

国家级电工电子实验教学示范中心实验教材系列

电路分析实验

主编 吕伟锋 董晓聪

主审 王光义



科学出版社

www.sciencep.com

国家级电工电子实验教学示范中心实验教材系列

电路分析实验

主编 吕伟锋 董晓聪

主审 王光义

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是与“电路分析”或“电路原理”等课程相配套的实践环节与实验设计教程,全书包括5章和2个附录,内容涵盖电路实验测试基本知识、直流电阻电路与基本测量、动态电路、正弦稳态电路、综合性实验、常用电子仪器设备,以及Multisim 8仿真软件介绍。本书内容全面,软、硬件相结合,每个实验从原理和实际应用出发,侧重实验思路和实验设计方法,采用自主式、多层式的实验设计理念,可适应不同层次学生的需要,以此培养学生的电路应用意识、实践设计能力和严谨的科学作风。

本书可作为高等院校电类专业本、专科生的电路实验设计教材,也可作为相关教学研究人员和工程技术人员的电路实验参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析实验/吕伟锋,董晓聪主编. —北京:科学出版社,2010.5

(国家级电工电子实验教学示范中心实验教材系列)

ISBN 978-7-03-027337-6

I. ①电… II. ①吕… ②董… III. ①电路分析-实验-高等学校-教材
IV. ①TM133-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 074796 号

责任编辑:贾瑞娜 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年5月第一次印刷 印张:10 1/2

印数:1—4 000 字数:210 000

定价:19.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电路实验是高等院校电子信息类本、专科生必不可少的实践环节。其目的不仅仅是巩固和加深相关理论知识,还包括通过实验操作和实践技能的训练,锻炼学生严谨的科学作风,并通过理论联系实际,分析、设计和解决具体问题,逐步达到实践应用能力和创新能力培养的目标。本书即是针对此目的而编写的。

全书包括 5 章和 2 个附录。首先介绍电路实验的基础知识;然后介绍实验内容,分为三大模块,即直流电阻电路与基本测量、动态电路及其响应和正弦稳态交流电路,共包含 13 个基础实验项目,内容几乎涵盖了电路理论课程所有的重要知识点;为了加深电路应用能力和综合应用所学电路知识的能力,本书增加了综合性实验部分;附录是常用电子测量仪器和 Multisim 8 仿真软件的介绍。

本书内容全面,实验设计软、硬件相结合,实验项目从原理和实际应用出发,侧重实验思路和实验设计方法,采用自主式、多层式的实验设计理念,可适应不同层次学生的需要。

本书由吕伟锋、董晓聪老师主编,王光义教授主审。吕伟锋负责统稿和拟定大纲,并编写第 1~3 章和附录 A;董晓聪编写第 4、5 章和附录 B;王光义教授是在电路领域有很深造诣和丰富教学实践经验的专家和学者,对本书进行了细致深入的审稿工作。实验室的部分同学参与了本书的绘图工作。需要说明的是,本书的出版是杭州电子科技大学电路分析课程组全体理论课老师二十多年丰富教学经验的积淀,同时更体现了实验课老师们在教学方面长期不断的积极探索、积累和提高,是集体智慧的结晶。

本书的出版得到了科学出版社编辑的帮助与支持,书中有些内容和思想参考了国内外众多的相关资料和文献,在此表示诚挚的谢意。同时,作者衷心感谢浙江省教育厅、杭州电子科技大学等对本课程和教材建设的大力支持,感谢各级领导与部门多年来的关心、支持与帮助,感谢课程组全体老师的辛勤劳动,感谢电工电子实验中心领导和老师的鼓励与帮助。

