

# 模拟电子技术实验

◎彭其圣 尹建新 主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 模拟电子技术实验

彭其圣 尹建新 主编

科学出版社

北京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

### 内 容 简 介

本书详细介绍了五种常用电子测量仪器的工作原理及相应的使用方法,同时对面包板的结构和使用方法进行了说明,并配以丰富详实的实物图。书中有八个实验内容,包括一个综合性实验和一个设计性实验;同时对实验方法进行了相应的改进,更加注重对实验结果的预估和判断,以避免实验中最容易出现的盲目性。书中注重拓展知识的介绍,并专门以不同字体加以标注。在综合性实验和设计性实验中,引导学生关注系统性参数,关注整个实验电路的技术指标,关注基本的器件指标以及与实验电路的关联。附录则介绍了实验中所用到的各种集成电路的技术资料,可供读者参考。

本书既有较多的背景知识可供学生预习,又特别强化了实验过程中对学生的理论要求,同时加强了实验数据记录和波形记录的规范性,可供电子信息及相关专业的本科生使用。

#### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术实验/彭其圣,尹建新主编. —北京:科学出版社,2010.9

ISBN 978-7-03-028953-7

I. 模… II. ①彭… ②尹… III. 模拟电路—电子技术—实验—高等学校—教材 IV. TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 176305 号

责任编辑:高 嵘/责任校对:王望容

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

京山德兴印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年9月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年9月第一次印刷 印张: 10

印数: 1—4 000 字数: 190 000

定价: 18.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

模拟电子技术课程是从介绍电子器件——晶体管的基本原理开始,然后根据电子器件的外特性来构建各种功能电路,而这些功能电路则是构成电子系统的基础.所以,模拟电子技术的实验主要是对各种功能电路进行测试和调试,根据测试结果对其性能进行了解和评估.对各种模拟电路的测量主要是对其外部特性的测量,如对于放大器输入输出阻抗、增益、带宽、效率的测量等,所得到的测量参数是否合理或者是否满足要求,则是由被测电路本身的工作原理以及相应的电路参数设置决定的.所以,如果要想达到预期的结果,则必须充分理解电路的工作原理,对电路参数进行适当的设置或调整,这个过程不仅需要充分理解所学的理论知识,同时也需要掌握相应的实践技能.

模拟电子技术的实验是电子信息类专业学生学习专业实践技能的开始,对于后续课程的实验有着基础性的影响.同时,对于实验中的各种现象的理解,对各种问题处理方法的经历等,这些感性认识的积累是深入理解所学理论的基础,没有足够的实践经历,是不可能对本课程的知识点达到良好把握的.

模拟电子技术的实验有一个很大的特点,就是“不确定性”,正是因为这种不确定性,所以模拟电子技术中的定量计算往往是一种“估算”.当然这种不确定性是在一定范围之内的.这些不确定性来源于诸如器件参数的离散性、实验中的干扰或噪声、元器件的误差、实验室的测量仪器由于长期没有计量而导致的不准确性等.这也是工程概念的一个方面,即工程上不仅会存在着这种不确定性,而且需要解决这种不确定性.所以在教科书和工程实践之间,往往还有许多需要学习的东西,而实验则是缩短这种距离的一个基础性教学环节.

要成功完成一个模拟电子技术的实验,需要做好如下方面的工作:

(1) 能够正确地熟练使用各种测量仪表,充分了解各种测量仪表的测量范围,从而正确选用仪表.

(2) 能够按照电原理图正确搭建电路,这需要确定元器件的参数、型号和引出脚.

(3) 模拟电路实验有一个共同点,就是首先要保证电路的直流状态正常,所以首先需要测量电路的直流状态,即使对于采用集成电路的被测电路也是如此,在测量之前应预估直流参数.

(4) 能够正确确定被测电路的端口及端口特性.一般来说,被测电路具有输入端口、输出端口和电源端口.对于输入端口,需要了解其输入阻抗和输入信号电平;对输出端口,则需要了解其输出阻抗和对输出幅度的估计;对电源端口,则需要了

解其电源电压和对电源电流进行估计等。

(5) 理解电路参数的测量方法,选用正确的测量仪表,并注意测量仪表的相关参数和测量范围,如信号源的输出阻抗、电压表或示波器的输入阻抗、电压表或示波器的频率范围.因为在有些情况下,它们对被测电路会有影响,我们需要对这种影响有所评估。

(6) 清楚电路的基本工作原理,对于测量结果要有预先的估算,从而为实际的测量结果提供分析和评估的依据。

测试完成后,需要对于测量结果进行必要的分析和判断,其判断依据就是在准备阶段根据电路的基本工作原理和电路参数进行的估算.如果出现明显不合理的参数,则需要找出原因所在,从而对被测电路进行调整,对实验数据进行更新。

所以,要成功地完成一个实验,即使是一个验证性实验,并不是一个很简单的工作,对于初学者尤其如此.不过在众多的问题中,弄清楚电路的基本工作原理是最核心的问题。

应该说,实验过程是一个重新学习的过程,也是一个深入学习的过程.重新学习是指在实验过程中将会学习很多新的知识,如元器件的知识、仪器仪表的知识、干扰和噪声的知识、实验方法、数量级概念等,也是初步学习如何将所学理论应用于实践的一个过程;而深入学习是指对所学知识的相互关联、所学概念的真正含义和应用场合等进行重新整合,从而形成一个较为完整的知识体系。

实验过程也是培养学生良好操作习惯的过程.操作习惯不仅是一个习惯问题,而且也是一个专业素质问题.不良的操作习惯可能会导致元器件、测量仪器的损坏,或者导致额外的测量误差、错误的测量结果等。

对于模拟电子技术的学习,基本概念的理解和运用极其重要.可以说,如果没有掌握基本概念的运用,就没有掌握模拟电子技术.而基本概念的运用必须要通过实践才能实现,模拟电子技术的实验就是向工程实践迈出的第一步。

在此书的编写过程中,得到了中南民族大学电子信息工程学院侯建华教授和计算实验中心兰华荣老师的大力支持,特此表示感谢!

编 者  
2010年6月

# 目 录

<b>第一章 常用电子测量仪器基本知识与使用方法</b> .....	1
第一节 数字万用表.....	2
第二节 交流电压表.....	7
第三节 函数信号发生器 .....	10
第四节 数字存储示波器 .....	17
第五节 频率特性测试仪 .....	39
第六节 面包板的结构及使用方法 .....	61
<b>第二章 实验</b> .....	64
实验一 单级共射放大电路 .....	64
实验二 共集电极放大电路——射极跟随器 .....	76
实验三 负反馈放大电路 .....	83
实验四 差动放大器 .....	98
实验五 功率放大器.....	113
实验六 集成运算放大器的线性应用.....	117
实验七 RC 正弦波发生器及波形变换(综合性实验) .....	124
实验八 集成稳压源(设计性实验).....	132
<b>附录</b> .....	138
附录 I 电阻器的型号和命名规则 .....	138
附录 II 电容器的型号和命名规则.....	139
附录 III 集成功率放大器 LM386 技术资料 .....	140
附录 IV 集成运算放大器 LM741 技术资料.....	142
附录 V 集成运算放大器 LM358 技术资料 .....	145
附录 VI 三端集成稳压器 LM7805 技术资料 .....	150

# 第一章 常用电子测量仪器基本知识和使用方法

电子测量仪器是实验中必须要使用的测量工具,也是电子类专业学生必须掌握的基本技能.要想很好地掌握这些仪器的操作方法,必须涉及一定的仪器工作原理和一些相关的基本知识.测量仪器一旦与被测电路相连,就必然对被测电路产生影响,所以应该了解测量仪器的有关参数,以对这种影响有一个客观评估.而且每种测量仪器都有其测量范围的限制,所以需要了解其测量范围的参数.测量仪器的连接线也称为探头(probe),它也是仪器的组成部分,同样需要了解探头的特性.

每种测量仪器都有其精度范围或精度等级.仪器在出厂前都需要进行计量,以保证其精度等级.但是在使用一段时间后,由于器件的老化或机械部件的磨损等原因,会造成其精度的下降,这就需要定期对测量仪器的精度进行检定,即计量.对于企业,这是一个法定的程序,但是教学单位虽然也大量地使用测量仪器,但一般都没有这个过程.所以,在教学单位使用时间长久的测量仪器往往就不再能够保证其测量精度了.

对于电子测量仪器,往往希望其具有多种测量功能以及更宽的测量范围,更高的测量精度,而这种要求必然带来测量仪器面板上众多的开关、旋钮、挡位和端口.即使是内部采用微控器的智能化程度较高的测量仪器,虽然面板布置往往简洁得多,但是必然带来其操作菜单的众多选项,使得电子测量仪器看起来非常复杂.其实有很多功能或者挡位在实验中没有用到,这并不意味着它们没有用处,只是在当前的测量中用不到而已.所以对于电子测量仪器的学习,往往并不是一开始就能够把仪器的所有功能精通,而首先应该学会其最基本的使用,然后逐渐深入.

具有金属外壳的测量仪器,如稳压电源或者示波器等,往往都会设置一个专门的接地连接端.这个地线端与仪器的金属外壳是相连的.设置这个端子的意义在于,金属外壳本身就如同一个特殊形状的导线,可以充当天线接收各种空间电磁干扰,这种电磁干扰的频率和幅度虽然难以确定,但是它们会通过金属外壳与内部电路之间的分布参数耦合到电路中,从而对测量结果产生影响.由于干扰的幅度毕竟不会很大,所以在大信号测量中一般不理睬这个连接端,但是在弱信号测量(如接收机灵敏度的测量等)中,就需要将各个测量仪器

的金属外壳连接在一起,然后与被测电路的地线相连,这时仪器的金属外壳也不再能够充当天线接收空间电磁干扰,而且反而成为了一个屏蔽体,这时这个特殊的地线端子就有用了。

电子测量仪器的探头往往容易被忽视,其实很多测量仪器都只能采用自身配置的探头才能正确使用,并且有的测量仪器的探头中含有电路。所以有必要对测量仪器的探头进行了解,当采用其他的探头代替时,需要根据被测电路参数和探头参数对其影响有所评估。

电子测量仪器种类繁多,新品层出不穷,而且智能化仪器和虚拟仪器方兴未艾。只要能够熟练地掌握几种最基本的电子测量仪器的原理及使用,就很容易熟悉其他的测量仪器,因为有很多知识是共同的。

对于电子测量仪器,如果仅仅停留在操作使用上,则失之狭隘。其实在电子测量仪器的使用中,存在着大量的知识,而这些知识往往是教科书中没有涉及的,但又是工程实践中往往遇到的,所以应该说电子测量仪器的使用是一个重新学习的过程。

## 第一节 数字万用表



图 1.1 DT9205 型数字万用表

万用表分为模拟万用表和数字万用表。模拟万用表一般是指针式的,内部采用模拟电路;数字万用表(digital multimeter)一般是数字显示的,内部采用模拟/数字转换(A/D 转换)将被测的模拟量转换为数字量。这种转换方法有多种,一般采用双积分式的 A/D 转换居多。由于双积分电路对于窄脉冲具有极小的响应,所以对于窄脉冲干扰具有较好的抑制作用。但是,这种万用表往往需要一段时间才能稳定地显示数据(积分常数大)。

现在的数字万用表的测量功能比较多,一般能够进行通断测量、电阻测量、交直流电压和电流测量、二极管测量、三极管测量,还有电容测量、频率测量等。图 1.1 所示是 DT9205 型数字万用表的实物图。

### 一、基本知识

从图 1.1 中可以看到,DT9205 型数字万用表分别有如下挡位:电阻测量挡位( $\Omega$ )、直流电压



测量挡位( $V \text{ ---}$ )、交流电压测量挡位( $V \sim$ )、电容测量挡位( $C_x$ )、交流电流测量挡位( $A \sim$ )、直流电流测量挡位( $A \text{ ---}$ )以及蜂鸣和二极管测量挡位( $\text{((\text{G} \blacktriangledown))}$ )。每个挡位都有不同的量程,量程的挡位值表示处于该挡位时的最大测量范围。例如,200 挡位表示此挡位最大只能测量 200。其中,电阻挡位的基本单位是  $\Omega$ 。电阻挡位的 200 量程挡,表示 200  $\Omega$ ;2 k 量程挡表示 2 k  $\Omega$ ;2 M 量程挡表示 2 M  $\Omega$ 。电压测量挡位的基本单位是 V,电流测量挡位的基本单位是 A。请注意,量程的挡位值一般是 2,20,200,2 k,20 k,200 k,2 M,20 M,200 M。为什么以 2 作为分挡值呢?这是因为数字万用表的最高位显示只用来显示 0 或者 1,这一位称为“半位”,其余的显示位则可以显示 0~9。例如,总共有四个显示位,则称为三位半;总共有五个显示位,则称为四位半。也可以表示成“3½位”、“4½位”。所以,三位半的数字万用表最大只能显示 1999,而四位半的数字万用表最大只能显示 19 999。故数字万用表一般以 2 作为分挡值。

数字万用表具有交流电压和交流电流测量功能。但是,其频率测量范围一般不超过 400~500 Hz(也有较高级的万用表频率范围可以达到 1 kHz)。如需测量更高频率的交流电压或电流,则不能采用数字万用表测量。

当被测量超过了当前量程的测量范围时,此时显示屏将会在最高位显示一个“1”,而其余的显示位则熄灭。例如,被测电阻是 10 k $\Omega$ ,但是表的量程挡位被设置在 200 或者 2 k,则显示屏会在最高位显示一个“1”,而其余显示位熄灭。有的数字万用表在被测量超过量程时显示字符“OL”,表示超载(over load)。

数字万用表内部一般采用 9 V 层叠电池供电,如果在较长的时间内不使用则应该关断电源,否则容易造成表内电池电量不足。当电池不足时,显示屏的左上角会显示电池符号。应该注意,当电池电量不足时,将不能保证测量精度。所以应该养成随手关断电源的习惯(有的数字万用表在一段时间没有操作时会自动断电)。

数字万用表在交直流电压挡位其输入电阻相当高(10 M $\Omega$  以上),所以对被测电路的影响极小,一般完全可以不予考虑。在测量直流电压或电流时,红表笔接被测电源的正极,黑表笔接负极,但是如果接反了,则显示屏会显示负号。当表笔悬空时,由于输入电阻大,而表笔可以充当接收空间电磁干扰的“天线”,所以即使表笔没有接任何被测量,显示屏也可能会显示出数据,并且所显示的数据会变动,此时如果将两个表笔短接,显示屏上应该显示零。

无论在电压挡位还是电流挡位,万用表对外电路来说是无源的,即表内没有对外电路进行驱动电源。但是,如果在电阻测量挡位或者蜂鸣/二极管测量挡位,则万用表对外电路来说是有源的,即如果在两个表笔之间接入被测元器件,则会有电流从红表笔端流向黑表笔端,或者说数字万用表红表笔与表内电池的正极相连(模拟万用表正好相反)。一般来说,这个电流不随外接元器件参数的改变而改变,而是恒流特性。不同的电阻量程挡位,这个电流值不同。量程值越大,电流越小。不过,在蜂鸣/二极管测量挡位,这个恒定电流一般是 1 mA。

数字万用表采用数字显示,而数字显示都有一个问題,那就是最末一位的不准确性。例如,对于 0.0054 的数值,若万用表只能显示  $3\frac{1}{2}$  位,则可能显示出 0.006 或者 0.005。即凡是采用数字显示来显示模拟量,都会存在着末位正负一个字的误差(也称为量化误差)。故要想测量精确,必须选择合适的量程挡位,以减少这种末位数误差的相对影响。这将在下面作进一步的说明。

用数字万用表测量元器件时,不能够在线测量,因为此时被测元件与电路中的其他元件相连,从而影响测量结果。更不能在电阻测量挡位或蜂鸣/二极管测量挡位时,对没有断电的电路进行在线测量,因为此时被测电路元件本身有电压电流,在线测量会使外电路的电流流入表内,从而造成万用表的损坏。

## 二、基本操作

### 1. 表笔的拿法

在测量电阻或者二极管时,需要将表笔与被测元器件相连。此时应该像使用筷子一样用右手拿住两个表笔(红上黑下),左手则拿住被测元器件。初学者往往将元器件放在桌上,然后用表笔按住被测元器件的引脚,这不是一个很好的操作方式。因为这容易导致表笔与元器件引脚的接触不良,从而导致表的显示屏数据不断变动(因为数字万用表需要大约几秒钟的时间才能得到稳定的显示)。

在使用这种操作方法时还要注意,拿住元器件的左手应该捏住元器件的一个引脚,或者捏住元器件的绝缘部分,而不应该同时捏住元器件的两个引脚。这是因为人体自身电阻的存在,尤其在人体出汗、被测元件具有较大阻值的情况下,会因为人体电阻被并联在被测元器件的引脚两端,从而影响测量结果。

在测量电压时(尤其是直流电压,这是最经常的测量),往往需要测量电路各节点的电位(各节点对地电压称为电位),这时应该将黑表笔与电路的地线固定连接(将一只手解放出来,以用于转换量程等操作),而红表笔则可用于测量各节点的电位。

### 2. 表笔插孔

数字万用表一般有四个表笔插孔,如图 1.1 所示。左边两个插孔用于交直流电流的测量,即测量电流时,要将红表笔插入左边两个插孔之一(视被测电流的大小选择)。但是这两个电流测量的插孔有所不同,最左边的 20 A 的插孔,内部是没有安装保险丝的,而且如果被测电流接近 20 A,则测量时间不能超过 15 s(20 A 15SEC MAX UNFUSED)。这是因为如果测量时间太长了,则 20 A 的电流会使得内部的电流采样电阻发热,时间如果过长,则温度将会上升到不允许的程度。

左边第二个电流测量插孔用于测量 0.2 A 以内的电流,并且内部设置了保险丝(0.2 A MAX FUSED)。

进行电流测量时,不仅要将红表笔插入左边相应的电流插孔,而且挡位开关必

须置于电流挡位(A  $\overline{\text{---}}$  或者 A $\sim$  挡位)。

特别需要注意的是,电流测量一旦测试完毕,应该立即将表笔回位,否则下次使用万用表时,如果没有注意到表笔依然插在电流插孔,一旦此时测量电源电压,就会对被测电压形成短路,此时不是损坏万用表,就是损坏电源。所以,电流测量完毕,立即将表笔归位——这是应该形成的一个习惯。

当然,对于电压、电阻测量和二极管测量,红表笔都应该插入最右边的插孔(V $\Omega$   $\blacktriangleright$  插孔),此时挡位开关也必须置于相应的挡位。

图 1.1 中黑表笔所在的插孔称为公共端(COM)。虽然红表笔会因为不同参数的测量而可能需要插入别的插孔,但是黑表笔只能始终插在公共端。

### 3. 被测元器件的连接

在测量元器件时,如果是电阻或者二极管,则被测元件连接在两个表笔之间(此时红表笔插入 V $\Omega$   $\blacktriangleright$  插孔)。但是,如果被测元件是电容器,则连接端不再是表笔,而是需要将被测电容插入电容插孔(C、插孔);如果被测元件是三极管(双极型管——以下不再说明),则需要将被测三极管插入三极管插孔(PNP 或 NPN 插孔),当然此时挡位开关必须置于相应的挡位。需要注意的是,无论是插入电容插孔还是三极管插孔,都需要根据手感左右摇动元器件,以保证元件脚确实插进去了。初学者容易出现的问题是,轻轻将元件脚插入便以为连接上了,其实元件脚并没有插入到内部的金属卡,以致造成测量错误。

### 4. 挡位与量程

#### (1) 蜂鸣/二极管挡位( $\text{((}\circ\text{)}\blacktriangledown$ )

蜂鸣挡用于通断测量,即检测电路中两个连接点之间是否相通,或者检测导线是否断线。在万用表置于该挡位时,一旦两个表笔之间是欧姆相通的,则万用表会产生蜂鸣声,同时表右边的发光二极管会点亮。这是一个经常需要用到的功能。但是需要明确的是,并不是两个表笔之间的导线电阻为零才会蜂鸣,而是只要两个表笔之间的导线的电阻小于某个值时万用表就会蜂鸣。这个值一般为几十欧姆(如 25  $\Omega$ ),不同型号的万用表略有不同,所以并不能错误地认为蜂鸣就意味着电阻为零。

这个挡位同样也是二极管测量挡位,主要用于简单测量二极管的单向导电性,或者说用于测量二极管的好坏。由于红表笔内接万用表的电池正极,故如果红表笔连接被测二极管的阳极,黑表笔接阴极,则此时被测二极管处于正偏状态,显示屏将会显示出被测二极管的正向导通压降,单位为 mV。例如,显示 628,表示被测二极管的正向导通压降为 0.628 V。但是需要明确,此时流过二极管的电流一般为 1 mA(也可以通过对万用表该挡位的实测来得知)。如果将被测二极管接反了,此时显示屏将会在最高位显示“1”,表示超过范围,即意味着二极管反向电阻很大。

#### (2) 电阻( $\Omega$ )、交直流电压(V $\overline{\text{---}}$ 和 V $\sim$ )、交直流电流(A $\overline{\text{---}}$ 和 A $\sim$ )挡位

这几个挡位的使用都比较简单,但是要注意选用正确的量程,以减小不必要的

测量误差. 例如, 假定被测电阻为  $15.845\text{ k}\Omega$ , 但是测量时如果将量程置于  $2\text{ M}\Omega$ , 则正确值应该是  $0.015845\text{ M}\Omega$ , 对于三位半的表, 则只能显示出  $0.015\text{ M}\Omega$ ; 四位半的表则显示  $0.0158\text{ M}\Omega$ . 但是, 如果将量程置于  $20\text{ k}\Omega$ , 则三位半的表显示出  $15.84\text{ k}\Omega$ ; 四位半的表显示  $15.845\text{ k}\Omega$ . 可见测量精度相差很远. 所以除非超量程, 否则应该采用最低挡位来测量, 此时误差最小. 对电压和电流测量当然也是如此.

另外, 采用交流电压挡测量交流电压时, 所显示的是真有效值, 任何波形都显示有效值.

### (3) 三极管挡位( $h_{FE}$ )

三极管挡位用于测量双极型晶体管的电流放大倍数, 即  $\beta$  值(或  $h_{FE}$ ). 测量的方法是首先将挡位开关置于  $h_{FE}$ , 然后将三极管的  $e, b, c$  引脚插入万用表右上侧的管子插孔, 此时显示屏所显示的值就是电流放大倍数. 但是, 首先需要确定管型(即 NPN 还是 PNP 型), 然后还需要确定管子的  $e, b, c$  引脚.

双极型三极管内部有两个 PN 结, 相当于内部有两个二极管. 对于 PNP 管相当于两个面对面的二极管相连, 而对于 NPN 管则相当于两个背靠背的二极管相连<sup>①</sup>, 如图 1.2 所示.

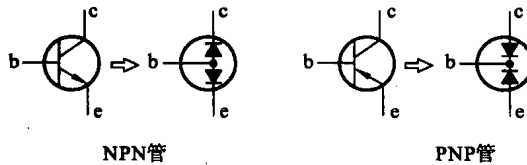


图 1.2 三极管内部 PN 结等效

由于采用数字万用表的蜂鸣/二极管挡位可以用来判断二极管的正负极, 故根据图 1.2 的等效电路, 可以判断出三极管的极型(NPN 或 PNP), 同时还可以判断出三极管的基极. 这是第一步. 第二步就是确定管子的发射极  $e$  和集电极  $c$ .

当将三极管的发射极当作集电极, 而集电极当作发射极使用时, 管子的电流放大倍数将会大大降低(如由 50 降低到 5). 所以, 首先对除了基极以外的两个电极任意假定, 根据假定将管子的引脚正确插入管脚插孔, 在表的  $h_{FE}$  挡位测量电流放大倍数, 然后再反过来假定, 重新测量电流放大倍数. 当显示屏上显示的数值比较大时, 说明相应的假定是正确的, 从而可以判断管子的发射极  $e$  和集电极  $c$ .

### (4) 电容挡位( $C_x$ )

尽管数字万用表往往设置有电容测量挡位, 但是一般测量范围不是很宽.

<sup>①</sup> 虽然三极管内部的两个 PN 结可以用两个二极管等效, 但是并不能用两个二极管连接成一个三极管. 这是因为三极管必须满足内部的工艺条件才能够具有电流放大作用, 即发射区高掺杂, 基区低掺杂且宽度很窄, 而集电区面积较大, 包围基区. 用两个二极管连接成三极管的形式并不能满足这些工艺条件.

图 1.1 中的数字万用表的电容测量范围为  $2 \text{ nF}$  ( $2000 \text{ pF}$ )  $\sim 20 \mu\text{F}$ , 这在实际应用中是不够的, 还需要采用专门的电感电容测试仪。

电容测量需要注意以下几点:

- ① 被测电容引脚插入  $C_x$  插孔(此时表笔无用), 挡位开关置于  $C_x$  挡位。
- ② 只能测量无极性电容, 不能测量有极性电容, 如电解电容。
- ③ 测量之前必须对被测电容进行放电, 尤其是容量大的电容, 否则可能会损坏万用表。

## 第二节 交流电压表

交流电压表(AC voltmeter)也称为高频毫伏表(high frequency millivoltmeter), 用于测量交流电压。交流电压表也有模拟表与数字表之分。模拟表内部采用模拟电路, 显示方式为指针式; 数字表内部采用数字电路(经过模拟/数字转换将模拟量转换成数字量), 显示方式为数字显示。

交流电压表一般具有电压测量和电平测量。电压测量是指测量电压的绝对量, 单位是 V; 电平测量是指测量电压的相对量, 单位是 dB。

对于指针式的模拟电压表, 当指针处于表盘的中间部分时精度最高。而如果表针处于表盘的两边, 则精度要低一些。所以, 模拟电压表的量程是以 1、3 作为分挡值的, 如  $300 \text{ V}$ 、 $100 \text{ V}$ 、 $30 \text{ V}$ 、 $10 \text{ V}$ 、 $3 \text{ V}$ 、 $1 \text{ V}$  等。量程的选择就是尽量使指针处于表盘的中间。

指针式表会存在视差问题, 即从左边和从右边看指针读数会略有不同, 而且用单眼看和双眼看指针读数也会略有不同, 所以一般会在表盘上安置一个镜面, 当实际指针和镜面指针处于同一条线上时, 视差最小。

图 1.3 是 SH2172 型交流电压表的实物图。

### 一、基本知识

交流电压表的频率范围高端一般为  $1 \sim 2 \text{ MHz}$ , 低端一般为  $20 \text{ Hz}$ , 不能测量直流。交流电压表的输入电阻典型值为  $1 \text{ M}\Omega$ , 这在一般的场合已经足够了, 除非被测节点的内阻(也称为输出电阻)很大。例如, 达到上百千欧姆, 此时电压表的输入电阻对被测电路的影响就开始显著了, 从而导致测量不准确。

由于交流电压表的输入电阻很大, 故仪器的测量馈线充当天线所接收的干扰幅度也会很大(其中尤其是工频干扰幅度最大), 这往往会造成一种现象, 即当表的量程开关置于较小挡位时, 表针会急速偏转到最右边, 俗称“打表”。所以作为一种操作习惯, 平时应该将量程开关置于较高的挡位, 如  $10 \text{ V}$ 、 $30 \text{ V}$  挡位或者更高挡位。无论在什么挡位, 一旦出现“打表”, 则只要将馈线短接, 稍等一会儿表针就会回零。如果不能回零, 则说明馈线有断路。

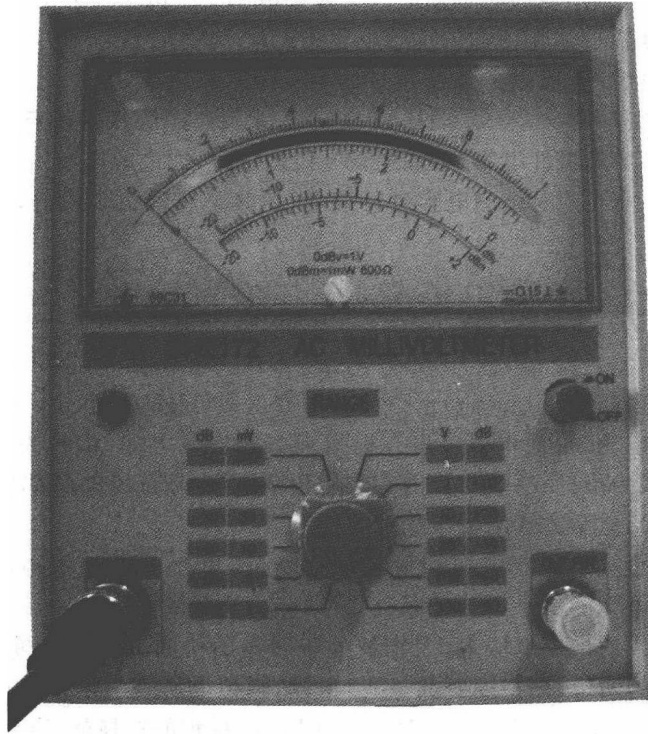


图 1.3 SH2172 型交流电压表

馈线的一端是 BNC 插头<sup>①</sup>,与仪器相连. 另一端则有两个连接有鳄鱼夹的引线,一个红色,一个黑色,用于连接被测电路. 虽然被测量是交流电压,但是测量时黑线必须与被测电路的地线相连,不能反过来. 即电子测量仪器的地线与被测电路的地线必须相连,俗称“共地”,不然会引入干扰. 这是所有电子测量的一个通用原则.

从交流电压表的指针所对应的表盘的电压刻度所读出的数值是有效值,但是这个有效值是针对正弦波而言的,对于非正弦波则得不到正确的结果. 所以,测量之前要确知被测电压是正弦波. 如果正弦波存在较大的失真,则测量结果将不再准确.

## 二、分贝的定义

工程上对于电压或功率的表示除了采用电压的实际值表示以外,还通常采用分贝(dB,decibel)表示. 用分贝表示的电压也称为“电平”. 采用分贝能够比较方便

---

<sup>①</sup> BNC 接头是一种用于同轴电缆的连接器,全称是 bayonet nut connector(刺刀螺母连接器,这个名称形象地描述了这种接头外形).

地表示范围很大的电压或功率. 分贝分为功率分贝和电压分贝, 其定义如下:

$$\text{电压分贝 dB} = 20 \lg \frac{U_o}{U_i}; \quad \text{功率分贝 dB} = 10 \lg \frac{P_o}{P_i}.$$

式中  $U_o$  和  $P_o$  为输出电压和输出功率;  $U_i$  和  $P_i$  为输入电压和输入功率. 其中功率分贝的定义式中之所以系数为 10, 而电压分贝的定义式中系数为 20, 是因为功率与电压是平方关系. 常用的电压分贝与电压倍数之间的关系如表 1.1 所示(功率分贝只是系数不同, 容易换算).

表 1.1 常用的电压分贝与电压倍数的关系

电压分贝	电压倍数
0	1
3 dB(-3 dB)	1.414(0.707)
6 dB(-6 dB)	2(0.5)
20 dB(-20 dB)	10(0.1)
40 dB(-40 dB)	100(0.01)
60 dB(-60 dB)	1000(0.001)
80 dB(-80 dB)	10000(0.0001)

工程上常用的分贝有  $\text{dB}_V$ ,  $\text{dB}_m$  等. 其中  $\text{dB}_V$  是电压分贝, 其定义是以 1 V 作为 0 dB, 即

$$\text{dB}_V = 20 \lg \frac{U}{1 \text{ V}}.$$

例如, 20  $\text{dB}_V$  表示 10 V 电压, -20  $\text{dB}_V$  则表示 0.1 V 电压. 而  $\text{dB}_m$  是功率分贝(也称为毫瓦分贝), 其定义是以 1 mW 作为 0 dB, 即

$$\text{dB}_m = 10 \lg \frac{P}{1 \text{ mW}}.$$

但是需要统一阻抗, 即 1 mW 是在多大阻抗上的功率, 则  $P$  也应该是在多大阻抗上的功率. 工程上一般音频领域功率分贝的阻抗统一在 600  $\Omega$ (见图 1.3 交流电压表表盘下排文字); 而射频领域中, 对于通信系列, 阻抗统一在 50  $\Omega$ , 电视系列则阻抗统一在 75  $\Omega$ . 例如, 在音频领域 10  $\text{dB}_m$  表示 10 mW 的功率(600  $\Omega$  阻抗), 在射频通信领域也表示 10 mW 的功率(50  $\Omega$  阻抗), 在射频电视领域还是表示 10 mW 的功率(75  $\Omega$  阻抗).

### 三、输入输出端口

从图 1.3 可以看到, SH2172 型交流电压表有一个输入端口(input), 还有一个输出端口(output). 输入端口无疑用于通过馈线连接被测电压, 典型端口参数是输入阻抗, 而输入阻抗的典型参数是 1 M $\Omega$ . 但是为什么还会设置一个输出端口, 该

端口输出什么呢？这是因为交流电压表内部由电压跟随器（提供高输入阻抗）、步进衰减器（提供量程划分）、宽带放大器（提供小信号放大）、检波器（提供交/直流转换）、表头（提供指示）组成，而输出端口就是在宽带放大器之后、检波器之前将信号引出。所以，输出端口的输出信号就是输入端口的输入信号，不过其幅度受量程开关（步进衰减器）的影响。这个端口用于连接其他的测量仪器，如示波器、频率计等，以方便测量中的仪器连接操作。

#### 四、量程开关

量程(range)挡位分为电压挡位(内侧数字)和分贝挡位(外侧数字)。电压挡位右边的单位是 V,左边的单位是 mV。分贝挡位右边是正的分贝数,左边是负的分贝数。对于分贝挡位,无论是电压分贝还是功率分贝,挡位值划分完全相同。挡位值表示处于该挡位时的最大测量范围(即满量程值)。

#### 五、表盘

在表盘的最下方有一个可以用改锥调节的旋钮,叫做机械调零。当仪器通电以后,将表笔短路,此时表针应该指向零电压处,仪器不通电时,表针也应该指向零电压处。如果不是,则用改锥将其调节到零。

表盘上一共有四条刻度。上面两条是电压刻度,下面两条是分贝刻度。第一条刻度针对量程为 1 的挡位,如 100 V、10 V、1 V、100 mV、10 mV 和 1 mV 挡位,都应该从第一条刻度读取数据。第二条刻度针对量程为 3 的挡位,如 300 V、30 V、3 V、300 mV、30 mV 和 3 mV 挡位,都应该从第二条刻度读取数据。

注意表盘上的第三条刻度和第四条刻度的读取有点特别。其方法是,将表针处的读数加上挡位值才是最终结果。例如,量程开关被置于 +20 dB 时,设表针指示在 -5 dB 处,则最终结果为 +20 dB - 5 dB = 15 dB。电压分贝读第三条刻度,功率分贝读第四条刻度,方法相同。不同的是测量功率分贝时,必须是在 600  $\Omega$  的阻抗上测量。

### 第三节 函数信号发生器

信号发生器也称为信号源,而函数信号发生器(function generator)是指能够产生多种波形的信号源。其实现方法是采用振荡器先产生一种波形,然后通过函数运算得到其他一系列波形,故称为函数信号源。一般函数信号源首先产生的是矩形波,然后通过积分电路产生锯齿波,再通过由一系列二极管组成的转换电路产生正弦波。占空比<sup>①</sup>为 50%的矩形波称为方波,占空比为 50%的锯齿波称为三角

<sup>①</sup> 占空比是指矩形脉冲高电平持续期与周期的比值的百分比。



波,所以方波是矩形波的一种特例,而三角波则是锯齿波的一种特例.由于正弦波是通过锯齿波转换而成的,而锯齿波则是通过矩形波转换而成的,所以如果调节占空比,则正弦波会变形,这一点在使用的时候应该注意.

函数信号源的频率范围直接取决于内部 RC 振荡器的频率范围,所以一般频率范围不宽,高端一般只能达到  $1\sim 2$  MHz.但是现在高级的信号源往往采用 DDS<sup>①</sup> 技术,使得其频率范围大大扩展,高端往往可以达到几十兆赫兹.函数信号源的频率低端可以做到  $0.01$  Hz 或者更低,这是函数信号源的一个特点(图 1.4 所示的是 YB3003 型数字合成函数信号源发生器,频率范围为  $1\ \mu\text{Hz}\sim 3$  MHz).

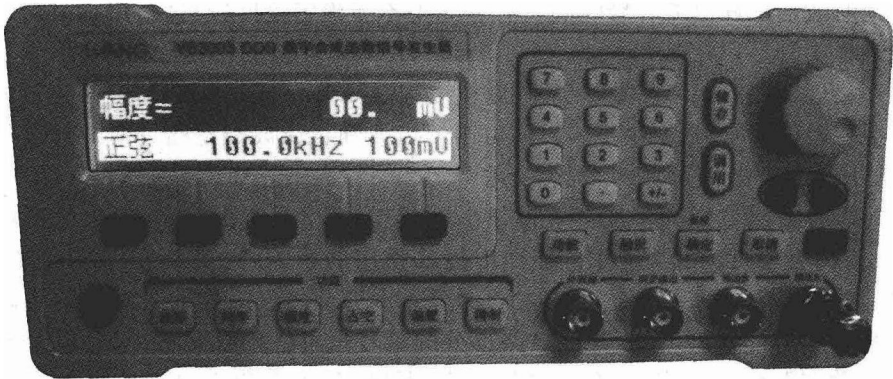


图 1.4 YB3003 型 DDS 数字合成函数信号发生器

作为信号源必然设置有输出幅度的调节和指示、输出频率的调节和指示、占空比的调节等.同时,函数信号源还有一些自身特有的功能,如直流偏置电平的调节(即在输出波形上叠加一个直流,并且这个直流量可调)、压控功能(即由外部输入电压控制其输出频率)和扫频功能(信号频率从低到高逐渐改变——扫频信号是测量电路的频率特性必须的信号)等.所以现在实验室里往往配置函数信号源,以取代早期的低频正弦波信号源.

### 一、基本知识

任何信号源都有内阻(也称为输出电阻),所以信号源都可以等效为一个理想电压源和一个内阻串联的形式.作为仪器,信号源的内阻一般统一在  $50\ \Omega$ .显然,信号源所接的负载阻抗不同,则其输出端口的输出电压就不同.但是,信号源的幅度指示并不反映这种情况.信号源的幅度指示一般是负载开路时仪器的输出电压,但是接上负载后,输出电压将会因为内阻的存在而降低,此时如果仅仅通过函

<sup>①</sup> DDS(direct digital synthesizer,直接数字频率合成器)是一种全数字化的频率合成器,它是采用纯粹的数学方法产生输出波形的一种技术.其基本方法是将一个周期的波形的二进制数据存储在存储器中,然后依次读出并进行 D/A 转换,从而得到输出波形.