



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；可大规模化生产；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: $\underbrace{\text{掩蔽腐蚀} + \text{高温键合技术}}_{\text{形成压力腔}} +$

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。

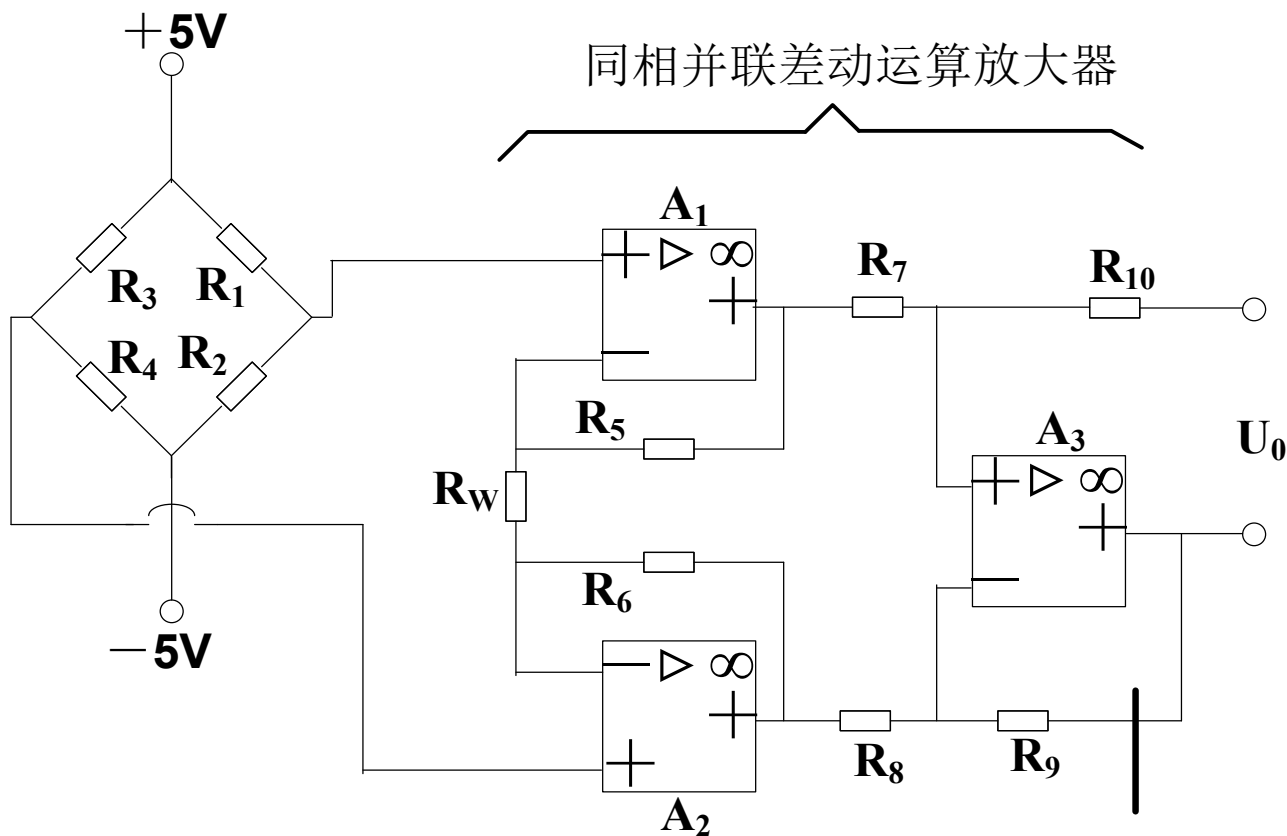
3) 尺寸: 1.5mm^2

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: $0 \sim 100\text{kPa}$; 被测量: 差压、表压、绝对压力;

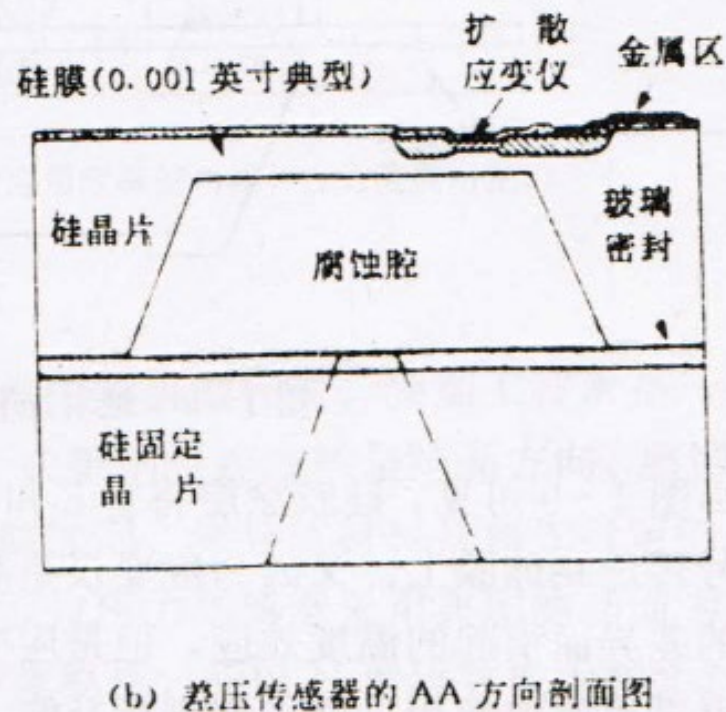
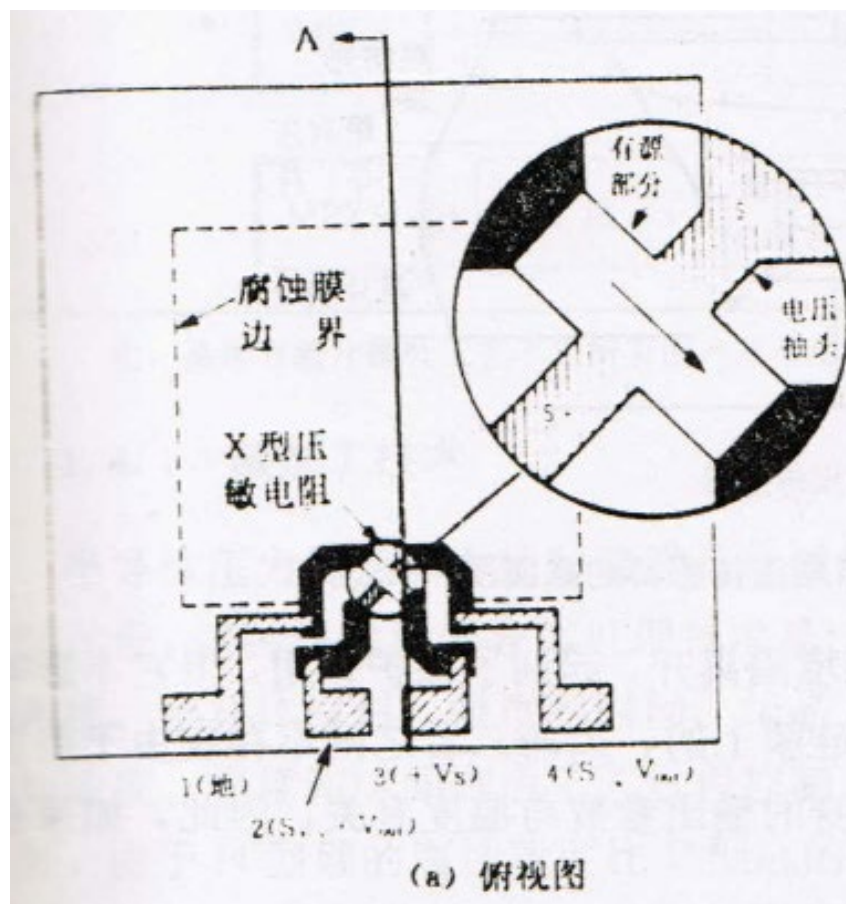
结构: 应变仪 + 温度补偿、校准和信号调理 + 激光修正。

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





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 压阻系数	P—Si	N—Si
π_{11}	6.6	-102.2
π_{12}	-1.1	53.4
π_{44}	133.1	-13.6

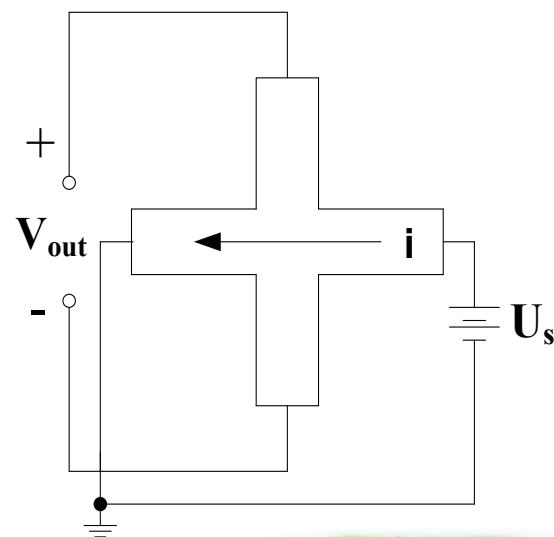
若令： i_1 、 $i_3 = 0$ ，则有： $\frac{E_1}{i_2} = \rho\pi_{44}\delta_{12}$ ， δ_{12} 为剪切应力。

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

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

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

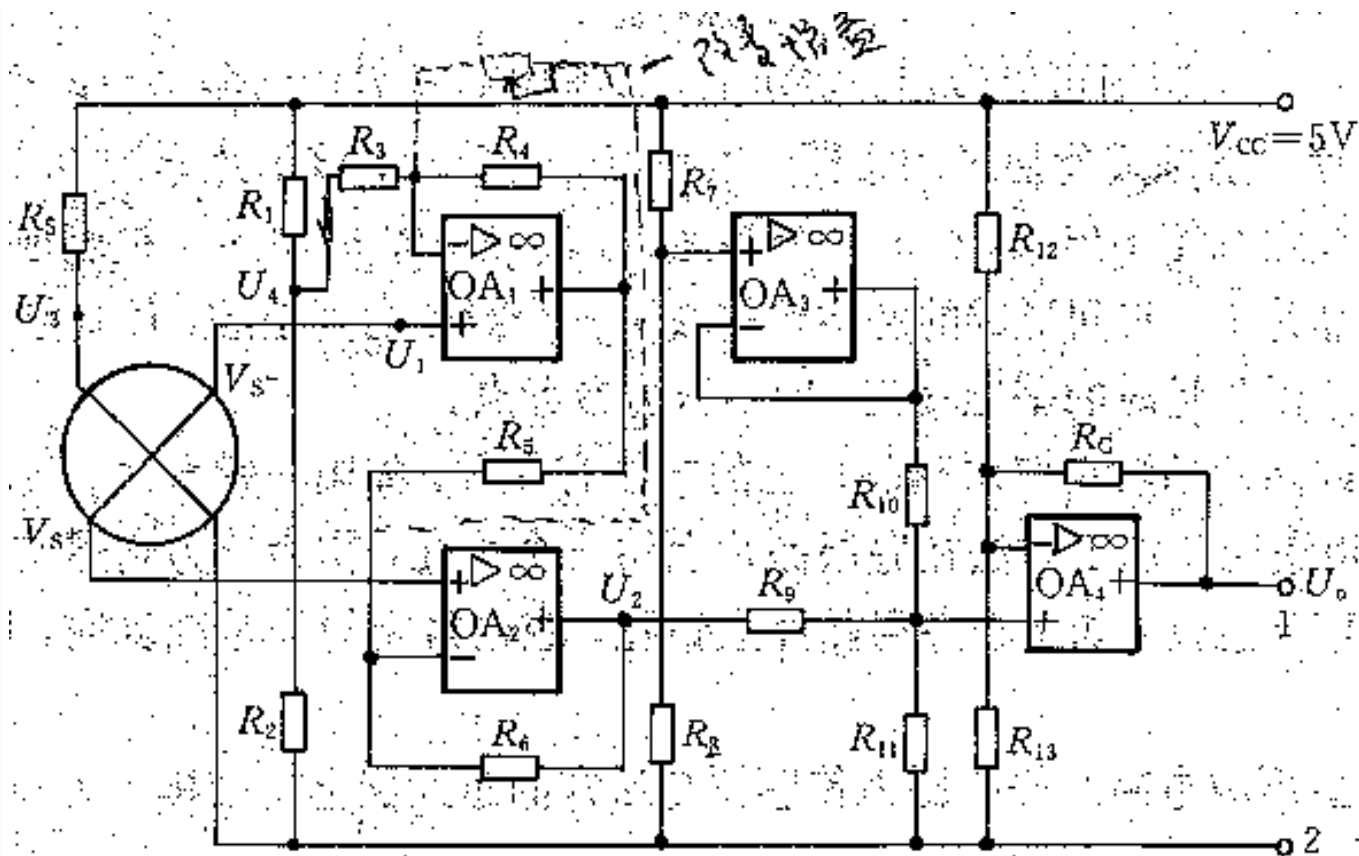
X型压力传感器输出电压幅度随温度升高而降低， $\alpha_T = -0.19\%/^{\circ}\text{C}$ ，传感器的输出与激励电压成比例关系，采用前面介绍的拼凑补偿法。在X型传感器的激励电源上串入一具有负温度系数的电阻 R_S ；X型压力传感器本身的电阻具有正温度系数，也起到一定补偿作用，补偿精度可达到0.5%。

