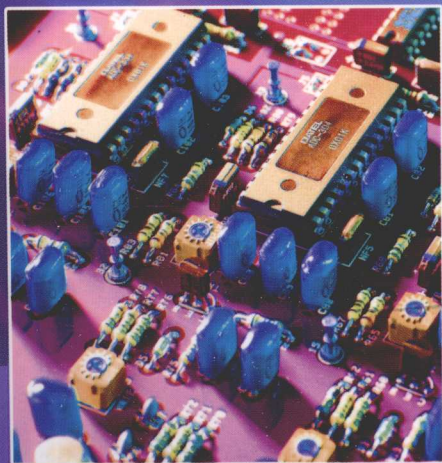




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工学实验

雷 勇 主编
宋黎明 副主编



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

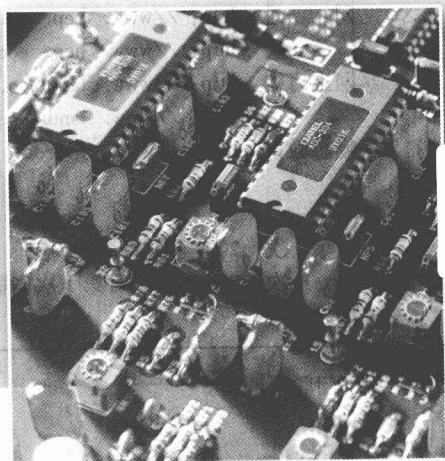
TM1-33/25

2009

电 工 学 实 验

雷 勇 主编

宋黎明 副主编



高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书是为高等院校非电类专业开设电工学实验课而编写的实验教学用书。

本书首先介绍了电工学实验基础和电工电子测量方法、测量设备,便于学生课前自学预习;然后根据课程实验特点分类,给出了基本实验、简单设计实验、综合实验三大类共计 27 个实验项目,附录中给出了常用软件使用方法介绍。对于每一个实验项目,配有简洁而细致的学习材料,以帮助学生自主完成实验准备、实验预习、实验详细方案设计、实验进程、实验总结与分析等实验过程,并将思考题与判断题贯穿其中,力求避免实验过程特别是实验接线中的常见错误,同时引导学生在实验预习及实验过程中进行积极深入的思考。

本书侧重科学实验方法的学习,加强基本电工实验技能的训练,体现对现代电气工程实验技术的了解,强调学生在整个实验过程中的参与。本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,适合于工科非电类专业电工学实验课程选用。

图书在版编目(CIP)数据

电工学实验/雷勇主编. —北京:高等教育出版社, 2009. 12

ISBN 978-7-04-028059-3

I. 电… II. 雷… III. 电工学-实验-高等学校-教材 IV. TM1-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 183525 号

策划编辑	金春英	责任编辑	唐笑慧	封面设计	于文燕	责任绘图	尹 莉
版式设计	马敬茹	责任校对	刘 莉	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 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京明月印务有限责任公司

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×1092 1/16
印 张 14.25
字 数 340 000

版 次 2009 年 12 月第 1 版
印 次 2009 年 12 月第 1 次印刷
定 价 17.20 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 28059-00

前言

本书是为高等院校非电类专业开设电工学实验课而编写的实验教学用书。本书参考了四川大学历年电工学实验指导书,并在此基础上,结合目前电工学教学内容的改革、实验手段的更新和电工电子新技术的发展趋势,对实验内容和实验手段做了较大幅度的调整和更新。

本书首先较全面地介绍了电工学实验基础和电工电子测量方法、常用电子元器件及测量设备,便于学生课前自学预习;然后根据课程实验特点分类,给出了基本实验、简单设计实验、综合实验三大类共计 27 个实验项目,附录中给出了常用软件使用方法。对于每一个实验项目,配有相应的学习材料,以帮助学生自主完成实验准备、实验预习、实验详细方案设计、实验进程、实验总结与分析等整个实验过程,并将思考题与判断题贯穿于其中,力求避免实验过程特别是实验接线中的常见错误,同时引导学生在实验预习及实验过程中进行积极深入的思考。

本书侧重科学实验方法的学习,加强基本电工实验技能的训练,体现对现代电气工程实验技术的了解,强调学生在整个实验过程中的参与,适合于工科非电类专业电工学实验课程选用。

参加本书编写工作的有:雷勇、宋黎明、张英敏、沈烨、涂国强、李雷、梁斌、朱天跃、林波、莫平、张晓东、张行、徐雪梅。其中,宋黎明编写 3.5 节、3.9 节和 5.1 节,张英敏编写 3.3 节和 3.6 节,沈烨编写 3.2 节、3.4 节、3.7 节和 3.8 节,涂国强编写 2.5 节和 5.3 节,李雷编写 5.4 节、5.5 节和附录的 OrCAD 部分,梁斌编写 2.6 节,朱天跃编写 2.8 节、3.11 节和 4.3 节,林波编写 3.13 节、3.15 节和 4.2 节,莫平编写 2.9 节和 3.12 节,张晓东编写 4.4 节、4.5 节和 4.6 节,张行编写 4.7 节,徐雪梅编写 4.1 节,其余内容由雷勇编写并由雷勇负责全书的统稿和定稿。

