



普通高等教育“十三五”规划教材

# 建筑环境与能源应用工程 实验教程

牛永红 李义科 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



普通高等教育“十三五”规划教材

# 建筑环境与能源应用工程 实验教程

牛永红 李义科 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书共分为实验基础知识、专业基础课程实验、专业课程实验三部分，包括 12 个章节，系统地介绍了建筑环境专业涉及的实验基础知识、常用的实验测试设备、技术原理和方法，以及传热学、工程热力学、流体力学 3 门专业基础课程及泵与风机、工业通风、供热工程、锅炉及锅炉房设备、空调工程、制冷技术 6 门专业课程共 76 个实验项目，内容包括实验目的、原理、装置及设备、方法及步骤、实验结果处理与分析等，部分实验为综合性实验，培养学生运用所学知识进行实验设计、分析及动手解决工程实际问题的能力，适应实验教学改革的发展趋势和对创新能力培养的要求。

本书可作为高等院校供热工程、建筑环境与能源应用工程、热能工程及其相关专业师生的实验教学指导用书，也可供土建、暖通、水利、热能、冶金、环保、化工等相关领域科研、设计及管理人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

建筑环境与能源应用工程实验教程 / 牛永红, 李义  
科编著. — 北京：中国水利水电出版社, 2019. 3  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5170-7524-0

I. ①建… II. ①牛… ②李… III. ①建筑工程—环  
境管理—高等学校—教材 IV. ①TU-023

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第051427号

|      |                                                                                                                                    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 普通高等教育“十三五”规划教材<br>建筑环境与能源应用工程实验教程<br>JIANZHU HUANJING YU NENGYUAN YINGYONG<br>GONGCHENG SHIYAN JIAOCHENG                          |
| 作 者  | 牛永红 李义科 编著                                                                                                                         |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心 (零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                      |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                    |
| 印 刷  | 清淤永业 (天津) 印刷有限公司                                                                                                                   |
| 规 格  | 184mm×260mm 16 开本 19.5 印张 449 千字                                                                                                   |
| 版 次  | 2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷                                                                                                  |
| 印 数  | 0001—2000 册                                                                                                                        |
| 定 价  | 49.00 元                                                                                                                            |

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

课程实验是高等院校理工科学生进行综合能力和素质培养的重要实践性教学环节之一。建筑环境与能源应用工程专业课程实验是该专业学生接受系统实验方法、进行技能训练和科学研究的重要基础,是掌握专业知识、获得专业设计技能、增强独立工作能力的重要途径。

本书共分为实验基础知识、专业基础课程实验、专业课程实验三部分,包括12个章节,系统地介绍了建筑环境专业涉及的实验基础知识、常用的实验测试设备、技术原理和方法,以及传热学、工程热力学、流体力学3门专业基础课程及泵与风机、工业通风、供热工程、锅炉及锅炉房设备、空调工程、制冷技术6门专业课程共76个实验项目,内容包括实验目的、原理、装置及设备、方法及步骤、实验结果处理与分析等,部分实验为综合性实验,培养学生运用所学知识进行实验设计、分析及动手解决工程实际问题的能力,适应实验教学改革的发展趋势和学生创新能力培养的要求。

本书可作为高等院校供热工程、建筑环境与能源应用工程、热能工程及其相关专业师生的实验教学指导用书,也可供土建、暖通、水利、热能、冶金、环保、化工等相关领域科研、设计及管理人员参考。

本书由内蒙古科技大学牛永红、李义科教授编著。编撰人员及分工为:内蒙古科技大学牛永红教授对绪论及其他11个章节进行了编撰;参与编撰的人员有内蒙古工业大学研究生陈佳艺(第3章),内蒙古科技大学顾洁教授(第5章),李义科教授、陈俊俊教授(第6章),董进忠高级工程师(第9章),西华大学吕原丽博士(第12章)。内蒙古科技大学研究生修诗博参与了本书各章节的编写,修诗博、刘琨琨、蔡尧尧、王倩倩、宋子墨对本书进行了编辑和整理。本书由牛永红教授统稿,李义科教授主审。在撰写过程中参考了很多相关著作和文献资料,在此对原作者表示衷心的感谢!

由于水平有限,编写过程中可能出现疏漏和错误,恳请读者批评指正。

本教程获得内蒙古科技大学教材基金项目，内蒙古科技大学 2017 年度教学（教改）研究项目（JY2017030）、内蒙古自治区教育科学“十三五”规划课题（NGJGH2017089）资助，特此感谢！

作者

于内蒙古科技大学

## 前言

## 第1部分 实验基础知识

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第1章 绪论                | 3  |
| 1.1 概述                | 3  |
| 1.2 实验教学特点及要求         | 4  |
| 第2章 实验基础知识            | 5  |
| 2.1 测量误差及分析           | 5  |
| 2.2 测量数据的处理           | 16 |
| 第3章 常用测试用仪表           | 20 |
| 3.1 常用仪表概述            | 20 |
| 3.2 温度测量仪表            | 21 |
| 3.3 相对湿度测量仪表          | 27 |
| 3.4 流速测量仪             | 29 |
| 3.5 压力测量仪表            | 34 |
| 3.6 流量测量仪表            | 41 |
| 3.7 辐射热测量仪表           | 47 |
| 3.8 GDYK-206 甲醛测定仪    | 48 |
| 3.9 testo 885 热成像仪    | 49 |
| 3.10 PTH-A24 精密温湿度巡检仪 | 50 |
| 3.11 空气质量检测仪          | 51 |

## 第2部分 专业基础课程实验

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第4章 传热学             | 55 |
| 实验一 稳态球体法测定粒状材料导热系数 | 55 |

|              |                               |            |
|--------------|-------------------------------|------------|
| 实验二          | 非稳态（准稳态）法测量材料的导热性能 .....      | 59         |
| 实验三          | 强迫对流表面传热系数的测定 .....           | 61         |
| 实验四          | 空气在水平管外自然对流时表面传热系数的测定 .....   | 64         |
| 实验五          | 用平板法测材料导热系数实验 .....           | 67         |
| 实验六          | 中温法向辐射时物体黑度测定 .....           | 72         |
| 实验七          | 综合传热性能测定 .....                | 75         |
| 实验八          | 翅片管束外放热和阻力系数测定 .....          | 77         |
| 实验九          | 等截面伸展体传热特性 .....              | 85         |
| 实验十          | 自由对流换热系数测定 .....              | 88         |
| 实验十一         | 热管换热器传热系数测定 .....             | 90         |
| <b>第 5 章</b> | <b>工程热力学 .....</b>            | <b>93</b>  |
| 实验一          | 二氧化碳 $p-V-T$ 关系测定实验 .....     | 93         |
| 实验二          | 水蒸气饱和压力与温度关系实验 .....          | 98         |
| 实验三          | 气体定压比热容测定实验 .....             | 100        |
| 实验四          | 真空条件下水蒸气饱和蒸汽压及汽化潜热的测定实验 ..... | 105        |
| 实验五          | 空气绝热指数测定实验 .....              | 107        |
| 实验六          | 喷管实验 .....                    | 109        |
| <b>第 6 章</b> | <b>流体力学 .....</b>             | <b>116</b> |
| 实验一          | 流量及阻力系数测定 .....               | 116        |
| 实验二          | 流体静力学实验 .....                 | 120        |
| 实验三          | 不可压缩流体恒定流能量方程实验 .....         | 123        |
| 实验四          | 雷诺实验 .....                    | 125        |
| 实验五          | 动量方程验证实验 .....                | 127        |
| 实验六          | 沿程水头损失实验 .....                | 129        |
| 实验七          | 管道局部水头损失实验 .....              | 131        |
| 实验八          | 孔口与管嘴流量系数验证实验 .....           | 134        |
| 实验九          | 文丘里流量计及孔板流量计测定实验 .....        | 137        |
| 实验十          | 流量和流速的测定实验 .....              | 139        |
| 实验十一         | 动量方程验证实验 .....                | 144        |
| 实验十二         | 气体紊流射流实验 .....                | 146        |

