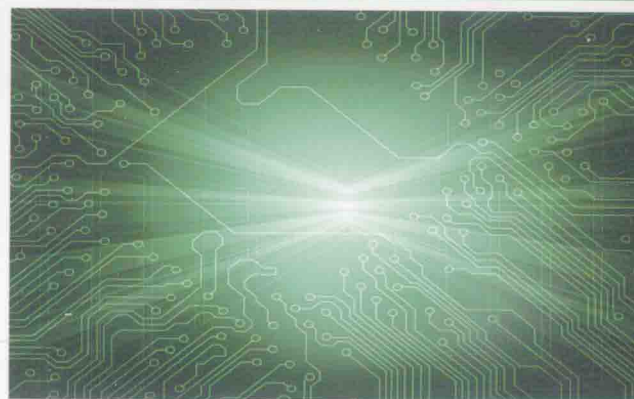


DIANGONGDIANZILEI
JICHU SHIYAN JIAOCHENG



电工电子类 基础实验教程

主编 喻其山

安徽师范大学出版社

省级特色专业项目（电子信息工程，项目代码：002341320）资助

电工电子类 基础实验教程

主 编：喻其山

副主编：陶文海

编 者：汪慧兰 晏菁 葛有根 杨峰

责任编辑: 吴毛顺 责任校对: 李 玲
装帧设计: 桑国磊 责任印制: 郭行洲

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子类基础实验教程/喻其山主编. —芜湖: 安徽师范大学出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5676-1558-8

I. ①电… II. ①喻… III. ①电工技术—实验—高等学校—教材 ②电子技术—实验—高等学校—教材 IV. ①TM-33 ②TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 216729 号

电工电子类基础实验教程

喻其山 主编

出版发行: 安徽师范大学出版社

芜湖市九华南路 189 号安徽师范大学花津校区 邮政编码: 241002

网 址: <http://www.ahnupress.com/>

发 行 部: 0553-3883578 5910327 5910310 (传真) E-mail: asdcbsfxb@126.com

印 刷: 安徽芜湖新华印务有限责任公司

版 次: 2014 年 10 月第 1 版

印 次: 2014 年 10 月第 1 次印刷

规 格: 700×1000 1/16

印 张: 11.75

字 数: 210 千

书 号: ISBN 978-7-5676-1558-8

定 价: 23.00 元

凡安徽师范大学出版社版图书有缺漏页、残破等质量问题, 本社负责调换。

前 言

电工技术、电路分析、模拟电子技术基础、数字电子技术和电工电子技术等课程都是理工科专业必修的主干专业基础课程,只是不同的专业对其中的内容取舍不一样。对于电子信息类专业而言,这些内容是后继许多专业课的理论基础。它主要讨论各种电路的原理和特性,包括强电和弱电、模电和数电等。这些课程理论性强,教学要求高,有一定的学习难度,它们的教学效果将对后续专业课程的学习产生较大影响。

由于这些课程是实践性较强的课程,课堂教学必须结合实验教学才能取得良好的教学效果。基于此,我们组织编写了这本《电工电子类基础实验教程》,以期达到理论教学与实践相统一。

本书内容是根据当前的教学大纲和教学计划,结合多门课程的要求编写的。不同专业、不同年级的学生可以根据其所上课程的不同要求,在本实验教程中选取相应的实验内容。这些实验内容切合学生学习的实际情况,结合实验基础和实验条件,使各门课程的实验内容可以保障学生掌握相应课程的电路原理,掌握各电路性能参数的调试、测试方法以及故障分析、排除等基本能力,培养学生具有初步的强电、弱电和模电、数电电路的综合分析和设计的能力。另外,根据不同的课程和不同的实验教学课时,在实验的数量、内容的难易程度上保留了充分的选择余地,可以照顾不同实验课时需要,也可以照顾不同学习水平的学生合理地选择实验学习内容。

