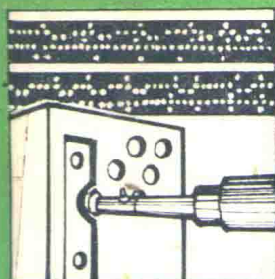
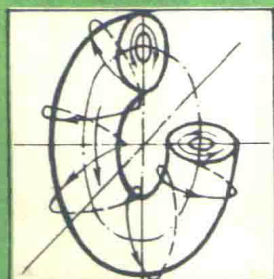
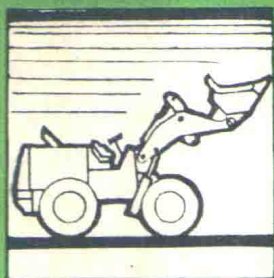


高等学校试用教材



# 热力机械测试技术

清华大学叶大均 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

# 热力机械测试技术

清华大学叶大均 主编

机械工业出版社

## 前 言

1978年4月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会协调了教学计划,并据此制定教材出版计划。根据轮机专业及锅炉专业这两个专业领域技术的发展与需要,决定将“测试技术”列为技术基础课,为四年(五年)制本科大学生的必修课程,规定学时都为60。为了节省人力物力,也为了扩大专业视界,两个专业决定将教材合并为《热力机械测试技术》并统一编写。

根据天津会议制订的教学计划,1978年5月全国轮机专业在黄山召开制订各课程教学大纲的会议,并落实教材编写工作。会上通过了本课程的教学大纲及教材编写原则,确定本教材主要结合轮机专业的需要来编写,适当照顾到锅炉专业的特点,各个专业可以根据不同技术领域的发展与需要,适当删减或增添部分内容来进行讲授。本教材着重阐述测试的基本原理及各基本量(如压力、温度、浓度及应力等)的测量方法,一般情况下没有涉及到具体研究对象的试验技术(如叶栅试验、燃烧室效率试验、锅炉热力试验等),有关这方面的问题应在专业课中讲述。在测量技术方面,主要讲述一次(感受)元件的设计原理与应用技术,而二次(变送与显示)元件则作一般性介绍,在介绍测量仪器时,尽量选择最先进的国内研制的产品为对象,对先进的测量技术如热线、激光与全息技术等也作了一定深度的介绍。鉴于测试技术的发展,本教材应用概率论与数理统计的观点来讲授误差理论,使学生能获得分析试验数据,正确进行数据处理的能力。

本书分为两篇共十三章,第一篇共五章,主要讲述误差理论及数据处理的数学方法;第二篇六至十三章分别叙述温度、压力及流速、流量、转速及功率、振动量、应力及气体成分的测量原理及方法。全书采用分章编写的方法汇集而成;其中第一、二、六章由孙锡九同志编写,第三、四、五章由叶大均同志编写,第七、十三章由张慰钧同志编写,第八章由杨露茜、孙锡九同志编写(以上编者皆为清华大学热能系教师),第九章由罗次申、金明月同志编写,第十章由杨本法、陈嘉骏同志编写,第十一章由韩祖舜同志、第十二章由傅志方同志编写而成(以上均为上海交通大学动力系教师),全书由清华大学叶大均同志主编,上海机械学院动力系徐昂千同志主审,责任编辑一机部教材编辑室高文龙同志。

本书系轮机、锅炉(热能工程)专业本科大学生的教材,也可供从事热力机械试验研究工作的研究生、工程师、实验员及工程技术人员参考。

1980年4月

# 目 录

## 第一篇 误差理论与试验数据处理

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 概况                   | 1  |
| § 1-1 测量的意义、测量方法、精密度与准确度 | 1  |
| § 1-2 测量与计量单位制           | 4  |
| § 1-3 误差的来源与分类           | 10 |
| 第二章 误差理论                 | 12 |
| § 2-1 测定值的分布规律           | 12 |
| § 2-2 误差的统计意义            | 23 |
| § 2-3 误差的各种表示方法          | 28 |
| § 2-4 测量结果的标准误差          | 32 |
| § 2-5 小子样误差分析—— $t$ 分布   | 34 |
| 第三章 误差传布理论               | 37 |
| § 3-1 误差传布原理             | 37 |
| § 3-2 间接测量误差理论的反问题       | 41 |
| § 3-3 误差传布理论的应用实例        | 42 |
| 第四章 疏忽误差、系统误差与误差的综合      | 48 |
| § 4-1 疏忽误差               | 48 |
| § 4-2 系统误差               | 50 |
| § 4-3 综合误差的计算            | 57 |
| § 4-4 有效数字               | 60 |
| 第五章 组合测量的数据处理            | 62 |
| § 5-1 二维随机变量的分布          | 62 |
| § 5-2 二维随机变量的数字特征        | 68 |
| § 5-3 子样相关系数与母体相关系数      | 72 |
| § 5-4 最小二乘法原理            | 77 |
| § 5-5 回归分析的概念            | 79 |
| § 5-6 一元线性回归             | 80 |
| § 5-7 一元非线性回归、经验方程之选取    | 84 |
| 第一篇 附录                   | 88 |
| 附表一 正态分布密度函数表            | 88 |
| 附表二 正态分布函数表              | 88 |
| 附表三 “学生氏”分布表             | 89 |
| 附表四 相关系数临界值表             | 90 |
| 附图一 母体相关系数的95%置信图        | 90 |

## 第二篇 测量技术

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第六章 测量仪表的基本概念                | 91  |
| § 6-1 测量设备及其组成               | 91  |
| § 6-2 测量仪表的主要性能              | 95  |
| 第七章 温度测量                     | 99  |
| § 7-1 温度和温度标尺                | 99  |
| § 7-2 玻璃管液体温度计               | 101 |
| § 7-3 温差热电偶                  | 102 |
| § 7-4 热电阻                    | 112 |
| § 7-5 测温显示仪表                 | 115 |
| § 7-6 辐射式温度计                 | 125 |
| § 7-7 温度数字巡回检测装置             | 130 |
| § 7-8 测温技术                   | 136 |
| 附表7-1 铂铑-铂热电偶分度表             | 152 |
| 附表7-2 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表     | 155 |
| 附表7-3 镍铬-考铜热电偶分度表            | 157 |
| 附表7-4 铂电阻温度计的刻度表(分度号 $B_1$ ) | 159 |
| 附表7-5 铂电阻温度计的刻度表(分度号 $B_2$ ) | 159 |
| 附表7-6 铂热电阻( $B_{A1}$ )分度表    | 159 |
| 附表7-7 铂热电阻( $B_{A2}$ )分度表    | 161 |
| 附表7-8 铜电阻温度计的刻度表             | 162 |
| 第八章 压力和速度测量                  | 163 |
| § 8-1 测压管、气流中静压、总压的测量        | 163 |
| § 8-2 气流速度的测量                | 175 |
| § 8-3 超音速气流的测量               | 187 |
| § 8-4 测压管校准技术与校准风洞           | 190 |
| § 8-5 压力测量的常规二次仪表            | 196 |
| § 8-6 压力传感器                  | 198 |
| § 8-7 传感器校准                  | 212 |
| § 8-8 热线风速仪                  | 216 |
| § 8-9 多普勒激光测速仪               | 226 |
| 第九章 流量测量                     | 239 |
| § 9-1 流量测量方法概述               | 239 |

## IV

|                                                              |     |                        |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|------------------------|-----|
| § 9-2 流速法测流量 .....                                           | 241 | § 10-4 测功器和测扭仪 .....   | 288 |
| § 9-3 标准节流装置 .....                                           | 246 | 第十一章 应力测量 .....        | 310 |
| § 9-4 进口流量管 .....                                            | 260 | § 11-1 电阻应变片 .....     | 310 |
| § 9-5 涡轮流量计 .....                                            | 264 | § 11-2 电阻应变仪 .....     | 317 |
| § 9-6 涡街流量计 .....                                            | 268 | § 11-3 光线示波器 .....     | 324 |
| 附表9-1 角接取压标准孔板的膨胀系数 $\epsilon$ 值 .....                       | 271 | § 11-4 旋转零件的应力测量 ..... | 331 |
| 附表9-2 角接取压标准孔板的光管流量系数 $\alpha_0$ .....                       | 271 | § 11-5 光弹技术 .....      | 336 |
| 附表9-3 角接取压标准孔板的 $\gamma_0$ 值 .....                           | 273 | 第十二章 振动测量 .....        | 342 |
| 附表9-4 角接取压标准孔板适用的最小雷诺数 $Re_{Dmin}$ 推荐值 .....                 | 273 | § 12-1 概述 .....        | 342 |
| 附表9-5 各种管道大致粗糙度 $K_s$ 值 .....                                | 273 | § 12-2 振动测量的基本仪器 ..... | 347 |
| 附表9-6 在不同 $\beta$ 值下的 $\alpha_0\beta^2$ 值 .....              | 274 | § 12-3 叶片振动测量 .....    | 372 |
| 附表9-7 节流件和管道常用材质的线膨胀系数 $\alpha_M \times 10^5$ 毫米/毫米·°C ..... | 275 | § 12-4 叶片振动疲劳试验 .....  | 391 |
| 第十章 转速及功率测量 .....                                            | 276 | § 12-5 轮盘振动测量 .....    | 398 |
| § 10-1 频率测量 .....                                            | 276 | 第十三章 气体成份分析 .....      | 402 |
| § 10-2 转速测量 .....                                            | 282 | § 13-1 奥氏气体分析器 .....   | 402 |
| § 10-3 透平机械功率的测量方法 .....                                     | 285 | § 13-2 热导式气体分析器 .....  | 404 |
|                                                              |     | § 13-3 热磁式氧分析器 .....   | 406 |
|                                                              |     | § 13-4 气相色谱分析仪 .....   | 407 |
|                                                              |     | § 13-5 氧化锆氧量计 .....    | 420 |

# 第一篇 误差理论与试验数据处理

## 第一章 概 况

### § 1-1 测量的意义、测量方法、精密度与准确度

#### 一、测量的意义

测量是人类对自然界的客观事物取得数量观念的一种认识过程。在这一过程中，借助于专门的设备，通过试验方法，求出以所采用的测量单位来表示的未知量的数值；换句话说，测量就是为取得任一未知参数而做的全部工作，其中包括测量的误差分析等计算工作在内。

在所有的自然科学和工程技术领域中所进行的一切研究活动，就其目的而言，无非是探求客观事物与量的变化关系。而在研究质与量的关系过程中都离不开测量。科学技术的发展与测量技术的不断完善是紧密相关的。测量技术推动科学的新发现并使之应用于技术实践中。

在生产斗争中，可靠的测量技术是生产过程自动化的先决和必要条件。测量是调节的根据，调节是测量的目的。生产过程自动化，就是根据测量设备所提供的信号来发出指令，对设备进行必要的操作，使生产过程按预定的、最安全和最经济的工况运行。

测量是判断事物质量指标的重要手段。任何质量指标都要通过一定的数量来表示，例如机组的效率、油耗率、热耗率等等。人们就是借助于测量所获的各种参数的数值来评断事物质量的优劣的。

无论在科学实验中还是在生产过程中，人们一旦离开了测量就必然给工作带来盲目性。既使在人们的日常生活中离开了测量也将会引起不可思议的混乱。

由于测量技术对科学研究的各个部门都具有重要意义，并与国民经济的发展有密切的关系，现在它已发展成为一专门学科。测量技术的状态反映了一个国家的经济发展和科学技术水平。

测量技术是研究有关测量方法和测量工具的科学技术。它根据测量对象的差异而分成若干方面，如力学测量、电学测量、长度测量、热工测量等等。蒸汽轮机和燃气轮机装置、锅炉设备等动力机械的热力学参数和机械量（如温度、压力、流量、振动、转速、功率等）的测量分别列属于热工测量和力学测量范畴之内的。