### 第 3 部分 专业课程实验

|              |                     |            |
|--------------|---------------------|------------|
| <b>第 7 章</b> | <b>泵与风机 .....</b>   | <b>153</b> |
| 实验一          | 泵的结构及性能实验 .....     | 153        |
| 实验二          | 风机的结构及性能实验 .....    | 154        |
| 实验三          | 水泵轴向力平衡装置设计实验 ..... | 154        |
| 实验四          | 空压机结构实验 .....       | 155        |
| 实验五          | 离心风机性能曲线的测定 .....   | 156        |
| 实验六          | 离心泵特性曲线实验 .....     | 159        |
| 实验七          | 离心泵串并联实验 .....      | 162        |
| 实验八          | 离心泵综合性能测定实验 .....   | 167        |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| <b>第 8 章 工业通风</b>       | 173 |
| 实验一 粉尘真密度的测定            | 173 |
| 实验二 工作区含尘浓度的测试          | 175 |
| 实验三 风管风流点风压和点风速测定       | 179 |
| 实验四 旋风除尘器性能实验 (一)       | 181 |
| 实验五 旋风除尘器性能实验 (二)       | 183 |
| 实验六 通风风道内阻力测定           | 188 |
| 实验七 袋式除尘器性能测定演示         | 189 |
| 实验八 电除尘器性能试验            | 191 |
| <b>第 9 章 供热工程</b>       | 200 |
| 实验一 采暖系统模拟演示实验          | 200 |
| 实验二 散热器热工性能实验           | 201 |
| 实验三 热网水压图水力工况实验         | 204 |
| 实验四 空气加热器性能测试实验         | 206 |
| <b>第 10 章 锅炉及锅炉房设备</b>  | 213 |
| 实验一 煤的工业分析              | 213 |
| 实验二 燃料发热量测定             | 219 |
| 实验三 煤的元素分析实验            | 222 |
| 实验四 锅炉实验台模型实验           | 224 |
| 实验五 锅炉热平衡实验             | 230 |
| 实验六 工业锅炉工作原理            | 236 |
| 实验七 燃气快速热水器的热工性能测定实验    | 240 |
| 实验八 燃气灶具性能实验            | 243 |
| 实验九 锅炉内胆水温检测            | 247 |
| <b>第 11 章 空调工程</b>      | 249 |
| 实验一 空调过程及空气热湿处理测定       | 249 |
| 实验二 风管内风压、风速、风量的测定      | 251 |
| 实验三 循环式空调过程实验装置         | 255 |
| 实验四 综合中央空调实验装置综合分析实验    | 259 |
| 实验五 室内空气品质的测定           | 261 |
| 实验六 热管换热器性能实验           | 266 |
| 实验七 空气气象参数的测定实验         | 269 |
| 实验八 空调系统运行工况实验          | 274 |
| <b>第 12 章 制冷技术</b>      | 279 |
| 实验一 制冷压缩机性能实验           | 279 |
| 实验二 制冷系统循环及热力计算         | 281 |
| 实验三 小型水源热泵机组性能系数测定      | 282 |
| 实验四 单级蒸汽压缩式制冷机性能实验      | 284 |
| 实验五 单级压缩无回热制冷循环实验       | 288 |
| 实验六 单级压缩有回热与无回热制冷循环对比实验 | 292 |
| 实验七 热力系统循环过程中的能量平衡实验    | 295 |

|      |                      |     |
|------|----------------------|-----|
| 实验八  | 制冷（热泵）循环演示装置实验 ..... | 298 |
| 实验九  | 制冷（热泵）故障实验 .....     | 300 |
| 实验十  | 分体式空调故障及排除方法实验 ..... | 302 |
| 参考文献 | .....                | 303 |

