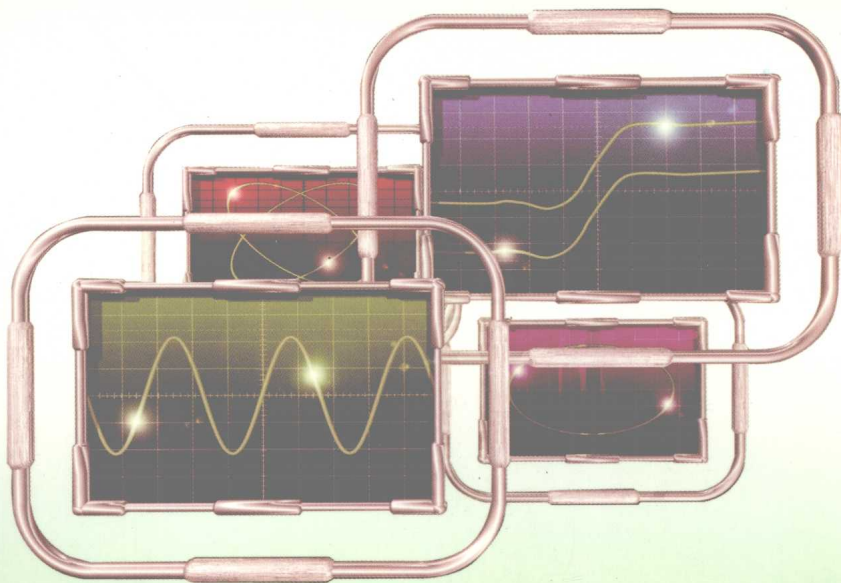


高等职业教育教材

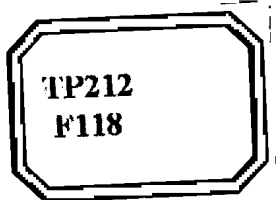
传感器与检测技术应用

CHUANGANQI YU JIANCEJISHUYINGYONG

■ 范晶彦 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等职业教育教材

传感器与检测技术应用

主 编 范晶彦
副主编 柏劲松 张建军 诸 刚
参 编 杨学坤 李雪梅
主 审 于 京

机械工业出版社

本书主要讲述检测技术的基础知识、传感器原理与应用。书中介绍了电阻、电感、电容、光电等多种传感器的工作原理、基本结构、典型特性及应用方法,并给出了典型的应用示例;介绍了电测仪表的原理、特性参数、使用方法;讲述了电路参数的测量原理与测量方法;介绍了数据处理、误差分析以及检测技术的综合应用。

本书共分17章,主要章节后面都附有习题或思考题。结合一些主要章节的内容给出10个实验应用。

本书内容介绍由浅入深,点面结合,并应用实验设备将微机系统和工程实测相结合,有较强的实践性和综合性。

本书可以作为高等职业教育机电一体化技术类、电子信息类、智能建筑类、汽车电器类、自动控制类等专业的教材,也可供生产技术管理人员及其他工程技术人员参考和自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术应用 / 范晶彦主编. —北京:机械工业出版社,
2005.8

高等职业教育教材

ISBN 7-111-17244-2

I. 传… II. 范… III. 传感器 - 高等学校:技术学校 - 教材 IV.
TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 095037 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:曲彩云 责任印制:侯新民

廊坊市长虹印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年8月第1版第1次印刷 2006年11月第1版第2次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 14.5 印张 · 349 千字

定价:24.00 元

前 言

高等职业教育的目标是培养能胜任专业技术岗位的技能型人才。随着科技的飞速发展,尤其是电子技术、计算机技术、自动控制技术的发展,使检测控制系统中的传感器技术和检测技术手段日新月异,日趋数字化、集成化、智能化。高等职业的教材在教学过程中起到了非常重要的工作,从整体上来看,高等职业缺乏实用的融合性教材,为培养注重技能的职业教育带来许多不便。

经过调查了解,在目前国内教材市场上,没有一本教材是将所学专业知、实践技能、与他人合作能力、创新能力等综合起来一起讲述的。

国内绝大部分高等院校和高职院校都开设了传感器技术或检测技术课程,实验室有不同的传感器实验设备。经调研发现将传感器实验设备与工程实例相结合作为一个组织教学活动,并应用实验设备、微机系统与教学活动相结合来开设一门多学科知识综合应用课程的工作尚少人问津,也无相应的教材。

在实际的教学实践活动中我们发现,利用实验室的实验设备、工程实例进行多学科知识综合应用的教学,可以起到非常好的教学效果。因此我们将多年的教学讲义进行整理作为正式教材出版,以供同行们参考。

本教材针对高等职业教育,充分体现教与学相结合的要求,具有以下特点:

1. 实用性 知识内容包括各种传感器的工程实例、工作原理、分类、特性、实际应用和工程技术中所要求解决的具体问题。分别由浅入深讲述电阻、电感、电容等十余种传感器;

2. 新颖性 知识内容、技术方法和工艺水平在当前处于先进水平,最大限度地贴近实用,给学生一个真实的理论联系实际的学习环境。在原理与特性分析中,采用教师讲解与学生讨论活动、实践活动互动的方式,充分调动学生的学习热情、积极性和主动性。讲解每一种传感器都引导学生解决一个或几个工程中的具体问题,让学生在学校的学习中就体会到作为一个工程技术人员是如何运用所学的知识与技能来解决实际问题的;

3. 职业性 体现高等职业教育注重技能培养的特色,以“必需”和“够用”为前提,删除不必要的理论叙述,重视对学生各种实际能力培养,尽量给学生留下更多的自主思考空间,只讲述最本质、最基本的知识、方法,然后由学生在学习活动中举一反三,独立解决实际问题;

4. 主动性 在教材中,只要涉及到的知识适合于组织以学生为主的教学活动,就将内容安排为适当的教学活动,让学生在主动参与的自主思考中学习,从而由被动学习转为主动学习;

5. 互动性 教材中提出需要学生通过认真思考、相互合作、相互讨论能够解决的实际问题,教师只是引导与指导,培养学生与他人交往的能力以及学生之间的团结合作能力。充分体现学生与教师、学生与学生之间的教学互动活动;

6. 综合性 本教材从易于学习、利于提高的角度出发,以各种传感器的应用为主线,以每一个实际应用模型为基础,将教材分为几个主要的课题进行叙述(一章就是一个课题);由于每一个课题都可各自独立成为一个完整的系统,因此教材中的每个课题所讲述的知识结构都是完整的、综合的,各个课题中的教学活动是按照由易到难的层次安排的。以这样的结构体系进行叙述,始终贯穿理论与实际紧密结合的方法组织教学活动,使学生由易到难逐步学习,可以大大提高学生的学习兴趣,达到更好的教学效果。

本书由北京电子科技职业学院范晶彦担任主编,包头轻工职业技术学院柏劲松、张建军、北京农业职业技术学院清河分院诸刚担任副主编,北京农业职业技术学院清河分院杨学坤北京电子科技职业学院李雪梅参加编写,北京电子科技职业学院于京担任主审。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,殷切希望广大读者提出宝贵意见。

编者

2005年8月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 传感器与检测技术的 基本理论	4
第一节 测量	4
第二节 测量误差	5
思考与习题	13
第二章 传感器的基本特性	15
第一节 传感器的基本概念	15
第二节 传感器的特性	16
思考与习题	19
第三章 电测量指示仪表	21
第一节 电测量指示仪表的知识	21
第二节 磁电系仪表	22
第三节 电磁系仪表	27
第四节 电动系仪表	28
第五节 感应系仪表	29
第六节 电测量指示仪表	31
思考与习题	32
第四章 电路参数的测量	33
第一节 电流、电压的测量	33
第二节 有功功率的测量	34
第三节 无功功率的测量	37
第四节 电能的测量	39
第五节 电阻的测量	41
第六节 阻抗的测量	43
第七节 接地电阻的测量	46
第八节 电容器的测量	48
第九节 频率的测量	49
第十节 转速的测量	49
第十一节 功率因数的测量	50
第十二节 相序的测量	51
第十三节 磁通与磁场强度的测量	51
思考与习题	53
第五章 电阻传感器	54
第一节 电位器传感器	54
第二节 电阻应变传感器	56
第三节 热电阻传感器	61
第四节 气敏电阻传感器	63
第五节 湿敏电阻传感器	64
思考与习题	65
第六章 电感传感器	66
第一节 自感传感器	66
第二节 差动变压器传感器	71
第三节 电感传感器的应用	73
思考与习题	77
第七章 电涡流传感器	78
第一节 电涡流传感器的工作原理	78
第二节 电涡流传感器的测量转换电路	81
第三节 电涡流传感器的应用	84
思考与习题	87
第八章 电容传感器	89
第一节 交流电路中的电容元件	89
第二节 电容传感器的工作原理	90
第三节 电容传感器的种类	90
第四节 电容传感器的等效电路	94
第五节 电容传感器的测量转换电路	95
第六节 电容传感器的应用	98
思考与习题	101
第九章 霍尔传感器	102
第一节 霍尔效应	102
第二节 霍尔元件	103
第三节 霍尔传感器	106
思考与习题	111
第十章 压电传感器	113
第一节 压电效应	113
第二节 压电传感器的工作原理	115
第三节 压电传感器的应用	117
思考与习题	120
第十一章 磁电传感器	122
第一节 磁电传感器的工作原理	122
第二节 磁电传感器的结构	124