本书内容丰富,包括电工技术基础、电路分析、模拟电子技术和数字电子技术4门主干课程的实验内容。

实验教师可以根据教学计划安排和已有实验条件,选择其中的部分内容作为学生的实验教学内容。

本书第一章由葛有根编写,第二章和第三章由汪慧兰和杨峰编写,第四章由晏菁编写,第五章由陶文海编写,全书由喻其山和陶文海负责统稿。

目 录

前 言	1
第一章 通用实验仪器的使用	1
第二章 电工技术基础实验	10
实验一 基本电工仪表的使用及测量误差的计算	10
实验二 电位、电压的测定及电路电位图的绘制	15
实验三 电压源与电流源的等效变换	18
实验四 正弦稳态交流电路相量的研究	22
实验五 R 、 L 、 C 串联谐振电路的研究	26
实验六 单相铁芯变压器特性的测试	30
实验七 三相交流电路电压、电流的测量	33
实验八 功率因数及相序的测量	37
实验九 三相鼠笼式异步电动机点动、自锁和正反转控制	40
实验十 三相鼠笼式异步电动机 $Y-\Delta$ 降压启动控制	46
第三章 电路分析实验	50
实验一 电路元件伏安特性曲线的测绘	50
实验二 基尔霍夫定律的验证	54
实验三 叠加原理的验证	57
实验四 戴维南定理和诺顿定理的验证——线性含源二端网络等效 参数的测定	60
实验五 最大功率传输条件的测定	65
实验六 受控源 VCVS、VCCS、CCVS、CCCS 的实验研究	68
实验七 RC 一阶电路响应的测试	73
实验八 二阶动态电路响应的研究	77

实验九	用三表法测量电路等效参数	80
实验十	负阻抗变换器	84
第四章 模拟电子技术实验		88
实验一	晶体管共射极单管放大器	90
实验二	射极跟随器	99
实验三	低频功率放大器——OTL 功率放大器	104
实验四	差分放大电路 (I) ——长尾式差分放大电路	109
实验五	差分放大电路 (II) ——恒流源式差分放大电路	113
实验六	负反馈放大器	117
实验七	模拟运算电路	121
实验八	集成运算放大器的基本应用 (I) ——电压比较器	127
实验九	集成运算放大器的基本应用 (II) ——正弦波发生器	131
实验十	集成运算放大器的基本应用 (III) ——非正弦波发生器	135
第五章 数字电子技术实验		139
实验一	组合逻辑电路的设计与测试	139
实验二	数值比较器的设计、测试及其应用	142
实验三	数据选择器及其应用	145
实验四	译码器及其应用	152
实验五	触发器及其应用	159
实验六	时序逻辑电路的设计与测试	165
实验七	计数器及其应用	168
实验八	寄存器及其应用	173
附录 常用数字电路逻辑图		181
主要参考文献		182

第一章 通用实验仪器的使用

一、实验目的

1. 学习电子电路实验中常用的电子仪器——示波器、函数信号发生器、交流毫伏表、万用表、脉冲信号发送器、逻辑笔、功率表等的主要技术指标、性能和使用方法。

2. 初步掌握用双踪示波器观察正弦信号波形和读取波形参数的方法。

二、实验设备及元件

YB4320 双踪示波器, 函数信号发生器, 交流毫伏表, 数字万用表, 脉冲信号源, 功率表, 功率因数表, 74LS74。

三、实验原理

在模拟电子电路实验中, 经常使用的电子仪器有示波器、函数信号发生器、直流稳压电源、交流毫伏表及频率计等, 它们和万用表一起, 完成对模拟电子电路静态和动态工作情况的测试。在实验中, 各种电子仪器要综合使用, 各仪器与被测实验装置之间的布局与连接通常如图 1-1 所示。

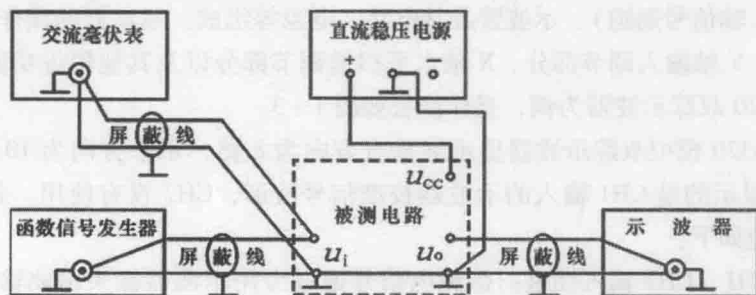


图 1-1 模拟电子电路中常用电子仪器布局图

数字电路实验中, 经常使用脉冲信号源、直流稳压源、开关电平输出、逻辑电平输入指示、示波器等, 完成对电路的输出电平、现态及次态的测试与波形观测。实验电路与各种电子仪器的连接示意图如图 1-2 所示。

