



智能传感器系统

主 讲：程 健； 助教：翟红雨

联系方式：chengj@ustc.edu.cn
hyzhai@mail.ustc.edu.cn

电二楼413, 414; 63601517

上课教室：中国科大西区3A306

上课时间：星期三（3,4）；星期五（1,2）





前　　言

从“智能化”、“传感器”、“系统”三个概念及其合成简要介绍“智能传感器系统”的外延和内涵。

“系统”：泛指由若干部件相互作用而构成的具有特定功能的整体，它强调的是从整体和部分的辩证关系进行问题的研究。





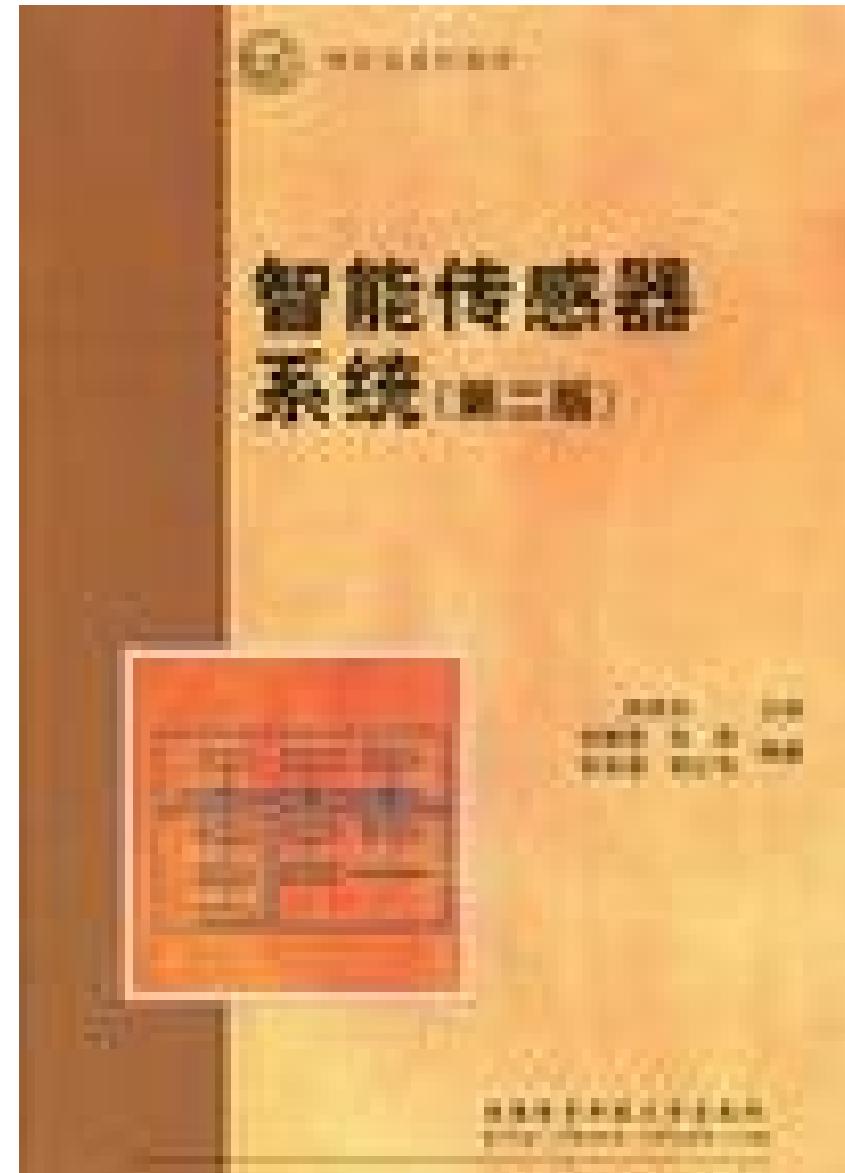
主要参考教材

“智能传感器系统

(2010年第2版) ”，

西安交通大学刘君华，

西安电子科技大学出版社





主要讲授内容

智能传感器系统的举例说明、传感器基础知识、智能传感器系统的集成方法与技术、智能化功能的实现、通讯功能与接口技术、智能技术(神经网络、模糊理论、支持向量机、粒子群优化、主成分分析等)在智能传感器系统中的应用；智能传感器的具体应用及应用中的抗干扰技术；无线传感器网络技术等。





教学方式

以课堂讲授为主，进行互动、布置课外作业、大作业等方式。最终目的是希望大家通过本课程的学习：了解智能传感器系统的构成、集成方法与技术；如何根据实际应用需要选取合适智能化的方法和手段；如何选用具体的智能传感器及如何根据应用需要具体使用；了解智能传感器系统的发展方向和趋势；熟悉相关参考资料及文献方面的知识；掌握一种开展该方面工作的方法。

最终成绩：平时成绩+期终成绩





需要掌握的基础知识

- ☺ 经典传感器知识
- ☺ 信号分析与处理
- ☺ 电路与系统
- ☺ 电子线路
- ☺ 嵌入式系统
- ☺ 网络、计算机及通信技术
- ☺ 智能技术：神经网络技术、模糊理论基础、支持向量机、粒子群优化技术、主成分分析法、遗传算法、小波变换等。





总 体 要 求

- ◆ 基本概念要清晰，
- ◆ 各种方法要熟悉，
- ◆ 适用条件要明确，
- ◆ 具体过程要清楚。





课件下载地址：

**[https://iamryanchia.github.io/
smartsensor/](https://iamryanchia.github.io/smartsensor/)**





课程主页

<https://iamryanchia.github.io/smartsensor/>



课程微信群

9月16日前扫码有效





作业1：

通过相关的检索手段，分项列出（每项中/英文至少各三种）有关“智能传感器系统”方面的专业杂志、网站、专业参考书等。





目 录

➤ 第1章 概 述

- 第2章 智能传感器系统相关技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述





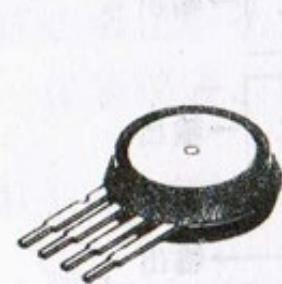
第1章 概述

要 点：

- ◆ 传感器的重要作用；
- ◆ 智能传感器的发展过程；
- ◆ 智能传感器的功能与特点；
- ◆ 智能传感器与传统传感器的差别；
- ◆ 智能传感器系统的构成；
- ◆ 智能传感器的实现方法；
- ◆ 智能传感器的发展趋势。



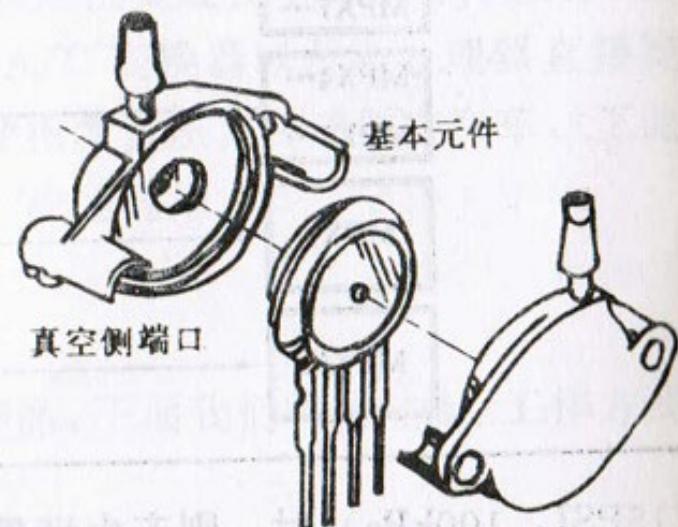




(a) 基本芯片载体单元
CASE 344
Style 1



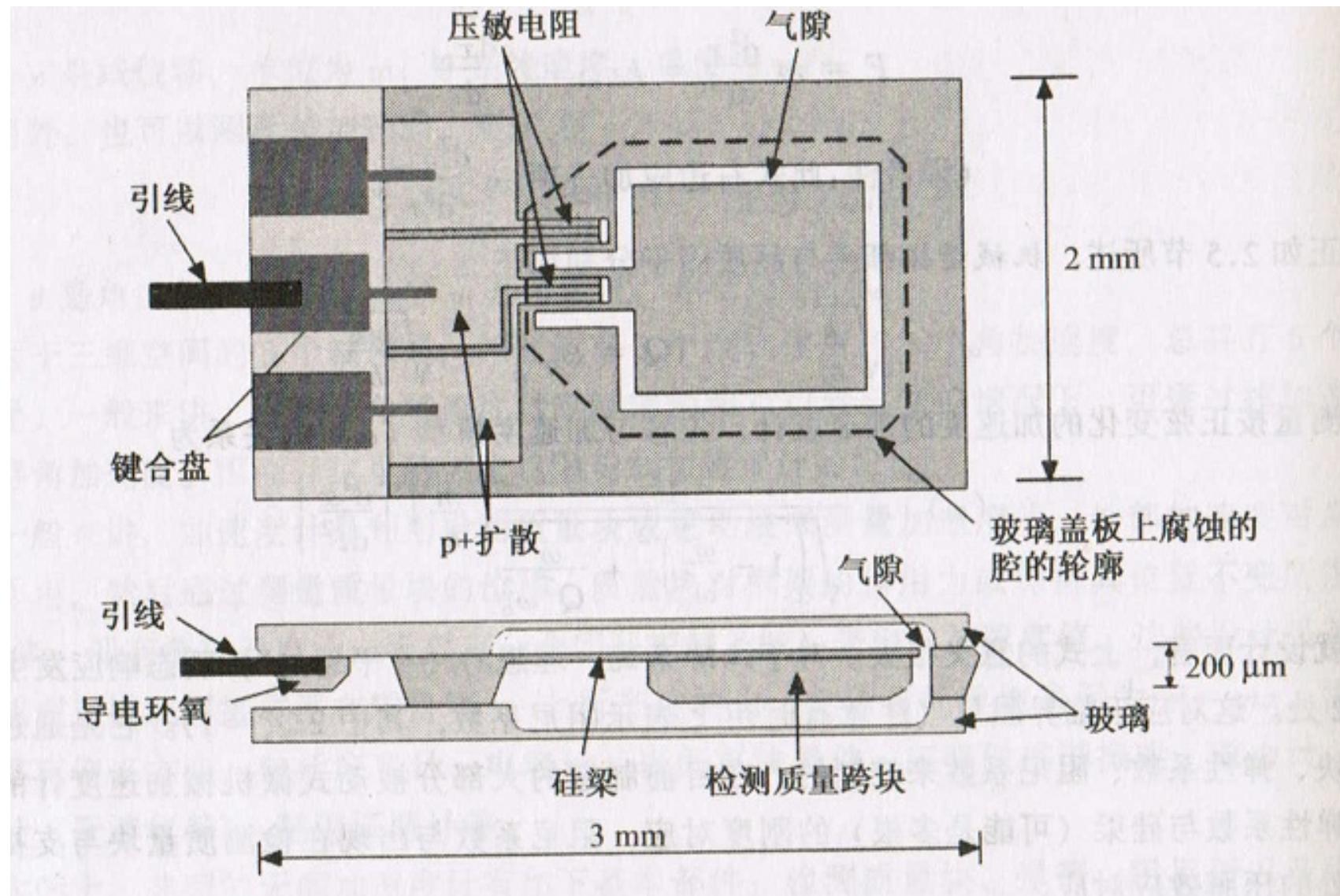
(b) 可选择的端口封装
CASE 352
Style 1

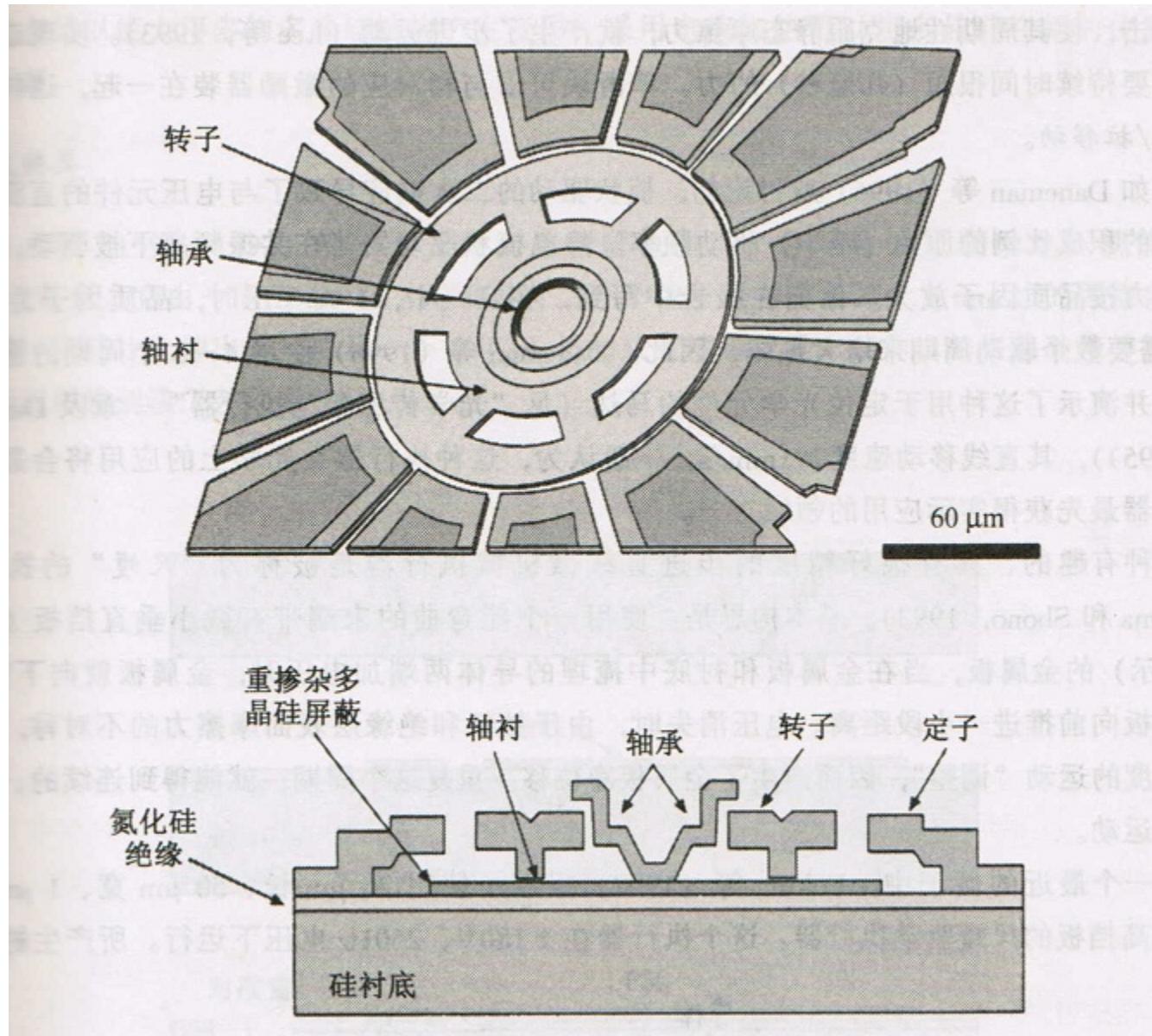


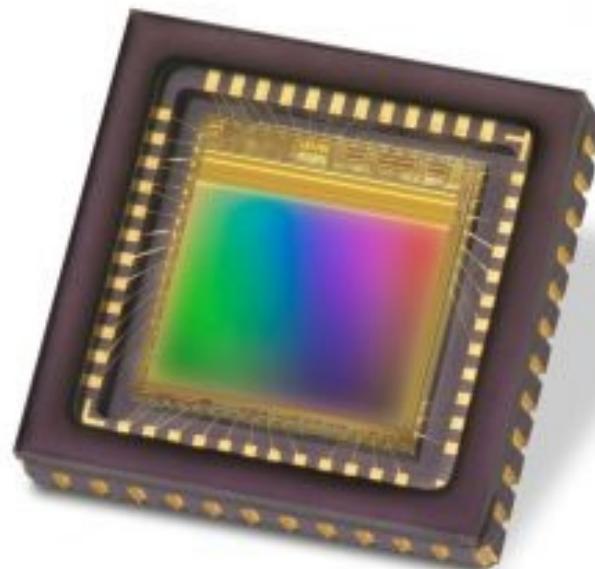
(c) 端口封装分解

图 1-4 摩托罗拉压力传感器封装形式











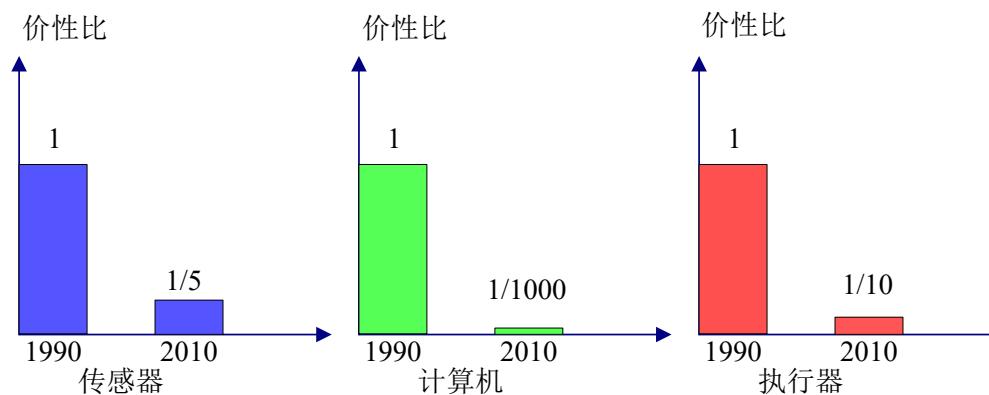
§ 1.1 传感器技术发展的重要性

- ◆ 是信息技术的三大支柱之一（传感与控制、通信、计算机）；
- ◆ 应用领域越来越广泛；
- ◆ 世界发达国家重点研究与开发的对象之一；
- ◆ 现代传感技术的发展远远不能满足社会的需求；
- ◆ 是提高产品竞争力的强有力的手段；
- ◆ 二十世纪是计算机的世纪，二十一世纪将是传感器的世纪。

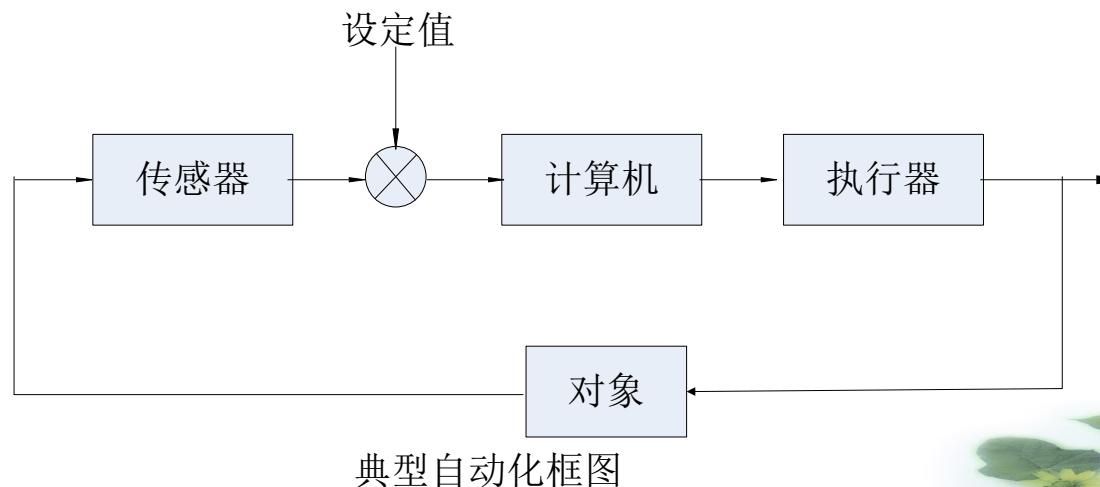


§ 1.2 智能传感器发展的历史背景

- 现代自动化系统对传感器最基本和最急切的要求是降低现行传感器的价格性能比



- 典型自动化系统中传感器的位置和作用





3. 人类自动化的历史进程

- 1) 首先发展了执行器，导致了“工业革命”，如：蒸气机的出现；
- 2) 计算机的出现，产生了“信息革命”；
- 3) 传感器的应用，导致了“自动化时代”的到来。

目前，传感器的发展处于拖后腿阶段。

4. 传统的传感器已达到其技术极限，而且有以下几种严重不足：

- 1) 结构尺寸大，频响特性差（与质量、大小有关）；
- 2) 输入一输出存在非线性，且随时间而漂移；
- 3) 受环境的影响严重；
- 4) 信噪比低，易受噪声干扰；
- 5) 存在**交叉灵敏度**，选择性、分辨率不高，导致性能低；
- 6) 传统传感器大多是“手工艺品”，因此成本高。

5. 现代自动化系统对传感器的要求





- 1) 现代自动化系统对传感器的要求;
- 2) 应用领域的不断扩展，特殊领域需要多参量同时测量;
- 3) 数字化、智能化、标准化。

自动化系统：50~60年代是集中控制

70年代是分散性控制（DCS系统）

80年代是基于现场总线的开放型控制系统（FCS系统），

该系统的特点：

- 传输数字信号，提高可靠性和抗干扰能力；节省现场与控制室的连接导线，简化系统的布线和设计；
- 总线采用统一标准，使系统具有开放性，有影响的几种总线标准；
- 采用智能化，控制职能分散下放到现场装置的原则，必须使用智能传感器。





§ 1.3 智能传感器的功能与特点

1. 功能

- 1) 自校零（消除零漂）、自标定（输出值对应的输入值）、自校正（输出特性的变化）
- 2) 自动补偿零点温漂、灵敏度温漂；
- 3) 自动采集数据，对数据进行预处理；
- 4) 自动进行检测、自选量程、自寻故障；
- 5) 数据存贮、记忆与信息处理功能；
- 6) 双向通讯、标准化数字输出或者符号输出功能；
- 7) 判断、决策处理功能。

2. 特点

- 1) 精度高：通过多项功能（1）、（2）、（3）保证；
- 2) 高可靠性与高稳定性：由功能（2）、（4）、（7）保证；
- 3) 高信噪比与高的分辨力：由功能（5）、（7）保证，





通过数据处理除去输入数据中的噪声；通过数据融合、神经网络技术消除交叉灵敏度的影响；

- 4) 强的自适应性；
- 5) 低的价格性能比

通过采用廉价的集成电路工艺和芯片以及强大的软件来实现，大大降低了传感器本身的价格。

最早研发出的智能型传感器有：

honeywell、ST-3000（压阻式）

Smar、LD302（电容式）

日本横河：EJA型（谐振式）

3. 我国在这方面的现状与差距





§ 1.4 智能传感器的概念与传感器系统

1. 智能传感器系统

就是传感器（包括信号调理电路）、计算机（信号处理）和通讯技术（对外通信）的结合，有两个主要研究方向：智能传感器系统（偏重智能化）与微传感器系统（偏重微小化）。

2. 定义

传感器（通过信号调理电路）与微处理器赋予智能的结合，兼有信息检测与信息处理功能的传感器就是智能传感器。

3. 智能化功能

具备学习、推理、感知、通讯以及管理等功能。

4. 模糊传感器

能够在线实现符号处理的功能。

5. 英文名称

English : Intelligent sensor

American: Smart sensor, Integrated smart sensor

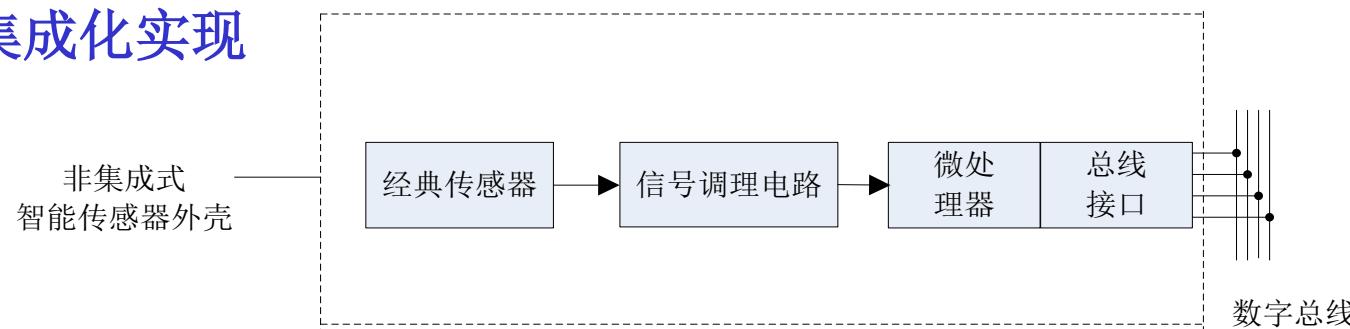
本书作者: Intelligent sensor system





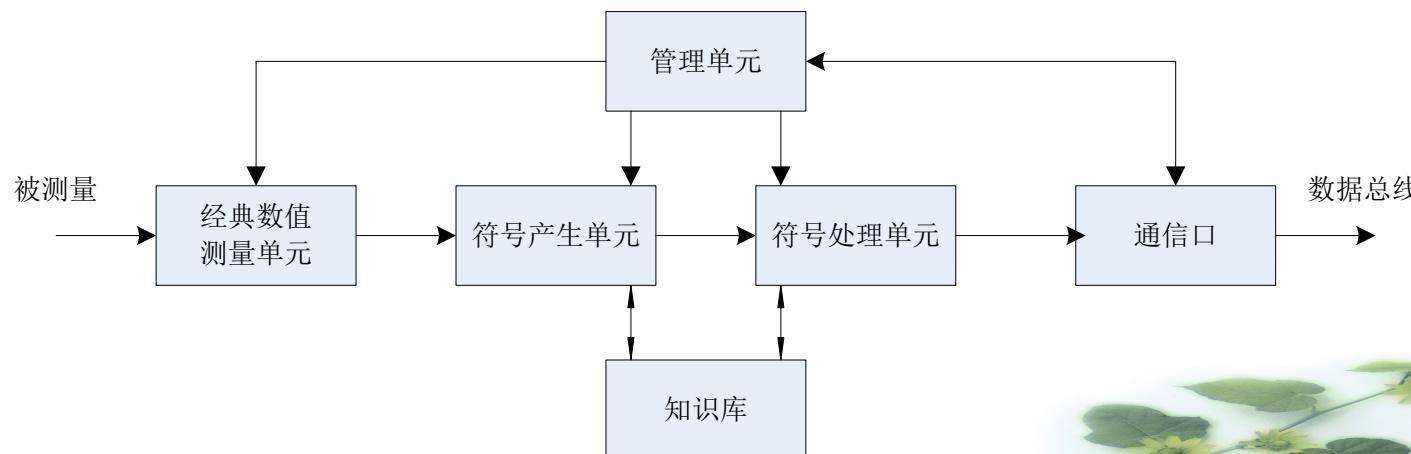
§ 1.5 智能传感器的实现途径（三条途径）

1. 非集成化实现



将上述电路组合为一个整体，经开发配置可进行通讯、控制、自校正、自补偿、自诊断等功能的智能化软件，如ST-3000。

模糊传感器也是一种非集成化的智能传感器。





关键问题：软件功能的设计

2. 集成化的实现

采用微机械加工技术和大规模集成电路技术，称为集成智能传感器（Integrated smart /Intelligent sensor），该技术也称为集成微型传感技术

其特点如下：

1) 微型化

血液流量计、发动机叶片表面的气体流速和压力传感器。

2) 结构一体化

传统的加工方法存在蠕变、迟滞、非线性特性。

3) 精度高

减少引线长度带来的寄生参量的影响。

4) 多功能

在同一硅片上可制作不同功能的多个传感器。





ST-3000 可测压力、压差、温度三种参量。

5) 阵列式

可在 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ 上制作有1024 (32×32) 个面阵触觉敏感触点。

优点：消除传感器的时变误差和交叉灵敏度的影响，提高传感器的可靠性、稳定性和分辨能力；实现从点测量到面测量乃至立体测量的跨越。

6) 全数字化

通过微机械加工技术制作合适的微结构，使其固有谐振频率可以设计成某种物理参量的单值函数，通过检测其谐振频率来检测被测物理量。

7) 使用方便、操作简单

集成化智能传感器的发展趋势：

a) 多功能化与阵列化，软件功能的增强；

b) 发展谐振式传感器，结合软件信息处理功能。





存在的问题：主要是工艺上的。

3. 混合实现

将1和2 两种方式结合起来，可能的混合集成方式有：

总线接口、微处理器、信号处理电路、集成化敏感单元的不同组合。

4. 集成式智能传感器的几种形式（按智能化程度来分）

1) 初级形式 (smart sensor)

敏感单元 + (智能) 信号调理电路。

2) 中级形式

在初级形式基础上增加微处理器单元，智能化功能由软件实现。

3) 高级形式

敏感单元多维、阵列化，信息处理软件功能更强大。





§ 1.6 智能传感器的发展趋势

智能传感器融合计算机技术和其他科学技术，正朝着单片集成化、微型化、网络化、系统化、高精度、多功能、低成本、高可靠性与安全性的方向发展。

1. 采用新机理、新材料、新技术、新工艺

用于战场上监测士兵身体状态的可印刷化学传感器；具有电致变色的新型智能材料。

2. 微型化技术与低功耗技术的应用

采用MEMS技术可研制出各种功能的传感器，如：智能微尘，可植入动物体内的生物电极；战场上用于侦察监测的人工“蜜蜂”。

3. 智能信息处理技术的广泛应用

生物智能、人工智能与计算智能；

数据融合、信息融合与知识融合。

4. 传感器的网络化

传感器、感知对象与观察者构成了传感器网络的三要素，传感器及泛在传感器网络将成为物联网、云计算、智慧地球等概念的支撑技术。



目 录

第1章 概 述

➤ 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础

第3章 不同集成度智能传感器系统介绍

第4章 智能传感器的集成技术

第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法

第6章 通信功能与总线接口

第7章 智能技术在传感器系统中的应用

第8章 智能传感器系统的设计与应用

第9章 无线传感器网络技术概述





第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础

要 点：

- ◆ 传感器系统的基本特性；
- ◆ 几种传感器的工作原理；
- ◆ 提高传感器性能的技术途径；
- ◆ 误差与测量误差分析。





§ 2.1 传感器系统的基本特性

智能化技术的主要任务之一是：提高传感器的精度，改善传感器的性能（安装、使用、维护、寿命），它的重要性在于提高经济效益，改善控制水平。

通过对传感器系统静态、动态特性的分析，了解决定传感器性能及精度的静态、动态技术指标和基本参量。

首先我们了解一下传感器的基本知识。目前已研制出来的传感器有几千种，广泛应用于各个领域，传感器的分类有这样几种方式。

按信号转换效应分：

物理型（电容式压力传感器）；化学型（气敏）；生物型（利用生物效应，如电阻的变化、产生热、生成新的物质——在生物酶的作用下）





按构成原理分：

结构型（转换特性由形状和尺寸决定）；

物性型（由传感器材料特性决定，如热电偶由塞贝克函数决定）。

按构成传感器敏感元件材料分：

半导体、陶瓷、有机材料。

按应用的用途（实际中用及比较多的）

温度，压力（电输出信号），光—光输出信号。

传感器的运作：

- 1) 接触型（电偶）、非接触型（红外测量）。
- 2) 能量转换型（热敏电阻）、能量控制型（光敏电阻）。
- 3) 转换原理、多重变换（热辐射温度计）。





对传感器系统基本特性的研究，基于两个方面的目的：

1) 用它作为一个测量系统

基于已知的系统特性和测量输出信号了解输入信号特性。

2) 用于传感器系统本身的研究、设计与建立。

根据输入信号是随时间变化还是不变化，基本特性分静态特性和动态特性，它是由系统内部自身的参数决定的。

§ 2.1.1 静态特性

静态特性又称“刻度曲线”、“标定曲线”，

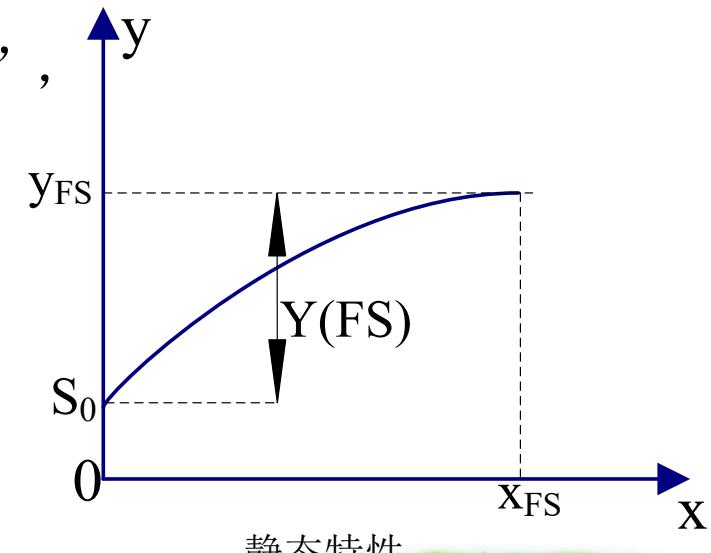
表达式： $y = s_0 + s_1x + s_2x^2 + \dots + s_nx^n$

1、静态特性的基本参数

1) 零位

当 $x=0$ 时， $y_0 = s_0$ 的值

2) 量程 $Y(FS)$ ，又称“满度值”





输出标准化的传感器系统（又称“变送器”）

对于模拟量，零位: $y_0 = s_0 = 4mA$ ，上限值:

$y_{FS} = 20mA$, 量程Y (FS) = 16mA。数字量：尚无标准。

3) 灵敏度

a) $S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\text{输出量的变化量}}{\text{输入量的变化量}}$

b) 相对灵敏度: $S = \frac{\Delta y / y}{\Delta x}$ 或 $S = \frac{\Delta y}{\Delta x / x}$

c) 灵敏度与静态特性（线性与非线性）；灵敏度的高与低。

d) 交叉灵敏度的概念

多输入 ($\Delta x_P, \Delta x_V, \Delta x_T$) 单输出 (Δy) 系统

$$\Delta y = S_P \cdot \Delta x_P + S_V \cdot \Delta x_V + S_T \cdot \Delta x_T$$

智能传感器系统可以依靠强大的软件功能，降低交叉灵敏度对测量结果的影响（如采用数据融合技术）。





4) 分辨率

表征系统有效分辨输入量最小变化量的能力。

具有A/D转换器的传感器系统，分辨率作为一个量化值 q 对应的输入变化量，对于实际测量，要求：噪声电平 $< q/2$ ，信号电平 $> q/2$ 。

智能传感器系统可选取软、硬件的方式来抑制噪声，提高分辨率。比如先测出零输入的噪声信号，然后减去。

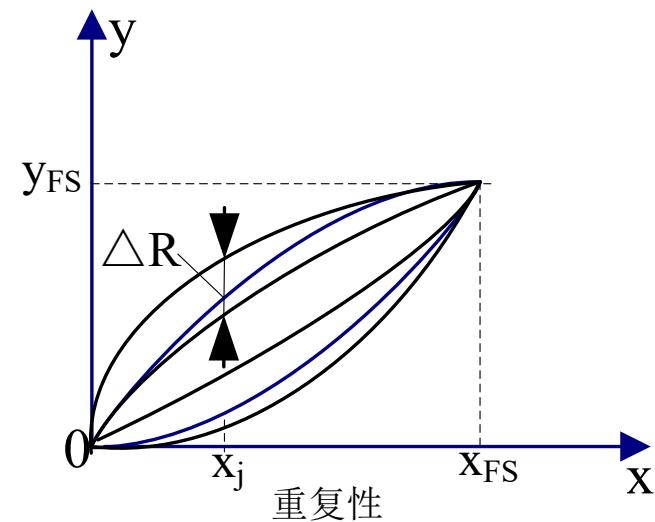
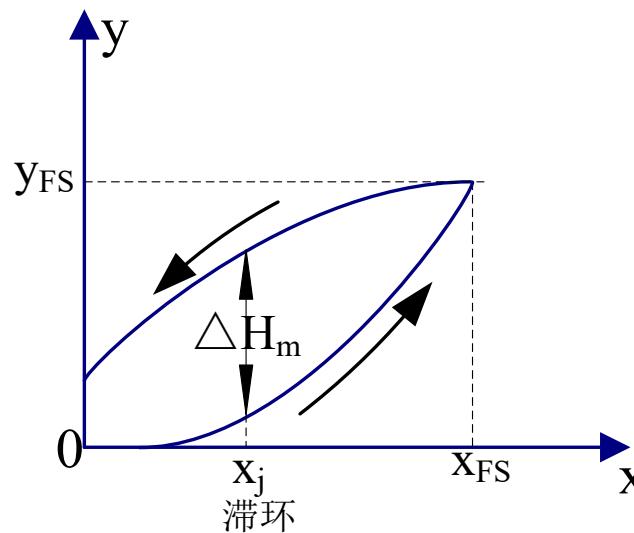
2、静态特性的性能指标

1) 迟滞

表征系统在全量程范围内，输入量由小到大（正行程）或由大到小（反行程）两个静态特性不一致的程度，如磁滞曲线。

$$\text{相对误差: } \delta_H = \frac{|\Delta H_m|}{Y(FS)} \times 100\%$$





2) 重复性

系统输入量按同一方向作全量程、连续多次变动时，静态特性不一致的程度。

$$\text{相对误差: } \delta_R = \frac{|\Delta R|}{Y(FS)} \times 100\%$$

ΔR : 多次循环同向行程输出量的最大绝对误差，见上图。

3) 线性度

系统静态特性对选定的拟合直线的接近程度。





相对误差: $\delta_L = \frac{|\Delta L_m|}{Y(FS)} \times 100\%$

拟合直线的方法:

- a) 理论线性度;
- b) 平均选点线性度;
- c) 端基线性度;
- d) 最小二乘法线性度。

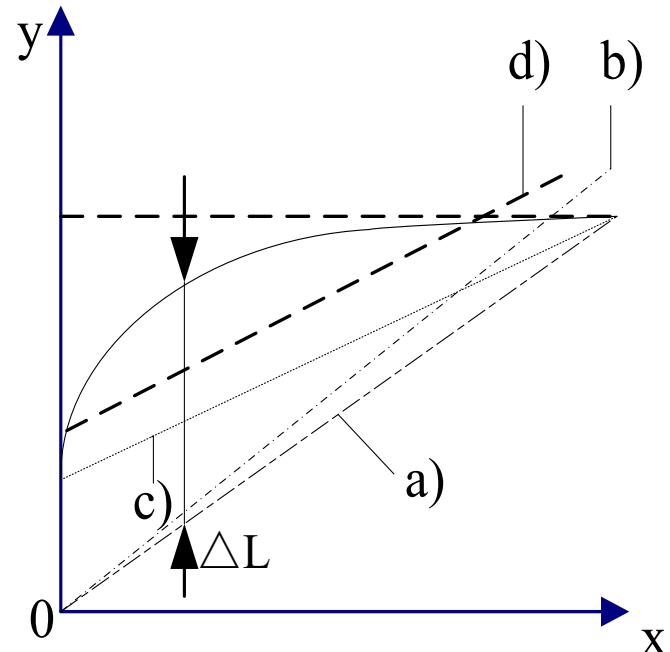
对应上述几种方式拟合直线表达式:

a) $y = \frac{y_{FS}}{x_{FS}} \cdot x$

b) $y = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \cdot x$

c) $y = \frac{y_{FS} - y_0}{x_{FS}} \cdot x + y_0$

d) $y = b + kx$





$$\Delta L_j = (b + kx_j) - y_j$$

均方差值: $\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\Delta L_j)^2 = f(b, k)$ 为最小值, 亦即:

$$\frac{\partial f(b, k)}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial f(b, k)}{\partial k} = 0$$

4) 系统的总精度为量程范围内的基本误差与满度值Y (FS) 之比的百分数。

$$A = \frac{\text{系统误差的绝对值 (迟滞、线性度) + 随机误差的绝对值 (重复性)}}{Y(FS)} = \frac{\text{基本误差}}{Y(FS)}$$
$$= \frac{[\delta_L Y(FS) + \delta_H Y(FS)] + \delta_R Y(FS)}{Y(FS)} = \delta_L + \delta_H + \delta_R$$





传感器技术的主要任务之一就是致力于改善静态特性。

静态特性是在标准试验条件下获得的，在实际使用中，由于环境条件的改变还将产生附加误差，其中温度附加误差是主要的。

5) 温度系数与温度附加误差

a) 零位温度系数 (α_0)

$$\alpha_0 = \frac{\Delta y_{0m}}{\Delta T \cdot Y(FS)} \times 100\%$$

ΔT : 传感器系统工作温度变化范围。

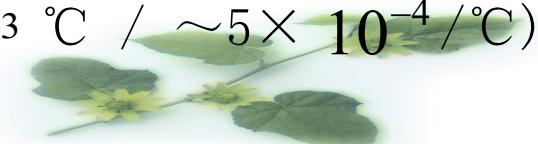
未经补偿的压阻式压力传感器 $\alpha_0 = 10^{-3} / ^\circ C$

例如：量程Y(FS)=100mv, $\Delta T = 60^\circ C$, $\Delta y_{0m} = 6mV$ 则温度附加误差的相对值=6%（满量程）。

b) 灵敏度温度系数 α_s 及其温度附加误差

$$\alpha_s = \frac{\Delta y_m}{\Delta T \cdot Y(FS)} \times 100\% \quad \alpha_s = \frac{S(T_2) - S(T_1)}{S(T_1) \cdot \Delta T} = \frac{y(T_2) - y(T_1)}{y(T_1) \cdot \Delta T}$$

未经补偿的压阻式压力传感器: $\alpha_s = -(10^{-3} ^\circ C / \sim 5 \times 10^{-4} / ^\circ C)$





$\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ 时, α_s 引起的温度附加误差的相对值: (6~3)%。

传统的传感器改善传感器的温度稳定性比较费时费力, 经过补偿后, α_0 、 α_s 均可减小一个数量级。

智能传感器系统主要采用软件补偿技术及数据融合技术。

§ 2.1.2 动态特性

系统的动态特性反映了测量动态信号的能力, 这里主要讨论系统动态特性、信号频率范围与动态误差的相应关系。

动态特性用数学模型来描述, 有三种形式:

时域中的微分方程, 复频域中的传递函数(差分方程、状态方程), 频率域中的频率特性。

1、微分方程

常见的传感器系统是一个一阶或二阶系统, 高阶系统由二者合成。

1) 一阶系统





$$\tau \frac{dy}{dx} + y = Kx \quad K: \text{放大倍数}, \quad \tau: \text{时间常数}$$

如热电偶测温元件。

2) 二阶系统

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = F$$

m: 等效质量, b: 阻尼系数, k: 弹簧刚度系数

压力传感器的弹性敏感元件可等效为质量—弹簧—阻尼力学系统。

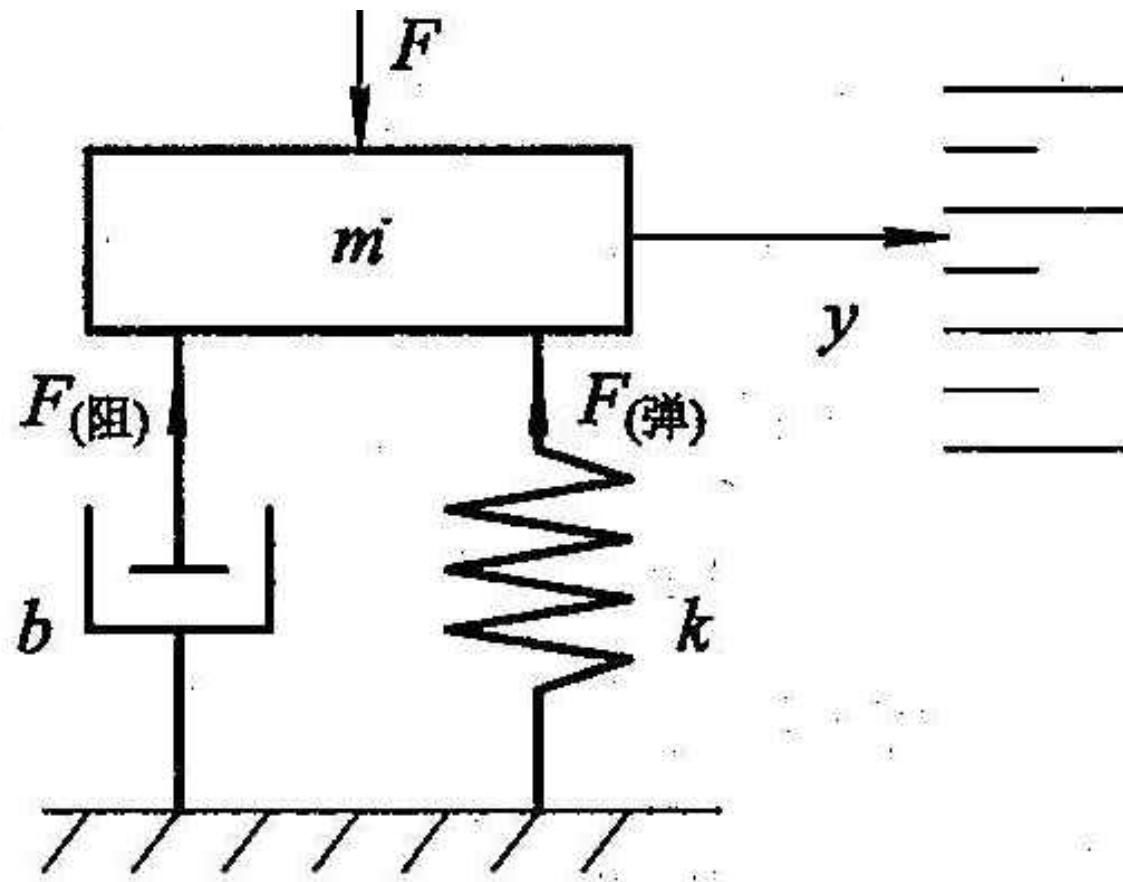
标准形式:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

ω_n : 系统无阻尼固有频率, ζ : 阻尼比, K: 直流放大倍数或静态灵敏度

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \zeta = \frac{b}{2\sqrt{mk}} \quad K = \frac{1}{k}$$

谐振频率: $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$, 固有频率: $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$



质量—弹簧—阻尼力学系统





2、传递函数

1) 一阶系统: $H(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$

2) 二阶系统: $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2}s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1}$

3、频率特性

频率特性是拉氏变换因子s的实部为零的拉氏变换，又称傅氏变换。

1) 一阶系统: $H(j\omega) = \frac{K}{j\omega\tau + 1} \quad \tau: \text{特征参数}$

2) 二阶系统 $H(j\omega) = \frac{K}{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2] + j2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}} \quad \omega_n, \zeta: \text{特征参数}$

$H(j\omega)$ 又可表示为: $A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$

$A(\omega)$: 幅频特性, $\varphi(\omega)$: 相频特性





* 一阶系统:

幅频特性: $A(\omega) = |H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$

对数幅频特性: $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$

相频特性: $\varphi(\omega) = -\arctan \omega\tau$

* 二阶系统:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$$

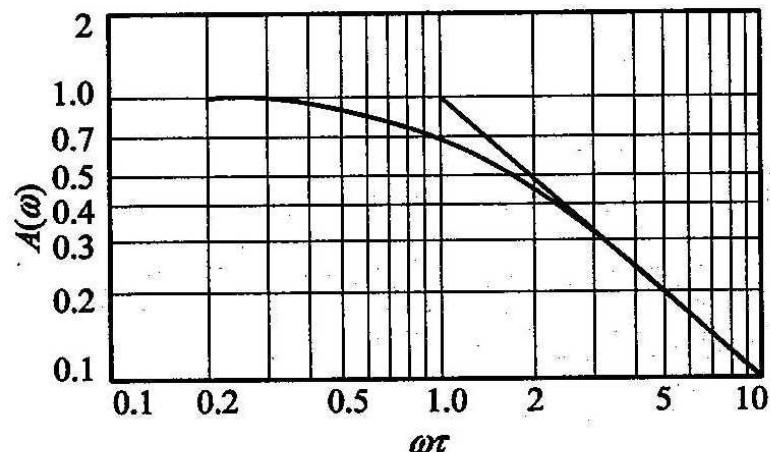
相频特性: $\varphi(\omega) = -\arctan\left[\frac{2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}\right]$

4、动态误差

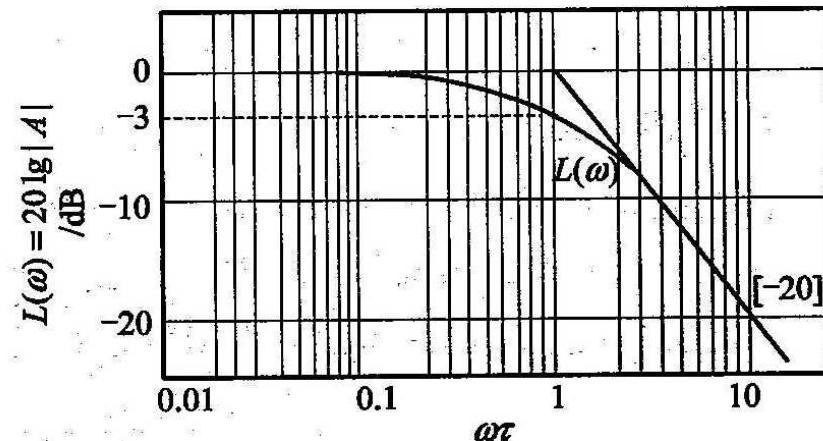
假定, 输入信号: $x(t) = x_0 \sin \omega t$

输出信号: $y(t) = y_0 \sin(\omega t + \varphi)$, 直流放大倍数为1

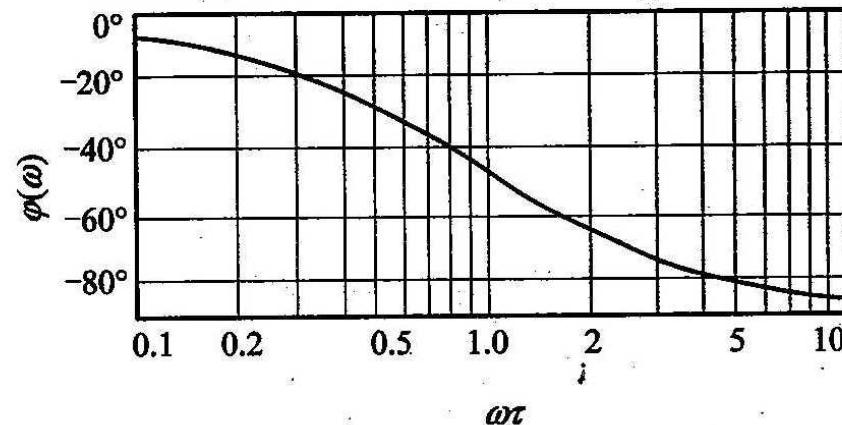




(a)



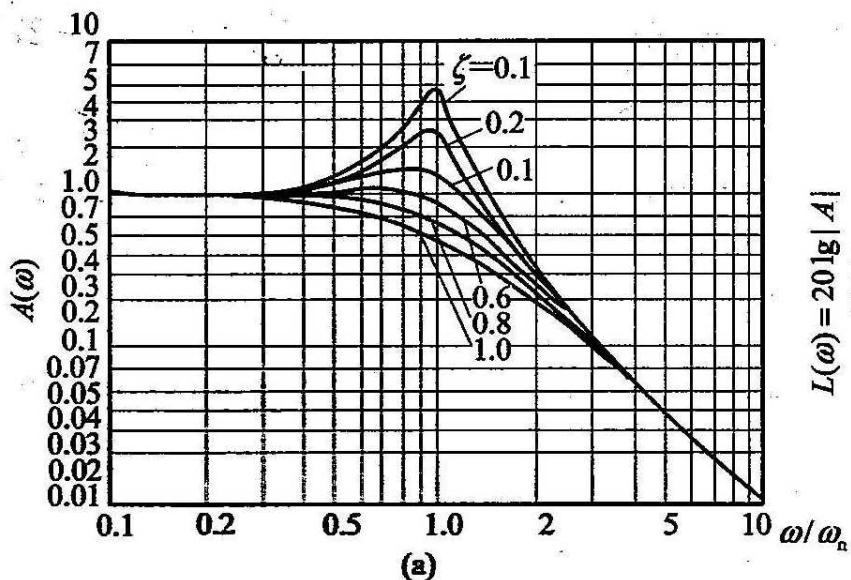
(b)



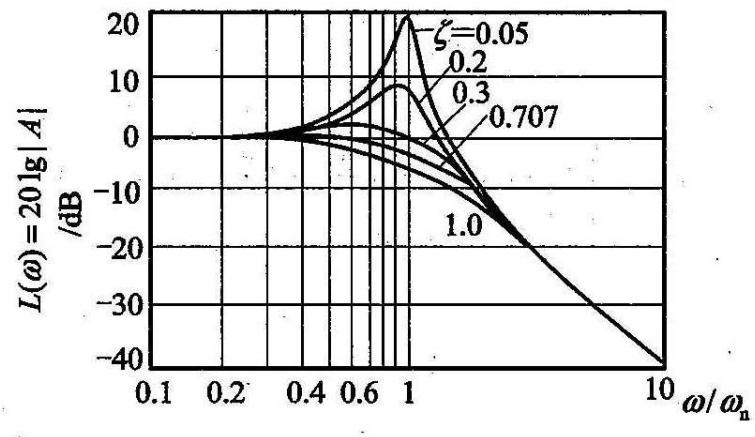
(c)

一阶系统频率特性曲线

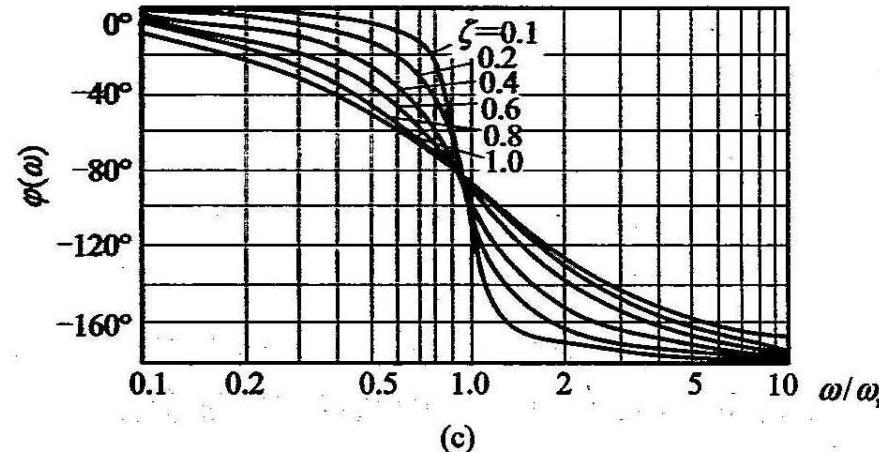




(a)



(b)



(c)

二阶系统频率特性曲线





动态幅值误差可表示为: $\gamma = \frac{|H(\omega)| - |H(0)|}{|H(0)|} \times 100\%$

$|H(0)|$ 表示 $\omega = 0$ 时的幅频特性的模, 结合上述频率特性表达式可得:

1) 一阶系统:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} - 1$$

频率越高, 动态幅值误差越大, 当 $\omega = \omega_\tau = \frac{1}{\tau}$ 时 , $\square \gamma = 29.3\%$
要减少 γ , 时间常数 τ 要足够小。

2) 二阶系统:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + (2\zeta\frac{\omega}{\omega_n})^2}} - 1$$

目标频率 ω 越高, 误差越大, 希望 ω_n 越大越好。由 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$
可知, 减少 m , 可增大 ω_n 。

采用微机械加工技术可实现微米数量级尺寸, 使微型化的压阻式压力
传感器固有频率 1MHz 以上, 而传统压力传感器固有频率 f_n 只有几十 KHz 。





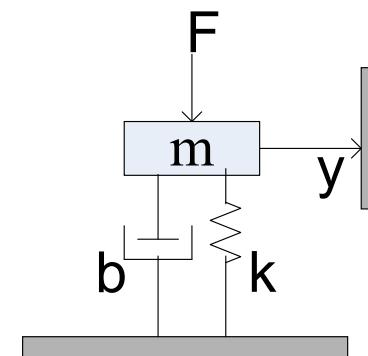
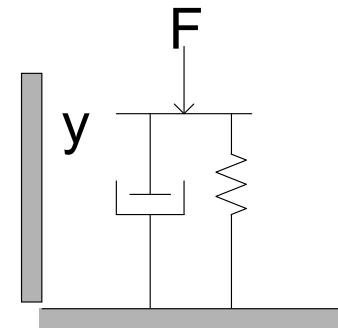
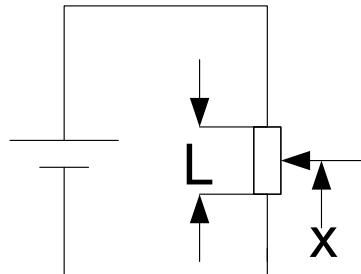
研究传感器的动态性能时，为避免复杂数学上带来的困难，通常都忽略了传感器的非线性，把传感器简化为一个集中参数系统。

用常系数线性常微分方程来描述：

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

传感器的物理模型，通常分别用零阶、一阶、二阶来描述。

例如：



电位器传感器为零阶 热敏传感器为一阶 加速度传感器为二阶





作业2：

一个二阶传感器系统，要想改善其动态特性，应如何进行，试用不同的模型形式具体分析之。





几种传感器动态特性分析方法：

1、传感器动态模型的分类

1) 参数模型与非参数模型

$\left\{ \begin{array}{l} \text{微分方程} \xrightarrow{\text{拉氏变换}} \text{传递函数} \xrightarrow{\text{双线性变换}} \text{差分方程} \\ \text{非: 脉冲相应、幅频特性和相频特性} \end{array} \right.$

2) 连续系统与离散系统模型

$\left\{ \begin{array}{l} \text{微分方程、传递函数、状态方程} \\ \text{差分方程、离散传递函数、离散状态方程} \end{array} \right.$

参数模型是个表达式，而非参数模型是条曲线。

2、脉冲响应函数法

对于线性传感器，任意形式的输入 $x(t)$ 看成是由无数个“脉冲”叠加组成，





$x(t) \rightarrow x_1(t), x_2(t) \dots$, 对应每一个脉冲输入, 传感器都有一个响应 $y_1(t)$, $y_2(t) \dots$ 因此总输出 $y(t)$ 是 $y_1(t)$, $y_2(t) \dots$ 之和:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

$h(t)$: 脉冲响应函数

3、动态建模方法:

1) 机理分析法

根据各种基本理论, 对传感器的转换原理进行分析和抽象, 提出模型, 列出微分方程。

2) 实验建模法

对传感器进行动态标定, 采集输入、输出数据; 采用系统辨识, 时间序列分析和沃尔什变换等方法, 建立其差分方程或微分方程形式的数学模型。





实验建模法的特点：

- a) 需要进行动态标定实验，需要相关实验设备，如数据采集、记录设备；
- b) 要选择合适的标定方法如激励信号，既要简单、易行，又要能充分考核传感器的动态特性。
- c) 其模型不直接反映传感器的结构和原理；
- d) 所建模型便于与实验结果对照，准确、可靠。





§ 2.2 几种传感器的工作原理

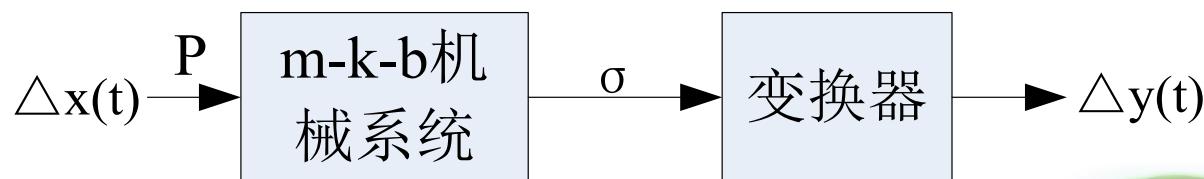
这里主要介绍几种易于采用标准集成化工艺来实现的传感器，如：

- ◆ 结构型；
- ◆ 谐振式；
- ◆ 电荷耦合器件（CCD）及指纹传感器；
- ◆ 气敏传感器。

§ 2.2.1 结构型传感器

工作原理与传统的结构型传感器完全一样，由两部分构成：

- 1) 等效机械系统，将被测量变换为中间变量；
- 2) 变换器，将中间变量变换为输出量。





主要介绍基于半导体压阻效应的电阻式变换器和基于电容效应的电容式变换器。可测：压力，加速度等参量。

1、基于压阻效应的电阻变换器

1) 压阻效应

指半导体材料受到应力 σ （西格玛）作用时，其电阻率发生明显变化的现象。

$$\text{电阻率相对变化: } \frac{d\rho}{\rho} = \pi_E \sigma$$

π_E ：材料的压阻系数（Si约为 $40 \sim 80 \times 10^{-11} m^2/N$ ）

电阻丝的电阻值： $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ ，若受拉力F作用时， l 增加 dl ， r （截面半径）减少 dr ，电阻率 ρ 增大 $d\rho$ ，则有：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

由材料力学： $\frac{dr}{r} = -\gamma \frac{dl}{l}$ γ :泊松比





由虎克定律: $\sigma = \pi\epsilon = E \frac{\Delta l}{l}$

将 $\frac{d\rho}{\rho} = \pi_E E \frac{\Delta l}{l}$, $\frac{dr}{r} = -\gamma \frac{dl}{l}$ 代入 $\frac{dR}{R}$ 得:

$$\frac{dR}{R} = \pi_E E \frac{dl}{l} + \frac{dl}{l} + 2\gamma \frac{dl}{l} = (1 + 2\gamma + \pi_E E) \epsilon = G \epsilon$$

G:材料的灵敏度系数 E:弹性模量;

a) 金属材料:

无压阻效应: $\Delta\rho = 0$, $\gamma = 0.5$, $G = 1 + 2\gamma = 2$;

b) 半导体材料的压阻系数很大:

$$G = 1 + 2\gamma + \pi_E E = \pi_E E = 66 \sim 133$$

$$\pi_E = 40 \sim 80 \times 10^{-11} m^2 / N; \quad E = 1.67 \times 10^{11} N / m^2$$





1) 基于压阻效应的变换器

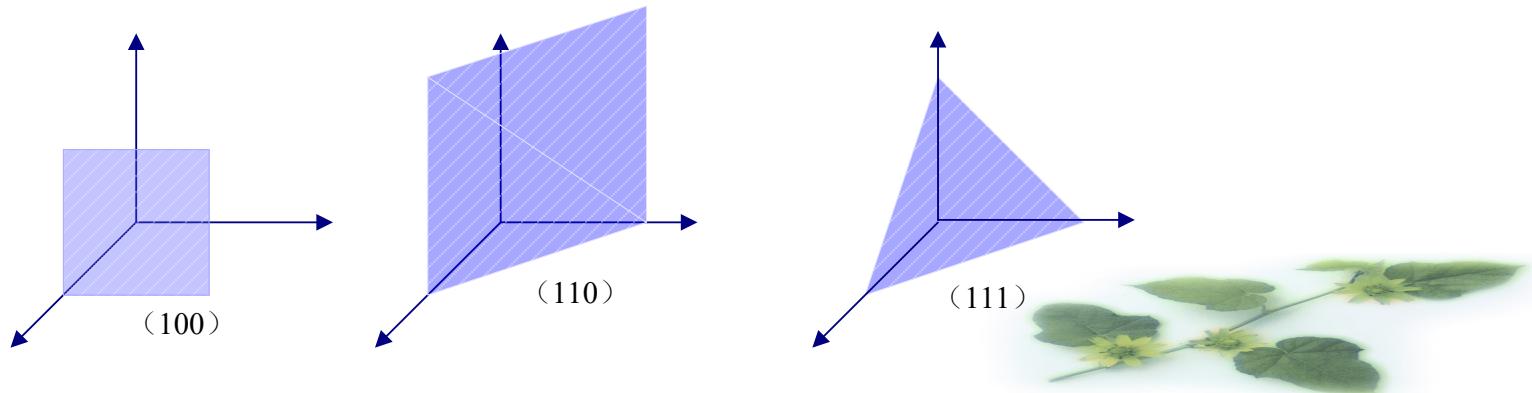
半导体硅材料的特性：具有良好的压阻特性和优良的弹性性能，加工工艺：半导体扩散工艺，离子注入工艺；制作型式：p型硅电阻条。

电阻条在应力作用下的相对变化量：

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_i \sigma_i \quad \pi_l, \pi_i : \text{分为纵向、横向压阻系数}$$

压阻系数应具有明显的各向异性，在不同的晶面、晶向上其压阻系数不同。

三种晶面： 如下图





硅晶体结构：

硅晶胞，晶格常数为：a；

硅是共价键，四方体结构，硅原子之间共有两个电子；

晶面：节点的排列完全相同；

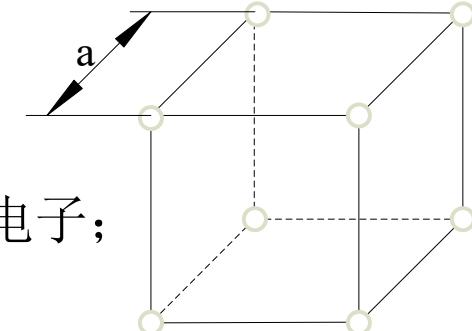
相邻面之间距离相等；一簇晶面可以把所有节点都包括进去；晶面不同，晶面上的节点密度（原子密度）就不同；晶面一般用晶面指数来标记。

取最小截距的整数值的晶面指数称为密勒指数。截距为负数，指数上划“—”作为标记：(100), (010), (001) → 晶面簇 {100}。

晶轴：对称性较高的晶向。

晶格间距：

$$d = \left(\frac{n^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$





晶体中所取的方向不同，其物理、化学性质不同，形成了晶体的各向异性：

(100) 5.42Å 腐蚀速率，最快

(110) 3.83Å ———快

(111) 3.13Å ———慢

晶向：取与晶面垂直的法线方向表示：[100], [110], [111]。
一簇对应的晶向： $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 。

物理型传感器与物质常数：





传感器材料	物质常数	有无利用各向异性	基本传感器例子
半导体	霍尔系数	有	霍尔元件
半导体	压阻系数	有	形变规
压电体	压电率	有	超声波传感器
热释电体	热释电常数	有	红外探测器
强磁性体	磁阻增加率	有	磁传感器
半导体金属	电阻温度系数	无	热敏电阻
半导体金属	赛贝克系数	无	热电偶
半导体	量子效应系数	无	光电管
半导体	光电导增益	无	光电池





压阻效应的数学表达式

晶体中受到应力作用，在晶胞中电场分量 E_i 是电流密度 J_j 应力 σ_{kl} 的函数。

$E_i = f(J_j, \sigma_{kl})$ ， i、j、k、l均为1, 2, 3；不考虑压电效应和恒流供电：

$$\frac{d\rho_{ij}}{d\sigma_{kl}} = \varphi_{ijkl}$$

压阻系数：

我们把 φ_{ijkl} 与零应力时的电阻率 ρ_0 的比值定义为压阻系数，即：

$$\pi_{ijkl} = \varphi_{ijkl} / \rho_0$$

1) 基本压阻系数

作用在Si晶体的应力，有三个独立的垂直应力分量 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$





和三个独立的剪切应力分量 $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$ (见下图)

应力 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ 所引起的电阻率相对变化为:

$$(\Delta\rho / \rho_0)_1, (\Delta\rho / \rho_0)_2, \dots, (\Delta\rho / \rho_0)_6$$

电阻率变化量、压阻系数、应力三者之间的关系:

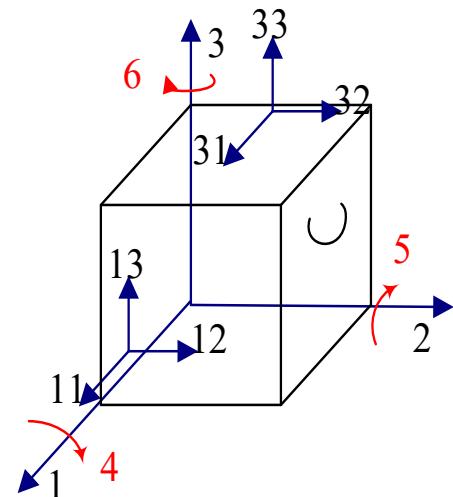
$$\begin{pmatrix} (\Delta\rho / \rho_0)_1 \\ (\Delta\rho / \rho_0)_2 \\ \vdots \\ (\Delta\rho / \rho_0)_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_{61} & \cdots & \pi_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_6 \end{pmatrix}$$

在晶轴坐标系中，三个晶轴是完全等效

的， $\pi_{11} = \pi_{22} = \pi_{33}$ ， $\pi_{44} = \pi_{55} = \pi_{66}$

考虑垂直应力不产生剪切压阻效应，剪切应力不产生垂直压阻效应。

压阻系数矩阵变为:





$$\begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix}$$

π_{11} : 纵向压阻系数, π_{12} : 横向压阻系数, π_{44} : 剪切压阻系数
 π_{11} 、 π_{12} 、 π_{44} 统称为晶轴坐标系的压阻系数。

2) 任意坐标系(非晶轴坐标系)的压阻系数:

用横向压阻系数 π_t (指电流方向与应力方向垂直) 和纵向压阻系数 π_l (电流方向与应力方向一致) 表示:

$$\pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + l_1^2 n_1^2)$$

$$\pi_t = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)$$





l_1, m_1, n_1 : 纵向方向余弦; l_2, m_2, n_2 : 横向方向余弦。

2、基于电容效应的电容变换器

1) 平板电容器

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{\delta}, \quad \epsilon: \text{介电常数}, \quad \delta: \text{板板间隙}.$$

集成传感器中制作电容变换器主要采用改变S和 δ 的方法实现。

2) 电容式变换器

a) 变间隙式电容变换器

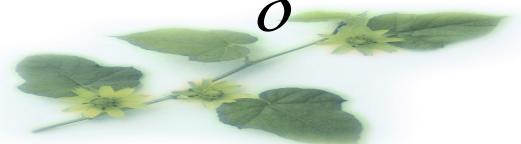
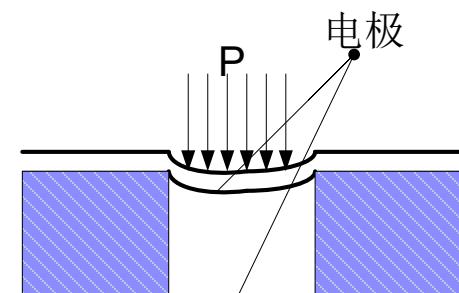
i) 输入—输出特性

$$\Delta\delta \sim \Delta C \text{ 或 } \frac{\Delta\delta}{\delta} \sim \frac{\Delta C}{C} \text{ 之间的关系}$$

在被测参量的作用下，动电极发生位移，产生变形，

$$C_0 + \Delta C = \frac{\epsilon S}{\delta_0 - \Delta\delta} \quad (\Delta S=0)$$

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}, \quad \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left(1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^{-1}, \quad \text{当 } \frac{\Delta\delta}{\delta} \ll 1 \text{ 时}$$





展开的幂级数为：

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right)$$

输入—输出的关系存在严重的非线性。

ii) 灵敏度 K_c :

$$K_c = \frac{\Delta c}{\Delta \delta} = \frac{c_0}{\delta_0} \left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right)$$

近似值： $K_c = \frac{c_0}{\delta_0} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0^2}$ ，与 δ_0 的平方成反比， δ_0 越小，灵敏度越高。

iii) 理论线性度

理想的拟合曲线方程： $\Delta C = \frac{C_0}{\delta_0} \Delta \delta$

拟合偏差：

$$\Delta = \Delta C - C_0 = C_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right)$$

最大拟合偏差： $\Delta_m = C_0 \left(\frac{\Delta \delta_m}{\delta_0} \right)^2$





理论线性度误差:

$$\delta_l = \frac{\Delta_m}{Y(FS)} \times 100\% \approx \frac{\Delta\delta_m}{\delta_0} \quad , \quad \delta_0 \text{ 越小, 线性度越差。}$$

线性度误差的产生, 源于灵敏度的非常数。

b) 变面积式电容变换器

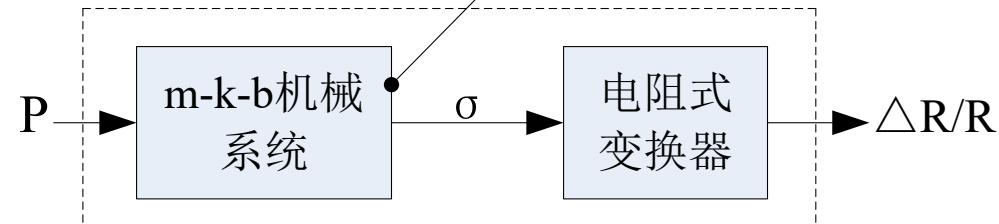
i) 输入—输出特性: $\Delta C = \frac{\varepsilon}{\delta_0} \cdot \Delta S$ ($\Delta \delta = 0$)

ii) 灵敏度: $K_c = \frac{\Delta c}{\Delta S} = \frac{\varepsilon}{\delta_0} = \text{常数}$

iii) 理论线性度: $\delta_l = 0$

上面我们介绍了基于“压阻效应”和“电容效应”的变换器, 下面我们介绍以此为基础的传感器。

弹性敏感元件

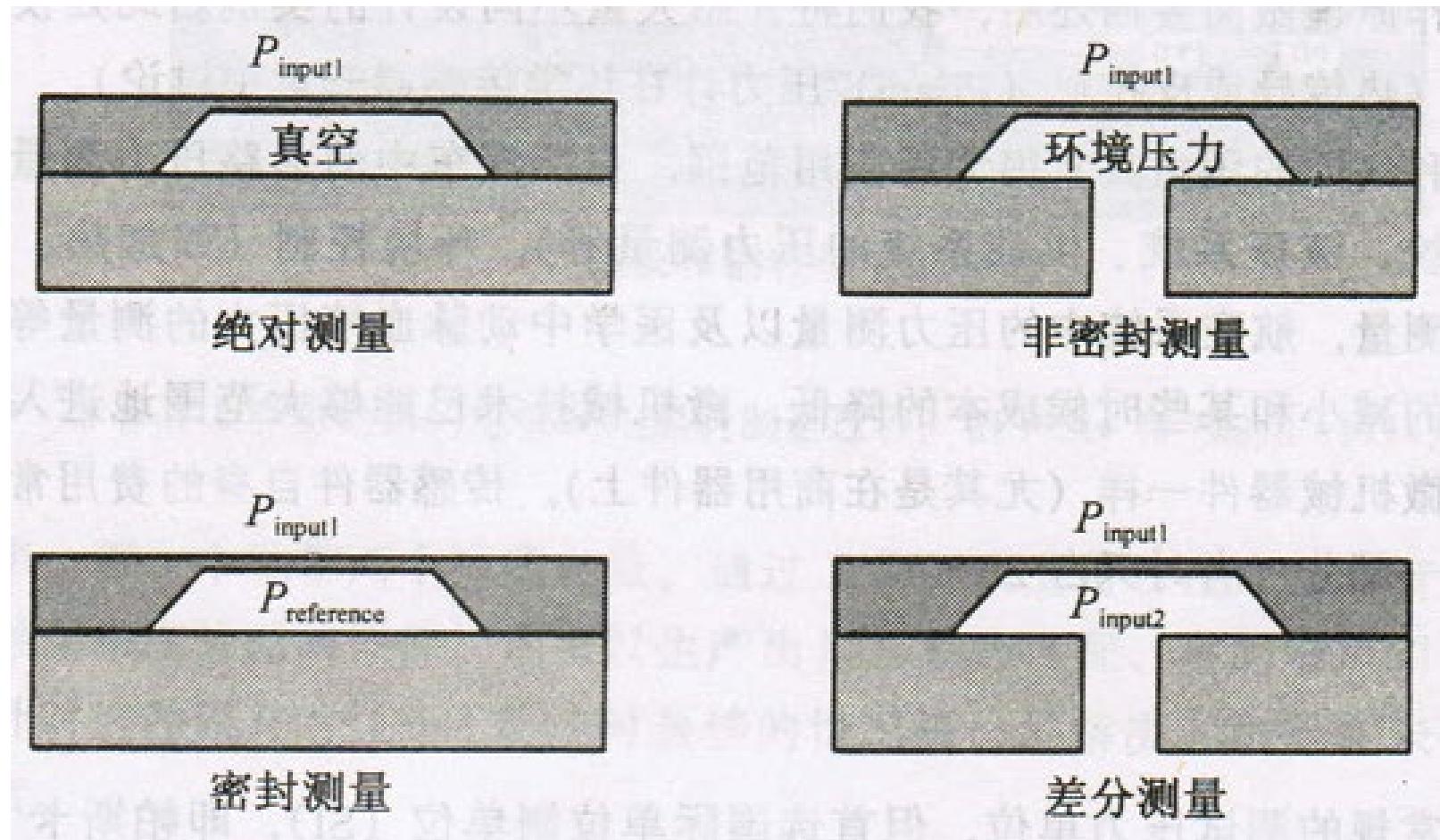


压阻式压力传感器组成框图



3、压力传感器

1) 压阻式压力传感器



常见的微机械压力传感器类型





常用的弹性敏感元件有：周边固支的圆形、方形和矩形膜片。电阻改变量与相应部位膜片的应力 σ 成正比，下面我们推导这种关系：

a) 周边固支圆形膜片

根据弹性力学理论：

径向应力：

$$\sigma_r(r) = \frac{3P}{8h^2} a^2 [(1 + \gamma) - (3 + \gamma) \frac{r^2}{a^2}]$$

切向应力：

$$\sigma_t(r) = \frac{3P}{8h^2} a^2 [(1 + \gamma) - (3\gamma + 1) \frac{r^2}{a^2}]$$

$r=0$, σ_r , σ_t 达到最大值：

$$\sigma_r(0) = \sigma_t(0) = \frac{3P}{8h^2} (1 + \gamma) a^2$$

$r=0.635a$, $\sigma_r=0$; $r=0.812a$, $\sigma_t=0$;

$r=a$, σ_r , σ_t 的绝对值最大。

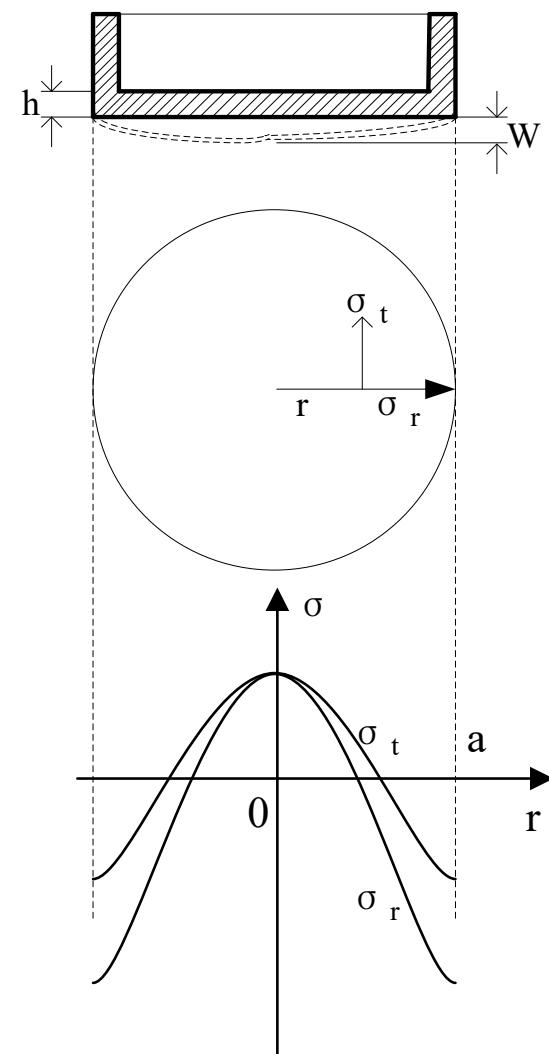
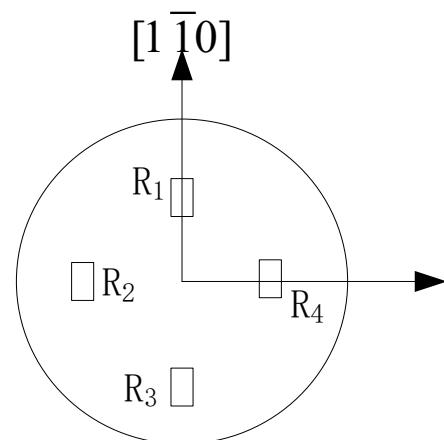




$$\sigma_r(a) = -\frac{3}{4} \frac{a^2}{h^2} P \quad , \quad \sigma_t(a) = -\frac{3}{4} \frac{a^2}{h^2} P \gamma$$

一般选 $\{001\}$, $\{011\}$, $\{211\}$
三个晶面族的晶面制作压敏电阻。

i) 若按下图在膜片上的同一应力区沿 $[1\bar{1}0]$
或 $[110]$ 晶向制作P型硅电阻，此时电阻的压阻
系数最大。





纵向压阻系数:

$$\pi_l(100) = \frac{1}{2} \pi_{44}$$

横向压阻系数:

$$\pi_i(100) = -\frac{1}{2} \pi_{44}$$

π_{44} :剪切压阻系数，由实验测定。

对于电阻 R_1 、 R_3 而言:

纵向应力: $\sigma_l = \sigma_r$; 横向应力: $\sigma_i = \sigma_t$, 则:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_r - \sigma_t) = -\frac{3Pr^2}{8h^2} \pi_{44} (1 - \gamma)$$

对于电阻 R_2 、 R_4 而言:

纵向应力: $\sigma_l = \sigma_t$; 横向应力: $\sigma_i = \sigma_r$, 则:

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{3Pr^2}{8h^2} \pi_{44} (1 - \gamma)$$





由上式可见，在压力P的作用下，电阻的变化与半径成正变，与膜片厚度成反变。当 $r=a$ 时，即在边缘处电阻变化是最大。

解释横向、纵向与径向、切向的关系。

由于 R_1, R_3 与 R_2, R_4 有相同的变化量，但符号相反，适合于构成全桥差动电路。

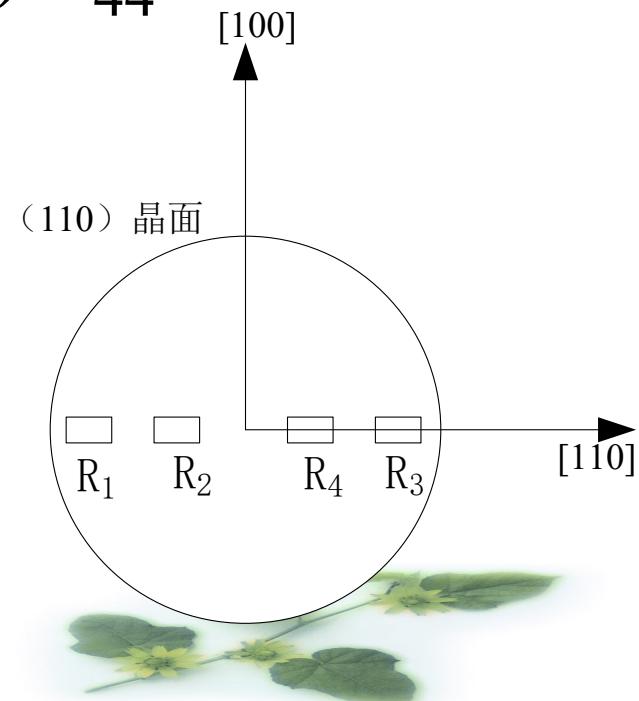
灵敏度： $S_R = \frac{|\frac{\Delta R}{R}|}{P} = \frac{3r^2}{8h^2} (1 - \gamma) \pi_{44}$

ii) 若压阻电阻分别位于正、负应力区：

选用N型硅（110）晶面作弹性膜片，沿[110]晶向的直径上制作四个等值P型硅电阻，如右图所示。此时：

纵向压阻系数： $\pi_l(110) = \frac{1}{2} \pi_{44}$

横向压阻系数： $\pi_i(110) = 0$





引起电阻改变量的符号取决于应力的方向。

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{\pi_{44}}{2} \overline{\sigma}_r(2,4) , \quad \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{1}{2} \pi_{44} \overline{\sigma}_r(1,3)$$

通过合理的设计电阻条的长度和位置，可以保证：

$$|\overline{\sigma}_{r2}| = |\overline{\sigma}_{r4}| = |\overline{\sigma}_{r1}| = |\overline{\sigma}_{r3}| ,$$

即四个电阻条的平均应力相等。在P的作用下，四个电阻的变化量相等，而符号相反，构成差动全桥输出。

$$\text{平均应力的计算公式: } \overline{\sigma}_r = \frac{1}{\int_r^{r+l} dr} \int_r^{r+l} \sigma_r dr$$

除了圆形膜片外，还有周边固支的方形、矩形膜片，它们均可建立：

$$\frac{\Delta R}{R} = kP , \quad k: \text{与压阻系数有关的常数。}$$





b) 动态性能

周边固支圆形弹性膜片的固有频率：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\perp}}{m}} = \frac{254h}{\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\gamma^2)}}$$

$\rho=2.35 g/cm^3$: 硅的密度；

$E=1.67 \times 10^{11} N/m^2$: 弹性模量；

$\gamma=0.35$: 硅的泊松比；

K_{\perp} = 模的横向刚度系数。

当 $a=0.045 cm$, $h=108 \mu m$, $f_n=2.268 MHz$

横向刚度系数：

$$K_{\perp} = \frac{F}{W} , F: \text{压力}, W: \text{中心挠度}.$$

中心挠度：

$$W = \frac{3a^4(1-\gamma^2)}{16Eh^3} P = 0.16 \frac{P}{E} \frac{a^4}{h^3}$$





c) 保证线性的基本条件

i) 中心挠度W不能太大，要保证好的线性关系：

$$\frac{W}{h} < 0.1$$

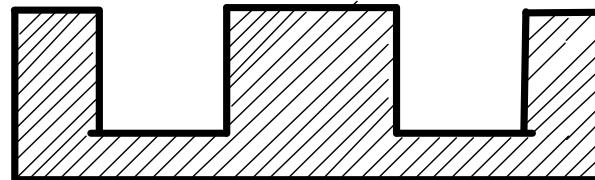
这时 $P \leq 0.61 \frac{Eh^4}{a^4}$ ，另外，上述一些公式的推导是建立在小挠度理论的基础上的，应力较大时这种线性关系便不成立，硅的破坏应力：

$\sigma_m = 4.5 \times 10^8 N/m^2$ ，要求 $\sigma < 0.2\sigma_m$ ，亦即：

$\sigma_r - \sigma_t = \sigma < 0.2\sigma_m$ ，这时： $P < 0.2\sigma_m \left(\frac{h^2}{a^2}\right)$ ，

上述两个公式是对被测压力量程的要求。

ii) 采用E型结构



d) 硅弹性膜片对性能的影响

正方形、长方形膜片的输出灵敏度高于圆形；圆形膜片精度高，低微压力、高压性能好；从小型化和易于批量生产的角度，方形优于圆形。



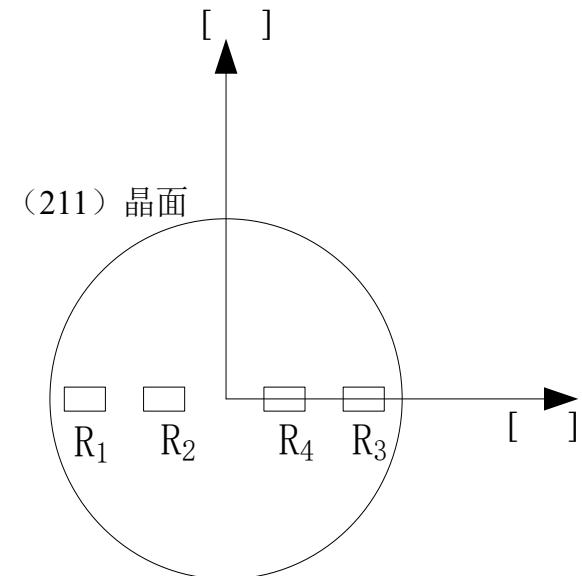


作业3：

为什么方形膜片的输出灵敏度高，而圆形膜片精度高，试分析之。

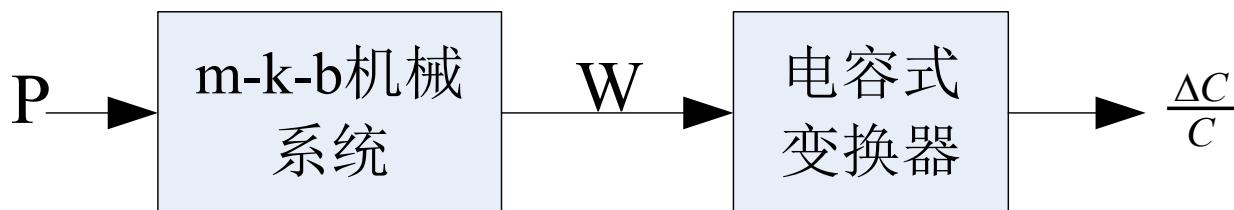
作业4：

若在 (2 1 1) 晶面上制作P型硅电阻，请问按下图在膜片上的同一应力区沿什么晶向制作，此时电阻的压阻系数最大，是多少？





2) 电容式压力传感器



变换形式: $P \rightarrow W$ (挠度) $\rightarrow \frac{\Delta c}{c}$

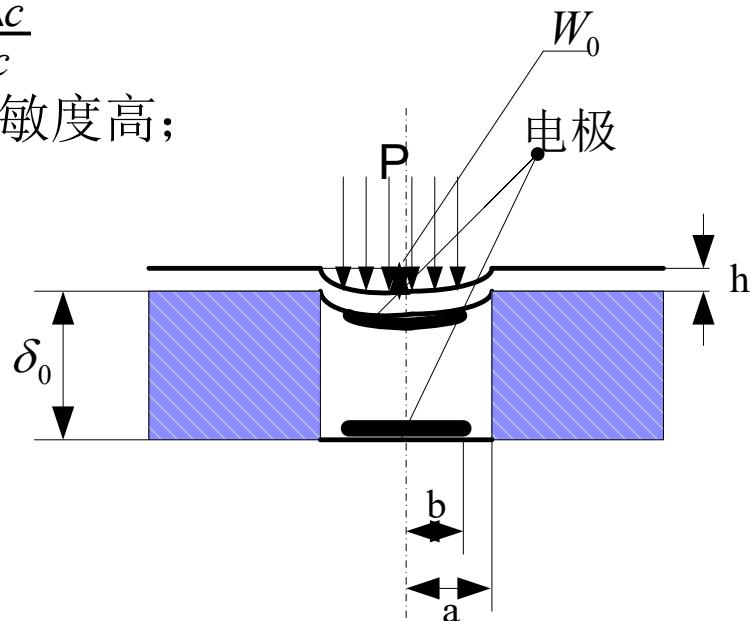
与压阻式压力传感器相比的优点: 灵敏度高;
温度稳定性好; 压力量程低。

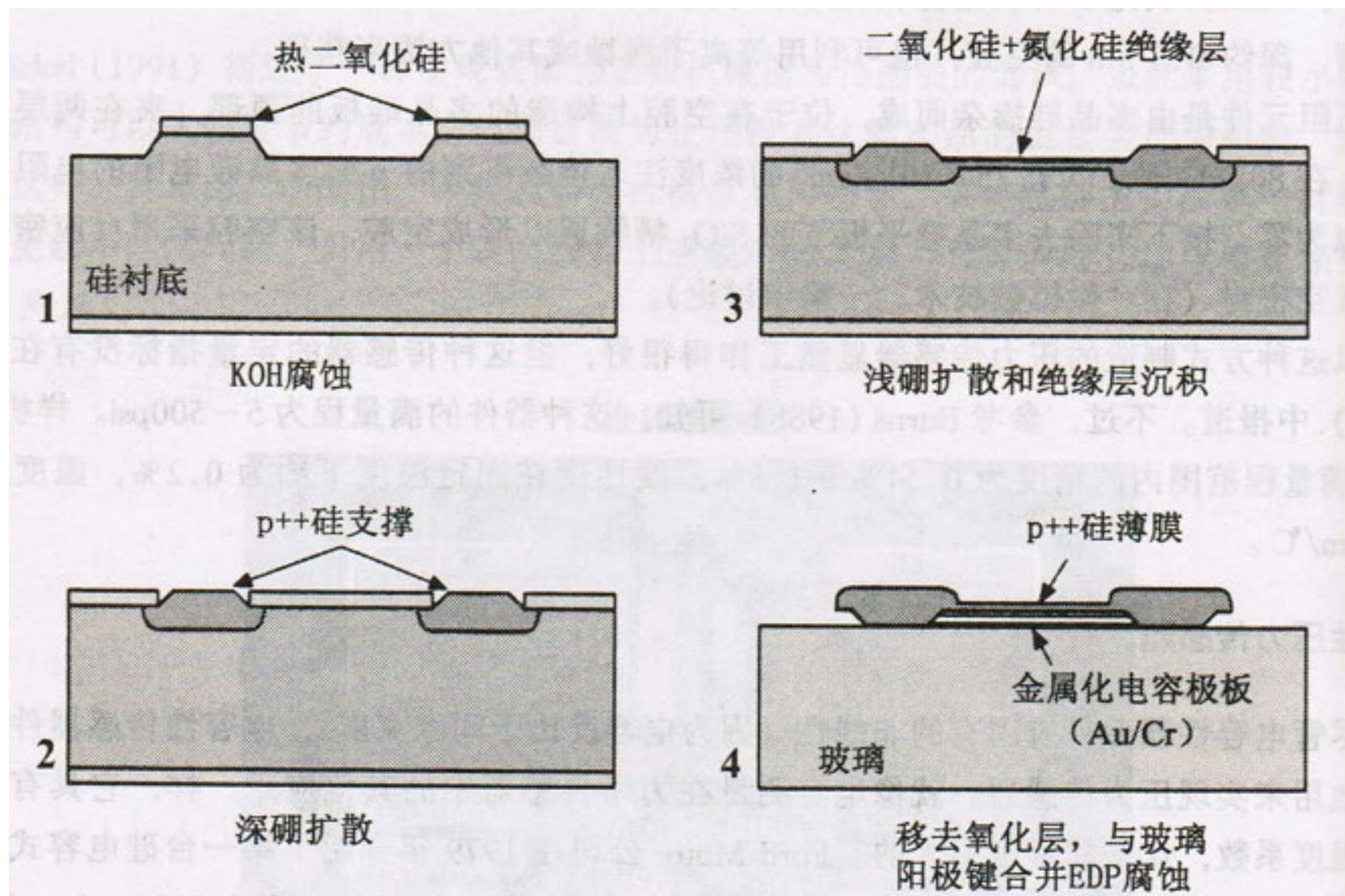
a) 圆形膜片压力敏感电容变换器

$$P = 0, C_0 = \frac{\epsilon_0 \pi b^2}{\delta_0}$$

$$\epsilon_0 = 8.87 \times 10^{-14} F/cm$$

$$P \neq 0, W_r = \frac{3P(1-\gamma^2)}{16Eh^3}(a^2 - r^2)^2 \quad , \quad b: \text{铝电极半径}$$







电容器的电容:

$$C = \int_0^b \epsilon_0 \frac{2\pi r dr}{\delta_0 - W_r} , \text{ 当 } W_0 \ll \delta_0 \text{ 时,}$$

$$C = C_0 \left[1 + \left(1 - g^2 + \frac{1}{3} g^4 \right) \frac{3(1-\gamma^2)a^4}{16Eh^3\delta_0} P \right] , \text{ 其中, } g = \frac{b}{a}$$

举例说明:

$$\delta_0 = 22 \mu m, a = 500 \mu m, b = 350 \mu m, h = 20 \mu m$$

当 $P = 9.8 \times 10^4 N/m^2$ 时,

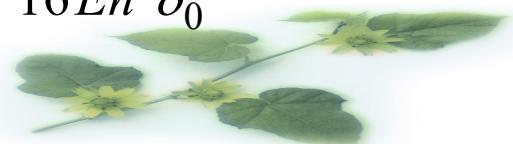
$$c_0 = 1.7 pF , \quad W_0 = 0.77 \mu m , \quad c = 2.08 pF$$

i) 输入-输出特性

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \left(1 - g^2 + \frac{1}{3} g^4 \right) \frac{3(1-\gamma^2)a^4}{16Eh^3\delta_0} P$$

ii) 压力灵敏度

$$S_c = \frac{\Delta c / c_0}{P} = \left(1 - g^2 + \frac{1}{3} g^4 \right) \frac{3(1-\gamma^2)a^4}{16Eh^3\delta_0}$$





与压阻式的比较:

$$\frac{S_c}{S_R} = \frac{(1-g^2 + \frac{1}{3}g^4)(1+\gamma)}{2E\pi_{44}} \frac{a^2}{\delta_0 h}$$

按上例的参数:

$$\frac{S_c}{S_R} = 51.5$$

说明: 电容式压力传感器比压阻式压力传感器灵敏度高。

b) 动态性能

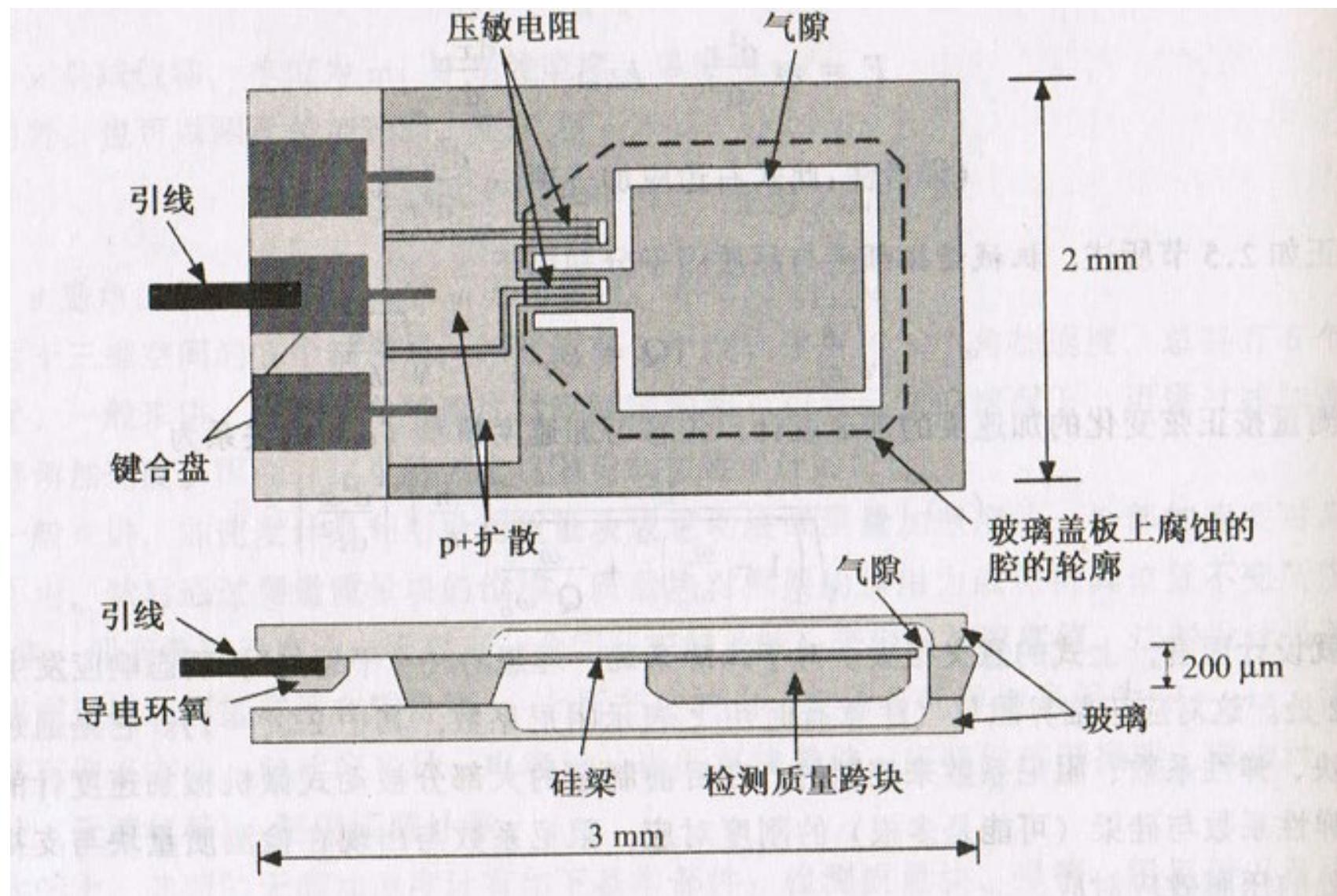
取决于弹性敏感元件, 应该与压阻式压力传感器一致。

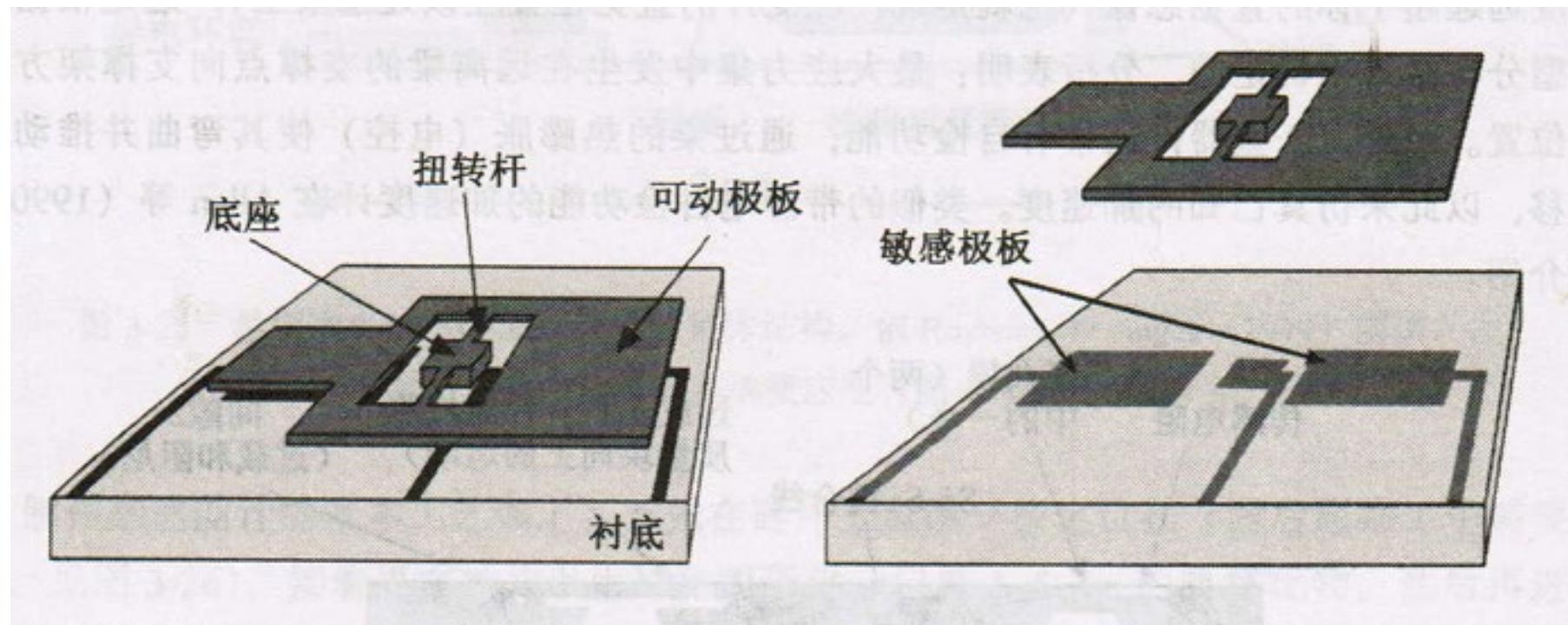
4、加速度传感器

1) 测量加速度的方法 (原理)

压阻式, 电容式, 压电式, 利用的基本上是m—k—b机械系统, 只是变换器输出的参量不同, $\Delta R, \Delta c, \Delta v$ 。







非对称扭转极板电容加速度计





在惯性式加速度计的力学模型中，我们需要了解的是其特性与参量间的关系：

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} K \text{ 无阻尼固有振荡频率} \\ |H_a(0)| = \frac{1}{\omega_n^2} = Km = \frac{m}{k} K \text{ 静态灵敏度} \end{cases}$$

m-k-b机械力学系统完成对被测加速度 $\mathbf{a} = \ddot{x}$ 转换为中间变量 (σ , 变形位移y) 的任务, 配以不同形式的检测 σ 或y的变换器则构成不同形式的加速度传感器。

2) 基于压电效应的加速度传感器

压电效应是可逆的, 压电传感器是一种典型的“双向传感器”。

a) 正压电效应：沿一定方向对某些电介质加力而使其变形，在一定表面上产生电荷，外力去掉，又重新回到不带电的状态。

b) 逆压电效应：在电介质的极化方向施加电场，电介质在一定方向上产生机械变形或机械应力。

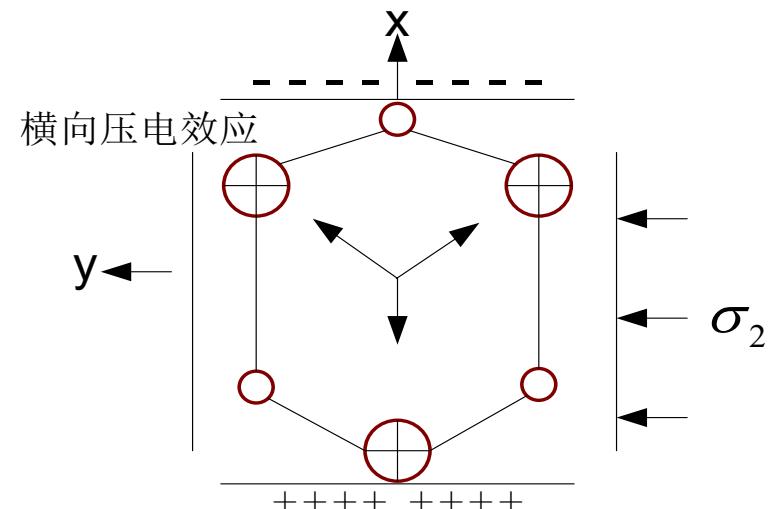
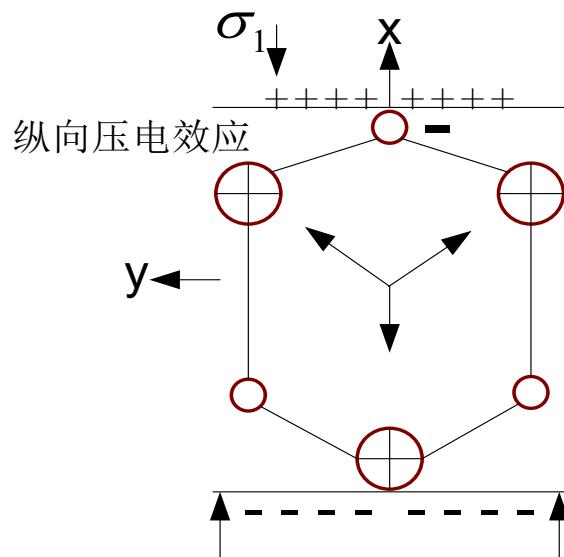




c) 缺点：无静态输出，要求有很高的电输出阻抗，需用低电容的低噪声电缆，工作温度25℃。

输出电荷表达式： $Q = dF$ ，d：压电系数

压电式加速度传感器： $Q = d_{ij}m\ddot{x}$





3) 伺服式加速度计

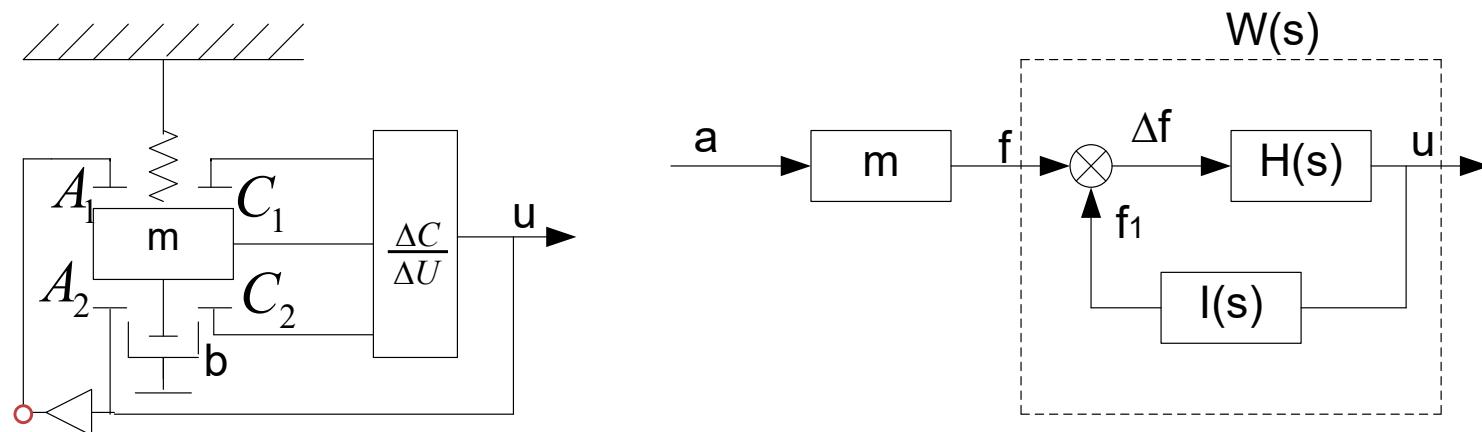
又称力平衡式加速度计，具有负反馈环节。

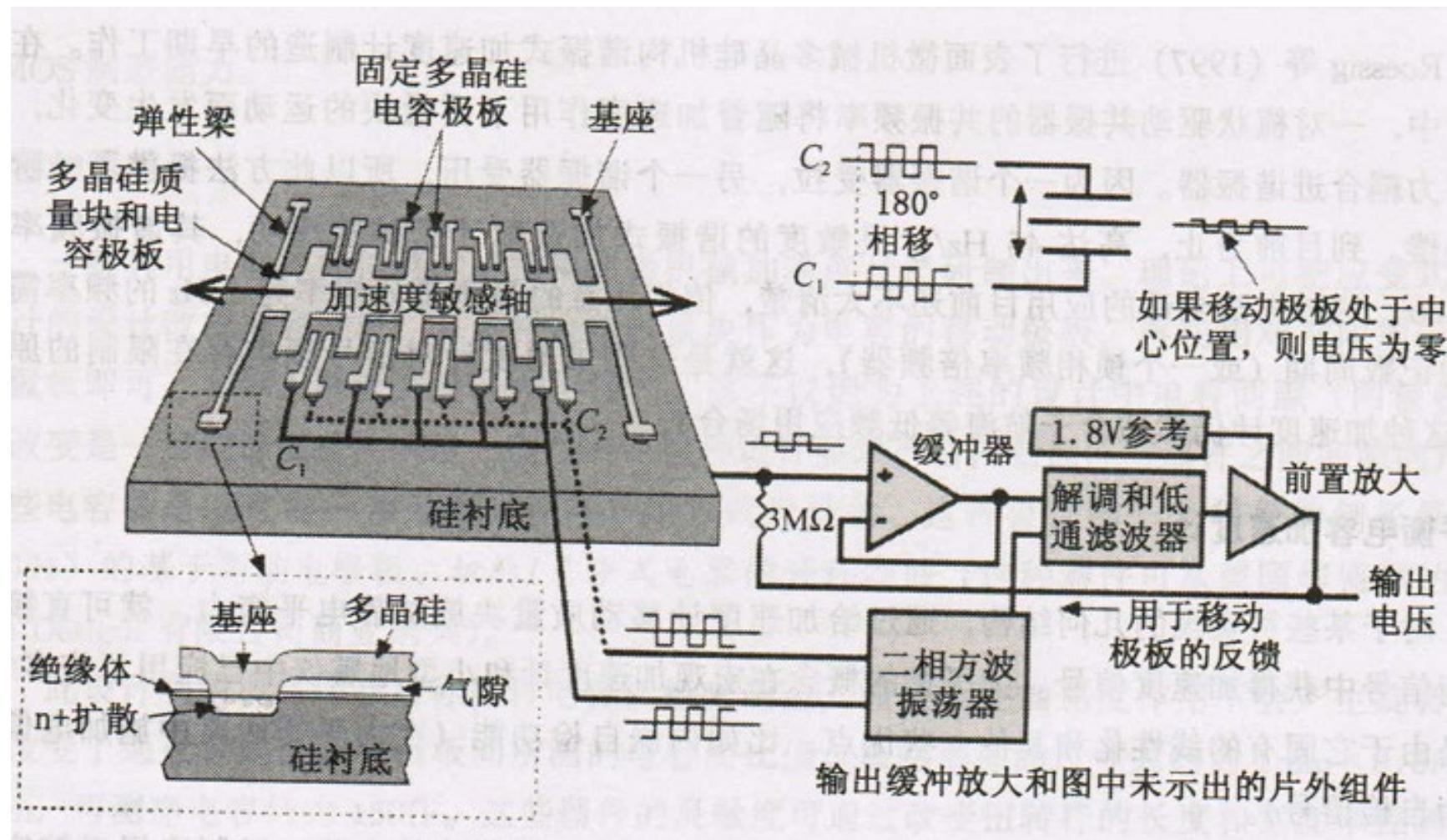
优点：大大改善加速度计的动态性能与静态精度。

在下图中假设： $\Delta C / \Delta u$

转换系数为1，则闭环系统的前向通道的传递函数：

$$H(s) = \frac{U(s)}{F(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1}$$







无反馈时，输出电压u在一定频带范围内（ $0 << \omega << \omega_n$ ）与惯性力 f 或者说被测加速度 a 成正比。

有反馈时，I(s) 是一个反向传感器， f_1 与 u 成正比，方向与 f 相反，当系统处于动态平衡时， $\Delta f \approx 0$ ，质量块位移量极小。

反向传感器传递函数： $I(s) = \frac{F_1(s)}{U(s)} = K_2$ = 常数

闭环传递函数：

$$W(s) = \frac{U(s)}{F(s)} = \frac{H(s)}{1+H(s)I(s)} \quad H(s) = \frac{U(s)}{\Delta F(s)},$$

以加速度 a 为输入，电压 u 为输出：

$$H_a(s) = \frac{U(s)}{A(s)} = W(s)m = \frac{H(s)}{1+H(s)I(s)}m = \frac{1}{\frac{1}{H(s)} + I(s)}m$$

$$= S_0 \frac{1}{\frac{1}{\omega'_n{}^2} + \frac{2\zeta'}{\omega'_n}s + 1}, \quad S_0 = \frac{Km}{\sqrt{1+KK_2}}, \quad \zeta' = \frac{\zeta}{\sqrt{1+KK_2}},$$

$$\omega'_n = \omega_n \sqrt{1+KK_2}$$





对于上述系统总传递函数，我们可作如下讨论：

a) 该系统仍为一个二阶系统；

i) $\omega'_n = \omega_n \sqrt{1+KK_2}$ ，固有角频率扩大了 $\sqrt{1+KK_2}$ 倍。

ii) 阻尼比 ζ' 减少了 $\sqrt{1+KK_2}$ 倍。

iii) $\omega=0$ 时，静态增益为 S_0 ，减少了 $\sqrt{1+KK_2}$ 倍。

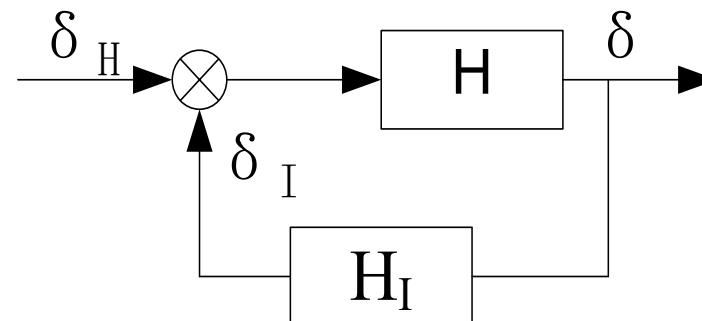
b) 闭环系统的静态精度

系统的相对误差：

$$\delta = \delta_H \frac{1}{1+KK_2} - \delta_I \frac{KK_2}{1+KK_2}$$

若： $\delta_H = 10\%$, $KK_2 = 20$, $\delta_I = 1\%$

则： $\delta = -0.5\%$ 。





§ 2.2.2 谐振式频率输出型传感器

谐振式传感器需要解决的问题：

谐振式与被测对象之间关系的建立：激振方式的选择，频率的测量。

特点：直接输出准数字量，如频率，相位或计数脉冲；精度高，稳定性好。

1) 谐振结构形式：悬臂梁、振弦、振膜、振筒等等。

2) 使力学结构起振的方式：利用逆压电效应的压电激励、热脉冲激励、光脉冲激励；利用电容效应的静电力激励；加电流脉冲的激励。

3) 测量方式：利用压电效应的压电变换器，基于压阻效应的电阻变换器；电容变换器等。

为维持等幅振荡，需加入具有正反馈的环节。

举例说明谐振传感器的工作原理：





1、一根张紧弦的固有频率

单自由度机械力学系统的无阻尼固有频率：

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$k = \pi^2 \frac{F_0}{l}$: 张紧弦的横向刚度系数 ;

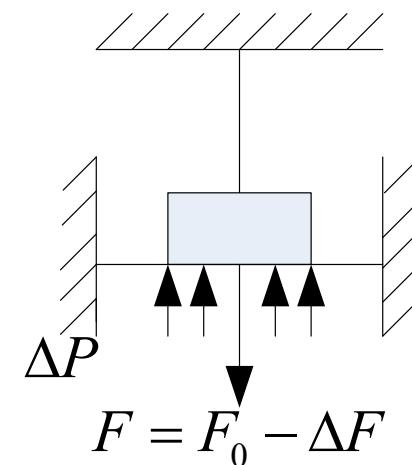
$m = l\rho_l$, ρ_l : 线密度; 则:

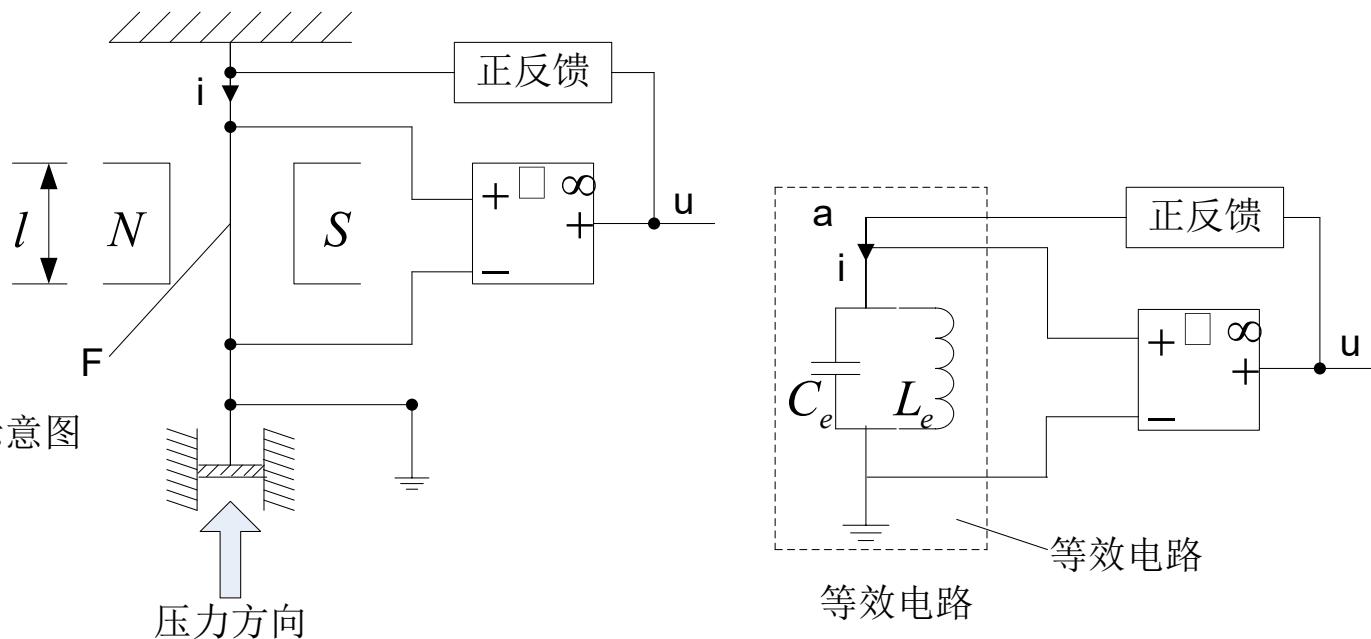
$$f_n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho_l}}$$

根据上式, 可测: 力、位移、压力、等, 构成频率输出型传感器。

2、恒定磁场中通电流振弦的等效电路

主要是建立起一种变换关系, 即在m-k-b机械系统与LC并联电路之间建立一种关系。





恒定磁场通电流谐振子示意图

在上图中, $i = i_C + i_L$, $F = F_C + F_L$,

$$u_L = L_e \frac{di_L}{dt} \quad u_c = \frac{1}{C_e} \int i_C dt$$

- * 电流 i_C 受到的磁场作用力 F_C 为克服惯性力使弦产生加速度 $\frac{dv_C}{dt}$, 其位移引起电容量变化, 因此:

$$F_C = Bl i_C = m \frac{dv_C}{dt} , \quad v_C = \frac{1}{m} \int F_C dt ,$$





$$e_C = Blv_C = \frac{B^2 l^2}{m} \int i_C dt$$

- * 电流 i_L 受到的磁场作用力 F_L 为克服弹性力使振弦产生横向变形位移 x , $F_L = Bli_L = kx$, k : 弦的横向刚度系数;
弦长的变化引起电感量的变化, 弦的形变位移速度: $v_L = \frac{dx}{dt}$

$$e_L = Blv_L = \frac{B^2 l^2}{k} \frac{di_L}{dt}$$

与前面的公式相互比较:

$$L_e = \frac{B^2 l^2}{k} , \quad C_e = \frac{m}{B^2 l^2} \quad \text{。 LC并联回路的谐振频率:}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_e}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

说明: 在恒定磁场中通以电流 i 的振弦, 其力学系统的固有频率与其





等效 C_e 、 L_e 并联电路的谐振频率一致，从而说明输出电压信号的频率可以直接反映压力的变化。

3、 测量电路

可采用上述的等效电路模型。

举例：日本横河公司开发出的H型硅微结构谐振式压力变送器，量程为 10^4 Pa 的精度为 $\pm 0.1\%$ ，($-40^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$) 工作范围内的综合精度为 $\pm 0.49\%$ 。

4、 振弦式力谐振传感器的输出—输入特性

在公式 $f_n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho_l}}$ 中，假定： $F = F_0 + \Delta F$ ，则：

$$f = f_n \sqrt{1 + \frac{\Delta F}{F_0}} ;$$

它的幂级数展开式为：

$$f = f_n \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F_0} - \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^3 - \dots \right]$$





$$= f_n + \Delta f, \Delta f = f - f_n = f_n \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F_0} - \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^3 - \dots \right]$$

具有较大的非线性，忽略高阶量，理论线性度：

$$\delta_L = \frac{\frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2}{\frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F_0}} = \frac{1}{4} \frac{\Delta F}{F_0}$$

灵敏度：

$$S = \frac{\Delta f / f_n}{\Delta F / F_0} = \frac{1}{2}$$

若采用差动式结构，即一个固有振荡频率增加，另一个减少，两者输出之差作为输出，则 $\delta_L = \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2$, $S=1$;

5、谐振型温度计

利用晶体的各向异性，通过选择适当的切割角度，把温度系数小的晶体用作频率的基准，温度系数大的作为测量频率。

特点：分辨率高，稳定性好，输出频率信号。

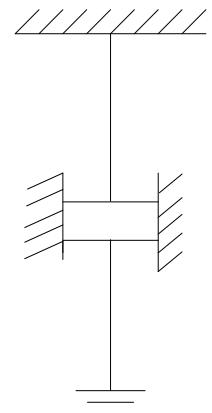




晶体振子频率 f_t 的温度特性近似用下式表示：

$$f_t = f_0 [1 + \alpha(t - t_0) + \beta(t - t_0)^2 + \gamma(t - t_0)^3] ;$$

α 、 β 、 γ ：由切割角度决定的常数。





§ 2.2.3 CCD图像传感器 (charge coupling device)

CID (charge infusion device) 电荷注入器件

补充：光传感器

1)、作为光量检测的方法

- a) 将光照射到显示光电效应的物质上，直接得到电输出；
- b) 光被物质吸收而转变为热，从而测量物质温度的升高而反映光的信息；
- c) 利用光的干涉效应，产生光波频率的和及差，反映光的信息。

光电效应分：

- a) 内光电效应：入射光子引起元件物质内部产生或感应出电子和空穴等载流子，这些载流子停留在物质内部，引起物质电性质发生变化（内量子效应），它分光电导效应和光电效应。
 - i) 光电导效应：改变元件物质的电导率，用于制作光敏电阻。



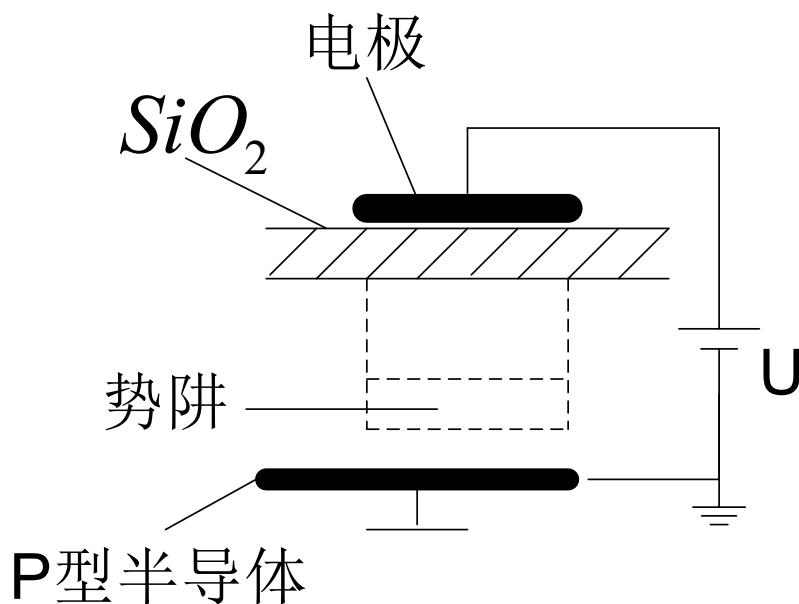


ii) 光电效应：入射光在两种半导体的结合处激发出电子—空穴对，电子与空穴分别向相反的方向移动，从而产生感应电势。P—N结、光敏二极管、三极管、CCD等。

b) 外光电效应：入射光被物质的表面所吸收，并从表面向外部释放电子，又称光电发射效应，如光电管、光电倍增管。

2) MOS结构的非稳定性

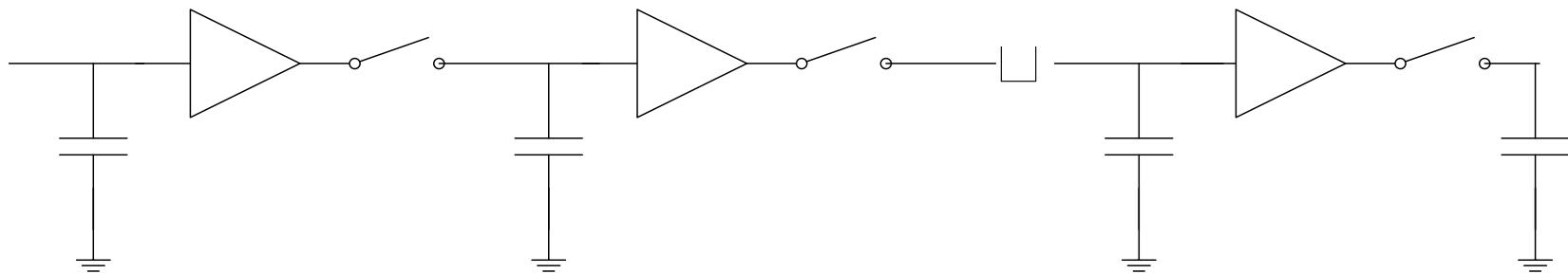
当足够数目的电子汇集在表面时，达到饱和状态，此时离开表面的扩散电流和流向表面的漂移电流达到动态平衡，达到饱和状态所需要的时间称为热驰豫时间，室温下为1秒到几秒，信号电荷的存贮时间为





要远小于热驰豫时间。

3) 、电荷传输的简单模型



4) 、转移效率

CCD是一种动态模拟移位寄存器，信号电荷的转移效率最重要，设从一个电极转移到下一个电极的转移效率为: $\eta = \frac{Q_1}{Q_0}$ 。

对应的 $\varepsilon = \frac{Q'}{Q_0}$ 称为失效率， $Q' + Q_1 = Q_0$ 。转移N个电极后电荷量为 Q_N ，则: $\frac{Q_N}{Q_0} = \eta^N = (1 - \varepsilon)^N$ ，一般要求 $\frac{Q_N}{Q_0} > 90\%$ 。





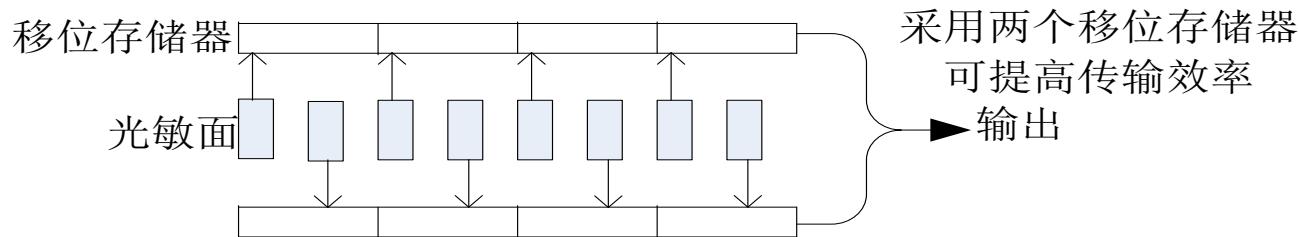
表面沟道电荷耦合器件（SCCD）与埋沟道电荷耦合器件（BCCD）的区别：

BCCD的优点：传输效率达到99. 99%，传输速度提高；

缺点：工艺复杂，结电容小，电荷存贮能力下降。

在P型衬底上外延或扩散薄n层，形成P—N结，当在P—N结上加反向偏压时，在P—N结区便形成了耗尽层。

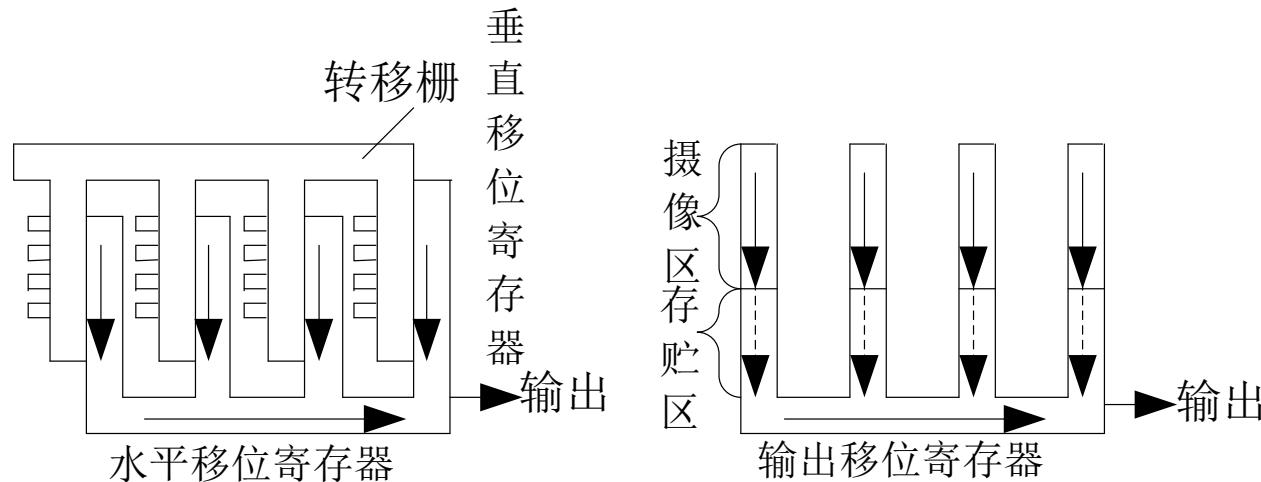
5) 、线阵CCD



6) 、面阵CCD:

- a) 行间传输结构
- b) 帧传输结构





7) CCD摄像器件的重要特性

a) 光电特性

输出信号电压与入射的照度是线性关系，入射照度 $>100\text{ lux}$ 输出饱和

b) 光谱特性

对蓝光和黄光的灵敏度低，因为反射的影响，需采用透明电极。

c) 暗电流

室温为 $5\sim10\text{nA/cm}^2$ ，对存贮时间有影响。

d) 噪声





CCD是一种低噪声器件，CCD噪声主要由输入电路、寄存器本身输出电路引起。主要从结构（BCCD）设计和工艺的改进方面降低噪声。

e) 分辨率：

由像素总数和传输效率决定。

CCD的工作过程：

通过光学系统将被测物体成像在器件的受光面上，受光面下的像素小单元将像光量转换为电荷信号并存储，然后在时序控制信号作用下，被存储的电荷信号被转移传输和顺序输出。

1、基本单元（参照前图）

作用：电荷的存储；电荷的转移。

2、基本单元的功能

1) 电荷存储

—— 加正电压，P型硅里的空穴被赶尽，形成负离子空间电荷（又





称耗尽区），没有导电的载流子。对于带负电的电子来说，耗尽区是电子的“势阱”。

——“势阱”具有存储电子的功能，存贮了电荷的势阱称为电荷包。

——势阱的深度决定于正电压U的大小，宽度决定电极的宽度。

——每个独立的存贮电子电荷的MOS基本单元被称为一个“像素”。

势阱中存储的电子来源有两种方式：

a) 光注入

光入射到半导体硅片上，产生电子空穴对，光生电子被附近的势阱俘获，空穴被排斥出耗尽区，光电子数量与光强成正比，该单元既可存储电荷，又有感光的作用，称为“光敏元”。

b) 由光电二极管阵列产生的光生载流子注入产生

光生电子被势阱俘获，光生空穴被赶走，该单元只起存储电荷的作用，如TCD142D型线阵CCD器件。





2) 电荷耦合

势阱中的电荷从一个MOS单元转移到另一个MOS单元是基于MOS单元的电荷耦合功能来实现的。

将一定规则变化的电压加到各个MOS单元的电极上，电极下的电荷包就能沿半导体表面按一定方向移动。

通常，把MOS元的电极分为几组，有三组，有两组。

三相驱动时钟脉冲相位相差 120° 。

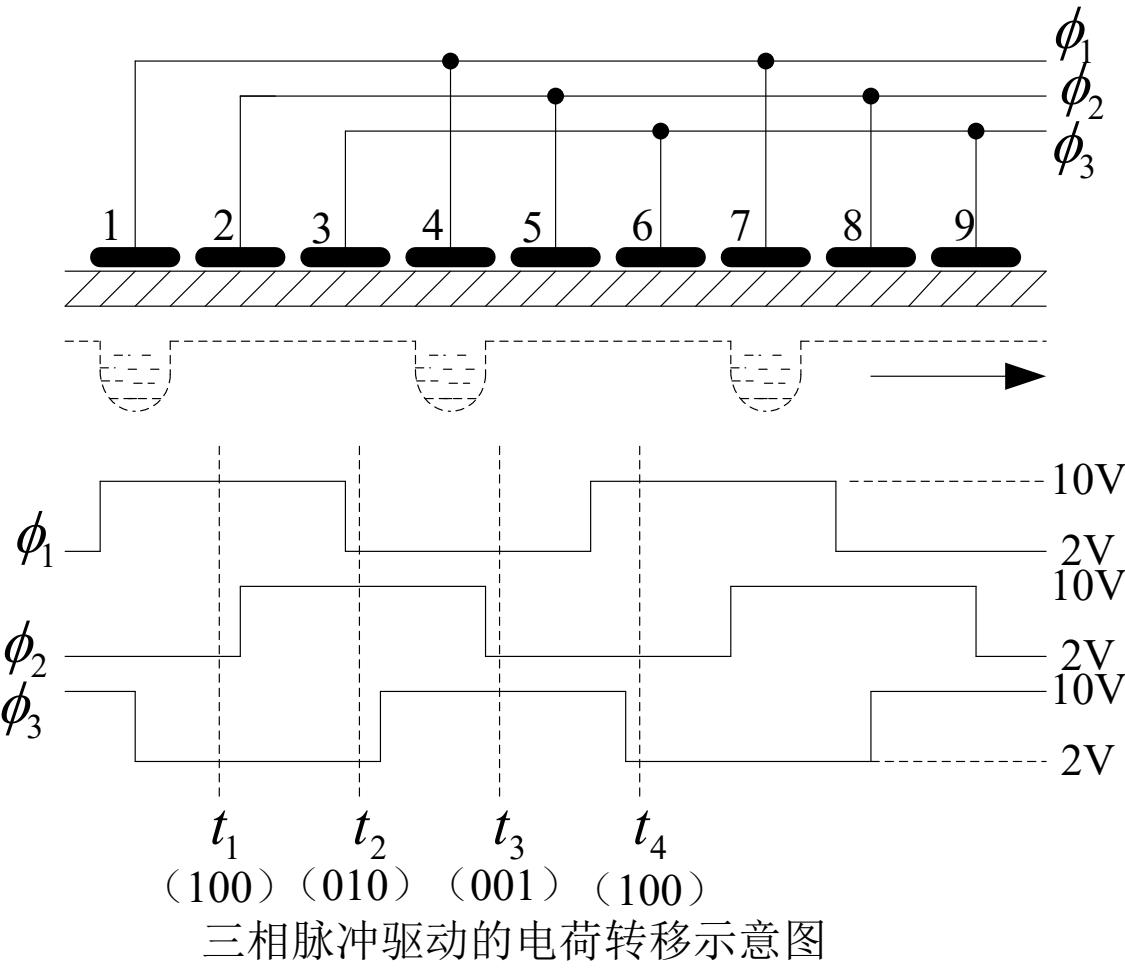
为了不使电极间隙下方界面处出现阻碍电荷转移的势垒，间隙宽度应小于 $3 \mu m$ ，只有电极间隙足够小，前一电极下势阱由深到浅，后一电极下的势阱由浅变深才相通，电荷的转移不会受阻碍。

电荷转移传输的MOS单元阵列称为读出移位寄存器，它们须遮光。

3) 电荷的输出

被转移传输的信号电荷要输出，输出方式有多种，下图为电流输出方

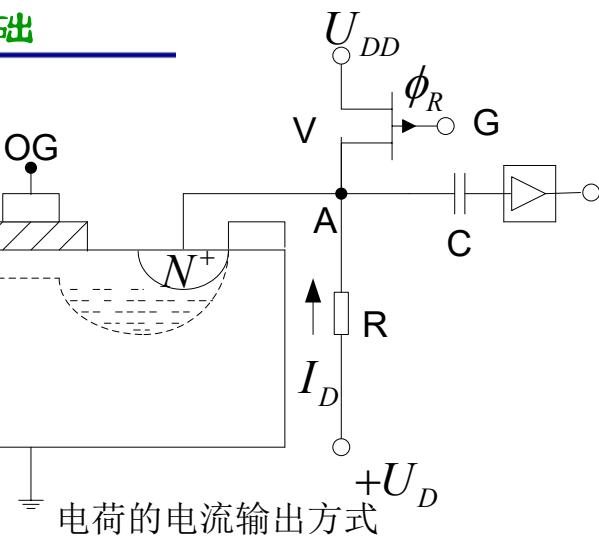
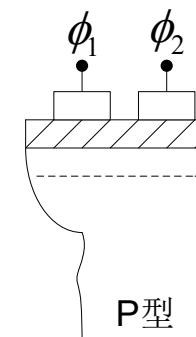
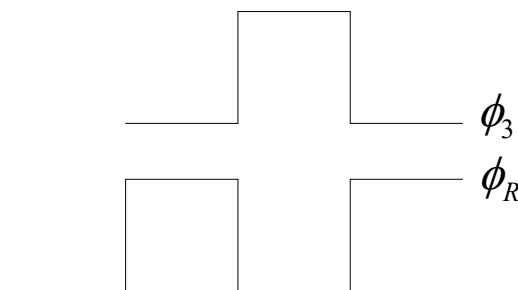




式。

OG: 输出栅极，加直流偏置以使漏扩散和时钟脉冲之间退耦，实际上是防止在时钟脉冲作用下最终信号电荷扩散掉。





N^+ 区与P型硅接触处构成PN结，施加 U_{DD} 构成反向偏置二极管，转移到 ϕ_3 下面的电荷包越过输出栅流入到反向偏置二极管的深势阱中。在 dt 时间内，流入的信号电荷为 Q_s ，二极管输出电流 $I_D = \frac{Q_s}{dt}$ 。

$$A点电位: U_A = U_D - I_D R$$

A点的电位变化量与信号电荷的量成正变， ΔU_A 经C耦合至放大器放大输出。

v为复位管，它的作用就是在 ϕ_3 电极下的势阱未形成前在栅极G加复位脉冲，使 A点电位复位到 V_{DD} ，当 Q_s 到来时，v截止。





3、二相线阵TCD142D型CCD器件的基本结构

组成部分：有2124个光电二极管线阵，其中前64个和后面12个是被遮蔽的，构成像素的是中间2048个单元。为提高传输速率，采取上下两行存贮栅的结构，分别存贮奇偶列的信号电荷。

单元： $14 \mu m \times 14 \mu m$ ，中心距： $14 \mu m$

有效总长： $2048 \times 14 = 28.672 \text{ mm}$ 。

存贮栅的作用：相当于数据采集系统中采样器的作用；

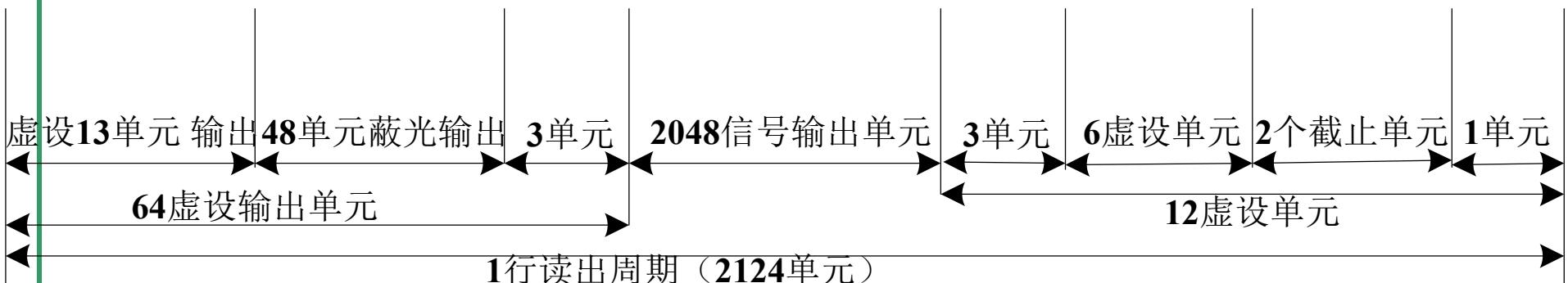
移位寄存器的作用：相当于数据采集系统中保持器的作用；

转移栅的作用：相当于数据采集系统中采样开关的作用。





4、 TCD142D型CCD器件的工作时序



5、 应用举例

利用线阵CCD器件自动检测工件直径，表面检测。机器人视觉系统应用。





单片指纹传感器

生物识别技术（Biometric Identification Technology）是利用人体生物特征进行身份认证的技术。

“认人不认物”的特征要求：人各有异，终身不变，随身携带。

同时具备这三个特点的人体生物特征主要有指纹、虹膜、DNA。

适用于生物识别的人体特征有手形、指纹、脸形、虹膜、视网膜、脉搏、耳廓等。行为特征有签字、声音、按键力度等。目前，指纹机和手形机在人体特征识别技术市场中的占有率达到34%，26%。

1、指纹识别基本原理

1) 指纹图像的两大特点：

- a) 具有唯一性，匹配上12个特征的两个指纹相同的几率仅为 $1/10^{50}$
- b) 具有基本不变的相对稳定性

指纹识别的过程分四个步骤：读取指纹图像、提取特征、保存数据和对比。





2) 指纹图像的获取

主要有4种：光学取像设备、压电式指纹传感器、半导体指纹传感器、超声波指纹扫描仪。

在半导体指纹传感器中又分温差感应式（FCD4B14）和电容感应式（FPS100）。

3) 指纹识别技术的基本原理

指纹特征分两类：一类是总体特征，用眼睛可直接观察到的特征；另一类是局部特征，主要指节点特征，主要以：

- a) 节点类型；
- b) 方向；
- c) 曲率；
- d) 位置（x, y坐标）

方面来区分。

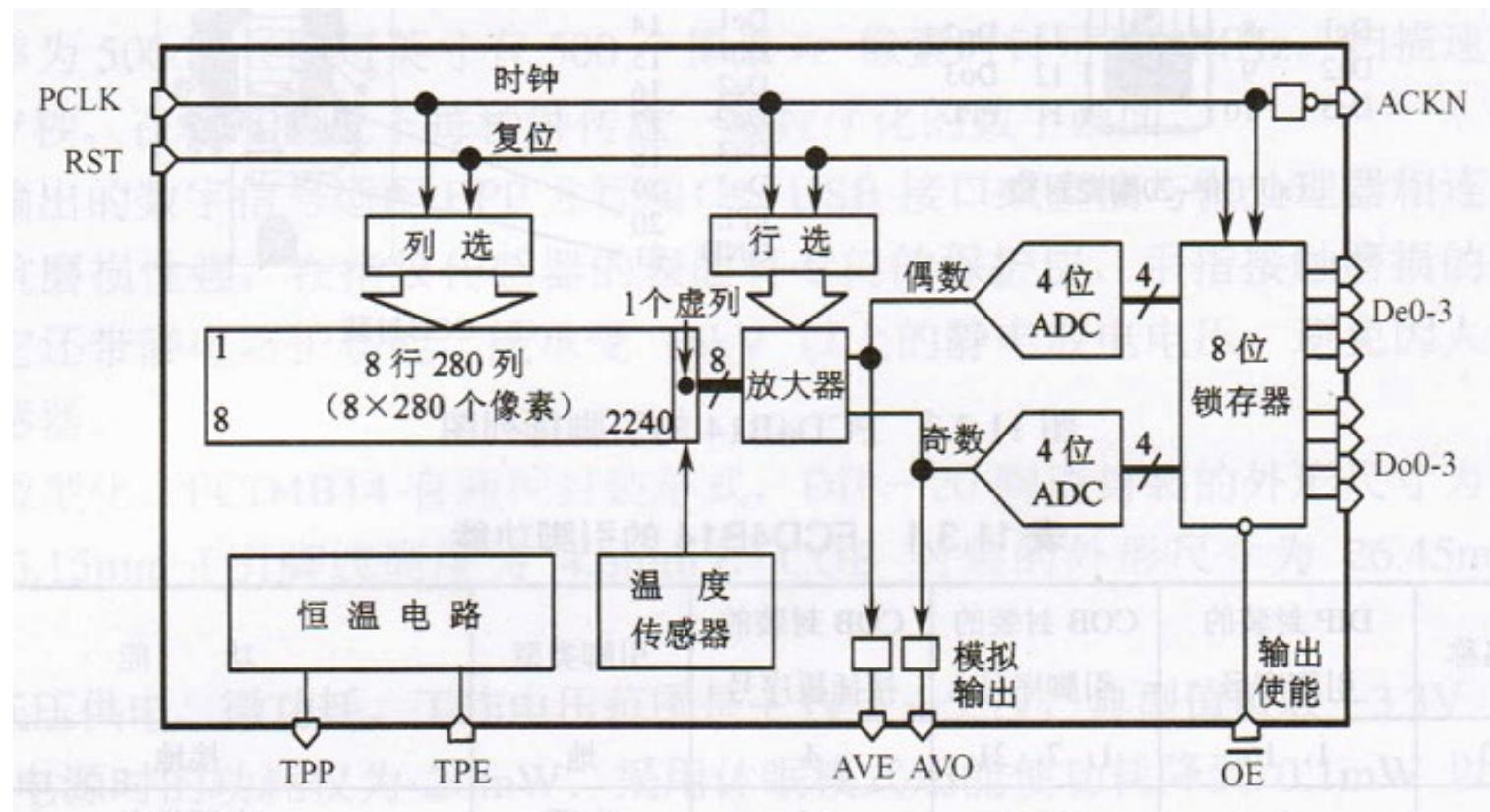


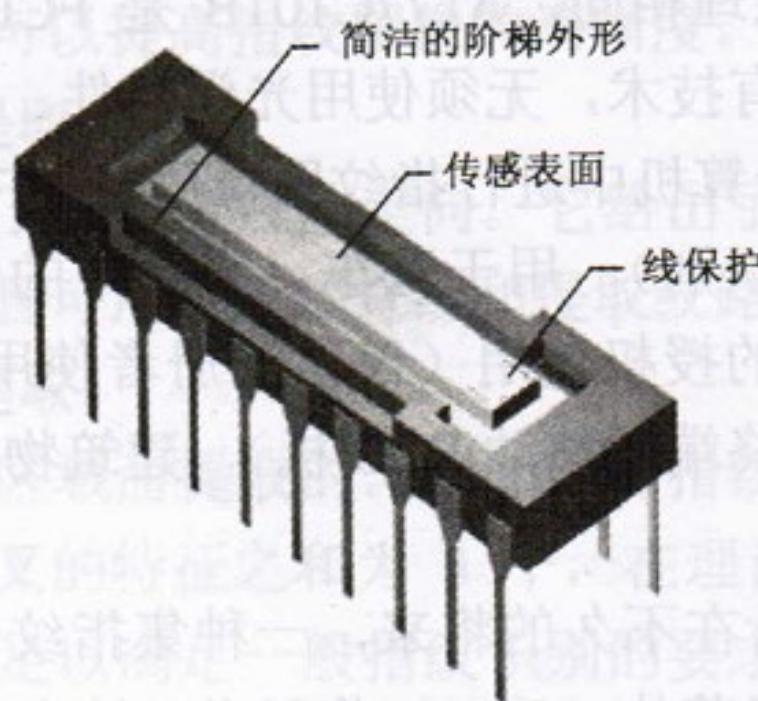


指纹识别过程：

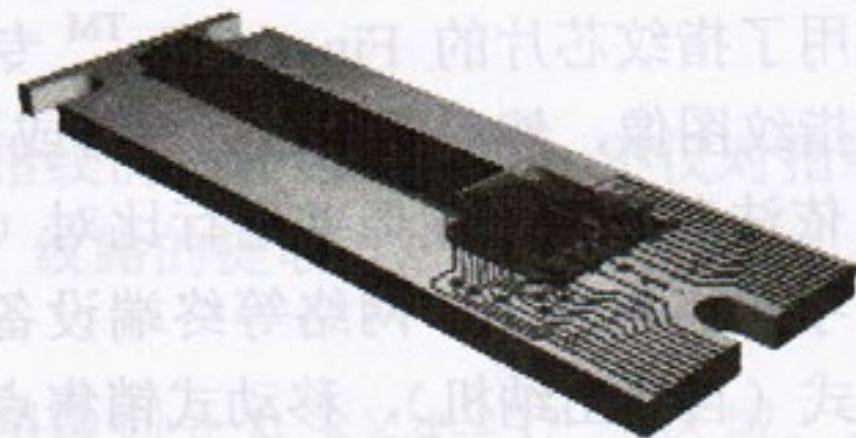
指纹采样→预处理→二值化→细化→纹路提取→细节特征提取→指纹匹配

2、FCD4B14/AT77C101B型指纹传感器（内部结构见下图）





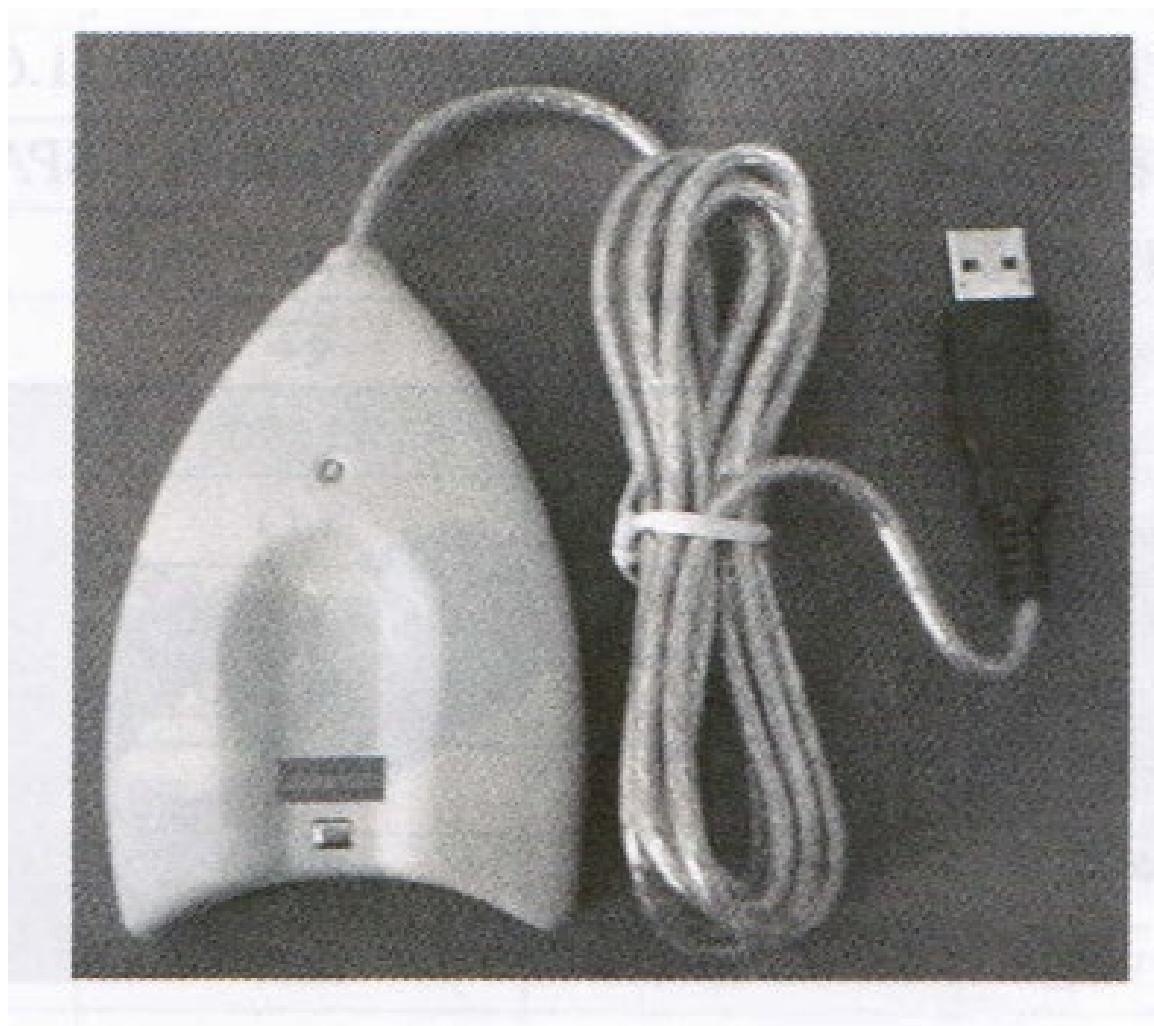
(a) DIP-20陶瓷封装

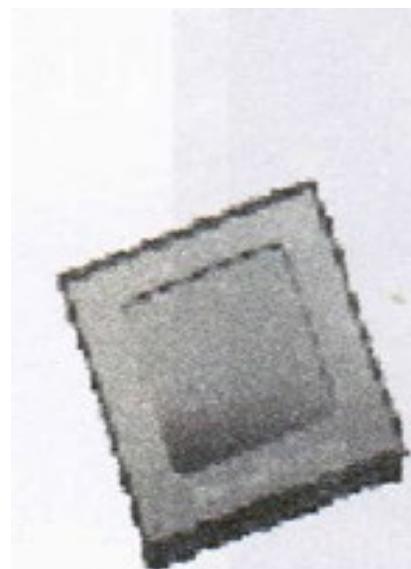


(b) COB封装

图 11.3.1 FCD4B14 的外形图







(a) FPS100的外形



(b) 指纹识别系统的输入设备





§ 2.2.4 半导体气敏传感器

传统手段:电化学—使用电极与电介液对气体进行检测。

光化学—利用气体的光学折射率或吸收等特性。

缺点: 检测速度慢, 设备复杂, 成本高, 使用不方便。

新型半导体气敏传感器的优点:

元件体积小, 功耗低, 特性一致性好, 适合自动, 连续过程检测。

其中以薄膜型器件为好, 它可以与集成电路的制造工艺兼容。

半导体气敏传感器按控制机理分类:

- 1) 电阻控制型气敏传感器 (金属氧化物半导体) ;
- 2) 非电阻控制型气敏传感器 (半导体材料硅) ;

气敏传感器的要求:

- 1) 具有良好的选择性 (半导体法的选择性较差)
- 2) 较高的灵敏度和宽的动态响应范围。
- 3) 性能稳定, (半导体法稍差, 可靠性也不是很好)





- 4) 响应速度快, 重复性好
- 5) 保养简单, 价格便宜

1、电阻控制型气敏传感器机理

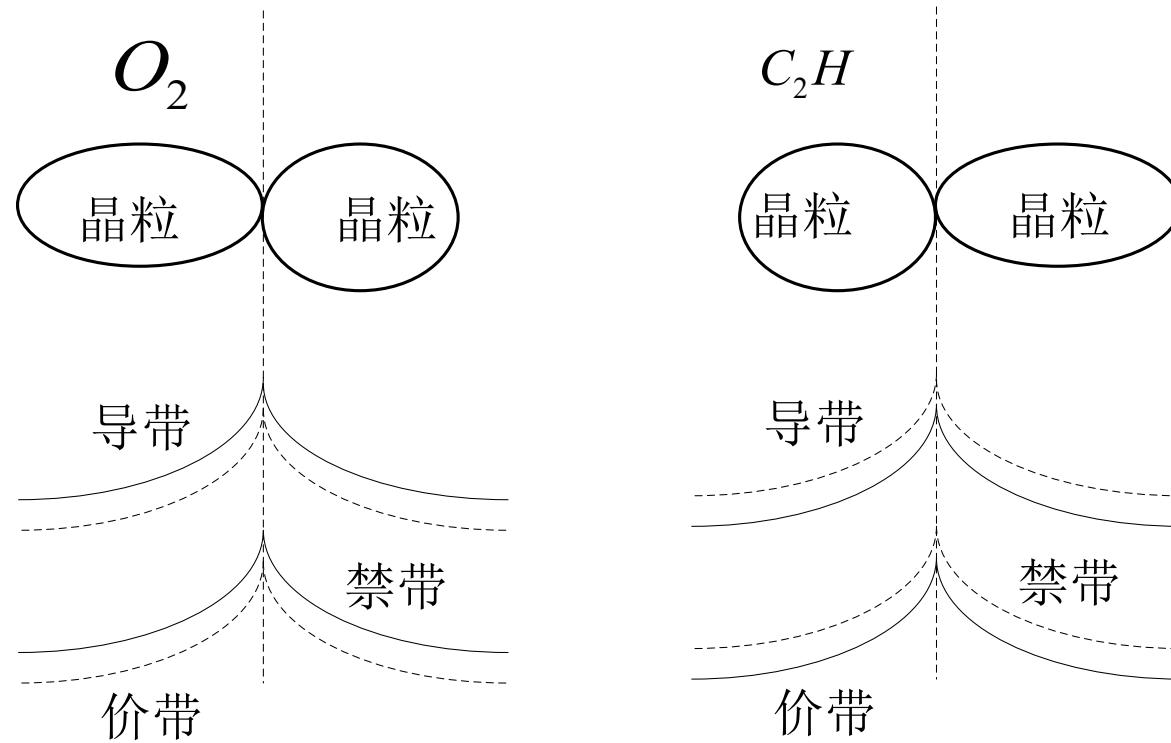
敏感元件与被测气体接触引起电导变化, 电导变化分表面电导变化与体电导变化。

一般构成: 加热器+温度测量元件+气敏元件

a) 晶界势垒模型

根据多晶体半导体能带模型。半导体气敏材料是半导体微粒的集合体。由于粒子接触界面势垒的存在, 当晶粒接触面吸附可以容纳电子性的气体 (O_2 等氧化性气体) 时, 势垒更加增高, 阻碍了电子在晶粒之间的运动, 材料表现为较高的电阻率; 当吸附可以供电子性的气体 (H_2 等还原性气体) 时, 势垒变低, 促进了电子在晶粒之间的运动, 材料的电阻率降低, 有些气体吸附后, 势垒无明显的变化。





对于半导体气敏机理（或工作原理）的解释，不同类型的传感器可以归纳成四种模式：＊接触粒界势垒理论；＊整体原子价控制理论；＊能级生成理论(SnO_2 , ZnO)；＊表面电荷层理论。

b) 颈部模型

参见相关参考书中的内容。





1) 表面控制型

利用半导体表面因吸附气体引起半导体元件电阻值变化的特性。

检测对象：多数是可燃性气体。

传感器材料： SnO_2 ， ZnO 。

激活剂（添加剂）：掺有少量的贵重金属（如Pt等）。

2) 体控制型

利用体电阻的变化。

检测对象：液化石油气（丙烷），煤气（ CO ， H_2 ），天然气（甲烷）

传感器材料： Fe_2O_3 ， TiO_2 ， CuO 等。

2、影响电阻控制型气敏传感器的因素及改善方法

1) 氧化分压的影响

气敏传感器对还原性气体的测量是建立在首先在氧化性气体中被氧化





的基础之上的，因此环境中氧化分压， P_{O_2} 对传感器的灵敏度影响很大，氧吸附接近饱和时，吸附覆盖度：

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{H_2} = \frac{K_{H_2} P_{H_2}}{K_{O_2} P_{O_2}} \dots K : \text{吸附平衡系数} \\ Q_{O_2} = 1 \end{array} \right.$$

2) 温度

因为温度可以促进氧化或还原反应的进行，因此温度对传感器的灵敏度影响很大，每种传感器都有一个最佳工作温度点。

SnO_2 : $\sim 300^\circ C$; ZnO: $450^\circ C \sim 500^\circ C$;

实际应用中，尽量选择工作温度低，灵敏度高的气敏传感器。

3) 湿度

为减少或消除湿度对传感器特性的影响，应尽可能选择较高的工作温度。根据水蒸气分压对传感器电导的影响特性，也可以将金属氧化物半导体用作湿敏材料。





4) 改善选择性

- a) 掺杂其他金属氧化物或其他添加物。
- b) 控制元件的烧结温度。
- c) 改变元件工作时的加热温度。

三种方法需要在实验的基础上进行不同的组合应用，才能取得好的效果。

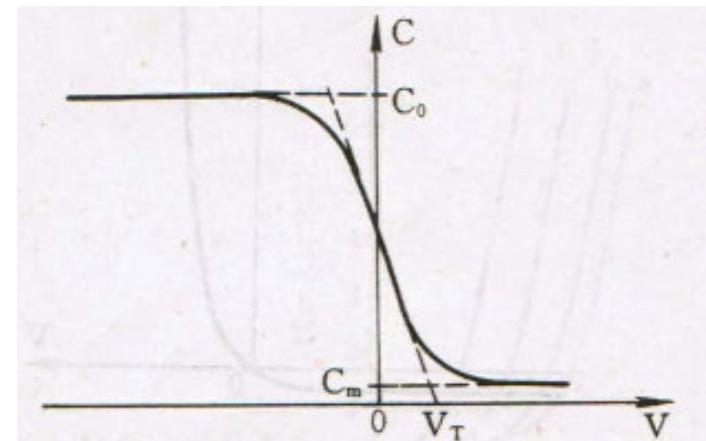
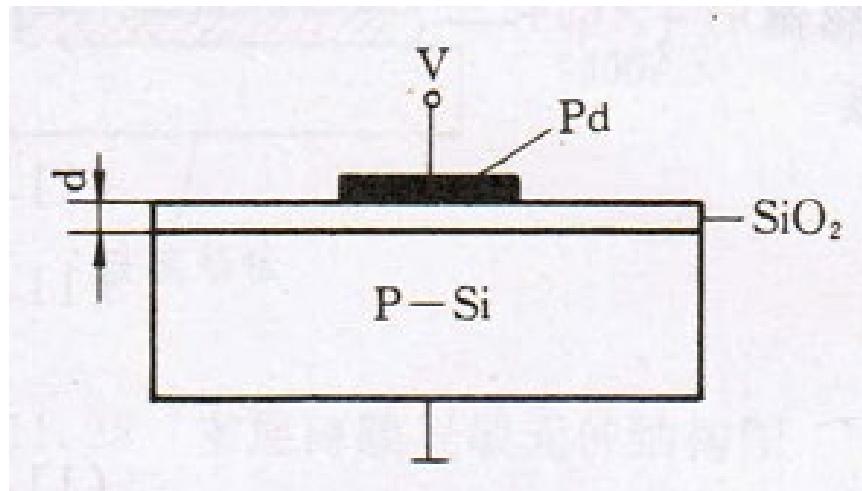
3、非电阻型气敏传感器

主要是利用金属和半导体接触的肖特基二极管的伏—安特性，金属—氧化物—半导体场效应管（MOSFET）的阈值（ V_T ）电压变化特性进行测量。

1) 金属栅MOS元件基本原理：

MOS电容器： $C_0 = \frac{\epsilon_{0x}}{d}$ ϵ_{0x} : SiO_2 介电常数



MOS 电容 $C-V$ 特性曲线

$$C_m = \frac{\epsilon_{0x}}{[d + (\epsilon_{0x}/\epsilon_s)D]} , \quad \epsilon_s : \text{硅介电常数}, D: \text{最大耗尽层厚度}$$

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{1 + 2\epsilon_{0x}^2 V / eN_A \epsilon_s d^2}} , \quad N_A : \text{P型硅的掺杂受主浓度};$$

V_T : MOS电容器的阈值电压，与金属栅的功函数及半导体的材料的性质和制造工艺有关。

$$V_T = \Phi_M - x - \frac{E_g}{2e} + \Phi_F + \sqrt{(4e\epsilon_s N_A \Phi_F - Q_f)/C_0}$$





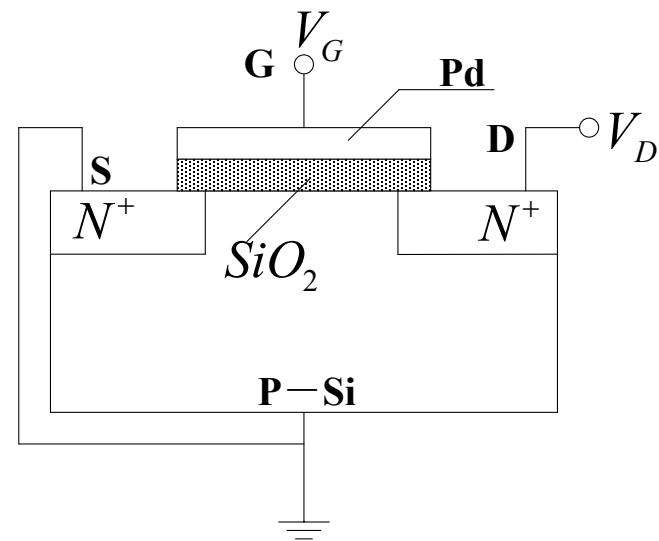
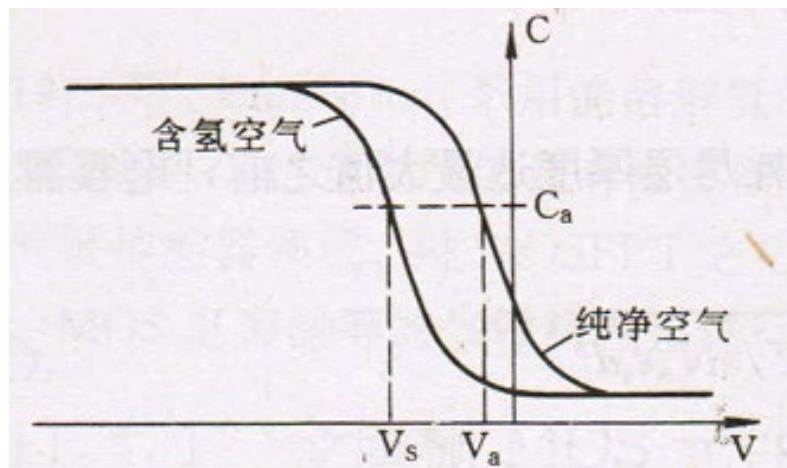
Φ_M : 金属的功函数; x : 半导体的电子亲和势;

E_g : 半导体的禁带宽度;

Φ_F : 半导体的费米能级与其本征费米能级之差;

Q_f : 氧化物的固定电荷量。

如下图所示:



2) MOSFET工作原理

在MOSFET的结构图中, $V_D \geq |V_{GS} - V_T|$ 时, MOS管工作于饱和状态, 漏源电流:





$$I_{DS} = \beta(V_{GS} - V_T)^2 ;$$

β : 常数, V_D : 漏极电压, V_{GS} : 栅源电压差。保持 I_{DS} 不变, 将栅极与漏极短接, 则:

$$\Delta V_{GS} = \Delta V_T .$$

在Pd-MOSFET氢敏器件中:

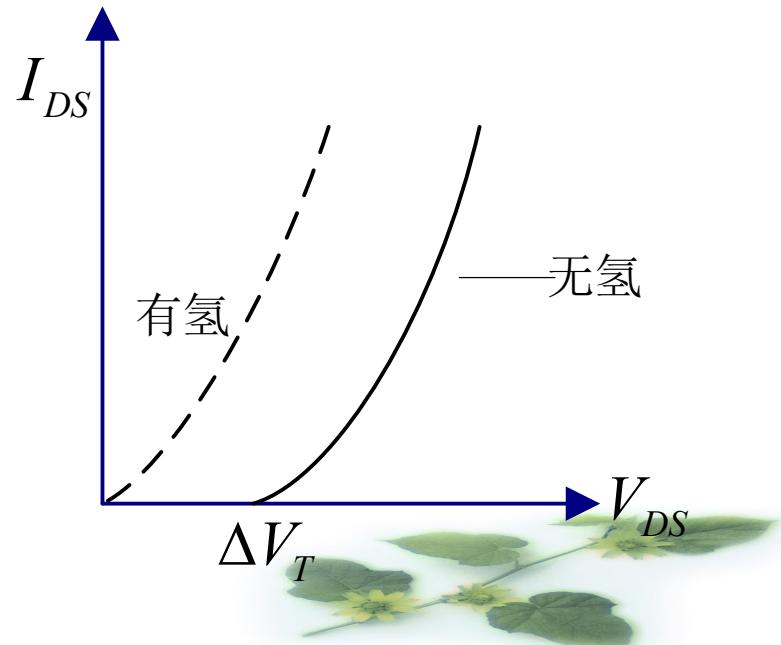
$$\Delta V_T = \Delta V_{TM} \frac{K\sqrt{P_{H_2}}}{1+K\sqrt{P_{H_2}}}$$

ΔV_{TM} : Pd- SiO_2 界面吸附氢原子饱和时, ΔV_T 变化的最大值,

见下图:

$$K = \sqrt{\frac{c_1}{d_1}},$$

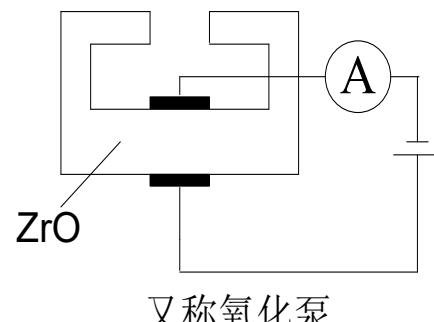
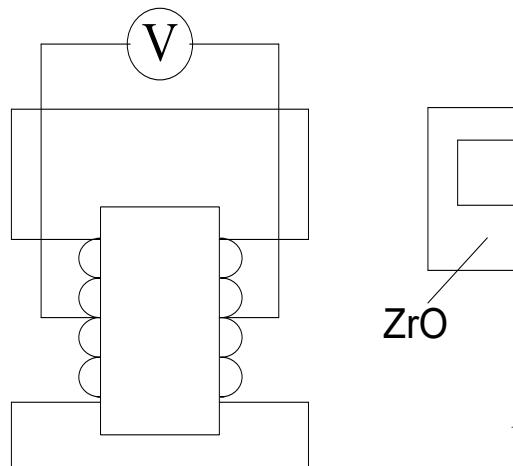
c_1, d_1 为正、逆反应的速度函数。



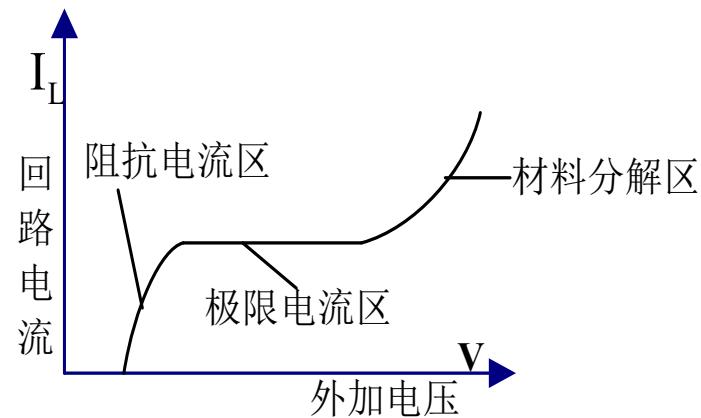


3) 氧化锆氧传感器。

工作原理的不同分：电位式、极限电流式。



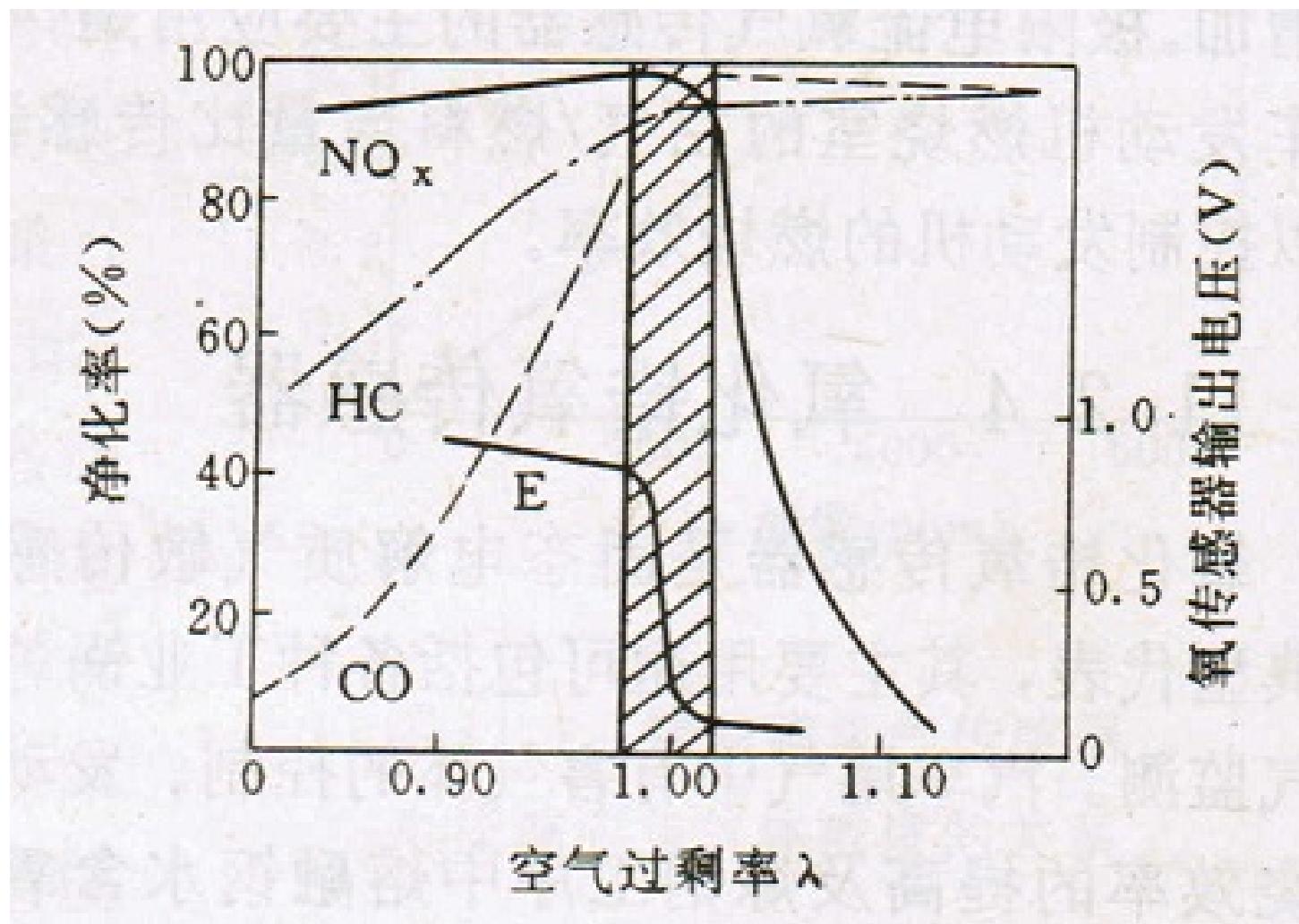
ZrO
又称氧化泵



4) 三元催化剂处理尾气： NO_x 、 CH 、 CO

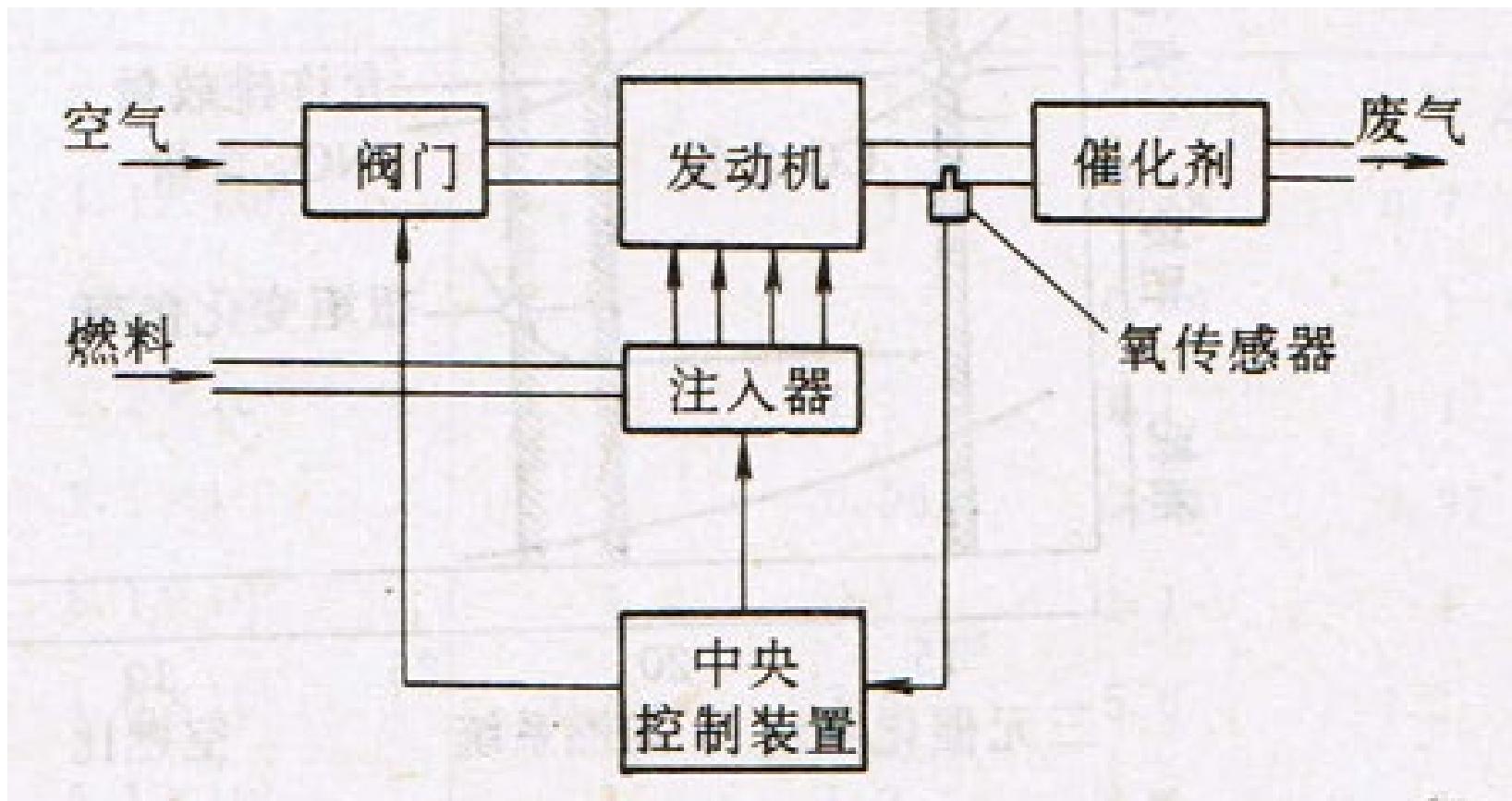
见下图：





催化剂废气净化率与传感器输出特征的关系





控制燃烧室空燃比的电路原理图





为提高燃烧效率，一般希望发动机工作在贫燃状态，这样对氧含量的检测提出了比较高的要求，这时采用极限电流式。

4、气敏传感器的集成化与智能化

集成化和智能化的含义：

- a) 多个传感器集成在同一芯片上，构成阵列式，提高选择性。
- b) 信号处理电路与传感器集成在一起。

1) 集成化对气敏元件的要求

须采用与集成电路兼容工艺制备，即特殊工艺不能对其它集成元件构成不良影响。

2) 集成化设计





a) 相邻相似单元

可以消除因环境因素所产生的系统误差，提高测量精度。

b) 带有自恒温系统与信号处理电路的传感器

使气敏传感器工作在对被测气体灵敏度最高的合适温度。

c) 气敏单元阵列

作用：提高传感器的选择性和浓度测量精度，类似于数字信号处理中的相关分析。





§ 2.3 提高传感器性能的技术途径

传感器性能主要指：稳定性、可靠性、精度、动态响应范围等。

§ 2.3.1 合理选择结构、参数和工艺

1、如压阻式压力传感器，硅敏感膜片有C型到E型、EI型。

按照前面的介绍，E型与C型比，可以提高它的线性度，EI型还可以提高灵敏度。

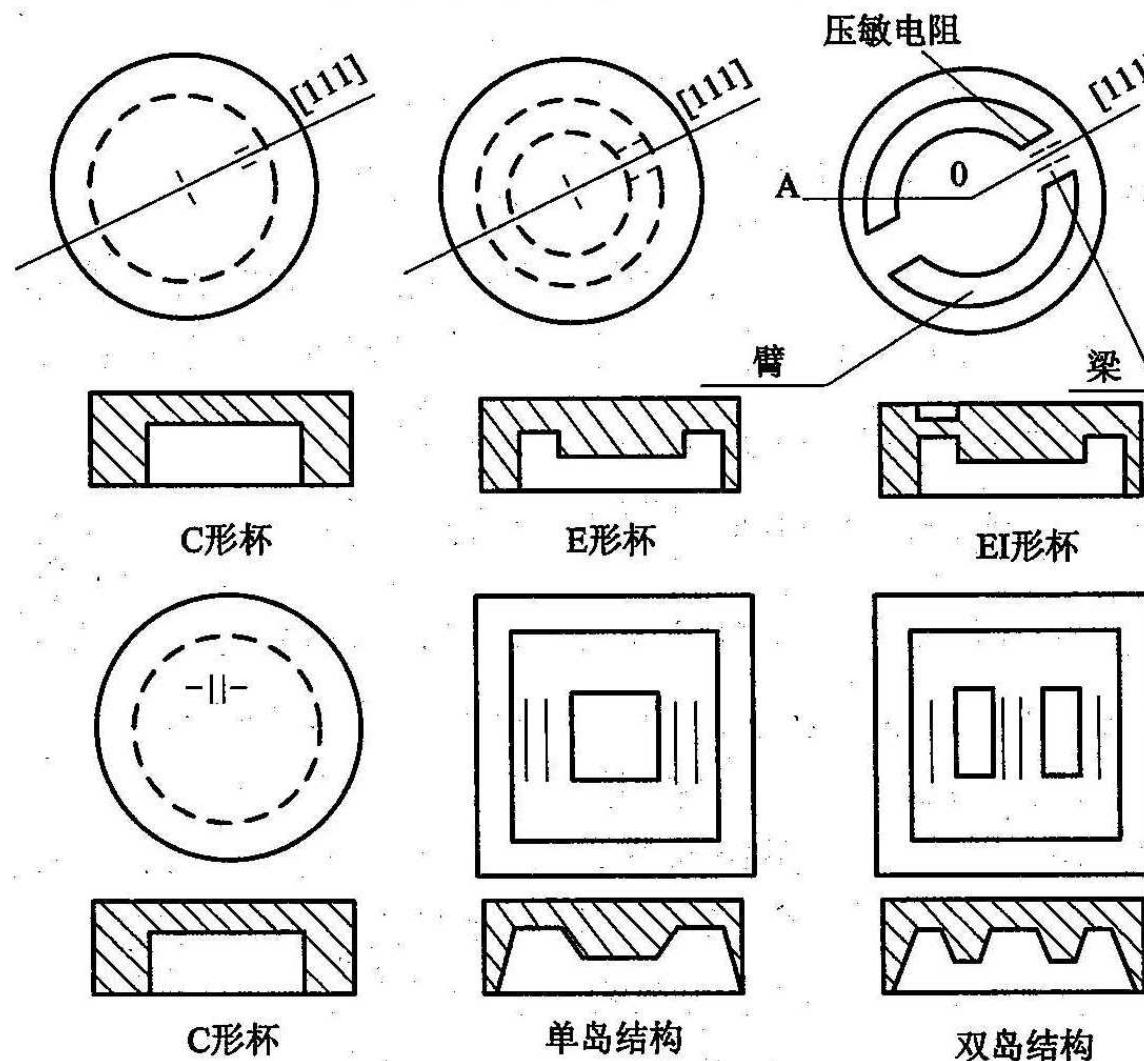
2、压阻式加速度传感器

从双梁变到4梁，升到双岛五梁，其演变的结果，可以得到高的灵敏度和小的横向效应。

§ 2.3.2 基于差动对称结构的差动技术

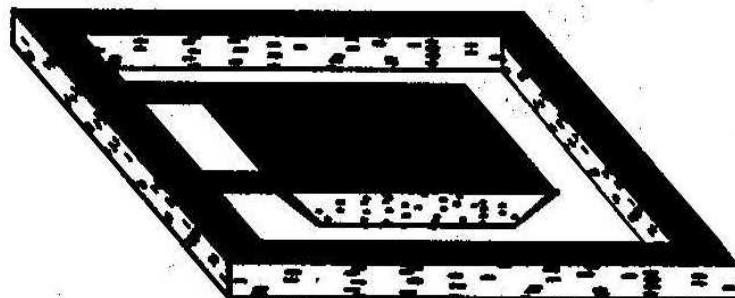
差动技术的优越性：可以消除零位值，减小非线性，提高灵敏度，抵消共模误差干扰。



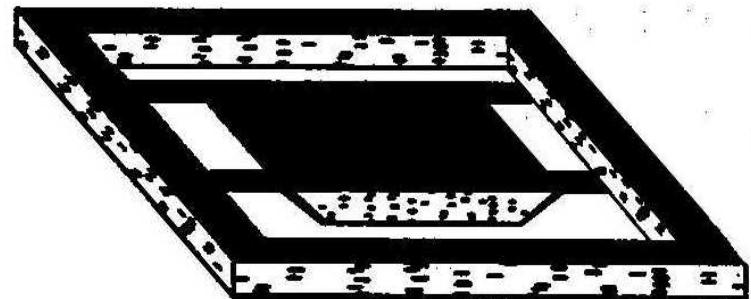


压阻式压力传感器硅敏感膜片的各种结构形式

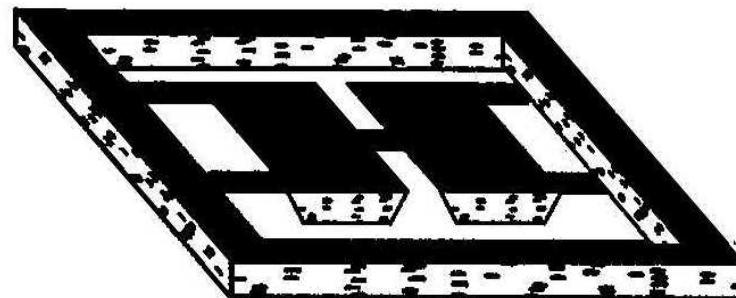




(a)



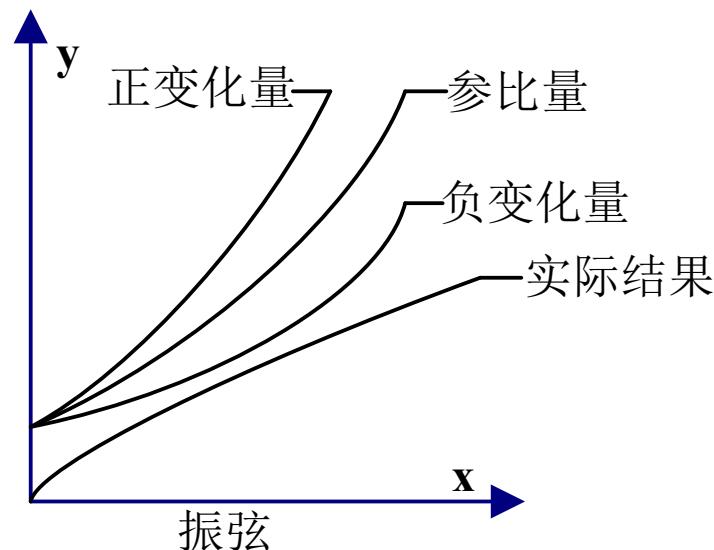
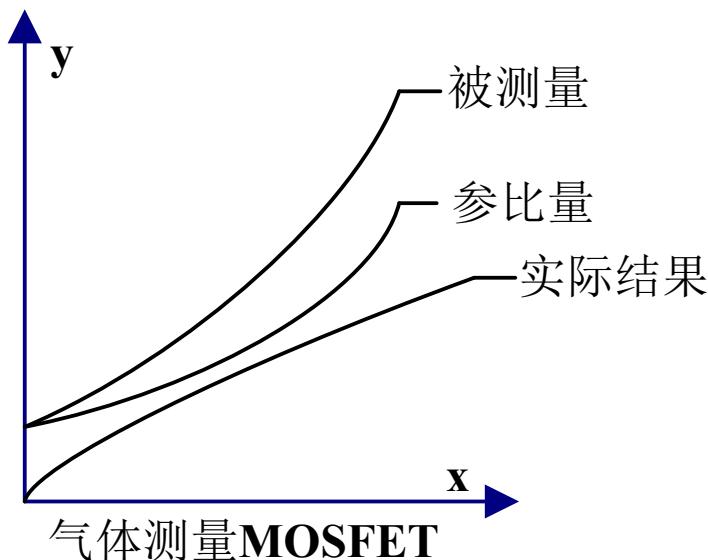
(b)



(c)

压阻式加速度传感器的各种结构形式





1、差值输出形式

如前面介绍过的振弦谐振式压力传感器的差动结构。

$$\Delta f_s = f_n \left[\frac{\Delta F}{F_0} + \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^3 + \dots \right]$$

与理论线性度相比，非线性误差减小 $\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)$ ，灵敏度提高一倍。

2、差与和之比值为输出形式

变间隙式电容变换器存在有严重的非线性：





$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta \quad \delta_2 = \delta_0 - \Delta\delta$$

$$C_1 = C_0 - \Delta C = \frac{C_0}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

$$C_2 = C_0 + \Delta C = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

1) 差值输出

$$\Delta C = C_2 - C_1 = C_0 [2 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + 2(\frac{\Delta\delta}{\delta_0})^3 + 2(\frac{\Delta\delta}{\delta_0})^5 + \dots]$$

理论线性度: $\delta_L = (\frac{\Delta\delta}{\delta_0})^2$, ($\delta'_L = \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$) ;

灵敏度: $K_C = 2 \frac{C_0}{\delta_0}$, ($K'_C = \frac{C_0}{\delta_0}$) ;

另外消除了零点值的项。





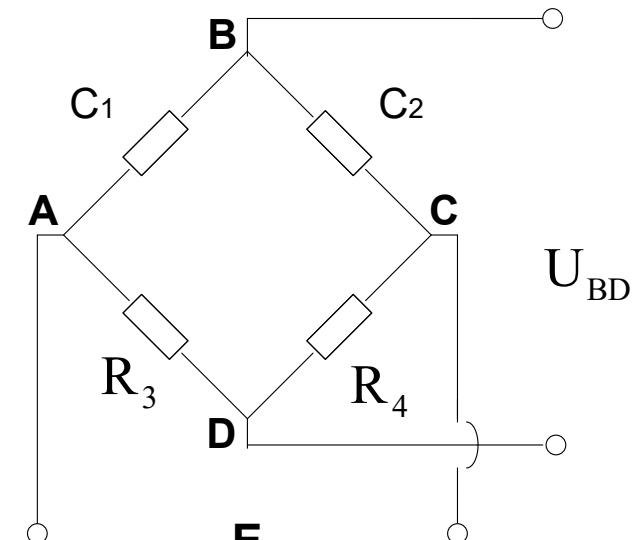
2) 差与和之比值:

$$\frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0}, \text{ 非线性误差为零。}$$

3) 电路实现形式 (如右图)

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$$

$$Z_3 = R_3 = R = Z_4 = R_4$$



$$U_{BD} = E \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} = \frac{E}{2} \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{E}{2} \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$$

U_{BD} 与 $\Delta\delta$ 之间是理想的线性关系。

3、 $(\Phi - \frac{1}{\Phi})$ 输出形式

仍以差动电容为例, 定义: $\Phi = \frac{C_1}{C_2}$, 则: $\frac{1}{\Phi} = \frac{C_2}{C_1}$, 通过公式变换, 略去高阶项:

$$\Phi - \frac{1}{\Phi} = -4 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} [1 + (\frac{\Delta\delta}{\delta_0})^2]$$



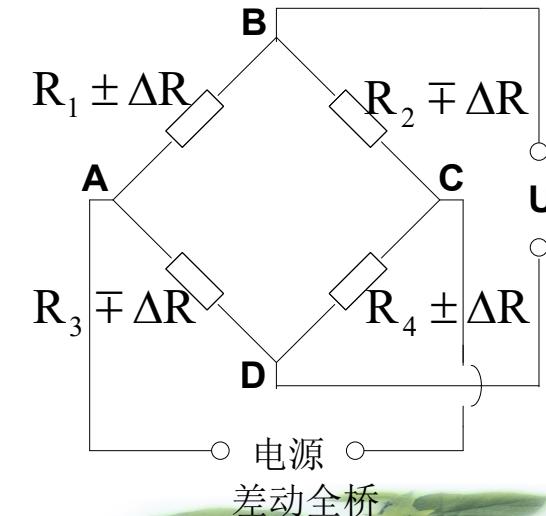
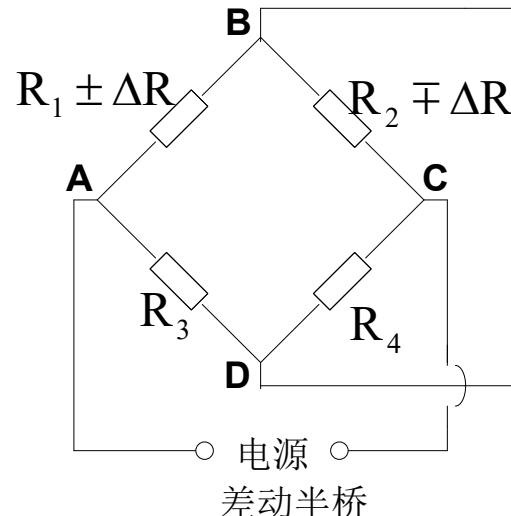
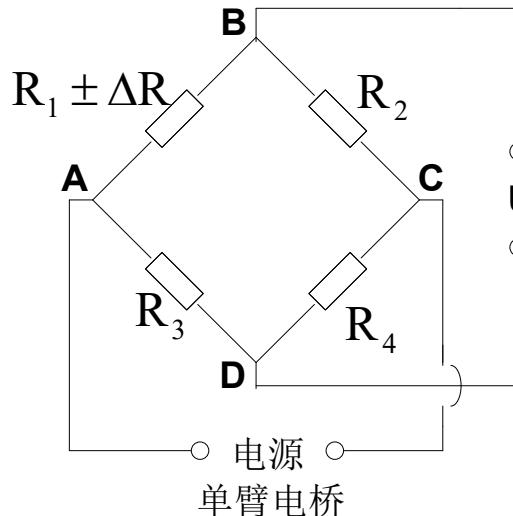
线性度: $\delta''_L = \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2$, 与差值输出一样;

灵敏度: $|K''_C| = 4$, 与差值输出比提高2倍, 比单个输出提高4倍。

4、电桥电路

电桥电路是集成式传感器一种重要的输出电路形式, 对于压阻式电阻变换器, 它是基本的配接电路。

1) 电桥的连接方式:





2) 恒流源与恒压源作为供电电源的差别

a) 电压源: $U = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E$, 灵敏度: $S_\alpha = \frac{U}{\Delta R / R}$;

单臂桥: $U = \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R_0} \frac{1}{1 + \Delta R / 2R_0} \approx e$, $S_E = \frac{E}{4} \frac{1}{1 + \Delta R / 2R_0}$;

线性度: $\delta_E = \frac{\Delta R}{2R_0}$ 。

半桥: $U = 2e = \frac{E}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$, $S_E = \frac{E}{2}$;

全桥: $U = 4e = E \frac{\Delta R}{R_0}$, $S_E = E$ 。

b) 电流源:

$$U = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I$$

单臂桥: $U = \frac{I}{4} \Delta R \frac{1}{1 + \Delta R / 4R_0} \approx e$, $S_I = \frac{I}{4} R_0 \frac{1}{1 + \Delta R / 4R_0}$

线性度: $\delta_I = \frac{\Delta R}{4R_0}$ 。





$$\text{差动半桥: } U = \frac{I}{2} \Delta R = 2e' , \quad S_I = \frac{I}{2} R_0$$

$$\text{全桥: } U = I \Delta R = 4e' , \quad S_I = IR_0$$

恒流源供电时，单臂电桥的非线性误差是电压源供电时的 $1/2$ 。

3) 电桥对共模干扰量的补偿特性

书中有比较详细的公式推导及结果，这里不作说明，但要了解单臂、差动半桥、差动全桥以及电压源与电流源供电时的差别。

- a) 电桥对同符号的共模干扰量 ΔR_T ，具有补偿作用。
- b) 恒流源供电的差动全桥，理论上无温度误差。
- c) 实际电路在制作过程中不可能保证特性完全一致，因而仍存在零位输出、零位漂移以及灵敏度温度误差，需要采用进一步的补偿措施。





§ 2.3.3 补偿措施

这里主要介绍针对压阻式传感器的一些补偿措施。

1、改善非线性的内补偿法

1) 指导思想: 想办法使两桥臂的非线性误差数值相等, 符号相反。

2) 具体实现形式: 双岛结构的方形硅膜片是一种结构补偿的形式
(见右图)。

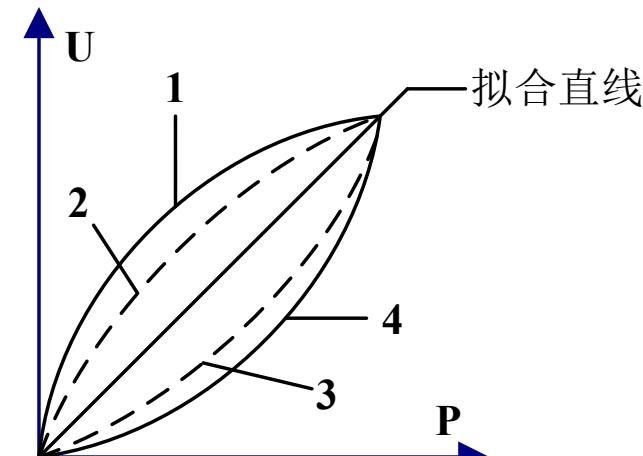
3) 补偿要求:

$$\delta = 0 \rightarrow n = \frac{W_A}{W_B} = 2.48$$

2、拼凑补偿法

1) 温度补偿

以保证输出量与目标量之间的单值函数关系为前提, 寻求目标参量之外的变化量之间的相互补偿。如电压源和电流源可被制作成一个与未补偿电桥输出具有相反温度特性的供电电源。



1: $P-U_1$ 特性 2: $P-U_2$ 特性
3: $P-U_3$ 特性 4: $P-U_4$ 特性





§ 2.3.4 多信号测量法

1、二信号法

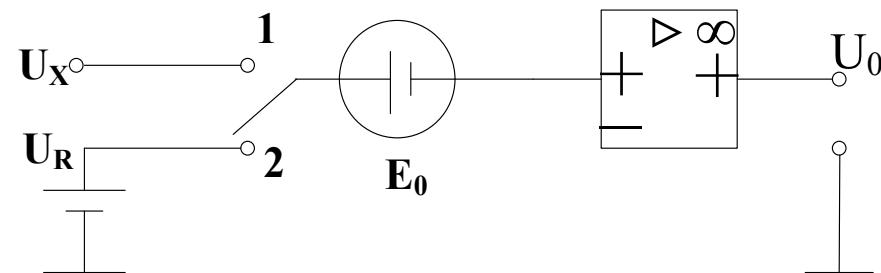
前提：有相同的系统误差，该系统误差可被大大减小（见下图）。

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{E_0}{U_x} \left(\frac{U_{01}}{U_{02}} - 1 \right)$$

如果直接测量：

$$\frac{\Delta U_{01}}{U_{01}} = \frac{E_0}{U_x},$$

希望 $U_R \rightarrow U_x \Rightarrow U_{01} \rightarrow U_{02}$ ，使得相对误差越小。

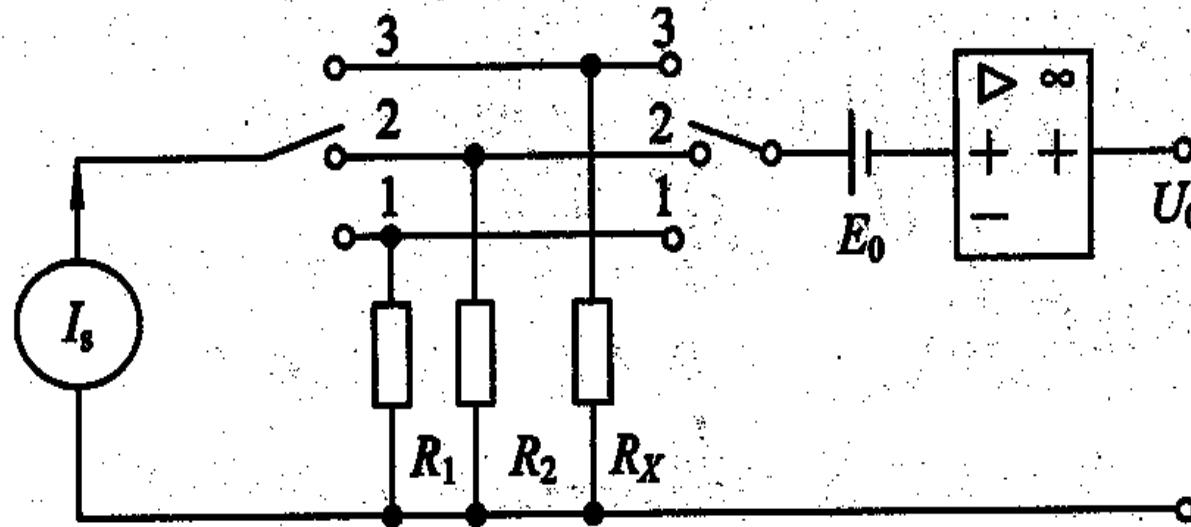




2、三信号法

$$N = \frac{U_{03} - U_{01}}{U_{02} - U_{01}} = \frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}, \quad R_x = N(R_2 - R_1) + R_1$$

前提：在测量过程中， E_0 、 I_s 、 A 均保持不变， R_1 、 R_2 均为精密电阻。



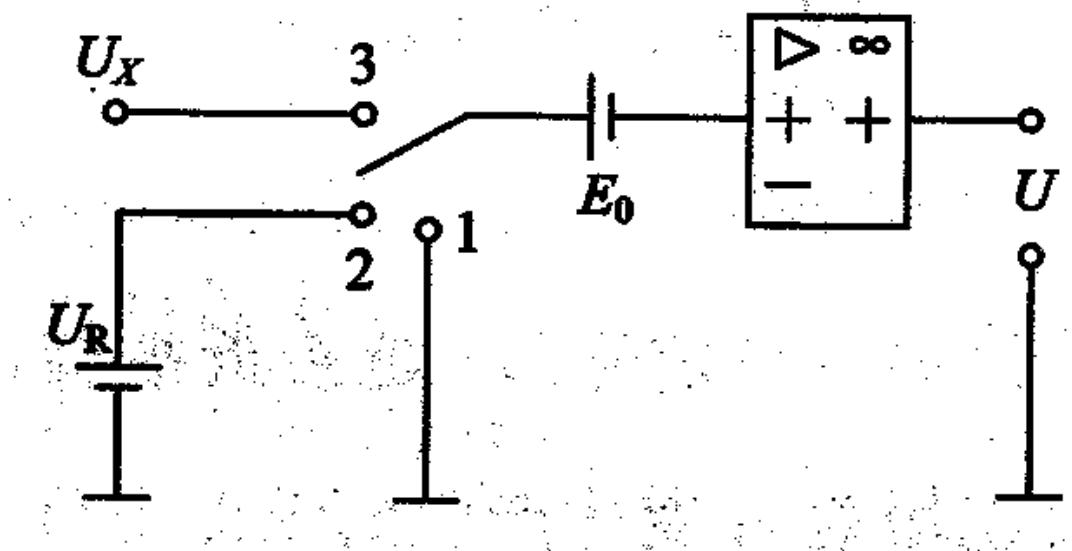
优点：可以用低精度的放大器、恒流源获得高精度的测量结果。





3、三步测量法

- 1) 测零点；
- 2) 用参考量 U_R 作标准对全系统总增益作实时标定；
- 3) 测量：其中 U_R 要有足够的精度才能保证测量精度。





§ 2.4 误差与测量误差分析

在这一节里，主要是系统性的介绍误差的概念、误差分析的方法及如何进行测量误差的分析，以便在进行传感器及仪器设备系统研制时，合理的分解分配各部分误差；对研制好的传感器及仪器设备，通过综合各部分的误差，对其性能给予正确的评价。

§ 2.4.1 误差的概念

1、误差的定义及相关术语

1) 真值、约定真值

真值：表征在研究某量时所处的条件下完善地确定的量值；

约定真值：为了给定的目的，可以替代真值的量值。

2) 精度（精确度）、精密度、准确度

精度：表示测量结果与被测“真值”靠近的程度；





精密度：精度的组成部分之一，反映被测量测量值中的随机误差大小。一般用标准偏差 σ 或者用或然误差 (0.6745σ) 来表示。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n}}$$

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

其中，测量值的50%落在 $\pm 0.6745\sigma$ 之间，测量值的68.3%落在 $\pm \sigma$ 之间。

准确度：精度的组成部分之一，反映被测量测量值中的系统误差大小。一般给出其修正公式而不作为性能指标。





3) 变差（迟滞误差）

4) 再现性与重复性、漂移

再现性是指经过一段时间以后，在同一工作条件下，输入/输出特性曲线间的一致程度。

再现性包含零点误差、量程误差、变差、不灵敏区、重复性、漂移。

5) 线性度

6) 测量误差与绝对误差、相对误差

测量误差=测量值-真值；

它反映的是测量值偏离真实值的大小和方向，因此又常称它为绝对误差。

绝对误差一般只适用于标准量具或标准仪表的校准，注意绝对误差具有符号。

绝对误差和相对误差均可以用来判断测试的精确程度，但绝对误差只





能用于判断同一被测量的测试精度，相对误差可用于比较不同类量或同类量而不同值的测试精度，以及具有不同类量变换的测试装置精度和多档测试装置精度。

7) 引用误差

是直读式指针仪表中通用的一种误差表示方法。

8) 偏差

偏差=测量值-算术平均值

误差与偏差概念上的差别：误差是测量值和真值之差。

9) 算术平均误差

在一组n次测量中，各次测量偏差的绝对值的平均值称为算术平均误差，

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n}, d_i = x_i - \bar{x}$$





算术平均误差是一种常用的表示误差的方法，但它不能反映出测量值的分布情况。

10) 标准误差（标准偏差）

标准误差（严格意义上来说应为标准偏差）也称为均方根误差。它的定义是：一组n次测量中（n是一个很大的数），各次测量偏差平方算术平均值的根称为单个测量值的标准偏差（或测量的标准偏差），

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

标准偏差的平方称为方差。

测量次数较少时，尤其当n<5时，常用如下计算公式：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$$





在 $n \geq 10$ 时， σ 与 S 差别很小。

11) 或然误差

或然误差常用符号 γ 表示。它表示在一组测量中，测量值的误差落在 $+\gamma$ 和 $-\gamma$ 之间的概率是 $1/2$ 。

当测量次数足够多时，或然误差 γ 、标准偏差 σ 、算术平均偏差 δ 之间存在一定的关系，见下表：

误差	σ	γ	δ
σ	1.0000	1.4826	1.2533
γ	0.6745	1.0000	0.8454
δ	0.7989	1.1829	1.0000





12) 基本误差

指传感器、仪表在规定的标准条件下所具有的误差，仪表的精度等级由其基本误差决定。

标准条件一般指：电源电压（ 220 ± 5 ）V；电网频率（ 50 ± 2 ）Hz；环境温度（ 20 ± 5 ）℃；大气压力（ 1013 ± 10 ）mbar；湿度 $65\% \pm 5\%$ 。

13) 附加误差

当传感器、仪表的使用条件偏离额定条件时，就会出现附加误差。

14) 零点误差、量程误差

零点误差：传感器、仪表输入为零时的输出值，一般用满量程的百分数来表示；

量程误差：传感器、仪表输出的理想量程与实测量程之差，一般用满量程的百分数来表示。

15) 仪器误差、环境误差

16) 粗大误差、人员误差、疏失误差





粗大误差：明显地歪曲了测量结果的异常误差。在进行误差分析处理时，含有粗差的测量值称为坏值，应该剔除。

17) 方法误差、定义误差、理论误差

方法误差：由于测量方法不完善及所依据的理论不严密所产生的，如：在测量结果的表达式中没有得到反映，而在实际测量中又起作用的一些因素所引起的误差。

定义误差：指对被测量的定义不够明确而形成的误差。

理论误差：指测量理论不够完善，而只能进行近似测量所引起的误差。

18) 测量的不确定度

是用来表示误差范围的一个重要概念。所谓不确定度，是指测量值附近的一个范围，这个范围可能（相当于标准差的置信概率）包括被测量量的真值。





在计量工作和精密测试中，已普遍使用不确定度来评定实验结果的误差。

19) 系统误差、随机误差/偶然误差

系统误差：对同一物理量进行多次重复测量时，如果误差按照一定的规律性出现，则称该误差为系统误差，又称为确定性误差。

随机误差：在相同条件下多次重复测量同一量时，误差的大小与符号均发生变化，且没有确定的变化规律，但多次测量其平均值趋于零的误差。

在测量中，系统误差、偶然误差、疏失误差三者同时存在，但它们对测量的影响不同。

系统误差、偶然误差均很小，测量的精确度高；

在工程测量中，有的测量结果是不可取的；

在测量中，系统误差与偶然误差的数量级必须一致，只有两者数值相当，其测量结果才是可取的。





2 误差的分类

按其数字表达式可分为：绝对误差和相对误差；

按其性质特点可分为：系统误差、偶然误差、疏失误差。

§ 2.4.2 误差分析理论

1 系统误差

1) 系统误差的特征、来源及分类

系统误差的特征

在确定的实验条件下，具有确定性。

系统误差的来源

测量仪器误差；个人因素引起的误差；测量方法或测量理论误差；环境误差；使用误差；定义误差。

系统误差的分类

已定系统误差/未定系统误差；恒定系统误差/变化系统误差。





2) 如何发现实验或测量中存在系统误差

分析实验所依据的理论公式所要求的约束条件在测量中是否已满足；

分析实验仪器所要求的使用条件在测量过程中是否满足。

◆ 对比的方法

包括实验方法、测量仪器、测量方法、测量条件的对比。

◆ 数据分析法

主要用于发现测量中是否存在变化的系统误差。

方法1：将测量值数列的偏差按测量的先后次序排列，观察其数值和符号的变化。要求：系统误差远较偶然误差为大。

方法2：将测量值序列分为前后两半，比较两部分偏差之和的差值 Δ ，如果显著不为0，则表明存在系统误差。





- ◆ 剩余误差观察法

与数据分析法类似，画出p-n分布图，观察其变化规律。

- ◆ 计算数据比较法

根据判据关系式确定测量中是否存在系统误差的标志。

$$C = \frac{|\bar{x}_i - \bar{x}_j|}{\sqrt{S_i^2 + S_j^2}} \angle 3$$

- ◆ 多组测量的方差分析

- ◆ 不同公式计算标准误差比较法





3) 如何消除实验或测量中的系统误差

从误差来源上消除系统误差；

用修正方法消除系统误差；

应用测量技术消除系统误差。

恒值系统误差：对换测量法；替代法；异号法。

变值系统误差：对称观测法；半周期偶然数观测法；使系统误差随机化；引入更正值法；直接比较法；替换法；差值法；正负误差相消法。

4) 如何确定实验或测量中的系统误差已被消除

某一项或几项残余系统误差的代数和的绝对值 $|e_m|$ 不超过测量结果的误差绝对值 $|e|$ 的最后一位有效数字的 $1/2$ 单位，可将 $|e_m|$ 舍去，且不会对测量结果的精度产生可察觉的影响。





5) 系统误差的综合与分配

系统误差的综合

绝对误差的综合：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) ;$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n ;$$

若 dx_i 的符号不清楚，可采用公式：

$$dy = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} dx_i \right| .$$

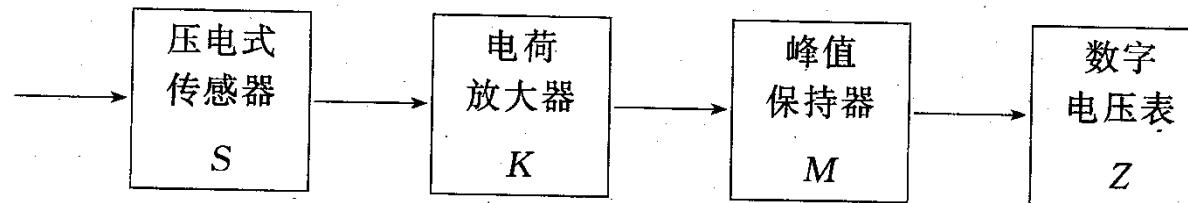
相对误差的综合：

$$\frac{dy}{y} = \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{dx_1}{y} + \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{dx_2}{y} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \frac{dx_n}{y}$$



系统误差的分配

在仪表或传感器系统设计中，一般都是按照各部件或元件的最大允许误差进行误差分配的。



测振仪系统结构框图

整台测振仪的特性：

$$N = S \bullet K \bullet M \bullet Z$$

系统综合误差：

$$\delta_N = \delta_S + \delta_K + \delta_M + \delta_Z$$





系统误差的分配方法和原则：

无论什么样的系统，均可以用全微分的方法来综合和分配其误差；

根据误差综合公式合理分配误差，以避免不必要的过高要求；

必须照顾到各部分可能达到的误差水平，进行可行的误差分配；

充分利用局部系统误差若存在正、负则可以相互抵消的特点，以减小

系统误差，从而采用质量较低的元件或部件构建整个系统，以降低成本。





2 随机误差/偶然误差

1) 随机误差的产生及其与系统误差的关系

随机误差是许多微小的、独立的、不可分割的系统误差的统计综合。一次测量的单个随机误差没有任何预知的确定规律，但在多次重复测量的总体上，随机误差服从统计规律。统计规律中，高斯正态分布是最基本和最重要的。服从正态分布的随机误差具有抵偿性，当测量次数趋于无穷时，其随机误差的总体平均值趋近于零。习惯上将这种具有抵偿性的随机误差又称做偶然误差。

在一定条件下，系统误差和偶然误差可以相互转化，两者之间并不存在绝对的界限。





2) 随机误差的分布

随机误差的3个特点：

小误差比大误差出现的机会多；

绝对值相等的正、负误差出现的机会相等；

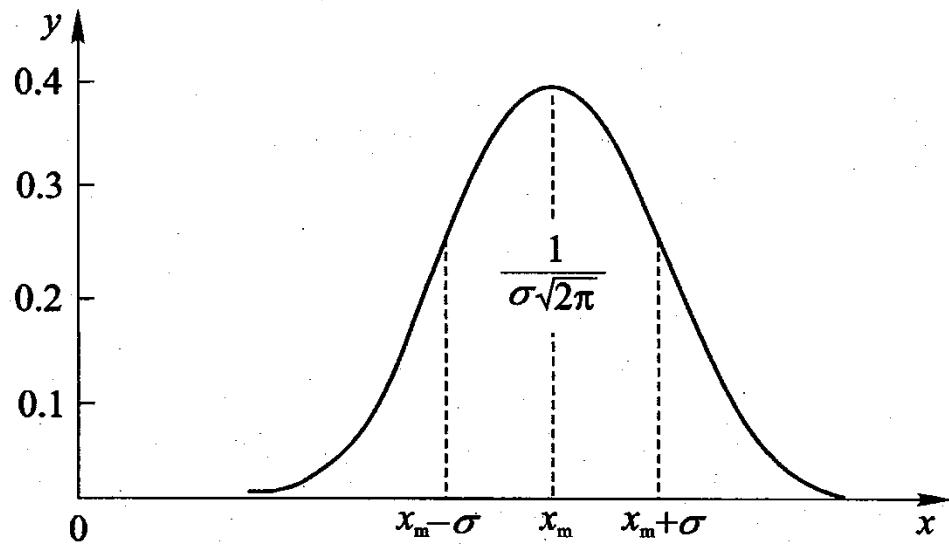
在一定的实验条件下，误差的绝对值有一定的限度。

$$p(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2(x-x_m)^2}$$

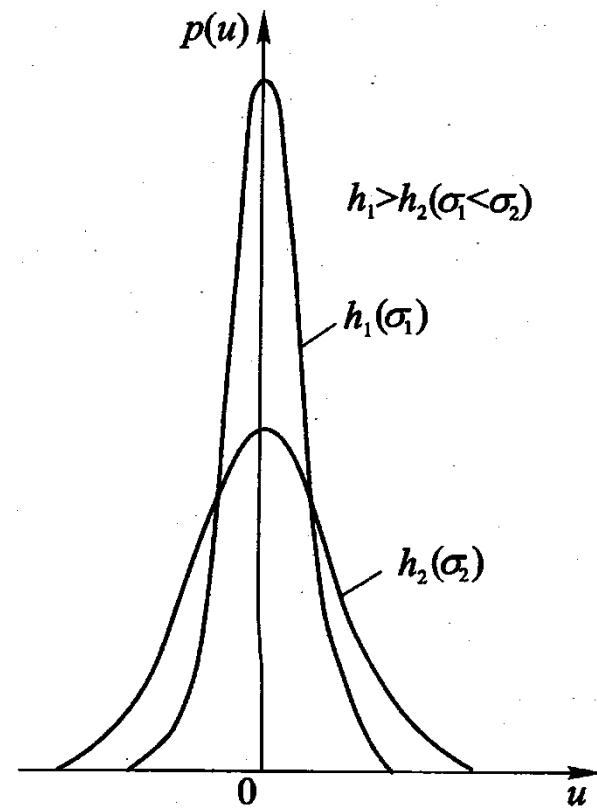
x : 测量值; $P(x)$: 测量值的概率密度; x_m : 被测物理量的真值;

$h = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma}$: 精密度指数; σ : 测量值的标准偏差; $u=x-x_m$: 误差。





测量值的概率密度分布曲线



精密度指数h的物理意义





一般的工程实验误差分布均近似的遵循正态分布；我们在给出其误差值大小的同时，亦应给出对应的概率大小；对于绝对值大于 3σ 的误差一般不应作为随机误差来考虑，这是区分系统误差、粗大误差和随机误差的基础。





§ 2.4.3 测量结果的数据处理

1 直接测量结果的数据处理

1) 单次测量结果的数据处理

单次测量无法进行误差计算而只能作误差估计。这种估计主要依据所使用的仪器精密度、测量环境条件、实验者的辨别能力等。

单次测量结果必须写成如下形式：

$$N \pm \Delta N$$

2) 等精度多次测量结果的数据处理

等精度多次测量结果的数据处理步骤：

判断系统误差，并消除或减小其影响；

求算术平均值；

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_k}{K}$$





求剩余误差

$$d_i = x_i - \bar{x}$$

求算术平均值的标准差

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{K}} \quad , \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k d_i^2}{K-1}}$$

求算术平均值的极限误差

$$\delta \lim \bar{x} = \pm 3S_{\bar{x}}$$

写出测量结果

$$x = \bar{x} \pm \delta \lim \bar{x} = \bar{x} \pm 3S_{\bar{x}}$$

建立在正态分布上的标准差计算结果，在测量次数较少时，对实际精度评价过高。因此，对于K<10的测量结果精度估计，常用置信概率和置信限来表示测量结果的误差限。





3) 非等精度多次测量结果的数据处理

非等精度多次测量结果的数据处理步骤：

判断系统误差，并消除或减小其影响；

将测量数据分成多组，每组按等精度数处理。根据每组的测量条件（如精度高低或测量次数），确定各组测量值的权值，求加权求算术平均值；

$$\bar{x} = \frac{P_1 \bar{x}_1 + P_2 \bar{x}_2 + \cdots + P_k \bar{x}_k}{P_1 + P_2 + \cdots + P_k} = \frac{[Px]}{[P]}$$

求剩余误差及其加权平方和；

$d_i = \bar{x}_i - \bar{x}$ ，按 $[Pd]=0$ 来检验计算是否正确，然后求加权平方和 $[Pd^2]$





求加权算术平均值的标准差；

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{[Pd^2]}{(m-1)[P]}} , \quad S_{\bar{x}} = S_{\bar{x}_i} \sqrt{\frac{P_i}{[P]}}$$

写出测量结果：

$$x = \bar{x} \pm \delta \lim \bar{x} = \bar{x} \pm 3S_{\bar{x}}$$

2 间接测量结果的数据处理

间接测量结果的数据处理就是把直接测量各参量的算术平均值代入函数关系式，求得间接测量的结果。

基本上和系统误差的综合与分配相对应。





1) 间接测量的误差计算

设A、B为直接测量的量，N是待测量， $N=f(A, B)$ ，在简单函数关系下，有：

如果 $N=A+B$ ，则： $\Delta N = \Delta A + \Delta B$ ；

如果 $N=A-B$ ，则： $\Delta N = \Delta A + \Delta B$ ；

如果 $N=A \times B$ ，则： $\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$ ；

如果 $N=A/B$ ，则： $\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$ 。





2) 误差合成的一般方法

误差合成的一般方法实际上就是函数的微分法，因此，各种微分法都可以用于解决误差合成的问题。

如： $y=F(u)$ ，而 $u=\Phi(v)$, $v=\varphi(\omega)$ ， $\omega=f(x)$ ，则y的误差传递系数为：

$$C = C_u \bullet C_v \bullet C_\omega \bullet C_x$$

3) 随机误差的合成

随机误差按理论上达到0.99以上的概率来估算合成后的实际分布范围，其合成规律如下：

$$\Delta_{\lim} = \pm 3\sigma \approx \pm 3\sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \sigma_i^2} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 (3\sigma_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \Delta_{i\lim}^2}$$





3 静态测量结果的数据处理

1) 测量数据的统计处理

前提条件：

测量条件保持不变，且系统误差已减小到可以忽略。

测量数据的整理规程：

将一系列等精度测量读数按先后顺序列成如下表格形式：

计算测量读数的算术平均值；

在每个测量读数旁列出剩余误差 p_i ；

检查 $\sum_{i=1}^n p_i = 0$ 的条件是否满足，若不满足，说明计算有误，需重新计算；





在每个剩余误差旁列出 p_i^2 ，然后求出均方根误差 σ ；

检查是否有 $p_i > 3\sigma$ 的读数。若有，舍去此数据，然后从第2项重新计算；

为谨慎起见，可用Peters公式再计算均方根误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sum_{i=1}^n |p_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \approx \frac{5}{4} \frac{\sum_{i=1}^n |p_i|}{n-1/2},$$

将此结果与第5步的结果比较，若相差太大，判定是否存在系统误差。

若有系统误差，应设法消除，并重新进行多次重复测量。

计算测量读数算术平均值的均方根误差 $\bar{\sigma}$ ；

写出最后的测量结果： $x = \bar{x} \pm \bar{\sigma}$ 或 $x = \bar{x} \pm 3\bar{\sigma}$ 。





2) 有效数字及其运算规则

有效数字的一般概念

通常把测量结果中可靠的几位数字加上可疑的一位（或二位）数字，统称为测量结果的有效数字。

有效数字的应用规则：

误差一般只有有效数字，最多不超过二位；

在任何一个物理量值中，数值的最后一位，在位数上应与误差的最后一位划齐；

一数值的有效位数越多，其百分数误差越小，数值的准确度越高；

有效数字的位数与十进制单位的变换无关。

数值的有效数字完全取决于绝对误差的大小，多次测量平均值的有效数字由它的绝对误差确定。





确定有效数字的粗略方法

直接测量中，以仪器最小刻度中估计的一位为产生误差的一位，即以仪器能读出的有效数字为准。

间接测量有效数字的粗略定法：

对于加减、乘除运算，计算结果的有效位数与参加运算的各数中有效数位数最少的相同；乘方、开方运算，结果保留与原运算数相同的有效位数。

数字计算规则

加减法

- ① 找出各量中具有最大误差的量；
- ② 以此量的末位作标准，简化其它分量，使其末位数在位数上仅仅多一位；
- ③ 进行数值计算；
- ④ 由绝对误差定出结果的有效位数。





乘除法

- ① 找出各量中具有最少有效数字的量；
- ② 以此量的有效数字为标准，简化其它分量，使其末位数在位数上仅仅多一位；
- ③ 进行数值计算，每经过一次运算，得出的数值就按第②步简化；
- ④ 由绝对误差定出结果的有效数字。

4 动态测量结果的数据处理

比较复杂，在这里暂不做讲解。





§ 2.4.4 测量结果的不确定度表示法

1 不确定度与误差在概念上的区别

对于 $y = X \pm \Delta X, E = \Delta X / X$ ，一般概念中， ΔX 称为绝对误差， E 称为相对误差。

1) 误差

测得值与真值之差。

2) 偏差

多次测量时某次测量值与算术平均值之差。分算术平均偏差和标准偏差。

3) 不确定度

说明测量结果的参数，用于表征测量真值的散布性。

若称 ΔX 为不确定度，则该不确定度是指在一定置信概率下误差限的绝对值。





2 不确定度与误差在处理上的区别

在工程或物理实验中，通常把误差分为偶然误差、系统误差和过失误差三大类。一般认为，过失误差应避免，系统误差应尽量消除，所以实际仅计算偶然误差。在单次测量或计算的偶然误差小于仪器误差时，才以仪器出厂误差限作为测量误差。

引入不确定度的概念后，在可修正的系统误差修正后，将余下的全部误差划分为A、B两类分量。

A类分量——可用统计方法求出的不确定度，相当于偶然误差及部分随机性质的系统误差；

B类分量——由不同于A类分量的其它方法求出的不确定度，剩余部分的系统误差。

在采用不确定度概念后，既要评定A类分量不确定度，又要评定B类分量不确定度，最后以合成不确定度表示测量结果中的不确定度。





3 测量结果的不确定度分析与表示

1) 工程或物理实验中如何分析测量结果的不确定度

测量结果不确定度的来源:

- ① 被测量定义的不完善;
- ② 实现被测量定义的不理想;
- ③ 所测样本不能完全代表定义的被测量的抽样;
- ④ 对测定的环境条件参数测得不准;
- ⑤ 人员读数偏移;
- ⑥ 仪器分辨率;
- ⑦ 基准器和标准物质给出的值;
- ⑧ 计算中用到的常数及其它参数;
- ⑨ 测量方法和程序的近似性;
- ⑩ 重复观测时的偶然变化等。





在工程或物理实验中，只要注意以下三个方面的不确定度来源就可以了：

- ① 多次测量中由标准差算出A类不确定度，并进行分布修正；
- ② 由仪器误差所带来的B类不确定度；
- ③ 由测试条件不符合要求带来的B类不确定度。

2) 单次测量时不确定度的表示

在工程或物理实验中，单次测量的不确定度只要考虑仪器的误差限作为不确定度的主要来源。

3) 间接测量量的不确定度传递

间接测量量的误差传递公式可近似借用数学中多元函数求等公式。





4) 测量结果的表示

测量结果最后要给出的参数有：

- ① 算术平均值或各直接测量量的算术平均值计算的测量结果；
- ② 不确定度 σ ；
- ③ 自由度 γ ；
- ④ 置信概率 P 。

测量值 L

不确定度 $L - \sigma$ $L + \sigma$ ($P=0.683$)

$L - 2\sigma$ $L + 2\sigma$ ($P=0.955$)

$L - 3\sigma$ $L + 3\sigma$ ($P=0.997$)





目 录

第1章 概 述

第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础

➤ 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍

第4章 智能传感器的集成技术

第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法

第6章 通信功能与总线接口

第7章 智能技术在传感器系统中的应用

第8章 智能传感器系统的设计与应用

第9章 无线传感器网络技术概述





第3章 不同集成度智能传感器系统介绍

要 点：

- ◆ 集成智能传感器的工作原理和结构特点；
- ◆ 初级形式：单片集成和混合集成；
- ◆ 中级形式：敏感单元+信号调理电路+微处理器系统；
- ◆ 高级形式：敏感单元阵列化，信号处理软件高级化。





§ 3.1 传感器的集成化和智能化

§ 3.1.1 传感器的集成化

1、集成化的概念：

它有两方面的含义：

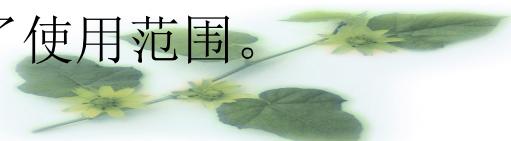
1) 传感器的阵列化，即将同一功能的单个传感器按一维、二维甚至三维的形式集成在同一芯片上。比较典型的例子是CCD。

2) 传感器的多功能化。将不同功能的传感器集成在同一芯片上或几个芯片组合在一起或将传感器的敏感元件、信号处理电路甚至微处理器集成在一起。如厚膜电路，ST—3000等。

2、集成化的优点

提高了传感器的整体性能；降低了生产成本；可规模化生产；提高了传感器的可靠性：与传统方式相比，主要是消除了中间环节一些不可靠因素的影响；

多功能化、智能化：可实现多参数检测；拓宽了使用范围。





§ 3.1.2 传感器的智能化

集成化的智能传感器主要由：

- * 传感器：分主传感器和辅助传感器
- * 补偿和校正电路：指温度补偿和非线性校正
- * 调理电路：滤波、放大、量程变换
- * 接口电路：输入、输出接口、信息接口等
- * 微处理器。

按传感器技术的发展层次分成三种形式：

1、初级形式

敏感元件+温度补偿及校正电路+线性补偿电路+信号调理电路。与传统传感器相比，精度和性能得到了大大提高，比较典型的例子是：

MOTOROLA公司的单片集成压力传感器MPX3100。

2、中级形式





在初级形式的基础上增加了微处理器和硬件接口电路，扩展功能有：自诊断（指故障、超量程）、自校正（进一步消除测量误差）、数据通讯，这些功能主要以软件的形式来实现，因此它的适应性更强。

3、高级形式

在中级形式的基础上，硬件上传感器多维化和阵列化，软件上结合神经网络技术、人工智能技术（专家系统、遗传算法等）和模糊控制理论甚至还有预测控制理论等，使它具有人脑的基本功能：识别、记忆、学习、思维。

由于我们国家的大规模集成电路的工艺水平和半导体集成技术比较低，近期内难以实现单片集成化智能化传感器（特别是中级形式），主要是研究开发混合式集成传感器。利用部分进口芯片、国产芯片和敏感元件，利用现有条件实现传感器智能化，或者在现有的传感器外壳内，装上专用集成电路芯片和单片微型计算机芯片（嵌入式系统）。这对于某些单纯靠硬件电路来实现的测量系统（如红外测温仪）还是很有实用价值的。





§ 3.2 集成化智能传感器系统的初级形式

下面我们举例介绍初级形式的结构组成，了解与传统传感器相比，硬件上它有哪些改进手段、方法和措施。

§ 3.2.1 单片集成式

1、具有CMOS放大器的单片集成压阻式压力传感器

1) 结构：敏感元件+CMOS信号调理电路

2) 加工工艺：掩蔽腐蚀+高温键合技术
形成压力腔

离子注入工艺
↓
制作压阻电桥

只进行单面加工，与标准IC工艺完全兼容。

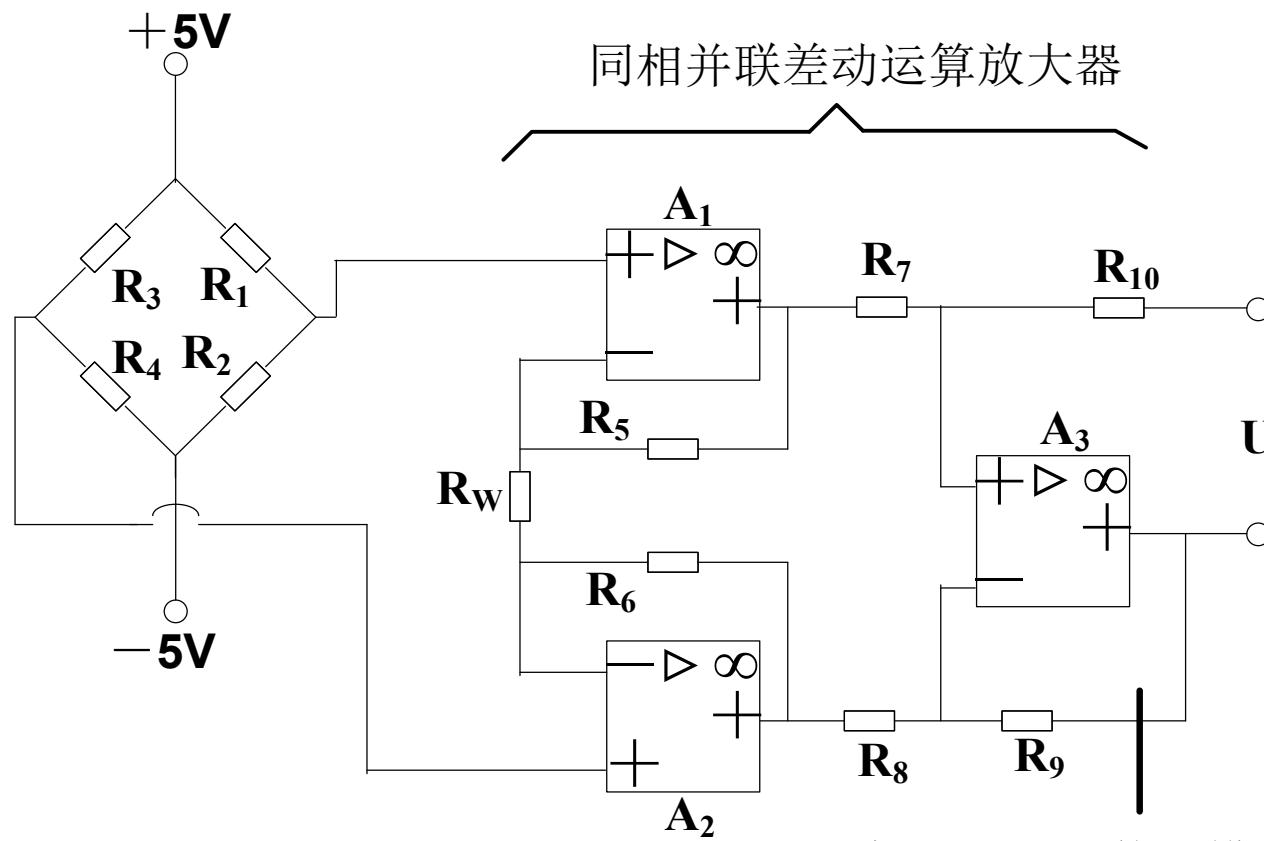
3) 尺寸：1.5mm²

4) 电路结构（见下图）：

a) $R_1 \sim R_4$: $\sim 5k\Omega$;

b) A_1 、 A_2 构成同向放大器；





不加该级，可使共模抑制比
更高，但输出有共模信号

优点：输入阻抗高，共模抑制比高。

放大倍数： $A' = 1 + \frac{R_5 + R_6}{R_W}$ ，改变 R_w ，可以调整 A' 。





c) A_3 : 基本差动输入放大器, 放大倍数: $A'' = \frac{R_8 + R_9}{R_8} \cdot \frac{R_{10}}{R_{10} + R_7}$

当 $R_8 = R_7$, $R_{10} = R_9$ 时, $A'' = \frac{R_9}{R_8}$ 。

d) 总的差模放大倍数:

$$A_d = A' A'' = \left(1 + \frac{R_5 + R_6}{R_W}\right) \frac{R_9}{R_8}$$

e) 降低 A'' 有益于减少输出温度漂移, 从而减小电路的输出失调电压。

2、MOTOROLA单片集成压力传感器MPX3100

量程: 0~100kPa; 被测量: 差压、表压、绝对压力;

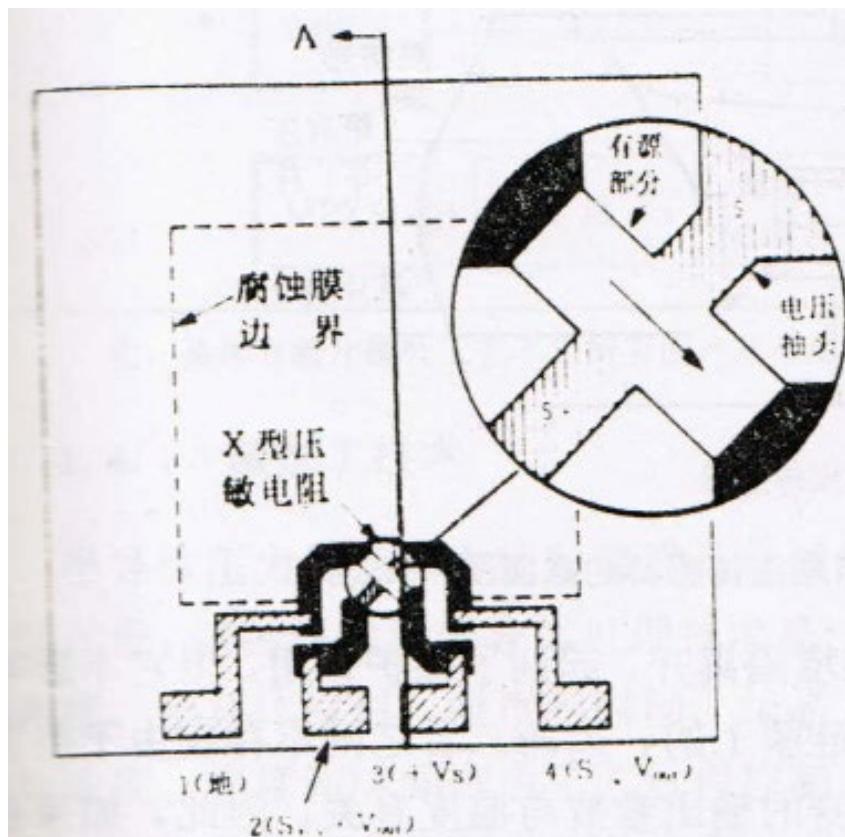
结构: 应变仪+温度补偿、校准和信号调理+激光修正。

1) 敏感元件结构及原理

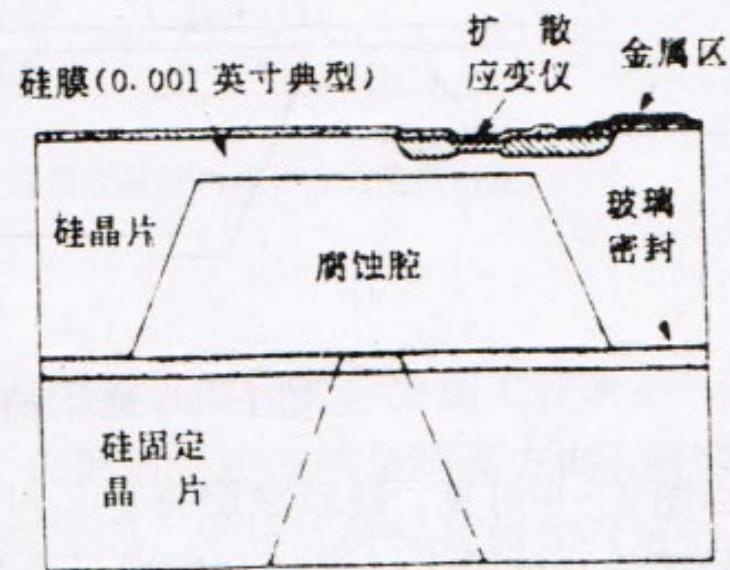
a) 结构为单个X型的压敏电阻

b) 工作原理: 利用单片压敏电阻产生随压力而变化的输出电压。受





(a) 俯视图



(b) 差压传感器的 AA 方向剖面图

X型压阻压力传感器基本结构图





到压力时，原来结构中的导带和价带之间的禁带宽度发生变化，使载流子的数量和载流子的迁移发生变化。

压阻效应的另一种表达方式：电场分量 E_j ，电流密度分量是 i_i ，应力分量是 δ_{ij}

$$\frac{E_1}{\rho} = i_1 [1 + \pi_{11} \delta_{11} + \pi_{12} (\delta_{22} + \delta_{33})] + \pi_{44} (i_2 \delta_{12} + i_3 \delta_{13})$$

$$\frac{E_2}{\rho} = i_2 [1 + \pi_{11} \delta_{22} + \pi_{12} (\delta_{11} + \delta_{33})] + \pi_{44} (i_1 \delta_{21} + i_3 \delta_{23})$$

$$\frac{E_3}{\rho} = i_3 [1 + \pi_{11} \delta_{33} + \pi_{12} (\delta_{11} + \delta_{22})] + \pi_{44} (i_1 \delta_{31} + i_2 \delta_{32})$$

ρ ：无应力作用时的各向同性电阻率；1，2，3表示3个轴方向。

π_{11} ：纵向压阻系数； π_{12} ：横向压阻系数； π_{44} ：剪切压阻系数。

对于P型硅， π_{44} 具有最大值。





导电类型	P-Si	N-Si
压阻系数		
π_{11}	6. 6	-102. 2
π_{12}	-1. 1	53. 4
π_{44}	133. 1	-13. 6

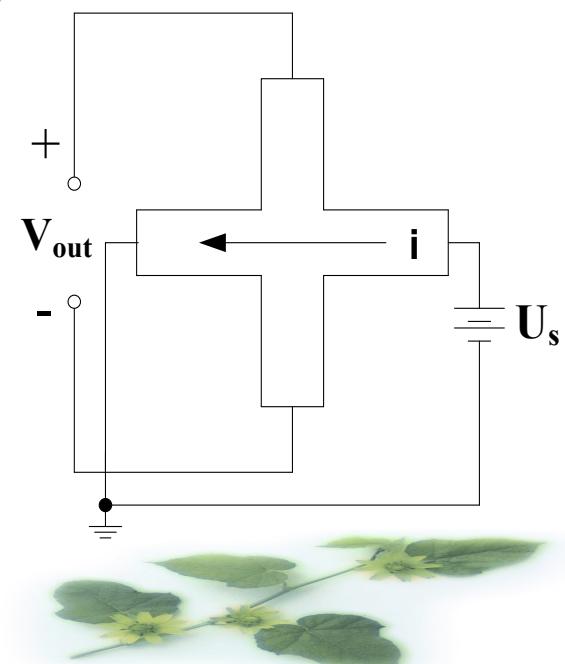
若令: $i_1, i_3 = 0$, 则有: $\frac{E_1}{i_2} = \rho \pi_{44} \delta_{12}$, δ_{12} 为剪切应力。

$$V_{out} = dE_1 = d \cdot k \delta_{12} = k' \delta_{12} ,$$

$$k = \rho \pi_{44} i_2 , \quad k' = dk ,$$

电场 E_1 引起该方向的电位分布发生变化。

c) 加工工艺: 掩蔽腐蚀+阳极键合法+离子注入工艺+激光微加工技术+激光修正技术。





d) 失调误差由横向电压抽头的对准度决定。

2) 温度补偿

一般半导体器件的输出参数均受温度的影响，为消除影响需进行补偿。

a) 满量程温漂补偿

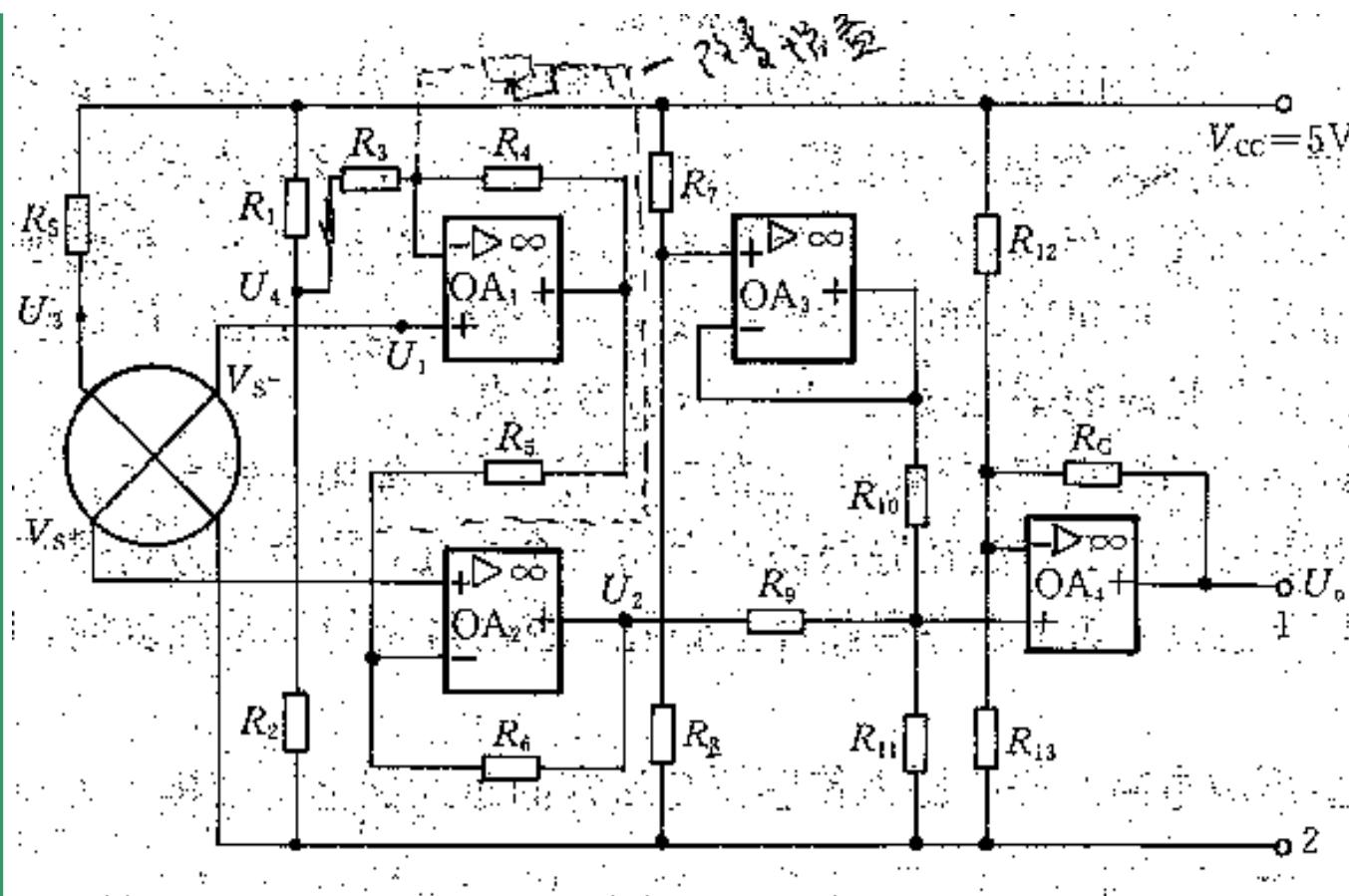
X型压力传感器输出电压幅度随温度升高而降低， $\alpha_T = -0.19\%/\text{°C}$ ，传感器的输出与激励电压成比例关系，采用前面介绍的拼凑补偿法。在X型传感器的激励电源上串入一具有负温度系数的电阻 R_S ；X型压力传感器本身的电阻具有正温度系数，也起到一定补偿作用，补偿精度可达到0.5%。

b) 零位温漂补偿

一般情况下，可通过光刻工艺使零位失调和温漂做得很小，在要求较高和宽温度范围内工作，需进行补偿。（电路图参见下图）

OA_1 的作用：进行零位温漂补偿；提高输入阻抗。





MPX3100 内部线路图



OA_2 的作用：将差分输出转换为单端对地输出；通过阻抗转换提高共模抑制比。

OA_1 、 OA_2 构成同相串联差动运算放大器，共模增益为零。

补偿电阻 R_3 ，可采用小信号分析法求得：

$$R_3 = \left(\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} \times R_5 \right) - \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

3) 信号调理和校准电路

OA_3 ：精密电压基准，校准整个系统的零位输出电压。

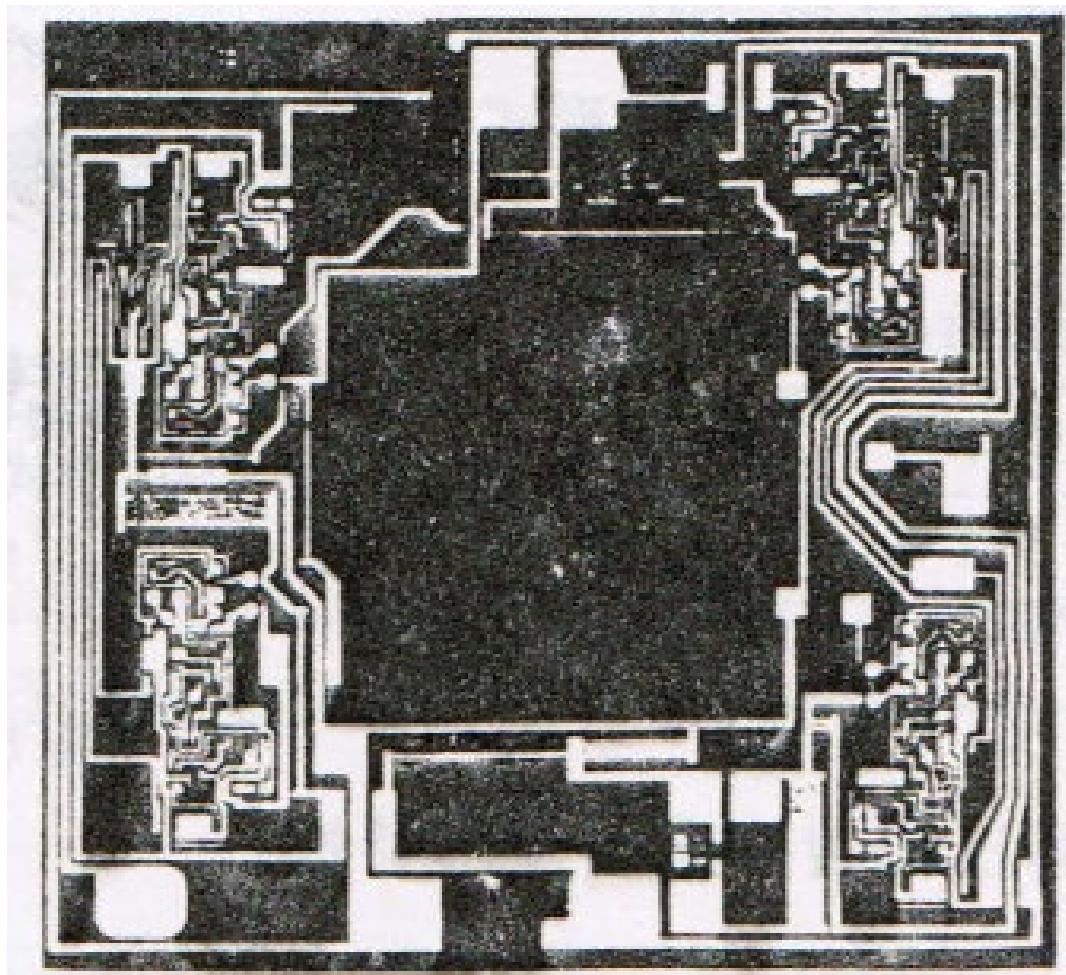
MPX3100的零位：0.5V；满量程：2.5V。

R_7 、 R_8 提供电压基准，保证零位输出0.5V。

放大器： OA_2 、 OA_4 用于保证系统满量程输出，校准：采用激光修正电阻 R_G 的方法。

3、带C/U转换电路的硅电容式单片集成压力传感器





MPX5100D 系列硅压力传感器的版图

压力敏感部分
的硅片面积为：
 $120\text{mils} \times 120\text{mils}$;
总的面积为：
 $145\text{mils} \times 130\text{mils}$





前面的介绍表明：硅电容式的性能指标高于扩散硅压阻式，灵敏度高1~几个数量级，功耗低2个数量级。

缺点：输出的非线性。

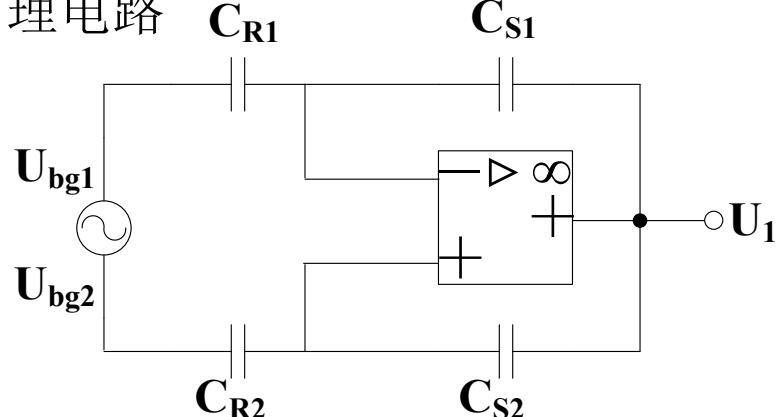
组成：敏感单元（单岛型弹性膜片）+C/U转换电路+放大电路（信号调理）+带隙电压基准电路+数字校正+时钟电路+三阶低通滤波器

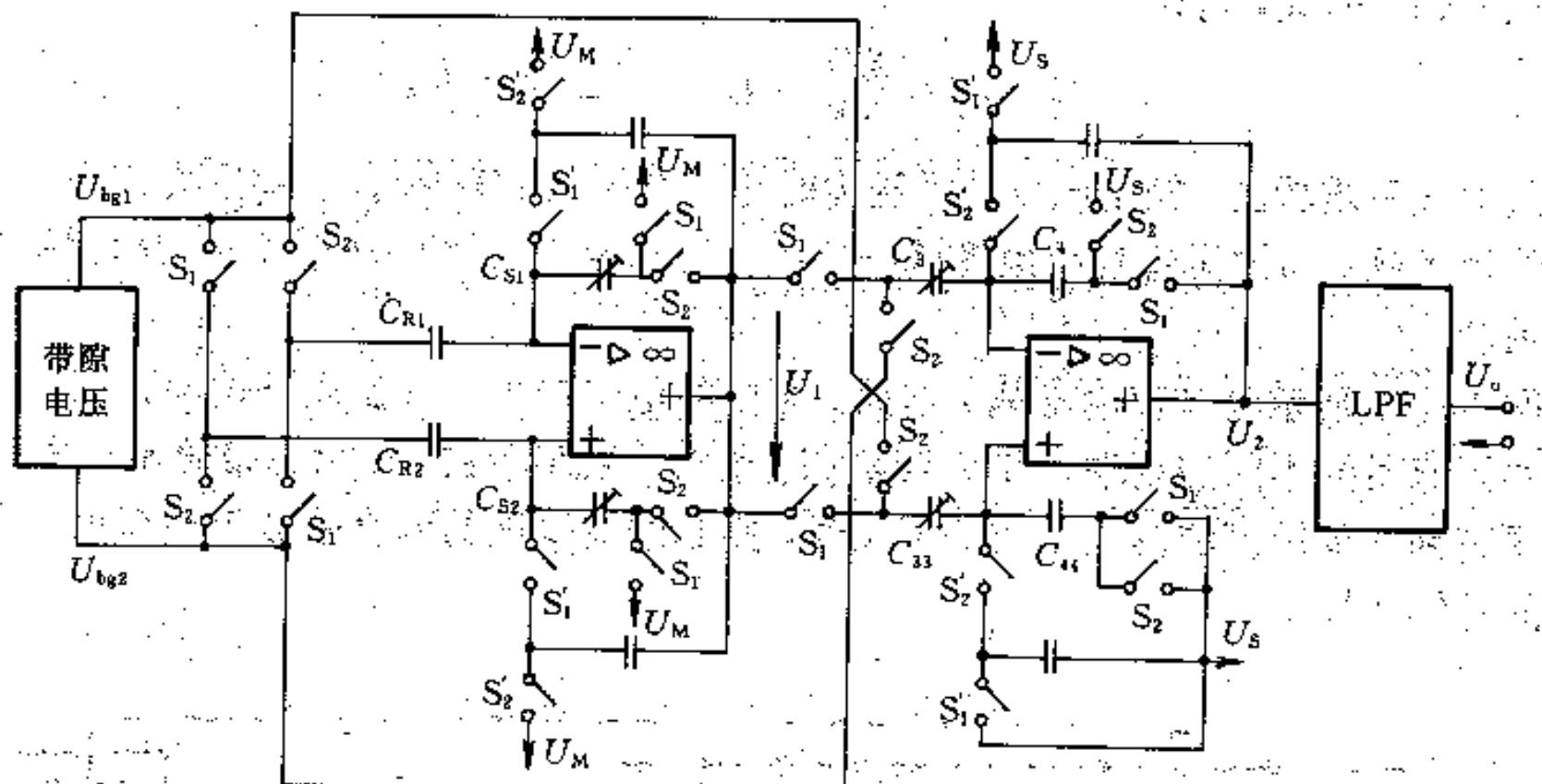
1) 信号调理电路

采用了差动结构设计；信号传感器电容： C_{S_1} 、 C_{S_2} ；参考传感器电容： C_{R_1} 、 C_{R_2} ；优点：消除干扰信号的影响（温度、杂散电容）。

a) 根据下图中提供的开关—电容调理电路 C_{R1} C_{S1}
我们可以将其中的前级放大部分进行简化分析。

当开关 S_2 吸合：





传感器的开关—电容调理电路





$$U_1 = -(U_{bg_1} - U_{bg_2}) \frac{C_{R_1}}{C_{S_1}} + (U_{bg_2} - U_{bg_1}) \frac{C_{R_2}}{C_{S_2}} + U_M$$

当 $C_{S_1} = C_{S_2}$, $C_{R_1} = C_{R_2}$ 时, $U_M = 0$,

$$U_1 = -2(U_{bg_1} - U_{bg_2}) \frac{C_{R_1}}{C_{S_1}}$$

b) 后一级放大电路, 其工作原理与前一级类似, 输入信号部分为:

$$U_1 \text{ 、 } (U_{bg_1} - U_{bg_2}) \text{ ; 且 } C_3 = C_{33} \text{ , } C_4 = C_{44} \text{ 。}$$

输出电压:

$$\begin{aligned} U_2 &= -\frac{C_3}{C_4} [(-U_{bg_1} + U_{bg_2}) + U_1] + U_S \\ &= -\frac{C_3}{C_4} (U_{bg_1} - U_{bg_2}) (2 \frac{C_{R_1}}{C_{S_1}} - 1) + U_S \end{aligned}$$

c) 假设 C_{S_1} , C_{R_1} 均为平板电容, 则:

$$C_{S_1} = \frac{A_S \varepsilon}{X_0 - X(P)} \quad C_{R_1} = \frac{A_R \varepsilon}{X_0}$$





取: $\frac{C_{R1}}{C_{S1}} = \frac{1}{2}$, 则: $\frac{A_R}{A_S} = \frac{1}{2}$ 。

上式可变换为:

$$U_2 = \frac{C_3}{C_4} (U_{bg_1} - U_{bg_2}) \frac{X(P)}{X_0} + U_S$$

d) 传感器灵敏度的调整: 用程控电容阵列开关, 选定不同的 $\frac{C_3}{C_4}$ 比值。

2) 带隙电压基准电路

a) 从上面推导出的输出表达式中, 输出信号电压与基准电路提供的电压成正比, 因此可通过调整带隙电压的温度系数来补偿灵敏度温度系数的影响, 达到温度补偿和校正的目的。

b) 提供高稳定度的电压值。

3) 传感器的结构设计

结构: 方形膜片 (单岛型) + 上下两片硼硅玻璃。

引线: 由金属化的玻璃表面引出。





加工工艺：掩蔽腐蚀+阳极键合+微加工技术

尺寸：8.4mm×6.2mm。

关于带隙基准电压源：

为满足现代电子测量之需要而提出的。它是基于能带间隙基准电压源的概念。所谓能带间隙是指半导体材料在0K温度下的带隙电压，其数值约为1.205V，用 U_{g0} 表示。





带隙基准电压源的基本原理是利用电阻压降的正温漂去补偿晶体管发射结正向压降的负温漂，从而实现零温漂。由于未采用工作在反向击穿状态下的稳压管，因此噪声极低。基准电压源的表达式为：

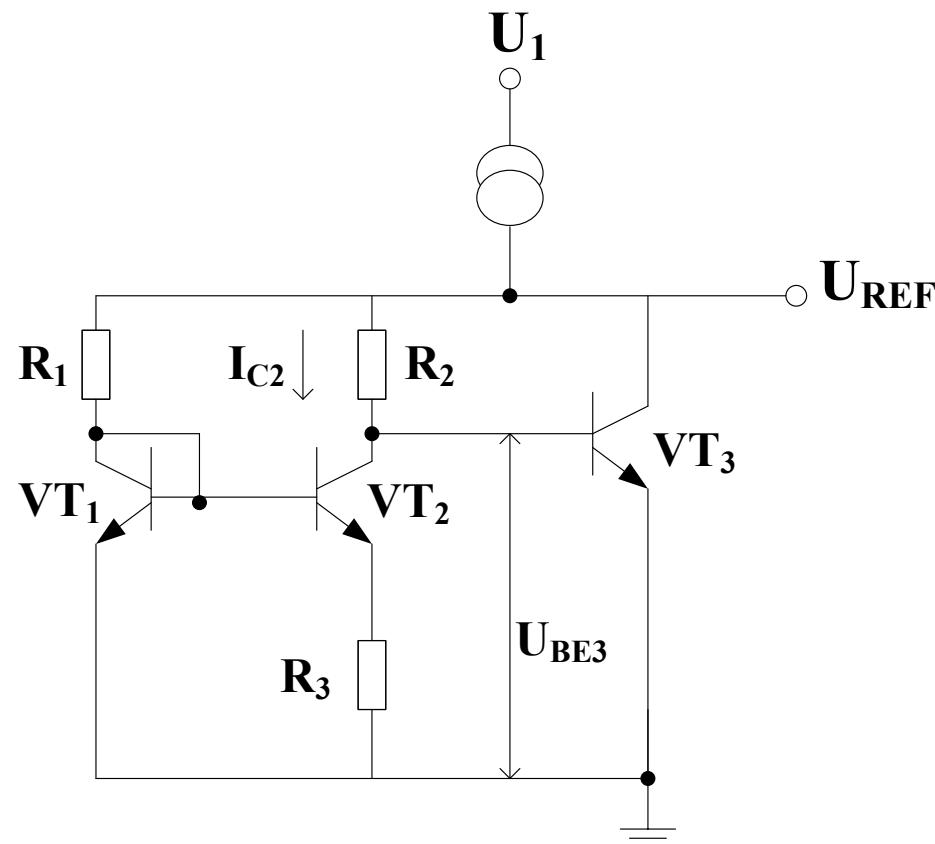
$$U_{REF} = U_{BE3} + I_{C_2} R_2$$

$$= U_{BE} + \frac{R_2}{R_3} \frac{kT}{q} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

k：玻尔兹曼常数；

q：电子电量；

T：热力学温度。



带隙基准电压源的简化电路





其电压温度系数:

$$\alpha_T = \frac{dU_{REF}}{dT} = \frac{dU_{BE}}{dT} + \frac{R_2}{R_3} \frac{k}{q} \ln \frac{R_1}{R_2} q$$

式中, $\frac{dU_{BE}}{dT} \approx -2.1\text{mV}/^\circ\text{C}$, 第二项为正数, 只要选择适当的电阻比, 使两项之和等于零, 即可实现零温漂。条件为:

$$U_{BE0} + \frac{R_2}{R_3} \frac{kT}{q} \ln \frac{R_1}{R_2} = U_{g0} = 1.205\text{V}$$

U_{BE0} 是常温 T_0 下 U_{BE} 的值。这表明从理论上讲, 基准电压与温度变化无关。实际上, 由于受基极电流 I_B 等因素的影响, U_{REF} 只能接近零温漂。





4、具有频率或数字输出的单片集成传感器

优点：测量精度和分辨率高；抗干扰能力强；直接进行数字信号处理（或简单预处理）；提高了系统的可靠性和响应速度；成本低。

结构形式：硅微结构谐振式、声表面波（SAW）式、电子振荡式、触发器式。

1) 硅微结构谐振式

特点：微型化、功耗低、响应快、易集成。

激励方式：热激励、光激励、电磁激励。

a) 电阻热激励

主要是提供了一个热激励源，该激励以加热电阻的形式实现。当加热电阻通以带有直流分量的交变电压时，会引起膜片的温度应力产





生交变，当其频率 ω 与膜片的自激频率一致时，膜片将发生谐振。通过 $R_1 \sim R_4$ 组成的电桥检测到含 $\cos \omega t$ 的输出信号。该信号一方面作为测量信号，另一方面可将它反馈到加热电阻R上，构成微结构谐振式传感器的闭环自激系统。

当膜片受压力作用时，膜片谐振子的谐振频率将产生变化，压力与频率之间有一定的对应关系。

需要注意的问题：

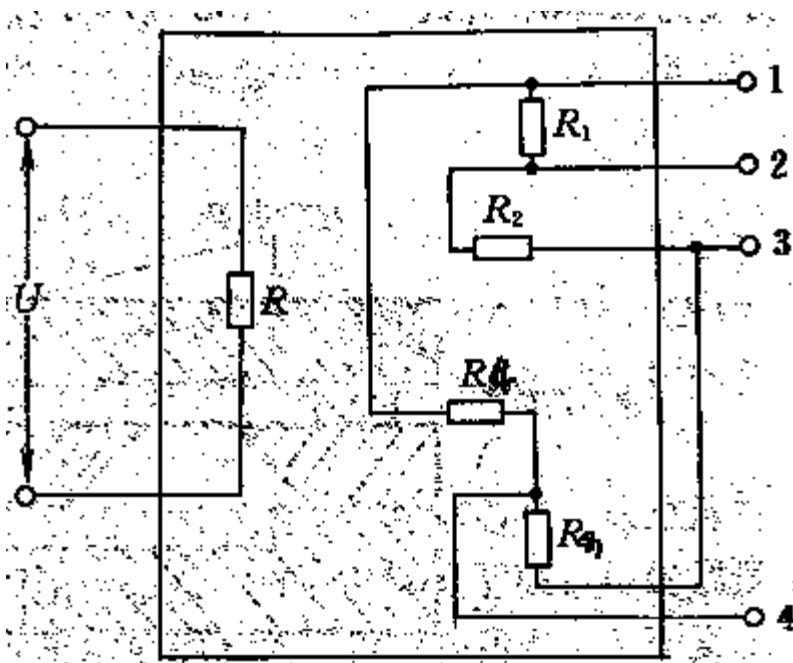
$$\Delta U = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} U_0$$

R_1 、 R_3 的特性， R_2 、 R_4 的特性要一致。

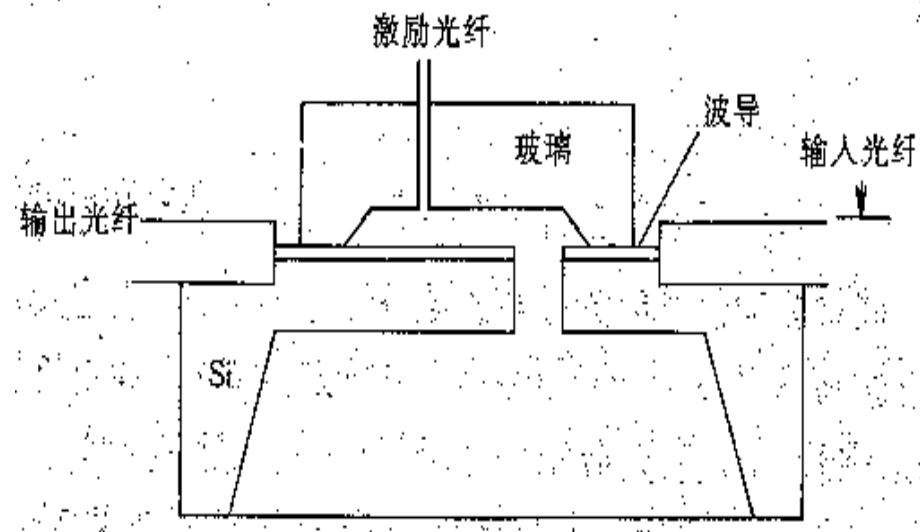
ii) 注意桥路电源电压 U_0 对膜片温度分布的影响。

b) 光激励





热激励硅膜片电阻分布



光激励谐振式传感器





加上光激励信号，且光激励信号频率 ω 与悬臂梁的谐振频率相等时，悬臂梁会出现谐振现象，通过测量光纤对管中接收光纤的信号变化就可以测出 ω 值。

c) 电磁激励

电磁激励实际上由激励线圈+激励硅梁+拾振硅梁+拾振线圈+与梁中电流方向相垂直的磁场组成，其中磁场由永久磁铁提供。

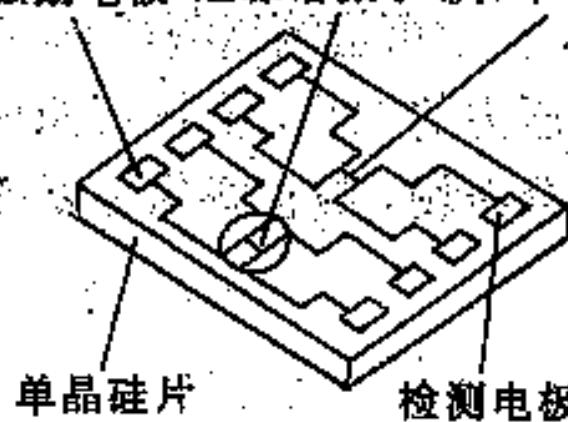
当被测压力作用时，膜片产生形变，中心处和边缘处的应力方向相反，中心处受拉，边缘处受压。中心处硅谐振梁的频率增加，边缘处的频率则下降，最高精度可达0.01%FS。

用测量频率差的方法检测压力，可以抑制环境温度等外界因素造成的误差。

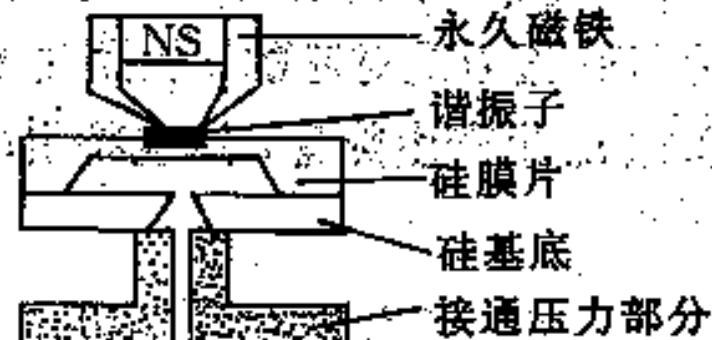




激励电极 边缘谐振子(f_e) 中心谐振子(f_c)



(a)



(b)

硅谐振式压力传感器原理结构图





2) 声表面波 (SAW) 式 (surface acoustical wave)

a) 波的类型

纵波: $V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}}$, 质点振动平行于传播方向;

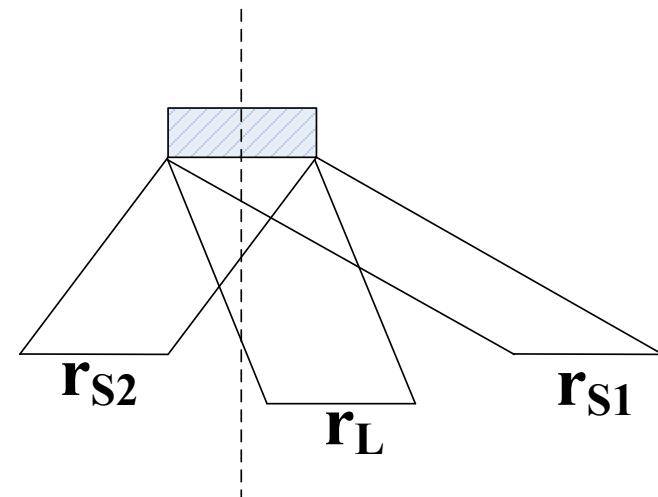
横波: $V_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\gamma)}}$, 质点振动垂直于传播方向;

E: 弹性模量, ρ : 密度, γ : 泊松比。

各向异性物质中声波的传播:

固体有界时, 由于边界变化的限制, 可出现各种类型的声表面波: 瑞利波、电声波、乐甫波、广义瑞利波、拉姆波等。

就波的传播速度与频率有无关系,
分为色散波和非色散波 (瑞利波、电声波)。





b) 声表面波的主要性质:

i) SAW的反射及模式转换

压电晶体表面蒸上金属指条; 表面刻有沟槽均能引起波的反射。
刻有沟槽均能引起波的反射。

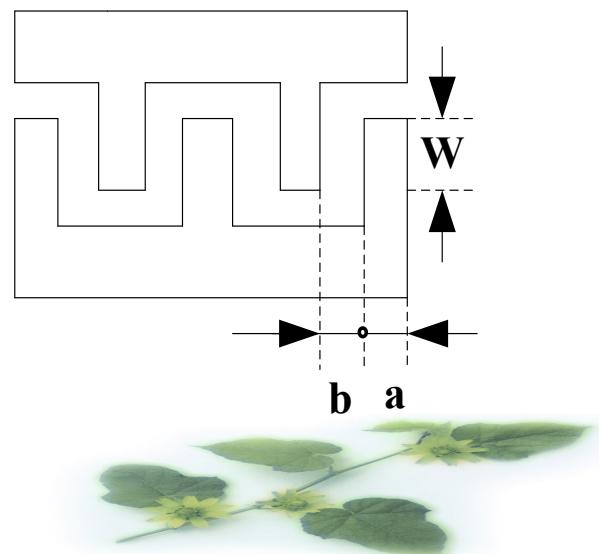
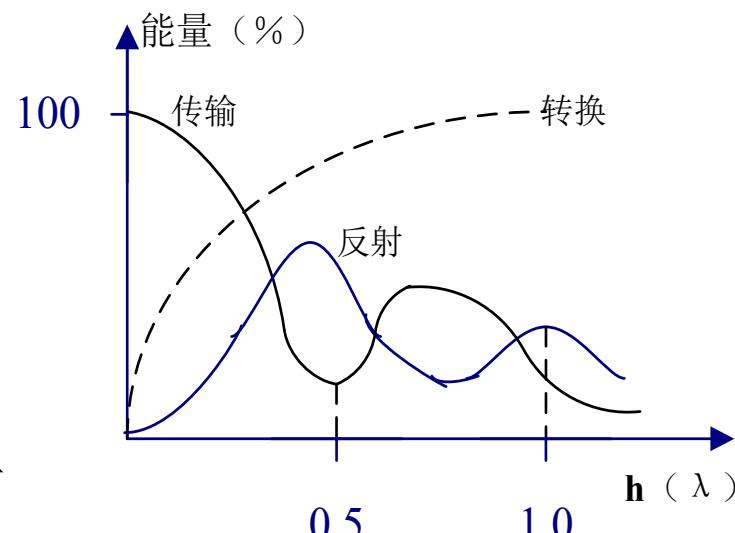
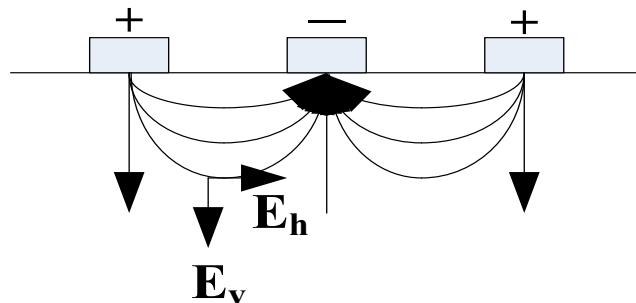
ii) 波束的偏离与衍射效应

iii) 声表面波的衰减:

偏离与衍射; 表面波与材料热声子相互作用引起; 材料表面粗糙在传播时不断向气体中辐射声波(与气体性质、气压有关)。

c) 声表面波叉指换能器

叉指周期: $T=2a+2b$





W=换能器的孔径; a=b, 声波波长: $\lambda = \frac{v}{f}$; $f_0 = \frac{1}{4} \frac{v}{a}$,
工作频率只受加工工艺限制。

若因外界因素的影响, 引起v与 λ 的变化, 则 f_0 产生变化。

$$f = (1 - k\varepsilon) f_0 , \quad \varepsilon : \text{应变率}; \quad k \approx 1, \text{ 常数。}$$

d) 声表面波传感器

i) 声表面波振荡器

* R型 (反射)

* DL型 (延迟线型)

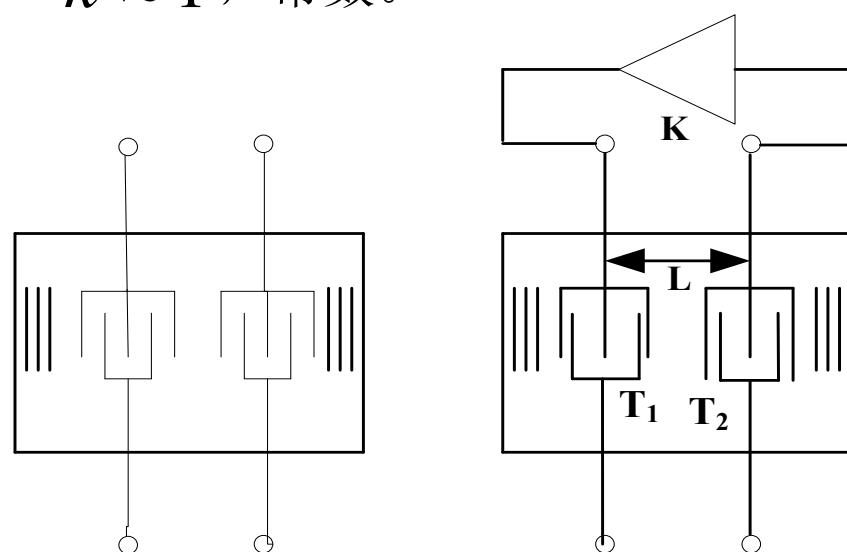
ii) SAW力和加速度传感器

利用: 应力作用, 使基片的弹

性系数和密度发生变化, 应力在SAW传

播方向上产生应变, 使L和 λ 改变, SAW的传播速度和频率也相应地变化。

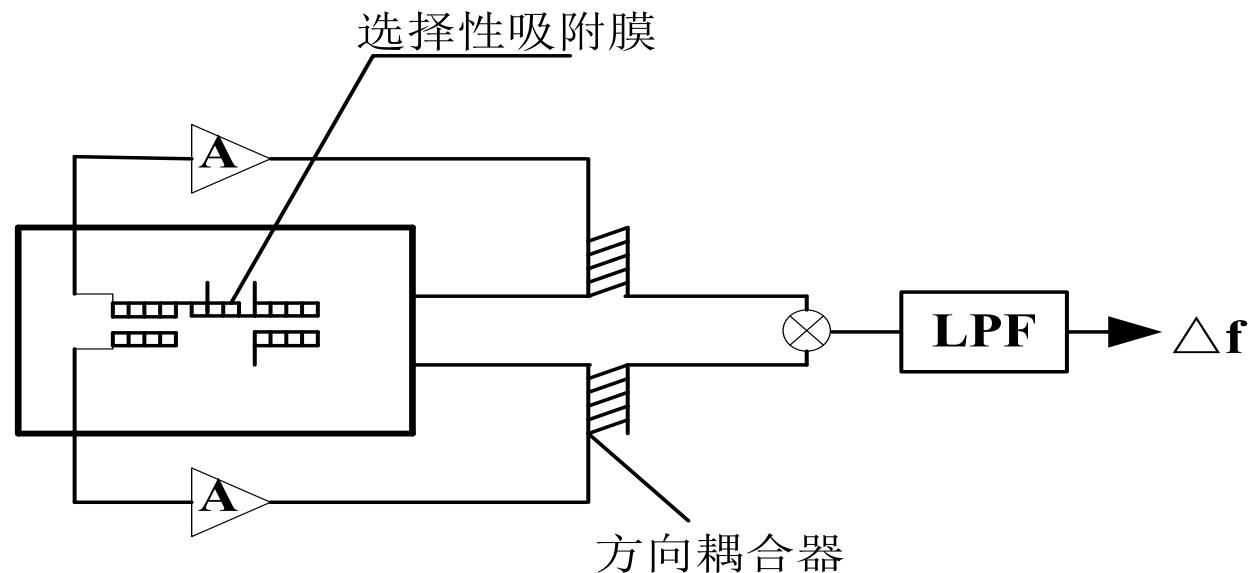
灵敏度: $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{v} - \frac{\Delta L}{L}$, 由于 $\frac{\Delta L}{L} \ll \frac{\Delta v}{v}$, $\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{\Delta v}{v}$





石英晶片地灵敏度: 0.5~1.5kHz/N, 压电陶瓷片: 10kHz/N。

iii) SAW气体传感器



以延迟线振荡器为基础，气体地吸附作用转变为覆盖层密度的变化，SAW延迟线传播路径上的质量负载效应使SAW波速发生变化，进而引起频偏。

e) 构成





声表面波谐振器（SAWR）（由叉指换能器+金属栅条式反射器构成）
+ 放大器+匹配网络（实际上就是移相网络电路）

f) 加工工艺：金属淀积工艺+光刻技术

工作原理：基于压电材料的逆压电和正压电效应。在激励SAW叉指换能器上加上适当频率的交变电信号后，压电基底内部会产生交变电场分布，由于逆压电效应，激励叉指换能器的叉指电极间的材料将产生周期形变，这种周期性的形变就产生沿叉指两侧表面传播出去的SAW，其频率等于所施加电信号的频率。当这种SAW通过基底传播到接收叉指换能器时，借助正压电效应，接受叉指换能器将输出交变的电信号。

起振后的振荡频率会随着温度、压电基底材料的变形等因素影响而发生变化。

反射栅条的作用：反射栅条主要是将SAW反射回来，加强振荡效果，这有点像激光器两端反射膜的作用。





3) 集成数字温度传感器

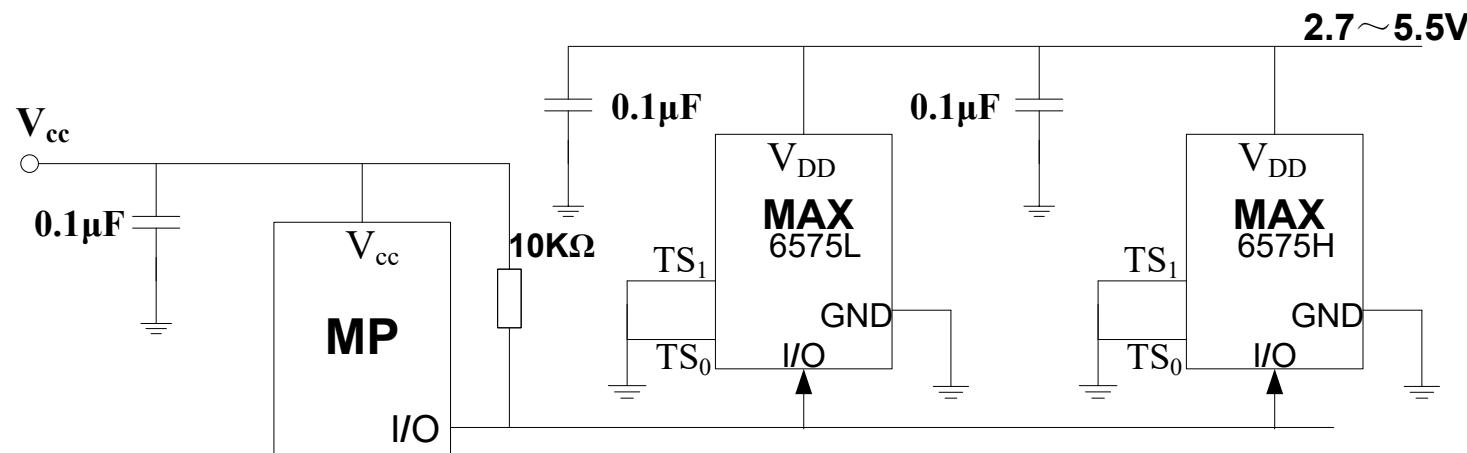
a) Maxim公司的产品

利用PN结的温度特性，输出形式：模拟输出、逻辑输出、数字输出，数字输出型一般带有串行接口： I^2C 、 $SPI/QSPI$ 、 $SM-BUS$

具体产品型号：MAX6575L/H、6576、6577

温度范围：-35°C～+125°C；封装0-S0723

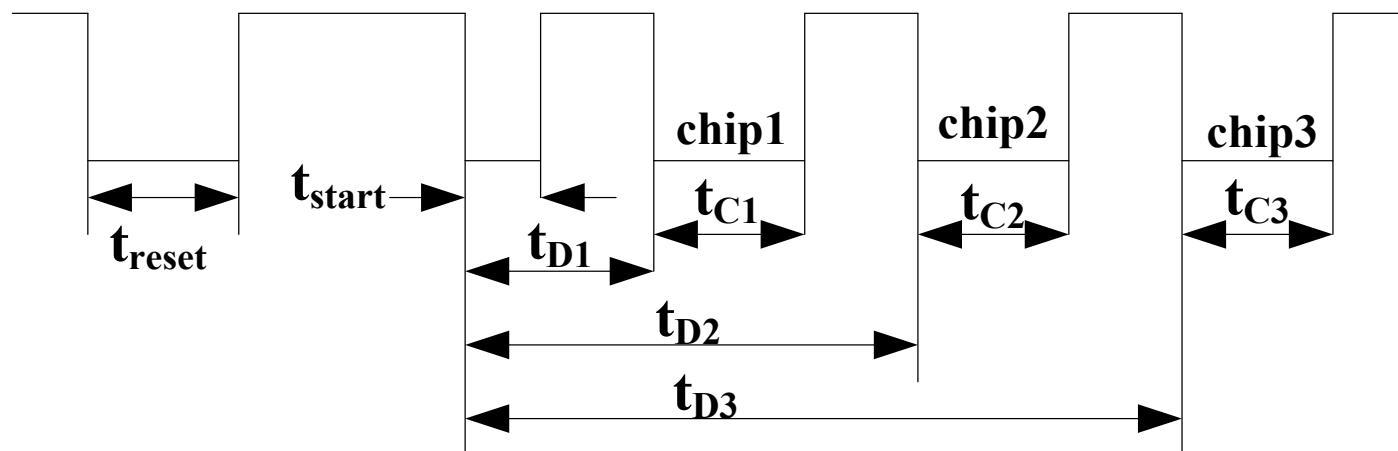
例：单线接口数字温度传感器（见下图）





时间系数的选择：($\mu s / k$)

TS_1	TS_0	6575L	6575H
GND	GND	5	160
GND	V_{DD}	20	320
V_{DD}	GND	40	480
V_{DD}	V_{DD}	80	640





测试温度与延迟时间的关系：

$$T \text{ (}^{\circ}\text{C)} = \frac{t_{D_x} (\mu\text{s})}{\text{时间系数 } (\mu\text{s}/k)} - 273.15\text{K}$$

温度传感器保持低电平的时间为 $5 \times T$ (μs)。

b) DALLAS公司产品，DS1820

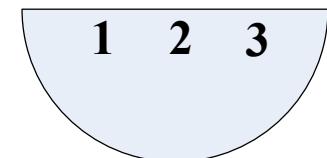
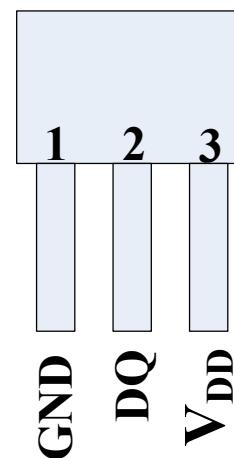
技术指标：-55°C ~ +75°C，精度：0.5°C

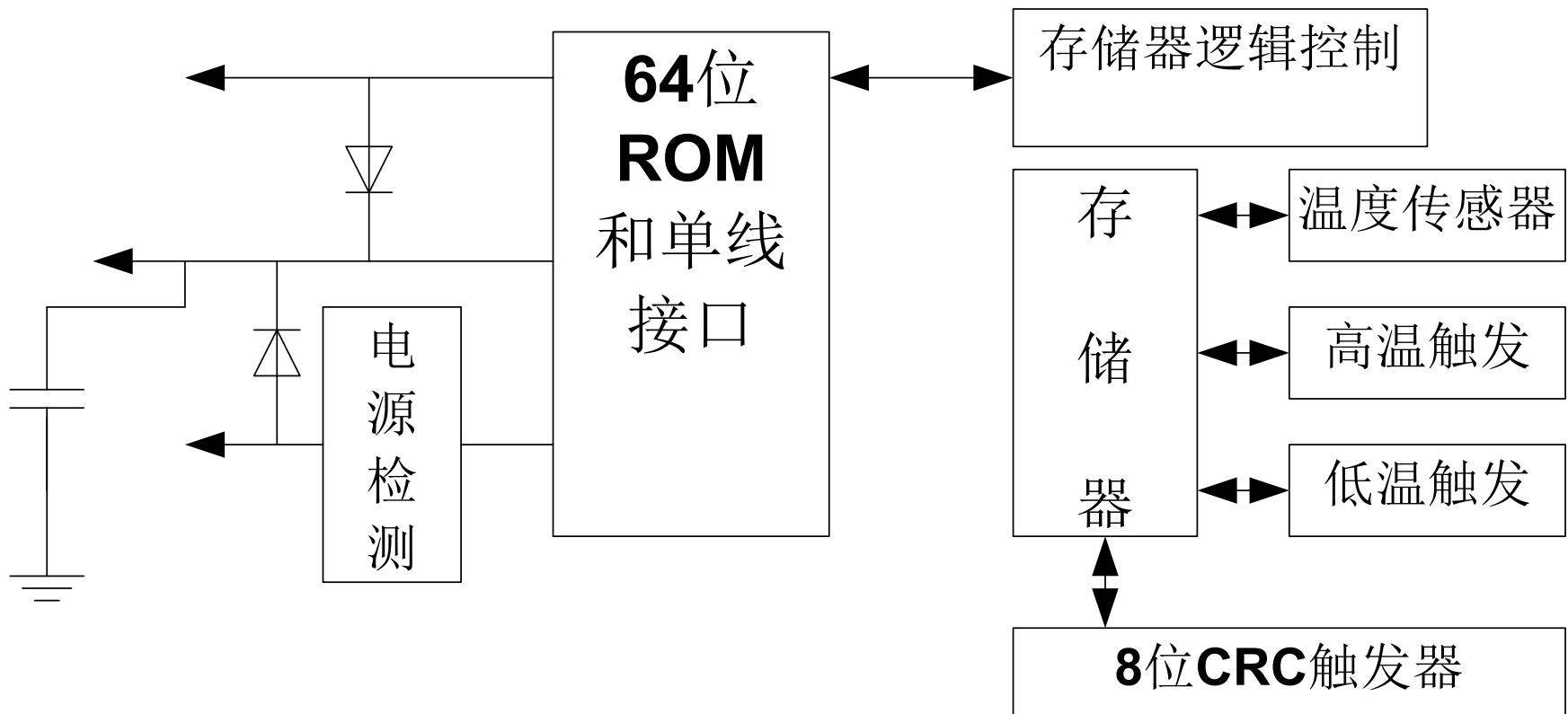
9位温度读数，其中一位符号位，A/D转换时间200ms，用户自定义报警上下限。

64BitRom结构：

8bitCRC+48bit序列号

+8bit工厂代码 (10H)



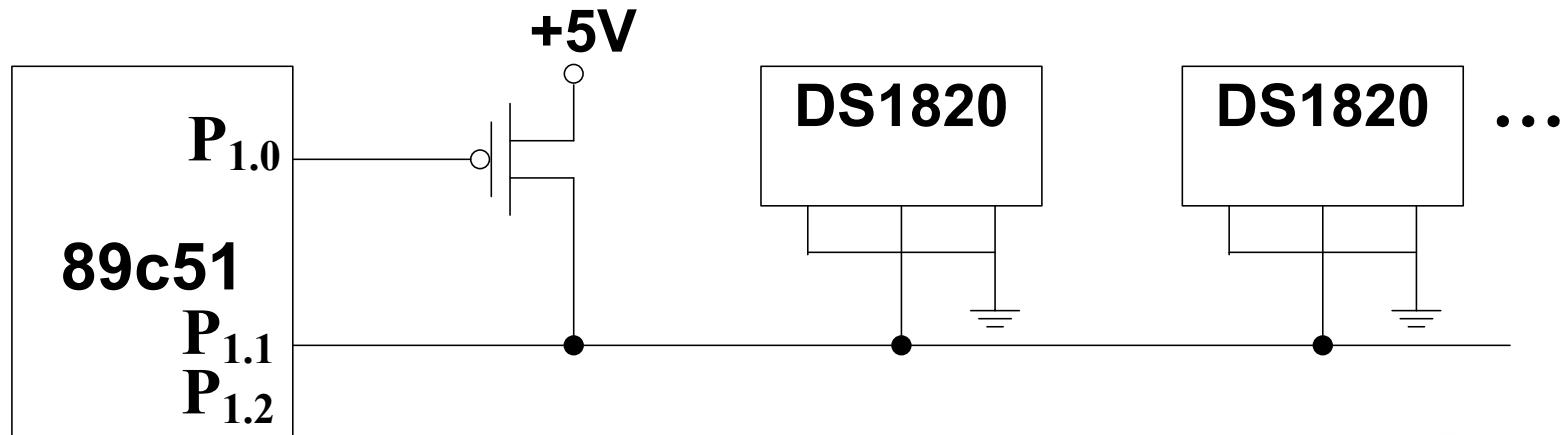




测温原理：内部计数器对一个受温度影响的振荡器计数。在低温时振荡器的脉冲可以通过门电路，而达到某一设置高温值时，振荡器的脉冲无法通过门电路。计数器设置为-55℃时的初值。

正常工作步骤：

- 1) 系统通过反复操作，搜索DS1820序列号；
- 2) 启动所有在线DS1820作温度A/D变换；
- 3) 逐个读出在线DS1820变换后的温度数据。





§ 3.2.2 初级形式的混合多片集成式

1、具有温度补偿功能的压阻全桥传感器

我们首先给大家介绍一下半导体力学量传感器中六种产生温漂的主要原因。

- i) 压阻系数随温度变化——对灵敏度温度漂移系数的影响；
- ii) 在腔体内存在残余气体——温度变化，引起气体体积的变化产生应力；
- iii) 桥路电阻的不等性（各电阻阻值不同、两支路电阻值不同），由膜厚不均引起。
- iv) 桥臂电阻的漏电流—桥臂电阻之间的绝缘度（表面电导、体电导）；
- v) 在 $SiO_2 - Si$ 或钝化膜—硅界面之间的热膨胀系数失配产生的应力；
- vi) 装配应力的影响（选择温度系数相近的材料进行装配并注意配合、选择好的粘合方式）。





a) 零位失调及零位温度漂移的补偿

i) 四桥臂电阻值已知，可寻取串联和并联附加电阻的方式，保证输出电压表达式中分子为零；

$$U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U$$

ii) 四桥臂电阻未知，零位失调电压已知，根据失调电压的正负，可在确定的桥臂上也采取串并联的方式。

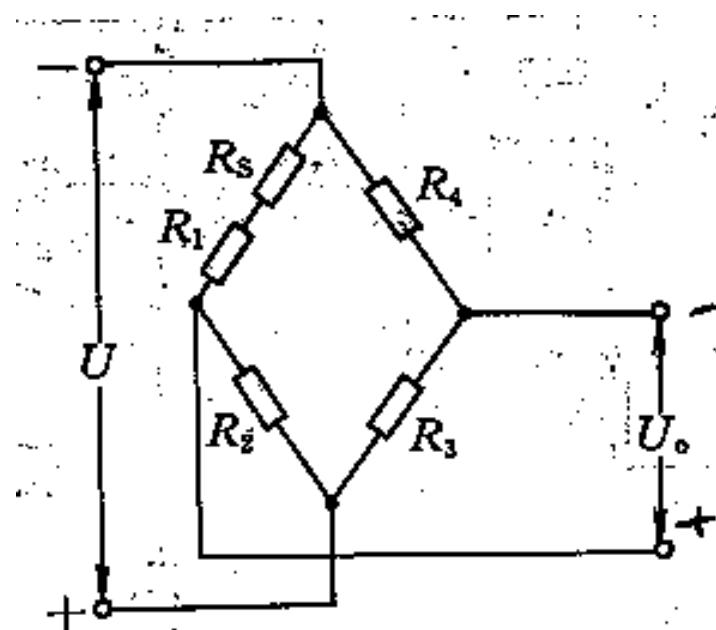
采用串联方式，串联电阻： $R_S = \frac{4R_0}{U} \Delta U_0$

iii) 零点温度漂移的补偿

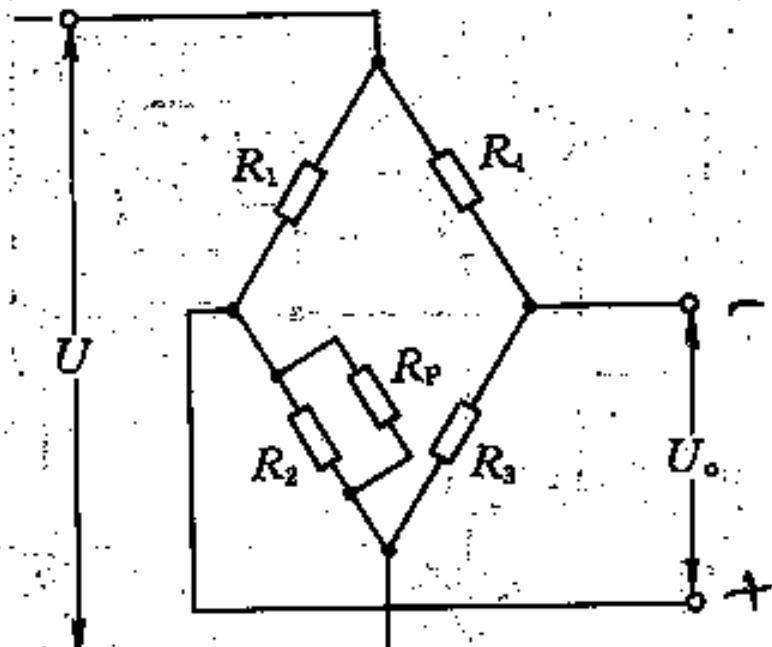
主要是考虑桥臂电阻温度系数不一致性，一般是采用串联和并联的方式，该串、并联电阻温度系数近似为零。计算方法书中有详细的介绍，这里就不赘述了。

计算过程为：先根据已知的桥臂电阻的初始值和各自的温度系数计算出





(a)



(b)

零位失调补偿方法

(a) 串联法

(b) 并联法





作业5

试就四桥臂电阻未知，零位失调电压已知，根据失调电压的正负，在确定的桥臂上采取并联方式，该并联电阻如何计算？





K值:
$$K = \frac{\alpha_3 - \alpha_4}{2\alpha_2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_3 - \alpha_4}{2\alpha_2}\right)^2 + \frac{R_{10}R_{30}}{R_{20}R_{40}} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$$

然后根据下面公式:

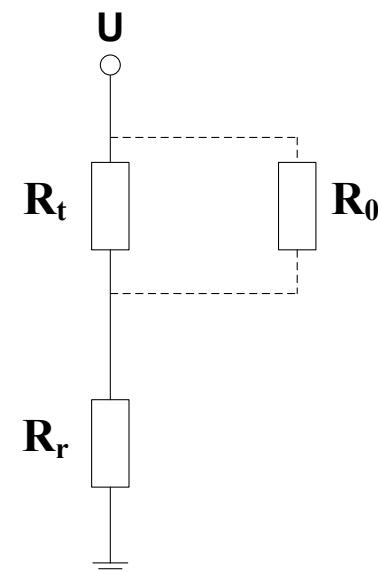
$$R_S = \frac{R_{20}R_{40}}{R_{30}} K - R_{10} \quad , \quad R_P = R_{20} \frac{K}{1-K}$$

求出 R_S 、 R_P ($R_S < R_{10}; R_{20} < R_P$)，将 R_S 串入 R_1 臂，将 R_P 并入 R_2 臂。

iv) 半桥电路零点温度漂移补偿:

$$R_0 = \frac{R_{t1}R_{t2}(R_{r2} - R_{r1})}{R_{r1}R_{t2} - R_{r2}R_{t1}} \quad (T_1 > T_2)$$

$R_0 > 0$, R_0 并在 R_t 上; $R_0 < 0$, R_0 并在 R_r 上。





v) 热敏电阻补偿法：（有正负两种温度系数）

$$R(t) = A \cdot e^{(B/t)}$$

上式具有非线性，为改善它可采用串并联固定电阻的方式。

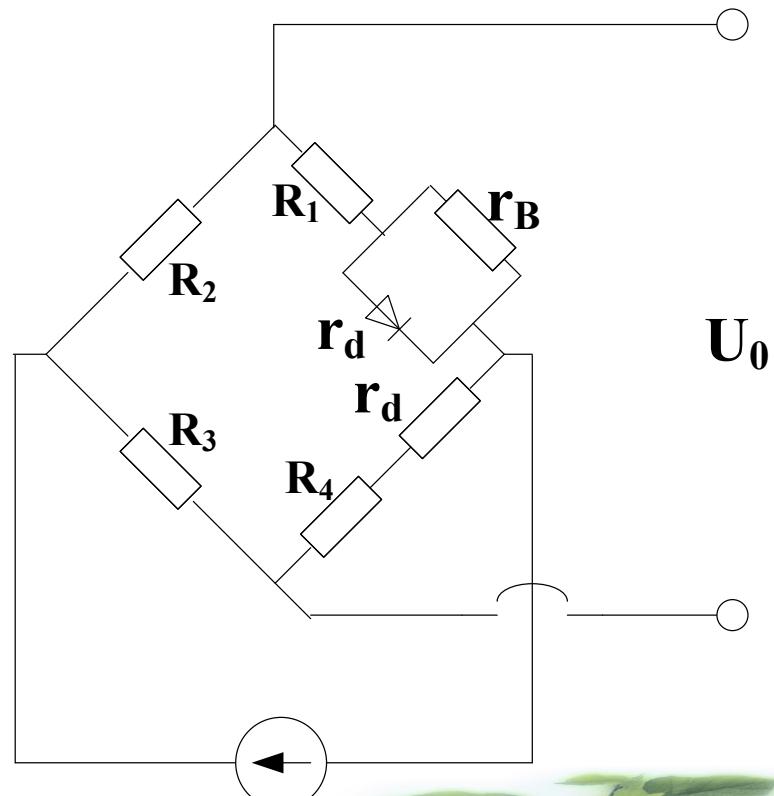
vi) 二极管补偿法（P-N结等效为一个负温度系数的电阻）

$$I = I_S (e^{qv/kt} - 1)$$

I_S ：P-N结反向饱和电流。

r_B ：为改善非线性而并联，

$r_d < r_B$ ， r_d ：动态电阻。





b) 灵敏度温度漂移的补偿

主要是由于压敏电阻的压阻系数随着温度变化引起的。

恒流源供电: $U_{BD} = I_0 \Delta R = I_0 G \varepsilon R$;

恒压源供电: $U_{BD} = \frac{\Delta R}{R} U = U G \varepsilon$ 。

$G = \pi E$, 材料的G因子, 具有负温度系数。灵敏度温度漂移的补偿主要是采用拼凑补偿。

i) 选择合适的掺杂浓度

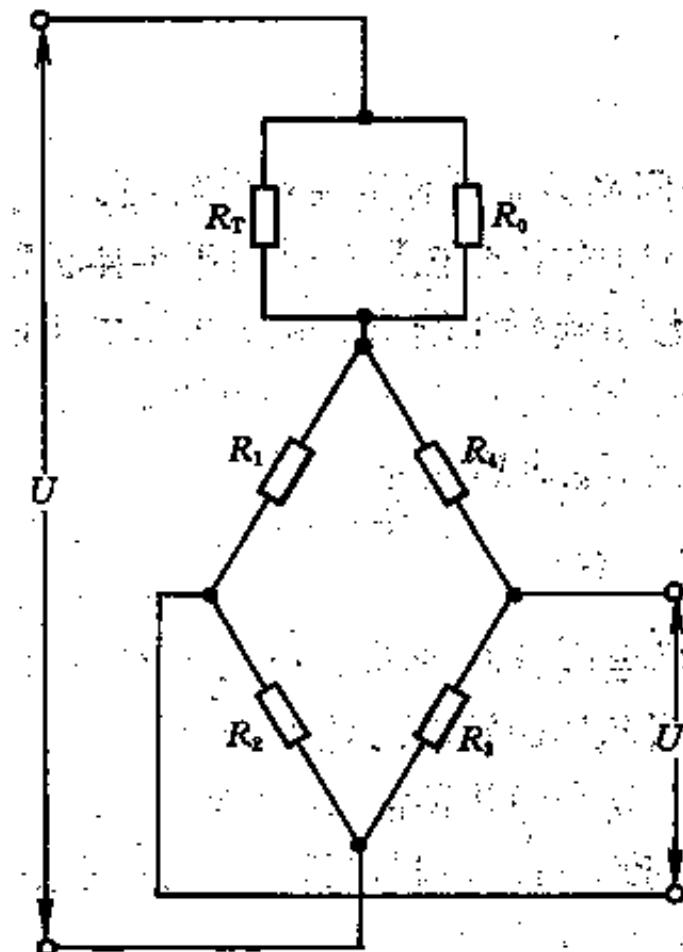
由于电阻R具有正温度系数, 通过合适的掺杂浓度, 可使G与R之间在一定范围内达到相互补偿的目的。

ii) 正温度系数恒压源补偿法

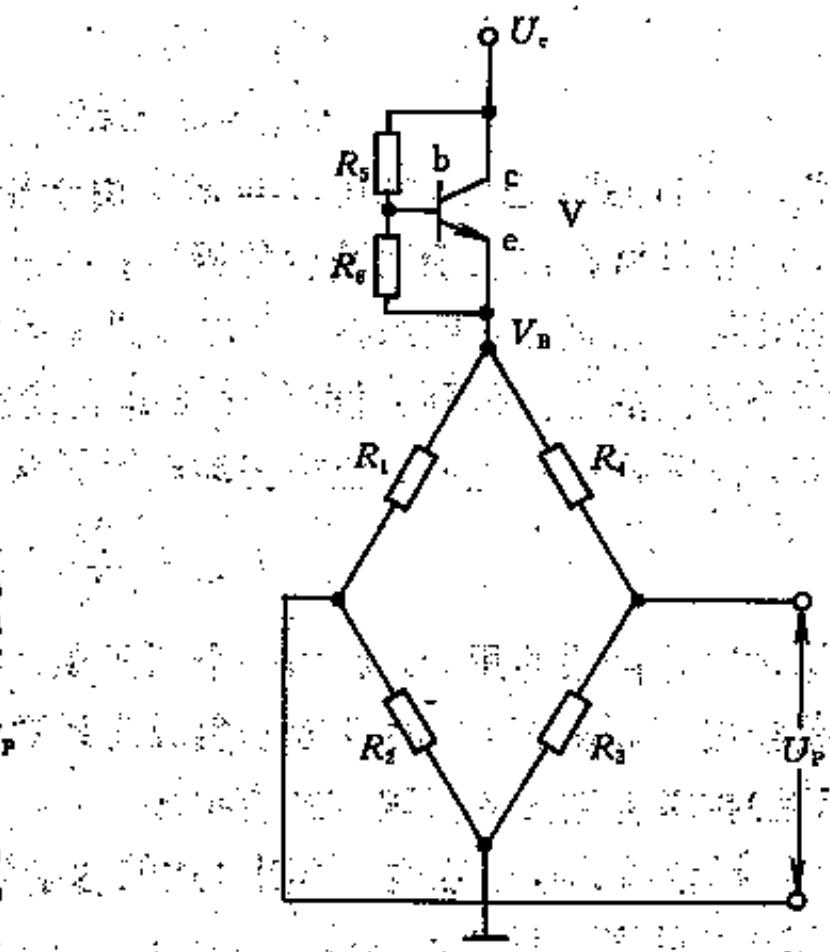
前面介绍的温度漂移补偿法中: 热敏电阻法(利用负温度系数)和二极管法均可适用。

热敏电阻补偿法的要求: 提高电源电压; 热敏电阻与桥路电阻处于同一温度场中。





正温度系数恒压源补偿电路



灵敏度温漂补偿电路





另外还有三极管补偿法（见下图）：

$$U_{ce} = U_{be} \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \quad U_B = U_C - U_{be} \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right)$$

$$T \uparrow \rightarrow U_{be} \downarrow \rightarrow U_B \uparrow$$

该方法简单，补偿效果好。

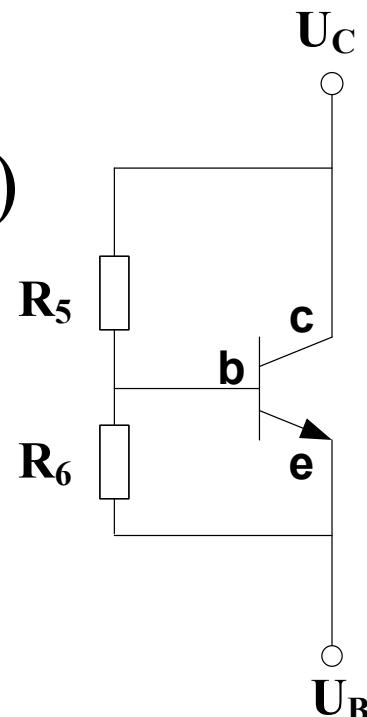
R_5 / R_6 具体取值的公式推导过程如下：

对于全桥测量电路，

$$\frac{\Delta R}{R} = G \varepsilon \quad G = G_0 (1 + \beta t)$$

$$U_{be} = U_{be0} (1 + \alpha t)$$

$$U_P = \frac{\Delta R}{R} U_B = \frac{\Delta R}{R} \left[U_C - U_{be} \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \right]$$





令: $R_5/R_6 = n$, 则:

$$U_p = G_0 \varepsilon (1 + \beta t) [U_C - U_{be0} (1 + \alpha t) (1 + n)]$$

当不随温度变化时, 即达到最佳温度补偿的目的, 即:

$$\frac{dU_p}{dt} = G_0 \varepsilon \{(1 + \beta t)[-U_{be0}(1 + n)\alpha] + \beta[U_C - U_{be0}(1 + \alpha t)(1 + n)]\} = 0$$

$$n = \frac{U_C \beta}{U_{be0}(\alpha + \beta + 2\alpha\beta t)} - 1$$

式中, U_{be0} 一般取0.7V, 温度每升高1°C, U_{be} 下降2.4mV, 故:

$$\alpha = \frac{U_{be} - U_{be0}}{U_{be0}t} \approx -3.4 \times 10^{-3} / ^\circ C$$





一般 β 取值为, $-3 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, 因此:

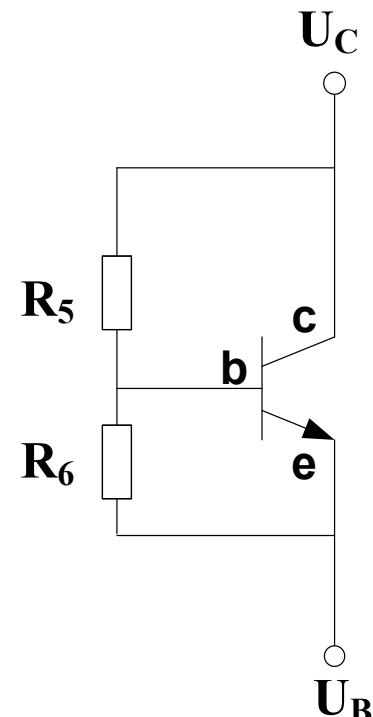
$$\text{n} = \frac{2}{3} U_C - 1$$

iii) 温度漂移的三点补偿法

确定三个温度点, 在这三点对传感器的零点漂移和零点温漂以及灵敏度温漂进行补偿, 亦即达到综合补偿的目的。

三点补偿法主要工作是通过选取合适的三个工作温度点, 测得四个桥臂电阻对应待测压力为零和满量程时的电阻值以及补偿热敏电阻网络中热敏电阻的值, 然后计算出补偿热敏电阻网络中固定电阻的值。

对于补偿网络的具体计算方法及公式推导参见参考教材中的相关内容。





iv) 温度漂移的双桥补偿

目的：避免上面所述的热敏电阻网络补偿法的缺点（补偿元件与补偿对象需处于同一温度场），增加了传感器的尺寸。

这有点像前面所述的差分信号输出的概念，它分为两部分：一部分为敏感电桥即测压电桥；另一部分为感温电桥，它们各自输出的电压信号经放大器放大后，经模拟运算器相加或相减再输出。经该方法补偿后，零位温漂可由 $-1 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ 达到 $-1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。

2) 一种具有温度补偿功能的混合集成压力传感器

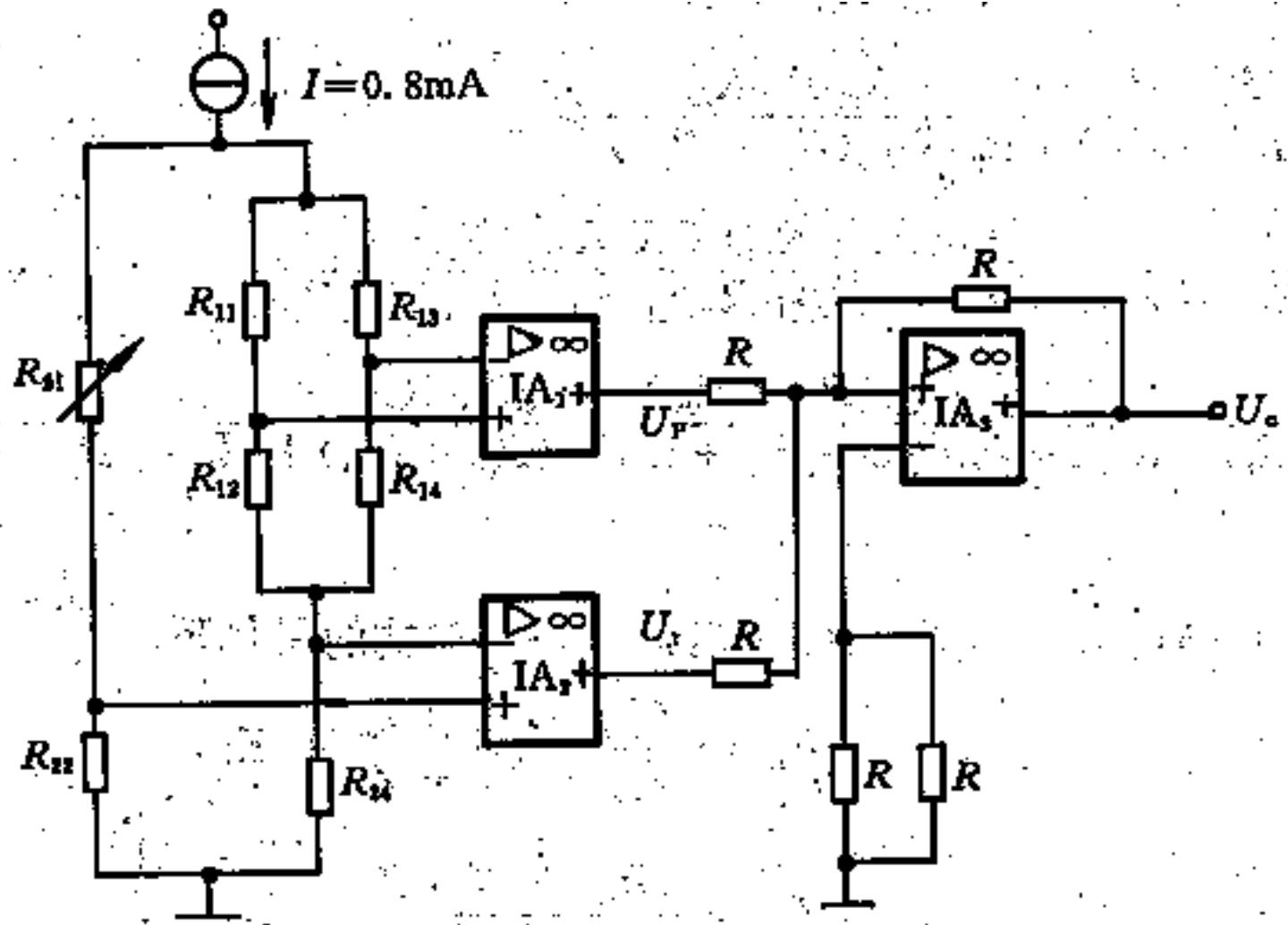
单片集成方式难以准确补偿零位时漂、温漂以及灵敏度温漂。

构成：敏感元件+零位温漂补偿电路+零位调节电路+灵敏度温漂补偿电路+信号放大电路

a) 压力敏感元件

$$P=1 \text{ atm}, U=6V, U_{BG}=10 \sim 20 \text{ mV}, T_Z > 1\% \text{ FS}/^\circ\text{C}, T_S > 0.5\% \text{ FS}/^\circ\text{C}$$





双桥补偿电路





b) 零位温漂补偿电路

由 R_P 来实现, R_P 并接在桥臂电阻上, 该桥臂电阻随温度的变化率改变量为:

$$|\Delta X| = \frac{4\Delta U_0}{U_E}$$

在前面的讲述中, 我们曾就并接电阻后, 桥臂电阻随温度的变化率与桥臂电阻、并联电阻之间关系式作过推导, 可根据此式求出 R_P 的值。

c) 灵敏度温度补偿电路

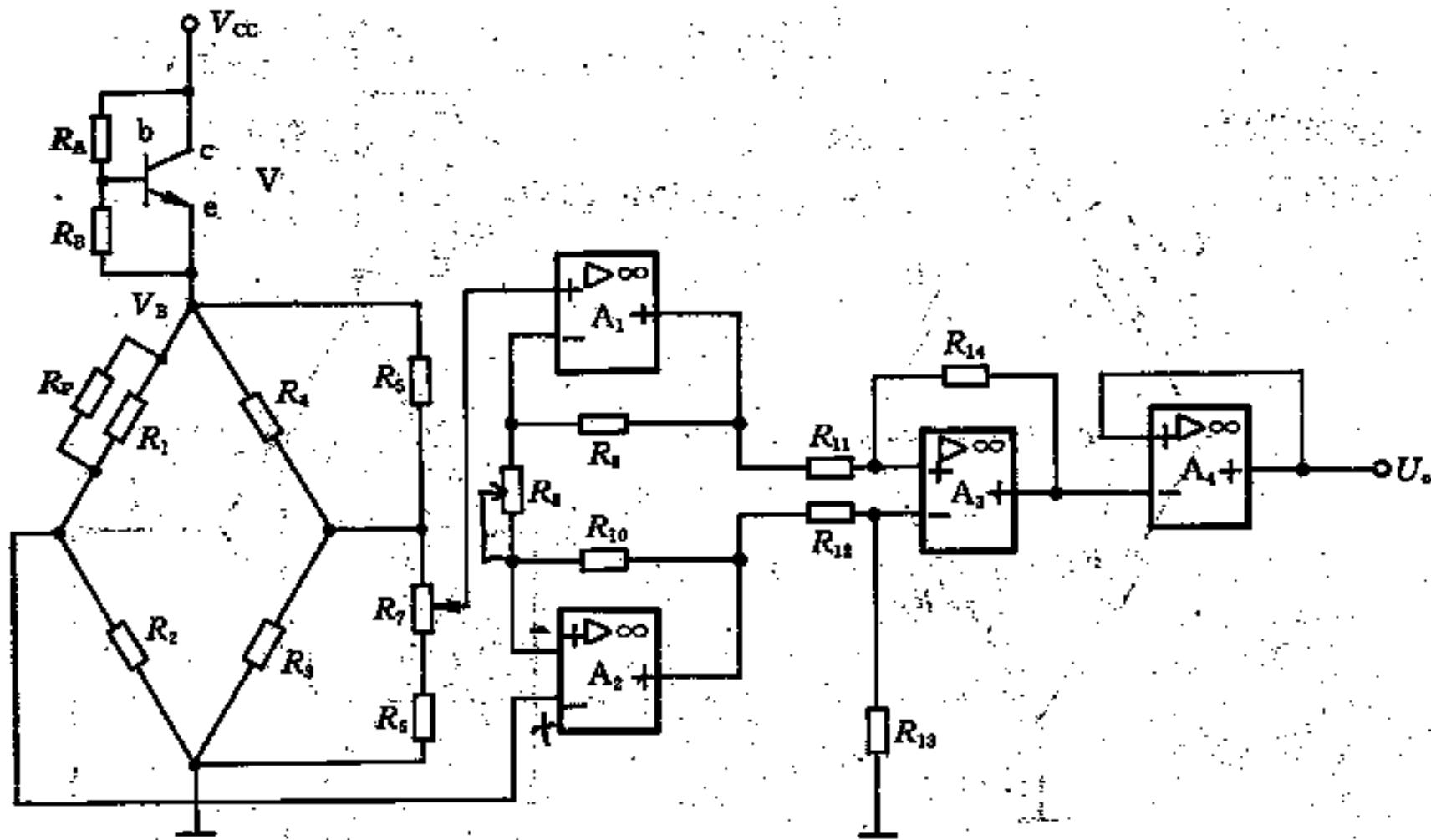
采用三级管并接旁路电阻的形式, 具体补偿参数的选择可参照《力学量敏感器件及应用》书中有关内容。 R_A 、 R_B 的选择应满足:

$R_B V_{CC} / (R_A + R_B + R_0)$ 在 $1 \sim 2V$ 之间, R_0 为桥路的等效输入电阻:

$$\approx \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

d) 信号放大电路





混合集成压力传感器电路图





采用的是同相并联差动运算放大电路， A_4 ：改善最终的输出特性。

e) 零位时漂调整电路

由 R_5 、 R_6 、 R_7 构成。上述各补偿电路在实际使用中需考虑一下几点因素：

- i) 相互之间的影响关系；
- ii) 补偿及调整的先后次序；
- iii) 工作点的选择；
- iv) 增加适当的可调整环节。

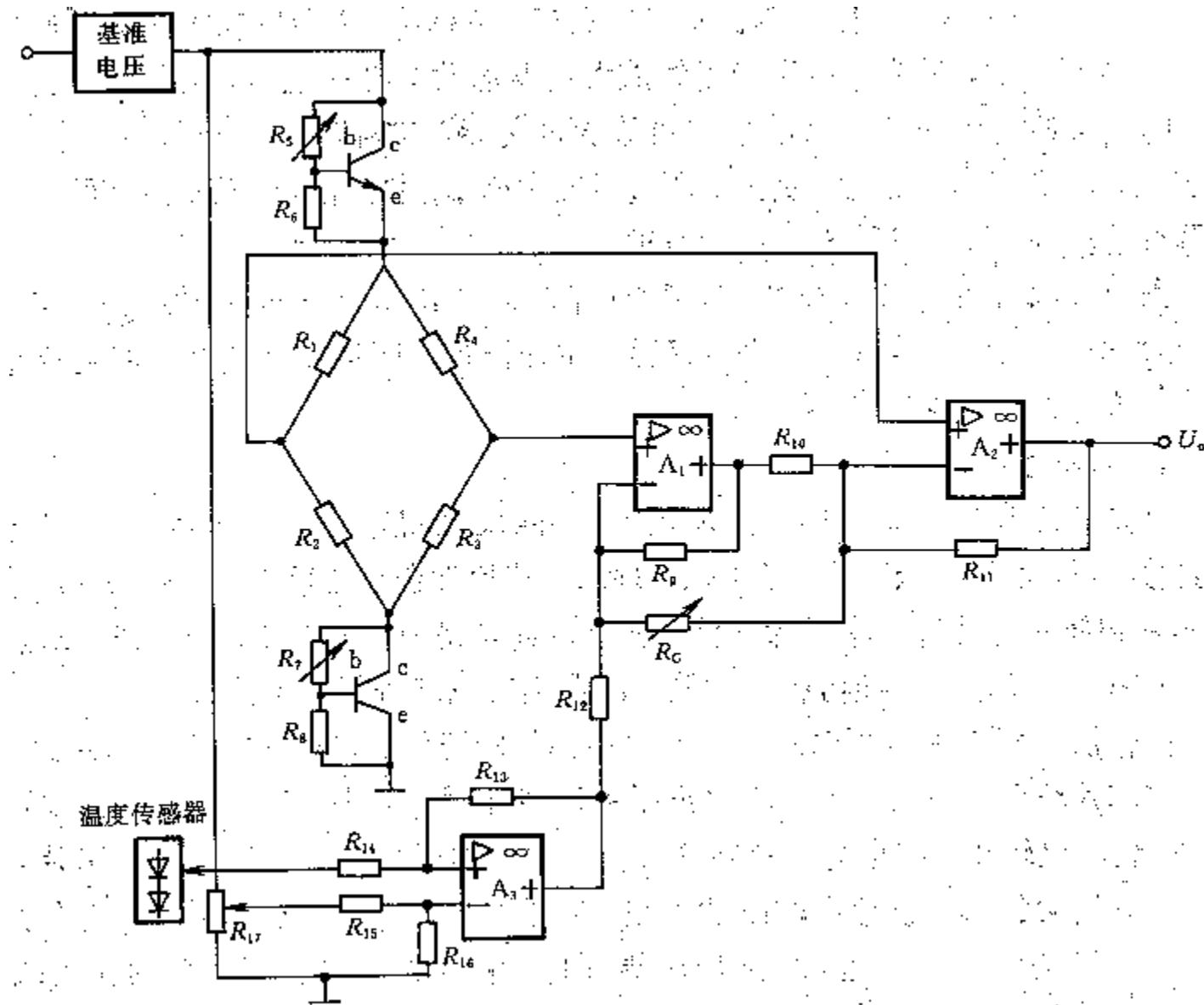
补偿结果： $T_Z = 0.1\% \text{FS}/^\circ\text{C}$ ， $T_S = 0.04\% \text{FS}/^\circ\text{C}$ ， $U_0 = 1 \sim 2\text{V}$ 。

2、一种带有信号调理电路的混合集成压力传感器

构成：

敏感元件 + 放大器（同相串联差动运算放大器）+ 温度补偿电路
在下图中，





压力传感器电路图





- 1) $R_1 \sim R_4$ 构成压阻全桥，通过控制制作工艺，使之尽量保证好的使用性能；
- 2) 放大电路采用了同相串联差动运放，这样可使之具有高的输入阻抗和低漂移信号输出，亦即具有高的共模抑制比；
- 3) 电源采用带隙基准电压源，使之具有低的温度漂移；
- 4) 灵敏度温度补偿采用上下对称的晶体管旁路电阻形式，这样在起到补偿作用的同时，保证电桥输出的共模电压在整个温度范围内为一常数，**为什么？**
- 5) 零位温漂补偿采用了可调的多个二极管组合的温度传感器；
- 6) 零位输出值通过 R_{17} 和 A_3 来进行调节；
- 7) 该集成传感器共有四块IC芯片采用厚膜技术集成为一体。





作业6

给出前置放大器、自稳零放大器、隔离放大器、仪表放大器的基本结构，说明其主要性能特点。





3、数字补偿电容式压力传感器

1) 构成: 传感器芯片=传感电容+参考电容+C—F转换器, 其中的C—F转换器为电容控制的方波振荡器。

数字电路部分主要是将频率信号转换为数字量输出。

2) 工作原理

在小量程范围内, 电容极板间隙的变化量可以等效为: $W = K\Delta P$

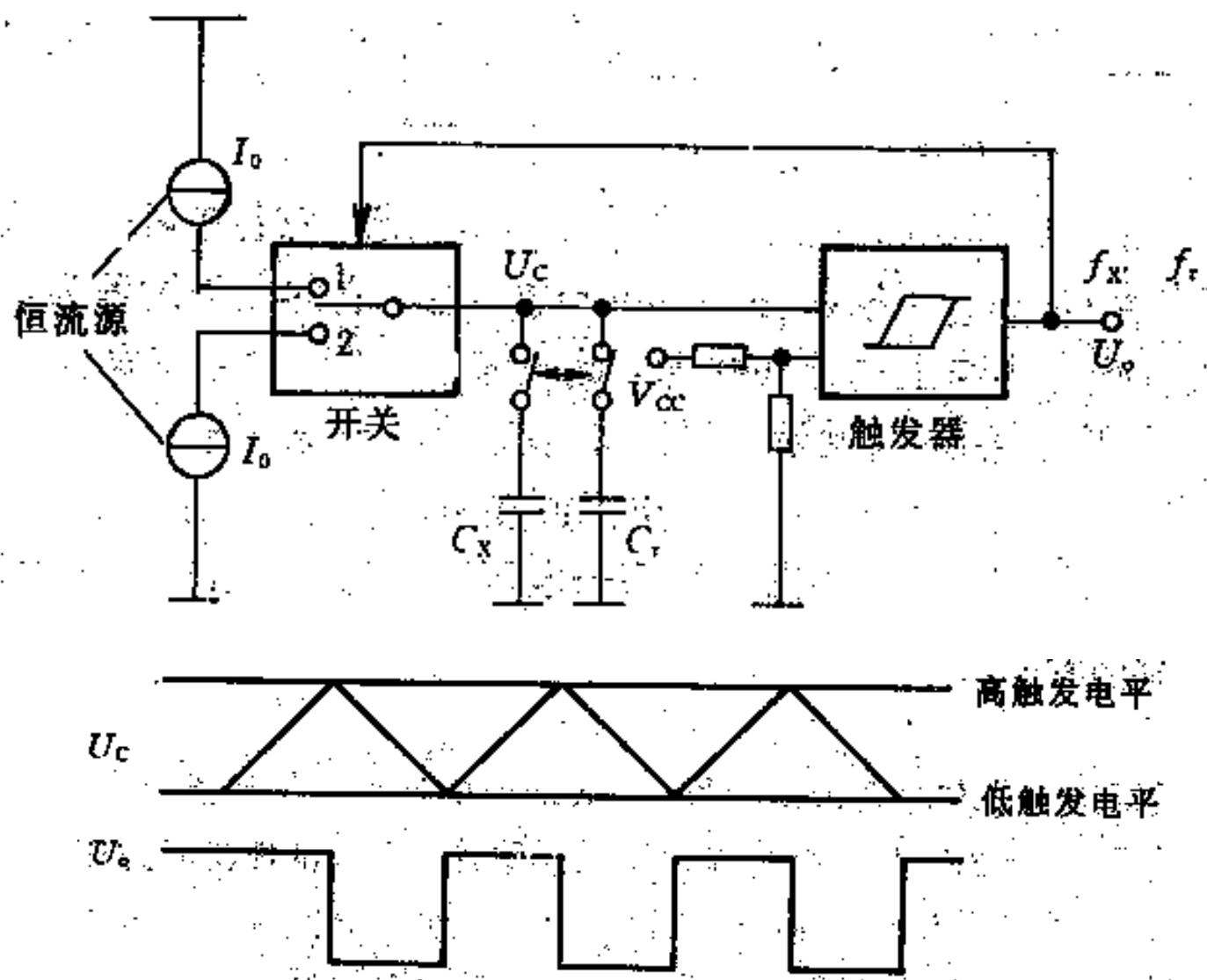
K : 为与膜片尺寸有关的常量。前面的分析表明, 相应于电容 C_0 , 它的输出频率为: $F_0 = \frac{I_x}{2C_0U_h}$, I_x : 充放电电流, U_h : 翻转电压值。

无压力作用与有压力作用时的频率差: $\Delta F = \frac{I_x K \Delta P}{2 C_0 U_h d}$,
d: 极板初始间隙。这说明压力差与频率差之间的线性关系。

3) 补偿技术

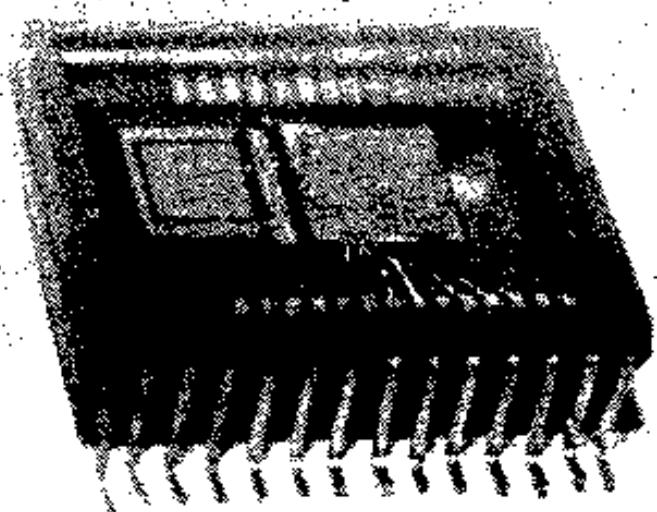
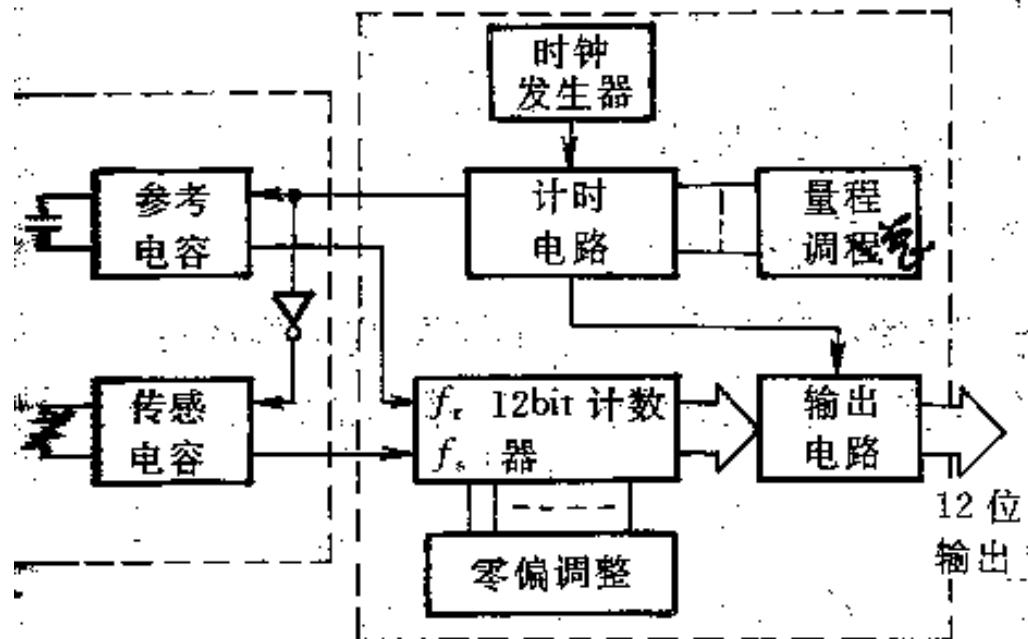
指导思想: 先在结构上进行补偿, 然后通过后续电路进行补偿。





电容控制的方波振荡器式压力传感器





电容式压力传感器结构图及实物照片



假设: $\Delta P = 0$ 时, $C_x = C_0$, $Q_x = Q_0$, ($Q = \frac{1}{2CU_h}$);

在 ΔT 温度变化范围内: 参考电容的电流温度系数为 α_{I_0} , Q_0 的温度系数为 α_{Q_0} , 传感电容的电流温度系数为 α_{I_x} , K 的温度系数为 α , 略去中间推导过程, 则有:

$$\Delta F_x = I_0 Q_0 (\alpha_{I_0} - \alpha_{I_x}) \Delta T + \frac{I_0 Q_0 K}{d} [1 + (\alpha_{Q_0} + \alpha_{I_x} + \alpha) \Delta T] \Delta P$$

a) 灵敏度温度漂移的补偿

通过调整 C_x 的 U_g 值, 使: $\alpha_{I_x} = -(\alpha_{Q_0} + \alpha)$ 。

b) 零点温漂的补偿

通过调整 C_0 的 U_g 值, 使: $\alpha_{I_0} = \alpha_{I_x}$ 。

c) 实际上 $C_x \neq C_0$, 因此仍存在零点输出。





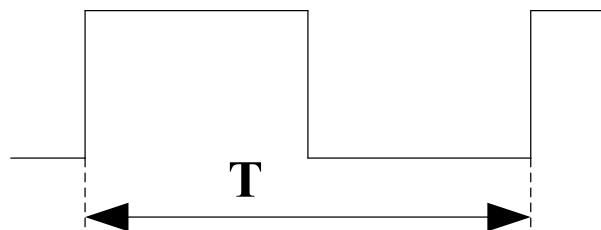
4) 数字调整技术

a) 讲述通过计数器进行差频计数的方法：递增计数（ C_0 ）与递减计数（ C_x ）

b) 讲述零点输出数字补偿的方法：预置初值。

c) 量程调整的方法

改变计时电路的计数时间。



5) 传感器的制作工艺

a) 制作传感器膜片和电容的下电极；用CMOS工艺制作相应电路。

b) 上下玻璃按要求进行加工，其中上层玻璃制作电容的上电极及引线等。

c) 硅片与上下玻璃之间的键合。

d) 切成单个芯片。



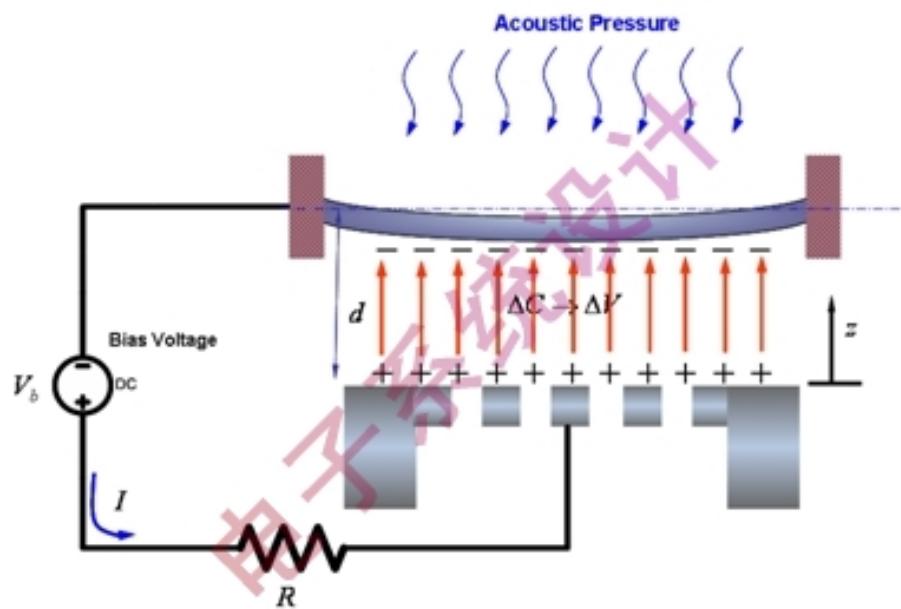


图1：电容式微麦克风原理。

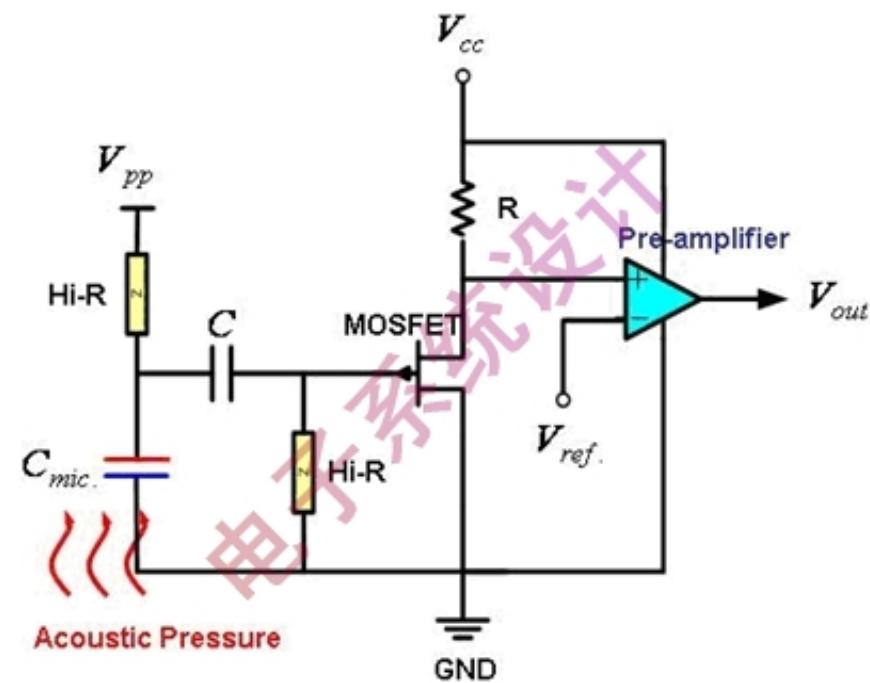


图2：微麦克风电路设计简图。

电容式压力传感器用于微麦克风设计





§ 3.3 集成化智能传感器系统的中级形式

§ 3.3.1 ST-3000型智能变送器

PROM：可编程的只读存贮器，E²PROM：电擦除可编程只读存贮器；特点：在计算机系统中进行在线修改，能在断电情况下保持修改结果。

特点：可进行差压、静压、温度三种量的测量；

在初级的基础上增加了微处理器、存储器、I/O接口；

输出信号：两种，一种是4~20mA标准模拟信号，另一种为数字信号。

性能：消除了交叉灵敏度的影响，使之具有高精度、高稳定性；

操作和使用：有点类似可编程控制器

1、结构与工作原理

1) 结构：传感器芯片（电桥+多路开关+A/D）及信号调理电路+微处理器系统（ROM+CPU+D/A+数字I/O）





2) 工作原理

主传感器： ΔP 传感器；辅助传感器：P、T；根据P值可确定工作点；

PROM存放：待测压力特征数据、环境温度特征数据、静压特征数据。

特征数据在生产线上检测校准时，由计算机采集预处理后送入PROM中。

2、性能特点

1) 宽量程化：

量程比：100: 1 (Max 400: 1)，一般传感器：10: 1

量程比是指最大量程与最小量程的比值。

2) 高精度和稳定性

模拟输出：0.075%FS，数字输出：0.0625%FS

作为对照：MOTOROLA公司的具有温度补偿、校正和信号调理电路的全集成单片硅压力传感器MPX4100和MPX5100系列（在0～+85℃范围内）只有1～5%的总精度，典型值为 ± 0.2%FS (25°C)。





3) 双向通信

由于它本身带有微处理器系统，所以比较容易实现现场与远程通信。

4) 自诊断功能

主要是检查系统的工作状态，便于发现问题和及时纠正。

5) 宽域温度及静压补偿

T: $-40^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$; P: $0 \sim 210\text{kgf/cm}^2 = 22\text{Atm}$

3、制作工艺流程

1) 芯片制备

2) 芯片检查

3) 芯片背面工艺，制作传感器

4) 装配测试

5) 制作主要设备

在这里大家只需建立这样一个概念：就是智能传感器是如何制作出





来的，有关加工的方法在第四章里作具体介绍。

4、SFC智能现场通讯器功能

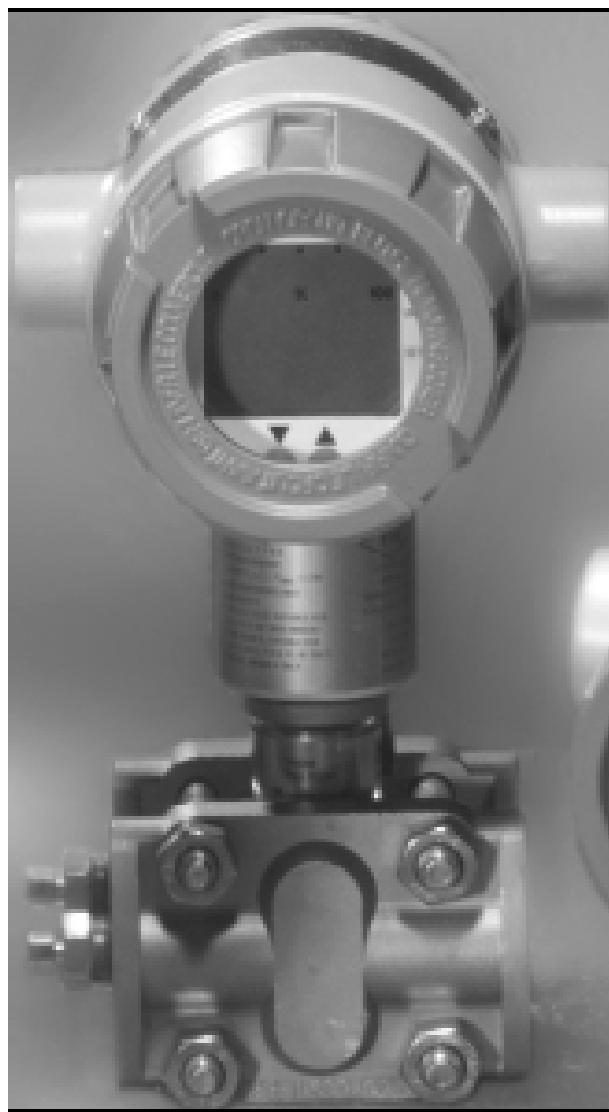
- 1) 组态：根据需要进行各种参数的预置（量程、输出单位、输出形式）
- 2) 诊断：前面已作过简单介绍
- 3) 校验：校验输出或整定零点。实际上现在已可以做到自整定。
- 4) 显示：显示有关信息，以便了解系统情况。
- 5) 远距离调节。

§ 3.3.2 具有微处理器（MCU）的单片集成压力传感器

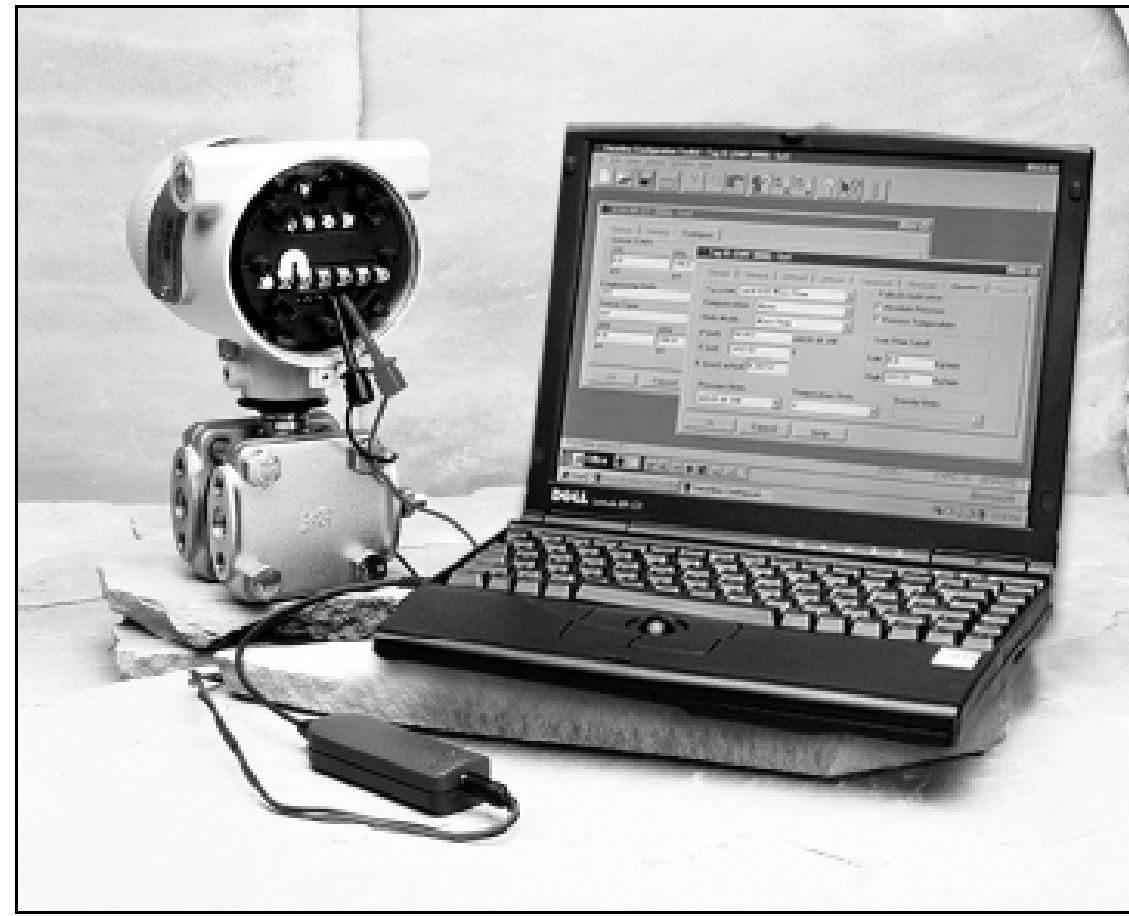
这一部分的内容与前面讲的内容大同小异，这里就不作介绍了，大家可以自己看一看参考教材，有什么问题可以提出来探讨。

下面给大家介绍国内研制的一种混合式的智能红外线测温仪。





ST-3000实物图



通过PC机进行现场组态





SFC智能现场通讯器

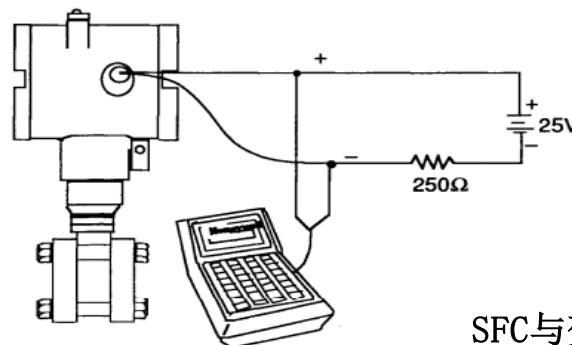
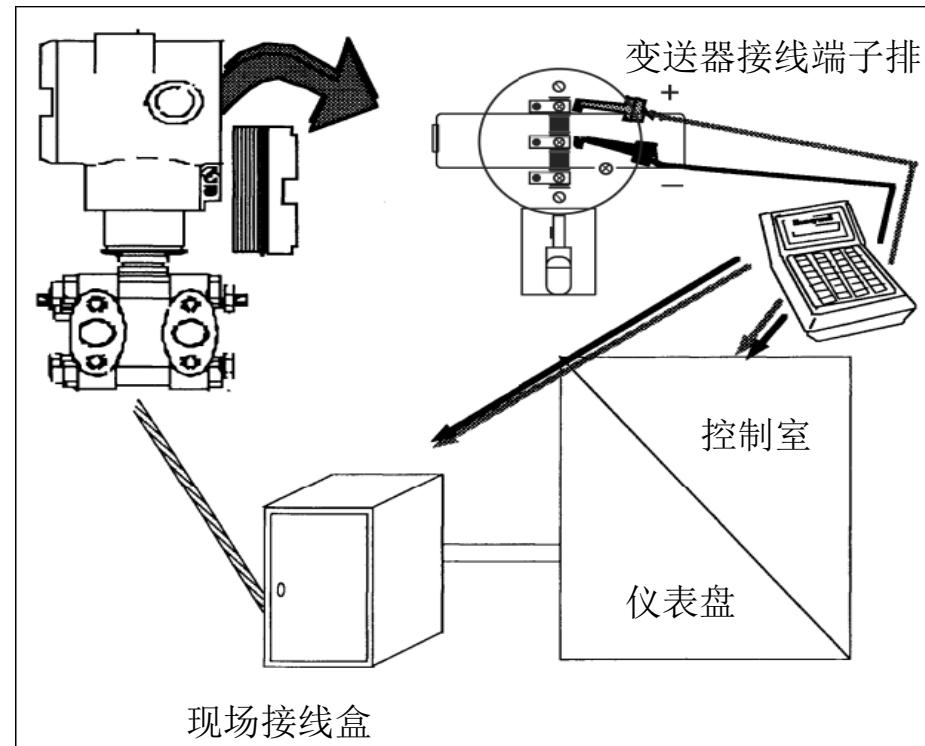


MCT多协议通讯器





SFC通过变送器
接线端子排、
现场接线盒、
控制室仪表盘、
与智能变送器
连接示意图

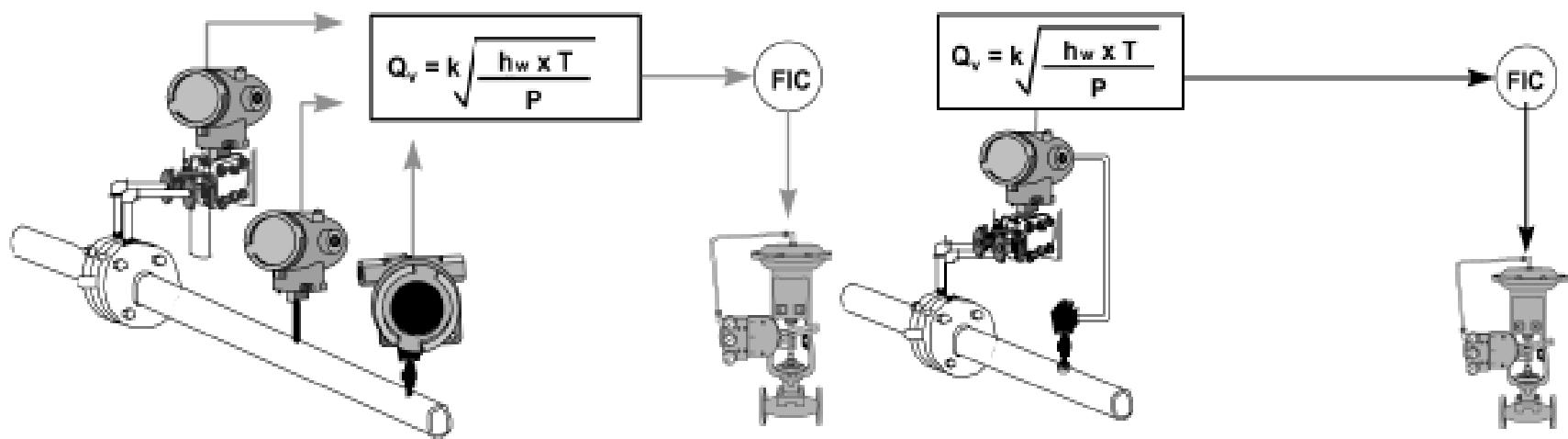


SFC与变送器信号线连接示意图





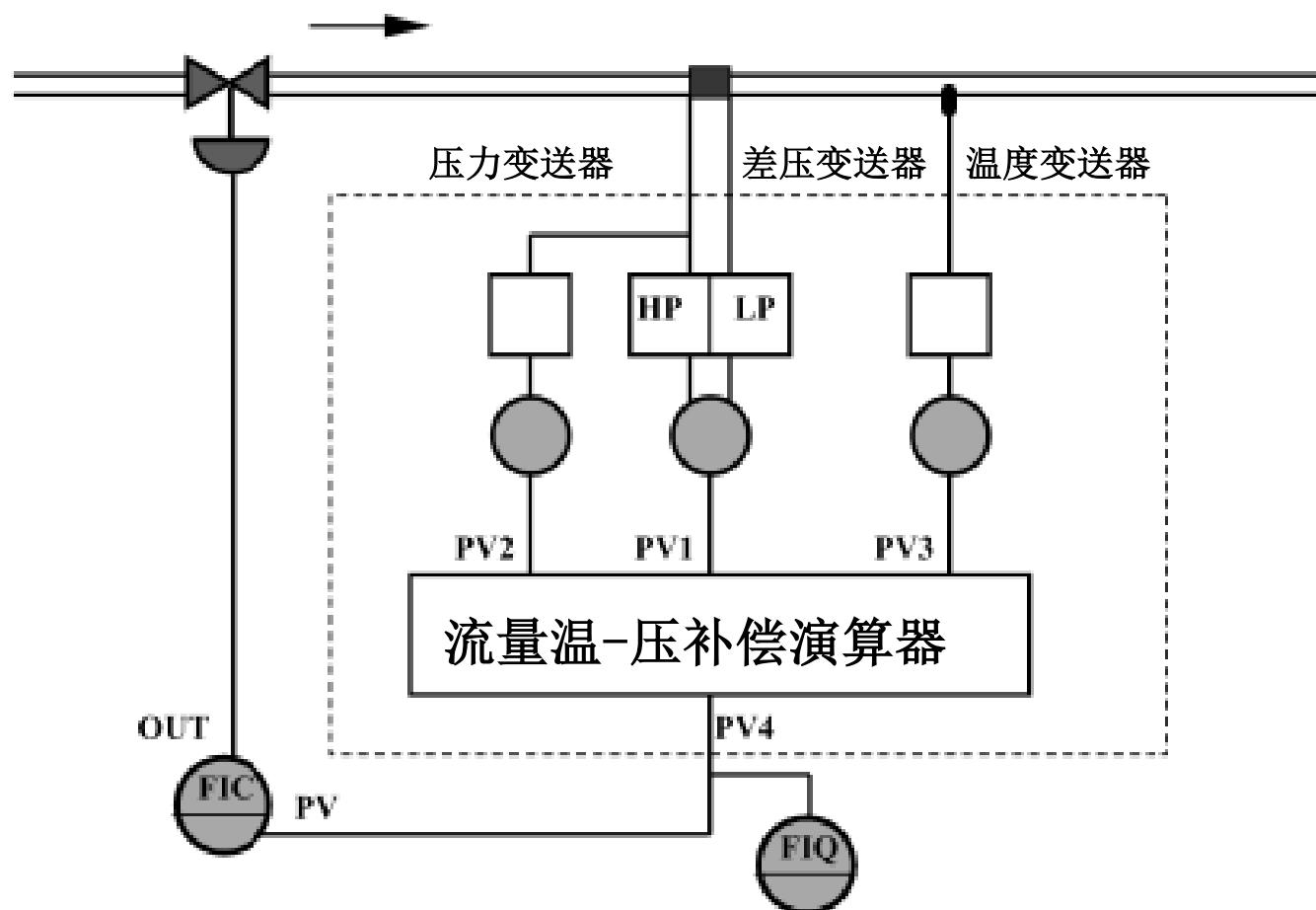
基于SMV3000/100系列全智能多变量变送器的流量测量



传统流量测量方法

多变量变送器流量测量方法





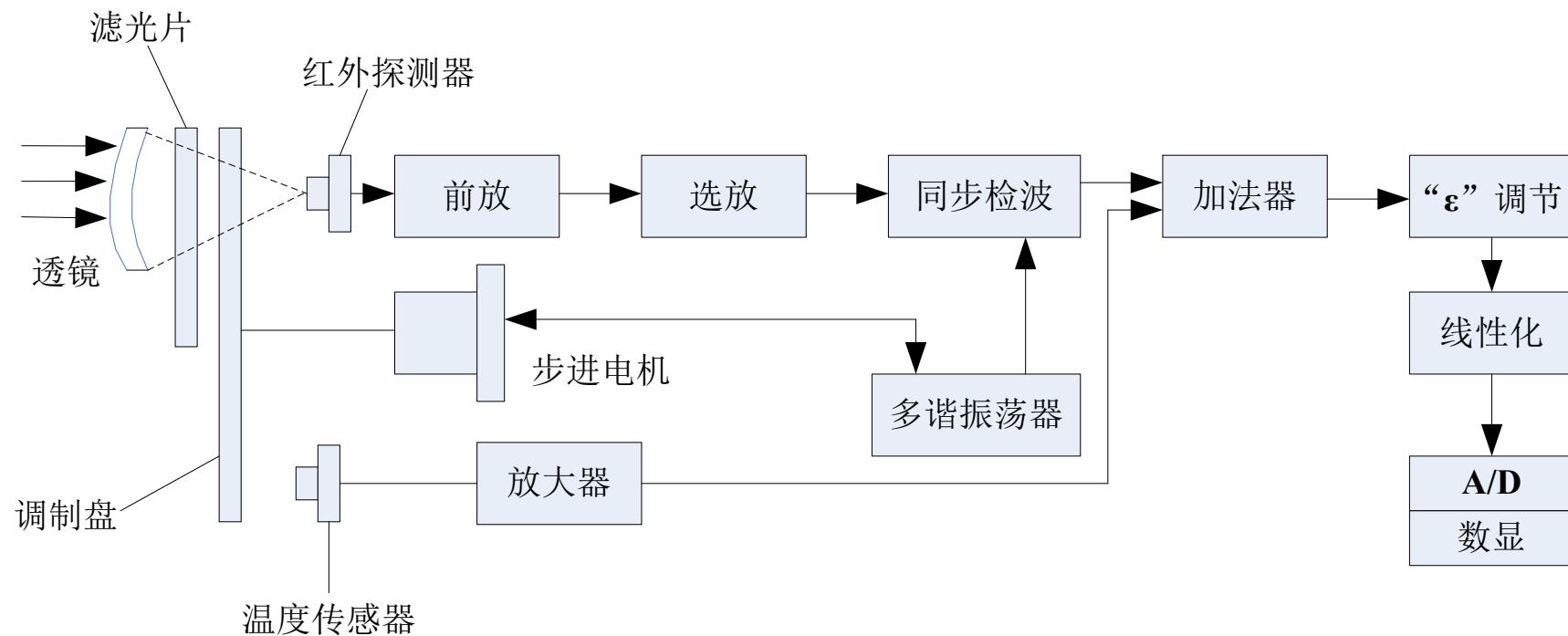
多变量变送器流量测量原理





1、传统的红外测温仪

1) 结构



- a) 滤光片：允许一定波长（ $8\sim14 \mu\text{m}$ ）的红外辐射通过；
- b) 调制盘：将恒定或缓变的红外辐射变换为交变辐射；
- c) 前放（前置放大器）：阻抗转换，信号放大；





- d) 选放（选频放大器）：只放大被调制的同频交流信号，抑制噪声；
 - e) 同步检波：包括倒相器、全波同步检波器、采样保持电路、滤波器等，将交流信号转换为峰—峰值的直流信号输出；
 - f) 加法器：将环境温度信号与测量信号相加，达到环境温度补偿的目的。
 - g) 发射率（ ϵ ）调节电路：黑体的 $\epsilon = 1$ ，当被测目标不是黑体， $\epsilon < 1$ 。该部分电路就是把相对减少部分恢复起来。
 - h) 线性化电路：因为物体的红外辐射与温度不是线性关系，所以要进行线性化处理；它由对数电路+乘法电路+反对数电路等组成；线性化后的测量信号与温度呈线性关系。
 - i) A/D变换器：模拟量→数字量，然后由数码管显示。
- 2) 工作原理

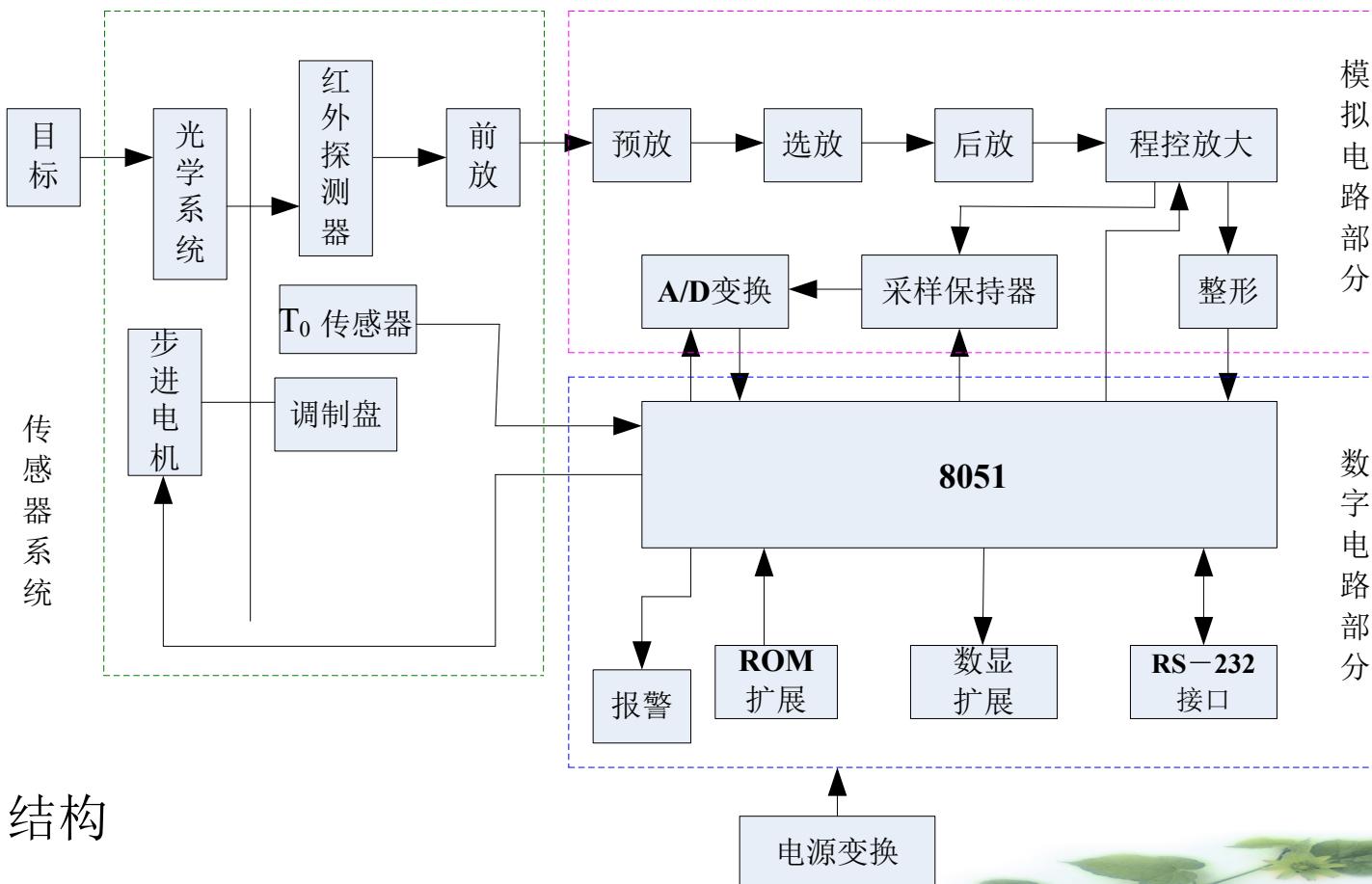
应用斯蒂芬—玻尔兹曼定律： $W = \epsilon\sigma T^4$





W: 单位面积的辐射功率; ϵ : 发射率, 0~1之间; σ : 斯蒂芬一玻尔兹曼常数; T: 物体的绝对温度。

2、智能式红外测温仪



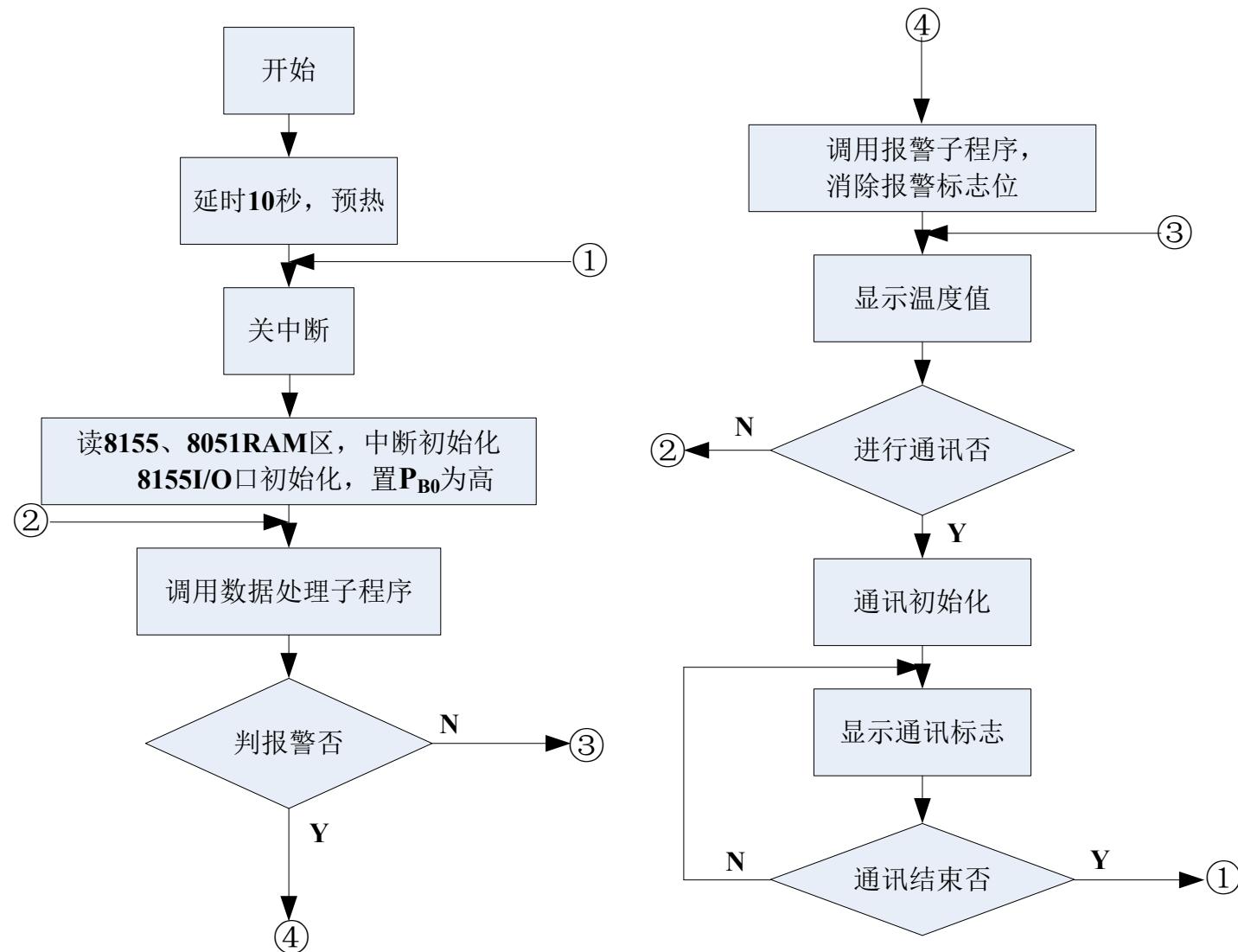
1) 结构



2) 功能

- a) 具有信息处理与计算功能；可用软件进行线性化处理；
 - b) 具有自调整功能；量程，数据修正；
 - c) 可直接输出数字信号，测量数据可方便的进行存取；
 - d) 具有通讯接口功能；
 - e) 可方便的对系数、参数进行修改设置（如报警值）；
 - f) 采用软件代替了部分比较复杂的硬件电路，如：同步检波、加法器、 ϵ 调节电路、线性化电路等；
 - g) 整体性能得到了大幅度的提高。
- 3) 工作程序流程（见下图）







§ 3.4 集成化智能传感器的高级形式

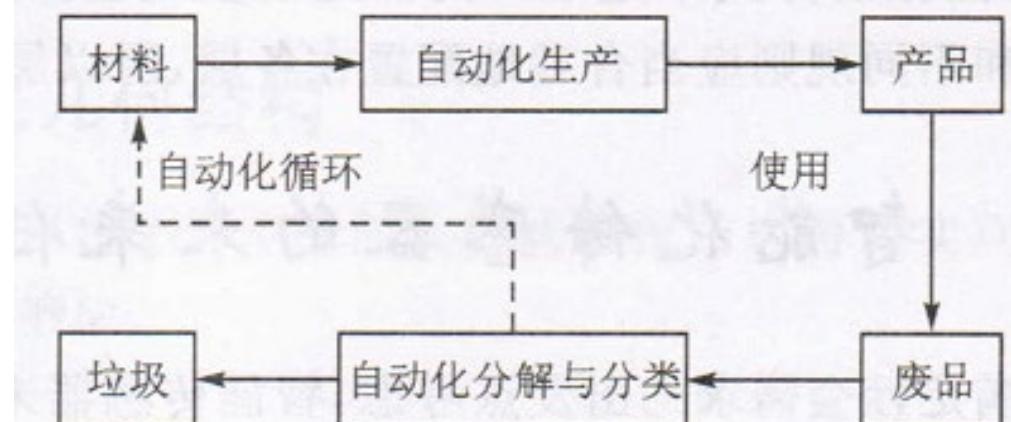
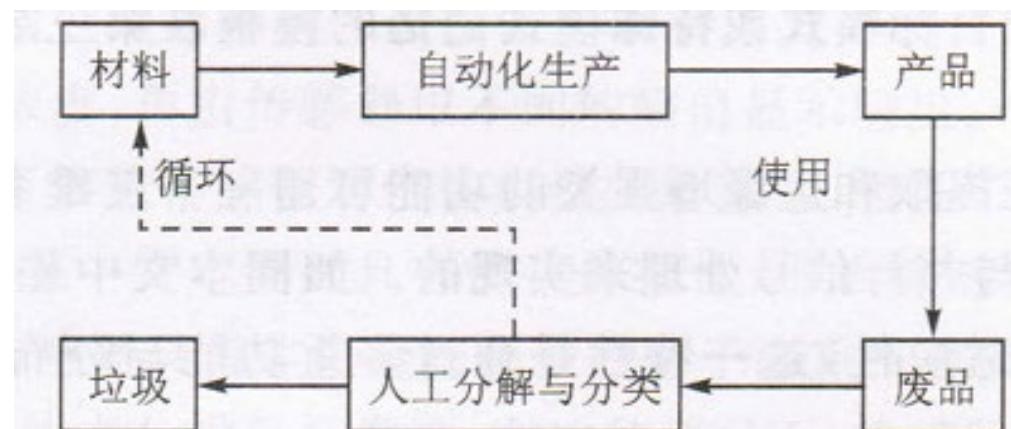
前面我们简单的介绍过高级形式的功能特点，即最终将达到和超过人类“五官”对环境的感测能力，部分代替人的认识活动；但目前已能够进行多维检测，图像显示及识别等。

大规模集成电路技术的快速发展将使具有学习能力的高度集成的先进传感系统得到进一步的发展和完善；神经网络与光导并行处理方式将有效地克服智能化传感器在适应性与金属线传输方面的限制。

智能传感器未来的任务：

- 1) 应用机器智能的故障探测和预报；
- 2) 目标成分分析的远程传感；
- 3) 用于资源有效循环的传感器智能。

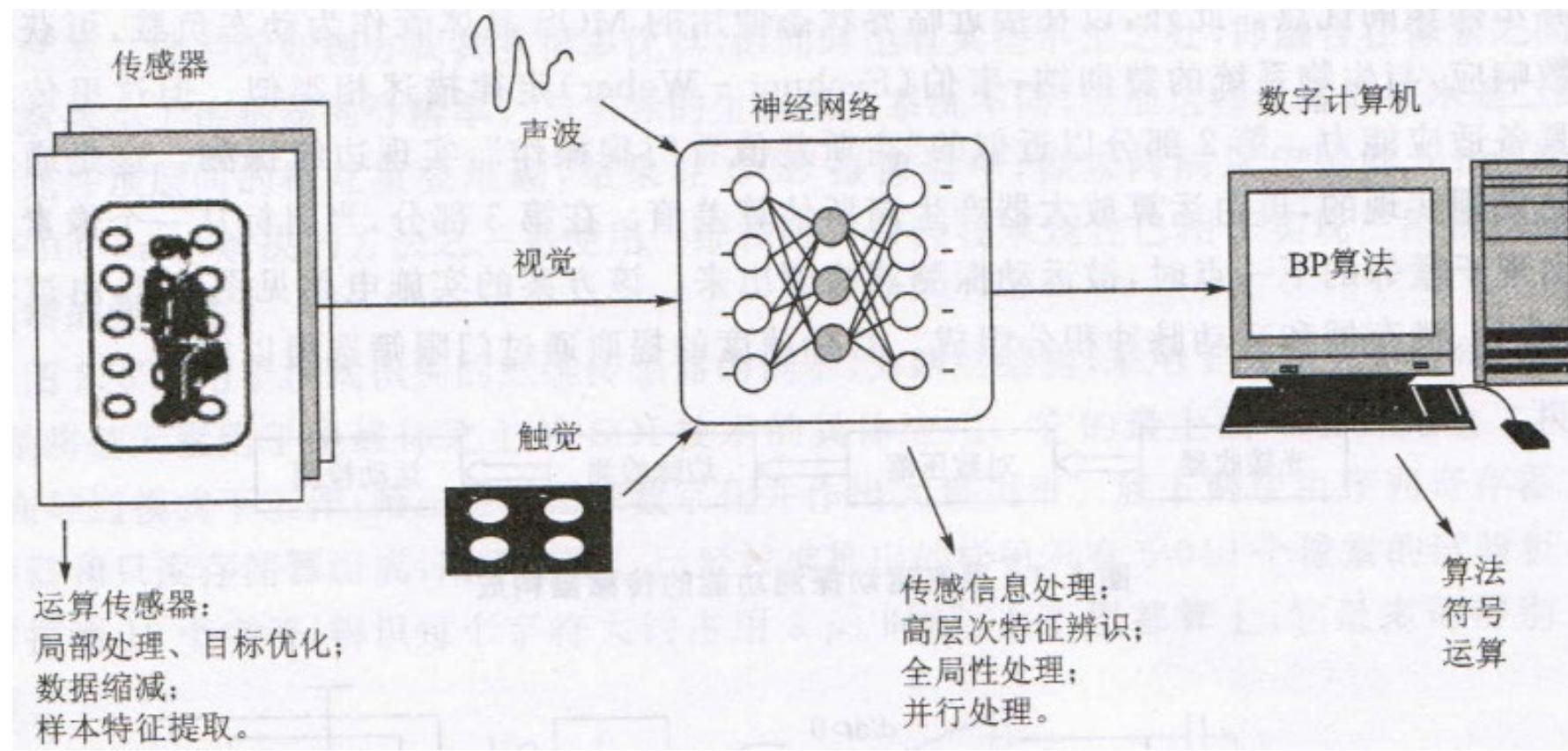




(b) 未来：利用自动化分解与分类的生活循环资源管理

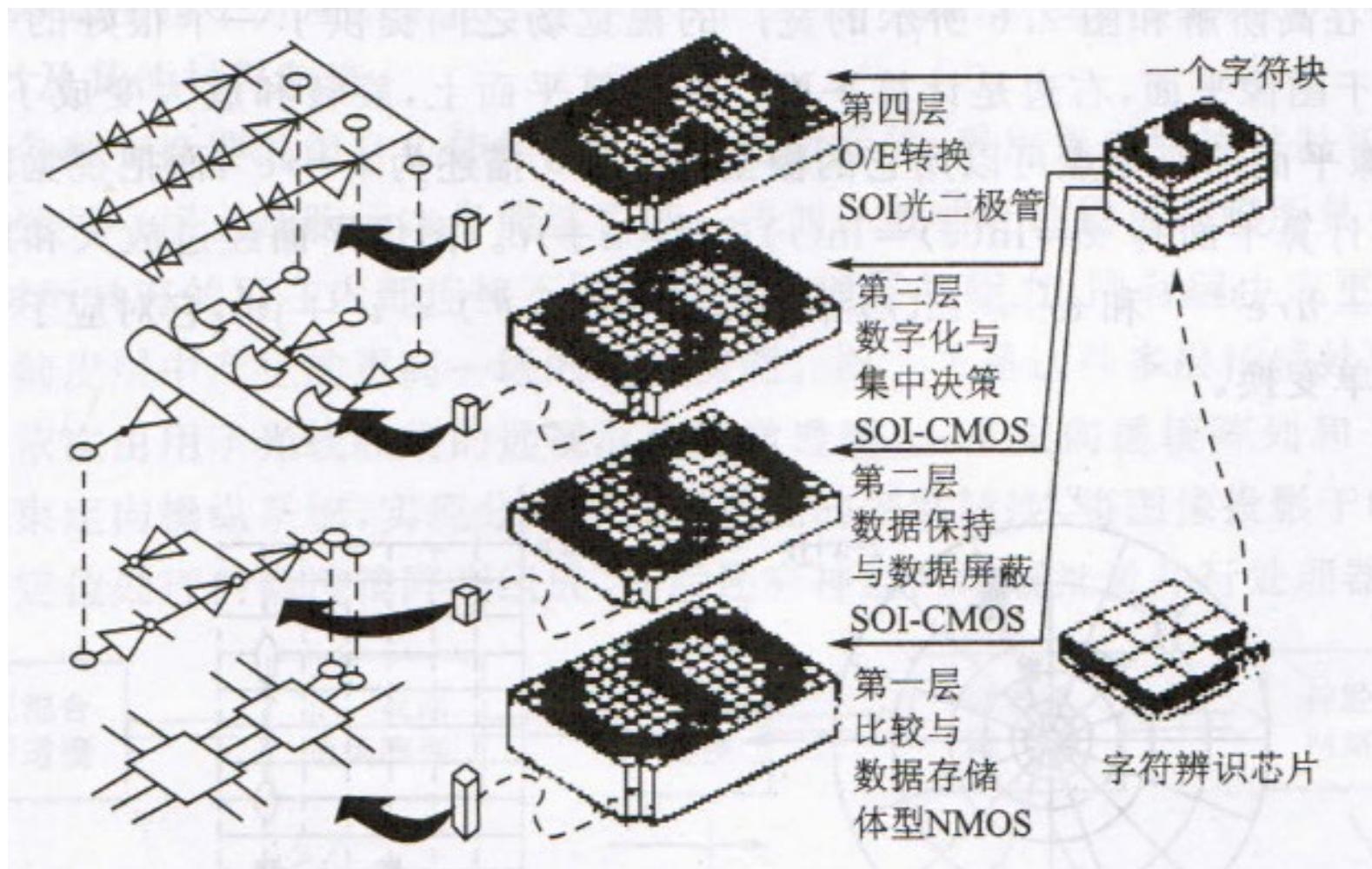
利用智能传感的先进资源循环系统





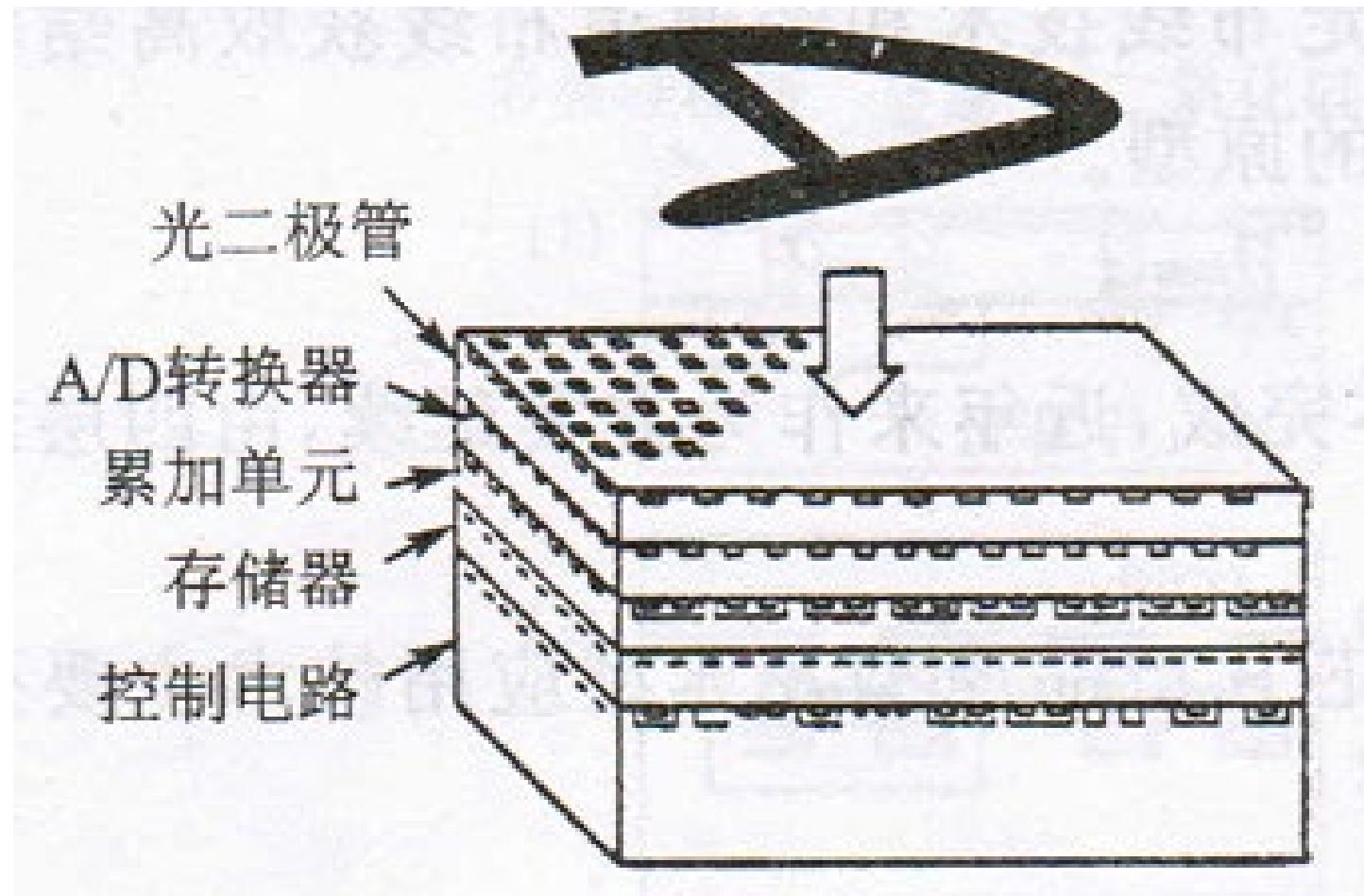
由计算型传感器、神经网络和数字计算机组成的传感处理系统





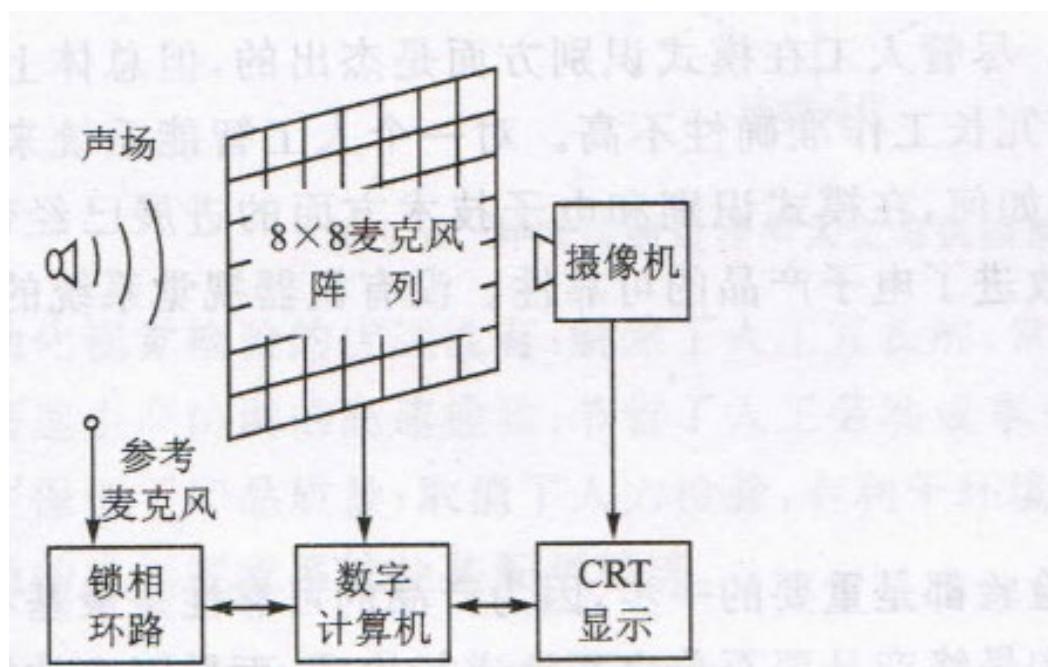
四层结构的三维字符辨识芯片示意



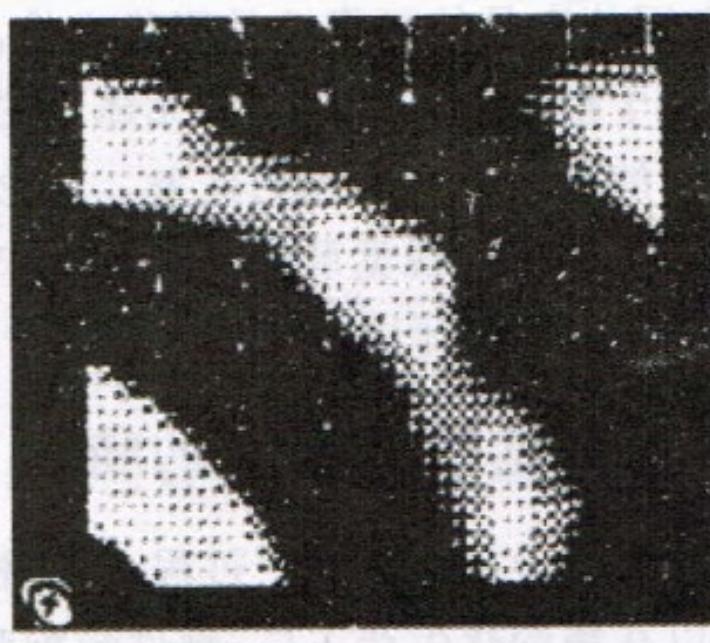


三维图像处理器

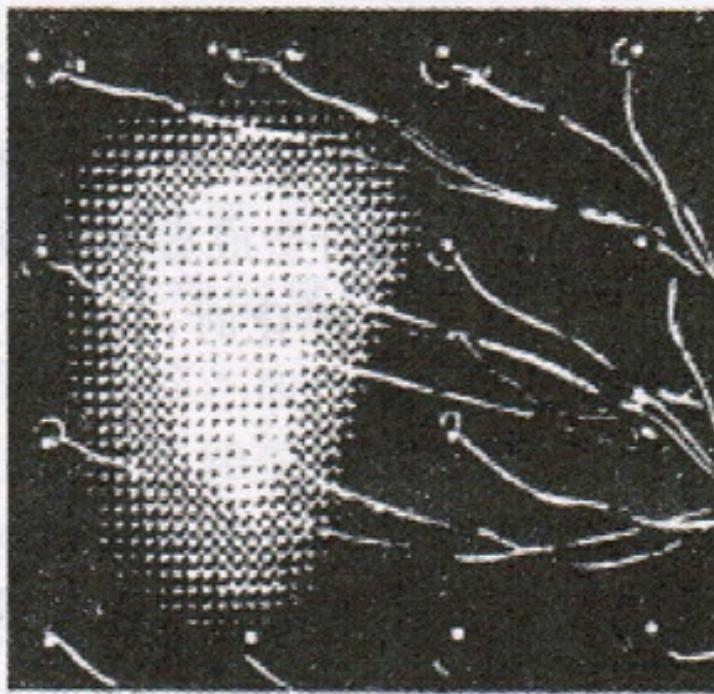




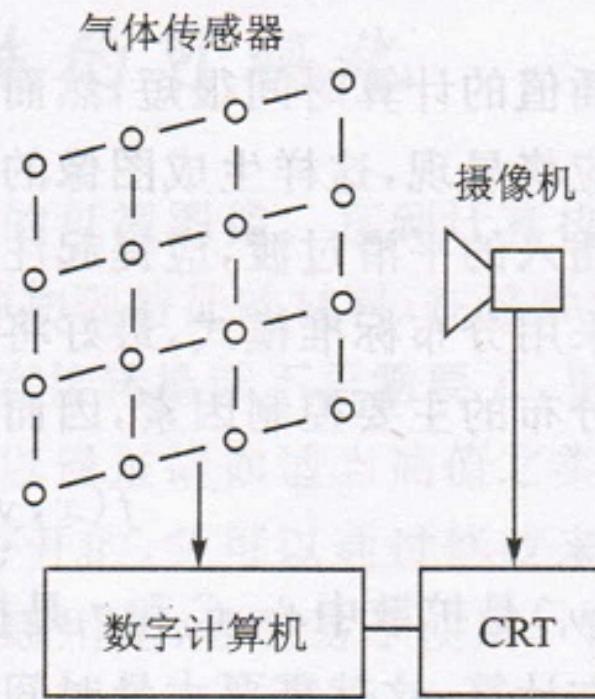
声场的可视系统



声音可视化的例子

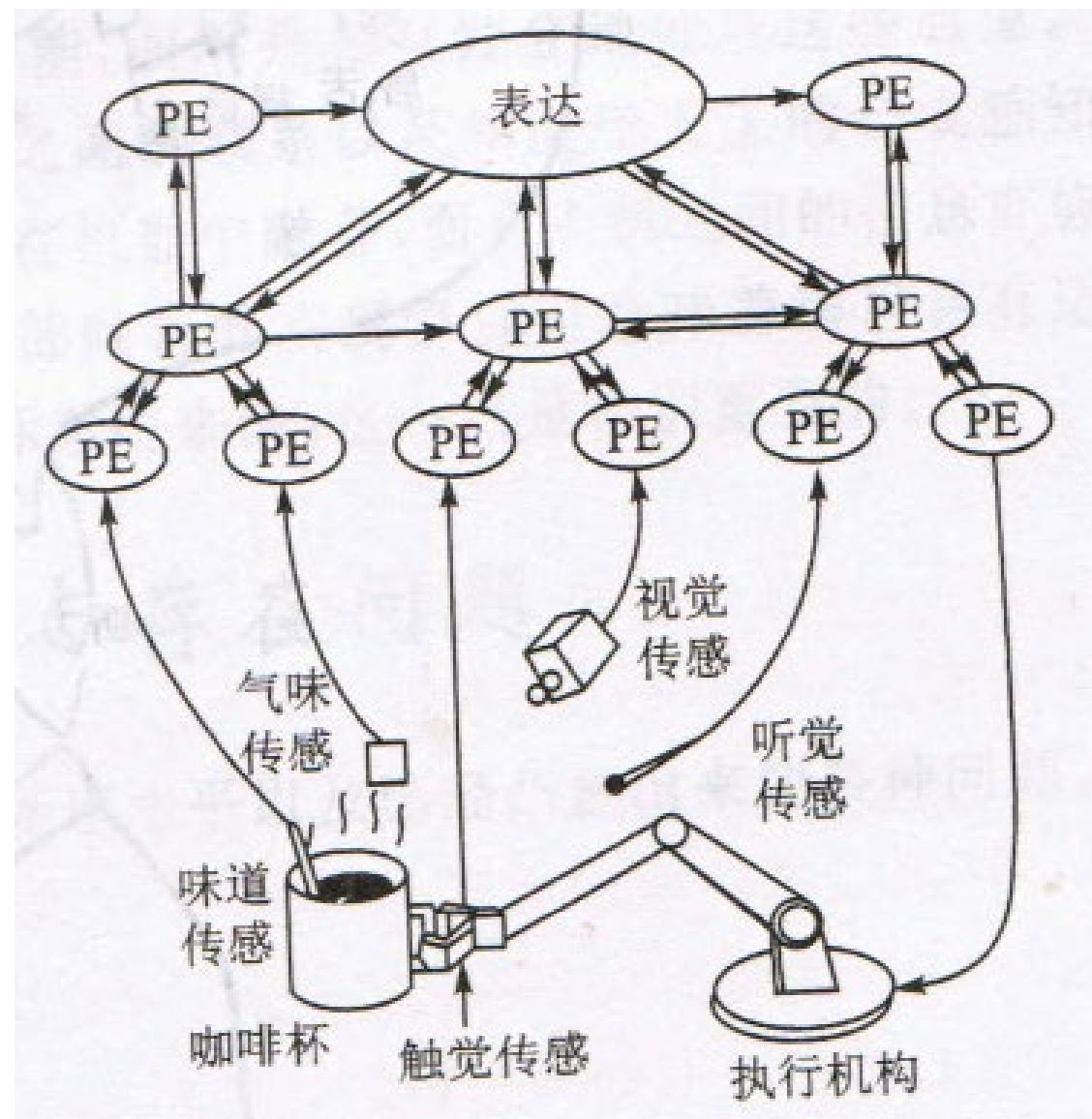


气体分布的可视化例子



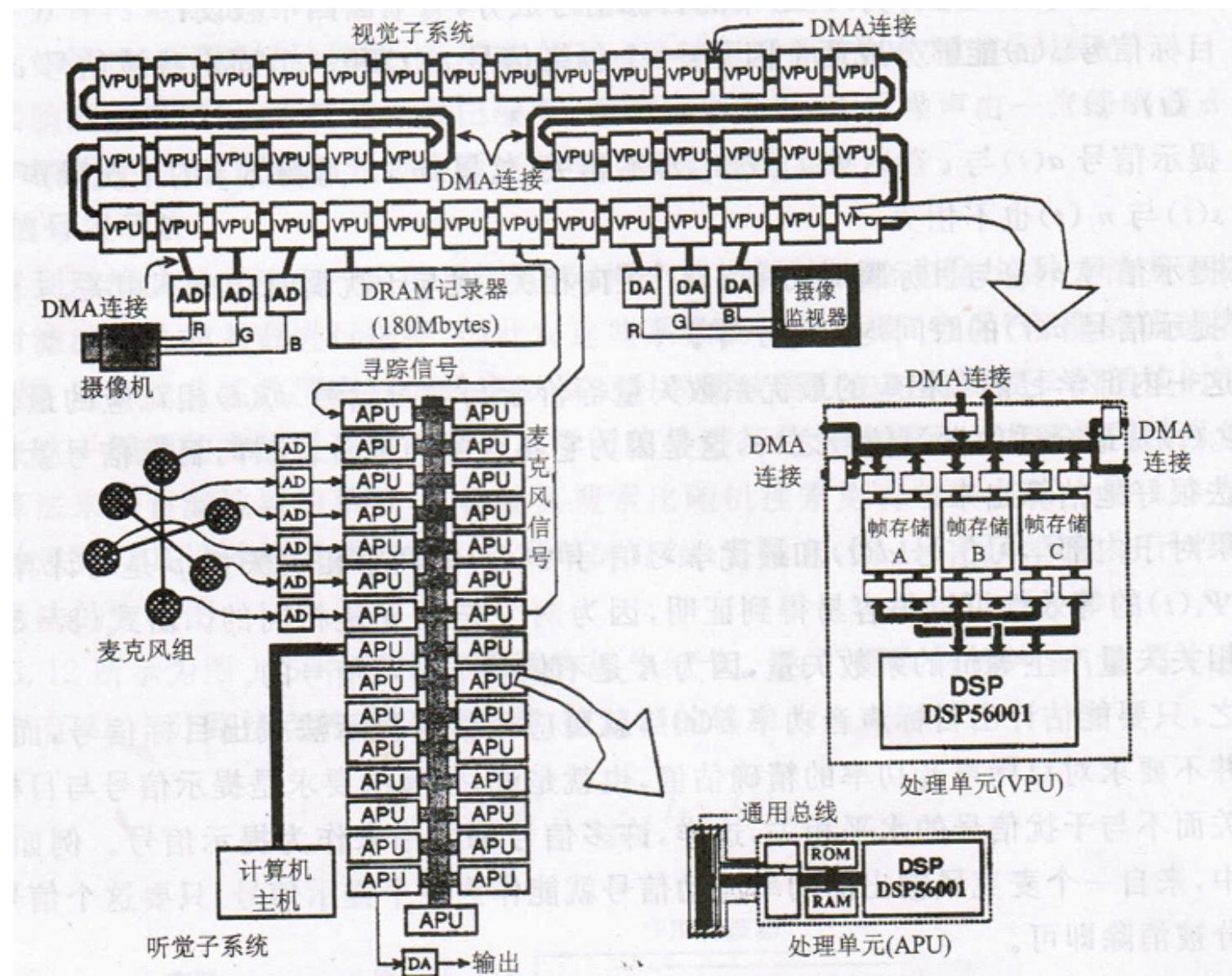
气体分布可视系统





传感器融合系统





实时传感器融合系统





目 录

- 第1章 概 述
- 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述





第4章 智能传感器的集成技术

要 点：

- ◆ 集成电路工艺及典型元件电路的示例；
- ◆ 微机械工艺及微机械结构的示例；
- ◆ 集成智能传感器系统示例。





第4章 智能传感器的集成技术

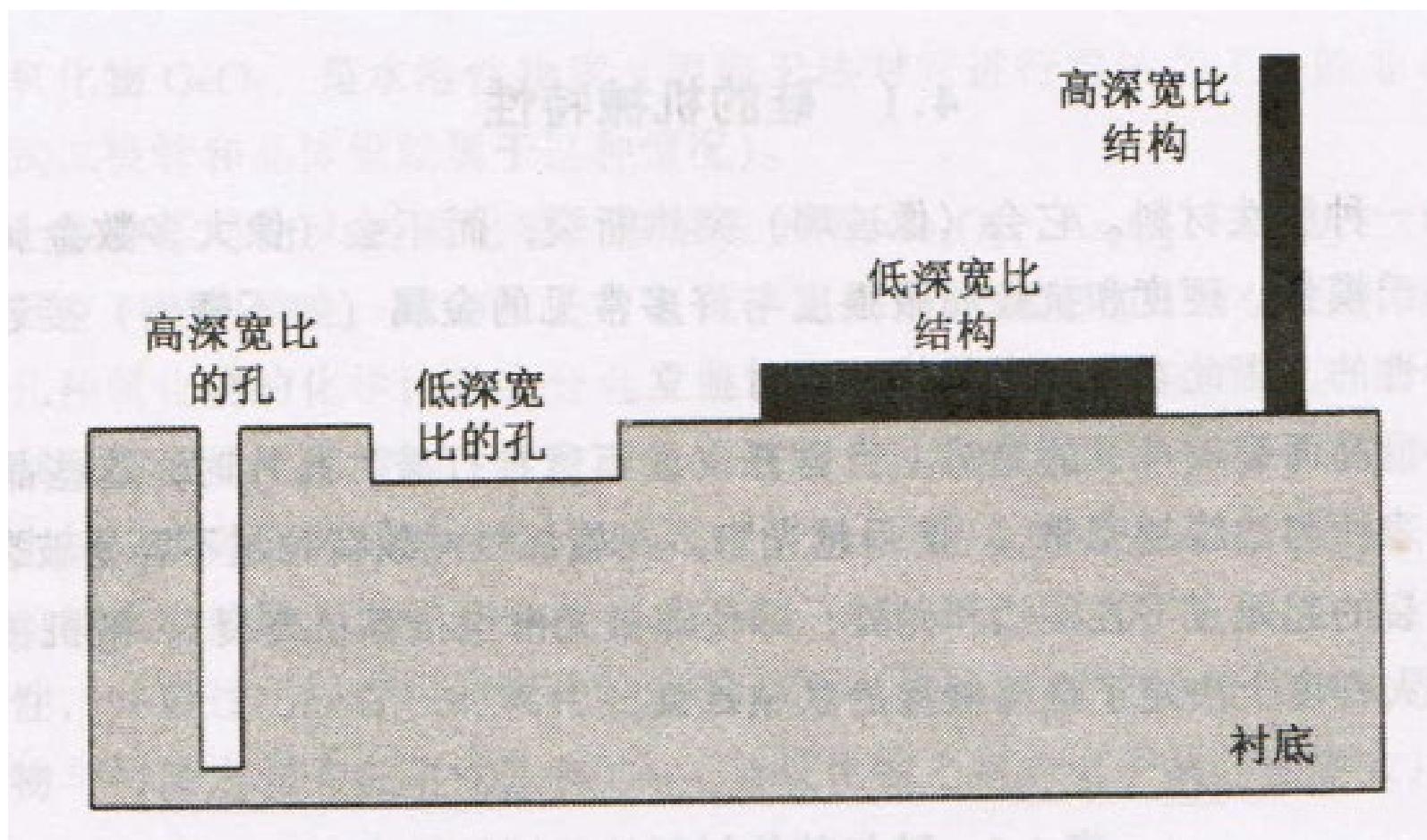
集成电路的基本工艺——制作传感器的电路部分，主要包括：材料的生长、扩散、离子注入、外延、光刻、腐蚀等。

微机械加工技术是在集成电路工艺的基础上发展起来的，制作传感器的敏感单元。

推荐一本参考书：

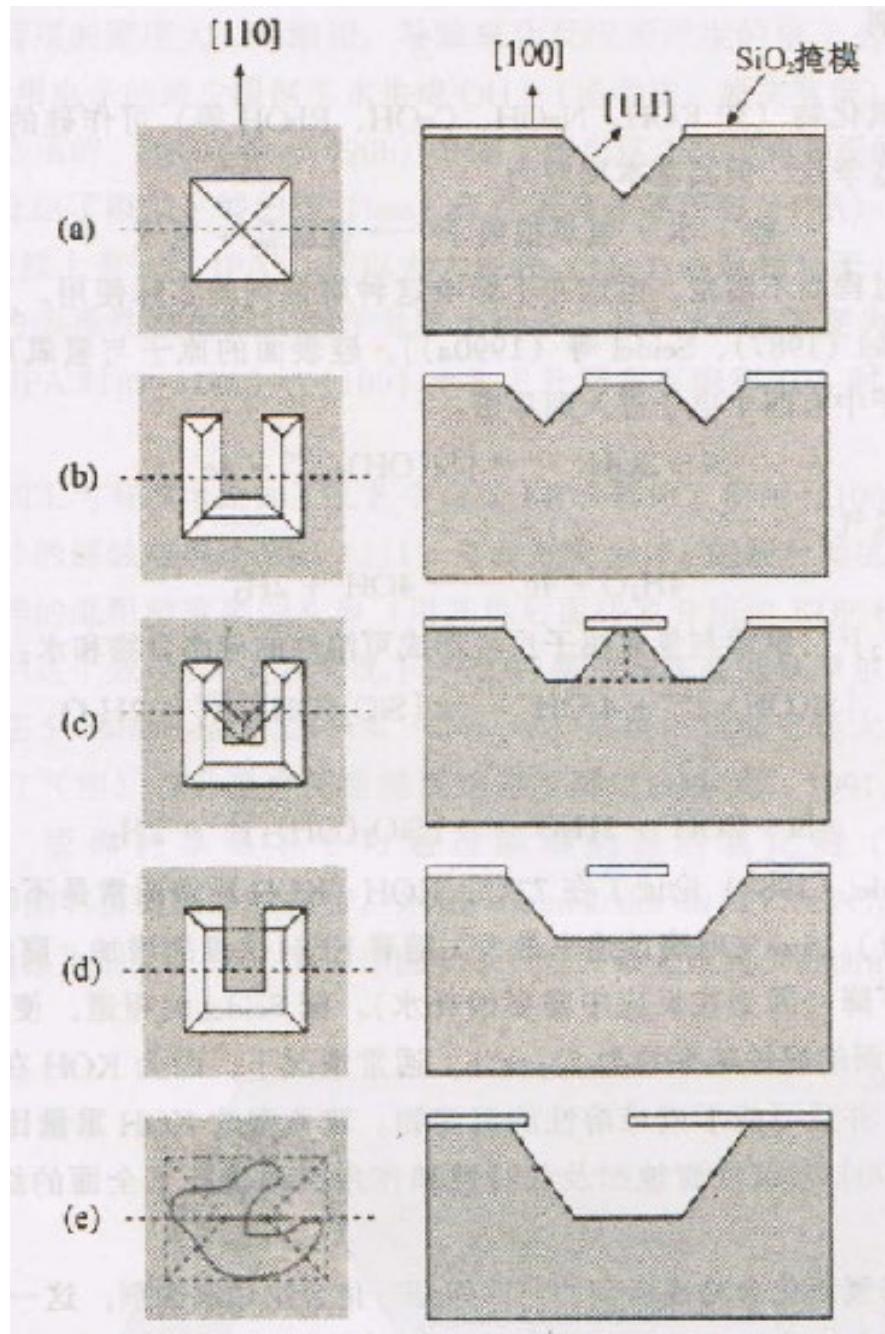
《微传感器与微执行器全书》(MICROMACHINED TRANSDUCERS SOURCE BOOK) [美]Gregory T. A. Kovacs 张文栋等译 [北京]科学出版社





不同深宽比示意图





(100)
硅片
各向
异性
腐蚀
图

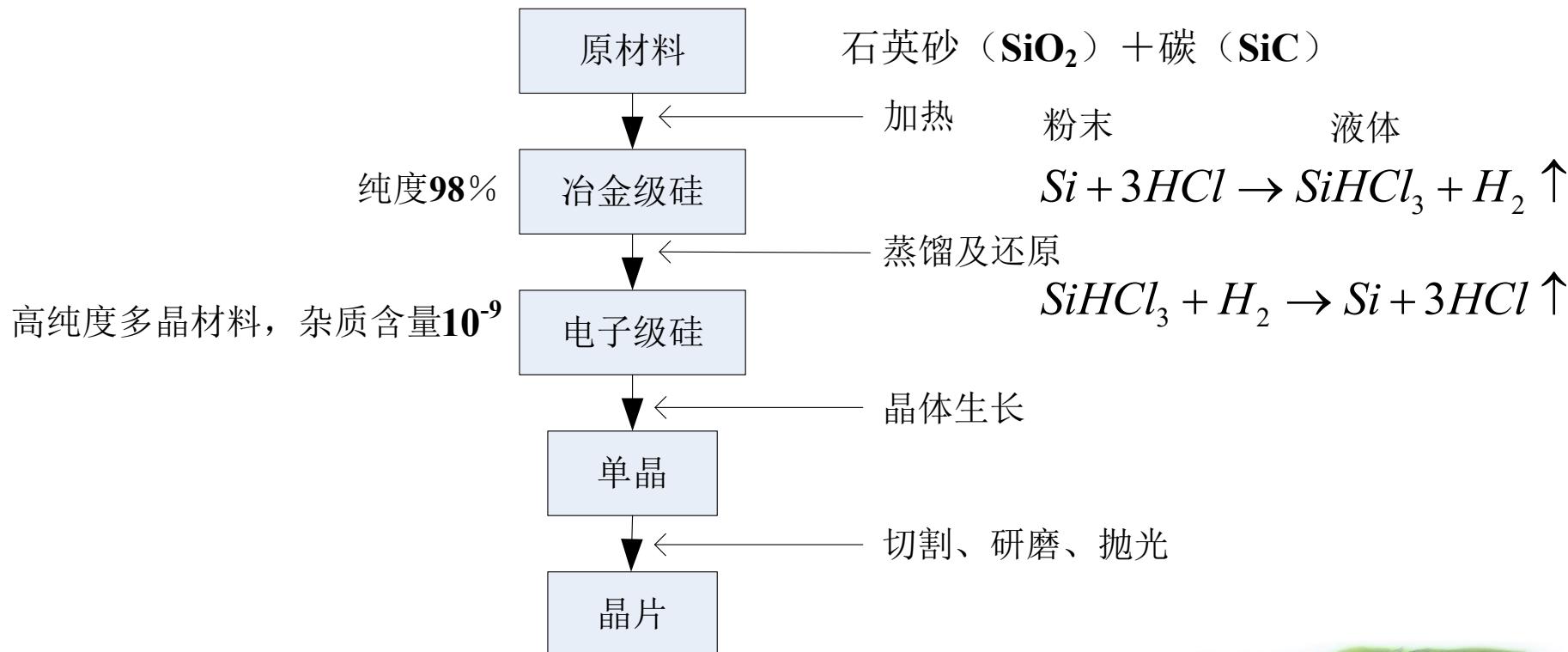


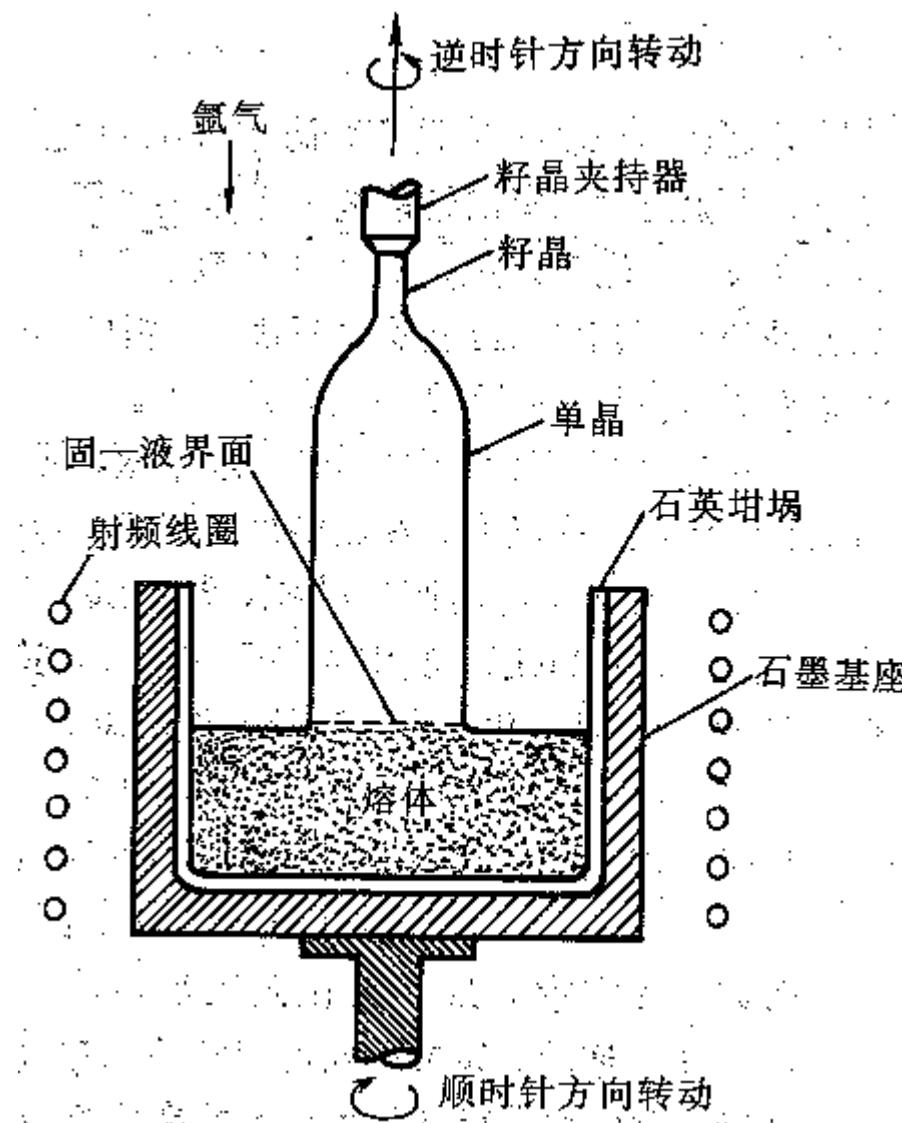


§ 4.1 集成电路的基本工艺

§ 4.1.1 晶片的制备

单晶硅片是制造半导体智能传感器最主要的材料，所以有必要先了解单晶硅片是怎么制造出来的。





直拉单晶炉





介绍生长单晶硅的装置：

- 1) 炉子：包括石英坩埚、石墨基座、旋转装置、加热元件及电源；
- 2) 单晶提拉机构：籽晶夹持器及旋转装置；
- 3) 保护气体控制系统：气体源、流量控制装置、抽气系统。

对籽晶的要求：晶向要合适[111]；

要使生长出来的晶体有一定的掺杂浓度，在熔体中加入一定量的掺杂剂；

切片的主要参数：表面晶向、厚度、斜度及弯曲度。

衬底材料的选择：

- 1) 导电类型和电阻率：

力敏器件多数是选N型单晶硅作衬底材料，采用扩散或离子注入工艺制作P型掺杂电阻。

* 同一电阻率的P型硅掺杂浓度高于N型掺杂浓度。掺杂浓度越高，





温度漂移越小。

* 相同温度相同表面杂质浓度下，P型层的压阻系数比N型层的高，有利于提高灵敏度。

2) 位错密度：

位错是单晶硅的原子排列上出现一种缺陷；位错会加快杂质扩散速度，影响隔离效果，产生应力集中。

3) 晶向和晶面

压阻效应与晶向有关，P型硅的压阻效应是 $[111] > [110] > [100]$ ；硅单晶的原子密度是以晶面 $(111) > (110) > (100)$ 的次序递减，而扩散速度、腐蚀速度以 $(111) < (110) < (100)$ 的顺序递增。

制作力敏器件，为加快扩散速度，缩短腐蚀时间和提高器件的稳定性，应选取 (100) 、 (110) 晶面。

4) 衬底切割的质量要求





- * 硅片厚度公差 $\pm 0.015\text{mm}$;
- * 平行度 0.02mm ;
- * 晶向偏差： $<1^\circ$ ；
- * 弯曲度：影响加工量，一般要求<磨片磨削量的 $1/2$ 。

§ 4.1.2 外延

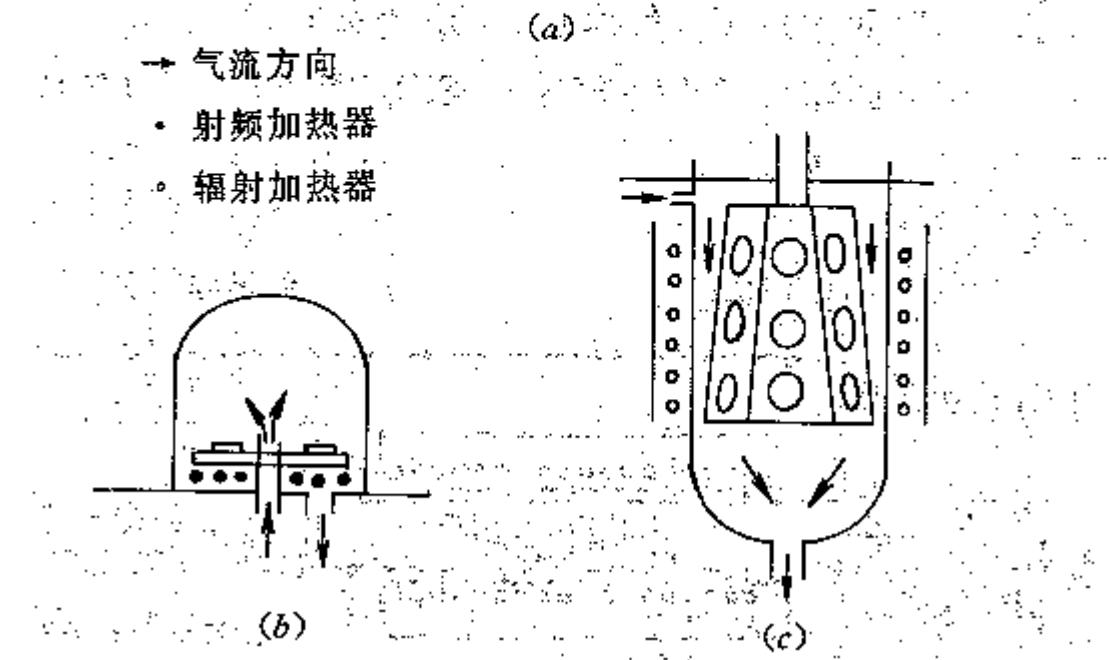
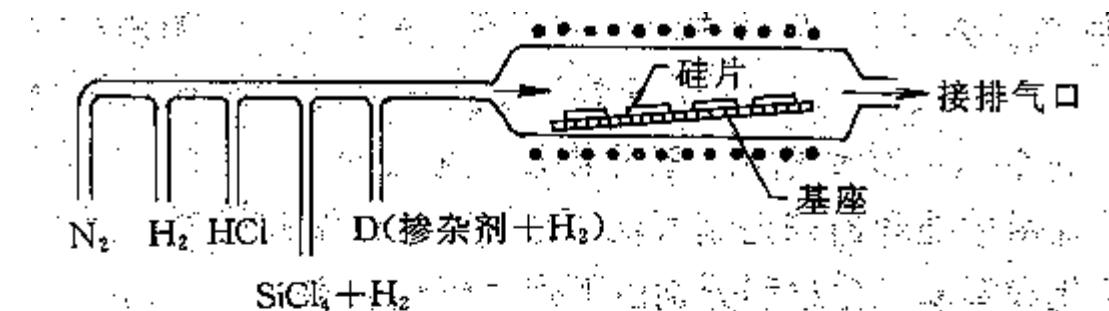
作用：控制杂质分布，优化器件和电路性能

方法：气相外延（VPC）；液相外延（LPC）；分子束外延（MBE）。

主要目的：通过一种化学反应的方式，在硅基片的表面生长一层所需的膜层，如掺杂层的生成。

优点：在远低于熔点的温度下生长。





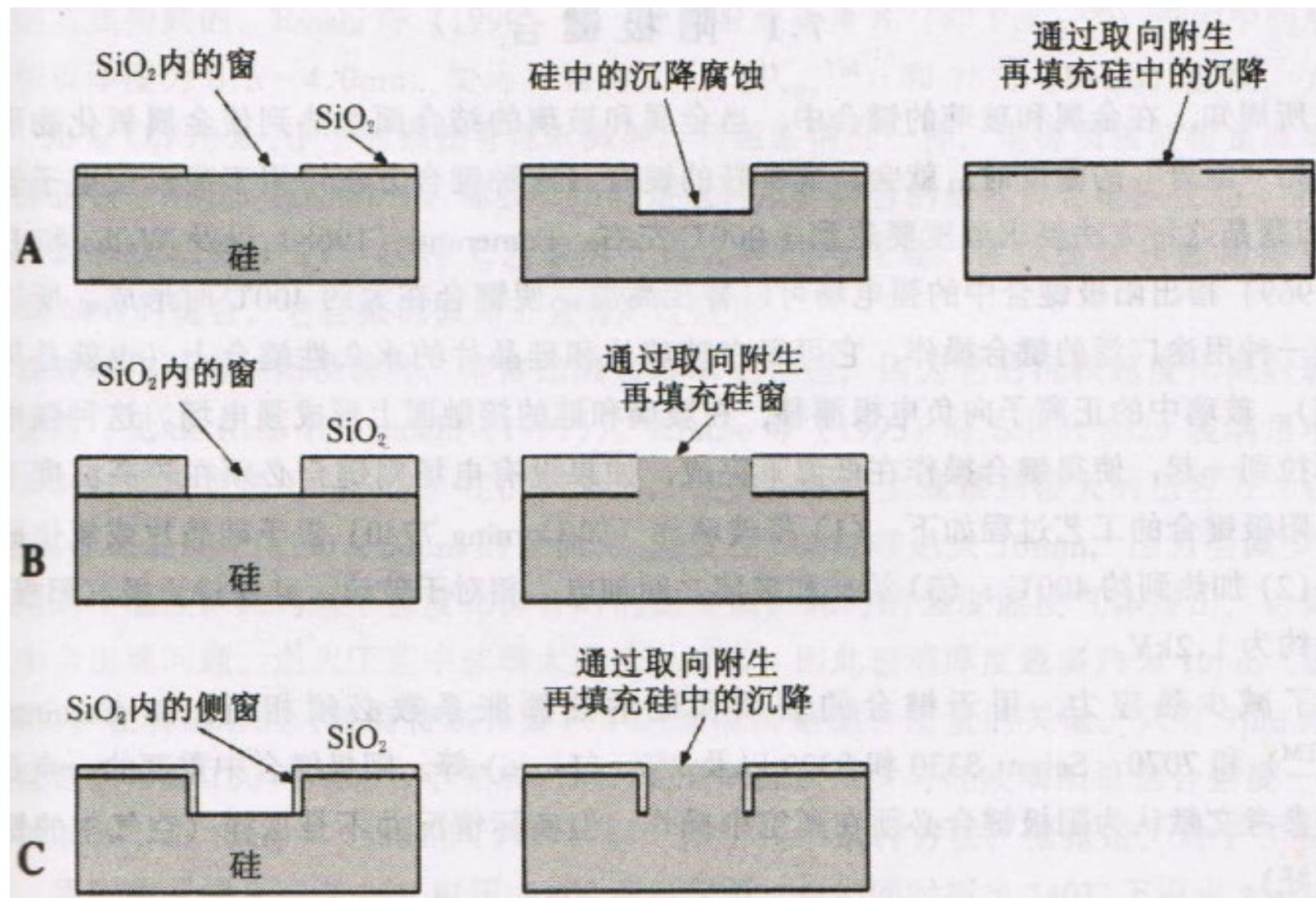
气相外延常用的三种基座

(a) 水平型

(b) 圆盘型

(c) 桶型





选择性外延生长的三种可能方案





§ 4.1.3 热氧化

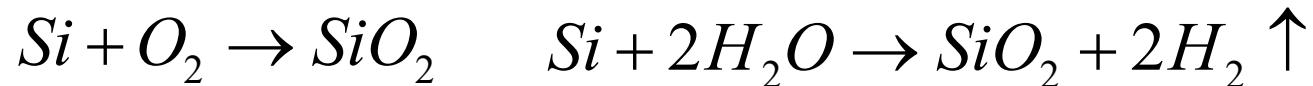
主要是生成半导体电路中所需的氧化层，如MOSFET电路中的栅氧化层，场氧化层。

氧化层的作用：隔离层、钝化层

方法：干氧氧化（高纯度干燥氧气） 湿氧氧化（高纯度水蒸气）

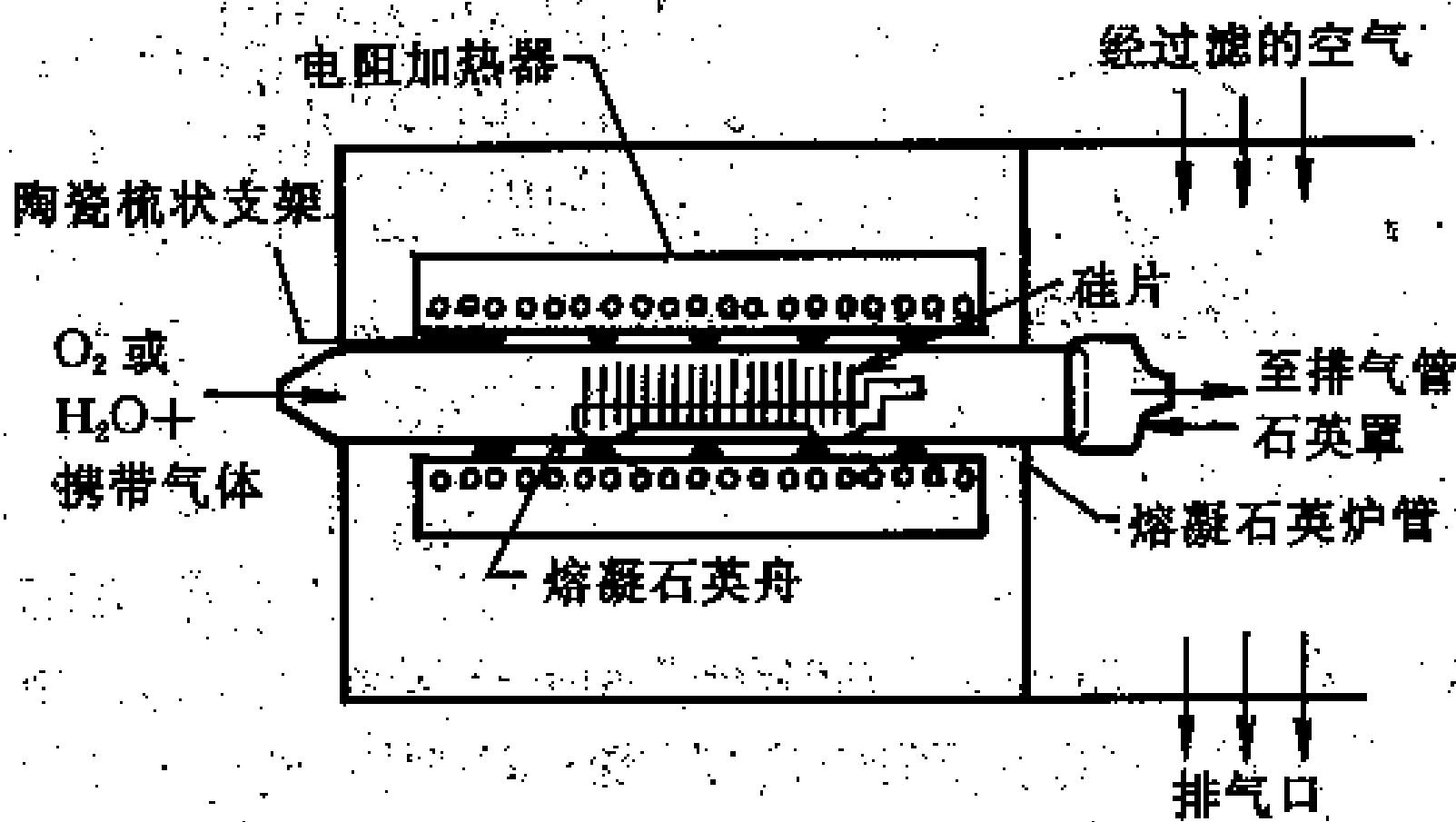
特点：干氧氧化（慢、性能好） 湿氧氧化（快，用于较厚氧化层）

反应条件：T：900~1000°C；v（气体流量）：1cm³/s，ΔT=±1°C；



钝化膜的作用：起掩蔽、保护、绝缘等作用；防止高温下硅表面以及硅中杂质的挥发，以及化学处理而引起的器件电学性能下降。





电阻加热氧化炉结构示意图





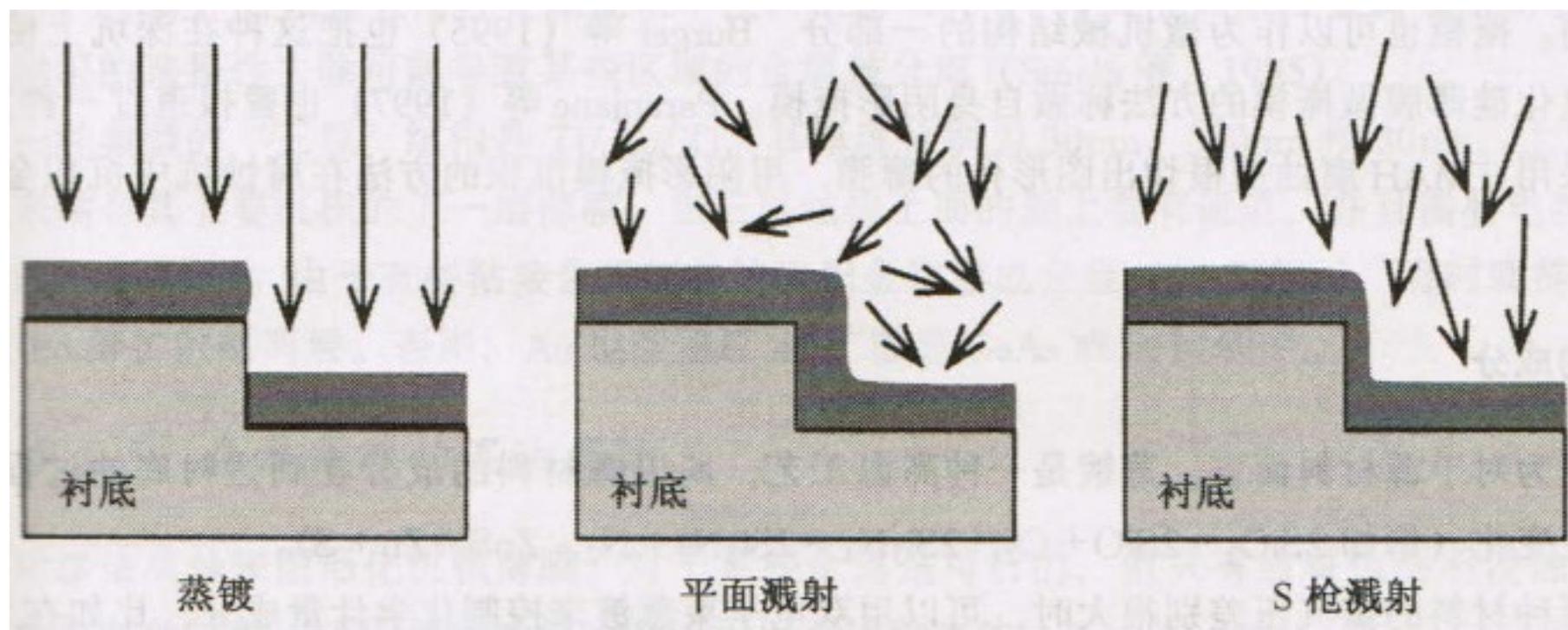
§ 4.1.4 物理气相沉积

作用：淀积一些金属材料，作为电极或连线；对器件进行金属化。

方法：真空蒸发淀积（辉光放电）——用于铝等熔点较低的材料；
物理溅射淀积（分直流、射频、磁控、离子束）——用于难熔金属或化合物材料。

直流	射频	磁控溅射	离子束
气压高 (1.3~13.3Pa)	0.133Pa	0.133Pa	(1.33×10^{-3} Pa) 高真空
只能用于导电材料	用于绝缘靶	薄膜均匀性好，淀积速率高1 μm/min	可用于绝缘靶，淀积速率高





蒸镀、平面溅射、S枪溅射台阶覆盖能力示意图





§ 4.1.5 化学气相沉积

作用：淀积用于分立器件和集成电路绝缘和钝化的介质膜，与物理气相淀积相比产生化学反应。

方法：

常压化学气相淀积 低压化学气相淀积 等离子体化学气相淀积

CVD

LPCVD

PCVD

用于金属化工艺

用于钝化器件、绝缘膜

作器件最终钝化膜

温度高

温度中等 (750°C)

温度低 (300°C)

薄膜电阻

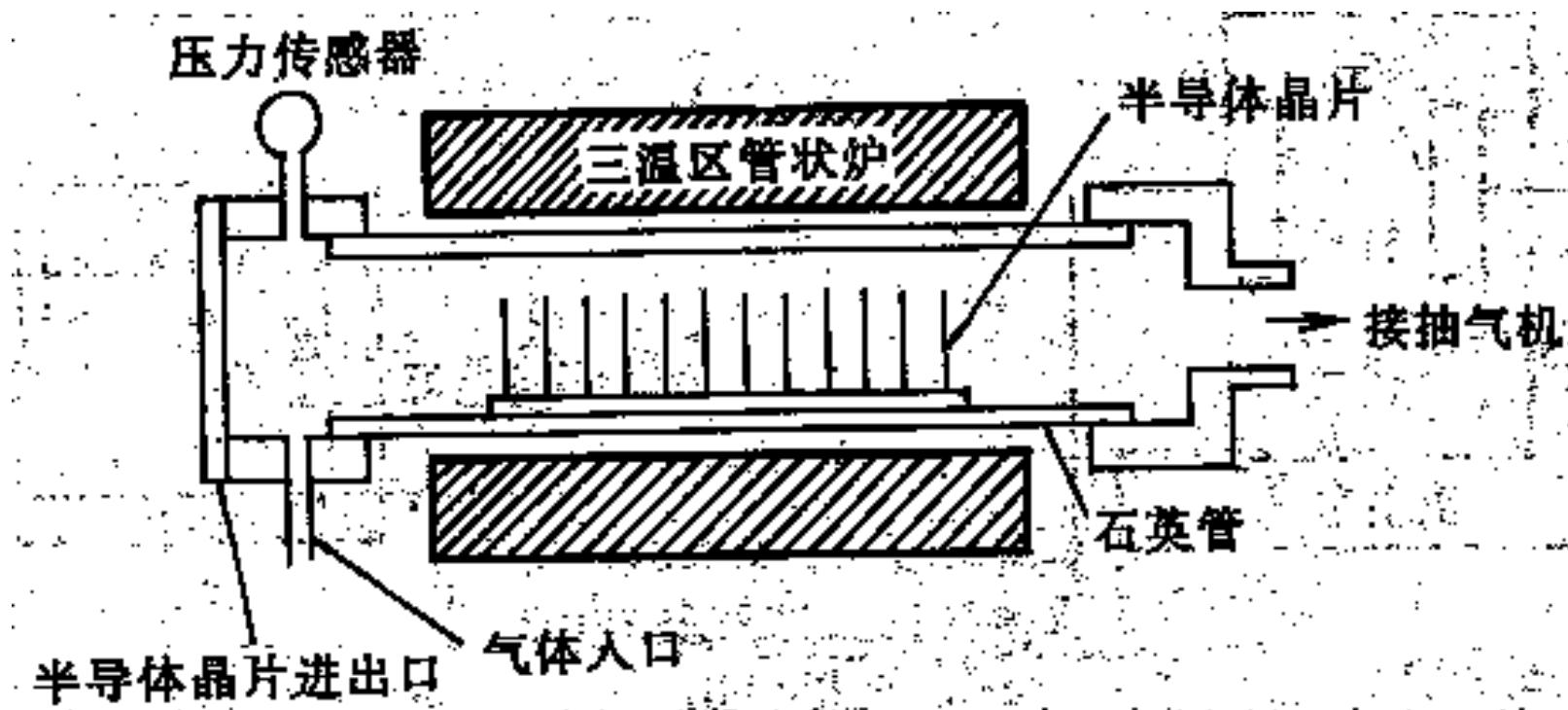
SiO_2 , 氮化硅膜

氮化硅膜

§ 4.1.6 光刻

光刻工艺是利用光刻胶受光照部分与未受光照部分溶解特性的巨大差异在衬底表面制作图形的技术。这有点类似照相底片的功能。





热壁低压化学气相沉积反应器原理图





1、光刻工艺流程

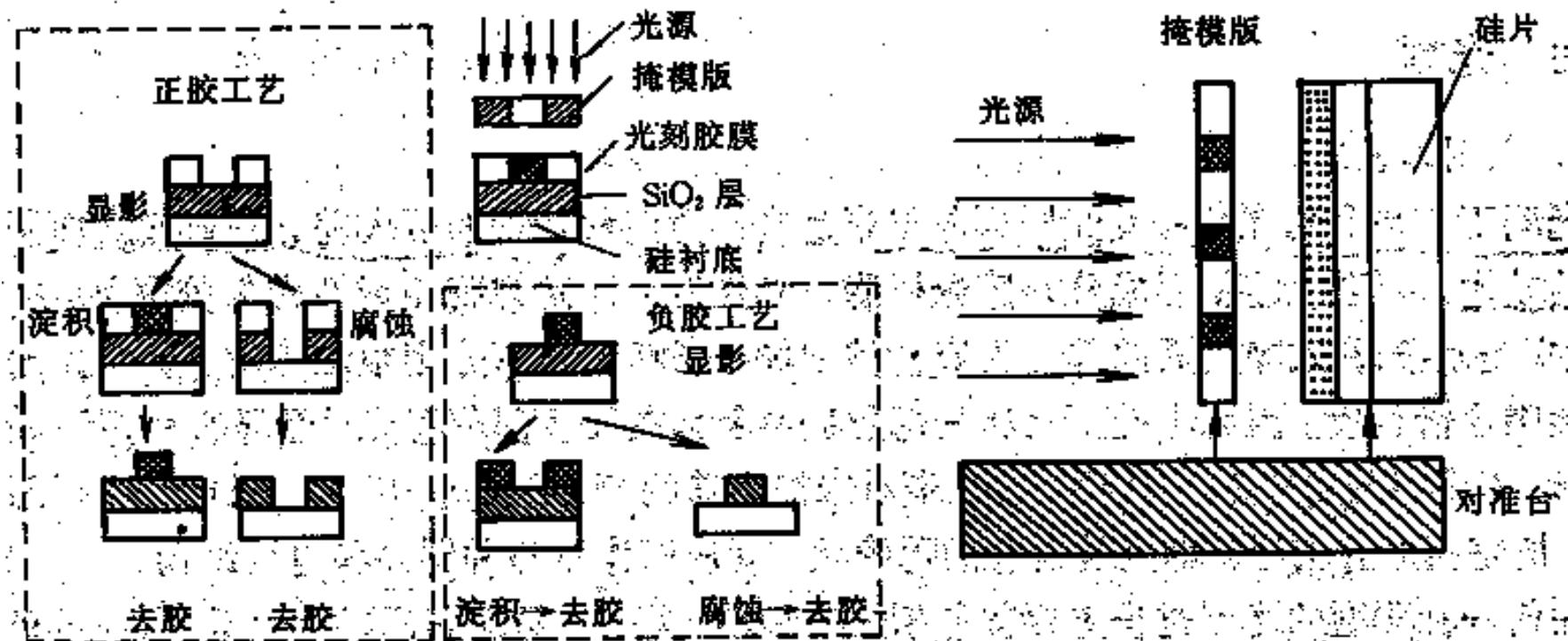
光刻胶分：正性光刻胶（曝光部分被溶解）；负性光刻胶（又叫反转片）。

工艺步骤：清洗、烘烤→涂胶（厚度取决于光刻胶种类、旋转速度、液态胶粘度）→前烘（使胶层中的溶剂挥发（红外线、热板、循环热风）增强粘附能力；提高耐磨性；提高和稳定感光灵敏度）→曝光（使胶层起光化学反应，方式有掩膜曝光、电子束曝光）→显影（样品放入显影液，使部分胶层溶解，分正负性）→后烘（显影后的样品放在一定温度下烘烤，使其硬化，又叫坚膜）→腐蚀或淀积（刻蚀掉下面的材料，或淀积所需的材料）→去胶（去除作为保护膜的光刻胶）。

2、紫外光曝光

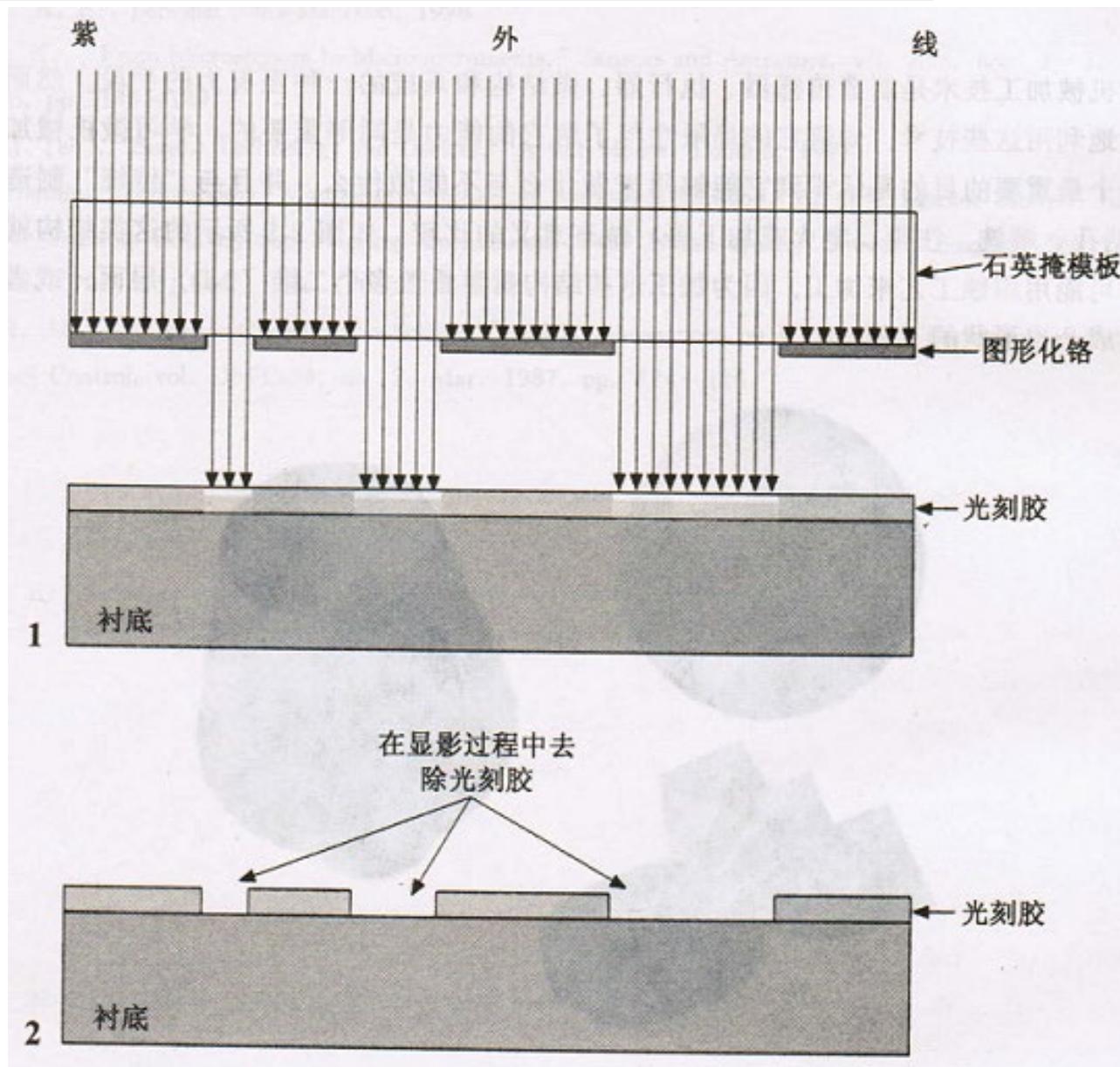
光刻光源： $CeCl_2$ 、 Ar^+ 准分子激光器：高亮度、高单色性、方向性好。





光刻主要工艺流程

接近式暴光装置示意图



在微机械加工中大量应用的基本光刻工艺



曝光方式：接触式、接近式（分辨率： $R = \frac{1}{2.8\sqrt{s}\lambda}$ ）、投影式（ $\delta Y = 0.61 \frac{\lambda}{N \cdot A}$ ）A：数值孔径。
上述曝光方式受衍射效应的影响。

3、几种新型的曝光系统

元件尺寸的减小，要求曝光系统的分辨率高。

- 1) 选用短波长的光源，如x射线（ $\lambda = 0.4 \sim 5 \text{ nm}$ ）；
- 2) 采用电子束曝光， $\lambda = 0.01 \text{ nm}$ ，但速度慢。

§ 4.1.7 刻蚀

在IC工艺和微机械加工工艺中占重要地位。

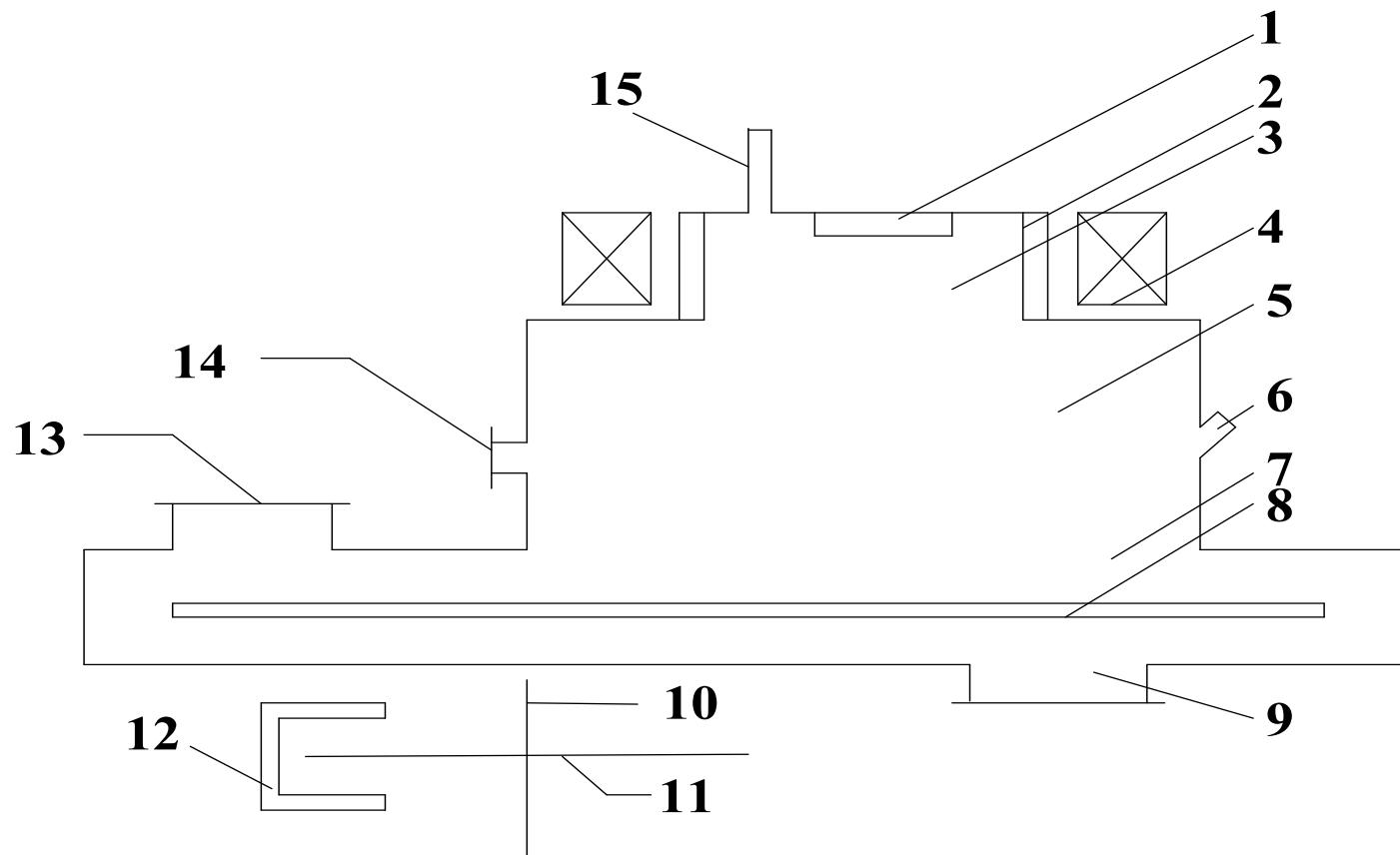
作用：把经过曝光、显形后光刻胶图形中下层材料的裸露部分去掉。

方法：各向同性腐蚀和各向异性腐蚀（或称为干法腐蚀与湿法腐蚀），干法效果好；湿法精度低，效果差。





简单介绍：等离子体刻蚀法（见下图）



1. 微波窗口 2. 水冷套 3. 等离子体发生室 4. 磁场线圈 5. 等离子体约束室
6. 观察窗口 7. 处理室 8. 基片架 9. 抽气口 10. 电机转轴 11. 光电盘
12. 光电传感器 13. 门 14. 探针口 15. 气体进口





§ 4.1.8 扩 散

作用：用于对衬底进行选择掺杂，以形成N型区或P型区，例如：制作P—N结。

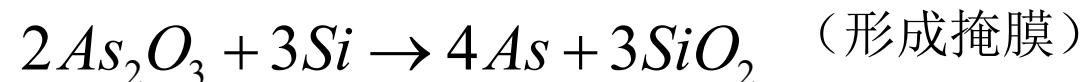
方法：恒定表面浓度扩散；恒定杂质总量扩散

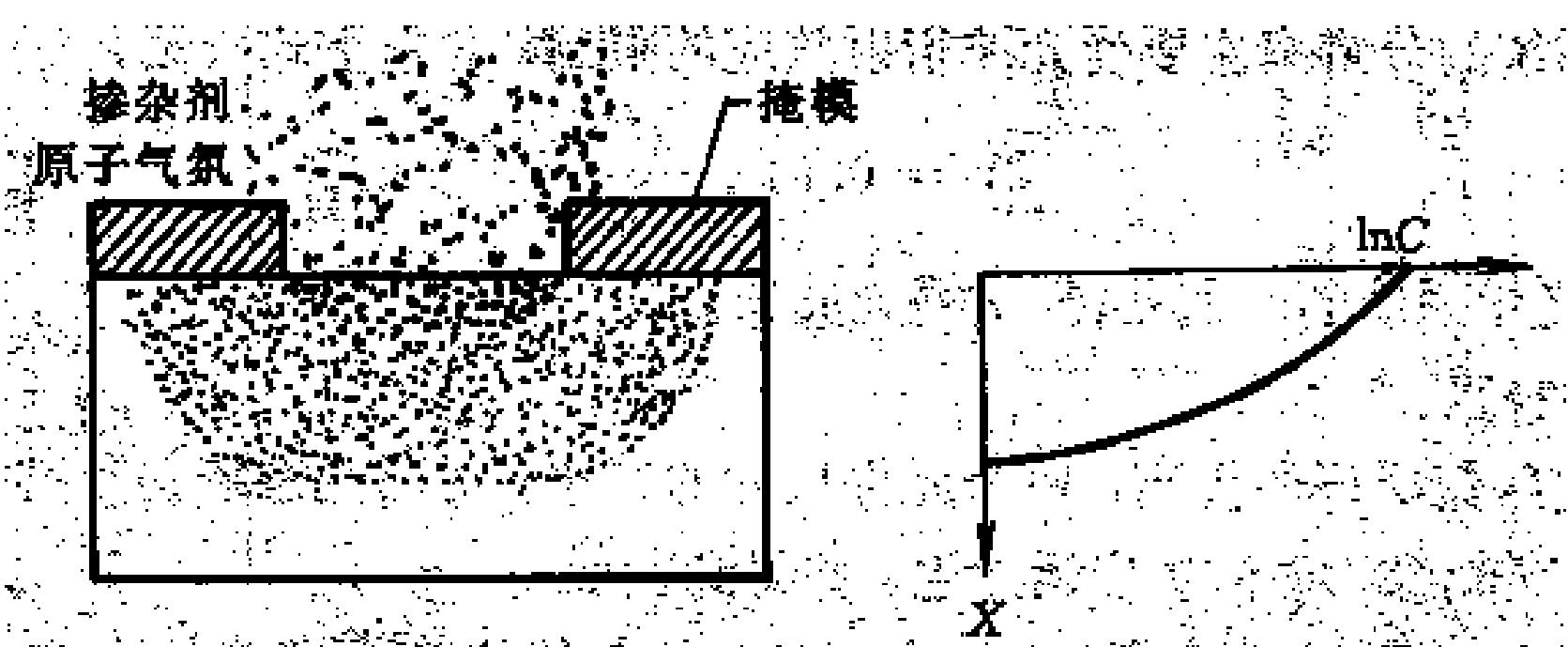
扩散效果：取决于扩散温度和扩散时间。

集成电路工艺中，一般采用两步扩散法：预淀积扩散、主扩散（或称再分布扩散）。

扩散设备：专用的扩散炉（与热氧化类似），对于硅： $T=800\sim1000^{\circ}\text{C}$ ；

扩散源：固态源： As_2O_3 、 P_2O_5 ；液态源： AsAl_3 、 POCl_3 ；气态源： AsH_3 、 PH_3 。





扩散杂质在衬底中的分布





§ 4.1.9 离子注入

作用：将一定能量的带电粒子掺入到硅等衬底中，用来改变衬底的电学性能，与扩散作用类似。

优点：可以精确控制掺杂的数量，重复性好，加工温度低。

离子注入系统：

离子源、质量分析器、(可变狭缝)、加速管、平面扫描电路、靶。

高能离子能量消耗机制：

核阻止过程

电子阻止过程

能量小

砷离子（重离子）

硼离子（轻离子）

磷离子介于两者之间，临界能量是130KeV

解释离子注入损伤的概念。

沟道效应：由入射离子对准某一主要晶向时造成，它的射程比在非





晶硅中大很多。

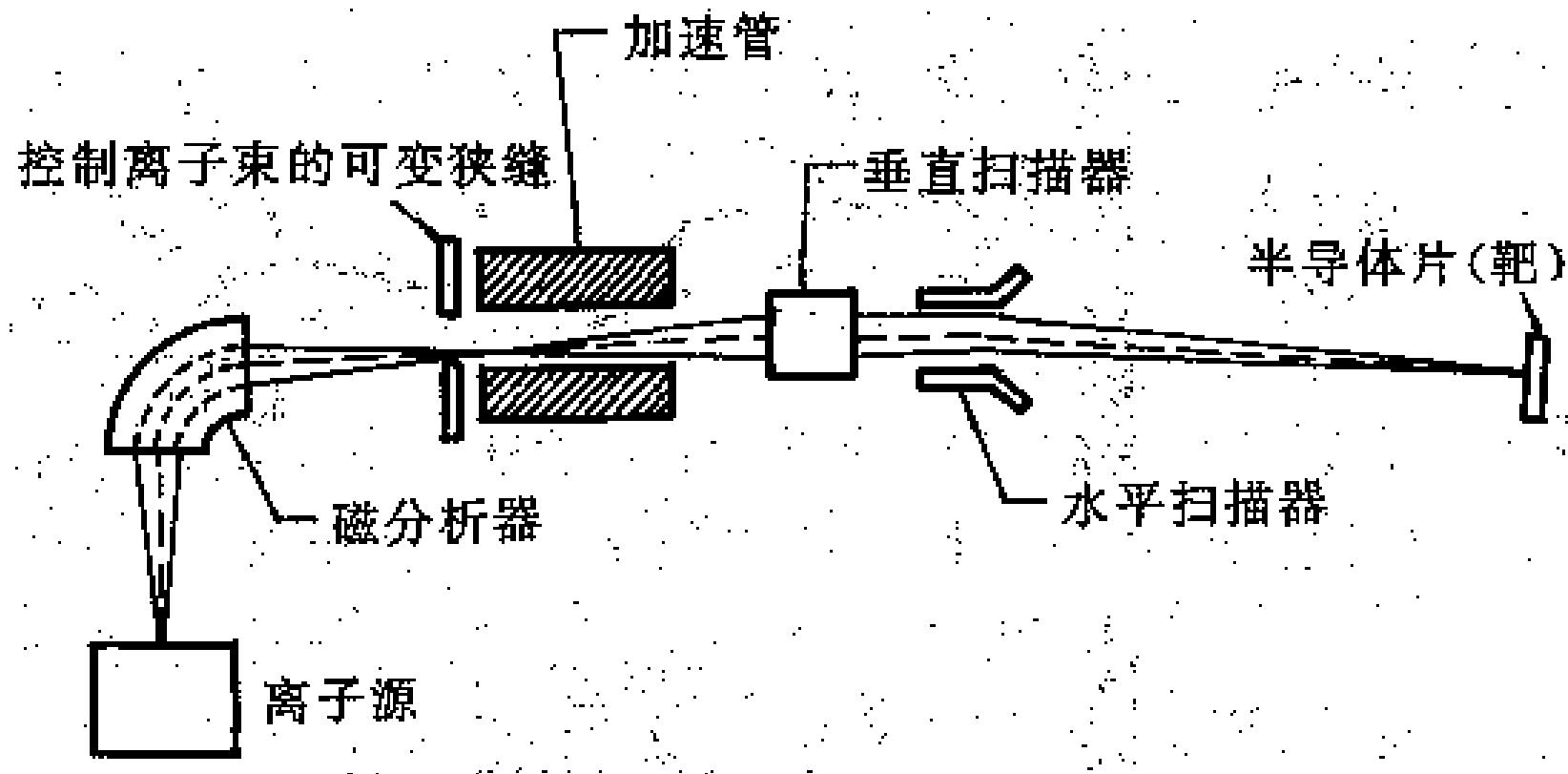
晶格无序：注入离子向晶格转移足够能量，使晶体原子发生移位，当原子移动距离接近原子密度时，单晶材料变成非晶材料。

轻离子的能量被吸收的特点：一开始是电子阻止消耗能量，能量减低后变为核阻止消耗能量。

损伤区的恢复：退火，使注入离子进入晶格点阵（又叫激活）

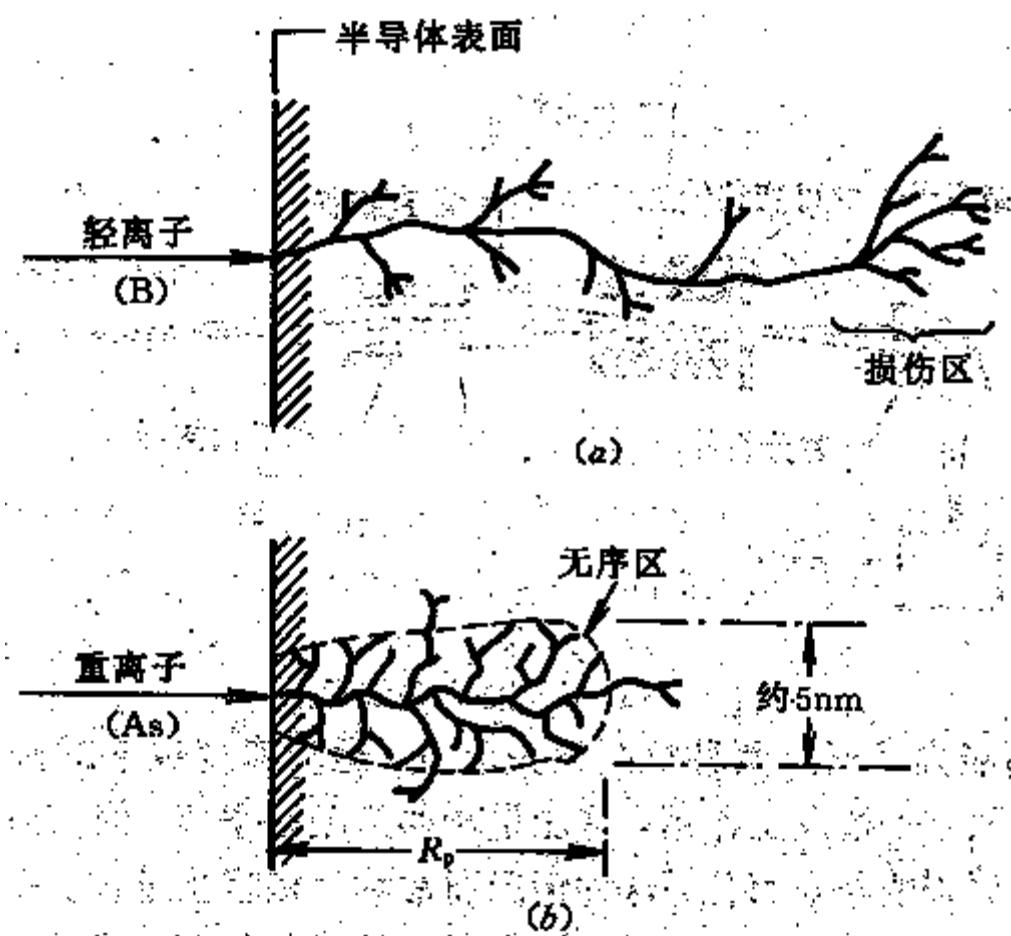
退火方法：扩散炉（时间长，效果差）；激光、电子束（时间短，低温，效果好）。





离子注入系统示意图





离子注入形成无序区





§ 4.2 典型的集成电路元件制作工艺

集成电路的基本构成单元：有源元件（二极管、三极管、场效应管）、无源元件（电阻、电容、电感）。

§ 4.2.1 典型的集成电路制造流程

设计、掩模版制造、芯片制造（扩散、氧化、离子注入、刻蚀）、封装、测试等一些步骤，下图是其流程图。CPU之类大规模集成电路的制作前后有两百多道工序。

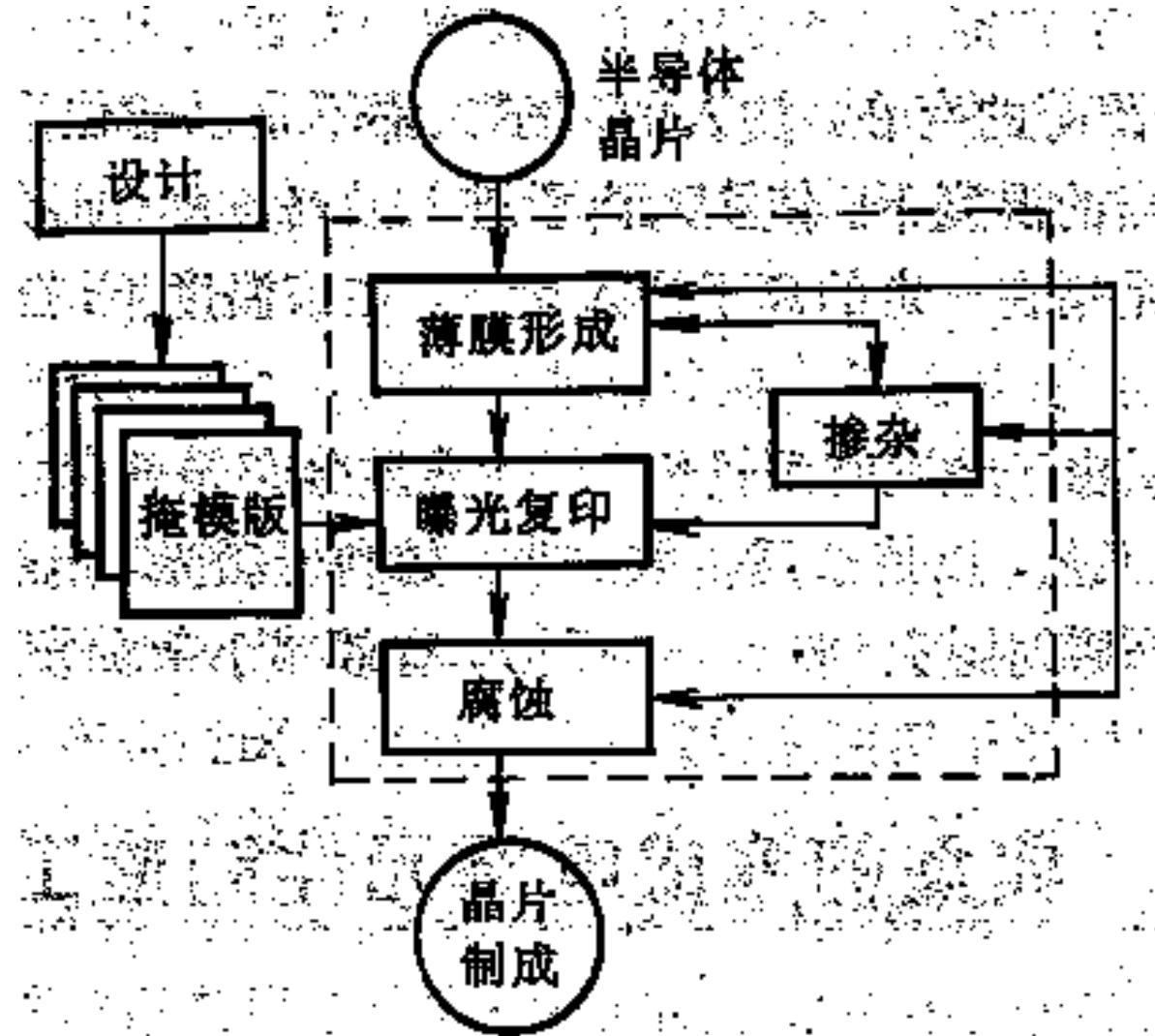
1) 设计

根据功能要求，借助CAD设计电路并生成版图→转化为光刻掩模板。

2) 芯片制造

利用前面所述的各种工艺，根据实际使用的需要，将各种加工方法进行合理的组合，最终将各个掩膜板的图形逐次转移到半导体晶片表面上，获得最终的IC器件。如果在一个晶片上制造了多个相同芯片，则还要进行划片或激光切割将芯片分开。





集成电路制造的主要步骤





3) 封装: 提供合适的散热和引线连接条件, 如带窗口的ROM。

4) 测试

§ 4.2.2 集成电路电阻器

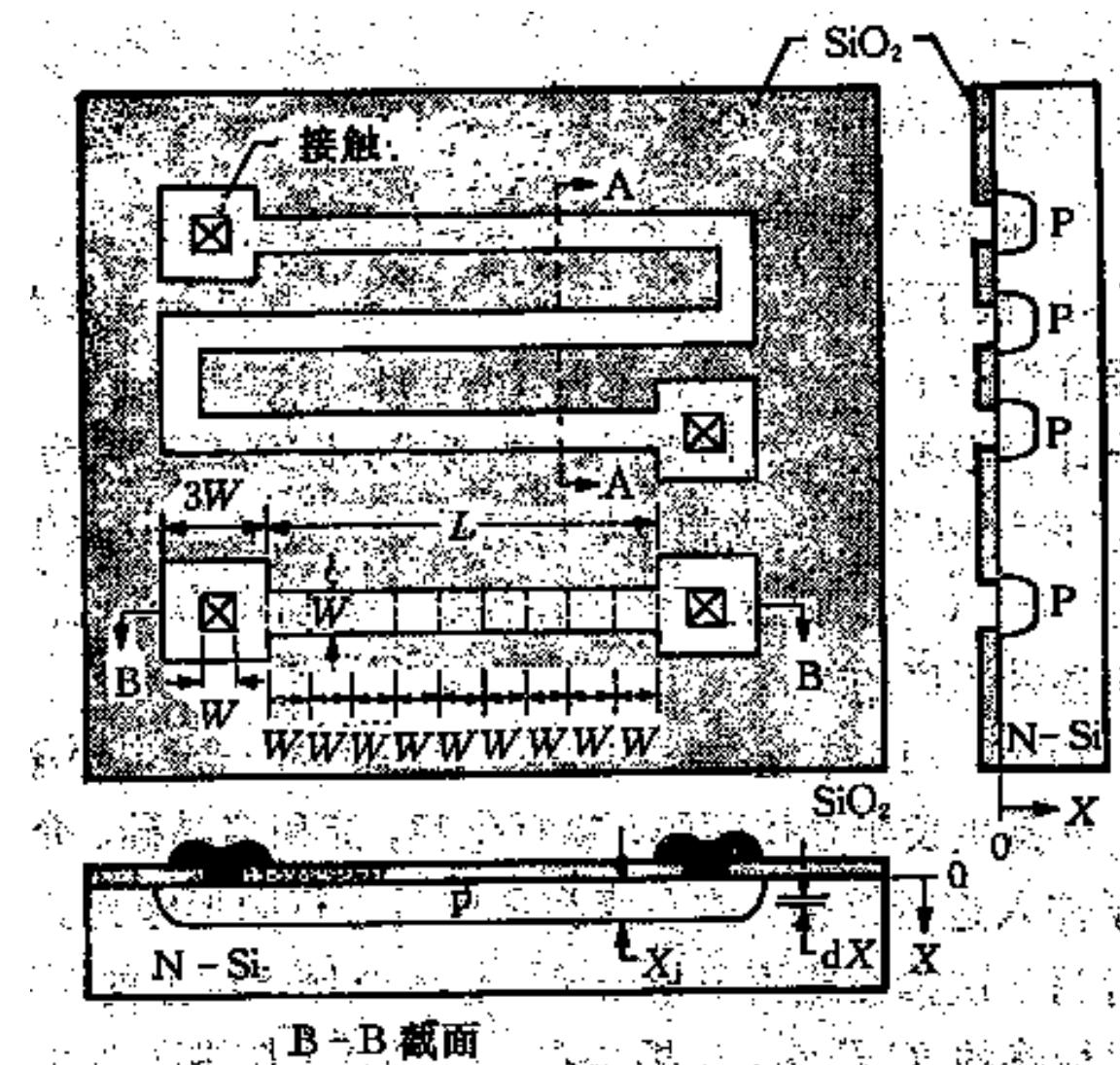
制作工艺: 硅衬底材料 (N-Si) $\xrightarrow{\text{热氧化}}$ 二氧化硅层 $\xrightarrow{\text{光刻}}$
形成制作电阻的图形 $\xrightarrow[\text{扩散}]{\text{离子注入}}$ 形成电阻器。

$R = \frac{L}{W} \left[\frac{1}{g} \right]$; $\frac{1}{g}$ 通常用符号 $R^* \square$ 表示, 称为薄层电阻, 单位: Ω / \square^{**} 。

§ 4.2.3 集成电路电容器

硅衬底材料 $\xrightarrow{\text{热氧化}}$ 二氧化硅层 $\xrightarrow{\text{光刻}}$ 形成所需的窗口
 $\xrightarrow[\text{扩散}]{\text{离子注入}}$ 形成 P^+ 区 \rightarrow 集成MOS电容器。





集成电阻器





§ 4.2.4 电感的制造

用于测量数据的无线传递，能量的无线发送，微执行器的电磁驱动。

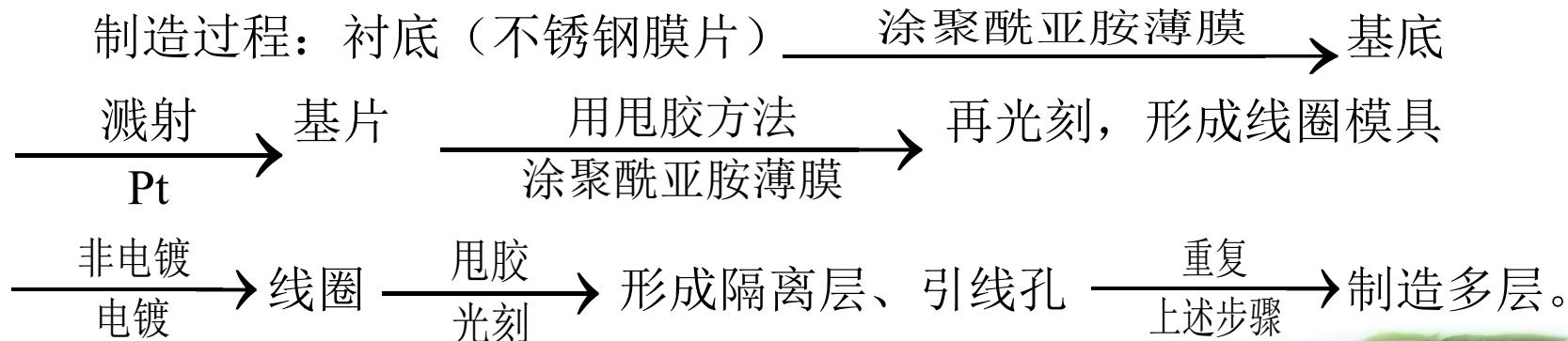
制造方法：

1) 在铜膜上制作电感掩膜，然后在腐蚀液中进行腐蚀；

2) 利用电感掩膜在衬底上淀积活化层，接着在活化层上电镀厚铜层。

上述两种方法只能制作微型电感。

3) 利用光刻胶材料制作电感模具，在模具中电镀生长铜线圈层，该方法可制作多层电感线圈。





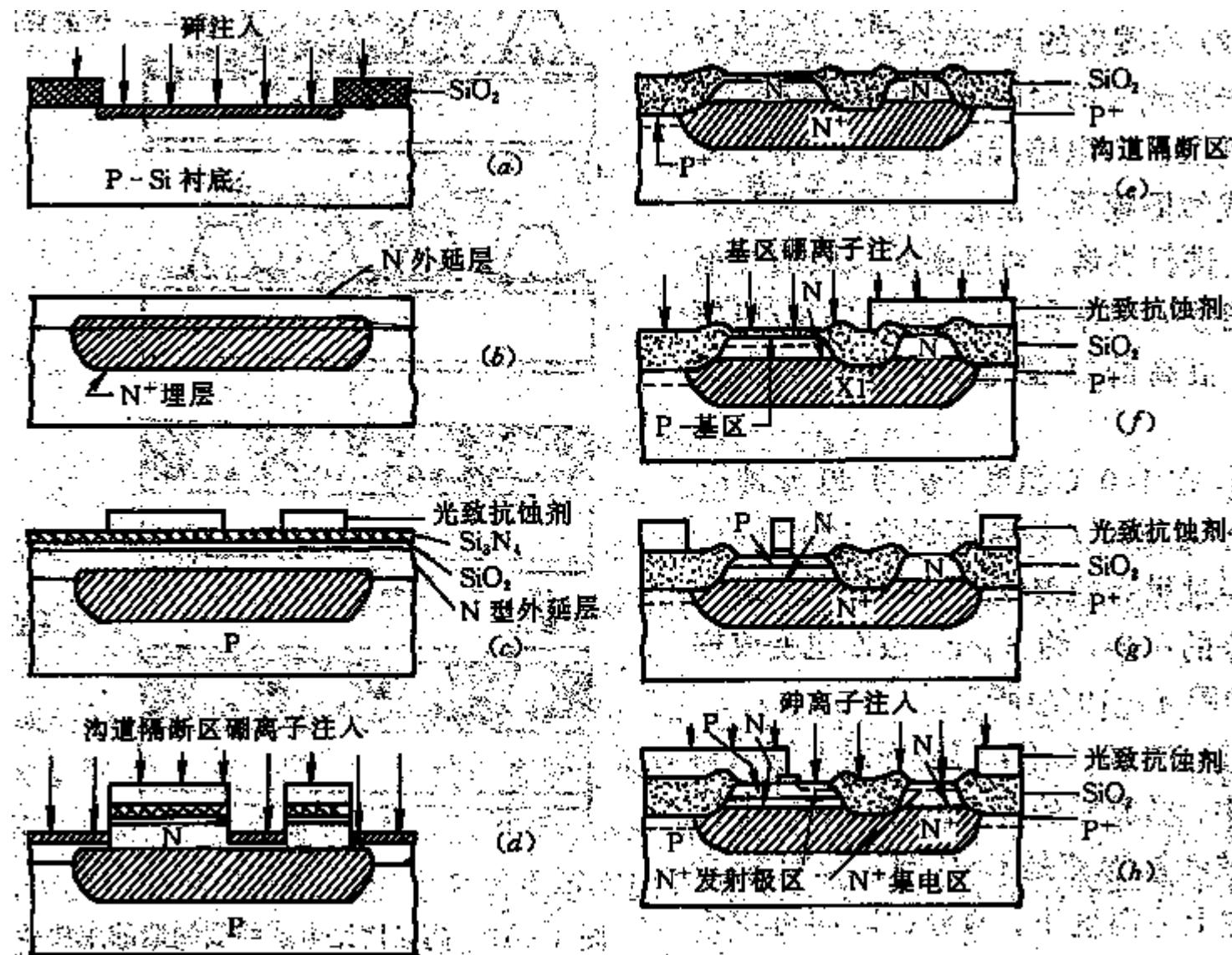
§ 4.2.5 双极性晶体管

双极性晶体管的制造过程比较复杂，它总共包括：薄膜形成6次；图形曝光6次；刻蚀4次；离子注入4次，共分6步完成制作过程。

IC中的双极晶体管大多是N—P—N型。

- 1) 形成埋层，减少集电极串联电阻；
- 2) 生长N型外延层，它的厚度和掺杂浓度决定于工作电压；
- 3) 形成横向氧化物隔离区，将发射区与集电区隔开；
- 4) 形成基区，基区与发射区位置比较接近；
- 5) 形成发射区；
- 6) 用金属化工艺形成基极、发射极、集电极引出电极。





双极晶体管制造过程截面图





§ 4.3 微机械工艺的主要技术

集成电路工艺基本上是平面工艺，而微机械工艺从某种角度上来说是立体工艺，它不仅仅用于微传感器的加工，而且用于电力电子器件、真空场发射阵列器件、扫描隧道显微镜中的微探针头、微电子机械系统等。

§ 4.3.1 SOI晶片 (Silicon on Insulator)

作用：将有源部分（电路部分）与敏感部分隔开，同时与恶劣环境隔开。

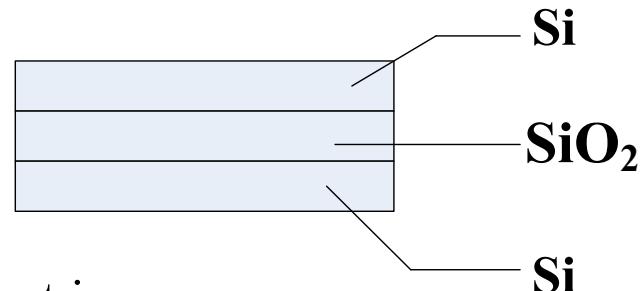
构成：

制备方法：

- 1) SIMOX (Separation by Ion Implantation of oxygen) 氧离子注入；

- 2) SDB (Silicon Wafer Direct Bonding) 键合；

注意点：防止衬底非晶化。





§ 4.3.2 硅的各向异性刻蚀技术

基于硅的不同晶面具有不同的腐蚀速率的特性，在硅衬底上加工出各种各样的微结构。（100）：最快；（110）：一般；（111）：最慢。

1、 腐蚀剂的种类

- a) 有机腐蚀剂：EDP（乙二胺，邻苯二酚，水）；联胺。
- b) 无机腐蚀剂：（碱性）KOH, NaOH水溶液

2、 影响腐蚀性的因素

- a) 腐蚀系统成分配比不同，腐蚀特性不同；
- b) 晶体的晶向及掺杂浓度

例如：在重掺硼（约 10^{20} cm^{-3} ）样品中，腐蚀速率接近于零；这种特性可用于自致停止腐蚀技术（掺硼的P型硅，掺磷的N型硅腐蚀速率随浓度升高而降低变慢）。

- c) 温度：温度越高，腐蚀速率越大。



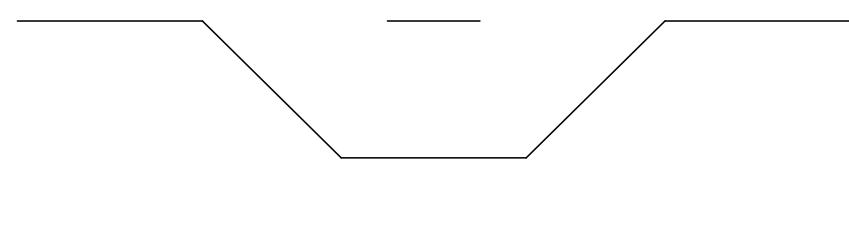


3、各向异性腐蚀的机制

- a) 硅不同晶面的悬挂键密度的不同, $\rho_{(100)} > \rho_{(111)}$;
- b) 由于硅在腐蚀过程中存在表面预钝化层, (111) 面预钝化层容易生长。

4、应用:

- a) 传感器: 悬臂梁, 压力-流量传感器芯片
- b) 电力电子器件: VVMOS;
- c) 场发射阵列;
- d) STM (扫描隧道显微镜) 探头;
- e) 太阳能电池。





§ 4.3.3 干法刻蚀

1、湿法刻蚀的缺点

- 1) 使用化学药品，不利于安全操作和环境保护；
- 2) 腐蚀后要清洗，效率低；
- 3) 由于侧向腐蚀和钻蚀，难以获得高精度的细线条；
- 4) Si_3N_4 、难熔金属难腐蚀。

目前干法刻蚀是VLSI的标准腐蚀技术。

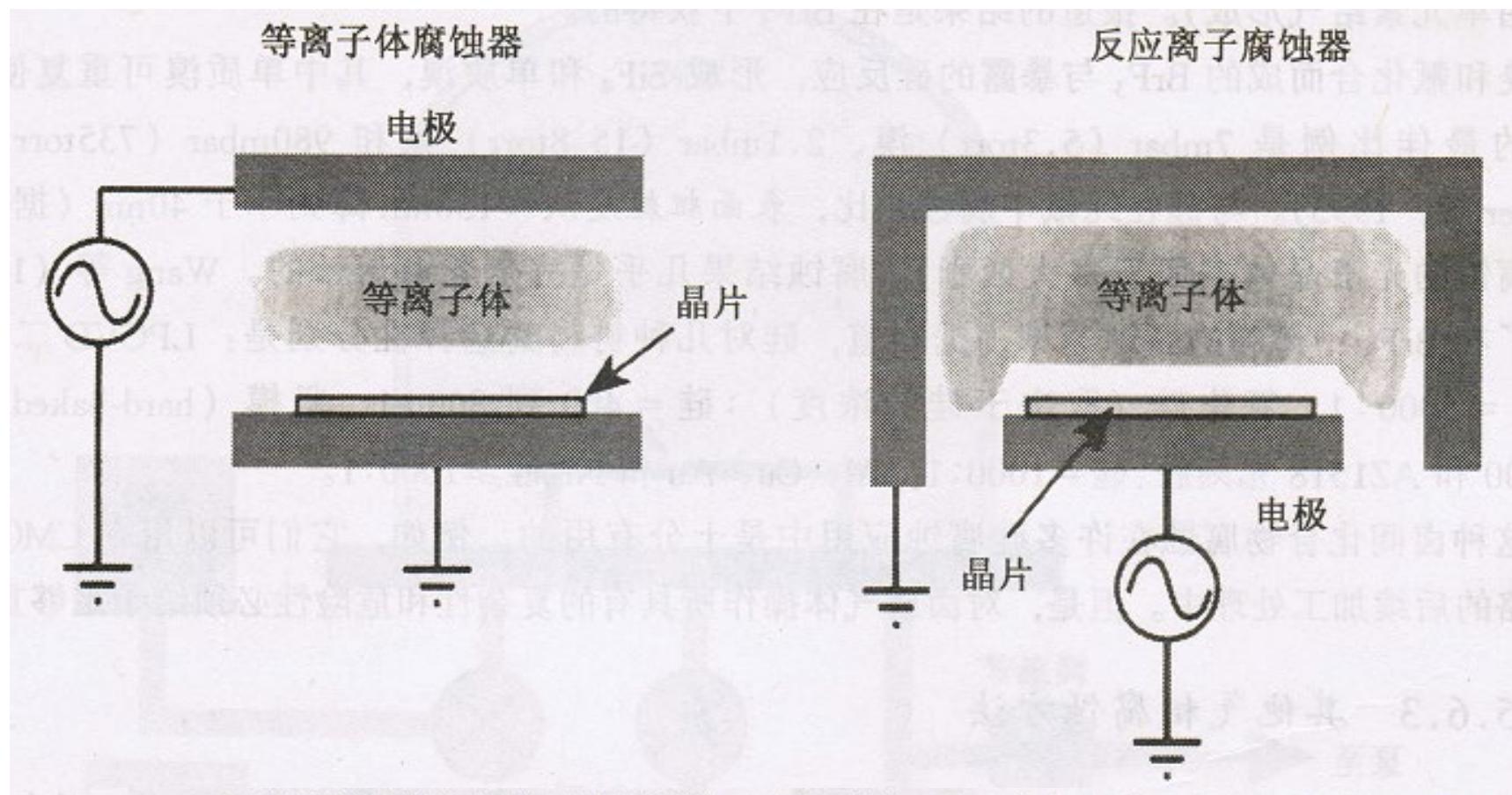
2、等离子体腐蚀技术

1) 溅射腐蚀和离子束铣蚀；具有高的分辨率，但选择性不够好，属物理反应。

2) 等离子体腐蚀：—ECR等离子体刻蚀机

惰性气体（ CF_4 ）在高频或直流电场中受到激发并分解，然后





等离子体腐蚀器（左）（晶片接地，电极对称）和反应离子腐蚀器（右）（晶片加电，接地电极的表面面积要比加电电极的大得多）。反应离子腐蚀器（RIE），具有以下特点：
1) 晶片位于加电电极之上，2) 电极不对称，3) 操作压力相对较低 (10^{-3} 到 10^{-1} torr)，而等离子体腐蚀为 10^{-1} 到 10^{+1} torr)，能产生垂直于表面的能量相对较高的离子



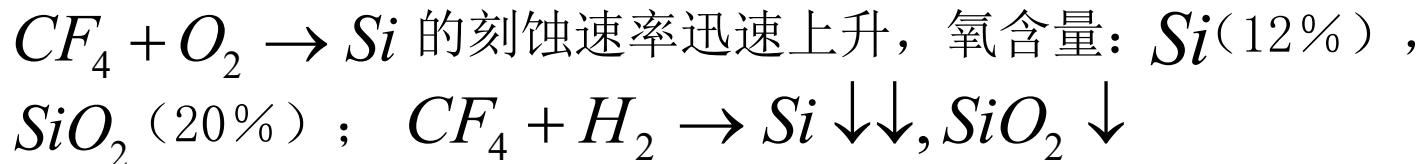


与被腐蚀材料起反应，形成挥发性物质（ SiF_4 ），再由抽气泵排出去，属物理/化学反应。

3) 反应离子腐蚀和反应离子束腐蚀，属化学反应，各向同性。只是用分子气体取代离子源中的惰性气体。

4) 影响腐蚀的因素

a) 气体的成分



C:F

$SiO_2 : Si$

CF_4 1:4

1:1

CHF_2 1:2

10:1

b) 其他因素

离子能量，入射角，气体的流速、压强，功率密度，频率，温度等。





3、 硅的直接激光加工

作用：对VLSI电路制造的各阶段中出现的差错进行局部修改

原理：利用强聚焦的激光束，促使表面进行化学反应（热激活反应、光化学反应）

4、 LIGA技术：光刻电铸成型

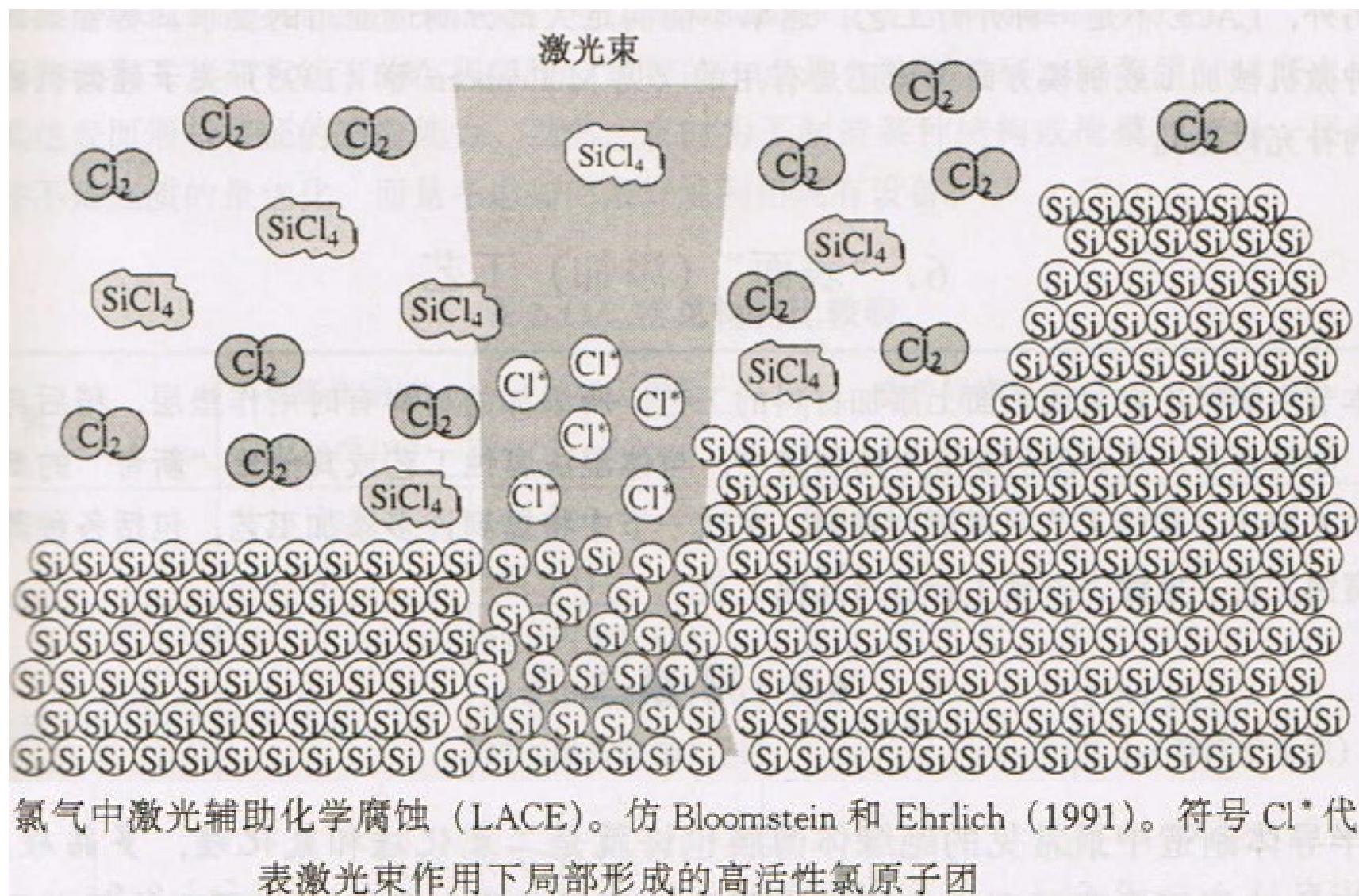
设备：使用由功率强大的同步辐射加速器所产生的软x射线源。

原理：使软x射线通过掩膜版，在导电的衬底上，将图形深深地刻在聚合物上，利用高能照射改变聚合物的腐蚀速率这一特性，将经照射后的聚合物，经过湿法腐蚀后在聚合物上留下了部件的主体模型。再用电镀工艺将金属淀积进入模型；将聚合物除去，就可得到最终部件。

§ 4.3.4 自致停技术

书中介绍的 P^+ 自致停腐蚀和P—N结自致停腐蚀以及埋层（SOI晶片）方法，属于通过控制掺杂浓度或控制硅的电位而达到自致停腐蚀的目







的，下面介绍几种其它方法。

1、注入损伤自致停腐蚀

进行阳极腐蚀时，空穴参与腐蚀过程。通过低剂量离子注入在硅表面形成一层损伤层，其中空穴的寿命非常短，则腐蚀液遇到损伤层速率明显降低。腐蚀完成后，需将硅片退火，使损伤层得到恢复。

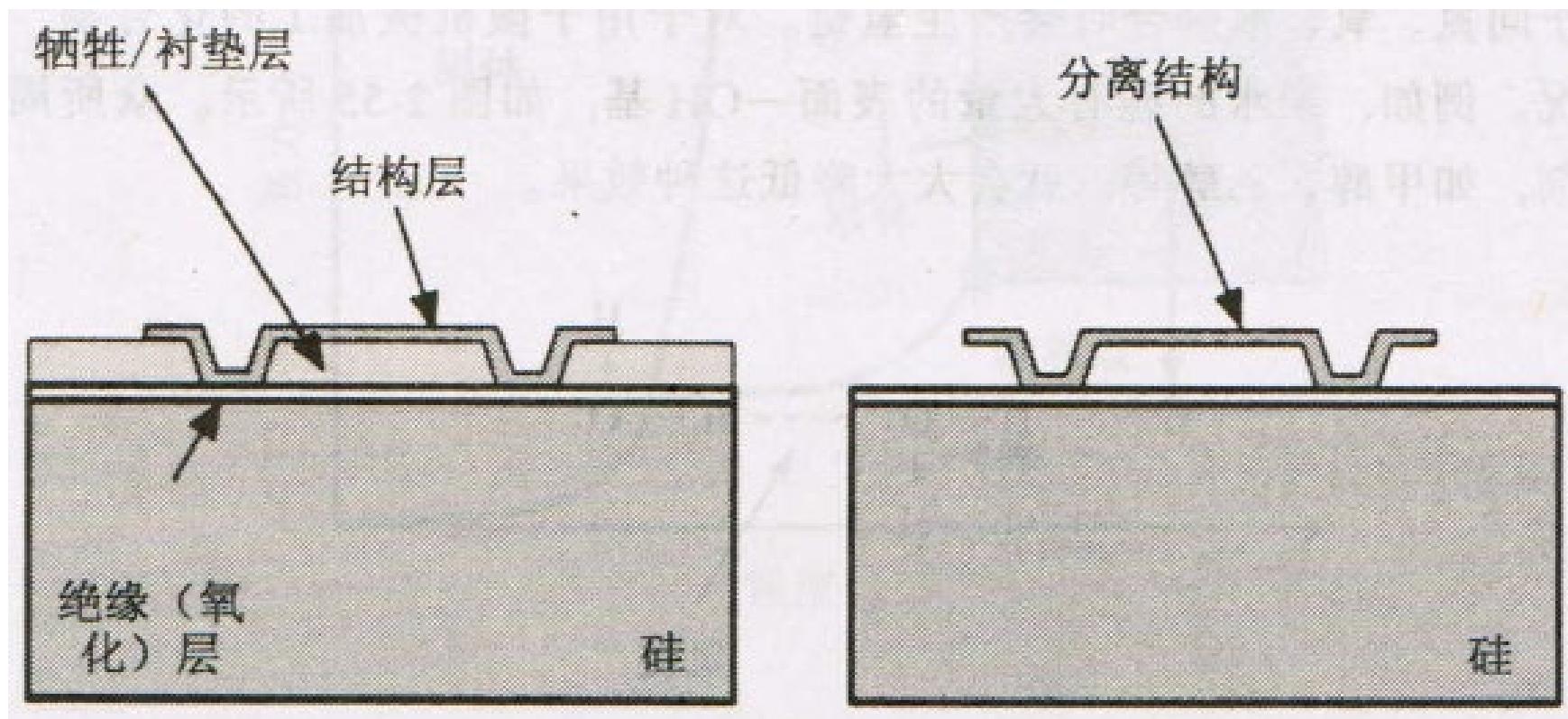
2、 $Si_{1-x}Ge_xSi$ 异质结构自致停腐蚀

利用分子束外延（MBE）或金属有机化学气相沉积技术获得 $Si_{1-x}Ge_xSi$ 的异质结构，然后对这些结构进行选择性腐蚀，如EDP、KOH腐蚀Si而不腐蚀 $Si_{1-x}Ge_x$ 。

§ 4.3.5 牺牲层技术

利用 SiO_2 作为牺牲层，采用选择性腐蚀技术，将两层薄膜中的下层薄膜腐蚀掉。





用牺牲层（如磷硅玻璃）形成的另一种材料（如多晶硅）构成的抬高和分离的微机械结构

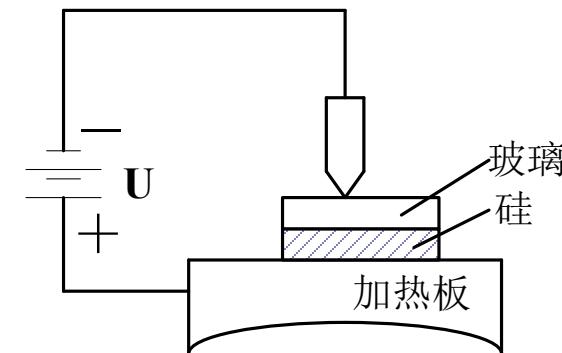
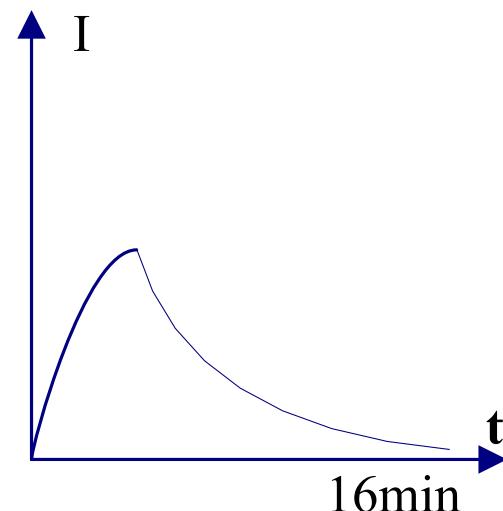




§ 4.3.6 键合技术

1、静电键合

1) 键合原理:



外加电压时，玻璃中的 Na^+ 向负极方向漂移，在紧邻硅片的玻璃表面形成耗尽层。由于耗尽层带负电荷，硅片带正电荷，所以硅片和玻璃之间存在较大的静电吸引力，使二者紧密接触。

当: $E = 3 \times 10^{-6} V/cm$ 时, $F \approx 24$ 大气压力。

温度的作用，使硅/玻璃界面发生化学反应，形成 $Si-O-Si$ 化学键。





2) 影响静电键合的因素

- a) 温度: $180\sim500^{\circ}\text{C}$ 低: 导电性差; 高: 软化。
- b) 电压: $200\sim1000\text{V}$ 低: 引力不够; 高: 击穿玻璃。
- c) 键合引入的应力: 选择热膨胀系数相同的材料; 选择合适的温度点, $T=300^{\circ}\text{C}$ 。
- d) 阳极形状的影响
采用双平行板电极会产生部分孔缝。

3) 应用

- a) 制作微传感器中传感器的封装;
- b) SOI材料的制备;
- c) 场发射阵列的制备。

2、热键合技术 (SDB)

两硅片通过高温处理直接键合在一起, 不需要粘合剂和外加电场。

1) 工艺步骤





- a) 表面处理;
- b) 预键合，在室温下将两硅片面对面贴合在一起;
- c) 键合。

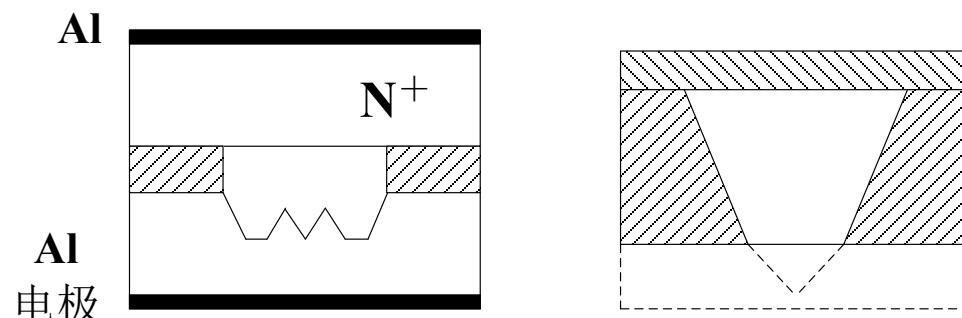
在 O_2 或 N_2 环境中经数小时的高温处理，书中给出了键合原理示意图。

2) 应用

适用于 $Si - Si$ ， $Si - SiO_2$ ， $SiO_2 - SiO_2$ 等。

- a) 电力电子器件，如双极模式MOSFET;
- b) SOI材料的制备;
- c) 传感器与微结构;
- d) 真空微电子器件。

自封闭真空微二极管：
(见右图)

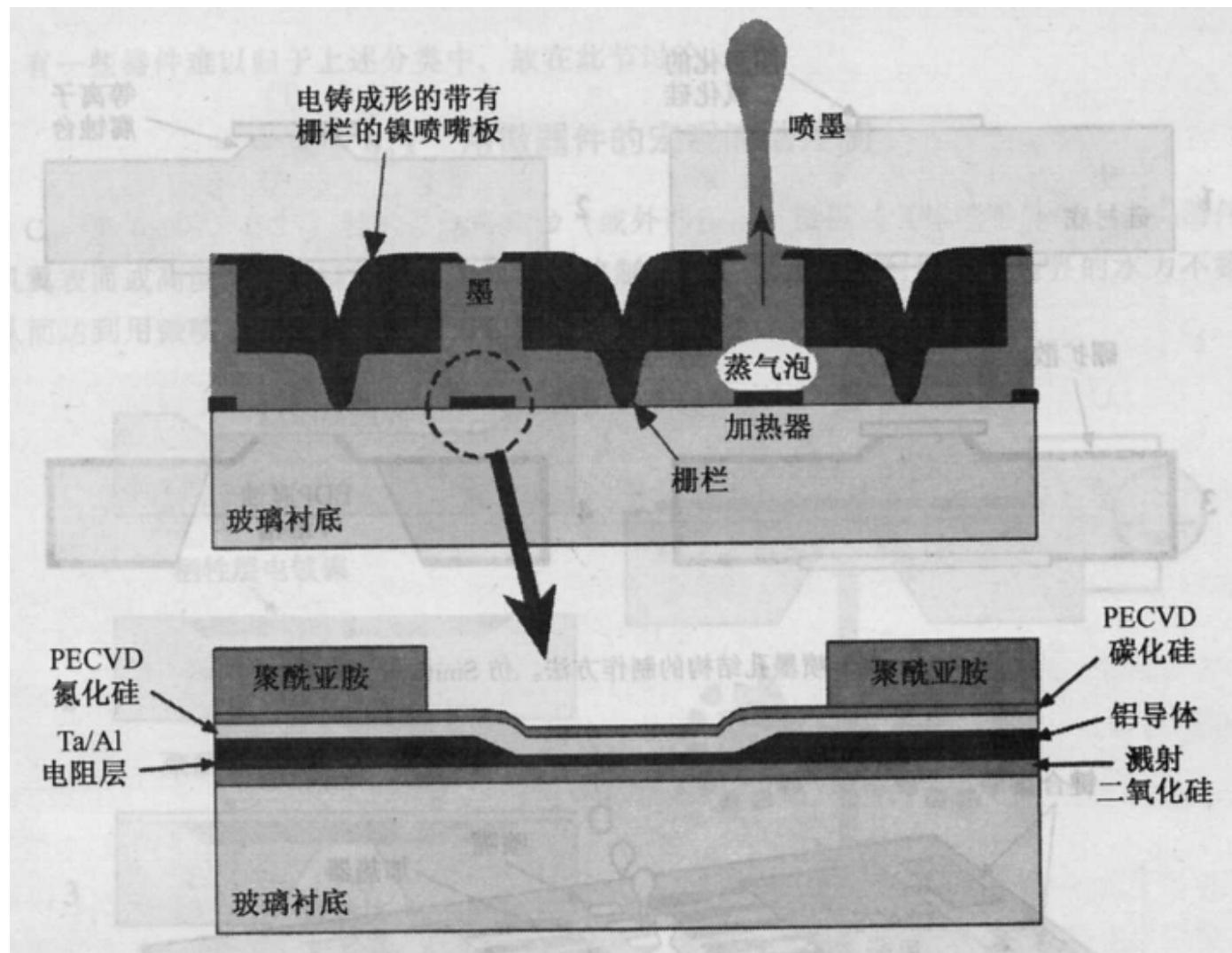




前面我们主要介绍了一些微机械加工技术，如：各向异性腐蚀、干法腐蚀、自致停技术以及键合技术等，在这里，我们结合微机械加工的基本技术，介绍典型的微机械结构及其加工过程。

为了开阔大家的眼界，这里罗列了一些采用微机械加工技术的多种器件，如：“喷墨嘴、微型光栅光谱仪、气相色谱仪、微型冷却器、触觉传感器、生物探针与生物传感器、陀螺仪、微型马达以及半导体压力传感器、硅加速度传感器等。”实际上这些器件的总的加工工艺都是大同小异，主要加工技术仍为：薄膜生成技术、刻蚀技术、键合技术。这里仅具体介绍硅微压阻式加速度传感器和同步马达。





