

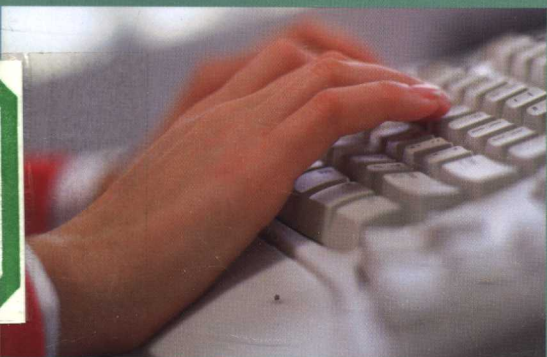
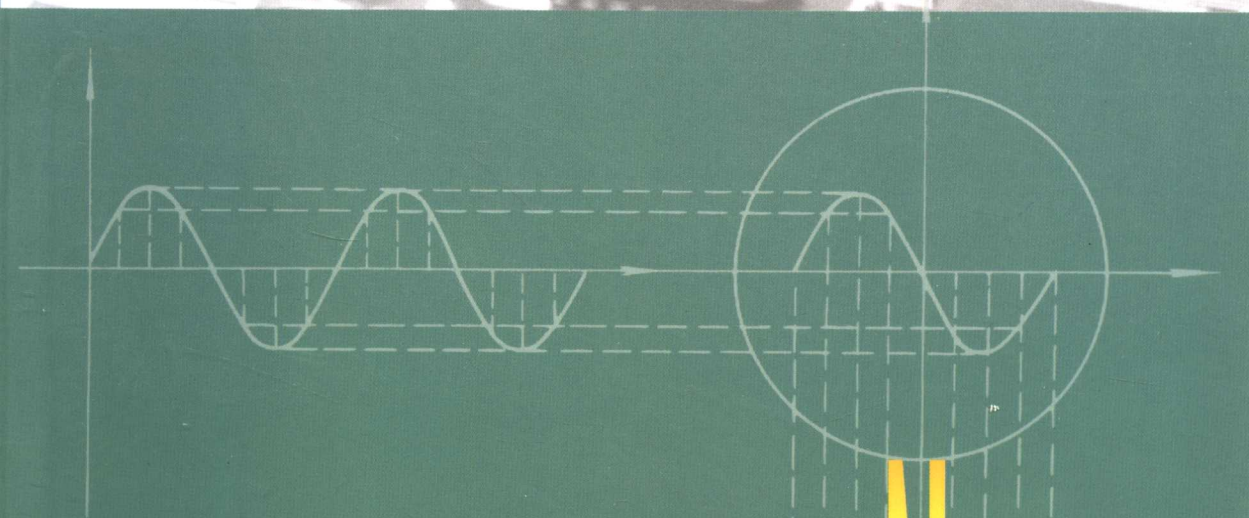


21世纪电工电子实验系列教材

总主编：秦杏荣 张保华

电工学实验基础

主 编 黄允千 副主编 秦杏荣 熊俊义



同济大学出版社

DIANGONGXUE
SHIYANJICHU

21 世纪电工电子实验系列教材

总主编 秦杏荣 张保华

电 工 学 实 验 基 础

主 编 黄允千

副主编 秦杏荣 熊俊义



同济大学出版社

内 容 简 介

为培养适应 21 世纪发展需要的工程技术人才,提高电工、电子实验教学水平,以 2004 年修订的“高等工业学校电工学课程教学基本要求”为依据,编写了本教材。

本教材的内容包括电工学实验基础知识、基本测量仪器和电工学实验三大部分。其中,实验部分选编电路、模拟电子技术、数字电子技术、电动机控制及可编程程序控制器等共 30 个。根据专业及学时的不同,可对实验内容进行不同的组合,以满足电工学实验教学的需要。本书可作为高等学校工科非电类专业及其他专业的实验教材。

本书可以与秦曾煌主编的《电工学》及其他电工学教材配套使用,也可作为“电工及电子技术实验”独立设课的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电工学实验基础/黄允千等主编. —上海:同济大学出版社,2005.9
ISBN 7-5608-3052-8

