

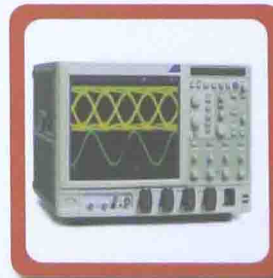
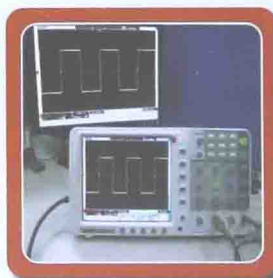
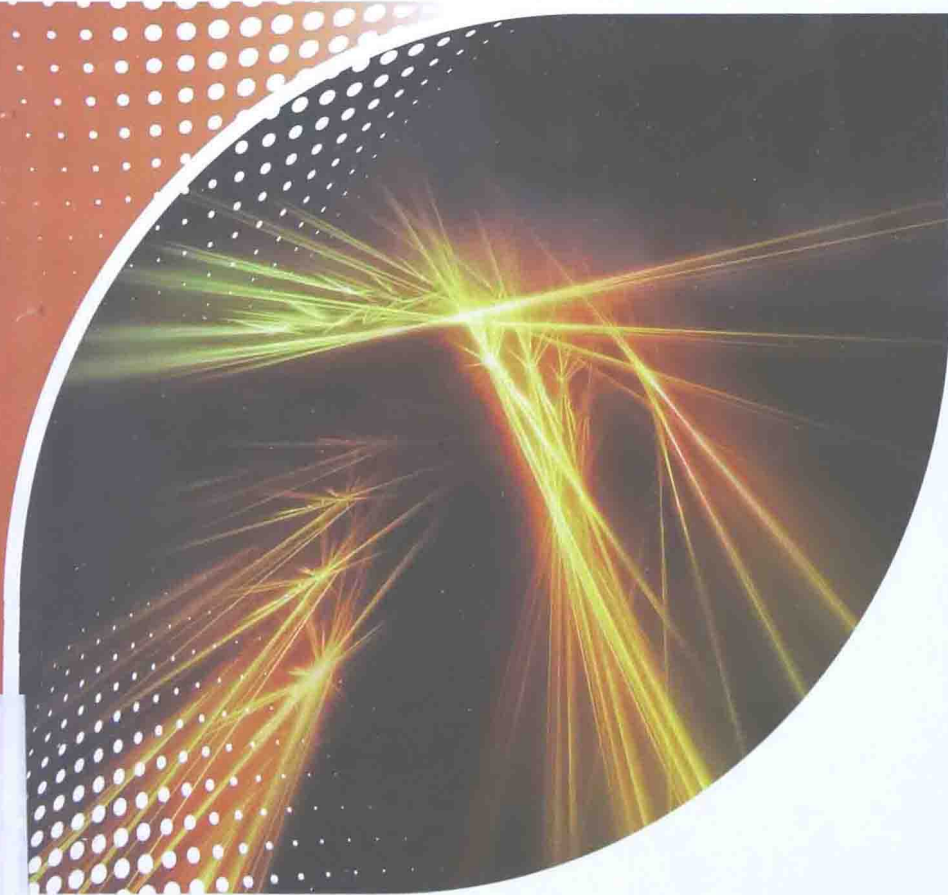


全国高等院校测控技术与仪器专业“十二五”规划教材

# 计量与测试 技术基础

◎ 郭斯羽 刘波峰 主 编

◎ 李占芳 副主编



展示现代计量学全貌及不同类物理量的测量方法  
详细介绍各计量领域具有共性的基本概念和知识  
提高读者解决具体物理量测量问题的能力和思路



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国高等院校测控技术与仪器专业“十二五”规划教材

# 计量与测试技术基础

郭斯羽 刘波峰 主 编  
李占芳 副主编



电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry

## 内 容 简 介

本书系统全面地介绍了测试与计量技术领域的基础知识,包括计量和测量的基本概念和术语、常见的测量方法、测量误差与数据处理的基本知识、量值传递与溯源的概念、基本计量单位和基本物理常数的基础知识、各类物理量的计量方法简介及标准物质的基础知识等。

全书共14章。第1章介绍了测量、计量、计量学和测试的基本概念、任务与特点,计量学的发展,国际计量组织,以及计量的作用与意义;第2章详细介绍了量与计量单位的基本概念和知识;第3章介绍了常用的测量方法,计量器具的定义和分类、结构和组成及其计量特性;第4章介绍了测量误差的基本概念与知识,以及常用的测量结果处理方法;第5章介绍了量值传递与溯源的概念、意义、基础与方式,计量基准和计量标准的概念,以及计量检定、比对、计量检定系统表和计量检定规程的基础知识;第6章介绍了基本计量单位的定义与发展,以及基本物理常数在计量中的地位及其确定;第7~13章分别介绍了几何量、力学、声学、时间频率、温度、电磁学、电子学、光学、化学和电离辐射等主要计量学分支的主要问题、任务及计量方法与计量标准等基础知识;第14章介绍了标准物质的基本知识。

本书可作为工科院校仪器科学与技术及电气信息类专业高年级本科生教材,也可供相关领域的技术和研究人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

计量与测试技术基础/郭斯羽,刘波峰主编. —北京:电子工业出版社,2015.1

全国高等院校测控技术与仪器专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-25042-2

I. ①计… II. ①郭…②刘… III. ①计量—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TB9

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第283988号

策划编辑:郭穗娟

责任编辑:陈韦凯 文字编辑:顾慧芳

印 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:448千字

版 次:2015年1月第1版

印 次:2015年1月第1次印刷

定 价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

《全国高等院校测控技术与仪器专业“十二五”规划教材》

## 编委会

主任委员：许贤泽

副主任委员：谭跃刚

|   |       |     |     |     |
|---|-------|-----|-----|-----|
|   | 刘波峰   | 郝晓剑 | 杨述斌 | 付 华 |
| 委 | 员：赵 燕 | 黄安贻 | 郭斯羽 | 武洪涛 |
|   | 靳 鸿   | 陶晓杰 | 戴 蓉 | 李建勇 |
|   | 秦 斌   | 王 欣 | 黎水平 | 孙士平 |
|   | 冯先成   | 白福忠 | 张国强 | 王后能 |
|   | 张雪飞   | 谭保华 | 周 晓 | 王 敏 |

