

TK39
7717

热 工 测 量

周建民 主编

赵希娴 王景龙 刘红 编著

鹿世金 主审

(京)新登字049号

内 容 简 介

本书介绍了热工过程参数测量的基础理论和应用技术,内容包括:测量的基本知识;温度、压力、流量、水位、烟气含氧量的测量原理与应用;传感器原理、结构和计算以及仪表配套、实际应用、误差分析和校验等。本书还介绍了很有应用前景的现代量测系统与智能仪表。

本书主要作为电力系统成人高校热能动力类专业的“热工测量”课程的教材,其他成人高校同类课程也可选用,并可供有关专业的技术人员参考。

热 工 测 量

周建民 主编

赵希娴 王景龙 刘红 编著

鹿世金 主审

*

兵器工业出版社出版发行

(北京市海淀区车道沟10号)

各地新华书店经销

北京京辉印刷厂印装

*

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: $6\frac{5}{16}$ 字数: 142千字

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数: 1—2,300 定价: 5.90元

ISBN 7-80038-447-0/TK·12

前 言

本书是遵照“能源部高等职业教育委员会”的决定而编写的，主要作为电力系统成人高校热能动力类专业的教材。

本书在编写时注意到以下几个方面：成人教育的特点与要求；实际应用状况；设备的更新与技术进步；汲取各校同行们在历次“课程组会议”上对教材提出的建议、设想与教学经验。另外，力求使内容具体，易于自学。

本书特点是：基本理论的叙述密切联系生产实际；结合微电子与计算机技术的新成果介绍用于“热工测量”的新型量测系统和正在发展的智能化仪表。此外，为提高热工技术人员的测量素质，对如何提高测量的精确度和可靠性也作了扼要的介绍。

鉴于自动量测系统是热工生产过程的重要环节，因而除介绍非电量的测量技术外，对微机化量测系统和智能仪表作了提纲挈领的介绍，以使广大读者对之发生兴趣，进而致力于此新型仪表的发展和应用。

本书由周建民副教授主编；鹿世金副教授主审。赵希娴讲师编写第二、三、四章；王景龙高级讲师编写第五、六章；周建民副教授编写第一、七章；刘红讲师参与了编写的部分工作；鹿世金副教授修改了部分初稿并对其他部分提出了修改意见。

另外，白方周教授、刘德盈高级工程师、张颖工程师、季瑞芝高级工程师、严蕊琪高级工程师等审阅了书稿并提出宝

贵意见；施桂英在组织、协调等方面做了大量工作并提出了宝贵的建议，在此一并致谢。

由于水平有限，难免有错误疏漏之处，希读者指正。

编者 1992.3

目 录

前言

第一章 测量学概论	1
第1节 物理量与单位制	1
第2节 测量与量测系统的基本概念	4
第3节 测量结果的估价	10
第4节 噪声与干扰	15
习题	17
第二章 温度测量	19
第1节 概述	19
第2节 热电偶测温原理	22
第3节 热电偶及其显示仪表	51
第4节 热电阻及其显示仪表	61
第5节 温度变送器	78
第6节 接触式测温的误差讨论	80
习题	84
第三章 压力及差压测量	87
第1节 概述	87
第2节 弹性压力计	38
第3节 压力变送器	94
第4节 压力表的选择、安装与校验	105
习题	109
第四章 汽包水位测量	111
第1节 概述	111
第2节 差压式水位计	113

习题	119
第五章 流量测量	121
第1节 概述	121
第2节 差压式流量计	123
第3节 标准节流装置的计算	143
第4节 差压式流量计的显示仪表	153
第六章 烟气含氧量的测量	169
第1节 概述	169
第2节 氧化锆氧量计	170
第3节 磁性氧量计	176
第七章 微机化量测系统与智能仪表	180
第1节 概述	180
第2节 微型机基本知识	181
第3节 智能仪表的结构与功能	187
第4节 单片机、DVCC开发系统与智能仪表实例	192
习题	195
参考文献	198

第一章 测量学概论

第1节 物理量与单位制

一、物理量与单位

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。如压力、温度、流量、水位、几何尺寸等等。

在进行测量时，把被测的物理量表达为一个数字和单位的乘积，称之为测量值。所说的单位是由国家或国际标准组织规定的；所说的数字表达了多少个测量单位与被测物理量的测量值相当。例如，某一物理量的单位是U，该物理量的测量值是X，X是U的A倍（即A个U与X相当），则

$$X = AU$$

这里要注意的是：X与实际物理量并不严格相当，绝对准确的测量是做不到的。

二、国际单位制与我国法定计量单位制

1. 国际单位制 (SI)

国际标准组织 (ISO) 对各种最主要、最常用的物理量规定了一套单位，称之为基本单位，SI 基本单位如表1-1所列。

在此基础上，ISO又规定了国际单位制 (SI) 的辅助单位，辅助单位共二个，即平面角：弧度 (rad) 和立体角：球面度 (sr)。

基本单位加词头后，就表示其整数或小数倍。常用的词

表 1-1 SI 基 本 单 位

量 的 名 称	单位名称	单位符号
长 度	米	m
质 量	千克(公斤)	kg
时 间	秒	s
电 流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

表 1-2 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量 的 名 称	单位名称	单位符号	其它表示式例
频 率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力; 重力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力; 压强; 应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能量; 功; 热	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率; 辐射通量	瓦[特]	W	J/s
电荷量	库[伦]	C	$A \cdot s$
电位; 电压; 电动势	伏[特]	V	W/A
电 容	法[拉]	F	C/V
电 阻	欧[姆]	Ω	V/A
电 导	西[门子]	S	A/V
磁通量	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$
磁通量密度, 磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电 感	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	
光通量	流[明]	lm	$cd \cdot sr$
光照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2
放射性活度	贝可[勒尔]	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	J/kg

头为 10^1 、 10^0 、 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-6} ...

由基本单位可派生出导出单位。国际单位制中具有专门名称的导出单位如表1-2所列。

三、我国法定计量单位

我国的法定计量单位是在国际单位制的基础上，结合我国具体情况而制定的。它保留了国际单位制中的基本单位、辅助单位和具有专门名称的导出单位，另外增加了非国际单位制单位，见表1-3所列。用于构成十进倍数和分数单位的词头是相同的。

表 1-3 与国际单位制并用的单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分 〔小〕时 天,〔日〕	min h d	1min=60s 1h=60min=3600s 1d=24h=86400s
平 面 角	〔角〕秒 〔角〕分 度	([°]) ([']) (^{''})	1 [°] =(π /648000)rad(π 为圆周率) 1 ['] =60 ^{''} =(π /10800)rad 1 [°] =60 ['] =(π /180)rad
旋转速度	转每分	r/min	1r/min=(1/60)s ⁻¹
长 度	海 里	n mile	1n mile=1852m(只用于航程)
速 度	节	kn	1kn=1n mile/h=(1852/3600)m/s (只用于航行)
质 量	吨 原子质量单位	t u	1t=10 ³ kg 1u $\approx$ 1.660 5655 $\times$ 10 ⁻²⁷ kg
体 积	升	L, (l)	1L=1dm ³ =10 ⁻³ m ³
能	电子伏	eV	1eV $\approx$ 1.602 1892 $\times$ 10 ⁻¹⁹ J
级 差	分 贝	dB	
线 密 度	特〔克斯〕	tex	1tex=1g/km

第2节 测量与量测系统的基本概念

一、测量与方法

测量就是把物理量的大小与单位值进行比较，确定二者之间的倍率关系。

在对物理量进行测量时要使用工具或仪表。

测量的方法有两种：一种是把测量值直接和标准值进行比较，称为直接测量法；另一种是采用中间变量，称为间接测量法。

例如，用水银温度计去测量温度，这是直接测量法。这种方法的优点是简便、快捷，但其适用范围有限，而且测量的精确程度直接与使用的仪表精度有关。

间接测量法是采用某一新的物理量，对该新物理量进行测量后，再根据物理定律或者经验推测出结果。间接测量有以下三种类型：

1. 采用传感器 将无法或不易测量的物理量转换为可直接测量的物理量。

2. 替换 将被测量按一定规则等价为可测量的物理量，例如，测量电流可替换为测量该电流流过的某一已知电阻两端的压降。

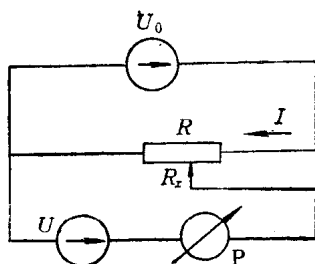


图 1-1 校正测量法举例

3. 平衡法 它包括两种方法：一是采用电桥方法进行测量，即通过惠斯登电桥演变成多种不同的测量办法；二是校正法，基本途径是将被测物理量与已知

的标准物理量进行比较, 并进行调校, 使二者的差值为 0。图 1-1 所示是用校正法测量电压的典型例子, U_0 、 R 为已知, 则通过 R 的电流 I 亦为已知, 调整 R_x 直至检流计 P 的指示值为 0, 则就测量出了 U 的大小:

$$U = IR_x$$

二、仪表的基本结构

1. 仪表的组成

在测量中所使用的仪表, 一般说来是由以下三个单元组成的, 其中, 每个单元可能包含几个部件。这三个单元可能是一个整体; 也可能是分离的, 而通过信号传输线将三个单元联系在一起。

(1) 传感器

传感器的作用是感受被测量, 并把被测量转换为与其成一定函数关系的电量。传感器质量的优劣是决定仪表质量的关键性因素。传感器主要应满足以下要求:

1) 传感器输出的电信号与被测量之间应当是稳定的单值关系。该函数关系应当是可以复现的。

2) 非被测量对传感器的影响应尽可能小, 甚至可以忽略。即传感器对被测量的变化反应要快速、灵敏; 而对其它非被测量则反应必须迟钝, 否则, 就应采取对其它影响因素的补偿、修正等措施。

3) 在进行测量时, 传感器对被测环境的状态应没有干扰作用。

(2) 变换器

为了将传感器的输出信号进行远距离传送、放大、线性化或变成统一信号, 要用变换器对传感器的输出信号进行加工处理。例如对节流式流量计的压差信号开方以得到线性化

的信号、把热电偶的mV信号转换成0~10mA的标准电流信号等。

(3) 显示装置

显示装置的作用是对观察者显示被测参数的数值量。如瞬时流量、累积流量、报警信号、记录等。有时甚至应具有输出调节功能。

传感器常称为一次元件，显示装置称为二次仪表。

2. 热工仪表的分类

在电厂热工过程测量中使用各种各样的仪表，测量热工参数的热工仪表，就可分为几种不同的类型。例如，按被测参数，可分为压力仪表、温度仪表、料位仪表、流量仪表、成分分析仪表等；按显示功能，可分为指示仪、记录仪、积分仪、调节仪表等。

不过，为了说明仪表的结构复杂程度，往往根据仪表各单元之间的连接方式，把仪表划分为开环、反馈两种基本类型。

(1) 开环型结构 把仪表的各个单元用方框表示，两个方框之间用箭头表示其相互关系，箭头表示信号进入还是离开这个方框。“进入信号”和“离开信号”分别称为输入量和输出量。如图 1-2 所示的仪表，信号从输入到输出经过各单元是单方向传递的，这就是开环型结构的仪表。这类仪表有两种：一种是把物理量转换为长度、位移等便于显示和观察的物理量，例如指针的角位移量等；另一种是把被测物理量转换为脉冲或数字量，以使用数字形式显示或计算，如数字温度计、数字流量计等。

(2) 反馈型结构 输出量经反向变换器后与输入量相减，所得的偏差信号再经正向变换器与放大器变为输出量，

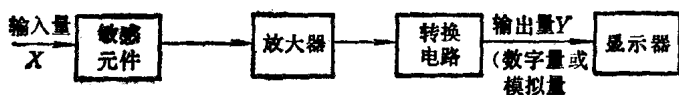


图 1-2 开环型结构框图

信号传递形成闭环形式。输出、输入量之间能自动保持既定的关系，如图1-3所示。

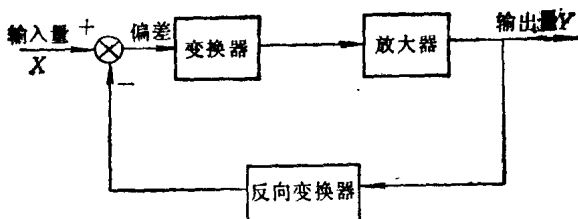


图 1-3 反馈型结构框图

三、量测系统的结构特征

量测系统由若干个仪表或功能块组成，每个仪表或功能块负担一部分特定的任务。在现代火电厂中，量测系统具有技术先进、功能完善、精度高等优点。图 1-4 所示是一个多

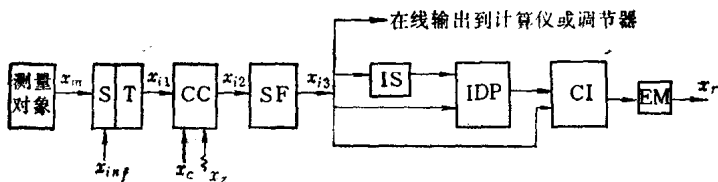


图 1-4 多功能量测系统举例

S—感测单元 T—变送元件 CC—接口比较单元 SF—信号整形 IS—存储器 IDP—数据处理单元 CI—数据通信单元 EM—测量结果修正单元
 x_m —被测物理量 x_{if} —干扰量 x_i —中间量 x_c —定值 x_z —干扰量
 x_r —输出结果

功能的现代量测系统，其主要特点是：传感器的感测元件 S 直接与被测对象接触，它产生的信号经变送元件 T 转换为可以使用的信号。传感器的输出信号可与某一定值信号 x_0 相减，产生偏差信号，以便进一步处理。该量测系统具有多种功能：输出调节信号、存储信息、加工数据、修正测量结果等。

四、仪表和量测系统的技术指标

评价仪表或量测系统的技术指标是多方面的，哪些为主哪些为次，要根据应用场合来确定，很难笼统地说哪一项指标最重要。不过，一般情况下应考虑以下几项技术指标：

(1) 准确度

准确度反映仪表指示值偏离真值的程度，可用误差来描述。这里所说的真值指的是被测量的实际量值，这里所说的误差用以下三种方法来表达：

绝对误差——指示值 x 与真值 x_0 之间的代数差，用 δ 表示：

$$\delta = x - x_0$$

相对误差——绝对误差 δ 与真值 x_0 之比，常用百分数表示：

$$\gamma = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\%$$

基本误差——在满量程范围内，绝对误差最大值 $|\delta|_{\max}$ 与满量程（上下限范围） A_m 之比：

$$R_m = \frac{|\delta|_{\max}}{A_m} \times 100\% = \frac{|x - x_0|_{\max}}{A_m} \times 100\%$$

国家统一规定了划分仪表的等级，即按仪表基本误差不超过某一定值——允许误差来划分，将允许误差去掉百分号

后就是该仪表的精度等级。国家规定的精度等级为4、2.5、1.5、1.0、0.5、0.2、0.1。例如0.2级，表示该仪表的允许误差为0.2%，超过0.2%则为不合格。

(2) 灵敏度

灵敏度是输出变化量 Δy 与输入变化量 Δx 之比，用 S 表示：

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

例如， Δy 可以是指针的线性位移量、偏转角等。 S 是一个有量纲的量。

(3) 线性度

理论上有线性输入、输出关系的仪表，实际上可能呈现出非线性。由于非线性引起的偏差，其最大值与满量程范围之比的百分数，称为线性度。

(4) 重复性

在同一条件下，多次按同一方向输入信号作满量程范围变化时，对相同的输入量，仪表指示值的一致性称为重复性，也常称为复现性。

此外，还有变差、漂移、可靠性、响应时间等。

在上述各项指标中，准确度和灵敏度常常是最主要的。在计算准确度时，真值 x_0 在理论上是不可获得的，一般是采用精度等级较高仪表（称为标准表）的指示值来代替 x_0 。

例1.1 有一温度计，测量范围为0~500℃，准确度为0.5级，测量范围内指针转角为270°，对此温度计进行检定，得出数据如下：

标准表读数 0 99 202 304 398 499

被检表读数 0 100 200 300 400 500

求：①各读数的相对误差和绝对误差；②根据基本误差，该

表是否为合格表？③灵敏度是多少？

解 ①100、300、500℃点的绝对误差和相对误差如下：

$$100^{\circ}\text{C点} \quad \delta = x - x_0 = 100 - 99 = 1^{\circ}\text{C}$$

$$\gamma = \frac{x - x_0}{x_0} = \frac{1}{99} \times 100\% = 1\%$$

$$300^{\circ}\text{C点} \quad \delta = -4^{\circ}\text{C}$$

$$\gamma = -1.32\%$$

$$500^{\circ}\text{C点} \quad \delta = 1^{\circ}\text{C}$$

$$\gamma = 0.2\%$$

$$② \quad R_m = \frac{\delta_{\max}}{A_m} = \frac{|-4|}{500-0} = 0.8\%$$

准确度为1.0级，故为不合格表

$$③ \quad S = \frac{270}{500-0} = 0.54 \quad (\text{度}/^{\circ}\text{C})$$

第3节 测量结果的估价

通过对物理量的测量可得到测量结果，但这种测量结果可能含有误差和不确定性。例如对同一量测量若干次，得到的结果互不相同，因此说测量结果是粗糙的。

估价的任务就是采用正确的方法把粗糙结果改变为确定性的信息，并估价该确定性信息与真值偏差的程度。但估价的任务并不是产生绝对精确的数据信息。

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。

一、测量误差的分类

产生误差的原因是多种多样的，因此误差的基本性质和

特点也互不相同一般说来，误差可分以下三种类型。

1. 粗大误差

明显地歪曲。测量结果的误差称为粗大误差。产生粗大误差的主要原因是错读错记、操作失误、计算粗心等。这类误差比较显著，容易发现和消除。

2. 系统误差

在相同的条件下多次测量同一物理量时，其误差的大小和符号不变，或按一定规律变化，这种误差称为系统误差。其产生的主要原因是仪表的某种不变性缺陷、环境影响、测量方法不当等。认真做好测量前的准备、选择合格仪表、维持环境条件不变等措施均可避免系统误差的产生。如发现存在系统误差，则应通过实验分析，查明其变化规律和原因，及时消除和修正。这对一切测量都是有重要意义的。

3. 随机误差

在相同条件下多次测量同一物理量时，其误差的大小和符号无规律性或不确定，这种误差称为随机误差。随机误差产生的原因是多种难以预计的偶然因素。如温度、电压波动、仪表特性变动、干扰等。对这类误差的估价和处理较难，一般用统计理论来进行估价。

二、随机误差的估价

在相同的仪表、环境等条件下，多次测量同一物理量，在测量结果中包含着偶然因素造成的随机误差。从表面上看，随机误差无规律性，但从总体上分析，它服从统计规律。利用统计理论和方法，可以找到大量测量结果中随机误差的若干规律，从而确定随机误差对测量结果的影响。

1. 正态分布

设对真值为 x_0 的物理量进行 N 次测量，若测量值为 x_1 、