I. 电… II. 黄… 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(2005)第 082396 号

21 世纪电工电子实验系列教材

电工学实验基础

主 编 黄允千 副主编 秦杏荣 熊俊义

责任编辑 蒯月红

责任校对 徐春莲

封面设计 李志云

出 版 行 同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂印刷

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 12.75

字 数 255 000

印 数 1—4 100

版 次 2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-3052-8/TM·34

定 价 18.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

《21 世纪电工电子实验系列教材》编委会

主任委员 严隽薇

总 主 编 秦杏荣 张保华

编 委 (以下以姓氏笔划为序)

冯卫国 刘锦高 李荣正 陈泉林

陈军宁 张 浩 周政新 郑晓东

杨万枫 高卫东 钱 平 钱剑敏

廖晓纬

总 主 审 朱承高

策 划 张平官 蒯月红

序

高等学校是培养社会主义建设人才的主渠道。尤其在科学技术高速发展的今天,如何培养学生的实践能力、创业能力、创新能力和国际竞争能力是我们每个教育工作者都必须认真思考的主题。传统意义上的实验教学模式显然已经不能为飞速发展的时代所接受,为此,全面推行教学改革,实施新的教学方案,编撰新的实验教材已成为我们每个致力于实验教学的教师的新课题。

本系列教材是在各参编学校多年来实验教学研究、改革和实践的基础上,吸取各兄弟院校近年来实验改革的经验编撰而成的。它是集体的智慧,更是众人的成果。

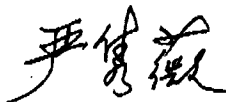
与以往形式单一、内容陈旧的实验教材不同之处,本系列教材中除保留了部分传统的验证性实验外,增加了设计性、研究性的实验内容和计算机仿真内容。考虑到在实施本系列教材时的学生还处在低年级阶段,其所学和掌握的理论知识和实践知识的局限性,新编实验教材在其内容和形式上都按照循序渐进的要求进行。本系列实验教材既考虑到与理论课教材的衔接、呼应和配套,又不失实验教材的自身独立体系。在编写实验项目时已经顾及所用实验仪器、设备和实验器材的通用性及实验装置的开放性。

实验计划时数可参照2004年教育部高等学校电子信息与电气学科教育指导委员会所属基础课程教育指导分会修定的《高等学校电工电子课程教学基本要求》适当放宽,以便于教师实施本教材时根据实际情况酌情选用。

参加本系列实验教材编纂的学校有同济大学、华东师范大学、华东理工大学、东华大学、上海海事大学、上海大学、上海电力学院、上海工程技术大学、上海应用技术学院、上海第二工业大学和安徽大学、淮南师范学院、中国人民解放军电子工程学院、中国人民解放军炮兵学院等。

本系列实验教材从筹划到出版,自始至终得到了同济大学出版社和各参编学校领导的鼎力相助和大力支持,在此我们谨以编委会的名义向他们致以崇高的敬意和衷心的感谢。

限于作者的业务水平和各校初次合作,书中难免存在一些不妥之处,敬请各使用者批评斧正。



2005年9月21日

前 言

《电工学实验基础》是为了适应现代电工及电子技术发展的需要,根据电工学课程教学基本要求,在保证加强基本理论、基本知识和基本技能训练的前提下而编写的。它是一本与《电工学》教材相配套的实验教材。

为培养适应 21 世纪高速发展的工程技术人员,反映我国当前在电工及电子技术实验教学体系、内容和方法上的改革思路和教学水平,本教材把教学目标定位在系统、科学地培养学生理论联系实际和实际动手能力上。

随着电工及电子技术的不断发展,日益渗透到其它学科领域,也随着电工学的教学在高等学校中不断地向管理专业延伸,就需要不断夯实电工学的实验基础,拓展在各学科中的应用。本教材的编写正迎合了这种改革的需要。

