

电子技术 实验与课程设计

翟卫青 王艳辉 主编



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

电子技术 实验与课程设计

主 编 翟卫青 王艳辉

副主编 张晓朋 赵志敏

参 编 张亚峰 李 宁

王 冠 王瑞尧

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是电子信息类、电气工程类专业共用的电子技术实验与课程设计实践环节教材，全书按照电子技术实验与课程设计预备知识、电子技术基础实验（含模拟电子技术、数字电子技术）、电子技术课程设计等模块进行编写。本书可满足电子信息类、电气工程类各专业电子技术实验与课程设计实践教学的需要。任课教师可根据不同专业的实际需要，对该课程开设学时数、实验数目及内容进行有机组合，以便学生学习与选修。

本书可供高等院校电子信息类、电气工程类专业学生使用，也可供电子、电气工程类技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

电子技术实验与课程设计 / 翟卫青，王艳辉主编. —北京：北京理工大学出版社，2018.8
ISBN 978-7-5682-6053-4

I. ①电… II. ①翟… ②王… III. ①电子技术-实验-高等学校-教材②电子技术-课程设计-高等学校-教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 182536 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775（总编室）

(010) 82562903（教材售后服务热线）

(010) 68948351（其他图书服务热线）

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17

字 数 / 400 千字

版 次 / 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 59.80 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 杜 枝

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

前 言

《电子技术实验与课程设计》是高等院校电类各专业电子实践教学教材，本教材力图体现以应用为目的的高等工程技术教育特点，既着眼于基本技能的培养，又努力反映新技术、新方法，无论是内容还是形式都有特色和新意，凝聚了编者所在院校教学改革的最新成果和经验。

《电子技术实验与课程设计》是高等工科院校电工电子技术课程对实践动手能力的基本要求，全书由四个部分组成，50 个实验，供不同专业、不同学时及不同条件的实验室选做。

本教材力求内容和编排的模块化和可选择性，使学时不同的电子信息类、电气工程类、机械电子类专业、物联网工程专业都方便使用。同时，实施的教学方式灵活，既可作为相应理论课的配套教材，与相应课程同步进行，也可单独设课（一个学期或一个学年内每周 2 学时）。在组织本教材的教学进度时，要重视理论和实践的紧密结合，实验要注意由浅入深、由易到难、循序渐进，才能取得最佳教学效果。

参加本教材编写的有：翟卫青、王艳辉、张晓朋、赵志敏、张亚峰、李宁、王冠、王瑞尧。全书由翟卫青、王艳辉担任主编，负责本书内容的组织和定稿。薛喜昌教授担任本书主审，他对全书的内容和形式提出很多宝贵的意见和建议，编者在此表示诚挚的谢意。

本教材是在相关专业使用十多年的实验讲义基础上编写而成的，同时也参考了大量的国内专业教材和资料，在此向相关作者表示衷心的感谢！

编 者
2018 年 6 月

目 录

第 1 章 电子技术实验与课程设计预备知识	1
1.1 电子测量误差基础	1
1.2 常见电子基本参数的测量	4
1.3 指针式电子仪表的工作原理	10
1.4 数字式电子测量仪表的工作原理	16
1.5 电子电路的安装调试和故障处理	20
1.6 实验室供电系统及安全用电常识	25
第 2 章 模拟电子技术实验	29
2.1 实验一：常用电子仪器的使用练习	29
2.2 实验二：晶体管共射极单管放大器	34
2.3 实验三：共集极三极管放大电路测试——射极跟随器	39
2.4 实验四：差动放大器性能测试	42
2.5 实验五：负反馈放大器测试	46
2.6 实验六：运算放大器应用	50
2.7 实验七：有源滤波器参数测试	56
2.8 实验八： RC 正弦波振荡器测试	61
2.9 实验九：电压比较器测试	65
2.10 实验十：OTL 功率放大器调试与测量	68
2.11 实验十一：直流稳压电源测试与设计	72
2.12 实验十二：精密全波整流电路测试	74
2.13 实验十三：晶体管两级放大电路设计	77
第 3 章 数字电子技术实验	85
3.1 实验一：集成逻辑门电路功能测试	85
3.2 实验二：集成逻辑门电路的参数测试	89
3.3 实验三：组合逻辑电路的分析与设计	93
3.4 实验四：译码器及其应用	98
3.5 实验五：数据选择器及其应用	105
3.6 实验六：触发器及其应用	111
3.7 实验七：移位寄存器及其应用	118
3.8 实验八：计数器及其应用	125
3.9 实验九：自激多谐振荡器——脉冲信号产生电路	130

