



“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”组织

电工电子实验系列教材

# 电子线路 设计与应用

臧春华 主编

葛玉蓝 施亿平 副主编

王伟跃 魏小龙 鲍丽星 戴祥 编



高等教育出版社

## 内容简介

本书是为高等学校工科电类专业编写的一本宽口径、厚基础的实验教材。旨在加强学生基本实验技能的综合训练、培养和提高学生的实际动手能力与工程设计能力。全书共有6章。第1章介绍测量技术、调试技术以及实验中故障的检测与排除等基本实验技能。第2、3章分别是数字电路实验和模拟电路实验。第4、5章依次为数字电路课程设计和模拟电路课程设计。第6章给出了数字与模拟混合的综合性课程设计课题。书中介绍了大量的新型集成器件及其典型应用,并有电子线路仿真实验和数字可编程与模拟可编程器件实验。

本书自成一体,可独立使用。实验课题难易相宜,循序渐进,且多数课题具有一定的伸缩性,适于电类不同专业、不同层次的学生。

本书可作为高等院校电子类、电气类、自控类、计算机类专业及其他相近专业电子技术实验和课程设计的教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子线路设计与应用/臧春华主编. —北京:高等教育出版社,2004.7  
ISBN 7-04-014566-9

I. 电... II. 臧... III. 电子电路-电路设计-教材 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 053917 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 吴陈滨 封面设计 李卫青 责任绘图 朱 静  
版式设计 马静如 责任校对 张 颖 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100011  
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 北京泽明印刷有限责任公司

开 本 787×1092 1/16  
印 张 19.25  
字 数 470 000

版 次 2004年7月第1版  
印 次 2004年9月第2次印刷  
定 价 22.30元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:14566-00

# 总 序

如何通过实践环节来培养工科大学生的创新意识以及如何更好地开展实验教学等问题已成为当前高等院校工科专业教学改革的热点与难点问题。“教育部关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知”(教高[2003]1号文件)中明确指出:“理论教学与实践教学并重。要高度重视实验、实习等实践性教学环节,通过实践培养和提高学生的创新能力。要大力改革实验教学的形式和内容,鼓励开设综合性、创新性实验和研究型课程。”但是,目前实验教材的现状却不容乐观,正式出版的实验教材品种很少;多数院校的实验教材都是校内讲义,验证性实验内容偏多,综合性、设计性实验内容很少,不利于学生能力培养;优秀实验教材不多,与理论教材相比尤其明显。这样,众多学校很难选到合适的优秀实验教材。

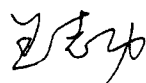
鉴于上述情况,“教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社共同策划组织了示范性电工电子实验系列课程教材的建设项目,该项目以国家电工电子教学基地院校为基础,发挥这些院校在理论教学和实践教学方面的示范作用,组织编写电工电子实验系列教材。

2003年12月在云南大学召开了“电工电子实验系列课程教学与教材建设研讨会”,成立了“电工电子实验系列教材编审委员会”(见附件)。30余所院校的参会代表围绕电工电子实践教学所涉及的知识点进行了充分研讨,确定了电工电子实践教学基本要求,为实验教材的编写提供参考依据。通过研讨达成了以下共识:(1)实验教学是非常重要的教学环节,是学生学习科技知识的重要手段。学生应能通过实验获取科学知识、验证相关理论、培养创新能力。(2)从培养学生能力的角度,实验一定要单独设课,而且要有不同于理论课程的实验课程体系。要改变依附于某一理论课程的原有模式。(3)实验能力培养包含实验设计、测试与仪器使用、仿真、简单故障排除、数据分析、实验报告与总结、查阅器件手册等方面的能力。(4)实验教学应按基础性、设计性、综合性等不同层次、循序渐进地提出要求。

2004年4月14日~15日在华中科技大学召开了由全体编审委员会成员参加的教材评审会。本着保证水平、突出特色、宁缺毋滥的原则,编审委员会成员对东南大学、华中科技大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学、西安电子科技大学、上海交通大学、浙江大学等15所院校申报的38种实验教学改革成果教材进行了评审。评出首批入选的教材有:东南大学、西安交通大学的两套实验系列教材,上海交通大学、哈尔滨工业大学和浙江大学的3种电路课程实验教材,华中科技大学、浙江大学和南京航空航天大学3种电子技术课程实验教材,北京交通大学的信号处理课程实验教材,西安电子科技大学的电磁场课程实验教材,上海交通大学、西安交通大学、厦门大学和ación计量学院的4种非电类电工学课程实验教材。