## 前 言

测量是人类认识与改造自然的一种基本手段，是人们为了解物质的属性与特征而进行的工作。现代计量学是关于测量的科学，它涵盖了测量的理论和实践的各个方面。而计量作为一种特殊的测量，是实现单位统一、保障量值准确可靠的活动，是为经济有效地满足社会对测量的需要而进行的法制、技术和管理方面的有组织的活动。

现代计量所包含的内容极为广泛，通常可以概括为6个方面：计量单位与单位制，计量器具，量值传递与溯源，物理常量、材料与物质特性的测定，测量不确定度、数据处理与测量理论及其方法和计量管理。由于测量对象的种类和数量都极为庞大，且针对不同场合往往需要不同的测量方法，故而所涉及的计量方法众多。本书力图对各计量领域具有共性的基本概念和知识加以清晰说明，同时尽可能全面地对各个计量分支领域进行基础性、知识性介绍，希望读者能够充分把握相关的基本概念，为今后的专业课程打下基础，同时也对不同物理量的测量方法有所了解，便于今后在实际应用中能够有的放矢地针对具体的测量问题进行文献查阅和提出基本的解决思路。

全书共14章。第1章介绍了测量、计量、计量学和测试的基本概念、任务与特点，计量学的发展，国际计量组织，以及计量的作用与意义；第2章详细介绍了量与计量单位的基本概念和知识；第3章介绍了常用的测量方法，计量器具的定义和分类、结构和组成及其计量特性；第4章介绍了测量误差的基本概念与知识，以及常用的测量结果处理方法；第5章介绍了量值传递与溯源的概念、意义、基础与方式，计量基准和计量标准的概念，以及计量检定、比对、计量检定系统表和计量检定规程的基础知识；第6章介绍了基本计量单位的定义与发展，以及基本物理常数在计量中的地位及其确定；第7~13章则分别介绍了几何量、力学、声学、时间频率、温度、电磁学、电子学、光学、化学和电离辐射等主要的计量学分支的主要问题、任务及计量方法与计量标准等基础知识；第14章介绍了标准物质的基本知识。

本书的第1~3章、第5~7章、第9章、第11~14章由湖南大学电气与信息工程学院仪器科学与技术系郭斯羽编写，第8章和第10章由湖南大学电气与信息工程学院仪器科学与技术系刘波峰编写，第4章由中国矿业大学的李占芳编写。

尽管我们对本书付出了十分的心血和努力，但仍存在一些疏漏之处。敬请读者批评指正，编者将不胜感激。

编者

2015年1月

# 目 录

|   |    |                                  |    |
|---|----|----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                              | 1  | 2.2.2 基本单位和导出单位 .....            | 17 |
| 1.1 测量、计量和测试 .....                          | 1  | 2.2.3 倍数单位和分数单位 .....            | 17 |
| 1.1.1 测量 .....                              | 1  | 2.2.4 量纲 .....                   | 18 |
| 1.1.2 计量 .....                              | 1  | 2.2.5 单位方程、量方程和数值<br>方程 .....    | 18 |
| 1.1.3 计量学 .....                             | 2  | 2.3 国际单位制及其使用方法 .....            | 19 |
| 1.1.4 测试 .....                              | 3  | 2.3.1 国际单位制的特点 .....             | 19 |
| 1.2 计量学的发展 .....                            | 3  | 2.3.2 国际单位制的构成 .....             | 20 |
| 1.2.1 计量学的创立 .....                          | 3  | 2.3.3 国际单位制的使用 .....             | 22 |
| 1.2.2 米制的产生与发展 .....                        | 4  | 2.4 我国的法定计量单位 .....              | 23 |
| 1.2.3 国际单位制 .....                           | 5  | 思考与练习 .....                      | 24 |
| 1.2.4 基本物理常数 .....                          | 6  | 第 3 章 测量方法与计量器具 .....            | 25 |
| 1.2.5 测量结果的评定与表述 .....                      | 6  | 3.1 测量方法及其分类 .....               | 25 |
| 1.2.6 计量学基本术语的统一 .....                      | 6  | 3.1.1 直接测量法和间接测量法<br>.....       | 25 |
| 1.3 国际计量组织 .....                            | 7  | 3.1.2 基本测量法和定义测量法<br>.....       | 25 |
| 1.3.1 《米制公约》及其组织机构<br>.....                 | 7  | 3.1.3 直接比较测量法和替代测<br>量法<br>..... | 26 |
| 1.3.2 国际法制计量组织 .....                        | 8  | 3.1.4 微差测量法和符合测量法<br>.....       | 26 |
| 1.3.3 国际计量技术联合会 .....                       | 9  | 3.1.5 补偿测量法和调换测量法<br>.....       | 26 |
| 1.3.4 国际原子能机构/世界卫生<br>组织次级标准计量实验室网<br>..... | 9  | 3.1.6 静态测量和动态测量 .....            | 27 |
| 1.3.5 国际标准物质信息库 .....                       | 9  | 3.1.7 其他测量方法 .....               | 27 |
| 1.3.6 亚太地区计量规划组织 .....                      | 9  | 3.2 计量器具的分类和特点 .....             | 27 |
| 1.3.7 西欧计量协会 .....                          | 10 | 3.2.1 量具 .....                   | 27 |
| 1.3.8 亚太法制计量论坛 .....                        | 10 | 3.2.2 计量仪器 .....                 | 28 |
| 1.4 中国计量科学研究院 .....                         | 10 | 3.2.3 计量装置 .....                 | 30 |
| 1.5 计量的作用与意义 .....                          | 11 | 3.3 计量器具的结构和组成 .....             | 31 |
| 思考与练习 .....                                 | 13 | 3.3.1 计量器具的总体构成及其测<br>量链 .....   | 31 |
| 第 2 章 量和单位制 .....                           | 14 | 3.3.2 计量器具的输入部分 .....            | 31 |
| 2.1 量 .....                                 | 14 | 3.3.3 计量器具的中间变换部分                |    |
| 2.1.1 物理量的概念 .....                          | 14 |                                  |    |
| 2.1.2 量的种类 .....                            | 14 |                                  |    |
| 2.1.3 量值的概念 .....                           | 16 |                                  |    |
| 2.2 单位和单位制 .....                            | 16 |                                  |    |
| 2.2.1 单位的概念 .....                           | 16 |                                  |    |

|                           |           |                          |           |
|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| .....                     | 32        | 5.5.1 比对在量值传递中的作用和组织方式   | 63        |
| 3.3.4 计量器具的输出部分           | 33        | 5.5.2 比对方式               | 63        |
| 3.4 计量器具的特性               | 33        | 5.5.3 比对的应用              | 64        |
| 思考与练习                     | 35        | 5.6 国家计量检定系统表及计量检定规程     | 65        |
| <b>第4章 测量误差与数据处理</b>      | <b>36</b> | 5.6.1 国家计量检定系统表概述        | 65        |
| 4.1 测量误差                  | 36        | 5.6.2 检定系统的主要内容          | 65        |
| 4.1.1 测量误差的定义             | 36        | 5.6.3 计量检定规程             | 67        |
| 4.1.2 测量误差的表示方法           | 36        | 思考与练习                    | 69        |
| 4.1.3 测量误差的分类             | 38        | <b>第6章 基本计量单位与基本物理常量</b> | <b>70</b> |
| 4.1.4 测量不确定度              | 40        | 6.1 基本计量单位               | 70        |
| 4.2 测量结果的处理               | 42        | 6.1.1 基本计量单位概述           | 70        |
| 4.2.1 有效数字与数据修约           | 42        | 6.1.2 时间单位               | 71        |
| 4.2.2 系统误差的发现与处理          | 43        | 6.1.3 长度单位               | 72        |
| 4.2.3 粗大误差的发现与处理          | 44        | 6.1.4 质量单位               | 73        |
| 4.2.4 算术平均值原理与最小二乘法       | 46        | 6.1.5 电流及有关电量单位          | 74        |
| 4.2.5 一元线性回归              | 49        | 6.1.6 温度单位               | 75        |
| 思考与练习                     | 52        | 6.1.7 物质的量的单位            | 76        |
| <b>第5章 量值传递与溯源</b>        | <b>54</b> | 6.1.8 发光强度单位             | 77        |
| 5.1 概述                    | 54        | 6.2 基本物理常数               | 78        |
| 5.1.1 量值传递与溯源的概念          | 54        | 6.2.1 真空中的光速             | 79        |
| 5.1.2 量值传递与溯源的必要性         | 54        | 6.2.2 磁常数和电常数            | 80        |
| 5.1.3 量值传递、溯源及保证量值准确一致的基础 | 54        | 6.2.3 阿伏伽德罗常数            | 80        |
| 5.2 量值传递与溯源的方式            | 55        | 6.2.4 与电学单位有关的基本常数       | 81        |
| 5.3 计量基准与计量标准             | 56        | 6.2.5 重力加速度              | 82        |
| 5.3.1 计量基准                | 56        | 思考与练习                    | 82        |
| 5.3.2 计量标准                | 58        | <b>第7章 几何量计量</b>         | <b>83</b> |
| 5.4 计量检定                  | 59        | 7.1 长度计量                 | 83        |
| 5.4.1 检定在计量工作中的地位         | 59        | 7.1.1 工作波长标准和测长干涉仪       | 83        |
| 5.4.2 检定方法                | 60        | 7.1.2 量块                 | 86        |
| 5.4.3 检定的步骤、记录以及对检定人员的要求  | 61        | 7.1.3 线纹尺                | 89        |
| 5.4.4 检定的分类               | 62        | 7.2 角度计量                 | 90        |
| 5.5 比对                    | 63        | 7.2.1 多面棱体               | 90        |
|                           |           | 7.2.2 角度块                | 91        |
|                           |           | 7.2.3 刻线度盘               | 92        |
|                           |           | 7.2.4 环形激光器              | 92        |

|                           |     |                            |     |
|---------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 7.2.5 小角度计量               | 93  | 和装置                        | 119 |
| 7.3 工程参量计量                | 95  | 8.5.3 气体流量计计量的原理、<br>方法和装置 | 120 |
| 7.3.1 直线度计量及其标准           | 95  | 8.6 振动、冲击与转速计量             | 121 |
| 7.3.2 平面度计量               | 96  | 8.6.1 振动与冲击计量概述            | 121 |
| 7.3.3 圆度和球面度计量            | 96  | 8.6.2 振动计量的原理、方法和<br>装置    | 124 |
| 7.3.4 表面粗糙度计量             | 96  | 8.6.3 冲击计量的原理、方法和<br>装置    | 124 |
| 7.3.5 渐开线样板               | 97  | 8.6.4 转速计量概述               | 126 |
| 7.3.6 螺旋线样板               | 98  | 8.6.5 转速计量的原理与方法           | 127 |
| 7.4 几何量计量的常用测量方法          | 99  | 8.7 声学计量                   | 127 |
| 7.4.1 绝对编码法、增量法与小数<br>重合法 | 99  | 8.7.1 基本声学量简介              | 127 |
| 7.4.2 组合定标法               | 99  | 8.7.2 空气声声压计量              | 128 |
| 7.4.3 范成法与坐标测量法           | 100 | 8.7.3 噪声计量                 | 130 |
| 思考与练习                     | 100 | 8.7.4 听觉计量                 | 132 |
| <b>第8章 力学与声学计量</b>        | 101 | 思考与练习                      | 133 |
| 8.1 质量、容量与密度计量            | 101 | <b>第9章 时间频率计量</b>          | 135 |
| 8.1.1 质量计量                | 101 | 9.1 基本概念                   | 135 |
| 8.1.2 容量计量                | 103 | 9.1.1 时间和频率                | 135 |
| 8.1.3 密度计量                | 104 | 9.1.2 时刻                   | 135 |
| 8.2 力值计量                  | 106 | 9.1.3 时标                   | 135 |
| 8.2.1 力值计量的原理与方法          | 106 | 9.1.4 钟和守时                 | 137 |
| 8.2.2 基(标)准测力机            | 107 | 9.2 时间频率基准                 | 137 |
| 8.2.3 标准测力仪               | 108 | 9.2.1 磁选态热束型铯原子时间频<br>率基准  | 138 |
| 8.2.4 标准扭矩机和扭矩仪           | 109 | 9.2.2 光抽运热束型铯基准            | 138 |
| 8.3 硬度计量                  | 110 | 9.2.3 激光冷却铯原子喷泉钟           | 138 |
| 8.3.1 硬度的概念、试验原理与表<br>达方法 | 110 | 9.2.4 新一代时间频率基准            | 138 |
| 8.3.2 常用硬度试验方法            | 111 | 9.3 时间频率标准                 | 140 |
| 8.4 压力与真空计量               | 113 | 9.3.1 晶体振荡器                | 140 |
| 8.4.1 压力与真空的概念、单位和<br>分类  | 113 | 9.3.2 铷原子频率标准              | 142 |
| 8.4.2 压力计量的原理、方法和<br>装置   | 114 | 9.3.3 氢原子频率标准              | 144 |
| 8.4.3 真空计量的原理、方法和<br>装置   | 116 | 9.3.4 商品型铯束频率标准            | 146 |
| 8.5 流量计量                  | 118 | 9.4 时间频率计量                 | 146 |
| 8.5.1 流量的概念、单位和流量计<br>的分类 | 118 | 9.4.1 时间间隔计量               | 146 |
| 8.5.2 液体流量计量的原理、方法        |     | 9.4.2 频率值计量                | 146 |
|                           |     | 9.5 频率稳定度及其计量              | 149 |



|                               |     |                             |     |
|-------------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 9.6 时间频率量值的传递 .....           | 150 | 11.5 磁计量 .....              | 183 |
| 9.6.1 利用电磁波信号的接收比对 .....      | 150 | 11.5.1 磁通计量 .....           | 183 |
| 9.6.2 利用电视信号的接收比对 .....       | 151 | 11.5.2 磁感应强度计量 .....        | 184 |
| 9.6.3 利用卫星的接收比对 .....         | 153 | 11.5.3 磁矩计量 .....           | 185 |
| 思考与练习 .....                   | 155 | 11.5.4 磁性材料磁特性的计量 .....     | 186 |
| <b>第10章 温度计量</b> .....        | 156 | 11.6 电子学计量概述 .....          | 186 |
| 10.1 温标 .....                 | 156 | 11.6.1 电子计量的内容 .....        | 186 |
| 10.2 温度的直接计量 .....            | 158 | 11.6.2 电子计量的特点 .....        | 187 |
| 10.2.1 玻璃液体温度计 .....          | 159 | 11.7 电子计量中的电压计量 .....       | 188 |
| 10.2.2 电阻温度计 .....            | 159 | 11.8 电子计量中的功率计量 .....       | 190 |
| 10.2.3 热电偶温度计 .....           | 162 | 11.9 电子计量中的衰减计量 .....       | 192 |
| 10.3 温度的间接计量 .....            | 164 | 11.10 电子计量中的阻抗计量 .....      | 195 |
| 10.3.1 温度间接计量方法的特点和种类 .....   | 164 | 11.11 电子计量中的噪声计量 .....      | 198 |
| 10.3.2 亮度计量温度的方法 .....        | 165 | 11.12 电子计量中的场强计量 .....      | 199 |
| 10.3.3 颜色计量温度法 .....          | 167 | 11.13 电子计量中的其他计量 .....      | 201 |
| 10.3.4 全辐射计量温度法 .....         | 167 | 思考与练习 .....                 | 203 |
| 思考与练习 .....                   | 168 | <b>第12章 光学计量</b> .....      | 205 |
| <b>第11章 电磁学计量与电子学计量</b> ..... | 169 | 12.1 光学计量概述 .....           | 205 |
| 11.1 电磁学计量概论 .....            | 169 | 12.2 光度计量 .....             | 205 |
| 11.2 电学量计量单位的复现和实物计量基准 .....  | 170 | 12.2.1 光度计量中的两个常用定律 .....   | 205 |
| 11.2.1 电流 .....               | 170 | 12.2.2 发光强度计量 .....         | 206 |
| 11.2.2 电压 .....               | 170 | 12.2.3 光源的总光通量计量 .....      | 207 |
| 11.2.3 电阻 .....               | 172 | 12.2.4 光照度、光亮度计量 .....      | 209 |
| 11.2.4 电容与电感 .....            | 175 | 12.3 辐射度计量 .....            | 209 |
| 11.3 电学直流计量 .....             | 175 | 12.3.1 黑体辐射定律 .....         | 209 |
| 11.3.1 直流电阻计量 .....           | 175 | 12.3.2 黑体辐射标准源的具体形式 .....   | 210 |
| 11.3.2 直流电压计量 .....           | 177 | 12.3.3 辐亮度、辐照度及光谱辐射计量 ..... | 211 |
| 11.3.3 直流电流计量 .....           | 178 | 12.4 激光计量 .....             | 212 |
| 11.3.4 直流功率和电能的计量 .....       | 179 | 12.4.1 激光功率计量 .....         | 212 |
| 11.4 电学交流计量 .....             | 179 | 12.4.2 激光能量计量 .....         | 213 |
| 11.4.1 交流阻抗计量 .....           | 180 | 12.4.3 其他激光参数计量 .....       | 214 |
| 11.4.2 交流电流与电压计量 .....        | 180 | 12.5 色度和感光计量 .....          | 214 |
| 11.4.3 交流功率和电能的计量 .....       | 182 | 12.5.1 颜色计量的原理 .....        | 214 |

|                               |     |                                  |     |
|-------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 12.5.2 色度计量 .....             | 216 | 13.7.2 吸收剂量测量仪器 .....            | 247 |
| 12.5.3 感光计量 .....             | 216 | 13.7.3 吸收剂量的量值传递 .....           | 248 |
| 12.6 光学材料和成像系统计量 .....        | 217 | 13.8 中子计量 .....                  | 249 |
| 12.6.1 光学材料计量 .....           | 217 | 13.8.1 中子计量概述 .....              | 249 |
| 12.6.2 成像系统的计量 .....          | 218 | 13.8.2 中子计量方法 .....              | 249 |
| 12.7 光探测器特性 .....             | 218 | 思考与练习 .....                      | 250 |
| 12.7.1 光探测器的分类 .....          | 218 | <b>第14章 标准物质概述</b> .....         | 252 |
| 12.7.2 光谱响应度计量 .....          | 218 | 14.1 标准物质的定义 .....               | 252 |
| 12.7.3 响应的线性度计量 .....         | 219 | 14.2 标准物质的基本要求 .....             | 252 |
| 12.7.4 其他光探测器参数的计量 .....      | 219 | 14.3 标准物质的分级、分类及管理 .....         | 253 |
| 思考与练习 .....                   | 220 | 14.3.1 标准物质的级别 .....             | 253 |
| <b>第13章 化学计量和电离辐射计量</b> ..... | 221 | 14.3.2 标准物质的品种和分类 .....          | 254 |
| 13.1 化学计量概述 .....             | 221 | 14.3.3 我国标准物质的分类、<br>分级与管理 ..... | 255 |
| 13.2 物理化学计量 .....             | 221 | 14.4 标准物质的研制 .....               | 257 |
| 13.2.1 热量计量 .....             | 222 | 14.4.1 标准物质的制备 .....             | 257 |
| 13.2.2 黏度计量 .....             | 224 | 14.4.2 标准物质的均匀性检验 .....          | 258 |
| 13.2.3 酸度计量 .....             | 225 | 14.4.3 标准物质的稳定性 .....            | 259 |
| 13.2.4 电解质电导率计量 .....         | 226 | 14.4.4 标准物质的定值 .....             | 260 |
| 13.2.5 湿度计量 .....             | 227 | 14.5 有证标准物质的使用 .....             | 261 |
| 13.2.6 浊度计量 .....             | 229 | 14.5.1 使用有证标准物质的一般<br>原则 .....   | 261 |
| 13.2.7 粒度计量 .....             | 229 | 14.5.2 选择有证标准物质的注意<br>事项 .....   | 262 |
| 13.2.8 聚合物分子量计量 .....         | 230 | 14.6 标准物质举例 .....                | 263 |
| 13.3 分析化学计量 .....             | 231 | 14.6.1 化学成分标准物质 .....            | 263 |
| 13.3.1 分析化学计量的目的 .....        | 231 | 14.6.2 物理化学特性标准物质 .....          | 264 |
| 13.3.2 化学分析和基准试剂 .....        | 232 | 14.6.3 工程技术特性标准物质 .....          | 265 |
| 13.3.3 仪器分析 .....             | 232 | 思考与练习 .....                      | 265 |
| 13.4 电离辐射计量概述 .....           | 240 | <b>参考文献</b> .....                | 267 |
| 13.5 射线探测器 .....              | 241 |                                  |     |
| 13.6 放射性核素活度测量 .....          | 243 |                                  |     |
| 13.6.1 活度测量概述 .....           | 243 |                                  |     |
| 13.6.2 活度测量方法 .....           | 243 |                                  |     |
| 13.6.3 活度量值传递 .....           | 246 |                                  |     |
| 13.7 吸收剂量测量 .....             | 246 |                                  |     |
| 13.7.1 剂量测量概述 .....           | 246 |                                  |     |

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 测量、计量和测试

#### 1.1.1 测量

测量是指以确定量值为目的的一组操作。

这一定义并未具体限定应为何种操作，一次测量可以是一个简单的徒手动作或半自动动作，例如利用弹簧秤称水果的重量，用直尺确定家居的尺寸，斟满一杯（300mL）饮料等；也可以是一组复杂的科学实验过程，它从定义被测量开始，包括测量原理和方法的选定、测量标准和仪器设备的选用、影响量取值范围的控制、实验和计算，一直到获得具有适当不确定度的测量结果，例如测量地球到月球的距离等。操作的目的在于确定量值，即把可测的量和一个数值联系起来。这是测量的定义的核心内涵，是测量作为一种操作而有别于其他操作的本质特征。通过被测量与数值之间的联系，使人们对物体、物质和自然现象的属性认识和掌握，达到从定性到定量的转化，增强对自然规律认识的确信性和科学性。

#### 1.1.2 计量

计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动。

相对于“计量是实现单位统一和量值可靠的测量”这一流行的定义，上述定义避免了将计量狭隘理解为就是对某种特定量进行的测量，同时也将测量活动之外的其他科技活动、法制活动、管理活动等包括在内。该定义涵盖了两方面内容：计量既是一门学科——计量学，又是一项由政府主导的社会事业——计量工作。

实现单位统一和量值准确可靠是计量的根本出发点。建立各个量的单位，可以使各种物理量得以分别定性和相互区分。单位统一是量值准确的前提。量值准确是指测量结果具有合理的准确度；可靠是指在不同条件下，同类被测量的量值具有可比性，并能展示其有效性。因此，可以广义地认为计量（测量）是对量的定性分析和定量确认的过程。为了满足该过程的要求，必须由政府部门和社会组织开展一系列的活动，包括进行科学研究和测量技术研究，建立基准标准和保证测量结果具有溯源性的技术条件，制定法律、法规和技术规范，开展行政监督管理等。

#### 1. 计量的对象

计量的对象主要是物理量，随着科技进步和社会发展，已经扩展到了工程量、化学量、生理量，当前普遍开展的有几何、温度、力学、电磁、电子、时间频率、光学、电离辐射、声学 and 化学量十大计量。此外，在生物、医学、环保、信息、航天和软件等高新技术领域，相关的专业计量测试也已得到开展。

## 2. 计量的内容

计量的内容通常可概括为六个方面：计量（测量）单位和单位制；计量器具（测量仪器），包括实现或复现计量单位的计量基准、标准和工作计量器具；量值传递和量值溯源，包括检定、校准、测试、检验与检测；物理常量、材料与物质特性的测定；不确定度、数据处理与测量理论及其方法；计量管理、计量保证与计量监督。

## 3. 计量的特点

计量的特点可概括为准确性、一致性、溯源性和法制性四个方面。

(1) 准确性是指测量结果与被测量真值的一致程度。由于实际上不存在完全准确无误的测量，因此在给出量值的同时，必须给出适应于应用目的或实际需要的不确定度或误差范围，否则，所进行的测量的质量（品质）就无从判断，量值也就不具备充分的社会实用价值。量值的准确，是指在一定的不确定度、误差极限或允许误差范围内的准确。

(2) 一致性是指在计量单位统一的基础上，无论何时、何地、采用何种方法、使用何种计量器具以及由何人进行测量，只要符合有关要求，测量结果就应在给定区间内表现一致，即测量结果应该是可重复、可再现（复现）、可比较的。

(3) 溯源性是指任何一个测量结果或计量标准的量值，都能通过一条具有规定不确定度的连续比较链与计量基准联系起来，使所有的同种量值都可以按照这条比较链，通过校准来向测量的源头追溯，溯源到同一计量基准（国家基准或国际基准），使准确性和一致性获得技术保证。如果量值出于多源或多头，必然会造成技术和管理上的混乱。

(4) 法制性源于计量的社会性。量值的准确可靠不仅有赖于科学技术手段，也需要相应的法律、法规、规范和行政监督管理。特别是对于国计民生影响明显、涉及公众利益和可持续发展的领域，或者需要特殊信任的领域，必须由政府部门主导建立法制保障，否则，量值的准确性、一致性和溯源性就无法实现，计量的作用也难以发挥。

计量的上述四个特性是普通测量一般不具备也不必具备的，因此，计量比普通测量更为严格。

### 1.1.3 计量学

计量学是关于测量的科学。计量学涵盖了有关测量的理论与实践的各个方面，是研究各种物理量测量技术的学科。物理量的概念是根据实际测量结果加以定义的，而描述物理量之间关系所用的数学表达式可以视为物理定律。每个物理量定义和物理定律都是对自然规律从定性认识到定量认识的一个飞跃。因此，计量学就是提高物理量量化精确性的科学。计量学的理论基础是物理学和数学。

根据计量学研究的领域和应用方面的不同，计量学可以按照不同的方式分类。目前国际上倾向于将计量学分为科学计量、工程计量和法制计量三类，分别概括了计量学的基础、应用和社会事业。

(1) 科学计量是指基础性、探索性、先行性的计量科学研究，利用最新的科技成果精确定义和实现计量单位，并为科技创新和高科技的发展提供可靠的测量技术基础。科学计量属于精确科学，通常是国家计量研究机构的主要任务，包括计量单位与单位制的研究、计量基准与标准的研制、物理常量与精密测量技术的研究、量值溯源与量值传递系统的研究、量值

比对方法与测量不确定度的研究。定义单位和建立计量单位体系是科学计量的核心内容。

(2) 工程计量也称为工业计量,是指各种工程、工业、交通运输、能源、信息等行业中的应用计量,例如原料的物流和消耗的计量测试,生产工艺流程的监控,产品(工程)质量与性能的测试,等等。随着产品(工程)的技术含量不断提高以及社会需求不断增长,工程计量在保证产品的国内、国际市场竞争能力、提供全球化贸易所必需的一致性和互换性,以及消除贸易壁垒等方面将发挥越来越重要的作用。工程计量测试能力是生产力发展的重要因素,它标志了国家的科学技术现代化水平和实力。

(3) 法制计量的主要内容包含两个方面:一是国家政府机关通过制定、实施计量法律、法规、规章,对一部分计量单位、测量方法、测量(计量)器具、测量(计量)数据和测量实验室实行法定监督管理;二是使用计量器具的单位,依据法规或合同规定,保证与贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境监测、资源控制、社会管理等有关的测量(计量)结果的公正性和可靠性,以取得用户的信任。

#### 1.1.4 测试

测试是测量和试验的综合。虽然测试工作由来已久,但迄今仍难以给出一个测试的明确定义及工作范围。测试是为了获取有用信息,而信息是以信号的形式表现的。针对具体的研究对象,如何估计其模型结构,如何设计试验方法,从而能最大限度地突出所需信息,并以较为明显的信号形式将其表现出来,这些无疑也是测试工作的一部分。可见,测试工作是一件非常复杂的工作,需要多种学科知识的综合运用。

测试技术是测量技术和试验技术的总称,依靠一定的科学技术手段定量地描述事物的状态变化和特征。从广义的角度而言,测试技术涉及试验设计、模型试验、传感器、信号调理和处理、误差理论、控制工程、系统辨识和参数估计等内容;从狭义的角度来讲,测试技术是指在选定的激励方式下所进行的信号检测、变换、处理、显示、记录以及电量输出的数据处理工作。

测试工作的基本任务是通过测试手段,对研究对象中人们感兴趣的有关信息量做出比较客观、准确的描述,使人们对它有一个恰当全面的认识,并达到进一步改造和控制研究对象的目的。

测试的基本任务是获取有用的信息,通常包含测量、计量、计算、检验、判断等多层含义,相比单纯的测量有着更丰富的内容。测试的范畴包括以下几方面:

- (1) 将被测量与标准量相比较,以获得被测对象的数值结果;
- (2) 将被测量与设定值比较,以对被测对象进行性能、质量、功能等方面的评价,这种评价常采用合格/不合格、好/坏等定性指标或等级的分类值表示;
- (3) 对测试数据进行处理,处理结果可形成各种信息,也可执行不同的操作。

## 1.2 计量学的发展

### 1.2.1 计量学的创立

现代计量学的创建可追溯至17世纪前后,欧洲的科学在这一时期发展迅速,物理学已经成为一门测量科学或称实验科学,并已引入了“物理量”的概念。物理量通过实际测量加以

定义，并且使用数学来建立相关物理量之间的关系，用以描述或论证物理现象，创立了科学理论，为计量学的发展奠定了基础。

牛顿在研究天体运动和物体运动定律时，对质量、动量、惯性和力等基本概念建立了确切的科学定义。他在 1685 年完成了万有引力定律和机械运动三大定律的论证和描述，建立起了完整的经典力学体系。牛顿力学对电磁学、热学等领域的研究产生了重大影响，也为计量学的创立和测量技术的发展奠定了基石。

从 18 世纪中期到末期，出现了以蒸汽机的广泛使用为标志的第一次技术革命。随着蒸汽机的研制和改进，热力（机）学得到了充分发展。经典力学和热力学成为了科技发展的理论基础，计量学中的力学、热工、温度、几何量计量随之发展起来。

到 19 世纪，便进入了以电的应用为标志的第二次技术革命时期。随着电磁理论的建立、深入和广泛应用，电磁计量、无线电计量得到了迅速推动。同时，在 19 世纪，热机研究也进一步发展，并最终形成了专门研究能量关系的学科——热力学。到 19 世纪中叶为止，化学尚未形成一门系统性的学科。1869 年门捷列夫公布了元素周期律，从而将化学知识纳入了科学的体系。18 世纪和 19 世纪的科学和测量技术的发展，为计量学的最终创立打下了基础。

1875 年，《米制公约》的签订促进了各国的计量制度走向统一，标志了现代计量学的初步建立。20 世纪，计量在世界范围内得到了全面发展，技术飞速进步。在世纪之初，各主要国家都已经建立起现代计量技术研究机构，而且许多国家都在本国原有的度量衡制的基础上采纳了米制。到 20 世纪五六十年代，大多数国家已经接受了国际单位制，参加了国际法制计量公约组织，建立起了本国的计量技术、行政、法规体系。

### 1.2.2 米制的产生与发展

18 世纪中叶，世界各国的计量制度和计量单位杂乱无章，科学家们各自使用各种计量单位来表述他们的实验结果。这种状况对交流和科学研究都产生了影响。统一计量单位制度成为了世界各国科学、文化、经济、交流的迫切需求，科学家们开始寻找一种适用于各国的通用计量单位制。

米制建立于 18 世纪 90 年代，是法国大革命的第一个科学成果。1790 年，国民议会责成巴黎科学院组成计量改革委员会；1791 年，委员会提议以赤道到北极的地球子午线的 1 千万分之一作为基本长度单位米，而质量的单位则是 1 立方分米的水在密度最大（温度为 4℃）时的质量。由于这种单位制完全以米为基础，因此称为米制。如图 1.1 所示即为当时所测量的子午线的南北两个端点位置：北端的法国敦刻尔克钟楼和南端的巴塞罗那蒙特惠奇堡。



(a) 北端的法国敦刻尔克钟楼



(b) 南端的巴塞罗那蒙特惠奇堡

图 1.1 在 18 世纪 90 年代确定米标准时所测子午线弧的南北两端

1799年6月22日，经测量得到的米和千克的两件原器被保存进巴黎的共和国档案局内，并从法律上给出了1米和1千克的值。尽管不久就发现这两件原器的值和米与千克的定义之间稍有出入，但由于测量不易，因此就直接以这两件原器作为长度单位米和质量单位千克的基准。如图1.2所示为1889年国际计量局对第一代米原器改良设计后所制作的铂铱合金米原器。如图1.3所示则为保存在三层玻璃罩内的国际千克原器。



图 1.2 第一代米原器改良设计后所制作的铂铱合金米原器

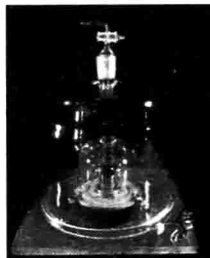


图 1.3 国际千克原器

19世纪后期，米制已经被许多欧美国家所接受，此时，将力学、热学、光学、静电学中的力学量、热工量、电磁学量和光学量的单位用一种逻辑关系加以联系成为了迫切需求。英国科学促进协会（BAAS）的标准委员会选定厘米、克和秒三个基本单位构成了力学单位制（CGS），它是第一个一贯单位制，但仅适用于力学领域。

1881年，第一次国际电学大会采用了安培、伏特和欧姆等实用单位，构成了“国际制”实用单位。到19世纪末，又逐渐增加了库仑、法拉、焦耳、瓦特、亨利、韦伯、高斯、麦克斯韦等单位，它们可以满足电学领域的一贯性原则，但如果与力学量同时出现，一贯性原则就不能得到保持。1901年，意大利科学家乔吉建议将米·千克·秒单位制中的力学单位和实用电学单位结合起来，形成包括长度、时间、质量和一个电学性质质量四个基本量的一贯单位制。1946年，国际计量委员会正式肯定了采用米·千克·秒·安培单位制（MKSA）的决定，并在后来成为了国际单位制的一部分。

### 1.2.3 国际单位制

第二次世界大战后，出现了国际间科技、经济合作进一步加强的趋势，但在科教、商贸中还存在着多种不同的计量单位制，如技术领域采用米·千克·秒制，工程领域采用米·千克力·秒制，物理学家使用厘米·克·秒制，法国采用米·吨·秒制，英语国家采用英尺·磅·秒制，等等。多种单位制的长期并存严重影响了国际间的交流和合作。

1954年，第十届国际计量大会决定采用米、千克、秒、安培、开氏度和坎德拉六个单位作为建立新单位制的基本单位。1960年，第十一届国际计量大会正式命名为“国际单位制（SI）”。

随着计量科学技术的发展，国际单位制基本单位的定义和复现方法得到了进一步的更新和完善，基准的科技水平和准确度也不断提高。1967年，第十三届国际计量大会将热力学温度单位开氏度（ $^{\circ}\text{K}$ ）改称为开尔文（ $\text{K}$ ）；1971年，第十四届国际计量大会将物质的量的单位摩尔增列为国际单位制的第七个基本单位。目前，由于频率测量的不确定度最小，因此利用基本物理常数导出单位的量纲，将各种物理量的测量转化为频率测量，是现在国际单位制的发展趋势。

#### 1.2.4 基本物理常数

基本物理常数是具有最佳恒定性的物理量，它不因时间、地点而异，也不受环境和实验条件以及材料性能的影响。随着物理学的研究从宏观进入微观，人们发现微观的量子效应比宏观现象具有更好的不变性。根据原子物理学和量子力学理论，我们可以通过电子质量、光速、普朗克常数、玻尔兹曼常数和阿伏伽德罗常数等一系列基本物理常数，来建立起微观量和宏观量之间的确定关系，即原则上可以由微观量定义计量单位。自 20 世纪 80 年代以来，量子电子学、激光、超导、纳米等技术的迅速发展，使得长度和电学计量单位都已经改为由基本物理常数和准确度的频率测量来加以定义和复现。

基本物理常数之间存在着密切的关系。测量某一个常数可以使用多种方法和手段，利用各种常数之间的数学关系式，可以对不同方法独立测得的各种常数或其组合量加以检验，综合考察它们在各自测量误差范围内是否一致，从中发现系统误差，改进实验方法。在数据处理中，常采用最小二乘法平差，得出常数的一组最佳值作为国际上的推荐值。

#### 1.2.5 测量结果的评定与表述

对测量数据进行分析处理和误差评估是计量学中的重要内容。近年来，国际上普遍引入测量不确定度来对测量结果的水平或质量进行评定。

1963 年，美国国家标准局的计量专家在研究“仪器校准系统的精密度和准确度的估计”时，提出了定量表示不确定度的建议；1980 年，国际计量局（BIPM）召集和成立了不确定度表示工作组，11 个国家计量院的专家参加起草了《不确定度表述》建议书《INC—1（1980）》，指出需要对不确定度的评定与表示规定一个统一的、一般可接受的原则；1981 年，国际计量委员会（CIPM）批准了上述建议书，并发布了国际计量委员会建议书《C1—1981》，后来又发布了《C1—1986》；自 20 世纪 80 年代以来，《C1—1986》建议的不确定度表示方法被世界各国的多个实验室和计量机构所使用，但《INC—1（1980）》只是一份十分简单的纲要性文件，缺乏对于要点在具体工作中的实施的实用、详细的指导。由于国际标准化组织（ISO）能更好地反映工商界以及各学科的广泛需求，1986 年，CIPM 要求 ISO 在《INC—1（1980）》的基础上，起草一份能广泛应用的导则。此项工作还得到了 BIPM、国际电工委员会（IEC）、国际临床化学联合会（IFCC）、国际理论化学与应用化学联合会（IUPAC）、国际理论物理与应用物理联合会（IUPAP）和国际法制计量组织（OIML）6 个国际组织的支持。1993 年，以这 7 个国际组织的名义发布了《测量不确定度表示指南》（简称为 GUM）第一版，并由 ISO 出版。GUM 是国际计量界总结大量测量实践和误差理论研究的重要成果，对测量不确定度的术语定义、概念、评定方法、报告的表达方式等各方面都进行了明确统一的规定。中国国家质量技术监督局组织计量专家对 GUM 进行了深入研讨，于 1999 年 1 月批准发布了适合我国国情的 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》，原则上等同采用 GUM 的基本内容。

#### 1.2.6 计量学基本术语的统一

计量学基本术语的统一，对于形成计量界的共同语言、开展学术交流、普及计量知识、正确评价计量测试结果、实现法制计量管理规范化等方面而言，都具有十分重要的意义。

国际上最早开展统一计量学基本术语工作的组织是 OIML，1969 年公布了国际建议《法



制计量学基本名词》(简称 VML), 并推荐给各成员国使用。为了使计量学通用基本名词在国际范围内得到统一理解, BIPM、IEC、ISO 和 OIML 成立了专门的国际联合工作组, 以采取联合行动来制定计量学通用的术语词汇文本, 并于 1984 年以这 4 个国际组织的名义、用《ISO 导则》的形式发表了《国际通用计量学基本名词》(简称 VIM)。该文本在国际上得到广泛采用, 为统一计量术语和概念发挥了积极作用, 但第一版文本中仍有若干不完善之处, 因此在原有的 4 个国际组织的基础上, 又增加了 IFCC、IUPAC 和 IUPAP 3 个国际组织, 由这 7 个国际组织的专家共同修订, 1993 年最终定稿为《国际通用计量学基本术语》。

我国自 20 世纪 70 年代起便积极采用国际组织制定的“计量学基本名词”。1982 年, 国家计量局着手组织编写 JJF 1001《通用计量术语及定义》, 并在之后多次修订。《通用计量术语及定义》尽可能与国际通用计量名词相一致, 同时又十分注意符合中国的计量法律法规实际, 力求内容充实提高, 满足使用要求, 大大推进了计量名词的统一和正确使用。

## 1.3 国际计量组织

### 1.3.1 《米制公约》及其组织机构

#### 1. 《米制公约》

在 18 世纪末米制创立以后, 便开始向全世界普及。1870 年 8 月, 在法国巴黎召开了第一次“国际米制委员会”会议, 24 国代表出席, 一致同意以巴黎档案局的米和千克原器作为国际上统一单位制的基础。1875 年 3 月 1 日, 法国政府召开“米制外长会议”, 20 个国家的代表和科学家参加; 5 月 20 日, 其中 17 国的全权代表代表本国政府正式签署了《米制公约》(Metric Convention)。我国于 1976 年 12 月加入《米制公约》。至 1999 年年底, 《米制公约》的签约国已达 48 个。

#### 2. 国际计量大会

国际计量大会(CGPM)是米制公约的最高组织形式, 由米制公约成员国的代表组成。CGPM 的主要任务包括以下几方面。

- ① 审议国际计量委员会的工作报告, 就重大问题做出决议;
- ② 讨论、制定并督促实施保证国际计量单位制推广和发展的必要措施;
- ③ 批准新建立的国际计量基准, 通过具有国际意义的科学技术决议或单位的新定义;
- ④ 通过有关国际计量局的组织和发展的重大决议;
- ⑤ 选举国际计量委员会委员。

#### 3. 国际计量委员会

国际计量委员会(CIPM)是米制公约的领导机构, 接受 CGPM 的领导, 负责 CGPM 休会期间的咨询和组织工作。其主要任务包括以下几方面。

- ① 组织成员国承担 CGPM 决定的计量任务, 并进行指导和协调;
- ② 负责监督国际原器和国际基准的建立和保存;
- ③ 设立咨询委员会, 并指导其工作;