

21世纪

高等学校电子信息类规划教材



# 电子测量技术基础

(第三版)

张永瑞 修编



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

# 电子测量技术基础

(第三版)

张永瑞 修编

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书为高等学校电子信息类规划教材,是参照各院校相关专业新修订的教学计划中“电子测量”课程的教学大纲及学时数要求,并考虑现代电子科技发展的趋势与潮流修编而成的。全书共10章,主要包括:电子测量与计量的基本概念、测量误差和测量结果处理、信号发生器、电子示波器、频率时间测量、相位差测量、电压测量、阻抗测量、噪声测量、数据域测量与测量新技术简介。书中重点讲述了主要物理量(电压、频率、时间、相位)、元件参数、阻抗、噪声等的基本测量原理、测量方法及常规仪器(示波器、信号源、计数器等)的工作原理和操作使用,并对矢量网络分析测试技术、智能测量系统、虚拟仪器等这些体现现代高科技的测量技术与仪器作了适度介绍。

本书编写思路清晰,概念和原理讲述透彻,深入浅出,通俗易懂,方法明了实用,必要的数学推导简明扼要,结论醒目。各章末配有小结与难度适中的习题,书末配有部分习题的参考答案。

本书既可作为高等工业院校测控技术与仪器、通信工程、电子信息工程、探测制导与控制技术、智能科学与技术等专业学生的教学用书,亦可作为从事电类专业的工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术基础/张永瑞编. —3版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2014.7(2014.8重印)

21世纪高等学校电子信息类规划教材

ISBN 978-7-5606-3405-0

I. ①电… II. ①张… III. ①电子测量技术—高等学校—教材 IV. ①TM93

## 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 131357 号

策 划 云立实

责任编辑 许青青

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014年7月第3版 2014年8月第37次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 20

字 数 469千字

印 数 238 001~244 000册

定 价 35.00元

ISBN 978-7-5606-3405-0/TM

**XDUP 3697003-37**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

现代科学技术的发展使得“九天揽月，五洋捉鳖”不再是神话而成为现实。我国的“嫦娥三号”成功登月，“玉兔号”月球车携带全景相机、测月雷达、红外光谱仪，肩负科学探测使命，开展了“观天、看地、测月”的科学探测活动，获得了大量的探测数据，发回了许多有科学研究意义的宇宙空间图像；我国自主研发的“蛟龙号”潜水器的设计潜海深度达 7000 米，可探测海底世界的奥秘。这些伟大的科学工程中都要用到电子检测！

电子技术在航空航天、工业、农业、交通运输、国防安全等国民经济诸多领域中得到了广泛应用，而电子测量又是电子技术信息检测的重要手段，它是一门发展快、应用面宽、实践性强的应用学科，在当今的信息化社会中正发挥着中流砥柱的作用。

在我国实现四个现代化与中国梦的宏伟事业中，科学技术的现代化是关键，科学实验手段的现代化是实现科学技术现代化的必要条件，而电子测量的方法与手段是否现代化正是科学实验手段是否现代化的重要标志。宇宙飞船、航天飞机的发射，火箭、导弹飞行轨道的控制，人造卫星姿态的调整，核潜艇的潜、浮操纵，都必须有快速、精确的信息检测；现代化的大地测量、气象遥感、地震预测预报、震后救灾、医疗诊断等都少不了应用电子技术进行高精度的电子信息检测。

为适应国民经济建设对电子测量技术专业人才的需求，许多高等工业学校相继开办了“测控技术与仪器”专业。即便是电类的其他专业，如“通信工程”、“电子信息工程”、“探测制导与控制技术”等专业也纷纷开设了电子测量类课程。特别是 1999 年教育部公布调整新的专业目录以来，各院校为培养宽专业口径的通用型人才，在 2013 年最新修订的教学计划中都增开了实践性强的课程，使培养的学生毕业之后既懂理论、会分析，又能动手组织设计科学实验，进行操作检测。

为满足新形势下的教学急需，我们再次组织了对《电子测量技术基础》的修编。参照各院校相关专业 2013 年新修订的教学计划中“电子测量”课程的教学大纲及学时数要求，并考虑到电子科技的发展新趋势、新潮流，参考国内、外同类教材好的编写理念与经验，在搜集、听取使用《电子测量技术基础(第二版)》作教材实施教学的老师和同学们意见的基础上，形成了如下几点修编思路。

(1) 总体上保留第二版教材的结构体系与风格。但也考虑到我国近年来高等教育发展迅猛、招生毛入学率急剧增加这种新形势下的学生基础情况，顾及高等院校的类别、本科生的层次，本书在内容选材上不追求知识面的完整系统，不追求数学上的严谨缜密，而注重工程上的实用为主、够用为度。比如，对测量原理、基本概念的讲解，把握由浅入深、通俗易懂的原则，便于读者自学；对测量方法的讲述，注重归纳、比较、易操作性，尽可能做到简明、实用。

(2) 考虑国内大多数院校实验仪器目前的配置情况，对实验仪器仪表，讲清其工作原理框图，不过多涉及单元内部具体电路，选用常规、通用、典型型号，而不选高、精、新的

仪器仪表作介绍。

(3) 重在根据测试对象选用合适的仪器仪表、采用合理的测量方法进行训练，重在基本仪器仪表的操作、使用方法的训练；对误差分析，侧重物理概念解释，对必要的数学定量推导，力求简明扼要，思路清晰，结论明确醒目，便于读者掌握。为便于教师施教和学生学习，第三版在各章末仍配有简明小结与数量够用、难易度适中的习题，补充、更新了少量习题，书末仍给出了部分习题的参考答案，供读者练习时参考。

(4) 更改了个别章或节的名称。如第 10 章名称更改为“数据域测量与测量新技术简介”。

(5) 对第二版中各章文字内容进行了润色，删除或增加了某些词、句或段落。对同一个概念有不同的描述语句定义的，第三版中做了简明、确切、统一的描述，特别是删去了易使读者“节外生枝”产生疑问的一些段落。

考虑第 8 章“阻抗测量”在“电路分析基础”课程中都已做过相应的实验，第 9 章“噪声测量”非通信专业用得较少，第 10 章“数据域测量与测量新技术简介”为扩展知识面的介绍内容，这三章前均加了 \* 号，前面 7 章中也有部分节前加了 \* 号，各院校可根据相关专业教学计划对“电子测量”课程的具体要求及计划学时数情况进行选讲。使用本教材的参考学时数约为 60 学时。

本书在再版过程中得到了西安电子科技大学机电学院测控技术与仪器系领导的关心与支持，得到了西安电子科技大学出版社云立实副编审、许青青编辑的热情帮助与指导，还得到了使用第二版作为教材的诸位老师与同学们的大力支持，本书参考文献中的诸位作者好的编写理念、思想对本次再版有很多启发与帮助，在此一并致以衷心的感谢！

由于作者学识水平有限，加之时间紧迫，书中定会有不足之处，敬请读者批评、赐教。

张永瑞  
于西安电子科技大学  
2014 年 3 月

## 第二版前言

随着现代科学技术的迅猛发展,电子技术在航空航天、工业、农业、交通运输等国民经济诸多领域中得到了广泛应用,而电子测量又是电子技术信息检测的重要手段,它是一门发展快、应用面宽、实践性强的应用学科,在现代高科技应用技术中起着非常重要的作用。

在我国实现四个现代化的宏伟事业中,科学技术的现代化是关键,科学实验手段的现代化是实现科学技术现代化的必要条件,而电子测量的方法与手段是否现代化正是科学实验手段是否现代化的重要标志。现代高科技中,宇宙飞船、航天飞机的发射,火箭、导弹飞行轨道的控制,人造卫星姿态的调整,都必须有快速、精密的信息检测;现代化的大地测量、气象遥感、地震测报和预报都少不了应用电子技术手段进行测量。

为适应国民经济建设对电子测量技术专业人才的需求,许多高等工业学校相继开办了“测控技术与仪器”专业。即便是电类的其他专业,如“通信工程”、“电子信息工程”、“探测制导与控制技术”等专业也纷纷开设了电子测量类的课程。特别是1999年教育部公布调整新的专业目录以来,各院校为培养宽专业口径的通用型人才,在2004年修订的新教学计划中都增开了实践性强的课程,使培养的学生毕业之后既懂理论,又能动手组织设计科学实验,进行操作检测。

为适应新形势下的教学急需,我们对由张永瑞、刘振起、杨林耀、顾玉昆编著,西安电子科技大学出版社出版的《电子测量技术基础》一书进行了修编。考虑到电子科技的新发展,参照“测控技术与仪器”、“通信工程”等有关专业新修订的教学计划中约定的教学时数及教学内容,在搜集、听取以往使用《电子测量技术基础》作教材实施教学的老师和同学们意见的基础上,形成了如下的修编思路。

(1)大体上保留第一版教材的结构体系与风格。对测量原理、基本概念的讲解,仍把握由浅入深、通俗易懂的原则,便于读者自学;对测量方法的讲述,仍注重归纳、比较,尽可能做到简明、实用;对测量仪器仪表,仍讲清其工作原理框图,不过多涉及单元内部具体电路,选用常规、典型型号,讲清操作、使用方法;对误差分析,仍多作定性说明(物理概念解释),必要的数学定量推导尽量简明扼要,思路清晰,结论明确醒目,便于读者掌握。为方便教师施教和学生学习,本次修订在各章后仍配有简明小结与难度适中的习题,补充、更新了少量习题,书末给出了部分习题的参考答案。

(2)更改了个别章或节的名称。对数据域测量、智能测量系统、虚拟仪器这些体现现代高科技的测量技术与仪器在本书的最后一章作了适度的介绍。对个别章或节前加了\*号,可视不同专业对本课程的要求及计划学时情况,作为选讲的内容。

(3)对全书各章文字内容进行了润色,修改了口语化的词句,删除或增加了某些段落。

(4)对电路图中不规范、不符合国标的元件符号进行了修改,对第一版中的个别印刷错误进行了更正。

本书在修编和出版过程中，得到了西安电子科技大学机电学院测控技术与仪器系领导的关心与支持，得到了西安电子科技大学出版社云立实副编审及许青青编辑的热情帮助与指导，还得到了以往使用第一版作为教材的诸位老师与同学们的大力支持，在此一并致以衷心的感谢。

由于作者学识水平有限，加之修编时间紧迫，书中不妥之处恳请广大读者批评指正。

作者

2008年9月

# 第一版前言

随着科学技术的迅速发展，在工业、农业、交通运输、航空航天、国防建设等国民经济的诸多领域都广泛应用着电子技术，而电子测量又是电子技术中进行信息检测的重要手段，它是一门发展快、应用面宽、实践性强且重要的应用学科，在现代科学技术中占有举足轻重的作用和地位。

在我国实现四个现代化的伟大事业中，科学技术的现代化是关键，科学实验手段的现代化是实现科学技术现代化的必要条件，而电子测量正是各个学科领域科学实验手段现代化的重要标志。现代高科技中，火箭、导弹飞行轨道的控制，人造卫星飞行姿态的调整，必须有快速、精密的信息检测；现代化的大地测量、气象遥感、地质勘探等也都少不了应用电子技术手段进行测量。

为适应国民经济建设对电子测量技术专业人才的需求，许多高等工业学校相继开办了“电子仪器及测量技术”、“检测技术与仪器仪表”专业。即便是电类的其他专业，如“通信工程”、“电子工程”、“应用电子技术”等专业也纷纷开设了电子测量的课程，目的是培养学生具有电子测量方面的基础知识和应用能力。

为满足教学急需，我们编写了《电子测量技术基础》一书。编写中，总的构思是：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；对测量方法侧重归纳、比较，突出简明、实用的特点；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、操作使用方法；对误差分析多作定性说明，必要的数学推导简明扼要，结论醒目明确，便于读者掌握。为便于教和学，本书各章后配有小结与习题，书末给出了部分习题的参考答案。

全书共分10章，第1、2、3、7章由刘振起编写，第5、6章由张永瑞编写，第8、9章由杨林耀编写，第4、10章由顾玉昆编写。

本书在编写和出版过程中，得到了西安电子科技大学测控仪器系领导的关心和支持，还得到了云立实编辑的热情帮助，在此一并致以衷心的感谢。

由于编者学识水平有限，书中定有许多不当之处，热忱欢迎读者赐教。

编者  
1994.5



# 目 录

<b>第 1 章 电子测量与计量的基本概念</b> ..... 1	<b>* 2.4 随机误差分析</b> ..... 30
1.1 测量与电子测量 ..... 1	2.4.1 测量值的数学期望和标准差 ..... 30
1.1.1 测量 ..... 1	2.4.2 随机误差的正态分布 ..... 32
1.1.2 电子测量 ..... 1	2.4.3 有限次测量下测量结果的表达 ... 36
1.2 电子测量的内容和特点 ..... 2	2.5 系统误差分析 ..... 37
1.2.1 电子测量的内容 ..... 2	2.5.1 系统误差的特性 ..... 37
1.2.2 电子测量的特点 ..... 3	2.5.2 系统误差的判断 ..... 38
1.3 电子测量方法的分类 ..... 4	2.5.3 消除系统误差产生的根源 ..... 39
1.4 电子测量仪器的功能、分类和主要性能指标 ..... 7	2.5.4 削弱系统误差的典型测量技术 ... 39
1.4.1 测量仪器的功能 ..... 7	2.5.5 消除或削弱系统误差的其他方法 ..... 43
1.4.2 测量仪器的分类 ..... 8	<b>* 2.6 系统误差的合成</b> ..... 45
1.4.3 测量仪器的主要性能指标 ..... 9	2.6.1 误差的合成 ..... 45
1.5 计量的基本概念 ..... 12	2.6.2 常用函数的合成误差 ..... 46
1.5.1 计量 ..... 12	2.6.3 系统不确定度 ..... 49
1.5.2 单位制 ..... 12	2.7 测量数据的处理 ..... 51
1.5.3 计量基准 ..... 13	2.7.1 有效数字的处理 ..... 51
1.5.4 量值的传递与跟踪, 检定与比对 ..... 14	2.7.2 等精度测量结果的处理 ..... 53
小结 ..... 15	小结 ..... 55
习题 1 ..... 15	习题 2 ..... 56
<b>第 2 章 测量误差和测量结果处理</b> ..... 17	<b>第 3 章 信号发生器</b> ..... 61
2.1 测量误差的基本概念 ..... 17	3.1 信号发生器概述 ..... 61
2.1.1 误差概念 ..... 17	3.1.1 信号发生器的用途 ..... 61
2.1.2 误差的表示方法 ..... 19	3.1.2 信号发生器的分类 ..... 61
2.1.3 测量仪器的容许误差 ..... 23	3.1.3 信号发生器的基本构成 ..... 63
2.2 测量误差的来源 ..... 25	3.1.4 信号发生器的发展趋势 ..... 63
2.2.1 仪器误差 ..... 25	3.2 正弦信号发生器的性能指标 ..... 63
2.2.2 使用误差 ..... 25	3.2.1 频率范围 ..... 64
2.2.3 人身误差 ..... 26	3.2.2 频率准确度 ..... 64
2.2.4 影响误差 ..... 26	3.2.3 频率稳定度 ..... 64
2.2.5 方法误差 ..... 26	3.2.4 由温度、电源、负载变化引起的频率变动量 ..... 65
2.3 误差的分类 ..... 27	3.2.5 非线性失真系数(失真度) ..... 65
2.3.1 系统误差 ..... 27	3.2.6 输出阻抗 ..... 66
2.3.2 随机误差 ..... 28	3.2.7 输出电平 ..... 66
2.3.3 粗大误差 ..... 30	3.2.8 调制特性 ..... 67

3.3 低频、超低频信号发生器 .....	67	* 4.6 高速示波器和取样示波器 .....	125
3.3.1 低频信号发生器 .....	67	4.6.1 高速示波器 .....	125
3.3.2 超低频信号发生器 .....	72	4.6.2 取样示波器 .....	126
3.3.3 低频信号发生器的发展现状 .....	79	* 4.7 记忆示波器与数字存储示波器 .....	129
3.4 射频信号发生器 .....	80	4.7.1 记忆示波器 .....	129
3.4.1 调谐信号发生器 .....	80	4.7.2 数字存储示波器 .....	132
3.4.2 锁相信号发生器 .....	82	* 4.8 数字化波形处理系统简介 .....	135
3.4.3 合成信号发生器 .....	84	小结 .....	135
3.4.4 射频信号发生器代表性产品的 性能介绍 .....	85	习题 4 .....	137
3.5 扫频信号发生器 .....	86	<b>第 5 章 频率时间测量</b> .....	139
3.5.1 线性电路幅频特性的测量 .....	86	5.1 频率时间测量概述 .....	139
3.5.2 扫频仪的基本构成 .....	89	5.1.1 时间、频率的基本概念 .....	139
3.5.3 BT-3 型扫频仪 .....	91	5.1.2 频率测量方法概述 .....	142
3.6 脉冲信号发生器 .....	93	5.2 电子计数法测量频率 .....	143
3.6.1 脉冲信号 .....	93	5.2.1 电子计数法测量频率的原理 .....	143
3.6.2 脉冲信号发生器的分类 .....	94	5.2.2 误差分析计算 .....	144
3.6.3 脉冲信号发生器的结构 .....	95	5.2.3 测量频率范围的扩大 .....	146
3.6.4 脉冲信号源的应用 .....	98	5.3 电子计数法测量周期 .....	147
* 3.7 噪声信号发生器 .....	99	5.3.1 电子计数法测量周期的原理 .....	147
3.7.1 噪声源 .....	100	5.3.2 电子计数器测量周期的 误差分析 .....	149
3.7.2 变换器 .....	101	5.3.3 中介频率 .....	151
3.7.3 输出衰减器 .....	101	5.4 电子计数法测量时间间隔 .....	153
小结 .....	101	5.4.1 电子计数法测量时间间隔的 原理 .....	153
习题 3 .....	102	5.4.2 电子计数器测量时间间隔的 误差分析 .....	154
<b>第 4 章 电子示波器</b> .....	104	5.5 典型通用电子计数器 E-312 .....	155
4.1 电子示波器概述 .....	104	5.5.1 E-312 型电子计数式频率计的 主要技术指标 .....	156
4.2 示波管 .....	105	5.5.2 E-312 型电子计数式频率计的 原理 .....	156
4.2.1 电子枪 .....	106	5.5.3 应用 E-312 进行测量 .....	158
4.2.2 偏转系统 .....	106	5.5.4 计数器的发展动态 .....	160
4.2.3 荧光屏 .....	107	5.6 测量频率的其他方法 .....	161
4.3 电子示波器的结构框图与性能 .....	108	5.6.1 直读法测频 .....	161
4.3.1 电子示波器的结构框图 .....	108	5.6.2 比较法测频 .....	164
4.3.2 示波器的主要性能指标 .....	109	小结 .....	170
4.4 电子示波器的 Y、X 通道及 校正器 .....	111	习题 5 .....	172
4.4.1 垂直偏转通道(Y 通道) .....	112	<b>第 6 章 相位差测量</b> .....	174
4.4.2 水平偏转通道(X 通道) .....	115	6.1 相位差测量概述 .....	174
4.4.3 校正器 .....	119	6.2 用示波器测量相位差 .....	174
4.5 双踪和双线示波器 .....	120	6.2.1 直接比较法 .....	175
4.5.1 双踪示波器 .....	120		
4.5.2 双线示波器 .....	121		
4.5.3 SR-8 型双踪示波器 .....	122		

6.2.2 椭圆法 .....	176	小结 .....	235
6.3 相位差转换为时间间隔进行测量 .....	177	习题 7 .....	237
6.3.1 模拟式直读相位计 .....	178	<b>* 第 8 章 阻抗测量 .....</b>	<b>240</b>
6.3.2 数字式相位计 .....	179	8.1 阻抗测量概述 .....	240
6.4 相位差转换为电压进行测量 .....	183	8.1.1 阻抗的定义及其表示方法 .....	240
6.4.1 差接式相位检波电路 .....	184	8.1.2 电阻器、电感器和电容器的 电路模型 .....	241
6.4.2 平衡式相位检波电路 .....	185	8.2 电桥法测量阻抗 .....	245
6.5 零示法测量相位差 .....	187	8.2.1 电桥平衡条件 .....	245
6.6 测量范围的扩展 .....	188	8.2.2 交流电桥的收敛性 .....	246
小结 .....	190	8.2.3 电桥电路 .....	247
习题 6 .....	191	8.2.4 电桥的电源和指示器 .....	251
<b>第 7 章 电压测量 .....</b>	<b>192</b>	8.2.5 电桥的屏蔽和防护 .....	251
7.1 电压测量概述 .....	192	8.3 谐振法测量阻抗 .....	254
7.1.1 电压测量的重要性 .....	192	8.3.1 谐振法测量阻抗的原理 .....	254
7.1.2 电压测量的特点 .....	192	8.3.2 Q 表的原理 .....	256
7.1.3 电压测量仪器的分类 .....	193	8.3.3 元件参数的测量 .....	257
7.2 模拟式直流电压测量 .....	194	8.3.4 数字式 Q 表的原理 .....	262
7.2.1 动圈式电压表 .....	194	8.4 利用变换器测量阻抗 .....	263
7.2.2 电子电压表 .....	197	8.4.1 电阻-电压变换器法 .....	263
7.3 交流电压的表征和测量方法 .....	200	8.4.2 阻抗-电压变换器法 .....	264
7.3.1 交流电压的表征 .....	200	小结 .....	265
7.3.2 交流电压的测量方法 .....	203	习题 8 .....	266
7.4 低频交流电压测量 .....	206	<b>* 第 9 章 噪声测量 .....</b>	<b>268</b>
7.4.1 均值电压表 .....	206	9.1 噪声测量概述 .....	268
7.4.2 波形换算 .....	208	9.2 噪声的统计特性及其测量 .....	268
7.4.3 均值检波器误差 .....	209	9.2.1 噪声的统计特性 .....	269
7.4.4 有效值检波器 .....	210	9.2.2 噪声特性的测量 .....	271
7.4.5 分贝值的测量 .....	212	9.3 器件的噪声参数及其测量 .....	273
7.5 高频交流电压测量 .....	213	9.3.1 等效输入噪声电压及其测量 .....	274
7.5.1 峰值检波器 .....	213	9.3.2 等效噪声电阻及其测量 .....	275
7.5.2 误差分析 .....	216	9.3.3 等效噪声带宽及其测量 .....	275
7.5.3 波形换算 .....	217	9.3.4 噪声系数及其测量 .....	276
7.6 脉冲电压测量 .....	218	9.3.5 等效噪声温度 .....	278
7.6.1 用示波器测量脉冲电压 .....	218	9.3.6 放大器的噪声等效电路 .....	278
7.6.2 用脉冲电压表测量脉冲电压 .....	219	小结 .....	279
7.7 电压的数字式测量 .....	222	习题 9 .....	280
7.7.1 概述 .....	222	<b>* 第 10 章 数据域测量与测量新 技术简介 .....</b>	<b>281</b>
7.7.2 数字式电压表(DVM)的 组成原理 .....	223	10.1 数据域测量的基本概念 .....	281
7.7.3 DVM 的主要类型 .....	226	10.1.1 数据域测量的特点 .....	281
7.7.4 逐次比较型 DVM .....	227	10.1.2 数字信号的特点 .....	282
7.7.5 双积分型 DVM .....	230		
7.7.6 DVM 的技术指标 .....	232		

10.2 数据域测量技术 .....	283	10.4.1 矢量网络分析测试技术 .....	300
10.2.1 简单逻辑电路的简易测试 .....	283	10.4.2 调制域测试技术 .....	300
10.2.2 穷举测试和随机测试 .....	285	10.4.3 VXI总线技术 .....	301
10.2.3 数据域测量技术 .....	287	10.4.4 智能仪器 .....	302
10.3 逻辑分析仪 .....	288	10.4.5 虚拟仪器 .....	302
10.3.1 逻辑分析仪的组成 .....	289	小结 .....	303
10.3.2 逻辑分析仪的触发方式 .....	289	习题 10 .....	303
10.3.3 逻辑分析仪的显示方式 .....	292	<b>部分习题参考答案</b> .....	305
10.3.4 逻辑分析仪的应用 .....	295	<b>参考文献</b> .....	308
10.3.5 逻辑分析仪的发展概况 .....	298		
10.4 测量新技术简介 .....	300		

# 第 1 章 电子测量与计量的基本概念

## 1.1 测量与电子测量

### 1.1.1 测量

测量是通过实验方法对客观事物取得数量信息的过程。人们通过对客观事物的大量观察和测量形成定性和定量的认识，归纳总结，建立起各种定理和定律，而后又通过测量来验证这些认识、定理和定律是否符合实际情况，经过如此反复实践，逐步认识事物的客观规律，并用以解释和改造世界。因此可以说，测量是人类认识和改造世界的一种不可或缺的手段。俄国科学家门捷列夫(Л. П. Менделеев)在论述测量的意义时曾说过：“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”。这些话都极为精辟地阐明了测量的重要意义。历史事实也已证明：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，可以说，评价一个国家的科技状态，最快捷的办法就是去审视那里所进行的测量以及由测量所累积的数据是如何被利用的。”

### 1.1.2 电子测量

电子测量是以电子技术理论为依据、以电子测量仪器为手段，对电量和非电量进行测量的一种测量技术。在对非电量进行测量时，先通过各种传感器将非电量转换为电量，然后再实现对非电量的测量。

电子测量方法往往更加方便、快捷、准确，有时是用其他测量方法所不能替代的。因此，电子测量不仅用于电学各专业，也广泛用于物理学、化学、机械学、材料学、生物学、医学、航空航天等科学领域及生产、国防、交通、通信、商业贸易、生态环境保护乃至日常生活的各个方面。

近几十年来计算技术和微电子技术的迅猛发展为电子测量和测量仪器增添了巨大活力。电子计算机尤其是微型计算机与电子测量仪器相结合，构成了一代崭新的仪器和测试系统，即人们通常所说的“智能仪器”和“自动测试系统”，它们能够对若干电参数进行自动测量、自动量程选择、数据记录和处理、数据传输、误差修正、自检自校、故障诊断及在线测试等，不仅改变了若干传统测量的概念，更对整个电子技术和其他科学技术产生了巨大

的推动作用。现在，电子测量技术(包括测量理论、测量方法、测量仪器装置等)已成为电子科学领域重要且发展迅速的分支学科。

## 1.2 电子测量的内容和特点

### 1.2.1 电子测量的内容

通常人们把电参数测量分为电磁测量和电子测量两类。电磁测量的内容包括交直流电量的指示测量和比较测量以及磁量的测量等。电子测量的内容包括对电量和非电量所进行的测量。其中，对电量的测量可细分为以下几个方面。

#### 1. 电能量测量

电能量测量包括对各种频率、波形下的电压、电流、功率等的测量。

#### 2. 电信号特性测量

电信号特性测量可分为时域、频域和数据域特性测量，具体包括对波形、频率、周期、相位、失真度、调幅度、调频指数、群延迟、信号带宽以及数字信号的逻辑状态等的测量。

#### 3. 电路元件参数测量

电路元件参数测量包括对电阻、电感、电容、阻抗、品质因数及电子器件参数等的测量。

#### 4. 电子设备的性能测量

电子设备的性能测量包括对增益、衰减、灵敏度、频率特性、噪声指数等的测量。

上述各项测量内容中，尤以对频率、时间、电压、相位、阻抗等基本电参数的测量更为重要，它们往往是其他参数测量的基础。例如，放大器的增益测量实际上就是对其输入、输出端电压的测量，再相比取对数得到增益分贝数；脉冲信号波形参数的测量可归结为对电压和时间的测量；许多情况下电流测量是不方便的，常以电压测量来代替。同时，由于时间和频率测量具有其他测量所不可比拟的精确性，因此人们越来越关注把对其他待测量的测量转换成对时间或频率的测量的方法和技术。

在科学研究和生产实践中，常常需要对许多非电量进行测量。传感技术的发展为这类测量提供了新的方法和途径。现在，可以利用各种敏感元件和传感装置将非电量(如位移、速度、温度、压力、流量、物质成分等)变换成电信号，再利用电子测量设备进行测量。在一些危险的和人们无法进行直接测量的场合，这种方法几乎成为唯一的选择。在生产自动过程控制系统中，将生产过程中各有关非电量转换成电信号进行测量、分析、记录并据此对生产过程进行控制是一种典型的方法，如图 1.1-1 所示。

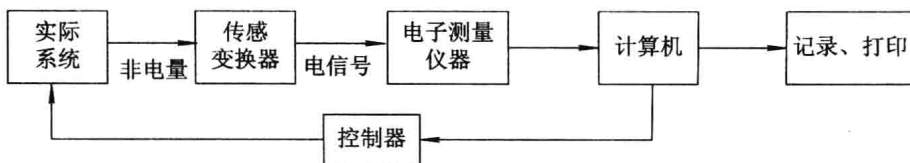


图 1.1-1 自动过程控制系统中非电量的测量

### 1.2.2 电子测量的特点

与其他测量方法和测量仪器相比,电子测量和电子测量仪器具有以下特点。

#### (1) 测量频率范围宽。

电子测量中所遇到的测量对象,其频率覆盖范围极宽,低至 $10^{-6}$  Hz,高至 $10^{12}$  Hz。当然,不能要求同一台仪器能在这样宽的频率范围内工作,通常根据不同的工作频段采用不同的测量原理,使用不同的测量仪器。例如阻抗的测量,在低频段多采用电流电压法,而在微波段则必须采用开槽测量线或反射计技术。上述两种方法无论在原理上,还是在测量设备上都大不一样。当然,随着技术的发展,能在相当宽的频率范围内正常工作的仪器不断地被研制出来。例如,现在一台较为先进的频率计,其频率测量范围可低至 $10^{-6}$  Hz,高至 $10^{11}$  Hz。

#### (2) 测量量程宽。

量程是测量范围的上、下限值之差或上、下限值之比。电子测量的另一个特点是被测对象的量值大小相差悬殊。例如,地面上接收到的宇宙飞船自外太空发来的信号功率低至 $10^{-14}$  W数量级,而远程雷达发射的脉冲功率可高达 $10^8$  W,两者之比为 $1:10^{22}$ 。一般情况下,使用同一台仪器,同一种测量方法,是难以覆盖如此宽广的量程的。如前所述,随着电子测量技术的不断发展,单台测量仪器的量程也可以很高。例如中档的国产YM3371型数字频率计,其测频范围为10 Hz~1000 MHz,国产WC2180型交流微伏表可以测量 $5\ \mu\text{V}\sim 300\ \text{V}$ 的交流电压,量程为 $1:(6\times 10^7)$ 。一些更为先进的仪器,其量程更宽。例如高档的数字万用表直接测量的电阻值为 $3\times 10^{-5}\sim 3\times 10^8\ \Omega$ ,量程为 $1:10^{13}$ 。前面提及的较完善的电子计数式频率计,其量程达 $1:10^{17}$ 。

#### (3) 测量准确度高低相差悬殊。

就整个电子测量所涉及的测量内容而言,测量结果的准确度是不一样的,有些参数的测量准确度可以很高,而有些参数的测量准确度却又相当低。例如,对频率和时间的测量准确度可以达到 $10^{-13}\sim 10^{-11}$ 的数量级,这是目前在测量准确度方面达到的最高指标,而长度测量的最高准确度为 $10^{-8}$ 数量级。可惜除了频率和时间的测量准确度很高之外,其他参数的测量准确度相对都比较低。例如,直流电压的准确度当前可达到 $10^{-6}$ 数量级,音频电压为 $10^{-4}$ 数量级,射频电压仅为 $10^{-3}$ 数量级,而品质因数Q值和电场强度的测量准确度只有 $10^{-1}$ 数量级。造成这种现象的主要原因在于电磁现象本身的性质,使得测量结果极易受到外部环境的影响,尤其在较高频段,待测装置和测量装置之间、装置内部各元器件之间的电磁耦合、外界干扰及测量电路中的损耗等对测量结果的影响往往不能忽略却又无法精确估计。

#### (4) 测量速度快。

由于电子测量基于电子运动和电磁波的传播,加之现代测试系统中高速电子计算机的应用,使得电子测量无论在测量速度还是在测量结果的处理和传输上都可以以极高的速度进行,这也是电子测量技术广泛应用于现代科技各个领域的重要原因。比如卫星、飞船等各种航天器的发射与运行,没有快速、自动的测量与控制,简直是无法想象的。

#### (5) 可以进行遥测。

如前所述,电子测量依据的是电子的运动和电磁波的传播,因此可以将现场各待测量

转换成易于传输的电信号,用有线或无线的方式传送到测试控制台(中心),从而实现遥测和遥控。这使得对那些远距离的、高速运动的或其他人们难以接近的地方的信号进行测量成为可能。

#### (6) 易于实现测试智能化和测试自动化。

电子测量本身是电子学科一个活跃的分支,电子科学的每一项进步都会非常迅速地在电子测量领域得到体现。电子计算机尤其是功耗低、体积小、处理速度快、可靠性高的微型计算机的出现,给电子测量理论、技术和设备带来了新的革命。比如,微处理器出现于1971年,而在1972年就出现了使用微处理器的自动电容电桥。现在,已有大量商品化带微处理器的电子测量仪器面世,许多仪器还带有 GPIB 标准仪器接口,可以方便地构成功能完善的自动测试系统。无疑,电子测试技术与计算机技术的紧密结合和相互促进,为测量领域带来了极为美好的前景。

#### (7) 影响因素众多,误差处理复杂。

任何测量都不可避免地会产生误差,如果不能准确地确定误差或误差范围的大小,则无法衡量测量结果的准确程度、测量结果的可靠性或可信性,从而也就失去了测量的意义和价值。造成测量误差的原因是多方面的。客观上影响测量结果及测量误差的因素大体上可分为外部因素和内部因素。能对测量结果产生影响的量称为影响量,它通常来自测量系统的外部,如环境温度、湿度、电源电压、外界电磁干扰等。测量系统内部会对测量结果产生影响的工作特性,称为影响特性。例如,交流电压表中检波器的检波特性会随着被测电压的频率和波形而有所改变,从而影响测量结果。前面已经提到,电子测量中另一个难以避免而又无法准确估算其实际影响大小的因素是测量仪器内部各元器件之间、测量与被测量装置之间无时无刻不在的寄生电容、电感、电导等的不良影响。不难看出,电子测量中的影响量和影响特性众多而又复杂,其规律难以确定,这就给测量结果的误差分析和处理带来了困难。

## 1.3 电子测量方法的分类

一个物理量的测量可以通过不同的方法实现。测量方法选择得正确与否直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量工作的经济性和可行性。不当或错误的测量方法除了得不到正确的测量结果外,甚至会损坏测量仪器和被测量设备。有了先进精密的测量仪器设备,并不等于就一定能获得准确的测量结果。必须根据不同的测量对象、测量要求和测量条件,选择正确的测量方法、合适的测量仪器,构成实际测量系统,进行正确、细心的操作,才能得到理想的测量结果。

### 1. 测量方法的分类

测量方法的分类形式有多种,下面介绍几种常见的分类方法。

#### 1) 按测量过程分类

(1) 直接测量。直接测量是指直接从测量仪表的读数获取被测量量值的方法,比如用电压表测量晶体管的工作电压,用欧姆表测量电阻阻值,用计数式频率计测量频率等。直接测量的特点是不需要对被测量与其他实测的量进行函数关系的辅助运算,因此测量过程简单、迅速,是工程测量中广泛应用的测量方法。

(2) 间接测量。间接测量是利用直接测量的量与被测量之间的函数关系(可以是公式、



曲线或表格等)间接得到被测量值的测量方法。例如需要测量电阻  $R$  上消耗的直流功率  $P$ , 可以通过直接测量电压  $U$ 、电流  $I$ , 而后根据函数关系  $P=UI$ , 经过计算, “间接”获得功耗  $P$ 。

间接测量费时、费事, 常在下列情况下使用: 直接测量不方便, 或间接测量的结果较直接测量更为准确, 或缺少直接测量仪器等。

(3) 组合测量。当某项测量结果需用多个未知参数表达时, 可通过改变测量条件进行多次测量, 根据测量量与未知参数间的函数关系列出方程组并求解, 进而得到未知量, 这种测量方法称为组合测量。一个典型的例子是电阻器的温度系数的测量。已知电阻器阻值  $R_t$  与温度  $t$  间满足关系:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1.3-1)$$

式中,  $R_{20}$  为  $t=20^\circ\text{C}$  时的电阻值, 一般为已知量;  $\alpha$ 、 $\beta$  为电阻的温度系数;  $t$  为环境温度。为了获得  $\alpha$ 、 $\beta$  值, 可以在两个不同的温度  $t_1$ 、 $t_2$  ( $t_1$ 、 $t_2$  可由温度计直接测得) 下测得相应的两个电阻值  $R_{t1}$ 、 $R_{t2}$ , 代入式(1.3-1)得到联立方程:

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \end{cases} \quad (1.3-2)$$

求解联立方程(1.3-2), 就可以得到  $\alpha$ 、 $\beta$  值。如果  $R_{20}$  也未知, 则显然可在三个不同的温度下分别测得  $R_{t1}$ 、 $R_{t2}$ 、 $R_{t3}$ , 列出由三个方程构成的方程组并求解, 进而得到  $R_{20}$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 。

## 2) 按测量方式分类

(1) 偏差式测量法。在测量过程中, 用仪器仪表指针的位移(偏差)表示被测量大小的测量方法称为偏差式测量法, 例如使用万用表测量电压、电流等。由于从仪表刻度上直接读取被测量, 包括大小和单位, 因此这种方法也叫直读法。用这种方法测量时, 作为计量标准的实物并不装在仪表内直接参与测量, 而是事先用标准量具对仪表读数、刻度进行校准, 实际测量时根据指针偏转大小确定被测量量值。

这种方法的显著优点是简单、方便, 因此在工程测量中被广泛采用。

(2) 零位式测量法。零位式测量法又称作零示法或平衡式测量法。测量时将被测量与标准量相比较(因此也把这种方法称作比较测量法), 用指零仪表(零示器)指示被测量与标准量相等(平衡), 从而获得被测量。利用惠斯登电桥测量电阻(或电容、电感)是这种方法的一个典型例子, 如图 1.3-1 所示。

当电桥平衡时, 可以得到:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 \quad (1.3-3)$$

通常是先大致调整比率  $R_1/R_2$ , 再调整标准电阻  $R_4$ , 直至电桥平衡, 充当零示器的检流计 PA 指示为零, 此时即可根据式(1.3-3)由比率和  $R_4$  值得到被测电阻  $R_x$  值。

只要零示器的灵敏度足够高, 零位式测量法的测量准确度就几乎等于标准量的准确度, 因而这种方法的测量准确度很高, 这是它的主要优点, 常用在实验室作为精密测量的一种方法。但由于测量过程中为了获得平衡状态需要进行反复调节, 因此即使采用一些自动平衡技术, 测量速度仍然较慢, 这是这种方法的一个不足之处。

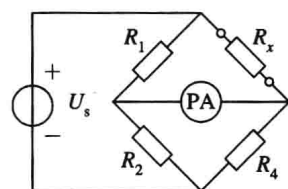


图 1.3-1 利用惠斯登电桥测量电阻示意图