希望这些优秀实验系列教材的出版能推动各高校的实验教学改革,真正达到培养学生创新能力的目的。

教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任



2004年6月

### 附件：“电工电子实验系列教材”编审委员会成员名单

专 家 组	蔡惟铮	哈尔滨工业大学	
	唐 介	大连理工大学	
	孙肖子	西安电子科技大学	
	谢自美	华中科技大学	
	朱承高	上海交通大学	
主任委员	王志功	东南大学	
副主任委员	孙雨耕	天津大学	
	马西奎	西安交通大学	
	胡仁杰	东南大学	
委 员	陈洪亮	上海交通大学	
	陈后金	北京交通大学	
	王小海	浙江大学	
	王永军	东北大学	
	杨 浩	重庆大学	
	殷瑞祥	华南理工大学	
	段哲民	西北工业大学	
	王成华	南京航空航天大学	
	罗 杰	华中科技大学	
	朱 红	电子科技大学	
	林育兹	厦门大学	
	秘 书	韩 颖	高等教育出版社

# 前 言

电子技术是20世纪发展最为迅速的领域之一,这主要得益于集成电路和计算机的发明。这两项技术既是电子技术发展的产物,又是电子技术持续发展的推动力。可以预见,在21世纪,电子技术还将以更快的速度向前发展。因此,掌握电子技术是对电类专业学生的基本要求。

模拟电路和数字电路,统称为电子线路,是电类专业重要的专业基础课和技术基础课,其实实践性很强。学生在掌握理论知识的同时,还必须具备对电子电路进行测量、调试和设计的能力,从而为后续专业课程及以后的工作打下坚实的基础。

电子线路的实践能力首先反映在对电路参数与性能测试方面,包括基本的测量方法、常用仪器的使用、测量数据的处理等。其次,实践能力还反映为对一个已有电路的调试能力,根据电路的测量结果,调整电路结构、器件以及元件参数从而使电路达到预期的功能与性能。更进一步,电子线路的实践能力反映在单元电路或电子系统的设计与实现。

近年来,各高等院校普遍对电子线路的教学进行了改革,其主要趋势或共同点是:更新教学内容、压缩理论课学时、增加实验时数。很多学校都将实验单独设课,并开设课程设计,独立考核、打分,以提高学生的重视程度,加强对学生的实践能力和创新能力的培养。

本书是为电子线路实验和课程设计而编写的实践教材。全书共分6章。

第1章为电子线路实验基础。主要介绍电子测量的基本技术与方法、常用电子测量仪器的原理与使用、电子线路的调试与故障检测方法以及常用电子器件的识别与选用。

第2、3章分别讨论数字电路和模拟电路的设计与实现。每章各有20个不同层次、不同难度的实验课题,其中绝大部分课题都是设计性题目,并有若干仿真和可编程器件的实验。

第4、5章依次是数字电路和模拟电路的课程设计。每章各有8个不同类型、难度不一的数字和模拟小系统设计课题供读者选择。

第6章包括4个数字与模拟混合的综合性课题,可训练学生的综合设计能力。

本书有3个附录。附录A给出了部分常用集成电路的型号、功能与引脚图。附录B对可编程逻辑器件的开发软件MAX+plus II的使用方法进行了简要介绍。附录C则简要讨论了可编程模拟器件的开发软件PAC-Designer的使用方法。

本书由臧春华任主编并统稿。葛玉蓝和施亿平任副主编。第1章和附录A~C由臧春华执笔,施亿平撰写了2.1、2.5、2.9、2.10、2.12、2.14、2.20、4.6、4.8、6.3,魏小龙撰写了2.2、2.3、2.7、2.11、2.16、2.18、2.19、4.3、4.5、4.7、6.4,戴祥撰写了2.4、2.6、2.8、2.13、2.15、2.17、4.1、4.2、4.4,王伟跃撰写了3.1、3.7、3.10、3.11、3.19、3.20、5.1、5.6、5.7、6.1,鲍丽星撰写了3.2、3.5、3.6、3.12、3.14、3.18、5.2、5.4、6.2,葛玉蓝撰写了3.3、3.4、3.8、3.9、3.13、3.15、3.16、3.17、5.3、5.5、5.8。

本书承蒙东南大学田良教授审阅,并提出了宝贵的修改意见,在此表示深切的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

