



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

火电厂 热工检测技术

程 蓓 主编



中国电力出版社

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



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

火电厂 热工检测技术

主 编	程 蓓	
编 写	程蔚萍	刘一福
	刘子亚	周 斌
主 审	祁锁荣	



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书分四部分，第一部分讲述测量学的基本理论；第二部分重点讲述各类热工测量仪表的原理、结构、安装、使用、校验、维修等知识，包括发电厂火电机组常用的热工仪表及新型测量仪表；第三部分介绍火电厂热工检测技术和系统；第四部分介绍电力行业热工仪表工种职业技能鉴定内容。书中内容以目前最先进的成熟技术为主，以测量原理、基本结构、系统组成、误差分析、系统安装调试和故障排除为主线，重点讲解电厂中各种热工参数的测量方法和仪表，并加入了一些先进的智能仪表，充分反映了热工测量中的新知识、新技术。

本书体系独特，各章节相互独立，以能力为本，灵活实用，符合高职教学规律。本书注重理论与实践结合，适合在一体化教室内授课，可在授课内容中穿插演示及实验项目，有助于学生对测量原理和结构的理解。

本书可作为高职高专院校电力技术类、自动化类专业“热工测量及仪表”、“热工检测技术”、“传感器及检测技术”等相关课程的教材，也可作为电厂技术人员职业技能鉴定培训教材，同时还可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电厂热工检测技术/程蓓主编. —北京：中国电力出版社，2008

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7271 - 6

I. 火… II. 程… III. 火电厂—热工测量—职业教育—教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 094591 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 7 月第一版 2008 年 7 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 400 千字
定价 26.80 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

本书讲述测量学的基本理论,重点讲述各类热工测量仪表的原理、结构、安装、使用、校验、维修等知识,包括发电厂火电机组常用的热工仪表及新型测量仪表;介绍电力行业热工仪表工种职业技能鉴定内容。本书是为适应高职高专院校热工检测技术教学、提高学生职业素质而编写的一本教材。

本书是在作者多年教学实践和生产实践的基础上,结合现有的教学讲义和最新技术的发展编写而成的。本书体现了理论教学和实践教学并重的宗旨,突出仪表结构、安装、使用、校验、维修方面的相关知识;结合职业技能鉴定标准,融入理论和技能知识要求;体系独特,各章节相互独立,每章理论与实践结合,适合在一体化教室内授课。在授课内容中穿插实验演示项目,有助于学生对测量原理和结构的理解。本书内容翔实,不同院校可根据实际情况和课时需要选授选学部分内容。除纸质教材外,本教材配套有教案、讲稿、课件、视频、题库、模拟试卷、实验实训指导、课程设计指导讲义、阅读文献等多种教学资源,并已建立精品课程网站,网址:<http://61.191.23.99/jpkc/rgyb/index.html>,本教材配套有留言交流网站,网址:<http://61.191.23.99/jpkc/rgyb/liuyanban/index2.asp>。

本书由安徽电气工程职业技术学院程蓓教授主编。全书共11章,第1、2、4、10章和附录由程蓓教授编写,第3、5、6章由安徽电气工程职业技术学院程蔚萍副教授编写,第7章由安徽省电力科学研究院刘一福高级工程师编写,第8、9章由安徽电气工程职业技术学院刘子亚老师编写,第11章由安徽电气工程职业技术学院周斌老师编写。全书由安徽省电力科学研究院教授级高级工程师祁锁荣担任主审,合肥工业大学肖本贤教授参与审稿。

在编写本书过程中,得到了安徽省电力科学研究院、合肥发电厂、大唐洛河电厂、田家庵电厂以及安徽电气工程职业技术学院等单位许多专家和技术人员的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,本书不足之处在所难免,恳请广大读者指正赐教。

编者

2008年6月

目 录

前 言

第 1 章 热工测量的基础知识	1
1.1 热工测量概述.....	1
1.2 测量的概念和测量方法	2
1.3 热工测量仪表的组成	5
1.4 测量误差及处理	7
1.5 仪表的质量指标	17
1.6 热工仪表的校验	19
1.7 热工计量	20
1.8 智能仪表	23
复习思考题	27
第 2 章 温度测量及仪表	28
2.1 国际温标与温标传递	28
2.2 温度测量仪表的分类	31
2.3 膨胀式温度计	32
2.4 热电偶.....	37
2.5 热电阻.....	52
2.6 模拟及数字式显示仪表.....	57
2.7 非接触式测温仪表	67
复习思考题	73
第 3 章 压力测量及仪表	75
3.1 液柱式压力计	76
3.2 弹性式压力计	78
3.3 压力变送器	85
3.4 数字压力表	94
3.5 压力测量仪表的选择和安装	96
复习思考题	99
第 4 章 流量测量及仪表	100
4.1 流量测量概述.....	100
4.2 皮托管流量计.....	102
4.3 节流式流量计.....	103
4.4 超声波流量计.....	116

4.5 其他流量计	119
复习思考题	124
第5章 物位测量及仪表	125
5.1 概述	125
5.2 就地水位计	126
5.3 差压水位计	128
5.4 电接点水位计	134
5.5 浮力式液位测量	137
5.6 超声波物位测量	139
5.7 核辐射式物位测量	142
5.8 电容式物位测量	145
5.9 其他物位测量	147
5.10 煤粉仓粉位测量	150
复习思考题	152
第6章 成分分析	154
6.1 氧化锆氧量计	154
6.2 烟气中飞灰含碳量的测量	165
6.3 烟气中一氧化碳的测定	167
6.4 大气污染监测系统	169
复习思考题	173
第7章 锅炉热工检测技术	174
7.1 锅炉热工检测的内容和重要性	174
7.2 锅炉一、二次风粉在线监测技术	177
7.3 炉膛火焰检测技术	181
7.4 锅炉蒸汽和给水流量参数的测量补偿	187
7.5 循环流化床(CFB)锅炉热工检测	190
复习思考题	193
第8章 汽轮发电机组热工测试	195
8.1 汽机监视仪表(TSI)概述	195
8.2 非接触式电涡流传感器	199
8.3 TSI的安装调试	204
复习思考题	206
第9章 数据采集系统	207
9.1 数据采集系统的基本功能	207
9.2 数据采集基本原理	216
复习思考题	224
第10章 热工测量新技术	225
10.1 光电传感器及其应用	225
10.2 光纤传感器及其应用	227

10.3 超声波传感器及应用	230
复习思考题	233
第 11 章 热工仪表检修工技能鉴定规范	234
11.1 职业概况	234
11.2 热工仪表检修工鉴定要求	234
11.3 鉴定内容	236
11.4 热工仪表检修工作票样例	241
11.5 热工仪表检修项目操作票样例	242
11.6 试卷样例	242
附录	250
附表 1 铂铑 10—铂热电偶分度表	250
附表 2 铂铑 13—铂热电偶分度表	250
附表 3 铂铑 30—铂铑 6 热电偶分度表	251
附表 4 镍铬—镍硅（镍铝）热电偶分度表	252
附表 5 镍铬—康铜热电偶分度表	252
附表 6 孔板与阻流件之间所要求的直管段长度	253
附表 7 喷嘴和文丘里喷嘴所要求的直管段长度	254
附表 8 经典文丘里管所要求的直管段长度	255
参考文献	256

热工测量的基础知识

1.1 热工测量概述

测量是人类认识和改造世界的一种重要手段。在人们对客观事物的认识过程中,需要进行定性、定量的分析,定量分析就需要进行测量。测量是通过实验方法对客观事物取得定量数据的过程,通过大量的观察和测量,人们逐步准确地认识各种客观事物,建立起各种定理和定律。例如,牛顿的三大定律,没有大量测量验证,是不可能得出结论的。科学家 Дмѣтрий Ивѣнович Менделѣев (德米特里·伊万诺维奇·门捷列夫) 在论述测量的意义时说过一句名言:“没有测量,就没有科学。”

科学的进步,生产的发展,都需要用测量技术进行定量分析,以取得科学的数据。离开测量,人类就不能真正准确地认识世界,也不能生产出合格的产品,尤其是现代化工业大生产,用在测量上的工时和费用占生产总成本的比例越来越大。例如,在大规模集成电路的生产成本中,测量成本已超过 50%。器件生产厂家也强烈要求降低集成电路测试仪价格,提高测试效率和减少综合测试成本。因此,提高测量水平,降低测量成本,对国民经济各个领域的发展都是至关重要的。

在各个历史时期,测量水平的高低可以反映出一个国家科学技术发展的状况。因此,努力提高测量水平,实现测量手段和方法的现代化,是实现科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。

在当今信息时代,测量技术——获取信息、通信技术——传递信息、计算机技术——处理信息被称为信息社会三大支柱。可见,测量是一门很重要的科学技术。

“测量技术”是研究测量原理、测量方法和测量工具的一门科学,是人们认识事物本质所不可缺少的手段,它的主要应用有三个方面。

(1) 过程监测:对过程参数的监测。

(2) 过程控制:为生产过程的自动控制提供依据。

(3) 试验分析与系统辨识:解决科学上的和过程上的问题,一般需要综合运用理论和实验的方法。

不同的科技和生产领域,有不同的测量项目和测量特点。测量技术可分为若干分支,如力学测量、电学测量、热工测量等。本书主要探讨热工测量方面的知识。

一、热工测量的概念

热工测量是指在热工过程中对各种热工参数,如温度、压力、流量、物位等的测量。用来测量热工参数的仪表称为热工测量仪表。电厂习惯上把转速、振动、位移和应力等参数的测量,以及一部分在线成分分析也归于热工测量的范围。

二、热工测量的重要意义

凡涉及热力过程的各种生产中,热工测量是在线监测工艺状态和检查设备情况的主要手段。电厂中热工测量提供的信息和数据是控制操作、经济核算和设备维护的依据,也是研究和改进生产所需的原始资料。通过测量热工参数,可以准确及时地反映热力设备以及热力系

统的运行工况，为运行人员提供操作的依据，并且为热工自动控制系统和装置提供所需的信号。提高测量技术水平是改善电厂生产管理的重要措施。

热工测量工作的主要内容：①按照安全经济生产、改善劳动条件和提高劳动生产率的要求，选择被测参数和相应的仪表，确定取样位置（即测点），设计热工测量系统、控制盘台和控制室；②检定测量器具；③安装、调试和维护测量器具与测量系统；④配合主机热力试验的特殊测量。

三、热工测量仪表的发展

在电力生产过程自动化发展的初级阶段，首先是应用一些自动监测仪表来监视生产。在 20 世纪 50 年代以前，火电机组自动化程度较低，采用常规模拟式仪表对运行参数进行检测，并用常规控制仪表对正常运行的重要参数（如锅炉汽包水位、汽温、汽压、汽轮机转速等）实行自动控制。20 世纪 70 年代以来，电子计算机在火电厂自动化中得到实际应用并迅速发展。起初它是和模拟式控制仪表配合，对机组运行状态进行有效监视。在自动化技术工具方面，新产品不断出现，气动Ⅱ型和电动Ⅱ型单元组合式仪表刚投入生产不久，气动Ⅲ型和电动Ⅲ型单元组合式仪表就相继问世，并进一步发展到具有多功能的组装仪表、智能式仪表，为实现各种特殊控制规律提供了条件。新型智能传感器和控制仪表的问世使仪表与计算机之间的直接联系极为方便。

我国电力行业从 20 世纪 80 年代中期开始引进和应用分散式控制系统（DCS）。现在，200MW 以上的火力发电机组都采用 DCS 进行控制。DCS 将数据显示、实时监控等功能集中化，其功能包括数据采集系统（DAS），完成对在线运行中的大量热工参数的动态信息的采集、处理、储存和历史追忆等。

目前热工测量仪表的发展势头迅猛。随着电厂热力设备日益向大容量、高参数发展，以及自动化水平的不断提高，对热工测量的要求也越来越高，促使采用新原理、新材料和新结构的热工仪表不断涌现。新型测量元件不断研制出来，超声波技术、光电技术的应用日益广泛。

随着现代科学技术的进步，学习热工测量及仪表方面的知识，对于管理和开发现代化电力生产过程是十分必要的。

1.2 测量的概念和测量方法

1.2.1 测量的定义

所谓测量，就是利用测量工具，通过实验的方法将被测量与同性质的标准量（即测量单位）进行比较，以确定出被测量是标准量多少倍数的过程。所得到的倍数就是被测量的值，即得到的测量结果。被测量是指需要定量的物理量。各种物理现象、物理过程、物理状态的可测量特征，统称为物理量。



[实验演示 1] 测量长度

设备、工具：一根导线或其他线段（长度约 2m）、一把卷尺

实验步骤：1) 以 1m 为标准量，比较线长与 1m 长度的倍数关系；

2) 以 1cm 为标准量，比较线长与 1cm 长度的倍数关系；

3) 以 1mm 为标准量，比较线长与 1mm 长度的倍数关系。

实验结果讨论：取不同的测量单位，所得测量值是否相同？

早在 1860 年 James Clerk Maxwell (詹姆斯·克拉克·麦克斯韦) 就提出: 每个物理量都可以被表示为一个纯数和一个单位的乘积, 即

$$x \approx qU \quad (1-1)$$

式中 x ——被测量;

q ——测量值, 即被测量与所选单位的比值;

U ——测量单位。

式 (1-1) 为测量的基本方程式。

根据式 (1-1), 要使测量结果有意义, 有两个要求: 用来进行比较的标准量应该是国际上或国家所公认的, 且性能稳定; 进行比较所用的方法和仪表必须经过验证。

1.2.2 国际单位制与我国法定计量单位

从式 (1-1) 中可知, 被测量的值与所选用的测量单位有关。测量单位人为规定, 并得到国家或国际公认。在“国际单位制”诞生前, 各国、各地区的测量单位各不相同, 同类被测量比较时, 必须进行单位换算, 很不方便, 且有些测量单位制订的科学性和严密性较差。随着科学技术的发展和国际科技、经济交往的加强, 人们迫切要求制订统一的测量单位。1960 年, 第十一届国际计量大会 (CGPM) 通过了“国际单位制 International System of Units”, 代号为 SI, 符号“SI”来自法文的 le système international d'unités。1875 年 5 月 20 日, 17 个国家在法国巴黎签署“米制公约”, 这是一项在全球范围内采用国际单位制和保证测量结果一致的政府间协议。100 多年来, 国际米制公约组织对保证国际计量标准统一、促进国际贸易和加速科技发展发挥了巨大作用。1999 年, 第 21 届国际计量大会决定把每年的 5 月 20 日确定为“世界计量日”。

一、国际单位制

国际单位制是由国际计量大会采纳推荐的一种一贯单位制, 它对长度、质量、时间、电流和热力学温度等七种基本单位作了统一规定。其他的物理量单位, 可以由这七种基本单位一一导出。实践证明, 国际单位制具有科学、合理、精确、实用等优点, 给生产建设和科技发展带来了很大方便。

在国际单位制中有 7 个独立定义的基本单位。

(1) 长度单位: 米 (m)。1m 是 $1/299792458$ s 时间间隔内光在真空中行程的长度。

(2) 质量单位: 千克 (kg)。1kg 等于国际千克原器的质量。

(3) 时间单位: 秒 (s)。1s 是铯 133 原子基态的两个超精细能级间跃迁的辐射周期的 9192631770 倍的持续时间。

(4) 电流强度单位: 安培 (A)。在真空中相距 1m 的两根无限长而截面积可忽略的平行直导线内通过一恒定电流, 若这恒定电流使两条导线之间每米长度上产生的力为 2×10^{-7} N, 这个恒定电流的电流强度为 1A。

(5) 热力学温度单位: 开尔文 (K)。1K 是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

(6) 物质的量单位: 摩尔 (mol)。1mol 是一系统的物质的量, 该系统中所包含的基本单元数与 0.012 kg 碳 12 的原子数目相等。

(7) 发光强度单位: 坎德拉 (cd)。1cd 是一光源在给定方向的发光强度, 该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射, 且在此方向上辐射强度为 $1/683$ W 每球面度。

这7个基本单位所对应的物理量称作基本量，由基本量导出的单位称作导出单位，其对应物理量是导出量。

有些导出单位还有专门名称和特有符号，如赫兹 (Hz)、牛顿 (N)、帕斯卡 (Pa)、伏特 (V)、焦耳 (J)、瓦特 (W)、库仑 (C)、法拉 (F)、欧姆 (Ω)、亨利 (H)、韦伯 (Wb)、特斯拉 (T) 等。

除了基本单位和导出单位，还有两个辅助单位：平面角以弧度为单位 (rad)，立体角以球面度为单位 (sr)。

二、我国的法定计量单位

我国于1984年2月27日由国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。我国法定的计量单位以国际单位制为基础，结合我国实际情况增加了一些非国际单位制单位。

我国的法定计量单位包括：

- (1) 国际单位制的基本单位；
- (2) 国际单位制的辅助单位；
- (3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位；
- (4) 国家选定的非国际单位制单位；
- (5) 由以上单位构成的组合形式的单位；
- (6) 由词头和以上单位构成的十进倍数和分数单位。

法定单位的定义、使用方法等，由国家计量局另行规定，可参阅有关资料。

1.2.3 测量方法

因自然界中的物理现象千姿百态，所以，各物理量的形式及其测量方法也就多种多样，各不相同。归纳起来，根据获得测量结果的方法不同，分为直接测量、间接测量和组合测量。

一、直接测量法

凡是能利用测量仪器、仪表等工具，直接测量、读出物理量值的方法叫直接测量法。例如，电路中的电流及电源电动势的大小，就可用电流表和电压表直接测出数值。又如，时间的长短、物体的长度，就可用钟表和直尺直接测出数据。直接测量方式过程简单，操作容易，读数迅速，广泛应用于工程测量中。

用直接测量法，能够直接从仪表刻度盘上或从显示器上读取被测量数值，又称为直读法。用欧姆表测量电阻时，从指示的数值可以直接读出被测电阻的数值。这一读数被认为是可信的，因为欧姆表的数值事先用标准电阻进行了校验，标准电阻已将它的量值和单位传递给欧姆表，间接地参与了测量。直读法测量虽然简便迅速，但其测量的准确度通常不高。



【实验演示2】测量电阻

设备、工具：一只万用表、一只可调电阻

实验步骤：1) 万用表选择电阻挡，调零；

2) 测电阻阻值，观察数字或指针读数；

3) 调节电阻阻值，观察读数变化。

实验结果讨论：实验演示1和2采用的是直接测量方法还是间接测量方法？

二、间接测量法

有一些物理量,因受某些条件限制,不能或不易用仪器、仪表等直接测出,但根据有关物理及几何知识,能利用仪器、仪表或一些特殊工具,先直接测出与其有关的其他物理量,再根据这些已测量与待测量间的特定关系,读出或计算出待测物理量的值,这种方法叫间接测量法。例如用电压表测电压 U ,用电流表测电流 I ,通过功率公式 $W=IU$ 来测量功率。

间接测量方法一般比直接测量要复杂一些,但随着计算机的应用、仪表功能的加强,测量过程中的数据处理完全可以由计算机快速而准确地完成,因而间接测量方法的应用正在扩大。

电厂中大多数热工参数的测量都是使用间接测量法,通常利用传感器来检测被测量。

三、组合测量法

当某项测量结果需要用多个未知参数表达时,可通过改变测量条件进行多次测量,根据函数关系列出方程组求解,从而得到未知量的值,这种测量方式称为组合测量,又称“联立测量”。这种测量方式比较复杂,测量时间长,但精度较高,一般适用于科学实验。

此外,测量还有其他的分类方法,如根据仪表是否与被测对象直接接触,分为接触测量法和非接触测量法;根据被测物理量的时间特性,分为静态测量和动态测量。

1.3 热工测量仪表的组成

热工测量仪表的种类繁多,结构多样,用途各异。有时同类仪表在外观上可能差异很大,而外观或结构相同的仪表其作用和原理却并不相同。但从本质上看,热工仪表通常有几个必要的组成部分。

1.3.1 组成

热工测量仪表通常由感受件、中间件和显示件三部分组成,如图1-1所示。这三部分可以独立存在,也可以是结合成整体。

感受件直接与被测量对象相联系,感受被测参数的变化,并将被测参数信号转换成相应的便于进行测量和显示的信号输出。中间件将感受件输出的信号直接传输给显示件或进行放大和转换,使之成为适应显示件的信号。显示件向观察者反映被测参数的量值和变化。

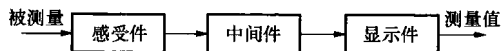


图 1-1 热工仪表组成示意图

【实验演示 3】用热电偶测量温度

设备、工具：一只热电偶、一只与热电偶配套的温度数显表、连接导线两根、盛有热水的容器

实验步骤：1) 将热电偶通过导线与数显表连接,注意正负极性;

2) 将热电偶测量端置于热水容器中;

3) 观察数显表读数变化。

实验结果讨论：热电偶、数显表、导线分别属于测量系统的哪部分?

一、感受件

感受件又称敏感元件，是测量系统直接与被测对象发生联系的部分，又称一次元件。它是能感知并检测出被测对象信息的装置。

感受件通常指传感器，是能把特定的被测量信息（包括物理量、化学量、生物量等）按一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置，简单地说，是提供与输入量有确定关系的输出量的器件。

所谓可用信号，是指便于处理和传输的信号。目前传感器的可用信号主要是电信号，即把外界非电信息转换成电信号输出。随着科学技术的发展，传感器的输出更多的将是光信号，因为光信号更便于快速、高效地处理与传输。

传感器的输出能否精确、快速和稳定地与被测参数相转换，决定着测量系统的好坏。理想的敏感元件通常应满足以下要求：

- (1) 敏感元件输入与输出之间应该有稳定的单值函数关系；
- (2) 敏感元件应该只对被测量的变化敏感，而对其他一切可能的输入信号不敏感；
- (3) 在测量过程中，敏感元件应该不干扰或尽量少干扰被测介质的状态；
- (4) 其他：如反应快，价格低等。

当然，实际使用的敏感元件几乎都不能完全满足上述要求；通常都要求它们有一定的使用条件，并采用补偿、修正等技术手段，以保证测量的精确度。

二、中间件

中间件也称连接件、传输变换部件，是传感器和显示件中间的部分。

中间件又细分为传输通道和变换器。传输通道是仪表各环节间输入、输出信号的连接部分，有电线、光导纤维和管路等。变换器又叫变送器，它是将传感器输出的信号变换成显示件易于接收的部件，对传感器输出信号进行处理，例如将微弱的信号放大、将传感器输出信号统一成标准信号等。对变换器的要求是：性能稳定，精确度高，使信息损失最小。

三、显示件

显示件是测量系统直接与观测者发生联系的部分，也称二次仪表。

显示装置的基本形式根据显示方式不同，分为模拟式显示元件、数字式显示元件、屏幕式显示元件。

模拟式仪表在 20 世纪 60 年代居多，通常用指针指示刻度值，配上记录纸或信号器，来显示被测量变化趋势或越限报警，也有用图形、图像来显示被测量的。

目前在现代化电厂中广泛使用的是数字式和屏幕式显示装置。数字显示直接以数码形式给出被测量值；屏幕显示可显示数值，也可显示模拟图形曲线，具有形象和便于读数以及被测参数间比较等优点。

1.3.2 热工测量系统概念

在《通用计量术语及定义》(JJF1001--1998)中对测量系统的定义为：组装起来以进行特定测量的全套测量仪器和其他设备。通常完成热工测量中某一个或几个参数测量的设备称为热工测量系统。热工测量系统可能是仅有一只测量仪表的简单测量系统，也可能是一套复杂的、包括多只仪表、高度自动化的测量系统。

热工测量系统可按显示件及计算机应用情况不同,分为模拟量测量系统、数字量显示测量系统、微机型多参数采集显示系统以及数据采集系统(DAS)等。

对于组成测量系统的仪表,也可简单地按照被测参数的名称不同,分为压力仪表、温度仪表、流量计、料位仪、成分分析仪表等。

1.4 测量误差及处理

1.4.1 测量误差表示方法

在测量技术中,对测量误差的研究是首先要关注的问题;在测量过程中,由于测量仪器精度、实验条件局限和各种因素的影响,测量结果总是与实际待测量有一定差异,即存在测量误差。测量误差有几种表示方式:绝对误差、相对误差和折合误差。

一、绝对误差

这种表示方法是用误差绝对值的大小来表示误差和评定实验的精确度。如果用 x 表示测量值, x_0 表示被测参数的实际值,也称真值,则

$$\delta = \text{测量值} - \text{真值} = x - x_0 \quad (1-2)$$

式中 δ ——测量的绝对误差;

x ——测定值(例如仪表指示值);

x_0 ——被测量的真值。

真值或称被测量真值是在确定条件下客观存在的值,但因为任何测量都是有误差的,所以真值一般无法得到,通常可采用标准表测得的值作为真值。

对于绝对误差,应注意下面几点:

- (1) 绝对误差是有单位的量,其单位与测定值和实际值相同。
- (2) 绝对误差是有符号的量,其符号表示出测定值与实际值的大小关系。
- (3) 测定值与被测量实际值之间的偏离程度和方向通过绝对误差来体现。

(4) 绝对误差虽然重要,但是它不能给出实验精确度的完整概念。在绝对误差数值相等的情况下,实验精度可能存在很大的差别。比如,在测温中,假设测定的绝对误差是 5°C ,如果我们测定的是 1600°C 左右钢液的温度,这个误差是完全可以满足要求的。但是如果测定的是水的温度,这个误差就超出了我们可以接受的范围。这是因为, 5°C 对于 1600°C 的钢液来讲,仅为其 $1/320$,而对于温度不超过 100°C 的水来讲,就超过了 $1/20$ 。

二、相对误差

为了解决绝对误差的上述不足,引入了相对误差的概念。相对误差等于绝对误差与真值之比,为无量纲数,通常用百分数表示,即

$$\begin{aligned} \text{相对误差 } \gamma &= (\text{绝对误差} / \text{真值}) \times 100\% = (x - x_0) / x_0 \times 100\% \\ &\approx (\text{绝对误差} / \text{测量值}) \times 100\% = (x - x_0) / x \times 100\% \end{aligned} \quad (1-3)$$

一般情况下,测量误差总是较小,所以可以把绝对误差与测量值的比作为相对误差,称为实际相对误差;而把绝对误差与真值的比称为标称相对误差。

显然,对于两个不同的测量结果,绝对误差大的其相对误差不一定大,相对误差大的其绝对误差也不一定大。

三、折合误差 (引用误差)

绝对误差和相对误差都是针对某一点测量值而计算的误差,而为了衡量仪表整个量程范围内的质量,引入引用误差 γ_c 的表示方法。引用误差是从相对误差演变过来的,其分母取仪表的量程。

$$\gamma_c = \frac{x - x_0}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 $A_{\max}$ ——仪表或测量系统的测量上限值;

$A_{\min}$ ——测量下限值。

另外,为了更好地表示误差的统计学特性,还有标准误差的表示方法,见 1.4.4。

1.4.2 测量误差的分类

测量过程中存在测量误差是不可避免的,任何测量值只能近似反映被测量的真值。测量过程中无数随机因素的影响,使得即使在同一条件下对同一对象进行重复测量也不会得到完全相同的测量值。为了完成对测量结果的估价,首先要了解测量结果中误差的基本特征与分类。

产生误差的原因是多种多样的,根据误差性质不同,可以把误差分成三类:粗大误差、系统误差、随机误差。

一、粗大误差

明显地歪曲测量结果的误差称为粗大误差,简称粗差。产生粗大误差的原因是由于测量条件的突发性变化或由于读错、记错等原因引起数据异常造成的。粗大误差也称疏忽误差或疏失误差,具有粗差的数据完全不可信赖,称为坏值,必须剔除。必须指出,判断一个观测值是否异常,需要以实验理论与技术上的理由为依据,原因不明时可用统计方法作出判断,不能无依据地贸然处理,见 1.4.5。

二、系统误差

在相同条件下,对同一被测量的多次测量中,误差的绝对值和符号或方向(正、负)保持恒定或在条件改变时,误差的绝对值和方向按一定的规律变化,这种误差称为系统误差,简称系差。

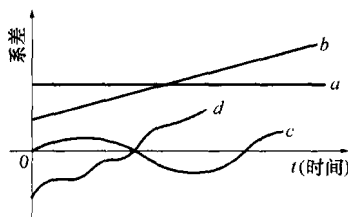


图 1-2 系统误差的种类

a—恒值; b—累进性; c—周期性;

d—按复杂规律变化

系统误差的特征是其确定的规律性,这种规律性可表现为定值,如未经零点校准的仪器造成的误差;也可表现为累加,如用受热膨胀的钢尺测量长度,其示值小于真实长度,并随待测长度成正比增加;也可表现为周期性规律,如测角仪圆形刻度盘中心与仪器转动中心不重合造成的偏心差。此外,还有变化规律复杂的系统误差,误差出现的规律无法用简单的数学解析式表示,如图 1-2 所示。

对于操作者来说,系统误差的规律和其产生原因可能知道,也可能不知道,因此又可分为可定系统误差和未定系统误差。对于可定系统误差,可以找出修正值对测量结果加以修正;而对于未定系统误差一般难以作出修正,只能对它作出估计。

习惯上用“正确度”来反映系统误差的大小程度。正确度是指对同一被测量进行多次测

量, 测量值偏离被测量真值的程度。系统误差越小, 正确度越高。

三、随机误差

在相同条件下多次重复测量同一个量时, 由于受到大量的、微小的随机因素的影响, 每次测量出现的误差以不可预知的方式变化 (测量误差的绝对值的大小和符号不确定), 这类误差称为随机误差, 简称随差, 又称偶然误差。

随机误差有很多复杂因素, 如空气扰动、气压和湿度的变化、测量人员感觉器官的生理变化等, 对测量值产生了综合影响, 它不能用修正或采取某种技术措施的办法来消除。

随机误差的特点是单个测量误差表现为不可预知的随机性, 而从总体来看这类误差服从统计规律。这就使人们有可能在确定的条件下, 通过多次重复测量, 用统计方法得出随机误差的分布范围, 进而研究它对测量结果的影响。

习惯上常用“精密度”这个词来反映随机误差的大小程度。精密度是指对同一被测量进行多次测量, 测量值重复一致的程度, 或者说测量值分布的密集程度。随机误差越小, 精密度越高。

精密度与正确度的综合指标称为精确度, 或称精度, 它反映随机误差和系统误差的综合影响, 见图 1-3。

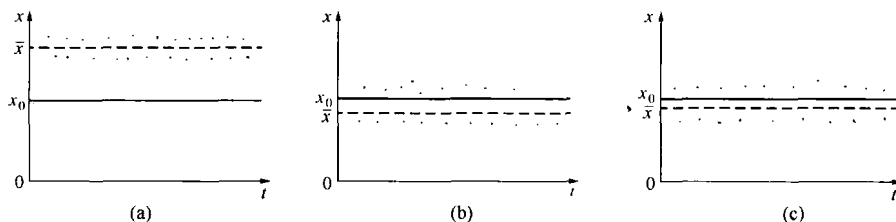


图 1-3 精密度与正确度

(a) 精密度高, 正确度不一定高; (b) 正确度高的精密度不一定高;

(c) 精确度高的, 精密度与正确度都高

1.4.3 系统误差的处理

消除系统误差, 首先从测量装置的设计入手, 消除产生误差的根源。在此基础上, 对测量结果进行修正。常用的方法有: 示值修正法和补偿法。

一、示值修正法

对于有一定规律的系统误差, 可以通过对读数的修正而得到测量的值, 即

$$\text{真值} = \text{测量读数} + \text{修正值}$$

修正值是用标准表 (高精度仪表) 与本测量仪表进行比较, 或根据理论分析导出修正值, 予以修正, 即修正值 = 标准表读数 - 仪表读数。

二、补偿法

设被测信号为 x , 干扰信号为 z , 为使测量仪表的显示值只与被测信号 x 有关, 要求测量仪表在接受传感器输出信号 y 时, 还会接受干扰信号 z , 将传感器输出信号和干扰信号一起运算, 最终使显示量只与被测信号 x 有关, 这就是信号补偿。

与示值修正的方法相比, 补偿法更适宜在生产过程中加以应用, 以利于在线运行。

1.4.4 随机误差的处理

对于随机误差的处理有完整的数学理论，此处只限于介绍它的主要特征和结论。

由误差理论可知，许多随机误差服从正态分布规律。下面通过一组实测数据来研究一下服从正态分布规律的随机误差的特点。

例如，用数字毫秒计测量一脉冲信号的周期，有 100 次测量数据（列于表 1-1 中）。

表 1-1 测量数据表

3820	3731	3867	3942	3980	3812	3825	3751	3835	3719
3762	3878	3767	3792	3924	3800	3843	3785	3858	3978
3887	3909	3892	3842	3878	3819	3988	3878	3939	3987
3853	3919	3894	3836	3895	3766	3936	3903	3867	3763
3903	3842	3738	3875	3740	3751	3989	3908	3794	3798
3773	3860	3888	3895	3773	3779	4015	3905	4013	3904
3887	3942	3857	4009	3799	3787	3945	3827	3877	3888
3929	3970	4001	3896	3858	3789	3787	3983	3829	3915
3827	3908	3926	3831	3850	3859	3842	3907	3949	3875
3908	3846	3822	3862	3854	3843	3883	3811	3862	3962

按统计方法作统计直方图。步骤如下。

第一，在测量数据中找到最小值 3719ms 和最大值 4015ms。根据两数据的大小把数据按一定组距（ $\delta_x=27\text{ms}$ ）分成若干组（ $n=11$ ）。

表 1-2 频数分布表

分组序号	分组范围 (ms)	频数 n_i (个)	相对频数 f_i	$y_i = \frac{f_i}{\delta_x} (\times 10^{-3} \text{m/s})$
1	3718.5~3745.5	2	0.02	0.741
2	3745.5~3772.5	6	0.06	2.22
3	3772.5~3799.5	8	0.08	2.96
4	3799.5~3826.5	11	0.11	4.07
5	3826.5~3853.5	14	0.14	5.18
6	3853.5~3880.5	15	0.15	5.56
7	3880.5~3907.5	14	0.14	5.18
8	3907.5~3934.5	12	0.12	4.44
9	3934.5~3961.5	9	0.09	3.33
10	3961.5~3988.5	7	0.07	2.59
11	3988.5~4015.5	4	0.04	1.48
		$\sum n_i = 100$	$\sum f_i = 1.00$	