作为单独的一本实验教材,在体系上作了一定的规划,本教材共分 3 章。第 1 章为电工学实验基础知识,简述了电工学实验中基本电量的测量方法、常用电工电子元器件的识别和测试、实验误差分析及处理方法,给学生奠定一个实验基础。第 2 章为基本测量仪器,介绍了万用表、示波器、信号源、稳压电源等常用实验仪器,给学生一个独立学习操作的简易资料库。第 3 章为电工学实验,按电工、模拟电子技术、数字电子技术的顺序安排了 30 个实验。按照电工学课程教学基本要求,在电工部分增强了电机控制及可编程控制器(PLC)的内容;电子部分加强了集成电路的应用的内容。整体上重视综合、设计性实验的开发,目的是提高学生动手能力。实验内容采用了多层次的模块,各专业可根据需要选择基本实验及深层次的实验。书中带 * 号的实验可选做。

本书的编写凝聚了集体的智慧。第 1 章及第 3 章的 3.24~3.30 由黄允千执笔,第 2 章的 2.3~2.5 及第 3 章的 3.1~3.12 由秦杏荣执笔,第 2 章的 2.1~2.2 及第 3 章的 3.16~3.23 由熊俊义执笔,第 3 章的 3.13~3.14 由孔凡娟执笔,3.15 由房广林执笔。此外,汤榴芳等积极参与编写。

本书承上海交通大学朱承高教授认真审阅,对全书的体系结构、内容安排等方面给予悉心指导,提出了宝贵的修改意见,在此表示敬意。

在本教材的编写过程中,得到上海海事大学、同济大学、解放军炮兵学院的电工电子实验中心相关老师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者、特别是使用本教材的老师和同学们批评、指正。

编 者

2005 年 9 月

目 录

序

前言

1 电工学实验基础知识	(1)
1.1 基本电量的测量	(1)
1.1.1 电压的测量	(1)
1.1.2 电流的测量	(2)
1.1.3 功率的测量	(3)
1.1.4 周期与频率的测量	(4)
1.1.5 相位的测量	(5)
1.2 误差分析与数据处理	(7)
1.2.1 误差的来源、分类与表示	(7)
1.2.2 数据处理	(9)
1.2.3 误差分析与数据处理的注意要点	(11)
1.3 常用电工电子元件的识别和测试	(11)
1.3.1 电阻器	(11)
1.3.2 电容器	(15)
1.3.3 晶体二极管	(17)
1.3.4 晶体三极管	(18)
2 基本测量仪器	(20)
2.1 万用表	(20)
2.1.1 指针式万用表	(20)
2.1.2 数字式万用表	(24)
2.2 示波器	(28)
2.2.1 通用示波器	(28)
2.2.2 TDS210 型数字式实时示波器	(37)
2.3 函数信号发生器	(43)
2.3.1 电路结构	(43)
2.3.2 工作原理	(44)
2.3.3 DDS 函数信号发生器	(45)
2.3.4 函数信号发生器的使用	(46)

2.4	晶体管交流毫伏表	(47)
2.4.1	电路结构和工作原理	(47)
2.4.2	双通道交流毫伏表	(47)
2.4.3	晶体管交流毫伏表的使用	(48)
2.5	直流稳压电源	(48)
2.5.1	电路结构和工作原理	(48)
2.5.2	开关型直流稳压电源	(49)
2.5.3	直流稳压电源的使用	(50)
3	电工学实验	(51)
3.1	电阻元件伏安特性的测量	(51)
3.2	叠加原理	(55)
3.3	戴维宁定理	(58)
3.4	电阻、电感和电容在正弦交流电路中的伏安特性	(62)
3.5	交流电路阻抗参数的测量	(68)
3.6	功率因数的提高	(71)
3.7	串联谐振电路	(74)
3.8	三相电路的电压与电流	(78)
3.9	三相电路的功率测量	(83)
3.10	RC电路的过渡过程	(87)
3.11	变压器的测试与分析	(92)
3.12	三相异步电动机的继电接触控制	(97)
3.13	可编程控制器(PLC)的基础知识	(100)
3.14	可编程控制器(PLC)的应用	(104)
3.15	晶闸管直流电机调速	(109)
3.16	常用电子仪器的使用	(114)
3.17	单管交流放大电路	(119)
3.18	功率放大电路	(125)
3.19	差动放大电路	(131)
3.20	集成运算放大器的线性应用	(135)
3.21	集成运算放大器的非线性应用	(140)
3.22	RC正弦波振荡电路	(144)
3.23	直流稳压电源	(149)
3.24	逻辑门电路	(155)
3.25	加法器	(159)
3.26	组合逻辑电路的应用	(162)
3.27	集成触发器	(165)

3.28	计数器	(171)
3.29	555 集成定时器的应用	(176)
3.30	A/D 转换器	(180)
附录 1	三菱 FX _{2N} 系列 PLC 概述	(184)
附录 2	三菱 FX _{2N} 系列 PLC 常用内部编程器件	(186)
附录 3	三菱 FX 系列 SWOPC-FXGP/WIN-C 编程软件的功能和使用	(188)
参考文献		(192)

1 电工学实验基础知识

1.1 基本电量的测量

电压、电流、功率、频率等参数是电工学实验中的基本测量内容。由于电工学课程中包含了电工技术及电子技术两大部分,所以实验中的被测量及测量方法或有共性,或各具特色。电压测量是实验基本技能,其他电流、功率、频率等物理量都可以通过测量电压来间接得到,因此在电压测量这一节中较为详细地加以阐述。

1.1.1 电压的测量

1. 直流电压的测量

(1) 电工电路中测量直流电压

通常用磁电式电压表,电压表应并联到被测电路的两端。使用直流电压表时,要注意极性、量程范围和精度。对低电压的一般性测量也可使用万用表。

(2) 电子电路中测量直流电压

通常用万用表,它有指针式及数字式两种,测量时,均应并联到被测电路的两端。接线时,在注意极性的同时,尽可能使万用表直流电压档的量程与被测的电压接近,以提高数据的有效位数。一般数字万用表直流电压档的输入电阻可达 $10\text{M}\Omega$ 以上,所以对被测电路的影响较小。指针式万用表直流电压档的输入电阻一般不太大,而且各量程档的内阻不同,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。

用示波器也可以测直流电压,但首先应将示波器垂直偏转灵敏度的微调旋钮置校准位置,同时将输入耦合开关置 GND(即接地)档,并将时基线与屏幕的某刻度线重合作为参考零电压值,然后将输入耦合开关置 DC(即直流)档,输入直流电压信号后,时基线就上移或下移,根据偏移值(DIV)及偏移方向,可算出被测直流电压值和极性,偏移值(DIV)与通道灵敏度(V/DIV)之乘积为被测的直流电压值。

2. 交流电压的测量

(1) 电工电路中测量交流电压

用电磁式电压表测量,它被并联到被测电路的两端。

测量交流高电压时,通常采用交流电压表经电压互感器并联到被测电路两端的方法,如图 1-1-1 所示。一般电压互感器二次侧电压设计为标准值 100V ,测量时,只要把电压表的实际读数乘上互感器的变压比,就是被测电压 U 。使用时,要注意电压互感器二次绕组不能短接,并且其一端要接地。

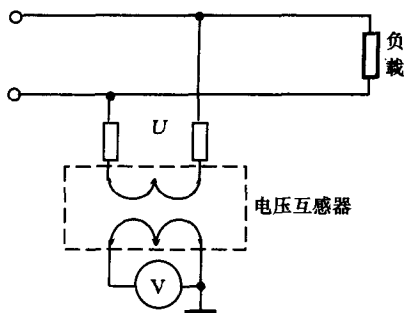


图 1-1-1 用电压互感器测量交流高电压

(2) 电子电路中测量交流电压

因交流信号电压有频率范围宽、存在非正弦电压、交直流电压并存等特点,在电压测量中,可根据被测电压的波形、工作频率、被测电路阻抗大小、测量精度等选择测量仪表。

① 用万用表测交流电压 用万用表的交流电压档能测 $45\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$ 交流电压。指针式万用表的各交流电压档内阻都较直流电压档低,测量时,应尽可能减小对被测电路的影响;数字式万用表的交流电压档输入阻抗