**编者**

2003年11月于南京航空航天大学

# 目 录

引论 .....	1	观察 .....	42
0.1 电子线路实验的内容与目的 .....	1	2.3 加法器与比较器的应用 .....	44
0.2 电子线路实验的要求 .....	2	2.4 数据选择器与译码器的应用 .....	46
0.3 实验报告的撰写要求 .....	2	2.5 十进制加法器设计 .....	50
<b>第1章 电子线路实验基础</b> .....	<b>3</b>	2.6 四位乘法器 .....	51
1.1 电子测量技术 .....	3	2.7 集成触发器的功能测试 .....	53
1.1.1 电压的测量方法 .....	3	2.8 同步时序电路设计 .....	56
1.1.2 电流的测量方法 .....	5	2.9 串行加法器设计 .....	59
1.1.3 放大器电压增益的测量 .....	5	2.10 计数、译码与显示 .....	60
1.1.4 幅频特性的测量 .....	6	2.11 移位寄存器的应用 .....	61
1.1.5 相位与相频特性的测量 .....	7	2.12 变步长可逆计数器 .....	64
1.2 误差分析与实验数据处理 .....	7	2.13 数/模转换器 .....	66
1.2.1 误差的表示方法 .....	8	2.14 直流数字电压表的设计 .....	68
1.2.2 误差来源与消除方法 .....	8	2.15 字符发生与显示 .....	71
1.2.3 实验数据的处理 .....	9	2.16 可编程定时器 .....	74
1.3 电子电路的安装、调试与 故障检测 .....	12	2.17 用 EWB 仿真数字电路 .....	76
1.3.1 电子电路的安装 .....	12	2.18 用 PLD 设计算术逻辑单元 .....	77
1.3.2 电子电路的调试 .....	14	2.19 用 PLD 设计时钟电路 .....	81
1.3.3 电子电路的故障检测 .....	14	2.20 水位警示控制器的设计 .....	82
1.4 常用电子仪器的使用 .....	16	<b>第3章 模拟电路设计与实现</b> .....	<b>85</b>
1.4.1 半导体管特性图示仪 .....	16	3.1 仪器使用、实验方法与晶体管 测试 .....	85
1.4.2 线性集成电路测量仪 .....	21	3.2 单级晶体管小信号放大器 .....	92
1.4.3 数字集成电路测试仪 .....	24	3.3 多级小信号放大器 .....	96
1.4.4 失真度测量仪 .....	27	3.4 负反馈放大器 .....	100
1.5 常用元器件的识别 .....	30	3.5 运算放大器的参数测量与 应用 .....	104
1.5.1 半导体器件的识别与检测 .....	30	3.6 电压比较器 .....	107
1.5.2 集成电路的识别 .....	35	3.7 波形发生器 .....	110
1.5.3 可编程器件简介 .....	36	3.8 集成功率放大器 .....	114
<b>第2章 数字电路设计与实现</b> .....	<b>39</b>	3.9 555 器件的应用 .....	118
2.1 集成门电路逻辑功能测试 .....	39	3.10 整流与稳压 .....	122
2.2 组合逻辑电路设计与险象			

3.11	差分放大器 .....	128	<b>第5章 模拟电路课程设计</b> .....	198
3.12	模拟乘法器 .....	133	5.1 函数波形发生器 .....	198
3.13	模拟运算电路 .....	137	5.2 频率/电压变换器 .....	204
3.14	RC 正弦波振荡器 .....	142	5.3 OTL 扩音机 .....	212
3.15	压控振荡器 .....	144	5.4 高低电平报警器 .....	220
3.16	可编程模拟器件应用之一 ——放大器的设计 .....	148	5.5 电表电路的设计 .....	225
3.17	可编程模拟器件应用之二 ——有源滤波器的设计 .....	155	5.6 电容测试仪 .....	231
3.18	用 EWB 仿真模拟电路 .....	160	5.7 可编程直流稳压电源 .....	233
3.19	光耦合器件的应用 .....	164	5.8 多路数据实时监控系統 .....	236
3.20	电流/电压转换电路 .....	168	<b>第6章 综合性课程设计</b> .....	242
<b>第4章 数字电路课程设计</b> .....	170	6.1 可编程放大器 .....	242	
4.1 简易测频计 .....	170	6.2 数显式稳压电源 .....	245	
4.2 竞赛抢答器 .....	172	6.3 直流电动机转速控制 .....	250	
4.3 数字闹钟 .....	175	6.4 高精度温控器的设计 .....	255	
4.4 出租车计价器 .....	179	<b>附录 A 部分常用集成电路的型号、功能 及引脚图</b> .....	261	
4.5 简易电子琴 .....	182	<b>附录 B Altera 可编程器件的开发软件 MAX + plus II</b> .....	274	
4.6 数字转速测量仪 .....	185	<b>附录 C ispPAC 器件及其开发软件 PAC-Designer</b> .....	287	
4.7 恒温控制器 .....	189			
4.8 十字路口交通灯控制器 .....	192			



电子线路是电类专业一门工程性、实践性很强的专业基础课和技术基础课,单纯地通过理论教学无法让学生掌握电子线路的设计、调试及测量技术。因此,在理论课之外必须配备一定学时的实践教学环节,如实验和课程设计等。近年来,培养大学生动手能力与创新能力已成为工科院校的教学重心。两年一次的以电子设计与制作为主题的全国大学生电子设计竞赛,更是对电子线路的实践教学起到了很好的推动作用。

当前,绝大多数工科院校对电子线路的实践教学都给予了足够的重视,主要表现在增加实验课时、实验单独设课以及增设课程设计等方面。那么,电子线路的实践教学到底应该包括哪些内容、要达到什么目标以及如何达到培养目标呢?

