

普通高等院校

电子信息类系列教材

*Dianzi Dianlu
Shiyan Jiaocheng*

电子电路 实验教程

◎ 曾浩 主编

◎ 罗小华 副主编 刘双临 邵凯 林云 编

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等院校电子信息类系列教材

电子电路实验教程

曾浩 主编

罗小华 副主编

刘双临 邵凯 林云 编

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

电子电路实验教程 / 曾浩主编; 刘双临, 邵凯, 林云编.
—北京: 人民邮电出版社, 2008.9
(普通高等院校电子信息类系列教材)
ISBN 978-7-115-18152-7

I. 电… II. ①曾…②刘…③邵…④林… III. 电子电路—
实验—高等学校—教材 IV. TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 072456 号

内 容 提 要

本书主要内容包括“低频电子电路实验”和“通信电子电路实验”,以电子信息学科相关专业为主,涵盖相近的光电工程类、计算机科学类、自动化类等专业的电子电路教学内容。在介绍基础知识和基础实验的同时,加入了 EDA 仿真技术的分析、设计方法。在实验中注重融入现代电子电路系统观念,强调电子电路的工程性,适当考虑理论教学、基础实验、仿真实验、设计研究型实验的比例,引领学生将系统理念与电路、信号的基础知识相结合,提高读者工程设计能力和创新能力。

本书是高等学校电工电子相关专业实验教材,也可作为工程技术人员的参考书。

普通高等院校电子信息类系列教材

电子电路实验教程

-
- ◆ 主 编 曾 浩
副 主 编 罗小华
编 刘双临 邵 凯 林 云
责任编辑 滑 玉
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 15
字数: 365 千字 2008 年 9 月第 1 版
印数: 1-3 000 册 2008 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-18152-7/TN

定价: 26.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

本书是根据当前高等教育的新形势，对原有“低频电子电路实验”和“通信电子电路实验”两门课程进行重新整合并根据新的实验需求而编写的。

“电子电路”是一门工程性和实践性很强的课程。随着电工电子新技术、微电子技术的迅速发展和计算机的广泛应用，电子电路的实验方法和实验手段也在不断更新和发展。本书按照“保证基础、加强实践、体现先进、着眼创新”的思路，实验覆盖基础层、提高设计层、综合应用开发层的内容，并通过运用新技术、新器件及EDA现代仿真技术，在加强学生实验基本技能训练的同时，更加注重培养学生的实际动手能力、理论联系实践能力、工程设计能力、运用和创新能力。

全书将电子电路实验分以下三个层次。

(1) 验证性实验。它主要是以电子元器件特性参数和基本单元电路为主。可根据实验目的、实验电路，运用仪器设备，按照较详细的步骤进行实验。通过这些实验认知电子技术的有关基础知识，从而进一步巩固所学的基本知识和理论。

(2) 仿真实验。它将先进的计算机技术应用于电子设计，通过仿真实验，学生可以初步掌握仿真的设计方法，以提高设计质量和综合应用的能力。本书以EWB软件为基础，为用户提供了一个一体化的设计与实验环境。该软件包含创建电路、实验分析与实验结果。

(3) 基础设计研究型实验。学生根据给定的实验题目、内容和要求，自行设计实验电路，选择合适的电子元器件来组装实验电路，拟定出调整测试方案，最后达到设计要求。通过这个过程，培养学生综合运用所学知识解决实际问题的独立工作能力，从而得到电路设计的初步入门训练。

本书主要以分离元件和基本集成电路进行电路分析和电路设计，读者可根据自身实际情况利用模块电路或实验箱来完成实验。

本书可以作为电子信息学科相关专业本科生的电子电路课程实验的教材，也可作为参加电子大赛人员及从事电子技术的工程技术人员的参考书；还可作为相关专业教师的教学参考书。

全书由曾浩任主编，罗小华任副主编。具体分工如下：曾浩提出编写大纲并负责全书的统编，具体编写了第1~3章，以及第4~6章的部分内容；罗小华编写了第4~6章的大部分内容；刘双临、邵凯共同编写了第7章的内容；林云编写了部分第6章的内容。

何丰教授审阅了全书，提出许多宝贵意见。重庆邮电大学通信与信息工程学院、电工电子基础教学部和实验中心的许多老师也提出了很多好的建议，在此谨向他们致以衷心的感谢。

限于编者能力与水平，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 电子电路实验的基础知识	1	2.2.6 放大—检波式毫伏表的使用 方法	29
1.1 电子电路实验课程的意义、目的及 要求	1	2.3 信号发生器的原理与使用	30
1.1.1 电子电路实验课程的意义	1	2.3.1 信号发生器的分类	30
1.1.2 电子电路实验课程的目的	1	2.3.2 对信号发生器的一般要求	31
1.1.3 电子电路实验课程的要求	2	2.3.3 正弦信号发生器	31
1.2 电子电路实验课程的特点和学习 方法	2	2.3.4 函数信号发生器的工作原理及 使用	33
1.2.1 电子电路实验课程的特点	2	2.4 电子示波器的原理与使用	37
1.2.2 电子电路实验课程的学习 方法	2	2.4.1 示波管原理	37
1.3 实验室的安全操作规程	3	2.4.2 示波器的基本构成及工作 原理	39
1.3.1 人身安全	3	2.4.3 示波器的多波形显示	44
1.3.2 仪器和器件的安全	4	2.4.4 示波器的正确使用	46
1.4 实验室常用工具和材料的使用	4	2.4.5 KENWOOD CS-4135 型双踪 示波器	47
1.4.1 主要工具	4	2.5 数字存储示波器原理与使用	51
1.4.2 主要材料	5	2.5.1 数字存储示波器的原理和 特点	51
1.4.3 辅助工具	5	2.5.2 PY2000-III 多功能数字 示波器	52
1.5 电子测量中的误差分析	7	2.6 直流稳压电源的原理与使用	54
1.5.1 误差产生的原因及其分类	7	2.6.1 直流稳压电源的工作原理	54
1.5.2 误差的各种表示方法	7	2.6.2 HT-1712F 型直流稳压电源	54
1.5.3 削弱或消除系统误差的主要 措施	9	2.7 晶体管特性图示仪的原理与使用	55
1.6 实验数据的处理方法	9	2.7.1 晶体管特性图示法	55
1.6.1 有效数字的处理	10	2.7.2 图示仪的基本组成	56
1.6.2 图解分析数据	11	2.7.3 JT-1 型晶体管图示仪	57
第 2 章 实验常用仪器	13	2.8 BT-3W 型频率特性测试仪的 使用	62
2.1 万用表的原理与使用	13	2.8.1 主要性能参数	62
2.1.1 模拟式万用表	13	2.8.2 面板装置	62
2.1.2 数字式万用表	22	2.8.3 使用方法	63
2.2 毫伏表的原理与使用	24	第 3 章 电子电路实验中的基本测量 方法	65
2.2.1 毫伏表的分类	24	3.1 电子测量概述	65
2.2.2 毫伏表的特点	24		
2.2.3 毫伏表的基本工作原理	25		
2.2.4 检波电路	26		
2.2.5 毫伏表的刻度特性	28		

3.1.1 电子测量的分类	65	实验十三 LC 三点式振荡器	126
3.1.2 电子电路测量的基本要求	66	实验十四 石英晶体振荡器	129
3.2 电路基本元器件参数的测量	67	实验十五 集成乘法器混频	131
3.2.1 电阻的测量	67	实验十六 调幅电路	133
3.2.2 电容的测量	69	实验十七 二极管包络检波电路	137
3.2.3 电感的测量	70	第 5 章 电子电路的仿真实验	139
3.2.4 半导体二极管的测量	72	5.1 EWB 5.0 简介	139
3.2.5 半导体三极管的测量	74	5.2 基于 EWB 的电子电路设计及 仿真	145
3.2.6 集成运算放大器参数的 测量	77	实验一 放大器静态工作点对动态 范围的影响	145
3.3 电子电路基本参数的测试方法	79	实验二 两级放大器	148
3.3.1 电压的测量方法	79	实验三 负反馈放大器	150
3.3.2 电流的测量方法	81	实验四 场效应管放大器	152
3.3.3 放大电路输入电阻的测量 方法	82	实验五 差分放大电路	154
3.3.4 放大电路输出电阻的测量 方法	82	实验六 晶体管放大电路通频带 扩展	156
3.3.5 频率与周期的测量方法	83	实验七 电压比较器特性研究	158
3.3.6 相位的测量方法	84	实验八 信号发生器的设计与调试	160
第 4 章 基础性实验	85	实验九 电容三点式振荡器	164
实验一 常用电子仪器仪表使用练习	85	实验十 模拟乘法器仿真	166
实验二 单级低频放大器	90	第 6 章 基础设计研究型实验	169
实验三 共集电极放大电路——射极 跟随器	95	实验一 集成运算放大器基本运算电路 设计	169
实验四 两级阻容耦合放大器及负反馈 放大器	97	实验二 有源滤波器的设计	173
实验五 差动放大器	101	实验三 电压比较器的设计与调测	178
实验六 集成功率放大器	104	实验四 集成稳压电源	181
实验七 集成运算放大器的线性 应用	107	实验五 电容三点式振荡电路	187
实验八 RC 正弦波振荡器及波形 变换	110	实验六 乘法器振幅调制电路	190
实验九 集成稳压源	113	实验七 二极管包络检波电路	193
实验十 压控振荡器调频与锁相环 鉴频	116	实验八 乘法器同步检波电路	197
实验十一 单调谐回路与双调谐回路 放大电路比较	120	实验九 压控振荡器调频电路	201
实验十二 高频丙类谐振功率 放大器	124	实验十 变容二极管调频电路	205
		实验十一 相位鉴频器	208
		实验十二 锁相环鉴频器	211
		第 7 章 实验中常用的电子器件	214
		7.1 半导体分立器件	214
		7.1.1 半导体分立器件的命名 方法	214

7.1.2	常用半导体二极管的主要参数 (如表 7-5 所示)	219	7.2.1	国产集成电路命名方法 (如表 7-15 所示)	225
7.1.3	常用整流桥的主要参数 (如表 7-6 所示)	220	7.2.2	国外部分公司及产品代号 (如表 7-16 所示)	226
7.1.4	常用稳压二极管的主要参数 (如表 7-7 所示)	220	7.2.3	部分模拟集成电路引脚 排列	226
7.1.5	常用半导体三极管的主要 参数	221	7.2.4	部分模拟集成电路主要 参数	227
7.2	半导体集成电路	225	7.2.5	常用数字集成电路	230

第 1 章 电子电路实验的基础知识

本章介绍电子电路实验课程的基本特点、基本要求、学习方法以及在实验中遇到的常识性问题，为较好地完成实验课程奠定基础。

1.1 电子电路实验课程的意义、目的及要求

1.1.1 电子电路实验课程的意义

电子电路是弱电类专业的重要专业基础课程，其特点之一是它的实践性。电子电路实验，是根据教学、科研、生产的要求，熟悉与掌握电子电路的设计、安装与调测的过程，是将理论转化为实用电路或产品的过程。要想较好地掌握电子技术，在熟悉电子电路基本器件的原理、基本电路的组成及分析方法的基础上，更重要的是掌握电子器件和基本电路的应用技术。实验是促进科学技术发展的重要手段，对于电子电路课程教学来讲实验课程是不可缺少的环节，因而电子电路实验课程是电子电路教学非常重要的组成部分。

通过实验，使得读者能进一步掌握电子器件的性能、参数及组成电子电路的规律，掌握各种功能电路之间的相互影响并验证理论，掌握电子电路的实验技术、电路参数的测量与调整技术、电路系统结构的分析技术等。在上述过程中，读者对电路的认识进一步深化，能促进读者发现新问题、产生新思想，使电子电路的理论和应用技术进一步向前发展。

随着社会的进步、高等教育教学的发展，本实验课程也得到不断发展和提高。传统的电子电路实验偏重验证性实验，多年来这种实验方法在为帮助读者学习基本理论、基本知识、基本技能，培养读者分析问题和解决问题的能力方面发挥了重要的作用。但是这种实验教学法已不能满足社会对 21 世纪宽口径、复合型人才的需求，为提高读者的综合运用及创新能力，本实验课程将传统的实验教学内容分成基础性实验、综合设计性实验、电子电路的仿真实验几个层面。

1.1.2 电子电路实验课程的目的

电子电路实验是培养电气类、电子类、通信类专业应用人才的基本内容之一和重要手段，“应用”可以说是直接的和最主要的目的。具体地说，通过实验可以巩固和深化应用技术的基础理论并将其付诸实施。在这一过程中，培养读者理论联系实际学风、严谨求实的科学态度以及基本的工程素质，从而为今后的工作打下坚实的理论基础和实际工作能力。

1.1.3 电子电路实验课程的要求

通过电子电路实验的学习，要求学生做到以下几点。

- (1) 掌握常用电子测量仪器的选择与使用。
- (2) 掌握各类基本电路性能的测试方法。
- (3) 能够读懂基本电子电路图，具有一定的分析电路作用或功能的能力。
- (4) 能查阅和利用技术资料、合理选用电子元器件并具有设计、组装、调试基本电子电路的能力。
- (5) 具有一定的分析和排除基本电子电路一般故障的能力。
- (6) 具有独立拟定基本电路的实验内容、实验步骤，写出科学的、严谨的、实事求是的、理论与实践相结合的实验报告。

1.2 电子电路实验课程的特点和学习方法

1.2.1 电子电路实验课程的特点

与其他实验相比较，电子电路实验有以下几个显著特点。

1. 理论性强

在电子电路实验中，如果没有正确的理论指导，就不可能设计出性能稳定、符合技术要求的实验电路，也不可能拟定出正确的实验方法和步骤，同时实验中一旦发生故障就会束手无策。因此，要较好地完成电子电路实验，首先应学好电子电路课程。

2. 工艺性强

即使有了成熟的实验电路方案，但由于装配工艺等不合理，也很难取得满意的实验结果，甚至会导致实验失败（高频电子电路实验尤其突出），因此需要认真掌握电子工艺等技术。

3. 测试技术要求高

电子电路实验电路类型多，不同的电路有不同的性能指标或功能，对不同的性能指标又有不同的测试方法，并采用不同的测试仪器，因此应熟练掌握基本测量技术和各种测量仪器的使用方法。

1.2.2 电子电路实验课程的学习方法

1. 掌握实验课程的学习规律

实验课程是以实验为主体的课程，每个实验都应历经预习、实验、总结三个阶段，每个阶段都有明确的要求。

预习阶段的任务是弄清实验的目的、内容、要求、实验的方法和实验中应注意的问题，

拟定实验的步骤, 绘出实验记录表格并对实验结果作出估计, 以便在实验过程中及时检验实验结果。预习充分, 实验才能顺利完成并取得收获。

实验阶段的任务是按照预定的方案进行实验, 其过程既是完成实验的过程, 也是锻炼实验能力、培养实验态度和实验作风的过程。在实验中, 既要动手、更要动脑, 要做好原始数据的记录, 并分析与解决实验中遇到的问题。

总结阶段是实验完成后, 通过整理实验数据, 培养学生总结归纳能力和编写实验报告能力, 是总结实验收获的重要过程。

2. 应用理论知识指导实验的进行

在实验开始前, 首先应从理论上研究实验电路的工作原理与特性, 制订出实验方案。在调测电路时, 要用理论来分析实验现象, 从而确定调测措施, 并对实验结果的正确性以及和理论的差异进行分析。

3. 注意实际知识和经验的积累

实验知识和经验需要长期积累才能丰富起来。在实验过程中, 应熟悉所用仪器和元器件的使用方法, 熟悉实验中出现的现象与故障的特征, 对实验中的经验教训进行总结。

4. 增强自觉提高实际工作能力的意识

要将实际工作能力的培养从被动转为主动。在实验过程中, 要主动地、有意识地培养自己的实际工作能力, 不应过多地依赖教师的指导, 而应力求自己解决实验中的各种问题、困难、失败等, 这是提高自己的最有效途径。

1.3 实验室的安全操作规程

为了保证人身安全以及仪器、器件的安全, 使实验得以顺利完成, 进入实验室后需要遵守实验室的规章制度和安全规则。

1.3.1 人身安全

实验室中最常见的危及人身安全的事故是触电, 轻者是身体局部不适, 严重者将受到永久性伤害, 甚至危及生命。为避免事故的发生, 进入实验室后应严格遵守以下规则。

(1) 在实验室中不得赤脚, 各种仪器设备应有良好的接地。

(2) 仪器设备、实验装置中通过强电的连线应有良好的绝缘外层, 芯线不得外露。

(3) 实验电路接好后, 应检查无误后方可接通电源, 实验完成后应先断开电源后再拆除实验电路。

(4) 在进行强电或具有一定危险性的实验时, 应至少两人以上合作。测量高电压时, 要养成单手操作的习惯并站在绝缘垫上, 或者穿上厚底胶鞋。在接通 220V 电源前, 应通知实验合作者。

(5) 万一发生触电事故, 应迅速切断电源, 如距电源开关较远, 可用绝缘器具将电源切

断，使触电者立即脱离电源并采取必要的措施。

1.3.2 仪器和器件的安全

使用仪器和器件时，应遵守以下规则。

- (1) 使用仪器前，应认真阅读使用说明书，掌握仪器的使用方法和注意事项。
- (2) 使用仪器前，应按照实验要求正确接线。
- (3) 实验中要有目的地操作仪器面板上的开关（或旋钮），切忌用力过猛。
- (4) 实验过程中，必须精神集中。当嗅到焦臭味、见到冒烟或火花、听到“劈啪”响声、感到设备过热或出现保险丝熔断等异常现象时，应立即切断电源，切勿尖叫、乱跑以免造成额外损失，在故障排除前不得再次开机。
- (5) 搬动仪器设备时，须轻拿轻放，未经允许不得随意调换仪器，更不准擅自拆卸仪器设备。
- (6) 为保证仪器及器件的安全，在连接实验电路时，应该在电路连接完成并检查完毕后再接通电源和信号源。
- (7) 仪器使用完毕，应将面板上开关、旋钮置于合适的位置。

1.4 实验室常用工具和使用材料

为了快速而准确地安装调测电子电路，除需要电路的理论知识、实验技能之外，检查实验工具和材料是必不可少的，否则将一事无成。

1.4.1 主要工具

1. 螺丝刀

螺丝刀是用来拆卸和装配螺丝必不可少的工具，有以下几种常用的螺丝刀：

- 扁口螺丝刀；
- 十字头螺丝刀；
- 装表小螺丝刀。

螺丝刀在使用时应注意以下几点。

- (1) 根据螺丝口的大小选择合适的螺丝刀。螺丝刀口太小会拧毛螺丝口，从而导致螺丝无法拆装。
- (2) 在拆卸螺丝时，若螺丝很紧，不要硬去拆卸，应先按顺时针方向拧紧该螺丝，以便让该螺丝松动，再逆时针方向拧下螺丝。
- (3) 将螺丝刀刀口在扬声器背面的磁钢上擦几下，让刀口带些磁性，这样在装螺丝时能够吸住螺丝。对于专门调整录音机磁头的螺丝刀不要这样处理，否则会使磁头带磁，影响磁头的工作性能。
- (4) 在装配螺丝时，不要装一个螺丝就拧紧一个螺丝，应在全部螺丝装上后，再把对角方向的螺丝均匀拧紧。

2. 电烙铁

电烙铁是用来焊接的。为了获得高质量的焊点，除需要掌握焊接技能、选用合适的助焊剂外，还需要根据焊接对象、环境温度合理选用电烙铁。如电子电路采用晶体管元器件，则焊接温度不宜太高，否则容易烫坏元器件，购买和使用电烙铁主要应注意以下几点。

(1) 20W 内热式电烙铁。主要用来焊接晶体管、集成电路、电阻器和电容器等元器件。内热式电烙铁具有预热时间快、体积小、效率高、重量轻、使用时间长等优点。

(2) 60W 左右电烙铁，可用外热式的。用来焊接一些引脚较粗的元器件，例如变压器、插座引脚等。

(3) 吸锡器。主要用来拆卸集成电路等多引脚元器件。

(4) 做一个电烙铁支架以防电烙铁碰到工作面上。支架最适合于冬季使用，底板要用木质的以绝热，底板中央开一个凹巢，放助焊剂——松香。

(5) 新买的电烙铁电源引线一般是橡胶质的线，当电烙铁头碰到引线时会烫坏皮线，为安全起见，应换成防火的花线。在更换电源线之后，还应进行安全检查，主要是引线头不能碰在电烙铁的外壳上。

1.4.2 主要材料

1. 焊锡丝

焊锡丝最好使用低熔点的细焊锡丝。细焊锡丝管内的助焊剂量正好与焊锡使用量一致，而粗焊锡丝焊锡的量较多。在焊接过程中，若发现焊点成豆腐渣状态时，很可能是焊锡质量不好，或是高熔点的焊锡丝，或是电烙铁的温度不够，这种焊点是不可靠的。

2. 助焊剂

助焊剂用来辅助焊接，可提高焊接的质量和速度。助焊剂是焊接中必不可少的。在焊锡丝的管芯中有助焊剂，当烙铁头去熔解焊锡丝时，管芯内的助焊剂便与熔解的焊锡丝合在一起。在焊接电路板时，只用焊锡丝中的助焊剂一般是不够的，需要有专门的助焊剂。助焊剂主要有以下两种。

(1) 成品的助焊剂。成品助焊剂是酸性的，对线路板有一定的腐蚀作用，用量不要太多，焊完焊点后最好擦去多余的助焊剂。

(2) 松香。平时常用松香作为助焊剂，松香对线路板没有腐蚀作用，但使用松香的焊点有斑点，不美观，可用酒精棉球擦净。

1.4.3 辅助工具

1. 钢针

钢针用来穿孔。在调试时拆下元器件后，线路板上的引脚孔会被焊锡堵住，此时用钢针在电烙铁的配合下穿通引脚孔。钢针可自制。

2. 刀片

刀片主要用来切断线路板上的铜箔线路。在电路调试中，常常需要对某个元器件进行脱开电路的检查，此时用刀片切断该元器件相关引脚连线的铜箔，可省去拆下该元器件的不便。刀片可用钢锯条自制，也可用刮胡刀片等，要求刀刃锋利，以免切割时损伤线路板上的铜箔线路。

3. 镊子

镊子是配合焊接不可缺少的工具。镊子可用来拉引线、送管脚等，以方便焊接。其次，镊子还有散热功能，可减少元器件被烫坏的可能。用镊子夹住元器件引脚，电烙铁焊接时的热量通过金属的镊子传递散热。对镊子的要求是钳口平整、弹性适中。

4. 剪刀

剪刀可用来修剪引线等软的材料，例如剥去导线外层的绝缘层。

5. 钳子

钳子可用来剪硬的材料和作为紧固的工具。通常需要一把尖嘴钳和一把平口钳，尖嘴钳可以用来安装、加固小的零件，平口钳可以用来剪元器件的引脚，也可以用来拆卸和紧固某些特殊的插脚和螺母。

6. 锉刀

锉刀用来锉一些金属制作的零件，或用来锉掉元器件管脚的氧化层、除锈等。

7. 面包板

图 1-4-1 所示的为面包板的示意图。在面包板上布满了供插接元器件的小孔，孔内有导电良好的金属簧片。每列的五个孔在电气上是相通的，而各列之间是不通的。因此每一列可作为电路的一个节点。在此节点上最多可接五个元器件。

面包板的使用是很方便和灵活的。虽然元器件的排列与引线的走向受到一定的限制，但仍可使所搭接的电路整齐美观。

由于面包板搭接的电路一般用于临时的试验，因此所有元器件的引线不必剪短，这样，这些元器件以后还可继续使用。

用面包板搭接电路的过程，是一个将电气原理图变为实际电路的过程，虽然两者在元器件的排列和导线的走向上可能不同，但各元器件间的电气相连关系应该是完全一致的。初学者往往会看电路原理图，而不会看实际电路，因此应通过搭接电路来培养看实际电路的能力。

用面包板搭接电路只适用于临时性的实验，对于已定型的电路，则需要采用印制电路板。

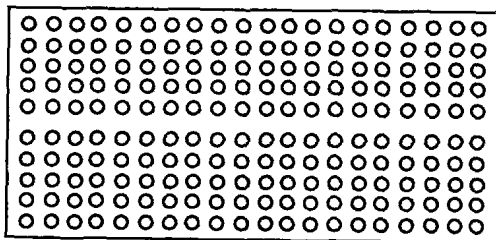


图 1-4-1 面包板示意图

1.5 电子测量中的误差分析

在电子电路实验中，被测量值有一个真实值，称其为真值，它由理论计算求得。在实际测量该量时，由于受到测量仪器精度、测量方法、环境条件或测量者能力等因素的限制，测量值与真值之间不可避免地存在着差异，这种差异称为测量误差。学习有关测量误差和测量数据处理的知识，以便在实验中合理地选用测量仪器和测量方法，并对实验数据进行正确的分析和处理，获得符合误差要求的测量结果。

1.5.1 误差产生的原因及其分类

根据误差的性质及其产生的原因，测量误差分为以下三类。

1. 系统误差

在规定的条件下对同一量进行多次测量时，如果误差的数值保持恒定或按某种确定规律变化，则称这种误差为系统误差。例如，电表零点不准，温度、湿度、电源电压等变化造成的误差，便属于系统误差。

2. 偶然误差

在规定的条件下对同一量进行多次测量时，如果误差的数值发生不规则的变化，则称这种误差为偶然误差（也称为随机误差）。例如，热骚动、外界干扰等。

3. 过失误差

过失误差是指在一定的测量条件下，测量值明显地偏离真值时的误差。从性质上来看，可能属于系统误差，也可能属于偶然误差，但它的误差值一般都明显地超过相同条件下的系统误差和偶然误差。例如，读错刻度、记错数字、计算错误以及测量方法不对等引起的误差，通过分析，确认是过失误差的测量数据应予以删除。

1.5.2 误差的各种表示方法

1. 绝对误差

如果有 X_Z 表示被测量的真值，用 X_C 表示测量仪器的示值（标称值），于是绝对误差 $\Delta X = X_C - X_Z$ 。若用高一等级标致的测量仪器测得的值作为被测量的真值，则在测量前仪器应由高一等级标致的仪器进行校正，校正量常用修正值表示。对于某一个被测量，高一等级标致的仪器的示值减去测量仪器的示值得到的值就是修正值。实际上修正值就是绝对误差，仅仅它们的符号相反。例如，用某电流表测量电流时，电流表的示值为 15mA，修正值为 +0.06mA，则被测电流的真值为 15.06mA。

2. 相对误差

相对误差 δ 是绝对误差与被测真值的比值，用百分比表示，即 $\delta = (\Delta X / X_Z) \times 100\%$ 。

当 $\Delta X \ll X_z$ 时, $\delta \approx (\Delta X/X_c) \times 100\%$ 。

例如,用频率计测量频率时,频率计的示值为 600MHz,频率计的修正值为 -600Hz,则

$$\delta \approx [600/(600 \times 10^6)] \times 100\% = 0.0001\% \quad (1-5-1)$$

再如,用修正值为 -0.6Hz 的频率计测得频率为 600Hz,则

$$\delta \approx (0.6/600) \times 100\% = 0.1\% \quad (1-5-2)$$

从上述两个例子可以看到,尽管后者的绝对误差远小于前者,但后者的相对误差远大于前者,因此前者的测量准确度实际上高于后者。

3. 允许误差

通常测量仪器的准确度用允许误差表示(又称最大误差、引用误差、满度相对误差),它是根据技术条件的要求,规定某一类仪器的误差不应超过的最大范围。仪器(含量具)技术说明书中所标的误差都指的是允许误差。

在指针式仪表中,允许误差就是满度相对误差(δ_m),定义为

$$\delta_m = (\Delta X/X_m) \times 100\% \quad (1-5-3)$$

式中, X_m 表示满刻度读数。

指针式表头的误差,主要取决于它的结构和制造精度,而与被测量的大小无关。因此,用上式表示的满度相对误差实际上是绝对误差与一个常量的比值。我国的电工仪表,按 δ_m 值分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 和 5 七级。

例如,用一只满刻度为 250V、1.5 级的电压表测量电压,其最大绝对误差为 $250V \times (\pm 1.5\%) = \pm 3.75V$ 。若表头的示值为 200V,则被测电压的真值在 $200 \pm 3.75V = 196.25V \sim 203.75V$ 范围内;若表头的示值为 20V,则被测电压的真值在 $16.25V \sim 23.75V$ 范围内。可见,用大量程的仪表测量小示值时误差很大。

为减小测量误差,提高测量的准确度,应使被测量的示值出现在接近满刻度的区域,至少应在满刻度的 2/3 以上。

在无线电测量仪器中,允许误差由基本误差和附加误差组成。所谓基本误差,是指仪器在规定工作条件下,在测量范围内出现的最大误差。规定工作条件也称为定标条件,一般包括环境条件(温度、湿度、大气压力、机械振动和冲击等)、电源条件(电源电压、频率、稳压系数及纹波系数等)、预热时间、工作位置等;所谓附加误差,是指定标条件的某一项或几项发生变化时,仪器附加产生的误差。附加产生的误差可分为两种,一种是使用条件(如温度、电源电压等)发生变化时仪器产生的误差,另一种是被测对象参数(如频率、负载等)发生变化时仪器产生的误差。例如,DA22 高频毫伏表,其基本误差为:

1mV 挡小于 $\pm 1\%$;

3mV 挡小于 $\pm 5\%$;

……

频率附加误差为:

在 5kHz~500MHz 范围内小于 $\pm 5\%$;

在 500MHz~1 000MHz 范围内小于 $\pm 30\%$ 。

温度附加误差为:每 10°C 增加 $\pm 3\%$ (1mV 挡增加 $\pm 5\%$)。

1.5.3 削弱或消除系统误差的主要措施

本节重点介绍产生系统误差的原因，并从中找出削弱或消除它的措施。

1. 仪器误差

仪器误差是指仪器本身电气或机械等不完善所造成的误差。例如，仪器校准不佳、定度不准等。消除的方法是在使用前要预先校准或确定出它的修正值，这样在测量结果中可引入适当的补偿值，即可消除仪器误差。

2. 装置误差

装置误差是指测量仪器和其他设备由于放置不当、使用方法不正确及外界环境条件改变所造成的误差。为了消除这种误差，测量仪器的安放必须遵守使用规则，例如，普通万用表应水平放置，电表与电表之间须有适当距离，注意避开过强的外部电磁场的影响等。

3. 人身误差（也称为个人误差）

人身误差是测量者个人的感觉器官不完善所造成的误差。例如，有人读指示刻度习惯于超过或欠少、无论怎样网络总是调不到真正的谐振点上等。为了消除这种误差，应提高个人的测量技能、改变不正确的测量习惯、改进测量方法和采用较先进的数字化仪器等。

4. 方法误差或理论误差

这是一种由测量方法所依据的理论不够严格，或采用了不适当的简化和近似公式等所造成的误差。例如，用伏安法测量电阻时，若直接以电压表的示值和电流表的示值之比作为测量结果，而未计及电表本身内阻的影响，所测阻值往往存在较大的误差。

5. 削弱或消除系统误差的两种方法

系统误差按其表现特性还可分为固定的和变化的两类。在一定条件下，多次重复测量所得到的误差值是固定的，称为固定误差；若多次得到的误差值是变化的，称为变化误差。下面介绍消除固定误差的方法。

在测量时，先对被测量进行测量，记录测量数据；之后，用一已知标准量代替被测量，通过改变标准量的数值，使测量仪器恢复到原来测量的数据上，这时已知标准量的数值就等于被测量的数值。这种方法由于测量条件相同，因此可以消除包括测量仪器内部结构、各种外界因素和装置不完善等所引起的系统误差。

1.6 实验数据的处理方法

实验数据的处理就是对测量数据进行计算、分析、整理和归纳，去粗取精、去伪存真，

以引出正确的科学结论，并用一定的形式加以表达，必要时还可将测量数据绘制成曲线或归纳成经验。

1.6.1 有效数字的处理

1. 有效数字

由于测量过程中总是不可避免地存在误差，在对测量数据进行计算时也总会遇到类似 π 这样的无理数，因此在记录或计算数据时，这些数据通常只能是一个近似数，这就涉及如何用近似数恰当地表达测量结果的问题，亦即有效数字的问题。

有效数字是指从左边第一个非 0 数字算起，直到右边最后一位数字为止的所有各位数字。例如，0.168k Ω ，2.05V，465kHz，1.20mA 等都是三位有效数字。

在确定有效数字的位数时应注意以下几点。

(1) 在第一位非 0 数字左边的“0”不是有效数字，而在非 0 数字中间的“0”和右边的“0”是有效数字，例如，0.168k Ω 的左边一个“0”不是有效数字，而 2.05V 和 1.20mA 中的“0”都是有效数字。

(2) 有效数字与测量误差的关系：一般规定误差不超过有效数字末位单位数字的一半。因此有效数字的末位数字为“0”时，不能随意删除。例如 1.20mA 表明误差不超过 $\pm 0.005\text{mA}$ ，若随意写为 1.2mA，则意味着测量误差不超过 $\pm 0.05\text{mA}$ 。

(3) 若用“10”的方幂来表示数据，则“10”的方幂前面的数字都是有效数字，例如， $20.60 \times 10^3\text{mV}$ ，它的有效数字是 4 位。

(4) 有效数字不能因选用的单位变化而改变，例如 2.05V，它的有效数字为 3 位，若改用 mV 为单位，则 2.05V 变为 2050mV，有效数字就变成了 4 位，所以当单位改变后应写为 $2.05 \times 10^3\text{mV}$ ，这时它的有效数字仍是 3 位。

2. 数据的舍入规则

当只需要 N 位有效数字时，对第 $N+1$ 位及其后面的各位数字就要根据舍入规则进行处理，现在普遍采用的舍入规则如下。

(1) 四舍六入。当第 $N+1$ 位为小于 5 的数时，舍掉第 $N+1$ 位及其后面的所有数字；若第 $N+1$ 位为大于 5 的数时，舍掉第 $N+1$ 位及其后面的所有数字的同时第 N 位加 1。

(2) 当第 $N+1$ 位为“5”时，若“5”之后有非零数字，则在舍 5 的同时第 N 位加 1；若“5”之后无数字或为 0 时，则由“5”之前的数的奇偶性来决定舍入，如果“5”之前为奇数则舍“5”且第 N 位加 1，如果“5”之前为偶数则舍“5”，第 N 位不变。

例如，根据上面的舍入规则，将下列数字保留三位有效数字：

666.6 \rightarrow 667	2.3053 \rightarrow 2.31	8.477 \rightarrow 8.48
334.5 \rightarrow 334	0.6154 \rightarrow 0.615	989.5 \rightarrow 990

3. 有效数字的运算

当需要对 N 个测量结果进行运算时，有效数字的保留原则上取决于误差最大即小数点