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。





OA1, OA2 构成同相
半桥差动运放电路
1. 是模拟输入电阻网络
2. 是电路的增益
即 $U_{in} \rightarrow U_o$
是桥路增益

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。

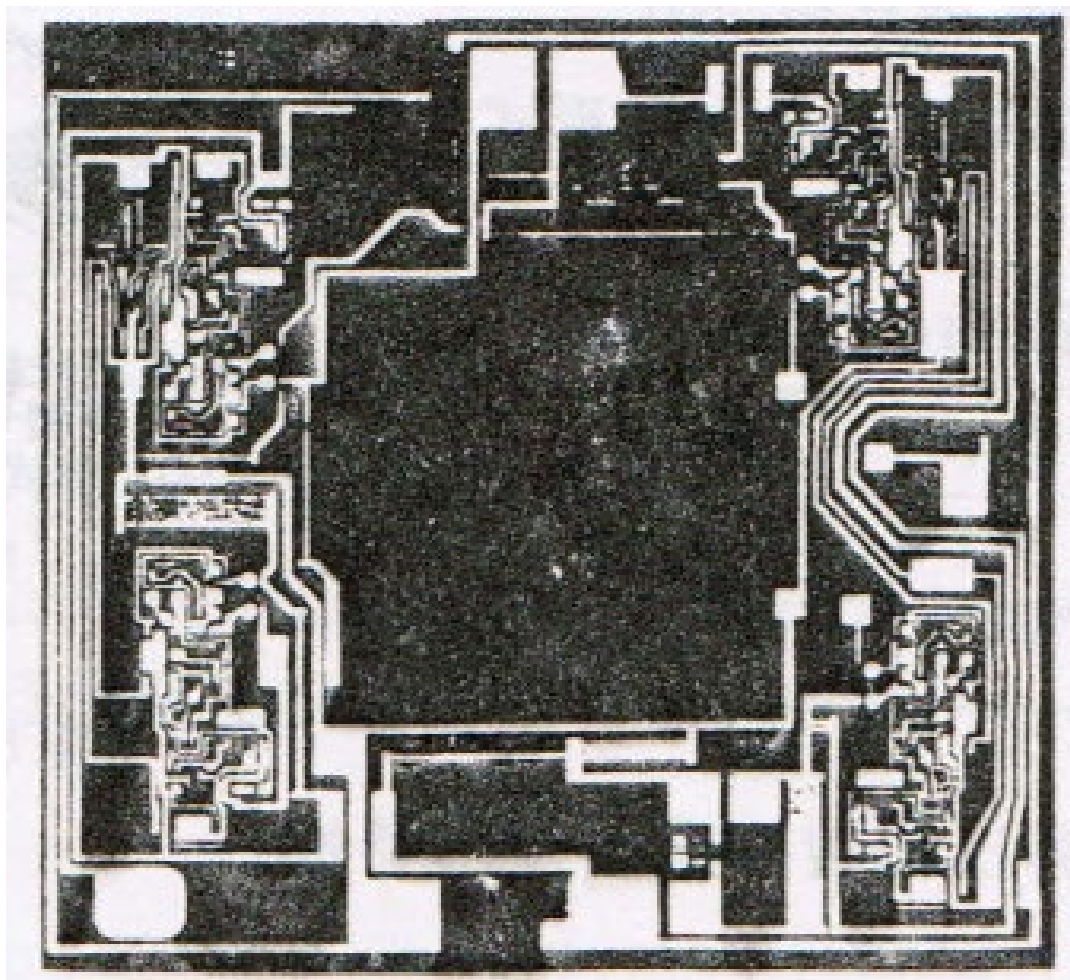
MPX3100的零位：0.5V；满量程：2.5V。

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

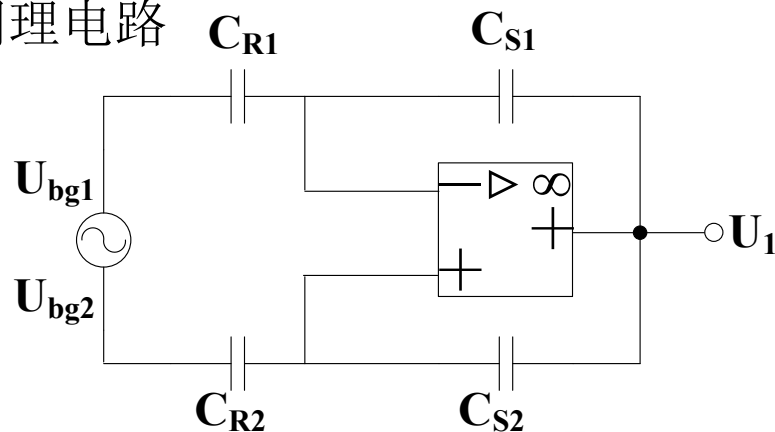
1) 信号调理电路

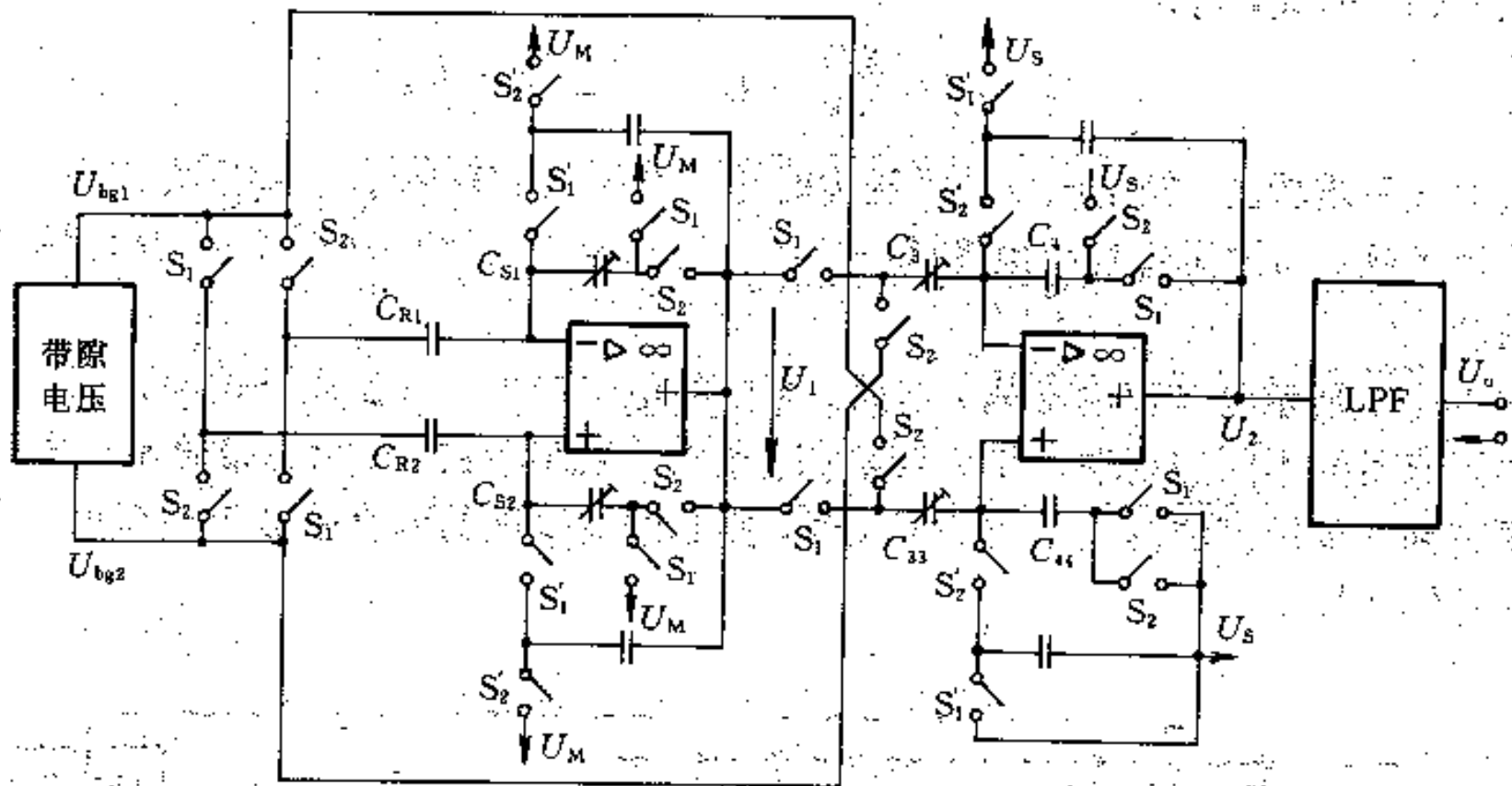
采用了差动结构设计；信号传感器电容： C_{S1} 、 C_{S2} ；参考传感器电容： C_{R1} 、 C_{R2} ；优点：消除干扰信号的影响（温度、杂散电容）。

a) 根据下图中提供的开关—电容调理电路

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

$$U_2 = \frac{C_3}{C_4} (U_{bg1} - U_{bg2}) \frac{X(P)}{X_0} + U_S$$

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：

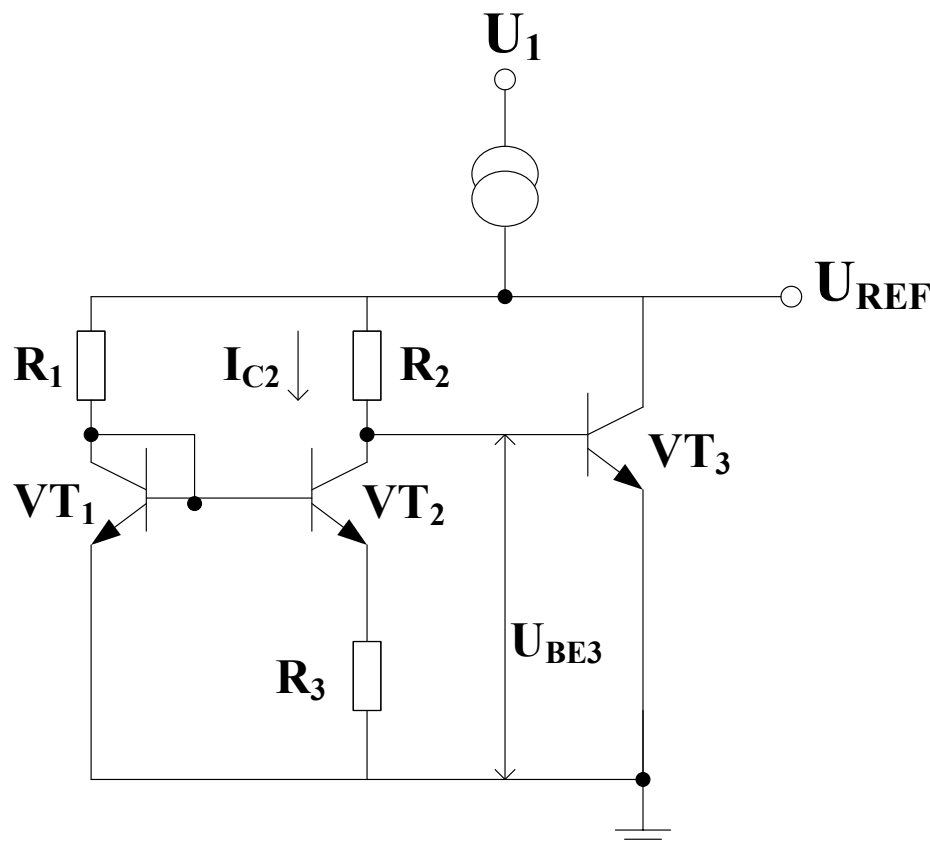
$$U_{REF} = U_{BE3} + I_{C2} R_2$$

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

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：

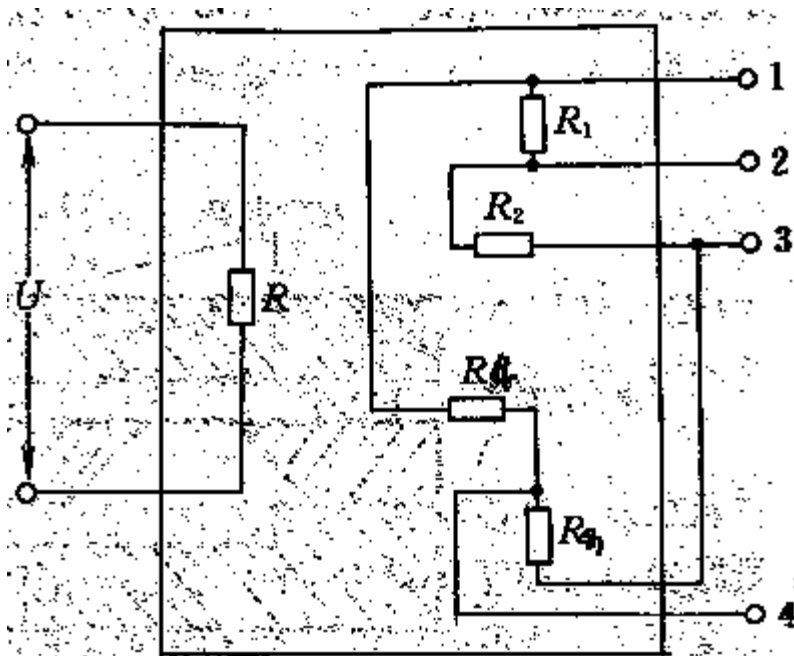
$$\Delta U = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} U_0$$

R_1 、 R_3 的特性， R_2 、 R_4 的特性要一致。

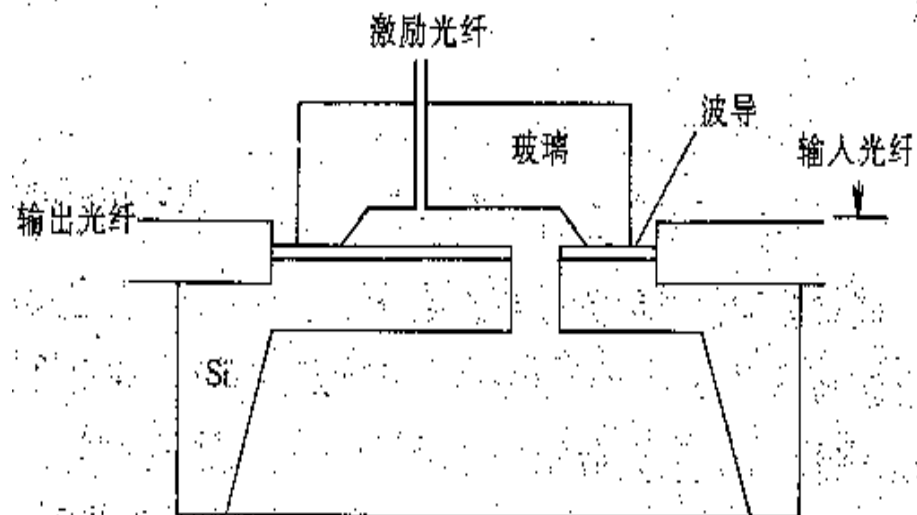
ii) 注意桥路电源电压 U_0 对膜片温度分布的影响。

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。

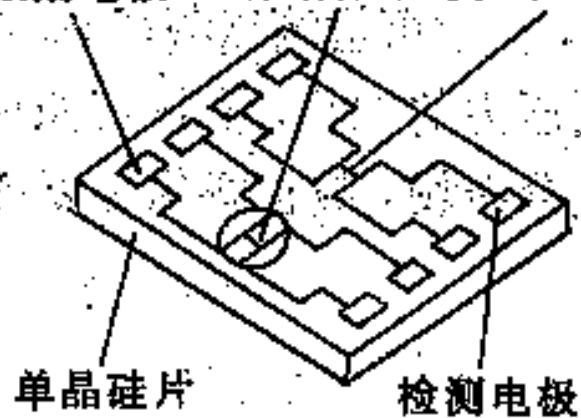
2) 声表面波 (SAW) 式 (surface acoustical wave)

a) 波的类型

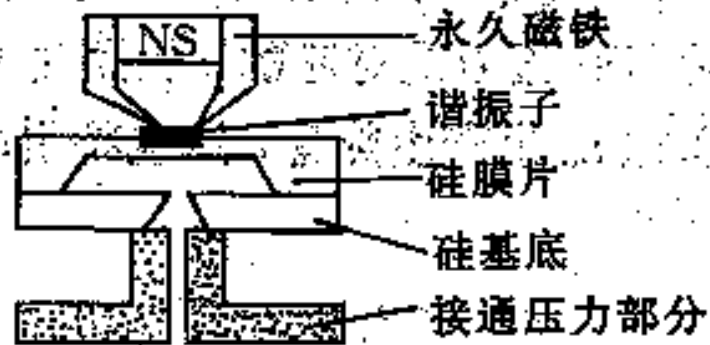




激励电极 边缘谐振子(f_t) 中心谐振子(f_c)



(a)



(b)

硅谐振式压力传感器原理结构图





纵波： ， 质点振动平行于传播方向；

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}}$$

横波： ， 质点振动垂直于传播方向；

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\gamma)}}$$

E：弹性模量， ρ ：密度， γ ：泊松比。

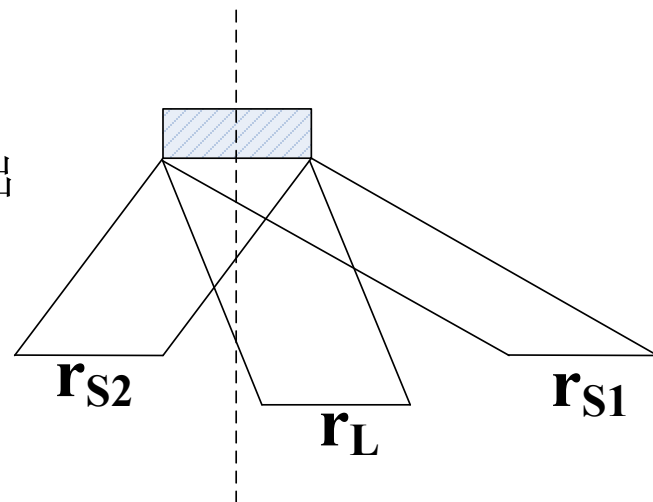
各向异性物质中声波的传播：

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。

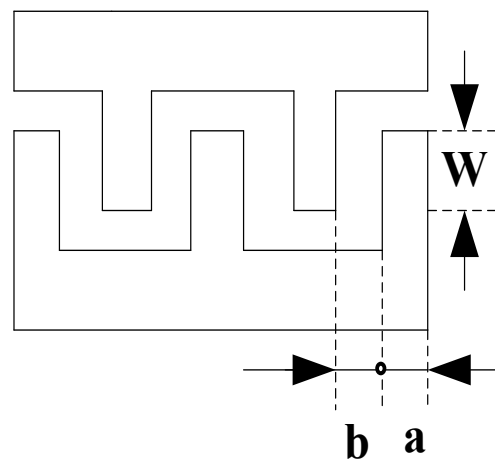
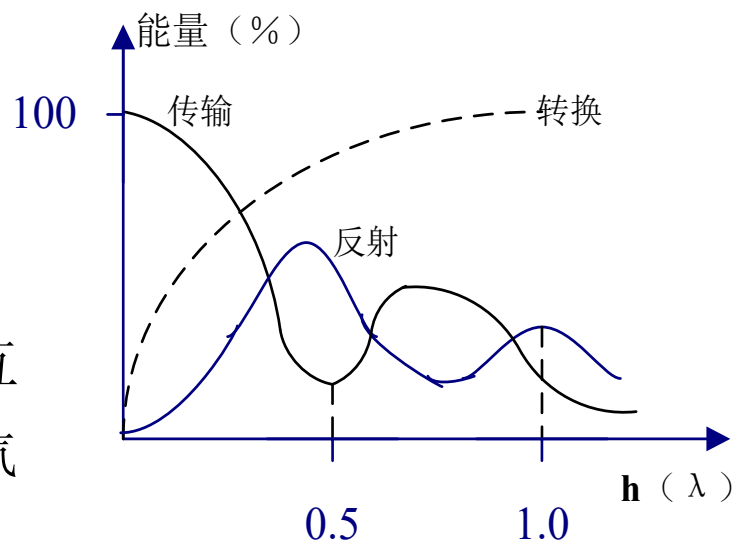
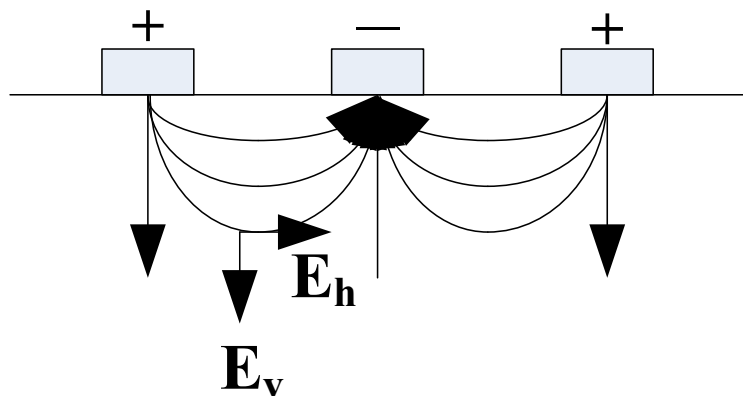
ii) 波束的偏离与衍射效应

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。

$f = (1 - k\varepsilon)f_0$ ， ε ：应变率； $k \approx 1$ ，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）

