

自动化工程师职业培训丛书

检测 技术基础及应用

主编 顾波 张海平



中国电力出版社
CHINA POWER PRESS



自动化工程师职业培训丛书

检测

技术基础及应用

主编 顾波 张海平
参编 陈莹 王东署 傅海龙



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统地介绍了检测技术的基本概念、理论基础、技术方法和应用实例。本书共九章，第一、二章主要介绍测量的基本概念及传感器的基础；第三至第八章主要介绍温度，力，流量，物位、位移，电量，生化量的测量方法及测量传感器，第九章主要介绍光电、光纤、CCD等其他类型的传感器。

本书侧重于基础知识的介绍，内容通俗易懂，适当介绍了提高部分，有利于检测技术从入门到提高的进阶学习。按温度，力，流量，物位、位移，电量，生化量，其他量等被测量把传感器分为七大类，形式新颖，分类方法独特，便于读者按分类进行学习、理解和应用。七大类传感器的介绍详略得当，既突出重点，又照顾大局。全书以技能训练为主，强调实际应用，列举了大量的应用实例。

本书既适用于自动化检测技术的初学者，又可作为工程技术人员的技术参考书及高校相关专业教材。

图书在版编目（CIP）数据

检测技术基础及应用 / 顾波，张海平主编. —北京：中国电力出版社，2010.9

（自动化工程师职业培训丛书）

ISBN 978-7-5123-0747-6

I. ①检… II. ①顾… ②张… III. ①传感器—检测—技术培训—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 158375 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 1 月第一版 2011 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.625 印张 332 千字

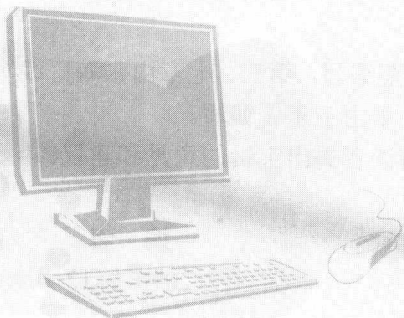
印数 0001—3000 册 定价 24.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

科学技术的发展与检测技术的发展是密切相关的,当前的科学技术研究与现代化生产,几乎无一例外地与检测技术相关联。人们正是通过各种检测仪器或者复杂的检测系统,对各种物理量、化学量、生物量进行检出、变换、处理、分析、显示与记录,来定性、定量地研究物质世界的状态及其客观规律。检测技术作为信息获取的前端,其发展程度决定了信息获取的质量。目前,检测技术已广泛应用于国防、航空、航天、交通运输、能源、机械、石油、化工、纺织、环保、医疗等各个行业。

随着科学技术的发展,特别是一些运用新材料制造、测量精度高、适应能力强的传感器的成功研制,以及计算机技术与检测技术的结合应用,使得检测手段、检测方法和检测设备都发生了革命性的变化,形成了自动化、系统化、智能化和网络化的综合性检测系统,显著提高了检测的准确性、快速性、可靠性和抗干扰性。现阶段,检测设备正向着高精度、微型化、智能化和多功能的方向发展。

本书具有以下四个方面的鲜明特色:

(1) 重点介绍检测技术的基本知识,语言通俗易懂,适当介绍了提高部分,便于从入门到提高的进阶学习,使读者可以循序渐进地理解和掌握检测技术。

(2) 按温度,力,流量,物位、位移,电量,生化量,其他量等被测量把传感器分为七大类,并结合每类中被测量的特点,对传感器进行了分节介绍。形式新颖,分类方法独特,便于读者按分类进行学习、理解和应用。

(3) 详细介绍了温度,力,流量,物位、位移,电量,生化量等被测量的检测方法及其测量传感器,内容详略得当,既突出重点,又照顾大局。

(4) 以技能训练为主,强调实际应用,书中列举了大量生产和生活中对各种被测量的测量方法和所使用的传感器,以加强读者对检测技术的理解和应用。

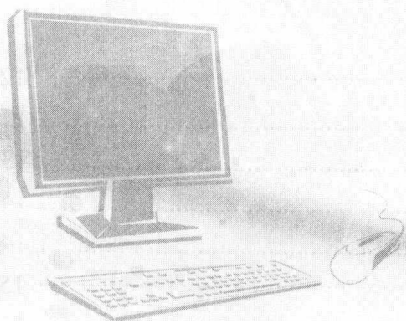
本书共九章,第一章介绍了测量的基础知识、误差的产生及处理方法、测量系统的构成与发展趋势;第二章介绍了传感器技术基础知识,包括传感器的分类、数学模型、基本特性、典型环节的动态响应分析、标定与校准;第三章介绍了温度传感器及温度测量,包括热电偶、热敏电阻、热电阻、集成温度传感器,并给出了部分传感器应用实例;第四章介绍了力传感器及力的测量,重点介绍了压力计及其使用、压力传感器、转矩测量;第五章介绍了流量传感器及流量测量,重点介绍速度式流量计、容积式流量计、差压式流量计和质量式流量计等常见流量计;第六章介绍了物位、位移传感器及测量,主要包括液体位置、物体位移、角位移和角速度测量;第七章介绍了常用的电量检测及检测仪表,主要包括磁电式仪表、电磁式仪表和电动式仪表等内容;第八章介绍了生化传感器及生化量测量,包括生物、气敏、湿敏、医学传感器;第九章介绍了光电、光纤、电荷耦合器件等其他类型的传感器。

本书由顾波负责全书的组织和统稿。第一、二章由陈莹编写，第三、七章由张海平编写，第四、五章由顾波编写，第六章由傅海龙编写，第八、九章由王东署编写。

限于编者水平，书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者提出宝贵的意见和建议。

编 者

2010 年 12 月



目 录

前言

第一章 测量的基本概念	1
第一节 测量的基础知识	1
第二节 测量与误差	4
第三节 测量误差的处理	7
第四节 测量系统的构成与发展	17
第二章 传感器技术基础	20
第一节 传感器的分类	20
第二节 传感器的数学模型及传递函数	22
第三节 传感器的基本特性	24
第四节 典型环节传感器系统的动态响应分析	29
第五节 传感器的标定与校准	34
第三章 温度传感器及温度测量	38
第一节 概论	38
第二节 热电偶温度传感器	42
第三节 热敏电阻温度传感器	52
第四节 热膨胀式温度计及金属热阻式温度传感器	60
第五节 集成温度传感器	63
第六节 部分传感器应用实例	67
第四章 力传感器及力的测量	73
第一节 力的基础知识	73
第二节 压力计及其使用	77
第三节 压力传感器	83
第四节 转矩测量	89
第五节 应用实例	93
第五章 流量传感器及流量测量	96
第一节 流量测量的基础知识	96
第二节 流量测量仪表	100
第三节 流量标准装置	116
第四节 流量传感器实例	117

第六章 物位、位移传感器及测量 121

 第一节 液体位置的测量..... 121

 第二节 物体位移的测量..... 132

 第三节 角位移及角速度测量..... 145

 第四节 位移传感器的实例..... 148

第七章 电量检测及检测仪表 152

 第一节 电工测量仪表..... 152

 第二节 测量方法..... 154

 第三节 电量参数的测量..... 157

 第四节 应用实例..... 163

第八章 生化传感器及生化量测量 168

 第一节 生物传感器..... 168

 第二节 气敏传感器..... 175

 第三节 湿敏传感器..... 180

 第四节 医学传感器..... 183

 第五节 生化传感器应用实例..... 191

第九章 其他类型传感器 194

 第一节 光电型传感器..... 194

 第二节 光纤传感器..... 202

 第三节 电荷耦合器件..... 207

参考文献 211

第一章

测量的基本概念

测量是人类认识客观世界最基本的方法之一，人类通过对各种类型数据的测量，不断地了解和改造客观世界。

当前的科学技术研究与现代化生产，几乎无一例外地与测量技术相关联，测量的应用领域涉及国防、航空、航天、交通运输、能源、机械、石油、化工、纺织等各个部门和环境保护、生物医学工程等各方面。人们通过各种检测仪器或者更复杂一些的检测系统，对各种物理量、化学量、生物量进行检出、变换、分析与处理、显示与记录，定性或定量地揭示出物质世界的状态或者变化规律。

例如，在各种航天器上，利用多种传感器测定和控制航天器的飞行参数、姿态和发动机工作状态，将传感器获取的各种信号再输送到各种测量仪表和自动控制系统中进行自动调节，使航天器按人们预先设计的轨道正常运行。再如，人们为了提高水稻的产量，在农田中设置多种传感器，对农田的水温和各种化学物质进行测量，以期找到最适合水稻生长的环境，提高水稻产量。

常见的检测设备或者检测系统主要由传感元件或传感器、信号或数据处理器、显示器或记录器等几大部分组成，其结构如图 1-1 所示。不同类型的检测设备，这些组成部分的要求和复杂程度可能相差很大。本书在各章中首先介绍传感器的结构和功能，然后介绍与此类传感器相关的物理量的测量。

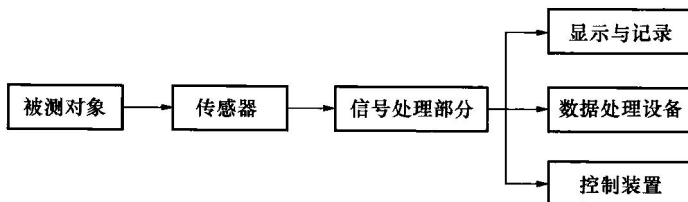


图 1-1 检测系统结构

② 第一节 测量的基础知识

一、被测参数的种类

被测参数的种类根据物质的电特性，可分为电量和非电量两类。电量一般是指物理学中的电学量，例如电压、电流、电阻、电容及电感等；非电量则是指除电量之外的一些参数，例如压力、流量、尺寸、位移量、重量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度及酸

碱度等。

根据被测参数的性质,可分为电工量、热工量、机械量、物性和成分量、状态量等。其中电工量包括电压、电流、电功率、电阻、电感、电容、频率、磁场强度、磁通密度等;热工量包括温度、热量、比热容、热流、热分布、压力、压差、真空度、流量、流速、风速、物位、液位、界面等;机械量包括位移、形状、力、应力、力矩、重量、质量、转速、线速度、振动、加速度、噪声等;物性和成分量包括气体成分、液体成分、固体成分、酸碱度、盐度、浓度、黏度、密度等;状态量包括颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面粗糙度等。

二、非电量的测量

工业生产过程中需要测控的大多数是非电量,其种类和数量远多于电量,然而这些涉及不同领域的量有大有小,有静有变,有连续有离散,若要对它们分别进行控制、变换、存储、记录与显示十分困难。

在实际生产生活中,对这些非电量往往不直接测量,而是把非电量转换为具有一定关系的电量,再进行测量。实现这种转换技术的器件叫传感器。采用传感器技术的非电量测量方法是目前应用最广泛的测量技术。随着科学技术的发展,现在也出现了以光通量、化学量等作为被测量的传感器。

三、检测装置的基本性能

检测装置即测量的仪器或仪表,其类型多种多样,在对它们进行优劣判别时,需要一些统一的评价准则,把这些评价准则称为检测装置的基本性能。衡量检测装置性能的主要指标有精度、稳定性和输入输出特性。

(一) 精度

检测装置的精度包括精密度、准确度和精确度 3 个内容。

1. 精密度

在相同条件下,对同一个量进行重复测量时,这些测量值之间的相互接近程度称为精密度。它反映了随机误差的大小。

2. 准确度

准确度表示测量仪器指示值相对于真值的偏离程度,它反映了系统误差的大小。

3. 精确度

精确度是精密度和准确度的综合反映,它反映了系统综合误差的大小,并且常用来表示测量误差的相对值。

表 1-1 中给出了 3 种不同的传感器对同一数值的 10 次测量结果。

表 1-1 3 种不同传感器的测量结果

传感器	次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
传感器 1	测量值	4.37	5.18	4.75	4.82	5.1	5.34	5.20	5.50	4.55	5.23
	真实值	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
传感器 2	测量值	4.12	4.09	4.15	4.04	4.11	4.17	3.98	4.21	4.02	4.11
	真实值	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
传感器 3	测量值	5.05	4.98	4.95	5.03	5.00	5.12	5.05	4.97	4.99	50.4
	真实值	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

从表 1-1 中可以知道, 传感器 1 的随机误差较大; 传感器 2 的测量值偏离真实值较大, 其系统误差较大; 传感器 3 的随机误差和系统误差均较小, 故其测量精度较高。

(二) 稳定性

检测装置一般工作在开环状态, 因此稳定性不存在大的问题, 而重要的问题是所谓漂移现象。在一定条件下, 保持输入信号不变, 输出信号随时间或环境温度的缓慢变化, 称为漂移。随时间的漂移称为时漂, 随环境温度的漂移称为温漂。例如, 弹性元件的时效、电子元件的老化和放大器的温漂在温度、气压、电源电压、电磁场等外界环境下都能引起漂移。

漂移能够说明检测装置工作的稳定性能, 对于长时间运行的检测装置, 这个指标更为重要。

(三) 输入输出特性

检测装置的输入输出特性有静态特性和动态特性两大类。所谓静态特性, 是指检测设备的输入量 (被测参数) 不随时间变化或随时间变化很缓慢时输出与输入的关系。在静态特性的分析过程中, 输出与输入的关系表达式方程是不含时间变量的。动态特性是指当输入量随时间快速变化时检测设备输出与输入的关系, 因为输入量是随时间变化的数值, 所以动态特性的关系式是含有时间变量的微分方程或微分方程组。静态特性和动态特性相互牵制, 当静态特性显示出非线性和随机性时, 静态特性会影响动态条件下的测量结果, 所以, 在进行实际测量过程时, 需要对静态特性作近似处理。

在检测技术中衡量检测装置静态特性的重要指标是线性度、灵敏度和滞环等。

1. 线性度

线性度对于没有迟滞、蠕变效应的理想检测装置, 其静态特性函数 $y = f(x)$ 可由下列方程式来表示

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (1-1)$$

式中 x ——输入量 (被测量信号);

y ——输出量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——灵敏度;

$a_2, \cdots, a_n$ ——非线性项常数。

从式 (1-1) 可见, 当 $a_0 = 0$, 此时静态特性由线性项 $a_1 x$ 和 x 的高次项所决定。当 $a_0 \neq 0$ 时, 表示即使输入量等于零, 仍有输出, 称为零位输出或零位偏移。

通常, 检测装置的静态特性为非线性关系, 典型的静态特性如图 1-2 所示。图 1-2 中, 实线 abc 表示实际特性线段, 虚线 ac 表示应用过程中的理论直线。从图上可以看出, 实际特性线段 abc 与理论直线 ac 有一定差距, 但在实际应用中, 总是使用某一规定的拟合直线来代替曲线, 常用的拟合直线是切线或割线, 如虚线段 ac 。实际特性线段与理论直线不吻合的程度称为该检测装置的非线性误差, 或称线性度, 常用实际曲线与理论直线之间的最大偏差与检测装置满量程输出之比 (%) 来表示, 即

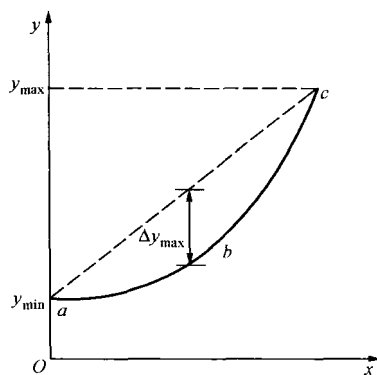


图 1-2 静态特性曲线

$$E = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 E ——线性度（非线性误差）；

$\Delta y_{\max}$ ——实际曲线与理论直线的最大偏差；

$y_{\max}$ ——输出最大值；

$y_{\min}$ ——输出最小值。

由此可见，线性度的大小是以规定的直线作为基准计算出来的。因此，基准直线不同，得出的线性精度也不一样，而且采用的基准直线不同，线性度的定义也有差异。本书中采用理论直线作为拟合直线来确定检测装置的线性度，因为这种方法在阐明检测装置或传感器的线性度时比较明确和方便。所谓理论直线，即指式（1-1）中高次项系数为零（通常也设 $a_0=0$ ）所得到的直线，即

$$y = a_1 x \quad (1-3)$$

由理论直线求得的线性度称为理论线性度。在检测技术中，可以使用最小二乘法来确定拟合直线。根据误差理论，最小二乘法线性度的拟合精度最高，但它的计算较为复杂。

2. 灵敏度与分辨率

灵敏度指传感器或检测装置在稳态下输出量的变化量 Δy 与输入量变化量 Δx 之比，常用 k 表示，即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-4)$$

对于线性传感器和检测仪表，它的灵敏度就是它的传递系数，即

$$k = \frac{y}{x} \quad (1-5)$$

传感器或检测装置的灵敏度阈值是引起输出量发生微小变化时所必需的最小的输入量的变化量。对于数字式测量仪表，灵敏度阈值以分辨率表示，分辨率等于数字式仪表最后一位数字所代表的值。

3. 滞环（迟滞）

滞环反映检测装置的正向特性（输入量增大）与反向特性（输入量减小）的不一致性，如图 1-3 所示，一般由实验确定。造成测量装置滞环的原因很多，如传动机构的间隙、摩擦，弹性元件的弹性滞后影响等。设在整个测量范围内的最大偏差为

$$\Delta_m = y_d - y_c \quad (1-6)$$

则最大的滞环误差用 E_m 表示，它等于最大偏差 Δ_m 与最大满量程输出 $y_{\max}$ 之比的百分数

$$E_m = \frac{\Delta_m}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-7)$$

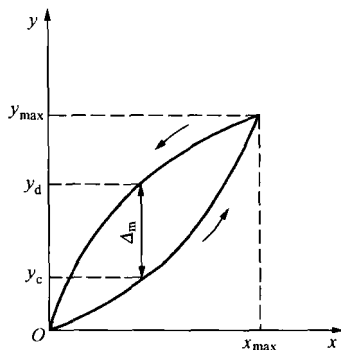


图 1-3 滞环特性示意图

② 第二节 测量与误差

一、测量的概念

测量（measurement）能够使人们对客观事物获得定量或定性认识，并由此发现客观事

物的规律性。测量是以确定被测物属性量值为目的的一组操作,这种操作是一个比较过程,它是将被测参数的量值与同性质的标准量进行比较,比出的结果即为测量的结果。测量单位、测量方法、测量仪器与设备是测量的“三要素”。

(1) 测量单位:测量过程中规定使用的单位,如毫米(mm)、米(m)、千克(kg)等。

(2) 测量方法:被测量与测量单位进行比较的方法。

(3) 测量仪表:为了最终获取测量结果而使用的仪器。

测量方法按测量的方式(测量途径)分类有直接测量、间接测量;按测量方法(度量器参与形式)分类有偏差式测量法、零位式测量法和微差式测量法;按被测参量变化快慢分类有静态测量、动态测量;按被测量在变化过程中被测情况分类有在线测量、离线测量;按测量敏感元件是否与被测介质接触分类有接触式测量与非接触式测量。

(一) 按测量的方式分类

1. 直接测量

用已标定的测量仪器对某一未知量进行测量,测量结果可以直接从实验数据获得的方法称为直接测量。直接测量不等于用直读式仪表进行测量,许多比较式仪器(例如电桥和电位差计)虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量之值,但因参与测量的对象就是被测量本身,因此仍属直接测量。

直接测量的优点是测量过程简单、迅速,缺点是测量精度不容易达到很高。这种测量方法在一般的工程中大量采用。

2. 间接测量

间接测量是指希望得到的量与被测量有确定的函数关系,运用函数解析式、函数曲线或表格等形式,通过被测量,求出希望得到的量的方法,称为间接测量。例如,测量导线电阻率的函数关系式如下

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4l} \quad (1-8)$$

可以先测量导线的电阻 R 、导线的长度 l 和导线的直径 d ,然后通过函数求得导线的电阻率,这类测量方法主要应用于实验室中。

(二) 按测量的方法分类

1. 偏差式测量法

在测量过程中,用仪表指针的偏移量表示被测量的测量方法,称为偏差式测量法。在测量时,应事先采用标准量具对仪表刻度进行校准,然后以间接方式实现被测量与标准量的比较,常见的弹簧压力表检测压力就采用这种方法。目前工程测量中,大多数的测量仪表均依据此原理,这种仪表结构简单、直观、经济,故应用甚广。但其精度较低,有时要消耗被测对象的部分能量,损失部分信息。

2. 零位式测量法(平衡式测量)

它采用指零仪表的零位来检测测量系统是否处于平衡状态。在实际检测过程中,通过改变可知的基准量与被测量达到平衡状态,从而得到被测量的值。这种测量方法准确度较高,但测量的过程比较复杂,一般适用于测量变化缓慢的信号,在工程实践和实验室中应用都比较普遍。

3. 微差式测量法

微差式测量法是将被测量和与它的量值只有微小差别的已知量相比较,并测出这两个

量值间的差值，以确定被测量的测量方法。

微差式测量的标准量存储在仪表内并直接参与比较，不需要调整标准量，它综合了偏差式测量和零位式测量的优点，反应快、测量精度高，适用于在线控制参数的测量。

（三）值的概念

1. 量和量值

量是指物体和物质可以定性区别和定量确定的一种属性。由一个数和合适的计量单位表示的量称为量值。例如：冰水混合物的温度是 0°C ，火力发电厂中汽轮机的蒸汽压力为 3.6MPa 等，它们分别由数值和计量单位两部分组成。

2. 真值、约定真值和实际值

真值是在理想情况下表征一个物理量真实的值，它客观存在却不能测量得到。随着科技的发展，测量结果的数值会不断接近真值，因而在实际工作中，经常使用的是“约定真值”和“相对真值”。

约定真值是按照国际公认的单位定义，利用科技发展的最高水平所复现的单位基准约定，与真值相近似并可供使用的值。

相对真值也称实际值，是在满足规定准确度时用以代替真值使用的值。

3. 标称值和指示值

标称值是计量或测量仪器上标注的量值，因受制造、测量及环境条件变化的影响，标称值并不一定等于它的实际值，通常在给出标称值的同时也应给出其误差范围或精度等级。

指示值是测量仪表或仪器给出或提供的量值，也称测量值。

二、测量误差的来源与分类

（一）误差

在现实生产生活中，所测量的一切数据，都不是绝对准确的数据，也就是说，测量值与真实值之间存在一定的差别，这些差别就叫误差。所以，在对一个物体进行测量时，如果不知道测量仪器或测量装置的可信度，则测量的结果是无意义和无价值的。因此，在实际测量中，如何减小、消除和估计误差对测量结果的影响，得到真实反映客观事实的结果，是误差研究中的一个重点。

（二）误差的来源

1. 测量装置误差

测量装置误差是指测量仪器或仪表本身及其附件所引入的误差。如装置本身电气或机械性能不完善，仪器、仪表的零位偏移，刻度不准确以及非线性等都含有误差。

2. 影响误差

现实环境条件与仪器仪表的使用条件不一致时，会在测量设备中引入一定量的误差，这部分误差就叫影响误差。

3. 方法误差和理论误差

由于选择的测量方法不合理而引起的误差称为方法误差。例如，人们在使用电压表测量某个 220V 设备的端子电压时，使用人员把电压表的单位调至 1000V ，从而使测量得到值约等于 0.2 ，误差约为 20V ；如果使用 1V 为单位，则测量的值为 219V ，测量的误差约为 1V 。

理论误差是用近似公式或近似值计算测量结果时所引起的误差。

4. 人身误差

指人员的心理素质、固有习惯、工作责任心以及测量水平等引起的误差。

(三) 误差的分类

在测量过程中,被检测的对象、测量的系统、测量的方法等都会在一定程度上引入误差。因此,在实际测量时,能够掌握误差的规律、性质及其特点等是非常重要的。测量误差按其规律来分,可以分为以下几类:

1. 系统误差

系统误差是指在一定的条件下,其数值遵循某一确切函数规律的误差。在同一测量条件下,对同一测量目标进行多次测量时,其误差的绝对值和符号保持恒定;当条件改变时,它又按某一确定的规律变化。

掌握系统误差的规律性,可以很好地减小和消除系统误差,如不平衡的零电位,温、湿度,电磁干扰等引起的误差。按系统误差的变化规律又可分为定值系统误差与变值系统误差。系统误差的发现、处理、归纳和总结,与其涉及的具体测量对象及原理有关,系统误差的大小取决于测量人员的经验、学识和技巧。

2. 随机误差

随机误差是在相同条件下多次重复测量同一量时,误差时大时小,时正时负,其大小和符号均是无规律的误差。它是由于测量过程中许多独立的、微小的偶然因素所引起的综合结果,又称偶然误差。它既不能用实验方法消除,也不能修正。

就一次测量来说,随机误差的数值大小和符号难以预测,但在多次的重复测量时,其总体服从统计规律。从随机误差的统计规律中可了解其分布特性,并能对其大小及测量结果的可靠性等作出估计。

例如,使用多个仪表测量某一对象的电压时,由于设备制造时的不绝对等同的原因,会在这多个测量值之间引入随机误差,可采用对测量值进行平均的方法削弱其误差。

3. 疏失误差

在相同的条件下,多次重复测量同一量时,有些测量结果明显地偏离了真实值,这些误差叫疏失误差,也称为粗大误差。疏失误差是由于疏忽大意、操作不当,或测量条件的突然变化而引起。

三类误差的定义是科学而严谨的。但在测量实践中,对测量误差的划分是人为的、有条件的。在一定的条件下,这三种误差的性质可以相互转化。例如,由于人们对客观世界认知的局限性,往往会把一些当前不能够完全认知的、不能够准确把握的误差归为随机误差。但是,随着人们知识的积累和对该类误差认识的加深,对该类误差能够准确把握或描述,从而又把该类误差划归为系统误差的类别。

③ 第三节 测量误差的处理

一、系统误差的处理

如何消除或削弱系统误差是测量技术的重要课题。消除系统误差最根本的方法是在测量前就去掉产生误差的根源,这就要求测量人员详细检查测量过程中可能产生系统误差的环节,把它们调整到最佳状态。如果上述措施效果不佳,在测量过程中就要采取适当的测量方法和读数方法,以便消除或削弱系统误差。消除系统误差常用的方法有如下几种:

(一) 替代法

替代法又称置换法，它是指在一定测量条件下选择一个大小适当并可调的已知标准量去替代被测量，并使仪表的指示值保持原值不变。此时该标准量即为被测量的数值。应该注意的是，在代替过程中测量电路及仪表的工作状态、指示器等均要保持不变，以使测量中的恒定误差不会对测量结果产生影响，而测量误差主要决定于标准量。

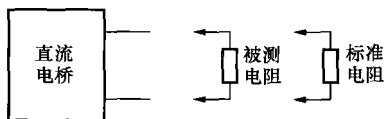


图 1-4 替代法测量电阻

图 1-4 为替代法测量电阻的原理图，从图 1-4 中可知，左侧直流电桥测量装置的误差几乎不会影响右侧电阻的测量精度。

(二) 交换法

在测量中将引起系统误差的某些条件相互交换，并且保持其他条件不变，从而使产生系统误差的因素对测量结果起相反的作用，取两次测量的平均值作为测量结果，以消除系统误差。例如，人们在使用天平称量时，常常把被称物体与砝码在天平的左右秤盘上交换，称量两次，然后再取平均值，则可消除由于天平两臂不等而引起的固定系统误差。

(三) 零示法

零示法属于比较法，其测量误差与读数误差无关，主要取决于已知的标准量，这种测量方法对测量设备的指示器灵敏度要求较高。

图 1-5 是使用零示法测量电压 U_x 的电路，图中 U_n 为标准电池，在进行测量时，只要判断中间的指零仪是否指向零点位置即可，不需要读出具体的数值，测量结果取决于 U_n 的精度、稳定性和指零仪的灵敏度。

(四) 微差法（差值法）

微差法的测量思想是若被测量为 A ，而标准量为 B ，二者的差值 $c=A-B$ ，通过测量仪表测出标准量与被测量之间的差值 c ，然后根据公式 $A=B+c$ 可求得被测量的值。

图 1-6 为微差法测量电压电路，其中 E_n 为标准直流电压源，它与被测稳压电压源 U_o 非常接近， U 为图中毫伏表的指示电压，根据毫伏表的指示电压，可以直接计算 U_o 的值为

$$U_o = U + E_n$$

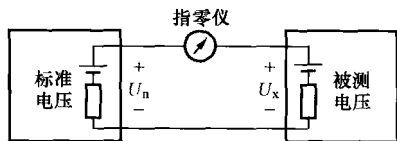


图 1-5 零示法测量电压

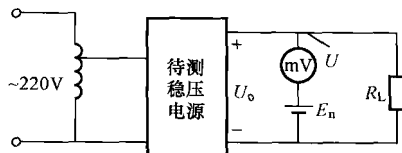


图 1-6 微差法测量电压电路

(五) 补偿法

补偿法是替代法的一种特殊形式，其测量原理是：令标准的量值为 A ，被测量的值为 B ，在进行第一次测量时，对 $A+B$ 相加后的值进行测量，令其测量结果为 m ；第二次进行测量时，去掉被测量 B ，单独对标准量 A 进行测量，调整标准量 A 的参数设置，调整后的标准量值为 A' ，使测量的结果也为 m 。这时，可以根据等式 $B=A'-A$ 来求得被测量 B 的值。

二、随机误差的处理

随机误差很难采用上面介绍的方法逐个进行处理，但是，随机误差一般具有一定的统

计规律,可以运用统计学方法找到这些测量数据的规律,进而减弱或消除随机误差对测量结果的影响,并估计出其残余误差的大小。

(一) 随机误差的统计特性

在检测过程中,测量值及其随机误差都可作为随机变量,相应的测量过程为随机过程。大量实践证明,这些随机过程具有平稳性,从而满足随机过程处理的理论和计算方法。

对于单个的随机变量而言,其大小和方向都无法预测,但是对于随机误差的总体,其具有一定的统计规律。在现实检测过程中,绝大多数的随机误差都满足正态分布规律,因此可以使用正态分布规律的一些性质来对随机误差进行分析。

(二) 正态分布规律的性质

假设在一定的测量条件下对某个物体 A 的重量进行 N 次测量,其测量值分别为 $X_1, X_2, \dots, X_N$, 令其真值为 X_0 , 则各个测量值出现的概率密度分布满足以下公式

$$p(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(X-X_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-9)$$

式中 σ ——均方根或标准偏差,表示测量数据的分散程度, σ 越小,曲线越尖锐;

σ^2 ——方差。

式(1-9)称为正态分布函数或高斯曲线方程,简记为 $X \sim N(X_0, \sigma^2)$ 的形式。 $p(X)$ 的图形如图 1-7 所示。

令 $\mu = X - X_0$, 可以进一步化简式(1-9),得到式(1-10),其表达式如下

$$p(\mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-10)$$

图 1-8 是对式(1-10)中 σ 取不同的数值时,得到的高斯曲线图,也称为标准正态分布曲线图。

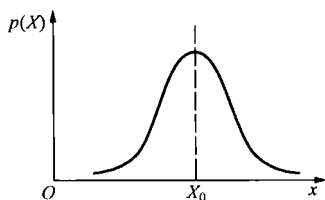


图 1-7 高斯曲线图

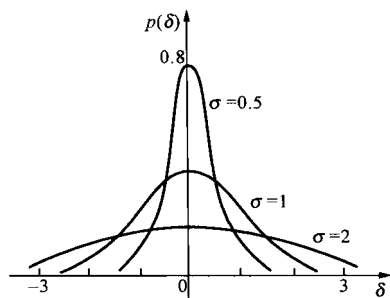


图 1-8 不同 σ 下的高斯曲线图

由正态分布规律的分析可知,随机误差有四种特性:

1. 集中性

在进行大量的测量时,得到的测量数据均集中在其平均值附近。也就是说,平均值附近的数值出现的机会最多,较小误差出现的概率最大。整个随机分布出现“中间大,两头小”的单峰分布规律。

2. 有界性

当误差非常大的情况下,误差出现的概率近于零,整个高斯曲线的两边无限与 x 轴接近。

3. 对称性

当测量次数足够多并趋于无穷的时候, 符号相反、绝对值相等的误差出现的概率大致相同; 正、负误差的分布具有对称性。

4. 抵偿性

在测量次数趋于无穷大的情况下, 可以从高斯曲线上看出, 测量的随机误差的代数和趋于零。无穷多次所测得数据的算术平均值是真值的最佳估计值。

(三) 随机误差的处理方法

1. 算术平均值

在测量过程中, 真值 x_0 总是没办法得到的。在科学实验中, 有时候可以以高精度的标准仪表的测量值作为被测量的真值, 但是在现实生产过程中, 由于生产环境恶劣, 被测量的真值是没办法通过仪器测量得到的。例如汽轮机中的蒸汽在推动转子做功的过程中, 气体的温度是不断变化的, 其温度在 500°C 以上, 压力在 3MPa 以上, 在这样的环境下, 没办法准确测量被测量的真值。在解决此类问题时, 可以通过反复多次测量, 然后对测量值进行处理, 得到与真值最为接近的数值, 最后可以通过统计学上的误差检验, 检验所得到的真值与实际真值的偏差程度。

在同样的条件下, 对被测量 x_0 作多次测量, 由于各种随机因素的影响, 各次测量的值均不相同, 假设测量的数值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则随机误差的值为

$$\Delta_i = x_i - x_0 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1-11)$$

将式 (1-11) 求和可得

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 \quad \text{或} \quad \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - x_0$$

由误差分布特性中的抵偿性可以知道

$$\text{当 } n \rightarrow \infty \text{ 时, } \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} \rightarrow 0, \text{ 故 } \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \rightarrow x_0 \quad (1-12)$$

由式 (1-12) 可知, 当测量次数 n 趋于无穷大的时候, 测量值的算术平均值无限趋于真值 x_0 , 所以, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$, 且系统误差不存在时, 即可把算术平均值当做真值来看待, 即 $\bar{x} = x_0$ 。

在有限次测量过程中, 也可以把算术平均值当做真值, 即

$$x_0 = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-13)$$

但是, 在有限次测量中, 由于使用平均值来代替真值, 则真值与测量值之差和平均值与测量值之差是不同的, 把测量值与平均值之差称为残余误差 (简称残差), 用 U_i 来表示。

$$U_i = x_i - \bar{x} \quad (1-14)$$

残差具有如下两个性质: