

传感器误差与特性分析



知识目标

- 掌握测量误差的分类及一般计算方法
- 掌握传感器的定义及组成
- 理解传感器的基本特性及相应指标
- 了解传感器技术的发展趋势



技能目标

- 能对测量数据进行分析整理
- 能根据实际使用条件选择适用的传感器

任务 1 检测结果的数据整理

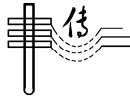
知识链接

ZHISHIJIANKA

在信息社会的一切活动领域中，检测是科学地认识各种现象的基础性方法和手段。现代化的检测手段在很大程度上决定了生产、科学技术的发展水平，而科学技术的发展又为检测技术提供了新的理论基础和制造工艺，同时对检测技术也提出了更高的要求。检测技术是所有科学技术的基础，是自动化技术的支柱之一。

1.1.1 测量与测量方法

测量（Measurement）是人们借助专门的技术和设备，通过实验的方法，把被测量与作为单位的标准量进行比较，以确定被测量是标准量的多少倍数的过程。所得的倍数就是测量值，



其大小可以用数字、曲线或图形表示，测量结果包括数值大小和测量单位两部分。

检测（Detection）是意义更为广泛的测量。测量、测试和检测具有相近的含义，在不强调它们之间细微差别的一般工程技术应用领域中，它们可以相互替代。随着自动化、现代化的发展，工业生产对检测技术提出了越来越多的新要求。例如，在自动化领域中，检测的任务不仅是对成品或半成品进行检验和测量，而且为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象并使之处于给定的最佳状态，需要随时检查和测量各种参量的大小和变化等情况。在图 1.1 所示的电炉控制系统中，为了使电炉内的温度按照预先设定的规律变化，计算机通过电炉内的温度传感器采集信息，根据设定的温度-时间曲线变化要求进行运算，将运算结果送给加热器控制装置，以控制电加热器产生最佳热量，实现预定的控制策略。同时，计算机可对电炉内的温度进行实时显示和记录等。

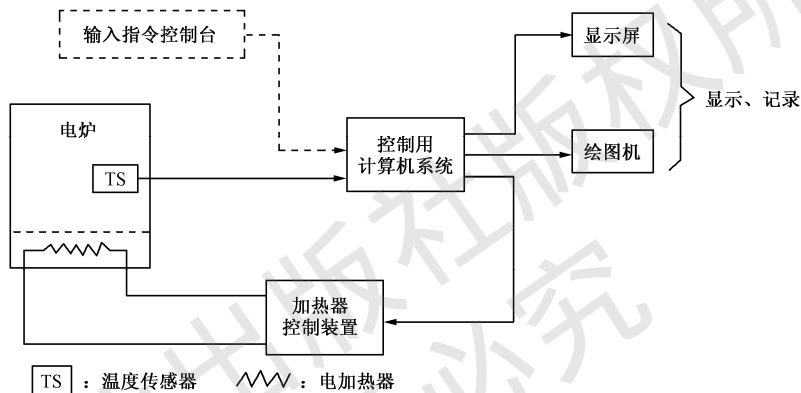


图 1.1 电炉控制系统

为了获得精确可靠的数据，选择合理的测量方法非常重要。测量方法多种多样，从不同的角度有不同的分类方法。

1. 电测法和非电测法

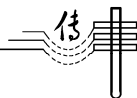
电测法在现代测量中被广泛采用。电测法是指在检测回路中含有测量信息的电信号转换环节，可以将被测的非电量转换为电信号输出。电测法可以获得很高的灵敏度和精确度，输出信号可实现远距离传输，便于实现测量过程的自动化、数字化和智能化。例如，电容式传感器中的交流电桥，可将被测参数所引起的电容变化量转换为电压信号输出。除电测法以外的测量方法都属于非电测法，如丈量土地、用体温计测体温、用弹簧管压力表测压力等。

2. 直接测量和间接测量

直接测量是指用预先标定好的测量仪表直接读取被测量的测量结果，如用万用表测量电压、电流、电阻等，简单且快速。间接测量则需要先测出中间量，利用被测量与中间量的函数关系再计算出被测量的数值，过程较为复杂。导线电阻率的测量就属于间接测量，事先需要测量导线的电阻、直径和长度，然后计算出导线电阻率。

3. 静态测量和动态测量

根据被测量是否随时间变化，将测量方法分为静态测量和动态测量。静态测量用于测量



不随时间变化或变化很缓慢的物理量；动态测量用于测量随时间变化的物理量。例如，用光纤陀螺仪测量火箭的飞行速度和方向属于动态测量，而超市中物品的称重则属于静态测量。应注意的是，静态与动态是相对的，可以把静态测量看成动态测量的一种特殊形式。

4. 接触式测量和非接触式测量

根据测量时测量仪器是否与被测对象接触，将测量方法分为接触式测量和非接触式测量。例如，用热电偶测量温度属于接触式测量，测量时不会破坏被测对象的温度场，测量精确度高；利用辐射式温度传感器测量则属于非接触式测量，这种方法不会影响被测对象的运行工况，检测速度快。

5. 模拟式测量和数字式测量

根据测量结果的显示方式不同，将测量方法分为模拟式测量和数字式测量。模拟式测量是指测量结果可根据仪表指针在标尺上的定位进行连续读取的方法；数字式测量是指测量结果以数字的形式直接给出的方法。精密测量时多采用数字式测量。

此外，测量结果还可以用计算机屏幕画面的方式显示，如连续变化的曲线、数据表格、工艺流程图及各种动态数据等，人们可通过屏幕画面提供的信息，对整个生产过程进行监视与控制。

1.1.2 测量误差及其表示方法

在一定条件下，被测物理量客观存在的实际值称为真值 (True value)，它是一个理想的概念。在实际测量时，由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响及人们辨识能力所限等因素，测量值与其真值之间不可避免地存在差异。测量值与真值之间的差值称为测量误差 (Measurement Error)。测量误差可用绝对误差和相对误差表示。

1. 绝对误差

绝对误差 (Absolute Error) Δx 是指测量值 x 与真值 L_0 之间的差值，即

$$\Delta x = x - L_0 \quad (1.1)$$

由于真值 L_0 的不可知性，在实际应用时，常用实际真值 L 代替，即用被测量多次测量的平均值或上一级标准仪器的测量值作为实际真值 L ，即

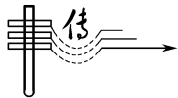
$$\Delta x = x - L \quad (1.2)$$

绝对误差是一个有符号、大小、量纲的物理量，它只表示测量值与真值之间的偏离程度和方向，而不能说明测量质量的好坏。

在实际测量中经常用到修正值。修正值 c 是指与绝对误差数值相等但符号相反的数值，即 $c = -\Delta x = L - x$ 。修正值给出的方式可以是具体数值、一条曲线、公式或数表。显然，将测量值与修正值相加就可以得到实际真值。

2. 相对误差

相对误差 (Relative Error) 常用百分比来表示，一般多取正值。相对误差可分为实际相



对误差、示值(标称)相对误差和引用(相对)误差。

(1) 实际相对误差 γ

实际相对误差是用测量值的绝对误差 Δx 与其实际真值 L 的百分比来表示的相对误差,即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% \quad (1.3)$$

(2) 示值(标称)相对误差 γ_x

示值(标称)相对误差是用测量值的绝对误差 Δx 与测量值 x 的百分比来表示的相对误差,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.4)$$

在检测技术中,由于相对误差能够反映测量技术水平的高低,因此更具有实用性。例如,测量两地距离为 1 000 km 的路程时,若测量结果为 1 001 km,则测量结果的绝对误差是 1 km,示值相对误差约为 1‰;如果把 100 m 长的一匹布量成 101 m,尽管绝对误差只有 1 m,与前者 1 km 相比小很多,但 1‰ 的示值相对误差却是前者 1‰ 的 10 倍,这充分说明后者的测量水平较低。

(3) 引用(相对)误差

引用(相对)误差(Fiducial Error)是指测量值的绝对误差 Δx 与仪器量程 A_m 的百分比。引用误差的最大值叫作最大引用(相对)误差 γ_m ,即

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% \quad (1.5)$$

式中, A_m 是指测量仪表的最大值与最小值之间的差值。

由于式(1.5)中的分子、分母都由仪表本身决定,所以人们经常使用最大引用误差评价仪表的性能。最大引用误差又称满度(引用)相对误差或仪表的基本误差(Intrinsic Error),是仪表的主要质量指标之一。一般将基本误差去掉百分号(%)后的数值定义为仪表的精度等级(Accuracy Class)。精度等级规定取一系列标准值,通常用阿拉伯数字标在仪表的刻度盘上,等级数字外有一圆圈。我国目前规定的精度等级有 0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0、5.0 等级别。精度等级数值越小,测量精确度越高,仪表价格越贵。

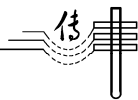
由于仪表都有一定的精度等级,因此,其刻度盘的分格值不应小于仪表的允许误差(绝对误差)值,小于允许误差的分度是没有意义的。

在正常工作条件下使用时,工业上常用的各精度等级仪表的基本误差不超过表 1.1 所规定的值。

表 1.1 仪表的精度等级和基本误差

精度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	4.0	5.0
基本误差	±0.1%	±0.2%	±0.5%	±1.0%	±1.5%	±2.5%	±4.0%	±5.0%

【例 1】 某温度计的量程范围为 0℃~500℃,校验时该表的最大绝对误差为 6℃,试确定其精度等级。



解：根据题意知 $|\Delta x|_m=6^{\circ}\text{C}$ ， $A_m=500^{\circ}\text{C}$ ，代入式（1.5）中

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% = \frac{6}{500} \times 100\% = 1.2\%$$

由于1.2%介于1.0%~1.5%，根据表1.1可知，该温度计的精度等级应定为1.5级。

【例2】 工艺要求检测温度指标 $(300 \pm 6)^{\circ}\text{C}$ ，现拟用一台 $0^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ 温度表测量，试选择该表的精度等级。

解：根据式（1.5）得

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% = \frac{6}{500} \times 100\% = 1.2\%$$

若选择1.5级的温度表，对应的 $|\Delta x|_m=7.5^{\circ}\text{C}$ ，显然不能满足工艺要求，因此这里选择1.0级的温度表。

通过上述两例可以看出，校验仪表时确定精度等级与根据工艺要求选择仪表精度等级是有区别的，在实际应用中应注意这一点。

1.1.3 测量误差的分类及来源

在测量过程中，由于被测量千差万别，影响测量工作的因素非常多，使得测量误差的表现形式也多种多样，因此测量误差有不同的分类方法。按测量误差表现出来的规律可分为系统误差、随机误差、粗大误差和缓变误差。

1. 系统误差

当对同一被测量进行多次重复测量时，若误差固定不变或者按照一定规律变化，这种误差称为系统误差（Systematic Error）。系统误差主要是由所使用仪器仪表存在误差、测量方法不完善、各种环境因素波动及测量者个体差异等原因造成的。

（1）系统误差的分类

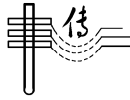
按照系统误差所表现出来的规律，通常将其划分为四类。

① 固定不变的系统误差。固定不变的系统误差是指在重复测量中，数值大小和符号均不变的系统误差。这种误差多数是由于测量设备的缺陷或者采用了不适当的测量方法造成的。例如，天平砝码的质量误差、观测者习惯性的错误观测角度等。固定不变的系统误差又叫恒值系统误差。

② 线性变化的系统误差。线性变化的系统误差是指随着测量次数或时间的增加，数值按照一定比例而不断增加（或减小）的系统误差。例如，在用齿轮流量计测量含有微小固体颗粒的液体时，由于磨损会使泄漏量越来越大，这样就产生了线性变化的系统误差。

③ 周期性变化的系统误差。周期性变化的系统误差是指数值和符号循环交替、重复变化的系统误差。例如，用热电偶在露天环境下测温时，其冷端温度随着昼夜温度的变化做周期性变化。若不进行冷端温度补偿，测量结果必然包含周期性变化的系统误差。

④ 复杂规律变化的系统误差。复杂规律变化的系统误差是指既不随时间做线性变化，也不做周期性变化，而是按照复杂规律变化的系统误差。



线性、周期性和复杂规律变化的系统误差统称为变值系统误差。

系统误差反映了测量值偏离真值的程度,也可用“正确度”一词表征。

系统误差一般可通过实验或分析的方法,查明其变化的规律及产生的原因,因此,它是可以预测的,也是可以消除的。

(2) 系统误差的发现

系统误差是由被测量受到若干因素的显著影响造成的,它对测量结果的影响远比随机误差严重,所以必须想办法发现和消除系统误差,把它降低到允许限度之内。

① 实验对比法。用多台同类或相近的仪表对同一被测量进行测量,通过分析测量结果的差异来判断系统误差是否存在。例如,用天平和台秤称量同一物体,即可发现台秤存在的系统误差。

② 残余误差观察法。残余误差为测量值与测量值平均值之差,即 $p_i = x_i - \bar{x}$ 。将一个测量列的残余误差在 p_i-n 坐标空间中拟合后,通过观察误差曲线即可判断有无系统误差存在。如图 1.2 所示,图 (a) 不存在系统误差,图 (b) 存在线性变化的系统误差,图 (c) 存在周期性变化的系统误差,图 (d) 同时存在线性变化和周期性变化的系统误差。

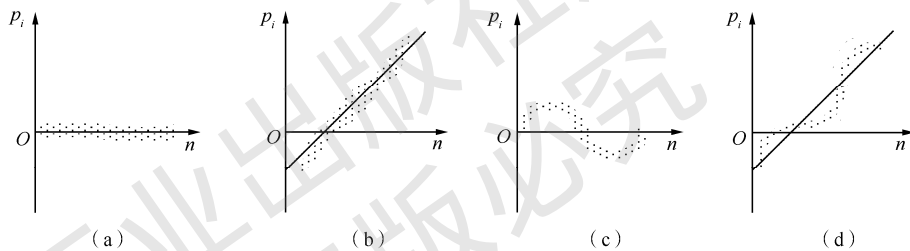


图 1.2 p_i-n 关系示意图

③ 准则判别法。有许多准则可以方便地判断出系统误差的存在,如马利科夫准则可以判断测量列中是否存在线性变化的系统误差;阿贝-赫梅特准则可以判断测量列中是否存在周期性变化的系统误差等。

(3) 系统误差的减小和消除方法

为了进行正确的测量并取得可靠的数据,在测量前或测量过程中,应尽量消除产生系统误差的来源,同时检查测量系统和测量方法本身是否正确。

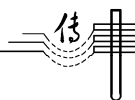
① 替代法。在测量条件不变的基础上,用标准量替代被测量,实现相同的测量效果,从而用标准量确定被测量。此法能有效消除检测装置的系统误差。

② 零位式测量法。测量时将被测量 x 与已知的标准量 A 进行比较,调节标准量使两者的效应相抵消,系统达到平衡时,被测量等于标准量。

③ 补偿法。在传感器的结构设计中,常选用在同一干扰变量作用下所产生的误差数值相等而符号相反的零部件或元器件作为补偿元件,如热电偶冷端温度补偿器的铜电阻。

④ 修正法。当仪表的修正值已知时,将测量结果的指示值加上修正值,就可以得到被测量的实际值。此法可削弱测量中的系统误差。

⑤ 对称观测法(交叉读数法)。许多复杂变化的系统误差,在短时间内可近似看作线性系统误差。在测量过程中,合理设计测量步骤以获得对称的数据,配以相应的数据处理程序,



从而得到与该影响无关的测量结果。这是消除线性系统误差的有效方法。

⑥ 半周期偶数观测法。周期性系统误差的特点是每隔半个周期所产生的误差大小相等、符号相反。假设系统误差呈正弦规律变化，在 τ_1 时刻误差为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_m \sin \omega \tau_1$ ，相隔半个周期的 τ_2 时刻，即 $\omega \tau_2 = \omega \tau_1 + \pi$ ，误差 $\varepsilon_2 = \varepsilon_m \sin \omega \tau_2 = \varepsilon_m \sin(\omega \tau_1 + \pi) = -\varepsilon_m \sin \omega \tau_1$ ，取 τ_1 、 τ_2 两个时刻测量值的平均值，则测量结果中就不含有周期性系统误差了。

2. 随机误差

当对同一被测量进行多次重复测量时，若误差的大小随机变化、不可预知，则这种误差称为随机误差 (Random Error)。随机误差是由很多复杂因素的微小变化引起的，尽管这些不可控微小因素中的一项对测量值的影响甚微，但这些因素的综合作用造成了各次测量值的差异。

(1) 随机误差的统计特性

随机误差就单次测量而言是无规律的，其大小、方向均不可预知，既不能用实验的方法消除，也不能修正，但当测量次数无限增加时，该测量列中的各个测量误差出现的概率密度服从正态分布 (如图 1.3 所示)，即

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.6)$$

式中， $\Delta x = x - L$ 为测量值的绝对误差， σ 为分布函数的标准误差。

测量结果符合正态分布曲线的例子非常多，如某校男生身高的分布、交流电源电压的波动等。

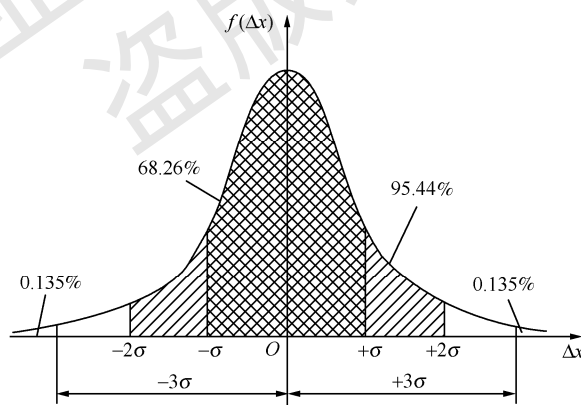


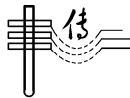
图 1.3 随机误差的正态分布曲线

对正态分布规律分析可知，随机误差具有 4 种特性。

① 集中性。大量重复测量时得到的数据，均集中在其平均值 \bar{x} 附近，较小的误差出现的概率大。随机误差的分布具有“两头小、中间大”的单峰性。

② 有界性。很大的误差出现的概率近于零；即使在有限次的测量中，误差的绝对值不超过一定的范围。

③ 对称性。当测量次数足够多时，符号相反、绝对值相等的误差出现的概率大致相同；正、负误差的分布具有对称性。



④ 抵偿性。当测量次数趋于无穷多时, 测量的随机误差的代数和趋于零。无穷多次所测得数据的算术平均值是真值的最佳估计值。

(2) 随机误差的估计

随机误差反映了测量结果的“精密度”, 即各个测量值之间相互接近的程度。对式(1.6)分析后可以发现, 当 σ 变化时, 正态分布曲线的形状会随之改变。若 σ 变小, 则曲线尖锐, 说明小误差出现的概率增大, 大误差出现的概率减小, 测量值都集中在真值附近, 这时测量值的离散程度小; 反之, 若 σ 增大, 则曲线平坦, 说明大误差和小误差出现的概率差异减小, 测量值不是集中在真值附近, 而是离散程度变大。这个现象说明, σ 值直接反映了测量结果的密集程度, 因此常用 σ 值来表征测量的精密度。

当对某个量 x 进行无限次测量时, 各次测量误差平方和的平均值的平方根称为均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE), 也叫标准误差, 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - L_0)^2}{n}} \quad (1.7)$$

由于真值 L_0 未知, 且实际测量中的测量次数为有限值, 所以通常用测量值的算术平均值 \bar{x} 替代真值 L_0 , \bar{x} 按下式计算

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.8)$$

这时均方根误差可按下式计算

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{n-1}} \quad (1.9)$$

式中, p_i 称为残余误差 (残差), 它可表示为

$$p_i = x_i - \bar{x} \quad (1.10)$$

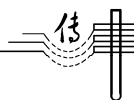
式(1.9)称为贝塞尔公式, 是求 σ 值的近似公式。

在实际测量中, 人们常关注测量值 x_i 在真值附近某一范围的概率大小, 此范围一般取标准误差 σ 的若干倍 $k\sigma$ 的对称区间, 即 $[-k\sigma, k\sigma]$, 该区间称为置信区间或置信限, k 称为置信系数, 习惯上 k 取整数。误差落在置信区间 $[-k\sigma, k\sigma]$ 的概率称为置信概率 P 。 $k=1$ 时, $P\{|\Delta x| \leq \sigma\} = 68.26\%$; $k=2$ 时, $P\{|\Delta x| \leq 2\sigma\} = 95.44\%$; $k=3$ 时, $P\{|\Delta x| \leq 3\sigma\} = 99.73\%$ 。由于误差出现在区间 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 的概率已经达到99.73%, 可以认为某次测量的误差基本上都落在这个区间, 所以可用 3σ 作为极限误差。

由于测量次数有限, 因此 \bar{x} 与 L_0 仍有一定误差, \bar{x} 只是 L_0 的估计值。某个测量列的 \bar{x} 与另一个测量列的 \bar{x} 之间也有区别, 即 \bar{x} 同样存在分散性问题。算术平均值的标准误差 $\bar{\sigma}$ 与测量值的标准误差 σ 的关系为

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.11)$$

对于一个等精度的、独立的、有限的测量列来说, 在没有系统误差和粗大误差的情况下, 它的测量结果通常表示为



$$x = \bar{x} \pm 3\sigma \quad (P = 99.73\%) \quad (1.12)$$

应该指出，在任何一次测量中，系统误差和随机误差一般都是同时存在的，而且两者之间并不存在绝对的界限。

3. 粗大误差

测量结果明显偏离其实际值时所对应的误差称为粗大误差（Gross Error）或疏忽误差，又叫过失误差。含有粗大误差的测量值称为坏值（Bad Value）。

产生粗大误差的原因有操作者的失误、使用有缺陷的仪器、实验条件的突变等。正确的测量结果中不应包含粗大误差。

实际测量时必须根据一定的准则判断测量结果中是否包含坏值，并在数据记录中将所有的坏值都予以剔除。同时，操作人员应加强工作责任心，对测量仪器进行经常性检查、维护、校验和修理等，以减小或消除粗大误差。

在无系统误差的条件下对被测量进行等精度测量后，若个别数据与其他数据有明显差异，则表明该数据可能包含粗大误差，这时应将其列为可疑数据。但可疑数据并不都是坏值，因此发现可疑数据时，要根据误差理论来决定取舍。

误差理论剔除坏值的基本方法是首先给定一个置信概率并确定一个置信区间，凡超出此区间的误差即认为它不属于随机误差而是粗大误差，应将该粗大误差所对应的坏值予以剔除。常用的拉依达准则（ 3σ 准则）规定：凡是随机误差大于 3σ 的测量值都认为是坏值，应予以剔除。

4. 缓变误差

数值随时间缓慢变化的误差称为缓变误差（Slowly Varying Error），它主要是由测量仪表零件老化、失效、变形等原因造成的。这种误差在短时间内不易被察觉，但在较长时间后会显露出来。通常可以采用定期校验的方法及时修正缓变误差。

此外，测量误差还有其他的分类方法。

按被测量与时间的关系划分，测量误差可分为静态误差和动态误差。静态误差是指被测量稳定不变时所产生的测量误差。动态误差是指被测量随时间迅速变化时，系统的输出量在时间上却跟不上输入量的变化而产生的误差。例如，将水银温度计插入 100°C 的沸水中，水银柱不可能立即上升到 100°C ，此时读数必然产生动态误差。

按测量仪表的使用条件分类，可将误差分为基本误差和附加误差。基本误差是指传感器在标准条件下使用时所具有的误差，它属于系统误差。当使用条件偏离标准条件时，传感器必然在基本误差的基础上增加了新的系统误差，称为附加误差。

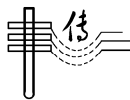
任务与实施

RENWUYUSHI

【任务】 在对被测量进行等精度多次重复测量，并取得一系列测量数据之后，就要对数据进行准确的加工整理和分析，以便得到一个较理想的测量结果。考虑到系统误差可以利用有关方法予以消除，故假定本任务给出的测量数据中不含有系统误差。

用温度传感器对某温度进行12次等精度测量，测量数据（ $^{\circ}\text{C}$ ）如下：

20.46、20.52、20.50、20.52、20.48、20.47、20.50、20.49、20.47、20.49、20.51、20.51



要求对该组数据进行分析整理, 并列写出最后的测量结果。

【实施方案】 数据处理一般采取的步骤是: 先记录填表, 然后计算和判别坏值, 最后列出测量结果, 这几个步骤必不可少。记录填表这一步往往很容易被人忽略, 一旦计算出错, 检查起来费时费力。

1. 记录填表

将测量数据 x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 按测量序号依次填入表格的第 1、2 列中, 如表 1.2 所示。

2. 计算

① 求出测量数据列的算术平均值 \bar{x} , 填入表 1.2 第 2 列的下面。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} x_i = \frac{1}{12} \times 245.92 \approx 20.493$$

② 计算各测量值的残余误差 $p_i = x_i - \bar{x}$, 并填入表 1.2 中的第 3 列。当计算无误时, 理论上 $\sum_{i=1}^n p_i = 0$, 但实际上, 由于计算过程的四舍五入所引入的误差, 此关系式通常不能满足。此处 $\sum_{i=1}^{12} p_i = 0.004 \approx 0$ 。

③ 计算 p_i^2 值并列在表 1.2 中的第 4 列, 按贝塞尔公式计算出标准误差 σ 后, 填入本列下面。

由于 $\sum_{i=1}^{12} p_i^2 = 44.68 \times 10^{-4}$, 于是

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{44.68 \times 10^{-4}}{11}} \approx 0.02$$

3. 判别坏值

根据拉依达准则检查测量数据中是否有坏值。如果发现坏值, 应将坏值剔除, 然后从第 2 步重新计算, 直至数据列中不存在坏值。若无坏值, 则继续步骤 4。

采用拉依达准则检查坏值, 因为 $3\sigma = 0.06$, 而所有测量值的残余误差 p_i 均满足 $|p_i| < 3\sigma$, 显然数据中无坏值。

4. 列写最后的测量结果

① 在确定不存在坏值后, 计算算术平均值的标准误差 $\bar{\sigma}$ 。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.02}{\sqrt{12}} \approx 0.006$$

② 写出最后的测量结果: $x = \bar{x} \pm 3\bar{\sigma}$, 并注明置信概率。

由于 $3\bar{\sigma} = 3 \times 0.006 = 0.018$, 因此最后的测量结果写为

$$x = 20.493 \pm 0.018 \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ (} P = 99.73\% \text{)}$$

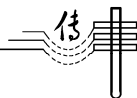


表 1.2 测量结果的数据整理举例

i	x_i (°C)	p_i	p_i^2
1	20.46	-0.033	0.001 089
2	20.52	+0.027	0.000 729
3	20.50	+0.007	0.000 049
4	20.52	+0.027	0.000 729
5	20.48	-0.013	0.000 169
6	20.47	-0.023	0.000 529
7	20.50	+0.007	0.000 049
8	20.49	-0.003	0.000 009
9	20.47	-0.023	0.000 529
10	20.49	-0.003	0.000 009
11	20.51	+0.017	0.000 289
12	20.51	+0.017	0.000 289
$\sum_{i=1}^{12} x_i = 245.92$ $\bar{x} \approx 20.493$		$\sum_{i=1}^{12} p_i = 0.004 \approx 0$	$\sum_{i=1}^{12} p_i^2 = 44.68 \times 10^{-4}$ $\sigma \approx 0.02$

5. 思考

针对 $x=20.493 \pm 0.018$ (°C) 的测量结果, 有人认为最后的测量结果只有两个: 20.475°C 和 20.511°C, 对此你是如何理解的?

任务2 传感器特性分析与传感器选用

知识链接

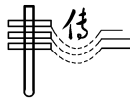
ZHISHIJIANKA

现代信息技术包括计算机技术、通信技术和传感器技术等, 计算机相当于人的大脑, 通信相当于人的神经, 而传感器则相当于人的感觉器官。如果没有各种精确可靠的传感器去检测原始数据并提供真实的信息, 即使是性能非常优越的计算机, 也无法发挥其应有的作用。

1.2.1 传感器的组成及其分类

1. 传感器的组成

传感器 (Transducer/Sensor) 就是能够感觉外界信息, 并能按一定规律将这些信息转换成可用的输出信号的器件或装置。传感器的输入量通常指非电量, 如物理量、化学量、生物量等; 而输出量则是便于传输、转换、处理、显示的物理量, 主要是电量信号。例如, 电容式传感器的输入量可以是力、压力、位移、速度等非电量信号, 输出量则是电信号。



传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路3部分组成，如图1.4所示。

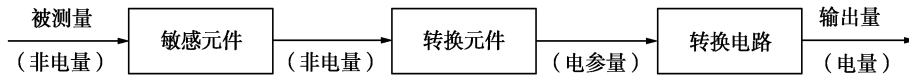


图1.4 传感器组成框图

（1）敏感元件

敏感元件是传感器中能直接感受被测量的部分，即直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量。例如，弹性敏感元件将压力转换为位移，且压力与位移之间保持一定的函数关系。

（2）转换元件

转换元件是传感器中将敏感元件输出的非电量转换为适于传输和测量的电参量的部分。例如，应变式压力传感器中的电阻应变片可以将应变转换成电阻的变化。

（3）转换电路

转换电路将电参量转换成便于测量的电压、电流、频率等电量信号。例如，交直流电桥、放大器、振荡器及电荷放大器等。

应注意，并不是所有的传感器必须同时包含敏感元件和转换元件。如果敏感元件能直接输出电参量，它就同时兼为转换元件，如热电偶；如果转换元件能直接感受被测量而输出与之成一定关系的电参量，则传感器就没有敏感元件，如压电元件。

2. 传感器的分类

传感器千差万别、种类繁多，分类方法也不尽相同，常用的分类方法有以下几种（见表1.3）。

（1）按被测物理量分类

传感器按被测物理量可分为温度、压力、流量、物位、位移、加速度、磁场、光通量等传感器。这种分类方法明确表明了传感器的用途，便于选用，如压力传感器用于测量压力信号。

（2）按传感器工作原理分类

传感器按工作原理可分为电阻传感器、热敏传感器、光敏传感器、电容传感器、电感传感器、磁电传感器等，这种分类方法表明了传感器的工作原理，有利于传感器的设计和应用，见表1.3。例如，电容传感器就是将被测量转换成电容值的变化。

（3）按传感器转换能量供给形式分类

传感器按转换能量供给形式分为能量变换型（发电型）传感器和能量控制型（参量型）传感器两种。

能量变换型传感器在进行信号转换时不需要额外提供能量，就可将输入信号能量变换为另一种形式的能量输出，如热电偶传感器、压电式传感器等。

能量控制型传感器工作时必须有外加电源，如电阻、电感、电容及霍尔式传感器等。

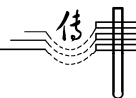


表 1.3 传感器的分类

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参量			
电参量	电阻	移动电位器触点改变电阻	电位器传感器	位移
		改变电阻丝或片的尺寸	电阻丝应变传感器、半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应（电阻温度系数）	热丝传感器	气流速度、液体流量
			电阻温度传感器	温度、辐射热
			热敏电阻传感器	温度
		利用电阻的光敏效应	光敏电阻传感器	光强
	利用电阻的湿度效应	湿敏电阻	湿度	
	电容	改变电容的几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量
	电感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感传感器	位移
		涡流去磁效应	涡流传感器	位移、厚度、硬度
		利用压磁效应	压磁传感器	力、压力
		改变互感	差动变压器	位移
			自整角机	位移
	旋转变压器	位移		
	频率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振传感器	力、温度等
	计数	利用莫尔条纹	光栅	大角位移、大直线位移
		改变互感	感应同步器	
利用数字编码		角度编码器		
数字	利用数字编码	角度编码器	大角位移	
电量	电动势	温差电动势	热电偶	温度、热流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
		光电效应	光电池	光强
	电荷	辐射电离	电离室	离子计数、放射性强度
		压电效应	压电传感器	动态力、加速度

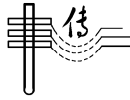
(4) 按传感器工作机理分类

按传感器工作机理可分为结构型传感器和物性型传感器。

结构型传感器指被测量变化时引起传感器的结构发生改变，从而引起输出电量的变化。以电容式压力传感器为例，当外加压力变化时，电容极板发生位移而使结构改变，从而引起电容值和输出电压发生变化。

物性型传感器利用物质的物理或化学特性随被测参数变化而改变的原理工作。一般没有可动结构部分，易小型化，如各种半导体传感器。

习惯上常把工作原理和用途结合起来命名传感器，如电容式压力传感器、电感式位移传感器等。



1.2.2 传感器的静态特性与指标

传感器的基本特性是指传感器的输出与输入之间的关系。传感器测量的参数：一种是不随时间变化（或变化极其缓慢）的稳态信号，另一种是随时间变化的动态信号。因此，传感器的基本特性分为静态特性和动态特性。

传感器的静态特性（Static Characteristic）是指传感器输入信号处于稳定状态时，其输出与输入之间呈现的关系，表示为

$$y = k_0 + k_1x + k_2x^2 + \cdots + k_nx^n \quad (1.13)$$

式中， y 为传感器输出量， x 为传感器输入量， k_0 为传感器的零位输出， k_1 为传感器的灵敏度， k_2 、 k_3 、 \cdots 、 k_n 为非线性项系数。

静态特性指标主要有精确度、稳定性、灵敏度、线性度、迟滞性和可靠性等。

1. 精密性、准确度和精确度

精确度是反映测量系统中系统误差和随机误差的综合评定指标。与精确度有关的指标有精密度和准确度。

(1) 精密性

精密性反映测量系统指示值的分散程度，精密度高则随机误差小。

(2) 准确度

准确度反映测量系统的输出值偏离真值的程度，准确度高则系统误差小。

(3) 精确度

精确度是准确度与精密性两者的总和，常用仪表的基本误差表示。精确度高表示精密性和准确度都高。

图 1.5 中的射击例子有助于对准确度、精密性和精确度三个概念的理解。图 (a) 表示准确度高而精密性低；图 (b) 表示精密性高而准确度低；图 (c) 表示准确度和精密性都高，即精确度高。

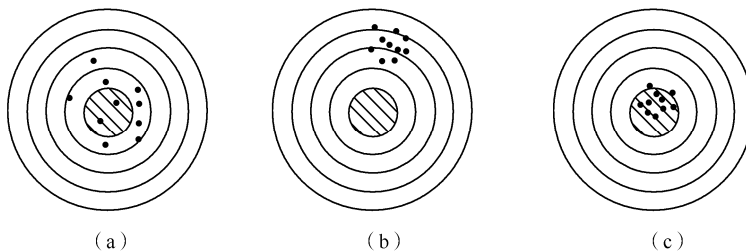
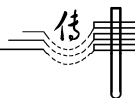


图 1.5 射击例子

2. 稳定性

传感器的稳定性（Regulation）常用稳定度和影响系数表示。



(1) 稳定度

稳定度 (Stability) 是指在规定工作条件范围和规定时间内, 传感器性能保持不变的能力。传感器在工作时, 内部随机变动的因素很多, 如发生周期性变动、漂移或机械部分的摩擦等都会引起输出值的变化。

稳定度一般用重复性的数值和观测时间的长短表示。例如, 某传感器输出电压值每小时变化 1.5 mV, 可写成稳定度为 1.5 mV/h。

(2) 影响系数

影响系数 (Influence Coefficient) 是指由于外界环境变化引起传感器输出值变化的量。一般传感器都有给定的标准工作条件, 如环境温度 20°C、相对湿度 60%、大气压力 101.33 kPa、电源电压 220 V 等。而实际工作条件通常会偏离标准工作条件, 这时传感器的输出也会发生变化。

影响系数常用输出值的变化量与影响量变化量的比值表示, 如某压力表的温度影响系数为 200 Pa/°C, 即表示当环境温度每变化 1°C 时, 压力表的示值变化 200 Pa。

3. 灵敏度

灵敏度 (Sensitivity) k 是指传感器在稳态下输出变化量 Δy 与输入变化量 Δx 的比值, 即

$$k = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.14)$$

显然, 灵敏度表示静态特性曲线上相应点的斜率。线性测量系统的灵敏度为常数, 非线性测量系统的灵敏度随着输入量的变化而变化, 如图 1.6 所示。

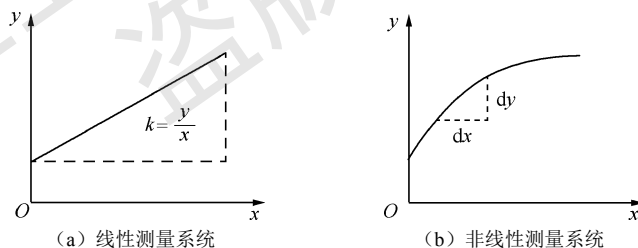


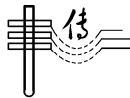
图 1.6 灵敏度的定义

灵敏度的量纲取决于传感器输入、输出信号的量纲。例如, 压力传感器灵敏度的量纲可表示为 mV/Pa。对于数字式仪表, 灵敏度以分辨力表示。所谓分辨力 (Resolution) 是指数字式仪表最后一位数字所代表的值。分辨力数值一般小于仪表的最大绝对误差。

实际测量时, 一般希望传感器的灵敏度高, 且在满量程范围内保持恒定值, 即传感器的静态特性曲线为直线。

4. 线性度

线性度 (Linearity) γ_L 又称非线性误差, 是指传感器实际特性曲线和其理论拟合直线之间的最大偏差 ΔL_{\max} 与传感器满量程输出 y_{FS} 的百分比, 即



$$\gamma_L = \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.15)$$

理论拟合直线选取方法不同,线性度的数值就不同。在图 1.7 中,将传感器的零点与对应于最大输入量的最大输出值点(满量程点)连接起来的直线叫端基直线(Terminated Line),相应的线性度称为端基线性度(Terminal-based Linearity)。

人们总是希望线性度越小越好,即传感器的静态特性接近于拟合直线,这时传感器的刻度是均匀的,读数方便且不易引起误差,容易标定。检测系统的非线性误差多采用计算机来纠正。

5. 迟滞性

迟滞性(Hysteresis)是指传感器在正(输入量增大)、反(输入量减小)行程中输出曲线不重合的现象,如图 1.8 所示。

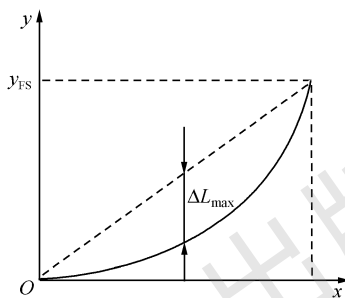


图 1.7 传感器线性度示意图

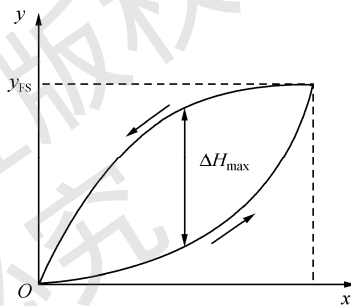


图 1.8 传感器迟滞性示意图

迟滞性 γ_H 用正、反行程输出值间的最大差值 ΔH_{\max} 与满量程输出 y_{FS} 的百分比表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.16)$$

造成迟滞的原因很多,如轴承摩擦、间隙、螺钉松动、电路元件老化、工作点漂移、积尘等。迟滞会引起分辨力变差或造成测量盲区,因此一般希望迟滞越小越好。

6. 可靠性

可靠性(Reliability)是指传感器或检测系统在规定工作条件和规定时间内具有正常工作性能的能力。它是一种综合性的质量指标,包括可靠度、平均无故障工作时间、平均修复时间和失效率。

(1) 可靠度 (Reliability)

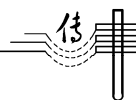
可靠度是传感器在规定的使用条件和工作周期内达到所规定性能的概率。

(2) 平均无故障工作时间 (MTBF)

平均无故障工作时间指相邻两次故障期间传感器正常工作时间的平均值。

(3) 平均修复时间 (MTTR)

平均修复时间指排除故障所花费时间的平均值。



(4) 失效率或故障率 (λ)

失效率 (Failure Rate) 是指在规定的条件下工作到某个时刻, 检测系统在连续单位时间内发生失效的概率。对可修复性的产品, 又称故障率。

如图 1.9 所示, 失效率是时间的函数, 一般分为早期失效期、偶然失效期和衰老失效期。

① 早期失效期。这期间开始阶段的故障率很高, 失效的可能性很大, 但随着使用时间的增加, 失效的可能性迅速降低。一些检测系统在使用前期通过“老化”试验可降低故障率。

② 偶然失效期。这期间故障率较低, 是构成检测系统使用寿命的主要部分。

③ 衰老失效期。由于元器件老化、经常损坏和维修, 故障率迅速增大, 对于超过使用寿命的系统, 即使未发生故障也应及时更换, 以免造成不可挽救的损失。

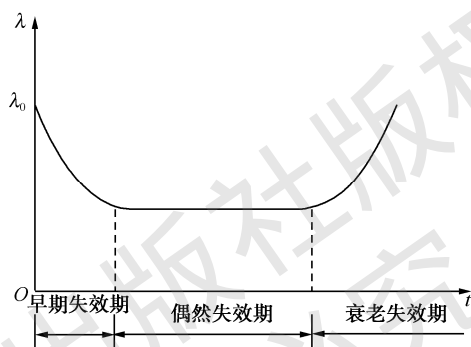


图 1.9 失效率变化曲线

1.2.3 传感器的动态特性与指标

传感器的动态特性 (Dynamic Characteristic) 是指传感器对于随时间变化的输入信号的响应特性。通常希望传感器的输出信号和输入信号随时间的变化曲线一致或相近, 但实际上两者总是存在着差异, 因此必须研究传感器的动态特性。

研究传感器的动态特性首先要建立动态模型, 动态模型有微分方程、传递函数和频率响应函数, 可以分别从时域、复数域和频域对系统的动态特性及规律进行研究。

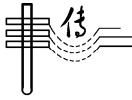
系统的动态特性取决于系统本身及输入信号的形式, 工程上常用正弦函数和单位阶跃函数作为标准的输入信号。通常, 在时域主要分析传感器在单位阶跃信号输入下的响应; 而在频域主要分析在正弦信号输入下的稳态响应, 并着重从系统的幅频特性和相频特性来讨论。

1. 传感器阶跃响应

传感器的动态模型可以用线性常系数微分方程表示, 即

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1.17)$$

式中, a_0 、 a_1 、 \cdots 、 a_n 、 b_0 、 b_1 、 \cdots 、 b_m 是取决于传感器参数的常数, 一般 $b_1 = b_2 = \cdots = b_m = 0$, 而 $b_0 \neq 0$ 。若 $n=0$, 则传感器为零阶系统; 若 $n=1$, 则传感器为一阶系统; 若 $n=2$, 则传感器为二阶系统; 若 $n \geq 3$, 则传感器称为高阶系统。



当传感器输入一个单位阶跃信号 $u(t)$ 时, 其输出信号称为阶跃响应 (Step Response)。常见的一阶、二阶传感器阶跃响应曲线如图 1.10 所示, 主要动态指标包括以下几个。

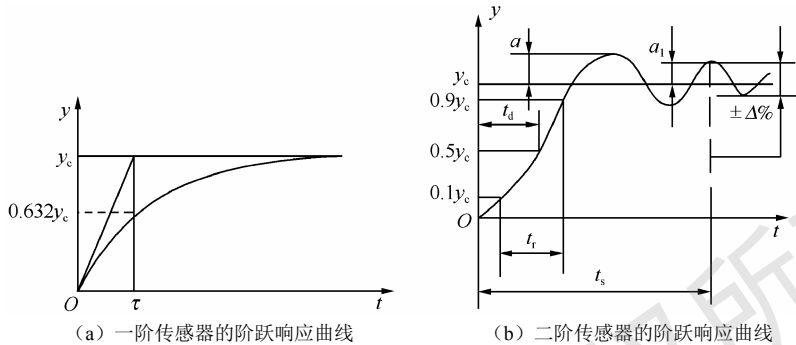


图 1.10 常见的一阶、二阶传感器阶跃响应曲线

(1) 时间常数 τ

时间常数指传感器输出 $y(t)$ 由零上升到稳态值 y_c 的 63.2% 所需的时间, 如图 1.10 (a) 所示。

(2) 上升时间 t_r

上升时间指传感器输出 $y(t)$ 由稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间, 如图 1.10 (b) 所示。

(3) 调节时间 t_s

调节时间指传感器输出 $y(t)$ 由零上升达到并一直保持在允许误差范围 $\pm\Delta\%$ 所需的时间。 $\pm\Delta\%$ 可以是 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 或 $\pm 10\%$, 根据实际情况确定。

(4) 最大超调量 a

输出最大值 y_{\max} 与输出稳态值 y_c 的相对误差称为最大超调量, 即

$$a = \frac{y_{\max} - y_c}{y_c} \times 100\% \quad (1.18)$$

(5) 振荡次数 N

振荡次数指调节时间内输出量在稳态值附近上下波动的次数。

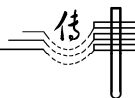
(6) 稳态误差 e_{ss}

无限长时间后传感器的稳态输出值 y_c 与目标值 y_0 之间偏差的相对值称为稳态误差, 即

$$e_{ss} = \frac{y_c - y_0}{y_c} \times 100\% \quad (1.19)$$

2. 传感器频率响应

将各种频率不同而幅值相等的正弦信号输入到传感器, 其输出正弦信号的幅值、相位与频率之间的关系称为频率响应 (Frequency Response) 特性。频率响应特性可用频率响应函数表示, 它由幅频特性和相频特性组成。



由控制理论可知，传感器的频率响应函数为

$$G(j\omega) = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (1.20)$$

幅频特性：频率响应特性 $G(j\omega)$ 的模，即输出与输入的幅值比 $A(\omega) = |G(j\omega)|$ 称为幅频特性。以 ω 为自变量、 $A(\omega)$ 为因变量的曲线称为幅频特性曲线。

相频特性：频率响应特性 $G(j\omega)$ 的相角 $\varphi(\omega)$ ，即输出与输入的相位差 $\varphi(\omega) = -\arctan G(j\omega)$ 称为相频特性。以 ω 为自变量、 $\varphi(\omega)$ 为因变量的曲线称为相频特性曲线。

最小相位系统的幅频特性与相频特性之间存在一一对应关系，因此在进行传感器的频率响应分析时主要使用幅频特性，如图 1.11 所示为典型测量仪表的幅频特性。当测量仪表的输入信号频率较低时，测量仪表能够在精度范围内检测到被测量；随着输入信号频率的增大，幅频特性逐渐减小，测量仪表将无法等比例复现被测量。

幅频特性中对应于幅值为 $0.707A(0)$ 时的频率称为截止频率 ω_b ，对应的频率范围 $0 \leq \omega \leq \omega_b$ 称为频带宽度，频带宽度反映了测量仪表对快变信号的检测能力。

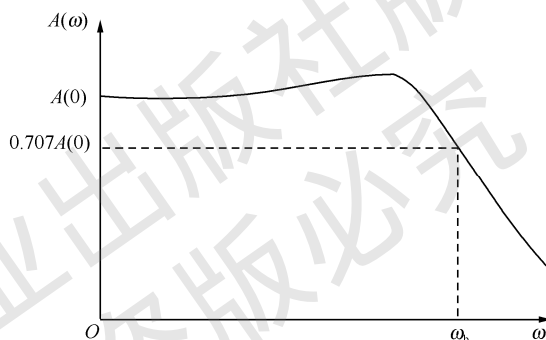


图 1.11 典型测量仪表的幅频特性

1.2.4 传感器的标定与选用

标定是指用标准设备产生已知非电量（标准量）或用基准量来确定传感器输出电量与非电输入量之间关系的过程。传感器的标定分为静态标定和动态标定两种。

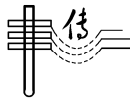
1. 静态标定

静态标定（Static Calibration）用于确定传感器的静态特性指标，如线性度、灵敏度、迟滞性等。

标定时首先要创造一个静态标定所要求的标准条件，即无加速度、振动、冲击（除非这些参量本身是被测物理量），环境温度一般为室温 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 85\%$ 、大气压力为 $(101 \pm 7) \text{ kPa}$ ；其次要求标定设备的精度至少比被标定的传感器及其系统高一个精度等级。

标定步骤具体如下。

- ① 将传感器量程（测量范围）分成若干等间距点。



② 根据传感器量程分点情况, 由小到大按等间距递增方式输入相应的标准量, 并记录与各输入值相对应的输出值。

③ 将输入值由大到小一点一点地递减, 同时记录与各输入值相对应的输出值。

④ 按照②、③步骤, 对传感器进行正、反行程往复循环多次测试, 将得到的输出、输入测试数据用表格列出或绘制成曲线。

⑤ 对测试数据进行必要的整理, 根据处理结果就可以确定传感器的线性度、灵敏度、迟滞性等静态特性指标了。

2. 动态标定

在对传感器进行动态特性分析和动态标定 (Dynamic Calibration) 时, 为便于比较和评价, 通常采用正弦变化和阶跃变化的输入信号。如前所述, 采用阶跃输入信号研究传感器时域动态性能时, 常用上升时间、响应时间和超调量等参数描述; 采用正弦输入信号研究传感器频域动态性能时, 常采用幅频特性和相频特性来描述。动态标定所采用的设备和标定过程都要比静态标定复杂。

传感器的校准是指通过定期检测传感器的基本性能参数, 确定其是否可以继续使用。若能继续使用, 则应对其有变化的主要性能指标进行数据修正, 以确保传感器的测量精度。传感器的校准与标定的内容基本相同。

任务与实施

REN WU YU SHI SHI

【任务】 现有 0.5 级的 $0\sim 300^{\circ}\text{C}$ 和 1.0 级的 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的两个温度计, 欲测量 80°C 的温度, 试问选用哪一个温度计比较好? 为什么? 在选用传感器时应考虑哪些因素?

【实施方案】

1. 计算

采用 0.5 级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量 80°C 时可能出现的最大示值相对误差分别为

$$|\Delta x|_{m1} = \gamma_{m1} \cdot A_{m1} = 0.5\% \times (300 - 0) = 1.5 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

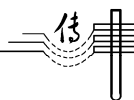
$$\gamma_{x1} = \frac{|\Delta x|_{m1}}{x_1} \times 100\% = \frac{1.5}{80} \times 100\% = 1.875\%$$

采用 1.0 级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量 80°C 时可能出现的最大示值相对误差分别为

$$|\Delta x|_{m2} = \gamma_{m2} \cdot A_{m2} = 1.0\% \times (100 - 0) = 1.0 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

$$\gamma_{x2} = \frac{|\Delta x|_{m2}}{x_2} \times 100\% = \frac{1.0}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

计算结果为 $\gamma_{x1} > \gamma_{x2}$, 显然, 用 1.0 级温度计比用 0.5 级温度计测量示值相对误差更小。因此, 在选用仪表时, 不能单纯追求高精度, 而应兼顾精度等级和量程, 最好使测量值落在仪表满度值的 $2/3$ 以上区域内。



2. 选用传感器应考虑的因素

传感器处于检测系统的输入端，一个检测系统性能的优劣，关键在于正确、合理地选择传感器。而传感器的种类繁多，性能又千差万别，对某一被测量通常会有多种不同工作原理的传感器可供使用。如何根据测量目的和实际条件合理地选用最适宜的传感器，是人们经常会遇到的问题。

由于传感器的精度高低、性能好坏直接影响整个自动检测系统的品质和运行状态，因此，选用传感器时应首先考虑这些因素；其次，在传感器满足所有性能指标要求的情况下，应优先选用成本低廉、工作可靠、易于维修的传感器，以期达到理想的性能价格比。

(1) 灵敏度

灵敏度高意味着传感器所能感知的变化量小，即被测量稍有变化，传感器就有较大的输出响应。一般来说，传感器的灵敏度越高越好。

但是传感器在采集有用信号的同时，其自身内部或周围存在着各种与测量信号无关的噪声，若传感器的灵敏度很高，即使是微弱的干扰信号也容易被混入，并且会伴随着有用信号一起被电子放大系统放大，显然这不是测量目标所希望出现的。因此，这时要综合考量，选择高信噪比的传感器，既要求传感器本身噪声小，又不易从外界引进干扰噪声。

传感器的量程范围与灵敏度有关。当输入量增大时，除非有专门的非线性校正措施，否则传感器是不应当进入非线性区域的，更不能进入饱和区。若传感器工作在既有被测量又有较强干扰量的情况下，过高的灵敏度反而会缩小传感器适用的测量范围。

(2) 线性范围

传感器理想的静态特性是在很大测量范围内输出与输入之间保持良好的线性关系。但实际上，传感器只能在一定范围内保持线性关系。线性范围越宽，表明传感器的工作量程越大。传感器工作在线性区内是保证测量精确度的基本条件，否则就会产生非线性误差。而在实际中，传感器绝对工作在线性区是很难保证的，也就是说，在许可的限度内，也可以工作在近似线性的区域内。因此，在选用时必须考虑被测量的变化范围，使其非线性误差在允许范围之内。

(3) 响应特性

通常希望传感器的输出信号和输入信号随时间的变化曲线相一致或基本相近，但在实际中很难做到这一点，延迟通常是不可避免的，但总希望延迟时间越短越好。

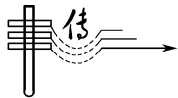
选用的传感器动态响应时间越短，延迟就越小。此外，还应考虑被测量的变化特点，如温度的惯性通常很大。

(4) 稳定性

影响传感器稳定性的因素是环境和时间。工作环境的温度、湿度、尘埃、油剂、振动等均会使传感器的输出发生改变，因此要选用适合于其使用环境的传感器，同时还要求传感器能长期使用而不需要经常更换或校准。

(5) 精确度

传感器的精确度是反映传感器能否真实反映被测量的一个重要指标，关系到整个测量系



统的性能。精确度越高，说明测量值与其真值越接近。但并不是在任何情况下都必须选择高精度的传感器，这是因为传感器的精确度越高，其价格就越高。如果一味追求高精度，必然会造成不必要的浪费。因此在选用传感器时，首先应明确测量目的。若属于相对比较的定性试验研究，只需获得相对比较值即可，就不必选用高精度的传感器；若要求获得精确值或对测量精度有特别要求时，则应选用高精度的传感器。

（6）测试方式

传感器在实际条件下的工作方式也是选用传感器时应考虑的重要因素，例如，是接触测量还是非接触测量？是在线测试还是非在线测试？是破坏性测试还是非破坏性测试等。

在线测试是一种与实际情况更接近一致的测试方式，在许多自动化过程的检测与控制中，通常要求真实性和可靠性，而且必须在现场条件下才能达到检测要求。实现在线测试是比较困难的，对传感器与检测系统都有一定的特殊要求，因此应选用适合于在线测试的传感器，这类传感器正在不断地被研制出来。

以上是选用传感器时应考虑的一些主要因素。此外，还应尽可能兼顾结构简单、体积小、质量轻、价格便宜、易于维护和易于更换等因素。

知识拓展

ZHISHITUOZHAN

传感器技术的发展趋势

现代科学技术的发展离不开检测技术，而检测技术的发展则离不开传感器。在信息产业的三大支柱中，传感器作为神经触角，通信技术作为神经中枢，计算机技术作为大脑，构成了一个完整的神经体系，这一体系已应用于各行各业。传感器技术水平的高低是衡量一个国家科技发展水平的主要标志之一。

1. 传感器的作用

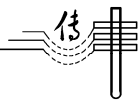
人们在信息时代的社会活动主要依靠对信息资源的开发、获取、传输与处理而进行，而传感器处于自动检测与控制系统之首，处于研究对象与测控系统的接口位置，是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学研究和生产过程要获取信息，都要通过传感器转换得到便于传输与处理的电信号。系统的自动化、智能化程度越高，对传感器的依赖性就越大，因此传感器对系统的功能起着决定性的作用。

2. 传感器技术的发展趋势

目前，传感器技术已从单一的物性型传感器进入功能更强大、技术高度集成的新型传感器阶段。21世纪传感器发展的总趋势是微型化、多功能化、集成化、网络化、数字化、智能化与系统化。

（1）传感器的微型化

微型传感器是以微机电系统（Micro-Electro Mechanical System, MEMS）技术为基础的。MEMS的核心技术是微电子机械加工技术，主要包括体硅微机械加工技术、表面硅微加工技



术、LIGA 技术（即 X 光深层光刻、微电铸和微复制技术）、激光微加工技术和微型封装技术等。微型传感器具有体积小、质量轻、反应快、灵敏度高及成本低等特点。比较成熟的微型传感器有压力传感器、微加速度传感器和微机械陀螺等。

（2）传感器的多功能化与集成化

由于传统的传感器只能用于检测一种物理量，但在许多应用领域，为了能准确反映客观事物和环境，通常需要同时测量大量参数，由若干种敏感元件组成的多功能传感器应运而生。这类传感器是将多种功能集成于一个传感器系统中，即在同一芯片上或将众多同一类型的单个传感器集成为一维、二维阵列型传感器，或将传感器与调整、补偿等电路一体化集成。半导体、电介质材料的进一步开发和集成技术的不断发展为传感器的集成化提供了基础。

（3）无线网络化

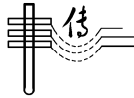
随着通信技术的发展，无线技术已应用到传感器技术中。例如，在水文观测中通过传感器获取水文的信息，然后通过无线技术将这些信息发送到集中控制平台，这样就可以在控制平台上监测到各个点的水文信息了。在航天技术中，通过卫星把传感器采集的数据发回地面，可以了解到太空中的各种情况。

（4）传感器的数字化、智能化与系统化

智能化的传感器是一种涉及多学科的新型传感器，是一种带微处理器的、具有自校准、自补偿、自诊断、数据处理、网络通信和数字信号输出功能的新型传感器。嵌入式技术、集成电路技术和微控制器的引入，使传感器成为硬件和软件的结合体，一方面，传感器的功耗降低、体积减小、抗干扰性和可靠性提高；另一方面，利用软件技术可以实现传感器的非线性补偿、零点漂移和温度补偿等；同时，网络接口技术的应用使传感器能方便地接入工业控制网络，为系统的扩充和维护提供了极大的方便。

课外作业 1

1. 解释下列名词术语的含义：真值、实际真值、示值、修正值、坏值、标定。
2. 仪表的基本误差与仪表的精度等级是什么关系？
3. 测量误差有几种表示方法？
4. 测量方法是如何分类的？分析说明电测法为什么得到广泛应用？
5. 误差按照表现出来的规律可分为哪几种？它们各有什么特点？
6. 随机误差有哪几方面的特性？
7. 如何判断测量列中是否含有坏值？
8. 传感器一般由哪几部分组成？传感器有哪些分类方法？
9. 传感器的静态和动态特性技术指标有哪些？各自的含义是什么？
10. 用电压表测量电压，测量值为 5.42V，改用标准电压表测量，示值为 5.60V，求第一只电压表测量的绝对误差、示值相对误差和实际相对误差。
11. 有一测量范围为 0~200℃、精度为 0.5 级的温度表，试求该表可能出现的最大绝对误差，以及示值分别为 20℃、100℃时的示值相对误差。



12. 被测温度为 400°C , 现有量程为 $0\sim 500^{\circ}\text{C}$ 、精度为 1.5 级和量程为 $0\sim 1\ 000^{\circ}\text{C}$ 、精度为 1.0 级的温度表各一块, 问选用哪一块温度表测量更好一些? 为什么?

13. 什么是仪表线性度? 已知某仪表的输入与输出数据如表 1.4 所示, 试计算它的线性度。

表 1.4 输入与输出数据

输入	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
输出	0	5.00	10.00	15.01	20.01	25.02	30.02	35.01	40.01	45.00	50.00

14. 已知某差压变送器的理想特性为 $U = 8x$ (mV), U 为输出电压, x 为位移, 实际测量的数据如表 1.5 所示, 试求:

- (1) 最大绝对误差、相对误差, 并指出其测量点。
- (2) 若指示仪表量程为 50 mV, 计算仪表精度等级。

表 1.5 差压变送器实测数据

x/mm	0	1	2	3	4	5
U/mV	0.1	8.0	16.3	24.1	31.6	39.7

15. 设用某压力表对容器内的压力进行了 14 次等精度测量, 获得的测量数据分别为 1.13、1.07、1.08、1.13、1.14、1.09、1.08、1.07、1.09、1.12、1.08、1.10、1.11 和 1.10 (单位: MPa), 试对该测量数据进行处理, 并写出最后的测量结果。



“十三五”职业教育国家规划教材
高等职业教育“新资源、新智造”系列精品教材

传感器与自动检测

(第4版)

常慧玲 主 编
薛凯娟 牟爱霞 副主编
赵金平 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了工业、科研、生活等领域常用传感器的工作原理、基本结构、选型、安装使用、综合应用等方面的知识，对测量技术的基础知识、检测系统的信号处理和抗干扰技术等也做了介绍，同时增加了微型传感器、智能传感器和物联网等新知识和新技术。

本书以实用性、操作性、创新性为特色，以项目为载体，采用任务驱动的教学方式，突出了各种常用传感器的应用；同时设置了传感器综合实训和自动检测系统设计项目，以加强对学生传感器实际应用能力的培养。

本书可作为高等职业院校、应用型本科院校电气自动化技术、机电一体化技术、工业生产自动化技术、机械制造与自动化、电厂热工自动化技术、工业自动化仪表、数控技术等相关专业的教材，也可供在企业生产一线从事技术、管理、运行等工作的相关技术人员参考使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

传感器与自动检测 / 常慧玲主编. —4 版. —北京：电子工业出版社，2021.3

ISBN 978-7-121-37800-3

I. ①传… II. ①常… III. ①传感器—高等学校—教材②自动检测—高等学校—教材 IV. ①TP212②TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 240858 号

责任编辑：王昭松

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：17 字数：435.2 千字

版 次：2009 年 4 月第 1 版

2021 年 3 月第 4 版

印 次：2021 年 3 月第 1 次印刷

印 数：2 000 册 定价：49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254015；wangzs@phei.com.cn；QQ：83169290。

第 4 版前言

职业教育作为一种类型教育，已成为我国高等教育的重要组成部分，目前进入了全面深化教育教学改革和提质培优新阶段。通过产教融合、校企合作，实现工学结合、知行合一，培养和输送更多大国工匠、能工巧匠及区域经济发展急需的高素质技术技能人才，是高职院校的根本任务。这就要求校企双元合作编写职业教育教材，将学生职业能力的培养贯穿始终。

《传感器与自动检测》一书自 2009 年 4 月首次出版以来，广大读者对本书给予了充分的肯定，也提出了许多宝贵意见，编者对教材进行了不断完善和修改，继续保持“以项目为载体、任务驱动教学”的特色和体系，贴近工程实际，注重传感器的综合应用、综合实训和综合系统设计，突出了高职教材的实用性和可操作性，力求打造一流的精品教材。

本书项目 1 介绍了传感器误差与特性分析，项目 2 至项目 7 介绍了温度、压力、流量、速度、位移、液位、厚度等参数的测量方法和传感器的信号处理与抗干扰技术，项目 8 至项目 10 介绍了各种传感器在实际生产和生活中的应用，以及传感器的相关实训和设计。为方便读者学习，本书配有传感器实物图片、习题及答案、自测题、热电偶和热电阻分度表等相关资料。

本书主要作为高职院校电气自动化技术、机电一体化技术、工业生产自动化技术、机械制造与自动化、电厂热工自动化技术、工业自动化仪表、数控技术等相关专业的教学和培训用书，各院校可根据不同专业的特点选择不同的教学内容，建议总学时为 60~80 学时；本书也可供在企业生产一线从事技术、管理、运行等工作的相关技术人员参考使用。

本书由山西工程职业学院常慧玲教授任主编，山西工程职业学院薛凯娟、山东工业职业学院牟爱霞任副主编。常慧玲编写了项目 1、项目 2、项目 3、项目 4、项目 8 和项目 10，薛凯娟编写了项目 6，牟爱霞编写了项目 5 和项目 7，山西工程职业学院赵江稳编写了项目 9。常慧玲负责教材统稿、修改和定稿，太原太航科技有限公司高级工程师赵金平对本书进行了认真审阅。

本书配有 PPT 课件供读者使用，网络课程资源也在不断完善，若有需要可通过华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）免费下载或与编者联系（邮箱为 changhl.horse@126.com）。

本书在编写过程中参考了许多专家和学者的著作、部分仪器仪表厂商的传感器技术资料和图片，在此一并表示衷心的感谢。另外，对于书中存在的不妥之处，恳请兄弟院校同行和广大读者提出批评和修改意见，以便修订时及时改正。

编者

目 录

项目 1 传感器误差与特性分析	1
任务 1 检测结果的数据整理	1
1.1.1 测量与测量方法	1
1.1.2 测量误差及其表示方法	3
1.1.3 测量误差的分类及来源	5
任务 2 传感器特性分析与传感器选用	11
1.2.1 传感器的组成及其分类	11
1.2.2 传感器的静态特性与指标	14
1.2.3 传感器的动态特性与指标	17
1.2.4 传感器的标定与选用	19
课外作业 1	23
项目 2 温度测量	25
任务 1 热电偶传感器测量温度	25
2.1.1 热电偶的工作原理	25
2.1.2 热电偶的基本定律	30
2.1.3 热电偶的材料、结构及种类	30
2.1.4 热电偶的冷端补偿	33
任务 2 热电阻传感器测量温度	38
2.2.1 金属热电阻	38
2.2.2 半导体热敏电阻	41
任务 3 红外传感器测量温度	44
2.3.1 红外辐射	44
2.3.2 红外传感器	45
课外作业 2	51
项目 3 压力测量	53
任务 1 电阻应变式传感器测量压力	53
3.1.1 电阻应变片的种类与结构	54
3.1.2 电阻应变效应	55
3.1.3 测量电路	58
3.1.4 应变片的温度误差及其补偿	61
3.1.5 电阻应变式传感器的应用	62
任务 2 电感式传感器测量压力	67
3.2.1 自感式传感器	67

3.2.2	互感式传感器	70
3.2.3	电感式传感器的应用	75
任务 3	压电式传感器测量压力	79
3.3.1	压电效应	79
3.3.2	压电材料	79
3.3.3	压电式传感器测量电路	82
课外作业 3		89
项目 4	流量测量	90
任务 1	差压式流量计测流量	90
4.1.1	流量及其测量方法	90
4.1.2	差压式流量计	92
4.1.3	差压计	98
任务 2	容积式流量计测流量	103
4.2.1	椭圆齿轮流量计	103
4.2.2	腰轮流量计	104
4.2.3	刮板式流量计	104
任务 3	速度式流量计测流量	105
4.3.1	电磁流量计	105
4.3.2	涡轮流量计	107
4.3.3	超声波流量计	108
4.3.4	流体振动式流量计	111
课外作业 4		120
项目 5	速度与位移测量	121
任务 1	光电传感器测量转速	121
5.1.1	光电效应	121
5.1.2	光电器件	122
5.1.3	光电式传感器	130
任务 2	霍尔传感器测量位移	133
5.2.1	霍尔元件工作原理	133
5.2.2	霍尔元件的主要特性参数	134
5.2.3	霍尔元件的测量电路及补偿	135
5.2.4	霍尔传感器的应用	137
任务 3	电涡流传感器测量位移	138
5.3.1	电涡流传感器的工作原理	138
5.3.2	电涡流传感器的种类	139
5.3.3	测量电路	140
5.3.4	典型应用	142

课外作业 5	144
项目 6 液位与厚度测量	146
任务 1 光纤传感器测量液位	146
6.1.1 光纤的结构及种类	146
6.1.2 光纤的传输原理	148
6.1.3 光纤传感器的结构、特点及种类	149
任务 2 电容式传感器测量液位和厚度	155
6.2.1 变间隙式电容传感器	155
6.2.2 变面积式电容传感器	163
6.2.3 变介电常数式电容传感器	164
课外作业 6	172
项目 7 传感器的信号处理与抗干扰	174
任务 1 传感器的信号处理	174
7.1.1 传感器用基本电路单元	174
7.1.2 信号变换	176
任务 2 传感器的抗干扰技术	180
7.2.1 干扰源及防护	180
7.2.2 干扰的途径	181
7.2.3 几种常见的抗干扰技术	183
课外作业 7	193
项目 8 传感器的综合应用	195
任务 1 传感器在冶金生产中的典型应用	195
任务 2 传感器在化工生产中的典型应用	199
任务 3 传感器在数控机床中的典型应用	201
任务 4 传感器在现代汽车中的典型应用	205
任务 5 传感器在环境保护监测中的典型应用	208
任务 6 传感器在智能楼宇中的典型应用	209
任务 7 传感器在日常生活中的应用	211
课外作业 8	216
项目 9 传感器综合实训	217
任务 1 实训准备	217
9.1.1 THSRZ—1 型传感器系统综合实训装置介绍	217
9.1.2 实训报告书写要点	218
任务 2 实训操作	219
实训 1 金属箔式应变片——测量电桥性能实训	219
实训 2 扩散硅压阻式压力传感器的压力测量实训	223

实训 3 差动变压器的应用——振动测量实验·····	225
实训 4 电容式传感器的位移特性实训·····	226
实训 5 霍尔传感器的位移特性实训·····	227
实训 6 压电式传感器振动实训·····	228
实训 7 电涡流传感器的位移特性实训·····	229
实训 8 光电转速传感器的转速测量实训·····	231
实训 9 K 型热电偶测温实训·····	231
实训 10 热电偶冷端温度补偿实训·····	233
课外作业 9·····	234
项目 10 自动检测系统设计·····	235
任务 1 自动检测系统设计·····	235
10.1.1 系统的基本构成与功能·····	235
10.1.2 微处理机系统及其性能的确定·····	238
10.1.3 微机化系统设计的一般原则·····	239
任务 2 电子皮带秤设计·····	240
任务 3 电子汽车传感器设计·····	244
课外作业 10·····	249
附录 A 常用传感器的实物图·····	250
附录 B 课外作业部分参考答案·····	258
附录 C 自测题·····	260
参考文献·····	263