



“十三五”普通高等教育本科规划教材

模拟电子技术 实训教程

何东钢 李 响 主 编
霍艳飞 缪新颖 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

模拟电子技术 实训教程

主 编 何东钢 李 响
副主编 霍艳飞 缪新颖
参 编 张 妍 王 魏



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。本书内容循序渐进,注重培养学生独立完成电子设计工作的能力。全书共6章,第1章是基本电参量测试基础,主要介绍测量方法;第2章是电子电路的一般设计方法;第3章是实验数据处理方法;第4章是Multisim在模拟电路中的应用;第5章涵盖了模拟电子技术基础实验;第6章是模拟电子技术综合实践。

本书可作为高等学校电子类、电气类、自动化类和其他相近专业而编写的模拟电子技术基础实验和课程设计教材,也可作为本科生参加各类电子制作比赛的参考资料,还可供高职高专院校师生和工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术实训教程/何东钢,李响主编. —北京:中国电力出版社,2016.3

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8691-4

I. ①模… II. ①何…②李… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第314629号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016年3月第一版 2016年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12.25印张 291千字

定价 24.00

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

模拟电子技术是高等工科院校电子类、电气类、自动化类专业的重要技术基础课,具有很强的实用性。

本书是根据模拟电子技术教学大纲的要求,同时考虑到模拟电路在工程实际中的广泛应用,并总结编者多年的实验教学经验组织编写而成的。

本书在内容的编排上力求全面概括、突出重点。全书共分为6章,第1章是基本电参量测试基础,主要介绍电压、电流、阻抗、频率、增益等测量方法;第2章是常用电子电路的一般设计方法,涵盖设计、组装、调试、检测、成文等几部分;第3章是实验数据处理方法,包括数据记录与图解表示、误差处理方法;第4章是应用一个项目讲解仿真软件 Multi-sim 实现模拟电路的仿真应用;第5章包含有17个实验项目,涵盖了模拟电子技术课程所需的基础实验,通过这17个基本实验,学生对模拟电子技术的内容会有一个基本的了解;第6章是有关模拟电路综合应用的课程设计,共编排了8个较为典型的模拟电子技术综合性应用电路。学生在做综合实验时,需要对模拟电子技术知识有一个较为系统的了解;随书配有实验考核表,方便学生记录实验及保存数据。

本书由大连海洋大学何东钢、李响任主编,霍艳飞、缪新颖任副主编,张妍、王魏参加编写。具体编写分工如下:第1~3章由王魏编写;第4章和第5章5.12、5.14、5.16、5.17由张妍编写;第5章5.1~5.5由霍燕飞编写;第5章5.6~5.9实验、第6章6.1~6.3由何东钢编写;第5章5.10、5.11、5.13、5.15由缪新颖编写;第6章6.4~6.8由李响编写。同时,张家俊参与了本书大量的绘图工作。

在本书的编写过程中,得到了大连海洋大学信息工程学院、应用技术学院领导同仁们的大力帮助,同时本书也参考了大量当今流行的实验实践教材、电路设计和网上资料,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不当和错误之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2015年11月

目 录

前言

第1章 基本电参量测试基础	1
1.1 电压测量	1
1.2 电流测量	6
1.3 阻抗测量	8
1.4 频率测量	13
1.5 增益测量	14
第2章 电子电路的一般设计方法	16
2.1 总体方案设计	16
2.2 单元电路的设计	17
2.3 元器件的选择	17
2.4 参数的计算	19
2.5 审图与实验	19
2.6 总电路图的绘制	21
2.7 撰写设计说明书	22
第3章 实验数据处理方法	23
3.1 实验数据的记录与表示	23
3.2 测量误差的表示	25
3.3 实验结果的图解处理	27
第4章 Multisim 在模拟电路中的应用	30
第5章 模拟电子技术基础实验	34
5.1 实验一 常用电子仪器的使用与练习实验	34
5.2 实验二 常用电子元器件识别与检测实验	38
5.3 实验三 单相整流滤波电路实验	49
5.4 实验四 共射极单管放大器实验	51
5.5 实验五 射极跟随器-共集电极基本放大电路实验	56
5.6 实验六 场效应管放大器实验	59
5.7 实验七 差动放大器实验	63
5.8 实验八 负反馈放大器实验	66
5.9 实验九 集成运算放大器指标测试实验	69
5.10 实验十 集成运放的模拟运算电路实验	75
5.11 实验十一 有源滤波电路实验	79
5.12 实验十二 波形发生器实验	82

5.13	实验十三	电压比较器实验	86
5.14	实验十四	功率放大器实验	90
5.15	实验十五	集成功率放大器实验	93
5.16	实验十六	晶体管稳压电源实验	96
5.17	实验十七	集成稳压器实验	99
第6章 模拟电子技术综合实践			104
6.1	设计实践一	晶体管单级放大器设计	104
6.2	设计实践二	加减运算电路设计	108
6.3	设计实践三	有源滤波器设计	111
6.4	设计实践四	便携式功率放大扩音器设计	112
6.5	设计实践五	射频宽带放大器设计	116
6.6	设计实践六	线性稳压逆变电源设计	124
6.7	设计实践七	函数发生器设计	137
6.8	设计实践八	小信号双声道音频功率放大电路设计	142
附录 实验考核表			153
参考文献			187

