



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information •
Science and Technology

电 工 学 实 验

白雪峰 王利强 孙志诚 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电工学实验

白雪峰 王利强 孙志诚 编著



机械工业出版社

为适应当前高等院校教学改革的要求,配合工科电工学教材的教学,参照教育部颁发的高等工科学校“电工技术(电工学Ⅰ)”、“电子技术(电工学Ⅱ)”及“电路与电子技术”三门课程的教学基本要求和有关的教学大纲编写了本书。

全书包括电工电子测量基础、基础型实验、综合设计型实验、计算机辅助分析实验和电工实验相关知识,共五个部分,着重培养学生的实验方法与手段、实践与动手能力、综合分析能力和创新意识。

本书可作为高等院校工科电工学实验课程的教材或实验指导书,也可供其他工科专业参阅和选用。

图书在版编目(CIP)数据

电工学实验/白雪峰等编著. —北京:机械工业出版社,2012.5
21世纪高等院校电气信息类系列教材
ISBN 978-7-111-37695-8

I. ①电… II. ①白… III. ①电工学-实验-高等学校-教材
IV. ①TM1-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第043124号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:时 静

责任编辑:时 静 张 博

责任印制:杨 曦

北京鑫海金澳胶印有限公司印刷

2012年4月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·8印张·192千字

0001—3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-37695-8

定价:19.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页、由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步、整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织出版了这套“21 世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

电工学实验是学习电工电子技术的一个重要环节，对巩固和加深课堂教学内容、提高学生实际工作技能、树立严谨的科学作风并为后续课程的学习和从事实践技术工作起着非常重要的作用。为适应电工电子技术的发展和高等教育教学改革的要求，提高学生实验技能和培养学生独立分析问题、解决问题的能力，作者结合当前一些新技术及实验设备的应用，在内蒙古工业大学电工学教研组多年教学经验的基础上，编写了此书。

作者参照“电工学”课程的教学要求及改革需求，努力做到既保留教学基本要求中所规定的基本实验，尽可能地反映工程中常用电气测量仪器仪表的使用方法、实验方法与手段，又体现教学改革的精神，重视训练学生的电气技能、综合实践能力及创新意识，反映当前电气工程的新技术和新的测试手段。

本书内容包括五个章节：第1章为电工电子测量基础；第2章为基础型实验，包括12个实验；第3章为综合设计型实验，包括5个实验；第4章为计算机辅助分析实验，包括3个实验；第5章为电工实验相关知识。其中，基础型实验及综合设计型实验中的电工技术部分由白雪峰老师编写；基础型实验及综合型设计实验中的电子技术部分由孙志诚老师编写；电工电子测量基础、计算机辅助分析实验及电工实验相关知识由王利强老师编写。全书由白雪峰老师统稿。

本书是内蒙古工业大学信息工程学院电工学教研组多年理论教学和实验教学的总结。考虑到不同层次的需要，实验内容的安排既有测试、验证的内容，也有设计、研究及综合应用的内容。部分实验内容要求学生自己完成方案选择、实验步骤及记录表格等，充分发挥学生的创造性和主动性。

在本书编著过程中，得到了内蒙古工业大学电工学教研组同事们的热情帮助，提出了许多宝贵的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢。

书中难免存在错误和不妥之处，恳请使用本书的老师和同学批评指正。

作 者
2012年1月

目 录

出版说明

前言

第1章 电工电子测量基础 1

- 1.1 常用电工电子仪器、仪表的使用 1
- 1.2 电工电子测量方法 6
 - 1.2.1 电工电子测量的常用方法 6
 - 1.2.2 测量中的安全手段及故障检测 9
- 1.3 测量误差分析 9
 - 1.3.1 测量误差的表示法 10
 - 1.3.2 仪表的误差及准确度 10
 - 1.3.3 测量误差的分析 11
- 1.4 测量数据表示法 13
 - 1.4.1 测量结果的表示 13
 - 1.4.2 测量数据的表示法 14

第2章 基础型实验 15

- 2.1 叠加原理 15
- 2.2 戴维南定理 17
- 2.3 正弦交流电路的参数测定 20
- 2.4 功率因数的提高 24
- 2.5 三相交流电路中电压、电流的
测量 27
- 2.6 异步电动机的继电-接触器控制 31
- 2.7 基于 PLC 的三相异步电动机
控制 35
- 2.8 晶体管单管放大电路的测试 40
- 2.9 集成运算放大器的应用 43
- 2.10 门电路与组合逻辑电路 48
- 2.11 双稳态触发器及其应用 52
- 2.12 555 定时器的应用 57

