

中国矿业大学卓越采矿工程师教材

能源与动力工程 测试技术

主 编 韩东太

副主编 晁 阳 何光艳 王国红 王 欣 张存宏

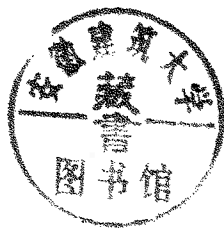
Nengyuan Yu Dongli Gongcheng Ceshi Jishu

中国矿业大学出版社

中国矿业大学“卓越采矿工程师”系列教材

能源与动力工程测试技术

主 编 韩东太
副主编 晁 阳 何光艳 王国红
王 欣 张存宏
主 审 郭楚文



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书为中国矿业大学“卓越采矿工程师”系列教材之一,是能源与动力工程“卓越工程师教育培养计划”本科专业主干课程配套教材。本书跟踪本领域的新理论、新技术,系统地阐述了能源动力工程领域热工参数的测试原理、测试仪器和测试方法,重点介绍了温度、压力、流量主要热工参数的测量方法及仪器。全书共分8章,第1章介绍测量的基本概念、仪表的主要性能指标、测量方法和误差分析的基础知识,第2、3、4章介绍温度、压力、流量等参数的测量,第5、6章介绍液位测量和气体成分测量,第7章介绍其他参数测量,第8章介绍相关生产实践案例。

本书可作为高等院校能源动力类专业本科生教材,也可作为能源动力行业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

能源与动力工程测试技术 / 韩东太主编. —徐州 :
中国矿业大学出版社, 2016. 6
ISBN 978 - 7 - 5646 -3158 - 1

I. ①能… II. ①韩… III. ①能源—测试技术—高等
学校—教材②动力工程—测试技术—高等学校—教材
IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146652 号

书 名 能源与动力工程测试技术
主 编 韩东太
责任编辑 褚建萍
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 20 字数 380 千字
版次印次 2016年6月第1版 2016年6月第1次印刷
定 价 33.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书为中国矿业大学“卓越采矿工程师”系列教材之一。“卓越工程师教育培养计划”是人才培养的一项创新举措,也是一个系统工程,其核心目标是提升学生的工程实践能力、创新能力和国际竞争力。卓越工程师的培养目标和培养计划,对配套教材提出了新的要求。本书在内容设置上以工程测量基本知识为基础,系统阐述了能源动力工程领域主要热工参数的测量原理、测量方法、常用检测仪表的结构和使用方法、热工测量系统的设计与维护以及能源与动力工程测量技术前沿知识。本书的特色主要体现在以下几点:

(1) 在正文内容中插入若干思考题,有助于启发式、研讨式学习。

(2) 在每章的最后一节介绍与本章相关的一种先进仪器或者国内外研究综述等拓展知识。

(3) 第8章为生产实践案例,将理论知识应用于工程实践,引导读者结合工程实际和社会需求去思考、探讨书本内容。

(4) 课后习题层次化设计,满足不同读者的差异化需求,加深对工程知识的理解,培养实践创新能力。本书习题分A、B、C、D四大类,其中A类题属于基本训练,题中含有丰富的热工基础知识,用于帮助掌握基本概念和基本规律;B类题属于理论分析题,用于提高科学思维能力和自我评价能力;C类题属于综合性应用题,用于提高理论结合实际的能力;D类题为知识拓展题。习题编号由序号和习题类型组成,如1A。

本书由中国矿业大学韩东太担任主编并负责全书统稿。各章编写分工如下:第1章、第3章由中国矿业大学何光艳编写,第2章、第4章由中国矿业大学晁阳编写,第5章、第6章由江苏徐矿综合利用发电有限公司王欣编写,第7章由中国矿业大学韩东太编写,第8章和每章的实践内容由徐州华润电力有限公司王国红编写,课后习题和其他部分由大屯煤电(集团)有限责任公司张存宏编写。

中国矿业大学郭楚文教授审阅了书稿,并提出了宝贵的意见和建议,使作者受益匪浅。本书在编写过程中得到了中国矿业大学教务部王琪和郭朝霞的帮助和指导,在此一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不足和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者
2016.3

目 录

1 测量及误差分析概述	1
1.1 测量的概念和测量方法	3
1.2 热工测量仪表的组成与分类	6
1.3 测量误差及其种类	9
1.4 仪表的质量指标及仪表的校验	14
1.5 测量误差的处理	25
1.6 误差的传递与合成	40
小结	42
习题	42
2 温度测量	43
2.1 概述	43
2.2 热电偶温度计	48
2.3 热电阻温度计	79
2.4 非接触式温度计	102
2.5 锅炉炉膛温度场测量技术研究综述	117
小结	122
习题	122
3 压力测量	124
3.1 概述	124
3.2 液柱式压力计	126
3.3 弹性式压力计	130
3.4 电气式压力测量	137
3.5 活塞式压力测量与压力仪表校验	160
3.6 测压仪表的选择安装与故障分析	163
小结	176
习题	176

4 流量测量	178
4.1 流量测量概述	178
4.2 节流式流量计	184
4.3 速度式流量计	194
4.4 容积式流量计	213
4.5 质量流量计	215
4.6 FUP1010 便携式超声波流量计	216
小结	220
习题	220
5 液位测量	222
5.1 液位测量的意义	222
5.2 连通式就地水位计	224
5.3 差压式水位计	230
5.4 电接点(电极式)水位计	239
5.5 磁翻板水位计	243
5.6 汽包水位内置式电极传感器	245
小结	246
习题	247
6 气体成分测量	248
6.1 概述	248
6.2 氧化锆氧量分析仪	250
6.3 红外气体分析仪	255
6.4 化学发光气体分析仪	259
6.5 烟气排放连续监测系统	260
6.6 ZO—4 型氧化锆氧量分析仪	264
小结	266
习题	267
7 其他参数测量	268
7.1 概述	268
7.2 转速测量	269
7.3 功率测量	275

7.4 振动测量	278
7.5 电子胶带秤称重测量	282
小结	284
习题	284
8 生产实践案例	286
8.1 锅炉冷态空气动力场试验	286
8.2 锅炉燃烧调整试验	294
8.3 汽轮机热力性能试验方案设计	297
附录	305
参考文献	311

1 测量及误差分析概述

本章提要 测量系统基本组成, 仪器仪表性能参数, 误差分类及处理基本知识。

重点与难点 误差的各种表示方法及区别, 直接测量及间接测量随机误差和系统误差的计算方法。

“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。人类在从事科学研究、工程技术以及其他一切生产活动时, 为了取得各种事物之间的定量关系, 就必须进行测量。测量是人们认识事物本质所不可缺少的手段。通过测量, 可以了解生产过程是否符合工艺规程规定, 是否达到了预期的质量、安全和技术经济指标, 测量是监视生产过程的重要手段。

不同的科技和生产领域, 有不同的测量项目和测量特点。测量技术的内容很多, 热工测量技术只是其中的一种。热工测量技术包括热工参数的测量方法和实现测量的仪表。热工测量原则上是指在热工过程中对各种热工参数, 如温度、压力、流量、液位等的测量(热力发电厂中, 有时也把成分分析、位移、转速、振动等参数列入其中)。用来测量热工参数的仪表称为热工测量仪表。

在火力发电厂中, 通过热工参数的准确测量, 可以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准确、及时地提供所需的信号。热工测量是控制系统的重要组成部分, 是控制系统的感觉环节, 它的输出信号是自动调节、程序控制、热工信号和连锁保护的依据。热工测量同时也提供事故分析、经济核算和运行改进等技术管理工作所需要的原始资料。因此, 热工测量是保证热力设备安全、经济运行以及实现自动控制的必要手段。测量工作的水平直接关系到控制质量的提高、劳动条件的改善、设备寿命的延长和劳动生产率的提高。

现代测量技术的基础是信息的拾取、传输和处理, 涉及多种学科领域。这些领域的新成就往往推动了新的测量方法诞生和测量系统、测量设备的改进, 使测量技术从中吸取营养而得以迅速发展。目前热工测量技术的发展趋势体现在以下几个方面:

(1) 测量原理和方法的突破

进入 21 世纪以来,网络、在线、智能、集成等高科技化已成为现代测量技术最主要的特征和发展趋势。研究人员在研究各种物理化学效应的应用技术以及信号处理技术的基础上拓展新的测量原理,研制新的传感器。例如,三维激光测速仪、激光相位多普勒技术、超声波流场测试仪、宽量程红外测温仪、热像仪、高速摄影技术等等。光纤、激光、超声波、微波、红外、纳米、超导、微电子和仿生技术等一大批高新技术成果的广泛应用,加上跨学科的综合设计,使测量技术突破了传统的光、机、电构架,尤其适合于对一些特殊参数的测量,比如参数场、超低温、高温、高压、高速以及恶劣条件下的参数测量。

材料科学的进步,使得在采用新材料、新工艺的基础上开发新型传感器也有了突破。通过改变材料的组成、结构、添加物或采用各种工艺技术,利用材料形态变化如薄膜化、微小化、纤维化、气孔化、复合化、无孔化等,提高材料对电、磁、光、热、声、力、吸附、分离、输送载流子、化学、生物等的敏感功能,研发出了一批新型敏感元件,拓宽了应用面。

(2) 测量仪表的全方位发展

新型的仪器仪表与元器件将朝着小(微)型化、智能化、网络化、计算机化、电子化、数字化、综合自动化、光机电一体化、集成化、成套化的方向发展,其中占主导地位、起核心作用的是小(微)型化、智能化和网络化。

小(微)型化以微电子机械系统技术为基础,将测量信号的拾取、变换和处理合为一体,构成智能化仪表。其中敏感元件是测量系统的基本部件,测量技术的发展在很大程度上依赖于敏感元件的发展。现代细微加工技术可使被加工的半导体材料尺寸达到光的波长量级,并可以大量生产,从而可制造出超小型、高稳定性、价格便宜的敏感元件。例如,美国 DALLAS 公司推出的数字温度传感器 DS18D20,可测温度范围 $-55\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,测温误差为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,封装和形状与普通小功率三极管十分相似。

随着信息技术、微电子技术和微机械技术的发展,测量仪表内部多含有微处理器或单片机,构成智能型仪器。它除具有常规的信号采集、放大、滤波、线性化处理、数据存储、与其他仪器的接口、与人的交互等功能外,还具有数字信号处理、复杂运算和逻辑判断的能力,能根据被测参数的变化自动选择量程,可实现自动校正、自动补偿、自寻故障以及远距离传输数据、遥测遥控等功能,可以做一些需要人类的智慧才能完成的工作。

网络化方面,目前主要是指采用多种现场总线或以太网,这要按各行业的需求,选择其中的一种或多种,近些年最流行的有 FF、Profibus、CAN、LonWorks、AS-I、Interbus、TCP/IP 等。

此外,随着微型化、智能化以及网络化程度提高,在信息获取基础上,多种功

能进一步集成甚至融合,是发展的必然趋势。多传感器数据融合的定义概括为:把分布在不同位置的多个同类或不同类传感器所提供的局部数据资源加以综合,采用计算机技术对其进行分析,消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾,加以互补,降低其不确定性,获得对被测对象的一致性解释与描述,从而提高系统决策、规划、反应的快速性和正确性,使系统获得更充分的信息。

(3) 测量系统性能指标的全面提升

测量系统仍将朝着高准确、高速度、高灵敏、高稳定、高可靠、高环保和长寿命的“六高一长”的方向发展。已经在超高温、超低温、混相流量测量、微差压(几十个帕)测量、超高压测量等以前需要尽早攻克的测量难题领域有所突破。

以温度为例,为满足某些科研试验的要求,已经研制出测温下限接近绝对零度($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$),且测温量程达到 15 K (约 $-258\text{ }^{\circ}\text{C}$)的高准确度超低温测量仪表。在某些需连续测量液态金属温度或长时间连续测量 $2\ 500\sim 3\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温介质温度的生产过程中,已生产出最高上限超过 $2\ 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热电偶,但测温范围一旦超过 $2\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$,热电偶极易氧化从而导致准确度下降。目前,各国科研人员正致力研究具有抗氧化性的高温特殊材料热电偶,以提高其使用寿命与可靠性。

1.1 测量的概念和测量方法

1.1.1 测量的定义

测量就是以确定量值为目的的一组操作,或者说,测量就是利用测量工具,通过试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的过程。所得到的倍数就是被测量的值,即

$$L = \frac{x}{b} \quad (1-1)$$

式中 x ——被测量;

b ——标准量(测量单位);

L ——所得到的被测量的值,即得到的测量结果。

从式(1-1)中可知,被测量的值与所选用的测量单位有关。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,且有些测量单位制定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,人们迫切要求制定统一的测量单位。1960年,第十一届国际计量大会通过了国际单位制,代号为SI,它对长度、质量、时间、电

流、热力学温度、物质的量和发光强度等七种严格定义的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。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》(国发[1984]28号)。其中规定我国的计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》。法定计量单位是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构成的。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(平面角和立体角);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。

【思考题】 测试和测量的区别是什么?

1.1.2 测量方法

测量是一种试验工作,为了及时获得准确、可靠的测量数据,必须根据行业的要求及被测对象的特点,选择合理的测量方法。

一个完整的测量包含六个要素,它们分别是:测量对象与被测量、测量环境、测量方法、测量单位、测量资源(包括测量仪器与辅助设施,测量人员等)、数据处理和测量结果。

在试验中,往往必须知道某个物理量在某一时刻的数值大小,因而必须对它进行检测,我们称需要检测的物理量为被测量参数或称为被测量。如在热能与动力工程的测量中,经常涉及的被测参数有温度、压力、流量、转速、位移、扭矩、振动等。按照被测量参数随时间变化关系可将其分为静态参数与动态参数。被测参数在整个测量过程中的数值大小不随时间变化的量称为静态参数。例如环境大气压力、压缩机及内燃机稳定工况下的转速等,严格地讲,这些参数的数值并非绝对恒定不变,只是随时间变化非常缓慢而已,在进行测量的时间间隔内其数值大小变化甚微。

随时间不断改变自身量值的被测量称为动态参数,例如非稳定工况或过渡过程的压缩机或内燃机的转速、机械设备的振动加速度、燃烧爆炸过程的压力波、加热及冷却过程的温度等等,均属于动态参数。这些参数随时间变化的函数可以是周期函数、随机函数等等。

所谓测量过程,就是将被测物理参数信号转换成可供识别记录的物理量,并与相应的测量单位进行比较的过程。这种转换有机械量向机械量转换、机械量向电量转换、电量向电量转换等多种形式。例如弹簧管式压力表把压力变化转换成弹簧管变形的位移、热电偶利用其热电效应把温度转换成电势信号等。

根据获得测量结果的程序(方式)不同,测量可分为以下几种:

(1) 直接测量。就是将测量直接与所选用的标准量进行比较,或者用预先标定好的测量仪表进行测量,从而直接得出被测量数值的方法。如用直尺测量物体长度、用玻璃管水位计测量水位、用水银温度计测量介质温度等都属于直接测量法。

(2) 间接测量。通过直接测量与被测量有确定函数关系的其他各个变量,然后将所得的数值代入已知的函数关系式进行计算,从而求得被测量值的方法称为间接测量。例如,用平衡容器测量汽包水位、通过公式 $P=UI$ 测量电功率等。

该测量方法过程复杂、费时,一般只应用在以下三种情况:

- ① 直接测量不方便;
- ② 间接测量比直接测量的结果更为准确;
- ③ 不能进行直接测量。

(3) 组合测量。组合测量是在测量两个或两个以上相关的未知量时,通过改变测量条件使各个未知量以不同的组合形式出现,在直接或间接测量出几组具有一定函数关系的量值的基础上,通过解联立方程来求取被测量的方法。例如,用铂电阻温度计测量介质温度,在一定温度范围内($0\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$)铂电阻与温度的关系为

$$R_t = R_{t_0}(1 + At + Bt^2) \quad (1-2)$$

式中 R_{t_0} ——铂电阻在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值;

R_t ——铂电阻在 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值;

A, B ——温度系数(常数)。

为了求出温度系数 A, B ,可以分别直接测出 $0\text{ }^{\circ}\text{C}, t_1\text{ }^{\circ}\text{C}, t_2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个不同温度值及相应温度下的电阻值 $R_{t_0}, R_{t_1}, R_{t_2}$,然后通过解联立方程组(1-3)来求得 A, B 的数值。

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_{t_0}(1 + At_1 + Bt_1^2) \\ R_{t_2} = R_{t_0}(1 + At_2 + Bt_2^2) \end{cases} \quad (1-3)$$

组合测量法在实验室和其他一些特殊场合的测量中使用较多。例如,建立测压管的方向特性、总压特性和速度特性曲线的经验关系式等。

注意:间接测量法的直接测量量和被测量之间具有确定的一个函数关系,通过直接测量量即可唯一确定被测量;而组合测量法被测量和直接测量量或间接测量量之间不是单一的函数关系,需要求解根据测量结果所建立的方程组来获得被测量。

根据检测仪表工作原理不同,测量可分为以下几种:

(1) 偏位测量法(偏差法或直读法)。被测量作用于仪表比较装置,使比较装置的某种参数按已知关系随被测量发生变化,平衡时,仪表输出信号变化量的大小可模拟被测量的量值。由于这种变化关系已在仪表上直接刻度,故直接可由仪表刻度尺上读出测量结果(被测量值),因此习惯上称之为直读法。例如,用玻璃管水银温度计测量温度时,可直接由水银柱高度读出温度值。

(2) 零值法(平衡法)。将被测量与一个已知标准量进行比较,当二者达到平衡时,仪表平衡指示器指零,这时已知量就是被测量值。例如,用天平测量物体的质量,用电位差计测量电势都是采用了零值法。

(3) 微差法。当被测量尚未完全与已知标准量相平衡时,读取它们之间的差值,由已知量和差值可求出被测量值。用不平衡电桥测量电阻就是用微差法测量的例子。

三种方法中,零值法和微差法测量对减小测量系统的误差很有利,由此测量准确度高,应用较为广泛。

根据仪表是否与被测对象接触,测量可分为以下两种:

(1) 接触测量法。指仪表的一部分与被测对象相接触,受到被测对象的作用才能得出测量结果的测量方法。例如用玻璃管水银温度计测温度时,温度计的温包应该置于被测介质之中,以感受温度的高低。

(2) 非接触测量法。指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。例如用光学高温计测温,是通过被测对象所产生的热辐射对仪表的作用实现测温的,因此仪表不必与对象直接接触。

1.2 热工测量仪表的组成与分类

【思考题】 热工测量中的“热工”准确含义是什么?

1.2.1 组成

火力发电厂中的热工参数多数不能直接测量,一般要借助于一些物质的物理、化学性质的关联性把测量参数转变为其他便于测量的相关量,以间接得出被测参数的数值。因此,各种测量仪表尽管工作原理、结构外形等有所不同,但从其各部分结构的功能和作用上看,总不外乎由三部分组成,即感受部件、传输变换部件及显示部件,如图 1-1 所示。

(1) 感受部件

感受部件也称敏感元件、一次仪表或传感器,它是测量仪表的感受部分,直接与被测对象相联系(但不一定直接接触)。它的作用是感受被测参数的大小和



图 1-1 测量仪表组成方框图

变化,并且必须随着被测参数变化产生一个相应的、便于测量和传递的信号输出到传输变换部件,以完成对被测对象的信息提取。通常要求转换为一种易于直接传递、记录或指示的物理量,比如在转速表中把旋转轴转速转变为电脉冲的光式传感器,把温度变化转化为水银柱高度变化的温度计等等。

仪表能否快速、准确地反映被测参数的大小和变化,很大程度上取决于感受部件。对感受部件的具体要求是:

- ① 输出信号必须随被测参数变化而变化。
- ② 输出信号只对被测参数的变化敏感。对非被测量的变化,感受部件应不受影响或受影响极小。

如果其他参数的变化会影响感受部件的输出,那么测量中这些参数的变化就是测量误差的来源。在这种情况下,一般要附加补偿装置或创造条件使这些参数的变化不影响或很少影响测量结果。

- ③ 输出信号与被测参数的变化之间呈稳定的单值函数关系,最好呈线性关系,并有较高的灵敏度,即有较小的被测量变化时,输出信号就有较显著的变化。

- ④ 具超然性,即测量过程中不干扰或尽量少干扰被测介质的状态。

感受部件要完全满足上述条件一般比较困难,因而通常在仪表内部采取一些措施加以弥补。例如设置中间放大环节以弥补感受件灵敏度的不足,设置补偿环节以克服非被测量的影响以及采用线性化环节克服非线性的影响等。

(2) 传输变换部件

传输变换部件也称中间件,它的作用是将感受部件输出的信号,根据显示部件的要求进行适当的处理后传送给显示部件。因此有的中间件只是单纯起传输作用(如信号管道、电缆、光纤等);有的则可放大感受部件发出的信号,以满足远距离传输以及驱动指示、记录装置的需要(如放大器);还有的在感受部件输出信号不适合于显示,不便于远距离传送,或者因某些特定要求需要变为某种统一的信号时,中间件可以根据要求将感受部件的输出信号变换为相应的其他输出量,如电流、电压等,再送到显示部件,这种传输变换部件往往构成独立完整的器件,通称为变送器。对于中间件,不仅要求它的性能稳定、准确度高,而且应使信息损失最小。例如在单元组合仪表中,将各种感受件的输出信号转换成具有统一数值范围的气、电信号,这样,一种形式的显示部件可以用来显示不同的被测

参数。

(3) 显示部件

显示部件也称二次仪表,其作用是接受传输变换部件送来的信号,并将其转换为测量人员可以辨识的信号。

根据显示方式不同,仪表一般可分为模拟显示仪表、数字显示仪表和屏幕显示仪表。模拟显示仪表通过指针、液面、光标、色带或图形图像等形式,反映被测量的连续变化;数字显示仪表则用数字量显示出被测量值的大小;屏幕显示仪表通过液晶屏或 CRT 显示屏以图形、数字等多种形式显示被测量的大小。

有些测量仪表根据不同的需要,还具有记录、累计、报警及调节等功能,有些还可以巡回检测多个不同的参数。

根据显示部件的功能不同,仪表又可分为指示仪表、记录仪表、积算式仪表(积算器)、信号式仪表和调节仪表。

指示仪表用来指示被测参数瞬时值;记录仪表用来记录被测参数随时间的变化;积算式仪表用来显示被测参数对时间的积分结果(例如在测量流量时,如果要测出某个时间间隔内流过的流量,就要采用流量式积算器);信号式仪表用来反映被测参数是否超过允许限值的,当被测参数达到或超过所规定限值时,仪表自动发出声、光信号,引起操作人员注意;调节仪表附加有自动调节功能,可以根据被测参数与规定值的偏差情况,发出对被测对象进行调节的信号,经过调节作用,使被测参数保持在预定的数值。

应该指出,上述测量仪表组成及各组成部分的功能描述并不是唯一的,尤其是感受部件和传输变换部件的名称和定义目前还未统一,即使是同一元件,在不同场合下也可能使用不同的名称。因此,关键在于弄清它们在测量仪表中的作用,而不必拘泥于名称本身。

1.2.2 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。

1.3 测量误差及其种类

1.3.1 测量误差及其表示方法

在测量技术中,首要关心的是测得准不准。故对测量误差的研究是必要的。

测量工作是一种试验工作,是一个变换、放大、比较、显示、读数等环节的综合过程,所以在进行测量工作时,测量原理的局限和简化、仪表本身不完善、测量系统本身存在制造安装误差、测量人员操作不当、测量时环境因素的影响和外界干扰的存在以及受人类自身认识水平的局限等种种原因,都会使得测量结果与被测量的真实值之间出现不符的现象,即存在测量误差。

测量误差一般有以下三种表示方法。

(1) 绝对误差

某一时刻某一物理量客观存在的量值称之为真实值,用 x_0 表示。通过测量仪表对该物理量检测得到的结果称为测量值,用 x 表示。

绝对误差是指仪表的测量值与被测量的真实值之间的差值,即

$$\delta = x - x_0 \quad (1-4)$$

式中 δ ——绝对误差;

x ——测量值;

x_0 ——被测量的真实值(真值)。

绝对误差是一个具有确定的大小、符号及单位的量,其单位与测量值相同。绝对误差适用于同一量级的同种量的测量结果的误差比较和单次测量结果的误差计算。绝对误差不能确切反映测量的准确度。

严格地讲,客观存在的物质时刻都在变化之中,而且测量误差的存在是不可避免的,任何测量值都只能近似反映被测量的真实值,实际上真值 x_0 是难以测量到的,也就是说 x_0 也只能是理论上的真实值。

既然在实际的热工测量中得不到绝对准确的真实值,那么,在实际应用中我们一般采用约定真值或相对真值。约定真值对于给定不确定度所赋予的(或约定采用的)特定量的值。约定真值的确定方法通常有如下几种:

- ① 由计量基准、标准复现而赋予该特定量的值;
- ② 采用权威组织推荐的值;

③ 用多次测量结果的算术平均值来确定约定真值。

相对真值则是指把相对高一级仪表(标准表)测量得到的值近似看做真值。比如对一般测量,如果高一级仪表的误差不大于等级低一级仪表误差的 $1/3$,对精密测量,高一级仪表的误差不大于低一级仪表误差的 $1/10$,就可认为高一级仪表所测结果是低一级仪表所测结果的相对真值。例如国家各级计量站所提供的标准质量在某种程度上就可作为真值看待。

(2) 相对误差

相对误差是仪表的绝对误差与被测量的真实值之比,用百分数表示,即

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

绝对误差有正、负值,有量纲,而相对误差有正、负值但无量纲。对于大小不同的测量值,相对误差比绝对误差更能反映测量的相对准确程度,相对误差越小,测量的准确性越高。

当被测量的大小不同时,允许的测量绝对误差是不同的。而当要求相对误差相同时,被测量的量值越小,其允许的测量绝对误差也越小。例如用高温计测量一炉子温度,高温计指示值为 $1\ 645\ ^\circ\text{C}$,炉子的真实温度为 $1\ 650\ ^\circ\text{C}$,则绝对误差为 $-5\ ^\circ\text{C}$,相对误差为 $-\frac{5}{1\ 650} \times 100\% = -0.3\%$ 。如果在测量 $100\ ^\circ\text{C}$ 的水时,某温度计也只有 $-5\ ^\circ\text{C}$ 的绝对误差,但其相对误差则为 -5% ,显然后者相对误差比前者大得多,说明后者的测量准确度要低得多。

【思考题】 相对误差和绝对误差的用途有何区别?二者能否判断仪表的质量?

(3) 折合误差(引用误差)

绝对误差和相对误差的表示形式都不能用于判断测量仪表的质量。因为,两只仪表如果绝对误差相同,但仪表的量程不同,显然量程范围大的那只仪表准确度更高些;而用某一已知准确度等级的测量仪表测量一个靠近测量范围下限的小量,计算得到的相对误差通常总比测量接近上限(如 $2/3$ 量程处)得到的相对误差大得多。所以,判断仪表的质量时一般不采用绝对误差和相对误差的表示形式,而采用折合误差。折合误差也称为引用误差,是指在仪表全量程范围内所有指示值的最大绝对误差与该仪表的量程范围之间的百分比,即

$$\gamma = \pm \frac{|\delta_{\max}|}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 δ_{\max} ——仪表量程范围内指示值的最大绝对误差;

$A_{\max} - A_{\min}$ ——仪表的量程。

例如一量程范围为 $0 \sim 8\ \text{MPa}$ 的压力表,在其标尺各点处指示值的最大绝