

# 现代电子 测量技术

杜宇人 编著



21世纪高等院校电子信息  
与电气学科系列规划教材

# 现代电子 测量技术

杜宇人 编著



机械工业出版社  
China Machine Press

本书按高等院校电子信息科学与工程类专业的教学要求编写，主要内容包括：测量误差与数据处理、模拟测量、数字测量、时域测量、频域测量、测量用信号发生器、数据域测量和自动测试系统等。各章末均配有小结与深度适中的习题。

本书既可作为高等学校理工类电子信息类专业的教材，也可作为从事电类专业的工程技术人员参考书。

版权所有，侵权必究

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代电子测量技术/杜宇人编著. —北京: 机械工业出版社, 2009. 7  
(21 世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)  
ISBN 978-7-111-27534-3

I. 现… II. 杜… III. 电子测量—高等学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 116194 号

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 曾 珊

北京市荣盛彩色印刷有限公司印刷

2009 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.5 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-27534-3

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有倒页、脱页、缺页, 由本社发行部调换  
本社购书热线: (010) 68326294

## PUBLICATION BACKGROUND

# 出版说明

机械工业出版社  
JIMECHENGYE  
CHUBANSHE  
HUAZHANGFEN  
SHE

随着信息技术的迅猛发展,培养“适应 21 世纪时代需求的、有创新能力的复合型人才”已成为当前高等院校教育工作的重点。新型的人才培养模式应以基础扎实、拓宽专业口径为着眼点,突出培养学生的科学研究能力和工程设计能力。“编写精品教材,创建精品课程”是实现新型培养模式的基本保证。为进一步配合全国高校提高教育教学质量,共享优质教学资源,推动电子电气类精品课程的建设工作,机械工业出版社华章分社将与教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员、教学名师和知名教授一起建设“高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”,从高校的教学改革出发,在对电子电气类课程的课程体系和教学内容深入研讨的基础上,建设具有先进性、创新性、实用性的精品教材和教学资源体系,使该系列教材成为“立足专业规范,面向新需求,成就高质量”的精品。

该系列教材的出版以新的教改精神和人才培养模式作为指导,这样不仅能够保证教材质量,而且有利于促进学科的发展。根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求、学科发展和人才培养的目标”,确定教材特色如下:

- 教材的编写要以教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求”为依据,以培养满足国家和社会需要的高素质人才为目标,系统整合教学改革成果,使教材结构体系具有渐进性,体现教学规律和学生的认知规律,使教材的结构完整,内容具有系统性、科学性和准确性,理论阐述严谨、正确。
- 教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性,有利于培养学生的科学思维能力;根据教学内容、学时、教学大纲的要求,优化知识结构,充分体现新知识、新技术、新工艺、新成果;既要加强基础理论,也要强化实践内容;理论的阐述、实验内容和习题的选取都应紧密联系实际,使学生做到运用理论知识处理实际问题,培养学生分析问题和解决问题的能力。

为做好该系列教材的出版工作,我们聘请了东南大学王志功教授为编审委员会顾问,天津大学孙雨耕教授为编审委员会主任,以及清华大学、北京大学、浙江大学、上海交通大学、电子科技大学、华中科技大学、西安电子科技大学、北京邮电大学、吉林大学等国内重点大学的教授为编审委员会副主任和委员,从根本上保证了教材的质量。我们将在今后的出版工作中广泛征询和听取一线教师的反馈意见和建议,逐步改进和完善该系列教材,积极推动高等院校教学改革和教材建设。

### 三 “21 世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”



## 编审委员会

编审委员会顾问：王志功（东南大学）

编审委员会主任：孙雨耕（天津大学）

编审委员会副主任：倪光正（浙江大学）

彭启琮（电子科技大学）

张晓林（北京航空航天大学）

戴先中（东南大学）

编审委员会委员：

陈洪亮（上海交通大学）

吴建强（哈尔滨工业大学）

马西奎（西安交通大学）

孟 桥（东南大学）

华成英（清华大学）

郭树旭（吉林大学）

王成华（南京航空航天大学）

陈鹤鸣（南京邮电大学）

姜建国（上海交通大学）

王泽忠（华北电力大学）

李哲英（北京联合大学）

陆文娟（清华大学）

尹项根（华中科技大学）

蔺志青（北京邮电大学）

邓建国（西安交通大学）

石光明（西安电子科技大学）

刘新元（北京大学）

黄瑞光（华中科技大学）

本书按照高等院校电子信息科学与工程类专业的教学要求编写。作为电子信息工程、自动化、测量仪器与控制、计算机技术与应用等工程类专业的专业课,《现代电子测量技术》对提高学生的分析问题、解决问题及创新能力有很大的益处,本课程的目的是使学生掌握近代电子测量的基本原理和方法,熟悉新型电子测量仪器的使用方法,在科学实验中能够制定先进、合理的测量和测试方案,合理选用测量仪器,正确处理测量数据,从而获得最佳的测试结果。