本书承华南理工大学殷瑞祥教授认真仔细地审阅。殷教授对全书的体系结构、内容等方面给予了悉心指导,提出了许多宝贵意见和修改建议。李雷为书稿的打印录入做了大量细致的工作,在此一并致谢。

本书将自主学习和研究性学习的教学理念体现在电工学实验课程的教学过程之中,所做的尝试性工作,定有不成熟及待完善之处,欢迎同行批评指正。

编者

2009 年 2 月于四川大学

目 录

第一章 电工学实验基础	1
1.1 电工学实验规则	1
1.2 安全用电	2
第二章 电工电子测量方法与设备	3
2.1 基本电量的测量	3
2.2 测量误差及其分析	9
2.3 测量结果的处理及仪器阻抗对测量的影响	11
2.4 电路调试和常见故障的分析与检查	14
2.5 常用电工电子元器件	18
2.6 万用表的使用	22
2.7 电压表、电流表及功率表的使用	26
2.8 示波器的使用	34
2.9 信号发生器的使用	48
第三章 基本实验	53
3.1 电路元件伏安特性的测绘及电源外特性的测量	53
3.2 叠加定理与戴维宁定理的验证	57
3.3 复杂直流电路故障排查及分析	63
3.4 一阶 RC 电路	67
3.5 日光灯电路及功率因数的提高	72
3.6 单相交流电路频率响应及故障分析	76
3.7 三相交流电路	80
3.8 磁路与变压器	87
3.9 三相异步电动机及继电器接触器控制	94
3.10 PLC 编程练习实验	100
3.11 电子仪器使用及单管放大电路	108
3.12 负反馈放大电路	115
3.13 集成运算放大器的基本应用	121
3.14 晶闸管可控整流电路	127
3.15 触发器及其应用	130
第四章 简单设计实验	136
4.1 集成运算放大器的非线性应用	136
4.2 整流、滤波和稳压电源的安装与设计	144

4.3 简单组合逻辑电路的设计	148
4.4 计数、译码与显示电路	153
4.5 555 时基电路及其设计	160
4.6 电子密码锁的设计与制作	164
4.7 A/D、D/A 转换器及其应用	166
第五章 综合实验	173
5.1 常规继电器接触器控制的实现	173
5.2 PLC 控制设计	176
5.3 开关电源的设计	178
5.4 交通灯控制电路的设计	183
5.5 简易出租车计价器设计	188
附录 常用软件使用方法	191
1. OrCAD 使用说明	191
2. 西门子 S7-200PLC 编程软件使用说明	197
3. PLD 编程软件使用说明	210
参考文献	219

第一章 电工学实验基础

1.1 电工学实验规则

1.1.1 实验课目的和要求

电工学实验是电工技术基础(电工学Ⅰ)和电子技术基础(电工学Ⅱ)的配套实验课程。实验的目的不仅要帮助学生巩固和加深理解所学的理论知识,更重要的是要训练学生的实验技能,使学生学会独立进行实验,树立工程实际观点和严谨的科学作风。

对学生实验技能训练的具体要求是:

- ① 能正确选择、使用常用的电工仪表、电工设备及常用的电子仪器。
- ② 能独立按电路图正确接线和查线。
- ③ 学习查阅手册,初步掌握常用电子元器件使用的基本知识。
- ④ 能准确读取实验数据,观察实验现象,测绘波形曲线;学习查找和排除简单的故障。
- ⑤ 能整理分析实验数据,独立写出内容完整、条理清楚和整洁的实验报告。

1.1.2 实验课几个阶段的具体要求

为了培养学生分析问题与解决问题的能力,充分发挥他们的主动性,提高实验课的质量,对学生在电工学实验的课前预习、实验进行和课后总结三个阶段提出以下具体要求。

1. 课前预习阶段

① 通过阅读实验教材及有关参考书,思考预习要求中的思考题,明确实验目的,理解有关原理,熟悉实验电路和内容,了解或拟定主要实验步骤,了解实验中的注意事项。

② 列出所使用的仪器、设备、仪表和元器件。

③ 列出测量数据的表格和待观察的现象,对实验电路进行理论分析和计算,并进行仿真。

2. 实验进行阶段

① 进实验室后要自觉遵守实验室规则。

② 实验前先清点和熟悉仪器、设备的性能和使用方法,按实验内容合理布置实验现场,实验台上配有直流稳压电源,在接入线路之前应调节好输出电压数值,使其符合实验线路要求。

③ 按实验方案连接实验线路。实验线路接线要准确、可靠和有条理,接线柱要拧紧,插头与线路中的插孔的结合要插准插紧,以免接触不良引起部分线路断开。线路中不要接活动裸接头,线头过长的铜丝应剪去,以免操作不慎或因偶然原因触电,或使线路短路造成意想不到的损失。接线完毕后,要认真复查,确信无误后,经指导教师检查同意,方可接通电源进行实验。

④ 测试前应根据估算的物理数值先选择好仪表的量程,一般应在实验线路稳定运行后再将仪表接入线路测试点。对于指针式仪表,应弄清所选量程的刻度值,被测量值通常应处于仪表量程的一半以上,按顺时针方向读数,以减少读数误差。

⑤ 认真记录实验数据、波形,并分析是否正确。若发生故障,应尽量独立分析和排除,并记录排除故障的方法。

⑥ 实验完毕,原始记录应交指导教师审阅签字,经指导教师同意后才能拆除线路,将仪器整理复原。

⑦ 实验过程中如果发生事故应立即切断电源,保持现场,报告指导教师。

3. 课后总结阶段

做完实验后,应及时处理实验数据,根据要求一律用学校规定的实验报告纸撰写实验报告。实验报告要求文字通顺、简练,数据、图表齐全、规范、正确,书写整洁。实验报告的具体内容包括:

① 实验目的。

② 实验电路图及主要仪器、设备的型号、规格。

③ 实验教材要求课前完成的预习内容。

④ 认真整理和处理实验原始数据,用坐标纸描绘波形或画出曲线。

⑤ 按实验教材要求完成总结、问题讨论和本次实验的心得体会以及对改进实验的建议。记录产生故障的情况,说明故障排除的方法。

1.2 安全用电

为了做好实验,确保人身和设备的安全,在做实验时,必须严格遵守下列安全用电规则:

① 接线、改接、拆线都必须在切断电源的情况下进行,即先接线后通电,先断电后拆线。

② 接线完毕后,要认真复查,确定无误后,再通知同组同学,方可接通电源。

③ 在电路通电情况下,人体严禁接触电路中不绝缘的金属导线或连接点等裸露的带电部位。万一遇到触电事故,应立即切断电源,进行必要的处理。

④ 实验中,特别是设备刚投入运行时,要随时注意仪器、设备的运行情况,如发现有超量程、过热、异味、异声、冒烟、火花等,应立即切断电源,并请指导教师检查。

⑤ 室内仪器、设备不能任意搬动调换,非本次实验所用的仪器、设备,未经指导教师允许不得动用。没有弄懂仪表、仪器、设备及元器件的使用方法前,不要贸然使用。若损坏仪器、设备,必须立即报告指导教师,作书面检查,如为责任事故要酌情赔偿。

⑥ 注意仪器、仪表允许的安全电压(或电流),切勿超过。当被测量的大小未知时,应从仪表的大量程开始测试,然后逐渐减小量程。

第二章 电工电子测量方法与设备

2.1 基本电量的测量

2.1.1 电压、电流和功率的测量

1. 电工技术实验中电压、电流和功率的测量

(1) 电压的测量

通常测量直流电压用磁电式电压表,测量交流电压用电磁式电压表。测量交流、直流电压都是把电压表直接并联于被测电路的两端。

选择电压表时要考虑:测直流还是交流电压、量程范围和精度。使用直流电压表时还要注意“+”、“-”极性。

(2) 电流的测量

通常测量直流电流用磁电式电流表,测量交流电流用电磁式电流表。电流表与待测电流的负载直接串联,为使电路的工作不因接入电流表而受影响,电流表的内阻应尽可能小,切不可将电流表并联在被测电路中,以免烧毁电流表。

选择电流表时要考虑:测直流还是交流电流、量程范围和精度。对于直流电流表还须注意“+”、“-”极性,保证电流从标有“+”的接线端流入仪表。

(3) 功率的测量

① 直流功率的测量 直流功率的测量可以采用间接测量方法,即用直流电流表和直流电压表的测量值,根据公式 $P=UI$ 计算得到。图 2.1.1(a) 所示接法适用于负载电阻小(负载电流大)的功率测量;图 2.1.1(b) 所示接法适用于负载电阻大(负载电流小)的功率测量。

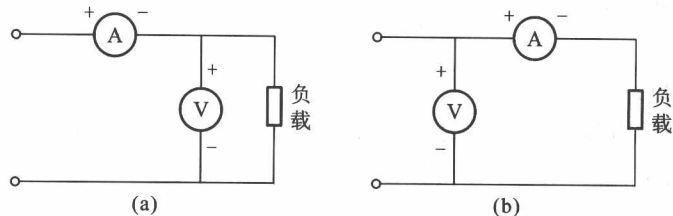


图 2.1.1 测量直流功率的两种情况

测量直流功率也可以采用电动式功率表(瓦特计)直接测出功率值。

② 交流有功功率的测量 交流电路中,通常选用电动式功率表测量有功功率。电动式功率表的电流线圈与负载相串联,其电压线圈与负载相并联,两个线圈标有“*”的一端称为同名端,它们应接在电源的同一侧。

单相交流电路中,利用单相功率表测量功率,如图 2.1.2 所示。在三相四线制交流电路中,利用三个单相功率表测量各相功率,三相总功率为三个单相功率表之和,其接线如图 2.1.3 所示。三相三线制电路中有功功率的测量采用两表法,即利用两只单相功率表测三相三线制负载的总功率,其接线如图 2.1.4 所示,两表法测得的三相总功率为两个单相功率表读数的代数和,而其中任意一个功率表的读数是没有意义的。

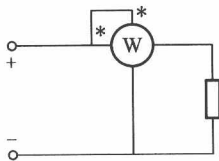


图 2.1.2 测量单相交流功率接线图

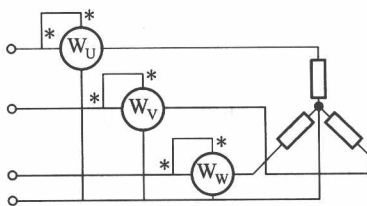


图 2.1.3 三表法测量三相四线制功率接线图

功率表的量程不是按所测功率值来选,而是根据流过功率表电流线圈的电流和电压线圈两端承受的电压来选择相应的量程。功率表读数时也要根据所选用的电流和电压线圈量程乘以适当的倍率。

2. 电子电路中电压的测量

电压是电子电路的基本参数之一,电流、功率、增益、频率特性等物理量都可以通过测量电压来间接得到,许多电子测量仪器也都用电压作指示,因此电压测量是许多电参数测量的基础。

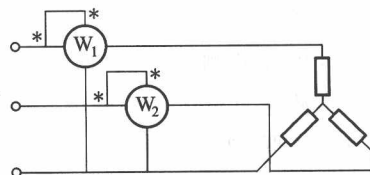


图 2.1.4 两表法测量三相负载功率接线图

电子电路中的电压有频率范围宽(直流至数百兆赫)、存在非正弦电压、交直流电压并存和电压范围宽(几微伏至千伏以上)等特点,并且由于电子电路一般是高阻抗电路,所以要求测量仪器有高输入阻抗,以减小它对被测电路的影响。

在电压测量中,可根据被测电压的性质、工作频率、波形、被测电路阻抗大小、测量精度等选择测量仪表。

(1) 直流电压的测量

用数字式万用表的直流电压挡测量直流电压,可直接显示被测直流电压的数值和极性,测量时尽可能使电压表的量程与被测的电压接近,以提高数据的有效位数。一般数字式万用表直流电压挡的输入电阻可达 $10\text{ M}\Omega$ 以上,所以对被测电路的影响较小。

模拟式万用表直流电压挡的输入电阻一般不太大,而且各量程挡的内阻不同,因此只适用于被测电路等效内阻很小或信号源内阻很小的情况。

用示波器也可以测量直流电压,但应先将示波器垂直偏转灵敏度的微调置校准位置,否则电压读数不准确;同时将 Y 轴耦合方式开关置“GND”位置,调节 Y 轴位移旋钮使扫描基线在一个

合适的位置上,作为零电压基准位置,如图 2.1.5 所示。

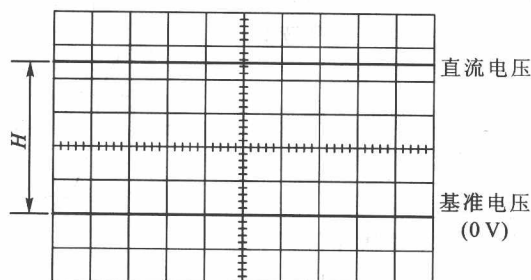


图 2.1.5 直流电压的测量方法

再将输入耦合方式选择按钮置于“DC”位置,调节 Y 轴灵敏度调节旋钮,使扫描线有合适的偏移量。调节“电平”使波形同步。根据波形偏移原扫描基线的垂直距离,用上述方法读取该信号的各个电压值。如果直流电压的坐标刻度(波形与基线之间的距离)为 $H(\text{div})$, Y 轴灵敏度旋钮的位置为 S_Y ,单位为 V/div ,探头的倍增系数为 k ,则所测得的直流电压值 $U_x = S_Y \cdot H \cdot k$ 。

(2) 交流电压的测量

① 交流电压表测量交流电压 交流电压表分模拟式和数字式两大类,它们都是先将交流电压经过检波器转换成直流电压后测量。

模拟式万用表的交流电压挡内阻较低,且各量程挡的内阻不同,测量时要注意仪表内阻对被测电路的影响;此外其频率范围较窄,一般只能测频率在 1 kHz 以下的交流电压。

数字式万用表的交流电压挡输入阻抗较高,对被测电路影响小,但它同样存在测量频率范围小的缺点。例如 DT-830 型数字式万用表交流电压挡的输入阻抗为 $10\text{ M}\Omega$,测量交流电压频率范围为 $40 \sim 500\text{ Hz}$ 正弦波。

