

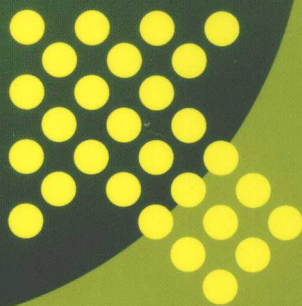
21世纪高等学校规划教材



DIANGONG DIJIAN JISHU
CELIANG YU SHIYAN

电工电子技术 测量与实验

段渝龙 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

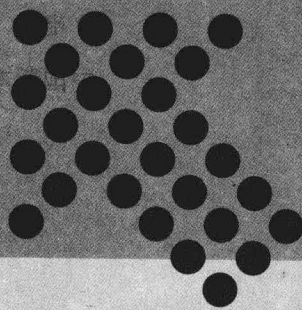
21世纪高等学校规划教材



DIANGONG DIANZI JISHU
CELIANG YU SHIYAN

电工电子技术 测量与实验

主 编 段渝龙
编 写 祝 进 张盛耀
主 审 徐 云



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是为读者掌握电路、电子测量实验技术而编写的。本书以实际操作为主，旨在提高工科学生的动手能力和实验技能，以弥补学生在这方面的欠缺。

本书分五章。第一章电路实验，本章安排的电路基本实验有 14 个，可满足电子信息、通信工程、计算机、信息工程等专业电路课程对实验的要求。第二章模拟电路实验，基本实验有 11 个。第三章数字逻辑实验，有基本实验也有设计实验，可满足理论课程和课程设计的要求。第四章测量与测量仪器仪表，分三节，前两节介绍误差及数据处理的基本原则和方法，第三节测量仪器仪表在内容上保留了传统常用的模拟式仪表，同时又增加了应用广泛的数字式仪表。第五章常用仪器仪表简介，介绍常用仪器的各类技术指标及操作规范。

本书可作为高等学校电子信息、通信工程、计算机、信息工程等专业基础实验课的指导书。本教材具有很好的实践性、连贯性，对大中专院校的教师和有关专业技术人员均有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子技术测量与实验/段渝龙主编. —北京：中国电力出版社，2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9599 - 9

I. 电… II. 段… III. 电子测量—高等学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 194248 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 12 月第一版 2009 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 326 千字

定价 25.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着科学技术的发展,特别是电子计算机、通信、电子技术的迅速发展,为人们的物质文化生活提供了优越的条件,应用电子技术的各种通信类、消费类产品更是琳琅满目。电子技术在科学技术领域中的应用,更是起着先锋龙头作用。本书是为高等学校的电子信息类、计算机类、电气及自动化控制类和其他相近专业而编著的实验教材,可以成为许多专业的专业基础课实验及课程设计的指导书。本书面向许多专业,根据各校专业的特点,为适应不同专业的需要,在总结许多专业实验教学的基础上,整合了多门课程的实验指导而编写了本教材。

本书主要是为大学本科学生,在学习完电路、电子测量课程后,需完成的实践教学和实验操作及技能而编写的。面向 21 世纪的人才培养,应突出基础训练、基本技能的培养和设计性综合应用能力、创新能力的培养。本书适应时代的要求,以实际操作为主,提高工科学生的动手能力和实验技能,可以作为大学生参加各种电子制作、电子竞赛、课程设计、毕业设计、电工实训、开放实验的教学参考书。

本书由段渝龙组织编写。第二章由祝进参与编写,第三章由张盛耀参与编写。在编写过程中得到贵州大学张正平教授、张达敏教授、张欣博士的帮助和支持,并提出了许多宝贵意见,在此表示深深的感谢。

限于编者水平,书中不足之处在所难免,诚恳地期望读者提出批评和建议。

编 者

2009 年 11 月

目 录

前言

第一章 电路实验	1
实验须知	1
实验一 电路元件特性的测试	1
实验二 线性电路定理的验证	4
实验三 测量仪器和信号发生器	6
实验四 一阶电路的响应	8
实验五 二阶电路的响应与状态轨迹	10
实验六 R 、 L 、 C 元件在交流电路中的特性	13
实验七 R 、 L 、 C 串联谐振电路	14
实验八 回转器的特性	16
实验九 二端口网络参数的测定	18
实验十 仿真线	21
实验十一 交流参数的测定	23
实验十二 日光灯及功率因数的改进	24
实验十三 三相电路功率的测量	25
实验十四 三相电路的研究	28
第二章 模拟电路实验	31
实验一 用万用表对模拟电子元件进行测量	31
实验二 小信号共射放大器	34
实验三 场效应管放大器	40
实验四 射极跟随器	43
实验五 差动放大器	46
实验六 集成运算放大器的基本应用 (1)——模拟运算放大电路	49
实验七 集成运算放大器的基本应用 (2)——有源滤波器	52
实验八 集成运算放大器的基本应用 (3)——电压比较器	57
实验九 RC 正弦波振荡器	60
实验十 直流稳压电源 (1)——串联型晶体管稳压电源	62
实验十一 直流稳压电源 (2)——集成稳压器	66
第三章 数字逻辑实验	71
实验一 TTL 集成逻辑门的逻辑功能与参数测试	71
实验二 组合逻辑电路的设计	75
实验三 译码器及其应用	78

