

普通高等教育实验实训规划教材

能源动力类

热能动力工程实验

靳智平 主编

程清果 卢改林 杨春 副主编



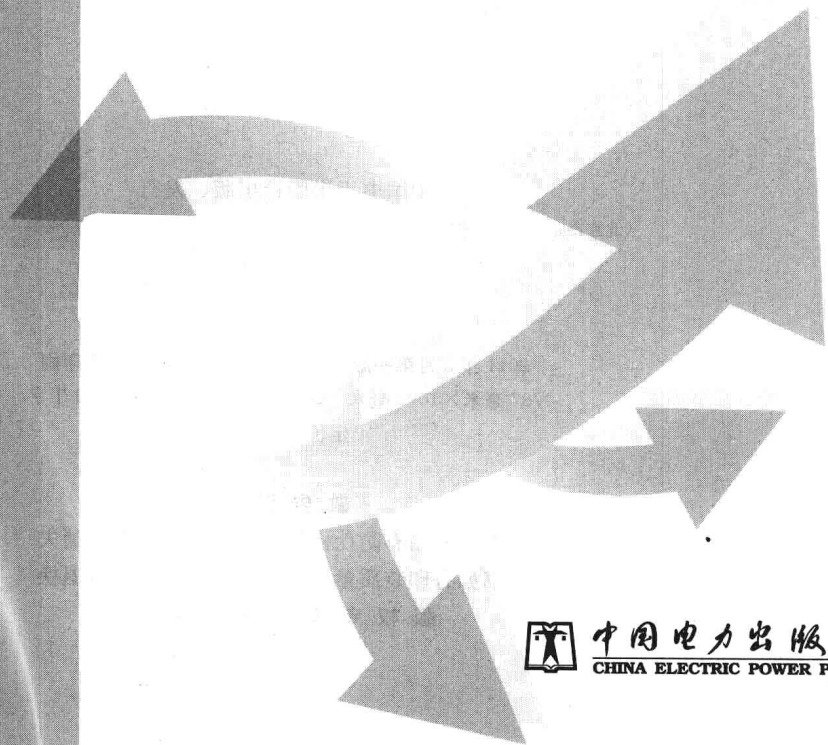
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育实验实训规划教材

能源动力类

热能动力工程实验



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

前 言

为进一步深化教学改革，加强实践教学环节，提高学生的实际动手能力，在实验教材短缺、内容不完整的前提下，尝试编写此书。该书是在长期实践教学积累的基础上，经过不断的修改和完善而编写完成的。

本书主要针对应用型本科院校能源动力类专业和高职高专院校电力技术类电厂热能动力装置等专业编写的。编写过程中始终贯彻理论联系实际、学以致用原则，注重实践创新，结合了开放实验的特点，力求教材内容符合学生的认识规律，便于学生独立操作。

在编写过程中，收集并参考了国内一些院校及厂家的相关资料，力求使实验内容更加完整；同时也得到了其他院校诸多老师的大力支持，在此表示衷心的感谢！

本书编写分工如下：第一章由山西大学工程学院靳智平编写；第二章、第三章由山西大学工程学院程清果编写；第四章由山西大学工程学院卢改林、程清果编写；第五章、第八章由山西大学工程学院杨春编写；第六章由靳智平和沈阳工程学院黄新章编写；第七章由靳智平和沈阳工程学院潘宏刚编写。本书由靳智平教授主编，并负责全书统稿。

全书由太原理工大学金燕教授主审。

由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2011.2

目 录

前言

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第一章 量测和实验数据处理基本知识 | 1 |
| 第一节 量测的基本知识..... | 1 |
| 第二节 实验误差..... | 2 |
| 第三节 实验数据处理..... | 3 |
| 第二章 常用仪器介绍 | 7 |
| 第一节 温度测量..... | 7 |
| 第二节 压力(压差)测量..... | 23 |
| 第三节 流速和流量测量..... | 33 |
| 第四节 万用表..... | 43 |
| 第五节 电子天平..... | 45 |
| 第六节 501型超级恒温器..... | 48 |
| 第七节 JT101—2型干燥箱..... | 51 |
| 第八节 灰熔点测定仪..... | 53 |
| 第九节 烟气分析仪..... | 55 |
| 第十节 SGMF—2000智能温控马弗炉..... | 71 |
| 第十一节 QT201林格曼测烟望远镜..... | 74 |
| 第十二节 SGCMCT—8A自动量热仪..... | 77 |
| 第十三节 SGSCM—6A自动测硫仪..... | 82 |
| 习题..... | 88 |
| 第三章 工程热力学实验 | 92 |
| 第一节 空气比定压热容的测定..... | 92 |
| 第二节 二氧化碳临界态观察及 $p-v-T$ 关系测定..... | 95 |
| 第三节 空气在喷管中流动特性的测定..... | 99 |
| 第四节 求空气的等熵指数..... | 105 |
| 第五节 可视性饱和蒸汽压力和温度的关系测定..... | 106 |
| 第四章 传热学实验 | 108 |
| 第一节 粒状材料导热系数测定..... | 108 |
| 第二节 二维稳态温度场的电热模拟..... | 111 |
| 第三节 中温辐射时物体黑度测试..... | 114 |
| 第四节 自然对流换热实验..... | 117 |
| 第五节 空气横掠单管时平均表面传热系数的测定实验..... | 121 |
| 第六节 空气横掠圆柱体时局部表面传热系数的测定实验..... | 126 |
| 第七节 空气纵掠平板时局部表面传热系数的测定实验..... | 131 |

| | | |
|------------|-----------------|------------|
| 第八节 | 水平管内水蒸气冷凝传热实验 | 135 |
| 第九节 | 大容器内水沸腾传热实验 | 140 |
| 第十节 | 换热器传热性能综合实验 | 145 |
| 第十一节 | 散热器传热性能实验 | 149 |
| 第十二节 | 气—液式翅片换热器传热性能实验 | 152 |
| 第五章 | 流体力学实验 | 157 |
| 第一节 | 流体静力学实验 | 157 |
| 第二节 | 不可压缩流体恒定流能量方程实验 | 160 |
| 第三节 | 不可压缩流体恒定流动量定律实验 | 163 |
| 第四节 | 皮托管测速实验 | 165 |
| 第五节 | 文丘里流量计实验 | 167 |
| 第六节 | 雷诺实验 | 169 |
| 第七节 | 沿程水头损失实验 | 171 |
| 第八节 | 局部阻力实验 | 175 |
| 第九节 | 孔口与管嘴出流实验 | 177 |
| 第十节 | 水击演示实验 | 179 |
| 第十一节 | 水流流动形态及绕流现象演示实验 | 181 |
| 第十二节 | 虹吸原理演示实验 | 183 |
| 第十三节 | 热网水力工况实验 | 184 |
| 第六章 | 锅炉实验 | 187 |
| 第一节 | 煤的工业分析 | 187 |
| 第二节 | 煤的发热量测定 | 195 |
| 第三节 | 煤中全硫的测定 | 200 |
| 第四节 | 煤灰熔融性的测定方法 | 203 |
| 第五节 | 烟气成分分析 | 207 |
| 第六节 | 自然循环锅炉水循环演示实验 | 210 |
| 第七节 | 煤的可磨性指数测定 | 213 |
| 第八节 | 煤粉颗粒均匀性测定 | 217 |
| 第九节 | 锅炉的热工性能试验 | 219 |
| 第七章 | 汽轮机实验 | 228 |
| 第一节 | 汽轮机轮周效率特性 | 228 |
| 第二节 | 喷嘴流量特性实验 | 231 |
| 第三节 | 叶片频率测试 | 235 |
| 第四节 | 汽轮机转子临界转速测试 | 239 |
| 第五节 | 汽轮机调节系统静态特性曲线测试 | 243 |
| 第六节 | 汽轮机调节系统动态特性曲线 | 245 |
| 第七节 | 凝汽器热力特性 | 247 |
| 第八节 | 汽轮机效率实验 | 254 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 第八章 泵与风机实验 | 257 |
| 第一节 离心泵综合实验 | 257 |
| 第二节 离心式风机性能曲线实验 | 263 |
| 第三节 旋风除尘器性能测定 | 266 |
| 第四节 袋式除尘器性能测定 | 269 |
| 第五节 电除尘器除尘效率测定 | 272 |
| 参考文献 | 275 |

第一章 量测和实验数据处理基本知识

第一节 量测的基本知识

一、量测的作用

量测是一种认识过程,就是将测量的物体与作为测量单位的同类物理量进行比较,从而确定被测量大小的过程。量测工作在科学技术领域和工业生产中是非常重要的工作,它是人们获得实践知识的重要手段,也是科学实验和工业生产中不可缺少的内容。

二、测量系统

热工测量技术是在热工基础理论的指导下,涉及很多知识领域的一门特殊学科。因为不论是自然界还是各项工程技术行业,都涉及与热和能相关的参数,如温度、热流、热焓、流量、速度、压力、浓度、功率、转速、扭矩、噪声、振动、位移、粒度等。要了解、利用和控制这些参数,离不开对它们的测量。

测量就是用实验的方法,将被测量的物理量与选取单位的同类量进行比较,确定被测参数的过程。一般的测量过程都需要通过测量系统来实现。当打算测量一个物体的温度时,首先需要一种感受元件。感受元件称为一次仪表,能够接收到被测物质所反映出的物理信号,并且将这种物理信号传递出来。在多数情况下,感受元件所反映出来的物理信号很微弱,需要进一步放大或者变换处理,才能更好地传递给能表达这种信号的仪表(即二次仪表)。许多现代的二次仪表都具有指示或显示、记录及打印功能。

有些测量系统中,还包括控制功能,由控制功能对输入信号进行分析,然后发出指令执行下一步操作。上述测量系统可以用图 1-1 来描述。

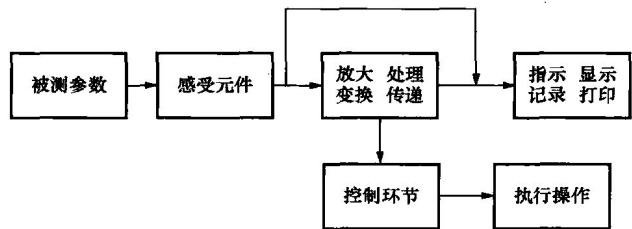


图 1-1 测量系统框图

三、测量方法

按照测量参数结果的获得途径来区分,测量可以分为直接测量和间接测量两种。直接测量是指被测量参数的数值可以直接在测量仪器上指示或者显示出来。如用玻璃柱温度计或者数字显示温度计测量温度,用压力表测量压力或者压差,用数字万用表测量电流、电压和电阻等。间接测量是指被测量参数的数值不能直接由测量仪器提供,而是将直接测得的相关参数值,用某种函数关系计算间接获得最终的被测参数数值。如测量电路中一段输出功率的大小,往往分别测量电路中的电压和电流,通过两者的乘积计算出功率的大小;又如,测量一段管路的阻力损失系数,首先要测量出管路的特征速度和阻力损失(压差),然后由相关的公式计算阻力损失系数。

按照测量方法来区分,测量又可以分为接触式测量和非接触式测量两种。接触式测量是指一次仪表要与被测物体接触,如用皮托管测量管道中的速度,就必须将皮托管伸进管路内部;非接触测量是指一次仪表可以远离被测物体,测量中不破坏它的固有状态,如用红外线

热像仪测量物体的温度。

第二节 实验误差

被测量的某个物理量在某一时刻的数值可以分为静态参数和动态参数。静态参数指被测参数在测量过程中不随时间变化，或者说受时间变化的影响非常小。动态参数与之相反，随时间不断变化，呈非稳态过程特性，如加热和冷却过程的温度就是如此。

对某一物理量不论是静态参数还是动态参数的测量，通过仪器所得到的测量结果相对于其客观存在来说，都是一种近似。假设实际客观存在的为真值，但是真值难以测到，因为不论测量系统的精度有多高，多么完善，总是存在一定的误差。在实际测量中，一般将相对高一级的仪器测量值近似为真值。

一、绝对误差和相对误差

某一物理量的测量值与其真值之差定义为绝对误差，记为 δ ，它可以是正值也可以是负值，其表达式为

$$\delta = X - X_0 \quad (1-1)$$

式中 X ——测量值；

X_0 ——真值。

定义相对误差是绝对误差与真值之比，记为 η ，其表达式为

$$\eta = \frac{\delta}{X_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

二、误差的分类

首先要弄清楚等精度测量的概念。所谓等精度测量，是指用同一仪器（设备），按照同一方法，由同一观测者在同一环境条件下所进行的测量。

在等精度测量过程中，根据误差的来源，可以将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

系统误差也称为工具误差或者方法误差，是测量系统不完善或工作原理不完善所引起的。如仪器的设计不完善或制造加工过程有缺陷，仪器的原材料或附件性能不能满足工艺上的要求，测量工作条件和周围环境发生变化，读数装置有问题，仪器的动态响应跟不上等。系统误差值呈某一确定的规律，可能是线性的、周期性的，或者呈复杂规律变化。

系统误差表明测量结果的正确度，系统误差越小，测量结果越接近被测量的实际值。系统误差是可以采取措施减小的。

2. 随机误差

随机误差是指在等精度测量条件下，由于大量的偶然因素，多次测量同一物理量时的测量误差。其结果或大或小，而且符号都不固定，具有随机变量的特点。但测量结果总体上服从一定的统计规律，如服从正态分布，可以通过数理统计的方法处理。随机误差越大，表明测量准确度越差。

3. 粗大误差

粗大误差是指测量结果中有非常明显的误差，也称为过失误差。例如，给错测量物理

量、读错数据、写错记录等。这种误差没有任何规律可循，必须从测量结果中剔除。但是这类测量出来的数据，由于开始并不知道它的误差性质，不能轻易剔除，需要先怀疑它，然后按照下述方法来处理：①将可疑值放在一边，先将其余测量值计算出算术平均值和平均绝对误差；②计算该可疑值与算术平均值的差值，如果这个差值大于平均绝对误差的4倍，则可以将该可疑值剔除掉。

4. 测量误差的计算方法和测量准确度的判断标准

除了粗大误差以外，系统误差和随机误差往往不容易辨别，二者多数同时存在，没有绝对的界限。在直接测量中，一般重视对随机误差进行估计。根据随机误差的性质，确定实际误差的大小、极限误差及概率分布，用平均误差或均方误差作为测量精度的判断标准。

(1) 平均误差。平均误差 $\bar{\delta}$ 的定义式为

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_0|}{n} \quad (1-3)$$

式中 δ_i ——各测点的绝对误差， $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

设测量准确度为 h ，此时平均误差与测量准确度的关系为

$$\bar{\delta} = \frac{0.5642}{h} \quad (1-4)$$

平均误差的计算比较简单，但是用它判断测量准确度尚有不足之处。

(2) 均方误差。均方误差也称为标准误差，定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1-5)$$

此时，均方误差与测量准确度的关系为

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}h} \quad (1-6)$$

第三节 实验数据处理

一、数据收集

数据收集在实验过程中是一项非常重要的工作，它关系到整个实验的成败，因此，一定要高度认真、一丝不苟。获得数据的方法一般有两种。一种是直读式，就是从测量器具上直接读到数据。如测针测水位、浮子流量计测流量等，但是在直读时要看清测量器具的刻度分划值和单位，每次读数要读到最小分划值的下一位，若附有游标尺时，要注意游标尺的读法。另一种是自动显示或自动记录，此法在非电量的电测法中广泛应用，如带显示器的涡轮流量计、光电流速仪等，它们显示出电脉冲数，然后由电脉冲数查率定曲线得到被测值，也有通过程序控制直接把电脉冲数转换成被测量值显示出来，也称为直读式，在动态测量中用示波器等自动记录变化过程，再从变化过程中找出某瞬时的被测量值。

二、数据处理

数据处理就是将收集到的数据按照一定规律和形式表示成实验的成果，其表示方法有以下三种。

1. 列表法

列表法是将各变量之间的函数关系用表格的形式表示出来,实质上就是函数式的计算表格,所以又称函数表。列表时应注意按自变量增大或减小的顺序排列,因变量与其一一对应,自变量间的差值要适宜。若差值过大,则使用时内插不准确;若差值过小,则又会增大表格篇幅,表中应注明各变量的名称、符号和单位,必要时还要加上表注。

列表法的优点是简单易做,数据应用比较方便,在表中可以清楚地看出因变量和自变量的变化关系。例如表 1-1 表示纯水在一个标准大气压下密度 ρ 随温度 t 的变化。

表 1-1 纯水在标准大气压下的密度随温度的变化

| | | | | | | | |
|---------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 温度 $t(^{\circ}\text{C})$ | 0 | 4 | 8 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| 密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 999.87 | 1000.00 | 999.88 | 999.73 | 999.13 | 998.23 | 995.67 |
| 温度 $t(^{\circ}\text{C})$ | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 | |
| 密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 992.24 | 988.27 | 983.24 | 977.81 | 971.83 | 958.38 | |

表 1-1 只是两个变量间的关系,在实际工作中,还有三个变量和四个变量间的列表法。

三个变量的列表法,将表格中第一行表示一个变量,第一列表示另一个变量,表中其他各行列皆为第三变量,例如表 1-2 中表示静水总压力 p 和水深 H 及受压宽度 b 的关系,由式 $p = \rho g H^2 b / 2$ 列表,式中 ρ 为水的密度, $\rho = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 1-2 三个变量列表法

kN

| 壁宽 $b(\text{m})$ \backslash 水深 $H(\text{m})$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1 | 4.9 | 9.8 | 14.7 | 19.6 | 24.5 | 29.4 |
| 2 | 19.6 | 39.2 | 58.8 | 78.4 | 98.0 | 117.6 |
| 3 | 44.1 | 88.2 | 132.3 | 176.4 | 220.5 | 264.8 |
| 4 | 78.4 | 156.8 | 235.2 | 313.6 | 392.0 | 470.4 |
| 5 | 122.5 | 254.0 | 381.0 | 508.0 | 635.0 | 762.0 |
| 6 | 176.4 | 352.8 | 529.2 | 705.6 | 882.0 | 1058.4 |

四个变量的列表法,一般由几张表格组成一组表格,列表时将变化范围小、连续性差的变量,按一定差值记在表格顶部,然后按三个变量的列表方法进行列表。

列表法最多只能用于四个变量的函数式,所以有一定的局限性。

2. 图形表示法

图形表示法是根据试验测得的数据点绘成曲线(或直线)图形,表示变量之间的关系。其优点是变量间的关系明显直观,数据应用方便,并能显示出最大、最小和转折点等情况。所以对实验工作有启示作用,根据实验数据作图,一般要注意以下几点:

(1) 图纸的选择。常用的图纸有等分直角坐标纸、双对数坐标纸、半对数坐标纸,究竟选用哪一种,应根据实际情况而定。在图形中直线是最容易绘制的,而且使用方便,因此对于幂函数型曲线,可采用双对数坐标纸;指数型函数曲线,可采用半对数坐标纸,这样曲线图形就变成了直线图形,其实质就是将幂函数和指数函数经过对数变换,变成直线函数。

(2) 纵横坐标比例尺的确定。一般以横坐标表示自变量,纵坐标表示因变量。确定比例

尺大小的原则,是所有实验点据都能在坐标轴上定出来,并考虑实验点据的精度,使在图纸上绘出的曲线(或直线)有近于1的斜率,或使曲线的坡度位于图纸上 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间。为了符合上述要求,根据实验数据采用不同的纵横比例尺进行试绘,当符合要求后,决定纵横比例尺。

(3) 在坐标轴上要标注变量名称、符号、单位,并将实验数据准确地地点标在图纸上,若数据的种类或来源不同时,要用不同的点符加以区别。

(4) 根据实验点连曲线,在连曲线之前,要仔细观察各实验点的分布趋势,然后用铅笔轻轻地绘出一条光滑曲线,再根据位于曲线两边的实验点据基本相等和两边实验点至曲线的垂直距离的总和也大致相等的原则,对曲线进行修改,最后用曲线板复描。注意,曲线不能向实验点外任意延长,如在一张图纸上有几条曲线,应分别用不同的线(如实线、虚线、点划线等),加以区别,以免混乱。

(5) 对图中不同线型和不同实验点符所代表的资料或来源应加以注释,必要时对图还要加以简单的说明,以便应用。

例如,在一个标准大气压下测得水的运动黏滞系数 γ 随温度变化数据如表1-3所示,用图形表示如图1-2所示。

表 1-3 标准大气压下测得的运动黏滞系数 γ 随温度变化数据

| 温度 $t(^{\circ}\text{C})$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 运动黏滞系数 $\gamma(10^{-2}\text{cm}^2/\text{s})$ | 1.794 | 1.310 | 1.010 | 0.804 | 0.659 | 0.556 | 0.478 | 0.416 | 0.367 | 0.328 | 0.296 |

图1-2仅表示两个变量之间的变化关系,若在实际工作中遇到三个变量之间的关系时,可以取其中的一个变量作为参变量,对其他两个变量间的关系,作图表示。

3. 方程表示法

列表法和图形表示法往往就事论事,不能深刻地反映变量之间的内在联系,为了克服这一缺点,可以采用方程表示法,将实验数据中因变量和自变量间的变化关系,用数学方程的形式表示出来,称为回归方程(或经验公式),回归方程有直线回归方程和曲线回归方程。

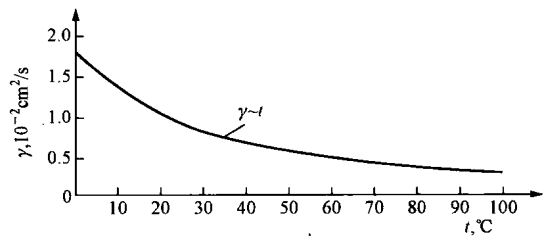


图 1-2 $\gamma\sim t$ 曲线

实验是人们认识自然规律的手段,是科学研究的基础,是检验理论的主要途径。教学实验的目的,除了培养能力,掌握量测技术外,主要是增加感性,加深对理论知识的理解,验证理论公式,测定经验系数等。为此,每个教学实验都有它一定的目的,要严肃认真,独立地思考并完成每个实验的全过程,就能取得预期的效果。每个实验过程,大体分为以下五个步骤:

- (1) 根据实验目的,对照实验仪器,设计实验方案(包括操作程序)。
- (2) 根据实验原理或基本公式,设计记录表格和计算表格。
- (3) 按设计的实验方案进行实验,并将收集的数据记入表格内。
- (4) 按规定要求进行数据处理,得出试验结果。

(5) 编写实验报告。

实验报告是实验成果的如实反映，因此要求在整理实验报告时，尊重科学，忠于原始观察资料，严禁任意修改数据，抄袭他人成果，对实验结果要进行分析判断，发现错误要重做。书写要工整，文句要简明，计算、绘图要准确，在报告上要写清实验名称，必要时在报告最后加以说明。

教学实验报告内容大体包括以下六个方面：①列出实验目的；②列出实验仪器（包括号码、草图或剖面图，已知常数）；③简述实验原理，列出所用公式，并根据公式设计出合理的记录表格；④按照要求进行数据处理；⑤分析实验结果，得出实验结论；⑥回答思考题。

研究、设计性实验报告内容大体包括以下六个方面：①研究内容概述；②研究方法介绍；③数据处理；④实验结果；⑤结果分析及建议；⑥参考文献。

第二章 常用仪器介绍

在各种热工实验中,经常要对热力设备中工质的状态、过程和循环进行测量。例如,要了解换热器的换热效果,就必须对换热器两侧介质(冷热流体)的参数(温度、压力、流量等)进行测量;要想对烟气进行分析,就必须对烟气的温度、压力等参数及烟气成分进行测量。常见的基本热工量有温度、压力、流速、流量、湿度、干度、热量、功率、液位等。本章主要介绍温度测量仪表、压力测量仪表、流速和流量测量仪表及热能动力工程实验中常用的仪器。

第一节 温度测量

温度是表征物体冷热程度的物理量,是工业生产和科学实验中最普遍、最重要的热工参数之一,也是人们日常生活中最关注的一个量。

一、温标

表示温度高低的标尺称为温标,最早建立的温标是华氏温标、摄氏温标等。华氏温标规定,在大气压下纯水的冰点为 32 ℉,沸点为 212 ℉,中间划分为 180 等份,每一等份为 1 华氏度,符号为 ℉,在美国的日常生活中,多采用华氏温标。摄氏温标规定,在标准大气压力下,冰水混合物的温度(冰点)为零度,水的沸腾温度(沸点)为 100℃,在 0~100℃ 之间划分了 100 等份,每一等份为 1 摄氏度,用符号 t 表示,单位记为℃,它是我国目前工业测量上通用的温度标尺。华氏温标和摄氏温标均属于经验温标,它们的缺陷是温度读数与测温属性有关,测同一热力学系统的温度,若使用摄氏温标标定的不同测温属性的温度计,其读数除固定点外,并不严格一致。为了得到可以作为统一标准的温标,开尔文在 1848 年根据卡诺定理引入了热力学温标(也称开氏温标),由于它与测温物质性质无关,所以又称绝对温标。用热力学温标规定的温度称为热力学温度,单位是开尔文,符号为 K(开)。热力学温标规定水的三相点(水的固态、液态、气态三相共存时的平衡状态)热力学温度为 273.16K,定义 1K(开尔文 1 度)等于水的三相点热力学温度的 1/273.16。

国际温标是一个国际协议性温标,以统一国际间的温度量值,并使之尽可能接近热力学温标。国际温标规定热力学温标是基本温标。通常将比水的三相点温度低 0.01K 的温度值规定为摄氏零度。常见的三种温标之间的换算关系见表 2-1。

表 2-1 三种温标之间的换算关系

| 待求温度 | 已知温度 | 变换公式 |
|---------------|---------------|-------------------|
| 摄氏温度 t (℃) | 华氏温度 F (℉) | $t = 5/9(F - 32)$ |
| 华氏温度 F (℉) | 摄氏温度 t (℃) | $F = 1.8t + 32$ |
| 摄氏温度 t (℃) | 热力学温度 T (K) | $t = T - 273.15$ |
| 热力学温度 T (K) | 摄氏温度 t (℃) | $T = t + 273.15$ |

二、温度测量方法

测温方法分为接触式与非接触式两大类。实验室常用的温度测量仪表有水银（或酒精）温度计、热电偶温度计、热电阻温度计、光学高温计、辐射高温计、红外探测器等。接触式测温简单可靠、测量准确度高，但由于达到热平衡需要一定时间，因而会产生测温的滞后现象。此外，感温元件往往会破坏被测对象的温度场，或受被测介质腐蚀。非接触式测温是通过热辐射来测量温度的，感温速度较快，多用来测量高温。但受到物体的发射率、对象到仪表之间的距离、烟尘和水蒸气等其他介质的影响，故测温准确度不高。

三、温度测量仪表分类

常用测温仪表的分类及性能见表 2-2。

表 2-2 常用测温仪表的分类及性能

| 按测温方式分 | 按原理分 | 温度计种类 | 测温原理 | 精确度等级 | 特点 | 测量范围(°C) |
|----------|---------|----------|------------------------|--|--|-----------------------|
| 接触式测温仪表 | 膨胀式 | 固体膨胀式 | 固体热膨胀变形量随温度变化 | 1~2.5 | 结构紧凑，牢固可靠，读数方便；准确度低，不能远传，能在一定振动场所使用 | -100~600，一般为-80~500 |
| | | 液体膨胀式 | 液体热膨胀体积量随温度变化 | 0.1~2.5 | 结构简单、使用方便、准确度高、价格低廉，测量上限和准确度受玻璃质量限制，易碎，不能记录与远传 | -200~600，一般为-100~600 |
| | 压力式 | 充液体压力式 | 气（汽）体、液体在定容条件下，压力随温度变化 | 1~2.5 | 抗振、坚固、防爆、价格低廉，可较远距离传送，传送距离小于 50m；准确度低，受环境温度影响较大 | 0~600，一般为 0~300 |
| | | 充气体压力式 | | | | |
| | | 充有机蒸汽压力式 | | | | |
| | 热电阻 | 金属热电阻 | 金属或半导体电阻值随温度变化 | 0.5~3.0 | 低温测量准确度高，便于远距离、多点、集中测量和自动控制，但不能测高温，因体积大，测某点温度较困难，需注意环境温度影响 | -258~1200，一般为-200~650 |
| | | 半导体热敏电阻 | | | | |
| 热电偶 | 标准材料热电偶 | 热电效应 | 0.5~1.0 | 测温范围广，准确度高，便于远距离、多点、集中测量和自动控制，但需进行冷端温度补偿，低温测量误差大 | -269~2800，一般为 200~1800 | |
| | 特殊材料热电偶 | | | | | |
| 非接触式测温仪表 | 辐射式 | 辐射式 | 物体全辐射能随温度变化 | 1.5 | 结构简单，稳定性好，被测物体温度场不被破坏；光路上环境介质吸收辐射，易产生测量误差 | 100~3200，一般为 700~2000 |
| | | 光学式 | 物体单色辐射强度及亮度随温度变化 | 1.0~1.5 | 结构简单，携带方便，不破坏对象温度场；易产生目测误差，外界反射辐射会引起测量误差 | 200~3200，一般为 600~2400 |

四、实验室常用温度测量仪表

(一) 液体玻璃温度计

1. 工作原理及特点

液体玻璃温度计是基于液体容积随温度升高而膨胀的原理制成的。使用最广泛的是水银玻璃温度计，其优点是结构简单、使用方便、准确度高、价格低廉，故广泛应用于工业和实验室各个领域；但玻璃管易损坏，读数较难且易产生误差，测量结果不能远距离传送和自动记录，且有较大的热惯性。液体玻璃温度计通常采用的工作液体和测温范围见表 2-3。

表 2-3 玻璃温度计工作液体及测温范围

| 工作液体 | 测温范围 (°C) | 测温液体 | 测温范围 (°C) |
|--------|-----------|------|-----------|
| 水银 | -30~550 | 石油醚 | -130~25 |
| 甲苯 | -90~100 | 戊烷 | -200~20 |
| 乙醇(酒精) | -100~75 | | |

2. 液体玻璃温度计的分类

玻璃温度计按其结构可分为棒式、内标式和外标式三种，如图 2-1 所示。它们都是由温包、毛细管、刻度标尺及安全包（避免温度过高时工作液胀破温度计而设的膨胀腔）组

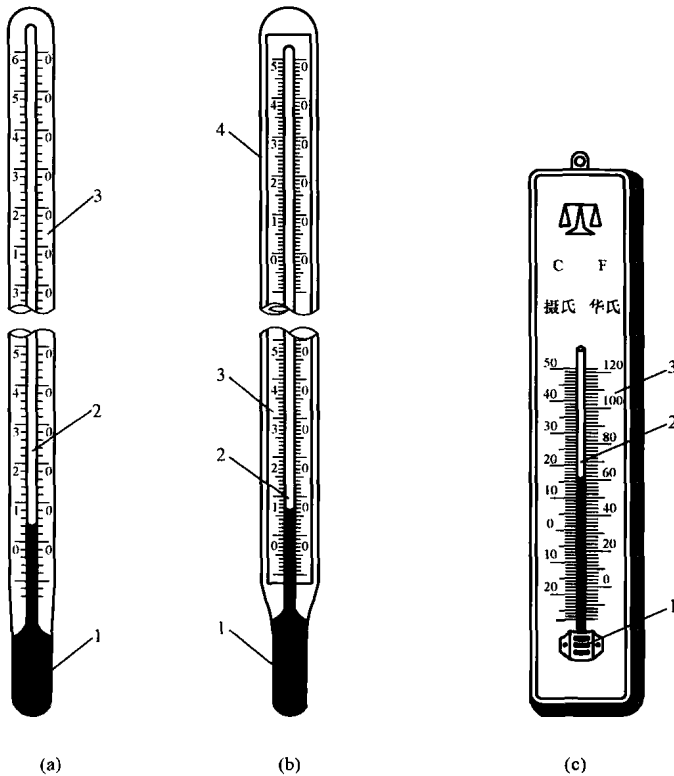


图 2-1 玻璃温度计

(a) 棒式温度计；(b) 内标式温度计；(c) 外标式温度计

1—温包；2—毛细管；3—温度标尺；4—玻璃外壳

成。棒式温度计的刻度标尺直接刻在厚壁玻璃毛细管的外壁上。内标式温度计有一乳白色的玻璃标尺，用金属丝捆在薄壁玻璃毛细管的后侧，两者一起封装在管状玻璃外壳内。内标式温度计观测清晰，但标尺与毛细管易错位，故测量准确度不如棒式温度计高。外标式温度计的特点是将连有温包的玻璃毛细管直接固定在外标尺上，通常室温计属于这类结构。

玻璃温度计按其用途（或按其测量准确度）可分为标准温度计、实验室温度计、工业用温度计和特殊用途温度计四类。

标准水银温度计用来进行精密的测量和校正其他温度计，其分度值为 $0.05\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ ($1/20^{\circ}\text{C}$ 和 $1/10^{\circ}\text{C}$)，甚至达 0.01°C ，做成棒式或内标式样。实验室用的温度计与标准温度计相仿，准确度也较高，最小分度一般为 $1/10^{\circ}\text{C}$ 。为避免碰伤，工业用温度计还常加上一个金属保护管套，下部一般可做成直的、弯成 90° 和 135° 的几种。另外，在热工实验中，还常用到电接点温度计和贝克曼温度计两种特殊用途的玻璃温度计。

(1) 电接点温度计。电接点温度计可以作为温度信号发生器和自动温度调节仪表。如图 2-2 所示，它内部有两条金属丝，一条为铂丝，另一条为钨丝（带有螺旋状的为铂丝引线）。用温度计顶端的磁钢旋动温度计内的螺杆，以调整电接点的整定值。当温度升到整定值时，两金属丝借助水银柱形成闭合回路，并通过两引线使受控继电器等动作，从而达到自动控制的目的。热工实验中经常使用的恒温器就是用这种电接点温度计来控温的。

(2) 贝克曼温度计。贝克曼温度计如图 2-3 所示。这是一种测量准确度很高的水银温度计，能测量微小的温度变化，多用于燃料发热量的测定。这种温度计的毛细管下端有一主水银温包，上端有一备用 U 形水银包，主水银包中的水银储存量可根据待测温度的不同与备用水银包进行相互转注，所测温度越高，从主水银包中转注到备用水银包中的水银量应越多（即主水银包中的水银量应越少）。温度计有两个刻度尺，主刻度尺和备用包处的副刻度尺。主刻度尺用来测量温差，其示值范围有 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 和 $0\sim 6^{\circ}\text{C}$ 或更小，分度值为 $0.002\sim 0.01^{\circ}\text{C}$ ；副刻度尺表示温度计测量温差的温度范围，在调整主刻度尺的温度间隔时，以此作为参考，其测量范围可达 $-30\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，分度值为 2°C 。因此，它具有用一支温度计即可精确测量 $-30\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内某一区间的微小温度变化的优点，但它不能测出温度的绝对值，只能得到相对温差值。

3. 液体玻璃温度计的选择与安装

液体玻璃温度计的量程范围和最小分度值应根据被测介质的温度范围和所要求的测量准确度来选取。安装点应选择在便于读数、不易损坏、有代表性的位置。温度计的标尺应垂直。如果必须倾斜安装时，则与水平线的夹角不应小于 45° 。当温度计安装在管道中时，应使测温包位于管道的中心线上，温度计的插入方向应为迎介质流动方向。在套管内还要放入适量的机油或铜屑（以温度计插入后没有机油溢出为度）。

(二) 干湿温度计

干湿温度计利用干球温度计和湿球温度计来测定空气的相对湿度 φ 。干球温度计即普通温度计，测出的是空气的真实温度，所得值称为干球温度 t 。另一只温度计的感温球上包裹一块浸在水中的湿纱布，由于纱布的水分在空气中蒸发（蒸发速度与空气的相对湿度有关）需要耗热，而使其温度逐渐下降到某一平衡温度，由这支温度计测得的这一平衡温度称为湿球温度 t_w 。根据测得的 t 及 t_w ，即可由干湿温度计上的换算表确定出空气的相对湿度 φ 值。然后再由 t 和 φ 值从空气的焓—湿图上查得含湿量（又称比湿度） d 。

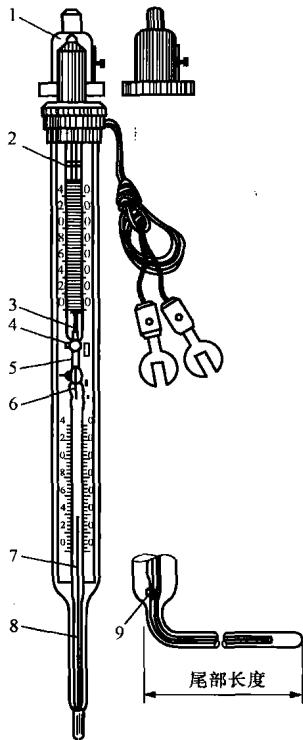


图 2-2 电接点温度计

- 1—磁钢；2—指示铁；3—螺旋杆；4—钨丝引出端；5—螺旋形铂丝；6—钨丝；7—水银；8—铂丝；9—铂丝引出端

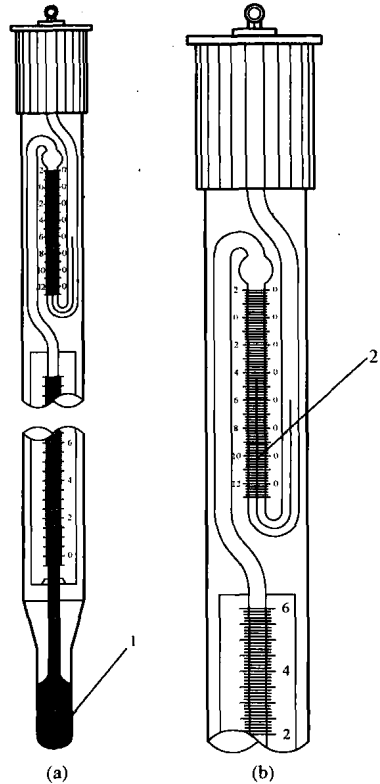


图 2-3 贝克曼温度计

- (a) 外观；(b) 上端放大
1—温包；2—U 形水银包

1. 使用方法

(1) 干湿温度计是为测量空气中的相对湿度而设计的，不要随意拆卸。

(2) 该仪器应放置在空气流通的地方（风速约为 2m/s ，若风速过大则可用计算温湿度的公式进行换算）。

(3) 使用前先将清水注入盛水瓶内，并将湿球纱布浸入瓶中，注意保持纱布与瓶水的清洁，切不可任意抬高或放低盛水瓶的位置。

(4) 干湿温度计中间所装的滚筒是空气相对湿度数值表，用来查对空气的相对湿度。

例如，干球温度为 25°C ，湿球温度为 23.5°C ，两表相差 1.5°C ，转动滚筒，使铝罩上“干湿差度”箭头指正“1.5”字行，再看铝罩上 25°C 线条（干球温度）所指的（滚筒上）对照表数字为“86”，则此时此处的空气相对湿度为 86%。

(5) 仪器中温度计毛细管内系真空制造，平放或倒置时，毛细管内水银柱因无空气压力会造成脱节倒流，这属正常现象。若水银柱脱节，应将该仪器垂直放置，轻轻敲击外壳，使水银柱接好后方可使用。

2. 注意事项

(1) 包裹湿球的纱布要松软、清洁且吸水性良好。湿润纱布时不要让水流入仪器的其他