

生物医学工程导论

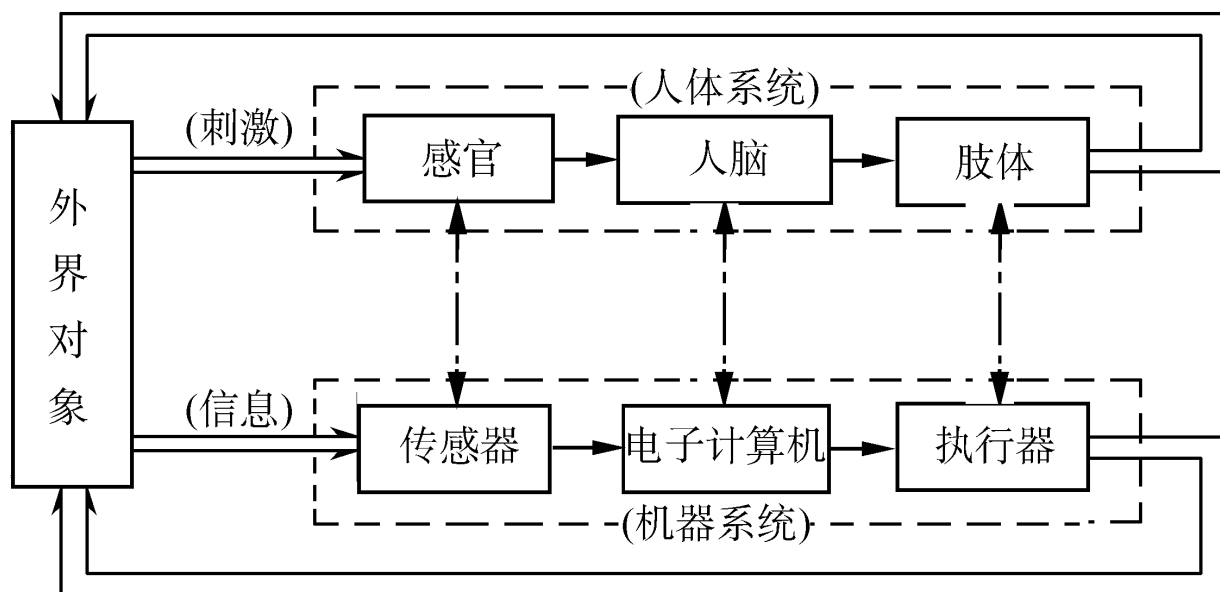
第六章 生物医学传感器技术

传感器的引入

- 人通过五官（视、听、嗅、味、触）接受外界的信息，经过大脑的思维（信息处理），作出相应的动作。
- 而用计算机控制的自动化装置来代替人的劳动，则可以说电子计算机相当于人的大脑（一般俗称电脑），而传感器则相当于人的五官部分（“电五官”）。

身体与机器人的对应关系

传感器是获取自然领域中信息的主要途径与手段。



第一节 传感器的定义和组成

一、传感器的定义

➤ 定义：

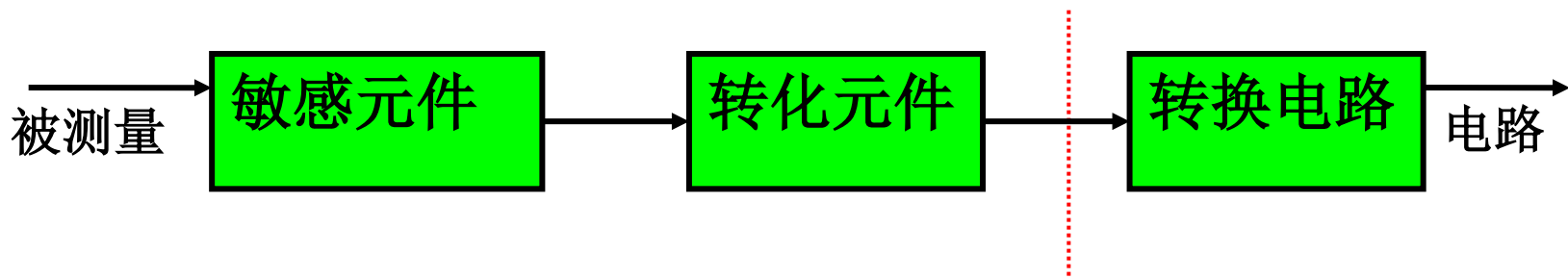
能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的 **器件或装置**。

传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。

- 其包含一下几个方面的意思：
- 传感器是测量装置，能完成检测任务
- 它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等
- 输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，这种量可以是气、光、电，但主要是电量。
- 输入输出有对应关系，且应有一定的精确度。

二、传感器的组成

➤ 传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成：



注：有的书上不包括
虚线后部分

- **敏感元件 (Sensitive element)** : 直接感受被测量, 并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。
- **转换元件 (Transduction element)** : 以敏感元件的输出为输入, 把输入转换成电路参数。
- **转换电路 (Transduction circuit)** : 将转换电路参数接入转换电路, 便可转换成电量输出。
- 有些传感器很简单, 仅由一个敏感元件 (兼作转换元件) 组成, 它感受被测量时直接输出电量。如热电偶。
- 有些传感器由敏感元件和转换元件组成, 没有转换电路。
- 有些传感器, 转换元件不止一个, 要经过若干次转换。

第二节 传感器的分类及要求

一、传感器的分类

- 传感器种类繁多，目前常用的分类有**两种**：
- **以被测量来分**
- **以传感器的原理来分**

按被测量来分类

被测量类别	被 测 量
热工量	温度、热量、比热；压力、压差、真空度；流量、流速、风速
机械量	位移（线位移、角位移），尺寸、形状；力、力矩、应力；重量、质量；转速、线速度；振动幅度、频率、加速度、噪声

被测量类别	被 测 量
物性和成分量	气体化学成分、液体化学成分；酸碱度（PH值）、盐度、浓度、粘度；密度、比重
状态量	颜色、透明度、磨损量、材料内部裂缝或缺陷、气体泄漏、表面质量

按传感器的原理来分类

- 电阻式，光电式（红外式、光导纤维式），电感式，谐振式，电容式，霍尔式（磁式），阻抗式（电涡流式），超声式，磁电式，同位素式，热电式，电化学式，压电式，微波式

二、分类目的：

- 各类传感器的工作原理、主要性能及其特点、应用。
- 使大家能合理地选择和使用传感器。
- 使学生了解常用传感器地工程设计方法和掌握常用传感器地试验研究方法。
- 了解传感器地发展方向等。

三、传感器的一般要求

- **足够的容量**——传感器的工作范围或量程足够大；具有一定的过载能力。
- **灵敏度高，精度适当**——即要求其输出信号与被测信号成确定的关系（通常为线性），且比值要大；传感器的静态响应与动态响应的准确度能满足要求。
- **响应速度快，工作稳定，可靠性好。**
- **使用性和适应性强**——体积小，重量轻，动作能量小，对被测对象的状态影响小；内部噪声小而又不易受外界干扰的影响；其输出力求采用通用或标准形式，以便与系统对接。
- **使用经济**——成本低，寿命长，且便于使用、维修和校准。

第三节 传感器的一般数学模型

- 传感器作为感受被测量信息的器件，希望它能按照一定的规律输出有用信号。
- 因此需要研究描述传感器的方法，来表示其输出——输入关系及特性，以便用理论指导其设计、制造、校准与使用。
- 最有效的描述方法是传感器的数学模型。

➤ 传感器的数学模型

指传感器的输入输出关系

➤ 传感器的数学模型分为两类

(1) 静态模型

在静态条件下（即输入量对时间 t 的各阶导数为0）得到的传感器输入输出的关系。

(2) 动态模型

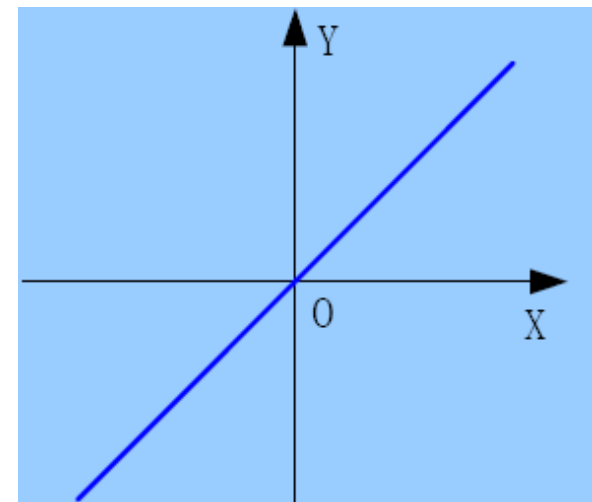
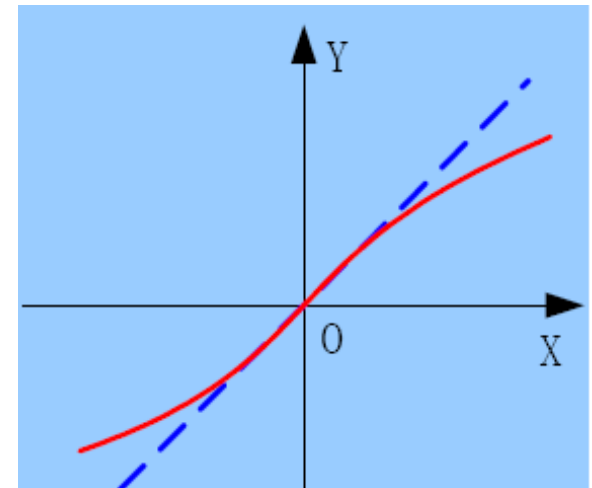
输入信号快速变化情况下，传感器输入输出的关系。

➤ 传感器的静态模型

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$$

➤ 式中： a_0 —输入量 x 为零时的输出量； $a_1, a_2, \dots, a_n$ —非线性项系数。各项系数决定了特性曲线的具体形式。

线性模型： $y = a_0 + a_1x$
或 $y = ax$



动态模型

传感器的动态模型是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。

它描述了输出和输入信号的一种数学关系。由于传感器的惯性和滞后，当被测量随时间变化时，传感器的输出往往来不及达到平衡状态，处于动态过渡过程之中，所以传感器的输出量也是时间的函数。

动态模型通常采用微分方程和传递函数描述。

➤ 传感器的动态模型

• 微分方程

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) \\ & = b_m \frac{d^m X(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dX(t)}{dt} + b_0 X(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0 \right) Y(S) \\ & = \left(b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots + b_1 S + b_0 \right) X(S) \end{aligned}$$

第四节 传感器的特性与指标

传感器的静态特性

- 静态特性表示传感器在被测量各个值处于稳定状态时的输入输出关系。也即当输入量为常量，或变化极慢时，这一关系就称为静态特性。



其中误差因数就是衡量传感器静态特性的主要技术指标。

静态特性曲线可实际测试获得。

为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系，可采用硬件和软件的补偿进行线性化处理。

在非线性误差不太大的情况下，采用直线拟合的方法线性化。

选择拟合直线的主要出发点：

获得最小的非线性误差。

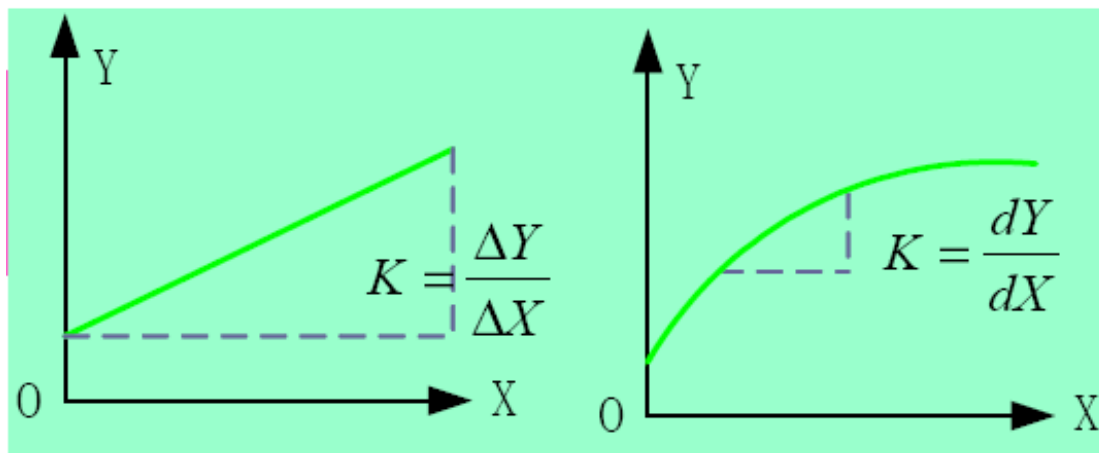
计算简便，使用方便。

(1) 灵敏度

传感器的灵敏度是指到达稳定工作状态时，输出变化量与引起此变化的输入变化量之比。

$$K = \frac{\text{输出变化量}}{\text{输入变化量}} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

它表示单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化，很显然，灵敏度S值越大，表示传感器越灵敏。



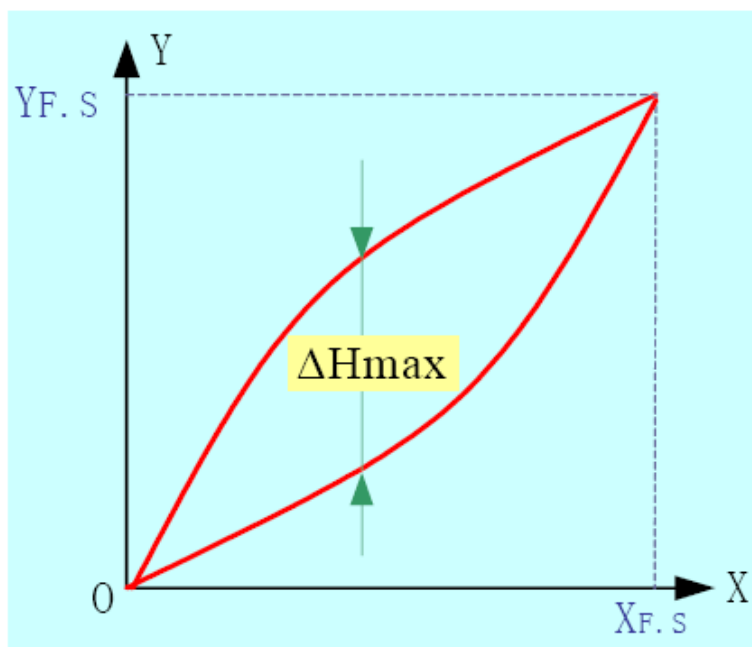
非线性传感器的灵敏度用 dy/dx 表示，其数值等于所对应的最小二乘法拟合直线的斜率。

(2) 稳定性

在室温条件下，经过相当长的时间间隔，传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异。

(3) 迟滞（回差）

在相同工作条件下在量程范围内，在同一次测量中对应同一输入量的正行程和反行程其输出值间的最大偏差。



$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100 \%$$

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2 Y_{F.S}} \times 100 \%$$

$\Delta H_{\max}$ — 输出值在正反行程间的最大偏差。

(4) 重复性

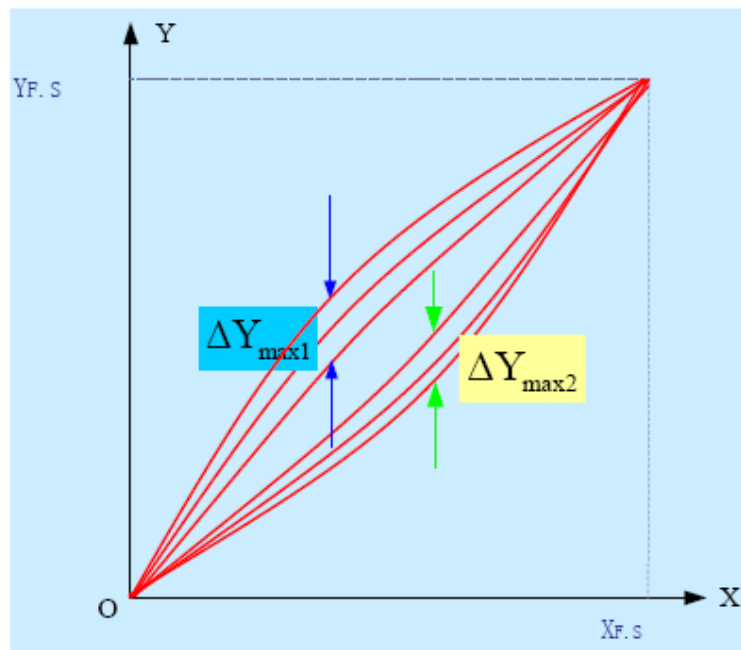
在同一工作条件下，输入量按同一方向在全测量范围内连续变动多次所得特性曲线的不一致性。数值上用各测量值正、反行程标准偏差的两倍或三倍与满量程的百分比。

$$\delta_K = \pm \frac{2\sigma \sim 3\sigma}{Y_{F.S}} \times 100\%$$

σ — 标准偏差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}$$

(贝塞尔公式)



