

新世纪高等学校研究生适用教材

化工测试技术

Measuring Techniques for Chemical Engineering

王一平 张金利 黄群武 编著

化 工 测 试 技 术

新世纪高等学校研究生适用教材

化工测试技术

Measuring techniques for chemical engineering

王一平 张金利 黄群武 编著

 天津大学出版社
Tianjin University Press

内容简介

本书重点介绍化工过程各类参数检测的原理,同时也针对化工科研中遇到的代表性问题介绍具体解决方案。全书分为十章,分别为测量的物理及数学基础、电学量的基本测量技术、温度及与之相关参数的检测、压力及与之相关参数的检测、浓度和含率及与之相关参数的检测、相变及与之相关参数的检测、位移及与之相关参数的检测、信号处理技术、抗干扰技术、化工测试系统的建立。

本书可作为以化学工程学科为代表的过程工程类各专业的硕士生、博士生教材,也是测试技术类相关专业和过程工程专业科研人员、技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工测试技术/王一平,张金利,黄群武编著. —天津:天津大学出版社, 2005. 4
ISBN 7-5618-2116-6

I. 化... II. ①王...②张...③黄... III. 化工工程—测试技术 IV. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 027810 号

出版发行 天津大学出版社
出版人 杨风和
地址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网址 www.tjup.com
印刷 河北省昌黎县第一印刷厂
经销 全国各地新华书店
开本 185mm×260mm
印张 19.75
字数 493 千
版次 2005 年 4 月第 1 版
印次 2005 年 4 月第 1 次
印数 1-3 000
定价 29.00 元

前 言

“工欲善其事,必先利其器”,以化学工程为代表的过程工程学科的研究与发展,首当其冲地要考虑用先进的测试手段来观测过程的变化,洞察过程演变的规律,进而运用这些规律为人类服务。

作者自上世纪 80 年代即编写了“化工测试技术”讲义,并在天津大学化工系开设了该课程,授课对象为博士生、硕士生及高年级本科生。经过 20 多年的教学与科研实践,体会到过程研究的深入与测试手段的完善是相辅相成、密不可分的,即过程研究水平的提高需要先进的测试手段的支撑,同时为测试技术的进步提供应用机会;而测试技术的进步赖以过程研究深入所产生的需求,同时为过程研究水平的提高提供利器。

随着过程研究的深入,研究内容已由空间域的“宏观”转向“微观”,由时间域的“平均”转向“瞬态”。在很多研究中,已没有现成的、甚至没有可供借鉴的测试方法及相应的仪器仪表,需要研究者自己针对研究对象的特点,建立专用的测试系统。从某种意义上说,对过程工程的研究者而言,完善的测试系统的建成之日,就是其研究目标的实现之时。

建立专用的测试系统,需要广泛且深入的专业知识。在知识爆炸的今天,很难有精通各类学科的天才为过程研究者提供满足千变万化要求的服务。在看似复杂的过程现象中,如何提炼出其中的科学问题予以解决,用什么手段予以解决,作者认为,提出问题比解决问题更重要。在测试系统的建立过程中,首先是要搞清研究目标物系的运动过程有哪些表征,其次是搞清这些表征与哪些物理量有关,再弄清这些物理量的变化能引起哪些易于检测的物性变化,则化工测试技术的最关键一环——专用传感器的开发环节就基本解决了。作为过程工程的研究者,就可以带着这些抽提出来的问题,去找分布在电子与信息、材料、计算机、自动化、精密仪器、应用物理等等学科方向上专业的测试技术人员来解决这些问题。当然,除了传感器这一关键一环外,其他基础知识也是必要的。

本书的特点在于从参数检测本质规律的关联性出发,根据自然运动规律的相似性,找出个性问题隶属的共性,共性问题中的个性,在过程研究者与测试专业人员之间建立桥梁与纽带,使天堑变通途。全书分为十章,分别介绍电学量基本测量技术;温度及与温度相关参数的检测;压力及与压力相关参数的检测;浓度、含率及与之相关参数的检测;相变及与相变相关参数的检测;位移及与位移相关参数的检测;信号处理技术;抗干扰技术;化工测试系统的建立等方面的知识。读者既是化工类专业的博士生、硕士生及高年级本科生,也是测试技术类相关的专业技术人员,还是广泛的过程工程工作者。限于水平,这种新的尝试难免存在众多问题,望读者不吝赐教。

