

第 1 章 传感器概述

随着科学技术的发展，电子行业中传感器测量是普遍使用的测量技术。在自动控制系统中传感器起着重要的作用。

传感器是人类五官的延伸，又被称为电五官。传感器现在已经渗透到诸如工业、农业、生物、环境、医学、勘测、交通、电子商务等极其广泛的领域。从天文气象的信息监测到海洋奥秘的结构勘察，甚至生产、生活中的数据采集，都离不开各种各样的传感器。由此可见，传感器技术对经济的发展、社会的进步起着重要作用。没有传感器技术的发展，就没有现代自动化检测技术，没有传感器，就没有现代科学技术的飞速发展。

在自然界中存在着各种各样的物理量。例如，电流、电阻、电压、电容、电感，这些物理量统称为电量；力、尺寸、质量、速度、加速度、温度、湿度等，这些物理量统称为非电量。电量可以利用电学仪器进行测量，而非电量在测量时，须先转化成电参量，再进行测量，实现这种转换技术的器件就称为传感器。

1.1 自动控制系统与传感器

近年来，智能机器人走进大家的视野，机器人的发展与传感器有着不解之缘。机器人能智能地探测工作对象并且对工作对象进行处理加工，依靠的是机器人在相应部位装备的传感器，因此机器人具备类似于人类的视觉功能、运动协调和触觉反馈。智能机器人能对工作对象进行检测或在恶劣环境中工作是依靠机器人装备的触觉传感器、视觉传感器、力觉传感器、光敏传感器、超声波传感器和声学传感器等，传感器的应用大大改善了智能机器人的知觉功能和反应能力，使其能够更灵活、更妥善地完成各种复杂的工作。

机械化生产制造催生出对自动包装技术的需求，人工包装的方式已远远不能满足批量生产作业。自动包装机械能够在控制系统的引导下完成一系列物品的包装工艺流程，提高产品包装效率，降低包装成本，但仍然避免不了会出现纰漏。因此，自动包装检测成为保证包装质量的一个重要环节。对于包装过程中含铁磁类物质的情况，利用接近传感器进行非接触检测是常采用的一种方式。

接近传感器的内部安装有产生交变磁场的线圈，当被检测铁磁物体处于该环境时，便会因电磁感应的作用在内部形成电涡流。当电涡流所产生的磁场足够大时便会反过来改变接近传感器原有的电路参数，从而产生信号输出。因此可利用接近传感器识别一定范围内是否存在含磁性或者易磁化的物质。在一些自动包装过程中，如巧克力金属箔纸包装，通过接近传感器对磁性物质存在性的检测，可以判断是否出现包装错误或工序遗漏的不合格



产品，进而提高包装质量，如图 1-1 所示。

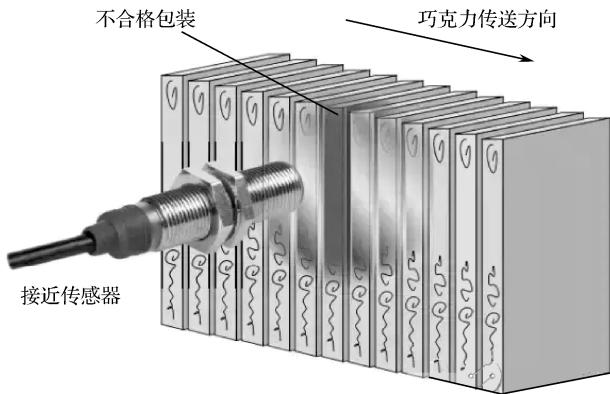


图 1-1 接近传感器检测示意图

自动控制是工业生产必不可少的控制系统。所谓自动控制，是在没有人的直接参与下，利用控制器使生产过程或被控对象的某一物理量准确地按照预期的规律运行。自动控制系统通常分为开环控制和闭环控制两类，如图 1-2 和图 1-3 所示。

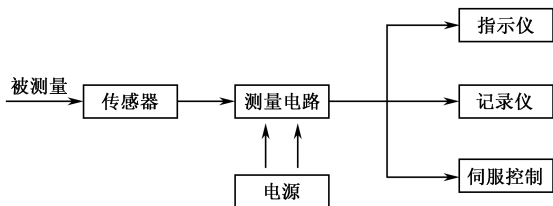


图 1-2 开环自动控制系统

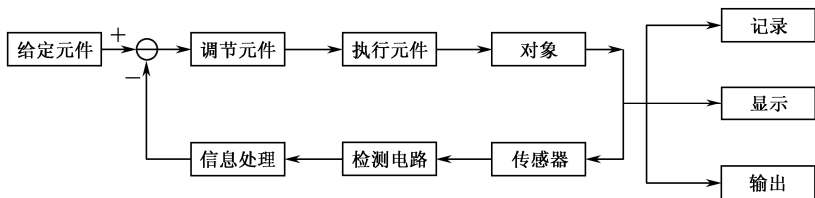


图 1-3 闭环自动控制系统

由图 1-2 和图 1-3 可知，一个完整的自动控制系统通常由传感器、测量电路、显示记录设备和调节装置及电源组成。

1.2 传感器的概念

1.2.1 传感器的定义和组成

传感器的定义：传感器是能感受规定的被测量并按一定规律将其转换成可用输出信号的



元件或装置，一般由敏感元件和转换元件组成。如图 1-4 所示为传感器的组成结构图。

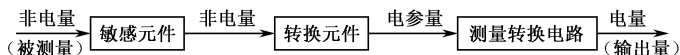


图 1-4 传感器的组成结构图

敏感元件在传感器中用于感受被测量，转化后的非电量反映被测量的所有信息；被测量通过敏感元件转换后，再由转换元件转换成电参量。而测量转换电路的作用是将转换元件输出的电参量转换成易于处理的电压、电流或频率量。

需要注意的是，并非所有的传感器都会有敏感元件和转换元件。如果敏感元件可以直接输出电量，它就同时起到了敏感元件和转换元件的双重作用；如果转换元件能直接感受被测量并且输出与之有一定规律的电参量，这时就不需要敏感元件了。敏感元件和转换元件合二为一的类型十分广泛，如热电偶、热敏电阻、压电元件、光电元件等。

1.2.2 传感器的分类

传感器的种类繁多，分类方法各不相同。常用的分类方法如下。

(1) 按被测量分类：可分为力、压力、温度、振动、转速、位移、加速度、流量、流速传感器等。

(2) 按工作原理分类：可分为电阻、电感、电容、热电偶、超声波、红外、光纤传感器等。

(3) 按能量的传递方式分类：可分为有源传感器和无源传感器。

① 有源传感器

有源传感器可以被看作是一台小型发电机，能将非电量转换为电量，它必须有信号放大器用于信号放大。所以有源传感器是一种将非电能量转化成电能的变换器，如压电传感器、热电偶传感器、电磁式传感器等。

② 无源传感器

无源传感器不进行能量的转换，被测非电量在传感器中控制或调节能量，因此它必须具备辅助电源，如电阻式传感器、电容式传感器和电感式传感器等。

(4) 按输出信号的性质分类：可分为模拟传感器与数字传感器。模拟传感器输出的模拟信号不能直接进入计算机，要先通过 A/D 转换器转换，然后才能用计算机进行信号分析和处理。而数字传感器就可以直接将输出信号送入计算机进行处理。

1.2.3 传感器的代号

传感器一般以这样的形式命名：主称—被测量—转换原理—序号。

(1) 主称——传感器的主称代号是 C。

(2) 被测量——用一个或两个汉语拼音的第一个大写字母标记。

(3) 转换原理——用一个或两个汉语拼音的第一个大写字母标记。

(4) 序号——用一个阿拉伯数字标记，由厂家自定，用来表征产品设计特性、性能参数、产品系列等。



例：C—WY—YB—20 传感器

解：C：传感器主称；WY：被测量是位移；YB：转换原理是应变式；20：传感器序号。
该传感器就是序号为20的应变式位移传感器。

1.3 传感器的基本特性

传感器的基本特性主要指输入、输出的关系特性，其输入、输出特性反映的是与内部结构参数有关系的基本特征，通常用静态特性和动态特性来描述。

1.3.1 静态特性

传感器的静态特性是指当被测量的数据值处于稳定状态时输入量与输出量的关系。只有传感器在一个稳定状态时，表示输入与输出的关系式中才不会出现随时间变化的变量。衡量静态特性的重要指标有线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨力、稳定性、漂移和可靠性等。

1. 线性度

线性度是指传感器输入量与输出量之间的静态特性曲线偏离直线的程度，又称为非线性误差，表示传感器实际特性曲线与拟合直线（也称为理论直线）之间的最大偏差与传感器量程范围内的满量程输出百分比，非线性误差越小越好。线性度的计算公式如下

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中， ΔL_{\max} 为最大非线性绝对误差； Y_{FS} 为满量程输出值。

在实际应用中，大部分传感器的静态特性曲线是非线性的。可用一条直线（切线或割线）近似地代表实际曲线的一段，使输入、输出特性线性化，这条直线通常被称为拟合直线。如图 1-5 所示为几种拟合直线。

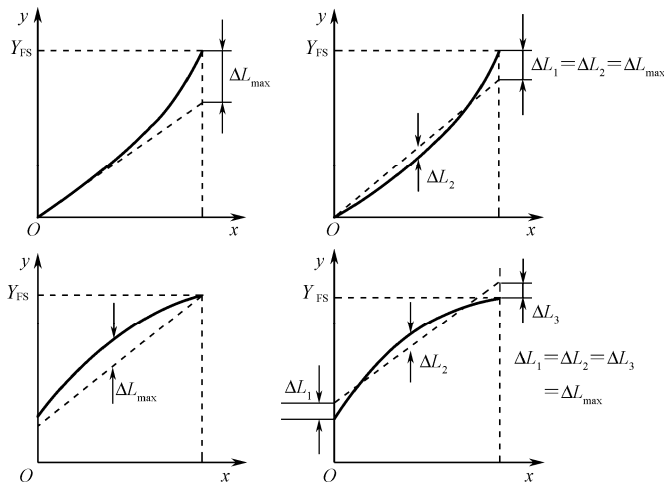


图 1-5 几种拟合直线



2. 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳定工作状态下输出变化量与输入变化量之比，用 k 来表示

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

式中， Δy 为输出量的增量； Δx 为输入量的增量。

灵敏度表征传感器对输入量变化的反应能力。对于线性传感器而言，灵敏度是该传感器特性曲线的斜率；而对于非线性传感器来说，灵敏度是一个随着工作点变化的变化量，实际是该点的导数，如图 1-6 所示为非线性传感器的输入、输出特性关系曲线。

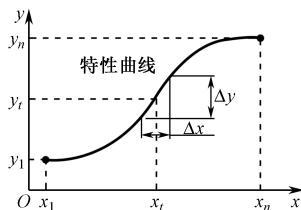


图 1-6 非线性传感器的输入、输出特性

3. 迟滞现象

迟滞现象是指传感器在输入量由小到大（正行程）和输入量由大到小（反行程）变化时其输入、输出特性曲线不重合的程度，对于同一大小的输入量，传感器正、反行程的输出量的大小是不相等的。如图 1-7 所示为传感器迟滞现象的曲线。

迟滞误差是指对应同一输入量的正、反行程输出值之间的最大差值与满量程值的百分比，通常用 γ_H 表示，即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中， ΔH_{\max} 为正、反行程输出值之间的最大差值， Y_{FS} 为满量程输出值。

传感器出现迟滞现象主要是由传感器中敏感元件材料的机械磨损、部件内部摩擦、积尘、电路老化、松动等原因引起的。

4. 重复性

如图 1-8 所示，重复性是指传感器对输入量按照同一方向作全量程多次测试时，所得到的输入、输出特性曲线不一致的现象。多次测量时按照相同输入条件测试出的特性曲线越重合，传感器的重复性越好，误差就会越小。

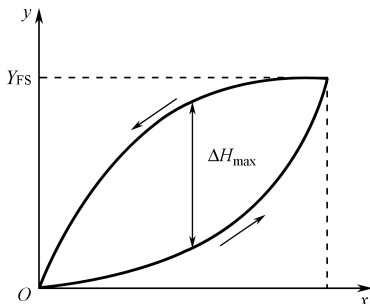


图 1-7 传感器的迟滞现象

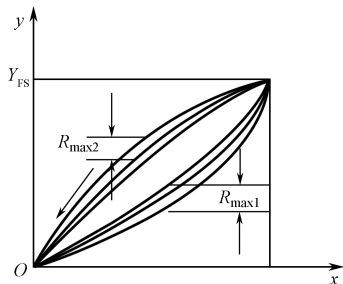


图 1-8 传感器的重复性





重复性误差是指各测量值正、反行程标准偏差的两倍或三倍与满量程值的百分比，通常用 γ_R 表示，即

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中， σ 为正、反行程标准偏差， Y_{FS} 为满量程输出值。

重复性误差也可以用正、反行程中的最大偏差 ΔR_{\max} 表示，即

$$\gamma_R = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中， ΔR_{\max} 为正、反行程中的最大偏差， Y_{FS} 为满量程输出值。

5. 分辨力

分辨力是指传感器能够检测出的被测量的最小变化量。当被测量的变化量小于分辨力时，传感器对输入量的变化不会出现任何反应。对数字式仪表而言，如果没有其他说明，可以认为该表的最后一位所表示的数值就是它的分辨力。

分辨力如果以满量程输出的百分数表示，则称为分辨率。

6. 稳定性

稳定性是指传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。

稳定性一般用在室温条件下经过一个定时间的间隔后（如一天、一个月或者一年），传感器此时的输出与起始标定时输出的差异来表示，这种差异称为稳定性误差。稳定性误差通常可由相对误差和绝对误差表示。

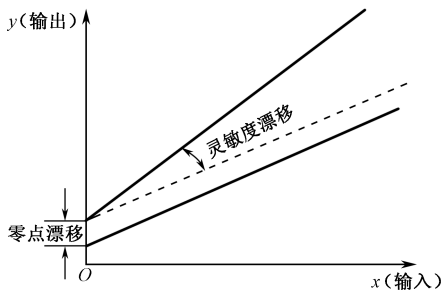


图 1-9 传感器的漂移

7. 漂移

漂移是指在外界的干扰下，在一定时间内，传感器输出量发生与输入量无关、不需要的变化。通常包括零点漂移和灵敏度漂移，如图 1-9 所示。产生漂移的主要原因有两个：一个是仪器自身参数的变化；另一个是周围环境导致输出的变化。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定的条件下，零点漂移或灵敏度漂移随时间的缓慢变化。温度漂移是指当环境温度变化时引起的零点漂移或灵敏度漂移。

8. 可靠性

可靠性是指传感器在规定的条件下和时间内，完成规定功能的一种能力。衡量传感器可靠性的指标有：

(1) 平均无故障时间。平均无故障时间是指传感器或检测系统在正常的工作条件下，连续不间断地工作，直到发生故障而丧失正常工作能力所用的时间。



- (2) 平均修复时间。平均修复时间是指排除故障所花费的时间。
 (3) 故障率。故障率也称为失效率，它是平均无故障时间的倒数。

1.3.2 动态特性

传感器的动态特性就是当输入信号随时间变化时输入与输出的响应特性，通常要求传感器能够迅速准确地响应和再现被测信号的变化，这也是传感器的重要特性之一。

在评价传感器的动态特性时，最常用的输入信号为阶跃信号和正弦信号，与其对应的方法为阶跃响应法和频率响应法。

1. 阶跃响应法

研究传感器的动态特性时，在时域中分析传感器的响应和过渡过程被称为时域分析法，这时传感器对阶跃输入信号的响应就称为阶跃响应。如图 1-10 所示为阶跃响应特性曲线。

衡量传感器阶跃响应特性的几项指标如下：

- (1) 最大超调量 σ_p 就是阶跃响应特性曲线偏离稳态值的最大值，常用百分数表示。
- (2) 延滞时间 t_d 是指阶跃响应特性曲线达到稳态值的 50% 所需的时间。
- (3) 上升时间 t_r 是指阶跃响应特性曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间。
- (4) 峰值时间 t_p 是指阶跃响应特性曲线从稳态值的零上升到第一个峰值所需的时间。
- (5) 响应时间 t_s 是指阶跃响应特性曲线到达与稳态值之差不超过 $\pm(2\% \sim 5\%)$ 稳态值所需要的时间。
- (6) 稳态误差 e_{ss} 是指期望的稳态输出量与实际的稳态输出量之差，控制系统的稳态误差越小说明控制精度越高。

2. 频率响应法

频率响应法是指从传感器的频率特性出发来研究传感器的动态特性。此时传感器的输入信号为正弦信号，这时的响应特性为频率响应特性。

大部分传感器可简化为单自由度一阶系统或单自由度二阶系统，即

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \quad (1-6)$$

式中， τ 为时间常数。

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\zeta \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (1-7)$$

式中， ω_n 为传感器的固有频率。

衡量传感器频率响应特性的几项指标如下。

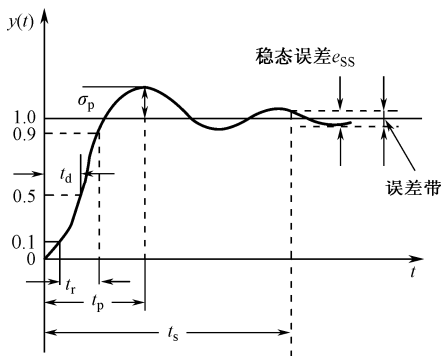


图 1-10 阶跃响应特性曲线



(1) 频带：传感器的增益保持在一定频率范围内，这一频率范围称为传感器的频带或通频带，对应有上截止频率和下截止频率。

(2) 时间常数：可用时间常数 τ 来表征传感器单自由度一阶系统的动态特性。时间常数 τ 越小，频带越宽。

(3) 固有频率：传感器单自由度二阶系统的固有频率可用 ω_n 来表征其动态特性。

1.4 传感器的标定和校准

任何新研制和生产的传感器在生产完成后都需要进行一系列的测试，确定其时间性能。经过一段时间的存储或使用后，传感器的特性会有所变化，因此还需要进行性能的复测。这个过程就是传感器的标定和校准。

1.4.1 传感器的标定

利用某种标准器具对新研制、新生产的传感器进行全面的检验和标度，称为标定。标定的基本方法是：利用标准仪器产生已知确定的非电量并且输入到待标定的传感器中，然后将传感器的输出量与输入的标准量一一进行比较，获得一系列校准数据或者曲线，所得的数据就是标定的数据。有时输入的标准量是利用一个标准传感器检测得到的，这时标定实质上就是待标定传感器与标准传感器之间的比较。

传感器的标定工作可分为以下几方面：首先将新研制的传感器进行技术上的检定，利用检定数据进行量值传递，检定数据同时也是改进传感器性能的重要依据；其次经过一定时间的存储和使用后的再次标定，可以检测出传感器的基本性能是否变化，是否可以继续使用，对可再使用的传感器的参数应该在原数据的基础上进行修正和校准。

为了保证传感器测量值的准确一致，标定应该按照计量部门规定的检定规程和管理办法进行。工程使用的传感器的标定应该在与实际测量环境相似的环境下进行，有时为了更高的标定精度，将与传感器配套的电缆、滤波器、放大器等纳入标定范围，有些传感器还需要规定安装技术条件。

传感器的标定分为静态标定和动态标定。静态标定的目的是确定静态指标，如线性度、灵敏度、迟滞、重复性等；动态标定的目的是确定动态指标，如频率响应、时间常数、固有频率等。

1.4.2 传感器的校准

对传感器在使用中或者储存后进行的性能复测，称为校准。传感器的校准与标定的实质相同。

本章小结

本章主要介绍了自动控制系统和传感器的关系、传感器的概念、传感器的基本特性，以





及传感器的标定和校准。

在自动控制系统中，传感器为系统提供准确的外界信息，在达到系统要求时发出信号，从而使系统能够根据此信号做出动作，完成预设的工作过程。因此在自动控制系统中，传感器是非常关键的一个组成部分。

传感器是利用各学科的多种原理制作出的用于测量非电量信息的一种装置，单一的一个传感器测量对应于该类传感器的非电量，而一种非电量可以用不同类型的传感器测量。传感器的种类众多，类型多样，在工业及生活中广泛使用，给人类的生产生活带来了许多方便。

习 题 1

- 1-1 什么是传感器？由哪几部分组成？各自的作用是什么？
- 1-2 传感器有什么类型？各自的优缺点是什么？
- 1-3 传感器的主要静态特性是什么？
- 1-4 如何区分传感器的标定和校准？

