

无线电实验丛书

模拟电子线路实验

■ 陆廷璋 编
■ 宋万年
■ 马建江

76
97
旦大学出版社

模 拟 电 子 线 路 实 验

陆廷璋 宋万年 马建江 编

复 旦 大 学 出 版 社

9110048

DSB2 106

内 容 提 要

本书论述了电路实验基础、低频模拟集成电路、直流稳压电源、模拟乘法器、高频放大器的工作原理。全书分为六个单元，其中包括 19 个实验和 22 个附录。第一单元介绍电路实验基础，第二单元讲述低频模拟集成电路的应用，第三单元概述直流稳压电源，第四单元论述模拟乘法器，第五单元阐述高频放大器，第六单元介绍计算机辅助电路分析与设计的应用。

《模拟电子线路实验》是《无线电实验丛书》中的一本，可作为综合性大学无线电专业及师范院校无线电专业的实验教材或实验教学参考书，也可供工科院校师生和有关工程技术人员参考。

无线电实验丛书

1. 脉冲与数字电路实验教程
2. 模拟电子线路实验
3. 微机原理与应用实验
4. 近代无线电实验
5. 常用无线电仪器和器件手册

责任编辑 林溪波

责任校对 周冬招

模拟电子线路实验

陆廷璋 宋万年 马建江 编

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 270,000

1990 年 8 月第 1 版 1990 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-309-00500-7/O·76

定价: 2.60 元

前 言

在电子学专业的本科教学中,实验教学是十分重要的环节。它对于提高教学质量,培养有实际工作能力的科技人才,起着重要的作用。多年来,我们在实验教学中坚持进行改革,逐步形成了电子学实验教学体系。与此相应,在不断补充、修改原教材的基础上,重新着手编写了一套《无线电实验丛书》。《模拟电子线路实验》是这套丛书中的一本。可供电子学各专业教学使用。

电子学是一门应用很广的科学技术,发展极其迅速。作为电子学基础实验教材,应以加强能力培养为宗旨。既要重视实验基本技能、基本方法的训练;又要适应电子技术发展的需要,不断更新实验内容和方法。这是我们编写这本教材的基本出发点。

为适应电子技术发展的需要,本书在内容和取材安排上以集成电路的应用为主。全书共分六个单元:第一单元为电路实验基础,主要介绍常用仪器的基本使用方法,阐述放大电路的安装、调试基本知识及其参数测试方法。这些内容也贯穿于本书后面的各个单元中,第二、三、四、五单元的实验,着重介绍集成运算放大器、集成电子稳压器、集成模拟乘法器及集成宽带放大器的特性、测试方法及其应用。并且讲述一些专用集成电路的应用。

随着集成电路与计算机技术的发展,传统的电路分析与设计方法在有些领域已不再适用,而现代化的计算机辅助电路分析与设计方法(简称 CAA, CAD)正在迅速发展。本书第六单元介绍了 CAA 与 CAD 技术在实验教学中的应用。将 CAA、CAD 方法应用于实验教学中,有效地提高实验效率与教学质量。

在各单元实验内容安排上,我们力图从认识规律出发,由浅入深,循序渐进。一般先让读者熟悉单元电路的特性及设计方法,并在此基础上安排几个小型综合实验,让读者学习用几个单元电路构成小型的电路系统。这样既增加了实验内容的趣味性和实用性,以利于提高学生的学习积极性,培养学生分析问题、解决问题的能力。

为适合不同专业、不同层次学生的教学需要,我们在安排实验内容时留有供选择的余地,以利于因材施教。本书各单元实验后面还设有附录部分,介绍一些电路的性能、典型应用、设计举例及其他和实验有关的知识,供学生在实验过程中查阅。

参加本书编写工作的有陆廷璋、宋万年、马建江同志。陈瑞涛副教授审阅了本书的大部分内容,并提出了宝贵的意见。叶君平副教授主编的《电子线路基础实验》一书,曾作为我们的实验教材,对我们编写本书有较大的帮助。本书中部分内容曾以讲义的形式试用过,在教学实践中黄群满、薛元农同志曾提出过宝贵的意见。在我们编写本书的过程中,凌燮亭教授及潘明德、林华、曹育明等同志曾给予热情的支持和帮助。吴震麟同志绘制了本书的全部图稿。在此谨向他们及其他关心、帮助过本书编写工作的同志们表示衷心的感谢!

由于编者的能力和水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评、指正。

编 者
1989 年 6 月

目 录

前 言

第一单元 电路实验基础

一、放大器静态工作点的设计考虑	1
二、放大器的基本关系式	4
三、放大器的调整与测试	7
四、放大器幅频特性的测试	10
实验 1-1 示波器的使用方法	11
实验 1-2 单管放大器	12
实验 1-3 负反馈放大器	14
实验 1-4 差分直流放大器	17
附录 1-I 阻容耦合放大器设计举例	23
附录 1-II 半导体分立元件的命名方法	29
附录 1-III 安装的基本知识	30
附录 1-IV 放大器中的寄生反馈	31

第二单元 低频模拟集成电路的应用

一、理想运放和实际运放特性比较	37
二、运放的基本使用及调试方法	38
实验 2-1 测量放大器	41
实验 2-2 晶体管输出特性曲线测试电路	44
实验 2-3 集成化扩音机的设计及制作	47
附录 2-I 运放应用电路	52
附录 2-II 运放参数测试	58
附录 2-III RC有源滤波器的设计	66
附录 2-IV LM 1458 双运算放大器简介	77
附录 2-V LM 324 四运算放大器简介	77
附录 2-VI 集成功放 5G 37 简介	77
附录 2-VII 开关电容滤波器 6514 简介	78

第三单元 直流稳压电源

一、结构及原理	80
二、参数及测量	81

三、设计过程及器件选择	82
实验 3-1 固定电压直流稳压电源	83
实验 3-2 可调式三端稳压器的应用	85
附录 3-I 电路器件的散热问题	87
附录 3-II 78 和 79 系列三端稳压器简介	90
附录 3-III 三端可调式稳压器简介	91

第四单元 模拟乘法器

一、模拟乘法器的原理	93
二、集成模拟乘法器的电路结构	96
三、乘法器的应用	97
实验 4-1 集成模拟乘法器的参数测试	98
实验 4-2 调幅与检波	102
实验 4-3 调频与鉴频	107
附录 4-I MC1496 技术参数	117
附录 4-II 交换法测量模拟乘法器失调电流	119
附录 4-III 乘法器鉴相特性测试	120
附录 4-IV 乘法器的其他应用	121

第五单元 高频放大器

一、高频电路的分类及分析方法	124
二、高频电路的结构	124
三、高频放大器的调整与测试方法	125
实验 5-1 宽带放大器	125
实验 5-2 调谐放大器	134
实验 5-3 集中选频放大器	141
附录 5-I μ PC10180 内部原理图与电性能参数	147

第六单元 计算机辅助电路分析与设计的应用

一、PSPICE 功能简介	149
二、PSPICE 编程规则	150
三、PSPICE 应用实例	153
四、印刷电路板布线的计算机辅助设计	160
实验 6-1 差分放大器的直流分析	161
实验 6-2 宽带放大器的交流分析	161
实验 6-3 有源滤波器设计与分析	161
实验 6-4 SMARTWORK 的应用	162
附录 6-I PSPICE 描述语句(部分)	162

附录 6-II PSPICE 操作手册	164
附录 6-III SMARTWORK 的运行和操作指令	164
参考文献	167

第一单元 电路实验基础

本单元安排了几个基本放大电路的实验。这些电路是复杂放大电路及模拟集成电路的基本单元。希望读者通过选做其中1~2个实验,加深对放大电路基本概念的理解,并学习放大电路参数的测试方法。从而为更好地理解、掌握复杂电路及模拟集成电路的工作原理、设计和测试方法打下基础。

对电路实验的初学者来说,本单元实验还要求学习仪器操作和安装基本知识。初步掌握电子示波器、低频信号发生器、晶体管特性图示仪等常用仪器的使用方法。有关这些仪器的原理及使用说明,可参考本套丛书的《常用无线电仪器和器件手册》,本书中不再赘述。

一、放大器静态工作点的设计考虑

(一) 放大器静态工作点的选择原则

选择放大器静态工作点的原则是保证输出波形不产生非线性失真,并使放大器有较大的增益。

放大器的输出波形是否产生非线性失真,主要取决于晶体管在外加信号输入后,其工作点的变化范围是否进入到晶体管的非线性区域。图1-1为晶体管的输入和输出特性曲线。由图可见,无论是 h_{ie} 还是 h_{fe} 的非线性,都将引起 V_o 与 V_i 之间产生非线性失真,从而

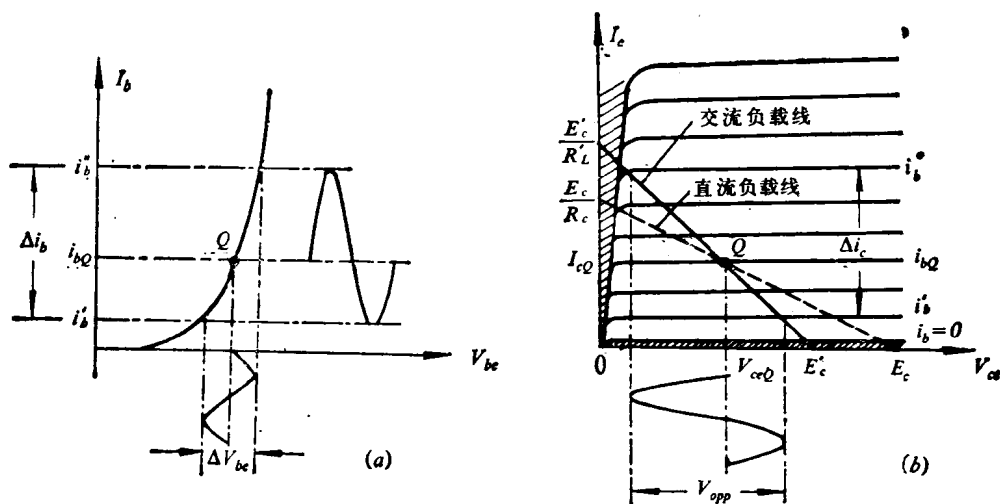


图 1-1

使输出波形 V_{opp} 失真。显然,非线性失真的大小与晶体管的特性曲线有关,与输入信号幅度及静态工作点 I_{cQ} 亦有关。

如图1-2(a)所示,若输入信号幅度增大至使工作点的变化范围超过交流负载线的A点

和B点(即晶体管进入饱和区或截止区),放大器输出波形将产生平顶限幅失真。A点和B点所对应的集电极电压变化范围,是该放大器输出电压的最大摆动幅度 V_{opp} 。

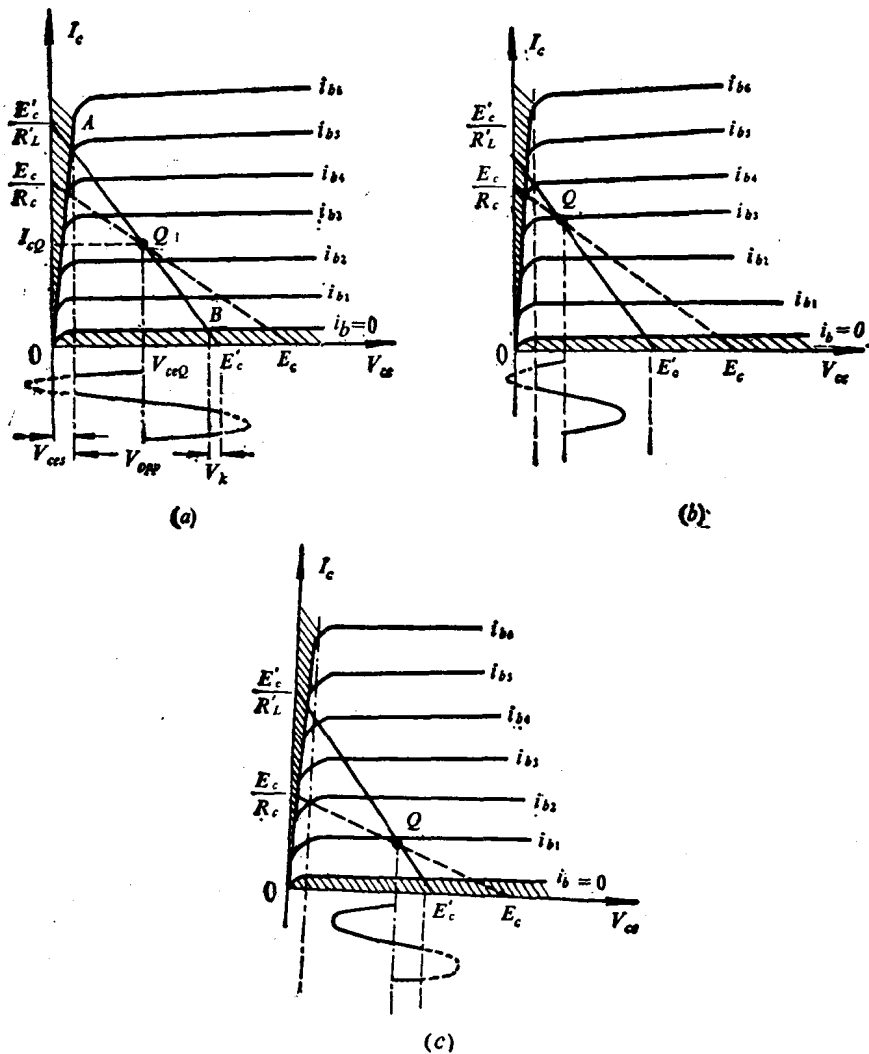


图 1-2

由图可见,若放大器要获得较大的 V_{opp} ,为了充分利用放大器的摆动范围,放大器的静态工作点 Q 应选在交流负载线的中点,即使

$$V_{ceQ} = \frac{1}{2} E'_c = \frac{1}{2} (V_{opp} + V_{ces} + V_h) \quad (1-1)$$

$$I_{cQ} = \frac{1}{2} \frac{E'_c}{R'_L} \quad (1-2)$$

式中, V_{ces} 是晶体管的饱和压降; $V_h = I_{cQ} R'_L$; $R'_L = R_e \parallel R_L$ 。若 Q 点选得太高(即 $V_{ceQ} < \frac{1}{2} E'_c$),则当输入信号使 I_c 加大时,很快就进入到饱和区,如图1-2(b)所示;反之,若 Q 点选得太低($V_{ceQ} > \frac{1}{2} E'_c$),则放大器很快进入截止区,使输出波形限幅失真,如图1-2(c)所示。

对于输出摆幅要求不高的放大单元, 放大器的动态范围不是设计考虑的主要问题, 工作点可以不选在交流负载线的中点, 而可根据增益或其他要求来选择。

对于单级放大器而言, 其电压放大倍数为

$$K_v \approx \frac{h_{fe} R'_L}{R_s + h_{ie}} \quad (1-3)$$

式中 h_{ie} 是晶体管的共射输入阻抗。根据 T 型等效电路可得

$$h_{ie} = r_{bb} + (1 + h_{fe}) r_e$$

式中, r_{bb} 是晶体管基区体电阻, 由基区材料决定。对于高频大功率管, $r_{bb} = 1 \sim 5 \Omega$; 对于高频小功率管, $r_{bb} = 10 \sim 300 \Omega$; 对于低频小功率管, $r_{bb} = 50 \sim 500 \Omega$ 。 r_e 是发射结正向交流电阻, 随工作电流不同而异:

$$r_e (\Omega) = \frac{26 (\text{mV})}{I_e (\text{mA})} \quad (1-4)$$

当晶体管工作电流不太大, 信号源内阻 R_s 较小, 能满足

$$(1 + h_{fe}) r_e \gg (R_s + r_{bb})$$

则(1-3)式可写成

$$K_v \approx -40 I_e R'_L \quad (1-5)$$

由此可见, 静态工作点不仅会影响放大器输出波形的非线性失真和最大摆幅, 而且还会影响放大器的放大倍数和输入阻抗。选择静态工作点时需根据电路要求, 兼顾各方面情况。

(二) 偏置电路的形式及其计算

晶体管偏置电路的形式有多种。由于分压式电流负反馈偏置电路 (如图 1-3(a)) 减小

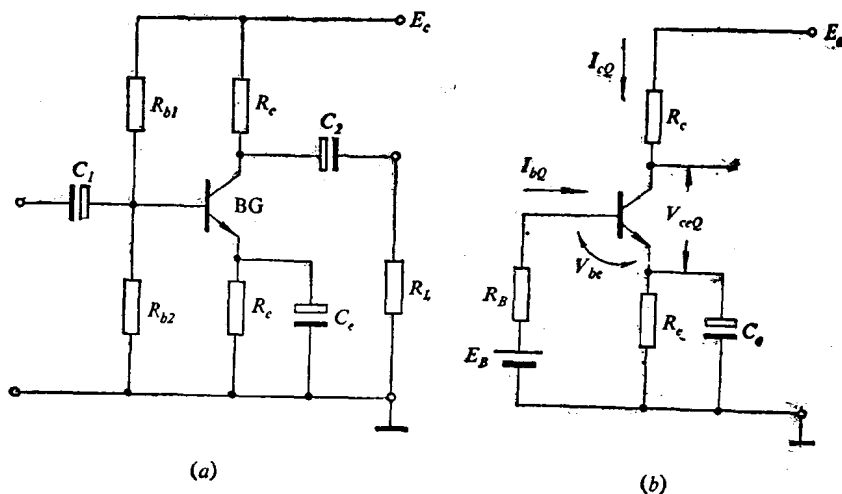


图 1-3

了工作电流对晶体管参数的依赖性, 有利于提高静态工作点的稳定性, 因而目前得到最为广泛的应用。

由图可写出工作点的电流和电压:

$$I_{eQ} = \frac{(E_B - V_{be})h_{fe}}{(1+h_{fe})R_e + R_B} + \frac{R_e + R_B}{(1+h_{fe})R_e + R_B} (1+h_{fe})I_{cb0} \approx \frac{(E_B - V_{be})h_{fe}}{(1+h_{fe})R_e + R_B} \quad (1-6)$$

式中 $R_B = R_{b1} \parallel R_{b2}$, $E_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} E_c$

偏置电路元件的计算一般可用工程估算的方法, 元件值一般应取系列值。

从提高电路工作点稳定性的角度考虑, V_{eQ} 宜取得稍大些。一般取

$$V_{eQ} = \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{3} \right) E_c$$

$$R_{eQ} \approx \frac{V_{eQ}}{I_{eQ}}$$

$$V_{bQ} = V_{eQ} + V_{beQ}$$

对于硅管, $V_{beQ} = 0.6 \sim 0.7$ V, 锗管 $V_{beQ} = 0.2 \sim 0.3$ V。由(1-6)式可见, R_B 取小些, 可减小工作点对晶体管参数 V_{be} 、 h_{fe} 的依赖性, 提高工作点的稳定性。但 R_B 过小将使基极偏置电阻对交流输入信号的分流增大。一般基极偏置电阻分流 I_1 取为

$$I_1 = (5 \sim 10) I_{bQ}$$

$$R_{b1} = \frac{E_c - V_{bQ}}{I_1}$$

$$R_{b2} = \frac{V_{bQ}}{I_1}$$

二、放大器的基本关系式

(一) 输入、输出电阻

放大器的输入、输出电阻可由放大器的交流等效电路求得。

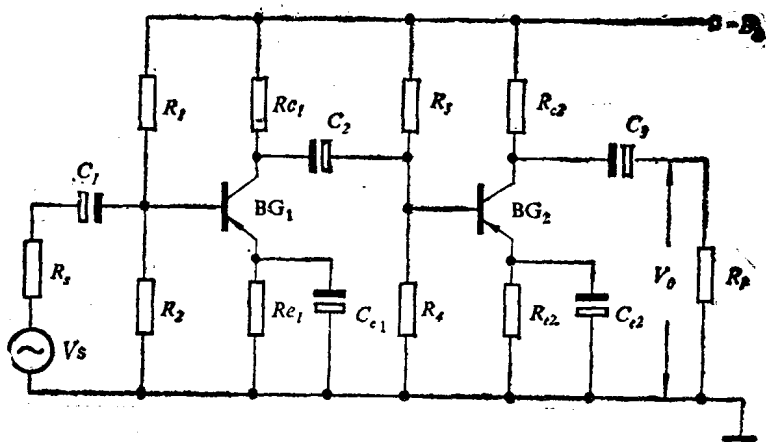


图 1-4

多级放大器的输入电阻由第一级放大器的输入电阻决定。如图1-4所示的二级阻容耦合放大器, 由等效电路不难求得其输入电阻为

$$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{ie1} \quad (1-7)$$

多级放大器的输出电阻由末级电路的输出电阻决定。由等效电路可求得图 1-4 电路的输出电阻为

$$R_0 = R_{e1} \parallel \frac{1}{h_{oe}} \approx R_{e1} \quad (1-8)$$

(二) 放大倍数

多级放大器的放大倍数应等于各级放大倍数的乘积。在计算各单级放大倍数时必须考虑到前、后级的相互影响。有两种计算方法，一种是把后级的输入电阻看成前级的负载；另一种是把前级的输出电阻看成后级信号源的内阻。两种方法计算结果相同。本书采用前者。以图 1-4 为例，其电压放大倍数为

$$K_{v1} = - \frac{R_{B1}}{R_S + R_{B1}} \cdot \frac{h_{fe1} \cdot R'_{i2}}{R'_S + h_{ie1}} \approx - \frac{h_{fe1} R'_{i2}}{R_S + h_{ie1}} \quad (1-9)$$

式中

$$R_{B1} = R_1 \parallel R_2, R'_S = R_{B1} \parallel R_S$$

$$R'_{i2} = R_{e1} \parallel R_{i2} \parallel \frac{1}{h_{oe}} \approx R_{e1} \parallel R_{i2}$$

$$R_{i2} = R_{B2} \parallel h_{ie2}, R_{B2} = R_3 \parallel R_4$$

第二级增益为

$$K_{v2} = - \frac{h_{fe2} R'_L}{h_{ie2}} \quad (1-10)$$

$$\text{式中: } R'_L = R_L \parallel R_{e2} \parallel \frac{1}{h_{oe}} \approx R_L \parallel R_{e2}$$

由此，图 1-4 电路总的电压放大倍数为

$$K_v = K_{v1} \cdot K_{v2} = h_{fe1} \cdot h_{fe2} \cdot \frac{R'_{i2}}{R_S + h_{ie1}} \cdot \frac{R'_L}{h_{ie2}} \quad (1-11)$$

如果不计各级偏流电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 及集电极直流负载电阻 R_{e1}, R_{e2} 对信号的分流作用，由(1-11)式可得图 1-4 电路的最大电压放大倍数：

$$K_{v\max} = h_{fe1} \cdot h_{fe2} \cdot \frac{R'_L}{R_S + h_{ie1}} \quad (1-12)$$

把此式推广到一般 n 级放大器，可写成：

$$K_{v\max} = (-1)^n h_{fe1} \cdot h_{fe2} \cdots h_{fen} \cdot \frac{R'_L}{R_S + h_{ie1}} \quad (1-13)$$

实际上所能达到的电压放大倍数总是小于 $K_{v\max}$ 。对于一般共射放大电路，实际所能达到的电压放大倍数可用下式估算：

$$K_v \approx (0.5 \sim 0.8)^n K_{v\max} \quad (1-14)$$

式中 $(0.5 \sim 0.8)$ 是个经验数据。若基极偏流电阻和集电极电阻较小，或晶体管工作电流较小 (0.5 mA 以下)，此系数可取得小些，反之应取得大些。(1-14) 式只能用来初步估计放大器大致应采用的级数 n 。

(三) 频率响应特性

任何放大电路总存在有各种电容元件，这是影响放大电路频率特性的主要因素。限制

放大器高频特性的主要因素是晶体管的结电容及电路的分布电容。其原理及计算将在有关的高频实验中详细讨论。影响放大器低频特性的主要原因是耦合电容和射极旁路电容。要严格计算这些电容对低频特性的影响较为麻烦。在工程设计中为了简化计算，可分别求出每个电容单独存在时所决定的转折频率，然后再综合计算。以图1-5电路为例，每个电容单独存在时所决定的转折频率 ω_L 等于与该电容两端相连的交流等效回路之时间常数 τ 的倒数。图1-5电路中电容 C_1 、 C_2 、 C_{e1} 所对应的回路如图1-6所示。

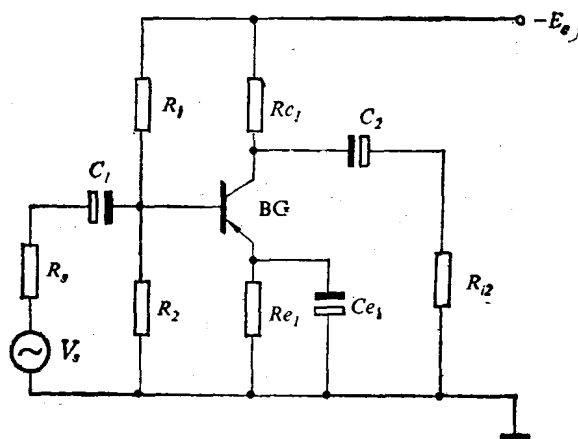


图 1-5

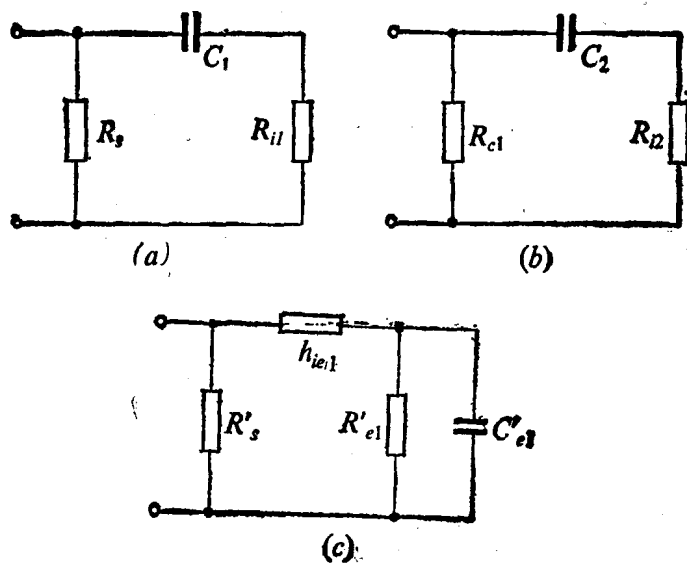


图 1-6

由图1-6 求得的转折频率为

$$\omega_{L1} = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{(R_s + R_{11})C_1} \quad (1-15)$$

$$\omega_{L2} = \frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{(R_{e1} + R_{i2})C_2} \quad (1-16)$$

$$\omega_{Le} = \frac{1}{\tau_{e1}} = \frac{1}{[(R'_S + h_{ie1}) \| R'_{e1}] C'_{e1}} \approx \frac{1 + h_{fe1}}{(R'_S + h_{ie1}) C_{e1}} \quad (1-17)$$

式中:

$$R'_S = R_1 \| R_2 \| R_S, R'_{e1} = (1 + h_{fe1}) R_{e1},$$

$$C'_{e1} = \frac{C_{e1}}{1 + h_{fe1}}$$

三个电容同时存在时, 在工程设计中为了简化计算, 通常将 C_1 , C_2 之值取得比 (1-16)、(1-17) 式的计算值大十倍以上, 这样放大器的 ω_L 就基本上取决于 C_{e1} 。当放大器的 f_L 给定后, 即可按下面式子估算电容:

$$C_1 \geq \frac{10}{2\pi f_L (R_S + R_{i1})} \quad (1-18)$$

$$C_2 \geq \frac{10}{2\pi f_L (R_{e1} + R_{i2})} \quad (1-19)$$

$$C_{e1} \geq \frac{1 + h_{fe}}{2\pi f_L (R'_S + h_{ie1})} \quad (1-20)$$

对于多级放大器, 若每一级放大器的电路形式相同, 且半功率点相等, 则多级放大器总的半功率点 $\omega_L(\omega_h)$ 与每一级放大器的半功率点 ω'_L (或 ω'_h) 的关系为

$$\omega_L = \frac{\omega'_L}{\sqrt[n]{2} - 1} \quad (1-21)$$

$$\omega_h = \omega'_h \sqrt[n]{2} - 1 \quad (1-22)$$

显然多级放大器的低半功率点 ω_L 要高于每一级放大器的低半功率点 ω'_L 。而高半功率点 ω_h 要低于每一级放大器的高半功率点 ω'_h , 级数 n 越大, 则降低越多。

三、放大器的调整与测试

(一) 测试前的电路检查

任何一个电子线路安装之后, 在接通电源之前必须对电路进行如下检查:

- i. 应仔细查电路中是否有假焊、虚焊, 元件是否接错, 尤其是电解电容的极性是否正确, 晶体管的管脚是否正确。
- ii. 用万用表电阻档测量电路的电源进线端对地的电阻, 看是否有短路现象。若有短路现象或阻值太小, 则应查出原因, 排除故障后才能接入电源。

(二) 静态工作点的测试和调整

我们知道, 静态工作点是通过 I_{EQ} 、 V_{CEQ} 、 I_{BQ} 来描述的。因此, 只要用电压表和电流表测出晶体管的 I_{EQ} 、 V_{CEQ} 、 I_{BQ} 即可。一般只需测 I_{EQ} 、 V_{CEQ} 。在具体测试过程中需注意以下几点:

- i. 凡是使用机壳接地的电子仪器时, 仪器的接地端应和放大器的接地线连接在一起, 否则仪器机壳引入的干扰不仅会使放大器的工作状态发生变化, 而且也会使测试结果不可靠。
- ii. 由于测电压较测电流方便, 因此测 I_{EQ} 时, 一般可用电压表测出 R_E 或 R_{E1} 两端的电压, 然后求出 I_{EQ} 。

- iii. 电压测量仪器的输入阻抗应远远大于被测点的等效阻抗, 否则将使测试结果产生

很大的误差。

iv. 测静态工作点应该是在没有输入信号的情况下测试,而且还应防止外界的干扰信号混入放大器以及放大器本身产生自激振荡。为此,测工作点时最好使输入端短路(对交流而言)。此外,也可用示波器“DC”输入来测工作点,这样可以及时发现放大器中是否有干扰和自激,从而避免各种错误的测试结果。

测试结果若 I_{cQ} 不正常,可改变 R_1 、 R_2 (基极偏置电阻)或 R_e ;若 V_{ceQ} 不正常,可改变 R_c 。

(三) 最大摆动幅度 V_{opp} 的测试

将信号源的输出端接到放大器的输入端,而放大器的输出端接到示波器的Y轴输入端。然后逐步加大(或减小)信号源的输出幅度,当示波器荧光屏上的波形刚刚出现平顶限幅(失真)时的幅度,就是放大器的最大摆动幅度 V_{opp} 。

(四) 放大器输入电阻的测试

最简单的测试方法是“串联电阻法”,其原理如图1-7所示。在被测放大器与信号源之间串入一个已知标准电阻 R_n ,只要分别测出放大器的输入电压 V_i 和输入电流 i_i 就可求出:

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = \frac{V_i}{\frac{V_i}{V_R}} = \frac{V_i}{V_R} R_n$$

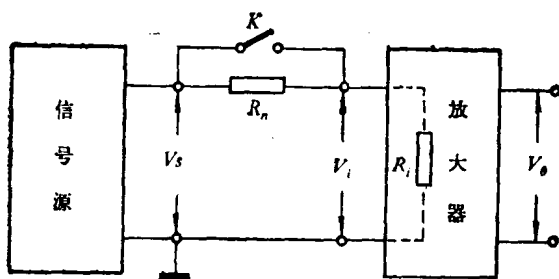


图 1-7

但是若要直接用交流毫伏表或示波器测试 R_n 两端的电压 V_R 是比较困难的,因 V_R 两端不接地。使得测试仪器和放大器没有公共地线,干扰太大,不能准确测试。为此,通常是直接测出 V_s 和 V_i 来计算 R_i ,由图不难求出:

$$R_i = \frac{V_i}{V_s - V_i} R_n \quad (1-23)$$

在具体测试过程中还必须注意下列几点:

i. 已知标准电阻 R_n 要选取适当。若 R_n 太大, V_i 太小,将使测试误差加大; R_n 太小,则 V_s 与 V_i 十分接近, V_s 、 V_i 的读数误差也会使 R_i 的测试误差大大增加。通常应使 $R_n \approx R_i$ 为宜。为了测试方便,也可用电位器代替 R_n ,测试时调节电位器使 $V_i = 0.5 V_s$,则电位器之值就是被测输入电阻 R_i 。

ii. 如果被测输入电阻 R_i 很大(在数百千欧姆以上),在测试过程中放大器输入端呈现

高阻抗,容易引起各种干扰。在这种情况下,放大器输入端应置于屏蔽盒内。

iii. V_s 不应取得太大,否则将使晶体管工作在线性状态。最好用示波器监视被测放大器的输出波形,使在不失真的条件下测试。

iv. 测试时信号频率应选在所需工作频率上。

v. 若因 V_s 、 V_i 值很小,测试仪器精度不够高时,亦可在放大器输出端读数。如图 1-7 的 K 闭合时,在放大器输出端测得输出电压 V_{01} :

$$V_{01} = K_v \cdot V_i \quad (1-24)$$

K 断开时,在放大器输出端测得输出电压 V_{02} :

$$V_{02} = K_v \cdot V_i \quad (1-25)$$

式中 K_v 为放大器电压放大倍数; V_s 为信号源输出电压; V_i 为放大器输入电压;

$$V_i = \frac{V_s}{R_n + R_i} \cdot R_n \quad (1-26)$$

则 R_i 可由下式求得:

$$R_i = \frac{V_{02}}{V_{01} - V_{02}} \cdot R_n \quad (1-27)$$

将(1-24)、(1-25)代入(1-27)式,可得

$$R_i = \frac{K_v \cdot V_i}{K_v \cdot V_s - K_v \cdot V_i} R_n = \frac{V_i}{V_s - V_i} R_n$$

上式与(1-23)式相同。可见,只要保证晶体管工作在线性区域,并且信号源内阻 $R_s \ll R_n$,那么在放大器输出端测得的 R_i 与直接在输入端测试所得 R_i 是一致的。

(五) 放大器输出电阻 R_0 的测试

放大器输出端可以等效成一个理想电压源 V_0 和输出电阻 R_0 相串联,如图 1-8 所示。输出电阻 R_0 的大小反映了放大器带负载的能力。因此也可以通过测量放大器接入负载前后的电压变化来求出输出电阻 R_0 。为此在放大器输入端加入一个固定电压,先不接入负载电阻 R_L ,测出放大器的输出电压 V'_L (开路电压),显然 $V'_L = V_0$; 然后接入适当的负载电阻 R_L ,再测出输出电压 V''_L ,由图不难求出输出电阻

$$R_0 = \left(\frac{V'_L}{V''_L} - 1 \right) R_L \quad (1-28)$$

在测试中必须注意以下几点:

i. 为减小测试误差,仍应以选取 $R_L \approx R_0$ 为宜。也可用电位器 W 来代替 R_L ,调电位器使 $V''_L = 0.5 V'_L$,则 $R_0 = R_W$ 。

ii. 最好用示波器监视放大器输出波形,应在 R_L 接入前后都不失真的条件下测试。

iii. 测试过程中输入信号幅度必须保持不变,信号频率应选在所需工作频率上。

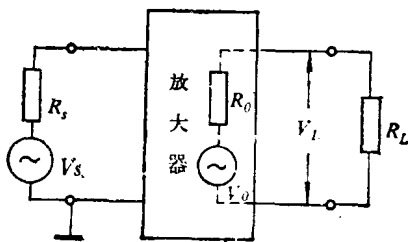


图 1-8

(六) 放大倍数的测试

一般情况下,只要测出输出、输入信号的大小,即可求出放大器的放大倍数。测试时需

注意:

i. 输入信号不可太大, 必须在输出波形不失真的条件下测试;

ii. 测多级放大器增益时, 为使输出波形不失真, 其输入信号一般都要小到毫伏级或微伏级。输入信号的测试必须有高灵敏度的电压表。如果不具备条件, 也可以在信号源与放大器之间接入一个分压器, 如图 1-9 所示, 其分压系数 $K = R_2 / (R_1 + R_2)$ 可由已知电阻 R_1 、 R_2 求得。这样就可以直接测量 V_0 、 V_i 来计算放大倍数:

$$K_v = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{V_0}{V_s} \quad (1-29)$$

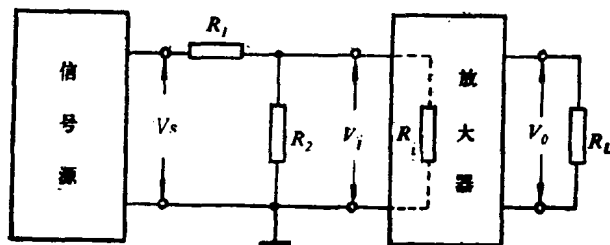


图 1-9

为了保证测试精度, R_1 、 R_2 应选择精密电阻并且应使 $R_2 \ll R_1$, 否则 R_1 将影响分压系数 K 的精度。通常 R_2 在数十欧以下。至于分压系数 K 可根据放大器增益而定, 以保证 V_s 测试方便为宜。为了保证设计时所取的 R_s 值与测试时一致, 亦可在信号源和放大器之间接入一个阻抗变换网络, 如图 1-10 所示。图中除了 R_1 、 R_2 组成的分压器外, 还多了一个电阻 R_3 , 适当选取 R_3 之值, 使其满足

$$[(R_1 + R_s) \parallel (R_2 + R_3)] = R'_s$$

式中 R'_s 为设计时给定的信号源内阻。通常 R_2 之值取得很小, 满足 $(R_1 + R_s) \gg R_2$, 因此只要取 $R_2 + R_3 = R'_s$ 即可。分压比

$$K = \frac{R_2 \parallel (R_3 + R_i)}{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + R_i)} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

因此, 既达到了分压的目的, 又实现了阻抗变换。

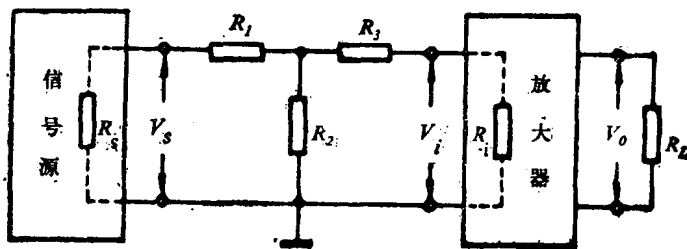


图 1-10

四、放大器幅频特性的测试

放大器的幅频曲线既可以用扫频法测试, 也可用逐点法测试。本实验采用逐点法测试。逐点法是以正弦信号为输入信号, 测出不同频率时的放大倍数。在测试中应注意以下几点: