

# 现代传感器发展方向

孙圣和

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 传感器是信息系统的源头, 在某种程度上是决定系统特性和性能指标的关键部件。本文试图探讨现代传感器技术发展方向, 从概念、原理、性能和应用等层面评述了 9 种传感器: 光纤传感器、集成传感器、MEMS 传感器、模糊传感器、智能传感器、多功能传感器、模型传感器、网络传感器及生物传感器, 且每类传感器列举了应用实例。

**关键词:** 集成传感器; MEMS 传感器; 智能传感器; 多功能传感器; 网络传感器

中图分类号: TP212 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460 4025

## Development trend of modern sensor

Sun Shenghe

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Sensor is the source of information system and it is the key component which determines the characteristics and performance of the system. This paper studies the development trend of the modern sensor, and nine kinds of sensors are reviewed from the views of concept, principle, performance and application. These sensors are fiber sensor, integrated sensor, MEMS sensor, fuzzy sensor, intelligent sensor, multi-function sensor, modeling sensor, networking sensor, biological sensor. The examples of each kind of sensor are listed.

**Keywords:** integrated sensor; MEMS sensor; intelligent sensor; multi-function sensor; networking sensor

## 1 引 言

传感器是将物理、化学、生物等自然科学和机械、土木、化工等工程技术中的非电信号转换成电信号的换能器。相应的英文单词为 Sensor 或 Transducer。注意, 若在英文文献中 Sensor 和 Transducer, 甚至还有 Actuator 同时出现时, 则 Transducer 应译为“换能器”, 是指将自然科学和工程技术中的非电能量转换成电能的设备。而 Actuator 应译为“执行器”, 定义为将电信号转换成物理、化学、生物等自然科学和机械、土木工程中的非电信号的换能器或转换为实际动作(如平动、转动、通断、发光、发声、发热等)的设备。

传感器可从不同角度分类。从被测量不同, 分为几何机械量(例如尺寸、角度、表面参数、位移、速度、加速度、角位移、角速度等), 热工量(例如温度、

压力、流量、密度、黏度、质量等), 光学量(强度、功率、波长、频率、相位、速度、脉宽、延迟、折射率、束散角等), 声学量, 生物参数, 医学量(生理参数)等。从传感器的输出不同, 可分为模拟信号(连续波和脉冲波), 数字信号, 电压和电流等传感器。本文从原理和技术角度论述现代传感器。

传感器是信息系统的源头。在客观对象的测量、测试、检测、监测、分析、定位、跟踪、导航、制导、控制及健康管理等系统中, 传感器是不可缺少的且在一定程度上是决定系统性能的重要部件。因此, 无论是材料、元器件和部件, 还是系统研发者对传感器进展高度关注。传感器是科学和工程结合产物, 既依赖于科学的新现象和新规律, 又依赖于新技术和工艺。

本文组织如下: (1) 光纤传感器; (2) 集成传感器; (3) MEMS 传感器; (4) 模糊传感器; (5) 智能传感器; (6) 多功能传感器; (7) 模型传感器; (8) 网络传

感器; (9) 生物传感器; 最后是结束语。

## 2 光纤传感器

### 2.1 定义与优点

光纤传感器是利用光纤元件的传感器。与传统传感器相比, 光纤传感器具有敏感度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘性好, 便于与计算机和被测实物连接, 结构简单、体积小、重量轻、耗电少、适合于有毒有害、防火防爆环境及远程分布场合应用等优点。

### 2.2 分类

光纤传感器有很多分类方法。按照工作原理不同可分为功能型和非功能型。功能型光纤传感器是利用光纤作敏感元件, 基于光纤的物理效应, 被测量调制光纤参数, 再调制光纤中的光波参数, 故也称为传感型或全光型光纤传感器。图 1 为这种传感器的原理示意图。非功能型传感器是利用其它敏感元件感受被测量的变化, 且敏感元件参数调制光波参数, 光纤只作为传输介质, 传输来自远处或难以接近场所的光信号, 故也称为传光型或混合型光纤传感器。

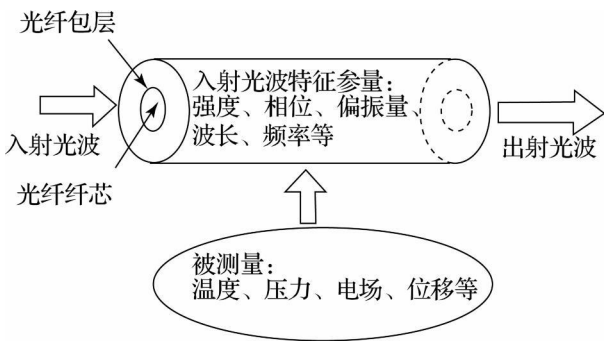


图 1 功能型传感器原理示意图  
Fig. 1 Scheme of functional sensor

按被测量不同可分为光纤温度传感器、光纤位移传感器、光纤浓度传感器、光纤电流传感器、光纤流速传感器等。

不管功能型或非功能型光纤传感器, 被测量都要直接或间接调制光波参数, 按调制的光波参数不同, 光纤传感器可分为光强调制型、相位调制型、频率调制型、偏振调制型和波长(颜色)调制型光纤传感器。表 1 列出了功能型和非功能型 5 种光调制传感器的调制机理和解调方式。