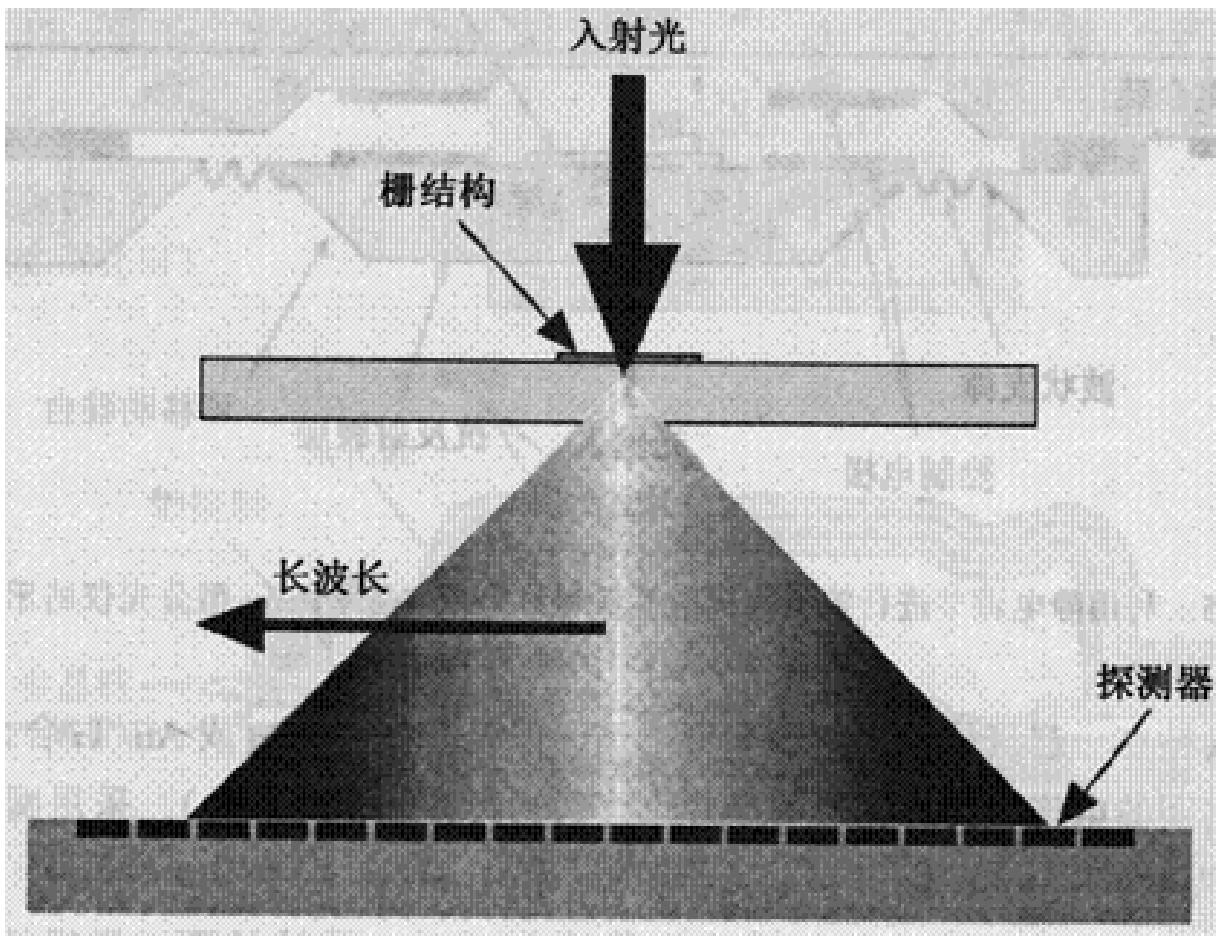
图中为键合的电铸成形镍喷嘴板和多层薄膜加热器

惠普喷墨器件图



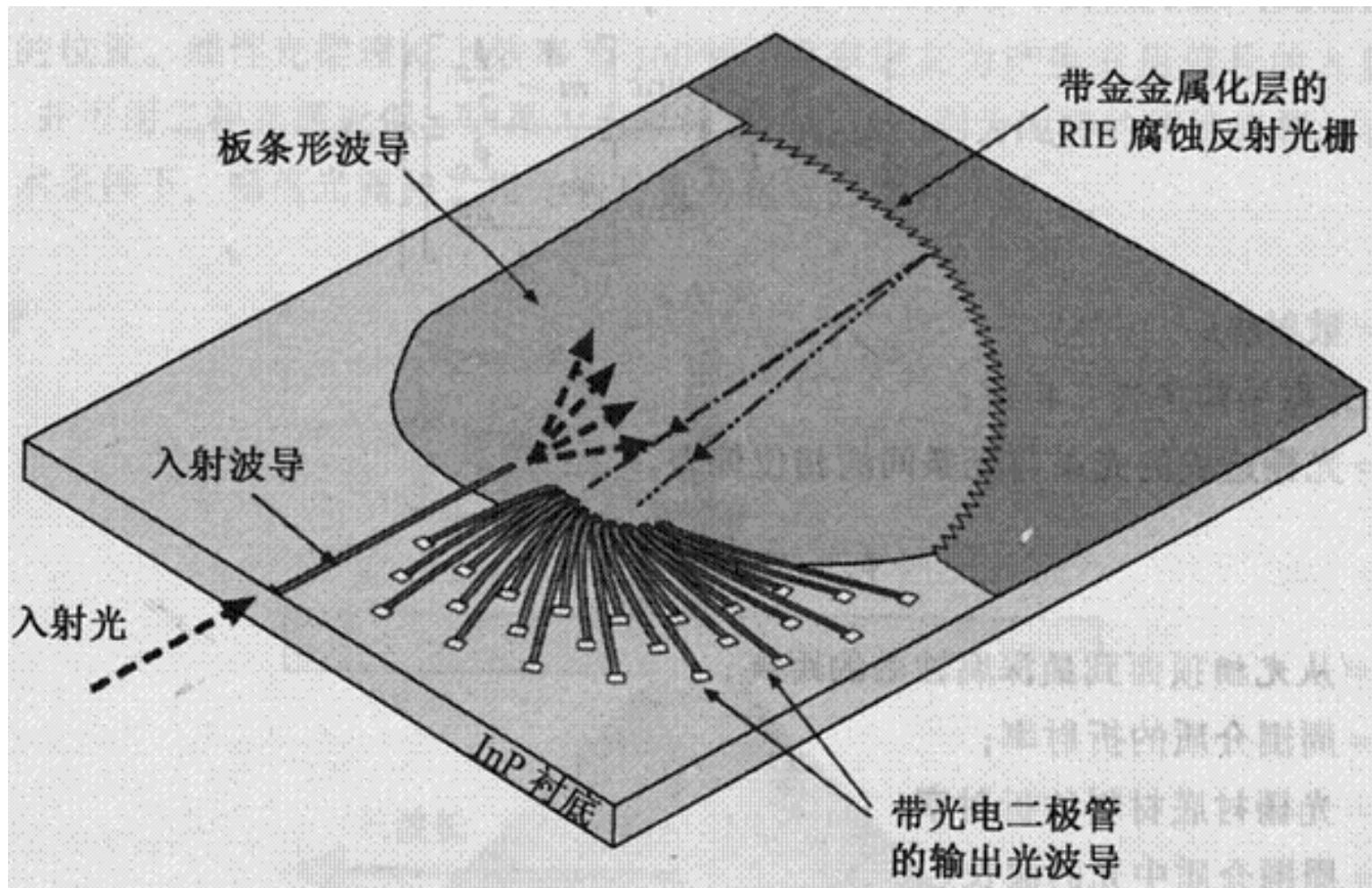


微型光栅光谱仪



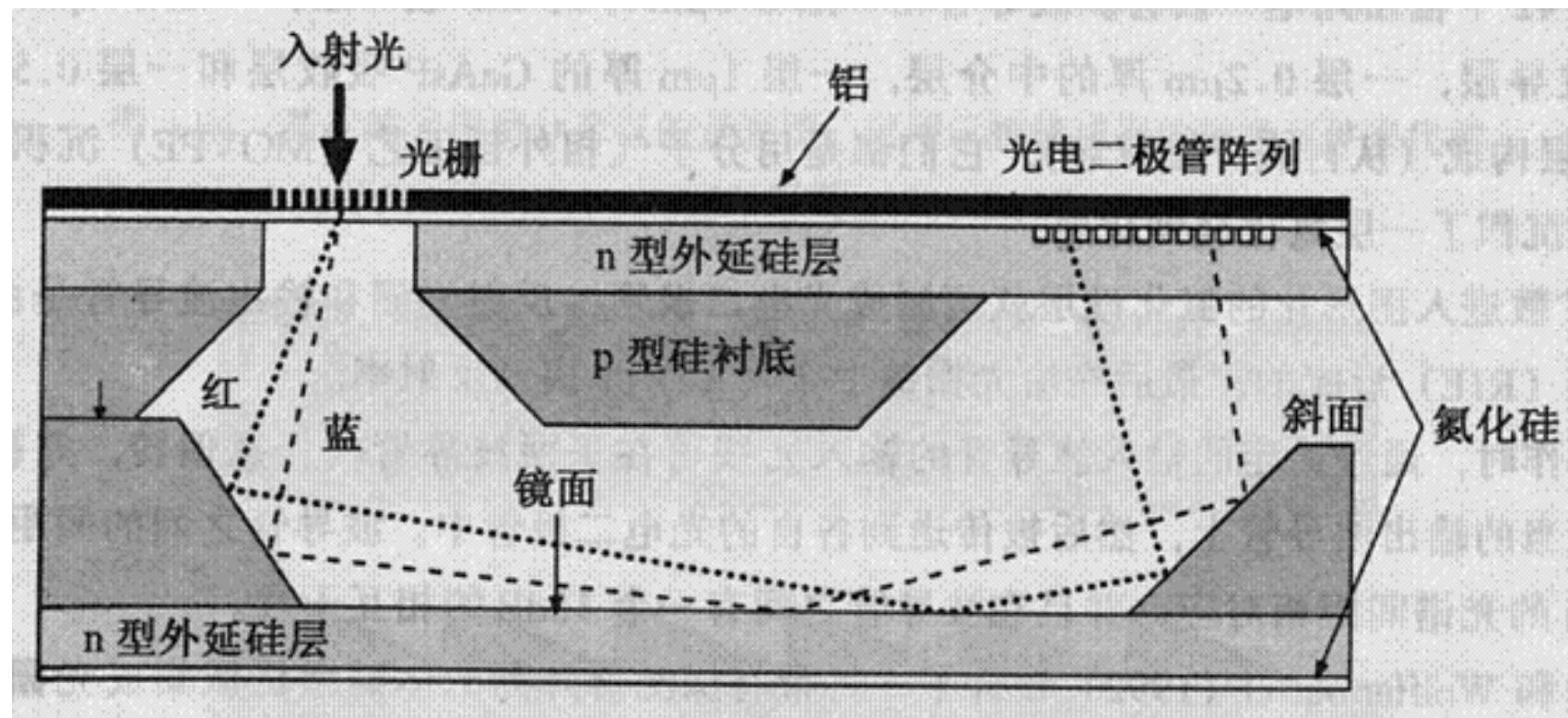
基本的光栅型分光仪的示意图。





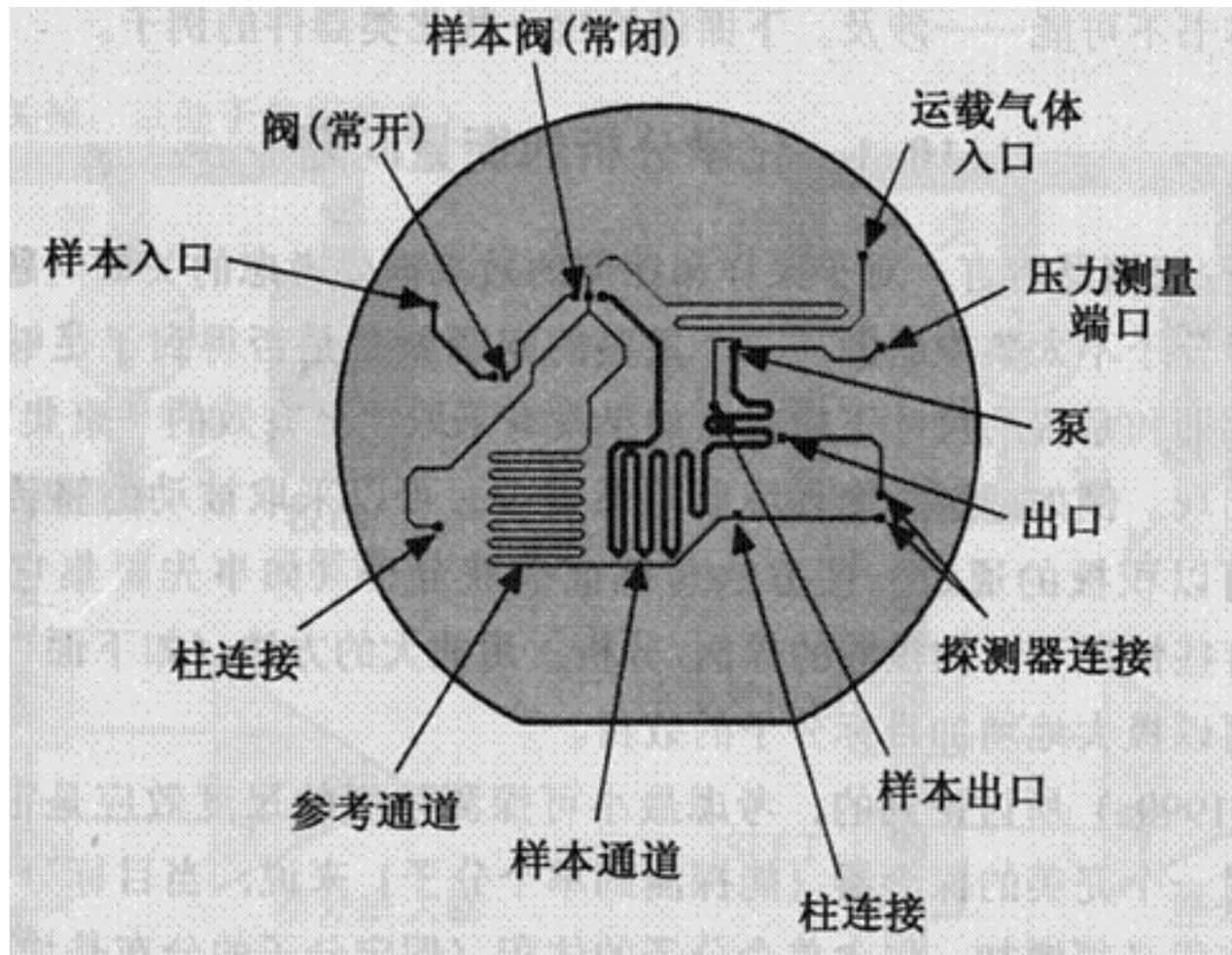
带有探测器的全集成 InGaAsP/InGaAs/InP 分光仪





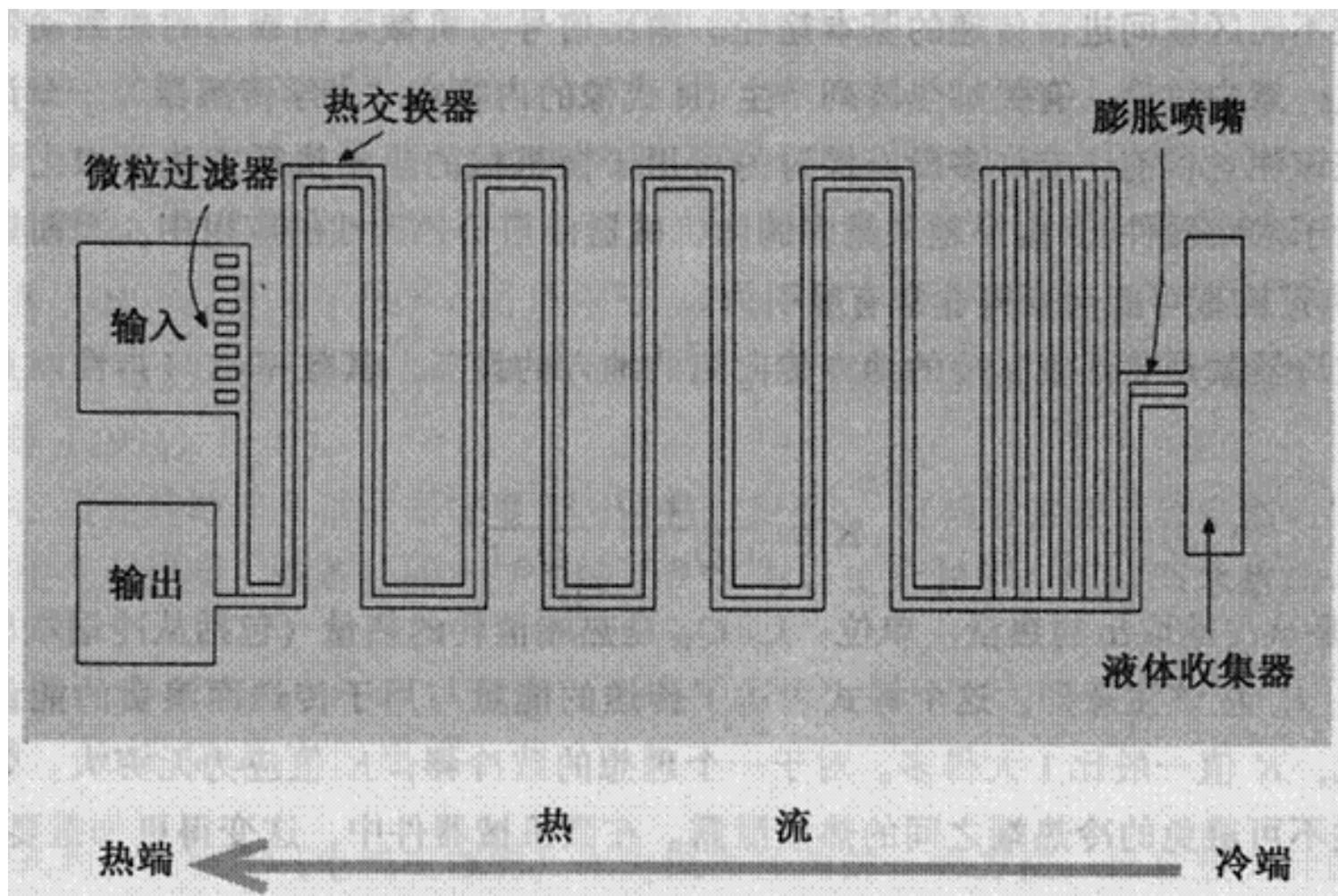
体微机械光栅分光仪的示意图





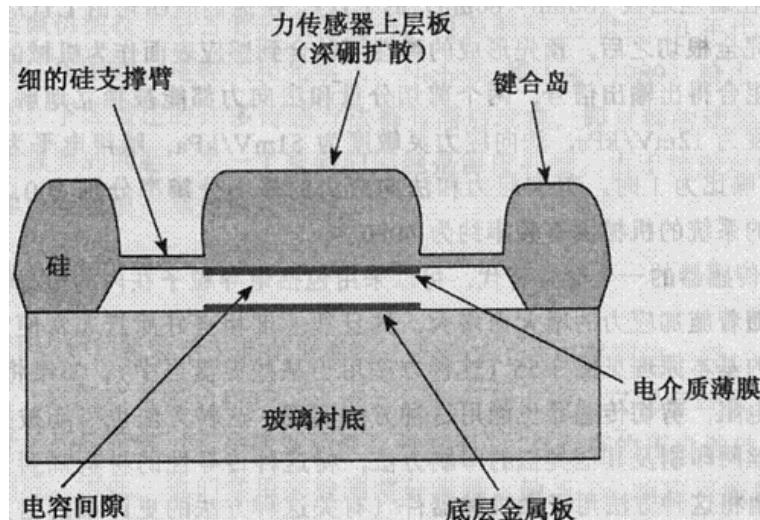
微机械气相色谱法系统



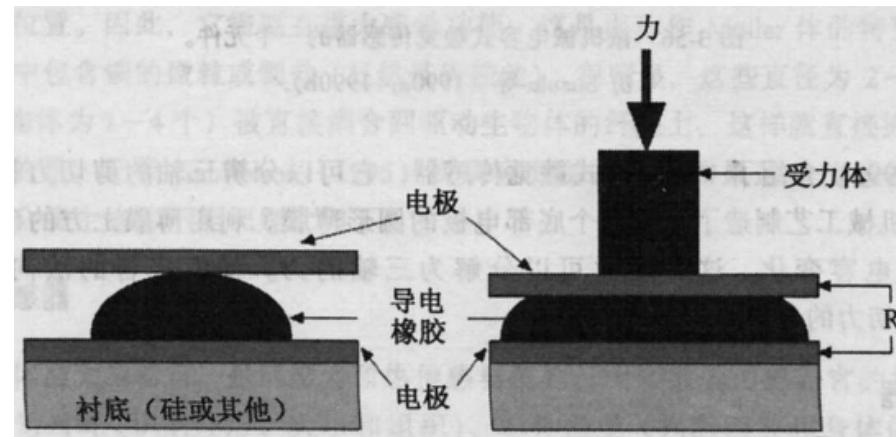


微机械 J-T 致冷器液体通道设计图

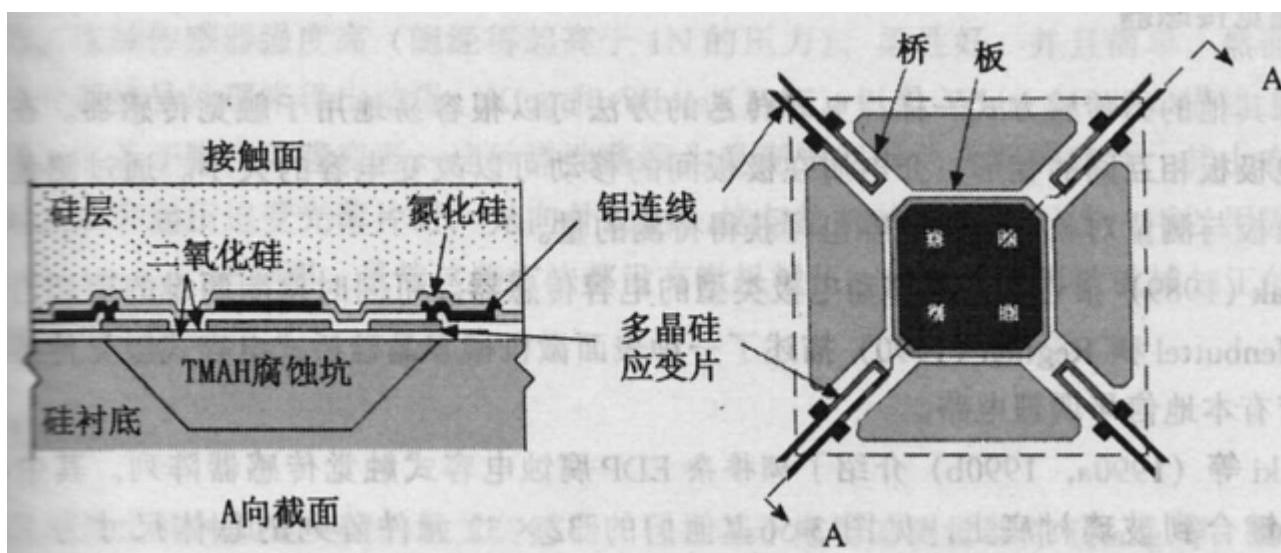




微机械电容式触觉传感器的一个元件



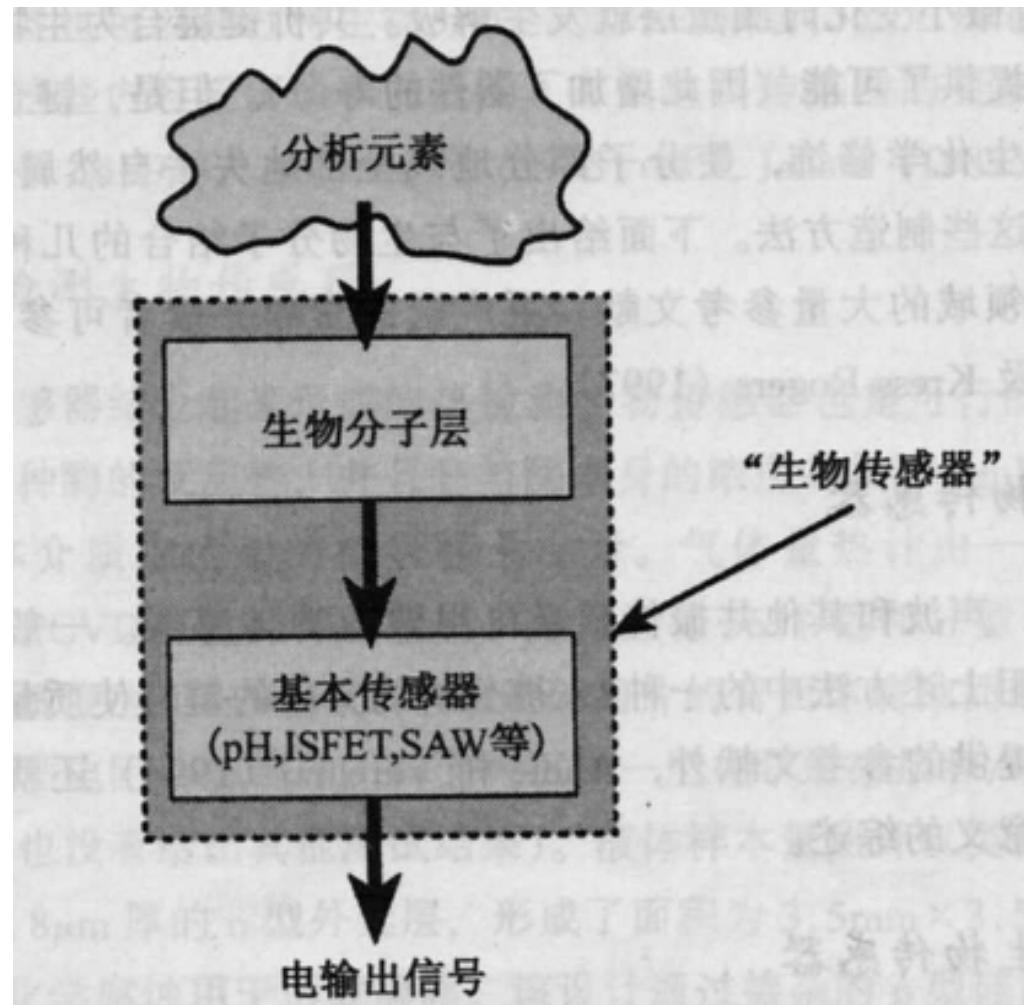
导电橡胶触觉传感器的基本概念图



微机械 CMOS 兼容的切向和法向力触觉传感器

几种不同形式的触觉传感器

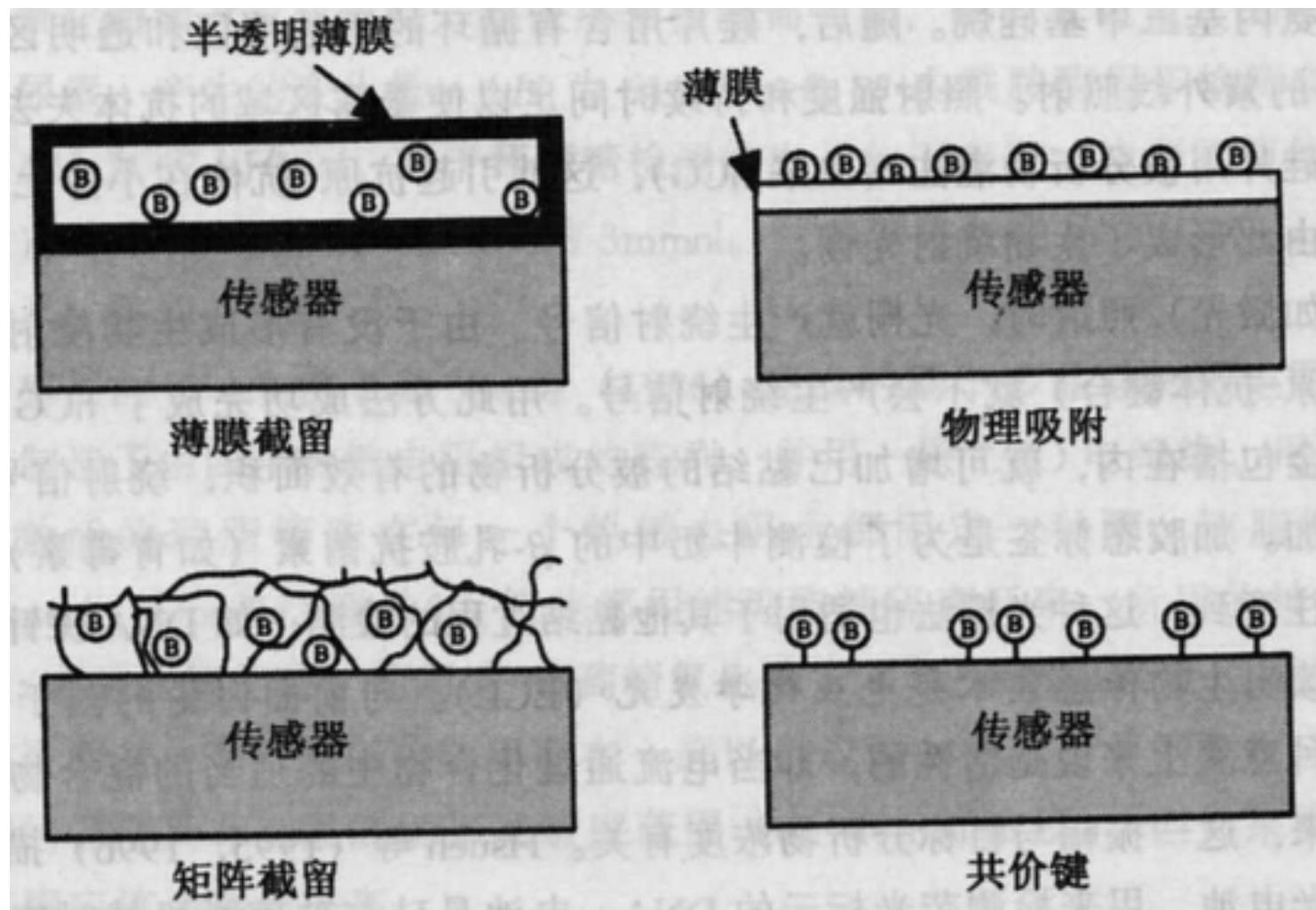




生物传感器的基本原理

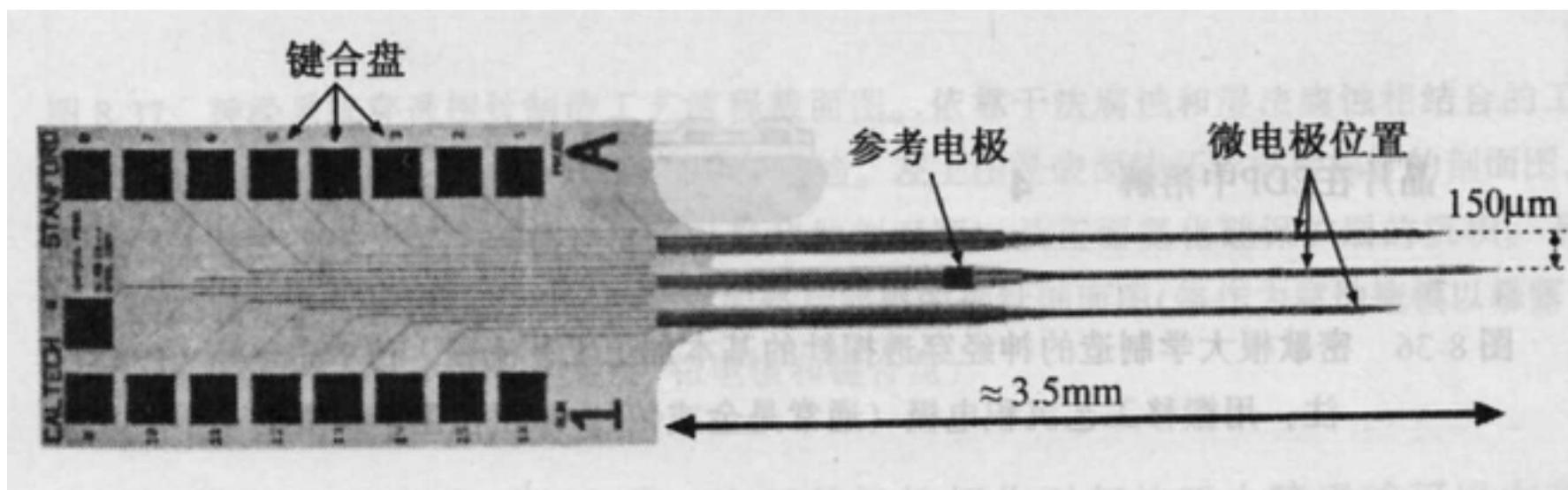
图中表示生物分子与提供输出电信号的二级传感器的结合





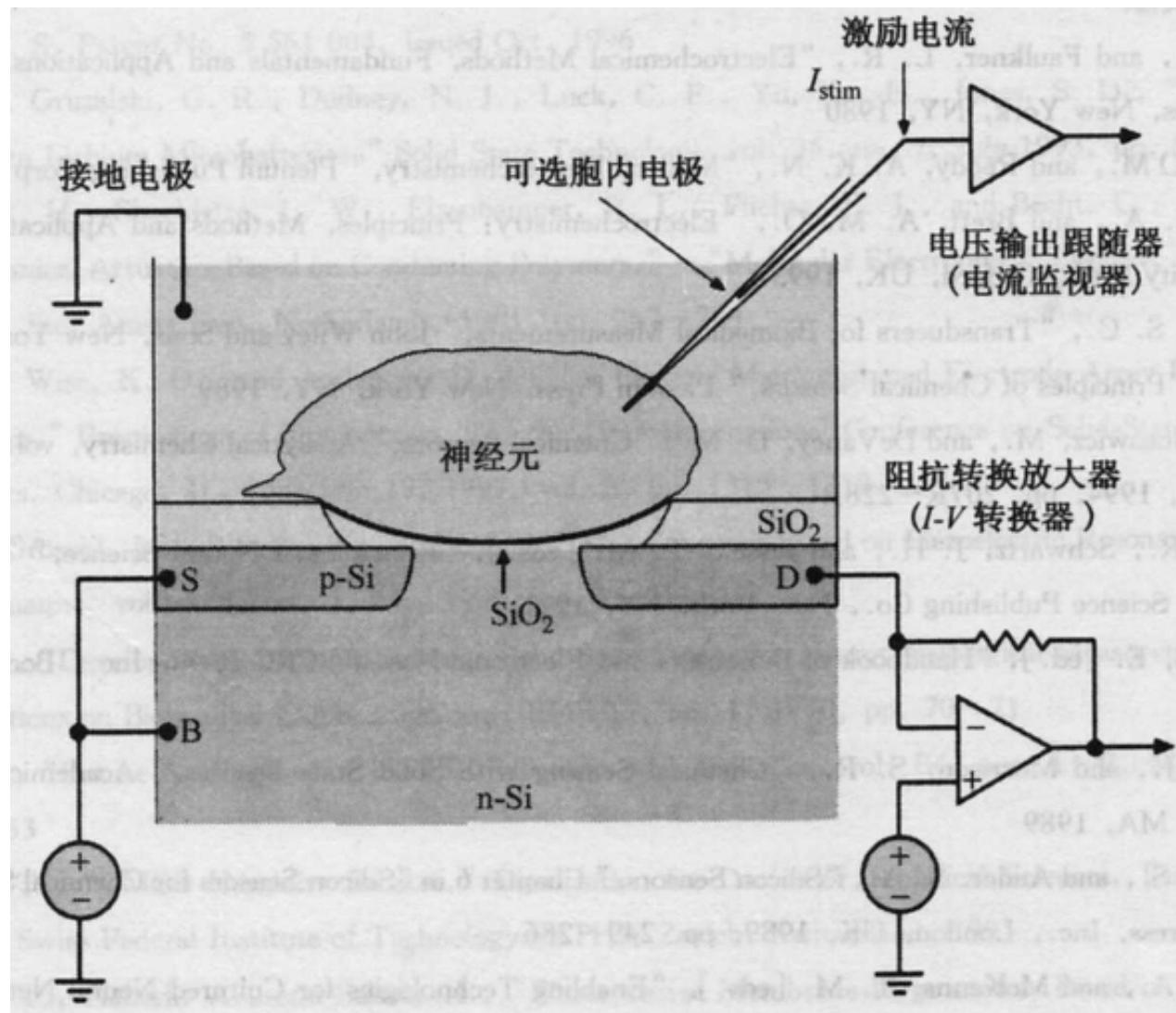
生物传感器中生物分子与基本传感器物理耦合的四种可能的模式。





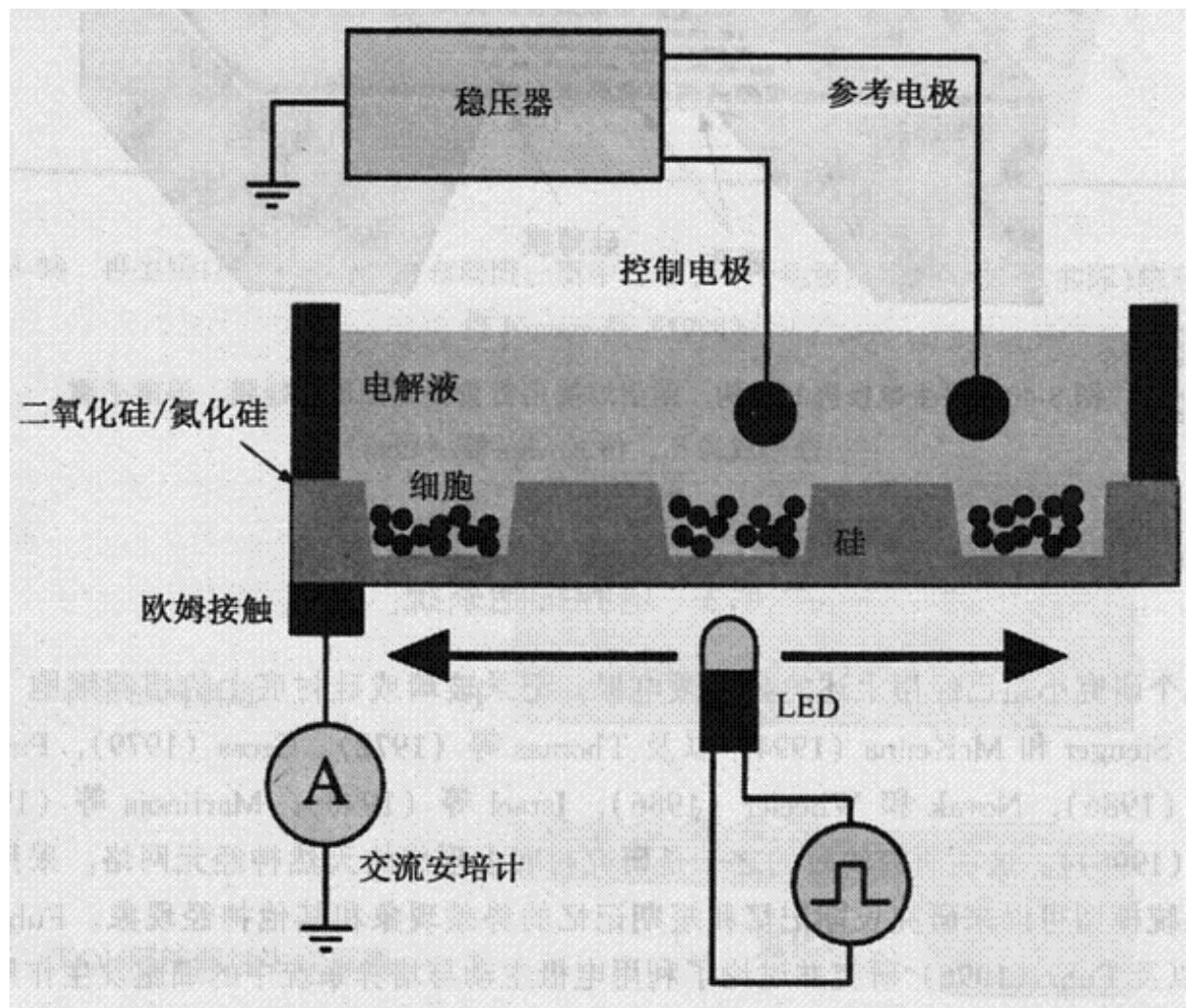
一种典型的神经系统穿透探针的俯视图





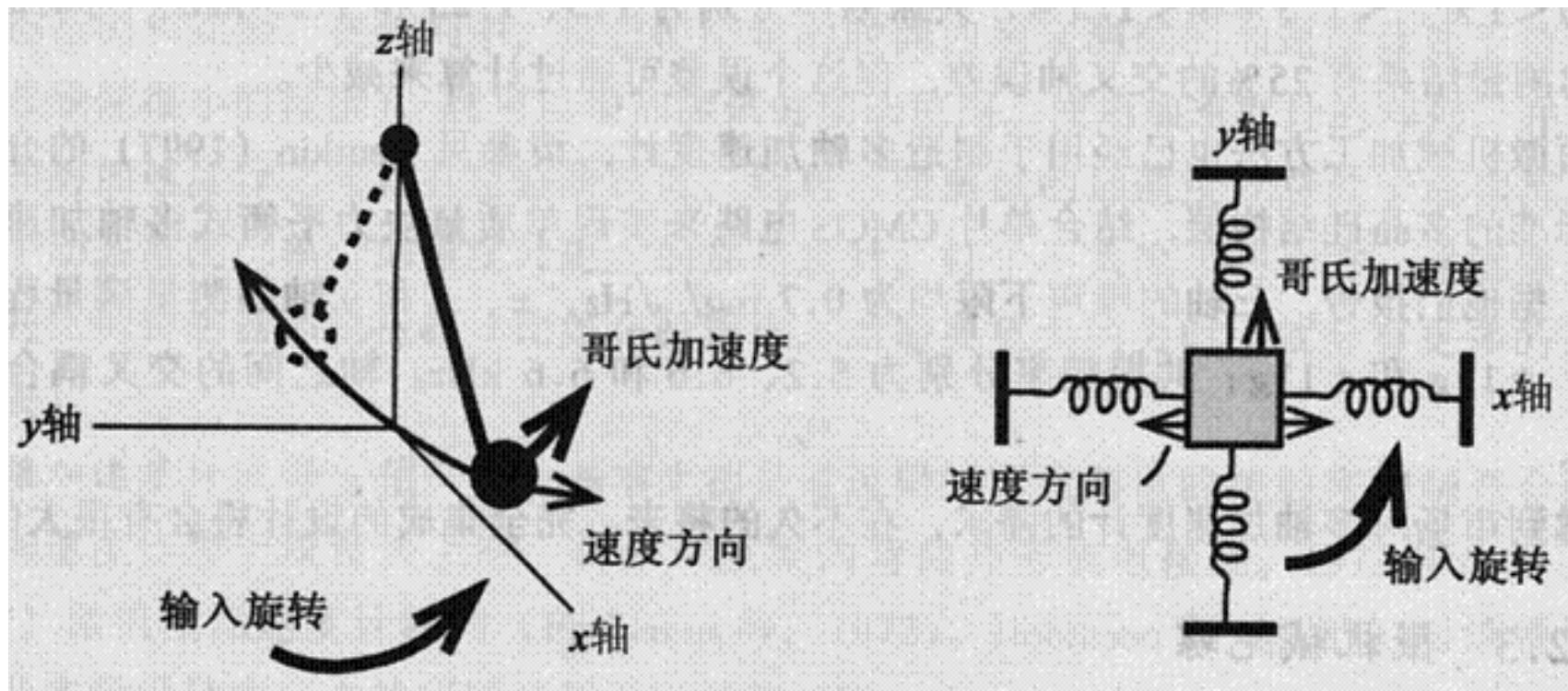
使用“开门”FET形成与神经元的直接电连接。





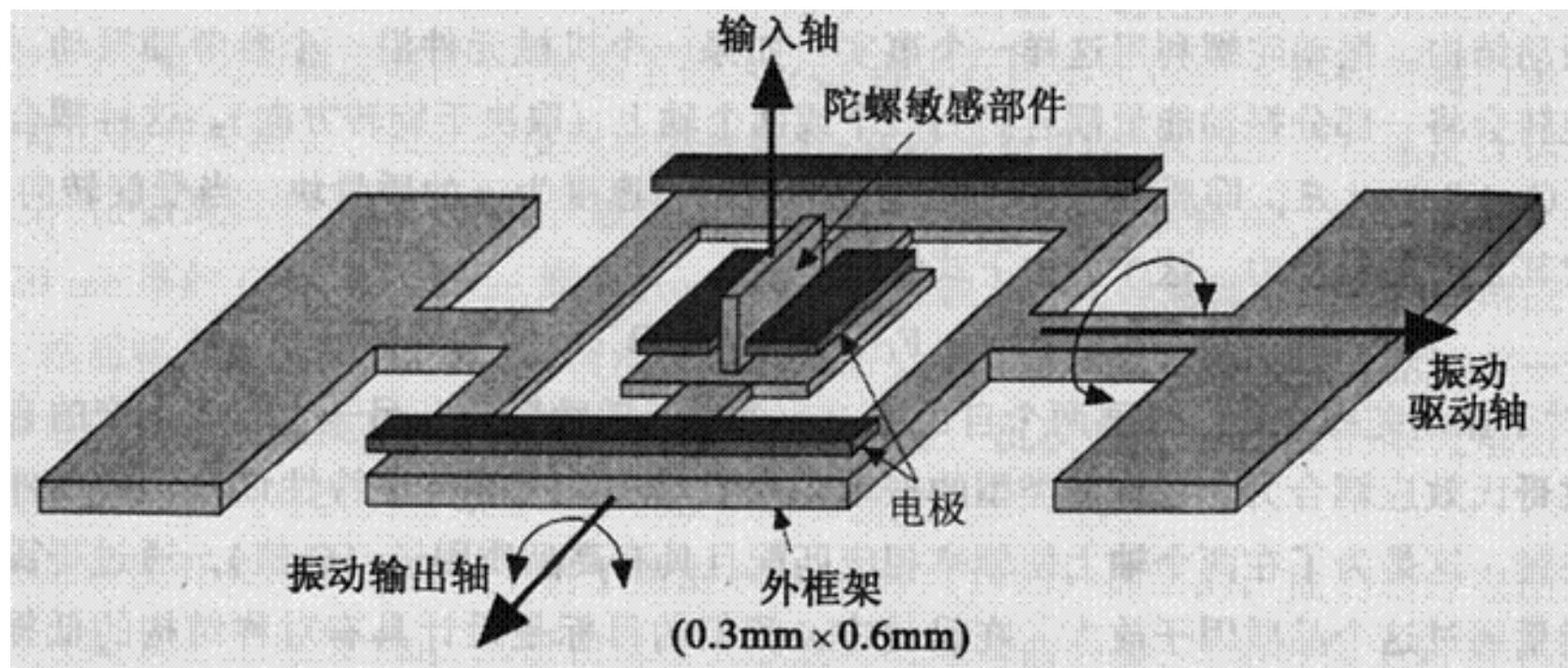
基于细胞外 pH 值测量的混合生物传感器系统





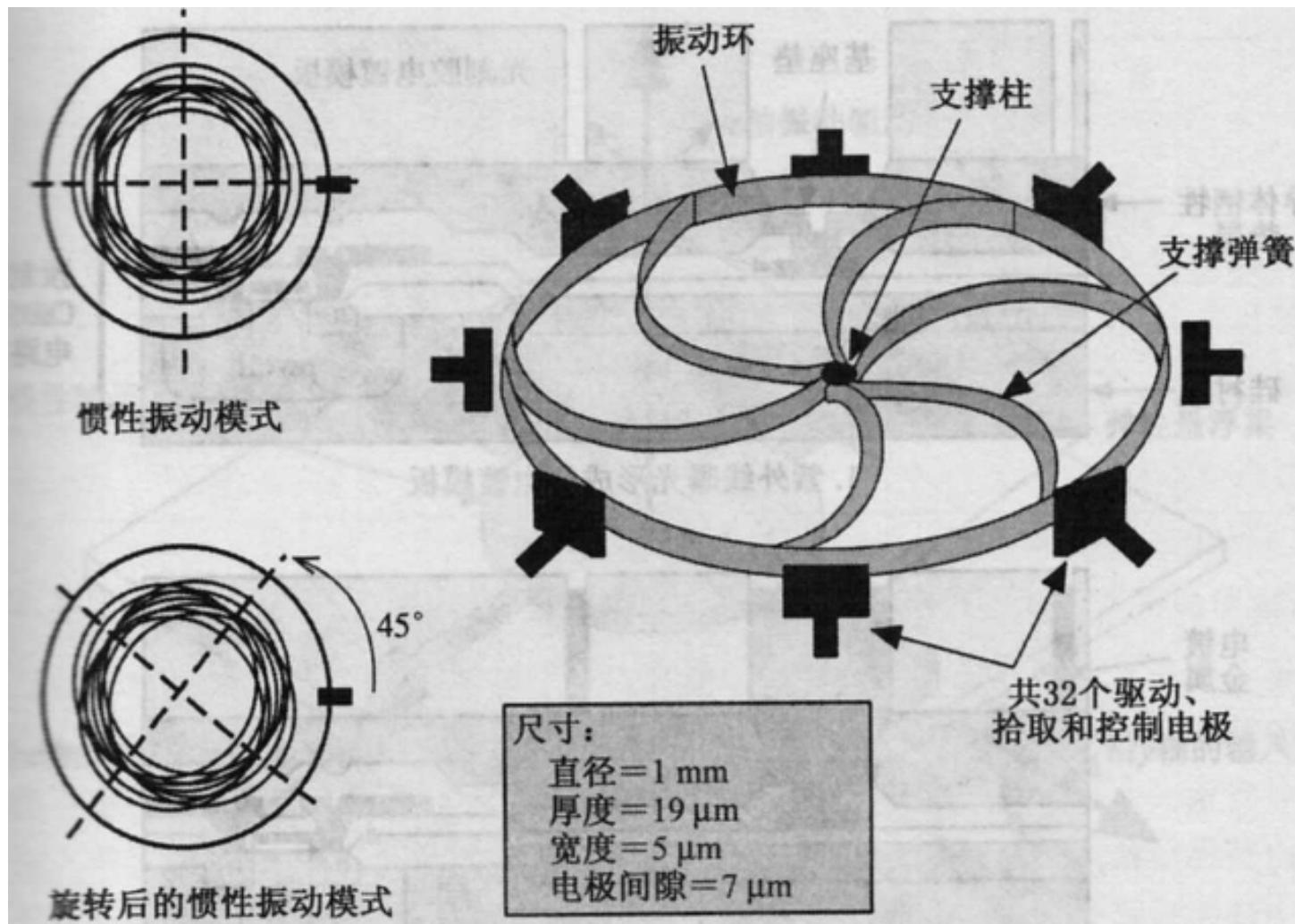
陀螺仪的基本工作原理和工作模式





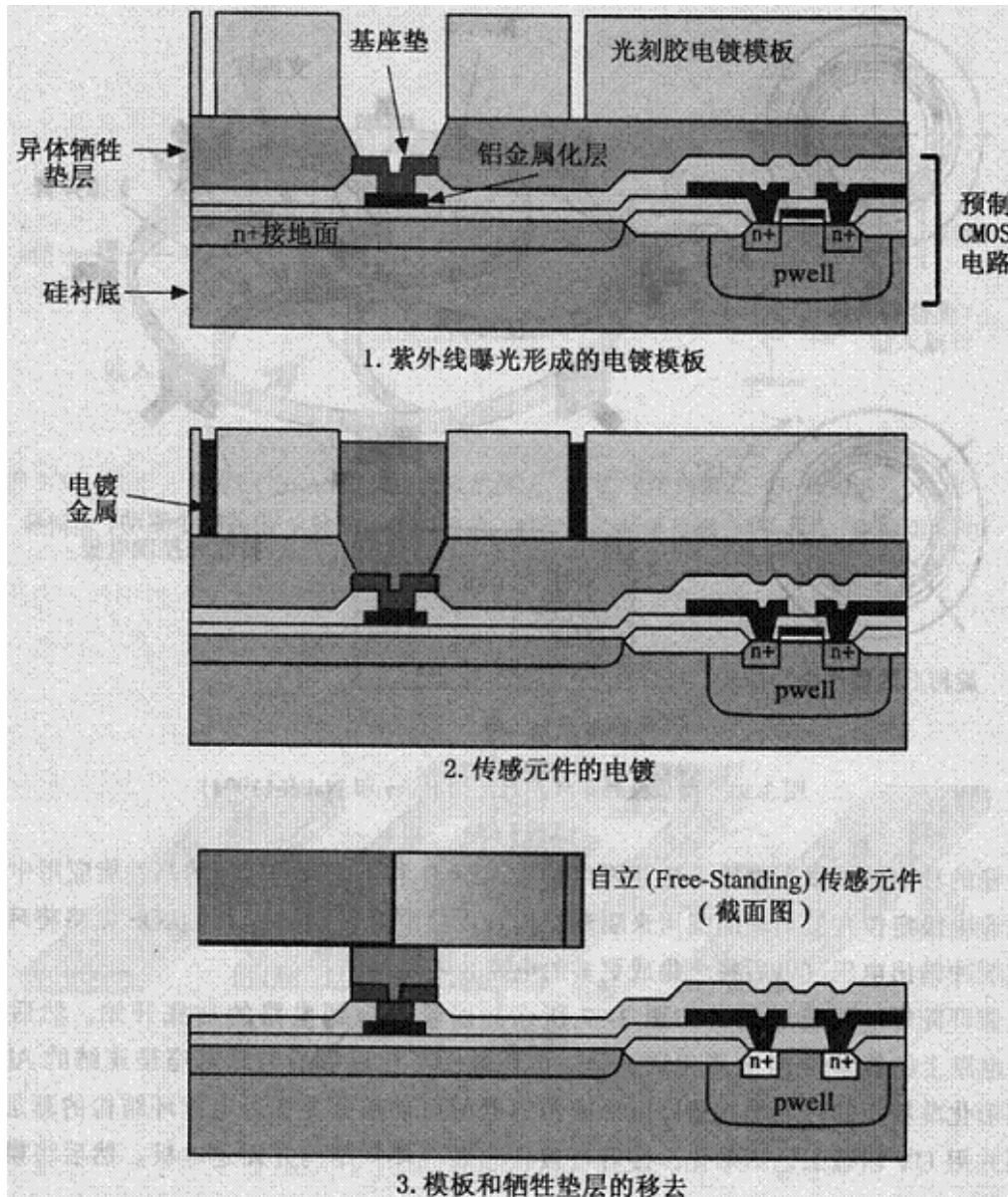
微机械力二次平衡陀螺





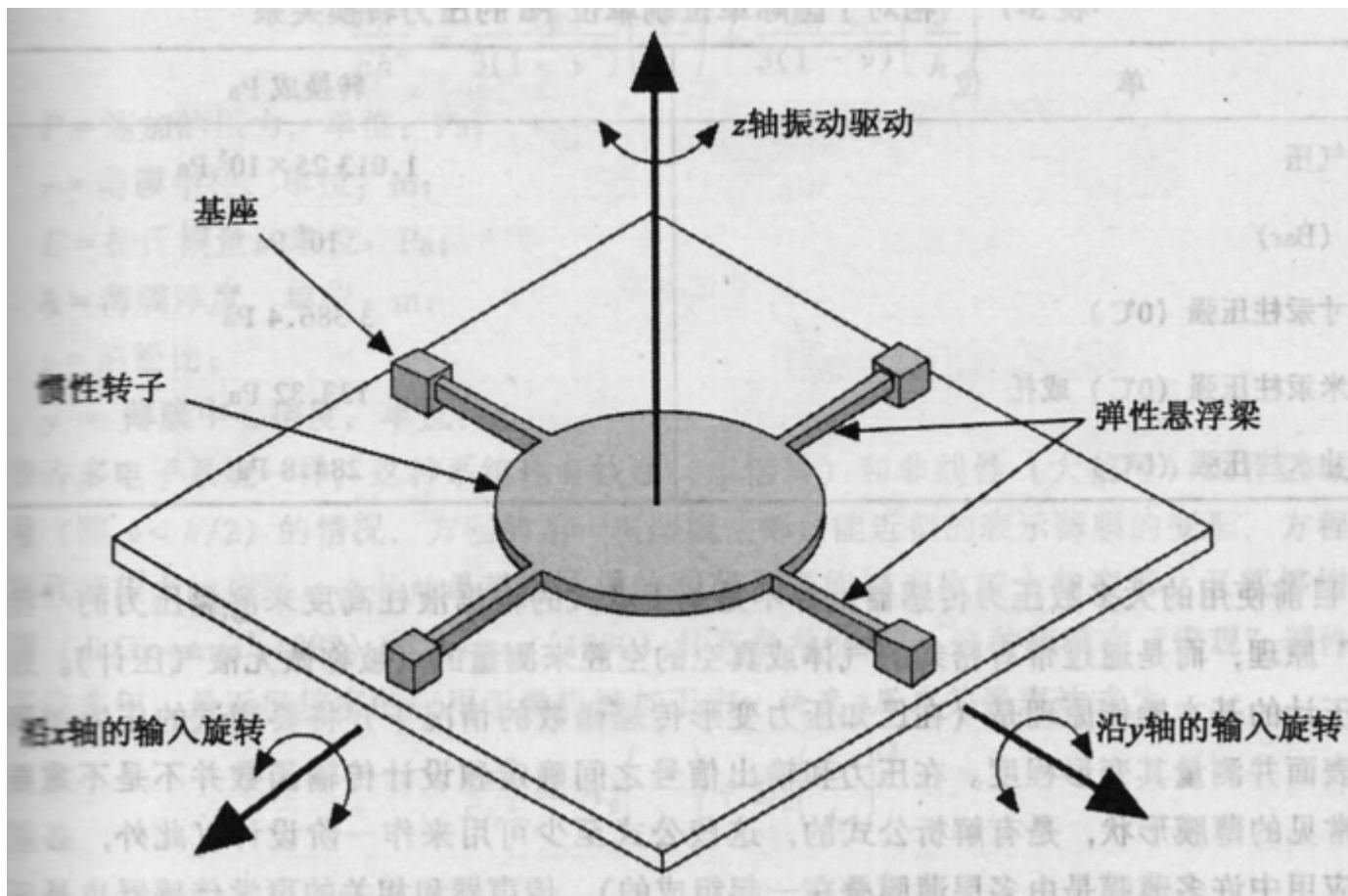
微机械共振环陀螺





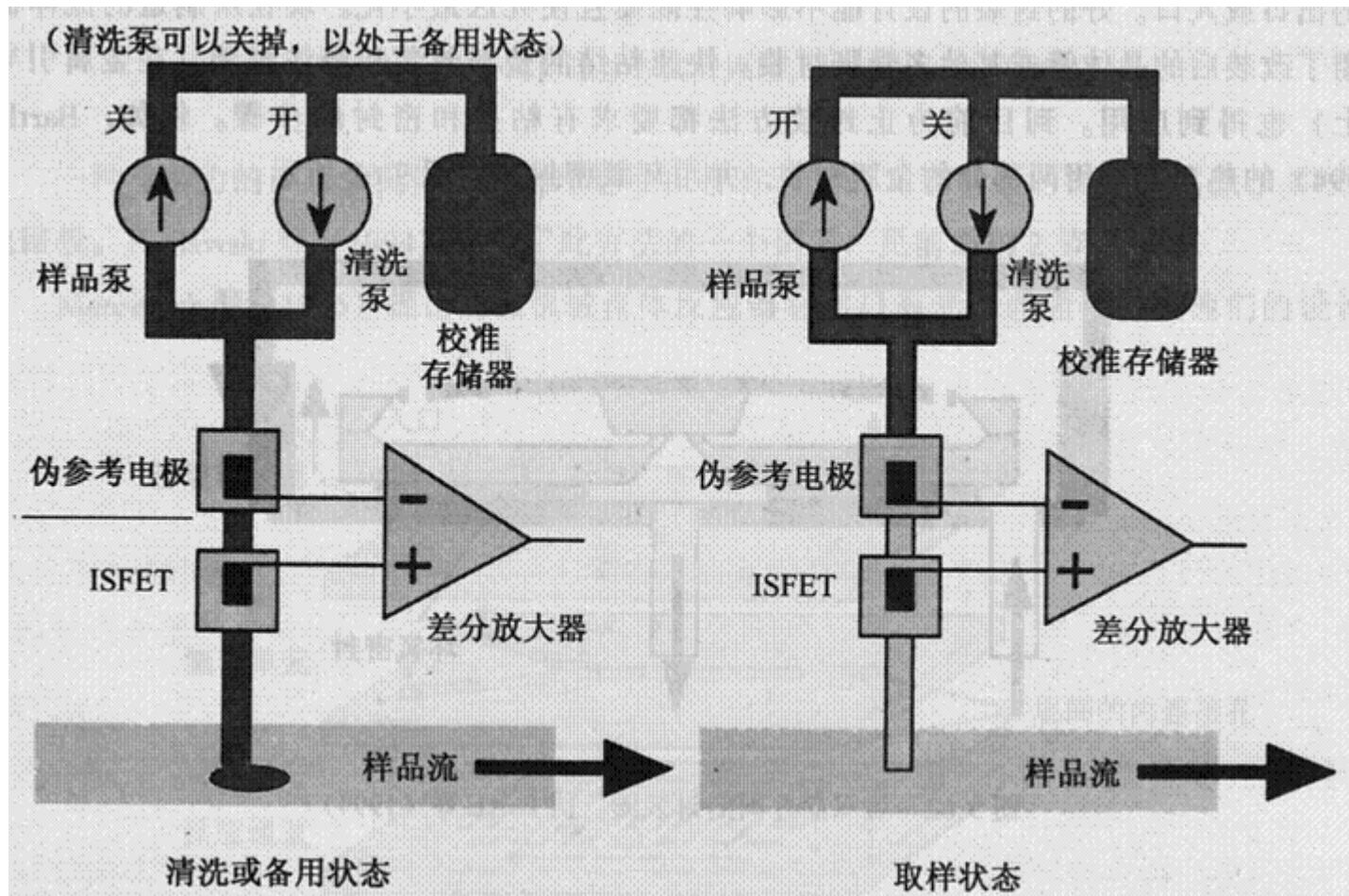
带有片上有源电路的电镀环陀螺的制造过程





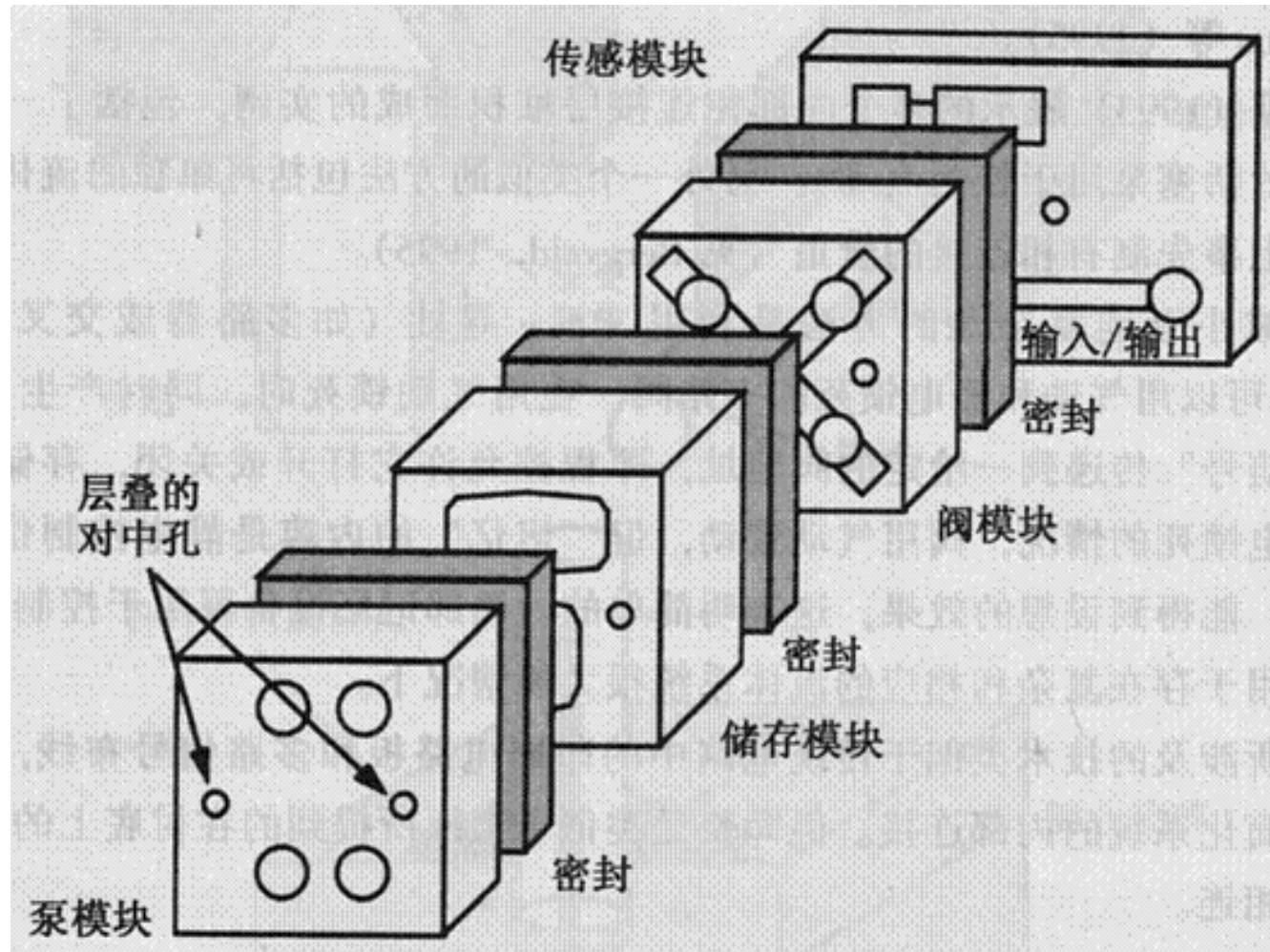
z 轴共振驱动的双轴微机械陀螺工作原理图





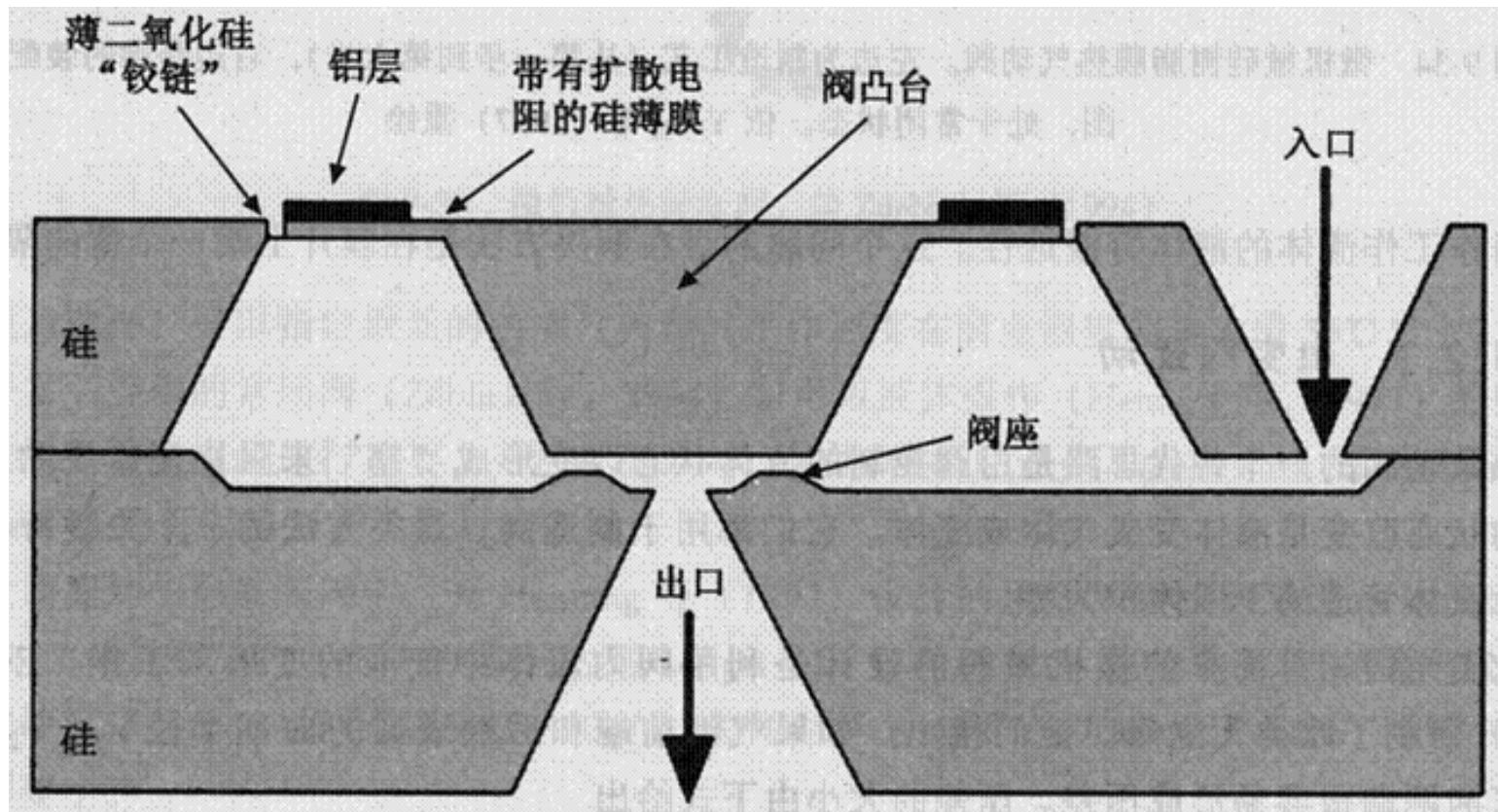
集成化学分析系统的清洗、校准、采样方案





堆积流体模块方案

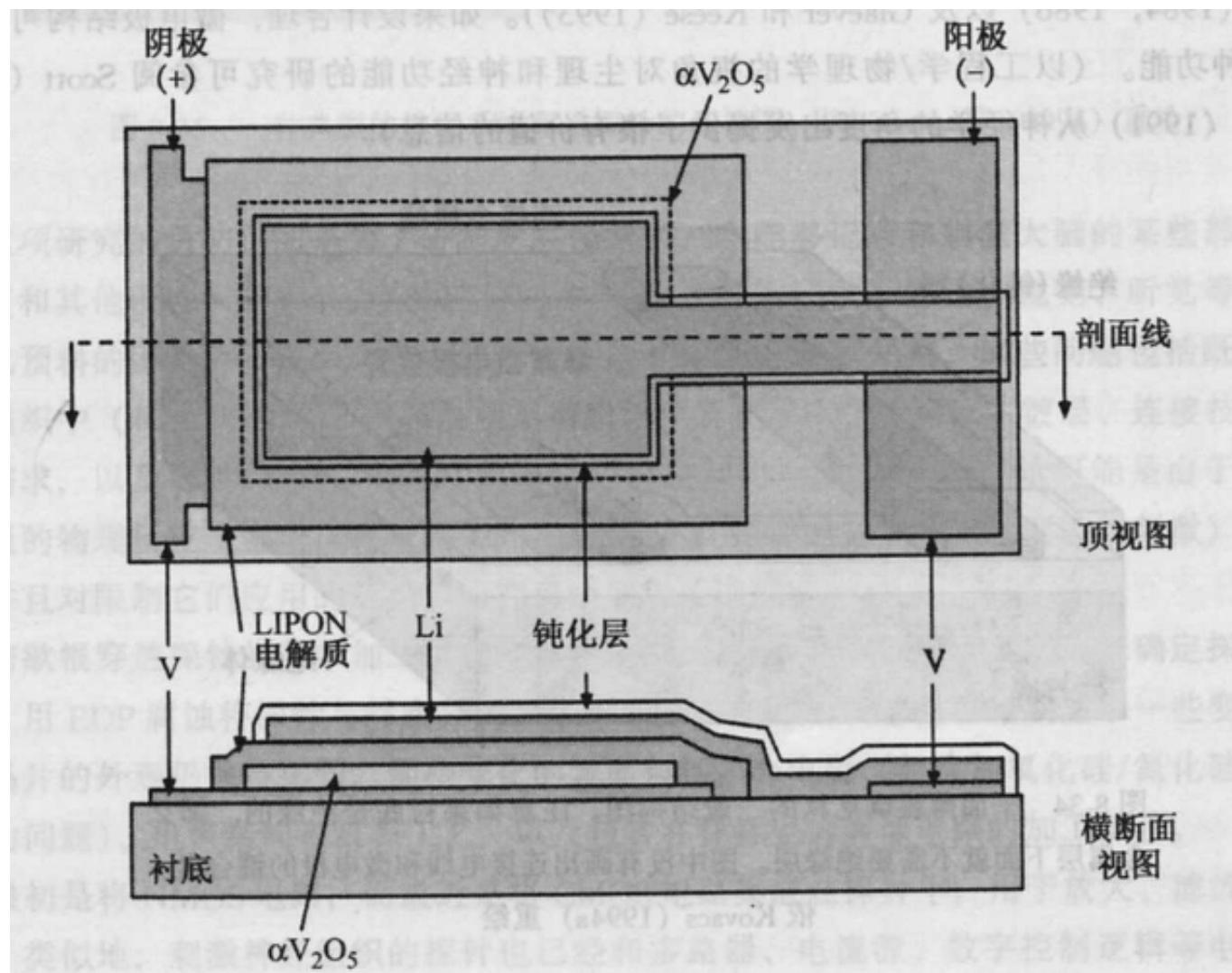




常闭气体阀双晶片结构和热双晶执行原理图

图中阀部分开启





薄膜锂电池的结构图

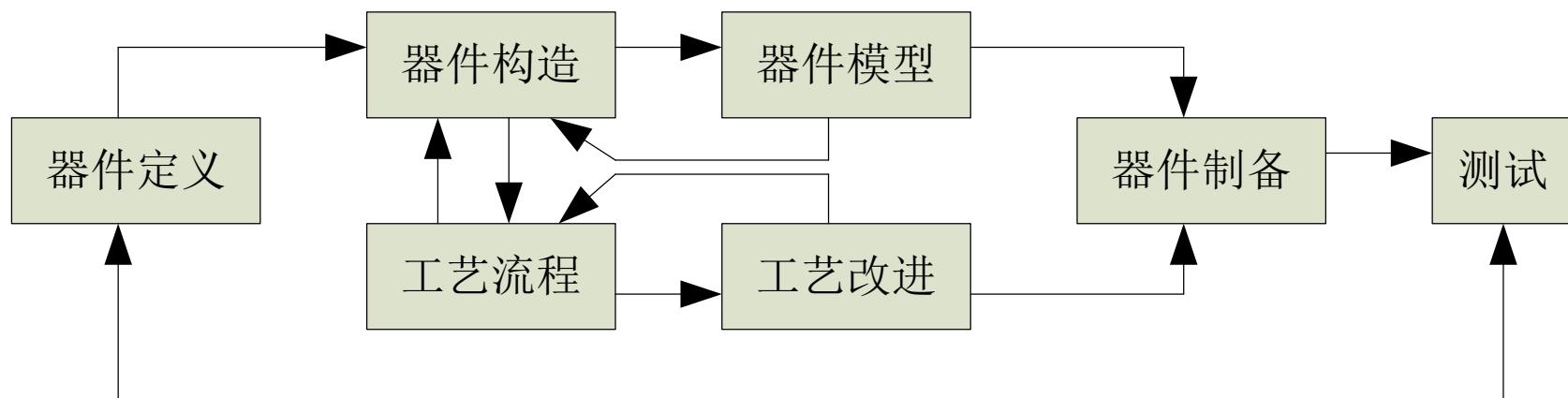




§ 4.4 典型微机械结构的制造

1、微传感器

以表面加工为基础的微传感器的设计与研究主要取决于工艺水平与新结构开发之间的相互关系，下面是基于微机械加工技术的微传感器设计、制备和测试流程图。



一般来说，我们要研究一种微传感器，首先要明确它的功能及要求，然后进行结构设计，在进行结构设计时，必须要考虑它的加工方法和步骤，即工艺流程，而且这两者之间的相互关系要反复多次才能协调起来。





2、 硅微压阻式加速度传感器

1) 加速度芯片的制作:

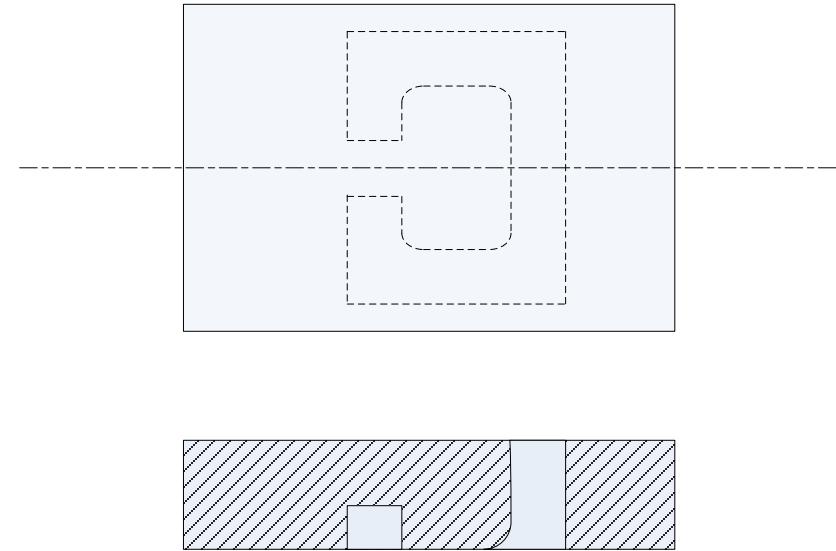
从设计传感器的角度，首先根据功能要求确定加速度芯片的结构。如：质量块的质量大小，对应的外形尺寸；梁的尺寸，应变电阻的位置，应变电阻阻值的大小，引出方式等；对应最大量程，质量块的最大振幅以及极限振幅。

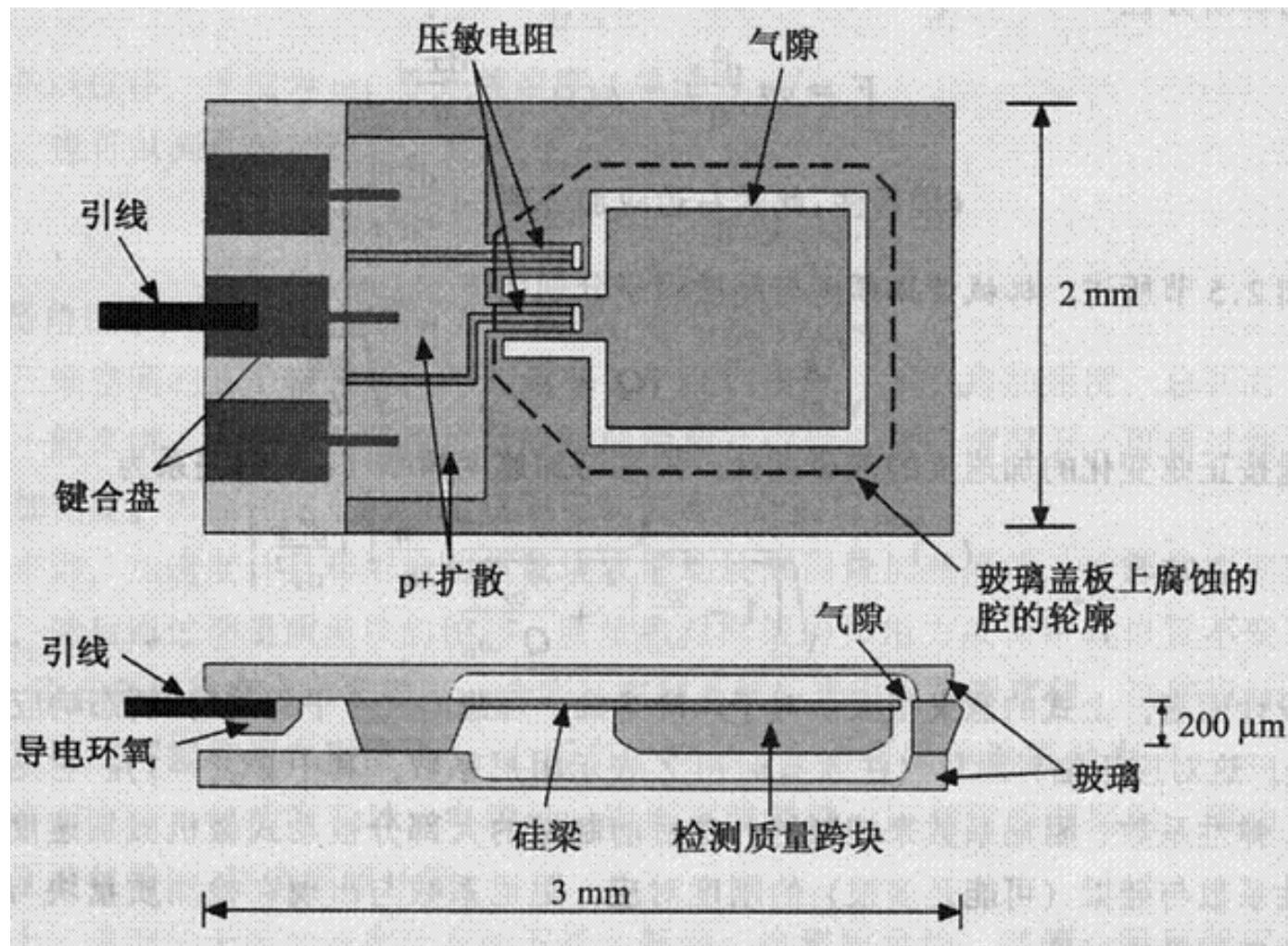
在上述工作的基础上再进行结构设计；在进行结构设计的同时需考虑加工的工艺，即加工手段、方法和加工次序。

a) 芯片的选择

N型（100）硅晶体。

b) 压敏电阻的制作





微机械压阻加速度计的整体结构





按照集成电阻的制作方法进行：先采用热氧化的方法生成 $1.5\mu m$ 厚的氧化层，再进行光刻和扩散形成电阻。

c) 质量块和悬臂梁的制作

采用热氧化的方法生成一层 SiO_2 膜作为掩膜；采用光刻工艺刻出悬臂梁及质量块的图形；采用各向异性或干法腐蚀工艺，将没有被掩膜覆盖的部分腐蚀掉，从而刻出梁周围空气隙和窗孔。

2) 上下两层玻璃盖的制作

a) 材料的选型

7740型玻璃，注意玻璃的热膨胀系数要与硅片相同（一致）。

b) 槽井的制作

槽井的外形尺寸及深度取决于前面的设计值，槽井也是采用制作掩膜，然后进行光刻，再腐蚀的方法进行。

c) 在上玻璃片上制作金属焊接片





先对玻璃面进行抛光处理，使之达到光学平整度，然后用Cr-Au膜做掩膜，通过光刻、淀积工艺，形成金属焊接片。

d) 做好键合前的准备工作

3) 静电键合

将准备好的玻璃片与硅片对准贴合在一起，在 $t=400^{\circ}\text{C}$ ， $U=600\text{V}$ 的条件下进行键合密封，键合要分两次进行（考虑极性的影响）。

4) 检测与校正

3、微型同步马达

下图是微型同步马达的结构图，

与参考教材中所讲的涡轮机结构有点类似。

1) 它的制作过程：

a) 在硅片上先热氧化生长一层 SiO_2 ($h=0.3\ \mu\text{m}$)；再淀积一层 ($h=1\ \mu\text{m}$)；然后淀积第一层多晶硅 ($h=0.3\ \mu\text{m}$)，通过光刻形成转子



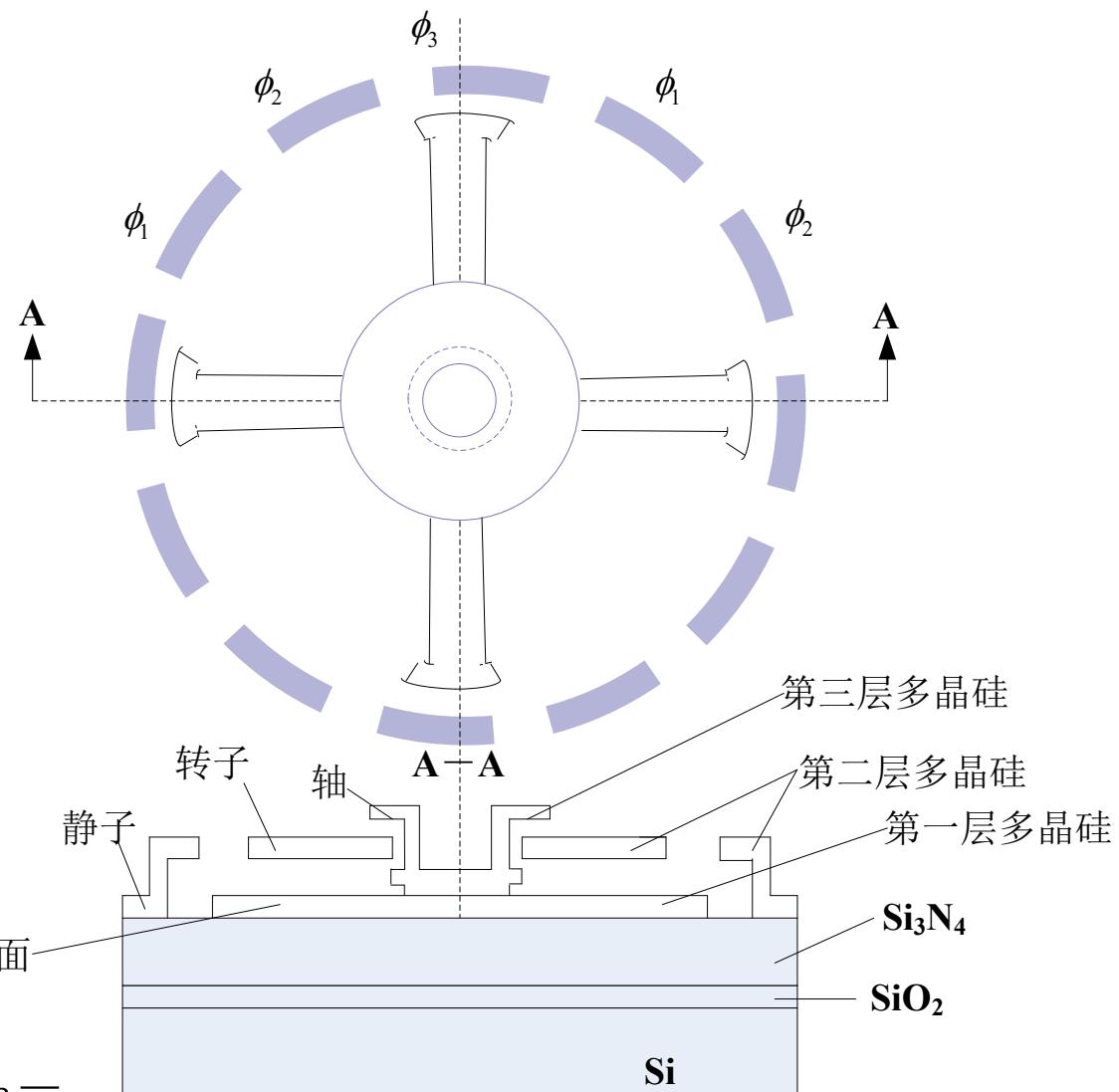


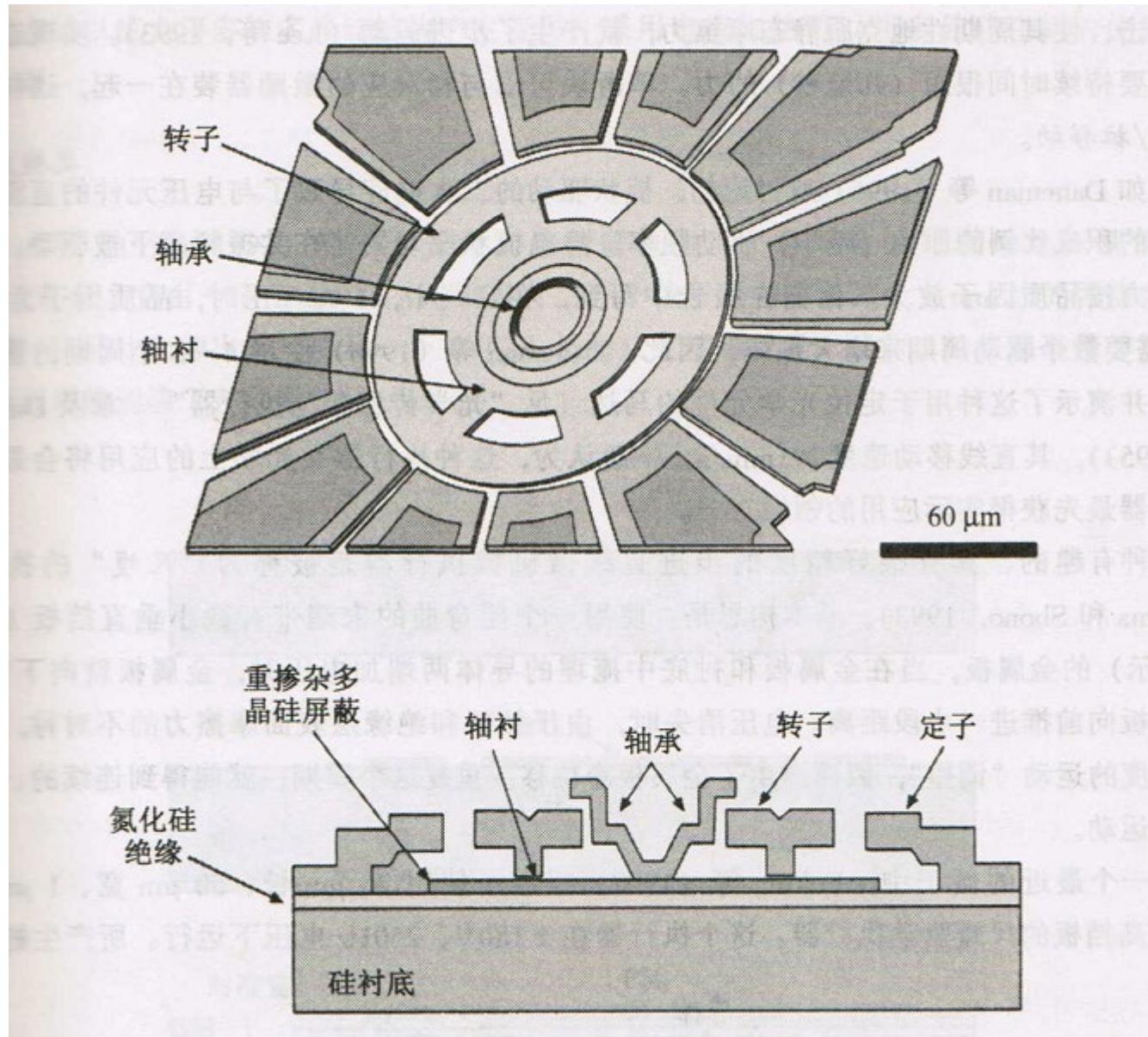
的接地面。

b) 淀积一层PSG（磷硅玻璃， $h=2.2\text{ }\mu\text{m}$ ）并进行光刻，然后淀积第二层多晶硅($h=1.5\text{ }\mu\text{m}$)，并对多晶规进行氧化($h=0.1\text{ }\mu\text{m}$)，光刻后形成静子和转子。

c) 淀积一层 Si_3N_4 ($h=0.34\text{ }\mu\text{m}$)，然后用 (RIE，反应离子刻蚀) 刻蚀 Si_3N_4 ，使之形成衬套。

d) 湿法腐蚀PSG形成凸缘，然后再淀积一层PSG ($h=0.7\text{ }\mu\text{m}$) 以填充转子下的侧向腐蚀部分。







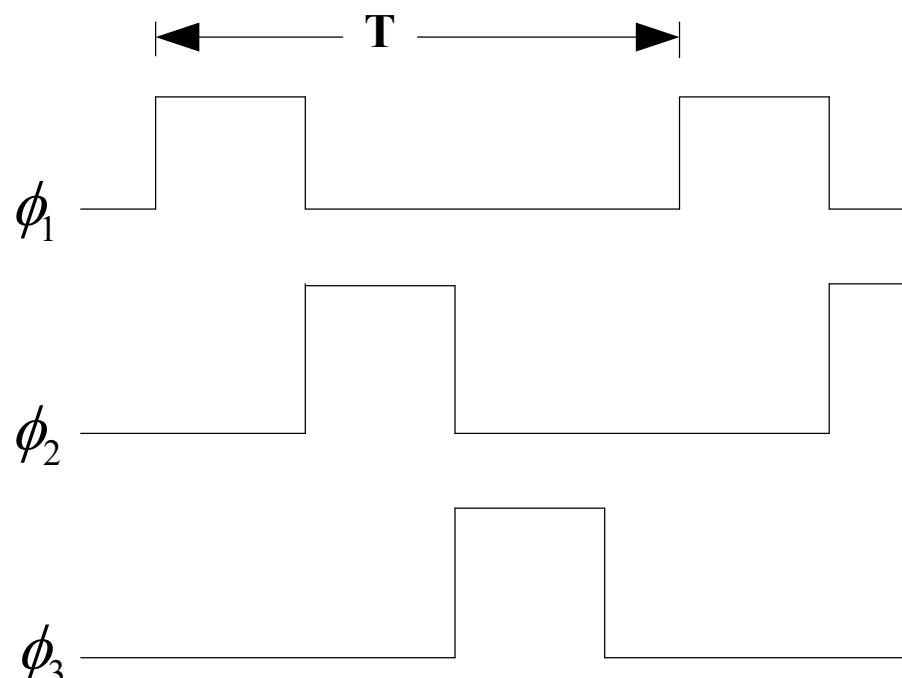
e) 开出轴空，淀积第三层多晶硅并光刻形成图形。

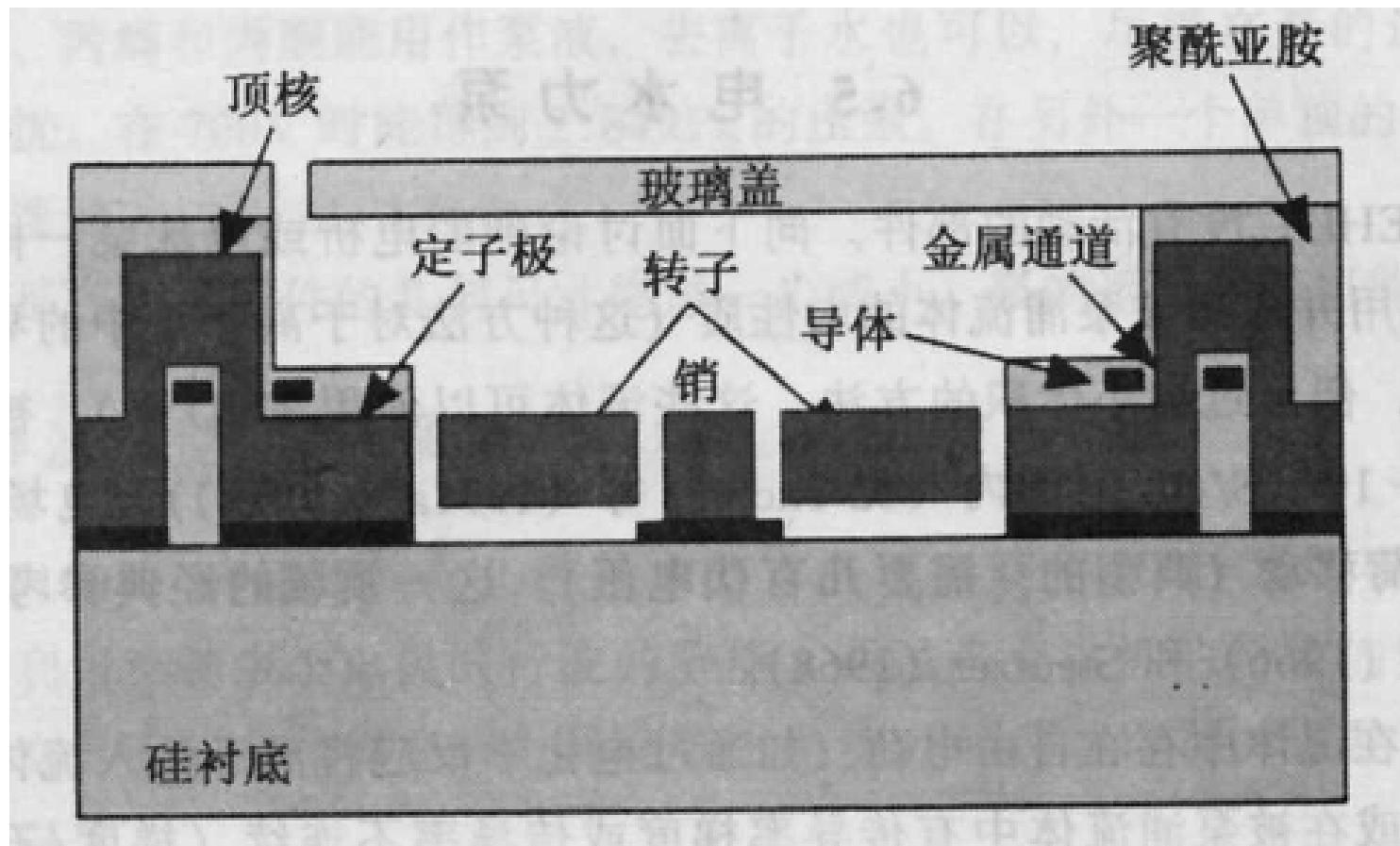
f) 最后用BHF (10 NH_4F +1 HF) 腐蚀掉所有的PSG。

2) 工作原理

在上图中，加三相脉冲电压，
波形如右图所示。由于静电感应，
转子与定子间静电力的作用，将
使转子顺时针方向转动。当
 $U=350V$, $n\approx 500$ (转/min)。

3) Si_3N_4 的作用
多晶硅之间的摩擦力大于多晶
硅与 Si_3N_4 之间的摩擦力，起减小
摩擦力的作用。





微机械磁旋转泵的横截面图





§ 4.5 集成智能传感器系统

参考教材中介绍了好几种集成智能传感器的例子，这里仅讲解两种，一种是集成血液流量微传感器，另一种是集成智能传感器。

§ 4.5.2 集成血液流量微传感器

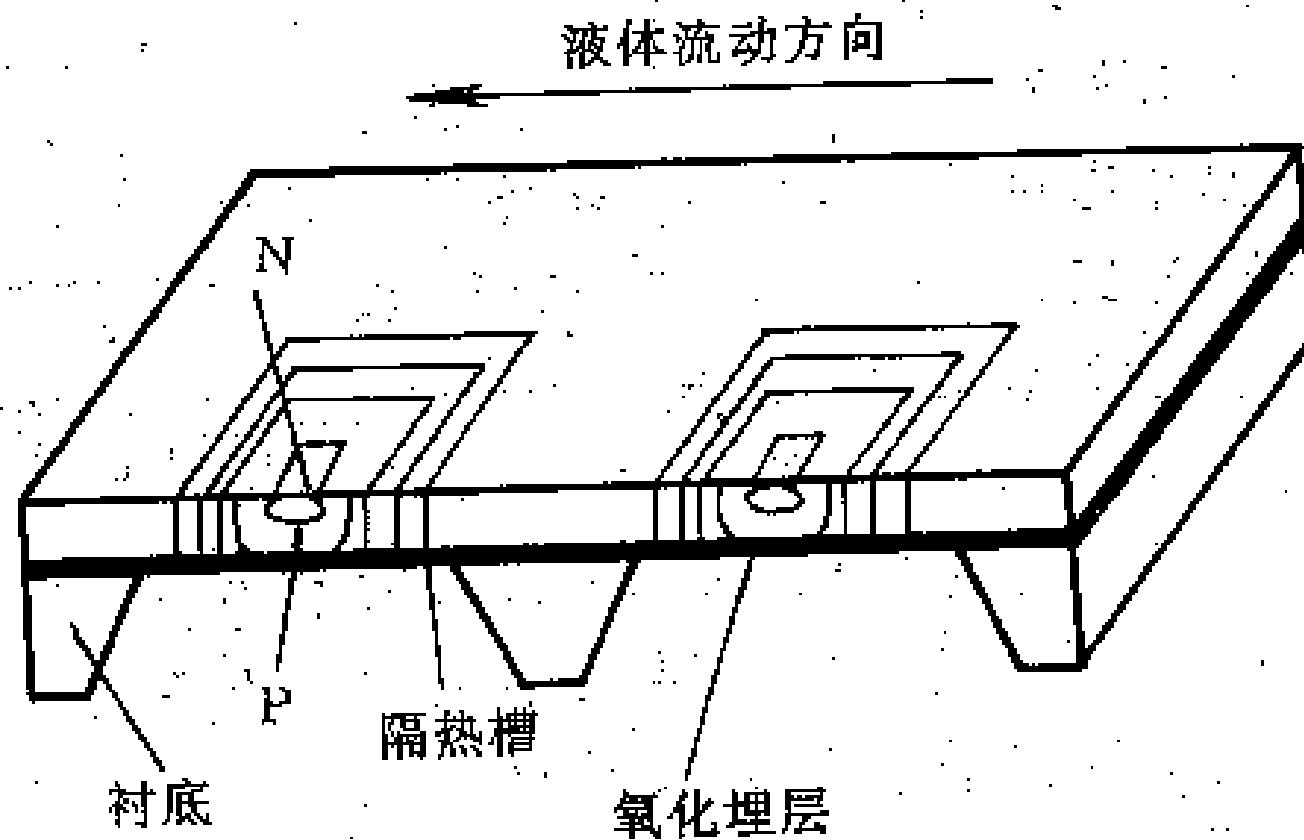
1、明确设计要求

- 1) 功耗: $P < 10\text{mW}$;
- 2) 温度要求: 传感器的工作温度与血液温度间的温差 $\Delta T < 5^\circ \text{K}$;
- 3) 外形尺寸: 可置于2mm的导管内工作;
- 4) 传感器置于血管内无不良反应, 亦即表面材料与血液相容。

2、传感器的设计和工作原理

1) 工作原理

利用流速改变薄膜温度的原理，在晶片背面腐蚀形成两个硅膜片，每个膜片上有一个温度二极管，其中一个膜片由一个功耗恒定的电阻器加热。流动的液体与整个芯片接触，使被加热的薄膜冷却，薄膜的温度变化



流量传感器工作原理结构示意图





依赖于液体流动速度的变化。另一个未被加热膜片上的P—N结用来监测环境温度。根据两个P—N结测出的温差就可以反映出液体流动的速度。

P—N结的温度特性：

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right], \quad I_0 : \text{饱和电流};$$

η ：二极管指数。

若保持I恒定，则结电压V是T的函数。灵敏度为：2.1mv/k， $I=10 \mu A$ 。

2) 设计：

以SOI晶片衬底，晶片的背面作为P—N结的制作面；正面利用CMOS工艺制作集成电路部分，它包括：放大电路、脉宽调制电路以及控制单元。

为提高流量传感器的灵敏度和降低功耗，加热膜周围刻有8个隔热微槽，微槽中充满二氧化硅层。

为防止电路短路，在上边淀积了一层氮化硅钝化层。

共有四个传感器。





外形尺寸: $1 \times 5 \text{ mm}^2$, $\Delta T < 2\text{K}$, $P < 5\text{mW}$;

流量为 $0 \sim 10\text{L/min}$ 时, $\Delta t: 45 \mu\text{s} \sim 25 \mu\text{s}$ 。

3、传感器的制作流程

1) 选用的工艺: $2 \mu\text{m}$ CMOS工艺

2) 选材: 晶片为 $h=300 \mu\text{m}$ 的P型(100)晶片。

3) 制作

a) SOI晶片的制备

* 采用氧离子注入工艺, 再退火处理, SiO_2 层厚= 400nm ;

* 在 SiO_2 层上淀积 200nm 的单晶硅层。

b) 制作隔离槽

* 在单晶硅层上外延生长一层 $5 \mu\text{m}$ 硅层;

* 用等离子体刻蚀的方法, 在外延层上刻蚀出 $5 \mu\text{m}$ 深的隔离槽;

* 热氧化使隔离槽充满二氧化硅;





- * 在表面淀积一层多晶硅，再将该多晶硅层腐蚀掉，使表面平坦。
- c) 制作其它电路
- * 采用离子注入形成P阱和N阱
- * 制作温敏二极管及其它电路。

一般电路部分先制作。为起保护作用，在SOI晶片两面用PECVD方法淀积700nm厚的氮化硅。

4、 系统结构

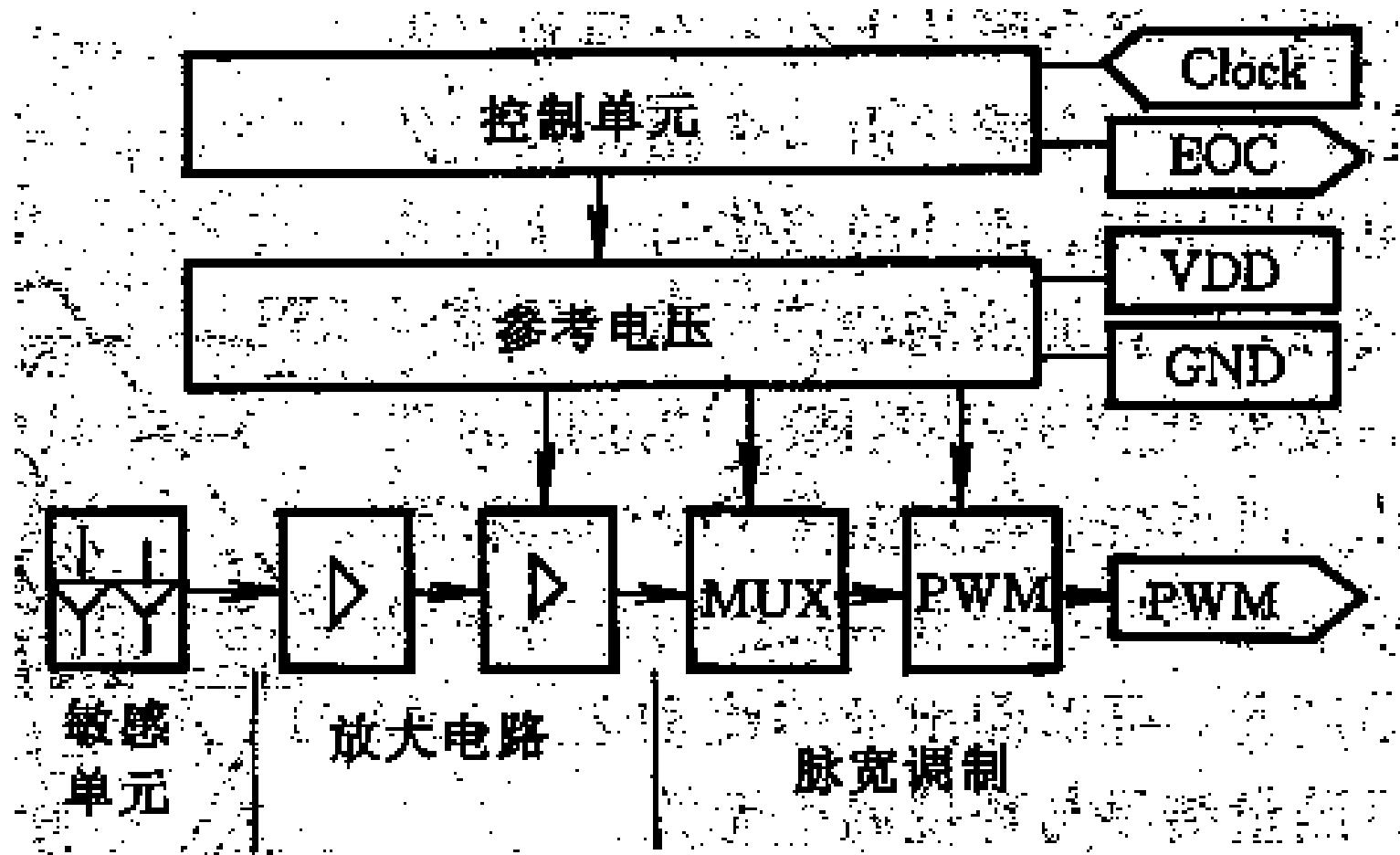
主要是由放大电路，脉宽调制电路（电压调制以及控制单元、供电电源等组成，其中温敏二极管的电流要恒定。

§ 4.5.4 集成智能传感器

这里主要介绍一种混合式的智能传感器系统。它的主要特点是：

- 1) 由多种传感器及其阵列构成的一个传感器系统；
- 2) 各种传感器及其阵列通过相应的接口电路构成标准输出，并通过





传感器电路系统结构框图





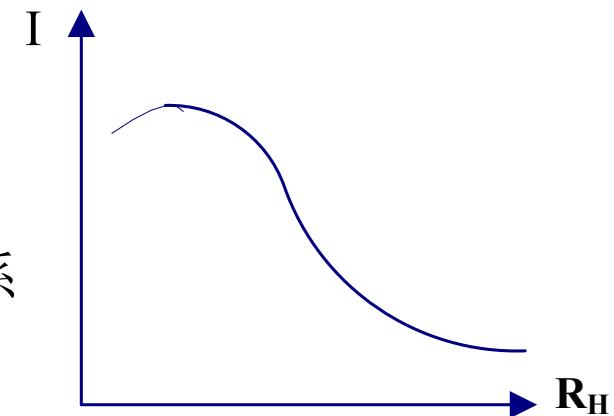
内部总线与后台的MCU进行数据传递。

- 3) 对外通讯可采用无线发送器或RS—232接口两种方式;
- 4) 具有电源管理功能。

1、各种传感器

被测对象： T、 P、 h (humidity) 、 S、 a;

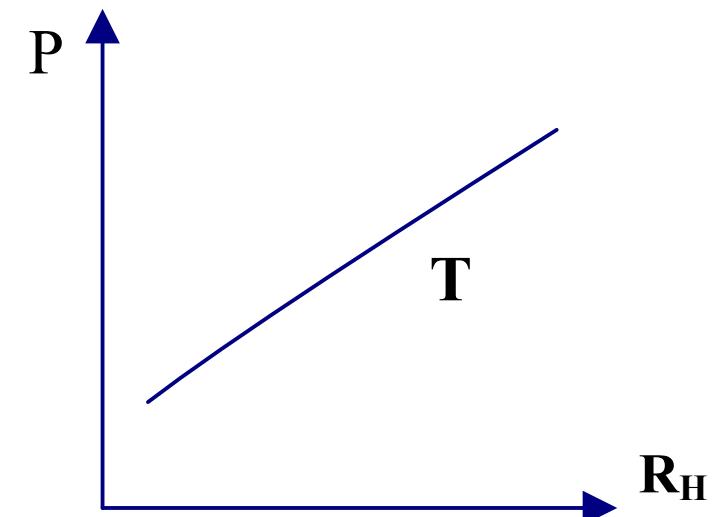
- 1) T: 振荡器的形式，振荡频率与温度有关，主要作温度补偿用
- 2) P: 微机械电容式传感器阵列；（根据量程大小选用合适的传感器）最高精度可达1m的压力变化；
- 3) h: 利用内置的高纵横比数字湿度计；
可集成化测湿度的传感器有：
 - a) 湿敏二极管：雪崩电流～相对湿度的关系





b) 硅MOS型 Al_2O_3 湿度传感器，利用 Al_2O_3 膜作为感湿膜。器件的电容值~环境湿度的关系。

c) FET湿度传感器，与b) 类似。



4) a: 微机械电容式加速度计阵列，采用4梁支撑的桥式结构。

5) 其它功能的扩充：

气体种类、浓度、声音、全球定位系统（GPS）。

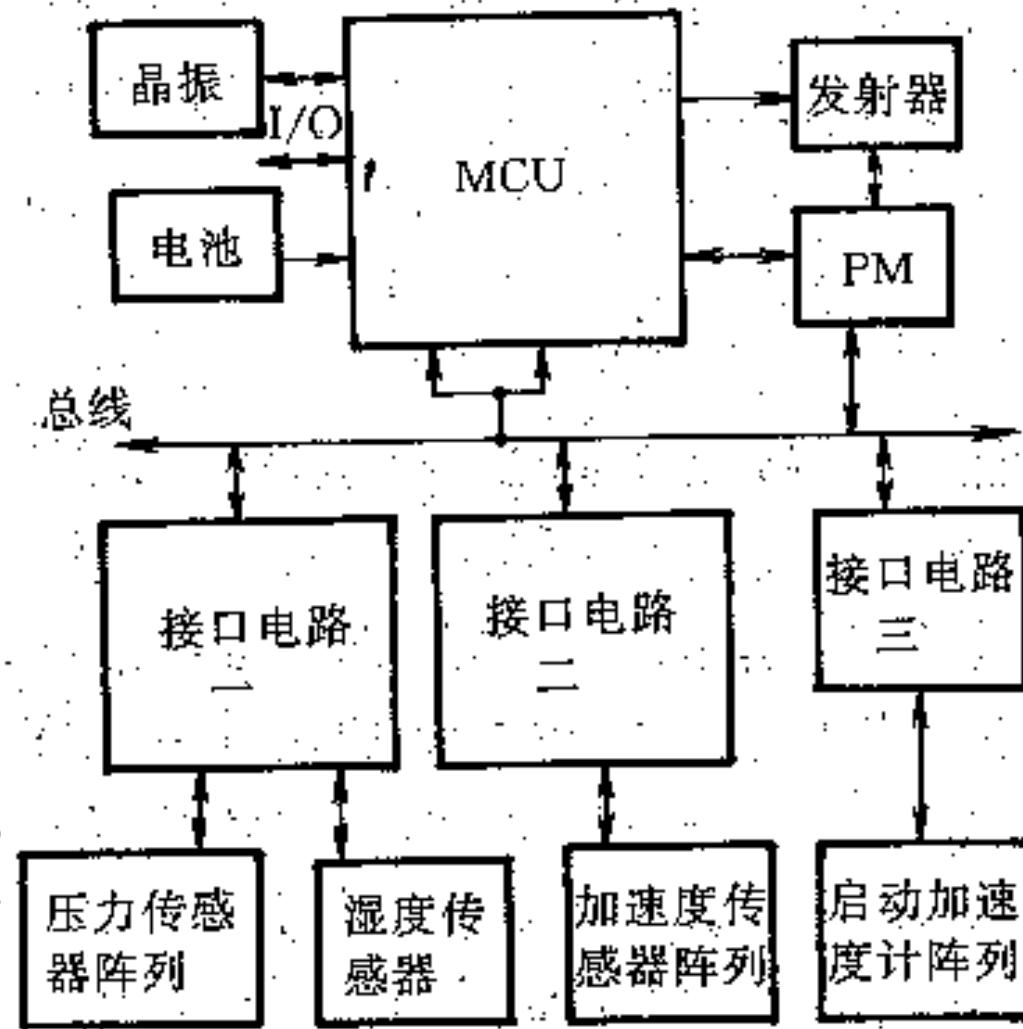
2、 内部通讯

1) 总线构成

三根电源线：+6V；+5V（参考电源）；地。

四根前台电路输入线：1MHz时钟；串行数据线；芯片启动；选通线。





混合智能传感器系统组成框图





两根前台电路输出线：数据输出；数据校验—带中断功能。

2) 接口电路

包含开关电容读出电路，将传感器输出的电容信号转换为可传输的数字量。

3、对外通讯

1) RS-232接口

两根异步串行通讯线。

2) 无线发送

315MHz振幅调制发生器，数据传输率为3KHz。

工作电源： $U=3V$ ， $I=4mA$ 。

信号格式：1（起始位）+8（数据位）+1（奇偶校验位）+1（停止位）

若配有无线，调制频率可达2.4GHz，传输距离 $L \geq 1000m$ 。





4、电源管理：（PM）

供电电源方式：1) 外部电源供电，2) 锂电池；

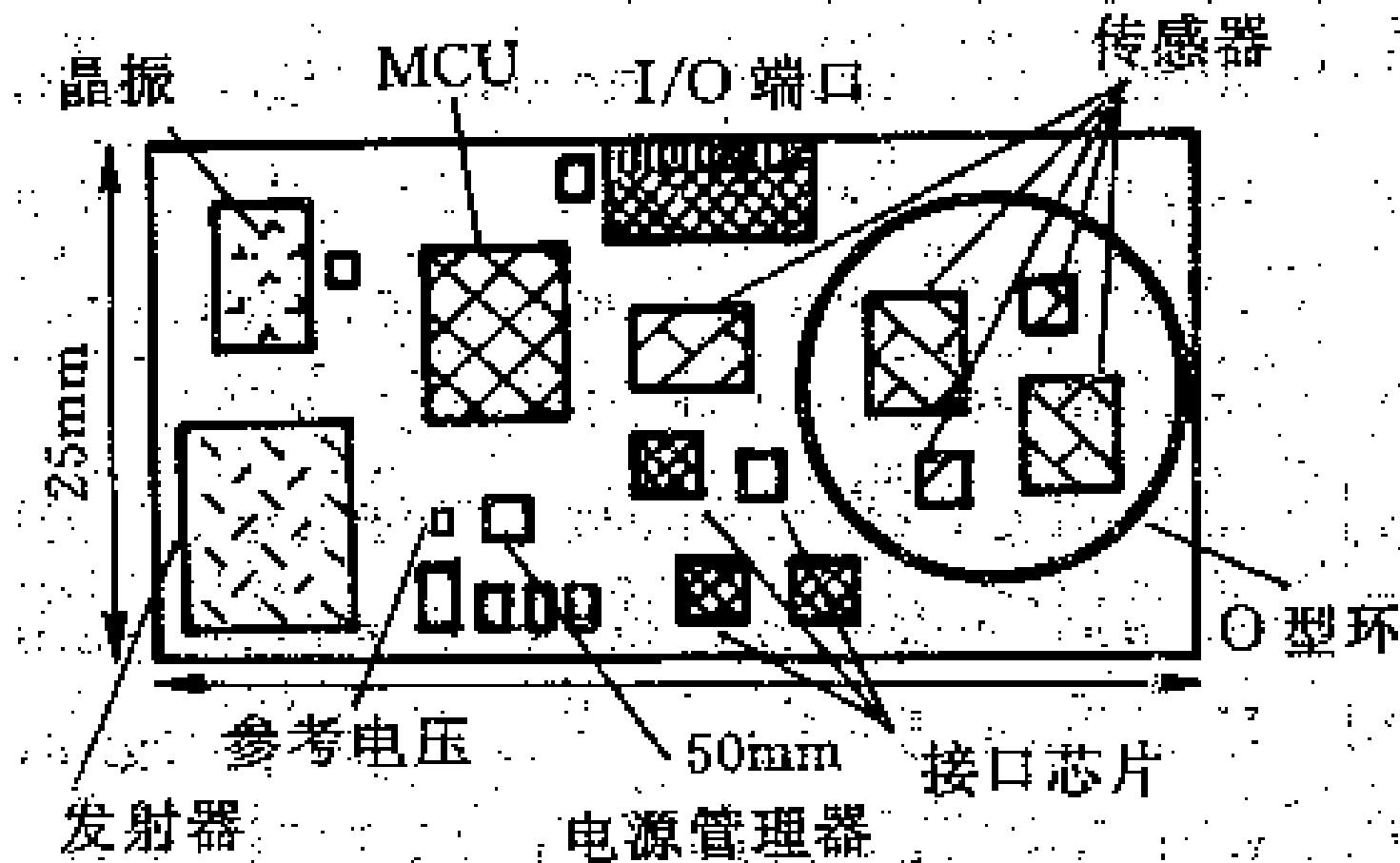
系统的工作状态分：扫描状态（休眠状态）和工作状态（唤醒状态）。

启动加速度传感器阵列的作用：起突发事件的响应作用，然后使MCU进入正常工作状态。

5、封装

解释折叠式结构。





各种器件在线路板上的实际布局





目 录

- 第1章 概 述
- 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述





第5章 智能化功能的实现方法

要 点：

- ◆ 非线性自校正技术；
- ◆ 自校零与自校准技术；
- ◆ 噪声抑制技术；
- ◆ 自补偿技术；
- ◆ 信息融合技术；
- ◆ 量程自动更换及自检测、自诊断技术；
- ◆ 图象处理技术。





1、用软件来进行非线性校正，一般来说它对测量系统没有太高的要求，但必须要保证：它的输入一输出特性具有好的重复性，因为它校正的依据是在它标准输入一输出特性曲线基础上进行的。

进行非线性校正可以达到两个目的：

- a) 有利于读数；
- b) 有利于分析处理测量结果，减少测量误差；

2、在智能化软件程序的导引下实时进行自动校零和实时自动校准/标定，其测量精度决定于作为标准量的基准精度，而对系统本身的精度、重复性、稳定性要求不高。

通过实时自校零和自校准，它可以：

- a) 消除系统误差；
- b) 降低外界干扰因素的影响；
- c) 提高系统的精度与稳定性。





3、噪声抑制技术主要是将有用信息从混有噪声的信号中提取出来。

a) 方法：数字滤波、相关分析、统计平均处理；

b) 目的：消除偶然误差或随机误差，排除干扰，提高信噪比和分辨率。

4、通过自补偿技术可以改善传感器系统动态特性以及温漂性能。

5、通过信息融合技术来消除交叉灵敏度、时漂等因素所产生的干扰量的影响。

6、实现自动选择更换量程、自检测、自诊断等功能，可以进一步提高传感器系统的测量范围、安全性和可靠性。





§ 5.1 非线性校正技术

非线性校正的目的就是达到使输入一输出特性是一条直线，在介绍用软件实现非线性校正之前我们先回顾一下非线性校正的历程。

§ 5.1.1 非线性校正的一些概念

1、具有典型非线性输出的传感器

- 1) 测温元件：热电偶、铂电阻、热敏电阻，输出电信号～被测温度。
- 2) 半导体气敏元件： SnO_2 ，传感器电导与水蒸气分压呈对数关系

2、非线性的类型： $[G_0 = K_{H_2O} (P_{H_2O})^{\frac{1}{x}}]$

常见的有两类：指數型曲线；有理代数函数型曲线。

- a) 如热敏电阻： $R_T = R_{T_0} e^{b(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$ ，一般式： $U_0 = a e^{bx_i} + c$
- b: 常数（与电阻特性有关） T_0 ：预定的基准温度（K）。





b) 如铂电阻: $R_T = R_0(1 + aT + bT^2)$,

R_0 : 0°C时的电阻值。

一般式: $U_0 = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \cdots + a_nx_i^n$

3、在测量仪表中用硬件进行非线性补偿的原理

1) 开环式非线性补偿



a) 计算法: 原理框图

$$U_1 = f_1(x) , \quad U_2 = a + KU_1 , \quad \text{要求: } U_0 = sx + b , \text{ 则:}$$

$$U_2 = a + Kf_1\left(\frac{U_0 - b}{s}\right) , \quad \text{即希望建立的线性化输入一输出特性。}$$

b) 图解法

下图是一种经典的仪表线性化图解法的简图。





I象限: $U_1 = f_1(x)$ 传感器

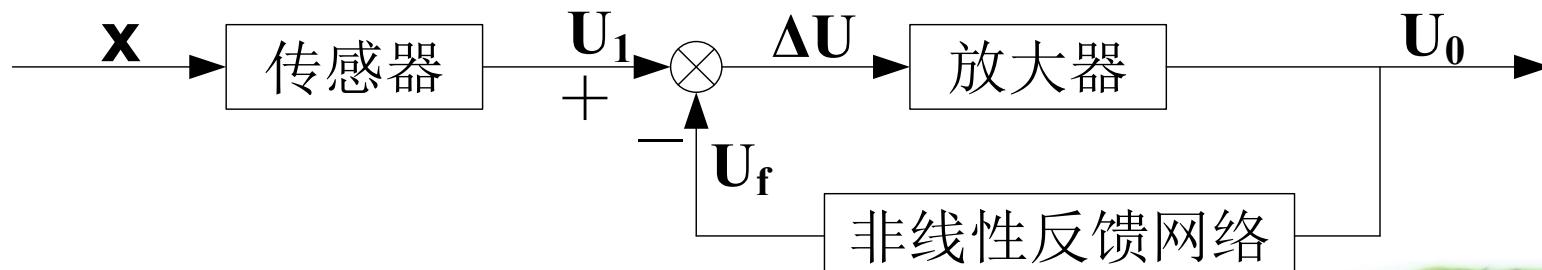
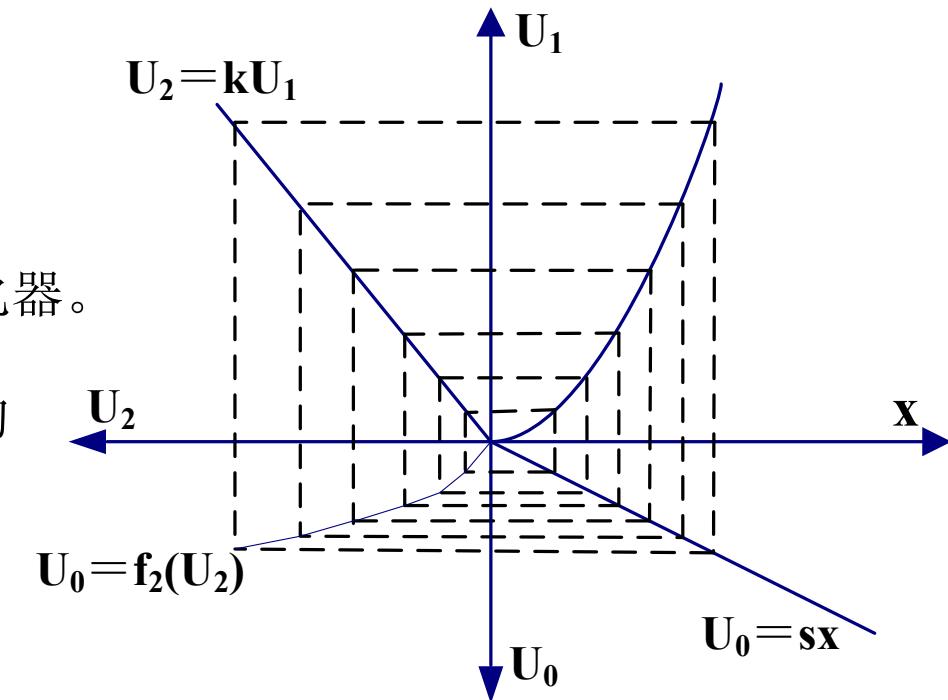
II象限: $U_2 = KU_1$ 放大器

III象限: $U_0 = f_2(U_2)$, 线性化器。

IV象限: $U_0 = sx$, 希望输出的
特性线。

2) 闭环式非线性补偿

主要是求解反馈网络的非线性特性。





a) 计算法

$$U_1 = f_1(x) \quad , \quad U_0 = K\Delta U \quad , \text{要求: } U_0 = sx$$

建立的非线性反馈网络的输入—输出特性: $U_f = f_1\left(\frac{U_0}{s}\right) - \frac{U_0}{K}$

希望: $1 < K < s$, 则: $U_f = f_1\left(\frac{U_0}{s}\right)$

b) 图解法

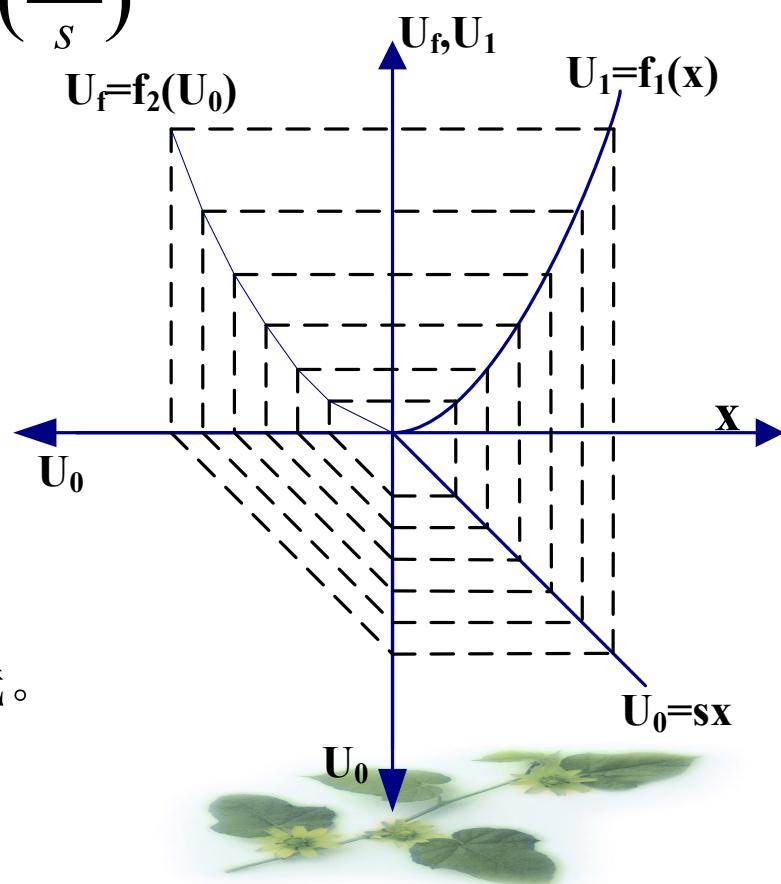
I象限: $U_1 = f_1(x)$, 传感器;

II象限: $U_f = f_2(U_0)$, 反馈网络。

III象限: 因 $U_1 \approx U_f$, 所以将

$U_1 \sim U_0$ 之间的关系也放在第二象限;

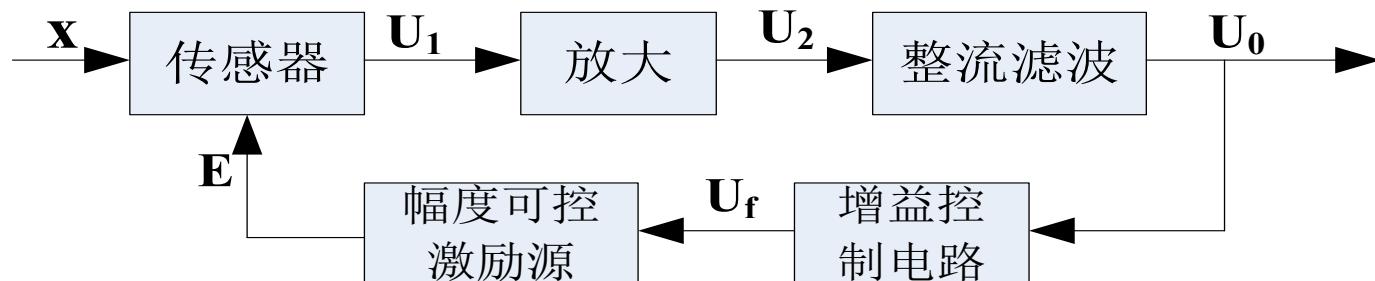
IV象限: $U_0 = sx$, 希望的输出直线。





3) 增益控制式非线性补偿

针对被动式传感器而言，亦即传感器的输出受激励源激励的调制。



在这里增益控制电路是具有非线性特性的校正电路。

希望: $U_0 \approx s(x_{\max} - x)$; $U_1 = Ef_1(x)$

$U_2 = KU_1$, $E = AU_f$, 表明传感器输出受激励源调制。

增益控制电路的非线性表达式:

$$U_f = f_2(U_0) = \frac{A_0}{AKf_1(x_{\max} - \frac{U_0}{s})}$$

4、线性化工程上的实现方法

1) 采用模拟电路; 如二极管阵列式开方器, 各种对数、指数、三角



函数等运算放大器，实现高精度补偿的难度太大。

- 2) 采用数字电路；如数字控制分段校正，非线性A/D转换等，能获得较高的精度。
- 3) 利用微处理器运算功能，亦即采用软件的方法来实现。

下面我们介绍几种用软件来实现非线性校正的方法。

§ 5.1.2 查表法

1、 实现方法

- 1) 首先确定反非线性曲线。可采用先测出输入—输出特性曲线，然后根据线性化特性的要求，建立反非线性曲线。
- 2) 根据精度要求对反非线性曲线分段，将折点坐标值存入数据表。
- 3) 测量时明确对应输入被测量 x_i 在哪一段。
- 4) 根据该段折线的斜率进行线性插值，确定对应的 x_i 的输出值。





$$5) \text{ 表达式: } y = x = x_k + \frac{x_{k+1} - x_k}{U_{k+1} - U_k} (U_i - U_k)$$

2、折线与折点的确定

1) Δ 近似法

折点在误差界上，书中表达不确切。

2) 截线近似法

折点在曲线上且误差最小，最大误差在折线段中部。

前面曾经介绍的拟合直线的方法有：理论线性度、最小二乘法线性度、平均选点线性度、端基线性度。

§ 5.1.3 曲线拟合法

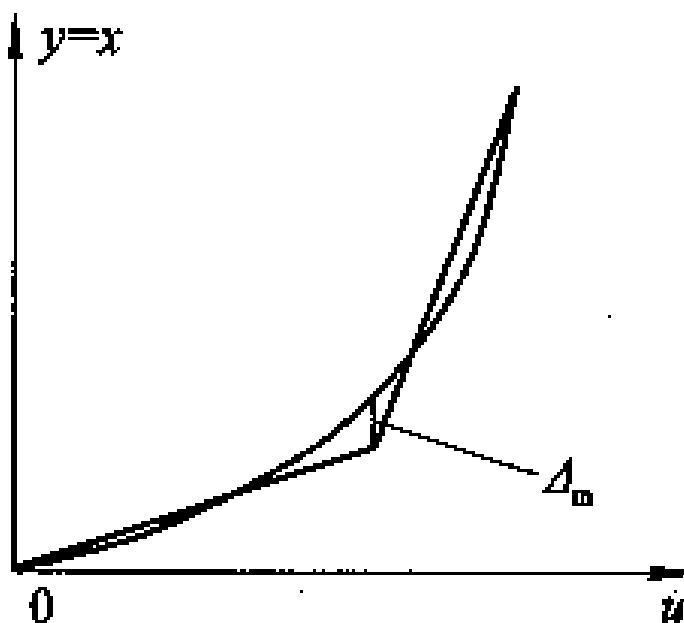
用n次多项式来逼近反非线性曲线。

1、列出逼近反非线性曲线的多项式方程

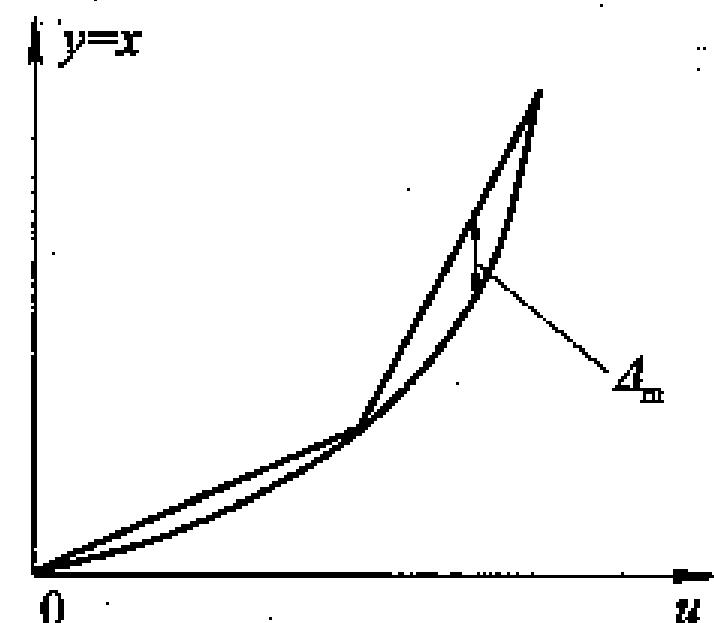
1) 对整个测量系统进行静态实验标定

对应输入： $x_i : x_1, x_2, \dots, x_N$ ； 输出为： $u_i : u_1, u_2, \dots, u_N$





(a)



(b)

(a) \triangle 近似法;

(b) 截线近似法

曲线的折线逼近





2) 反非线性曲线的拟合方程

$$x_i(u_i) = a_0 + a_1 u_i + a_2 u_i^2 + a_3 u_i^3 + \cdots + a_N u_i^N$$

在实际使用中，一般根据测量精度要求来选定拟合项数。

3) 求解待定常数 a_0, a_1, a_2, \dots

求解方法：根据最小二乘法原则。

$$\sum_{i=1}^N [x_i(u_i) - x_i]^2 = F(a_0, a_1, a_2, \dots, a_N) = Min$$

对函数F分别求导并令其为零，则通过解联立方程的形式即可求出各

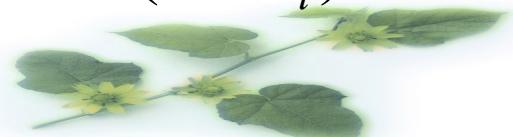
常数的值。

从参考教材中推导的公式来看，当N=3时，其计算量已经比较大了。

2、将求得的常系数 $a_0 \sim a_3$ 存入内存

$$x(u) = a_3 u^3 + a_2 u^2 + a_1 u + a_0 = [(a_3 u + a_2) u + a_1] u + a_0$$

在实际使用中，根据u值计算 $x(u)$ 时可按计算式 $(b + a_i)u$ ，





进行循环运算，亦即第一次将 a_3 赋值给b, $a_i = 0$, 而第二次 $b = a_3 u$,
 $a_i = a_2 \dots$

参考教材中所述噪声对矩阵计算影响的解释：

所以有些信号需先作平滑和滤波处理，后面讲述。

§ 5.1.4 函数链神经网络法

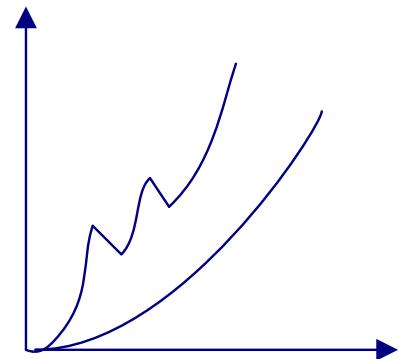
1、传感器及其调理电路的实验标定

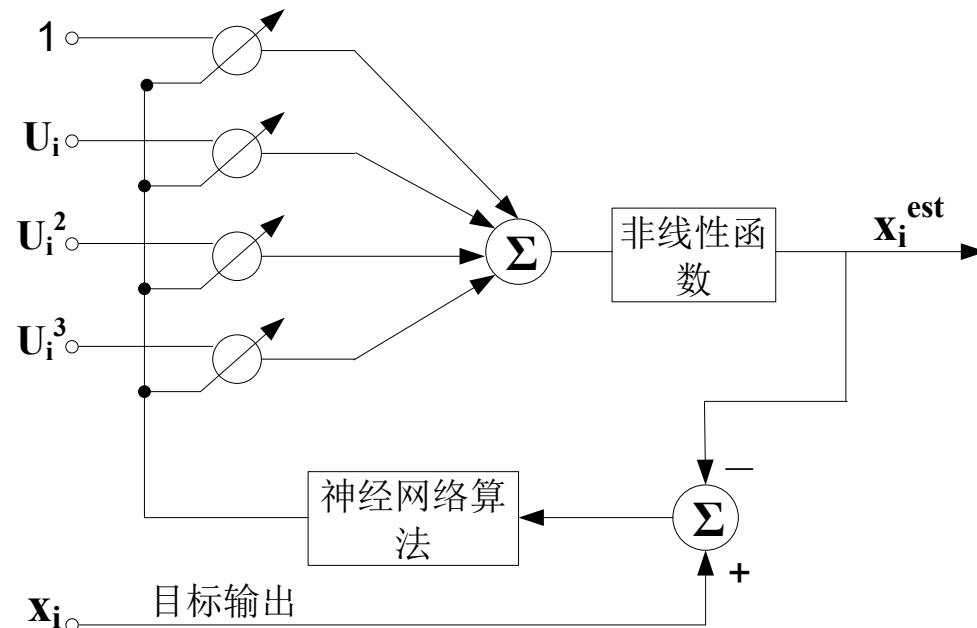
输入: $x_i : x_1, x_2, \dots, x_N$; 输出: $u_i : u_1, u_2, \dots, u_N$

2、列出反非线性特性拟合方程

$$x_i(u_i) = a_0 + a_1 u_i + a_2 u_i^2 + a_3 u_i^3 + \dots + a_N u_i^N$$

3、神经网络的处理方法是基于分布式处理方式，而不像传统的计算机系统基于多个计算步骤串行处理方式。基于串行处理方式，中间任何一个环节出现问题，结果会引起灾难性的失败。





主要工作是计算出权值: W_j

根据: $x_i^{est}(k) = \sum_{j=0}^N u_i^j W_j(k)$, 估计误差: $e_i(k) = x_i - x_i^{est}(k)$
来调节权值。

权值调节公式为: $W_j(k+1) = W_j(k) + \eta_i e_i(k) u_i^j$,
 η_i : 学习因子。

当估计误差值满足精度要求时, 所得的权值: $W_j : W_0, W_1, W_2, W_3$





即为多项式待定常数: $a_0 \sim a_3$, $[e_i(k)] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2(k)} \leq \varepsilon$

权值初始值的确定: W_0 与 W_1 为同一数量级; W_2 比 W_1 低一个数量级以上, W_3 比 W_2 低更多。

4、应用举例:

参考教材中讲的是一个测量浓度传感器系统的例子, 该传感器系统的输出是频率信号, 当浓度增加时, 输出频率减小。

该例子说明:

- 1) 学习因子 η 影响迭代收敛的速度和稳定性, 在实际使用中可根据情况进行调整;
- 2) 学习的次数越多, 拟合的精度越高;
- 3) 精度约为1%左右。





作业7

某一传感器的输出-输入关系为：

$$U = e^{0.01x} - 1$$

输出量程范围为：0~5V，试采用查表法对其进行非线性校正，校正的精度要求为1%。





§ 5.2 自校零与自校准技术

理想传感器系统的输出y—输入x特性为: $y = a_0 + a_1 x$, 但实际使用的传感器系统, 因温度等一些环境因素的影响, 仍存在零位漂移和灵敏度漂移, 亦即上式为: $y = (a_0 + \Delta a_0) + (a_1 + \Delta a_1)x$; Δa_0 : 称为零位误差, $\Delta a_1 x$: 称为测量误差。

智能传感器系统的自校零与自校准技术是基于实时校准。

§ 5.2.1 方法一

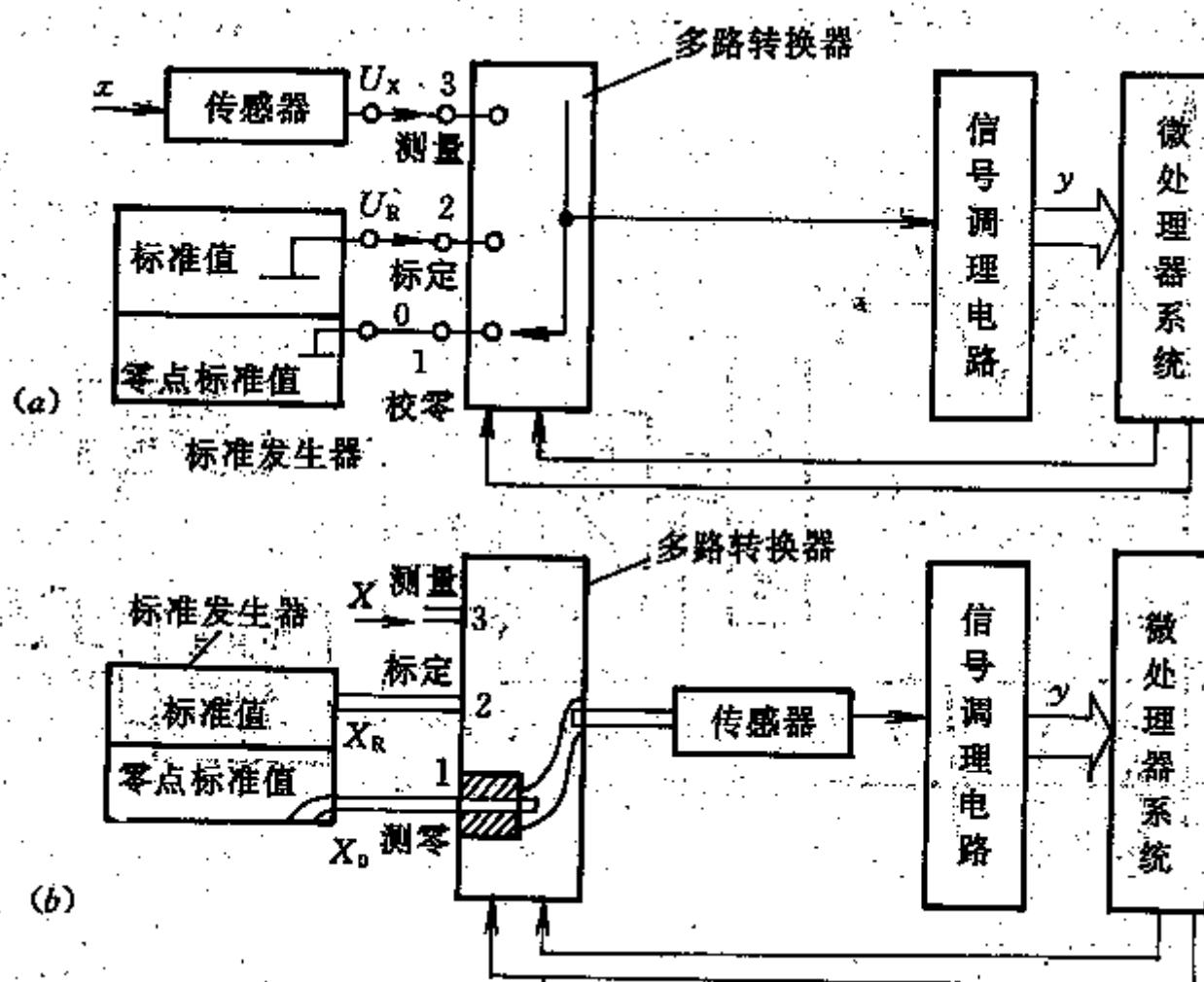
采用第二章第3节: 提高传感器性能的技术途径之三: 多信号测量法中的三点测量法。

1、 系统构成

1) 不含传感器的自校

a) 系统提供一标准信号发生器, 它包括零点标准值和测量标准值, 该值应与传感器的输出信号具有相同的量纲 (或相同属性) ;





智能传感器系统实现自校准功能原理框图

(a) 不含传感器自校;

(b) 含传感器自校





- b) 包含一多路转换器，有电动、气动、液压；
 - c) 传感器测量系统；
 - d) 微处理器系统。
- 2) 含传感器的自校

系统构成基本相同，且标准信号发生器的输出信号与传感器的被测对象具有相同的属性。如测压力的，提供标准的压力信号。

2、 测量方法：

在每一个测量周期内，由微处理器控制多路转换器执行三步测量方法：

- 1) 校零： 输入零点标准值， 输出： $y_0 = a_0$ ；
- 2) 标定： 输入标准值 U_R ， 输出： y_R ；
- 3) 测量： 输入传感器输出 U_x ， 输出： y_x 。

由第1)、2) 步可求得： $a_0, a_1, U_x = \frac{y_x - y_0}{y_R - y_0} U_R$





这种方法对于系统响应频率不是很高，而且零点和灵敏度变化比较大的使用场合较适用，而对于系统信号变化很快或零点和灵敏度变化不是很快的场合倒没有必要采用该种方法。

§ 5.2.2 方法二（宽量程多档多增益系统的标定）

实际上是测出系统的增益或者说灵敏度。

1) 方法：斜率比动态校准法

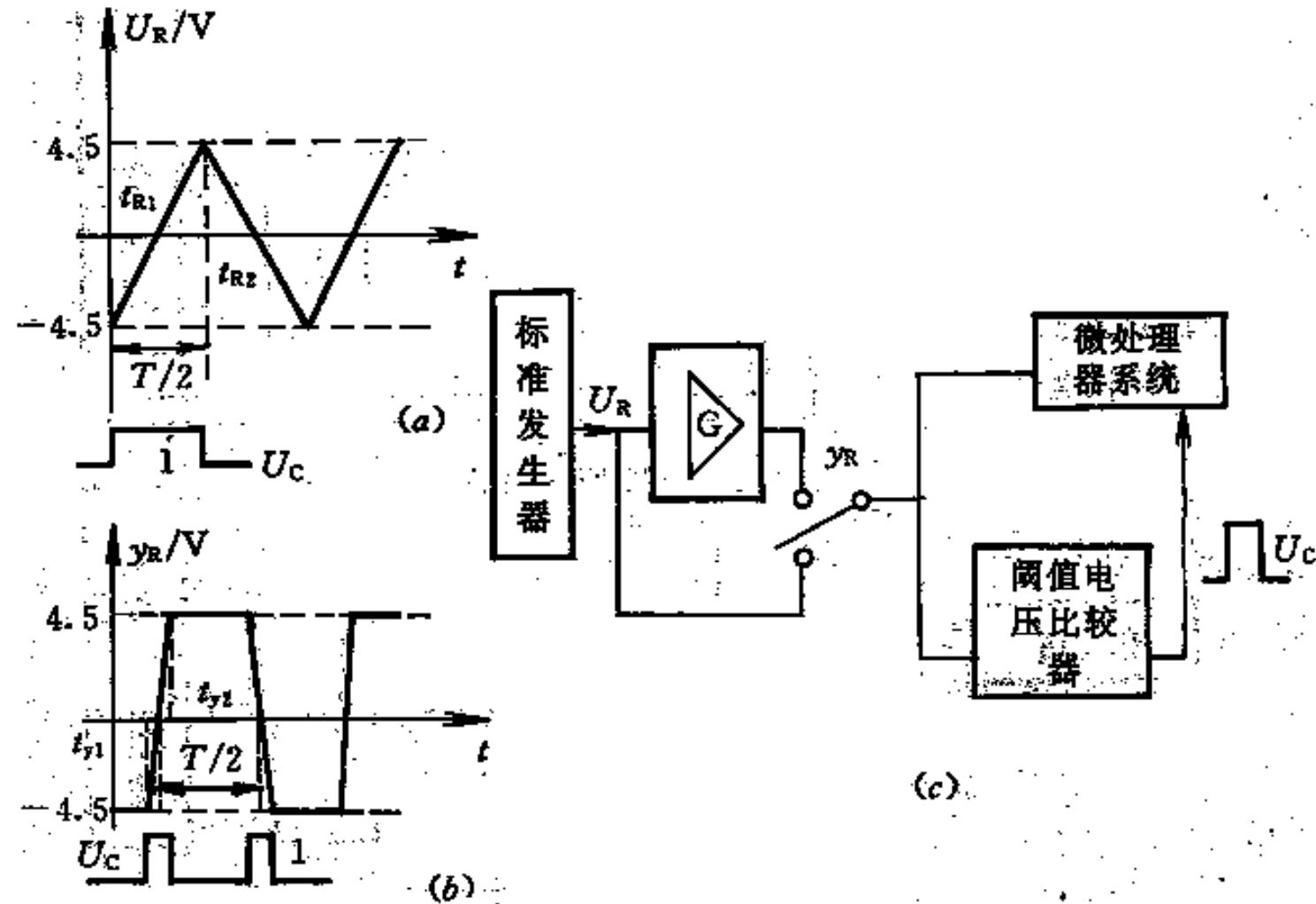
$$a_1 = \frac{t_{R_2} - t_{R_1}}{t_{y_2} - t_{y_1}}, \quad t_{R_2} - t_{R_1} : \text{输入信号从 } -4.5V \text{—} +4.5V \text{ 的时间间隔;}$$

$t_{y_2} - t_{y_1}$: 输出信号从 $-4.5V$ — $+4.5V$ 的时间间隔;

2) 影响校准精度的因素

- a) 阈值电压比较器的分辨率,
- b) 微处理器采样系统中A/D的量化误差,
- c) 标准信号频率,
- d) 微处理器系统的时钟频率。





(a) 标准信号 U_R 波形; (b) 输出波形; (c) 原理框图

斜率比动态校准法





上述因素之间是相互关联的，标准信号频率低可提高精度，但增大了量化误差的影响。

§ 5.2.3 方法三

上述方法仅适用于输出一输入特性呈线性关系的场合，而实际传感器由于非目标参量交叉灵敏度的影响，它的输出一输入特性是不稳定的，即在一定条件下呈非线性的关系。因此也就不能按前述方法进行校准，而要采取测量前的在线实时三点标定法。

- 1、标准信号发生器提供三个标准值信号，按实际测量的需要接好系统回路。通过微机系统的控制，依次输入三个标准值： x_{R_1} ， x_{R_2} ， x_{R_3} ；测得相应输出值 y_{R_1} ， y_{R_2} ， y_{R_3} 。
- 2、按照第一节所述的非线性校正的曲线拟合法，求出反非线性特性拟合方程式中系数值，即： $x(y) = c_0 + c_1y + c_2y^2$ 中的 c_0 ， c_1 ， c_2 。





3、通过控制将智能传感器系统的转换开关转向测量状态，将测量值代入上式中，则 $x(y)$ 值即代表系统测出的输入待测目标参量x。

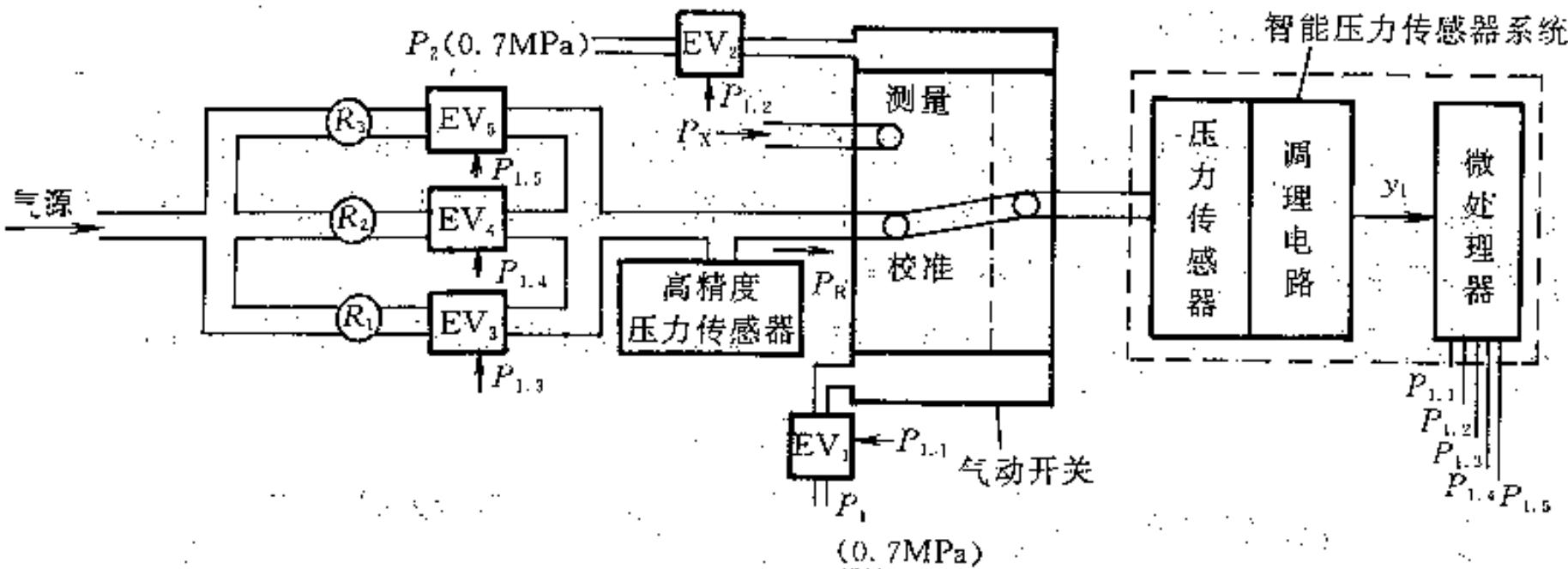
实现条件：传感器系统在实时标定与测量期间，输出一输入特性保持不变。

测量精度：决定于实时标定的精度。

效果示例：总误差：± 1%，标准值精度：± 0.02%，短时精度：
± 0.1%

下图给出了一个压力自校准系统的例子，它的标准测量周期，完全取决于压力达到稳定状态的时间；周期越短，对提高测量精度越有利。





压力自校准系统原理框图





§ 5.3 噪声抑制技术

有关噪声的抑制技术实际上在有关的课程里都讲过，一般有滤波、相关技术、平均技术等。

§ 5.3.1 滤波

用途：信号频谱与噪声频谱不重合时。

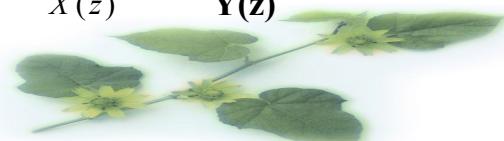
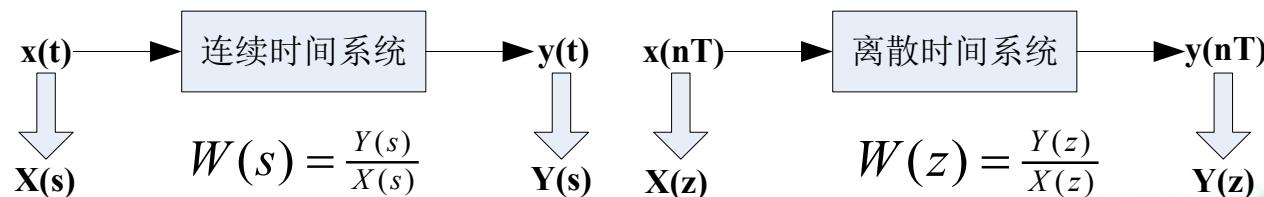
滤波器的分类：模拟滤波器—由硬件组成，属于连续时间系统。

数字滤波器—由软件实现，属于离散时间系统。

1、数字滤波器中的Z变换

传递函数的特性，广义地说就是滤波器的特性。

在介绍数字滤波器之前，我们先了解一下Z变换的概念；对于连续时间系统，一般采用拉氏变换，而对于离散时间系统则采用Z变换。





Z变换定义式: $X(z) = Z[x(t)] = Z[x(nT)] = Z[x(n)] = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n)z^{-n}$

其中: $z = e^{j\omega T}$, 或 $X(z) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n)e^{-j\omega T}$ ——傅立叶变换的离散形式。

1) 典型函数的Z变换

a) 单位阶跃函数的Z变换

$$X(z) = \frac{z}{z-1} \quad x(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

b) 单位斜坡函数 $x(t)$ 的Z变换

$$X(z) = T \frac{z}{(z-1)^2} \quad x(t) = \begin{cases} t & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

c) 指数函数的Z变换

$$X(z) = \frac{z}{z-e^{-aT}} \quad x(t) = \begin{cases} e^{-aT} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$





d) 余弦函数的Z变换

$$X(z) = \frac{1-z^{-1} \cos \omega T}{1-2z^{-1} \cos \omega T + z^{-2}} \quad x(t) = \begin{cases} \cos \omega t \dots (t \geq 0) \\ 0 \dots (t < 0) \end{cases}$$

2) 求_S域的Z变换

将 $X(s) \rightarrow x(t) \rightarrow x(nT) \rightarrow$ Z变换。

3) Z反变换

a) 查表法

b) 直接除法——幂级数展开法

将x (z) 的关系式展开成: $X(z) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n)z^{-n} = x(0) + x(1)z^{-1} + \dots$ 的形式。

c) 留数法 (积分反演法), 在z=0处无极点, 分母中无z项

I) 单极点留数: $K = \lim_{z \rightarrow z_i} (z - z_i) X(z) z^{n-1}$

II) m阶重极点留数: $K = \frac{1}{(m-1)!} \lim_{z \rightarrow z_i} \frac{d^{m-1}}{dz^{m-1}} [(z - z_i)^m X(z) z^{n-1}]$





d) 部分分式展开法

将 $X(z)$ 展开成简单的一阶或二阶项之和，再利用查表法求出各项的Z反变换。说明： $x(t)$ 的Z变换是 $X(z)$ ，但 $X(z)$ 的反变换不一定就是 $x(t)$ 。

4) Z变换的基本性质和定理

a) 线性特性——并联连接关系

$x_1(n) \Leftrightarrow X_1(z)$ ， $x_2(n) \Leftrightarrow X_2(z)$ ，则：

$$x(n) = a_1x_1(n) + a_2x_2(n) \Leftrightarrow a_1X_1(z) + a_2X_2(z) = X(z)$$

b) 延迟性质

$x(n) \Leftrightarrow X(z)$ ，则： $x(n-m) \Leftrightarrow z^{-m}X(z)$ ；

$$x(n+m) \Leftrightarrow z^m[X(z) - \sum_{n=0}^{m-1} x(n)z^{-n}]$$

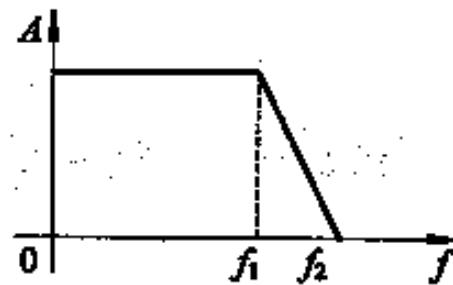




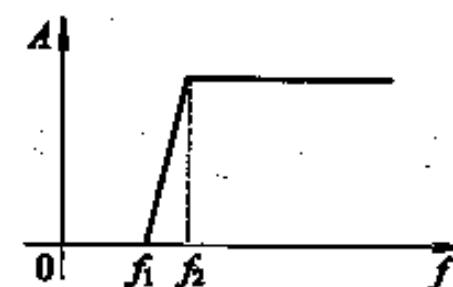
2、模拟滤波器相关知识

1) 滤波器的特征频带与分类

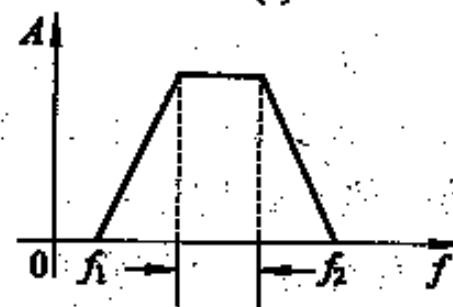
通带、阻带、过渡带。



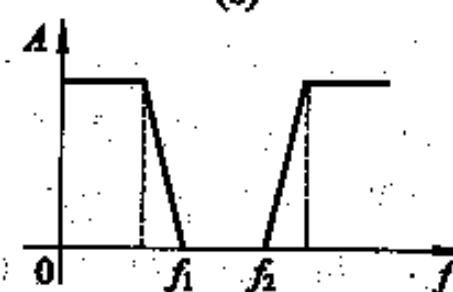
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) 低通滤波器; (b) 高通滤波器; (c) 带通滤波器; (d) 带阻滤波器





2) 巴特沃斯滤波器与切比雪夫滤波器

低通滤波器传递函数的一般表达式：

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Kb_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0}$$

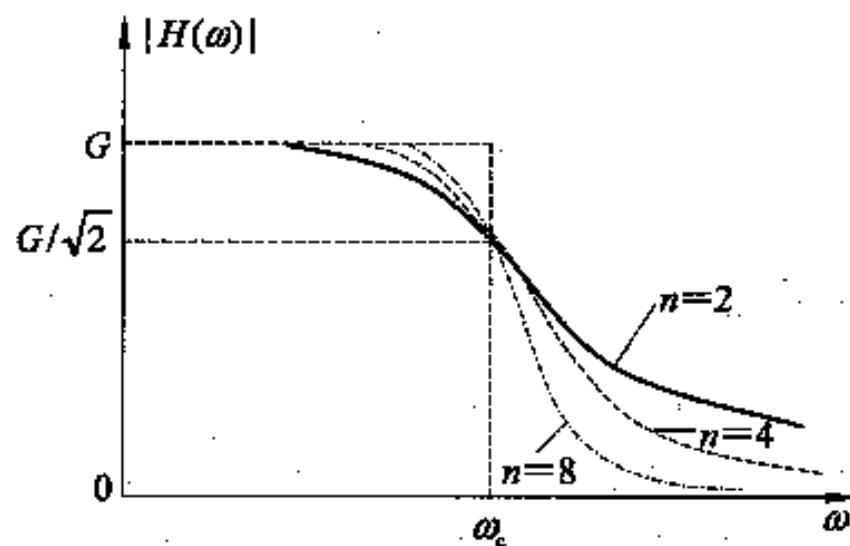
在很多逼近准则中，巴特沃斯(Butterworth)和切比雪夫(Chebyshev)是常用的准则。

巴特沃斯低通滤波器的幅频特性：

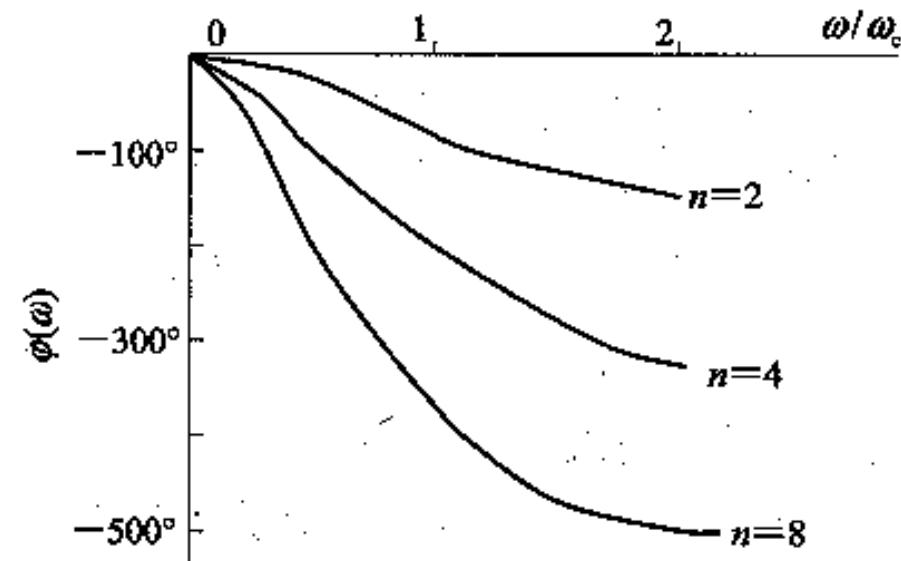
$$|H(\omega)| = \frac{|Y(\omega)|}{|X(\omega)|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}}$$

ω_c ：截止角频率





(a)



(b)

n 值不同时巴特沃斯低通滤波器频率特性

(a) 幅频特性;

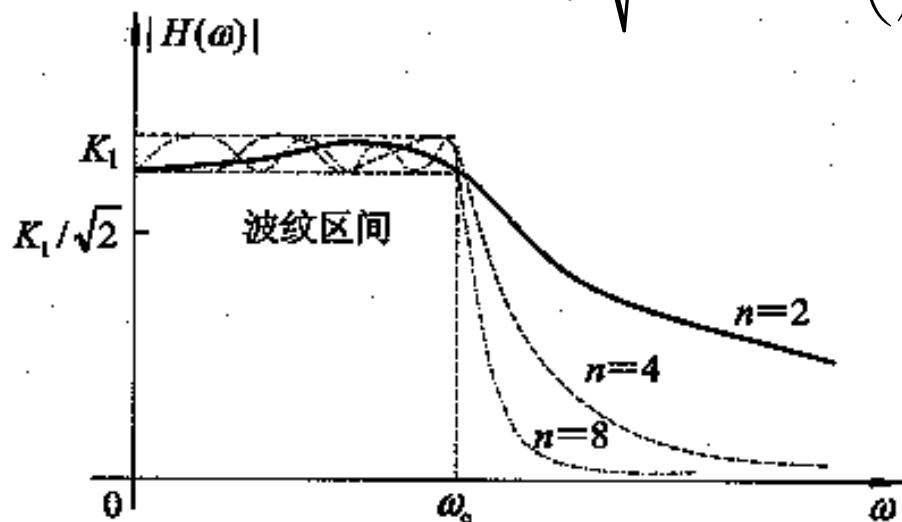
(b) 相频特性





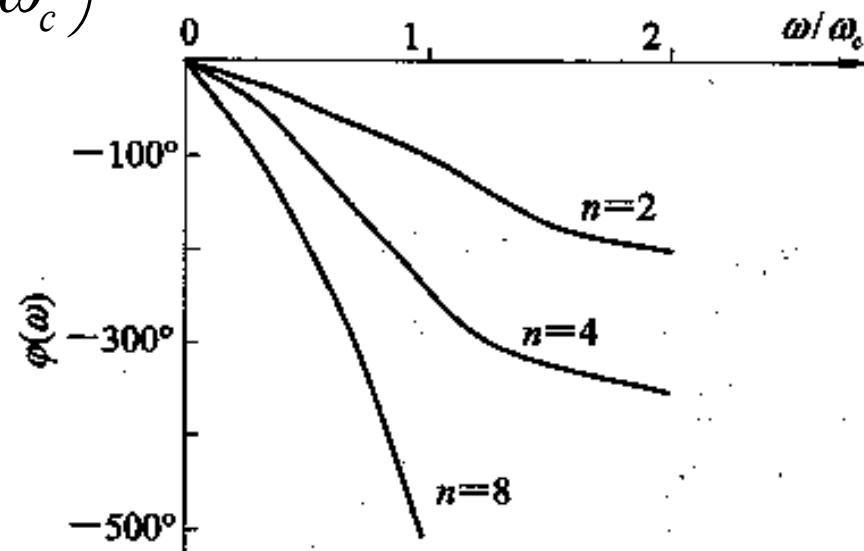
切比雪夫低通滤波器的幅频特性：

$$|H(\omega)| = \frac{|Y(\omega)|}{|X(\omega)|} = \frac{K}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)}}$$



(a)

ε ：与纹波大小有关的常数
 C_n ：切比雪夫多项式系数。



(b)

n 值不同时切比雪夫低通滤波器频率特性

(a) 幅频特性；

(b) 相频特性





3、以模拟滤波器为基础的数字滤波器的设计

或者说根据 $H(s)$ 求 $G(z)$ ，因为频率选择型模拟滤波器的构成法或设计方法，已有完整的理论，并可得到性能良好的滤波器。

1) 脉冲响应不变法

用于低通滤波器或带通滤波器的设计。

设模拟滤波器的传递函数为 $H(s)$ ，脉冲响应为 $h(t)$ ，则对应的数字滤波器的脉冲响应 $g_D(nT)$ 为：
$$g_D(nT) = Th(t) \Big|_{t=nT},$$
 上式的获得，是因为：

$$H(z) \Big|_{z=e^{sT}} = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} H_a(s - j \frac{2\pi}{T} k)$$

$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} H_a(j \frac{\omega - 2\pi k}{T})$$

为保持不失真：

$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{T} H_a(j \frac{\omega}{T}), \quad |\omega| < \pi$$





如果采样频率很高，即 T 很小，则滤波器的增益太高，影响使用效果。

希望数字滤波器的频率响应不随采样频率变化，作以下修正：

$$h(n) = T \cdot h_a(nT) \quad , \text{ 亦即 } g_D(nT) = T \cdot h(t) \Big|_{t=nT}$$

2) 后向差分法

对于一阶系统：传递函数： $W(s) = \frac{a}{s+a} ;$

$$\frac{dy(t)}{dt} = -ay(t) + ax(t) , \quad a = \frac{1}{\tau} \quad (\tau : \text{时间常数})$$

其后向差分方程为：

$$y(kT) - y[(k-1)T] = -aTy(kT) + aTx(kT)$$

由传递函数 $W(s)$ 求等效数字滤波器 $G_D(z)$ 时，令 $S = \frac{1-z^{-1}}{T}$ 即可。
对应后向差分法还有前向差分法：

$$y[(k+1)T] - y(kT) = -aTy(kT) + aTx(kT)$$

则上述方法不成立。





3) 双线性变换法（梯形积分法或Tustin法）

又称双一次变换法，是最常用的方法。

若以：

$$\int_{(k-1)T}^{kT} y(t)dt = \frac{1}{2} \{y(kT) + y[(k-1)T]\}T$$

$$\int_{(k-1)T}^{kT} x(t)dt = \frac{1}{2} \{x(kT) + x[(k-1)T]\}T$$

代入后向差分方程式的右边项，则：

$$y(kT) - y[(k-1)T] = -\frac{aT}{2} \{y(kT) + y[(k-1)T]\}T + \frac{aT}{2} \{x(kT) + x[(k-1)T]\}T$$

经Z变换后：

$$G_D(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{a}{s+a} \quad s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$$

亦即在传递函数 $W(s)$ 中，以 $s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$ 代入即可求 $G_D(z)$ 。

上述方法对所有形式的频率选择滤波器的设计均有效。





4) 频率预曲折双线性变换法

a) 对于连续滤波器 $G(s) = \frac{a}{s+a}$, 对应的数字滤波器两者之间的响应频率之间的关系为:

$$\omega_A = \frac{2}{T} \tan \frac{\omega_D T}{2} , \quad \text{当 } \omega_D \ll \frac{\pi}{T} \text{ 时, } \omega_A \approx \omega_D$$

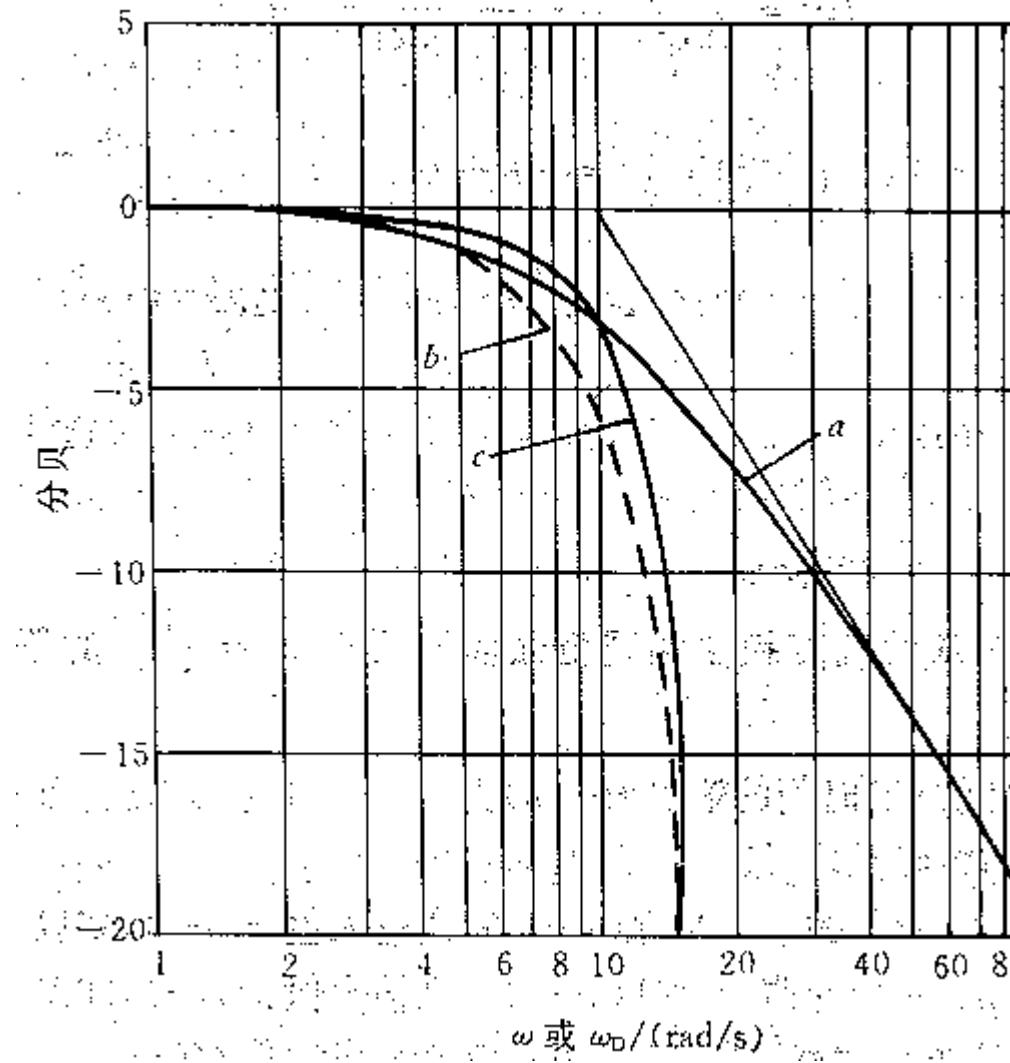
而 ω_D 当接近 $\frac{\pi}{T}$ 时, 则 $\omega_A \rightarrow \infty$, 频率发生畸变。

b) 频率预曲折

目的: 在所要求的使用范围内, 使 $G(s)$ 与 $G_D(z)$ 有相同的频率特性。

在 $G(s) = \frac{a}{s+a}$ 中, 其中 $a = \frac{1}{\tau}$ 为时间常数, 它所对应的频率为转折频率。若令: $\frac{2}{T} \tan \frac{aT}{2} = a$, 亦即: 在 $G(s)$ 中, 令: $s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$, $a = \frac{2}{T} \tan \frac{aT}{2}$, 则求得的的频率特性满足设计要求。





(a) $G(j\omega)$ 的波德图; (b) 双线性变换法解得的波德图; (c) 频率预曲折双线性变换法解得的波德图





3、数字滤波器的设计举例

1) 数字滤波器的设计步骤

- a) 根据模拟滤波器的传递函数 $G(s)$ 选择合适的设计方法；
- b) 根据选定的设计方法求出等效数字滤波器的传递函数 $G_D(z)$ ；
- c) 求出对应的 $G_D(z)$ 差分方程，亦即： $Y(z) = X(z) \cdot G_D(z)$ ；
- d) 求差分方程的Z反变换关系式

该关系式一般表达了当前nT时刻的输出值y(n)与当前时刻的输入x(n)和前一时刻输入x(n-1)，输出y(n-1)；甚至前二时刻输入x(n-2)，输出y(n-2)之间的关系。

- e) 根据上述关系式，可以很方便的编写相应的信号处理软件。

2) 举例说明

求低通滤波器 $H(s)$ 的等效数字滤波器 $H(z)$ ， $H(s) = \frac{1}{1 + \tau s}$

- a) 选择方法：后向差分法， $a = \frac{1}{\tau}$ ， $s = (1 - z^{-1})/T$ ；





b) $H(z) = \frac{aT}{1+aT-z^{-1}}$

c) $(1+aT)Y(z) - z^{-1}Y(z) = aTX(z)$

d) $y(n) = \frac{1}{1+aT}[aTx(n) + y(n-1)]$

令: $q = \frac{T}{T+\tau}$, $p = \frac{\tau}{T+\tau}$, 则: $y(n) = qx(n) + py(n-1)$

转折角频率: $\omega_\tau = \alpha = \frac{1}{\tau}$

通过调整q, p的值可以改变低通滤波器的时间常数 τ 。在信号缓变的流量、压力、温度测量的智能传感器系统中, 可采用该方法来滤除高频噪声。





§ 5.3.2 相关分析技术

用途：用于信号频带与噪声频带相重叠或者噪声幅值比信号大的场合。

所谓相关乃指信号的一些特征参量相同或相近。

噪声信号的特点：

- 1) 噪声信号是一种随机性的信号，它的估计平均值是不随时间变化。
- 2) 某些受外界因素干扰的信号具有产生干扰的对象的特征。如工频干扰信号，它具有与工频相同的频率，若工频幅值不变，则在相同条件下，干扰信号的幅值也不变。

在讲述采用相关技术处理含有上述噪声的信号之前，我们先了解一下表征随机信号的一些参量。

1、随机信号的各种表征参量

- 1) 平均值：又称直流分量

$$E[x(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = m \quad , \quad T \text{为有限值则为: } \hat{m}$$





- 2) 均方值: 表示信号的强度 $\psi^2 = E[x^2(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$
- 3) 方差: 又称波动分量部分 $\sigma^2 = E[(x(t) - m)^2] = \psi^2 - m^2$

4) 自相关函数 $R_x(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau) dt$

相关性的好坏主要表征信号的规律性好坏, 或者说是一种将有规则的信号提取出来的方法。

5) 互相关函数 $R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t + \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt$

表征两个不同的随机信号在相隔 τ 时取值的相关程度。

2、自相关函数的性质和特点

- 1) 性质





- a) 自相关函数是偶函数，亦即： $R_x(\tau) = R_x(-\tau)$
- b) $\tau = 0$ 时， $R_x(0)$ 是 $R_x(\tau)$ 的最大值，等于 ψ^2 。举例解释一下
- c) 自相关函数 $R_x(\tau)$ 不反映相位信息，只与 τ 有关
- d) $\tau \rightarrow \infty$ 时， $R_x(\infty)$ 是 $R_x(\tau)$ 的最小值，等于 m^2 ；这说明相关分析主要是除去随机信号的波动分量。

2) 特点

- a) 确定性信号，在所有 τ 值，都存在 $R_x(\tau) \neq m$ 的数值存在，依此可检测其周期。而随机信号在 τ 趋向一定值时， $R_x(\tau) = m$
- b) 若确定性信号 $x(t)$ 是周期性信号，则它的 $R_x(\tau)$ 也是周期函数，而且两者周期相同。

例如正弦函数的自相关函数为余弦函数，它与正弦函数的初相位无关，且周期与正弦函数相同，但幅值为 $\frac{A^2}{2}$ ，A为正弦波幅值。





3) 应用

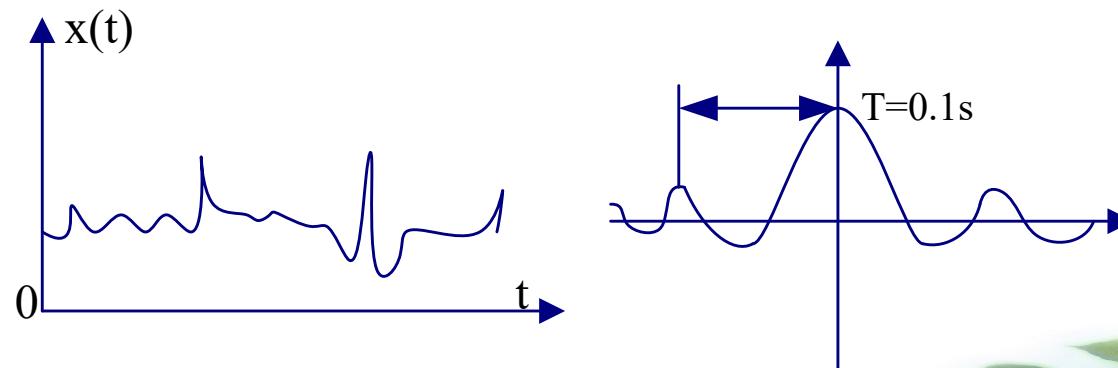
可用于检测淹没在随机噪声中的周期性信号。

假设一输入信号为: $x(t) = x_0(t) + N(t)$

$x_0(t)$ 为确定性信号, $N(t)$ 为噪声信号。

通过自相关分析, 其自相关函数为: $R_x(\tau) = R_{x_0}(\tau) + R_N(\tau)$

根据前面讲述的自相关函数的特点, 在 $R_x(\tau)$ 中, $x_0(t)$ 的相关值得到增强, 而 $N(t)$ 的相关值被减弱, 从而很容易识别提取有用信号的特征参数值。如 : 汽车垂直加速度的检测。





3、互相关函数的性质与特点

1) 性质

a) 互相关函数不是偶函数，它与两信号的相位有关，亦即：

$$R_{xy}(\tau) \neq R_{xy}(-\tau), \text{ 但: } R_{xy}(\tau) = R_{yx}(-\tau)$$

b) $R_{xy}(\tau)$ 在 $\tau = 0$ 时无特征性。

c) 互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 有时也有最大值，这一点与a) 联系在一起。

2) 特点

a) 由于互相关函数与信号的相位有关，因此它包含有时间延迟信息，可用来测量有时间延迟信息的物理量，如：速度、流量等。

b) 对随机干扰噪声有极强的抑制能力。

4、相关技术的应用

1) 利用相关分析去除工频干扰

思路：假定被测信号为： $s(t) = x(t) + x_i(t)$





$x(t)$: 有用信号; $x_i(t)$: 工频干扰信号

$x_i(t)$ 可表征为: $x_i(t) = A \cos \omega_i t + B \sin \omega_i t$

在一段时间内, 可认为A, B, ω_i 是不变的, 因此只要求出A, B, ω_i 的值, 即可确定工频干扰信号的值, 然后将 $s(t)$ 减去 $x_i(t)$ 就可得到有用信号。

求解A, B, ω_i 的步骤:

a) 在一定的取值范围内(如49~51)先取定 ω_i 的值。

b) 将 $\sin \omega_i t$ 与 $s(t)$ 进行互相关分析处理, 求得A的值。

对于有限的离散点: $\hat{A} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cos \hat{\omega}_i n$

c) 将 $\cos \omega_i t$ 与 $s(t)$ 进行相关分析处理, 求得B的值。

对于有限的离散点: $\hat{B} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \sin \hat{\omega}_i n$

d) 求 $\sqrt{\hat{A}^2 + \hat{B}^2}$ 的值





e) 改变 ω_i 的值（按一定的步长），重复b), c), d) 求取对应不同 ω_i 的 $\sqrt{\hat{A}^2 + \hat{B}^2}$ 的值；若 ω_i 的取值与实际的频率值相同，则 $s(t)$ 中包含的工频信号与 $\cos \omega_i t$ （或 $\sin \omega_i t$ ）是一种自相关的关系，则此时相关值达到最大。

因此对应 $\sqrt{\hat{A}^2 + \hat{B}^2}$ 最大值的 ω_i 即为实际的工频信号频率，将对应的 \hat{A} 、 \hat{B} 值代入上式即可求得工频干扰信号 $x_i(t)$ 。

在实际运算时，上述信号都是离散的形式，因此：

$$x(n) = s(n) - x_i(n), n = 0, 1, 2, \dots, N$$

说明：在进行 $s(t)$ 与 $\cos \omega_i t$ （和 $\sin \omega_i t$ ）互相关分析处理时，利用了以下两点特性：

a) 两相互独立无关的信号（其中一个需为周期信号）在进行互相关时，互相关函数为零；

b) 正交函数（相位相差90°）进行互相关时，互相关函数为零。





作业8:

一相对平稳测量信号受到工频信号的干扰，假定测量信号的输出幅值为0~5V，工频干扰幅值1V，试设计一个数字滤波器，使之经过数字滤波后信噪比 >100 。

作业9:

在无功补偿系统中，电流与电压信号之间的相位差需要精确测量，但实际测量中，因干扰信号的影响，很难直接获得精确值，试用相关分析的方法具体实现之。假定干扰信号为白噪声，信噪比为1，具体计算相关后的精度。





2) 相关相位差计

用于精确测量两个相同频率信号 $x(t)$, $y(t)$ 在受噪声干扰情况下的相位差。

求解方法及步骤:

a) 求取 $x(t) = A \sin(\omega t + \theta) + N_x(t)$ 中A的值, $A > \max[N_x(t)]$

采用自相关的方法: $\hat{R}_x(0) = \frac{A^2}{2}$, $A = \sqrt{2\hat{R}_x(0)}$

b) 求取 $y(t) = B \sin(\omega t + \theta + \varphi) + N_y(t)$ 中B的值, $B > \max[N_y(t)]$

c) 求取 φ

采用 $x(t)$ 与 $y(t)$ 互相关的方法: $\hat{R}_{xy}(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} x(n)y(n)$

$$\cos \varphi = \frac{2\hat{R}_{xy}(0)}{AB} \quad \varphi = \arccos \frac{2\hat{R}_{xy}(0)}{AB}$$

d) 实际信号处理是离散的形式

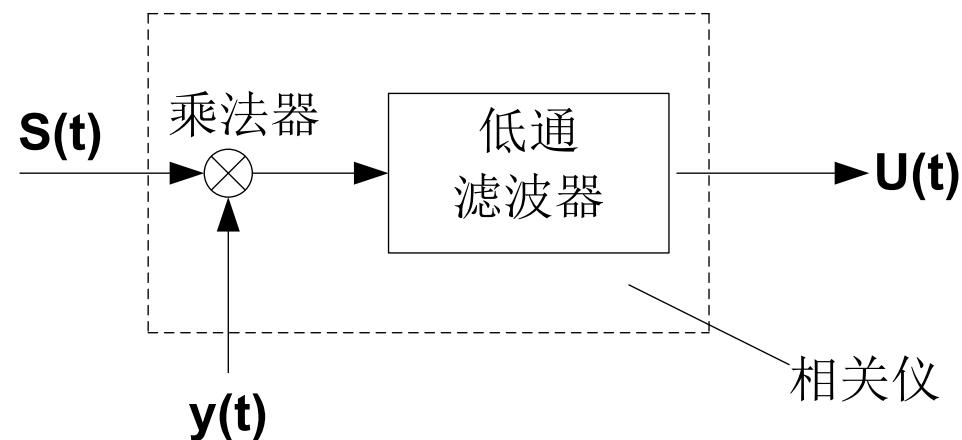




$$\hat{R}_{xy}(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} x(n)y(n)$$

$$\hat{R}_x(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} x(n)^2$$

$$\hat{R}_y(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} y(n)^2$$



3) 相关分析仪（又称锁相放大器）

在无线通信中，它相当于一个解调器的作用。

在右图中， $s(t)$ 是一个包含被测量信号、调制信号和噪声信号的混合信号， $y(t)$ 是调制信号， $s(t)$ 与 $y(t)$ 经乘法器再经低通滤波器输出的信号实际上就是 $s(t)$ 与 $y(t)$ 在延迟 $\tau = 0$ 时互相关后的函数值。

$$U(t) = \hat{R}_{xy}(0) = \frac{BC(t)}{2} \cos \varphi$$





其中: $s(t) = C(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi) + N(t)$, $y(t) = B \sin \omega t$

前提: $C(t)$ 是一个缓变信号, 而 ω 相对 $C(t)$ 的角频率很大。

在一般的信号传输和测量中(特别是无线通信), 为了提高信噪比, 先将被测或被传输信号进行高频调制, 然后再进行测量和传输, 经过解调后可基本上保持原信号不变, 或不受干扰信号的影响。

另外书中还介绍了如何实现输入信号受参考信号调制的方法, 大家自己看一看。

§ 5.3.3 其它滤波技术

1、频域谱分析法(又叫快速傅里叶变换)

- a) 首先对输入信号进行采样, 对采样点进行离散傅里叶变换(FFT), 得到输入信号的频谱;
- b) 除去输入信号中干扰信号的频谱;
- c) 对剩下的信号频谱进行傅里叶反变换(IFFT), 则得到一个恢复信





号，该恢复信号即为被测对象的信号。

采用频域谱分析法，可以很容易的构成低通滤波器，高通滤波器和带通滤波器。

傅里叶变换的形式：

$$\text{对于信号 } x(t), \quad x(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\omega n}, \quad \omega = \Omega \cdot T,$$

反变换：

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(e^{j\omega}) \cdot e^{j\omega n} d\omega$$

2、平均滤波技术

1) 同步加算平均法

将记录的信号 $x(t)$ 分为等长的 m 段，得到 m 个样本函数，若：

$x(t) = s(t) + N(t)$ ， $s(t)$ 为规则的有用信号， $N(t)$ 为随机噪声信号，则每个样本的： $\psi_s = s(t)$ ， $\psi_N^2 = \sigma^2$ ，

m 个样本： $s(t)$ ， $\psi_s = ms(t)$ ， $\psi_N^2 = m\sigma^2$ ， $\psi_N = \sqrt{m}\sigma$





$$\text{因此: } \left[\frac{s}{N} \right]_m = \frac{ms(t)}{\sigma\sqrt{m}} = \sqrt{m} \left[\frac{s}{N} \right]$$

2) 移动平均法:

对于离散时间序列 $x(n)$, 在其中顺序取 m 个数求平均, 该平均值为输出

$$\text{值, 亦即: } y(n) = \frac{1}{2k+1} \sum_{i=n-k}^{n+k} x(n+i), \quad n=0,1,2,\dots, \quad m=2k+1$$

a) 为保持对称性, m 一般取奇数。

b) m 值的确定: 取决于有用信号的频率, 一般希望 $m \leq \frac{T}{2}$ 。

m 的取值不同, 决定了输出信号的幅值大小, m 值过大, 输出只有直流分量。

c) 为消除尖脉冲的干扰, 有时在 m 中去掉一个最大值和一个最小值。





3) 中值滤波

对m窗口里的数按大小进行排队，取中间值作为输出值。

作用：抑制高频尖峰噪声。





§ 5.4 自补偿

包括两个方面的内容

- 1) 改善系统温度性能的补偿技术;
- 2) 系统工作频带的扩展。

§ 5.4.1 温度补偿

在前面讲述的内容里，我们曾在两个地方讲到了如何进行温度补偿：

- 1) 第一次是在第二章的第3节，拼凑补偿技术中讲的采用硬件的方法，亦即使供电电源具有压阻电桥相反温度输出特性，从而达到补偿目的。
- 2) 第二次在一节讲述自校准技术时，介绍在测量当时的工作条件下对传感器系统进行实时在线标定，确定当时的输出—输入特性。

这里介绍的温度补偿则是一种称作“监测补偿法”——首先对干扰量进行监测，在此基础上，再用软件实现补偿，因此该方法更具实用价值。





1、温度信号的获得

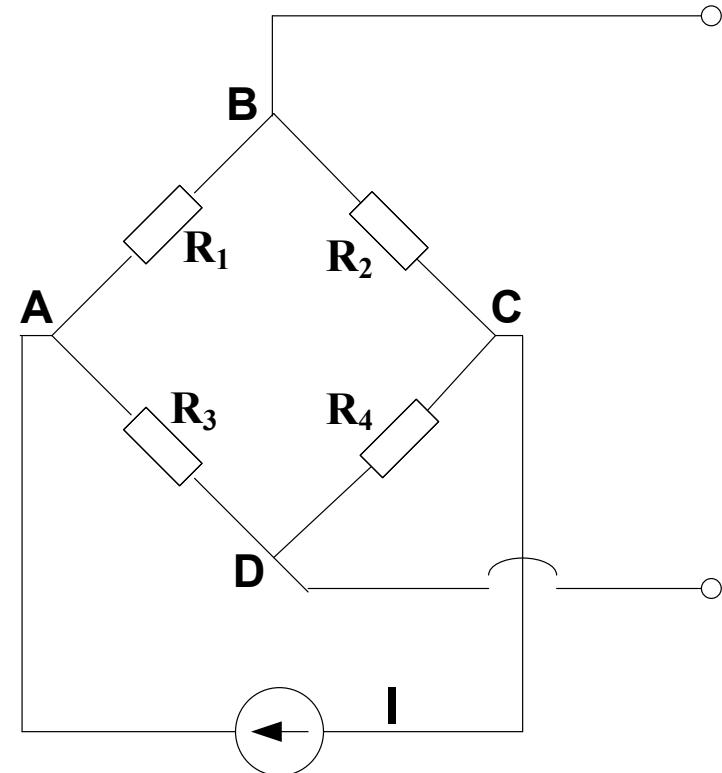
一般采用测温传感器来获得。对于压阻式压力传感器，采用“一桥二测”技术，下面我们介绍一下什么叫“一桥二测”技术。

如右图所示：以恒流源作为供电电源，我们知道作为压敏电压输出端：

$$U_{BD} = I \cdot \Delta R \quad (\text{不考虑温漂}) ,$$

而 U_{AC} 的输出值则反映了温度量的信息。

按照理想条件： $U_{AC} = IR + I\Delta R_T$ ，它的输出与压敏电阻变化值无关。而仅与因温度变化引起电阻值的变化有关，因此欲求压敏电阻处的温度：





- 1) 首先对传感器系统进行 $U_{AC} —— T$ 特性的标定, 给出 $U_{AC} —— T$ 曲线;
- 2) 根据测得的 U_{AC} 输出值和 $U_{AC} —— T$ 曲线按前述方法求得当时的T值。

2、多段折线逼近补偿法

1) 零位温漂的补偿

由于一般传感器的零位温漂特性是一种非线性的关系, 因此针对不同性质和用途的传感器可采用本章第一节讲的非线性校正的方法进行。如: 查表法, 曲线拟合法, 神经网络法。

2) 灵敏度温度漂移的补偿

这里讲灵敏度温度漂移的补偿与前面讲的内容有所差别。前一章讲的自校准, 是有前提条件的, 即: 在进行标定和测量时, 某些量是处于相对稳定不变状态, 若温度是干扰量, 则温度是相对稳定的。在这里考虑用软件实现补偿,





它的输出量是作为二元函数来考虑的。若输出是电压量，则：

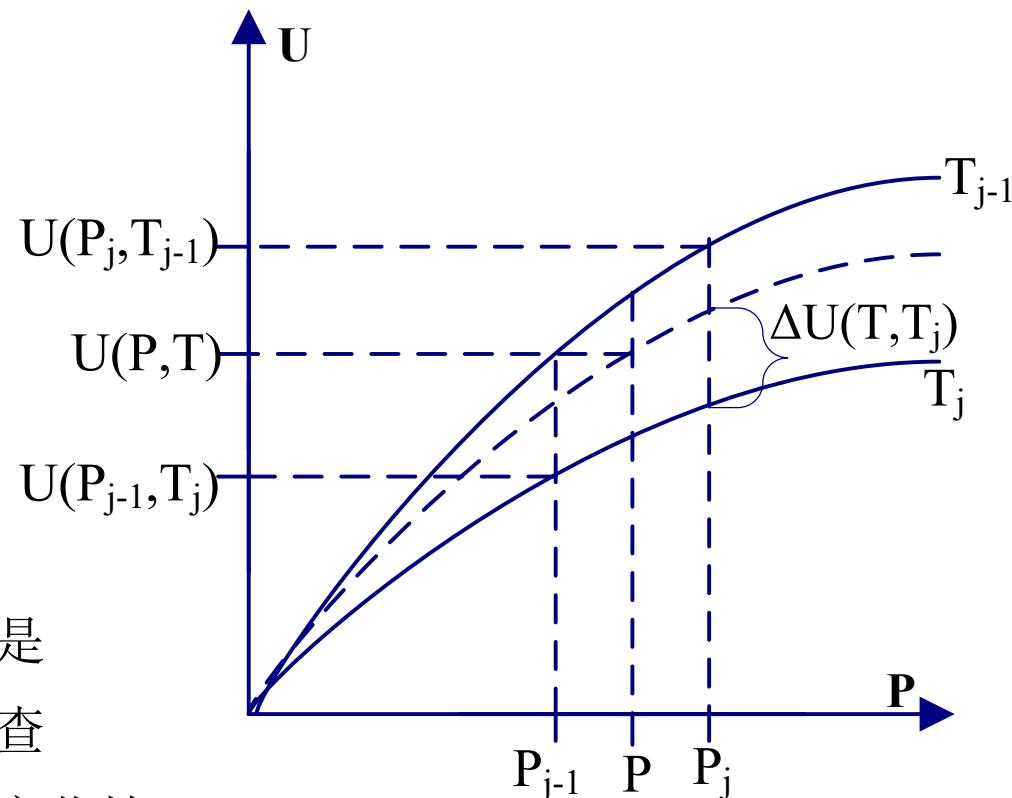
$U = f(P, T)$ ， U 与 P 和 T 之间均是一种非线性的关系，因此补偿起来要复杂一些。

1) 需要解决的问题

当我们给出一个被测量的值的时候，总是在其它影响因素固定的情况下给出的，若影响因素发生变化，则被测量的值也会发生变化。

对一个传感器系统进行标定也是这样的。前面讲述的非线性校正的查表法，实际上是不考虑影响因素的变化情况。

对于半导体传感器，在考虑主要影响因素——温度变化时的标定，我们可





以给出在不同工作温度值时的被测量与输出量之间的列表值，但这些量都是有限的，而且是离散的。

若对应的输出量不在这些节点所确定的标定线上，如何求得对应的被测量？如上图所示。

2) 补偿方法及步骤：

在上图中，我们假定： $P_{j-1} < P < P_j$ ， $T_{j-1} < T < T_j$

则： $U(P_{j-1}, T_j) < U(P, T) < U(P_j, T_{j-1})$

那么我们希望求出对应 T_{j-1} 的V-P曲线上 $U(P, T_{j-1})$ 值或对应 T_j 的V-P曲线上 $U(P, T_j)$ 的值，然后采用反非线性的方法求出对应的P值。因此在表达式： $U(P, T_j) = U(P, T) - \Delta U_P(T, T_j)$ 中，如何求取 $\Delta U_P(T, T_{j-1})$ 或 $\Delta U_P(T, T_j)$ 的值。

采用参考教材中讲述的方法求取，对于不同位置 $U(P, T)$ 的值，有





时误差较大。考虑一下，如何求取可以尽量减少 $\Delta U_P(T, T_{j-1})$ 或 $\Delta U_P(T, T_j)$ 的计算误差。（参考教材中是按 T_1 进行比较的）。

步骤：

- a) 根据传感器系统的工作被测量范围和工作环境温度确定标定时合理的分段值。
- b) 通过标定实验给出标定列表值并存入内存（零点—温度标定； $U_{AC} — T$ 标定； $U(P, T)$ 标定）。
- c) 当进行现场测量时，首先由测温传感器的输出值求得T值，将已消除零位误差的输入量的值和对应的T值与标定值进行比较，判定它所在列表网格中的位置。
- d) 按上述方法求得补偿电压值。
- e) 求出对应标定曲线上对应输入量值的输出电压值。
- f) 按反非线性特性求得被测量的值。





3) 综合补偿程序

参考教材中给出了该程序的主程序框图和求取补偿电压的子程序框图。其它主要过程和步骤与上面介绍的内容相同，那么这里需要注意的几点有：

- a) 一开始给定的转换特性输出值是经过零位修正后的值。
- b) 先由 U_{AC} 求取T值，然后再对输入 $U(P, T)$ 作零位修正。
- c) 如何快速求取P的值。
- d) 提高计算精度的问题。

4) 计算举例：

具体过程这里就不说了，但参考教材中提到了一个补偿误差估算的问题。这里实际上是我们前面讲到的 $U(P, T)$ 在确定网格位置不同时所引起的计算误差。按前面讲的方法算一下做一个比较。

尽管如此，根据参考教材中给的参数值计算表明，其补偿后的灵敏度仍可提高一个数量级以上。





3、曲线拟合补偿法

1) 补偿原理：前面讲的多段折线逼近补偿法类似于单变量中查表法，而这里讲的两个变量曲线拟合与单变量曲线拟合类似。它的拟合结果，从某种角度来讲是一种曲面的效果。

用于找出在工作温度范围内非标定条件下的任一温度T时的输入—输出特性，因此这种方法更具有普遍性。

2) 补偿步骤

a) 利用标定实验数据，建立多项式方程

$$T_1 : U(T_1) = \beta_{11}P + \beta_{21}P^2 + \beta_{31}P^3 + \dots , \text{ 须先考虑零位值的修正} .$$

$$T_2 : U(T_2) = \beta_{12}P + \beta_{22}P^2 + \beta_{32}P^3 + \dots$$

⋮

$$T_i : U(T_i) = \beta_{1i}P + \beta_{2i}P^2 + \beta_{3i}P^3 + \dots$$





求取上述方程中的函数值，即可确定U~P之间的关系，多项式项数的多少取决于补偿精度的要求。

b) 建立系数 β 的曲线拟合方程

上式中 β 的值也用一维多项式方程表示：

$$\text{一次项: } \beta_1 = A_1 T + B_1 T^2 + C_1 T^3 + D_1 T^4$$

$$\text{二次项: } \beta_2 = A_2 T + B_2 T^2 + C_2 T^3 + D_2 T^4$$

⋮

若在确定温度T的情况下，将 β_i 系数的多项式方程式代入U~P多项式方程中，选取不同的P值，测定U值，则我们可以求得系数 A_i ， B_i ， C_i ， D_i 的值。至少要进行多少次标定，才能求出该系数？

3) 确定工作温度T时的P—U特性的曲线拟合方程。





由 U_{AC} 确定T值，将T代入 β 的曲线拟合方程，则可以求得各 β 的系
数值，再由方程：

$$U(P, T) = \beta_1 P + \beta_2 P^2 + \beta_3 P^3 + \beta_4 P^4 + \beta_5 P^5$$

可求得P值。

优点：从原理上来说，可消除温度变化引起的误差。

4) 补偿效果

补偿后输出电压的温度稳定性得到了非常大的提高。

§ 5.4.2 频率补偿

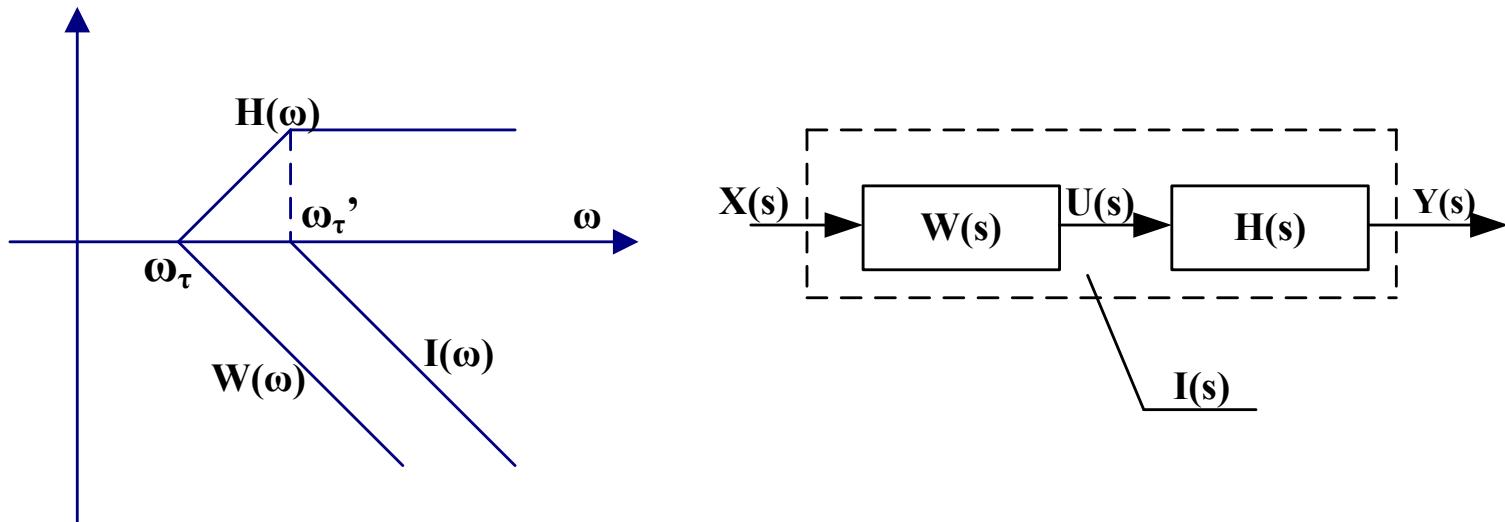
目的：扩展系统的频带，改善系统的动态性能。

方法：数字滤波法，频率校正法。

1、数字滤波法

见下图





1) 工作原理

在学自动控制时，我们知道，要想改善该控制系统的动态性能（幅频特性，相频特性），可以通过硬件的方法在控制回路中增加某一环节来达到改善的目的。

在上图中，即是串入 $H(s)$ 。

数字滤波器的方法即是通过软件的方法来实现附加传递函数 $H(s)$ 。

$$H(s) = \frac{I(s)}{W(s)}, \quad s = \frac{1-z^{-1}}{T}$$





这里 $W(s)$ 是原系统的传递函数, $I(s)$ 是希望改善后的系统传递函数。

2) 实现方法

在上一章里我们讲滤波技术的时候, 比较详细的介绍了数字滤波器的设计方法, 其前提就是根据系统已知的s域的传递函数 $H(s)$ 求得等效的数字滤波器, 其中共分5个步骤进行。

上述分析主要是针对一阶系统进行的, 二阶系统实现方法与此类似。但是在进行数字滤波器设计之前, 必须要知道传感器系统动态特性。对于一阶系统为时间常数 τ ; 对于二阶系统则为固有振荡频率 ω_0 和阻尼比 ζ 。

3) 时间常数 τ 的确定。

a) 可采用阶跃响应法测定

b) 频率特性法: 输入频率可调的正弦信号, 输出幅值最大时的频率值





为系统频率。

4) 补偿后的效果

系统经过补偿以后，输出特性将会发生改变。按补偿效果来分，会有下面几种情况：

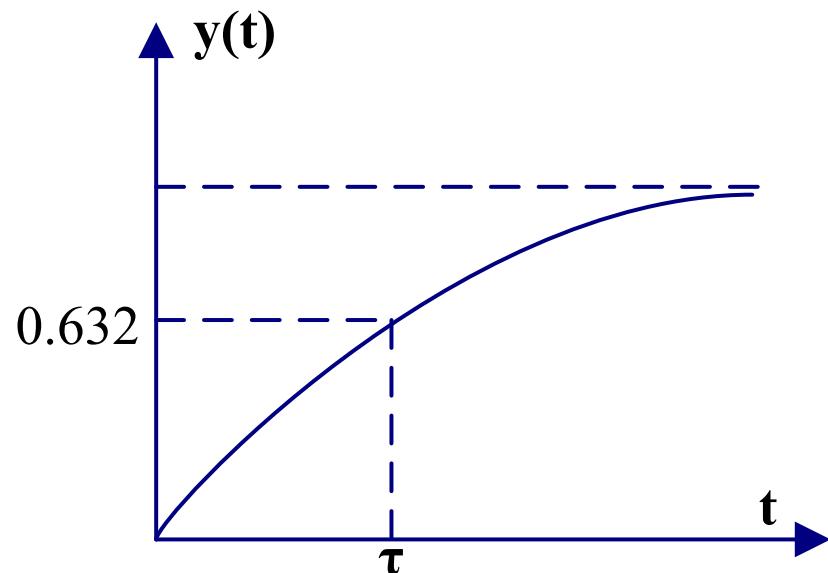
a) 补偿不足： $f_C < f_{C_0}$

b) 补偿过分： $f_C > f_{C_0}$

c) 补偿正好： $f_C = f_{C_0}$

由于数字滤波器是通过软件编程实现的，可以很容易进行调整达到最佳补偿效果。

出现上述情况，是由于不能精确测定 τ 值所引起的。





2、频域校正法

这里讲的频域校正法与前面介绍的5.3.3其它滤波技术中频域谱分析法基本一致。

- 1) 对输入信号的输出响应信号进行采样, $f_s > 2f_m$;
- 2) 对采样信号进行FFT, 求得频谱 $Y(\omega)$;
- 3) 采用复数除法运算求得系统被测输入信号的频谱;
- 4) 采用IFFT求得原函数 $x(t)$ 的离散时间序列。

校正思想:

由于系统本身的频带宽度限制, 使得输入信号的高频部分被衰减或产生畸变, 但是对于已知的系统而言, 这种畸变是确定的, 可以根据畸变的结果和确定的系统就可以恢复出真正的输入信号。





§ 5.5 多传感器信息融合

上一节我们讲的自补偿技术是针对消除温度对输出量的影响和扩展系统频带宽度而言的，这一节讲的多传感器信息融合技术就是通过对多个参数的监测，采用一定的信息处理方法达到提高每一个参数量测量精度的目的。也就是通过降低或消除各参量间交叉灵敏度的影响，提高目标参量测量精度的一种手段，因此信息融合技术更具有普遍性和强的实用价值。

——举例说明：ST—3000，硅压阻式多功能传感器

差压测量—差压电桥，静压测量—静压电桥，温度测量—感温电阻。

是多传感器信息融合处理技术的代表，因之称为智能传感器系统发展的摇篮。

——简单介绍信息融合技术在其它方面的应用

- * 多媒体的组成；
- * 多传感器使用提高可靠性；
- * 现代战争中各种信息的处理。





——受交叉灵敏度影响较深当首推各种气体传感器

* 说明气体传感器的特性

* 解决方法：——采用阵列技术，两方面的内容。

1) 研制集成微型气体传感器阵列

2) 采用多传感器信息融合技术

* 达到目的：气体识别，混合气体组分的含量分析

——信息融合处理方法

1) 多维回归分析法，实际上是多元函数的数值解法，如上一节介绍的曲线拟合法。

2) 模式识别气体种类的方法

3) 神经网络分析法

下面我们分别介绍上述几种方法及其应用：





§ 5.5.1 二传感器信息融合

前面介绍的自补偿技术中，以其中的一个参量（如压力作为目标输入量，其它量作为干扰量来考虑的，因此称之为“监测补偿法”。但如果要将干扰量——温度也作为一个目标输入量来考虑，这就是二传感器信息融合的概念。

它可以采用二维回归分析法（或称为曲面拟合算法，二元函数分析法）来进行分析处理，下面我们介绍该方法的基本原理

1、曲面拟合法原理

对于一存在温度灵敏度的压力传感器系统，它的压力传感器输出信号实际上是P和T（或 U_T ）的二元函数，即：

$$U = g(P, U_t) \text{ —— 一个曲面函数}$$

我们也可以将实际输入压力P表示为U和 U_t 的二元函数：

$$P = f(U, U_t), \text{ 该函数可解释为：因} U \text{ 中包含} T \text{ 的信息，为消除} U \text{ 中} T \text{ 的影}$$





响而求得实际的输入P的值，所以加入 U_t 。上述函数采用二次曲面拟合方程多项式，可表示为：

$$U = \alpha_0' + \alpha_1' P + \alpha_2' U_t + \alpha_3' P^2 + \alpha_4' P U_t + \alpha_5' U_t^2 + \varepsilon'$$

$$P = \alpha_0 + \alpha_1 U + \alpha_2 U_t + \alpha_3 U^2 + \alpha_4 U U_t + \alpha_5 U_t^2 + \varepsilon$$

上述仅是一个二阶二元函数的多项式， ε' 、 ε 为高阶小量， $\alpha_0' \sim \alpha_5'$ ， $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 为常系数。因此曲面拟合法的实质是求系数 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 。

2、曲面拟合法求解方法

该方法实际上与上一节介绍的曲线拟合法基本类似。

1) 首先进行二维标定实验，测得在工作量程范围和温度范围内的压力传感器（或温度传感器）的输出值。

若 P_i 为 $i=1 \sim n$, t_j 为 $j=1 \sim m$; 则有 $n \times m$ 个输出值。

2) 根据标定实验值求解拟合方程的待定常数





由标定的输入、输出值，采用最小二乘法原理：

$$\begin{aligned}\Delta_k^2 &= [P_k - P(U_k, U_{tk})]^2, \quad k=1, 2, \dots, m \times n \\ &= [P_k - (\alpha_0 + \alpha_1 U_k + \alpha_2 U_{tk} + \alpha_3 U_k^2 + \alpha_4 U_k U_{tk} + \alpha_5 U_{tk}^2)]^2\end{aligned}$$

总的均方差

$$\Delta = \sum_{k=1}^{m \times n} \Delta_k^2$$

根据多元函数求极值的条件，则可建立 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 的矩阵方程组。矩阵

方程组的系数可通过标定输入值 P_k, T_k 以及传感器输出值 U_k, U_{tk} 求得，因此通过求解矩阵方程即可求数 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 。

3) 确定二次曲面的拟合方程

将求得的 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 的值代入P表达式的方程，这样实际的输入量P的值就可根据对应的输出信号U、 U_t 计算求得。

3、二传感器信息融合的应用





1) 用于单一功能的传感器

其作用或功效等同于上一节介绍的曲线拟合法，但该方法使用时，须保证干扰量传感器能真实反映被测目标参量传感器所感受的干扰量。

2) 用于两功能的传感器。用于存在交叉灵敏度的两个测量目标参量的两功能传感器系统，另外一个目标参量的求解方法同前面介绍的方法完全一样，只不过在求系数的矩阵方程组中，矩阵方程组的系数有所改变。

3) 信息融合实例

该实例用的仍是“一桥双测”法硅压阻式压力传感器。在该例中，它将标定的压力、温度二输入参量分为6个点来进行，即 $n=6$, $m=6$ ，最后得到 6×6 的标定输出值U、 U_t 。

具体的计算过程，我们这里就不做介绍了，但计算的结果我们还是可以作一个比较：

a) 系统主要特征参数进行融合处理前后的比较：





* 温度灵敏度系数:

前: $\alpha_s = 7.49 \times 10^{-3} / {}^\circ\text{C}$,

后: $\alpha_s' = 5.78 \times 10^{-4} / {}^\circ\text{C}$;

* 零位温度系数:

前: $\alpha_0 = 1.51 \times 10^{-3} / {}^\circ\text{C}$,

后: $\alpha_0' = 7.3 \times 10^{-4} / {}^\circ\text{C}$;

* 压力灵敏度系数:

前: $\alpha_p = 6.6 \times 10^{-2} / 5.0 \times 10^4 \text{ Pa}$;

后: $\alpha_p' = 7.0 \times 10^{-3} / 5.0 \times 10^4 \text{ Pa}$.