较高,对被测电路影响小。两者都有测量频率范围小的缺点,只能测频率为几百赫兹的交流电压值。

② 用晶体管毫伏表测交流电压 晶体管毫伏表是实验室中常用的一种模拟式电子电压表,它将被测信号经放大、检波变换成直流电压,再由微安表的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,可测频率范围达 $20\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ 。晶体管毫伏表测到的是电路中各点对地的交流信号电压有效值。

③ 用示波器测交流电压 用示波器能测各种波形的电压,速度快,但误差较大,一般误差为 $5\% \sim 10\%$ 。测量时,将示波器的微调旋钮置校正位置,输入耦合开关置 AC(即交流)档,将待测信号送至垂直输入端,选择合适的衰减档及时间档,可在屏幕上显示稳定的波形。波形最大值的垂直距离(DIV)与通道灵敏度(V/DIV)之积是被测交流电压的峰值。

1.1.2 电流的测量

1. 直流电流的测量

测量直流电流通常用磁电式电流表,电流表应串联在待测电流的支路中,切不可将电流表并联在被测电路中,以免烧毁电表。选择电流表时,应考虑量程范围和精度,同时还必须注意极性,保证电流从标有“+”的接线端流入仪表。

用万用表测量小电流时,应使用直流电流档,在注意极性的同时,也应注意相应的量程。

2. 交流电流的测量

测量交流电流用电磁式电流表,同样,电流表也应串联在待测电流的支路中。

测量工频交流大电流时,多采用电流互感器,其接线示意图如图 1-1-2 所示。电流互感器的一次绕组串入待测电路,二次绕组

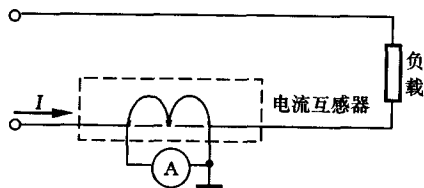


图 1-1-2 用电流互感器测交流大电流

与电流表连接成闭合回路。电流互感器的二次绕组不能开路,否则在二次绕组两端将感应出高电压并且铁芯很快发热,对人和设备均有危险。通常,电流互感器二次绕组额定电流为标准值 5A,所以,测量时,只要把电流表的读数乘上互感器变流比,就是被测交流电流值。

1.1.3 功率的测量

1. 直流功率的测量

为测直流功率,可先测出直流电流值和直流电压值,再用公式 $P=UI$ 加以计算,得到直流功率。根据不同的负载,直流电流表、直流电压表接在电路中的方式也不同。图 1-1-3(a)所示的接法适用于负载电流大的功率测量;图 1-1-3(b)所示的接法适用于负载电流小的功率测量。

直流功率,也可以采用电动式功率表直接测出。

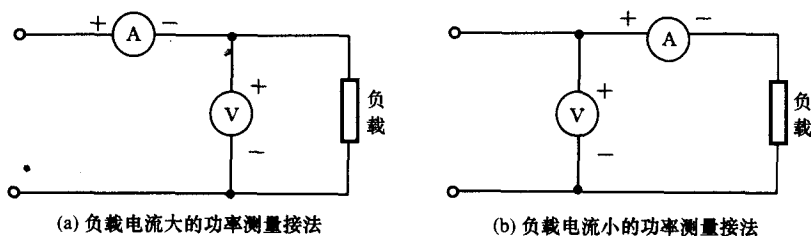


图 1-1-3 测量直流功率的两种情况

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来测量有功功率。其电流线圈与负载相串联,其电压线圈与负载相并联,两个线圈的同名端(用 * 表示),应接在电源的同一侧。图 1-1-4 所示的是用单相功率表测量单相交流电路功率的接法。在三相四线制交流电路中,可利用三只单相功率表测各相功率,三相总功率为三个单相功率之和,其接线方法如图 1-1-5 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