本课程作为一门重要的面向工程应用的专业课,学时不多,但承接先前课程的概念多,新技术、新方法、新仪器及新工艺也多,如何精选内容、组织教材,是摆在我们面前的难题。20多年来对电子测量技术的研究,使我们感到电子测量技术博大精深,我们将本教材编写视为创新性的工作,希望在立足于吸收国内外众多科研成果的基础上,充分反映我们对电子测量技术学习讲授,指导研究生和从事科研实践的成果与体会。严谨、求实、创新是我们编书的基本原则,使本书可读性好、学术性强、实用价值大是我们的目标。

本书力求内容丰富、叙述精炼,尽量反映当代测量技术的新成就,有利于教学使用,因此对测量原理的讲解力求深入浅出、通俗易懂、便于自学,突出基本概念;对测量方法的介绍侧重于归纳、比较,突出简明、实用;对测量仪器仪表讲清工作原理框图,不过多涉及单元内部具体电路,突出常规、典型、操作使用;对误差分析多做定性说明,必要的数学推导简明扼要、结论醒目明确,便于读者掌握。为了教和学的方便,本书各章最后均配有小结与习题。因此,本书内容体系结构具有科学的合理性和鲜明的先进性,同时突出工程上的实用性。为了深入掌握好本课程的内容,必须完成相应数量的习题,并在实验室进行基本的实验操作训练,才能理论联系实际,提高综合应用能力。

本书在选材上具有一定的系统性、先进性和实用性。全书深入浅出、图文并茂、内容丰富、适用面广,可作为高等院校理工类电子信息类专业的教材或参考书,也可供从事电子科技工作的科技人员自学参考,还可作为各类成人职业教育的培训教材。

在本书编写过程中,束长宝、陈万陪、夏梅珍、郭志波参与了“虚拟仪器”、“频率的模拟测量”、“分贝的测量”和“合成信号发生器”等内容的编写工作,袁峰、吴震宇、师文和刘彩云在校稿、制作电子课件等方面做了大量工作。本书的内容除了包含我们的某些科研成果之外,还选取了国内外诸多专家学者的研究成果,在此表示衷心的感谢。本书的编著工作得到扬州大学出版基金和国家自然科学基金委“十五”重大项目(20299030)子课题、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB714501)子课题、教育部生命分析化学重点实验室开放课题(KLACLS08002)、扬州大学自然科学基金项目(KK0313090)、留学回国人员启动基金项目等科研项目的资助。

由于作者水平所限,难免存在错漏之处,恳请读者提出宝贵意见。

杜宇人  
2009年6月

# 教学建议

## INSTRUCTOR'S MANUAL

| 教学内容             | 学习要点及教学要求                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 课时安排 |      |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 全部讲授 | 部分选讲 |
| 第1章<br>绪论        | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解测量与计量的基本概念。</li> <li>了解电子测量的意义、内容和特点。</li> <li>弄清常用的电子测量方法。</li> <li>弄清电子测量的变换技术、放大技术、比较技术和处理技术。</li> <li>了解电子测量仪器的分类和主要技术指标。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                      | 2~3  | 1~2  |
| 第2章<br>测量误差与数据处理 | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解测量误差的基本原理，掌握误差的表示方法。</li> <li>弄清测量误差的来源，重点掌握误差的分类。</li> <li>弄清随机误差的描述、随机误差的分布和测量结果的置信度，重点掌握有限次测量下的计算方法。</li> <li>弄清粗大误差的特性和检验方法。</li> <li>弄清系统误差的特性、系统误差的检查与判别，重点掌握系统误差的削弱或消除方法。</li> <li>弄清测量误差的合成与分配、微小误差准则、最佳测量方案的选择和系统不确定度，重点掌握系统误差合成和常用函数的合成误差的计算。</li> <li>初步学会测量数据的处理方法，弄清非等精度测量、最小二乘法原理以及一元线性回归等方法，重点掌握有效数字的处理和等精度测量结果的处理。</li> </ul> | 8~11 | 5~8  |
| 第3章<br>模拟测量      | <ul style="list-style-type: none"> <li>弄清直流电压的模拟测量方法，重点掌握交流电压的模拟测量方法。</li> <li>了解分贝测量的定义和方法。</li> <li>理解谐波失真度的定义，掌握其测量方法。</li> <li>弄清频率的模拟测量方法（电桥法、谐振法、频率-电压转换法、拍频法和差频法）的工作原理和特点。</li> <li>弄清阻抗的模拟测量方法（伏安法、电桥法和谐振法）的工作原理和特点。</li> </ul>                                                                                                                                                | 8~11 | 5~8  |
| 第4章<br>数字测量      | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解数字电压表的组成及主要性能指标，弄清数字多用表的工作原理，了解电压测量的干扰与抑制技术，重点掌握双积分式A/D转换器和逐次逼近比较式A/D转换器的工作原理和特点。</li> <li>了解时间与频率测量的特点和频率测量的方法，弄清测量时间间隔的工作原理，重点掌握电子计数法测量频率、电子计数法测量周期、中介频率的计算和减小计数器<math>\pm 1</math>误差的方法。</li> </ul>                                                                                                                                        | 8~11 | 5~8  |