该方法与自补偿技术相比, 从参考教材中给出的数据来看, 在融合处理特征方程多项式阶数仅仅取二阶的情况下, 效果没有自补偿技术好。

b) 若特征方程多项式取四阶进行融合处理, 亦即方程的系数为:





$\alpha_0 \sim \alpha_{14}$ ，根据书中计算，可得为如下结果：

$$\alpha_s'' = 1.4 \times 10^{-4} / {}^\circ\text{C}$$

$$\alpha_0'' = 4.9 \times 10^{-5} / {}^\circ\text{C}$$

$$\alpha_p'' = 9.5 \times 10^{-3} / 5.0 \times 10^4 \text{ Pa}$$

c) 采用神经网络技术（BP网络又称误差后向传播神经网络）第7章中有稍微详细的介绍。

为达到四阶特征方程多项式的结果，采用三层BP神经网络，经过10000次的样本训练后即可。





问题10：

试比较：自补偿技术中的多段折线逼近法，曲线拟合法以及曲面拟合法，BP神经网络法这几种信息处理方法各自的特点， 主要从实时性、计算精度、复杂性等方面讨论；上述方法是否能消除（或降低）迟滞和重复性的影响？





§ 5.5.2 三传感器信息融合

用于：两个非目标参数监测多信息融合与三功能传感器的多信息融合。

1、三功能传感器多信息融合

对于硅压阻式实现测量压力（差） P 、静压 S_P 、温度 t 的三功能传感器，其三个参数 P 、 S_P 、 t 可分别表示为三输出量 U_P 、 U_{SP} 、 U_t 的三元函数，亦即：

$$P = f(U_P, U_{SP}, U_t); S_P = h(U_P, U_{SP}, U_t); t = g(U_P, U_{SP}, U_t)$$

处理方法1：

1) 先进行降维处理

由于静压 S_P 仅影响 P 的零点输出，对温度输出值 U_t 没有什么影响，因此可以考虑先消除 S_P （或 U_{SP} ）对 P 的零点输出的影响，这样 P 就可以降为二元函数，然后按二传感器信息融合的处理方法进行分析。





a) 将P的零点输出 U_0' 表示为 U_{SP} 的多项表达式:

$$U_0' = \gamma_0 + \gamma_1 U_{SP} + \gamma_2 U_{SP}^2 + \dots$$

b) 进行标定实验:

$$S_{Pi} : S_{P1}, S_{P2}, \dots$$

$$U_{0i}' : U_{01}', U_{02}', \dots$$

$$U_{SPi} : U_{SP1}, U_{SP2}, \dots$$

c) 根据最小二乘法原理建立系数 $\gamma_0 \sim \gamma_n$ 的矩阵方程组，代入标定值即可求得系数 $\gamma_0 \sim \gamma_n$ ，将该系数值存入内存。

2) 在实际测量时，首先对输出量 U_P, U_{SP}, U_t 进行采样，将 U_{SP} 代入P零点计算公式，求得消除了 S_P 影响的压力输出值。

此时: $P = f(U_P - U_0', U_t), \quad t = h(U_P, U_t)$





3) 按二传感器信息融合法求解。

处理方法2:

- 1) 建立三元函数的多项式拟合方程;
- 2) 进行三维标定实验;
- 3) 根据最小二乘法原理建立拟合方程系数的矩阵方程;
- 4) 代入标定值求解系数矩阵方程, 就得各系数值;
- 5) 将各系数代入多项式拟合方程即可。

维数增多, 一方面标定工作量增大, 另一方面计算量增大, 处理过程变得更

复杂。因此在满足信息输出精度的前提下, 尽量寻求一种方便、快捷的方法。

2、两个非目标参数监测多信息融合

用于: 受两个干扰量影响的单一功能传感器。

处理方法:

- 1) 建立被测目标参量的三元函数多项式方程;

比如说受工作温度和电源电压影响的压力传感器:





$$U_P(P, U_t, \Delta U) = \alpha_0 + \alpha_1 P + \alpha_2 U_t + \alpha_3 \Delta U + \alpha_4 P^2 + \alpha_5 P U_t + \alpha_6 U_t^2 + \alpha_7 P \Delta U + \alpha_8 U_t \Delta U + \alpha_9 \Delta U^2 + \varepsilon_0$$

同样 $P(U_P, U_t, \Delta U)$ 也可以用类似表达式建立。与二元函数多项式方程比较其差别。

2) 其余步骤同上述处理方法2

3) 处理效果: 按参考教材中举例说明

采用二阶项处理后, 输出精度可提高近一个量级。

§ 5.5.3 传感器阵列信息融合

主要用于气体传感器的智能化, 消除交叉灵敏度的影响, 提高对气体种类和混合气体组分的判别分析精度。

1、模式识别中最近邻域法的应用

用于: 识别气体的种类

由于气体传感器本身特性的限制(或者说目前技术水平的限制), 在





混合气体中很难由单个传感器对某种气体及其含量作出定量检测和判别，因此必须采用多个传感器阵列来进行检测，但由于严重的交叉灵敏度的影响，仍很难象其它传感器那样通过一次标定就可以精确测量，但若结合一些先进的信息处理手段和方法，比如模糊理论、模式识别、神经网络技术等，就可以大大提高其检测能力和精度。

简要介绍模式识别的基本概念，说明最近邻域法。

用于气体检测模式识别方法的处理过程：

1) 提取传感器与检测气体相互作用的特征和特性

金属氧化物半导体气敏元件其阻值与气体的种类和浓度有关，

$$\frac{R_{ij}}{R_{i0}} = K_{ij} (C_j)^{r_j}$$

这里的特征或者说特性，就是不同种类、不同浓度气体所引起的某种传感器阻值的不同。





i: 气敏元件序号, $i = 1, 2, \dots, n$,

j: 气体种类的序号, $j = 1, 2, \dots, m$;

R_{ij} : 气敏元件i在浓度为 C_j 的气体中的电阻值;

R_{i0} : 气敏元件在纯净空气中的阻值;

K_{ij} : 在气体j中与元件i特性有关的系数;

r_j : 与气体j特性有关的参数。

为求得排除气体浓度影响而仅与气体的种类有关的特征值 A_{ij} , 令:

$$A_{ij} = \frac{R_{ij} / R_{i0}}{\sum_{i=1}^n R_{ij} / R_{i0}} = \frac{K_{ij}}{\sum_{i=1}^n K_{ij}}$$

它的含义是: 气敏元件i在气体j中(浓度为 C_j)的相对电阻值与所有气敏元件在气体j中(浓度为 C_j)相对电阻值之和的比值。那么有n个敏感元件的元件阵列, 对于m中气体共有 $n \times m$ 个特征值。





2) 建立标准样本库

- a) 测 R_{i0} , $i = 1, 2, \dots, n$, n : 气敏元件阵列中元件个数
 - b) 通过配气箱提供的m种气体, 分别测 R_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$,
 $j = 1, 2, \dots, m$;
 - c) 求特征值 A_{ij} , 共有 $n \times m$ 个特征参数值。
- 3) 确立未知模式的判别准则:

根据最近邻域法, 未知模式的判别式为:

$$d_j = \min \left[\sum_{i=1}^{n=8} (A_{ix} - A_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} ; A_{ix} : \text{气敏元件 } i \text{ 在未知气体 } x \text{ 中的特征值。}$$

上式表明: 若气体x是m种气体中的某一种(假定为k), 则: A_{ix} 的值应与 A_{ik} 的值最接近, (理想情况下, $A_{ix} = A_{ik}$) 而与其它的 A_{ij} 值相差较大, 因此即可判定出气体x即为气体k;





4) 未知气体种类的判别

按上述步骤最终求出相对标准值的m种气体的d值，其中最小d值对应的气体为未知气体。

5) 提高判别成功率的措施

a) 提高各敏感元件对不同种类气体灵敏度的差异性，差异性越大，相互之间的差值越大。

b) 采用更为有效的模式识别算法和判别方法

* 如多次重复测量求平均值法。

* 为消除或降低分散性的影响，采用加权求值法。

对某种重要的特性或差异性较大的特性取较大的权值。

* 采用人工神经网络技术。

2、空气中含单一还原性气体种类和浓度的判定

由于只考虑一种气体的检测与判定，因此首先排除了交叉对测量结果





的影响，但既要判别气体的种类，又要给出浓度参数，因此它仍涉及到信息融合的问题。

根据上一讲内容，我们知道，某一气敏元件在某一气体中的电阻值：

$R = KR_0 C^r$ ，两边取对数： $\ln R = \ln(KR_0 C^r) = \ln KR_0 + r \ln C$
令： $y = \ln R$ ， $r_0 = \ln KR_0$ ， $x = \ln C$ ，则： $y = r_0 + rx$ 。

对应于某种气体和某种气敏元件，该方程可通过实验标定的方式建立：对应浓度 C_k ，则有相应的电阻值 R_k 对应：

$$y_k = \ln R_k, \text{ 同时: } y_k' = r_0 + rx_k = r_0 + r \ln C_k$$

根据最小二乘法原理：

$$\sum_{k=1}^l (y_k - y_k')^2 = \sum_{k=1}^l (y_k - r_0 - rx_k)^2 \quad r_0 l + r \sum_{k=1}^l x_k = \sum_{k=1}^l y_k$$

$$r_0 \sum_{k=1}^l x_k + r \sum_{k=1}^l x_k^2 = \sum_{k=1}^l x_k y_k$$





分别对该式求对应 r_0 , r 的偏导数，并令其为零，则可得到上面的公式，解上式即可求得 r_0 和 r 。

单纯的靠一个方程或者说靠一个气敏传感器是不能同时作出气体种类和浓度的判别的。解释为什么（两条相交直线才能确定一点）。

必须用两个不同种类的气敏元件。

判定方法：

1) 建立两个气敏元件的方程，亦即求出各自的 r_0 和 r ，在不同的气体中有不同的 r_{0i} 和 r_i 。（ r_{0i} 和 r_i 就是标准样本库）

2) 根据 R_1 , R_2 的值求得 y_1 , y_2 ，然后根据方程 $y = r_0 + rx$ ，求解对应 r_{0i} , r_i 的 x_1 , x_2 的值。

若 $x_{1i} = x_{2i}$ ，则样本*i*所代表的气体种类即为所要识别的气体，同时相应的浓度 $C_i = e^{x_{1i}}$

要求：气敏元件的重复性要保持一致。

3、神经网络识别法（结合第七章内容作介绍）





§ 5.6 自选量程和增益控制

自选量程和增益控制又称量程自动转换技术，在有关自动检测技术和智能控制技术的课程都会涉及到这方面的内容。它的主要目的是保证必要的测量精度，适用于以下几种情况：

1) 多路信号检测过程中，多个通道共用一个放大器，经放大处理后到A/D转换器，由于各输入量送到放大器的信号电平不同，因此对放大器的增益要求也不同。

2) 单通道输入信号，宽的变化范围。为保证在整个输入信号的范围内均能满足必要的测量精度的要求，必须分段调节放大器的增益。

一般来说，模拟量经A/D转换器后变为数字量，应尽可能使模拟量在1/2满度～接近满度的区域中转换。

1、量程与增益的确定方法

假定对于一个n位的A/D转换器，由A/D转换器量化噪声产生的相对误差不得大于 δ ，对应的满量程输出电压为 U_H ，则：





量化值: $q = \frac{U_H}{2^n}$, 最大量化误差: $e_m = \frac{1}{2}q$

对应某一电压 U_i , 若希望它的量化相对误差小于 δ , 则:

$$\frac{e_m}{U_i} \leq \delta \Rightarrow U_i \geq \frac{e_m}{\delta} = \frac{q}{2\delta} \quad , \text{同时:}$$

$$U_i \leq U_H = 2^n q - q$$

因此进行量程切换的判据为: $\begin{cases} U_i < \frac{q}{2\delta} \dots \text{切换到小量程} \\ U_i > 2^n q - q \dots \text{切换到大量程} \end{cases}$

2、量程与增益切换的实现方法

下图是一单通道数据采集自动转换量程的硬件电路。多路转换开关用来改变放大器的增益。对于 K_1, K_2, K_3 的吸合相应的增益分别为: 1, 10, 100。 (如下图)

根据输入信号的幅度由控制器来控制放大器的增益。





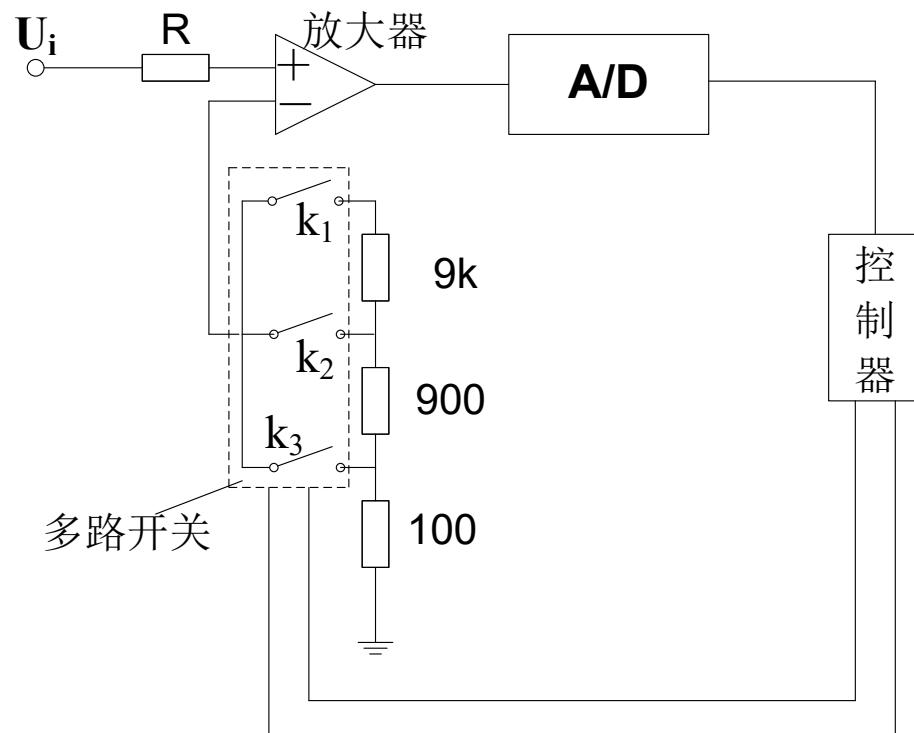
—— 在上图中需要注意的问题是：由于开关的切换会引起放大器的输入端电阻失去对称性，产生失调电流，造成放大器的零漂。解决的方法是采用双多路开关，同时切换平衡电阻值以保持对称性。

—— 量程自动切换可利用硬件的方法亦可采用软件的方法实现。

1) 硬件实现方法

采用参考信号加比较器的方法来控制量程开关的切换。

2) 软件实现方法

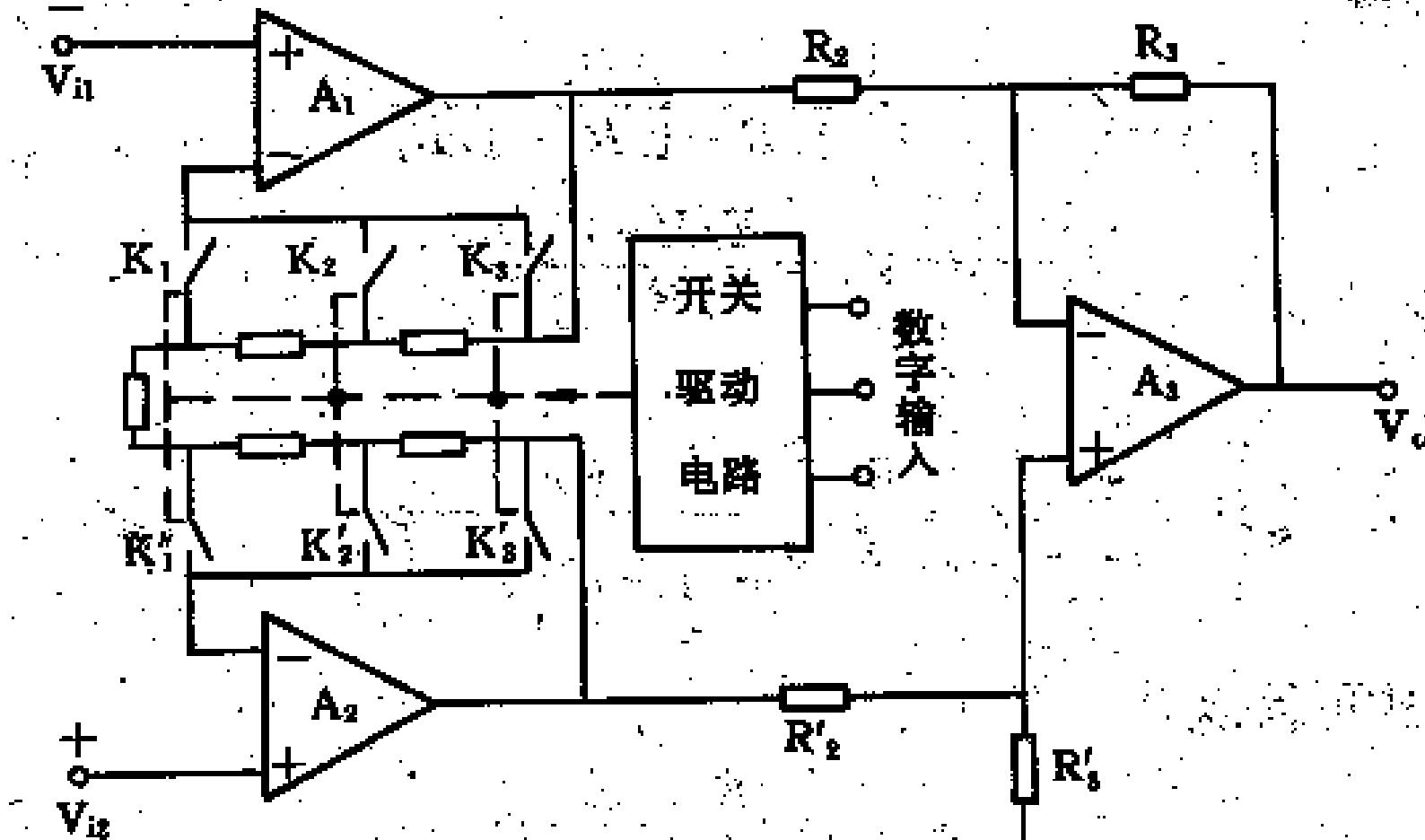




通过对采样的信号进行必要的计算后与该量程（一般先设置最大量程档）的满度值比较，然后给出控制编码，控制量程开关的切换。

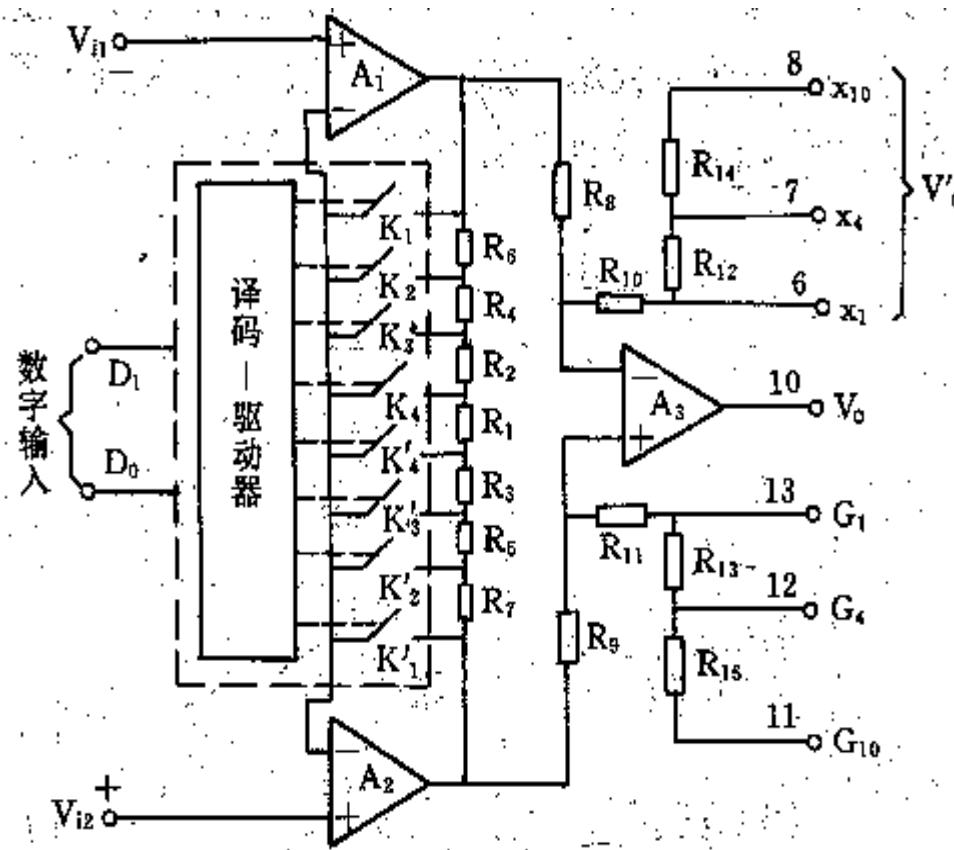
在对实时性要求不高且要求通用性强的场合，常采用软件切换的方法。



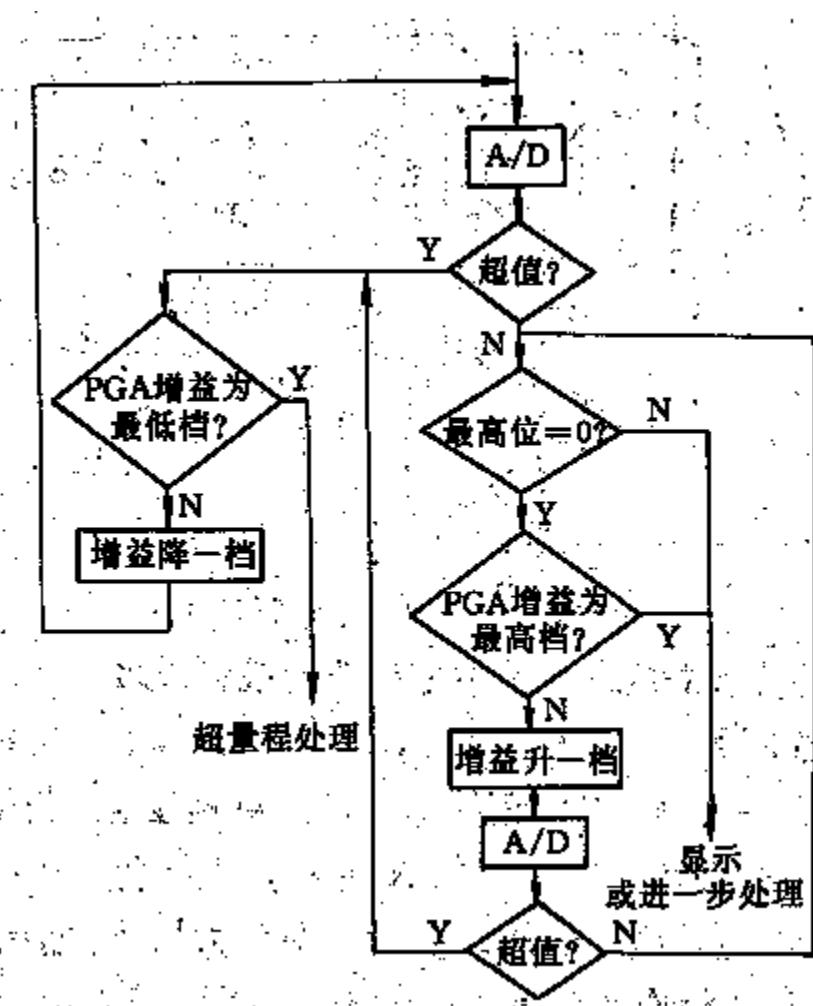


可编程放大器





可编程放大器LH0084电原理图



自动量程切换程序框图





§ 5.7 智能传感器的自检验

为了提高系统安全运行的可靠性。一般有三种方式：

1、开机自检

同PC机开机自检一样，检测对象：显示装置、ROM、RAM、总线、即插件等。

2、周期性自检

在智能传感器的运行过程中周期性的插入自检操作。保证整个系统始终处于最优工作状态。比如现在有的PC机带有CPU、主板、电源的工作温度检测，风机状态检测。有一种诺顿工具软件可对整个计算机系统的整个运行状态进行实时检测等等。

3、键控自检

是一种人工干预的检测手段。用于不能在正常运行操作中进行的自检项目。





§ 5.7.1 ROM自检

对于智能传感器而言，ROM存放的是全部工作软件。它的内容的可靠性直接影响系统是否能正常运行。

自检方法：“校验和法”，分空ROM和已固化软件两种情况。

在ROM的最后一单元写入校验字，保证ROM的每一列的校验和全为“1”或全为“0”，否则为错。累加求和采用异或的方法。

§ 5.7.2 特殊功能寄存器自检

特殊功能寄存器是指用来对片内各功能模块进行管理、控制、监视的控制寄存器和状态寄存器，是一个特殊功能的RAM区。如单片机（51系列）系统的程序计数器、栈指针、累加器、数据指针、中断优先级寄存器等。

* 对于标志寄存器的检测，可采取先置位然后执行条件转移指令，看能否正确跳转的方法来判定标志位是否正常。

* 对于可读写的寄存器，可采取先写入再读出比较的方法来判定。





§ 5.7.3 RAM自检

1、静态RAM与动态RAM的区别

静态RAM的数据能够被锁存，动态RAM的数据则不能，因此为保证数据信息不流失，需定期刷新。

2、静态RAM的自检

- 1) RAM为空，将一定的数据写入，然后再读出与原数据比较是否正确。
- 2) RAM已有数据，将数据读出取反再与RAM的数据进行“异或”，若全为“1”，则OK。

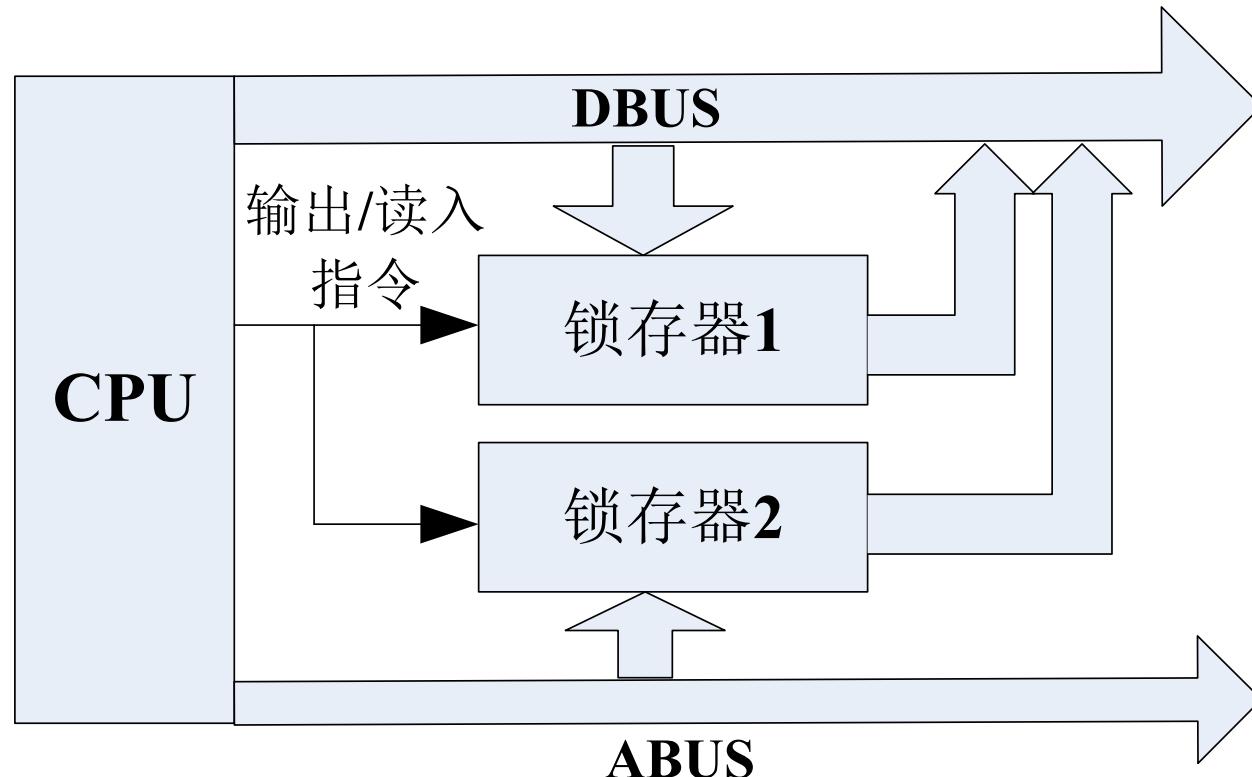
3、动态RAM的自检

注意对校验电路和定时器电路的检测。

§ 5.7.4 总线自检

总线系统实际上是CPU与I/O接口器件的连接通道，判定总线系统是否正常可采用下图检测电路。





简述检测过程。

实际上总线系统除了地址总线，数据总线，还有控制总线，对于控制总线的判定可采取输出指令，看能否正确执行。

外部总线的检查可采取分别置位的方式进行。





§ 5.7.5 A/D和D/A的自检

它们的转换精度直接影响系统的控制运算精度。

1、标定电路和A/D变换器的自检

通过自检系统将智能传感器内的参考/基准电源接在标定电路的输入端，然后启动正常测量程序，并将采样结果与预定值比较，判定该部分是否正常。若有问题，则将参考/基准电源切换到A/D的输入端，将采样结果与预定值比较，以作判定。

2、D/A的自检

锯齿波→D/A → A/D →与内部输入信号比较判定。

§ 5.7.6 I/O接口电路自检

不同的I/O接口电路有不同的检测方法。

- 1) 如前面讲的多路转换开关，通过软件控制读入的数据进行比较判别；





- 2) 读取相应的标志寄存器来判定;
- 3) 自带自检电路的I/O，控制启动它的自检电路。

§ 5.7.7 接插件自检

1、插件是否已经插入

寻取插件与CPU之间的应答信号出现与否来判定。一般采取寻址方式进行，如计算机内的即插即用。

2、插件是否正常工作

采用模拟方法进行。若该插件板有输入输出信号，则自检系统给出模拟信号输出，然后读入相应的输入信号并进行判定，有时要对主要特征参数进行检测。主要采用故障诊断的方法，如专家系统。

§ 5.7.8 显示面板自检

主要检查所有显示器件是否正常工作。如液晶显示器、数码管、发光管等。





方法1：

令所有显示器件均发光，然后令其全部熄灭，然后进入键扫描程序。

方法2：

显示某些特征字符，几秒钟后自动消失，再进入正常工作状态。

§ 5.7.9 自检故障及自检的实现方法

经过自检后发现的故障，可采取面板显示的方式给出故障代码。亦可采取声光报警的方式，还可以通过远程通讯接口传输出去。

自检的实现方法一般有如下几种：

- 1、借助于系统本身的硬件系统再配上一些自检软件。自检软件的执行可采取定时方式调用或中断方式调用。如零输入自检。
- 2、在系统内部增加些必要的硬件电路，再配上自检软件，如标定自检。
- 3、另外增加专用的检测电路或专用的设备，该部分工作可与下面要讲的自诊断工作结合起来进行。





§ 5.8 智能传感器的自诊断

—— 讲述自诊断的必要性和应用领域

 自动化程度的不断提高；自动控制系统的复杂性和重要性；提高系统的可靠性。

—— 解释什么是硬故障；什么是软故障

—— 传感器故障诊断方法

1) 硬件冗余法

 解释什么叫“冗余”

2) 解析冗余法

3) 人工神经网络法

 上述方法在实际应用过程中各有其特点，下面我们将对它们分别进行介绍。





§ 6.5.1 硬件冗余法

解释二传感不能进行故障分离。

这是故障诊断的早期主要方法。它采取的是对容易失效的传感器设置一定的备份。然后通过表决器方法进行管理。

优点：不需要建立数学模型

缺点：设备复杂，成本高。

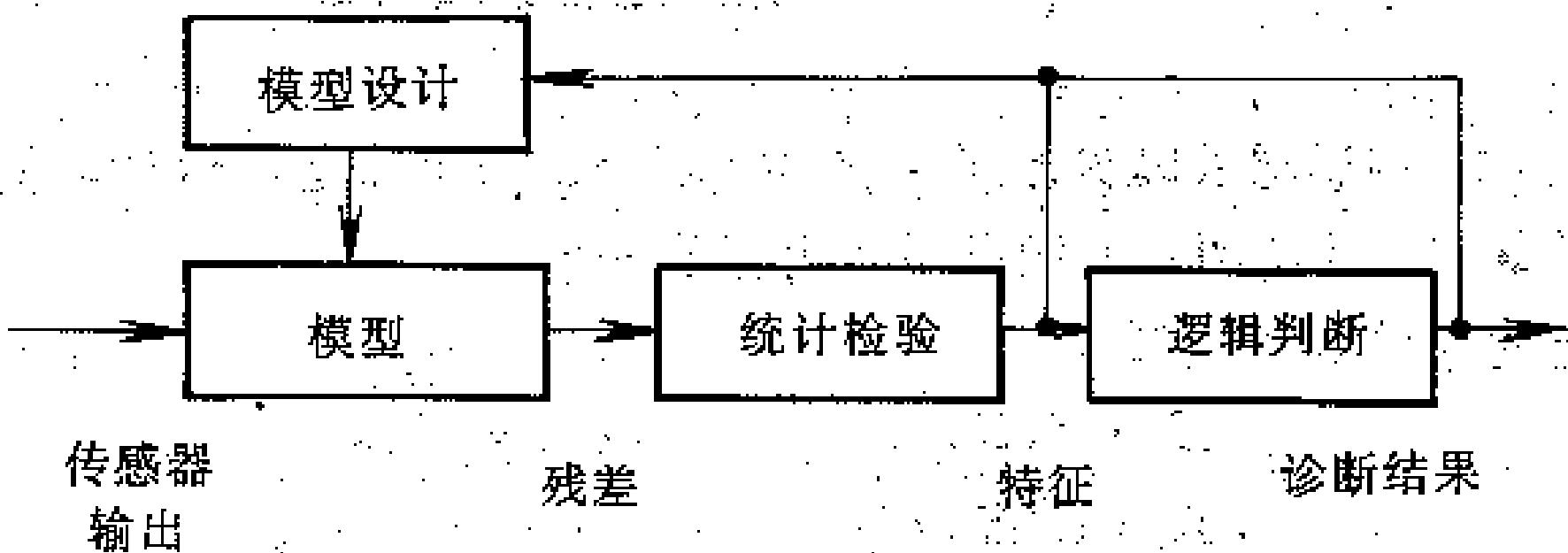
适用对象：火箭、导弹等武器系统；航空航天领域。

§ 6.5.2 解析冗余法（也叫模型方法），软测量方法

通过建立一个适当的数学模型来表示系统的动态特性，然后比较模型输出同实际输出之间的差异来判断是否发生传感器故障。

解析冗余方法是一种用得比较多的方法，它利用的是控制系统中各传感输出之间存在的冗余关系进行故障诊断。





传感器故障诊断中解析冗余法原理框图





1、解析冗余法原理

- 1) 建立被控对象的数学模型；
- 2) 设计与传感器故障相关的残差或者说特征输出值；
- 3) 进行统计检验和逻辑分析，诊断出传感器故障的具体类型，或者说由特征输出值判定故障的种类和原因。

基于建立数学模型的方法不同，有如下几种：

- * 观测器组方法；
- * 故障检测滤波器方法；
- * 一致性空间方法；
- * 状态和参数辨识方法；
- * 基于知识的方法（如：专家系统、遗传算法）。

2、传统的观测器组方法

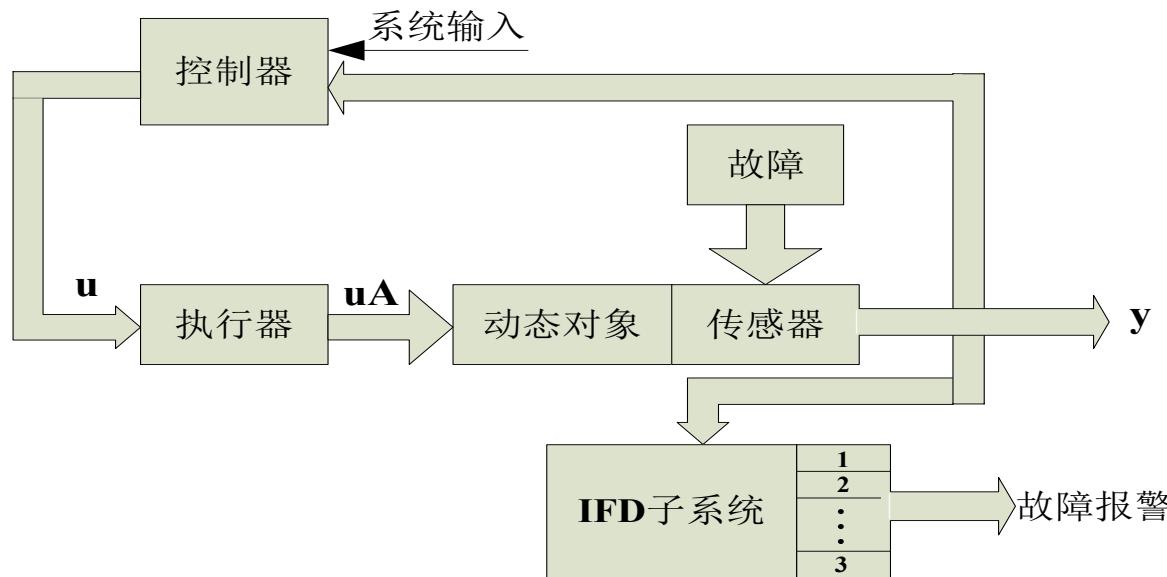
分为：专用观测器组方法；简化观测器组法；广义观测器组法。





1) 专用观测器组方法

a) 讲述一般控制系统的构成及各部分的作用。



- * 系统的输入：指对被控对象的要求，由外界给出。
- * 该部分考虑的仅仅是传感器的故障诊断，也就是说在整个控制系统都处于正常状态下，该诊断方法才有效。
- * 该方法是基于传感器的输出量与动态对象的输入控制量之间，在正常情况下有着一种确定的关系。





这种关系就是我们希望建立的数学模型。但是，如果传感器出现故障，则对于确定的输入控制量和已确定的数学模型，由此计算出的传感器的输出量和实际输出量之间存在差异。对这种差异的分析和判断即可确定传感器的故障及故障种类（原因）。

* 对于估计值与实际值之间差异的分析和判断是由决策逻辑单元完成。

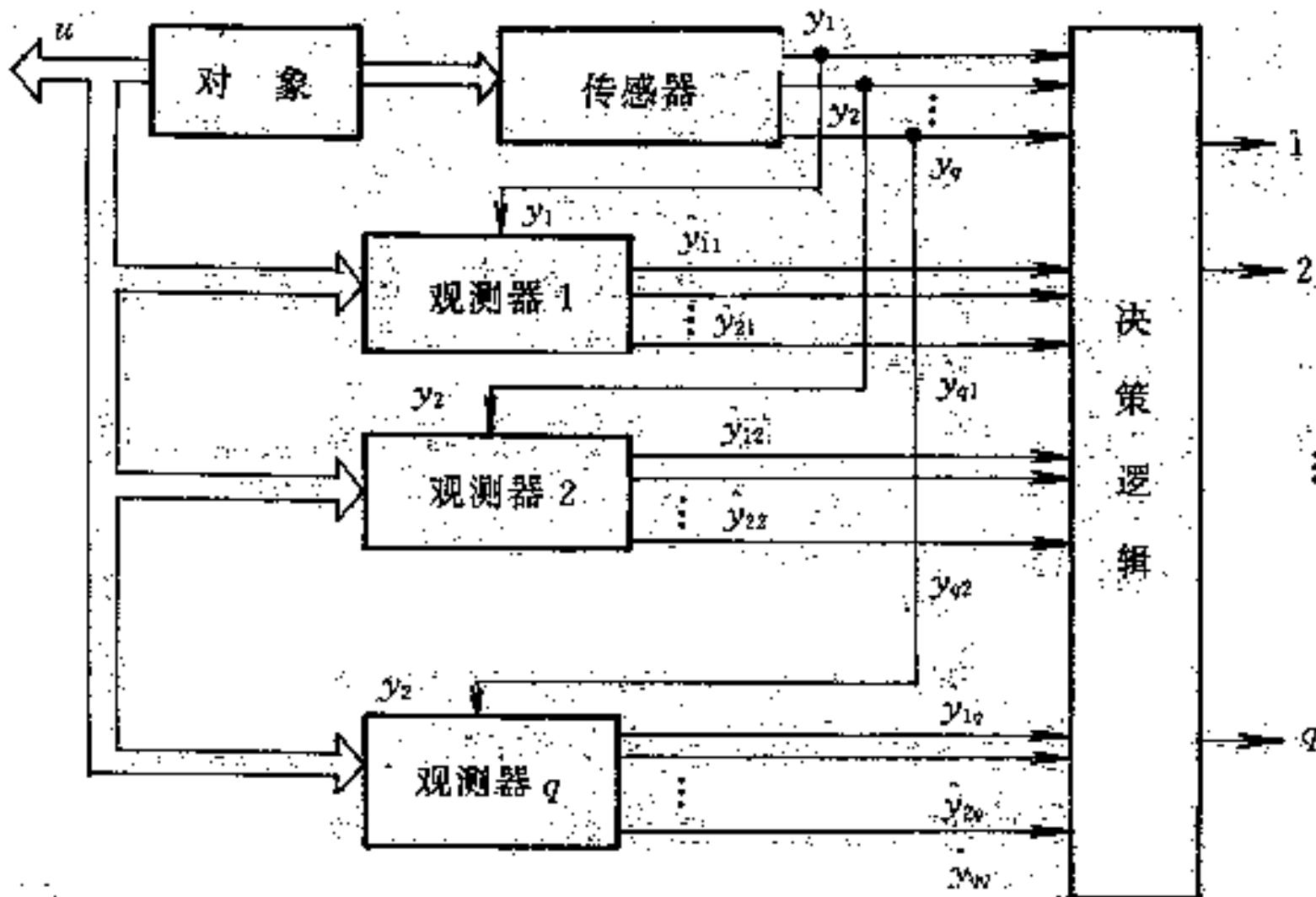
* 对于对象的输入量输入到观测器，一般可由执行器的输出量直接给出，有些非电量须由相关传感器变换后给出。

b) 数学模型的建立

q 个观测器得到冗余度为 q 的观测向量，是指系统内部状态能够从每个传感器的输出量中被观测到。

* 传感器输出： $Y = C(X, U)$ ， X ：内部状态， U ：输入控制量。





专用观测器组方法基本原理框图





- * 模型输出: $\hat{Y} = C(\hat{X}, U)$, \hat{X} 为X的估计值
- * 由 y_i 驱动的模型输出: $\hat{Y}_i = (\hat{y}_{1i}, \hat{y}_{2i}, \dots, \hat{y}_{qi})^T$
- * 无故障: $\hat{Y}_i = \hat{Y}_j = Y(i, j = 1, 2, \dots, q)$
- * 有故障: $\hat{Y}_m \neq \hat{Y}_i = Y(i, j = 1, 2, \dots, q; i \neq m)$

优点: 能够对传感器故障进行唯一的定位(解释一下概念), 但是观测器太多。

2) 简化的观测器组方法

仅有一个观测器, 对q个传感器输出可采取巡回切换的方法, 由可测变量 $y_i (i = 1, 2, \dots, q)$ 驱动。

要求: 传感器的输出量可以提供全状态和输出估计, 也就是说该输出量包含了X、U的内容。

优点: 可以对故障传感器作出唯一的隔离, 而上述方法则不能。





3) 广义的观测器组的方法

在简化的观测器组中，驱动向量是Y的子集，而且它是可变的，因此具有很大的灵活性。

它采取阈值逻辑进行故障报警：

$$\Delta_i(t) = \prod_{j=1, j \neq i}^q |y_j - \hat{y}_{ji}| \quad , \quad \Delta_i(t) > \tau_i \quad (\text{i传感器有故障})$$

$\Delta_i(t) \leq \tau_i$ (i 传感器正常) , τ_i : 为判定传感器*i*是否正常而设定的阈值。

3、解析冗余方法的特点

- 1) 优点：能够精确定位故障源，判定故障大小，增加硬件较少。
- 2) 缺点：必须有精确的数学模型；不适合非线性系统；仅用于故障诊断，不能恢复故障传感器的信号。





§ 6.5.3 基于专家系统的故障诊断技术

目前已研制成功并投入应用的故障诊断系统有：

1985年：飞行器控制系统监视器；

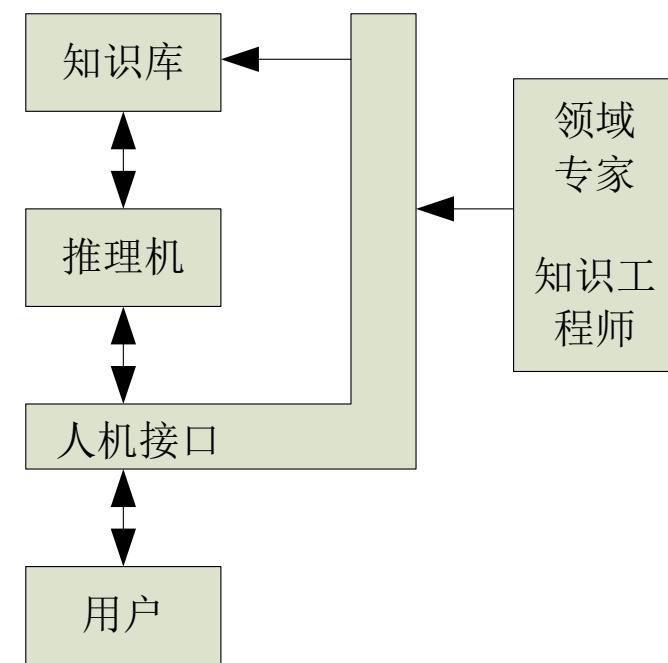
1987年：汽车故障诊断专家系统，飞行器故障诊断专家系统；

1989年：火箭发动机故障诊断专家系统，卫星控制系统地面实时故障诊断专家系统。

1、传统诊断专家系统设计的基本组成

在知识库的创建和维护阶段，由领域专家与知识工程师合作，通过人机接口对知识库进行操作。

在诊断阶段，用户通过人机接口将征兆信息送给推理机，推理机根据诊断过程的需要，检索知识库中的各种知识或继续向用户要征兆信息，诊断结果通过人机接口返回给用户。





2、专家系统的特性

1) 启发性。在知识库中有逻辑性知识（如 $A=B$, $B=C$, 则 $A=C$ ）也有启发性知识，它是领域专家所掌握的一些专业知识。

2) 透明性。能解释它的推理过程，并回答关于自身的问题。

3) 灵活性。知识库中的知识应便于修改和补充。

存在的问题：知识的获取是一个“瓶颈”。

3、自诊断系统的构成

在传统诊断专家系统的基本组成中，若将用户提供信息变为由系统本身提供，则可构成自诊断系统。其中系统本身提供的信息必须是反映被诊断对象（传感器）主要特征量的信息，如传感器本身的输出量，对象的输入量等。

4、现代诊断专家系统

主要指神经网络故障诊断专家系统，模糊神经网络故障诊断专家系统。

相关技术：机器学习、智能计算机。





§ 5.9 图像处理

目的：通过图像处理将由噪声等其它干扰因素使变坏变质的图像复原为原始图像，或提取图像中有关元素的特征参数。

图像传感器系统；显微图像摄像系统；卫星多光谱扫描成像系统；机器人视觉系统等。

图像分：静态图像、动态图像、图片。

§ 5.9.1 图像的平滑

目的：用于抑制图像噪声。

实际上图像的处理可以当作二元离散函数信号来处理，因此二元离散函数的一些处理手段和方法均可用于图像处理。

图像中的噪声一般在频域中均可表示为频率成分，而图像的细节部分表现为高频成份，因此如何将两者区分开是解决问题的关键。





1、邻域平均法

方法：令图像中每个像素点的灰度值等于其周围邻域内各个像素点的灰度平均值。

$$P_0 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 P_i$$

缺点：图像的轮廓变得模糊不清。

2、低通滤波器

方法：二维图像→进行FFT，成为频域函数→滤除噪声频谱→再进行IFFT，恢复成二维图像。

缺点：图像处理时间长，实时性较差。

3、多幅图像叠加法

类似于一元函数中包含随机噪声信号，通过求平均值来消除随机噪声信号的方法。

该方法仅适用于图像中物体对象是静止的，对于具有时间动态特性的





的物体则不合适。

另外多幅图像叠加会增加背景灰度等级。

§ 5.9.2 图像的增强

目的：突出图像中的有用成分；抑制图像中的无用部分。

示例：边缘探测和边缘增强。如汽车牌照的识别。

1、方法1：利用微分法

将二维图像 $f(x, y)$ 定义为标量函数： $G[f(x, y)]$

$G[f(x, y)] = [(\frac{\partial f}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f}{\partial y})^2]^{\frac{1}{2}}$ ，它为 $f(x, y)$ 的梯度。

存在的问题：在灰度级为常数的区域内梯度为零，为解决该问题，对 $G[f(x, y)]$ 的选择按以下几种形式进行。





$$1) \quad g(x,y) = \begin{cases} G[f(x,y)] & \dots G[f(x,y)] \geq T \text{ 时}, \quad T \geq 0 \\ f(x,y) & \dots \dots \dots \text{其它, 保持灰度级} \end{cases}$$

$$2) \quad g(x, y) = \begin{cases} G & \dots \dots \dots G \geq T \\ L_B & \dots \text{其它}, \quad L_B: \text{背景灰度级} \end{cases}$$

2、方法2：采用高通滤波法

与低通滤波方法一致。





§ 5.9.3 图像的灰度变换

目的: 用于拉大图像的对比度或者说增大有用部分与没用(背景)部分的反差。曝光不足的图像就属于反差小, 曝光过度的图像就属于反差太大。有时为了某种艺术的需要也经常采用大反差或小反差的做法。

方法: 逐点处理法; 直方图修正法。

1、逐点处理法

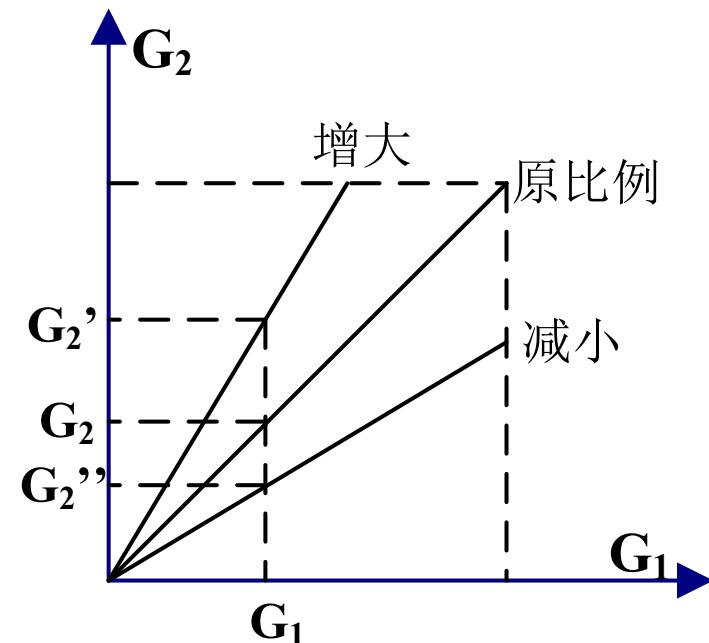
采用逐点运算来修改图像像素点的灰度。

1) 线性变换的概念: $G_2 = aG_1$

原关系为: $G_1 \rightarrow G_2$, $a=1$;

增大反差: $G_1 \rightarrow G_2'$, $a>1$;

减少反差: $G_1 \rightarrow G_2''$, $a<1$ 。





2) r 变换的概念，灰度等级最高为1，白色

$r < 1$, 灰度值较小部分变化幅度大

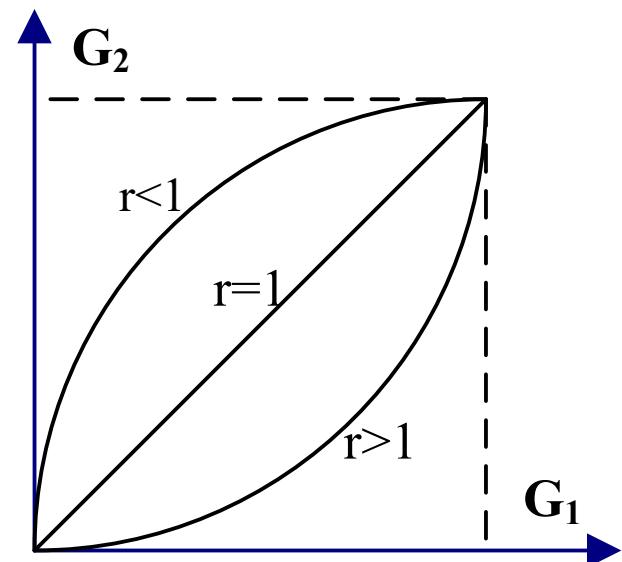
$r > 1$, 灰度值较大部分变化幅度大。

$$G_2 = K G_1^r$$

2、直方图修正法

直方图是一种统计图形，它表示灰度值与像素点数目之间的一种关系。直方图修正法是利用图像灰度分布信息，对灰度分布形式作校正来修正图像灰度，最终达到增强图像质量的目的。

均衡化: $S(r_k) = T(r_k) = \sum_{i=0}^k \frac{n(r_i)}{n}$, $T(r_k)$: 变换函数,
 r_k : 原始图像的灰度级, S : 变换后图像的灰度级, $n(r_i)$: 灰度
级为 r_i 的像素点数。





§ 5.9.4 图像特征的度量和纹理分析

图像特征是进行图像解释的基础，它包括：

- 1) 灰度：包含光谱和色彩信息；
- 2) 边缘：描述灰度变化的程度和位置；
- 3) 纹理特征：反映灰度变化的一些规律；
- 4) 形状特征：描述物体区域或者元素的外形；
- 5) 对象的运动信息：如拍摄图像的重影，或者拍摄速度与位置改变的关系。

1、周长的度量

先进行边缘图像的增强，将周界闭合曲线以离散点的形式表达出来，然后沿周界曲线上的像素点逐个移动，垂直或水平方向上移动一个像素点，计数为1，沿斜线移动计数为 $\sqrt{2}$ ，最后得到的总和为周长。





2、 面积的度量

计算闭合曲线所包围的全部离散点数的总和与像素点面积的乘积。

3、 纹理分析

可采用频率域中的频率分析法和空间域中的度量重复性的分析法。

§ 5.9.5 图像识别

前面介绍的图像的平滑、增强、灰度变换以及特征的度量都是为图像的识别作准备的。图像识别的过程分两部分进行。首先进行特征的提取，这些特征是进行图像识别的主要依据，然后根据抽取的特征判断对象物体所属的类别。

1、 模板匹配方法

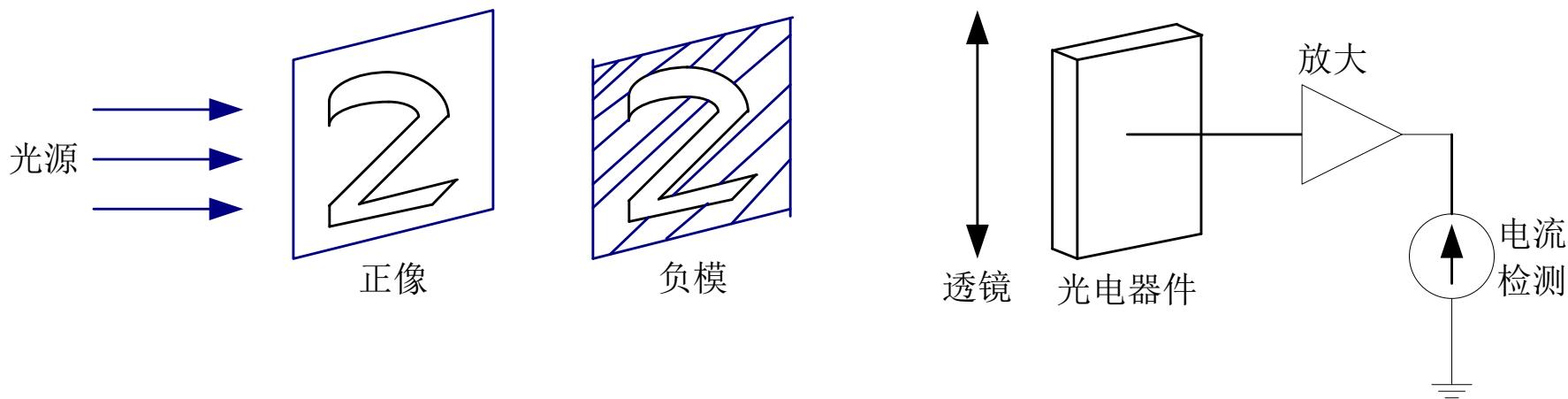
它是模式识别中最原始、最基本的方法，属于一种统计识别方法。取模板单元与样品单元匹配最好的作为识别结果。





1) 模板匹配的实现原理:

a) 光学模板匹配

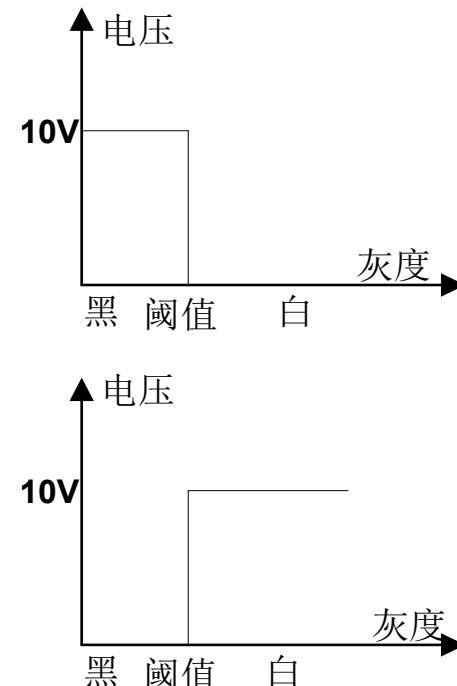
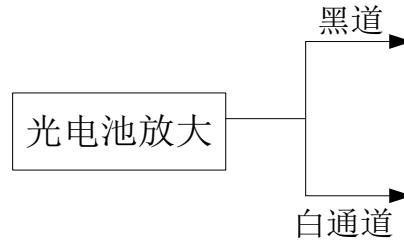
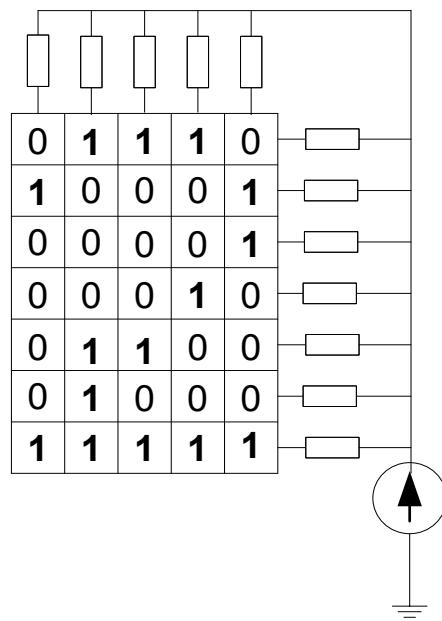


将由光通量转换成的电流量大小作为匹配是否一致的度量。取输出电流最小，且小于预定阀值者为识别类别。误识与拒识的问题。

b) 电子模板匹配

见下图：





以二进制电路代替其中的放大器，采用最简单的0, 1两级灰度的数字模板，输出： $h_k = |x_k - m_k|$ ， x_k ：k点正像， m_k ：k点的模板。

总输出电流： $H \propto \sum_{k=0}^K |x_k - m_k|$





2) 模板匹配的实现

为找到最好的匹配模板，直接利用输入图像 x 与不同类别的模板的 M_j 的 H_j 值进行比较：

$$H_j = \sum_{k=0}^K |x_k - m_{jk}| \quad , \text{ 若: } H_i = \min_{j=1 \sim K} H_j \quad , \quad H_i < P$$

则： $X \in M_i$

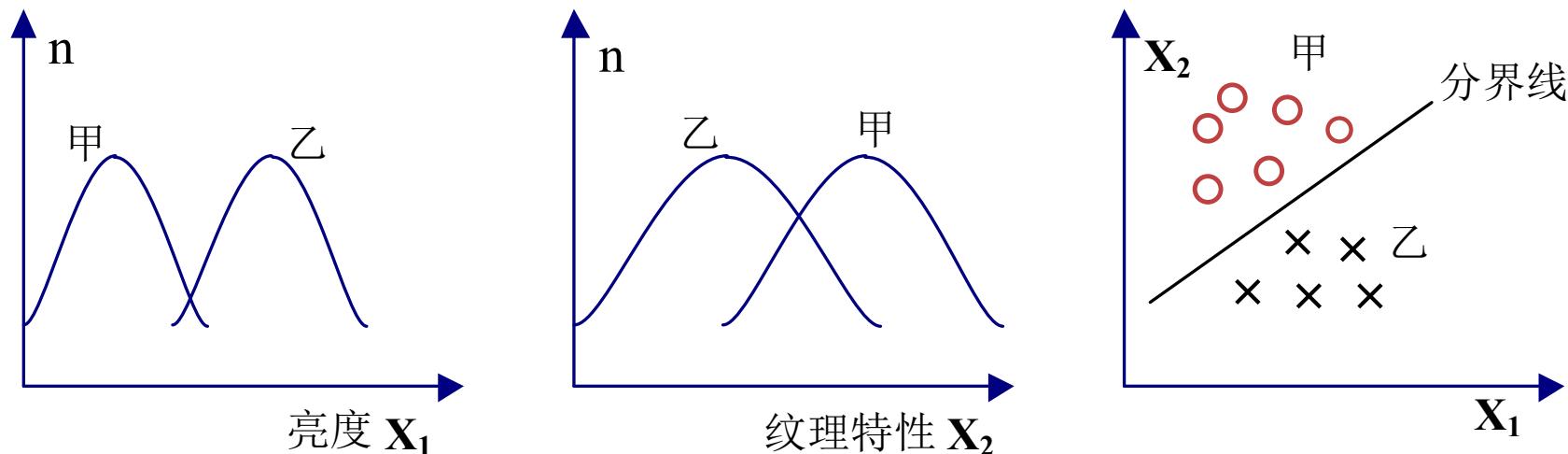
对于文字识别和语言识别，模板匹配是一种较重要的方法。

若采用相关函数的分析方法，则是采用书中的表达式。

2、最小距离识别（又叫最近邻域法）

假设甲、乙两类物品可按其亮度与纹理来区分，则其直方图和特征空间分布为下图所示：





将特征空间分割成若干区域，每个区域对应于一个种类，再看被识别对象落在哪个区域中，即被识别为该类。

若进行数学描述，则就是书中的6-101~6-103公式所表达的内容。

§ 5.9.6 图像的复原

图像的复原的任务就是将由于系统误差、成像畸变、噪声及干扰等各种因素造成的退化的图像恢复成原始图像。主要特点是：将图像退化的过程模型化，并据此取相反的过程以得到原始的图像。





1、退化模型：

$g(x, y) = f(x, y)h(x, y) + n(x, y)$ ，其中 $h(x, y)$ 是系统H的点扩散函数。

2、处理方法

1) 逆滤波方法——又称无约束恢复

$$\hat{F}(u, v) = G(u, v) * \frac{1}{H(u, v)}$$

2) 维纳滤波方法——又称有约束恢复

它是一种最小均方差滤波器：

$$\varepsilon = E\{[f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2\} = \min \quad , \text{ 实际上:}$$

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)} \times \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + s[S_n(u, v)/S_f(u, v)]} \right] G(u, v)$$

s: 拉格朗日乘数的倒数；





- a) $s=1$, 称为维纳滤波器
- b) s 是变量, 称为参数滤波器
- c) $S_n = 0$, 理想逆滤波器

$s=1$, 上式仅仅是在 $E\{[f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2\}$ 最小化的意义
下是最优的。





目 录

- 第1章 概 述
- 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述





第6章 通信功能与总线接口

要 点：

- ◆ 现场总线与智能传感器；
- ◆ CAN接口技术；
- ◆ IEEE 1451标准；
- ◆ 工业以太网络技术。





第6章 通信功能与总线接口

一个庞大的多点、多参数测控系统是由为数众多的现场设备及传感器或变送器组成。随着信息技术的迅速发展，基于传统技术的分散型控制系统（DCS）越来越表现出它的许多不足之处：不能适应庞大的复杂系统控制的需要；随着规模增大，系统变得过于复杂，成本较高。

为解决上述问题，通过向计算机网络控制扩展，将过程控制、监督控制和管理调度进一步结合起来，加强系统功能。采用专家系统，制造自动化协议标准，以及硬件上诸多新技术。乃致二十世纪八十年代中后期陆续出现了多种不同形式的现场总线，如：HART、CAN、PROFIBUS、FF、LONWORKS等。

在多种现场总线共存的情况下，主要的问题就是：尚无一个最完善、最具有权威性、一致公认、统一的标准协议。为解决上述问题，在多方的共同努力下，目前基本上有望以IEEE1451标准和工业以太网协议作为控制领域针对底层和控制层及其以上层统一的标准协议。





§6.1 现场总线与智能传感器

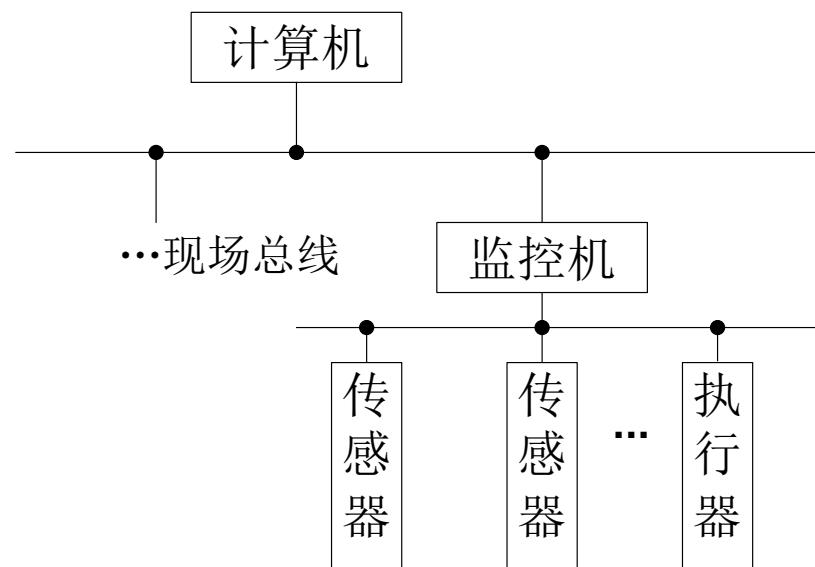
§ 6.1.1 现场总线控制系统中的智能传感器与现场总线

现场总线是应用在生产现场，在微机化测量控制设备之间实现双向串行多节点数字通信的系统，也被称为开放式、数字化、多点通信的底层控制网络。

现场总线控制系统的出现是生产与管理自动化、信息网络化发展的一种必然结果。

FCS的典型结构：

现场总线的节点是现场设备或现场仪表。监控机用于管理挂接在现场总线上的各种智能仪表或传感器、执行器等。





现场总线控制系统中的传感器与仪表

1、特点

- 1) 传感器与仪表是智能化的，智能仪表为现场总线的出现奠定了基础；
- 2) 具有自校准、自补偿功能；
- 3) 具有自我管理的功能；
- 4) 成为对单一量的自行测量、自行数据处理、自行分析判断、决策的控制系统，亦即就地控制；
- 5) 具有标准数字总线接口。

2、与传统集散控制系统的比较

- 1) 传统控制系统是信息集中处理分散控制，而现场总线中设备本身兼具处理与控制功能，亦称分散智能。如同现在经济建设中的宏观调控（相对于计划经济）。
- 2) 与上位机的关系仅仅是通报信息，接受宏观调控。





现场总线控制系统中的现场总线

它是用于现场总线仪表与控制室系统之间的一种全数字化、串行、双向、多站的通信网络。

实现基本控制、补偿计算、参数修改、报警显示、监控、优化及管控一体化的综合自动化功能。

物理层：一般采用双绞线。

1、特点：全数字化通信；通信线供电，开放式互联网络

1) 全数字化通信

“DCS”是“半数字”系统，现场总线是“纯数字”系统，因此它具有强的抗干扰能力，通过校验检验可进一步提高信号传输的正确性，这样可使得过程控制的准确性和可靠性更高，从而使整个控制水平进入到一个高的层次，产生间接的经济效益。

2) 通信线供电





类似于电话，可进一步提高控制现场的安全性。

前提：低功耗现场仪表；基础：集成化和智能化。

3) 开放式互连网络

可实现同层网络相连和不同层网络相连。

前提：统一的标准数字化总线接口；遵守统一的通信协议。

问题：现场总线仪表、设备种类繁多。

最终的效果：即插即用，自由组态。

4) 专门为过程控制而设计

工业过程控制的要求：高完整性、高可靠性、本质安全。

工业环境的特点：高温、高压、有毒、爆炸性、电磁干扰、机械振动、放射性等。

2、现场总线的优越性

1) 成本低。节省硬件数量与投资；减少变送器的数量；不需要DCS系统





的信号调理、转换、隔离等功能单元及复杂接线；可用工控PC作操作站。

- 2) 节省安装费用，可节约安装费用60%以上。
- 3) 节省维护费用，由于现场设备具有自诊断及简单故障处理能力。
- 4) 用户具有高度的系统集成自主权。
- 5) 提高了系统的准确性与可靠性。

§ 6.1.2 现场总线网络协议模式

我们前面讲到现场总线的推广应用，需要有统一的标准数字化总线接口和通信协议。

那么这个统一的协议模式应该是什么样的呢？

我们先了解一下按照国际标准化组织（ISO）制定的开放系统互连（OSI）的参考模型：

见下图





开放系统互连是指：在终端设备、节点计算机之间借助于通信线路交换信息时，所需遵循的那些标准协议。

OSI模型的主要结构思想之一是功能结构分层的原则。任何一个主机节点相对于另一个主机节点的同等层之间，都有对应的通信协议。同等层之间的通信是每一层把数据和控制信息送到下一层，这样层层下传，各层分别执行本层特有的功能，直到最低物理层将信息传送给另一节点主机的物理层，进行实际的物理通信，两个节点高层之间只存在着虚拟的通信。

低三层可以用 X·25（通信子网协议）分组交换网协议。





1) 物理层: 通过系统的连接透明地传送比特流, 不考虑信息的意义和构成。有四个主要特性:

- a) 机械特性: 各种机械接口, 插头座的结构, 针脚数;
- b) 电气特性: 规定分界点处的电器性能, 电平的高低;
- c) 功能特性: 数据、控制、定时、接地、交换电路的交换功能;
- d) 规程特性: 规定如何使用上述接口线。

作用: 在数据链路实体之间建立、维护和拆除物理连接。

2) 数据链路层: 针对数据传送, 并使其达到无差错传输, 它对物理层的要求:

- a) 在两结点之间能建立数据电路的连接;
- b) 收站发站都是逐比特地传送信息, 而且已经建立了位的同步。

本层解决的问题:





- a) 数据链路的建立和拆除：字符同步、站地确认、收发关系确立、传输结束的表示。
- b) 信息的传输：信息帧的格式、大小、顺序编号，曼彻斯特编码。
- c) 传输差错的控制，CRC校验。
- d) 异常情况的处理

纠正差错采用计时器恢复和自动请求重发等技术。

控制规程分两种：面向字符型，面向比特型。

- 3) 网络层：完成控制通信子网的工作，并解决每个节点中通信控制处理器同其主机之间的接口，从而完成通信控制处理机同主机的协议。

功能：实现两个系统之间的连接。在计算机网络系统中，还具有多路复用的功能。网络的交换技术、路由选择、流量控制、拥塞控制和差错控制。





4) 传送层：给用户提供一个端到端的传输服务，起着底层与高层之间接口层的作用，完成开放系统之间的数据传送控制。

功能：开放系统之间数据的收发确认，对经过下三层之后仍然存在的传输差错进行恢复，进一步提高可靠性。

编址与寻址；连接的建立与终止；流量控制、缓冲；多路复用；分流和合流；差错校正。主要是提高吞吐量和服务质量。

5) 会话层：面向用户的服务，用于用户标识识别、登录、故障恢复等。

标识的典型方法是通过主计算机号和进程号来标识报文的出处，会话层的目的在于为表示实体提供组织和同步它们之间的对话手段，交替改变发信端的传送控制；在传送数据中需给数据打上标记，以便出现意外时，由打标记处重发。





提供的服务有：

- a) 建立会话连接；
 - b) 释放会话连接；
 - c) 正常的数据交换；
 - d) 隔离服务；
 - e) 加速数据交换；
 - f) 交互式管理；
 - g) 会话连接同步；
 - h) 例外报告。
- 6) 表示层

作用：用户进程若要向第6层送入一个报文流，表示层便将此报文压缩、加密、而后发送给目的地主机，而且目的地主机第6层则把它们解密和扩展复原之后，再把这些报文转交给目的地用户进程。





提供的服务：提供表达信息，它包括：

提供字符代码、数据格式、控制信息格式、加密等的统一表示，仅对应用层的信息内容的形式进行变换，而不改变内容本身。

7) 应用层：是用户同计算机通信网络真正的界面。它没有被精确定义，其应用进程分为三种类型：

a) 系统管理应用进程：用于执行所需的系统功能，以便控制和监视系统的操作。

b) 应用管理进程：用于监视和控制应用进程的操作。

c) 用户应用进程：供终端用户去执行实际要进行的信息处理。

在应用层需要考虑的问题：

—— 分布式数据库系统：完成分布式数据库的存取功能，达到在网络上的用户能共享数据的目的。





——分布式操作系统：用统一的方法去管理网络数据和运行程序。

以ISO/OSI参考模型简化的IEC/ISA现场总线通信结构模型，为满足过程控制实时性的要求，仅为三层结构体系：应用层；数据链路层；物理层。

应用层（FAL）

功能：为过程控制用户提供一系列的服务，它包括：实现应用进程之间的通信；提供应用接口的操作标准。

进程：任务执行过程中的环节、步骤和事件。

1、几个概念

1) 应用进程（AP）：概念化的分布式系统的信息处理部件（软件和硬件）资源的集合，由用户部分及通信部分组成，它以应用进程目标来表达。

这就像有一些实验仪器设备和操作规程，要想做个实验，就把所需的仪器设备组合起来，按照操作规程来进行实验，最后得到所需的实验结果。





2) 应用进程目标 (APO) : 为应用进程处理活动和处理信息的网络表达。它靠应用实体 (AE) 来支持, 由应用实体提供对APO的访问。

3) 应用实体 (AE) : 为一些通信服务功能, 它是现场总应用服务元素的集合。多个应用服务元素 (ASE) 提供一组传递应用层及其APO的请求和应答的服务。每个ASE都是特定的, 它包括变量、事件、装载区域、功能请求等, 它相当于实验中的具有特定功能的仪器。

—— 应用进程之间的信息交换是在相似的应用服务元素之间以应用协议数据单元 (APDU) 来实现的。

—— 应用进程之间的关系是通过逻辑链接来实现的 (称为应用关系AR), 应用关系表示了一种两个或多个应用实体之间的关系, 系统通过一个特殊的应用服务元素 (ARASE) 提供建立、维持这种应用关系。并提供在多个AP之间传送应用协议数据单元服务。





2、现场总线通信结构模型中两种不同的单向数据交换模式：

1) PUSH模式

由发布方来启动向索取方的数据发送，数据通信不需要应答。

2) PULL模式

由单独的发布管理器决定数据发送的时刻，并强迫发布方发送相关的信息，同时需要确认。

3、客户/服务器类型

方式：客户请求，服务器响应请求并进行相应操作。

分为：确认服务和非确认服务。

数据链路层

上下层之间的接口，通过它进行实时管理，来协调不同应用进程的工作过程。





为保证实时性，现场总线采用集中式管理方式，可有效利用物理通道，减少或避免实时通信的延迟。

特点：

- 1) 建立一个特殊的站点，该站点给需要传送信息的站点分配带宽（数据通道），称为链接调度器。
- 2) 周期性数据的两种发送方式：
 - a) PULL模式；
 - b) 令牌，规定了使用时间。
- 3) 非周期性数据
 - a) 实时性要求高——采用相应的管理策略，如中断；
 - b) 实时性不是很高——采用“尽快”策略，令牌的使用。
- 4) 具有调度表修改的功能，亦即优先级的管理策略。





物理层

同ISO/OSI模型中物理层的概念，但具体要求不一样。

介质：双绞线，光纤，射频

传输速度：31.25Kb/s（用于支持本质安全的环境），1Mb/s，2.5Mb/s

通信距离：1900m（31.25Kb/s），750m（1Mb/s），500m（2.5Mb/s）。

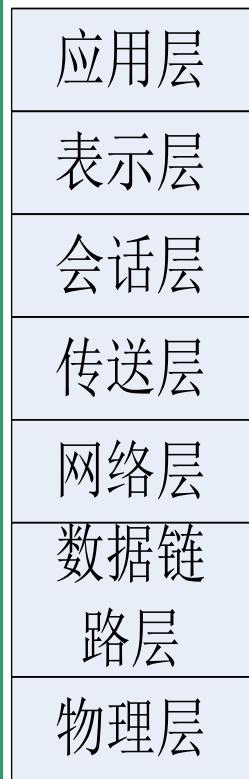
§ 6.1.3 几种典型的现场总线标准

书中介绍的几种现场总线标准基本上都包括了前面我们介绍的物理层、数据链路层和应用层，它们之间的主要差别也就是在应用层上的差别。

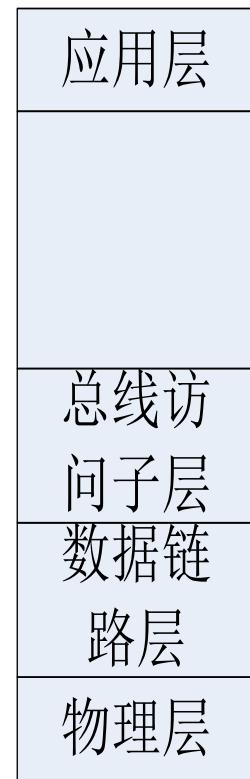
具体的协议内容要结合相应的产品应用才能领会其实质。

各种总线标准的比较

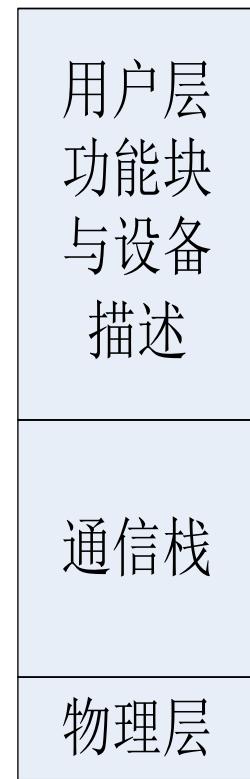




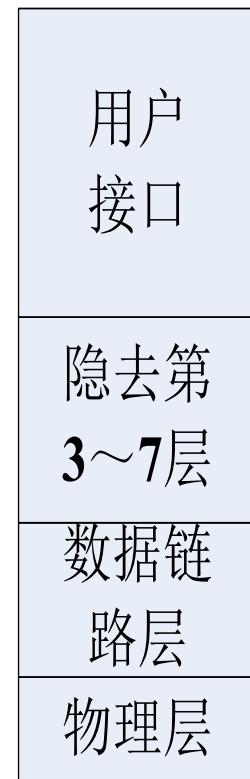
ISO/OSI



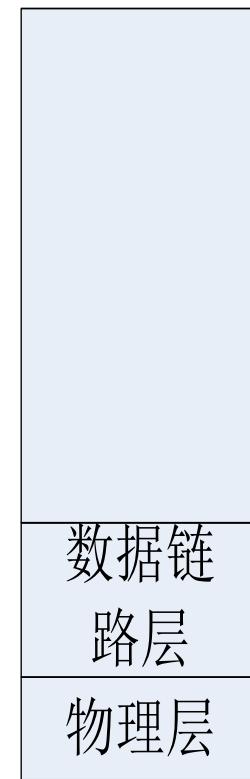
现场总线协议



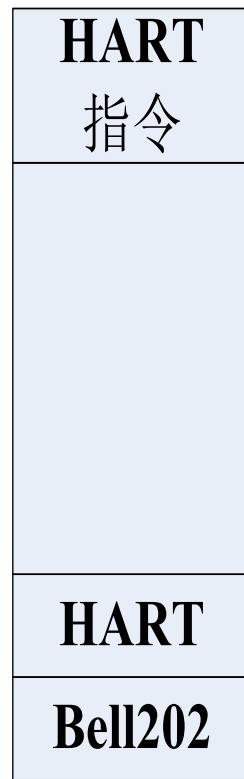
FF模型



PROFIBUS



CAN





FF (Foundation Fieldbus) 现场总线

为适应自动化系统，特别是过程自动化系统在功能环境与技术上的需要而专门设计的。它可以工作在工厂生产的现场环境下，能适应本质安全防爆的要求，还可通过传输数据的总线为现场设备提供工作电源。

它使自动化系统具备了网络化特征。

传输速率的典型值为：(H_1) —31.25Kb/s；(H_2) —1Mb/s和2.5Mb/s。

1) FF现场总线的通信技术

通信模型、协议、控制器芯片、网络与系统管理

2) 标准化功能块与功能应用进程

提供了一个通用结构，把实现控制系统所需的各种功能划分为功能模块，使其公共特征标准化，并可组成为在某个现场设备中执行的应用进程。





3) 设备描述与设备描述语言（指进行设备描述的标准编程语言）

目的：实现现场设备的互操作性，支持标准的功能块操作，可理解为系统或主机对某个设备的驱动程序。

4) 现场总线通信控制器与智能仪表或工业计算机之间的接口技术

通信控制芯片、通信栈软件

5) 系统集成技术

通信系统与控制系统的集成。如网络通信系统组态、网络拓扑、配线、网络、系统管理、控制系统组态、人机接口、系统管理维护等。

6) 系统测试技术

通信系统的一致性与互操作性测试技术、总线监听分析技术、系统的功能和性能测试技术。





LON总线 (Local Operating Networks)

采用Echelon公司开发的Lonworks技术，主要应用在工业、楼宇、家庭、能源等自动化领域。

最大特点：对OSI七层协议的支持

采用开放式通信协议LonTalk，为设备之间变换控制信息建立了一个通用标准。具体实现采用了网络变量这一形式。

神经元芯片 (neuron chip) 是Lonworks技术的核心，不仅可作LON总线的通信处理器，还可作为采集和控制的通用处理器。

Lonworks技术由以下几个部分组成：

- 1) Lonworks节点和路由器；
- 2) LonTalk协议；
- 3) Lonworks收发器；
- 4) Lonworks网络和节点开发工具。





由于Lonworks总线采用了路由器，所以它对多种通信介质均支持，从而使得LON总线可以根据不同的现场环境选择不同的收发器和介质。

通信介质：双绞线（直接驱动，EIA—485，变压器耦合）、电源线、电力线、无线、光纤。

PROFIBUS (Process Fieldbus)

它是一种国际性的开放式的现场总线标准，即EN50170欧洲标准，广泛应用于加工制造、过程和楼宇自动化，是成熟的技术。

有三个兼容版本：PROFIBUS—FMS，PROFIBUS—DP，PROFIBUS—PA。
具体见下图。

提供三种传输技术：

1) DP和FMS的RS485传输；





通用性自动化	工厂自动化	过程自动化
—— FMS	—— DP	—— PA
通用 —— 大范围使用 —— 多元通信	快速 —— 即插即用 —— 高效低成本	面向应用 —— 总线供电 —— 本质安全
纺织工业，楼宇自动化， 电气传动，可编程控制器 低压开关设备	分布式控制系统的高速 数据传输	安全性要求高的场合





通常称为 H_2 ，采用屏蔽双绞铜线电缆，适用于需要高速传输和设施简单而又便宜的各个领域。

2) 遵从IEC1158-2要求的PA传输

通常称之为 H_1 ，可保持其本质安全性，使现场设备通过总线供电，
31.25Kb/s。

3) 光纤传输

应用于电磁干扰很大的环境，通过专用的总线插头可将RS485信号转换成光纤信号，反之亦然。

HART通信协议 (Highway Addressable Remote Transduser)

最初由美国Rosemount公司开发，已应用了多年，目前有HART通信基金会。它可使模拟信号与数字信号双向通信能同时进行，而不相互干扰。

HART协议被认为是事实上的工业标准，是一种过渡性的协议。





§6.2 CAN接口技术

最初由德国的BOSCH公司为汽车监测系统而设计。现已形成国际标准，主要应用于汽车行业、过程行业、机械工业、机器人、数控机床、医疗器械及传感器等领域。属于总线式串行通信网络。近年来，国内已有很多领域大量应用CAN技术，特别是在大型仪器设备、传感器及数据采集系统、工业控制中。

主要特点：具有突出的可靠性、实时性和灵活性。

- 1) 为多主方式工作，可方便地构成多机备份系统。
- 2) 网络上的节点信息分成不同的优先级，高优先级的数据可在134uS内得到传输。
- 3) 采用非破坏性的总线仲裁技术，可使网络避免出现瘫痪的情况（以太网则有可能）。
- 4) 通过报文滤波可实现点对点、一点对多点及全面广播等传送接收数据，无需专门的“调度”。





- 5) 直接通信距离达10Km (<5Kbps)，最高1Mbps (40m)。
- 6) 理论节点数可达110个，实际节点数主要取决于总线驱动电路，一般可达19个；报文标识符可达2032种 (CAN2.0A), 扩展标准 (CAN2.0B) 的报文标识符几乎不受限制。
- 7) 采用短帧结构 (8个数据字节)，具有极好的检错效果。
- 8) 通信介质可为双绞线、同轴电缆、光纤。
- 9) 节点在错误严重的情况下具有自动关闭输出功能，使其它节点操作不受影响。





§ 6.2.1 CAN的技术规范

1、标准

1991. 9发布CAN技术规范；

1993. 11ISO颁布国际标准ISO11898；

有2种CAN总线协议：CAN1. 0， CAN2. 0；

CAN2. 0 规范有2种形式：2. 0A（标准格式）和2. 0B（标准和扩展）。

CAN1. 0 和CAN2. 0A仅支持11位标识符， 而CAN2. 0B在支持29位标识符的基础上， 兼容11位标识符。

11位和29位标识的信息所适用的CAN协议：

CAN信息格式	CAN器件		
	2. 0A	被动2. 0B	2. 0B
11位标识	OK	OK	OK
29位标识	出错	容错	OK





由于这2种格式必须能够共存于同一条总线上，协议规定，当出现相同的基本标识，但格式不同的信息所引起的总线接入冲突时，标准格式信息总是优先于扩展格式信息。

2、协议层次结构及属性

按照OSI参考模型，CAN结构划分为2层：物理层和数据链路层（见下图）。

物理层采用双线差动，包括物理层信令（PLS）和媒体访问单元（MAU），它定义了传输媒体、信号电平和位表示。

链路层是CAN的核心，定义了不同的信息类型、总线访问的仲裁规则及故障处理的方式，由LLC子层和MAC子层构成。

LLC子层的主要功能是为数据传送和远程数据请求提供服务，确认由LLC子层接收的报文已被接收，并为恢复管理和通知超载提供信息。

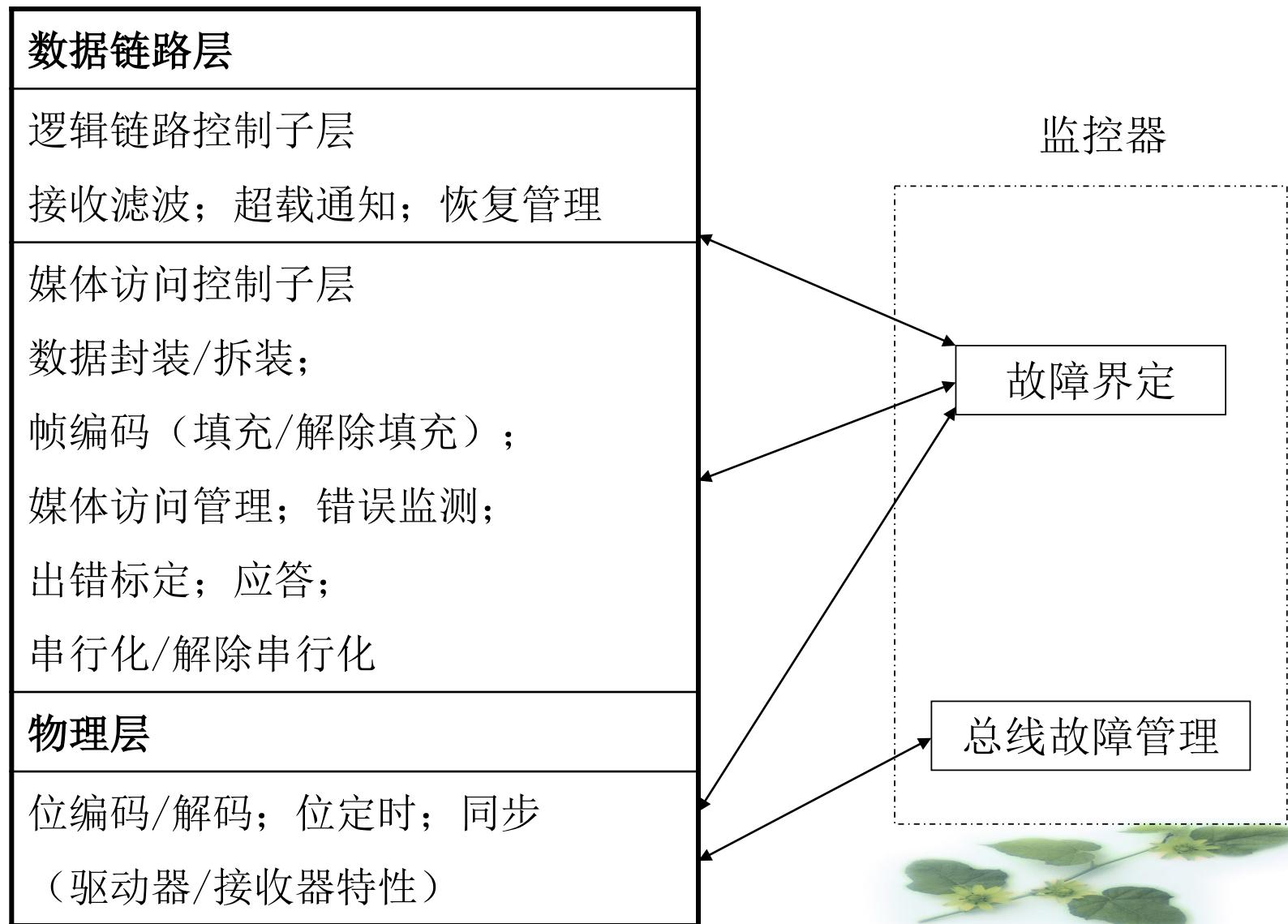
MAC子层的功能主要是传送规则，亦即控制帧结构、执行仲裁、错误检





测、出错标定和故障界定。

在实际应用中，需要在这2层之外附加一层来支持应用过程。





由于所有的错误检测、纠错、传输和接收等都是通过CAN控制器硬件完成的，所以用户组建这样的两线网络，仅需要极少的软件。

3、报文传送及其帧结构

报文传送有4种不同类型的帧表示和控制。

数据帧：数据帧携带数据从发送器到接收器；

远程帧：总线单元发出远程帧，请求发送具有同一识别符的数据帧；

错误帧：任何单元检测到一总线错误就发出错误帧；

过载帧：用以在先行的和后续的数据帧（或远程帧）之间提供附加的延时。

数据帧（或远程帧）通过帧间空间与前述的各帧分开。

构成一帧的帧起始、仲裁场、控制场、数据场和CRC序列均借助位填充规则进行编码。

当发送器在发送的位流中检测到5位连续的相同数据值时，将自动的在发送的位流中插入一个补码位。





出错帧和超载帧是固定格式，不进行位填充。

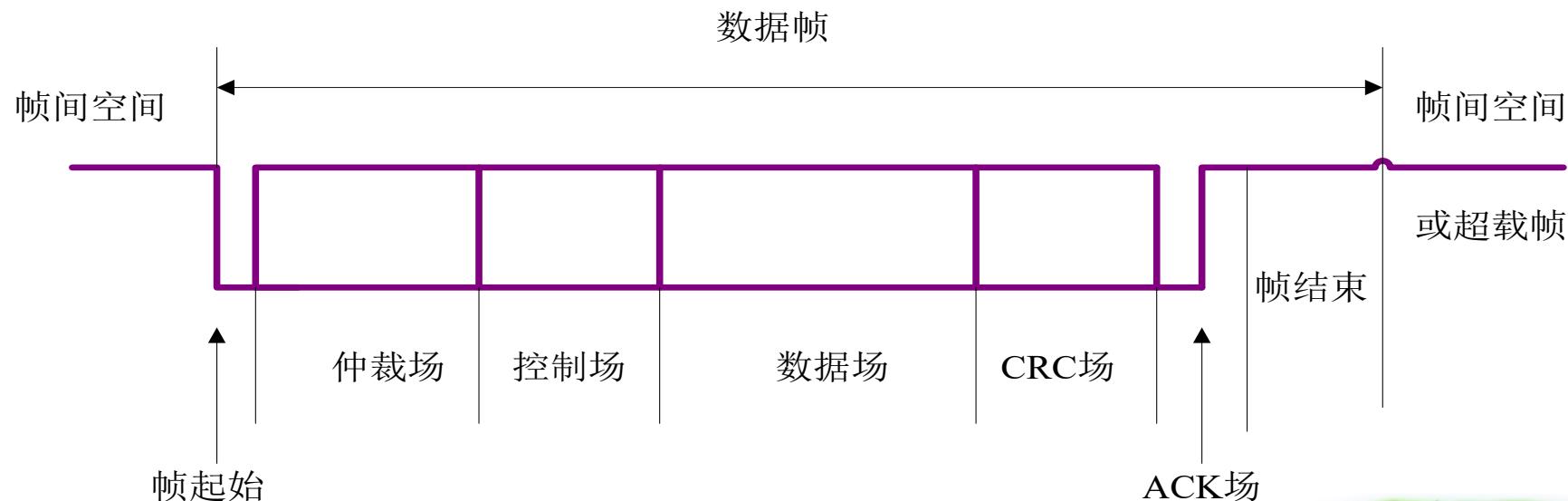
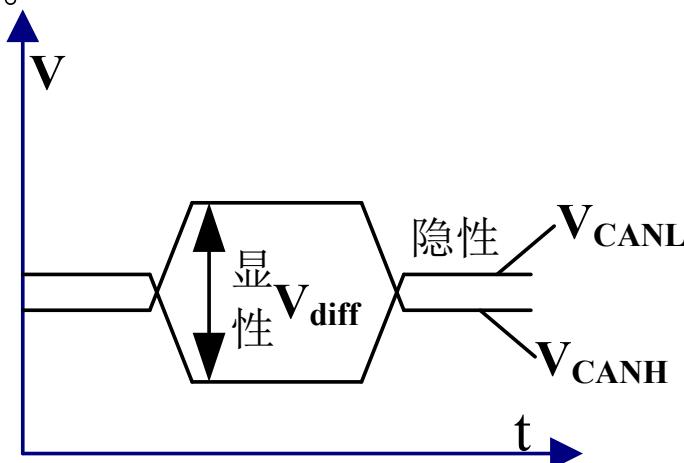
报文位流按非归零（NRZ）方法
编码（如右图所示）。

1) 数据帧

数据帧的组成见下图：

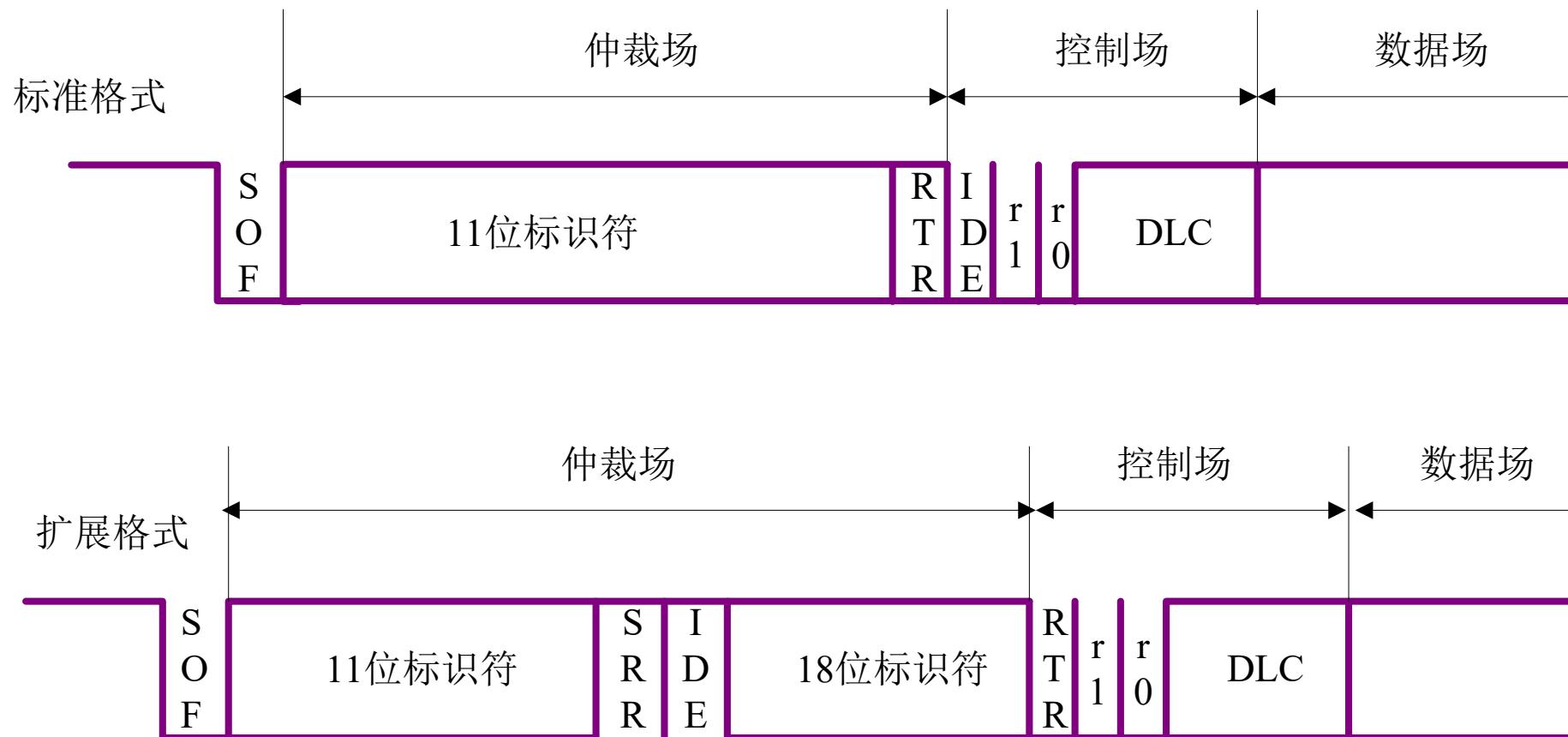
由7个不同的位场组成，即帧起始、

仲裁场、控制场、数据场、CRC场、应答场和帧结束。





具有11位标识符的帧为标准帧；包括29位标识符的帧为扩展帧（如下图所示）。





CAN2.0B对报文滤波特别加以描述，报文滤波以整个标识符为基准。屏蔽寄存器可用于选择一组标识符，以便映像至接收缓存器中，屏蔽寄存器每一位都须是可编程的，其长度既可以是整个标识符，也可以是其中一部分。

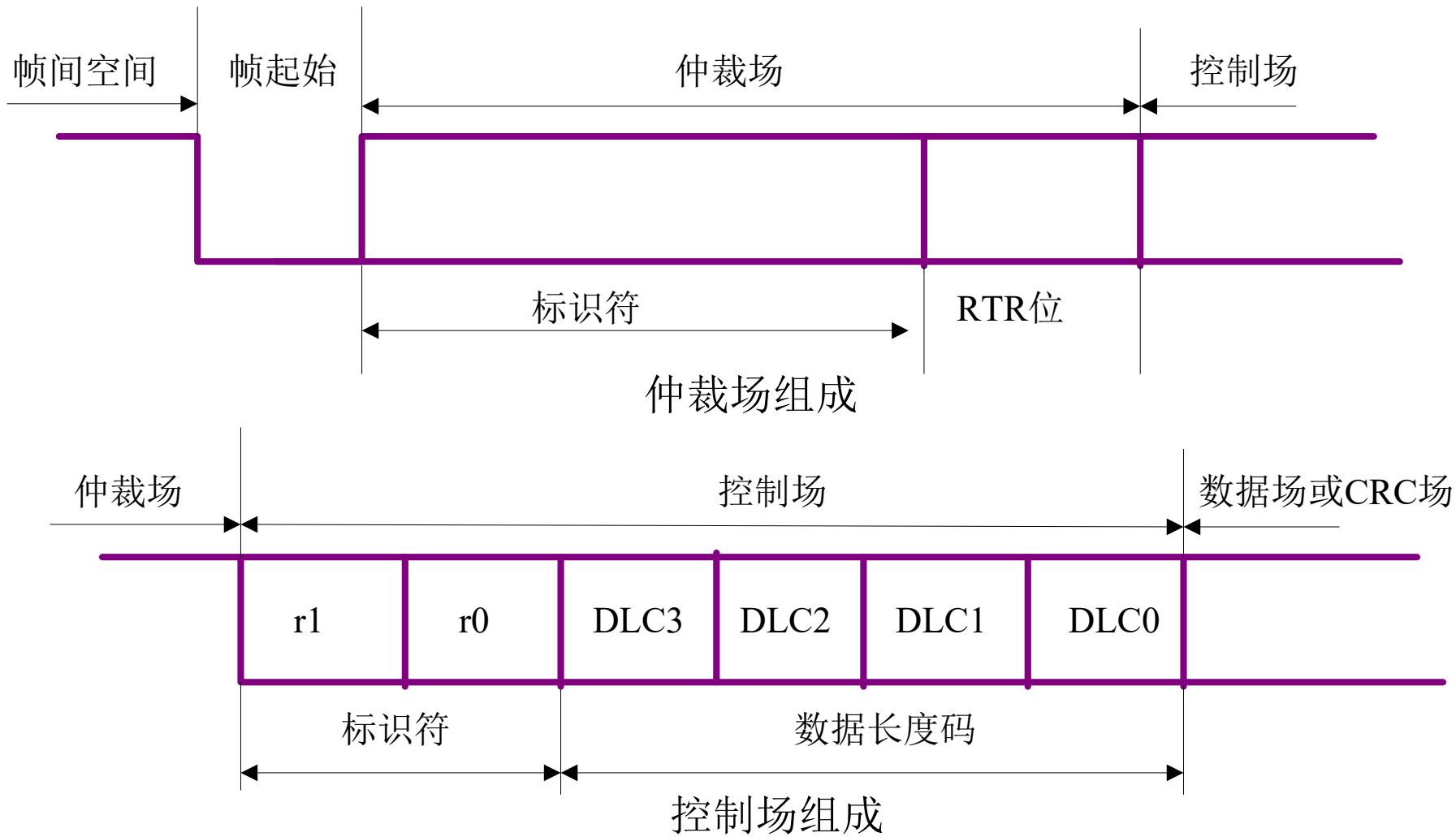
a) **帧起始**: 标志数据帧和远程帧的起始，由一个显位构成。只有当总线处于空闲状态时，才允许站开始发送。所有站都必须同步于首先开始发送的那个站的帧起始前沿。

b) **仲裁场**: 由标识符和远程发送请求位（RTR）组成，如下图所示。

CAN2.0A的标识符长度为11位，这些位以从高位到低位的顺序发送。其中，最高7位：ID. 10～ID. 4不能全为隐位。RTR位在数据帧中必须是显位，而在远程帧中必须是隐位。

CAN2.0B中，标准格式和扩展格式的仲裁场格式不同。在标准格式中，仲裁场的标识符位为：ID. 28～ID. 18；而在扩展格式中，仲裁场的标识符位为：ID. 28～ID. 0。





IDE位用于区别标准格式和扩展格式，IDE位对于扩展格式属于仲裁场





对于标准格式属于控制场。IDE在标准格式中以显性电平发送，而在扩展格式中以隐性电平发送。SRR位为隐位，在扩展格式中，它替代标准格式中的RTR位。

c) **控制场**: 如上图所示，由6位组成。包括2个保留位和4个数据长度编码，2个保留位必须发送显性电平，但接收器认可显位与隐位的全部组合。数据字节允许使用的数目为0~8，不能使用其它数目。

d) **数据场**: 可包括0~8个字节，每个字节8位，最高有效位先发送。

e) **CRC场**: 包括CRC序列和CRC界定符（一个隐位），如下图所示。

实现CRC计算的范围包括：帧起始、仲裁场、控制场、数据场在内的无填充的位流，生成多项式为：

$$x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$$

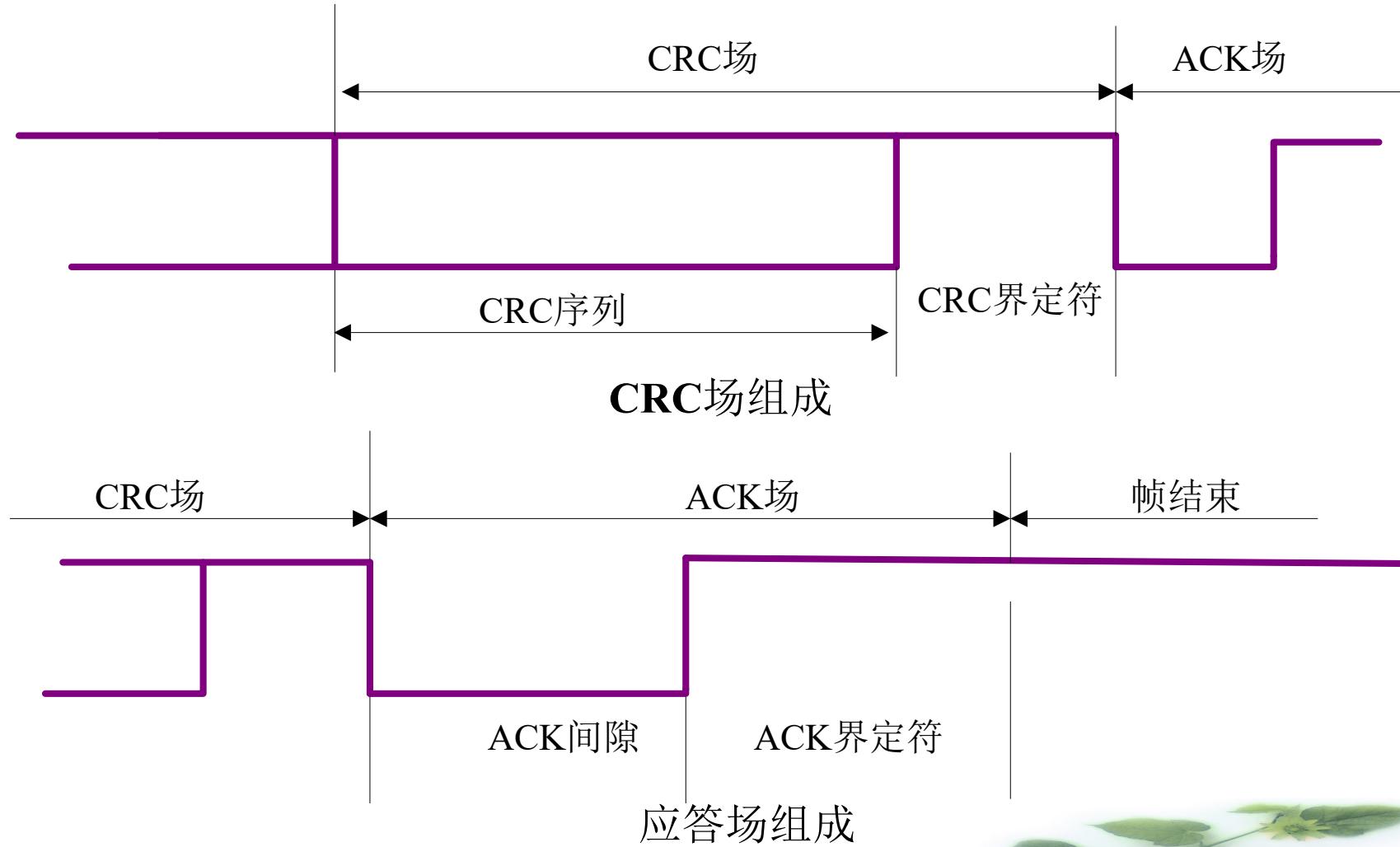
f) **应答场**: 包括ACK间隙和ACK界定符。

在应答场中，发送器送出两个隐位。一个正确的接收到有效位的接收





器，在应答间隙将此信息通过发送一个显位报告给发送器，应答场的第二位是应答界定符，必须是隐位。





g) 帧结束：每个数据帧和远程帧均由7个隐位组成的标志序列界定。

2) 远程帧

激活为数据接收器的站可以借助于传送一个远程帧初始化源节点数据的发送，与数据帧相比，仅少一个数据场。

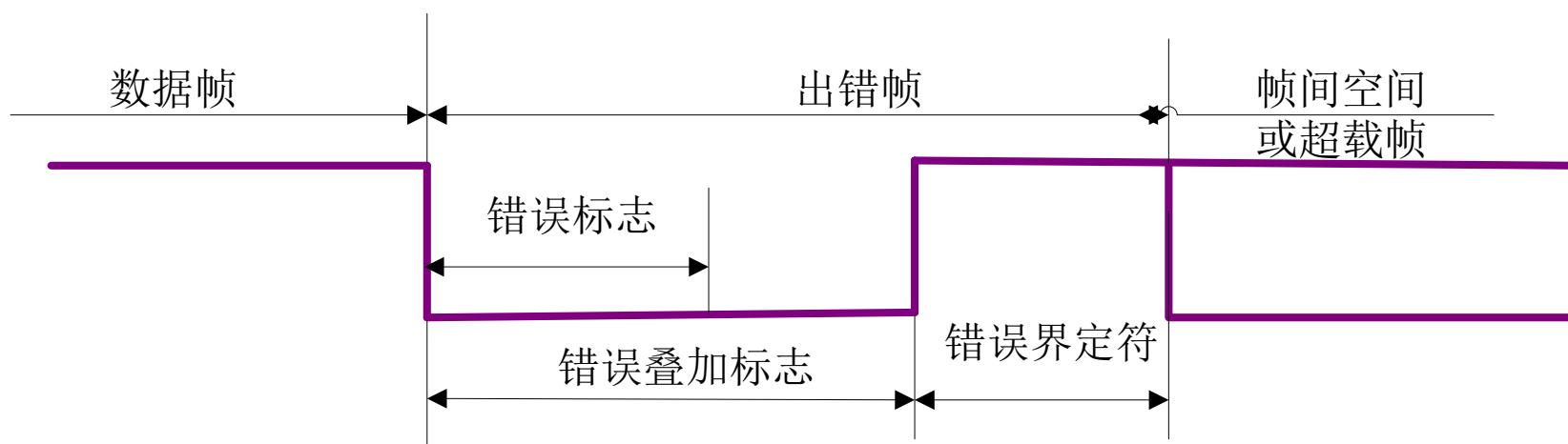
3) 出错帧

由两个场组成：错误叠加标志（长度6~12位）、错误界定符（8个隐位）。

错误标志具有2种形式：活动错误标志和认可错误标志。活动错误标志由6个连续的显位组成；认可错误标志一般由6个连续的隐位组成，除非被来自其它节点的显位冲掉重写。

出错界定符包括8个隐位，错误标志发送后，每个站都送出隐位，并监视总线，直到检测到隐位，然后发送剩余的7个隐位。



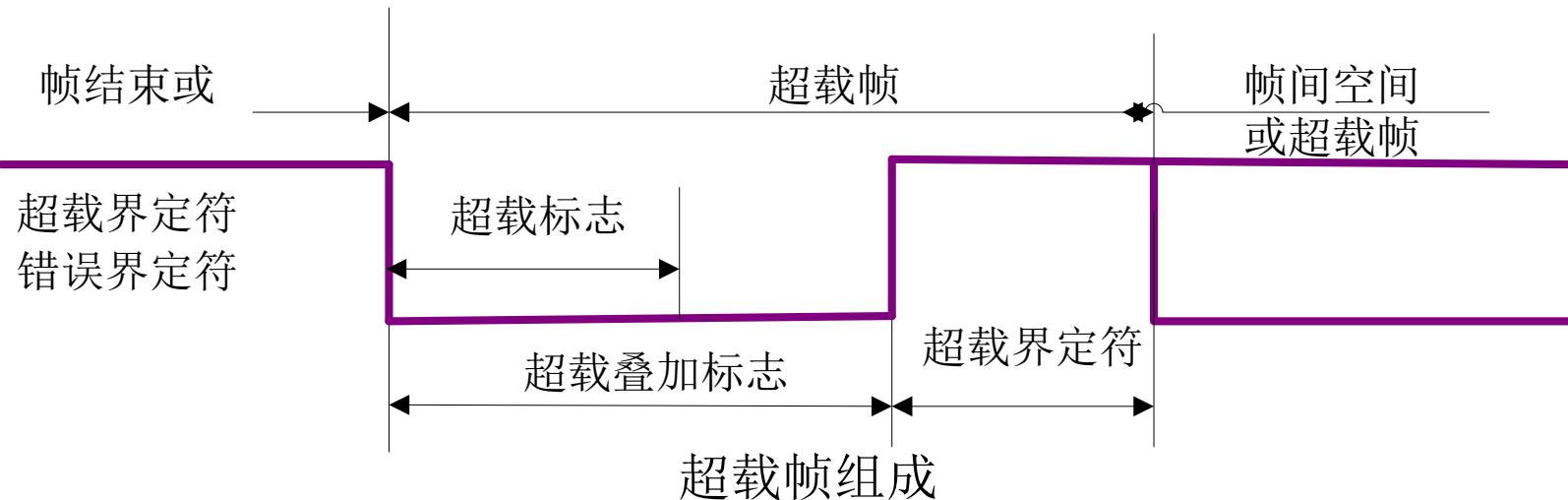


4) 超载帧

出错帧组成

由两个场组成：超载标志（6个显位）、超载界定符（8个隐位）。





有两种导致发送超载标志的超载条件：一是要求延迟下一个数据帧或远程帧的接收器的内部条件；二是在间歇场检测到显位。由前一个超载条件引起的超载帧起点，仅允许在期望间歇场的第一位开始；而由后一个超载条件引起的超载帧在检测到显位的后一位开始。

超载标志形式对应于活动标志形式；超载界定符与错误界定符具有相同的形式





5) 帧间空间：包括间歇场（3个隐位，间隙期间，不允许启动发送数据和远程帧）和总线空闲场。

任何传输相邻的数据帧和远程帧之间均被称为帧间空间分开；而在超载帧和出错帧前面没有帧间空间。

对于发送“错误认可”报文的站在其发送的帧间空间中还包含有暂停发送场；而对于非“错误认可”或已经完成前面报文的接收器，其帧间空间只包含间歇场和总线空闲场。具体结构参见下图。

暂停发送场是指错误认可站发完报文后，在开始下一次报文发送或认可总线空闲之前，紧随间歇场后送出8个隐位。如果其间开始一次发送（由其它站引起），本站将变为报文接收器。





a “非错误认可” 帧间空间



b “错误认可” 帧间空间

帧间空间





4、错误类型和界定

有5种类型的错误。

1) **位错误**: 指某个单元在监测出总线上的位数据值与送出的位数据值不同时。下列情况不属于位错误: 在仲裁场的填充位流期间; 应答间隙期间; 错误叠加标志期间。

2) **填充错误**: 在应该使用位填充方法进行编码的报文中, 出现了第6个连续相同的位电平时, 即为一个位填充错误, 一般出现在数据帧和远程帧。

3) **CRC错误**: 当接收器在接收到一个完整的报文帧后, 其CRC的计算结果与接收到的CRC序列不相同时, 即检出一个CRC错误。

4) **形式错误**: 当固定形式的位场中出现一个或多个非法位时, 即检出一个形式错误。

5) **应答错误**: 在应答间隙, 当发送器未检测到显位时, 即检出一个应答错误。





检测到出错条件的站通过发送错误标志进行标定。当任何站检出位错误、填充错误、形式错误或应答错误时，由该站在下一位开始发送错误标志；当检测到CRC错误时，出错标志在应答界定符后面那一位开始发送。

在CAN总线中，任何站点可能有3种故障状态：错误激活、错误认可、总线关闭。其中错误激活状态节点和错误认可状态节点均参与总线通信，而总线状态关闭节点仅接收总线位流信息。

站点的错误状态由单元内发送错误计数器和接收错误计数器的计数值确定。当发送错误计数器和接收错误计数器的计数均小于或等于127时，为错误激活节点；当发送错误计数器和接收错误计数器的计数大于127时，为错误认可节点；当发送错误计数器的计数值等于或大于256时，节点处于总线关闭状态。

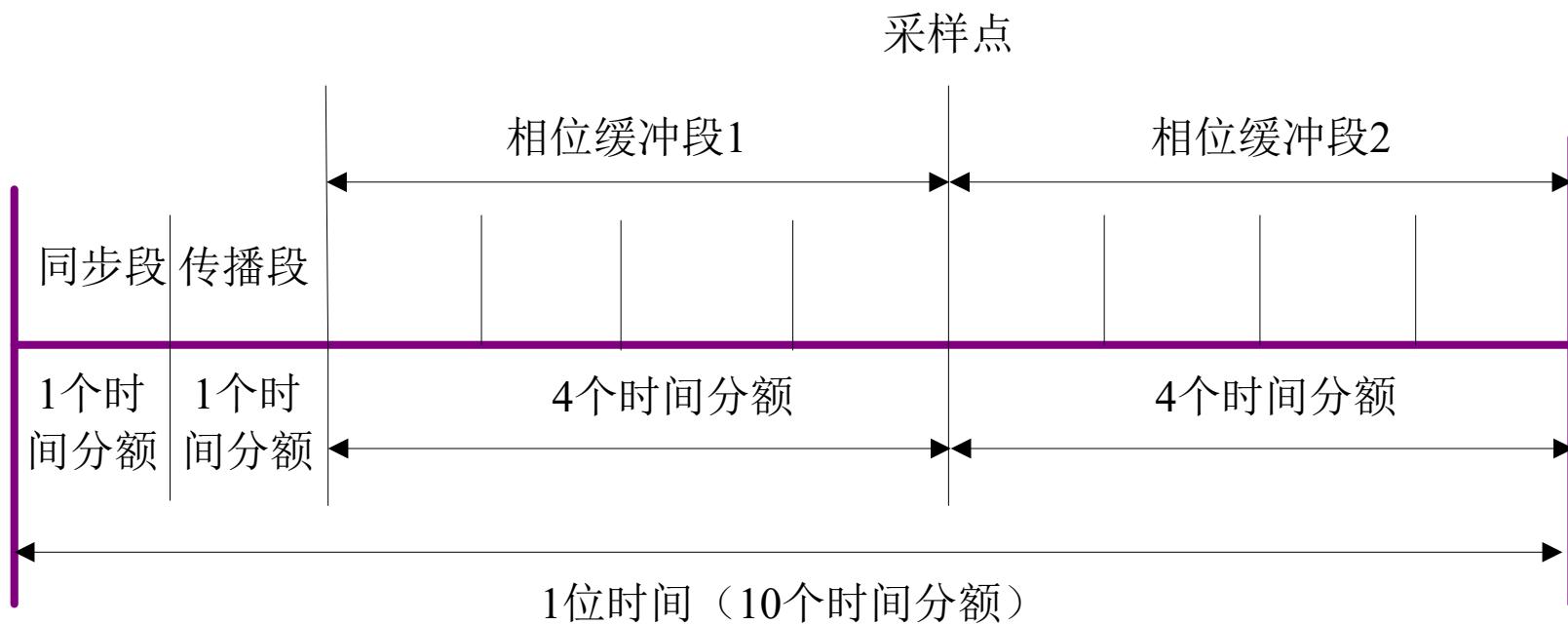
5、位定时与同步

CAN总线一个数据位的组成部分如下图所示：





在位时间中，时间分额的总数通过编程设定可在8~25之间，图示为10。



位时间的各组成部分





同步调制宽度 (SJW)：考虑节点时钟的分散性，定义了在重同步事件中被增加或缩短了的时间份额Tq的数量。

段名称	段的作用	Tq 数	
同步段 (SS: Synchronization Segment)	多个连接在总线上的单元通过此段实现时序调整，同步进行接收和发送的工作。由隐性电平到显性电平的边沿或由显性电平到隐性电平边沿最好出现在此段中。	1Tq	8~25Tq
传播时间段 (PTS: Propagation Time Segment)	用于吸收网络上的物理延迟的段。 所谓的网络的物理延迟指发送单元的输出延迟、总线上信号的传播延迟、接收单元的输入延迟。 这个段的时间为以上各延迟时间的和的两倍。	1~8Tq	
相位缓冲段 1 (PBS1: Phase Buffer Segment 1)	当信号边沿不能被包含于 SS 段中时，可在此段进行补偿。	1~8Tq	
相位缓冲段 2 (PBS2: Phase Buffer Segment 2)	由于各单元以各自独立的时钟工作，细微的时钟误差会累积起来，PBS 段可用于吸收此误差。 通过对相位缓冲段加减 SJW 吸收误差。（请参照图 34）。SJW 加大后允许误差加大，但通信速度下降。	2~8Tq	
再同步补偿宽度 (SJW: reSynchronization Jump Width)	因时钟频率偏差、传送延迟等，各单元有同步误差。SJW 为补偿此误差的最大值。	1~4Tq	





6、CAN高层协议

指应用层协议，它是在CAN规范的基础上发展起来的。目前有代表性的应用层协议有：CANopen、DeviceNet等。**DeviceNet**适合于工厂自动化控制；而**CANopen**协议适合于所有机械设备系统的嵌入式网络，如汽车电子系统。

§ 6.2.2 CAN总线通信介质及收发装置特性

CAN最常用的物理媒体是双绞线。信号使用差分电压传送。2条信号线被称为“CAN-H”、“CAN-L”，静态时电压都是2.5V左右。此时状态表示为逻辑“1”，称为“隐性”。在CAN-H上的电压为3.5V，CAN-L上的电压为1.5V时，此时总线的状态表示为逻辑“0”，称为“显性”。

ISO 11898建议的电气连接如下图所示，连接于总线上的节点称为电子控制单元（ECU），总线末端均接有用于抑制反射的终端电阻 R_L 。

总线驱动可采用单线上拉、单线下拉或双线驱动；接收采用差分比较器

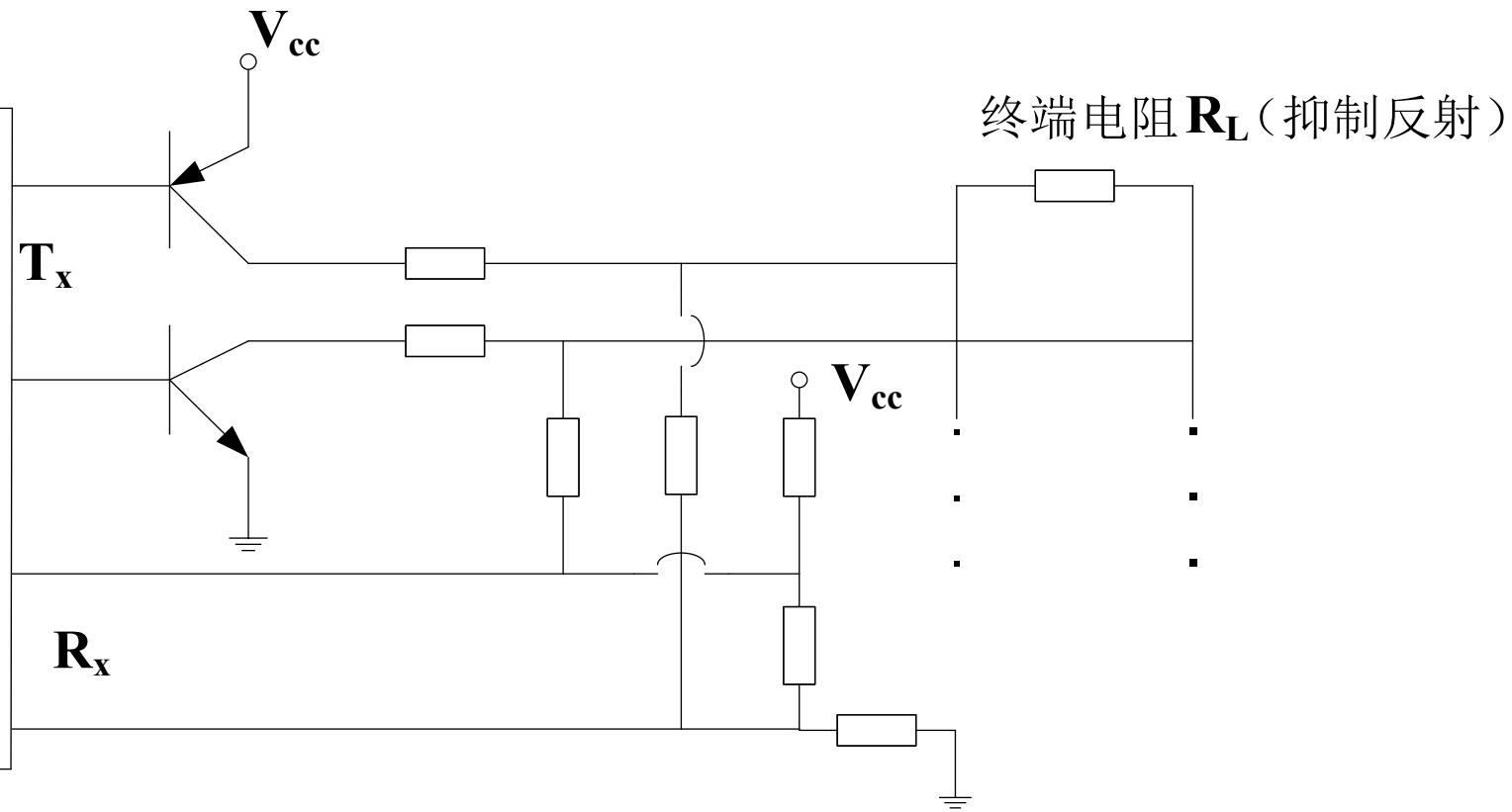
。





CAN

模块



若所有的ECU的晶体管均被关闭，则总线处于隐性状态；若成对晶体管至少有一个被接通，则总线处于显性状态。





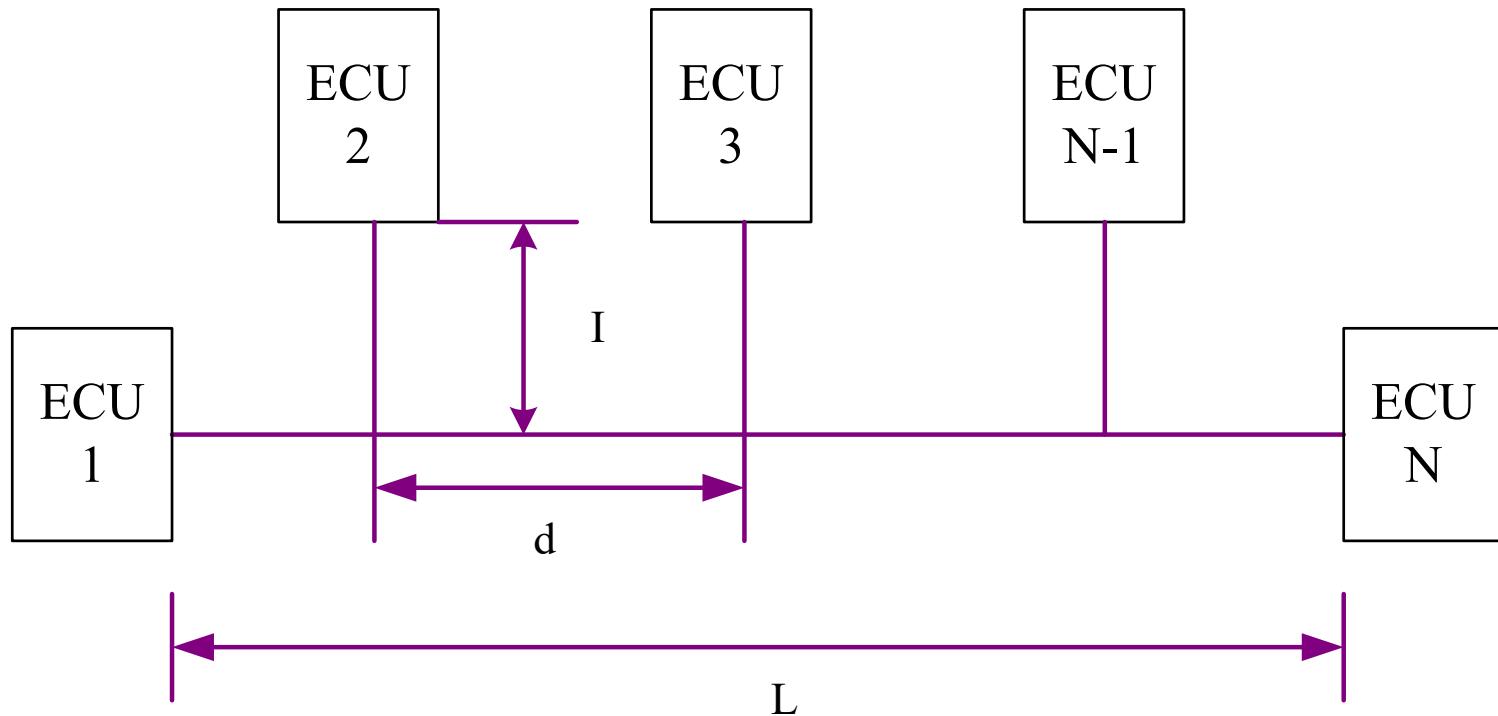
1、总线电气参数（双绞线）

参数	符号	单位	最小值	典型值	最大值	条件
特征阻抗	Z	Ω	108	120	132	—
单位长度电阻	r	Ω/m	—	70	—	—
传播延时	—	ns/m	—	5	—	—
终端电阻	RL	Ω	118	120	130	—

2、总线拓扑结构及参数

参数	符号	单位	最小值	典型值	最大值	条件
总线长度	L	m	0	—	40	位速率为 1Mbit/S
节点分支长度	I	m	0	—	0.3	
节点距离	d	m	0	—	40	





根据ISO 11898建议的总线媒体电气性能，总线在发生某些故障时应不至于使通信中断，并为故障的定位提供可能。





§ 6.2.3 CAN总线的接口器件

目前，一些主要的CAN总线器件产品如下表所示。

类别	型号	备注	类别	型号	备注
CAN微控制器	P87C591	替代P87C592	CAN收发器	TJA940	高速CAN收发器
XCA37		16位MCU		TJA941	高速CAN收发器
CAN控制器	SJA900	替代82C200		TJA950	高速CAN收发器
CAN收发器	PCA82C250	高速CAN收发器		TJA953	容错CAN收发器
	PCA82C251	高速CAN收发器		TJA954	容错CAN收发器
	PCA82C252	高速CAN收发器	LIN收发器	TJA920	LIN收发器

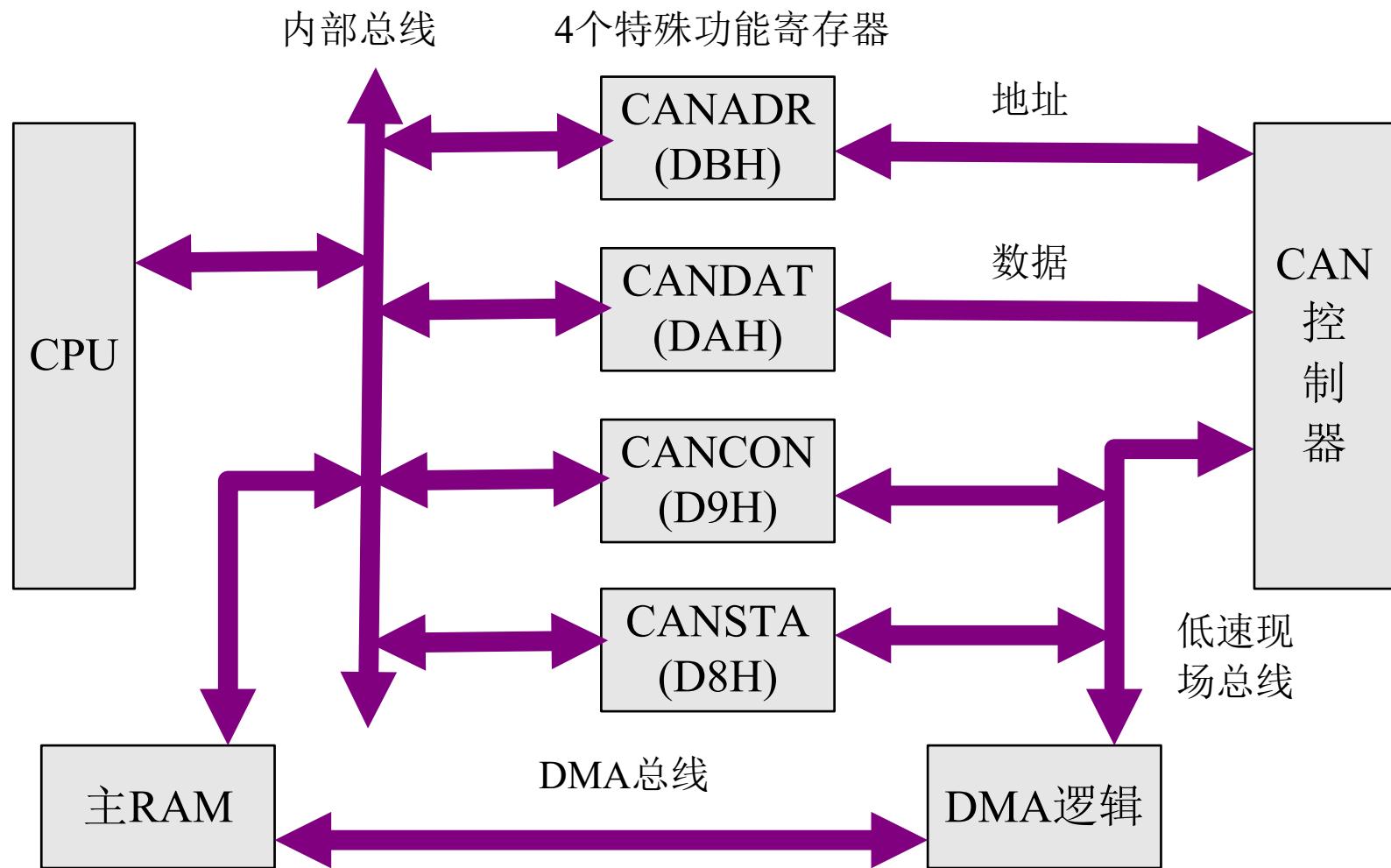
1、带有CAN总线接口的微控制器及I/O器件：P8XC592

这是一款将常规微控制器和CAN通信控制器功能结合在一起的器件，其





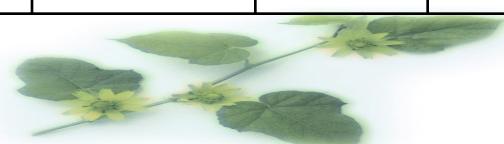
系统结构如下图所示。





4个特殊功能寄存器的位功能如下表所示：

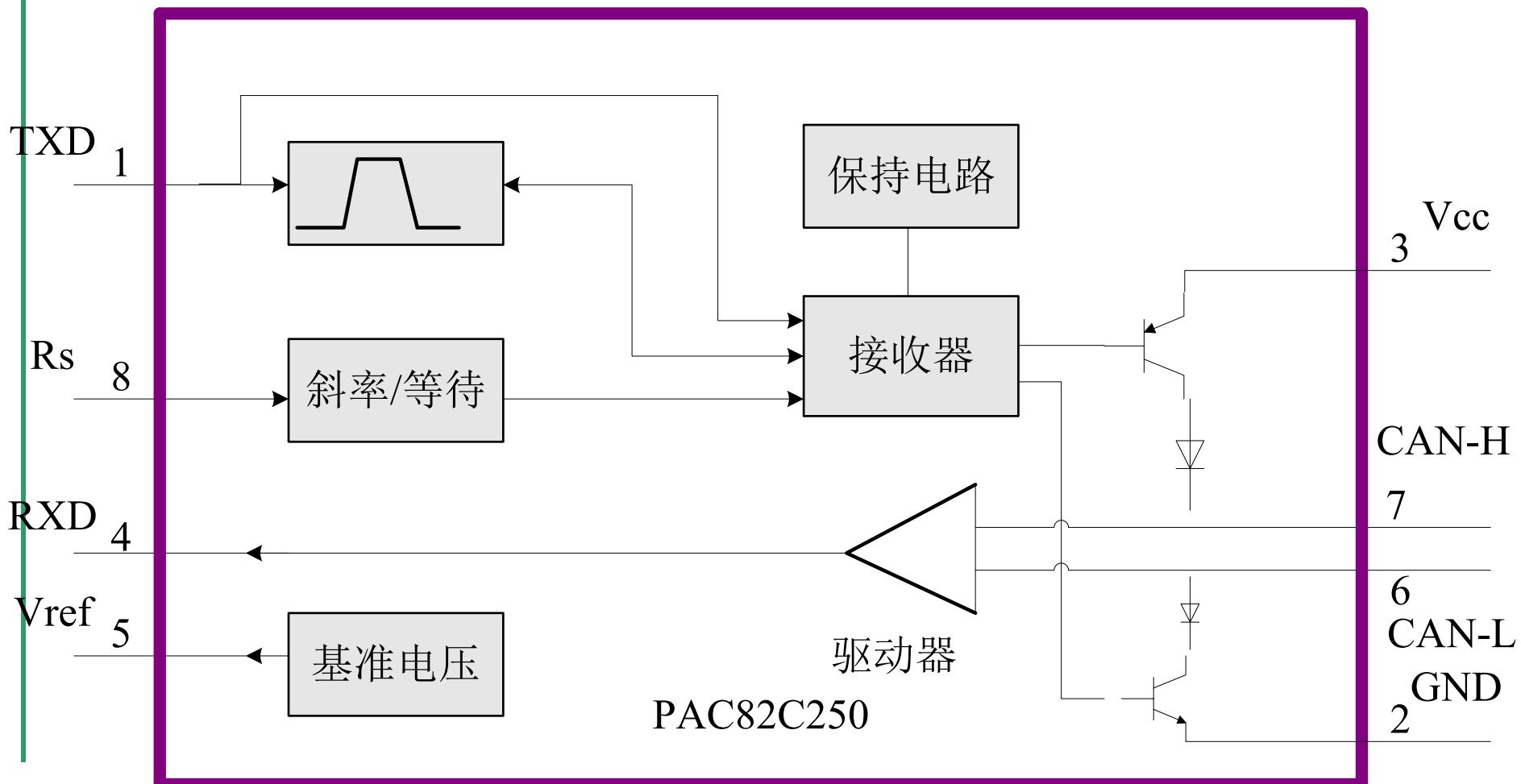
SFR	地址	读/ 写	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
CANADR	DBH	RW	DMA	—	自动增量	CANA4	CANA3	CANA2	CANA1	CANA0
CANDAT	DAH	RW	CAND7	CAND6	CAND5	CAND4	CAND3	CAND2	CAND1	CAND0
CANCON	D9H	R				唤醒中 断	超载中 断	出错中断	发送中 断	接收中 断
		W	RX0 激活	RX1 激活	唤醒方式	睡眠	清除超 载	释放接收缓 存器	发送失 败	发送请 求
CANSTA	D8H	R	总线状 态	错误状态	发送状态	接收状 态	发送完 成状态	发送缓存访 问	数据超 载	接收缓 存状态
		W	RAMA7	RAMA6	RAMA5	RAMA4	RAMA3	RAMA2	RAMA1	RAMA0





2、CAN总线I/O器件：82C250

1) 功能框图如下图所示：





2) 82C250真值表

电源/V	TXD	CAN-H	CAN-L	总线状态	RXD
4.5~5.5	0	高电平	低电平	显性	0
4.5~5.5	1(或悬浮)	悬浮状态	悬浮状态	隐性	1
小于2(未加电)	—	悬浮状态	悬浮状态	隐性	—
$2 < V_{cc} < 4.5$	$> 0.75V_{cc}$	悬浮状态	悬浮状态	隐性	—
$2 < V_{cc} < 4.5$	—	若 $V_{RS} > 0.75V$ 则悬浮	若 $V_{RS} > 0.75V$ 则悬浮	隐性	—





§ 6.2.4 CAN总线的应用

- 1) 大型仪器设备（如CT断层扫描仪）
- 2) 在传感器技术及数据采集系统中的应用

MTS公司的磁致伸缩长度测量传感器；

MTZ公司的4通道数据采集系统ccc4。

- 3) 在工业控制中的应用。利用它的多主通道机制。





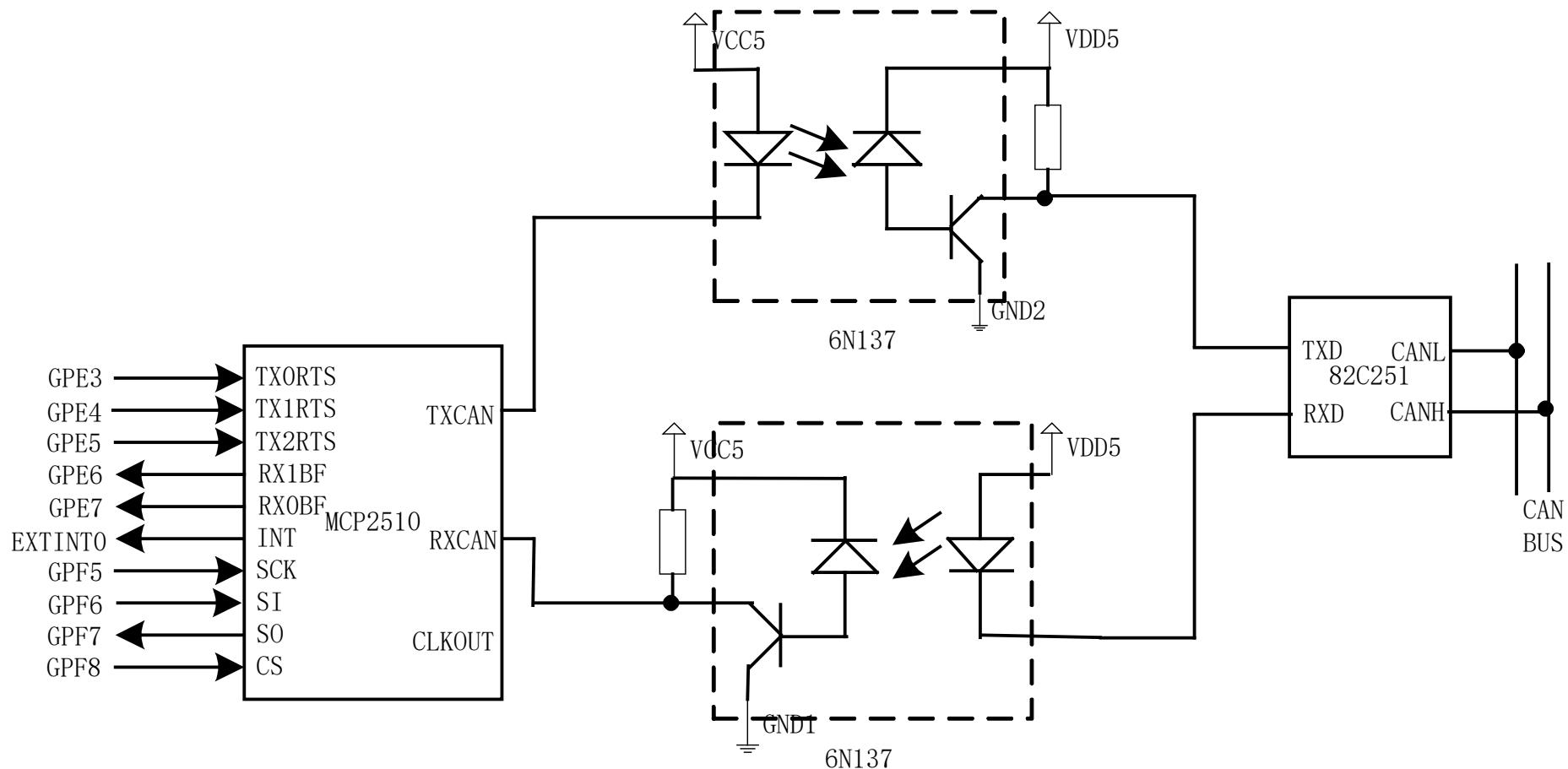
具体应用举例：

1、通过SPI接口与ARM处理器的连接

CAN控制器采用的是微芯公司的带SPI接口的独立的CAN控制器MCP2510，支持CAN 总线V2.0A/B技术规范。CAN节点速率可达1Mbps。MCP2510的特性如下：

- 0—8字节的报文长度；
- 标准帧和数据扩展帧，支持远程帧；
- 两个接收缓冲器，可优先储存报文；
- 六个完全验收滤波器，两个完全验收屏蔽滤波器；
- 三个发送缓冲器，可进行发送优先级设定并可中止发送；
- 有用于自检的巡回功能；
- 高速的SPI总线（最高速率可达5MHz）。





CAN总线接口连线图





MCP2510的中断采用处理器的外部中断0，TX0RTS、TX1RTS、TX2RTS三个输入引脚可用于分别启动相应三个发送缓冲器中报文的发送。当接收缓冲器0和1中接收到有效报文时，可以RX1BF和RX0BF这两个输出引脚向处理器发送中断信号。CLKOUT是MCP2510时钟分频输出引脚，可以向MCU提供时钟。

由于MCP2510的总线驱动能力有限，必须外加CAN总线收发器，可以采用Philips 公司的总线收发器PCA82C251。但是并没有直接把MCP2510的总线信号TXCAN和RXCAN接到82C251上，而是分别经过光隔器件6N137隔离之后与收发器相连，这样可以大大提高总线的抗干扰和抗高压能力。

2、通过并口与8位单片机的连接

采用的CAN控制器是广泛应用于8位单片机系统中的独立的**CAN**控制器



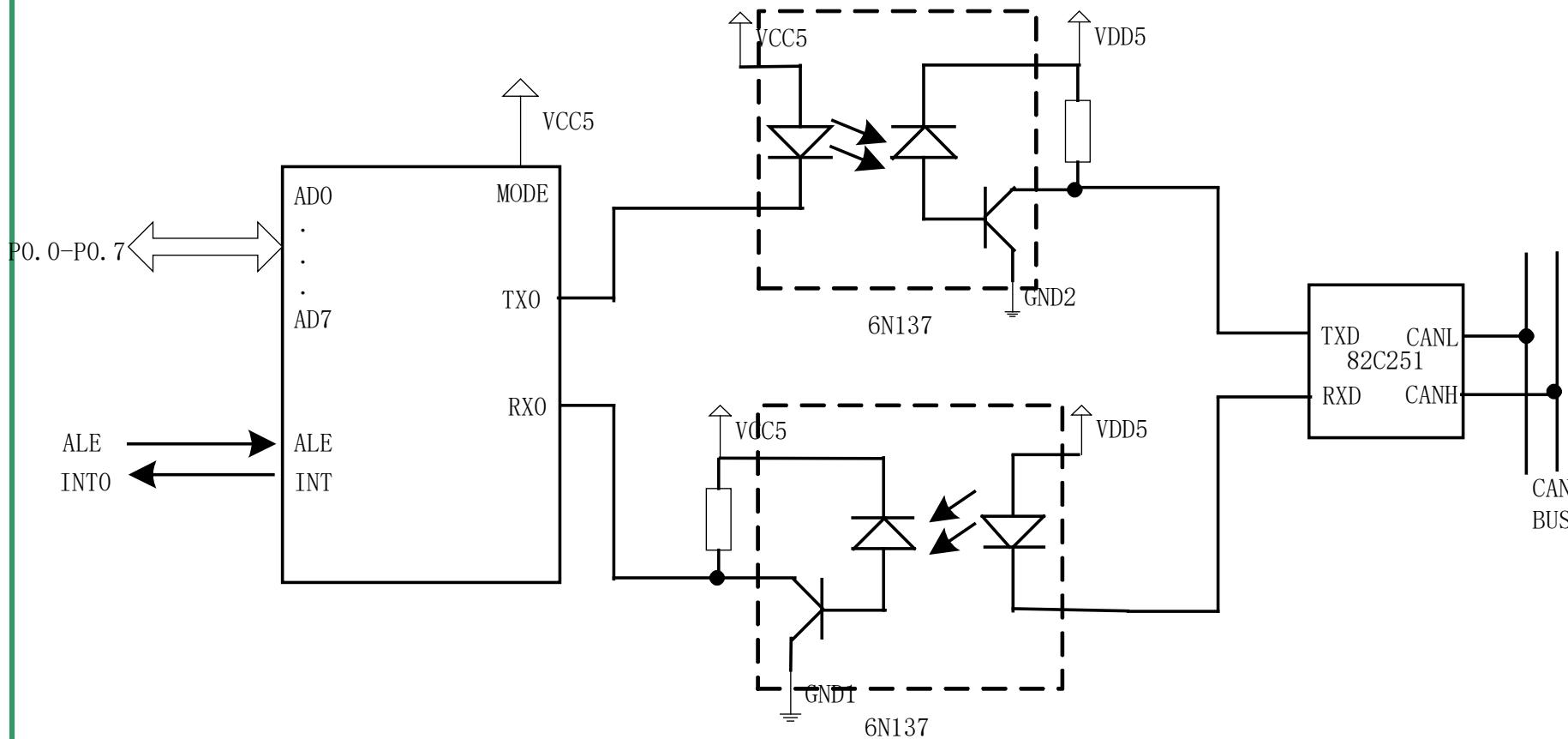


SJA1000。和MCP2510一样，SJA1000同样也支持两种模式：BasicCan和PeliCan模式。特性如下：

- 灵活的微处理器接口；
- 可编程的CAN输出驱动器；
- 位频率最高可达1Mbps；
- 64字节的接收FIFO，接收FIFO可以储存高达21个报文，延长了中断复位时间，避免了数据超载；
- 接收比较器旁路，可以减少内部延迟，改进位定时编程，使CAN总线线路更长。

CAN总线接口连线如下图所示。SJA1000具有8位地址数据复用并行I/O口AD0-AD7，接51芯片的P0口，P0口正好也是数据地址复用，ALE接51的地址锁存信号。控制器的中断输出INT接51的外部中断0。SJA1000支持直接连接两个微型处理器系列：80C51和68XX，MODE引脚用来配置接口模式，Intel模





CAN总线接口电路





式： MODE=高， Motorola模式： MODE=低。若采用51单片机， MODE接高电平。

SJA1000有两路总线接口： TX0， RX0； TX1， RX1。这里只用了一路TX0和RX0。

同样设备节点在CAN控制器和收发器之间也加了光隔电路，因为设备节点单片机系统的电源直接来自与之相连的设备，而各个设备的电位往往相差较大，为了保持总线上数据信号的正常传输必须要将总线电平和设备内部电平隔离，同时这样也能提高总线的抗干扰性。





问题11：

结合CAN总线的一般电气连接结构形式和协议规范，说明CAN所采用的多主通信和非破坏性总线仲裁技术的机制。





§6.3 IEEE 1451标准

§ 6.3.1 通用智能变送器接口标准IEEE1451简介

IEEE1451的目标是要定义一套通用的通信接口，以使传感器与现有基于微处理器的系统、仪器仪表和现场总线网络相连，并最终实现传感器到网络的互换性和互操作性。2004年以前标准系列包括：IEEE1451.1，IEEE1451.2，IEEE1451.3，IEEE1451.4。目前又增加了：IEEE1451.0，IEEE1451.5，IEEE1451.6，IEEE1451.7（草案）。

- 1) IEEE1451.1：网络应用处理器信息模式标准；
- 2) IEEE1451.2：变换器、微处理器通信协议和变换器电子数据表（TEDS）标准；
- 3) IEEE1451.3：分布式多点系统的变换器信息格式和数字通信标准；
- 4) IEEE1451.4：混合型变换器信息格式和通信协议标准。





5) IEEE1451. 0: 该层标准包括通用功能、通信协议以及电子数据表格 (Common Functions, Communiuation Protocols, and TEDS Fomrats)。IEEE 1451. 0标准通过定义基本命令设置和通信协议接口，为不同的物理层提供通用、简单的标准，以加强这些标准之间的互操作性；

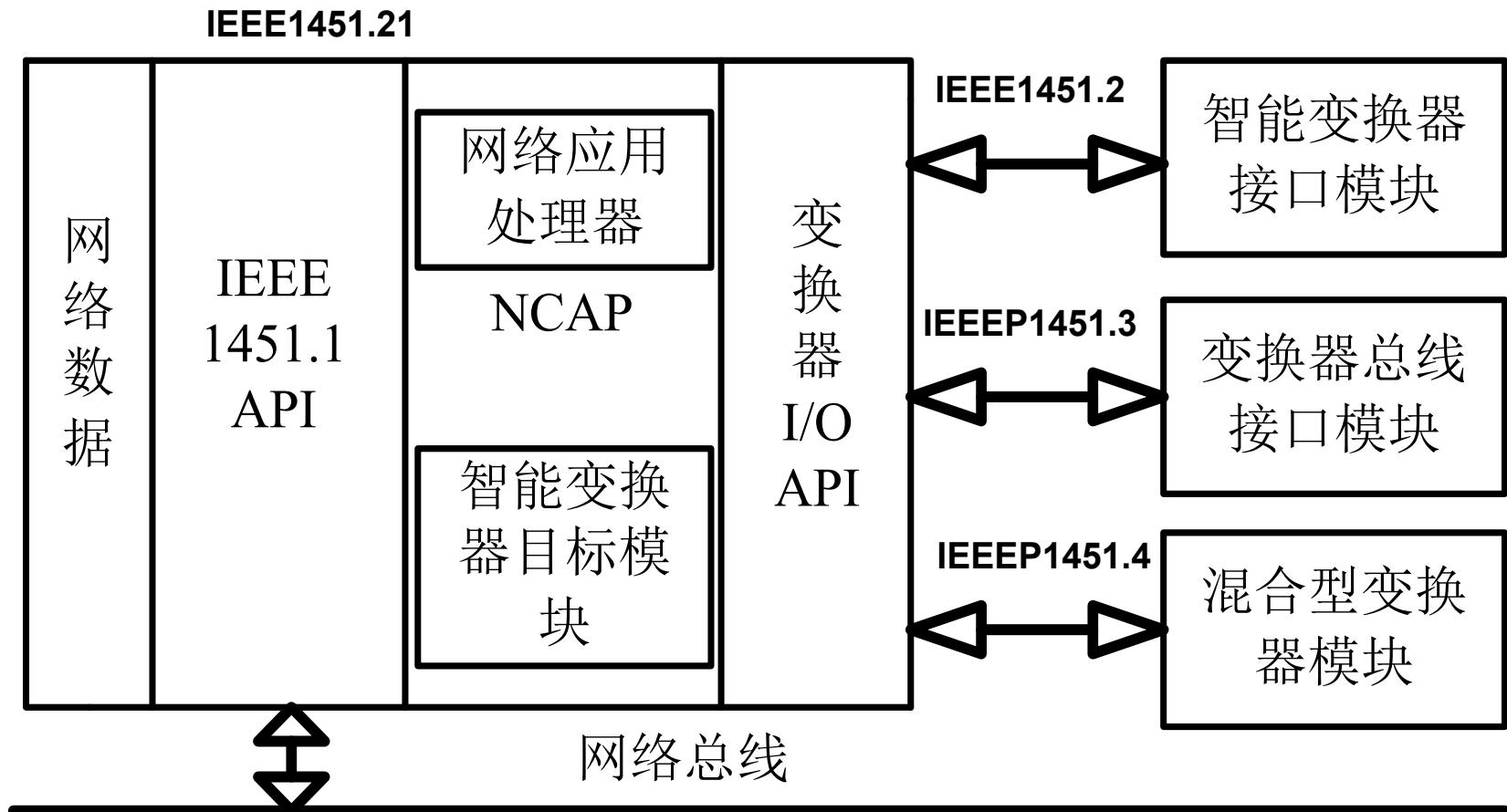
6) IEEE1451. 5: 无线通信与变送器电子数据表格式 (Wireless Communiication and Transducer Electronic DataSheet (TEDS) Formats)；

7) IEEE1451. 6: CANopen 协议变送器网络接口标准，支持内在安全或非安全的应用。它定义了基于1451标准的TEDS和CAN一0pen之间的条目、通信消息、配置参数、诊断信息之间的映射；

8) IEEE1451. 7: 针对RFID系统、RFID标签与变送器（传感器/执行器）进行信息交互，定义了新的TEDS。

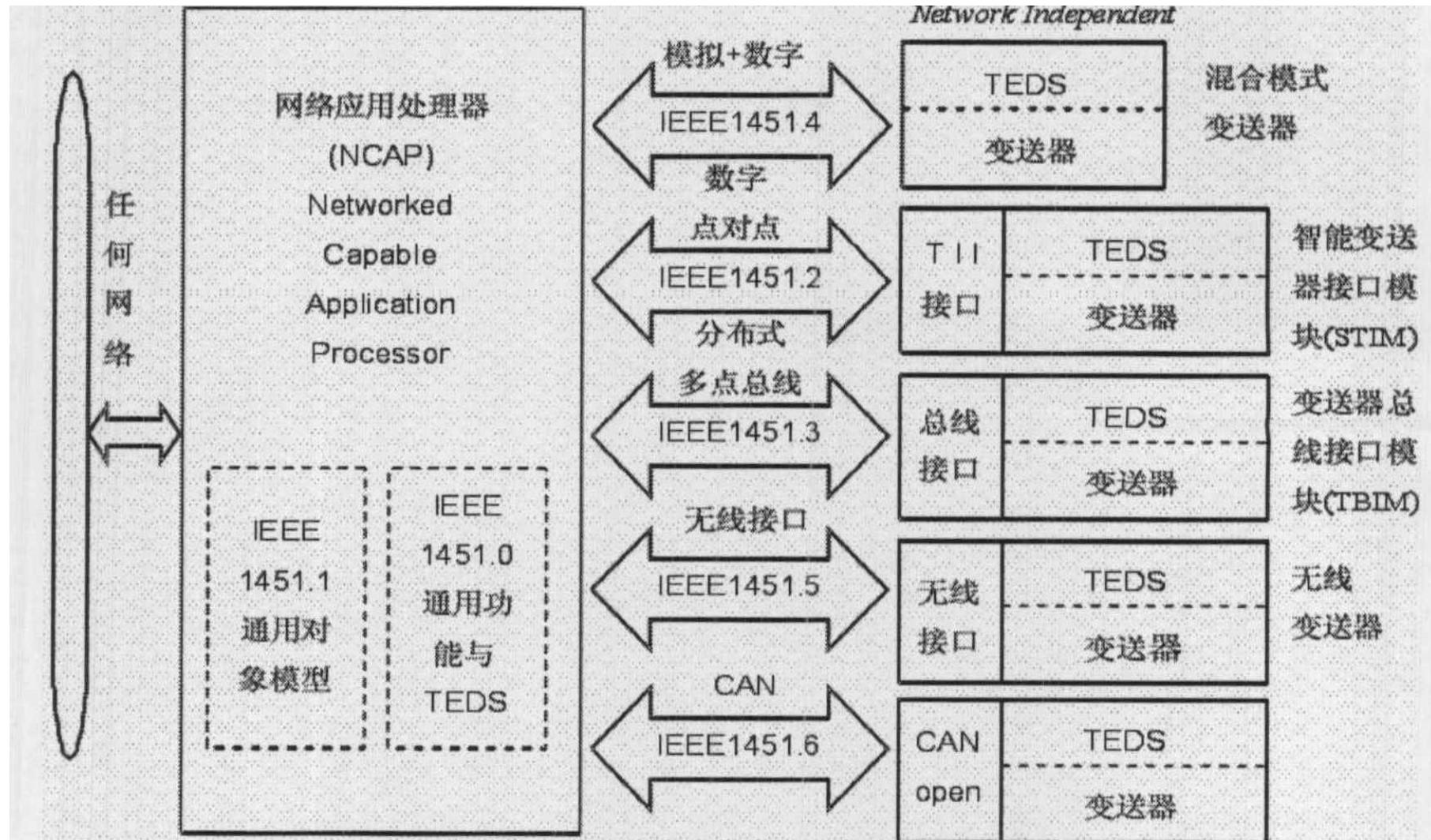
它把传感器节点设计与网络实现分隔开来，这其中包括传感器自识别、自配置、远程自标定、长期自身文档维护、简化传感器升级维护以及增加系统与数据的可靠性等。





IEEE1451系列标准间的相互关系 (2004)





IEEE1451系列标准间的相互关系(2010)





IEEE1451标准定义的功能框架包含了一系列数据与对象模型，以使传感器数据能够通过网络进行交互。

IEEE1451的4个标准通过网络应用处理器NCAP把智能变换器接口模块STIM、总线接口模块以及混合型模块等单元联系在一起。

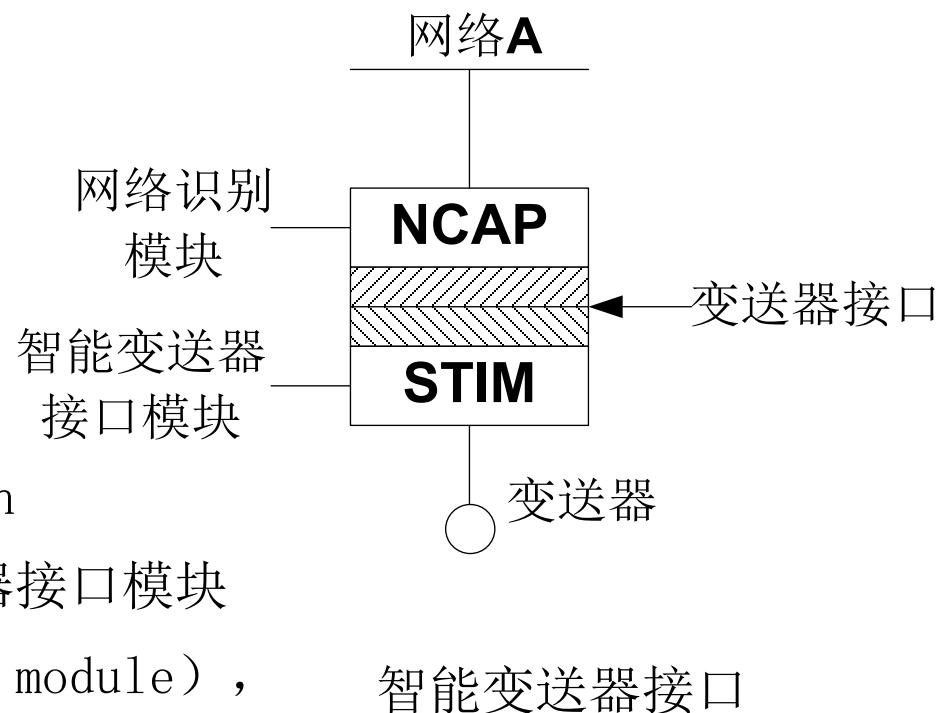
将节点功能分成两种结构模块，

第一种模块结构用来运行网络

协议栈（network protocol stack）和应用固件（application firmware）即网络匹配处理器

NCAP（network capable application process）；第二种模块为智能变送器接口模块

STIM（smart transducer interface module），





其中包括变送器辅助电子系统和变送器电子数据单TEDS (transducer electronic data sheet)。

IEEE1451系列标准的比较

成员	硬件接口	TEDS	元件间的距离	信号转换	测量水平
IEEE1451.1	N/A	支持	N/A	N/A	支持测量
IEEE1451.2	10线数字	支持	点到点短距	是	原始数字工程单位
IEEEP1451.3	4线数字	支持	多点中距	是	原始数字工程单位
IEEEP1451.4	2~4线模拟/数字	支持	点到点中距	是	模拟
IEEEP1451.5	无线	支持	多点中距	是	原始数字工程单位
IEEEP1451.6	2线数字	支持	多点中距	是	原始数字工程单位





§ 6.3.2 IEEE1451.0

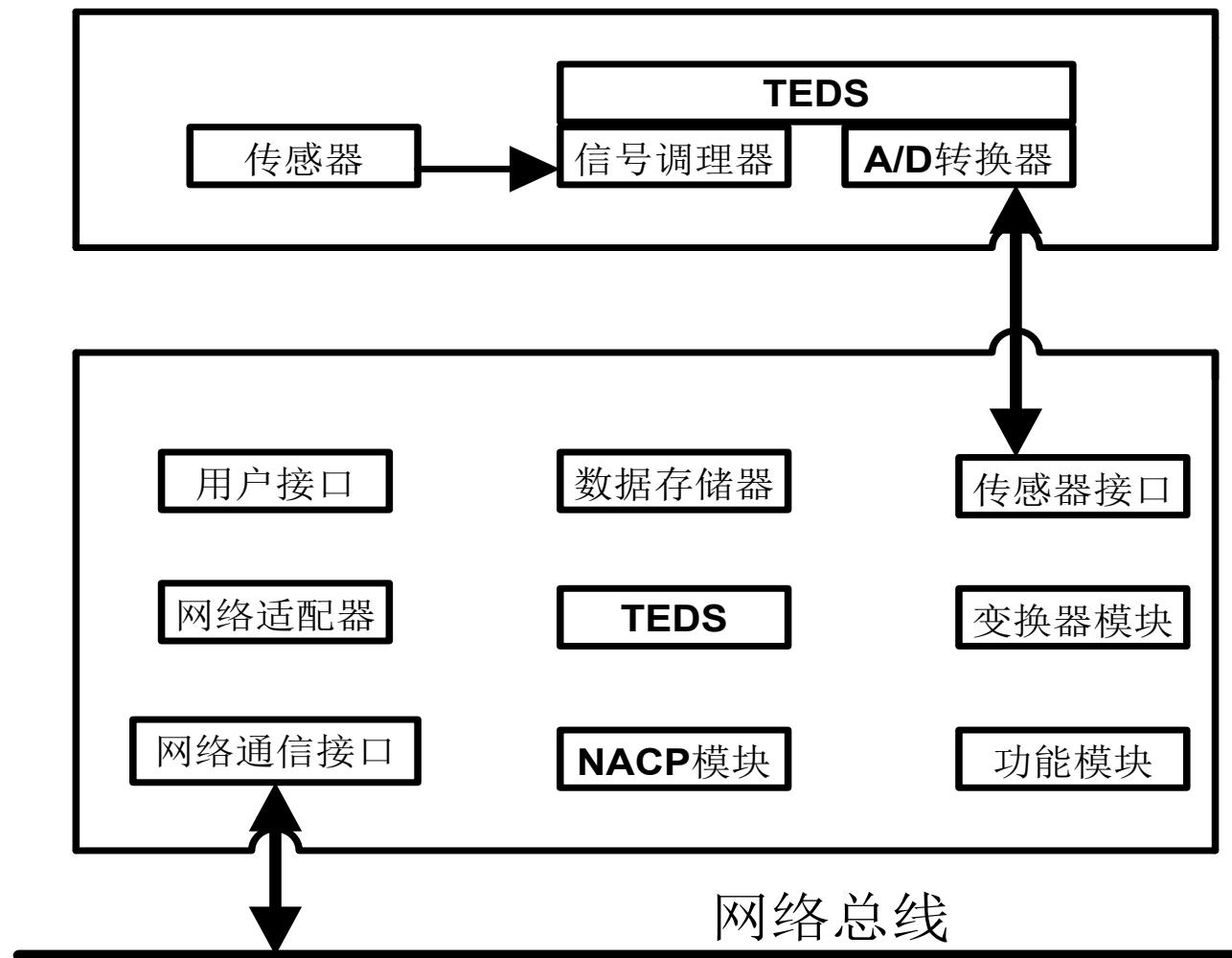
IEEE1451.0是通用的功能、协议和传感器电子数据表格式标准。

IEEE1451.0标准的提出，主要是为了解决IEEE1451标准族的几个子标准之间存在的兼容性问题，尽管它们之间有共同的特征。通过一些基本的命令和通信协议，它实现了一个与物理层独立的NCAP与智能传感器之间的模块接口，从而加强了这些子标准之间的交互性。如果要增加新的传感器设备到IEEE1451标准中，只需要定义一个新的物理层，包括物理层的TEDS以及支持新的物理层命令和功能即可。





§ 6.3.3 IEEE1451.1





IEEE1451.1定义了智能变换器的对象模型，用面向对象的语言对传感器的行为进行描述。通过这个模型，原始传感器数据借助标定数据来进行修正并产生一个标准化的输出。通过一个标准的应用编程接口（API）来实现从模型到网络协议的映射，并以可选的方式支持所有通信接口。

网络匹配处理器（NCAP）包含一个带有嵌入式操作系统的处理器，在NCAP的功能模块中，有基本传感器模块、非IEEE1451对象、数个软件程序、一个对象的NCAP模块。区分对象是依据对象的类别ID、类别名称、对象ID、对象标签、对象名称和对象发送地址等6个指标来实现。

IEEE1451.1标准提供了两种网络通信模式：客户/服务器模式和发布/订阅模式，分别对应一对一通信和一对多或多对多。网络软件提供一个代码库，代码库含有IEEE1451.1与网络之间的呼叫例程。





§ 6.3.4 IEEE1451. 2

IEEE1451. 2定义了智能变换器接口模块（包括TEDS）和一个10线的数字接口——变换器独立接口（TII）。传感器的TEDS包含了产品相关信息，如制造商名称、传感器类型、序列号和标定数据等，并在系统上电或有命令请求时立刻发布到网络或仪器上。变换器数据首先转换成数字形式，然后通过TII发送给NCAP。



普通智能变送器模块图





1、变换器独立接口TII

引脚序号	信号名称	正/负逻辑	驱动来源	功能
1	DCLK	上升沿有效	NCAP	获得DIN和DOUT数据
2	DIN	正	NCAP	由NCAP向STIM传送地址和数据
3	DOUT	正	STIM	由STIM 向NCAP传送数据
4	NACK	负	STIM	实现启动响应、数据传送响应
5	COM	N/A	NCAP	信号的公共端或接地
6	NIOE	低电平有效	NCAP	表示正在传送数据，并区分出数据传送帧结构
7	NINT	负	STIM	STIM 请求NCAP服务
8	NTRIG	负	NCAP	执行启动功能
9	POWER	N/A	NCAP	5V电源端
10	NSAET	低电平有效	STIM	NCAP用来检查 STIM的存在





2、变换器接口模块STIM

在变换器接口模块中包含了变换器（XDCR）、信号调理器、A/D转换器、D/A转换器、数字I/O接口、存储器、TEDS等。STIM包括1~255个不同类型的变换器，由一个NCAP模块通过精密的数字接口来控制。在一个STIM中，可以只有一个传感器或执行器，也可以有多个通道的变换器。STIM具有一个适当格式的TEDS、一个TII和适当的协议。

IEEE1451.2定义了6种变换器，其中有4种传感器、一个执行器和一个事件探测器。4种传感器包括：传感器、缓冲传感器、数据序列传感器、缓冲数据序列传感器。它们都可以读取变量并将数据进行A/D转换，以获得微处理器能够处理的有效数据。

3、变换器电子数据单TEDS

TEDS包含了变送器本身的重要信息：变送器信息（生产商、模型号、版本





号、系列号、设备型号、日期）、数据模型（信号转换数据模型、模型长度、重要二进制位）、用户单位、校准参数（校准时间、变量、类型和使用局限、校准常数）、系统参数设置（通道读/写时间设置、采样周期、预热时间、刷新时间、电源要求（电压和电流、TEDS的长度和通道的数目））等。

IEEE1451.2定义了8种不同的TEDS，它们分别是：Meta-TEDS、Channel-TEDS、Calibration-TEDS、Meta-identification TEDS、Channel-identification TEDS、Calibration-identification TEDS、End Users' Application-Specific TEDS和Industry Extensions TEDS，其中Meta-TEDS、Channel-TEDS是必需的，其他是可选的。

Meta-TEDS描述TEDS的数据结构、STIM的极限时间参数和通道组信息等有关STIM的总体信息； Channel-TEDS主要定义每个通道的具体信息，如函





类型	可读媒体	托管或选择类型
元TEDS	机器	托管
通道TEDS	机器	托管
校准TEDS	机器	选择
工业扩展TEDS	机器	选择
元识别TEDS	人工	选择
通道识别TEDS	人工	选择
校准识别TEDS	人工	选择
端用户专用TEDS	人工	选择

数模型、校准模型、物理单位、量程上下限、使用时限等参数； End Users' Application-Specific TEDS用来为最终用户额外提供所需要的特殊信息，如STIM所处的位置、维护人员的姓名、电话等。





4、校正/纠错

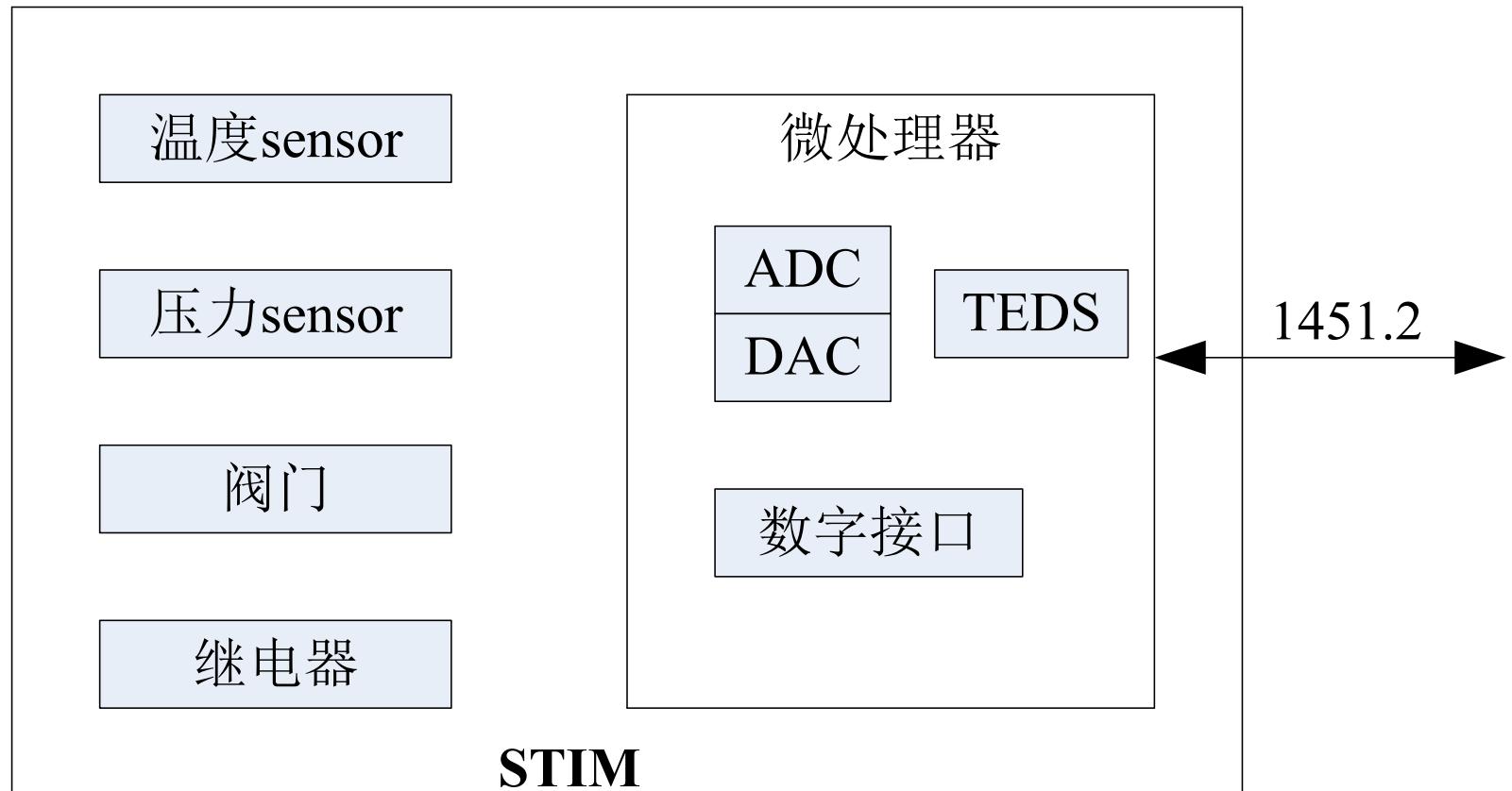
IEEE1451.2描述了一个纠错算法，让用户将ADC输出转换为工程单元给变换器，再将工程单元转换为DAC的输出给执行器。真值表、线性变换、多输入多项式校准都包括在传感器可能使用的数据之中。

5、STIM的电源

一般规定为直流5V（±0.20V），STIM接口控制电路的电源主要由通信接口来提供，如果传感器和执行器的电流或电压超出NCAP所能提供的水平，则由外界提供。

6、STIM的结构类型、举例



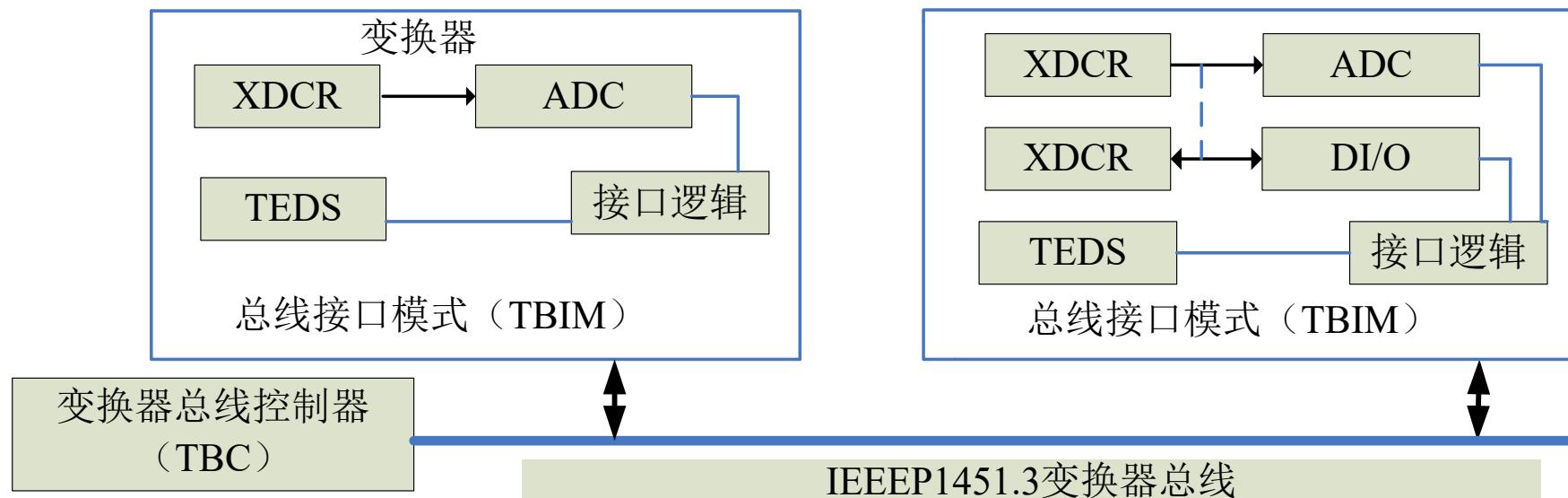




§ 6.3.5 IEEE1451.3

IEEE P1451.3定义了分布式多点系统的变换器信息格式和数字通信，是一种物理上相互独立的、连接多个传感器的数字总线接口。它允许数字信息存储于变换器内，且通过变换器总线传输，是一种微型总线模式。

变换器总线控制器TBC负责管理微型总线接口与数据交换。

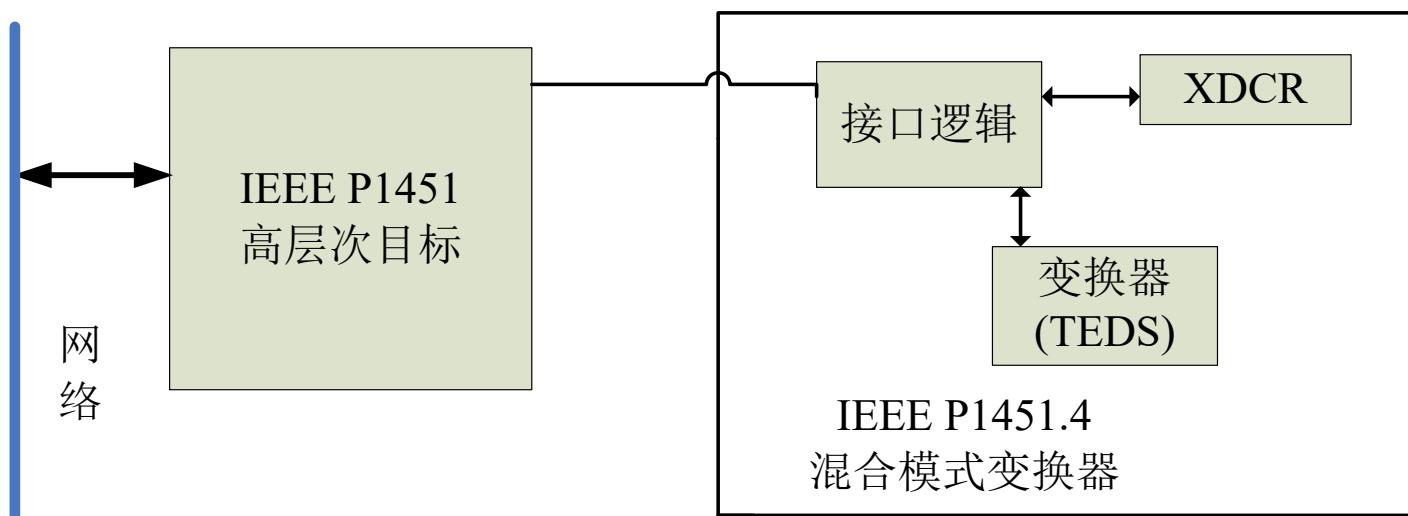




§ 6.3.6 IEEE1451.4

IEEE P1451.4定义了混合型变换器信息格式与高级IEEE1451目标进行数字信息通信的协议及简化的TEDS，也定义了自识别、测试和可编程信号规范的双向数字通信，IEEE P1451.4可以与传统的系统兼容。

IEEE P1451.4混合模式网络对TEDS进行重新定义，以使存储单元最小化。





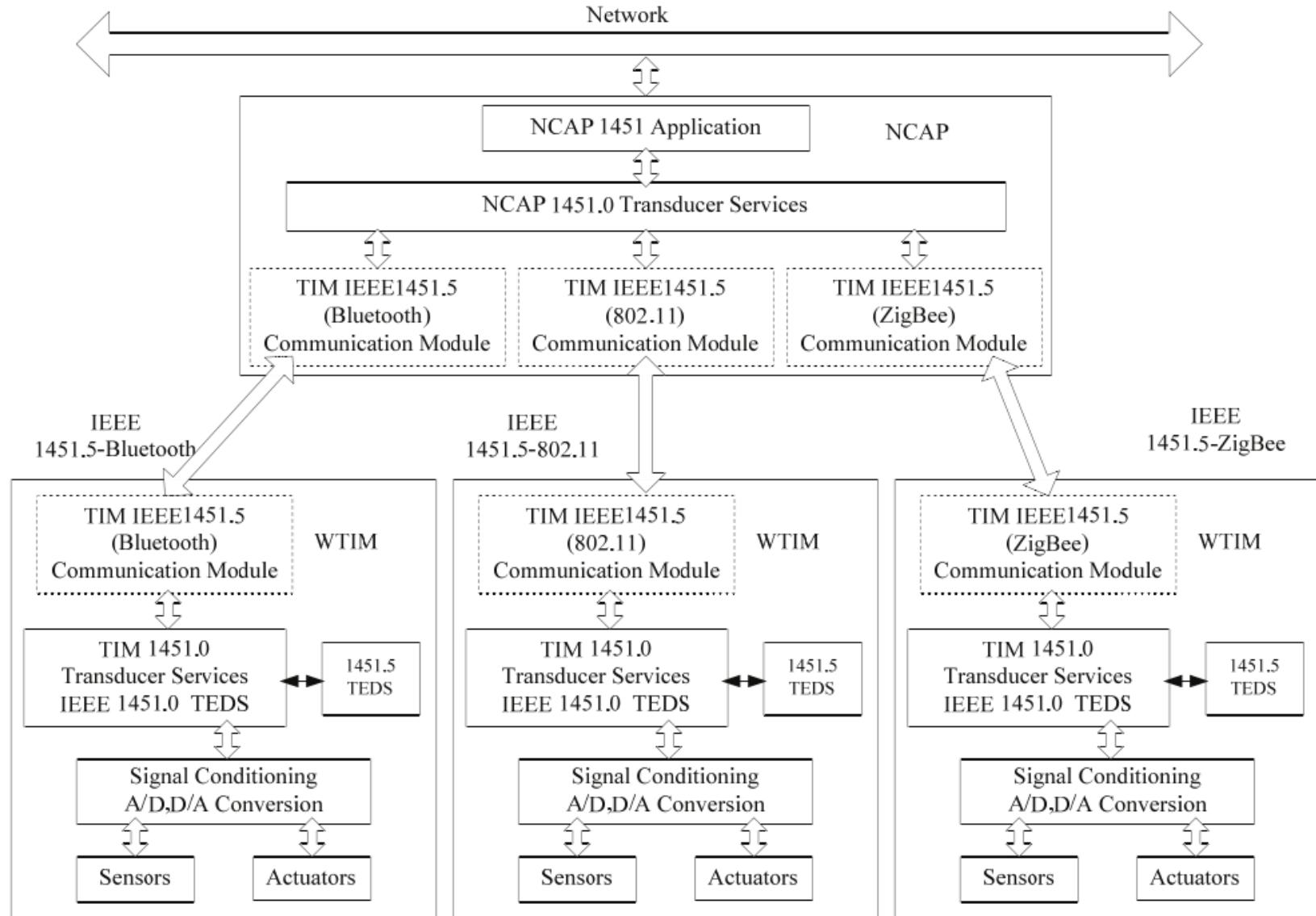
§ 6.3.7 IEEE1451.5

IEEE 1451.5 标准定义的无线传感器通信协议和相应的 TEDS，旨在现有的 IEEE1451 框架下，构筑一个开放的标准无线传感器接口，如后图所示。

在无线通信方式上可采用三种标准，即： IEEE 802.11 标准、 Bluetooth 标准和 ZigBee 标准。

标准制订面临的任务在于定义 IEEE 1451.0/5 通信应用编程接口（API）； IEEE1451.5 物理层（PHY）TEDS（包括 802.11、Bluetooth、ZigBee 以下传输协议物理层 TEDS）； IEEE1451.5 标准命令集。该标准参考模型、物理层（Physical Layer）TEDS 和命令集遵循 IEEE 1451.0 标准。





IEEE P1451.5 标准的结构





三种无线技术的比较

规范	价格	安全性	传输速度	通信距离	频段	国际标准
ZigBee	芯片组约 4 美元	中等	10Kbps ~250Kbps	有效范围 10m~75m	2.4GHz 866MHz (欧洲) 915MHz (美国)	IEEE 802.15.4
BlueTooth	芯片组约 5 美元	高	1Mbps	0~10m	2.4GHz	IEEE802.15.1x
Wi-Fi	芯片组约 25 美元	低	54Mbps	0~100m	2.4GHz	IEEE802.11b IEEE802.11g



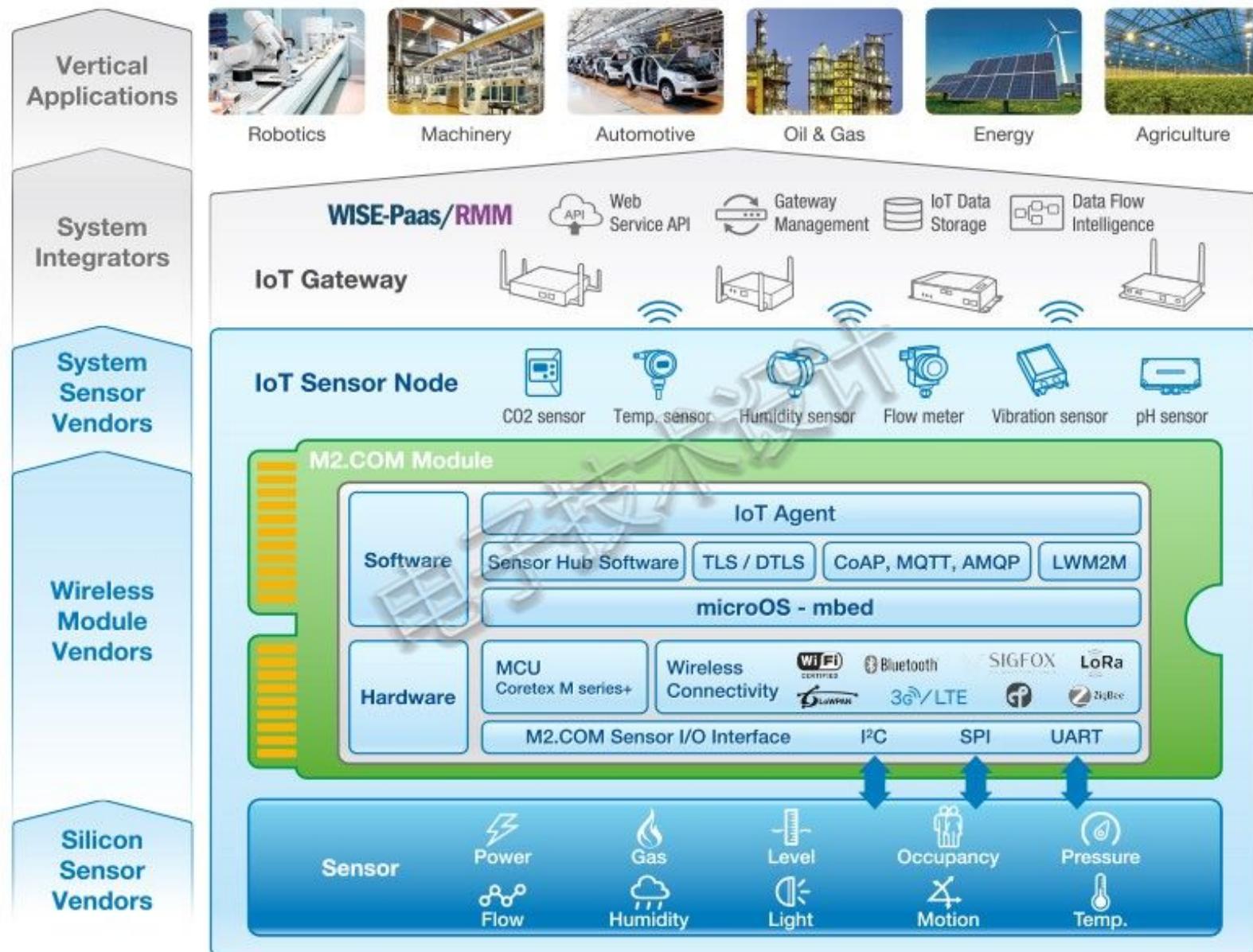


工业用无线网络所使用的通讯协议表

通讯协议	标准与作业频率	说明	范例模块	优点	缺点
Zigbee	IEEE 802.15.4 ISM 频段 2.4GHz 和 900MHz	用于控制与监控的网状网络标准;建筑/家庭自动化、内嵌感测。涵盖范围最远可至 50 公尺。	Silicon Labs Ember® E M35x NXP 的 JN5148-001 Panasonic 的 PAN4561	低成本、省电、适用于小型网络的简易解决方案。应用相当普遍。	无法在指定期间伺服大量节点。
WirelessHART 高速可寻址远程传感器通讯协议 (HART)。	IEEE 802.15.4 ISM 频段 2.4GHz。	专为制程监控设计的多重供货商标准;可透过网状网络链接大量传感器/节点。范围不到 100 英呎。	RFM 的 XDM2510HP Panasonic 的 PAN4561	指定为国际标准。以 30 年的老旧 HART 技术为基础。为受到认可的标准。专为工业用途控制设计。	不兼容于部分既有的有线网络协议 (FieldBus®、Profibus® 等) 网络上最多可涵盖 250 个节点。
ISA-100.11a	IEEE 802.15.4 ISM 频段 2.4GHz。	针对非关键监控所设计的无线联机能力,为安全可靠的多重供货商标准。低数据传输速率、超省电。ISM 频段 2.4GHz。范围为 600 公尺。	RFM 的 LPR2430 Microchip 的 MRF24J40MA Panasonic 的 PAN4561	每个网络可扩充至 250 个节点以上。为受到认可的标准。专为工业用途控制设计。范围为 600 公尺。	尚未广受采用。 可与 HART®、Fieldbus®、Modbus®、Profibus® 通讯。
Wi-Fi - 低功率	IEEE 802.11a/b/g/n/ac 2.4 GHz 和 5GHz。(未全球统一)	针对商业/消费者用途开发的完备无线网络标准。涵盖范围最远可为 100 - 200 公尺。	Murata 的 LBEE5ZSTNC-523 Microchip 的 MRF24WB0Mx	高数据传输速率。技术成熟完备;接口与网页之间不需桥接。	较耗电。
蓝牙低功耗	IEEE 802.15.1 ISM 频段 2.4GHz。	取代如 RS-232 及 RS-485 等序列联机以及短距离(100 公尺以内)以太网络。	Murata 的 LBEE5ZSTNC-523 Panasonic 的 PAN4561	低功率。	比 802.15.4 通讯协议耗电,但比 802.11 省电。

