

“十一五”高等院校规划教材

ELECTRONIC SYSTEM DESIGN

本书配套多媒体教学课件

电子系统设计 ——专题篇

黄 虎 奚大顺 编著
曾国强 余小平 薛滨杰



北京航空航天大学出版社

“十一五”高等院校规划教材

电子系统设计

——专题篇

黄 虎 奚大顺 编著
曾国强 余小平 薛滨杰

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书为《电子系统设计——基础篇》的续篇,以专题的形式介绍了测量技术、控制技术、无线电技术、数字化语音技术等领域以及系统可靠性设计技术(含电磁兼容、抗干扰)的相关知识和设计方法。内容上力求新颖,紧密结合工程实际,简化工作原理与计算,讲述由浅入深、循序渐进。各章后均附有小结与设计练习,以利于自学。

本书既可以作为高等院校电子信息专业本科和硕士研究生的教材或者电子设计竞赛的培训教材,也适合广大电子系统设计者使用。

图书在版编目(CIP)数据

电子系统设计. 专题篇/黄虎等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.2

ISBN 978-7-81124-585-1

I. 电… II. 黄… III. 电子系统—系统设计 IV. TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 008202 号

© 2009,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制本书内容。
侵权必究。

电子系统设计——专题篇

黄 虎 奚大顺
曾国强 余小平 薛滨杰 编 著
 责任编辑 冯 颖

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:emsbook@gmail.com

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:550 千字

2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81124-585-1 定价:38.00 元

前 言

当面对一个电子系统设计课题时,应该具备哪些知识与技能方能成功地设计并制作出符合其功能与可靠性要求的产品呢?就知识而言,应当具有较为深厚的理论基础与设计知识;就技能而言,必须掌握电子 EDA、测试工具的使用等等。前者依靠相应的基础学科,如数字电子技术等以及本书基础篇所介绍的设计知识;后者则依靠实践的锻炼。但是,仅有上述的知识与技能还不够,许多课题还涉及很多专业知识。例如,即使设计一个比较简单的温控系统,还必须了解传感器知识、控制算法、电力电子器件等知识,而为了达到系统“耐用”的目的,还必须在设计的全过程贯穿可靠性设计的思想。本专题篇正是补充这方面的知识。

本书具有以下特点:

1. 内容选取上,撷取了涉及电路基础、模电、数电、高频、MCU、FPGA 等广阔知识的测量技术;电子技术在各领域广泛应用的控制技术;历史悠久、已成为 IT 业基石的无线电技术;方兴未艾的数字化语音处理技术以及作为电子系统质量保证的可靠性设计技术。由于时至今日,电子技术的知识已浩若瀚海,本书只介绍了以上几个常见的专业领域,可谓“挂一漏万”。

2. 尽量采撷新技术、新成果、新器件,例如在模糊控制算法、数字化 Q 测量等新知识上着墨较多。

3. 在编写上力求紧密结合工程实际,例如系统可靠性估算介绍了工程上最常用、最简便的元器件计数法,并且每一小节均附有可实现的设计实例。

4. 原理知识的讲述以能满足设计的要求为限,并避免繁琐的数学推导。注意了基础知识与各专门知识的综合,强化了设计理念。

5. 注意了知识的系统与完整。例如在第 2 章“控制技术”,从常用传感器讲起,直到驱动和控制算法。

6. 叙述简明扼要、由浅入深、循序渐进,每章均附有小结和设计练习,以利于自学。

本书既可以作为高等院校电子信息专业本科和硕士研究生的教材或者电子设计竞赛的培训教材,也适合广大电子系统设计者使用。

黄虎、奚大顺为本书统稿。黄虎编写了第 1 章,曾国强编写了第 2 章、薛滨杰编写了第 3 章,余小平编写了第 4 章,奚大顺编写了第 5 章和 1.1 节。

在编写的过程中,作者参阅了大量的文献与参考资料(书末所附文献可供读者进一步了解相关内容),在此也一并致谢。

由于作者水平有限,书中错误与不妥之处在所难免,恳请广大读者提出宝贵意

见。有兴趣的读者可发送邮件到 xds@cdut.edu.cn, 与本书作者进一步交流; 也可发送邮件到 buaafy@sina.com, 与本书策划编辑进行交流。

作 者

2009 年元月

于成都理工大学

本教材还配有教学课件。需要用于教学的教师, 请与北京航空航天大学出版社联系。北京航空航天大学出版社联系方式如下:

通信地址: 北京海淀区学院路 37 号北京航空航天大学出版社教材推广部

邮 编: 100191

电 话: 010-82317027

传 真: 010-82328026

E-mail: bhkejian@126.com

目 录

第 1 章 测量技术

1.1 阻抗测量	1
1.1.1 阻抗的基本概念	1
1.1.2 电阻测量	3
1.1.3 电容测量	8
1.1.4 电感测量	10
1.1.5 Q 表	11
1.2 交直流电压、交直流电流测量	21
1.2.1 直流电压测量	21
1.2.2 交流电压测量	22
1.2.3 直流电流测量	28
1.2.4 交流电流测量	31
1.2.5 频率、时间、相位差测量	32
1.2.6 功率测量	40
1.2.7 设计实例	41
1.3 信号源	47
1.3.1 正弦信号发生器	48
1.3.2 脉冲信号发生器	53
1.3.3 其他信号发生器	56
1.3.4 设计实例	73
1.4 数字示波器	84
1.4.1 数据采集方法与电路	90
1.4.2 数据存储与显示	105
1.4.3 设计实例	115
1.5 失真度测量	126
1.5.1 失真度测量的基本原理	126
1.5.2 基于数控滤波器的失真度测量	127
1.5.3 基于 FFT 的失真度测量	132
1.5.4 设计实例	134
小 结	137
设计练习	137

第2章 控制技术

2.1 常用传感器	139
2.1.1 光电传感器	139
2.1.2 温度传感器	154
2.1.3 其他传感器	162
2.2 信号调理电路	163
2.2.1 仪表放大器	164
2.2.2 差分 ADC 及其驱动	169
2.3 电机	177
2.3.1 直流电机及其驱动	178
2.3.2 步进电机及其驱动	188
2.3.3 舵机及其驱动	195
2.4 控制算法	199
2.4.1 PID 控制算法原理及程序	200
2.4.2 模糊控制算法原理及程序	205
2.4.3 设计实例	210
小 结	212
设计练习	213

第3章 无线电技术

3.1 无线电信号	215
3.1.1 非正弦周期信号	215
3.1.2 非正弦周期信号的频谱	219
3.1.3 非周期性信号及频谱	219
3.2 传输线	220
3.2.1 传输线的类型	220
3.2.2 传输线的特性阻抗	221
3.2.3 均匀传输线上的波	222
3.2.4 微带线	223
3.3 谐振电路	224
3.3.1 LC 串联谐振回路的特性	224
3.3.2 LC 并联谐振回路的特性	225
3.3.3 串联电路和并联电路的互相转换	225
3.3.4 串联谐振回路的通频带	227
3.3.5 并联谐振回路的通频带	229
3.3.6 电感线圈 Q 值的测量	229
3.4 天线	230
3.4.1 天线的基本参数	230

3.4.2 电波在平面地上的传播特征	232
3.5 无线电技术应用	233
3.5.1 MF RC522 非接触式读写卡芯片	233
3.5.2 MF RC522 的引脚及功能	233
3.5.3 MF RC522 的工作原理	235
3.5.4 MF RC522 应用	237
小 结	237
设计练习	238

第 4 章 数字化语音信号处理

4.1 语音编码	239
4.1.1 语音编码简介	239
4.1.2 语音编码应用举例	242
4.1.3 语音录放应用举例	247
4.2 语音合成	257
4.2.1 语音合成简介	257
4.2.2 语音合成应用实例	258
4.3 语音识别	262
4.3.1 语音识别技术简介	262
4.3.2 语音识别集成电路 HL7003 及其应用	263
4.4 说话人识别	266
4.4.1 说话人识别技术简介	266
4.4.2 RSC4128 信号处理器简介	267
小 结	268
设计练习	268

第 5 章 可靠性设计

5.1 可靠性基本概念	269
5.1.1 可靠性特征量参数	269
5.1.2 失效率曲线	272
5.1.3 失效分布类型	273
5.1.4 电子系统可靠性估算	274
5.2 可靠性设计方法	288
5.2.1 硬件电路的综合与优化	290
5.2.2 合理选择元器件	291
5.2.3 减额设计	292
5.2.4 容错设计	297
5.2.5 耐环境设计	300
5.2.6 冗余设计	303