## 0.1 电子线路实验的内容与目的

电子线路实践教学的主要内容包括:

- (1) 常用元器件的识别。
- (2) 常用电子测量仪器的使用。
- (3) 单元电路的安装、调试与测量。
- (4) 单元电路的设计与调整。
- (5) 中等规模电路的设计、安装与调试。
- (6) 综合性电路的设计、安装与调试。
- (7) 小型电子系统的设计与制作。

因此,在实验课题方面应包括基础训练性实验、验证性实验、设计性实验、综合性实验、综合设计性实验等多个层次。

电子线路实践教学的目标是使学生具有扎实的实验技能、较强的动手能力和一定的创新能力,具体反映在下列几个方面:

- (1) 掌握电子电路的基本测量技术与方法。
- (2) 掌握常用电子测量仪器的原理与使用方法。
- (3) 能正确识别和合理选用常用的电子元器件。
- (4) 能设计、安装和调试电子电路,具有一定的排除故障能力。
- (5) 能设计与制作一些小的电子系统。

## 0.2 电子线路实验的要求

理论来自实践,但又为实践提供指导。因此学生在进行实验前,应切实掌握相关的理论知识和实验原理,为此需学好理论课,并认真预习实验原理。对于设计性实验,还需要预先了解并选择相关的器件,设计好电路,画出原理图和器件引脚连线图。为验证设计的正确性,在条件许可的情况下,还可以用 EWB 等工具先进行计算机仿真,然后拟订实验方法和步骤,设计实验表格,估算(分析)实验结果,撰写预习报告。

学生进入实验室后,应根据预习报告,在实验板上细心地搭接电路;特别要注意元器件的方向、引脚不要弄错。电路搭接好以后要仔细检查有无错线、漏线。

通电前须仔细测量和检查电源电压与极性是否正确无误,否则有可能损坏元器件。然后给电路加上正确的输入信号,检查和测量电路的响应和输出。出现问题时,要利用所学的理论知识和电路原理冷静地进行分析,查找原因。对实验过程中出现的现象、电路调整的过程以及测量结果要认真记录。

实验完成后要让老师检查实验结果与实验数据,通过后方能拆除电路。

实验结束后要对实验数据进行整理、分析,结合思考题的求解,加深对理论知识和实验原理的理解,在此基础上,撰写实验报告。

## 0.3 实验报告的撰写要求

实验报告除了要真实地反映实验过程与结果外,还是对实验进行总结、提高的重要环节。因此,应当认真撰写实验报告。实验报告一般应包括下列内容:

- (1) 列出实验条件。包括实验课题的已知条件、技术指标、实验电路和实验仪器等。
- (2) 详述实验过程。包括电路的测量与调整方法、出现的故障以及排除故障的方法与过程。
- (3) 整理实验数据,列出表格和绘制波形。
- (4) 分析实验结果,找出误差原因,提出减小误差的方法。
- (5) 总结实验心得体会和收获,解答思考题,提出改进实验的建议。

除上述一般性要求外,还有结合各个实验具体内容提出的一些特定要求。

实验报告应概念正确,文理通顺,表达清楚,文字简洁,图表完备,符号标准。

# 第1章 电子线路实验基础

## 1.1 电子测量技术

测量是为确定被测对象量值而进行的实验过程。在此过程中,人们借助专门的测试仪器,将被测对象的大小直接或间接地与同类已知单位进行比较,取得用数值和单位共同表示的测量结果。

电子测量是指利用电子技术进行的测量。电子线路中的电子测量则主要测量电子电路中的有关量值,属于弱电测量。其测量内容包括下列几个方面:

- (1) 电能量的测量。主要是电压与电流的测量。
- (2) 电信号特性的测量。主要是测量信号频率、相位、失真度以及逻辑状态等。
- (3) 电子电路性能的测量。主要指增益(衰减)、灵敏度、幅频特性、相频特性等。
- (4) 电路参数的测量。包括电阻、电容、电感、阻抗、品质因数以及电子器件的参数等。

电路参数的测量方法应该已在电路实验中掌握了,本书对电信号特性的测量将结合具体的仪器使用加以介绍。本节只讨论电子电路中电压、电流、增益和幅频特性、相频特性的测量方法。

### ▷▷ 1.1.1 电压的测量方法

电压是电路中两个不同节点间的电位之差。如果其中一个节点为地电位,则可以测出另一个节点对地的电位(电平)。电压是最基本、最重要的电参量之一。许多电参量都可以视为电压的派生量。各种电路的工作状态通常都是用电压来表征的,而且各种电子设备的信号也主要由电压来表示。因此,电压测量是电参量测量的基础。