3.10	实验十：单稳态触发器与施密特触发器——脉冲延时整形电路	134
3.11	实验十一：555 定时器功能及应用	140
3.12	实验十二：D/A、A/D 转换器	147
3.13	实验十三：数字秒表设计	152
3.14	实验十四：病房呼叫系统设计	158
第 4 章	电子技术课程设计	166
4.1	电子电路设计的方法与步骤	166
4.2	模拟电子技术课程设计实例	169
4.3	模拟电子技术课程设计推荐选题	176
4.4	数字电子技术课程设计实例	179
4.5	数字电子技术课程设计推荐选题	190
第 5 章	常用电子实践训练平台和仪器	194
5.1	DZX-1 型电子学综合实验装置使用说明	194
5.2	UTD2062C 型数字存储示波器使用说明	197
5.3	VC9801A 型数字万用表使用说明	199
5.4	F20A 型数字合成函数信号发生器使用说明	204
第 6 章	常用电子实践训练元器件	216
6.1	常用电路元件的性能和规格	216
6.2	半导体分立器件的简单识别与型号命名法	228
6.3	常用线性集成电路	237
6.4	常用数字集成电路	245
6.5	面包板使用方法及连接	253
参考文献		259

第 1 章

电子技术实验与课程设计预备知识

1.1 电子测量误差基础

电子测量的方法按获得测量对象数值的途径一般分为直接测量法、间接测量法两种。直接测量法在测量过程中能从仪器、仪表上直接读出被测参量的波形或数值的大小；间接测量法是先对各间接参量进行直接测量，并将测得的数值代入公式，通过计算得到待测参量。电子测量获得的数据，因测量仪器、测量方法、测量环境、人为因素等的影响，测量结果往往偏离真实数值，产生测量误差。

1.1.1 数据的有效数字

1. 有效数字和有效数字位数

测量得到的结果往往都是近似值。例如，用电压表测量电压时，指针的位置如图 1-1-1 所示，此时电压读数可读成 27.5 V。很明显，2 和 7 两个数字是准确的，称为准确数字；而末位的数字 5 则是根据指针在标尺的最小分格中的位置估计出来的，是不准确数字，称为欠准数字。准确数字和欠准数字在测量结果中，都是不可缺少的，它们统称为有效数字，即从左边第一个非零的数字到右边最后一个非零数字为止所包含的数字。有效数字不但包含了被测参量的大小，也确定了测量的精度。在测试中，记录数据时读数只应保留一位欠准数字，超过一位欠准数字的估计数字是没有意义的。例如，如果将图 1-1-1 的电压读数读为 27.51 V，则末位数 1 是毫无意义的。保留有效数字位数的多少与小数点无关，如 27.5 和 275 都是三位有效数字。0 在数字之间或数字之末算作有效数字，而在数字之前不算作有效数字，如 5.80 和 5.8，两种写法表示的是同一个数值，但前者是 3 位有效数字，后者只有 2 位有效数字，反映了不同的测量精确度。另外，大数值与小数值要用幂的乘积形式表示，如 3 500 V 应记作： 3.5×10^4 V。在表示误差时，一般只取一位有效数字，最多取两位有效数字。

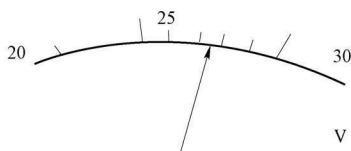


图 1-1-1 有效数字读取示意图

2. 有效数字的运算规则

1) 修约规则

当有效位数确定后，可对有效位数右边的数字进行处理，即把多余位数上的数字全舍去，或舍去后再向有效位数的末位进一。这种处理方法叫作数的修约，它与传统的“四舍

五入”方法略有不同。修约方法应按国家标准 GB 8170《数值修约规则》进行。

2) 进舍规则

进舍规则可概括为以下几句口诀：四舍六入五不定，五后非零则进一，五后皆零视五前，五前奇数则进一，五前偶数则舍去。

3) 删除规则

对测量数据进行运算之前，检查其中有无异常数据，有则删除。

4) 平均数有效位数的确定

平均数的有效位数分下述两种情况确定：

(1) 求 4 个以下的有效数的平均数时，平均数的有效位数与和值的有效位数相同；

(2) 求 4 个或 4 个以上的有效数的平均数时，平均数的有效位数应比和值的有效位数多一位。

3. 有效数字的运算

1) 加法运算

若若干个小数位数不同的有效位数相加时，以小数位数最少的数为标准数，其余各加数的小数位数应修约成比标准数的小数位数多一位，然后相加，其和的小数位数与标准数的小数位数相同。

[例 1-1-1] 计算 $3.513+4.5314+0.04$ 。

解：各加数中，0.04 的小数位数最少，为 2 位小数；所以其余各加数取 3 位小数，然后相加；其和取 2 位小数。其运算过程为：

$$\text{原式} \approx 3.513 + 4.531 + 0.04 = 8.084 \approx 8.08$$

2) 减法运算

减法运算应分下述两种情况进行：

(1) 当两个数值相差较大的有效数相减时，运算法则与加法相同。

(2) 当两个数值相差较小的有效数相减时，运算法则与加法略有不同。先确定小数位数少的数为标准数，另一数的小数位数应尽可能比标准数的小数位数多取几位，以免舍去过多小数位后相减而失去意义（即差值为 0）。差值也应多取几位小数。

[例 1-1-2] 计算 $7.86-7.8598$ 。

解：这两数相差很小，若仍按加法法则计算，原式 $\approx 7.86-7.86=0$ ，差值为 0，失去意义。所以在计算中，小数位数应尽可能多取几位；或者不进行修约，直接计算。即

$$7.86-7.8598=0.0002$$

3) 乘除运算

有效数相乘（或相除）时，以有效位数最少的数为标准数，其余各数修约成比标准数多一位有效数字的数，然后进行计算。其结果的有效位数与标准数的有效位数相同。

[例 1-1-3] 计算 $5.8763 \times 4.2347 \times 0.023$ 。

解：式中，0.023 的有效位数为 2，所以其余两数应修约成有效位数为 3 的数，然后进行计算，其积取两位有效数字。其计算过程为：

$$\text{原式} \approx 5.88 \times 4.23 \times 0.023 = 0.5720652 \approx 0.57$$

4) 平方、开平方

有效数的平方值，其有效位数应比底数的有效位数多取一位；有效数的平方根，其有

效位数也应比被开方数的有效位数多取一位。

[例 1-1-4] 计算 2.15^2 、4.87，并确定有效位数。

解：根据计算法则，所得结果的有效位数为 4。即

$$\begin{aligned} 2.15^2 &= 4.622\ 5 \approx 4.622 \\ \sqrt{4.87} &\approx 2.206\ 807\ 6 \approx 2.207 \end{aligned}$$

1.1.2 误差的基本概念

一般来说，测量仪器的测量准确度通常用允许误差来表示，它是根据技术条件的要求，规定某一类仪器的误差的最大范围。允许误差的表示可以用相对误差表示，也可以用相对误差与绝对误差相结合的形式加以表示。

1. 绝对误差

测量仪表的指示值 X 与被测参量真实值 A_0 之间的差值，称为绝对误差，用 ΔX 表示，即

$$\Delta X = X - A_0 \quad (1-1-1)$$

式中，真实值 A_0 是一个理想的概念。在实际测量时，测量真实值一般采用两种方法：一是以高一级标准仪表的指示值 A 来代替 A_0 ，称为实际值；二是采用多次测量的结果的平均值 A 代替真实值。此时的绝对误差为：

$$\Delta X = X - A \quad (1-1-2)$$

绝对误差是有单位、符号的值，其单位与被测参数单位相同，并不能说明测量的准确性。一般情况下，将与 ΔX 大小相等、符号相反的值，称为修正值，用 C 表示，即

$$C = -\Delta X = A - X \quad (1-1-3)$$

利用修正值可求出测量仪表所表示的实际值，即

$$A = X + C \quad (1-1-4)$$

仪器仪表的修正值通常由生产厂家随仪器仪表以数据表或曲线给出，用于对仪器仪表的读数值的修正。

2. 示值相对误差 γ_x

示值相对误差又称相对真值误差，是绝对误差 ΔX 与仪表指示值 X 的比值，用百分比表示，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

相对误差只有大小，没有单位。在比较测量结果的误差程度时，仅有绝对误差是不够的。实际测量中，一般用相对误差来表示误差的大小。为了减小相对误差，在测量电压和电流时，指针式仪表量程的选择应尽可能使指针接近满偏转（或满刻度的 $2/3$ 以上）。另外，用万用表测量时，所选择的量程应尽可能地使指针指到标尺中心位置附近，此时读数误差最小。

3. 满度相对误差

γ_m 满度相对误差是绝对误差 ΔX 与仪表满度值 X_m 的百分比，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (1-1-6)$$

因为 γ_m 是用绝对误差 ΔX 与一个常数 X_m 的比值来表示的，所以实际上给出的是绝对误差

的大小。若 γ_m 已知, 则在同一量程内绝对误差是一个常数, 因而可反映仪表的基本误差。

1.1.3 测量误差的产生和消除

从误差的来源和性质入手去认识误差并削弱、消除误差, 是最根本的途径和极为有效的措施。误差的产生主要有以下几个方面。

1. 仪器误差

仪器误差是仪器本身电气性能或机械性能不良造成的误差, 如仪器校正不好、刻度不准等造成的误差。消除的方法是预先对仪器进行校准, 配备性能优良的仪器, 并定期计量或校准。