晶体管毫伏表(又称交流毫伏表)是实验室中常用的一种模拟式电子电压表,它是将被测信号经放大、检波转换成直流电压,再由微安表头指针指示出被测电压的大小。这类电压表输入阻抗高、量程范围广、频率范围宽。例如 DA-16 型晶体管毫伏表测量电压范围为 $100\text{ }\mu\text{V} \sim 300\text{ V}$,频率范围为 $20\text{ Hz} \sim 1\text{ MHz}$,输入电阻为 $1.5\text{ M}\Omega$,输入电容为 $50 \sim 70\text{ pF}$ 。一般模拟式电子电压表只能测量电路中各点对地的交流电压,不能直接测量任意两点间的电压,因为它的一端为被测信号输入端,而其金属机壳为接地端。需要注意的是这类表的表盘刻度都是按正弦波的有效值刻度的,所以当测量正弦波形的电压时,可直接在表盘上读取电压的有效值,但若测量非正弦电压,就不能直接读数。

② 示波器测量交流电压 用示波器测量交流电压较之用电压表测量具有下述优点,即速度快、能测量各种波形的电压、能测量瞬时电压、能同时测量直流和交流电压。但示波器的误差较大,一般为 $5\% \sim 10\%$ 。示波器测量交流电压时首先将示波器的微调旋钮置校准位置,当只需测量被测信号的交流成分时,应将 Y 轴输入耦合方式选择按钮置“AC”位置,根据被测信号的幅度和频率,调整 Y 轴灵敏度调节旋钮和 X 轴的扫描时间调节旋钮于合适的位置,使波形在屏幕中的显示幅度适中,再选择合适的触发源和触发耦合方式,调整触发电平调节旋钮,使示波器屏幕

显示出稳定的波形,如图 2.1.6 所示。

根据 Y 轴灵敏度的指示值 S_Y (V/div) 和波形在垂直方向显示的坐标 H (div)。按下式读取:

$$U_{p-p} = S_Y (V/div) \cdot H (div)$$

上述被测信号是不含直流成分的正弦信号,一般选用交流耦合方式。但即使被测信号是正弦信号,若频率很低,就应选用直流耦合方式。如果输入信号是含有直流分量的交流信号或脉冲信号,则通常选用直流耦合方式,以便观察输入信号的全部内容。

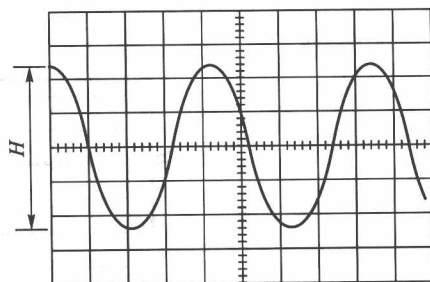


图 2.1.6 交流电压的测量方法

2.1.2 时间、频率和相位的测量

1. 时间的测量

时间的测量在科学技术各个领域都十分重要。时间的测量可用具有时间测量功能的数字频率计或示波器来进行。本小节介绍用示波器测量的方法。

时间测量通常是测量信号的周期、脉冲宽度、上升时间、下降时间等。

测量前应对示波器的扫描速率进行校准,将扫描微调置于校准位置,再用示波器本身的校准信号进行校准,检查扫描速率 t/div 开关标称值是否准确。

需要说明的是:第一,若所测时间间隔对应的长度为 L_X (div),扫描速率为 W ,单位为 ms/div ,X 轴的扩展系数为 k ,则所测时间间隔 $T_X = W \cdot L_X \cdot k$;第二,在测量信号的周期时,可以测量信号的一个周期时间,也可以测量 n 个周期时间,再除以周期个数 n ,如图 2.1.7 所示。相对而言,后一种方法产生的误差会小些。

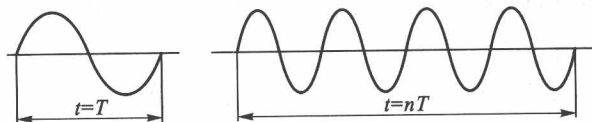


图 2.1.7 信号周期的测量

测量脉冲信号的脉冲宽度 t_w 、上升时间 t_r 、下降时间 t_f 等参数,只要按其定义测量出相应的时间间隔即可,它们的测量方法是一样的。

2. 频率的测量

频率是指电信号每秒钟重复变化的次数,可采用示波器和数字频率计来测量。

(1) 用示波器测量频率

由于信号的频率与周期是倒数关系,所以可用前面介绍的方法,先测得信号的周期,再求得频率。这种方法方便,但精度不太高,常用作频率的粗略测量。

(2) 计数法测量频率

计数法的原理是在某个已知标准时间间隔 T_s 内,测出被测信号重复出现的次数 N ,则频率 $f = N/T_s$ 。目前广泛采用的数字频率计就是按此原理设计的。

数字频率计是用石英晶体振荡器产生高稳定的振荡信号,经分频后产生准确的时间间隔 T_s ,用 T_s 作为门控信号去控制主门的开启时间。开始测量时,先将计数器置零,被测信号经放大整形后,变换成方波脉冲,在主门开启时间 T_s 内通过主门,由计数器对通过主门的方波脉冲计数,直到门控信号结束,主门关闭,停止计数。若在时间间隔 T_s 内计数值为 N ,则被测信号频率为 $f=N/T_s$,最后由译码显示电路将测量结果显示出来。

3. 相位的测量

所谓相位测量,通常是指测量两个同频率信号之间的相位差,如测量 RC 电路的相移特性、放大电路的输出信号相对于输入信号的相移特性等。

用双踪示波器测量两个信号之间的相位差是很方便的。测量时,把两个通道的基准线调到重合,再测试波形。要选定其中一个输入通道的信号作为触发电源,调整触发电平,以显示出两个稳定的波形,如图 2.1.8 所示。在测量中应调整 Y 轴灵敏度和 X 轴扫描速率,使波形的高度和宽度合适。

由图 2.1.8 可知,两波形的相位差为

$$\varphi = \frac{L_X}{L_T} \times 360^\circ$$

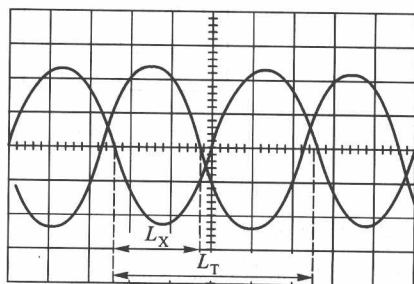


图 2.1.8 两信号相位差的测量

2.1.3 频率特性的测量

频率特性包含幅频特性和相频特性。本节讨论放大电路频率特性的测量方法,但它同样适用于其他电路,如 RC 串联选频电路、 RC 低通滤波电路等。

1. 放大电路幅频特性的测量

放大电路的幅频特性是指放大电路输出电压与输入电压的比值(即放大倍数)和频率之间的关系曲线。放大电路的幅频特性在一段频率范围(称中频段)内,电压放大倍数最大且近似为常数,用 $|A_{um}|$ 表示,当输入信号频率升高或降低时,电压放大倍数都要下降。当信号频率降低到使电压放大倍数下降为 $|A_{um}|/\sqrt{2}$ 时,所对应的频率称为放大电路的下限截止频率 f_L ;当信号频率增加到使电压放大倍数下降为 $|A_{um}|/\sqrt{2}$ 时,所对应的频率称为放大电路的上限截止频率 f_H 。上限、下限截止频率之间的频率范围称为放大电路的通频带。

幅频特性的测量方法有逐点法和扫频法。

(1) 逐点法

逐点法测量幅频特性就是保持输入信号的幅度不变(用晶体管毫伏表监测),改变输入信号的频率,用毫伏表逐点测量不同输入频率时放大电路的输出电压,就可作出放大电路的幅频特性曲线。逐点法测量电路如图 2.1.9 所示。在测量过程中必须用示波器监测输出波形,始终保持输出信号不失真。

测量时应合理选择测试点,首先粗调信号频率,粗测上限、下限截止频率的数值,然后在这两点附近多测几点,而在曲线变化比较平坦的地方放大倍数基本不变,可少取测试点,尽量使取点量少而又能真实反映客观情况。逐点法测量幅频特性的优点是可以采用常用的电子仪器进行测试,但由于测试需要选取的频率点一般在十几个以上,所以操作费时、繁琐,而且还可能由于取的

点不够而漏掉一些细节。

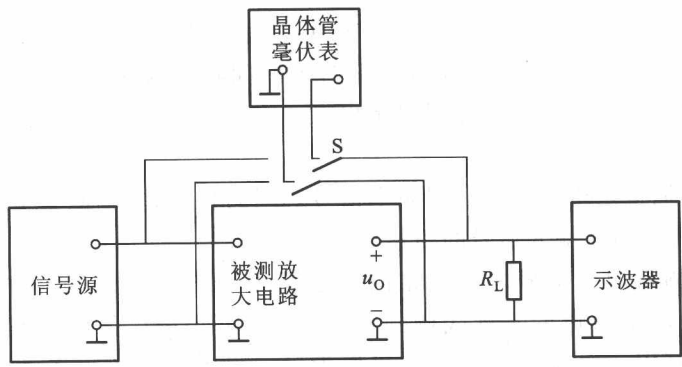


图 2.1.9 逐点法测量放大电路的幅频特性

(2) 扫频法

扫频法能克服逐点法的缺点,它可以在扫频仪的荧光屏上直接显示出幅频特性曲线,而且可以在调整被测放大电路中有关元器件及电路参数的同时,观察到幅频特性曲线的变化,从而达到设计的要求。