表 1 按被调光波参数不同光纤传感器分类

Table 1 Classification of fiber sensors according to the modulated parameters

	传输型调制机理	功能型调制机理	解调方式
光强调制型	光束切割、光闸、松耦合、物理效应等	微弯损耗、变折射率、变吸收特性、变模耦合特性、荧光效应等	光电探测器、光功率计
相位调制型	利用被测量改变被测光相对参考光的光程差、Sagnac 效应	力应变效应、热应变效应、弹光效应、热光效应	干涉法——将光相位信号转换成相应的光强信号
偏振调制型	利用被测量改变某些透明介质的自然旋光特性进行偏振调制	利用磁光效应、弹光效应等实现对光波偏振态的调制	将光偏振态的变化转换为光强信号或转换为光相位移
波长调制型	利用被测量改变 F-P 干涉腔长度或进行波长选择	光纤光栅	光谱分析法、波长扫描法、光学滤波法、非平衡 M-Z 干涉法
频率调制型	利用被测量调制多普勒频率		干涉检测法: 零差法、外差检测多普勒频移等

### 2.3 光纤光栅

目前, 光纤传感器的热点是光纤光栅传感器。这种传感器利用光纤光栅作敏感元件。光纤光栅是利用掺杂光纤(如掺锗、掺磷等)的光敏特性, 使光纤折射率沿轴向周期或非周期变化。光纤光栅的作用可等效为纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤光器或发射镜。光纤光栅种类很多, 折射率沿轴向周期均匀变化的光栅称为光纤布拉格光栅(FBG)。图 2 表示 FBG 传感器原理。反射光波波长与栅距

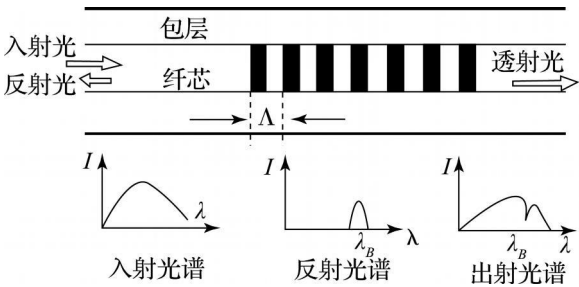


图 2 FBG 原理示意图  
Fig. 2 FBG Scheme

$\Lambda$  的关系如式 (1) 所示

$$\lambda = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

式中:  $n_{eff}$  为光栅的等效折射率。当压力、温度等被测量作用于光栅时, 则引起  $\Lambda$  或  $n_{eff}$  变化, 从而调制反射光波长。

## 2.4 应用实例

光纤传感器可探测的物理量很多, 已应用的光纤传感器可测量近百种物理量。例如, 压力、水声、应变、表面粗糙度、振动、位移、加速度、温度、流量、电磁场强度、大电压、大电流、辐射强度、体温、胎压、血流、血液成分、血气成分、大气成分等。本文列举几种光纤传感器。

### 1) 光纤陀螺

基于光波调制效应, 利用光纤测量几何量和机械量的传感器很多。光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的光波相位调制测量角速率的传感器, 图 3 表示 Sagnac 效应。

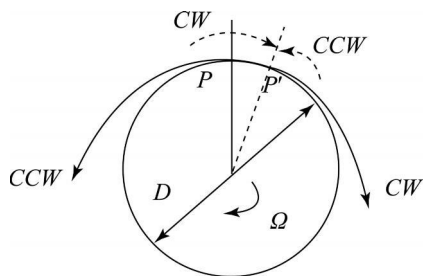


图 3 Sagnac 效应示意图

Fig. 3 Scheme of Sagnac effect

假设有一匝如图 3 所示的直径为  $D$  的光纤线圈, 且在  $P$  点入射方向相反的两束光波, 通过光纤线圈后在  $P$  点可得到方向相反的两路出射波。如果线圈不动 ( $P$  点不动), 即角速度  $\Omega = 0$ , 则两路光波同时到达  $P$  点, 即无时间差和相位差。如果线圈顺时针转动 ( $P$  点到达  $P'$  点), 则顺时光波行进的路程大于逆时光波路程, 故顺时光波迟后到达  $P'$  点, 因此两路出射波产生了时间差和相位差, 这种现象叫做 Sagnac 效应。理论分析可得到,  $N$  匝线圈产生的两路出射光波的相位差公式如下:

$$\varphi_s = \frac{2\pi n^2 L D}{C \lambda} \Omega = K_s \Omega \quad (2)$$

式中:  $K_s$  为 Sagnac 陀螺标定系数;  $L$  为  $N$  匝线圈长度;  $n$  为光纤折射率;  $C$  和  $\lambda$  分别为光波在真空中的速度和波长。由上可见, 加大  $D$  和增加光纤线圈匝数  $N$  可提高此种光纤陀螺仪的灵敏度。

### 2) 光纤磁场传感器

光纤磁场传感器分两大类: 基于法拉第旋光效应和磁致效应传感器。法拉第旋光效应是磁场使介质具有旋光性的效应, 也称为磁光效应。具体地说, 是一束偏振光通过位于磁场中的旋光介质时, 其偏振面发生旋转的现象, 故也称为磁偏振效应。图 4 表示这种传感器原理图。起偏器将输入光波变成偏振光, 位于磁场中的法拉第 (磁偏振) 介质使偏振光随磁场强度旋转, 检偏器可检测出偏振光旋转角度, 因而测出磁场强度。

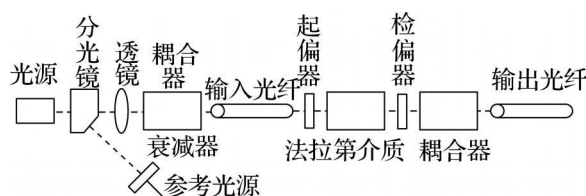


图 4 基于偏振效应的磁场传感器

Fig. 4 Polarization based magnetic field sensor

磁致伸缩效应是磁场引起位于其中的磁性材料产生伸缩变形现象。若在光纤上被覆或粘合磁致伸缩材料, 则在磁场作用下被覆这种材料的光纤会产生纵向、横向和体应变, 从而使通过光纤的光波产生相移。通过干涉技术检测出相位变化, 即可测得磁场强度。图 5 表示光纤被覆或粘合磁致伸缩材料的结构形式。

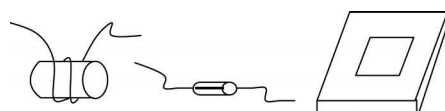


图 5 光纤磁场传感器敏感元件的基本结构

Fig. 5 Sensing elements of fiber magnetic field sensor

### 3) 光纤电流传感器

电力系统的大电流可利用光纤被覆金属材料、磁致伸缩材料和压电材料等方法构成光纤电流传感器。

金属被覆的单模光纤传感器如图 6 所示, 它利用热致伸缩效应 (即热胀冷缩现象)。通电流时铝护套发热, 使光纤发生变形, 进而光波产生相位变化。

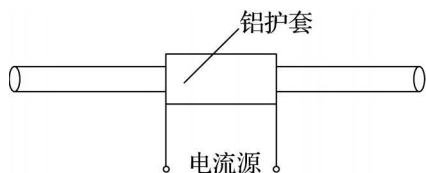


图6 光纤电流传感器示意图

Fig. 6 Scheme of  
fiber current sensor

## 4) 光纤血气分析传感器

光纤传感器具有体积小, 电绝缘性好, 不受电磁干扰, 与被测生物体亲和性好等优点, 在医学诊断与监护中广泛应用。光纤温度计有强度调制型和波长调制型。前者原理是使入射光通过液晶、双折射晶体、荧光材料和液体介质等, 由于这些介质的反射率、双折射率、荧光效应、折射率均是温度的函数, 故出射光强度被温度调制。后者也是使入射光通过半导体或液体等物质, 利用它们的光谱吸收或热色效应与温度有关的特性, 将被测温度变化转换成波长变化。光纤体压传感器主要用来测量心血管、肠胃等器官和泌尿系统及生殖系统压力的传感器。按原理可分为薄膜型和光弹型光纤体压传感器。前者将被测压力转换成膜片变形, 再调制入射光强度。后者利用光弹效应, 即材料的弹性应变引起光折射率改变的效应。具体地说, 被测压力引起光弹材料应变, 进而调制通过光的强度。光纤血流传感器是基于光多普勒效应。它是指波源与观察者的相对位置发生变化时, 观察者观测到的波源频率发生变化的效应。具体地说, 激光照射到流动的血液时, 探测器接收到的反射波或散射波频率与激光源发射波频率不同, 频率差正比于径向速度, 因此测得多普勒频率即可测得血流速。

在病人监护或手术过程中经常需要连续地实时监测人体内血气值的变化。血气值主要有氧分压( $pO_2$ )、二氧化碳分压( $pCO_2$ )和酸碱度(pH值)。图7示出血气探头结构图。包括3个单光纤传感器和一个热电偶。3个光纤探头分别测量pH值、 $pCO_2$ 和 $pO_2$ 。热电偶直接测量探头尖端的血液温度, 以便将实际体温下测得的pH值、 $pCO_2$ 和 $pO_2$ 值换算到诊断需要的标准温度 $37^\circ\text{C}$ 时的血气值。光纤pH值传感器是以染料指示剂为基础的。酚红染料试剂是具有两种可逆状态的指示剂。两种状态是基本状态和酸化状态, 每种状态有不同的光吸收

谱线, 基本状态吸收绿光谱线, 酸化状态吸收蓝光谱线, pH值是由酚红试剂对绿光或蓝光光谱的吸收量来决定的。图8表示pH值传感器探头结构图。两根光纤插入装有试剂的半透膜套管中, 密封胶防止染料试剂与被测物直接混合。血液的酸碱性物质渗透到酚红中, 直接影响其对入射光的吸收量。 $pO_2$ 的测量是基于染料二次发光的荧光效应。在染料试剂与血液中的氧充分接触时,  $pO_2$ 变大, 则染料的荧光衰减就大。因此, 测量染料荧光强度大小, 就可测得 $pO_2$ 大小。图9示出 $pO_2$ 探头结构图。荧光材料吸附在支撑物上并装入孔状聚乙烯管中。管一端封闭并形成封闭尖点, 另一端装入两根可弯曲的光纤, 并将其末端置于荧光染料中。当蓝光通过光纤传至荧光染料时, 染料被激发到荧光态, 于是绿色荧光体随着散射的蓝光进入接受光纤, 传输到测量仪器。绿荧光强度 $I$ 表示 $pO_2$ 的大小, 而蓝光 $I_0$ 用作补偿光源稳定性的参考光。

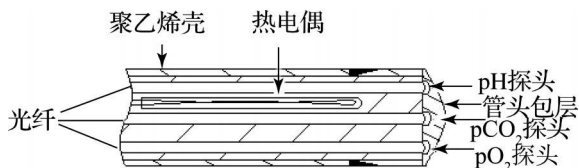


图7 血气探头结构图

Fig. 7 Probe of gas in blood

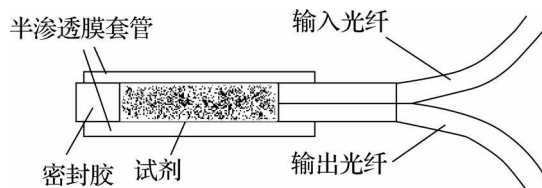
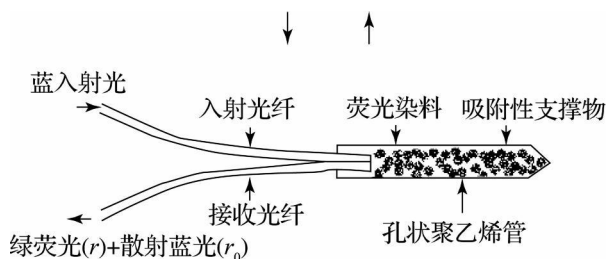


图8 pH值传感器探头结构图

Fig. 8 Probe of pH sensor

图9  $pO_2$ 探头结构图Fig. 9 Probe of  $pO_2$  sensor

5) 光纤二氧化碳(CO<sub>2</sub>) 传感器

由于光纤传感器体积小, 易弯曲, 适合于有害有毒、易燃易爆环境及多点分布实时监测场合应用, 故广泛用于大气污染监测。

大气的正常组分是氮气 78. 06%, 氧气 20. 95%, 氩气 0. 93%。3 种气体总量约占99. 94%, 其它气体的总和不到 0. 1%。由于火山爆发和森林着火等自然原因以及工业和交通运输产生的大量有害物质逸散到空气中, 使大气增加了许多新成分, 当其达到一定浓度时会破坏大气正常组分的物理、化学和生态平衡, 对人体、动植物以及食品、材料等产生不利的影响, 即称为大气污染。大气中有害的代表性污染物有: 氮氧化物、二氧化碳、二氧化硫、光化学氧化剂、漂尘、氰化物、有机磷化物等。

光纤二氧化氮(NO<sub>2</sub>) 传感器按原理不同分 2 类: 弹光型光纤 NO<sub>2</sub> 传感器和光谱吸收型 NO<sub>2</sub> 传感器。前者基于光声效应和弹光效应, 光声效应是光通过光声材料时产生声波的现象。具体的说, 开关调制的光波( 波长是 496. 5 nm) 通过充有 NO<sub>2</sub> 气体的光声元件时, 由于 NO<sub>2</sub> 对该光谱( 496. 5 nm) 有最大吸收量, 于是光声元件产生周期声波, 该声波压力使绕有光纤的弹光元件产生弹性形变, 进而导致光纤中传输的光波相位变化。因此, 测量光纤中光波相位变化便可测量 NO<sub>2</sub> 浓度。

光纤二氧化碳(CO<sub>2</sub>) 传感器结构框图如图 10 所示。被测的 CO<sub>2</sub> 通过渗透膜 M<sub>CO<sub>2</sub></sub>, 并与碳酸氢负离子(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 小室相连的 pH 敏感膜 M<sub>pH</sub> 的荧光物质作用。光纤的出射光照射 M<sub>pH</sub> 后产生荧光, 并被出射光纤收集。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的作用是增强荧光效率。CO<sub>2</sub> 的浓度调制荧光强度。因此, 测量荧光强度便测得 CO<sub>2</sub> 浓度。

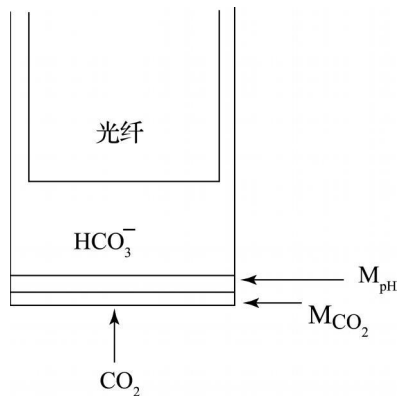


图 10 光纤 CO<sub>2</sub> 传感器结构

Fig. 10 Structure of CO<sub>2</sub> fiber sensor

3 集成传感器

3.1 概念定义与一般结构

集成传感器是利用集成电路工艺( 镀膜、掩膜、腐蚀等) 将半导体敏感元件及测量处理电路集成在一个芯片上的传感器。集成传感器的一般电路结构如图 11 所示。

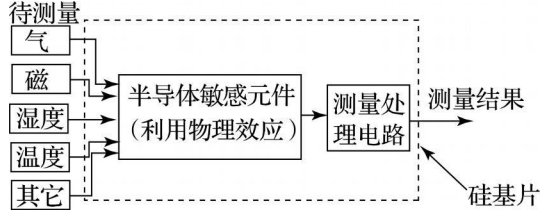


图 11 集成传感器的一般电路结构示意图

Fig. 11 General scheme of integrated sensor

半导体敏感元件是基于半导体材料和 P-N 结的物理效应将被测的非电量转换成电量。例如, 热敏、光敏、磁敏、压敏等效应。传感器输出归一化的测量信号, 由仪器完成采集、处理等操作。若将仪器的采集、处理、控制与显示等电路均集成在同一芯片上, 则称为集成仪器芯片。若将多个仪器及系统接口也集成在同一芯片上, 则称为集成测量系统芯片。

3.2 应用实例

集成传感器具有体积小、重量轻、高精度、高频响, 且可做到高可靠、长寿命、低功耗、低成本, 是一代新型传感器。目前, 已广泛用于石油、化工、机械动力、气象、地质、生物医学及航空、航天、航海等领域。

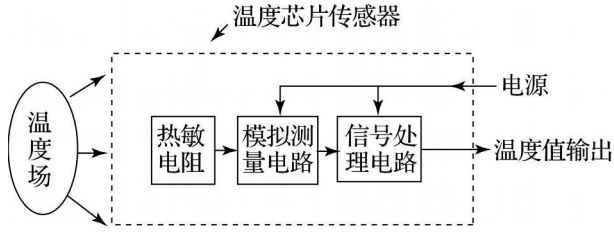


图 12 集成温度传感器组成框图

Fig. 12 Scheme of integrated temperature sensor

1) 集成温度传感器

图 12 表示集成温度传感器组成框图。热敏电阻

将被测温度转换成电阻,通过模拟测量电路的恒流源或电桥将电阻转换成电压,处理电路包括线性化、归一化、影响量补偿、甚至转换成数字量处理等功能。

## 2) 霍尔效应集成传感器

霍尔效应是美国物理学家 E. HALL 于 1879 年发现的一种新的物理效应。在一片金属薄片的上下方(垂直方向)通电流  $I$ , 在垂直于金属面的方向(深度方向)加磁场(磁感应强度为  $B$ ), 则在金属片的左右两侧(水平方向), 产生电压  $V_H$ , 这一效应称为霍尔效应。实验证明, 只要磁场不特别强,  $V_H$  和  $I$  和  $B$  成正比, 与薄片厚度成反比。

$$\text{即 } V_H = R_H \cdot I \cdot B / d \quad (3)$$

式中:  $V_H$  为霍尔电压;  $R_H$  为霍尔系数, 金属片称为霍尔元件。对给定的霍尔元件,  $R_H$  和  $d$  是已确定的, 式(3)改写成

$$V_H = (R_H / d) \cdot I \cdot B = K_H \cdot I \cdot B \quad (4)$$

式中:  $K_H$  称为霍尔灵敏度。

霍尔电压  $V_H$  通常很小, 需要放大。将霍尔元件、放大器、温度补偿电路和稳压电源等集成在一个芯片上称为霍尔集成传感器。根据传感器输出信号的形式, 将其分为“线性型”和“开关型”2种。

图 13 给出利用开关型霍尔集成传感器的开门报警器电路。这种报警器电路能检测电冰箱门的开闭。报警电路装在门框中, NS 磁铁装在门上。开关型霍尔集成传感器还可用于照明、供水等自动控制设备中, 线性型霍尔传感器可用微弱磁场测量。

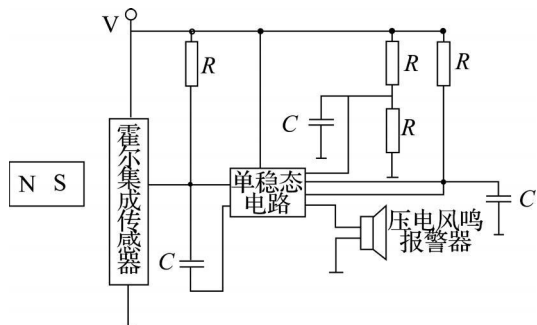


图 13 报警器电路

Fig. 13 Alarm circuit

# 4 MEMS 传感器

## 4.1 概念与结构

MEMS 传感器是利用集成电路技术工艺和机械加工方法将基于各种物理效应的机电敏感元件

件和处理电路集成在一个芯片上的传感器。MEMS 是微电子机械系统的缩写, 一般简称微机电。

如图 14 所示, 主要由微型机光电敏感器和微型信号处理器组成。前者功能与传统传感器相同, 区别是用 MEMS 工艺实现传统传感器的机光电元器件。后者功能是对敏感元件输出的数据进行各种处理, 以补偿和校正敏感元件特性不理想和影响量引入的失真, 进而恢复真实的被测量。

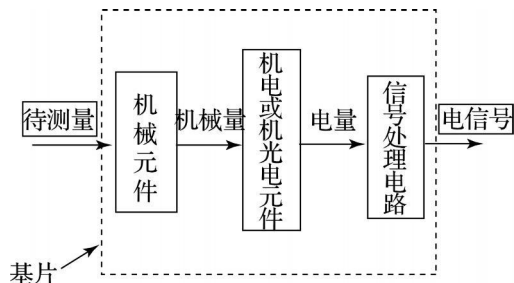


图 14 MEMS 传感器原理图

Fig. 14 Scheme of MEMS sensor

MEMS 传感器主要用于控制系统。利用 MEMS 技术工艺将 MEMS 传感器、MEMS 执行器和 MEMS 控制处理器都集中在一个芯片上, 则所构成的系统称为 MEMS 芯片控制系统。图 15 表示了 MEMS 控制系统。微控制处理器的主要功能包括 A/D 和 D/A 转换, 数据处理和执行控制算法。微执行器将电信号转换成非电量, 使被控对象产生平动、转动、声、光、热等动作。系统接口单元便于同高层的管理处理器通信, 以适合远程分布测控。

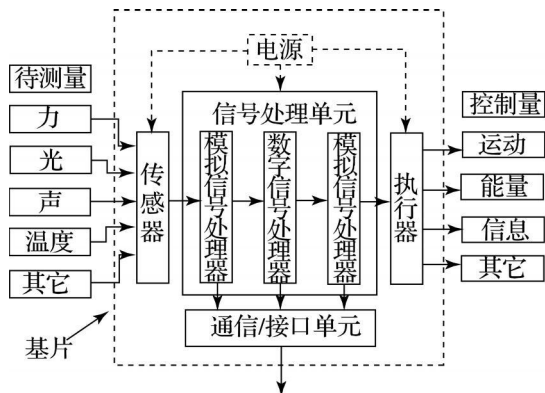


图 15 MEMS 控制系统原理框图

Fig. 15 Scheme of MEMS control system

### 4.2 应用实例

MEMS 传感器具有体积小、质量轻、响应快、灵敏度高、易批产、成本低、可测量各种物理量、化学量和生物量等优势,在航天、航空、航海、兵器、机械、化工等领域,尤其是汽车工业获得较广泛应用,且国外已形成 MEMS 产业。

MEMS 器件目前已有 MEMS 压力传感器、加速度计、陀螺、静电电机、磁力矩器、电池、多路转换开关和矩阵开关等。本文简介压力传感器和加速度计。

1) 压力传感器  
MEMS 压力传感器一般采用压阻力敏原理,即被测压力作用于敏感元件引起电阻变化。利用恒流源或惠斯顿电桥将电阻变化转化成电压。

这种传感器用单晶硅作基片,用 MEMS 技术在基片上生成力敏薄膜,然后在膜上扩散杂质形成 4 只应变电阻,再将应变电阻连接成惠斯顿电桥电路,以获得较高的压力灵敏度,其输出大多为 0~ 5 V 模拟量。一枚晶片可同时制作多个力敏芯片,易于批量生产。力敏芯片性能受温度影响,采用调理电路补偿。

2) 加速度计  
MEMS 加速度传感器基于牛顿第二定律  $f = ma$ 。敏感元件通常由一个平行的悬臂梁构成,梁的一端固定在边框架上,另一端固定一个小质量物体块(约 10 μg)。无加速度  $a$  时,质量块不运动,而当有垂直加速度时,质量块运动,对加速度  $a$  敏感的力  $f$  导致悬臂梁活动端位移。敏感元件的结构主要有悬臂梁式和梳齿状折叠梁式。前者结构简单,采用各向异性体硅材料,用半导体平面工艺,各向异性腐蚀和静电封装制作。后者可看作是悬臂梁的并、串联组合,结构设计复杂,采用各向同性的多晶硅材料,用表面牺牲层技术制作。

按位移检测方式不同, MEMS 加速度计有电阻式、电容式、隧道式、共振式、光纤式等。图 16 给出聚合物微光振动加速度传感器结构。输入光纤与一端固定在框架上的悬臂梁连接,输出光纤的光耦合器与悬臂梁活动端间有很小的气隙。当活动端有位移时,则改变耦合到输出光纤中光波强度。

## 4 模糊传感器

### 4.1 概念及结构

模糊传感器是基于模糊集理论和技术,将输入的模拟或数字被测量(即传统传感器的输出量)转换成模糊量的传感器。模糊集合论认为某元素既属于集合 A 又属于集合 B,由隶属函数值判断最终所属的集合,而经典集合论认为某元素属于集合 A 就不属于集合 B,反之亦然。

模糊传感器的原理是将被测量值范围划分成若干区间,利用隶属度值判断被测量值所处的区间,并用区间中值或相应的特定符号表示被测量值,这一过程称为模糊化。实现模糊化过程的变换器称为模糊器,或符号变换器。显然,模糊区间越小精度越高,而测量速度越慢。隶属函数的选取也影响模糊传感器的精度和速度。常选用三角函数或高斯函数等。图 17 给出模糊传感器功能结构。范围划分器提供区间端点值。模糊器计算各区间的隶属函数值,判断被测量值所属的区间,并输出表示被测量值的区间中值或相应的区间符号。组合模糊判决器将多个被测量符号进行组合判决,并依模糊判据给出最终测量结果。

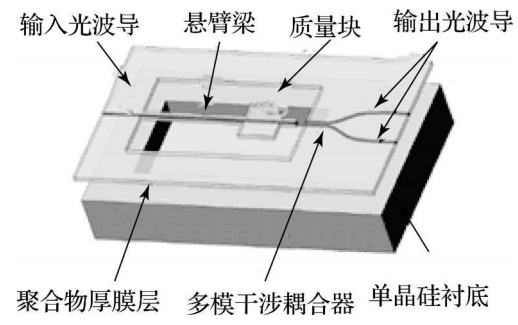


图 16 聚合物微光振动加速度传感器结构示意图

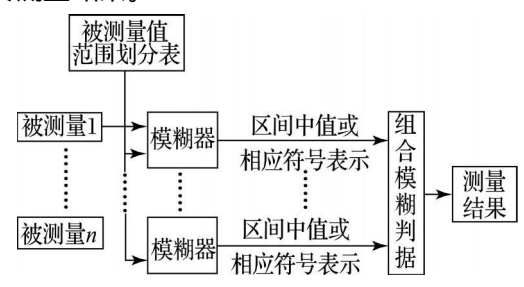


图 17 模糊传感器功能结构  
Fig. 17 Function structure of fuzzy sensor

### 4.2 应用实例

模糊传感器广泛应用于模糊控制和多因素综合评价等场合,具有速度快、设备简单、成本低、可靠性高等优点。图 18 给出基于温度、湿度的环境舒适度传

传感器功能结构。传统传感器输出的温度和湿度信号分别输入到相应的模糊器。温度和湿度设定器分别将温度和湿度分成 5 个区间。选择的隶属函数  $\mu = e^{-K(t-a)^2}$ 。组合模糊判决器按判据给出测量结果。

表 2 给出舒适度的组合模糊判据。由表可见, 舒适度有 4 种结果: 很舒适  $S_V$ 、较舒适  $S_D$ 、不舒适  $S_U$ 、很不舒适  $S_{VU}$ 。温度很低  $T_{VL}$ 、很高  $T_{VH}$  或湿度很低  $H_{VL}$ 、很高  $H_{VH}$  的任何组合都是很不舒适的, 只有温度适当和湿度适当才是很舒适的环境。当然, 描述人们生存环境的舒适度还受噪声、电磁干扰、辐射、大气污染等多种因素影响, 利用模糊传感器进行测量和控制是最佳的选择。

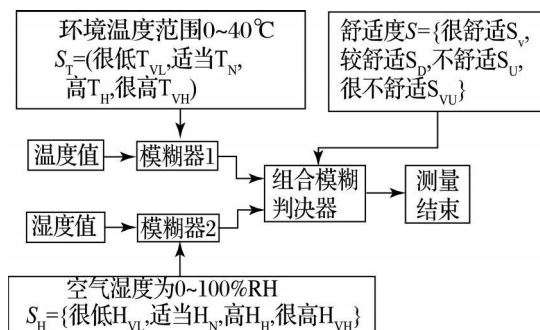


图 18 基于温湿度的环境舒适度  
模糊传感器原理框图

Fig. 18 Scheme of temperature humidity  
fuzzy sensor

表 2 舒适度组合模糊判据  
Table 2 Combined fuzzy criterion

温度	湿度				
	很低 $H_{VL}$	低 $H_L$	适当 $H_N$	高 $H_H$	很高 $H_{VH}$
很低 $T_{VL}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$
低 $T_L$	很不舒适 $S_{VU}$	不舒适 $S_U$	较舒适 $S_D$	不舒适 $S_U$	很不舒适 $S_{VU}$
适当 $T_N$	很不舒适 $S_{VU}$	较舒适 $S_D$	很舒适 $S_V$	较舒适 $S_D$	很不舒适 $S_{VU}$
高 $T_H$	很不舒适 $S_{VU}$	不舒适 $S_U$	较舒适 $S_D$	不舒适 $S_U$	很不舒适 $S_{VU}$
很高 $T_{VH}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$	很不舒适 $S_{VU}$