第1章 基本电参量测试基础

在现代检测技术中,为了便于对被测量的检测、处理、记录和控制,同时也是为了提高测量的精度,对于各种类型被测量的测量,大多数都是直接或通过各种传感器、电路等转换为与被测量相关的电压、电流、频率等电学参量后进行检测 and 处理的。因此,了解和掌握基本电参量的测量方法十分重要。本章将分别介绍电压、电流、阻抗、频率、增益等参量的测量方法。

1.1 电 压 测 量

电压是电子测量的一个基本参数,电压测量是电子测量的基础。电压是指电场力对电场中的单位正电荷由一点移动到另一点所做的功。很多电子设备都与电压有关,如信号发生器、发射机、接收机等,电压均是其主要的技术指标,其他一些技术指标,例如灵敏度、选择性、增益等也都与电压有关。电路正常工作时,电路中各点的工作电压都有一个相对稳定的正常值或动态变化范围。如果电路中出现开路、短路或元器件性能参数发生改变时,该电路中的工作电压也会跟着发生改变。所以电压测量法就能通过检测电路中某些关键点的工作电压有或者没有、偏大或偏小、动态变化是否正常,然后根据不同的故障现象,结合电路的工作原理进行分析,找出故障的原因。

电压的测量可分为模拟和数字两种方法。前者以模拟式电压表显示测量结果,后者以数字显示器显示测量结果。模拟式电压表的优点是结构简单、价格便宜,测量频率范围较宽;缺点是准确度、分辨力较低,不便于与计算机组成自动测试系统。

1.1.1 直流电压的测量

1. 普通直流电压表

普通直流电压表通常由动圈式高灵敏度直流电流表串联适当的电阻构成,如图 1-1-1 所示。

设电流表的满偏电流(或满度电流)为 I_m , 电流表本身内阻为 R_c , 串联电阻 R_n 所构成的电压表的满度电压为

$$U_m = I_m(R_c + R_n) \quad (1-1-1)$$

所构成的电压表的内阻为

$$R_v = R_c + R_n = \frac{U_m}{I_m} \quad (1-1-2)$$

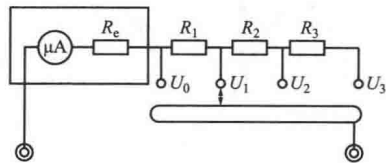


图 1-1-1 普通直流电压表电路

如图中电流表串接三个电阻后,除最小电压量程 $U_0 = I_m R_c$ 外,又增加了 U_1 、 U_2 、 U_3 三个量程,根据所需扩展的量程,可估算出三个扩展电阻的阻值

$$\begin{cases} R_1 = U_1/I_m - R_c \\ R_2 = (U_2 - U_1)/I_m \\ R_3 = (U_3 - U_2)/I_m \end{cases} \quad (1-1-3)$$

通常把内阻 R_v 与量程 U_m 之比 (Ω/V , 每伏的欧姆数) 定义为电压表的电压灵敏度, 即

$$K_v = R_v / U_m = 1 / I_m \quad (1-1-4)$$

由此可见, “ Ω/V ” 数越大, 表明为使指针偏转同样角度所需的驱动电流越小。“ Ω/V ” 数一般标明在磁电式电压表表盘上, 可依据它推算出不同量程时的电压表内阻, 即

$$R_v = U_m / I_m = K_v U_m \quad (1-1-5)$$

在工程测量中为了满足测量准确度的要求, 常采用输入电阻和电压灵敏度高的模拟式直流电子电压表进行测量。

2. 直流电子电压表

直流电子电压表通常是在磁电式表头前加装跟随器 (以提高输入阻抗) 和直流放大器 (以提高测量灵敏度) 构成, 当需要测量高直流电压时, 输入端接入由高阻值电阻构成的分压电路。

直流电子电压表中的直流放大器的零点漂移影响电压灵敏度的提高, 为此, 电子电压表中常采用斩波稳零式放大器或称调制式放大器以抑制零点漂移, 使电子电压表能测量微伏级的电压。跟随器分为电压跟随器和电流跟随器。

1.1.2 交流电压的测量

1. 交流电压的表征

交流电压可以用峰值、平均值、有效值、波形系数及波峰系数来表征。

(1) 峰值。周期性交流电压 $u(t)$ 在一个周期内偏离零电平的最大值称为峰值, 用 U_p 表示。正、负峰值不等时分别用 U_{p+} 和 U_{p-} 表示, 如图 1-1-2 (a) 所示。 $u(t)$ 在一个周期内偏离直流分量 U_0 的最大值称为幅值或振幅, 用 U_m 表示。正、负幅值不等时分别用 U_{m+} 和 U_{m-} 表示。如图 1-1-2 (b) 所示, 图中 $U_0 = 0$, 且正、负幅值相等。

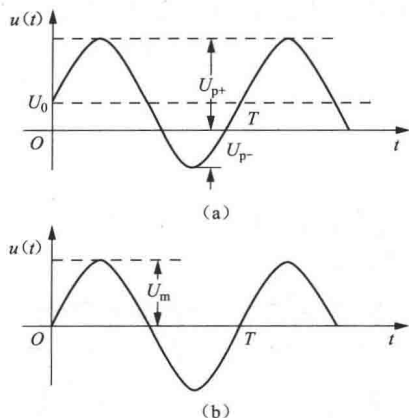


图 1-1-2 交流电压的峰值和幅值

(2) 平均值。 $u(t)$ 的平均值的数学定义为

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (1-1-6)$$

按照这个定义, 实质上就是被测电压的直流分量 U_0 , 如图 1-1-2 (a) 中虚线所示。

在电子测量中, 平均值通常指交流电压检波 (也称整流) 以后的平均值, 又可分为半波整流平均值和全波整流平均值。全波平均值定义为

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \quad (1-1-7)$$

如不另加说明, 平均值通常指全波平均值。

(3) 有效值。一个交流电压和一个直流电压分别加在同一电阻上, 若它们在一个周期内产生的热量相等, 则交流电压有效值 U (或 U_{rms}) 等于该直流电压, 可表示为

$$\int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt = \frac{U^2}{R} T \quad (1-1-8)$$

即

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1-1-9)$$

(4) 波形系数、波峰系数。交流电压的波形系数 K_F 定义为该电压的有效值与平均值之比

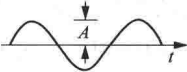
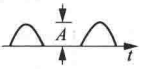
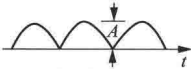
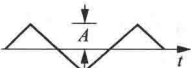
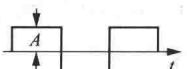
$$K_F = \frac{U}{\bar{U}} \tag{1-1-10}$$

交流电压的波峰系数 K_p 定义为该电压的峰值与有效值之比

$$K_p = \frac{U_p}{U} \tag{1-1-11}$$

不同电压波形，其 K_F 、 K_p 值不同，表 1-1-1 列出了几种常见电压的有关参数。

表 1-1-1 常见电压的有关参数

名称	波形图	波形系数 K_F	波峰系数 K_p	有效值 U	平均值 $\bar{U}$
正弦波		1.11	1.414	$A/\sqrt{2}$	$2A/\pi$
半波整流		1.57	2	$A/2$	A/π
全波整流		1.11	1.414	$A/\sqrt{2}$	$2A/\pi$
三角波		1.15	1.73	$A/\sqrt{3}$	$A/2$
方波		1	1	A	A
锯齿波		1.15	1.73	$A/\sqrt{3}$	$A/\sqrt{2}$

虽然交流电压量值可以用峰值、有效值和平均值表征，但基于功率的概念，国际上一直以有效值作为交流电压的表征量，例如电压表。除特殊情况外，几乎都按正弦波的有效值来定度。当用以正弦波有效值定度的交流电压表测量电压时，如果被测电压是正弦波，那么由表 1-1-1 很容易从电压表读数即有效值得知它的峰值和平均值。如果被测电压是非正弦波，那就需根据电压表读数和电压表所采用的检波方法，进行必要的波形换算，才能得到有关参数。

2. 交流电压的测量方法

测量交流电压的方法很多，依据的原理也不同，其中最主要的是利用交流/直流（AC/DC）转换电路将交流电压转换成直流电压，然后再接到直流电压表上进行测量。根据 AC/DC 转换器的类型，可分为检波法和热电转换法。根据检波特性的不同，检波法又可分为平均值检波、峰值检波、有效值检波等。按照 AC/DC 变换的先后不同，模拟式交流电压表大致可分成以下三种类型：

(1) 检波-放大式。图 1-1-3 所示为检波-放大式电压表的组成方框图，它是将被测电压先检波变成直流电流，然后再用直流放大器放大，放大后的直流电流去驱动电流表偏转。这种类型的特点是“先检波后放大”，故测量电压的频率范围只决定于检波器的频响（一般在

20Hz 至数百 MHz)，通常所称高频电压表或超高频电压表都属于这一类型。早期的检波-放大式电压表，其灵敏度不高，一般约为 0.1V，主要受直流放大器增益的限制。目前，采用调制式直流放大器，可把检波-放大式电压表的灵敏度提高到 mV 级。进一步提高灵敏度将受到检波器件的非线性限制。



图 1-1-3 检波-放大式电压表

(2) 放大-检波式。当被测电压较低时，直接检波会显著增大误差。为提高交流电压表的测量灵敏度，先用宽带放大器放大被测电压，然后再检波。放大-检波式电压表的方框图见图 1-1-4。这种电压表的频率范围主要受宽带放大器带宽的限制，而灵敏度受放大器内部噪声的限制，一般可做到 mV 级，典型的频率范围为 20Hz~10MHz，又称视频毫伏表。



图 1-1-4 放大-检波式电压表

(3) 外差式电压表。检波-放大式电压表的灵敏度受检波器件非线性的限制。而放大-检波式电压表，由于宽带放大器增益和带宽的矛盾，也很难把频率上限提得很高，且两种测量方法的灵敏度都受到仪器内部噪声和外部干扰的限制。如图 1-1-5 所示的外差测量方法可以解决上述矛盾。图中的输入电路包括输入衰减器（用于大电压测量）和高频放大器

