



高等学校“十三五”重点规划
信息与自动化系列

电子测量仪器 原理及应用

DIANZI CELIANG YIQI YUANLI JI YINGYONG

主编 李志刚 田雪怡 张晓彤

 哈尔滨工程大学出版社

电子测量仪器原理及应用

主 编 李志刚 田雪怡 张晓彤

主 审 王松武

内 容 简 介

本书介绍常规电子测量仪器,包括电子电压表、信号发生器、示波器、扫频测量仪与数字电压表。该书分为5章,每章的顺序都是先介绍这些常用仪器的基本原理,然后分析特定的仪器原理。并在分析仪器原理的基础上着重介绍仪器的使用、校准以及维护。

本书可以作为高等院校的教材、各种培训班的教材,也可以作为工程技术人员、电子技术爱好者的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量仪器原理及应用/李志刚,田雪怡,张晓
彤主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.4

ISBN 978 - 7 - 5661 - 1481 - 5

I. ①电… II. ①李… ②田… ③张… III. ①电子测
量设备 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 065584 号

责任编辑:张忠远

封面设计:博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 10.75
插 页 4
字 数 305 千字
版 次 2017 年 4 月第 1 版
印 次 2017 年 4 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

电子测量仪器是工程技术人员的基本工具。合理地选用仪器、正确地制定测量方案、有效地组成测试系统、熟练地使用电子仪器,以及及时有效地对仪器进行校准与维护是工程技术人员应掌握的基本功。

常规电子测量仪器是最传统、最基本的仪器,它完全是由硬件电路组成的实体。这类仪器的通用性强,操作简单,在使用中处于主导地位。

现代实验室使用的电子测量仪器可以分为智能仪器与虚拟仪器两类。随着计算机技术、电子测量技术、仪器仪表技术、芯片制造技术的发展,人们将这些技术有机地结合在一起,构成了新的仪器——智能仪器。它能够根据被测量参数的变化自动选择量程、自动补偿、自动校正、自动诊断故障等;它可以完成一些需要人类的智慧才能完成的工作,因此被称为智能仪器。智能仪器具有强大的数据存储、数据处理能力和较高的测量精度,是今后电子测量仪器的重要发展方向。

虚拟仪器可以看成是智能仪器的一个分支。虚拟仪器除了必备的硬件系统之外,主要利用软件来完成复杂的控制、分析和数据的采集、处理,因此虚拟仪器建立了“软件仪器”的新概念。利用虚拟环境,人们可以进行网上测量与实验,开展远程教育,其发展前景无限光明。

仪器仪表涉及的知识面极为广泛,采用了一系列的新技术、新器件与新工艺。中大规模集成电路、微处理器、A/D 与 D/A 变换器、数据采集器及存储器在仪器仪表中广为应用。电子测量仪器涵盖了电工基础、电子线路、自动控制、微机原理等各门课程的知识,有的仪表还涉及声、光、磁、机械和传感器等知识。因此,电子测量仪器作为一门独立的学科方向,在科学技术领域起着重要的作用。

目前,在电子测量仪器的制造业内,生产厂商之间的竞争十分激烈,而竞争促进了仪器仪表的发展,更新换代相当迅速。从一年两届的全国高教仪器设备展示订货会上可以看出,每次展会都会推出新产品。国内外厂商生产的各种新型电子仪器仪表使得当今电子市场呈现一片繁荣景象。本书就是为了适应电子仪器仪表的发展和社会需要而编写的,其主要特点如下:

1. 本书所介绍的仪器仪表都是高等院校、科研单位、企业厂矿中常用的电子仪器,具有通用性强、覆盖面广的特点。

2. 在编写体系上,本书本着由浅入深、先易后难、突出重点的原则介绍仪器仪表。在每一章里,先介绍基本知识或带有共性的内容和各种仪器仪表的组成方案,针对实际的仪器的机型进行分析与学习,叙述整机的工作原理、各部分的参数计算、软硬件分析、信号处理过程等。每一章又具有相对独立性,可以直接阅读。

3. 考虑到仪器仪表是一个整机电路,本身就构成了一个独立的电子系统,因此在学习本书时,应向电子系统方向延伸,以系统的观点分析仪器仪表线路。在分析时注重仪器仪表的设计思想和系统的组成,分析硬件原理、软件流程,使本书与电路、电子线路、微机原理等课程紧密结合。这样对于巩固前述知识、提高整机识图能力和工程估算能力是有实用价值的。仪器仪表中采用的新器件、新技术、新工艺能开拓人们的思路,具有借鉴意义。

本书的第1章、第2章与第3章由李志刚编写,第4章由张晓彤编写,第5章由田雪怡编写。全书由王松武主审。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2016 年 10 月

目 录

第 1 章 电子电压表	1
1.1 概述	1
1.2 电子电压表中的典型应用电路	3
1.3 各种电子电压表的组成方案	10
1.4 数字交流毫伏表	19
第 2 章 信号发生器	23
2.1 概述	23
2.2 通用信号发生器	26
2.3 DDS 数字式频率合成信号发生器	32
2.4 函数信号发生器	35
2.5 TFG3050L 系列 DDS 函数信号发生器	39
第 3 章 示波器	56
3.1 概述	56
3.2 模拟示波器	57
3.3 数字示波器	63
3.4 DS1000E, DS1000D 系列数字示波器	69
第 4 章 扫频测量仪	93
4.1 概述	93
4.2 扫频仪的工作原理	94
4.3 数字频率特性测试仪	100
第 5 章 数字电压表	132
5.1 概述	132
5.2 逐次逼近比较式 DVM	135
5.3 脉冲调宽式 DVM	137
5.4 双积分式 DVM	139
5.5 电荷平衡式 DVM	145
5.6 斜坡式 DVM	148

5.7 DT890 型数字万用表	149
附图 1 SX2172 型交流毫伏表电原理图	
附图 9 HWS3342 数字频率计电原理图	
附图 10 DT-890 型数字万用表电原理图	
附图 2 HFJ-8 型超高频毫伏表总电路图	
附图 3 YB1631 功率函数发生器电原理图(三角波发生)	
附图 4 YB1631 功率函数发生器电原理图(功放和电源)	
附图 5 XJ4316 示波器垂直系统电原理图	
附图 6 XJ4316 示波器水平系统电原理图	
附图 7 XJ4316 示波器主机系统电原理图	
附图 8 SS5705 示波器垂直控制器电原理图	

第1章 电子电压表

1.1 概 述

电压、电流、功率是表征电信号能量的三个重要参量。但是在测量中,测量电压最为方便,测量电压的机会最多,这是因为:许多非电量如温度、压力等都可转化为电压来测量;此外,诸如失真度、调制度等电压的派生量也是通过测量电压来实现的。因此,电压测量仪器是电子测量仪器中最基本、最常用的仪器。

1.1.1 电压测量仪器的分类

广义的电压测量仪器分为模拟式和数字式两大类。模拟式(即指针式)电压表具有灵敏度高、刻度线性好、测量范围广、频带宽的优点,但输入阻抗低、测量精度差;数字电压表采用 A/D 变换技术将模拟电压转变为数字电压进行测量,其优点是测量精度高、测量速度快、易于实现测试自动化,但只适于测量直流电和频率较低的正弦交流电。数字电压表是电压测量技术的重要发展方向。

本章介绍的电子电压表属于模拟式电压表,通常称为电子电压表。

电子电压表是常用的测量仪器之一,是各类测量仪器中较为简单的一种仪表。电子电压表是在万用表的基础上加上放大环节,把微弱的被测电压加以放大,然后再利用磁电式电流表头进行测量,使电压表的灵敏度大为提高,特别是扩大了测量量程的下限。有的电子电压表也像万用表那样,做成多用式的,可测电压、电阻、电流,故有繁用表之称。指针式电子电压表又称模拟电压表。如果说万用表是无源网络,电子电压表便为有源网络。

1.1.2 对电压测量的基本要求

对电压测量提出的基本要求,也是电子电压表所具有的特点。

(1)测量的频率范围宽,从直流到几吉赫兹。

(2)输入阻抗高,以减轻对被测电压的影响。一般电子电压表的输入电阻达 $1\text{ M}\Omega$,接入探头可达 $10\text{ M}\Omega$ 。

(3)测量范围大,从零点几微伏到几十千伏。

(4)测量精度高,模拟电压表测交流电压可达 10^{-3} 的精度,数字电压表测直流电压可达 10^{-6} 的精度。

(5)测量范围广,除测正弦电压外,还能测非正弦电压和脉冲电压。

(6)抗干扰能力强。

1.1.3 电子电压表的基本结构

电子电压表一般由五部分组成,即分压器、磁电式指示表头、检波器、放大器、整机电源。有的电子电压表做成斩波式放大器,因此设有调制器和解调器。按检波器在放大器之前或之后,电子电压表有两种组成形式,即检波-放大式和放大-检波式。

1. 放大-检波式

放大-检波式电子电压表的结构框图如图1-1所示。这种方案是用放大器将被测信号预先放大,提高灵敏度;检波器进行大信号检波,避免了因检波器的非线性产生的失真;又由于在放大器之前有阻抗变换器,输入阻抗较高。这些优点对于测量小信号很有利。其缺点是被测信号的频率受到放大器带宽的限制,影响了整机的带宽。放大-检波式的通频带一般为2 Hz~10 MHz,测量的最小幅值为几百微伏或几毫伏,因此一般称为低频毫伏表。

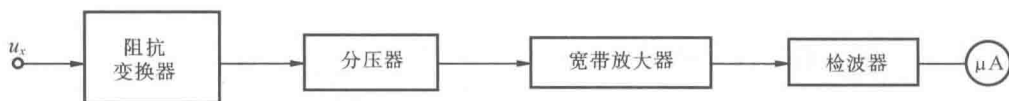


图 1-1 放大-检波式框图

2. 检波-放大式

检波-放大式电子电压表的结构框图如图1-2所示。这种方案的特点是被测信号先检波后放大,因此带宽主要取决于检波器,其带宽很宽,上限频率可达1 000 MHz,故有超高频毫伏表之称。但其缺点是不能进行阻抗变换,输入阻抗低,最小量程是毫伏级,检波器工作于小信号检波状态,非线性失真大,影响测量精度。

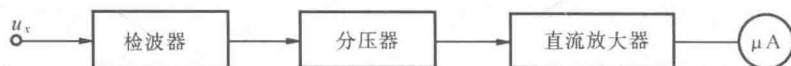


图 1-2 检波-放大式框图

1.1.4 电子电压表的性能指标

1. 工作频率范围

工作频率范围是指电子电压表能以规定的准确度进行电压测量的频率范围。这个范围的大小与电子电压表的电路结构有密切的关系,不同类型的电压表都有规定的频率范围。例如,DA-16型低频毫伏表,电路结构是放大-检波式,其频率范围为20 Hz~1 MHz;HFC-1型超高频毫伏表,电路结构是检波-放大式,其频率范围为5 kHz~1 000 MHz。因此,必须根据被测信号电压的频率范围选用适当的电子电压表。

2. 灵敏度和电压量程

电压量程是指电子电压表可以测量电压的范围;灵敏度是指量程的下限值,而其上限值则取决于电子电压表本机的分压器和衰减探头。例如,DA-16毫伏表的量程为1 mV~

300 V; HFC-1 超高频毫伏表的量程为 1 mV ~ 3 V, 如采用 100:1 衰减探头, 测量电压的上限可扩展到 300 V。

3. 准确度和工作误差

电子电压表的准确度通常由基本误差、频率附加误差、温度附加误差等系统误差来表征。例如, HFC-1 超高频毫伏表的电压基本误差: 1 mV 挡小于 $\pm 10\%$, 3 mV 挡小于 $\pm 5\%$; 频率附加误差: 5 kHz ~ 500 MHz 小于 $\pm 5\%$; 电源附加误差: 220 V $\pm 10\%$ 时小于 $\pm 1\%$ 。当然, 不同类型的电子电压表的准确度是不同的。一般来说, 电子电压表的基本误差为 $\pm 2\%$ 左右, 而频率误差的出入较大, 为 $\pm 2\% \sim \pm 10\%$ 。

4. 输入阻抗

输入阻抗是指输入电阻 R_i 和输入电容 C_i 的并联值。输入阻抗的大小对测量电压的准确度有很大影响, 我们希望 R_i 越大越好, C_i 越小越好。例如, DA-16 低频毫伏表的输入电阻大于 1 M Ω , 输入电容约 50 pF, 而 HFC-1 超高频毫伏表的输入电阻大于 50 k Ω , 输入电容小于 2 pF。在使用中常采用衰减探头以提高输入阻抗。

1.2 电子电压表中的典型应用电路

1.2.1 分压器

由于电子电压表的灵敏度很高, 能测微小电压, 当被测电压高时, 要用分压器将高电压变为低电压。特别是为适应多量程测量, 分压器常做成多挡步进式。电子电压表中的分压器有三种类型。

1. 可变分压器

可变分压器如图 1-3 所示。当 K 置“1”时, 分压比 $k_1 = 1$; 当 K 置“2”时, 分压比 $k_2 = \frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$; 当 K 置“3”时, 分压比 $k_3 = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$ 。由此可见, 改变波段开关 K 可以很方便地改变量程。

2. 补偿式分压器

在可变分压器中, 我们都希望采用大的分压电阻, 以提高输入阻抗。但分压电阻大, 寄生电容的影响变得更为突出而使工作频率降低, 因此可采用补偿式分压器(图 1-4)。在图 1-4 中, 当电路满足条件

$$R_1 C_1 = R_2 C_2 \quad (1-1)$$

时, 电路具有宽频带的平坦的响应。此特性可用阶跃信号激励证明。

设输入 $u_i(t)$ 为阶跃信号, 从零跃变到 E , 应用快速公式

$$u_o(t) = f(\infty) + [f(0^+) - f(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-2)$$

其中, 瞬态值 $u_o(0^+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} E$; 稳态值 $u_o(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$; 时间常数 $\tau = RC$ 。则

$$u_o(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E + \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} E - \frac{R_2}{R_1 + R_2} E \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-3)$$

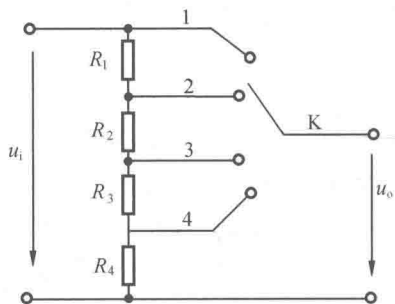


图 1-3 可变分压器

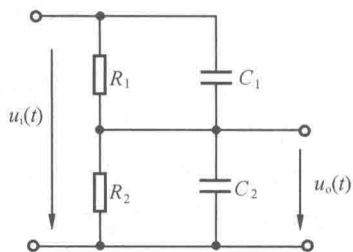


图 1-4 补偿式分压器

当电路参数不同时,有三种响应状态,即:

状态一:当 $\frac{C_1}{C_1 + C_2} > \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 时, $R_1 C_1 > R_2 C_2$, 即 $u_o(0^+) > u_o(\infty)$, 过补偿。

状态二:当 $\frac{C_1}{C_1 + C_2} < \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 时, $R_1 C_1 < R_2 C_2$, 即 $u_o(0^+) < u_o(\infty)$, 欠补偿。

状态三:当 $\frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 时, $R_1 C_1 = R_2 C_2$, 即 $u_o(0^+) = u_o(\infty)$, 临界补偿。

三种补偿所对应的输出如图 1-5 所示。易见,在 $R_1 C_1 = R_2 C_2$ 临界补偿时,输出 $u_o(t)$ 是不失真的阶跃信号,这时网络具有宽频带特性。

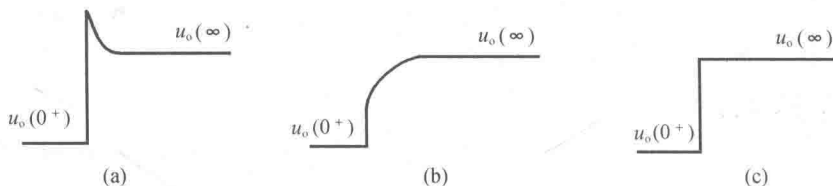


图 1-5 三种补偿所对应的响应

(a) 过补偿; (b) 欠补偿; (c) 临界补偿

3. 带源极输出器的分压器

在补偿式分压器中,引入 C_1, C_2 可减轻分布电容的影响,展宽频带,但却使输入电容增加,引起输入阻抗变低。因此,用源极输出器以提高输入阻抗,如图 1-6 所示,亦可用射极输出器。

1.2.2 检波器

电子电压表中常用的检波器有峰值式和均值式两种。

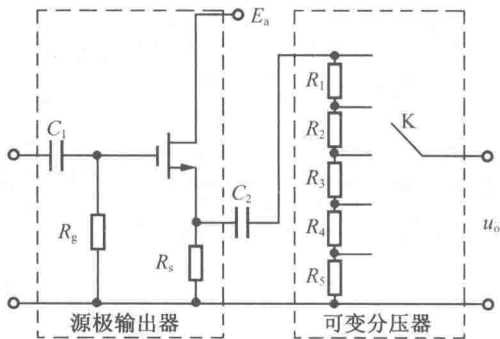


图 1-6 带源极输出器的分压器

1. 均值检波器的工作原理

均值检波器有两类,图 1-7 中(a),(b)为半波,图 1-7 中(c),(d)为全波。但无论哪种类型,均值检波器都要求电路的时间常数很小,所以检波后不接 RC 充放电回路,表头两端一般并联一个小电容 C ,是为防止表头流过交流电使表针抖动,以及消除表头动圈内阻产生的热损耗。以图 1-7(c) 电路为例,设被测电压为 $u_i(t)$,四个二极管具有相同的正向电阻 R_d ,微安表内阻为 R_m ,于是二极管导通而流过微安表的正向平均电流为

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|u_i(t)|}{2R_d + R_m} dt = \frac{\bar{U}}{2R_d + R_m} \quad (1-4)$$

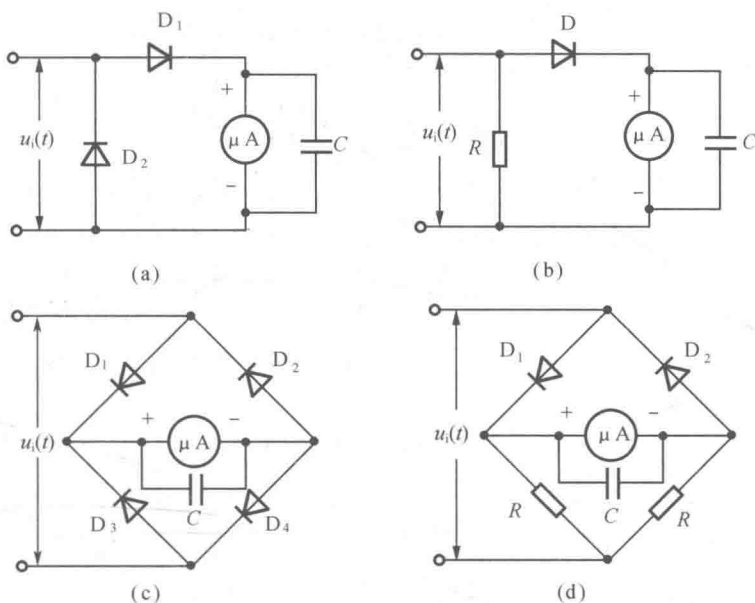


图 1-7 常用平均值检波电路

(a),(b)半波式;(c),(d)全波式

易见,流过表头的电流 $\bar{I}$ 正比于被测电压的平均值 $\bar{U}$,故表头可按电压定度。注意到在式(1-4)中并未涉及被测电压 $u_i(t)$ 的波形,即表头示值正比于被测电压的平均值而与波形无关。由于被测交流电压大多数为正弦电压,而且希望测量其有效值,所以表头都以正弦电压的有效值定度,即表头示值即为被测正弦电压的有效值,即

$$\alpha = U = k_F \bar{U} \quad (1-5)$$

其中, α 为电压表读数(示值); U 为正弦电压有效值; k_F 为波形因数,对于正弦波全波检波器 $k_F = 1.11$ (半波检波器 $k_F = 2.22$)。由于不同波形电压的 k_F 值不同,故当用这类电压表测非正弦电压时,其示值 α 无直接的物理意义,只有把读数除以 1.11 后才是被测电压的全波平均值,即

$$\bar{U} = \frac{\alpha}{1.11} = 0.9\alpha \quad (1-6)$$

然后由被测电压的波形因数 k_F ,按式(1-5)计算出该电压的有效值。

均值检波器的输入阻抗为(证明略)

$$R_i = 2R_d + \frac{8}{\pi^2} R_m \quad (1-7)$$

设 $R_d = 500 \Omega$, $R_m = 1 \text{ k}\Omega$, 得 $R_i = 1.8 \text{ k}\Omega$ 。可见均值检波器的输入阻抗很低, 因此多用于放大-检波式电压表中, 前面可加射极跟随器等阻抗变换装置。

2. 均值检波器的线性补偿

由于检波二极管伏安特性的非线性, 特别在小信号检波时非线性尤为严重, 因而造成表头刻度起始部分的非线性, 为此对检波器采取线性补偿措施。常用的补偿电路如图 1-8、图 1-9、图 1-10 所示。

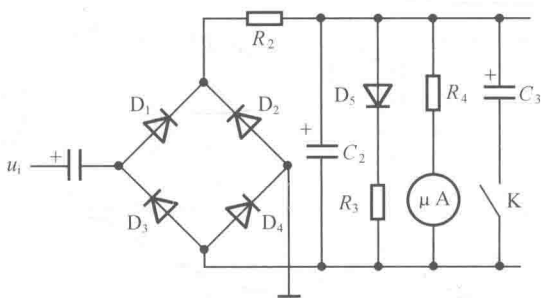


图 1-8 简单的线性补偿电路

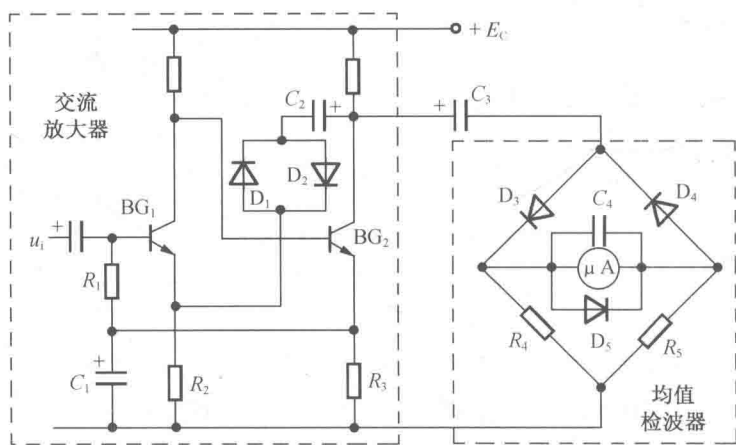


图 1-9 放大器级间负反馈补偿电路

在图 1-8 中, 利用二极管 D_5 的内阻动态变化作补偿。补偿的原理是: 当输入信号很小时, D_5 内阻增加, 流过 D_5 支路的电流很小, 但流过表头的电流增加, 表头读数增加。这种补偿电路简单, 但由于 D_5 的阻尼作用使表头灵敏度降低。图 1-9 的补偿原理与图 1-8 基本相同, 当输入信号很小时, D_1, D_2 的内阻较大, 流经 D_1, D_2 反馈支路的电流较小, 放大器的增益较高, 表头读数增加。这种补偿利用的是放大器的级间负反馈, 因此补偿的范围较大。图 1-10 的补偿原理是: 当输入信号较小时, 检波二极管的非线性使输出电流偏小, 负反馈电压小, 放大器增益高。这种补偿范围宽、线性好。

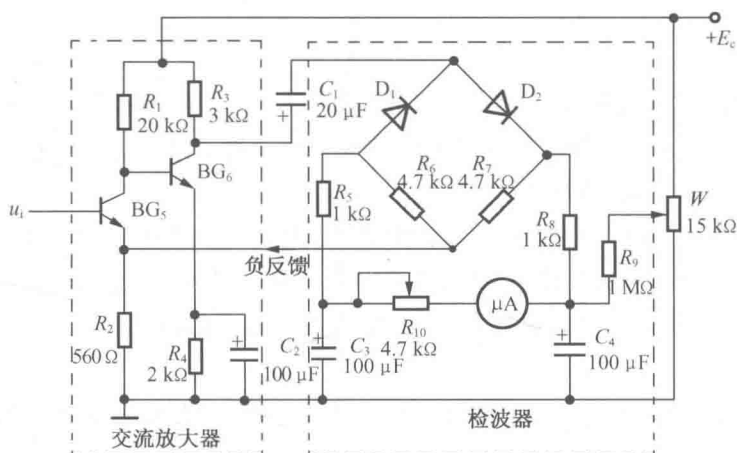


图 1-10 闭环负反馈线性补偿电路

3. 峰值检波器的工作原理

峰值检波器是检波后的直流电压正比于输入交流电压峰值的检波器,有串联型和并联型两类,其基本电路和工作波形如图 1-11、图 1-12 所示。

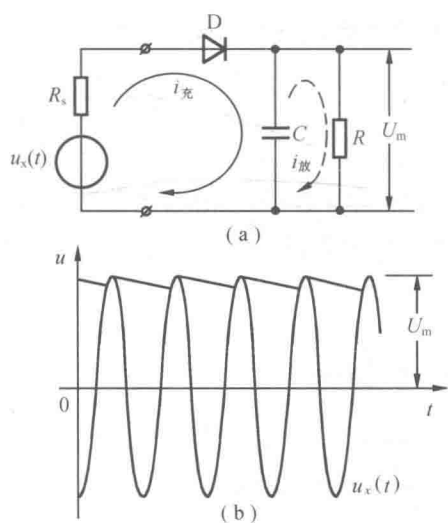


图 1-11 串联型峰值检波器

(a) 基本电路; (b) 工作波形

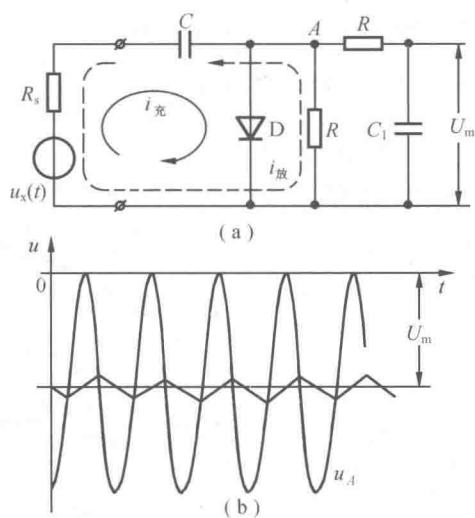


图 1-12 并联型峰值检波器

(a) 基本电路; (b) 工作波形

在图 1-11 和图 1-12 中,若信号源内阻 R_s 忽略不计,则充电时间常数 $\tau_{\text{充}} = R_d C$,放电时间常数 $\tau_{\text{放}} = RC$ 。其中 R_d 为二极管 D 的正向电阻,因此峰值检波器满足条件:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{充}} &= R_d C \ll \tau_{\text{放}} = RC \\ RC &\gg T_{\text{max}} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

其中, T_{max} 为被测电压的最大周期。由式(1-8)易知,电容 C 上总是充有输入电压的峰值,二极管 D 仅在输入电压峰值到来时才导通,其导通角 θ 趋近于 0° ,因此二极管工作于乙类,使峰值检波器的输入电阻大为提高,其输入电阻为(证明略)

$$R_i = \frac{R}{3} \quad (1-9)$$

其中, R 为检波器的负载电阻, 一般为数十到数百兆欧。由于峰值检波器的输入阻抗较高, 因此适于作检波-放大式。注意到式(1-9)是在理想条件下推导出来的, 实际输入电阻比计算值小, 特别在高频小信号时要小得多。

均值检波器中的负载就是微安表, 其内阻较小, 为 $10^3 \sim 10^4 \Omega$ 量级, 否则检波灵敏度降低; 而在峰值检波器中, 为满足检波条件, 负载电阻 R 应尽量大些, 通常在 $10^7 \sim 10^8 \Omega$, 因此流经 R 的电流很小, 不便于串联电流表测量, 应当用高输入阻抗的直流电压表来测量输出的直流电压。

同均值检波器一样, 峰值检波器也用正弦有效值定度, 表头示值即为正弦电压有效值:

$$\alpha = U = \frac{U_p}{k_p} \quad (1-10)$$

其中, α 为示值; U 为正弦电压有效值; U_p 为正弦电压峰值; k_p 为波峰因数, 对于正弦波 $k_p = \sqrt{2}$ 。

由于不同波形电压的 k_p 值不同, 当测量任意波形时, 示值 α 没有直接的物理意义, 只有把它乘以 $\sqrt{2}$ 后才等于被测电压的峰值, 然后根据该电压的波峰因数 k_p , 按式(1-10)计算有效值。例如, 用峰值检波器测量三角波, 示值 $\alpha = 5 \text{ V}$, 则其峰值为 $5\sqrt{2} = 7.07 \text{ V}$, 由于三角

波的 $k_p = 1.73$, 则其有效值为 $U = \frac{U_p}{k_p} = \frac{7.07}{1.73} = 4.087 \text{ V}$ 。

4. 双峰值检波器

双峰值检波器又称倍压检波器。图1-13中的两种电路工作原理相同, 仍满足 $\tau_{\text{充}} \ll \tau_{\text{放}}$ 和 $RC \gg T_{\text{max}}$, 但检波输出的直流电压是输入交流电压峰值的2倍。其优点是传输系数大, 缺点是输入阻抗低。

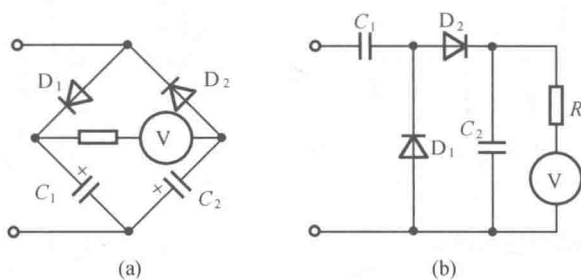


图1-13 双峰值检波器

1.2.3 放大器

电子电压表中的放大器应具有的特点是: 输入阻抗高、频带宽、动态范围大、线性好。为满足上述要求, 要采取一些电路技术。例如, 前置级采用阴极输出器(射极输出器或源极输出器)以提高输入阻抗; 用较高的电源供电, 采用饱和压降小的三极管和选取合适的静态

工作点以扩大动态范围;采用线性补偿、负反馈以获得良好的线性;为扩展上限频率,在电子电压表中采用各种高频补偿措施。高频补偿在仪表中应用相当广泛,这项技术也十分成熟,在后面的章节中会经常看到高频补偿的实例。常用的高频补偿电路如下:

(1) 选用截止频率高的晶体管,尽量用小的集电极负载电阻以减小负载电容和分布电容。

(2) 电路中引入较深的负反馈。如放大器的开环增益为 A_0 , 反馈系数为 F , 则加负反馈后高频截止频率扩展为原来的 $(1 + A_0 F)$ 倍。

(3) 采用共射-共集级联电路。共集电路的输入阻抗高, 输入电容小, 从而减小了共射电路集电极回路电容; 同时它的输出阻抗低, 负载电容的影响变小。亦可用共射-共基电路, 由于共基组态的截止频率较高, 也能扩展上限频率。

(4) 在电路中用电抗元件加以补偿。在分布电容较大或集电极电阻较大时, 可在集电极负载支路中串入电感 L , 如图 1-14(a) 所示。图中, L 为高频补偿电感, C_0 为分布电容, C_L 为负载电容, R_L 为负载电阻。图 1-14(b) 为其交流等效电路。调节 L 大小使之与 C_0 , C_L 谐振, 可以克服 C_0 , C_L 的影响, 从而使高频端增益提升, 其频响曲线如图 1-14(c) 所示。

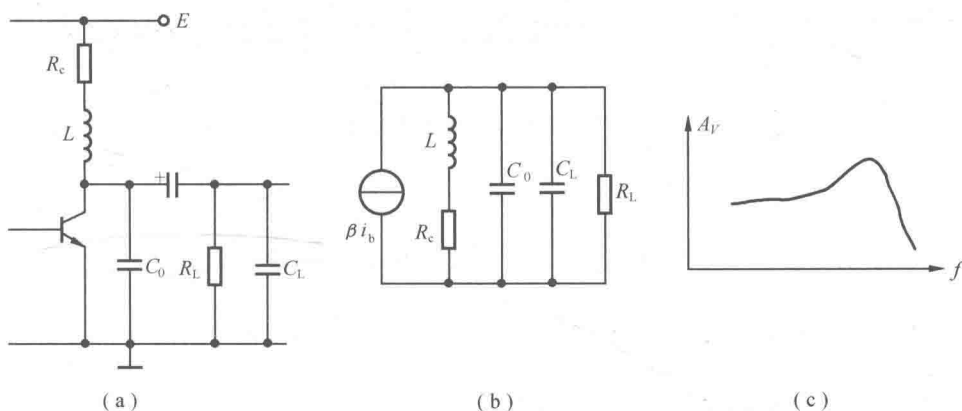


图 1-14 电感高频补偿

(a) 电路图; (b) 等效电路; (c) 频率响应

(5) 当电路中的 R_c 或 R_L 较小时, 对高频补偿电感 L 的阻尼作用变大, 补偿不明显, 这时可采用射极并电容 C_e 。但这时 C_e 不是旁路电容而是容量较小的补偿电容。接入 C_e 后, 随频率的增加, 放大器的电流串联负反馈减小, 因而增益提高, 通频带扩展, 当满足

$$C_e R_e = (C_0 + C_L) R'_L \quad (1-11)$$

时为最佳补偿。当然也可同时采用集电极串电感 L 和射极并电容 C_e , 以获得更好的效果。采用以上各种措施后, 放大器的通频带可以达到数十兆赫兹, 精心设计可达 100 MHz。

(6) 为扩展下限频率, 采用直流放大器, 可使下限频率扩展到直流。但直流放大器不可避免地存在着零点漂移, 为克服这一缺陷, 有的电子电压表采用斩波式放大器, 如图 1-15 所示。其工作原理是: 输入电压 U_i 通过斩波器调制变为交流信号 U_a , 其峰值等于输入电压, 经耦合电容 C_1 后成为对称的交流电压 U_b , 经交流放大器后成为交流电压 U_c , 经解调和

滤波后还原为直流电压。它与输入电压成正比,比例系数即等效的直流放大倍数。调制器和解调器实际上是一组同步工作的模拟开关,即 K_1 和 K_2 , K_1, K_2 由同一控制信号源驱动。当 K_1, K_2 断开时, a, b 点有输入, c, d 点有输出;当 K_1, K_2 闭合时, $a \sim d$ 点均无电压,通过 K_1, K_2 的开与关将输入直流电压斩波成交流电压,经 R, C_3 平滑滤波后即为直流电压。由于斩波放大器有隔直电容 C_1 和 C_2 ,所以不受零点漂移的影响。在实际的斩波式放大器中,调制器都做成平衡式电路。斩波器有机械振子式的,也有电子开关式的,而解调器则采用全波式以提高效率。

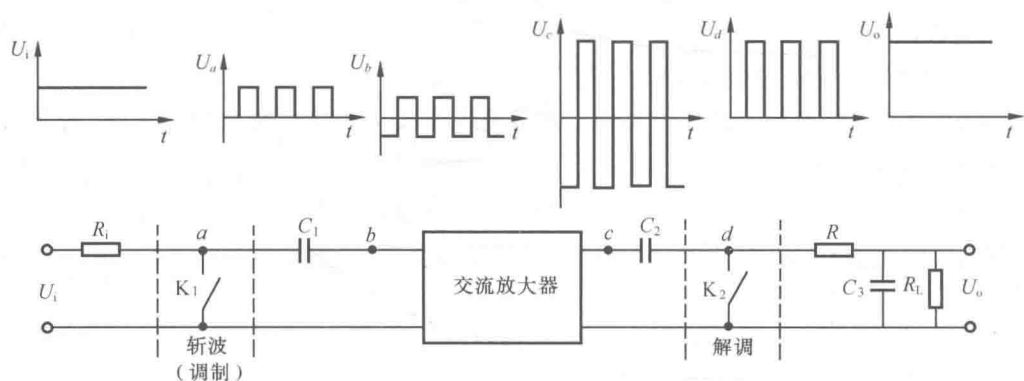


图 1-15 斩波式放大器

1.3 各种电子电压表的组成方案

在实际应用中,根据不同用途有各种类型的电子电压表,分别介绍如下。

1.3.1 电子繁用表

在普通电子电压表的基础上再增加测量电阻和直流电流的功能,便得到电子繁用表(图 1-16)。由于电子繁用表能做交直流测量,所以其下限频率从零开始,电路必须是直流放大式,对交流电压的测量必须采用检波-放大式。这些在前面已有叙述,下面介绍电阻挡和直流电流挡。

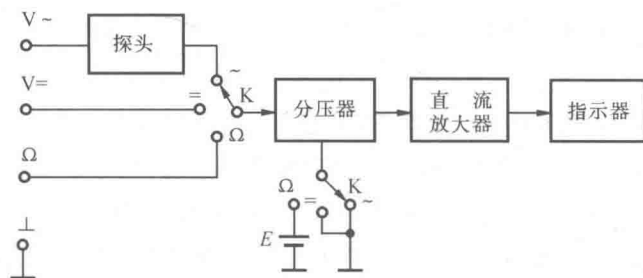


图 1-16 电子繁用表方框图