

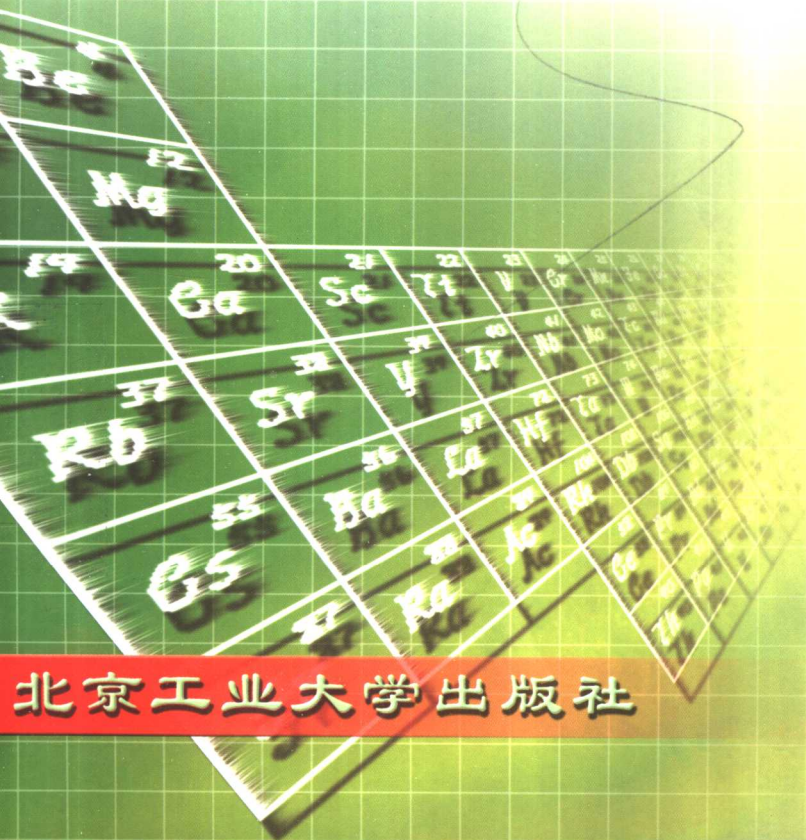
面向

21

世纪材料科学与工程高等
教育改革试用教材
所院校材料科学与工程学科
公共专业课系列共建教材

张国忠 李耳 主编

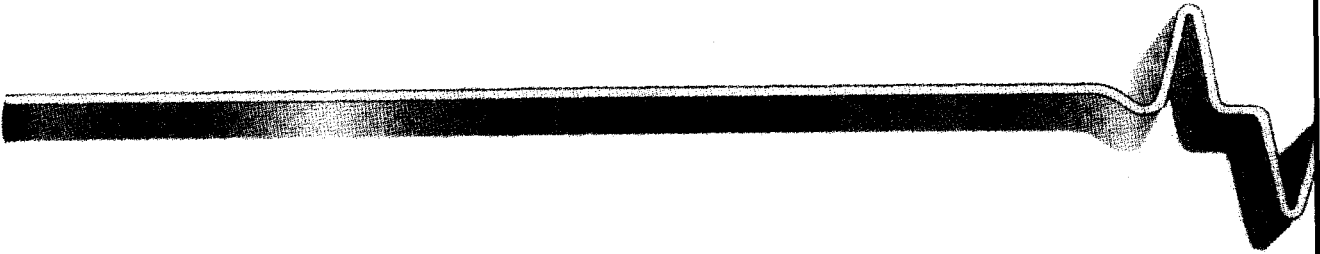
材料工程测试技术



北京工业大学出版社

TB302
10

面向 **21** 世纪材料科学与工程高等教育改革试用教材
所院校材料科学与工程学科公共专业课系列共建教材



材料工程测试技术

张国忠 李 耳 主编

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

材料工程测试技术/张国忠, 李耳主编. —北京: 北京工业大学出版社, 2006.8

ISBN 7-5639-1670-9

I. 材... II. ①张... ②李... III. 工程材料-测试-高等学校-教材 IV. TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 076519 号

材料工程测试技术

张国忠 李 耳 主编

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010) 67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

787 mm×1 092 mm 16 开本 13.5 印张 334 千字

印数: 1~3 000 册

ISBN 7-5639-1670-9/G·830

定价: 21.00 元

出版说明

为适应面向 21 世纪材料科学与工程高等教育改革的需要, 全国 21 所高等院校在“材料教育改革交流研讨会”上就共建材料科学与工程学科公共专业课(7 门)系列教材达成共识, 成立了由 9 所院校组成的“共建教材编写协作组”负责本系列教材的编写组织工作。系列教材的编写得到各院校相关领导与教师的重视, 得到北京工业大学教材建设基金的支持, 并被列入北京市教委教育科研项目。

本系列教材内容界定在“材料科学与工程”一级学科范围内, 试图成为材料科学与工程类二级学科专业(教育部新的学科专业目录)或一级学科专业(材料科学与工程)公共专业课(本科)教材或主要教学参考书。