由于编者水平有限,加之编写时间有限,书中难免有疏漏和错误之处,恳请广大师生、工程技术人员批评指正。

编 者

2009 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 实验测试基本知识	1
1.1 实验的基本要求和指导	1
1.2 测量的基本概念及方法	4
1.3 测量数据与误差的处理.....	12
第 2 章 直流电阻电路与基本测量	17
2.1 常用实验设备及仪表使用.....	17
2.2 元件伏安特性及电源外特性的测试.....	23
2.3 叠加原理及基尔霍夫定律.....	28
2.4 戴维南定理与诺顿定理.....	31
2.5 受控源电路的设计与研究.....	36
第 3 章 动态电路及其响应	44
3.1 一阶动态电路及其响应.....	44
3.2 二阶动态电路及其响应.....	49
第 4 章 正弦稳态交流电路	53
4.1 交流电路元件参数的测量方法.....	53
4.2 正弦稳态网络函数频率特性的测量方法.....	60
4.3 交流电路元件阻抗特性的观测及电路参数的测量.....	63
4.4 正弦稳态电路相量的研究.....	67
4.5 三相交流电路的研究.....	73
4.6 RC 选频网络的研究	79
4.7 互感电路观测.....	83
第 5 章 综合性实验	90
5.1 综合性实验概述.....	90
5.2 最大功率传递定律的研究.....	93
5.3 正弦交流电路功率因数的提高.....	94
5.4 RLC 串联谐振电路的研究	95
5.5 负阻抗变换器的仿真与设计.....	97
5.6 回转器的仿真与设计	101

附录 A 常用电子测量仪器介绍	105
A1 电工电路实验台	105
A2 CS-4125A 双踪示波器	109
A3 DS1022C 数字双踪示波器	116
A4 SP1631A 型函数信号发生器	121
A5 UT803 型数字台式万用表	124
A6 CDM-8045A 型数字万用表	127
A7 AS2173 系列交流毫伏表	129
附录 B 电路仿真软件 Multisim 8 简介	133
B1 Multisim 8 的工作界面	133
B2 Multisim 8 的基本操作	153
参考文献	162

第 1 章 实验测试基本知识

本章讲述电路分析实验中所涉及的基本概念、基本知识和基本测试方法,包括该课程实验的设置意义和目的、实验的要求和规范、实验报告的书写;然后向读者介绍电子测量的基础知识,如测量误差的概念和基本的测量方法;最后是测试数据及实验误差的处理。虽然本章内容不涉及具体的实验项目,但其内容不仅贯穿本门实验课程,而且还贯穿所有的电工电子实验环节,对实验起到理论指导作用,是必须掌握的重要内容。

1.1 实验的基本要求和指导

1.1.1 电路分析实验的意义和任务

“电路分析”是电子、电气信息工程专业学生接触到的第一门专业基础课程,“电路分析实验”则是与之相配套的实践环节。这门实验课既是理论课的补充,又是整个电工电子实验的先导,对培养学生的实际动手操作能力和良好的科学研究作风形成有其特殊性和重要意义,因此把它作为一门独立开设的实验课程。

“电路分析实验”的任务不仅是巩固和加深相关理论知识,更重要的是通过实验操作和实践技能的训练,锻炼学生严谨的科学态度和认真务实的工作作风。并通过理论联系实际,分析、设计和解决具体问题的训练,逐步实现实践应用能力和创新能力培养的根本目标。

1.1.2 实验的基本要求

1. 实验预习和实验报告

实验预习是整个实验特别是综合创新型实验不可或缺的环节,要求学生在实验开始前对相关的实验内容有基本的认识,做到心中有数,从而提高实验的收获和效率。

实验报告是反映实验情况的文档,也是备查的依据,可以较为详细地记录实验中的现象,加深对实验的理解和收获,也锻炼了学生归纳、整理材料的能力。

实验预习大致包括如下内容:

- (1) 研读实验指导书,理解该实验所依据的基本原理和实验思想。
- (2) 明确实验目的,了解实验方法与步骤、要求观察的现象、记录的数据、

注意的问题。

(3) 根据测量时的具体要求,理解所用的仪器设备及型号,会自主选取合理的量程。

(4) 使用实验仪器设备之前,必须阅读有关的仪器设备使用说明,大致掌握其使用方法。

(5) 设计性实验要给出所设计电路的结构和参数,并拟定需测试的波形和记录的数据。

(6) 研究性和综合性实验,要预先查找相关资料,设计实验方案、电路结构和参数。

(7) 写出比较完整和规范的预习报告内容。

一份完整的实验报告的主要内容一般包括:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的(或意义)。

(3) 实验原理(或实验思想)。

(4) 仪器设备和型号。

(5) 方案设计和必要的分析计算。

(6) 预习思考题的回答。

(7) 实验内容、步骤与电路图。

(8) 原始数据测试、记录表格。

(9) 实验操作注意事项。

(10) 实验的数据处理,包括误差计算、分析和图形绘制等。

(11) 实验结果分析、结论和总结体会等。

上述内容的(1)~(9)项可作为学生预习报告的内容,须在实验开始前完成;而(10)和(11)项可在实验操作完成后,回去自己仔细总结,这部分的内容是十分重要的,直接关系到整个实验的质量和收获,一定要认真书写。

实验报告一般用16开大小的纸张,每次实验报告均应有封面并应装订好,下一次实验时交给指导教师批改。

实验报告封面的内容一般包括:实验课程名称,实验项目名称,实验者姓名、班级、学号、实验指导教师、实验日期等内容。要说明的是最后两项不关乎学生信息的内容也是十分重要的,因为有可能做相同实验的学生很多,指导教师也很多,只有把这两项写清楚,此实验报告才能迅速确定指导教师和相应的实验批次。

2. 实验操作规范

实验操作规范是指学生在具体的实验操作过程中应该遵守的操作规则和规程,其目的一方面是为了提高实验操作效率,培养良好的操作习惯,避免因操作

不当造成的损坏和失误,更重要的是可以提高实验的安全性,避免对师生身体造成损害,因为电路实验中往往会接触非安全用电。这就要求:

- (1) 规范放置仪器仪表。
- (2) 合理选取仪表的量程。
- (3) 正确连接电路,排除故障。
- (4) 检查无误后接通电源。
- (5) 测试和读取实验数据。
- (6) 记录实验数据、波形及现象等。
- (7) 经教师检查验收后方可拆除线路。
- (8) 离开实验室前,整理好所有实验器材。

3. 安全操作注意事项

由于本实验室会接触强电实验,为了学生的安全,操作时还须特别注意以下问题:

- (1) 确认线路连接无误后,才可接通电源。
- (2) 注意各种仪器仪表的正确使用。
- (3) 电路在接通电源后,避免用手触及带强电部分。
- (4) 改接或拆除电路之前,须将电源断开。
- (5) 若出现异常现象或事故,应立即切断电源,并及时向指导教师报告。

1.1.3 电路实验室规则

实验时必须保证人身、设备安全,爱护国家财产,培养科学作风。为使实验顺利进行,实验者应严格遵守下列规则:

- (1) 没有充分预习,不得进行实验。在实验课上,教师要对预习情况进行检查提问,检查不通过暂不得参加本次实验。
- (2) 实验前教师应对学生进行安全教育。
- (3) 接通电源前必须请指导教师检查线路。
- (4) 严禁带电拆、接线。
- (5) 实验所需要的仪器、仪表和设备分组专用,必须爱护使用,不准随便搬动调换。
- (6) 实验中损坏了仪器仪表设备必须立即报告指导教师,并作出书面检查。责任事故要酌情赔偿。
- (7) 上实验课,未经请假不得无故迟到、缺席。实验时要严肃认真,保持安静、整洁的实验环境。实验完毕后必须将仪器设备整理好,放回原处,实验结果经教师认可后,方可离开实验室。

1.2 测量的基本概念及方法

1.2.1 测量与误差的基本概念

1. 测量的概念

所谓“测量”，是指利用专用设备把被测物理量同标准量进行比较，得出被测量值是标准量的倍数，从而确定被测量大小的实验操作过程。测量是定量的基础，也是实验的重要环节和过程，进行各种测量所需的全部仪器、设备统称为测量仪器。电路分析实验中的测量仪器一般称作电子测量仪器，即其测量的是有关电的量值。