扫频仪的原理简述如下:扫频仪内的扫描发生器产生与时间成正比的锯齿波扫描电压(u),该电压一方面经放大后加到仪器内示波管的 X 轴,使荧光屏的光点在水平方向移动;另一方面这个锯齿波电压控制扫频信号发生器,使之输出一个频率随时间作线性变化而幅度恒定的正弦波,该信号送到被测放大电路的输入端,由于放大电路对不同频率信号的放大倍数不同,所以经过检波电路就检出该放大电路对应不同频率时输出信号幅度变化的轨迹,再经放大后加到示波管的 Y 轴,这样荧光屏所显示的图形就是被测放大电路的幅频特性曲线。

由于荧光屏水平方向光点偏移 d 正比于锯齿波的扫描电压 u ,而扫频信号发生器输出正弦波的频率 f 也正比于 u ,所以 d 正比于 f ,因此荧光屏上的水平轴就变成了频率轴,荧光屏上可直接显示被测放大电路的幅频特性曲线,并可直接读出上限、下限截止频率。

扫频法测量幅频特性的框图如图 2.1.10 所示。

2. 放大电路相频特性的测量

放大电路的相频特性是指放大电路输出信号相对于输入信号的相移随信号频率而变化的关系曲线。

只要测出不同频率时输出信号与输入信号的相位差即可得到相频特性,关于相位差的测量在本章 2.1.2 小节中已有介绍。可以用双踪示波器,通过改变输入信号的频率,用逐点法测出相移,即可画出相频特性曲线。

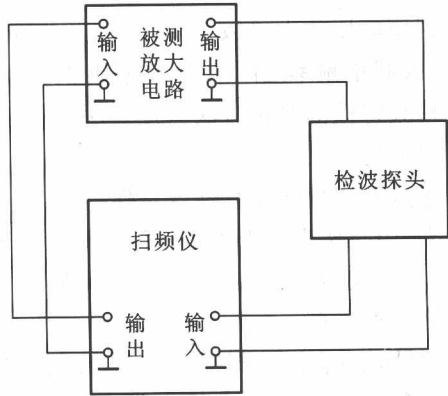


图 2.1.10 扫频法测量幅频特性的框图

2.2 测量误差及其分析

在科学实验与生产实践的过程中,为了获取表征被研究对象特征的定量信息,必须准确地进行测量。在测量过程中,由于各种原因,测量结果和待测量的客观真值之间总存在一定差别,即测量误差。因此,分析误差产生的原因,如何采取措施减少误差,使测量结果更加准确,对实验人员及科技工作者来说是必须了解和掌握的。

2.2.1 误差的来源与分类

1. 测量误差的来源

测量误差的来源主要有以下几个方面:

(1) 仪器误差

仪器误差是指测量仪器本身的电气或机械等性能不完善所造成的误差,如校准误差、刻度误差等。显然,消除仪器误差的方法是配备性能优良的仪器并定时对测量仪器进行校准。

(2) 使用误差

使用误差也称操作误差,是指测量过程中因操作不当而引起的误差。减小使用误差的办法是测量前详细阅读仪器使用说明书,掌握仪器的使用方法,严格遵守操作规程,提高实验技巧和对各种仪器的操作能力。例如,万用表表盘上的符号 $\perp$ 、 $\sqcap$ 、 $\angle 60^\circ$ 分别表示万用表垂直位置使用、水平位置使用、与水平面倾斜成 60° 位置使用,使用时应按规定放置万用表,否则会带来误差,至于用电阻挡测电阻前不调零所带来的误差,则更是显而易见的。

(3) 方法误差

方法误差又称为理论误差,是指由于使用的测量方法不完善、理论依据不严密、对某些经典测量方法作了不适当的修改简化所产生的,即凡是在测量结果的表达式中没有得到反映的因素,而实际上这些因素在测量过程中又起到一定的作用所引起的误差。例如,用伏安法测电阻时,若直接以电压表示值与电流表示值之比作为测量结果,而不计仪器本身内阻的影响,就会引起此误差。

(4) 影响误差

影响误差主要指测量者以及环境的影响而引起的误差,如人的感觉器官、运动器官的限制造成的误差以及环境的温度、湿度、机械振动、声音等影响所造成的误差。

2. 测量误差的分类

测量误差按性质和特点可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

(1) 系统误差

系统误差是指在相同条件下重复测量同一量时,误差的大小和符号保持不变,或按照一定的规律变化的误差。系统误差一般可通过实验或分析方法查出,查明其变化规律及产生原因,从而减少或消除系统误差。电路与电子技术实验中系统误差常来源于测量仪器的调整不当和使用方法不当。

(2) 随机误差

随机误差又称偶然误差,是指在相同条件下多次重复测量同一量时,误差数值大小和符号无规律的变化的误差。随机误差不能用实验方法消除。但从随机误差的统计规律中可了解它的分布特性,并能对其大小及测量结果的可靠性作出估计,或通过多次重复测量,然后取其算术平均值来减小随机误差。

(3) 过失误差

过失误差是由于测量者对仪器不了解或粗心,导致读数不正确而引起的误差,测量条件的突然变化也会引起过失误差。含有过失测量值称为坏值或异常值。必须根据统计检验方法的某些准则去判断哪个测量值是坏值,然后将其消除。

2.2.2 误差的分析

误差可以用绝对误差和相对误差来表示。

1. 绝对误差

设被测量的真值为 A_0 , 测量仪器的示值为 X , 则绝对误差 ΔX 为

$$\Delta X = X - A_0$$

在某一时间及空间条件下,被测量的真值虽然是客观存在的,但一般无法测得,只能尽量接近它。故常用高一级标准测量仪器的测量值 A 代替真值 A_0 , 则绝对误差

$$\Delta X = X - A$$

在测量前,测量仪器应由高一级标准测量仪器进行校正,校正量常用修正值 C 表示。对于被测量值,高一级标准测量仪器的示值减去测量仪器的示值所得的差值,就是修正值。实际上,修正值就是绝对误差,只是符号相反,即

$$C = -\Delta X = A - X$$

利用修正值便可得该仪器所测量的实际值

$$A = X + C$$

例如,用电压表测量电压时,电压表的示值为 1.5 V,通过鉴定得出其修正值为 -0.05 V,则被测电压的真值为

$$A = [1.5 + (-0.05)] \text{ V} = 1.45 \text{ V}$$

修正值给出的方式可以是曲线、公式或数表。对于自动测量仪器,修正值则预先编制成有关程序,存于仪器中,测量时对误差进行自动修正,所得结果便是实际值。

2. 相对误差

绝对误差值的大小往往不能确切地反映出被测量值的准确程度。例如,测量 100 V 电压时, $\Delta X_1 = 2 \text{ V}$, 测量 10 V 电压时, $\Delta X_2 = 0.5 \text{ V}$, 虽然 $\Delta X_1 > \Delta X_2$, 可实际 ΔX_1 只占被测量的 2%, 而 ΔX_2 却占被测量的 5%。显然,后者的误差对测量结果的影响相对较大。因此,工程上常采用相对误差来比较测量结果的准确程度。

相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差和引用相对误差。

(1) 实际相对误差

实际相对误差是用绝对误差 ΔX 与被测量的实际值 A 的比值的百分数来表示的相对误差,记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A} \times 100\%$$

(2) 示值相对误差

示值相对误差是用绝对误差 ΔX 与仪器示值 X 的百分数来表示的相对误差,记为

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%$$

(3) 引用相对误差

引用相对误差是用绝对误差 ΔX 与仪器的满刻度值 X_m 之比的百分数来表示的相对误差,记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\%$$

电工仪表的准确度等级是由 γ_m 决定的,如 1.5 级的电表,表明 $\gamma_m \leq \pm 1.5\%$ 。我国电工仪表按值共分 7 级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。若某仪表的等级是 S 级,它的满刻度值为 X_m ,则测量的绝对误差为

$$\Delta X \leq X_m \cdot S\%$$

其示值相对误差为

$$\gamma_m \leq \frac{X_m}{X} S\%$$

在上式中,总是满足 $X \leq X_m$ 的,可见当仪表等级 S 选定后, X 愈接近 X_m , 上限值愈小,测量就愈准确。因此,当使用这类仪表进行测量时,一般应使被测量的值尽可能在仪表满刻度值的 1/2 以上。

2.3 测量结果的处理及仪器阻抗对测量的影响

2.3.1 测量结果的处理

测量结果通常用数据或图形表示,下面进行讨论。

(1) 近似数和有效数字

由于存在误差,若用数据来表示测量结果,测量数据总是近似值,它通常由可靠数字和欠准数字两部分组成,所以在进行数据处理时,除要注意有效数字的正确取舍外,还应符合数据处理方法,以减少测量中随机误差的影响。要从复杂的测量结果中得出可靠的实验结果,找出各物理量之间的变化关系及变化规律,就需要对实验数据进行分析、整理、归纳计算等处理,最后用数据表格清晰地表示出来。若以图形表示测量结果,则应考虑坐标的选择和作图的方法。例如,由电流表测得电流为 11.5 mA,这是个近似数,11 是可靠数字,而末位 5 为欠准数字,即 11.5 为 3 位有效数字。有效数字对测量结果的科学表述极为重要。

对有效数字的正确表示,应注意以下几点。

① “0”在数字中可能是有效数字,也可能不是有效数字。如 0.450 kV 这个数据,它前面的“0”不是有效数字,其有效数字只有 3 位。它可以写成 450 V,有效数字还是 3 位。可见,