



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ZIDONG CELIANG JISHU

自动测量技术

丁轲轲 主 编

杨晋萍 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA

ZIDONG CELIANG JISHU

自动测量技术

主 编 丁轲轲
副主编 杨晋萍
编 写 冯江涛
主 审 吕震中 吴军基



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书主要论述了自动测量技术的基本传感原理以及典型测量仪表的结构、组成、特点和功能。全书共分为九章,内容包括:自动测量技术的基本知识、生产过程中各种参数的测量技术(如温度、压力、流量、物位、机械量和锅炉炉膛火焰等)、成分分析技术和智能测量技术等。

本书主要作为高等院校热能动力工程专业的本科生教材,也可供机械类专业和相近专业的学生使用,同时可作为相关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动测量技术/丁轲轲主编. —北京:中国电力出版社,
2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-4986-2

I. 自... II. 丁... III. 传感器—高等学校—教材
IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第055987号

中国电力出版社出版、发行
(北京 甲河路6号 100044 <http://j.c.cep.com.cn>)
北京市同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

2007年7月第 版 2007年7月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 15印张 365千字
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

目 录

前言

第一章 自动测量技术基础	1
第一节 自动测量技术的发展和应	1
第二节 自动测量系统的基本组成	3
第三节 测量的基本方法	4
第四节 测量系统的误差和质量指标	5
第二章 温度测量技术	12
第一节 概述	12
第二节 简单测温仪表	14
第三节 热电偶温度计	18
第四节 热电阻温度计	32
第五节 非接触式测温仪表	41
第三章 压力测量技术	48
第一节 概述	48
第二节 弹性式压力测量技术	49
第三节 电气式压力测量技术	53
第四节 压力测量仪表的选择和安装	70
第四章 流量测量技术	72
第一节 概述	72
第二节 差压式流量测量技术	73
第三节 均速管流量测量技术	82
第四节 浮子流量测量技术	84
第五节 涡轮流量测量技术	87
第六节 涡街流量测量技术	90
第七节 电磁流量测量技术	95
第八节 超声波流量测量技术	102
第九节 多普勒流量测量技术	105
第十节 容积式流量测量技术	108
第十一节 质量流量测量技术	110
第十二节 其他流量测量技术	116
第十三节 流量传感器发展趋势	119
第五章 物位测量技术	122
第一节 概述	122

第二节 静压式液位测量技术	123
第三节 浮力式液位测量技术	131
第四节 超声波物位测量技术	133
第五节 电容式物位测量技术	138
第六节 核辐射式物位测量技术	140
第七节 其他物位测量技术	142
第八节 物位测量技术的应用和发展趋势	145
第六章 成分分析技术	148
第一节 烟气中含氧量的测量技术	148
第二节 烟气中飞灰含碳量的测量技术	151
第三节 烟气中一氧化碳的测定技术	153
第四节 大气污染的监测技术	156
第七章 机械量测量技术	160
第一节 汽轮机状态监测的基本参数	160
第二节 基本参数的测量原理	166
第三节 本特利·内华达 3500TSI 系统的监测器	178
第八章 火焰测量技术	200
第一节 炉膛火焰特性及检测原理	200
第二节 火焰检测装置	205
第三节 火焰监视在电厂中的应用	209
第九章 现代测量技术	215
第一节 传感器的发展趋势	215
第二节 智能传感器	217
第三节 虚拟仪表	223
第四节 现场总线仪表	225
第五节 软测量技术	228
第六节 传感器信息的融合技术	230
参考文献	233

第一章 自动测量技术基础

第一节 自动测量技术的发展和应

一、自动测量技术的发展

各个自然科学领域的产生与发展离不开测量技术,“科学,只有当人类懂得测量时才开始”,测量是人类认识自然的主要武器。自动测量技术是随着现代科学技术的发展而迅速发展起来的一门学科。自动测量技术早在20世纪20年代已经应用在工程试验和生产过程的自动控制中。1946年电子计算机诞生,并很快渗透到工业领域中。20世纪50年代初期出现了第一批机电一体化的产品,它将加工、测量以及计算机技术结合在一起,大大提高了加工精度和生产效率。

随着物理学、化学、材料学,特别是半导体材料学、微电子学、计算机及信息化、通信技术等方面新成果的产生,使新型的自动测量系统正在向器件集成化、信息数字化和控制智能化方向发展,新型或具有特殊功能的传感器不断涌现出来,已广泛地应用在能源与动力工程、机械工程、电子通讯、国防工业、交通运输以及航空航天等一切科学技术领域。自动测量技术的发展主要表现在以下几个方面。

1. 不断提高自动测量系统的测量精确度、扩大测量范围、延长使用寿命、提高可靠性

在科学技术不断发展的同时,对自动测量系统测量精确度的要求也相应提高。近年来,人们研制出许多高精度的自动测量仪器以满足各种需要。测量范围也不断扩大,如压力可从几十个帕的微压力到几千兆帕高压的压力传感器,能够测出极微弱磁场的磁敏传感器。从20世纪60年代开始,人们对传感器的可靠性和故障率的数学模型进行了大量的研究,使得自动测量系统的可靠性及寿命大幅度的提高,现在许多自动测量系统,如航天测量船使用的各类测量系统,可以在极其恶劣的环境下连续工作。目前人们正在不断努力,进一步提高自动测量系统的各项性能指标。

2. 应用新技术和新的物理效应,扩大自动测量的领域

自动测量原理大多以各种物理效应为基础,人们根据新原理、新材料和新工艺研究所取得的成果,将研制出更多品质优良的新型传感器。近代物理学的研究成果,如激光、红外、超声、微波、光纤、放射性同位素等的应用,都为自动测量技术的发展提供了更多的途径。研制出的传感器有光纤传感器、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。激光测距、红外测温、超声波无损探伤、放射性测厚等非接触测量技术也得到迅速发展。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,将是今后传感器技术研究和发展的方向。

3. 发展集成化、功能化的传感器

随着超大规模集成电路技术的发展,硅电子元件的集成化有可能大量地向传感器领域渗透。人们将传感器与信号处理电路制作在同一块硅片上,得到体积小、性能好、功能强的集成传感器,使传感器本身具有检测、放大、判断和一定的信号处理功能,例如,已研制出高

精确度的 PN 结的测温集成电路。又如,人们已能将排成阵列的成千上万个光敏元件及扫描放大电路制作在一块芯片上,制成 CCD 摄像机。今后,还将在光、磁、温度、压力等领域开发新型的集成化、功能化的传感器。

4. 采用计算机技术,使自动测量技术智能化

从 20 世纪 60 年代微处理器问世后,人们已逐渐将计算机信息处理与通信技术,构成监测与远程诊断网络,使自动测量仪器智能化,从而扩展了功能,提高了精确度和可靠性。计算机技术在自动测量技术中的应用,还突出地表现在整个自动测量工作可在计算机控制下,自动按照给定的测量实验程序进行,并直接给出测量结果,构成自动测量系统。其他诸如波形存储、数据采集、非线性校正和系统误差的消除、数字滤波、参数估计、软测量、多传感器信息融合、模式识别等方面,也都是计算机技术在自动测量领域中应用的重要成果。目前,新研制的自动测量系统大都带有微处理器。

二、自动测量在生产过程中的应用

测量是人类认识和改造客观世界的一种必不可少的手段。无论是在科学实验中,还是在生产过程中,一旦离开了测量,必然会给工作带来巨大的盲目性。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以及最后结果,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。检测技术就是利用各种物理效应,选择合适的方法与装置,将生产、科研、生活中的有关信息,通过检查与测量进行定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施。只有通过可靠准确的测量,才能判断科学实验和生产过程的正确性,才有可能进一步解决自然科学和工程技术上的问题。

自然科学的产生与发展离不开测量,现代科学技术的发展更离不开测量技术,特别是科学技术迅猛发展的今天,在电力工程、机械工程、电子通信、交通运输、军事技术等许多领域都离不开测量技术。

在我国社会主义经济建设中机械工业占有相当重要的地位,它既要以各种技术来装备各个工业领域,同时又要提供大量日用机电产品来满足人们日益增长的物质需求。经过 50 多年的努力和发展,我国不但可以生产具有尖端技术的航天、航空和航海设备,而且还可以生产各类高精确度的仪器仪表和机床等。

在火力发电厂中,为了保证机组安全、经济地运行,必须对表征热工过程状况的各种参数进行连续的检测和显示,随时向运行人员提供主、辅设备及热力系统的运行情况,以便监视生产,并将测量结果作为对生产过程控制和调节的依据。因此,热工测量是热工过程自动化的重要环节,而测量仪表常被喻为运行人员的耳目。另外,热工测量还为企业经济核算提供准确的数据。在发生事故时,异常参数的显示和记录,是事故分析和故障诊断的依据,据此可提出改进和防范措施。在机械制造行业中,通过对机床的许多静态、动态参数,如对工件的加工精度、切削速度、床身振动等进行在线测量,从而控制加工质量。在化工、电力等行业中,如果不随时对生产工艺过程中的温度、压力和流量等参数进行自动测量,生产过程就无法控制甚至发生危险。在交通领域,一辆现代化汽车装备的传感器就有十几种,分别用于测量车速、方位、转矩、振动、油压、油量、温度等。在国防科研中,测量技术用得更多,许多尖端的测量技术都是因国防工业需要而发展起来的。例如,研究飞机的强度,就要在机身和机翼上贴上几百片应变片并进行动态测量。在导弹、卫星、飞船的研制中,测量技术就更为重要,例如阿波罗宇宙飞船

用了1218个传感器,运载火箭部分用了2077个传感器,对加速度、温度、压力、应变、振幅、流量、声学等进行测量。测量技术也已广泛地进入人们的日常生活中,例如:空气调节、控制房间的温度和湿度等。

总之,测量技术已广泛地应用于科学研究、国内外贸易、国防建设、交通运输、工农业生产、医疗卫生、环境保护和人民日常生活中的各个方面,起着越来越重要的作用,成为国民经济发展和社会进步的一项必不可少的重要基础技术。因而,使用先进的测量技术也就成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

从另一方面看,现代化生产和科学技术的发展也不断地对测量技术提出更新的要求和课题,已成为促进测量技术向前发展的强大动力,同时科学技术的新发现和新成果也不断应用于测量技术中,有力地促进了测量技术自身的现代化。测量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。

第二节 自动测量系统的基本组成

自动测量系统或完整的测量装置通常是由传感元件、变换元件和显示元件组成,分别完成信息获取、变换、处理和显示等功能。图1-1给出了测量系统的组成框图。

1. 传感元件

传感元件是测量系统的信号拾取部分,作用是感受被测量并将其转换成可用的规范信号输出,通常这种输出是电信号。如

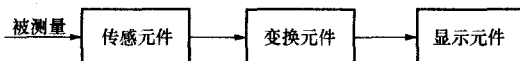


图 1-1 测量系统的组成

将温度、压力、流量、机械位移量转换成电阻、电容、电感或电势等。对传感元件的要求是:

(1) 输出信号必须随被测参数的变化而变化,即要求传感元件的输出信号与输入的被测信号之间有稳定的单值函数关系,最好是线性关系。

(2) 非被测量对传感元件输出的影响应小得可以忽略,否则将造成测量误差。在这种情况下,一般要附加补偿装置进行补偿或修正。

(3) 传感元件应尽量少地消耗被测对象的能量,并且不干扰被测对象的状态。

2. 变换元件

变换元件是传感元件与显示元件之间的部分。它将传感元件输出的信号变成显示元件易于接受的信号。变换元件有下列功能:

(1) 变换信号的数值,如放大传感元件输出的信号,以满足远距离传输处理信号以及驱动指示、记录装置的需要,如差压流量计中的开方器把传感元件输出的信号线性化。

(2) 传感元件输出的物理量不适合显示元件的要求时,要通过变换元件把信号进行转换,如差压信号变换成电信号等。变换元件的性能应稳定。

3. 显示元件

显示元件在热工测量中常叫二次仪表,显示元件是人和仪表联系的主要环节,它的作用是向观测者显示被测参数的量值。因此,要求它的结构能使观测者便于读出数据。显示方式有模拟式、数字式和屏幕画面三种。

(1) 模拟式显示。最常见的显示方式是仪表指针在标尺上定位,可连续指示被测参数的数值。读数的最低位由读者估计。模拟显示设备结构简单,价格低廉,是一种常见的显示方式。模拟式显示有时伴有记录,即以曲线形式给出测量数据。

(2) 数字式显示。直接以数字给出被测量值,所示不会有视差,但有量化误差。量化误差的大小取决于模/数转换器的位数,记录时可打印出数据。此种显示的形象性较差。

(3) 屏幕画面显示。它是计算机技术和电视技术在测量显示上的应用,是目前最先进的显示方式。它既能按模拟式显示给出曲线,也能给出数值,或者同时按两种分式显示。它还可以给出数据表格、曲线和工艺流程图及工艺流程各处的工质参数。对于屏幕画面显示方式,生产操作人员观察十分方便,他们可以根据机组运行状态的需要任意选择监视内容,从而提高了监控水平。这类显示器可配合打印或内存、外存作记录,还可以增加在事故发生时跟踪事故过程的记录,称为事故追忆。屏幕画面显示具有形象性和易于读数的优点,但显示元件设备的投资和技术要求都比较高。

按照显示元件的功能不同,显示仪表可分为以下几类:

(1) 指示被测参数的瞬时值的仪表,叫指示仪表(显示仪表)。

(2) 记录被测参数随时间变化的仪表,叫记录仪表。

(3) 显示被测参数对时间积分结果的仪表,叫积算仪表。

(4) 反映被测参数是否超过允许限值的仪表,叫信号仪表。

(5) 同一显示仪表具有多功能显示,如既能指示;又能记录和发信号并具有轮流显示、记录、报警等功能,这就是巡回检测仪表。

第三节 测量的基本方法

测量方法是基于测量原理所采用的手段。测量方法主要有六种分类。

1. 电测法和非电测法

两者的差别在于检测回路中是否含有测量信息的电信号转换。在现代测量中都是采用电测方法来测量非电量。广泛采用非电量电测法的原因是电测法可以获得很高的灵敏度和精确度,可实现远距离传输,便于实现测量过程的自动化、数字化和智能化。

2. 静态测量和动态测量

这两种测量方法是根据被测物理量的性质来划分的。静态测量是测量那些不随时间变化或变化很缓慢的物理量;动态测量是测量那些随时间而变化的物理量。静态与动态是相对的,可以把静态测量看作是动态测量的一种特殊形式。动态测量的误差分析比静态测量要复杂。

3. 直接测量和间接测量

直接测量是用预先标定好的测量仪表,对某一未知量直接进行测量,得到测量结果。例如用压力表测量压力;用万用表测量电压、电流、电阻等。直接测量的优点是简单而迅速,所以在工程上广泛应用。

间接测量是对几个与被测物理量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后把所得到的数据代入关系式中进行计算,从而求出被测物理量。间接测量方法比较复杂,一般在直接测量很不方便或无法进行时才采用间接测量。

4. 接触测量和非接触测量

接触测量是指测量时仪器的传感元件与工件表面或工质直接接触。

非接触测量是指测量时仪器的传感元件与工件表面或工质不直接接触。一般利用光、气、磁等中介物理量使传感元件与工件表面或工质产生联系。

5. 绝对测量和相对测量

绝对测量是指能直接从计量器具的读数装置读出被测量数值的测量，如用千分尺测量轴的直径等。

相对测量又称比较测量。先用标准器具调整计量器具的零位，测量时由仪器的读数装置读出被测量相对于标准器具的偏差，被测量的整个量值等于所示的偏差与标准量的代数和。

6. 在线测量和离线测量

在线测量又称主动测量，是在生产过程中进行的测量，它可直接测量生产过程中的参数或用来控制生产过程。离线测量又称被动测量，它是在非生产过程进行的测量。

第四节 测量系统的误差和质量指标

一、误差的表达形式

被测物理量所具有的客观存在的量值，称为真值。真值是在某一时刻和某一状态下，被测物理量的效应体现出的客观值或实际值，这是一个理想的概念，一般无法得到，实际测量中常用高精确度的测量值或平均值代表真值。所谓误差就是测量值和真值的差异。误差一般有两种表达形式。

1. 绝对误差

被测量的测量结果与真值之差称为绝对误差。

$$\text{绝对误差} = \text{被测量的测量结果} - \text{真值} \quad (1-1)$$

在被测量值大小相近时用绝对误差来说明测量误差是比较清楚的，但是当被测量值相差悬殊时，单纯用误差的绝对大小就很难确切地说明哪一个测量质量更高了。例如：测量 100℃ 温度时的绝对误差为 1℃，而测量 1000℃ 温度时的绝对误差为 5℃，当然绝对误差为 1℃ 要比绝对误差为 5℃ 小，但在两个被测量值相差悬殊的前提下是不宜用绝对误差比较的，而应是从被测量值大、容许的绝对误差大这一相对性出发，提出相对误差的概念。

2. 相对误差

相对误差有三种表达方式：

(1) 实际相对误差

$$\text{实际相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\% \quad (1-2)$$

(2) 示值相对误差

一般工程上所指的相对误差都以测量仪表的示值代替真值，这样计算所得到的相对误差实际上是示值相对误差。

$$\text{示值相对误差} = \frac{\text{测量示值的绝对误差}}{\text{测量示值}} \times 100\% \quad (1-3)$$

(3) 引用相对误差

为了工程上计算简便、合理，并且便于划分仪表的精确度等级，提出了引用相对误差的概念。

$$\text{引用相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{仪表量程}} \times 100\% \quad (1-4)$$

仪表量程是仪表同一测量档的刻度上限值和刻度下限值的差值。

二、误差的分类

按测量误差的性质来划分，可分为系统误差、随机误差和粗差。

1. 系统误差

定义：在相同条件下（指人员、仪表和环境等条件）多次测量同一被测量值过程中，误差值的大小和符号保持不变或者条件变化时按某一确定的规律变化的误差。

系统误差的大小表明测量结果偏离实际值的程度，可用“正确度”一词表征。

2. 随机误差

定义：在相同条件下，多次测量同一被测量值过程中，误差值的大小和符号总以不可准确预计的方式变化（时大时小，时正时负，没有确定规律），但具有抵偿性的误差。它是由于测量过程中某些尚未认知的原因或无法控制的因素所引起的，其大小、方向难以预测，无一定规律可循。所谓抵偿性，是指单次测量时误差无规律，即误差值有正负相消的机会，即单次测量不确定，但随着测量次数的增加，误差平均值趋于零。

随机误差的大小表明了测量结果的“精密度”，即重复测量同一量值时各个测量值之间相互接近的程度，或随机误差弥散的程度。测量的精密度越高，表明测量结果的重复性越好。

3. 粗差

粗差又称疏忽误差、粗大误差或过失误差。

定义：明显歪曲了测量结果的误差。通常是由于观察者对仪表不了解或思想不集中、疏忽大意导致错误的读数或不正确的观测所引起的，或测量条件的突然变化，或测量条件未达到预定的要求指标而匆忙测量等，都会带来粗差，如读错数、操作失误、记错数等，其误差值一般远大于正常条件下的误差值，无规律，出现次数极少。

含有粗差的测量值称为坏值或异常值。正确的测量结果不应包含粗差，实际测量中必须根据统计检验方法的某些准则去判断一组测量中哪个测量值是坏值，并在数据记录中将所有的坏值都予以剔除。

三、误差的判别与减少误差的方法

（一）系统误差

1. 系统误差判别

为了进行正确的测量，取得可靠的测量数据，在测量及测量过程中，必须尽量消除或减小系统误差，才能有效地提高测量精确度。但是形成系统误差的因素相当复杂或难以查明所有的系统误差，因此提出了如何发现系统误差的问题。下面介绍一些常用的发现恒值系统误差的判别方法。

（1）比较法。用多台同类或相近的仪表对同一被测量值进行测量，分析测量结果的差异来判断系统误差是否存在，以便提供一致性的数据。但该法只能说明一种仪表相对于另一种仪表有恒值系统误差，一般不能说明哪一种仪表存在误差。

(2) 改变测量条件法。当系统误差与许多影响量有关并且在某一测量条件下为一确定不变的值, 若改变测量条件为另一确定值时, 这就是属于随测量条件而变化的系统误差。利用这一性质, 即可通过改变测量条件得到几组测量数据, 通过分析比较可以判断是否存在系统误差。为进一步确定这种系统误差的大小, 可选用更高精确度的标准表与被测量表同时测量一个被测量, 若标准仪表显示值为 x_0 , 被测量仪表显示值为 x , 测量次数 n 个, 则测量仪表的系统误差 Δ 为

$$\Delta = x - x_0 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_{0i} \right) \quad (1-5)$$

(3) 理论计算与分析法。对于因测量方法或测量原理引入的恒值系统误差, 可通过理论计算与分析的方法来发现并加以修正。

(4) 残差分析法。把测量值的残差按测量值先后排列, 若其大小和符号有规律地变化, 就可直接由误差数据或误差曲线来判断有无系统误差。这种方法主要适用于发现有规律变化的系统误差。当偶然误差较系统误差显著时, 就不能通过观察法发现系统误差, 而只能借助于一些判据加以判别。

(5) 马利科夫 (Маликов) 判据。按测量先后顺序将等精确度测量得到的一组测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 排列好, 求出其相应的残差 $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$, 并将这些残差分为前后两组求和 (两组数目相等), 然后求两组残差和的差值 M , 即

$$M = \sum_{i=1}^k \nu_i - \sum_{i=k+1}^n \nu_i \quad (1-6)$$

式中, 当 n 为偶数时, $k=n/2$; 当 n 为奇数时, $k=(n+1)/2$ 。

若计算出 M 显著不为 0, 即差值 M 与残差 ν_i 相当或更大, 则说明测量中存在线性系统误差 (又称累进性系统误差)。该判据对线性系统误差很容易判断。

(6) 阿贝—赫梅特 (Abbe-Helmert) 判据。该判据适用于判别周期性误差。设一组等精确度测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 相应残差为 $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$, 令 $A = \left| \sum_{i=1}^{n-1} \nu_i \nu_{i+1} \right|$, 若

$$A > \sqrt{n-1} \sigma^2 \quad (1-7)$$

则认为测量中存在周期性系统误差。

2. 消除或减小系统误差的方法

(1) 修正法。在测量前预先对测量装置进行标定或检定, 求出误差, 再取与误差值大小相等、符号相反的值作修正值。在测量过程中, 将实际测量值加上修正值, 即可得到不包含系统误差的测量结果。

(2) 消除法。这是消除系统误差的根本方法, 要求测量人员对测量过程中可能产生的系统误差的因素、环节做细致分析, 并在测量前尽量将误差从产生根源上加以消除。例如, 为了防止测量过程中仪表零点变动, 在测量开始后或结束时都必须检查零点; 在测量某物理参数时, 从被测物体获取能量不应改变其工作状态; 选取观测位置消除视差, 在外界条件较稳定时读数; 使用仪表时, 正确选择仪表型号和量程等。

(3) 补偿法。例如用热电偶测量温度时, 热电偶冷端温度变化会引起系统误差, 消除方法之一是在测量回路中加一个冷端温度补偿器。

(4) 采取适当的测量方法。在实际测量中, 选择适当的测量方法, 使系统误差可以抵消

而不带入测量值中去。常用的方法有：

1) 抵消法。将测量中的某些条件(如被测物的位置)相互交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的作用,从而抵消误差。

2) 置换法。在一定测量条件下,选择一个已知的适当大小的标准量去替换被测量,并通过调整标准量来保证仪表的示值不变,这时被测量的值就等于标准量的值。只要测量装置的灵敏度足够高,就可达到消除系统误差的目的。

3) 零位法。用被测量与标准量直接进行比较,用指零仪指示仪表平衡状态,调整标准量使之与被测量相等,测量系统达到平衡,指零仪表指零。只要检测系统具有足够灵敏度,就能由标准量的示值得到被测量,电位差计测量热电势就是采用零位法。

4) 微差法。用与被测量相近的固定不变的标准量与被测量相减,取得微小的差值,再对这微小的差值进行测量。此法由于差值远远小于标准量,故测量微差的误差对被测量影响极小,其测量误差主要由标准量的精确度决定。

(5) 用对称测量法消除线性系统误差。对于随影响量(如时间、温度)作线性变化的系统误差,可在选择的中心测量点两侧分别进行两次对称测量。因两次测量的系统误差值大小相等、符号相反,取两次测量结果的算术平均值即可消除系统误差的影响。

(6) 用半周期偶数测量法消除周期性系统误差。对于周期性系统误差(可表示为 $\Delta = a \sin \frac{2\pi t}{T}$, t 为决定周期性误差的因素,如时间、角度等, T 为误差变化的周期),由于相隔 $T/2$ 的两次测量的误差大小相等而符号相反,故可以用相隔半个周期测量一次,取相邻两次测量值进行算术平均来消除系统误差。该方法广泛用于测角仪器上,其度盘的对径上装有一对或数对读数装置,故又称对径测量法。

(7) 周期检定法消除渐变误差。渐变误差的变化往往具有随机性,故不能采用一次性检定修正的办法去减小或消除。工程上常用的方法是将仪表定期与标准量(或标准表)比对或受检,并根据检定或比对结果去调整仪表零点和量程,将渐变误差限制在允许值以内,即仪表实际精确度不低于标准精确度。校准周期主要取决于渐变误差变化速度(曲线斜率)及允许的误差限。

(二) 随机误差

1. 随机误差的特性

随机误差是由测量过程中很多暂时未能掌握或不便掌握的许多独立的、微小的偶然因素(如测量装置、环境和人员方面原因)所引起的,因此对同一参数在相同条件下进行多次等精确度测量时,得到的是一系列不完全相同的测量值,每个测量值都会有误差。从每个测量结果来看,这些误差的出现似乎没有确定的规律,即由前一个误差的出现不能预计下一个误差的大小和方向,但从多次重复测量的结果看或就误差的整体而言,却具有统计规律。

若在测量结果中不包括系统误差和粗大误差,则测量列中的随机误差的分布图形一般有如下四个特点:

(1) 对称性。随机误差出现的概率,即绝对值相等的正误差和负误差出现的次数相等,以零误差为中心呈对称分布。重复测量的次数越多,则误差分布图形的对称性越好。

(2) 单峰性。绝对值小的随机误差比绝对值大的随机误差出现的概率大。从概率分布曲线看,零误差对应误差概率的峰值。

(3) 有界性。在一定条件下, 随机误差的绝对值不会超过一定的范围或出现的概率近乎为零。

(4) 抵偿性。在同样条件下, 对同一量的测量, 随着测量次数的增加, 随机误差的算术平均值 (或总和) 趋向于零。该特性是随机误差的最本质特性, 换言之, 凡具有抵偿性的误差, 原则上都可以按随机误差处理。

2. 减小随机误差的方法

产生随机误差的原因是很多独立因素综合作用引起的, 而且这些独立因素所起的作用也往往是随机的, 因此随机误差很难消除。如仪表的活动零件与静止零件间的摩擦、振动、电噪声、热噪声等都会使仪表产生随机误差。

对于已知的因素可以采取一定的对策, 例如加大驱动力, 减少摩擦因素的影响, 采用隔振措施减小振动的影响, 利用电、磁、热屏蔽等办法减小干扰因素的影响。在使用仪表时, 可以通过对同一被测量增加测量次数取平均值的方法, 有效地减小随机误差。此外, 选用以微处理器为核心的智能仪表, 利用数字滤波法也可减小随机误差。

(三) 粗大误差

粗大误差又称粗差, 产生的原因主要有测量人员的主观原因 (如经验不足、操作不当等) 和测量条件意外变化 (如机械振动、电网电压突然波动等)。粗差的数值一般比较大, 必然会对测量结果产生明显的歪曲, 一旦发现含有粗差的测量值, 应将其从测量结果中剔除。另一方面, 即使是一组正确的测量也有分散性, 它客观地反映了测量对象的随机波动特性, 若人为剔除一些误差较大的值也是不恰当的。因此, 在判断测量值中是否含有粗差时应特别慎重。

就方法而言, 一种是物理判别法, 即在测量过程中读错、记录错误、仪表突然受到振动时, 随时发现随时就剔除, 然后重新测量。另一种是统计法判别, 在整个测量完成后不能确定哪一个测量值是坏值或对怀疑为异常的值又找不出产生这种异常数据的明确原因时才采用。统计法的基本思想在于: 给定一个置信概率 (例如 0.99) 并确定一个置信限, 凡超过这个限值的误差就认为它不属于随机误差范畴, 而是粗差, 应予以剔除。

对粗大误差, 除了采用从测量结果中加以判别和剔除外, 更重要的是做到以下几点: 加强测量者的工作责任心, 提高测量操作技能, 以严格的科学态度对待测量工作; 保证测量条件满足和稳定, 或者避免在外界条件发生剧烈变化时进行测量; 为了及时发现或防止产生粗差, 还可采用不等精确度测量或相互之间的校核方法, 如对某量进行测量时, 可用两台仪表或两种不同方法, 由两位测量者进行测量、读数和记录。

四、测量系统的质量指标

1. 允许误差

仪表出厂时应保证它的误差不超过某一规定值, 该规定值叫做仪表的允许误差。允许误差以引用相对误差的形式表示。

2. 精确度

测量误差的存在影响了测量结果的准确性。对任何一次有意义的测量, 都要尽量减小误差对测量结果的影响。常用精密度和正确度来衡量测量结果与被测参数真值之间的精确程度。

(1) 精密度。精密度表征了对同一被测量在相同条件下, 使用同一仪表, 由同一操作者

进行多次重复测量所得测量值彼此之间接近的程度,也就是说,它表示测量重复性的好坏。精密度反映随机误差的影响。随机误差小,测量的重复性就好,精密度也高;反之重复性差,精密度也低(如手枪打靶:打靶成绩为7环、8环和7环的精密度就比打靶成绩为7环、10环和7环的精密度要高)。

(2) 正确度。正确度表示测量值与被测量真值之间的符合程度。正确度反映了系统误差的影响,误差愈小,正确度愈高;反之误差愈大,正确度愈低(如手枪打靶:打靶成绩为7环、10环和7环的正确度就比打靶成绩为7环、8环和7环的正确度要高)。

(3) 仪表的精确度等级。精确度就是精密度和正确度的综合描述。它反映测量结果与真值的一致程度。而仪表的精确度等级则是按国家统一规定的允许误差大小划分的,国家统一规定的允许误差去掉百分号就是仪表的精确度等级数字。

划分的仪表精确度等级系列大致为 $\cdots 0.02$ 、 0.04 、 0.05 、 0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.5 、 4.0 …。数字愈小,精确度愈高。

仪表在出厂时,不仅要在产品说明书中说明仪表的精确度等级,而且还要在仪表的表盘上标出等级数字。例如,在仪表指示面板上刻有1.0数字,表明该仪表的精确度等级为1.0级,其允许误差为 $\pm 1.0\%$,即该仪表的允许误差不超过该仪表量程的 $\pm 1.0\%$ 。一台合格的仪表,其误差要小于或等于该仪表的允许误差,否则为不合格仪表,应酌情降级使用。

例如某一温度表的精确度等级为1.0级,量程为 $100\sim 1100^{\circ}\text{C}$,那么在测量中可能产生的仪表误差不应超过量程的1%,仪表的各处示值的绝对误差均不允许超过 $(1100-100)\times (\pm 1.0\%) = \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

应用仪表精确度这一概念时必须注意,在测量工作中只有使用同一精确度等级且量程相同的仪表时,其仪表的允许误差才相等,与被测参数大小无关。而对同一精确度等级仪表,如果仪表量程不同,其允许误差是不同的。量程愈大,仪表允许误差(以绝对误差形式表示)愈大。故在选用仪表时,在满足被测量数值范围的前提下,尽可能选择量程小的仪表,以提高测量的准确性。仪表刻度盘的分度值不应小于仪表的允许误差(以绝对误差的形式表示)值,小于允许误差值的分度是没有意义的。

3. 变差

在外界条件不变的情况下,使用同一仪表对被测参数进行正反行程(即逐渐由小到大再由大到小)测量时,在同一被测参数值下仪表的示值却不相同,这种差异的程度用变差予以表征。变差又称回程误差和滞后误差。在全量程范围内,上下行程测量差异最大的数值与仪表量程之比的百分数为测量系统或仪表的变差。变差通常是由仪表中的弹性元件、磁性元件等滞后现象引起的,也可能是由机械元件之间的间隙等原因引起的。仪表变差不应超过允许误差。为了测出仪表变差,在校验仪表时,一般应进行上、下行程的校验。

4. 灵敏度

灵敏度是表征仪表静态特性的一个基本参数,它反映仪表对被测参数变化的灵敏程度,其值为仪表的输出信号的变化量与产生该变化量的输入信号的变化量之比。

对于具有线性刻度关系的仪表,灵敏度又是一个常数。对于非线性刻度的仪表,其灵敏度随输入量的变化而变化。

仪表的灵敏度可以通过静态校准求得。灵敏度的量纲是系统输出量量纲与输入量量纲之比。系统输出量量纲一般指实际物理输出量的量纲,而不是刻度量纲。

5. 分辨率

分辨率是与灵敏度有关的仪表的另一性能指标，它反映测量系统或仪表不灵敏的程度。所谓分辨率是指能够引起测量系统或仪表输出量发生变化所对应输入量的最小变化量。通常把不能引起输出量变化的最大输入信号的值称为仪表的不灵敏区（或死区）。

6. 线性度

仪表的线性度（非线性误差）是衡量实际特性曲线与理想特性曲线符合程度的一项指标。理想仪表的输入和输出关系曲线应是线性的，即灵敏度为常数。但实际上并非如此，实际输入和输出特性曲线往往偏离理想特性曲线。偏离程度用“线性度”加以表征，其值用仪表测量范围内实际特性曲线偏离理想特性曲线的最大偏差与仪表全量程的百分比表示。

第二章 温度测量技术

第一节 概 述

温度在生产过程中是一个既普遍而又重要的物理量。生产过程中都伴随着物质的物理和化学性质的改变,都存在有能量的转换和转化,这些变化都是在一定的温度范围内进行的。在电力生产过程中,最普遍的交换形式是热量的交换,因此,温度测点高达近百个,温度是最重要的被测量之一。在化工生产过程中,温度对许多产品的质量和产量都有很大影响,要严格地测量和控制温度才能完成化工产品的生产。可见温度的测量与控制是保证生产过程正常进行,实现安全、经济、优质生产的关键之一。

一、温度的概念

温度是衡量物体冷热程度的物理量,我们对周围环境或物体冷热的感觉,以及自然界中的热效应,都是用温度这个物理量来描述的。温度高称为热,温度低称为冷。物体的冷热是由物体内部分子平均动能的大小所决定的,分子运动越快,平均动能越大,物体越热;运动越慢,平均动能越小,物体越冷。

应当注意,热量和温度是两个不同的物理量,温度相等的两个物体可能具有不同热量;相反,具有相同热量的两个物体,其温度不一定相等。热量的计量单位为焦耳(J),温度则为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

两个温度不同的物体,在仅能发生热交换的条件下互相接触,热量将由温度高的物体传给温度低的物体,经过一定时间后达到热平衡状态,表现出相同的温度。人们利用这一原理,用已知物质的物理性质和温度之间的关系,设计出各种接触式温度测量仪表,如利用物质热胀冷缩制成玻璃温度计;利用物质的电阻值随温度变化制成电阻温度计;利用物质的热电效应制成热电偶温度计;利用热辐射原理制成辐射式温度计等。

二、温标的概念

用来度量温度高低的标尺称为温标,它是用数值来表示温度的方法,不同温标对同一定点的温度表示的数值是不同的。

1. 摄氏温标($^{\circ}\text{C}$)

摄氏温标也叫百分温标,它是利用水银等物体体积热膨胀的性质建立起来的,标准大气压下,冰的熔点为 0°C ,水的沸点为 100°C 的一种温标,在 0°C 到 100°C 之间分成一百等分,每一等分为一摄氏度,即 1°C 。

2. 华氏温标($^{\circ}\text{F}$)

华氏温标定义在标准大气压下,冰的熔点为 32°F ,水的沸点为 212°F ,中间分成180等分,每一等分为一华氏度,即 1°F 。

摄氏温标与华氏温标之间的关系为

$$\text{华氏温度} = (1.8 \times N + 32)^{\circ}\text{F} \quad (2-1)$$

式中: N 代表摄氏温标的温度示值。

华氏温度单位在我国法定计量单位中已被淘汰,如需引用时应换算为法定单位。