第3章 综合设计型实验 62

- 3.1 简易万用表电路的实现 62
- 3.2 PLC 的应用设计 66
- 3.3 直流稳压电源 68

- 3.4 计数器及其应用 72

- 3.5 四人抢答器电路的实现 75

第4章 计算机辅助分析实验 79

- 4.1 基本电路的仿真 79
- 4.2 模拟电路的仿真 83
- 4.3 数字电路的仿真 85

第5章 电工实验相关知识 90

- 5.1 欧姆龙可编程序控制器编程软件的使用 90
 - 5.1.1 CX-Programmer 软件主界面及各部分功能 90
 - 5.1.2 使用 CX-Programmer 软件编程 96
 - 5.1.3 程序下载和监视程序 99
- 5.2 电路仿真工具 Multisim 的介绍 101
 - 5.2.1 Multisim 简介 101
 - 5.2.2 Multisim 的电路创建基础及仿真 106
 - 5.2.3 仿真实例 110
- 5.3 常用元器件的使用知识 111
 - 5.3.1 电阻器 111
 - 5.3.2 电容器 113
 - 5.3.3 电感器 115
 - 5.3.4 二极管 116
 - 5.3.5 晶体管 116
 - 5.3.6 晶闸管 117
- 5.4 常用数字集成电路组件的引脚图 118
- 5.5 电气测量仪表刻度盘上的标志及端钮符号 119
 - 5.5.1 仪表刻度盘上的标志符号 119
 - 5.5.2 仪表端钮符号 119

参考文献 120

第1章 电工电子测量基础

1.1 常用电工电子仪器、仪表的使用

电气测量是电工电子实验中不可缺少的一个重要部分，它的主要任务是测量电流、电压、电功率和电阻等各种电气参数。正确使用各种电工电子仪器、测量仪表是完成全部测量任务的基础。

1. 电压表、电流表的使用

根据被测量的大小，电压表可分为毫伏表、伏特表和千伏表；电流表可分为微安表、毫安表和安培表。

1) 型式的选择：测量直流电压、电流时，可使用磁电式、电磁式或电动式仪表（直流电表）。由于磁电式的灵敏度和准确度高，所以使用最为广泛；测量交流电压、电流（有效值）时，则只能选用电磁式或电动式的仪表（交流电表），其中电磁式仪表较为常用。可见电磁式或电动式仪表可以交、直流两用。整流式仪表用于测量周期电压、电流的平均值。不同型式仪表的符号见 5.5 节。

2) 接线方法：电压表必须并接在被测电压的两端；电流表必须串接到被测量的电路中。使用磁电式仪表测量直流量时，还应注意仪表接线端钮上的“+”、“-”极性标记，应和被测两点的高低电位相一致，不能接错，否则指针会反转，并且损坏仪表。

3) 量程的选择：选择电压表、电流表量程时，应使所选量程大于被测电压的值，以免损坏仪表。此外，在选择量程时还应注意使指针尽可能接近满标值，最好让仪表工作在不小于满标值的三分之二的区域，以提高测量的准确度。

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不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。而实际使用的电工仪表都不能满足上述要求。因此，测量仪表一旦接入电路，就会改变原有的工作状态，这就导致仪表的读数与电路原有的实际值之间出现误差，这种测量误差值的大小与仪表本身内阻值的大小密切相关。

2. 万用表的使用

万用表可测量多种电气参数，虽然准确度不高，但是使用简单，携带方便，特别适合检查线路和修理电气设备时使用。万用表有指针式和数字式两种。

常用指针式万用表的正确使用方法如下：

(1) 端钮（或插孔）的正确选择

① 万用表一般配有红、黑两种颜色的表笔，面板上也有红、黑两色端钮或标有“+”、“-”极性的插孔。使用时应将红表笔接红色端钮或插入标有“+”号的插孔内，黑表笔接黑色端钮或插入标有“-”号的插孔内。需要说明的是，面板上的“+”端是接至内部电池的负极上的，而“-”端是接至内部电池的正极上的。

② 测量电流与电压的方法与一般电表相同，即测电流时串接于电路，测电压时并接于电路。测量直流时要注意正、负极性，红表笔接正极，黑表笔接负极。

(2) 机械调零和欧姆调零

用万用表测量前，应通过面板上的调零螺钉进行机械调零，以保证测量的准确性。

在测量电阻时，每转换一次量程，都要进行欧姆调零。方法是将两根表笔短接，如指针不在 $R=0$ 的位置上，则调整面板上的“欧姆调零”旋钮，使指针指零，如果这种方法不能使指针指零，则说明表中所用电池的电压不足，应更换新电池。

(3) 选择正确的转换开关位置

① 根据测量对象，将转换开关转至需要的位置上。例如测量电流时，转换开关转至相应的（直流或交流）电流档；测量电压时，转换开关转至相应的（直流或交流）电压档。

② 合理选择量程。测量电压或电流时，应使被测量的值落在量程的 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 范围内；测量电阻时，测量值应尽量落在欧姆表中心值的 $0.1 \sim 10$ 倍范围内。这样，读数比较准确。

(4) 结束测量

测量完毕，将转换开关转至交流电压档最大量程位置上或旋至“OFF”档。

数字式万用表一般有 4 个表笔插孔，测量时黑表笔插入 COM 插孔，红表笔则根据需要，插入相应的插孔。数字式万用表的使用方法与指针式万用表大体相同，但与指针式万用表比较，测量准确度较高，测量范围较大，此外，还可检查半导体二极管的导电性能，并能测量晶体管的电流放大系数 h_{fe} （即 β ）和检查线路的通、断。使用时还应注意以下几点：

① 当数字式万用表在测量档位显示 1 时，说明已超过量程，需调高一档。

② 与指针式万用表不同，数字式万用表红表笔接内部电池的正极，黑表笔接内部电池的负极。测量二极管功能时（在相应的档位上），显示值为二极管正向压降，二极管接反则显示 1。

③ 测晶体管的电流放大系数 β 时，由于工作电压仅为 2.8V ，测量值为近似值。

④ 测量结束应关闭电源。

不论是数字式万用表还是模拟式万用表，测量高电压、大电流时，不可带电转换开关，以免电弧烧毁转换开关触点；严禁带电测电阻；长期不用时，应取出电池，防止漏电。测未知的电压或电流时，应先选择最高档，然后逐渐转至适当档位以避免烧坏表内电路。

3. 功率表的使用

直流电流中功率 $P = UI$ ，可利用电压表、电流表分别测量被测电路或元器件的端电压及流过的电流而得到。

正弦交流电路中的功率包括电阻元件消耗的有功功率，储能元件上用于能量互换的无功功率，及表示电源设备容量的视在功率。有功功率的测量可采用有功功率表，简称功率表，无功功率的测量可使用无功功率表。当然利用（有功）功率表也可以测量无功功率。

功率表可分为安装式功率表（为直读单量程式，表上的示数即为功率数）和便携式功率表（一般为多量程式指针表），下面介绍便携式功率表的使用。

1) 使用方法：便携式功率表（又称瓦特表）是一种电动式仪表，一般内部含有两个电流线圈和一个可动电压线圈，其表头如图 1-1-1 所示（以 D34-W 为例）。两个电流线圈可串联或并联，因而可得两个电流量限，如功率表电流量限为 $0.5\text{A}/1\text{A}$ ，电流量程换接片采

用图 1-1-1 中虚线（横向）的接法，即为功率表的两个电流线圈串联，其量限为 0.5 A；如换接片按实线（纵向）连接，即功率表两个电流线圈并联，量限为 1 A。使用时，其电流线圈应与负载串联；其电压线圈应并联到被测负载上，有三个量限。

电流线圈和电压线圈都有一端标有“*”号，这两端为同极性端（同名端），接线时必须将同极性端接在同一根电源线上，以保证两线圈电流都能从该端子流入。按此原则，功率表的接线法有两种，如图 1-1-2 所示，图中 1、2 端之间为电流线圈，3、4 端之间为电压线圈。图 1-1-2a 为电压线圈前接方式，适用于负载电阻远大于电流线圈电阻（即电流小、电压高、功率小的负载）的测量；图 1-1-2b 为电压线圈后接方式，适用于负载电阻远小于电压线圈电阻及大电流、大功率负载的测量。当弄不清电源线在负载哪一边时，指针可能反转，这时只需将电压线圈端钮的接线对调一下，或将装在电压线圈中改换极性的开关转换一下即可。

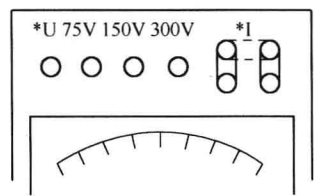


图 1-1-1 功率表表头

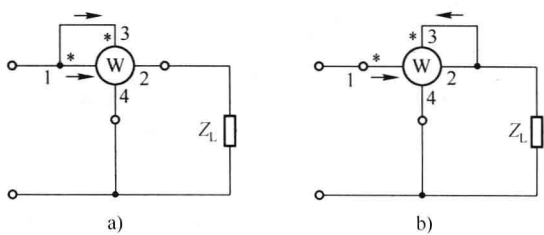


图 1-1-2 功率表接线图

2) 读数：由于功率表是多量程的，而面板上一般只刻有一条标度尺，所以在选用不同的量程时，每一分格就代表不同的功率数。因而功率表指针的读数（分格数）要乘以系数 K 才能得出所测的实际功率。即功率为

$$P = K \times \text{读数}$$

式中，系数 $K = \frac{U_e \times I_e}{\alpha_m}$ （瓦/格）。 U_e 和 I_e 分别为功率表的电压量程和电流量程， α_m 为表盘满刻度的分格数（满标值）。

需要注意的是，对于低功率因数表的读数还要乘以表的功率因数 $\cos\varphi$ ，即

$$P = K \times \text{读数} \times \cos\varphi$$

4. 双踪示波器的使用

示波器是一种快速的 X-Y 描绘器，可根据需要描绘出输入信号对另一信号或者输入信号对时间的关系曲线。

利用示波器可以观察周期性变化的电压和电流的波形，同时还可测量电压和电流的幅度、频率、相位、功率等，而且具有输入阻抗高、频率响应好、灵敏度高等优点，因此，它在近代无线电测量技术中得到了广泛的应用。双踪示波器的使用最普遍，它能同时显示两路输入信号的波形，且使用方便。这里以 VP-5220P 双踪示波器为例加以说明，其面板如图 1-1-3 所示。

VP-5220P 双踪示波器的荧光屏上可单独显示每个通道（CH1、CH2）的信号波形，也可在荧光屏上同时看到两个通道的信号波形，还可在荧光屏上观察到两个通道叠加后的信号波形。在使用过程中应把示波器探头的地线与其他设备或实验电路上的参考电位点连接在一

