



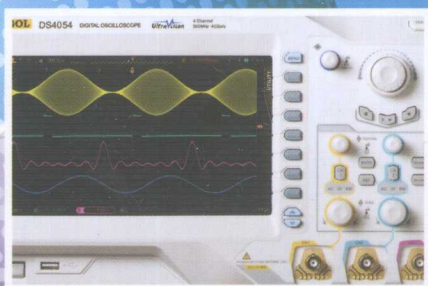
普通高等教育“十二五”规划教材
全国电子信息类优秀教材一等奖

◎ 电子信息科学与工程类专业 规划教材

电子测量与仪器

(第3版)

◎ 陈尚松 郭庆 黄新 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十二五”规划教材
全国电子信息类优秀教材一等奖
电子信息科学与工程类专业规划教材

电子测量与仪器 (第3版)

陈尚松 郭庆 黄新 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书按照高等学校电子信息科学与工程类专业的教学要求编写。内容包括:绪论、误差与不确定度、信号发生器、时频测量、电压测量、时域测量、阻抗测量、频域测量、数据域测试及自动测试技术,共10章。每章均附有本章要点、小结和思考题与习题。本书配有电子课件及习题解答。

本书在选材上具有系统性、先进性和实用性特点。全书深入浅出,图文并茂,内容丰富,适用面广。本书可作为高等学校理工类本科、专科电子信息类专业的教材或参考书,也可供从事电子技术工作的科技人员参考,还可作为各类成人职业教育的培训教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量与仪器 / 陈尚松, 郭庆, 黄新编著. —3版. —北京: 电子工业出版社, 2012.7
电子信息科学与工程类专业规划教材
ISBN 978-7-121-17422-3

I. ①电… II. ①陈… ②郭… ③黄… III. ①电子测量—高等学校—教材②电子测量设备—高等学校—教材IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 135754 号

责任编辑:冉 哲

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司
装 订:

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:25.75 字数:693 千字

印 次:2012 年 7 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:49.80 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 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

《电子测量与仪器》教材第1版于2005年1月出版发行,第2版于2009年1月出版发行,先后印刷了15次。现已被近百所院校选用,也为业界科技人员和工厂企业技术人员所欢迎。2007年被评为广西优秀教材一等奖,2010年被评为全国电子信息类优秀教材一等奖。本教材是电子信息科学与工程类专业规划教材,已列为普通高等教育“十二五”规划教材。

由于电子测量与仪器技术发展很快,教材中一些内容应与时俱进,在技术上要跟进更新。同时,在教学中发现教材尚有错漏及不妥之处需要更改。为此,有必要对第2版教材进行修订。

第3版是在第2版教材的基础上修订而成。基本上保留了第2版的主要内容和特色,但也更新了不少重要的内容。变动较大的是以下章节内容:

1. 第2章“误差与不确定度”修改较多。其中,根据《国际计量学词汇——通用、基本概念及相关术语》第3版和国家计量技术规范《通用计量术语及定义》(JJF 1001—1998)对有关误差的名词、定义、性质做了修正;对测量误差的定义引入了“参考量值”的概念。对国家计量技术规范《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059—1999)做了较深入的探讨,加深了对不确定度的理解,完善了对不确定度的评定方法,规范了测量不确定度的计算步骤和表示方法。这章修订后会更有利于读者对误差和不确定度的理解与应用。根据中国合格评定国家认可委员会于2006年6月发布的《能力验证结果的统计处理和能力评价指南》(CNAS—GL02)对校准实验室间能力验证计划的结果处理方法做了简明的实用性介绍,并给出了如何区分不确定度是否符合要求的方法。

2. 第6章“时域测量”从显示屏出发分别介绍示波管和TFT液晶屏,另外由于当今数字示波器已占主导地位,故教材削减了模拟示波器中的一些细节内容。但是,模拟示波器是数字示波器的基础,许多基本原理、术语、技术指标和应用方法都是在模拟示波器的基础上发展起来的,有些领域还在应用模拟示波器及其相关的技术产品,因此还得先介绍模拟示波器,然后重点讨论数字示波器。在模拟示波器中精减了内容,对原来繁杂的水平(X)通道做了较大的删改,使“扫描环”概念更加清晰易懂。在数字示波器中,修改了数字示波器的原理框图、技术性能指标及高速A/D转换器、存储器结构、触发类型等内容,并通过北京普源精电公司生产的DS1012D经济型混合信号数字示波器的具体实例介绍了数字示波器的使用方法。

3. 第8章“频域测量”对频谱仪原理的引入做了形象的图解,引导学生逆向思维的方法。其中增加频谱仪实例,指出了现代频谱仪大多已引入计算机的操作平台,增加了许多新功能,故有些产品已将频谱仪改称为信号分析仪。删减了微波网络分析仪及频谱仪应用中的部分内容。

4. 第9章“数据域测试”修改较多。其中加强和更新了逻辑分析仪的内容,增加了实例与应用。对可测性设计也根据实际发展状况做了简明介绍。

5. 第10章由“现代电子测量技术”改为“自动测试技术”,其中增加了下一代自动测试技术,介绍了合成仪器、AXIe总线等内容。

其他章节没有大的修改,但都有局部的更新。仪器的技术参数也根据发展情况做了修订。在有些章节中还删去了一些应用价值不大的内容。

修订后的第3版教材具有以下特点:

1. 相比同类教材内容较新、实用性强。在《国外电子测量技术》杂志社和相关国内外厂商的

帮助下更新了教材中各种仪器参数,增加了一些新型仪器。

2. 按国家技术规范对误差与不确定度做了精练的阐述,删繁就简,概念明确,计算方法、步骤清晰,更便于学习理解与实际应用。

3. 按发展历程讲解仪器原理,容易入门,叙述深入浅出,图文并茂,适合自学,同时也有些扩展或深入的内容可供教学和科研的不同需求选用。

4. 理论联系实际。既讲电子测量原理,又讲具体仪器应用,通过实例与仪器型号、参数介绍,加深对仪器的认识和对国内外技术水平的了解。

5. “弘扬民族品牌,宣讲国产仪器”。书中列举了国产仪器型号、参数及实例,以树立民族自信心,激励我国电子仪器事业的发展。

第3版修订工作主要由陈尚松教授、郭庆教授及黄新副教授完成。李长俊、胡鸿志、胡锦涛等老师为教材修订提出了很好的意见。王月娥、梁勇和黄山学院周云艳等老师为教材的勘误、校对做了很细致的工作。北京《仪器仪表学报》杂志译审汪铁华老师帮助审定了译文资料。在修订中参考或引用了相关教材和论文中的有关内容,包括列入参考文献的,在此顺致诚挚的感谢。

第3版修订工作得到了桂林电子科技大学有关领导的支持与帮助,得到了《国外电子测量技术》、《电子测量与仪器》、《电子测量技术》杂志社的支持和帮助,得到了中国电子科技集团公司第41研究所、北京普源精电科技有限公司、广州致远电子股份有限公司、石家庄数英仪器有限公司(原无线电四厂)和成都前锋电子仪器厂等单位的支持和帮助,得到了采用本书作为教材的兄弟院校任课教师的支持和帮助,得到了电子工业出版社的支持和帮助,在此,一并致以衷心的感谢!

由于作者水平所限,错漏和不当之处,恳请同行和读者批评指正。尤其是对选用本书作为教材的教师,欢迎加强联系,共同切磋书中的内容及习题的解答,探讨教学心得,共同教好这门课程。

书中标有※号的章节,可供不同教学计划要求选用。本书配有电子课件及习题解答,可向任课教师免费提供,请登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)注册后免费下载,或联系作者。与本书配套的实验教材也将出版,欢迎订购。

联系地址:桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院 陈尚松收

邮编:541004

电话:0773-2291254/2291047/2291522

E-mail: tcr@guet.edu.cn

QQ号:798405139

陈尚松

于桂林电子科技大学

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4 系统误差	33
1.1 电子测量概述	1	2.4.1 系统误差的产生原因	33
1.1.1 测量及其重要意义	1	2.4.2 系统误差的检查和判别	34
1.1.2 电子测量的任务与内容	1	2.4.3 削弱系统误差的 基本方法	36
1.1.3 电子测量的特点	2	2.4.4 重复性测量结果的 数据处理	38
1.1.4 电子测量的方法	3	2.5 误差的合成与分配	40
1.2 电子测量仪器概述	4	2.5.1 测量误差的合成	40
1.2.1 电子测量仪器的功能	5	2.5.2 测量误差的分配	43
1.2.2 电子测量仪器的分类	5	2.5.3 最佳测量方案的选择	45
1.3 计量的基本概念	6	2.6 测量不确定度	46
1.3.1 计量	6	2.6.1 测量不确定度概述	46
1.3.2 单位制	7	2.6.2 标准不确定度的评定	49
1.3.3 计量基准	7	2.6.3 测量不确定度的合成	52
1.3.4 量值的传递与跟踪、 检定与比对	8	2.6.4 扩展(展伸)不确定度	55
1.4 电子测量仪器的发展概况	9	2.6.5 不确定度的报告	56
1.5 本课程任务	10	2.6.6 测量不确定度的应用与 实例	57
本章小结	11	2.7 测量数据处理	61
思考题与习题	12	2.7.1 有效数字的处理	61
第 2 章 误差与不确定度	13	2.7.2 测量数据的表示方法	63
2.1 误差的概念与表示方法	13	本章小结	65
2.1.1 测量误差	13	思考题与习题	68
2.1.2 误差的表示方法	14	第 3 章 信号发生器	71
2.1.3 误差的性质与分类	16	3.1 信号发生器概述	71
2.1.4 基本术语	18	3.1.1 信号发生器的功用	71
2.2 随机误差	19	3.1.2 信号发生器的分类	71
2.2.1 定义与性质	19	3.1.3 正弦信号发生器的 性能指标	73
2.2.2 随机误差的统计处理	21	3.2 模拟信号发生器	76
2.2.3 有限次测值的算术平均值 和标准差	23	3.2.1 低频信号发生器	76
2.2.4 测量结果的置信度	26	3.2.2 高频信号发生器	78
2.2.5 非等精度测量	28	3.2.3 脉冲信号发生器	82
2.3 粗大误差	31	3.2.4 函数信号发生器	84
2.3.1 莱特检验法	31	3.2.5 噪声发生器	85
2.3.2 格拉布斯检验法	31	3.3 合成信号发生器	86
2.3.3 中位数检验法	31		
2.3.4 应用举例	32		

3.3.1 直接模拟频率合成法	86	4.7 调制域测量	140
3.3.2 直接数字频率合成法	88	4.7.1 调制域分析概述	140
3.3.3 间接合成法	93	4.7.2 调制域分析的关键技术	141
3.3.4 频率合成技术的进展	98	4.7.3 调制域分析仪的应用	142
3.4 射频合成信号发生器(数字调制 信号源、矢量信号源)	101	本章小结	144
3.4.1 射频合成信号发生器 基本原理	101	思考题与习题	145
3.4.2 实例 1:AV1485 数字 调制信号发生器	102	第 5 章 电压测量	147
3.4.3 实例 2:QF1484 矢量信号 发生器	103	5.1 概述	147
本章小结	105	5.1.1 电压测量的重要性	147
思考题与习题	106	5.1.2 对电压测量的基本要求	147
第 4 章 时频测量	109	5.1.3 电压测量仪器的分类	148
4.1 概述	109	※5.2 模拟式直流电压的测量	148
4.1.1 时频关系	109	5.2.1 三用表中的直流电流、 电压测量	148
4.1.2 时频基准	110	5.2.2 直流电子电压表	150
4.1.3 频率测量方法	110	5.3 交流电压的测量	151
4.2 电子计数法测量频率	111	5.3.1 交流电压的表征	151
4.2.1 电子计数法测频原理	111	5.3.2 交流电压的测量	153
4.2.2 误差分析计算	113	※5.3.3 高频电压的测量	159
4.2.3 结论	115	5.3.4 电平(分贝)的测量	161
4.3 电子计数法测量时间	116	※5.3.5 噪声的测量	162
4.3.1 电子计数法测量周期的 原理	116	※5.3.6 脉冲电压的测量	163
4.3.2 电子计数器测量周期的 误差分析	116	5.4 数字电压表概述	164
4.3.3 中界频率	119	5.4.1 数字电压表的组成原理	164
4.3.4 时间间隔的测量	120	5.4.2 数字电压表的主要 工作特性	165
4.4 通用计数器	122	5.4.3 数字电压表的分类	168
4.4.1 概述	122	5.5 积分式 A/D 转换器	168
4.4.2 通用计数器的功能	123	5.5.1 双斜积分式 A/D 转换器	168
4.4.3 单片通用计数器	124	※5.5.2 脉冲调宽式 A/D 转换器原理	174
※4.5 电子计数器性能的改进	126	※5.5.3 压频(V/F)式 A/D 转换器原理	176
4.5.1 多周期同步测频	126	※5.5.4 $\Sigma-\Delta$ 型 A/D 转换器	178
4.5.2 提高测时分分辨率的办法	127	5.5.5 积分式 A/D 转换器 的发展	180
4.5.3 微波计数器	130	5.6 比较式 A/D 转换器	183
※4.6 标准频率源的测量	132	5.6.1 逐次逼近比较式 A/D 转换器	183
4.6.1 频率稳定度的定义	133	5.6.2 余数循环比较式 A/D 转换器	186
4.6.2 长期频率稳定度的表征	133	5.6.3 并联比较式 A/D 转换器 (Flash A/D)	187
4.6.3 短期频率稳定度的表征	134		
4.6.4 标准频率源	140		

※5.6.4 分级型(流水线式)A/D 转换器	188	6.6.1 数字示波器的组成原理	236
5.7 数字多用表	190	6.6.2 信号的采集处理技术	240
5.7.1 交流一直流(AC—DC) 转换器	191	6.6.3 波形显示技术	248
5.7.2 电流—电压(I—V) 转换器	191	6.6.4 技术性能指标	250
5.7.3 电阻—电压(R—V) 转换器	192	6.6.5 基本功能	252
5.7.4 数字多用表的发展近况	193	6.6.6 数字示波器的应用	257
5.8 数字电压表的误差与干扰	195	本章小结	262
5.8.1 数字电压测量 误差公式	195	思考题与习题	264
5.8.2 数字电压表主要部件 误差分析	196	第7章 阻抗测量	266
5.8.3 数字电压测量的 误差合成	198	7.1 概述	266
5.8.4 电压测量的干扰及其 抑制技术	199	7.1.1 阻抗的定义与表示式	266
本章小结	205	7.1.2 阻抗元件 R、L、C 的 基本特性	266
思考题与习题	206	7.1.3 阻抗的测量特点和方法	268
第6章 时域测量	209	7.2 电阻的测量	269
6.1 时域测量引论	209	7.2.1 伏安法	269
6.1.1 示波器的功用	209	7.2.2 三用表中的电阻挡	269
6.1.2 示波器的分类	209	7.2.3 电桥法	272
6.1.3 示波器的组成	210	7.3 电感、电容的测量	273
6.2 示波管及波形显示原理	211	7.3.1 电桥法	273
6.2.1 示波管	211	7.3.2 谐振法(Q表)	275
6.2.2 示波管波形显示原理	213	7.3.3 数字化方法	278
6.3 平板显示技术	216	本章小结	284
6.3.1 平板显示技术概述	216	思考题与习题	284
6.3.2 液晶显示原理	216	第8章 频域测量	286
6.3.3 TFT LCD 的工作原理	217	8.1 线性系统幅频特性的测量	286
6.4 模拟示波器	217	8.1.1 静态频率特性测量: 点频法	286
6.4.1 模拟示波器的组成	217	8.1.2 动态频率特性测量: 扫频法	287
6.4.2 示波器的 Y(垂直)通道	218	8.1.3 扫频仪举例 1:BT—3 型 频率特性测试仪	289
6.4.3 示波器的 X(水平)通道	222	8.1.4 扫频仪举例 2:SA1030 数字 式频率特性测试仪	292
6.4.4 示波器的多波形显示	226	※8.2 微波网络分析仪	295
6.4.5 模拟示波器的应用	228	8.2.1 微波网络特性参数	295
6.5 取样技术在示波器中的应用	233	8.2.2 网络分析仪的组成	297
6.5.1 取样示波器的基本原理	233	8.2.3 微波自动网络分析仪	299
6.5.2 取样示波器的基本组成	235	8.3 频谱分析仪概述	300
6.6 数字示波器	236	8.3.1 信号的时域与频域分析	300
		8.3.2 频谱仪的主要用途	301
		8.3.3 频谱仪原理分类	302
		8.3.4 频谱仪的工作原理	302

8.4 扫频式频谱分析仪	304	9.3.4 边界扫描测试技术	349
8.4.1 工作原理	304	本章小结	356
8.4.2 实例 1:BP-1 型频谱仪	304	思考题与习题	357
8.4.3 实例 2:AV4032 系列 频谱仪	306	第 10 章 自动测试技术	358
※8.5 实时频谱分析仪(RTSA)	308	10.1 自动测试系统	358
8.5.1 概述	308	10.1.1 自动测试系统(CAT 平台)的 基本组成	358
8.5.2 工作原理	309	10.1.2 自动测试系统的发展概况	359
8.5.3 典型产品特性与应用	311	10.2 智能仪器	363
8.6 频谱仪的主要技术特性	312	10.2.1 智能仪器的特点	363
8.6.1 选择性	312	10.2.2 智能仪器的组成	363
8.6.2 灵敏度	315	10.3 虚拟仪器	365
8.6.3 动态范围	315	10.3.1 虚拟仪器的基本概念和 特点	365
8.6.4 典型产品简介与示例	317	10.3.2 虚拟仪器的组成及关键 技术	366
8.7 频谱仪的应用	318	10.3.3 基于不同仪器总线的虚拟 仪器的比较	367
8.7.1 正弦信号的测量	318	10.3.4 虚拟仪器软件结构	368
8.7.2 调幅信号的测量	321	10.4 接口总线及信道	369
8.7.3 调频信号的测量	323	10.4.1 测试系统中常用的接口 总线及信道	369
8.7.4 脉冲调制信号的测量	324	10.4.2 GPIB 接口总线	376
8.7.5 相位噪声的测量	324	10.4.3 VXI 总线	379
本章小结	325	10.4.4 LXI 总线	383
思考题与习题	326	10.5 测试软件	388
第 9 章 数据域测试	327	10.6 自动测试系统的集成	390
9.1 数据域测试概述	327	10.6.1 自动测试系统集成的 步骤	390
9.1.1 数据域的基本概念	327	10.6.2 实例 1:导弹综合测试 系统	391
9.1.2 数据域测试的任务与 故障模型	328	10.6.3 实例 2:无人值守机房自动 监测系统	393
9.1.3 数据域测试系统与仪器	330	10.6.4 实例 3:网络自动气象站	395
9.2 逻辑分析仪的组成原理	334	本章小结	397
9.2.1 逻辑分析仪的特点和分类	334	思考题与习题	398
9.2.2 逻辑分析仪的基本 组成原理	335	附录 A 正态分布在对称区间的 积分表	399
9.2.3 逻辑分析仪的触发方式	335	附录 B t 分布在对称区间的 积分表	400
9.2.4 逻辑分析仪的数据捕获 和存储	337	附录 C 电子测量仪器相关网址	401
9.2.5 逻辑分析仪的显示	339	参考文献	403
9.2.6 逻辑分析仪的主要技术指标及 发展趋势	341		
9.2.7 逻辑分析仪的应用	343		
9.3 可测试性设计	345		
9.3.1 概述	345		
9.3.2 扫描设计技术	346		
9.3.3 内建自测试技术	348		

第1章 绪 论

本章要点

- 测量的重要意义,电子测量的内容、特点与方法
- 电子测量仪器的功能、分类和主要技术指标
- 计量的概念、基准和量值传递
- 电子测量仪器的发展概况

1.1 电子测量概述

1.1.1 测量及其重要意义

测量是人类认识和改造世界的一种重要手段。在人们对客观事物的认识过程中,需要进行定性、定量的分析,定量分析就需要进行测量。测量是通过实验方法对客观事物取得定量数据的过程。通过大量的观察和测量,人们逐步准确地认识各种客观事物,建立起各种定理和定律。例如,牛顿的三大定律,如果没有大量测量验证,就不可能得出这样的科学结论。所以,门捷列夫在论述测量的意义时说过一句名言:“没有测量,就没有科学。”

科学的进步,生产的发展,都需要用测量技术进行定量分析,以取得科学的数据。离开测量,人类就不能真正准确地认识世界,也不能生产出合格的产品。尤其是现代化工业大生产,用在测量上的工时和费用占生产总成本的比例越来越大。例如,在大规模集成电路的生产成本中,测量成本已超过50%。因此,提高测量水平,降低测量成本,对国民经济各个领域的发展都是至关重要的。

在各个历史时期,测量水平的高低可以反映出一个国家科学技术发展的状况。因此,努力提高测量水平,实现测量手段和方法的现代化,是实现科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。

在当今信息时代,测量技术(获取信息)、通信技术(传递信息)和计算机技术(处理信息)被称为信息社会三大支柱。

可见,测量技术是一门很重要的科学技术。

1.1.2 电子测量的任务与内容

电子测量是测量领域的主要组成部分,它泛指以电子技术为基本手段的测量技术。电子测量主要是运用电子科学的原理、方法和设备对各种电量、电信号及电路元器件的特性和参数进行测量,同时还可以通过各种传感器把非电量转换成电量来进行测量。因此,电子测量不仅用于电子领域,而且广泛用于物理学、化学、光学、机械学、材料学、生物学和医学等科学领域,以及生产、国防、交通、商贸、农业、环保乃至日常生活的各个方面。

近几十年来,由于计算机技术和微电子技术的迅猛发展,使电子测量技术发生了质的飞跃。计算机技术与电子测量仪器相结合,构成了新一代的智能仪器和自动测试系统。这不仅改变了一些传统的测量观念,对整个电子技术和其他科学技术也都产生了巨大的推动作用。

通常,人们把电参数测量分为电磁测量和电子测量两类。电磁测量主要是指交直流电量的指示测量法、比较测量法及磁量的测量等。电子测量是指以电子技术理论为依据,以电子测量仪器和设备为手段,对电量或非电量进行的测量。其中,电量测量可分为以下几个方面。

1) 电能量测量

电能量测量包括各种频率、波形下的电压、电流和功率等的测量。

2) 电信号特性测量

电信号特性测量包括波形、频率、周期、相位、失真度、调幅度、调频指数及数字信号的逻辑状态等的测量。

3) 电路元器件参数测量

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

4) 电子设备的性能测量

电子设备的性能测量包括增益、衰减、灵敏度、频率特性和噪声指数等的测量。

在上述各项测量内容中,尤以频率、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其输入/输出端电压的测量,脉冲信号波形参数的测量可归结为电压和时间的测量。在许多情况下,不方便进行电流测量,就以电压测量来代替。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其他待测量转换成时间或频率进行测量的方法和技术。

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。非电量是指各种非电物理量,如压力、位移、温度、湿度、亮度、颜色、物质成分等。非电量测量可以通过各种对应的敏感元件(通常称为传感器),将被测物理量转换成与之相关的电压、电流等,而后再通过对电压、电流的测量,得到被测物理量的大小。传感技术的发展为这类测量提供了新的方法和途径。

1.1.3 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,其频率覆盖范围很宽,低至 10^{-6} Hz 以下,高至 10^{12} Hz 以上。当然,不能要求同一台仪器在这样宽的频率范围内工作。通常,要根据不同的工作频段,采用不同的测量原理并使用不同的测量仪器,例如,超低频信号发生器、音频信号发生器、高频信号发生器等。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,频率测量范围为 $10^{-6} \sim 10^{11}$ Hz。

2. 测量量程宽

量程是指测量范围的上、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量值大小相差悬殊。例如,地面上接收到的宇宙飞船自外空发来的信号功率,低到 10^{-14} W 数量级;而远程雷达发射的脉冲功率,可高达 10^8 W 以上,两者之比为 $1 : 10^{22}$ 。在一般情况下,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达到很宽。例如,高档次的数字万用表可直接测量的电阻值的范围为 $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^8 \Omega$,量程为 $1 : 10^{13}$ 。

3. 测量方便灵活

在电子测量中,各种电量之间的转换很容易实现,如电压、电流、功率、频率等。对于非电量,如温度、湿度、压力、位移等物理量,可通过各种类型的传感器将其转换为电量来测量。可以根据不同的对象、不同的要求,以不同的方式方法很好地完成测量任务。

在电子测量中,可以方便地利用各种转换技术,如分频、倍频、调制、检波、斩波、V/T、V/F、A/D、D/A 等,还可以采用先进的信号处理技术,使测量数据更为准确可靠。电子测量的显示方式也比较清晰、直观,例如,可以采用发光二极管(LED)、液晶显示(LCD)屏和荧光屏显示。测量结果便于打印、绘图、传输、指示或报警。

4. 测量速度快

由于电子测量是基于电子运动和电磁波传播的,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方面,还是在测量结果的处理和传输方面,都能以极高的速度进行。这也是电子测量技术广泛用于现代科技各个领域的重要原因。例如,卫星、飞船等各种航天器的发射与运行,如果没有快速、自动的测量与控制,将是无法想象的。

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、高速运动的,或者人类难以接近的地方的信号测量成为可能。

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科学一个活跃的分支。电子科学的每一项进步,都非常迅速地在电子测量领域得到体现。随着电子计算机,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,使测试易于实现智能化和自动化。

1.1.4 电子测量的方法

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度,也关系到测量工作的经济性和可行性。

测量方法的分类形式有很多种,下面介绍几种常见的方法。

1. 按测量手段分类

1) 直接测量

在测量过程中,能够直接将被测量与同类标准量进行比较,或者能够直接用事先刻度好的测量仪器对被测量进行测量,直接获得数值,这种测量方式称为直接测量。例如,用电压表测量电压、用直流电桥测量电阻等都是直接测量。直接测量方式简单、迅速,广泛应用于工程测量中。

2) 间接测量

当被测量由于某种原因不能直接测量时,可以通过直接测量与被测量有一定函数关系的物理量,然后按函数关系计算出被测量的数值,这种间接获得测量结果的方式称为间接测量。例如,用伏安法测量电阻,就是利用电压表和电流表分别测量出电阻两端的电压和通过该电阻的电流,然后根据欧姆定律计算出被测电阻的大小。间接测量方式广泛应用于科研、实验室及工程测量中。

3) 组合测量

当某项测量结果需要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,根据函数关系列出方程组求解,从而得到未知量的值,这种测量方式称为组合测量。这种测量方式比较复杂,测量时间长,但精度较高,一般适用于科学实验。

2. 按测量方式分类

1) 直读法

用直接指示被测量大小的指示仪表进行测量,能够直接从仪表刻度盘上或者从显示器上读取被测量数值的测量方法,称为直读法。例如,用欧姆表测量电阻时,从指示的数值可以直接读出被测电阻的数值。这一读数被认为是可信的,因为欧姆表的数值事先用标准电阻进行过校验,标准电阻已将它的量值和单位传递给欧姆表,间接地参与了测量。直读法测量的过程简单,操作

容易,读数迅速,但其测量的准确度不高。

2) 比较法

将被测量与标准量在比较仪器中直接比较,从而获得被测量数值的方法,称为比较法。例如,用电桥测量电阻时,标准电阻直接参与了测量过程。在电子测量中,比较法具有很高的测量准确度,有的可以达到 0.001% ,但测量时操作比较麻烦,相应的测量设备价格也比较昂贵。

比较法又分为零值法、微差法和替代法3种。

① 零值法又称平衡法,它是利用被测量和标准量对仪器的相互抵消作用,由指零仪表做出判断的方法,即当指零仪表指示为零时,表示两者的作用相等,仪器达到平衡状态,此时按一定的关系可计算出被测量的数值。

② 微差法是通过测量被测量与标准量的差值或正比于该差值的量,根据标准量来确定被测量数值的方法。

③ 替代法是分别把被测量和标准量接入同一测量系统中,在用标准量替代被测量时,调节标准量,使系统的工作状态在替代前后保持一致,然后根据标准量来确定被测量数值的方法。用替代法测量时,由于替代前后测量系统的工作状态是一样的,因此仪器本身的性能和外界因素对替代前后的影响几乎是相同的,有效地消除了外界因素对测量结果的影响。

3. 按被测物理量时间特性分类

在自然界中,微观地看,各物理量都是处于运动之中的,但宏观地看,各种物理量随时间变化的情况是不同的,可将它们分成静态、稳态及动态3种状况。

1) 静态(直流)测试技术

被测对象属于直流(或缓变)性质的静态或准静态信号,测量过程不受时间限制,测量原理、方法较简单。传统的测试大多是在这种最简单的静态或准静态下进行的,典型方法是量值比较法。

2) 稳态(交流)测试技术

对于一个波形(幅度、频率和相位)恒定不变的周期性(正弦或非正弦)交流信号,可以看成是一个处于稳定状态的信号,这种周期性的交流信号是电子测量的一个基本对象,通常称为交流测量。大多数仪器,如交流电压表、通用示波器、频率计等电子测量仪器,均只适用于测量这类处于平稳状态的周期性交流信号,而不适用于测量非周期性或单次瞬变信号。因此,稳态测量是电子测量中最常见、使用最多的一种测量。

3) 动态(脉冲)测试技术

自然界还存在大量瞬变冲击的物理现象,如力学中的爆炸、冲击、碰撞等,电学中的充放电、闪电、雷击等,对这类随时间瞬变的对象进行测量,称为动态测量或瞬态测量。动态测量有两种方式:一种是测量有源量,测量幅值随时间呈非周期性变化(突变、瞬变)的电信号;另一种是测量无源量,要用最典型的脉冲或阶跃信号作为被测系统的激励,观测系统的输出响应(随时间的变化关系),即研究被测系统的瞬态特性。无论测量有源量还是测量无源量,激励与响应均是脉冲型的,故动态测量又叫脉冲测量。此外,它是以时间为变量对线性系统进行测试的,也就是说,在时域内研究被测信号和系统的瞬态响应情况,即非周期的瞬态测试技术常采用时域测试技术。

1.2 电子测量仪器概述

利用电子技术实现测量的仪表设备,统称为电子测量仪器。本节简单介绍电子测量仪器的功能、分类和主要技术指标。

1.2.1 电子测量仪器的功能

测量仪器通常都具备物理量转换、信号处理与传输,以及测量结果的显示等基本功能。

1. 转换功能

对于电压、电流等电学量的测量,是通过测量各种电效应来达到目的的。例如,作为模拟式仪表最基本组成单元的动圈式检流计(电流表),就是将流过线圈的电流强度转化成与之成正比的扭矩,从而使仪表指针相对于初始位置偏转一个角度,根据角度偏转大小(可通过刻度盘上的刻度获得)得到被测电流的大小,这就是一种很基本的转换功能。对非电量测量,必须将各种非电物理量,如压力、位移、温度、湿度、亮度、颜色、物质成分等,通过各种对应的传感器转换成与之相关的电压、电流等,而后再通过对电压、电流的测量,得到被测物理量的大小。随着测量技术的发展和需要,现在往往将传感器、放大电路及其他相关部分构成独立的单元电路,将被测量转换成模拟的或数字的标准电信号,送往测量和处理装置,这样的单元电路常称为变送器,它是现代测量系统中极为重要的组成部分。

2. 信号处理与传输功能

对进入测量电路的电信号,通常要进行信号处理,例如,对弱信号要放大,强信号要衰减,有的要加滤波等防干扰措施,有的要将模拟信号转换为数字信号,有的要用微处理器对信号进行处理等。

在遥测、遥控等系统中,现场测量结果经变送器处理后,需经较长距离的传输才能送到测试终端和控制台。不管采用有线的还是无线的方式,传输过程中造成的信号失真和外界干扰等问题都会存在。因此,现代测量技术和测量仪器都必须认真对待测量信号的传输问题。

3. 显示功能

测量结果必须以某种方式显示出来才有意义。因此,任何测量仪器都必须具备显示功能。例如,模拟式仪表通过指针在仪表度盘上的位置显示测量结果,数字式仪表通过数码管、液晶或阴极射线管显示测量结果。

此外,一些先进的仪器,如智能仪器等,还具有数据记录、处理及自检、自校、报警提示等功能。

1.2.2 电子测量仪器的分类

电子测量仪器有多种分类方法,通常分为通用和专用两大类。通用电子仪器有较广泛的应用范围,如示波器、多用表及通用计数器等。专用电子仪器有特定的用途,例如,光纤测试仪器用于测试光纤的特性,通信测试仪器用于测试通信线路及通信设备。另外,电子仪器按工作频段可分为超低频、音频、视频、高频及微波等,按电路原理可分为模拟式和数字式,按仪器结构可分为便携式、台式、架式、模块式及插件式等,按使用条件又可分为I、II和III组仪器。I组仪器为高精度度仪器,要求工作环境温度 $10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$,湿度为 30% 、 $(20\%\sim 75\%)$ RH,只允许有轻微的震动;II组仪器要求环境温度为 $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$,湿度为 40% 、 $(2\%\sim 90\%)$ RH,仪器在使用中允许有一般的震动和冲击,通用仪器应符合该组要求;III组仪器可工作在室外环境下,要求温度为 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$,湿度为 50% 、 $(5\%\sim 90\%)$ RH,在运输过程中允许受到震动和冲击。

1. 按照被测量的特性分类

1) 时域测试仪器

该类仪器用于测试电信号在时域中的各种特性,例如,观察和测试信号的时基波形(示波器),测量电信号的电压、电流及功率(电压表、电流表及功率计),测量电信号的频率、周期、相位

及时间间隔(通用计数器、频率计、相位计及时间计数器等),测量脉冲占空比、上升沿、下降沿、上冲,测量失真度及调制度等。

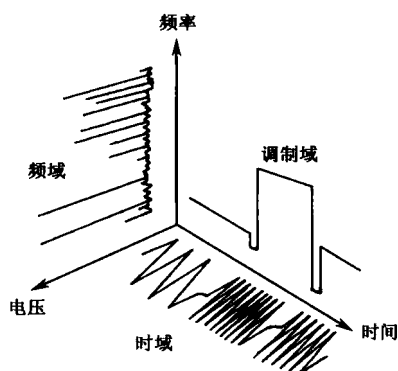


图 1.1 时域、频域和调制域

2) 频域测试仪器

该类仪器用于测量信号的频谱、功率谱、相位噪声功率谱等,典型仪器有频谱分析仪、信号分析仪等。

3) 调制域测试仪器

调制域描述了信号的频率、周期、时间间隔及相位随时间变化的变化关系,如图 1.1 所示。美国 HP 公司于 1987 年首先推出了调制域分析仪。使用调制域分析仪可测量压控振荡器(VCO)的暂态过程和频率漂移,调频和调相的线性及失真,数据和时钟信号的相位抖动,脉宽调制信号,扫描范围、周期及线性,旋转机械的启动及运转状况,锁相环路的捕捉及跟踪范围,捷变频信号

等。当然,也可无间隔地测量稳态信号的频率、周期及相位等。

2. 测量电子元器件及电路网络参数的仪器

这类仪器包括:

- ① 测量电阻、电容、电感、阻抗、导纳及 Q 值等电子元件参数的仪器;
- ② 测量半导体分立器件、模拟集成电路及数字集成电路等电子器件特性的仪器;
- ③ 测量各类无源和有源电路网络特性的仪器,包括测量电路的传输系数、频率特性、冲激响应、灵敏度、驻波比及耦合度等特性的仪器。

3. 数据域测试仪器

这类仪器所测试的不是电信号的特性,而是各种数据,主要是二进制数据流。它们所关心的不是信号波形、幅度及相位等信息,而是信号在特定时刻的状态“0”和“1”,这些特定时刻包括时钟、读/写、输入/输出、选通及芯片选择等信号的有效沿。因此,用数据域测试仪器测试数字系统的数据时,除了输入被测数据流外,还应输入选通信号,以正确选通输入数据流。数据域测试的另一个特点是多通道输入,例如,当测试微型计算机的地址或数据总线时可多达 32 路或 64 路。该类仪器还有丰富的显示、触发及跟踪等功能。

4. 随机域测量仪器

这类仪器主要对各种噪声、干扰信号等随机量进行测量。

1.3 计量的基本概念

计量是从事测量的人员应该了解的基础知识。随着生产的发展、商品的交换,以及国际、国内的交流,客观上要求对同一量在不同的地方、用不同的测量手段测量时,所得的结果应该一致。因而出现了大家公认的统一的单位,以及体现这些单位的基准与标准和用这些基准与标准来校准的测量器具,还用法律形式将其固定下来,从而形成了与测量有联系而又有别于测量的新概念,这就是计量的概念。也可以说,计量是保证量值统一和准确一致的一种测量。它有 3 个主要特征:统一性、准确性和法制性。其内容包括计量单位及其基准与标准的建立、保存、传递、复制和使用,测量的方法和测量的准确度,计量器具及计量管理和法制等。

1.3.1 计量

计量和测量是互相联系又有区别的两个概念。测量是指通过实验手段取得客观事物定量信

息的过程,也就是利用实验手段把待测量直接或间接地与另一个同类已知量进行比较,从而得到待测量值的过程。测量过程中所使用的器具和仪器直接或间接地体现了已知量。测量结果的准确与否,与所采用的测量方法、实际操作和作为比较标准的已知量的准确程度都有着密切的关系。因此,在测量过程中作为比较标准(体现已知量)的各类量具、仪器仪表,必须定期进行检验和校准,以保证测量结果的准确性、可靠性和统一性。这个过程,称为计量。计量可定义为:“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。”计量可以看做是测量的特殊形式。在计量过程中,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。因此,计量又是测量的基础和依据。可以说没有测量,就谈不上计量;没有计量,测量则失去价值。计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作,在工农业生产、科学技术、国防建设、国内外贸易及人民生活等各个方面起着技术保证和技术监督作用。

1.3.2 单位制

任何测量都要有一个统一的体现计量单位的量作为标准,这样的量称做计量标准。计量单位是有明确定义和名称并令其数值为1的固定的量,例如,长度单位1米(m),时间单位1秒(s)等。计量单位必须以严格的科学理论为依据进行定义。法定计量单位是国家以法令形式规定使用的计量单位,是统一计量单位制和单位量值的依据和基础,因而具有统一性、权威性和法制性。1984年2月27日,国务院在发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》时指出:我国的计量单位一律采用中华人民共和国法定计量单位。我国法定计量单位以国际单位制(SI)为基础,并包括10个国家选定的非国际单位制单位,如时间(分、时、天),平面角(秒、分、度),长度(海里),质量(吨)和体积(升)等。在国际单位制中,分为基本单位、导出单位和辅助单位3种。基本单位是那些可以彼此独立地加以规定的物理量单位,共7个,分别是长度单位米(m),时间单位秒(s),质量单位千克(kg),电流单位安培(A),热力学温度单位开尔文(K),发光强度单位坎德拉(cd)和物质的量单位摩尔(mol)。由基本单位通过定义、定律及其他函数关系派生出来的单位称为导出单位,例如,力的单位牛顿(N)定义为“使质量为1千克的物体产生加速度为1米每二次方秒的力”,即 $N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。在电学量中,除电流外,其他物理量的单位都是导出单位,例如,频率的单位为赫兹(Hz),定义为“周期为1秒的周期现象的频率”,即 $\text{Hz} = 1/\text{s}$;能量(功)的单位焦耳(J),定义为“1牛顿的力使作用点在力的方向上移动1米所做的功”,即 $J = N \cdot \text{m}$;功率的单位瓦特(W)定义为“1秒内产生1焦耳能量的功率”,即 $W = J/\text{s}$;电荷量库仑(C),定义为“1安培的电流在1秒内所传送的电荷量”,即 $C = A \cdot \text{s}$;电位(电压)的单位伏特(V),定义为“在载有1安培恒定电流导线的两点间消耗1瓦特的功率”,即 $V = W/A$;电阻的单位欧姆(Ω),定义为“导体两点间的电阻,当该两点间加上1伏特恒定电压时,导体内产生1安培的电流”,即 $\Omega = V/A$;等等。国际上把既可作为基本单位又可作为导出单位的单位,单独列为一类,叫做辅助单位。国际单位制中包含两个辅助单位,分别是平面角的单位弧度(rad)和立体角的单位球面度(sr)。

由基本单位、辅助单位和导出单位构成的完整体系,称为单位制。单位制随基本单位的选择不同而不同。例如,在确定厘米、克、秒为基本单位后,速度单位为厘米每秒(cm/s),密度单位为克每立方厘米(g/cm^3),力的单位为牛顿(N)等,构成一个体系,称为厘米克秒制。而国际单位制就是由前面列举的7个基本单位、2个辅助单位和19个具有专门名称的导出单位构成的一种单位制。

1.3.3 计量基准

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3种,也分别称做一级、二级和三级基准。

1. 主基准

主基准也称做原始基准,是用来复现和保存计量单位,具有现代科学技术所能达到的最高准确度的计量器具,并经国家鉴定批准,作为统一全国计量单位量值的最高依据。因此主基准也叫做国家基准。

2. 副基准

副基准是指通过直接或间接与国家基准比对,确定其量值并经国家鉴定批准的计量器具。它在全国作为复现计量单位的地位仅次于国家基准,平时用来代替国家基准或验证国家基准的变化。

3. 工作基准

工作基准是指经与主基准或副基准校准或比对,并经国家鉴定批准,实际用以检定下属计量标准的计量器具。它在全国作为复现计量单位的地位仅在主基准和副基准之下。设置工作基准的目的是使主基准和副基准不会因频繁使用而丧失原有的准确度。

应当了解,基准本身并不一定刚好等于一个计量单位。例如,铯¹³³原子频率基准所复现的时间值不是1s,而是 $919\,261\,770^{-1}\text{s}$;氪⁸⁶长度基准复现的长度值不是1m,而是 $1\,650\,763.73^{-1}\text{m}$;标准电池复现的电压值是1.018 6V,不是1V等。

1.3.4 量值的传递与跟踪、检定与比对

首先介绍几个有关的概念。

计量器具 复现量值或将被测量转换成可直接观测的指示值或等效信息的量具、仪器、装置。

计量标准器具 准确度低于计量基准,用于检定计量标准或工作计量器具的计量器具。可按其准确度等级分类,如:1级、2级、3级、4级、5级标准砝码。计量标准器具按其法律地位可分为三类:① 社会公用计量标准,是指县级以上地方政府计量部门建立的,作为统一本地区量值的依据,并对社会实施计量监督具有公证作用的各项计量标准;② 部门使用的计量标准,是指省级以上政府有关主管部门组织建立的,统一本部门量值依据的各项计量标准;③ 企事业单位使用的计量标准,是指企业、事业单位组织建立的,作为本单位量值依据的各项计量标准。

工作计量器具 在工作岗位上使用的,不用于进行量值传递的,直接用来测量被测对象量值的计量器具。

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

检定 用高一等级准确度的计量器具与低一等级的计量器具进行比较,以达到全面评定被检计量器具的计量性能是否合格的目的。一般要求计量标准的准确度为被检者的1/3到1/10。

校准 将被校的计量器具与高一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。一般而言,检定要比较校准包括更广泛的内容。

量值的传递与跟踪 把一个物理量单位通过各级基准、标准及相应的辅助手段准确地传递到日常工作中所使用的测量仪器、量具上,以保证量值统一的全过程。

如前所述,测量就是利用实验手段,借助各种测量仪器量具(作为和未知量比较的标准),获