(续)

| 教学内容            | 学习要点及教学要求                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 课时安排 |      |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 全部讲授 | 部分选讲 |
| 第4章<br>数字测量     | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解相位差的数字测量的特点, 弄清相位差的数字测量方法(相位-电压转换法和相位-时间转换法)的工作原理和特点。</li> <li>弄清阻抗的数字测量方法(矢量电流电压法和自动平衡电桥法)的工作原理和特点。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                            | 8~11 | 5~8  |
| 第5章<br>时域测量     | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解示波器的基本特点、主要用途、分类和主要技术指标, 弄清CRT的组成和作用, 重点掌握CRT显示原理。</li> <li>了解通用示波器的组成, 弄清示波器的多波形显示原理, 重点掌握通用示波器垂直通道和水平通道的组成、电路和工作原理。</li> <li>了解采样示波器的主要参数, 弄清采样原理和非实时采样技术, 重点掌握采样示波器工作原理。</li> <li>了解数字存储示波器的组成和主要技术指标, 弄清采样方式和采样速率, 掌握数字存储示波器的主要特点。</li> <li>了解示波器的选用和探头的正确使用, 重点掌握用示波器测量电压、相位、时间间隔、周期和频率的方法。</li> </ul>                | 6~8  | 4~6  |
| 第6章<br>频域测量     | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解频谱分析仪的主要用途和分类, 弄清时域和频域的关系。</li> <li>了解频谱分析仪的主要性能及发展趋势, 弄清滤波式频谱仪的工作原理, 掌握外差式频谱仪的组成和工作原理。</li> <li>弄清静态频率特性测量-点频法和动态频率特性测量-扫频法的原理, 掌握扫频仪的使用方法。</li> </ul>                                                                                                                                                                    | 5~7  | 3~5  |
| 第7章<br>测量用信号发生器 | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解信号发生器的功能、分类和正弦信号发生器的性能指标, 掌握信号发生器的组成与工作原理。</li> <li>了解低频信号发生器的主要性能指标和基本使用方法, 掌握低频信号发生器的组成与工作原理。</li> <li>了解高频信号发生器的主要性能指标, 掌握高频信号发生器的组成与调谐信号发生器的工作原理。</li> <li>了解函数信号发生器的主要性能指标, 掌握函数信号发生器的组成与工作原理。</li> <li>了解脉冲信号发生器的主要性能指标和分类, 掌握脉冲信号发生器的组成与工作原理。</li> <li>了解合成信号发生器的特点, 弄清模拟直接合成法和间接合成法的原理, 掌握合成扫频信号源的工作原理。</li> </ul> | 5~7  | 3~5  |
| 第8章<br>数据域测量    | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解数据域测试的特点, 弄清数字信号的特点。</li> <li>了解数据域测量技术, 重点掌握简单逻辑电路的测试、组合电路的测试和时序电路的测试方法。</li> <li>了解逻辑分析仪的发展和分类, 弄清逻辑分析仪的组成和技术指标, 掌握逻辑分析仪的触发方式、显示方式和应用。</li> </ul>                                                                                                                                                                        | 5~7  | 3~5  |



(续)

| 教学内容            | 学习要点及教学要求                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 课时安排    |         |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|
|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 全部讲授    | 部分选讲    |
| 第 9 章<br>自动测试系统 | <ul style="list-style-type: none"><li>• 了解自动测试系统的发展，弄清自动测试系统的组成，掌握自动测试系统硬件设计和软件设计。</li><li>• 了解常用接口总线，弄清 PXI 总线和 LXI 总线的特性，掌握 GPIB 接口总线和 VXI 总线的构成和基本特性。</li><li>• 了解智能仪器的特点，弄清智能仪器的结构。</li><li>• 了解虚拟仪器的特点，弄清虚拟仪器的开发平台，掌握虚拟仪器的组成和虚拟仪器的软件系统。</li><li>• 了解网络仪器的发展，弄清网络仪器的核心技术，掌握网络仪器的体系结构。</li></ul> | 5 ~ 7   | 3 ~ 5   |
| 教学总学时建议         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60 ~ 83 | 37 ~ 60 |

说明：1. 本教材为电子信息与电气学科本科专业“现代电子测量技术”课程教材，理论授课学时数为 60 ~ 83 学时（相关配套实验另行单独安排），不同专业根据不同的教学要求和计划教学学时数，可酌情对教材内容进行适当取舍。例如，电子信息工程、通信工程、自动控制等专业，教材内容原则上全讲；其他专业，可酌情对教材内容进行适当删减。

2. 本教材理论授课学时数（60 ~ 83 学时）中，包含习题课、课堂讨论等必要的课内教学环节。

3. 若某些电子信息与电气学科本科专业教学计划课时少于 60 学时，可部分或全部舍去各章节中的相关电路设计内容。

# CONTENTS

# 目 录

出版说明

前言

教学建议

## 第1章 绪论..... 1

### 1.1 测量与计量 ..... 1

#### 1.1.1 测量 ..... 1

#### 1.1.2 计量 ..... 2

### 1.2 电子测量的内容和特点 ..... 5

#### 1.2.1 电子测量的意义 ..... 5

#### 1.2.2 电子测量的特点 ..... 5

#### 1.2.3 电子测量的内容 ..... 6

### 1.3 电子测量方法 ..... 7

#### 1.3.1 按测量手段分类 ..... 7

#### 1.3.2 按被测量信号的性质 分类 ..... 8

#### 1.3.3 按测量系统的性质 分类 ..... 9

#### 1.3.4 测量方法的选择原则 ... 10

### 1.4 电子测量技术 ..... 10

#### 1.4.1 电子测量的变换技术 ... 10

#### 1.4.2 电子测量的放大技术 ... 10

#### 1.4.3 电子测量的比较技术 ... 11

#### 1.4.4 电子测量的处理技术 ... 11

### 1.5 电子测量仪器 ..... 11

#### 1.5.1 测量仪表的主要性能 指标 ..... 11

#### 1.5.2 电子测量仪器的分类 ... 12

### 本章小结 ..... 13

### 思考题与习题 ..... 13

## 第2章 测量误差与数据处理 ..... 14

### 2.1 测量误差的基本原理 ..... 14

#### 2.1.1 测量标准 ..... 14

#### 2.1.2 测量误差 ..... 15

### 2.2 测量误差的分类 ..... 20

#### 2.2.1 测量误差的来源 ..... 20

#### 2.2.2 误差的分类 ..... 21

### 2.3 随机误差 ..... 24

#### 2.3.1 随机变量的数学期望 和标准差 ..... 24

#### 2.3.2 随机误差的分布 ..... 26

#### 2.3.3 有限次测量下的计算 方法 ..... 28

#### 2.3.4 测量结果的置信度 ..... 29

### 2.4 粗大误差 ..... 33

#### 2.4.1 莱特检验法 ..... 33

#### 2.4.2 肖维纳检验法 ..... 33

#### 2.4.3 格拉布斯检验法 ..... 34

### 2.5 系统误差 ..... 35

#### 2.5.1 系统误差的特性 ..... 35

#### 2.5.2 系统误差的检查与 判别 ..... 36

#### 2.5.3 系统误差的削弱或 消除方法 ..... 37

### 2.6 误差的合成与分配 ..... 39

#### 2.6.1 误差传递公式 ..... 39

#### 2.6.2 常用函数的合成误差 ... 40

#### 2.6.3 系统误差的合成 ..... 42

#### 2.6.4 微小误差准则 ..... 43

#### 2.6.5 测量误差的分配 ..... 44

#### 2.6.6 最佳测量方案的选择 ... 46

### 2.7 测量数据的处理 ..... 47

#### 2.7.1 有效数字的处理 ..... 47

|                                 |    |                                     |     |
|---------------------------------|----|-------------------------------------|-----|
| 2.7.2 等精度测量结果的<br>处理.....       | 48 | 4.2.5 中界频率 .....                    | 100 |
| 2.7.3 非等精度测量结果<br>的处理.....      | 50 | 4.2.6 测量时间间隔 .....                  | 101 |
| 2.7.4 最小二乘法原理 .....             | 52 | 4.2.7 减小计数器 $\pm 1$ 误差的<br>方法 ..... | 103 |
| 2.7.5 一元线性回归 .....              | 54 | 4.3 相位差的数字测量.....                   | 105 |
| 本章小结 .....                      | 55 | 4.3.1 相位 - 电压转换法 ...                | 105 |
| 思考题与习题 .....                    | 56 | 4.3.2 相位 - 时间转换法 ...                | 106 |
| <b>第3章 模拟测量</b> .....           | 58 | 4.4 阻抗的数字测量.....                    | 107 |
| 3.1 电压的模拟测量 .....               | 58 | 4.4.1 矢量电流电压法 .....                 | 107 |
| 3.1.1 概述.....                   | 58 | 4.4.2 固定轴法与自由<br>轴法 .....           | 108 |
| 3.1.2 直流电压的模拟测量 ...             | 60 | 本章小结 .....                          | 109 |
| 3.1.3 交流电压的模拟测量 ...             | 61 | 思考题与习题 .....                        | 110 |
| 3.2 分贝的测量 .....                 | 68 | <b>第5章 时域测量</b> .....               | 112 |
| 3.2.1 数学定义 .....                | 68 | 5.1 概述 .....                        | 112 |
| 3.2.2 分贝值的测量 .....              | 69 | 5.1.1 示波器的主要特点 ...                  | 112 |
| 3.3 频率的模拟测量 .....               | 70 | 5.1.2 示波器的主要用途 ...                  | 112 |
| 3.3.1 直接法.....                  | 70 | 5.1.3 示波器的分类 .....                  | 113 |
| 3.3.2 比较法.....                  | 72 | 5.1.4 示波器的主要技术<br>指标 .....          | 113 |
| 3.4 阻抗的模拟测量 .....               | 73 | 5.2 CRT 显示原理 .....                  | 114 |
| 3.4.1 概述.....                   | 73 | 5.2.1 CRT 原理 .....                  | 114 |
| 3.4.2 阻抗参数的测量 .....             | 74 | 5.2.2 示波管显示原理 .....                 | 116 |
| 本章小结 .....                      | 79 | 5.3 通用示波器 .....                     | 118 |
| 思考题与习题 .....                    | 80 | 5.3.1 通用示波器的组成 ...                  | 118 |
| <b>第4章 数字测量</b> .....           | 81 | 5.3.2 通用示波器的垂直<br>通道 .....          | 119 |
| 4.1 电压的数字测量 .....               | 81 | 5.3.3 通用示波器的水平<br>通道 .....          | 122 |
| 4.1.1 数字电压表的组成及<br>主要性能指标 ..... | 81 | 5.3.4 通用示波器的其他<br>电路 .....          | 126 |
| 4.1.2 A/D 转换原理 .....            | 83 | 5.3.5 示波器的多波形<br>显示 .....           | 126 |
| 4.1.3 数字多用表 .....               | 88 | 5.4 采样示波器 .....                     | 129 |
| 4.1.4 电压测量的干扰与抑<br>制技术.....     | 89 | 5.4.1 采样技术 .....                    | 129 |
| 4.2 时间与频率的数字测量 .....            | 93 | 5.4.2 采样示波器工作<br>原理 .....           | 131 |
| 4.2.1 时间与频率测量的<br>特点.....       | 93 | 5.4.3 采样示波器的主要<br>参数 .....          | 132 |
| 4.2.2 频率测量的方法 .....             | 94 | 5.5 数字存储示波器.....                    | 133 |
| 4.2.3 电子计数法测量频率 ...             | 94 |                                     |     |
| 4.2.4 电子计数法测量<br>周期.....        | 97 |                                     |     |

|                            |     |                           |     |
|----------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 5.5.1 数字存储示波器的原理 .....     | 133 | 7.1.2 信号发生器的分类 ...        | 159 |
| 5.5.2 数字存储示波器的主要特点 .....   | 134 | 7.1.3 信号发生器的组成与原理 .....   | 161 |
| 5.5.3 数字存储示波器的主要技术指标 ..... | 134 | 7.1.4 正弦信号发生器的性能指标 .....  | 162 |
| 5.6 示波器的基本测量技术 .....       | 136 | 7.2 低频信号发生器 .....         | 164 |
| 5.6.1 示波器的正确使用 ...         | 136 | 7.2.1 组成与工作原理 .....       | 165 |
| 5.6.2 用示波器测量电压 ...         | 136 | 7.2.2 主要性能指标 .....        | 166 |
| 5.6.3 用示波器测量时间和频率 .....    | 138 | 7.2.3 基本使用方法 .....        | 167 |
| 5.6.4 用示波器测量相位 ...         | 139 | 7.3 高频信号发生器 .....         | 167 |
| 本章小结 .....                 | 140 | 7.3.1 高频信号发生器的组成 .....    | 168 |
| 思考题与习题 .....               | 141 | 7.3.2 调谐信号发生器 .....       | 169 |
| <b>第6章 频域测量</b> .....      | 142 | 7.3.3 主要性能指标 .....        | 169 |
| 6.1 概述 .....               | 142 | 7.4 函数信号发生器 .....         | 170 |
| 6.1.1 时域和频域的关系 ...         | 142 | 7.4.1 组成与工作原理 .....       | 170 |
| 6.1.2 频谱分析仪的主要用途 .....     | 143 | 7.4.2 主要性能指标 .....        | 172 |
| 6.1.3 频谱分析仪的分类 ...         | 143 | 7.5 脉冲信号发生器 .....         | 173 |
| 6.2 频谱仪的工作原理 .....         | 144 | 7.5.1 组成与工作原理 .....       | 173 |
| 6.2.1 滤波式频谱仪 .....         | 144 | 7.5.2 脉冲信号发生器的分类 .....    | 174 |
| 6.2.2 外差式频谱仪 .....         | 146 | 7.5.3 主要性能指标 .....        | 175 |
| 6.2.3 频谱分析仪的发展趋势 .....     | 148 | 7.6 合成信号发生器 .....         | 175 |
| 6.3 信号失真度测量 .....          | 148 | 7.6.1 直接合成法 .....         | 176 |
| 6.3.1 谐波失真度的定义 ...         | 148 | 7.6.2 DDS 频率合成信号源实例 ..... | 178 |
| 6.3.2 谐波失真度的测量方法 .....     | 150 | 7.6.3 间接合成技术 .....        | 180 |
| 6.3.3 失真度测试仪 .....         | 151 | 7.6.4 合成扫频信号源 .....       | 183 |
| 6.4 线性系统频率特性的测量 .....      | 151 | 本章小结 .....                | 184 |
| 6.4.1 频率特性测量方法 ...         | 152 | 思考题与习题 .....              | 185 |
| 6.4.2 相频特性测量 .....         | 153 | <b>第8章 数据域测量</b> .....    | 186 |
| 6.4.3 扫频仪 .....            | 153 | 8.1 概述 .....              | 186 |
| 本章小结 .....                 | 157 | 8.1.1 数据域测试的特点 ...        | 186 |
| 思考题与习题 .....               | 158 | 8.1.2 数字信号的特点 .....       | 187 |
| <b>第7章 测量用信号发生器</b> .....  | 159 | 8.2 数据域测量技术 .....         | 187 |
| 7.1 概述 .....               | 159 | 8.2.1 简单逻辑电路的测试 .....     | 187 |
| 7.1.1 信号发生器的功能 ...         | 159 | 8.2.2 组合电路的测试 .....       | 189 |
|                            |     | 8.2.3 时序电路的测试 .....       | 191 |
|                            |     | 8.2.4 穷举测试法 .....         | 191 |

|                            |     |                           |     |
|----------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 8.2.5 随机测试法 .....          | 192 | 9.2.2 GPIB 接口总线 .....     | 210 |
| 8.3 逻辑分析仪 .....            | 193 | 9.2.3 VXI 总线 .....        | 214 |
| 8.3.1 概述 .....             | 193 | 9.2.4 PXI 总线 .....        | 218 |
| 8.3.2 逻辑分析仪的组成 ...         | 193 | 9.2.5 LXI 总线 .....        | 219 |
| 8.3.3 逻辑分析仪的触发<br>方式 ..... | 194 | 9.3 智能仪器 .....            | 223 |
| 8.3.4 逻辑分析仪的显示<br>方式 ..... | 196 | 9.3.1 智能仪器的结构 .....       | 223 |
| 8.3.5 逻辑分析仪的技术<br>指标 ..... | 198 | 9.3.2 智能仪器的特点 .....       | 224 |
| 8.3.6 逻辑分析仪的应用 ...         | 198 | 9.4 虚拟仪器技术 .....          | 225 |
| 8.3.7 逻辑分析仪的发展<br>趋势 ..... | 202 | 9.4.1 概述 .....            | 225 |
| 本章小结 .....                 | 203 | 9.4.2 虚拟仪器的硬件<br>平台 ..... | 227 |
| 思考题与习题 .....               | 203 | 9.4.3 虚拟仪器的软件<br>平台 ..... | 228 |
| <b>第 9 章 自动测试系统</b> .....  | 204 | 9.4.4 虚拟仪器的开发<br>平台 ..... | 229 |
| 9.1 概述 .....               | 204 | 9.5 网络仪器 .....            | 230 |
| 9.1.1 自动测试系统的<br>发展 .....  | 204 | 9.5.1 概述 .....            | 230 |
| 9.1.2 自动测试系统的<br>组成 .....  | 205 | 9.5.2 网络仪器的体系<br>结构 ..... | 231 |
| 9.1.3 自动测试系统的<br>设计 .....  | 205 | 9.5.3 网络仪器的核心<br>技术 ..... | 232 |
| 9.2 接口总线 .....             | 208 | 本章小结 .....                | 233 |
| 9.2.1 常用接口总线 .....         | 208 | 思考题与习题 .....              | 234 |
|                            |     | <b>参考文献</b> .....         | 235 |

# 绪 论

本章重点介绍了测量和计量的基本概念、电子测量的内容与特点，并对电子测量方法、电子测量技术、电子测量仪器等做了详细论述。

## 1.1 测量与计量

### 1.1.1 测量

#### 1. 测量的意义

正如俄国科学家门捷列夫所说：“没有测量，就没有科学”，“测量是认识自然界的主要工具”。英国科学家库克（A. H. cook）也认为：“测量是技术生命的神经系统”。离开测量，人类就不能真正准确地认识世界。物理定律是定量的定律，只有通过精密的测量才能确定它们的正确性。例如光谱学的精密测量帮助人们揭示了原子结构的秘密；用射电望远镜才能发现类星体和脉冲星。另一方面，科学技术的发展也推动了测量技术的发展。例如像时间这样的基本量，在以前很长一段时间内一直用沙钟和滴漏进行很粗略的测量，直到伽利略对摆的观察才启发人们用计数周期的谐振系统（如钟表）来测量时间。目前，使用铯原子谐振和氢原子谐振来测量时间，其准确度相当于在30万年内误差小于1秒。现代测量仪器是科学研究的成果，而测量仪器又促进了科学技术的发展。

在科学技术发展过程中，测量结果不仅用于验证理论，而且是发现新问题、提出新理论的依据。历史事实证明：科学的进步、生产的发展与测量理论技术手段的发展和进步是相互依赖、相互促进的。测量手段的现代化，已被公认是科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。如没有望远镜就没有天文学，没有显微镜就没有细胞学，没有指南针就没有航海事业科学的进步和发展。离开测量就不会有真正的科学。日常生活中处处离不开测量，如农业社会中，需要丈量土地、衡量谷物，就产生了长度、面积、容积和重量的测量；掌握季节和节候，出现了原始的时间测量器具，并有了天文测量。现代化的工业生产中，处处离不开测量，例如，一个大型钢铁厂需要约2万个测量点；在高新技术和国防现代化建设中则更是离不开测量，例如，每种新设计的飞机，需要测试飞机高速飞行中受气流冲击作用下的性能，通过风洞试验测定机身、机翼的受力和振动分布情况，以验证和改进设计。

测量技术水平是一个历史时期、一个国家的科学技术水平的一面“镜子”。正如特尔曼（F. E. Telmen）教授所说：“科学和技术的发展是与测量技艺并行进步相互匹配的。事实上测量技术水平可以用来评价一个国家的科技状态”。

## 2. 测量的定义

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程，是人们认识和改造自然的一种不可缺少的手段。

### (1) 狭义测量的定义

在测量过程中，人们借助专门的设备，对被测对象进行直接或间接测量，是为了确定被测对象量值而进行的实验过程。用同类已知单位进行比较，取得用数值和单位共同表示的测量结果。

测量的内涵可描述为：

- 1) 测量对象：被测客体中的相应的量值信息；
- 2) 测量目的：对被测对象取得一个定量的认识；
- 3) 测量过程：通过实验去认识对象的过程；
- 4) 测量方法：进行比较（直接比较、间接比较），需要测量仪器；
- 5) 测量标准：同类已知单位；
- 6) 测量结果：最终能表示给测量主体（人）。

### (2) 广义测量的定义

广义地讲，测量不仅对被测的物理量进行定量的测量，而且还包括对更广泛的被测对象进行定性、定位的测量，例如，故障诊断、无损探伤、遥感遥测、矿藏勘探、地震源测定、卫星定位等。而测量结果也不仅是由量值和单位来表征的一维信息，还可以用二维或多维的图形、图像来显示被测对象的属性特征、空间分布、拓扑结构等。广义测量原理可以从信息获取过程来说明，包括信息的感知和信息识别两个环节。

## 3. 测量的基本要素

测量的基本要素包括有：被测对象、测量仪器系统和测量人员，如图 1-1 所示。

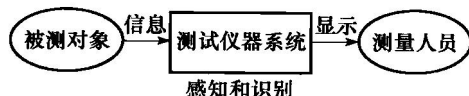


图 1-1 测量的基本要素

测量包含下面三个阶段：

### (1) 论证阶段

测量的主体（测量人员）根据测试任务的要求、被测对象的特点、属性，及现有仪器设备状况，拟定合理的测试方案。

### (2) 设计阶段

选择测试仪器，组建测试系统。

制定出测试策略（测量算法）和操作步骤（测试程序）。

### (3) 实施阶段

对仪器和系统实施测试操作（发控制命令），按照逻辑和时序完成测量过程，取得测量数据，分析测量误差并显示测量出结果。

## 1.1.2 计量

为使在不同的地方用不同的手段测量同一量时，所得的结果一致，就要求使用统一的单位、基准、标准和测量器具。计量是为了保证量值的统一和准确一致的一种测量。它的三个主要特征是统一性、准确性和法制性。

计量是国民经济的一项重要的技术基础，计量工作在国民经济建设中占有十分重要的地位，对于改进企业管理、提高产品质量、节约能源，为实现标准化、自动化提供科学数据等

方面都起着重要的作用。同样,计量科学技术的水平也标志着一个国家科学技术发展的水平。

### 1. 计量的定义

计量是利用技术和法制手段实现单位统一和量值准确可靠的测量。计量是一种特殊形式的测量,它把被测量与国家计量部门作为基准或标准的同类单位量进行比较,以确定合格与否,并给出具有法律效力的《检定证书》。在计量的过程中,认为所使用的量具和仪器是标准的,用它们来校准、检定受检量具和仪器设备,以衡量和保证使用受检量具仪器进行测量时所获得测量结果的可靠性。

计量学是研究测量、保证测量统一和准确的科学,它研究的主要内容包括:计量和测量的方法、技术、量具及仪器设备等一般理论;计量单位的定义和转换;量值的传递和保证量值统一所必须采取的措施、规程和法制等。

### 2. 计量与测量的关系

计量与测量不同,但二者又有密切的联系。测量是用已知的标准单位量与同类物质进行比较以获得该物质数量的过程,认为被测量的真实数值是客观存在的,其误差是由测量仪器和测量方法等引起的。而计量则认为使用的仪器是标准的,误差是由受检仪器引起的,它的任务是确定测量结果的可靠性。计量是测量的基础和依据。没有计量,也谈不上测量。计量和测量相互配合,才能在国民经济各个领域发挥重要作用。

计量学把测量技术和测量理论加以完善和发展,对测量起着推动作用。反之,随着测量技术的发展,也在不断出现各种新的计量仪器,推动计量学的发展。测量发展的客观需要才出现了计量。而测量是计量应用的重要途径。没有测量,计量将失去价值。为了保证测量结果的准确性,必须定期对仪器进行检定和校准,这个过程就是计量。

计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作,它在工农业生产、科学技术、国防建设以及人民生活等各个方面起着技术保证和技术监督的作用。

### 3. 单位和单位制

单位是表征测量结果的重要组成部分,又是对两个同类量值进行比较的基础。单位的确定和统一是非常重要的。必须采用公认的而且是固定不变的单位,只有这样,测量才有意义。

1960年第十一届国际计量大会(CGPM)上正式通过国际单位制(代号SI),其中包括了整个自然科学的各种物理量的单位,经1971年第14届CGPM修订,国际单位制有7个基本单位,例如长度单位米(m),时间单位秒(s)等。国际单位制是由国际单位制单位、国际单位制词头和国际单位制的十进倍数单位三部分组成。国际单位制词头表示使单位增大或缩小的十进倍数。1984年2月4日国务院颁布了《中华人民共和国法定计量单位》,决定我国法定计量单位以国际单位制为基础。

### 4. 计量基准和标准

#### (1) 计量基准

计量基准是计量基准器具的简称,是在特定计量领域内复现和保存计量单位(或其倍数或分数)并且有最高计量特性的计量器具,是统一量值的最高依据。计量基准用来复现某一基本测量单位的量值,只用于鉴定各种量具的精度,不直接参加测量。基准是指用当代最先进的科学技术和工艺水平,以最高的准确度和稳定性建立起来的专门用以规定、保持和复现物理量计量单位的特殊量具或仪器装置等。根据基准的地位、性质和用途,基准通常又



分为主基准、副基准和工作基准，也分别称做一级、二级和三级基准。

1) 主基准，又称国家计量基准（简称国家基准）和一级基准，是经国家鉴定并批准，作为统一全国计量单位量值的最高依据，具有当代或本国科学技术所能达到的最高计量特性的计量基准，是给定量的所有其他计量器具在国内定度的最高依据。该基准是最高水平的基准，一个国家只有一个。主基准一般不轻易使用，只用于对副基准、工作基准的定度或校准，不直接用于日常计量。

2) 副基准，又称二级基准。副基准的量值精度由主基准确定，用以代替主基准向下传递或代替主基准参加国际比对。它在全国作为复现计量单位的地位仅次于国家基准。副基准主要是为了维护主基准而设的，一般也不用于日常计量。

3) 工作基准，又称三级基准。是经与国家基准或副基准校准或比对，并经国家鉴定，实际用以检定计量标准的计量器具。工作基准用来直接向下属标准量具进行量值传递，用以检定下属计量标准量具的精确度。它在全国作为复现计量单位的地位仅在国家基准及副基准之下。设立工作基准的目的是不使国家基准由于使用频繁而丧失其应有的精确度或遭到破坏。

#### (2) 标准

根据工作基准复现出不同等级的便于经常使用的计量标准量具或仪器，简称标准。计量标准的准确度等级在工作基准之下，工作计量器具之上。按精度高低又分为一级标准、二级标准和三级标准。通过这些标准经常性地对日常工作仪器进行检定，确定其量值的精确度大小。除标准器具外，还有标准物质。

#### (3) 基准的权威性

基准的理论定义最严格的、制作工艺技术最先进。原器基准自身也会随时间、地点、环境条件而变化，甚至会损坏，会失传。从现代科学的观点来看，最好的基准是原子基准。

#### (4) 基准的相对性

一个时期的测量基准反映当时的人类认识水平和科学水平。例：以太阳为基准，时间测量的精确度1天内可达到1秒钟。而目前铯原子钟的计时精确度在三十万年内也不超过1秒。

### 5. 常用计量术语

#### (1) 量具

以固定形式复现量值的计量器具称为量具。量具可用或不用其他计量器具而进行测量工作，一般没有指示器。量具分为单值量具（例如：砝码、标准电池等）、多值量具和成套量具。而且量具本身的数值并不一定刚好等于一个计量单位，如标准电池复现的是1.0186V，而不是1V。

#### (2) 比对

在规定条件下，对相同准确度等级的同类基准、标准或工作计量器之间的量值进行比较，其目的是考核量值的一致性。

#### (3) 校准

校准是指被校的计量器具与较高等级的计量标准相比较，以确定被校计量器具的示值误差（有时也包括确定被校器具的其他计量性能）的全部工作。

#### (4) 检定

检定是用高一等级准确度的计量器具对低一等级的计量器具进行比较，以全面评定被检计量器具的计量性能是否合格的全部工作。一般要求计量标准的准确度为被检者的1/3到1/10。