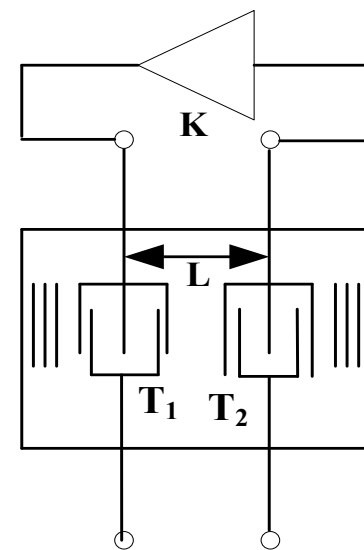
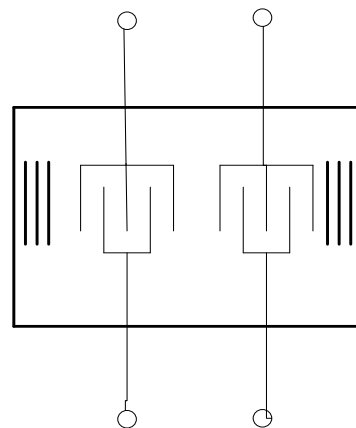
ii) SAW力和加速度传感器

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。

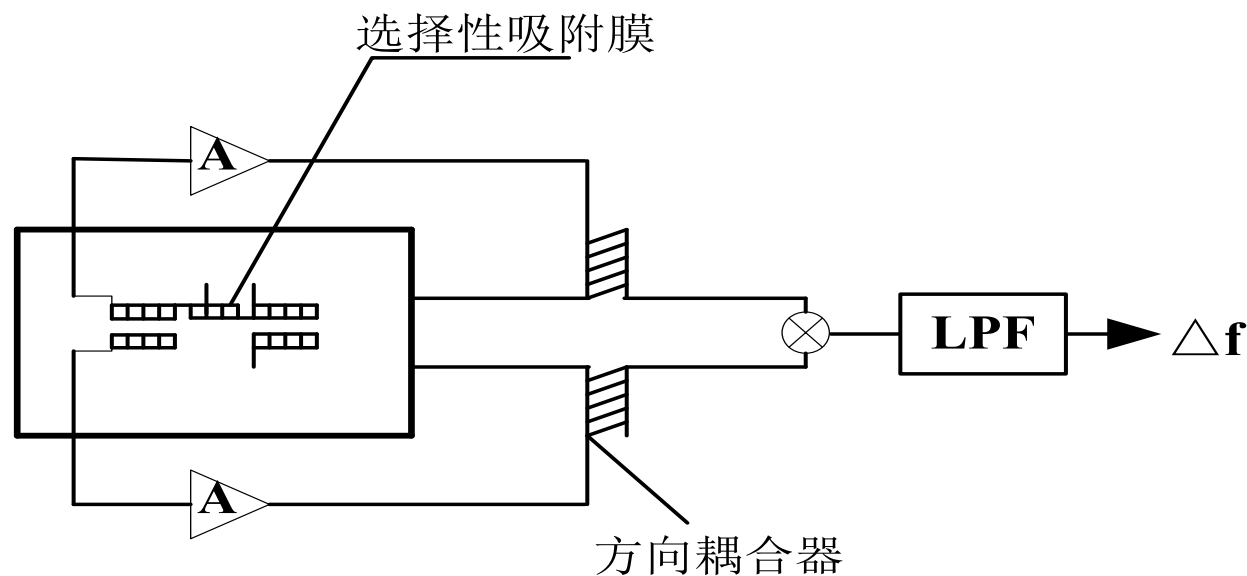
灵敏度： $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{v} - \frac{\Delta L}{L}$ ，由于 $\frac{\Delta L}{L} \ll \frac{\Delta v}{v}$ ， $\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{\Delta v}{v}$





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

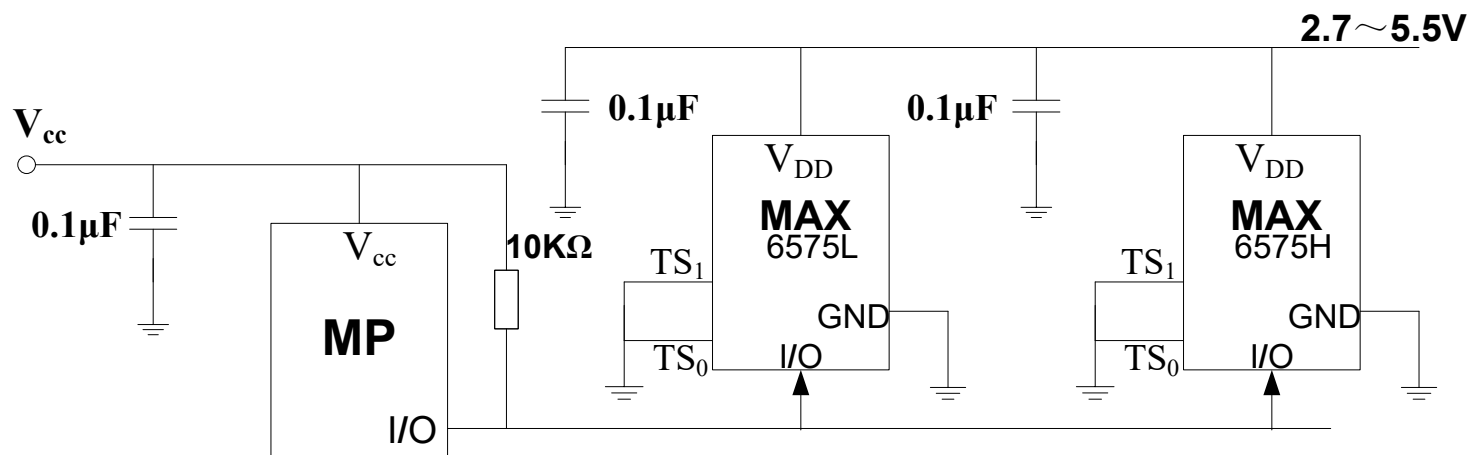
a) Maxim公司的产品

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： $-35^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ ；封装0—S0723

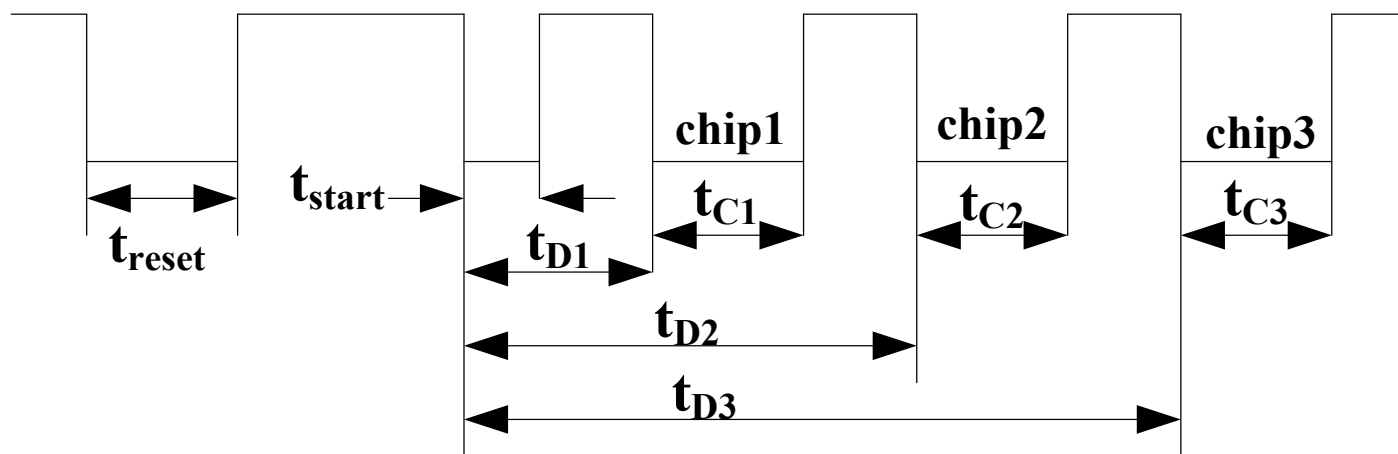
例：单线接口数字温度传感器（见下图）





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：

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

温度传感器保持低电平的时间为 $5 \times T(\mu\text{s})$ 。

b) DALLAS公司产品，DS1820

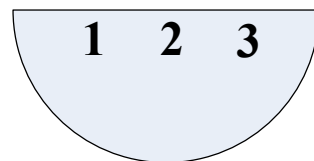
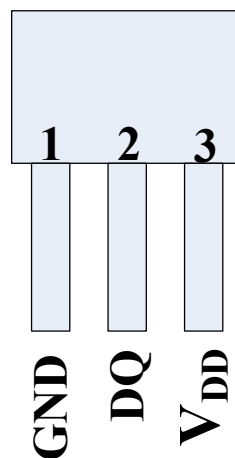
技术指标： $-55^{\circ}\text{C} \sim +75^{\circ}\text{C}$ ，精度： 0.5°C

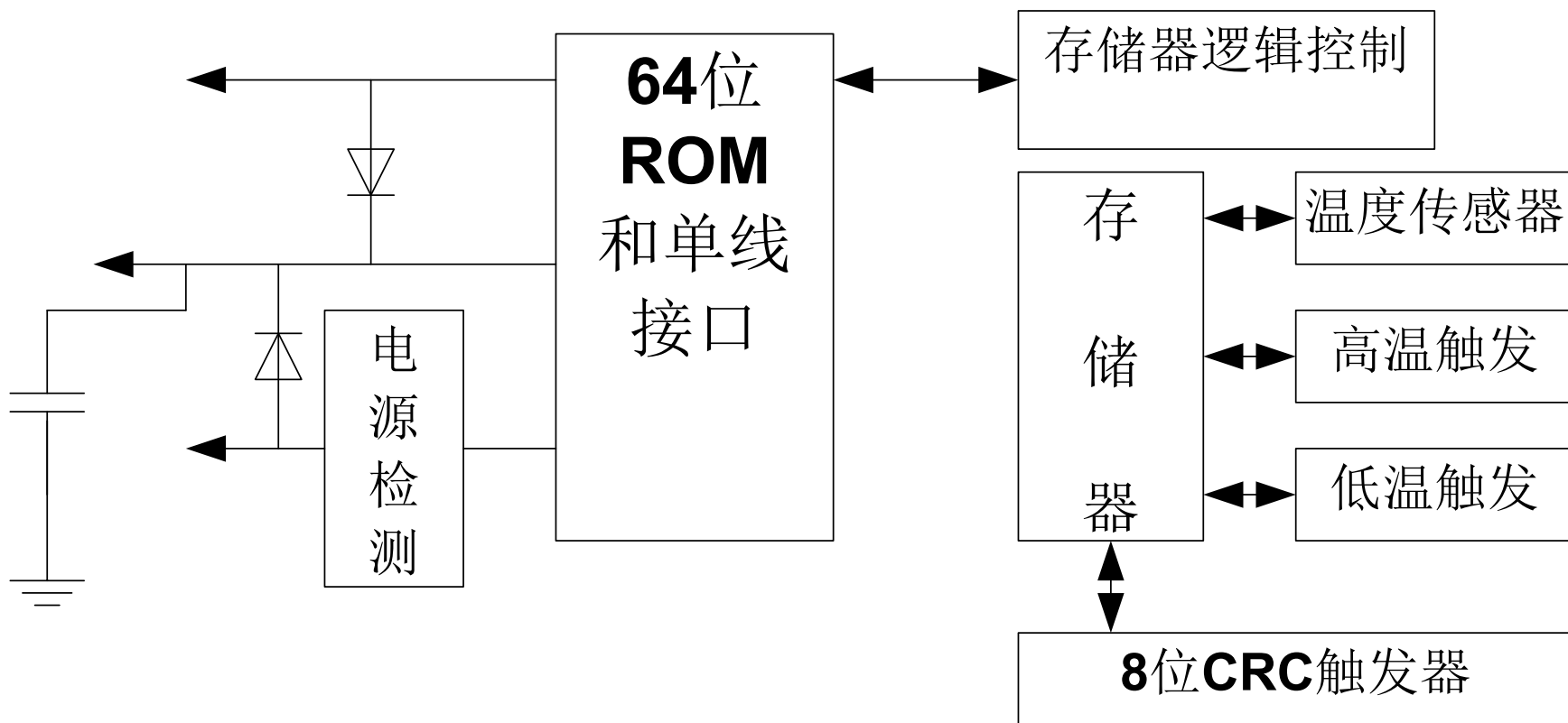
9位温度读数，其中一位符号位，A/D转换时间200ms，用户自定义报警上下限。

64BitRom结构：

8bitCRC+48bit序列号

+8bit工厂代码(10H)



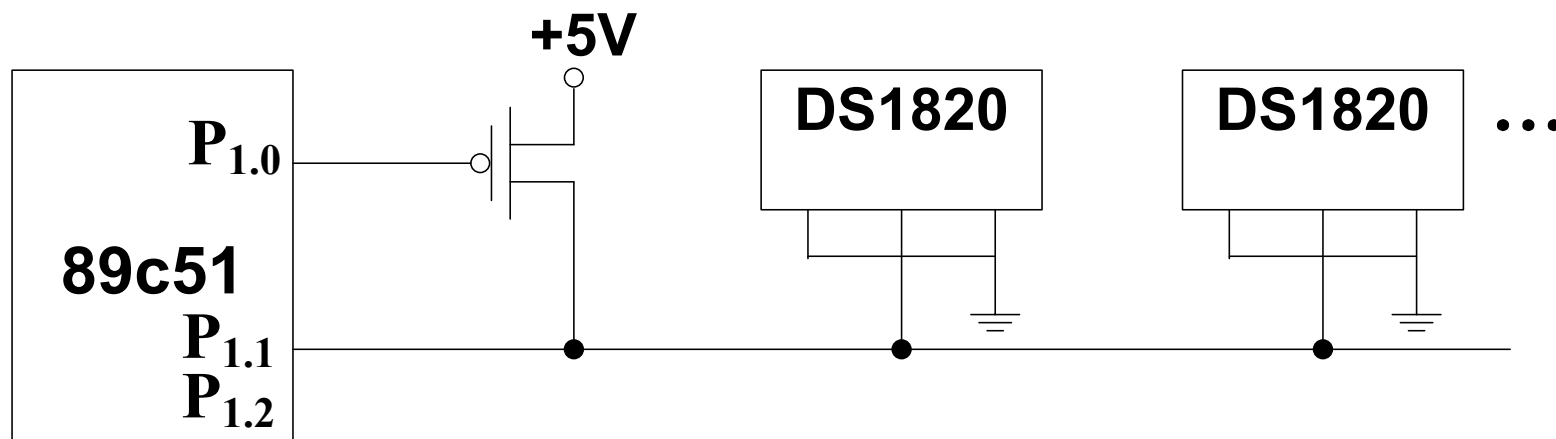




测温原理：内部计数器对一个受温度影响的振荡器计数。在低温时振荡器的脉冲可以通过门电路，而达到某一设置高温值时，振荡器的脉冲无法通过门电路。计数器设置为 -55°C 时的初值。

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。

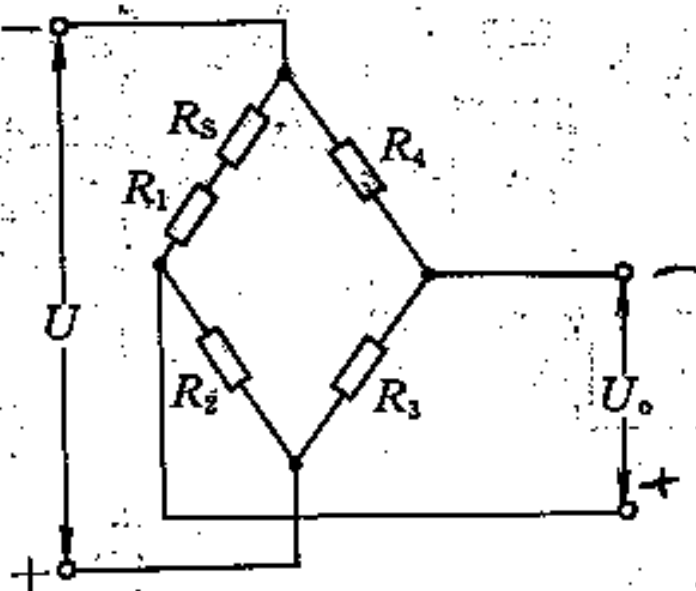
采用串联方式，串联电阻： $R_s = \frac{4R_0}{U} \Delta U_0$

iii) 零点温度漂移的补偿

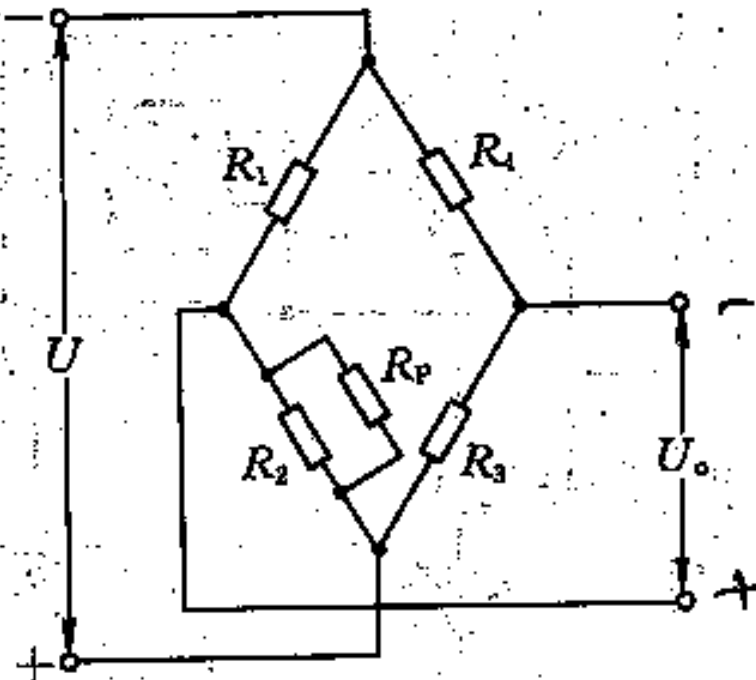
主要是考虑桥臂电阻温度系数不一致性，一般是采用串联和并联的方式，该串、并联电阻温度系数近似为零。计算方法书中有详细的介绍，这里就不赘述了。

