



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
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5版)

郭 庆 黄 新 陈尚松 编著

电子工业出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。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、自动测试技术、环境监测与产品安全规范测试,共11章。每章均附有本章要点、思考题与习题。本书配有电子课件,登录华信教育资源网([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))免费下载。

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。

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 / 郭庆, 黄新, 陈尚松编著. —5 版. —北京: 电子工业出版社, 2020.6  
ISBN 978-7-121-38860-6

I. ①电… II. ①郭… ②黄… ③陈… 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(2020)第 048812 号

责任编辑:冉 哲

印 刷:

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: 787×1 092 1/16 印张:25 字数:688 千字

版 次: 2005 年 1 月第 1 版

2020 年 6 月第 5 版

印 次: 2020 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 59.80 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)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式:[ran@phei.com.cn](mailto:ran@phei.com.cn)

## 第5版前言

《电子测量与仪器》第1版于2005年1月出版发行,第2版于2009年1月出版发行。2007年,本书获广西优秀教材一等奖。2010年,本书获全国电子信息类优秀教材一等奖。2012年7月,本书出版发行第3版,内容做了较多修改。2014年,本书被教育部评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。2018年1月,本书出版发行第4版。本书从第1版开始,历经3次修订,已被近百所高校选做教材,也受到业界科研人员和企业技术人员的欢迎。

2019年9月29日,教育部在《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》中明确提出:推动高水平教材编写使用。教材作为一流课程建设的基础,是实施“双万计划”的重要内容;企业对人才培养的需求,是进行专业工程教育认证必须满足的条件,这些都对更新教材内容提出了客观的要求。

另外,由于电子测量与仪器技术发展很快,国内外厂家都推出了新型号的电子仪器,测量技术应用领域扩展。为此,有必要对本书再次进行修订。

第5版在第4版的基础上进行修订,基本上保留了第4版的主要内容和特色,删减了部分应用价值不大的内容,修改了一些公式和文字表述,调整了DDS原理的表述方式,更新了任意波形发生器、射频信号发生器、通用计数器、手持式万用表、台式万用表、高端数字示波器、混合域示波器、RLC测量仪、网络分析仪、频谱分析仪、逻辑分析仪等仪器的技术参数,更新了射频信号发生器实例、数字频率特性测试仪实例,更新了频谱分析仪测试应用实例。另外,还增加了北京普源精电科技有限公司自主研发的数字示波器芯片组“凤凰座”的简介,该芯片组突破了国产示波器1GHz带宽的限制,使国产示波器在中高端数字示波器领域迈出了新的一步。为了满足新工科建设和工程教育认证的需求,还增加了环境检测领域光谱仪器和电气设备安全规范测试等方面的内容。

### 本书主要内容

“电子测量与仪器”课程内容很广泛,但受教学时数的限制,本书只能讲述电子测量技术基础理论和电子测量基础仪器的原理与应用,主要内容如下。

① 绪论。阐述测量的重要意义,主要介绍:电子测量的内容、特点与方法,电子测量仪器的功能和分类,计量的概念、计量基准和量值传递,电子测量仪器的发展概况。

② 误差与不确定度。这是测量技术的理论基础,主要介绍:误差的概念与表示方法,随机误差、粗大误差和系统误差的特性与处理方法,误差的合成与分配,测量不确定度的概念和评定方法,测量数据的处理。

③ 信号发生器。主要介绍:信号发生器的功用、分类和主要性能指标,通用低频、高频信号发生器的组成原理、特性和应用,合成信号发生器的组成原理、特性和应用,频率合成技术的发展状况。

④ 时频测量。主要介绍:时频关系与时频标准及频率的测量方法,电子计数法测量频率、周期的原理与误差分析,通用计数器的功能、应用及性能改进方法,频率稳定度的概念和表征,调制域测量的原理与应用。

⑤ 电压测量。主要介绍:电压测量的重要性,对电压测量的要求和分类,模拟电压表直流、交流电压的测量及高频、噪声、脉冲电压的测量,数字电压表的组成原理、主要工作特性和分类,积分

式和比较式 A/D 转换器及数字多用表的组成原理与特点,数字电压表的误差与干扰。

⑥ 时域测量。主要介绍:示波器的功用、分类和组成,示波器及波形显示原理,通用示波器的组成原理、特性与应用,数字示波器的组成原理、信号采集处理技术以及数字示波器的特性与功能。

⑦ 阻抗测量。主要介绍:阻抗的定义、表达式和基本特性,电阻的测量,电感、电容的测量。

⑧ 频域测量。主要介绍:扫频仪(频率特性分析仪)的原理与应用,微波网络特性和网络分析仪的工作原理,频谱分析仪的用途、原理与分类,外差式频谱分析仪的原理、特性和应用。

⑨ 数据域测试。主要介绍:数据域的基本概念,数据域测试系统与仪器,逻辑分析仪的组成原理、触发方式、显示方式及应用,可测试性设计。

⑩ 自动测试技术。主要介绍:自动测试系统的基本组成和发展概况,智能仪器、虚拟仪器和合成仪器,接口总线及信道,测试软件,自动测试系统的集成。

⑪ 环境检测与产品安全规范测试。主要介绍:原子光谱和分子光谱分析物理基础,环境领域常用的光谱分析法及仪器;电气设备安全的基本准则,常用的产品安全规范测试项目、测试原理及测试方法。

对于测控技术与仪器等专业学生,另开设有智能仪器、虚拟仪器或自动测试系统之类的课程,同时因教学时数所限,书中标有“※”号的章节,可以不必讲授。

本书在选材上具有一定的系统性、先进性和实用性,内容丰富,适用面广,包含了许多新技术,学生学习时应着重对电子测量的基本原理和方法的理解与应用,还应完成相当数量的习题。

同时,本书具有很强的实践性,必须结合实验等实践环节才能理论联系实际,提高综合应用能力。

### 本书特点

① 相比于同类教材,本书内容较新、实用性强。在国内外厂商帮助下,更新了书中各种仪器参数,增加了一些国产的新型仪器。

② 按国家技术规范对误差与不确定度进行了精炼的阐述,删繁就简,概念明确,计算方法的步骤清晰,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,同时提供扩展或更深入的内容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的型号、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。

⑥ 专业教育与创新创业教育融合。多年来,本书已成为众多高校学生参加全国大学生电子设计竞赛及相关学科竞赛的参考书。本次修订增加了相关的案例介绍,同时计划在后期的课程建设中增加这方面的视频讲座内容。

⑦ “校企协同,共建一流课程”。“电子测量与仪器”作为一门专业课,应及时满足企业需求,跟踪仪器技术的最新发展,因此,“校企协同,共建一流课程”是必然的选择。

第 5 版修订工作由郭庆教授策划,由黄新正高级实验师执笔。梁英教授和许金编写了 11.1.1~11.1.2 节,苏海涛编写了新型便携式户外分光光度计实例,固纬电子(苏州)有限公司为电气产品安全规范测试提供了技术材料,艾诺仪器公司提供了电动汽车安全规范测试实例。笔者今年已经 83 岁了,今后的工作主要靠年轻人去做。故此,本书封面署名排序,从第 5 版开始变更为郭庆、黄新、陈尚松。

在修订中参考、引用了相关教材和论文中的有关内容,除将其列入本书参考文献外,在此对原作者顺致诚挚的感谢。

本书的编写及修订,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》《电子测量与仪器学报》《电子测量技术》杂志社或编辑部的支持与帮助;得到了中电科仪器仪表有限公司、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(无线电四厂)、固纬电子(苏州)有限公司、深圳鼎阳科技股份有限公司、常州同惠电子股份有限公司、成都前锋电子仪器厂、泰克科技(中国)有限公司、是德科技(中国)有限公司、艾诺仪器公司等的支持与帮助;得到了选用本书作为教材的兄弟院校任课教师的支持与帮助;得到了电子工业出版社的支持与帮助。在此,一并致以衷心的感谢!

在本书编写及修订中,可能存在错漏和不当之处,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,对本书提出建议,并探讨教学心得,以期共同教好这门课程。

书中标有※号的章节,是供不同教学计划要求选用的内容。本书配有 PPT 电子课件及习题解答,可向任课教师免费提供。

联系地址:桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院 郭庆 黄新

邮编:541004

E-mail:hxgl@guet.edu.cn

陈尚松

2020 年于桂林电子科技大学



# 目 录

<b>第1章 绪论</b>	1	2.3.4 应用举例	29
1.1 电子测量概述	1	2.4 系统误差	30
1.1.1 测量及其重要意义	1	2.4.1 系统误差的产生原因	31
1.1.2 电子测量的任务与内容	1	2.4.2 系统误差的检查和判别	31
1.1.3 电子测量的特点	2	2.4.3 削弱系统误差的基本方法	33
1.1.4 电子测量的方法	3	2.4.4 重复性测量结果的数据处理	34
1.2 电子测量仪器概述	4	2.5 误差的合成与分配	36
1.2.1 电子测量仪器的功能	4	2.5.1 测量误差的合成	36
1.2.2 电子测量仪器的分类	5	2.5.2 测量误差的分配	39
1.3 计量的基本概念	6	2.5.3 最佳测量方案的选择	41
1.3.1 计量	6	2.6 测量不确定度	43
1.3.2 单位制	7	2.6.1 测量不确定度概述	43
1.3.3 计量基准	7	2.6.2 标准不确定度的评定	46
1.3.4 几个与计量有关的概念	8	2.6.3 测量不确定度的合成	48
1.4 电子测量仪器的发展概况	9	2.6.4 扩展不确定度	51
思考题与习题	10	2.6.5 测量不确定度的报告	52
<b>第2章 误差与不确定度</b>	11	2.6.6 应用举例	53
2.1 误差的概念与表示方法	11	2.7 测量数据的处理	57
2.1.1 测量误差	11	2.7.1 有效数字的处理	57
2.1.2 误差的表示方法	12	2.7.2 测量数据的表示方法	59
2.1.3 误差的性质与分类	14	思考题与习题	62
2.1.4 基本术语	16	<b>第3章 信号发生器</b>	66
2.2 随机误差	17	3.1 信号发生器概述	66
2.2.1 定义与性质	17	3.1.1 信号发生器的功用	66
2.2.2 随机误差的统计处理	18	3.1.2 信号发生器的分类	66
2.2.3 有限次测量值的算术平均值和		3.1.3 正弦信号发生器的性能指标	68
标准差	20	3.2 模拟信号发生器	71
2.2.4 测量结果的置信概率	23	3.2.1 低频信号发生器	71
2.2.5 非等精度测量	26	3.2.2 高频信号发生器	73
2.3 粗大误差	28	3.2.3 脉冲信号发生器	77
2.3.1 莱特检验法	28	3.2.4 函数信号发生器	79
2.3.2 格拉布斯检验法	28	3.2.5 噪声信号发生器	80
2.3.3 中位数检验法	29	3.3 合成信号发生器	80

3.3.1	直接模拟频率合成法	81	4.7.2	调制域分析的关键技术	130	
3.3.2	直接数字频率合成法	82	4.7.3	调制域分析仪的应用	131	
3.3.3	间接合成法	88	思考题与习题			133
3.3.4	频率合成技术的进展	92	第5章 电压测量			135
3.4	射频合成信号发生器	95	5.1	概述	135	
3.4.1	射频合成信号发生器基本原理	95	※5.2	模拟电压表测量直流电压	136	
3.4.2	实例1:1465信号发生器	96	5.2.1	多用表中的直流电流、电压测量	136	
3.4.3	实例2:QF1485矢量信号发生器	97	5.2.2	直流电子电压表	138	
思考题与习题			5.3	交流电压的测量	139	
第4章 时频测量			5.3.1	交流电压的表征	139	
4.1	概述	101	5.3.2	交流电压的测量	141	
4.1.1	时频关系	101	※5.3.3	高频电压的测量	147	
4.1.2	时频基准	102	5.3.4	电平(分贝)的测量	149	
4.1.3	频率测量方法	102	※5.3.5	噪声电压的测量	150	
4.2	电子计数法测量频率	103	※5.3.6	脉冲电压的测量	151	
4.2.1	电子计数法测量频率的原理	103	5.4	数字电压表概述	152	
4.2.2	误差分析	105	5.4.1	数字电压表的组成原理	152	
4.2.3	结论	107	5.4.2	数字电压表的主要工作特性	153	
4.3	电子计数法测量时间	108	5.4.3	数字电压表的分类	156	
4.3.1	电子计数法测量周期的原理	108	5.5	积分式A/D转换器	156	
4.3.2	误差分析	108	5.5.1	双斜积分式A/D转换器	156	
4.3.3	中界频率	111	※5.5.2	脉冲调宽式A/D转换器	162	
4.3.4	时间间隔的测量	111	※5.5.3	V/F转换式A/D转换器原理	164	
4.4	通用计数器	113	※5.5.4	Σ-Δ型A/D转换器	167	
4.4.1	概述	113	5.5.5	积分式A/D转换器的发展	168	
4.4.2	通用计数器的功能	114	5.6	比较式A/D转换器	172	
※4.5	电子计数器性能的改进	116	5.6.1	逐次逼近比较式A/D转换器	172	
4.5.1	多周期同步测量频率	116	5.6.2	余数循环比较式A/D转换器	174	
4.5.2	提高测时分辨率的方法	117	5.6.3	并联比较式A/D转换器	176	
4.5.3	微波计数器	119	※5.6.4	分层级(流水线式)A/D转换器	177	
※4.6	标准频率源的测量	121	5.7	数字多用表	179	
4.6.1	频率稳定度的定义	122	5.7.1	交流—直流转换器	180	
4.6.2	长期频率稳定度的表征	122	5.7.2	电流—电压转换器	180	
4.6.3	短期频率稳定度的表征	123	5.7.3	电阻—电压转换器	181	
4.6.4	频率标准的获取	129	5.7.4	数字多用表的发展近况	183	
4.7	调制域测量	129	5.8	数字电压表的误差与干扰	184	
4.7.1	调制域分析概述	129	5.8.1	数字电压表测量误差公式	185	

5.8.2 数字电压表主要部件误差分析	185	7.2.3 电桥法	253
5.8.3 数字电压表测量的误差合成	187	7.3 电感、电容的测量	254
5.8.4 电压测量的干扰及其抑制技术	189	7.3.1 电桥法	254
思考题与习题	194	7.3.2 谐振法(Q表)	257
<b>第6章 时域测量</b>	<b>197</b>	7.3.3 数字化方法	259
6.1 时域测量引论	197	思考题与习题	265
6.1.1 示波器的功用	197	<b>第8章 频域测量</b>	<b>266</b>
6.1.2 示波器的分类	197	8.1 线性系统幅频特性的测量	266
6.1.3 示波器的组成	198	8.1.1 静态频率特性测量:点频法	266
6.2 示波管及其波形显示原理	199	8.1.2 动态频率特性测量:扫频法	267
6.2.1 示波管	199	8.1.3 扫频仪举例:SA1140C 数字	
6.2.2 示波管波形显示原理	201	频率特性测试仪	269
6.3 平板显示技术	203	※8.2 微波网络分析仪	272
6.3.1 平板显示技术概述	203	8.2.1 微波网络参数	273
6.3.2 液晶显示原理	204	8.2.2 网络分析仪的组成	274
6.3.3 TFT LCD 的工作原理	204	8.2.3 自动网络分析仪	276
6.4 模拟示波器	205	8.3 频谱分析仪概述	277
6.4.1 模拟示波器的组成	205	8.3.1 信号的时域与频域分析	277
6.4.2 示波器的Y(垂直)通道	205	8.3.2 频谱分析仪的主要用途	278
6.4.3 示波器的X(水平)通道	209	8.3.3 频谱分析仪的分类	278
6.4.4 示波器的多波形显示	213	8.3.4 频谱分析仪的工作原理	279
6.4.5 模拟示波器的应用	215	8.4 扫频外差式频谱分析仪	280
6.5 数字示波器	220	8.4.1 工作原理	280
6.5.1 数字示波器的组成原理	220	8.4.2 实例1:BP-1型频谱分析仪	281
6.5.2 信号采集处理技术	224	8.4.3 实例2:AV4051系列频谱	
6.5.3 波形显示技术	232	分析仪	283
6.5.4 技术指标	234	※8.5 实时频谱分析仪(RTSA)	284
6.5.5 基本功能	235	8.5.1 概述	284
6.5.6 数字示波器的应用	240	8.5.2 工作原理	285
思考题与习题	245	8.6 频谱分析仪的主要技术特性	287
<b>第7章 阻抗测量</b>	<b>247</b>	8.6.1 选择性	287
7.1 概述	247	8.6.2 灵敏度	290
7.1.1 阻抗的定义与表示	247	8.6.3 动态范围	291
7.1.2 阻抗元件的基本特性	247	8.6.4 典型产品简介	292
7.1.3 阻抗测量的特点和方法	249	8.7 频谱分析仪的应用	294
7.2 电阻的测量	250	8.7.1 测量正弦信号	294
7.2.1 伏安法	250	8.7.2 测量小信号	295
7.2.2 多用表中的电阻挡	250	8.7.3 失真测量	296

8.7.4 噪声信号测量	297	10.4.1 测试系统中常用的总线及信道	339
8.7.5 AM 信号解调	297	10.4.2 GPIB 总线	346
思考题与习题	299	10.4.3 VXI 总线	349
<b>第 9 章 数据域测试</b>	<b>300</b>	10.4.4 LXI 总线	352
9.1 数据域测试概述	300	10.5 测试程序	357
9.1.1 数据域的基本概念	300	10.6 自动测试系统的集成	359
9.1.2 数据域测试的任务与故障模型	301	10.6.1 自动测试系统集成的步骤	359
9.1.3 数据域测试系统与仪器	303	10.6.2 实例 1: 导弹综合测试系统	359
9.2 逻辑分析仪	306	10.6.3 实例 2: 无人值守安全监控	
9.2.1 逻辑分析仪的特点和分类	306	系统	361
9.2.2 逻辑分析仪的基本组成	307	思考题与习题	364
9.2.3 逻辑分析仪的触发方式	308	<b>第 11 章 环境监测与产品安全规范测试</b>	<b>365</b>
9.2.4 逻辑分析仪的数据捕获和存储	310	11.1 环境监测	365
9.2.5 逻辑分析仪的显示	311	11.1.1 光谱分析法概要	365
9.2.6 逻辑分析仪的主要技术指标及发展趋势	314	11.1.2 光谱分析仪器的基本组成	367
9.2.7 逻辑分析仪的应用实例	316	11.1.3 原子发射光谱仪	367
9.3 可测试性设计	317	11.1.4 原子吸收分光光度计	368
9.3.1 概述	317	11.1.5 原子荧光分光光度计	368
9.3.2 扫描设计技术	319	11.1.6 紫外—可见分光光度计	369
9.3.3 内建自测试技术	320	11.1.7 分子荧光分光光度计	369
9.3.4 边界扫描测试技术	321	11.1.8 红外光谱仪	369
思考题与习题	327	11.1.9 实例: 新型便携式户外分光	
<b>第 10 章 自动测试技术</b>	<b>329</b>	光度计	370
10.1 自动测试系统	329	11.2 电气设备安全规范测试	372
10.1.1 自动测试系统的基本组成	329	11.2.1 产品安全的基本准则	372
10.1.2 自动测试系统的发展概况	330	11.2.2 电气设备防电击防护分类	373
10.2 智能仪器	334	11.2.3 耐压测试	374
10.2.1 智能仪器的特点	334	11.2.4 泄漏电流测试	376
10.2.2 智能仪器的组成	334	11.2.5 绝缘电阻测试	379
10.3 虚拟仪器	335	11.2.6 接地电阻测试	379
10.3.1 虚拟仪器的基本概念和特点	335	11.2.7 实例: 电动汽车安全规范测试	
10.3.2 虚拟仪器的组成及关键技术	336	解决方案	380
10.3.3 基于不同总线的虚拟仪器的比较	338	思考题与习题	384
10.3.4 虚拟仪器软件结构	338	<b>附录 A 正态分布在对称区间的积分表</b>	<b>385</b>
10.4 接口总线及信道	339	<b>附录 B t 分布在对称区间的积分表</b>	<b>386</b>
		<b>附录 C 电子测量仪器相关网址</b>	<b>387</b>
		<b>参考资料</b>	<b>389</b>

# 第1章 緒論

## 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、计量基准和量值传递
- 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,是实现科学技术与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。电子测量主要是指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,构成了崭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、比较测量及磁量的测量等。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

电路元器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端/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。

在科学的研究和生产实践中,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太空发来的信号功率,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 转换等,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)、液晶显示屏(LCD)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,可以先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及通过该电阻的电流,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。直读法的测量过程简单,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进行比较,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):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,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: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。

③ 替代法: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。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 种情况。

① 静态(直流)测量。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、方法比较简单。传统的测量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)测量。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,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)测量。自然界中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,故动态测量又称为脉冲测量。此外,它是以时间为变量对线性系统进行测量的,也就是说,在时域内研究被测信号和系统的瞬态响应情况,即非周期的瞬态测量技术常采用时域测量技术。

# 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

电子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为与之成正比的扭矩,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,必须将被测量,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,而后再通过对电压、电流的测量,得到被测量的大小。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,现代测量技术和电子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,任何电子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刻度盘上的位置显示测量结果,数字式仪表通过数码管、液晶模块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。通用电子测量仪器有较宽广的应用范围,如示波器、多用表及通用计数器等。专用电子测量仪器有特定的用途,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,电子测量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组仪器为高精确度仪器,要求工作环境温度为10~30℃,湿度为30℃、(20%~75%)RH,只允许有轻微的震动;Ⅱ组仪器要求环境温度为0~40℃,湿度为40℃、(2%~90%)RH,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-10~50℃,湿度为50℃、(5%~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。

##### 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。

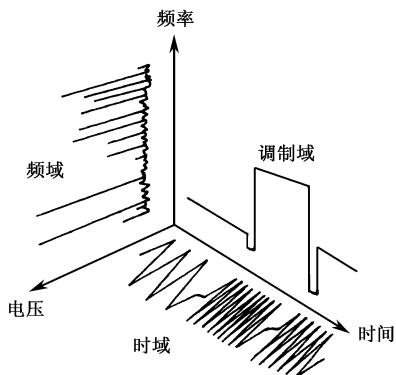


图 1.1 时域、频域和调制域

### 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、周期及线性度,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,还要选择合适的触发方式,才能观测到需要的数据流。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进行校准的测量器具,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。”计量可以看作测量的特殊形式。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,以衡量与保证使用受检量具和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,这样的量称为计量标准。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。基本单位是指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 $1N=1kg \cdot m/s^2$ 。在电量中,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 $1Hz=1/s$ ;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 $1J=1N \cdot m$ ;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 $1W=1J/s$ ;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 $1C=1A \cdot s$ ;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 $1V=1W/A$ ;电阻的单位欧姆( $\Omega$ ),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 $1\Omega=1V/A$ ;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,称为辅助单位。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整体体系,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、两个辅助单位和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

计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、保持及复现物理量计量单位的特殊量具或仪器、装置等。根据其地位、性质和用途不同,计量基准通常又分为主基准、副基准和工作基准3种,也分别称为一级、二级和三级基准。

#### 1) 主基准

主基准也称为原始基准,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。因此主基准也称为国家基准。

### 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,计量基准本身并不一定刚好等于一个计量单位。例如,铯<sup>133</sup>原子频率基准所复现的时间值不是1s,而是919 261 770<sup>-1</sup>s;氪<sup>86</sup>长度基准复现的长度值不是1m,而是1 650 763. 73<sup>-1</sup>m。

## 1.3.4 几个与计量有关的概念

这里介绍几个与计量有关的概念。

**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3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被检计量器具进行比较,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1/3~1/10。

**校准** 用高一等级准确度的计量器具与被校准的计量器具进行比较,以确定被校准计量器具的示值误差是否在允许范围内(有时也包括确定被校准器具的其他计量性能)的全部工作。一般而言,检定比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和量具上,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,借助各种测量仪器和量具(作为与未知量进行比较的标准),获得未知量量值的过程。显然,为了保证测量结果的统一、准确、可靠,必须要求作为比较标准的测量仪器和量具统一、准确、可靠。因此,测量仪器和量具在制造完毕时,必须按照规定等级的标准(工作标准)进行校准。该标准又要定期地用更高等级的标准进行检定,一直到国家级工作基准,如此逐级进行。同样,测量仪器和量具在使用过程中也要按着法定规程(包括检定方法、检定设备、检定步骤,以及对受检仪器和量具给出误差的方式等),定期由上级计量部门进行检定,并发给检定合格证书。没有合格证书或证书失效者(如超过有效期),该仪器的精度指标及测量结果只能作为参考。检定、比对和校准是各级计量部门的重要业务活动,通过这些业务活动和国家有关法令、法规的执行,将全国各地区、各部门、各行业、各单位都纳入法律规定的完整计量体系中,从而保证现代社会中的生产、科研、贸易、日常生活等各个环节的顺利运行和健康发展。

## 1.4 电子测量仪器的发展概况

电子测量仪器的发展,围绕着如何更好地实现自动测量这一核心技术,大体经历了5个阶段:模拟仪器、数字化仪器、智能仪器、虚拟仪器和合成仪器。

### 1. 模拟仪器

这类仪器在多数实验室中仍能看到,如指针式万用表、晶体管电压表等。它们的基本结构是电磁机械式的,借助于指针来显示测量结果。

### 2. 数字化仪器

这类仪器目前相当普及,如数字电压表、数字频率计等。这类仪器将模拟信号的测量转化为数字信号测量,并以数字方式输出测量结果,适用于需要快速响应和较高准确度的测量。

### 3. 智能仪器

通常,人们把内含微处理器和通用标准总线(General Purpose Interface Bus, GPIB)的仪器称为智能仪器,以区别于传统的电子测量仪器。这种仪器具备通用的测量功能,可以单独使用,也可以通过GPIB接口作为程控仪器组建自动测量系统。这类仪器既能进行自动测量,又具有一定的数据处理能力,可代替部分脑力劳动,习惯上称为智能仪器。但由于其功能块全部都是以硬件(或固化的软件)的形式存在的,因而无论开发还是应用,都缺乏灵活性。

### 4. 虚拟仪器

虚拟仪器(Virtual Instruments, VI)是检测技术与计算机技术和通信技术有机结合的产物。它是在美国国家仪器(National Instruments, NI)公司于1981年提出的个人仪器(Personal Computer Instrument)的基础上发展起来的。虚拟仪器是指在通用计算机上添加一层软件和一些硬件模块,使用户操作这台通用计算机就像操作一台真实的仪器一样。虚拟仪器技术强调软件的作用,提出了“软件即仪器”的概念。

虚拟仪器软件体系结构(Virtual Instrument Software Architecture, VISA)使得不管虚拟仪器使用的计算机或操作系统是什么,所编写的用户应用程序都是可移植的,从而使软件模块具有通用性。

自虚拟仪器概念提出以来,以软件代替硬件,以图像代替代码,以组态代替编程,以虚拟仪器代替真实仪器,组建自动测试系统的技术得到迅速发展。

### 5. 合成仪器

合成仪器(Synthetic Instrument, SI)是美国军方首先提出的概念,现已被公认为下一代自动测试系统(NxTest)的发展方向。合成仪器的核心思想是将传统仪器分割成一些基本功能模块,通过微处理器的软、硬件组合成仪器系统,并用标准接口对外连接,取代专用高端仪器并实现标定、校正等功能,完成不同的测量任务,并建立开放的软、硬件平台,为各军种武器系统提供维护和保障,例如,将频谱分析仪、射频功率计、波形分析仪、时间/频率测量仪和交/直流电压表等仪器的功能用合成仪器模块来实现。合成仪器代表了自动测试系统未来的发展方向,因此开展对合成仪器软、硬件平台的研制具有非常重要的意义。

通常,将能自动进行测量、数据处理、传输,并以适当方式显示或输出结果的系统称为自动测试系统(Automatic Test System, ATS)。在自动测试系统中,整个测试工作都是由计算机在预先编制好的测试程序统一指挥下自动完成的。因此,自动测试系统有时也称为计算机辅助测试(Computer Aided Test, CAT)系统。

由于现代信息科学领域中的微电子技术、计算机技术、信号处理技术的高速发展,加速了电子测量技术与仪器的变革,新的测量方法和理论、新的测量仪器和结构及新的测试领域正在不断出现,冲击着电子测量技术和仪器的传统观念。

同时,网络技术迅猛发展,正渗透到各个领域,推动着社会朝网络化方向发展。利用网络,除了资源共享、传递文字、图像信息,还可用来传递实时测控信息,实现异地监测与控制,组建一个庞大的远程自动测控系统。

以虚拟仪器和智能(程控)仪器为核心的自动测试技术在各个领域得到了广泛的应用,促使现代电子测量技术向着自动化、智能化、网络化和标准化方向发展。

## 思考题与习题



本章小结

- 1.1 解释名词:测量,电子测量。
- 1.2 叙述直接测量、间接测量、组合测量的特点,并各举一两个测量实例。
- 1.3 解释静态、稳态和动态测量技术的含义,并列举测量实例。
- 1.4 叙述电子测量的主要内容。
- 1.5 列举电子测量的主要特点。
- 1.6 选择测量方法时,主要考虑的因素有哪些?
- 1.7 比较测量和计量的类同与区别。
- 1.8 解释名词:计量基准,主基准,副基准,工作基准。
- 1.9 说明检定、比对、校准的含义,简述各类测量仪器为什么要定期进行检定和比对。
- 1.10 简述电子测量仪器发展历程。