2. 使用误差

使用误差也称为操作误差, 是指在使用过程中仪器和其他设备的安装、调节、布置不正确或使用不当所造成的误差。减小使用误差的方法是测量前详细了解和掌握仪器的使用方法, 严格按操作规程使用仪器, 提高操作技能及分析能力。

3. 方法误差

方法误差是由于测试方法不够完善, 依据的理论不够严格, 或测量定义不明确, 过度的简化或近似等所导致的误差。减小方法误差首先要根据被测的对象选择合理的测试方法, 还要选择合适的仪器仪表, 进行科学的分析和计算。

4. 人身误差

人身误差是由于操作者测试习惯不良所引起的误差。例如, 读刻度盘时视角不垂直表盘, 读数时有偏大或偏小的习惯等。减小该误差, 应提高操作和测试技能, 改正不正确的测试习惯和方法。

1.1.4 测量结果的表示法

首先, 对于测量的误差值, 包括绝对误差、相对误差、不确定度、标准偏差等, 一般只需取一位到两位数字, 过多的位数通常没有什么意义。

其次, 被测量的量值最低位通常与误差最低位对齐。例如, 某频率为 $3\,000.583\text{ kHz} \pm 0.068\text{ kHz}$ 等。

另外, 如果被测量的量值本身低位数字的位比误差低位数还低, 特别是这个量值是经过某些计算包含了较多位数的情况下, 这时应把多余的位数按舍入规则处理掉, 即从与误差最低位对齐处截断。

例如, 计算某电压测量值的算术平均值为 $y = 1.366\,67\text{ V}$, 测量误差为 $\pm 0.31\text{ V}$, 则最后给出测量结果为 $y = (1.37 \pm 0.31)\text{ V}$ 。

1.2 常见电子基本参数的测量

1.2.1 电流的测量

测量直流电流通常采用磁电系电流表, 测量交流电流主要采用电磁系电流表, 比较精密的测量可以使用电动系电流表。测量电流时, 测量机构应串联在被测电路中, 如图 1-2-1 所示。

磁电系测量机构允许通过的电流很小。为了扩大量限，可在测量机构两端并联分流电阻 R_{fl} ，如图 1-2-2 所示。实验室中常用的为多量限电流表，它们并联的分流电阻不同。分流电阻又称为分流器，它有内附式和外附式两种。电磁系和电动系测量机构通入的电流进入固定线圈，可以通入较大的电流。因此，它们的表头可以直接测量较大电流，其改变量限的方法是固定线圈分段串、并换接。如图 1-2-3 为电磁系电流表改变量限线圈的换接方法。电动系电流表改变量限的换接方法与电磁系电流表基本相同，只是要注意测量大电流时，可动线圈与固定线圈并联。

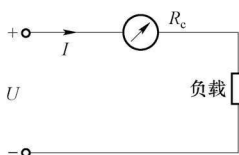


图 1-2-1 磁电系测量机构直接接入电路

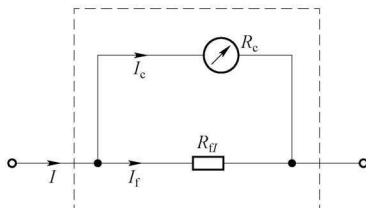


图 1-2-2 磁电系电流表的分流

为了使电路工作不因电流表的接入而受到影响，其内阻必须很小。因此，如果不慎将电流表并联在电路两端，电流表将被烧坏。这一点使用时必须特别注意。

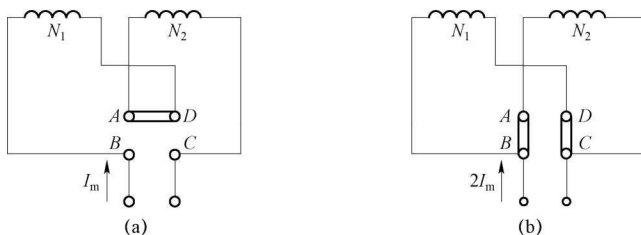


图 1-2-3 电磁系电流表双量限换接示意图

(a) 线圈串联；(b) 线圈并联

1.2.2 电压的测量

测量直流电压常用磁电系电压表，测量交流电压常用电磁系和电动系电压表。电压表测量电压时，必须并联到被测电路，如图 1-2-4 所示。

不管将哪种测量机构并联到电路上，所能测量的电压都很小。为了扩大量程，必须将表头与分压电阻串联。多量限的电压表，有标明不同量限的接线端钮，这些接线端钮分别与不同的分压电阻串联，如图 1-2-5 所示。为了使工作电路不因并入电压表而受到影响，要求电压表的内阻必须很高。磁电系电压表的内阻比电磁系和电动系的内阻大，使用时注意选择。

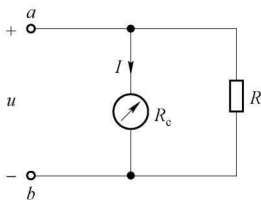


图 1-2-4 电压表测电压

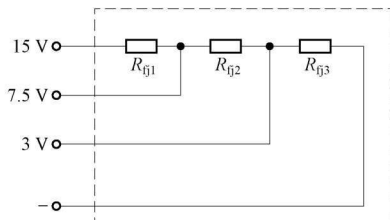


图 1-2-5 电压表扩大量限

1.2.3 频率和时间的测量

频率是电子技术中最基本的参数,它与其他电参数都有密切关系,故在测量中显得特别重要。频率与周期互为倒数,即

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-2-1)$$

这表明 f 频率不仅是电信号的基本参数,而且也是计时的重要参数。所以,频率和时间可以共用一个基准。将此基准统称为时间频率基准,简称为时频标准。

时频标准的研究工作不断取得巨大进展和成果。过去,采用天文测量定标,现在,已采用原子频率标准(即量子频率标准)定标。其准确度可达 10^{-3} 量级,使时间频率的计量进入了一个崭新阶段。目前的电子测量中,频率测量的精确度最高。

必须指出,并不是所有测量场合都需要用这种极高精确度的标准来测量。测量精确度的高低应取决于测量任务和具体要求。如在实验室里研究频率对谐振回路和回路参数的影响时,频率的精确度有 $\pm 1 \times 10^{-2}$ 量级或稍高些就足够了。在测定广播电视发射设备的频率时,其精确度应达到 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 量级。因此一般用频率稳定度很高的石英晶体振荡器,经过一定的频率转换电路,获得所需的标准时间间隔。

1. 电子计算法测量频率和时间

电子计算法是严格按照频率定义进行测量的,它是在某个准确的已知时间间隔 T_0 内,测出电压信号重复出现的次数 N ,然后计算出频率 f ,即

$$f = \frac{N}{T_0} \quad (1-2-2)$$

目前广泛应用数字式频率计,它可以测量周期电压信号的频率,也可测量周期时间。

2. 用示波器测量频率和时间

示波器是实验室中的常用仪器,用它测量频率和周期简便易行。当测量精确度要求不高时,经常采用这种方法。

1) 利用定量扫描测量频率

示波器都有 X 轴水平扫描系统,它是一个线性度良好的锯齿波电压,使得光点的 X 轴位移与时间呈线性关系。目前广泛采用对 X 轴扫描时间进行定量校正后,再把定量值直接刻度在控制旋钮的各挡上。例如 SR-071B 型双踪示波器,当 X 轴扫描速度置于校正挡时,其扫描速度由选择波段开关位置上的对应值决定。例如 $1 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、 $10 \text{ ms}/\text{cm}$ 等,表示荧光屏上 1 cm (相当于一大格)的扫描时间分别为 $1 \mu\text{s}$ 和 10 ms 。

有了扫描时基标准,就能测量信号的频率,而示波器上显示的稳定波形,至少包含一个完整的周期。如果考虑到 X 轴扫描对被测信号的时间延迟,最好显示两个周期以上的电压波形。读数方法如下。

(1) 读出一个周期的时间。

测出两个相邻周期信号同相点之间的 X 轴上的间隔(cm) D_0 ,然后乘以扫描速度 t/cm ,则周期时间为:

$$T = D_0 \cdot t \text{ (s)} \quad (1-2-3)$$

(2) 读出 N 个周期波占有的时间。

测出 N 个周期波同相点之间的距离 D (cm), 扫描速度 t/cm , 则周期时间为:

$$T = \frac{1}{N} \cdot D \cdot t \text{ (s)} \quad (1-2-4)$$

频率为 $f = \frac{1}{T}$ 。

注意: 有的示波器有扫描“扩展”, 一般为“ $\times 5$ ”或“ $\times 10$ ”倍, 它可以使波形在水平方向按倍率扩展, 使扫描速度扩大相应的倍数。实际读数时, 应把扫描时基选择位置上的刻度值除以相应的倍数。

2) 用李沙育图形测量频率

与李沙育图形的对应关系

断开示波器的内部扫描电路, 一般可将时基扫描选择置于“外”, 表示 X 轴由外部输入。而 SR-071B 型双踪示波器是将 Y_2 通道的 X - Y 显示开关拉出, 从 Y_2 输入作为 X 轴的输入端, 然后在示波器的 Y 轴和 X 轴输入两个简谐信号, 荧光屏就显示出李沙育图形, 如图 1-2-6 所示。假设被测频率为 f_y 的信号加在 Y 轴输入端, 已知标准频率为 f_x 的信号加在 X 轴输入端。当调节标准信号源的频率 f_x , 使得两个信号的频率相等, 即 $f_y = f_x$ 时, 其李沙育图形为一条直线, 或一个圆, 或一个椭圆。图 1-2-7 示出了两信号之间的相位差从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化时李沙育图形的变化。由于 f_y 和 f_x 有偏差, 两信号之间的相位差将随时间而变, 相位差从 0° 变到 360° , 李沙育图形将转动一周, 所需时间相当于一个差频 $F (=f_y - f_x)$ 的周期, 也就是说, f_x (可看作基准 f_0) 和 f_y 的频差越大, 图形转动得越快。所以, 我们可测量李沙育图形转动一周所需的时间, 就不难求得频差为:

$$F = \frac{1}{T} - \frac{1}{t} \quad (1-2-5)$$

则被测频率源的频率准确度为:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{F}{f_0} = \frac{1}{tf_0} \quad (1-2-6)$$

式中, t 为李沙育图形转动一周所需的时间, 可用秒表计时; f_0 为标称频率。

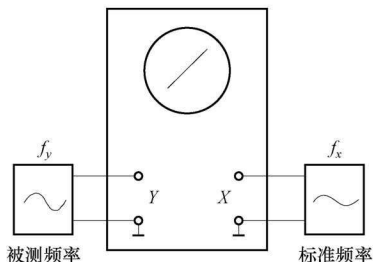


图 1-2-6 测频率线路连接示意图

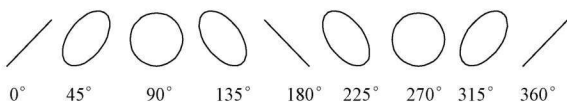


图 1-2-7 待测信号与标准信号的相位差

1.2.4 放大器的放大倍数的测量

放大倍数是放大器最基本的性能指标之一, 它包括电压放大倍数、电流放大倍数和功率放大倍数。在低频电子电路中, 对放大量的测量, 实质上是对电压和电流的测量。

1. 直接测量法

对放大电路放大倍数的测量, 实际上也是对四端网络传输比的测量, 即把放大器看成一个四端口网络。

测量放大倍数的基本方法如图 1-2-8 所示。即在放大电路的输入端接入信号源 U_s , R_s 为信号源内阻。在输出端接额定负载 R_L 。选择信号源的工作频率在放大器的中心频率附近, 这是因为放大器工作在中频时, 电路中的电抗性元件不引起附加相移。如果是调谐放大器, 则选择在电路调谐时的频率, 分别测出输入电压 U_i 和电流 I_i , 以及输出电压 U_o 和电流 I_o , 则放大电路的电压放大倍数为:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (1-2-7)$$

电流放大倍数为:

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \quad (1-2-8)$$

功率放大倍数为:

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = A_u A_i = \frac{U_o I_o}{U_i I_i} \quad (1-2-9)$$

在以上的测量中, 电压和电流均为有效值, 这样测量到的放大量只为数值大小, 不包括输入和输出信号之间的相位关系。如果测量时选用频率不适当, 作为电压放大倍数和电流放大倍数的测量不受其影响, 但功率的测量就必须考虑电压和电流之间的相位差, 因为功率为 $P = UI \cos \phi$, 所以一般放大电路的放大倍数都以中频时的测量值为其性能指标。在测量电压和电流过程中, 还有一些必须注意的事项:

- (1) 整个放大电路的工作要正常, 不能有振荡现象和严重干扰存在。
- (2) 测量仪器的接入不能严重影响电路的工作状态, 不能引入附加的干扰噪声和振荡。
- (3) 输出信号应在没有畸变或在允许有一定失真度的情况下测量。为了保证测量条件的满足, 可以用示波器监视输出信号, 必要时可用失真度仪测量信号失真的大小。当输入信号在 10 mV 以下时, 外界干扰信号的影响比较明显, 一般使用屏蔽线或专用测试电缆线作为信号源和放大电路的连接线。

2. 分压法测量放大倍数

若放大器放大倍数较大, 要求输入信号电压较小, 以致电压表的最小读数也不能满足测量要求时, 则可在信号发生器与放大器之间接入一个适当的分压器, 此分压器实际上可用标准衰减器代替, 如图 1-2-9 所示。当选择 $R_2 \ll R_1$ 时, 放大器的输入电阻 R_i 对分压器的影响可以忽略。通过测量 U_s 和 U_o 的值, 利用下式求出电压放大倍数:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_s}{U_i} \cdot \frac{U_o}{U_s} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{U_o}{U_s} \quad (1-2-10)$$

为了减少误差, 电阻 R_1 和 R_2 应事先测量其值。 R_2 的阻值通常在几十欧以下, 越小越好, 既减小 R_i 的影响, 也可避免 R_2 的引入所造成分布参数和外界干扰的影响。有时为了衰减分压器与信号源内阻相匹配, R_1 和 R_2 的值受到限制时, 为使 R_2 阻值小些, 可再多用一级分压器。

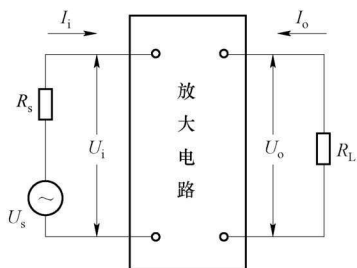


图 1-2-8 直接测量放大倍数示意图

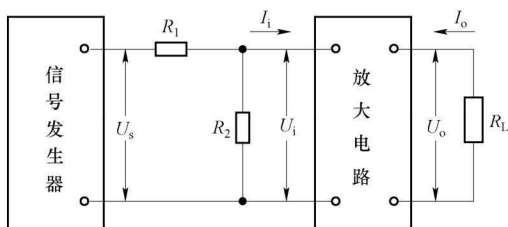


图 1-2-9 分压法测量放大倍数示意图

1.2.5 放大器输入电阻的测量

放大器输入电阻 R_i 是电路的基本动态参数之一。如图 1-2-8 所示，测出电路的输入电压 U_i 和输入电流 I_i 就可求得输入电阻为：

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (1-2-11)$$

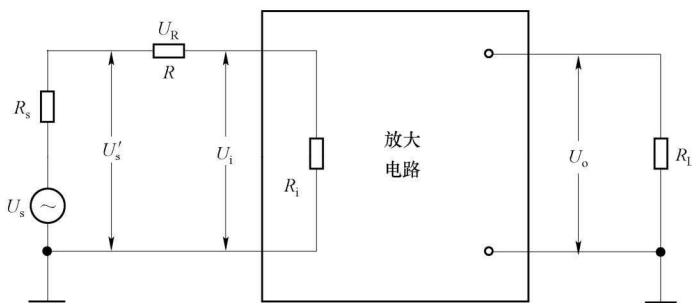
一般规定电路处在中频线性工作区域时，工作信号不产生非线性失真条件下进行输入电阻的测量。一般不采用直接测量法，以下介绍常用的一种间接测量法——串接固定电阻测量法。

如图 1-2-10 所示，电阻 R 的阻值要实际测量，最好不用其标称值。由图 1-2-10 可知，放大器的输入电阻为：

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U'_s} R = \frac{U_i}{U'_s - U_i} R \quad (1-2-12)$$

放大器的 R_i 为纯电阻时，只要分别测出 U'_s 和 U_i 的值就可求出输入电阻。

测量时，电阻 R 的值不宜过大或过小，应与 R_i 的值相当，这样信号源电压 U'_s 不用取得过大， U_i 也能测到明显的数值。

图 1-2-10 串接固定电阻测量 R_i 与输出端加载测量 R_o 示意图

1.2.6 放大器输出电阻的测量

放大电路的输出电阻是衡量电路带负载能力的重要指标，一般希望输出电压源的输出电阻越小越好，而输出电流源的输出电阻越大越好。无论是电压源还是电流源，都可以相互进行等效变换，通常采用常见的等效电压源的方法来测量其输出电阻——输出电路加载测量法。

当被测电路不接负载电阻 R_L 时, 测量在输入信号源 U_s 的作用下的输出电压 $U_{o\infty}$, 如图 1-2-10 所示, 最好测出此时的 U_s 和 U_i ; 然后合上开关 K , 即在输出端接入额定负载 R_L , 在保持 U_s 或 U_i 不变的情况下, 测出输出电压值 U_o , 则放大器的输出电阻为:

$$R_o = \frac{U_{o\infty} - U_o}{U_o} R_L \quad (1-2-13)$$

在测量过程中, 除选择信号源的工作频率为放大器的中频外, 所谓保持 U_s 或 U_i 不变, 应该用电压表监测。同时要保证电路处在线性工作区域, 而且负载 R 的接入不能超过电路的承受能力。