#### 二、测量方法

我们知道，任何物理现象，其特定状态及其过程可用数值（个性）来表示，其共有特性（共性）可用单位来表示者称为物理量。根据适当定义而规定的数值为1的物理量称之为单位，并用它作为对同类物理量进行测量的基础。因此，被测物理量 $Q$ 可用下式表达：

$$Q = qU$$

式中  $U$ ——所选用的测量单位；

$q$ ——被测量与单位量的数字比值。

当所选用的测量单位  $U$  用另一测量单位  $U'$  代换时（如以米代替厘米，以焦耳代替千卡时），则所求的数字比值  $q$  也将随单位变换之间的转化关系而作相应的变化。

为了有利于研究测量过程中所产生的误差，有必要把测量方法按测量结果产生的方式进行分类，它们是直接测量法、间接测量法和组合测量法。

### （一）直接测量法

在测量中，使未知物理量与做为标准的物理量直接比较，用预先标定好了的测量仪器进行测量，从而直接求出未知量的数值。这类测量称之为直接测量。

属于直接测量的例子很多，在工程技术中使用的很广泛：如用水银温度计测量介质温度，用压力表测量容器内的介质压力，用电流表测量电路中的电流等。

在由若干基本物理量单位导出的物理量中，有相当多的物理量是不能用直接测量法测出结果的。例如燃气轮机的油耗率、压气机的轴功率，机组的各种效率等。此时需采用间接测量法。

### （二）间接测量法

测量中，通过未知量与若干个变量相联系的关系式先分别对各变量进行直接测量，然后将所得数值代入该关系式中进行计算，从而求得未知量的数值，这类测量称之为间接测量。在间接测量中，未知量与被测量之间存在一定的函数关系。

例如当需要求得透平机械轴功率  $N$  时，借用关系式：

$$N = \frac{Mn}{9549} \text{ (千瓦)}$$

式中  $M$ ——透平机械轴传递的扭矩（牛顿·米）；

$n$ ——轴的转速（转/分）。

用测速测扭仪在扭力轴上（连接于透平机械受力轴端）同时进行扭矩  $M$  和转速  $n$  的直接测量，然后将它们经处理后的读数代入上式就可计算出结果  $N$  来。

### （三）组合测量法

测量中使各个未知量以不同的组合形式出现（或改变测量条件以获得这种不同的组合），根据直接测量或间接测量所获得的数据，通过求解联立方程组以求得未知量的数值，这类测量称之为组合测量。在组合测量中，未知量与被测量之间存在一定的关系。

例如在用铂电阻温度计测量介质温度时，其电阻值和温度的关系是：

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2)$$

式中  $R_t$ ——在  $t^\circ\text{C}$  时的铂电阻值（欧姆）；

$R_0$ ——在  $0^\circ\text{C}$  时的铂电阻值（欧姆）；

$a, b$ ——铂电阻的温度系数（欧姆/ $^\circ\text{C}$ ）。

为了确定铂电阻温度系数，首先需测得在不同温度下的电阻值，然后再经组合解联立方程以获得  $a, b$  的数值。

组合测量法在试验室的工作中是较常使用的。例如为测压管的总压、方向和速度特性曲线确定关系式；为透平机械空载下的功率损失与转速的关系建立经验公式而确定转速的系数与指数等等。

在评定测量数据中所包含的随机误差时，其数字处理方法取决于测量方法。一般说来，对直接测量数据的处理方法是基于正态分布律而求出未知量的最优概值（算术平均值）和它所包含的误差；对于间接测量数据的处理尚需借助于平均误差传播原理；对于组合测量的数据普遍地使用回归分析确定相关系数并最后求得未知参量和评定误差。

当然还可以根据测量中的其它因素对测量方法进行分类：如绝对测量法与相对测量法；等精度测量法与非等精度测量法；零示法、微差法和替代法等等。

**绝对测量法：**根据被测量的物理定义对定义中的各基本量同时进行测量以获得被测量值的方法称之为绝对测量法。目前，在国际单位制中，作为基本量的共有七个，它们是长度（米）、质量（千克）、时间（原子秒）、电流强度（安培）、热力学温度（开尔文）、发光强度（坎德拉）和物的质量（摩尔）。例如用某质点在一定时间内所经过的距离测量质点速度。

**相对测量法：**将被测量值和一已知的同类量值进行比较，或和一个与其成函数关系的其它已知量值进行比较，以获得被测量值的方法称之为相对测量。例如：用容量的实物量具测量燃油的体积；用受力后弹性膜盒的变形量测量力值等等。相对测量法根据比较方法的差异又分为替代法、交换法、零位法重合法和偏差法等等。

**等精度测量法和非等精度测量法：**在多次测量中，如果每次测量都使用相同的方法，相同的仪器，在同样的环境下进行，而且测试人员每一次都以同样的细心和注意力来进行操作和观测……，总之，即在同一条件下所进行的一系列重复测量称之为等精度测量。否则，称之为非等精度测量。

### 三、精密度、准确度和精确度。

精密度是指在测量中所测数值重复一致的程度。准确度是指测量值与真值偏离的程度。精密度和准确度是两种不同的概念，不能混为一谈，二者之间的区别可以用打靶时的弹着点分布情况来说明，见图 1-1。

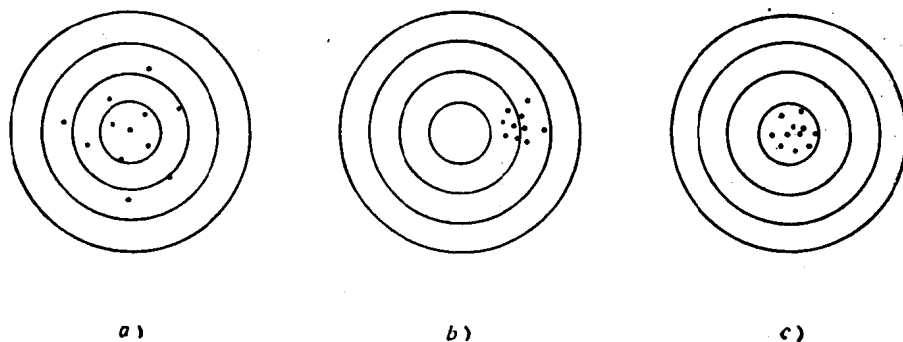


图1-1 精密度、准确度与精确度含义示图

精密度的高低在靶纸上体现在弹着点分布区域的大小。当弹着点都密集于一个很小的区域中时，则精密度是高的；如果弹着点十分稀疏地散布于靶纸的各个部分则精密度是很差的。因此精密度与弹着点是否落在靶心没有关系。准确度则体现在所有弹着点相对于靶心的偏离程度，显然弹着点相对于靶心分布的愈对称则准确度愈高。图 1-1 中的 a) 显示了射手的射击准确度较好而精密度差，而 b) 显示了射手有较高的精密度而准确度差，因此二者的成绩都不理想。而 c) 显示了射手在准确度和精密度两方面都很优异的技能。在测量中，被测量

的真值相当于靶纸上的靶心。为了获得精确的测量结果，对测量设备的要求，不仅要看它的精密度，也要注意它的准确度。精密度与准确度的综合指标称为精确度，简称精度。

还可以进一步分析靶情。如果三个射手都使用同一支步枪，枪的本身没有什么问题，则对射手 a) 来说还有待于刻苦训练，在扣板机时减少造成枪身不稳定的因素与活动，这在测量中称之为减少随机误差而寻求提高精密度的各种措施；对于射手 b) 则需要寻求、克服和纠正业以习惯了的错误瞄准方法，这在测量技术中称之为更正系统误差。

## § 1-2 测量与计量单位制

### 一、测量与计量

计量是将物理量与其单位的定义做比较的一种实验科学，它是测量的一种特殊形式。

当我们测量某工件的尺寸时，使用的是米尺、卡尺、螺旋测微器等量具，我们没有用米的长度定义：“等于氪 86 原子的  $2p_{10}$  和  $5d_5$  能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 1650763.73 倍”去比较。那么，这米尺与米的定义值是否吻合呢？不难设想从物理量的单位定义到工作量具之间有一系列的量值传递过程。开展计量工作的目的就在于保障测量量值的准确一致，保证测量设备的准确统一，并使之获得所要求的精确度。

从法制规定的基本单位的定义出发，用最先进的科学技术和工艺手段建立起来的复现单位定义而且具有最高精确度的计量设备称之为基准。由于基本单位有七个，因此相应地有七个基准器，它可以是计量装置，也可以是计量器具（实物基准）。其它由七个基本单位导出的物理单位量值的基准称之为标准。

基准器共分三级：

#### （一）一级基准器

又可称为主基准器、原始基准器。它是同一计量单位中精确度最高的基准器。它经国家鉴定合格后称为国家基准器，并做为全国计量单位量值的最高依据。由国际协议所承认的原始基准器称为国际基准器。

#### （二）二级基准器

它是由一级基准器确定其量值的基准器，又称为副基准器，它的功能是

1. 作证基准：用以检验主基准的稳定性和完善性，并在其损坏或失效时代替主基准的副基准。
2. 比较基准：精确度比较接近的（同一物理量）基准互相比对其量值的过程叫比对。对不能直接互相比对的基准进行间接比对时所用的副基准称为比较基准。
3. 参考基准：是用来将量值传递给工作基准的一种副基准。

#### （三）三级基准器

它是将单位量值传递给精确度较高的标准测量设备而用的一种基准，或称为工作基准器。

测量设备或仪表按国家规定的精确度要求又分为若干等级标准。

任何物理量由其基准向工作基准、各级标准或单一物理量的精密测量设备逐级传递单位量值并确定其精确度，为此而建立的一系列规定的精确度，测量程序、方法、设备、机构所构成的整个体系称为量值传递体制。显然，这样一套严密的体制使测量量值的准确一致和

测量设备的准确统一得到了保证。有时，将从工作基准、各级标准向日常用的测量设备传递量值的体系称为检定体制。

所有新生产的测量设备在出厂以前都要经国家计量业务机构作全面的鉴定。鉴定的一种形式是由国家业务部门对某项新产品组织召开鉴定会或定型会。在会上用集体审查的方法，核实产品表演所达到的全面指标，并给以切实的评语，对合格者发给合格证书。出厂后的测量设备在使用中必须定期检定，判断测量设备的精确度、稳定度、可靠性是否仍保持出厂水平。

在整个量值传递体制中，按精确度的高低，对仪器仪表又划分为若干个等级。例如压力表，电流表等分为七级，并用 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 及 5.0 来表示。这些数字是代表仪器示值（或满刻度时）所包含的相对误差范围。任何一只仪表的表盘或说明书上都应注有精度等级。显然，包含相对误差越小的仪表其精确度愈高。

## 二、单位制

为进一步统一我国的计量单位，根据国务院一九七七年五月颁发的“中华人民共和国计量管理条例（试行）”第三条：“我国的基本计量制度是米制，逐步采用国际单位制”的规定，在全国范围内正在进行国际单位制的推行工作。由于国际单位制是在米制计量单位基础上发展起来的计量单位，因此有必要介绍一下这个发展过程，简述国际单位制的优越性以及国际单位制的内容和使用注意事项。

### （一）米制（公制、国际公制）

在十八世纪，全世界有各种形式的计量制度，不仅各国之间计量制度不同，各城市、地区之间计量制度也不同。1795年4月法国颁布了米制条例，这是米制的最初形式。当时因作为长度计量单位的“米”的测量工作尚未完成，假定了一个临时米长度，并规定以下几项：

1. 采用十进制；
2. 定义“米”的长度是在经过巴黎的子午线上自北极到赤道这段弧长的一千万分之一；
3. 升的容量是一个以十分之一米为边长的立方体容积；
4. 克的重量等于一个以百分之一米为边长的立方体的纯水在真空中称得的重量，此时纯水温度是 4℃（当时还没有使用质量这个词）。

1799年6月，测量工作完成，发现原假定的临时米长度比定义米长了 0.3 毫米。因此又重新制造纯铂质的米原器和千克原器（公斤原器）各一个作为国家原器。

米制出现以后，采用的国家逐渐增多。1870年与1872年由法国发起，由二十多个国家组成米制委员会，决议用90%铂和10%铱的合金，按照截面为X形状制造米原器和圆柱形千克原器。1875年在巴黎开会，正式签定了米制公约，自1876年1月1日生效。1877年国际计量局成立并开始工作。

1889年国际计量局制成铂铱米原器 31 个，铂铱千克原器 40 个，选定其中一个做为国际原器，一个做为国际副原器，其余分给各个国家做为国家原器。

米作为长度主单位定义为：国际米原器上两条刻线在标准大气压和 0℃ 条件下的距离。后来，在 1960 年第十一届国际计量大会上定义为：等于氪 86 原子的  $2p_{1/2}$  和  $5d_{5/2}$  能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 1650763.73 倍。

千克（公斤）作为质量的主单位定义为：国际铂铱合金千克原器的质量。重量和质量

关系：1 千克（公斤）重量是一千克质量在重力加速度为  $9.80665 \text{ m/s}^2$  处真空中所表现的重力。重量等于质量乘重力加速度，质量在各地一致，重量随各地重力加速度而变动。

升做为容量的主单位定义为：质量为一千克的纯水在标准大气压和最大密度（+ 4℃）时所占有的体积。升和立方分米的关系：1 升 = 1.000028 立方分米。如果相对精确度不要求超过 0.01%，可将 1 立方分米做为 1 升计算。后来，在 1964 年第十二届计量大会上废除了升的旧定义，但“升”仍保留作为 1 立方分米的专用名词。建议不用升这个名词来表示高精度的容量测量结果。

在法国最初创建米制时，曾经想使长度、重量和容量的单位都以一个自然常数为依据，也就是以地球的子午线所制定的“米”为根据。后来，这种米制就成了制定各种单位制的基础。例如在物理学中以米的分数单位“厘米”为长度单位制定了厘米-克-秒制；在工程技术界以“米”为长度单位创立了米-千克-秒制和重力单位制；在电磁学中以米制为基础建立了米-千克（公斤）-秒-安培实用单位制和电磁单位制，静电单位制等。从米制派生出来的这些单位制，虽然都属于米制，但是它们之间缺乏科学的连系，使很多物理量具有许多彼此独立的单位，给科学研究和生产带来一些不必要的麻烦，这正是几年来许多国家推行国际单位制的一个重要原因。

## （二）国际单位制的建立经过

在 1948 年的第九届国际计量大会上，国际理论与应用物理学会和法国政府提出了统一国际计量单位制的建议，并提议取消以力或重力的单位为基本单位的单位制，而在国际之间采用以米-千克（公斤）-秒-安培为基本单位的实用单位制。1954 年第十届计量大会决定采用米-千克（公斤）-秒-安培-开氏度（热力学温度单位，第十三届国际计量大会决定将它改为现在的名称“开尔文”）和烛光为基本单位的单位制，并由国际计量委员会专门成立了单位制委员会。该委员会在 1954~1956 年整理了国际意见，结果有 21 个国家对统一计量单位制的草案都十分赞成。1956 年国际计量委员会决定将这种单位制定名为“国际单位制”，并通过了辅助单位和导出单位。会后经过研究与试验，终于在 1960 年第十一届国际计量大会上正式通过。经过历届国际计量大会的修改，到 1971 年的第十四届国际计量大会决定国际单位制以米-千克（公斤）-秒-安培-开尔文-摩尔和坎德拉七个单位为基本单位。

## （三）国际单位制的优越性

### 1. 科学的构成原则

（1）定义方法：在国际单位制中，各量的单位不是全部独立定义的，而是选择各学科的几个量作为彼此独立的基本量，其它的量是通过选择与基本量相联系的方程式表示。只要实际复现几个基本单位就可以方便地得到其它导出单位。这样，由国际单位制的几个基本单位（有时应要利用两个辅助单位）可以构成某一学科范围的单位制。例如用米、千克（公斤）、秒和两个辅助单位定出全部力学和声学单位；通过米、千克（公斤）、秒、安培定义出全部电学和磁学单位；由米、千克（公斤）、秒和开尔文定出全部热力学单位。

（2）一贯性：一贯性是指单位制中各导出单位的定义方程式中的比例系数一律都取 1，从而使各单位之间合理地相互联系起来。这种单位制称为一贯单位制。对于单位来说，一贯性的概念只适于导出单位，例如牛顿是国际单位制中力的一贯导出单位。只有采取一贯单位制才能使表明物理规律的方程具有最简单的形式。

（3）十进十退：国际单位制中的倍数单位与分数单位是由十进位词冠加在主单位之前

构成。

## 2. 便于统一世界计量制度

国际单位制包括力学、热学、电磁学、光学、声学、化学等所有领域的计量单位。从而使科学技术与生产、国际贸易和日常生活等所有方面的计量单位统一在一个单位制中，以代替各国所用的一切单位制，达到计量制度在全世界范围内的统一，可以消除多种单位制和单位并用的现象。例如用一个国际制压力单位帕斯卡（牛顿/米<sup>2</sup>）就可以代替公斤力/厘米<sup>2</sup>、公斤力/米<sup>2</sup>、大气压、毫米汞柱、毫米水柱、巴、达因/厘米<sup>2</sup>等所有压力单位。又如在力学、热学和电学中的功、能和热量这几个量虽然测量形式不同，但它们在本质上是相同的量，而过去多种单位制及单位并存时，它们的常用单位有千克力米、克力米、尔格、千卡、卡、电子伏特、瓦时、千瓦时等很多米制单位，此外还有磅力英尺，马力小时，BTU 英热单位等多种英制及其它制单位，而在国际单位制中只用一个单位焦耳就代替了所有这些常用单位。这不仅反映了这几个量之间的物理联系，而且也省略了很多计算，同时也避免了同类量具有不同量纲和不同类量具有相同量纲的矛盾。

国际单位制明确和澄清了很多量与单位的概念。它的单位是根据物理规律严格而明确定义的，并经过考虑放弃了一些旧的不科学的习惯概念和用法。例如，长期以来千克（公斤）既是质量单位又是重量单位。实际上重量和质量根本不同，它是和力有相同性质的量。在国际单位制中，千克（公斤）只做为质量的单位，而力的单位是牛顿，它当然也是重量的单位。

表1-1 国际制基本单位和辅助单位

|                  | 量的名称  | 单位名称       | 单位代号 |            | 定义                                                                                                  |
|------------------|-------|------------|------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |       |            | 国际   | 中文         |                                                                                                     |
| 基<br>本<br>单<br>位 | 长度    | 米          | m    | 米          | 米等于氪86原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的1650763.73个波长的长度                                      |
|                  | 质量    | 千克<br>(公斤) | kg   | 千克<br>(公斤) | 千克是质量单位，等于国际千克原器的质量                                                                                 |
|                  | 时间    | 秒          | s    | 秒          | 秒是铯133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间                                                     |
|                  | 电流    | 安培         | A    | 安          | 安培是一恒定电流，若保持在处于真空中相距一米的两无限长而圆截面可忽略的平行直导线内，则在此两导线之间产生的力在每米长度上等于 $2 \times 10^{-7}$ 牛顿                |
|                  | 热力学温度 | 开尔文        | K    | 开          | 热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的1/273.16                                                                       |
|                  | 物质的量  | 摩尔         | mol  | 摩          | 1.摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与0.012千克碳12的原子数目相等。<br>2.在使用摩尔时，基本单位应予指明，可以是原子、分子、离子、电子及其它粒子，或是这些粒子的特定组合 |
| 辅<br>助<br>单<br>位 | 光强度   | 坎德拉        | cd   | 坎          | 坎德拉是在101325帕斯卡压力下，处于铂凝固温度的黑体的1/600000平方米表面垂直方向上的光强度                                                 |
|                  | 平面角   | 弧度         | rad  | 弧度         | 弧度是一个圆内两条半径之间的平面角，这两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等                                                               |
|                  | 立体角   | 球面度        | sr   | 球面度        | 球面度是一个立体角，其顶点位于球心，而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积                                                       |

国际单位制取消了大量的不必要的各种单位，简化了物理规律的表现形式和计算手续，省略了很多不同单位制与单位之间的换算系数。例如很多力学与热力学公式采用国际单位制后就可以省去热功当量、功热当量、千克力和牛顿的转换系数等常量，同时也可以省去很多计算图表，节省了人力。

表1-2 国际制导出单位

| 量的名称         | 单位名称      | 单位代号                                   |                       | 备注                                                             |
|--------------|-----------|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|
|              |           | 国际                                     | 中文                    |                                                                |
| 密度           | 千克每立方米    | $\text{kg}/\text{m}^3$                 | 千克/米 <sup>3</sup>     |                                                                |
| 力            | 牛顿        | N                                      | 牛                     | $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$             |
| 力矩           | 牛顿米       | $\text{N} \cdot \text{m}$              | 牛·米                   |                                                                |
| 压力(压强)、应力、声压 | 帕斯卡       | Pa                                     | 帕                     | $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$                            |
| 重度           | 牛顿每立方米    | $\text{N}/\text{m}^3$                  | 牛/米 <sup>3</sup>      |                                                                |
| 动力粘度         | 帕斯卡秒      | $\text{Pa} \cdot \text{s}$             | 帕·秒                   |                                                                |
| 能、功、热量       | 焦耳        | J                                      | 焦                     | $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$                         |
| 功率           | 瓦特        | W                                      | 瓦                     | $1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$                               |
| 导热系数         | 瓦特每米开尔文   | $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$   | 瓦/(米·开)               |                                                                |
| 传热系数         | 瓦特每平方米开尔文 | $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ | 瓦/(米 <sup>2</sup> ·开) |                                                                |
| 热容、熵         | 焦耳每开尔文    | $\text{J}/\text{K}$                    | 焦/开                   |                                                                |
| 比热容          | 焦耳每千克开尔文  | $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  | 焦/(千克·开)              |                                                                |
| 转速           | 每秒        | $\text{s}^{-1}$                        | 秒 <sup>-1</sup>       | 暂时与国际单位制并用的转速名称为“转每分”，国际代号为 $\text{min}^{-1}$ , rpm, 中文代号“转/分” |
| 电势, 电压电动势    | 伏特        | V                                      | 伏                     | $1\text{V} = 1\text{W}/\text{A}$                               |
| 电容           | 法拉        | F                                      | 法                     | 1F                                                             |
| 电通量          | 库仑        | C                                      | 库                     | $1\text{C} = 1\text{s} \cdot \text{A}$                         |
| 电阻           | 欧姆        | $\Omega$                               | 欧                     | $1\Omega = 1\text{V}/\text{A}$                                 |
| 磁通           | 韦伯        | Wb                                     | 韦                     | $1\text{Wb} = 1\text{V} \cdot \text{s}$                        |
| 电感           | 亨利        | H                                      | 亨                     | $1\text{H} = 1\text{Wb}/\text{A}$                              |
| 光通           | 流明        | lm                                     | 流                     | $1\text{lm} = 1\text{cd} \cdot \text{sr}$                      |
| 光量           | 流明秒       | $\text{lm} \cdot \text{s}$             | 流·秒                   |                                                                |
| 光亮度          | 坎德拉每平方米   | $\text{cd}/\text{m}^2$                 | 坎/米 <sup>2</sup>      |                                                                |
| 光照度          | 勒克斯       | lx                                     | 勒                     | $1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$                           |
| 电导           | 西门子       | S                                      | 西                     | $1\text{S} = 1\text{A}/\text{V}$                               |
| 磁感强度, 磁通密度   | 特斯拉       | T                                      | 特                     | $1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$                            |

#### (四) 国际单位制内容

国际单位制代号为 SI，它包括有

1. 国际制单位：国际制基本单位和辅助单位的代号和定义见表 1-1。国际制导出单位中有些单位具有专门名称和代号（例如力的单位“千克米每秒平方”的专门名称是“牛顿”，国际代号是“N”，中文代号是“牛”）。这些专门名称和代号也可以用来表示其它国际制导出单位。常用的国际制导出单位见表 1-2。

2. 国际制词冠：将 10 的各个整数幂冠以名称和代号。

3. 国际制单位的十进倍数单位与分数单位，由国际制词冠加在国际制单位之前构成。但质量的十进倍数单位与分数单位是由词冠加在“克”的前面而成。

国际制单位的倍数单位和分数单位按以下原则选用：使量的数值尽可能处在 0.1~1000 的范围内。例如 10 万千瓦最好用 100MW；1401Pa（帕）可以写成 1.401kPa（千帕）。

国际制单位与其它单位制的单位换算见表 1-3。

表1-3 各种单位制与国际制单位的关系

| 量的名称        | 单位名称                | 单位代号                        |                           | 与国际制单位的关系                                                                        | 备注          |
|-------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|             |                     | 国际                          | 中文                        |                                                                                  |             |
| 力           | 千克力(公斤力)            | kgf                         | 千克力(公斤力)                  | 1kgf = 9.80665N                                                                  |             |
| 力矩          | 千克力米                | kgf·m                       | 千克力·米                     | 1kgf·m = 9.80665N·m                                                              |             |
| 压 力         | 巴                   | bar                         | 巴                         | 1bar = 0.1MPa = 10 <sup>5</sup> Pa                                               | Torr        |
|             | 标准大气压               | atm                         | 标准大气压                     | 1atm = 101325Pa                                                                  |             |
|             | 托                   |                             | 托                         | 1托 = (101325/760)帕                                                               |             |
|             | 毫米汞柱                |                             | 毫米汞柱                      | 1mmHg = 133.3224Pa                                                               |             |
|             | 毫米水柱                |                             | 毫米水柱                      | 1mmH <sub>2</sub> O = 9.80665Pa                                                  |             |
|             | 千克力/厘米 <sup>2</sup> |                             |                           |                                                                                  |             |
|             | (工程大气压)             | kgf/cm <sup>2</sup> (at)    |                           | 1at = 9.80665 × 10 <sup>4</sup> Pa                                               |             |
| 应 力         | 千克力每平方毫米            |                             | 千克力/毫米 <sup>2</sup>       | 1kgf/mm <sup>2</sup> = 9.80665Pa                                                 |             |
| 粘 度         | 泊                   | P                           | 泊                         | 1P = 0.1Pa·s                                                                     |             |
| 运动粘度        | 斯托克斯                | st                          | 斯                         | 1st = 1cm <sup>2</sup> /s                                                        |             |
| 能、功、<br>热 量 | 千克力米                | kgf·m                       | 千克力·米                     | 1kgf·m = 9.80665 J                                                               | 指国际<br>蒸汽表卡 |
|             | 瓦特小时                | W·h                         | 瓦·时                       | 1W·h = 3600 J                                                                    |             |
|             | 卡                   | cal                         | 卡                         | 1cal = 4.1868 J                                                                  |             |
| 功 率         | 马力                  | hp                          | 马力                        | 1hp = 0.7353kW = 75kgf·m/s                                                       | 米制马力        |
|             | 马力                  | hp                          | 马力                        | 1hp = 0.7455kW = 76.04kgf·m/s                                                    |             |
| 比热容         | 卡每克摄氏度              | cal/(g·°C)                  | 卡/(克·度)                   | 1cal/(g·°C)<br>= 4.1868 × 10 <sup>-3</sup> J/(g·K)                               |             |
| 传热系数        | 卡每平方厘米秒<br>摄氏度      | cal/(cm <sup>2</sup> ·s·°C) | 卡/(厘米 <sup>2</sup> ·秒·°C) | 1cal/(cm <sup>2</sup> ·s·°C)<br>= 4.1868 × 10 <sup>4</sup> W/(m <sup>2</sup> ·K) |             |
| 导热率         | 卡每厘米<br>秒摄氏度        | cal/(cm·s·°C)               | 卡/(厘米·秒·°C)               | 1cal/(cm·s·°C)<br>= 4.1868 × 10 <sup>2</sup> W/(m·K)                             |             |

### § 1-3 误差的来源与分类

由测量器具或仪器的读数装置所指示出来的数值称为测定值，或称示值。测定值与真值的差异量称之为测量的绝对误差，或简称误差。即  $\text{测量误差} = \text{测定值} - \text{真值}$ 。

显而易见，当测定值大于真值时，测量误差的符号是正的。当已知测定值和测量误差时，被测量的真值可从上式求出，即

$$\text{真值} = \text{测定值} - \text{测量误差}。$$

任何测定值都只能近似地反映客观真实值。无论所用的测量仪器有多么精确，测量方法有多么完善，测试人员又是多么老练与细心，其测定值必然是有别于真值的，即肯定存在着误差。在科学试验中，只有当每一个测量结果的误差已经知道，或者误差的可能范围已被指出的时候，由科学试验所提供的资料才是有意义的。

根据误差产生的原因，可将误差分为三类：系统误差、粗大误差和随机误差。

#### 一、系统误差

系统误差的特点是：在反复测量过程中，其误差数值的大小和符号或是固定不变的（恒值误差），或是按一定规律变化的（变值误差）。而变值误差又可分为累进误差，周期性误差和按复杂规律变化的误差三种。系统误差产生的基本原因可能是仪表制造、安装或使用方法不正确，也可能是测量人员的一些不良习惯所引起的。

系统误差决定了测量的准确度。系统误差说明测量结果偏离被测量真值的程度。系统误差越小，测量结果就越准确。

因为系统误差就个体而言具有规律性，因此可以通过试验的方法加以消除，也可以通过引入更正值的方法加以修正。

更正值的数值等于系统误差的数值，但符号与之相反。例如一台磅秤出厂时附有一张该磅秤刻度的校准表（表 1-4）。表中所示的 +5，+10，…+20 等数值，就是该磅秤在各测定值条件下的更正值。当用该磅秤测得燃油量（测定值）为 2000 克时，对应它的更正值为 +12 克，系统误差为 -12 克，燃油量的真值是  $2000 - (-12) = 2012$  克。

表 1-4

| 磅秤示值(克) | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 |
|---------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 更正值(克)  | +5  | +10  | +12  | +12  | +15  | +15  | +18  | +20  |

#### 二、粗大误差（疏失误差、过失误差、粗差）

粗大误差主要是由于测量人员的粗心大意，读数错误，记录或运算错误，错误操作仪表等原因造成的。例如，在用铜—康铜热电偶测量温度时，错误地使用了铂铑—铂毫伏温度计做为指示仪表，将数字 19.68 误写成 49.68 等等。由于上述原因而使测量结果有明显的歪曲，就其数值而言，粗大误差往往都远远地超过同一条件下的系统误差和随机误差。

判断测定值中是否含有粗大误差要遵守一定的准则。凡经证实的粗大误差应从试验数据中剔除不用，因为它是不可信赖的。

### 三、随机误差，偶然误差

在通常的情况下，测量某一参数时一般只测量一次，在手头上有测量仪表更正值和校正曲线，并且知道仪表的精密度，只要确认测量方法是正确的，同时没有粗差发生的条件下可以对测定值的误差范围给予明确的判断。这样测量又省时又省力，但是测量的误差范围大，精度低。

为了提高测量精度，就需要进行多次测量。在完成了多次等精度测量之后发现每次测量所获的测定值在剔除系统误差之后，其数值总不会完全一致，在数值的最后一、二位上总存在差异，其差异值的变化又毫无规律，或者说，测定值在最后一、二位上有任意性，随机性。因此做如下定义：在重复测量时，受大量的微小的随机因素的作用，测量误差的出现没有一定的规律，其数值的大小和符号均不固定的称为随机误差。这类误差是始终存在的，是难于消除的，就象人们不能控制和消除随机因素一样，随机误差是客观存在。

产生随机误差的来源是：

(一) 仪表内部存在有摩擦和间隙等不规则变化；

(二) 测量人员对仪表最末一位读数估计不准。一切数字式仪器，由于计数脉冲列与闸门开关时间的相对相位关系而产生的 $\pm 1$ 个字的误差等；

(三) 周围环境不稳定对测量对象和测量仪器的影响，如气压、温度、湿度、电磁干扰、振动、光照等因素的微量随机变化都会使测量对象在数值大小上引起相应的变化，使测量仪器本身的精度发生变化。

随机误差产生的原因也可以认为是由不可控制的或不值得耗费很大财力物力去消除的各种因素造成的。在这些随机因素中，有的我们已经认识到，估计到，有些可能我们尚未发现，但是它们肯定是影响测量的次要因素。在某些情况下，经剔除后尚残存的那些数值微小符号可变可不变的系统误差也混在随机误差中间。测量时把一切次要因素都统统考虑进去是不必要的，有时也是不可能的。科学的方法正是要抓住主要的，忽略次要的因素，并估价次要的因素造成的影响范围，得到可以信赖的结果。

虽然个别的随机误差的产生是没有规律的，但是只要在等精度测量条件下测量的次数足够多，则可发现随机误差却完全服从一定的统计规律。随机误差不能通过试验的方法加以剔除，但因其总体服从统计规律，因此可以从理论上估计其对测量结果的影响。

随机误差决定测量的精密度。随机误差越小测量结果的精密度越高。

## 第二章 误差理论

测量的目的是求出某一物理量的真值。然而，在任何一次试验中，对各种物理量进行测量后所获得的全部数据，由于主观和客观因素的影响，都不可避免地存在有误差；例如，设某物理量的真值为 $X$ ，我们对它进行了 $n$ 次测量，获得了 $n$ 个测量值 $M_1, M_2, \dots, M_n$ ，谓之测定值，那么，每次测量后测定值所包含的误差为：

$$M_1 - X = x_1$$

$$M_2 - X = x_2$$

$$\dots\dots\dots$$

$$M_n - X = x_n$$

因为 $X$ 是欲求的未知量，所以误差 $x$ 也是未知的，用 $n$ 个方程求 $n+1$ 个未知数无论如何也是不会成功的。采用先进的测量工具，应用先进的测量技术也不能使误差为零，因而只依靠上式不能获得真值 $X$ 。我们的任务在于在给定条件下，找出测定值与真值间误差的分布规律，从而由一组测定值中确定一个所谓的最优概值，用它来代表我们要测的物理量，随后对这一最优概值的精确度做出估计。这种从一组测定值中选取被测量的最优概值，并估计其精确度的过程称之为数据处理。显然，数据处理的目的和过程就是使随机误差对最终结果的影响减至最小。

本章将利用概率论和数理统计课程中所获得的知识，介绍直接测量中随机误差分布的规律及数据处理的方法。事实上，在测定值中不可避免地会混有系统误差及粗大误差，这些将在第四章内叙述，而在本章中所涉及到的测定值都应作已剔除系统误差及粗大误差的测定值来理解。

### § 2-1 测定值的分布规律

#### 一、频率分布直方图与经验分布曲线的建立

用同一个仪器对同一对象在相同条件下进行多次测量，其结果总是各不相同的，例如对某处于稳定工作状况下运行的透平机械进行测量，发现其转速是在某一区间波动的，今以同一工况下50次测量中所获取的数据作一分析。

**例2-1** 透平机械同一稳定工况下对其转速进行多次测量，得到的结果如下：（单位是转/分）

|        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 4753.1 | 4757.5 | 4752.7 | 4752.8 | 4752.1 |
| 4749.2 | 4750.6 | 4751.0 | 4753.9 | 4751.2 |
| 4750.3 | 4753.3 | 4752.1 | 4751.2 | 4752.3 |
| 4748.4 | 4752.5 | 4754.7 | 4750.0 | 4751.0 |
| 4752.3 | 4751.8 | 4750.6 | 4752.5 | 4752.4 |
| 4751.6 | 4747.9 | 4748.3 | 4753.4 | 4753.5 |