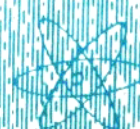
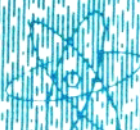


中等专业学校试用教材



非电量电测技术

上册



严锦生 编
夏元复 主审

原子能出版社

中等专业学校试用教材

非电量电测技术

(常规仪表检测技术)

上册

严锦生 编 夏元复 主审
李保祥 审

原子能出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

非电量电测技术 上册:常规仪表检测技术/严锦生编. —北京:原子能出版社,1997.6
中等专业学校试用教材
ISBN 7-5022-1565-X

I. 非… I. 严… III. 非电量测量-专业学校-教材 IV. TM938.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 08604 号

内 容 提 要

全书分上、下两册共 17 章。上册为 1~14 章,介绍各类常用传感器的工作原理、特性、测量电路以及测量信号的放大、处理、显示与记录;下册为 15~17 章,介绍常用核辐射探测器、核辐射测量基本单元电路及核辐射技术在检测中的应用。上册学时为 120 学时,下册学时为 60 学时,总学时为 180 学时。

上册可作为各类中等专业学校电子技术应用专业、检测专业、电气专业和自动化专业的教学用书。下册特别适用于作核工业部门的中等专业学校的教学用书。全书可以作为高等工业学校教师和学生的参考书或专业化培训教材,也可供有关技术人员参考。



本书经核工业教材委员会核物理教材委员会于 1993 年 12 月由夏元复教授主持召开的审稿会审定作为中等专业学校试用教材。

非电量电测技术 上册

(常规仪表检测技术)

严锦生 编

©原子能出版社,1997

责任编辑:袁祖伟

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

、 原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 18.25 字数 451 千字

1997 年 6 月北京第 1 版 1997 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500

定价:14.50 元

前 言

本书是根据中国核工业总公司教材委员会于1990年8月召开的教材编审会议审定的《非电量电测技术》编写提纲编写的。

核工业测量技术领域,除了要进行核辐射探测外,更大量的检测工作则是热工量、机械量及其他非电量的检测。在核工业部门从事检测工作的技术人员往往会涉及大量常规仪表的工作。随着核技术在国民经济各领域的应用日益扩大,从事常规仪表工作的技术人员也会接触到各种同位素仪表。同位素仪表是非电量电测的一个重要分支,在检测技术中显示出了强大的生命力,一些常规仪器不能胜任或难以胜任的检测工作,使用同位素仪表可以得到令人满意的结果。因此,本书不仅介绍了各类常用的传感器,而且还以相当的篇幅介绍了常用的核辐射探测器、核电子学基本单元电路及核辐射技术在检测中的应用。

本书从应用的角度介绍传感器和有关技术。以介绍结构型传感器为主,对物性型传感器也做了一定篇幅的介绍。对传感器的工作原理只做一般性的叙述,力求深入浅出,避免繁杂的数学推导。测量电路部分则做了较详细的分析和叙述。对涉及到正确、合理使用传感器的一些实用性较强的技术环节以及补偿电路也做了较详细的叙述。

全书共17章,分为上、下两册。上册介绍常规传感器的工作原理、特性、测量电路及其应用,测量信号的放大、处理及显示记录;下册介绍常用核辐射探测器、核辐射测量基本单元电路及核辐射技术在检测中的应用。

本书上册可作为中等专业学校电子技术应用专业、检测专业、电气专业和自动化专业的教材及有关专业的参考书,下册特别适用于核工业部门中专学校的教学,亦可作为专业化培训教材。本书各章独立成篇,教学时可根据需要取舍。

本书由南京大学物理系夏元复教授主审,清华大学李保祥副教授审校,核工业总公司264厂官本诚总工程师、263厂李学颜副总工程师、原子能出版社袁祖伟副编审参加了审定工作。审稿人对全书作了仔细的审阅,提出了许多宝贵的意见。本书在编写过程中得到了南京工业学校领导的大力支持,南京工业学校解坤荣、吴敏中高级讲师提供了宝贵的意见和帮助,张永号、高建平、杨标、江春老师在教材的微机录入和初校中做了大量的工作,在此谨致以深切的谢意。

编者在原讲义的基础上综合了多年的教学实践及工作经验编成此书。由于教学经验及水平有限,错误和不当之处在所难免,望各位专家、同行及读者,不吝赐教,编者不胜感谢。

编 者

1993年12月

目 录

绪论	(1)
第一章 非电量电测技术的基本知识	(5)
第一节 测量和误差的概念与定义	(5)
第二节 测量系统的静态特性	(12)
第三节 测量系统的动态特性	(15)
第二章 弹性敏感元件	(23)
第一节 弹性敏感元件的基本特性	(23)
第二节 变换力的弹性敏感元件	(25)
第三节 变换压力的弹性敏感元件	(32)
第三章 电阻应变式传感器	(39)
第一节 电阻应变片	(39)
第二节 应变式传感器	(45)
第三节 电阻应变式传感器测量电路	(48)
第四节 典型电阻应变仪	(63)
第四章 电感式传感器	(71)
第一节 自感传感器	(71)
第二节 差动变压器	(78)
第三节 电感式传感器的应用	(87)
第五章 涡流传感器	(93)
第一节 涡流传感器的工作原理	(93)
第二节 涡流传感器的测量电路	(97)
第三节 涡流传感器的应用	(104)
第六章 电容式传感器	(108)
第一节 电容式传感器的工作原理	(108)
第二节 电容式传感器的静态特性和等效电路	(111)
第三节 电容式传感器的测量电路	(114)
第四节 电容式传感器的应用	(122)
第五节 电容式传感器测量仪器	(126)
第七章 磁电式传感器	(131)
第一节 磁电式传感器的工作原理和结构	(131)
第二节 磁电式传感器的测量电路	(134)
第三节 磁电式传感器的应用	(139)
第八章 压电式传感器	(145)
第一节 压电效应和压电材料	(145)
第二节 压电式传感器	(149)
第三节 压电式传感器的测量电路	(151)

第四节	电荷放大器	(154)
第五节	压电式传感器的应用	(163)
第九章	热电偶传感器	(166)
第一节	热电效应	(166)
第二节	热电偶的种类和结构	(170)
第三节	热电偶的冷端温度补偿及测量误差	(175)
第四节	热电偶的测量电路	(180)
第十章	霍尔传感器	(185)
第一节	霍尔效应与霍尔元件	(185)
第二节	霍尔元件的测量电路及其补偿	(189)
第三节	霍尔传感器的应用	(194)
第十一章	光电传感器	(200)
第一节	光电效应及其器件	(200)
第二节	光电导效应、光生伏特效应及其器件	(206)
第三节	光电转换电路	(215)
第四节	光电传感器的应用	(220)
第十二章	半导体敏感器件	(224)
第一节	半导体湿敏器件	(224)
第二节	半导体气敏器件	(229)
第十三章	信号的放大和处理	(236)
第一节	数据放大器	(236)
第二节	绝对值检测电路	(246)
第三节	峰值保持电路	(250)
第四节	线性化电路	(255)
第十四章	信号的显示与记录	(265)
第一节	笔式记录仪	(265)
第二节	自动平衡式显示与记录仪表	(269)
第三节	磁带记录仪	(275)
第四节	记忆示波器和存储示波器	(279)
参考文献		(284)

绪 论

在科学实验和工农业生产中,人们要测量各种各样的物理量。从电学角度,物理量可分为两大类:一类为电量,如电压、电流等参量;另一类为非电量,如温度、压力、流量、力、力矩、速度、加速度、位移、距离、长度、振动频率和幅度、放射性强度等参量。在科学技术和工程上所要测量的参量大多为非电量。利用电测的方法测量非电量,称为非电量电测技术,它的主要内容是研究如何利用电子学技术正确地测量非电量。

一、非电量电测系统

一个非电量电测仪器(或系统)是由三大部分组成的,即传感器、测量电路部分和显示记录部分,有时还有数据处理部分,如图 0.0.1 所示。

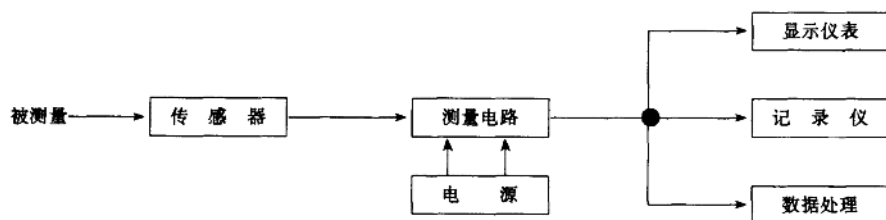


图0.0.1 非电量测量系统

传感器是一个把被测非电量变换为电量的器件。实现非电量和电量之间的变换,这是检测的首要环节,正是因为使用传感器实现了这一变换,人们才得以用电测系统来测定非电量。

传感器是测量系统中的关键性的器件,在系统中占有非常重要的地位。传感器能否精确地、可靠地将被测非电量变换为电量,关系到整个测量系统的精度和可靠性。如果传感器的误差大,即使后面的测量电路和显示电路的精度再高,也不可能获得高精度的测量结果。没有精确可靠的传感器,就没有精确可靠的电测系统。

测量电路的作用是把传感器输出的电信号进行放大和适当的转换,使之变成适于显示和记录的电流、电压信号。例如,在力、压力的测量中常利用传感器将力和压力变换为电参数(电阻、电容、电感)的变化。然而这些电参数的变化是很微小的,也不适于记录和显示,因此必须用电桥电路将电参数的微小变化转换为电桥输出电压的微小变化,并用放大电路将电桥的微弱输出信号放大至适宜显示和记录的幅度。测量电路中有时还设有补偿电路,以对误差进行适当的补偿,提高测量的精度。测量电路的具体结构和特性参数决定于传感器的性能和测量要求。

测量的目的是使人们得到被测量的数值,所以必须要有显示、记录装置,将被测的非电量显示记录下来,以便分析、研究。显示、记录装置的种类和具体结构决定于测量电路的输出和具体的测量要求。最简单的显示方法是表头显示,它根据指针与经过标定的标尺的相对位置来读数。常用的表头有电流表、电压表,其标尺是按被测的非电量(如力、压力)来刻度的,并事先按

标准量进行标定。数字显示是用数字形式来显示读数,实际上是一只专用的数字电压表、数字电流表。表头显示和数字显示只适用于静态量的检测,如果被测量是一个随时间变化的动态量,在测量中不仅要测出被测参数的数值,而且要了解其随时间的变化过程,则必须采用图形显示。常用的图形显示设备有电子电位差计、 x - y 函数记录仪、光线示波器、磁带记录仪等,这些设备将被测量的变化过程以图形的形式予以显示或记录。

在分析非电量测量仪器的结构时,常把测量仪器的传感器部分称为一次仪表,而把测量电路和记录、显示部分合称为二次仪表。

与电量的电测技术相比较,一般说来,非电量的电测技术要复杂得多。电量的电测中,只要将待测的电量放大、变换为适宜显示与记录的电压、电流信号;而非电量的电测中,则多出一个转换环节,必须用传感器将非电量转换成为电量。在使用传感器进行检测时,性能各异的传感器对测量电路有其特殊的要求,在检测的实施过程中,某些实施的环节可能会引入较大的测量误差,测量电路必须予以消除与补偿。这些因素增加了非电量电测系统的技术难度和复杂程度。

二、非电量电测技术的特点及其应用

非电量电测技术是将非电量转换为电量而进行测量的,与其它的测量方法相比较,它具有很多的优点。电测技术的主要优点有:

1) 电子装置的惯性小,反应速度快,有比较宽的频率响应,不仅能测量缓变参量,也能测量快速变化的参量。

2) 电信号易于传输和控制,可以进行远距离自动检测。

3) 测量结果很容易变换为数字信号,便于利用电子计算机对检测结果进行分析和处理。

4) 测量的精确度和灵敏度高,能够较方便地调节灵敏度,具有很宽的量程。

因此,非电量电测技术在科学技术和工程上有着极其广泛的应用。现代化工业生产离不开非电量电测技术。

在现代化的工业生产中,为了保证正常、安全生产,必须对许多参数进行检测和监视,在某些参数达到警戒值时,还必须发出报警信号和控制信号,以便及时地采取安全措施。为了保证高效率地生产,必须对某些工艺参数予以控制,而要实现控制,首先就必须进行检测,然后根据检测结果及时地发出控制信号,使生产始终在最合理、最经济的参数下进行,以获得巨大的经济效益。为了保证产品的质量,使其达到规定的要求,在生产过程中必须严格检测其工艺参数,产成品质量更必须严格检测。

随着核技术的发展,核辐射技术在农学、医学、矿山地质和检测中的应用正在日益扩大。许多新型的同位素仪表,如核子秤、 α 感烟火灾报警器、中子水分计、中子测井仪等,获得了日益广泛的应用,同位素仪表显示了其独特的优越性和强大的生命力。

非电量电测技术在科学研究、工农业生产、医疗卫生、国防、环境监测等领域有着极其广泛的应用,随着人民生活水平的提高,非电量电测技术正逐步进入人们日常生活的领域。

三、非电量电测技术的发展趋势

非电量电测技术紧密地伴随着现代科学技术的发展而发展。一方面,材料科学的发展使许多新型的物性型传感器不断出现,一些难于转换成电量的非电量也能用电测的方法来测量。近

年来,在生物学、医学方面应用的生物传感器不断地被研制成功,它可将各种生化、生理信息转换成电量。另一方面,集成电路和微处理机的发展使二次仪表部分产生了重大的变革,整个测量系统趋向于集成化、智能化,测量系统的可靠性、稳定性及测量的精度也在不断地改善与提高。与此同时,高精度、高自动化的生产也对检测技术提出了更高的要求,促使人们研制出更新的、更完善的检测技术和测量系统。总的说来,非电量电测技术的发展趋势有以下几个方面:

1)高可靠性、高稳定性、高精度 提高测量系统的可靠性、稳定性和精度,既是一个不断研究的老问题,也是有待探索的新趋向。错误的检测会给生产带来重大的损失,高质量的仪器仪表才能保证正常的、高效率的生产。现代化的生产对仪器仪表的可靠性、稳定性、精度提出了越来越高的要求。仪器仪表要在原有的基础上不断提高其技术性能指标。

2)集成化、数字化、智能化 随着半导体集成技术的发展,将传感器和测量电路合为一体,制成混合集成电路器件,不但可以提高器件的抗干扰能力,而且可以大大减小整个检测装置的体积,有利于提高性能和降低成本。目前国外已经研制出这种新型的元件。

采用数字式传感器直接输出数字量,可以省掉模-数转换环节,便于和计算机衔接。

采用微处理器和单片微型计算机的检测系统,可以由计算机进行测量结果和误差计算,可以进行温度补偿、非线性补偿,可以自调零、自校准、自选量程、自动测试,从而实现仪器的智能化。智能化的检测系统只要求传感器有好的重复性和稳定性,而仪器性能的改善及信号的处理全部由微处理机来完成。

3)新型传感器、新领域、新的检测方法 在检测技术的开发中,需要测量极端参数值(超高压、超高温、超低温、微差压、大吨位)和特种参数(心电流、脑电波、嗅觉、味觉、视觉)等,这就促使人们探讨新的测量原理和新的检测方法,研制新型的传感器。生命科学的研究促成了各种各样的生物传感器的开发,仿生传感器也获得了迅速发展,并在工业上开始初步应用。

有人说“征服了传感器,就几乎等于征服了科学技术”,由此可见,传感器技术在信息社会的重要性。非电量电测技术正以其强大的生命力迅速地发展。

四、本课程的要求和学习方法

非电量电测技术是一门涉及学科较多的交叉性学科,直接与本课程有关的基础课程有数学、物理学、工程力学、电子学、电工学等,尤其是与物理学、电子学的关系更为密切。本课程介绍的传感器的原理,绝大部分是基于各种物理现象和物理效应,而测量电路又以模拟电路、数字电路为基础,测量电路部分可以看作是电子技术课程的应用、综合和延伸。

通过本课程的学习,要求学生能了解常规传感器的工作原理和特性,在工程检测中能正确地、合理地选择和使用传感器;较深入地掌握信号的获得和变换技术,熟悉基本测量电路(电桥电路、数据放大器、电荷放大器等)的工作原理、分析计算方法;了解信息的显示、记录技术;掌握几种较典型的非电量测量系统。核辐射在检测中的应用部分,要求学生了解常用的核辐射探测器的工作原理和特性,较深入地掌握核电子学基本电路的基础知识,对同位素仪表有所了解和认识。学生应有一定的实验和调试技能。

学习本课程时,必须掌握正确的学习方法。

本课程虽然不要求掌握设计传感器的方法,只要求正确地选择和使用传感器,但了解传感器的工作原理和特性是十分重要的。只有较深入掌握这部分知识,才能正确地选择和使用传感器,才能明确传感器对测量电路的要求。

本课程是以传感器为主线编写的,传感器各章彼此独立。由于传感器的工作原理各异,对测量电路的要求也不一样,学习时要注意到各类传感器所配用的测量电路的特点,同时注意对各种测量电路予以纵向、横向的比较。例如在学习参数型传感器时,电桥电路作为基本测量电路,必须注意电阻式、电容式、电感式传感器所配用的电桥电路的特点和异同点。

“非电量电测技术”是一门应用型学科,有很强的实践性,在检测的实施过程中,有些因素和实施环节会给测量带来较大的误差,有的甚至于关系到能否进行有意义的测量。例如,电容式传感器使用中如何克服电缆分布电容的影响,霍尔传感器的不等位电势和温度的补偿,应变片的温度补偿,等等,对于这些问题,测量电路中都采取了一定的补偿技术和其他技术措施予以克服。深入了解和掌握这些实用性很强的补偿技术是十分重要的,一旦传感器选定后,这些实用性技术往往是合理使用传感器的关键。

第一章 非电量电测技术的基本知识

第一节 测量和误差的概念与定义

一、测量的基本概念

测量是人们借助于专门的仪器和设备,通过物理测试定量认识客观事物的过程。测量是获得客观事物量值的唯一手段,它将被测量与同性质的标准量通过一定的技术手段和方法进行比较,并取得被测量对标准量的比值。测量过程一般都包括比较、示差、平衡和读数四个过程。

为了便于进行被测量与标准量的比较并获得更精确的被测量对标准量的比值,必须采取一定的技术手段和方法,将被测量和标准量进行适当的变换。

标准量是计量部门通过量值的测量而获得的高精度的量,被测量只有通过标准量的比较才能测量出它的量值。但是被测量与标准量能直接比较的场合是不多的,往往需要将标准量和被测量都变换为某一中间量,以便进行比较。将标准量变换为某一中间量,称之为测量仪器或系统的标定,不经标定的仪器或系统测量出来的量值没有任何意义。例如用指针式仪表测量某物理量时,被测量被变换成指针的角位移量,而标准量被变换成仪表表盘上的刻度,即变成表盘刻度上的角位移量,这时即可很方便地进行二者之间的比较。

为了提高测量的精度,有时必须把被测量和标准量变换为便于进行高精度测量的中间量。例如,用普通电压表测电压时,难以区分电压值的 $1/100$ 和 $1/1000$ 的差异。若把电压转换为频率量,频率的量测范围很宽,可从 $n \times 10\text{Hz} \sim n \times 10\text{MHz}$,最高频率和最低频率相差 $10^5 \sim 10^6$ 倍,要区分频率值的 $1/100$ 和 $1/1000$ 并不困难。因此,适当的变换可以提高测量的精度。

在非电量电测技术中,变换更有重要的意义。首先必须通过传感器将被测量变换为电量,再由检测电路将电量变换为某种便于比较的中间量,而标准量亦已被转换为同一中间量,非电量电测的主要课题就是怎样利用电子学技术去实现被测量和标准量与中间量的变换。

二、误差和误差的分类

在任何测试中,无论采用的测试方法多么完善,测试仪器和设备多么精确,都不可避免地存在误差。因为在测试中进行各种变换时,由于设备,环境等多种因素的限制,不可能完全复现被测量的值。被测量的真值是指在一定的条件下某被测量所体现的真实的数值,这一真实的数值客观上是存在的,但人们永远不可能测到它,测量到的只是真值的近似值。只有将这些含有误差的测量值进行数学处理,才能求得被测量的最佳逼近值,并估计其精确的程度。

为了数学处理和研究的方便,在误差处理中,通常将误差按各种形式分类。

1. 绝对误差和相对误差

(1) 绝对误差

某被测量的测量值 x 与被测量的真值 A_0 之差 Δx ,称为测量误差(又叫真误差),即

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.1.1)$$

真值 A_0 实际上是测不到的, 因此, 常用高一级的标准仪表所测得的值或多次测量测得的平均值 x_0 来代替真值。 x_0 可视为约定真值, 被测量值 x 与约定真值 x_0 之间的误差 Δx 为绝对误差, 即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1.2)$$

绝对误差 Δx 可能是正值, 也可能是负值, 约定真值 x_0 为

$$x_0 = x - \Delta x \quad (1.1.3)$$

绝对误差 Δx 的大小表示被测量值偏离真值的程度, 表明了测试的精确度。绝对误差愈大, 则测试的精度愈低, 反之, 精度愈高。要提高测试的精确度, 必须采取有效措施来减小绝对误差。

(2) 相对误差

绝对误差只能用以判断同样量值的被测量的测量精度, 对于不同量值的被测量, 则难于判断其测量精度。例如, 第一次用一种仪表测量 100A 的电流, 约对误差为 1A; 第二次用另一种仪表测量, 同样也是 100A 的电流, 绝对误差为 0.1A。显然第二次测量的精度比第一次的精度高。但用后一种仪表测量 10A 的电流, 若绝对误差 Δx 为 0.1A, 这时用哪种仪表测量的精度高, 仅用绝对误差 Δx 则难以说明。为了表示和比较不同大小量的测量结果的精确程度, 应采用相对误差来表示。

相对误差可分为下列几种:

实际相对误差 绝对误差 Δx 与被测量约定真值的百分比

$$\delta_A = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.1.4)$$

示值相对误差 绝对误差 Δx 与仪器示值 x 的百分比

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.1.5)$$

满度相对误差 绝对误差 Δx 与仪器满度值 x_m 的百分比

$$\delta_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.1.6)$$

实际相对误差和示值相对误差不能用来衡量不同仪表的精度, 因同一台仪表在整个测量范围内的相对误差不是定值。随着被测量的减小, 相对误差在增大, 当被测量接近量值的起始零点时, 相对误差趋于无穷大。测量最大值时的满度相对误差可以用来表征仪表的精度, 电工仪表的精度等级就是据此划分的。若其满度相对误差为 0.1%, 则其精度等级为 0.1 级。用满量程为 50V 的 0.1 级的电压表测量 5V 的电压, 绝对误差不超过 $\pm 0.05V$, 相对误差不超过 1%, 用满量程为 5V 的 0.5 级电压表测量 5V 的电压, 绝对误差不超过 $\pm 0.025V$, 相对误差则不超过 0.5%。

为了全面衡量测量精度, 常用实际相对误差和满度相对误差来综合表示测量结果的准确度。

2. 系统误差和随机误差

(1) 系统误差

系统误差是不随时间变化的、定值的或与某些参数成函数关系的、有规律的误差。某种测试方法和某种测试装置的系统误差, 一般在测试前通过对测试方法和测试装置的分析即可发

现,可以采取技术措施予以消除,或在测量结果中予以校正。例如可用修正值消除刻度误差;调好仪器零点可消除零位误差;磁电式传感器永久磁铁气隙中的磁感应强度随温度变化,从而出现与温度有关的系统误差,可用磁分流器的办法进行温度误差的校正;应变片电阻随温度变化,可用加温度补偿片的办法进行补偿;采用驱动电缆电路可以补偿电容传感器测量系统中分布电容引起的误差。

工具误差和方法误差都属系统误差。工具误差是由于测量系统中各个环节的不完善而产生的误差;方法误差是由于测量方法不完善或理论上的缺陷所引起的误差。

减小系统误差可从每一环节的元器件带来的系统误差入手,但设计者的任务不应是全部选用高质量的元器件,重要的是合理的设计和正确地选择元器件。设计和使用传感器和仪表时也应避免由于原理和方法上的不完善而带来的系统误差。安装调整也是很重要的,即使一台设计良好的仪器也会因安装调整不当而带来系统误差。

(2)随机误差

随机误差是按统计规律变化的误差。随机误差又称为偶然误差,是由一系列的偶然因素引起的不易控制的测量误差。在测试过程中,随机误差是难以避免的。例如,在相同的条件下多次重复测量同一物理量时,在已经消除了引起系统误差的因素之后,其测量结果也是各不相同的,仍然存在误差。这是由于许多互不相关的因素综合作用而引起各因素微量变化的结果。就每次测量误差的个体而言,随机误差出现是无规律的,但多次测量后,测量结果的总体符合统计规律。

测试过程中外界条件的瞬间变化如温度、湿度的变化、空气的振动和电压波动等所引起的误差均属随机误差。

随机误差的大小反映了数据的分散程度,它决定测试数据的精密度,而系统误差则决定了测试结果的准确度。随机误差和系统误差的综合决定测试结果的不确定度。不确定度、精密度、准确度三者的概念与定义是不同的,这可用图 1.1.1 来说明。既精密又准确的测量才是高精度的测量。

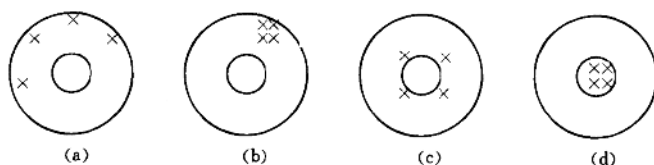


图1.1.1 准确度与精密度的区别

- (a)低准确度,低精密度;(b)低准确度,高精密度;
(c)高准确度;低精密度;(d)高准确度;高精密度。

三、误差的处理

系统误差的处理方法是对测量结果进行校正,随机误差的处理方法是按统计规律进行误差的计算。

系统误差和随机误差虽然是两类性质不同的误差,但它们总是同时存在并对测量结果产生影响,实际上很难把它们严格区分开来,有时不得不把没有完全掌握的、分析起来过于复杂

的系统误差当作随机误差来处理,因此在进行误差处理时可按下列方式进行:对于有明显规律的系统误差,可从误差中予以清除,剩余下来的误差纯属随机误差,按随机误差处理;系统误差可认为纯属随机误差的,即可按随机误差处理;系统误差的规律不清楚,误差中难于区分哪部分是系统误差,哪部分是随机误差的,则按随机误差处理。

多次重复测量某一被测量得一系列数据,或对记录曲线整理出一系列数据,称为测量列,若测量列的数据已清除了系统误差,仅含随机误差,则经过统计处理可得到被测量真值的可能存在的范围。

根据随机误差特性和最小二乘法原理,可以证明,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 可看作是被测量的真值。算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1.1.7)$$

式中: x_i 为测量列中的各次测得的数据;

n 为测量次数。

一般测量次数为有限值,算术平均值 $\bar{x}$ 的均方根误差为

$$\delta = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.1.8)$$

其中 σ 称为均方根误差,又称为标准误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n-1}} \quad (1.1.9)$$

式中 Δx_i 为剩余误差,即每次测量值与算术平均值的差值,剩余误差 Δx_i 为

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (1.1.10)$$

通过测量列计算出算术平均值 $\bar{x}$ 和算术平均值 $\bar{x}$ 的均方根误差 δ ,即可求出被测量真值的范围为

$$A = \bar{x} \pm \Delta x \quad (1.1.11)$$

Δx 为算术平均值与真值之间的绝对误差,真值 A 的数值也不是必然在 $\bar{x} + \Delta x \sim \bar{x} - \Delta x$ 之间,也有可能在此区间之外, A 的数值在 $\bar{x} + \Delta x \sim \bar{x} - \Delta x$ 区间内的概率为:当 $\Delta x = 3\delta$ 时,概率为 99.7%;当 $\Delta x = 2\delta$ 时,概率为 95%;当 $\Delta x = 1\delta$ 时,概率为 68.3%;因此,可能性最大的绝对误差 Δx 为 3δ 。

均方根误差的 3 倍称为最大误差 Δ_{xm} ,即误差的极限值,最大误差 Δ_{xm} 为

$$\Delta_{xm} = 3\sigma \quad (1.1.12)$$

应用统计处理可以减少随机误差的影响,得到比较正确的测量结果,但不能消除系统误差。

在测量中,有时会出现粗大误差,亦称过失误差,它是由于某种过失和失误所引起的明显与事实不符的误差。含有粗大误差的数据为非正常条件下得到的数据,此数据应从测量列中予以清除,然后,再对此测量列重新进行误差处理。

[例]对某电压测量 15 次,获得数据(单位 V)如下:

10.36	10.34	10.32	10.34	10.35
10.33	10.35	10.35	10.33	10.34
10.35	10.34	10.34	10.48	10.35

试对此测量列进行误差处理。

[解]首先求出测量列的算术平均值:

$$\bar{x}=10.351(\text{V})$$

由此可求出剩余误差 Δx_i 和均方根误差 σ :

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{0.019175}{14}}=0.037$$

最大误差 Δx_m 应为

$$\Delta x_m=3\sigma=0.111$$

序号	测量值 (V)	含异常值的计算		剔除异常值的计算	
		$\Delta x'_i(\text{V})$	$\Delta x_i'^2$	$\Delta x_i(\text{V})$	Δx_i^2
1	10.36	+0.009	0.000081	+0.018	0.000324
2	10.33	-0.021	0.000441	+0.012	0.000144
3	10.35	-0.001	0.000001	+0.008	0.000064
4	10.34	-0.011	0.000121	+0.002	0.000004
5	10.35	-0.001	0.000001	+0.008	0.000064
6	10.34	-0.011	0.000121	+0.002	0.000004
7	10.32	-0.031	0.000961	+0.022	0.000484
8	10.35	-0.001	0.000001	+0.008	0.000064
9	10.34	-0.011	0.000121	+0.002	0.000004
10	10.34	-0.011	0.000121	+0.002	0.000004
11	10.33	-0.021	0.000441	+0.012	0.000144
12	10.48	+0.129	0.016641	—	—
13	10.35	-0.001	0.000001	+0.008	0.000064
14	10.34	-0.011	0.000121	+0.002	0.000004
15	10.35	-0.001	0.000001	+0.008	0.000064
		$\sum \Delta x_i'^2=0.019175$		$\sum \Delta x_i^2=0.001436$	

由此看出第12次测量的数据的剩余误差+0.129大于 3σ ,此误差为粗大误差,此数据应予剔除,此数据剔除后重新计算的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x}=10.324(\text{V})$$

重新计算的剩余误差 Δx 如表所示,均方根误差 σ 为

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{0.01436}{13}}=0.011$$

算术平均值的均方根误差 δ 为

$$\delta=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}=0.003(\text{V})$$

被测电压的最大可能的真值为

$$A = \bar{x} \pm 3\delta = 10.342 \pm 0.009(\text{V})$$

也就是说被测电压的真值有 99.7% 的可能性在 10.351V 至 10.333V 之间。而被测电压的极限值 A_m 为

$$A_m = \bar{x} \pm \Delta x_m = \bar{x} \pm 3\sigma = 10.342 \pm 0.033(\text{V})$$

也就是说被测电压的真值必然在 10.375V 至 10.309V 之间。

四、间接测量的误差

在非电量电测中,被测量是用间接测量的方法测得的,即直接测量被测量转换成的电量,再通过非电量与电量之间的函数关系,求出被测非电量。既然直接测量的电量存在着误差,那么由直接测量的电量而计算出来的被测非电量也必然存在误差。

由微分理论可求出误差的传递规律,由直接测量的误差计算出间接测量的误差。下面给出几种简单函数关系的标准误差(均为根误差)的计算公式。

1. 和与差的标准误差

若 $y = x_1 \pm x_2$, 则

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2} \quad (1.1.12')$$

式中 $\sigma_y, \sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}$ 分别为 y, x_1, x_2 的标准误差。

2. 乘积的标准误差

若 $y = c \cdot x_1 \cdot x_2$ (其中 c 为常数), 则

$$\sigma_y = c \sqrt{\sigma_{x_2}^2 x_1^2 + \sigma_{x_1}^2 x_2^2} \quad (1.1.13)$$

3. 商的标准误差

若 $y = c \frac{x_1}{x_2}$ (其中 c 为常数), 则

$$\sigma_y = \frac{c}{x_2} \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \frac{x_1^2}{x_2^2} \sigma_{x_2}^2} \quad (1.1.14)$$

4. 指数或方根的标准误差

若 $y = b + cx^n$ (其中 b, c, n 为常数) 则

$$\sigma_y = ncx^{n-1} \sigma_x \quad (1.1.15)$$

5. 对数的标准误差

若 $y = c + n \cdot \ln x$ (其中 c, n 为常数), 则

$$\sigma_y = \frac{n}{x} \sigma_x \quad (1.1.16)$$

五、有效数字

在表示和计算测试结果时,记录下来的数字应当包括全部有用的数字,同时又应当去掉并不反映测试数据的数字,只保留有意义的位数。实验数据的记录和运算应当遵循数的修约规则。

一个数据,从左边第一个非零数字起至右边含有误差的一位为止,中间的所有的数码均为有效数字。测量结果为被测量真值的近似值,有效数字的多少决定了这个近似值的准确度,因

此在记录数据和进行运算时应严格遵守数的修约规则。

当使用不同的仪表来测量同一电压值时,若测量结果分别为 0.0010V 和 0.00100V,其意义显然是不一样的,0.0010 的有效数字为 2 位,0.00100 的有效数字为 3 位,显然后者的精确度比前者高。此数据中,前面的 3 个零不计为有效数字,后面的零计为有效数字,因最后一个零是含有误差的一位。有时亦会出现数据后面的零不计为有效数字的情况,如用千伏表测量电压时读得数据为 3.5kV,有效数字为 2 位,若计为 3500V,则后面的两个零不作为有效数字。为避免混淆,通常将数据中后面不作为有效数字的零表示为 10 的幂的形式,上述数字即可表示为 $3.5 \times 10^3 \text{V}$ 。数据中前面的数字零不作为有效数字,这些零可表示为 10 的幂的形式,如 $3.5 \mu\text{V}$ 可写成 0.0000035V ,前面的 6 个零不是有效数字,可写成 $3.5 \times 10^{-6}\text{V}$ 。数据的前面或后面不作为有效数字的零是因单位变更而出现的,故不能作为有效数字。

对测量结果中多余的有效数字,在进行数据处理时应四舍五入,但与通常的四舍五入有所不同。这时的四舍五入规则为:若保留 N 个有效数字,当第 $N+1$ 位数字大于 5 时,则入;小于 5 时,则舍;若第 $N+1$ 位数字恰好等于 5,如 5 之后还有数字则入,5 之后无数字或为零时,若第 N 位为奇数则入,第 N 位为偶数则舍。

[例]若要求把有效数字保留到小数点后二位下列数据四舍五入前后的关系如下:

原始数据	修约数
53.3362	52.34
52.3341	52.33
52.3351	52.34
52.3350	52.34
52.3250	52.32

有效数字运算规则如下:

- 1) 用有效数字记录测量结果时,只保留一位欠准数字(估计数字)。
- 2) 有效数字的位数确定后,后续的数字按上述的四舍五入的规则舍弃。
- 3) 加减运算中,参与运算的各数所保留的小数点后的位数,应与各数中小数点后位数最少的相同,运算时,小数点后位数较多的数字可保留比小数位数最少的数据只多一位小数,计算结果应保留的小数位数要与参与运算的各数中小数位数最少者的位数相同。

如 21.0255, 21.0332, 21.32, 23.4565 相加应为

$$\begin{array}{r} 21.026 \\ 21.033 \\ 21.32 \\ + 23.456 \\ \hline 86.83 \end{array}$$

- 4) 乘除运算中,应把有效数字较多的数据作四舍五入处理,只保留比有效数字少的数据多一位的有效数字,运算结果的有效数字位数与有效数字位数最小的数据相同。如

$$3.2565 \times 3.2466 \times 0.0231 \text{ 应为 } 3.256 \times 3.247 \times 0.0231 = 0.244$$

- 5) 乘方及开方运算中,运算结果应比原数据多保留一位有效数字,如