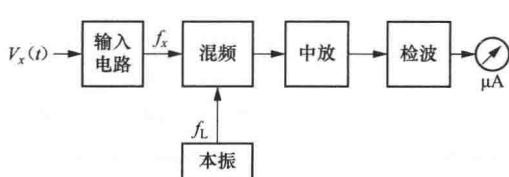


图 1-1-5 外差式电压表

（用于宽频低增益放大）。被测信号通过输入电路，在混频器中与本机振荡器（本振）频率 f_L 混频，输出频率固定的中频（ $f_L - f_x$ ）信号（可改变 f_L 以跟踪信号频率 f_x ，保持 $f_L - f_x$ 不变），用中频放大器选择并放大、检波，并用表头指示。

由于中频放大器具有良好的频率选择性，而且中频是固定的，这样就解决了放大器增益与带宽的矛盾。同时，由于中频放大器有很窄的带通滤波特性，从而可以在高增益条件下，大大削弱内部噪声的影响，使测量灵敏度提高到 μV 级。因此，这类仪表称为高频微伏表。

3. 低频交流电压的测量

通常把测量低频（1MHz 以下）信号电压的电压表称作交流电压表或交流毫伏表。这类电压表一般采用放大-检波式，检波器多为平均值检波器或有效值检波器，分别构成均值电压表或有效值电压表。

平均值电压表中的检波器是平均值检波器，电压表的读数与被测电压的平均值成正比。但是，平均值电压表的表头却不是按平均值定度的，而是按正弦波的有效值定度。这就是说，一个有效值为 U 的正弦电压加到平均值电压表上时，平均值电压表的指示值也为 U 而不是 $\bar{U}$ 。由 $K_F = U/\bar{U}$ 可知，只有将指示值 U 除以正弦波的波形系数 $K_F = 1.11$ ，才能求得被测正弦电压的平均值。

由于表头是按正弦波的有效值定度的,因此表头指示值并不适用于被测电压为非正弦电压的情况。当用平均值电压表测量非正弦电压时,应先将读数值 U_a 除以正弦波的波形系数 $K_F=1.11$,折算成正弦波电压的平均值。由于平均值电压表的读数只与被测电压的平均值有关,与其波形无关,所以正弦波形与非正弦波形的指示值相等,就意味着两者的平均值也相等。折算出的正弦电压的平均值也就是被测非正弦电压的平均值,将此平均值乘以被测电压的波形系数 K_F ,即求得被测非正弦电压的有效值 $U_{x\text{rms}}$ 。因此,波形换算公式为

$$U_{x\text{rms}} = \frac{U_a K_F}{1.11} = 0.9 K_F U_a \quad (1-1-12)$$

显然,如果被测电压不是正弦波时,直接将电压表指示值作为被测电压的有效值,必将带来较大的误差,通常称作波形误差,由式(1-1-12)可得,波形误差计算公式为

$$\gamma = \frac{U_a - 0.9 U_a K_F}{U_a} \times 100\% = (1 - 0.9 K_F) \times 100\% \quad (1-1-13)$$

4. 高频交流电压的测量

高频交流电压的测量不采用放大-检波式(以避免高频测量受放大器通频带的限制),而采用检波-放大式或外差式电压表来测量。最常用的检波放大式高频电压表,都把高频二极管构成的峰值检波器放置在屏蔽良好的探头(探极)内,用探头探针直接接触被测点,把被测高频信号首先变成直流电压,这样可大大减少分布参数的影响和信号传输损失。

采用峰值检波器的电压表,称为峰值电压表。像均值电压表一样,峰值电压表也是按正弦电压的有效值定度的。这就是说,一个有效值为 U 的正弦电压加到峰值电压表上时,峰值电压表的指示值也为 U 而不是 U_p 。据式 $K_p = U_p/U$ 可知,只有将指示值 U_a 乘以正弦电压的波峰系数 $K_p = \sqrt{2}$ 才能求得被测正弦电压的峰值 U_p ,即

$$U_p = \sqrt{2} U_a \quad (1-1-14)$$

如果被测电压为非正弦电压,峰值电压表读数也为 U_a ,那就意味着该被测非正弦电压的峰值也为 $U_p = \sqrt{2} U_a$ 。该被测非正弦电压的有效值 $U_{x\text{rms}}$ 等于其峰值 U_p 除以其峰值系数 K_p ,因此非正弦电压的波形换算公式为

$$U_{x\text{rms}} = \frac{U_p}{K_p} = \frac{\sqrt{2}}{K_p} U_a \quad (1-1-15)$$

1.1.3 电压测量法的检测要点

1. 电源电压的检测

电源是电路正常工作的必要条件,所以当电路出现故障时,应首先检测电源部分。如果电源电压不正常,应重点检查电源电路和负载电路是否存在开路或短路故障。在通常情况下,如果电源部分有开路故障,电源就没有电压输出;如果负载出现开路故障,电源电压就会升高;如果负载出现短路故障,电源电压会降低,甚至引发火灾;对开关电源,还应着重检查保护电路是否正常。

2. 三极管工作电压的检测

通过检测三极管各极的电位,根据三极管在电路中的工作状态进行分析就能找出故障原因。所以在分析和检测前必须掌握各种电路的工作原理,了解被测三极管的工作状态。

3. 集成电路工作电压的检测

通过检测集成电路各引脚的电压,然后把检测结果与正常值进行对比就能初步判断集成

电路本身、该集成电路的相关电路或外围元件是否存在故障。应着重检测电源、时钟、信号的输入输出等引脚的电压。

4. 电路中某些动态电压的检测

在收音机、电视机、录像机、影碟机等设备中,各引脚的电压都会根据不同情况发生动态变化。通过检测这些电压的动态变化,就能快速找出故障原因。

1.1.4 使用电压测量法的注意事项

(1) 使用电压测量法检测电路时,必须先了解被测电路的情况、被测电压的种类、被测电压的高低范围,然后根据实际情况合理选择测量设备(如万用表)的挡位,以防止烧毁测试仪表。

(2) 测量前必须分清被测电压是交流还是直流电压,确保万用表红表笔接电位高的测试点,黑表笔接电位低的测试点,防止因指针反向偏转而损坏电表。

(3) 使用电压测量法时要注意防止触电,确保人身安全。测量时人体不要接触表笔的金属部分。具体操作时,一般先把黑表笔固定,然后用单手拿着红表笔进行测量。

1.2 电 流 测 量

直流电流的测量一般采用直接测量法和间接测量法两种。测量直流电流可采用模拟直流电流表、指针式万用表、数字式万用表等仪器。

1.2.1 电流表直接测量法

直接测量电流的方法通常是在被测电流的通路中串入适当量程的电流表,让被测电流的全部或一部分流过电流表。从电流表上直接读取被测电流值或被测电流分流值。

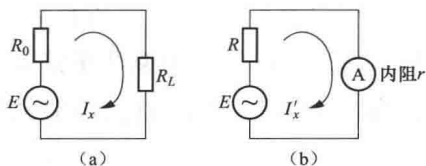


图 1-2-1 用电流表测量电流

对于图 1-2-1 (a) 所示电路,被测电流实际值为

$$I_x = \frac{E}{R_0 + R_L} = \frac{E}{R} \quad (1-2-1)$$

式中 R_0 ——信号源内阻;

R_L ——负载电阻;

R ——电流回路电阻, $R = R_0 + R_L$ 。

在图 1-2-1 (a) 电路中串接一个内阻为 r 的电流表,如图 1-2-1 (b) 所示,则流过电流表的电流即电流表读数值为

$$I'_x = \frac{E}{R + r} = \frac{I_x}{1 + \frac{r}{R}} \quad (1-2-2)$$

相对测量误差为

$$\delta = \frac{I'_x - I_x}{I_x} = -\frac{r}{R + r} \quad (1-2-3)$$

由式 (1-2-3) 可见,为使电流表读数值 I'_x 尽可能接近被测电流实际值 I_x ,就要求电流表的内阻 r 尽可能接近于 0。也就是说,电流表内阻越小越好。

在串入电流表不方便或没有适当量程的电流表时,可以采取间接测量的方法,即把电流转换成电压、频率、磁场强度等物理量,直接测量转换量,根据该转换量与被测电流的对应关系求得电流值。下面介绍几种间接测量电流的转换方法。

1.2.2 电流-电压转换法

可以采用在被测电流回路中串入很小的标准电阻 r , 称为取样电阻, 将被测电流转换为被测电压 U_x 。

$$U_x = I'_x r \quad (1-2-4)$$

$$I'_x = \frac{E}{R+r} = \frac{I_x}{1+\frac{r}{R}} \quad (1-2-5)$$

当满足条件 $r \ll R$ 时, 可得

$$U_x = I_x r \quad \text{或} \quad I_x = \frac{U_x}{r} \quad (1-2-6)$$

若被测电流 I_x 很大, 可以直接用高阻抗电压表测量标准电阻两端电压 U_x ; 若被测电流 I_x 较小, 应将 U_x 放大到接近电压表量程的适当值后再由电压表进行测量。为了减小 U_x 的测量误差, 要求该放大电路应具有极高的输入阻抗和极低的输出阻抗, 因此, 一般采用电压串联负反馈放大电路。

1.2.3 电流-磁场转换法

无论用电流表直接测量电流还是用上述转换法间接测量电流, 都需要切断电路接入测量装置。在不允许切断电路或被测电流太大的情况下, 可采取测量电流所产生的磁场的方法来间接测得该电流的值。

图 1-2-2 所示为采用霍尔传感器的钳形电流表结构示意图。冷轧硅钢片圆环的作用是将被测电流 I_x 产生的磁场集中到霍尔元件上以提高灵敏度, 作用于霍尔片的磁感应强度 B 为

$$B = K_B I_x \quad (1-2-7)$$

式中 K_B ——电磁转换灵敏度。

线性集成霍尔片的输出电压 U_o 为

$$U_o = K_H IB = K_H K_B II_x = KI_x \quad (1-2-8)$$

式中 I ——霍尔片控制电流;

K_H ——霍尔片灵敏度;

K ——电流表灵敏度, $K = K_H K_B I$ 。

若 I_x 为直流, 则 U_o 也为直流; 若 I_x 为交流, 则 U_o 也为交流。霍尔式钳形电流表可测的最大电流达 100kA 以上, 可用来测量输电线上的电流, 也可用来测量电子束、离子束等无法用普通电流表直接进行测量的电流。图 1-2-2 中被测电流导线如果在硅钢片圆环上绕几圈, 电流表灵敏度便会减小几倍。用这种办法可调整霍尔式钳形电流表的灵敏度和量程。

1.2.4 电流互感器法

除上述方法外, 采用电流互感器法也可以在不切断电路的情况下, 测得电路中的电流。

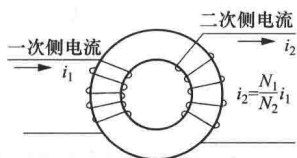


图 1-2-3 电流互感器结构

电流互感器的结构如图 1-2-3 所示, 它是在磁环上 (或铁芯) 上绕一些线圈而构成的。

假设被测电流 (一次侧电流) 为 i_1 , 一次侧绕组匝数为 N_1 , 二次侧绕组匝数为 N_2 , 则二次侧电流为

$$i_2 = i_1 (N_1 / N_2) \quad (1-2-9)$$

可见, 只要测得二次侧电流 i_2 , 就可得知被测电流 (一次侧电

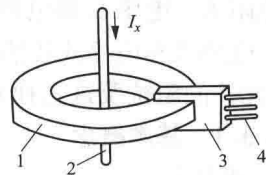


图 1-2-2 霍尔式钳形电流表

1—冷轧硅钢片圆环; 2—被测电流导线;

3—霍尔元件; 4—霍尔元件引脚

流)的大小。

由于电流互感器二次侧绕组匝数远大于原边,在使用时二次侧绝对不允许开路。否则会使一次侧电流完全变成激磁电流,铁芯达到高度饱和状态,使铁芯严重发热并在二次侧产生很高的电压,引起互感器的热破坏和电击穿,对人身及设备造成伤害。此外,为了人身安全,互感器二次侧一端必须可靠地接地(安全接地)。

电流互感器输出的是电流,测量时,互感器二次侧接一电阻 R ,从 R 上取得电压接到放大器或交直流变换器上, R 的大小由互感器的容量伏安值决定(一般常用电流互感器为10VA或5VA), R 上输出电压 U_o 为

$$U_o = i_2 R = i_1 R (N_1 / N_2) \quad (1-2-10)$$

1.2.5 使用电流表的注意事项

- (1) 电流必须从“+”接线柱流入,从“-”接线柱流出电流表。
- (2) 所测电流不要超过电流表的量程。注意:如果预先不知道所测电流的大小,要用试触法试触选择合适的量程。
- (3) 电流表必须和被测用电器串联。
- (4) 任何情况下都不能使电流表直接连到电源的两极上。

1.3 阻抗测量

电阻 R 、电感 L 和电容 C 是电路的三种基本元件,在测量技术中,许多传感器(如电阻式、电感式和电容式传感器)是将被测量转换为电阻、电感和电容输出的。本节研究 R 、 L 、 C 元件的阻抗及这三种元件参数的测量方法。

1.3.1 基本概念

1. 阻抗定义

阻抗是描述一个元器件或电路网络中电压、电流关系的特征参量,其定义为

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX = |Z| e^{j\theta} = |Z| (\cos\theta + j\sin\theta) \quad (1-3-1)$$

式中 $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$ ——电压和电流向量;

R 、 X ——阻抗的电阻分量和电抗分量;

$|Z|$ ——阻抗的模, $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$;

θ ——相角,即电压和电流之间的相位差, $\theta = \arctan(X/R)$ 。

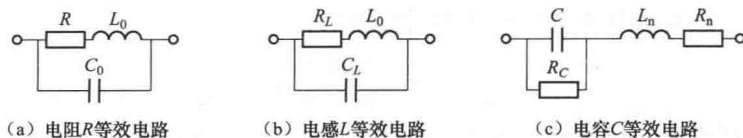
理想的电阻只有电阻分量,没有电抗分量。而理想电感和理想电容则只有电抗分量。电感电抗和电容电抗分别简称为感抗 X_L 和容抗 X_C ,表示为

$$\begin{cases} X_L = \omega L = 2\pi fL \\ X_C = 1/\omega C = 1/2\pi fC \end{cases} \quad (1-3-2)$$

式中 ω 、 f ——信号角频率和频率。

2. 电阻、电感和电容的等效电路

实际的电阻、电感和电容元件,不可能是理想的,存在着寄生电容、寄生电感和损耗。图1-3-1所示为考虑了各种因素后,实际电阻 R 、电感 L 、电容 C 元件的等效电路。

图 1-3-1 电阻 R 、电感 L 、电容 C 元件的等效电路

(1) 电阻。同一个电阻元件在通以直流和交流电时测得的电阻值是不相同的。在高频交流下，须考虑电阻元件的引线电感 L_0 和分布电容 C_0 的影响，其等效电路如图 1-3-1 (a) 所示，图中 R 为理想电阻。由图可知此元件在频率 f 下的等效阻抗为

$$\begin{aligned}
 Z_e &= \frac{(R + j\omega L_0) \cdot \frac{1}{j\omega C_0}}{R + j\omega L_0 + \frac{1}{j\omega C_0}} \\
 &= \frac{R}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega C_0 R)^2} + j\omega \frac{L_0(1 - \omega^2 L_0 C_0) - R^2 C_0}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega C_0 R)^2} \\
 &= R_e + jX_e
 \end{aligned} \quad (1-3-3)$$

式 (1-3-3) 中 $\omega = 2\pi f$, R_e 和 X_e 分别为等效电阻分量和电抗分量，且

$$R_e = \frac{R}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega C_0 R)^2} \quad (1-3-4)$$

从式 (1-3-4) 可知 R_e 除与 f 有关外，还与 L_0 、 C_0 有关。这表明当 L_0 、 C_0 不可忽略时，在交流下测此电阻元件的电阻值，得到的将是 R_e 而非 R 值。

(2) 电感。电感元件除电感 L 外，也总是有损耗电阻 R_L 和分布电容 C_L 。一般情况下 R_L 和 C_L 的影响很小。电感元件接于直流并达到稳态时，可视为电阻；若接于低频交流电路则可视作理想电感 L 和损耗电阻 R_L 的串联；在高频时其等效电路如图 1-3-1 (b) 所示。比较图 1-3-1 (a)，可知二者实际上是相同的，电感元件的高频等效阻抗可参照式 (1-3-3) 来确定。

$$\begin{aligned}
 Z_e &= \frac{R_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2 + (\omega C_L R_L)^2} + j\omega \frac{L(1 - \omega^2 L C_L) - R_L^2 C_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2 + (\omega C_L R_L)^2} \\
 &= R_e + j\omega L_e
 \end{aligned} \quad (1-3-5)$$

式中 R_e 、 L_e ——电感元件的等效电阻和等效电感。

$$L_e = \frac{L(1 - \omega^2 L C_L) - R_L^2 C_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2 + (\omega C_L R_L)^2} \quad (1-3-6)$$

从式 (1-3-6) 知，当 C_L 很小时或 R_L 、 C_L 和 ω 都不大时， L_e 才会等于 L 或接近等于 L 。

(3) 电容。在交流电路中，电容元件总有一定介质损耗，此外其引线也有一定电阻 R_n 和分布电感 L_n ，因此电容元件等效电路如图 1-3-1 (c) 所示。图中 C 是元件的固有电容， R_c 是介质损耗的等效电阻。等效阻抗为

$$\begin{aligned}
 Z_e &= \frac{R_c}{1 + j\omega C R_c} + j\omega L_n + R_n \\
 &= \left[\frac{R_c}{1 + (\omega C R_c)^2} + R_n \right] - j\omega \left[\frac{C R_c^2}{1 + (\omega C R_c)^2} - L_n \right] \\
 &= R_e - j\omega \left(\frac{1}{\omega^2 C_e} \right)
 \end{aligned} \quad (1-3-7)$$

式中 R_e 、 C_e ——电容元件的等效电阻和等效电容。

$$C_e = \frac{1 + (\omega CR_C)^2}{\omega^2 (CR_C^2 - \omega^2 C^2 R_C^2 L_n - L_n)} \quad (1-3-8)$$

一般介质损耗很小,可忽略(即 $R_C \rightarrow \infty$),则式(1-3-8)简化为

$$C_e = \frac{C}{1 - \omega^2 CL_n} \quad (1-3-9)$$

由式(1-3-9)可知,若 L_n 越大,频率越高,则 C_e 与 C 相差就越大。

从上述讨论中可以看出,接交流测量 R 、 L 、 C ,实际所测的都是等效值 R_e 、 L_e 、 C_e ;由于电阻、电容和电感的实际阻抗随环境及工作频率的变化而变。因此,在阻抗测量中应尽量按实际工作条件(尤其是工作频率)进行,否则测得的结果将会有很大的误差,甚至是错误的。

1.3.2 直流电阻测量

在直流条件下测得的电阻称为直流电阻。在工程和实验应用中,所需测量的电阻范围很宽,约为 $10^{-6} \sim 10^{17} \Omega$ 或更宽。从测量角度出发,一般将电阻分为小电阻 (1Ω 以下,如接触电阻、导线电阻等),中值电阻 ($1 \sim 10^6 \Omega$) 和大电阻 ($10^6 \Omega$ 以上,如绝缘材料电阻)。

电阻的测量方法很多,按原理可分为直接测量法、比较测量法、间接测量法;也可分为电表法、电桥法、谐振法、利用变换器测量电阻等方法。

1. 电表法

电表法测量电阻的原理建立在欧姆定律之上,伏特-安培表法(简称伏-安法)、欧姆表法及三表法是电表法的常见形式。

(1) 伏-安法。测量直流电阻的伏-安法是一种间接测量法,利用电流表和电压表同时测出流经被测电阻 R_x 的电流及其两端电压,根据欧姆定律,被测电阻 R_x 的阻值为

$$R_x = \frac{U_V}{I_A} \quad (1-3-10)$$

式中 U_V 、 I_A ——电压表和电流表的示值。

伏-安法测量电阻有两种方案,如图 1-3-2 所示,其中, R_V 和 R_A 分别为电压表和电流表的内阻。

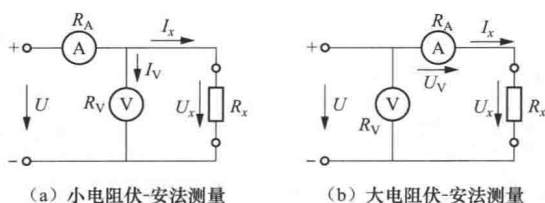


图 1-3-2 伏-安法测量直流电阻

图 1-3-2 (a) 所示方案中电流表的示值包含了流过电压表的电流,适用于测量阻值较小的电阻;图 1-3-2 (b) 所示方案中电压表的示值包含了电流表上的压降,适用于测量阻值较大的元件。

伏-安法的优点是可按被测电阻的工作电流测量,因此非常适合测量电阻值与电流

有关的非线性元件(如热敏电阻等),且测量简单。但由于电表有内阻,故无论用哪种方案均存在方法误差。因此,伏-安法测量精度不高。

(2) 欧姆表法。从式(1-3-10)可知,如果 U_V 保持不变,被测电阻 R_x 将与通过电流表 A 的电流 I_A 成单值的反比关系,而磁电式电流表指针的偏转角 θ 与通过的电流 I_A 成正比,则 A 指针的偏转角能反映 R_x 值大小。因此,如果将电流表按欧姆值刻度,就成为可直接测量电阻值 R_x 的仪表,称为欧姆表。

欧姆表测量电阻的电路如图 1-3-3 所示。图中 R_A 为欧姆表内阻,这里欧姆表实际是按

欧姆值刻度的磁电式微安表； R_1 为限流电阻， K 是短接开关；欧姆表中以电池的电压 E 作为恒定电压源，考虑到电池的电压会逐渐降低，为了消除电压变化对电阻测量的影响，设有调零电阻 R_2 。被测电阻 R_x 串联接入电路中。测量前，先将 K 闭合并调节 R_2 直至欧姆表指针正确指在 0 刻度，然后断开 K ，接入被测电阻 R_x 进行测量，并从欧姆表直接读出被测值。

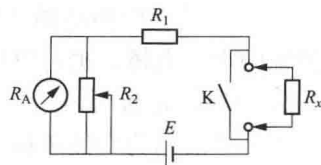


图 1-3-3 欧姆表测量电阻电路

除传统的指针式欧姆表外，数字式欧姆表也得到普遍使用。数字式欧姆表一般是在数字式直流电压表的输入端加一欧姆电压变换器后得到的，图 1-3-4 所示为欧姆-电压变换器的原理。

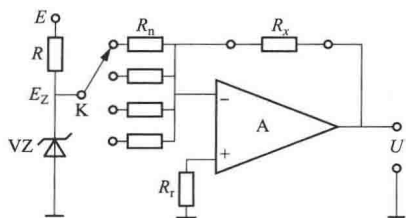


图 1-3-4 欧姆-电压变换器原理

图中外接电源 E 经 R 和稳压二极管 VZ ，提供稳定的基准电压 E_z ； K 为量程开关，用来切换不同的输入电阻 R_n ，以改变欧姆表量程范围； A 是反相接法的运算放大器，用来把被测电阻 R_x 变换为电压，故又称变换放大器。该电路的输出电压为

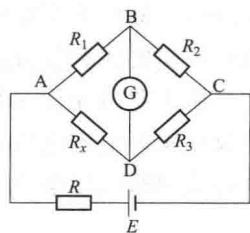
$$U = \left| -\frac{R_x}{R_n} \right| E_z \quad (1-3-11)$$

从式 (1-3-11) 可知，变换器的输出直流电压 U 与 R_x 成正比关系，故用直流数字式电压表来测量此 U 值并按欧姆刻度，就可得到 R_x 值。

2. 电桥法

测量直流电阻最常用的是电桥法。电桥分为直流电桥和交流电桥两大类，直流电桥主要用于测量电阻。

直流电桥由四个桥臂、检流计和电源组成，其原理电路如图 1-3-5 所示。图中 R_1 、 R_2 、 R_3 是标准电阻， R_x 是被测电阻； G 是灵敏度很高的微安级磁电式检流计，用来指零。测量时调节 R_1 、 R_2 、 R_3 使电桥平衡，电桥达到平衡时 U_{BD} 为零，检流计 G 中无电流，由电桥平衡条件可得被测电阻为



$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (1-3-12) \quad \text{图 1-3-5 欧姆-电压变换器原理电路}$$

由式 (1-3-12) 可见，这种方法实质上是用标准电阻与被测电阻 R_x 相比较，用指零仪表指示被测量与标准量是否相等（平衡），从而求得被测量。因此这种方法又称为零位式测量法或比较测量法，测量的准确度几乎等于标准量的准确度。这种测量方法的缺点是在测量过程中，为获得平衡状态，需要进行反复调节，测试速度慢，不能适应大量、快速测量的需要，也不适合于电阻传感器中变化电阻的测量。

直流单电桥测电阻的范围在 $1\Omega \sim 1M\Omega$ 之间。电阻大于 $1M\Omega$ 时，电桥的漏电流对测量误差的影响已不能忽略；而电阻小于 1Ω 时，接线电阻和接触电阻的影响开始增大。

1.3.3 交流阻抗及 L 、 C 的测量

在交流条件下， R 、 L 、 C 元件必须考虑损耗、引线电阻、分布电感和分布电容的影响，