5.3 抗干扰设计	303
5.3.1 有关干扰的基本概念	304
5.3.2 电子系统硬件抗干扰措施	305
5.3.3 软件可靠性设计与抗干扰技术	323
小 结	331
设计练习	331
参考文献	332

第 1 章 测量技术

俄国著名科学家门捷列夫(Д. И. Менделеев)曾说过:“测量是认识自然界的主要工具”,“没有测量就没有科学”。

获取被测对象信息的技术称为测量技术。为此,人们借助于专门的设备——测量仪器去感知和识别有关被测对象的属性和量值的信息,并且以便于人们利用的形式表示出来。

电子测量技术泛指以电子技术为基本手段的一种测量技术,它是电子系统的基石。从元器件的筛选、系统的制造、系统质量的监控到系统的维护,没有一个环节能离开电子测量技术。

1.1 阻抗测量

阻抗测量指的是电阻、电容、电感以及相关的 Q 值、损耗角 δ 、电导 G 的测量。

1.1.1 阻抗的基本概念

对于图 1.1.1(a)所示的单口或多口网络,端口两端电压 $\dot{U}$ 与流入端口的电流 $\dot{I}$ 之比即为阻抗 Z

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

若所施加的为直流电压 U ,则

$$Z = \frac{U}{I} = R$$

若所施加的为交流电压,则阻抗在直角坐标系中可分解为实部与虚部两部分,即为复数阻抗。阻抗也可以在极坐标系中用幅度 $|Z|$ 和相角 θ 表示,如图 1.1.1(b)所示。

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \theta = \operatorname{atctg} \frac{X}{R}$$

$$R = |Z| \cos \theta, \quad X = |Z| \sin \theta$$

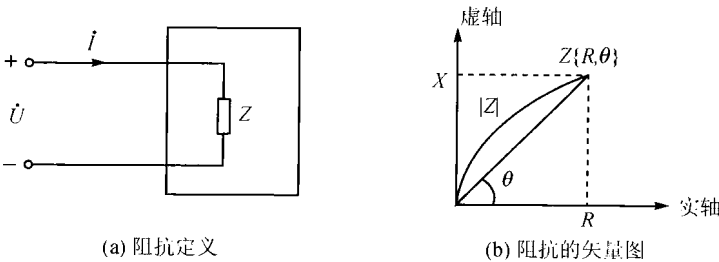


图 1.1.1 阻抗定义示意图

导纳 Y 为阻抗 Z 的倒数,即

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R^2 + X^2} + j \frac{-X}{R^2 + X^2} = G + jB = |Y| e^{j\varphi}$$

其中 G 为电导, B 为电纳, $|Y|$ 和 φ 分别为导纳的幅度和导纳角。

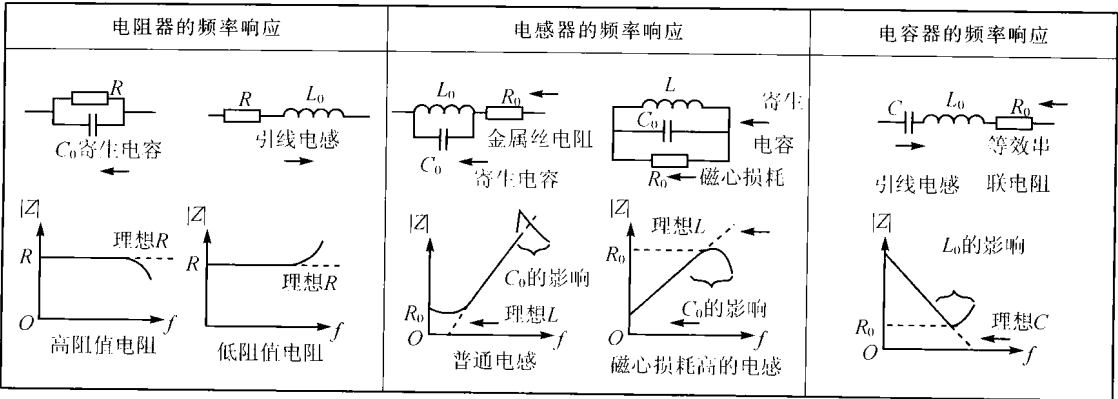
实际的电阻器、电容器和电感器均存在着损耗、寄生电容和寄生电感。因此,工作频率、工作电流、工作环境温度和湿度等都会对阻抗的有效值(考虑了寄生参数影响的阻抗值)产生影响,表 1.1.1 为 RLC 的等效电路模型。

表 1.1.1 电阻器、电容器、电感器等效电路模型

元件类型	组 成	等效电路模型	等效阻抗
电阻器	理想电阻		$Z=R$
	考虑引线电感		$Z=R+j\omega L_0$
	考虑引线电感和分布电容		$Z = \frac{R+j\omega L_0 \left[1 - \frac{C_0}{L_0} (R^2 + \omega^2 L_0^2) \right]}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + \omega^2 C_0^2 R^2}$
电容器	理想电容		$Z = \frac{1}{j\omega C}$
	考虑泄漏、介质损耗等		$Z = \frac{R_0}{1 + \omega^2 C^2 R_0^2} - j \frac{\omega C R_0^2}{1 + \omega^2 C^2 R_0^2}$
	考虑泄漏、引线电阻和电感		$Z = \left(R_0' + \frac{R_0}{1 + \omega^2 C^2 R_0^2} \right) + j \left(\omega L_0 - \frac{\omega C R_0^2}{1 + \omega^2 C^2 R_0^2} \right)$
电感器	理想电感		$Z=j\omega L$
	考虑导线损耗		$Z=R_0+j\omega L$
	考虑导线损耗和分布电容		$Z = \frac{R_0+j\omega L \left[1 - \frac{C_0}{L} (R_0^2 + \omega^2 L^2) \right]}{(1 - \omega^2 L C_0)^2 + \omega^2 C_0^2 R_0^2}$

表 1.1.2 为 RLC 的典型频率响应情况。

表 1.1.2 实际的电阻器、电感器和电容器的典型频率响应



1.1.2 电阻测量

电阻的测量方法较多,主要有以下几种方法。

1. 直流电桥法

最经典的传统电阻测量方法为直流双臂凯尔文(Kelvin)电桥法,简称直流电桥法,其原理电路如图 1.1.2 所示。电桥的四个臂分别由标准电阻 R_1 和 R_2 、待测电阻 R_x 、桥臂电阻 R_3 组成,电阻由直流电源 E 供电,灵敏检流计 G 接于电桥的另一对角线。当电桥平衡时,有

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

这样的测量方法适合用测量低阻值电阻,其精度可达 0.1% ,但需手动调整。

利用上述方法并数字化的仪器有 QJ84 型数字式直流电桥,可直接显示测量结果,其精度达 0.5% ,测量范围为 $20\text{ m}\Omega \sim 20\text{ k}\Omega$ 。

2. 比例法

比例法电阻测量是广泛采用的一种电阻测量方法。其典型电路之一如图 1.1.3 所示。它由基准电压源 U_r 、被测电阻 R_x 、标准电阻 R_s 、运算放大器 OA 以及数字电压表 DVM 组成。由图可知:

$$U_{in} = \frac{R_x}{R_s} U_r \quad \text{或} \quad R_x = \frac{U_{in}}{U_r} R_s$$

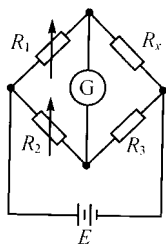


图 1.1.2 直流电桥法电阻测量电路

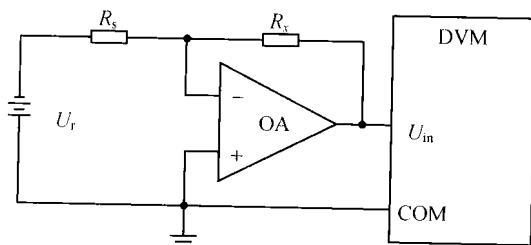


图 1.1.3 比例法电阻测量电路

由 DVM 测得的电压即可反映出待测电阻 R_x 的大小。 R_s 可用以确定其量程。

图 1.1.4(a) 为数字万用表利用比例法测量电阻的原理电路。 $3\frac{1}{2}$ 位 ADC(ICL7106) 的参考电压 U_{ref} 由外部提供的基准电压 U_+ 在标准电阻 R_s 、待测电阻 R_x 串联电路的电流 I 在 R_s 上的压降提供。由于 ICL7106 的输入端(IN)漏电流约为 1 pA ,故可以认为流过 R_s 与流过 R_x 的电流相等,均为 I 。因此

