第 1 章　绪　　论

1.1　传感器的概念

人们在利用传感器获取信息的过程中，首先要获取精确、可靠的信息。这种信息的获取是保证机器设备正常运行或处于最佳状态的基础。传感器不仅在现代化生产、经营领域中发挥着重要的作用，而且在基础学科研究和高新技术领域的开发过程中具有重要的应用，尤其是在超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等条件下，迫切需要适应各种极限环境的高灵敏度、高可靠性的检测传感器。

目前，传感技术早已渗透到工业生产、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程、宇宙开发、海洋探测，甚至文物保护等广泛的领域。在人们的生活中，处处都使用着各种各样的传感器，如电视机、音响、DVD、空调遥控器等使用的是红外线传感器；电冰箱、微波炉、空调机温控使用的是温度传感器；家用煤气灶、燃气热水器报警使用的是气敏传感器；家用摄像机、数码相机、上网聊天视频使用的是光电传感器；汽车使用的传感器更多，如速度、压力、油量、爆震传感器及角度线性位移传感器等。这些传感器的共同特点是利用各种物理、化学、生物效应等实现对被测信号的测量。

在传感器中包含两个不同的概念：一是检测信号，二是能把检测的信号转换为一种与被测量有对应函数关系且便于传输和处理的物理量。例如，家庭常用的遥控器把光信号转换为电信号，楼道照明的声控开关把声音转换为电信号。因此，传感器又常称为变换器、转换器、检测器、敏感元件、换能器等。在不同的学科领域中，这些不同的名称是根据同一类型的器件在不同领域中的应用得来的。现代化生产和科学技术的发展不断地应用于传感技术，也有力地推动着传感技术的现代化。传感技术与现代化生产和科学技术的密切关系，使传感技术成为一门十分活跃的技术学科，几乎渗透到了人类的一切活动领域，发挥着越来越重要的作用。研究新机制、高性能传感器，往往会导致某些边缘学科在技术上的突破。

1.1.1　传感器的基本组成

传感器一般由两个基本元件组成：敏感元件与转换元件。在完成非电量到电量的变换过程中，并非所有的非电量参数都能一次直接变换为电量，而往往是先变换成一种易于变换成电量的非电量（如位移、应变等），然后再通过适当的方法变换成电量。因此，人们把能够完成预变换的器件称为敏感元件。例如，在传感器中，建立在力学结构分析上的各种类型的弹性元件（如梁、板等）统称为弹性敏感元件。而转换元件是能将感觉到的被测非电量参数转换为电量的器件，如应变计、压电晶体、热电偶等。转换元件是传感器的核心部分，是利用各种物理、化学、生物效应等原理制成的。新的物理、化学、生物效应的发现，常被用到新型传感器上，使其品种与功能日益增多，应用领域更加广泛。应该指出的是，并非所有传感器都包括敏感元件与转换元件，有些传感器不需要起预变换作用的敏感元件，如热敏电阻、光电器件等。传感器的基本组成如图 1.1 所示。

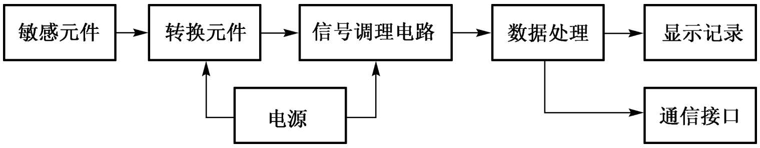


图 1.1 传感器的基本组成

1.1.2 传感器的定义

传感器的定义有很多种，当前的主要定义如下。

【定义 1】国家标准《传感器通用术语》（GB7665—1987）对传感器（Transducer/Sensor）的定义是：“能感受（或响应）规定的被测量并按一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成。”

这一定义与美国仪表协会（ISA）给出的定义类似，该定义包含的内容是：① 传感器是测量装置，能完成检测任务；② 传感器可以完成对被测量的转换。

除定义 1 外，有些教科书根据定义 1 的含义引申出了更通俗和更易理解的传感器定义。

【定义 2】传感器是一种以一定的精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。

在上述定义中，需要说明的是：① 被测量可能是物理量，也可能是化学量或生物量等；② 其输出量是某种便于转换、传输和处理的物理量，可能是气、光、电等物理量，但通常是电物理量，电物理量是物理量中最容易传输、转换和处理的；③ 传感器的输出与输入之间有对应的关系，且这种对应关系需有一定的规律性和精度要求；④ 传感器可以是一种由简单的物理材料制成的元器件，也可以是较复杂的、包含转换和放大环节的集成电路元件或装置。

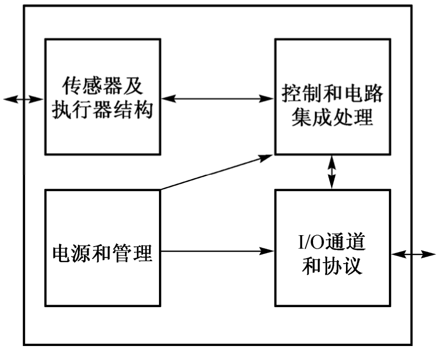


图 1.2 广义换能器

【定义 3】从广义来讲，传感器是换能器的一种，换能器（Transducer）是将能量从一种形式转换为另一种形式的装置。换能器包括传感器和执行器两个方面的含义。图 1.2 所示为传感器与执行器系统的基本组成。

1.2 传感器的分类

传感器是知识密集、技术密集的产品，其种类十分繁杂。主要的分类方式有以下几种。

1. 按物理定律机制进行分类

（1）结构型传感器

结构型传感器是按物理学中场的定律定义的，这些定律包括动力场的运动力学、电磁场的电磁定律等。这些定律一般是以方程式给出的，因此这些方程式也就是许多传感器工作时的数学模型。其特点是，传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置的变化引起场的变化为基础的，而不是以材料特性的变化为基础的。

（2）物性型传感器

物性型传感器是按照物质定律定义的，如胡克定律、欧姆定律等。由于物质定律是表示物质某种客观性质的法则，因此物性型传感器的性能随着材料的性质不同而异。例如，光电管就是物性型传感器，它基于物质法则中的外光电效应，其特性与电极涂层材料的性质密切相关。

（3）复合型传感器

复合型传感器是由结构型和物性型组合而成的，兼有两者特征的传感器。

2．按电路供电方式进行分类

（1）无源传感器

无源传感器也称为能量转换型传感器，主要由能量变换元件构成，它不需要外部电源。例如，基于压电效应、热电效应、光电动势效应构成的传感器都属于无源传感器。

（2）有源传感器

有源传感器也称为能量控制型传感器，在信息变化过程中，其能量需要由外部电源供给。例如，电阻、电容、电感等电路参量传感器和基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器均属于有源传感器。

3．按原理进行分类

按原理进行分类时，传感器主要包括以下几种。

① 电参量式传感器：电阻式、电感式、电容式传感器。

② 磁电式传感器：磁电感应式、霍尔式、磁栅式传感器。

③ 压电式传感器：压电式力传感器、压电式加速度传感器、压电式压力传感器。

④ 光电式传感器：红外式、CCD 摄像式、光纤式、激光式传感器等。

⑤ 气电式传感器：半导体气敏传感器、集成复合型气敏传感器。

⑥ 热电式传感器：热电偶等。

⑦ 波式传感器：超声波式、微波式传感器。

⑧ 射线式传感器：核辐射物位计、厚度计、密度计等。

⑨ 半导体式传感器：半导体温度传感器、半导体湿度传感器等。

⑩ 其他原理的传感器。

4．按用途进行分类

按用途分类的传感器包括温度传感器、气敏传感器、生物传感器、光敏传感器、力敏传感器、声敏传感器、湿度传感器、磁敏传感器、流量传感器及其他传感器。

5．按信号输出方式进行分类

按信号输出方式进行分类，可分为模拟量传感器和数字量传感器。凡输出量为模拟量的传感器称为模拟量传感器，而输出量为数字量的传感器则称为数字量传感器。

6．按传输、转换过程是否可逆进行分类

根据传输、转换的过程是否可逆，传感器可分成双向（可逆）传感器和单向（不可逆）传感器。

传感器的分类方法大致可分为上述 6 种模式，但常用的分类方法还是按照原理和用途来分的。这两种分类方法的缺点是很难严格地归类，因此在许多情况下常常出现两种分类的交叉、重叠和混淆。如果根据工作原理和用途把两种方法综合使用，则比较科学、合理。本书在经过比较和分析各种分类方法后，采用了按原理和用途两种方法的综合分类法。

1.3 传感器的基本特性

传感器是实现传感功能的基本器件，传感器的输入和输出关系特性是传感器的基本特性，也是传感器内部参数作用关系的外部特性表现，不同传感器的内部结构参数决定了其所具有的不同外部特性。

传感器测量的物理量基本上有两种形式：静态（稳态或准静态）和动态（周期变化或瞬态）。前者的信号不随时间变化（或变化比较缓慢），后者的信号则随时间变化而变化。传感器要尽量准确地反映输入物理量的状态，因此传感器所表现出的输入和输出特性也就不同，即存在静态特性和动态特性。

不同传感器有不同的内部参数，因此它们的静态特性和动态特性就表现出不同的特点，对测量结果也产生不同的影响。一个高精度的传感器，必须要有良好的静态特性和动态特性，从而确保检测信号（或能量）的无失真转换，使检测结果尽量反映被测量的原始特征。

1.3.1 传感器的静态特性

假设房间里有一个温度计，且其读数显示的温度为 20℃。不必关心房间的真实温度是 19.5℃还是 20.5℃，而且人们的身体也不能区分 0.5℃这样小的温度变化，因此不准确度在±0.5℃范围内的温度计完全够用。如果必须测量某些化学过程的温度，那么 0.5℃的温度变化就可能会对反应的速率甚至产品的过程产生明显的作用，此时的测量不准确度就必须远低于±0.5℃。

测量准确度是在特定应用中选择传感器时需要考虑的因素，需要考虑的其他因素包括灵敏度、线性度及对环境温度变化的反应。这些因素统称为传感器的静态特性，它们会在特定传感器的数据表中给出。特别需要注意的是传感器特性值，仅在特定的校准条件下适用。在其他条件下使用传感器时，需对特性做某些补偿。

下面介绍各种静态特性。

1．准确度和不准确度（测量的不确定度）

传感器的准确度（Accuracy）衡量的是传感器的示值与真值的接近程度。真值是指被测量在一定条件下客观存在的、实际具备的量值。真值是不可确切获知的，实际测量中常用“约定真值”和“相对真值”。约定真值是用约定的办法确定的真值，如砝码的质量。相对真值是指具有更高精度等级的计量器的测量值。示值是由传感器给出的量值，也称测量值或测量结果。准确度是测量结果中系统误差与随机误差的综合，表示测量结果与真值的一致程度，由于真值未知，因此准确度是个定性的概念。

在实践中，更常引用的是一个传感器的不准确度（Inaccuracy）或测量不确定度而非准确度。不准确度或测量的不确定度是指其中一个读数可能是错误的程度，经常被引述为传感器满量程（Y_{FS}）读数的百分比。传感器测量的不准确度表示测量结果不能肯定的程度，或者表征测量结果分散性的一个参数。它只涉及测量值，是可以量化的，且经常由被测量算术平均值的标准差、相关量的标准不准确度等联合表示。

由于传感器的最大测量误差通常与传感器满量程的读数相关，若测量值远小于满量程读数，这样意味着放大了可能的测量误差。因此，需要选择量程和测量对象测量值相近的传感器，进而减少传感器的测量误差，这是传感器系统的一项重要设计规则。例如，一个压力测量预期值为 0～1MPa 的测控系统，应该选择 0～1Mpa 的传感器，而不应使用测量范围为 0～10MPa 的传感器。

【例 1.1】 一个压力传感器的测量范围为 0～10MPa，其满量程读数误差为±1%。(a)该传感器的最大测量误差的预期是什么？(b)如果该压力计测量 1MPa 的压力，那么可能的测量误差表示为输出读数的百分比是多少？

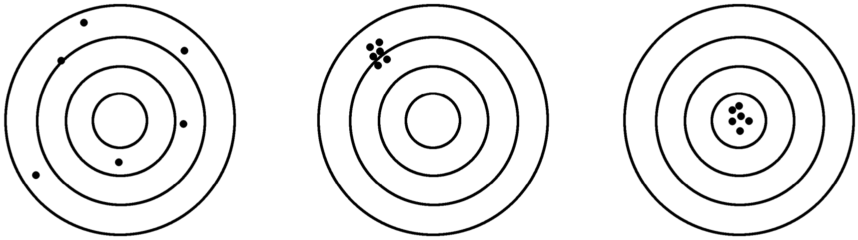
解：任何传感器读数的最大测量误差的预期是满量程读数的 1.0%，该特定传感器的满量程是 10MPa，因此最大可能的误差是 1.0%×10= 0.1MPa。

最大测量误差是一个定值，它仅与传感器的满量程读数有关，而与该传感器实际测量的量的大小无关。在这种情况下，正如之前计算出的那样，最大测量误差的大小为 0.1MPa。因此，在测量 1MPa 的压力时，最大可能的误差为 0.1MPa，因此其测量误差是 10%。

2．精度/重复性/再现性

精度（Precision）是描述传感器自由度随机误差的一个术语，如果用高精度传感器测得的大量读数的值相同，那么这些读数的传播会非常小。精度往往会与准确度相混淆。精度高并不意味着准确度高。高精度的传感器可能准确度低。高精度传感器中的低准确度通常是由测量过程中的偏差引起的，而偏差可通过重校校准来消除。

图 1.3 所示为三个工业机器人将组件放在桌上一个规定点处的测试结果，它清楚地说明以上概念。目标点在同心圆的中心位置，黑点表示每个机器人实际每次尝试放置组件的点。机器人 1 的准确度和精度在该次试验中都很低，即低精度、低准确度；机器人 2 始终把组件放在大致相同的错误位置，因此其精度高，准确度低；机器人 3 的精度和准确度都很高，因为它始终将组件放在正确的目标位置。



(a) 低精度、低准确度（机器人 1） (b) 高精度、低准确度（机器人2） (c) 高精度、高准确度（机器人3）

图 1.3 准确度和精度的比较

重复性（Repeatability）和再现性（Reproducibility）的含义基本相同，但应用在不同环境下。重复性描述在测量条件、传感器和观察者、位置、使用条件相同时，短时间内重复相同的输入时，输出读数的接近程度。再现性描述在测量方法、观察者、测量传感器、测量位置、使用条件和测量时间发生变化时，相同的输入所对应的输出读数的接近程度。这两个术语均描述了在相同的输入时，输出读数的分布。这种分布在测量条件不发生变化时称为重复性，而在测量条件发生变化时则称为再现性。传感器在测量过程中，重复性和再现性的程度是其精度的另一种表达方式。在一般模式中，传感器的重复性用于描述同一工作条件下输入量按同一方向在全量程范围内连续多次重复测量所得特性曲线的不一致性（波动性），ΔR_{max} 是正反量程最大重复性偏差，如图 1.4 所示。

$$\delta_K = \pm \frac{\Delta R_{max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.1)$$

或者用同一输入量 N 次测量的标准偏差 δ 表示：

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}} \quad (1.2)$$

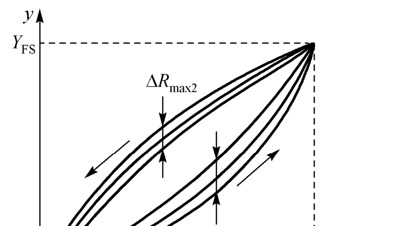


图 1.4 传感器的重复性

3．容差

容差（Tolerance）是一个与准确度紧密相关的术语，它定义了某些值的可预期最大误差。严格地说，容差并不是传感器的一个静态特性，这里提到它是因为某些传感器的准确度有时会引用为容差值。

在正确使用的情况下，容差在机械制造中称为公差，它描述了机械组件尺寸相对于一些额定值的

最大偏差。例如，曲轴加工的直径公差是几微米（10^{-6}m），普通电阻有约 5%的容差。在传感器中，有时用容差来表示准确度。

【例 1.2】 电子元件店购买了一包电阻，标称电阻值为 1000Ω，其制造容差为 5%。若在这包电阻中随机选择一个电阻，这个特定电阻的最小和最大电阻值可能是多少？

解： 最小可能值是$1000\times(1-5\%)=950\Omega$；最大可能值是$1000\times(1+5\%)=1050\Omega$。

4．线性度

传感器的输出读数通常线性正比于被测量值。图 1.5 中的“×”表示相应被测量值所对应的传感器典型输出读数的点。一般拟合过程是通过图中的“×”画一条合适的直线来实现的，如图 1.5 所示（虽然通常可以通过眼睛合理并准确地完成，但最好用数学中的最小二乘法拟合技术）。因此，非线性度就定义为任何输出读数标记“×”与这条直线的最大偏差。非线性度通常表示为满量程读数的一个百分比。

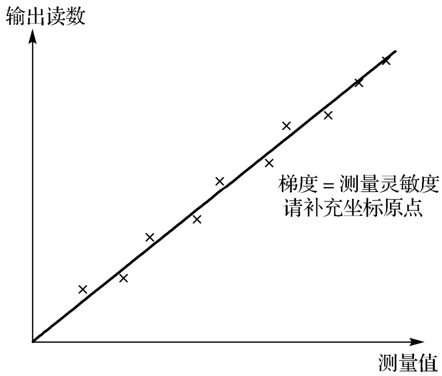


图 1.5　传感器的输出特性

下面从数学角度来解释传感器的线性度（Linearity）。

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看，希望具有线性关系，即具有理想的输出和输入关系。但实际遇到的传感器大多为非线性的，传感器的输出与输入关系可用多项式表示：

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+\cdots+a_nx^n \tag{1.3}$$

式中，a_0为零位输出；x为输入量；a_1为线性常数；a_2、…、a_n为非线性项系数。

各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式各不相同。线性度就是用来表示实际曲线与拟合直线接近的一个性能指标，静态特性曲线可通过实际测试获得。在实际使用中，为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系，因此引入各种非线性补偿环节。例如，采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理，从而使传感器的输出与输入关系为线性或接近线性。但在传感器非线性的幂次不高，输入量变化范围较小时，可用一条直线（切线或割线）近似地代表实际曲线的一段，如图 1.6 所示，使传感器输出/输入特性线性化所采用的直线称为拟合直线。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差（或线性度），通常用相对误差表示，即

$$\delta_{\mathrm{f}}=\pm\frac{\Delta L_{\max}}{Y_{\mathrm{FS}}}\times100\% \tag{1.4}$$

式中，$\Delta L_{\max}$为实际曲线和拟合直线间的最大偏差；Y_{FS}为满量程输出。

在实际应用中，一般将传感器的标定曲线用一条直线关系表达，为确定该线性关系式一般通过数据线性拟合得到该关系式。目前常用的拟合方法有理论拟合、过零旋转拟合、端点连线拟合、端点平移拟合及最小二乘拟合等。

前 4 种方法如图 1.6 所示。图中实线为实际输出曲线，虚线为拟合直线。

图 1.6(a)所示为理论拟合，拟合直线为传感器的理论特性，与实际测试值无关。该方法十分简单，但一般来说$\Delta L_{\max}$较大。

图 1.6(b)所示为过零旋转拟合，常用于曲线过零的传感器。拟合时，使$\Delta L_1=\left|\Delta L_2\right|=\Delta L_{\max}$。这种方法也比较简单，非线性误差比前一种小很多。

图 1.6(c)所示为端点连线拟合，是指把输出曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便，但 $\Delta L_{\max}$ 也较大。

图 1.6(d)所示为端点平移拟合，是在图 1.6(c)的基础上使直线平移，移动距离为原 $\Delta L_{\max}$ 的一半，这样输出的曲线就分布于拟合直线的两侧，$\Delta L_2 = |\Delta L_1| = |\Delta L_3| = \Delta L_{\max}$，与图 1.6(c)相比，非线性误差减小一半，提高了精度。

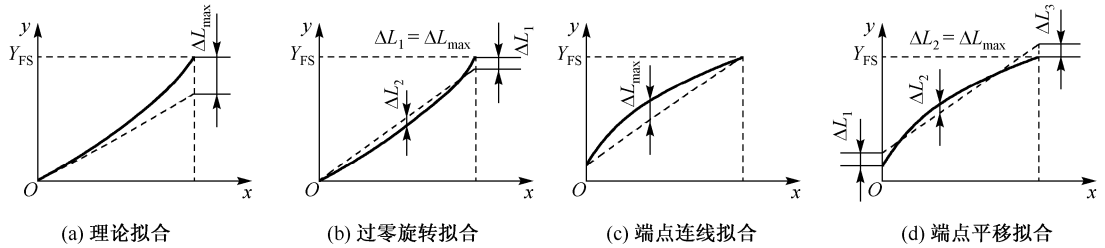


图 1.6　几种直线拟合方法

除了上述方法外，还经常采用最小二乘法进行拟合，采用最小二乘法拟合时，拟合结果如图 1.7 所示。

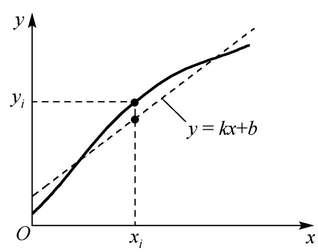


图 1.7　最小二乘法拟合

最小二乘法拟合过程如下。

设拟合直线方程为

$$y = kx + b \tag{1.5}$$

实际校准测试点有 n 个，第 i 个校准数据与拟合直线上响应值之间的残差为

$$\varDelta_{\mathrm{i}} = y_{\mathrm{i}} - (kx_{\mathrm{i}} + b) \tag{1.6}$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使 $\sum \varDelta_{\mathrm{i}}^2$ 的值最小，即

$$\sum_{i=1}^{n} \varDelta_{\mathrm{i}}^2 = \sum_{i=1}^{n} [y_{\mathrm{i}} - (kx_{\mathrm{i}} + b)]^2 = \min \tag{1.7}$$

也就是使 $\sum \varDelta_{\mathrm{i}}^2$ 关于 k 和 b 的一阶偏导数等于零，即

$$\frac{\partial}{\partial k}\sum_{i=1}^{n} \varDelta_{\mathrm{i}}^2 = 2\sum_{i=1}^{n}(y_{\mathrm{i}} - kx_{\mathrm{i}} - b)(-x_{\mathrm{i}}) = 0 \tag{1.8}$$

$$\frac{\partial}{\partial k}\sum_{i=1}^{n} \varDelta_{\mathrm{i}}^2 = 2\sum_{i=1}^{n}(y_{\mathrm{i}} - kx_{\mathrm{i}} - b)(-1) = 0 \tag{1.9}$$

从而求出 k 和 b 的表达式为

$$k = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}} y_{\mathrm{i}} - \sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}} \sum_{i=1}^{n} y_{\mathrm{i}}}{n\sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}}^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}}\right)^2} \tag{1.10}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}}^2 \sum_{i=1}^{n} y_{\mathrm{i}} - \sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}} \sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}} y_{\mathrm{i}}}{n\sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}}^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}}\right)^2} \tag{1.11}$$

将 k 和 b 的值代入式（1.5），即可得到拟合直线，然后按式（1.4）求出残差的最大值 $\Delta L_{\max}$，即为非线性误差。

由图 1.6 和图 1.7 可见，即使是同类传感器，拟合直线不同，其线性度也是不同的。选取拟合直线的方法很多。不同拟合方式得到的结果不相同，在实践中应根据测量的需求选择使用适当的线性拟合方式。

5．灵敏度

灵敏度（Sensitivity of Measurement）是指传感器在稳定工作时的输出量变化（Δy）与输入量变化（Δx）的比值。对于线性传感器，其灵敏度就是其静态特性的斜率，即 $S = \Delta y/\Delta x$，它为一常数；而非线性传感器的灵敏度为一变量，用 $S = \mathrm{d}y/\mathrm{d}x$ 表示。传感器的灵敏度如图 1.8 所示。

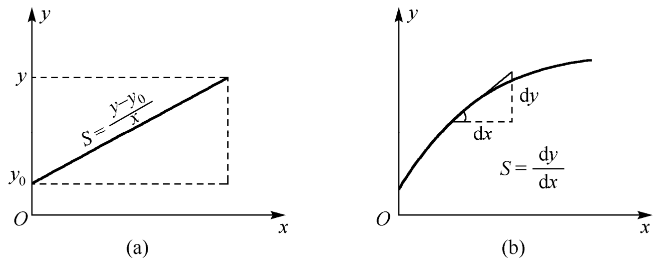


图 1.8 传感器的灵敏度

【例 1.3】 表 1.1 所示为铂电阻温度计在一定温度范围内测量的电阻值，求传感器的测量灵敏度（Ω/℃）。

表 1.1 一定温度内测量的电阻值

电阻（Ω）	温度（℃）
307	200
314	230
321	260
328	290

解： 如果这些值标注在图形中，电阻变化和温度变化之间的直线关系是显而易见的。温度变化为 30℃，电阻的变化为 7Ω，因此测量的灵敏度 ＝7/30＝0.233Ω/℃。

6．迟滞

在相同工作条件下进行全测量范围测量时，正行程和反行程输出的不重合程度称为迟滞（Hysteresis Effects）或滞后。传感器的正反行程输出信号大小不等，如图 1.9 所示。这种现象是由传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷造成的，如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。迟滞大小通常由实验确定，其计算公式为

$$\delta_{\mathrm{H}} = \pm\frac{\Delta H_{\max}}{Y_{\mathrm{FS}}}\times 100\% \tag{1.12}$$

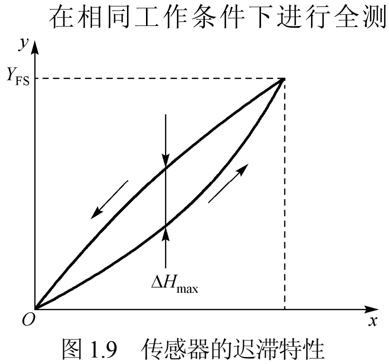


图 1.9 传感器的迟滞特性

式中，Y_{FS} 为满量程输出；$\Delta H_{\max}$ 为正反量程最大输出偏差。

7．阈值

如果传感器的输入从零逐渐增加，那么在传感器输出读数的变化大到足以被探测到之前，输入必

须达到一定的最低水平。这种最低水平的输入称为传感器的阈值（Threshold）。不同制造商为传感器指定阈值的方式会有所不同。有些制造商会使用绝对值，有些制造商则使用传感器满量程的一个百分比。例如，汽车测速仪通常具有约 15km/h 的阈值，这意味着汽车在休息和加速过程中，在速度达到 15km/h 之前，速度里程表上不会观察到输出读数。

8．分辨率

分辨率（Resolution）是描述传感器可以感受到的被测量最小变化的能力。若输入量缓慢变化且其变化值未超过某一范围时，输出不变化，即此范围内分辨不出输入的变化（图 1.10），只有当输入量变化超过此范围时输出才发生变化。一般来说，各输入点能分辨的范围不同，人们将用满量程中使输出阶跃变化的输入量中最大的可分辨范围作为衡量指标，并定义为传感器的分辨率（$\Delta X_{\max}$）。也可用分辨率表示，即

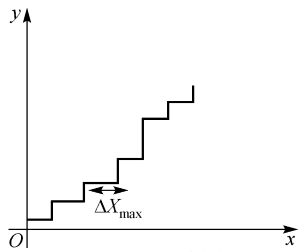


图 1.10　分辨率

$$\frac{\Delta X_{\max}}{Y_{\mathrm{FS}}}\times 100\% \tag{1.13}$$

当传感器显示一个特定的输出读数时，由输入被测量的大小变化产生可以观测到的传感器输出的变化，该输入被测量大小的变化有一个下限，称为阈值。分辨率有时被指定为一个绝对值，有时是传感器满量程的一个百分比。影响传感器分辨率的一个主要因素是，其输出范围是如何精细地细分的。例如，汽车里程表通常以 20km/h 细分，这意味着当指针在刻度标记之间时，人们估计速度的分辨率不超过 5km/h。因此 5km/h 这个值就代表了传感器的分辨率。

9．扰动敏感度

传感器的所有校准仅在温度、压力等受控条件下才有效。这些标准环境条件通常在传感器规范中定义。在环境的温度、压力等因素发生变化时，传感器的某些静态特性会发生变化，扰动敏感度（Sensitivity to Disturbance）用于衡量这种变化的大小。这种因外界环境因素变化对传感器的测量影响主要是零点漂移和零点灵敏度漂移。

零点漂移是描述传感器的零时读数受环境条件变化影响的程度。它导致了存在于整个传感器测量范围内的恒定误差。机械形式的体重秤是一种常见的容易出现零点漂移的例子。例如，人们经常发现在秤上没有人时也有 1kg 的读数。如果有已知体重为 70kg 的人在秤上，秤的读数会是 71kg，如果有已知体重为 100kg 的人在秤上，秤的读数会是 101kg。零点漂移通常通过校准来消除。对于刚刚描述的体重秤，通常可转动拨轮来使秤的读数为零，从而消除零点漂移。

零点漂移中零点温度漂移是最为常见的一种漂移，它主要与温度变化相关，通常用零点温度漂移系数进行描述，其典型单位是 V/℃。如果传感器的特性对几个环境参数敏感，那么它将有几个零点漂移系数，每个零点漂移系数分别对应一个环境参数。图 1.11(a)所示为一个受零点漂移影响的典型压力计输出特性的变化。

灵敏度漂移（也称比例因子漂移）是定义传感器测量灵敏度随环境条件变化而变化的量。它由灵敏度漂移系数量化表示，灵敏度漂移系数定义了传感器特性敏感的每个环境参数单位变化引起的漂移量的多少。导致灵敏度漂移的原因源于传感器内部的组件会受环境波动（如温度的变化）的影响，如弹簧的弹性模量就受温度的影响。图 1.11(b)所示为是灵敏度温度漂移对一个压力传感器的输出特性的影响。该图中灵敏度温度漂移的测量单位为 MPa/℃。如果传感器同时受零点漂移和灵敏度漂移的影响，则对输出特性的典型修改如图 1.11(c)所示。

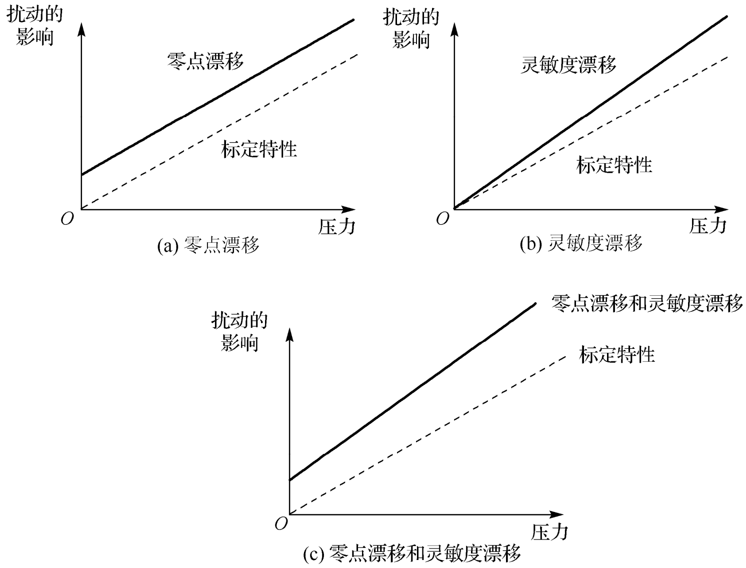


图 1.11 扰动的影响

【例 1.4】 表 1.2 显示为两种条件下某传感器电压表测量输出。

表 1.2 两种条件下传感器电压表测量输出

校准温度为 20℃时的电压读数（V）	校准温度为 50℃时的电压读数（V）
10.2	10.5
20.3	20.6
30.7	40.0
40.8	50.1

假设在 20℃环境中使用时的测量值是正确的，求在 50℃环境中使用时的零点漂移，并计算零点漂移系数。

解：50℃温度下的零点漂移是这两组输出读数之间的恒定差，即 0.3V。零点漂移系数是漂移的幅度（0.3V）除以引起漂移的温度变化幅度（30℃），因此零点漂移系数为 0.3/30＝0.01V/℃。

【例 1.5】 弹簧平衡是在温度为 20℃的环境中校准的，且挠度/负载特性如下:

负载（Load，kg）	0	1	2	3
挠度（Deflection，mm）	0	20	40	60

然后在温度为 30℃的环境中使用，且测量的挠度/负载特性如下:

负载（Load，kg ）	0	1	2	3
挠度（Deflection，mm）	5	27	49	71

求环境温度每变化 1℃的零点漂移和灵敏度漂移。

解：在 20℃时，挠度/负载特性是一条直线，灵敏度＝20mm/kg。

在 30℃时，挠度/负载特性仍是一条直线，灵敏度＝22mm/kg。

零点漂移（温漂）＝5mm（无载挠度）；灵敏度漂移 ＝2mm/kg。

零点漂移/℃＝5/10＝0.5mm/℃；灵敏度漂移/℃＝2/10＝0.2(mm/kg)/℃。

10．温度稳定性

温度稳定性反映的是传感器特性值受温度变化影响的程度。温度稳定性（Temperature Stability）用一些重要指标来确定，如测量范围、线性度、迟滞、重复性及灵敏度等。

一般用温度系数来描述温度引起的误差，表示为

$$\alpha_{\mathrm{T}} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_{\mathrm{FS}}\Delta T} \times 100\% \tag{1.14}$$

式中，Y_1、Y_2分别为温度T_1、T_2时的输出值；$\Delta T = T_2 - T_1$。

11．测量范围

每个传感器都有一定的测量范围（Y_{FS}）（Range or Span），超过该范围进行测量时，会带来很大的测量误差，甚至将其损坏。一般将测量范围确定在一定的线性区域或保证在一定的寿命范围内。在实际应用时，所选择传感器的测量范围应大于实际的测量范围，以保证测量的准确性并延长传感器及其电路的寿命。

12．死区

死区（Dead Space）是在不同输入值范围内输出值没有变化的定义。任何展示出迟滞的传感器均会显示死区，然而，一些传感器在没有受任何显著迟滞效应影响时仍然表现出在输出特性上的死区。例如，在机械传感器中，传动齿轮的齿隙是死区产生的典型原因，齿隙通常在齿轮组平移和旋转运动之间的转换中产生。典型的传感器死区输出特性如图 1.12 所示。

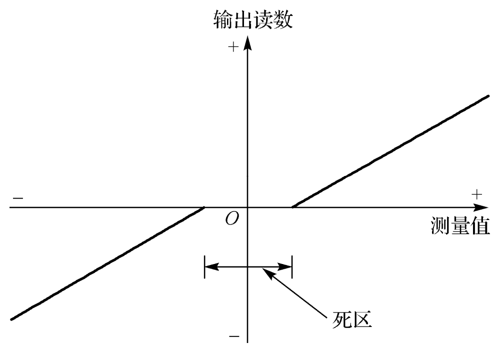


图 1.12　传感器的死区输出特性

1.3.2　传感器的动态特性相关的数学模型

在上面传感器的静态特性中，被测信号是一个不随时间变化的量。因此，在测量时不受时间的影响。但是在实际的测量过程中，很多的被测信号是随时间变化的，对这种动态信号的测量不仅需要精确地测量信号的幅值，而且还要测量和记录这种动态信号的变化过程，因此，就需要传感器能迅速、准确地测出信号幅值和被测信号随时间变化的规律。

测量仪器的静态特性只关心仪器平稳下来的稳态读数，如读数的准确性。测量仪器的动态特性是描述被测量从零时刻起直到传感器输出响应达到稳定值为止，传感器输出的随时间变化过程。与传感器的静态特性一样，传感器动态特性的使用仅适用于当传感器在特定的环境条件确定的情况下。在这些校准环境条件之外，传感器的动态参数的会发生一些变化，其变化可能是不可预期的。

在数学描述上，传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性。当被测量随时间变化，即是时间的函数时，传感器的输出量也是时间的函数，它们之间的关系要用动态特性来表示。一个动态特性好的传感器，其输出将再现输入量的变化规律，即具有相同的时间函数。实际上，除了具有理想的比例特性外，输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数，这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

一般而言，在任何线性、时间不变测量系统中，以下的公式可以在时间 t>0 时写成输入和输出之间的关系。

$$a_n \frac{\mathrm{d}^n q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t^n} + a_{n-1}\frac{\mathrm{d}^{n-1} q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t} + a_0 q_{\mathrm{o}} = b_m \frac{\mathrm{d}^m q_{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t^m} + b_{m-1}\frac{\mathrm{d}^{m-1} q_{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t} + b_0 q_{\mathrm{i}} \tag{1.15}$$

式中，q_{i} 为测量值；q_{o} 为输出读数；$a_0 \cdots a_n$，$b_0 \cdots b_m$ 是常数。

该公式的简化形式适用于一般正常的测量情况下。

如果只有阶跃变化的测量值时，则式（1.15）可简化为

$$a_{\mathrm{n}}\frac{\mathrm{d}^{n}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t^{n}}+a_{n-1}\frac{\mathrm{d}^{n-1}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t^{n-1}}+\cdots+a_{1}\frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t}+a_{0}q_{\mathrm{o}}=b_{0}q_{\mathrm{i}} \qquad (1.16)$$

可以通过式（1.16）的某些特殊情况进一步简化，它们提炼出可共同适用于几乎所有的传感器系统的典型系统。下面对常用的传感器典型系统进行讨论。

1．零阶传感器

如果式（1.16）中除了 a_0 外所有的系数 $a_1\cdots a_{\mathrm{n}}$ 都假设为 0，则

$$a_0q_{\mathrm{o}}=b_0q_{\mathrm{i}} \quad 或 \quad q_{\mathrm{o}}=b_0q_{\mathrm{i}}/a_0=Kq_{\mathrm{i}} \qquad (1.17)$$

式中，K 是常数，称为传感器的灵敏度。

如果一个传感器的灵敏度可以用式（1.17）表示，称为零阶传感器。零阶系统的一个典型例子是传感器在时间 t 时随即被测量发生阶跃变化，在同样的时间 t 时，传感器的输出立即移动到一个新值，如图 1.13 所示。测量电位变化的电位计就是这种传感器的一个很好的例子，当滑块沿着电位计轨道追踪时电位计输出电压瞬间变化。

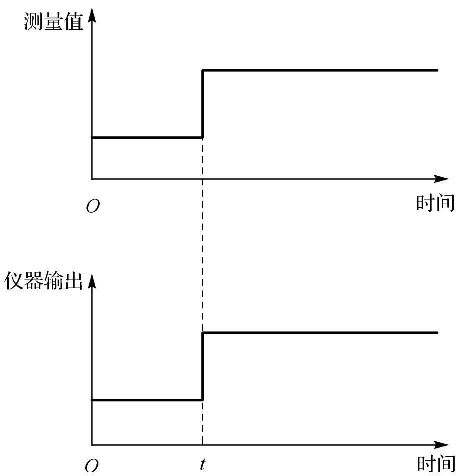


图 1.13 零阶传感器特性

2．一阶传感器

如果式（1.16）中除了 a_0 和 a_1 所有的系数 $a_2\cdots\cdots a_{\mathrm{n}}$ 都假设为 0，则

$$a_1\frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t}+a_0q_{\mathrm{o}}=b_0q_{\mathrm{i}} \qquad (1.18)$$

任何传感器根据式（1.18）表现被称为一阶形式传感器。如果用 D 运算符替换式（1.18）中的 $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$，可以得到

$$a_1Dq_{\mathrm{o}}+a_0q_{\mathrm{o}}=b_0q_{\mathrm{i}}$$

且重新安排公式可以给出

$$q_{\mathrm{o}}=\frac{(b_0/a_0)q_{\mathrm{i}}}{[1+(a_1/a_0)D]} \qquad (1.19)$$

定义 $K=b_0/a_0$ 为静态灵敏度，并且 $\tau=a_1/a_0$ 为系统的时间常数，则式（1.19）变为

$$q_{\mathrm{o}}=\frac{Kq_{\mathrm{i}}}{1+\tau D} \qquad (1.20)$$

如果对式（1.20）进行解析，输出量 q_{o} 对输入量 q_{i} 在时间 t 时的阶跃变化的响应随时间变化的方式如图 1.14 所示。阶跃响应的时间常数 τ 是输出量达到输出最终值的 63%时所需的时间。

热电偶是一阶传感器的一个很好的例子。众所周知，如果一个热电偶在室温下被塞入沸水中，输出的电动势不会在瞬间上升到指示 100℃的水平，而是接近指示 100℃的水平的读数，在方式上类似于如图 1.14 所示。

实际工业应用的大量的传感器都属于一阶传感器：对于一阶传感器系统，时间常数是一个重要的指标，其反映了传感器响应的速度。幸运的是，大多数的一阶传感器的时间常数相对于被测过程的动态而言是相当小的，完全能够满足被测系统的响应要求，因此不会产生严重的问题。

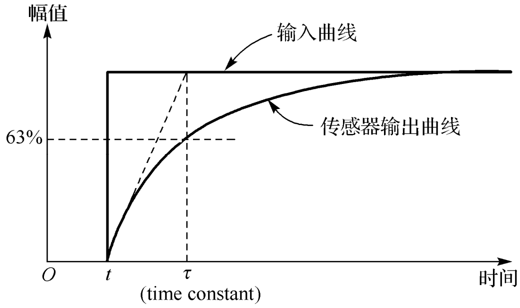


图 1.14　一阶传感器特性

【例 1.6】 一气球配备有温度和高度的测量仪器，并且具有可以传输传感器输出读数到地面的无线电设备。该气球最初固定在地面上时传感器的输出读数在稳定的状态。高度测量传感器大约是零阶传感器，且温度传感器是有着 15s 时间常数的一阶传感器。地面的温度 T_0 是 10℃，在高度为 xm 的温度 T_x 通过以下关系式给出：$T_x = T_0 - 0.01x$。如果气球在时间零时释放，然后以 5m/s 的速度上升，画一个表格显示出在前 50s 的旅行中每间隔 10s 时温度和高度测量报告。同时在表中显示每个温度读数的误差。在 5000m 的高度时，气球报告的温度是多少？

解： 对于温度传感器，其时是一个一阶传感器，并且高度传感器是零阶传感器。由式（1.20）在 xm 高度，气球在时间 t 报告的温度为 T_r。然后 T_x 和 T_r 之间的关系由下式给出：

$$T_r = \frac{T_x}{1+\tau D} = \frac{T_0 - 0.01x}{1+\tau D} = \frac{10-0.01x}{1+15D}$$

因为气球以 5m/s 的速度上升，故 $x = 5t$，则

$$T_r = \frac{10-0.05t}{1+15D}$$

对上述方程可运用常数变易法进行求解，相关一阶微分方程的解法可参考高等数学教材。

该非齐次一阶微分方程对应的齐次方程通解（$T_x = 0$）由 $T_{r_{cf}} = Ce^{-t/15}$ 给出。

该非齐次一阶微分方程的非齐次特解由 $T_{r_{pi}} = 10 - 0.05(t-15)$ 给出。

该非齐次一阶微分方程的通解由 $T_r = T_{r_{cf}} + T_{r_{pi}} = Ce^{-t/15} + 10 - 0.05(t-15)$ 给出。

应用初始条件：

在 $t = 0$，$T_r = 10$ 时，则 $10 = Ce^{-0} + 10 - 0.05(-15)$

因此 $C = -0.75$

且该方程的通解可以写成：$T_r = 10 - 0.75e^{-t/15} - 0.05(t-15)$

根据 $T_x = T_0 - 0.01x$，可以得到温度的真值。

使用上述计算式计算 T_r 在变化的 t 值时，温度读数与误差如表 1.3 所示。

表 1.3　温度读数与误差

时间（Time）	高度（Altitude）	温度读数（Temperature reading）	温度误差（Temperature error）
0	0	10	0
10	50	9.86	0.36
20	100	9.55	0.55
30	150	9.15	0.65
40	200	8.70	0.70
50	250	8.22	0.72

在 $x = 5000\text{m}$，$t = 1000\text{s}$ 时。根据上述公式计算 T_{r}：

$$T_{\text{r}} = 10 - 0.75\text{e}^{-1000/15} - 0.05\times(1000-15)$$

该指数项接近于 0，因此 T_{r} 可记为:

$$T_{\text{r}} \approx 10 - 0.05\times(985) = -39.25\ ℃$$

$$T_{\text{x}} = T_0 - 0.01x = 10-50 = -40℃$$

该结果可能是从前面给出的表中推断出，该表中可以看出温度误差的收敛趋于的值 0.75。对于大的 t 值，传感器读数滞后真实温度一段为 15s 的时间。在这段时间里，气球旅行了 75m 的距离且温度下降了 0.75℃。因此对于大的 t 值，温度输出读数始终是小于真正值 0.75℃。

3．二阶传感器

如果式（1.16）中除了 a_0、a_1 和 a_2 之外，其他所有系数 $a_3 \cdots a_{\text{n}}$ 为 0，可以得到：

$$a_2\frac{\text{d}^2 q_{\text{o}}}{\text{d}t^2} + a_1\frac{\text{d}q_{\text{o}}}{\text{d}t} + a_0 q_{\text{o}} = b_0 q_{\text{i}} \tag{1.21}$$

再次应用 D 运算符得：

$$a_2 D^2 q_{\text{o}} + a_1 D q_{\text{o}} + a_0 q_{\text{o}} = b_0 q_{\text{i}}$$

重新安排得：

$$q_{\text{o}} = \frac{b_0 q_{\text{i}}}{a_0 + a_1 D + a_2 D^2} \tag{1.22}$$

在式（1.22）中可以很方便地重新表达变量 a_0、a_1 和 a_2。就 K（静态灵敏度），ω_{n}（无阻尼自然频率）和 ξ（阻尼比）三个参数而言，则

$$K = b_0 / a_0\ ；\quad \omega_{\text{n}} = \sqrt{a_0 / a_2}\ ；\quad \xi = a_1 / 2\sqrt{a_0 a_2}$$

ξ 可以写为：

$$\xi = \frac{a_1}{2a_0\sqrt{a_2 / a_0}} = \frac{a_1\omega_{\text{n}}}{2a_0}$$

如果将式（1.22）除以 a_0，可以得到：

$$q_{\text{o}} = \frac{(b_0 / a_0)q_{\text{i}}}{1 + (a_1 / a_0)D + (a_2 / a_0)D^2} \tag{1.23}$$

式（1.23）中的项可以写成以下关于 ω_{n} 和 ξ 的项：

$$\frac{b_0}{a_0} = K\ ；\quad \left(\frac{a_1}{a_0}\right)D = \frac{2\xi D}{\omega_{\text{n}}}\ ；\quad \left(\frac{a_2}{a_0}\right)D^2 = \frac{D^2}{{\omega_{\text{n}}}^2}$$

因此，通过式（1.23）除以 q_{i}，且替代 a_0、a_1、a_2 可以得出：

$$\frac{q_{\text{o}}}{q_{\text{i}}} = \frac{K}{D^2 / \omega_{\text{n}}^2 + 2\xi D / \omega_{\text{n}} + 1} \tag{1.24}$$

这是二阶系统的标准方程式，很多实际应用传感器可以通过二阶传感器来描述。如果式（1.23）通过解析的方法进行求解，所获得的阶跃响应的形状取决于阻尼比参数 ξ 的值。不同阻尼比参数 ξ 值的二阶传感器的输出响应随时间 t 变化的曲线如图 1.15 所示。

对于曲线 A，ξ=0；当输入是阶跃函数时，当被测物理量受任何变化的干扰时，没有阻尼且传感

器的输出显示出恒定的振幅振荡。对于 $\xi = 0.2$ 的轻阻尼，如曲线 B 所示，对输入阶跃变化的响应仍然是振荡的，但振荡逐渐的减弱。随着阻尼比参数 ξ 值进一步的增加，振荡和过冲减少仍减少，如曲线 C 和 D 所示。随着阻尼比参数进一步的增加，其响应变成过阻尼，如曲线 E 所示，其输出读数非常缓慢地趋于正确读数。

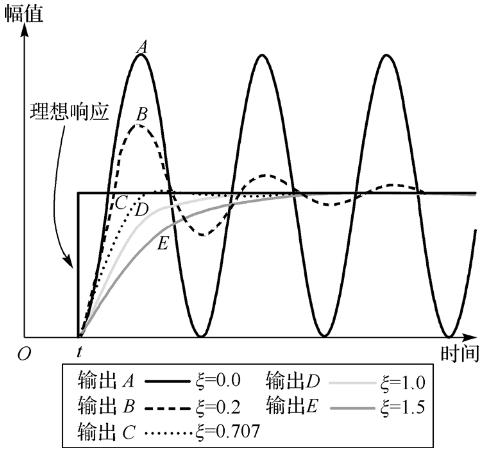


图 1.15　二阶传感器的响应特性

显然，极端的响应曲线 A 和 E 非常不适合传感器测量。如果传感器是阶跃输入，那么传感器的设计策略是较快的收敛速度，较小的过调和较少的震荡次数，该设计策略使阻尼比参数 ξ 将向 0.707 的目标趋近，这就给出了临界阻尼响应（C）。但是，传感器要求测量大多数不是阶跃函数，而是以不同斜坡的坡道形式。当输入变量的形式发生了变化，参数 ξ 的最佳值也相应地发生变化。商用的二阶传感器，其中加速度是一种常见的例子，通常阻尼比参数 ξ 都设计为 0.6～0.8。

1.3.3　传感器的动态特性描述

上面介绍了典型的传感器数学模型，为了将上述数学模型的讨论结果普遍化，这里需要讨论传感器的动态特性描述。为了描述传感器的动态特性，需要寻找方法对上述系统动态特性进行描述，为了简化起见，下面仍以动态测温的问题（典型一阶系统）进行讨论。在被测温度随时间变化或传感器突然插入被测介质中，以及传感器以扫描方式测量某温度场的温度分布等情况下，都存在动态测温问题。例如，把一支热电偶从温度为 t_0℃的环境中迅速插入一个温度为 t℃的恒温水槽中（插入时间忽略不计），这时热电偶测量的介质温度从 t_0℃突然上升到 t℃，而热电偶反映出来的温度从 t_0℃变化到 t℃需要经历一段时间，即有一段过渡过程，如图 1.16 所示。热电偶反映出来的温度与介质温度的差值称为动态误差。

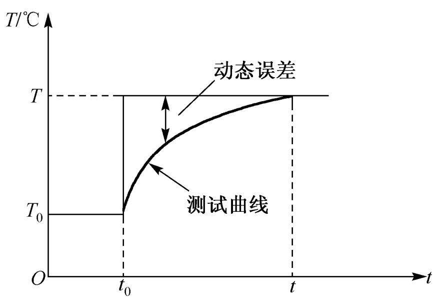


图 1.16　热电偶测温过程的动态特性

在上述例子中，造成热电偶输出波形失真和产生动态误差的原因，是因为温度传感器有热惯性（由传感器的比热容和质量大小决定）和传热热阻，使得在动态测温时传感器输出总是滞后于被测介质的温度变化。例如，带有套管的热电偶的热惯性要比裸热电偶的热惯性大得多。这种热惯性是热电偶固有的，而且决定了热电偶测量快速温度变化时会产生动态误差。影响动态特性的“固有因素”任何传感器都有，只不过它们的表现形式和作用程度不同而已。动态特性除了与传感器的固有因素有关之外，还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说，人们在研究传感器动态特性时，通常是根据不同输入变化规律来考察传感器的响应的。

动态特性除了与传感器的固有因素有关外，还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说，在研究传感器动态特性时，通常应根据不同输入变化规律来考察传感器的响应。用于研究传感器动态特性的激励信号是多种多样的，常见的激励信号分类如图 1.17 所示。

一般来说，在研究动态特性时，通常只能根据“规律性”的输入来考虑传感器的响应。复杂周期信号可以分解为各种谐波，所以可用正弦周期输入信号来代替；其他瞬变输入不如阶跃输入对系统的

- 动态测量输入信号
  - 规律性的
    - 周期性的
      - 正弦周期输入
      - 复杂周期输入
    - 非周期性的
      - 阶跃输入
      - 线性输入
      - 其他瞬变输入
  - 随机性的
    - 平衡的
      - 各态历经过程
      - 非各态历经过程
    - 非平衡的随机过程

图 1.17　常见激励信号分类

影响剧烈，可用阶跃输入代表。因此，通常使用的“标准”输入只有两种：正弦输入和阶跃输入。传感器动态特性的分析及标定都以这两种输入为依据。当采用正弦输入作为评价依据时，一般使用幅频特性与相频特性进行描述，评价指标为频带宽度，简称带宽，即传感器输出增益变化不超出某一规定分贝值的频率范围，相应的方法称为频率响应法。当采用阶跃输入为评价依据时，常用上升时间、响应时间、超调量等参数来综合描述，相应的方法称为阶跃响应法。

虽然传感器的种类和形式很多，但它们一般可以简化为一阶或二阶系统（高阶可以分解为若干低阶环节），因此一阶和二阶传感器是最基本的。传感器的输入量随时间变化的规律是各种各样的，下面在对传感器动态特性进行分析时，采用最普遍、最简单、易实现的阶跃信号和正弦信号作为标准输入信号。对于阶跃输入信号，传感器的响应称为阶跃响应或瞬态响应。对于正弦输入信号，则称为传感器的频率响应或稳态响应。

1．（阶跃）瞬态响应特性

传感器的瞬态响应是时间响应。在研究传感器的动态特性时，有时需要从时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析，这种分析方法称为时域分析法。传感器对所加激励信号的响应称为瞬态响应。常用的激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。下面以传感器的单位阶跃响应来分析传感器的动态性能指标。

当输入为阶跃函数时，则传感器的响应函数 $y(t)$分为两个响应过程，一个是从初始状态到接近终态之间的过程，即动态过程（又称为过渡过程），t 趋于无穷时，输出基本稳定，称为稳态过程，如图 1.18 所示。

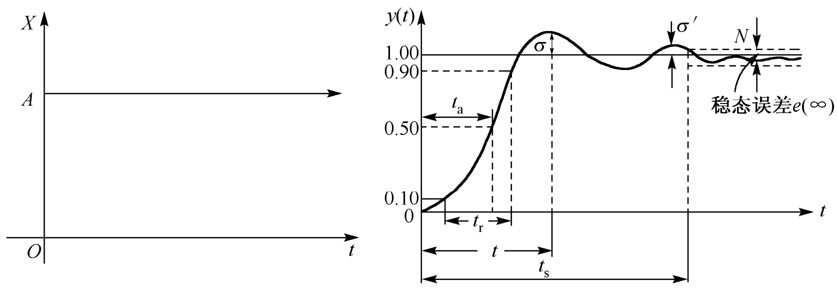


图 1.18　阶跃输入与响应

（1）一阶传感器的单位（阶跃）瞬态响应

在工程上，一般将
$$a_1\frac{\mathrm{d}q_o}{\mathrm{d}t}+a_0q_o=b_0q_i \tag{1.25}$$
视为一阶传感器单位阶跃响应的通式。

式中，$x(t)$、$y(t)$分别为传感器的输入量和输出量，均是时间的函数；t 为表征传感器的时间常数，具有时间“秒”的量纲。

一阶传感器的传递函数可写为

$$H(s)=\frac{q_0(s)}{q_i(s)}=\frac{1}{\tau s+1} \tag{1.26}$$

对初始状态为零的传感器，当输入一个单位阶跃信号

$$x=\begin{cases}0, & t<0\\ 1, & t>0\end{cases} \tag{1.27}$$

时，由于 $x(t)=1(t)$，$x(t)=1/s$，传感器输出的拉氏变换为

$$q_0(s)=H(s)q_{\mathrm{i}}(s)=\frac{1}{\tau+1}\cdot\frac{1}{s} \tag{1.28}$$

一阶传感器的单位阶跃响应信号为

$$y(t)=1-\mathrm{e}^{-t/\tau} \tag{1.29}$$

相应的响应曲线如图 1.19 所示。由图 1.19 可知，传感器存在惯性，它的输出不能立即复现输入信号，而是从零开始，按指数规律上升，最终达到稳态值。理论上传感器的响应只在 t 趋于无穷大时才达到稳态值，但实际上当 $t=4\tau$，其输出达到稳态值的 98.2%时，可以认为已达到稳态。τ 越小，响应曲线越接近于输入阶跃曲线，因此，τ 值是一阶传感器重要的性能参数。

（2）二阶传感器的单位阶跃响应

二阶传感器的单位阶跃响应的通式为

$$a_2\frac{\mathrm{d}^2q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t^2}+a_1\frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t}+a_0q_{\mathrm{o}}=b_0q_{\mathrm{i}}\text{，即 }a_2D^2q_0+a_1Dq_0=b_0q_i \tag{1.30}$$

二阶传感器的传递函数为

$$H(s)=\frac{\omega_{\mathrm{n}}^2}{s(s^2+2\xi\omega_{\mathrm{n}}s+\omega_{\mathrm{n}}^2)} \tag{1.31}$$

式中，ω_{n} 为传感器的自然频率；ξ 为传感器的阻尼比。

二阶传感器对阶跃信号的响应在很大程度上取决于阻尼比 ξ 和自然频率 ω_{n}。自然频率 ω_{n} 由传感器主要结构参数所决定。ω_{n} 越高，传感器的响应越快。当 ω_{n} 为常数时，传感器的响应取决于阻尼比 ξ。图 1.20 所示为二阶传感器的单位阶跃响应曲线。阻尼比 ξ 直接影响超调量和振荡次数。当 $\xi=0$ 时，为临界阻尼，超调量为 100%，产生等幅振荡，达不到稳态。当 $\xi>1$ 时，为过阻尼，无超调也无振荡，但达到稳态所需时间较长。当 $\xi<1$ 时，为欠阻尼，衰减振荡，达到稳态值所需时间随阻尼比 ξ 的减小而加长。当 $\xi=1$ 时响应时间最短。但实际使用中常按稍欠阻尼调整，ξ 值为 0.7～0.8 时最佳。

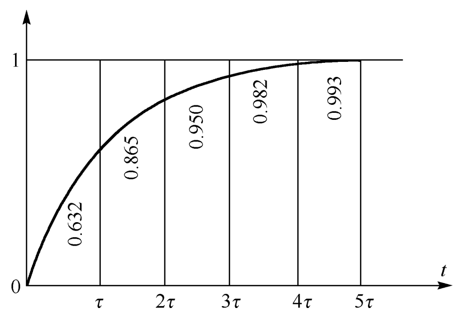


图 1.19　一阶传感器的单位阶跃响应曲线

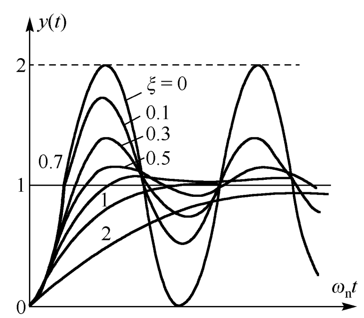


图 1.20　二阶传感器单位阶跃响应曲线

（3）阶跃响应过渡过程中的特性参数

① 时间常数 τ：输出量从 0 上升到稳态 $Y(\infty)$的 63%所需的时间。

② 上升时间 t_{r}：从稳态值 $Y(\infty)$的 10%上升到 90%所需的时间。它表示传感器的响应速度，t_{r} 值越小，表明传感器对输入的响应速度越快。

③ 响应时间 t_s：从输入量开始到输出进入稳定值的允许误差范围（±1%或 2%）内所需的时间，也能表示响应速度。

④ 振荡次数 N：输出量在稳态值 $Y(\infty)$上下振荡的次数，N 越小，表明稳定性越好。

⑤ 稳态误差 e：响应的实际值 $Y(\infty)$与期望值之差，它反映稳态的精确程度。

2．频率响应特性

传感器对正弦输入信号 $X(t) = A\sin(\omega t)$的响应特性，称为频率响应特性。频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性的方法。

（1）传感器数学模型

零阶传感器的数学模型：a_0 和 b_0 是传感器的系数，b_0/a_0 是静态灵敏度。

$$a_0 q_0 = b_0 q_{\mathrm{i}} \quad 或者 \quad q_{\mathrm{o}} = b_0 q_{\mathrm{i}} / a_0 = K q_{\mathrm{i}} \tag{1.32}$$

一阶传感器的数学模型：a_0、a_1 和 b_0 是传感器的系数，b_0/a_0 是静态灵敏度。

$$a_1 \frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t} + a_0 q_{\mathrm{o}} = b_0 q_{\mathrm{i}} \tag{1.33}$$

二阶传感器的数学模型：

$$a_2 \frac{\mathrm{d}^2 q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t^2} + a_1 \frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t} + a_0 q_{\mathrm{o}} = b_0 q_{\mathrm{i}} \tag{1.34}$$

n 阶传感器系统的数学模型：

$$a_{\mathrm{n}} \frac{\mathrm{d}^n q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t^n} + a_{\mathrm{n}-1} \frac{\mathrm{d}^{n-1} q_o}{\mathrm{d}t^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}t} + a_0 q_{\mathrm{o}} = b_{\mathrm{m}} \frac{\mathrm{d}^m q_{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t^m} + b_{\mathrm{m}-1} \frac{\mathrm{d}^{m-1} q_{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t} + b_0 q_{\mathrm{i}} \tag{1.35}$$

若输入信号为正弦波 $X(t) = A\sin(\omega t)$，用复数表示为 $A\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}$，此时输出信号 $y(t)$将 $Y(t) = B\sin(\omega t + \phi)$，用复数表示为 $B\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\phi)}$，所以经过拉氏变换后为

$$H(\mathrm{j}\omega) = \frac{Y(\mathrm{j}\omega)}{X(\mathrm{j}\omega)} = \frac{B\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\phi)}}{A\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}} = \frac{B}{A}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi} = \frac{b_{\mathrm{m}}(\mathrm{j}\omega)^m + b_{\mathrm{m}-1}(\mathrm{j}\omega)^{m-1} + \cdots + b_1(\mathrm{j}\omega) + b_0}{a_{\mathrm{n}}(\mathrm{j}\omega)^n + a_{\mathrm{n}-1}(\mathrm{j}\omega)^{n-1} + \cdots + a_1(\mathrm{j}\omega) + a_0} \tag{1.36}$$

频率传递函数的模$\left|H(\mathrm{j}\omega)\right|$为输出与输入的幅值之比，即 B/A，它与角频率ω 的关系被称为幅频特性。输出与输入的相位之差与频率的关系称为相频关系。

（2）一阶传感器的频率响应

将一阶传感器的传递函数中的 s 用 jω代替后，即可得频率特性表达式：

$$H(\mathrm{j}\omega) = \frac{1}{\tau(\mathrm{j}\omega) + 1} \tag{1.37}$$

幅频特性

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \tag{1.38}$$

相频特性

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \tag{1.39}$$

图 1.21 所示为一阶传感器的频率响应特性曲线。由式（1.37）～式（1.39）和图 1.21 可知，时间常数 τ 越小，频率响应特性越好。当$\omega\tau << 1$ 时，$A(\omega) \approx 1$，$\Phi(\omega) \approx 0$，表明传感器输出与输入为线性关系，且相位差也很小，输出 $y(t)$比较真实地反映了输入 $x(t)$的变化规律。因此，减小 τ 可改善传感器的频率特性。

（3）二阶传感器的频率响应

二阶传感器的频率特性表达式、幅频特性、相频特性分别如下。