电压测量时要注意信号的频率和电压范围,以选择合适的电压表和正确的量程。

电压表通常采用高灵敏度直流电流表头串接适当电阻来构成。测量时电压表是并接在被测对象上的,与被测对象呈并联关系。因此,为减小对被测电路的影响、提高测量精度,电压表的内阻要很大(一般不小于  $20 \text{ k}\Omega/\text{V}$ )。改变电压表的量程实际上就是改变其内阻,量程越大,内阻也越大。

电压的测量可分为模拟和数字两种方法。前者采用模拟(指针)方式显示测量结果,后者采用数字方式显示测量结果。因此,两者的区别主要在于:后者增加了模/数转换器(ADC),先将模拟量变成数字量,再直接以数字方式显示。

在用指针式(模拟)电压表测量电压时,要注意待测两点间电位的高、低。若将表笔接反,将导致指针反偏,有可能损坏表头。同样道理,如果量程选择过小,将使指针过偏,也有可能损坏

表头。

### 1. 直流电压的测量

用指针式(模拟)万用表和数字式万用表的直流电压挡均可以进行直流电压的测量。一般万用表的最大量程为 500 V ~ 1 000 V。超过 1 000 V 时,就需要采用高压表进行测量。

示波器的输入阻抗高(达 1 MΩ),用示波器也可以测量节点对地的直流电压。如果要测量两个非地节点间的电压,可以分别测出两节点对地电压后再相减算出待测电压。但用示波器测量直流电压时,输入信号的耦合方式必须选择“直流耦合”,测量时可根据垂直灵敏度“V/div”和显示屏上直流信号与地电位间的相对高度算出电压值。另外输入信号的大小不能超出示波器的最大允许输入电压(一般为 400 V)。

带 CRT 读出功能的示波器可以在显示屏上直接给出电压值,这是因为这种示波器较普通的模拟示波器增加了 A/D 转换器以及字符显示功能。

数字存储示波器是一种数字式测量仪器,带有多项测量功能,可以直接测出电压值。

### 2. 交流电压的测量

交流电压的量值有:平均值  $\bar{V}$ 、有效值(即均方根值)  $V_{\text{rms}}$ 、幅值  $V_m$ 、峰值  $V_p$  和峰-峰值  $V_{p-p}$ 。 $\bar{V}$  实质上就是被测电压的直流分量。 $V_{\text{rms}}$  是与交流电压在电阻上消耗同等功率的直流电压量。 $V_m$  是交流信号在一个周期内偏离直流分量的最大值,当正、负幅值不相等时,分别用  $V_m^+$  和  $V_m^-$  表示。 $V_p$  是交流信号在一个周期内偏离零电位的最大值,当正、负峰值不相等时,分别用  $V_p^+$  和  $V_p^-$  表示。 $V_{p-p}$  是交流信号在一个周期内最大值与最小值之差。图 1-1-1 给出了交流电压部分量值的含义。显然有

$$V_m = \frac{V_{p-p}}{2}$$

$$V_p = \bar{V} + \frac{V_{p-p}}{2}$$

$$V_{\text{rms}} = \bar{V} + \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

若  $\bar{V} = 0$  V, 则

$$V_m = V_p = \frac{V_{p-p}}{2}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

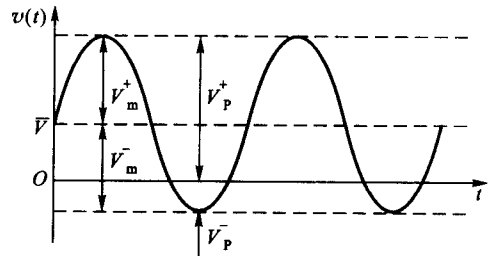


图 1-1-1 交流电压的量值

上述换算关系只对正弦信号成立,对非正弦信号有偏差。

交流电压测量与直流电压测量的不同之处在于,需要将交流电压变换成直流电压(进行 AC/DC 转换)来进行测量,且大多数交流电压表的指示值是有效值。

万用表除可以测量直流电压外,还可以测量较低频率(几十 kHz 以下)的交流电压,如工频(50 Hz)电压,万用表测出的交流电压为有效值。

当信号频率较高时,需采用专门的交流电压表进行测量。若信号频率在 1 MHz 以内,可使用交流毫伏表(最大量程为 300 V);若信号频率在 10 MHz 以内,可使用视频毫伏表(最大量程为 300 V);对于 10 MHz 以上的信号,则需要采用超高频毫伏表(最大量程为 3 V)。毫伏表所测出

的交流电压一般为有效值。

用示波器也可以测量交流电压。用示波器测量交流电压时,若输入信号的耦合方式为“直流耦合”,则交流电压中的直流分量将被保留;若输入信号的耦合方式为“交流耦合”,则交流电压中的直流分量将被滤除。根据垂直灵敏度“V/div”和显示屏所显示的交流信号波形,可以测出各种交流电压值。此外,用示波器还可以测出交流电压的频率、相位等参数。

带 CRT 读出功能的示波器,可以在显示屏上直接给出若干种交流电压值。利用数字存储示波器的测量功能,也可以直接测出各种交流电压值。

在用示波器测量交流电压时,被测信号的频率不能超出示波器的带宽,否则会导致测量结果不准(偏小)。

### 3. 脉冲电压的测量

如果数字电路中信号的电平要么为高电平要么为低电平,则这种信号称为脉冲信号。对于 TTL 电路,高电平约为 3.6 V,低电平约为 0.1 V。对于 CMOS 电路,高电平约为电源电压  $V_{DD}$ ,低电平约为 0 V。

如果待测信号稳定在某个电平上,则可以采用与测量直流电压相同的方法进行测量。

若待测信号在高、低电平间不断变化,则必须采用示波器进行测量。此时,不仅能测出信号的高、低电平值并观察到信号的变化规律,还可以测出诸如脉冲信号的上升时间、下降时间、脉冲宽度、信号频率等参数。

## ▷▷ 1.1.2 电流的测量方法

电流也是一个重要的电参量。电流一般是针对电路中某条支路而言的,因此测量时需将电流表串在待测支路中,且表的内阻要尽可能小,以免影响测量精度。

对于直流电流(如直流电源的工作电流)和较低频率(如工频 50 Hz)的交流电流的测量,一般可以将万用表串入电路中进行测量。测量时同样要注意量程的选择,而且大电流的测量往往需采用专门的接线柱。

由于电流测量需要将电流表串入电路,这在很多情况下难以做到。因此,对电流的测量通常采用间接测量法。根据电阻上电流与电压的关系

$$I = \frac{V}{R}$$

可以先测出待测支路中某个电阻上的电压,再用上式换算出电流。

## ▷▷ 1.1.3 放大器电压增益的测量

放大器电压增益指电路的电压放大倍数。将适当频率和大小的信号加到放大器的输入端,然后测量电路的输入电压  $v_i$  和输出电压  $v_o$ ,如图 1-1-2 所示,就可以算出电路的电压增益

$$K_v = \frac{v_o}{v_i}$$

电路的增益常常以其对数值来表示

$$K_v = 20 \lg \frac{v_o}{v_i}$$

此时,  $K_v$  的单位为分贝 (dB)。

对于多级放大器, 其放大倍数是相乘的关系。如两级放大器的放大倍数分别为  $K_{v1}$  和  $K_{v2}$ , 则总的放大倍数为

$$K_v = K_{v1} K_{v2}$$

若按分贝计算, 则总的增益是相加关系

$$K_v = K_{v1} + K_{v2}$$

测量时,  $v_i$  一定要实测, 不能以信号源的读数为准。因为信号源具有内阻  $R_S$ , 信号源上的读数往往是阻抗匹配情况下的输出电压, 即当被测电路的输入阻抗  $R_i = R_S$  (一般为  $50 \Omega$ ) 时电路输入端所获得的电压, 如图 1-1-3(a) 所示, 即

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_S} v_s$$

当  $R_i = R_S$  时,  $v_i$  只有  $v_s$  的一半, 而当信号源如图 1-1-3(b) 所示为输出开路 (相当于  $R_i = \infty$ ) 时,  $v_i = v_s$ 。显然,  $v_i$  的大小随  $R_i$  而变化, 并不总是与信号源上的读数 ( $v_s/2$ ) 相同。

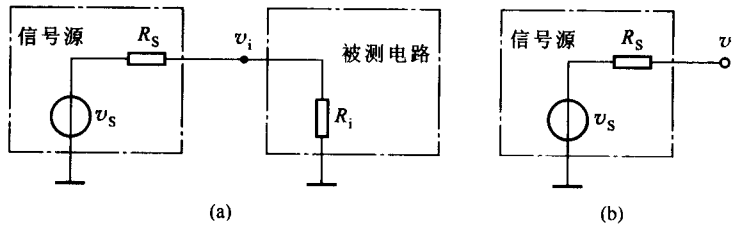


图 1-1-3 信号源的负载对输出电压的影响

电路的输入电压  $v_i$  和输出电压  $v_o$  的测量, 既可以用交流毫伏表也可以用示波器来进行。若电路的增益  $K_v < 1$ , 则电路是一个衰减器,  $K_v$  即为其衰减率。

## ▷▷ 1.1.4 幅频特性的测量

由于器件工作速度的限制, 电子电路的工作特性往往与信号的频率相关。对于某些电路, 如滤波器、放大器, 需要测量电路的增益随频率变化的规律, 这就是幅频特性测量。

幅频特性测量的基础是电路增益 (衰减) 的测量, 可以利用前述电路增益的测量方法, 通过改变信号源的输出信号频率, 在多个不同的频率下测出电路的增益, 然后再手工描成电路增益与信号频率的关系曲线, 即为电路的幅频特性。

这种测量方法不仅效率低, 而且频率点少, 精度也不够高。为此, 人们设计了专门用于幅频特性测量的扫频仪。该仪器集成了信号源和示波器的部分功能。其信号发生电路可以产生频率连续变化的等幅的正弦信号, 送至被测电路。扫频仪的信号检测电路对被测电路的输出信号进行测量, 并将结果与信号源的输出相除, 得出电路在各个频率点的增益, 并通过示波管显示出来。扫频仪所显示的增益一般以 dB 表示。

## ▷▷ 1.1.5 相位与相频特性的测量

相频特性是指待测电路的相移与信号频率之间的关系。因此,其测量基础是相位差的测量。相位差的测量可以使用专门的相位计。在没有相位计的情况下也可以使用示波器。

对于单踪示波器,只能采用椭圆法进行测量。即将两路频率相同、相位不同的信号分别作为水平扫描(从 X 轴输入)和垂直扫描(从 Y 轴输入),便会在显示屏上形成一个椭圆,根据其形状就可以计算出两个信号的相位差。

目前,大多数通用示波器都是双踪的,所以可以采用线性扫描法方便地测量相位差。即将两路频率相同、相位不同的信号分别从两个垂直通道输入,水平扫描采用示波器内部的线性扫描信号,采用“交替”或“断续”(对频率较低的信号)方式就可以在屏幕上直接显示出两路信号的波形,如图 1-1-4 所示。为使波形显示稳定、便于测量,扫描信号必须被两路输入信号中的一路所同步。

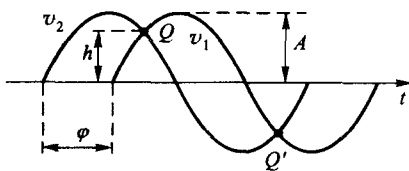


图 1-1-4 相位的测量方法

设

$$v_1 = A \sin(\omega t)$$

$$v_2 = A \sin(\omega t + \varphi)$$

由图 1-1-4 可知,两个波形的交叉点  $Q(Q')$  应满足

$$h = A \sin(\omega t)$$

$$h = A \sin(\omega t + \varphi)$$

从上面两个方程中消去  $\omega t$ , 可得

$$\varphi = 2 \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{A}{h}\right)^2 - 1}$$

因此,从示波器显示屏上测出  $A$  和  $h$ , 就可以计算出两个信号的相位差。

按图 1-1-2 将被测电路的输入接信号源,且电路的输入、输出同时接到双踪示波器的两个垂直通道上。调节信号源,在多个频率点上分别测量电路输出与输入信号的相位差(相移),就可以绘出电路的相频特性。

电子电路又称为电路网络,用网络分析仪可以直接测出电路的幅频特性、相频特性以及其他电路参数。但网络分析仪价格昂贵,属于高档仪器,目前一般的电子线路实验室尚未配备。

## ▶▶ 1.2 误差分析与实验数据处理

所谓测量误差是指被测量的测出值与实际值之差。任何测量系统的测量结果都会存在误差,测量仪器通常用精度来表示误差的大小。

被测量的对象本身所具有的真正值(或理论值)称为“真值”。根据误差理论,在排除测量系统误差的前提下,当测量次数为无穷多次时,测量结果的算术平均值非常接近于真值,可将其视

为被测量的真值。但由于测量次数总是有限的,因此由此得到的算术平均值只是真值的近似值。由于测量系统的误差不可能完全被排除,通常只能把精度更高一级的标准测量器具所测得的值作为“真值”。为强调它并非真正的“真值”,而将其称为“实际值”。由测量仪器读数装置所指示的被测量的数值称为“示值”。

## ▷▷ 1.2.1 误差的表示方法

误差通常可以表示成绝对误差和相对误差两种形式。

### 1. 绝对误差

绝对误差是示值与被测量真值之差。“示值”是由测量仪器读数装置所指示的被测量的数值。设被测量的真值和示值分别为  $x_0$  和  $x$ , 则绝对误差

$$\Delta x = x - x_0$$

由于一般难以测得真值,在实践中,常用实际值代替真值。

### 2. 相对误差

绝对误差往往不能确切地反映测量的准确度。如测量两个电压  $v_1 = 1 \text{ V}$ ,  $v_2 = 10 \text{ mV}$ , 前者的绝对误差  $\Delta v_1 = 2 \text{ mV}$ , 后者的绝对误差  $\Delta v_2 = 1 \text{ mV}$ 。尽管  $\Delta v_1 > \Delta v_2$ , 但由于  $\Delta v_1$  只占  $v_1$  的 0.2%, 而  $\Delta v_2$  却占  $v_2$  的 10%, 因此前者的测量准确度反而高于后者。为此,人们又提出了相对误差的表示方法。

相对误差是绝对误差  $\Delta x$  与被测量的某一约定值之比。根据约定值的不同,相对误差又有多种形式:

(1) 实际相对误差。实际相对误差  $\gamma_0$  是绝对误差  $\Delta x$  与被测量的实际值  $x_0$  之比,即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100 \%$$

(2) 示值相对误差。示值相对误差  $\gamma_x$  是绝对误差  $\Delta x$  与测量仪器的示值  $x$  之比,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100 \%$$

(3) 满度相对误差。满度相对误差  $\gamma_m$  又称为满度误差或引用误差,是绝对误差  $\Delta x$  与测量仪器某一量程的满度值  $x_m$  之比

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100 \%$$

满度误差是应用最多的表示方法,满度误差与满度值之积反映了该量程内绝对误差的最大值。我国电工仪表的准确度就是按满度误差来规定等级的。

## ▷▷ 1.2.2 误差来源与消除方法

### 1. 系统误差

所谓系统误差是指在相同条件下多次重复测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定,或在条件改变时误差按某种确定的规律变化。

引起系统误差的原因主要有:测量仪器本身的不完善、不准确、调整不当以及测量方法不当



和读数误差等。如用指针式万用表测电阻时,改变量程后应调零,否则将因零点不对,引入固定的偏差。再比如用万用表测量大电阻上的电压时,若万用表内阻不能远大于被测电阻,则将引入误差。当测量人员读取指针式仪表的示数时,若视线不是垂直于表盘,而是习惯性地偏左或偏右,将会使读数偏离仪表的示数。

由于系统误差存在确定性与规律性,因此只要找出误差的起因,就可加以纠正或修正。

对待系统误差,首先要分析测量系统是否存在系统误差,发现误差特点,找出原因,力争在测量前就将其消除。其次对于无法消除的系统误差,要设法找到误差的规律,用修正或校准的方法进行补偿,以消除其对测量结果的影响。对于无法避免又难以确定其规律进行补偿的系统误差,应尽量找出系统误差的大致范围,以估算测量数据的可信程度。

## 2. 随机误差

所谓随机误差是指在相同条件下多次重复测量同一量时,误差的绝对值和符号均会发生变化,时大时小,时正时负,没有确定的变化规律。

随机误差主要是由互不相关的多种因素共同造成的,如元器件的热骚动、噪声干扰、电磁场的微变等。

由于随机误差没有规律、不可预测和无法控制,因此不能通过实验的方法加以消除和修正。但随机误差具有有界性,在测量条件不变的情况下其绝对值不会超过一定的界限。随机误差还具有对称性,其算术平均值随着测量次数的增大而趋于零。也就是说,在多次测量中随机误差具有相互抵消性。因此,可以采用多次测量再取算术平均的方法来减小随机误差对测量结果的影响。

根据概率论,随机误差和受其影响所得到的测量数据通常呈正态分布。尽管受随机误差的影响,测量数据有一定的离散性,但在无系统误差的情况下,测量数据总是分布在被测量真值的附近。因此当出现个别误差绝对值较大(与测量数据平均值偏离较大)的测量数据时,应将其列为可疑数据,可通过检查在该数据的测量过程中是否有偶然原因(如强电磁干扰、电源跳变)、测量方法不当或读数失误等因素存在,以决定对该数据的取舍。

## 3. 粗大误差

所谓粗大误差是指在一定的测量条件下,测量值显著地偏离被测量的真值时所对应的误差,又称为差错误差。它是由读数错误、记录错误、仪器故障、测量方法错误、操作错误或计算错误等原因造成的。其特点是,误差大小明显超过正常测量条件下的系统误差和随机误差。含有粗大误差的测量值为坏值,要将其从测量数据中剔除。

### ▷▷ 1.2.3 实验数据的处理

通过实验测出数据后,通常还需要对实验数据进行计算、分析和整理,有时还要把数据变换成图、表、曲线或归纳成一定的表达式。这些都属于实验数据的处理。

#### 1. 读数与有效位数

读取模拟式仪表上的测量数据,除了上文所述读数姿势要正确外,还应注意所读数据的有效位数以及末位舍入规则。

由于在测量中不可避免地存在误差,且仪器的精度和分辨能力总有一定的限制,因此测量数