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:

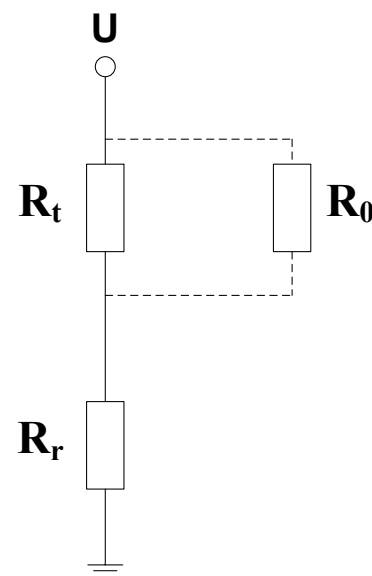
$$R_S = \frac{R_{20}R_{40}}{R_{30}} K - R_{10}, \quad R_P = R_{20} \frac{K}{1-K}$$

求出 R_S 、 R_P ($R_S \angle \angle R_{10}$; $R_{20} \angle \angle R_P$), 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。

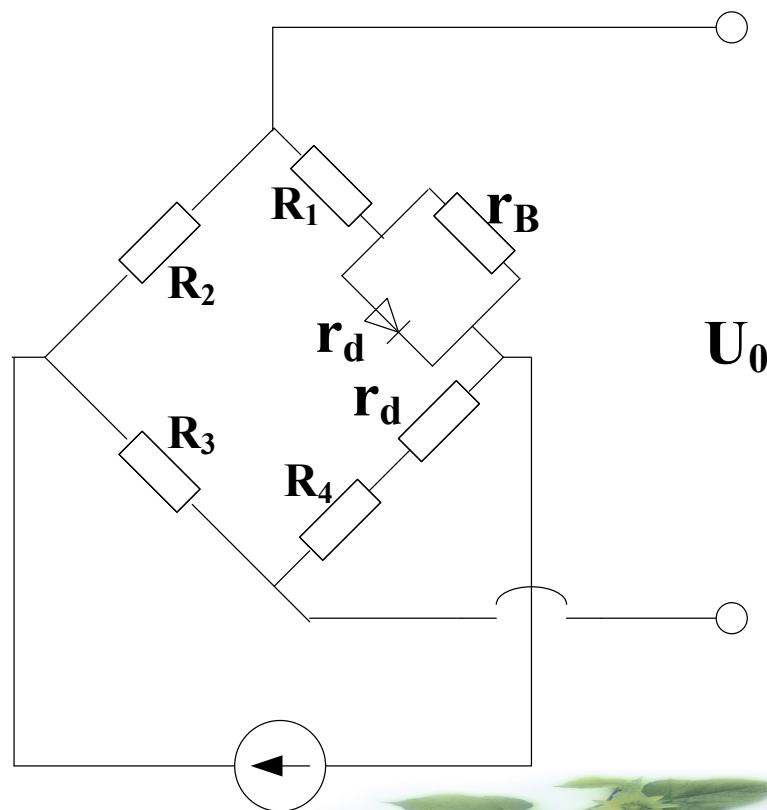
vi) 二极管补偿法（P-N结等效为一个负温度系数的电阻）

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

I_s : P-N结反向饱和电流。

r_B : 为改善非线性而并联，

$r_d \ll r_B$, 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

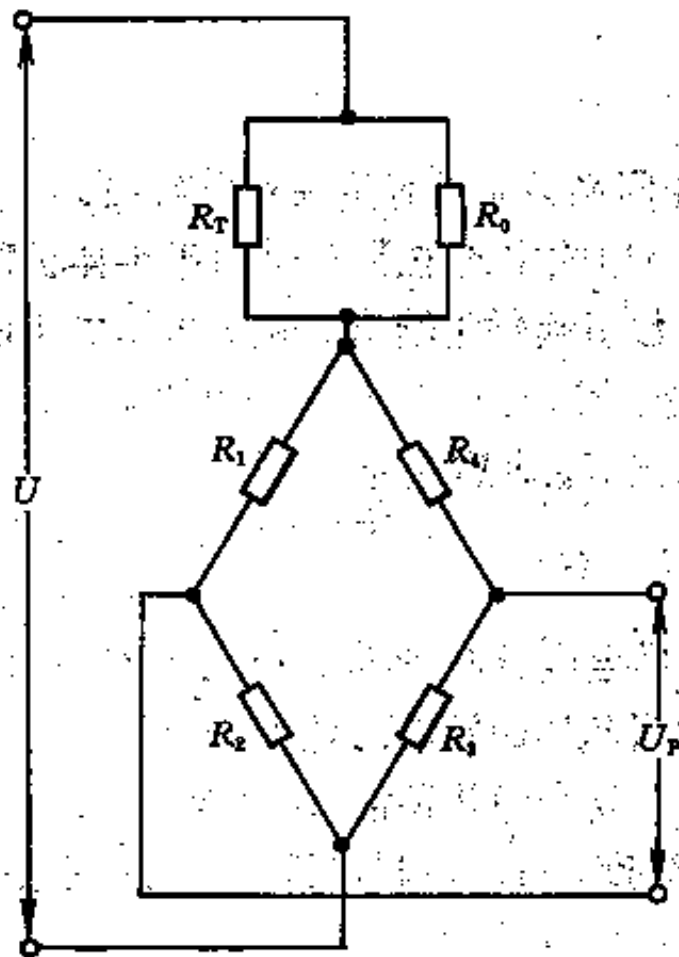
由于电阻R具有正温度系数，通过合适的掺杂浓度，可使G与R之间在一定范围内达到相互补偿的目的。

ii) 正温度系数恒压源补偿法

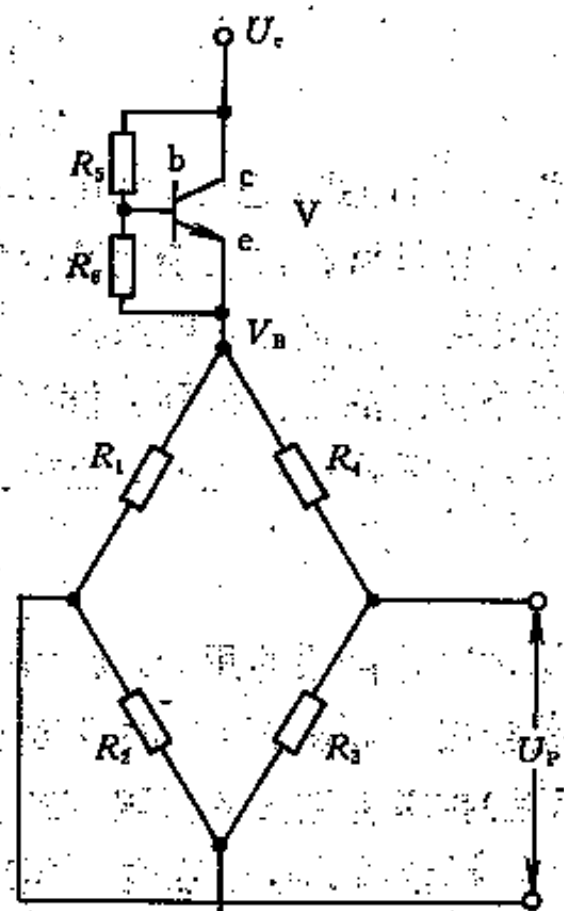
前面介绍的温度漂移补偿法中：热敏电阻法（利用负温度系数）和二极管法均可适用。

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）：

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

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

R_5 / R_6 的具体取值可参考书中的公式推导。

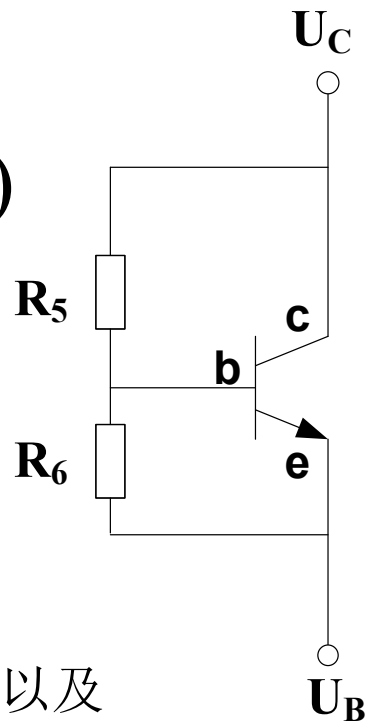
该方法简单，补偿效果好。

iii) 温度漂移的三点补偿法

确定三个温度点，在这三点传感器的零点漂移和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。

补偿网络的具体计算方法及公式推导参见书中 $P_{112} \sim P_{113}$ 页。





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

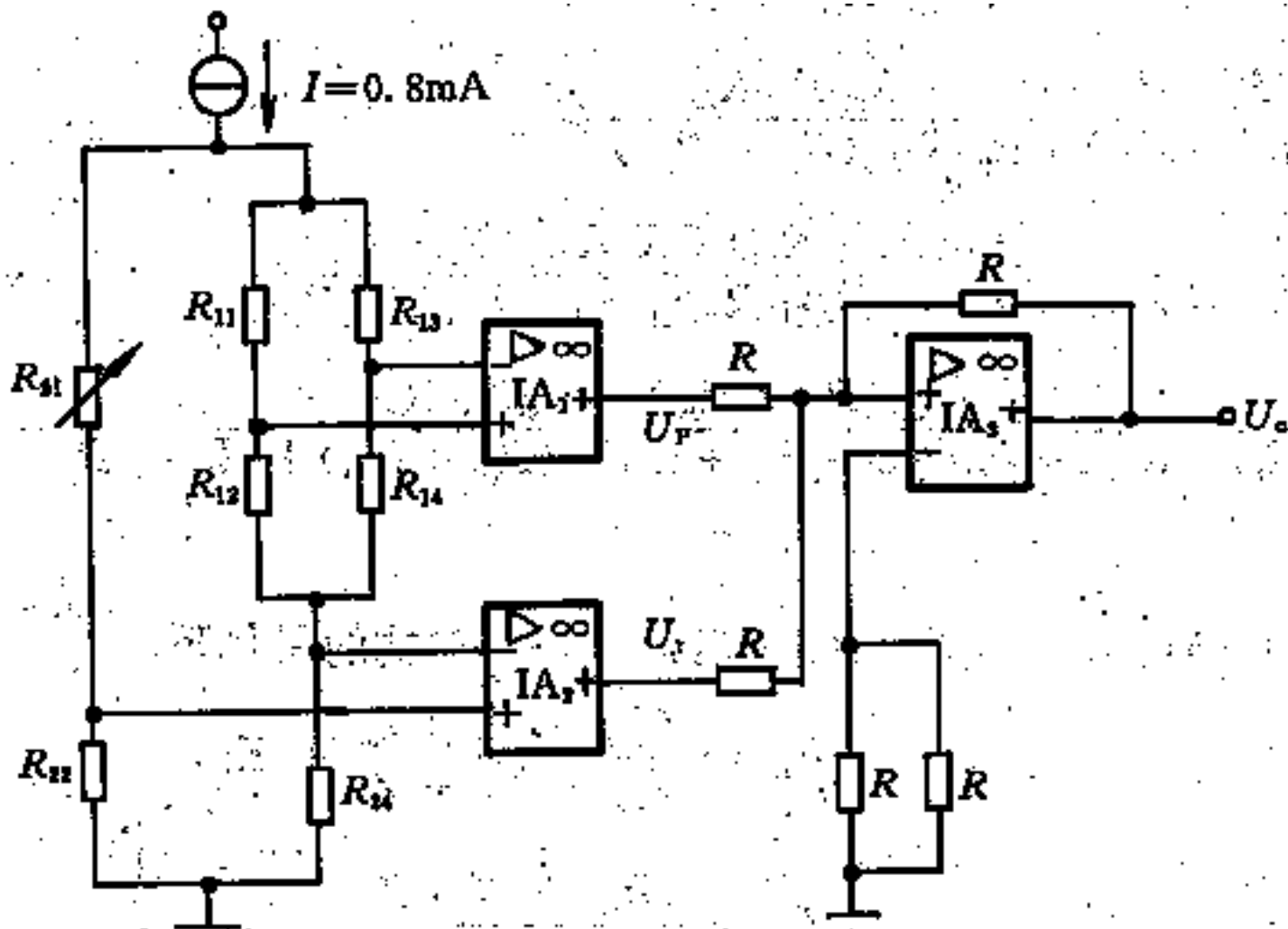
单片集成方式难以准确补偿零位时漂、温漂以及灵敏度温漂。

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

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





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。

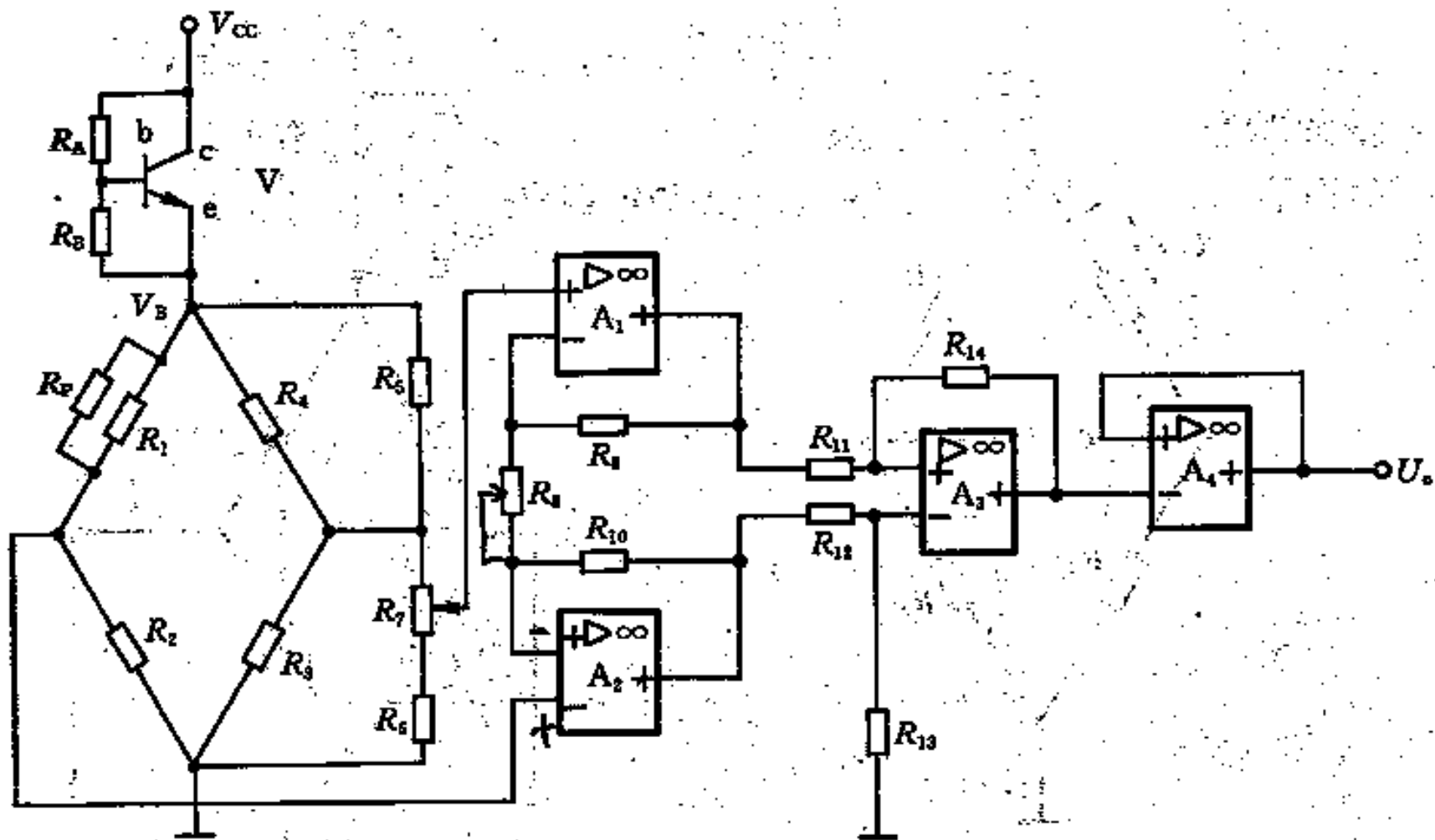
c) 灵敏度温度补偿电路

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:

$$R_B V_{CC} / (R_A + R_B + R_0) \text{ 在 } 1 \sim 2V \text{ 之间, } R_0 \text{ 为桥路的等效输入电阻:}$$
$$\approx \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

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。

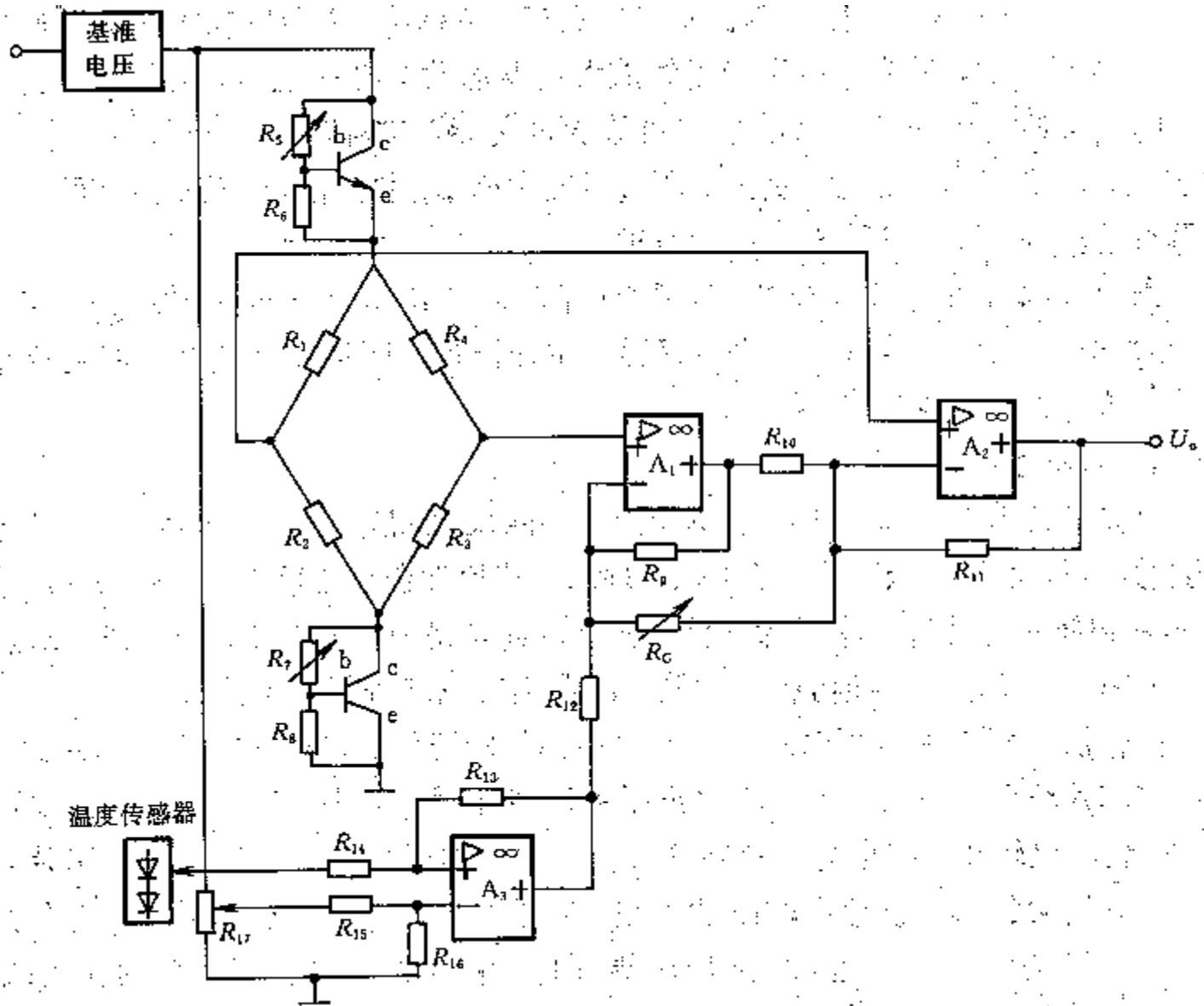
补偿结果： $T_Z = 0.1\%FS/^\circ C$ ， $T_S = 0.04\%FS/^\circ C$ ， $U_0 = 1 \sim 2V$ 。

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： $W = K\Delta P$

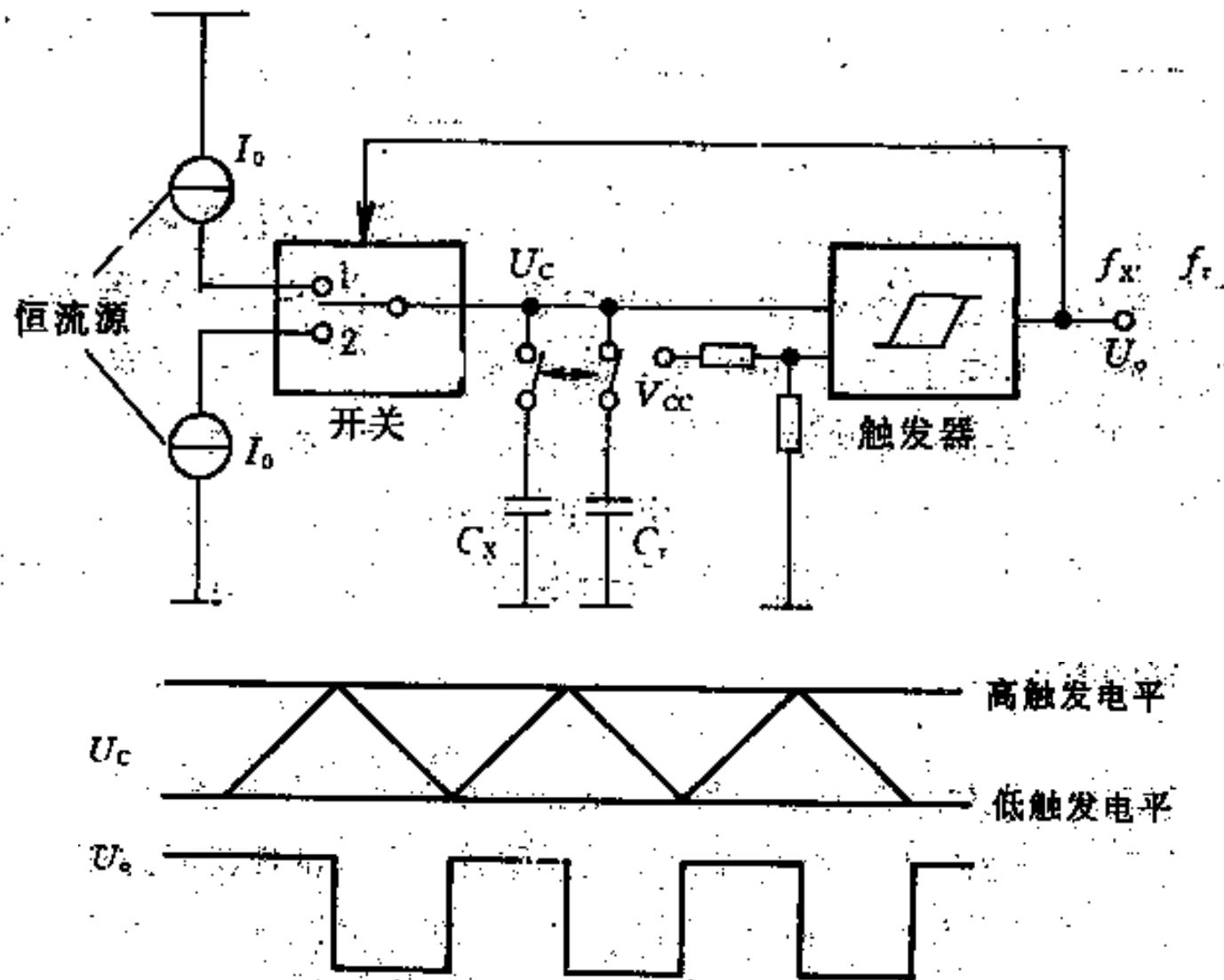
K ：为与膜片尺寸有关的常量。前面的分析表明，相应于电容 C_0 ，它的输出频率为： $F_0 = \frac{I_x}{2C_0U_h}$ ， I_x ：充放电电流， U_h ：翻转电压值。

无压力作用与有压力作用时的频率差： $\Delta F = \frac{I_x K \Delta P}{2C_0 U_h d}$ ，
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

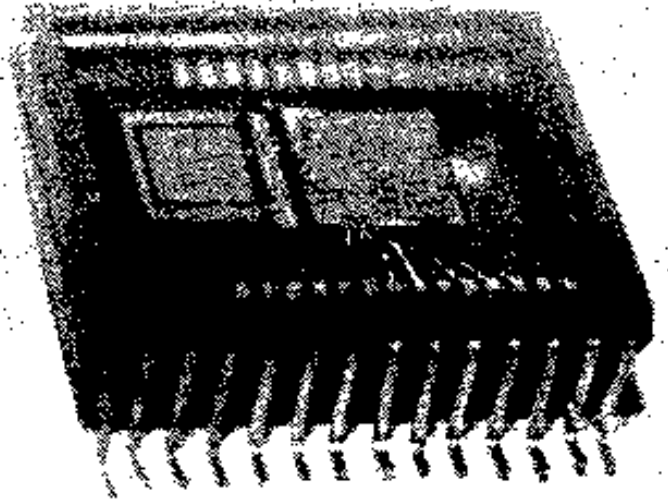
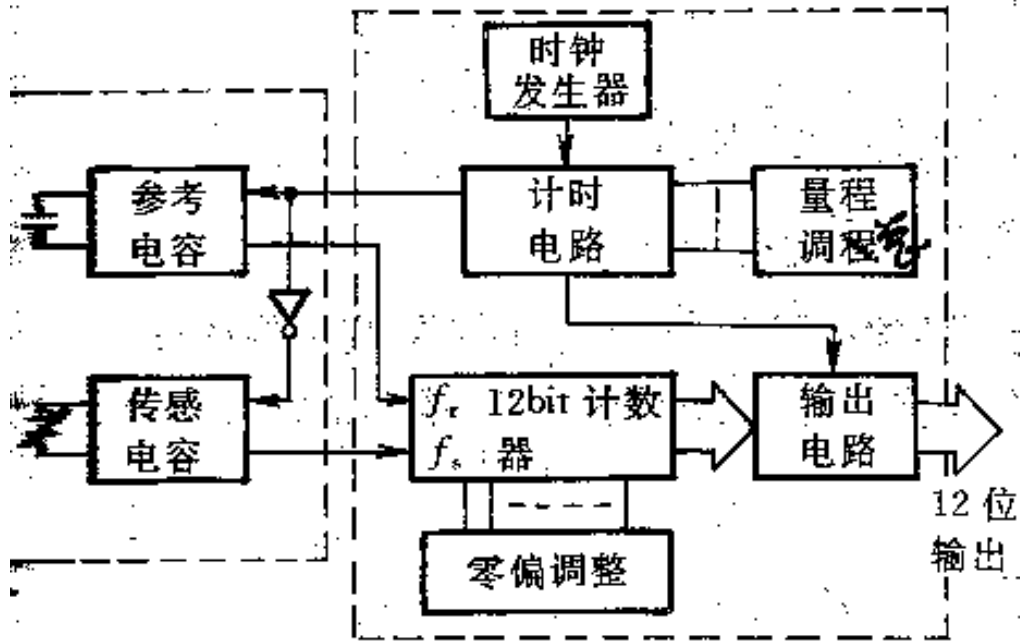
指导思想：先在结构上进行补偿，然后通过后续电路进行补偿。





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

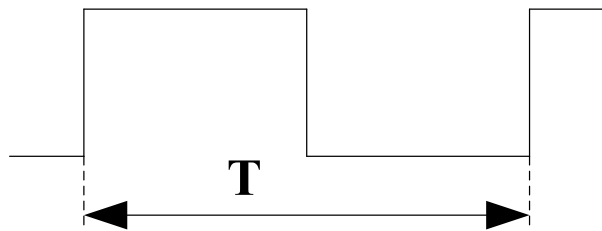
5) 传感器的制作工艺

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。



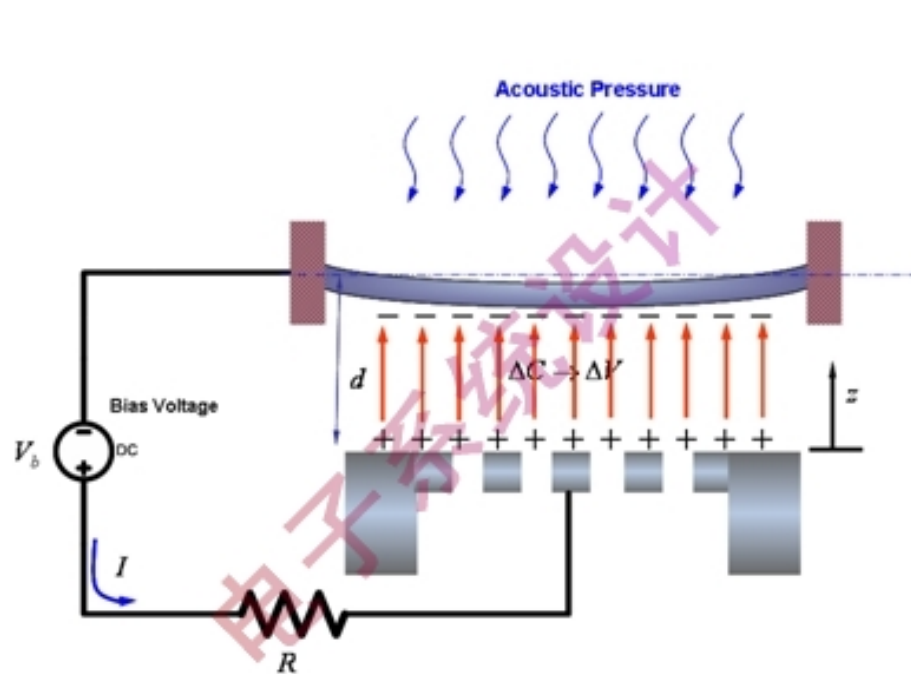


图1：电容式微麦克风原理。

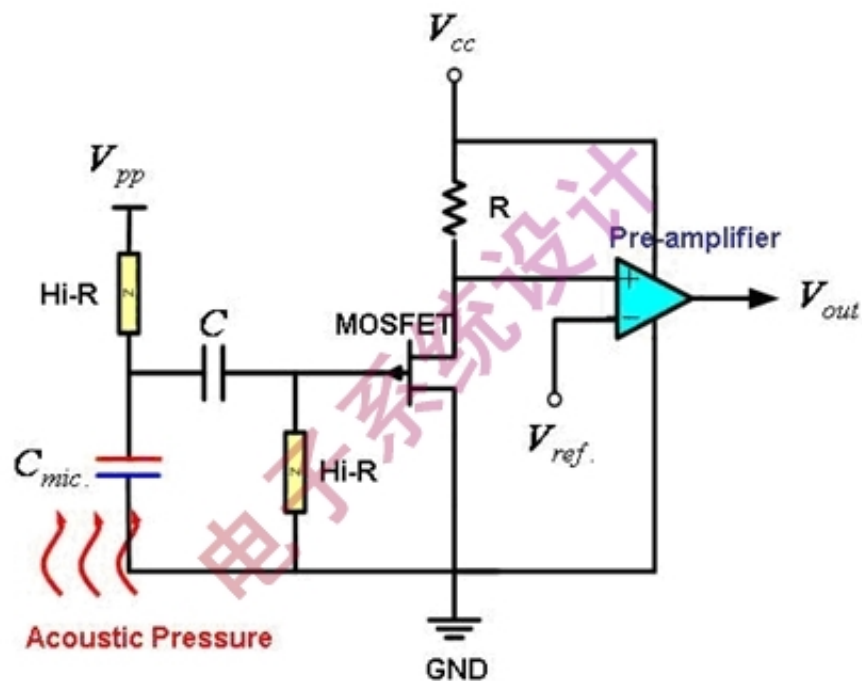


图2：微麦克风电路设计简图。

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 $\pm 0.2\%FS$ （25℃）。





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: $0 \sim 210\text{kgf}/\text{cm}^2 = 22\text{Atm}$

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

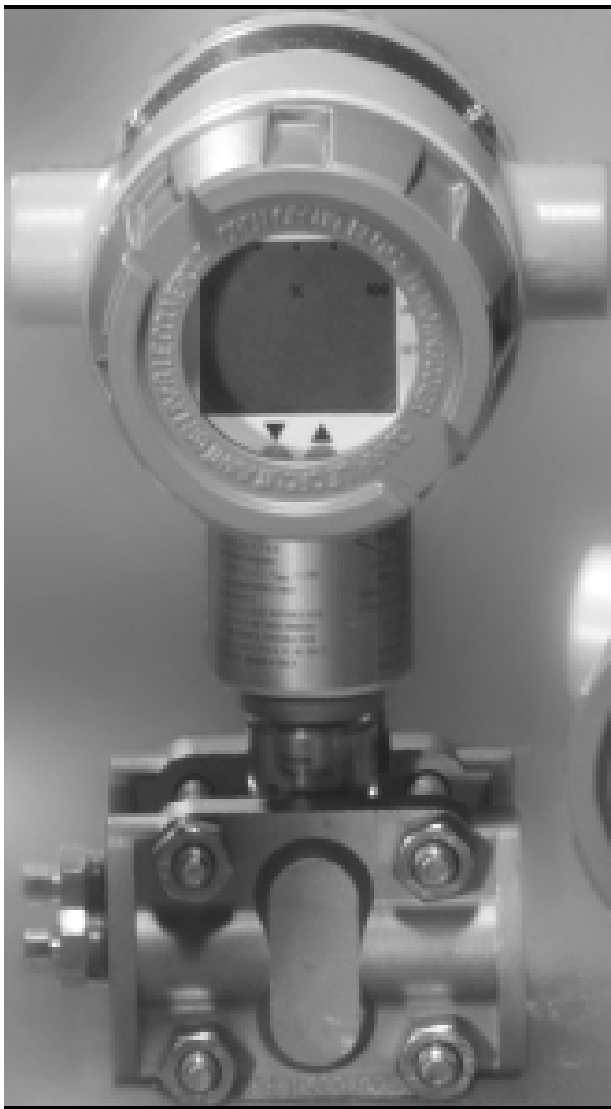
- 1) 组态：根据需要进行各种参数的预置（量程、输出单位、输出形式）
- 2) 诊断：前面已作过简单介绍
- 3) 校验：校验输出或整定零点。实际上现在已可以做到自整定。
- 4) 显示：显示有关信息，以便了解系统情况。
- 5) 远距离调节。