1.3 指针式电子仪表的工作原理

1.3.1 概述

指针式电子仪表种类很多, 但是它们的主要作用都是将被测电量变换成仪表活动部分的偏转角位移。任何电工仪表都由测量机构和测量电路两大部分组成。

1. 测量机构

具有接收电量后就能产生转动的机构, 称为测量机构。它由以下三部分组成。

(1) 驱动装置: 产生转动力矩, 使活动部分偏转。转动力矩大小与输入到测量机构的电量成函数关系。

(2) 控制装置: 产生反作用力矩, 与转动力矩相平衡, 使活动部分偏转到一定位置。

(3) 阻尼装置: 产生阻尼力矩, 在可动部分运动过程中, 消耗其动能, 缩短其摆动时间。

2. 测量电路

一定的测量机构借以产生偏转的电量是一定的, 一般不是电流, 便是电压或是两个电量的乘积。若被测量是其他各种参数, 如功率、频率等, 或者被测电流、电压过大或过小, 都不能直接作用到测量机构上去, 而必须将各种被测量转换成测量机构所能接收的电量, 实现这类转换的电路被称为测量电路。不同功能的仪表, 其测量电路也是各不相同的。

1.3.2 磁电式仪表

1. 磁电式仪表的结构及其工作原理

磁电式仪表是根据通电线圈在磁场中受到电磁力作用的原理制成的。

处于永久磁铁的磁场中的可动线圈中通有电流时, 线圈电流和磁场相互作用而产生转动力矩, 使可动线圈发生偏转。根据左手定则可判断, 在可动线圈的每个侧边上, 将产生如图 1-3-1 所示的作用力 F , 其大小为:

$$F = BlnI \quad (1-3-1)$$

式中 B ——空气隙的磁感应强度;

l ——可动线圈每个受力边的有效长度;

n ——可动线圈匝数;

I ——通过可动线圈的电流。

在图 1-3-1 所示电流和磁场的方向下, 可动线圈将按顺时针方向旋转, 其转动力矩为:

$$M = 2Fr = 2rBl nI \quad (1-3-2)$$

式中, r 为转轴中心到可动线圈有效边的距离。考虑到可动线圈所包围的有效面积 $S = 2rl$, 则

$$M = BS nI \quad (1-3-3)$$

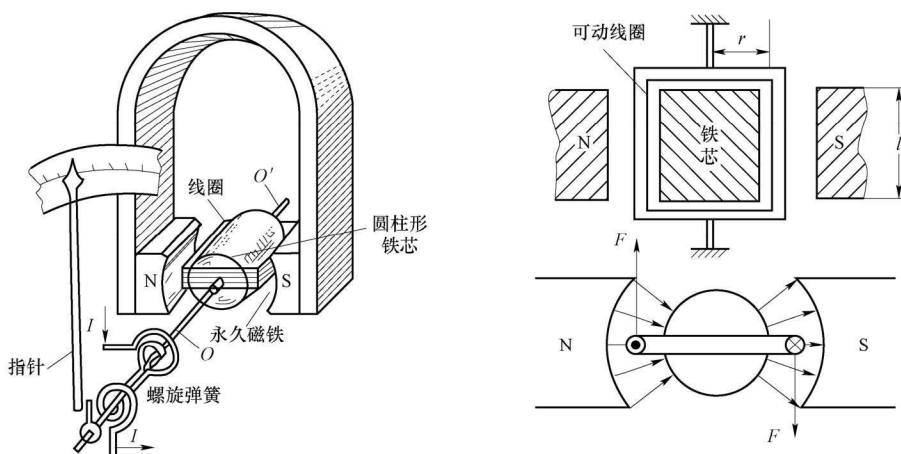


图 1-3-1 磁电式仪表结构

因此, 只要可动线圈通有电流, 在转矩 M 作用下, 仪表的可动部分将产生运动。表针就开始偏转。这时如果没有一个反作用力矩与其平衡, 则不论可动线圈中电流的大小, 可动部分都要偏转到极限位置, 直到指针受挡为止。这样的仪表只能反映被测量的有无, 而看不出被测量的大小。为了使仪表指示出被测量的大小, 就必须加入一个与转动力矩 M 相反的反作用力矩, 并且它随可动线圈偏转角的增大而增加。当两个力矩相等时, 可动部分就停下来, 指示出被测量的数值。

用来产生反作用力矩的元件, 通常是游丝或张丝, 根据游丝的弹力或张丝的扭力与可动部分的转角成正比特性, 仪表的反作用力矩 M_α 为:

$$M_\alpha = D\alpha$$

式中 D ——游丝或张丝的反作用力矩系数;

α ——指针偏转角。

当可动线圈处于平衡状态时, 有

$$M = M_\alpha$$

因此可得

$$\alpha = nBSI / D = S_I I \quad (1-3-4)$$

式中 S ——可动线圈的有效面积;

S_I ——电流灵敏度 ($S_I = nBS / D$)。

从 $S_I = nBS / D$ 可见, 电流灵敏度仅与仪表的结构和材料性质有关, 对每一块仪表来说