



高等学校电子信息类“十二五”规划教材

模拟电子技术 实验及综合设计

谭爱国 沈 易 顾秋洁 杨一波 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

模拟电子技术实验及综合设计

谭爱国 沈易 顾秋洁 杨一波 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书是根据高等院校理工科模拟电子技术实验教学要求编写的。全书分为三个部分,内容包括模拟电子技术基础实验、模拟电子技术设计与综合实验以及模拟电子技术计算机仿真实验。附录中介绍了常用仪器仪表的使用。

本书将实践技能的训练与理论知识相融合,同时配合计算机仿真实验,对学生的实践技能进行渐进式的培养,多方位地提高学生的实践能力。

本书可作为高等院校电气、电子信息、计算机、医疗器械和机电一体化等专业的实验教材,也可作为课程设计、电子设计竞赛和开放性实验的实践教材,同时可供从事电子工程设计和研制工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术实验及综合设计/谭爱国等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2013.2

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3008-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 023856 号

策 划 毛红兵

责任编辑 阎彬 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印张 7.5

字 数 150千字

印 数 1~3000册

定 价 13.00元

ISBN 978-7-5606-3008-3/TN

XDUP 3300001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

模拟电子技术是高等院校电类专业本科教学中的一门重要的、实践性很强的专业基础课,本书是为该课程的实践课编写的教材,旨在通过实践环节的锻炼,巩固和加深学生对所学理论知识的理解,加强对学生的基本技能的训练,培养学生的实际动手能力、工程设计能力以及应用创新能力。

书中介绍了实验原理、基本实验操作和测试方法、计算机仿真软件与仿真实验的开发,拓展了综合与设计性实验内容。通过将实践技能的训练与理论知识相融合,同时配合计算机仿真实验,本书力图对学生的实践技能进行多层次的培养,充分提高学生系统开发的综合实践能力。

本书由上海理工大学电工电子实验中心的谭爱国编写了第1章的第1节到第3节、第2章的第6节到第8节、第3章的第1节以及附录;沈易编写了第1章的第4节到第9节;顾秋洁编写了第1章的第10节到第12节、第2章的第1节到第5节;杨一波编写了第3章的第2节到第11节。谭爱国负责全书的统稿工作。

感谢上海理工大学沈龙妹、陈静媚两位老师为本书出版所做的前期工作,感谢上海理工大学电工电子实验中心全体教师在本书编写过程中所给予的支持,也感谢在编写过程中给予帮助的其他老师和同行。在编写的过程中我们参考了许多资料,在此向这些资料的作者致谢。

本书可作为高等院校电气、电子信息、计算机、医疗器械和机电一体化等专业的实验教材,也可作为课程设计、电子设计竞赛和开放性实验的实践教材,同时可供从事电子工程设计和研制工作的技术人员参考。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请使用本书的读者提出批评与改进意见。

编者

2012.10

目 录

第 1 章 模拟电子技术基础实验	1
1.1 常用电子仪器的使用	1
1.2 单管放大电路的研究	3
1.3 单管放大电路的负载线及其最大不失真输出的研究	8
1.4 负反馈放大器	11
1.5 电压并联负反馈放大器基本特性研究	14
1.6 差动放大电路性能测试的研究	17
1.7 差动放大电路共模输入电压范围的研究	21
1.8 运算放大器的基本运算	24
1.9 积分器与三角波发生器特性研究	27
1.10 正弦波发生器的设计	29
1.11 低频功率放大器的设计	32
1.12 集成功放的性能测试	36
第 2 章 模拟电子技术设计与综合实验	38
2.1 二阶低通有源滤波器的设计	38
2.2 矩形波发生器的设计	40
2.3 施密特电路的设计	42
2.4 电压放大指示器设计	45
2.5 直流稳压电源的设计	46
2.6 温度检测与控制电路设计	51
2.7 频率/电压转换器	54
2.8 电流/电压转换电路	58
第 3 章 模拟电子技术软件仿真实验	60
3.1 OrCAD / PSpice 软件的基本操作	60

