

高等院校十二五规划教材



# 电子测量实用教程

DIANZI CELIANG SHIYONG JIAOCHENG

储飞黄 主编

黄发文 钱宇红 梁 强 罗卫星 编著



合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

# 电子测量实用教程

储飞黄 主编  
黄发文 钱宇红 梁 强 罗卫星 编著

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子测量实用教程/ 储飞黄主编.

—合肥: 合肥工业大学出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-5650-1788-9

I. ①电… II. ①储… III. ①电子测量技术—教材

IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 052072 号



电子测量实用教程

储飞黄 主编

策划 兰亭工作室

责任编辑 周晓毓 王 磊 杨国平

|        |                        |     |                     |
|--------|------------------------|-----|---------------------|
| 出 版    | 合肥工业大学出版社              | 版 次 | 2014 年 4 月第 1 版     |
| 地 址    | 合肥市屯溪路 193 号           | 印 次 | 2014 年 4 月第 1 次印刷   |
| 邮 编    | 230009                 | 开 本 | 710 毫米×1010 毫米 1/16 |
| 电 话    | 总编室:0551—62903038      | 印 张 | 15.25               |
|        | 发行部:0551—62903198      | 字 数 | 290 千字              |
| 网 址    | www.hfutpress.com.cn   | 印 刷 | 合肥学苑印务有限公司          |
| E-mail | press@hfutpress.com.cn | 发 行 | 全国新华书店              |

ISBN 978-7-5650-1788-9

定价:30.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

# 前 言

测量技术是国家现代化建设的关键基础技术,广泛应用于农轻重、陆海空、吃穿用,在国民经济中具有四两拨千斤的作用。

电子测量技术是测量技术的重要分支,电子测量仪器是电子测量技术的物化产品。电子测量技术及仪器是多学科、多专业综合应用水平和创新能力的集中展现,是国民经济与国防科技的重要支撑和倍增器,在武器装备现代化建设过程中占有重要地位,也是衡量一个国家科学技术发展水平乃至国防现代化水平的重要标志之一。

本书围绕最基本、最常用的电子测量需求,以“原理→应用→实验”为主线,介绍无线电计量基础知识、电子测量技术、电子测量仪器及应用,实用性较强。由于书中的实例以国产仪器为主,特别适合国外仪器使用受限的技术人员自学或培训。

全书共分9章。第1章绪论,介绍电子测量与无线电计量的基础知识;第2章测量误差与数据处理,主要从如何提高测量精度和可靠性的角度出发,对测量误差的概念、误差的分析、测量数据的处理等方面进行分析和讨论;第3章信号发生器,介绍信号发生器的功能、分类、基本构成和性能,重点对函数发生器与合成信号发生器的组成、工作原理、特点和应用进行分析和讨论;第4章时间频率测量,介绍频率与时间测量的基本原理、电子计数器的组成与工作原理,重点是电子计数器法测量频率与时间的方法;第5章波形测量,介绍示波器的功能、分类、基本构成和性能,重点对数字存储示波器的组成、工作原理、特点和应用进行分析和讨论;第6章频谱测量,介绍频谱分析的概念、频谱分析仪的原理及应用;第7章功率测量,介绍微波功率测量的基本方法,并对微波功率计性能指标进行描述,分析了常见微波功率探头和功率计的工作原理;第8章网络参数测量,讲述矢量网络分析仪的工作原理、误差修正原理、校准件与校准方法,介绍矢量网络分析仪典型产品,并给出网络分析仪的应用及操作方法;第9章专题实验,介绍信号主要参数的测量方法与步骤,可配合相关章节使用。

本书是集体智慧的结晶。黄发文编著第1章;钱宇红编著第2、3、4章;储飞黄编著第5、6章;梁强编著第7、8章;罗卫星编著第9章的专题实验。研究生杨朋辉、孙战先、谢海勇做了大量的文字和图表工作;杨旭宏、于敏、李永生审校了全书,并提出许多宝贵的修改意见和建议,在此深表感谢!

本书编著过程中,广泛参考了国内外相关文献资料,吸取了其中优秀的学术

成果和编写经验,编者对本书参考文献所列专家表示衷心的感谢!感谢合肥工业大学出版社对本书出版给予的支持和帮助。由于作者水平有限,书中难免存在不妥与错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 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 .....            | 1  |
| 1.2 电子测量基础知识 .....        | 2  |
| 1.2.1 电子测量的内容和特点 .....    | 2  |
| 1.2.2 电子测量方法 .....        | 3  |
| 1.2.3 电子测量仪器 .....        | 4  |
| 1.3 无线电计量基础知识 .....       | 6  |
| 1.3.1 无线电计量的内容和特点 .....   | 6  |
| 1.3.2 无线电计量方法 .....       | 8  |
| 1.3.3 无线电计量实验室的技术要求 ..... | 9  |
| 1.3.4 计量法规体系 .....        | 12 |
| 1.3.5 计量管理体系 .....        | 13 |
| 1.3.6 计量基准与标准 .....       | 16 |
| 1.3.7 量值传递与溯源 .....       | 19 |
| 1.4 武器装备的计量保障 .....       | 20 |
| 思考题 .....                 | 21 |
| 第 2 章 测量误差与数据处理 .....     | 23 |
| 2.1 测量误差基础知识 .....        | 23 |
| 2.1.1 有关物理量的基本定义 .....    | 23 |
| 2.1.2 测量误差的表示方法 .....     | 24 |
| 2.1.3 测量误差的分类 .....       | 26 |
| 2.1.4 测量误差的来源 .....       | 27 |
| 2.1.5 测量结果的评价 .....       | 27 |
| 2.1.6 测量结果的表示 .....       | 28 |
| 2.2 随机误差 .....            | 29 |
| 2.2.1 随机误差的概念 .....       | 29 |

|       |                             |    |
|-------|-----------------------------|----|
| 2.2.2 | 随机误差的特性 .....               | 29 |
| 2.2.3 | 随机误差的估计 .....               | 30 |
| 2.3   | 系统误差 .....                  | 32 |
| 2.3.1 | 系统误差的产生原因 .....             | 32 |
| 2.3.2 | 系统误差的分类与特征 .....            | 32 |
| 2.3.3 | 系统误差的发现方法 .....             | 33 |
| 2.3.4 | 系统误差的减小和消除 .....            | 34 |
| 2.4   | 粗大误差 .....                  | 35 |
| 2.5   | 测量结果的数据处理 .....             | 35 |
| 2.5.1 | 有效数字的取舍规则和运算规则 .....        | 35 |
| 2.5.2 | 测量数据的分析处理 .....             | 36 |
|       | 思考题 .....                   | 39 |
| 第3章   | 信号发生器 .....                 | 40 |
| 3.1   | 概述 .....                    | 40 |
| 3.1.1 | 信号发生器的功能与分类 .....           | 40 |
| 3.1.2 | 信号发生器的组成与工作原理 .....         | 42 |
| 3.1.3 | 信号发生器的主要技术指标 .....          | 43 |
| 3.2   | 函数/任意波信号发生器 .....           | 45 |
| 3.2.1 | 概述 .....                    | 45 |
| 3.2.2 | 函数/任意波信号发生器的基本结构与工作原理 ..... | 46 |
| 3.2.3 | YB33200 系列函数/任意波信号发生器 ..... | 46 |
| 3.2.4 | AWG5000 任意波形发生器 .....       | 49 |
| 3.3   | 合成信号发生器 .....               | 52 |
| 3.3.1 | 概述 .....                    | 52 |
| 3.3.2 | 合成信号发生器的基本结构与工作原理 .....     | 52 |
| 3.3.3 | AV1485/1486 合成信号发生器 .....   | 55 |
| 3.3.4 | SMF100A 微波信号发生器 .....       | 57 |
| 3.4   | 脉冲信号发生器 .....               | 59 |
| 3.4.1 | 概述 .....                    | 59 |
| 3.4.2 | 脉冲信号发生器的基本结构与工作原理 .....     | 61 |
| 3.4.3 | 81100 系列脉冲信号发生器 .....       | 62 |
| 3.5   | 信号发生器的选择与使用要点 .....         | 64 |
| 3.5.1 | 信号发生器的选择 .....              | 64 |
| 3.5.2 | 信号发生器的使用要点 .....            | 64 |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 思考题 .....                   | 65        |
| <b>第 4 章 时间频率测量 .....</b>   | <b>66</b> |
| 4.1 概述 .....                | 66        |
| 4.1.1 时间的基本概念 .....         | 66        |
| 4.1.2 频率的基本概念 .....         | 67        |
| 4.1.3 时间同步与时间编码 .....       | 68        |
| 4.1.4 时间频率测量的特点 .....       | 69        |
| 4.2 模拟式频率测量方法 .....         | 70        |
| 4.2.1 谐振法测频 .....           | 70        |
| 4.2.2 电桥法测频 .....           | 70        |
| 4.2.3 拍频法测频 .....           | 71        |
| 4.2.4 示波法测频 .....           | 72        |
| 4.2.5 外差法测频 .....           | 73        |
| 4.3 数字式时间频率测量 .....         | 74        |
| 4.3.1 计数法测量频率 .....         | 74        |
| 4.3.2 计数法测量周期 .....         | 75        |
| 4.3.3 计数法测量时间间隔 .....       | 75        |
| 4.3.4 计数法测量时间频率的误差分析 .....  | 77        |
| 4.3.5 数字式频率计的主要技术指标 .....   | 79        |
| 4.4 典型数字式频率计介绍 .....        | 79        |
| 4.4.1 SP3382A 智能微波频率计 ..... | 80        |
| 4.4.2 53200A 系列频率计数器 .....  | 84        |
| 思考题 .....                   | 85        |
| <b>第 5 章 波形测量 .....</b>     | <b>86</b> |
| 5.1 概述 .....                | 86        |
| 5.1.1 示波器的主要特点 .....        | 86        |
| 5.1.2 示波器的功能与分类 .....       | 87        |
| 5.2 模拟示波器 .....             | 87        |
| 5.2.1 模拟示波器的基本结构与工作原理 ..... | 87        |
| 5.2.2 模拟示波器的主要技术指标 .....    | 89        |
| 5.3 数字示波器 .....             | 91        |
| 5.3.1 概述 .....              | 91        |
| 5.3.2 数字示波器的主要特点 .....      | 92        |

|              |                          |            |
|--------------|--------------------------|------------|
| 5.3.3        | 数字示波器的基本结构与工作原理 .....    | 92         |
| 5.3.4        | 数字示波器的主要技术指标 .....       | 98         |
| 5.4          | 典型数字示波器介绍 .....          | 101        |
| 5.4.1        | YB44200 型数字存储示波表 .....   | 101        |
| 5.4.2        | DPO7000C 系列数字荧光示波器 ..... | 103        |
| 5.5          | 数字示波器的正确使用 .....         | 108        |
|              | 思考题 .....                | 111        |
| <b>第 6 章</b> | <b>频谱测量 .....</b>        | <b>112</b> |
| 6.1          | 概述 .....                 | 112        |
| 6.1.1        | 时域与频域的关系 .....           | 112        |
| 6.1.2        | 离散傅立叶变换 .....            | 113        |
| 6.1.3        | 频谱分析仪的功能与分类 .....        | 113        |
| 6.1.4        | 频谱分析仪的主要技术指标 .....       | 115        |
| 6.2          | 频谱分析仪的结构原理 .....         | 122        |
| 6.2.1        | 模拟式频谱分析仪的基本原理 .....      | 123        |
| 6.2.2        | 数字式频谱分析仪的基本原理 .....      | 124        |
| 6.2.3        | 外差式频谱分析仪的基本原理 .....      | 125        |
| 6.3          | 频谱分析仪的应用 .....           | 126        |
| 6.3.1        | 调幅信号的测量 .....            | 126        |
| 6.3.2        | 调频信号的测量 .....            | 128        |
| 6.3.3        | 脉冲调制信号的测量 .....          | 131        |
| 6.3.4        | 信号失真测量 .....             | 132        |
| 6.3.5        | 相位噪声测量 .....             | 134        |
| 6.4          | 典型频谱分析仪介绍 .....          | 136        |
| 6.4.1        | AV4033 系列频谱分析仪 .....     | 136        |
| 6.4.2        | AV4022 型便携式射频频谱分析仪 ..... | 139        |
| 6.4.3        | ESA 系列频谱分析仪 .....        | 140        |
|              | 思考题 .....                | 141        |
| <b>第 7 章</b> | <b>功率测量 .....</b>        | <b>143</b> |
| 7.1          | 概述 .....                 | 143        |
| 7.1.1        | 功率的基本定义 .....            | 143        |
| 7.1.2        | 功率的度量单位 .....            | 145        |
| 7.1.3        | 功率计的功能与分类 .....          | 146        |

---

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 7.1.4 | 微波功率计的主要技术指标    | 147 |
| 7.2   | 微波功率计的结构原理      | 149 |
| 7.2.1 | 热敏电阻功率探头及其功率计   | 149 |
| 7.2.2 | 热电偶功率探头及其功率计    | 151 |
| 7.2.3 | 二极管功率探头及其功率计    | 153 |
| 7.3   | 微波功率计的应用        | 157 |
| 7.3.1 | 峰值功率测量          | 157 |
| 7.3.2 | 大功率测量           | 159 |
| 7.4   | 典型微波功率计介绍       | 159 |
| 7.4.1 | AV2432 微波功率计    | 159 |
| 7.4.2 | N1911/12A 功率计   | 161 |
| 7.5   | 微波功率计的正确使用      | 162 |
| 7.5.1 | 微波功率计的使用方法      | 162 |
| 7.5.2 | 微波功率计的注意事项      | 162 |
|       | 思考题             | 163 |
| 第 8 章 | 网络参数测量          | 165 |
| 8.1   | 概述              | 165 |
| 8.1.1 | 二端口网络的 $S$ 参数表示 | 165 |
| 8.1.2 | 网络分析仪的功能和分类     | 166 |
| 8.2   | 矢量网络分析仪的组成与工作原理 | 166 |
| 8.2.1 | 矢量网络分析仪的基本组成    | 166 |
| 8.2.2 | 矢量网络分析仪的工作原理    | 168 |
| 8.3   | 矢量网络分析仪的误差校正    | 172 |
| 8.3.1 | 系统误差与误差修正       | 172 |
| 8.3.2 | 误差修正的基本原理       | 174 |
| 8.3.3 | 机械校准件与校准方法      | 177 |
| 8.3.4 | 电子校准件与校准方法      | 179 |
| 8.4   | 矢量网络分析仪的主要性能指标  | 181 |
| 8.4.1 | 系统误差特性          | 181 |
| 8.4.2 | 端口特性指标          | 184 |
| 8.4.3 | 校验              | 185 |
| 8.5   | 矢量网络分析仪的应用      | 186 |
| 8.5.1 | 滤波器参数测量         | 186 |
| 8.5.2 | 放大器非线性测量        | 187 |

|              |                      |            |
|--------------|----------------------|------------|
| 8.5.3        | 脉冲 S 参数测量 .....      | 190        |
| 8.5.4        | 天线参数测量 .....         | 197        |
| 8.6          | 典型产品介绍 .....         | 200        |
| 8.6.1        | 典型产品介绍 .....         | 200        |
| 8.6.2        | 矢量网络分析仪的操作 .....     | 201        |
| 8.7          | 网络分析仪的安全使用 .....     | 204        |
| 8.7.1        | 静电防护 .....           | 204        |
| 8.7.2        | 供电安全 .....           | 204        |
|              | 思考题 .....            | 205        |
| <b>第 9 章</b> | <b>专题实验 .....</b>    | <b>207</b> |
| 实验 1         | 信号发生器与时间频率参数测量 ..... | 207        |
| 实验 2         | 波形参数测量 .....         | 209        |
| 实验 3         | 频谱参数测量 .....         | 212        |
| 实验 4         | 功率参数测量 .....         | 216        |
| 实验 5         | 网络参数测量 .....         | 218        |
| <b>附录</b>    | <b>.....</b>         | <b>222</b> |
| 附录 1         | 无线电频段划分表 .....       | 222        |
| 附录 2         | 中国无线电资源分配表 .....     | 223        |
| 附录 3         | 部分电子测量仪器国家标准 .....   | 225        |
| 附录 4         | 驻波比与传输参数换算关系 .....   | 226        |
| 附录 5         | 常用射频连接器及其特性 .....    | 227        |
| 附录 6         | 电阻电容电感元件系列表 .....    | 228        |
| 附录 7         | GPIB 接口定义 .....      | 229        |
| 附录 8         | RS232 接口定义 .....     | 230        |
| 附录 9         | ASCII 字符表 .....      | 231        |
| <b>参考文献</b>  | <b>.....</b>         | <b>232</b> |

# 第1章 绪 论

本章重点介绍测量与计量的基本概念、电子测量与无线电计量的主要内容和特点,并对计量法规与管理体系、量值传递与溯源、武器装备的计量保障等内容作简要论述。

## 1.1 测量与计量

### 1.1.1 测量

世界著名科学家门捷列夫指出:“科学从测量开始。”汤姆逊也说:“每一件事物只有当可以测量时才能认识。”可见,测量是人类认识自然和改造自然的重要手段。人们通过测量,可以获得客观事物数量上的认识,进而从观察中总结出一般性的规律。

从定义上讲,测量是人们为了确定被测对象的量值(或确定一些量值的依从关系)而进行的实验过程。在这个过程中,人们借助专门的装置,把被测量与标准单位进行比较,取得用数值和标准单位共同表示的测量结果,如线路流过的电流为3A等。用来确定被测量量值的装置,称为测量器具,包括测量仪器和量具。测量仪器将被测的量转换成示值(或与示值相等效的信息),如指针式电压表把被测的电压转换成指针的偏转量,可利用刻度读出其对应的电压值等;量具是以固定的形式复现出某一个量(或几个量)的已知量值,可作为标准元件使用,如标准电阻器等。

测量结果不仅用于验证理论,而且是发现新问题、提出新理论的重要依据。事实证明:科学的进步、生产的发展与测量理论和技术手段的进步是相互依赖、相互促进的。评价一个国家的科技状态,最快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。测量手段的现代化,已被公认为科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。

### 1.1.2 计量

生产的发展、商品的交换和国内外的交流,客观上要求同一个量在不同的时间、不同的地点、由不同操作者用不同测量手段进行测量时,所得的结果应该一致。因而,出现了大家公认的统一单位(如国际单位制)和用来体现这些单位的

基准,以及用这些基准来校准的测量器具,这些测量基准和测量器具用法律的形式被固定下来,从而形成了与测量有联系而又有别于测量的概念,这就是计量。由此可见,计量是为了保证量值统一和准确一致的一种测量,它具有统一性、准确性和法制性等主要特征。

计量、测量二者之间具有密切的关系,它们都是为了解决“量”的问题,都属于测量的范畴。计量是测量的基础,测量是形成计量的前提。同时,计量又不同于一般的测量,它具有统一性、准确性和法制性的特征,而测量没有这些要求。所以,计量属于测量又严于一般的测量。

## 1.2 电子测量基础知识

### 1.2.1 电子测量的内容和特点

电子测量是测量技术与电子技术相互结合的产物,它以测量理论和方法为基础,采用电子技术手段,实现各种电量与磁量的测量。电子测量技术与传感器技术结合还可以实现各种非电量的测量,从而构成工业生产中广泛应用的自动检测与控制系统。

#### 1. 电子测量的基本内容

电子测量建立在电信号测量的基础上,其内容主要包括以下几方面:

##### (1) 基本电量的测量

电子测量的基础内容是基本电量的测量(如电压、电流和功率等),并在此基础上可扩展至其他量的测量(如阻抗、频率、时间、相位、电场强度、磁场相关量等)。

##### (2) 元器件参数及其特性的测量

通过电子测量,可得到常用电子元器件(如电阻、电感、电容、集成电路等)的参数,也可得到元器件、单元电路或电子设备整机的特性(如伏安特性、频率特性等)。

##### (3) 电信号波形及其波形参数的测量

电子测量可以测量各种电信号的波形、幅值、相位、相位差、周期、频率、失真度、调制度、频谱构成、噪声、干扰等参数。

##### (4) 电子设备性能指标的测量

电子测量可用于测量各种电子设备的性能指标(如灵敏度、增益、带宽、信噪比等)。

#### 2. 电子测量的主要特点

##### (1) 频率范围宽

采用电子测量的方法,能够测量频率范围高达 160GHz 以上的信号。随着电子技术的发展,可测量的信号频率范围还在向着更宽频段扩展。

#### (2) 量程范围大

量程反映测量仪器的上下限测量值范围。当被测量的数值相差很大时,测量仪器必须具有足够大的量程。例如,数字电压表(DVM)可测量微伏级至千伏级电压,量程达 9 个数量级。

#### (3) 准确度高

总体上来说,电子测量的准确度要高于其他测量方法。例如,用电子测量方法对频率和时间进行测量时,使用石英晶体振荡器作为基准,可以使测量准确度达到  $10^{-10}$  数量级,如果采用原子频标作为基准,准确度更是可达  $10^{-14}$  数量级以上。

#### (4) 测量速度快

电信号以电场形式传播,电子测量建立在电信号的传播基础之上,相对于其他测量方法而言,测量速度更高,这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之一。

#### (5) 易于实现遥测

对于遥远距离或环境恶劣、人体不便接触或无法到达的区域,电子测量可通过传感器进行测量,用计算机进行数据处理和转换,最后以无线方式传输信号。

#### (6) 易于实现自动化、智能化与网络化

随着计算机技术的广泛应用,电子测量仪器的功能得到大幅扩展,自动化与智能化程度大幅提高,易于实现程控、遥控、自动量程转换、自动调节、自动校准、自动诊断故障和自动恢复,测量数据可进行自动记录、分析和处理,并已显现出网络化的发展趋势。

### 1.2.2 电子测量方法

一个参量的测量可以通过不同的方法来实现。测量方法不仅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,不仅得不到正确的测量结果,甚至会损坏测量仪器和设备。必须根据具体的测量对象、环境、条件和要求,选择正确的测量方法和仪器,构成合理的测量方案,进行正确的操作,才能得到理想的测量结果。测量方法有多种分类形式,下面介绍几种常见的分类方法。

#### 1. 依据测量手段的分类

依据测量手段,电子测量方法可分为直接测量、间接测量与组合测量。

直接测量能直接从电子仪器或仪表上读出测量结果。例如,用电压表测量电压,用电子计数器测量频率等。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运算,因而测量过程简单迅速,是测量中广泛应用的测量方法。

间接测量需要先对几个与被测量有确定函数关系的电参量进行测量,再将测量结果代入表示该函数关系的公式、曲线或表格,通过计算求出被测量。例如,要测量电阻上消耗的直流功率  $P$ ,可以通过直接测量电压  $U$ 、电流  $I$ ,而后根据函数关系  $P=UI$ ,“间接”获得。间接测量一般费时费事,多在不便直接测量或间接测量结果更准确的情况下使用。

当某被测量需要用多个未知量表达时,需要改变测量条件进行多次测量,根据被测量与未知量的函数关系列方程组并求解,从而得到未知量的测量方法称为组合测量。它是一种兼用直接测量和间接测量的方法。组合测量复杂、费时,但更易达到较高的准确度,适用于科学实验或一些特殊场合。

## 2. 依据被测量性质的分类

依据被测量性质,电子测量方法可分为时域测量、频域测量、数据域测量与随机测量。

时域测量是指对以时间为函数的量(如电压、电流等)的测量。这些量的稳态值、有效值多用仪器仪表直接测量,其瞬态值可通过示波器等仪器观测。

频域测量是指对以频率为函数的量(例如电路的增益、相位移等)的测量。这些量可通过分析电路的频率特性或频谱特性等方法进行测量。

数据域测量是指对数字量进行的测量,也称为逻辑量测量,主要是用逻辑分析仪等设备对数字量和电路的逻辑状态进行分析。例如,用逻辑分析仪可以同时观察多条数据通道上的逻辑状态或显示某条数据线上的时序波形,分析大规模集成电路芯片的逻辑功能等。随着计算机和各种数字信号处理技术的广泛应用,有效的数据域测量显得日益重要。

随机测量又称统计测量,主要是对各种噪声信号、干扰信号进行动态测量和统计分析,这是一项较新的测量技术,尤其是在通信领域有着广泛的应用。

### 1.2.3 电子测量仪器

#### 1. 电子测量仪器的地位与军事作用

利用电子技术对各种待测量进行测量的设备,统称为电子测量仪器。电子测量仪器是信息产业的基础,对于国防、科研、生产和生活等起着非常重要的作用。军用电子仪器和测试系统在武器装备的研制、生产及维护保养中发挥着重要的作用,有的已成为武器装备不可分割的一部分。

近些年来,我国军用电子仪器与武器装备一样,得到国家工业部门与军方的有力支持,不仅在品种和数量上大大增加,而且在质量上也有了长足的进步,一批高质量的仪器已赶上或接近国外先进水平。如在微波领域,以矢量网络分析

仪、频谱分析仪为代表的微波仪器基本上实现了主要品种与数量的配套能力,并逐步扩展到毫米波段;在自动测试领域,包括 VXI 模块化仪器、VXI 内嵌式控制机、自动测试的软平台和武器装备的 ATE 系统集成技术都取得了重大突破;通信仪器也有了长足的发展,尤其是数字通信、光通信仪器成绩突出;通用仪器逐步实现了更新换代。这些仪器大量应用于武器装备的研制与保障中,为国防建设作出了巨大的贡献。

## 2. 电子测量仪器的分类

近年来,随着科学和技术的发展,电子测量仪器无论是品种还是功能都发生了很大的变化。特别是大规模集成电路的应用,仪器的功能越来越全,可靠性越来越高,体积越来越小。过去的庞然大物,许多都变成了手持式仪器,使用和携带都非常方便。

总体来说,现代电子测量仪器正朝着全频段、多参数、多功能、综合测试和自动测试的方向发展。除了为保证最高准确度而专门设计制作的计量标准外,单功能的仪器正逐步被多参数、多功能仪器所取代,多合一的仪器非常常见,如信号发生器与频谱分析仪的组合、示波器与频谱分析仪组合、示波器与电压表的组合等等,这些仪器在自动测试系统中也发挥了重要的作用。此外,现代仪器大多配备功能选件,用户可以根据需要任意选择安装,灵活性很强,既节约了研制与生产成本,也为用户提供了更高的性价比。

电子测量仪器种类很多,可粗分为专用和通用仪器两大类(如表 1.1 所示)。专用仪器是指各个专业领域中测量特殊参量的仪器;通用仪器是指应用面广、灵活性好的测量仪器。

表 1.1 通用电子测量仪器的类别

| 序号 | 类别           | 内容及用途                                                |
|----|--------------|------------------------------------------------------|
| 1  | 信号发生器        | 提供各种测量用信号,如低频、高频、脉冲、函数、扫频和噪声信号等,也可称作测量用信号发生器或信号源     |
| 2  | 信号分析仪        | 观测、分析和记录各种电参量在时域、频域和数据域的变化过程,如示波器、波形分析仪、频谱分析仪、逻辑分析仪等 |
| 3  | 电压测量仪器       | 测量电压信号的仪器,如低频毫伏表、高频毫伏表、数字电压表等                        |
| 4  | 频率、时间、相位测量仪器 | 测量频率、时间间隔、相位及相位差,如频率计、相位计以及各种时间、频率标准等                |
| 5  | 电子元器件测试仪     | 测量各种电子元器件的电参数或特性曲线,如晶体管参数测试仪、晶体管特性图示仪、模拟或数字集成电路测试仪等  |
| 6  | 模拟电路特性测试仪    | 分析模拟电路幅频特性和噪声特性,如扫频仪、噪声系数测试仪等                        |
| 7  | 数字电路特性测试仪    | 分析数字电路逻辑等特性的仪器,如逻辑分析仪、特征分析仪等                         |

## 1.3 无线电计量基础知识

### 1.3.1 无线电计量的内容和特点

随着科学的进步,无线电计量已成为一门发展迅速,应用广泛,与各行各业联系密切,对现代科学技术发展起着巨大推动作用的学科。由于各种智能型测量仪器和自动测试系统的广泛应用,无线电计量测试技术范围不断扩大,计量参数不断增多,计量速度不断加快,准确度不断提高。在我们面前,大规模集成电路检测、微波参数测量、自动化测量、动态测量、在线测量等,都是无线电计量测试的新课题。

#### 1. 无线电计量的基本内容

无线电计量测试包括建立和保存无线电计量基本参数的计量标准;保证量值的传递准确一致;研究各种精密测量技术和测量方法三个方面。无线电计量测试能力通常可以用计量的参数、准确度和频带宽度来表示。

在无线电计量测试中,需要开展量值传递的参数很多,在这么多的参数中,哪些参数是主要的,哪些参数是次要的,并没有严格的理论依据和原则规定,而是随着科学技术的发展和实际工作的需要在不断地发展。如频率范围,从最初电磁计量一般不超过几十千赫,到现在无线电计量的毫米波,频率超过 100GHz。

目前,在我国开展无线电计量的参数如表 1.2 所示。其中,除时间和电流单位是国际单位制基本单位外,其他单位都是导出单位。

表 1.2 无线电计量参数和单位

| 参数名称 | 单位            | 参数名称  | 单位                         | 参数名称     | 单位                |
|------|---------------|-------|----------------------------|----------|-------------------|
| 频率   | Hz            | 电场强度  | $V \cdot m^{-1}$           | 噪声功率谱密度  | $W \cdot Hz^{-1}$ |
| 时间   | s             | 磁场强度  | $A \cdot m^{-1}$           | 噪声系数     | 无量纲               |
| 波长   | m             | 失真系数  | 无量纲                        | 脉冲响应函数   | 无量纲               |
| 电压   | V             | 天线增益  | 无量纲                        | 脉冲上升时间   | s                 |
| 电流   | A             | 天线效率  | 无量纲                        | 复数反射系数   | 无量纲               |
| 功率   | W             | 电压驻波比 | 无量纲                        | 复数相对磁导率  | 无量纲               |
| 复数阻抗 | $\Omega$      | Q 值   | 无量纲                        | 复数散射矩阵分量 | 无量纲               |
| 复数导纳 | $\Omega^{-1}$ | 调幅系数  | 无量纲                        | 复数相对介电常数 | 无量纲               |
| 衰减   | 无量纲           | 频偏    | 无量纲                        | 介质损耗角正切  | 无量纲               |
| 增益   | 无量纲           | 电导率   | $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ | 功率通量密度   | $W \cdot m^{-2}$  |
| 相移   | 无量纲           | 反射率   | 无量纲                        | 噪声温度     | K                 |

从表 1.2 可以看出,无线电计量包括很多无量纲的量,如衰减、电压驻波比、