电路分析实验中的被测物理量大致分为两类：

一类是表征电信号特征的量，如电流、电压、频率、周期等。它们可直接送入测量设备与同类标准量进行比较，或者在测量设备中经某种变换（幅度变换、频率变换、波形变换等）后，再与标准量比较，最后由显示部件指示出测量结果。其测量过程如图 1.2.1 所示。

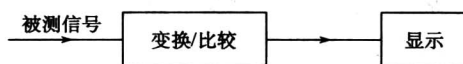


图 1.2.1 信号特性的一般测量过程

另一类是表征各种元器件及电路系统电磁特性的量，如电阻、电感、电容、阻抗、传输特性等，它们只在一定的信号作用下才显示出其固有的特性。例如，只有在电压或电流激励下，电阻器才表现出它电阻的作用和性质。这类物理量的一般测量过程如图 1.2.2 所示。

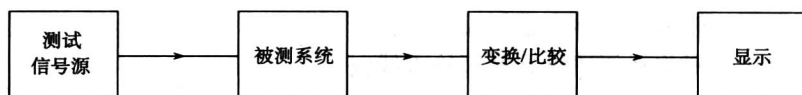


图 1.2.2 系统特性的一般测量过程

从上述测量过程可见，电子测量仪器应该包括电信号特性测试仪（如电压表、电流表、频率计等），测试信号源（如低频信号发生器、脉冲信号发生器、高频信号发生器、功率函数信号发生器、直流稳压电源等），以及由测试信号源与电信号特性测试仪组成的组合式仪器（如扫频仪、示波器等）。

无论使用何种仪器去测量哪种物理量，测量结果总是根据仪器示值或再计算

确定。所谓仪器示值,就是由仪器装置给出的被测量的数值。如果进行单次测量,通常取仪器示值为测量结果。如果相同的测量进行多次,则测量结果就取各次测量所得仪器示值的算术平均值。

通常情况下,仪器示值或测量结果与被测量的真实值之间总会存在一些差异,称为误差。这是由客观条件(如实验原理的缺陷,仪器设备不够精密等)所决定的。通常把测量仪器的示值与被测量真实值之间的误差叫做仪器误差,把测量结果与被测量真实值之间的误差叫做测量误差。当测量结果等于仪器示值时,测量误差就是仪器误差。

2. 测量误差大小的表达

一个被测对象本身有一个真实大小,这个大小在一定的客观条件下是一个确定的数值,称为真值,记为 x_0 。测量误差大小通常分为绝对误差和相对误差两种表示方式。

定义 绝对误差(绝对真误差)表示为 $\Delta x = x - x_0$,其中 x 为被测量的给出值。由于真值是无法测得的,通常将更高一级的标准仪器所测得的值 x_0 称为“实际值或约定真值”,用它来替代真值。

绝对误差不能确切地反映测量的准确程度,例如测量两个电阻 $R_1 = 100\text{ k}\Omega$, $R_2 = 100\Omega$,其绝对误差分别为 $\Delta R_1 = 1\text{ k}\Omega$, $\Delta R_2 = 10\Omega$,不能认为后者的测量比前者更好,更准确,因此又引入相对误差。

定义 相对误差(相对真误差)是绝对误差与真值的比值,可用 γ 表示。

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

因此,上例中 $\gamma_1 = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\%$, $\gamma_2 = \frac{10}{100} \times 100\% = 10\%$, $\gamma_1 < \gamma_2$ 。计算结果说明,虽然 ΔR_1 比 ΔR_2 大,但是对 R_1 测量的相对误差比对 R_2 测量的相对误差要小,即对 R_1 的测量准确度高,这与事实是相符合的。因此常用相对误差来表示测量准确程度。