3.2 单管交流放大电路仿真	76
3.3 负反馈放大电路仿真	78
3.4 差动放大电路仿真	79
3.5 积分电路仿真	81
3.6 三角波发生器仿真	84
3.7 RC 串并联电路的电压传输频率特性仿真	85
3.8 正弦波发生器仿真	87
3.9 方波发生器仿真	88
3.10 二阶低通有源滤波器仿真	91
3.11 功率放大电路仿真	92
 附录 A DG1022 型双通道函数/任意波形发生器的使用	 96
附录 B DS1000 系列双踪数字示波器的使用简介	104
附录 C YB2173F 双路智能数字交流毫伏表的使用	110
参考文献	113

第 1 章 模拟电子技术基础实验

1.1 常用电子仪器的使用

1. 实验目的

- (1) 熟悉函数信号发生器、交流毫伏表、双踪示波器、直流稳压电源、万用表的基本性能。
- (2) 初步掌握上述仪器的基本使用方法。

2. 预习要求

- (1) 认真阅读附录中关于 DG1022 型双通道函数/任意波形发生器、YB2173F 双路智能数字交流毫伏表以及 DS1000 系列双踪数字示波器的使用说明。
- (2) 复习交流电压幅值、峰-峰值和有效值之间的关系。

3. 实验原理

(1) 模拟电子技术实验系统组成。在模拟电子技术实验中，经常使用的电子仪器有示波器、函数信号发生器、直流稳压电源、交流毫伏表等，它们和万用表一起构成模拟电子技术实验系统，可以完成对模拟电路的静态和动态工作情况的测试，其系统组成如图 1-1-1 所示。直流稳压电源为实验电路提供直流工作电压；实验电路运算或处理的交流信号由信号发生器输出；示波器、交流毫伏表、万用表用于电路中参数的测量，其中万用表具备多种测试功能，示波器和交流毫伏表用于电压的测量。

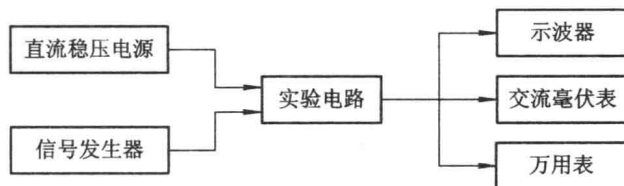


图 1-1-1 模拟电子技术实验系统组成

(2) 电路连接。根据电路原理，将直流稳压电源、信号发生器、交流毫伏表和示波器连接成如图 1-1-2 所示的方式。

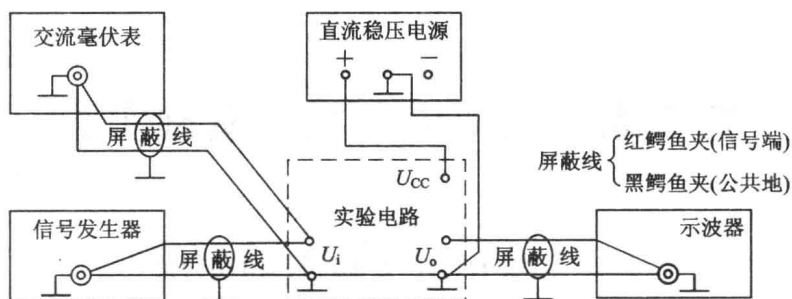


图 1-1-2 仪器互连原理图

4. 实验内容与步骤

(1) DG1022 型双通道函数/任意波形发生器的使用。熟悉信号发生器的波形选择、幅度和频率参数的调节方法。

(2) YB2173F 双路智能数字交流毫伏表的使用。熟悉用数字毫伏表测量电压参数的方法。

(3) DS1000 系列双踪数字示波器的使用。熟悉双踪数字示波器的垂直系统、水平系统、触发系统和波形自动显示的设置方法，能用示波器进行电压参数的测量。

(4) DG1022 型双通道函数/任意波形发生器、YB2173F 双路智能数字交流毫伏表和 DS1000 系列双踪数字示波器三种仪器的综合使用练习。按表 1-1-1 的要求，将信号发生器输出的信号送到交流毫伏表和示波器进行测量，对测量值进行误差分析。

