

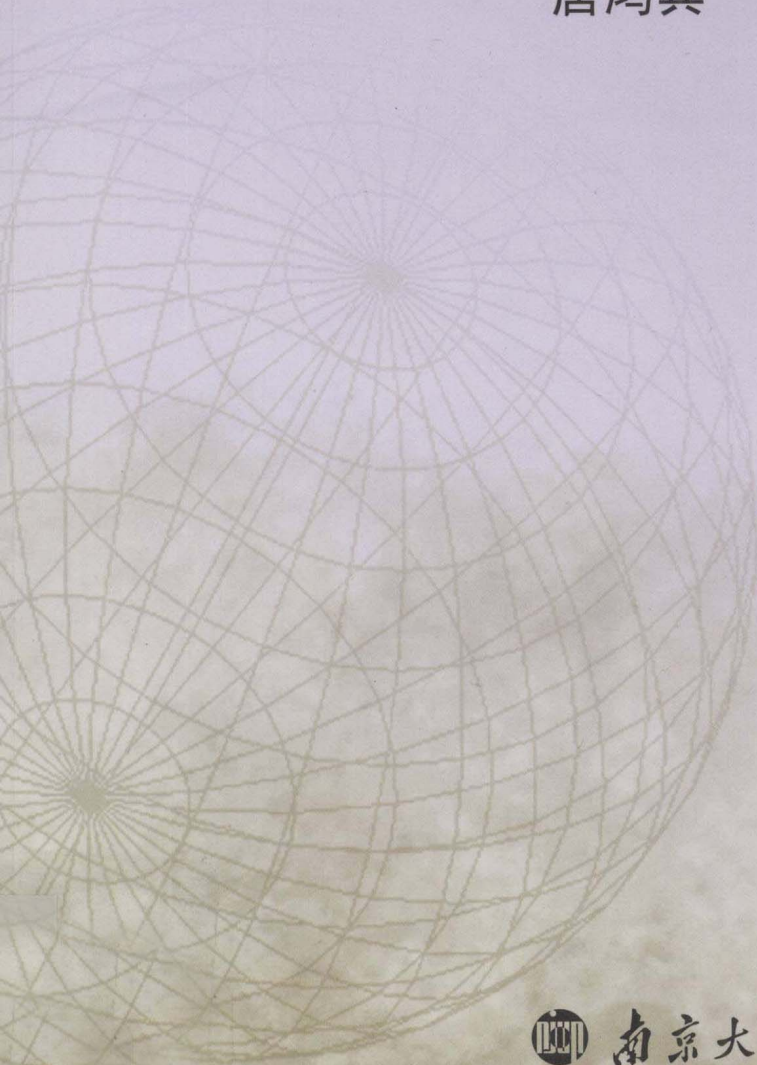


高等学校教材

GAODENG XUEXIAO JIAOCAI

现代模拟电路实验

唐鸿宾 编 著



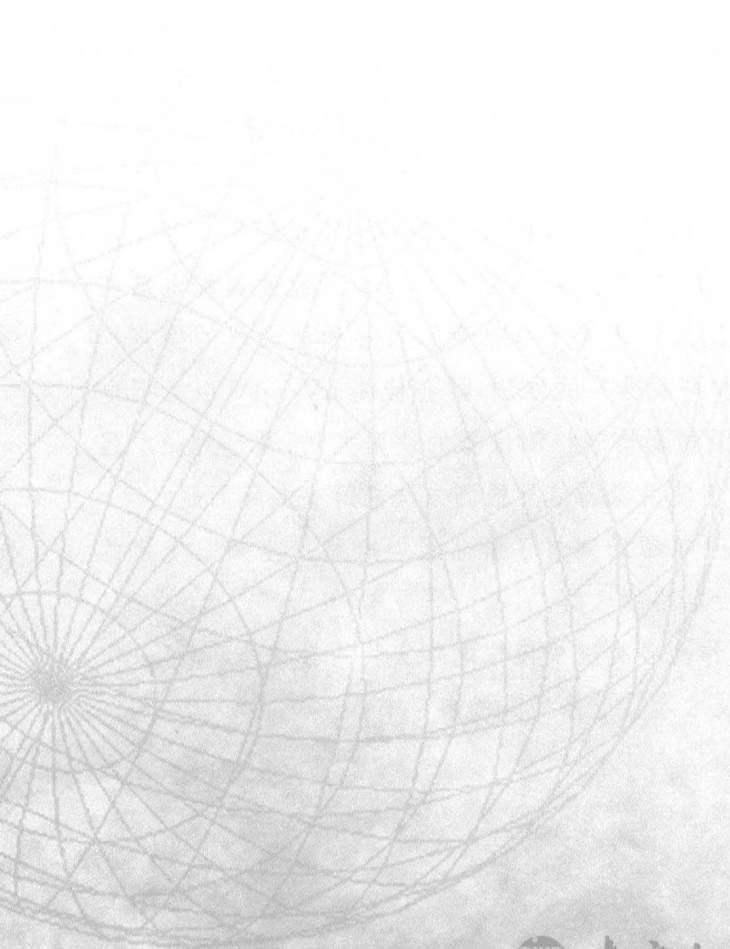
南京大学出版社

高等学校教材

GAODENG XUEXIAO JIAOCAI

现代模拟电路实验

唐鸿宾 编 著



 南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代模拟电路实验 / 唐鸿宾编著. —南京:南京大学出版社, 2009. 1

高等学校教材

ISBN 978 - 7 - 305 - 05653 - 6

I. 现… II. 唐… III. 模拟电路—实验—高等学校—教材 IV. TN710 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 187667 号

出版者 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093
网 址 <http://press.nju.edu.com>
出版人 左 健

丛 书 名 高等学校教材
书 名 现代模拟电路实验
编 著 唐鸿宾
责任编辑 吴 华 编辑热线 025-83592146

照 排 南京玄武湖印刷照排中心
印 刷 南京紫藤制版印务中心
开 本 787×1092 1/16 印张 13.75 字数 335 千
版 次 2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
印 数 1~3 000
ISBN 978 - 7 - 305 - 05653 - 6
定 价 25.00 元

发行热线 025-83594756
电子邮箱 nupress1@public1.ptt.js.cn

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购图书销售部门联系调换

内容简介

现代模拟电路实验的实验内容、实验方法、测试原理、测试仪器与现有的模拟电路实验有很大区别,本书采用了近代理念、近代原理、近代方法和近代测试仪器,因此命名为“现代模拟电路实验”。本书内容面广,新颖,实用性强,具有启发性和研究性,不同的学校和专业可以根据其特点和实际需要选择实验内容。

本书崭新的实验内容,得益于微弱信号检测仪器在模拟电路实验中的应用,南京鸿宾微弱信号检测有限公司以微弱信号检测仪器为核心,研制的 HB-511 型现代模拟电路实验测试系统,具有锁定放大器、矢量电压表、噪声测试仪、频谱分析仪、数字相位计、数字微欧仪、幅频特性测试仪、相频特性测试仪等现代测试仪器的功能,使常规的测试仪器无法测量的实验内容能顺利开设。

本书分八篇,共 40 个实验。其中第一到第五篇(27 个实验)是无源网络和有源线性电路实验,在给出基本概念和理论公式后,通过测量阻抗、传递函数、矢量电压、幅频特性、相频特性、微弱偏置电压、微弱偏置电流、频谱等实验内容,比较理论公式与实验结果,加深对电路的理解,并讨论误差产生的原因和解决方法。

“第六篇 噪声及测量”和“第七篇 微弱信号检测”(10 个实验)是 21 世纪理工科学生和从事电子工作的工程技术人员应该要掌握的内容。但是,目前各高校开设的模拟电路实验课程中缺少这部分内容。通过这 10 个实验,使读者了解噪声的特性和放大器的噪声模型,根据噪声和信号的不同特点,掌握减少和抑制噪声的方法,学会检测 nV — μV 级微弱电压和 fA 、 pA 、 nA 级微弱电流的原理和方法及微弱信号检测仪器的使用方法;通过对微电阻和 nH 级微电抗的测量实验,了解和掌握如何使用微弱信号检测方法来解决实际问题。

第八篇是非线性电路实验(3 个实验),可以帮助读者了解非线性电路产生频率变换的特性,通过对谐波分量的测量,加强对非线性电路的理解。

本书的内容和测量方法比较新颖,除可作为各类院校模拟电路实验的教材外,也可以作为青年教师和从事电子与测量工作的工程技术人员进修提高的参考书。

前 言

21 世纪高等院校的人才培养目标必须面对高科技发展和知识经济大潮,创新精神是高等院校人才必须具备的素质之一。模拟电路教学和实验是高等学校理工类专业基础教学的主要组成部分。

模拟电路课程及实验的教学目的,应该是为学生进一步深造打下坚实基础,使学生毕业后能创造性地从事现代电子设备的使用、维护和研究设计工作。课堂教学中学到的模拟电路知识,通常是基于理想元器件的基本电路的理论知识,要通过实验加深理解。但是,由于受到实验设备的限制,许多重要概念和电路参数无法测量,实验也只能做一些理想化的定性测量。有些学校增加了计算机仿真实验,这些软件也是在元器件理想化的条件下进行编程仿真,结果与实际还是有很大距离。

为了达到教学目的,众多专家认为,模拟电路实验需作如下改进和提高:

(1) 大学模拟电路教学,学生只是定性理解电路理论,这是远远不够的,模拟电路实验须从实际电路出发,通过实际电路直接测量各种主要参数,分析这些参数对电路性能的影响。这样,在今后设计或使用实际电路时,才能合理选择和使用这些参数。

(2) 必须掌握新知识和新实验内容,例如,噪声的知识及其测量方法,微弱信号检测的知识和测量方法,等等。

(3) 使用现代电子学的测试原理、方法和手段,增加普通仪器无法直接测量或无法精确测量的实验内容。例如,用微弱信号检测仪器和方法测量在闭环条件下,运算放大器开环增益幅频和相频特性曲线,测量虚地点微弱电压的幅频和相频特性曲线,等等。

通过上述三点改进和提高后,模拟电路实验将以崭新的面貌出现,实验内容和方法有了质的飞跃。实验内容、实验方法、测试原理和测试手段与现在的模拟电路相比,有很大的区别,采用近代理念、近代原理、近代方法、近代测试仪器构成的模拟电路实验命名为**现代模拟电路实验**。实验可以是:**交流阻抗的测量,无源网络传递函数的测量,运算放大器基本参数交流幅频、相频特性的测量,运算放大器虚地点电压幅频、相频特性的测量,高共模抑制比响应的测量,放大器及各种滤波器幅频、相频特性的测量,电阻器件热噪声的测量,放大器噪声电压和噪声电流的测量,微弱电压、电流信号的测量,导线和印刷板导线电阻、电感的测量,非线性器件频谱分析等**。要开设这些现代模拟电路实验,需采用更现代的测量仪器,只采用过去常用的示波器、交流毫伏表、交流信号发生器、数字多用表等普通仪器无法完成上述实验的测量要求。要实现这些实验,最好能配备下列现代仪器:**锁定放大器、数字相位计、数字**

阻抗仪、数字微欧仪、噪声测试仪、频谱分析仪、矢量电压表等。当然,作为高校的基础实验,要配备如此多的现代仪器设备,目前尚有困难。为配合高校能开设这些实验,南京鸿宾微弱信号检测有限公司利用长期从事微弱信号检测仪器研制与生产的成果,结合在教学中的实践经验,研制成了价格适中、性能优良,综合上述现代仪器功能,适合现代模拟电路实验的测试系统——HB-511型现代模拟电路实验测试系统。该系统具有:① 锁定放大器;② 矢量电压表;③ 噪声测试仪;④ 频谱分析器;⑤ 数字阻抗仪;⑥ 数字相位计;⑦ 数字微欧仪;⑧ 幅频特性测试仪;⑨ 相频特性测试仪等现代仪器的功能,完全满足现代模拟电路实验的测量要求。

本书分八篇,共40个实验,是根据现代模拟电路实验的理念和要求,采用HB-511型现代模拟电路实验测试系统作为实验仪器设备而编写的,具有内容全面、系统、新颖,技术先进,理论紧密联系实验等优点。

由于本书的内容、方法、测试仪器均是初次尝试,难免有不足和不当之处,敬请广大读者批评指正。

唐鸿宾

2008年元月8日

目 录

第一篇 阻抗和无源网络传递函数	1
实验 1 电容的容抗测试及电容损耗对容抗的影响	4
实验 2 电感的感抗测试及电感电阻对感抗的影响	9
实验 3 无源网络传递函数的测量及幅频、相频特性	9
实验 4 无源网络的输入/输出阻抗的测量及频率响应	13
第二篇 运算放大器的主要参数	17
实验 5 运算放大器主要参数——输入偏置电流、失调电流、失调电压的测量	17
实验 6 运算放大器差模输入阻抗及其频率特性的测量	21
实验 7 运算放大器开环增益幅频和相频特性的测量	25
实验 8 运算放大器开环截止频率 f_c 和单位增益带宽 f_u 的测量	28
实验 9 高共模抑制比测量及频率对共模抑制比的影响	30
实验 10 电源电压抑制比频率响应的测量	34
实验 11 运算放大器开环输出阻抗及频率特性的测量	36
第三篇 信号运算电路	39
实验 12 反相放大器、同相放大器传递函数幅频、相频特性的测量	41
实验 13 加法、减法运算放大器矢量运算的测量	44
实验 14 反相和同相加法器运算精度的测量	50
实验 15 反相放大器虚地点微弱电压的测量及频响特性	52
实验 16 反相放大器、同相放大器运算精度与开环参数之间的关系	54
实验 17 反相放大器、同相放大器输入阻抗与电路参数的影响及测量	60
实验 18 反相放大器、同相放大器输出阻抗与反馈系数的影响及测量	67
第四篇 有源滤波器	70
实验 19 低通滤波器幅频、相频特性的测量	70
实验 20 高通滤波器幅频、相频特性的测量	76

实验 21 带通滤波器幅频、相频特性的测量	81
实验 22 带阻滤波器幅频、相频特性的测量	85
实验 23 相移滤波器幅频、相频特性的测量	91
实验 24 开关电容滤波器幅频、相频特性及噪声的测量	96
第五篇 正弦波信号发生器	102
实验 25 文氏电桥正弦波发生器	103
实验 26 频率可调桥式 T 型选频网络正弦波发生器	108
实验 27 频率可调的移相式振荡器及正交振荡器	114
第六篇 噪声及测量	119
实验 28 噪声电压均方根值的测量	122
实验 29 热噪声的测量	130
实验 30 放大器噪声电压和噪声电流的测量	138
实验 31 噪声系数与最佳源内阻的测量	143
第七篇 微弱信号检测	150
实验 32 微弱 μV 级直流电压信号的检测	154
实验 33 微弱 pA — nA 级直流电流的测量	158
实验 34 nV — μV 级微弱交流电压信号的测量	164
实验 35 pA — fA 级交流电流信号的测量	170
实验 36 淹没在噪声或干扰中正弦信号的测量	176
实验 37 微欧级电阻的测量	182
第八篇 非线性器件电路	187
实验 38 全波整流、半波整流波形谐波分量的测量	188
实验 39 方波信号、三角波信号谐波分量的测量	194
实验 40 乘法器与相敏检波器	199
附 录	207
参考文献	213

第一篇 阻抗和无源网络传递函数

电阻 R 、电感 L 和电容 C 是电子电路的三种基本元件,所有的电子电路都包含这三种基本元件。许多传感器如电阻式、电感式和电容式传感器是将被测的各种物理量或其他量转换成电阻、电感和电容,然后进行测量。本实验研究和介绍电阻 R 、电感 L 和电容 C 元件及其组成网络的阻抗和传递函数,并进行测量。

1. 阻抗

阻抗是描述一个元器件或一个电路网络中电压与电流关系的特征参数,其定义为:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}(t)}{\dot{I}(t)} \quad (1-1)$$

式中 $\dot{Z}$ 为阻抗, $\dot{V}(t)$ 、 $\dot{I}(t)$ 分别为电压和电流的相量。(1-1)式也可表示为:

$$\dot{Z} = R + jX = |Z| e^{j\varphi} = |Z| (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (1-2)$$

式中 R 、 X 分别为阻抗的电阻分量和电抗分量; $|Z|$ 是阻抗的模, $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$; φ 为相角,即电压 $\dot{V}(t)$ 和电流 $\dot{I}(t)$ 之间的相位差, $\varphi = \arctan(X/R)$ 。

理想的电阻 R 只有电阻分量,没有电抗分量,与信号频率无关。理想的电感 L 和理想的电容 C 只有电抗分量,与信号频率有关。电感的电抗分量称为感抗 X_L ,电容的电抗分量称为容抗 X_C ,与信号频率 f 或角频率 $\omega = 2\pi f$ 的表达式如下:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (1-3)$$

$$X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi f C) \quad (1-4)$$

当信号频率较高时或进行精确计算和测量时,电阻、电感、电容都不能看作理想元件。电阻存在着寄生电容和电感,电感存在电阻和寄生电容,电容存在引线电感和损耗。因此,实际电阻、电感、电容元件的等效电路如图 1-1 所示。

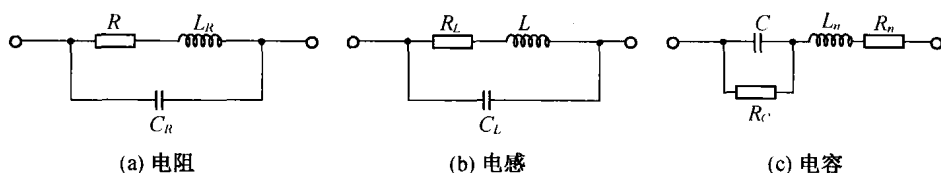


图 1-1 实际电阻、电感、电容的等效电路

图中 L_R 、 C_R 为电阻的寄生电感和寄生电容,在信号工作频率不太高时可以忽略,可以把电阻看成理想电阻。 C_L 为电感的寄生电容,在频率较低时它的作用也可以忽略; R_L 为电感的线绕电阻,通常不能忽略。电容有介质损耗,通常用并联电阻 R_C 来等效,当损耗为 0 时, $R_C \rightarrow \infty$; R_n 、 L_n 为电容的引线电阻和电感,一般情况下也可以忽略。

一个电阻在高频交流时,须考虑电阻的引线电感 L_R 和分布电容 C_R 的影响,等效电路

如图 1-1(a)所示,图中 R 为理想电阻值或直流电阻值。由图(a)的等效电路求得在频率 f 下的阻抗为:

$$\dot{Z}_R = \frac{(R + j\omega L_R) \frac{1}{j\omega C_R}}{R + j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R}} = R_R + jX_R \quad (1-5)$$

式中:

$$R_R = \frac{R}{(1 - \omega^2 L_R C_R)^2 + (\omega C_R R)^2} \quad (1-6)$$

$$X_R = \omega \frac{L_R(1 - \omega^2 L_R C_R)^2 - R^2 C_R}{(1 - \omega^2 L_R C_R)^2 + (\omega C_R R)^2} \quad (1-7)$$

由(1-5)、(1-6)、(1-7)式可知,一个电阻当 L_R 、 C_R 不能忽略时,其阻抗与频率有关。在直流时, $f=0$, 则

$$R_R = R, X_R = 0, \dot{Z}_R = R \quad (1-8)$$

表明此时的阻抗为纯电阻。一般来讲,由于引线电感和分布电容都很小,在交流频率 f 不是很高时,我们仍然可以把电阻看作一个纯电阻 R 。

电感元件一般由导线绕在磁性或非磁性材料上构成,由于导线总有电阻,也就是说总是有损耗电阻 R_L , R_L 为电感元件接于直流电压后,达到稳定时的电阻,即为绕制导线的电阻。分布电容 C_L 一般很小,在低频时,通常可以忽略其影响。图 1-1(b)所示的等效电路简化为如图 1-2 所示。



图 1-2 电感元件在低频时的等效电路图

图 1-2 所示的电感的阻抗为:

$$\dot{Z}_L = R_L + j\omega L \quad (1-9)$$

当 R_L 很小时,电感才能认为是纯感抗,并电压超前电流 90° 。

电容在交流电作用下,总有一定的介质损耗,一般用并联在电容两端的电阻 R_C 来等效。损耗越小, R_C 越大,无损电容 $R_C \rightarrow \infty$ 。此外,电容的引线也有一定的电阻,因此,电容元件在高频下等效电路如图 1-1(c)所示。等效阻抗为:

$$\dot{Z}_C = \frac{R_C}{1 + j\omega C R_C} + j\omega L_n + R_n \quad (1-10)$$

忽略 L_n 和 R_n 时,电容的阻抗为

$$\dot{Z}_C = \frac{R_C}{1 + j\omega C R_C} = \frac{R_C}{1 + (\omega C R_C)^2} - j \frac{\omega C R_C^2}{1 + (\omega C R_C)^2} \quad (1-11)$$

对于无耗或介质损耗很小的电容, $R_C \rightarrow \infty$, 则

$$\dot{Z}_C = 1/(j\omega C) = -j/(\omega C) \quad (1-12)$$

表示电容元件为纯容抗,并电压迟后电流 90° 。

当频率较高时, L_n 不能忽略,考虑到引线电感时,容抗(1-12)式中要加上引线电感的感抗,此式为:

$$\dot{Z}_C = -j \frac{1}{\omega C} + j\omega L_n = -j \frac{1}{\omega C} (1 - \omega^2 L_n C) \quad (1-13)$$

由(1-13)式可知,若 L_n 越大,频率 f 越高,则容抗偏离理想容抗越大。因此,在高频电路中采用贴片电容来减小 L_n ,使电容元器件接近理想电容器的容抗。

从上式讨论中可知,在交流下 R 、 L 、 C 的实际值并不是理想元件值,实际阻抗随工作频率和环境变化而变化。因此,电路的阻抗测量很重要,应尽量按实际工作条件进行。否则,测量值与使用结果将会有很大的误差,甚至会得到错误的结果。

根据阻抗的定义,对于一个元器件或一个电路网络要测量它的阻抗 $\dot{Z}$,在交流信号作用下,只要分别测量流过它的电流 $\dot{I}(t)$ 和它两端的电压 $\dot{V}(t)$ 。由(1-1)式求得阻抗 $\dot{Z}$,测量原理如图 1-3(a)、(b)所示。

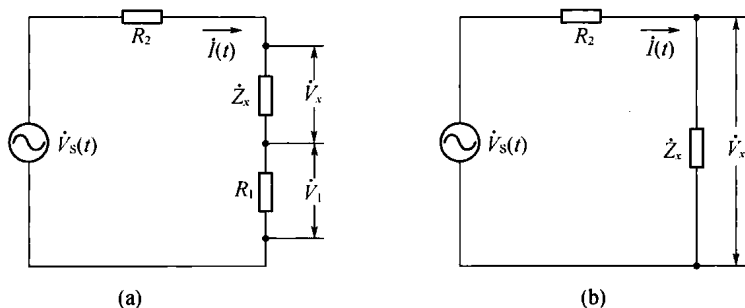


图 1-3 阻抗 Z_x 测量原理图

图中 $\dot{V}_s(t)$ 为交流电压源;电阻 $R_2 \gg |\dot{Z}_x|$ 和 R_1 , R_1 为 $10\ \Omega$ 的精密电阻。对于如图 1-3(a) 中电路的测量,首先测量 R_1 上的电压 $\dot{V}_1(t)$,求得电流 $\dot{I}(t) = \dot{V}_1(t)/R_1$,此电流 $\dot{I}(t)$ 即为流过待测阻抗 $\dot{Z}_x$ 上的电流。然后测量待测阻抗上的电压 $\dot{V}_x(t)$ 。此方法称交流电压法。

对于图 1-3(b),有公式

$$\dot{V}_x(t) = \frac{\dot{Z}_x}{R_2 + \dot{Z}_x} \dot{V}_s(t) \quad (1-14)$$

由(1-14)式可知,流过 Z_x 的电流为

$$\dot{I}(t) = \frac{\dot{V}_s(t)}{R_2 + \dot{Z}_x} \quad (1-15)$$

选择 $R_2 \gg |\dot{Z}_x|$,则得到:

$$\dot{I}(t) = \frac{\dot{V}_s(t)}{R_2} \quad (1-16)$$

$\dot{I}(t)$ 可以近似认为不随 $\dot{Z}_x$ 变化, $\dot{I}(t)$ 是恒流源,因此,称为恒流源法。

不论图 1-3(a)、(b)中哪种测量方案,只要测得 $\dot{V}_x(t)$ 和 $\dot{I}(t)$,根据阻抗的定义(1-1)式,就可求得阻抗 $\dot{Z}_x$ 。

2. 传递函数

在线性系统理论中,对系统最常用的数学描述方法是采用传递函数。对于稳态信号 $\dot{V}_i = \hat{V}_i \sin \omega t$ 通过线性电路,可以这样来描述:电路输出信号的幅值被电路幅频特性加权,频率不变,不出现新的频率,由于电路是物理可实现的系统,电路的输出信号滞后于电路的输入信号,也就是说,相位发生了变化。图 1-4 是用传递函数 $\dot{K}(\omega)$ 描述线性电路的最简单形式。

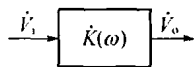


图 1-4 传递函数框图

用公式表示:

$$\dot{V}_o = \dot{K}(\omega) \dot{V}_i \quad (1-17)$$

当输入信号为 $\dot{V}_i = \hat{V}_i \sin \omega t$ 时,(1-17)式也可以表示为:

$$\dot{V}_o = |\dot{K}(\omega)| \hat{V}_i \sin[\omega t + \arg \dot{K}(\omega)] \quad (1-18)$$

式中 $|\dot{K}(\omega)|$ 是系统的幅频特性, $\arg \dot{K}(\omega)$ 是系统的相频特性。用 $\varphi(\omega)$ 表示相频特性,传递函数可以表示为: $\dot{K}(\omega) = |\dot{K}(\omega)| [\cos \varphi(\omega) + j \sin \varphi(\omega)]$ 。在本实验课程中,除第八篇外,无论是无源网络还是有源网络,若不作特别说明外,都认为是线性电路,都用传递函数来讨论电路的性能。对传递函数的测量也采用本实验课程常用的方法。

实验 1 电容的容抗测试及电容损耗对容抗的影响

实验目的

- 掌握阻抗的测试方法,了解数字阻抗仪的原理。
- 加深电容容抗的理解,掌握电容的测试方法。
- 熟悉双相锁定放大器的功能及使用方法。

实验仪器

HB-511 型现代模拟电路实验测试系统 A、D 分箱,双踪示波器,数字多用表。

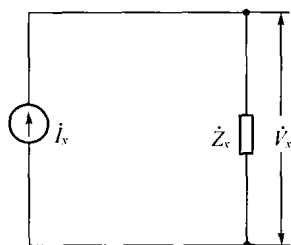
实验内容

1. 测试方法及原理

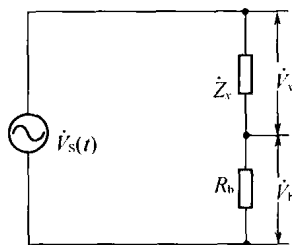
传统的阻抗测量仪是模拟式的,主要采用交流电桥、变量器电桥、谐振法等进行测量,缺点较多。测量技术的发展,要求阻抗测试仪快速、精确,并能实现自动测量数字显示。近年来,阻抗仪向数字化、智能化发展,出现了数字阻抗仪。数字阻抗仪就是采用双相锁定放大器的原理,专门为阻抗测量而设计生产的专用仪器。

(1) 数字式阻抗测试仪的原理

从阻抗的基本定义出发,根据被测阻抗元件或网络两端的矢量电压和流过它的矢量电流,通过(1-1)式,计算出被测元件和网络的阻抗值。图1-5(a)、(b)分别表示用交流电流源和引入标准电阻 R_b 的交流电压源测量阻抗的原理。



(a) 交流电流源法测阻抗



(b) 引入标准电阻交流电压源法测阻抗

图 1-5 阻抗测量原理

根据阻抗定义(1-1)式,若精确已知被测阻抗的端电压和流过的电流矢量,则可以精确求得被测阻抗。

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{V}_x}{\dot{I}_x} = R_x + jX_x \quad (1-19)$$

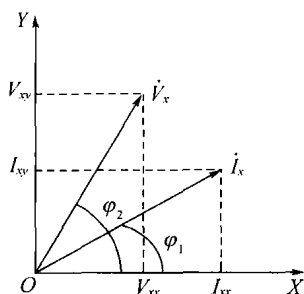
图1-5(a)的矢量电流由交流恒流源给出标准值 $\dot{I}_x$,并精确测量阻抗两端的矢量电压 $\dot{V}_x$,用下式表示:

$$\begin{cases} \dot{I}_x = I_{xx} + jI_{xy} \\ \dot{V}_x = V_{xx} + jV_{xy} \end{cases} \quad (1-20)$$

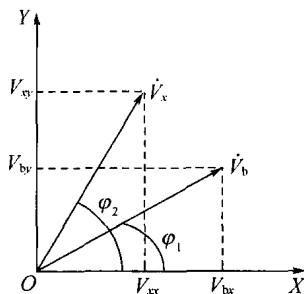
图1-5(b)的矢量电流通过测量标准电阻 R_b 上的矢量电压 $\dot{V}_b$ 获得,并精确测量阻抗两端的矢量电压 $\dot{V}_x$,用下式表示:

$$\begin{cases} \dot{I}_x = \frac{\dot{V}_b}{R_b} = \frac{1}{R_b} V_{bx} + j \frac{1}{R_b} V_{by} \\ \dot{V}_x = V_{xx} + jV_{xy} \end{cases} \quad (1-21)$$

图 1-6(a)、(b)分别为(1-20)和(1-21)矢量图。



(a) (1-20) 式矢量图



(b) (1-21) 式矢量图

图 1-6 阻抗矢量电压、矢量电流在直角坐标上的投影图

通过测量被测阻抗 $\dot{Z}_x$ 两端电压 $\dot{V}_x$ 和通过的电流 $\dot{I}_x$ ，由矢量运算可以求得：

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{V}_x}{\dot{I}_x} = \frac{V_{xx}I_{xx} + V_{xy}I_{xy}}{I_{xx}^2 + I_{xy}^2} + j \frac{V_{xy}I_{xx} - V_{xx}I_{xy}}{I_{xx}^2 + I_{xy}^2} \quad (1-22)$$

为了计算简单，测量时通常设定电流的相位为 0° ，即 $\dot{I}_x = I_x = I_x$ （其中 $\dot{I}_x$ 为标量），(1-22)式简化为：

$$\dot{Z}_x = \frac{1}{I_x} (V_{xx} + jV_{xy}) \quad (1-23)$$

用标准电阻测量电流，同样可以使 $\dot{I}_x$ 的相角为 0° ，有 $I_x = V_b / R_b$ ， $\dot{Z}_x$ 为：

$$\dot{Z}_x = \frac{R_b}{V_b} (V_{xx} + jV_{xy}) \quad (1-24)$$

由上式可知，只要在测量电流 $\dot{I}_x$ 时，调节相位使电流相位为 0° ，使 $\dot{I}_x$ 只有实分量，保持相位不变。然后，再测量两端的矢量电压 $\dot{V}_x$ ，由(1-23)、(1-24)式很容易求得阻抗 $\dot{Z}_x$ 。

(2) 阻抗测试仪框图

阻抗测试仪和双相锁定放大器的主要功能就是能对电压或电流进行矢量测量，亦称矢量电压表。图 1-7 是双相锁定放大器基本组成框图，能实现矢量电压表功能。

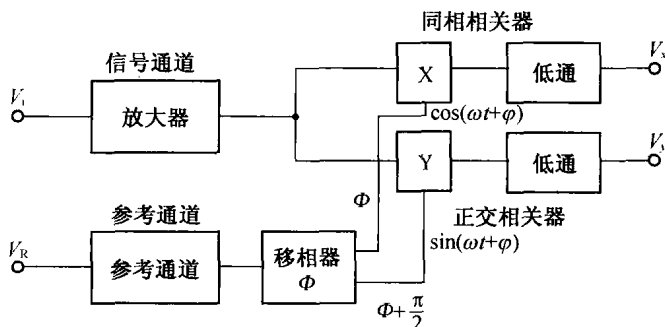


图 1-7 双相锁定放大器主要部件原理框图

图 1-7 是双相锁定放大器实现矢量测量的框图部分，主要由三部分组成，一个参考通

道、一个信号通道及同相和正交相关器,工作原理如下:

参考通道是由触发电路、相移电路组成,把与被测信号同步的参考信号处理成相位可调的两个相位相差 90° 的信号,即余弦信号 $\cos(\omega t + \varphi)$ 和正弦信号 $\sin(\omega t + \varphi)$, 分别送给同相相关器和正交相关器的乘法器。信号通道是由放大器和滤波器组成,被测信号 V_i 被放大成 $V_s = K_1 \hat{V}_i \cos \omega t$, 同时送给两个相关器的乘法器,与参考信号送来的信号相乘,通过滤波器滤去交流成分。输出电压分别为:

$$\begin{cases} V_x = K \hat{V}_i \cos \varphi \\ V_y = K \hat{V}_i \sin \varphi \end{cases} \quad (1-25)$$

式中 K 是由仪器的放大倍数等参数决定的常数。

由上述描述可知,输入信号通过双相锁定放大器的测量,分解成 V_x 、 V_y 两分量, (1-25) 式表示被测信号在直角坐标 X 轴和 Y 轴上的投影,也就是说实现了矢量电压表的功能。通常 V_x 、 V_y 均是数字显示,因此,用双相锁定放大器能实现阻抗数字化测量。

2. 实验步骤与操作

- ① 熟悉 HB-511-A 分箱中的双相锁定放大器和多功能信号源性能指标和使用方法。
- ② 按图 1-8 连接测试电路并选择元器件(或用 D 分箱实验 1 电路)。

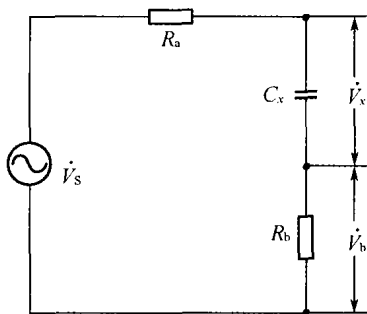


图 1-8 电容 C_x 的阻抗测试电路

标准电阻 R_b 选用精度为 0.1% 的 $10\ \Omega$ 电阻, R_a 为限流电阻,阻值和精度没有要求,选 $1\ \text{k}\Omega$,待测电容 C_x 选 $0.1\ \mu\text{F}$ 的电容。

③ 电压信号源 $\dot{V}_s$, 使用 A 分箱多功能信号源的正弦波输出,输出大小选 $1\ \text{V}$ 左右,频率根据需要选择。如果要测量电容量的大小,为了计算方便,最好选用 $\omega = 2\pi f$ 为整数,例如: $f = 1.592\ \text{kHz}$, 则 $\omega = 2\pi f = 10\ 000$, 把信号源正弦波输出接到待测电路信号源处。

④ 双相锁定放大器参考信号输入选用“内”输入,此时,参考信号由仪器内部把多功能信号源的正弦波直接连接到锁定放大器参考信号的输入端。

⑤ 标准电阻两端的电压 V_b 的测量。锁定放大器输入模式,选择 A 输入,通过输入电缆接入 R_b 的两端测量 V_b , 改变锁定放大器的量程,使被测信号 V_b 的量级和量程相对应。例如: V_b 信号为 $8\ \text{mV}$ 时,选择量程为 $10\ \text{mV}$ 为宜。调节参考信号中相移器, 0° 、 90° 、 180° 、 270° 和 $0^\circ \sim 100^\circ$ 电位器,使相位为 0° (调到小于 1° 即可)。此时, $V_b = V_{bx}$, $V_{by} = 0$ 。注意:相移器调好之后,保持不变,以后测量 $\dot{V}_x$ 时的相位就是相对于此时的相位差。

⑥ 电容两端电压 $\dot{V}_x$ 的测量。由于电容两端没有一端是接地的,因此,测量其两端的电压差 $\dot{V}_x$ 就需要用差分方式来测量。锁定放大器的输入模式选择差分“A-B”模式, $\dot{V}_x = \dot{V}_A - \dot{V}_B$ 。锁定放大器“A”输入端接电容上端与地,测量 $\dot{V}_A$,“B”输入端接电容下端与地,测量 $\dot{V}_B$ 。选择适合的量程,测得 $\dot{V}_x = V_{xx} + jV_{xy}$ 。

⑦ 求电容的阻抗。根据(1-24)式求得阻抗

$$\dot{Z}_x = \frac{R_b}{V_b}(V_{xx} + jV_{xy})$$

由测量的矢量电压 $\dot{V}_x$ 可知, $V_{xx} \ll V_{xy}$, 且 V_{xy} 为负值, 上式变成:

$$\dot{Z}_x = -j \frac{R_b}{V_b} |V_{xy}| \quad (1-26)$$

(1-26)式表明,一个电容的阻抗,实数部分很小,表示此电容的损耗很小;虚数部分为负数,表示电容两端电压相位迟后通过电流相位 90° 。

⑧ 求电容值。电容的容抗为

$$\dot{Z}_x = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} \quad (1-27)$$

对比(1-26)和(1-27)式,可得:

$$C = \frac{R_b}{\omega V_b} |V_{xy}| \quad (1-28)$$

当 $f = 1.592 \text{ kHz}$, $\omega = 10\,000$ 时,容易从(1-28)式求得电容值。

⑨ 有耗电容的阻抗。理想电容是没有能量损耗的,实际电容器在电场作用下,总有一部分能量转换成热能,形成损耗。损耗可分为金属损耗和介质损耗,小功率电容器主要是介质损耗。

介质损耗是处在电场中的电介质的极化过程和介质电阻所引起的损耗,称为损耗功率。损耗功率与电容器的无功功率之比为损耗因数,记为 $\tan \delta$, 其中 δ 称为电容的损耗角。

$$\tan \delta = \text{损耗功率} / \text{电容的无功功率} \quad (1-29)$$

有耗电容可以用图 1-9 来等效,并联电阻表示损耗。

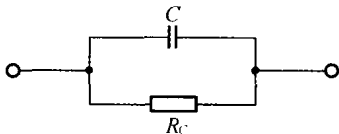


图 1-9 有耗电容的等效电路

阻抗表达式为(1-11)式,重写如下:

$$\dot{Z}_C = \frac{R_C}{1 + (\omega C R_C)^2} - j \frac{\omega C R_C^2}{1 + (\omega C R_C)^2} = Z_x - jZ_y$$

阻抗的有耗功率是由阻抗的实部 Z_x 贡献,无功功率是由阻抗的虚部 Z_y 贡献。用电容的阻抗来表示:

$$\tan \delta = \text{阻抗实部} / \text{阻抗虚部} = Z_x / Z_y \quad (1-30)$$

$$\delta = \arctan(Z_x / Z_y) \quad (1-31)$$

由(1-29)、(1-30)、(1-31)式可知,只要测得电容的阻抗,就能知道电容的损耗。

反之,如果电容有损耗,电容的阻抗分量会出现实分量,电容上的交流电压相位也不会滞后电流相位 90° 。

为了加深电容损耗与阻抗之间关系的概念,在电容两端并联上 $51 \text{ k}\Omega$ 的电阻,作为电容的损耗。重复上述阻抗的测量,可计算损耗角。

实验2 电感的感抗测试及电感电阻对感抗的影响

由于感抗的测量与容抗的测量基本上相同,本实验可以作为实验1的一部分,或作为研究提高实验。达到下列目的:

- ① 理想电感的交流电压相位超前于通过的电流相位 90° 。
- ② 测出电感的阻抗,阻抗的实部为电感导线的电阻,虚部为电感的感抗。计算电感的品质因数:

$$Q = \omega L / R \quad (1-32)$$

- ③ 通过阻抗的测量,测量电感的电感量。

实验3 无源网络传递函数的测量及幅频、相频特性

实验目的

- 了解测量传递函数和幅频、相频特性的原理。
- 掌握测量传递函数和幅频、相频特性的测量方法。
- 计算双 T 无源网络传递函数,与测量实验数据进行比较,并讨论实验结果。

实验仪器

HB-511 型现代模拟电路实验测试系统 A 分箱、D 分箱,示波器,数字多用表。

实验内容

1. 测试方法及原理

根据传递函数的表达式(1-17)式可知,要求得某一线性电路的传递函数,只要测得该网络的输入电压和输出电压的矢量电压值,就可以求得传递函数 $K(\omega)$ 。或由(1-18)式可知,只要测得系统的幅频特性和相频特性,也就知道了该系统的传递函数。实际上,上述两种表达方式,只是选择的坐标系不一样。矢量电压表示的方式是在直角坐标系中的表述,幅