# 第 1 部分

# 实验基础知识



## 1.1 概 述

教育部关于印发《普通高等学校本科专业目录（2012 年）》《普通高等学校本科专业设置管理规定》等文件的通知中，将建筑环境与设备工程专业和建筑节能技术与工程、建筑设施智能技术（部分）专业合并为建筑环境与能源应用工程专业（其早期名称为供热通风与空调专业）。新专业体现了现代建筑对舒适性控制和建筑节能并重的要求。建筑环境与能源应用工程专业（以下简称“建环专业”）主要培养能够从事以下 3 个方面的专业技术人才：①能从事建筑物采暖、空调、通风除尘、空气净化和燃气应用等系统与设备以及相关的城市供热、供燃气系统与设备的设计、安装调试与运行工作；②能够以工程技术为依托，以建筑智能化系统为平台，对工业建筑及大型现代化楼宇中环境系统和供能设施的设计、安装、估价、调试、运行、维护、技术经济分析和管理；③能适应低碳经济建设与社会可持续发展的需要，具备建筑节能设计、建造、运行管理的基本理论与专业技能，知识面宽，具有向土建类相关领域拓展渗透的能力，适应能力和实际工作能力。建环专业的教学培养目标非常注重理论与实践的结合，注重学生实践能力与工程能力及综合素质的培养。课程实验是高等院校理工科学生进行综合能力和素质培养的重要实践性教学环节之一。建环专业课程实验是该专业学生接受系统实验方法、进行技能训练和科学研究的重要基础，是掌握专业知识、获得专业设计技能、增强独立工作能力的重要途径。

《建筑环境与能源应用工程实验教程》（以下简称《实验教程》）是建环专业重要的实验教学指导用书。本书共分为实验基础知识、专业基础课程实验、专业课程实验三部分，包括绪论及 11 个章节，系统地介绍了建筑环境与能源应用工程专业涉及的实验基础知识、常用的实验测试设备、技术原理和方法，以及传热学、工程热力学、流体力学 3 门专业基础课程及泵与风机、工业通风、供热工程、锅炉及锅炉房设备、空调工程、制冷技术 6 门专业课程共 76 个实验项目，内容包括实验目的、原理、装置及设备、方法及步骤、实验结果处理与分析等，部分实验为综合性实验。

通过实验教学环节使学生在学校受到了工程应用的实际训练，掌握了专业相关系统及设备的操作、测试和分析方法，使学生将理论和实践结合起来，培养学生运

用所学知识进行实验设计、分析及动手解决工程实际问题的能力,提高综合分析问题和解决问题的能力。同时通过实践性环节的教学,培养学生吃苦耐劳、团结协作的精神,激励学生的学习兴趣和创造能力,在工作中体现出“能力强、上手快”的特点。

## 1.2 实验教学特点及要求

当前用人单位对大学毕业生的要求更加注重其实际动手能力和创新能力。建环专业本科教学必须适应这些要求,才能使学生在激烈的就业市场竞争中拥有竞争力。实验教学环节无疑是完成培养目标,使学生知识、能力和素质得到提高的关键环节,完善实验教学内容是当前建环专业本科生实现培养目标的重要工作。适应实验教学改革的发展趋势和对培养学生创新能力培养的要求。

结合建环专业本科培养目标需求,搞好实践性教学环节,对培养学生良好的意志品质、提高学生综合素质与动手实践应用能力具有重要意义。

### 1.2.1 实验教学特点

实验教学环节具有以下特点。

(1) 设置独立的实验教学环节。每一项实验都具有针对性,同时整个实验环节又组成一个系统工程,不仅巩固理论课教学知识,而且提高学生的动手能力及创造能力。

(2) 每一个实验都要按理论知识的学习确定训练任务及方向,使理论与实践相结合落到实处,并逐项重点突破,使学生能够应用所学知识进行实验设计、分析及解决问题,使学生综合素质得到培养和提高。

### 1.2.2 实验基本要求

实验的基本要求如下。

(1) 掌握正确使用仪器、仪表的基本方法;正确采集实验原始数据;正确进行实验数据处理的基本方法。

(2) 熟悉常用的仪器仪表、设备及实验系统的工作原理;对实验结果具有初步分析能力,可以给出比较明确的结论。

(3) 了解实验内容与知识单元课程教学内容间的关系。

实验教学应有完备的实验教学大纲、教学计划、任务书、实验指导书等教学文件。实验设备拥有率应保证操作性实验每组不多于 5 人,演示性实验每组不多于 20 人。实验内容可根据本校的专业方向和具体情况有所侧重,提倡开设综合性实验。

测量是人类认识事物本质不可缺少的手段。通过测量和实验能使人们对事物获得定量的概念、发现事物的规律性。科学上很多新的发现和突破都是以实验测量为基础的。测量就是用实验的方法,将被测物理量与所选用作为标准的同类量进行比较,从而确定它的大小。

实验测量是实验技术的基础,通过一定的实验测量手段和测量方法,人们便可获得需要的未知参数。实验过程中由于实验设备的不完善,实验仪器精度的限制及周围环境的影响,以及实验测试人员的观察力、熟练程度、测量程序等限制,实验观测值和它的客观真实值之间总是存在一定的差异。因此,在测量实践中,尽管常常使用同一套仪表,但在相同的环境条件下采用同样的测量方法,对同一稳定参数多次测量却得不到相同的测量结果,这种情况的出现是因为存在测量误差的缘故,这个不同在数值上表现为误差。人们进行实验的目的,通常是为了获得尽可能接近真值的实验结果,如果实验误差超出一定限度,实验工作及由实验结果所得出的结论就失去了意义。

## 2.1 测量误差及分析

实验误差的存在具有必然性和普遍性,人们只能根据需求和可能,将其限制在一定范围内而不可能完全加以消除。为了评定实验数据的精确性或误差,认清误差的来源及其影响,需要对实验的误差进行分析和讨论。由此可以判定哪些因素是影响实验精确度的主要方面,从而在以后的实验中进一步改进实验方案,缩小实验观测值和真实值之间的差值,提高实验的精确性。

### 2.1.1 误差的基本概念

#### 1. 真值与平均值

真值是指在某一时刻和某一状态下,待测物理量客观存在的确定值,也称理论值或定义值。要想得到真值,必须利用理想的量具或实验仪器进行无误差的实验,因此真值通常是无法测得的。若在实验中测量的次数无限多,根据误差的分布定律,正负误差的出现概率相等。再经过细致地消除系统误差,将测量值加以平均,可以获得非常接近于真值的数值。但是实际上实验测量的次数总是有限的,用有限测量值求得的平均值只能是近似真值,常用的平均值有下列几种。

(1) 算术平均值。算术平均值是最常见的一种平均值。

设  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $\cdots$ 、 $x_n$  为各次测量值,  $n$  代表测量次数, 则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

(2) 几何平均值。几何平均值是将一组  $n$  个测量值连乘并开  $n$  次方求得的平均值, 即

$$\bar{x}_L = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \cdots \cdot x_n} \quad (2.2)$$

(3) 均方根平均值, 即

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (2.3)$$

(4) 对数平均值。在化学反应、热量和质量传递中, 其分布曲线多具有对数的特性, 在这种情况下表征平均值常用对数平均值。

设两个量  $x_1$ 、 $x_2$ , 其对数平均值为

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (2.4)$$

应该指出, 两个量的对数平均值总小于算术平均值。当  $1/2 \leq x_1/x_2 \leq 2$  时, 可以用算术平均值代替对数平均值, 引起的相对误差小于 4.4%。

以上介绍各平均值的目的是要从一组测定值中找出最接近真值的那个值。在建筑环境设备实验和科学研究中, 数据的分布较多属于正态分布, 所以通常采用算术平均值。

## 2. 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因, 一般分为系统误差、偶然误差、过失误差 3 类。

(1) 系统误差。系统误差是指在一定的实验条件下, 由某个或某些因素按照某一确定规律起作用而形成的误差。系统误差产生的原因很多: 如测量仪器刻度不准, 仪表零点未校正; 周围环境如温度、压力、湿度的改变偏离校准值; 实验人员的习惯和偏向使读数偏高或偏低等, 也可来自实验方案本身的不完善引起的误差。当实验条件一经确定, 系统误差就获得一个客观上的恒定值。当改变实验条件时, 就能发现系统误差的变化规律。只有对系统误差产生的原因有了充分的认识, 才能对其进行校正或设法消除。

(2) 偶然误差。偶然误差也称随机误差, 在已消除系统误差的一切量值的多次重复观测中, 所测数据仍在末位数字上有差别, 而且它们的绝对值和符号的变化没有确定的规律, 时大时小、时正时负, 这类误差称为偶然误差或随机误差。偶然误差产生的原因不明, 因而无法控制和补偿。但是, 对某一量值作足够多次的等精度测量后, 就会发现偶然误差完全服从统计规律, 误差的大小或正负的出现完全由概率决定。因此, 随着测量次数的增加, 随机误差的算术平均值趋近于零, 所以多次测量结果的算术平均值将更接近于真值。

(3) 过失误差。过失误差也称粗大误差，过失误差是一种显然与事实不符的误差，它往往是由于实验人员粗心大意和操作不正确等原因引起的。此类误差无规则可寻，只要加强责任感、多方警惕、细心操作，过失误差是可以避免的。确认含有过失误差的测得值称为坏值，坏值不能反映被测量的真实数值，应当剔除不用。

### 3. 精密度、准确度和精确度

误差的大小可以反映实验结果的好坏，但是这个误差可能是由于系统误差或偶然误差单独造成的，也有可能是两者都存在。反映测量结果与真实值接近程度的量，称为精度（也称精确度）。它与误差大小相对应，测量的精度越高，其测量误差就越小。精度应包括精密度和准确度两层含义。

(1) 精密度。测量中所测得数值重现性的程度，称为精密度。它反映偶然误差的影响程度，精密度高就表示偶然误差小。

(2) 准确度。测量值与真值的偏移程度，称为准确度。它反映系统误差的影响程度，准确度高就表示系统误差小。

(3) 精确度（精度）。它反映测量中所有系统误差和偶然误差综合的影响程度。

在一组测量中，精密度高的准确度不一定高，准确度高的精密度也不一定高，但精确度高，则精密度和准确度都高。

为了说明精密度与准确度的区别，可用下述打靶例子来说明，如图 2.1 所示。

图 2.1 (a) 中表示精密度和准确度都很好，则精确度高；图 2.1 (b) 表示精密度很好，但准确度却不高；图 2.1 (c) 表示精密度与准确度都不好。在实际测量中没有像靶心那样明确的真值，而是设法去测定这个未知的真值。学生在实验过程中往往满足于实验数据的重现性，而忽略了数据测量值的准确程度。

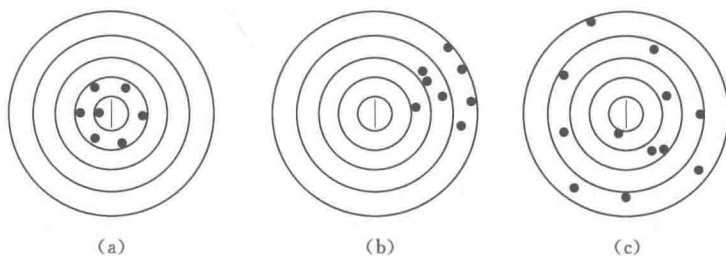


图 2.1 精密度和准确度的关系

(a) 精密度和准确度均好；(b) 精密度很好，准确度不高；(c) 精密度和准确度均不好

### 4. 误差的表示方法

利用任何量具或仪器进行测量时，虽然测量值  $X$  可以无限地接近真值  $A_0$ ，但其却不能准确地等于真值  $A_0$ ，而只是它的近似值，两者间的差异程度称为测量误差。测量的质量高低以测量精确度作指标，根据测量误差的大小来估计测量的精确度。测量结果的误差愈小，则认为测量就愈精确。误差常用绝对误差、相对误差或有效数字来说明一个近似值的准确程度。

(1) 绝对误差。测量值  $X$  和真值  $A_0$  之差为绝对误差，通常称为误差，记为

$$D = X - A_0 \quad (2.5)$$

绝对误差  $D$  表示了测量误差在量值上的大小。测量结果记作  $X \pm D$ 。

由于真值  $A_0$  一般无法求得，因而上式只有理论意义。常用高一标准仪器的

示值作为实际值  $A$  以代替真值  $A_0$ 。由于高一级标准仪器存在较小的误差, 因而  $A$  不等于  $A_0$ , 但总比  $X$  更接近于  $A_0$ 。 $X$  与  $A$  之差称为仪器的示值绝对误差, 记为

$$d = X - A \quad (2.6)$$

与  $d$  相反的数称为修正值, 记为

$$C = -d = A - X$$

通过检定, 可以由高一级标准仪器给出被检仪器的修正值  $C$ 。利用修正值便可以求出该仪器的实际值  $A$ , 即

$$A = X + C \quad (2.7)$$

(2) 相对误差。由于绝对误差仅表示出了测量误差数值的大小, 而不能表示出测量的精确程度, 为了表示出测量误差精确程度, 一般用相对误差来表示。示值绝对误差  $d$  与被测量的实际值  $A$  的百分比值称为实际相对误差, 记为

$$\delta_A = \frac{d}{A} \times 100\% \quad (2.8)$$

以仪器的示值  $X$  代替实际值  $A$  的相对误差称为示值相对误差, 记为

$$\delta_X = \frac{d}{X} \times 100\% \quad (2.9)$$

一般来说, 除了某些理论分析外, 用示值相对误差较为适宜。

**【例 2.1】** 某样品质量的称量结果为  $80.8\text{g} \pm 0.1\text{g}$ , 试求其相对误差为多少?

**解** 依题意, 称量的绝对误差为  $0.1\text{g}$ , 所以相对误差为

$$\delta_A = \frac{d}{A} \times 100\% = \frac{0.1}{80.8} = 1.2 \times 10^{-3}$$

(3) 引用误差。为了计算和划分仪表精确度等级, 提出引用误差概念。其定义为仪表示值的绝对误差与量程范围之比, 即

$$\delta_A = \frac{\text{示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d}{X_n} \times 100\% \quad (2.10)$$

式中  $d$ ——示值绝对误差;

$X_n$ ——标尺上限值与标尺下限值之差。

(4) 算术平均误差。算术平均误差是各个测量点的实验值与算术平均值之间偏差的绝对值再进行平均得到的平均值。

$$\delta_{\text{平}} = \frac{\sum |d_i|}{n} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

式中  $n$ ——测量次数;

$d_i$ ——第  $i$  次测量的误差。

(5) 标准误差。标准误差也称为均方根误差、标准偏差, 简称标准差。当实验次数  $n$  无穷大时, 称为总体标准差, 其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (2.12)$$

上式适用于无限测量的场合。实际测量工作中, 测量次数是有限的, 用样本标准差来表示, 则改为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (2.13)$$