实验四 数据选择器及其应用	80
实验五 触发器及其应用	84
实验六 计数器及其应用	89
实验七 移位寄存器及其应用	93
实验八 555 时基电路及其应用	99
实验九 使用门电路产生脉冲信号	103
实验十 D/A、A/D 转换器	106
实验十一 智力竞赛抢答装置	111
实验十二 电子秒表	112
第四章 测量与测量仪器仪表	117
第一节 测量误差及其表示与测量数据的处理	117
第二节 实验数据的表示及处理	130
第三节 测量仪表与仪器	149
第五章 常用仪器仪表简介	174
第一节 示波器	174
第二节 功率函数发生器	182
第三节 双路直流稳压电源	187
第四节 数字万用表	190
第五节 毫伏表	196
附录 部分集成电路引脚排列	199
参考文献	208

第一章 电 路 实 验

实 验 须 知

科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,是工科学技术的基础。培养实验能力和实验技能是高等工业院校教育的重要内容之一,因此必须高度重视实验教学。

为了维护正常的教学实验秩序,高质量地完成各项实验任务,确保人身、设备安全,特制订该“实验须知”,请师生们在实验教学中自觉遵守,发扬踏实、严谨和实事求是的科学作风,培养爱护国家财产的优良品质。

(1) 坚持理论与实践统一的原则,学生必须按教学计划的要求,认真完成规定的实验课程。

(2) 实验实行记分,实验成绩由指导教师根据学生在实验课中的表现和预习报告、实验报告、实验考试成绩等综合评定。

(3) 学生在实验前必须做好规定的预习准备工作,并按要求写好预习实验报告和实验方案,经指导教师认可后方可进行实验。

(4) 实验时应严肃、认真、仔细。实验结果经教师审阅签字后,才能拆除实验线路,整理好使用的仪器、导线等,并归还借用的物品,实验结束后应按要求及时完成实验报告。

(5) 爱护器材、工具和设备,使用仪器前,必须了解其使用方法及注意事项,在操作时应严格遵守。

(6) 自觉保持实验室内的安静和整洁,不准喧闹、吐痰、抽烟。不乱拿其他组仪器及非本次实验所用仪器。

(7) 凡属下列情况之一者不准参加实验:

1) 未按要求写预习报告者。

2) 实验开始后迟到 10min 以上者。

3) 实验中不遵守实验室有关规定,不爱护仪器,表现不好而又不服从管理教育者。

(8) 所接实验线路,须由学生自行认真检查,再由教师核对无误后才能合上电源,开始实验。

(9) 使用仪器、设备时严格遵守操作规程。发生仪器设备损坏时,必须及时报告,认真检查原因,从中吸取教训,并按规定的赔偿办法处理。

(10) 发生事故时,应立即切断电源,保持现场,并立即向教师和实验负责人报告。

(11) 实验结束应切断实验桌上的电源。

实验一 电路元件特性的测试

一、实验目的

(1) 学习用直流电压表和直流电流表测量电路元件的伏安特性。

(2) 了解理想电压源和实际电压源的外特性,了解理想电流源和实际电流源的外特性。

二、原理与说明

(1) 电路元件的特性, 可用该元件的电压和通过该元件的电流之间的函数关系表示, 也可用电压表和电流表来测定, 这种测量方法, 称为伏安测量法。

(2) 一个实际电压源可以用理想电压源 U_0 与一个电阻 R_0 相串联的模型来表示, 图 1-1 (a) 所示为其电路图, 当电流源对外输出电流时, 其伏安特性称为该电源的外特性, 其公式为

$$U = U_0 - IR_0$$

表征上式关系的曲线如图 1-1 (b) 所示, 实际电压源的内阻越小, 电源的端电压 U 越接近 U_0 。当电源内阻 $R_0 = 0$ 时, $U = U_0$, 这样的电压源称为理想电压源。

(3) 一个实际电流源可用一个理想电流源 I_0 及一个电阻 R_0 相并联的模型来表征, 如图 1-2 (a) 所示, 对外接有负载时, 其外特性可表为

$$I = I_0 - \frac{U}{R_0}$$

图 1-2 (b) 所示为表征外特性函数关系的曲线。实际电流源的内阻越大, 其输出电流 I 越接近 I_0 , 当 $R_0 = \infty$, $I = I_0$, 这样的电流源就称之为理想电流源^[1]。

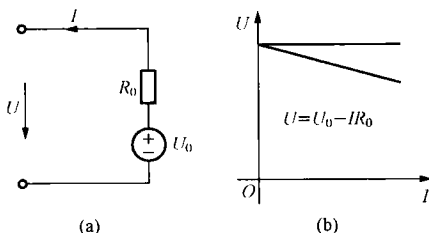


图 1-1 理想电压源与实际电压源

(a) 电路图; (b) 伏安特性图

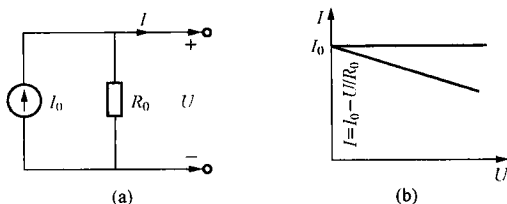


图 1-2 理想电流源与实际电流源

(a) 电路图; (b) 伏安特性图

(4) 电阻元件的特性可以用该元件两端的电压 U 与流过该元件的电流 I 的关系来表征。在 $U-I$ 坐标平面上, 线性电阻的特性为一条通过坐标原点的直线。对于非线性电阻, 则分为以下 3 种类型:

- 1) 若元件的端电压是流过该元件电流的单值函数, 则称之为电流控制型电阻元件。
- 2) 若流过元件的电流是该元件端电压的单值函数, 则称之为电压控制型电阻元件。
- 3) 若元件的伏安特性曲线是单调增加或减少的, 则该元件是双控的, 称之为单调型电阻元件。

三、任务与方法

(1) 测量理想电压源和实际电压源的外特性。按图 1-3 接线, 限流电阻 R_1 与可变电阻 R_2

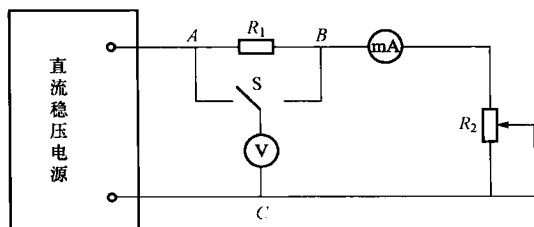


图 1-3 实验电路

相串联后与稳压电源相连。图中, S 是单刀双掷开关, V 是直流电压表, mA 是毫安表。

1) 先将开关 S 的活动接点接入 A 端, 逐步变化 R_2 的值, 以测量对应的电压值和电流值, 记录于表 1-1 中。

2) 将开关 S 合向 B 端, 重复 1) 步骤, 测出数据填入表中, 表格自拟。

(2) 测定线性电阻的伏安特性, 按图 1-3 接线, 固定 R_1 和 R_2 的值不变, 将开关 S 的活动接点接入 B 端, 逐步调节电源电压, 将测得的对应电流 I 和 U_{BC} 记录于表 1-2 中。

(3) 测定非线性电阻的伏安特性曲线。将 R_1 固定为 $1\sim 2k\Omega$, 依图 1-3 接线, 将图中的可变电阻 R_2 撤掉, 换上非线性二端流控电阻 R_N , R_N 实际上是一个单结晶体管, 注意 R_N 上的“+”、“-”端, 应与电路中电源的方向对应。然后逐步调节电源电压, 测出对应的 U_{BC} 和 I 值, 填入表 1-3 中, 注意在负阻特性段应多选取几个测试点。

表 1-1 理想电压源值

U_{AC} (V)								
I (mA)								

表 1-2 线性电阻测量值

U_{BC} (V)								
I (mA)								

表 1-3 非线性电阻测量值

I (mA)								
U_{BC} (V)								

(4) 测量理想电流源和实际电流源的外特性。实验接线图如图 1-4 所示, 保持恒流源的输出。逐步增加 R_2 的值, 并测量出对应的电流 I 和电压 U 的数值, 记录于表 1-4 中。

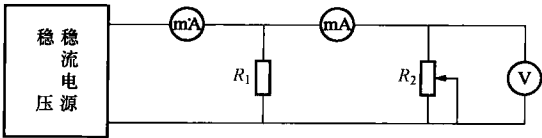


图 1-4 理想电流源与实际电流源实验电路

表 1-4 理想电流源值

电阻值 (Ω)								
电压值 (V)								
电流值 (mA)								

指导教师签名: _____

四、注意事项

- (1) 实验中, 严禁将直流稳压电源短路。
- (2) 在接线或改接电路时, 一定要先关掉电源。
- (3) 在绘制元件的特性曲线时, 要选取比例恰当的坐标。

五、实验报告要求

- (1) 根据测量数据, 在坐标纸上按比例绘出各元件的伏安特性曲线, 采用适当的校正方

法使曲线光滑,并注明坐标轴的量值及单位。

(2) 记录所使用的仪器、设备及器件。

(3) 回答思考题。

六、思考题

(1) 若在用伏安法测量电路元件特性时,没有电流表,只有两块电压表,可否测量?用什么方法?

(2) 算出非线性电阻各测试点对应的静态电阻 U/I 和动态电阻 $(U_2 - U_1)/(I_2 - I_1)$ 。

实验二 线性电路定理的验证

一、实验目的

(1) 通过实验理解和验证叠加原理、戴维南定理、基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律。

(2) 熟悉仪器设备,提高实验分析和设计能力。

二、原理与说明

(1) 如果把独立电源称为激励,被它所引起的支路电压、电流称为响应,叠加原理简述为:在任一线性网络中,多个激励同时作用时的总响应等于各个激励单独作用时引起的响应之和。所谓某一激励单独作用,就是除了该激励外,其余激励均为零值。

(2) 任何一个线性含源二端网络对外电路的作用,可用一个含内阻的等效电源来代替,既可根据戴维南定理,用一个等效的理想电压源 U_0 和一个等效的内阻 R_0 的串联电路来等

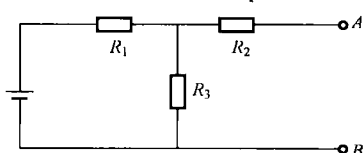


图 1-5 戴维南定理实验电路

效代替;也可根据诺顿定理,用一个等效的理想电流源 I_0 和一个等效的电阻 R_0 相并联的电路来等效代替。

(3) 图 1-5 所示的电路, A、B 左侧为一含源二端网络,将外电路开路,则等效电源的电压 $U_0 = U_{AB}$, 将外电路短路,则

$$U_{AB} = U_0 - I_{sc}R_0 = 0$$

$$R_0 = \frac{U_0}{I_{sc}}$$

式中 I_{sc} ——短路端的短路电流。

上式表明,用开路电压 U_{∞} 除以短路电流 I_{sc} 即为等效电源的内阻 R_0 , 而 U_{∞} 为戴维南定理中的等效理想电压源的电压 U_0 , I_{sc} 则为诺顿定理中的等效理想电流源的电流 I_0 。因此,只要对含源网络进行开路和短路实验,就可以获得等效电源的各参数。但在大电源的情况下,将负载短路是不允许的,这时测量内阻应采用别的方法。

三、任务与方法

(1) 将元件按图 1-6 接线, R_1 、 R_2 、 R_3 为电阻,电压源 E_1 、 E_2 分别由两台直流稳压电源提供, S1 和 S2 是两只单刀双掷换路开关,它们投向 E_1 、 E_2 时,表明两电源已接入电路,当它们投向短路侧时,则电源从电路中撤

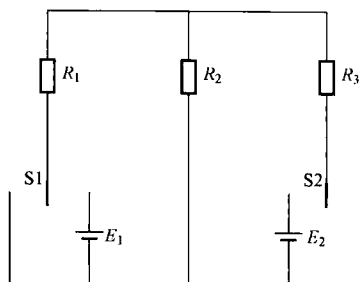


图 1-6 叠加原理实验电路

出。图 1-6 的电路,通过拨动 S1 和 S2,可以使 E_1 、 E_2 分别作用于电路,也可使 E_1 和 E_2 共同作用于电路,测验各种激励条件下的响应,以验证叠加原理。具体操作步骤由同学们自己拟定,并将数据记入表 1-5 中。

表 1-5 叠加原理测量值

E_1 单独作用		E_2 单独作用		E_1 和 E_2 共同作用	
I'_1 (mA)		I''_1 (mA)		I_1 (mA)	
I'_2 (mA)		I''_2 (mA)		I_2 (mA)	
I'_3 (mA)		I''_3 (mA)		I_3 (mA)	

(2) 戴维南定理和诺顿定理的实验验证。

1) 按图 1-7 接线,把电压 E_1 和 E_2 调到 10V,将负载电阻 R_N 接入 A、B 端,变化 R_N 的值,并测量 R_N 为不同值时流过 R_N 的电流和 R_N 两端的电压,并将数据记入表 1-6 中。

2) 将 R_N 拆出,测量该网络的开路电压 U_∞ 。

3) 将 AB 端短路,并测量短路电流 I_{sc} ,然后计算等效内阻 R_0 。

4) 调节直流稳压电源的输出电压为等效电源电压 U_∞ ,与等效内阻 R_0 相串联后与负载电阻 R_N 相连接。改变 R_N 的阻值,同步骤 1) 中的阻值对应,测量流过 R_N 的电流或 R_N 两端的电压,并将数据记入表 1-7 中,电路自行设计。

5) 将 3) 中测得的 I_{sc} 用一可调恒流源代替,与等效内阻 R_0 并联后,构成等效电流源。再与可调负载电阻 R_N 并联,改变 R_N 的值,与 1) 中的阻值一一对应,测出对应的电流和电压,数据填入表中,表格自拟,实验电路自行设计。

表 1-6 戴维南定理端口测量值

R_N (Ω)								
I (mA)								
U_{AB} (V)								

表 1-7 戴维南定理等效测量值

R_N (Ω)								
I (mA)								
U_{AB} (V)								

指导教师签名: _____

四、注意事项

(1) 做叠加原理实验时,应标明各电压、电流的参考方向,并注意电压表和电流表的极性,测量数据要冠以正负号。

(2) 实验完毕或改接线路时,一定要先关掉稳压电源的电源开关,以免拆线时造成电源短路。

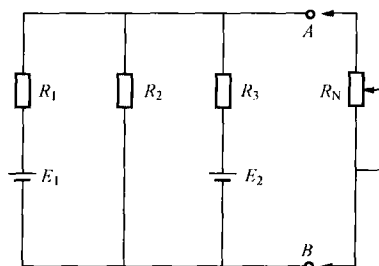


图 1-7 戴维南实验电路

五、实验报告要求

- (1) 根据表 1-5 验证叠加原理, 如有误差, 试分析原因。
- (2) 将表 1-6 和表 1-7 的数据进行比较, 验证戴维南定理。
- (3) 回答思考题, 记录所使用的仪器和设备。

六、思考题和设计任务

- (1) 用表 1-5 的任一组数据, 可否验证基尔霍夫定律?
- (2) 测定等效电源内阻时, 有些大电源不能采用实验中所用的方法, 还有其它方法吗? 试说明。
- (3) 参考图 1-5, 设计一个用以验证互易定理的电路图, 并简拟实验步骤。

实验三 测量仪器和信号发生器

一、实验目的

- (1) 通过本实验, 要求能够大致了解示波器的原理, 熟悉示波器面板上开关和旋钮的作用, 初步学会示波器的一般使用方法。
- (2) 学习信号发生器的使用方法。

二、原理与说明

(1) 示波器是一种综合性的电信号特性测试仪。用它可以直接显示出电信号的波形, 测量其幅值、频率以及同频率两信号的相位差等。电路实验中, 这种基本电子测量仪器会多次用到。

(2) 信号发生器是产生各种波形的信号电源。常用的有正弦信号发生器、方波信号发生器、脉冲信号发生器等。信号电源的频率(周期)和输出幅值一般可以通过开关和旋钮加以调节。它也是电路实验中常用的一种基本仪器。

(3) 示波器的结构较为复杂, 面板上的开关和旋钮较多, 而信号发生器又是初次接触, 因此, 为使本实验能顺利进行, 要在课前预习示波器和信号发生器简介的基础上, 仔细听取教师针对具体仪器进行的讲解和演示, 然后再动手操作, 并调试出图 1-8 所示的图形。

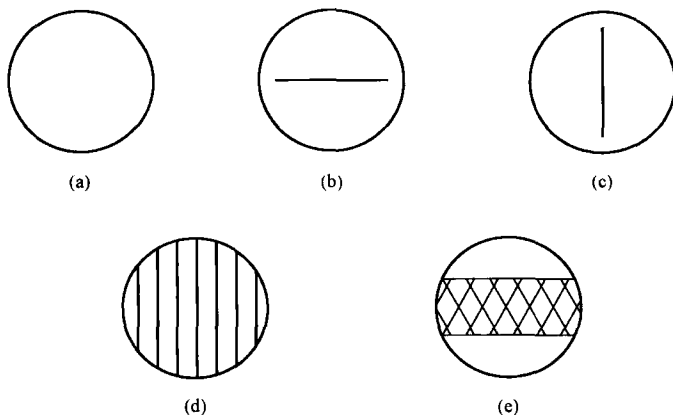


图 1-8 示波器观测图

- (a) 无任何图形; (b) 水平一条线; (c) 垂直一条线;
(d) 只有暗淡的垂直竖线; (e) 图形不稳定

(4) 示波器是现代测量中一种最常用的仪器,它能够直观地观察被测信号的真实波形,直接测量信号幅度、周期和时间,并能同时显示几个信号进行比较测量。示波器测量技术是一种最灵活的、多用途的测量技术。图 1-9 为示波器显示的一个完整的正弦波。

三、任务与方法

(1) 熟悉示波器和信号发生器的各主要开关和旋钮的作用。

1) 将示波器置于扫描(连续)工作方式,接通电源并经预热以后,在示波器的荧光屏上调出一条水平扫描亮线来。分别旋转[聚焦]、[辅助聚焦]、[亮度]、[标尺亮度]、[垂直位移]、[水平位移]等旋钮,体会这些旋钮的作用和对水平扫描线的影响。

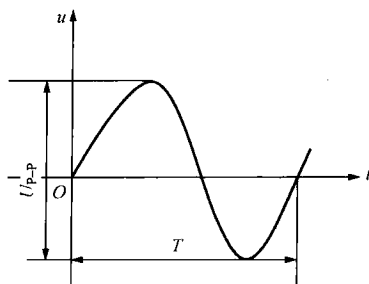


图 1-9 示波器测量图

2) 把信号发生器输出调到零值位置并接至示波器的输入端,然后合上信号发生器的电源开关,预热后再给定一输出电压,在示波器的荧光屏上,调出被测信号的波形来。分别旋动(或转换)示波器的水平扫描系统(X通道)和垂直系统(Y通道)的各旋钮(或开关),体会这些旋钮(或开关)的作用以及对输入信号波形的形状和稳定性的影响。

分别改变信号的幅值和频率,重复调节并加以体会。

(2) 用示波器测量给定信号电源的幅值和频率,把测出的频率与信号发生器的标称频率相比较,记下测量步骤和方法。

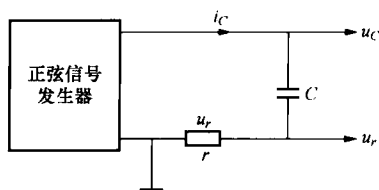


图 1-10 外侧波形接线图

(3) 按图 1-10 接线。由正弦信号发生器输出一给定电压,用示波器观察电容器的端电压 u_C 和流过电容器的电流 i_C 的波形,图中 r 为电流取样电阻, u_r 的波形即表示 i_C 的波形。然后用示波器测量 u_C 和 i_C 的相位差。

(4) 用示波器测量信号发生器的输出波形。

1) 测量正弦信号波形最高和最低两点之间(峰-峰)在 Y 轴方向占有的方格个数 H (可为小数,例如 2.5 格)。

2) 测量一个完整的正弦波形在 X 轴方向占有的方格个数 D (可为小数),将数据记入表 1-8 中。

3) 将信号波形改为方波或三角波,重复以上步骤,并分别将数据记入表 1-8 中“方波”或“三角波”一栏。

4) 分别按下列计算公式计算信号的有效值 U ,并记入表 1-8。

正弦波:
$$U = \frac{U_{P-P}}{2\sqrt{2}}$$

方波:
$$U = \frac{1}{2}U_{P-P}$$

三角波:
$$U = \frac{1.15}{4}U_{P-P}$$

表 1-8

典型信号的测量

信号发生器		示波器			
波形	频率 (kHz)	T	f	U_{p-p}	U
正弦波	1.5				
方波	1.5				
三角波	1.5				

指导教师签名: _____

四、注意事项

(1) 在大致了解示波器、信号发生器的使用方法以及各旋钮和开关的作用之后,再动手操作。使用这些仪器时,转动各旋钮和开关不要用力过猛。

(2) 用示波器观察信号发生器的波形时,两台仪器的公共地线要接在一起,以免引起干扰信号。

五、实验报告要求

(1) 记录用示波器测得的各个波形,标明被测信号的幅值和频率等。

(2) 总结用示波器测量信号电压的幅值、频率和两个同频率信号相位差的步骤和方法。

(3) 回答思考题。

六、思考题

用一台工作正常的示波器测量正弦信号时,观察到如图 1-8 所示的现象,试指出应该首先转动哪些旋钮,才有可能得到清晰和稳定的波形。

七、列出所用仪器设备

实验四 一阶电路的响应

一、实验目的

(1) 学习用示波器观察和分析电路的响应。

(2) 研究 RC 电路在零输入、阶跃激励和方波激励情况下,响应的基本规律和特点。

二、原理与说明

(1) 含有 L、C 储能元件的电路,其响应可以由微分方程求解。凡是可用一阶微分方程描述的电路,称为一阶电路,一阶电路通常由一个储能元件和若干个电阻元件组成。

(2) 所有储能元件初始值为零的电路对激励的响应称为零状态响应。对于图 1-11 所示的一阶电路,当 $t=0$ 时开关 S 由位置 2 掷向位置 1,直流电流经 R 向 C 充电,电路方程为

$$u_C + RC \frac{du_C}{dt} = U_S$$

$$u_C(0_-) = 0$$

可以得出电容的电压和电流随时间变化的规律

$$u_C(t) = U_S(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad t \geq 0$$

$$i_C(t) = \frac{U_S}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0$$

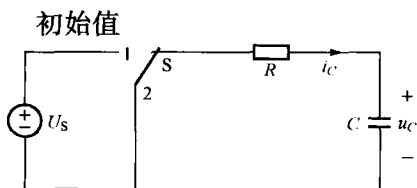


图 1-11 零状态零输入响应产生

上式表明,零状态响应是输入的线性函数,其中, $\tau =$

RC 为时间常数,它是反应电路过渡过程进行得快慢的物理量。 τ 越大,暂态响应所持续的时间越长,过渡过程的时间越长;反之, τ 越小,过渡过程的时间越短。

(3) 电路在无激励情况下,由储能元件的初始状态引起的响应称为零输入响应。在图 1-11 中,当开关 S 置于 1, $u_C = U_0$, $t = 0$ 时,再将开关 S 转换到位置 2,电容器的初始电压 $u_C(0_-)$ 经 R 放电。由方程 $u_C + RC \frac{du_C}{dt} = 0$, $t \geq 0$ 及初始值 $u_C(0_-) = U_0$, 可以得出电容器上的电压和电流随时间变化的规律

$$\begin{aligned} u_C(t) &= u_C(0_+)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0 \\ i_C(t) &= -\frac{u_C(0_+)}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0 \end{aligned}$$

式中, $u_C(0_+) = u_C(0_-) = U_0$ 。上式表明,零输入响应是初始状态的线性函数。

(4) 对于 RC 电路的方波响应,在电路的时间常数远小于方波周期时,可以视为零状态响应和零输入响应的多次过程。方波的前沿相当于给电路一个阶跃输入,其响应就是零状态响应,方波的后沿相当于在电容具有初始值 $u_C(0_-)$ 时把电源用短路置换,电路响应转换成零输入响应。

为了清楚地观察到响应的全过程,可使方波的半周期和时间常数 RC 保持 5:1 左右的关系。由于方波是周期信号,可以用普通示波器显示出稳定的图形,以便于定量分析。

(5) RC 电路充放电的时间常数 τ 可以从响应波形中估算出来。设时间坐标单位 t 确定,对于充电曲线来说,幅值上升到终值的 63.2% 所对应的时间即为一个 τ [如图 1-12 (a) 所示]。对于放电曲线幅值下降到初值的 36.8% 所对应的时间即为一个 τ [如图 1-12 (b) 所示]。

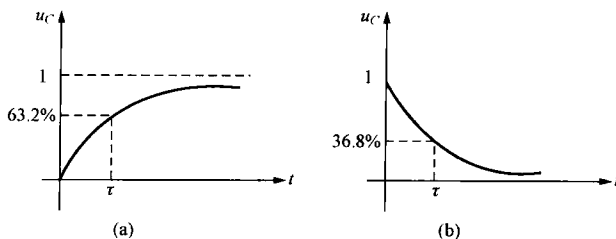


图 1-12 时间常数测量

(a) 上升沿时间常数测量; (b) 下降沿时间常数测量

(6) 微分电路:当选择 R 和 C 的值使电容 C 上的电压 u_C 远大于电阻 R 上的电压 u_R 时

$$\begin{aligned} u_C &\approx u_S \\ i &= C \frac{du_C}{dt} \approx C \frac{du_S}{dt} \\ u_R &= Ri \approx RC \frac{du_C}{dt} \end{aligned}$$

即电阻 R 上的电压与输入电压近似微分关系。以正弦输入为例,则有 $1/\omega C \gg R$ 。

(7) 积分电路。当选择 R 和 C 的值使电容 C 上的电压 u_C 远小于电阻 R 上的电压 u_R 时,即 $u_C \ll Ri$, 也就是时间常数 $\tau = RC$ 很大,则可得 $Ri \approx u_S$, $i = u_S/R$ 。由

$$i = C \frac{du_C}{dt}$$

得

$$u_C = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C dt = \frac{1}{CR} \int_{-\infty}^t u_S dt$$

即 u_C 与输入电压成积分关系。

三、任务与方法

(1) 研究 RC 电路零输入响应与零状态响应。实验电路如图 1-13 所示, U_S 为直流电压

源的电压, r 为电流取样电阻。开关首先置于位置 2, 当电容器电压为零以后, 开关由位置 2 转到位置 1, 即可用示波器观察到零状态响应的波形; 电路达到稳态以后, 开关再由位置 1 转换到位置 2, 即可观察到零输入响应的波形。分别改变电阻 R , 电容 C 和电压 U_s 的数值, 观察并描绘出零输入响应和零状态响应时的 $u_C(t)$ 和 $i_C(t)$ 波形。

(2) 研究 RC 电路的方波响应。实验线路原理图如图 1-14 所示, $u_s(t)$ 为方波信号发生器产生的周期为 T 的信号电压。适当选取方波电源的周期和 R 、 C 的数值, 观察并描绘出 $u_C(t)$ 和 $i_C(t)$ 的波形, 改变 R 或 C 的数值, 使 $RC = \frac{T}{10}$, $RC \ll \frac{T}{10}$, $RC = \frac{T}{2}$, $RC \gg \frac{T}{2}$, 观察 $u_C(t)$ 和 $i_C(t)$ 如何变化, 并作记录。