起，即“共地”。如接地不可靠，显示波形会出现严重的干扰，影响正常测量工作。当旋钮开关已处于极限位置时，切勿再用力旋转，以免损坏开关。

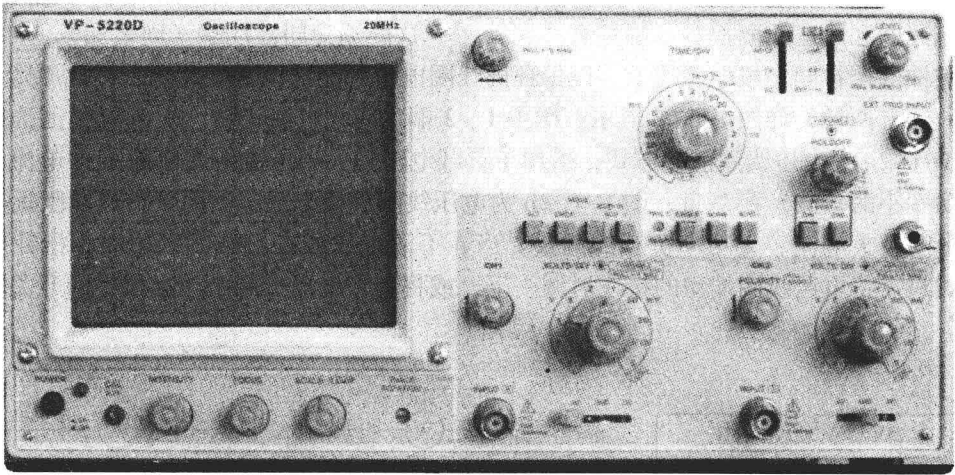


图 1-1-3 VP-5220P 双踪示波器面板

(1) 双踪示波器的使用准备

将 VP-5220P 双踪示波器与电源接通，调节选择示波器的工作方式：

① 垂直系统的通道选择：用于选择信号测量探头的接入通道及工作方式。将“MODE（垂直通道工作方式）”开关置于“CH1”时，只显示通道 1 的输入信号；置于“CH2”时，只显示通道 2 的输入信号；置于“ALT（交替方式）”时，交替显示两个通道的信号，由于交替速度很快，屏幕上看到的是两个稳定的波形，适合于高频信号的显示；置于“CHOP（断续方式）”时，在两个通道间切换显示，同样由于断续切换频率很高，屏幕上看到的是两个完整的波形，适合于高频信号的显示；置于“ADD（相加）”时，加入通道 1 和通道 2 输入端的信号代数相加，并在示波管屏幕上显示其和。通道 2“极性（PULL INVERT）”开关可使显示内容为 CH1 + CH2 或 CH1 - CH2。

② 垂直系统输入耦合方式的选择：选择“DC（直流）”耦合，适用于观察包含直流分量的信号，如信号的逻辑电平和静态信号的直流电平，当被测信号的频率很低时，也必须采用这种方式；选择“AC（交流）”耦合，信号中的直流分量被隔断，用于观察信号的交流分量，如观察较高直流电平上的小信号。选择“GND（接地）”，通道输入端接地（输入信号断开），用于确定输入为零时光迹所处位置。

③ 水平系统扫描方式的选择：扫描方式开关置于“AUTO（自动）”位置，无触发信号（或者触发信号频率低于 50 Hz）时，屏幕上显示光迹，有信号时显示稳定的波形；开关置于“NORM（常态）”位置，无触发信号时，屏幕上无显示，有信号时显示稳定波形。

④ 触发信号源的选择：用于选择触发源为“INT（内）”、“EXT（外）”或“LINE（电源）”。当触发源开关置于“LINE（电源）”触发时，机内 50 Hz 信号输入到触发电路；当触发源开关置于“EXT（外）”触发时，由面板上外触发输入插座输入触发信号；当触发源开关置于“INT（内）”触发时，由内触发源选择开关控制。

在内触发状态下，将“SOTH IN（内触发源选择）”开关置于与通道选择相应的 CH1 或

CH2。当选择“VERT（交替触发）”（CH1 和 CH2 开关同时按下）时，触发源受垂直通道工作方式开关控制；当垂直方式开关置于“CH1”时，触发源自动切换到通道 1；当垂直方式开关置于“CH2”时，触发源自动切换到通道 2；当垂直方式开关置于“交替”时，触发源与通道 1、通道 2 同步切换，在这种状态使用时，两个不相关的信号其频率不应相差很大，同时垂直输入耦合应置于“AC”，触发方式应置于“自动”或“常态”。当垂直方式开关置于“断续”和“代数和”时，内触发源选择应置于“CH1”或“CH2”。

最后，调节“垂直位移”和“水平位移”旋钮，使荧光屏上出现扫描线，并调节“辉度”、“聚集”旋钮，使扫描线成为一条亮度适中、均匀光滑而纤细的光迹，并位于屏幕中央。

另外需说明的是，面板上的触发“HOLDOFF（释抑）”旋钮的作用是暂时将示波器的触发电路封闭一段时间（即释抑时间），在这段时间内，即使有满足触发条件的信号波形点示波器也不会触发。释抑也是为了稳定显示波形而设置的功能。

(2) 电压测量中的应用

将“V/div（伏特/格）”微调旋钮置于“CAL（校准）”位置，耦合方式“AC—GND—DC”开关置于“AC”或“DC”，以测交流或直流信号。在 CH1 或 CH2 通道口接入被测信号。

对于直流电压，置“扫描方式”开关于“AUTO”，选择扫描速度以使扫描不发生闪烁现象。然后置“交流—地—直流”开关于“GND”，此时的扫描显示作为如图 1-1-4 所示的 0V 基准线，调节垂直“位移”旋钮，使该扫描线准确地落在水平刻度线上，以便于读取信号电压。再置“交流—地—直流”开关于“DC”，并将被测电压加至输入端，扫迹的垂直位移即为信号的电压幅度，如果扫迹上移，被测电压相对于地电位为正；如果下移，该电压为负。此时电压值为

用探头的 ×1 位置测量：

$$\text{电压(V)} = \text{“伏特/格”设定值(V/格)} \times \text{输入信号显示幅度(格)}$$

用探头的 ×10 位置测量：

$$\text{电压(V)} = \text{“伏特/格”设定值(V/格)} \times \text{输入信号显示幅度(格)} \times 10$$

在测量直流电压时示波器具有高输入阻抗、高灵敏度、快速响应的功能。

对于交流量，调整“V/div”，并使被测信号的波形稳定地位于屏幕中央，如图 1-1-5 所示，则信号的峰—峰值电压为

用探头的 ×1 位置测量：

$$U_{p-p}(V) = \text{“V/div”设定值} \times \text{波形所占垂直方向的刻度数(div)}$$

用探头的 ×10 位置测量：

$$U_{p-p}(V) = \text{“V/div”设定值} \times \text{波形所占垂直方向的刻度数(div)} \times 10$$

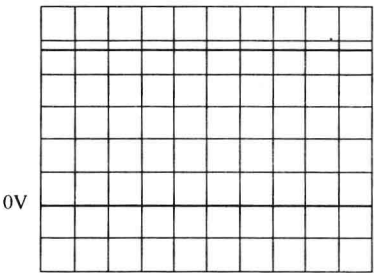


图 1-1-4 直流电压的测量

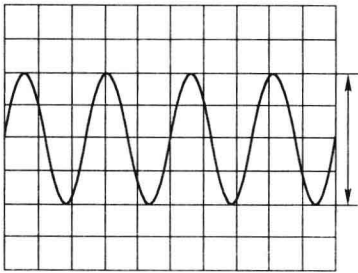


图 1-1-5 交流电压的测量

(3) 时间（频率）测量中的应用

将“t/div(s/格)”微调旋钮置于“CAL（校准）”位置，调整“t/div”旋钮。这样，被测信号波形两点间的时间间隔的测量值为

$$\text{时间(s)} = \text{“t/div”设定值} \times \text{被测两点水平方向的间距(div)}$$

$$\text{频率}(f) = \frac{1}{T}(\text{Hz})$$

式中， T 为信号的变化周期。

(4) 相位测量中的应用

利用双踪显示功能可显示测量两个波形的相位差。图 1-1-6 给出了一个具有相同频率的超前和滞后正弦波双踪显示的例子。在此情况下，“触发源”开关必须置于相位超前信号的通道，同时调节“时间/格”开关使所显示的正弦波一个周期的长度为 9 格。

此时，1 格刻度代表波形相位 40° （1 周期 = $2\pi = 360^\circ$ ）。则两个信号之间相位差为

$$\text{相位差(度)} = T(\text{格}) \times 40^\circ$$

式中， T 是超前和滞后信号与刻度水平中心线（时基线）相交的两点间的距离。

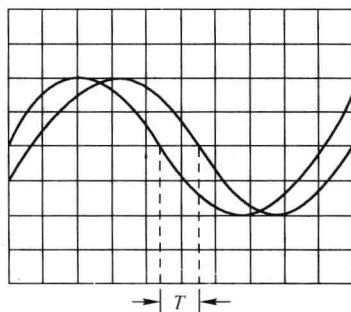


图 1-1-6 相位测量

1.2 电工电子测量方法

1.2.1 电工电子测量的常用方法

电工电子测量就是借助于电工电子测量仪器、仪表对电路的参数、电量及信号特性等进行测量，并按一定的方法得到测量结果。由于测量性质的不同，以及测量结果获得方法的不同，因而测量的方法也不同。常用的测量方法有以下几种：

1. 直接测量法

直接测量，就是直接从测量的实测数据中得到测量结果的方法。如，用电流表测电流，用电压表测电压，用欧姆表测电阻等。直接测量法具有简便、读数迅速等优点。但是测量结果一方面取决于所选测量仪器、仪表的量程、阻抗、准确度等级等，另一方面测量仪器、仪表接入被测电路后，可使被测电路的工作状态发生改变，也会影响测量结果，因而测量精度不高。