电子学中有时会用到分贝误差,即相对误差的另一种形式,如电压增益为 A_0 ,则可用分贝表示为 $A_0[\text{dB}] = 20\lg A_0\text{dB}$,当测量中存在误差,设测得的增益用分贝表示为 $A[\text{dB}]$,则其分贝误差为

$$\gamma[\text{dB}] = A[\text{dB}] - A_0[\text{dB}]$$

为了在连续刻度的仪表中,方便地表示整个量程内仪表的准确程度,将相对误差中的真值 x_0 改为电表量程(满刻度值),所得误差称为引用误差,也叫满度相对误差,即

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

式中, x_m 表示仪表量程。常用电工仪表分为 ± 0.1 、 ± 0.2 、 ± 0.5 、 ± 1.0 、 ± 1.5 、 ± 2.5 、 ± 5.0 共七级, 分别表示它们的引用相对误差不超过的百分比, 如一块电工仪表的等级为 ± 1.5 级, 则用该仪表测量时, 引用误差不会超过 $\pm 1.5\%$, 否则表示其不合格。

3. 误差的分类和来源

根据测量误差的来源并综合考虑误差的性质及特点, 常将其分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

1) 系统误差

指相同条件下多次测量其绝对值和符号保持恒定, 或在条件改变时按某种确定规律变化的误差。前者称为恒值系统误差, 后者称为变值系统误差。系统误差的来源主要有:

(1) 测量仪器本身不准确, 包括基本误差 (是仪器本身固有的) 和附加误差 (由工作条件如温度、湿度、外界电磁场的变化所引起)。

(2) 测量方法不够完善。

(3) 操作人员的习惯和偏向以及人们感觉器官不完善而造成的误差。

(4) 测量环境变化引起的误差。

系统误差的大小反映了测量结果偏离真值的程度, 可以用系统误差来表示测量的正确度, 即系统误差越小, 测量结果越正确。由于系统误差是具有一定规律性, 故可以通过实验和研究来发现它的规律, 从而设法通过技术手段加以消除或减小。

2) 随机误差

指在相同条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化。其特点是进行多次重复测量时, 其值具有有界性、对称性和抵偿性。同时随机误差在足够多次测量的总体上服从统计规律, 根据数理统计的有关原理和大量的实践证明, 很多测量结果的随机误差的分布形式接近于正态分布, 即测量值对称地分布在被测量的数学期望的两侧, 如图 1.2.3 所示。

随机误差的来源主要是由那些对测量结果影响较小, 又互不相关的因素造成的。如供电的起伏, 环境温度变化, 室外车辆通过造成的振动等, 它们是无法预测的。但是当测量次数为无穷多次时, 从总体上服从统计规律, 即随机误差的平均值趋于零。若真值为 x_0 , 各次测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 每次测量的绝对误差为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$, 则绝对误差的平均值为 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i$ 。当测量次数 n 趋于无穷时, 有 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$ 。因此, 对同一物理量进行多次重复

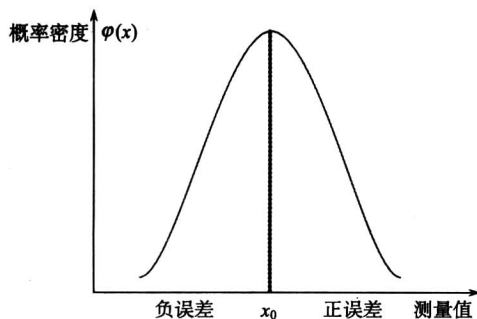


图 1.2.3 测量值的分布规律

测量并非多余,对多次测量所得数据进行适当处理,可减少偶然因素引起的误差对测量结果的影响。

3) 粗大误差

指超出在规定条件下预期的误差,它使测量结果明显地偏离真值。该误差主要是由于实验操作者在操作、读数和记录中发生差错所引起的,相应地包含这种误差的测量数据是没有意义的,在作数据处理时应该剔除不用。只要测试人员能仔细地操作,就能避免出现这类误差。

对误差还有其他多种分类,如根据仪器的工作条件,最常用到的两种仪器误差是:

(1) 固有误差,又叫基本误差,是在基准工作条件下测得的仪器误差。固有误差大致能反映仪器本身的准确程度,同时在基准条件下也便于对仪器的检验与检定。

(2) 工作误差,是指在仪器标准或产品说明书所给额定工作条件内任一点上的误差。仪器的工作误差常以工作误差极限的形式给出,在确定概率下,工作误差处于该误差极限之内。

1.2.2 基本测量方法

电路分析中的基本变量是电压、电流和功率等,它们也是表征电信号能量的三个物理量,其中最基本的测量任务是测电压。对电流和功率的测量除可使用电流表和功率表外,也可用间接测量方法,如通过测量电压后计算而得;或通过观测电阻器两端电压波形而得知其电流波形。

1. 电表法

1) 电压的测量

电压表应并联在被测电路的两端,如图 1.2.4(a) 所示。为了减少对被测电路

原工作状态的影响,电压表的内阻 R_V 要远大于被测负载的电阻 R_0 ,为了测量电路中的多处电压,一般电压表可用活动的测试棒进行测量,如图 1.2.4(b) 所示。

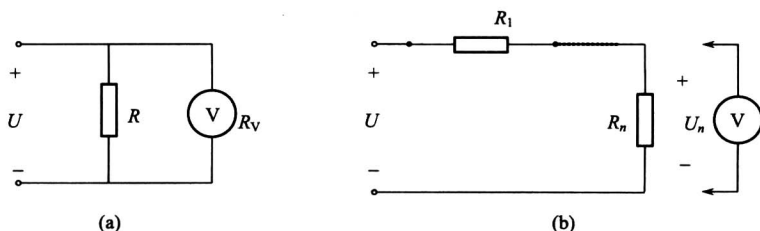


图 1.2.4 电压的测量

2) 电流的测量

测电流时,电流表应串联在被测电路中,如图 1.2.5 所示。为了尽量减少对被测电路原工作状态的影响,电流表的内阻一般做得很小,可忽略不计。为测量电路中多处的电流,可在需要的各支路中串接电流插孔,并在电流插孔两端跨接短路桥,当需测量该支路电流时,只需将电流表的测试棒插入该支路电流插孔两端,并将原插孔两端的短路桥拆去;当该支路电流测试完毕后,只需将短路桥插回原电流插孔两端,拆去电流表的测试棒即可。这样就可利用一只电流表很方便地进行多支路电流的测量,如图 1.2.5 (b) 所示。

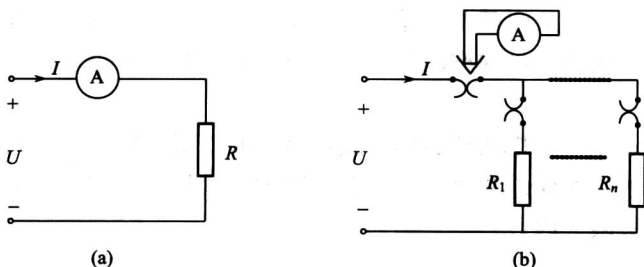


图 1.2.5 电流的测量

无论是测量电压还是电流,对于无自动量程转换的电表,量程的大小应在实验前进行估算,并根据估算值进行选择。量程的选择要恰当,量程选大了,读数偏小,引起的误差较大;量程选小了,仪器易过载而引起“打钉”,或使仪器损坏,无法读出数值。一般情况下,指针式仪表的指针偏转角度大于 $1/2$ 满偏值时测量较为准确,而数字式仪表测量值应尽可能靠近量程。对直流仪表,在使用时还应注意它的“+”、“-”极性,切不可将指针式仪表的测试表棒极性接反,否则指针反偏,易造成仪表指针或游丝损坏。

3) 功率的测量

对于指针式的功率表,首先要注意的是量程的选择。选择不同的电压和电流量限,功率表的读数要乘以不同的倍率 C , 即 $P=C \times$ 指示的刻度值, 倍率 C 代表了每格刻度的瓦数值。对于 D-26W 型功率表, 其倍率如表 1.2.1 所示。在数值上, 倍率 $C = \text{电压量限} \times \text{电流量限} / \text{满度格数}$ 。现在的数字式功率表, 在读数上则要简单直观得多。