§ 3.3.2 具有微处理器（MCU）的单片集成压力传感器

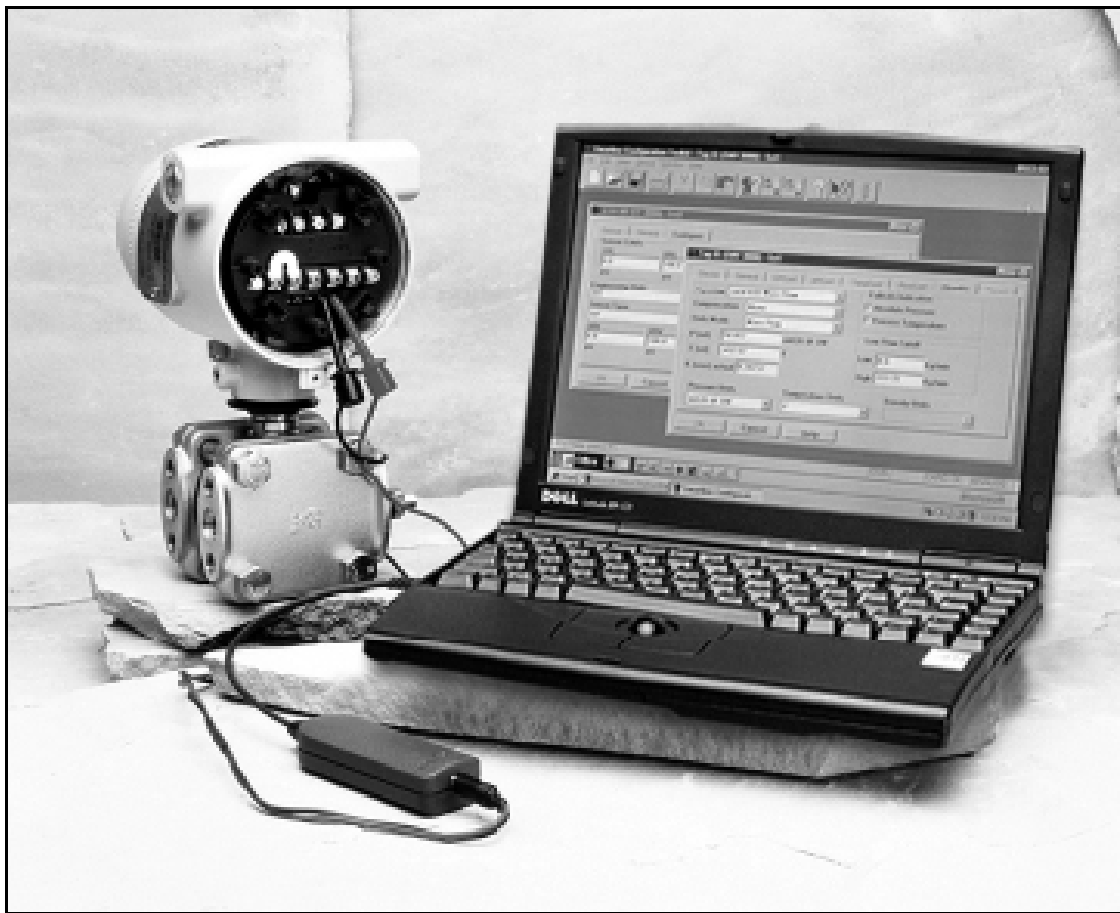
这一部分的内容与前面讲的内容大同小异，这里就不作介绍了，大家可以自己看一看参考教材，有什么问题可以提出来探讨。

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



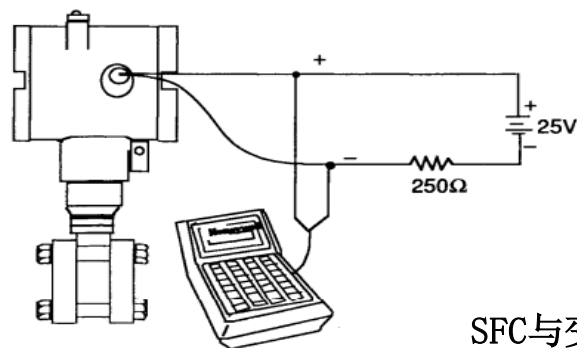
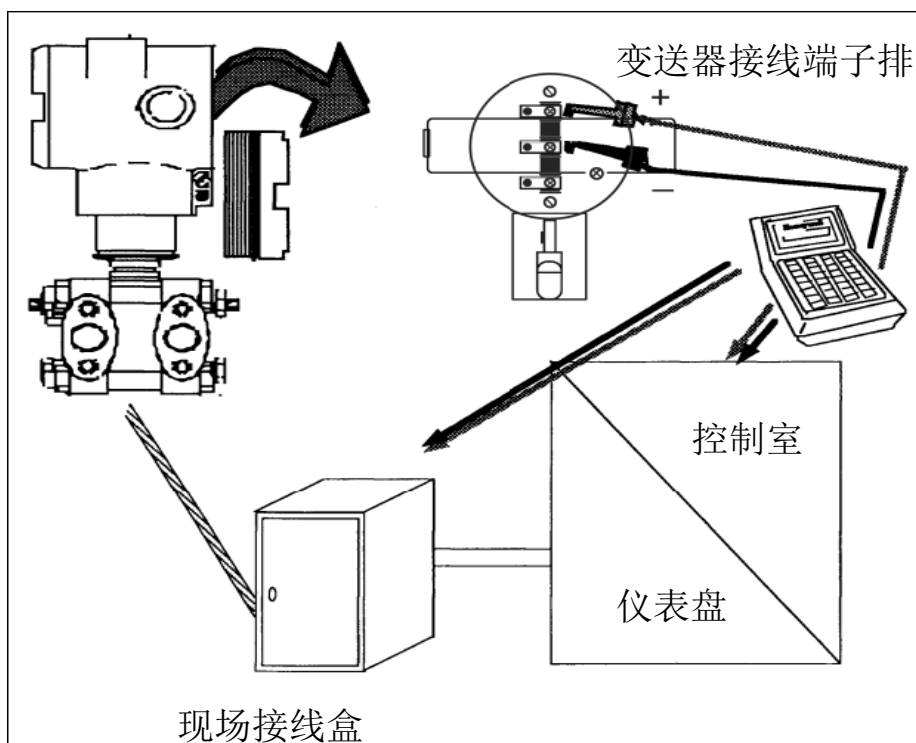
MCT多协议通讯器





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

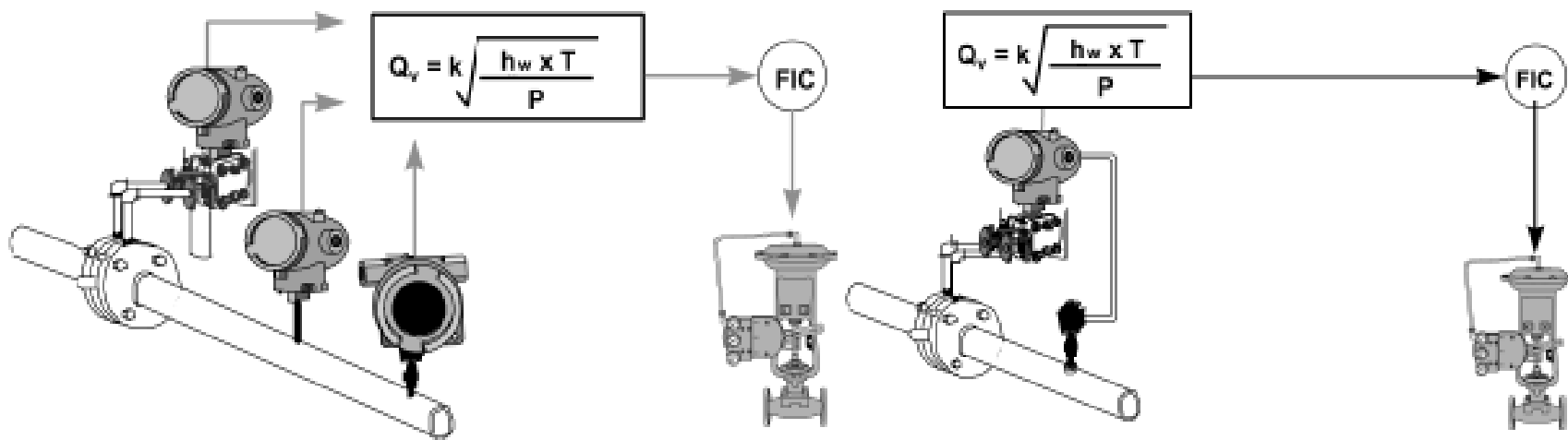


SFC与变送器信号线连接示意图





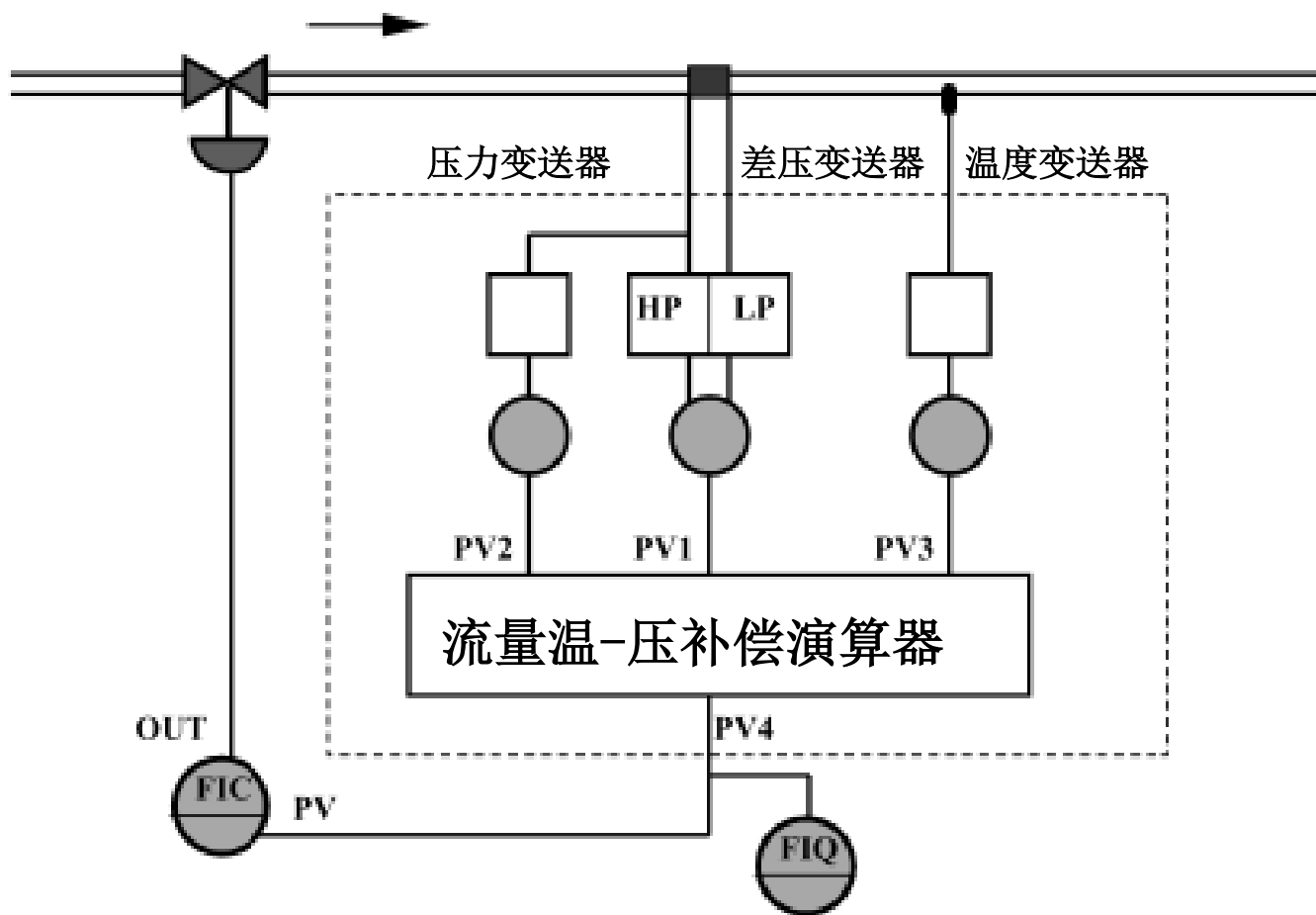
基于SMV3000/100系列全智能多变量变送器的流量测量



传统流量测量方法

多变量变送器流量测量方法





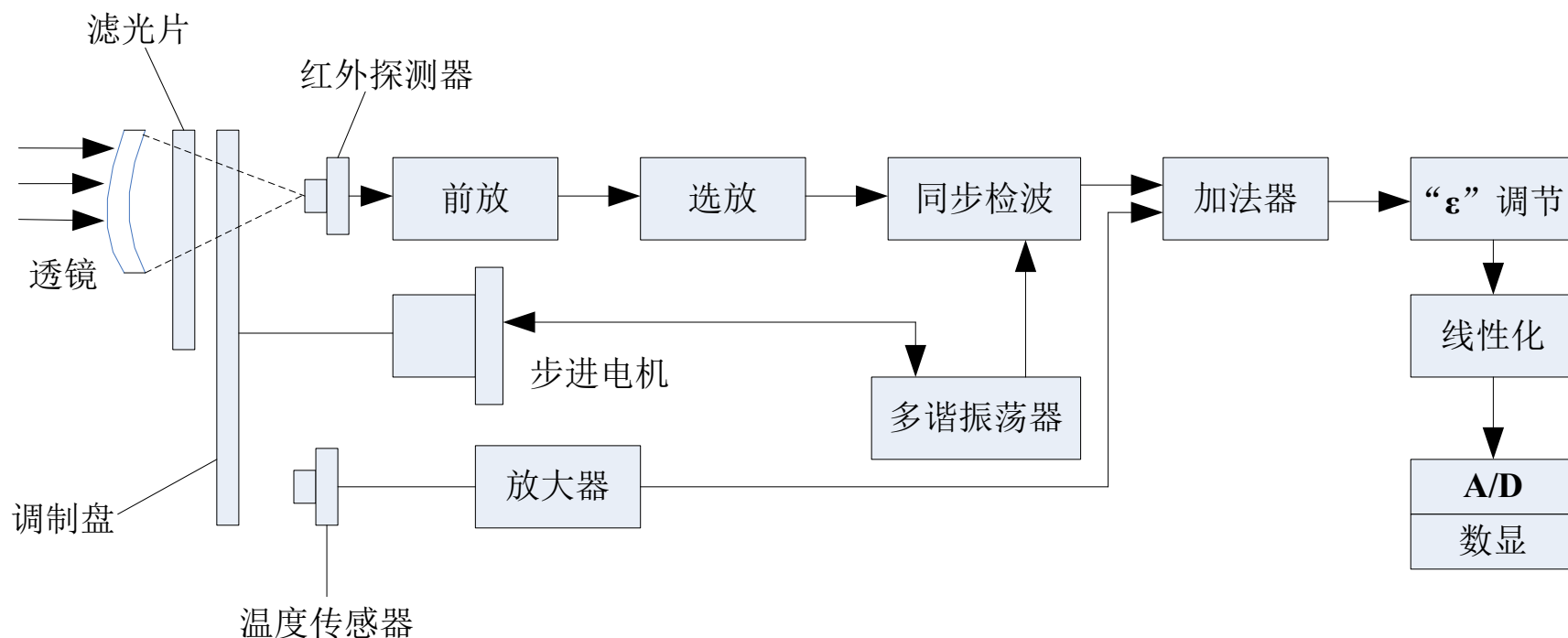
多变量变送器流量测量原理





1、传统的红外测温仪

1) 结构



- a) 滤光片：允许一定波长（ $8\sim 14\mu\text{m}$ ）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 $\varepsilon = 1$ ，当被测目标不是黑体， $\varepsilon < 1$ 。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

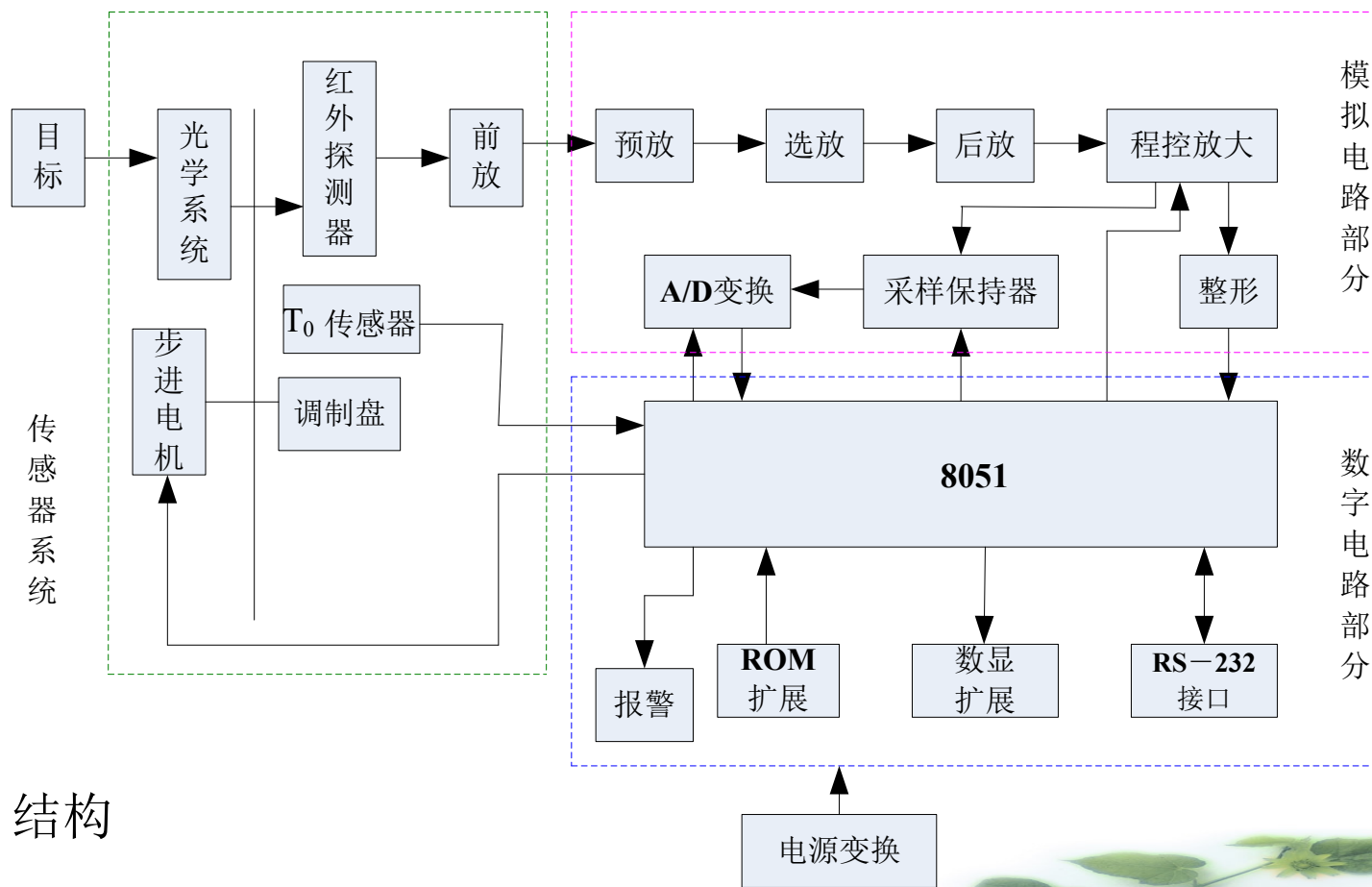
应用斯蒂芬—玻尔兹曼定律：
$$W = \varepsilon \sigma T^4$$





W : 单位面积的辐射功率; ε : 发射率, $0 \sim 1$ 之间; σ : 斯蒂芬—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

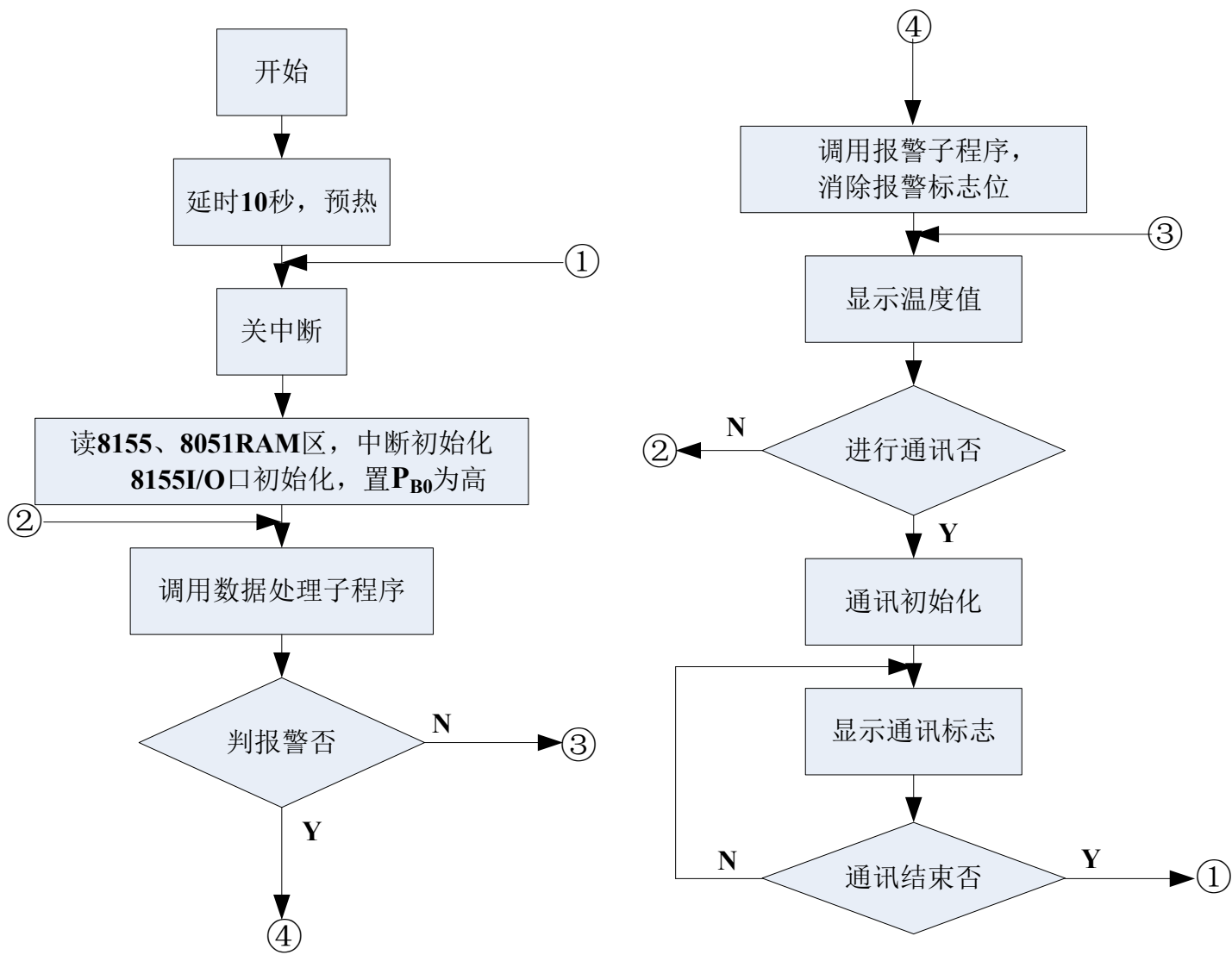


2) 功能

- 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

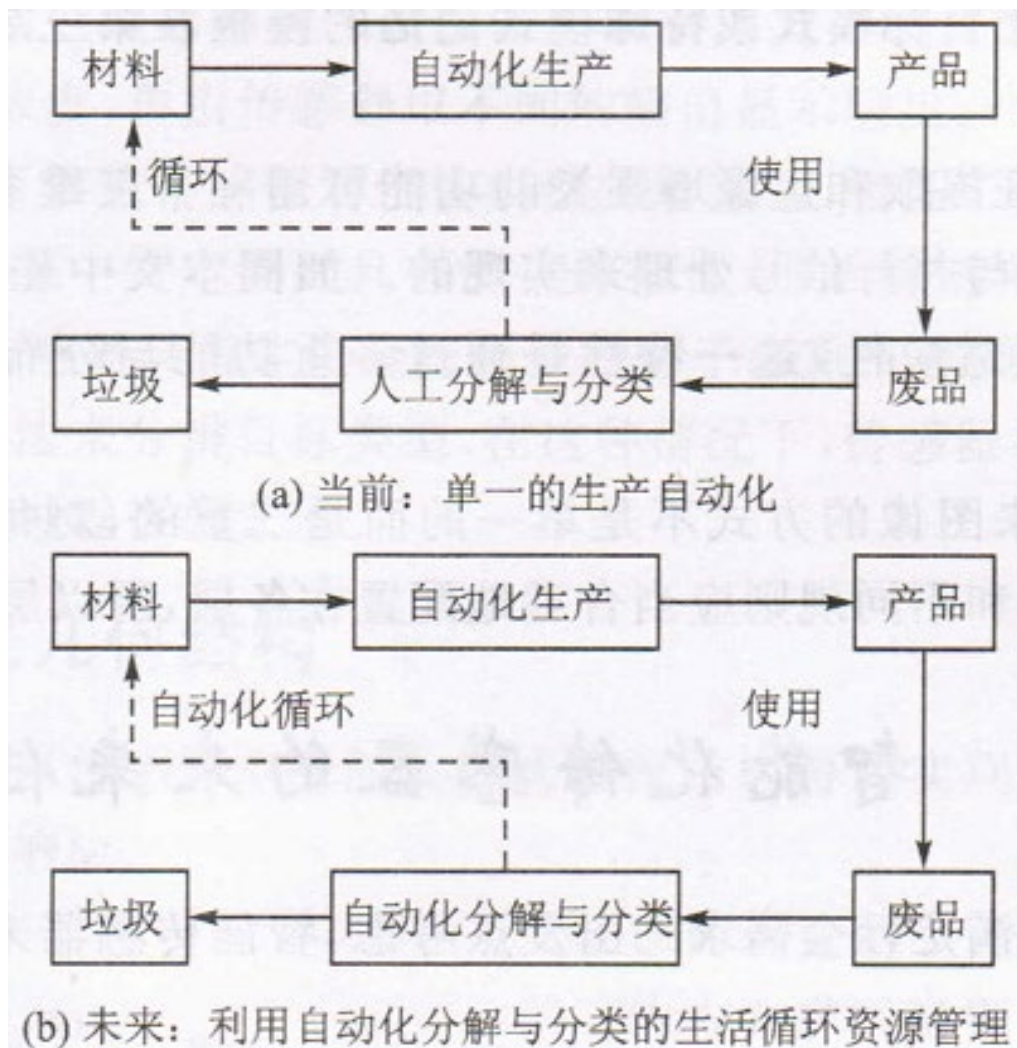
前面我们简单的介绍过高级形式的功能特点，即最终将达到和超过人类“五官”对环境的感测能力，部分代替人的认识活动；但目前已能够进行多维检测，图像显示及识别等。

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：

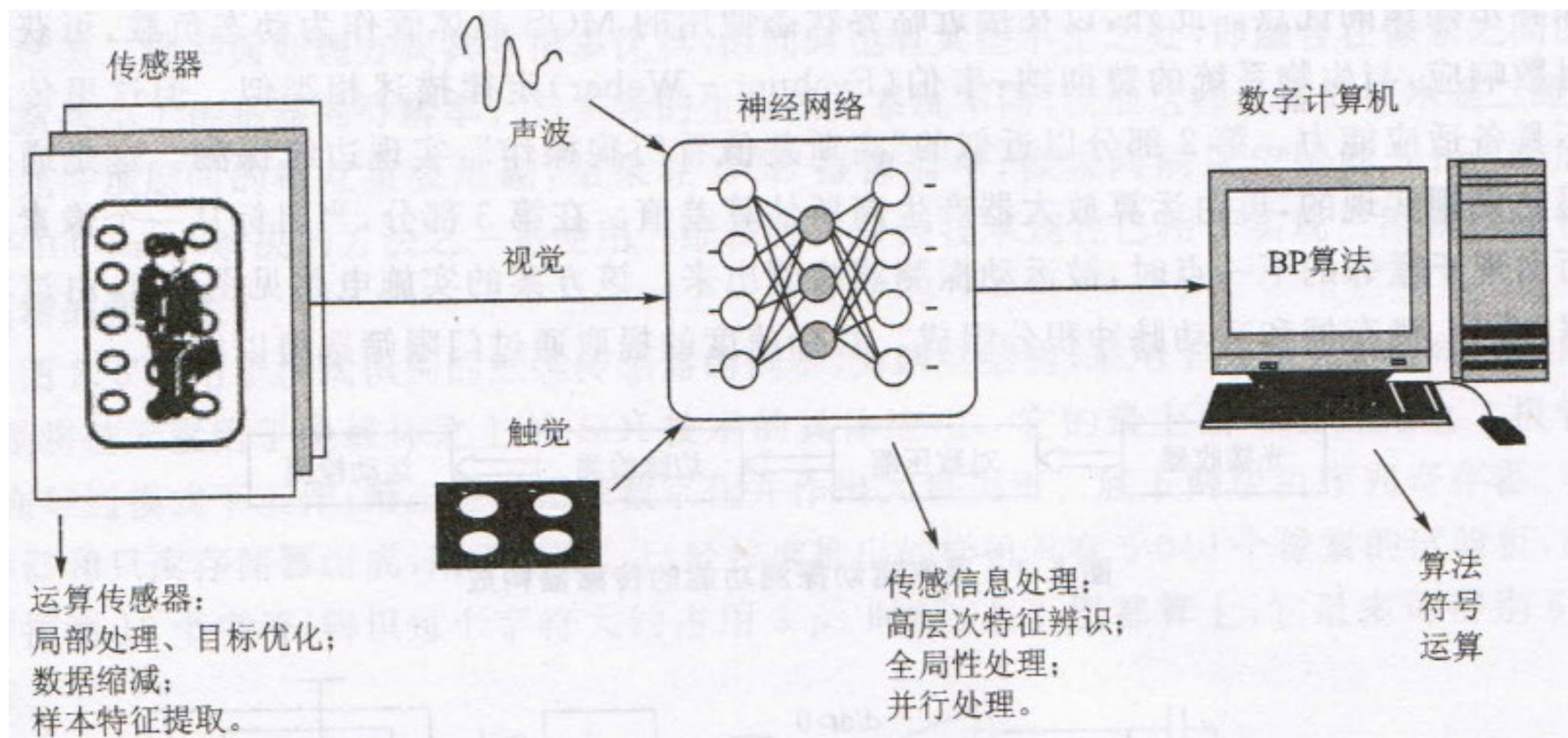
- 1) 应用机器智能的故障探测和预报；
- 2) 目标成分分析的远程传感；
- 3) 用于资源有效循环的传感器智能。





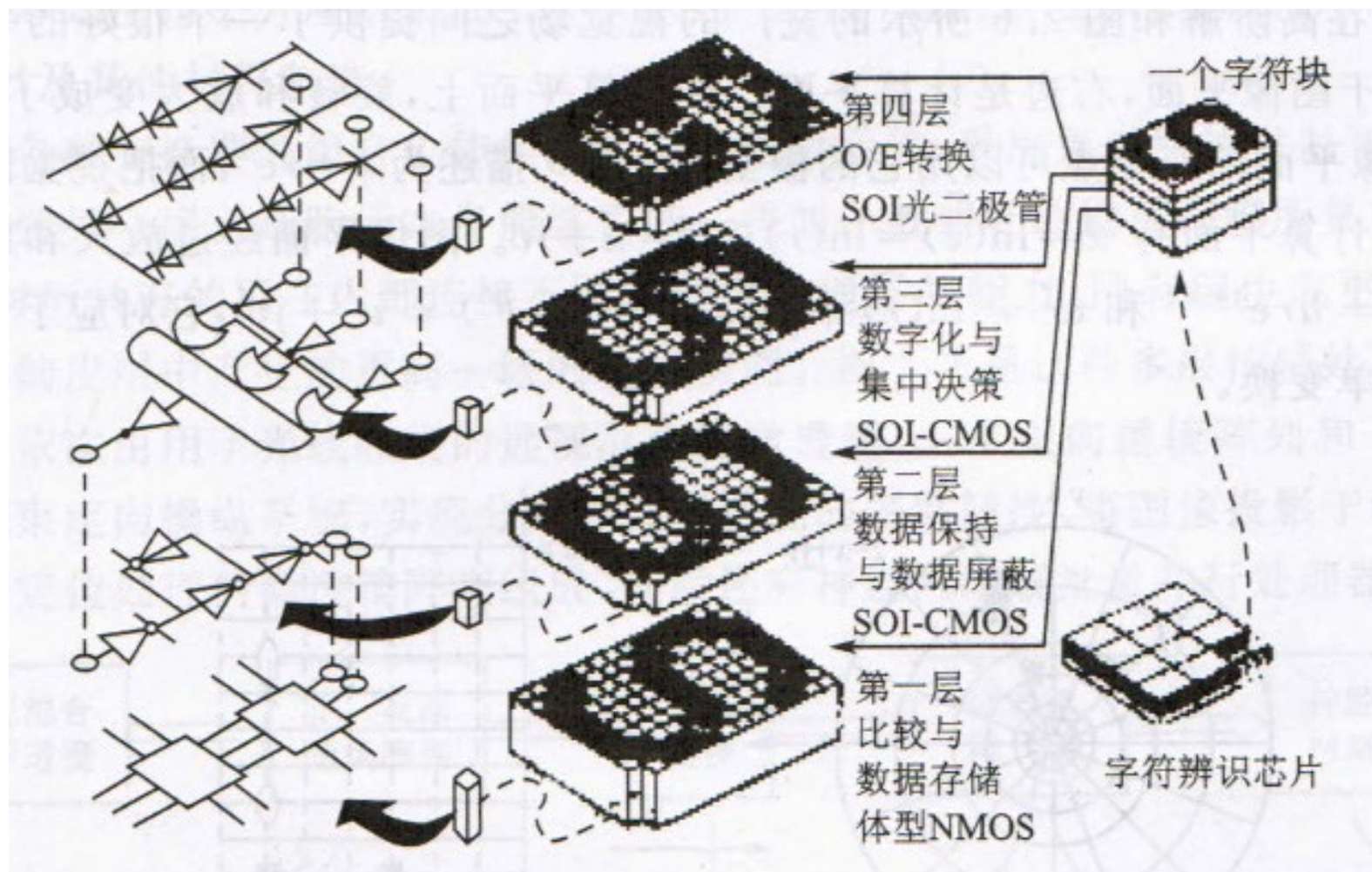
利用智能传感的先进资源循环系统





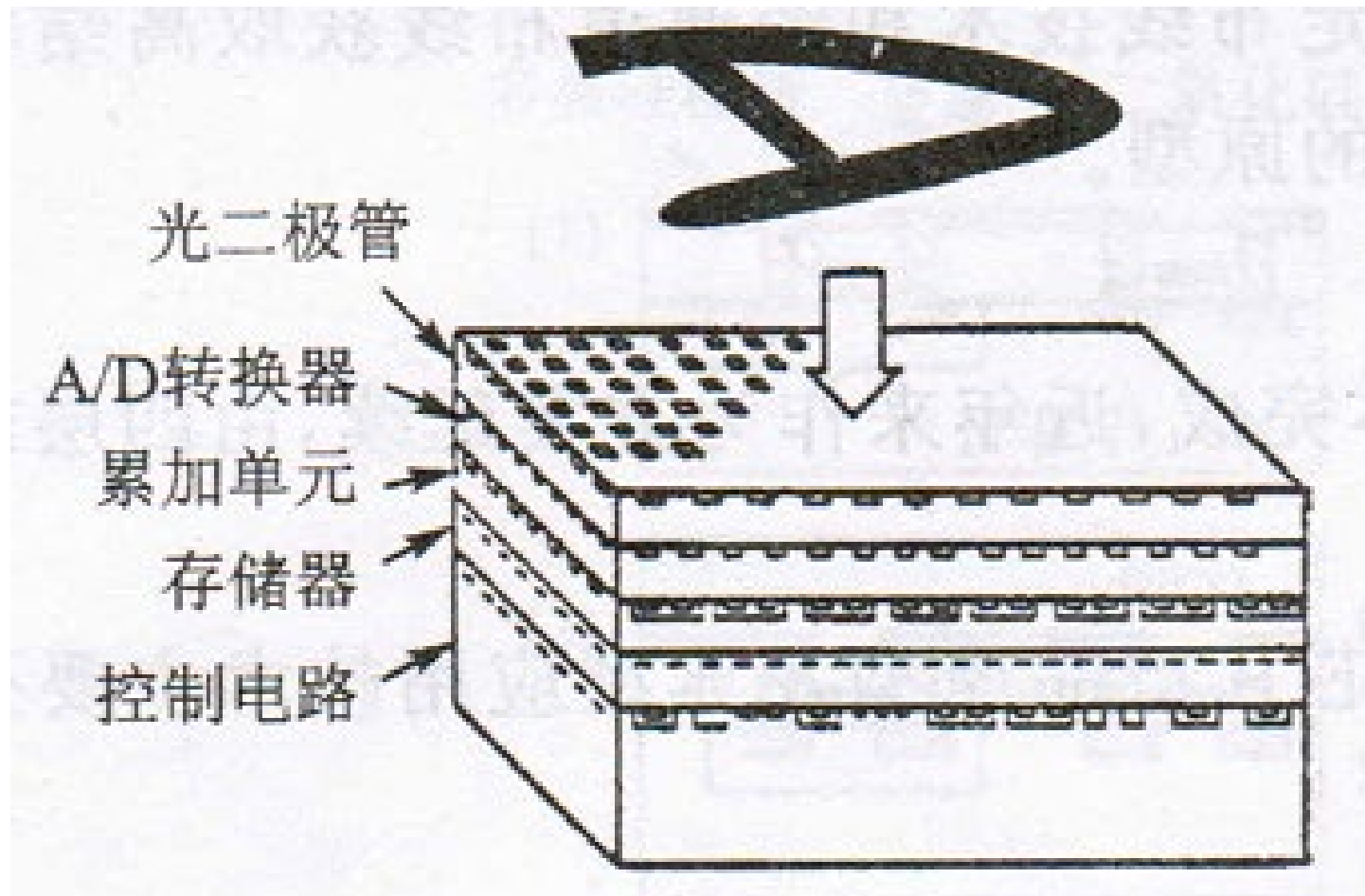
由计算型传感器、神经网络和数字计算机组成的传感处理系统





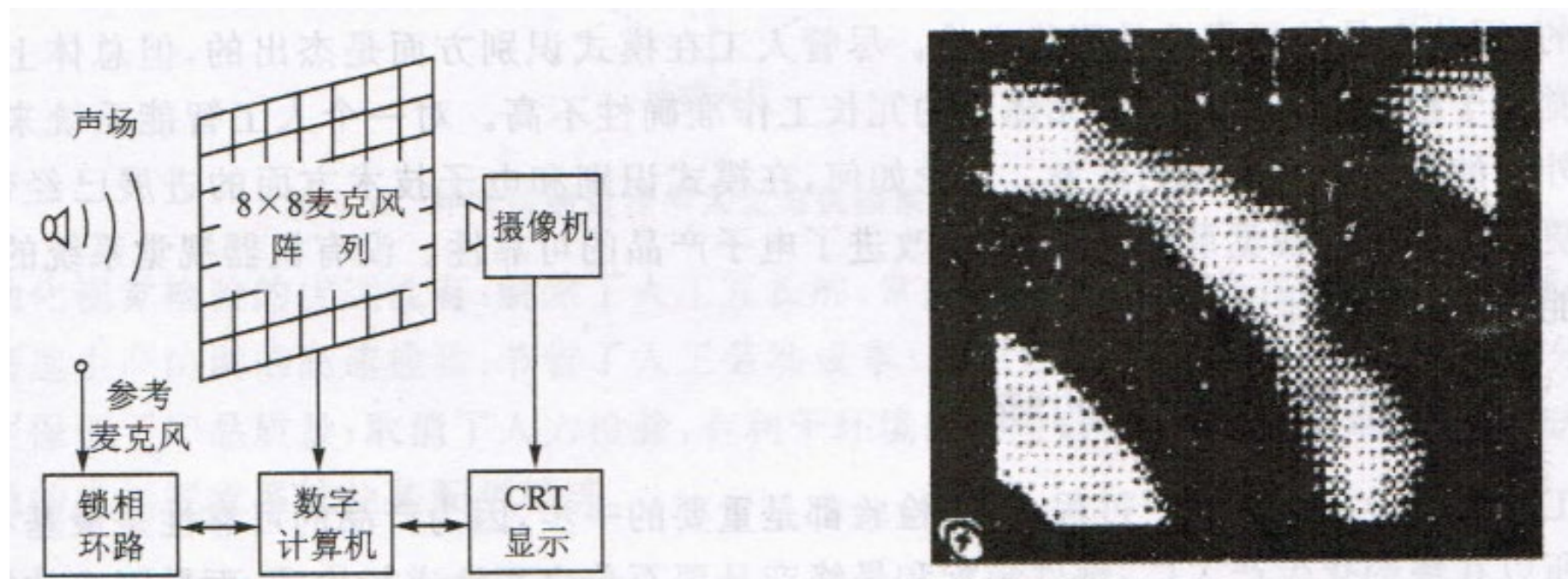
四层结构的三维字符辨识芯片示意





三维图像处理器

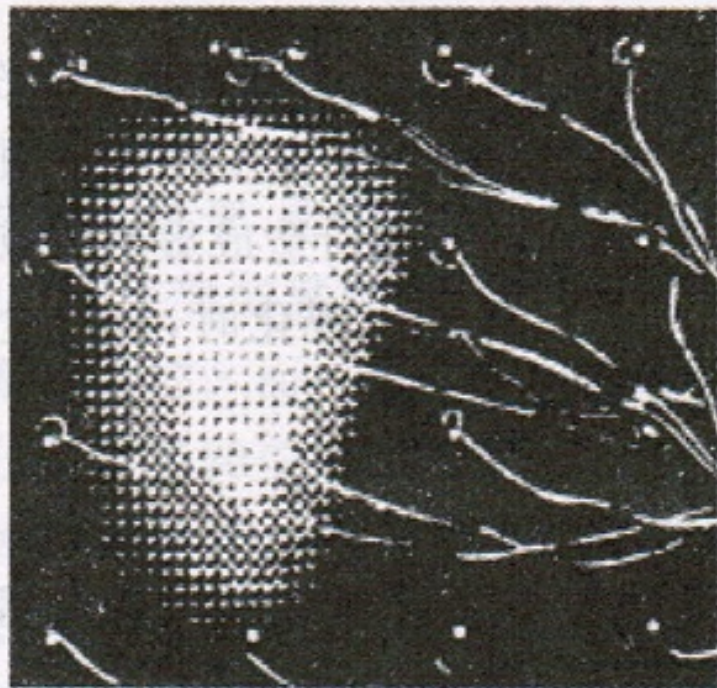




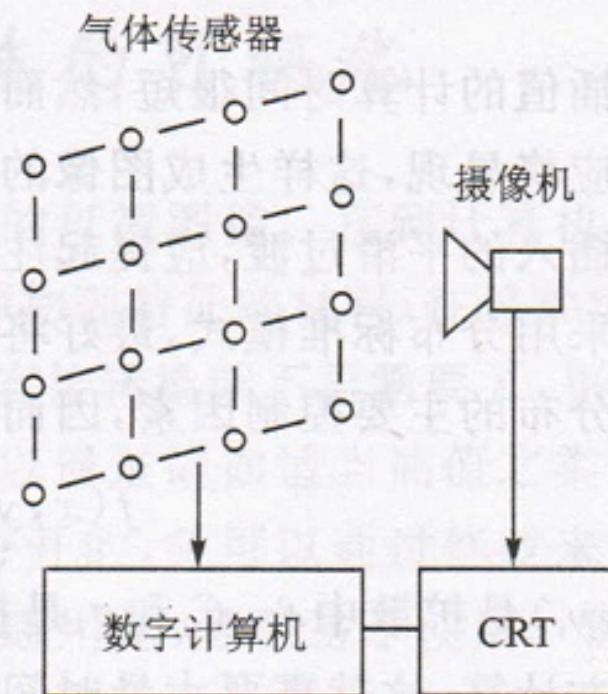
声场的可视系统

声音可视化的例子



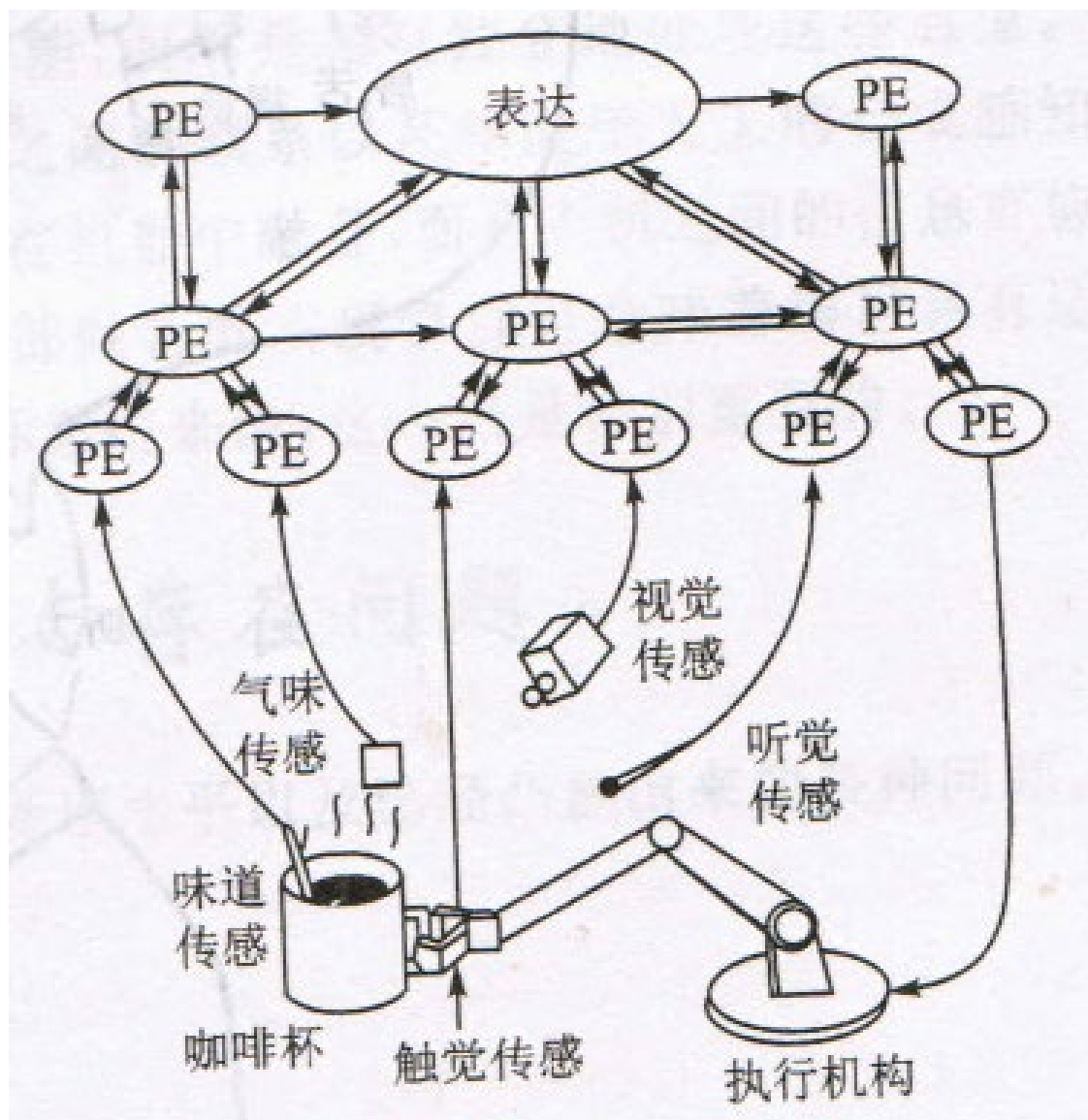


气体分布的可视化例子



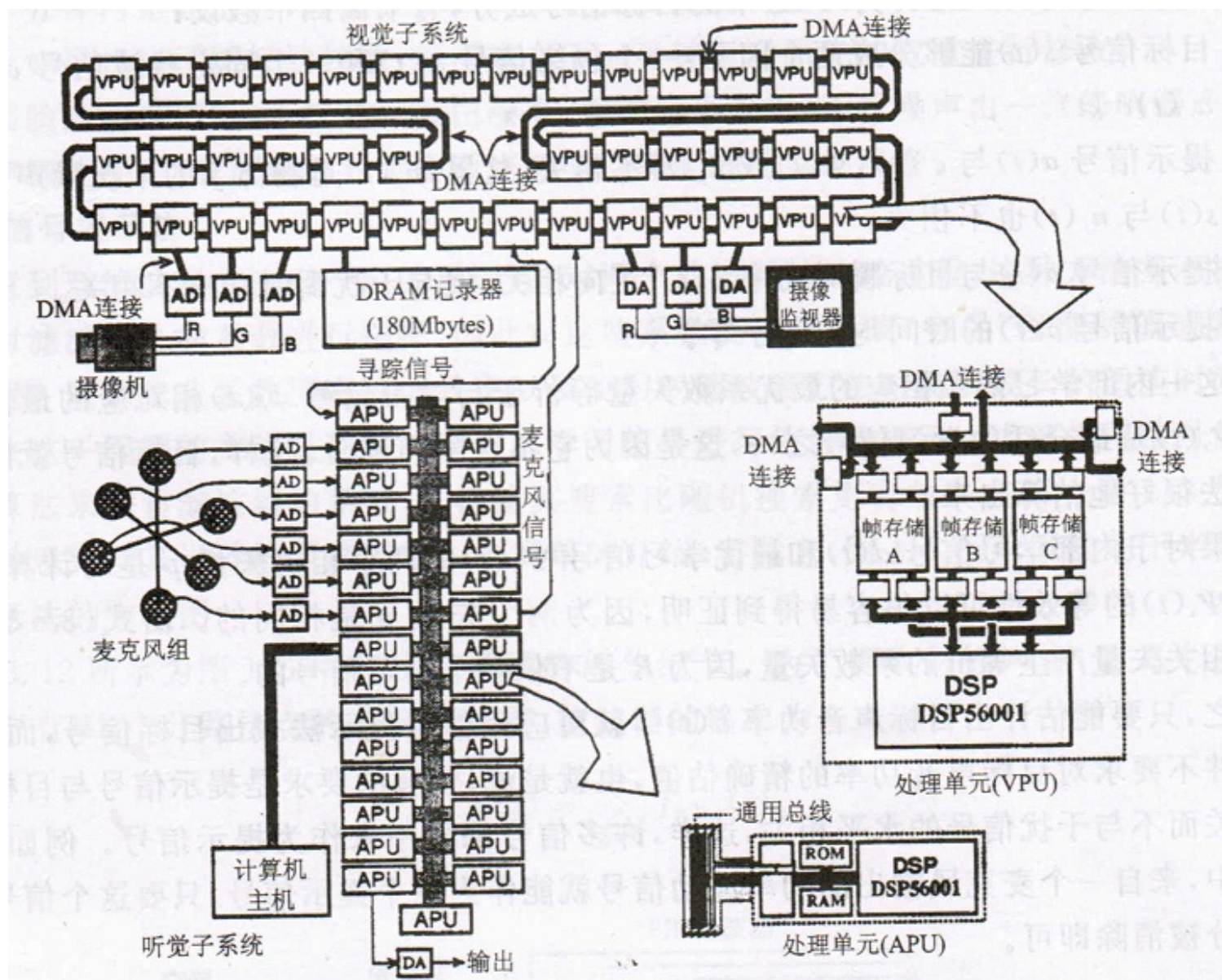
气体分布可视系统





传感器融合系统





实时传感器融合系统