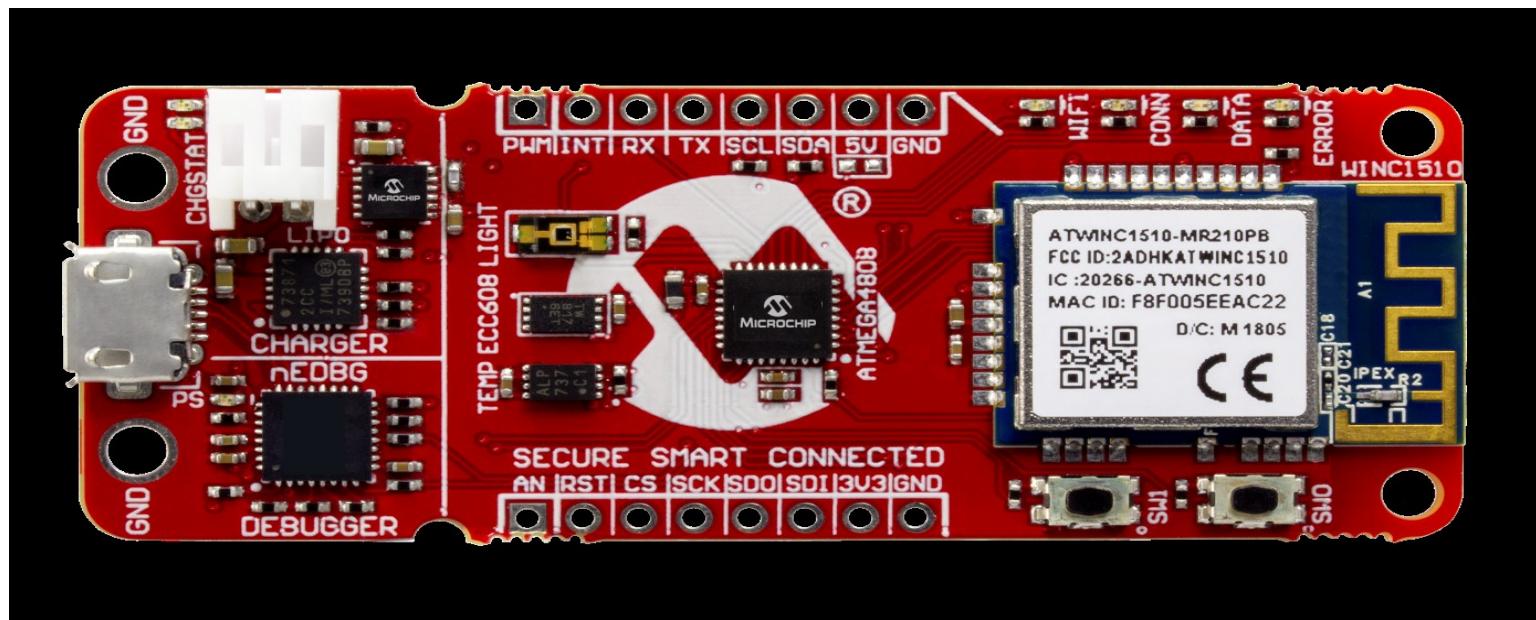
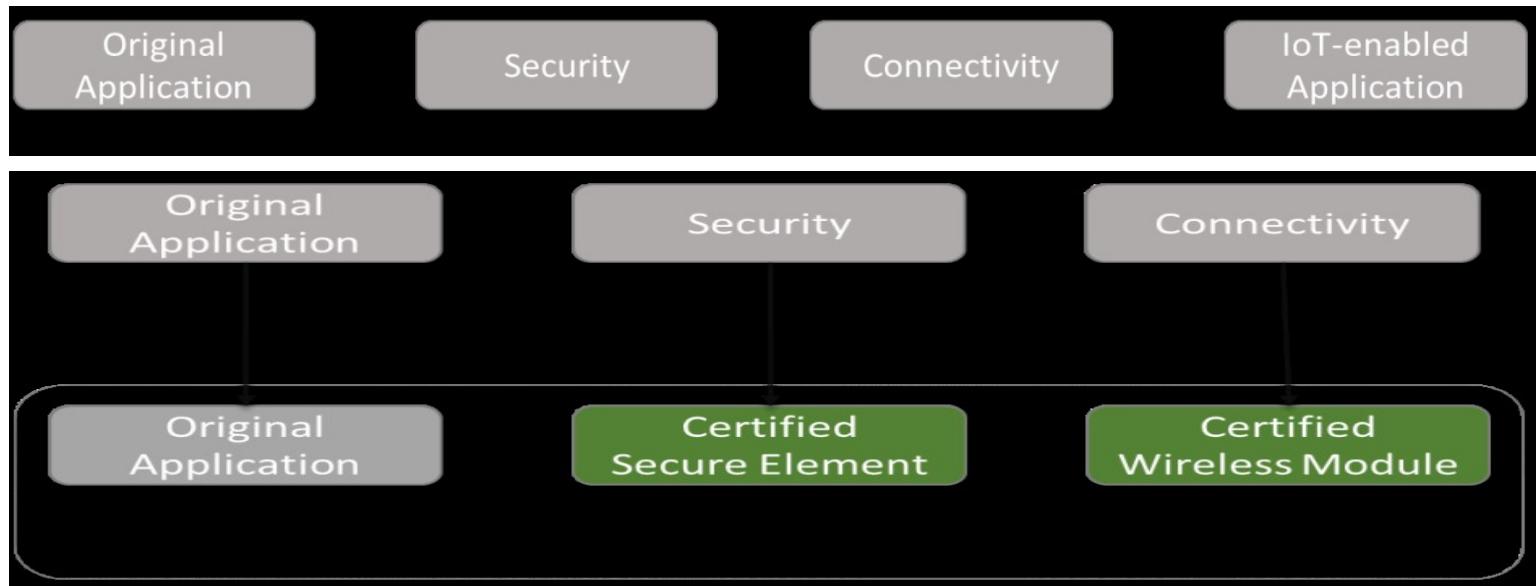


典型的IIoT传感器系统结构组成





基于模块化结构设计将已有系统接入物联网的一种方法(Microchip)





§6.4 工业以太网络技术

§ 6.4.1 Ethernet协议概述

1、Ethernet技术规范与IEEE802.2、IEEE802.3标准两者之间的比较：

物理规范

服务

帧格式

802.3 帧格式：

前导码	SFD（开始定位符）	DA（目的地址）	SA（源地址）	长度	LLC帧	PAD（填充段）	CRC（校验码）
-----	------------	----------	---------	----	------	----------	----------

Ethernet 帧格式：

前导码	SFD（开始定位符）	DA（目的地址）	SA（源地址）	类型	LLC帧	CRC（校验码）
-----	------------	----------	---------	----	------	----------





2、Ethernet的体系结构

三层结构：物理层、数据链路层、用户层。

物理层功能

数据链路层的主要逻辑功能

Ethernet网的协议自识别功能

Ethernet是IEEE802.3协议的一种具体实现

Ethernet地址实行全球编址，其站地址具有全球唯一性。

§ 6.4.2 工业Ethernet的特点及要求

工业以太网，一般来讲是指技术上与商用以太网（即IEEE802.3标准）兼容，但在产品设计时，在材质的选用、产品的强度、适用性以及实时性、可互操作性、可靠性、抗干扰性和本质安全等方面能满足工业现场的需要。





Ethernet技术的迅速发展，Ethernet传输速率的提高和Ethernet交换技术的发展，给解决Ethernet通信的非确定性问题带来了希望，并使Ethernet全面应用于工业控制领域成为可能。目前，主要体现在以下几个方面。

1、通信的确定性和实时性

工业控制网络不同于普通数据网络的最大特点在于它必须满足控制作用对实时性的要求，即信号传输要足够的快和满足信号的确定性。实时控制往往要求对某些变量的数据准确定时刷新。由于Ethernet采用CSMA/CD碰撞检测方式，网络负荷较大时，网络传输的不确定性不能满足工业控制的实时要求，因此传统以太网技术难以满足控制系统要求准确定时通信的实时性要求，一直被视为非确定性的网络。

然而，快速以太网与交换式以太网技术的发展，给解决以太网的非确定性问题带来了新的契机，使这一应用成为可能。





1) Ethernet的通信速率从10M、100M增大到如今的1000M、10G，在数据吞吐量相同的情况下，通信速率的提高意味着网络负荷的减轻和网络传输延时的减小，即网络碰撞机率大大下降。

2) 采用星型网络拓扑结构，交换机将网络划分若干个网段。Ethernet交换机由于具有数据存储、转发的功能，使各端口之间输入和输出的数据帧能够得到缓冲，不再发生碰撞；同时交换机还可对网络上传输的数据进行过滤，使每个网段内节点间数据的传输只限在本地网段内进行，而不需经过主干网，也不占用其它网段带宽，从而降低了所有网段和主干网的网络负荷。

3) 全双工通信又使得端口间两对双绞线（或两根光纤）上分别同时接收和发送报文帧，也不会发生冲突。

因此，采用交换式集线器和全双工通信，可使网络上的冲突或不复存在（全双工通信），或碰撞机率大大降低（半双工），因此使Ethernet通信确定性和实时性大大提高。





2、稳定性与可靠性

为了解决在不间断的工业应用领域，在极端条件下网络也能稳定工作的问题，美国Synergetic微系统公司和德国Hirschmann、Jetter AG等公司专门开发和生产了导轨式集线器、交换机产品，安装在标准DIN导轨上，并有冗余电源供电，接插件采用牢固的DB-9结构。台湾Moxa科技在2002年6月推出工业以太网产品—MOXA EtherDevice Server(工业以太网设备服务器)，特别设计用于连接工业应用中具有以太网络接口工业设备（如 PLC、HMI、DCS系统等）。

最近刚刚发布的IEEE802.3af标准中，对Ethernet的总线供电规范也进行了定义。此外，在实际应用中，主干网可采用光纤传输，现场设备的连接则可采用屏蔽双绞线，对于重要的网段还可采用冗余网络技术，以此提高网络的抗干扰能力和可靠性。





3、工业Ethernet协议

工业自动化网络控制系统除了完成数据传输之外，往往还需要依靠所传输的数据和指令，执行某些控制计算与操作功能，由多个网络节点协调完成自控任务。因而它需要在应用、用户等高层协议与规范上满足开放系统的要求，满足互操作条件。

对应于ISO/OSI七层通信模型，以太网技术规范只映射为其中的物理层和数据链路层；而在其之上的网络层和传输层协议，目前以TCP/IP协议为主（已成为以太网之上传输层和网络层“事实上的”标准）。而对较高的层次如会话层、表示层、应用层等没有作技术规定。目前商用计算机设备之间是通过FTP（文件传送协议）、Telnet（远程登录协议）、SMTP（简单邮件传送协议）、HTTP（WWW协议）、SNMP（简单网络管理协议）等应用层协议进行信息透明访问的，它们如今在互联网上发挥了非常重要的作用。但这些协议所定义的数据结构等特性不适合应用于工业过程控制领域现场设备之间的





实时通信。

为满足工业现场控制系统的应用要求，必须在Ethernet+TCP/IP协议之上，建立完整的、有效的通信服务模型，制定有效的实时通信服务机制，协调好工业现场控制系统中实时和非实时信息的传输服务，形成为广大工控生产厂商和用户所接收的应用层、用户层协议，进而形成开放的标准。为此，各现场总线组织纷纷将以太网引入其现场总线体系中的高速部分，利用以太网和TCP/IP技术，以及原有的低速现场总线应用层协议，从而构成了所谓的工业以太网协议，如HSE、PROFINet、Ethernet/IP等。

1) HSE(High Speed Ethernet, 高速以太网)

HSE是现场总线基金会在摒弃了原有高速总线H2之后的新作。FF现场总线基金会明确将HSE定位成实现控制网络与互联网Internet的集成。由HSE链接设备将H1网段信息传送到以太网的主干上并进一步送到企业的ERP和管理系统。操作员在主控室可以直接使用网络浏览器查看现场运行情况。现场设





备同样也可以从网络获得控制信息。

HSE在低四层直接采用以太网+TCP/IP，在应用层和用户层直接采用FF H1的应用层服务和功能块应用进程规范，并通过链接设备（Linking Device）将FF H1网络连接到HSE网段上，HSE链接设备同时也具有网桥和网关功能，它的网桥功能能用来连接多个H1总线网段，使不同H1网段上的H1设备之间能够进行对等通信而无需主机系统的干预。HSE主机可以与所有的链接设备和链接设备上挂接的H1设备进行通信，使操作数据能传送到远程的现场设备，并接收来自现场设备的数据信息，实现监控和报表功能。监视和控制参数可直接映射到标准功能块或者“柔性功能块”（FFB）中。

2) PROFINet

Profibus国际组织针对工业控制要求和Profibus技术特点，提出了基于以太网的PROFINet，它主要包含3方面的技术：

- a) 基于通用对象模型(COM)的分布式自动化系统；





- b) 规定了Profibus和标准以太网之间的开放、透明通信；
- c) 提供了一个包括设备层和系统层、独立于制造商的系统模型。

PROFINet采用标准TCP/IP+以太网作为连接介质，采用标准TCP/IP协议加上应用层的RPC / DCOM来完成节点之间的通信和网络寻址。它可以同时挂接传统Profibus系统和新型的智能现场设备。现有的Profibus网段可以通过一个代理设备(proxy)连接到PROFINet网络当中，使整套Profibus设备和协议能够原封不动地在PROFINet中使用。传统Profibus设备可通过代理proxy与PROFINet上面的COM对象进行通信，并通过OLE自动化接口实现COM对象之间的调用。

3) Ethernet/IP

Ethernet/IP(以太网工业协议)是主推ControlNet现场总线的Rockwell Automation公司对以太网进入自动化领域做出的积极响应。Ethernet/IP网络采用商业以太网通信芯片、物理介质和星形拓扑结构，采用以太网交换机





实现各设备间点对点连接，能同时支持10Mbps和100Mbps以太网商用产品，Ethernet/IP的协议由IEEE 802.3物理层和数据链路层标准、TCP/IP协议组和控制与信息协议CIP(Control Information Protocol)等3个部分组成，前面两部分为标准的以太网技术，其特色就是被称作控制和信息协议的CIP部分。Ethernet/IP为了提高设备间的互操作性，采用了ControlNet和DeviceNet控制网络中相同的CIP，CIP一方面提供实时I/O通信，一方面实现信息的对等传输，其控制部分用来实现实时I/O通信，信息部分则用来实现非实时的信息交换。

§ 6.4.3 工业Ethernet的发展趋势

1、工业以太网与现场总线相结合

工业以太网技术的研究还只是近几年才引起国内外工控专家的关注。而现场总线经过十几年的发展，在技术上日渐成熟，在市场上也开始了全面推





广，并且形成了一定的市场。就目前而言，全面代替现场总线还存在一些问题，需要进一步深入研究基于工业以太网的全新控制系统体系结构，开发出基于工业以太网的系列产品。因此，近一段时间内，工业以太网技术的发展将与现场总线相结合，具体表现在：

- 1) 物理介质采用标准以太网连线，如双绞线、光纤等；
- 2) 使用标准以太网连接设备（如交换机等），在工业现场使用工业以太网交换机；
- 3) 采用IEEE 802.3物理层和数据链路层标准、TCP/IP协议组；
- 4) 应用层（甚至是用户层）采用现场总线的应用层、用户层协议；
- 5) 兼容现有成熟的传统控制系统，如DCS、PLC等。

这方面比较典型的应用有如法国施耐德公司推出“透明工厂”的概念，即将工厂的商务网、车间的制造网络和现场级的仪表、设备网络构成畅通的透明网络，并与Web功能相结合，与工厂的电子商务、物资供应链和ERP等形式





成整体。

2、工业以太网技术直接应用于工业现场设备间的通信已成大势所趋

随着以太网通信速率的提高、全双工通信、交换技术的发展，为以太网的通信确定性的解决提供了技术基础，从而消除了以太网直接应用于工业现场设备间通信的主要障碍，为以太网直接应用于工业现场设备间通信提供了技术可能。为此，国际电工委员会IEC正着手起草实时以太网(Real-time Ethernet, RTE)标准，旨在推动以太网技术在工业控制领域的全面应用。

国内相关单位在国家“863”计划的支持下，开展了EPA(Ethernet for Plant Automation)技术的研究，重点是研究以太网技术应用于工业控制现场设备间通信的关键技术，通过研究和攻关，取得了以下成果：

1) 以太网应用于现场设备间通信的关键技术获得重大突破。

针对工业现场设备间通信具有实时性强、数据信息短、周期性较强等特点和要求，经过认真细致的调研和分析，采用以下技术基本解决了以太网应





用于现场设备间通信的关键技术：

a) 实时通信技术

其中采用以太网交换技术、全双工通信、流量控制等技术，以及确定性数据通信调度控制策略、简化通信栈软件层次、现场设备层网络微网段化等针对工业过程控制的通信实时性措施，解决了以太网通信的实时性。

b) 总线供电技术

采用直流电源耦合、电源冗余管理等技术，设计了能实现网络供电或总线供电的以太网集线器，解决了以太网总线的供电问题。

c) 远距离传输技术

采用网络分层、控制区域微网段化、网络超小时滞中继以及光纤等技术解决以太网的远距离传输问题。

d) 网络安全技术

采用控制区域微网段化，各控制区域通过具有网络隔离和安全过滤的现





场控制器与系统主干相连，实现各控制区域与其他区域之间的逻辑上的网络隔离。

e) 可靠性技术

采用分散结构化设计、EMC设计、冗余、自诊断等可靠性设计技术等，提高基于以太网技术的现场设备可靠性，经实验室EMC测试，设备可靠性符合工业现场控制要求。

2) 起草了EPA国家标准。

以工业现场设备间通信为目标，以工业控制工程师（包括开发和应用）为使用对象，基于以太网、无线局域网、蓝牙技术+TCP/IP协议，起草了“用于工业测量与控制系统的EPA系统结构和通信标准”（草案），并通过了由TC124组织的技术评审。

3) 开发基于以太网的现场总线控制设备及相关软件原型样机，并在化工生产装置上成功应用。针对工业现场控制应用的特点，通过采用软、硬件





抗干扰、EMC设计措施，开发出了基于以太网技术的现场控制设备，主要包括：基于以太网的现场设备通信模块、变送器、执行机构、数据采集器、软PLC等成果等。

3、发展前景

美国权威调查机构ARC(Automation Research Company)报告指出，今后Ethernet不仅继续垄断商业计算机网络通信和工业控制系统的上层网络通信市场，也必将领导未来现场总线的发展，Ethernet和TCP/IP将成为器件总线和现场总线的基础协议。美国VDC(Venture Development Corp.)调查报告也指出，Ethernet在工业控制领域中的应用将越来越广泛，市场占有率的增长也越来越快，将从2000年的11%增加到2005年的23%。

由于以太网有“一网到底”的美誉，即它可以一直延伸到企业现场设备控制层，所以被人们普遍认为是未来控制网络的最佳解决方案，工业以太网已成为现场总线中的主流技术。





目前，在国际上有多个组织从事工业以太网的标准化工作，2001年9月，我国科技部发布了基于高速以太网技术的现场总线设备研究项目，其目标是：攻克应用于工业控制现场的高速以太网的关键技术，其中包括解决以太网通信的实时性、可互操作性、可靠性、抗干扰性和本质安全等问题，同时研究开发相关高速以太网技术的现场设备、网络化控制系统和系统软件。





以太网供电（POE: Power Over Ethernet）标准

1、POE标准供电系统的主要供电特性参数为：

- 电压在44~57V之间，典型值为48V。
- 允许最大电流为550mA，最大启动电流为500mA。
- 典型工作电流为10~350mA，超载检测电流为350~500mA。
- 在空载条件下，最大需要电流为5mA。
- 为PD设备提供3.84~12.95W五个等级的电功率请求，最大不超过13W。





2、POE标准供电的工作过程：

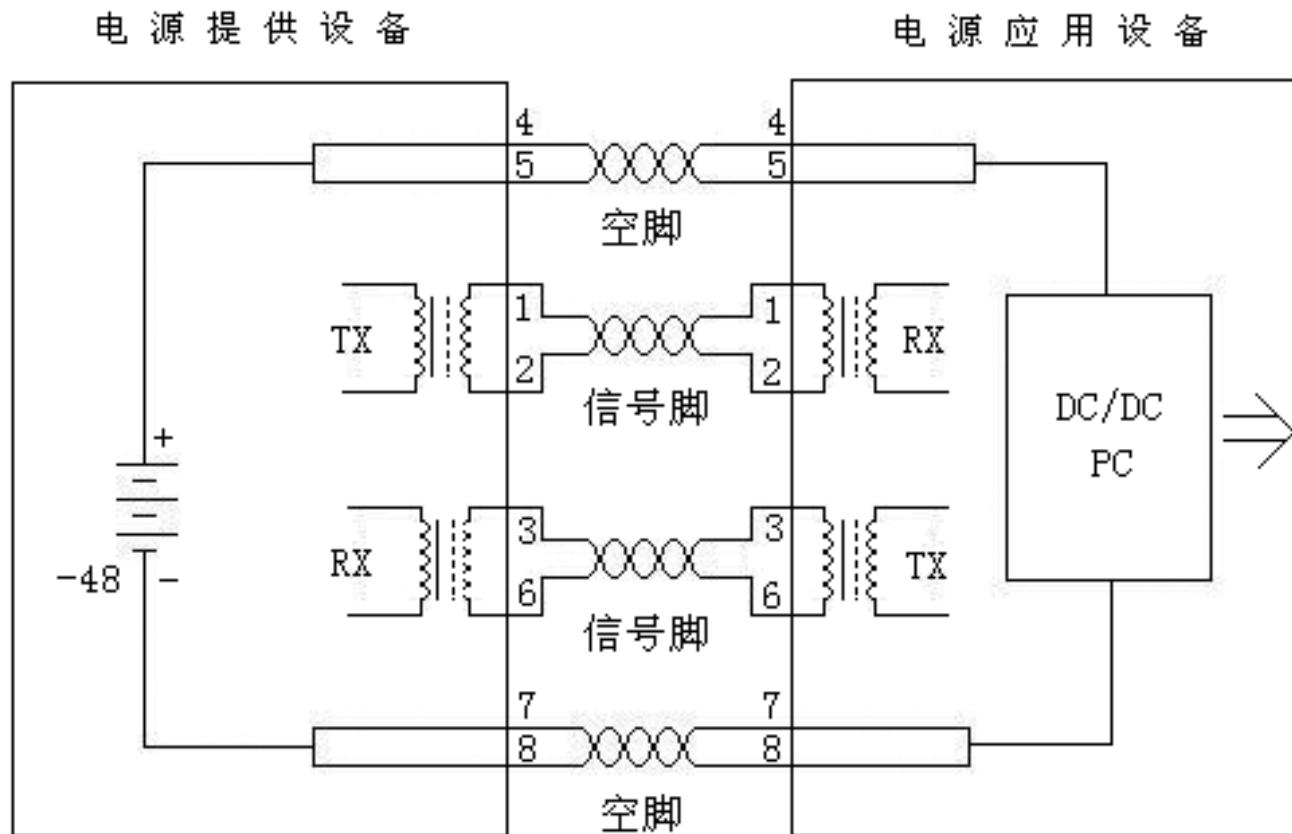
- 检测：一开始，PSE设备在端口输出很小的电压，直到其检测到线缆终端的连接为一个支持IEEE 802.3af标准的受电端设备。
- PD端设备分类：当检测到受电端设备PD之后，PSE设备可能会为PD设备进行分类，并且评估此PD设备所需的功率损耗。
- 开始供电：在一个可配置时间(一般小于15 μ s)的启动期内，PSE设备开始从低电压向PD设备供电，直至提供48V的直流电源。
- 供电：为PD设备提供稳定可靠48V的直流电，满足PD设备不超过15.4W的功率消耗。
- 断电：若PD设备从网络上断开时，PSE就会快速地(一般在300~400ms之内)停止为PD设备供电，并重复检测过程以检测线缆的终端是否连接PD设备。





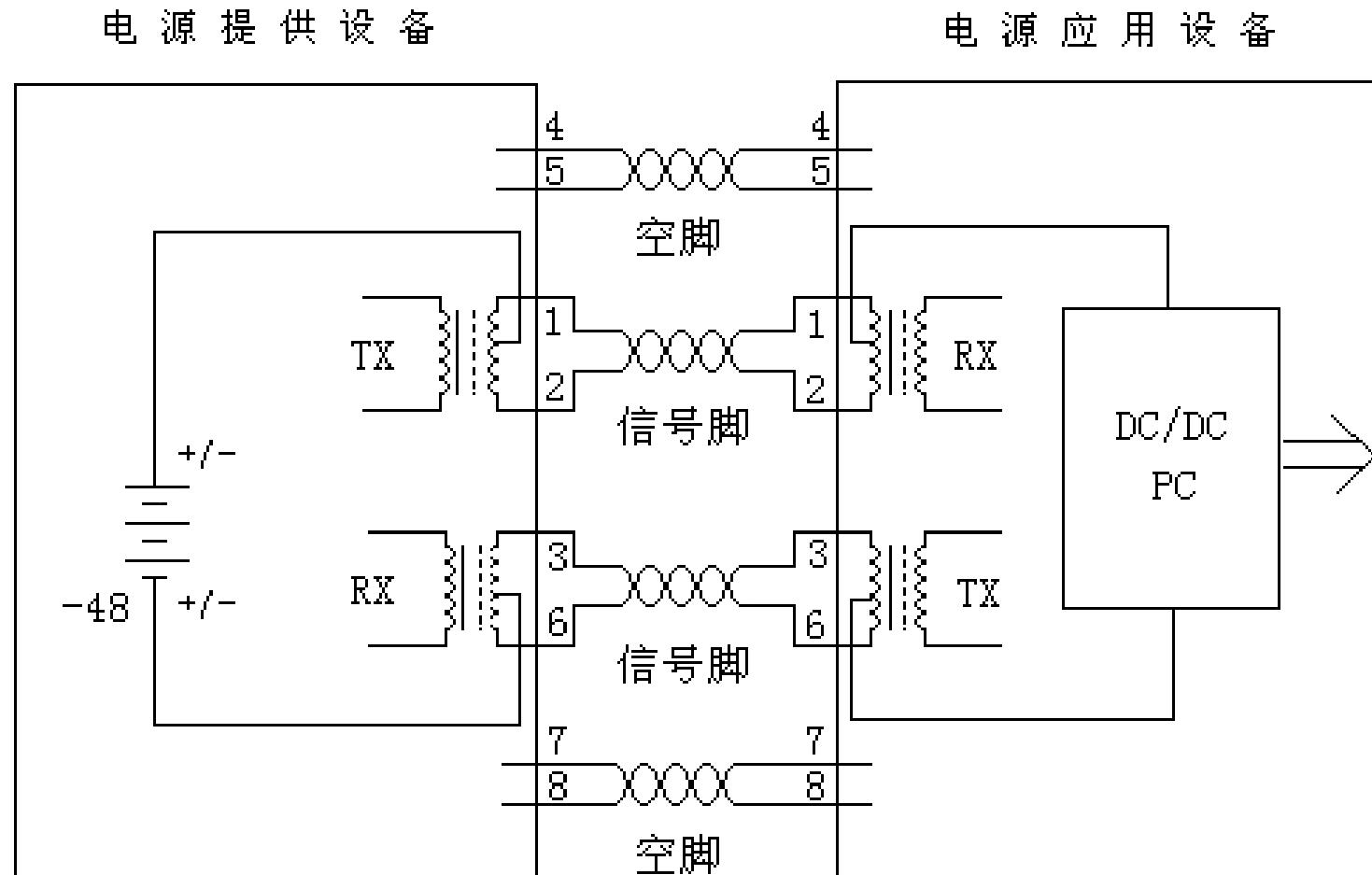
3、POE通过电缆供电的原理：

- 方法1：通过空闲脚供电





方法2：通过数据脚供电





一些重要的以太网标准

Recent Significant Ethernet Standards

IEEE standard	Ratification date	Explanation
802.3ac	1998	Frame size increased to 1522 bytes to allow tagging for virtual LANs and establishing data priority
802.3ae	2003	10-Gbit/s standard; multiple versions over fiber
802.3af	2003	Power over Ethernet (PoE); dc power distribution over the UTP medium to power wireless access points up to 15 W
802.3an	2006	10 Gbits/s over UTP
802.3ap	2008	1 and 10 Gbits/s over printed-circuit-board backplanes
802.3at/au	2009	PoE enhancements and isolation; power boost to the 30- to 45-W range
802.3av	2009	10-Gbit/s Ethernet passive optical network (EPON)
802.3ba	2010	40/100 Gbits/s over fiber





关于以太网供电的最新进展：

IEEE标准	时间	输出功率	应用	备注
802.3af (PoE)	2003	13W	IP电话,基本的安保摄像机	
802.3at (PoE+)	2009	25.5W	IP电话,安保摄像机	
凌力尔特专有 标准 (LTPoE++)	2011	90W	微微蜂窝基站、无线 接入点、LED标牌和 加热云台变焦(PTZ)室 外摄像机	支持4种不同的 功率等级(38.7W 、52.7W、70W 、90W)





CANopen协议简介与应用开发

要 点：

- ◆ CANopen协议简介；
- ◆ CANopen协议具体应用开发。





— CANopen协议简介

CANopen协议是建立在CAN基础上的通信网络技术，是欧洲CiA组织定义的几种CAN高层协议标准之一，因其开放性和低成本等优势，发布后不久就得到了广大厂商和用户的亲睐。在欧洲，在众多基于CAN的工业系统中，CANopen协议是事实上占据领导地位的标准。目前CANopen协议已经在运动控制、车辆工业、电机驱动、工程机械、船舶海运、楼宇自动化等行业得到广泛的应用。





1、协议特性

- ◆ 基于多种网络通信模式，适合对时间要求苛刻的通讯场合。
- ◆ 以对象字典的形式来定义标准设备描述文件，并通过SDO(服务数据对象)报文存取。
- ◆ 包含标准的设备监护服务信息（节点监视/心跳）、网络管理信息以及紧急信息对象。
- ◆ 支持同步、异步传输模式。
- ◆ 提供预定义连接集，简化系统配置工作。
- ◆ 在实际应用中，一般以主从式结构模式为主。





1.1 主节点主要的功能

- 控制从节点运行状态；
- 通过SDO对对象字典的参数进行读取和修改；
- 监视从节点的运行状况和是否发生错误(即进行节点保护)；
- 由从节点中获得相应的信息和运行状态；启动和终止SDO通讯；
- 发送SYNC报文；
- 提供分配特定标识符等网络管理的服务。





1.2 从节点功能

- 负责底层的网络通讯和控制任务，每个从节点只完成属于自己范围内的特定任务。
- 进行实时数据的传输，即PDO (过程数据对象)的通讯。
- 响应主节点发送的管理信息帧。
- 对自己负责的底层设备进行数据采集和控制。





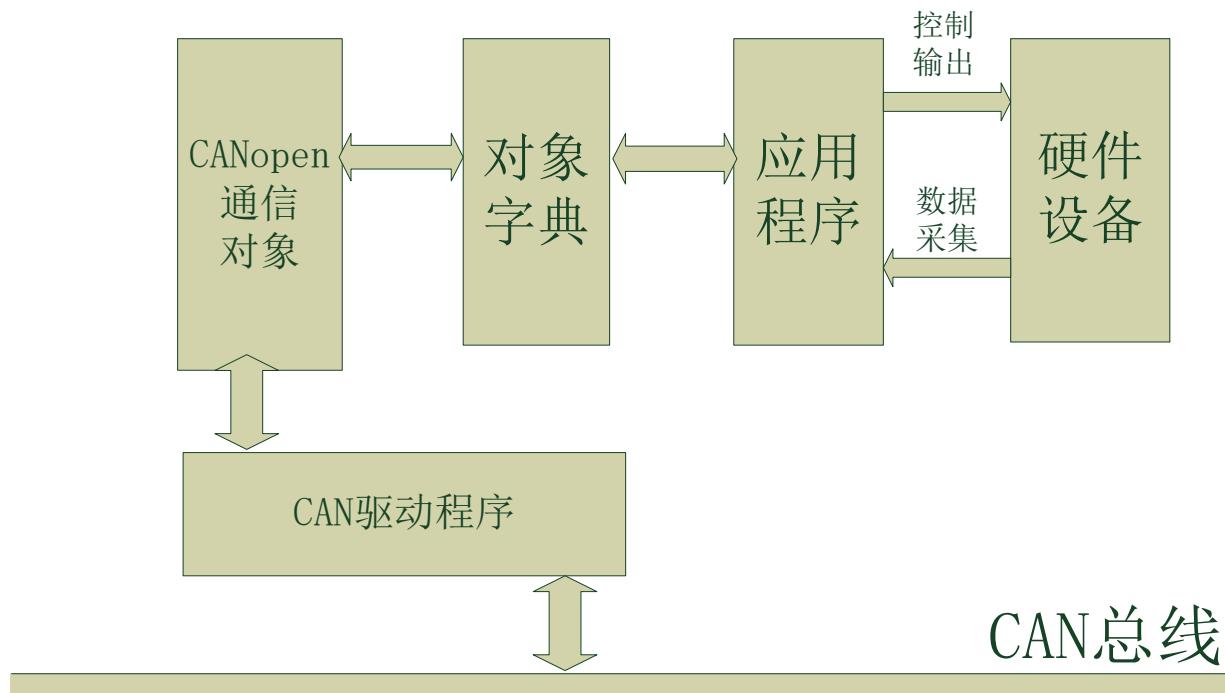
1.3 从节点架构

CAN驱动：CAN控制器初始化，报文收发处理。

通信对象：收发和解析各种报文对象，实现数据交互过程。

对象字典：存储节点所有信息，向通信对象和应用程序提供接口。

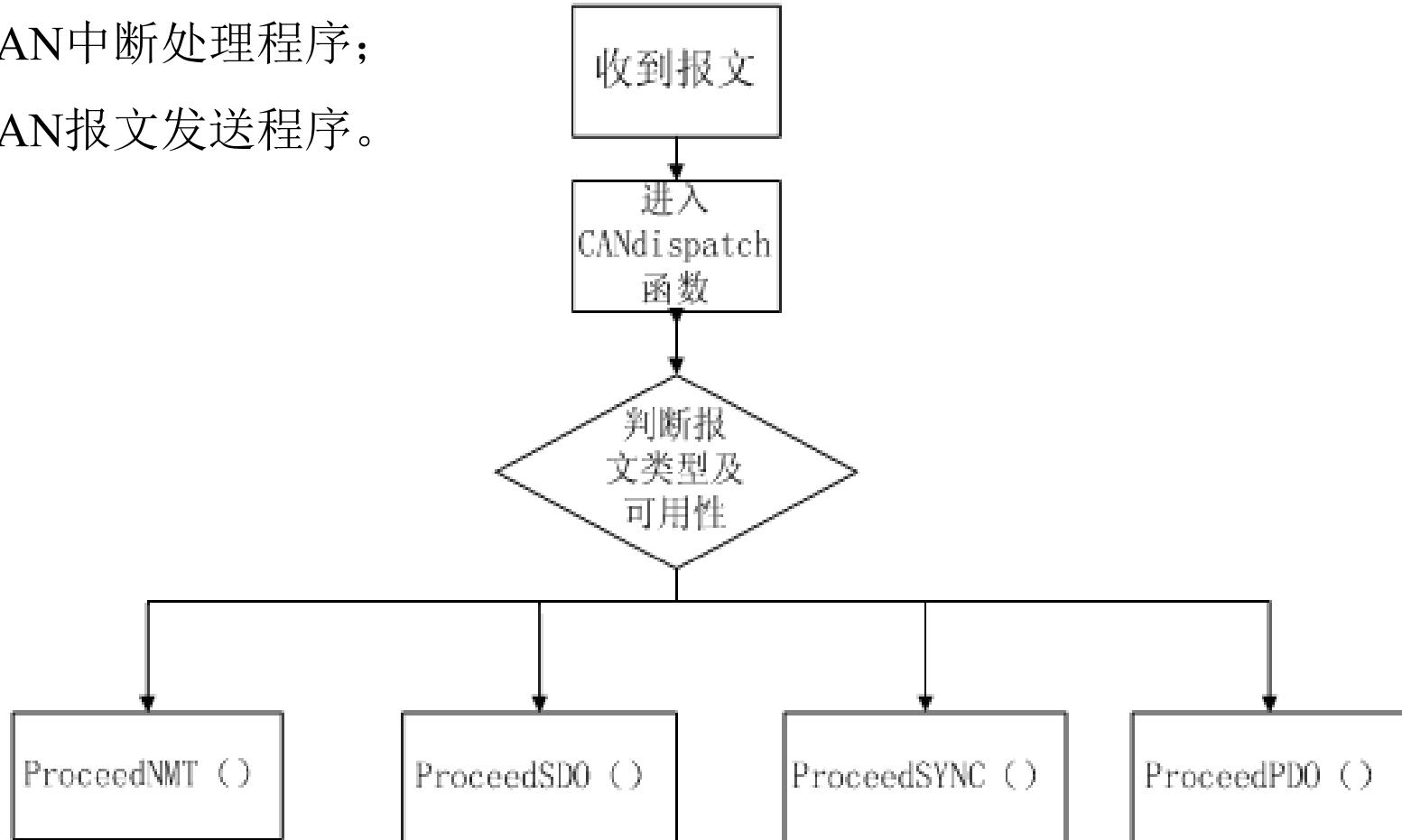
应用程序：实现节点的功能，如控制、数据采集等，用户自定义。





1、CAN驱动程序

- CAN控制器初始化程序；
- CAN中断处理程序；
- CAN报文发送程序。





2、对象字典

对象字典就是一个有序的对象组，每个对象采用一个16位的索引值来寻址，为了允许访问数据结构中的单个元素，同时也定义了一个8位的索引值，这个索引值通常被称为子索引。

每个CANopen设备都有一个对象字典，对象字典包含了描述这个设备和它的网络行为的所有参数，对象字典通常用电子数据文档（EDS）来记录这些参数。





索引	对象
0000	Not used
0001 - 001F	静态数据类型 (标准数据类型, 如 Boolean, Integer 16)
0020 - 003F	复杂数据类型 (预定义由简单类型组合成的结构如 PDOCommPar, SDOParParameter)
0040 - 005F	制造商规定的复杂数据类型
0060 - 007F	设备子协议规定的静态数据类型
0080 - 009F	设备子协议规定的复杂数据类型
00A0 - 0FFF	Reserved
1000 - 1FFF	通讯子协议区域 (如设备类型, 错误寄存器, 支持的 PDO 数量)
2000 - 5FFF	制造商特定子协议区域
6000 - 9FFF	标准的设备子协议区域 (例如 “DSP-401 I/O 模块设备子协议”: Read State 8 Input Lines 等)
A000 - FFFF	Reserved





- 通信子协议
 - SYNC报文参数设置（1005H、1006H、1007H）
 - SDO报文参数设置
 - 客户端SDO（1200H-127FH）
 - 服务器SDO（1280H-12FFH）
 - 接收PDO报文参数设置
 - PDO通信参数（1400H-15FFH）
 - PDO映射参数（1600H-17FFH）
 - 发送PDO报文参数设置
 - PDO通信参数（1800H-19FFH）
 - PDO映射参数（1A00H-1BFFH）
- 设备子协议
 - 与特定设备相关的参数，用于存储设备的相关参数。（6000H-9FFFH）





- 对象的结构

Index (hex)	Object (Symbolic Name)	Name	Type	Attrib.	M/O

Index: 指出该对象在对象字典中的位置

Object: 指明该对象的类型

Name: 对象的名称

Type: 指明该对象的数据类型

Attrib: 对象的属性值

M/O: 说明该对象是强制实现的还是可选的





- 从节点对象字典实现

由于从节点需要实现的对象字典项不是很多，也不复杂，所以可以直接采用二维数组的形式来实现。例如：

```
/* index 0x1400 : Receive PDO 1 Parameter. */
UNS8 ObjDict_highestSubIndex_obj1400 = 5; /* number of subindex - 1 */
UNS32 ObjDict_obj1400_COB_ID_used_by_PDO = 0x200; /* 512 */
UNS8 ObjDict_obj1400_Transmission_Type = 0x1; /* 1 */
UNS16 ObjDict_obj1400_Inhibit_Time = 0x0; /* 0 */
UNS8 ObjDict_obj1400_Compatibility_Entry = 0x0; /* 0 */
UNS16 ObjDict_obj1400_Event_Timer = 0x0; /* 0 */
subindex ObjDict_Index1400[] =
{
    { RO, uint8, sizeof(UNS8), (void*)&ObjDict_highestSubIndex_obj1400 },
    { RW, uint32, sizeof(UNS32), (void*)&ObjDict_obj1400_COB_ID_used_by_PDO },
    { RW, uint8, sizeof(UNS8), (void*)&ObjDict_obj1400_Transmission_Type },
    { RW, uint16, sizeof(UNS16), (void*)&ObjDict_obj1400_Inhibit_Time },
    { RW, uint8, sizeof(UNS8), (void*)&ObjDict_obj1400_Compatibility_Entry },
    { RW, uint16, sizeof(UNS16), (void*)&ObjDict_obj1400_Event_Timer }
};
```





- 对象字典实现

将所有对象集合起来，得到对象字典；

```
const indextable ObjDict_objdict[] =  
{  
    {  
        (subindex*)ObjDict_Index1000,sizeof(ObjDict_Index1000)/sizeof(ObjDic  
t_Index1000[0]), 0x1000}, {  
        (subindex*)ObjDict_Index1001,sizeof(ObjDict_Index1001)/sizeof(ObjDic  
t_Index1001[0]), 0x1001}, {  
        (subindex*)ObjDict_Index1003,sizeof(ObjDict_Index1003)/sizeof(ObjDic  
t_Index1003[0]), 0x1003},  
        .....  
};
```





- 扫描函数

根据对象字典的实现方式，相应的扫描函数实现如下：

```
const indextable * ObjDict_scanIndexOD (UNS16 wIndex, UNS32 * errorCode,
                                         ODCallback_t **callbacks)
{
    int i;
    *callbacks = NULL;
    switch(wIndex){
        case 0x1000: i = 0;break;
        case 0x1001: i = 1;break;
        case 0x1003: i = 2;*callbacks = ObjDict_Index1003_callbacks; break;
        case 0x1005: i = 3;*callbacks = ObjDict_Index1005_callbacks; break;
        case 0x1008: i = 4;break;
        case 0x1009: i = 5;break;
        case 0x100A: i = 6;break;
        case 0x1010: i = 7;break;
        case 0x1011: i = 8;break;
        .....
    }
}
```





- 存取函数

由getODentry（）和setODentry（）函数来实现，思路如下：

- 通过扫描函数定位到指定对象的入口；
- 检查对应对象的访问权限，若越权返回错误码；
- 若权限正确，允许访问，根据调用的函数，将指定内容copy进指定对象，或将指定对象里的内容copy到目标地址（注意检查是否越界）；
- 返回。





3、报文对象

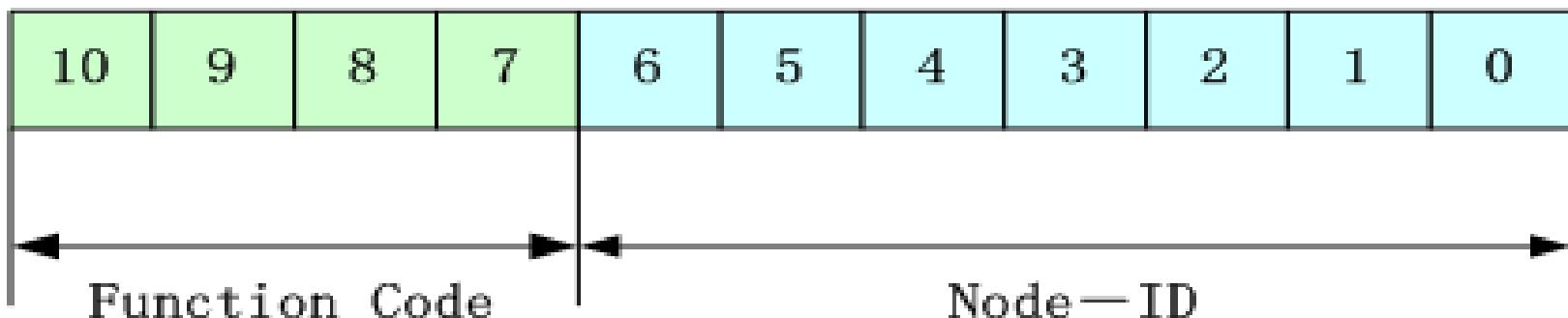
- 报文格式

基于CAN总线的报文格式

11位标识符（或29位）+1-8byte数据

- 标识符格式

Node-ID由系统集成商定义，例如通过设备上的拨码开关设置。Node-ID范围是1~127（0不允许被使用）。





CANopen协议定义了四种报文对象，分别是：

- 网络管理报文对象NMT
- 服务数据对象SDO
- 过程数据对象PDO
- 预定义报文或特殊功能对象





1.4 NMT

管理报文（Network Management）主要负责层管理、网络管理和ID分配服务，例如，初始化、配置和网络管理（其中包括节点保护）。

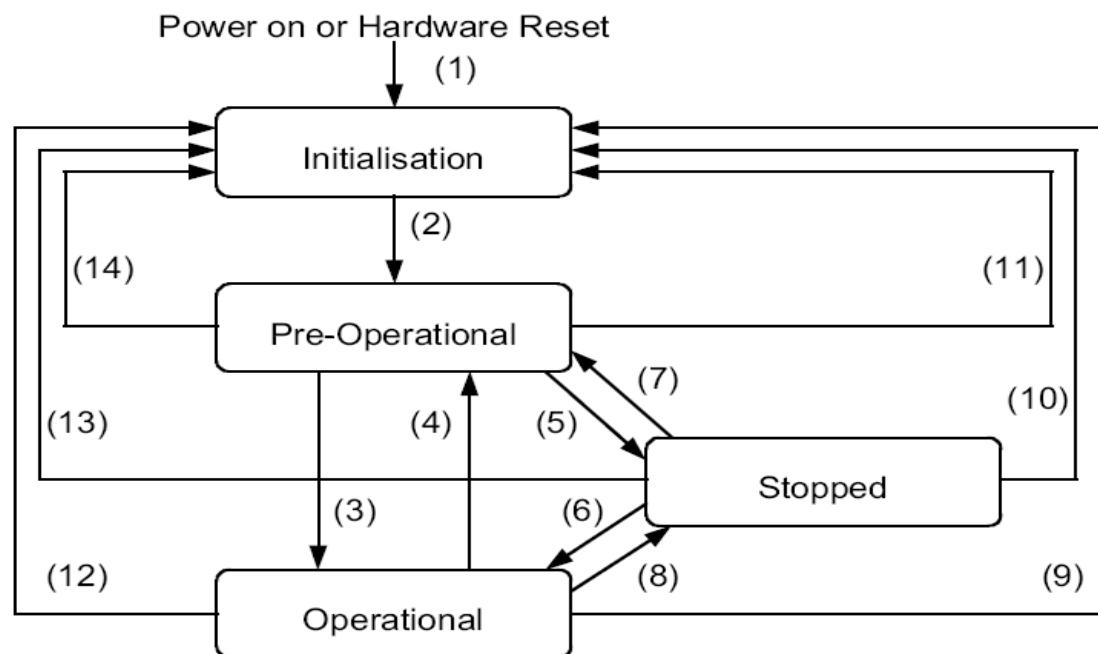
网络管理中，同一个网络中只允许有一个主节点、一个或多个从节点，并遵循主从模式。



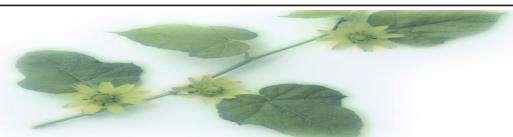


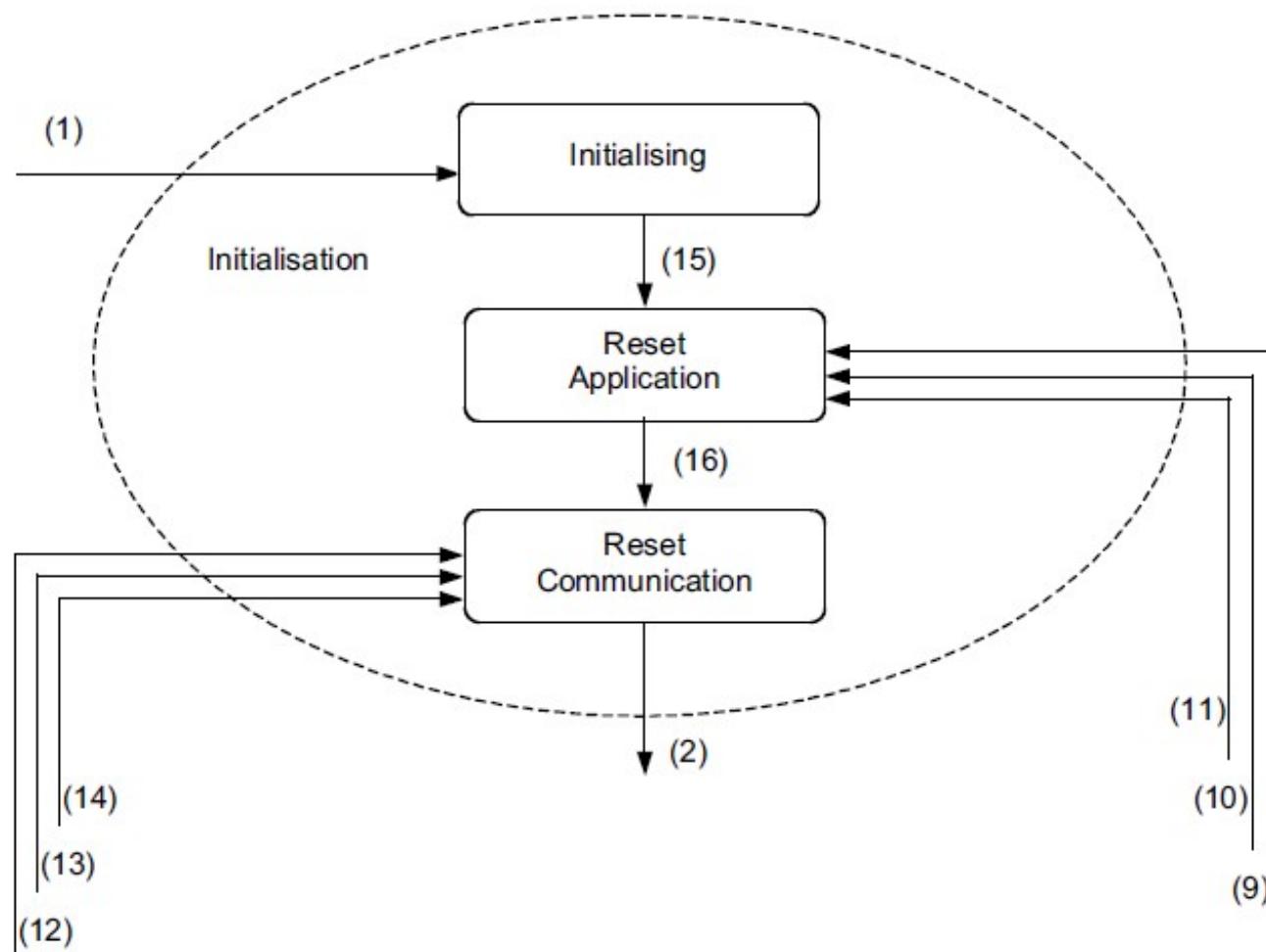
从节点内必须实现一个状态机，其状态转换由主节点控制，不同的状态对应不同的报文对象可用性，目的是使主节点可以控制从节点在总线上的通信行为。

NMT——状态机



(1)	At Power on the initialisation state is entered autonomously
(2)	Initialisation finished - enter PRE-OPERATIONAL automatically
(3),(6)	Start_Remote_Node indication
(4),(7)	Enter_PRE-OPERATIONAL_State indication
(5),(8)	Stop_Remote_Node indication
(9),(10),(11)	Reset_Node indication
(12),(13),(14)	Reset_Communication indication





- **Initialisation:** 从节点上电后自动进入该状态，主要完成节点的硬件初始化，通信参数和应用参数的重置，成功后自动进入Pre-Operational状态。





- Pre-Operational: 在此状态中，从节点SDO被允许，主节点通过SDO完成从节点通信参数的设置，如从节点的PDO参数映射设置。主节点发送start_remote_node命令使从节点进入Operational状态。
- Operational: 在此状态中，从节点完成自己的正常工作，采集数据，控制设备，与主节点通信，所有报文对象类型都被允许。
- Stopped: 当从节点发生错误时，或主节点检测到从节点出错了，通过发送stop_remote_node命令使从节点进入此状态，除了接受NMT报文，其他报文对象都被禁止，以此消除对总线的不良影响。若主节点检测到错误节点恢复正常，仍可通过NMT报文让其正常运行。





只有NMT-Master节点能够传送NMT 状态控制报文（通常都是主节点）。所有从设备必须支持NMT模块控制服务。NMT 状态控制消息不需要应答。NMT消息格式如

NMT-Master → NMT-Slave(s)

COB-ID	Byte 0	Byte 1
0x000	CS	Node-ID

命令字	NMT 服务
1	Start Remote Node
2	Stop Remote Node
128	Enter Pre-operational State
129	Reset Node
130	Reset Communication

右图：第一个字节表示从节点收到命令后需要进入的状态，第二个字节是接收命令的从节点ID，若为0，此时所有节点都接收该命令





- 实现

- 定义一个状态数组
 - 包含所有的报文类型
- 状态改变函数
 - 原子操作
 - 状态报文可用性设置
 - 状态转换

```
typedef struct
{
    INTEGER8 csBoot_Up;
    INTEGER8 csSDO;
    INTEGER8 csEmergency;
    INTEGER8 csSYNC;
    INTEGER8 csHeartbeat;
    INTEGER8 csPDO;
    INTEGER8 csLSS;
} s_state_communication;

case Pre_operational:
{
    s_state_communication newCommunicationState = {0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1};
    d->nodeState = Pre_operational;
    switchCommunicationState(d, &newCommunicationState);
    if (!(*d->iAm_a_slave))
    {
        masterSendNMTstateChange (d, 0, NMT_Reset_Node);
    }
    (*d->preOperational) (d);
}
break;

void switchCommunicationState(CO_Data* d, s_state_communication *newCommunicationState)
{
#ifdef CO_ENABLE_LSS
    StartOrStop(csLSS, startLSS(d), stopLSS(d));
#endif
    StartOrStop(csSDO, None, resetSDO(d));
    StartOrStop(csSYNC, startSYNC(d), stopSYNC(d));
    StartOrStop(csHeartbeat, heartbeatInit(d), heartbeatStop(d));
    StartOrStop(csEmergency, emergencyInit(d), emergencyStop(d));
    StartOrStop(csPDO, PDOInit(d), PDOStop(d));
    StartOrStop(csBoot_Up, None, slaveSendBootUp(d));
}
```





- 实现（续）

状态转换最终还需要报文的解析来实现报文可用性的控制。

```
canDispatch()
```

```
{
```

```
    UNS16 cob_id = UNS16_LE(m->cob_id);
```

```
    switch(cob_id >> 7)
```

```
{
```

检查COB_ID对应的报文对象在目前节点状态下是否可用；

若可用，则进入相应的报文处理函数； 不可用则跳出；

```
}
```

```
}
```





- NMT节点保护

通过节点保护服务，NMT主节点可以检查每个节点的当前状态，当这些节点没有数据传送时这种服务尤其有意义。

数据部分包括一个触发位（bit7），触发位必须在每次节点保护应答中交替置“0”或者“1”。触发位在第一次节点保护请求时置为“0”。位0到位6（bits0~6）表示节点状态，可为下表中的数值。

NMT-Master → NMT-Slave

COB-ID
0x700+Node_ID

NMT-Master ← NMT-Slave

COB-ID	Byte0
0x700 + Node_ID	Bit 7 : toggle Bit6-0 : 状态

Value	状态
0	Initialising
1	Disconnected *
2	Connecting *
3	Preparing *
4	Stopped
5	Operational
127	Pre-operational





- NMT心跳报文

从节点可被配置为产生周期性的被称作心跳报文的报文。

当一个Heartbeat节点启动后它的Bootup报文是其第一个心跳报文。

Heartbeat消费者通常是主节点，它为每个Heartbeat节点设定一个超时值，当超时发生时采取相应动作。

一个节点不能够同时支持Node Guarding和Heartbeat协议！

状态	意义
0	Boot-up
4	Stopped
5	Operational
127	Pre-operational

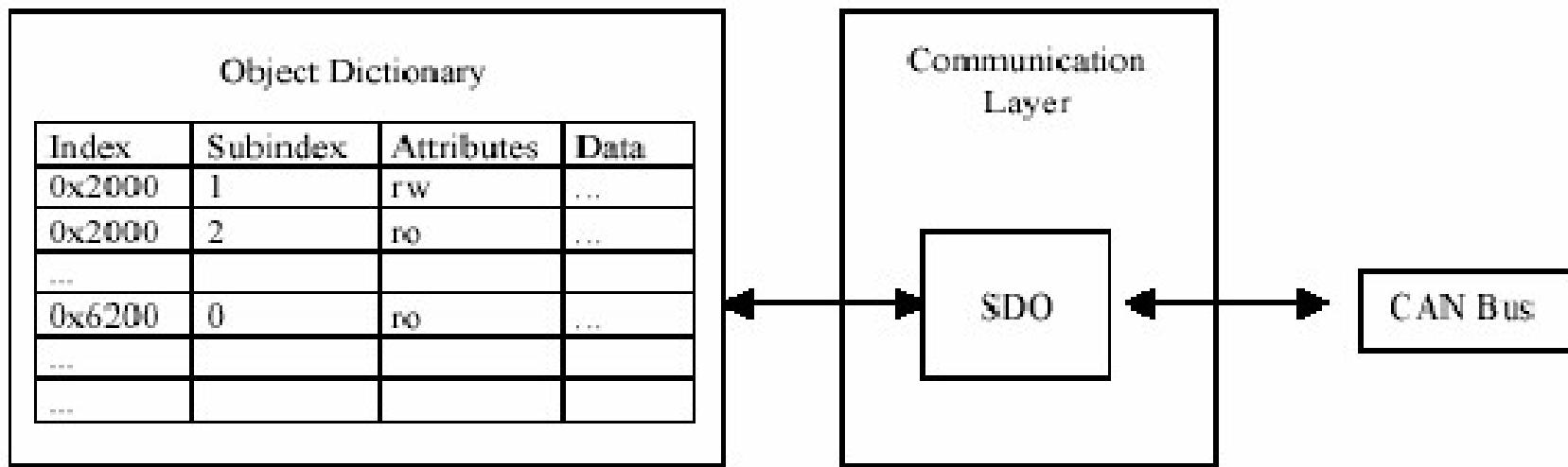
Heartbeat Producer → Consumer(s)	
COB-ID	Byte 0
0x700 + Node_ID	状态





1.5 SDO

SDO是服务数据对象接口(Service Data Object)的缩写，顾名思义提供服务数据的访问接口，所谓服务数据指一些实时性要求不高的数据，一般是指节点配置参数，因此，SDO一般用来配置和获得节点的配置参数，充当OD对外的接口，其优先级只比心跳(Heartbeat)高。





SDO基于CS模式，所有报文都需要确认。通常从节点作为SDO服务器，主节点作为客户端。客户端通过索引和子索引，访问服务器上的任意对象字典，SDO的上传与下载，是从server的角度去理解的，

上传：client对server的OD进行读操作；

下载：client对server的OD进行写操作。





- 传送机制：
 - 加速传送：最多传送4Byte数据
 - 分段传送：传送数据大于4Byte
- 报文基本结构：

Client → Server / Server → Client

Byte 0	Byte 1-2	Byte 3	Byte 4-7
SDO Command Specifier	对象索引	对象子索引	**

Client → Server / Server → Client

Byte 0	Byte 1-70
SDO 命令字	最大 7 字节数据 (segmented transfer)





- SDO 命令字包含如下信息：
 - 下载/上传 (Download / Upload)
 - 请求/应答 (Request /Response)
 - 分段/加速传送 (Segmented / Expedited)
 - CAN帧数据字节长度
 - 用于后续每个分段的交替清零和置位的触发位

SDO中实现了5个请求/应答协议：启动域下载，域分段下载，启动域上传，域分段上传和域传送中止。





启动域下载 (Initiate Domain Download)								
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Client→	0	0	1	-	n	e	s	
←Server	0	1	1	-	-	-	-	-

说明：

- n：如果 e=1，且 s=1，则有效，否则为 0；表示数据部分中无意义数据的字节数（字节 8-n 到 7 数据无意义）。
- e：0 = 正常传送，1 = 加速传送。
- s：是否指明数据长度，0 = 数据长度未指明，1 = 数据长度指明。
- e=0, s=0：由 CiA 保留。
- e=0, s=1：数据字节为字节计数器，byte 4 是数据低位部分 (LSB)，byte 7 是数据高位部分 (MSB)。
- e=1：数据字节为将要下载 (download) 的数据。

域分段下载 (Download Domain Segment)								
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Client→	0	0	0	t	n			c
←Server	0	0	1	t	-	-	-	-

说明：

- n：无意义的数据字节数。如果没有指明段长度，则为 0。
- c：0 = 有后续分段需要 download，1 = 最后一个段。
- t：触发位，后续每个分段交替清零和置位（第一次传送为 0，等效于 request/response）。

命
令
字
细
节(续
节
(
续
))

启动域上传 (Initiate Domain Upload)								
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Client→	0	1	0	-	-	-	-	-
←Server	0	1	0	-	n	e	s	

说明: n, e, s: 与启动域下载相同。

域分段上传 (Upload Domain Segment)								
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Client→	0	1	1	t	-	-	-	-
←Server	0	0	0	t	n	c		

说明: n, c, t: 与域分段下载相同。

SDO 客户或服务器通过发出如下格式的报文来中止 SDO 传送:

域传送中止 (Abort Domain Transfer)								
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
C→/←S	1	0	0	-	-	-	-	-





- 实现方案——SDO线程

借鉴操作系统多线程机制的一套SDO服务处理方法，每个SDO线程表示的是与网络上其他节点建立的一个SDO链接，相当于在两个节点间建立一个SDO通讯路径，其中每个节点都拥有一个对这个路径的描述，在通讯过程中双方通过这个路径来交流，SDO通讯结束则释放该线程，每个节点可以同时与多个节点建立多个这样的路径且互不影响，就如同操作系统的多线程机制一样。





一次SDO访问是这样完成的：

- SDO发起节点(client)收集足够的信息，建立一个SDO线程，将收集的信息以特定格式放入参数表，形成一帧SDO请求，发送出去；
- server收到这帧请求，为它建立一个SDO线程，将这帧请求解析以获得足够信息来初始化这个SDO线程对应的参数表；
- 程序按照参数表的描述去执行server的功能收集数据，然后将收集到的数据形成SDO应答帧返回给client；
- 如果此次请求结束则释放该线程，否则等待下一帧请求到来； client在收到应答后判断该请求是否还有后续请求，无则释放此SDO线程；
- 如果在这个过程中，server 和client所在节点有收到其他节点的SDO请求或需要通过SDO请求其它节点，则新建SDO线程来实现，跟上面的步骤一样。





1.6 PDO

PDO(Process Data Object)被用来传输实时数据，数据从一个生产者传到一个或多个消费者，采用无确认的方式，数据长度被限制为1~8字节。PDO通讯没有协议规定。PDO数据内容只由它的映射参数对象定义，假定生产者和消费者知道这个PDO的数据内容。





- PDO通讯参数：包含哪个COB-ID将被PDO使用， 传输类型， 禁止时间和定时器周期。

Index	Sub-Index	Description	Data Type
1XXXh	0h	number of entries	Unsigned8
	1h	COB-ID	Unsigned32
	2h	transmission type	Unsigned8
	3h	inhibit time	Unsigned16
	4h	reserved	Unsigned8
	5h	event timer	Unsigned16





- PDO通讯参数
 - PDO可以指定禁止时间，避免由于高优先级信息的数据量太大，始终占据总线，而使其它优先级较低的数据无力竞争总线的问题。禁止时间单位100us。
 - PDO可以指定一个事件定时周期，当超过定时时间后，一个PDO传输可以被触发（不需要触发位）。事件定时周期由16位无符号整数定义，单位1ms。





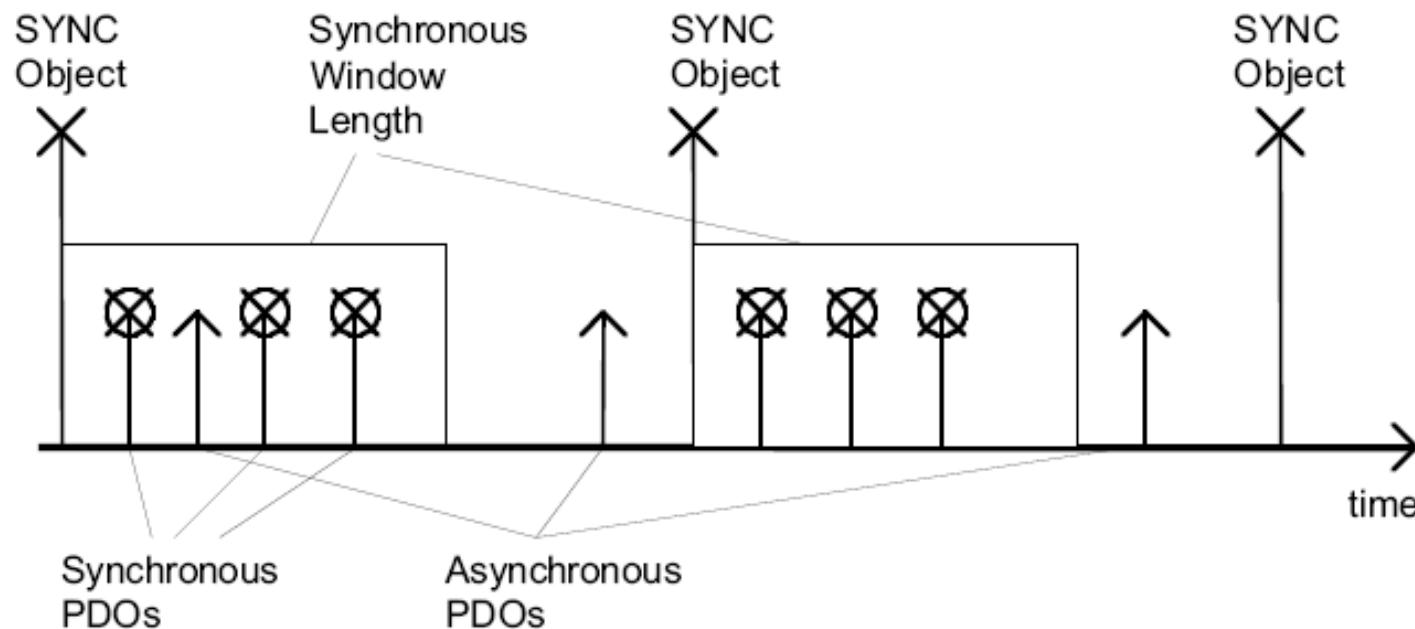
- PDO传输模式
 - 异步触发模式
 - 远程索取模式
 - 同步触发模式
 - 同步周期模式
 - 同步非周期模式
- PDO的同步传输模式

同步传输（通过接收SYNC对象实现同步），同步传输又可分为非周期和周期传输。非周期传输是由远程帧预触发或者由设备子协议中规定的对象特定事件预触发传送。周期传输则是通过接收同步对象（SYNC）来实现。





每个SYNC后，有一段同步时间窗口，同步PDO在窗口内发送。可设置同步PDO的发送速率，如传输类型为0，表示PDO仅在有事件发生SYNC前，在时间窗口内发送。若为N(1-240)，传送在每N个SYNC消息后触发。





- PDO的异步传输模式

其触发方式可有两种，第一种是通过发送与PDO的COB-ID相同的远程帧来触发PDO的发送（传输类型为253），第二种是由设备子协议中规定的对象特定事件来触发（例如，定时传输，数据变化传输等，传输类型为255）。





- PDO映射参数：包含一个对象字典中对象的列表，这些对象映射到PDO里，包括它们的数据长度。生产者和消费者必须知道这个映射，以解释PDO内容。

PDO Mapping

Object Dictionary		
xxxxh	xxh	Appl.Object A
yyyyh	yyh	Appl.Object B
zzzh	yyh	Appl.Object C

PDO_1 Mapping			
0	3		
1	yyyyh	yyh	8
2	zzzh	zzh	16
3	xxxxh	xxh	8

PDO_1 Appl.Obj.B Application Object C Appl.Obj.A





举个例子，一个PDO的映射参数对象（1A01）：

对象 0x1A01：第二个 Transmit-PDO 映射		
子索引	值	意义
0	2	2 个对象映射到 PDO 中
1	0x60000208	对象 0x6000，子索引 0x02，由 8 位组成
2	0x64010110	对象 0x6401，子索引 0x01，由 16 位组成

则这个PDO报文的内容是：

COB-ID	Byte 0	Byte 1	Byte 2
0x280+Node_ID	8 位数据量输入	16 位模拟量输入 (低 8 位)	16 位模块量输入 (高 8 位)

改变1A01里面的内容，就可以改变该PDO报文的数据内容。





- 实现

sendPDOevent函数：

- 用于辅助proceedPDO函数；
- 循环更新每个PDO的当前trans_type_para；
- 若当前传输类型等于原传输类型，调用buildPDO，发送PDO；
- 若传参类型为TRANS_RTR_SYNC,则buildPDO,为远程请求的应答做好准备，设置当前状态为RTR_SYNC_READY；
- 若当前传参类型为TRANS_SYNC_ACYCLIC或EVENT相关且未被禁止，则buildPDO，为事件触发做好准备；
- 若不是同步事件，且事件周期和禁止时间不为0，则设置两个定时器，在计时器到达前将PDO状态设为禁止。





- 实现（续）

proceed PDO函数：

- 接收到PDO报文，有两种类型：
- 若RTR为0，表示普通PDO报文，对从节点就是主节点发出的控制命令，需要从节点来执行。对普通PDO报文的处理：找到对应COB-ID的PDO映射参数，并把数据写入相应的对象中，等待应用来执行；
- 若RTR为1，表示远程请求，根据传输类型不同作相应处理；
- 若传输类型为TRANS_RTR，则buildPDO，发送应答PDO；
- 若传输类型为TRANS_RTR_SYNC，且当前状态为RTR_SYNC_READY，则直接发送PDO；
- 若传输类型为EVENT相关，则调用PDOEventTimerAlarm函数等待定时器到期，自动触发PDO发送。





1.7 特殊功能对象

预定义报文或特殊功能对象为CANopen设备提供特定的功能，方便CANopen主站对从站管理。在CANopen协议中，已经为特殊的功能预定义了COB-ID，其主要有以下几种特殊报文：

- 紧急事件对象（Emergency），当设备内部发生错误时触发该对象，即发送设备内部错误代码；
- 时间标记对象（Time Stamp），为各个节点提供公共的时间参考；





- 节点/寿命保护（Node/Life Guarding），主节点可通过节点保护方式获取从节点的状态。从节点可通过寿命保护方式获取主节点的状态；
- 启动报文对象（Boot-up），从节点初始化完成后向网络中发送该对象，并进入到Pre-Operational状态。

NMT-Master ← NMT-Slave

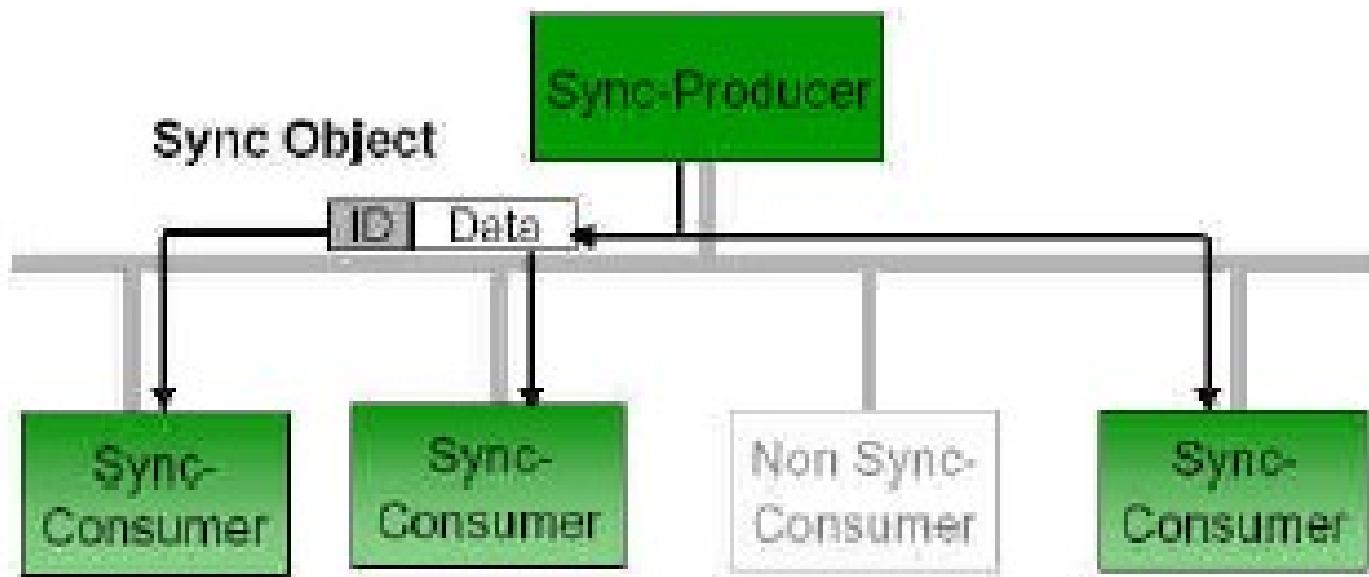
COB-ID	Byte 0
0x700 + Node_ID	0





特殊功能对象——SYNC

同步（SYNC），该报文对象基于生产者/消费者模式，由SYNC生产者周期性的广播，作为网络基本时钟，实现整个网络的同步传输，每个节点都以该同步报文作为同步PDO触发参数，因此该同步报文的COB-ID具有比较高的优先级以及最短的传输时间。





- 描述(对象字典)
 - 1005H: 存放SYNC的COB-ID
 - 1006H: 存放SYNC的通信周期
 - 1007H: 存放SYNC时间窗口
- 实现
 - sendSYNC: 由定时器中断来调用, 定时值就是通信周期;
– proceedSYNC: 检查节点是否在Operation状态, 调用sendPDOevent函数来处理同步PDO;





预定义连接集

由于动态分配CAN-ID将占用较多的系统资源，对于一些相对简单的CANopen网络，动态分配标识符也没有太大的必要性，为减少简单网络的组态工作量，CANopen定义了强制性的缺省标识符（CAN-ID）分配表。这些标志符在预操作状态下可用，通过动态分配还可修改他们。

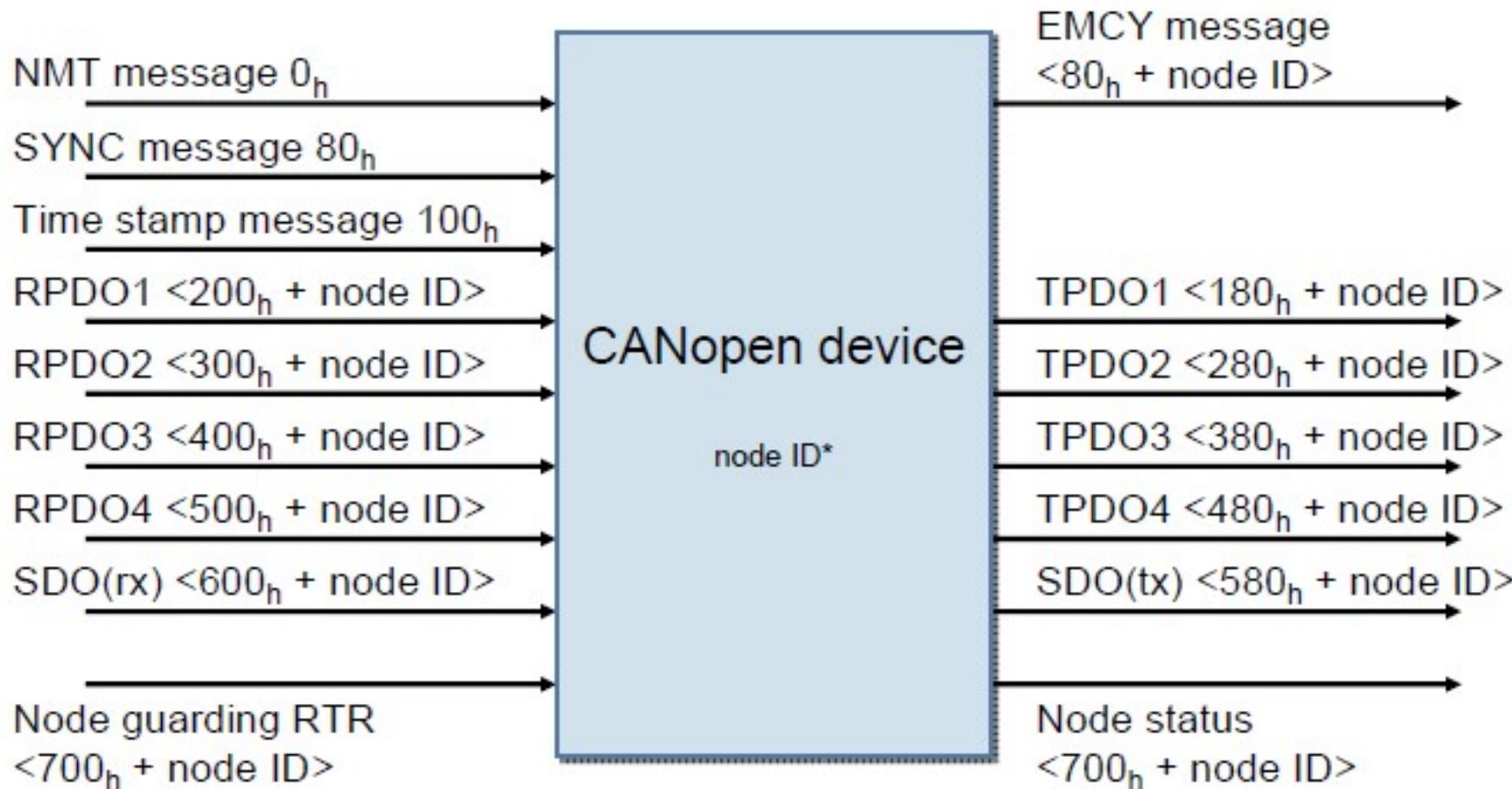
预定义连接集定义了4个接收PDO（Receive-PDO），4个发送PDO（Transmit-PDO），1个SDO（占用2个CAN-ID），1个紧急对象和1个节点错误控制（Node-Error-Control）ID。也支持不需确认的NMT-Module-Control服务，SYNC和Time Stamp对象的广播。





CANopen 预定义主/从连接集的广播对象			
对象	功能码 (ID-bits 10-7)	COB-ID	通讯参数在 OD 中的索引
NMT Module Control	0000	000H	-
SYNC	0001	080H	1005H, 1006H, 1007H
TIME SSTAMP	0010	100H	1012H, 1013H

CANopen 主/从连接集的对等对象			
对象	功能码 功能码 (ID-bits 10-7)	COB-ID	通讯参数在 OD 中的索引
紧急	0001	081H-0FFH	1024H, 1015H
PDO1(发送)	0011	181H-1FFH	1800H
PDO1(接收)	0100	201H-27FH	1400H
PDO2(发送)	0101	281H-2FFH	1801H
PDO2(接收)	0110	301H-37FH	1401H
PDO3(发送)	0111	381H-3FFH	1802H
PDO3(接收)	1000	401H-47FH	1402H
PDO4(发送)	1001	481H-4FFH	1803H
PDO4(接收)	1010	501H-57FH	1403H
SDO(发送/服务器)	1011	581H-5FFH	1200H
SDO(接收/客户)	1100	601H-67FH	1200H
NMT Error Control	1110	701H-77FH	1016H-1017H



* node ID 0 is reserved





CANopen支持多种类型设备模块，不同的设备子协议(DS 4XX)，对于预定义连接集中的PDO定义是不同的。

例如CiA DS 401作为I/O模块的设备子协议，详细地规定了各个PDO的通信参数和数据映射参数。

四组PDO中一组用于DI/DO，其余三组用于AI/AO，若模块只实现其中的部分功能，则其他功能部分可以不使用。





- DS 401
 - RPDO1: 映射到6200H的8个8bit array (DO)
 - 对应最大64个DI/DO (Boolean)
 - RPDO2: 映射到6411H的前4个16bit array (AO)
 - TPDO2: 映射到6401H的前4个16bit array (AI)
 - RPDO3: 映射到6411H的中4个16bit array (AO)
 - TPDO3: 映射到6401H的中4个16bit array (AI)
 - RPDO4: 映射到6411H的后4个16bit array (AO)
 - TPDO4: 映射到6401H的后4个16bit array (AI)
 - Integer类型

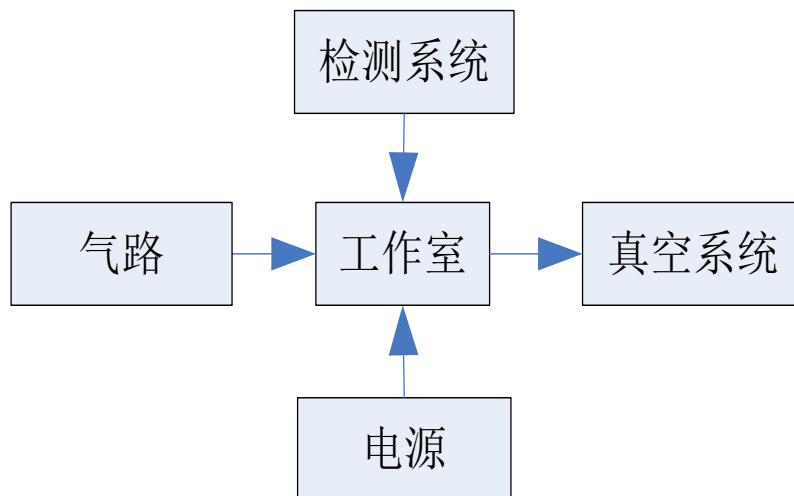


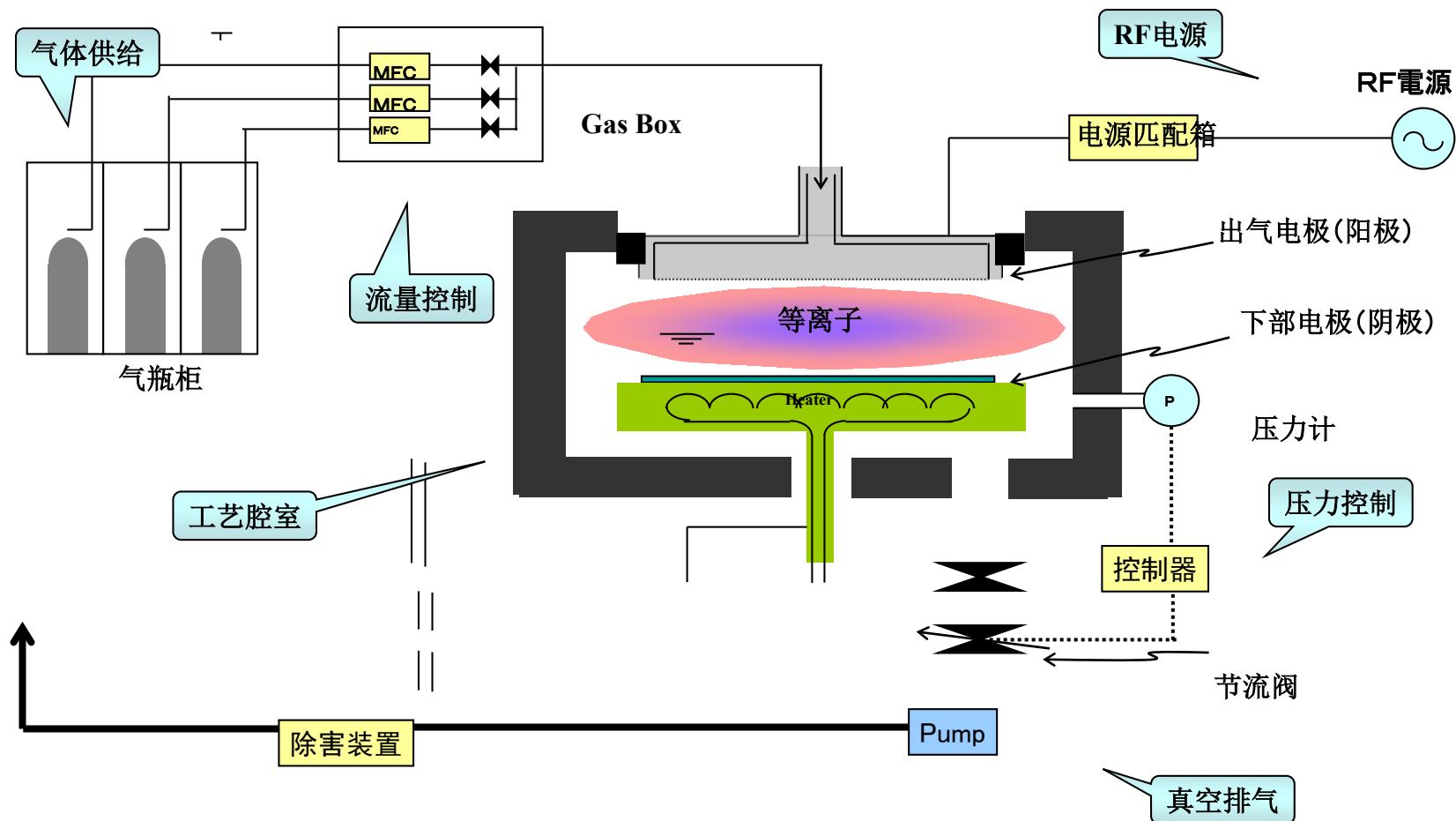


二 CANopen协议具体应用开发

2. 1 应用对象

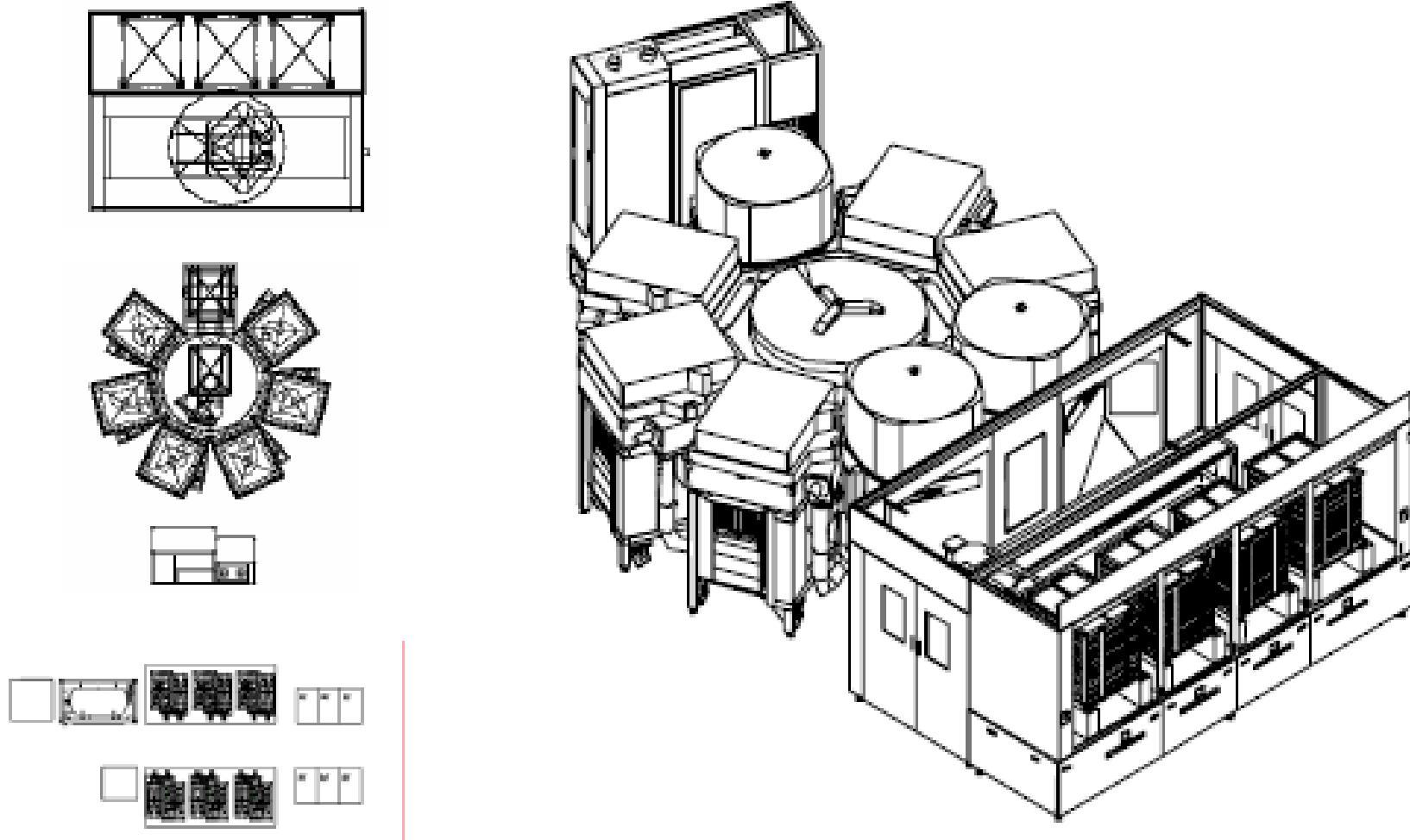
低温等离子体设备系统。





PECVD设备系统概念图



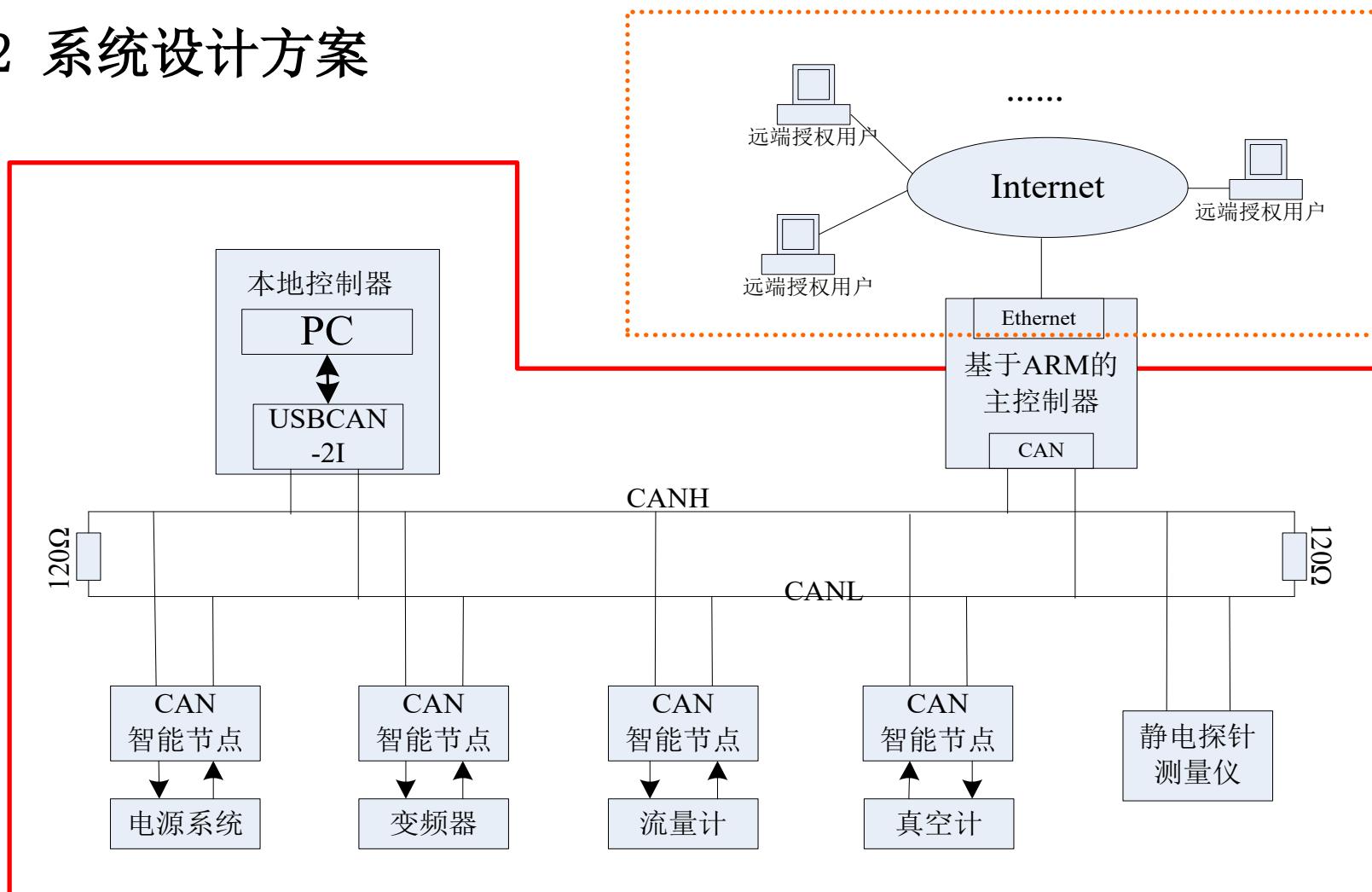


PECVD设备组成结构示意图



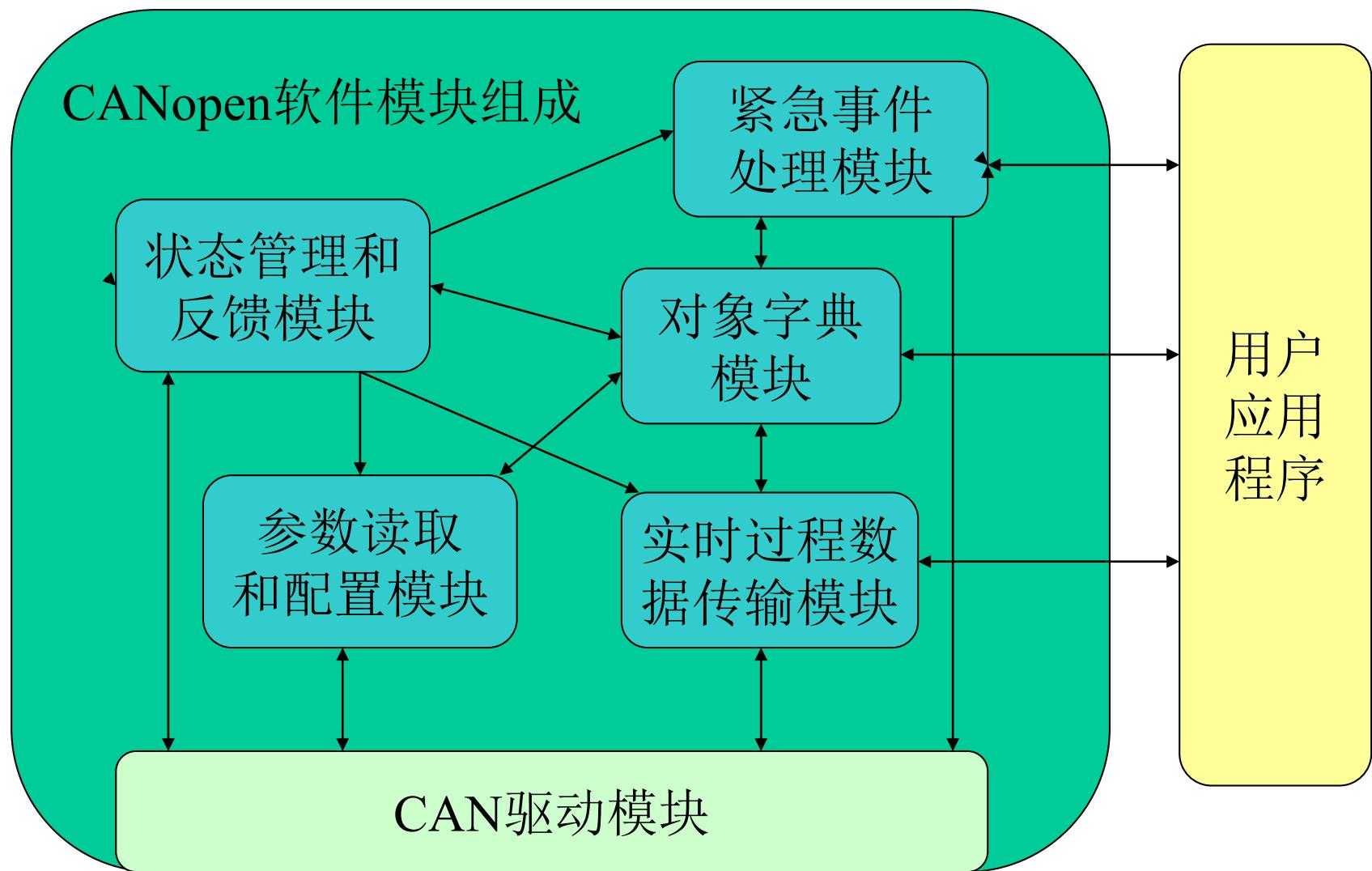


2.2 系统设计方案



基于CAN总线的低温等离子体设备系统设计方案





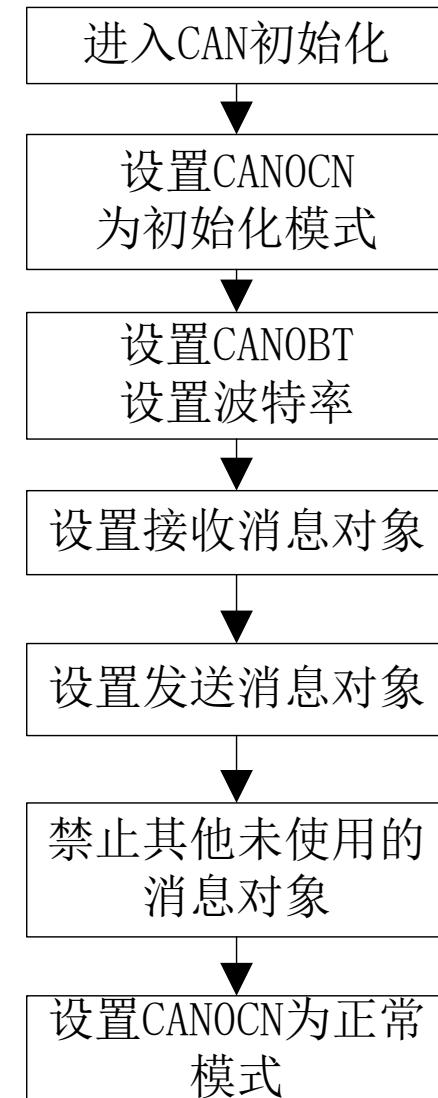
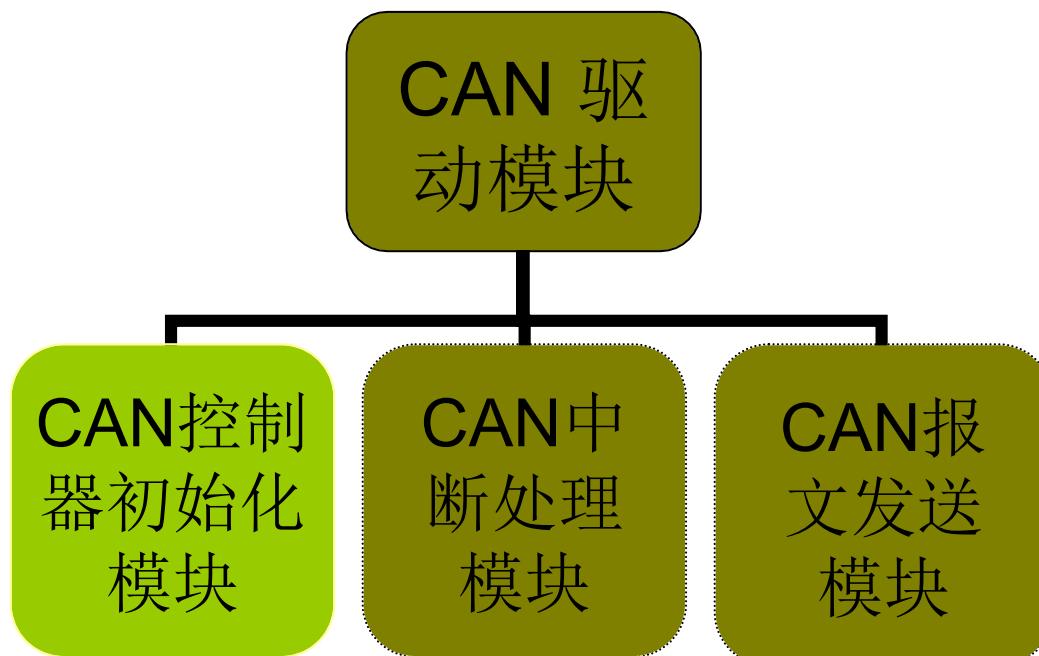
系统软件总体框架





2.3 软件功能模块设计

2.3.1 CAN驱动程序





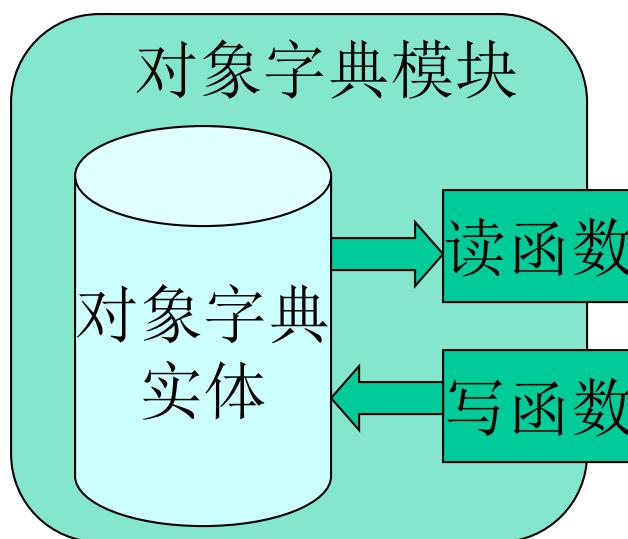
2.3.2 对象字典

对象字典是CANopen的核心概念，它存储了节点的所有信息。是一个有序的对象组，每个对象采用一个16位的索引值来寻址，同时定义了一个8位的子索引用于访问数据结构中的单个元素。

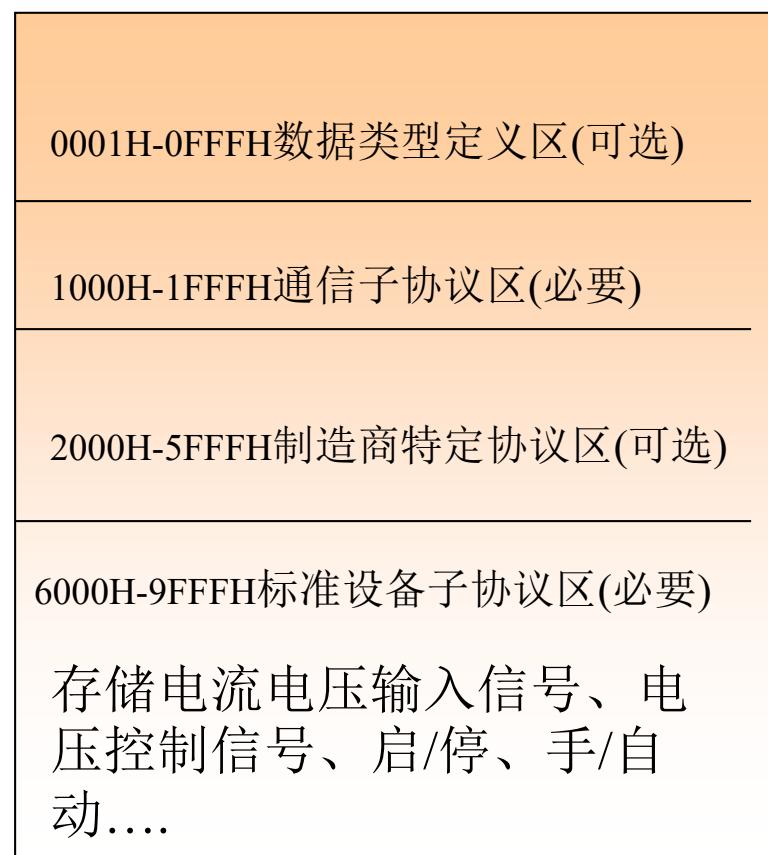




- 对象字典功能框图



- 对象字典实体结构

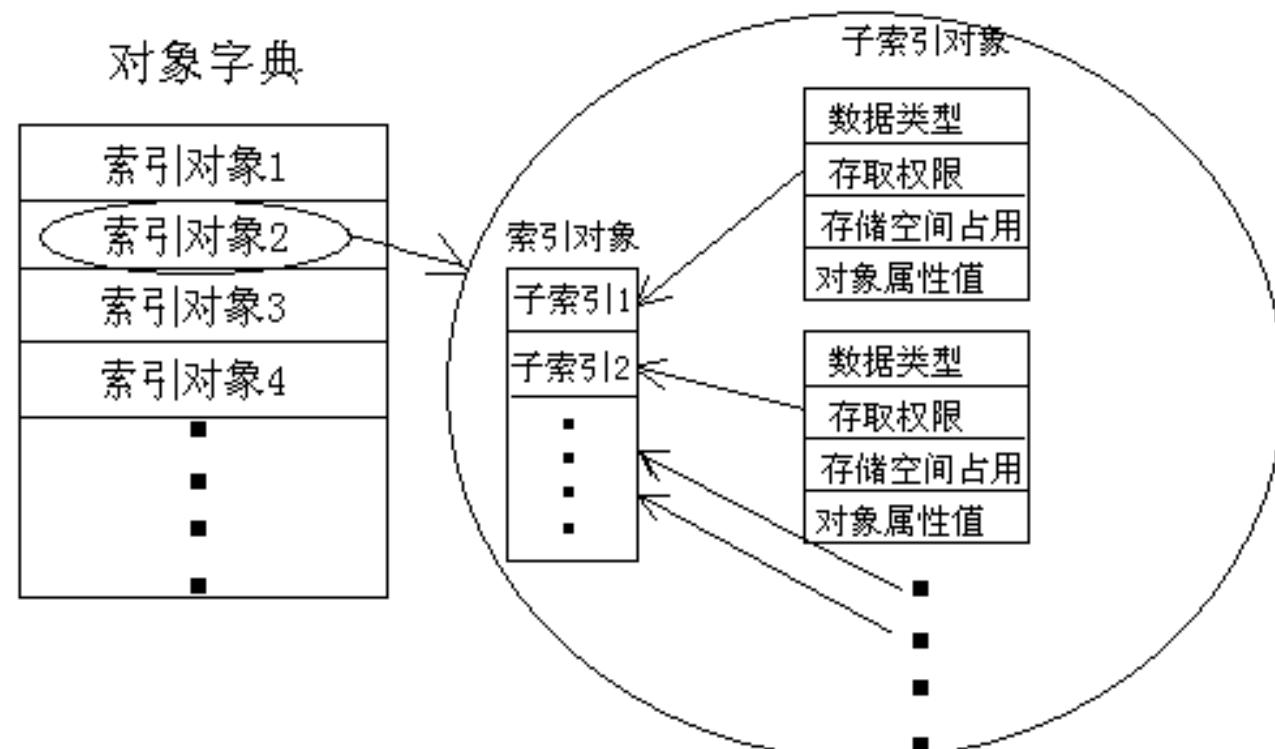




- 实现方案

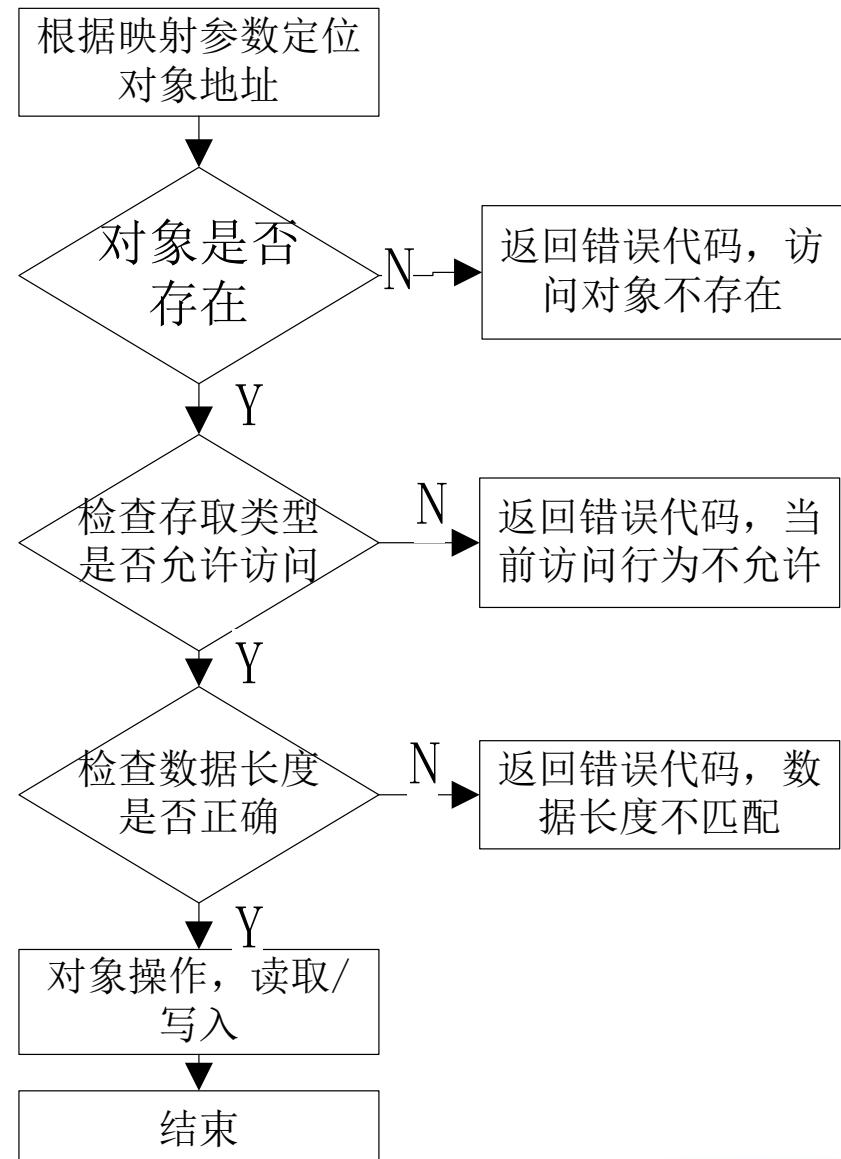
单片机计算资源紧缺，采用静态结构体数组

- 结构简单，易于实现
- 访问效率高





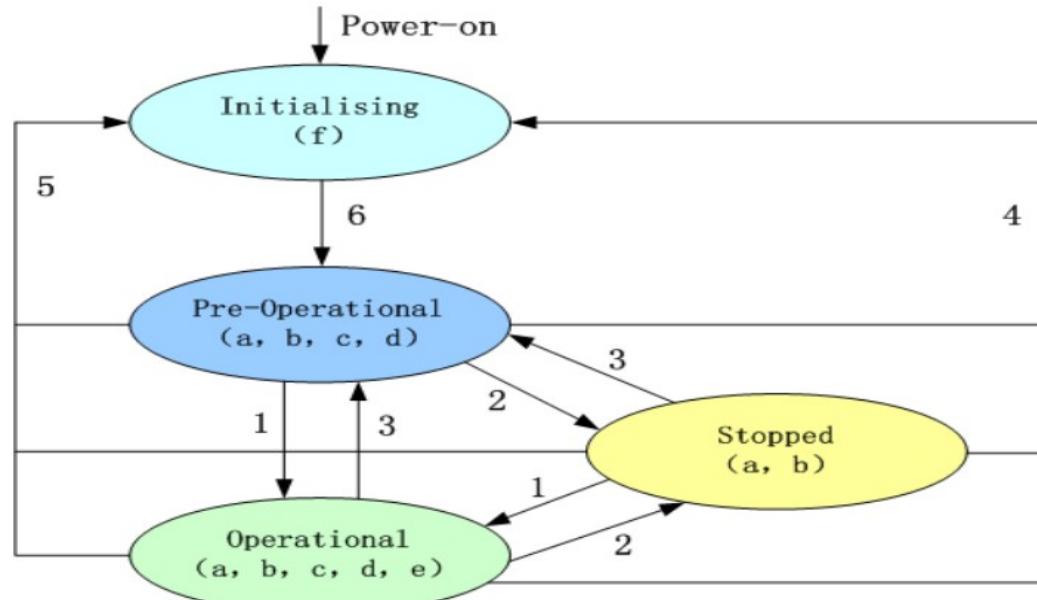
- 对象字典接口函数
 - getODentry、setODentry
 - 与对象字典配套使用
 - 访问指定对象
 - 控制访问行为，杜绝非法访问，防止数据损坏





2.3.3 状态控制

在节点内部运行着一个状态机，状态转换由管理者控制，节点在不同的状态下执行不同的任务，各个功能模块的使能情况也不同。

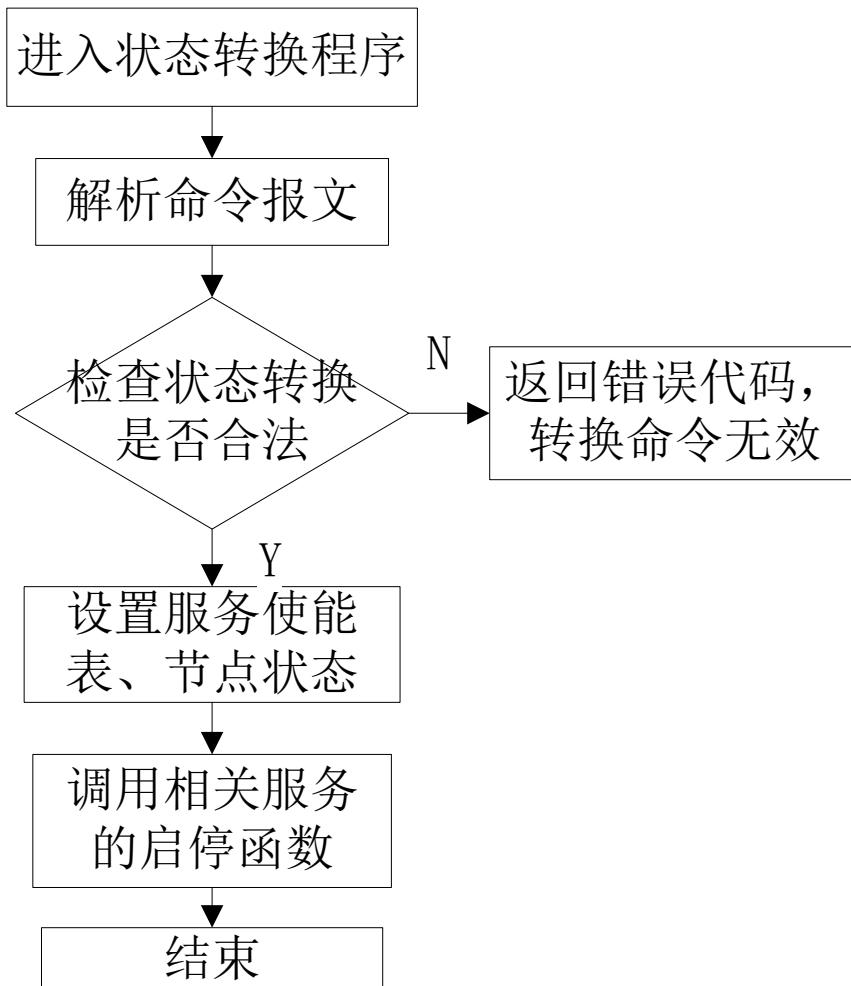


1	启动远程节点
2	暂停远程节点
3	进入预操作状态
4	重置节点
5	重置节点通信
6	初始化完成后自动进入预操作状态





- 状态转换过程



- 功能可用性控制

- 调用相应的功能模块时检查功能使能表。
- 只有服务被使能，调用才生效。

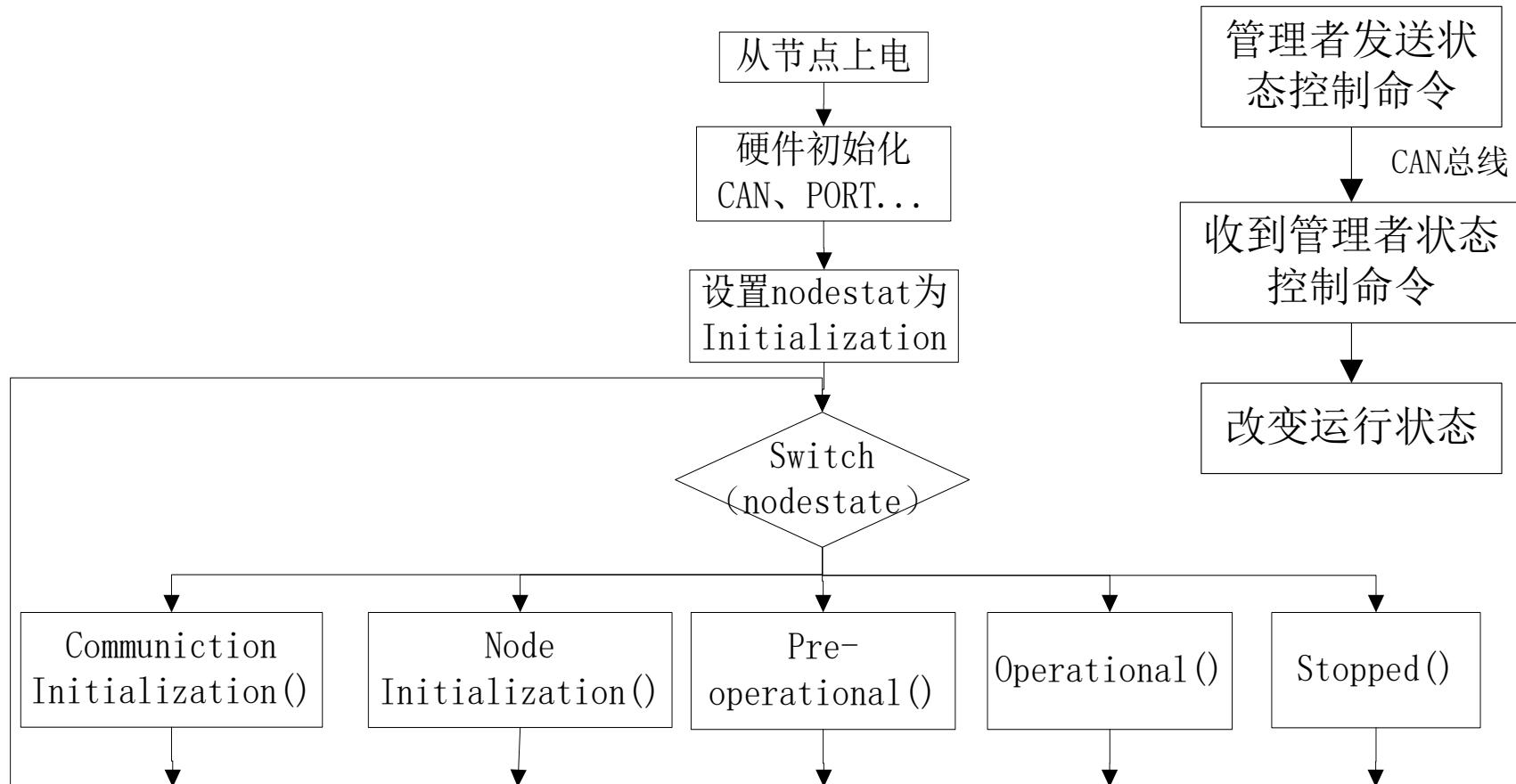
服务使能表

启动报文服务
紧急事件服务
心跳服务
实时数据传输服务
参数配置服务
状态控制服务





- 从节点上电后在状态机里运行，状态受管理者控制，设计从节点的软件总体流程如下：

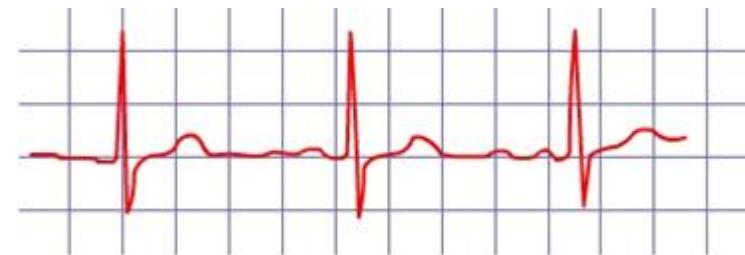




2.3.4 状态反馈

节点可以通过一种叫做**心跳**的方式**周期性**地向主站汇报当前的状态。

- 生产者/消费者模式
- 检测节点是否在线
- 监视节点状态
- 定时器中断处理发送，定时值取自对象字典。



Heartbeat Producer → Consumer(s)

COB-ID	Byte 0
0x700 + Node_ID	状态

状态	意义
0	Boot-up
4	Stopped
5	Operational
127	Pre-operational





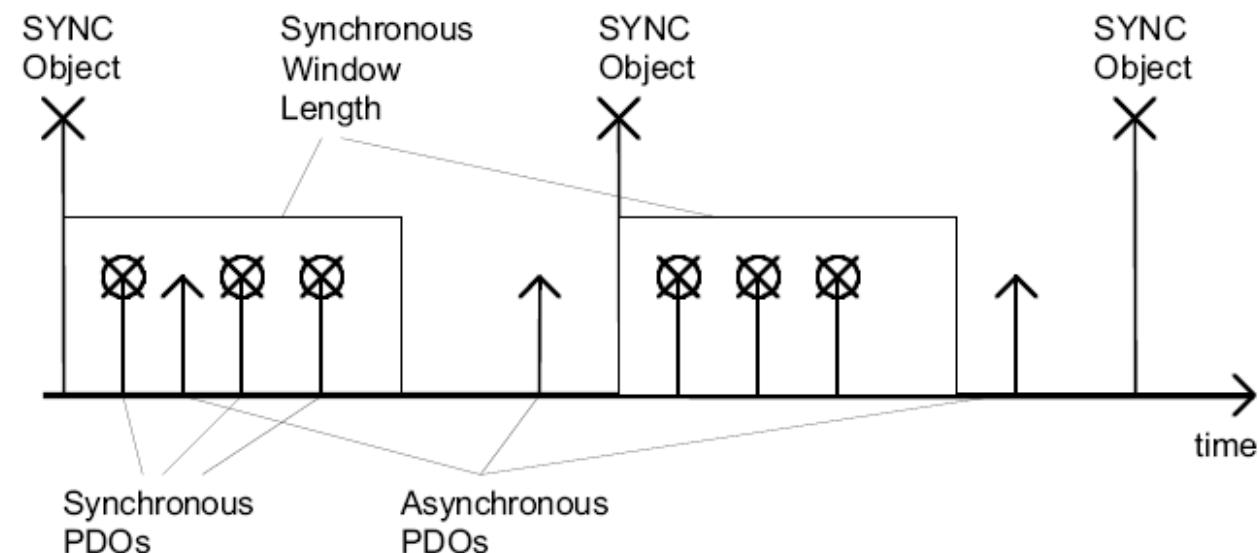
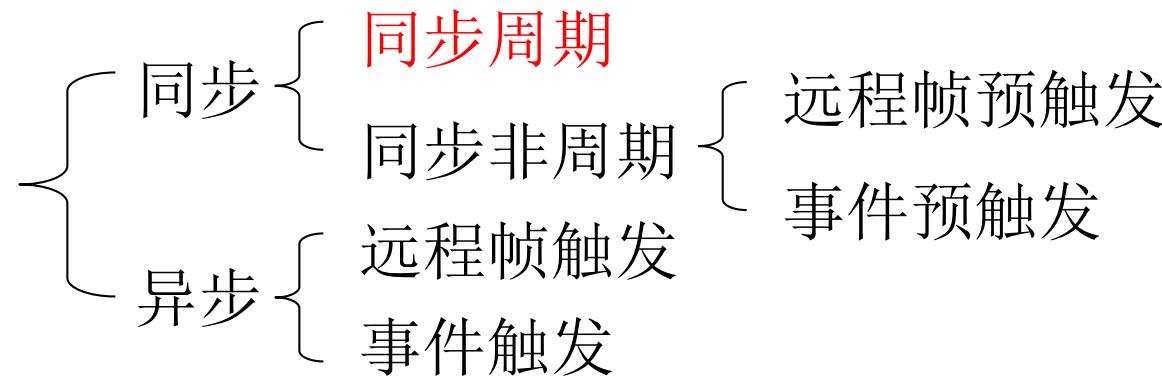
2.3.5 实时过程数据传输

- 引入CANopen的目的之一：更规范和有效地传输实时过程数据。
- 两个问题：
 - I/O数据什么时候被传输？
 - 数据如何封装？
- 利用CANopen协议中的PDO(Process Data Object)功能
 - 基于生产者/消费者模式。
 - 多种传输模式。
 - 数据长度被限制为1~8字节。
 - 数据内容由映射参数对象决定，双方都知道。





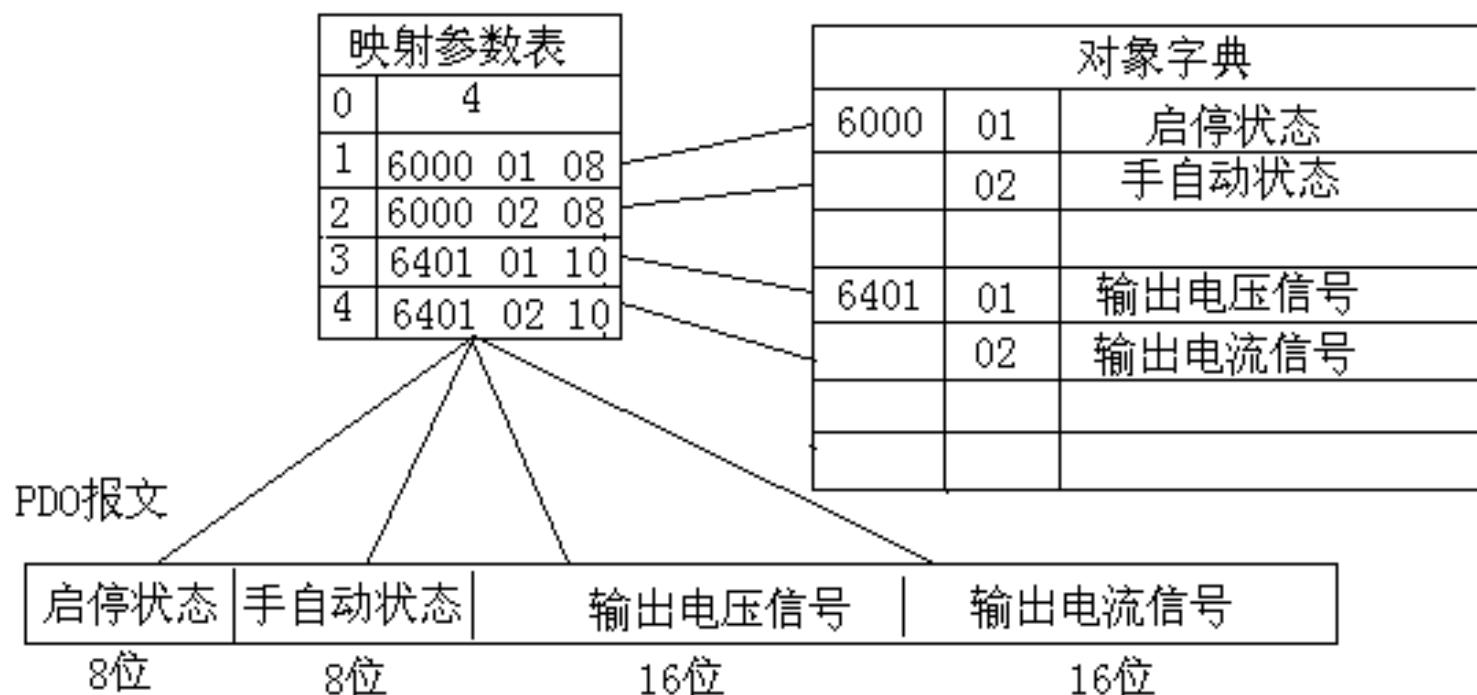
- 多种传输模式





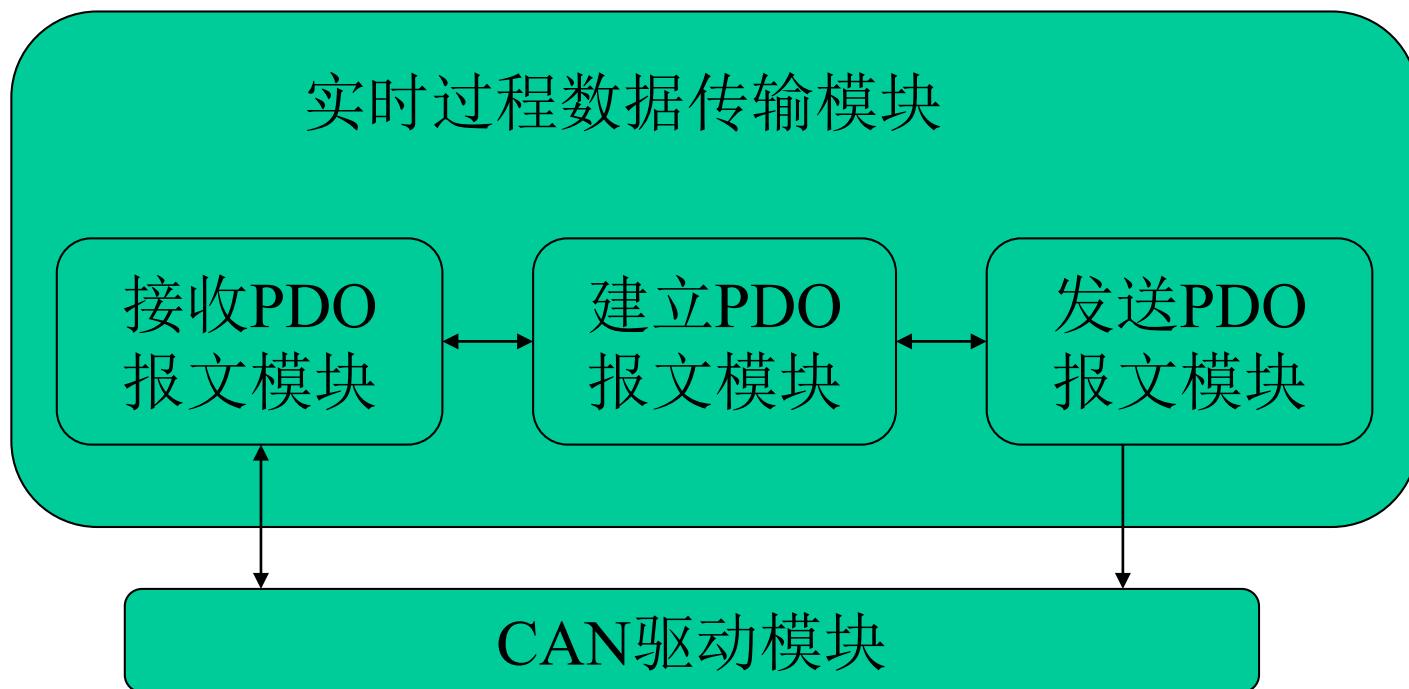
- 映射参数

包含一个对象字典中对象的列表，这些对象映射到 PDO报文里，包括对象的数据长度。生产者和消费者必须知道这个映射，才能解释PDO报文的内容。



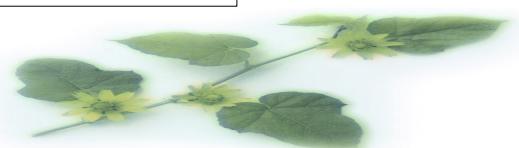
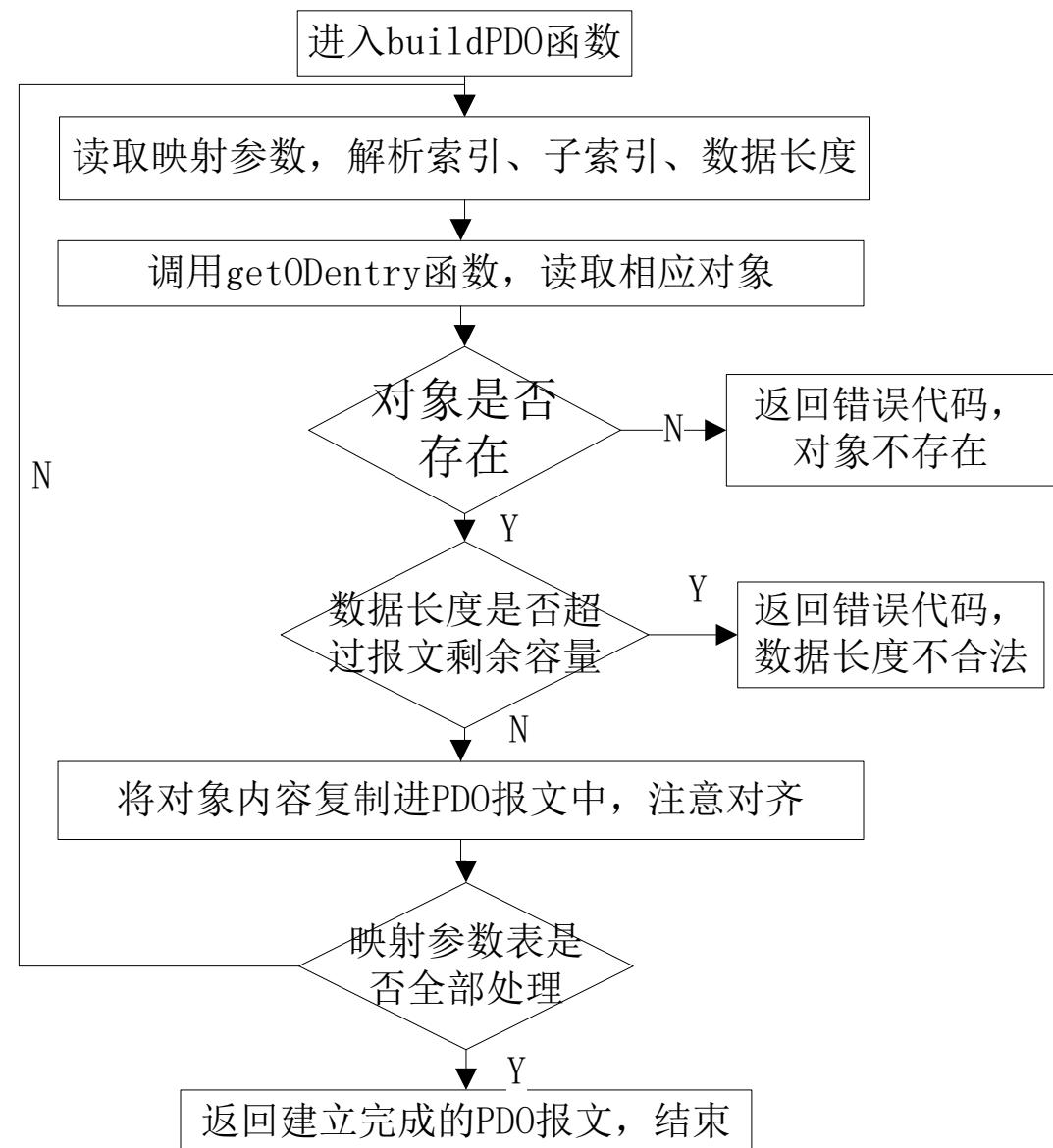


- 实时过程数据传输模块组成



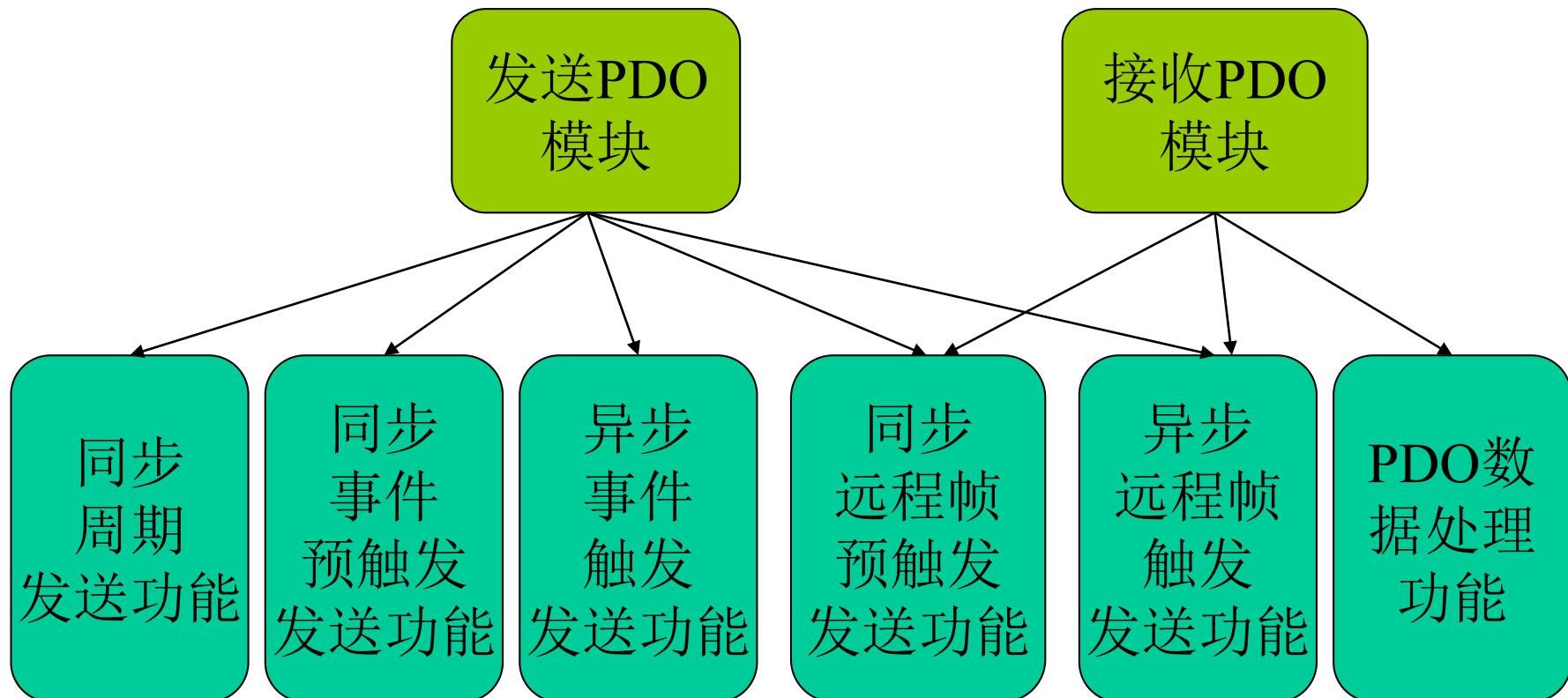


- 建立PDO函数
 - 被发送和接收模块调用。
 - 根据映射参数表建立PDO报文。





- 发送和接收模块
 - 实现PDO报文的各种传输方式。
 - 处理收到的PDO报文。



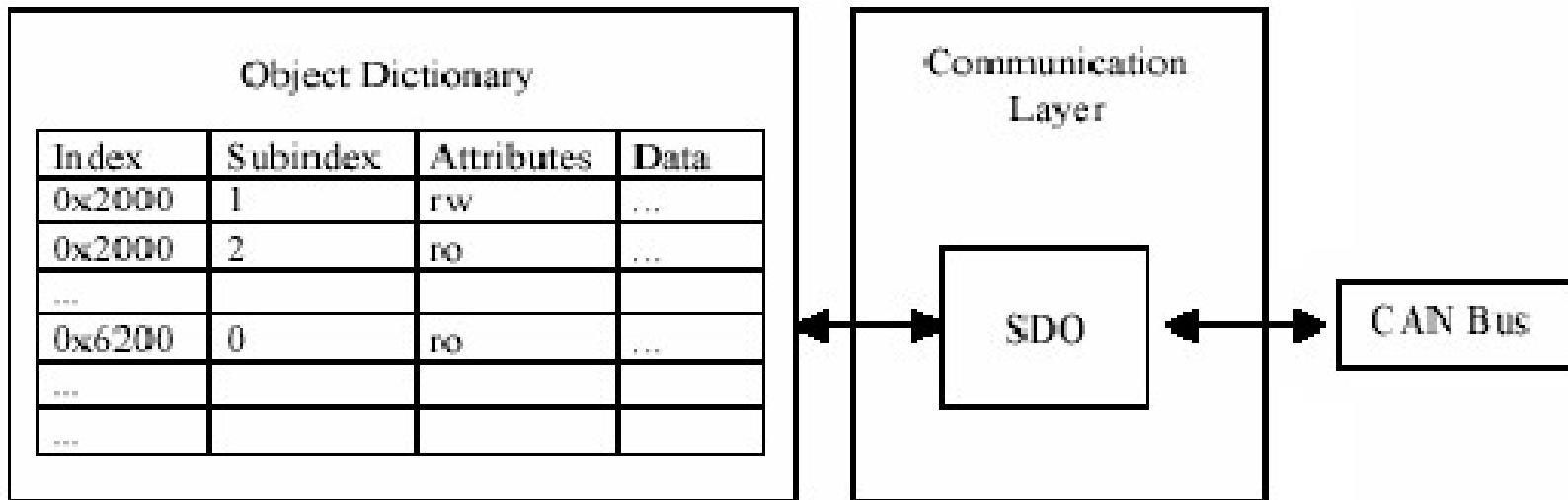


2.3.6 参数读取和设置

管理者如何配置和读取节点服务的参数？

利用CANopen协议的SDO (Service Data Object)功能。

- 对象字典的远程访问接口
- 用来配置和读取节点的参数
- 基于客户端/服务器模式





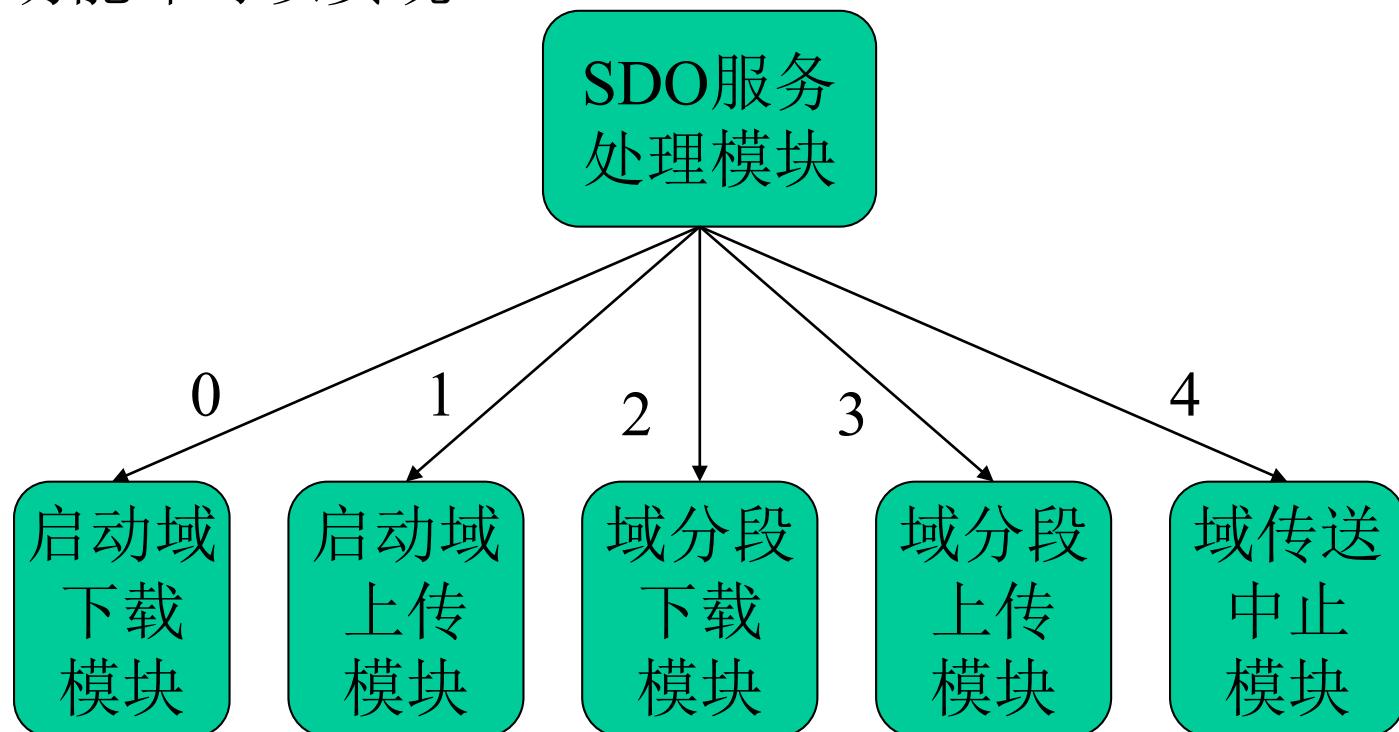
- 对象字典安全要求高，数据项长度不一，访问须遵循一定的规范。
- SDO服务定义了5个协议：启动域下载，域分段下载，启动域上传，域分段上传和域传送中止。
- 访问协议体现在SDO报文命令字中。





- SDO服务实现

关键是解析SDO命令字。命令字前三位只有0、1、2、3、4这几种类型，对其进行分类并按照协议规范处理，SDO功能即可以实现。





2.3.7 紧急事件服务

- 属于网络管理的一部分
- 嵌入到用户应用程序中
- 若检测到紧急情况（过压、过流等），处理过程分两步
 - :
 - 1. 采取既定的**紧急保护措施**，断电保护、输出复位。
 - 2. 以高优先级**发送紧急事件报文**，携带节点地址和错误代码，向管理者汇报报警信息，等待后续处理。

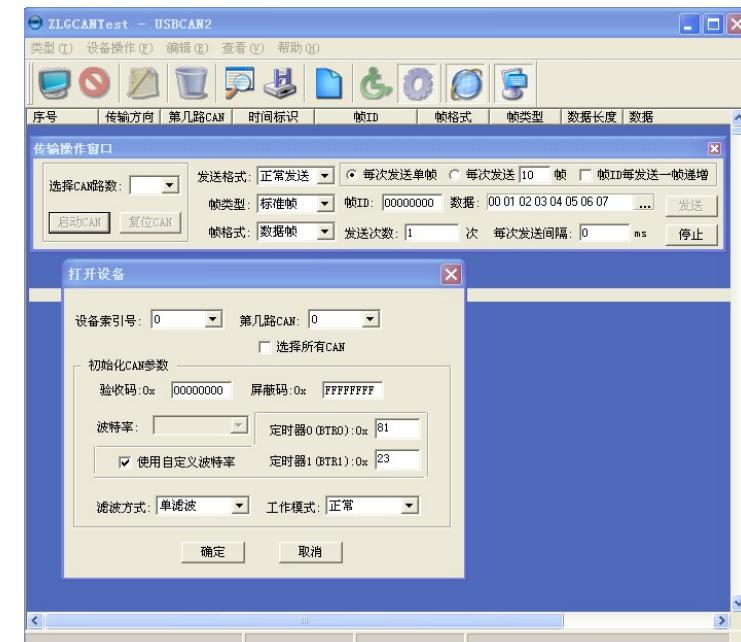
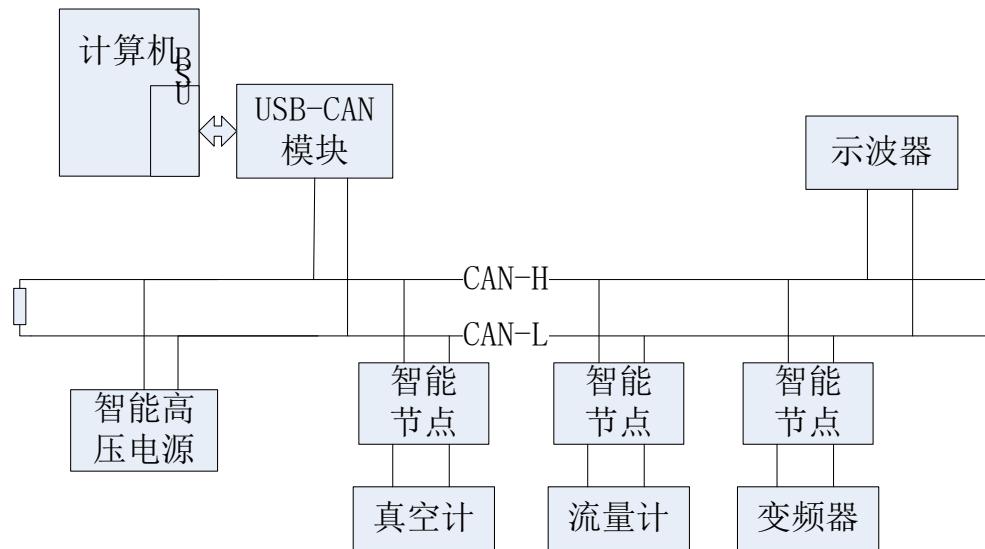




2.4 协议栈测试

2.4.1 测试与实验平台搭建

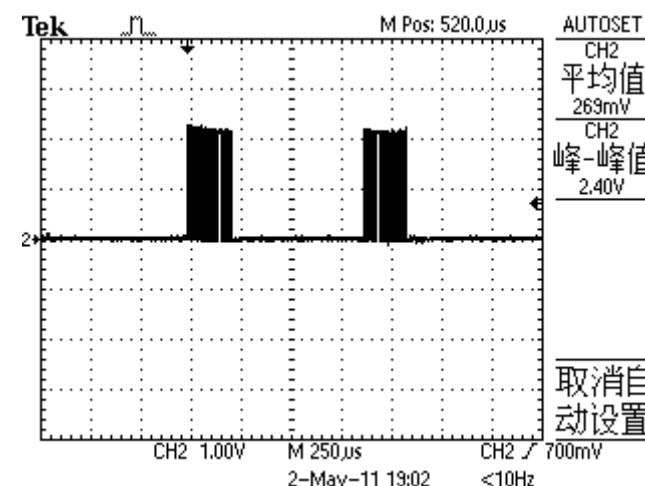
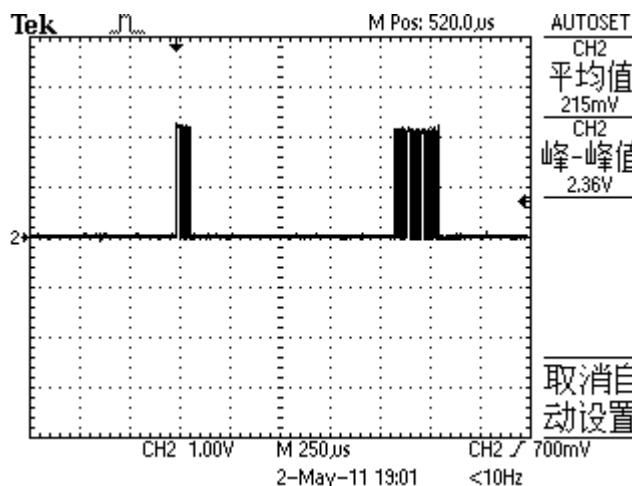
- USB-CAN模块作为监控计算机的CAN网络接口
- 具备存储功能的示波器观察总线波形
- 挂载4个智能节点，囊括了基本的低温等离子体设备
- ZLGCANtest软件监视总线上所有报文
- 总线波特率500Kbps





2.4.2 单节点通信周期测试

- 单节点实时过程数据传输最小周期测试
 - 计算机发送同步报文后，节点根据PDO通信参数发送报文。
 - 设置 PDO 为同步周期发送模式，周期为”1”
- 单节点参数配置通信最小周期测试
 - 计算机发送SDO请求，从节点接收到后必须回复一个SDO应答，测试参数配置响应周期。





2.4.3 多节点实时数据通信周期测试

- 模拟多节点CAN网络实际运行的情况
- 测试最小的可靠网络数据刷新时间
- 观测不同通信周期下的丢包现象

同步周期	同步报文数量	接收PDO数量	延迟发送和丢包现象
100ms	1000	4000	正常无延迟
40ms	1000	4000	正常无延迟
30ms	1000	4000	开始出现延迟发送现象
25ms	1000	4000	延迟发送现象加剧
20ms	1000	4000	延迟发送现象更严重
15ms	1000	1973	出现严重丢包现象
10ms	1000	2052	出现严重丢包现象





2.4.4 实现功能总结

- 实现的协议栈提供的功能如下表所示：

功能	必要性	本文协议栈
SDO服务器端	必要	完成，支持1个服务器端
SDO客户端	必要	部分支持
PDO发送	必要	完成
PDO接收	必要	完成
节点保护/心跳保护	必要	支持心跳保护
运行状态机	必要	完成
紧急事件报文	必要	完成，通知上层
时间戳	可选	不支持
自动设置CAN波特率	可选	不支持
通过拨码开关设置节点号	可选	不支持
可移植性		C编写，模块化，可移植性较好





2.4.5 应用

将CANopen与各设备软件功能模块结合，实现了设备的计算机控制、数据实时汇报等功能

o

相比原来的手动控制有效提高了**设备控制精度和监控效率**，对于提高低温等离子体设备系统的自动化水平有积极的借鉴意义。

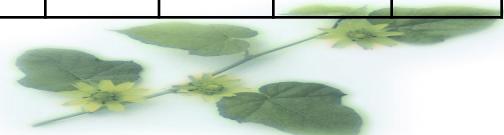




2.4.6 低温等离子体设备系统中主从节点帧格式定义

- 从站帧格式：

真空计									
报文种类	cob-id	1	2	3	4	5	6	7	8
控制报文	202H	手/自动	启/停						
汇报报文	182H	真空度（低8位）	真空度（高8位）	手/自动状态	启/停状态				
流量计									
控制报文	203H	手自动切换	关闭/阀控/清洗	流量（低8位）	流量（高8位）				
汇报报文	183H	手/自动状态	关闭/阀控/清洗状态	流量（低8位）	流量（高8位）				





变频器									
控制报文	204H	运行/停止	手/自动切换	驱动频率(低8位)	驱动频率(高8位)				
汇报报文	184H	运行/停止状态	手/自动状态	驱动频率(低8位)	驱动频率(高8位)	驱动电压(低8位)	驱动电压(高8位)	驱动电流(低8位)	驱动电流(低8位)
高压电源									
控制报文	201H	启动/停止供电	手/自动切换	自动控制输出(00H-64H)					
汇报报文	181H	输出电流(低8位)	输出电流(高8位)	输出电压(低8位)	输出电压(高8位)				





- 主站对象字典中的PDO映射参数(主站的，注意跟从站的区分)

1.1、TPDO (发送报文，传输控制命令)

1.1.1 TPDO1 (与高压电源通信) COB_ID :201H

6200 01 08 启/停控制 (00启动, 01断开)

6200 02 08 手自动切换 (00 单片机控制 , 01 手动控制)

6410 01 08 自动控制输出 (00H-64H, 对应数字电位器5-0V)

1.1.2 TPDO2 (与真空计通信) COB_ID :202H

6200 03 08 手/自动控制

6200 04 08 启停控制

1.1.3 TPDO3 (与流量计通信) COB_ID :203H

6200 05 08 手/自动切换

6200 06 08 关闭/阀控/清洗

6411 01 10 流量设定值 (16位)

1.1.4 TPDO4 (与变频器通信) COB_ID :204H

6200 07 08 运行/停止

6200 08 08 手自动切换

6411 02 10 驱动频率 (16位)





1.2、RPDO（汇报报文，接收I/O数据）

1.2.1 RPDO1（与高压电源通信） COB_ID :181H

6401 01 10 电流反馈（16位）

6401 02 10 电压反馈（16位）

1.2.2 RPDO2（与真空计通信） COB_ID :182H

6401 03 10 真空度反馈（16位）

6000 01 08 手/自动状态

6000 02 08 启/停状态

1.2.3 RPDO3（与流量计通信） COB_ID :183H

6000 03 08 手/自动状态

6000 04 08 关闭/阀控/清洗状态

6401 04 10 流量设定值（16位）

1.2.4 RPDO4（与变频器通信） COB_ID :184H

6000 05 08 运行/停止状态

6000 06 08 手/自动状态





目 录

- 第1章 概 述
- 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述





第7章 智能技术在传感器系统中的应用

要 点：

- ◆ 智能模糊传感器；
- ◆ 人工神经网络在智能传感器中的应用。





§ 7.1 智能模糊传感器

模糊传感器就是采用模糊集合理论方法，来实现测量的数值结果转换为人类语言的符号来表示。其核心部分是将测量结果的数值表示转换为用人类语言符号表示的单元模块，亦即数值——符号转换器。

介绍模糊传感器的起源：

专业化→通俗化；

数值化→符号化；

简单化→智能化。





§ 7.1.1 基础知识

测量结果“符号化表示”的概念

1、测量的概念：以确定被测量值为目的的一组操作，亦或是将被测量与标准量进行比较的过程。

2、测量领域的不断扩大和深化；被测对象的多维性和问题的复杂性；信息难以进行定量描述；信息存储等方面的问题，仅用数值符号来描述测量结果是不够的。

3、符号化表示的优点：

- * 信息量紧凑，存储量少；
- * 无需建立精确模型；
- * 允许数值测量有较大的非线性和较低的精度；
- * 可以进行推理、学习、并可以将人类经验、专家知识与智能事先集成，易于理解。





4、在数学中描述量与量之间的关系有三条途径：

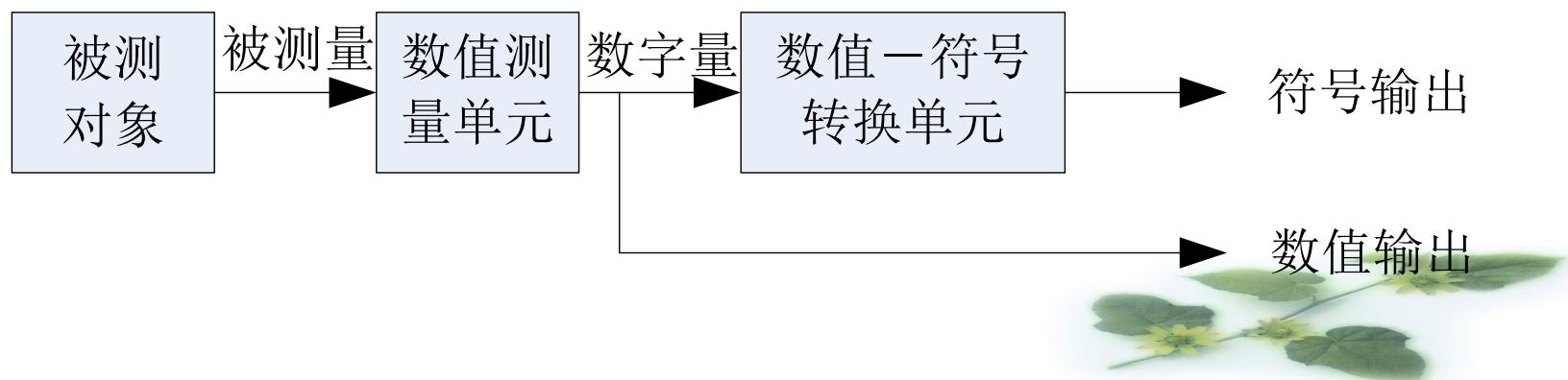
- 1) 经典的数学分析和集合论，它是描述与度量“确定性”量的数学方法。
- 2) 概率论与数理统计，它是研究事先不能判定其发生与否的“随机性”事件，但事件本身的含义仍是分明的。
- 3) 模糊数学，它是用数学的方法来描述和研究具有“模糊性”事物的数学，用于解决本身概念都尚不分明的事物，并定量的研究这些客观存在的模糊现象。

符号测量系统——符号传感器系统

1、符号测量系统的概念与组成

- 1) 可以处理和实现数值测量和符号测量的测量系统，称为符号测量系统

。

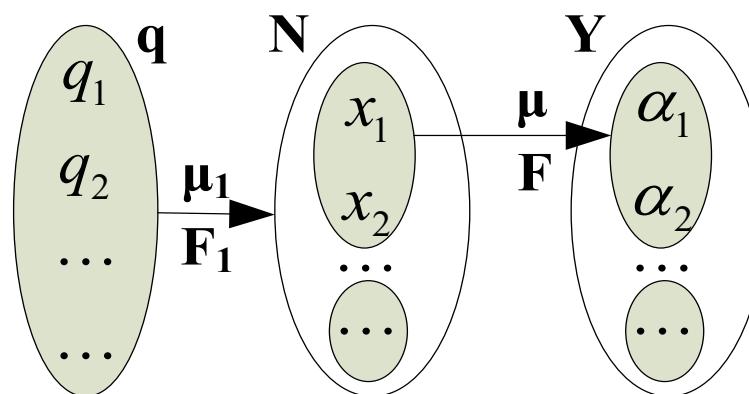




2) 基本构成: 由两大部分组成

- a) 传统的数值测量系统;
- b) 数值——符号转换单元。

2、三种符号系统



1) 数值符号系统

被测对象的有关物理参量向数值域的转换或称映射，这就称作用符号表示的传统的测量系统。

$$Q_1 = \langle\langle q, N, \mu_1, R_q, R_N, F_1 \rangle\rangle$$





a) $q = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}$

b) $N = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$

c) μ_1 : 映射关系; 表示对象域向数值域映射的某种关系。

$$\mu_1 : q \rightarrow N \quad x_i = \mu_1(q_i)$$

d) $R_q : q_1, q_2, \dots, q_k$ 之间的关系

e) $R_N : x_1, x_2, \dots, x_k$ 之间的关系

f) F_1 : R_q 到 R_N 关系的映射;

$$F_1 : R_q \rightarrow R_N, \quad R_N = F_1(R_q)$$

F_1 构成了数值符号系统的关系概念。

2) 语言符号系统

完成由数值域向伪语言符号域的转换或称映射。本身构成数值——符号转换器，由软件实现。





$$Q = \langle\langle N, Y, \mu, R_N, R_Y, F \rangle\rangle$$

a) $N = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$

b) $Y = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j\}$

c) μ : 映射关系, 数值域 \rightarrow 语言域

$$\mu: N \rightarrow Y, \quad \alpha_j = \mu(x_i)$$

d) $R_N: x_1, x_2, \dots, x_k$ 之间的关系

e) $R_Y: \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j$ 之间的关系

f) F : R_N 到 R_Y 的映射关系; $F: R_N \rightarrow R_Y, R_Y = F(R_N);$
 F 构成了语言符号系统的关系概念。

3) 人类自然语言符号系统

直接将现实世界与自然语言符号域相对应。亦即:

$$F': R_q \rightarrow R_Y$$





3、模糊传感器的基本概念

采用模糊集合理论方法来构成数值——符号转换单元，以实现测量的数值结果转换为人类自然语言符号表示的符号测量系统，称为模糊传感器。

模糊集合理论简介

模糊集合是精确集合的推广和扩充，不能简单判定“是”与“不是”。

精确集合的概念：一个对象要么符合该概念（属于），要么不属于该集合。

1、模糊集合（经典集合）

一个对象组成的论域： $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，或称所有元素的集合，从 U 到闭区间 $[0, 1]$ 有映射 $\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$ ，则称 μ_A 确定了 U 的一个模糊集合 A ，而 μ_A 称为模糊集合 A 的隶属函数。

$\mu_A(x)$ 称为论域 U 中元素 x 隶属于模糊集合 A 的程度，简称 x 对 A 的隶属度。





$\mu_A(x) \rightarrow 1$, 隶属度高; $\mu_A(x) \rightarrow 0$, 隶属程度低。

精确集合是模糊集合的特殊形式。

2、确定隶属函数的方法

模糊子集完全由其隶属函数所描述。进行模糊识别首先要获取识别信息，而模糊识别信息可借助于隶属函数获得。因此确定隶属函数是一项基本而又非常重要的工作。

- 1) 隶属函数的确定方法（也叫原则）
 - a) 通过模糊统计来确定；
 - b) 采用二元对比排序法；
 - c) 借用常见的模糊分布来确定；
 - d) 利用动态信号处理的结果，经过适当转换得到隶属函数，如机械运动系统的状态；
 - e) 通过神经网络模型来学习和获取隶属函数；





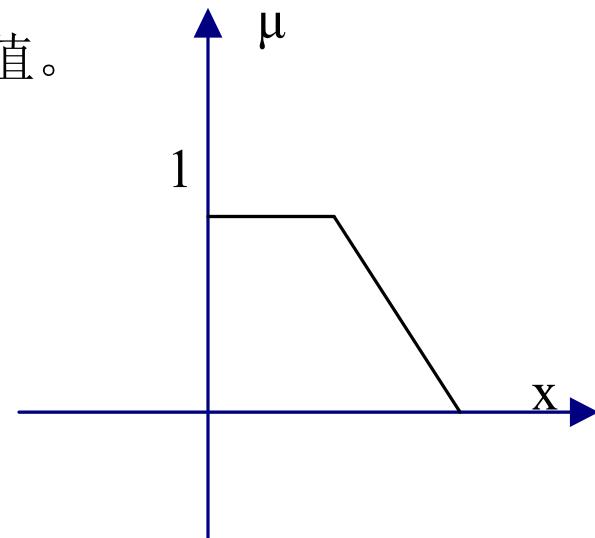
f) 主观认识、个人经验、人为评分等。

2) 几种常见的隶属函数及其曲线

设论域为实数域U，若A为U上的模糊子集，则 $\mu_A(x)$ 又称为A的模糊分布，简记为 $\mu(x)$ 。

a) 戒上型（偏小型）

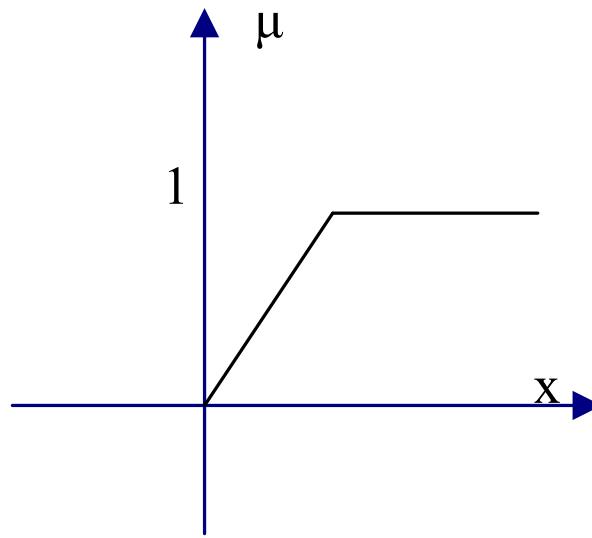
适用于x很小的隶属函数，论域x均取正值。



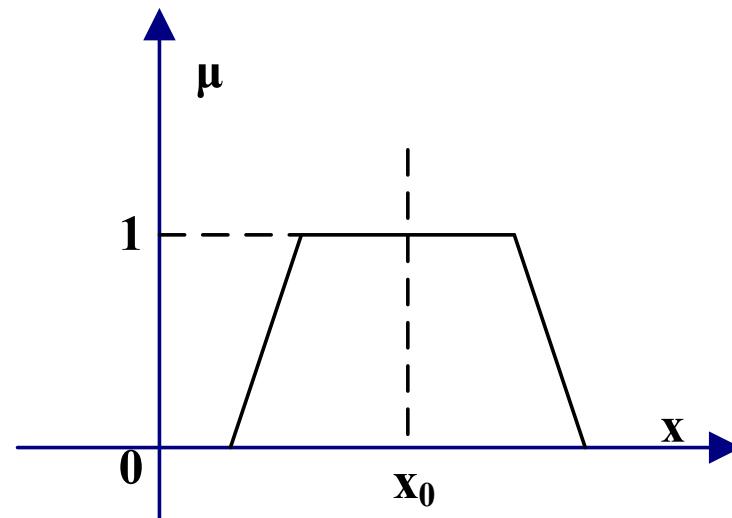
b) 戒下型（偏大型）（下图）

适用于x较大时的隶属函数，论域x均取正值。





c) 中间对称型



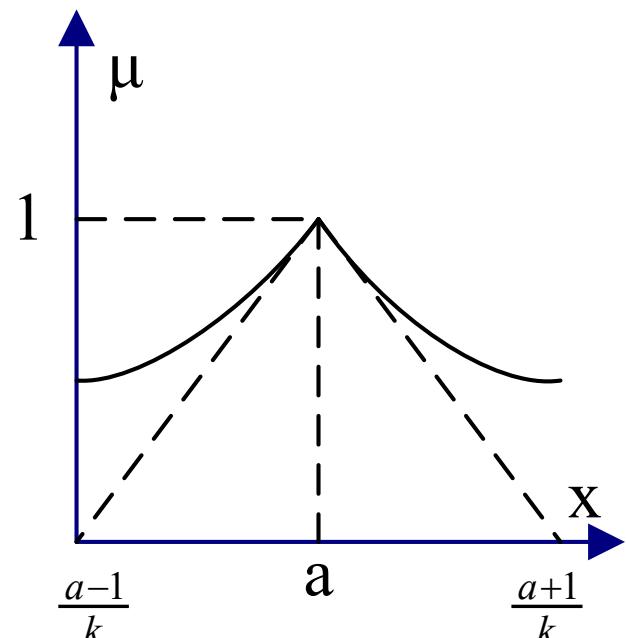
函数形式除了书上讲的三种，还有：





尖 Γ 分布：

$$\mu(x) = \begin{cases} e^{k(x-a)}, & x \leq a \\ e^{-k(x-a)}, & x > a \end{cases}$$

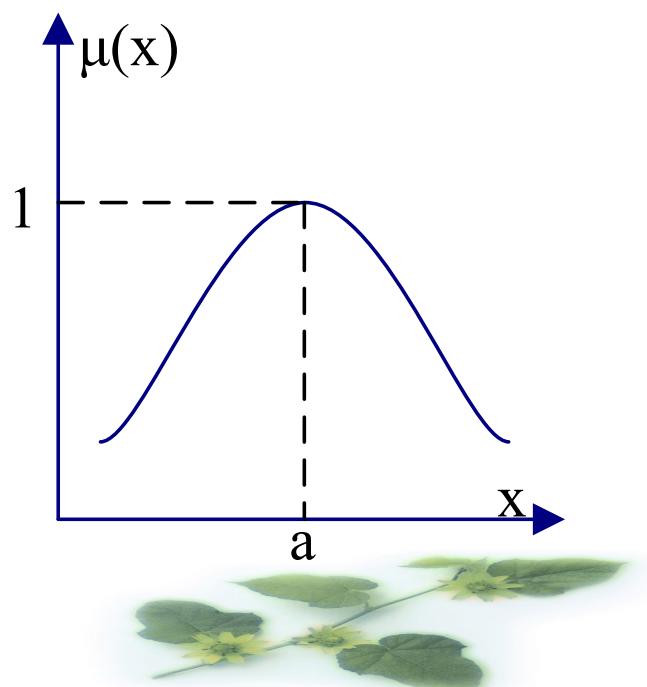


哥西分布：

$$\mu(x) = \frac{1}{1+\alpha(x-a)^\beta}$$

$\alpha > 0$, β 为正偶数,

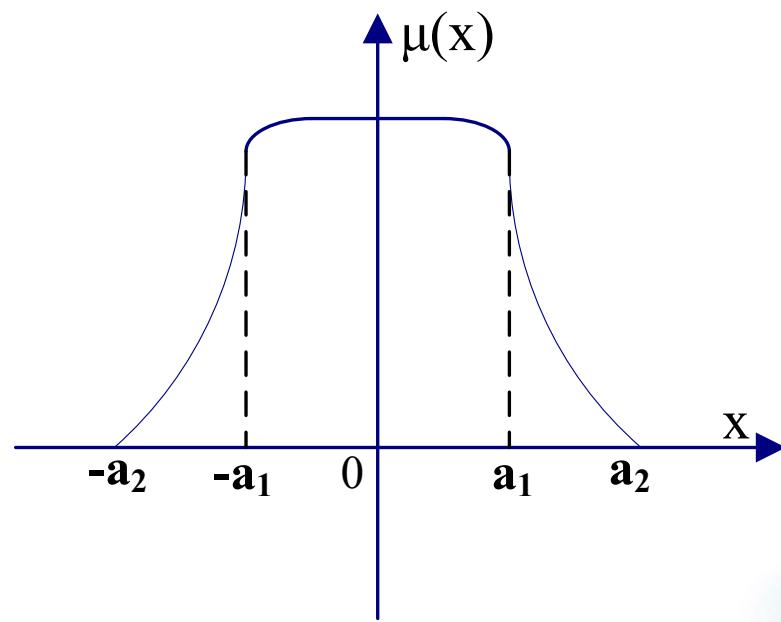
书中讲的柯西型，有的书上称为正态分布。





岭型分布:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -a_2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2-a_1} \left(x - \frac{a_1+a_2}{2} \right), & -a_2 < x \leq -a_1 \\ 1, & -a_1 < x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2-a_1} \left(x - \frac{a_1+a_2}{2} \right), & a_1 < x \leq a_2 \\ 0, & x > a_2 \end{cases}$$





3、模糊算子

两个模糊集合A、B之间在[0, 1]闭区间中的二元运算。它的运算规则与我们以前学的集合的运算概念相一致。

它的运算结果最大为1，最小为0。其中模糊积就是它们的数值积：

$$\mu_A(x) \cdot \mu_B(x) = \mu_A(x)\mu_B(x)$$

4、含义映射 $\tau(\alpha)$ 与描述映射 $l(x)$

1) 含义映射 $\tau(\alpha)$

$\tau : Y \rightarrow P(N)$ ，亦即语言域Y上的任意一个元素 α ，它的原像可用 $\tau(\alpha)$ 表示，且等于数值域上的x，也就是说值x是语言 α 的含义值。

2) 描述映射 $l(x)$

$l : N \rightarrow P(Y)$ ，亦即数值域N上的任意一个元素x，它的像可用 $l(x)$ 表示，且等于符号域上的 α ，也就是说语言 α 是数值x的描述。





5、模糊语义和模糊描述

与上述概念相对应。

1) 模糊语义 $\tau: Y \rightarrow F(N)$, 语言值的模糊语义是 $Y \rightarrow N$ 上的模糊子集 $F(N)$ 的映射。

$x = \tau(\alpha)$: 语言值 α 的模糊语义为 x 。

2) 模糊描述:

$l: N \rightarrow F(Y)$, 数值量的模糊描述是 $N \rightarrow Y$ 的模糊子集 $F(Y)$ 的映射。

$\alpha = l(x)$, 数值量 x 的模糊描述为 a 。

3) 模糊关系

模糊关系R是指模糊语义和模糊描述之间的关系, 它的隶属函数为:

$\mu_R: Y \times N \rightarrow [0,1], \mu_{\tau(\alpha)}(x) = \mu_R(\alpha, x)$ 。

在语言域Y中给定一个语言量 α , 模糊关系R就在数值域N中确定一个模糊





子集 $\tau(\alpha)$ ，则任意一个属于数值域 N 中的数值量 x 属于模糊子集 $\tau(\alpha)$ 的程度 $\mu_{\tau(\alpha)}(x)$ 由模糊关系隶属函数 $\mu_R(\alpha, x)$ 给定。

举例说明：

一个汽车系统，语言域 Y 描述为：汽车系统故障，其中一个语言量为发动机故障，对应的数值域 N 的模糊子集有 $\tau(\alpha)$ ：气缸温度、气缸磨损度、活塞外径、气缸内径，……。对于喷油嘴的喷油量引起发动机故障的概率或者说程度即为 $\mu_{\tau(\alpha)}(x)$ 。

同样，在数值域 N 中也一样。

有些概念性的东西，理解起来比较费劲，关键是要仔细体会。

例如：一个人的血压高，原因有：缺乏锻炼、饮食不好、遗传、工作环境的影响等等。同样饮食不好，可能会引起：血压高、血脂高、身体过胖、糖尿病等等。那么在有些时候要确定一个最主要的因素和结果。





6、基本符号测量分度和模糊分度

1) 符号测量分度

目的：建立合适的与定量测量一致的符号化测量形式。

a) 标称分度

表达了被测对象域 α 和符号域 Y 的相等关系：

$$q_1 \sim_{\alpha} q_2 \Leftrightarrow \mu(q_1) =_Y \mu(q_2)$$

如果对象域上的两个元素相等，则它们的像——测量结果，也相等。

即：如果两个人的身高相等均为1.85m，则他们都属于：高的范围。

b) 顺序分度

(如：不同产家的同一类产品的质量判定)

表达了集合 α 和 Y 上相对应的顺序关系：

$$q_1 \geq_{\alpha} q_2 \Leftrightarrow \mu(q_1) \geq_Y \mu(q_2)$$





对象域上的顺序关系应与映射到符号域上的保持一致。

c) 线性分度

表达了在对象域 α 和符号域 Y 上的一个相等关系和一个相加运算：

$$q_1 \sim_{\alpha} q_2 \Leftrightarrow \mu(q_1) =_Y \mu(q_2)$$

$$q_1 \cdot_{\alpha} q_2 \sim_{\alpha} q_3 \Leftrightarrow \mu(q_1) +_Y \mu(q_2) =_Y \mu(q_3)$$

d) 映射关系与变换法则：

被测对象域 α 和符号域之间的映射关系 μ 不是唯一的，它可以通过变换法则 F 变为 $\mu' = F(\mu)$ 。

变换法则 F 的有效性：要保持其测量分度的类型的有效性不变。

标称分度的允许变换法则是任意一个一一映射；

顺序分度的允许变换法则是任意一个单调增映射；

线性分度的允许变换法则是 $\mu' = F(\mu) = \alpha\mu + \beta$ ， $\alpha > 0, \beta > 0$ 。





符号测量分度表达的是由被测对象域（亦即数值域）向符号域推导的过程。

2) 模糊分度

目的：从语言信息中推导出有意义的描述。

a) 模糊对称分度

符号域Y中的两元素a和b

$$a = b \Leftrightarrow \mu_{l(x)}(a) = \mu_{l(x)}(b), \forall x \in N, l(x) : Y \text{上的模糊子集};$$

$$a = b \Leftrightarrow \mu_{\tau(a)}(x) = \mu_{\tau(b)}(x), \forall x \in N, \tau(a) : N \text{上的模糊子集};$$

$$l(x) = l(x') \Leftrightarrow \mu_{l(x)}(a) = \mu_{l(x')}(a), \forall a \in Y$$

对于关系式： $x = x' \Rightarrow l(x) =_Y l(x')$ 的举例说明：

两个人身高均为1.85，它们均为Y域上“高”，但是两个人在Y域上的“高”，并不能说明两个人的身高相等，也可能有差别。也就是上式没有





可逆的关系存在。

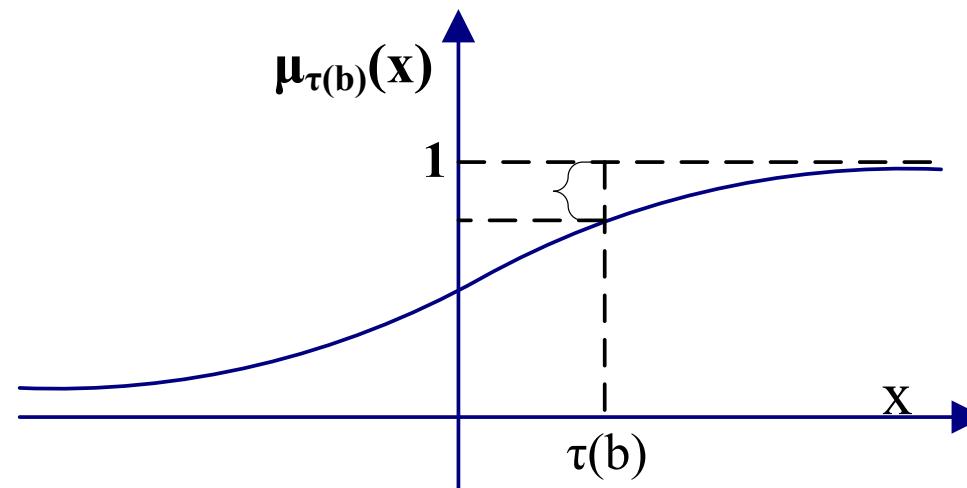
b) 模糊顺序分度

$$a \leq_Y b \Leftrightarrow \mu_{\tau(a)}(x) \leq \mu_{(-\infty, \tau(b)]}(x), \forall x \in N$$

$$\mu_{(-\infty, \tau(b)]}(x) = 1 - \mu_{[\tau(b), +\infty)}(x)$$

$$\mu_{[\tau(b), +\infty)}(x) = \inf\{1 - \mu_{\tau(b)}(y) \mid x \leq y\}$$

的解释：假定 $\tau(b)$ 是一个在 $(-\infty, +\infty)$ 之间的实数值，则其隶属函数为：





距离概念的解释：

两个集合：A、B

a) 最远距离；

b) 最近距离；

c) 平均距离（中心距离）；

d) 加权线性距离；欧几里得距离；Minkowsky距离；极小极大化距离。

贴近度的概念：

用距离来度量模糊度，在离散情况下需要求和，在连续情况下需要求积分，当论域元素很多，计算较困难，为此引入贴近度的概念；有几种不同的定义贴近度的算法。





§ 7.1.2 模糊传感器的功能及结构

模糊传感器的功能

一方面具有智能传感器的一般特点和功能，另一方面有自己的独特功能。

1、学习功能

主要综合利用已有的知识、经验，并达到拟人化表达的效果；功能本身
的需要。

学习方法：指导学习和自学习。

效果：自拟定检测方案（相关被测量的选择），相当于一个专家系统。

2、推理功能

基于知识库和模糊推理规则实现对传感器信息的综合处理。（基于模糊逻辑方法处理由模糊性引起的不精确推理称为模糊逻辑推理。）





3、感知功能

指模糊传感器感知敏感元件确定的被测量，输出易于人类理解和掌握的自然语言符号量。

4、通信功能

内部信息交换；外部信息交换。

总之，模糊传感器相当于一个不断学习的学生。

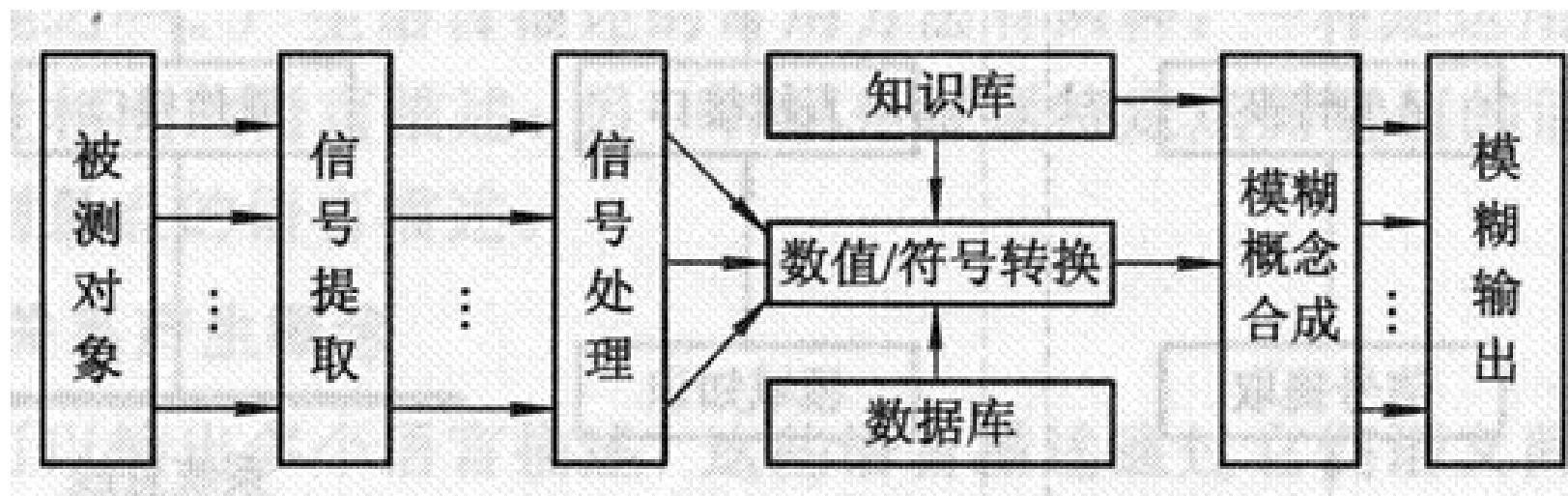
模糊传感器的结构

1、基本逻辑结构

参见下图，主要由信号获取、信号处理、数值/符号转换、模糊概念合成等功能模块组成。

其中的信号处理单元是提供精确的数值量；而数值/符号转换单元是实现模糊测量的核心；知识库包含隶属函数、隶属度、模糊推理规则等方面的知识内容；数据库包含所有的数据信息；模糊概念合成模块则根据知识库、数值/符号转换单元的输出进行模糊推理论和合成，通过模糊输出模块，用语言符号表达测量结果。





模糊传感器的基本逻辑结构





2、基本结构框图

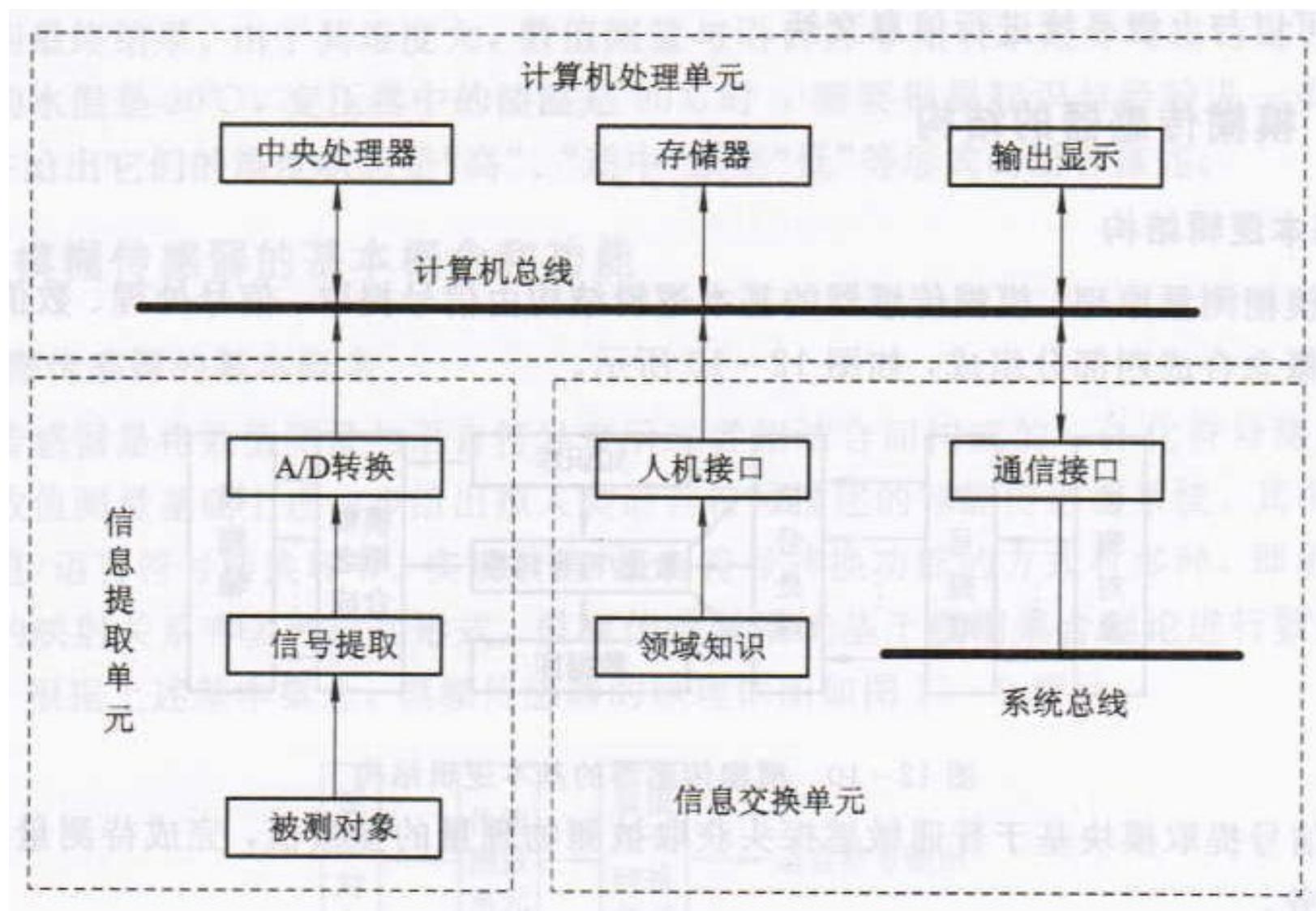
1) 基本物理结构

该结构应该是很容易被接受和理解。需要说明的是：专家信号通过人机接口与系统进行联系，一般是产品出厂前和定期检查以及系统更新时使用。

2) 基本软件结构

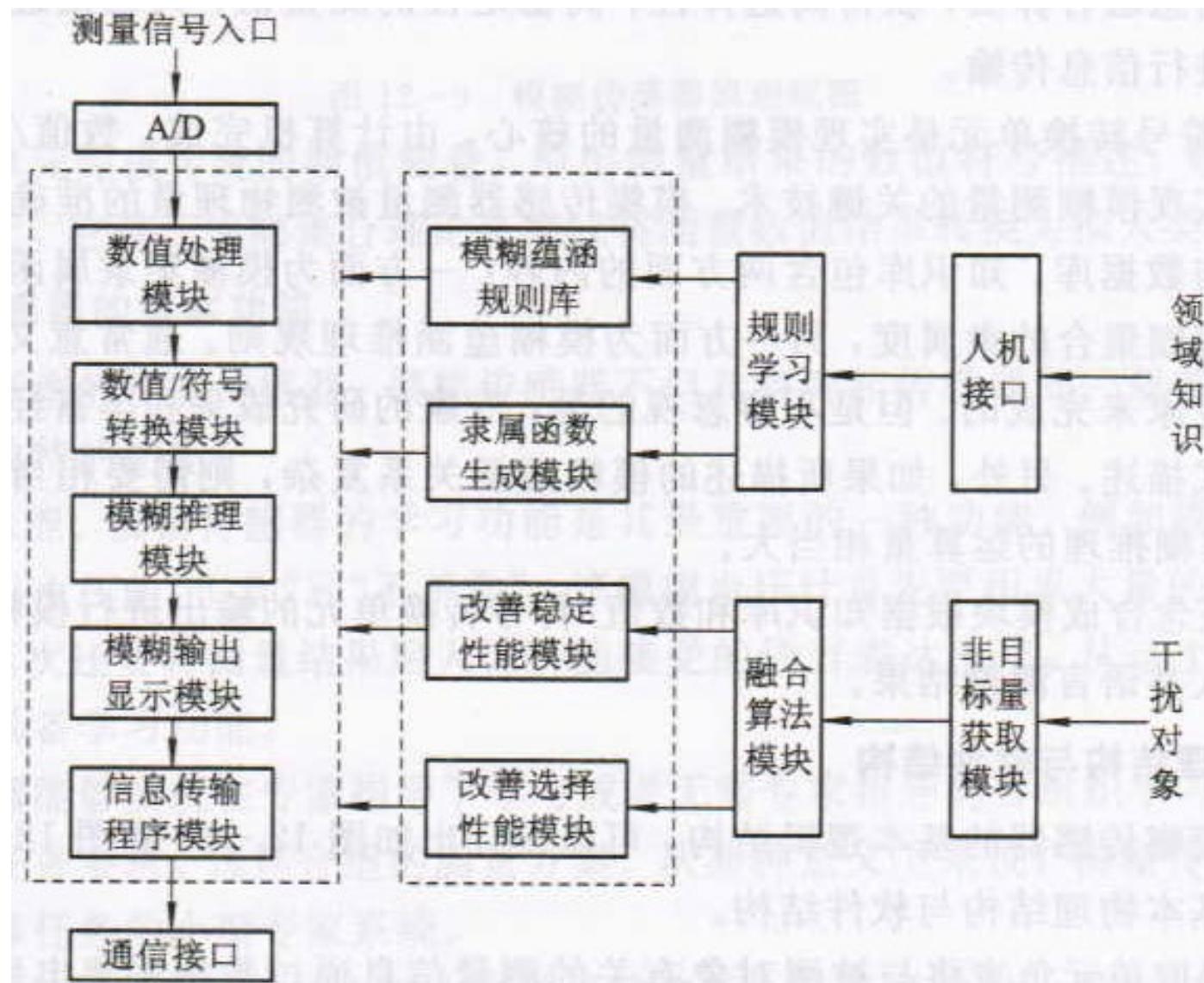
与基本物理结构相对应。数值/符号转换模块和符号/数值转换模块相当于A/D与D/A。软件结构在实际使用中，关键在于该软件系统如何进行有效合理的组织与设计，从而使之快速、有效、可靠。





模糊传感器的基本物理结构





模糊传感器的基本软件结构



3、多维模糊传感器结构

属于相互关联的多被测量传感器系统，在上述工作的基础上，主要的问题是解决信息融合的问题和在此基础上知识库的建立以及语言概念的生成。

1) 基础测量单元

敏感元件阵列、信号调理电路阵列、A/D阵列、数值预处理阵列组成，功能与传统传感器系统一致，输出量是数值信号或其特征量 q_{xi}

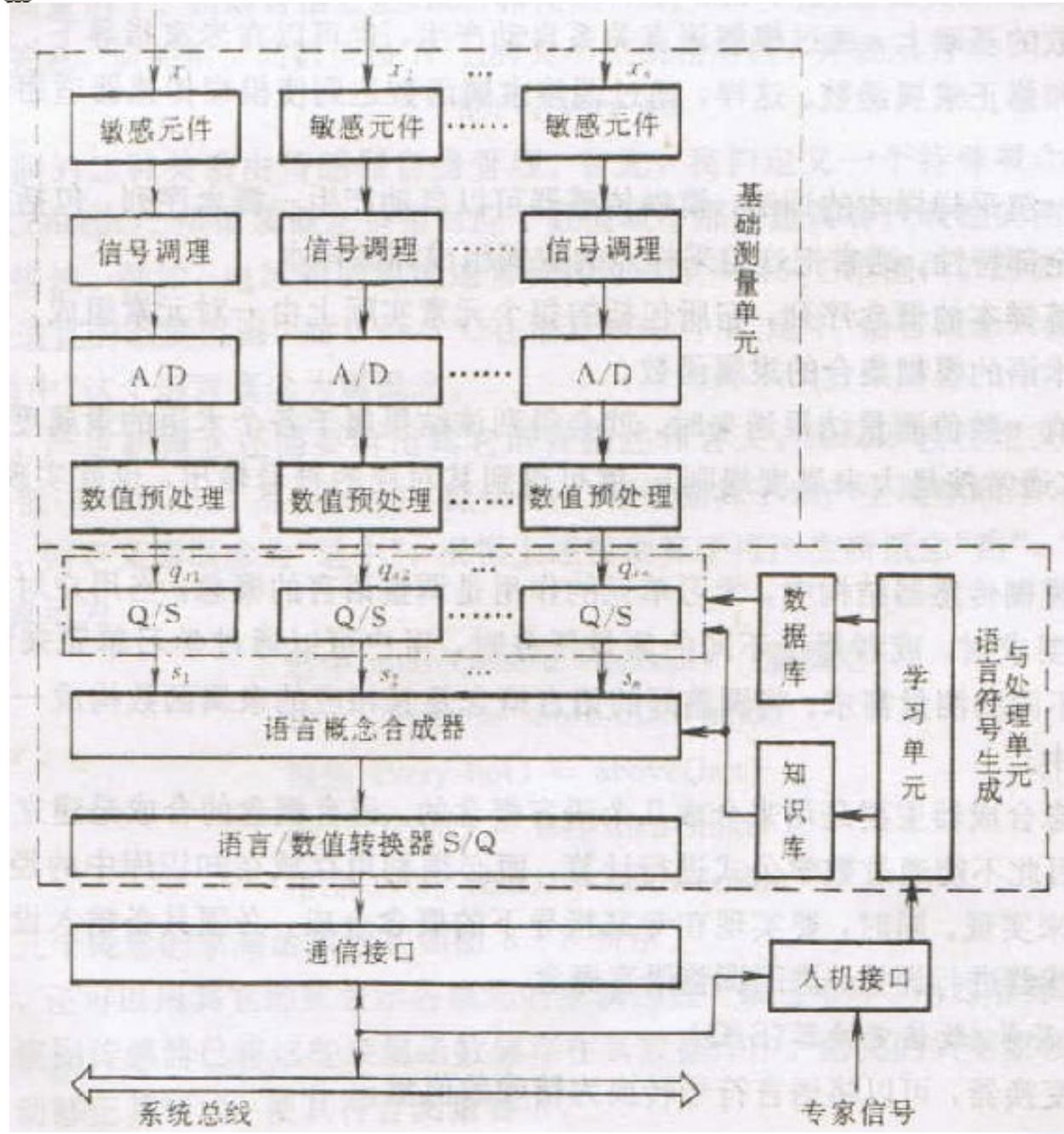
2) 语言符号生成与处理单元

数值/语言符号转换器阵列；概念合成器；知识库；数据库；学习单元，它们组成了多维模糊传感器的核心。主要功能：实现数值/语言符号的模糊转换，输出量是语言符号S（sentence—语句，semantic—语义）；

a) 知识库的内容

- * 模糊集合及其对应的隶属函数；
- * 生成概念的模糊推理规则；
- * 检测对象的特性背景知识。





多维模糊传感器结构框图



如相同血压值的不同人，其生成的符号肯定是不同的，指不同人的各种主要特征量。

* 测量系统的相关知识。

与系统本身的构成与功能特性相关，如同样称重的衡器，杆秤与电子秤的差别，或者测同样的量（如加速度）可采用不同的测量方法（电容法、应变法）。

功能：产生对应于模糊集合的隶属函数。

* 通过前面我们讲的各种方法，通过模糊语言关系自动生成；

* 在专家的指导下，通过学习和训练来产生和修正隶属函数。

b) 模糊传感器在使用前要进行样本训练，产生一概念序列，该序列中的每个元素由两部分组成：术语概念和隶属函数。





c) 实际测量时，数值量的结果经过该单元处理，得到属于各个术语的隶属度，再按模糊集运算规则（如前面我们介绍的最小邻域法规则）就可得到其对应的符号输出。

d) 学习单元的作用

- * 调整语言的概念、亦即术语；
- * 调整隶属函数；
- * 增加新的概念序列等。

e) 语言概念合成器

相当于我们前面介绍的多传感器信息融合的概念，只不过它是讲符号域中的不同符号进行融合后给出最恰当的语言符号输出。实际上是语言知识的综合。它的融合方法将在下一节里介绍。





3) 其他部分 (S/Q、人机接口、通信接口)

同前面的内容基本相同。其中通信接口中符号量的变换与传输，计算机通信领域中已经是非常成熟的技术。

§ 7.1.3 模糊传感器语言概念的产生方法

提供数值测量的语言描述。

方法：1) 运用语言间的语义关系

2) 根据确定特定数值测量值的语言描述，通过插值产生其它测量点的模糊描述。

通过语义关系产生概念

模糊传感器可对应被测数值量的变化范围输出多个语言描述，这些语言描述通过它们语义间的关系相联系。

为了表述这种“关系”，首先需定义一个特殊概念——属概念。“属概念”指对应于数值域中那些最具有代表性的测量点或测量范围的语言描述。





如：我们定义男性标准身高（按一个地区的统计数字来表示）为1.74m，那么对应数值1.74m的属概念为：“适中”，若再定义低于1.70m为低，高于1.80m为高，则介于1.70m~1.74m之间为“偏低”，介于1.74m~1.80m为“偏高”，后两个语义是在前面三个概念的基础上通过语义关系产生的。

采用模糊理论描述语义关系产生新概念的方法为：

- 1) 定义属概念及其隶属函数；隶属函数的确定主要是根据对象特性和经验知识。
- 2) 利用存贮于模糊传感器中的模糊算子，产生新的模糊概念；
- 3) 利用属概念隶属函数求得新产生概念的隶属函数；
- 4) 新概念若不符合测量要求，则通过训练算法修正其隶属函数。

新生概念的隶属函数的函数形式为：

$$f(\zeta) = \zeta \{1 - \sin[k\pi(\zeta - 0.5)]\}, \zeta \leq 1,$$

k：修正因子， $0 < k < 1$





模糊算子在语言域中用汉语词汇来表达的话，基本上是修饰性的副词。

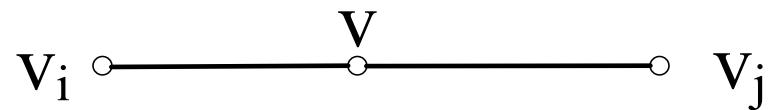
插值法产生概念

1) 数值域中特定的元素（又称为特征测量量）的概念：

如前面我们讲的身高：1.70, 1.74, 1.80均为数值域中的特定元素。若还包括体重量作为被测量，则：60kg, 70kg, 80kg亦为体重数值域的特定元素，若再包括年龄，则该系统就变成了三维被测对象系统。

2) 距离的概念

前面我们已经讲过了距离的概念。而这里讲任意一点 $v \in [v_i, v_j]$ 及其与 v_i, v_j 之间的距离的概念，可以理解为 v_i, v_j 两点之间连线的点，而不是连线之外的点。





它的产生方法是：

1) 在数值域中确定特定测量量或者说进行特征抽取。

特征抽取的效果涉及具体问题的背景及识别者的知识、技巧和意志等。

2) 建立隶属函数，包括特征量的隶属函数和插值量的隶属函数。

3) 识别判决产生对应插值的概念。

模糊传感器对测量环境的适应性

前面我们就讲到特征量抽取时涉及到具体问题的背景知识，考虑测量背景知识的影响，需对数值测量的描述进行适应性处理。这正如书中讲的具体温度值在不同的测量对象中有不同的概念一样。

处理的方法有两种： 1) 基于适应函数的处理方法；

2) 基于专家定性学习的方法。





1、基于适应函数的处理方法

适应函数的概念：从标准数值域到实际数值域之间的映射关系。

如：一般模拟信号作为 $4\sim 20mA$ 的标准信号输出的转换关系；再者一般产品的一些技术参数指标都在 $25^{\circ}C$ 和一个标准大气压下给出的，在实际测量和使用中，实际环境条件的变化会对相应的参数指标有影响。

适应函数使用的约束条件：

- 1) 与属概念对应的特征测量点不应随适应函数的变化而变化，如前面讲的“适中”的语义概念，对应的特征测量点； $4mA$ 对应零输入。
- 2) 特征测量点的描述应保持线性。

2、专家指导下的定性学习法

该方法主要是通过比较专家和模糊传感器对同一被测量定性描述的差异





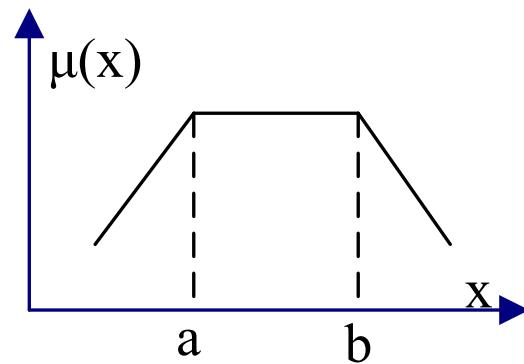
性，然后根据这种差异性按一定的修正规则来进行修正，以专家的定性描述作为标准 ($l(x)$)，一般分为三种情况：

- 1) $l'(x) < l(x)$ ，通过“增加”模糊算子调整；
- 2) $l'(x) = l(x)$ ，通过“不变”模糊算子调整；
- 3) $l'(x) > l(x)$ ，通过“减少”模糊算子调整。

专家信息的输入步骤中：

“3)”点的解释：被训练概念的模糊子集指两个相邻被测量数值之间的范围；

“4)”点的解释：如梯形隶属函数中a、b两点。





隶属函数的训练算法

语言概念的产生主要是基于专家经验和知识建立起来的，在实际测量中是否满足实际使用需要，亦即隶属函数是否准确，需要进行两方面的工作：

- 1) 通过标准样本对对应概念的隶属函数进行训练，亦即不断调整和改进，使隶属函数曲线调整到所需形状。
- 2) 在实际应用中亦要根据不同的测量环境作适当的调整。

这就相当于开发一个产品，它的设计方案首先要进行必要的验证和评审，最终是否合理还需顾客确认。

举例说明机器人。

我们在前面讲述隶属函数时，从隶属函数曲线来看有的曲线是连续变化的，也有曲线是分段变化的，下面就这两种情况作一讨论。

1、连续隶属函数训练方法





我们前面介绍的新生概念隶属函数为：

$$f(\zeta) = \zeta \{1 - \sin[k\pi(\zeta - 0.5)]\}$$

对隶属函数训练的结果是体现在对修正因子k值的最终确定，相对于传统传感器系统而言，相当于“定标”的概念。

训练步骤：

- 1) 确定训练样本所归属数值域的子集、范围和对应的语言域模糊子集；
- 2) 确定该训练样本在相关子集中的隶属函数；
- 3) 判定样本相关子集中的隶属度是否与希望的要求一致，若完全一致则维持原结果，否则需进行修正，修正有两种情况：

a) 不完全一致

指语言概念同训练样本的状态相符，但“精度”不够。

b) 完全不一致





指语言概念同训练样本的状态不相符。

实际上样本训练主要是解决各模糊子集相互交叉部分的被测量语言概念的归属问题，对于不交叉部分则是比较明确的。

2、分段隶属函数的训练样本

分段隶属函数的训练相对于连续隶属函数而言更简明，其训练步骤及方法亦基本一致。最终归结为对应模糊子集的特征量和对应数值域子集范围的调整。

模糊综合评判的概念

前面讲的内容基本上是针对单一变量进行单独评判的，而对于一个多被测量系统，且各个被测量之间可能还有一定的关联性，那么它的语言概念的生成必须采用模糊综合评判的方法来解决。





根据系统的复杂程度，模糊综合评判又分单级和多级两种形式。模糊综合评判基本上是先对各个因素进行单独评判，然后再对所有因素进行综合评判。

1、首先确定状态原因集

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$$

u_i ：可以是模糊的，也可以是非模糊的。

2、再确定权重集

引起各种状态的各种原因，其重要程度不尽相同，对状态影响大的原因要特别重视。

对应的 u_i 权集为: $\tilde{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$

各权数 a_i 应符合归一化和非负性的条件，亦即: $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ ， $a_i \geq 0$
权重集可表示为原因集上的模糊子集:

$$\tilde{A} = \frac{a_1}{u_1} + \frac{a_2}{u_2} + \cdots + \frac{a_m}{u_m}$$





a_i 的确定：根据知识、经验或隶属函数。

3、征兆集

是各状态原因可能引起的各种不同的征兆所组成的集合。

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, v_j$: 可以是模糊的，也可以是非模糊的。

模糊综合评判就是在综合考虑所有征兆（亦即各被测量对应符号域模糊子集）的基础上，给出最终的语言概念。

4、单原因的模糊评判

目的：确定被评判对象在一个状态原因的影响下对征兆集元素的隶属程度。

设定 u_i 隶属 v_j 的程度 r_{ij} ， u_i 的评判结果可用模糊集合 \tilde{R}_i 表示：

$$\tilde{R}_i = \frac{r_{i1}}{v_1} + \frac{r_{i2}}{v_2} + \cdots + \frac{r_{in}}{v_n} , \quad \tilde{R}_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}$$





单原因评判集:

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

它实际上是状态原因评判集U和征兆集V之间的一种模糊关系。

5、单原因的模糊综合评判

对 \tilde{R} 各项乘上对应的权数 a_i ($i = 1, 2, \dots, m$)，则模糊综合评判式为：

$$\tilde{B} = \tilde{A} \cdot \tilde{R} = (a_1, a_2, \dots, a_m) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$





$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij}), j = 1, 2, \dots, n$$

\tilde{B} : 模糊综合评判集; b_j 称为模糊综合评判指标。

它实际上是表达了一个状态原因所引起的各种征兆出现的可能性大小。

§ 7.1.4 模糊传感器举例

根据书中讲述的内容, 我们要明确这样几点:

- 1) 模糊传感器用于处理用数值传感器难以处理和解决的问题;
- 2) 模糊传感器可以输出更容易被人所理解和接受的结果;
- 3) 它具有学习和推理功能;
- 4) 对于某些应用领域, 它有着更为有效的实现方法和功能。

模糊血压传感器

功能: 相当于医学专家的处理水平, 可以综合环境及测量对象的背景知识对测量结果给出正确的评判。





1、功能实现：见书中的叙述

2、隶属函数产生的过程

1) 初始隶属函数 μ_{n0} 的确定为: $\mu_{n0} = e^{-k(p-a)^2}$

它是一个正态分布函数。为什么选用正态分布函数，这是因为一开始最佳血压值a的选定是按照大多数人的统计数值确定的，也就是说对应某一年龄段，其血压值的分布是一正态分布。

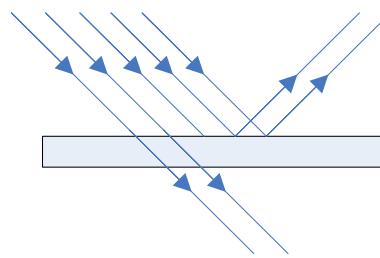
2) 根据性别、年龄、职业对隶属函数调整，实际上就是调整k值和a值。

模糊色彩传感器

1) 漫反射原理的概念

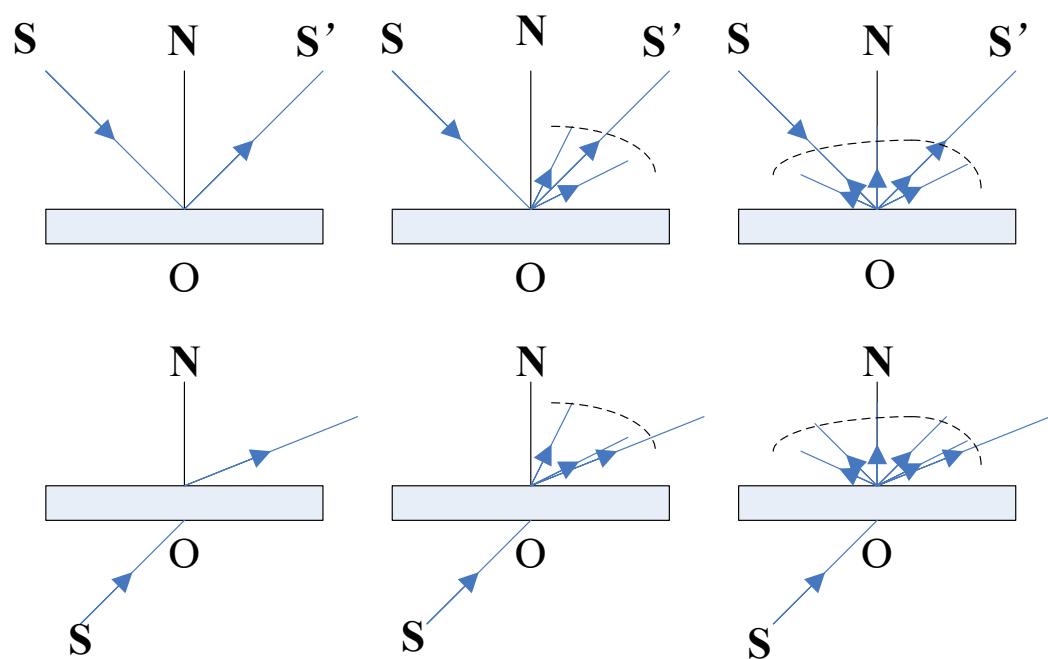
a) 光的反射吸收与透射：当光线投射到物体表面时，光线与物理表面相互作用后，会产生三种现象：反射现象；吸收现象；透射现象。一般依据材料性质不同，其系数值各不相同，但对于同一表面，三系数和为1。





b) 反射分布

- * 方向性正直反射；
- * 方向性漫散反射；
- * 漫散反射。



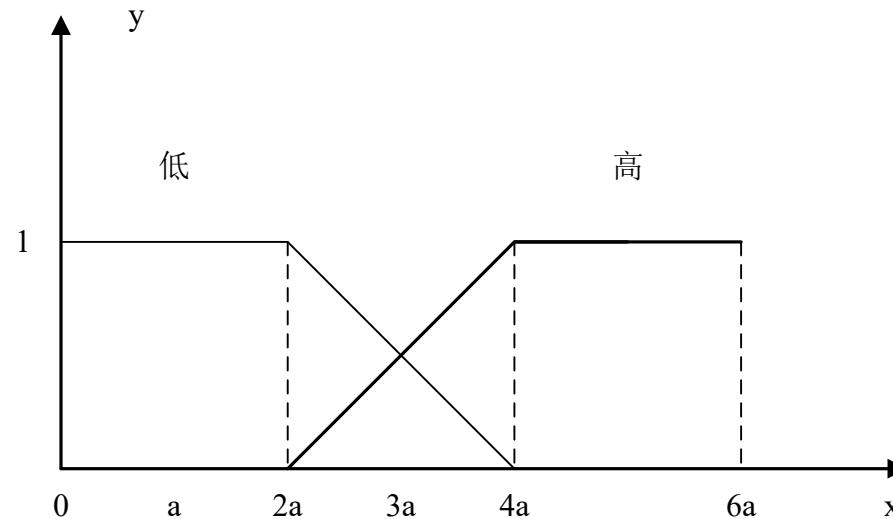
c) 透射分布





作业12

在集合 $U=\{0, 6a\}$ 的论域中，“低”和“高”为两个模糊概念，其对应的隶属函数曲线如下图所示。现要求按照下图分布形式，采用线性插值的方法，在中间增加“适中”的模糊概念，试给出其对应的隶属函数表达式，并重新画出整个论域中的曲线。





§ 7.2 人工神经网络在智能传感器中的应用

我们前面介绍的模糊智能传感器是将人类习惯的语言符号变量和适合于传感器的量化特征联系起来，同时强调对模糊性概念用可能性分布来解释。

但是以特征提取为基础的信号处理方法，在如何表示和提取特征、需要多少特征，都存在很大的盲目性和低效率，识别过程必须经历从数据获取、特征提取到判决几个阶段，所需的运算使得系统难以满足实时性的要求。

神经网络技术是解决上述问题的有力工具。在前面几章里的内容中都曾涉及到神经网络技术，但我们没做介绍，准备在本章主要内容讲完后再回过头去展开。

“人工神经网络”（Artificial Neural Network, ANN）是在对人脑组织结构和运行机制认识理解的基础上模拟其结构和智能行为的一种系统工程。





神经网络是由大量处理单元互连而成的网络，它是在现代神经生物学和认知科学对人类信息处理研究成果的基础上提出来的，它的特点如下：

- 1) 具有很强的适应能力、学习能力、容错能力和鲁棒性；
- 2) 信号处理过程接近人类思维活动；
- 3) 具有高度并行运算能力；
- 4) 可以实时实现最优信号处理算法。

神经网络技术的主要应用领域：模式分类、机器视觉、机器听觉、智能计算、机器人控制、信息处理、组合优化问题求解、联想记忆等许多领域。





§ 7.2.1 神经网络基本知识

人工神经网络模型

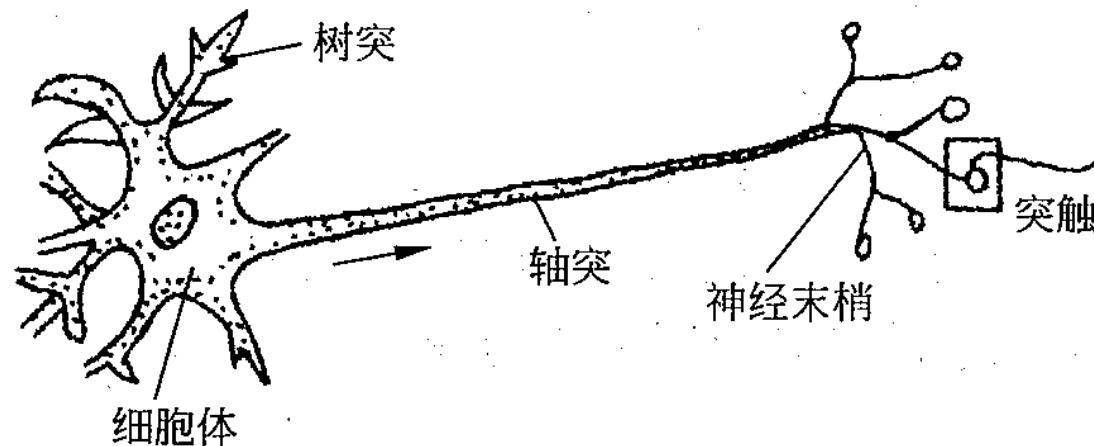
现有的神经网络模型已达上百种，随着应用研究的不断深入，新的模型还在不断推出。在信号处理和模式识别领域，应用最多的是以下四种基本模型和它们的改进型。

- 1) Hopfield神经网络（反馈网络）；
- 2) 多层感知器，其中BP网络（及由此延伸出的RBF神经网络）的应用率最高，达到80%～90%；
- 3) 自组织神经网络，又称自学习网络或竞争网络；
- 4) 概率神经网络。

神经网络的基本理论主要涉及到**稳定性、学习算法、动态性能**等几个方面，但是不管是什么模型的神经网络，神经元均是它们的基本组成单元。

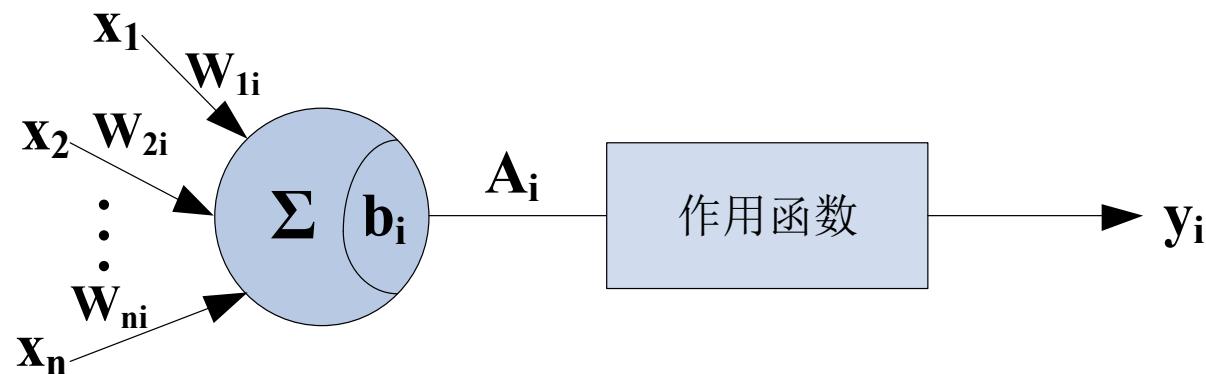
生理神经元的基本结构和基本神经元模型分别如下图所示：





生理神经元基本结构

每个人大脑中含有 $10^{11} \sim 10^{12}$ 个神经元，每个神经元又约束 $10^3 \sim 10^4$ 个突触



基本神经元模型

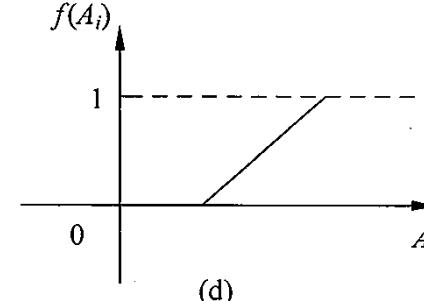
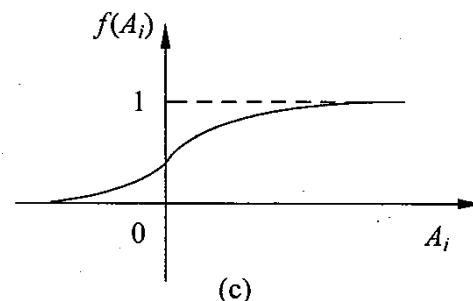
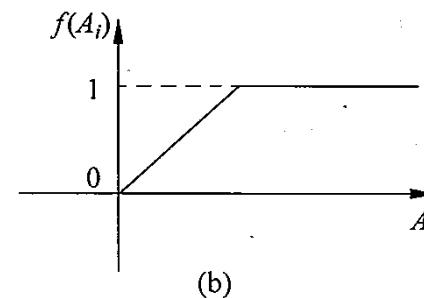
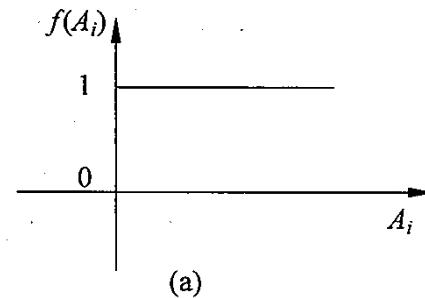




在多个输入量的作用下产生输出量，输出量为： y_i

$$y_i = f(A_i) \quad , \quad A_i = \sum_{j=1}^n w_{ji} x_j - b_i$$

第*j*个神经元输出量对第*i*个神经元的作用强度用 w_{ji} 表示，它的值称为权值。第*i*神经元输入总和称为激活函数，如果 A_i 超过相应的阀值 b_i ，就会产生一个输出来激励下一个神经元。而这两个神经元间的连接关系由作用函数（或称传递函数） f 来体现。常用作用函数的类型：





1) 阈值型神经元，又称M—P模型

它是二值型神经元，输出状态取值为1或0，如外界事件的存在与否而在人脑产生“有”或“无”的概念，冰和水之间的分界温度0℃。

$$y_i = f(A_i) = \begin{cases} 1 & A_i > 0 \\ 0 & A_i \leq 0 \end{cases}$$

2) 线性饱和型

输入——输出特性满足一定的区间线性关系，一般用于神经网络输出层。如人对某一追逐物的逃避速度。

$$y_i = \begin{cases} 0 & A_i \leq 0 \\ CA_i & 0 \leq A_i \leq A_c \\ 1 & A_c \leq A_i \end{cases}$$





3) S型神经元模型

又称连续型神经元模型，输出量在某一范围内连续取值。如人体对外界温度变化所产生的感受，假定 25°C 为一中性点。

它的输入——输出特性是非线性的，一般用于多层神经网络的隐层。

$$y_i = f(A_i) = 1 / (1 + \exp(-A_i))$$

或 $y_i = f(A_i) = 1 / (2(1 + \tanh(A_i / A_0)))$

4) 子阈累积型

当所产生的激活值超过T值时，该神经元将被激活而产生响应，子阈的一个作用是抑制噪声。

5) 概率型

属于二值型神经元激活函数，其输出状态0或1是根据激活函数的大小，按照一定的概率来确定。





假定神经元状态为1的概率为：

$$P(S_i = 1) = 1 / (1 + \exp(A_i / T))$$

则状态为0的概率为：

$$P(S_i = 0) = 1 - P(S_i = 1)$$

式中，T为一个随机变量。玻尔兹曼机神经元属于这一。

6) 高斯型函数

一般用于RBF网络的隐层传递函数。

上述模型均是在生物神经系统研究成果的基础上演绎出来的。当众多的神经元连接成一个网络并动态运行时，就构成了一个高维非线性动力学系统。





人工神经网络的基本数学基础

主要指是非线性动力学系统及神经网络学习算法方面的数学基础。

1、向量的内积（向量积）与外积（交积）

给定一个n维向量： $V = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n)$

$$U = W \square V$$

表示给定一个单元U，它接受来自n个单元的输入向量V和权向量W的内积。

两个向量的交积（外积），其结果仍为向量，设三维空间中的两个向量：

$$A = (a_1, a_2, a_3) \quad B = (b_1, b_2, b_3)$$

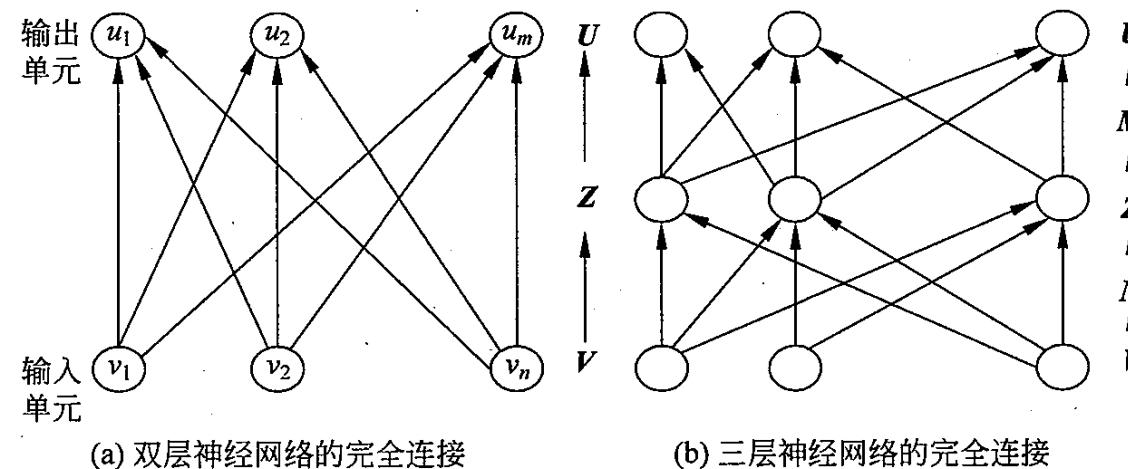
$$A \times B = [(a_2 b_3 - a_3 b_2), (a_3 b_1 - a_1 b_3), (a_1 b_2 - a_2 b_1)]$$

2、矩阵运算与层次结构网络

给定一个向量V和一个矩阵W，则它们的乘积为一向量，则有：

$$W \square V = U \quad U = WV \quad V = W^{-1}U$$





W^{-1} 为 W 的逆矩阵； U^T 、 V^T 分别是 U 、 V 的转置矩阵。

在图（b）中，输入向量 V 通过权矩阵 N 映射成向量 Z ，然后 Z 再通过权矩阵 M 映射成向量 U ，即： $U = MZ = M(NV)$

在人工神经网络模型和算法研究中，可采用向量及矩阵的转置和外积运算来进行，设： $V = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n)$ ， $U = (u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n)$ 则： $VU^T = \sum v_i u_i$

外积的概念可用来表示一个神经网络的学习过程。对于给定向量 V ，当算出 V 和 V^T 的内积时，就能生成有关存储状态唯一的存储矩阵。





人工神经网络的结构

是由基本神经元按一定的拓扑结构构成群体并行分布式处理的计算结构。根据拓扑结构不同，分：分层网络，相互连接型网络。

1、分层网络（如多层次感知器）

对于分层网络的研究，早期仅局限于单层结构，但单层结构在实际应用中有很大的局限性。随着研究的不断深入和发展，两层和三层结构可以很好的解决应用中的一些问题，层数越多功能越强，但太多会使问题变得过于复杂。

参考教材介绍的是一种三层网络结构，它包括：输入层、隐含层、输出层，是一种用得比较多得网络结构。每层节点数（或者说神经元数）的确定：

- 1) 输入层：对应输入量个数。
- 2) 隐含层：一般来说个数不限，但不能少于3个，5个以上效果就比较好，越多效果越好，实际应用一般取5~9之间。
- 3) 输出层：对应输出量个数。





2、相互连接型结构（如自学习网络）

它的特点是：神经网络在接受外界输入时，将会分成不同的区域，不同的区域对不同的模式具有不同的响应特征，即不同的神经元以最佳的方式响应不同性质的信号激励，从而形成一种拓扑意义上的有序图，它是一种非线性的映射关系。

例如：从甲地到乙地有几条路可走，但具体是哪条路最好？

学习与记忆

1、神经网络的学习

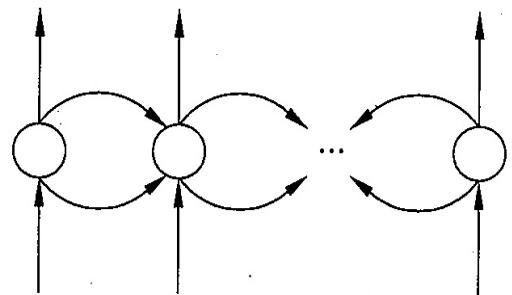
对于神经网络而言，学习的过程实际上就是样本训练的过程，通过训练，调整网络的连接权值。

1) 这种调整方式或者说学习规则有两种：

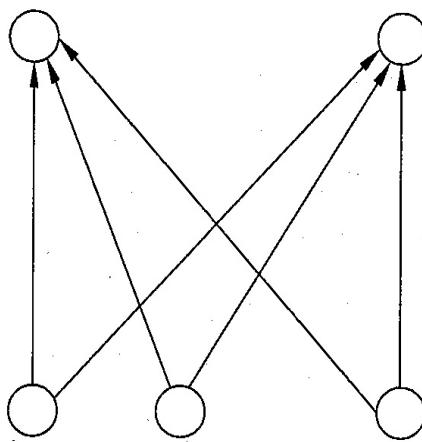
a) 相关学习规则 (Hebb学习律)

$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta[x_i(t), x_j(t)]$, η ：学习因子
相当于一种开环系统。

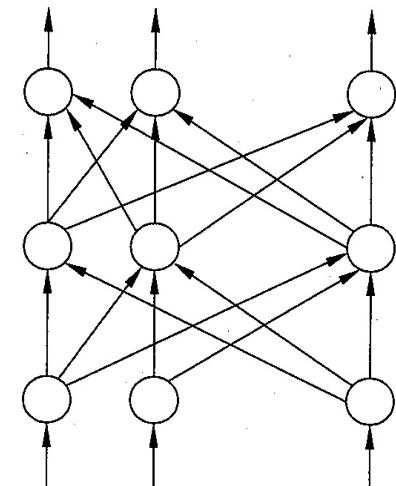




(a)

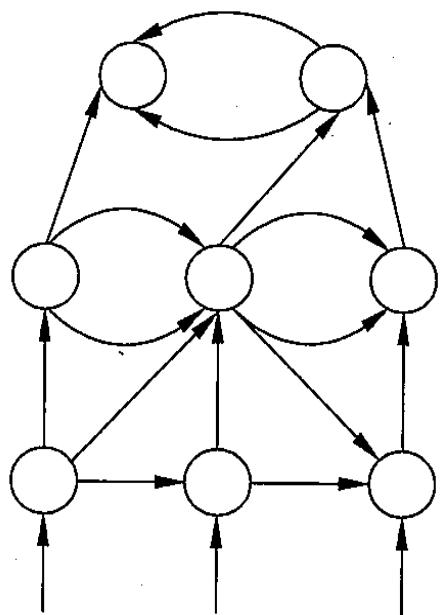


(b)



(c)

分层网络的结构



(d)

相互连接型网络的结构





b) 误差修正学习规律（ δ 学习规则）

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta[d_j - y_j(t)]x_i(t), i = 1, 2, \dots, n$$

采用该种学习律的多层网络又称误差后向传播网络

2) 学习类型:

a) 有导师学习，必须预先知道学习的期望结果—教师信息，并依此按照某一学习规则来修正权值。

b) 强化学习，利用某一技术表示“奖/惩”的全局信号，衡量与强化输入相关的局部决策（权值、神经元状态等变量的变化）。

c) 无导师学习，不需要教师信息和强化信号，只要给定输入信息，就能够通过自组织、自调整、自学习给出一定意义上的输出响应。

2、神经网络的记忆

主要体现在权值上，因为该权值的获得是通过学习将获取的知识信息凝聚起来的表现。权值为正，起兴奋作用；权值为负，起抑制作用；权值绝对值大小反映连接作用的强弱。





§ 7.2.2 前向网络（感知机、BP网络、竞争学习网络）

感知机

它属于两层网络结构，仅由输入层和输出层构成

1) 训练要素：

训练样本：通过给定样本输入量和希望的输出量对网络进行训练；

训练规则：亦即权值修正方法。

2) 权值修正法：采用 δ 学习规则。

BP网络（这里的“BP”主要指它的学习算法）

1、BP(Back Propagation) 网络模型

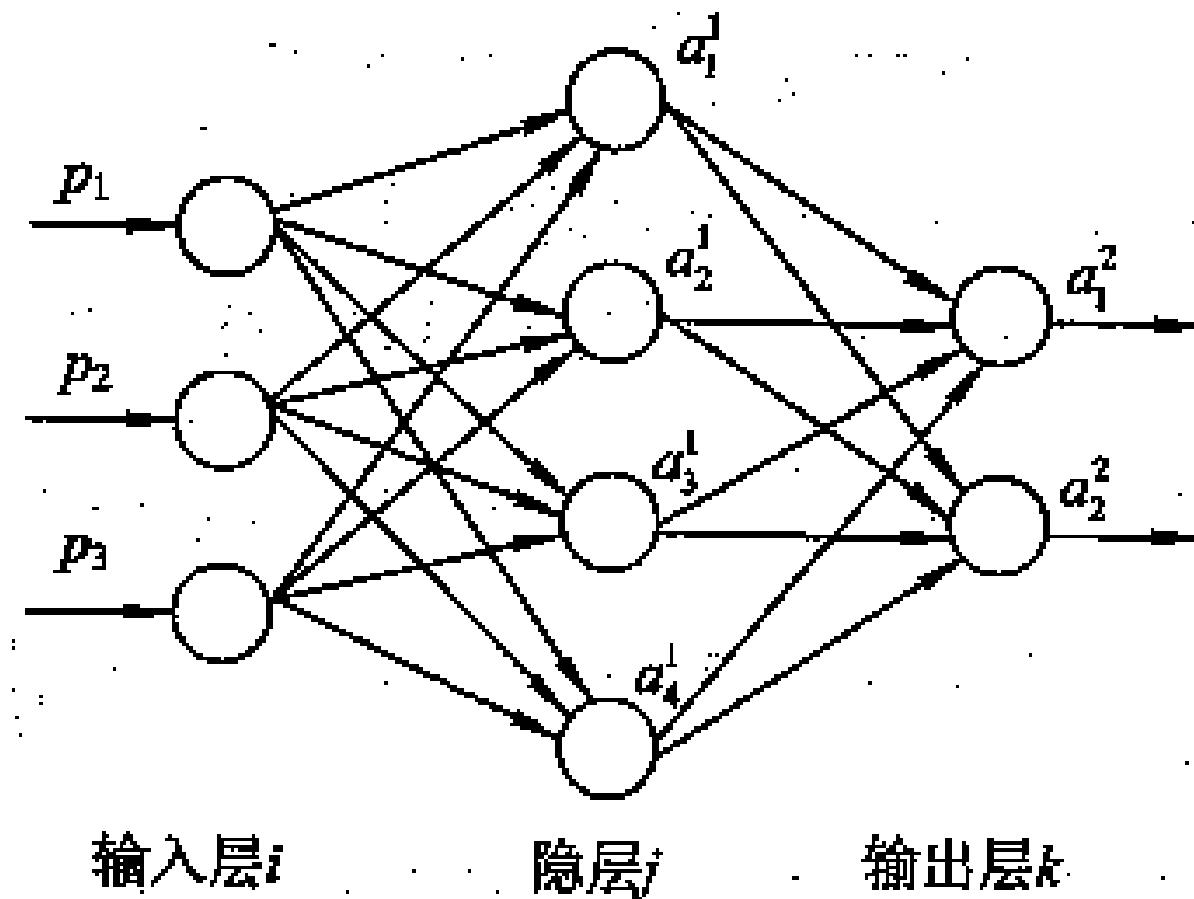
1) 采用多层网络结构，层与层之间多采用全互连方式；同一层单元之间不连接。

2) 作用函数为： $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$

通用形式：

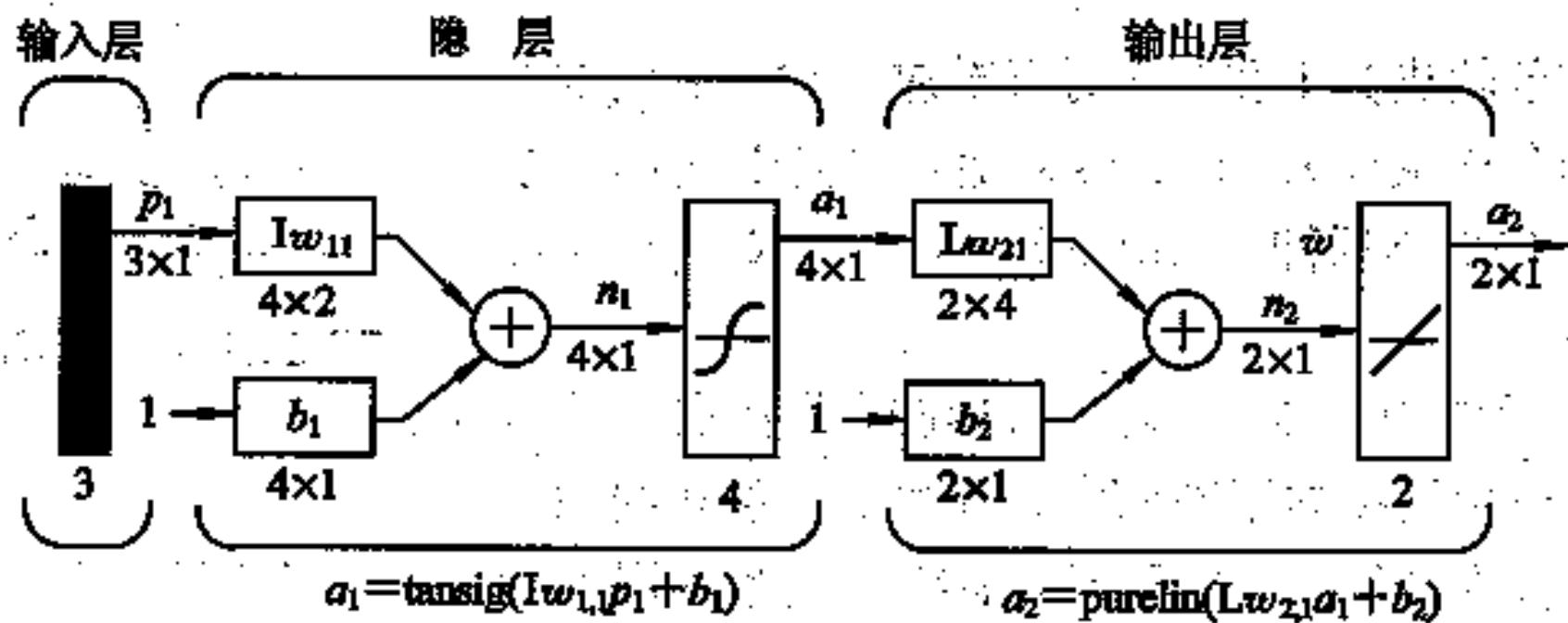
$$y_i = \frac{1}{1+\exp[-(A_i - b_i)/b_0]} , \quad A_i : \text{样本输入值。}$$





BP网络模型示意图





BP网络模型





对通用形式作用函数的解释

b_i : 偏置值或称阀值, 正阀值的作用是将激励函数沿横轴向右平移,
 b_0 的作用是改变激励函数的形状。采用较小的 b_0 会使作用函数接近阀值型,
而较大的 b_0 则对应平滑变化的作用函数。

3) 权值修正法: 采用 δ 学习规则

输入层输入、输出:

$$O_i = P_i$$

隐 层输入、输出:

$$n_{1j} = \sum_{i=1}^{R=3} O_i \square w_{ji} + b_{1j} \quad O_{1j} = f(n_{1j}) = \frac{1}{1+e^{-n_{1j}}} = a_j^1$$

输出层输入、输出:

$$n_{2k} = \sum_{j=1}^{L=4} O_{1j} \square w_{kj} + b_{2k} \quad O_{2k} = f(n_{2k}) = \frac{1}{1+e^{-n_{2k}}}$$





2、学习算法

输出层节点k的输出 O_{2k} 与期望输出 d_k 存在误差，输出层m个节点的总误差E为：

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{m=2} (d_k - O_{2k})^2$$

网络学习的过程，就是通过反复的计算，求取E，根据E调整相关参数，最终使得E小于给定的允许偏差。权值参数调整的规则就称为学习法则：

$$\Delta Lw_{kj} = Lw_{kj}(t+1) - Lw_{kj}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial Lw_{kj}}$$

$$\Delta Iw_{ji} = Iw_{ji}(t+1) - Iw_{ji}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial Iw_{ji}}$$

η 称为学习因子。





1) 输出层训练误差 δ_{2k} :

$$\begin{aligned}\delta_{2k} &= -\frac{\partial E}{\partial n_{2k}} = -\frac{\partial E}{\partial O_{2k}} \frac{\partial O_{2k}}{\partial n_{2k}} \\ &= -f(n_{2k})[1 - f(n_{2k})] \square [d_k - f(n_{2k})]\end{aligned}$$

2) 隐层训练误差 δ_{1j} :

$$\begin{aligned}\delta_{1j} &= -\frac{\partial E}{\partial n_{1j}} = -\frac{\partial E}{\partial O_{1j}} \frac{\partial O_{1j}}{\partial n_{1j}} \\ &= -f(n_{1j})[1 - f(n_{1j})] \square \sum_{k=1}^{L=4} \delta_{1k} Iw_{kj}\end{aligned}$$





3) 权值修正公式:

Lw_{kj} 的修正公式:

$$\Delta Lw_{kj} = -\eta \frac{\partial E}{\partial Lw_{kj}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial n_{2k}} \frac{\partial n_{2k}}{\partial Lw_{kj}} = \eta \delta_{2k} O_{2j}$$

$$Lw_{kj}(t+1) = Lw_{kj}(t) + \eta \delta_{2k} O_{2j}$$

Iw_{ji} 的修正公式:

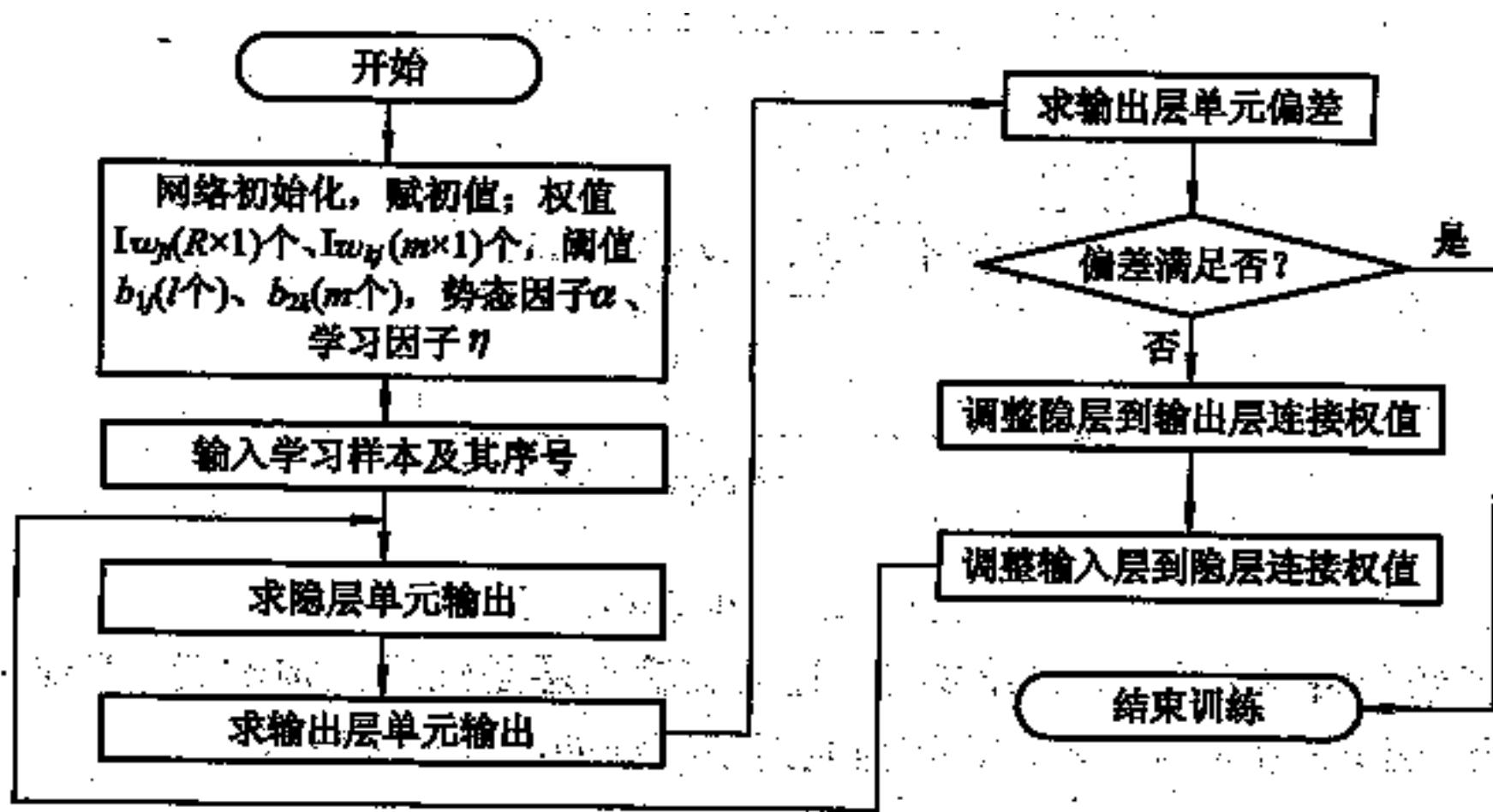
$$\Delta Iw_{ji} = Iw_{ji}(t+1) - Iw_{ji}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial n_{1j}} \frac{\partial n_{1j}}{\partial Iw_{ji}} = \eta \delta_{1j} O_{1i}$$

$$Iw_{ji}(t+1) = Iw_{ji}(t) + \eta \delta_{1j} O_{1i}$$





4) 学习的流程:





整个学习过程：

- a) 随机地给出一组不完全相同的数值作为权值初始值；
- b) 取一组样本，依次将其中每一个样本作为网络输入，计算网络输出值；
- c) 计算每个样本对应的 δ_{pj} ，并进而求出 Δw_{ji} ，由此调整权值；
- d) 如训练样本未使用完，~~取~~另一组样本，转至 δ_{pj} ；
否则根据误差准则判定是否收敛于一组稳定权值。

越大，学习速度可能会越快，但也可能引起振荡效应，为此在权值修正公式中再加上一个“惯性项”（又称为势态项）

， α ：势态因子

$$\Delta w_{ji}(t+1) = \eta \delta_{pj} O_{pj} + \alpha \Delta w_{ji}(t)$$





α 的作用：有益于抑制振荡，但延长了学习时间。

5) 学习结果的判定

用网络的均方根值误差来定量反映学习性能。

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^m \sum_{j=1}^n (d_{pj} - y_{pj})^2}{mn}} , \text{ 当 } E_{RMS} < 0.1 \text{ 时,}$$

则表明学习结果满足要求。

改善方法：采用遗传算法等。

3、竞争网络

对于竞争网络的结构和机理，书中已讲得比较明确，这里仅介绍一下竞争算法的步骤：

1) 权值初始化并选定邻域的大小，所谓邻域大小指与某一节点相连的所有节点数；





2) 确定输入模式;

3) 计算空间距离:

$$d_j = \sum_{i=1}^{N-1} [x_i(t) - w_{ji}(t)]^2 \quad , \quad w_{ji}(t) \quad : \text{节点i与j之间的权值。}$$

4) 选择节点 $j^\#$ ，它满足 $d_{j^\#} = \min_j d_j$

5) 按下式改变 $j^\#$ 和其邻域节点的连接强度。

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta(t)[x_i(t) - w_{ji}(t)] \quad ,$$

$j \in j^\#$ 的邻域, $0 \leq i \leq N-1$

6) 返回到2)，直至满足 $[x_i(t) - w_{ji}(t)]^2 < \varepsilon$ (给定误差)





§ 7.2.3 反馈网络

Hopfield网络结构

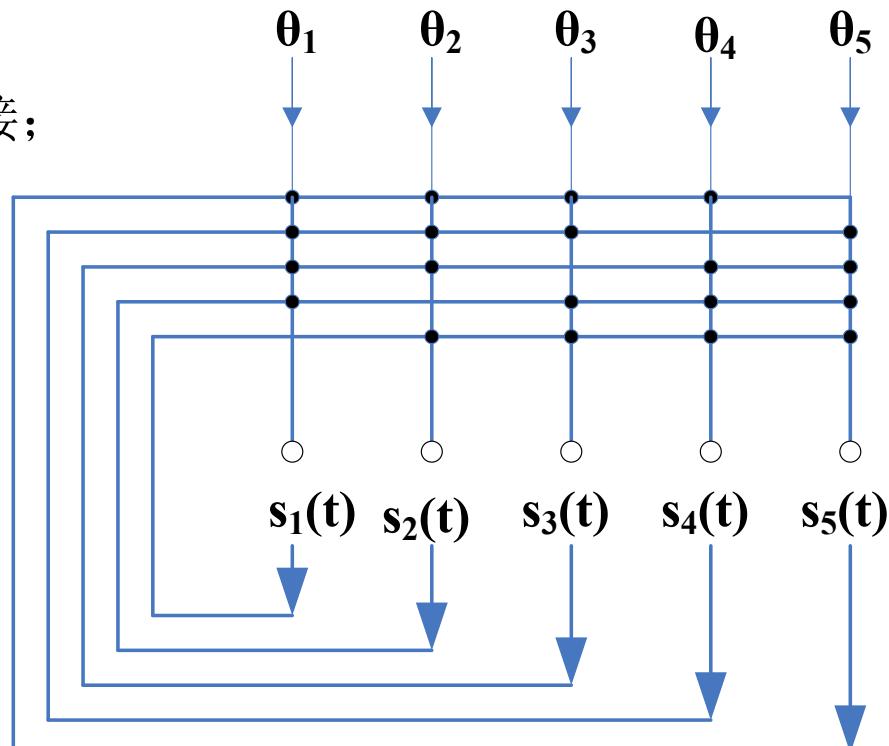
特点：

- 1) 属于单层互连神经网络；
- 2) 任意两个神经元之间都有连接；
- 3) 分为离散型和连续型。

离散型Hopfield网络

神经元的输出为离散值，1和0（或 -1 ），它们分别代表神经元的激活和抑制状态。神经元在时刻t的状态用向量表示为：

$$S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]$$





权值矩阵: $T = \{T_{ij}\}$, $i = 1 \sim N$, $j = 1 \sim N$, 阈值矢量:
 $b = [b_1, b_2, \dots, b_N]$; 则: T 和 b 定义了一个唯一的N维的离散型 Hopfield 网络。

1、衡量这种神经网络的性能指标:

- 1) 稳定性, 在t时刻, 对于任意 $\Delta t > 0$, 有 $S(t + \Delta t) = S(t)$;
- 2) 存贮容量, 指网络的稳定点个数;
- 3) 吸引域半径, 指网络进入稳定状态时初始状态的集合的Hamming球的半径;
- 4) 收敛时间, 指网络从某一起始状态进入稳定点状态所需的时间。

2、网络的工作方式 (三种)

- 1) 串行方式: 在某一时刻, 只有一个神经元的状态按下式发生变换。





$$\begin{cases} S_i(t+1) = \text{sgn}\left[\sum_{j=1}^N T_{ij} S_j(t) - b_i\right] \\ S_j(t+1) = S_j(t), j \neq i \end{cases}$$

- 2) 部分并行方式: 在某一时刻, 部分神经元的状态发生变化
- 3) 全并行(同步)方式: 在某一时刻, 所有神经元状态均发生变化。

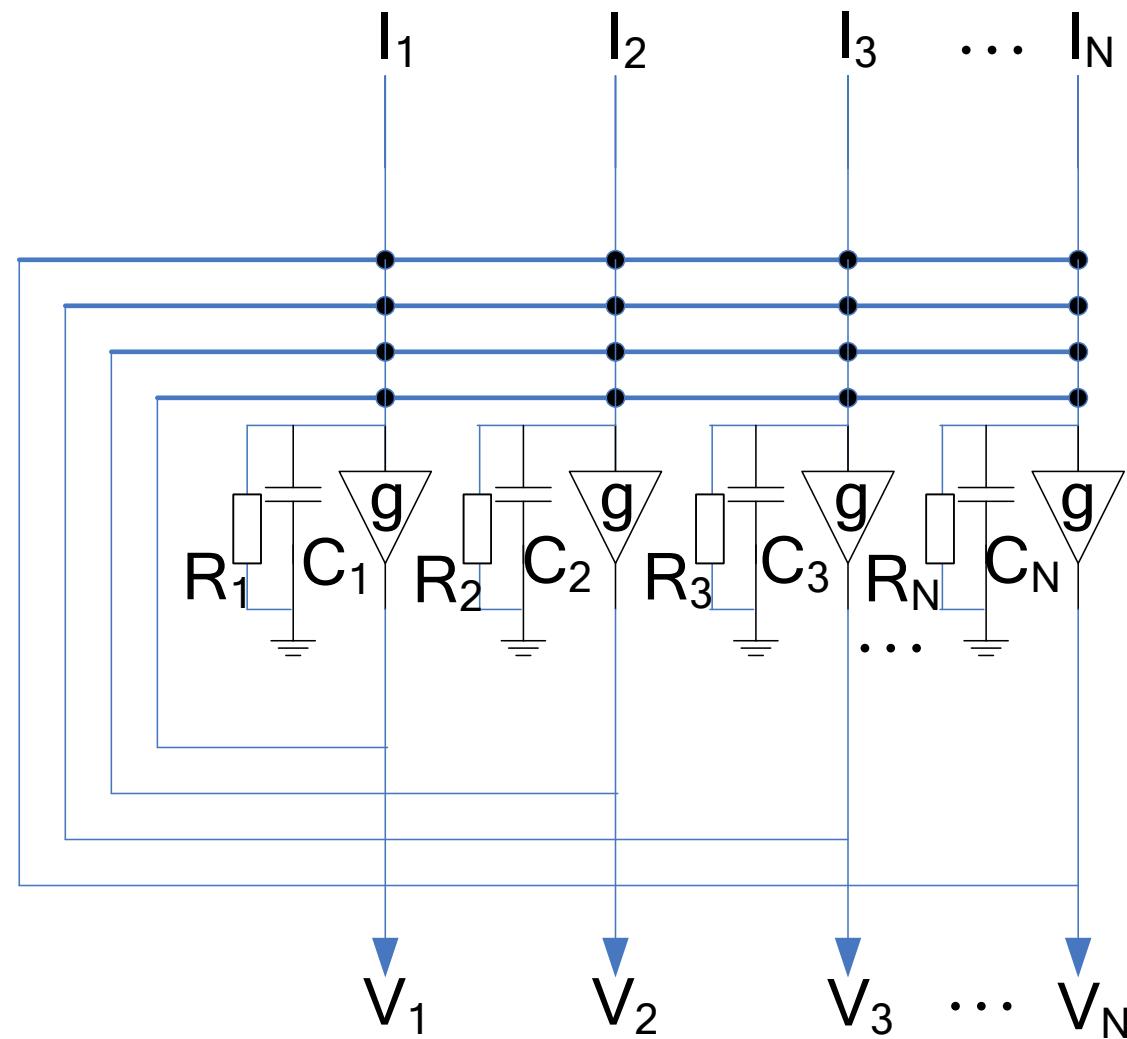
连续状态Hopfield神经网络

指神经元的输出不再是离散值0和1, 而可以在某一区间连续变化。 $g_i(u)$ 为第*i*个神经元的传递函数, 通常取连续、有界和单调增长的函数。

应用领域: 信号分解、自适应滤波、谱估计、A/D变换等。

见下图







§ 7.2.4 神经网络技术在智能传感器中的应用

在上一节里我们主要介绍了神经网络技术的一些基本知识，通过学习，我们知道 了神经元的基本特征，它是神经网络的构成元素，神经元之间的关系由作用函数来建立。应用神经网络技术来解决实际问题，一般按以下几个步骤进行：

- 1) 根据处理对象选择神经网络结构和模型（或称作用函数）；
- 2) 确定权值修正算法，那么这里有相关学习法（Hebb学习律）、误差修正学习法（ δ 学习律），还有 δ 规则的推广形式：BP算法。
- 3) 提供一定量的标准样本进行网络的样本训练，以确定最终权值。那么在整个训练过程中，一个要注意训练方法，再者判定训练的结果是否符合要求。

神经网络技术在智能传感器中所能解决的问题：

- 1) 非线性修正和在线标定；





- 2) 信号滤波，实现对噪声干扰信号的抑制；
- 3) 信号的分解与提取，亦即从强的背景噪声中提取微弱有用信号；
- 4) 静态误差的综合修正；
- 5) 通过传感器的信息融合消除交叉灵敏度的影响；
- 6) 进行传感器的故障诊断和信号恢复。

下面我们将对前面涉及到神经网络的部分内容重新认识一下：

1、(§ 6.2) 多传感器信息融合技术中的传感器阵列信息融合之例三： P_{283}

功能：自动识别未知气体的类别和混合气体的浓度

1) 硬件结构

a) 阵列由四个单元组成，每一个单元含有一个气敏电阻，一个加热电阻和一个测温电阻。

b) 信号调理电路：使每个单元都在最佳温度状态下工作。





c) 微处理器系统：信号采集、温度控制、数据融合。

2) 人工神经网络技术

采用三层BP网络结构，作用函数选用S型，具体过程与我们前面讲的内容完全一致。

3) 识别效果

可以达到一般的信息处理方法所不能做的效果，若增加在线标定功能，可以大大降低对气体传感器本身选择性及时间稳定性的要求。

4) 存在的问题

a) 如何进一步提高精度；

b) 如何进一步提高对环境的适应性，也就是使之更“聪明”。

这就相当于一个小学生，教会他的题型他可能会做，但是题型有所变化，聪明的孩子可能还会做，一般的孩子可能就一筹莫展了。





2、(§ 6.5) 自诊断中 § 6.5.3 人工神经网络方法

应用神经网络方法进行传感器系统的故障诊断和信号恢复是基于人工神经网络技术如下方面的优越性。

I) 具有强的非线性拟合能力

非线性可以用高阶多项式来拟合，而高阶多项式的每一项均可作为神经网络的输入项，这样一来，不仅仅解决了非线性的问题，而且取得串行计算变换为并行计算的效果。

II) 它可以是一个多输入多输出系统，因此输出信息是可以根据需要设定，亦即确定相应的网络结构和输出模式。因此它具有分类和细化能力。

III) 实时性效果比较好，可以进行在线监测。

IV) 具有自学习能力，以适应环境变化引起系统参数时变和未知干扰输入信号的影响。





V) 信号的分解功能。利用它具有信号分解的功能，再利用多传感器信息融合的能力，可以将故障传感器的输出信号恢复出来（前提：该故障传感器输出信号所包含的信息必须存在于其它传感器之中）。

1) 人工神经网络的结构

采用了多层次前馈神经网络，亦即BP网络

优点：能够很好地近似非线性映射；能够任意精度一致地逼近子集上的实连续函数。

2) 人工神经网络方法的故障诊断和信号恢复的步骤

a) 故障诊断的方法：与我们前面讲的方法基本一致

i) 确定神经网络的输入输出量

输入量：关键传感器的输出；输出量：根据需要确定，一般来说是指最能反映传感器是否存在故障的最敏感的特征量。





比如说科大目前衡量一个职工对科大贡献的大小：文章（级别、数量），科研项目（经费数、获奖级别），创收等。

ii) 选择合适类型和结构的神经网络。

iii) 选择样本数据进行样本训练，确定权值和阀值。

iv) 进行在线分析，给出诊断结果，判断分析是否满足实际需要。

b) 信号恢复的方法

i) 确定神经网络的输入输出量

输入量：故障传感器的输出数据；输出量：正常工作传感器的输出值。这里分析两种情况：

* 传感器阵列中的某一传感器有故障，阵列中的传感器具有相同功能；





* 多传感器系统中的某一传感器有故障，每个传感器具有不完全相同的功能，但相互之间是包容的。

其余步骤同a)

3、传感器过失误差检测方法

a) 过失误差的概念：由于传感器故障等原因引起测量数据产生的偏差。

b) 检测的目的：判定某一传感器输出的测量数据是否存在过失误差，这种检测在实际工作当中还是有重要意义的。

如对于某一重要的控制系统，一旦传感器的数据与实际值的误差超过一定的阈值，则可能会引起系统失控等。俗话说：失之毫厘，谬以千里，这也就是软故障的概念。

c) 人工神经网络的构成

采用BP网络和S型作用函数

d) 输入输出量





以偏差向量作为神经网络的输入向量，以各测量变量作为输出量，测量变量不存在过失误差，网络对应的输出值为0，否则为1。

4、神经网络实现微弱信号提取

a) BP网络权向量方法原理 (BPWV)

该方法实际上分两步进行：

i) 第一步取检测系统的输入为背景噪声信号，确定偏移权向量为零时的权向量 W_x^*

ii) 在输入信号为背景噪声信号+被测学习信号的情况下会产生新的权向量 W_k

由于在有被测信号输入的情况下，输入到BP网络的误差信号包含了被测信号的信号，亦即： $V_k = W_k - W_x^*$ 包含了 S_k 的信息。

通过偏移权向量检测器变换就可以输出 S_k 的信号。





iii) 横式滤波器亦即可调带通滤波器。

5、传感器静态误差综合修正法

主要是如何确定输入、输出量

输入量：传感器的输出量；环境参量： $t = (t_1, t_2, \dots, t_k)$

网络结构：S型BP网络。

6、三传感器数据融合处理法（消除两个非目标参量）

与多维回归分析法的比较：

不需要建立包含非目标参量的函数解析式，但需要检测非目标参量k，进行 $k+1$ 维标定实验，由标定实验数据作为学习标本。

a) 三传感数据融合原理

该智能传感器由传感器模块和神经网络模块组成，实际上这里的神经网络模块就可以由DSP构成。





传感器模块：提供对应三输入量P、T、I的三输出量：

U_P 、 U_t 、 U_I ，在作为神经网络的输入量时，电流变化量以
 $\gamma = \frac{|\Delta I|}{I}$ 作为输入量。

神经网络模块：

输入量： U_P 、 U_t 、 γ ，输出量： P' ，为消除t和 ΔI 影响后的压力值。

b) 样本库的建立

i) 进行三维标定实验

主要是确定不同的测量点，然后测出对应的三信号输出值。

ii) 样本数据的归一化处理

神经网络的输入输出数值一般要求在−1~1之间。





c) 神经网络的训练及其结构的确定

采用BP网络及S型作用函数

训练判定标准值：

$$e = \frac{1}{18} \sum_{m=1}^{18} (P' - \hat{P}_m)^2 \leq \varepsilon$$

d) 结果及评价

经神经网络处理后输出稳定性提高了14.7倍，可见采用神经网络法对消除传感器本身受交叉因素干扰的影响非常有效。





作业13

应用于智能传感器系统的多层感知机网络结构是什么？简述BP算法的学习过程。

作业14

试查找一篇最近一年公开发表的与智能传感器相关的英文文章，先将论文题目发给助教，确认后进行消化吸收，然后分组进行交流，每组推荐一名上讲台进行交流。





目 录

- 第1章 概 述
- 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述



第7章 智能技术在传感器系统中的应用 ——补充内容

要 点：

- ◆ 支持向量机技术在智能传感器中的应用；
- ◆ 粒子群优化算法在智能传感器中的应用。



§ 7.3 支持向量机技术在智能传感器中的应用

支持向量机SVM（Support Vector Machines），主要用于传感器的动态建模、故障诊断、气体辨识和交叉灵敏度的消除等。

支持向量机通过定义不同的内积函数，可以实现多项式逼近、贝叶斯分类器、径向基函数、多层感知器等学习算法的功能。

支持向量机与神经网络方法类似，相对于多元回归分析法，不需要建立包括非目标参量在内的函数解析式，但均需由实验标定提供训练样本和检验样本，对于 k 个非目标参量，需要提供 $k+1$ 维的标定实验数据。



§ 7.3.1 基础知识

一、统计学习理论

基于数据的机器学习：

从观测数据出发，寻找研究对象的规律性，利用其规律性进行数学建模，并进而对未来的数据进行预测。

三种机器学习的实现方法：

- ◆ 经典的参数统计估计方法——传统统计学
缺点：要求研究的样本数目趋于无穷大，缺乏实用性。
- ◆ 经验非线性方法，如人工神经网络
两个方向：参数选择的优化算法；选择“最优”模型的统计测量方法。
- ◆ 基于统计学习理论的学习方法，如支持向量机和基于核的方法
专门研究小样本数据量情况下，机器学习规律性的理论。
统计学习理论研究的主要问题包括四个方面：



- 1) 基于经验风险最小化原则下统计学习一致性的充要条件。
- 2) 学习过程的收敛性及收敛速度。
- 3) 学习过程中收敛速度（推广能力）的控制。
- 4) 学习算法的构造

1、学习问题的一般性表示

学习：利用有限数量的观测数据来寻找待求的依赖关系。

最小化风险泛函：

$$R(\alpha) = \int Q(z, \alpha) dF(z), \alpha \in \Lambda$$

$F(z)$ ：空间 z 上的概率测度；

$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots]$, $\alpha \in \Lambda$: 参数集合；

$Q(z, \alpha)$ ：函数集合；

z : z_1, z_2, \dots, z_l , 独立同分布数据。



测试误差的期望风险:

$$R(\alpha) = \int \frac{1}{2} |y - f(x, \alpha)| dP(x, y)$$

$P(x, y)$: 未知概率分布, 对应的 p 是其分布密度;

y : 与 x 相对应的实际值;

$f(x, \alpha)$: 与 x 相对应的理论值;

一个观测数量有限的训练集上的被测平均误差率——经验风险:

$$R_{emp}(\alpha) = \frac{1}{2l} \sum_{i=1}^l |y_i - f(x_i, \alpha)|$$

期望风险与经验风险的关系描述:

$$R(\alpha) \leq R_{emp}(\alpha) + \sqrt{\frac{h[\ln(2l/h) + 1] - \ln(\eta/4)}{l}}$$



上式成立的概率： $1 - \eta$ ； $0 \leq \eta \leq 1$ ；

h ：非负整数，称为VC维， h 越大，学习机器的复杂性越高；

上式右边称为“风险界”，第2项称为“VC置信范围”。

2、VC (Vapnik Chervonenkis) 维

用于测量函数列的容量。

$$VC\ dim(F) = \max \{h : N(F, h) = 2^h\}$$

$N(F, h)$ ： h 维向量中不同向量的个数。

3、结构风险最小化 (Structural Risk Minimization, SRM)

定义了在对给定数据逼近的准确性与逼近函数的复杂性之间的一种折中。



对于一定的 (p, τ_k) ，函数集合满足下列不等式：

$$\sup_{\alpha \in \wedge_k} \frac{\left(\int Q^p(z, \alpha) dF(z) \right)^{1/p}}{\int Q(z, \alpha) dF(z)} \leq \tau_k, \quad p > 2$$

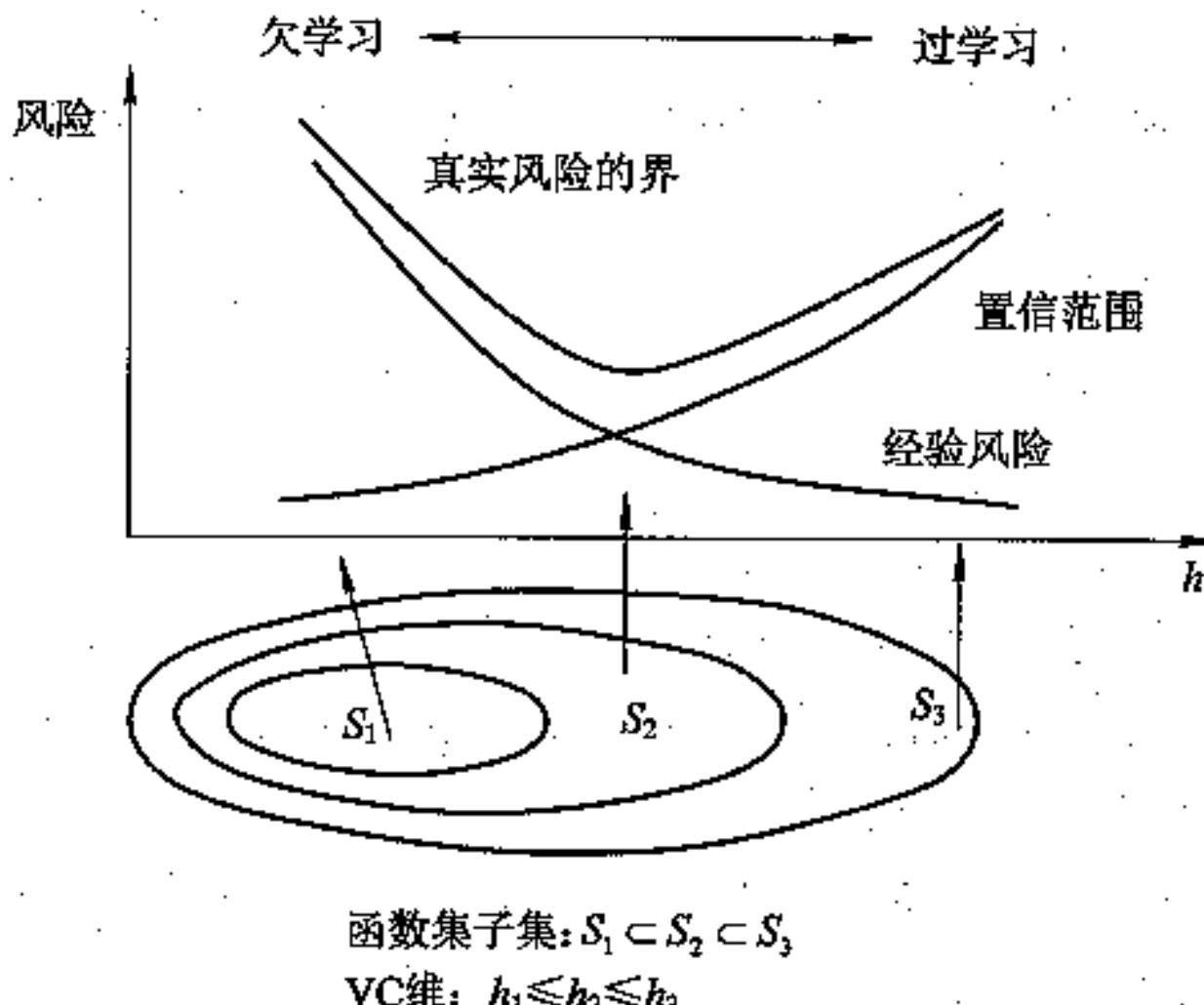
这种结构称为容许结构，结构风险最小化原则就是在容许结构的嵌套函数集 S_k 中寻找一个合适的子集 S^* ，使结构风险达到最小，即：

$$\min_{S_k} R_{emp}(\alpha) + \sqrt{\frac{h[\ln(2l/h) + 1] - \ln(\eta/4)}{l}}$$

4、建模误差

包括逼近误差和估计误差。

逼近误差因模型失配产生；估计误差因学习过程中选择了非优化模型所造成。这两个误差共同形成泛化误差。



结构风险最小化原理



二、支持向量机 (Support Vector Machine)

基于统计学习理论的一种新的通用机器学习方法，**基本思想**：

- ◆ 通过用内积函数定义的非线性变换将输入空间变换到一个高维特征空间；
- ◆ 在高维空间用线性函数假设空间寻找输入与输出之间的非线性关系；
- ◆ 学习算法基于结构风险最小化原则。

1、支持向量机的优点：

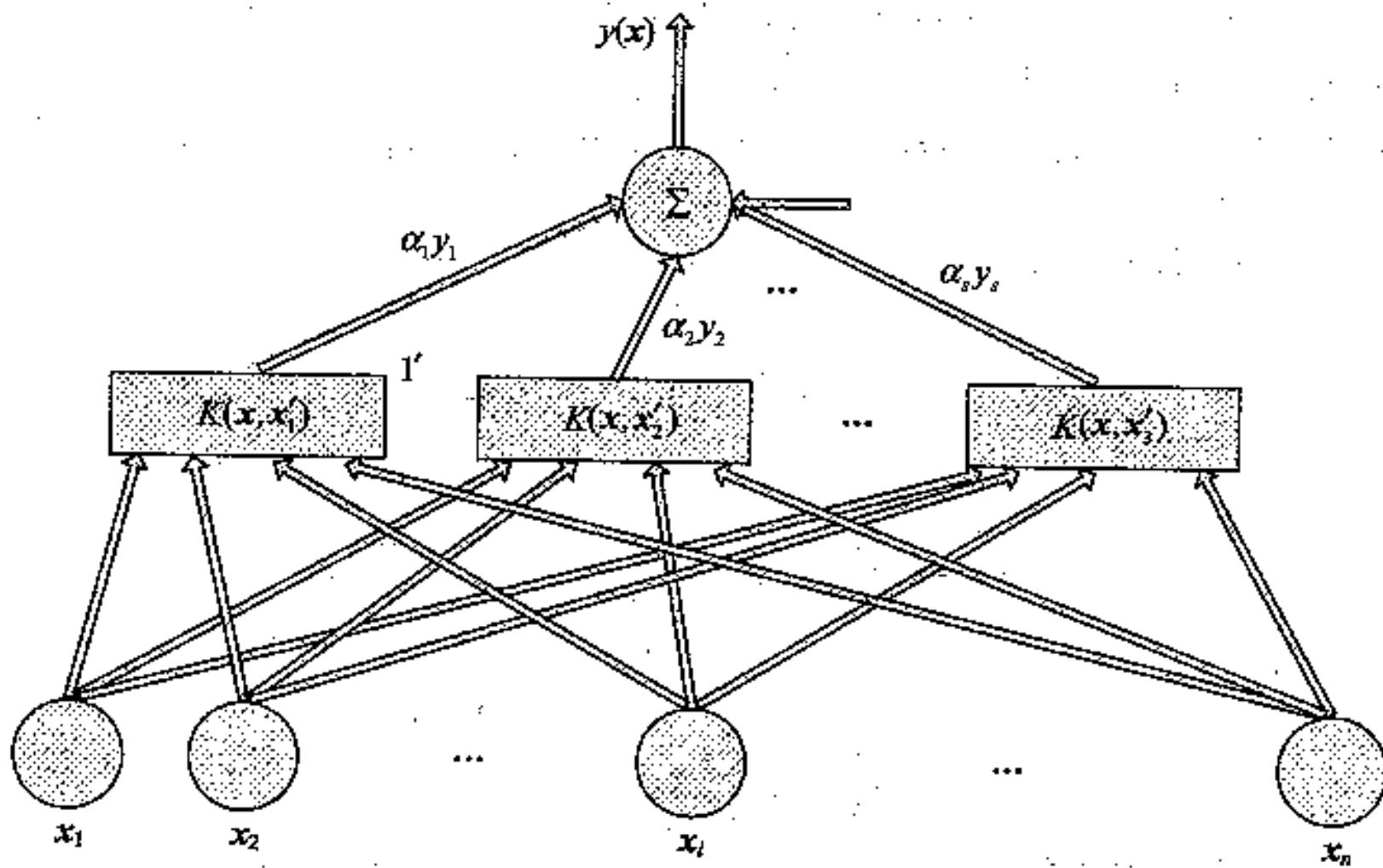
- ◆ 专门针对有限样本，求得在现有信息条件下的最优解；
- ◆ 通过二次型寻优，解决了神经网络方法中无法避免的局部极值问题；
- ◆ 通过非线性变换，保证学习机器有较好的推广能力，并使算法复杂度与样本维数无关。

2、支持向量机的结构

a_i ：拉格朗日乘子， $i=1, 2, \dots, s$ ；

b ：阈值或偏移量；

$K(x, x'_i)$ ：一个支持向量机的核函数；



支持向量机结构示意图



支持向量机通过核函数将输入空间的数据映射到高维的特征空间，在特征空间F中，通过线性回归函数进行数据的分类或拟合。

$$f(x) = \omega K(x, x_i) + b$$

3、支持向量机的核函数：

建立核函数的目标是使得特征空间的维数不再影响计算，或在特征空间不需要进行内积计算。

定义 φ 为输入空间 X 到特征空间 F 的映射，若特征空间的内积与输入空间的核函数等价，即：

$$K(x, x') = \langle \varphi(x), \varphi(x') \rangle = \langle \varphi(x'), \varphi(x) \rangle$$

满足Mercer条件：

$$K(x, x') = \sum_m^{\infty} a_m \varphi_m(x) \varphi_m(x'), a_m \geq 0$$



$$\iint K(x, x') g(x) g(x') dx dx' > 0, g \in L_2$$

则核函数就能表征为特征空间中的一个内积。

4、核函数的种类

SVM的核函数不同，则SVM输出表达式及输出结果就不同。

1) 线性核

$$K(x, x_i) = \langle x, x_i \rangle$$

2) 多项式核

$$K(x, x_i) = (\langle x, x_i \rangle + p_2)^{p_1}$$

3) RBF核——高斯型径向基函数

$$K(x, x_i) = e^{-\frac{\|x-x_i\|^2}{2\sigma^2}}$$



4) Sigmoid (多层感知器) 核

$$K(x, x_i) = \tanh(p_1 \langle x, x_i \rangle + p_2), \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

5) 张量积核

$$K(x, x_i) = \prod_{i=1}^n K_i(x, x_i)$$

5、支持向量机的种类:

1) SVC (支持向量分类)

用支持向量的方法描述分类的问题，这里又分线性可分、线性不可分、非线性分类三种情形。

2) SVR (支持向量回归)

用支持向量的方法描述回归的问题，分线性回归、非线性回归。



§ 7.3.2 支持向量机的训练、检验与测量

一、训练样本及检验样本的制备

在输入变量整个变化范围内根据需要确定标定点及数量，对实验标定所获得的样本数据N，将其分为两部分：训练样本 N_1 、检验样本 N_2 ，并使其格式相同，从而形成SVM的输入向量（样本）和输出向量（样本）：

$$\{[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}], y_i\}$$

二、支持向量机的训练

训练步骤：

1) 输入训练样本

训练样本 (N_1 个) 作为支持向量，y作为期望输出向量，并行输入支持向量机；



检验样本 (N_2 个) 作为特征空间向量，串行输入支持向量机。

- 2) 设置SVM学习参数及核函数参数
- 3) SVM训练：

基于训练样本及真实风险最小化原则，求出SVM结构参数（权系数和偏移量）。若模型输出向量 $y(x)$ 与期望输出向量 y 的差值最小，则训练结束。

三、支持向量机的检验

将检验样本 (N_2 个) 作为输入向量输入训练好的支持向量机，比较检验样本输出结果与期望的输出值，若：

- 1) 在要求的误差范围内，训练好的支持向量机满足使用要求；
- 2) 超出范围， 调整SVM学习参数及核函数参数，重新训练；
- 3) 确定权系数 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ 和偏移量 b ，即得到回归模型。



四、测量

由实际测量中获得的测量样本输入到SVM的输出表达式中，即可获得准确的待测量。

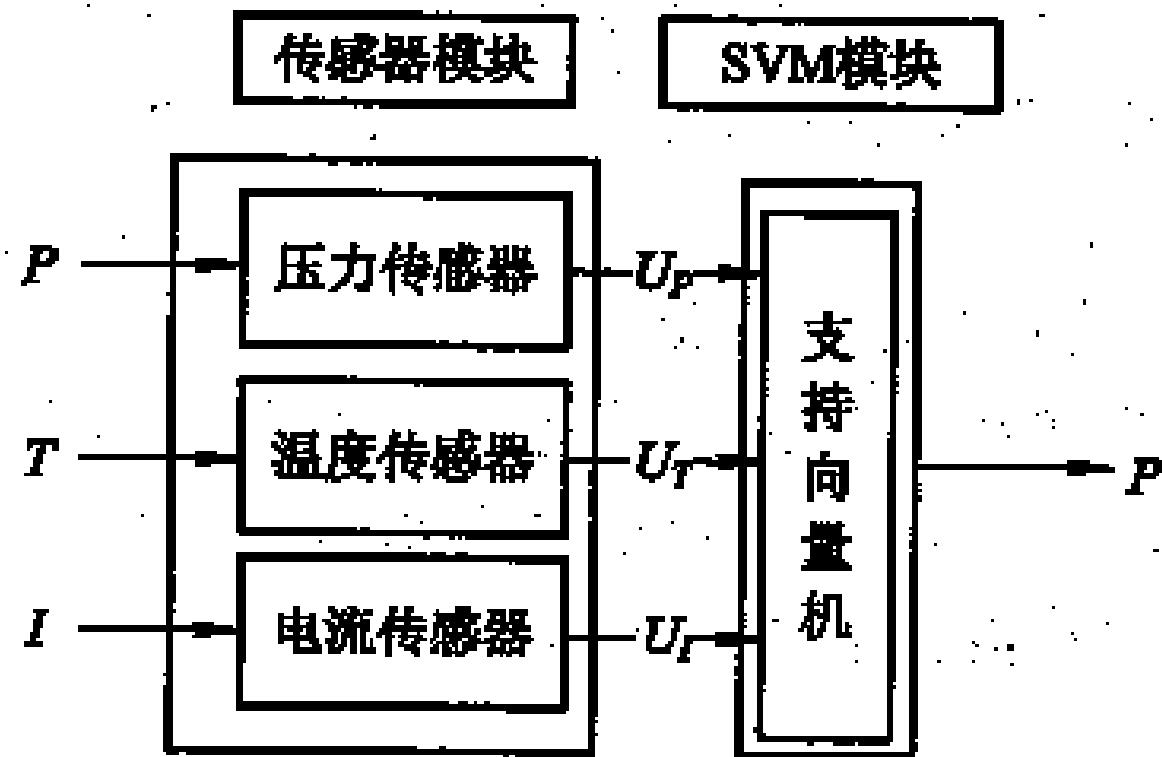
五、移植

经过训练并通过检验的支持向量机，将已知的权系数和偏移量代入SVM的输出表达式，根据所选用的硬件使用环境，进行软件编程实现，并通过实际运行，获得同样的使用效果。



§ 7.3.3 基于SVM方法的三传感器数据融合

一、系统组成

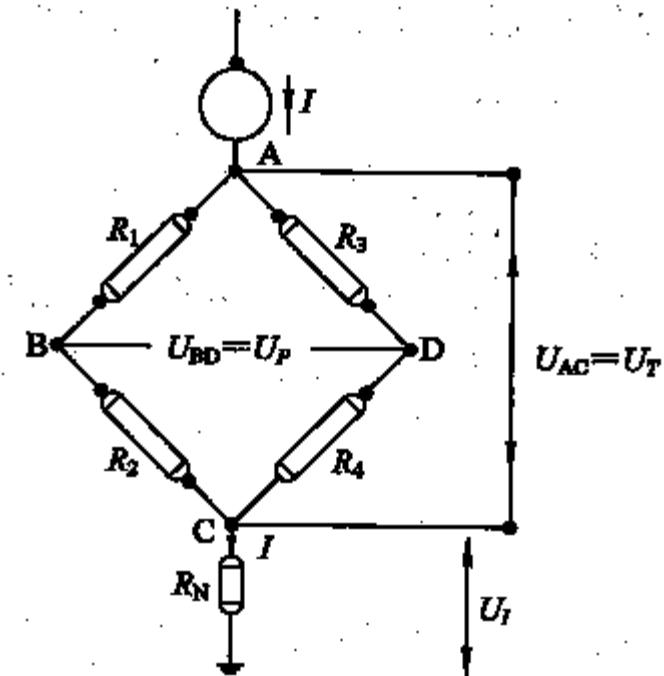


基于SVM的智能压力传感器系统框图



1、传感器模块

采用右图所示的检测电路，
分别获取压力、温度、电流信
号的电压输出值： U_p 、 U_t 、 U_i 。



2、支持向量机模块

$$y(x) = w^T x + b = \sum_{i=1}^s \alpha_i K(x, x_i) + b$$

在上式中，通过多维标定实验获得 n 组样本： $\{[U_{Pi}, U_{Ti}, U_{Ii}], P_i\}$ ；
输入向量的维数 $m=3$ ； x_i 是从 n 组样本中取 s 组样本作为训练样本的支持向量；
 b 是SVM的阈值或偏移量； w 是SVM的权系数向量，数量为 s ； α_i 是与 x_i 对应
的拉格朗日乘子；



实际测量时， x 代表被测输入向量，即： U_P 、 U_T 、 U_I ；而 y 代表期望输出标量 P ； $K(x, x_i)$ 是SVM的核函数。

二、示例1：降低两个干扰量影响的SVM功能模块的设计

采用Gaussian型RBF核函数的SVM作为其计算模型。

1、样本的制作

分学习（训练）样本、测试（检验）样本；

输入样本（三维）、输出样本（一维）。

2、编程实现

- 1) 利用Matlab平台进行设计、测试、验证；
- 2) 数据的预处理，根据需要确定是否进行归一化处理；
- 3) 支持向量机的参数；
- 4) 不同参数对输出结果的影响， σ 影响最大；



5) 对输入样本是否进行归一化处理，使输出结果最佳的 σ 的最优值一般不一样。

3、SVM 融合输出结果及评价

核函数的参数 kerneloption (σ) 对融合输出结果的影响比较大，需要反复测试，才能找到合适的 support vector 机的结构参数：w、b。

评价参数	零位温度系数 a_0 (/°C)	灵敏度温度系数 a_s (/°C)	电流影响系数 a_I (/mA)
融合前计算值	1.9×10^{-3}	1.2×10^{-2}	9.0×10^{-2}
$\sigma = 0.338$, Gaussian 型 RBF 核融合	2.1×10^{-4}	4.6×10^{-4}	3.6×10^{-4}
$\sigma = 10$, Gaussian 型 RBF 核融合	8.2×10^{-3}	6.1×10^{-4}	4.7×10^{-3}



4、移植

利用PC的强大计算功能，基于Matlab软件计算平台，进行支持向量SVM的训练，确定好训练合格支持向量SVM的结构参数、权系数w、偏置量b、RBF核参数 σ 。

将上述参数直接固化到单片机或DSP的内存中；同时用C语言改编上述实际运行程序为单片机或DSP能够直接编译执行的程序并下载固化。

现场实际测量时，由下式求取融合后的数值：

$$y = \mathbf{w}\mathbf{x} + b$$



§ 7.4 粒子群优化算法在智能传感器中的应用

粒子群优化算法是近年来迅速发展的一种智能优化算法，与遗传算法有点类似，都是基于群体优化的方法，都是将系统初始化为一组随机数，通过迭代搜索最优值。但粒子群优化算法更简单、更容易实现，因此，目前已成为国际上优化领域新的研究热点。

在这里，我们结合参考教材里面的相关内容，对粒子群优化算法的基本概念、基本内容、具体应用做一个简要的介绍。



§ 7.4.1 粒子群优化算法概况

群智能 (Swarm Intelligence)

无智能或简单智能的主体通过任何形式的聚集协同而表现出智能行为的特性。

群智能的主要算法

两种主要算法：

1) 蚁群优化算法 (Ant Colony Optimization, ACO)

应用于组合优化问题，如：车辆调度、机器人路径规划、路由算法设计等。

2) 粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)

应用于过程控制、图像识别、故障诊断等一些优化领域。

群智能算法的特点

1) 是一种能够有效解决大多数全局优化问题的新方法，而且方法简单，易于实现。



- 2) 应用领域包括：多目标优化、数据分类、聚类、模式识别、流程规划、信号处理、系统辨识、控制与决策等。
- 3) 仍然处于新兴发展与改进完善阶段。

§ 7.4.2 粒子群优化算法基础知识

粒子群优化算法源于人类对自然界生物群体行为研究的结果，通过计算机对动物复杂的群体行为进行仿真研究，建立起了微粒群算法的基本概念，其规则为：

- 1) 飞离最近的个体；
- 2) 飞向目标；
- 3) 飞向群体的中心。

个体学习与文化传递；信念的社会性及智能性；个性与社会性的平衡。



基本粒子群优化算法

粒子 i 在第 j 维子空间中运动的速度及位置：

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)]$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1)$$

$i = 1, 2, \dots, M$, M 是粒子的总数；

j : 表示微粒的第 j 维，或称为算法优化的第 j 个参数；

c_1 : 认知参数，又称加速因子，取值范围： $0 \sim 2$ ；

c_2 : 社会参数，又称加速因子，取值范围： $0 \sim 2$ ；

r_{1j} : 随机函数，在 $[0 \sim 1]$ 之间变化；

r_{2j} : 随机函数，在 $[0 \sim 1]$ 之间变化；

p_{ij} : 为粒子个体 i 的历史最好解的第 j 维值；

p_{gj} : 为所有粒子在 t 时刻的历史最好解的第 j 维值。

$$p_{gj}(t) = \min \{ p_{ij}(t) \}$$



每次迭代，每个粒子根据目标函数计算其适应值大小，再根据适应值确定当前粒子最优位置 $p_{ij}(t)$ ，群体最优位置 $p_{gj}(t)$ ，再由上式调整各个粒子的速度及位置。

结束条件：

- 1) 迭代次数达到设定值，一般设为100；
- 2) 搜索到的最优位置满足预设的最小适应值，一般为零。

设 $f(x)$ 为最小化目标函数，微粒 i 的当前最好位置：

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t), & f(x_i(t+1)) \geq f(p_i(t)) \\ x_i(t+1), & f(x_i(t+1)) < f(p_i(t)) \end{cases}$$

粒子数为 M 的群体最好位置：

$$\begin{aligned} p_g(t) &\in \{p_0(t), p_1(t), \dots, p_M(t)\} \mid f(p_g(t)) \\ &= \min\{f(p_0(t)), f(p_1(t)), \dots, f(p_M(t))\} \end{aligned}$$



为防止微粒在进化过程中离开搜索空间，对 v_{ij} 有范围限定：

$$v_{ij} \in [-v_{\max}, v_{\max}] \quad v_{\max} = k \bullet x_{\max}, 0.1 \leq k \leq 1.0$$

标准粒子群优化算法

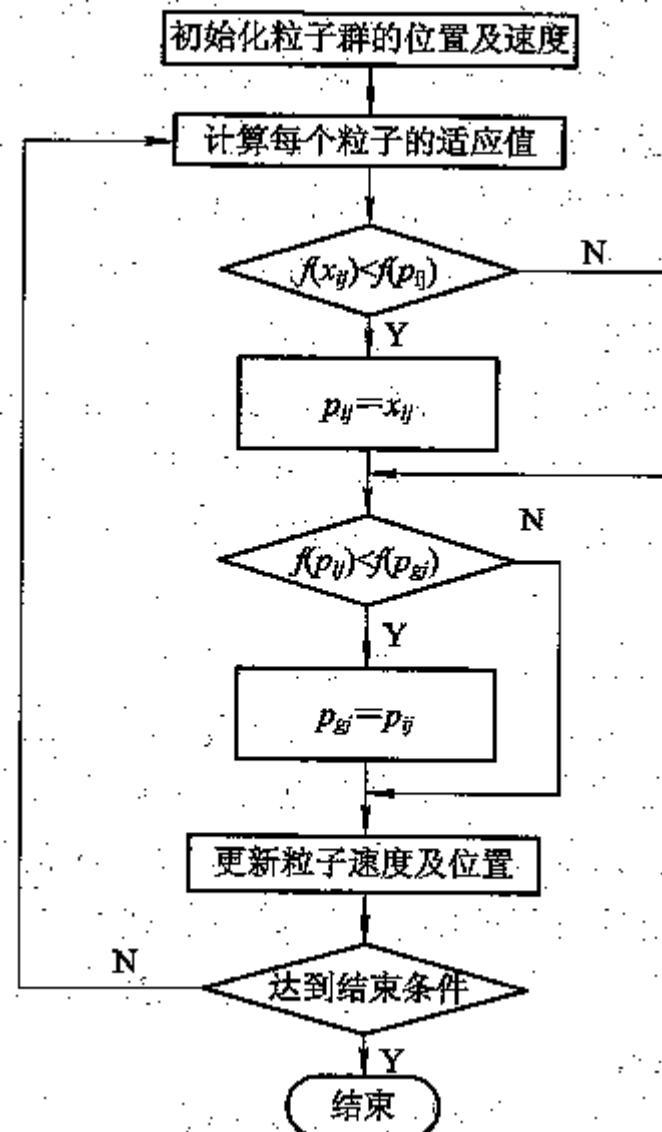
在基本PSO算法的基础上，引入了惯性权重因子，即：

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)]$$

w 本身是非负实数，具有平衡全局和局部搜索能力的作用。在实际使用过程中，一般在 (1, 0) 之间取值，由大到小逐渐变化。

粒子群优化算法流程

1) 初始化。在允许范围内随机设置粒子的初始位置、速度、群体最优值。



粒子群优化流程



- 2) 计算每个粒子的适应值或目标函数值（均方误差、方差、均方根误差）。
- 3) 将每个粒子的适应值与历史最优位置 p_{ij} 的适应值 $f(p_{ij})$ 进行比较，决定是否置换。
- 4) 将每个粒子的当前最优位置 p_{ij} 的适应值 $f(p_{ij})$ 与历史最优位置 p_{gj} 适应值 $f(p_{gj})$ 进行比较，决定是否置换。
- 5) 由上述计算结果更新粒子的速度和位置值。
- 6) 检查终止条件，若满足，终止迭代；否则返回2) 重复进行。



§ 7.4.3 粒子群优化算法的应用

以优化选取最小二乘法支持向量机 (LS-SVM) 中核函数参数 σ 及惩罚因子C为应用目标。

几种优化方法的比较：

评价参数	零位温度系数 a_0 (/°C)	灵敏度温度系数 a_t (/°C)	电流影响系数 a_I (/mA)
模型校正前	1.4×10^{-3}	1.32×10^{-2}	8.91×10^{-2}
遍历优化	1.85×10^{-3}	2.54×10^{-3}	1.65×10^{-3}
PSO 优化一个参数	9.23×10^{-4}	2.04×10^{-3}	1.32×10^{-3}
PSO 优化两个参数	4.49×10^{-4}	3.89×10^{-4}	2.53×10^{-3}

这里的比较，是说明：通过粒子群优化算法，获得更精确的核函数参数 σ 及惩罚因子C，从而提高了支持向量机的融合精度。



目 录

- 第1章 概 述
- 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述





第8章 智能传感器系统的设计与应用

要 点：

- ◆ 智能传感器系统外围电路及抗干扰措施；
- ◆ 基于DS18B20的分布式温度测量系统；
- ◆ 集成化智能传感器的应用。





§ 8.1 智能传感器系统外围电路及抗干扰措施

§ 8.1.1 外围电路

1、数字电位器

传统的机械电位器属于模拟式分立元件；缺点是：噪声大、易污损、抗震动性能差、体积较大、需要手动调节、使用寿命较短。

数字电位器（Digital Potentiometer）亦称数控可编程电位器，它是采用CMOS工艺制成的数字模拟混合信号处理集成电路，能在数字信号的控制下自动改变滑动端位置，获得所需要的电阻值。

1) 主要特点：

- a) 输入数字量，输出模拟量，输出是电阻值或电阻比率；
- b) 调节精度高，可编程，抗震动，不易污损，体积小，寿命长，逐步取代传统机械电位器；





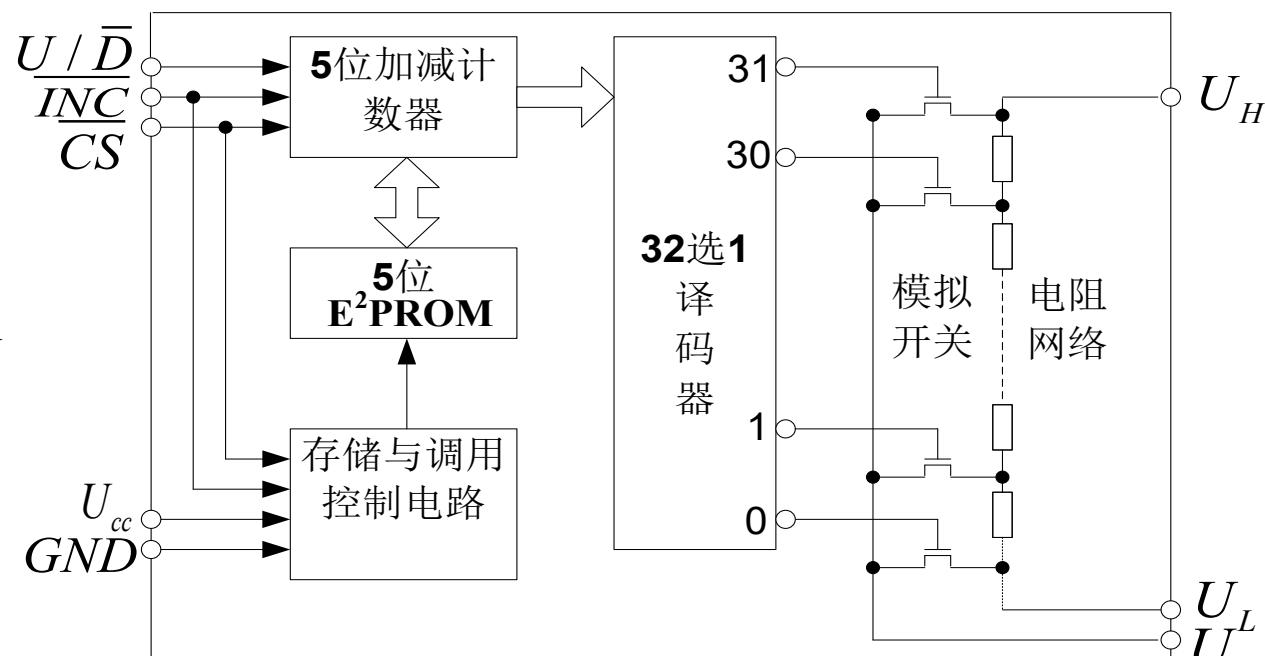
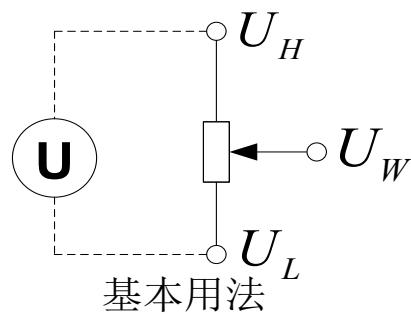
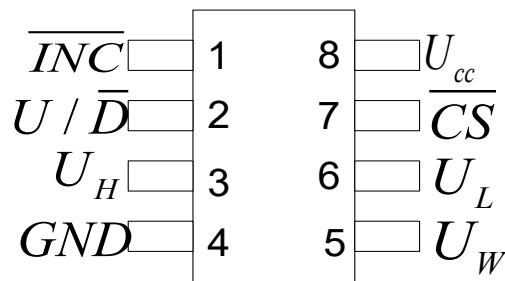
- c) 适配微处理器，通过串行总线来控制滑动端的位置。
 - d) 内部有E²PROM，用户可对其进行读写操作。掉电后能长期保存原有控制数据及滑动端位置不变。
 - e) 使用灵活，用途广泛。可进行串、并联或混联，可组成同轴电位器，可应用于可编程增益放大器、频率补偿网络、自动量程转换、自动控制调节电路等。
 - f) 低电压、低功耗、超小型化。
- 2) 产品分类及工作原理
- 芯片包含的电位器个数：1，2，4，6等；
- 线性与非线性（对数、指类型）之分；
- 内部抽头数：32，64，128，256，512，1024；抽头数越多，精度越高；
- 有的带有温度补偿及电压基准源；





厂家：Xicor、CATALYST、MAXIM、ADI等。

a) 工作原理





b) 数字电位器的误差

引起电阻误差的原因主要有两个：

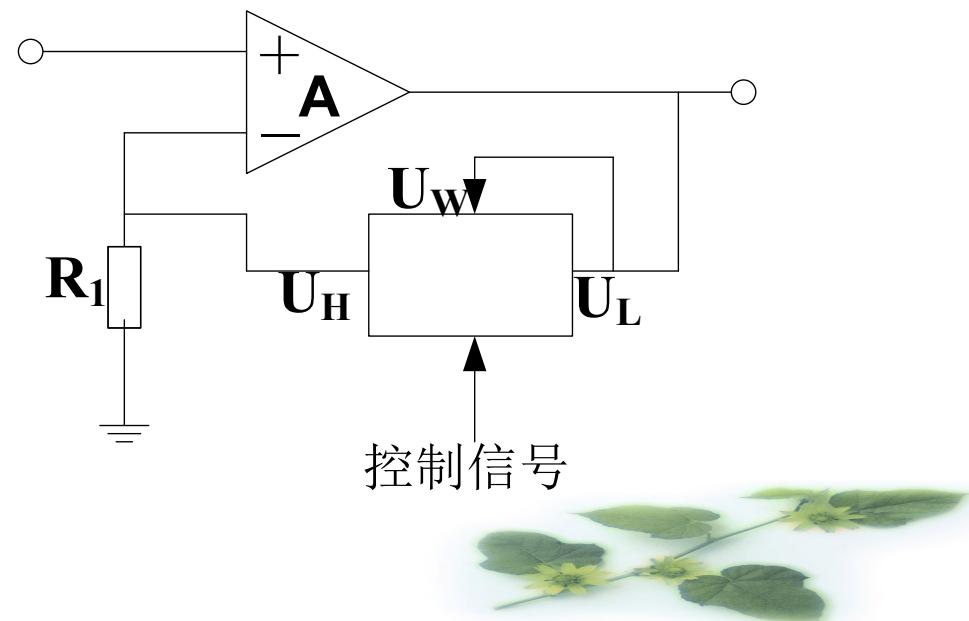
- * 各电阻单元的误差；
- * 模拟开关的导通电阻值。

总误差: $\Delta = \pm \left(r \sum_{i=1}^n \gamma_i + r_{on} \right)$, γ_i : i个单元的误差系数

相对误差: $\delta = \frac{\Delta}{nr} = \pm \left(\bar{\gamma} + \frac{r_{on}}{nr} \right)$, $n \uparrow$ 则 $\delta \downarrow$

3) 应用

a) 可编程增益放大器





2、实时日历时钟电路

1) 产品分类及性能特点

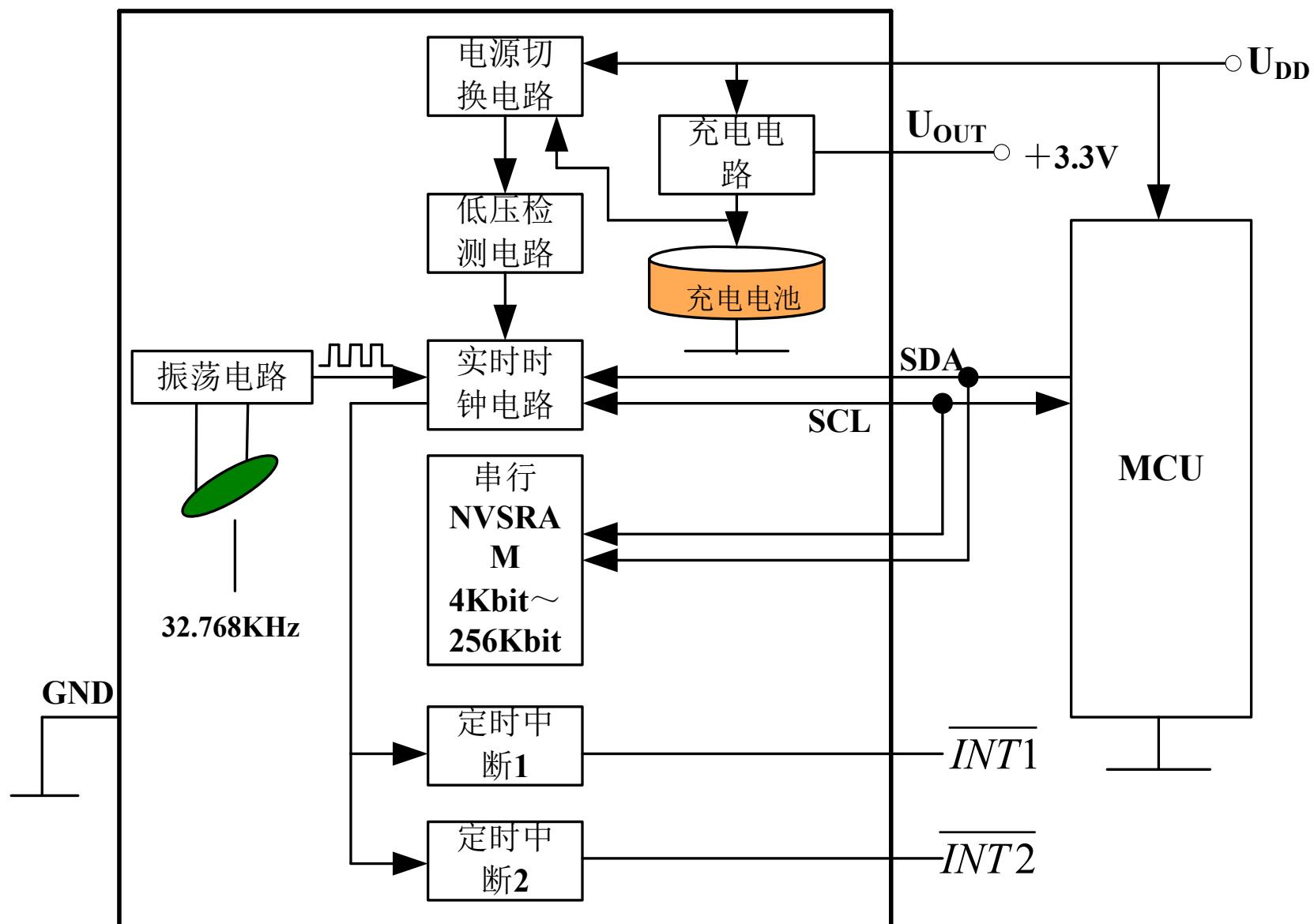
内置晶振电路、电池和非易失性SRAM，带 I^2C 接口。

性能特点：

- a) 高精度： $\pm 4 \times 10^{-6}$ ，年误差在2min以内；
- b) 内置32.768KHz晶振电路，能产生7种时标信号，以BCD码输出；
- c) 带 I^2C 串行总线接口，易于同单片机通信；
- d) 内含4Kbit～256Kbit的SRAM，写操作时无延时；
- e) 内置稳压电路和电源掉电检测电路；
- f) 低功耗，典型工作电流1.0 μA ，内置电源管理电路；
- g) 工作温度范围宽，工业品：-40°C～85°C。

2) 工作原理：（见下图）







a) 实时时钟电路

由三位操作编码可构成对实时时钟部分的8条操作指令，实时时钟部分共包括4个寄存器：实时数据寄存器（56bit）；状态寄存器（8bit）；两组报警时间/频率事件设置寄存器（16bit）。

b) 电池电压检测电路

每1s采样一次，时间15.6ms，检测到 < 2.0 V，停止采样保持高电平，直到执行初始化或读状态寄存器命令。

c) 电源管理电路

3) 应用

SDA、SCL端口分别接单片机的两个引脚， P_1 口或 P_3 口均可。



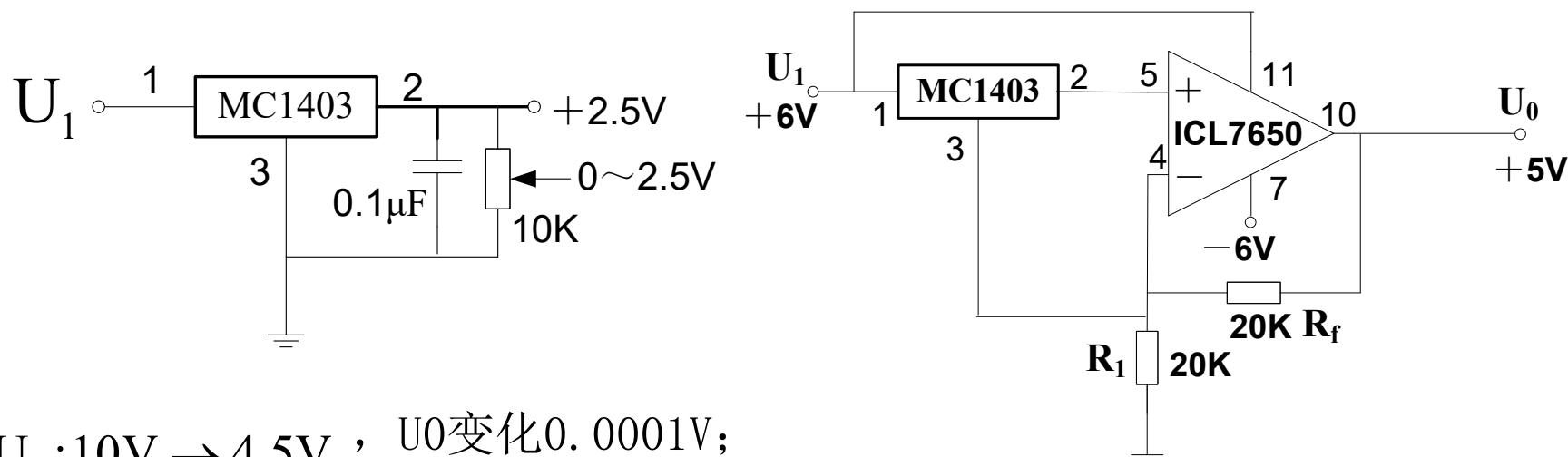


3、基准电压源

基准电压源的关键技术是电压温度系数 α_T , $10^{-6} / ^\circ\text{C}$

精密型 ($0.3 \sim 5$) $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 较精密型 ($10 \sim 20$) $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 普通型 ($30 \sim 100$) $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 又分固定型与可编程输出可变型。

1) 带隙基准电压源MC1403



$U_1 : 10\text{V} \rightarrow 4.5\text{V}$, U_0 变化 0.0001V ;

$$\alpha_T = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

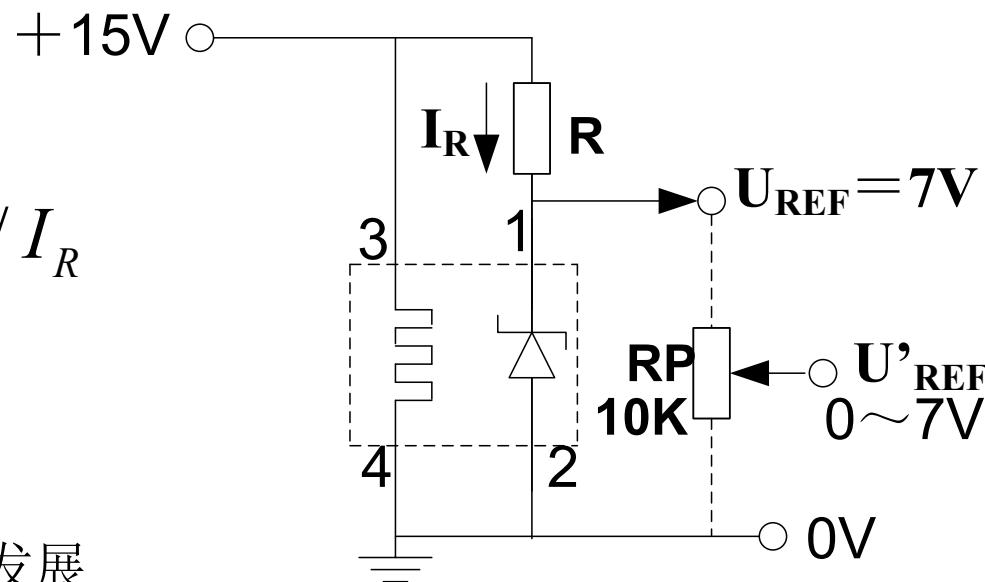
要求输出高于2.5V, 需经放大器放大, $U_0 = 2.5 \times (1 + R_f / R_1)$





2) LM399: $\alpha_T = 0.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 内带恒温器。

$$R = (U_I - U_{REF}) / I_R$$



4、集成恒流源

向集成化、多用途方向发展

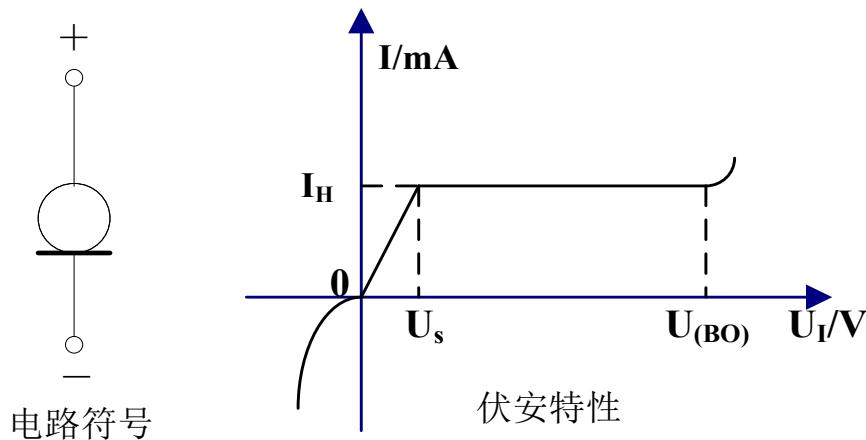
目前有：恒流二极管（CRD）、恒流三极管（CRT）、三端可调恒流源、四端可调恒流源、高压恒流源等恒流器件。

a) 恒流二极管及应用（见下图）

$$I_H < 0.6mA, \alpha_T > 0$$

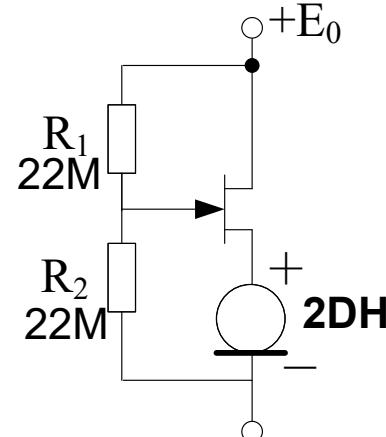
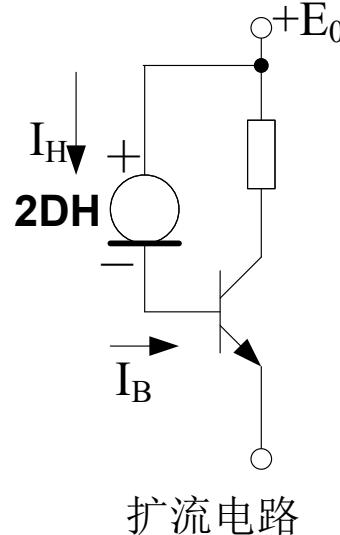
$$I_H > 0.6mA, \alpha_T < 0$$





恒流二极管只能提供几毫安的电流，耐压几十伏。

$$I'_H = h_{FE} I_H$$

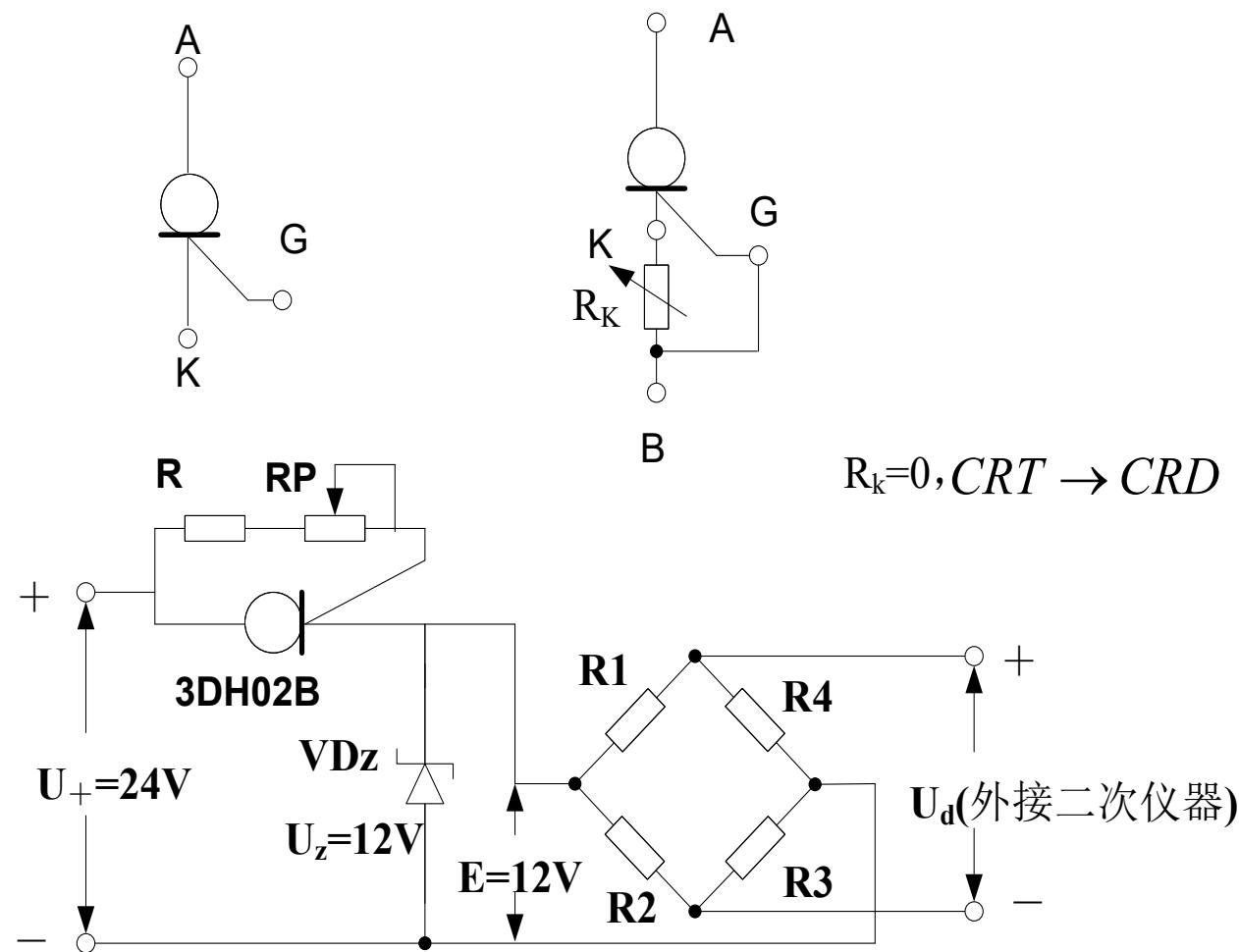


$$U'_{(BO)} = U_{(BO)} + U_{(BO)DS} \text{ (3DJ6的漏一源极击穿电压)}$$





b) 恒流三极管的应用



恒流三极管在电子秤中的应用





c) 可调精密集成恒流源应用

R_{SET1} , R_{SET2} 为设定电阻,
改变二者的电阻比即可调节 α_T ,
($+2.0 \sim -0.2\%$) / $^{\circ}\text{C}$ 范围内调节。

4DH5:

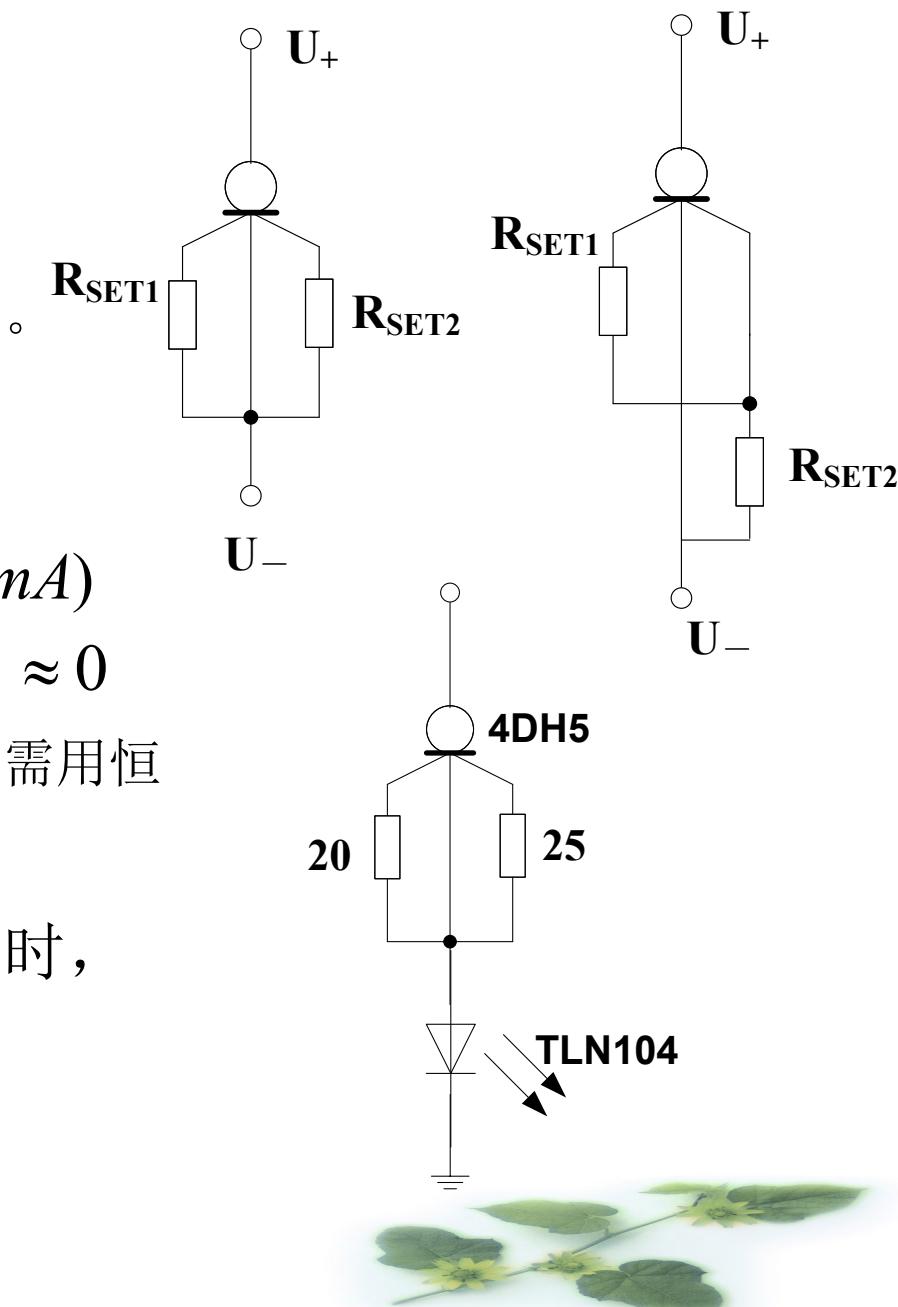
$$I_H = 540 / R_{SET1} + 600 / R_{SET2} (\text{mA})$$

, 当 $R_{SET2} / R_{SET1} = 1.26$ 时 $\alpha_T \approx 0$

红外光测量仪中红外发射管，需用恒流源供电。

$R_{SET1} = 20\Omega$, $R_{SET2} = 25\Omega$ 时,

$$I_H \approx 50\text{mA} , \alpha_T = 0^{\circ}$$





5、精密 $U-f$ 、 $f-U$ 转换器

广泛用于测控系统以及调制解调器中，以AD650为例作简要说明。

1) 性能特点

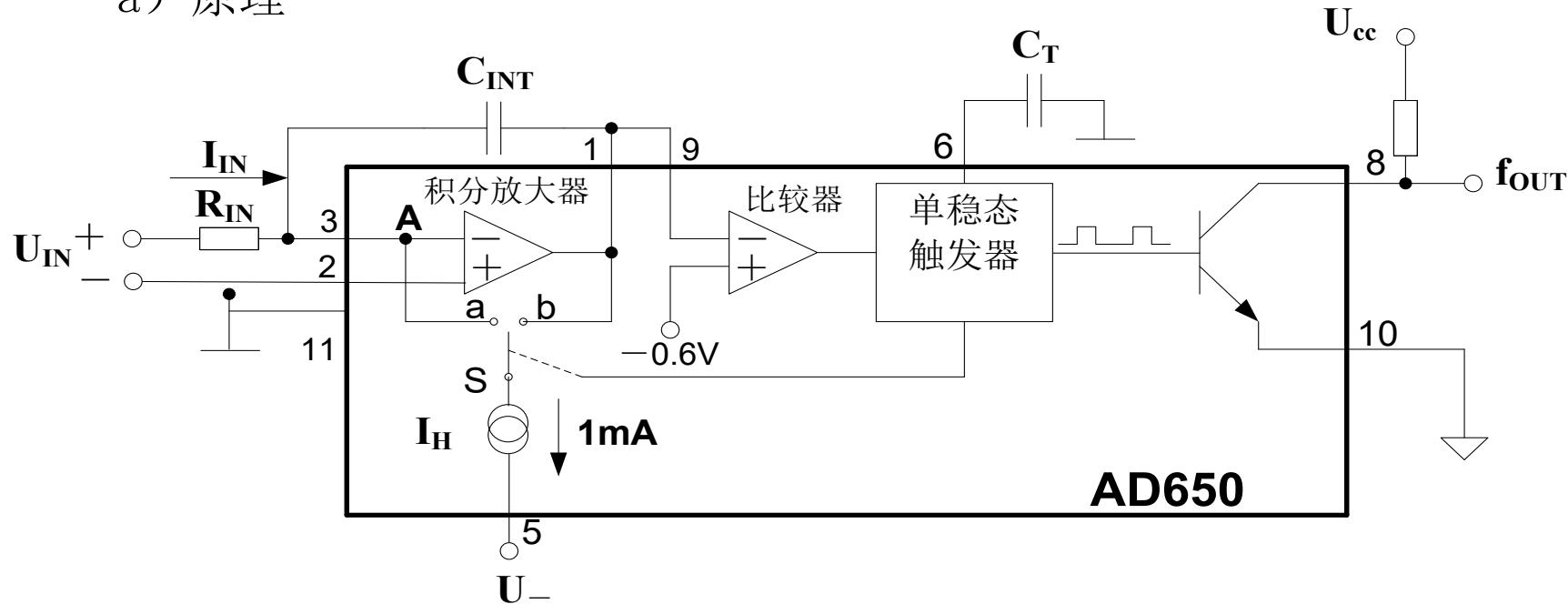
- a) 采用电荷平衡式 $U-f$ (即A/D) 转换原理，输入为单级性电压、双极性电压或差分电压，输出为矩形波，转换精度达14bit；
- b) 非线性误差小，频率范围宽。对应0.002%，0.005%，0.007%分别输出10KHz，100KHz，1MHz；
- c) 通过外接元器件的变化，可构成 $U-f$ 或 $f-U$ 转换器；
- d) 采用集电极开路输出，输出端经上拉电阻外接电源，能与CMOS、TTL电路兼容。

2) 原理及应用





a) 原理



$$f_{OUT} = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1+T_2} = \frac{I_{IN}}{T_1 I_H} = \frac{0.15 U_{IN}}{R_{IN}(C_T + 44)}$$

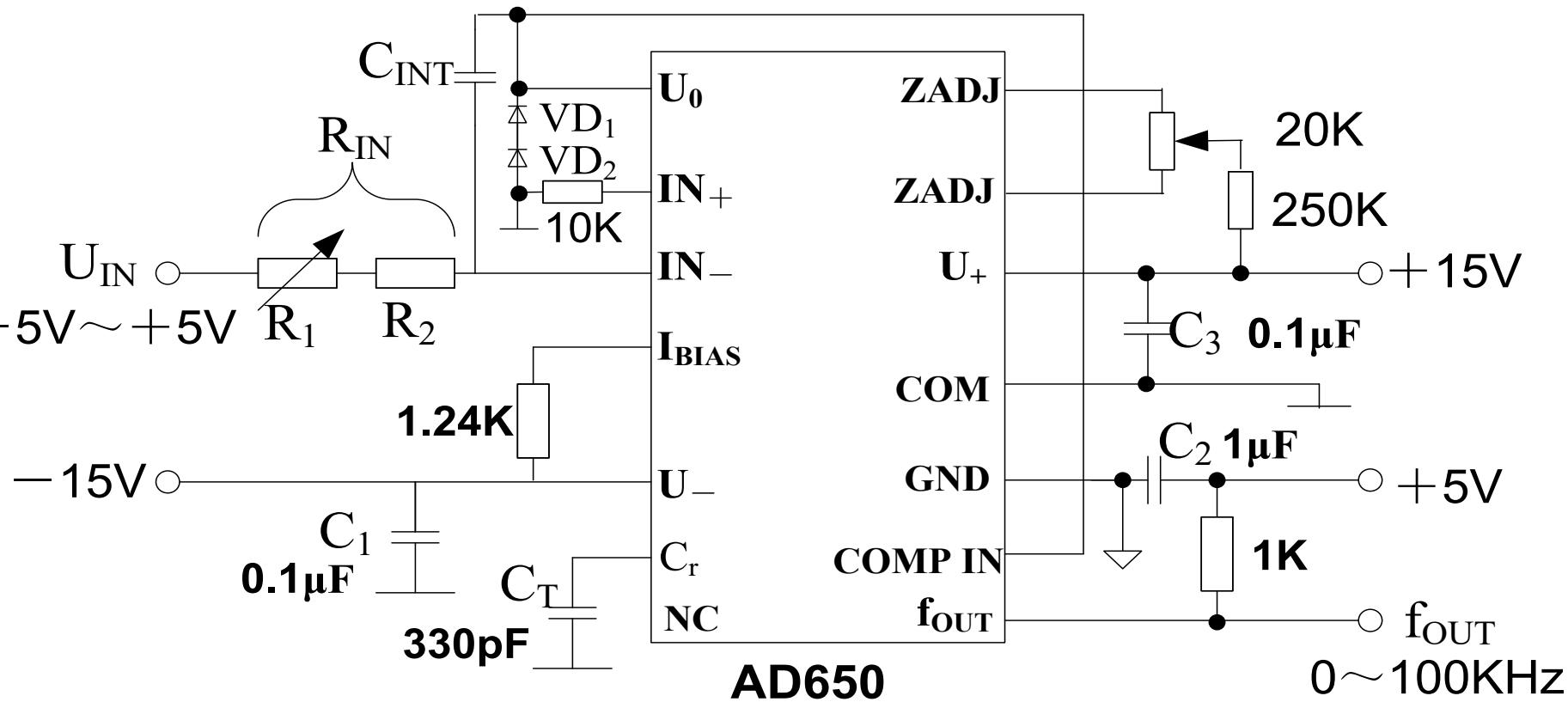
C_T : PF单位, 44PF为 C_T 引脚的分布电容。

C_{INT} ：与输出频率无关，它仅仅决定锯齿波幅度的大小。





b) 输入双极性电压的 $U-f$ 转换电路

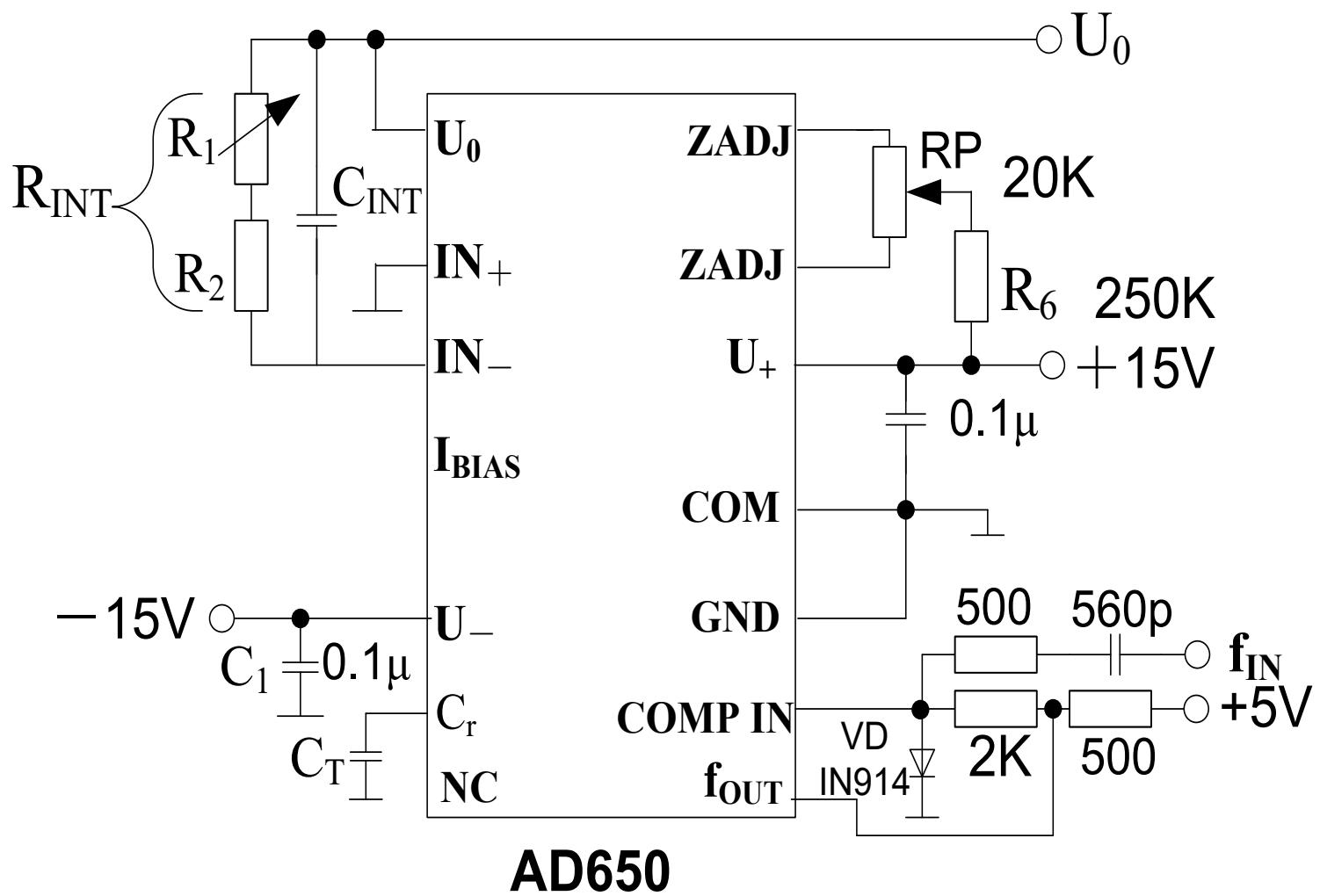


R1=5.1K; R2=37.4K。





c) $f-U$ 转换器





§ 8.1.2 智能传感器系统的抗干扰措施

智能传感器系统是模拟电路与数字电路并存，包含了多种不同功能的电路部件和器件，在工业环境下远距离传输信号时，不仅容易受到外界干扰，而且系统本身也会产生干扰。为了提高系统的可靠性，必须有效地抑制各种干扰，优化电路设计和软件设计。

1、电磁兼容性概述

1) 概念

包含了三个方面的内容：

- a) 电子设备应有抑制外部电磁干扰的能力；
- b) 该电子设备所产生的电磁干扰应低于规定的限度，不得影响同一电磁环境中其它电子设备的正常工作；
- c) 任何电子设备的电磁兼容性都是可以测量的。





2) 研究领域

主要包括电磁干扰的产生与传输、电磁兼容性的设计（含制定标准）、电磁干扰的诊断与抑制，电磁兼容性的测试（含实验）。

3) 设计

首先学习并掌握有关标准及规定，然后参照实际电磁环境来提出具体要求，制定技术和工艺上的实施方案。

在设计电子仪器设备时，应重点考虑电路设计、隔离、退耦、滤波、接地、屏蔽以及射频资源的分配等问题，如用CMOS电路代替TTL电路，用固态继电器代替电磁继电器等。

4) 测量

测量是对设备的电磁兼容性设计做出评价的重要依据。分发射试验和敏感度试验。





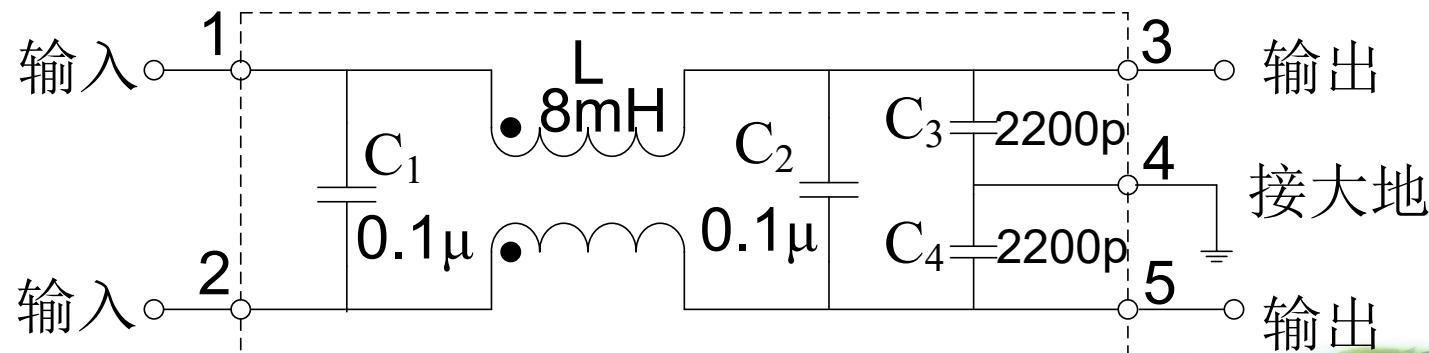
2、电磁干扰滤波器

电磁干扰滤波器（EMI Filter）能有效地抑制电网噪声，提高电子设备的抗干扰能力及系统的可靠性。

- * 电源噪声属于射频干扰（RFI），是电磁干扰的一种，频谱为10KHz~30KHz，它具有双向性。
- * 串模干扰与共模干扰

电磁干扰滤波器应符合电磁兼容性（EMC）的要求，必须是双向射频滤波器。

1) 原理电路





L的电感量大小与额定电流I有关， $I=1A$, $L=8\sim23mH$; $I=10A$, $L=0.2\sim0.3mH$, L主要用来抑制共模干扰。

C_1 、 C_2 主要用来滤除串模干扰； C_3 、 C_4 的连接方式可有效抑制共模干扰。

2) 主要技术参数

额定电压、额定电流、漏电流、测试电压、绝缘电阻、直流电阻、使用温度范围、工作温升、插入损耗（ A_{dB} ）、外形尺寸、重量。

插入损耗（ A_{dB} ）是频率的函数，用dB表示：

$$A_{dB} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \quad ,$$

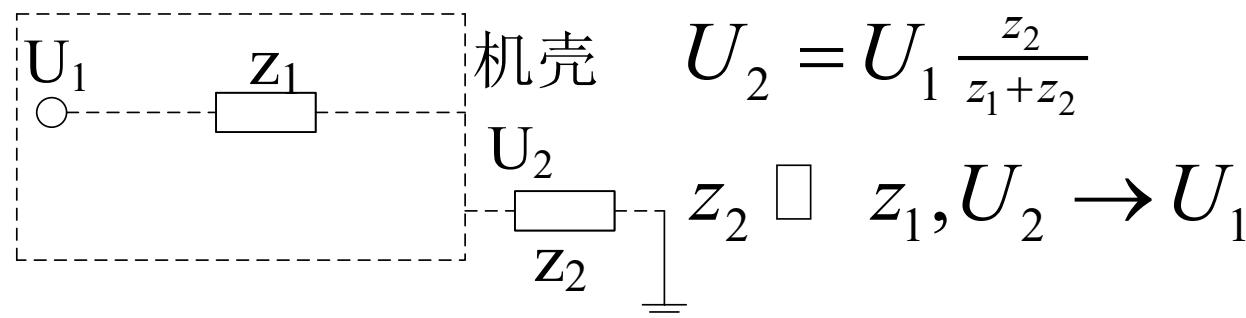
P_1 、 P_2 是滤波器插入前后传输到负载上的噪声功率。一般可将1MHz~30MHz的噪声电压衰减65dB。





3、智能传感器系统的接地

系统“地”的概念有两种：一种是“参考地”，另一种是“大地”。这里讲的接地指“大地”。



1) 接地的作用及方式

作用：a) 安全；b) 抑制干扰。

接地方式有保护性接地和功能性接地之分：

- a) 保护性接地：防触电接地、防雷击接地、防静电接地。
- b) 功能性接地：信号地、数字地、功率地、交流地、屏蔽地。

传输信号的频率高低决定了不同的接地方式。





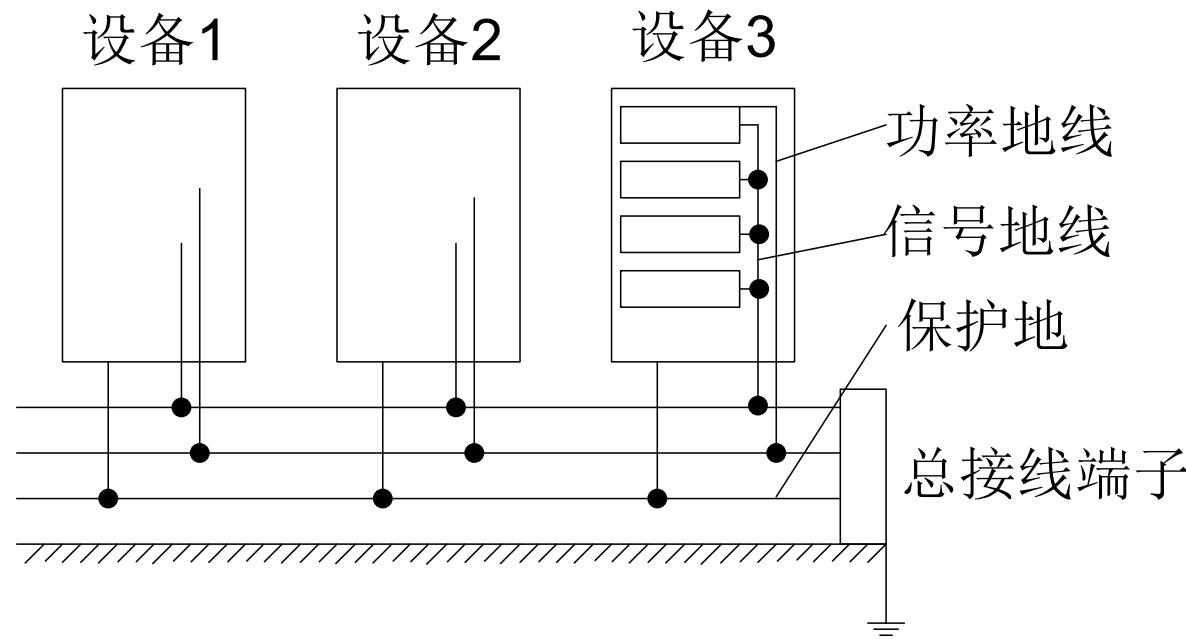
- * $f_s < 1MHz$, 单点接地，接地点靠近信号测量端，屏蔽双绞线；
- * $f_s > 1MHz$, 多点接地，可分别在信号源端和测量端接地，连接介质为双绞线或同轴电缆。

另外还分并联或串联或单点接地、多点接地和环形接地。

2) 智能传感器系统的接地

- a) **信号接地：**给回路确定一个参考电位，使电路工作于稳定状态并能比较信号的有无及大小。
- b) **功率接地：**指电源回路的接地。一般要将系统内的信号地与功率地分开布置，最后在输出端汇合。因为功率地线上一般有大电流，在导线上的压降如被引入信号端，会影响系统信号的稳定性。
- c) **智能传感器系统的接地：**主要考虑信号频率、接地线的长度、宽度、系统的灵敏度之间的相互关系；接地电极的形状；辐射式接地系统等。





4、智能传感器的屏蔽

屏蔽是保护电路、设备、传输线等不受静电场、电磁场或磁场干扰的一种手段。

1) 分类:

a) **静电屏蔽:** 消除静电场的影响, 用良导体制成并通过接地达到屏蔽效果。



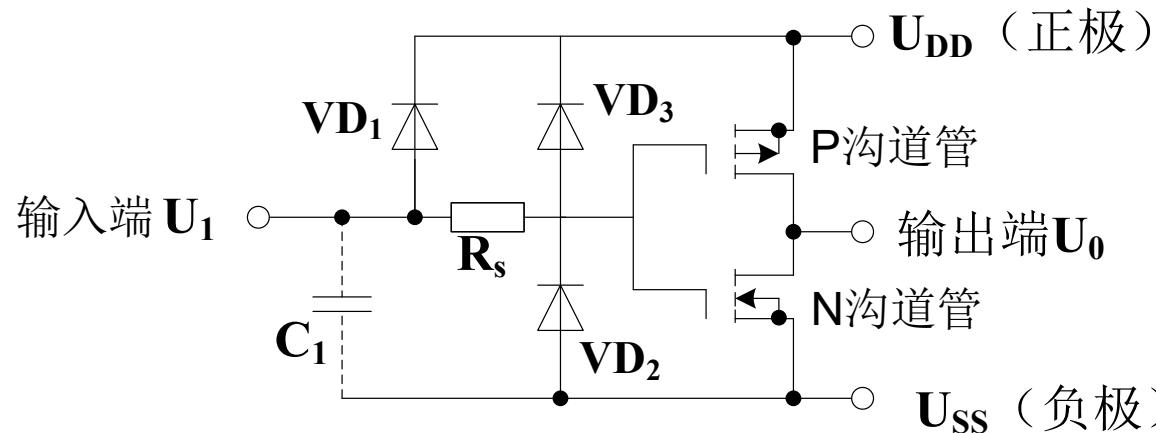


b) **磁屏蔽**: 抑制低频磁场干扰, 用高磁导率材料制成, 能防止磁感应的产生。

c) **电磁屏蔽**: 用于抑制高频磁场干扰, 用良导体制成, 对电磁波起到反射和吸收的作用。

2) 静电放电的保护

CMOS电路中输入端防静电的三极管——电阻双向保护电路。



U_D 的正向压降: $U_F = 0.7V$, 反向击穿电压: $U_{BR} \approx 30V$

在智能传感器系统中经常用的屏蔽有导线的屏蔽、元器件的屏蔽、





放大器的屏蔽、振荡电路的屏蔽、电桥电路的屏蔽等。

3) 磁屏蔽

分低频和高频，主要指电源变压器和发射天线部分。

5、智能传感器系统的抗干扰措施

1) 干扰的成因

a) 电网干扰：主要指浪涌电压和电磁干扰；

b) 传输线干扰：在 输入、输出口线上形成的干扰，与传输线的长度、连线方式等有关；

c) 空间电磁波干扰；

d) 机内干扰：由内部不同功能的电子元器件和部件产生。

2) 电路设计中的抗干扰措施

a) 切断干扰的传播途径

具体的通过采用屏蔽、接地、功能分区、隔离、合理布线、





使用抗干扰元件等措施切断干扰的传播途径。

b) 尽量采用抗干扰性能强的单片机

* 降低系统内部的电源噪声；

* 降低时钟频率（68HC08单片机外部时钟32KHz，内部总线8MHz）；

* EFT技术（Electrical Fast Transient）

消除尖峰干扰对时钟信号的影响。

c) 频率抖动技术

将频率抖动信号叠加到随机信号噪声上，以使ADC的量化噪声与输入信号无关，消除ADC输出的谐波分量。

d) 防止漏电流技术

通过设置防止极间漏电用的保护环。

e) 滤波技术

无源滤波器、有源滤波器、数字滤波器。





f) 隔离技术

光电隔离、变压器隔离、继电器隔离、布线隔离。

g) 抑制传输线上的干扰

双绞线：频带较窄，波阻抗高，抗共模干扰能力强。对于长传输线使用时要注意阻抗匹配问题，以消除反射波。

h) 正确选择接地点

i) 传感器的屏蔽

j) 塑料机箱的屏蔽

k) 元器件的选择

尽量采用金属膜电阻和低噪声的有源器件，积分电容宜选用漏电小、介质损耗因数低的聚丙烯或聚苯乙烯电容；

能用低速的器件就不用高速器件。

l) 消噪电路





消噪电容： $0.1 \mu F$ ；CMOS电路代替TTL电路。

m) 电源退耦电容

在电源进线端并联一只 $10 \mu F \sim 100 \mu F$ 的钽电容，进行电源退耦；在每个芯片的电源进线端并联一只高频、低分布电感的陶瓷电容， $0.1 \mu F$ ， $f_s > 15MHz$ 时， $0.01 \mu F$ 。

6、软件抗干扰措施

1) 数字滤波器

2) 软件看门狗——防止CPU进入死循环或程序跑飞

3) 指令冗余技术

NOP指令的使用，或有效单字节指令重写，有助于程序跑飞后恢复正常，消除随机干扰。

4) 软件陷阱技术

跑飞的程序进入非程序区或表格区时，通过设置软件陷阱可将程序引向





某一指定位置，对程序出错进行处理。

5) 多次采样技术

消除尖脉冲干扰。

6) 延时防止抖动技术

在已知某些干扰要发生的情况下，使CPU暂停正常工作，待干扰过后再恢复工作。

7) 定时刷新输出口

防止干扰对用锁存器控制输出口信号输出的影响。

7、系统的安全性

1) 安全标准

IEC950标准，分泄漏电流、耐压、绝缘电阻、接地电阻等项。

2) 安全认证





- a) CCEC认证：中国电工产品安全认证委员会（CCEC），又称长城认证；
- b) UL认证：美国保险商实验所（UL）；
- c) CB认证：国际电工委员会电工产品安全认证组织（IECEE）；
- d) GS认证：德国莱茵技术监督公司（TUV）；
- e) FCC认证：电子产品的抗电磁干扰能力。





§ 8.2 基于智能温度传感器的分布式温度测量系统

§ 8.2.1 基于1—Wire总线的DS18B20型智能温度传感器

1、DS18B20的性能特点

是DALLAS公司继DS1820之后推出的改进型，在原来的基础上有如下改进：

- 1) 供电电压：3.0V~5.5V，在-10°C~+85°C范围内，测量误差<±0.5°C。
- 2) 温度分辨率可编程。9~12位，通过对便笺式RAM中CONFIG寄存器的可编程温度分辨率位 R_0 、 R_1 进行编程，可设定不同的温度分辨率及最大的转换时间。

见下图





R_0	R_1	工作模式	分辨率/°C	最大转换时间/ms
0	0	9	0.5	93.75
0	1	10	0.25	187.5
1	0	11	0.125	375
1	1	12	0.0625	750

当DS18B20接收到温度转换命令（44H）后，开始启动转换，转换完成后的温度值就以16位带符号扩展的二进制补码形式，存储在便笺RAM的第0、1字节。在执行读便笺RAM命令后，可将这两个字节的温度值通过单线总线传送给CPU。

- 3) DS1820的转换时间（9位）为200ms，可见DS18B20的转换时间t缩短。
- 4) 具有电源反接保护电路



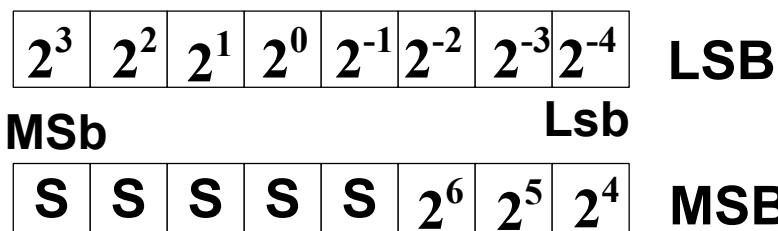
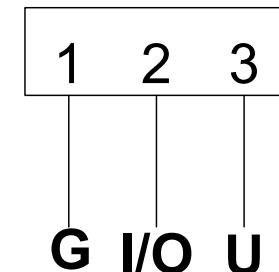


5) DS18B20的引脚及内部电路框图与DS1820完全相同，体积小一半。

2、DS18B20的工作原理

DS18B20采用3脚PC—35封装或8脚SOIC封装。

I/O为数据输入/输出端，它属于漏极开路输出，外接上拉电阻后常态下是高电平。



+25. 0625°C 0000 0001 1001 0001 0191H

-10. 125°C 1111 1111 0101 1110 FF5EH

主要包括7部分：

- 1) 寄生电源；
- 2) 温度传感器；





3) 64位激光ROM

与单线接口；

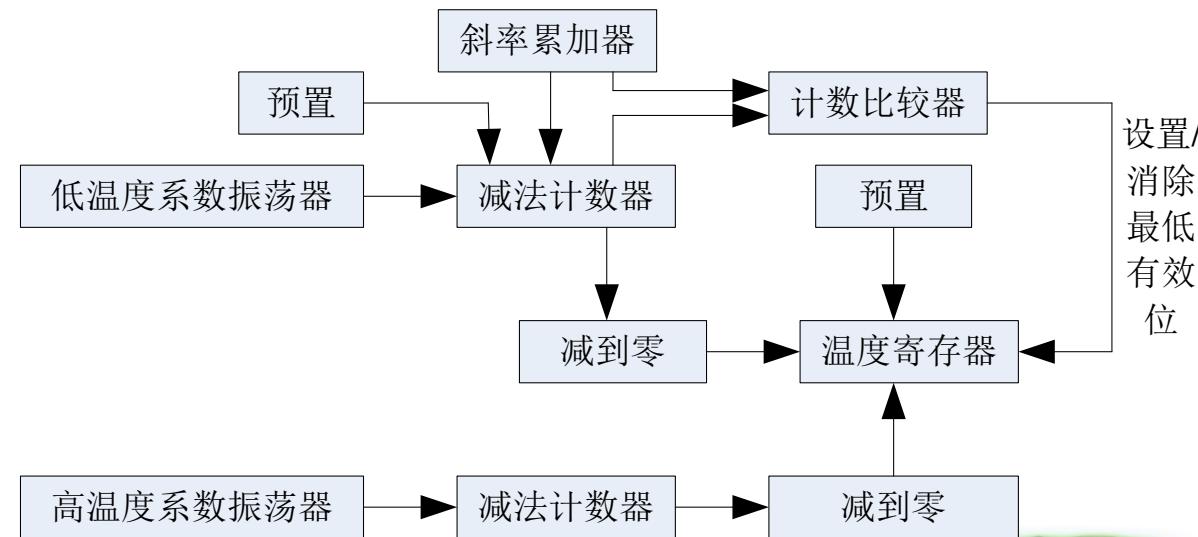
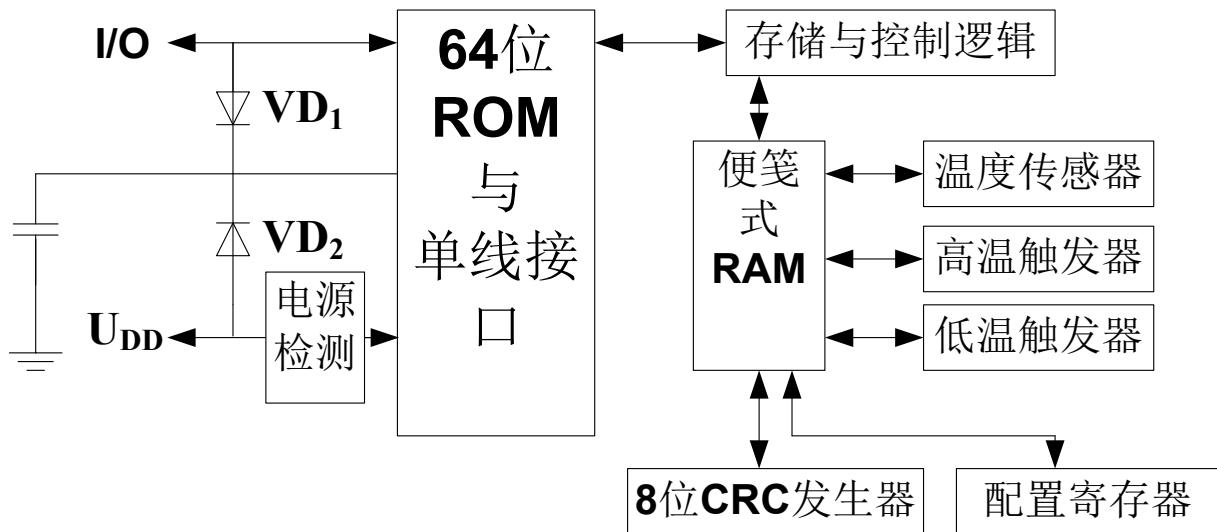
4) 高速暂存器，
即便箝式RAM，存放中
间数据；

5) T_H 、 T_L 触发寄
存器，存放用户设定
的温度上、下限值；

6) 存储与控制逻
辑；

7) 8位循环冗余
校验码。

测温原理：如右
图。





低温度系数振荡器用于产生稳定的频率 f_0 ，高温度系数振荡器则相当于 T/f 转换器，能将被测温度转换成频率信号 f 。图中隐含着计数门，当计数门打开时，DS18B20就对低温度系数振荡器产生的时钟脉冲 f_0 进行计数，进而完成温度测量。计数门的开启时间由高温度系数振荡器来决定。每次测量前，首先将-55℃所对应的基数分别置入减法计数器、温度寄存器中。在计数门关闭之前若计数器已减到零，温度寄存器中的数值就增加0.5℃。然后，继续着依斜率累加器的状态置入新的数值，再对时钟计数，然后减到零，温度寄存器值又增加0.5℃。只要计数门仍未关闭，就重复上述过程，直到温度寄存器值达到被测温度值。

64位ROM：8位工厂编码（DS18B20为28H）+48位出厂编号+8位CRC校验码。 $CRC = X^8 + X^5 + X^4 + 1$

配置寄存器：

0	R_1	R_0	1	1	1	1	1
----------	-------	-------	----------	----------	----------	----------	----------





暂存器

温度低字节
温度高字节
T_H/用户定义字节1
T_L/用户定义字节2
配置
备用
备用
备用
CRC

E²RAM

T_H/用户定义字节1
T_L/用户定义字节2
配置

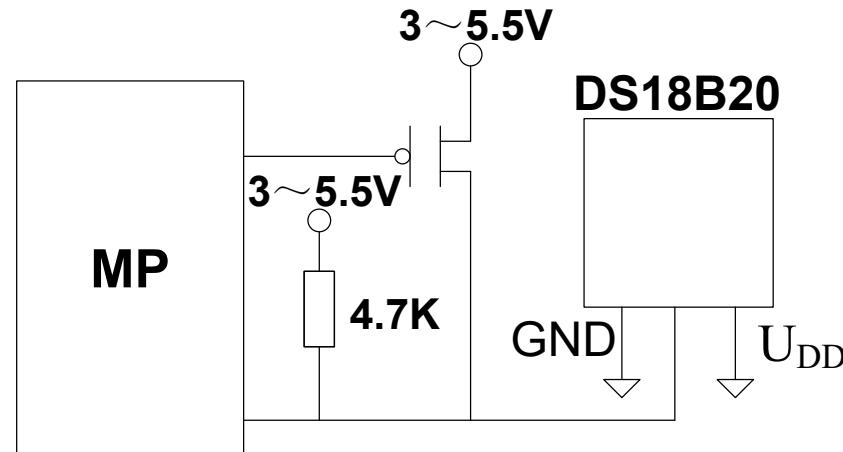




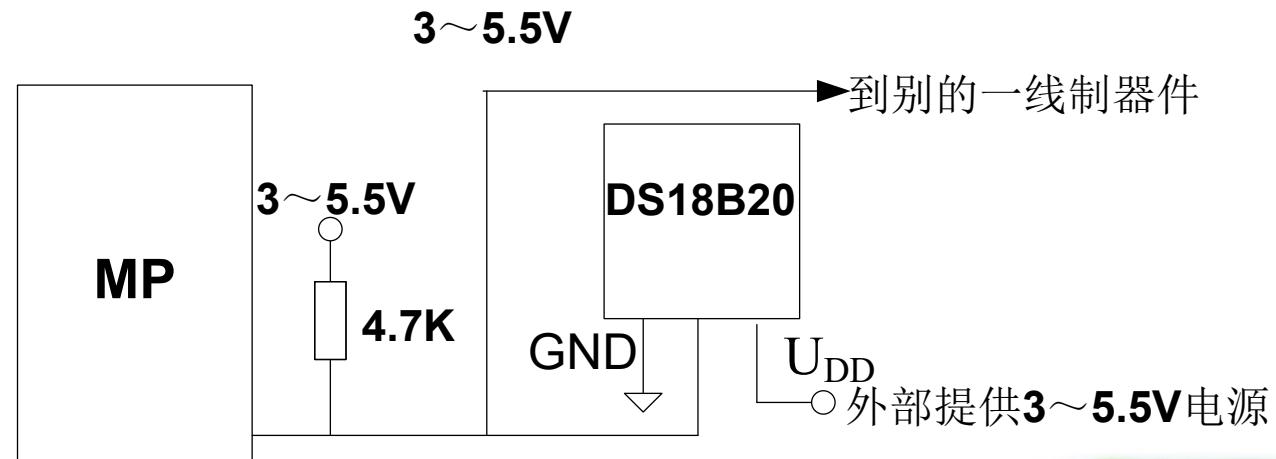
§ 10.2.2 基于DS18B20的分布式温度测控系统

1、 DS18B20与微处理器之间的连接

1) 总线供电

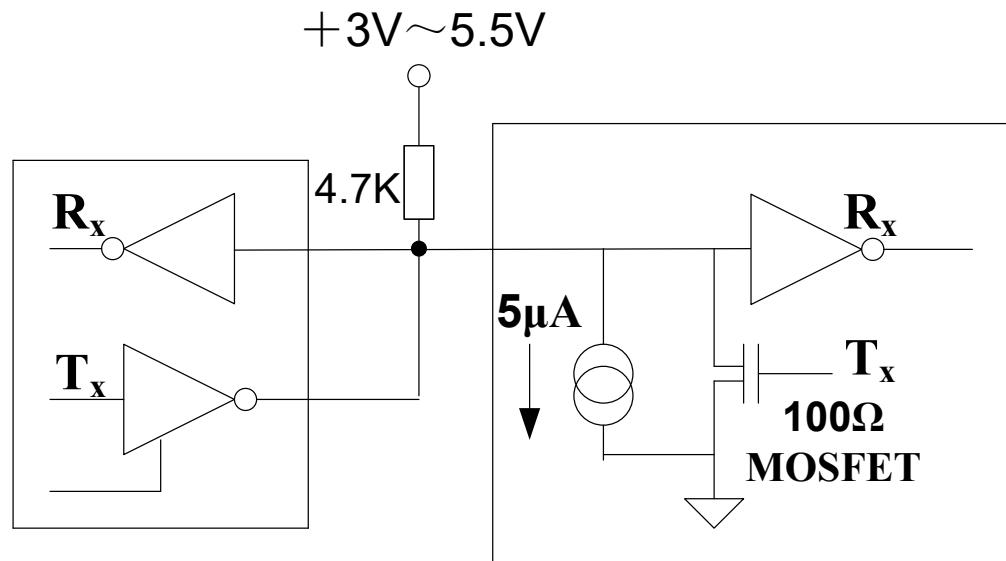


2) 电源供电





3) 具体硬件配置结构:



2、DS18B20操作指令

1) 发送时序:

- 初始化；由主机发出一个复位脉冲，然后从机发送一个响应脉冲；
- ROM功能指令；
- 存储器功能指令；
- 发送数据。

2) ROM功能指令（均为8位）

- 读ROM（33h）





读取DS18B20的8位工厂编号，唯一的48位序列号和8位CRC编码。该命令只能用于总线上只有一只DS18B20时，否则会产生数据冲突。

b) 比较ROM (55h)

由主机寻址特定的DS18B20，只有地址相吻合的DS18B20才响应后续的存储器功能命令。

c) 跳读ROM (CCh)

允许主机在不提供64位ROM码的情况下访问存储器功能。

d) 搜索ROM (F0h)

用于系统上电后，主机对总线上全部器件的识别。

e) 报警搜索 (ECh)

与搜索ROM命令流程一样，用于获得具备报警条件的DS18B20的信息。





ROM搜索举例：

ROM搜索处理是一个不断重复一个简单的三步操作的过程：读一个位，读一个完整的位，然后写那个位的希望值。

ROM1 00 11 01 01 • • •

ROM2 10 10 10 10 • • •

ROM3 11 11 01 01 • • •

ROM4 00 01 00 01 • • •

搜索处理的过程如下：

- ①总线主机通过产生一个负位脉冲进行初始化，全部端器件产生一个响应脉冲。
- ②总线主机向总线上产生一个搜索ROM指令。
- ③总线主机从总线上读一个位；每个器件把ROM第一个位的值放置到总线上以作为响应，对于ROM1~4第一位“与”的结果是总线上的位置为“0”。





总线主机再读写另外一位。作为响应，所有的器件将第1位取反后再将该值放置到总线上。

通过三步操作以两次读得的数据位可能的结果如下：

00 在该位的器件位相反；

01 所有器件在该位均为“0”；

10所有器件在该位均为“1”；

11 没有器件在总线上。

④总线主机写个“0”，这就排除了ROM2和ROM3进行后续的搜索，而只留下了ROM1和ROM4连接在总线上。

总线主机通过每次的ROM搜寻操作获取未知器件的ID，所占用的时间：

$$960 \mu s + (8 + 3 \times 64) 61 \mu s = 13.16ms$$

因此总线主机在1s时间里可以标识75个不同的一线制器件。

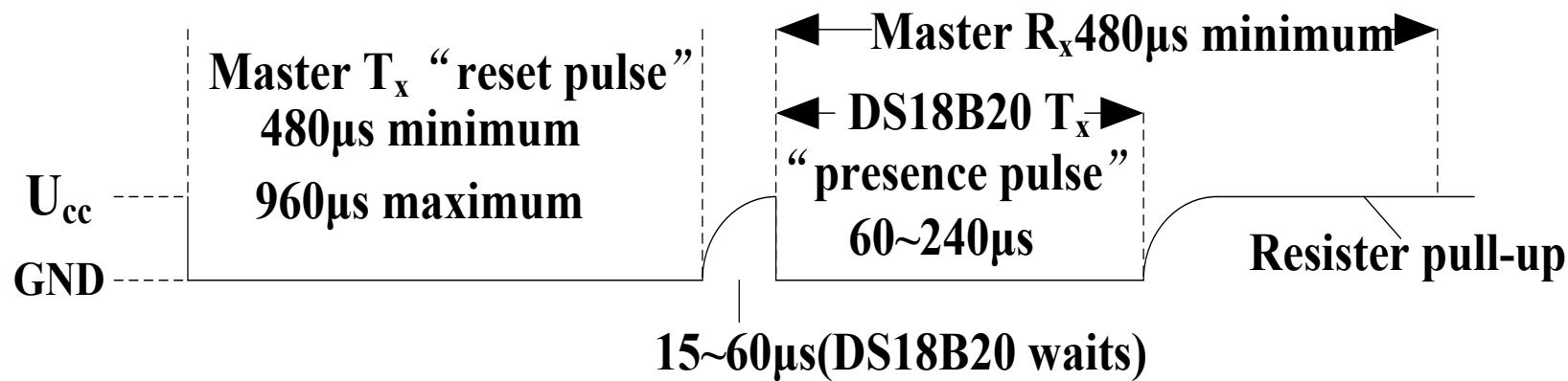
3) I/O信号





DS18B20要求严格的协议确保数据的完整性。协议由一线制上使用的几种类型的信标组成:复位脉冲、响应脉冲，写“0”，写“1”，读“0”，读“1”。这些信号，除了响应脉冲，均由总线主机发起。

按照下图脉冲时序，在主机发出复位信号后，DS18B20表示“存在”的脉冲。



4) 存储命令功能

见下图。





暂存器

温度低字节
温度高字节
T_H /用户定义字节1
T_L /用户定义字节2
配置
备用
备用
备用
CRC

 $E^2\text{RAM}$

T_H /用户定义字节1
T_L /用户定义字节2
配置

a) 写暂存器 (4Eh)

这个命令是向DS18B20的暂存器写，从 T_H 寄存器开始，三个字节对应到2, 3, 4。在一个复位产生前，三个字节应已被写入。

b) 读暂存器 (BEh)





这个命令是读所有的暂存器的内容。从字节0～字节8，假若所有的内容没被读出，主机可以产生一个“复位”中止读。

c) 拷贝暂存器 (48h)

这个命令是拷贝暂存器的内容到 E^2RAM ，将温度报警及配置信息存入非易失性存储器。在DS18B20拷贝期间，输出“0”将总线拉低。对于总线供电，在发生该命令后主机必须上拉总线至少10ms。

d) 转换T (44h)

这个命令开始一个温度转换，在转换期间，DS18B20输出“0”，转换结束输出“1”。对于总线供电，在发出该命令后，主机必须上拉总线至少大于 t_{conv} 。

e) Recall E^2RAM (B8h)

将 E^2RAM 的内容回调到暂存器，在系统上电时，DS18B20



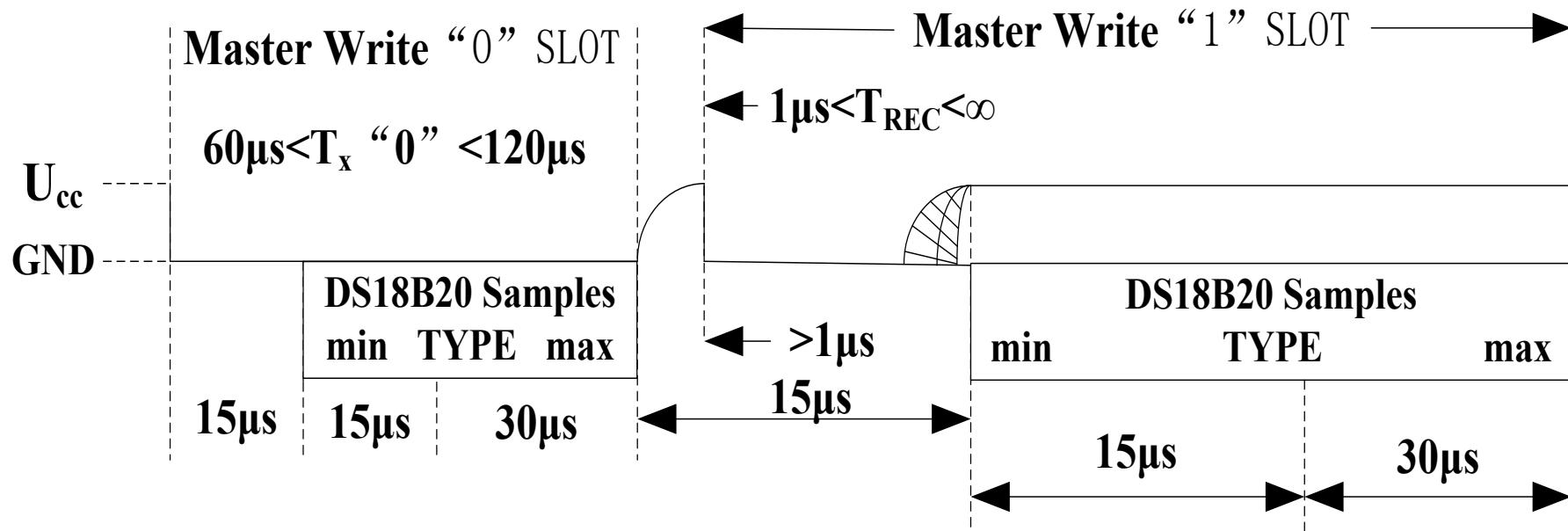


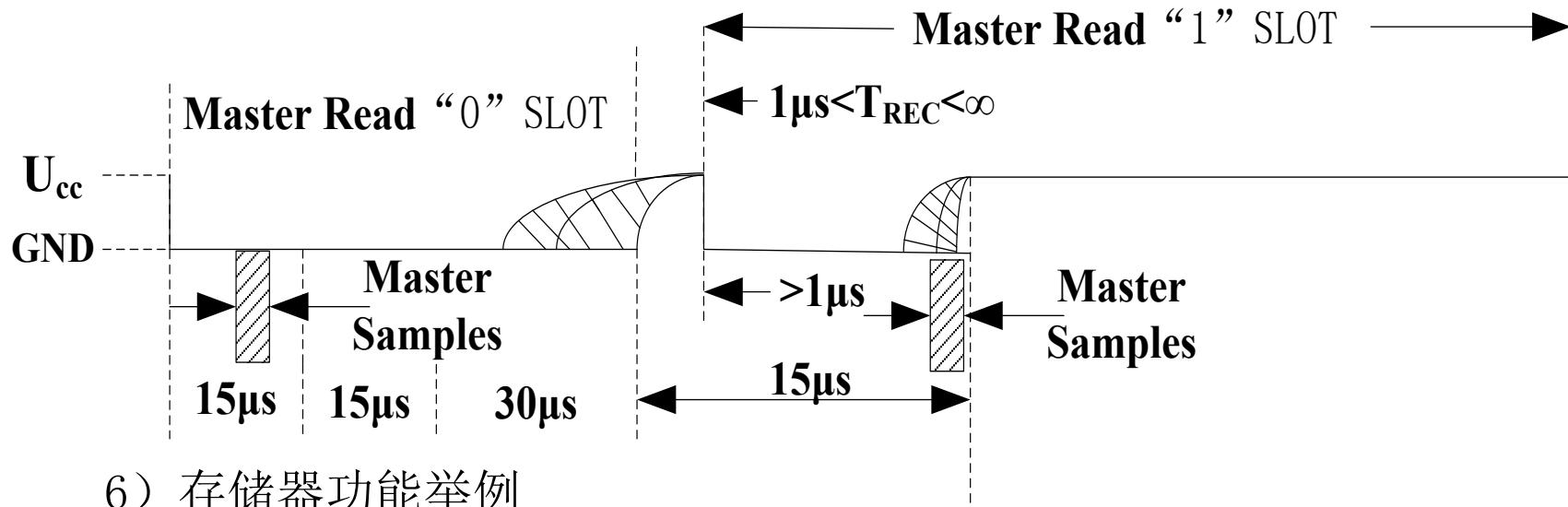
自动的完成该工作。

f) 核查供电模式 (B4h)

在该命令发出后，器件输出“0”表示总线供电，“1”表示外部电源供电。

5) 读/写时间片 (slots)





6) 存储器功能举例

- a) 总线主机启动温度转换，然后读温度值（假定总线供电）

主机模式	数据（低位在前）	说明
T_x	Reset	Reset Pulse (480~960)
R_x	Presence	Prsence Pulse
T_x	55h	产生“Match ROM”命令
T_x	64位ROM码	传输DS18B20地址
T_x	44h	发送“Convert T”命令





T_x	I/O线拉高	总线主机拉高数据线时间> t_{conv}
T_x	Reset	Reset Pulse
R_x	Presence	Presence Pulse
T_x	55h	发送“Match ROM”命令
T_x	(64位ROM码)	传输DS18B20地址
T_x	BEh	发送“Read Scratch Pad”命令
T_x	(9个数据字节)	主机读9个字节暂存器的数据并计算前8个字节的CRC码，若相同，继续，若不同，读操作重复。
R_x	Reset	Reset Pulse
R_x	Presence	Presence Pulse, done





b) 总线主机写存储器（假定总线供电，只有一只DS18B20）

主机模式	数据（低位在前）	说明
T_x	Reset	Reset Pulse (480~960 μ s)
R_x	Presence	Prsence Pulse
T_x	CCh	Skip ROM命令
T_x	4Eh	Write Scratch pad command
T_x	(3个数据字节)	T_H, T_L , Config
T_x	Reset	Reset Pulse
R_x	Presence	Prsence Pulse
T_x	CCh	
T_x	BEh	读暂存器命令



 R_x

(9个数据字节)

 T_x

Reset

Reset Pulse

 R_x

Presence

Prsence Pulse

 T_x

CCh

 T_x

48h（拷贝暂存器命令，在发出该命令后，主机必须等待10ms保证该命令执行完。

 T_x

Reset

Reset Pulse

 R_x

Presence

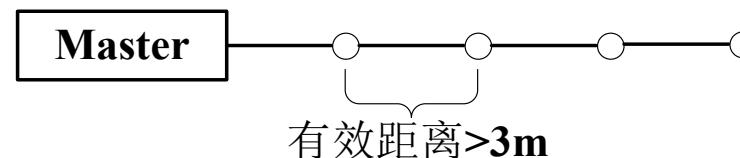




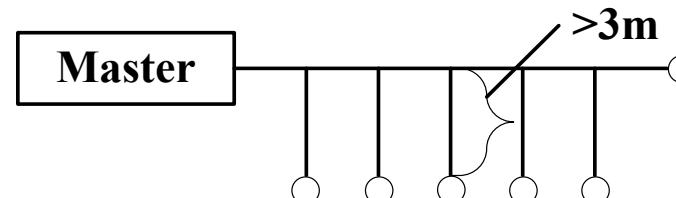
3、一线式网络

1) 一线式网络拓扑

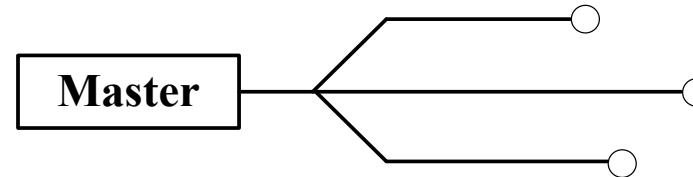
a) 线性拓扑



b) 分支拓扑



c) 星形拓扑



2) 一线网络术语

“radius” 和 “weight”

radius：指主机末端与最远节点从器件之间的连线长度。





Weight：指网络中所有连线的总长，单位：米。

如星形网络，有3个分支，长度分别为10m，20m，30m，则：

$\text{radius}=30\text{m}$, $\text{weight}=60\text{m}$

一般，网络的总长度受限于电缆的上升时间，而半径确定了信号反射的最快时间。

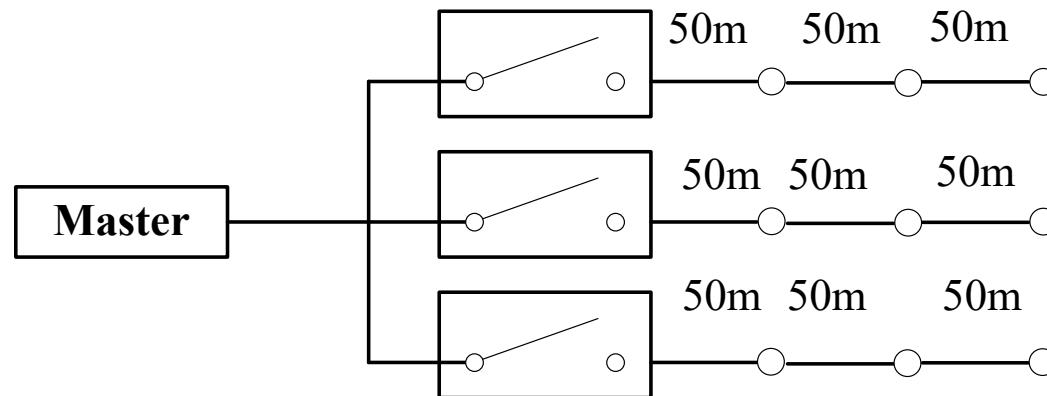
从理论上，一线式网络的radius可以大于750m，但由于电缆引入的时间延迟使得通信协议失效。实际上考虑到其它一些影响因素，实际值要小。

3) 从器件weight

每增加一个从器件，相当于要使网络的weight减少1~0.5m，这主要是受分布电容的影响，对于连接电缆的分布电容一般为24PF/m（5类双绞铜线）。

4) 开关网络（见下图）



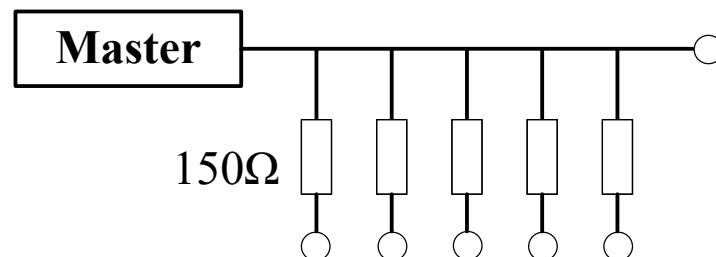


6) 总线供电问题

在网络上的从节点器件均从总线上吸收电源时，若因总线上传输数据导致供电不足时，会影响网络的正常运行。

7) 分布式阻抗匹配

采用下图可以降低反射影响，但同时也会降低信噪比。



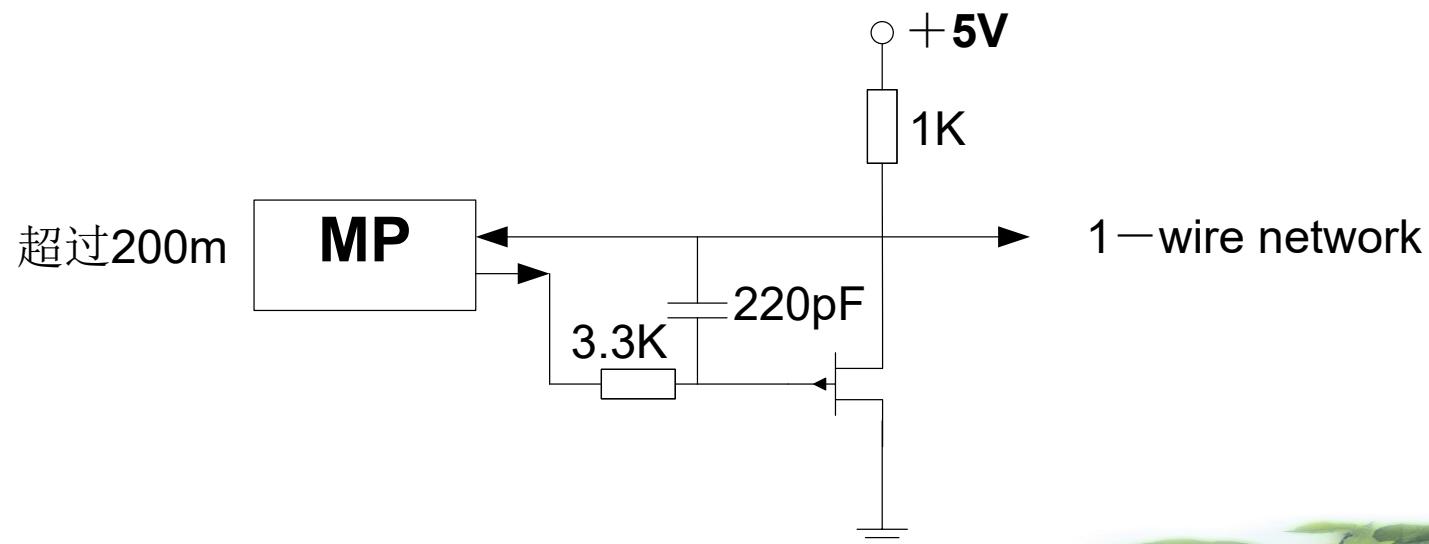


4、 接口驱动

1) 典型CPU端口连接口

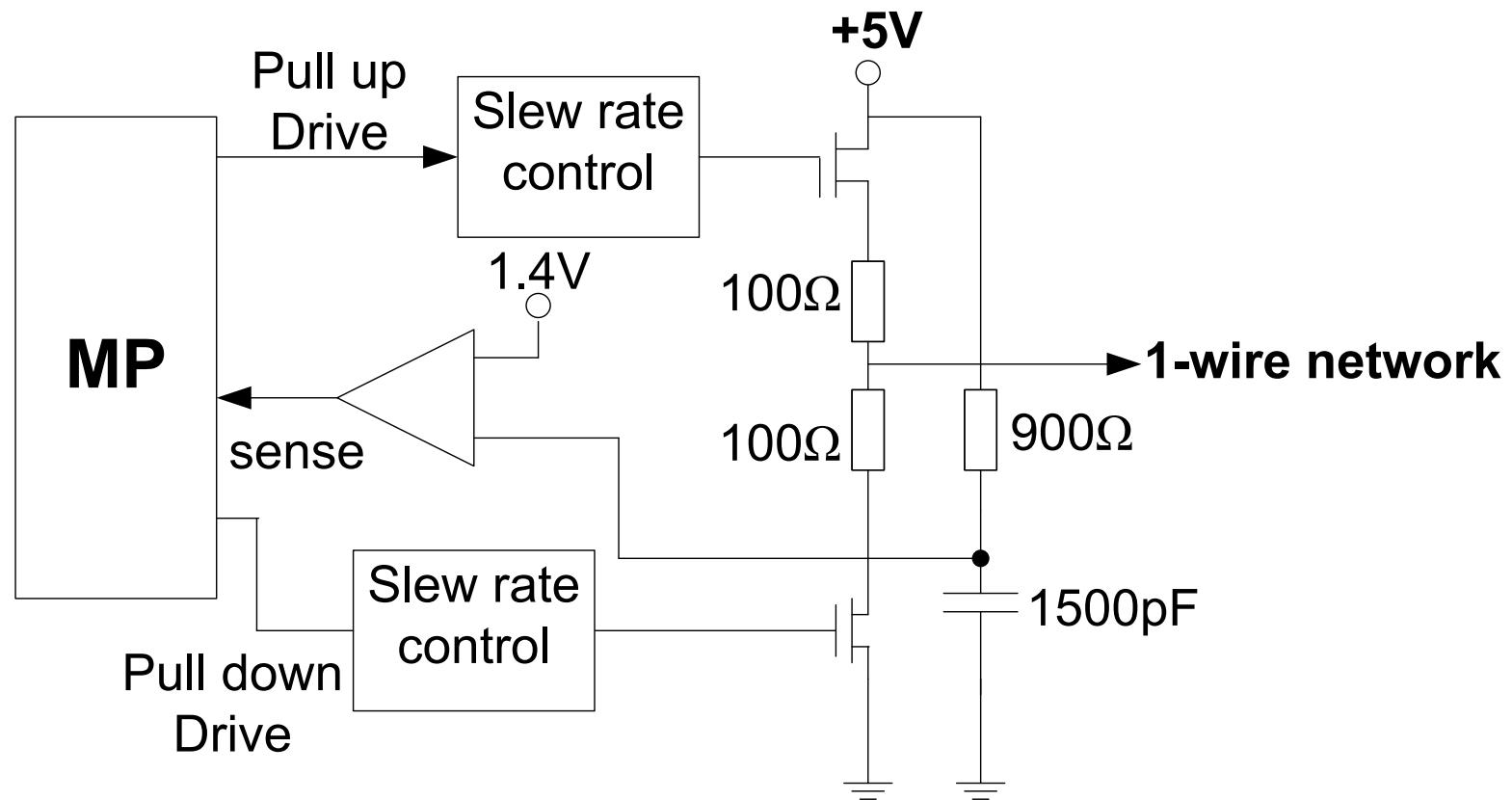


2) 改进型CPU总线接口





3) 高级一线式网络驱动器

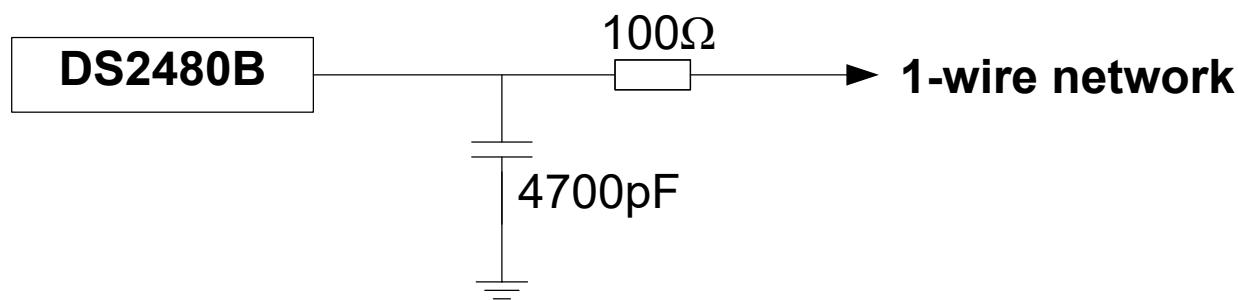


具有“智能化”功能，适应网络从小到大的要求，其**weight**超过**500m**





4) 采用串行接口适配器DS2480B的驱动电路（用于短连接介质网络（1~100m））





§ 8.3 集成化智能传感器的应用

PPT系列网络化智能压力传感器的典型应用

- ♣ PPT模拟输出的配置
- ♣ 远程模拟压力信号的传输与记录
- ♣ 网络结构

4Y4型智能化超声波测距集成电路

- ♣ 4Y4的性能特点
- ♣ 4Y4的工作原理
- ♣ 单片液晶显示测距仪

ACS750型集成电流传感器

- ♣ 交流电流检测技术
- ♣ ACS750型集成电流传感器的原理与应用





AD693型多功能传感信号调理器

- ♣ AD693的性能特点
- ♣ AD693的工作原理
- ♣ AD693的典型应用
- ♣ AD693在电子测量仪器中的应用

APMS—10G型带微处理器的智能混浊度传感器

- ♣ APMS—10G的性能特点
- ♣ APMS—10G的测量原理
- ♣ APMS—KIT. exe软件的安装使用及通信协议
- ♣ 使用注意事项





§ 8.3.1 PPT系列网络化智能压力传感器的典型应用

1、PPT系列传感器简介：

(1) PPT系列传感器采用钢膜片，带RS—232接口，传感器距离不超过18m，适合测量快速变化或缓慢变化的各种不易燃、无腐蚀性气体或液体的压力、压差及绝对压力，测量精度高达± 0.05%。

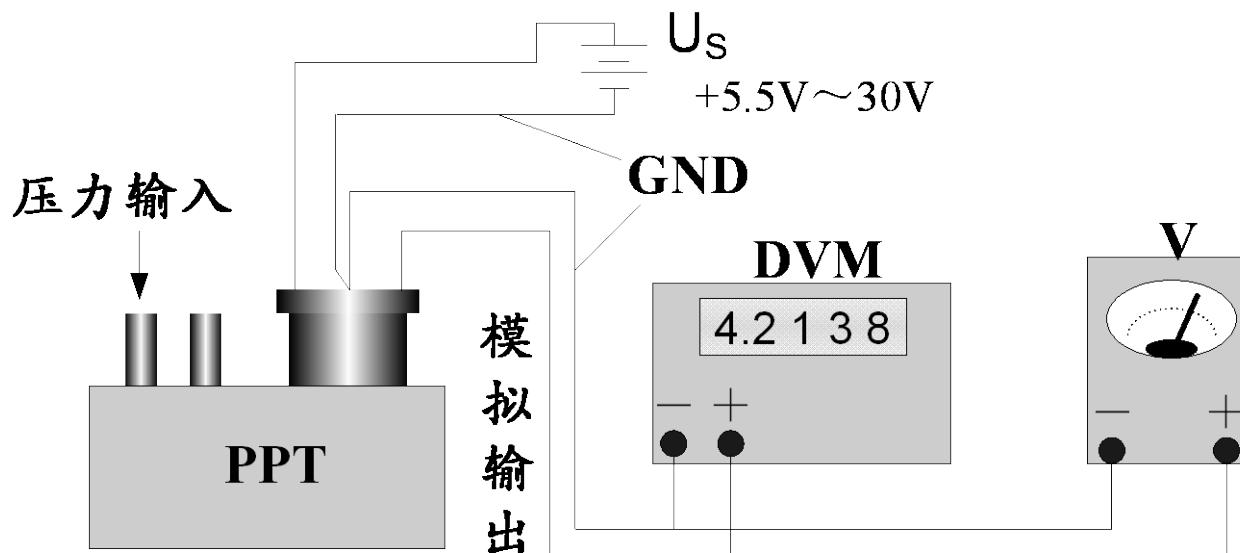
- (2) 它属于网络传感器。
- (3) 能输出经过校准后的压力数字量和模拟量。
- (4) 可通过接口电路与PC机进行串行通信。
- (5) 有12种压力单位可供选择。
- (6) 利用内部的集成温度传感器来检测传感器温度并对压力进行补偿。
- (7) 电源电压的范围是+5. 5V~+30V，工作电流为15mA~30mA，工作温度范围是−40°C ~ +85°C 。





2、PPT模拟量的输出

单独使用一个PPT，能代替传统的模拟式压力传感器。其最大优点是不需要校准即可达到高精度指标。PPT模拟输出与测量仪表的接线如下图所示：



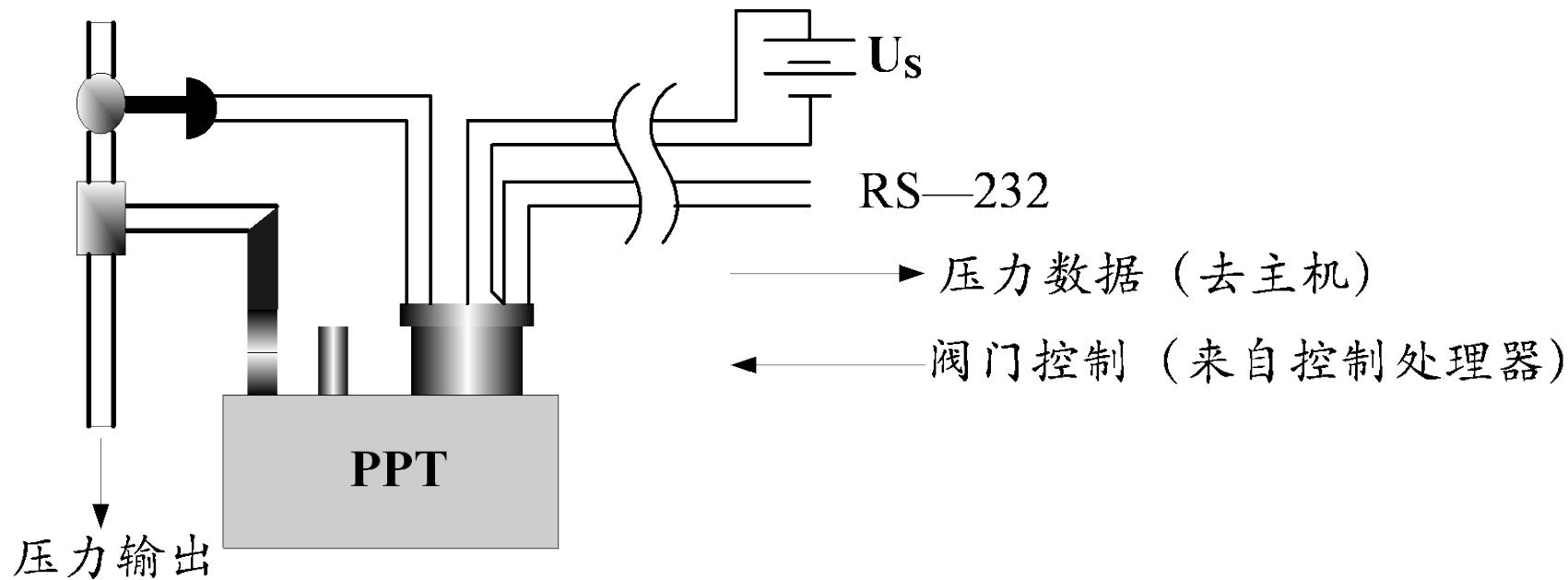
PPT模拟输出与测量仪表的接线图

用户既可通过数字电压表（DVM）读取压力的精确值，亦可利用模拟式电压表（V）来观察压力的变化过程及变化趋势。





对PPT进行设置后，它还能在传送压力数据的同时，接收来自控制处理器的阀门控制信号，以实现压力自动调节，具体接线如下图所示，这对于压力测控系统非常有用。阀门控制数据可以和压力数据无关。



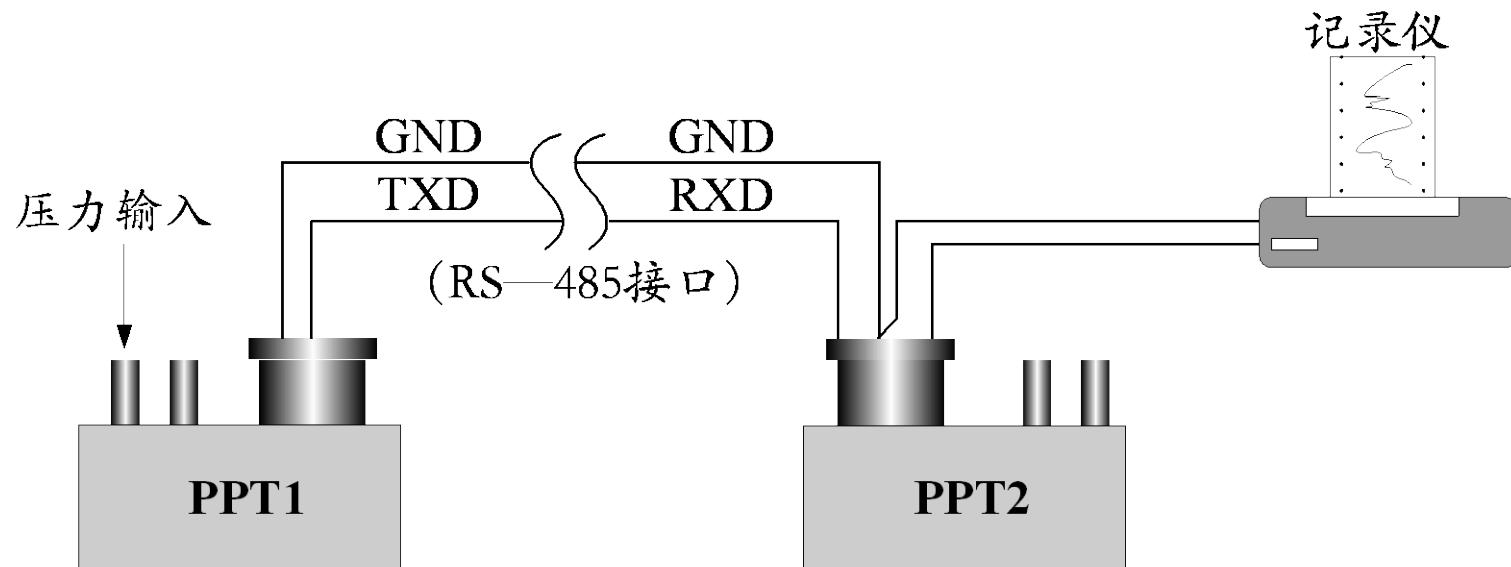
能实现压力调节的接线图





3、远程模拟压力信号的传输与记录

PPT的模拟信号可直接送给记录仪来记录压力波形，但在远距离传输模拟信号时很容易受线路干扰及环境噪声的影响，还会造成信号衰减。可按下图连接，这种方法适用于RS—485接口，传输距离可达数千米。若采用RS—232接口的PPT系列传感器，需增加驱动器和中继器。该方案传输速率快，当波特率选28800bit/s时，数据传输所造成的延迟时间不超过2ms。



远程模拟压力信号传输与记录的接线图





下面是远距离传输的设定指令表，假定PPT1和PPT2在同一组。

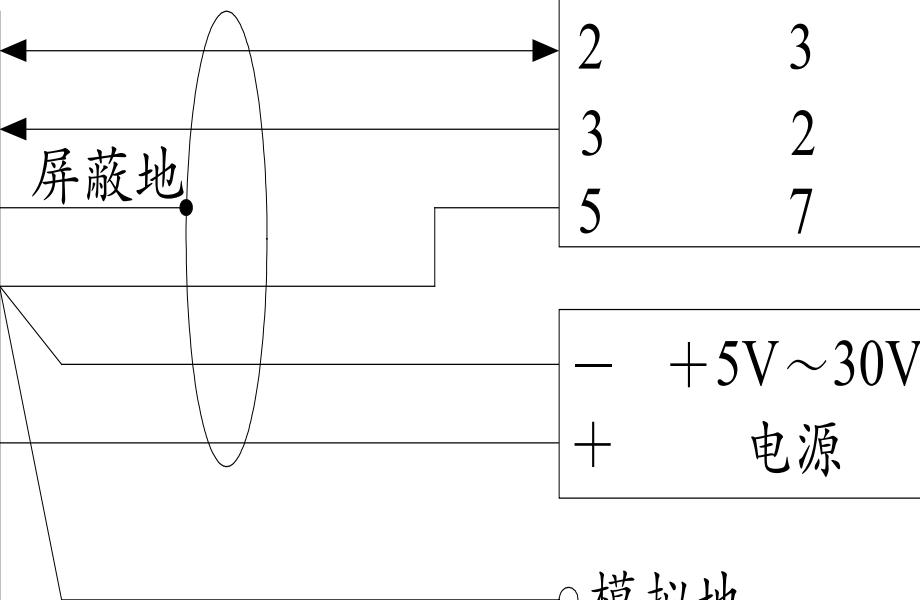
PPT1的设定指令		PPT2的设定指令	
输入指令	说明	输入指令	说明
*01WE=RAM	写操作使能	*02WE=RAM	写操作使能
*01DA=U	将压力转换成“-”格式	*02DA=R	将数字输出转换为模拟输出
*01MO=P4	上电模式	*02NE=DAC	能写入DAC中
*01WE	E ² PROM写操作使能	*02WE	E ² PROM写操作使能
*01SP=ALL	将全部结果存入E ² PROM	*02SP=ALL	将全部结果存入E ² PROM

PPT与主机的接线如下图所示，图中D9、D25分别代表主机上的9针插座和25针插座。





PPT RS—232发送	1
RS—232接收	2
外壳地	3
电源及信号公共地	4
直流电源输入	5
模拟电压输出	6



○模拟地

○0~5V输出

PPT与主机的接线图

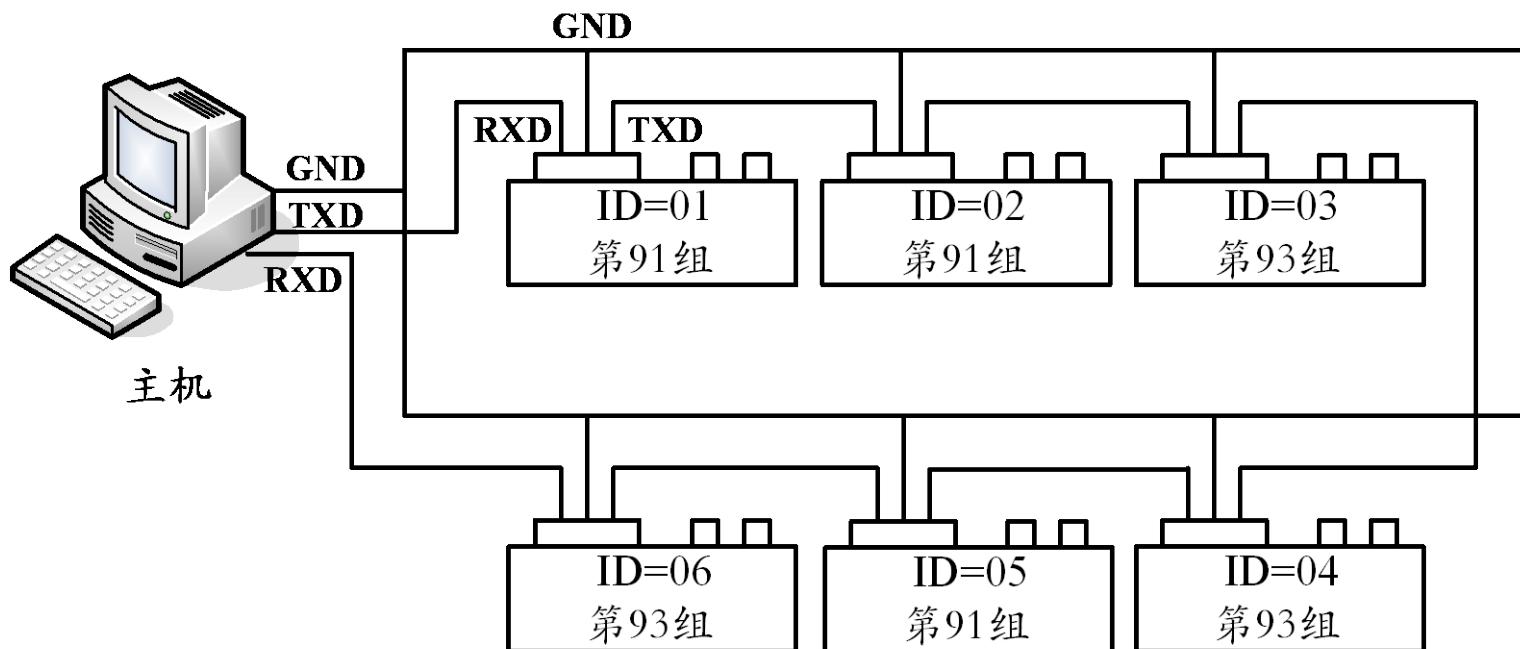




4、 网络结构

1) RS—232环形网络

RS—232环形网络的起点和终点都在TXD、RXD和GND接口线上。其特点是网络接口可接多台PC机的串行接口。具有6个PPT单元的RS—232环形网络如下图所示：



具有6个PPT单元的RS—232环形网络





该例中，各PPT单元的ID地址是从主机接口开始按照环形顺序排列的，从01开始，到06终止。两个组地址分别为91、93，每组有3个PPT单元被分配地址。为使PPT单元能单独接收主机指令，每个PPT单元必须有唯一的地址。一旦有几个PPT单元设定的地址相同，那么当主机发出该地址指令时，只有最先接收到主机的那个PPT单元能收到该指令，指令也就不再往下传送。该网络的另一个特点就是能对每个PPT单元自动分配ID地址。

例如用*99ID=1的指令将ID=01分配到PPT1时，其余PPT的ID地址就依次递加1。最终返回主机时它读出的结果就变成*99ID=7，主机自动编址为07。当主机传送一条组地址（*90～*98）指令时，该指令就依次传给环路中的每个PPT单元，只有符合该组地址的PPT单元才能读到这条指令。仅当主机发出全局地址（*99）指令时，全部PPT单元都能响应。





2) RS—485多点网络

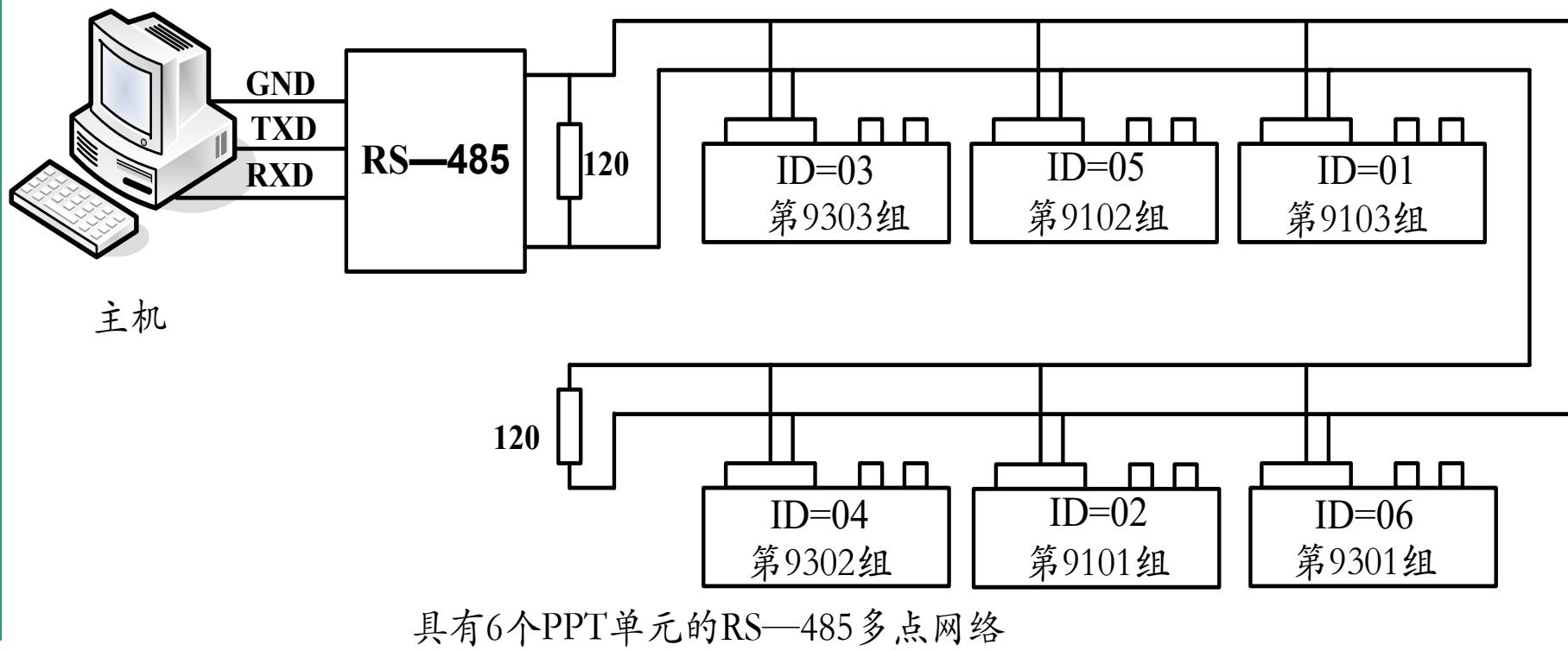
RS—485多点网络是以主机为起点、以距主机最远点为终点，它采用多点网络结构，亦称星形网络结构。该网络不仅传输距离远，而且在不断开网络的情况下就能增、减PPT的数目。该网络最多只能连接32个PPT单元，利用中继器可扩展到89个PPT单元。在RS—485的始端与末端，需分别并联一只 120Ω 的电阻作为匹配电阻。

具有6个PPT单元的RS—485多点网络如下所示。在该网络中，各PPT单元的ID地址可以不按照顺序排列。下面通过一个例子来介绍传输全局地址及分配组地址的过程：①首先传送全局指令*99WE和*99S=00001234，这将使ID号为#00001234的PPT单元在下一条指令之前指定自己的ID号，并做好接受新指令的准备。然后传送*99WE， *99ID=02， *02WE和*02SP=ALL指令，完成设备ID的地址分配。只要在RS—485网络上重复上述过程，即可完





成设备ID的地址分配工作；②分配组地址：一旦设置好设备的ID，即可进行组ID的分配。同一组中的每个PPT单元必须有一个始于01的子地址。子地址将告知每一个PPT单元在组地址指令中的响应顺序。





若要设置设备ID=02的组地址为91，子地址为01，可传送下述命令：

*02WE, *02ID=9101, *02WE, *02ISP=ALL。当第一条指令传送到第91组时，ID=02的单元就会第一个做出响应。





§ 8.3.2 4Y4型智能化超声波测距集成电路

简介：

4Y4是中澳合资上海雷博（LEBOK）电子有限公司继4Y2、4Y3之后开发出的一种新型测距集成电路。它采用了超声波测量领域中的多项新技术，具有高性能、多功能、智能化、低成本等显著特点，可用于对距离进行检测、控制及报警。





1、4Y4的性能特点

(1) 芯片内部有推挽式功率放大器，能直接驱动发送器，此外还有三级交流放大器及限幅电路，可直接配接收器，使外围电路大为简化。

(2) 可选择低速测量(1次/s)、高速测量(16次/s)两种模式。具有区间指示/LCD数字显示/BCD码三种输出方式。

(3) 具有低电压检测、自动关机、读数保持、自动报警、单音或复音输出、芯片自检等功能，操作非常简单。

(4) 抗干扰能力强。内部有按钮开关防抖动及按钮计数电路，在操作按钮时所产生的开关抖动信号不会造成误动作。

(5) 外围电路简单，仅需配少量元器件即可构成单片液晶显示测距仪。

(6) 电源电压可选+3V，最高不超过+6V。平均工作电流仅为 $140\text{ }\mu\text{A}$ ，但在发射过程中的瞬间电流却可达到 15mA ，自动关机之后的待机电流低至 $1\text{ }\mu\text{A}$ 。

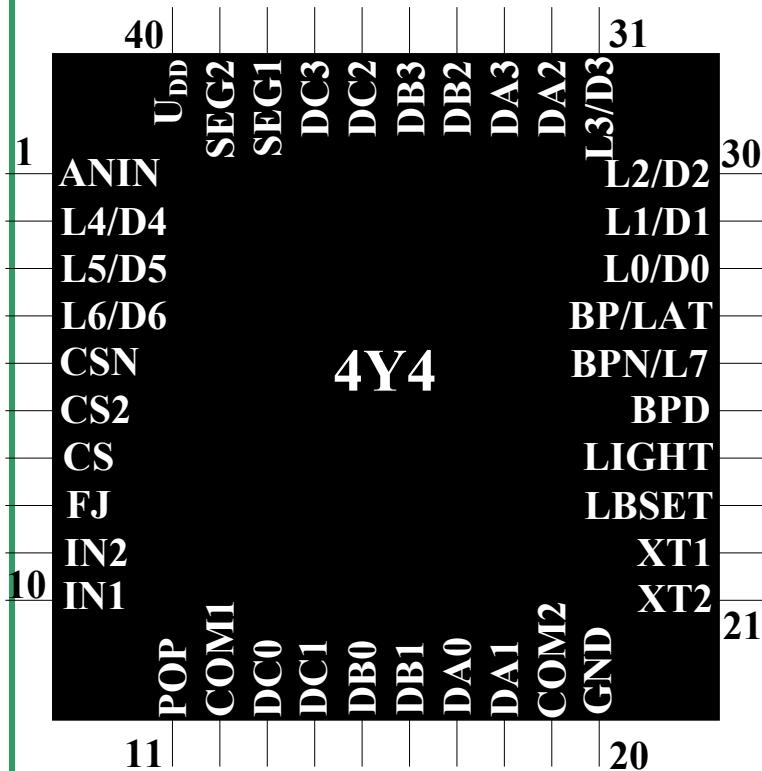




2、4Y4的工作原理

1) 引脚功能

4Y4采用40脚扁平封装，引脚排列如下图所示。



U_{DD} 、GND端分别接+3V电源和地。ANIN为按钮信号输入端，内有下拉电阻，悬空时呈低电平。L0/D0~L6/D6分别为6个区间指示/BCD码输出端，L0~L6所对应的区间为0~20cm、20cm ~ 40cm、40 ~ 60cm、60 ~ 80cm、80 ~ 100cm、100cm ~ 120cm和120cm ~ 140cm；而D0 ~ D6分别对应于第0位和第6位的BCD码。CS为超声波发送端，接发送器。CS2为超声波发送端2，该端经过电阻接CS端，对发射完超声波以后的“余振”现象有抑制作用。





CSN为反相输出的发送端，它与CS端一起组成推挽式功率输出端，该端应接发送器外壳。IN1和IN2分别为接收放大器的输入、输出端，接收器就接在IN1与地之间。POP为复位/设置端。COM1、COM2为LCD上的两个公共电极。DA0～DA3、DB0～DB3、DC0～DC3分别为显示个位到千位的液晶笔段驱动端。SEG1、SEG2为标志符驱动端。XT1、XT2分别为晶振输入端、晶振输出端，接455kHz压电陶瓷滤波器。LBSET为低电压检测端，用于设定低电压报警的阀值电压。LIGHT为路灯控制信号端。BPD为门铃控制信号输出端。BP/LAT为音频信号输出/数据锁存端，可驱动蜂鸣器或扬声器。BPN/L7为音频信号的反相输出端/第七位的BCD码输出端，它采用推挽式音频输出电路，可输出2.5kHz的单音，也可输出由1.25kHz与2.5kHz混合而成的复音。





2) 4Y4的工作原理

4Y4的工作原理是首先发送一束超声波，然后由接收器接收从目标物体反射的回波信号，再利用计数器算出从开始发射直至接受到回波信号的时间间隔 Δt 。 Δt 与目标距离成正比。

a) 工作模式的设置

POP状态	ANIN端状态	芯片功能	优先级
接低电平	接高电平	16次/s高速测量，连续测量，不能自动关机，输出的BCD码代表以m或dm作为单位的距离	3
	接中电平	16次/s高速测量，连续测量，不能自动关机，输出的BCD码代表以cm或dm的数值（注意是cm在前，dm在后）	3
	接低电平（默认）	16次/s高速测量，连续测量，不能自动关机，从L0~L6端可分别输出区间距离信号，每段距离为20cm	3





POP状态	ANIN端状态	芯片功能	优先级
接中电平	接固定值	将芯片复位	1
	接两次高电平	将芯片复位，进入自测试状态	2
接高电平 (默认)	接高电平	打开电源，开始测量	3
	接两次高电平	开机测量后再次按下按钮即进入读数保持状态	4
	接三次高电平	连续3次快速的按下按钮，芯片即进入连续测量状态（不能自动关机）	5
	接中电平	不能自动关机	3
	接低电平 (默认)	自动关机，开机后经过11s关机	5

POP与ANIN均为三态输入端。POP端内部有上拉电阻，该端悬空时呈高电平，利用芯片内部的电平监测器可检测出高、中、低三个电平，设置不同功能。在POP端与地之间接一只电容，即可实现上电复位。ANIN端的电路结构和POP端相似，区别是内部有一只下拉电阻，悬空时呈低电平。

b) 声隔离技术





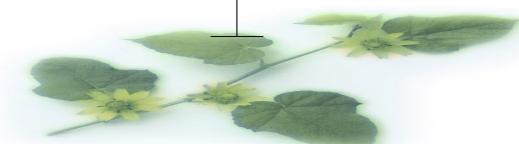
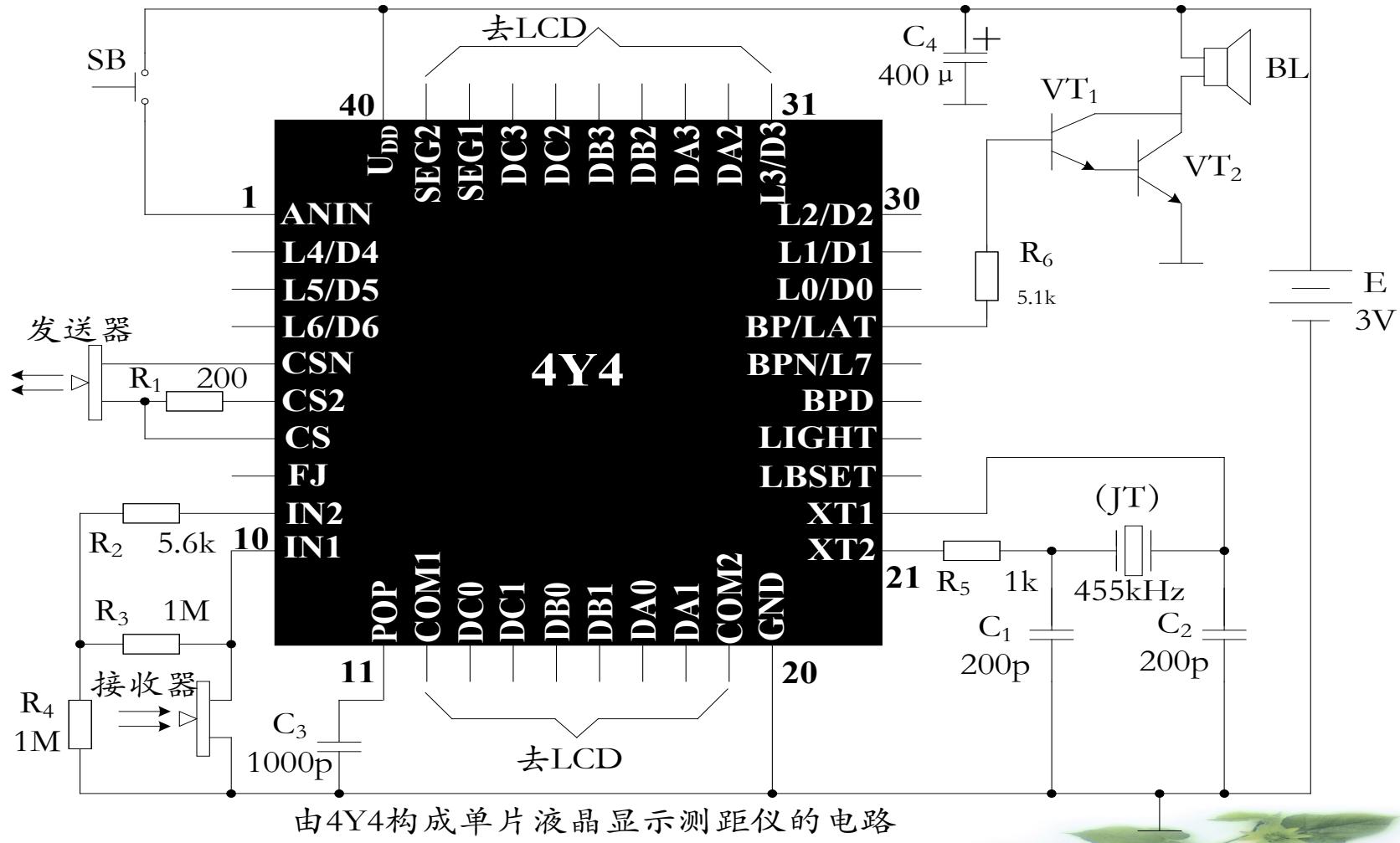
4Y4专门设置了一个静音周期，可实现发送器与接收器之间的“声隔离”。4Y4在发出一束超声波之后并不立即进入接收状态，而是在静音周期内将发送器与接收器的全部脚对地短路，使之不起作用，这样即可因避免发射波绕射到接收器而引起的“余振”现象。





3、单片液晶显示测距仪

下图为4Y4构成单片机液晶显示测距仪的电路。





该仪器主要包括超声波发送器、接收器、LCD显示器、按钮开关和蜂鸣器（或扬声器），为了简化引线，4Y4直接焊在LCD显示板的背面。上图中，4Y4的第2~4脚、第8脚、第23~26脚和第28~30脚不用。 R_1 为发送电路的限流电阻。 $R_2 \sim R_4$ 为接收放大器的外部元件。 C_3 为开机自动复位电容。晶振电路采用廉价的455kHz压电陶瓷滤波器来代替石英晶体（JT）， C_1 和 C_2 为振荡电容。SB为按钮开关。 C_4 为电源退耦电容。4Y4只能驱动压电陶瓷蜂鸣器或微型讯响器，为了驱动扬声器，还需要增加一级达林顿管（ VT_1 、 VT_2 ）作为功率放大使用。 R_6 为 VT_1 的限流电阻。

根据实际需要，4Y4还可接外部发送电路或接收电路。





§ 8.3.3 ACS750型集成电流传感器

简介：

ACS750是美国快捷微系统公司（Allegro MicroSystems. Inc.）新推出的由精密线性霍尔集成电路构成的隔离式电流传感器。它适用于汽车及工业系统中的电流检测、电机控制、过程控制、伺服系统、电源转换、电池转换、电池监控、过电流保护等领域。





1、交流电流检测技术

1) 交流电流检测技术

交流电流的检测方法主要有以下三种：

- a) 利用分立式传感电阻检测交流电流。
- b) 利用电流互感器（CT）测交流电流。

CT属于不用驱动电路的无源设备，其测量原理是根据电磁感应定律首先将一次侧电流转换成二次侧电流，然后利用交流电流表去测量二次侧电流，再根据变流比换算成一次侧电流值。

- c) 利用霍尔传感器测交流电流（分开环、闭环两种）。

几种常用电流传感器的性能比较

传感器种类	测量原理	电流隔离	功耗	体积	成本	测量电流范围
传感电阻	欧姆定律	不隔离	高	小	低	$\leq 20A (DC \sim 100kHz)$
电流互感器	电磁感应定律	隔离	中高	大	高	$\leq 1000A (AC)$
开环霍尔电流传感器	霍尔效应	隔离	最低	小	较低	$\leq 1000A (DC \sim 20kHz)$
闭环霍尔电流传感器	霍尔效应	隔离	低	小	较高	$\leq 500A (DC \sim 150kHz)$





2) 集成电流传感器的名词术语

输出电压灵敏度: 当一次侧导线上的电流变化1A时所对应的传感器输出电压变化量，被称作输出电压灵敏度，其单位是mV/A。

线性度: 表示满量程时传感器输出电压随一次侧电流成比例变化的程度。

准确度: 表示实际输出电压与理想情况下输出电压的最大偏差，即测量的总误差。

静态输出电压: 是指当一次侧电流为零时传感器的输出电压值，其标称值应等于电源电压的一半。

偏移量: 它是磁滞现象而引起的输出偏移量，又称作磁滞误差。





2、ACS750型集成电流传感器的原理与应用

简 介：

ACS750又分ACS750LCA—075、 ACS750ECA—100两种产品，二者可检测的最大电流分别为± 75A（+150°C）、 ± 100A（+85°C）。

1) 性能特点

- a) 属于工作在开环状态下的精密线性霍尔集成电路，内含霍尔元件和信号调理器，其输出电压与一次侧电流成正比，可直接配数字电压表测量电流。
- b) 具有自校准和电流隔离功能，使用时不需要对增益及偏移量进行微调。
- c) 输出电压灵敏度为19.75mV/A，输出阻抗为1Ω（均为典型值）。





d) 超低功耗

其一次侧的电流检测电阻仅为 $120 \mu\Omega$ ，即使测量100A的大电流，所产生的功耗仅为12mW。

e) 可靠性高，安全性好

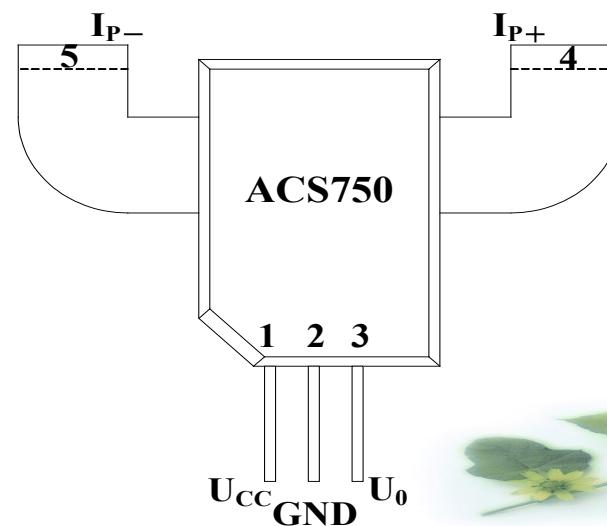
在一次侧与二次侧之间可承受2.5kV的绝缘测试电压。

f) 采用+5V电源供电，电源电压的允许范围是+4.5V～+5.5V。

电源电流的典型值为7mA，最大不超过10mA。ACS750LCA-075的工作温度范围是-40 °C～+50 °C。ACS750ECA-100的工作温度范围是-40 °C～+85 °C，其外形尺寸为 10mm×13mm×7mm。

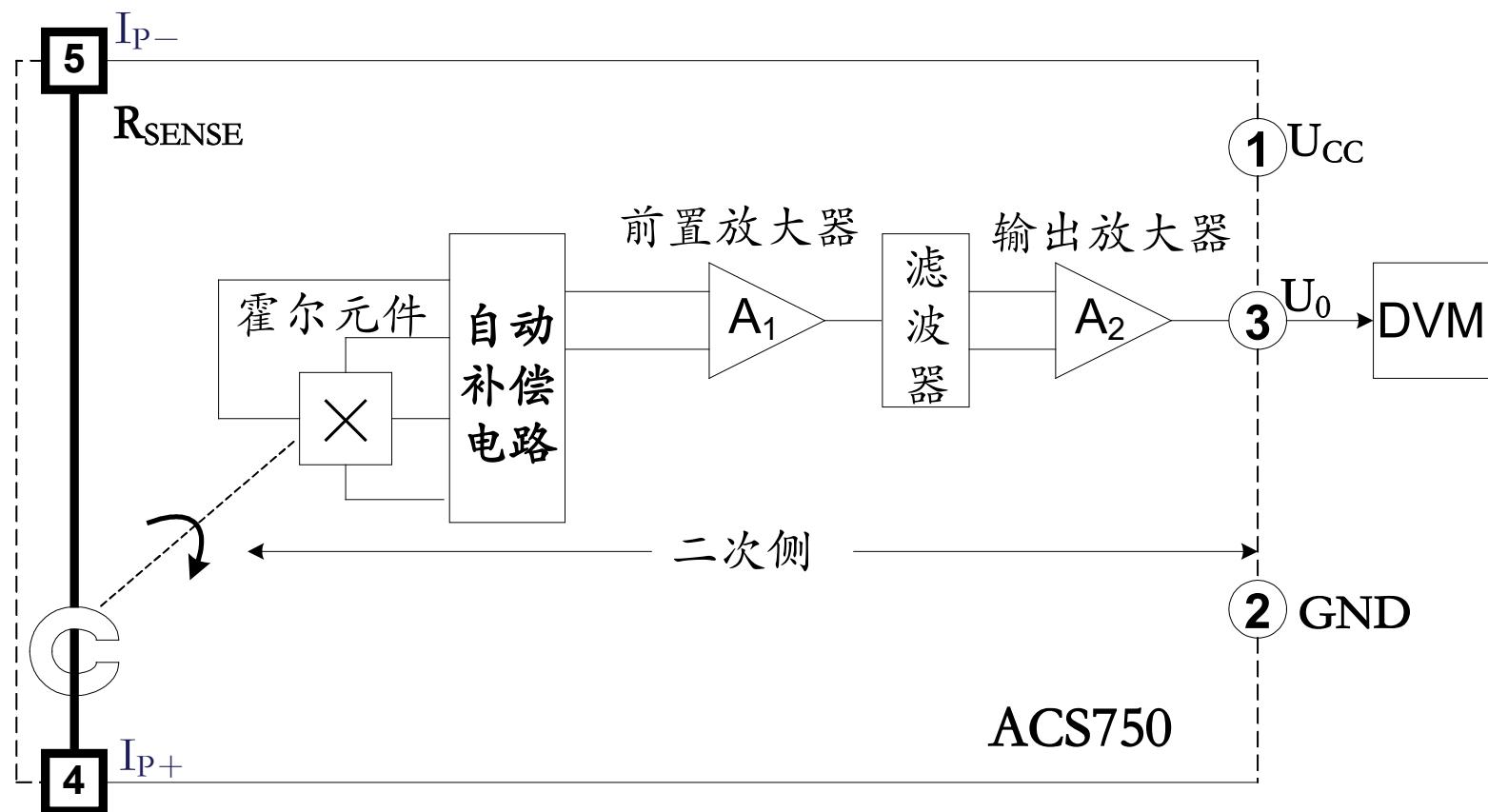
2) 原理与应用

ACS750的外形如右图。





U_{CC} 、GND分别为电源端和地。 U_0 为电压输出端。 I_{P+} 与 I_{P-} 为一次侧引脚，测量电流时这两脚应串入被测线路中。下图是ACS750的内部电路框图及典型应用。



ACS750的内部电路框图及典型应用

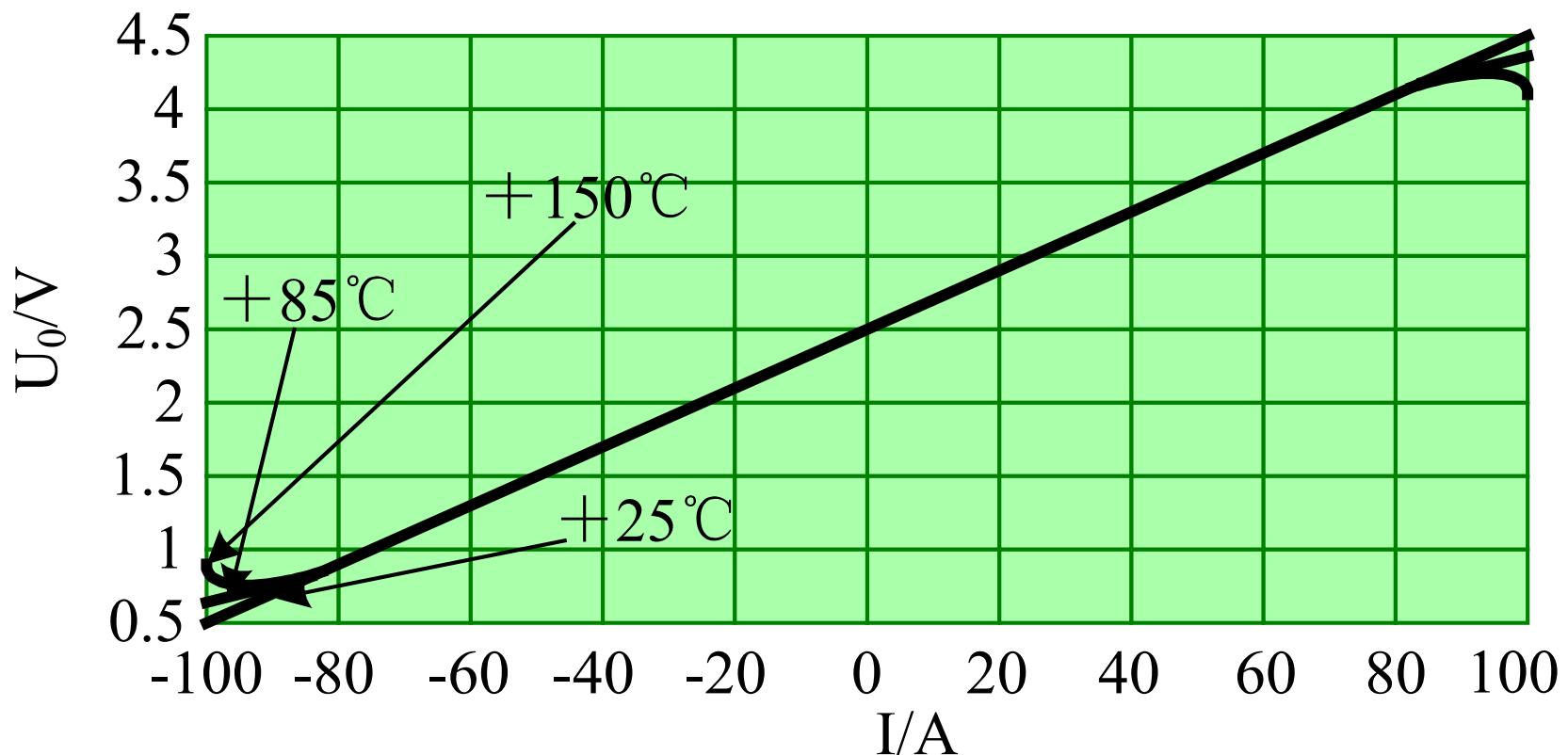




上图中，芯片包含一次侧的电流检测电阻 R_{SENSE} ，二次侧的霍尔元件，自动补偿电路、前置放大器（ A_1 ）、滤波器和输出电流放大器（ A_2 ）。开环霍尔电流传感器是由磁心和放置在磁心开口空气隙上的霍尔元件所组成的。当载流导线穿过磁心中心孔时就产生一个与导线电流成比例的磁场。ACS750含有温度补偿电路，它输出一个经过校正的电压，在输出端与地之间可接一块10V量程的3位半交流数字电压表（DVM）。在不同温度下，一次侧电流与输出电压地关系曲线如下图。

该图分别绘出了当环境温度分别为 $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的三条曲线。由图所见，在 $-80\text{A} \sim +85\text{A}$ 的测量范围内这三条曲线基本重合，并且 U_0 与 I 呈线性关系。





在不同温度下一次侧电流与输出电压的关系曲线





§ 8.3.4 AD693型多功能传感信号调理器

简 介：

AD693是ADI公司推出的一种单片信号调理电路，它具有高精度、多功能的特点。其用途十分广泛，使用也非常灵活，不仅可用作小信号U/I转换器，还可以作为各种传感器的信号调理电路。AD693适用于传感测量系统、工业过程控制及自动化仪表领域。AD693的同类产品为AD694，AD694适合接收高电平输入信号，但芯片内部没有备用放大器。





1、AD693的性能特点

- 1) 内含可编程输入放大器、U/I转换器和多路输出式基准电压源。
- 2) 输出电流有三种形式： $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ （单极性）， $0 \sim 20\text{mA}$ （单极性）， $12\text{mA} \pm 8\text{mA}$ （双极性）。
- 3) 输入电压范围和电流零点均可单独调节，二者互不影响。
- 4) 高精度。电流调零前的总误差为 $\pm 0.25\%$ ，非线性误差低于 $\pm 0.05\%$ 。经过调零后的总转换误差小于 $\pm 0.1\%$ 。
- 5) 利用芯片中的放大器，可对由铂热电阻（PRTD）、各种热电偶及电阻应变片桥路所产生的信号进行调理（包括缓冲、放大、与其他信号进行组合等）。
- 6) 带Pt100型PRTD接口，配铂热电阻时的测温误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。
- 7) 利用外部电阻可选配不同类型的热电偶并设定最高测量温度。





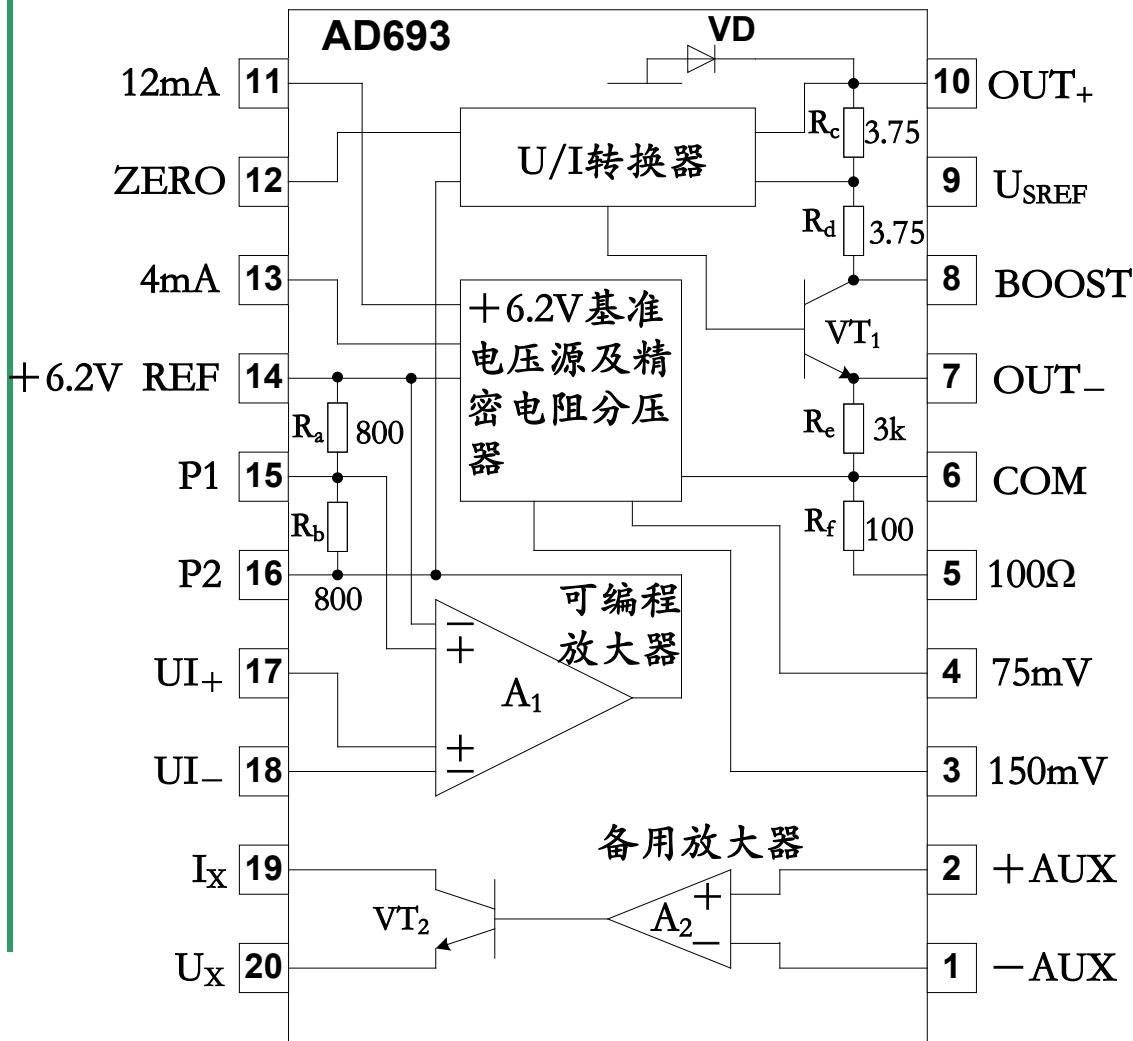
8) 具有过电流保护和反向过电压保护功能。当环路电流接近25mA时能自动限流。当反向电压通过电流环施加到AD693的输出端时，内部二极管能起到钳位保护作用。

9) AD693通常由环路电源供电，特殊情况下也可由本地电源单独供电。





2、AD693的工作原理



左图为AD693的引脚排列及内部电路框图。

其中ZERO为U/I转换器的调零端。 U_{I+} 和 U_{I-} 分别接输入电压的正端和负端。

OUT_+ 、 OUT_- 依次为输出电流的正端和负端。

BOOST为升压端，该端接 U_{SREF} 端时可为基准电压提供一个高于+6.2V的辅助电源。

COM为信号地。

“100Ω”端为Pt100型铂热电阻的接口端。 $75mV$ 、 $150mV$ 是分压器输出的两路标准电压。



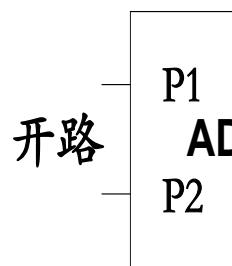


+AUX、-AUX分别为备用放大器的同相输入端、反相输入端。

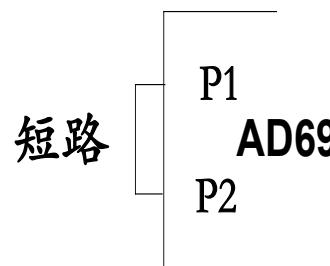
I_x 和 U_x 为备用放大器输出级的引出端，从 I_x 端可输出电流信号，将 U_x 端接上负载可输出电压信号。

1) 可编程输入放大器

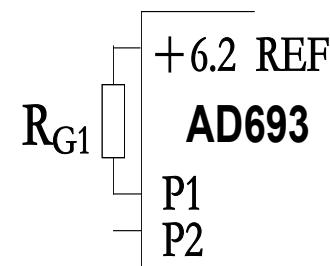
该放大器是一个仪表放大器，简称为输入放大器。它有两个作用，一是进行缓冲放大，二是来设定输入电压范围。改变P1、P2的接线方式就能调整A1的增益，进而设置输入电压范围。能设定不同4种输入电压范围的4种电路图如下：



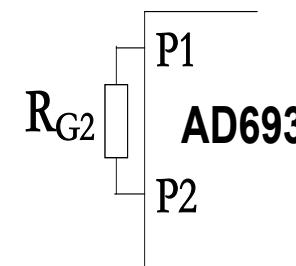
(a) P1、P2端开路 ($K_V=2$)



(b) P1、P2端短路 ($K_V=1$)



(c) 利用 R_{G1} 设定小于30mV的输入电压范围



(d) 利用 R_{G2} 设定30mV~60mV的输入电压范围





a) 电路如 (a) 图所示时, 对应于4mA~20mA输出电流范围, 输入电压范围 $U_I=0\sim 60\text{mV}$; 对应于0~20mA输出电流范围, $U_I=0\sim 75\text{mV}$ 。

b) 电路如 (b) 图所示时, 当输入600mV电压时, 可得到满度为20mA的电流范围。

c) 电路如 (c) 图所示时, 假定用户所期望的输入电压最大值为S, 利用下式可计算出 R_{G1} 的电阻值, $R_{G1}=400/(30/S-1)$; 式中S的单位是mV, R_{G1} 的单位是 Ω 。

d) 电路如 (d) 图所示时, R_{G2} 可由下式确定, $R_{G2}=400\times(1-60/S)/(30/S-1)$; 一般要求 $R_{G2}\geq 200\ \Omega$ 。

需要指出, 内部增益电阻 R_a 和 R_b 的允许误差均为 $\pm 10\%$, 为使输入电压范围严格符合要求, 需要调整 R_{G1} 和 R_{G2} 的值。 R_a 和 R_b 的值可从相应的引脚上





测出。此外 R_a 、 R_b 的电阻温度系数仅为 $-17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，这就要求 R_{G1} 和 R_{G2} 必须选用低温度系数的精密金属膜电阻。

2) U/I转换器

U/I转换器属于跨导放大器，其跨导标称值为0.2666S（S代表西门子， $1\text{S}=1\text{A/V}$ ），显然当 $U_I=75\text{mV}$ 时， $I_0=75\text{mV} \times 0.2666\text{A/V}=20\text{mA}$ 。

U/I转换器内部还有一个限流比较器，能将环路电流限制在±25mA以下。

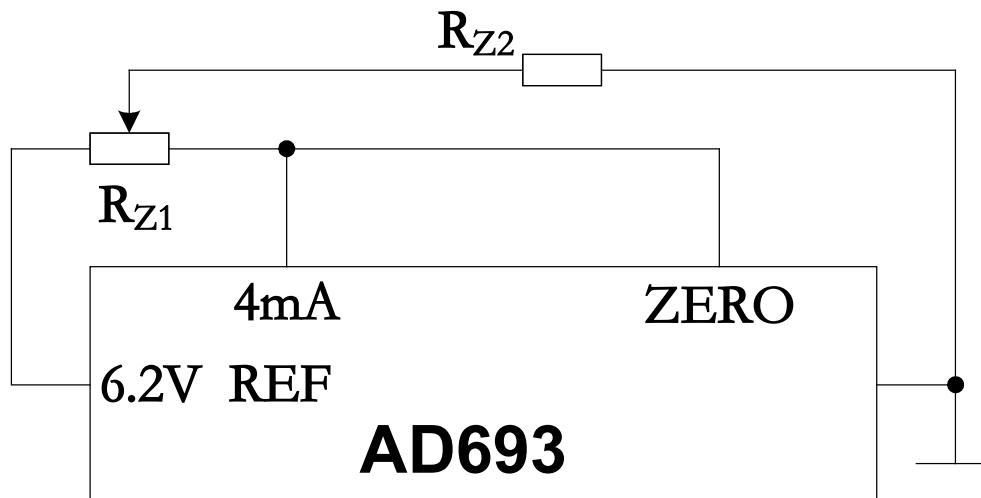
3) 基准电压及精密分压器

芯片内部有高稳定度的+6.2V带隙基准电压源和经过激光修正的精密电阻分压器。利用基准电压源可为U/I转换器提供偏置电压，用来调节输出电流的零点，还可用作外部传感器的激励。





分压器是由精密电阻网络构成的，只需将分压器上的某个抽头接至调零端（ZERO），即可获得相应的输出偏置电流。校准偏置电流的电路如下图所示， R_{Z1} 和 R_{Z2} 为校准电阻。



校准偏置电流的电路

假定校准范围是 I_A ，校准4mA偏置电流时可分别用下式计算 R_{Z1} 和 R_{Z2} 值：

$$R_{Z1} = \frac{1.6}{I_A} - 400 \quad , \quad R_{Z2} = \frac{3.1R_{Z1}}{15 \times 10^{-3} + 3.75I_A} \quad .$$





当校准12mA偏置电流时， R_{Z1} 、 R_{Z2} 的计算公式如下：

$$R_{Z1} = \frac{4.8}{I_A} - 400$$

$$R_{Z2} = \frac{3.1R_{Z1}}{45 \times 10^{-3} + 3.75I_A}$$

4) 备用放大器及输出级

备用放大器（A2）是专为扩展AD693的功能而设置的一个辅助放大器，可对传感信号进行U/I转换或T/I转换，把被测量（电压、温度等）转换为4mA~20mA的电流信号，以便于远距离传输。其输出级采用高增益的达林顿管， I_X 、 U_X 端分别接集电极与发射极。 I_X 可作为高阻抗电流源，给传感器提供 $750\mu A$ ~ $1.5mA$ 的驱动电流，若在 U_X 端与地之间接上负载R，即可获得电压信号。

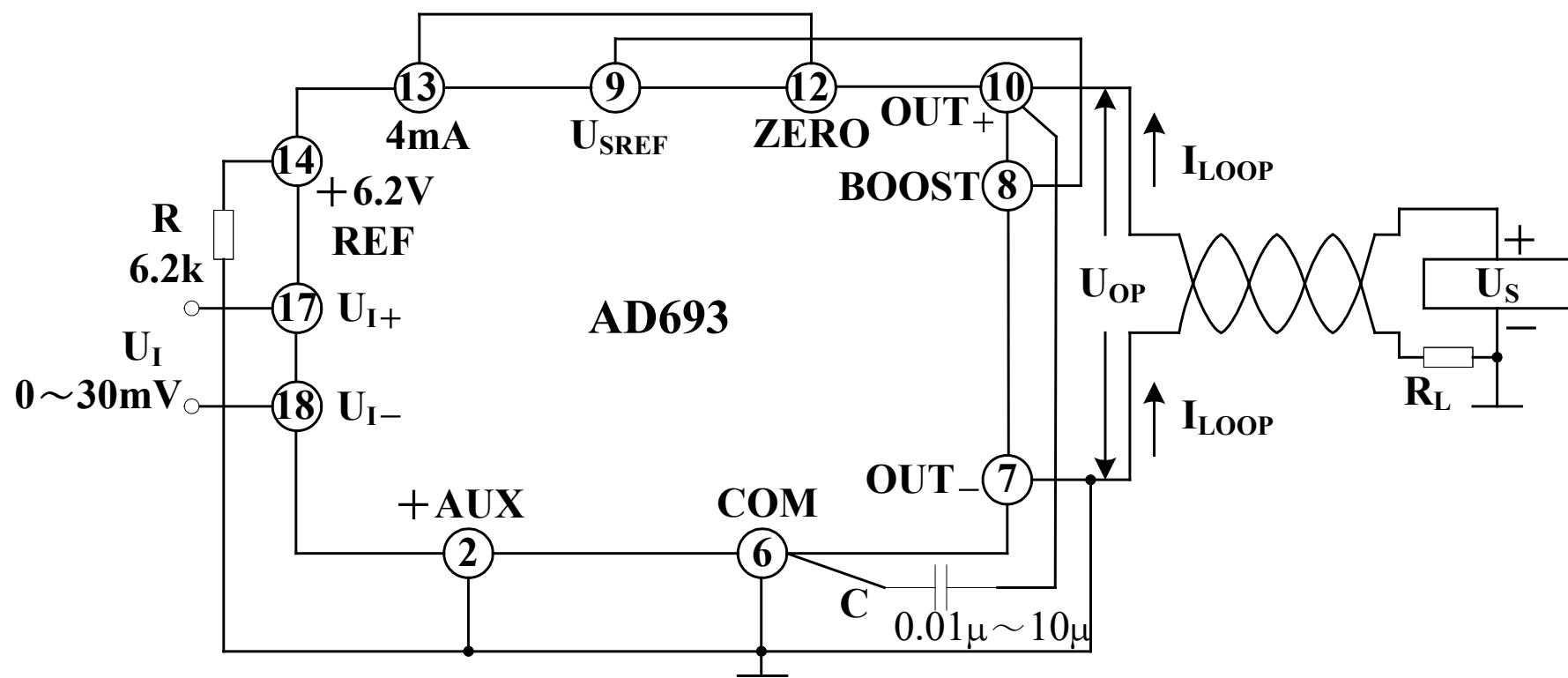




3、AD693的典型应用

1) 典型应用

由AD693构成0~+30mV单极性输入、4mA~20mA输出的电路如下图所示。

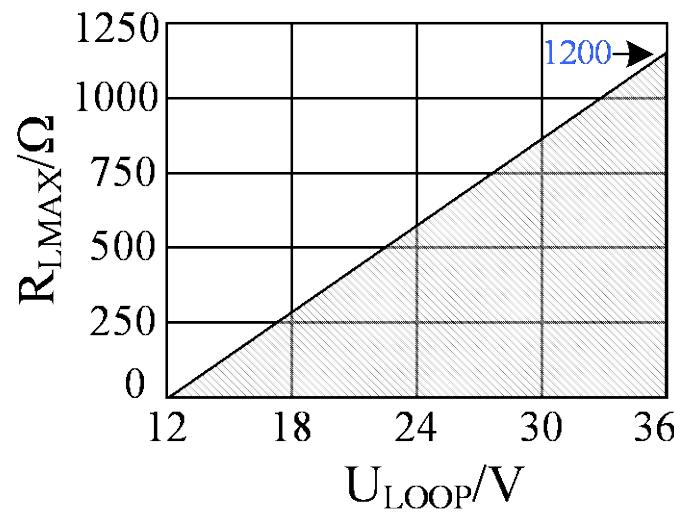




上图中环路电源 U_S 的允许范围是 $+12V \sim +36V$ 。 R_L 为电流环中的负载电阻， I_{LOOP} 为环路电流。实际加到AD693上的电源电压（ U_{OP} ）为： $U_{OP} = U_S - I_{LOOP} R_L$ 。不使用本地电源时， $+6.2V$ 基准电压源与地之间需接 $6.2k\Omega$ 电阻，将基准电压源的负载电流设定为 $1mA$ 。C为电源退耦电容。

2) 电源电压的选择

采用环路电源供电时，最大负载电阻（ R_{LMAX} ）与环路电压（ U_{LOOP} ）的对应关系如下图所示。且二者关系式如下：



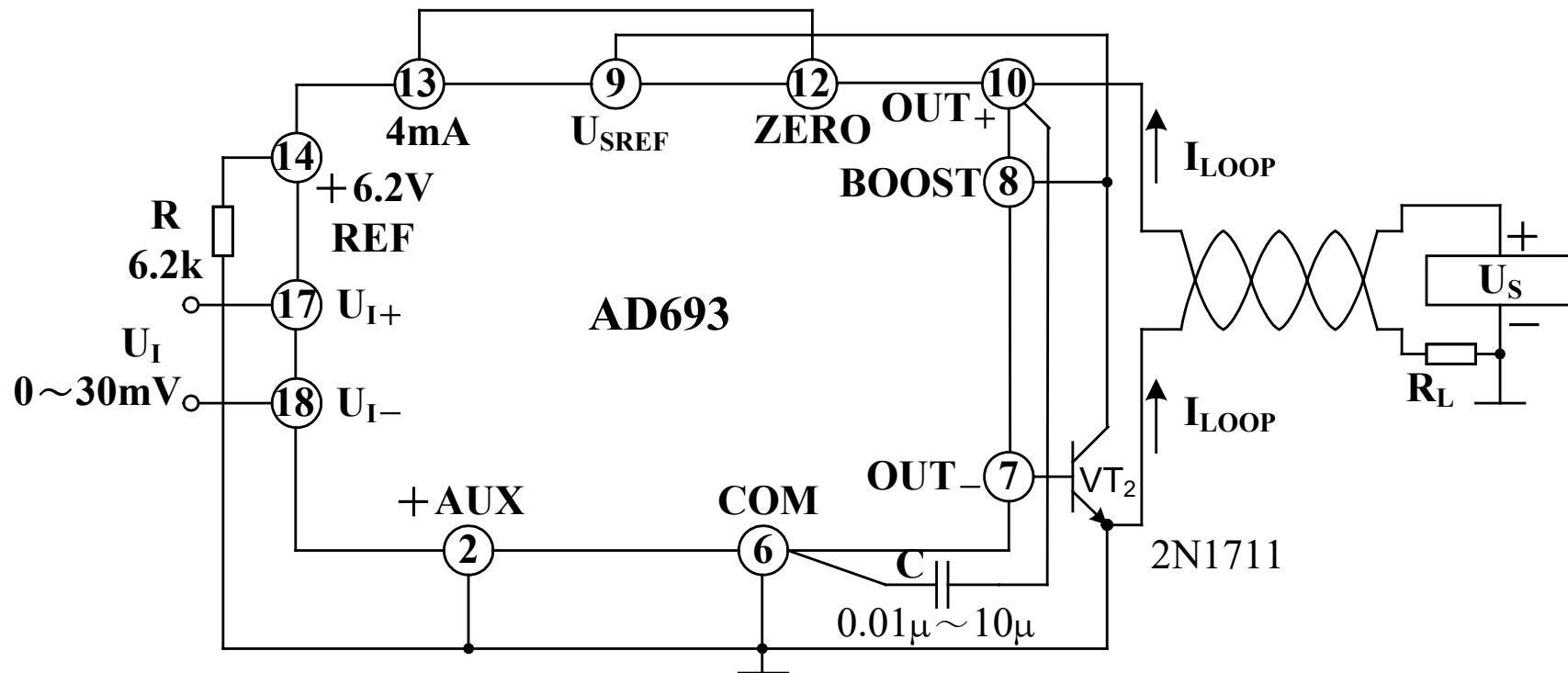
$$R_{LMAX} = \frac{U_{LOOP} - 2}{20 \times 10^{-3}}$$





3) 降低芯片功耗的方法

在AD693内部以输出晶体管VT₁的耗电量为最大，必要时可采用并联外部功率管的方法来降低其功耗，具体电路如下图。





VT₂可选用2N1711型或2N2219A型NPN功率管，其基极接OUT_端，集电极接BOOST端。要求功率管的截止频率 $f_T = 10\text{MHz} \sim 100\text{MHz}$ ，交流电流放大系数 $\beta > 10$ 。2N1711和2N2219A的主要参数为 $U_{CEO} = 75\text{V}$, $I_{CM} = 0.8\text{A}$, $P_{CM} = 0.8\text{W}$ 。

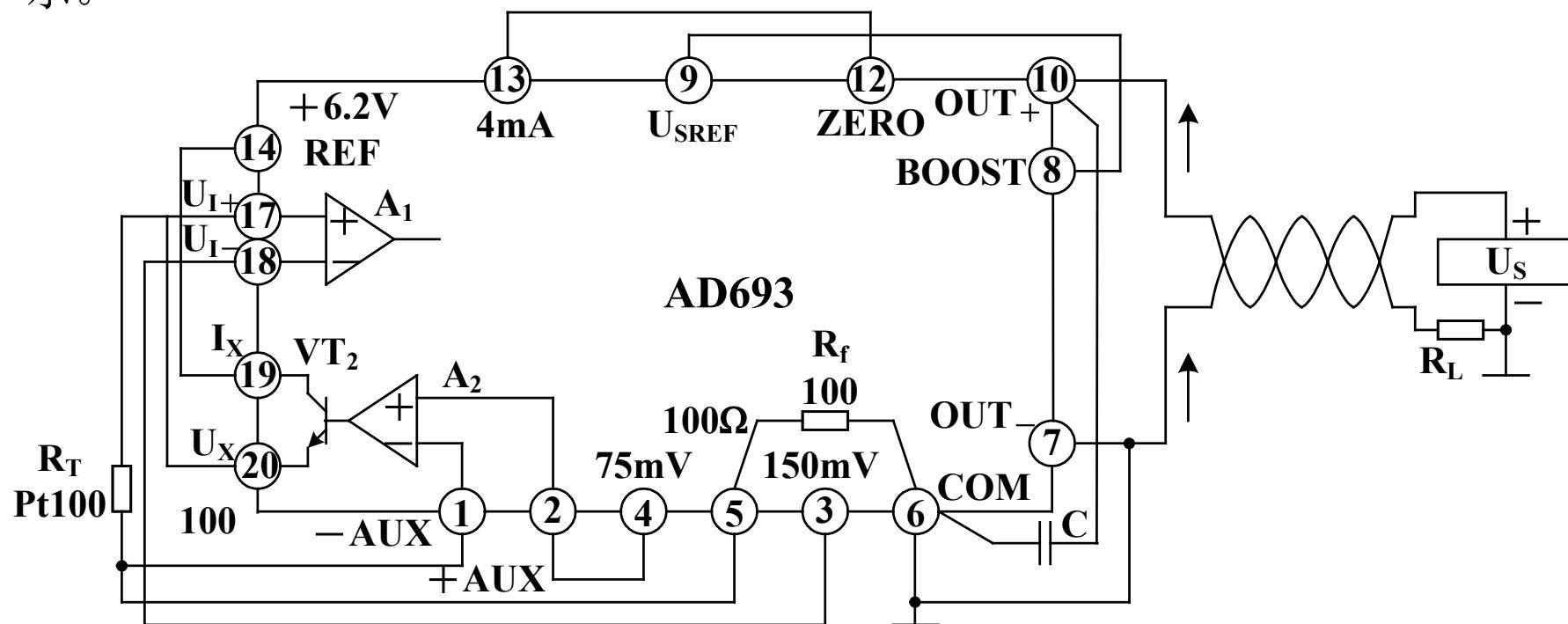




4、AD693在电子测量仪器中的应用

1) 铂热电阻信号调理电路

铂热电阻是常用的测温传感器，其电阻值 R_T 与温度呈线性关系。AD693带Pt100型铂热电阻接口，能直接配置成PRTD信号调理器，电路如下图所示。





Pt100在0℃时的电阻值为100Ω，单位温度下的电阻变化率TCR=0.00385 Ω/℃。该电阻能将0~+104 ℃范围内的温度转换成4mA~20mA的电流，完成温度/电流（T/I）转换。AD693可设定6种不同的测温范围，以满足不同用户的需要，详见下表。

测温范围℃	需要短接的引脚
0~+140	第12脚—第13脚
0~+211	第12脚—第13脚， 第15脚—第16脚
+25~+130	第12脚—第14脚
+51~+266	第12脚—第14脚， 第15脚—第16脚
-50~+51	第12脚—第11脚
-100~+104	第12脚—第11脚， 第15脚—第16脚





这里需要指出的是， A_1 的增益越高，输入电压范围及测温范围就越窄。例如将 A_1 的增益从原来的2倍改变成4倍时，4mA~20mA的输出电流所对应的测温范围就减小到0~+52°C，这恰好是0~+104°C的一半。

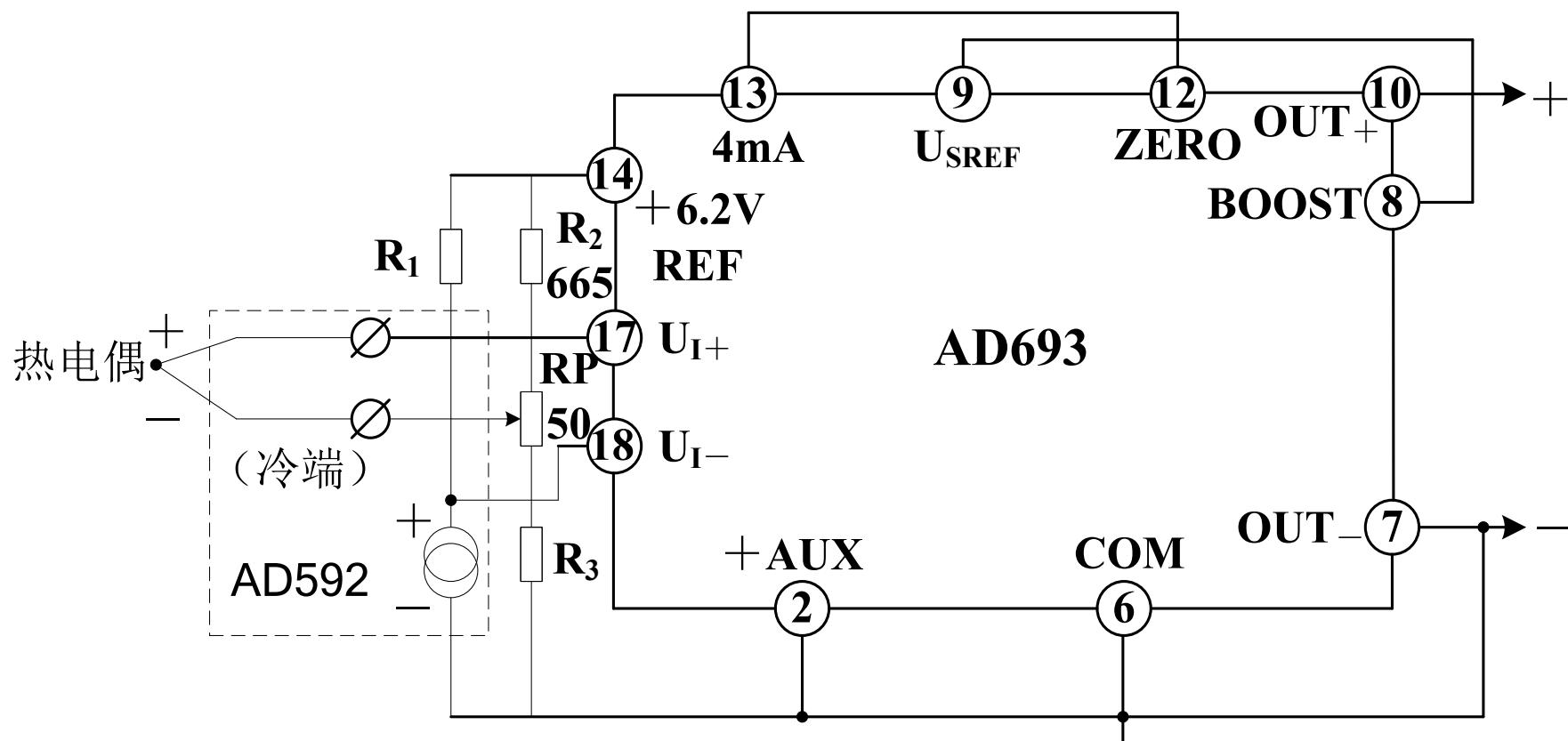
此外，改变 A_1 的参考电压还可选择其他的测温范围。举例说明，在第3脚与第6脚之间接一只1.5KΩ的电阻，就能将参考电压降低一半，使测温范围扩大一倍。反之，在第14脚与第13脚之间接上电阻，即可提高参考电压，缩小测温范围。





2) 带冷端温度补偿的热电偶测温电路

由AD693和AD592构成的带冷端温度补偿的热电偶测温电路，如下图所示。





该电路有以下特点：

- a) 适配各种类型的热电偶；
- b) 利用一片AD592型电流输出式集成温度传感器进行冷端温度补偿，AD592的电流温度系数为 $1 \mu A/K$ ；
- c) 能将热力学温度 (K) 转换成摄氏度 (°C)，再变换成标准电流信号以便于远距离传输；
- d) 能够灵活地设定测温范围。RP为调零电位器。

R_1 、 R_3 的电阻值应视热电偶类型及环境温度而定，详见下页的表。

根据标准热电偶的毫伏—温度对照表以及AD693的输入电压量程 (30 mV或60mV)，可选择更合适的测温范围。例如，当最高温度为+300°C时，可选择K型热电偶。它在+300°C时的热电势为12. 207mV。将输入电压量程设定为60mV时， A_1 的增益应为 $60mV/12. 207mV=4. 915$ 倍。将电阻 R_{G2} 与500Ω电位器串联后，接在P1端与+6. 2V REF端之间，以便于对增益进行调节。





热电偶 类型	极性	材料	环境温 度/°C	R ₁ /Ω	R ₃ /kΩ	最高测量温度/°C		
						30mV量程	60mV量程	
J	+	金属 铜镍合金	25	51.7	301	546	1035	
	-		75	53.6	294			
K	+	镍铬合金 镍铝合金	25	40.2	392	721	-	
	-		75	42.2	374			
E	+	镍铬合金 铜镍合金	25	60.4	261k	413	287	
	-		75	64.9	243k			
T	+	铜 铜镍合金	25	40.2	392	用于增益大 于2的情况		
	-		75	45.3	340			

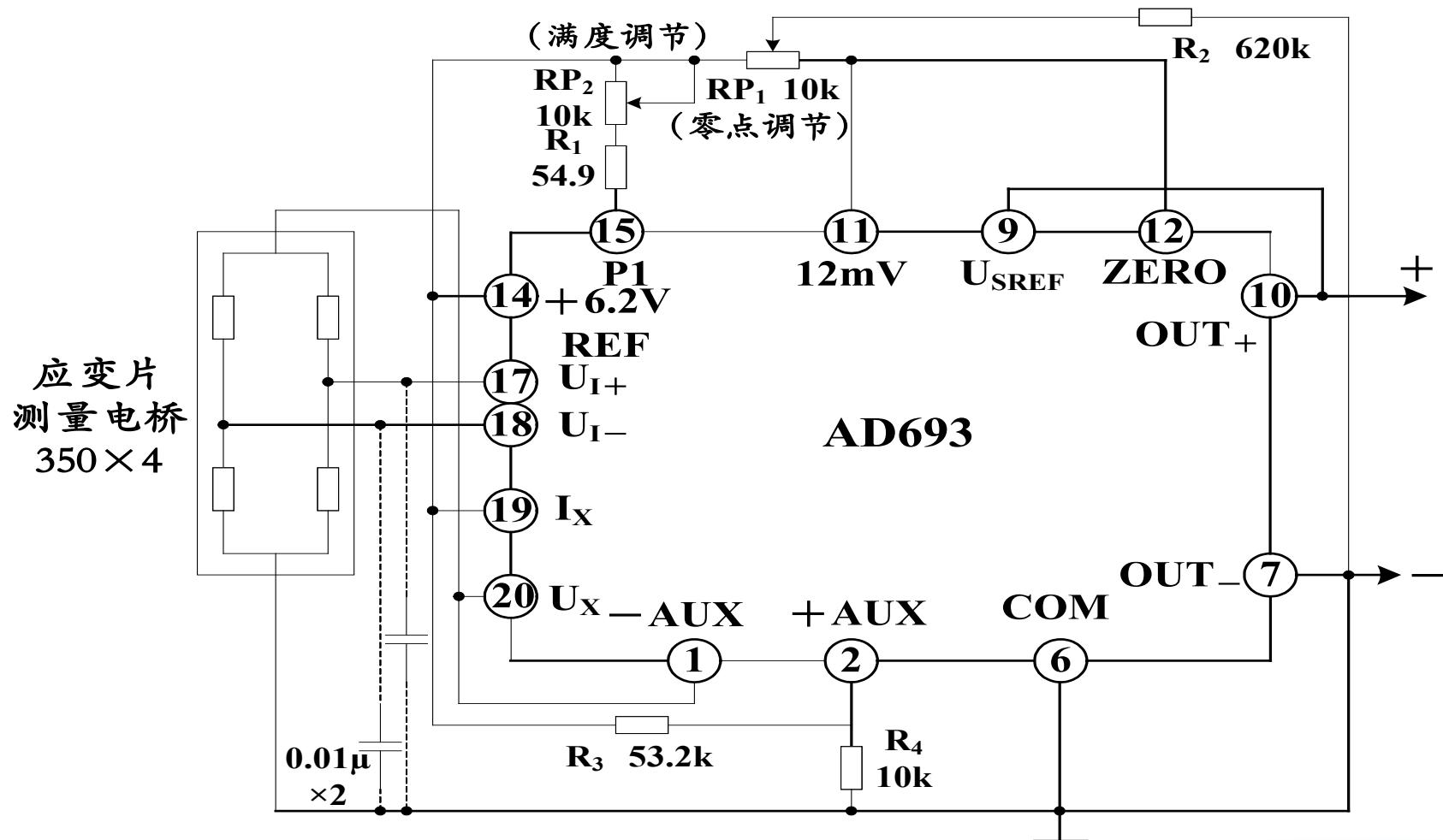
热电偶测温电路的元件及参数选择





3) AD693在应变仪中的应用

AD693可以配电阻应变片构成应变仪，用于测量应力，如下图。





上图中测量电路中包含4个 350Ω 的铂式应变片，其灵敏度为 $2mV/V$ 。 RP_1 和 RP_2 分别为零点调节和满度调节电位器。

应变仪测量电路的工作原理：将应变片固定在被测试件表面上，当试件受到外力时就会产生形变，使得应变片的电阻值改变。在一定范围内电阻值的变化率与电阻丝长度的变化率（即应变值）成正比。通常是由应变片构成测量桥路，当试件受力发生形变时，测量电桥的平衡被破坏而产生输出电压 Δu ，再经过AD693进行U/I转换，最终获得与应变值成正比的 $4mA \sim 20mA$ 电流信号。





§ 8.3.4 APMS—10G型带微处理器的智能混浊度传感器

简 介：

混浊度（turbidity）亦称不透明度，它表示水或其他液体的不透明度。当单色光通过含有悬浮粒子的液体时，由于悬浮粒子引起光的散射，使单色光的强度被减弱，其衰减量就代表液体的混浊度。混浊度是个比值，其单位用NTU来表示。测量混浊度对于环境保护和日常生活具有重要意义。

测量混浊度的方法是采用浊度仪（turbimeter），又称浊度计。传统浊度仪的测试性能较差，无法满足现代测量的需要。而美国霍尼韦尔（Honeywell）公司推出了APMS—10G型带微处理器和单线接口的智能化混浊度传感器，能同时测量液体的混浊度、电导和温度，适合构成多参数在线检测系统，可广泛用于水质净化，清洗设备及化工、食品、医疗卫生等部门。





1、APMS—10G的性能特点

- 1) 内部主要包含混浊度传感器、电导传感器、温度传感器、A/D转换器、微处理器（ μ P）和单线I/O接口，能直接测量液体的混浊度、电导及温度并转换成数字输出。
- 2) 它属于基于软件的虚拟传感器，需要使用Honeywell公司提供的专用软件来完成检测任务（不包括控制）。
- 3) 可通过9脚RS—232接口与计算机相连，计算机为主机，传感器则工作在从机模式。通信速率为2400b/s。
- 4) 混浊度的测量结果就表示散射光强与发射光强之比，输出比率范围是0~4000NTU（所对应的输出数据为0.03~10），响应时间为1.3s。测量电导的范围是0.0001mS~15mS（所对应的输出数据为4~255），mS表示毫西门子。所对应的电阻值为 $10M\Omega \sim 1k\Omega$ 。测量电导的响应时间为0.85s。测量混浊度及电导的误差均为±3个字。测量温度的范围是+68°F~+140





°F（即+20°C ~ +60°C），重复性误差小于±4°F，响应时间为0.03s，达到稳定的时间为4min。

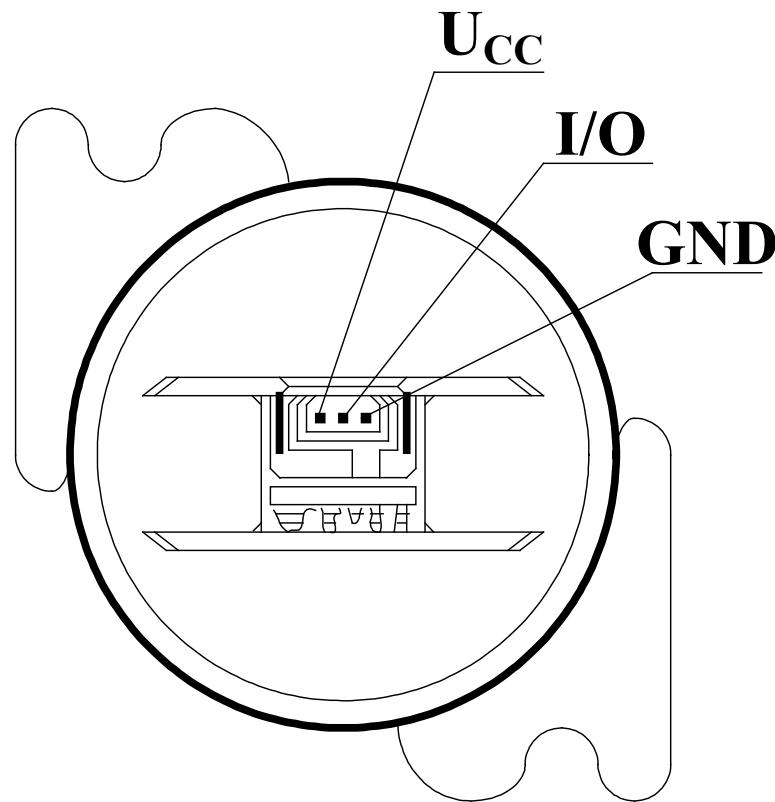
- 5) 利用传感器内部的增益自动控制电路，能消除因红外光源亮度发生变化或传感器外壳被氧化所造成的测量误差。
- 6) 采用+8V~+30V直流电源供电，电源电流为16mA（典型值）。
- 7) 该产品有三种规格：APMS-10GRCF
APMS-10GRCF-50
APMS-10GRCF-18。





2、APMS—10G的测量原理

APMS—10GRCF的引脚排列如下图所示。

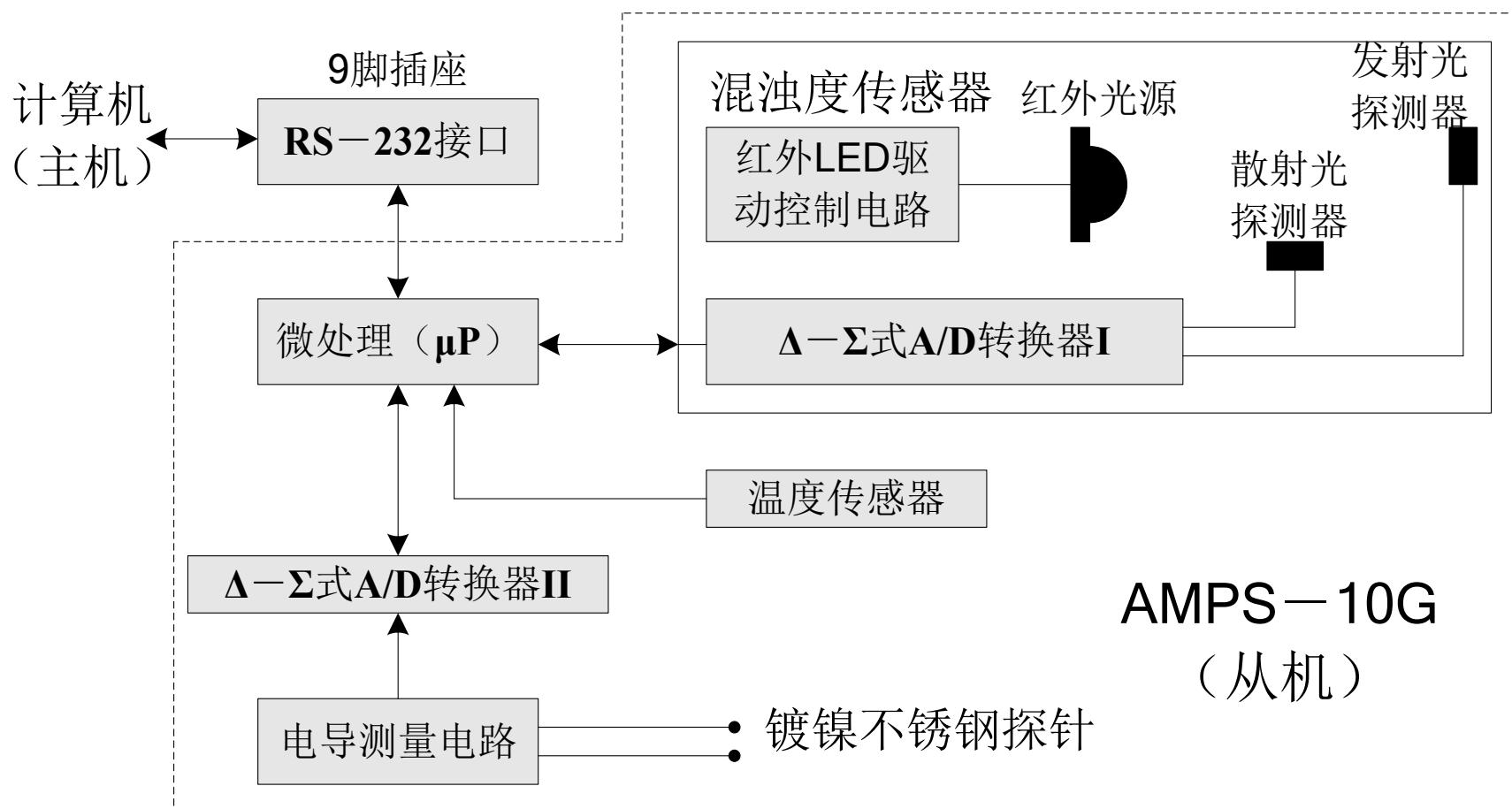


其中UCC和GND分别为电源端和地，I/O为单线输入/输出接口。





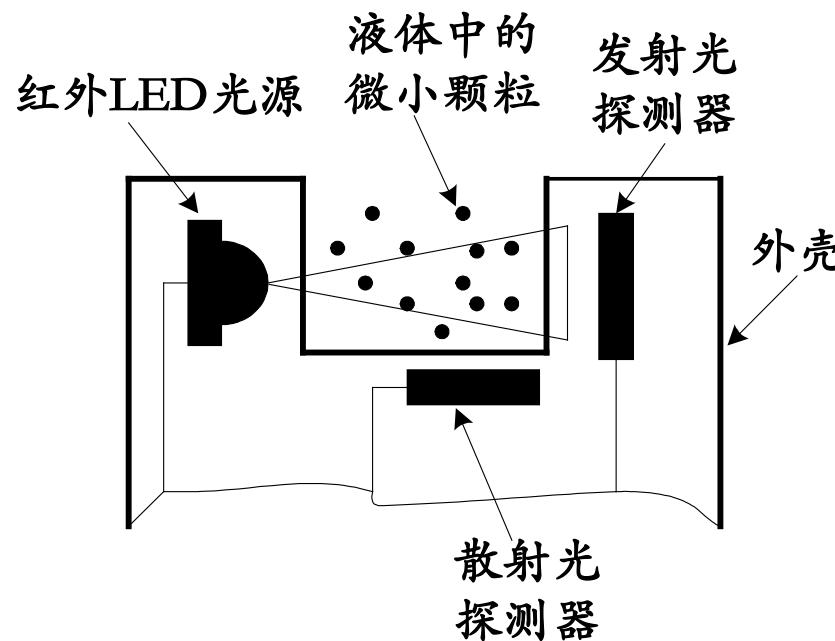
APMS-10GRCF的内部框图如下图所示。





1) 测量混浊度的原理

测量混浊度的原理如下图所示。



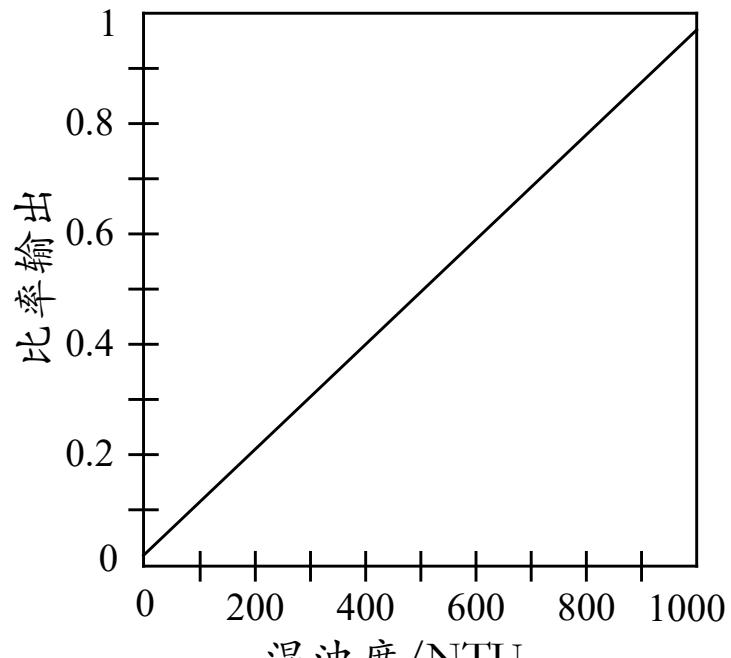
将传感器的正面浸入被测液体，使液体进入凹槽中。采用波长为925nm的红外发光二极管（LED）做光源，由红外LED驱动控制电路使之发射红外光。红外光穿过液体射到发射光探测器上。



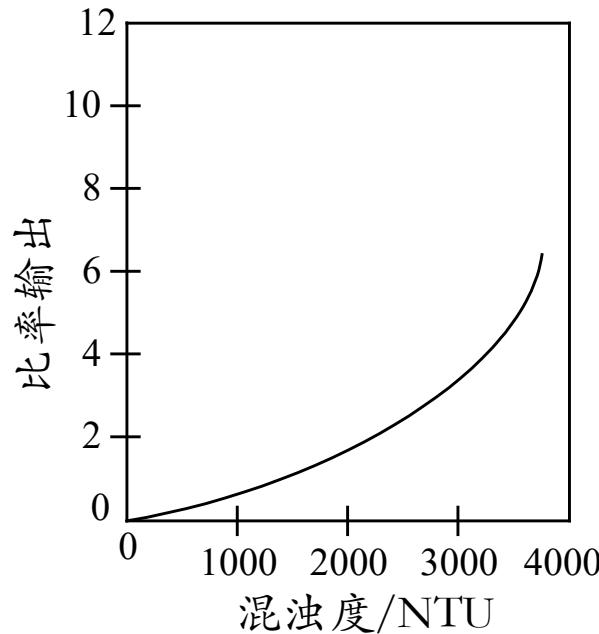


由于散射光探测器与发射光探测器互相垂直，因此它只能接收被测液体中微小颗粒所散射来的光线。再把两路光电信号分别发送至 $\Delta - \Sigma$ 式A/D转换器I，转换成数字量，最后通过 μ P计算出散射光与发射光强的比值，即为被测混浊度。

在含有formazin的标准体试样中，实测APMS-10G的比率输出特性曲线。



(a) 混浊度范围是0~1000NTU



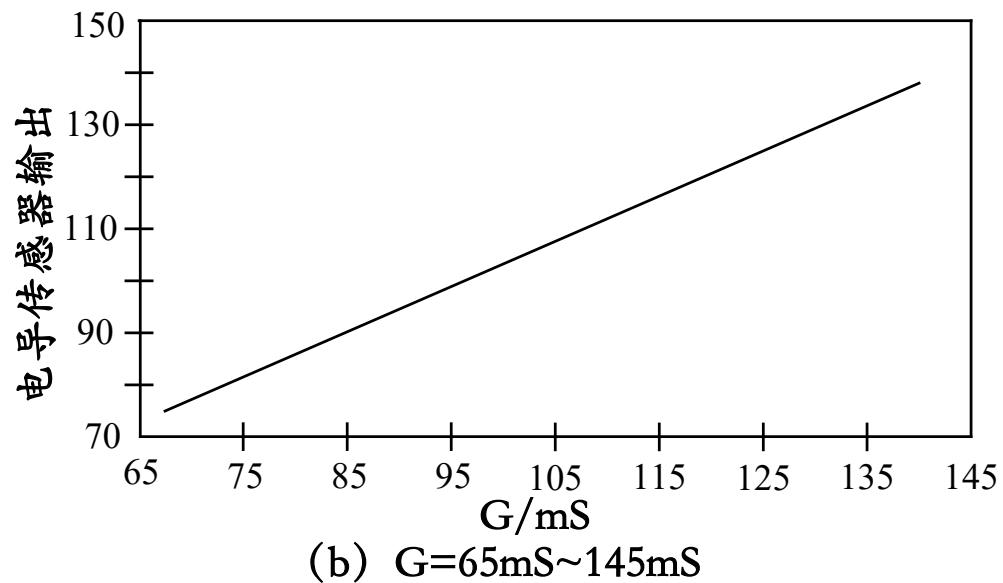
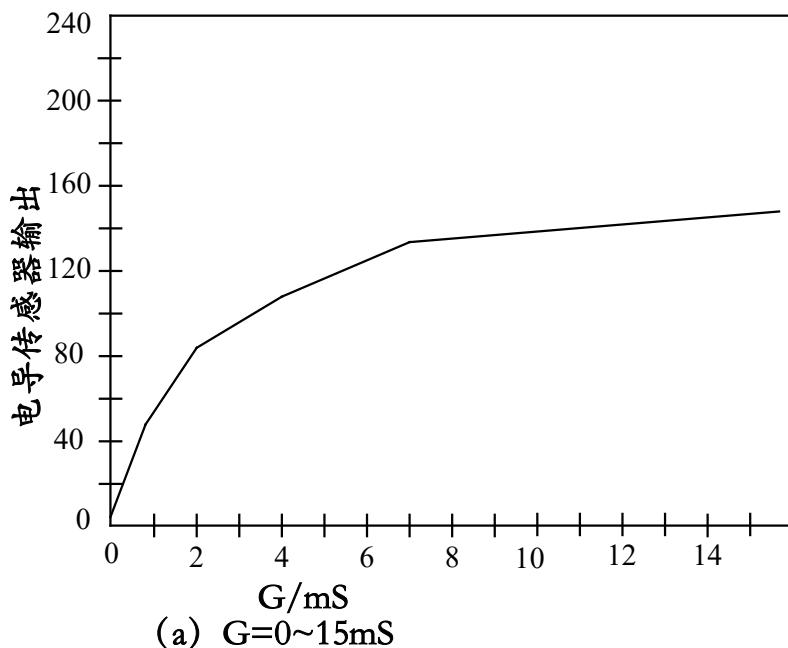
(b) 混浊度范围是0~4000NTU





2) 测量电导

测量混浊度只能反映出液体中悬浮微粒的多少，导电性则取决于溶解于液体中离子数量的多少。APMS-10G首先由两个镀镍不锈钢探针发出低压交流电压信号，然后通过检测液体的电流信号来计算出电导值，计算公式为 $G=I/U$ 。其特性曲线如下：





3) 测量温度

APMS-10G采用一只热敏电阻来测量温度，温度脉冲信号被送到 μ P中，测温范围是 $+68^{\circ}\text{F} \sim +140^{\circ}\text{F}$ （即 $+20^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ ）。

4) 微处理器

微处理器能将4路信号（发射信号、散射信号、电导信号和温度信号）转换成数字信号输出，并通过RS-232串行接口将数据传输给外部主控制器。

该传感器没有模拟信号输出，必要时用户可通过外部 $\Delta - \Sigma$ 式A/D转换器来获得传感器输出。





3、APMS—KIT. exe软件的安装使用及通信协议

简 介：

Honeywell公司专门为APMS—10G设计了一套APMS—KIT. exe软件。该软件是传感器与计算机进行通信的载体，其主要任务是完成测量和进行数据处理，而控制系统的软件要由用户自行设计。

1) 软件的安装

该软件可在MS—DOS系统（或Windows系统）中运行。可用的串行口为COM1、COM2、或COM3。计算机上接16550A UART通用异步收发端口（COM1～COM3）。该软件所用串行口的指定地址如下：

串行口名	地址
COM1	3F8
COM2	2F8
COM3	3E8,

然后安装该软件到指定的目录下。





2) 软件的使用方法

- a) 在DOS提示下，在指定的目录下打开可执行文件。
- b) 根据屏幕上的提示，键入传感器所要连接的串行口名（必须选1、2、3）。该软件将检验传感器及通信是否正常。
- c) 检验的参数包括混浊度、电导和温度。
- d) 在提示符下面键入数据文件名，若未给出文件名，这些文件将不被存储。
- e) 标题能显示出暂停键和停止键，同时也能显示数据列的名称，每个数据专栏都有自己独有的颜色。
- f) 按下暂停键，可暂停接收数据。
- g) 按“取消”键时，停止接收数据。





3) 常见故障的排除方法

故障1：选择一个串行口后出现错误信息：“No UART at xxxx address for comm number x.”，表示没有与地址相匹配的端口。

排除方法：检查所选择的端口是否激活为通用异步收发方式。还应该检查软件的安装是否有特殊要求。

故障2：选择一个串行口后出现错误信息：“Turbidity Data not available. Check power on sensor.”，表示混浊度的数据不可用，应检查传感器电源及接线。

排除方法：检查所有的连接，包括接口电路的供电电源、接口电路与所选串口的连接电缆。检查接口电路选择装置确保它被激活。

故障3：在接收信息的时候，收到错误信息：“Sensor not communicating. Check power on sensor.”，表示传感器不通，应检查传感器电源。





排除方法：检查所有的连接。准备好后按返回键。按ESC键时停止接收数据。

4) 通信协议

a) 字符格式

字符格式为首先是起始位，然后是8个数据位，最后是停止位。

b) 传感器的字符接收

该传感器作为主控制器的一个从机，上电后它将重新设置并检测串行接口。如果接口保持空闲状态的时间相当于传输两个字符的时间，则该传感器将检测有效的信息。在等待周期结束之前，如果接口有任何变化，传感器将重新启动并且重新开始程序。传感器上电后，串口需要有一定的空闲时间。如果串口线的空闲时间为8.32ms，那么这个传感器开始监测口线从高电平到低电平的跳变，就表示控制器启动的一个起始位。





传感器只要接收到起始位的下降沿，就激活计数器，产生 $208 \mu s$ 延迟时间。

传感器重新对串口进行采样，以确保其仍保持在低电平状态，确定一个有效的起始位。如果不处于低电平状态，那么传感器会重新启动并且在响应另一起始位之前，大约等待两个字符的空闲时间。若这个起始位是有效的，传感器内部的计数器就等待 $416 \mu s$ ，然后重新对串口采样。

c) 字符传输

传感器通过口线传输字符。总线的波特率为2400bps，因此字符传输时间为 $10\text{bit}/2400 \text{ Bits Per Second} = 4.16\text{ms}$ ，传输每个字节需要4.16 ms。





d) 标准信息格式

信息格式有两种：一种是传感器输入信息，另一种是传感器输出信息。详见下表。

传感器输入的信息格式

	字符1	字符2	字符3
测量请求	信息目标	传感器代码	校验和
混浊度	50	05	AD
电导	50	00	B0
温度	50	01	AF

传感器输出的信息格式

	字符1	字符2	字符3	字符4	字符5	字符6	字符7
测量请求	信息目标	传感器代码					
混浊度	C0	03	trans_lo	trans_hi	scatt_lo	scatt_hi	checksum
电导	C0	00	conduct	checksum	—	—	—
温度	C0	01	temp	checksum			





5) 校验和的计算实例

在总线上计算校验和，就是首先对所有校验字符前面的字符求和，然后求反，再加1。通过将所有的字节加和并检验最后8位是否为00，可判断是否为有效信息。





4、 使用注意事项

使用APMS—10G型混浊度传感器时，需注意以下几项：

- 1) 该传感器未加反向电压保护措施，若将电源电压接反了就有可能损坏传感器。
- 2) 传感器的背面没有被密封，应避免让水或者其他杂质进入传感器和连接器内部。
- 3) 在使用过程中传感器的光面应保持潮湿。
- 4) 传感器内含有光学敏感元件，应避免与未加静电放电（ESD）保护的终端相接触。
- 5) 需要注意的是，液体中的气泡也会产生光学散射效应，其作用效果与悬浮粒子相同。所以，应确保传感器与外部环境的隔离，不被泡沫影响，以免得到错误的混浊度读数。





- 6) 由于大量的污物和外部物体能阻塞光线路径，影响混浊度的测量，因此传感器不要放在有沉淀物的地方。
- 7) 混浊度传感器采用的是红外线光源，须考虑传感器避光的问题。
- 8) 固体含量过高也会污染传感器。所以偶尔使清洁过的水从传感器流过几分钟，有助于保持传感器的清洁。





目 录

- 第1章 概 述
- 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述





第9章 无线传感器网络技术概述

要 点：

- ◆ 无线传感器网络概述；
- ◆ 无线传感器网络的关键技术；
- ◆ 无线传感器网络的应用。





无线传感器网络（**WSN**）就是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成、通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统。

它的目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖地区中感知对象的信息，并发给观察者。

三个要素：传感器、感知对象、观察者。

WSN将逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起，改变了人类与自然界的交互方式。

美国商业周刊和MIT技术评论分别将无线传感器网络列为21世纪最有影响的21项技术和改变世界的10大技术之一。

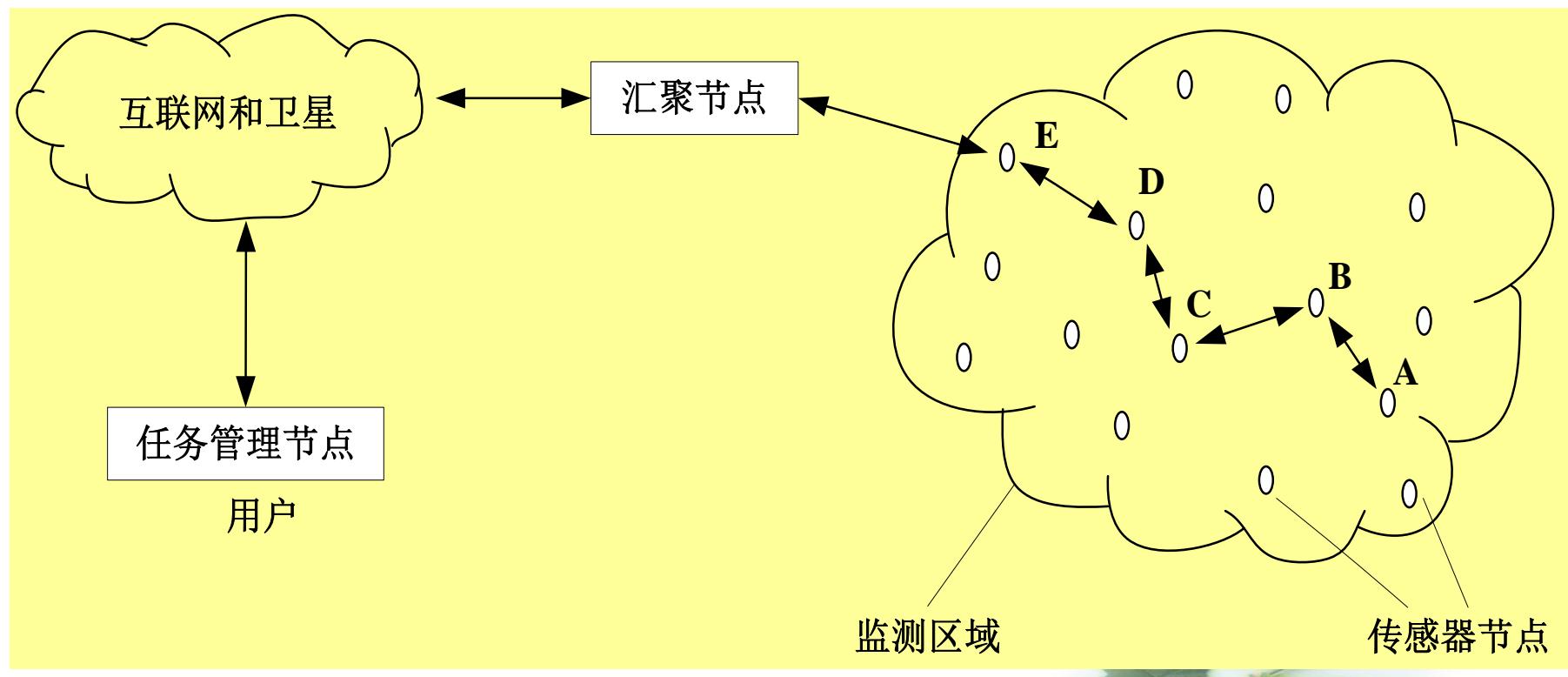




§ 9.1 无线传感器网络概述

§ 9.1.1 传感器网络结构

- 无线传感器网络系统通常包括**传感器节点**、**汇聚节点**和**管理节点**。
- 大量传感器节点随机部署在监测区域内部或附近，通过自组织方式构成网络。





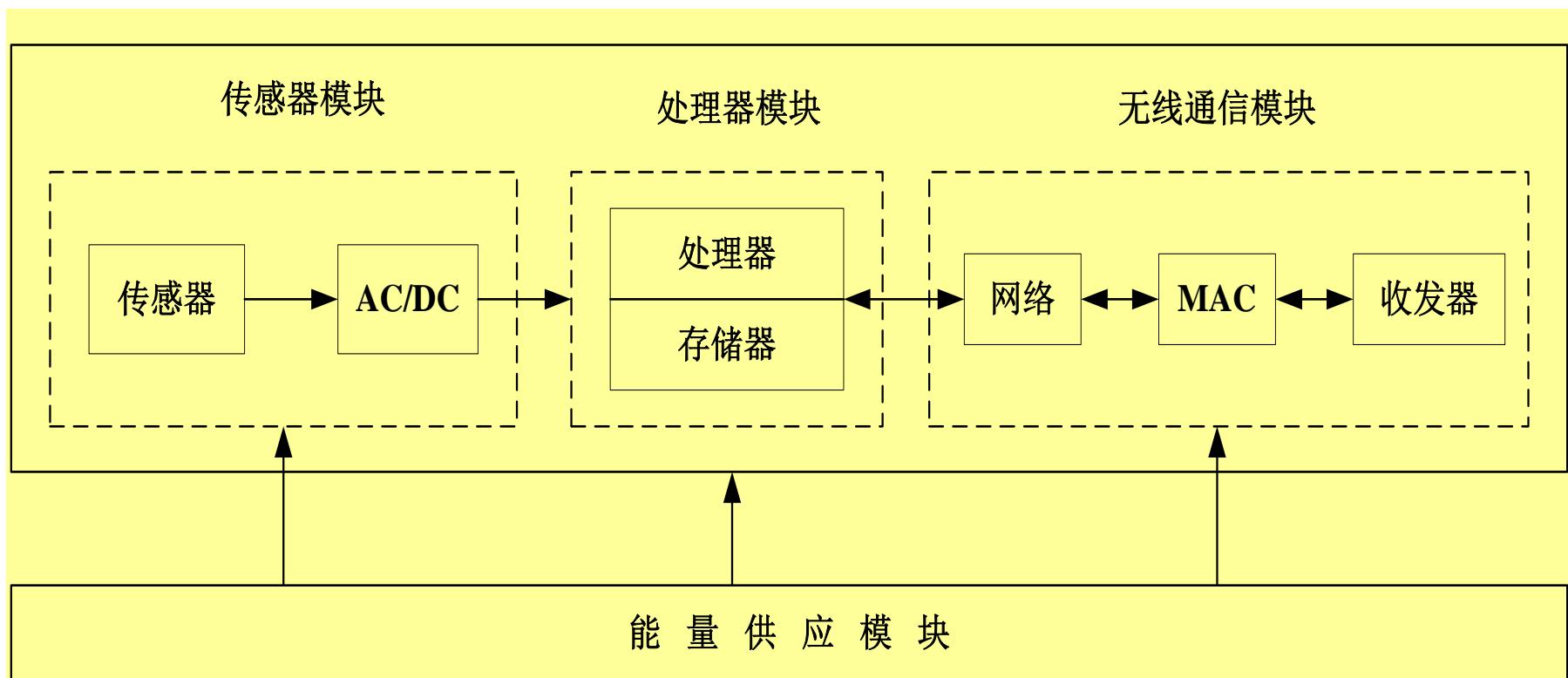
- ◆ **传感器节点**通常是一个微型的嵌入式系统，它的处理能力、存储能力和通信能力相对较弱。每个传感器节点兼顾传统网络节点的终端和路由器双重功能。
- ◆ **汇聚节点**的处理能力、存储能力和通信能力相对较强，它连接传感器网络和外部网络，实现两种协议栈之间的通信协议转换，同时发布管理节点的监测任务，并把收集到的数据转发到外部网络上。
- ◆ 用户通过**管理节点**对传感器网络进行配置和管理，发布监测任务以及收集监测数据。





§ 9.1.2 传感器节点结构

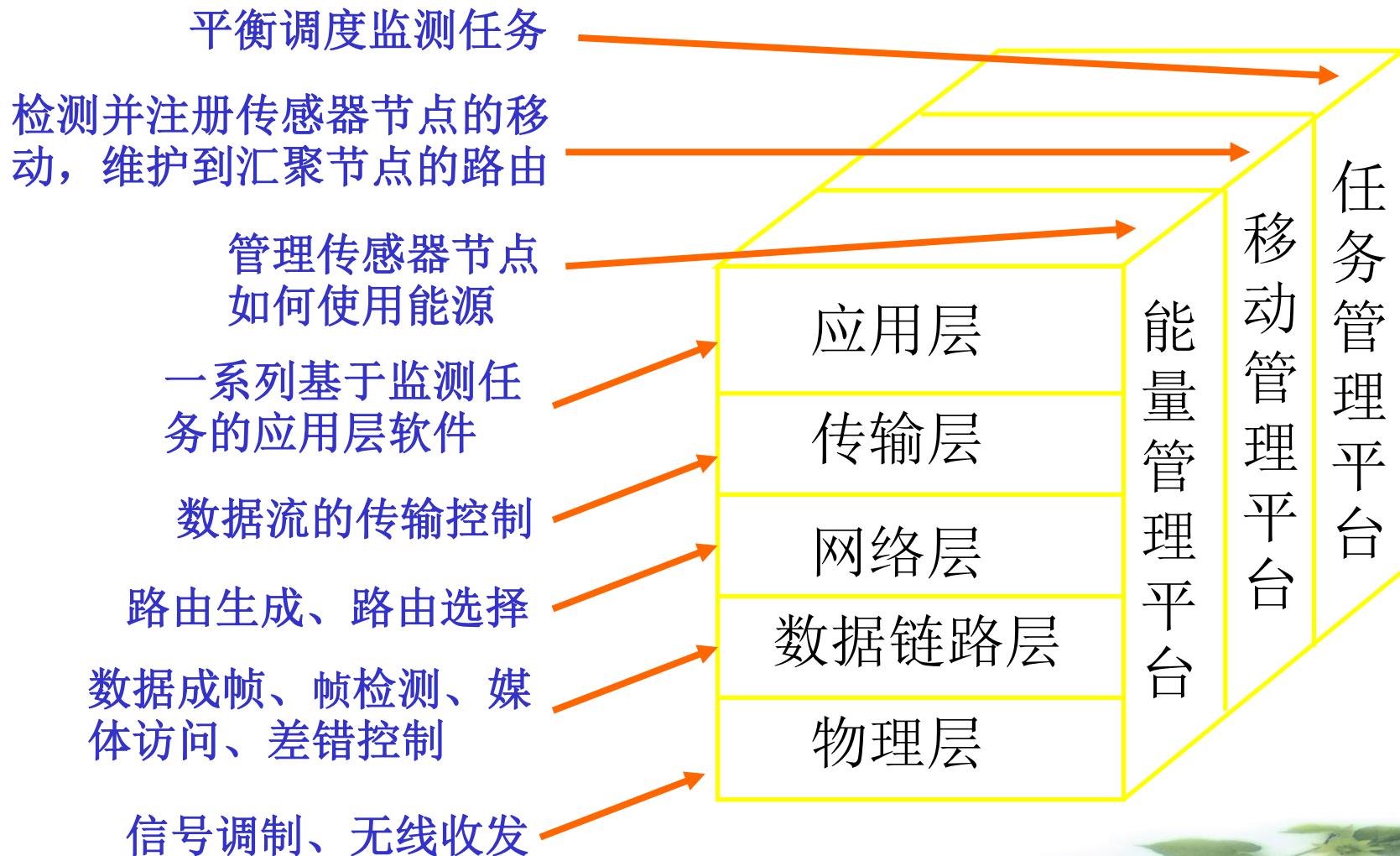
传感器节点由**传感器模块**、**处理器模块**、**无线通信模块**和**能量供应模块**四部分构成。





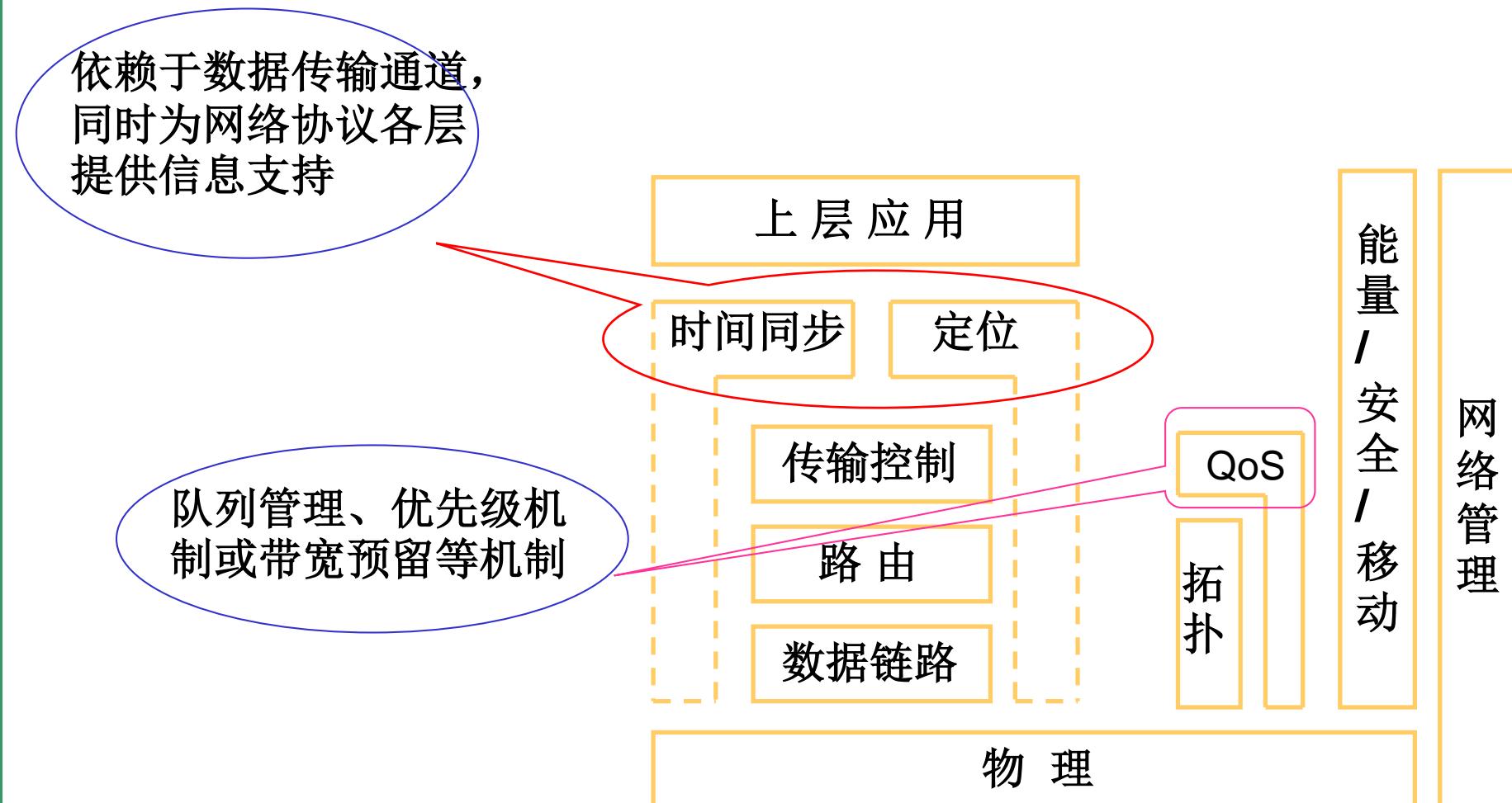
§ 9.1.3 传感器网络协议栈

—— 早期的协议栈





—— 改进的协议栈





§ 9.1.4 传感器网络的特征

—— 与现有无线网络的区别

- 无线自组网 (mobile ad-hoc network) 是一个由几十到上百个节点组成的、采用无线通信方式的、动态组网的多跳的移动性对等网络。

传感器网络：

- 是集成了监测、控制及无线通信的网络系统，节点数目更庞大，分布更密集。
- 节点更容易出现故障。
- 环境干扰和节点故障容易造成网络拓扑结构的变化。
- 通常情况大多数传感器节点固定不动的。





- 节点具有的能量、处理能力、存储能力和通信能力十分有限。

传统无线网络

- 首要设计目标是提供高服务质量高效带宽利用，其次才考虑节约能源。
- 传感器网络的首要设计目标是能源的高效利用，这是两种网络最重要的区别之一。





传感器节点的限制

- 电源能量有限

 传感器节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块。

- 通信能力有限

 无线通信的能量消耗和通信距离的关系为：

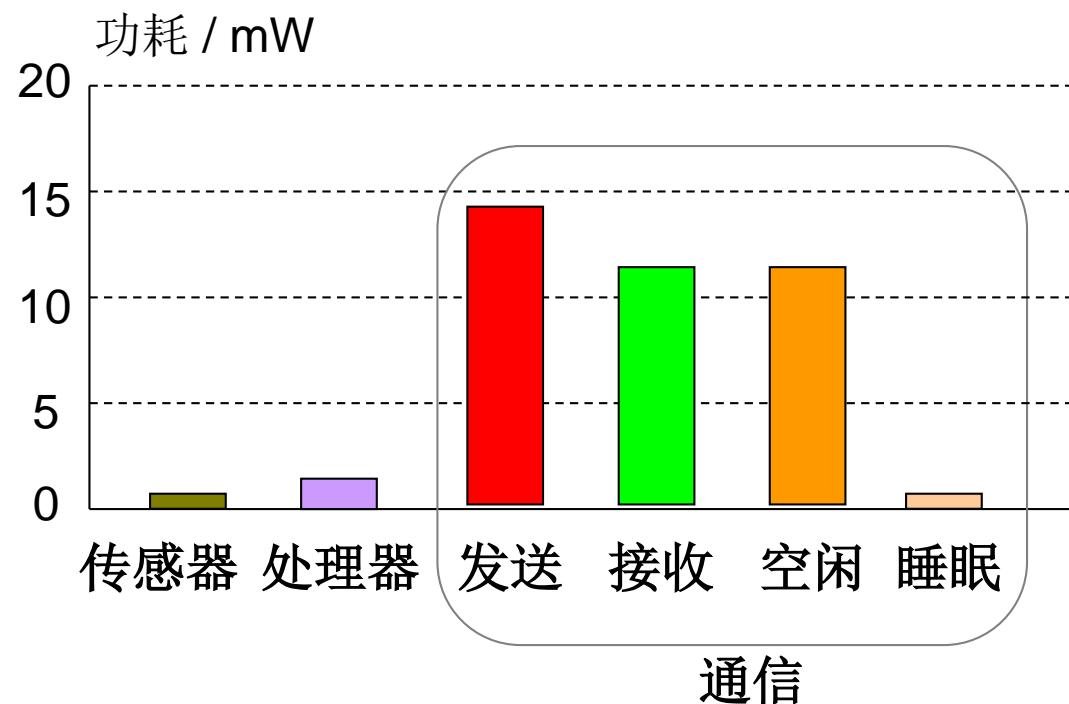
$$E = kd^n$$

其中 $2 < n < 4$ ，通常取3。

 节点的无线通信带宽有限，通常仅有几百 kbps 的速率。

- 计算和存储能力有限

 如何利用有限的计算和存储资源完成诸多协同任务成为传感器网络设计的挑战。





§ 9.1.5 传感器网络的特点

1、 大规模网络

- 1) 分布在很大的区域内
- 2) 节点部署很密集

2、 自组织性网络

传感器节点具有自组织的能力，能够自动进行配置和管理，通过拓扑控制机制和网络协议自动形成转发监测数据的多条无线网络系统。

3、 动态性网络

适应如下变化：

- 1) 传感器节点出现故障或失效。
- 2) 无线通信链路带宽变化，甚至时断时通。
- 3) 传感器、感知对象、观察者这三要素可能具有移动性。
- 4) 新节点的加入。





4、可靠的网络

传感器网络的软硬件具有鲁棒性和容错性。

5、与应用相关的网络

根据不同的应用背景来研究传感器网络技术。

6、以数据为中心的网络

传感器网络是任务型的网络。用户直接将所关心的事件通告给网络，网络在获得指定事件的信息后回报给用户。

以数据本身作为查询或传输线索。





§ 9.1.6 传感器网络的研究进展

1、军事领域

美国陆军2001年提出“灵巧传感器网络通信”计划；

美国陆军近期确立了“无人值守地面传感器群”项目；

美国海军最近确立了“传感器组网系统”研究项目；

美国海军最近开展了协同交战能力（CEC）的技术；

2002年5月美国Sandia国家实验室与美国能源部合作的系统。

2、民用领域

美国交通部1995年提出了“国家智能交通系统项目规划”；

Intel公司2002年10月发布了“基于微型传感器网络的新型计算发展规划”；

3、学术界

美国自然科学基金委员会2003年制定了无线传感器网络研究计划；

我国许多院校和科研机构加入到该领域的研究中来。





§ 9.2 无线传感器网络的关键技术

§ 9.2.1 拓扑控制

1、网络拓扑控制的意义

- 1) 影响整个网络的生存时间——保证网络连通性和覆盖性的情况下，合理高效的使用网络能量。
 - 2) 减少节点间通信干扰，提高通信效率——功率控制技术。
 - 3) 为路由协议提供基础——确定哪些点为转发节点，确定节点间的邻居关系。
 - 4) 影响数据融合——选择骨干节点。
 - 5) 弥补节点失效的影响——具有鲁棒性。
- 2、目前主要的研究问题是在满足网络覆盖度和连通度的前提下，通过功率控制和骨干网节点选择，剔除节点之间不必要的无线通信链路，生成一个高效的数据转发的网络拓扑结构。
- 3、拓扑控制分为节点功率控制和层次型拓扑结构组织。





§ 9.2.2 网络协议

- 1、负责使各个独立的节点形成一个多跳的数据传输网络。
- 2、目前研究的重点是网络层协议和数据链路层协议。
- 3、数据链路层的介质访问控制（MAC）用来构建底层的基础机构，控制传感器节点的通信过程和工作模式。
- 4、MAC协议首先要考虑节省能源和可扩展性，其次才考虑公平性、利用率和实时性等。
- 5、MAC层的能量消耗主要表现在空闲侦听、接收不必要数据和碰撞重传等。
- 6、无线传感器网络MAC协议通常采用“侦听/睡眠”交替的无线信道使用策略。
- 7、传感器网络的MAC协议可分为三类：1) 采用无线信道的时分复用方式(TDMA)；2) 采用无线信道的随机竞争方式；3) 其他MAC协议（如频分复用或码分复用等方式）。





§ 9.2.3 路由协议

- 1、路由协议负责将数据分组从源节点通过网络转发到目的节点。
- 2、路由协议功能：寻找源节点和目的节点间的优化路径，将数据分组沿着优化路径正确转发。
- 3、传统无线网络路由协议的主要任务是寻找源节点到目的节点间通信延迟小的路径，同时提高整个网络的利用率，避免产生通信拥塞并平衡网络流量，而能量消耗不是考虑的重点。
- 4、无线传感器网络节点能量有限且一般没有能量补充，因此路由协议需要高效利用能量。
- 5、无线传感器网络节点数目很大，节点只能获取局部拓扑结构信息，路由协议要能在局部网路信息基础上选择合适的路径。
- 6、无线传感器网络具有很强的相关性，不同应用中的路由协议可能差别很大，没有一个通用的路由协议。





7、无线传感器网络路由机制还经常与数据融合技术联系在一起。

8、无线传感器网络路由协议的特点：

- 1) 能量优先
- 2) 基于局部拓扑信息
- 3) 以数据为中心
- 4) 与应用相关

9、设计路由机制时要满足的要求：

- 1) 能量高效 —— 能量消耗小且整个网络能量均衡消耗
- 2) 可扩展性 —— 考虑区域范围、节点密度、节点失败、新节点加入、节点移动等情况。
- 3) 鲁棒性 —— 具有一定的容错能力
- 4) 快速收敛性 —— 适应网络拓扑的动态变化，减少通信协议开销，提高消息传输的效率。





§ 9.2.4 网络安全

1、传感器网络要解决的安全问题：

- 1) 机密性问题；
- 2) 点到点的消息认证问题；
- 3) 完整性鉴别问题；
- 4) 新鲜性问题；
- 5) 认证组播/广播问题；
- 6) 安全管理问题。

2、物理层考虑机密性主要侧重在安全编码方面

3、链路层和网络层的机密性考虑的是数据帧和路由信息的加解密技术

4、应用层考虑的是密钥的管理和交换过程，为下层的加解密技术提供
安全支撑。





5、传感器网络的安全隐患在于网络部署区域的开放特性以及无线电网络的广播特性。

表一 传感器网络攻防手段一览表

网络层次	攻击方法	防御手段
物理层	拥塞攻击 (jamming)	宽频（跳频）、优先级消息、低占空比、区域映射、模式转换
	物理破坏	破坏证明、节点伪装和隐藏
链路层	碰撞攻击 (collision)	纠错码
	耗尽攻击 (exhaustion)	设置竞争门限
	非公平竞争 (unfairness)	设置短帧策略和非优先级策略
网络层	丢弃和贪婪破坏 (neglect and greed)	使用冗余路径、探测机制
	汇聚节点攻击 (homing)	使用加密和逐跳认证机制
	方向误导攻击 (misdirection)	出口过滤；认证、监视机制
	黑洞攻击 (blackholes)	认证、监视、冗余机制
传输层	洪泛攻击 (flooding)	客户端谜题
	失步攻击 (disynchronization)	认证



§ 9.2.5 时间同步

- 1、时间同步是需要协同工作的传感器网络系统的一个关键机制。
- 2、由于传感器网络的特点，以及能量、价格和体积等多方面的约束，使得现有的时间同步机制不适用于传感器网络。
- 3、设计传感器网络的时间同步机制考虑的几个方面：
 - 1) 扩展性 —— 要能够适应网络范围或节点密度的变化；
 - 2) 稳定性 —— 能在拓扑结构的动态变化中保持时间同步的连续性和精度的稳定；
 - 3) 鲁棒性 —— 良好的适应环境的动态变化；
 - 4) 收敛性 —— 要求建立时间同步的时间要短；
 - 5) 能量感知 —— 网络通信和计算负载应该可预知。
- 4、三种基本同步机制：RBS、TINY/MINI-SYNC和TPSN。





§ 9.2.6 定位技术

- 1、确定事件发生的位置或采集数据的节点位置是传感器网络最基本的功能之一。
- 2、定位信息的用途：
 - 1) 报告事件发生的地点；
 - 2) 目标跟踪；
 - 3) 协助路由；
 - 4) 协助网络管理。
- 3、传感器网络的定位算法需具备的特点：
 - 1) 自组织性；
 - 2) 健壮性：具有良好的容错性；
 - 3) 能量高效：减少计算的复杂性，减少节点的通信开销；
 - 4) 分布式计算：每个节点计算自身位置。
- 4、算法分为基于距离的定位算法和距离无关的距离算法。





§ 9.2.7 数据融合

- 1、由于传感器网络节点的易失效性，使得网络需要数据融合技术对多份数据进行综合。
- 2、数据融合的作用
 - 1) 节省能量——去掉冗余信息，将要传输的数据量最小化；
 - 2) 获得更准确的信息——提高信息的精度和可信度；
 - 3) 提高数据收集效率——减少了要传输的数据量，减轻网络传输拥塞，降低传输延迟，减少了冲突碰撞，提高了无线信道的利用率。
- 3、数据融合可以与传感器网络的多个协议层次（如应用层、网络层等）结合。
- 4、数据融合的代价：增加了网络的平均延迟；鲁棒性变差。





§ 9.2.8 数据管理

- 1、目的：将传感器网络上数据的逻辑视图（命名、存取和操作）和网络的物理实现分离开来，使得传感器网络的用户和应用程序只需关心所要提出的查询的逻辑结构，而无需关心传感器网络的细节。
- 2、两类数据：
 - 1) 静态数据：如描述传感器特性的信息；
 - 2) 动态数据：由传感器自身感知的数据。
- 3、传感器网络数据管理系统一般不把每个传感器的感知数据都集中到中央处理节点进行分析处理，而是尽可能在网络内部进行分析处理，即网内处理（in-network processing）这会极大地减少能源消耗，延长整个传感器网络的生存期。





- 4、 传感器网络的数据管理与传统的分布式数据库有很大的差别，原因是：
 - 1) 传感器节点能量受限且容易失效，数据管理系统必须在减少能量消耗的同时提供有效的数据服务。
 - 2) 网络节点数量庞大，且节点产生的是无限的数据流，无法通过传统的数据管理技术进行分析处理。
 - 3) 传感器网络数据的查询经常是连续的查询或随机抽样的查询，传统的技术不适用于传感器网络。
- 5、 数据管理系统的结构主要有4种：集中式结构、半分布式结构、分布式结构和层次性结构。
- 6、 目前大多数研究工作均集中在半分布式结构方面。两种典型的半分布式结构是Fjord系统的结构和Cougar系统的结构。





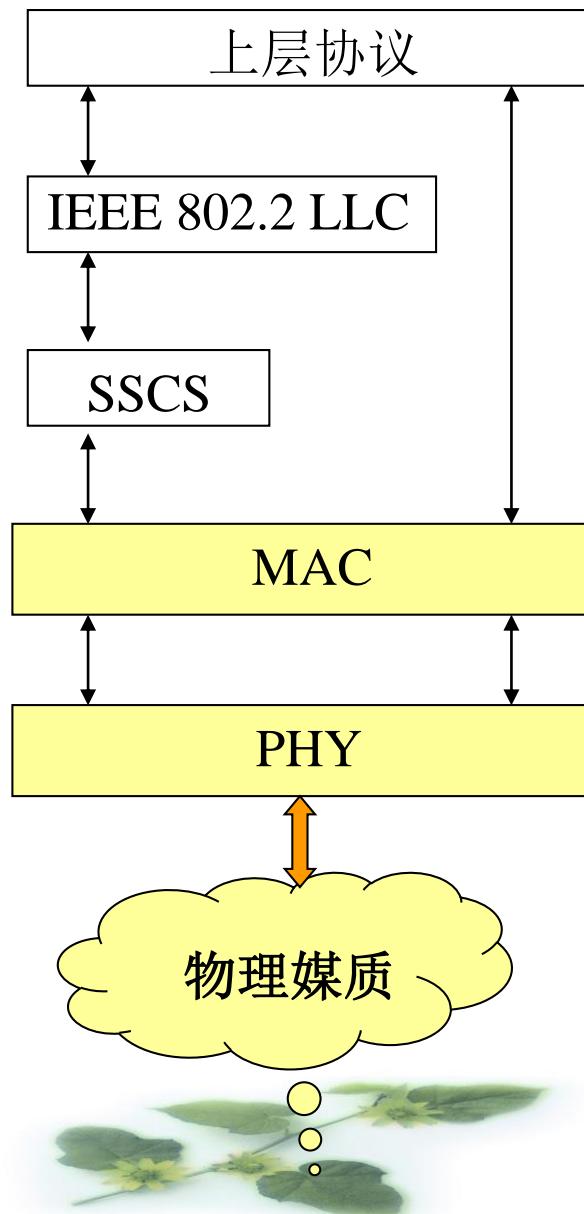
§ 9.2.9 无线通信技术

- 1、 IEEE 802.15.4标准是针对低速无线个人域网络（low-rate wireless personal area network, LR-WPAN）的无线通信标准，设计的主要目标是低功耗、低成本。由于此标准的网络特征与无线传感器网络存在很多相似之处，因此许多研究机构把它作为无线传感器网络的无线通信平台。
- 2、 LR-WPAN网络具有如下特点
 - 1) 在不同的载波频率下实现了20kbps、40kbps和250kbps三种不同的传输速率。
 - 2) 支持星型和点对点两种网络拓扑结构。
 - 3) 有16位和64位两种地址格式，其中64位地址是全球唯一的扩展地址。
 - 4) 支持避免冲突的载波多路侦听技术（carrier sense multiple access with collision avoidance，CSMA-CA）。





- 5) 支持确认(ACK)机制，保证传输可靠性。
- 3、IEEE 802.15.4 网络协议栈(右图)：
- 4、IEEE 802.15.4 标准只定义了PHY层和数据链路层的MAC层。
- 5、MAC层以上的几个层次只是该标准的可能的上层协议，不在该标准的定义范围之内。
- 6、SSCS为IEEE 802.15.4 的MAC层接入IEEE 802.2标准中定义的LLC子层提供聚合服务。
- 7、LLC子层可以使用SSCS的服务接口访问IEEE 802.15.4 网络，为应用层提供链路层服务。





- 8、LR-WPAN网络采用CSMA-CA机制、帧确认机制和帧校验机制来保证数据传送的鲁棒性。
- 9、在LR-WPAN网络中，许多应用的设备用电池供电。这些设备可通过“轮换值班”来减少能量消耗。
- 10、IEEE 802.15.4提供的安全服务是在应用层已经提供密钥的情况下对称密钥服务。密钥的管理和分配都由上层协议负责。
- 11、MAC子层可以为输入输出的MAC帧提供安全服务，主要包括四种服务：访问控制、数据加密、帧完整性检查和顺序更新。
- 12、在LR-WPAN网络中设备可以根据自身需要选择不同的安全模式。





§ 9.2.10 其它技术

除了上面所述的技术，还包括嵌入式操作系统和应用层技术。

- 1、**嵌入式操作系统：**能够有效的满足那些发生频繁、并发程度高、执行过程比较短的逻辑控制流程；能够让应用程序方便的对硬件进行控制，且在不影响整体开销的情况下，应用程序的各个部分能够较方便的进行重新组合。
- 2、**应用层技术：**应用层的研究主要是各种传感器网络应用系统的开发和多任务之间的协调。
- 3、**传感器网络应用开发环境的研究，**旨在为应用系统的开发提供有效的软件开发环境和软件工具，需要解决的问题包括：传感器网络程序设计语言，传感器网络程序设计方法学，传感器网络软件开发环境和工具，传感器网络软件测试工具的研究，面向应用的系统服务，给予感知数据的理解、决策和举措的理论与技术。





§ 9.3 无线传感器网络的应用

- ◆ 军事应用
- ◆ 环境观测和预报系统
- ◆ 医疗护理
- ◆ 智能家居
- ◆ 建筑物状态监控
- ◆ 其他方面的应用

如数据采集分析、空间探索等。





§ 9.3.1 环境监测系统

- 1、 使用传感器网络进行环境监控的显著优势：
 - 1) 传感器节点的体积小且整个网络只需部署一次，因此对监控环境的人为影响很小。
 - 2) 节点数量大，分布密度高，传感器网络具有数据采集量大、精度高的特点。
 - 3) 传感器节点本身具有一定的计算能力、存储能力、无线通信能力，可以进行较为复杂的监控。
- 2、 体系结构：是一个层次性网络结构。最底层是部署在实际监测环境中的传感器节点，向上层依次是传输网络，基站，最终连接到Internet。
- 3、 传感器节点将数据送到一个网关节点，网关节点将传感器节点送来的数据经由一个传输网络发送到基站上。
- 4、 传输网络负责协同各个传感器网络网关节点、综合网关节点信息。

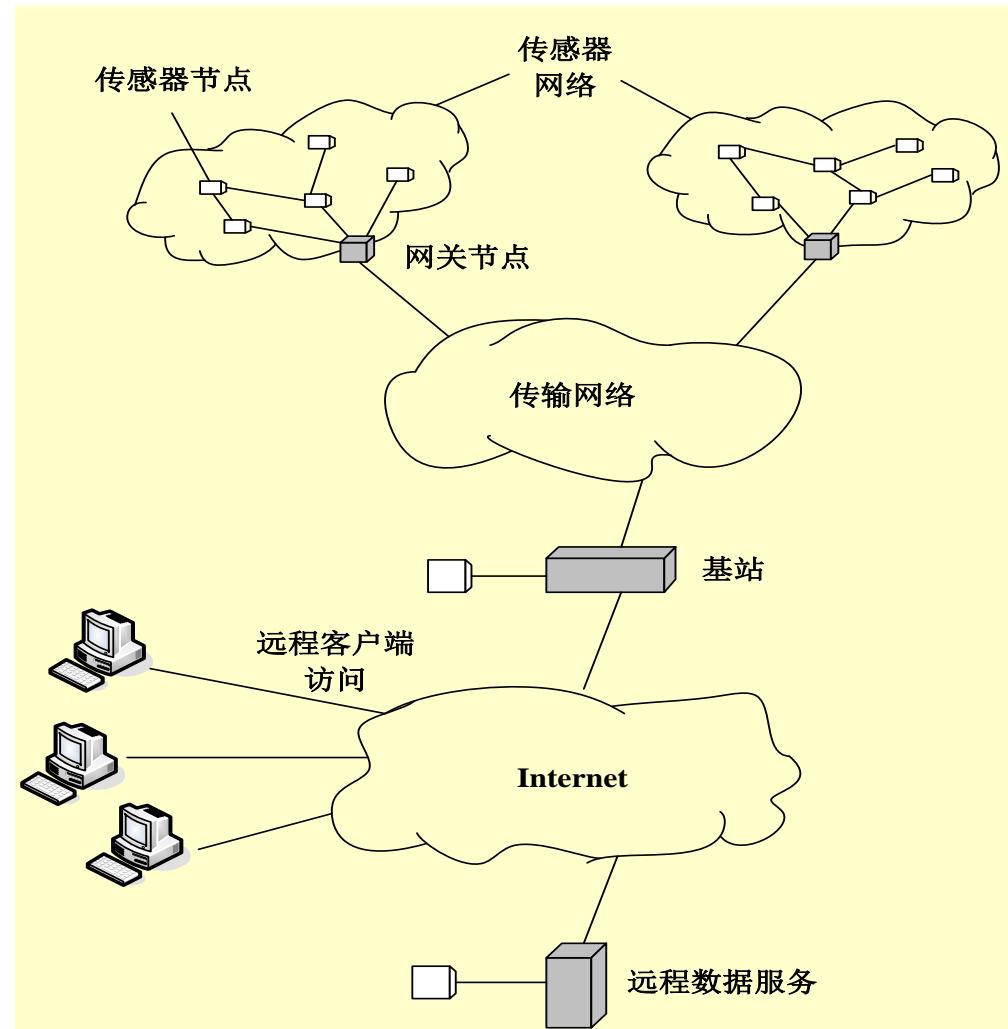




5、基站将传感数据通过Internet发送到数据处理中心。

6、研究人员通过任意一台连入Internet的终端访问数据中心，或者向基站发出命令。

7、研究人员将传感器节点放置到感兴趣的监测区域内，传感器节点能自主形成网络。每个节点搜集周围环境的湿度、温度、光照等信息。





- 8、传感器节点具有一定的数据处理能力和通信能力。
- 9、传感器自主形成一个多跳网络。处于传感器网络边缘的节点必须通过其他节点向网关发送数据。
- 10、每个传感器区域都有一个网关负责搜集传感器节点发送来的数据。所有的网关都连接到上层传输网络上。
- 11、传输网络包括具有较强的计算能力和存储能力、并具有不间断电源供应的多个无线通信节点，提供网关节点和基站之间的通信带宽和通信可靠性。
- 12、基站负责搜集传输网络送来的所有数据，发送到Internet，并将传感数据的日志保存到本地数据库中。
- 13、传感器节点搜集的数据最后都通过Internet传送到一个中心数据库存储。中心数据库提供远程数据服务。





§ 9.3.2 环境监测系统中的关键技术

节点及节点部署

- 用于环境监测的传感器节点需要满足体积小、精度高、生命周期长的要求。
- 目前应用中使用比较多的是加州大学伯克利分校研制的Mote节点。Mote节点带有一个专有的传感器板。板上载有光学传感器、I²C温度传感器、大气压传感器、大气温度传感器、湿度传感器、温差电堆传感器、热敏电阻传感器。
- 选择可替换、精度高的传感器对于环境监测来说至关重要。
- 传感器选择中的另一个重要因素是传感器的启动时间。
- 几种传感器联合使用可以进行一些比较复杂的监测操作。





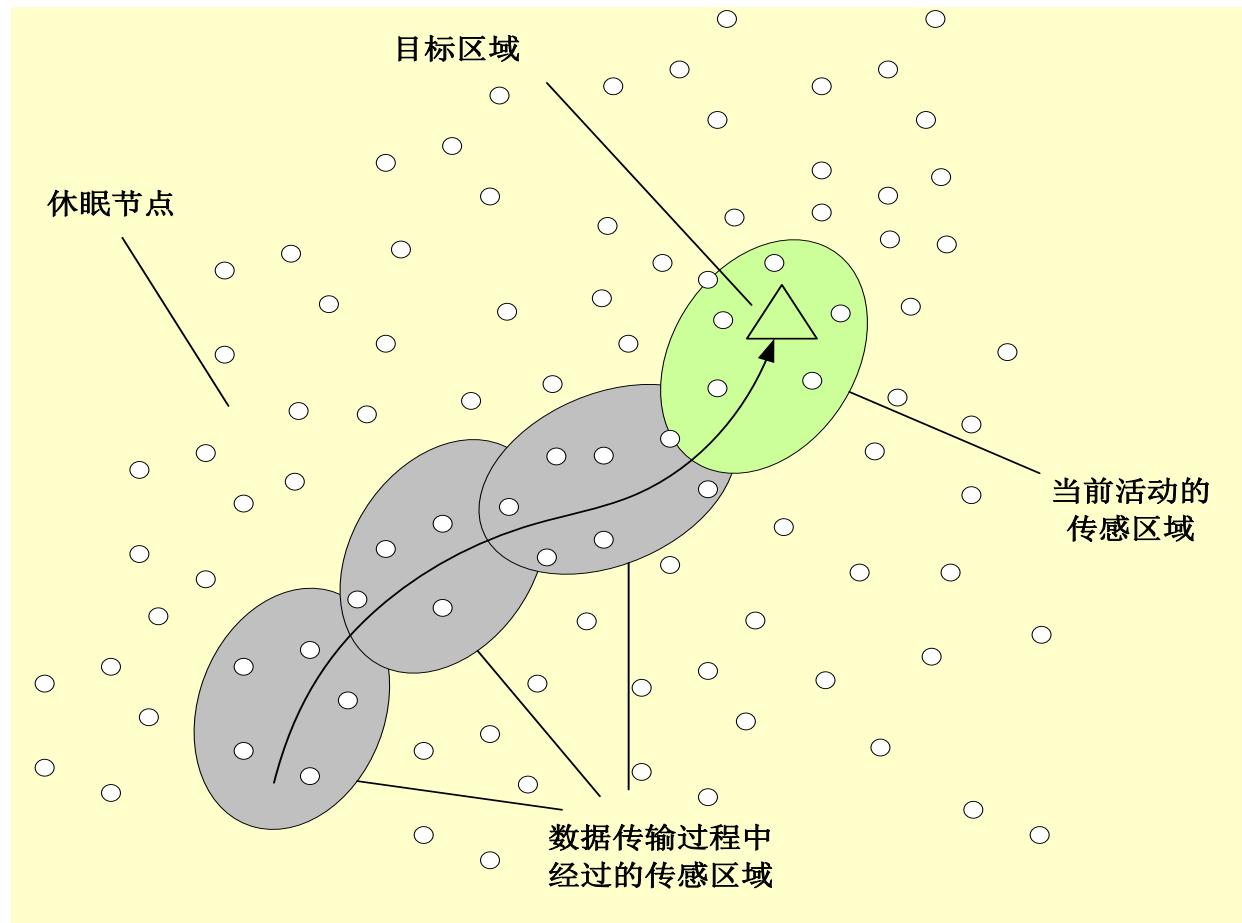
能量管理

- 有些环境监控应用需要进行连续数月的监测，这对传感器节点的能量供应提出了很高的要求。
- 在一个传感器网络中，不同节点对能量的需求和使用也会有不同。因此，有些节点消耗能量比较快，成为整个网络的能量瓶颈。
- 实际应用中，需要预测可能消耗能量比较快的节点，并采取一定的节点冗余措施以保证数据传输不会因为个别节点失效而中断。
- 节点节省能量的最主要方式是休眠机制。当节点目前没有传感任务并且不需要为其他节点转发传感数据时，关闭节点的无线通信模块、数据采集模块甚至计算模块以节省能量。这样，一个传感任务发生时，只有与之相邻的区域内的传感器节点处于活动状态，从而形成一个活动区域。





- 活动区域随着数据向网关节点传送而移动，这样原先活动的节点在离开活动区域后可以转到休眠模式，从而节省能量。





远程任务控制

- 传感器网络通过基站与Internet相连。基站以及基站到中心服务器的连接要具有高可靠性。基站要能对可能的系统异常及时进行处理。如果系统崩溃，基站需要及时地重新启动系统并主动连接中心服务器，以使远程控制人员能够恢复对传感器网络的远程控制。
- 远程任务控制最主要的是重新安排传感器网络的监控任务。
- 远程任务控制还需要监控传感器节点的工作状态以及健康情况，并据此调整节点的工作任务。





数据采样和收集

- 环境监测应用的最终目标是对监测环境的数据采样和数据收集。
- 采样频率和精度由具体应用确定，并由控制中心向传感器网络发出指令。
- 传感器节点需要考虑采样数据量和能量消耗之间的折中。
- 处于监控区域边缘的节点只需将采集的数据发送给基站，能量消耗相对较少。
- 靠近基站的节点由于同时还需要为边缘节点路由数据，消耗的能量要多2个数量级左右。因此边缘节点必须对采集到的数据进行一定的压缩和融合处理后再发送给基站。
- 数据融合是减少数据通信量的一个重要方面。目前的应用中通过信号处理技术和软件数据分析技术进行数据融合。





能量高效的通信机制

- 对于环境监测应用来说，能量高效的通信机制包括一系列的路由算法、MAC算法以及对通信部件的直接控制和访问机制。
- 路由算法需要保证节点间高效通信，维护数据传输路径的连通性。Intel实验室的环境监控项目中采用了层次性的路由协议。
- 网络生存期也是传感器网络的一个重要问题。通过使用GAF、SPAN算法等网络拓扑管理机制可以提高整个网络的生存期2~3倍。实际应用还需要低能耗的MAC协议。可以将两者结合起来在实际中使用。





§ 9.3.3 大鸭岛生态环境监控实例

- 加州大学与大西洋学院联合开展的对大鸭岛海燕栖息地的研究是一个典型的利用传感器网络监控生态环境的例子。
- 海岛生物种群对外来因素非常敏感，在此种情况下，传感器网络具有很大的优势。
- 研究人员关心的几个问题：
 - 1) 当海燕在孵卵期时，以24小时到72小时为周期监控巢穴的使用情况；
 - 2) 在7个月的孵卵期内，海燕洞穴和海岛表面的生态参数变化；
 - 3) 海燕大量筑巢给海岛微观环境带来的影响。
- 可以看出，上述问题所感兴趣的数据及数据采集频率都有很大不同。一方面需要在一段较短时间内连续监控，另一方面要能监控尽可能长





的时间。

- 使用传感器网络可以很好的适应大鸭岛的监控需求。利用一次部署的传感器网络和智能传感器节点，可以在研究人员的控制下在需要的时间进行不间断的监控，且对岛上的生态环境几乎没有影响。
- 大鸭岛监控项目的应用需求：
 - 1) 远程访问和控制能力；
 - 2) 层次型网络结构；
 - 3) 足够长的传感器网络生存期；
 - 4) 对自然环境的影响小；
 - 5) 感应和搜集数据能力；
 - 6) 直接交互能力；
 - 7) 数据存储和归档能力。





- 2002年夏天，研究组在大鹏岛部署了由43个传感器节点组成的传感器网络。传感器节点使用了Berkeley的Mote节点，节点上运行的软件是Berkeley开发的TinyOS。节点上装有多种传感器以监测海岛上不同类型的数据。
- 部署在实际中的节点作了良好的封装。
- 结果：实验期间有些节点失效，有些节点发生通信问题，有些节点得到了无效的传感数据。数据库也曾经崩溃过。网络建立的初始阶段数据丢失率比较高，随着时间的推移，网络的性能明显好转并趋于稳定。
- 实验表明传感器网络在这样的应用环境中有非常明显的优势。
- 传感器网络为实现更加准确、数据量更大、对环境影响更小的生态监测提供了一个全新的手段！





智能传感器系统

课 程 总 结



总 体 要 求

- ◆ 基本概念要清晰，
- ◆ 各种方法要熟悉，
- ◆ 适用条件要明确，
- ◆ 具体过程要清楚。



目 录

第1章 概 述

第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础

第3章 不同集成度智能传感器系统介绍

第4章 智能传感器的集成技术

第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法

第6章 通信功能与总线接口

第6章 通信功能与总线接口（补充内容）

第7章 智能技术在传感器系统中的应用

第7章 智能技术在传感器系统中的应用（补充内容）

第8章 智能传感器系统的设计与应用

第9章 无线传感器网络技术概述



第1章 概述

要 点：

- ◆ 传感器的重要作用；
- ◆ 智能传感器的发展过程；
- ◆ 智能传感器的功能与特点；
- ◆ 智能传感器与传统传感器的差别；
- ◆ 智能传感器系统的构成；
- ◆ 智能传感器的实现方法。

第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础

要 点：

- ◆ 传感器系统的基本特性

静态特性与动态特性；静、动态特性指标；静、动态特性具体分析方法。

- ◆ 几种传感器的工作原理

压阻效应与电容效应；几种传感器的工作原理与特性。

- ◆ 提高传感器性能的技术途径

熟悉、了解通过结构、参数与工艺的合理选择、输出形式的变换等来改善传感器的输出特性的思想、方法；多信号测量法中的基本思想和方法及使用条件。

第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础

要 点：

◆ 误差与测量误差分析

主要是要系统性的了解误差的概念、误差分析的方法及如何进行测量误差的分析，以便在进行传感器及仪器设备系统研制时，合理的分解分配各部分误差；对研制好的传感器及仪器设备，通过综合各部分的误差，对其性能给予正确的评价。



第3章 不同集成度智能传感器系统介绍

要 点：

◆ 集成智能传感器的工作原理和结构特点

◆ 初级形式：单片集成和混合集成

主要是要熟悉、了解各种硬件补偿的措施及其特点，有关信号调理电路的组成及功能特点。

◆ 中级形式：敏感单元+信号调理电路+微处理器系统

熟悉、了解中级形式的基本组成单元及其功能。

◆ 高级形式：敏感单元阵列化，信号处理软件高级化

了解其发展现状、发展趋势及未来需要解决的问题。



第4章 智能传感器的集成技术

要 点：

- ◆ 集成电路工艺及典型元件电路的示例；
- ◆ 微机械工艺及微机械结构的示例；
- ◆ 集成智能传感器系统示例。



第5章 智能化功能的实现方法

要 点：

- ◆ 非线性自校正技术；
- ◆ 自校零与自校准技术；
- ◆ 噪声抑制技术；
- ◆ 自补偿技术；
- ◆ 信息融合技术；
- ◆ 量程自动更换及自检测、自诊断技术；



第5章 智能化功能的实现方法

1、用软件来进行非线性校正，一般来说它对测量系统没有太高的要求，但必须要保证：它的输入—输出特性具有好的重复性，因为它校正的依据是它在标准输入—输出特性曲线的基础上进行的。

进行非线性校正可以达到两个目的：

- a) 有利于读数；
- b) 有利于分析处理测量结果，减少测量误差；

2、在智能化软件程序的导引下实时进行自动校零和实时自动校准/标定，其测量精度决定于作为标准量的基准精度，而对系统本身的精度、重复性、稳定性要求不高。

通过实时自校零和自校准，它可以：

- a) 消除系统误差；
- b) 降低外界干扰因素的影响；
- c) 提高系统的精度与稳定性。



第5章 智能化功能的实现方法

3、噪声抑制技术主要是将有用信息从混有噪声的信号中提取出来。

a) 方法：数字滤波、相关分析、统计平均处理；

b) 目的：消除偶然误差或随机误差，排除干扰，提高信噪比和分辨率。

4、通过自补偿技术可以改善传感器系统动态特性以及温漂性能。

5、通过信息融合技术来消除交叉灵敏度、时漂等因素所产生的干扰量的影响。

6、实现自动选择更换量程、自检测、自诊断等功能，可以进一步提高传感器系统的测量范围、安全性和可靠性。



第6章 通信功能与总线接口

要 点：

◆ 现场总线与智能传感器

熟悉、了解现有的几种现场总线的共性与个性；现场总线与智能传感器相互之间的要求。

◆ CAN接口技术

熟悉、了解CAN总线标准物理层和数据链路层的规范；在此基础上，能够进行相关应用方案的设计，并针对系统中可能出现的问题进行正确的分析。



第6章 通信功能与总线接口

◆ IEEE 1451标准

熟悉、了解IEEE 1451.0~1451.7标准的基本内容、各自的應用范围与相互之间的关系，主要是IEEE 1451.1~1451.4标准；重点是TEDS、NCAP、TII的概念及其內容；基于上述标准的具体应用形式。

◆ 工业以太网络技术

熟悉工业以太网络的特点和要求及具体的实现方法；了解国际上当今的发展现状和发展趋势。



第6章 通信功能与总线接口（补充内容）

要 点：

◆ CANopen协议简介

熟悉、了解CANopen协议的特性、节点的架构、报文的类型及功能，对象字典的概念和内涵，状态机的组成及工作流程。

◆ CANopen协议具体应用开发

熟悉、了解CANopen协议的具体开发流程，能够进行相关应用方案的设计；正确理解接口驱动软件的结构形式、对象字典的实体结构形式，并能够设计实现。



第7章 智能技术在传感器系统中的应用

要 点：

- ◆ 智能模糊传感器

在理解隶属函数、模糊算子、属概念的基础上，要能够熟练的针对具体问题进行隶属函数的求解，掌握智能模糊传感器的设计方法并能够具体的进行设计。

- ◆ 人工神经网络在智能传感器中的应用

要熟练掌握并能够具体应用BP网络解决传感器系统中的具体问题。



第7章 智能技术在传感器系统中的应用（补充内容）

要 点：

◆ 支持向量机技术在智能传感器中的应用

能够正确理解经验风险、期望风险、逼近误差、估计误差、结构风险最小化原理的概念；了解支持向量机技术应用于智能传感器数据融合的处理过程及注意事项，并能够具体实现。

◆ 粒子群优化算法在智能传感器中的应用

能够正确理解粒子群优化算法，明确粒子群优化算法在智能传感器系统中具体解决那些问题及如何解决。



第8章 智能传感器系统的设计与应用

要 点：

◆ 智能传感器系统外围电路及抗干扰措施

常用的外围电路及其功能、特点和作用；硬件抗干扰措施：滤波、屏蔽、隔离、接地，元器件的正确选型，布线的要求；软件抗干扰措施。要能够根据具体的应用要求正确的选择相应的措施。

◆ 基于DS18B20的分布式温度测量系统

DS18B20的结构特点；一线式网络的特点与具体应用要求；针对具体应用中出现的问题善于正确分析和解决。



第8章 智能传感器系统的设计与应用

◆ 集成化智能传感器的应用

如何获得最新的智能传感器产品和应用信息；如何用好具体的智能传感器产品。



第9章 无线传感器网络技术概述

要 点：

◆ 无线传感器网络概述

 无线传感器网络系统的结构及特点；各节点的构成及其功能要求。

◆ 无线传感器网络的关键技术

 拓扑控制；网络协议；路由协议；网络安全；时间同步；定位技术；数据融合；数据管理；无线通信技术；其它技术：嵌入式操作系统，应用层技术。



第9章 无线传感器网络技术概述

◆ 无线传感器网络的应用

能够针对具体的实际应用，提出相应的基本构成方案，明确需要解决的关键性问题及解决问题的基本思想和方法。