

0 绪 论

传感技术是以传感器敏感材料的电、磁、光、声、热、力等物理“效应”、化学“反应”以及生物“机理”作为理论基础，以研究传感器的材料、设计、制作、应用为主要内容，综合了物理学、微电子学、光学、化学、仿生学、材料学等方面的知识和技术而形成的一门综合性学科，是现代信息产业（传感技术、通信技术和计算机技术）的三大支柱之一。

何谓传感器？传感器是一种能把特定的被测量信息（包括物理量、化学量、生物学量等）按照一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。当今的“可用信号”是指便于处理和传输的电信号等，因此可把传感器狭义地定义为：能把外界非电信息按一定规律转换成与之有确定对应关系的电信息的输出器件或装置。

0.1 传感技术的地位和作用

在基础科学和尖端技术的研究中，必须借助于配备有相应传感器的高精度测控仪器或大型测控系统才能奏效。大到上千光年的茫茫宇宙，小到 10^{-13}cm 的粒子世界；长到数十亿年的天体演化，短到 10^{-24}s 的瞬间反应；高到 $5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^8\text{ }^\circ\text{C}$ 的超高温或 $3 \times 10^8\text{ Pa}$ 的超高压，低到 0.01K 的超低温或 10^{-13} Pa 的超真空；强到 25T 以上的超强磁场，弱到 10^{-11}T 的超弱磁场……要测量或控制如此极端巨微的信息，人的感官或一般电子设备远已无能为力。而传感器的发展依赖于传感器敏感材料的开发，加工技术的提高，新物理“效应”、新化学“反应”及新生物“机理”的挖掘和应用。美国把传感技术列为 20 世纪 90 年代 22 项关键技术之一，日本也将传感技术列为十大技术之首，因而传感技术已成为一些发达国家研究的重要热门技术之一。

从茫茫太空到浩瀚海洋，从各种复杂工程系统到日常生活的衣食住行，几乎每一个角落都离不开各种各样的传感器。

在机器人技术领域，作为第三次产业革命的典型代表——智能机器人，将大量使用视觉、触觉、听觉、嗅觉以及各种内脏传感器。一些机器人专家认为，“智能机器人系统应该是一个传感器系统的集成而不是机构的集成”。

在航空、航天技术领域，传感器应用非常多，范围非常广，仅阿波罗 10 号飞船就使用了大量传感器，对 3 295 个测量参数进行监测，可以说整个飞船就是高性能传感器的集合体。

在兵器领域，国外新设计的引信，除具有引爆炸药的功能外，同时采用几个传感器，以分别监测环境和目标信息，从而更好地解决了安全、可靠和通用性问题。战场侦察传感器系统是 20 世纪 60 年代在美国、苏联和欧洲等国家和地区发展起来并装备部队的侦察武器。由于现代战争的突发性，侦察兵难以隐蔽和渗透，因此替代侦察兵的战场

侦察传感器也应运而生。初期研制了侦察用的磁、声、振动传感器；80年代采用红外 CCD 器件等新成果，提高了战场传感器的性能。各国研制的重要新型精确打击武器——目标敏感弹都是以传感器为技术核心的。

在生产企业中，随着生产过程自动化程度的提高，传感器成为实现测试与控制的关键环节。如果没有传感器对原始信息的准确捕获与转换，那么对信息的准确测试与控制就将无法实现。例如：在木材干燥系统中，窑内木材含水率、平衡含水率、温度等参量的获取均离不开相应的传感器。在中密度纤维板的调施胶控制系统中，进料时要自动对原料称重，分析原料成分或浓度，然后依据即定配方自动计算多种原料的比例加入量，并顺序检测各个原料罐的液位信号，控制各原料的投料量。在施胶阶段，主要通过不断检测纤维的输出量来动态地调节施胶量。所有这些环节均需要使用各种传感器对相应的非电量进行检测和控制，使设备或系统自动、正常地运行在最佳状态，保证生产的高效率和高质量。

在交通领域，为了研究飞机的强度，要在机身、机翼上贴上几百片应变片，在试飞时还要利用传感器测量发动机的参数（转速、转矩、振动等）以及机上有关部位各种参数（应力、温度、流量、油箱液位等）。一辆现代化汽车装备的传感器就达 30 多种，用以检测车速、方位、转矩、振动、油压、油量、温度等。美国为实现“汽车电子化”，正准备在一辆汽车上安装 90 多种传感器。

生物传感器的发展将引起临床检测领域的一场革命，使复杂的医学生化检测过程大为简化，进而走出实验室，步入普通病人的家庭，使普通病人也能熟练掌握和操作这些仪器，随时了解自己的病情，为治疗和康复提供有利条件。

家庭生活中使用的传感器也越来越多。如电冰箱中的温度传感器、监视煤气溢出的一氧化碳气敏传感器、防止火灾的烟雾传感器等，洗衣机、电饭锅、录像机、收录机、电视机、空调机、血压计等都需要传感器。

总之，在以计算机为基础的测控系统中，在加强国防建设与促进科技发展的今天，在改造传统产业实现自动化检测和发展新兴产业时，传感技术起着举足轻重的作用。

一个国家的现代化水平是用自动化程度来衡量的，而传感器技术是自动化系统的关键环节。如果没有先进的传感技术，那么信息的准确获得与精密检测就成了一句空话。

0.2 传感技术的特点

传感技术的特点集中体现在知识密集性、内容离散性、品种庞杂性、功能智能性、测试精确性、工艺复杂性和应用广泛性上。

(1) 知识密集性。传感技术中几乎牵涉到支撑现代文明的所有科学技术。各类传感器机理各异，与多门学科紧密相关。在理论上，以物理学中的“效应”、“现象”，化学中的“反应”，生物学中的“机理”为基础；在技术上，涉及到电子、机械制造、化学工程、生物工程等学科。因此，传感技术是多学科相互渗透的知识密集型学科。

(2) 内容离散性。传感技术所涉及和利用的物理学中的“效应”，化学中的“反应”，生物学中的“机理”，不仅为数甚多，而且彼此独立。因此，有关传感技术的教

材、参考书的目录，虽章节顺序各异，但都有其各自的目的。

(3) 品种庞杂性。自然界中各种信息千差万别，对应不同的信息就有不同类别的传感器，如液位传感器、温度传感器、速度传感器等，品种繁多。对于自然界中一种信息的检测，就可根据不同原理、不同材料制作许多种类的传感器，例如仅线位移传感器就有 18 种；由于产品更新换代快，新的传感器不断出现，品种也在不断增加。总之，传感器具有品种庞杂的特点。

(4) 功能智能性。传感器具有多种作用，既可代替人类五官感觉的功能，也能检测人类五官不能感觉的信息（如超声波、红外线、 α 射线、 β 射线、 γ 射线等），称得上是人类五官功能的扩展。同时，还能在人类无法忍受的高温、高压等恶劣环境下工作，而且具有记忆、存储、解析、统计处理、自诊断、自校准和自适应等功能，因而称其为“智能性”。

(5) 测试精确性。传感器检测各类信息的量程宽，如温度可在 $-273 \sim 2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，湿度从 $\frac{1}{100\,000}$ RH 到 100% RH。

(6) 工艺复杂性。传感器制作涉及许多高新技术，如集成技术、薄膜技术、超导技术、键合技术、高密封技术、特种加工技术以及多功能化、智能化技术等，工艺难度大，要求高。例如直径为 1 mm 的微型传感器精加工技术、厚度为 1 μm 以下的硅片超薄加工技术、耐压几百兆帕的大压力传感器的密封技术等均极其复杂而又需要高精尖技术。

(7) 应用广泛性。从航天、航空、兵器、船舶、交通、冶金、机械、电子、化工、轻工、能源、煤炭、石油、医疗卫生、生物工程、宇宙开发等领域，到农、林、牧、副、渔五业，直到人们日常生活的方方面面，几乎处处都应用到传感技术。

0.3 本课程的任务

本课程具有涉及学科范围广、综合性强的特点，通过对本课程的学习，要求达到

- (1) 对传感技术有一个整体的认识。
- (2) 对各类传感器的机理、优缺点和应用有一定的理解。
- (3) 具有正确选择传感器的能力。
- (4) 对传感器和由传感器组成的检测系统有一定的分析能力。
- (5) 具备传感器实用电路的自学能力。

1 传感技术概论

为了研究自然现象和制造劳动工具，人类仅靠五官获取外界信息已远远不够，故发明了能代替或补充五官功能的传感器。传感器的历史远比近代科学的历史悠久，天平自埃及五朝即开始使用，利用液体膨胀特性检测温度始于 16 世纪，19 世纪奠定电磁学基础的法拉第物理法则仍是当今电磁传感器的工作原理。对自然现象的定量认识，先要通过传感器获取信息，然后通过处理获取的信息，弄清自然现象的本质。以电量为输出的传感器虽然历史不长，但发展迅速，目前只要谈到传感器，指的几乎都是具有电输出的传感器。集成电路技术和半导体应用技术的发展使传感器性能大大提高。

1.1 传感器的定义、组成与分类

1.1.1 传感器的定义

关于传感器，至今尚无一个比较全面的定义。不过，对以下提法，学者们似乎不持异议，传感器（Transducer 或 Sensor）有时亦被称为换能器、变换器、变送器或探测器，主要特征是能感知和检测某一形态的信息，并将其转换成另一形态的信息。因此，传感器是指那些对被测对象的某一确定的信息具有感受（或响应）与检出功能，并使之按照一定规律转换成与之对应的有用输出信号的元器件或装置。当然这里的信息应包括电量或非电量。在不少场合，人们将传感器定义为敏感于待测非电量并可将其转换成与之对应的电信号的元件、器件或装置的总称。当然，将非电量转换为电信号并不是唯一的形式。例如，可将一种形式的非电量转换成另一种形式的非电量（如将力转换成位移等）；另外，从发展的眼光来看，将非电量转换成光信号或许更为有利。

1.1.2 传感器的组成

传感器一般是利用物理、化学和生物等学科的某些效应或机理，按照一定的工艺和结构研制出来的，因此传感器的组成的细节有较大差异。但是，总的来说，传感器应由敏感元件、转换元件和其他辅助部件组成，如图 1-1 所示。敏感元件是指传感器中能直接感受（或响应）与检出被测对象的待测信息（非电量）的部分，转换元件是指传感器中能将敏感元件所感受（或响应）出的信息直接转换成电信号的部分。例如，应变式压力传感器由弹性膜片和电阻应变片组成，其中的弹性膜片就是敏感元件，它能将压力转换成弹性膜片的应变（形变）；弹性膜片的应变施加在电阻应变片上，它能将应变转换成电阻的变化量，电阻应变片就是转换元件。

应该指出的是，并不是所有的传感器都必须包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量，它就同时兼为转换元件，因此，敏感元件和转换元件两者合一的

传感器是很多的。例如，压电晶体、热电偶、热敏电阻、光电器件等都是这种形式的传感器。

信号调节电路是能把转换元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理和控制的有用电信号的电路。辅助电路通常包括电源，即交、直流供电系统。

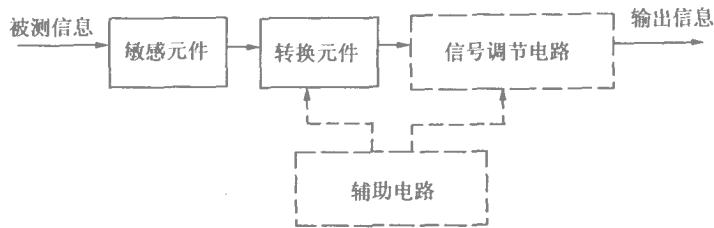


图 1-1 传感器组成框图

1.1.3 传感器的分类

传感器的品种极多，原理各异，分类方法也不同，归纳起来大致有如下几种。

(1) 按照传感器的结构分为三种类型，如图 1-2 所示。

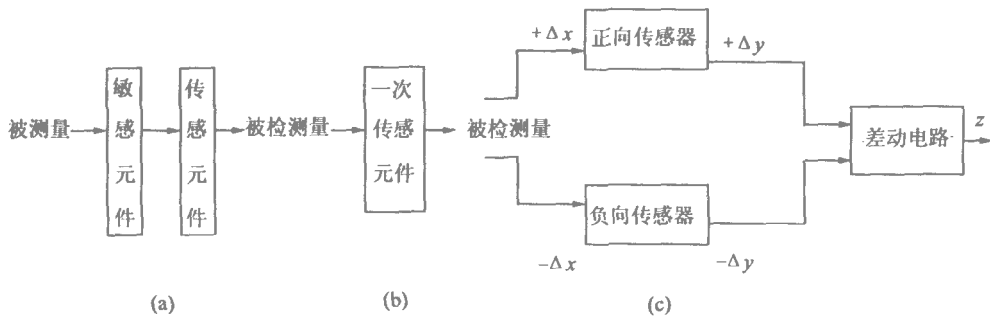


图 1-2 传感器的结构类型

图 1-1 (a) 和图 1-1 (b) 具有结构简单的优点，图 1-1 (c) 具有灵敏度高、抗干扰能力强、线性度好等优点。

(2) 按照传感器输出量的性质分为模拟传感器和数字传感器。

其中数字传感器便于与计算机联用，且抗干扰性较强，例如脉冲盘式角度数字传感器、光栅传感器等。传感器数字化是今后的发展趋势。

(3) 按敏感材料不同分为半导体传感器、陶瓷传感器、石英传感器、光导纤维传感器、金属传感器、有机材料传感器、高分子材料传感器……，按这种方法可分出很多种类。

(4) 按应用场合不同分为工业用、农用、军用、医用、科研用、环保用和家庭用传感器等。若按具体使用场合，还可分为汽车用、舰船用、飞机用、宇宙飞船用、防灾用传感器等。此外，根据使用目的的不同，又可分为计测用、监视用、检查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

(5) 按照工作原理分类,可分为电阻式、电容式、电感式、光电式、光栅式、热电式、压电式、红外、光纤、超声波、激光传感器等。这种分类有助于对传感器的工作原理的阐述。

(6) 按被测量分类,可分为力学量、光学量、磁学量、几何学量、运动学量、流速与流量、液面、热学量、化学量、生物量传感器等。这种分类有助于人们选择传感器和应用传感器。

1.2 传感器的数学模型概述

从系统角度来看,一种传感器就是一种系统。根据系统工程学理论,一个系统总可以用一个数学方程式或函数来描述,即用某种方程式或函数表征传感器的输出和输入间的关系和特性,从而用这种关系指导对传感器的设计、制造、校正和使用。但是准确地建立一个系统的数学模型是困难的。在工程上,总是采用一些近似方法建立起系统的初步模型,然后,经过反复模拟试验确立系统的最终数学模型,这种方法同样适用于传感器数学模型的建立。下面介绍传感器静态和动态数学模型的一般描述方法。

1.2.1 静态模型

静态模型是指在静态信号(输入信号不随时间变化的量)情况下,描述传感器输出与输入量间的一种函数关系。如果不考虑蠕动效应和迟滞特性,传感器的静态模型一般可用多项式来表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中: x ——输入量;

y ——输出量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器线性灵敏度,常用 K 或 S 表示;

a_2, \dots, a_n ——非线性项的待定系数。

传感器的静态模型有三种有用的特殊形式:

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots \quad (1-3)$$

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots \quad (1-4)$$

式(1-2)表示传感器的输出量和输入量呈严格的线性关系,式(1-3)和式(1-4)均为非线性关系。

1.2.2 动态模型

动态模型是指传感器在准动态信号或动态信号(输入信号随时间而变化的量)作用下,描述其输出和输入信号之间的一种数学关系的模型。动态模型通常采用微分方程和传递函数等来描述。

1.2.2.1 微分方程

绝大多数传感器都属模拟（连续变化）系统之列。描述模拟系统的一般方法是采用微分方程。在实际的模型建立过程中，一般采用线性不变系统理论描述传感器的动态特性，即用线性常系数微分方程表示传感器输出量 y 和输入量 x 的关系。其通式如下：

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-5)$$

式中 a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 和 b_m, b_{m-1}, \dots, b_0 为传感器的结构参数（是常量）。对于传感器，除 $b_0 \neq 0$ 外，一般取 b_1, b_2, b_m 为 0。

对于复杂的系统，其微分方程的建立求解是很困难的，但是一旦求出微分方程的解就能分清其暂态响应和稳定响应。为了求解的方便，常采用拉普拉斯变换（简称拉氏变换）将式（1-5）变为算子 S 的代数式或采用下面将要介绍的传递函数研究传感器的动态特性。

1.2.2.2 传递函数

如果 $y(t) \leq 0$ 在 $y(t) = 0$ 时 则 $y(t)$ 的拉氏变换可定义为

$$Y(S) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (1-6)$$

式中： $S = \sigma + j\omega$ ， $\sigma > 0$ 。

对式（1-5）两边取拉氏变换，则得

$$Y(S)(a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_0) = X(S)(b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_0)$$

我们定义输出 $y(t)$ 的拉氏变换 $Y(S)$ 和输入 $x(t)$ 的拉氏变换 $X(S)$ 的比为该系统的传递函数 $H(S)$ ：

$$H(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (1-7)$$

对 $y(t)$ 进行拉氏变换的初始条件是 $t \leq 0, y(t) = 0$ 。这要求传感器被激励之前所有的储能元件（如质量块、弹性元件、电气元件）均应符合上述初始条件。从式（1-7）可知，它与输入量 $x(t)$ 无关，只与系统结构参数有关。因此， $H(S)$ 可以简单而恰当地描述系统输出与输入的关系。

只要知道 $Y(S)$ 、 $X(S)$ 、 $H(S)$ 三者中的任意两者，第三者便可方便地求出。可见，无需了解复杂系统的具体内容，只要给系统一个激励信号 $x(t)$ ，便可得到系统的响应 $y(t)$ ，系统特性就能被确定。它们可用图 1-3 (a) 所示框图表示。

对于多环节串、并联组成的传感器，如果各个环节阻抗匹配适当，可忽略相互间的影响，则传感器的等效传递函数可按下列代数方式求得：

若传感器由 r 个环节串联而成，如图 1-3 (b) 所示，其等效传递函数为

$$H(S) = H_1(S) * H_2(S) * \cdots * H_r(S) \quad (1-8)$$

若传感器由 p 个环节并联而成，如图 1-3 (c) 所示，其等效传递函数为

$$H(S) = H_1(S) + H_2(S) + \cdots + H_p(S) \quad (1-9)$$

其中 $H_i(S)$ 为各个环节的传递函数。

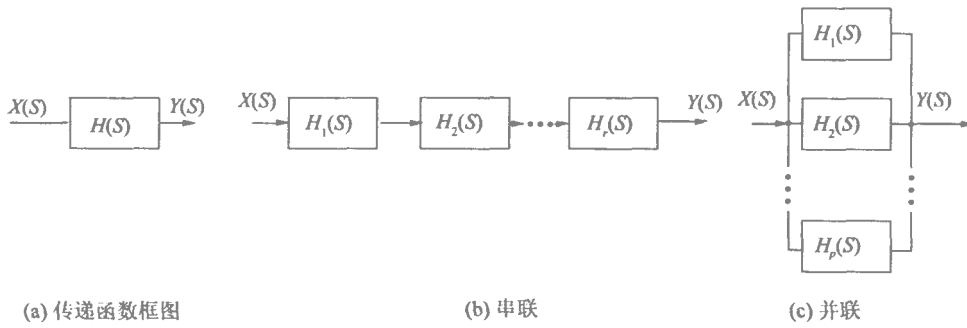


图 1-3 传感器的传递函数框图表示法

1.3 传感器的基本特性

传感器所测量的非电量一般有两种形式：一种是稳定的，即不随时间变化或变化极其缓慢，称为静态信号；另一种是随时间变化而变化，称为动态信号。由于输入量的状态不同，传感器所呈现出来的输入 - 输出特性也不同，因此存在所谓的静态特性和动态特性。为了降低或消除传感器在测量控制系统中的误差，传感器必须具有良好的静态和动态特性，才能使信号（或能量）按规律准确地转换。

1.3.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性主要由下列几种性能来描述。

1.3.1.1 线性度

所谓传感器的线性度就是其输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离直线的程度，又称为非线性误差。非线性误差可用下式表示：

$$E = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中： Δ_{\max} ——输出量和输入量实际曲线与拟合直线之间的最大偏差；

Y_{FS} ——满量程输出值。

式(1-1) ~ 式(1-4)所示的静态模型所呈现的非线性程度是不一样的，可用图1-4表示。

从图1-4(d)可以看到，仅具有奇数次方的多项式模型的传感器在相当大的输入范围内有较宽的准线性，图1-4(b)为理想线性特性，几乎每一种传感器都不具备如此特性，即都存在非线性，因此在使用非线性传感器时必须对它的输出特性进行线性处理。常用的方法有理论直线法、端点线法、割线法和切线法、最小二乘法和计算程序法等。

1.3.1.2 灵敏度

传感器的灵敏度是其在稳态下输出增量 Δy 与输入增量 Δx 的比值，常用 S_n 来表

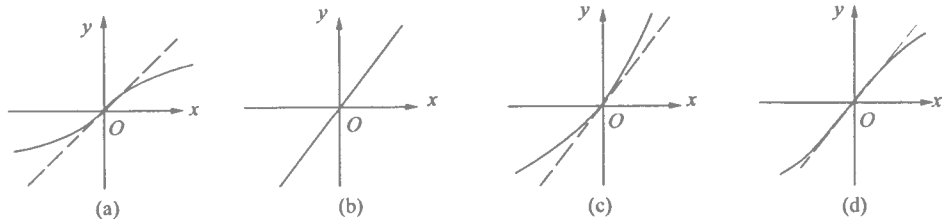


图 1-4 传感器的线性度表示

示，即

$$S_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-11)$$

对于线性传感器，其灵敏度就是它的静态特性的斜率，如图 1-5 (a) 所示，即

$$S_n = \frac{y - y_0}{x}$$

非线性传感器的灵敏度是一个变量，如图 1-5 (b) 所示，即用 $\frac{dy}{dx}$ 表示传感器在某一工作点的灵敏度。

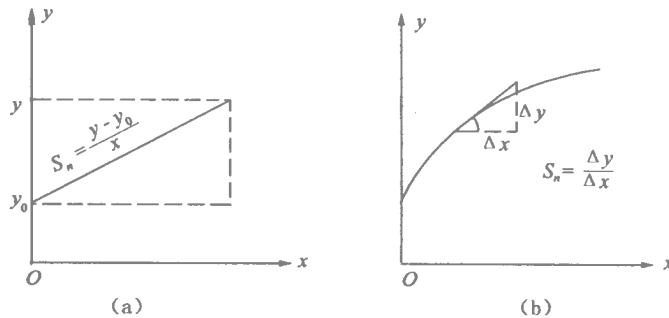


图 1-5 灵敏度定义

1.3.1.3 重复性

重复性表示传感器在输入量按同一方向作全程多次测试时所得特性曲线不一致性的程度（见图 1-6）。按相同输入条件测试的多条输出特性曲线越重合，其重复性越好，误差也越小。传感器输出特性的不重复性主要由传感器机械部分的磨损、间隙、松动、部件的内摩擦、积尘以及辅助电路老化和漂移等原因产生。

不重复性一般采用下式的极限误差式表示：

$$E_s = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中： Δ_{\max} ——输出最大不重复误差；

Y_{FS} ——满量程输出值。

1.3.1.4 迟滞

迟滞特性表明传感器在正（输出量增大）行程和反向（输出量减小）行程期间输出

—输入曲线不重合的程度，如图 1-7 所示。对于同一大小的输入信号 x ，在 x 连续增大的行程中，对应某一输出量为 y_i ，在 x 连续减小过程中，对应于输出量为 y_d 之间的差值叫做滞环误差，这就是迟滞现象。该误差用 E 表示为：

$$E = |y_i - y_d| \quad (1-13)$$

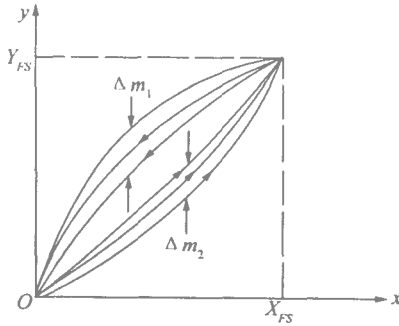


图 1-6 重

复 性

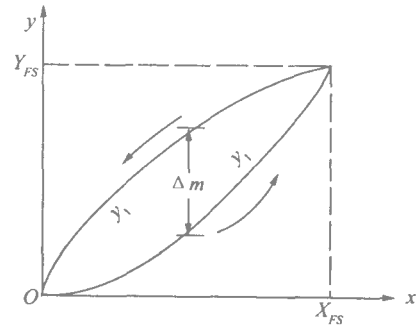


图 1-7 迟滞现象

在整个测量范围内产生的最大滞环误差用 Δm 表示，它与满量程输出值的比值称为最大滞环率 E_{\max} ，可用下式表示：

$$E_{\max} = \frac{\Delta m}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

产生这种现象的主要原因类似于重复误差的原因。

1.3.1.5 精确度（精度）

说明精确度的指标有三个：精密度、正确度和精确度。

(1) 精密度 δ 。精密度说明测量结果的分散性，即对某一稳定的对象（被测量）由同一测量者用同一传感器和测量仪表在相当短的时间内连续重复测量多次（等精度测量），其测量结果的分散程度。 δ 愈小，则说明测量愈精密（对应随机误差）。

(2) 正确度 ϵ 。正确度说明测量结果偏离真值大小的程度，即示值有规则偏离真值的程度，也指所测值与真值的符合程度（对应系统误差）。

(3) 精确度 τ 。精确度含有精密度与正确度两者之和的意思，即测量的综合优良程度。在最简单的场合下可取两者的代数和，即 $\tau = \delta + \epsilon$ 。通常精确度是用测量误差的相对值来表示的。

在工程应用中，为了简单表示测量结果的可靠程度，引入一个精确度等级概念，用 A 来表示。传感器与测量仪表精确度等级 A 以一系列标准百分数值（0.001, 0.005, 0.02, 0.05, ..., 1.5, 2.5, 4.0, ...）进行分档。这个数值是传感器和测量仪表在规定条件下允许的最大绝对误差值相对于其测量范围的百分数，它可以用下式表示：

$$A = \frac{\Delta A}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中： A ——传感器的精度；

ΔA ——测量范围内允许的最大绝对误差；

Y_{FS} ——满量程输出值。

传感器设计和出厂检验时，其精度等级代表的误差指传感器测量的最大允许误差。

1.3.1.6 分辨力

分辨力是用来表示传感器或仪表装置能够检测被测量最小变化量的能力，通常以最小量程的单位值来表示。当被测量的变化值小于分辨力时，传感器对输入量的变化无任何反应。例如电压表的分辨力是 $10\ \mu\text{V}$ ，即能测的最小电压为 $10\ \mu\text{V}$ ，当增加 $7\ \mu\text{V}$ 或 $8\ \mu\text{V}$ 的电压时，电压表不会有任何反应。

1.3.1.7 漂移

传感器的漂移是指在外界的干扰下，在一定时间间隔内，输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等。

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，零点或灵敏度随时间的缓慢变化。温度漂移为环境温度变化而引起的零点或灵敏度的漂移。

1.3.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性指传感器测量动态信号时，输出对输入的响应特性。传感器测量静态信号时，由于被测量不随时间变化，测量和记录的过程不受时间限制，但是实际检测中的大量被测量是随时间变化的动态信号，传感器的输出不仅需要能精确地显示被测量的大小，而且还能显示被测量随时间变化的规律，即被测量的波形。传感器能测量动态信号的能力用动态特性来表示。

动态特性与静态特性的主要区别是：动态特性中输出量与输入量的关系不是一个定值，而是时间的函数，它随输入信号的频率而改变。在实际工作中，传感器的动态特性常用它对某些标准输入信号的响应来表示。这是因为传感器对标准输入信号的响应容易用实验方法求得，并且它对标准输入信号的响应与它对任意输入信号的响应之间存在一定的关系，往往知道了前者就能推定后者。最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种，所以传感器的动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

1.3.2.1 阶跃响应

当给静止的传感器输入一个单位阶跃函数信号

$$u(t) \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

时，其输出特性称为阶跃响应特性。衡量阶跃响应特性的指标如图 1-8 所示。

(1) 最大超调量 δ_p 。最大超调量就是响应曲线偏离阶跃曲线的最大值，常用百分数表示。当稳态值为 1 时，最大百分比超调量 $\delta_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$ 。

最大超调量能说明传感器的相对稳定性。

(2) 延滞时间 t_d 。 t_d 是阶跃响应达到稳态值 50% 所需要的时间。

(3) 上升时间 t_r 。 t_r 是响应曲线从零上升到稳态值的 10% ~ 90% 所需要的时间。

(4) 峰值时间 t_p 。 t_p 是响应曲线到第一个峰值所需的时间。

(5) 响应时间 t_s 。 t_s 是响应曲线衰减到稳态值之差不得超过 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 时所需要的

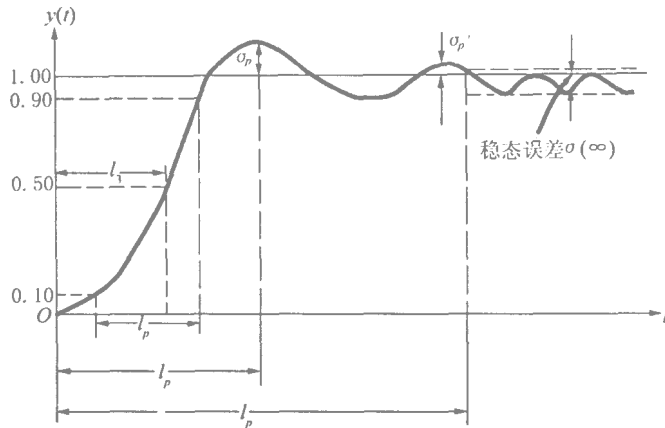


图 1-8 阶跃响应特性

时间，有时称为过渡过程时间。

上述是时域响应的主要指标。对于一个传感器，并非每一个指标均要提出，往往只要提出几个被认为是重要的性能指标就可以了。

1.3.2.2 频率响应

由物理学可知，在一定条件下，任意信号均可分解为一系列不同频率的正弦信号。也就是说，一个以时间作为独立变量进行描述的时域信号，可以变换成一个以频率作为独立变量进行描述的频域信号。所以，一个复杂的被测实际信号往往包含了许多种不同频率的正弦波。如果我们把正弦信号作为传感器的输入，然后测出它的响应，就可对传感器的频率动态性能作出分析和评价。

(一) 频率响应的通式

输入信号为正弦波 $x(t) = A\sin\omega t$ 时 输出信号 $y(t)$ 的波形如图 1-9 所示。由于瞬态响应的影 响，开始时输出信号并不是正弦波，但经过一定时间后，瞬态响应部分逐渐衰 减以至消失 这时输出量 $y(t)$ 是与输入量 $x(t)$ 的频率相同、幅值不等且有一定相位差的正弦波 即 $y(t) = B\sin(\omega t + \varphi)$ 。因此，输入信号振幅 A 即使一定 只要 ω 有所变化 输出信号的振幅和相位也会发生变化。频率响应就是在稳定状态下，幅值比 B/A 和相位 φ 随 ω 变化而变化的状况。

(二) 频率响应特性曲线

用频率响应法求传感器的动态特性，只要对它施以正弦激励信号，令 $x(t) = A\sin\omega t$ ，在输出达到稳态后测量输出和输入的幅值比和相位差即可。逐次改变输入信号 $x(t)$ 的频率，即可绘出输出、输入幅值比和频率的关系——幅频特性曲线及输出、输入相位差与频率的关系——相频特性曲线，其一般情况如图 1-10 所示。利用它可以 从频率域形象、直观、定量地表征传感器的动态特性。

在实际作图时，对于幅频曲线，常以 $\lg\omega$ 作自变量，以 $20\lg\omega$ 作因变量（单位为分贝）；对于相频曲线，常以 $\lg\omega$ 作自变量，以 $\varphi(\omega)$ 作因变量（单位为度）。两者分别称

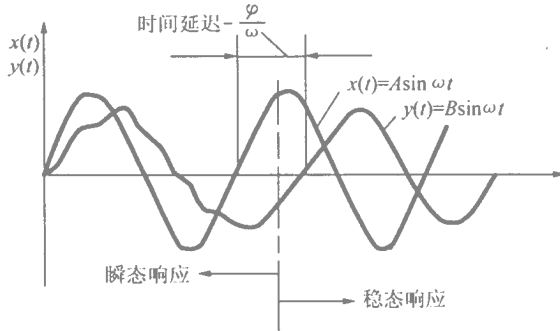
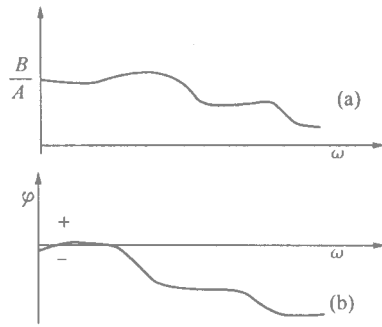


图 1-9 正弦输入时的频率响应

图 1-10 幅频特性曲线和相频特性曲线
(a) 幅频特性; (b) 相频特性

为对数幅频曲线和对数相频曲线。

(三) 频率响应性能指标

传感器的频率响应性能指标是由其幅频特性（或对数幅频特性）和相频特性曲线上的特性参数来表示的。为使被测信号中的各种频率成分通过传感器时输出、输入的幅值比和相位差（即滞后时间）相同，也即不产生失真，传感器的幅频特性应工作在曲线的平直段，相频特性应工作在曲线的直线段。

通常在表示传感器的频响特性时主要用幅频特性。典型的对数幅频特性曲线如图 1-11 所示，其主要性能指标有：

(1) 频率响应范围。图 1-11 中的 0dB 的水平线为对数幅频曲线上的平直段，是理想的传感器的幅频特性，其输出与输入有固定的比例关系。如果传感器的幅频曲线偏离理想直线，但曲线上的某一段幅值比的变化量即使不超过某个允许的公差带，仍然认为是可用的范围（如在声学 and 电学仪器中往往规定 $\pm 3\text{dB}$ 的公差带），而对传感器来讲则要根据所需的测量精度来定公差带。幅频曲线越出公差带处所对应的频率分别叫做下截止频率 ω_L 和上截止频率 ω_H ，而这个频率区间（ $\omega_H - \omega_L$ ）称为传感器的频率响应范围或称频响范围，简称频带或通频带。

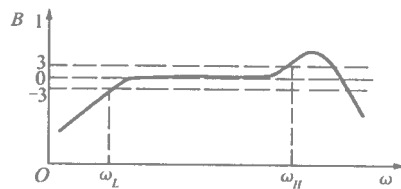


图 1-11 对数幅频特性曲线

在选择频响范围时，为不丢失被测对象的全部有用信息，应使被测信号的有用谐波频率都在这个范围之内。

(2) 幅值误差和相位误差。这一误差是在频率响应范围内与理想传感器相比产生的幅值和相位。

1.3.3 实现不失真测量的条件

所谓不失真测量，就是被测信号输入测量装置后，其输出无滞后，且能不失真地复现被测输入信号的波形。此时，输出 $y(t)$ 与输入 $x(t)$ 应满足如下关系：

$$y(t) = Kx(t)$$

式中： K ——常数。

此式表明输出无滞后 ($\tau_d = 0$)，波形不失真，只不过幅值增大了 K 倍而已，如图 1-12 (a) 所示。

如果测量的目的只是为了精确地测定输入，而不作为控制系统的反馈信号，那么输出滞后于输入 ($\tau_d \neq 0$) 也无妨，只要波形不失真即可，如图 1-12 (b) 所示。此时输出 $y(t)$ 与输入 $x(t)$ 应满足如下关系：

$$y(t) = Kx(t - \tau_d) \quad (1-16)$$

式中： τ_d ——滞后时间。

此时，若将输出信号沿时间轴向左平移 τ_d ，再将其幅值缩小 K 倍，则与输入信号完全重合。

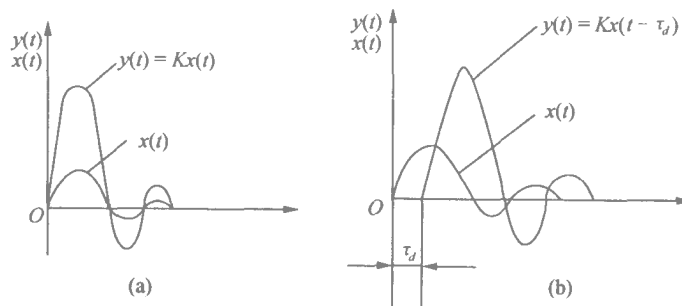


图 1-12 不失真测量

(a) $\tau_d = 0$; (b) $\tau_d \neq 0$

要使式 (1-16) 成立，测量装置的频率响应特性应同时满足以下两个条件：

(1) 装置对输入的被测信号中所包含的各种频率成分的幅值放大倍数都一样，即装置的幅频特性应满足 $B/A = K = \text{常数}$ 。

(2) 输入的被测信号中的各种频率成分通过装置后，它的输出滞后于输入的时间 τ_d 都要一样，即装置的相频特性应满足 $\varphi(\omega) = -\tau_d\omega$ 。

上述两个条件中只要任何一个不满足，都将引起输出信号的失真。当 $B/A = \text{常数}$ 时引起的失真称为幅值失真；当 $\varphi(\omega) = -\tau_d\omega$ 时，即 $\varphi(\omega)$ 与 ω 之间存在非线性关系时引起的失真称为相位失真。对传感器而言， τ_d 通常为负值，即输出滞后于输入。

对一个实际的测量装置，即使在某一频率响应范围内工作，也难以完全理想地实现不失真测量，通常只能使失真限制在一定的误差范围内，满足特定的要求。所以在具体测量时，首先要选好测量装置，并掌握所用测量装置的动态特性，使其在要求的工作频率范围内的幅频特性和相频特性比较接近不失真测量的条件。其次，应对输入的被测信号进行必要的前置处理，及时滤掉非信号频带内的噪声，以免某些噪声因其频带进入测量装置的谐振区而使信噪比变坏。此外，在选择测量装置时，还应根据不同的测量目的和要求，有针对性地满足测量要求。例如，当仅要求精确地测定其输入的大小，即只要求了解信号中某些频率成分及其强度（幅值）时，只要求测量装置有好的幅频特性就可

以了；如果为了将测量结果用作自动控制系统的反馈控制信号，这时对测量装置的幅频特性和相频特性就都有严格要求了，因为在这种应用场合下幅值和相位失真的误差都会影响自动控制系统的精度和稳定性。

1.3.4 传感器的性能指标

传感器的性能指标如表 1-1 所示。

表 1-1 传感器性能指标一览表

基本参数指标	环境参数指标	可靠性指标	其他指标
1. 量程指标： 量程范围、过载能力等 2. 灵敏度指标： 灵敏度、满量程输出、分辨力、输入输出阻抗等 3. 精度方面的指标： 精度（误差）、重复性、线性、滞后、灵敏度误差、阈值、稳定性、漂移等 4. 动态性能指标： 固有频率、阻尼系数、频响范围、频率特性、时间常数、上升时间、响应时间、过冲量、衰减稳态误差、临界速度、临界频率等	1. 温度指标： 工作温度范围、温度误差、温度漂移、灵敏度温度系数、热滞后等 2. 抗冲振指标： 各向冲振容许频率、振幅值、加速度、冲振引起的误差等 3. 其他环境参数： 抗潮湿、抗介质腐蚀、抗电磁场干扰能力等	工作寿命、平均无故障时间、保险期、疲劳性能、绝缘电阻、耐压、反抗飞弧性能等	1. 使用方面： 供电方式（直流、交流、频率、波形等）、电压幅度与稳定度、功耗、各项分布参数等 2. 结构方面： 外形尺寸、重量、外壳、材料、结构特点等 3. 安装连接方面： 安装方式、馈线、电缆等

1.3.5 传感器特性的应用

(1) 如果输入、输出是可以观察的量（已知），那么通过输入、输出就可以推断系统的传输或转换特性（系统标定就是利用这样的过程）。

(2) 如果系统特性已知、输出可测，那么通过该特性和输出就可以推断导致该输出的相应输入量（检测就是利用这样的过程）。

(3) 如果输入和系统特性已知，则可以推断和估计系统的输出量（干扰的查找就是利用这样的过程）。

一般应根据测试或控制的目的、使用环境、被测对象、允许的测量误差和信号处理等条件，在总观、全面、综合考虑的基础上兼顾经济因素，合理地选取传感器。在性能上，一般要求传感器输出信号大，与输入信号成比例；迟滞与非线性误差小；内部噪声小，且不易受外界干扰；反应速度快；动作能量小；对被测状态的影响小；使用寿命长；工作稳定可靠；成本低；容易使用、维修和校准等。由于有不少因素相互影响、相互制约，因此要全面考虑，提出合理要求。例如，灵敏度高，传感器所能感知的变化量小，被测量只要有微小的变化，传感器就有较大的输出，这对保证测量精度有益。但还

应注意到，要保证测量精度，传感器必须工作在非饱和区的线性段，而过高的灵敏度会影响其适用的测量范围，且灵敏度愈高，与测量信号无关的干扰信号也愈容易混入，且会被放大系统放大，影响测量精度。在通常情况下，传感器的精确度愈高，价格愈昂贵，维护愈困难，所以在保证测量精度的前提下，不要随便选用高精度、高灵敏度的传感器。

在传感器的选用过程中还应对环境进行调查，以选择能适应工作条件的传感器。如湿度过大会使硒光电池很快变坏，影响电器的绝缘性能，造成光学器件不能正常工作；湿气会改变电容介质，影响电容传感器的正常工作；温度变化可能给某些传感器带来零点漂移，温度影响结构尺寸变化，可能带来测量误差，过热能使某些传感器不能正常工作；磁场对磁电式传感器有影响等。因此应针对不同的使用环境选择传感器。

思考题

1. 简述传感器的组成及其各部分的功能。
2. 传感器静态特性技术指标及其各自的意义是什么？
3. 当线位移传感器从 4 mm 变到 2 mm 时，输出电压变化了 1 mV，则该传感器的灵敏度是多少？
4. 传感器的动态特性常用什么方法进行描述？
5. 传感器实现不失真测量的条件是什么？在实际工作中应如何具体运用？

2 电阻应变式传感器

2.1 弹性敏感元件

2.1.1 弹性敏感元件的概念

物体因外力作用而改变原来的尺寸或形状，称为变形。如果外力去掉后完全恢复其原来的尺寸和形状，那么这种变形称为弹性形变。具有弹性形变特点的元件称为弹性元件。弹性元件是很多传感器的核心部分，它能把感受到的各种形式的非电量变换成应变和位移量，然后由各种形式的传感元件把这些量变为电量。

当弹性敏感元件受压（拉）力时，元件除了产生变形以外，其内部横截面之间的相互作用力称为内力，记为 N ，单位是 N。弹性敏感元件单位横截面 S （单位为 mm^2 ）上所受的力称为应力，记为 σ 。

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad (2-1)$$

如图 2-1 所示，单位长度产生的形变称为相对形变，也称为应变，记为 ϵ 。

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2-2)$$

在材料的弹性范围内， σ/ϵ 为常数，称为弹性模量，记为 E 。

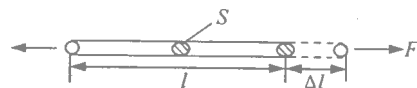


图 2-1 应变示意图

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2-3)$$

拉压虎克定律为：

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \epsilon \\ \epsilon &= \frac{\sigma}{E} = \frac{N}{ES} \end{aligned} \quad (2-4)$$

2.1.2 弹性敏感元件的特性

2.1.2.1 刚度

刚度是弹性元件在外力作用下变形的量度，一般用 k 表示。

$$k = \frac{dF}{dx} \quad (2-5)$$

式中： F ——作用在弹性元件上的外力；

x ——弹性元件产生的变形。