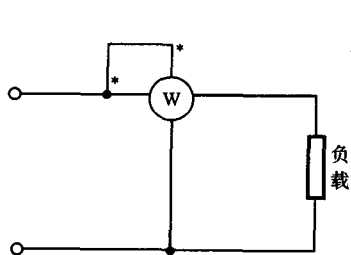


图 1-1-4 测量单相交流功率接线图

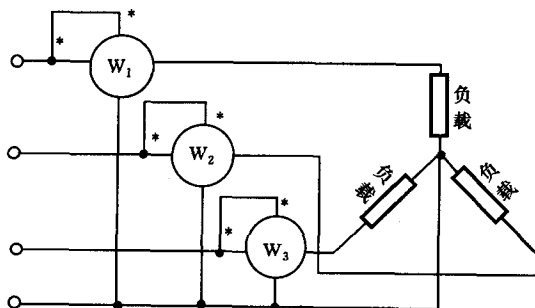


图 1-1-5 三表法测量三相四线制功率接线图

只单相功率表测三相三线制负载的总功率,其接线方法如图 1-1-6 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。

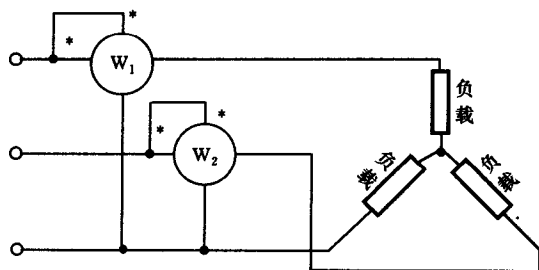


图 1-1-6 二表法测量三相负载功率接线图

功率表的量程不是按照所测功率值来选,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其电流线圈和电压线圈相应的量程。功率表读数时,要根据所选用的电流线圈和电压线圈量程,把指示的格数乘以相应的倍率。

1.1.4 周期与频率的测量

在实验中,通常用示波器来测量被测信号的周期与频率以及相关的动态参数。

1. 周期的测量

对周期性变化的稳定信号,可用示波器来测量它的周期。在完成示波器正常的校准后,输入被测信号,调节扫描速度(t/DIV)旋钮开关,调整X轴扫描速度,使示波器显示稳定的波形。在波形上选定可以代表周期的两点,读取X轴方向两点之间的格数(DIV),则周期 T 为

$$T = \text{格数值(DIV)} \times \text{扫描速度}(t/\text{DIV})$$

为提高测量的准确度,也可用选用多个波形进行测量,即读出数个波形的时间间隔,然后再除以波形个数,就得到信号的周期值。

2. 脉冲的测量

用示波器测量信号显示波形,使脉冲幅度尽量大,再调节扫描速度,使整个脉冲展开,前后沿清晰。如图 1-1-7 所示,以最大幅度 U_m 值的 10% 和 90% 两位置为测试点,测出波形上升或下降时相应 X 轴方向的格数(DIV)和此时的扫描速度(t/DIV),就可计算出脉冲波形的前沿时间 t_r 和后沿时间 t_f 。

同样,也可用上述方法测量脉冲的宽度。测出脉冲前沿和后沿的 $0.5U_m$ 处两点间的 X 轴方向的格数(DIV)和此时的扫描速度(t/DIV),就可计算出被测脉冲波形的宽度。

分析信号动态特性时,都可用此法来测量延迟时间、存储时间等动态参数。

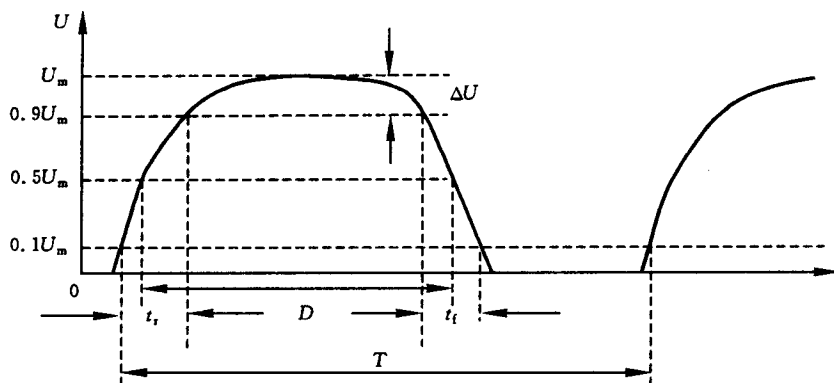


图 1-1-7 脉冲波形

3. 频率的测量

可用示波器和数字频率计来测量信号的频率。

(1) 用示波器测量频率

信号的频率与周期互为倒数,可用示波器先测出周期,再求得频率。此法方便,但精度不太高,仅作粗略测量。

(2) 用数字频率计测量频率

数字频率计是直接显示数据的频率测量仪器,内部用石英晶体振荡器产生高稳定的振荡信号,分频后产生具有精确脉冲宽度的秒脉冲信号,用它作为门控信号去控制主闸门的开启时间。同时由计数器对通过主闸门的信号脉冲计数,直到门控信号结束,主闸门关闭,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 $f = N/T_s$ 。工作原理如图 1-1-8 所示。

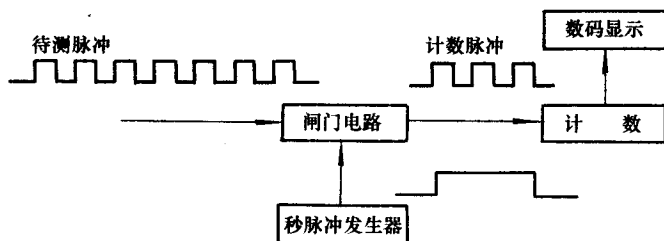


图 1-1-8 数字式频率计工作原理

1.1.5 相位的测量

相位的测量实际上是指两个同频率的信号之间的相位差测量。在电工学测量中,一般用示波器测量相位差。

1. 李沙育图形法

李沙育图形法是测两个频率相同的信号间相位差的经典方法,用单踪示波器便能实现。此法比双踪示波法复杂,但较准确。测量时,将两个信号分别接到示波器的垂直通道和水平通道,示波器置双通道工作方式。当两个信号频率相同而初相位不同时,示波器上通常会呈现一个斜形的椭圆,根据椭圆在 X 轴或 Y 轴上的幅度以及椭圆与 X 轴或 Y 轴的交点的距离进行相应的计算分析,得出相位差。对一些特殊的相位差,李沙育图形可为一直线、一个圆或一个椭圆,图 1-1-9 所示是一些特殊的李沙育图形。

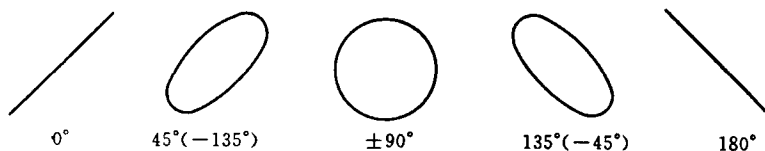


图 1-1-9 李沙育图形的一些特殊情况

2. 双踪显示法

用双踪示波器将需要测量的两信号进行双踪显示,可直观地比较两个信号的相位差,测试电路如图 1-1-10(a)所示。图 1-1-10(b)显示了屏幕上两个大小适中的稳

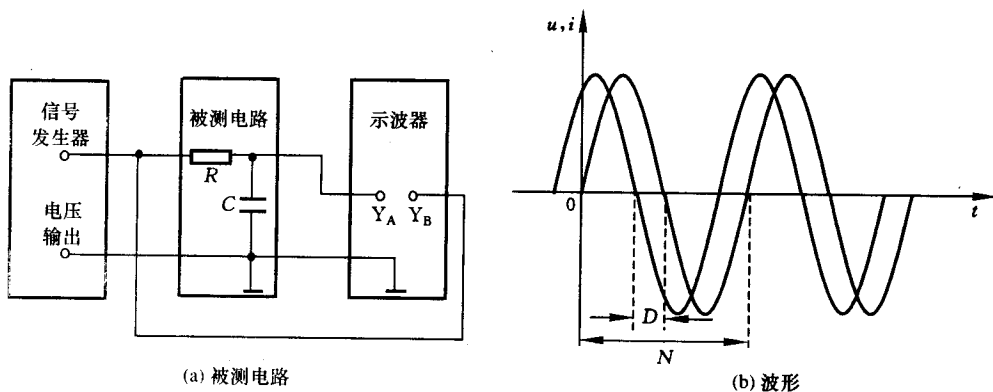


图 1-1-10 相位差测量电路及波形

定波形,对这两个波形进行比较,即得两个同频率信号的相位差 θ 为

$$\theta = D(\text{DIV}) \times \frac{360^\circ}{N(\text{DIV})}$$

式中 N ——一个周期在水平方向所占的距离;

D ——两个波形上对应点(如过零点)在水平方向上的间隔。

1.2 误差分析与数据处理

在使用设备仪器对各种电量进行测量时,由于测试的方法及设备的精度等原因,测量值和被测量的客观真值之间总存在一定的差别,即测量误差。因此,实验人员必须分析误差产生的原因,采取措施减少误差,使测量结果更加准确。

1.2.1 误差的来源、分类与表示

1. 测量误差的来源

(1) 仪器误差

这是由于测量仪器的性能不完善所产生的误差。指示值实际上是被测量的近似值,该误差为仪器所固有。

(2) 使用误差

又称操作误差,是指在使用仪器过程中,因安装、调试和使用不当等引起的误差。

(3) 人身误差

它是由于人的感觉器官和运动器官的限制所造成的误差。

(4) 环境误差

这是由于受到环境影响所造成的附加误差。

(5) 方法误差

又称理论误差,这是由于使用的测量方法不完善和测量所依据的理论本身不严密所引起的误差。

2. 测量误差的分类

根据误差的性质及产生的原因,可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

(1) 系统误差

在规定的测量条件下对同一个量进行多次测量时,如果误差的数值保持恒定或按某种确定的规律变化,这种误差称为系统误差。它有一定的规律性,一般可通过实验和分析找出原因,设法减小和消除误差。

(2) 随机误差

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变化,则称这种误差为随机误差(偶然误差)。尽管在每次测量某一量时其偶然误差是不规则的,但是实践证明,如果测量次数足够多,随机误差的平均值的极限值就会趋近于零。所以,通过多次测量某一量并求出其算术平均值,可以清除随机误差。

(3) 过失误差

它是在一定的测量条件下,测量值出现明显偏离真值的误差。通过分析,确认是过失误差的测量数据称为坏值,应该予以剔除。

3. 误差的几种表示法

测量误差常用绝对误差、相对误差和引用误差来表示。

(1) 绝对误差

这是测量值与被测量的真值之间的差值。如用 x 表示测量值, 用 x_0 表示真值, 则绝对误差可表示为

$$\Delta x = x - x_0$$

绝对误差 Δx 值可以为正, 也可以为负。显然, 绝对误差无法表示测量的准确度, 所以必须引入另一误差——相对误差。

(2) 相对误差

相对误差 δ_0 是绝对误差与被测量的真值之比, 用百分数表示, 即

$$\delta_0 = \frac{|\Delta x|}{x_0} \times 100\%$$

在实际测量中, 被测量的真值 x_0 是可望而不可求的。一般是用高一级标准的测量仪器测得的值作为被测量的真值, 然后校正用现有仪器测得的值, 得到修正值, 该修正值可视为绝对误差。

为此, 在误差分析中往往采用标称相对误差的概念。标称相对误差 δ_x 被定义为: 绝对误差与被测量的实际测量值之比, 用百分数表示。即

$$\delta_x = \frac{|\Delta x|}{x} \times 100\%$$

在电工实验测量中, 对测量结果的误差或估价测量结果的准确度时, 一般都用标称相对误差来表示。

(3) 引用误差

引用误差可作为衡量仪器测量准确度的标志。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。通常仪器技术说明书所标明的误差, 都是指引用误差。

在指针式仪表中, 引用误差就是对应于满刻度的相对误差, 定义为

$$\delta = \frac{|\Delta x|}{X_m} \times 100\%$$

式中, X_m 为仪表的满刻度。

仪表的准确度是按仪表的最大引用误差来划分等级的。目前, 我国直读式电工测量仪表共分七级: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。前三级常用于精密测量或作其他仪表的校正, 后四级作一般工程测量。各级仪表的基本误差见表 1-2-1。