2. 间接测量法

间接测量，就是通过测量与被测量有关的量，然后通过计算得出被测量。一般间接测量法比直接测量法的误差要大。下面给出几种间接测量的例子：

(1) 伏安法测线性有源二端网络等效电阻

线性有源二端网络输出电压与电流间的关系特性称为这个网络的外特性（伏安特性），即 $U=f(I)$ 。用图 1-2-1 所示的电路测出网络在不同负载下的电压和电流，就能得到网络的外特性曲线，如图 1-2-2 所示，是一条直线。它与其等效的电压源的外特性（ $U=U_0-IR_0$ ）

相同。根据外特性曲线求出斜率 $\tan\varphi$ ，则等效电阻为

$$R_o = \tan\varphi = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

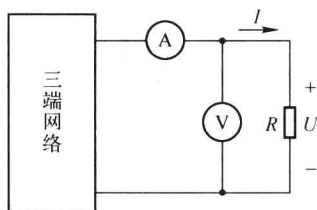


图 1-2-1 外特性测试电路

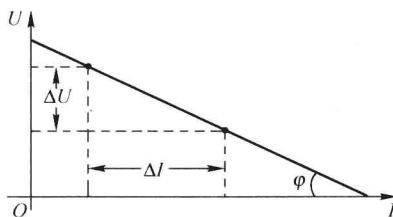


图 1-2-2 外特性曲线

(2) 两次电压测量法测线性有源二端网络等效电阻

测量电路如图 1-2-3 所示，第一次测量 A、B 端的开路电压 U_o ，第二次在 A、B 端接已知电阻 R_L （负载电阻），测量此时 A、B 端的负载电压 U ，则 A、B 端之间的等效电阻 R_o 为

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U} - 1 \right) R_L$$

若负载电压正好为被测网络开路电压的一半，负载电阻 R_L 的大小即为有源二端网络的等效内阻值 R_o 的大小。

(3) 串联电阻法测量放大电路的输入电阻

放大电路的输入电阻是指从放大电路输入端看入电路，放大器所呈现出的等效电阻 r_i 。大小为

$$r_i = \frac{U_i}{I_i}$$

式中， U_i 是加到放大电路输入端的电压有效值， I_i 是流入输入端的电流有效值。

由于 I_i 一般比较小（微安级），若不具备高灵敏度的交流电流表，可采用“串联电阻法”。其原理如图 1-2-4 所示。在被测放大电路与信号源之间串入一个已知的标准电阻 R ，信号源输出电压为 u_s ，放大电路得到的输入电压为 u'_i 。只要测出电阻 R 两端的电压 U_R 及 U'_i 就可求出 r_i 。

$$r_i = \frac{U'_i}{I'_i} = \frac{U'_i}{U_R/R} = \frac{U'_i}{U_R} R$$

另需说明，要直接用交流毫伏表测量 R 两端的电压是困难的，因为 R 两端不接地。使得测试仪器和放大器没有公共地线，干扰太大，不能准确测试。为此，通常是直接测出 R 两端对地的电压即电位值 V_s 和 V'_i 来计算 r_i ，由图 1-2-4 不难求出

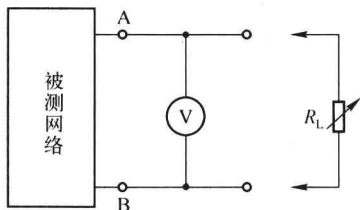


图 1-2-3 两次电压法测量电路

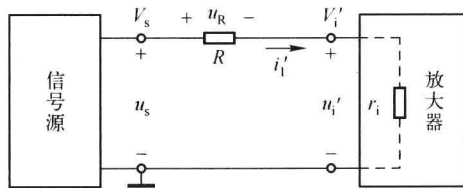


图 1-2-4 串联电阻法测量输入电阻

$$r_i = \frac{U'_i}{U_s - U'_i} R = \frac{V'_i}{V_s - V'_i} R$$

在具体测试过程中，还必须注意两点：第一，已知标准电阻不宜选得过大或过小，否则将使测试误差加大，通常应选取 R 与 r_i 为同一数量级；第二， U'_i 不应取得过大，否则将使晶体管工作在非线性状态，从而使测试不准，一般取 $V'_i = U_i$ 为宜。因此，要用示波器监视被测放大电路的输出波形，应在不失真条件下测试。信号频率应选在所需工作频率上。

3. 比较测量法

比较测量，就是将待测量与标准量在比较仪器中直接比较，从而获得测量结果。常用的比较法有以下三种：

(1) 零示法

零示法是利用待测量与已知量或参考量对测量仪器、仪表的相互作用，使测量仪器、仪表的示值为零，此时待测量与已知量或参考量相等，从而得到待测量的大小。零示法的准确度取决于测量仪器、仪表的准确度及灵敏度。

例如，在测量具有高内阻有源二端网络的开路电压时，用电压表进行直接测量会产生较大的误差。为了消除电压表内阻的影响，往往采用零示法，如图 1-2-5 所示。

其测量原理是用一个低内阻的稳压电源与待测有源二端网络进行比较，当稳压电源的输出电压与有源二端网络的开路电压相等时，电压表的读数将为“0”，然后将电路断开，测量此时稳压电源的输出电压，即为待测有源二端网络的开路电压。

(2) 较差法

较差法是利用待测量与已知量的差值，作用于测量仪器、仪表而实现测量目的的一种方法。较差法有着较高的测量精度。

例如，为测量出直流稳压电源由于电网或负载的变化而引起的输出电压的微小变化量，若无多位的数字电压表，可用较差法来测量，如图 1-2-6 所示。图中， E 是一个标准电源， $E = U_0$ 。当稳压电源有一微小变量时，利用电压表的毫伏档便可测出。

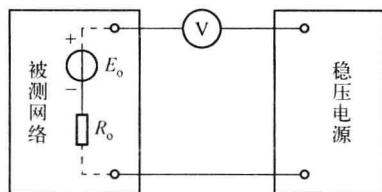


图 1-2-5 零示法测量电路

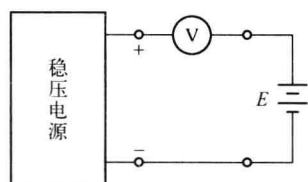


图 1-2-6 较差法测量电路

(3) 替代法

替代法是利用已知量代替待测量，并使测量仪器、仪表的示值不变，这时待测量就等于已知量，从而获得了测量结果。其准确度主要取决于已知量的准确度及测量装置的灵敏度。

例如，测量放大电路的输入电阻时就可采用这种方法，如图 1-2-7 所示。当开关 S 至于位置“1”时，读出交流电压表读数；再将 S 至于位置

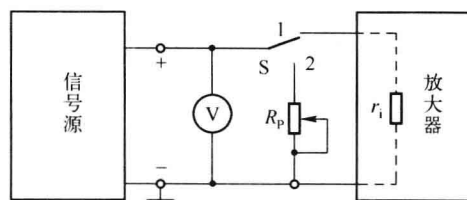


图 1-2-7 替代法测量输入电阻

“2”，调节 R_p ，使交流电压表读数不变，这时 R_p 的阻值即为输入电阻 r_i 的大小。电压的测量也可以采用示波器。

1.2.2 测量中的安全手段及故障检测

1. 安全手段

测量中，为确保人身安全和设备安全，切忌麻痹大意，必须严格遵守安全操作规程。

1) 连接线路测量时，不随意接通电源；不触及带电部分。严格遵守“先接线后通电”，“先断电后拆线”的操作顺序。

2) 使用电子仪器时应先熟悉仪器使用方法，了解各种旋钮的作用；使用仪表时应选择适当量程；使用电机与电器设备时应符合其铭牌上的额定值。

3) 分压器、调压器等可调设备的起始位置要放在最安全位置，仪表档位、量程、指零应先调好。

4) 发现异常现象（设备发热，发出焦味，电机转动声音不正常，以及电源短路熔丝熔断发出响声等）应立即断开电源，然后对其进行检查处理，以免故障面进一步扩大。

5) 注意仪器设备的规格、量程和操作规程。不了解性能和用法时，不得使用该设备。

6) 搬动仪器设备时，必须双手操作，轻拿轻放。

2. 故障检测

在电工电子实验及测量中，会遇到各种各样的故障现象，为确定检测手段与方法，就要判断故障性质，分析故障原因，从而排除故障。

故障性质通常分为破坏性故障和非破坏性故障。破坏性故障是指故障出现时会有打火、冒烟、发声、发热等现象，会对器件、电路或仪器仪表造成永久性损坏。一旦发生此类故障，应立即断开电源，以防故障面扩大；非破坏性故障是指故障改变了电路原有功能，只影响测量结果，不会对器件、电路或仪器仪表造成损坏。

常见的故障原因：仪器设备故障，是指仪器设备自身存在故障或仪器设备使用错误；器件故障，是指选错了器件或器件参数；线路连接故障，是指存在错误接线，导致原电路结构发生改变；操作故障，是指未正确使用仪器仪表或采用了错误的测量方法。

为排除故障，故障的检测可采用以下的方法和手段：

1) 根据故障现象分析故障原因，确定故障位置，从而有针对性的进行故障的检测与排除。

2) 发生破坏性故障时，一定要在断电情况下检查。查找到电路的损坏部分后，进而仔细检查线路的连接、器件的参数等。

3) 断电检测。断开故障电路电源后，通过测量电阻的方法，检查电路是否存在开路或短路的地方；某部分电路、器件的电阻值是否发生了改变；电容、二极管是否被击穿等。

4) 通电检测。此方法只适用于非破坏性故障。接通电路电源，有时可加上输入信号，从电源或信号源开始逐点向后通过测量结点电位或支路电流，逐步查找故障。

1.3 测量误差分析

用仪器仪表对某一被测量进行测量时，由于受到测量仪器精度、测量方法、测量条件及

手段等因素的影响,不可避免地使测量结果与被测量的真值存在一定的偏差,这个偏差就称为误差。

1.3.1 测量误差的表示法

1. 绝对误差

测量值与真值之间的差值称为测量的绝对误差,如用 A_x 表示测量结果, A_0 表示被测量的真值,则绝对误差 Δ 可表示为

$$\Delta = A_x - A_0$$

真值是客观存在的,但又是难以得到的。这里的真值是指人们设法采用各种可靠的分析和处理方法得到的相对意义上的真值。

2. 相对误差

用绝对误差无法比较不同测量结果的准确度,于是人们用测量值的绝对误差 Δ 与被测量的真值 A_0 之比值来评价,并称之为相对误差。相对误差通常以百分数 γ 来表示,即

$$\gamma = (\Delta/A_0) \times 100\%$$

因为 A_0 难以获得,所以有时用 A_x 来代替 A_0 ,则有

$$\gamma = (\Delta/A_x) \times 100\%$$

而绝对误差可以根据测量仪表的修正值或准确度以及理论计算等来得到。

3. 引用误差

相对误差虽然可以用来表示测量结果的准确度,但若用来表示指示仪表的准确度则不太合适。因为指示仪表用来测量某一规定范围(通常为“量限”或“量程”)内的被测量,而不是只测量某一固定大小的被测量。当仪表用来测量不同大小的被测量时,由于 γ 表达式中的分母 A_0 不同,相对误差就随着不同(通常同一块仪表的绝对误差 Δ 基本不变),所以用相对误差来衡量仪表的性能是不方便的。例如,一个测量范围为 $0 \sim 250 \text{ V}$ 的电压表,在刻度 200 V 处基本误差为 2 V ,其相对误差为 1% (设没有附加误差);而在刻度 100 V 处基本误差也是 2 V ,这时相对误差变成了 2% 。因此,通常用“引用误差”来衡量仪表的准确度。引用误差用仪表的基本误差与其量程比值的百分数来表示,即

$$\gamma_n = (\Delta/A_m) \times 100\%$$

式中, γ_n 表示仪表的引用误差; Δ 表示仪表的基本误差; A_m 表示仪表的量程。

1.3.2 仪表的误差及准确度

仪表的准确度,说明仪表的读数与被测物理量的真值相符合的程度。显然,误差愈小,准确度愈高。

1. 仪表误差的分类

根据引起误差的原因,可将仪表误差分为基本误差和附加误差两种。

(1) 基本误差

仪表在正常工作条件下进行测量时,由于内部结构和制作不完善而引起的误差(通常是一个常数),称为基本误差。

仪表正常工作条件通常是指:

- ① 仪表指针调整到机械零位。

- ② 仪表按规定的工作位置放置。
- ③ 除地磁场外，没有外来电磁场。
- ④ 环境温度是 20℃，或为仪表限定温度。
- ⑤ 交流仪表的使用频率符合仪表的规定，所测量的波形为正弦波。

(2) 附加误差

仪表因偏离其正常工作条件而产生的，除上述基本误差以外的误差，称为附加误差。如温度、外来电磁场、频率、波形等不符合正常工作条件时，都会引起附加误差。

2. 仪表的准确度

由于仪表在不同的刻度上对应的基本误差只是近似相等（实际上其值有大有小，符号有正有负），为了保险起见，用“最大引用误差”来衡量仪表的准确度更为合适。最大引用误差为

$$\gamma_{\text{mm}} = (\Delta_{\text{m}} / A_{\text{m}}) \times 100\%$$

式中， γ_{mm} 为仪表的最大引用误差； Δ_{m} 为仪表对应于不同刻度的最大基本误差。

目前我国生产的电气测量指示仪表，按最大引用误差的不同，其准确度 a 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级。随着仪表制造业的快速发展，现已出现了准确度为 0.05 级的仪表。

应该指出，仪表的准确度等级是用来衡量仪表性能的指标，在使用仪表进行测量时它产生的测量误差可能会超过仪表的准确度等级。这可用下面的例子来说明。

例 1-1：用量程为 10A、准确度为 0.5 级的电流表来测量 10A 和 5A 的两个电流。求：两次测量的相对误差。

解：(1) 测量 10A 电流时，仪表的最大基本误差为

$$\Delta_{\text{m}} = \pm a\% \times A_{\text{m}} = \pm 0.5\% \times 10\text{A} = \pm 0.05\text{A}$$

因而，此时的最大相对误差为

$$\gamma = \pm 0.05 / 10 \times 100\% = \pm 0.5\%$$

(2) 测量 5A 电流时，仪表的最大基本误差仍为

$$\Delta_{\text{m}} = \pm a\% \times A_{\text{m}} = \pm 0.05\% \times 10\text{A} = \pm 0.05\text{A}$$

则，此时的最大相对误差为

$$\gamma = \pm 0.05 / 5 = \pm 1\%$$

由此可见，当仪表的准确度（最大引用误差）等级给定后，则被选用仪表的量程大于被测量的范围越小越好（测量误差小）。

1.3.3 测量误差的分析

1. 测量误差的分类

任何一种测量总存在一定的测量误差，为了得到良好的测量结果，必须尽量减小各种误差。为此，应该了解测量误差的分类、性质和产生的原因。测量（包括各种物理量的测量）误差可分为三类：系统误差、随机误差和疏失误差。

(1) 系统误差

在相同的测量条件下，多次测量同一个量时，大小和符号保持恒定或按一定规律变化的误差即为系统误差。如：用重量不准的天平砝码称物，必然产生恒定的误差；用不准的米尺