本系列教材包括如下 7 种, 将由北京工业大学出版社陆续出版:

材料科学概论

材料科学基础

材料工程基础

材料性能学

材料现代分析方法

材料工程测试技术

计算机在材料科学中的应用

材料科学与工程学科公共专业课系列教材共建单位

北京工业大学 太原理工大学 上海大学 内蒙古工业大学 福州大学 山东工业大学 河北工业大学 青岛大学 天津理工学院(以上单位组成“共建教材编写协作组”) 辽宁工学院 广东工业大学 山东建材工业学院 山东建筑工程学院 山东轻工业学院 四川工业学院 吉林工学院 北京联大机械工程学院 沈阳工业学院 河北理工学院 南昌大学 贵州工业大学

编写说明

本书是为适应 21 世纪材料科学与工程学科高等教育改革之需而编写的,编写指导思想遵循全国 21 所高校就材料科学与工程学科公共专业课系列共建教材所达成的共识,内容符合所制定的共建教材大纲。

材料科学与工程学科的迅速发展,已成为本世纪科技发展的热点之一。金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料、生物工程材料的研发和应用发展迅猛,超导材料、光电子材料等众多功能材料和新型结构材料的研究更是方兴未艾。这些除依靠基础理论的突破之外,制备技术和测试技术的提高也是极重要的保证条件。这里的重点是工艺过程的参数检测和控制以及相应的测控系统的构成等,而这些均是自动控制和自动化专业重要的内容,为此就要求本学科人才对这方面的内容要有一定的了解。

为适应材料科学的发展和社会对材料类专业人才需求的变化,各高校都将原分属不同系别的相关专业进行了整合重组,按照教育部的指导专业目录,以拓宽专业面、加强基础理论教育、培养高素质人才为目标,在教学体系和教育内容上进行了大幅度改革,在此指导下,在原有各专业有关测试技术教学的基础上制定了新的“材料工程测试技术”教材编写大纲。

“材料工程测试技术”是材料科学与工程学科一级学科的主干课程,其主要任务是使学生了解与掌握材料科学与工程学科领域内相关工艺参数的检测变换原理与数据处理方法、常用仪表、计算机测控系统的构成原理和评价,以及常用的温度量控制方法等,并以此为例了解相关的经典的现代控制原理知识。

本书内容界定在“材料科学与工程”一级学科范围,作为“材料科学与工程”一级学科或二级学科专业公共课程——“材料工程测试技术”的教材或主要教学参考书,全书分成六章。

第一章绪论。除介绍本书的主要内容外,重点讨论测量误差与提高测量准确度的途径,以及检测的一般方法等检测技术的基础知识。此外,还简要介绍了检测技术的新发展以及在目前条件下解决检测疑难问题的主要办法。

第二章材料工程的测试系统。全章阐述了检测构成系统的必然性和必要性,以及系统中各个环节的作用与地位。分类汇总了各种系统,并特别突出了应用日趋广泛的计算机测控系统,对于其信息连接标准作了较全面的介绍,这是构成现代测控系统必不可少的知识。在系统的特性方面除介绍常用的静态特性外,还阐明了无失真测试条件等动态检测的基本保证。

第三章检测转换原理。这是本书检测和数据处理的基础。按照非电量电流技术办法介绍各种非电工艺参数变换成电量的办法、相应传感器的原理和特性及选用。检测变换依照电阻、电容、电感、电势(磁电、热电、压电、霍尔电势及光电)次序展开。

第四章基本参数的测量。主要介绍在材料科学领域中大量出现的温度、压力、流量等过程量的测量原理、方法和相应传感器(仪表)的选用。

第五章测控仪表. 全章较全面地介绍了我国测控仪表的概况, 以及常用检测仪表、显示记录仪表的原理和特性, 在模拟式、数字式控制仪表中重点介绍了应用甚广的 DDZ-III 型和 PID 调节器及可编程调节器、可编程控制器 (PLC) 的原理. 本章还专门介绍了智能仪表的结构和性能特点, 这是近年来随着计算机技术的发展, 在测控领域应用日趋广泛的仪表.

第六章温度的调节. 本章除全面介绍常用的温度调节方法和调节原理之外, 还以“温度调节”为例说明了“调节”、“控制”的概念和常用调节原理所依据的经典控制理论、控制方法以及相应的控制系统构成, 并且简要介绍了现代控制理论所包含的内容及最新的论证理论, 这些是目前控制技术的方向.

以上各章均对目前较新的技术原理作了简要介绍, 以期扩大学生在这方面的知识面.

考虑到本书内容的技术特点, 编写组委请北京工业大学电控学院张国忠教授担任本书的主编, 并由他编写了第一、二、三、五章以及第四、六章部分内容, 北京联合大学赵双华副教授、北京工业大学激光研究院施定远教授分别编写了第四、六章部分内容, 北京工业大学材料学院李耳副教授编写了第四章部分内容, 并组织与协调全书和稿件整理. 本书编写组成员还有北京工业大学材料学院张继光、沈阳工业学院材料分院邓子玉、天津理工学院李国刚.