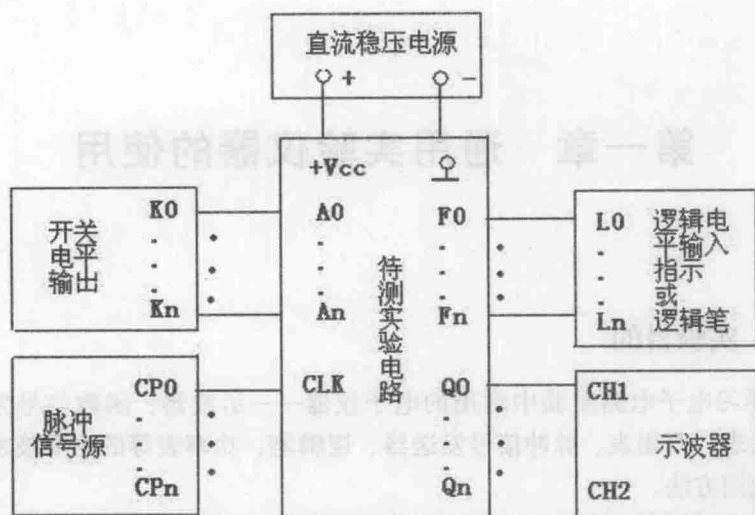


图 1-2 数字电路实验中常用仪器与待测电路连接示意图

为防止外界干扰,各仪器的公共接地端应连接在一起,称为共地。信号发生器和交流毫伏表的连接线通常用屏蔽线或专用电缆线,示波器的连接线使用专用电缆线,直流电源的连接线用普通导线。

1. 示波器

示波器是一种用途很广的电子测量仪器,它既能直接显示电信号的波形,又能对电信号进行各种基本参数的测量。示波器分为数字示波器、模拟示波器,本实验采用模拟双踪示波器 YB4320。

(1) 双踪示波器 YB4320 操作面板简介。

模拟示波器的工作原理基本相同,都由垂直系统(Y轴信号通道)、水平系统(X轴信号通道)、示波管及其电路、电源等组成。示波器的操作面板大致分为:Y轴输入调节部分、X轴水平扫描调节部分以及其他辅佐功能旋钮。以 YB4320 双踪示波器为例,操作面板如图 1-3。

YB4320 模拟双踪示波器显示屏垂直方向为 8 格,水平方向为 10 格。图 1-3 上显示的是 CH1 输入的示波器校准信号波形,CH2 没有使用。各插孔、旋钮功能如下:

①CH1、CH2 输入插座:待测电信号通过专用示波器探头由此输入示波器,可同时输入两路待测电信号。

②CH1、CH2 灵敏度选择开关:Y 轴上单位刻度选择, VOLTS/DIV 表示在垂直方向上(Y 轴)每一大格代表的电压值。例如,在图 1-3 中 CH1 灵敏度选择开关指向 0.1 V/DIV,表示垂直方向每格为 0.1 V (CH1、CH2 微调旋



图 1-3 YB4320 双踪示波器控制面板

钮必须在校准位置)。

③CH1、CH2 微调旋钮：和上面的 CH1、CH2 灵敏度选择开关共同决定待测波形在垂直方向上的高度，调节范围 ≥ 2.5 倍。测量信号幅度时要旋转到校准位置。

④扫描速率选择开关：X 轴上单位刻度选择，SEC/DIV 表示在水平方向 (X 轴) 每一大格代表的时间值。例如，在图 1-3 中扫描速率选择开关指向 0.2 ms，表示水平方向每格为 0.2 ms (扫描速率微调旋钮必须在校准位置)。

⑤扫描微调旋钮：和上面的扫描速率选择开关共同决定待测波形在水平方向上的宽度，调节范围 ≥ 2.5 倍。测量信号周期时要旋转到校准位置。

(2) 电信号基本参数测量与计算。

①信号幅度测量。调节示波器上相应开关和旋钮，使波形显示值方便读取，再根据 CH1 或 CH2 灵敏度选择开关的指示值和波形在垂直方向占有的格数 H (DIV)，按下式计算：

$$V_{p-p} = \text{CH1 或 CH2 灵敏度选择开关的指示值} \times \text{垂直方向占有的格数 } H。$$

上述公式不包括示波器探头的衰减倍数，如计入还应该乘以探头的衰减倍数。

在图 1-3 中，待测信号由 CH1 输入，从图上可以看出：CH1 灵敏度选择旋钮指向 0.1 (V/DIV)，波形在垂直方向上占有 4.8 格。因此，该波形 $V_{p-p} = 0.1 \text{ (V/DIV)} \times 4.8 \text{ (DIV)} = 0.48 \text{ V}$ 。

注意：当测量信号幅度时，CH1、CH2 的微调旋钮必须放在校准位置，CH1 (或 CH2) 灵敏度选择开关的指示值才是出厂时的校准值，否则，最大误差可达 2.5 倍。

②周期（频率）及待测波形上两点之间的时间测量。对某一波形的周期测量，首先调节示波器上相应开关和旋钮使波形显示值方便读取，再根据扫描速率选择开关的指示值和一个周期波形在水平方向占有的格数 L （DIV），按下式计算：

周期 = 扫描速率选择开关的指示值 $\times$ 一个周期波形在水平方向占有的格数 L 。

在图 1-3 中，扫描速率选择开关指向 0.2 （ms/DIV），波形在一个周期内占有的水平方向格数为 5 格。因此，该波形周期 = 0.2 （ms/DIV） $\times 5$ （DIV）= 1 ms；频率 = $1/\text{周期} = 1$ kHz。

待测波形上两点之间的时间测量也是按上述方法测量，即

波形上两点之间的时间 = 扫描速率选择开关的指示值 $\times$ 两点在水平方向占有的格数 L 。

注意：上述公式不包括水平“ $\times 5$ 扩展”按钮（在扫描速率选择开关的右上方）使用情况。如使用了扫描速率选择开关右上方的“ $\times 5$ 扩展”按钮，上述的周期值或时间值还要除以 5。

③相位差测量。CH1、CH2 输入耦合方式开关（该开关位于 CH1、CH2 的微调旋钮左下方）置于“AC”，将两个同频正弦波 u_i 、 u_R 同时由 CH1、CH2 输入，显示方式开关（该开关位于 CH1、CH2 灵敏度选择开关上方）置于“交替”。调节示波器上相应开关和旋钮，使在示波器显示屏上显示出易于观察的两个相位不同的正弦波形 u_i 及 u_R ，如图 1-4 所示。根据两波形在水平方向相距格数 X 及信号周期格数 X_T ，则可求得两波形相位差 θ 。

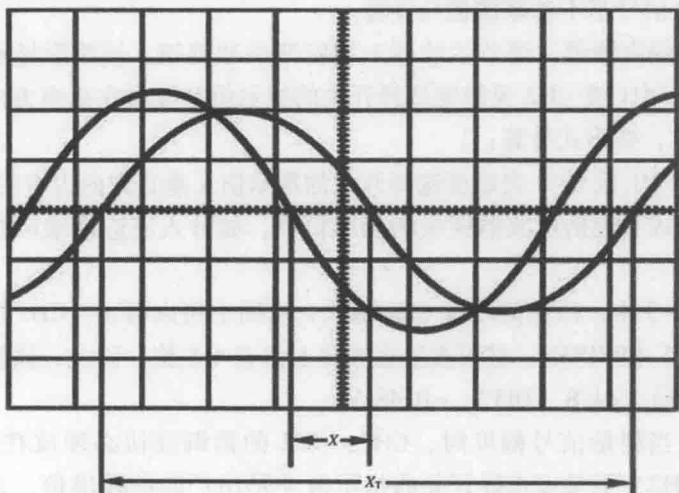


图 1-4 双踪示波器显示的两个不同相位的正弦波

$$\theta = \frac{X \text{ (DIV)}}{X_T \text{ (DIV)}} \times 360^\circ$$

式中: X_T ——一个周期所占格数;

X ——两波形在 X 轴方向差距格数。

2. 函数信号发送器

本实验采用 KHM-2 型模拟电路实验台自带的函数信号发生器, 其使用方法和其他型号信号发生器基本相同, 如图 1-5。

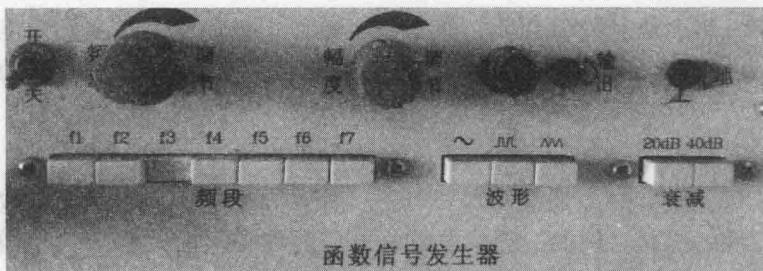


图 1-5 KHM-2 型模拟电路实验台自带函数信号发生器

(1) 基本参数。

- ①输出信号的幅度, 正弦输出的有效值 $\geq 6 \text{ V}$ 。
- ②输出信号的幅度衰减范围: $0 \sim 60 \text{ dB}$ 。
- ③输出信号的频率范围: $0 \sim 2 \text{ MHz}$ 。
- ④ $f_1 \sim f_7$ 频段选择按钮输出范围。 f_1 : $0 \sim 10 \text{ Hz}$, f_2 : $10 \sim 100 \text{ Hz}$, f_3 : $100 \text{ Hz} \sim 1 \text{ kHz}$, f_4 : $1 \text{ kHz} \sim 10 \text{ kHz}$, f_5 : $10 \text{ kHz} \sim 50 \text{ kHz}$, f_6 : $50 \text{ kHz} \sim 500 \text{ kHz}$, f_7 : $500 \text{ kHz} \sim 2 \text{ MHz}$ 。

(2) 使用方法。

- ①按下电源开关。
- ②根据需要选择并按下一个波形开关 (可选波形: 正弦波、方波、锯齿波)。
- ③根据需要选择并按下 $f_1 \sim f_7$ 频段选择按钮中的一个, 然后调节频率调节旋钮, 同时, 观察频率计读数或观测示波器上波形的周期, 直到输出为所需频率为止。
- ④根据需要调节幅度调节旋钮, 如需要信号幅度 $\leq 0.6 \text{ V}$ 时, 根据需要选择并按下相应的衰减按钮, 然后调节幅度调节旋钮。同时观察交流毫伏表读数或观测示波器上波形的幅度, 直到输出为所需幅度为止。

注意: 函数信号发生器的输出端不允许短路。

3. 交流毫伏表

交流毫伏表只能在其工作频率范围之内测量正弦信号电压的有效值。

使用方法及注意事项：

(1) 为了防止过载而损坏，测量前一般先把量程开关置于量程较大的位置，然后在测量中逐挡减小量程。

(2) 为读数准确减小误差，应选择合适的量程，使指针位于 $1/3$ 量程到满量程之间。

(3) 每次测量完毕后应将量程选择开关旋转至最大量程处。

4. 数字万用表

数字万用表是一种多功能、通用性、便携式测量仪器。主要功能有：测量电阻、电流和电压（交流或直流）、三极管的 h_{fe} 、电容及二极管的正负极判断等。

使用方法及注意事项：

(1) 测量前，将黑表笔插入“COM”插孔，根据所要测量的参数将红表笔插入相应的插孔。例如，测量电阻或电压时红表笔插入“V/ Ω ”插孔，测量电流时红表笔插入“200 mA”或“20 A”插孔。

(2) 测量时，根据所要测量的参数将选择开关旋转至相应的挡位和量程，为防止大电压、大电流烧坏万用表，应先选择最大量程再逐步旋转至适合量程。

(3) 测量电压、电阻时将表笔跨接在被测电路或元件两端；测量电流时将表笔串接在被测电路上，压紧。被测电路或元件的参数将显示在显示屏上。

(4) 使用完毕后将选择开关旋转至电压挡最大量程，同时关闭电源，以防止万用表内部电池耗尽。

5. 脉冲信号源

脉冲信号源是数字电路实验中必不可少的常用仪器，图 1-6 为 KHD-2 型数字电路实验台自带的脉冲信号源，使用方法和其他通用的脉冲信号源基本一致。

脉冲信号源主要功能及参数：

(1) 频率调节。频率范围分为 3 挡：1 Hz、1 kHz、20 kHz。每挡的输

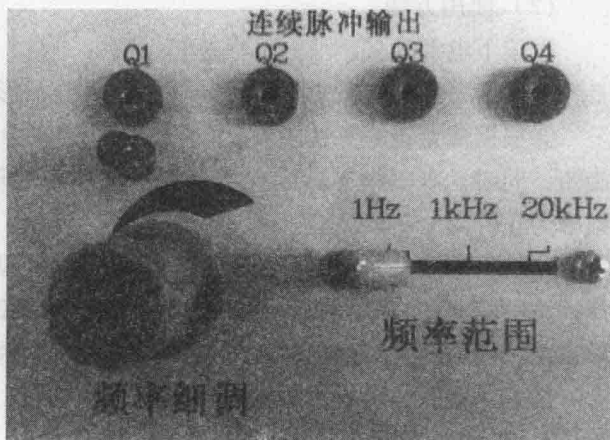


图 1-6 KHD-2 型数字电路实验台自带脉冲信号源

出频率对应于 Q_1 输出频率, 频率细调旋钮的调节范围为本挡位的 $\pm 50\%$ 。

(2) 信号输出。信号输出插孔有 4 个: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 。它们的输出信号频率有下列比例关系:

$$f(Q_1) : f(Q_2) : f(Q_3) : f(Q_4) = 8 : 4 : 2 : 1。$$

(3) 输出信号基本参数。输出信号为占空比 50% 的方波脉冲, 高电平 $\geq 3.6 \text{ V}$, 低电平 $\leq 0.3 \text{ V}$ 。

注意: 输出端不允许短路。

四、实验内容与实验步骤

1. 模拟电路实验中常用实验仪器的使用

(1) 用示波器和交流毫伏表测量信号幅度、周期(频率)。

①扫描基线调节。将示波器的显示方式选择开关置于“CH1”或“CH2”, 输入耦合方式开关置于“接地”, 扫描方式开关选择“自动”(该开关位于扫描速率选择开关上方)。开启电源开关后, 调节“辉度”“聚焦”旋钮, 使显示屏上显示一条细而且亮度适中的扫描基线。然后调节“垂直位移”和“水平位移”旋钮, 使扫描线位于屏幕中央, 并且能上下左右移动。

②待测正弦波信号调节。调节函数信号发生器, 使其输出频率分别为 100 Hz、1 kHz、10 kHz、100 kHz (观察频率计读数), 有效值均为 1 V 的正弦波信号 (观察交流毫伏表测量值)。请按照实验原理中的“2. 函数信号发生器”的使用方法对函数信号发生器进行调节。

③正弦波信号的周期(频率)、幅度测量。将示波器的输入耦合方式开关置于“AC”, CH1、CH2 微调旋钮和扫描微调旋钮置于“校准”位置; 将调节好的正弦波信号由专用示波器探头接入选定的“CH1”或“CH2”通道; 然后按下示波器显示方式选择开关中相应的“CH1”或“CH2”按钮; 扫描方式选择置于“自动”(如显示的波形不稳定, 将扫描方式选择置于“常态”, 同时调节“电平”旋钮, 直至观察到稳定的波形); 调节扫描速率选择开关和 CH1、CH2 灵敏度选择开关, 使示波器显示出一个或数个周期稳定的波形, 观察并测量待测波形的周期(频率)和幅度, 记入表 1-1。

表 1-1

信号电压频率	示波器测量值		信号电压 毫伏表读数 (V)	示波器测量值	
	周期 (ms)	频率 (Hz)		峰峰值 (V)	有效值 (V)
100 Hz					
1 kHz					
10 kHz					
100 kHz					

(2) 双踪示波器测量两同频波形的相位差。

①显示方式开关置于“交替”，将 CH1 和 CH2 输入耦合方式开关置于“接地”。调节“垂直位移”旋钮，使两条扫描基线重合。

②将示波器 CH1 和 CH2 输入耦合方式开关置于“AC”。按图 1-7 连接实验电路，调节函数信号发生器的输出信号为频率 1 kHz、幅值为 2 V 的正弦波，经 RC 移相网络获得频率相同但相位不同的两路信号 u_i 和 u_R ，分别加到双踪示波器的 CH1 和 CH2 输入端。

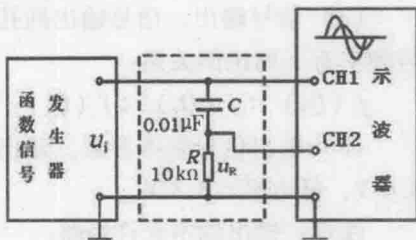


图 1-7 两波形间相位差测量电路

③示波器扫描方式选择“自动”或“常态”+“电平”方式（波形不稳定时）。调节扫描速率选择开关及 CH1、CH2 灵敏度选择开关，使显示屏上显示出易于观察的两个相位不同的正弦波形 u_i 及 u_R 。根据两波形在水平方向相距 X 格数及信号周期 X_T 格数，则可求得两波形相位差，填入表 1-2。

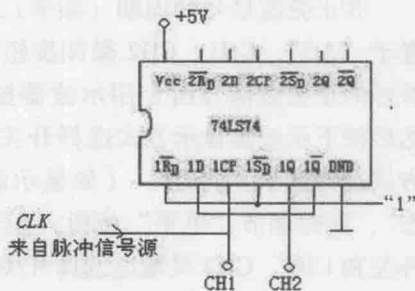
表 1-2

一周期格数 $X_T =$	两波形 X 轴差距格数 $X =$	相位差	
		实测值 $\theta =$	计算值 $\theta =$

(3) 数字电路实验常用实验仪器的使用。

①按图 1-8 连接好电路图。

②将连续脉冲信号源的“频率范围”选择拨至 1 kHz 挡，连续脉冲 Q_1 的输出连接至“CLK”；芯片 74LS74 的 1CP、1Q 的波形分别送至示波器 Y 轴输入“CH1、CH2”端。高电平“1”由实验台“16 位开关电平输出”任一输出端提供。

图 1-8 $D \rightarrow T$ 电路连接图

③调节示波器相关旋钮、开关，直至观测到两个清晰、稳定的波形，并将观察和测量的波形、参数填入表 1-3。

表 1-3

波形描绘	幅度 (V)	周期 (ms)
1CP 输出		
1Q 输出		

五、实验报告

1. 整理实验数据, 并进行分析。

2. 问题讨论。

(1) 归纳出示波器的 general 使用方法。例如:

扫描基线调节

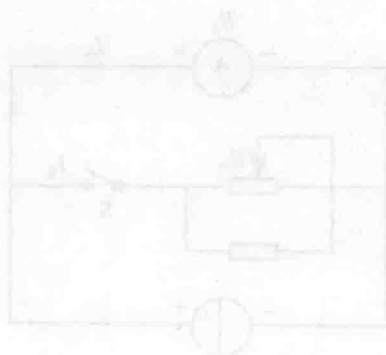
输入耦合方式选择

显示方式选择

.....

(2) 使用双踪示波器观测“李萨如”曲线, 测量待测信号的频率。

(3) 能否用万用表测量正弦交流信号电压幅度?



第二章 电工技术基础实验

实验一 基本电工仪表的使用及测量误差的计算

一、实验目的

1. 熟悉实验台上各类电源及各类测量仪表的布局和使用方法。
2. 掌握指针式电压表、电流表内阻的测量方法。
3. 熟悉电工仪表测量误差的计算方法。

二、实验原理

为了准确地测量电路中实际的电压和电流,必须保证仪表接入电路后不会改变被测电路的工作状态。这就要求电压表的内阻为无穷大,电流表的内阻为零,而实际使用的指针式电工仪表都不能满足上述要求。因此,当测量仪表接入电路,就会改变电路原有的工作状态,这就导致仪表的读数与电路原有的实际值之间出现误差。误差的大小与仪表本身内阻的大小密切相关。只要测出仪表的内阻,即可计算出由其产生的测量误差。下面介绍几种测量指针式仪表内阻的方法。

1. 用分流法测量电流表的内阻

如图 2-1-1 所示,Ⓐ 为被测内阻为 R_A 的直流电流表。测量时先断开开关 S,调节电源的输出电流 I 使Ⓐ 表指针满偏转。然后合上开关 S,并保持 I 值不变,调节电阻箱 R_B 的阻值,使电流表的指针指在满偏转 1/2 位置,此时有

$$I_A = I_S = I/2,$$

$$R_A = R_B // R_1。$$

R_1 为固定电阻器之值, R_B 可由电阻箱的

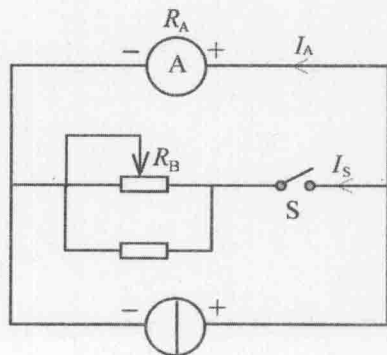


图 2-1-1

刻度盘上读得。

2. 用分压法测量电压表的内阻

如图 2-1-2 所示, $\textcircled{V}$ 为被测内阻为 R_V 的电压表。测量时先将开关 S 闭合, 调节直流稳压电源的输出电压, 使电压表 $\textcircled{V}$ 的指针为满偏转。然后断开开关 S, 调节 R_B 使电压表 $\textcircled{V}$ 的指示值减半。此时有: $R_V = R_B + R_1$ 。

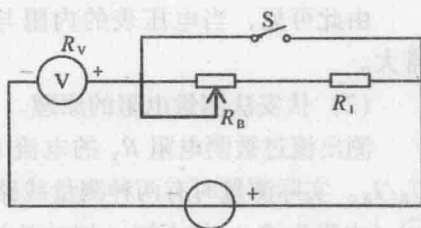


图 2-1-2

电压表的灵敏度为 $S = R_V / U$ (Ω/V)。

式中 U 为电压表满偏时的电压值。

3. 仪表内阻引起的测量误差的计算

仪表内阻引起的测量误差通常称之为方法误差, 而仪表本身结构引起的误差称为仪表基本误差。

(1) 绝对误差和相对误差。

以图 2-1-3 所示电路为例, R_1 上的电压为 $U_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$, 若 $R_1 = R_2$, 则

$U_{R1} = \frac{1}{2} U$ 。现用一内阻为 R_V 的电压表来

测量 U_{R1} 值, 当 R_V 与 R_1 并联后, $R_{AB} = \frac{R_V R_1}{R_V + R_1}$, 以此来替代上式中的 R_1 , 则得

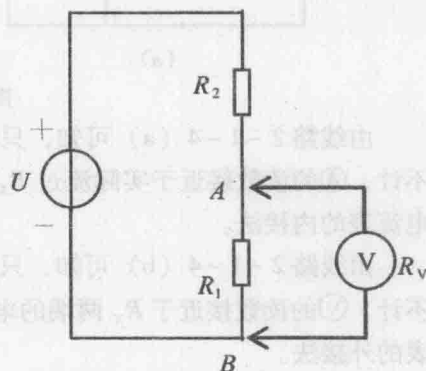


图 2-1-3

$$U'_{R1} = \frac{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1}}{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1} + R_2} U,$$

$$\text{绝对误差 } \Delta U = U'_{R1} - U_{R1} = U \left(\frac{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1}}{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1} + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right),$$

$$\text{化简后得 } \Delta U = \frac{-R_1^2 R_2 U}{R_V (R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2) + R_1 R_2 (R_1 + R_2)}.$$

$$\text{若 } R_1 = R_2 = R_V, \text{ 则得 } \Delta U = -\frac{U}{6},$$