表 1.2.1 D-26W 型功率表量程和倍率

倍率 C 电压量限/V 电流量限/A	75	150	300
0.5	0.25	0.5	1
1	0.5	1	2

其次, 要注意功率表的正确接法。功率表的电流线圈接法与电流表相同, 应与负载串联; 电压线圈接法与电压表相同, 应与负载并联。电流线圈标有 (*) 的端子, 必须与电压线圈标有 (*) 的端子接于电路中的同一点, 否则仪表指针将反偏。

功率表在电路中有两种连接方式: 为了减小测量误差, 当电路的负载为高阻抗负载时, 采用功率表电压线圈前接方式, 如图 1.2.6 (a) 所示, 此时仪表电压支路两端的电压等于负载电压加上仪表电流线圈的电压降; 当电路的负载为低阻抗负载时, 采用功率表电压线圈后接方式, 此时仪表电流线圈的电流等于负载电流加上电压线圈的电流, 如图 1.2.6 (b) 所示。

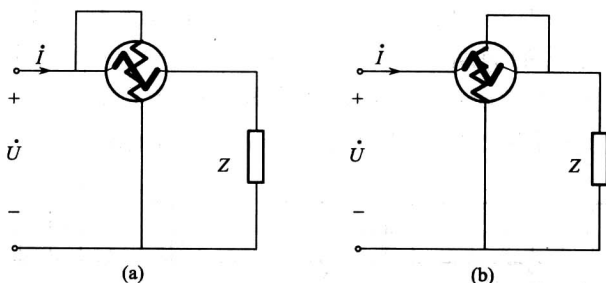


图 1.2.6 功率表的接法

2. 示波法

1) 信号电压幅值的测量

用示波器观察和测量信号电压的优点是: 能直接显示被测信号的波形, 因而

不仅仅限于直流信号和正弦信号，对其他各种电信号都能方便地测出瞬时值。一般示波器可将被测信号的直流成分隔离出来，单独测量交流部分；频率特性从DC开始的示波器可同时显示直、交流成分混合的波形。用示波器测量电压的缺点是精度较低，误差一般在5%~10%的范围。

示波器测量信号电压幅值采用比较法：在示波器荧光屏前都有一坐标刻度，其X轴表示时间；Y轴表示信号的幅度。由于示波器在正常显示区域内，Y方向的偏转距离与引起偏转的输入电压成正比，可先观察一已知幅度的直流或方波信号，如峰-峰值为5V的正弦波，若它恰好在荧光屏刻度上占有5格位置，那么Y轴刻度的每一格就表示1V，则此时示波器的偏转因数V/DIV旋钮的位置应打在“1V”挡，如图1.2.7所示。再对被测信号进行观察（应保持Y轴放大和衰减不变），即可由被测信号幅度所占刻度的格数得出。

现在用的数字存储示波器（如附录中的DS1022）还可以采用直接用光标测量功能，在测量幅度时，通常都是采用两条水平光标线，分别对准显示图形上任意两个被测点，显示屏上会给出这两点间电压幅度之差。光标法简单直观，且比一般由比较法得到的结果更准确。与自动参数测量法比较，其优点是可以直接测量任意两点间的电压，但自动参数测量法可以直接读得电压有效值、平均值和最大值等参数。通常，现在的数字存储示波器同时提供这两种测电压的方法，用户可自由选择。

2) 频率（或周期）的测量

将被测信号波形显示在示波器荧光屏上，根据X轴刻度读出被测信号波形的周期所占格数，即可计算出该信号的频 f 。例如，若X轴扫描因数T/DIV旋钮置于 $0.1\mu\text{s}$ （即X轴每格代表 $0.1\mu\text{s}$ ），如果此时观察到一波形的周期在X轴上占有6格，则信号的周期为 $T=0.1\mu\text{s}/\text{格}\times 6\text{格}=0.6\mu\text{s}$ ，则 $f=1/0.6\mu\text{s}\approx 1.667\text{MHz}$ ，如图1.2.7所示。同理，现代数字存储示波器具有光标测量功能，常用两条垂直的光标测量时间。两条光标分别置于待测时间段的两端，显示屏上

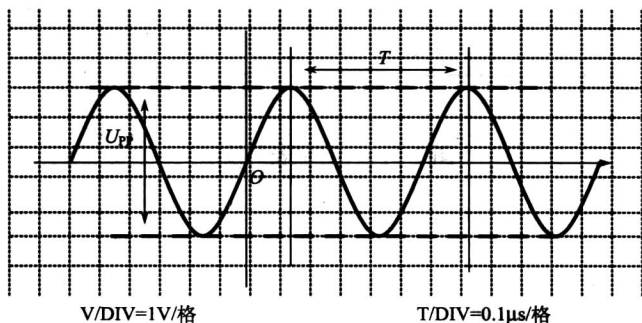


图 1.2.7 示波法测量信号幅度和频率

自动显示光标之间的时间间隔 ΔT 。光标法测时间简便、直观，若要得到波形参数，可以使用其自动测量功能。

3) 相位差的测量

相位差的测量通常有两种方法：线性扫描法和李沙育图形法。

线性扫描法是将同频率的信号电压 u_1 、 u_2 分别加到双踪示波器的 CH1、CH2 端，调节示波器相应通道的有关旋钮开关，并置垂直方式开关为“ALT”或“CHOP”状态，使荧光屏上显示出稳定清晰的波形，并使两波形的基线与荧光屏的坐标横轴重合，同时取其中一个通道的信号（通常取输入信号）为触发信号，如图 1.2.8 所示。然后读取波形一个周期时间所对应长度设为 T (cm)，再读取两个波形过相邻顶点（或零点）的间隔设为 t (cm)，则它们的相位差可表示为

$$\varphi = \frac{t}{T} \times 360^\circ$$

这种方法使用方便但测量精度不高，一般误差达 $\pm 5^\circ$ 左右。应用这种方法时，为了提高精度，在调整示波器时应使波形的半周期在荧光屏上所占的长度尽量长，以提高时基分辨率。

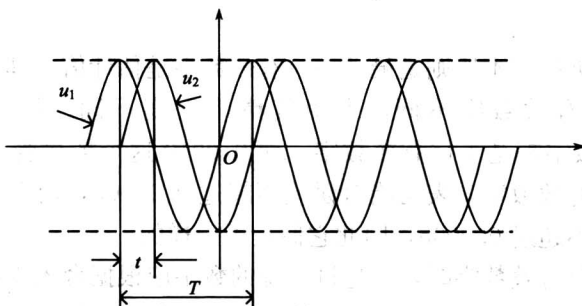


图 1.2.8 线性扫描法测相位差

李沙育图形法是把两个同频率不同相位的正弦波分别加在示波器的 X、Y 偏转板上（即打开示波器的 X-Y 开关），这时可以得到李沙育图形。设

$$\begin{cases} u_x = U_{xm} \sin(\omega t + \theta) \\ u_y = U_{ym} \sin \omega t \end{cases}$$

把它们分别加到示波器的偏转板，调节使椭圆的中心与显示屏坐标原点重合，即椭圆与坐标轴的上下和左右截距分别相等，得到如图 1.2.9 所示图形。当 $\omega t = 0$ 时， $u_{x0} = U_{xm} \sin \theta$ ，根据偏转距离正比于偏转

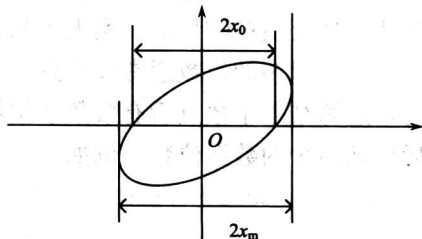


图 1.2.9 李沙育图像测相位差