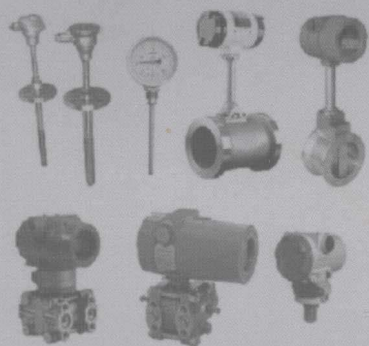


电厂实用技术
读·本·系·列



热工仪表及自动控制系统
JI ZIDONG KONGZHI XITONG

热工仪表 及自动控制系统

周善龙 ◎ 主 编

谭兴强 ◎ 副主编



化学工业出版社

 电厂实用技术
读·本·系·列

常州大学图书馆
藏书章

热工仪表 及自动控制系统

周善龙 ◎ 主 编
谭兴强 ◎ 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

热工仪表及自动控制系统/周善龙主编. —北京:
化学工业出版社, 2012.8
(电厂实用技术读本系列)
ISBN 978-7-122-14428-7

I. 热… II. 周… III. 热工仪表-自动控制系统
IV. ①TH81②TK3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 112941 号

责任编辑: 高墨荣
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 徐卿华
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 15 $\frac{1}{4}$ 字数 395 千字 2012 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

前言

I O R L W O R D

本书是《电厂实用技术读本系列》丛书之一，是为发电厂热工专业人员及热机运行人员学习热工专业基础知识并掌握有关设备维护及现场操作实用技术而编写的。本书重点介绍了火力发电厂热工测量仪表和自动控制与保护的基本原理、设备构造知识和运行维护与故障分析处理的方法，并结合最新发电厂热工自动化技术发展动态介绍了有关仪表与控制的高新技术装备。本书紧密联系现场生产实际，考虑到不同层次人员的学习需求，内容上由浅入深，以浅显易懂为主，注重实用性，读者能根据不同火力发电厂的实际情况，了解热工专业知识，掌握现场设备运行、维护与故障处理的方法，具备必要的技能。

全书分2章、12节，共48个主题小节。第1章“热工测量仪表”主要内容包括热工测量基础知识，温度、压力、流量和液位、转速及机械量测量等常见仪表的原理、结构、使用维护与故障处理的知识，CEMS及其他常见在线分析仪表的有关知识；第2章“热工自动控制与保护”主要内容包括热工自动调节、顺序控制、PLC、DCS及DEH等系统设备的软件构成、逻辑原理、运行维护与故障处理的基本知识。

本书主要供发电厂热工专业管理人员和设备维护人员培训学习使用，也可以作为热力机械专业的运行及管理人员了解有关热工专业知识的参考读本，还可作为大、中专院校学生的学习资料。

本书由周善龙主编，谭兴强副主编。编写分工为：第1章中1.1、1.7和第2章中2.3由谭兴强编写，第1章中1.2~1.5和第2章中2.1、2.2、2.4、2.5由周善龙编写，第1章中1.6由谢献勇编写。全书由谭兴强统稿。本丛书在编写过程中得到了江苏仪化设备工程公司、中国石化仪征化纤股份公司热电中心及中国石化仪征化纤股份公司设备动力部有关领导和工程技术人员的大力支持，在此表示感谢。

限于编写时间仓促，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

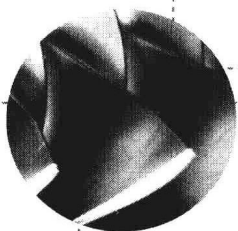
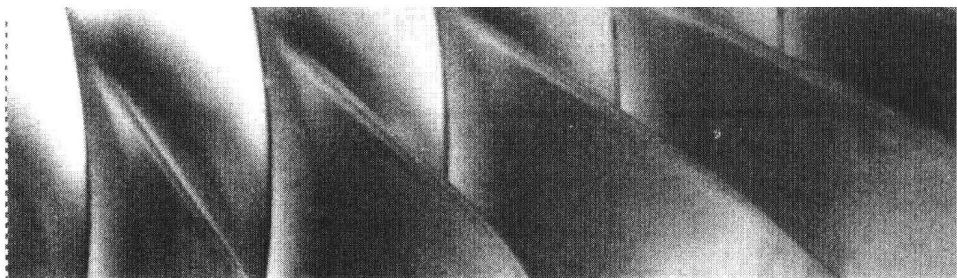
编者

第1章 热工测量仪表

1.1 热工测量基础知识	2
1.1.1 测量和测量仪表的基本概念	2
1.1.2 计量与计量单位	5
1.1.3 测量误差	8
1.2 温度测量仪表	14
1.2.1 概述	14
1.2.2 热电偶	17
1.2.3 热电阻	27
1.3 压力测量仪表	30
1.3.1 概述	30
1.3.2 液柱式压力计	32
1.3.3 弹性式压力计	34
1.3.4 压力传感器	36
1.3.5 压力测量仪表常见故障处理	44
1.4 流量测量仪表	45
1.4.1 差压式流量计	46
1.4.2 电磁流量计	52
1.4.3 转子流量计	57
1.4.4 其他原理的流量计	60
1.5 火力发电厂其他常用测量仪表	70
1.5.1 液位测量仪表	70
1.5.2 转速测量	78
1.5.3 位移、膨胀和振动的测量	81
1.6 在线分析仪表	85
1.6.1 氧化锆氧量测量仪表	86
1.6.2 电导率测量	89
1.6.3 pH计	91
1.6.4 浊度计	95
1.7 烟气连续排放监测系统	97
1.7.1 颗粒物(烟尘)监测子系统	97
1.7.2 气态污染物监测子系统	100
1.7.3 烟气排放参数测量子系统	102
1.7.4 CEMS的校准与故障处理	104

第2章 热工自动控制与保护

2.1 热工自动控制	108
2.1.1 自动控制基础知识	108
2.1.2 执行器设备	119
2.1.3 发电厂典型自动控制系统	126
2.2 顺序控制系统	137
2.2.1 概述	137
2.2.2 锅炉风烟系统顺序控制	139
2.2.3 给水系统顺序控制	147
2.2.4 炉膛安全监控系统	151
2.3 DEH 系统	171
2.3.1 DEH 系统的构成	171
2.3.2 DEH 的转速和负荷控制	172
2.3.3 阀门管理	177
2.3.4 DEH 的保护及其他功能	180
2.3.5 DEH 的运行方式	184
2.3.6 DEH 常见故障及处理	186
2.4 可编程控制系统	188
2.4.1 概述	188
2.4.2 可编程控制器的硬件结构	191
2.4.3 可编程控制器的工作原理	195
2.4.4 可编程控制器的网络	197
2.4.5 可编程控制器应用举例	203
2.5 分散控制系统	206
2.5.1 概述	206
2.5.2 DCS 系统应用举例及人性化设计	216
2.5.3 DCS 系统调试与运行维护	221
2.5.4 DCS 系统故障分析	227
参考文献	234



第 1 章

热工测量仪表





1.1 热工测量基础知识

1.1.1 测量和测量仪表的基本概念

1.1.1.1 测量的定义与相关名词

测量是人们对外界客观事物和探索对象的一种量化手段，在各种人类活动中都有应用，已经形成了一套行之有效的有关测量的科学方法与认识。

JJF1001—1998《通用计量术语及定义》中对测量的定义是：测量是以确定量值为目的的一组操作。所谓测量，具体地讲，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，是对被测量定量认识的过程，所得到的倍数就是被测量的值，如式(1-1)所示：

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

式中 x ——被测量；

b ——标准量（测量单位）；

L ——得到的被测量的值，即得到的测量结果。

例如用游标卡尺对一轴径的测量，就是用测量工具（游标卡尺）将被测对象（轴的直径）与长度单位（mm）相比较。若其比值为 20.22，准确度为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，则测量结果可表达为 $(20.22 \pm 0.02)\text{mm}$ 。

任何测量过程都包含：测量对象、计量单位、测量方法和测量误差四个要素。在这个例子中看见了测量对象（轴）、被测量（轴径）、计量单位（mm）、测量方法（用游标卡尺测量）和测量误差（准确度为 $\pm 0.02\text{mm}$ ）、测量结果 $[(20.22 \pm 0.02)\text{mm}]$ 等。其实用游标卡尺测量就是一种测量的原理，而整个测量过程就是遵照了一定测量程序进行的一项测量活动。结合上例，在发电厂热工测量工作中还涉及到以下基本名词。

① 测量原理 是指测量的科学基础，比如：应用于温度测量的热电效应，应用于电位差测量的约瑟夫森效应，应用于速度测量的多普勒效应，应用于分子振动波数测量的喇曼效应等。

② 测量方法 是指进行测量时所使用的、按类别叙述的一组操作逻辑次序，它可按不同方式分类，如替代法、微差法、零位法。

③ 测量的程序 进行特定测量时所用的、根据给定的测量方法具体叙述的一组操作。测量程序通常记录在文件中，并且足够详细，以使操作者在进行测量时不再需要补充资料。

④ 被测量 作为测量对象的特定量。对被测量的详细描述，可要求包括对其他有关量（如时间、温度、压力等）作出说明。

⑤ 测量结果 在计量学中，对测量结果给出了更精确的定义，它所说的“由测量所得到的赋予被测量的值”，其意义包括两个方面，一是在给出测量结果时，应说明它是示值、未修正测量结果或已修正测量结果，还应表明它是否为几个值的平均；二是在测量结果的完整表述中还应包括测量不确定度，必要时还应说明有关影响量的取值范围。

1.1.1.2 测量方法的分类

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

(1) 根据获得测量结果的程序不同，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，从而直接得出测量值的方法。如用尺测长度，用玻璃管水位计测水位等。

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函数进行计算，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；通过测量导线电阻、长度及截面求电阻率等。

③ 组合测量 组合测量是在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得被测量的方法。例如，在一定温度范围内铂电阻与温度关系如式(1-2)所示：

$$R_t = R_{t_0} (1 + At_1 + Bt_2) \quad (1-2)$$

式中 R_{t_0} ——铂电阻在 0°C 时的电阻值；

R_t ——铂电阻在 $t^\circ\text{C}$ 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°C 、 $t_1^\circ\text{C}$ 、 $t_2^\circ\text{C}$ 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} ，然后通过联立方程来求得 A, B 数值。

(2) 根据检测装置动作原理不同，测量可分为以下几种。

① 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，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读出测量结果。例如，用玻璃管水银温度计测量温度时，可直接用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。零值法和微差法测量对减小测量系统的误差很有利，因此测量准确度高，应用较为广泛。

(3) 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 仪表的一部分与被测对象接触，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量温度时，温度计的温包应该置于被测介质之中，以感受温度高低。

② 非接触测量法 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，是通过被测量对象所产生的热辐射对仪表的作用而实现测温的，因此仪表不必与对象直接接触。

1.1.1.3 测量仪表的分类

热工测量仪表的分类方法很多，可以根据测量介质参数（即被测变量）、功能、测量方式以及结构等进行分类。

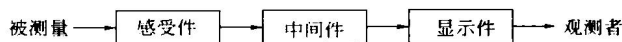
① 按工质参数分类，热工参数有温度、压力、流量、物位等，因此，测量这些参数的仪表就有温度仪表、压力仪表、流量仪表、物位仪表、分析仪表等。



- ② 按照功能可分为检测仪表、显示仪表、控制仪表。
- ③ 按测量方式可分为接触与非接触测量仪表。
- ④ 按安装方式或形式可分为现场仪表、盘装仪表和架装仪表。
- ⑤ 按仪表信号形式可分为模拟仪表和数字仪表。
- ⑥ 按是否使用微处理器可分为智能仪表和非智能仪表。
- ⑦ 按能源种类的不同可分为气动仪表、电动仪表和液动仪表。
- ⑧ 按显示功能分类有指示仪、记录仪、累计器、信号报警器、屏幕显示仪。
- ⑨ 按仪表的组合形式可分为基地式仪表、单元组合仪表、综合控制装置、现场总线仪表。

1.1.1.4 热工测量仪表的基本组成

虽然不同种类热工测量仪表的工作原理、结构外形、所测参数等不尽相同,但从其本身组成的各部分功能和作用上看,主要包括三个组成部分,如图 1-1 所示。



■ 图 1-1 热工测量仪表的三个组成部分

(1) 感受件

感受件是仪表中直接与被测对象发生关系的部件,它能感知被测参数的变化并将其转换成一种便于测量的信号输出。感受件通常也称作敏感元件、一次件、一次仪表或传感器,例如玻璃液体温度计的温包。

感受件的性能好坏直接影响着测量仪表能否快速、准确地反映被测参数的变化,因此,感受件的性能应符合以下要求。

- ① 输出信号与被测参数变化呈稳定的单值函数关系,且最好是线性的。
- ② 应有较高的灵敏度。
- ③ 反应快、延迟小。

感受件要完全满足上述条件一般是比较困难的,因而通常在仪表内采取一些措施加以弥补。如设置中间放大环节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,设置线性化环节以克服非线性的影响。

(2) 中间件

中间件是用来接受感受件的输出信号并将其送到显示件的部件,中间件的主要作用如下。

- ① 单纯起传输作用,如信号管道、电缆、光纤等。
- ② 起信号放大作用,将感受件输出的微弱信号进行放大,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。
- ③ 起变送作用,将感受件的输出信号变换为相应的其他量,以便于远距离传送或适于二次仪表的显示,如变送器。

(3) 显示件

显示件用来接受中间件送来的信号,并将其转变为测量人员可以识别的信号,它是与测量人员直接联系的部件。

根据仪表的显示方式不同,显示件可分为模拟显示、数字显示和屏幕显示三种。模拟显示是由指针、光标、色带等反映被测参数的连续变化;数字显示则直接用数字显示被测参数

的大小或高低；屏幕显示是用计算机和电视屏幕等显示测量结果，它既能作模拟显示，也能作数字式显示，或者同时按两种方式进行显示，还可以给出要求的数据表格、曲线等，是现代热工测量仪表的主要显示方式。

根据仪表的显示量特点不同，显示件还可分为显示被测参数瞬时值的瞬时量显示、显示被测参数在一段时间内累计值的累计量显示和具有信号报警功能的越限与极限显示等。

1.1.1.5 热工测量在火力发电厂的应用

在火力发电厂中，通过热工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、及时地提供所需要的信号。

一般根据热力设备及系统工艺过程中进行的检测、监视、调节、控制、保护与联锁等作用，将热工仪表及控制装置系统主要分为：仪表检测及显示系统、自动调节系统、顺序控制系统、程序控制系统、量值传递系统等。对热力设备及系统的热工参数进行检测的仪表称为热工仪表，对热力设备及系统的工艺过程进行调节、控制、保护与联锁的系统称为热工控制系统，或称为热工控制装置。热工仪表及控制装置是保障机组安全启停、正常运行和故障处理的重要技术装置，是促进安全经济运行、文明生产和提高劳动生产率不可缺少的手段。

热工测量和控制仪表分布在火力发电厂的各个部位，除了在锅炉和汽轮机及其配置的辅助设备组成的系统，如输煤、制粉、燃油、风烟、除尘、出灰、蒸汽、真空、补给水、水处理、循环水、减温减压、热网供热系统、发电机冷却、汽轮机油系统等热力机械系统上大量安装和使用热工测量与控制仪表外，还在变压器、发电机、电动机等电气设备上也安装有热工测量与控制仪表，如风温、油温等。

1.1.2 计量与计量单位

关于计量与测量异同，一直有着争论。计量也是一种测量活动，而计量法规定计量是规范测量的测量，计量依法监督测量工具的准确性与测量行为的规范性。使用有溯源性的标准与测量仪器、按照规程、由资格被确认的人员进行的以判别测量器具合格性为目的的测量，是计量。

从测量手段上讲，测量是用测量工具去考察、认识未知量，测量的目的是得到准确的测得值。计量是拿标准（已知的量值）来与测量工具进行，以考察测量工具是否准确，计量的目的是保证测量的准确。

结合热工仪表的实际工作来看，认为热工仪表测量是在一定计量标准下进行的，努力实现对热力过程中的各类参数的准确测量。因此必须在计量法的框架下，保证测量的准确性、可重复性、连续性、合法性、严肃性和统一性，做好量值的传递和可追溯性。

1.1.2.1 国际单位制

被测量的值与使用的测量单位有关。1948年召开的第九届国际计量大会作出决定，要求国际计量委员会创立一种简单而科学的、供所有米制公约组织成员国均能使用的实用单位制。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、电流和热力学温度等六种基本单位作了统一规定，1974年的第十四届国际计量大会又决定增加物质的量的单位摩尔（mol）作为基本单位。其他的测量单位，可以由这七种基本单位一一导出，目前国际单位制共有七个基本单位（见表1-1）。实践证明，国际单位制具有科学、合理、精确、实用等优点。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》。法定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构成。

■ 表 1-1 国际单位制基本单位

量	SI 基本单位		量	SI 基本单位	
	名称	符号		名称	符号
长度	米	m	热力学温度	开[尔文]	K
质量	千克	kg	发光强度	坎[德拉]	cd
时间	秒	s	物质的量	摩[尔]	mol
电流	安[培]	A			

国际单位制是由国际计量大会（CGPM）采纳和推荐的一种一贯单位制，SI 是国际单位制的国际通用符号。各基本单位的定义如下。

① 长度：米（m），1 米是 $1/299792458$ 秒的时间间隔内光在真空中行程的长度。

② 质量：千克（kg），千克定义为国际千克原器的质量。

③ 时间：秒（s），1 秒是铯-133 原子基态两个超精细能级间跃迁辐射 $9,192,631,770$ 周所持续的时间。国际原子时是根据以上秒的定义的一种国际参照时标，属国际单位制。

④ 电流：安[培]（A），安培是一恒定电流，若保持在处于真空中相距 1m 的两无限长、而圆截面可忽略的平行直导线内，则两导线之间产生的力在每米长度上等于 $2 \times 10^{-7}\text{N}$ 。

⑤ 热力学温度：开[尔文]（K），英文是 Kelvin，简称开，国际代号 K。开尔文是国际单位制中 7 个基本单位之一，以绝对零度（0K）为最低温度，规定水的三相点的温度为 273.16K ， 1K 等于水三相点温度的 $1/273.16$ ，它与水的三相点性质有关，是恒量。摄氏温标与国际温标之间的换算大约为 $t_c = T_k - 273.15$ 。

⑥ 发光强度：坎[德拉]（cd），坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射，而且在此方向上的辐射强度为 $1/683\text{W/Sr}$ 。定义中的 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 辐射波长约为 555nm ，它是人眼感觉最灵敏的波长。

⑦ 物质的量：摩[尔]（mol），表示组成物质微粒数目多少的物理量（物质的量是一个专用名词，不可分割和省略）。根据科学测定， $12\text{g}^{12}\text{C}$ 所含的 C 原子数约为 6.0220943×10^{23} ，用符号 N_A 表示，称阿伏加德罗常数，近似值为 6.02×10^{23} 。凡是含有阿伏加德罗常数个结构微粒（约 6.02×10^{23} ）的物质，其物质的量为 1 摩[尔]。

1.1.2.2 SI 导出单位

导出单位是用基本单位以代数形式表示的单位。这种单位符号中的乘和除采用数学符号，如速度的 SI 单位为米每秒（m/s）。

对某些 SI 导出单位，国际计量大会通过了专门的名称和符号（见表 1-2），使用这些专门名称以及用它们表示其他导出单位，往往更为方便、明确。

单位弧度和球面度这两个 SI 导出单位称为 SI 辅助单位，在许多实际情况中，用专门名称弧度和球面度分别代替数字 1 更明了和方便，例如角速度的 SI 单位可写成弧度每秒（rad/s）。

1.1.2.3 词头及使用规则

表 1-3 给出了 SI 词头的名称、符号及中文简称。词头用语构成倍数单位（十进倍数单

位与分数单位)，但不得单独使用。

■ 表 1-2 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名称	单位符号	与基本单位及其他导出单位的关系
[平面]角	弧度	rad	1rad= 1m/m= 1
立体角	球面度	sr	1sr= 1m ² /m ² = 1
频率	赫[兹]	Hz	1Hz= 1s ⁻¹
力	牛[顿]	N	1N= 1kg·m/s ²
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	1Pa= 1N/m ²
能[量],功,热量	焦[耳]	J	1J= 1N·m
功率,辐[射能]通量	瓦[特]	W	1W= 1J/s
电荷[量]	库[仑]	C	1C= 1A·s
电压,电动势,电位,(电势)	伏[特]	V	1V= 1W/A
电容	法[拉]	F	1F= 1C/V
电阻	欧[姆]	Ω	1Ω= 1V/A
电导	西[门子]	S	1S= 1Ω ⁻¹
磁通[量]	韦[伯]	Wb	1Wb= 1V·s
磁通[量]密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	1T= 1Wb/m ²
电感	亨[利]	H	1H= 1Wb/A
摄氏温度	摄氏度	℃	1℃= 1K
光通量	流[明]	lm	1lm= 1cd·sr
[光]照度	勒[克斯]	lx	1lx= 1lm/m ²

■ 表 1-3 SI 词头

所表示的因数	词头名称(英文)	词头符号	(中文)
10 ²⁴	yotta	Y	尧[它]
10 ²¹	zetta	Z	泽[它]
10 ¹⁸	exa	E	艾[可萨]
10 ¹⁵	peta	P	拍[它]
10 ¹²	tera	T	太[拉]
10 ⁹	giga	G	吉[咖]
10 ⁶	mega	M	兆
10 ³	kilo	k	千
10 ²	hecto	h	百
10 ¹	deca	da	十
10 ⁻¹	deci	d	分
10 ⁻²	centi	c	厘
10 ⁻³	milli	m	毫
10 ⁻⁶	micro	μ	微
10 ⁻⁹	nano	n	纳[诺]
10 ⁻¹²	pico	p	皮[可]
10 ⁻¹⁵	femto	f	飞[母托]
10 ⁻¹⁸	atto	a	阿[托]
10 ⁻²¹	zepto	z	仄[普托]
10 ⁻²⁴	yocto	y	幺[科托]

词头符号与所紧接的单位符号(指 SI 基本单位、SI 辅助单位和具有专门名称的 SI 导出单位,而不是指组合单位整体)应作为一个整体对待,它们一起组成一个新单位(十进倍数单位或分数单位),并具有相同的幂次,而且也可以和其他单位构成组合单位。例如:1cm³=(10⁻²m)³=10⁻⁶m³,1μs⁻¹=(10⁻⁶s)⁻¹=10⁶s⁻¹等。

- 倍数单位在使用中应注意以下几点。
- ① 不得使用重叠词头,如只能写 nm,而不能写 mμm。
 - ② SI 单位的倍数单位根据使用方便的原则选取,通过适当的选择,可使数值处于实用范围内。选用的 SI 单位的倍数单位,一般应使量的数值处于 0.1~1000 范围内。例如:1.2×10⁴N 可写成 12kN,0.00394m 可写成 3.94mm,11401Pa 可写成 11.401kPa,3.1×10⁻⁸s 可写成 31ns。
 - 在某些情况下,习惯使用的单位可以不受这个限制。如大部分机械图使用的单位用 mm,导线截面积使用的单位用 mm²,领土面积用 km²。
 - ③ 由于历史原因,质量的 SI 单位名称“千克”中,已包含 SI 词头“千”,所以质量的十进倍数单位由词头加在“克”前构成。如用 mg 而不得用 μkg。
 - ④ 词头 h、da、d、c(百、十、分、厘),一般用于某些长度、面积和体积。
 - ⑤ 对于组合单位,其倍数单位的构成,一般只使用一个词头,而且尽可能用于组合单位中的第一个单位。
- 通过相乘构成的组合单位的词头通常加在第一个单位之前,例如力矩的单位 kN·m,不宜写成 N·km。
- 通过相除构成的组合单位,或通过乘和除构成的组合单位,其词头一般都应加在分子的第一个单位之前,分母中一般不用词头,但质量单位 kg 在分母中时例外,例如摩尔内能单



位 kJ/mol 不宜写成 J/mmol , 质量能 (比能) 单位可以是 kJ/kg 。

一般不在组合单位的分子分母中同时采用词头。当组合单位分母是长度、面积和体积单位时, 分母中可以选用某些词头构成倍数单位。例如密度的单位可以选用 g/cm^3 。

⑥ 在计算中, 为了方便, 所有量均可用 SI 单位表示, 将词头用 10 的幂代替。

⑦ 有些国际单位制以外的单位, 可以按习惯用 SI 词头构成倍数单位, 但它们不属于国际单位制, 如 MeV 、 mCi 、 mL 等。

⑧ 摄氏温度单位摄氏度, 角度单位度、分、秒与时间单位日、时、分等非十进制单位不得用 SI 词头构成倍数单位。

1.1.2.4 可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位

中华人民共和国法定计量单位 (简称法定单位) 是以国际单位制单位为基础, 同时选用了一些非国际单位制的单位构成的。

国家选定的非国际单位制的单位, 见表 1-4。这些单位都是由于实用中的重要性和专门领域的需要, 并得到国际计量委员会承认可以与国际单位制单位并用的。

■ 表 1-4 可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位

量	单位名称	单位符号	与 SI 单位的关系
时间	分	min	$1\text{min}=60\text{s}$
	[小] 时	h	$1\text{h}=60\text{min}=3600\text{s}$
	日,(天)	d	$1\text{d}=24\text{h}=86400\text{s}$
[平面] 角	度	$^{\circ}$	$1^{\circ}=(\pi/180)\text{rad}$
	[角] 分	'	$1'=(1/60)^{\circ}=(\pi/10800)\text{rad}$
	[角] 秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000)\text{rad}$
体积,容积	升	L(l)	$1\text{L}=1\text{dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
质量	吨	t	$1\text{t}=10^3\text{kg}$
	原子质量单位	u	$1\text{u}\approx 1.660540\times 10^{-27}\text{kg}$
旋转速度	转每分	r/min	$1\text{r/min}=(1/60)\text{s}^{-1}$
长度	海里	n mile	$1\text{n mile}=1852\text{m}$ (只用于航行)
速度	节	kn	$1\text{kn}=1\text{n mile/h}=(1852/3600)\text{m/s}$ (只用于航行)
能	电子伏	eV	$1\text{eV}\approx 1.602177\times 10^{-19}\text{J}$
级差	分贝	dB	
线密度	特 [克斯]	tex	$1\text{tex}=10^{-6}\text{kg/m}$
面积	公顷	hm ²	$1\text{hm}^2=10^4\text{m}^2$

1.1.3 测量误差

1.1.3.1 定义与相关名词

测量误差的定义是被测量的测得值 x 与其真值 x_0 之差, 即 $\Delta=x-x_0$ 。由于真值是不可能确切获得的, 因而上关于测量误差的定义也是一个理想的概念。在实际工作中往往将被测量值的可信度 (精度) 更高的值, 作为其当前测量值的 “真值”。

说明测量误差时还会涉及到有关名词, 现简要介绍如下。

① 被测量的真值和实际值 一个量在被测量时, 本身所具有的真实大小是被测量的真值。由于不可能知道被测量的真值, 在实际测量中, 常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值。实际值是满足规定准确度的用来代替真值的量值。通常在检定中, 把高

于被测量准确度的计量标准所测得的量值称为实际值。

② 测得值和测量结果 测得值是以计量器具直接反映或经过必要计算而得来的量值。测量结果是由测量所得到的赋予被测量的值。在给出测量结果时,应说明它是示值、未修正测量结果或已修正测量结果,还应表明它是否为几个值的平均;在测量结果的完整表述中应包括测量不确定度,必要时还应说明有关影响量的取值范围。

③ 绝对误差和相对误差 测量结果减去被测量的真值,称为测量误差,为与相对误差相区别,又称为绝对误差,即绝对误差=测量结果-被测量的真值。它反映了测量值偏离真值或约定真值的大小和方向。相对误差是测量的绝对误差和被测量真值之比。

④ 仪表示值误差 仪表的示值和被测量的真值之间的差值。即仪表示值误差=示值-被测量真值。

⑤ 修正值 用代数方法与未修正测量结果相加,以补偿其系统误差的值。它等于负的系统误差,但由于系统误差不能完全获知,因此这种补偿并不完全。

⑥ 引用误差和仪表示值引用误差 引用误差是指绝对误差与测量范围上限值或量程之比值,用百分数表示。引用误差可以用来度量仪表的精确度。仪表示值引用误差是指仪表示值误差与仪表满量程值之比。

⑦ 基本误差、附加误差和综合误差 基本误差又称固有误差。在参比条件下仪器仪表的示值误差,其计算公式为:基本误差=测量值-真实值。附加误差是由于仪表超出规定的正常工作条件时所增加的误差。综合误差是指各项误差的合成。

⑧ 回程误差 回程误差又称之为变差,是指在正常条件下,仪表正反行程在同一点示值上被测量值之差的绝对值。

⑨ 误差的绝对值 不考虑正负号的误差值。误差的绝对值是指绝对误差的数值,或指绝对误差的模,是仅仅对正负号而言,不考虑误差的方向性。而绝对误差是指测量值与真值之差,它反映了测量值偏离真值或约定真值的大小和方向,因而绝对误差具有符号。

⑩ 精密度 精密度表示测量结果中随机误差的大小程度,也可简称为精度。精密度是指在一定的条件下进行多次测量时,所得测量结果彼此之间符合的程度,通常用随机不确定度来表示。

⑪ 正确度 正确度表示测量结果中系统误差的大小程度。正确度是指在规定条件下,在测量中所有系统误差的综合。理论上对已定系统误差可用修正值来消除,对未定系统误差可用系统不确定度来估计。

⑫ 准确度 准确度是测量结果中系统误差与随机误差的综合,表示测量结果与真值的一致程度。从误差观点来看,准确度反映了测量的各类误差的综合。若已修正所有已定系统误差,则准确度可用不确定度来表示。

⑬ 不确定度 不确定度表示由于测量误差的存在面对被测量值不能肯定的程度。

⑭ 偏差 表示仪表实际值对于标称值(名义值)偏离的程度,即偏差=实际值-标称值。

1.1.3.2 误差的来源

任何测量由于测量方法、测量工具(仪器、设备)所带来的误差、测量环境条件对测量结果所造成的影响、工作人员的水平 and 观察能力以及被测对象本身的变化对测量结果产生的影响,使测量总有一定的误差,而不可能得到被测量的真实值(真值)。分析造成误差的因素,就是为了使测量结果更接近真值。

下面就测量器具、测量方法、测量环境和测量人员等方面因素造成的测量误差进行简要



分析。

(1) 测量器具

测量器具引起的误差包括测量仪器、标准量具由于制造误差、元件稳定性和计量传递误差所带来的,以及测量设备附件所带来的误差。比如,设计中存在的原理误差,像杠杆机构、阿贝误差等;制造和装配过程中的误差造成的示值误差,像刻线尺的制造误差、表盘的刻制与装配偏心等。其中最重要的是基准件的误差,如刻线尺和量块的误差,它是测量器具误差的主要来源。

(2) 测量方法

由于测量方法或理论所引起的误差,例如双电桥的通常计算公式是一个近似值,它的全公式要比通常计算公式多一个附加项,由于忽略了附加项,按通常计算公式求得的电阻值就有一定误差。像这样的误差就称为方法误差或理论误差。间接测量法是主要的测量方法,因此间接测量法中因采用近似的函数关系原理而产生的误差或多个数据经过计算后的误差累积是客观存在的。

(3) 测量环境

由于测量时周围环境中温度、气压、湿度、振动、空气质量等因素的影响,从而使测量仪器发生变化而引起测量误差。在一般测量过程中,温度是最重要的因素,测量温度对标准温度($+20^{\circ}\text{C}$)的偏离、测量过程中温度的变化以及测量器具与被测件的温差等都将产生测量误差。如标准电池由于不同温度其电动势值也不同,通常检验证书上标定的是 20°C 的电动势值,当在其他温度下使用时,如仍按 20°C 的电动势值计算,就会带来测量误差。

(4) 测量人员

由于测量人员视差、读数的分散性所引起的视差、估读误差,精神不集中造成的疏忽误差,它们的大小取决于测量人员的操作技术和其他主观因素。另外还有测量人员限于水平不能发现的测量过程中的误差。

1.1.3.3 误差的分类

测量误差按误差性质分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差

在规定条件下,绝对值和符号保持不变或按某一确定规律变化的误差,称为系统误差。其中绝对值和符号不变的系统误差为定值系统误差,按一定规律变化的系统误差为变值系统误差。如量块的误差、刻线尺的误差、度盘偏心的误差。系统误差大部分能通过修正值或找出其变化规律后加以消除。

(2) 随机误差

在规定条件下,绝对值和符号以不可预知的方式变化的误差,称为随机误差。以同样的仔细程度重复进行同一个量的测量时,测量结果往往不完全相同,也称为偶然误差。就某一次测量而言,随机误差的出现无规律可循,因而无法消除。但若进行多次等精度重复测量,则与其他随机事件一样具有统计规律的基本特性,可以通过分析,估算出随机误差值的范围。随机误差主要由温度波动、测量力变化、测量器具传动机构不稳、视差等各种随机因素造成,虽然无法消除,但只要认真、仔细地分析产生的原因,还是能减少其对测量结果的影响。

(3) 粗大误差

明显超出规定条件下预期的误差,称为粗大误差,也称疏失误差。粗大误差是由某种非

正常的原因造成的。如读数错误、温度的突然大幅度变动、记录错误等。该误差可根据误差理论，按一定规则予以剔除。

1.1.3.4 数据处理

在修正了已定系统误差和剔除了粗大误差以后，测得值中仍含有随机误差和部分系统误差，还需估算其测量误差的大小，评定测得值的不确定度，知道测得值及该测得值的变化范围（可信程度），才能获得完整的测量结果。测量是以确定量值为目的的一组操作，因此测量结果总是以数据的形式来表现。如何进行数据处理，应该根据测量误差的要求来确定，数据取多少位，应和其误差大小相对应，这就是数据处理的过程。

(1) 有效数字、欠准数字和可靠数字

测量结果中能准确读出来的数字叫可靠数字，估读出来的是欠准数字，将二者合起来就称为有效数字。测量结果经过修约后的数值，从左边第一个非零数字到最后一位数字止的所有数字都是有效数字。在一个数字中，只保留一位欠准数字，其余都是可靠数字。比如：3.827 是四位有效数字，其中，3.82 是可靠数字，7 是欠准数字。含有误差的有效数字一般只需保留一位。

在有效数字中，关于“0”数字有其特别说明。只与计量单位有关的“0”数字不计入有效数字，比如 19.99mA 与 0.01999A，都是四位有效数字，两者只是因为单位换算而形成的不同表达形式。但小数点后的“0”数字不是可以随便省略的，比如在有效数 4mA 与 4.0mA 中，一是有效位数不一样，二是可靠性不一样：在“4mA”中，可能是 3mA、也可能是 5mA；但在 4.0mA 中，4 是可靠数字，而 0 是欠准数字。所以，小数点后的“0”数字必须根据测量误差的需要而选择有效位数，并恰当使用小数点后的零，使数据有效。

测量结果数据的确定要注意下面几个问题。

① 根据微小误差准则，有效位数的化整原则通常为允许测量误差的 1/10。这样，由于化整所引起的误差属于微小误差，可以忽略不计而不会影响测量的准确度。例如测量误差为 0.1%，则数据化整应为 0.01%。如果数据化整到 0.1%，由于化整误差直接影响到测量误差，这是不允许的，但是也没有必要化整得过细，如化整到 0.001% 对测量结果也没有意义。

② 在数据的加减法运算中，要对小数位数多的进行舍入处理，使其比小数位数少的只多一位小数，运算得到的结果，比如： $16.9 + 4.87 + 38.123$ ，应先进行化整，将 38.123 化整为 38.12，就得到 $16.9 + 4.87 + 38.12 = 59.89$ ，然后再化整为与 16.9 同样的小数位，即一位小数，则得到结果 59.9。

③ 在数据的乘除运算中，以有效位数最少的为准，对位数多的数进行统一处理，使其只比位数少的多一位，然后运算，运算结果只保留各数中小数位数最少的位数。

(2) 数据修约

在上述内容的两组数据化整不一样，一是将 38.123 化整为 38.12，一个是将 59.89 化整为 59.9，这就牵涉到数据修约。

在热工仪表检定中最常用到是数据修约规则就是：4 舍 6 入 5 凑偶。

当拟舍去的数字中最左边的数字小于 5，即为 4 或 4 以下时，则舍去。比如 38.1234521，保留两位小数，则 34521 都是拟舍去数字，其最左边的数 3 小于 5，所以化整为 38.12。而 59.89 则因要保留一位小数，因 9 是 6 以上的数字，所以要进一位，就变成了 59.9。