第三节	磁电传感器的基本特性	125	第二节	磁编码器	177
第四节	磁电传感器的测量转换电路	126	第三节	感应同步器	178
第五节	磁电传感器的应用	128	第四节	光栅传感器	178
第十二章	温度传感器	131	第五节	磁栅传感器	182
第一节	温度与温标	131	第六节	容栅传感器	182
第二节	测温方法与测温仪器的分类	131	第七节	机器人传感器	182
第三节	热电偶温度传感器	132	思考与习题		183
第四节	晶体管温度传感器	141	第十七章	检测技术的综合应用	185
思考与习题		142	第一节	检测系统的抗干扰技术	185
第十三章	超声波传感器	144	第二节	现代检测系统	188
第一节	超声波的物理基础	144	第三节	检测控制系统综合应用实例	189
第二节	超声波的传播方式与波形	144	实验一	数字显示仪表	193
第三节	超声波的特性	145	实验二	电阻传感器	195
第四节	超声波传感器的工作原理	147	实验三	电感传感器	198
第五节	超声波传感器的应用	149	实验四	电涡流传感器	201
思考与习题		153	实验五	电容传感器	205
第十四章	微波传感器	155	实验六	霍尔传感器	208
第一节	微波的基本概念	155	实验七	压电传感器	211
第二节	微波传感器	155	实验八	磁电传感器	213
第十五章	光电传感器	158	实验九	温度传感器	217
第一节	光电效应与光电器件	158	实验十	光纤传感器	220
第二节	光电传感器	168	附录	镍铬—镍硅 K 型热电偶分度表	
第三节	光纤传感器	171	(自由端为 0℃)		223
思考与习题		175	参考文献		224
第十六章	新型传感器	176			
第一节	数字式位置传感器	176			

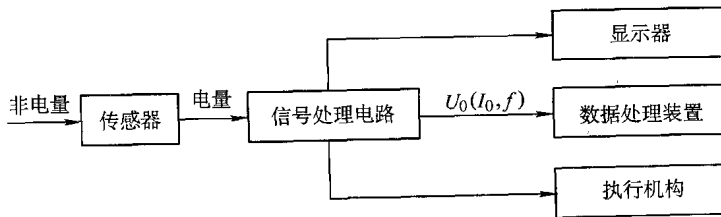
绪 论

传感器与检测技术很早就渗透到人类的生产活动、科学实验和日常生活中。在工业生产领域内，生产过程中产品的检测、产品质量的控制、提高生产的经济效益、生产过程的自动化等都广泛地应用了检测技术。在人们的日常生活中，也越来越离不开检测技术。

一、课程研究的内容

1. 电工仪器与电工仪表；
2. 误差理论与数据处理；
3. 电路参数的测量方法；
4. 各种传感器的工作原理、分类、特性、应用；
5. 检测技术的综合应用。

检测技术是利用各种物理、化学效应，选择合适的方法与装置，将生产、科研生活等各方面的有关信息，通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。



自动检测系统原理框图

传感器是指一个能将非电量转换成电量的器件。也就是一种以测量为目的，以一定的精度把被测量转换成与之有确定关系的、便于处理的另一种物理量的测量器件。

常用的显示器有四类：模拟显示、数字显示、图像显示和记录仪等。

模拟式显示是利用指针对标尺的相对位置表示被测量数值的大小，如各种指针式电气测量仪表，其特点是读数方便、直观，结构简单、价格低廉，在检测系统中一直被大量应用。但这种显示方式的精度受标尺最小分度限制，而且读数时易引入主观误差。

数字式显示则直接以十进制数字形式来显示读数，实际上是专用的数字电压表，它可以附加打印机，打印记录测量数值，并且易于和计算机联机，使数据处理更加方便。常见的数字显示器有发光二极管和液晶等，这种方式有利于消除读数的主观误差。图像显示是用图像、图形的形式在屏幕显示出测量结果。如果被测量处于动态变化之中，用显示仪表读数就十分困难，这时可以将输出信号送至记录仪，从而描绘出被测量随时间变化的曲线，作为检测结果，供分析使用。常用的自动记录仪器有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪等。

二、检测技术的含义、作用和地位

在人类的各项生产活动和科学实验中，为了了解和掌握整个过程的进展及其最后结果，经常需要对各种基本参数或物理量进行检查和测量，从而获得必要的信息，作为分析判断和

决策的依据，可以认为检测技术就是人们为了对被测对象所包含的信息进行定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施。随着人类社会进入信息时代，以信息的获取、转换、显示和处理为主要内容的检测技术已经发展成为一门完整的技术科学，在促进生产发展和科技进步的广阔领域内发挥着重要作用。其主要应用如下：

1. 检测技术是产品检验和质量控制的重要手段

借助于检测工具对产品进行质量评价是人们十分熟悉的，这是检测技术重要的应用领域。但传统的检测方法只能将产品分为合格品和废品，起到产品验收和废品剔除的作用。这种被动检测方法，对废品的出现并没有预先防止的能力。在传统检测技术基础上发展起来的主动检测技术或称之为在线检测技术使检测和生产加工同时进行，及时地用检测结果对生产过程主动地进行控制，使之适应生产条件的变化或自动地调整到最佳状态。这样检测的作用已经不只是单纯的检查产品的最终结果而且要过问和干预造成这些结果的原因，从而进入质量控制的领域。

2. 检测技术在大型设备安全经济运行监测中得到广泛应用

电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备通常在高温、高压、高速和大功率状态下运行，保证这些关键设备安全运行在国民经济中具有重大意义。为此，通常设置故障监测系统以对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期动态监测，以便及时发现异常情况，加强故障预防，达到早期诊断的目的。这样做可以避免严重的突发事件，保证设备和人员安全，提高经济效益。

另外，在日常运行中，这种连续监测可以及时发现设备故障前兆，采取预防性检修。随着计算机技术的发展，这类监测系统已经发展到故障自诊断系统。可以采用计算机来处理检测信息，进行分析、判断，及时诊断出设备故障并自动报警或采取相应的对策。

3. 检测技术和装置是自动化系统中不可缺少的组成部分

人们为了有目的地进行控制，首先必须通过检测获取有关信息，然后才能进行分析判断以便实现自动控制。所谓自动化，就是用各种技术工具与方法代替人来完成检测、分析、判断和控制工作。一个自动化系统通常由多个环节组成，分别完成信息获取、信息转换、信息处理、信息传送及信息执行等功能。在实现自动化的过程中，信息的获取与转换是极其重要的组成环节，只有精确及时地将被控对象的各项参数检测出来并转换成易于传送和处理的信号，整个系统才能正常地工作。因此，自动检测与转换是自动化技术中不可缺少的组成部分。

4. 检测技术的完善和发展推动着现代科学技术的进步

人们在自然科学各个领域内从事的研究工作，一般是利用已知的规律对观测、试验的结果进行概括、推理，从而对所研究的对象取得定量的概念并发现它的规律性，然后上升到理论。因此，现代化检测手段所达到的水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。检测技术达到的水平愈高，提供的信息愈丰富、愈可靠，科学研究取得突破性进展的可能性就愈大。

从另一方面看，现代化生产和科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求和课题，成为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术中，也有力地促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术的密切关系，使它成为一门十分活跃的技术学科，几

乎渗透到人类的一切活动领域，发挥着愈来愈大的作用。

三、传感器与检测技术的发展趋势

科学技术的迅猛发展，为检测技术的现代化创造了条件，主要表现在以下两个方面：

1. 人们研究新原理、新材料和新工艺所取得的成果将产生更多品质优良的新型传感器

例如，光纤传感器、液晶传感器、以高分子有机材料为敏感元件的压敏传感器、微生物传感器等。另外，代替视觉、嗅觉、味觉和听觉的各种仿生传感器和检测超高温、超高压、超低温和超高真空等极端参数的新型传感器也是今后传感器技术研究和发展的方向。新型传感器技术除了采用新原理、新材料和新工艺之外，还向着高精度小型化和集成化的方向发展。

2. 提高检测的分辨率、精度、稳定性、可靠性

随着科学技术的不断发展，对检测系统测量精度的要求也相应地在提高。近年来，人们研制出许多高精度的测量仪器以满足各种需要。例如，用直线光栅测量直线位移时，测量范围可达二、三十米，而分辨率可达微米级；人们以研制出能测量小至几个帕的微压力和大到几千兆帕高压的压力传感器；开发了能够测出极微弱磁场的磁敏传感器等。

3. 检测系统或检测装置目前正迅速地由模拟式、数字式向智能化方向发展

带有微处理机的各种智能化仪表已经出现，这类仪表选用微处理机做控制单元，利用计算机可编程的特点，使仪表内的各个环节自动地协调工作，并且具有数据处理和故障诊断功能，成为一代崭新仪表，把检测技术自动化推进到一个新水平。智能化仪表比一般检测装置功能强得多，它可以进行：

1) 自动调零和自动校准。

2) 自动量程转换。在程序控制下，可以使测量工作从高量程到低量程自动进行，并通过比较判断，使被测量处于最适当的量程之内。

3) 自动选择功能。通过多路转换器和 A/D 转换器的配合，在程序控制下，既可以顺序地测量，也可以任意地选择对应不同参数的测量通道，从而自动改变仪表测量功能。

4) 自动数据处理和误差修正。利用微机强大的运算能力，编制适当的数据处理程序，即可完成线性化、求取平均值、标准偏差、做相关计算等数据处理工作，并且可以根据工作条件的变化，按照一定公式自动计算出修正值，同时修正测量结果，提高测量精度。

5) 自动定时测量。利用计算机硬件定时或软件定时的功能可以完成各种时间间隔的定时自动测量。

6) 自动故障诊断。在微机控制下，可对仪表电路进行故障检查和诊断，遇到故障点后能够自动显示故障部位，使得排查故障方便，缩短检修时间。

随着微电子技术的发展，已可以将十分复杂的信号处理和电路集成到单块芯片中去。传感器的输出不再是模拟量，而是符合某种协议格式（可即插即用）的数字信号。从而可以通过企业内部网络，也可以通过 Internet 网，实现数据交换和共享。可以远在千里之外，随时随地浏览现场工程，实现远程调试、远程故障诊断、远程数据采集和实时操作，从而构成网络化的检测系统。传感器和测量电路的集成化可以减少干扰，提高灵敏度，方便使用。如果将传感器和数据处理电路集成在一起，则可以方便地实现实时数据处理。

第一章 传感器与检测技术的基本理论

测量是检测技术的主要部分,本章介绍测量的基本概念、测量方法、测量的分类、误差的分类,以及测量在实际生产、生活中的应用。

第一节 测 量

一、测量

测量是借助专门的技术和仪表设备,采用一定的方法取得某一客观事物定量数据资料的认识过程。

测量的结果是得到定量的数据资料,就是使用一定精度等级的测量仪器、仪表,比较准确的测出被测量的数值。测量的结果包括数值大小和测量单位两部分。数值的大小可以用数字表示,也可以是曲线或者图形。无论表现形式如何,在测量结果中必须注明单位,否则,测量结果是没有意义的。测量过程的核心是比较,但被测量能直接与标准量比较的场合并不多,大多数情况下,是将被测量和标准量转换成双方易于比较的某个中间变量来进行的。例如,用弹簧秤称重。被测重量通过弹簧按比例伸长,转换为指针位移,而标准重量转换成标尺刻度。这样,被测量和标准量都转换成位移这一中间变量,可以进行直接比较。

此外,为了提高测量精度并且能够对变化快、持续时间短的动态量进行测量,通常将被测量转换为电压或电流信号,利用电子装置完成比较、示差、平衡和读数的测量过程。

二、测量的方法分类

从测量的不同角度出发,有不同的分类方法。

1. 根据测量的手段不同可分为直接测量和间接测量 直接测量是用仪表直接读取被测量的测量结果。例如,用温度计测量温度,用电压表测量电压,电流表测量电流等。直接测量是工程技术中大量采用的方法,其优点是直观、简便、迅速,但不易达到很高的测量精度。

间接测量需要首先对与被测量有确定函数关系的量进行直接测量,再将测量值带入函数关系式,经过计算求得被测量。例如,测量直流有功功率时,根据 $P = IU$ 的关系,分别对 I 、 U 进行直接测量,再计算出有功功率 P ; 如果测量交流电路的功率因数,可以先测出电路的有功功率、电压和电流,再利用功率因数的计算方法 $\cos\varphi = P/UI$ 将功率因数计算出来。间接测量手续多,花费时间长,当被测量不便于直接测量或没有相应直接测量的仪表时才采用。

2. 根据测量结果的显示方式不同可分为模拟式测量和数字式测量。

3. 根据测量时是否与被测对象接触分为接触式测量和非接触式测量 例如,普通体温计测量体温是接触式测量;而光电体温计测量体温是非接触式测量。

4. 根据被测量是否随时间变化可分为静态测量和动态测量 被测量在测量过程中认为是固定不变的,对这种被测量进行的测量称为静态测量。例如,测量电压、电流、电阻属于

静态测量。静态测量不需要考虑时间因素对测量的影响。

若被测量在测量过程中是随时间不断变化的，对这种被测量进行的测量称为动态测量。例如，测量飞机的飞行速度是动态测量。

5. 根据测量的具体手段不同分为偏位式测量、零位式测量、微差式测量

(1) 偏位式测量 偏位式测量是直接以仪表的偏移量表示被测量的测量方式。例如，用指针式万用表测量电阻、用弹簧称测量物体的质量，均是用指针的偏移的大小来表示被测量。偏位式测量在测量之前，必须先对仪表进行校正。

偏位式测量的优点是测量的过程简单、迅速；缺点是精度不高，容易产生灵敏度漂移和零点漂移。

(2) 零位式测量 零位式测量是在测量的过程中，被测量与仪表内部的标准量相比较，当测量系统达到平衡时，用已知标准量的值决定被测量的值。例如，用天平来测量物体的质量。

零位式测量的优点是测量的精度高，缺点是平衡的操作时间花费很多。

(3) 微差式测量 微差式测量综合了偏位式测量法速度快和零位式测量法精度高的优点。预先使被测量与测量装置内部的标准量取得平衡，当被测量有微小变化时，测量装置失去平衡，用偏位式仪表指示出其变化部分的数值。例如，用电子秤测量物体的质量。

课堂分析题：电工实验中，采用平衡电桥测量电阻的阻值，是属于_____测量，而用水银温度计测量水温的微小变化，是属于_____测量。

A) 偏位式 B) 零位式 C) 微差式

第二节 测量误差

一、测量误差的概念

在检测过程中，被测对象、检测系统、检测方法和检测人员都会受到各种变动因素的影响。而且，对被测量的转换有时也会改变被测对象原有的状态。这就造成了检测结果和被测量的客观真值之间存在一定的差别。这个差值称为测量误差。误差公理告诉我们：任何实验结果都是有误差的，误差自始至终存在于一切科学实验和测量之中，被测量的真值是永远难以得到的。尽管如此，我们仍然可以设法改进检测工具和实验手段，并通过对检测数据的误差分析和处理，使测量误差处在允许的范围之内，或者说，达到一定的测量精度。这样的测量结果就被认为是合理的，可信的。

1. 真值 被测量本身所具有的真正值（在一定条件下被测量客观存在的实际值）。

2. 实际值 为了强调真值并非真正的“真值”，又把它称为实际值。

3. 标称值 测量器具上所标出来的数值。

4. 示值 由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

5. 测量误差 用器具进行测量时，所测量出来的数值与被测量的实际值之间的差值。

二、误差分类

(一) 按表示方法分类

例题 1-1 某采购员分别在三家商店购买 100kg 大米，10kg 苹果，1kg 巧克力，发现均

缺少约 0.5kg, 但该采购员对卖巧克力的商店意见最大。为什么?

1. 绝对误差 示值与被测量真值之间的差值, 即

$$\Delta X = X - X_0$$

式中 ΔX ——绝对误差;

X ——示值;

X_0 ——真值 (标称值)。

通常实际值 $A =$ 真值 X_0 , 例如, 一个标称值为 5Ω 的电阻, 用万用表测量出的电阻值为 5.05Ω , 则绝对误差为 0.05Ω 。

例题 1-1 中的绝对误差: $\Delta X = X - X_0$ 均为 0.5kg 。

修正值与绝对误差 ΔX 相等, 符号相反的值 C , 即

$$C = -\Delta X = X_0 - X$$

则实际值

$$X = X_0 - C$$

含有误差的指示值加上修正值之后, 可以消除误差的影响。在计量工作中, 通常采用加修正值的方法来保证测量值的准确可靠, 仪表送上级计量部门检定, 其主要目的就是获得一个准确的修正值。绝对误差愈小, 说明指示值愈接近真值, 测量精度愈高。但这一结论只适用于被测量值相同的情况, 而不能说明不同值的测量精度。例题 1-1 中采购员分别在三家商店购买 100kg 大米, 10kg 苹果, 1kg 巧克力, 它们的标称值分别为 99.5kg 、 9.5kg 、 0.5kg , 绝对误差均为 0.5kg 。这就很难按绝对误差的大小来判断采购员对哪家的商店满意, 为此, 人们引入了相对误差的概念。

2. 相对误差 绝对误差 ΔX 与被测量的约定值之比称为相对误差, 它又分为实际相对误差、示值相对误差和满度相对误差。

(1) 实际相对误差——绝对误差 ΔX 与被测量的实际值 A 的百分比值, 即

$$\gamma_A = \Delta X / A \times 100\%$$

采购员分别在三家商店购买 100kg 大米, 10kg 苹果, 1kg 巧克力, 它们的标称值分别为 99.5kg 、 9.5kg 、 0.5kg , 绝对误差均为 0.5kg 。实际相对误差分别为 0.5% 、 5% 、 50% 。卖巧克力的商店的实际相对误差最大, 所以对卖巧克力的商店最不满意。

(2) 示值相对误差——绝对误差 ΔX 与器具的示值 X 的百分比值, 即

$$\gamma_x = \Delta X / X \times 100\%$$

采购员分别在三家商店购买 100kg 大米, 10kg 苹果, 1kg 巧克力, 它们的标称值分别为 99.5kg 、 9.5kg 、 0.5kg , 绝对误差均为 0.5kg 。示值相对误差分别为 0.5025% 、 5.26% 、 50% 。卖巧克力的商店的示值相对误差最大, 也可以说明对卖巧克力的商店最不满意。

(3) 满度相对误差——绝对误差 ΔX 与仪器的满度值 (量程) X_m 的百分比值, 即

$$\gamma_m = \Delta X / X_m \times 100\%$$

(4) 精度——最大绝对误差 Δm 与仪器的量程 X_m 的比值的绝对值乘以 100, 即

$$S = \left| \frac{\Delta m}{X_m} \right| \times 100$$

精度等级 S 规定取一系列标准值, 我国电工仪表的模拟仪表有下列 7 种等级: 0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.5 、 5.0 。精度等级也被称为准确度, 仪表的精度等级越小, 仪表的

价格就越贵。仪表的准确度等级和基本误差见表 1-1。根据仪表的精度等级可以确定测量的满度相对误差和最大绝对误差。

表 1-1 仪表的准确度等级和基本误差

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

例题 1-2 某压力表精度为 2.5 级，量程为 0~1.5MPa，测量结果显示为 0.7MPa，求：

- (1) 可能出现的最大满度相对误差 γ_m ；
- (2) 可能出现的最大绝对误差 Δm ；
- (3) 可能出现的最大示值相对误差 γ_x 。

解：

- (1) 可能出现的最大满度相对误差可以从精度等级直接得到，即 $\gamma_m = 2.5\%$
- (2) $\Delta m = \gamma_m \times X_m = 2.5\% \times 1.5\text{MPa} = 37.5\text{kPa}$
- (3) $\gamma_x = \Delta m / X \times 100\% = 0.0375 / 0.7 \times 100\% = 5.36\%$

例题 1-3 现有 0.5 级的 0~300℃ 的和 1.0 级的 0~100℃ 的两个温度计，要测量 80℃ 的温度，试问采用哪一个温度计好？

解：

用 0.5 级表进行测量时，可能出现的最大示值相对误差为

$$\gamma_{x_1} = \Delta m / X \times 100\% = 300 \times 0.5\% / 80 = 1.875\%$$

用 1.0 级表进行测量时，可能出现的最大示值相对误差为

$$\gamma_{x_2} = \Delta m / X \times 100\% = 100 \times 1.0\% / 80 = 1.25\%$$

所以，用 1.0 级表比用 0.5 级表更合适。

3. 容许误差 根据技术条件的要求，规定某一类器具误差不应超过的最大范围。

(二) 按误差出现的规律分类

按误差出现的规律分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差 (系差) 系统误差是一个测量结果偏离真值或实际值的程度。分为恒定系统误差、变化系统误差。恒定系统误差是误差大小和符号恒定不变的误差，例如仪表零点的偏高或偏低。变化误差是按照一定规律变化的系统误差，变化误差又分为累积系差 (在测量过程中随着时间的增长逐渐加大或减小)、周期系差 (在测量过程中误差大小和符号均按一定周期发生变化的系差)、复杂变化系差 (变化规律仍未掌握的系差)。系统误差产生的原因主要是检测装置本身性能不完善、测量方法不完善、测量者对仪器使用不当、环境条件的变化等，系统误差越小，测量越准确。例如，某仪表刻度盘分度不准确，就会造成读数偏大或偏小，从而产生恒定系统误差。温度、气压等环境条件的变化和仪表电池电压随使用时间的增长而逐渐下降，则可能产生变化系统误差。

判别系统误差的方法是凡误差的数值固定或按一定规律变化，均属于系统误差。

系统误差的特点是可以通过实验或分析的方法查明其变化规律和产生原因，通过对测量值的修正或者采取一定的预防措施，就能够消除或减少它对测量结果的影响。

对于系统误差，尽管它的取值固定或按一定规律变化，但往往不易从测量结果中发现它

的存在和认识它的规律，也不可能像对待随机误差那样，用统计分析的方法确定它的存在和影响，而只能针对具体情况采取不同的处理措施，对此没有普遍适用的处理方法。总之，系统误差虽然是有规律的，但实际处理起来往往比无规则的随机误差困难得多。对系统误差的处理是否得当，很大程度上取决于测量者的知识水平、工作经验和实验技巧。

消除系统误差方法为：首先，应检查测量仪器本身的性能是否符合要求；其次，测量前仔细检查仪表是否处于正常工作状态；再次，检查测量系统和测量方法是否正确。具体的方法有：

(1) 交换法——在测量中，将引起系统误差的某些条件（如被测量的位置等）相互交换，而保持其他条件不变，使产生系统误差的因素对测量结果起相反的作用，从而抵消系统误差。例如，以等臂天平称量时，由于天平左右两臂长的微小差别，会引起称量的恒值系统误差。如果被称物与砝码在天平左右称盘上交换，称量两次，取两次测量平均值作为被称物的质量，这时测量结果中就抵消了因天平不等臂引起的系统误差。

(2) 抵消法——改变测量中的某些条件（如测量方向），使前后两次测量结果的误差符号相反，取其平均值以消除系统误差。

(3) 换向法——取上行读数和下行读数的平均值。

(4) 校准法——用标准表进行现场检验或送检。

(5) 补偿法——在测量系统中采取补偿措施，自动消除系统误差。例如，热电偶测温时，冷端温度的变化会引起变化系统误差。在测量系统中采用补偿电桥，就可以起到自动补偿作用。

2. 随机误差（随差） 随机误差也称为偶然误差。由复杂因素的微小变化所引起。随机误差越小，精度越高。测量值时大时小，误差的绝对值及正、负以不可预见的方式变化。

如果某一测量结果的随机误差和系统误差均很小，则表明测量既精密又准确，简称精确。我们可以通过多次重复测量，利用统计分析的方法估算出随机误差的取值范围。

3. 粗大误差（粗差） 明显歪曲测量结果的误差称做粗大误差，又称过失误差。粗大误差主要是人为因素造成的。例如，测量人员工作时疏忽大意，出现了读数错误、记录错误、计算错误或操作不当等。另外，测量方法不恰当，测量条件意外的突然变化，也可能造成粗大误差。

含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。坏值应从测量结果中剔除。

在实际测量工作中，由于粗大误差的误差数值特别大，容易从测量结果中发现，一经发现粗大误差，可以认为该次测量无效，测量数据应剔除，从而消除它对测量结果的影响。坏值剔除后，正确的测量结果中不包含粗大误差。因此要分析处理的误差只有系统误差和随机误差两种。

课堂分析题：用万用表交流电压档（频率上限为 5kHz）测量 100kHz、10V 左右的高频电压，发现示值不到 2V，该误差属于_____，用该表直流电压档测量 5 号干电池电压，发现每次示值均为 1.8V，该误差属于_____。

A) 系统误差 B) 粗大误差 C) 随机误差

(三) 按误差的来源分类

1. 工具误差 工具误差是测量工具本身不完善引起的误差。有读数误差和内部噪声引起的误差。

2. 方法误差 方法误差是测量方法不完善所产生的误差。

(四) 按照使用条件分类

1. 基本误差 基本误差是测试系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。

2. 附加误差 附加误差是当使用条件偏离标准的使用条件时，除基本误差外所产生的误差。

(五) 按被测量随时间变化的速度分类

1. 静态误差 静态误差是被测量不随时间变化时产生的误差。

2. 动态误差 动态误差是被测量随时间迅速变化时，测量所产生的附加误差。

(六) 按误差与被测量的关系分类

1. 定值误差 定值误差是指误差对被测量来说是一个定值，不随被测量变化。

2. 累计误差 累计误差是在整个测试系统量程内，绝对误差值 ΔX 与被测量 X 成比例的变化。

三、随机误差概率密度的正态分布

(一) 随机误差的实验结果

用长 300mm 的钢板尺，测量已知长度为 836mm 的导线，共测量了 150 次，即 $n = 150$ 。现将测量结果，对应的误差，各误差出现的次数 n_i ，列于表 1-2 中。

表 1-2 测量误差分布表

区间号	测量区间中心值	误差区间中心值	出现次数	频率
	x_i	δ_i		n_i/n
	(mm)	(mm)	n_i	(%)
1	831	-5	1	0.66
2	832	-4	3	2.00
3	833	-3	8	5.33
4	834	-2	18	12.00
5	835	-1	28	18.66
6	836	+0	34	22.66
7	837	+1	29	19.33
8	838	+2	17	11.33
9	839	+3	9	6.00
10	840	+4	2	1.32
11	841	+5	1	0.66

为了便于统计,在这里我们将测量结果分成了 11 个区间。因此,测量误差也相应的被分成 11 个区间(误差区间长度)。

表 1-2 中还列出根据统计结果计算得到的频率 (n_i/n) 的数值。它表示测量值或随机误差落在某个区间的相对次数。

在直角坐标图上,以频率 (n_i/n) 为纵坐标,以随机误差 δ_i 为横坐标,画出它们的关系曲线,得到频率直方图,或称为统计直方图,如图 1-1 所示。

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,随机误差的概率密度为

$$f(\delta) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_i}{n \Delta \delta} = \frac{1}{n} \frac{dn}{d\delta}$$

则 $f(\delta) d\delta = dn/n$ 就是曲线阴影部分的面积,见图 1-2。

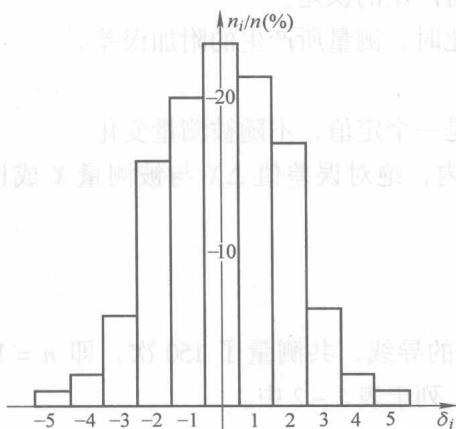


图 1-1 随机误差的统计直方图

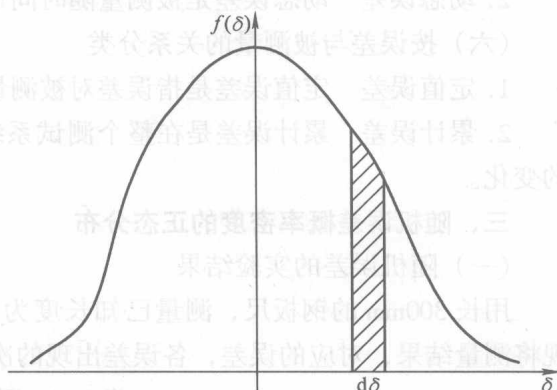


图 1-2 随机误差的正态分布曲线

总结实验结果的统计特点:

1. 对称性 随机误差可正可负,但绝对值相等的正、负误差出现的机会相等。
2. 单峰性(集中性) 绝对值小的随机误差比绝对值大的随机误差出现的机会多,即前者比后者的概率密度大。
3. 有界性 在一定测量条件下,随机误差的绝对值不会超过一定的范围,即绝对值很大的随机误差几乎不出现。
4. 抵偿性 在相同条件下,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,全体随机误差的代数和等于零。

(二) 概率密度呈正态分布

我们可以用解析的方法推导出随机误差正态分布曲线的数学表达式,即正态概率密度分布函数。数学表达式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right)$$

式中 σ ——是均方根误差或称标准误差。

$$\sigma = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \dots}$$

式中 δ ——随机误差。

由此可以看出: