

# 电子工业 生产技术手册

16

生产质量保证卷

电子测量技术

可靠性与质量管理

## 内 容 简 介

《电子工业生产技术手册》第16分册,共分“电子测量技术”和“可靠性与质量管理”两篇。

第3篇“电子测量技术”共分5章:第1章概论;第2章介绍各种电子参数的测量方法;第3章介绍先进的自动测试技术;第4章介绍电子测量中的测试环境要求以及各种测试的方法;第5章介绍电子测量中的计量知识及量值传递系统、误差处理方法等。

第4篇“可靠性与质量管理”共分7章:第1章概论;第2章介绍可靠性的基本概念;第3章介绍生产准备阶段生产条件与原材料的质量管理;第4章介绍生产工艺过程中的质量管理;第5章介绍电子产品的可靠性试验与筛选方法;第6章介绍电子产品电磁兼容性试验与安全性试验的方法与标准;第7章介绍我国现行的几种质量管理制度。

本书可供从事电子工业生产可靠性与质量管理、试验、测量的干部、技术人员和工人阅读,也可供高等院校师生参考。

## 电子工业生产技术手册

(16)

### 生产质量技术保证卷

《电子工业生产技术手册》编委会 编

国防工业出版社出版发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

北京卫顺排版厂排版 国防工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张22 $\frac{1}{2}$  519千字

1989年3月第一版 1989年3月第一次印刷 印数:0,001—5,000册

ISBN 7-118-00134-1/TN25 定价14.50元

科技新书目182-029

## 出 版 说 明

《电子工业生产技术手册》(以下简称《手册》)是由电子工业部和中国电子学会联合组织编写的一部大型综合性工具书。全书共约一千五百万字,分成五卷:

1. 电子元件卷 (1~3 分册);
2. 电真空器件卷 (4~5 分册);
3. 半导体与集成电路卷 (6~8 分册);
4. 通用工艺卷 (9~14分册);
5. 生产质量技术保证卷 (15~17分册)。

《手册》主要是供具有中专以上水平的电子工业工程技术人员、高级技术工人及生产技术管理干部查阅使用,也可作为高等院校和中等专业学校电子类专业的教学参考书。

《手册》是在总结我国电子工业三十多年来生产技术实践经验的基础上,适当参阅了国外有关技术资料中对我国适用的电子生产技术编写而成的。对于一些即将淘汰与不宜继续采用的现行生产技术,一般不予编入;对那些国内外新近出现的,虽尚未经实践反复验证,但具有方向性的新技术,则在有关篇的“今后展望”中予以介绍。

《手册》力求突出电子工业生产技术的特點,原则上不编入与其他手册相重复的内容。但是,鉴于现代电子工业属高技术密集型工业,涉及的技术门类多,除与电子、机械、化工、冶金等基础科学有密切关系外,还涉及许多边缘科学。为便于查阅,也适当地收集了一些散见于其他手册中的共性资料。

在《手册》的编写过程中,结合我国电子工业的实际情况,认真贯彻了1984年国务院颁发的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》和《全面推行我国法定计量单位的意见》。

由于电子产品发展很快,更新换代频繁,各种生产技术进步迅速,第一次编写生产技术性的手册缺少经验,初版会有许多不足之处。为了使《手册》在我国电子工业的发展中能够不断地起到促进和指导作用,希望读者在使用《手册》过程中,如发现谬误或对《手册》的内容有新的建议,请及时与《手册》总编辑部(山西省太原市第115信箱)联系。今后将根据各篇的技术发展情况,及时修订或出版续篇。在适当时间,将全部重新编写出版。

《手册》的编写和出版工作,得到了中央各有关部、委、各省(市)电子工业领导部门及有关厂、所、院、校的大力支持。参加编写、审校和讨论的各方面的专家、教授、科技人员近千人。谨向这些单位与有关人员致以谢意。

《手册》总编辑委员会  
一九八六年八月二十五日

## 总 编 辑 委 员 会

### 主 任 委 员

孙 俊 人

### 副主任委员

(按姓氏笔划为序)

边 拱 陆崇真 周文盛 童志鹏

谢高觉 蒋葆增

### 委 员

(按姓氏笔划为序)

厉声树 刘联宝 陈力为 陈克恭 张立鼎

杨臣华 沈金宝 武尔楨 周生珣 林金庭

郭文昭 郭桂庭 袁行健 戴昌鼎

## 总 编 辑 部

### 主 任

孙凤阁

### 成 员

(按姓氏笔划为序)

李桂馨 赵全喜 虞苏玮

## 前 言

电子工业生产技术既包括生产工艺过程各个环节的技术,也包括全面质量保证和各种控制环节所涉及的技术。随着微电子技术和微细加工技术的发展,产品精度、集成度及封装密度都有了显著的提高。因此,电子产品从原材料检验到生产全过程的质量控制以及对产品可靠性指标的要求更为严格。随之对检测手段和方法,各项质量的技术保证,也提出了更高的要求。同时,还须重视对生产环境的控制,要严格控制在生产过程中各个介质对制品污染的限度,控制各种环境因素对生产的影响。在电子工业的生产中,同样也要注意对周围环境的保护,采取必要的污染治理的管理及监视措施,以防止对环境的污染。

上述各项技术,无论在电子元器件,还是各种电子设备的生产中,大部分都是适用的。

本卷共分6篇:第1篇物理检测、第2篇化学分析、第3篇电子测量技术、第4篇可靠性与质量管理、第5篇生产环境技术、第6篇环境保护。

本卷内容通用性较强,突出电子工业特点,具有一定的先进性、适用性和普及性。可供电子工业生产、管理、工厂设计及建设等部门的技术人员和管理干部使用。有关工业部门人员及高等院校师生也可参考。

由于我们水平有限,缺点和错误在所难免,望读者指正,以便再版时修订。

生产质量技术保证卷编委会

一九八六年十二月

## 卷 编 辑 委 员 会

主任委员 袁行健

副 主 任 委 员

(按姓氏笔划为序)

李 湘 陈亨廷 周立基

委 员

(按姓氏笔划为序)

马怀祖 刘 钊 刘存宏 刘雨森

吕钟瑜 张云鹏

## 卷 编 辑 部

主 任 黄瑞光

成 员

(按姓氏笔划为序)

关志仁 杨耀祖 杨鹏涛 李瑜珍

林德琨 盛志森

责 任 编 辑

何美莲

# 目 录

## 第3篇 电子测量技术

|                                  |    |                           |     |
|----------------------------------|----|---------------------------|-----|
| <b>第1章 概论</b> .....              | 3  | 2.5.6 电压测量的发展趋向 .....     | 78  |
| <b>第2章 参数测量</b> .....            | 5  | <b>2.6 功率测量</b> .....     | 78  |
| <b>2.1 电阻、电感和电容测量</b> .....      | 5  | 2.6.1 功率的定义及功率测量的分类 ..... | 78  |
| 2.1.1 概述 .....                   | 5  | 2.6.2 射频和微波功率测量方法         |     |
| 2.1.2 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 等效电路 ..... | 5  | 及仪器 .....                 | 79  |
| 2.1.3 端口数对阻抗测量的影响 .....          | 7  | 2.6.3 功率测量中的参数及误差 .....   | 85  |
| 2.1.4 电阻测量 .....                 | 9  | 2.6.4 功率量值的传递、校准方         |     |
| 2.1.5 电容和电感测量 .....              | 12 | 法 .....                   | 88  |
| <b>2.2 高频阻抗、高频介质材料</b>           |    | <b>2.7 频率与时间测量</b> .....  | 89  |
| 电参数和微波 $Q$ 值测量 .....             | 21 | 2.7.1 时间、频率及其测量的基本        |     |
| 2.2.1 定义、术语 .....                | 21 | 概念 .....                  | 89  |
| 2.2.2 测量类别和等效串、并联电               |    | 2.7.2 频率标准 .....          | 94  |
| 路 .....                          | 22 | 2.7.3 频率、周期和时间的直接         |     |
| 2.2.3 高频阻抗量值的溯源性 .....           | 23 | 数字法测量 .....               | 95  |
| 2.2.4 高频阻抗测量中的连接头                |    | 2.7.4 频率的外差法测量 .....      | 97  |
| 及转换 .....                        | 24 | 2.7.5 频率的谐振法测量 .....      | 97  |
| 2.2.5 高频阻抗测量方法及效能 .....          | 25 | 2.7.6 微波频率数字法测量 .....     | 98  |
| 2.2.6 典型高频阻抗测量仪器 .....           | 26 | 2.7.7 频率的高精度测量 .....      | 100 |
| 2.2.7 高频介质材料电性能测量 .....          | 31 | 2.7.8 频率稳定性和漂移率的测         |     |
| 2.2.8 微波 $Q$ 值测量 .....           | 32 | 量 .....                   | 103 |
| <b>2.3 晶体管参数测量</b> .....         | 34 | <b>2.8 波形测量</b> .....     | 107 |
| 2.3.1 半导体二极管参数的测试 .....          | 34 | 2.8.1 定义和测量方法 .....       | 107 |
| 2.3.2 半导体三极管参数的测试 .....          | 37 | 2.8.2 示波器 .....           | 109 |
| 2.3.3 场效应管参数的测试 .....            | 42 | 2.8.3 波形参数测量 .....        | 112 |
| 2.3.4 可控硅参数的测试 .....             | 44 | 2.8.4 几种重要的波形测量要点 .....   | 115 |
| 2.3.5 晶体管网络参数的测试 .....           | 46 | <b>2.9 频谱测量</b> .....     | 121 |
| <b>2.4 半导体逻辑集成电路的测试</b> .....    | 53 | 2.9.1 概述 .....            | 121 |
| 2.4.1 数字逻辑电路测试 .....             | 53 | 2.9.2 频谱分析仪的种类 .....      | 122 |
| 2.4.2 半导体存储器的测试 .....            | 59 | 2.9.3 扫频超外差型频谱分析仪的        |     |
| 2.4.3 数字集成电路测试仪 .....            | 64 | 构造与原理 .....               | 123 |
| <b>2.5 电压测量</b> .....            | 66 | 2.9.4 扫频超外差型频谱分析仪         |     |
| 2.5.1 定义 .....                   | 66 | 的主要工作特性 .....             | 123 |
| 2.5.2 直流电压测量 .....               | 68 | 2.9.5 频谱分析仪的应用 .....      | 126 |
| 2.5.3 低频电压测量 .....               | 69 | <b>2.10 驻波系数的测量</b> ..... | 130 |
| 2.5.4 高频电压测量 .....               | 71 | 2.10.1 测量线法 .....         | 131 |
| 2.5.5 电压测量的误差因素 .....            | 76 | 2.10.2 反射计法 .....         | 137 |



|        |                     |     |       |                      |     |
|--------|---------------------|-----|-------|----------------------|-----|
| 2.10.3 | 电桥法                 | 140 | 3.2.1 | S 参数定义               | 225 |
| 2.10.4 | 扫频长线分离法             | 141 | 3.2.2 | 手动网络分析仪              | 226 |
| 2.11   | 衰减测量                | 142 | 3.2.3 | 自动网络分析仪              | 226 |
| 2.11.1 | 定义与术语               | 142 | 3.2.4 | 网络分析仪的应用             | 231 |
| 2.11.2 | 测量系统的组成和失配误差        | 143 | 3.3   | 六端口技术                | 231 |
| 2.11.3 | 衰减测量方法              | 144 | 3.3.1 | 基本原理                 | 231 |
| 2.11.4 | 衰减测量的选择             | 157 | 3.3.2 | 六端口接头                | 234 |
| 2.12   | 相移测量                | 158 | 3.3.3 | 六端口测量系统              | 237 |
| 2.12.1 | 术语与定义               | 158 | 3.3.4 | 校准方法                 | 238 |
| 2.12.2 | 相移测量方法              | 159 | 3.4   | 印制电路板自动测试系统          | 240 |
| 2.12.3 | 相移测量误差及其修正          | 165 | 3.4.1 | 印制电路板自动测试的必<br>要性    | 240 |
| 2.12.4 | 相移计量                | 169 | 3.4.2 | 印制电路板自动测试系统的<br>分类   | 240 |
| 2.13   | 噪声特性测量              | 170 | 3.4.3 | 印制电路板自动测试的方法<br>和原理  | 241 |
| 2.13.1 | 术语与定义               | 170 | 第4章   | 电子测量仪器的测试环境<br>和测试条件 | 252 |
| 2.13.2 | 测量方法                | 171 | 4.1   | 环境对电子仪器的影响           | 252 |
| 2.13.3 | 误差分析                | 178 | 4.1.1 | 电子仪器的环境要求            | 252 |
| 2.13.4 | 测试仪器的选择             | 180 | 4.1.2 | 环境条件对电子仪器的影<br>响     | 252 |
| 2.13.5 | 噪声计量                | 182 | 4.1.3 | 电子仪器的环境分组            | 253 |
| 2.14   | 场强测量                | 184 | 4.2   | 电子仪器的测试条件            | 253 |
| 2.14.1 | 场强测量的意义             | 184 | 4.2.1 | 基准条件                 | 253 |
| 2.14.2 | 基本知识与定义             | 185 | 4.2.2 | 电子仪器的基本环境试验          | 254 |
| 2.14.3 | 场强标准                | 189 | 4.3   | 温度、湿度、压力             | 255 |
| 2.14.4 | 场强计与辐射危险计           | 196 | 4.3.1 | 电子仪器的温度循环试验          | 255 |
| 2.14.5 | 辐射泄漏与屏蔽             | 197 | 4.3.2 | 电子仪器的湿度循环试验          | 255 |
| 2.15   | 介电常数与损耗角正切<br>的测量   | 198 | 4.3.3 | 电子仪器的低气压试验           | 255 |
| 2.15.1 | 概述                  | 198 | 4.4   | 振动、冲击、跌落             | 258 |
| 2.15.2 | 谐振腔法                | 199 | 4.4.1 | 电子仪器的振动试验            | 258 |
| 2.15.3 | 驻波法                 | 206 | 4.4.2 | 电子仪器的冲击试验            | 258 |
| 2.15.4 | 自由空间法               | 210 | 4.4.3 | 电子仪器的运输跌落试验          | 259 |
| 2.15.5 | 介质试样的制备             | 211 | 4.5   | 电磁干扰                 | 259 |
| 第3章    | 自动测试技术              | 213 | 4.5.1 | 敏感度试验                | 259 |
| 3.1    | 扫频测量技术              | 213 | 4.5.2 | 干扰试验                 | 260 |
| 3.1.1  | 扫频测量及特点             | 213 | 4.6   | 电源电压与频率              | 260 |
| 3.1.2  | 扫频测量系统及原理           | 213 | 4.6.1 | 供电电源的一般要求            | 260 |
| 3.1.3  | 扫频测量在电子测量中的<br>应用   | 214 | 4.6.2 | 尖峰瞬态试验               | 260 |
| 3.1.4  | 扫频测量系统中的常用仪<br>器及器件 | 222 | 4.6.3 | 电源电压与频率瞬态试验          | 261 |
| 3.1.5  | 自动扫频测量              | 223 |       |                      |     |
| 3.1.6  | 测量误差分析              | 224 |       |                      |     |
| 3.2    | 自动网络分析技术            | 225 |       |                      |     |



|                            |     |                        |     |
|----------------------------|-----|------------------------|-----|
| 4.7 安全试验 .....             | 261 | 5.3.4 量值传递系统图 .....    | 272 |
| 4.7.1 绝缘电阻的测试 .....        | 261 | 5.4 仪器的管理、维护与检定 .....  | 272 |
| 4.7.2 漏电流的测试 .....         | 261 | 5.4.1 仪器的维护 .....      | 272 |
| 4.7.3 介电强度电压的测试 .....      | 262 | 5.4.2 仪器的检定 .....      | 273 |
| 4.8 电子仪器的可靠性试验 .....       | 262 | 5.5 计量对环境的要求 .....     | 273 |
| 4.8.1 可靠性试验方案 .....        | 262 | 5.6 计量管理工作简介 .....     | 274 |
| 4.8.2 可靠性试验的应力条件 .....     | 266 | 5.6.1 目的 .....         | 274 |
| 4.8.3 失效的统计与分析 .....       | 267 | 5.6.2 计量管理机构系统图 .....  | 274 |
| <b>第5章 电子仪器与计量</b> .....   | 268 | 5.6.3 计量管理工作的内容 .....  | 274 |
| 5.1 电子计量与测量 .....          | 268 | 5.7 测量误差及其处理方法 .....   | 275 |
| 5.1.1 电子计量的基本内容及主要项目 ..... | 268 | 5.7.1 基本概念 .....       | 275 |
| 5.2 电子计量基准与标准 .....        | 269 | 5.7.2 系统误差 .....       | 280 |
| 5.2.1 计量基准与标准 .....        | 269 | 5.7.3 函数误差与平均值原理 ..... | 280 |
| 5.2.2 电子计量基准与标准的建立 .....   | 269 | 5.7.4 标准差的计算 .....     | 281 |
| 5.3 量值传递 .....             | 270 | 5.7.5 粗差剔除 .....       | 281 |
| 5.3.1 量值传递机构 .....         | 270 | 5.7.6 有效数字与修约规则 .....  | 282 |
| 5.3.2 量值传递机构系统图 .....      | 270 | 5.7.7 权与不等精度测量 .....   | 283 |
| 5.3.3 量值传递系统 .....         | 270 | 5.7.8 最小二乘法 .....      | 284 |
|                            |     | 5.7.9 测量不确定度的表示 .....  | 285 |
|                            |     | 5.7.10 仪器误差的一般规定 ..... | 286 |

## 第4篇 可靠性与质量管理

|                                |     |                             |     |
|--------------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| <b>第1章 概论</b> .....            | 291 | 3.2.3 验收检验 .....            | 302 |
| <b>第2章 可靠性基本概念</b> .....       | 294 | 3.2.4 库存管理 .....            | 303 |
| 2.1 可靠性的定量指标 .....             | 294 | 3.2.5 质量信息反馈 .....          | 303 |
| 2.2 产品失效的基本规律 .....            | 296 | 3.3 生产环境条件的管理 .....         | 304 |
| 2.3 维修性与寿命周期 .....             | 296 | 3.4 生产设备仪器的管理与维护 .....      | 304 |
| 2.3.1 产品的维修性 .....             | 296 | 3.5 生产人员的教育与培训 .....        | 304 |
| 2.3.2 产品的寿命周期 .....            | 297 | <b>第4章 工艺过程中的质量管理</b> ..... | 306 |
| 2.4 可靠性管理 .....                | 297 | 4.1 工艺质量管理 .....            | 306 |
| 2.5 可靠性工作的基本内容 .....           | 299 | 4.1.1 工艺文件管理 .....          | 306 |
| <b>第3章 生产条件及原材料的质量管理</b> ..... | 300 | 4.1.2 建立质量管理点 .....         | 306 |
| 3.1 建立质量保证体系 .....             | 300 | 4.2 质量检验 .....              | 311 |
| 3.1.1 建立全面质量管理体系 .....         | 300 | 4.3 质量分析 .....              | 312 |
| 3.1.2 建立产品质量保证体系 .....         | 300 | 4.3.1 在线质量分析 .....          | 312 |
| 3.2 原材料、零部件的质量管理 .....         | 301 | 4.3.2 成品失效分析 .....          | 313 |
| 3.2.1 技术文件准备 .....             | 301 | 4.4 质量数据档案 .....            | 315 |
| 3.2.2 供货厂点的选择 .....            | 302 | 4.5 质量信息反馈系统 .....          | 316 |

|                                |     |                              |     |
|--------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 4.6 工序质量管理水平的评定 .....          | 317 | 6.2 电磁兼容性试验一般要求 .....        | 333 |
| <b>第5章 可靠性试验与筛选</b> .....      | 318 | 6.2.1 试验的工作状态和试验频率 .....     | 333 |
| 5.1 可靠性试验的目的与分类 .....          | 318 | 6.2.2 发射试验 .....             | 333 |
| 5.1.1 可靠性试验的目的 .....           | 318 | 6.2.3 敏感度试验 .....            | 334 |
| 5.1.2 可靠性试验的分类 .....           | 319 | 6.3 电磁兼容性试验实例 .....          | 334 |
| 5.2 环境试验 .....                 | 320 | 6.3.1 电源线传导发射电压的测量 .....     | 334 |
| 5.3 寿命试验 .....                 | 321 | 6.3.2 电源线和互连线传导发射电流的测量 ..... | 335 |
| 5.4 失效率鉴定试验 .....              | 321 | 6.3.3 磁场辐射发射的测量 .....        | 338 |
| 5.4.1 失效率的单位与等级划分 .....        | 321 | 6.3.4 电场辐射发射的测量 .....        | 338 |
| 5.4.2 失效率鉴定试验实施方法 .....        | 322 | 6.3.5 电源线重复尖峰信号传导敏感度试验 ..... | 339 |
| 5.5 电子元器件的可靠性试验 .....          | 323 | 6.3.6 结构共模电流传导敏感度试验 .....    | 340 |
| 5.5.1 研制定型阶段的可靠性评价试验 .....     | 323 | 6.3.7 磁场辐射敏感度试验 .....        | 341 |
| 5.5.2 批量生产阶段的可靠性保证试验 .....     | 324 | 6.3.8 静电放电试验 .....           | 342 |
| 5.6 电子设备的可靠性试验 .....           | 324 | 6.4 安全性试验的分类与标准 .....        | 342 |
| 5.6.1 研制、定型阶段的可靠性试验 .....      | 324 | 6.5 典型的安全性试验方法 .....         | 343 |
| 5.6.2 批量生产阶段的可靠性试验 .....       | 325 | 6.5.1 显像管防爆试验 .....          | 343 |
| 5.7 可靠性筛选 .....                | 326 | 6.5.2 电子材料耐燃性试验 .....        | 344 |
| 5.7.1 筛选方法的选择 .....            | 326 | 6.5.3 防电击试验 .....            | 344 |
| 5.7.2 筛选项目和条件的选择 .....         | 326 | 6.5.4 防辐射试验 .....            | 344 |
| 5.7.3 常用筛选项目及其效果 .....         | 327 | 6.5.5 防雷电试验 .....            | 345 |
| 5.7.4 电子装置的老练与筛选 .....         | 329 | 6.5.6 倾斜稳定性(或机械稳定性)试验 .....  | 345 |
| <b>第6章 电磁兼容性试验与安全性试验</b> ..... | 330 | <b>第7章 几种质量管理制度</b> .....    | 347 |
| 6.1 电磁兼容性试验的种类 .....           | 330 | 7.1 生产许可证制度 .....            | 347 |
| 6.1.1 定义与目的 .....              | 330 | 7.2 七专质量控制与反馈制度 .....        | 348 |
| 6.1.2 试验种类与分类项目 .....          | 330 | 7.3 电子元器件质量认证制度 .....        | 349 |
| 6.1.3 受试产品的分类 .....            | 330 |                              |     |

# 电子测量技术

主 编

张云鹏 孙福庆

主 审

周立基 王义举



# 第 1 章 概 论

张云鹏

本篇介绍电子测量技术、计量知识、测量环境、以及电子测量仪器生产过程中为保证质量而进行的整个检测程序。

电子测量技术以电子学理论为依据,以电子测量仪器及设备为手段,以被测电气及电子参量为对象。电子测量技术与电子测量仪器的研制与发展紧密相联。从电子产品的发展来看,任何一种新的电子理论的出现,必将出现新的电子产品,也将出现与新电子产品相适应的新的电子测量仪器。新的电子测量技术又将推动电子技术的发展。示波器的研制成功,能直观显示,从而推动了电子产品的发展。近年来,各种宽频带器件的发展,改变了经典的逐点测量方式,促进了宽带扫频测量仪器的研制,近期又将微型计算机技术与此相结合,发展成一门崭新的自动化、智能化电子测量技术。过去需数小时甚至几个月才能完成的测试过程,仅需几秒到几分钟就能完成。电子测量技术大体上经历了经典的单频单参数、综合测量、宽带扫频、单机自动化多功能测试等发展阶段。目前,正在向多机组合、自动化、数字化、智能化、高精度等方向发展。虽然崭新的技术正在改变许多经典的测量方法,但从目前来看,尚不能取代它。这不仅是新的测试技术是在经典的方法基础上逐步发展起来的,而且还由于在电子工业很多经典方法在性价比方面,还有其独特之处。因此,在本篇中仍用较多的篇幅阐述经典的测量技术。

电子产品都有不同的频率特性。因而形成了低频、高频、甚高频及微波测量等不同表征方法及测量过程。对于可以用集中参数表征电路特性的电子测量,通常可以分为以下几种:

- 1) 电能参数的测量,包括电压、电流和功率等;
- 2) 电路参数的测量,包括电阻、电感、电容、阻抗、品质因数和损耗等;
- 3) 电信号波形参数的测量,包括频率、频谱、时间、相位、失真度、调幅系数、调频频偏等;
- 4) 电路特性的测量,包括放大量、衰减、灵敏度、频率特性、噪声系数等。

而在微波频段内,由于分布参数的影响,发展成一门独特的微波测量技术。早期集中于功率、波长和频率、频谱和波形、驻波系数和阻抗、衰减和 $Q$ 值等测量方法及仪器的研制。对于微波器件的反射特性、传输特性比较着重于幅值,而忽视对相位的研究。由于相控阵雷达及其他新技术的出现,在微波测量技术中发展了网络分析技术。近年来,超高速脉冲发生器和采样技术的出现,使得时域测量技术进入了微波测量之中。出现了通过快速傅氏变换能得出频域散射参数的时域自动网络分析仪。

集成电路技术的大量发展,使计算机技术及微处理器得到了广泛的应用。除了人们熟悉的频域及时域的测量,又开辟了数据域测量的新领域。诸如逻辑分析仪、微处理器开发系统等日益显示出现代化测量技术的优越性。当前国际上出现的新型电子仪器,常常将计算机、宽带扫频、数字显示以及微处理器技术等结合起来,这类仪器的品种发展很快,预计它的出现将进一步推动电子产品发展。

为了使电子测量能得到统一的量值,不致因地点不同而使同一个测量对象获得不同的结果,必须对电子测量仪器进行计量,使其统一到一个标准的量值上。国家计量局对各种电子测量技术中的计量量值建立了原始基准,并通过副基准,由不同的计量系统传递至各工作单位。对于各项量的计量规定了严格的定义,计量标准及相应的计量仪器。

在电子计量基准中发展较快的是量子频率基准。目前常用的有铯束谐振器无源原子频标,其准确度达  $2 \times 10^{-13}$ 。长期稳定度较高的为氢激射器有源原子频标,其100s、一个月的稳定度可达  $10^{-13}$  量级。作为次级频标、铷气泡无源原子频标应用较广。

在电子测量技术中,目前正在形成一种根据物理学原理而建立起带自校准的新技术。它使以往的量值一级传递一级的宝塔式结构的传统计量观念,受到重新审议。例如衰减器的测量,可根据衰减量与电平相对变化有一定对应关系的原理,通过一定的方式,使电平成倍增加来实现衰减量的测量,它不需要标准衰减器。在3 cm及5 cm波导衰减器上检定42dB量程的衰减量,准确度达到0.002dB/10dB,还可利用计算机的存贮能力,将一些标准件接入系统中测量,测量结果与标准件所给出的数值差别,即为系统本身的固有误差。将此误差信息贮存起来,在以后测量时,通过计算机进行数据处理。用此误差信息修正被测件的测试数据,得到准确的结果。

现代电子产品的印制板及插件板日趋繁杂,电子工业的传统检测方法已很难适应。七十年代发展起来的各种数字型及模拟型印制板及插件板测试仪,得到了广泛的应用。它的出现改变了电子工厂的生产工艺,极大地提高了检测效率。其生产模式可概括为:

1) 采用印制板通断测试仪,对光板进行测量,将误联或误断的光板筛选出来。例如,对具有4000个孔的印制板进行测量,孔与孔之间的测量次数达数百万次以上,人工测量几乎是不可能实现的,而采用自动化仪表,仅需数秒钟,不仅找出故障,还能打印出具体的位置。

2) 印制板插装上元器件后,由于插装中的错误或其他原因,需在插件板加电前进行在线测试。在线测试合格的插件板,才能进入整机装配。

3) 部分插件板有时还需经功能测试仪检查其功能是否符合技术性能指标。

因此,印制板的光板测试仪,插件板的在线测试仪及功能测试仪是现代化电子工厂保证生产质量的重要手段。

## 第 2 章 参数测量

### 2.1 电阻、电感和电容测量

#### 2.1.1 概 述

通常, 电路的基本参数为电阻 $R$ 、电感 $L$ 和电容 $C$ 。阻抗 $Z$ 、品质因数 $Q$  (或损耗系数 $D$ ) 等是前者的导出函数。

这些参数值, 常用电桥法、谐振法、电表法和充放电法测量。

由于电路元件的特性和参数是频率的函数, 并且与工作状态和环境条件有关, 因此, 被测元件应在实际工作时的频率、电平和环境条件下进行测量, 或按统一规定的标准进行。

本节叙述频率为 1GHz 以下的 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 测量。

#### 2.1.2 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 等效电路

理想的 $R$ 、 $L$ 、 $C$ , 只有基本参数。实际上, 它们总是以基本参数为主, 兼有两个寄生参数, 如图 2-1 所示。

电阻器, 除电阻 $R$ 外, 尚有分布电容 $C_0$ 和电感 $l$ , 频率低时,  $\omega l/R \ll 1$ ,  $\omega C_0 R \ll 1$ , 其阻抗为

$$Z = R(1 + j\omega\tau) \quad (2-1)$$

$$\tau = l/R - RC_0 \quad (2-2)$$

式中  $\tau$  ——电阻器的时间常数;

$\omega$  ——角频率。

电感器, 除电感 $L$ 外, 尚有损耗电阻 $r_L$ 和固有电容 $C_L$ 。常用品质因数 $Q_L$ 和固有角频率 $\omega_0$ 表征其特性;

$$Q_L = \omega L / r_L \quad \omega_0 = 1 / \sqrt{LC_L}$$

式中  $r_L$  与 $C_L$ 和频率有关。频率越高,  $r_L$ 越大。在 $\omega_0$ 附近,  $C_L$ 变化较大, 远低于 $\omega_0$ 时,  $C_L$ 可视为常数。

电容器, 除电容 $C$ 外, 尚有损耗电阻 $r_0$ 和引线及极片电感 $l_0$ 。常用损耗系数 $D$ 及固有角频率 $\omega_0$ 表征其特性。

$$D = 1 / \omega r_0 C \quad \omega_0 = 1 / \sqrt{l_0 C}$$

与电感器相比, 它的 $\omega_0$ 较高,  $D$ 较低。

三种元件的特性, 受寄生参数和频率的影响, 见表 2-1。

通常, 电容器和电感器的的工作频率远低于 $\omega_0$ 。故常用等效电容 $C_p$ 与电阻 $R_p$ 并联, 或等效电容 $C_s$ 与电阻 $r_s$ 串联来表示电容器; 用等效电感 $L_s$ 与电阻 $r_s$ 串联, 或等效电感 $L_p$ 与电阻 $R_p$ 并联来表示电感器。其等效电路图、矢量图与参数转换关系, 见表 2-2。

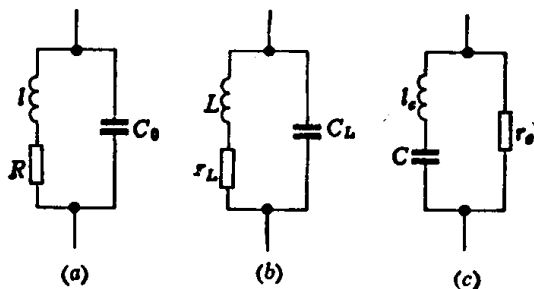


图2-1 元件等效电路图

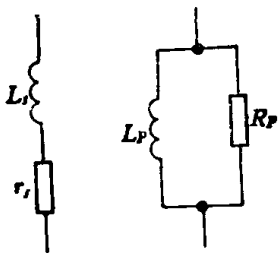
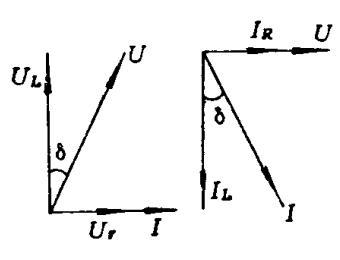
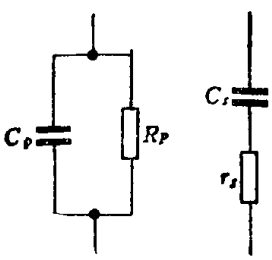
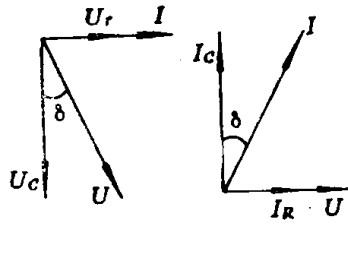
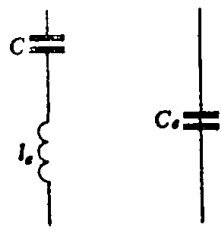
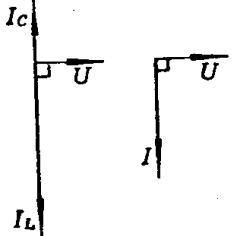
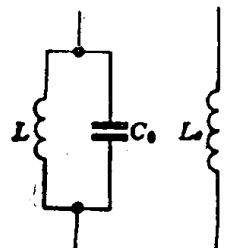
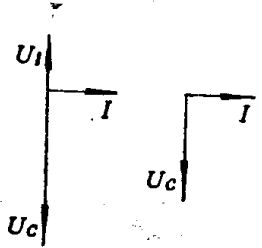
(a) 电阻器; (b) 电感器; (c) 电容器。



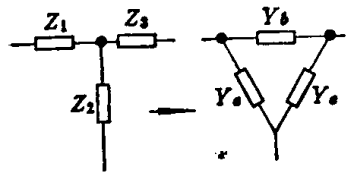
表2-1 寄生参数和频率对元件特性的影响

| 电 阻 器    |     | 电 感 器             |     | 电 容 器             |     |
|----------|-----|-------------------|-----|-------------------|-----|
| $\tau=0$ | 呈纯阻 | $\omega=\omega_0$ | 呈纯阻 | $\omega=\omega_0$ | 呈纯阻 |
| $\tau<0$ | 呈容性 | $\omega<\omega_0$ | 呈感性 | $\omega<\omega_0$ | 呈容性 |
| $\tau>0$ | 呈感性 | $\omega>\omega_0$ | 呈容性 | $\omega>\omega_0$ | 呈感性 |

表2-2 常用等效电路参数转换一览表

| 等 效 电 路 图                                                                           | 矢 量 图                                                                               | 转 换 公 式                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   | $Z = r_s + j\omega L_s = \frac{R_p + jQ^2\omega L_p}{1+Q^2}$ $Q = \frac{1}{D} = \frac{\omega L_s}{r_s} = \frac{R_p}{\omega L_p}$ $L_s = \frac{Q^2}{1+Q^2} L_p, \quad L_p = \frac{L_s}{1+D^2}$ $r_s = \frac{R_p}{1+Q^2}$ |
|  |  | $Z = r_s - j\frac{1}{\omega C_s} = \frac{D^2 R_p - j\frac{1}{\omega C_p}}{1+D^2}$ $D = \frac{1}{Q} = \omega r_s C_s = \frac{1}{\omega R_p C_p}$ $C_s = (1+D^2) C_p$ $r_s = \frac{D^2}{1+D^2} R_p = \frac{R_p}{1+Q^2}$   |
|  |  | $C_s = \frac{C}{1 - (\frac{\omega}{\omega_{0L}})^2}$ $\omega_{0L} = \frac{1}{\sqrt{L_s C}}$ <p>当 <math>\omega &lt; \omega_{0L}</math> 时</p>                                                                             |
|  |  | $L_s = \frac{L}{1 - (\frac{\omega}{\omega_{0L}})^2}$ $\omega_{0L} = \frac{1}{\sqrt{LC_s}}$ <p>当 <math>\omega &lt; \omega_{0L}</math> 时</p>                                                                              |

(续)

| 等效电路图                                                                             | 矢量图 | 转换公式                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |     | $Z_s = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$ $Z_b = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2}$ $Y_s = Y_1 + Y_2 + \frac{Y_1 \cdot Y_2}{Y_3}$ $Y_b = \frac{1}{Z_b} \quad Y_s = \frac{1}{Z_s}$ |

2.1.3 端口数对阻抗测量的影响

一个元件至少有两个端口。用两条线将元件接入回路测量，称二端测量。此外，尚有三端、四端、五端、六端以至八端测量。

1. 二端测量

二端测量为较常用的一种方法。图 2-2 所示为二端测量原理图。

其中， $Z_x$  为被测阻抗， $Z_1$ 、 $Z_3$  为与  $Z_x$  并联的旁路阻抗， $Z_1$  至  $Z_6$  为各引线串联阻抗。由测得的端电压和流过器件的电流，可算出被测值  $Z_x$ ：

$$Z_x = Z_s \cdot (1 + (Z_1 + Z_3) / Z_s - Z_s / (Z_1 + Z_3)) \tag{2-3}$$

当  $Z_x$  较小，或  $Z_1$ 、 $Z_3$  较大时，由  $Z_1$ 、 $Z_3$  串联阻抗引起的误差较大；当  $Z_x$  较大，或  $Z_1$ 、 $Z_3$  较小时，由  $Z_1$ 、 $Z_3$  并联阻抗引起的误差较大。二端测量连接最简单，不能作为较低或较高阻抗的精密测量。

2. 四端测量

上例量得的端电压，尚含有  $Z_1$ 、 $Z_3$  上的压降。若将电压表按图 2-3 连接，就变成了四端测量。此时电压表测得的电压，为  $Z_x$  上的真正端电压，则有：

$$Z_x = Z_s \cdot (1 - Z_s / (Z_1 + Z_3)) \tag{2-4}$$

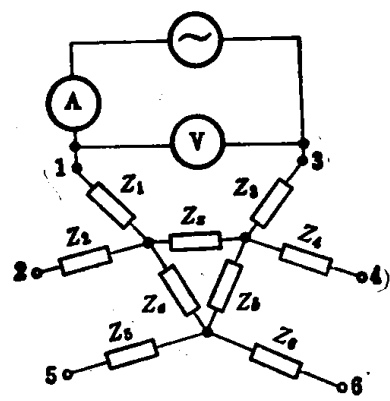


图2-2 二端测量原理图

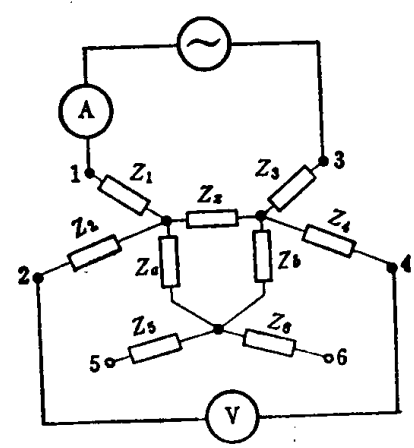


图2-3 四端测量的原理图

当  $Z_x$  小时， $Z_1$ 、 $Z_3$  对测量影响也小， $Z_1$ 、 $Z_3$  除降低测量灵敏度外，不引入其它误差。它适用于低阻抗精密测量。