(3) 按图 1-12 所示的方法, 试估算时间常数 τ 。

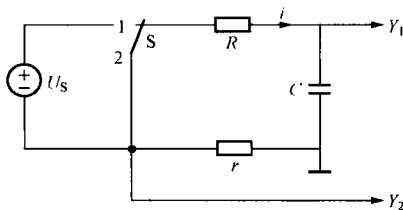


图 1-13 零输入零状态测量

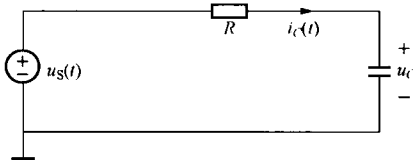


图 1-14 方波信号响应

四、注意事项

(1) 用示波器观察响应的一次过程时 (如图 1-13 所示), 扫描时间要选取适当, 当扫描亮点开始在荧光屏左端出现时, 立即合上开关 S 。

(2) 在观察 $u_C(t)$ 和 $i_C(t)$ 波形时, 由于其幅度值相差较大, 因此要注意调节 Y 轴的灵敏度。

(3) 由于示波器和方波信号发生器的公共地线必须接在一起, 因此在实验中, 方波响应、零输入和零状态响应的电流取样电阻 r 的接地端不同, 在观察和描绘电流响应波形时, 注意分析波形的实际方向。

五、实验报告要求

(1) 把观察描绘出的各响应的波形分别画在坐标纸上, 并注明各坐标轴的量值和单位。

(2) 从方波响应 $u_C(t)$ 的波形中估算出时间常数 τ , 并与计算值比较。

(3) 列出所用仪器设备。

六、思考题

(1) 当电容器具有初始电压时, RC 电路在阶跃激励下是否会出现没有暂态的现象? 为什么?

(2) 如何用实验方法证明全响应是零状态响应分量和零输入响应分量之和?

实验五 二阶电路的响应与状态轨迹

一、实验目的

(1) 研究 L 、 R 、 C 串联电路对应的二阶微分方程的解的类型特点及其与元件参数的关系。

(2) 观察分析各种类型的状态轨迹。

二、原理与说明

(1) R 、 L 、 C 串联电路，无论是零输入响应，还是零状态响应，电路过渡过程的性质完全由特征方程

$$LCp^2 + RCp + 1 = 0$$

的特征根

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right)^2} \\ &= -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \end{aligned}$$

来决定。

$$\text{式中} \quad \delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

1) 如果 $R > 2\sqrt{L/C}$ ，则 $p_{1,2}$ 为两个不相等的负实根，电路过渡过程的性质为过阻尼的非振荡过程。

2) 如果 $R = 2\sqrt{L/C}$ ，则 $p_{1,2}$ 为两个相等的负实根，电路过渡过程的性质为临界阻尼过程。

3) 如果 $R < 2\sqrt{L/C}$ ，则 $p_{1,2}$ 为一对共轭复根，电路过渡过程的性质为欠阻尼的振荡过程。改变电路参数 R 、 L 或 C ，均可使电路发生上述 3 种不同性质的过程。

在电路发生振荡过程时，其振荡的性质取决于电路的衰减系数 $\delta = \frac{R}{2L}$ ，在一般情况下， δ 是正实数，这种振荡为衰减振荡；如果电路中的电阻为零，这种振荡为等幅振荡；如果有可能使电路中的总电阻为负值，则这种振荡就变成了增幅振荡。

(2) 对于欠阻尼情况，衰减振荡角频率 ω_d 和衰减系数 δ 可以从响应波形中测量出来，例如在响应 $i(t)$ 的波形中（如图 1-15 所示） ω_d 可以利用示波器直接测出， $\omega_d = \sqrt{\omega^2 - \delta^2} = \frac{2\pi}{t_2 - t_1}$ ，对于 δ ，由于有

$$\begin{aligned} i_{1m} &= Ae^{-\delta t_1}, \quad i_{2m} = Ae^{-\delta t_2} \\ \frac{i_{1m}}{i_{2m}} &= e^{-\delta(t_1 - t_2)} = e^{\delta(t_2 - t_1)} \end{aligned}$$

显然， $(t_2 - t_1)$ 即为周期 $T_d = \frac{2\pi}{\omega_d}$ ，所以

$$\delta = \frac{1}{T_d} \ln \frac{i_{1m}}{i_{2m}}$$

由此可见，用示波器测出周期 T_d 和幅值 i_{1m} 、 i_{2m} 后，就可以算出 δ 的值。

(3) 对于图 1-16 所示的电路 ($r=0$)，也可以用两个一阶方程的联立即由状态方程来求解

$$\begin{aligned} du_C/dt &= i_L/C \\ di_L/dt &= (u_S - u_C - Ri_L)/L \end{aligned}$$