由于编者水平所限, 书中疏漏和欠妥之处在所难免, 不当之处敬请读者批评指正.

《材料工程测试技术》编写组

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 材料工程的测试技术	(1)
1.2 测量误差和提高准确度的方法	(1)
1.2.1 测量误差概述	(1)
1.2.2 提高测量准确度的方法	(3)
1.3 检测的一般方法	(6)
1.4 检测技术的新发展	(7)
第二章 材料工程的测试系统	(10)
2.1 测试系统的构成	(10)
2.2 测试系统的分类	(10)
2.2.1 按信号传输方式分类	(10)
2.2.2 按系统实现装置分类	(11)
2.3 测试系统的一般特性	(12)
2.3.1 静态特征	(12)
2.3.2 动态特性	(13)
2.4 测试系统信息连接标准化和传递方式	(16)
2.4.1 仪表系统的信号标准和传递方式	(16)
2.4.2 计算机测试系统的总线及其规则	(17)
第三章 检测转换原理	(22)
3.1 概述	(22)
3.2 电阻式传感器	(22)
3.2.1 金属热电阻和半导体热敏电阻	(23)
3.2.2 应变式电阻传感器	(27)
3.2.3 电阻式传感器的测量电路	(32)
3.3 电容式传感器	(37)
3.3.1 概述	(37)
3.3.2 电容式传感器的静态特性	(38)
3.3.3 电容式传感器的测量电路	(42)
3.3.4 电容式传感器的应用	(47)
3.4 电感式传感器	(48)
3.4.1 概述	(48)
3.4.2 自感型传感器	(49)
3.4.3 互感型传感器	(55)

3.4.4 电感式传感器的应用	(64)
3.5 磁电式传感器	(66)
3.5.1 概述	(66)
3.5.2 变压器电势	(66)
3.5.3 切割电势	(69)
3.5.4 磁电式传感器的应用	(71)
3.6 热电式传感器	(71)
3.6.1 概述	(71)
3.6.2 热电效应	(72)
3.6.3 热电偶的基本特性	(76)
3.6.4 热电偶的测量电路	(77)
3.6.5 热电偶的应用	(77)
3.7 压电式传感器	(78)
3.7.1 概述	(78)
3.7.2 压电效应及压电材料	(78)
3.7.3 压电特性	(79)
3.7.4 压电式传感器的测量电路	(83)
3.7.5 压电式传感器的应用	(88)
3.8 霍尔式传感器	(89)
3.8.1 概述	(89)
3.8.2 霍尔式传感器的工作原理	(89)
3.8.3 霍尔元件的特性	(90)
3.8.4 霍尔式传感器的测量电路	(95)
3.8.5 霍尔式传感器的应用	(96)
3.9 光电式传感器	(98)
3.9.1 概述	(98)
3.9.2 光电探测器的基本参数	(99)
3.9.3 光电效应及光子型探测器	(101)
3.9.4 光电探测器的选用	(111)
第四章 基本参量的测量	(112)
4.1 温度量的测量	(112)
4.1.1 温度和温标	(112)
4.1.2 接触法测温	(113)
4.1.3 辐射测温	(128)
4.2 流体压力的测量	(137)
4.2.1 流体压力和压力测量单位	(137)
4.2.2 常见的压力测量方法与压力表的分类	(138)
4.2.3 常用的压力测量仪表	(139)
4.2.4 真空的测量	(142)
4.2.5 压力测量仪表的选用	(145)
4.3 流体流量测量	(146)

4.3.1 流体流量和测量单位	(146)
4.3.2 流体流量的测量方法和流量仪表分类	(147)
4.3.3 常用流量计原理	(150)
4.3.4 流量计的选用	(158)
第五章 测控仪表	(163)
5.1 概述	(163)
5.1.1 材料测试的测控仪表	(163)
5.1.2 我国测控仪表的概况	(163)
5.2 检测仪表及变送器	(166)
5.2.1 检测仪表构成原理	(166)
5.2.2 变送器	(167)
5.3 显示、记录仪表	(171)
5.3.1 显示、记录仪表的分类	(171)
5.3.2 常用的模拟式平衡结构显示仪表	(172)
5.4 控制仪表	(174)
5.4.1 概述	(174)
5.4.2 DDZ-Ⅲ型 PID 基型调节器	(175)
5.4.3 数字式控制仪表	(176)
5.5 智能仪表	(179)
5.5.1 概述	(179)
5.5.2 智能仪表的一般结构	(181)
5.5.3 智能仪表的性能特点	(181)
第六章 温度的调节	(184)
6.1 温度自动调节系统的基本概念	(184)
6.1.1 自动调节系统的框图	(184)
6.1.2 调节系统的过渡过程	(184)
6.1.3 自动调节系统的品质指标	(186)
6.2 温度的断续调节	(187)
6.2.1 两位调节器	(187)
6.2.2 三位调节器	(188)
6.2.3 时间比例调节器	(189)
6.3 温度的连续调节	(191)
6.3.1 调节器的基本调节规律	(191)
6.3.2 调节器调节规律的选型	(197)
6.4 调节、控制及控制理论的发展	(198)
6.4.1 经典控制理论	(198)
6.4.2 现代控制理论	(201)
6.4.3 大系统和复杂系统控制理论及智能控制理论	(203)
主要参考文献	(204)

第一章 绪 论

1.1 材料工程的测试技术

测试是以试验为目的的测量，或者说是测量和试验的综合。

按国际通用计量学基本名词推荐，“测量是以确定量值为目的的一组操作”，这种操作就是测量中的比对过程——将被测参数的量值与作为单位的标准量值进行比对，比对出的倍数即为测量结果。

检测则是意义更为广泛的测量。它不仅是测量，还包含：检验——仅需分辨出参数量值所隶属的某一范围带，以此来判断被测参数合格与否或现象的有或无等；检出——将被测控对象所包含有用信息的信号检出。

材料工程测试技术是针对一门学科的工程检测技术。工程检测技术的任务不仅是对成品或半成品的检测和测量，而且是在人们为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象使之处于人们选定的最佳状况时，随时掌控反映这种最佳状况的各种参数，为此，就要求随时定性检查或定量测量这些参数的大小和变化情况。

材料工程为了满足科技进步和生产发展，需要不断研制性能优异的新型材料。经验表明，新型材料的制备中常会对生产工艺有严格的要求；在为了提高某种材料原有性能的加工处理（如热处理、表面处理等）中同样会对加工工艺有严格的要求，能满足这样严格要求的绝非手工操作所能，要有自动控制技术来保证。为此就需把反映工艺要求的相关参数检测出来，经处理后送入控制装置，由它来按一定规律实施自动控制。此外，材料性能的测量和试验、探伤也是重要方面。

因此本课程包含了如下内容：检测的概念和一般方法、测量误差和处理、被测参数检出原理和检测系统的构成、实施检测和控制常用装置（仪器仪表）、常用的控制基本理论以及相关方面的最新发展。

1.2 测量误差和提高准确度的方法

1.2.1 测量误差概述

被测对象某参数的量值之真实大小（真值） x_0 是客观存在的，由于种种原因，测量结果总会有误差。有的误差人们只能将其控制在所允许的有限范围内，并用数学办法估算出大小，而不能主动使其为零。测量误差显然会影响人们认识的准确性，为此要研究它的规律，以求尽量缩小它。

1. 误差产生的原因

(1) 测量方法方面——方法误差

由于测量方法的不完善、不适当,原理上的近似,定义的不严密,以及在测量结果表达式中没有得到反映,但在实际测量中又在原理上和方法上起作用的一些因素所引起的误差统称方法误差.

(2) 测量设备方面——设备误差

由于测量所使用的仪器、仪表、量具及附件不准确所引起的误差称为设备误差.

(3) 环境方面——环境误差

测量时由于实际环境条件与规定的条件不一致而引起的误差称为环境误差.

(4) 测量人员方面——人员误差

由于测量人员的生理特点(分辨能力、反应速度、感觉器官、情绪变化等)、心理的固有习惯(读数的偏大或偏小)、工作责任心、操作经验、知识水平等引起的误差称为人员误差.

2. 测量误差的分类

(1) 按误差表示方法分

按表示方法可将误差分为绝对误差和相对误差.

1) 绝对误差 测量值 x 和真值 x_0 之差,有 $\Delta x = x - x_0$.

2) 相对误差 绝对误差 Δx 和约定值之比.

约定值若为真值 x_0 ,则称 $\Delta x/x_0 = r_L$ (实际相对误差);若为被测量 x ,则称 $\Delta x/x = r_X$ (标称相对误差);若为测量仪表的满刻度值 x_n ,则称 $\Delta x/x_n = r_n$ (引用相对误差).

(2) 按使用条件的满足程度分

按使用条件的满足程度可将误差分为基本误差和附加误差.

1) 基本误差 仪器仪表在标准条件下使用时所产生的误差称基本误差或固有误差.

2) 附加误差 当使用时,条件偏离标准条件而使误差大于基本误差,其大出的部分即为附加误差.

(3) 按被测量的变化速率分

按被测量的变化速率可将误差分为静态误差、动态误差.

1) 静态误差 被测量不随时间变化或输出达到稳态时所测得的测量误差.

2) 动态误差 在被测量随时间变化过程中进行测量,由此产生的附加误差称为动态误差.因为一般它是测量系统(或仪表)对输入信号变化响应的滞后或输入信号中不同频率成分通过测量系统时受到不同的衰减和延迟而造成的误差,因此动态误差应以动态中测量和静态中测量所得误差之差值来表示其大小.

(4) 按误差与被测量的数值关系分

按与被测量的数值关系可将误差分为定值误差、累积误差和整量化误差.

1) 定值误差(相加误差) 误差 Δx 是一定值,它不随被测量 x 的大小而变化.如仪表指针不指零.

2) 累积误差(相乘误差) 误差值大小和被测量 x 成比例变化.如放大器的放大倍数有误差,那么输出造成的误差随输入的增加而增加.

3) 整量化误差 这是特殊形式的误差,产生于连续信号转换成离散信号整量化过程中,

存在的误差 Δ 在 $+\Delta_m$ 和 $-\Delta_m$ 之间, Δ_m 是半个量化单位.

(5) 按误差出现的规律性分

按出现的规律性可将误差分为系统误差、随机误差、缓变误差和粗大误差.

1) 系统误差(系差) 是相同条件下, 多次重复测量同一量时, 误差的大小和符号均保持不变, 或当条件改变时, 按某一确定规律变化的误差. 测量过程中大小和符号均保持不变的称恒定系差; 随某些因素按某一规律(如线性、周期、多项式或复杂规律)而变化的称为可变系差.

系差是某些个别因素影响较大所致, 它使测量结果偏离真值, 影响正确, 但误差有一定规律, 故可以按其规律引入修正量加以校正, 或改善测量方法来消除, 而单纯增加测量次数是无法消除的.

2) 随机误差 是在相同条件下多次重复测量同一量时, 误差的大小和符号均发生变化, 其值时大时小, 符号时正时负, 没有确定的规律, 无法控制, 也不能事前预知的误差.

随机误差是由多个互不相关的独立因素围绕其平均值产生随机起伏(如电磁场微变、热起伏、空气扰动、大地微震、仪器结构参数的波动、测试人员感觉器官的生理变化等), 对测量结果产生综合影响所造成的, 它使测量结果随机性分散, 影响测量的精密. 因为一次测量的单个随机误差没有任何预知的确定规律, 但多次重复测量的总体上, 误差的出现(大的, 小的; 正的, 负的)具有一定的统计规律, 最典型的是正态分布规律, 因此通过适当增加测量次数、用数理统计的办法可使测量结果尽量接近真值.

3) 缓变误差 是指数值上随时间缓慢变化的误差. 例如由于零部件老化、机械零件内应力变化等引起的. 由于它有不平稳随机过程的特点, 误差值在单调缓慢变化, 因此不能像对系差那样引进一次修正量来校正, 也不能像对随机误差那样按平稳随机过程的特点来处理, 因而需不断校正, 且测量准确度与校正周期有关.

4) 粗大误差(粗差) 是误差值超出规定的误差. 它无任何规律可循, 主要是由于操作者过失或外界的重大干扰造成的, 因此无法也不必校正, 一旦发现必须剔除该次测量结果.

1.2.2 提高测量准确度的方法

提高准确度意味着减小误差. 从误差产生的原因上来分析, 依据完善的测量原理, 使用优良的仪器设备, 改善使用环境, 提高操作人员的素质无疑能减小误差. 但就现有的有限客观条件(设备、环境、人员), 在测量方法、校正手段以及数据处理上研究出一些办法来提高准确度无疑更有积极意义.

从误差出现的规律性入手, 对于系统误差可按其规律性, 通过专业的理论分析从测量方法上实现校正, 或通过实验找出应修正的量值大小; 缓变误差因有不平稳随机过程的特点, 目前只能通过不断校正, 且校正周期尽量短一些的办法来解决; 带有粗差的测量数据常称坏值, 一经发现立即剔除, 关键是如何发现; 对于随机误差, 则应利用其统计规律来尽量减小其影响, 使测量结果分散性(精确度)减小. 下面分析说明如何利用统计规律估算随机误差、减小和剔除粗差.

1. 随机误差的估算

虽然避免测量仪表的间隙和摩擦以及外界噪声干扰可减小随机误差, 但就其特点来讲它是由众多微小因素共同作用造成的, 因此利用其出现的统计分布规律, 可在得出测量结果

时,将估算出的随机误差大小范围尽量缩小。

(1) 随机误差出现的概率分布

因为绝大多数随机误差是由许多独立因素的微小变化共同作用所致,因此误差出现的概率分布正好符合正态分布。对一个不变的量作 n 次测量,其随机误差的概率密度函数 $P(\delta)$ 为

$$P(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1)$$

概率分布函数为

$$F(\delta) = \int_{-\infty}^{\delta} P(\delta) d\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_{-\infty}^{\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (1-2)$$

式中: δ 为误差,真值为 x_0 时,测量值 x 的误差 $\delta = x - x_0$; σ 为均方根误差(标准误差),

$$\text{有 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}.$$

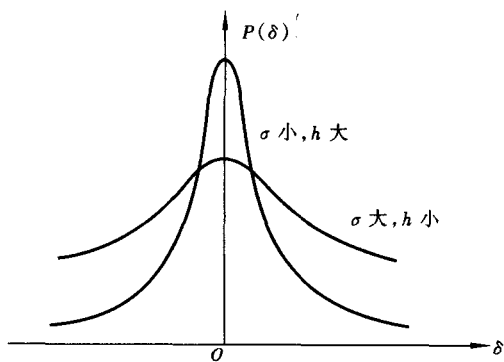


图 1-1 正态分布的概率密度分布曲线

由图 1-1 知, σ 大, $P(\delta)$ 曲线平坦,说明随机误差 δ 大的和小的出现概率密度相差不大; σ 小, $P(\delta)$ 曲线尖峭,说明 δ 小的出现概率密度很高,而 δ 大的出现概率密度较低。此无疑说明很多测量数据所带随机误差小,而带随机误差大的数据较少,表现为测量结果分散性很小,精密度高。因此 σ 的大小可反映出测量结果随机误差的大小。

$F(\delta)$ 是指误差大小在一定范围内出现的次数(以占总测量次数的百分比表示),误差在 $-\infty \sim \delta$ 之间总共的个数是 $\int_{-\infty}^{\delta} P(\delta) d\delta$,显然全部测量次数应在误差 $-\infty \sim \infty$ 范围内,即: $\int_{-\infty}^{\infty} P(\delta) d\delta = 1$ 。可以计算出随机误差大小在 $-\sigma \sim \sigma$ 范围内有: $\int_{-\sigma}^{\sigma} P(\delta) d\delta = 0.6827$; 在 $-2\sigma \sim 2\sigma$ 内有 $\int_{-2\sigma}^{2\sigma} P(\delta) d\delta = 0.9545$; 在 $-3\sigma \sim 3\sigma$ 内有 $\int_{-3\sigma}^{3\sigma} P(\delta) d\delta = 0.9973$,即几乎全部测量数据的随机误差大小是在 $\pm 3\sigma$ 之间(也就是说几乎全部测量数据大小是在 $x_0 \pm 3\sigma$ 范围内),因此在没有系统误差情况下测量时,若某个测量数据误差超出 $-3\sigma \sim 3\sigma$,那么此数据就值得怀疑,即不可置信了(但这种结论的可信度是 99.73%),因此以置信系数 K 表示($K = 1, 2, 3$)相应的概率(0.6827; 0.9545; 0.9973 等)称为置信概率 $p = 1 - \alpha$, α 称为超限概率。 $\pm K\sigma$ 称为不确定度(常用 $\pm e$ 表示)。

(2) n 次测量结果中随机误差的估算

由正态分布 $P(\delta)$ 曲线知,随机误差有如下特点。

- 1) 对称性 即误差绝对值相同的正误差和负误差出现次数相等。
- 2) 单峰性 误差绝对值小的比大的出现次数多。
- 3) 有界性 在一定测量条件下,误差的绝对值不会超出一定的界限,超出此界限的出

现概率小, 可视为几乎不可能 (例如 $\pm 3\sigma$).

4) 抵偿性 随测量次数 n 的增加, 误差代数和趋向于零, 有以下两种情况.

① n 为无限次测量时, 对一个不变量作 n 次无系差测量, 根据 $P(\delta)$ 的抵偿性, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

即
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 = 0$$

故被测量的真值 $x_0 = \frac{1}{n} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$, 即为全部测量值的算术平均值 $\bar{x}_0$.

所以能表征随机误差大小的标准差 δ 为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

② n 为有限次测量时, 测量次数 n 总是有限的, 可以证明此情况下, 测量数据的算术

平均值 $\bar{x}$ 是真值 x_0 的最佳和无偏估计值, σ 的无偏估计值为 $\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ (此后简称为 σ).

(3) 测量结果随机误差的估算

对一个不变的量作 n 次无系差的有限次测量, 得测量数据列 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$.

若以其中任一数据为测量结果, 那么其随机误差大小范围为: $\pm 3\sigma (p = 0.9973)$; 或

$\pm 2\sigma (p = 0.9545)$; 或 $\pm \sigma (p = 0.6827)$. 其中, 标准差 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$.

若以算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 来表示测量结果, 那么其随机误差大小范围则为 $\pm 3\sigma_{\bar{x}}$, 或 $\pm 2\sigma_{\bar{x}}$, 或 $\pm \sigma_{\bar{x}}$. 可以证明算术平均值 $\bar{x}$ 的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-3)$$

$\sigma_{\bar{x}}$ 仅是 σ 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$, 这是通常总以测量列的算术平均值来表示测量结果的重要原因.

2. 粗大误差的减小和剔除准则

含粗差的测量值是显然与事实不符的坏值, 测量中应主观上避免出现 (操作者防止出错, 避免外界重大干扰下测量, 保证测量设备完好), 一旦发现应给予剔除. 从测量中判别坏值有物理判别法和统计判别法.

物理判别是在测量过程中一旦发现出错 (读错、记录错、操作错)、不符合测量条件或环境突变 (重大干扰、震动等) 时, 随时剔除, 重新测量.

统计判别是在自动检测中待测量完毕后用统计办法处理测量数据. 在无系差的测量中, 随机误差的大小是有限的, 且误差很大者出现的次数是极少的, 据此可制定出剔除准则, 常

用的有 3σ 准则（拉依达准则），如前述随机误差大小超过 $\pm 3\sigma$ 的概率仅有 $1 - 0.997\,3 = 0.002\,7$ ，即几乎不可能出现，因此可以视为大于 $\pm 3\delta$ 的误差的测量值为坏值。

1.3 检测的一般方法

由于检测对象千差万别、待测参数众多、量值大小差异悬殊、环境多变，因此就相应发展出种种测量方法。

1. 电测量和非电量电测量（非电量电测）

待测参数可分为电量与非电量，电参数（电路参数 R 、 L 、 C 等和电参数 U 、 I 、 Q 等）无论在检测方法还是在检测仪器设备方面均较为成熟，而非电参数种类繁多，如过程参数（温度、压力、流量、料位等）、机械参数（尺寸、位移、形状、力、重量、转速、振动等）、物性和成分参数（酸碱度、盐度、浓度、黏度、密度、粒度、湿度等）、状态参数（颜色、透明度、磨损量、裂纹、泄漏、粗糙度、白度、灰度等），这些参数差别很大，直接检出和测量困难很多、很大。为此常采用非电量电测量技术，即通过传感器（或敏感元件）将待测的非电参数转换成电参数，然后测出此电量，再按原转换的规律逆向找出待测非电量。

传感器（又称探测器、转换器）按我国标准（GB 7665—87）定义为，能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。

敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量输出与被测量成确定关系的其他量，若这个量已是电量，则称为转换元件。

由于待转换的非电参数很多，因此传感器的种类也很多，涉及的原理非常广泛，其主要内容将在第三章介绍。

2. 主动检测和被动检测

为了检测，主动向被测对象施加能量，由其响应情况实现检测，此为主动检测（如为检测瓷瓶是否破裂，可主动敲击一下，听其发出的声响来判断），主动检测当然会干扰对象的状态。而被动检测则无须向对象施加能量（如辐射测温，是接受被测物的辐射能量，按其大小来判断出其温度值）。

3. 接触检测和非接触检测

接触检测是将检测仪器直接和对象接触。这当然会对对象产生干扰，甚至影响测定的正确性（例如测量小试管中的热水温度时，若将温度计插入水中则必然会改变原水温）。有时对象因其特殊性（高腐蚀、高辐射等）也不便或不允许接触被测对象。因此，常应用非接触检测，它不会破坏对象的原来状态，但因为非接触，常会侵入外界干扰。

4. 偏差法、平衡法和微差法；替代法和计数法

这些方法是在测量过程的被测量和单位量对比操作上做些变化，可使在原有仪表的条件下，测量准确度提高。

偏差法就是常规测量办法，由模拟的显示仪表指针偏转来反映被测量大小，像用电压表测电压那样，操作简单快速，但其准确度取决于仪表等级。平衡法则像天平称重那样，不断调节已知标准量大小（砝码的质量）使之与被测量平衡，当指零仪表示零时表示达到平衡，此时的标准量大小即为被测量大小。电位差计和平衡电桥均基于此原理。只要示零仪表有足够的灵敏度就能使测量有高的准确度。微差法则类似于平衡法，只是不必将标准量调整到和

被测量完全相等,可以有微小差值,再用偏差法测出此差值,被测量大小即是此微差值和标准量之和,它比直接用偏差法准确度高。

替代法最典型的例子是我国古代曹冲称象,以若干石块替代大象,使船只吃水深度达到原承载大象时的深度,分别称量每块石头的重量,得总和即为大象体重,由此解决了直接称重的困难,这种方法在检测中经常被应用,如后述的辐射测温等。

计数法最典型的应用是在精确计时中,为测量两个信号之间的时间间隔 Δt ,可用一个信号去打开电子的门电路,另一个信号则是去关闭此门电路,在开、闭间隔 Δt 期间用标准的高频脉冲信号通过门电路进入计数器, Δt 内计数器计数到的通过脉冲个数乘以脉冲的标准周期即为 Δt 的长短。此法亦用于将模拟量量化为数字量(脉冲数),因此测量误差仅为量化误差。

5. 直接法、间接法和组合法

直接法就是常规的用被测量和标准量直接比对得出倍数的测量方法;而间接法则直接测量的是与被测量有函数关系的几个量,然后代入该函数式,计算出被测量。间接法常用于直接测量有困难的场合。例如:要测某导体的电阻率 ρ ,可先直接测量出导体长度 l 、截面 S 和电阻值 R ,再通过 $R = \rho \frac{l}{S}$ 计算出 ρ 。在这里 $\rho = f(R, l, S)$ 就是测量电阻率的一个确切固定的模型。

组合法则需令被测量以不同的组合形式出现,得到若干方程组,求解联立方程组才能得出被测量。如铂热电阻其电阻值 R_t 和温度 t 的关系为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

R_0 为已知的 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的阻值, A 与 B 是待定的常数,此外用组合法需通过二次试验:令 $t = t_1$ 时测得电阻为 R_{t_1} , $t = t_2$ 时为 R_{t_2} ,求解联立方程组:

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_0(1 + At_1 + Bt_1^2) \\ R_{t_2} = R_0(1 + At_2 + Bt_2^2) \end{cases}$$

即可得出待定系数 A 与 B ,从而获得 R_t-t 的确切、固定的模型。

1.4 检测技术的新发展

随着检测技术应用的日趋广泛(从工业生产扩大到农业、交通、医学等其他领域)和深入(如将材料的无损检测引入现场,在线监测重要的零部件等),遇到的困难越来越多,总的表现如下。①检测对象复杂。其工作原理涉及物理、化学和生化反应,需要完成物质(或能量)的转换或传递,甚至原理尚不十分清晰,因此为检测所建立的模型或不确切或模糊。描述对象状态的参数或很多或不确定。例如,要测量用气流传送固体粉粒的质量流量时,就涉及要了解清楚诸如压力、温度、气-固两相流的流速及分布、粉粒密度及分布,甚至温度、输送过程中摩擦管道产生的噪声等。②参数检测困难。或参数定义不清晰,或难于直接检测,或数值过大、过小。③环境恶劣。检测进入现场,因此干扰严重,温湿度影响大,存在振动、粉尘等。

不过,越困难解决的办法就越多,有生产和科技发展的需求,就有检测技术发展的动力,主要表现如下.①基础理论的发展为设计新型传感器在原理上不断提供新规律、新效应;材料科学的发展不断提供新材料(尤其是功能材料)和细微加工技术,这些为传感器的小型化、集成化、智能化、多功能化打下了基础.②现代控制理论的辨识、参数估计、滤波技术、神经网络和模糊控制等技术应用到检测模型的建立中,为复杂对象和困难参数的检测创造了条件.③电子技术、计算机技术的硬件与软件发展为检测仪器的智能化、便捷化、多功能化创造了条件.这些综合体现在以下方面.

1. 软测量技术(软仪表技术)

它类似于间接测量,不过,描述易测的直接测出量(称为辅助变量)和待测的难测出量(称为主导变量)之间关系的测量模型,不像前述间接测量中所列举的 $\rho = f(R, l, S)$ 模型那样固定和确切,而是比较难于选定和建立.必须通过对象工作原理清晰了解和分析(一般较困难),或对大量专门的试验数据作回归分析,或依靠状态估计、模式识别、人工神经网络等技术才可得出.显然,这些要依靠多个传感器,采集相关参数,经由数据采集卡送入计算机,计算机按相应的建模方法所设定的程序计算出测量结果.

2. 多传感器信息融合技术

生产和科技发展需要了解检测对象的综合信息和内在特征信息,此绝非由孤立的单一传感器所能检测,而要通过多个、多种传感器在不同时间、空间采集信息来实现,这样得到的众多信息中有冗余的(它有助于提高容错能力和可靠性,可提高测量精度和减小不确定度),有互补的(每个传感器从不同的时间、空间来检测,从而得到一个完整的描述),有协同的(一个传感器的信息依赖于另一个的),当然亦有相互间矛盾的、不协调的,每个传感器得到的数据有不同的统计特性和不确定度等,这些要依靠融合技术,即分层次处理:在每个层次按各自目标分别进行信息的选用、组合、回归、相关、估计、识别和推理等,最终达到对对象特性的最好描述.因此,多传感器信息融合涉及信号检测、数据处理、模式识别、人工智能、神经网络及计算机等技术.

3. 模糊检测技术

对于复杂参数或状态,由于问题复杂并缺乏足够的信息,采用精确方法检测困难,或没有实际意义,甚至尚不存在精确方法.若用部分精确检测再推广到整体目标有时反而不准确.为此,可模仿人脑思维的模糊性、概括性和模糊推理方式来处理.先根据以往的丰富经验和知识建立一个模糊化的知识库、推理的规则和图表,并确立相应的模糊参量,将精确检测到的数据转化成相应参量及其隶属度,根据知识库中的推理规则和图表得出模糊的检测结果,再反模糊化得出精确形式下的检测结论.这种技术已有效用于检测对象的在线检测和故障诊断.

4. 智能传感器和智能检测技术

智能传感器是一种带有微处理器、兼有信息检测和信息处理功能的传感器,其硬件上除传感器固有的完成检测变换的元件之外,还有调理电路来处理原始转换得到的信号,并拥有A/D、D/A以及通信接口等.此外,依据微处理器的水平、存储容量和相应的功能软件,可实现不同层次的“智能”功能.上述功能涉及以下方面.①数据保护方面:存储记忆,甚至为防范掉电丢失数据设置备用电源.②对数据的预处理和对传感器特性的改善:滤波、取均值、求随机误差、剔除坏值等;用补偿方法消除影响传感器的外界干扰因素(温度、压力