

本书从应用角度出发,按照由浅入深、从理论到实践、先分析后综合的原则,系统地介绍了电测法的基本知识和对电测装置的基本要求;常用传感器的基本原理及所测参量;常用测量电路的基本测量原理;各种测量显示及记录仪表的测量原理、特点与使用;应力、应变及位移的测量方法;热工测量技术、传统热分析测试技术、差热分析、示差量热分析、热重分析的基本原理及应用;常用的无损检测方法、金属材料的腐蚀与磨损的检测方法;透射电镜、扫描电镜的基本原理和应用等。

本书可作为材料成形及控制专业的教材,也可供材料,尤其是金属材料成形工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形检测技术/李晨希,曲迎东,杭争翔,李强
编著. —北京:化学工业出版社,2007.1
ISBN 978-7-5025-9936-2

I. 材… II. ①李…②曲…③杭…④李… III. 工
程材料-成形-检测 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 010190 号

责任编辑:丁尚林
责任校对:宋 夏

文字编辑:颜克俭
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市彩桥印刷有限责任公司

装 订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张16 $\frac{3}{4}$ 字数421千字 2007年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

材料成形检测技术是研究与材料成形技术有关的参量的检测原理与方法，包括为保证产品质量而进行的检测。检测技术在材料热加工工程中占重要地位，检测技术的完善和发展推动着材料热加工技术的进步。

《材料成形检测技术》是材料成形与控制工程专业的一门技术基础课，通过本课程的学习，使读者能够建立材料成形检测的基本概念，了解各种物理量或参量的测量原理和方法，掌握各种常用传感器、测量电路及测试方法，熟练使用各种仪表对被测量数据进行记录和处理，为以后进行科学实验和生产过程检测与控制打下基础。

本书从应用角度出发，按照由浅入深、从理论到实践、先分析后综合的原则，把全书内容分为 10 章，第 1 章介绍测试技术在材料成形与控制技术中的重要性及通常检测的参量；第 2 章介绍了电测量法的基本知识和对电测装置的基本要求；第 3 章着重介绍常用传感器的基本原理及所测参量；第 4 章介绍了常用测量电路的基本测量原理；第 5 章介绍了各种测量显示及记录仪表，目的是使读者能够掌握各种测量仪表的测量原理及特点，并熟练使用；第 6 章介绍了应力、应变及位移的测量方法；第 7 章为热工测量技术，要求掌握常用的测温方法及基本原理，了解流体压力和流量的测量、炉气成分分析及料位测量显示技术；第 8 章介绍了传统热分析测试技术、差热分析、示差量热分析、热重分析的基本原理及应用；第 9 章介绍了常用的无损检测方法、金属材料的腐蚀与磨损的检测方法；第 10 章介绍了透射电镜、扫描电镜的基本原理和应用。

本书可作为材料成形及控制专业的教材，也可供材料加工、成形工程技术人员参考使用。

本书第 2~4 章由曲迎东编写；第 1、6、10 章由李强编写；第 5、7 章由杭争翔编写；第 8、9 章由李晨希编写；李晨希负责全书统稿。由于编者水平有限，书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 2 月

第 1 章 绪 论

(1) 检测技术的重要性

检测技术包括测量和实验两方面内容，它是实验科学的重要组成部分。它的主要研究内容为各种物理量的测量原理和测量方法，它是进行科学实验和生产过程参量测量与控制必不可少的手段。测试是人们认识客观事物的重要手段，通过测试可以揭示事物的内在联系和变化规律，从而帮助人们认识和利用它，推动科学技术的不断进步。从科学技术发展的过程来看，很多新的发明和发现都与测试技术分不开；同时科学技术的发展又大大促进了测试技术的发展，为测试技术提供更新的方法和设备。

科学研究中的问题十分复杂，很多问题无法进行准确的理论分析和计算，这就必须依靠实验方法来解决，特别是对于那些影响因素多而且影响因素之间相互作用的问题，通过实验能够快速找出各种因素的影响规律。

测试技术是自动化系统的基础。随着自动控制生产系统的广泛应用，为了保证系统高效率地运行，必须对生产流程中的有关参数进行测试采集，以准确地对系统实现自动控制。此外，对产品质量的评估也要通过测试才能实现。

检测技术在材料科学与工程学科中占有一席重要的地位，检测分析技术的完善和发展推动着现代材料科学技术的进步。同时，检测技术的发展又得益于其他科学技术的研究成果。

(2) 材料成形中经常检测的物理量

材料成形生产中，经常需要检测的物理量和有关参量概括如下。

① 温度 温度是铸造、焊接和锻压生产中的重要工艺参数，金属材料成形过程基本上都是在高温状态下进行的，因此只有准确地测量温度变化，才能正确控制材料加工工艺，从而才能获得高质量的产品。

② 与流体运动有关的参量 主要有气体与液体的速度、流量、液面高度等。

③ 应力与应变 在研究构件的强度与变形、焊接结构、铸造应力及锻压塑性变形时，都涉及应力、应变的测量。

④ 工件缺陷检测 检测工件中的气孔、缩孔、裂纹、夹渣等。

⑤ 材料的成分与结构测定 如化学成分、晶体结构、晶体缺陷、晶粒形貌、断口等。

⑥ 力学性能 如抗拉强度、屈服极限、伸长率、断面收缩率、冲击韧性、显微硬度、布氏硬度等。

⑦ 其他 材料的熔点、相变温度，材料的耐磨、耐蚀、耐热等性能的检测。

上述物理量或参量的检测方法很多，按照测量原理可分为机械测量法、电测法和光测

法等。机械测量法是利用机械器具对被测参量进行直接测量，比如杠杆应变计测量应变、用机械式测振仪测量振动参量。电测法是将被测参量转换成电信号，通过电测仪表进行测量的方法，如利用电阻应变仪测量应力-应变，用电动式测振仪测量振动参量，电测法是目前应用最广泛的一种测试方法。光测法是利用光学原理对被测参量进行测量的办法，如应力/应变的光测法就有：光弹性实验法、密栅云纹法等。

第 2 章 电测量法

利用各种传感器，将温度、速度、几何尺寸、位移等非电量转换成相应的电量信号，再借助相关的测量电路对这些信号进行滤波、放大等处理，最后将处理的结果显示出来，这就是所谓的电测量法。

材料成形加工过程涉及的参量、变量多，工艺过程复杂，为获得微观组织性能优异、宏观几何尺寸精确的优质零件，检测技术在材料加工过程中不可缺少。目前，电子技术、计算机技术发展迅速，使得电测量检测在材料加工领域里应用的范围正逐步扩大。随着材料成形过程自动化、智能化的发展，各种电测量技术在材料加工领域应用前景更加广泛，许多新的测量技术在材料加工领域里已有应用，如 CCD（电荷耦合器件）摄像头对焊接熔池尺寸的检测、相多普勒分析仪 PDA（phase doppler anemometer）对喷射成形雾化液滴尺寸的检测、喷射沉积坯表面温度远红外线的检测等。

电测量法对物理量检测前，需了解如下内容：①被测量的物理性质及其动态变化特点；②传感器，电测装置的静、动态特性。此外，误差是评价检测准确性的一个重要指标，有关内容在本章也将涉及。

2.1 被测参量的特征及其频谱分析

被测量的特征一般指其物理特征、量值特征和时变特征。物理特征主要包括被测量的密度、质量、速度、形变等反映其物理特点的特征；量值特征是指被测量的量值大小和范围；时变特征指被测量随时间而变化的情况，即物理量的动态变化特征。因为这些特征都是选择与设计传感器和电测装置的主要依据，故掌握被测量的这些特征是实现其精确测量的前提条件。在实际应用中，可根据被测量的物理特征和量值特征选择传感器的种类、电源装置的形式和量程大小；根据被测量的时变特征选择传感器和电测装置的频率特性。由于物理量的时变特征是任何检测过程都必须了解的共性问题，下面将讨论之。

在检测过程中，被测量是时间和空间的函数，可用 $F=F(t, x, y, z)$ 来描述。对于大多数物理量的检测，测试的位置常常固定不变，则被测量只是时间的函数，故上式可简化为 $F=F(t)$ ，也可用图 2-1 所示的曲线来表示，图中的纵坐标表示被测量 $F(t)$ ，横坐标表示时间 t ， τ 为被测量的持续时间， T 为工作周期。

根据被测量随时间变化的特点可将被测物理量分成两类。

(1) 静态过程

特点是 $F(t)$ 在一定时间 τ 内固定不变，即 $F(t) = \text{常量}$ ，一般 $\tau=10\text{min}$ 或更大，图 2-1 中最上面的实直线表示的就是静态过程。静态过程也称稳态过程，泛指物理量不随时

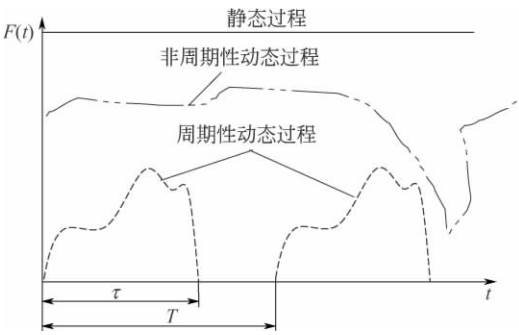


图 2-1 被测参量的变化曲线

间发生变化的过程。

(2) 动态过程

$F(t)$ = 变量, 是指物理量随时间变化的过程, 也称非稳态变化过程。根据 $F(t)$ 是否周期地变化, 可将动态过程分为周期性动态过程与非周期性动态过程。周期性动态过程的特点是 $F(t) = F(T+t)$, T 为工作周期, 图 2-1 中的两个虚线就是物理量的周期性变化过程。而非周期性动态过程的特点是 $F(t) \neq F(T+t)$, 这类变化是

检测过程中遇到的更为普遍的一类物理量变化过程, 见图 2-1 中的双点划线。

被测物理量随时间的变化过程, 可直接用时间域的方法描述, 即 $F = F(t)$ 为时间的显示函数。时间域描述方法虽然直观, 但在工程实际中, 被测量的时变过程比较复杂, 其频谱难以从时间域信号中直接获得。为此, 常将复杂的时变函数展开成一系列正弦函数(谐波分量)的和或积分, 即用频率域的方法描述。将复杂的时变函数按谐波分量描述的方法, 称为频谱分析或谐波分析, 这是工程中对信号分析常采用的方法。

2.1.1 周期过程的频谱分析

周期性变化的物理量在时间域内的函数形式可以表达为一系列频率离散的正弦函数(谐波分量)的和, 其频谱分析所采用的方法为傅里叶级数。由高等数学的知识可知, 如果某一周期性函数满足狄利克里(Direchlet)条件: ①除有限个第一类间断点外, 函数处处连续; ②分段单调, 即单调区间的个数有限, 则该周期性函数可由一个处处收敛的傅里叶(Fourier)级数表达:

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\Omega t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\Omega t \quad (2-1)$$

式中 $F(t)$ ——满足狄氏条件的周期函数;

$\Omega = 2\pi/T$ —— $F(t)$ 的圆频率;

F_0, A_n, B_n ——分别为常数, 可计算为:

$$F_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) dt, A_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \cos n\Omega t dt, B_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \sin n\Omega t dt \quad (2-2)$$

式(2-1) 利用三角函数关系, 可变换成:

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin(n\Omega t + \Phi_n) \quad (2-3)$$

式中:

$$F_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}, \Phi_n = \arctan \frac{A_n}{B_n} \quad (2-4)$$

式(2-3) 的物理意义是: 任何周期性过程都可以表示为满足正交关系的许多谐波分量的叠加。所谓正交关系, 是指式(2-1) 中任意两个不同的正弦、余弦三角函数在 $[-\pi, +\pi]$ 区间内的积分为 0。系数 F_0, F_n, Φ_n 可根据式(2-2) 计算, 利用三角函数的和差公式最终将其表达为式(2-3) 的形式, 该式中第一项称零次谐波或平均值; 第二项 $F_n \sin(n\Omega t + \Phi_n)$ 称第 n 次谐波; $n\Omega, F_n, \Phi_n$ 为 n 次谐波的圆频率、幅值、相位; $n = 1$

时，第二项称一次谐波或基波， $n=2$ 时称二次谐波，其余项如此类推。

图 2-2(a) 描述了某物理量与时间的关系曲线，该物理量由一次谐波、三次谐波和五次谐波叠加而成。其频率域可表示为图 2-2(b)，横坐标表示各谐波的频率 (ω)，纵坐标表示各谐波的幅值 (F_n)，此图清晰地描述了各谐波分量频率和幅值的关系。

周期过程的频谱有三个特点：频谱的不连续性，是离散频谱；各谐波频率对基波频率有简单的倍数关系；谐波的幅值随频率增加而衰减。这三个特性分别称为周期过程频谱的离散性、谐波性和收敛性。

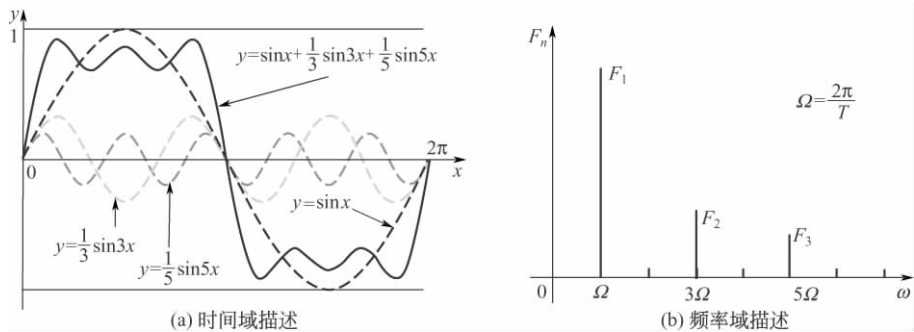


图 2-2 周期过程的频谱分析实例

2.1.2 非周期过程的频谱分析

与周期过程变化的物理量一样，非周期变化的物理量也可在时间域、频率域内进行描述，其实质与周期性过程的频谱分析没有分别，都是将时间域的物理量变换为频率的描述形式，只是非周期过程的频谱分析采用傅里叶变换而非傅里叶级数的方法。非周期函数 $F(t)$ 的傅里叶变换为：

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t)e^{-j\omega t} dt = |F(\omega)| e^{j\varphi_{\omega}} \tag{2-5}$$

式中 ω ——谐波分量的圆频率，为 $0 \rightarrow \infty$ 的连续量；

$F(\omega), \varphi_{\omega}$ ——各谐波分量的幅值和相角。

$F(t)$ 也为 $F(j\omega)$ 的逆变换，即为各谐波分量（频谱）在 $(-\infty, +\infty)$ 内的积分：

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \tag{2-6}$$

根据傅里叶积分定理，只要函数 $F(t)$ 满足：① $F(t)$ 在任一有限区间满足狄利克里条件；② $F(t)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 区间绝对可积，即：

$$\int_{-\infty}^{\infty} |F(t)| dt < +\infty \tag{2-7}$$

则 $F(t)$ 的傅里叶积分收敛，即式(2-6) 成立。

例如，有一过程如图 2-3(a) 所示 ($\tau=1$)：

$$y = \begin{cases} e^t & t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases}$$

现在它进行频谱分析：

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t)e^{-j\omega t} dt = \int_0^{\tau} e^t e^{-j\omega t} dt = -\frac{1}{1-j\omega} e^{(1-j\omega)t} \Big|_0^{\tau} = F(\omega) e^{j\phi_{\omega}}$$

解得：此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

$$F(\omega) = \sqrt{(e^{2\tau} + 1 - 2e^{\tau} \cos \omega \tau) / (1 + \omega^2)}$$

即： $\Phi(\omega) = \Phi_1(\omega) + \Phi_2(\omega)$ ，其中 $\Phi_1(\omega) = \arctan \omega$ ， $\Phi_2(\omega) = \arctan [e^{\tau} \sin \omega \tau / (e^{\tau} \cos \omega \tau - 1)]$ 。

$F(\omega)$ ， $\Phi(\omega)$ 描述了各谐波分量的幅值、相角与频率 ω 的关系。它的频谱图如图 2-3 所示，图 2-3(a) 为物理量时间域的描述，图 2-3(b) 为频率域描述。与周期过程的频谱不同，非周期过程的频谱是连续频谱，并且各谐波的幅值随着频率的增加而衰减，也呈现幅值收敛的特性。

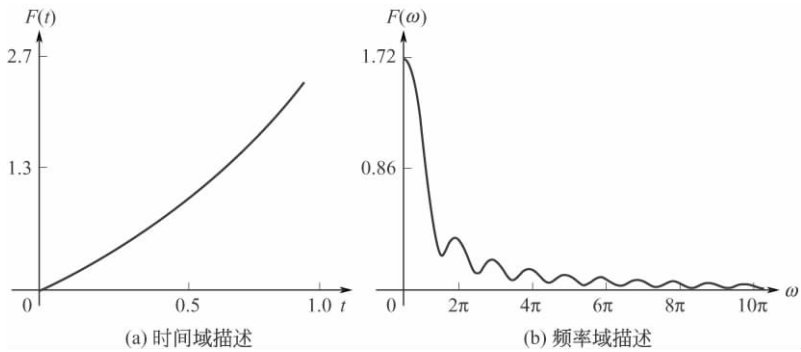


图 2-3 非周期过程得频谱分析实例

可见，对于任一变化的物理量，无论它是周期性变化过程，还是非周期性变化过程，都可以利用频谱分析的方法将其分解成一系列谐波分量的和或积分，从而将时间域的函数转换成频率域的描述形式。被测量的频谱分析对于传感器和电测装置的选择具有重要意义。根据频谱分析结果，可初步估算被测参量的频率范围，以作为选择与设计传感器和电测装置的依据。被测物理量频率范围的估算过程如下：对未知的被测量 $F(t)$ ，若它为周期函数，则其变化的周期 T 应已知，因此可知其基波频率为 $1/T$ ；若它为非周期函数，则其持续时间 τ 应已知，故可知其主要频率为 $1/\tau$ 。再根据谐波分量的幅值随频率增加而递减的特点，对周期函数最高谐波取其基本频率的 $7 \sim 10$ 倍；对非周期函数最高频率取其主频率的 $4 \sim 5$ 倍。这样，物理量的频率范围可估算为：周期动态过程为 $[0, n/T]$ ，其中 $n = 7 \sim 10$ ；非周期动态过程为 $0 \sim n/\tau$ ，其中 $n = 4 \sim 5$ 。

2.2 电测装置的静态特性和动态特性

对于一般的检测过程，电测装置是对传感器输出信号进行处理不可缺少的装置，包括信号放大、滤波、相敏检波等器件。电测装置的输出信号 $y(t)$ 与电测装置的输入信号 $F(t)$ 之间必然存在某种内在的对应关系，这种关系可由电测装置的静态特性和动态特性来描述。

2.2.1 电测装置的静态特性

电测装置的静态特性又称为“标定曲线”或“校准曲线”，是指在静态条件下，电测装置的输出与输入量间的关系。输出量 $y(t)$ 与输入量 $F(t)$ 在静态特性下的关系，可用代数方程 $y = f(F)$ 来描述，此时方程中 F 和 y 都是与时间无关的值，该方程称电测装置

的静态数学模型, 可用图 2-4 的曲线描述, 此曲线称静态特性曲线或工作曲线。静态方程与曲线的形式完全取决于电测装置各组成环节的特性。电测装置的静态特性可用灵敏度、线性度、迟滞、量程等参数进行表征。

(1) 灵敏度

用检测系统的输出变化量 Δy 与引起该输出量变化的输入变化量 ΔF 之比来表征, 见图 2-4, 工作曲线上某点的斜率即为该工作点的灵敏度 K_i :

$$K_i = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta F} = \frac{dy}{dF} \quad (2-8)$$

若工作曲线呈线性关系, 则各点的灵敏度相同。当输入量或输出量采用相对变化量时, 灵敏度还有多种表征形式。灵敏度可用来描述电测装置输出对输入变化的反应能力, 灵敏度越大, 表示电测装置越灵敏。

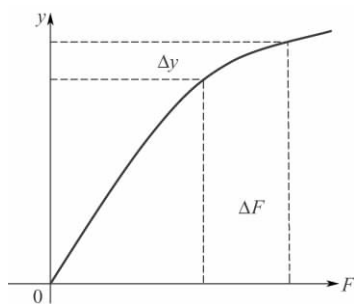


图 2-4 静态特性曲线

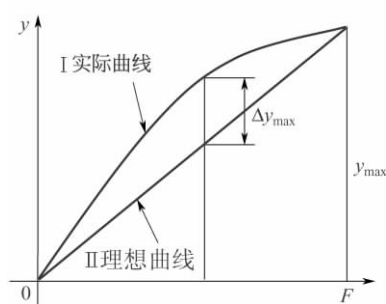


图 2-5 线性和非线性系统

(2) 线性度

用以描述电测装置输出与输入之间关系曲线对直线的接近程度。它用非线性引用误差 γ_L 表示, 见图 2-5, I、II 分别为实际和理想工作曲线, 最大偏离值 $\Delta a_{\max}$ 与额定输出值 $a_{\max}$ 之比即为 γ_L :

$$\gamma_L = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (2-9)$$

当 $\gamma_L = 0$ 时, 电测装置的工作曲线为直线, 此时该系统称为线性系统; 当 $\gamma_L \neq 0$ 时, 电测装置的工作曲线为曲线, 此时该系统称为非线性系统。测量时都希望电测装置为线性系统, 但实际的工作曲线, 往往与理想的工作曲线有一定偏离, γ_L 正是描述这种偏离程度的参量。线性系统最重要的特点是可应用叠加原理, 叠加原理表明, 若输入是个复杂信号, 但可被分解为几个简单分量的叠加, 则总输出就等于各分量单独作用时输出的叠加, 这一点正是测试所要求的。对于动态测量, 必须采用线性系统, 否则会产生非线性失真。对于静态测量, 为了便于测量换算或仪器刻度读数方便, 也需采用线性系统。所以, 线性系统是理想的测量系统。对于实际系统, 若 $\gamma_L \ll 1$, 则该系统可近似为线性系统。

(3) 迟滞

也称“滞后”, 在检测系统的全量范围内, 当输入由小到大和由大到小循环变化时, 输出的工作曲线不一致的程度, 如图 2-6 所示。一般以两个曲线的最大不重合值 H 与额定输出值 $y_{\max}$ 的比值 γ_H 来表示:

$$\gamma_H = \frac{H}{y_{\max}} \times 100\% \quad (2-10)$$

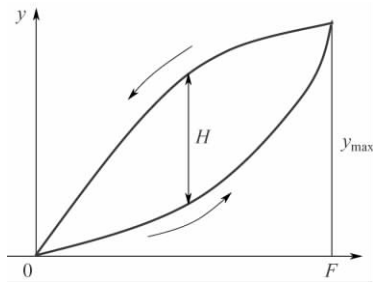


图 2-6 滞后性

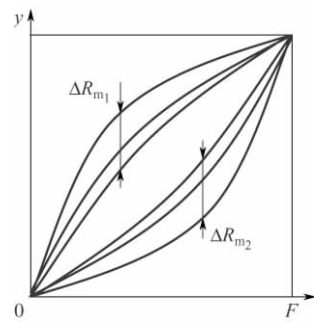


图 2-7 重复性

滞后性是由于材料滞后（磁滞等）以及仪器的不工作区等引起的。对于电测装置，希望其滞后性越小越好。

(4) 重复性

检测系统输入量按同一方向变化作全量程连续多次测量时，其输出的静态工作曲线不一致的程度，见图 2-7 所示。引用误差 γ_R 可表示为：

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_m}{y_{\max}} \tag{2-11}$$

式中， ΔR_m 为同一输入多次循环测量时输出量的绝对误差，可由标准偏差计算。

2.2.2 电测装置的动态特性

电测装置的动态特性是指在动态条件下 $y(t)$ 与 $F(t)$ 的关系，此时输入量为 t 的函数。电测装置的动态特性取决于自身的性质，它反映了电测装置对动态信号的反映能力。由于输入信号可表示为频率离散的谐波分量的和（周期函数）或频率连续的谐波分量的积分（非周期函数），要求电测装置在对应的频率范围内具有匹配的动态特性，以使其输入、输出间具有相同的变化规律。现仅介绍描述电测装置动态特性的一般方法。

根据电测装置的物理特性，可写出描述其输入、输出动态关系的微分方程，即时间域的数学模型：

$$a_n y^n(t) + a_{n-1} y^{n-1}(t) + K + a_1 y(t) + a_0 y(t) = b_m F^m(t) + b_{m-1} F^{m-1}(t) + K + b_0 F(t) \tag{2-12}$$

式中 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$ ——与电测装置有关的常数，完全取决于电测装置的物理特性，微分方程（2-12）的解就是时间域内输出、输入间的动态关系。

电测装置输入和输出的动态关系也可用频率域的方法描述，传递函数 $K(S)$ 是频率域上描述动态输入、输出关系常采用的方法。所谓传递函数是指测量系统在零初始条件下输出、输入的拉氏变换的比值：

$$K(S) = \frac{L[a(t)]}{L[F(t)]} = \frac{y(S)}{F(S)}$$

式中 $y(S) = \int_0^\infty y(t) e^{-S \cdot t} dt$ 为输出的拉氏变换；

$F(S) = \int_0^\infty F(t) e^{-S \cdot t} dt$ 为输入的拉氏变换。

对式(2-12) 两边取拉氏变换，并设初始条件为零，则有：

$$K(S) = \frac{y(S)}{F(S)} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \Delta + b_1 S + b_0}{a_n S^n + b_{n-1} S^{n-1} + \Delta + b_1 S + a_0} \quad (2-13)$$

传递函数 $K(S)$ 中的 $S = \sigma + j\omega$ ，在复平面上取值，当 S 仅在复平面的虚轴上取值时，有 $\sigma = 0$ ， $S = j\omega$ ，这时传递函数也称频率响应函数 $K(j\omega)$ ：

$$K(j\omega) = K(S) \big|_{s=j\omega} = \frac{y(j\omega)}{F(j\omega)} \quad (2-14)$$

式中 $y(j\omega) = \int_0^\infty y(t) e^{-j\omega t} dt$ —— 输出的富氏变换；

$F(j\omega) = \int_0^\infty F(t) e^{-j\omega t} dt$ —— 输入的富氏变换。可见频率响应函数是输出傅立叶变

换与输入傅立叶变换的比值，它反映了将各种频率不同、幅值相等的正弦信号输入到电测系统时，其输出的正弦信号的幅值、相位与频率间的关系。若在电测装置的输入端加上正弦信号 $F \sin \omega t$ ，其输出信号为 $a \sin(\omega t + \phi)$ ，则输出与输入的幅值比为 $A = a/F$ ，相位角（差）为 ϕ ，幅值比 K 及相位角 ϕ 就是频率响应函数 $K(j\omega)$ （仅当频率为 ω 时）的幅值与相角。

幅频特性 $A(\omega)$ ：即频率响应函数 $K(j\omega)$ 的模，也是电测装置输出与输入的幅值比，是以 ω 为自变量的函数，它表明了输入与输出信号幅值的比值或放大倍数随频率 ω 的变化关系。将 $\omega-K(\omega)$ 绘制的曲线称为幅频特性曲线，见图 2-8(a)。

相频特性 $\phi(\omega)$ ：即频率响应函数 $K(j\omega)$ 的相角，也是电测装置输出与输入的相角差，是以 ω 为自变量的函数，它表明了输出与输入信号之相位角（差）随频率 ω 的变化关系。将 $\omega-\phi(\omega)$ 绘制的曲线称为相频特性曲线，见图 2-8(b)。幅频特性与相频特性统称为频率特性，对一固定频率 ω ， $A(\omega)$ 和 $\phi(\omega)$ 分别为电测装置对频率 ω 的谐波信号的放大倍数和相角差。

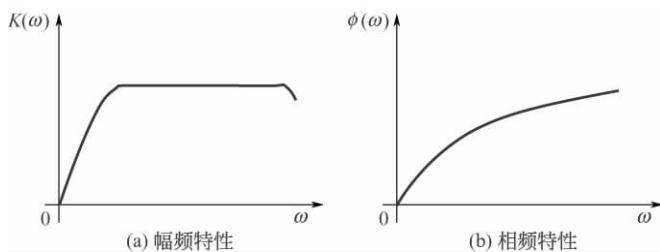


图 2-8 频率特性

频率特性描述了系统对不同频率的谐波分量的响应情况，由幅频特性可知道各频率信号在幅值上放大了多少倍，由相频特性可知各频率信号在相位上产生了多大的相位移；再根据叠加原理，就可以方便地从已知的输入确定其输出，或从已知的输出确定其输入。测量是属于后一种情况，即由测试结果 $y(t)$ 求被测量 $F(t)$ 。需要强调的是，式(2-16)仅为频率特性的定义式，当电测装置的各个环节确定后，其频率特性也随之确定，而并非由输入和输出决定其频率特性，但电测装置的输入和输出关系必须满足式(2-14)。

2.3 测量误差及其分类

任何测量都会存在误差，这是因为测量所涉及的每一环节，包括设备、方法、测量者、环境等因素，都会影响测量结果，使得测量结果与被测量实际值之间存在偏差。研究

误差的目的是找出误差产生的原因,使得测量结果尽可能接近物理量的实际真值。

真值:真值是指被测量的实际值。被测量真值只是一个理论值,实际中常用一定精度的仪表测出的约定值或用特定的方法确定的约定真值代替真值。

约定真值:约定真值是对于给定不确定度的、赋予确定量的值,有时也称指定值、最佳估计等。约定真值常可由以下几种方法确定:①采用权威组织推荐该物理量的值;②用某量的多次测量结果确定约定真值;③可采用约定参考标尺中的值作为约定真值;④由国家标准计量机构标定过的标准仪表测量的值。

2.3.1 按误差的表示方法分类

(1) 绝对误差

某一物理量的测量值 y 与真值 Y_0 的差值称为绝对误差 ΔY :

$$\Delta Y = y - Y_0 \quad (2-15)$$

在实验室测量和计量工作中常用修正值来表示绝对误差,测量值加上修正值就可得到真值,故有:

$$C = Y_0 - y \quad (2-16)$$

比较式(2-15)和式(2-16)可知,修正值与绝对误差大小相等、符号相反,即:

$$C = -\Delta Y \quad (2-17)$$

(2) 相对误差

为了说明测量精度的好坏,常用相对误差表示,根据引用的约定真值不同,相对误差可分为以下几类。

① **实际相对误差** 用绝对误差 ΔY 与被测量的约定真值 Y 的百分比来表示的相对误差:

$$\delta_{\text{实}} = \frac{\Delta Y}{Y} \times 100\% \quad (2-18)$$

② **示值(标称)相对误差** 示值相对误差是用绝对误差 ΔY 与仪器示值 y 的百分比来表示的相对误差:

$$\delta_{\text{标}} = \frac{\Delta Y}{y} \times 100\% \quad (2-19)$$

③ **满度(或引用)相对误差** 用绝对误差 ΔY 与仪器满度值的百分比来表示的相对误差:

$$\delta_{\text{引}} = \frac{\Delta Y}{\text{标尺刻度上限} - \text{标尺刻度下限}} = \frac{\Delta Y}{\text{量程}} \times 100\% \quad (2-20)$$

④ **最大引用误差** 用最大绝对误差与量程的比值表示,常被用来确定仪表的精度等级:

$$\delta_{\text{引},m} = \frac{\Delta Y_m}{\text{标尺刻度上限} - \text{标尺刻度下限}} = \frac{\Delta Y_m}{\text{量程}} \times 100\% \quad (2-21)$$

2.3.2 根据误差的性质和产生的原因分类

(1) 系统误差

在相同条件下多次测量时,所得的平均值与被测量真值之差,或在条件改变时,按某一确定规律变化的误差,称为系统误差。根据误差变化与否,系统误差又分为定值系统误差和变值系统误差。由于重复测量次数是有限的,真值只能用约定真值代替,故系统误差

只是估计值，具有一定不确定度。

系统误差产生的原因大体上有：测量所用的工具本身性能不完善而产生的误差；测量设备和电路等安装、布置、调整不当而产生的误差；测量人员感觉器官和运动器官不完善或不良习惯而产生的误差；在测量过程中因环境发生变化所产生的误差；测量方法不完善，或者由于测量所依据的理论本身不完善等原因所产生的误差。总之，系统误差的特征是：系统误差出现的规律性和产生原因的可知性。

在一个测量系统中，测量的准确度由系统误差来表征。系统误差愈小，则表明测量准确度愈高。

(2) 随机误差

在相同条件下多次测量同一物理量时，在已经消除引起系统误差的因素之后，测量结果仍有误差，呈无规律的随机变化，称为随机误差。随机误差既不能修正，也不能用实验方法消除，它的符号和大小无一定规律可循，但总体上服从统计规律（如正态分布、均匀分布）。随机误差表现了测量结果的分散性，通常用精密度表征其大小。误差值越小，精密度越高，表明测量的重复性好。

系统误差和随机误差的综合又称综合误差，它反映了测量的“准确度”和“精密度”。因此，精确度高说明准确度、精密度均高，也就是说系统误差和随机误差都小。精密度与准确度的区别，可以用图 2-9 射击的例子说明：图 2-9(a) 表示精密度差；图 2-9(b) 表示准确度差；图 2-9(c) 表示精密度与准确度都很好。

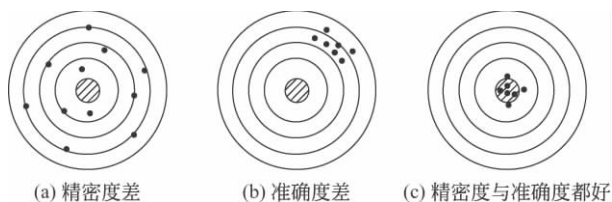


图 2-9 误差评价性能指标

由于在任何一次测量中，系统误差与随机误差一般都同时存在，所以常按其测量结果的影响程度分三种情况来处理：当系统误差远大于随机误差，此时按纯粹系统误差处理；系统误差很大，可按纯粹随机误差处理；系统误差和随机误差两者影响差不多，此时应分别按不同方法来处理。

(3) 疏忽误差

疏忽误差是由于仪器产生故障、操作者失误或重大的外界干扰所引起的测量值的异常值。这种测量值一般称为“坏值”，发现时应从测量数据中剔除。一般可通过加强测量者的工作责任心、采用科学测量方法、选择平稳的外界测量环境等措施，消除疏忽误差的影响。

2.4 对电测装置的基本要求

综上所述，确定电测装置必须慎重，为选择合适的电测装置，对电测装置有如下几点基本要求。

- ① 整个电测装置应具有较高的灵敏度，以提高检测系统对输入变化的反应能力。
- ② 电测装置的各个环节应在线性状态下工作，即其输出与输入呈线性关系，以保证不产生非线性失真。
- ③ 电测装置各环节要具有较好的频率特性，避免产生幅频失真和相频失真。
- ④ 电测装置应具有小的迟滞特性，响应速度要快，能及时反映出被测量的瞬变。
- ⑤ 电测装置应具有良好的工作稳定性和抗干扰能力，延长电测装置的使用寿命。

第 3 章 传 感 器

传感器是一种能够感受外界信息，如力、热、声、磁、光、色、味、位移、尺寸等信息变化，并按一定规律将其转换成电信号的装置。在非电量测量中，必须通过传感器将其转换成电量，然后再用电测装置进行信号处理，最终获得被测量值。在现代科学技术发展过程中，非电量（压力、应变、速度、加速度、温度、流量、液位、浓度、成分、pH 值、反应速率、血压、脉搏等）检测技术已经应用于国民生产的各个领域，是测量技术中的关键环节，一切与测量相关的技术均以传感器为核心展开。此外，随着自动化技术在国民经济中的应用范围不断扩大，传感器成为自动控制系统中不可缺少的组成部分，利用传感器提供的准确数据，是任何控制系统中实现精确控制不可缺少的重要环节。

3. 1 传感器的基本概念

3. 1. 1 传感器定义与组成

在非电量测量中，传感器是将被测非电量信号转换为与之有确定对应关系电量输出的器件或装置。传感器也称变换器、换能器、探测器和检测器。

传感器一般是利用某种材料所具有的物理、化学和生物效应或原理，按照一定的加工工艺制备出来的电器元件，由于传感器原理存在差异之处，故传感器的组成也不同。一般情况下，传感器可以抽象出由敏感元件、传感元件、信号转换和调节电路、其他辅助元件组成的电子元件，见图 3-1。

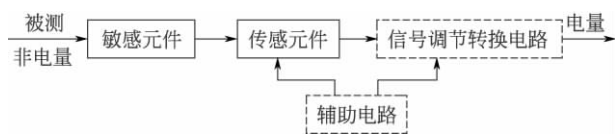


图 3-1 传感器组成框图

敏感元件是直接感受被测非电量，将被测量转换成与之有确定关系的其他量（一般为非电量）的元件。如在电感式传感器中，当铁芯和衔铁距离变化时，两者的磁阻也发生改变，位移和磁阻间建立了一定关系，因此衔铁是位移敏感元件。

传感元件又称变换器，是将敏感元件感受到的非电量直接转换成电信号的器件，这些电信号包括电压、电量、电阻、电感、电容、频率等。在前面的例子中，铁芯上连接线圈后，当磁阻变化时，线圈感知了磁阻的变化并使自身的电感也随之发生相应的变化。因此，线圈起到传感元件的功能。

传感器都包含敏感元件与传感元件，分别完成感知被测量和将被测量转换成电量的过

程。但在有些传感器中，敏感元件和传感元件区别不是很明显。如果敏感元件直接输出电量，它就同时兼为传感元件；如果传感元件能直接感受被测非电量而输出与之成确定关系的电量，它同时兼为敏感元件。可见，敏感元件和传感元件两者合二为一的例子在传感器中也很常见，例如压电晶体、热电偶、热敏电阻等。

信号调节与转换电路是位于传感器和终端之间的各种元件的总称，其作用是将传感器输出的信号转换为便于显示、记录、处理和控制的信号，常用的信号处理电路包括放大、滤波、调制、A/D 和 D/A 转换等。

辅助电路通常指电源，包括直流电源和交流电源，由传感器类型而定。由于交流电源不需要额外的转换电路，在传感器辅助电路中应用最广泛；此外，有些传感器系统也常用电池供电。

传感器技术包括传感器原理、传感器设计、传感器开发和应用等多项综合技术，正朝着高精度、智能化、微型化和集成化的方向发展，但新材料的开发和加工工艺技术水平的提高才是传感器技术发展的基础。

3. 1. 2 传感器的分类

各领域生产中所涉及的被测对象千差万别，采用的传感器也不同，可见被测量的差异性决定了传感器种类的多样性，一般传感器可分为如下几类。

(1) 按输入物理量分类

这种方法是根据输入量的性质进行分类，每一类物理量又可抽象为基本物理量和派生物理量两大类。例如：力可视为基本物理量，而压力、拉力、质量、应力、力矩、电磁力等为派生物理量，对上述物理量的测量，只要采用力传感器就可以完成。现将常见的基本物理量和派生物理量列于表 3-1。

表 3-1 基本物理量和派生物理量

基 本 物 理 量	派 生 物 理 量
位移(线、角位移)	长度、厚度、高度、应变、振动、磨损、不平度、旋转角、偏转角、角振动等
速度(线、角速度)	速度、振动、流量、动量等、转速、角振动
加速度(线、角加速度)	振动、冲击、质量等、角振动、扭矩、转动惯量等
力(压力、拉力)	重力、应力、力矩、电磁力等
时间(频率)	周期、计数、统计分布等
温度	热容量、气体速度、涡流等
光	光通量与密度、光谱分布等

以输入量性质不同分类传感器，其优点是比较明确地表达了传感器的检测对象，便于使用者根据具体的使用用途选用传感器；但是，对于同一个物理量可以采用不同的传感器进行检测，故以输入物理量分类传感器的方法并不能体现传感器的工作原理，每种传感器在工作机理上的共性和差异难以被区分。所以，这种分类方法不利于初学者学习传感器的一些基本原理及分析方法。

(2) 按检测时传感器与被测对象接触与否进行分类

测量时与被测对象接触的传感器称为接触式传感器；而与被测对象无直接接触的传感器，则称为非接触式传感器，如超声波传感器、光传感器、热辐射传感器等均为非接触式传感器。由于非接触传感器不接触被测对象，故传感器和被测间不会产生交互

影响。

(3) 按工作原理分类

根据物理、化学等学科的各种原理、规律和效应，可将传感器分为压电式、热电式、光电式等传感器。这种分类法的优点是传感器的工作原理明确，有利于初学者掌握传感器的各种工作原理，本书将按这种分类法介绍各种传感器。

(4) 按输出信号的性质分类

可将传感器分为模拟式和数字式传感器。数字传感器便于与计算机联用，抗干扰性较强，近些年发展较为迅速。传感器还有其他分类方法，这里不过多讨论。

3.2 电阻传感器

电阻传感器利用电阻作为传感元件，将非电量如力、位移、形变、速度和加速度等物理量变换成与之具有一定函数关系的电阻值的变化，再通过电测装置对电阻值的测量达到对物理量测量的目的。电阻传感器主要分为两大类：电位计（器）式电阻传感器和应变式电阻传感器。前者分为线绕式和非线绕式两种，它们主要用于非电量变化较大的测量场合；后者分为金属应变片和半导体应变片式电阻传感器，它们用于测量变化量相对较小的情况，具有灵敏度高的优点。

3.2.1 电位器式电阻传感器

(1) 线绕电位器式电阻传感器工作原理

线绕电位器式传感器的工作原理，与滑动变阻器的工作原理基本相同，可由图 3-2 来说明。若线绕电位器的绕线截面积均匀，则电阻 R_x 与滑动位移 x 间呈线性变化关系，通过测量电阻的变化量，便可以求出被测量位移 x 。图 3-2 中的 U_i 为工作电压， U_o 为输出电压； R_x 为电位器电刷移动长度为 x （物理量移动的距离）时对应的电阻， R_L 为长度为 L 的电位器的总电阻， R_U 为电测装置内阻（电位计的负载电阻）。

若电位器的负载电阻 $R_U = \infty$ ，根据分压原理，得：

$$U_o = U_i \frac{R_x}{R_L} \quad (3-1)$$

对应的电阻变化为：

$$\frac{R_x}{R_L} = \frac{x}{L}, R_x = R_L \frac{x}{L} = S_R x \quad (3-2)$$

将式(3-2)代入式(3-1)，得：

$$U_o = U_i \frac{x}{L} = S_V x \quad (3-3)$$

式中， $S_R = R_L/L$ ， $S_V = U_i/L$ 分别称为线绕电位器的电阻灵敏度和电压灵敏度，反映了电刷单位位移所能引起的输出电阻和输出电压的变化， S_R 、 S_V 均为常数。式(3-3)表明， x 与 U_o 间呈线性关系。

若电位器的负载电阻 $R_L \neq \infty$ ，则输出电压 U_o 应为：

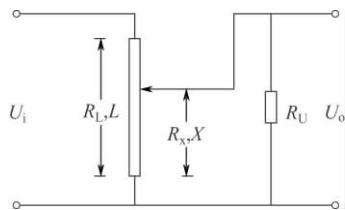


图 3-2 线绕式电阻传感器的工作原理