$$I = \frac{U_{ref}}{R_s} = \frac{U_{in}}{R_x}$$

或

$$R_x = \frac{U_{in}}{U_{ref}} R_s$$

通过 ICL7106 输入电压 U_{in} 即可反映待测电阻的大小。

图 1.1.4(b)为数字万用表比例法电阻测量的实际电路。其中 R_t (PTC——正温度系数的热敏电阻) 和 T_1 的发射结用以构成输入过压(如电阻测量时误接高电压)的保护电路。 T_2 的发射结当成稳压管。 R_2 和 C_3 为 ICL7106 输入端低通滤波。通过量程转换开关选择不同的 R_s 来改变量程。对于该电路来说,液晶显示器显示的计数 N 为

$$N = \frac{R_x}{R_s} \times 1000$$

此电路的最大量程为 $20\text{ M}\Omega$ 。

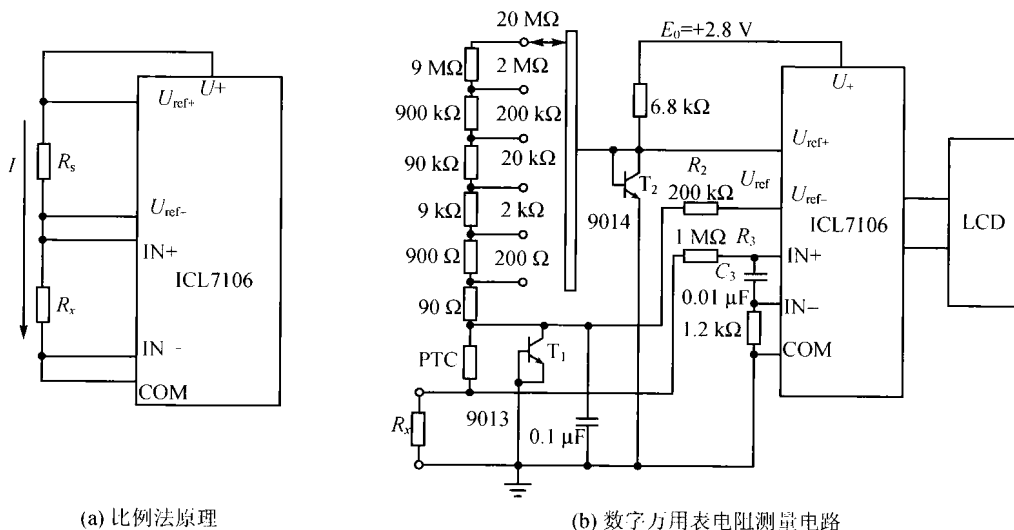


图 1.1.4 数字万用表比例法电阻测量电路

3. 恒流源法

恒流源电阻测量的原理电路如图 1.1.5 所示。这个电路实质上是一个 $I-U$ 转换电路。恒流源提供恒定准确的电流 I_s , 则 DVM 的输入电压 U_{in} 为

$$U_{in} = I_s R_x$$

U_{in} 反映了待测电阻 R_x 的大小。改变恒流源的电流即可切换量程。表 1.1.3 为某欧姆表电阻测量量程与 I_s 、 U_{in} 的关系。由表可知,高阻测量需 $<5\text{ }\mu\text{A}$ 的 I_s , 实现起来有一定的难度。

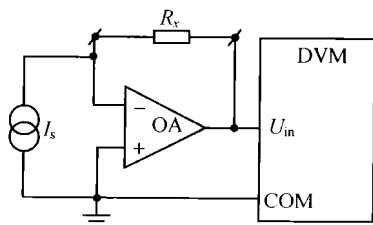


图 1.1.5 恒流源法测电阻

表 1.1.3 某欧姆表的量程

量程范围	恒流源	满度电压
$0 \sim 200\text{ }\Omega$	1 mA	0.2 V
$0 \sim 2\text{ k}\Omega$	1 mA	2.0 V
$0 \sim 20\text{ k}\Omega$	$100\text{ }\mu\text{A}$	2.0 V
$0 \sim 200\text{ k}\Omega$	$10\text{ }\mu\text{A}$	2.0 V
$0 \sim 2\text{ M}\Omega$	$5\text{ }\mu\text{A}$	10.0 V

此种方法在测量低电阻时由引线引起的误差较大。图 1.1.6(a)中的 R_1 和 R_2 为引线电阻,此时

$$U_{in} = I_S(R_x + R_1 + R_2)$$

为减小其影响,可采用图 1.1.6(b)所示四端测量法。电路中 R_{1-1} 对 I_S 无影响,运算 OA 的反相输入端电流近似为 0,故 R_{1-2} 上的压降为 0。由于 DVM 的输入端电阻很大,流经 R_{2-2} 的电流近似为 0, R_{2-2} 上的压降为 0,故 U_{in} 仍然等于 $I_S R_x$,避免了引线的影响。

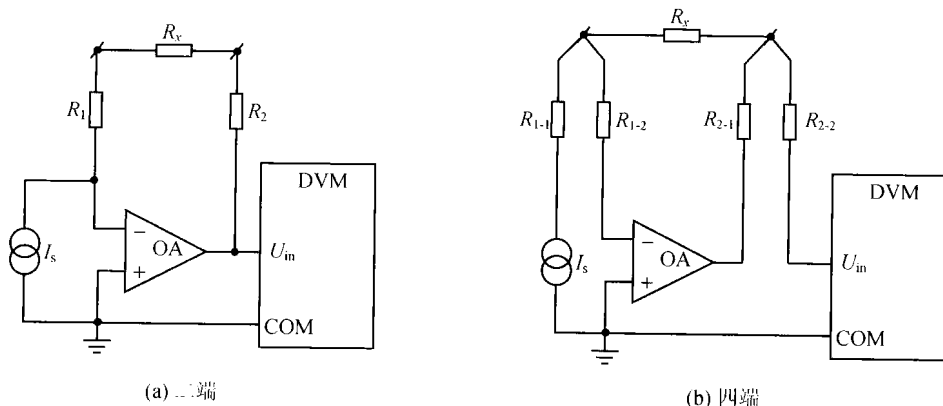


图 1.1.6 四端恒流源电阻测量

4. 复阻抗测量法

复阻抗测量法的原理与实现请参阅 1.1.5 小节。电阻测量是复阻抗测量的一个特殊情况。

5. $R-f$ 测量法

利用 RC 作为定时元件的各种振荡器,如 RC 多谐振荡器、 RC 文氏电桥振荡器等,由于其振荡频率由定时元件 R 和 C 决定,故可以通过精确测频,由单片机 MCU 等计算出待测电阻值。

图 1.1.7 由 NE555(CC7555)和待测电阻 R_x 、标准电阻 R_s 、标准电容 C_s 组成的一个典型的 RC 多谐振荡器。

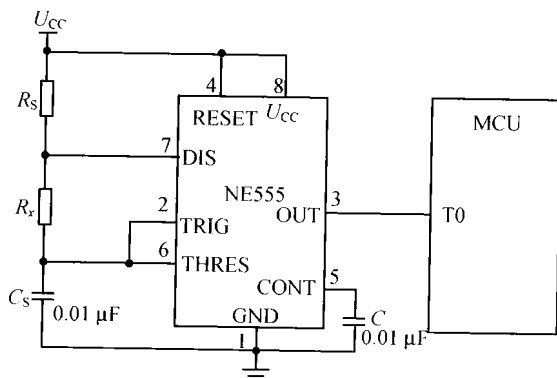


图 1.1.7 RC 多谐振荡器测电阻

电路的振荡频率

$$f = \frac{1}{(R_s + 2R_x)C_s \ln 2}$$

或

$$R_x = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C_s f \ln 2} - R_s \right)$$

如果标准电阻 R_s 采用金属膜 $\pm 0.1\%$ 的精密电阻, 认为其为常数的话, 则

$$R_s + 2R_x = \frac{1}{C_s f \ln 2}$$

$$2\Delta R_x = -\frac{\Delta f}{C_s f \ln 2} - \frac{\Delta C}{C_s^2 f \ln 2}$$

$$\left| \frac{\Delta R_x}{R_s/2 + R_x} \right| = \left| \frac{\Delta f}{f} \right| + \left| \frac{\Delta C_s}{C_s} \right|$$

即 R_x 的测量精度取决于测频误差与标准电容的误差。测频精度可以由以 MCU 或 FPGA 为核心的各种高精度测频电路和较高的中心频率来保证(请参阅本书 1.2.5 小节), C_s 的稳定性可由选用高质量的电容器(如 CC4 型多层陶瓷电容, 独石电容)来保证。电容器的公差可由软件修正。采用这些措施以后, 可达到小于 $\pm 1\%$ 的读数误差。

6. 绝缘电阻测量法

在电气工程上, 经常需要对发电机、电动机、变压器、断路器等电力设备和输电电缆的绝缘电阻进行测定。绝缘电阻是上述设备的一项重要指标。

绝缘电阻和普通电阻的测量有两个不同之处: 一个是按电气检测规定, 必须在被测端加上测试电压, 测试电压有 50 V、100 V、250 V、500 V、1000 V、2000 V、2500 V、5000 V、10000 V 共 9 种, 其中以 500 V 和 1000 V 应用最多; 第二个不同之处是绝缘电阻阻值高, 通常在 $0.5 \text{ M}\Omega \sim 10 \text{ G}\Omega (10^9 \Omega)$ 。

因此, 绝缘电阻测量仪总是由高压发生器和高阻测量两部分组成。

早期传统的绝缘电阻测量仪由带稳速装置的高压发电机和基于 $U-I$ 测量原理的电阻测量部分组成, 俗称“摇表”。

图 1.1.8 所示为一种指针式电子兆欧表的电路。图中 555 定时器接成多谐振荡器形式, 产生平均 85 kHz 的方波脉冲。经功率 VT_1 驱动脉冲变压器 T, 在其次级经半波整流滤波后

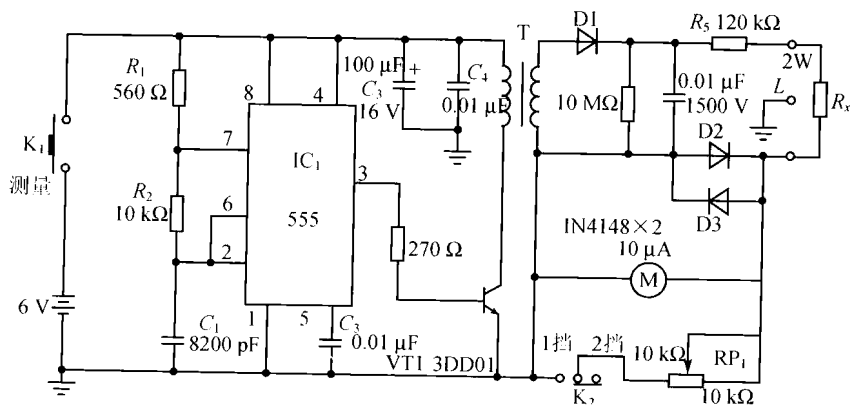


图 1.1.8 指针式电子兆欧表电路

产生约 1000 V 的测试直流电压。流过 100 μ A 电流表 M 的电流

$$I_M = \frac{1000}{R_x}$$

R_x 的最大值约为 1000 M Ω (1 G Ω)。电路中 RP_2 为 M 的分流电阻,用以校准读数。 R_r 为短路保护电阻。 D_2 、 D_3 为电流表保护二极管。

图 1.1.9 为数字式兆欧表的原理框图。它由直流高压产生电路、测量电路和以 MCU 为核心的数字电路组成。

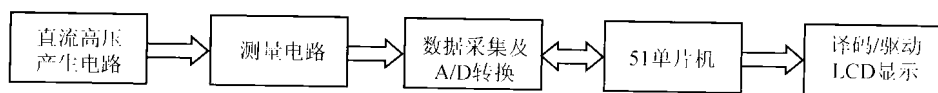


图 1.1.9 数字式兆欧表原理框图

图 1.1.10(a)为直流高压产生电路,它与图 1.1.7 的电路的区别仅仅是取消了指针式电表的相应电路。 $HU=1000$ V。图 1.1.10(b)为其测量电路。对于 4 $\frac{1}{2}$ 位 ADC(ICL7135)而言,其输出的数字值 N 为

$$N = \frac{U_i}{U_r} \times 20000 = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}{\frac{R_s}{R_r + R_s}} \times 20000 = \frac{R_2(R_r + R_s)}{R_s(R_1 + R_2)} \times 20000$$

$\therefore$

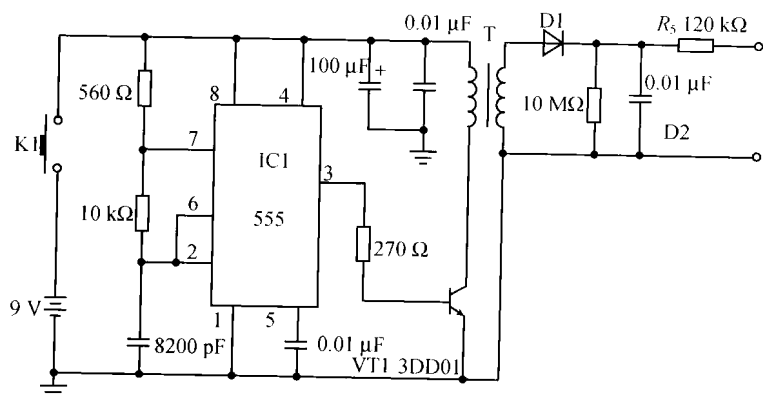
$$R_1 \gg R_2, R_r \gg R_s,$$

$\therefore$

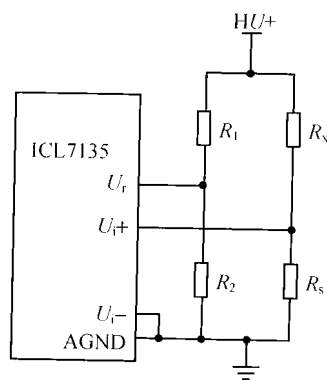
$$N \approx \frac{R_r R_2}{R_s R_1} \times 20000$$

或

$$R_r = \frac{R_s R_1}{20000 R_2} \times N$$



(a) 基于 555 的电路



(b) ICL7135 电路

图 1.1.10 数字式兆欧的电路

由于 R_1 、 R_2 、 R_s 均为定值,故由 N 值可求得 R_r 。应注意 R_1 、 R_2 、 R_s 的选取不要超过 ICL7135 U_r 和 U_i 的极限值。

此表的 MCU 电路可很容易设计出来。

1.1.3 电容测量

1. 交流电桥法

图 1.1.11(a) 为典型的四臂电桥, 若被测阻 Z_x 和标准阻抗相邻连接, 为“臂比”电桥; 若被测阻抗 Z_x 与标准阻抗相连接, 为“臂乘”电桥。对于图 1.1.11(a) 的电桥, 其平衡条件为:

$$\frac{Z_x}{Z_1} = \frac{Z_3}{Z_2} \quad \text{或} \quad Z_x Z_2 = Z_1 Z_3$$

若 Z_3 取为标准阻抗 Z_s , Z_1 、 Z_2 为固定阻抗, 构成臂比电桥, 则

$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_s$$

由于

$$Z_x = R_x + jX_x, \quad Z_s = R_s + jX_s$$

令

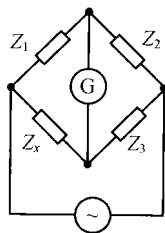
$$Z_1/Z_2 = \alpha + j\beta$$

则可得到:

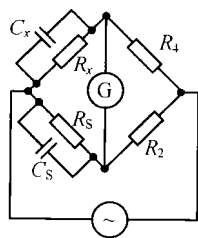
$$\begin{cases} R_x = \alpha R_s - \beta X_s \\ X_s = \beta R_s - \alpha X_s \end{cases}$$

若 $\alpha = 0$ 或 $\beta = 0$ (Z_1/Z_2 为纯虚数或纯实数), 则电表平衡时, R_x 和 X_x 可分别从标准元件 R_s 或 X_s 的刻度上读出。

电容测量时, 必须考虑泄漏和介质损耗, 常常可忽略引线电阻和电感, 用理想电容和介质电阻(漏电阻、绝缘电阻)的并联电路来等效, 如表 1.1.1 所列。这时可采用图 1.1.11(b) 所示的并联电容臂比电桥进行测量。此时,



(a) 原理电路



(b) 并联电容臂比电桥

图 1.1.11 阻抗测量电桥

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_s, \quad R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_s R_s}$$

式中 $\operatorname{tg} \delta$ 为电容器损耗角的正切值, ω 为激励电源的角频率。

2. C-f 法

与 $R-f$ 测电阻原理相同, 利用 RC 振荡电路通过测频, 也可以测出电容来。在图 1.1.7 的电路中使两只定时电阻相等, 即 $R_s = R_x$, C_s 换为被测电容 C_x , 则

$$f = \frac{1}{3R_s C_x \ln 2}$$

或

$$C_x = \frac{0.48}{R_s f}$$

切换 R_s 可满足 C 测量范围的要求。测量误差为

$$\left| \frac{\Delta C_x}{C_x} \right| = \left| \frac{\Delta f}{f} \right| + \left| \frac{\Delta R_s}{R_s} \right|$$