## 5 智能传感器

### 5.1 定义与功能

智能传感器概念最早由美国宇航局在研发宇宙飞船过程中提出来, 并于 1979 年形成产品。宇宙飞船上需要大量的传感器不断向地面或飞船上的处理器发送温度、位置、速度和姿态等数据信息, 即便使用一台大型计算机也很难同时处理如此庞大的数据。何况飞船又限制计算机体积和重量, 于是引入了分布处理的智能传感器概念。其思想是赋予传感器智能处理功能, 以分担中央处理器集中处理功能。同时, 为了减少智能处理器数量, 通常不是一个传感器而是多个传感器系统配备一个处理器, 且该系统处理器配备网络接口。

目前, 智能传感器尚没有标准化的科学定义。归纳诸多学者的观点, 笔者认为应模仿人的感官和大脑功能来定义智能传感器。本质上, 它应定义为基于人工智能理论, 利用微处理器实现智能处理功能的传感器。

智能传感器不仅具有视觉、触觉、听觉、嗅觉、味

觉功能, 且应具有记忆、学习、思维、推理和判断等“大脑”能力。前者由传统的传感器来完成。此处的传统传感器的功能结构包括敏感元件、调理电路和模数转换器(ADC), 敏感元件将描述客观对象与环境状态或特性的物理量转换成电路元件参量或状态参量, 调理电路将电路参量转换成电压信号并进行归一化处理以满足 ADC 动态范围。智能处理器应对 ADC 输出的数字信号进行智能处理, 主要智能处理功能如下:

#### 1) 自补偿功能

根据给定的传统传感器和环境条件的先验知识, 处理器利用数字计算方法, 自动补偿传统传感器硬件线性、非线性和漂移以及环境影响因素引起的信号失真, 以最佳地恢复被测信号。计算方法用软件实现, 达到软件补偿硬件缺陷的目的。

#### 2) 自计算和处理功能

根据给定的间接测量和组合测量数学模型, 智能处理器利用补偿的数据可计算出不能直接测量的物理量数值。利用给定的统计模型可计算被测对象总体的统计特性和参数。利用已知的电子数据表, 处理器可重新标定传感器特性。



3) 自学习与自适应功能

传感器通过对被测量样本值学习, 处理器利用近似公式和迭代算法可认知新的被测量值, 即有再学习能力。同时, 通过对被测量和影响量的学习, 处理器利用判断准则自适应地重构结构和重置参数。例如, 自选量程, 自选通道、自动触发、自动滤波切换和自动温度补偿等。

4) 自诊断功能

因内部和外部因素影响, 传感器性能会下降或失效, 分别称为软、硬故障。处理器利用补偿后的状态数据, 通过电子故障字典或有关算法可预测、检测和定位故障。

5) 其它的常用功能

包括用于数据交换通信接口功能, 数字和模拟输出功能及使用备用电源的断电保护功能等。

5.2 结构和实现

根据上述的功能分析, 智能传感器的一般功能结构如图 19 所示。图中没有标出影响量的传感器功能模块。

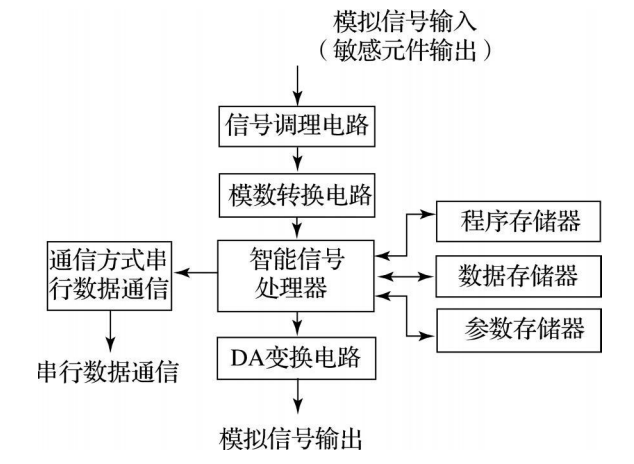


图 19 智能传感器的| 般功能 结构原理图  
Fig. 19 General scheme of intelligent sensor

智能传感器的实现方式有 3 种: 1) 模块化集成方式。将敏感元件、调理电路和微处理器都做成带标准接口的模块, 将模块集成并配备有关的智能处理软件。这种方式最经济、最快速。2) 单芯片集成方式。利用微电子微机械加工技术将智能传感器的硬件集成在一个芯片上。这种方式使智能传感器达到微型化、结构一体化, 从而提高了精度、稳定性和可靠性。若敏感元件构成阵列并配备相应的图像处理软件, 可实现二维和三维图形图像传感器, 这种智

能传感器达到了它的最高级形式。3) 多芯片集成方式。根据需求和可能, 将系统的各功能部件或模块( 如敏感、调理、处理和接口) 分别集成在 2 个或多个芯片上, 并将芯片以不同方式组合在一个基片上, 并封装在一个外壳里。多芯片集成适合更复杂系统集成, 或对给定的系统可降低集成工艺设备要求。