作者

2005.3 于天津大学

e-mail: xinxing@tju.edu.cn

目 录

第1章 测量的物理及数学基础	(1)
1.1 测量学及计量学的基本知识	(1)
1.1.1 测量的定义	(1)
1.1.2 测量结果的表示	(1)
1.1.3 测量中的变换	(1)
1.1.4 量具和比较仪	(1)
1.1.5 测量装置与系统	(2)
1.1.6 计量学与测量学的关系	(2)
1.1.7 单位与单位制	(2)
1.1.8 基准与标准	(2)
1.1.9 测量仪器的标定	(3)
1.1.10 测量方法	(3)
1.1.11 误差与修正值	(4)
1.1.12 测量误差及其主要来源	(5)
1.2 误差	(6)
1.2.1 误差的性质及其分类	(6)
1.2.2 随机误差	(8)
1.2.3 系统误差	(17)
1.2.4 误差的合成与分配	(19)
1.3 测量结果的处理	(24)
1.3.1 测量结果的数据处理	(24)
1.3.2 测量结果的图解分析	(25)
1.3.3 用最小二乘法回归曲线	(28)
1.3.4 经验公式的确定	(31)
第2章 电学量的基本测量技术	(33)
2.1 常用指示电表原理	(33)
2.1.1 磁电系仪表	(33)
2.1.2 数字式仪表	(36)
2.1.3 频率计	(38)
2.2 万用电表	(44)
2.2.1 模拟式万用表	(44)
2.2.2 数字式万用表	(50)
2.2.3 使用万用表的注意事项	(55)



2.3 显示和记录装置	(57)
2.3.1 模拟式	(57)
2.3.2 数字式	(70)
第3章 温度及与之相关参数的检测	(77)
3.1 引起温度变化的因素	(77)
3.1.1 能量转化引起的温度变化	(77)
3.1.2 热量传递造成的温度变化	(80)
3.2 温度所能引起的变化	(82)
3.2.1 热的机械效应	(82)
3.2.2 热的辐射效应	(83)
3.2.3 热的电效应	(84)
3.2.4 热的化学效应	(86)
3.2.5 热的其他效应	(88)
3.3 温度的测量	(91)
3.3.1 接触式非电参量输出测量技术	(91)
3.3.2 接触式电参量输出测温技术	(96)
3.3.3 非接触测温技术	(102)
3.4 与温度相关参数的测量	(105)
3.4.1 与导热系数相关参数的测量	(105)
3.4.2 与对流传热系数相关参数的检测	(106)
3.4.3 热示踪法流动参数测量	(109)
3.4.4 光电式露点仪	(110)
第4章 压力及与之相关参数的检测	(111)
4.1 引起压力变化的因素	(111)
4.1.1 力学因素所引起的压力变化	(111)
4.1.2 物理因素导致的压力变化	(113)
4.1.3 化学因素导致的压力变化	(115)
4.2 压力所能引起的变化	(116)
4.2.1 压阻效应	(117)
4.2.2 压电效应	(118)
4.2.3 压磁效应	(119)
4.2.4 压频效应	(119)
4.3 压力的检测	(121)
4.3.1 重力平衡式压力计	(121)
4.3.2 弹性平衡式压力表	(123)
4.3.3 电子式测压装置	(125)
4.3.4 压力测量注意事项	(129)
4.4 与压力相关参数的测量	(134)
4.4.1 液位的测量	(134)

4.4.2 节流式流量计	(136)
4.4.3 靶式流量计	(137)
4.4.4 流速的测量	(137)
4.4.5 质量的测量	(138)
第5章 浓度和含率及与之相关参数的检测	(139)
5.1 引起浓度和含率变化的因素	(140)
5.1.1 传递过程	(140)
5.1.2 化学反应过程	(142)
5.2 浓度和含率所能引起的变化	(143)
5.2.1 物理性质变化	(143)
5.2.2 化学变化	(147)
5.3 浓度和含率的测量	(147)
5.3.1 密度测量法	(147)
5.3.2 热导测量法	(148)
5.3.3 电导测量法	(151)
5.3.4 电磁测量法	(154)
5.3.5 旋光测量法	(157)
5.3.6 折光测量法	(158)
5.3.7 光吸收式分析仪	(160)
5.3.8 色谱分析法	(162)
5.3.9 其他测试方法	(165)
5.4 与浓度和含率相关参数的测量	(170)
5.4.1 密度的测量	(170)
5.4.2 停留时间分布的测定	(171)
第6章 相变及与之相关参数的检测	(174)
6.1 引起相变的因素	(176)
6.1.1 温度的影响	(176)
6.1.2 压力的影响	(177)
6.1.3 电场的影响	(178)
6.1.4 颗粒尺寸的影响	(178)
6.1.5 其他因素的影响	(178)
6.2 相变引起的变化	(179)
6.3 相变测量技术	(180)
6.3.1 熔点测定	(180)
6.3.2 沸点仪	(183)
6.3.3 固体相变类型的检测	(184)
6.3.4 其他相变检测方法	(189)
6.4 与相变相关参数的测量	(195)
6.4.1 相变测温	(195)



6.4.2 金属熔点附近热物性测试	(196)
第7章 位移及与之相关参数的检测	(198)
7.1 引起位移变化的因素	(198)
7.2 位移所能引起的变化	(199)
7.3 位移的检测	(201)
7.3.1 电位器式位移传感器	(201)
7.3.2 电感式位移测量系统	(204)
7.3.3 旋转变压器角位移测量系统	(207)
7.3.4 电涡流式位移测量系统	(209)
7.3.5 霍尔式位移传感器	(214)
7.3.6 电容式位移测量系统	(218)
7.3.7 纤维光学位移传感器	(222)
7.3.8 激光位移测量系统	(225)
7.3.9 计量光栅系统	(227)
7.3.10 编码器系统	(230)
7.3.11 感应同步器系统	(233)
7.4 与位移相关参数的检测	(237)
7.4.1 温度的检测	(237)
7.4.2 压力的检测	(237)
7.4.3 物位的检测	(238)
7.4.4 转速的检测	(239)
7.4.5 其他与位移相关参数的检测	(239)
第8章 信号处理技术	(240)
8.1 测量电桥	(240)
8.1.1 电桥的分类	(241)
8.1.2 直流电桥	(242)
8.1.3 交流电桥	(247)
8.2 信号的放大	(252)
8.2.1 基本概念	(253)
8.2.2 数据放大器的设计	(254)
8.3 非线性特性的线性化	(256)
8.3.1 非线性特性的类型	(256)
8.3.2 非线性校正的模拟方法	(256)
8.3.3 非线性校正的数字方法	(260)
8.4 测量信号的计算机采集	(261)
8.4.1 A/D 转换器	(262)
8.4.2 采样/保持电路	(265)
8.4.3 多路转换开关电路	(267)

第 9 章 抗干扰技术	(270)
9.1 物系的干扰	(270)
9.1.1 物系干扰源	(270)
9.1.2 消除物系干扰的措施	(272)
9.2 电磁干扰	(273)
9.2.1 干扰的分类	(273)
9.2.2 干扰的形成	(276)
9.2.3 抑制电磁干扰的基本方法	(279)
第 10 章 化工测试系统的建立	(290)
10.1 现代测试系统概述	(290)
10.1.1 现代测试系统的基本结构	(290)
10.1.2 现代测试系统的特点	(293)
10.2 测试系统的组建原则	(295)
10.3 测试系统的设计	(297)
10.3.1 测试系统的设计内容	(297)
10.3.2 测试系统的软件设计	(298)
10.4 测试系统的综合评价与标定	(303)
10.4.1 测试系统性能的综合评估	(304)
10.4.2 测试系统的标定	(305)
参考文献	(306)



第1章 测量的物理及数学基础

1.1 测量学及计量学的基本知识

1.1.1 测量的定义

测量是人们用一个预定的标准与一个未知量进行定量比较的过程或结果。实际中,人们通过专门的设备,借助于实验的方法,对客观事物取得数量的认识过程就称为测量,以此为目的的研究理论被称为测量学。

为了使结果具有普遍意义,对测量有如下要求:①用来进行比较的标准必须准确并已得到公认;②进行比较所用的方法和仪器必须已得到验证。

1.1.2 测量结果的表示

测量结果可以是一定的数字、曲线及某种图形,也可能以某种形式的信号出现。不论结果以哪一种形式出现都包含有一定的数值及相应的单位。就是说,测量结果都是有名数,如 0.7 mol/L 、 3.2 MPa 、 $0.005 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等等;而有些结果,如空隙率,看上去无因次,而实际上却是两个体积之比。

另外,由于各种因素的影响,在测量结果中不可避免地存在误差,为了表明所测量结果的可靠程度,必须在结果中注明测量误差的数值或范围。必须指出,误差是在任何情况下都存在的,了解误差对测量者来说是极为重要的。

因此,在表示测量结果时,除了数值外还必须包括单位及误差,它们缺一不可。

1.1.3 测量中的变换

由于电子学的发展,今后的绝大部分待测量都将被转换为电学量来检测。因此,很有必要将待测量经过尽可能少的次数可靠地转变为电信号。

另外,随着科学技术的发展,要求测量结果的精确度越来越高、测量速度越来越快、量程越来越广、数据处理越来越方便。这样,就需要对测量量进行另一层面的变换,以使数据处理能达到以上要求,如 A/D 、 D/A 变换等都属于此类变换。

1.1.4 量具和比较仪

如前所述,测量是一个比较过程,而在一个比较过程中,必须有一个体现测量单位的已知量,这样才能将被测量与已知量进行比较来确定被测量与已知量的倍数关系。因此将体现测量单位的器具称为量具。

如果待测量不能或不方便与已知量直接比较,则需要用专用设备来比较,通常将这些专用



设备称为比较仪。例如用尺度量长度,用量杯度量液体体积都是直接比较,尺与量杯都是量具;而在进行质量的测量时,则需借助于天平等比较仪。

1.1.5 测量装置与系统

在测量中,除了使用量具和比较仪外,广泛使用的是测量装置与测量系统。

测量装置是由若干台测量仪器及辅助设备组成的一个整体。如用光导纤维测定气—固流化床床层空隙度的装置就是由专用光源、光纤探头及积分仪所组成的。这里所说的仪器指一切参与测量工作的设备,如信号发生器、放大器、模拟显示器等等。

测量系统是指那些为实现对多种参数进行综合测定,由若干用于不同目的的测量仪器及有关辅助设备组成的系统。例如用电导法进行气—液—固三相含率及流动状况测量即采用由电导仪、放大器、图示仪、斩波器、计数器以及积分仪所组成的测量系统。

目前,测量已向更大规模、更高精密度的方向发展,往往测量仪器本身已是一个由测量及数据处理部分所组成的系统。

1.1.6 计量学与测量学的关系

一般认为计量学是一门关于测量的基础理论科学。它是一门研究如何保证量值的统一和准确所必需的方法、技术、政策以及专门设备的科学。它主要涉及如下内容:①关于测量及计量的一般理论;②关于测量及计量的方法、技术及专用量具和仪器,各种基准和标准;③关于单位制问题,各物理量的单位及其互换关系;④关于量值的传递,以及保证量值统一所要采用的法规、措施等。以上四项工作是具有法律意义的。

1.1.7 单位与单位制

单位是表征测量结果的重要组成部分,是赖以对两个同类物理量进行比较的基础。可以说,物理量的单位是根据定义而令系数为1的量。

这样,人们就可以依据单位的定义任意地将那些彼此无关地分别确定物理量的单位作为基本单位,再由此派生出各种导出单位,进而可以由它们组成单位制。实际上,各国以及各个地区在以往由于交流的不发达,产生过各种单位制,这在当时是必要的。但是,随着科学的进步,单位制的繁多愈显不便,于是在1960年第十一届国际计量会议上通过了一种统一单位制——国际单位制,代号SI。

在国际单位制中,包含了7个基本单位:米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、摩尔(mol)、坎德拉(cd),用它们分别表达长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量以及发光强度的单位。在国际单位制中,另有两个辅助单位,即表示平面角的“弧度(rad)”以及表示立体角的“球面度(sr)”。

1.1.8 基准与标准

基准是用当代最先进的科学技术和工艺水平,以最高的精确度和稳定性建立起来的、专门用以规定、保持和复现某种物理量计量单位的特殊量具或仪器。

根据基准所复现的量值而制成的标准量具或仪器称为标准。根据要求的不同,标准又可分为若干等级。在测量中,通常使用的是标准,而不轻易使用基准,这是因为基准的准确度与



稳定性要求不允许经常使用的原因。实际上,对于一般的计量来说(尤其是化工测量),使用较低级别的标准就可以满足要求。

1.1.9 测量仪器的标定

一般来说,任何一种仪器都有一定的精确度,其通常在产品说明书中会给出。若是自己设计制造的非标准仪器,依制造的技术水平也有相应的精确度。问题在于,对自制的仪器,其精确度到底有多高;对产品仪器,是否符合其声称的精确度;对符合标准的仪器,在使用一段时间后,是否仍然符合原设计要求。要解决这一类问题,就需要进行一项通常称为“标定”的工作。

标定是用高一等级的仪器来检验低一等级的仪器,最终由基准检定标准。对于检定来说,可以用一高精度的量值,由待检定仪器来测量,以确定其精确度;也可以用一高精度的仪器与待测仪器同条件地测量未知量,通过比较测量结果来确定待检仪器的精确度。

当没有高一级的仪器可供校准时,也可以进行称之为“比对”的校准工作。所谓比对,就是指相同或相近精度的基准、标准或测量仪器,为了比较相互间量值的一致性而进行的一项比较工作。这通常在研制新的基准和标准中使用。

由于目前所使用的大多数仪器都不同程度地使用了电子元件,而这些元件常发生性能的不稳和老化,在使用一段时间后其精确度可能下降,因而有必要经常地对其进行标定,以使测量数据的可靠性得以保持。

注意到标定是与高标准仪器的比较,即使是比对也应是同精度间进行的,因而切忌与未知精确度及精确度较低的仪器进行比较,当无法或无把握进行标定时,应送上一级计量检测机构进行检定。

1.1.10 测量方法

测量方法的分类繁多,这里介绍的是直接测量与间接测量,以及由此发展而成的组合测量。

直接测量是用预先按已知标准量定度的测量仪器对某一未知量值直接进行测量,从而得出未知量的数值。通常用 pH 计测 pH 值,用测温计测温等均属于此类。

间接测量是对几个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后通过该函数关系求出待测未知量。间接测量的例子,如通过直接测量电阻和电压来确定电流($I = \frac{U}{R}$)等。

有时在测量中,使各个未知量以不同的组合形式出现,根据直接测量和间接测量所得的数据,通过解一组联立方程而求出未知量的数值,这就是组合测量。这类例子也很多,如在考虑环境温度对铂电阻阻值的影响时,在 $0 \sim 630.74$ °C 范围内铂的电阻值(R_t)与温度(t)的关系可用下式表达:

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

式中: R_0 ——0 °C 时的电阻值;

A, B ——待定常数。

为了确定 R_0, A, B 值,必须求出三种温度下的 R_t 值,即 R_{t1}, R_{t2}, R_{t3} ,再代入方程联立求解得之。

1.1.11 误差与修正值

先介绍几个测量术语。

真值 A_0 ——在一定的时间及空间条件下,某物理量所体现的真实数值。

实际值 A ——由高一级标准仪器所指示的测量值。

示值 x ——仪器在一定的时间及空间条件下所指示出的测量值。

误差公理——利用任何量具或仪器进行测量时,总存在着误差。

从误差公理可以看出,测量结果不可能准确地等于被测量的真值,即任何自称为无误差的结果都是有其误差限的。

几种误差的定义如下。

①绝对误差

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.1)$$

②示值误差

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

③修正值

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1.3)$$

④实际相对误差

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

⑤示值相对误差

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.5)$$

这里需要提醒的是:某些供能仪器(如信号发生器)的绝对误差定义为

$$\Delta x = A - x \quad (1.2a)$$

相应的修正值

$$C = -\Delta x = x - A \quad (1.3a)$$

在实际中,常用的误差表达形式为相对误差 γ_x 。

对于另一些比较陌生的误差,如满度相对误差、用分贝数表示的相对误差等,这里只给出它们的定义,需用时可查阅有关测量误差的专著。

⑥满度相对误差——用绝对误差 Δx 与仪器的满度值 x_m 之比来表示的相对误差

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.6)$$

对于中心指零仪表,左右对称满度值都是 x_m 时

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{2x_m} \times 100\% \quad (1.6a)$$

对于无零位标度仪表,刻度上、下限分别为 x_m 及 x_M 的表盘有

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{(x_m + x_M)/2} \times 100\% \quad (1.6b)$$

⑦用分贝(dB)表示的相对误差



对电压、电流类电参数有

$$\gamma_{dB} = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \text{dB} \quad (1.7)$$

对功率类电参量有

$$\gamma_{dB} = 10 \lg \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \text{dB} \quad (1.7a)$$

最后再介绍关于允许误差的概念。所谓允许误差是指根据技术条件的要求,规定某一类仪器误差不应超过的最大范围。通常在仪器上或说明书中所给定的误差都是允许误差。关于允许误差,我们应注意两点:①允许误差是指某一类仪器不应超出的误差最大范围,并不是指某一部特定仪器的实际误差;②允许误差是以误差极限的形式给出的。允许误差在表达上可以是绝对误差,也可以是相对误差,甚至是两者的组合。

1.1.12 测量误差及其主要来源

依误差公理可知,误差对于任何测量来说都是存在的,它是测量仪器本身的误差以及测量辅助设备、测量方法、操作环境与技术等误差因素共同作用的结果。在本书中,若不声明,所提到的误差都指测量误差。

主要误差来源于如下几方面。

1. 仪器误差

仪器误差是由于仪器本身电气或机械性能不完善所产生的误差,它主要包括如下几项。

1) 读数误差

读数误差基本上由以下几种误差构成,它们分别是:校准误差、刻度误差、读数分辨率不高所引起的误差、读数调节机构不完善所引起的误差以及量化误差等。分别介绍如下。

(1)校准误差 校准误差通常指仪器出厂时,用标准仪器对指定的校准点进行定标时所产生的误差。

(2)刻度误差 在仪器的批量生产中,同类仪器都采用统一的表盘,但每台仪器的特性又各不相同。因此在仪器的非校准点上就可能产生不同精度的误差,这就是刻度误差的来源。有时,人们也将刻度误差归于校准误差。

(3)读数分辨率不高所引起的误差 仪器的读数分辨率是指仪器能读出被测量的最小变化量。若仪器刻度的分辨率不高就将带来误差。应该指出,分辨率的高低应与仪器的允许误差相适应。尽管读数分辨率太低将增加测量误差,但不适当地提高仪器读数机构的分辨率也是毫无意义的。这主要因为仪器的允许误差与精确度是对应的,若仪器本身不稳定,则其过度精细的读数也是不可信赖的。

(4)读数调节机构不完善所致的误差 对某些机械调节装置(如齿轮调谐结构等),尽管努力提高其精确度但仍然有回差,这种回差所引起的误差就是由于调节机构不完善所引起的。降低这种误差影响的方法通常是采用两次反向调节,再将两次读数值平均后取值。

(5)量化误差 这种误差通常是在将模拟量变换为数字量时引起的,数字式指示仪器及处理机具有这类误差。

2) 噪声所引起的误差

噪声是指由仪器内、外部产生的并影响到仪器所处理的信号的杂音信号。它广泛地产生



于电子元器件的内部热运动、接触不良及电火花等等之中。这种噪声的存在限制了测量灵敏度的提高,也必然出现误差。

3) 稳定误差

前已述及,仪器中的元器件不可避免地会发生老化。除此之外,还有磨损、疲劳、钝化等。这些都会使得仪器的工作点不稳、零点漂移,从而造成读数发生变化。这些都表现在稳定误差上。

4) 动态误差

在进行动态测量时,由于电路中存在过渡过程以及阻尼时间、调节机构的速度有限等,都将形成一个总的滞后或信息损失,这就是动态误差。该问题在根据测量对象选择仪器时需作重点考虑。

仪器误差除上述4种外,还有其他因素,例如在测量装置或系统中,辅助装置以及附件也会造成误差。

2. 使用误差

使用误差即操作误差,是由于对仪器的安装、调节、布置及使用不当,未按仪器说明书中规定的操作程序以及缺乏仪器使用常识而造成的。因而消除此项误差的方法在于严格按技术规程操作及提高实验技巧,并对各种现象提高分析能力。

3. 人身误差及影响误差

人身误差是指由于人的感觉器官或运动器官不完善所致的误差。如在用眼观察、用耳听取以及用手调节测量仪器时都会不同程度地引入此项误差。减弱这项误差的方法是改进测量方法及提高操作技能。

对于由外界温度、湿度、压力、震动、放射线等的影响所造成的误差,统称为影响误差或环境误差。消除这项误差的方法是严格在规定的使用范围内使用。这项误差有时也部分地归入噪声误差之中。

4. 方法误差

方法误差即理论误差,它是由于测量时所使用的理论不完善,所依据的理论不严密,对一些理论尚未掌握清楚,对被测量定义不明确以及对成熟的测量方法进行不适当的化简所致。对那些由于定义不确切、不统一所造成的方法误差有时也称为定义误差。

1.2 误差

1.2.1 误差的性质及其分类

误差的分类可以有各种方法,本书按其性质和特点来分类,通常,这种分类法能够满足化工测量的需要。

1. 系统误差

系统误差简称系差,是指在一定条件下误差的数值保持恒定,或按某种确定的函数规律变化的误差。具体又有恒定系差和变值系差。

1) 恒定系差

恒定系差也称恒差,是指误差的数值在一定条件下保持不变的误差。例如一个 1.450 V



的稳压二极管,经检定其实际值为 1.453 V,则这个误差为恒定系差: $\Delta V = 1.453 - 1.450 = 0.003$ V。

2) 变值系差

变值系差也称变差,是指误差的数值在一定的条件下,按某一确切规律变化的误差。依变化规律可将变差分为以下三种。

(1) 累进性变差 累进性变差是指在整个测量过程中误差的数值在逐渐增加或逐渐减小的误差。例如电池在使用过程中会因放电而使其电动势逐渐下降,从而形成累进性变差。

(2) 周期性变差 周期性变差是指在测量过程中误差的数值发生周期性变化的系统误差。例如在对某物理量进行昼夜连续测量时,昼夜温差的影响基本上是周期性的。

(3) 按复杂规律变化的系差 这种变差的变化规律是很复杂的,有时甚至将这种系差认为是随机误差。例如作为直流电压基准的标准电池,其电动势随环境温度变化的规律十分复杂,最初未能找出其规律,直到前不久才找到其温度误差的经验公式为

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_{20} - E_t \\ &= [39.94(t - 20) + 0.929(t - 20)^2 - 0.0092(t - 20)^3 + 0.00006(t - 20)^4] \times 10^{-6} \text{ V}\end{aligned}$$

由此可见这个规律的复杂性。通常表示这种复杂关系的系差是用曲线、表格及经验公式。

系统误差表明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度,因而又称为系统偏差。在描述系统误差时,有时又用到准确度这个概念。这两者的关系是:系统误差越大则准确度越小,反之亦然。

2. 随机误差

随机误差简称随差,当其服从正态分布时也称偶然误差。这种误差具有随机变量的一切特点,因而决定了它在一定条件下服从统计学规律。

既然随机误差遵从统计学规律,就应该从大量数据的统计中寻找规律。在测量中所接触的随机误差通常很小,为了在测量结果中体现出它的影响,需要使测量灵敏度足够高并排除附加干扰。就是说,测量过程中应尽可能保持各影响量以及测量仪器、方法、人员不变,即保持“等精度测量”的条件。

随机误差与随时间按复杂规律变化的系统误差的不同点在于:再复杂的变差最终也能找出其规律性,终归有规律可循;而随机误差则不然,只有通过大量的观测才能找出其统计规律。

在描述随机误差时,为了表现测量结果的分散性,也常用“精密度”一词。随机误差大则精密度低,精密度高则随机误差小。

若一个测量结果的系差和随差都很小,则说明这个结果既精密又准确,也简称精确。如前面曾数次提到仪器的精确度(亦称精准度)即为此项指标。

3. 粗大误差

粗大误差即差错,也称为巨差或粗差,它是指那些在一定条件下测量结果显著地偏离其实际值时所对应的误差。用统计学的术语来说,这个测量值已不在置信区间之中。粗差的性质可能是系统误差,也可能是随机误差,其本身不构成一类误差。由于粗差严重地歪曲了结果,因此有必要特别加以讨论。

产生粗差的主要原因有以下几种。

(1) 测量方法的不当 粗差实际上是一种绝对值很大的方法误差,具有系统误差的性质。



例如用低输入阻抗的指示仪表(如光线示波器)去直接测量高输出阻抗的信号源电压波形,由于阻抗不匹配,就不能正确地指示数值。

(2)随机因素的影响 这里所指的随机因素产生的粗差,实际是一种出现概率极小而绝对值又很大的随机误差。诸如外界电火花的干扰以及电源跳闸所造成的未为人们所发现的大干扰因素,都可能引起粗差。

(3)操作者的过失 这种误差又称过失误差或疏忽误差。例如测量时读错数据以及未按要求在测量前对仪器进行校准(如用万用表测电阻时)都可能引起这种误差。

在测量及数据处理中,当发现某次测量结果所对应的误差特别大时,应认真判别该误差是否属于粗差。但应注意,不能随意地取舍测量数据,否则可能将测量的真实结果舍去。真正稳妥的方法是加强分析及观察,最终用统计学的方法判断是否应拒绝这个结果。

4. 系差与随差的关系

在通常的测量中,很难严格地将系差与随差确切地区分出来。因而在分析中,一般看这两者谁占主导地位,在处理上再按该类误差加以考虑。另外,由于人们对事物认识的深度及处理手段的不同,有时不得不把一些暂时没有完全掌握规律的系差当作随差来处理。同样,对于某些随机误差,当设法了解了其作用规律后,也可作为系统误差并设法加以修正。

对于如此复杂的误差因素,有时只能给出系统误差可能的取值范围,故近年来开始广泛地采用了“系统不确定度”这一名称。不确定度也可用来表征随机误差的可能范围,将此范围称为随机不确定度。当同时存在系统误差和随机误差时,则用测量的不确定度来表征总的误差范围。

图 1.1 给出了测量误差的总分类,通过它可以了解更多的误差知识。

1.2.2 随机误差

当对某物理量进行多次重复测量时,只要测量仪器灵敏度足够高,就会从测量结果中体现出随机误差的影响。因而在精密测量及计量中,对随机误差的研究有十分重要的意义。

显然,我们不可能详尽无遗地掌握这些随机影响的确切规律,也不可能逐个地排除这些影响。我们的目的不是要研究这些个别的特殊因素,而是要了解它们的总体对测量结果的总效果。因此,只有仔细地设计测量方案,周密地准备测量系统,并应用统计学的方法来处理测量数据,才能削弱该项误差的影响。

对于随机误差所作的统计处理,是在完全排除了系统误差的前提下进行的。所谓完全排除,即认为系统误差不存在,或者已经修正,或者小到可以忽略的程度。

1. 正态分布

通过大量的实践,人们认识到:随机误差的出现基本上是遵从正态分布的。但并非无其他分布,在本书涉及的范围内其他分布极少出现,故不多述及,若读者有兴趣,可查阅有关测量误差及数据处理的专著。

从理论上说,测量误差大多数服从正态分布是概率论中的中心极限定理的一个必然结果。设在一定的条件下对某一个真值为 A_0 的物理量进行 N 次等精度测量,得到一系列示值 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$, 则各个测得值出现的概率密度分布可以由下列正态分布函数来表达

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - A_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1.8)$$