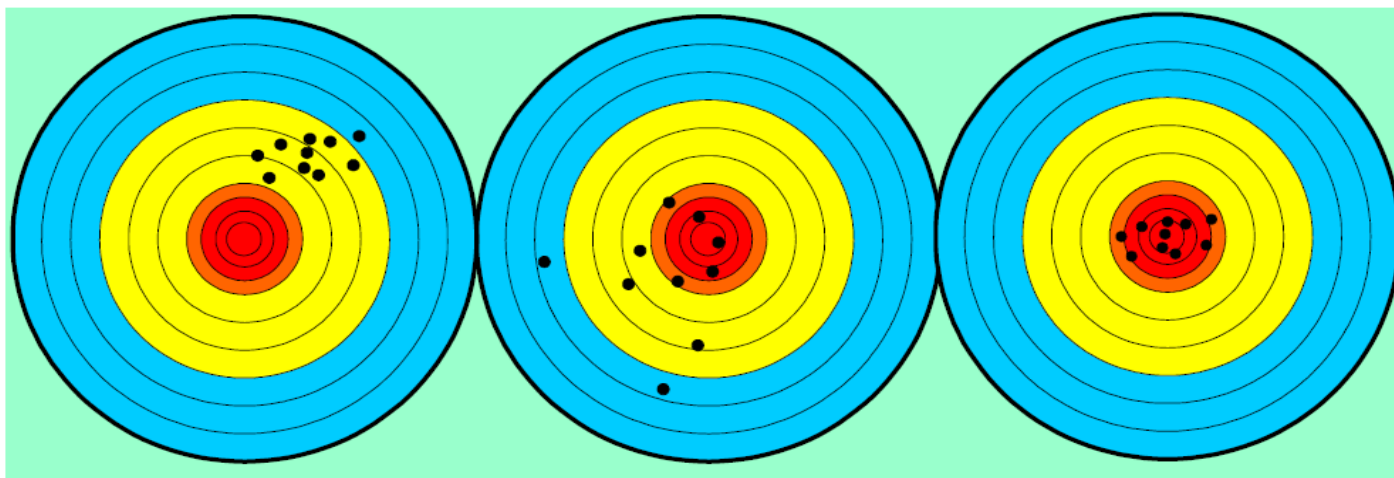
➤ 注意：迟滞和重复性的差异

- 迟滞反映传感器机械结构和制造工艺上的缺陷，如轴承摩擦、间隙、螺丝松动。元件腐蚀或碎裂及积尘等。
- 重复性反映测量结果偶然误差的大小，而不表示与真值之间的差别。有时重复性很好，但可能远离真值。

(5) 精度（静态精确度）

精度的指标：精密度、准确度、精确度

- 精密度：说明测量结果的分散性（随机误差）
- 准确度：说明测量结果偏离真值大小的程度（系统误差）
- 精确度：精密度和准确度的综合（极限误差）



(6) 其他特性

➤ 阈值

- 从输出看能测出的输入量最小变化值，实际上是零位附近的灵敏度

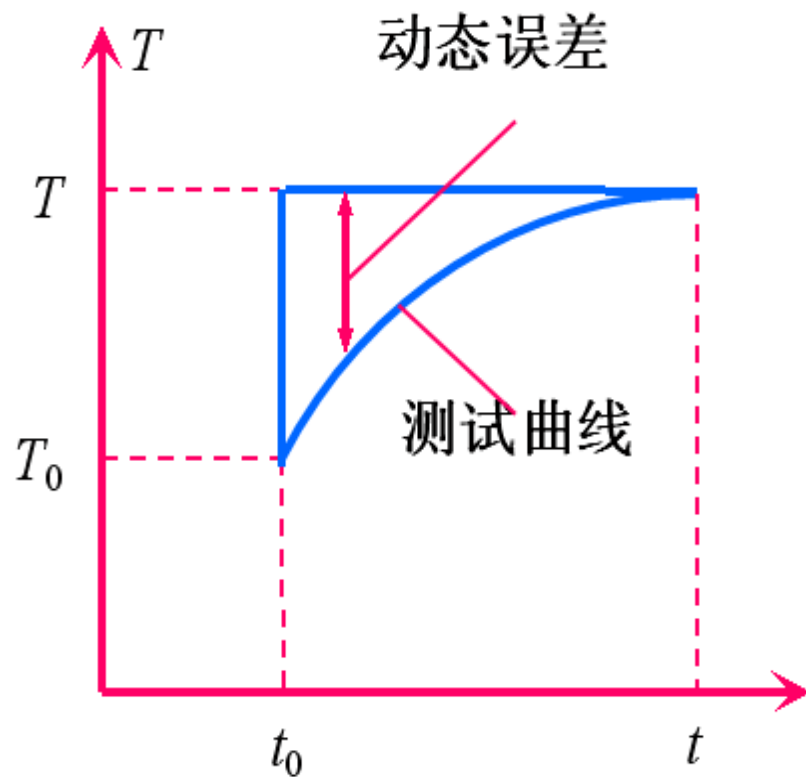
➤ 漂移

- 传感器不因输入的原因而发生的变化
- 零点漂移：时漂、温漂
- 灵敏度漂移

传感器的动态特性

- 当输入量随时间变化时，输入与输出间的关系（动态量指周期信号、瞬变信号或随机信号）。
- 动态特性取决于传感器本身，另一方面也与被测参量的变化形式有关。

动态特性



在动态的输入信号情况下，输出与输入间的差异即为动态误差。

第五节 传感器的作用和重要性

一、传感器的作用

- 传感器实际上是一种**功能块**，其作用是将来自外界的各种信号转换成电信号。
- 因此作为一种功能块的传感器可狭义的定义为：“**将外界输入信号变换为电信号的一类元件。**”

如下图所示



传感器所检测的信号近来显著地增加，因而其品种也极其繁多。为了对各种各样的信号进行检测、控制，就必须获得尽量简单易于处理的信号，这样的要求只有电信号能够满足。

电信号能较容易地进行放大、反馈、滤波、微分、存贮、远距离操作等。

二、传感器的重要性

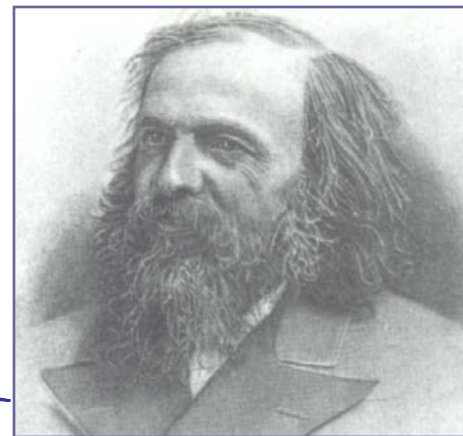
- 作为人脑的一种模拟的电子计算机的发展极为迅速，可是起五种感觉模拟作用的传感器却发展很慢，因而如果不能进行传感器的开发，现在的电子计算机将不能适应实际需要。现代社会的要求传感器、电子计算机和执行器三者都能相互协调才行。
- 这样，传感器就成了现代科学的中枢神经系统，它日益受到人们的普遍重视，这已成为现代传感器技术的必然趋势。

三、传感器的应用：

- 传感器技术在工业自动化、军事国防和以宇宙开发、海洋开发为代表的尖端科学与工程等重要领域有广泛应用。
- 同时，它正以自己的巨大潜力，向着与人们生活密切相关的方面渗透；**生物工程、医疗卫生**、环境保护、安全防范、家用电器、网络家居等方面的传感器已层出不穷，并在日新月异地发展。

(一)、在信息技术中的地位

科学仅仅是在人们懂得了测量才开始的
——门捷列夫

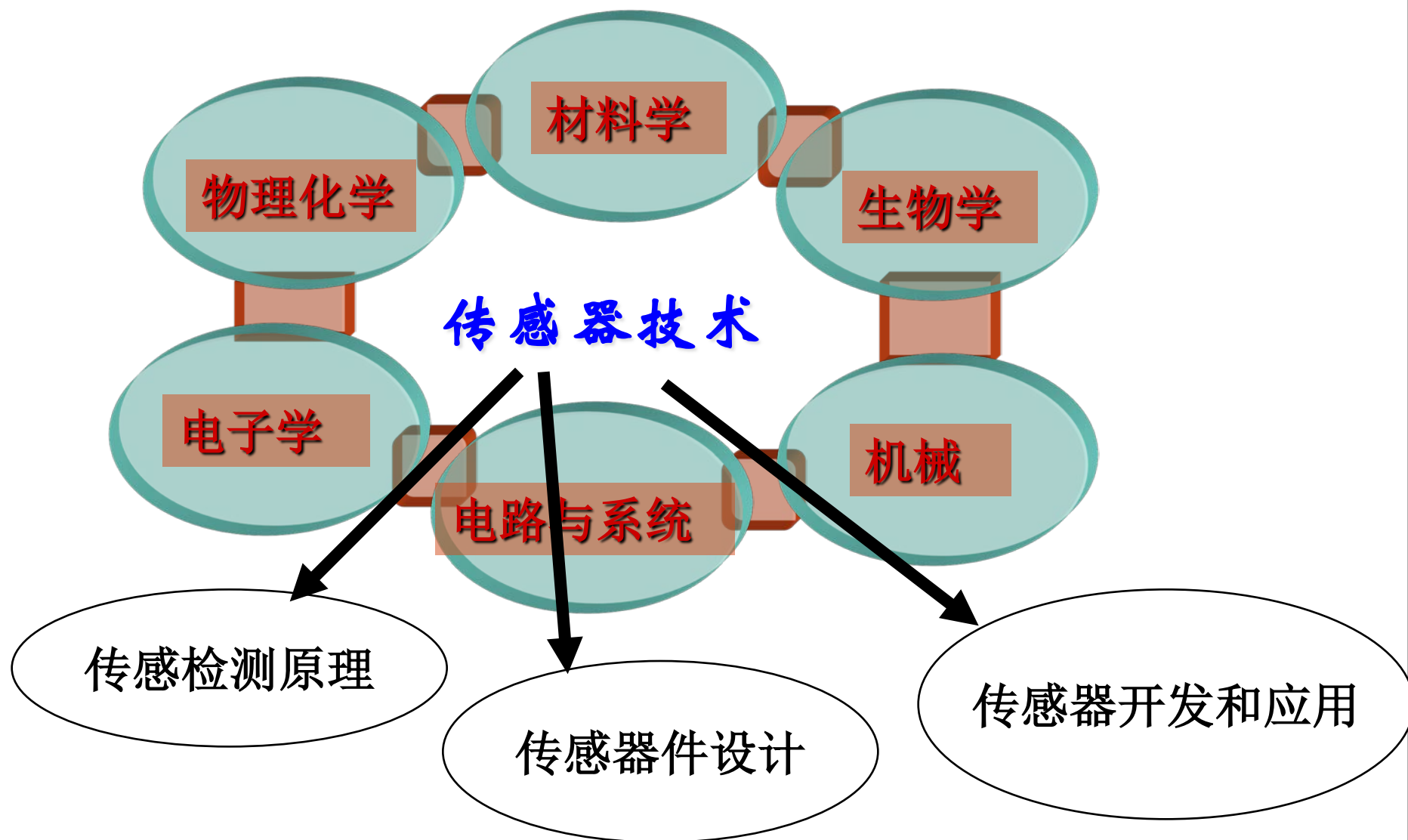


[Mendelyeev,Dmitry Ivanovich]

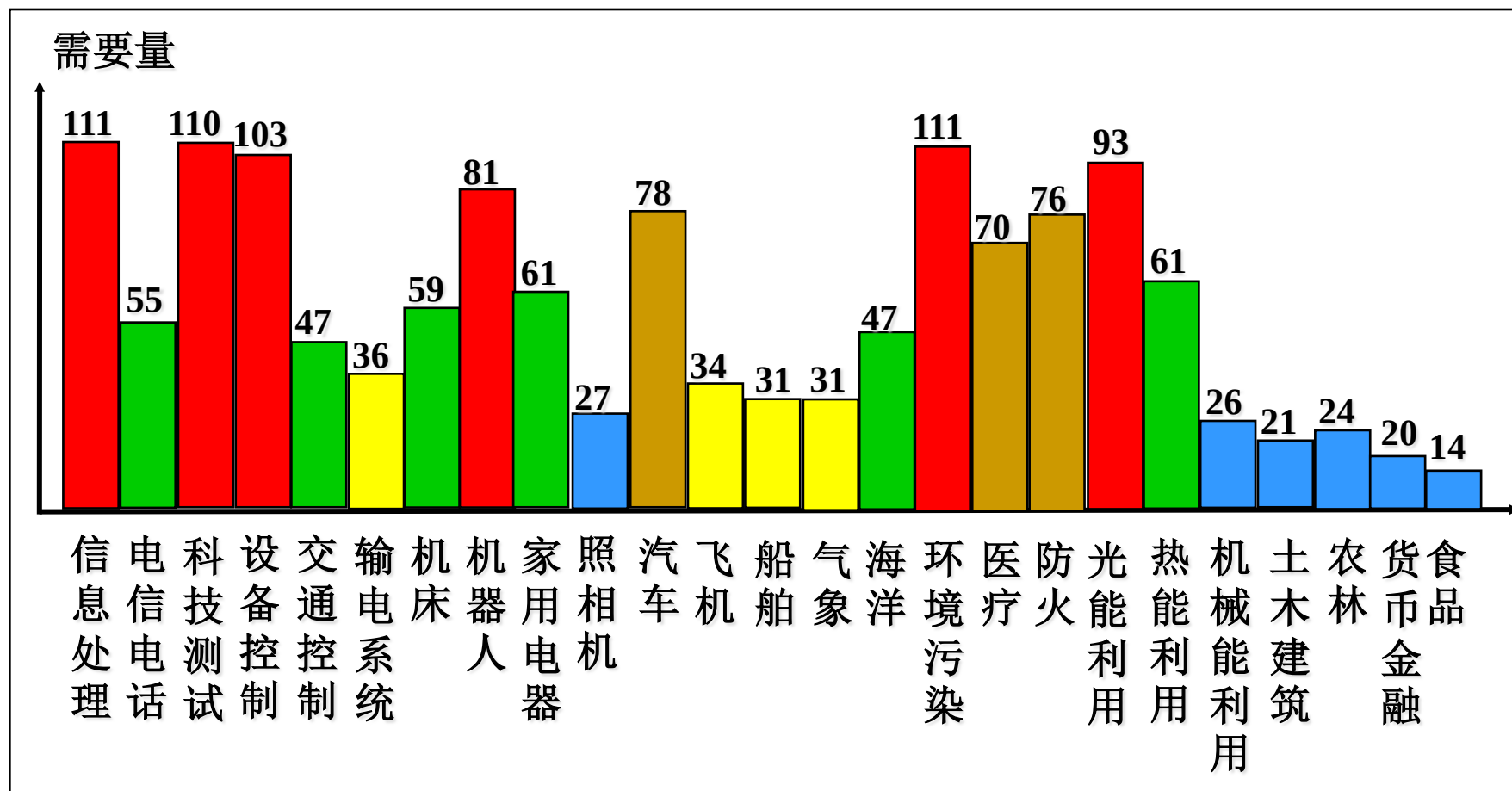
➤ 信息技术之首

信息技术 { **传感器技术:** 信息采集
 ↓
 通信技术: 信息传输
 ↓
 计算机技术: 信息处理

➤ 多技术融合



➤ 应用领域广泛



传感器技术对国民经济的发展起着重要的作用。

➤ 各国政府高度重视

(计
日本

20世纪80年代，面对美国、日本日益激烈的竞争，西欧国家制定了一项在尖端科学领域内开展联合研究与开发的计划，即“尤里卡计划”。尤里卡(EURECA)是“欧洲研究协调机构”

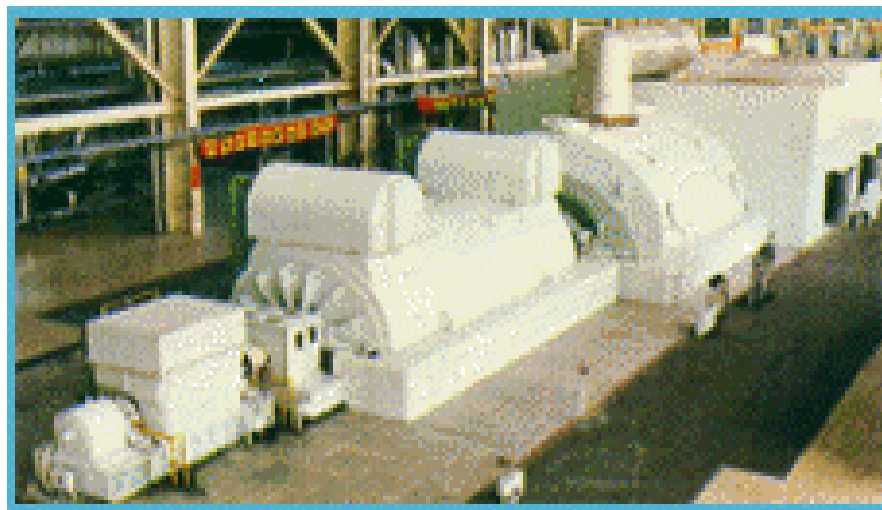
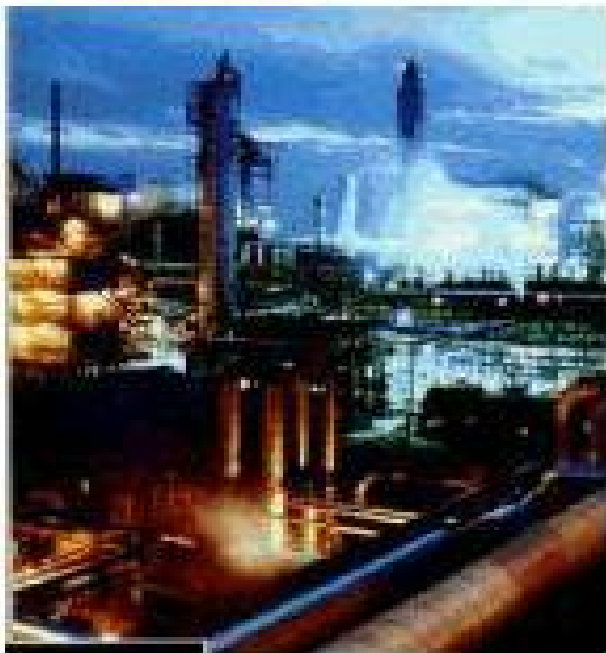
(European Research Coordination Agency)的英文缩写。

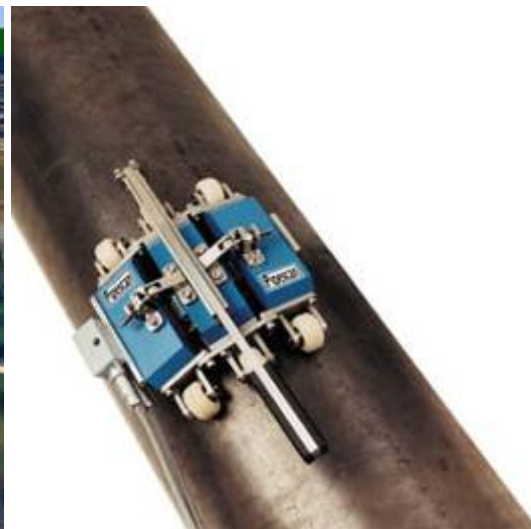
西欧各国在制定“尤里卡”发展计划中，把传感器技术作为优先发展的重点技术。

我国政府在“863计划”及重点科技攻关项目中，均把传感器列在重要位置。

(二)、传感器的主要应用

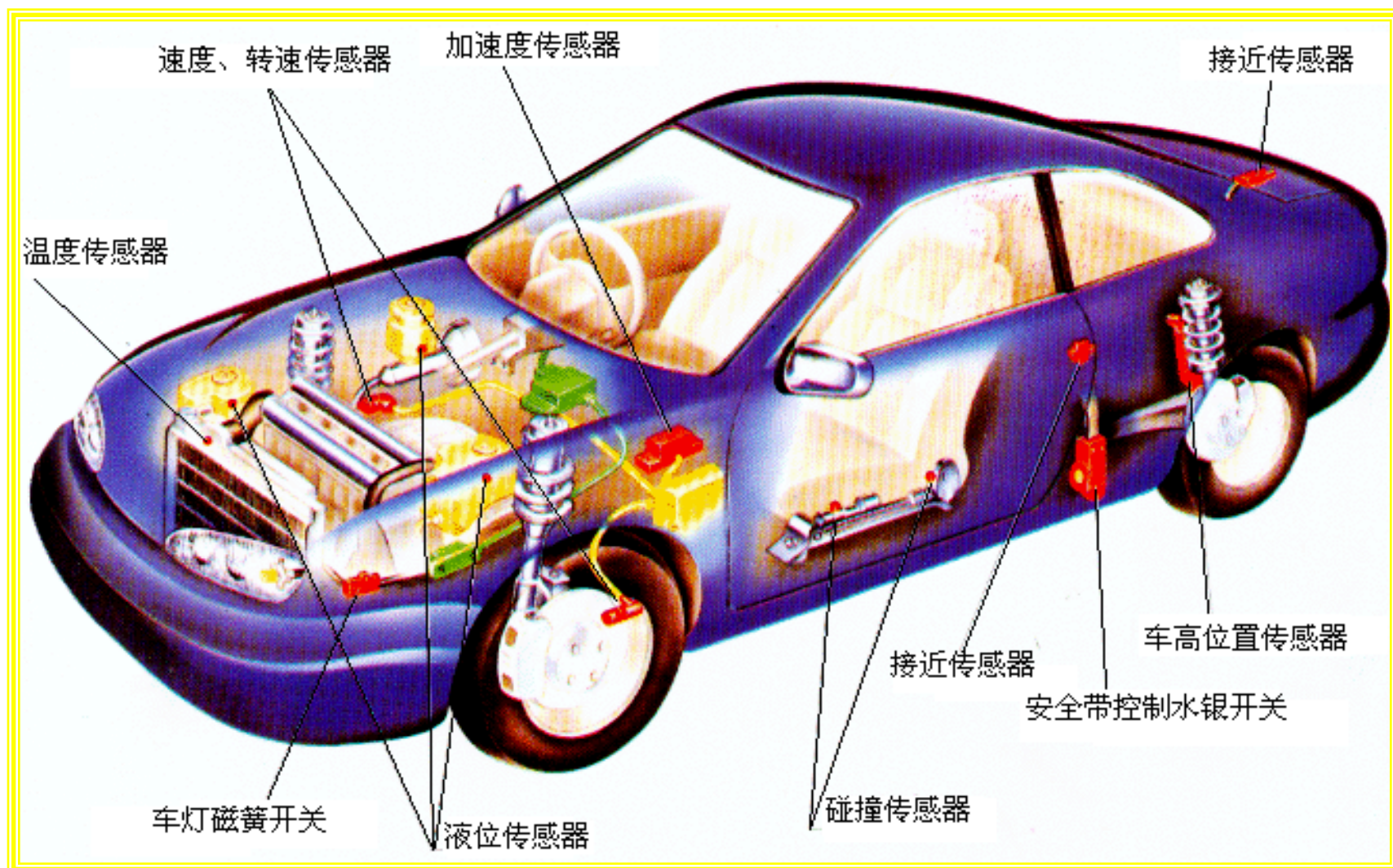
1、自动检测与自动控制系统





石化企业输油管道、储油罐等压力容器的破损和泄露检测。

2、汽车与传感器



车身到位检测



QT50U长距离超声波传感器可以可靠检测车身的到位，不受车身颜色的影响。

汽车安全气囊



3、传感器与家用电器

家用电器



4、传感器与PC机



鼠标:光电位移传感器



摄像头:CCD传感器



声位笔:超声波传感器



麦克风:电容传声器



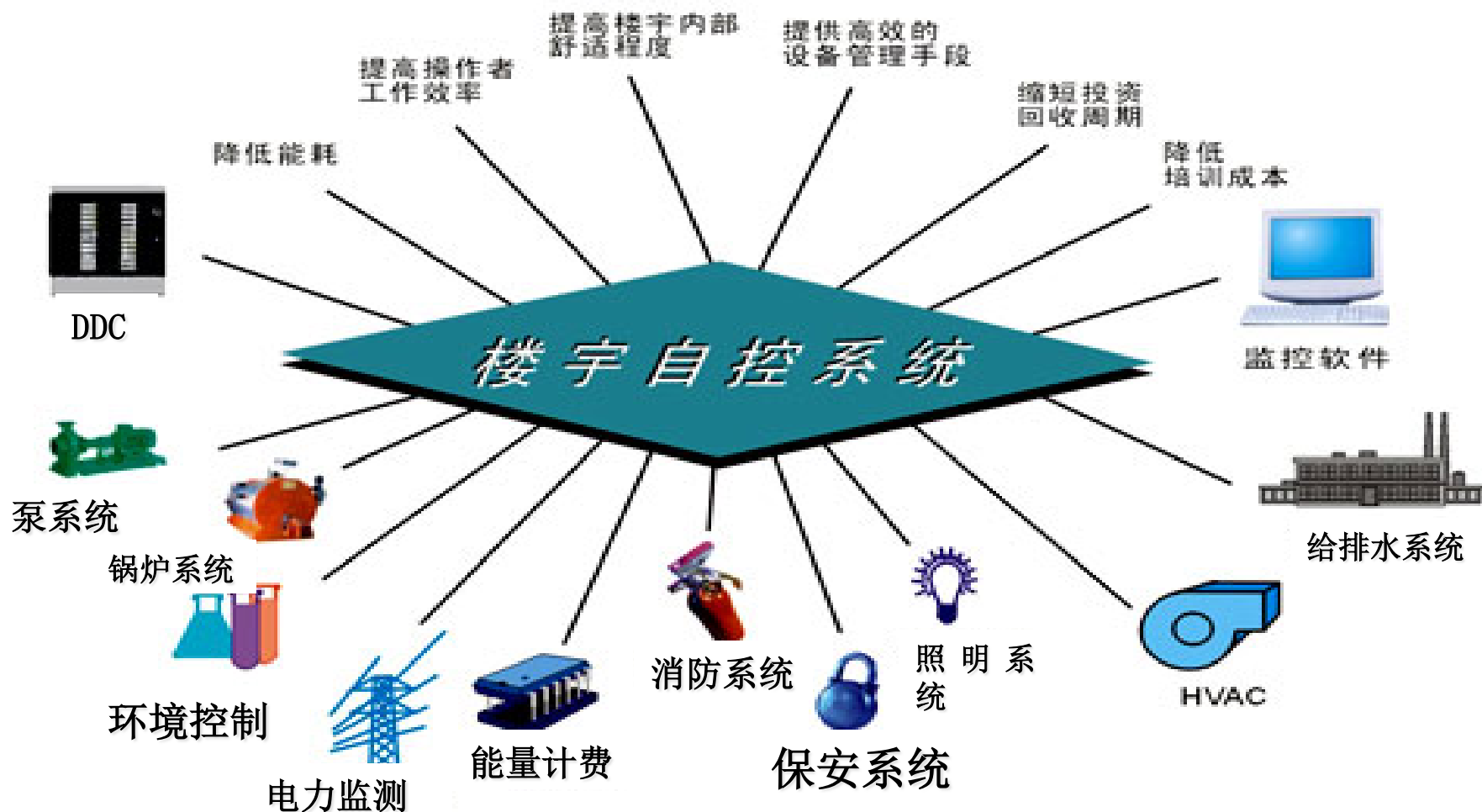
声卡:A/D卡 + D/A卡



软驱:速度,位置伺服

5、传感器技术与现代建筑

智能建筑



门禁系统打破了人们几百年来用钥匙开锁的传统



指纹门禁



6、传感器在机器人上的应用

视觉： 平面、立体

非视觉：触觉、滑觉、
热觉、力觉、
接近觉、...





机器人伴舞



机器人奏乐

军事机器人



我国引进的排爆机器人



进攻型机器人

7、传感器与航空及航天

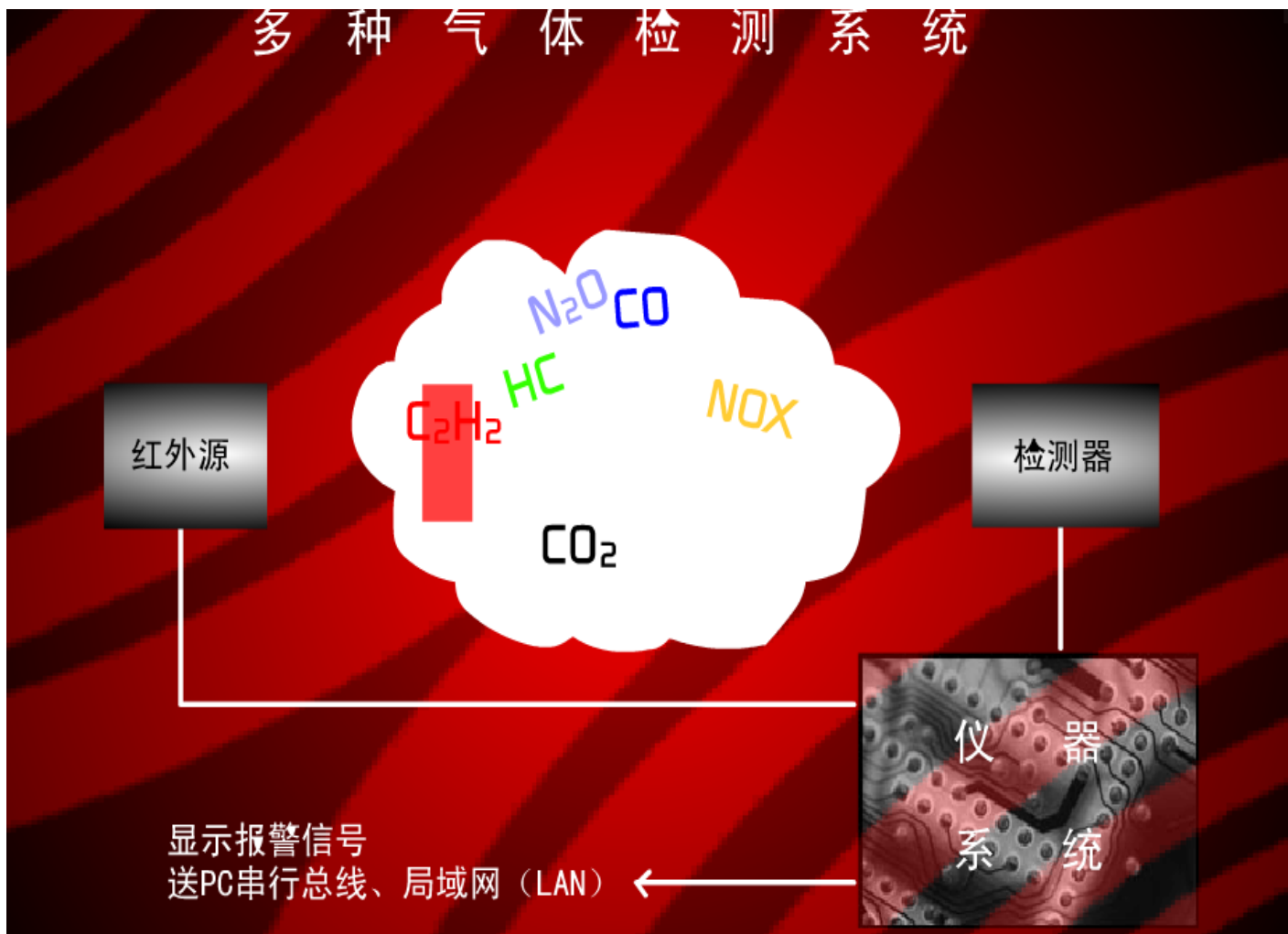


飞行器：控制在预定轨道上

速度、加速度、飞行距离测量、周围环境、内部设备监控、本身状态

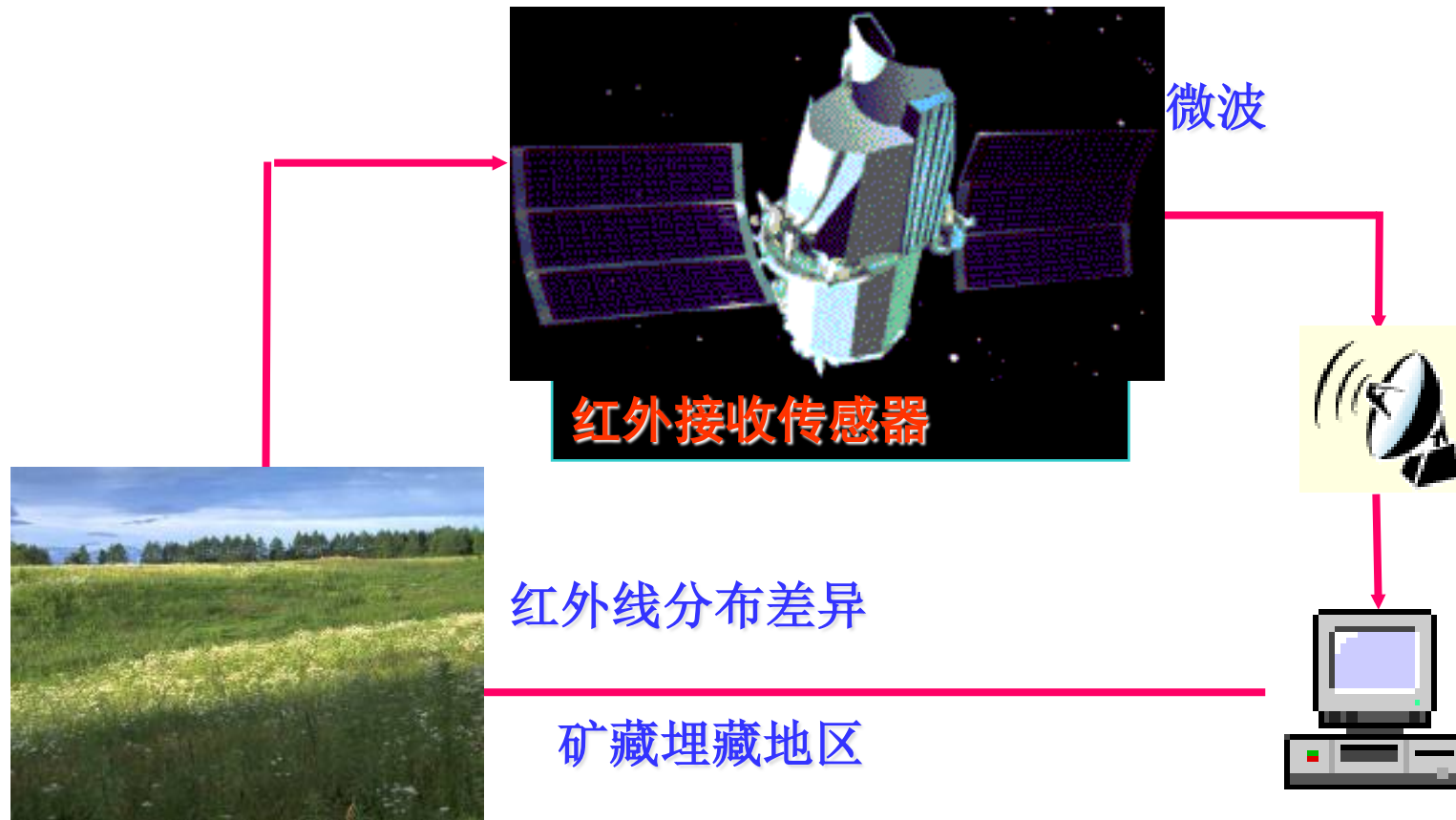
陀螺仪、阳光传感器、星光传感器、地磁传感器

8、传感器与环境保护

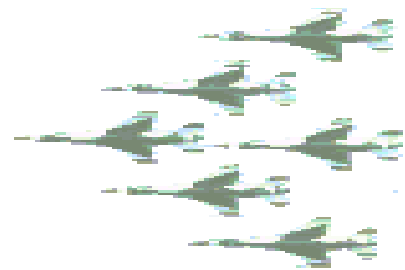


9、传感器与遥感技术

飞机及航天飞行器：近紫外线、可见光、远红外线、微波、
船舶：超声波传感器



10、传感器在军事技术领域的应用



先进的科学技术总是最先被应用于战争。

以坦克、飞机、军舰为标志的作战平台是传统的主战兵器，各类传感器不过是配属的保障设施。

而当前由信息技术发展推动的军事革命把重点从作战平台转向如何观察战场、怎样传递所观察到的战场情况、怎样运用那些性能优越的精确武器的问题上来，从重视军舰、坦克和飞机转为重视信息获取技术和信息获取装置的作用，传感器、通信以及精确制导武器等已在战争中至关重要的作用。

11、传感器与农业

农业



主要用于温度、湿度、土壤干燥度、**CO₂**、光照度、土壤养分等参数的测量

第六节 生物医学传感器的分类

生物医学传感器（**Biomedical Sensors**）

顾名思义，它是应用于生物医学领域的那一部分传感器，是将被测的生物体内各种生理的、生化的和病理的信息转换为与之相应的电学量输出，以满足生物医学基础和临床诊断的研究与分析所需的数据和图象，对于化验、诊断、监护、控制、治疗和保健等都有重要作用。

生物医学传感器的分类

按被测量分类（一种宏观分类方法）

物理传感器：用于测量血压、体温、血流量、生物磁场等，被测量都是物理量。设计时多这些非电量的利用物理性质和物理效应。

化学传感器：用于测量人体内某些化学成分、浓度、PH值等，被测量都属于化学量（被测物质分子量较小）。设计时多利用电化学原理或物理效应。

生物传感器：用于测量酶、抗原、抗体、激素、DNA、RNA等物质，被测量都属于化学量（被测物质分子量较大）。利用生物活性物质具有的选择识别待测生物化学物质的能力而制成传感器。

生物传感器的分类：按构成原理

(a) 根据生物识别器件
(敏感物质) 分类：

酶传感器

免疫传感器

微生物传感器

组织传感器

细胞传感器

DNA传感器

(b) 根据信号转换器分类：

热敏生物传感器

场效应管生物传感器

压电生物传感器

光学生物传感器

电化学生物传感器

声波道生物传感器

酶电极生物传感器

介体生物传感器

生物医学传感器的其它分类方法：

按被测对象：如血压传感器、葡萄糖传感器、基因传感器等

按工作原理：如光纤传感器、超导传感器、免疫传感器等

按尺寸分类：如微型传感器、分子传感器等

按使用方法：如一次性传感器、植入式传感器等

按功能分类：如多参数传感器、智能传感器等

按工艺分类：如厚膜传感器、集成传感器等

目前比较流行的分类方法“功能+特征”：如葡萄糖氧化酶传感器、葡萄糖光纤传感器等

生物医学传感器的特殊性

生物医学传感器是用于生物体的，除了一般测量对传感器的要求外，必须考虑到**生物体因素的影响及生物信号的特殊性**；必须考虑传感器的**生物相容性**（植入生物体内材料与生物体相互作用问题，或两者间相适应的问题，称为生物相容性）、**可靠性**、**安全性**；必须考虑**使用对象的复杂性**等，这是与工业用传感器的显著区别。

应注意生物传感器的以下几个方面特殊性：

- 1、对人体测量时，应尽量**避免传感器干扰人的正常生理、生化状态**，尽量**避免**给人的正常活动带来负担或痛苦。
- 2、为了减轻对被测生物体的侵扰，尽量采用**非接触与无损伤或低损伤**的传感器。

3、对于植入体内使用的传感器应考虑其微型化、能量及信息的传输方式，插入或植入材料的生物相容性及安全性等要求。

4、生物信号的特点是信号微弱、频率低、噪声及干扰大、随机性强、个体差异大，而且生物体内多种生理、生化过程同时进行，这都增加了检测难度。除了通过后续电路进行处理外，重要的是优化传感器的设计，防止噪声、干扰的混入，使其具有高的灵敏度和动态范围，不失真。

5、生物医学传感器的设计与应用，应充分考虑生物体的特性，选择传感器与人体间相匹配的材料。

6、生物医学传感器的使用对象极为广泛，使用环境多种多样，设计时应考虑分别适应各种对象和环境。

注重使用方便、舒适、稳定、可靠、安全、耐用、便捷。

医学上，传感器的主要用途有：

(1) 检测生物体信息：检测正常或异常生理参数。如心音、血压、脉搏、血流、呼吸、体温等信息，供临床诊断和医学研究用。

如：先心病病人手术前须用血压传感器测量心内压力，估计缺陷程度。

(2) 监护：长时间连续测定某些参量，监视这些参量是否处于规定的范围内，以便了解病人的恢复过程，出现异常时及时报警。在ICU病房，对危重病病人的体温、脉搏、血压、呼吸、心电等进行连续监护的监护仪。



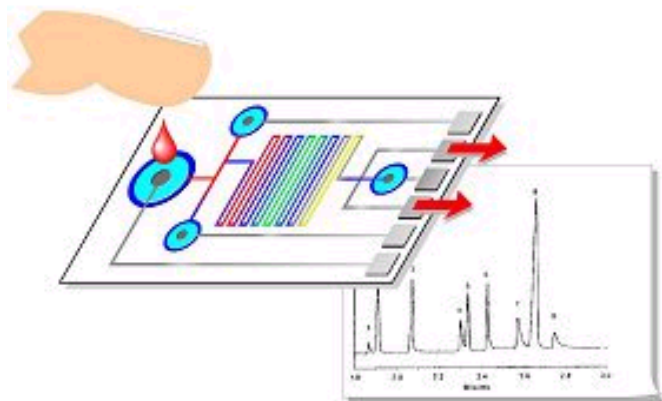
(3) 疾病治疗和控制：利用检测到的生理参数控制人体的生理过程。

例如：**自动呼吸器**就是用传感器检测病人的呼吸信号来控制呼吸器的动作，使之与人体呼吸同步。

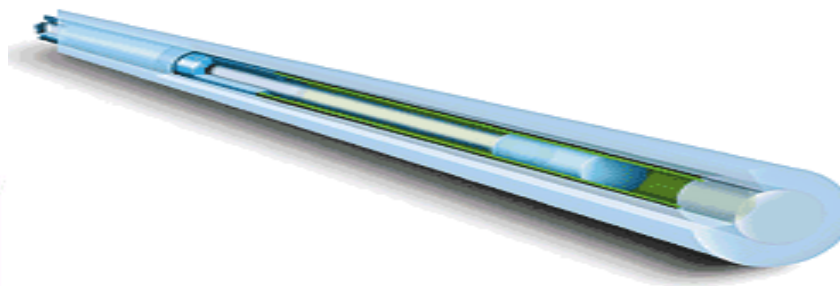
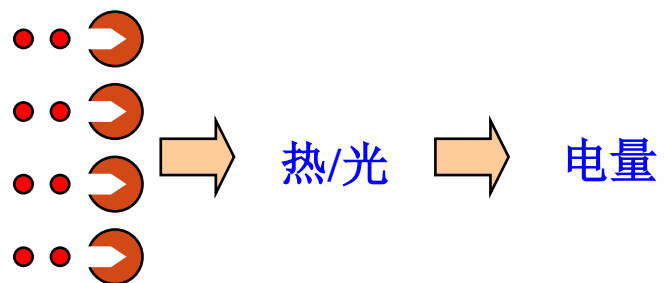
电子假肢就是用测得的肌电信号控制人工肢体的运动。

体外循环中的血流、血压控制等。

(4) 临床检验：除直接从人体收集信息外，临床上常从各种体液（血、尿、唾液等）样品获得诊断信息，即生化检验信息。它是利用**化学传感器**和**生物传感器**来获取，是诊断各种疾病必不可少的依据。



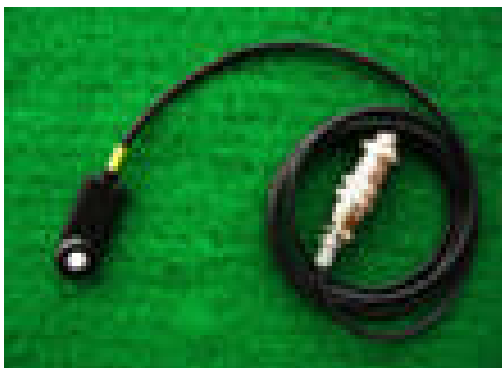
生物酶血样分析传感器



光纤流速传感器



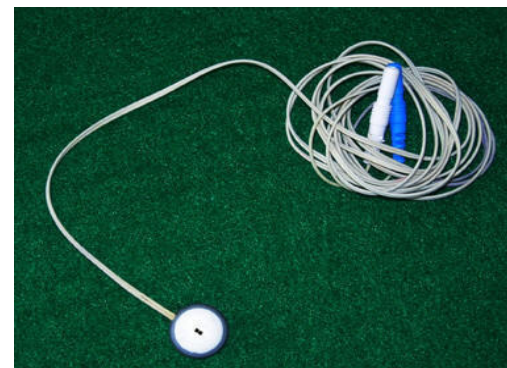
荧光材料制作的电子鼻传感器



MB—3型
脉搏波传感器



MB—4型
脉搏波传感器



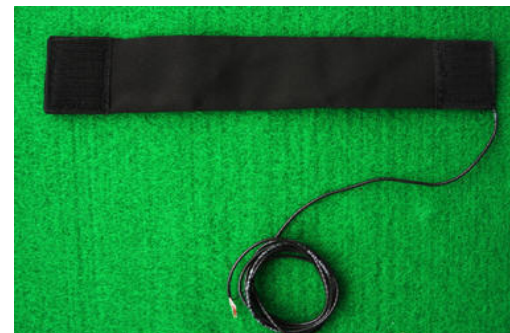
MB—5A型
脉搏波传感器



RM—2型口鼻
气流传感器



QD—1型口鼻
气流传感器



YXF—2型胸腹部呼
吸运动波形传感器

第七节 传感器开发的新趋势

- 传感器开发的新趋向包括：
- 社会对传感器需求的新动向
- 传感器新技术的发展趋势

一、传感器需求的新动向

- 社会需求是传感器技术发展的强大动力。随着现代科学技术，特别是微电子技术和信息产业的飞速发展，以及“电脑”的普及，传感器在新的技术革命中的地位和作用将更为突出，一股竞相开发和应用传感器的热潮已在世界范围内掀起。
- 原因：
 - “电五官”落后于“电脑”的现状，已成为微型计算机进一步开发和应用的一大障碍
 - 许多有竞争力的新产品开发和卓有成效的技术改造，都离不开传感器
 - 传感器的应用直接带来了明显的经济效益和社会效益
 - 传感器普及于社会各个领域，将造成良好的销售前景

二、传感器技术的发展趋势

- 传感器的开发方向，大致分为如下*四个方面*：
- 向检测范围挑战。
- 集成化，多功能化。
- 向未开发的领域挑战——生物传感器。
- 智能传感器（Smart sensor）

向检测范围挑战：

- 传感器的量子化
- 传感器的极限检测范围大多取决于量子力学效应。其比较典型的例子是利用核磁共振吸收的磁传感器以及利用约瑟夫效应的磁传感器。

集成化，多功能化：

- 向敏感功能装置发展
- 传感器的集成化，最近积极地应用了**半导体集成电路**技术及其开发思想。

生物传感器：

- 到目前为止，正大力研究。开发的传感器大多为物理传感器，今后应积极开发研究化学传感器和生物传感器。

智能传感器：

- 具有判断能力、学习能力的传感器
- 智能传感器大致分为如下三种：
 - 具有判断力的敏感装置
 - 具有学习能力的敏感装置
 - 具有创造能力的敏感装置

智能式传感器特点：

- 同一般传感器相比，智能式传感器有以下几个显著特点：
- 精度高
- 稳定、可靠性好
- 检测与处理方便
- 功能广
- 性能价格比高

精度高：

- 由于智能式传感器具有信息处理的功能，因此通过软件不仅可以修正各种**确定性系统误差**（如传感器输入输出的非线性误差、温度误差、零点误差、正反行程误差等），而且还可以适当地补偿**随机误差**，降低噪声，从而使传感器的精度大大提高。

稳定、可靠性好：

- 它具有自诊断、自校准和数据存储功能，对于智能结构系统还有自适应功能。

检测与处理方便：

- 它不仅具有一定的可编程自动化能力，可根据检测对象或条件的改变，方便地改变量程及输出数据的形式等，而且输出数据可通过串行或并行通讯线直接送入远地计算机进行处理。

功能广：

- 不仅可以实现多传感器多参数综合测量，扩大测量与使用范围，而且可以有多种形式输出(如RS232串行输出，PIO并行输出，IEEE-488总线输出以及经D/A转换后的模拟量输出等)。

性能价格比高：

- 在相同精度条件下，多功能智能式传感器与单一功能的普通传感器相比，其性能价格比高，尤其是在采用比较便宜的单片机后更为明显。