5.3 应用与方向

智能传感器已广泛应用于航天、航空、国防、科技和工农业生产等各个领域。例如, 它在机器人领域中有广阔应用前景, 智能传感器使机器人具有类人的五官和大脑功能, 可感知各种现象, 完成各种动作。在工业生产中, 利用传统的传感器无法对某些产品质量指标( 例如, 黏度、硬度、表面光洁度、成分、颜色及味道等) 进行快速直接测量并在线控制。而利用智能传感器可直接测量与产品质量指标有函数关系的生产过程中的某些量( 如温度、压力、流量等) , 利用神经网络或专家系统技术建立的数学模型进行计算, 可推断出产品的质量。在医学领域中, 糖尿病患者需要随时掌握血糖水平, 以便调整饮食和注射胰岛素, 防止其它并发症。通常测血糖时必须刺破手指采血, 再将血样放到葡萄糖试纸上, 最后把试纸放到电子血糖计上进行测量。这是一种既麻烦又痛苦的方法。美国 Cygnus 公司生产了一种“葡萄糖手表”, 其外观像普通手表一样, 戴上它就能实现无疼、无血、连续的血糖测试。“葡萄糖手表”上有一块涂着试剂的垫子, 当垫子与皮肤接触时, 葡萄糖分子就被吸附到垫子上, 并与试剂发生电化学反应, 产生电流。传感器测量该电流, 经处理器计算出与该电流对应的血糖浓度, 并以数字量显示。图 20 给出智能温度传感器功能结构框图。它具有自动通道选择、自动量程选择、自动补偿、自动报警等多种智能功能。

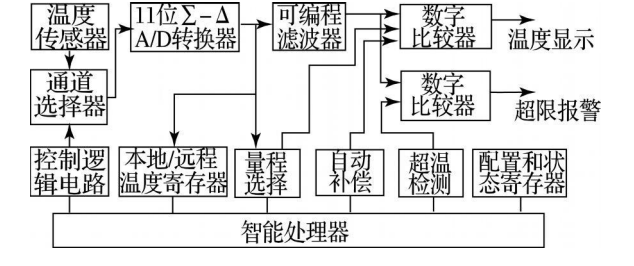


图 20 智能温度传感功能结构框图  
Fig. 20 Scheme of intelligent temperature sensor

发展完善的 3 个主要方向。虚拟化是利用通用的硬件平台充分利用软件实现智能传感器的特定硬件功能, 虚拟化传感器可缩短产品开发周期, 降低成本, 提高可靠性。网络化智能传感器是将利用各种总线的多个传感器组成系统并配备带有网络接口(LAN 或 Internet)的微处理器。通过系统和网络处理器可实现传感器之间、传感器与执行器之间、传感器与系统之间数据交换和共享。多传感器信息融合是智能处理的多传感器信息经元素级、特征级和决策级组合, 形成更为精确的被测对象特性和参数。

(下期待续)

## 参考文献:

- [1] 孙圣和. 现代传感器发展方向[C]. 第一届仪器仪表与测控技术学术大会, 2007, 成都.  
SUN SH H. Development trend of modern sensor[C]. The 1st Conference of Instrumentation and Measure Control, May 2007, Chengdu, China.
- [2] 孙圣和. 现代传感器发展方向[C]. 第二届仪器仪表与测控技术学术大会, 2008.  
SUN SH H. Development trend of modern sensor[C]. The 2nd Conference of Instrumentation and Measure Control, 2008.
- [3] 孙圣和. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002, 8.  
SUN SH H. Fiber measurement and sensor[M]. Harbin Institute of Technology Publishing House, 2002.
- [4] 徐鼎新. 开关型霍尔效应集成传感器的原理与应用[J]. 计量与测试技术, 2003(4): 33-34.  
XU D X. The theory and application of switch type Hall sensor[J]. Metrology and Test, 2003(4): 33-34.
- [5] 张子栋. 智能传感器原理与应用[M]. 河南科技学院学报: 自然版, 2008, 36(2): 116-119.  
ZHANG Z D. Research on the principle and application of intelligent sensor[M]. Journal of Henan University of Science and Technology: nature edition, 2008, 36(2): 116-119.
- [6] 吴雄. 汽车 MEMS 传感器的应用与发展[J]. 传感器世界, 2002, (3): 7-10.  
WU X. Application and development of automobile MEMS sensor[J]. Sensor World, 2002(3): 7-10.
- [7] LEE K. Wireless sensor network based on IEEE 1451. 0 and IEEE 1451. 5-802. 11[A]// Electronic Measurement and Instruments[C]. 8th International Conference on Electronics Measurement and Instrument, 2007.
- [8] 1451 IEEE standard for A smart transducer interface for sensor and actuators[S]. IEEE IMS, 1997-2004.
- [9] 王雪萍. 一种利用 RBF 神经网络的传感器建模新方法[J]. 新疆大学学报: 自然科学版, 2002, 19(3): 368-371.  
WANG X P. A new approach to model sensors with RBF Neural Network[J]. Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition, 2002, 19(3): 368-371.
- [10] 吴德全. 基于支持向量机的电容式压力传感器建模方法[J]. 传感器技, 2005, 24(7): 10-12.  
WU D Q. Modeling method of capacitive pressure sensor based on SVM[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(7): 10-12.
- [11] 张海峰. 生物传感器的研究现状、应用及前景[J]. 计测技术, 2006, (26): 92-96.  
ZHANG H F. Recent research progress, applications and prospects of electrochemical biosensors[J]. Metrology & Measurement Technology, 2006(26): 92-96.
- [12] 杨艳. 生物传感器发展及应用[J]. 茂名学院学报, 2006, 16(4): 43-46.  
YANG Y. The Development and application of Biosensors[J]. Journal of Maoming College, 2006, 16(4): 43-46.

## 作者简介:

孙圣和: 1937 年出生, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授、博导, 主要研究方向为自动测试、信息安全、图像处理等。

E-mail: sunshenghe@hit.edu.cn

Sun Shenghe was born in 1937, and he is a professor in Harbin Institute of Technology. His research interests covers automatic testing, information security and image processing, etc.