表 1-1-1 信号发生器、交流毫伏表和示波器的综合使用

波 形	正弦波			说 明
幅度/mV	30	100	4000	信号源输出信号的幅度设置
直流偏置/ V_{DC}	0			信号源输出信号的直流偏移设置
频率/kHz	0.5	2	20	信号源输出信号的频率设置
毫伏表的测量值/mV				用交流毫伏表测量
VOL/DIV (电压倍率)				波形在示波器 Y 轴方向每一大格的电压量
Y 轴格数				波形在 Y 轴方向所占的格数
U_{P-P} /mV (峰-峰值)				电压倍率与 Y 轴方向波形格数的乘积
U 有效值(计)/mV				根据峰-峰值计算的有效值: $U = U_{P-P} / 2\sqrt{2}$

续表

波 形	正弦波			说 明
电压误差/(%)				计算值与毫伏表读数之间的误差
SEC/DIV (时间倍率)				波形在示波器 X 轴方向每一大格的时间量
X 轴格数				一个完整波形在 X 轴方向所占的格数
T/s (周期)				时间倍率与 X 轴方向波形格数的乘积
f/Hz (频率)				根据周期算出来的频率
频率误差/(%)				计算值与信号源频率设置值之间的误差

(5) 直流稳压电源的使用。

(6) 万用表的使用，即用万用表分别测量直流电压、电流和电阻。

5. 实验思考

(1) 仪器互连时，将公共端连接在一起的目的是什么？

(2) YB2173F 双路智能数字交流毫伏表的共地和浮置测量功能的应用有何区别？

(3) DS1000 系列双踪数字示波器的触发设置对波形显示区的波形稳定性有何影响？

1.2 单管放大电路的研究

1. 实验目的

(1) 掌握模拟电路实验板的连接方法。

(2) 学会设置和调整放大器的静态工作点并分析静态工作点对放大器性能的影响。

(3) 掌握放大电路的放大倍数、输入电阻和输出电阻的测量方法。

(4) 学会测量放大器的通频带。

2. 预习要求

(1) 复习单管放大电路的原理。

(2) 思考：放大电路的输出波形会出现几种失真？出现的原因是什么？

3. 实验原理

单管放大电路有共发射极、共集电极和共基极三种基本组态。分压式偏置共射极单管

放大电路是一种应用最为广泛的放大电路，实验电路如图 1-2-1 所示。

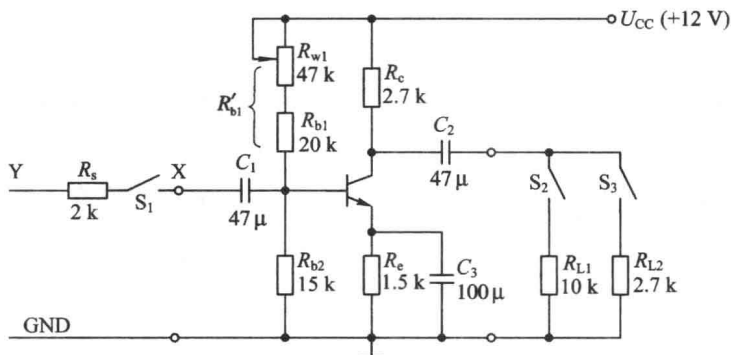


图 1-2-1 分压式偏置共射极单管放大电路

1) 静态工作点的设置

电路接成分压式偏置电路时，若流过偏置电阻 R_{b1} 和 R_{b2} 的电流远大于晶体管的基极电流 I_B (约为 5 ~ 10 倍的 I_B)，则静态工作点可用下式估算：

$$U_{BQ} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BE}}{R_e}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - (R_c + R_e) I_{CQ}$$

静态工作点的设置是否合理，对放大器的性能影响很大。为了使放大器有最大不失真输出电压，静态工作点 Q 应该设置在交流负载线的中间。当静态工作点 Q 选择很高，接近饱和区 (如图 1-2-2 所示的 Q_1 点) 时，若输入电压信号较大，会使输出信号电压产生饱和失真，为了确保输出信号电压不失真，只能减小输入信号，从而导致输出电压很小。当静态工作点选择很低，接近截止区 (如图 1-2-2 所示的 Q_2 点所示) 时，若输入电压信号较大，会使输出信号电压产生截止失真，为了确保输出信号电压不失真，只能减小输入信号，从而导致输出电压很小。

2) 放大电路的主要技术指标

(1) 电压放大倍数 A_v 。其计算公式为

$$A_v = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

式中： $R'_L = R_c // R_L$ ； $r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$ 。

电压放大倍数 A_v 的测量是在输出波形不失真的条件下进行的，若波形失真，应减小输入电压的数值。

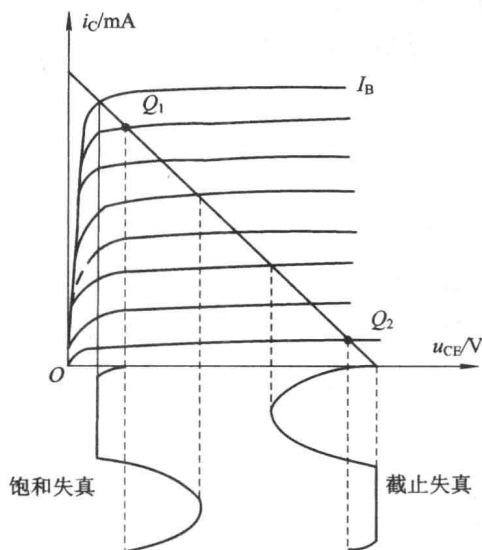


图 1-2-2 静态工作点不合适引起的输出波形失真

(2) 输入电阻 R_i 。其计算公式为

$$R_i = R_{b1}' // R_{b2} // r_{be}$$

输入电阻 R_i 的大小反映放大电路从信号发生器吸取电流的大小，输入电阻越大，则放大电路从信号发生器吸取的电流就越小。输入电阻 R_i 的测量可以采用串联采样电阻法，测量电路如图 1-2-3 所示。在信号发生器和放大电路之间串联一个已知电阻 R_s ，调节信号发生器的输出幅度，使放大电路输出不失真，此时测出信号发生器的电压 U_s 和放大电路的输入电压 U_i ，则有

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s$$

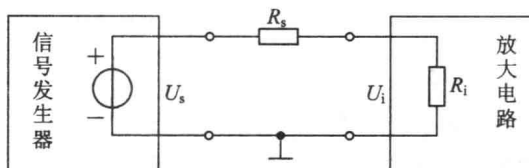


图 1-2-3 测量输入电阻原理图

(3) 输出电阻 R_o 。其计算公式为

$$R_o = R_c$$

放大电路输出电阻的大小反映了放大电路带负载的能力，输出电阻越小，带负载能力

就越强。放大电路输出电阻的测量方法如图 1-2-4 所示。在放大电路输入端加入一输入信号 U_i ，在输出波形不失真的条件下，分别测量出不带负载和带负载情况下的输出电压 U_o 和 U_{oL} ，则有

$$R_o = \frac{U_o - U_{oL}}{U_{oL}} R_L$$

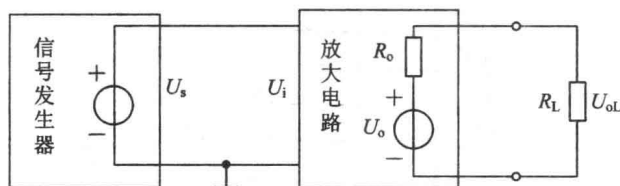


图 1-2-4 测量输出电阻原理图

(4) 频率响应。放大电路的幅频特性如图 1-2-5 所示。随着信号频率 f 的增大或减小，放大电路的电压放大倍数 A_v 比中频电压放大倍数 A_{vm} 会减小，通常称放大倍数减小到中频放大倍数的 0.707 倍时，所对应的信号频率为上限频率 f_H 和下限频率 f_L 。放大电路的带宽 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。

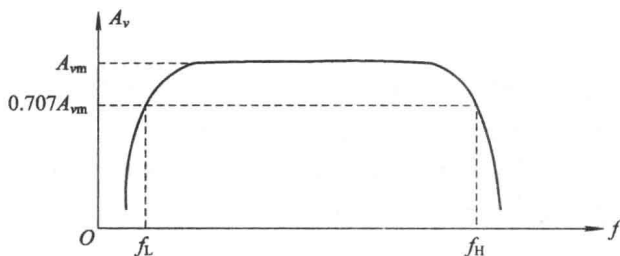


图 1-2-5 放大电路的频率特性

4. 实验内容与步骤

1) 静态工作点的调试和测试

实验电路图如图 1-2-1 所示。

(1) 电路的连接。在实验装置上按实验电路图进行线路连接。

(2) 将直流稳压电源的输出幅度调节到 12 V，关闭电源，将电源接入电路中，检查电路连接无误后，打开电源。

(3) 静态工作点的调试。有两种方法：

方法一：在无交流输入信号的情况下，调节 R_{w1} ，使 U_B 达到 3.5 V 左右，即可认为工作点已调好，然后用直流电压表和直流电流表分别测量静态工作点的各个参数，填入表 1-2-1 中。（注： $I_C = U_{R_c} / R_c$ ）。

表 1-2-1 单管放大电路静态工作点的测试值

测试条件	测试值				计算值($\beta=60$)			
	U_B/V	U_E/V	U_C/V	I_C/mA	U_{BE}/V	U_{CE}/V	I_C/mA	r_{be}/Ω
$U_B=3.5\text{ V}$								

方法二：在输入端 X 点加 $f = 1\text{ kHz}$ 的正弦交流信号，反复调节信号源电压和 R_{w1} 电位器，当输出波形 U_o 出现失真，且饱和失真和截止失真同时对称出现时，即可认为工作点已调好。

2) 放大电路的增益测试

在电路输出端接入不同负载 R_L (负载条件如表 1-2-2 所示)，对放大电路的电压放大倍数进行测试。实验方法如下：

在输入端 X 点加 $f = 1\text{ kHz}$ 的正弦交流信号，用示波器观察输出波形 U_o ，调节信号发生器的输出幅度，使输出波形 U_o 达到不失真。用交流毫伏表测出 U_o 和 U_i 的电压值，即可求得： $A_v = U_o/U_i$ 。将测试数据填入表 1-2-2 中。

表 1-2-2 放大电路的增益测试

测试条件			测试数据		由测试值计算	理论计算($\beta=60$)
U_o 不 失 真	R_c/Ω	R_L/Ω	U_i/mV	U_o/V	A_v	$A_v = -\beta R'_L/r_{be}$
	2.7 k	∞		$U_o =$		
	2.7 k	10 k		$U'_o =$		
	2.7 k	2.7 k		$U''_o =$		

3) 输入电阻 R_i 的测试

输入信号从 Y 点输入，利用输入端电阻 R_s ，求取输入信号电流，测出 R_s 前后的信号 U_s 和 U_i (注意必须使输出波形在不失真的情况下才能测量)，填入表 1-2-3 中，根据公式计算出输入电阻 R_i 。

表 1-2-3 输入电阻(R_i)的测试值

测试条件	测试值/mV		由测试值计算	理论计算值
U_o 不失真	U_s	U_i	$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s$	R_i

4) 输出电阻 R_o 的测试

在输入信号相同的条件下，分别测出 $R_L = \infty$ 时的 U_o 和 $R_L = 2.7\text{ k}\Omega$ 时的 U''_o (注意必须使输出波形在不失真的情况下才能测量)，填入表 1-2-4 中，然后根据公式计算出 R_o 。

表 1-2-4 输出电阻(R_o)的测试值

测试条件	测试值/V		由测试值计算	理论计算值
U_o 不失真	U_o	U_o''	$R_o = \frac{U_o - U_o''}{U_o''} R_L$	R_o

5) 静态工作点对波形失真的影响

调节 R_{w1} , 当 R_{w1} 增大时, 使静态 I_C 变小, 输出波形将产生截止失真; 反之将产生饱和失真。分别在图 1-2-6 中记录各种状态下的波形。

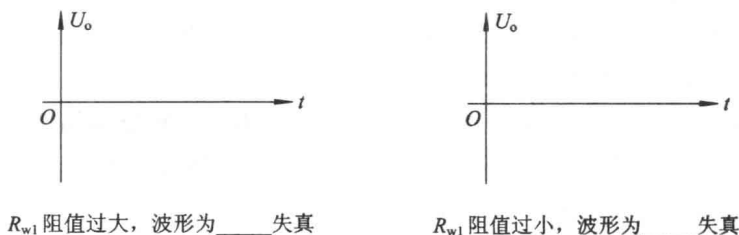


图 1-2-6

6) 频率特性的测试

固定输入电压 U_i 在某一数值, 首先测出放大电路在中频时的输出电压 U_o 。然后升高信号频率, 直至输出电压降到 $0.707U_o$ 时为止, 此时的频率即为 f_H ; 同样, 降低信号频率, 直至输出电压降到 $0.707U_o$ 时为止, 此时的频率即为 f_L 。放大电路的带宽 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。

5. 实验思考

- (1) 当电路的输出波形出现饱和失真和截止失真时, 电路该怎样调试?
- (2) 对本实验来说, 如果输入信号 U_i 加大, 输出信号的波形将产生什么失真?
- (3) 负载电阻变化对放大电路的增益和静态工作点有无影响?

1.3 单管放大电路的负载线及其最大不失真输出的研究

1. 实验目的

- (1) 了解单管放大电路的直流负载线与交流负载线的含义。
- (2) 学会测绘单管放大电路的直流负载线与交流负载线的实验方法。
- (3) 掌握单管放大器最大不失真输出电压的测试方法。

2. 预习要求

- (1) 了解直流负载线和交流负载线的测绘方法。

(2) 思考如何调整电路参数, 使单管放大电路获得最大不失真输出电压。

3. 实验原理

共射极单管放大电路的实验电路图如图 1-3-1 所示。

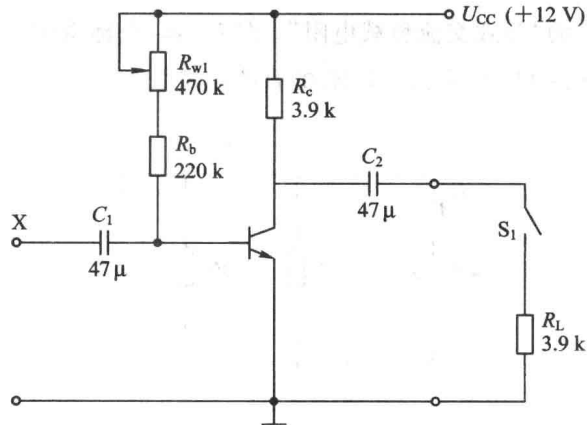


图 1-3-1 共射极单管放大电路

1) 直流负载线和交流负载线

共射极单管放大电路直流通路的输出回路如图 1-3-2 所示。在图中, 电压和电流的关系为

$$U_{CC} = I_C R_c + U_{CE} \quad \text{或} \quad I_C = \frac{U_{CC}}{R_c} - \frac{U_{CE}}{R_c}$$

在 $i_C - u_{CE}$ 坐标系中, 电压与电流的关系曲线是一条斜率为 $-1/R_c$ 的直线, 如图 1-3-3 所示, 该直线称为放大电路的直流负载线。

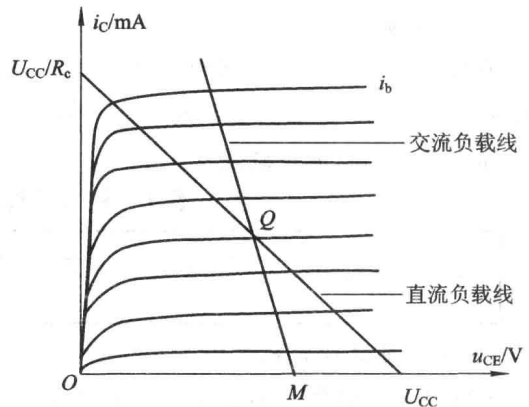
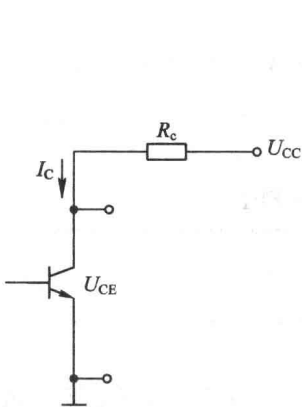


图 1-3-2 共射极单管放大电路直流输出回路 图 1-3-3 共射极单管放大电路交、直流负载线

共射极单管放大电路交流通路的输出回路如图 1-3-4 所示。在图中,电压和电流的关系为

$$i_c = -\frac{u_o}{R_c // R_L} = -\frac{u_{ce}}{R_c // R_L} = -\frac{u_{ce}}{R_L'}$$

式中, R_L' 叫做放大电路的“等效交流负载电阻”。在 $i_c - u_{ce}$ 坐标系中,电压与电流的关系曲线是一条通过静态工作点 Q 、斜率为 $-1/R_L'$ 的直线,如图 1-3-3 所示,该直线称为放大电路的交流负载线。

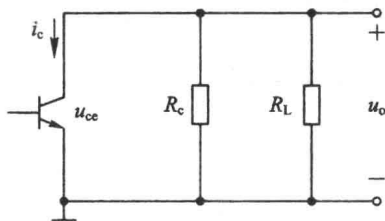


图 1-3-4 共射极单管放大电路交流输出回路

2) 最大不失真输出

为了得到最大动态范围,应将静态工作点调到交流负载线的中点。为此,在放大器正常工作的情况下,逐步增大输入信号的幅度,并同时调节 R_{w1} (改变静态工作点),用示波器观察输出波形,当输出波形同时出现截止失真和饱和失真时,说明静态工作点已调在交流负载线的中点。然后反复调整输入信号,使波形输出幅度最大,且无明显失真,此时可以测出放大电路最大不失真输出 U_o 。

4. 实验内容与步骤

1) 直流负载线的测绘

在图 1-3-1 所示电路中,令 $U_i = 0$,调节 R_{w1} 使电路的静态集电极电流在 $0.8 \text{ mA} \sim 3 \text{ mA}$ 之间变化,分别测量不同电流下的 U_{ce} 值(填入表 1-3-1 中),将所测得的点连接起来,即为电路的直流负载线。

表 1-3-1 直流负载线的测试

I_C/mA	0.8	1	1.5	2	2.5	2.8	3
U_{ce}/V							

2) 交流负载线的测绘

调节 R_{w1} 使电路的静态工作点置于 $I_C = 1.5 \text{ mA}$ ($U_{ce} \approx 6 \text{ V}$) 的状态下,接入 U_i ($f = 1 \text{ kHz}$),其数值由小增大,同时用示波器观察放大器输出电压 U_o 的波形。对照图 1-3-3,可见随着 U_i 的增大,输出电压的正半周首先出现失真,测出此时的 U_o (临界值)。则图中

M 点的近似坐标电压值 U_M 为

$$U_M \approx U_{CE} + \sqrt{2}U_o$$

连接 M 与 Q 点, 延伸此线即为电路的交流负载线。

3) 合适的工作点选择对最大不失真输出电压的影响

通过分析可知, 在现有情况下, 如果改变静态工作点(将 I_C 值提高), 可在一定程度上提高最大不失真输出电压。试分析一下针对本电路的参数, I_C 应调至何值, 才能最大限度地提高电路的最大不失真输出, 并用实验证实。

5. 实验思考

(1) 将测试结果与理论分析作比较, 说明测绘直流负载线与交流负载线的依据。

(2) 分析在已知 U_{CC} 、 R_c 、 R_L 的情况下, 为提高电路的最大不失真输出电压, 应如何选择电路的静态工作点。

1.4 负反馈放大器

1. 实验目的

(1) 通过实验, 加深理解负反馈对放大器性能的改善。

(2) 熟练掌握放大器的静态工作点、放大倍数、输入电阻、输出电阻等性能指标的测量方法。

2. 预习要求

(1) 复习电压串联负反馈电路的原理及电路的计算方法。

(2) 掌握放大电路的一般调试方法和测试手段。

(3) 复习负反馈对放大器性能改善的原理和定量分析。

3. 实验原理

在放大电路中, 将输出信号通过反馈电阻送回到输入端, 并参与放大器的控制过程的称为反馈电路。反馈信号是电流信号的称为电流反馈, 反馈信号是电压信号的称为电压反馈。若 $|1 + \dot{A}_v \dot{F}_v| > 1$, 则 $|\dot{A}_{vF}| < |\dot{A}_v|$, 即引入反馈后, 增益减小了, 这种反馈一般称为负反馈。电流反馈将使输出电流保持稳定, 因而增大了输出电阻; 而电压反馈将使输出电压保持稳定, 其效果是减小了输出电阻。

在本实验中, 我们研究电压串联负反馈放大电路, 电路图如图 1-4-1 所示。负反馈的引入使放大器的放大倍数降低了, 但在很多方面改善了放大器的动态指标, 如稳定放大倍数、提高输入电阻、降低输出电阻, 减小非线性失真和展宽通频带等。电路的主要性能指标计算如下: