

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



REGONG JIANCE JISHU

热工检测技术

曾 蓉 主 编
张 波 谢碧蓉 副主编



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



REGONG JIANCE JISHU

热工检测技术

主 编 曾 蓉
副主编 张 波 谢碧蓉
主 审 郭巧菊

工业学院图书馆
藏书章



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”规划教材（高职高专教育）。

本书重点介绍了电厂热工生产过程参数的测量技术，内容包括：误差理论简介、仪表质量指标；发电厂热工过程的各种参数，如温度、压力、流量、水位及炉烟成分的测量原理、测量方法、测量系统及仪表故障的处理方法；热工测量新技术、智能变送器、计算机监视系统以及 P&ID 图等在热工测量中的应用。

本书可作为高职高专电力技术类相关专业“热工测量和仪表”课程的教材，亦可供相关工程技术人才参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工检测技术/曾蓉主编. —北京：中国电力出版社，2009
普通高等教育“十一五”规划教材，高职高专教育
ISBN 978 - 7 - 5083 - 8034 - 6

I. 热… II. 曾… III. 热工测量—高等学校：技术学校—
教材 IV. TK3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 159930 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>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 1 月第一版 2009 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 274 千字

定价 18.80 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着国民经济的不断增长,能源的需求量不断增加,电力工业逐渐向大电网、大机组、高参数、高度自动化方向发展。由于高参数、大容量机组发展迅速,装机数量日益增多,机组自动化的要求也日益提高,另外,由于脱硫等工艺的广泛采用,计算机网络化控制技术水平提高,对电厂热工检测技术的准确性、可靠性等要求也越来越高。

本书重点介绍了目前电厂中最先进、最成熟的各种热工参数的检测原理和方法,加入了仪表故障的处理方法,融入了新知识、新技术,并在附录中简介了P&ID图及热控KKS编码标识系统,力求与电厂生产实际紧密结合,注重实际能力的培养。

本书由重庆电力高等专科学校曾蓉主编,并编写了第一章、第四章及第七章,第二章第一~三节和第五节、第五章、第六章由张波编写,第二章第四节、第三章由谢碧蓉编写。全书由曾蓉统稿。

书稿经郑州电力高等专科学校郭巧菊副教授审阅,并提出了宝贵的建议和意见,在此表示深深的谢意。

由于编者水平所限,加之编写时间仓促,书中难免有疏漏及不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2008年10月

目 录

前言

第一章 热工测量的基本知识	1
第一节 热工测量的意义	1
第二节 测量的基本概念	2
第三节 测量误差的分析与处理	7
第四节 仪表或测量系统的静态性能指标	12
复习思考题	15
第二章 温度测量	17
第一节 温度测量概述	17
第二节 热电偶	22
第三节 热电阻	40
第四节 温度变送器	45
第五节 显示仪表	51
第六节 热电偶和热电阻的校验	58
复习思考题	60
第三章 压力测量	62
第一节 压力测量概述	62
第二节 弹性式压力计	65
第三节 压力(压差)信号的电变送方法及压力变送器	71
第四节 压力仪表的选择及安装	89
第五节 压力测量系统故障分析	92
第六节 压力仪表的检定	94
复习思考题	97
第四章 流量测量	98
第一节 概述	98
第二节 节流变压降流量计	100
第三节 无节流元件的主蒸汽流量测量	111
第四节 其他流量测量方法	113
第五节 流量测量系统的故障排除	126
复习思考题	127
第五章 水位测量	128
第一节 云母水位计和双色水位计	128
第二节 电接点水位计	130

第三节 差压式水位计·····	134
第四节 水位测量常见故障的消除·····	138
复习思考题·····	139
第六章 炉烟分析·····	140
第一节 概述·····	140
第二节 氧化锆氧量分析仪·····	141
复习思考题·····	146
第七章 火电厂计算机监视系统·····	147
复习思考题·····	152
附录 1 热电偶、热电阻分度表 ·····	153
附录 2 热控专业 KKS 编码 ·····	169
附录 3 P&ID 图例（仅供参考） ·····	174
参考文献·····	175

第一章 热工测量的基本知识

第一节 热工测量的意义

在火力发电厂中,为了及时反映热力设备的运行工况,为运行人员提供操作依据,为热工自动化装置准确及时地提供信号,为运行的经济性计算提供数据,必须进行热工参数的测量。因此,热工测量是保证热力设备安全、经济运行及实现自动化的必要条件,也是经济管理、环境保护、研究新型热力生产系统和设备的重要手段。

热工检测就是检查和测量反映生产过程运行情况的各种物理量、化学量以及生产设备的工作状态,以监视生产过程的进行情况和趋势。

随着科技水平和环保要求的不断提高,电力工业逐渐向大电网、大机组、高参数、高度自动化方向发展。由于高参数、大容量机组发展迅速,装机数量日益增多,对热工测量的准确性、可靠性和机组自动化水平的要求也日益提高。以“4C(计算机、控制、通信、CRT)技术”为基础的现代火电机组热工自动化技术也相应得到了迅速发展。大机组的特点之一是监视点多(600MW 机组 I/O 点多达 3000~5000 个),随着发电机—变压器组和厂用电源等电气部分监视纳入 DCS(分散控制系统)之后, I/O 点已超过 7000 个;特点之二是参数变化速度快和控制对象数量大(600MW 机组超过 1300 个),而各个控制对象又相互关联,所以,操作稍有失误,引起的后果十分严重。如果将大机组的监视与控制操作任务仅交给运行人员去完成,不仅体力和脑力劳动强度大,而且很难做到及时调整和避免人为的操作失误,因此,必须由高度计算机化的机组集控取而代之,大型火电机组离开了高度的自动化,将不可能实现安全经济运行。因此,实时、准确地掌握机组的参数,就显得尤其重要。

锅炉汽轮机装有大量的热工检测仪表,包括测量仪表、变送器、显示仪和记录仪等,它们随时显示、记录机组运行的各种参数,如温度、压力、流量、水位、转速等,以便进行必要的操作和控制,保障机组安全、经济地运行。

图 1-1 显示了热工测量在热力生产过程控制系统中的地位,对生产过程实时、准确地监测,是实现热力生产过程自动控制的前提。图 1-2 是某火力发电厂机组的一幅运行监控画面。从该画面可以看出,上面有汽包水位、压力的显示,有给水的温度、压力、流量,有除氧器的温度、压力、水位等各热力设备运行参数的显示。由此可以看出,热工检测的内容广泛,且以计算机为基础的数据采集系统(DAS)是目前电厂监控的最主要的方式,它不仅能进行一般的监测及报警,而且能提供参数变化率、机组运行效率等数据,能定期打印制表,并在事故情况下追忆事故前后被控设备各部分的参数,以供

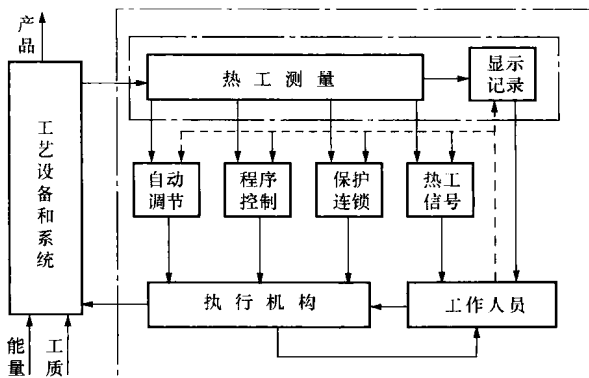


图 1-1 热力生产过程控制系统的组成框图

运行分析及资料累积。由此可看出，热工检测在热力生产过程中的重要地位。

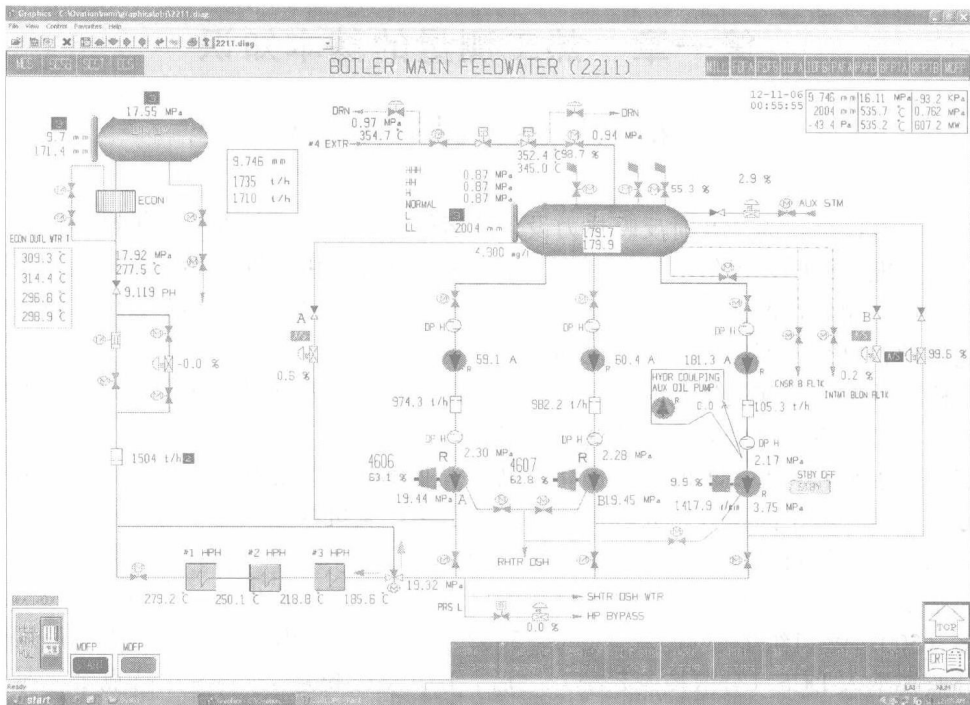


图 1-2 火力发电厂生产过程监控画面举例

第二节 测量的基本概念

一、测量

测量是人们借助专门工具，通过试验和对试验数据的分析计算，将被测量 x_0 以测量单位 U 的倍数显示出来的过程，即

$$x_0 = \mu U \quad (1-1)$$

式 (1-1) 称为测量的基本方程式。式中，数值化后的比值 μ 称为被测量的真实数值，简称为真值。然而，测量方法不够完善，测量工具不够精确，观测者的主观性和周围环境的影响以及所取数值化后的比值位数有限等，都会引起测量误差。所以被测量的真值 μ 只能近似地等于其测量值 x ，即式 (1-1) 变为

$$x_0 \approx xU \quad (1-2)$$

由于测量中总是存在着测量误差，测量工作者的任务之一就是要尽量使之减小。因此，应选择合理的测量方法；所用的测量单位必须是稳定的，并且是国家法定或国际公认的，例如是国际单位制中所规定的单位；所用的测量工具必须足够准确，并事先经过检定等。测量方法、测量单位及测量工具就是测量过程的三要素。

热工测量是指压力、温度等热力状态参数的测量，通常还包括一些与热力生产过程密切相关的参数测量，如测量流量、液位、振动、位移、转速和烟气成分等。

二、测量方法

测量方法就是实现被测量与测量单位的比较，并给出比值的方法。测量方法的分类有四种。

1. 按测量结果的获取方式分

按测量结果的获取方式来分，可分为直接测量法和间接测量法，这种分类方法对测量误差的分析很有意义。

(1) 直接测量法：使被测量直接与测量单位进行比较，或者用预先标定好的测量仪器进行测量，从而得到被测量数值的测量方法，称直接测量法。例如，用直尺测量长度，用压力表测量容器内介质压力，用玻璃温度计测量介质温度等。

(2) 间接测量法：通过直接测量与被测量有某种确定函数关系的其他各变量，再按函数关系进行计算，从而求得被测量数值的方法，称为间接测量法。例如，直接测量过热蒸汽的温度、压力和标准节流装置输出的差压信号，通过计算得到过热蒸汽的质量流量。

2. 按被测量与测量单位的比较方式分

按被测量与测量单位的比较方式来分，测量可分为偏差测量法、微差测量法和零差测量法。

(1) 偏差测量法：测量器具受被测量的作用，其工作参数产生与初始状态的偏离，由偏离量得到被测量值，称为偏差测量法。例如：单管压力计在压力作用下，管中水银柱偏离初始零刻度点，偏离量就显示了被测压力值；热电偶测量温度，弹簧管压力表测量压力等，都是采用了偏差测量法。

(2) 微差测量法：用准确已知的、与被测量同类的恒定量去平衡掉被测量的大部分，然后用偏差法测量余下的差值，测量结果是已知量值和偏差法测得值的代数和。例如，用微差法检定热电偶时，将同类型的标准热电偶与被校热电偶反向串接，两者的热端同置于检定炉中，冷端置于冰点瓶中，它们的负热电极并接在一起，冷端的正极则和电位差计的两输入端子相连接，用电位差计测量标准热电偶与被校热电偶热电势的差值。由于标准热电偶热电势的准确度很高，被校热电偶的热电势大部分为其所平衡，两者差值很小，再通过电位差计测量此差值，就可得到较高的测量准确度。

(3) 零差测量法：用作比较的量是准确已知并连续可调的，测量过程中使它随时等于被测量，也就是说，使已知量和被测量的差值为零，这时偏差测量仅起检零作用，因此，被测量就是已知的比较量。例如：用电位差计测量热电偶产生的热电势。零差测量法比微差测量法具有更高的测量准确度，但操作时间较长，更适合于稳定参数的测量。

3. 按被测量在测量过程中的状态分

按被测量在测量过程中的状态来分，测量又可分为静态测量方法和动态测量方法。被测量在测量过程中不随时间变化，或其变化速率相对于测量速率十分缓慢，这类量的测量称为静态测量，例如，恒温水槽中水的温度测量。若测量过程中，被测量随时间有明显变化，则称动态测量，例如，汽轮机在启动过程中的蒸汽温度、压力、汽轮机的转速等的测量。严格来说，绝对不随时间变化的量是不存在的。但是，在实际测量过程中总是可以把那些变化速度相对十分缓慢的量的测量按静态测量来处理。

4. 按测量仪表是否与被测对象接触分

按测量仪表是否与被测对象相接触，测量可分为接触测量和非接触测量。在测量中，仪

表的一部分与被测对象相接触,受到被测对象的直接作用才能得出测量结果的方法为接触测量法。在测量中,仪表的任何部分都不必与被测对象直接接触就能得到测量结果的测量方法为非接触测量法。

三、测量误差

任何一个被测量,在任一时刻它都具有一个客观存在的量值,这一量值称之为真值,用 μ 表示;通过测量仪表测量得到的结果称为测量值,用 x 表示。

测量的任务就是要测出被测量的真值。但是,由于测量仪表、测量方法、测量环境、人的观察能力以及测量程序等都不能做到完美无缺,所以真值是无法测得的。

测量误差是被测量参数的测量值 x 与其真值 μ 之差。但由于被测参数的真值是不可知的,那么我们如何计算误差呢?在计算中获取真值常用的方法有:①用标准物质(标准器)所提供的标准值,例如水的三相点;②用高一级的标准仪表测量得到的值来近似作为真值;③对被测量进行 N 次等准确度测量,各次测量值的算术平均值近似为真值, N 越大,越接近真值。

常见的测量误差表达方式如下所述。

1. 绝对误差

仪表测量值与被测量的真实值之间的差值,称为绝对误差。但是被测量的真实值是不知道的,所以在实际测量中是用标准仪表的读数来代替真实值的,称为标准值。如果测量仪表的指示值即测量值为 x ,标准仪表的指示值为 x_0 ,则该点批示值的绝对误差为

$$\delta = x - x_0 \quad (1-3)$$

式中 δ ——绝对误差;

x ——测量值;

x_0 ——真实值(真值)。

2. 相对误差

除了绝对误差表示形式这外,测量误差还可以用相对误差及折合误差形式表示。相对误差为绝对误差与实际值之比,常用百分数表示,即

$$\gamma = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 γ ——相对误差。

对于大小数值不同的测量值,用相对误差更能比较出测量的准确程度,即相对误差越小,准确程度越高。

3. 标称相对误差

示值的绝对误差与该仪表示值的比值,称为示值的标称相对误差,以百分数表示,即

$$\gamma_x = \frac{\delta}{x} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x} \times 100\% \quad (1-5)$$

对于大小数值不同的测量值,以相对误差更能比较出测量的准确程度,即相对误差越小,准确程度越高。

4. 折合误差

折合误差为绝对误差与所用测量仪表的量程之比,也以百分数表示,即

$$\gamma_x = \frac{\delta}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 γ_x ——折合误差；

$A_{\max}$ 、 $A_{\min}$ ——测量仪表上限及下限刻度。

$A_{\max}$ 、 $A_{\min}$ 称为测量仪表的量程，折合误差一般用于比较测量仪表的优劣。

四、测量系统

为了测得某一被测物理量的值，必然要使用若干测量设备（包括测量仪表、测量装置、测量元件及辅助设备），并要把它们按一定的方式组合起来。例如，为了测量物质流量，常用标准孔板获得与流量有关的差压信号 Δp ，如图 1-3 所示，然后将差压信号输入差压计或差压流量变送器，经过转换、运算，变成电信号，用连接导线将电信号传送到显示仪表，显示出的流量值 q_2 近似于被测流量值 q_1 （因为存在误差），或采集进计算机监控系统进行显示记录。

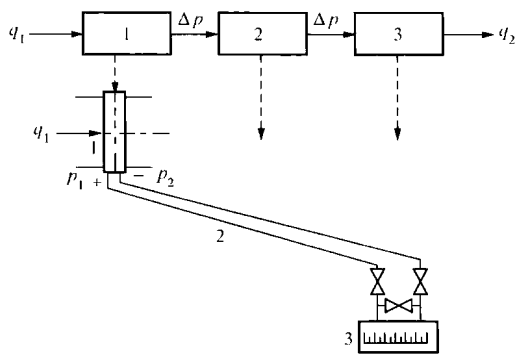


图 1-3 流量测量系统示意

1—节流装置；2—传压管路；3—差压计或差压流量变送器

q_1 —被测流量； Δp —差压信号；

q_2 —流量显示值， $q_1 \approx q_2$

为了实现一定的测量目的，将测量设备

按一定方式进行组合的系统称为测量系统，也称检测系统。由于测量原理不同，测量准确度的要求不同，测量系统的构成会有很大的差别。它可能是仅有一只测量仪表的简单测量系统，如水银温度计；也可能是一套价格昂贵、高度自动化的复杂测量系统，如用计算机进行数据采集和数据处理的自动测量系统。

热工测量系统是对热工过程中的热工参数进行测量的系统，其中用来测量热工参数的仪表叫热工仪表。

（一）测量系统的组成

一般测量系统由三个基本环节组成：传感元件、传送变换元件和显示元件。图 1-4 表示的是一般测量系统的框图。

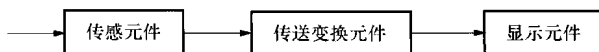


图 1-4 一般测量系统框图

1. 传感元件

传感元件（传感器）也叫敏感元件。传感元件是测量系统中直接与被测对象相接触的部分，它接受来自被测介质的信号（能量），产生一个以某种形式与被测量有关的输出信号。例如，热电偶测温系统中的热电偶，它把被测介质的温度信号转换成为热电动势信号输出，也即将热能转换为了电能。对传感元件的要求如下所述。

（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，而且可复现。

（2）非被测量对传感元件输出的影响应小得可以忽略。若不能忽略，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）传感元件需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或者干扰

极小。

2. 传送变换元件

传送变换元件的作用是将感受元件输出的信号, 根据显示元件的要求, 传输给显示元件。

(1) 单纯起传输作用。当感受件输出的信号只送给显示件时, 传送件只起传输作用。如信号导管、电缆、光纤、无线电电被, 都可以起传送信息的作用, 又如流量测量系统中, 标准孔板产生的差压信号通过导压管传送到差压流量变送器, 而差压流量变送器输出的电流信号通过导线传送到显示仪表, 此处的导压管和导线都是该测量系统的传送元件。

传送元件选择不当或安排不合理, 会造成信息能量损失, 引入干扰, 使信号失真, 严重时根本无法测量。例如导压管过细、过长, 使传输信号受阻, 产生传输迟延, 影响动态压力测量准确度, 导线电阻不匹配, 将使电压、电流信号失真, 甚至信号不能送进仪表或使仪表给出错误的测量结果。

(2) 将感受件输出的信号放大, 以满足远距离传输以及驱动显示、记录装置的需要。

(3) 为了使各种感受件的输出信号便于与显示仪表和调节装置配接, 要通过变换件把信号转换成标准化的统一信号, 各种感受件的输出信号都被转换成统一数值范围的气、电信号, 这时的传送件常称为变送器。这样, 同一种类型的显示仪表常可用来显示不同类型的被测量。

3. 显示元件

显示元件的作用是向观测者显示被测参数的量值。显示元件是人和仪表联系的主要环节, 因此, 要求它的结构能使观测者便于读出数据, 并能防止读者的主观误差。

显示元件的显示方式有模拟式、数字式和屏幕式三种。

(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。读数的最低位由读数者估计。模拟显示设备结构简单, 价格低廉, 是一种常见的显示形式。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。此种显示的直观形象性较差。

(3) 屏幕画面显示。它是目前电厂比较常见的显示方式。它既能按模拟式显示给出曲线, 也能给出数值, 或者同时按两种方式显示。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, 如图 1-2 所示。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。本书将在第七章进行详述。

(二) 仪表的分类

根据仪表的用途、原理及结构等不同, 热工仪表可分为多种类型。

(1) 按被测参数不同, 可分为温度、压力、流量、物位、成分分析及机械量(位移、转速、振动等)测量仪表。

(2) 按仪表的用途不同, 可分为标准用、实验室用及工程用仪表。

(3) 按显示特点和功能不同, 可分为指示式、记录式、积算式、数字式及屏幕式仪表。

(4) 按工作原理不同, 可分为机械式、电气式、电子式、化学式、气动式和液动式

仪表。

(5) 按安装地点不同,可分为就地安装式及盘用仪表。

(6) 按使用方式不同,可分为固定式和便携式仪表。

在热工生产现场,大多采用结构牢固,能适应较为恶劣环境的工程用仪表,标准仪表则常作为实验室校验工程用仪表以及作为标准传递之用。

第三节 测量误差的分析与处理

由于测量过程中所用仪表准确度的限制,环境条件的变化,测量方法的不够完善,以及测量人员生理、心理上的原因,测量结果不可避免地与被测真值之间存在差异,这称为测量误差。因此,只有在得到测量结果的同时,指出测量误差的范围,所得的测量结果才是有意义的。测量误差分析的目的是:根据测量误差的规律性,找出消除或减少误差的方法,科学地表达测量结果,合理地设计测量系统。

根据测量误差性质的不同,一般将测量误差分为系统误差、随机误差和疏忽误差三类,以便对测量误差采取不同的误差处理方法。

一、系统误差

(一) 系统误差的概念

在同一条件下(同一观测者,同一台测量器具,相同的环境条件等),多次测量同一被测量,绝对值和符号保持不变或按某种确定规律变化的误差称为系统误差。前者称为恒值系统误差,后者称为变值系统误差。测量系统和测量条件不变时,增加重复测量次数并不能减少系统误差,系统误差通常是由于测量仪表本身的原因,或仪表使用不当,以及测量环境条件发生较大改变等原因引起的。例如,仪表零位未调整好会引起恒值系统误差。系统误差可通过校验仪表,求得与该误差数值相等、符号相反的校正值,加到测量值上来消除。又例如,仪表使用时的环境温度与校验时不同,并且是变化的,这就会引起变值系统误差。变值系统误差可以通过实验方法找出产生误差的原因及变化规律,改善测量条件来加以消除,也可通过计算或在仪表上附加补偿装置加以校正。

还有一些未定系统误差尚未被充分认识,因此只能估计它的误差范围,在测量结果上标明。

(二) 系统误差的分类

1. 定值系统误差

定值系统误差是指误差的大小和符号都不变的误差,如仪表的零点偏高使全部测量值偏大,形成一定数值的系统误差。一般通过校验来确定定值系统误差及其修正值。

2. 变值系统误差

变值系统误差按一定规律变化,根据变化规律的不同,它可分为累积系统误差和周期性系统误差。

随时间的增长逐渐增大或逐渐减小的误差为累积系统误差。例如,检测元件老化,沿线电阻的磨损等均可引起累积误差。对累积误差只能在某瞬时引入校正,不能只作一次性校正。

测量误差的大小和符号均按一定周期变化的系统误差为周期性误差。例如,秒表的指针

回转中心和刻度盘中心有偏差时,会产生周期性系统误差。

用重复测量并不能减小系统误差对测量结果的影响,也难于发现系统误差,并且有时误差数值可能很大。例如,测高温烟气温度的时候,测温元件对冷壁的辐射散热可能引起上百摄氏度的误差,因此,测量中特别要重视这项误差。主要是通过对测量对象与测量方法的具体分析,用改变测量条件或用不同的测量方法进行对比分析,对测量系统进行检定等来发现系统误差,并找出引起误差的原因和误差的规律,这在测量中是非常重要的。为了减小测量系统的误差,我们建立的复杂系统,例如,在采用节流元件对主蒸汽流量的测量时,除了要测量节流元件前后的压差,同时还要测量主蒸汽温度和压力,以便构成较完善的测量系统,以减小测量的系统误差。

(三) 消除系统误差的一般方法

1. 消除系统误差的来源

在测量工作投入之前,仔细检查测量系统中各环节的安装及连接线路,使其达到规定要求,尽量消除误差的来源。

2. 在测量结果中加修正值

对不能消除的系统误差,在测量之前,对检测系统中的各仪表进行检定,确定出修正值。对各种影响量如温度、气压、湿度等要力求确定出修正公式、修正曲线或修正表格以便对测量结果进行修正。

3. 采用补偿措施

在检测系统中加装补偿装置(或自动补偿环节),以便在测量中自动消除系统误差。如在热电偶测温回路中加装参比端温度补偿器,自动消除由于热电偶参比端温度变化产生的系统误差。又如,采用平衡容器对汽包水位的测量,要进行汽包压力的补偿,也是由于减小汽包压力变化对其水位产生的系统误差。

4. 改善测量方法

测量方法不完善将导致测量结果不正确。在实际测量中,应尽可能采用较完善的测量方法,消除或减少系统误差对测量结果的影响。常用两种方法。

(1) 交换法。交换法是消除定值系统误差的常用方法,也叫对置法。此种方法的实质是交换某些测量条件,使得引起定值系统误差的原因以相反方向影响测量结果,从而消除其影响。

(2) 对称法。对称法是消除线性系统误差的有效方法。

图 1-5 所示为按线性规律变化的温度测定值和时间的关系,温度测定值的系统误差也是与时间 t 成比例变化的,可以通过对称法来消除此系统误差。具体地说,就是将测量工作

以某一时刻为中心对称地安排,取各对称点两次测定值的算术平均值作为测量结果,即

$$\theta_{t2} = \frac{\theta_{t1} + \theta_{t3}}{2}$$

上述是指时间上对称的。如果系统误差与温度成比例变化,则横坐标量是温度。热电偶检定时对各支热电偶热电势的循环读数,即“标准→被检 1→被检 2→…→被检 2→被检 1→标准”的读数方式,取各对称点两次测定值的算术平均值作为测量结

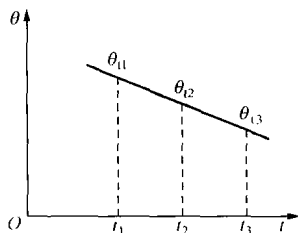


图 1-5 对称观测法中的
温度与时间的关系

果, 就是采用了对称法。

二、随机误差

在相同条件下多次测量同一被测量时, 绝对值和符号不可预知地变化着的误差称为随机误差。这类误差对于单个测量值来说, 误差的大小和正负都是不确定的, 但对于一系列重复测量值来说, 误差的分布服从统计规律。因此随机误差只有在不改变测量条件的情况下, 对同一被测量进行多次测量才能计算出来。

随机误差大多是由测量过程中大量彼此独立的微小因素对测量影响的综合结果造成的。这些因素通常是测量者所不知道的, 或者因其变化过分微小而无法加以严格控制。如气温和电源电压的微小波动, 气流的微小改变等。

值得指出, 随机误差与系统误差之间既有区别又有联系, 二者并无绝对的界限, 在一定条件下它们可以相互转化。随着测量条件的改善、认识水平的提高, 一些过去视为随机误差的测量误差可能分离出来作为系统误差处理。

对于单个测量值, 其随机误差的大小和方向都是不确定的, 但多次重复测量结果的随机误差却有规律性。

实践与理论证明, 只要重复测量次数足够多, 测定值的随机误差的概率密度服从于正态分布。

随机误差概率密度的正态分布曲线如图 1-6 所示。曲线的横坐标为误差 $\delta = x - x_0$, 纵坐标为随机误差概率密度 $f(\delta)$, 误差的概率密度 $f(\delta)$ 与误差 δ 之间的关系为

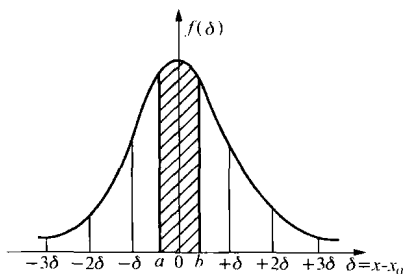


图 1-6 概率密度分布曲线

$$\left. \begin{aligned} f(\delta) &= \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \\ \delta &= x - x_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中 δ ——测定值的误差;

x ——测定值;

x_0 ——真值;

σ ——标准误差 (均方根误差)。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2}{N}} \quad (1-8)$$

式中 N ——总的测量次数。

从图 1-6 可看出, 按正态分布的随机误差有以下特性。

(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。重复的测量次数越多, 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绝对值很大随机误差出现的概率几乎为零。

(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。

三、疏忽误差

明显歪曲了测量结果,使该次测量失效的误差称为疏忽误差。含有疏忽误差的测量值称为坏值。出现坏值的原因有:测量者的主观过失,如读错、记错测量值;操作错误;测量系统突发故障等。应尽量避免出现这类误差,存在这类误差的测量值应当剔除。在测量时一旦发现坏值,应重新测量。如已离开测量现场,则应根据统计检验方法来判别是否存在疏忽误差,以决定是否剔除坏值。但应注意不应当无根据地轻率剔除测量值。

四、测量的精密度、正确度和准确度

上述三类误差都使测量结果偏离真值,通常用精密度、正确度和准确度来衡量测量结果与真值的接近程度。

(1) 精密度。对同一被测量进行多次测量,测量的重复性程度称为精密度。精密度反映了测量值中随机误差的大小。随机误差越小,测量值分布越密集、测量的精密度越高。

(2) 正确度。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称为正确度。正确度反映了测量结果中系统误差的大小,系统误差越小、测量的正确度越高。

(3) 准确度。精密度与正确度的综合称为准确度。它反映了测量结果中系统误差和随机误差的综合数值,即测量结果与真值的一致程度。准确度也称为精确度。

对于测量结果,测量精密度高、正确度不一定高,正确度高的精密度也不一定高,但如果测量结果的准确度高,则精密度和正确度都高,图 1-7 说明了这种情况。图中 μ 代表被测参数的真值, $\bar{x}$ 代表多次测量获得的测量值的平均值,小黑点代表每次测量所得到的测定值 x , t 为测量顺序。从图 1-7 (a) 可知,测量值密集于平均值 $\bar{x}$ 周围,随机误差小,表明测量精密度高,但测量值的平均值 $\bar{x}$ 偏离被测量真值较大,说明系统误差大,测量正确度低;图 1-7 (b) 中,测定值分布离散性大,说明随机误差大,测量精密度低,但平均值 $\bar{x}$ 较接近真值 μ ,说明系统误差小,正确度高;图 1-7 (c) 中,测量结果既精密又正确,说明随机误差和系统误差均小,测量的准确度高。图 1-7 (c) 中的测量值 x_k 明显地不同于其他测量值,可判定是疏忽误差造成的坏值,应去除。

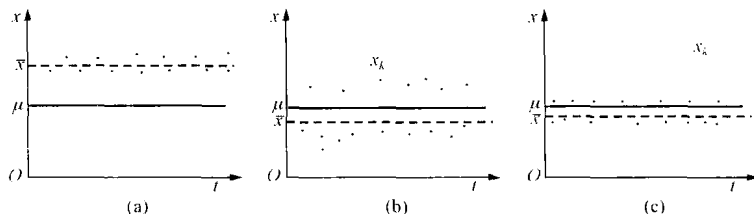


图 1-7 测量值及其误差图

(a) 精密度高; (b) 正确度高; (c) 准确度高

五、误差的综合

测量中,经常可能同时存在多个随机误差和系统误差。为判断测量结果的准确度要对全部误差进行综合。

1. 随机误差的综合

若测量结果中含有 k 个彼此独立的随机误差，它们的标准误差分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$ ，则它们的综合效应所造成的综合标准误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2} \quad (1-9)$$

若它们的随机不确定度为 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k$ ，置信概率都为 P ，则综合的随机不确定度 δ 为

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^k \delta_i^2} \quad (1-10)$$

置信概率亦为 P 。

2. 系统误差的综合

若测量结果含有 m 个系统误差，其系统误差分别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m$ ，则其总的系统误差 ϵ 可用下述方法得到。

(1) 代数合成。已知各系统误差的分量 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m$ 的大小及符号，可采用各分量的代数和求得总系统误差 ϵ ，即

$$\epsilon = \sum_{i=1}^m \epsilon_i \quad (1-11)$$

(2) 绝对值合成。在测量中只能估计出各系统误差分量 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m$ 的数值大小，而不能确定其符号时，可采用最保守的合成法，将各分量误差的绝对值相加，此法称为绝对值合成法，即

$$\epsilon = \pm \sum_{i=1}^m |\epsilon_i| \quad (1-12)$$

对于 $m > 10$ 的情况，绝对值合成法对误差的估计往往偏大。

(3) 方和根合成。当测量中系统误差的分量比较多 (m 较大) 时，各分量最大误差值同时出现的概率是不大的，它们之间还会互相抵消一部分。因此，如果仍按绝对值合成法计算总的系统误差，显然会把误差值估计得过大。此种情况可采用方和根合成法，即

$$\epsilon = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k \epsilon_i^2} \quad (1-13)$$

应该特别指出的是：当系统误差纯属于定值系统误差时，可直接采用与定值系统误差大小相等、符号相反的量去修正测量结果，修正后此项误差就不存在了。

【例 1-1】 如图 1-8 所示，使用弹簧管压力表测量某给水管路中的压力，试计算系统误差。已知压力表的准确度等级为 0.5 级，量程为 0~600kPa，表盘刻度分度值为 2kPa，压力表位置高出管道 h ($h=0.05\text{m}$)。测量时压力表指示 300kPa，读数时指针来回摆动 ± 1 格。压力表使用条件大都符合要求，但环境温度偏离标准值 (20°C)，当时环境温度为 30°C ，每偏离 1°C 造成的附加误差为仪表基本误差的 4%。

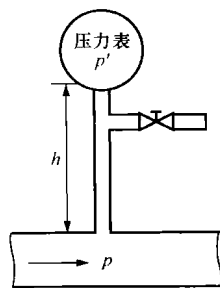


图 1-8 管道流体压力测量示意