第2章 常用模拟电路 Multisim 设计与仿真

Multisim 提供了诸多针对模拟电路的仿真分析方法与虚拟仪器,对模拟电路的设计起着很大的 辅助作用,毕竟在计算机上对电路进行仿真,比构建和调试实际的电路要快得多,可以减轻设计方 案验证阶段的工作量。本章涉及四个基本的模拟实验电路(实验条件均为:计算机1台,NI Multisim 14.0软件1套),用于巩固和加深模拟电子线路中重要基础理论知识,激发学生对电子电路设计的 兴趣。

2.1 单级放大电路设计与仿真

放大器就是将微弱的电信号进行处理而变成幅度较大的信号。一般对微弱信号进行的放大为线 性放大。线性放大器意味着放大器的输出信号等于输入信号乘以一个常数,即输出信号与输入信号 成正比。放大的前提是不失真,因为只有在不失真的情况下放大才有意义。晶体三极管和场效应管 是放大电路的核心元件,只有它们工作在合适的区域内,才能使输出量与输入量始终保持线性关系。 对于晶体三极管构成的基本放大电路,如果静态工作点不合适,输出波形会产生非线性失真——饱 和失真和截止失真,而不能正常放大。

设计放大电路时必须遵循以下原则:

(1)必须根据所用放大管的类型提供直流电源,以便设置合适的静态工作点,并作为输出的能源。对于三极管放大电路,电源的极性和大小应使三极管发射结处于正向偏置,集电结处于反向偏置状态,即保证三极管工作在放大区。

(2) 电阻取值要得当,保证和电源搭配后使三极管具有合适的静态工作电流。

(3) 电路设置要求输入信号能有效地传输到输出回路。

1. 实验目的

- (1) 使用 Multisim 软件进行原理图仿真。
- (2) 掌握仿真软件调整和测量基本放大电路静态工作点的方法。
- (3) 掌握仿真软件观察静态工作点对输出波形的影响。
- (4) 掌握利用特性曲线测量三极管小信号模型参数的方法。
- (5) 掌握放大电路动态参数的测量方法。

2. 实验要求

(1)设计一个分压偏置的单管共射放大电路,调节基极偏置电阻,观察电路出现饱和失真和截止失真的输出信号波形,并测试对应的静态工作点的值。

(2)放大器输入端接入峰值为 1mV 的正弦信号,调节电路静态工作点(调节偏置电阻),观测电路输出信号,使得输出波形不失真。在此状态下:

- ① 测量电路静态工作点;
- ② 绘制三极管的输入、输出特性曲线,得到三极管小信号模型参数 r_{be} 、 β 、 r_{ce} 的值;
- ③ 利用示波器得到输出波形,求出该放大电路的放大倍数;
- ④ 仿真和测量电路的输入电阻和输出电阻;
- ⑤ 测试电路的频率特性,得到通频带 BW。

3. 实验步骤

打开 Multisim 14.0,在绘图区绘制如图 2.1 所示分压偏置单管共射放大电路,其中滑动变阻器用 于调节放大电路中晶体三极管的工作区域。

(1) 非线性失真分析

放大器要求输出信号与输入信号之间是线性关系,不能产生失真。由于三极管存在非线性,使 输出信号产生了非线性失真。从图 2.2 所示三极管的输出特性曲线可以看出,当静态工作点(Q 点) 处于放大区时,三极管才能处于放大状态;当静态工作点接近饱和区或截止区时,都会引起失真。









放大电路的静态工作点因接近三极管的饱和区而引起的非线性失真称为饱和失真,如图 2.3 所示,对于 NPN 管,输出电压表现为底部失真。放大电路的静态工作点接近或到达三极管的截止区而 引起的非线性失真称为截止失真,对于 NPN 管,输出电压表现为顶部失真。不过由于静态工作点达 到截止区,三极管几乎失去放大能力,输出的电流非常小,于是输出电压波形也非常小,因此有时 很难看到顶部失真的现象,而只能观察到输出波形已经接近于零。

失真波形可以通过示波器观察,也可以通过总谐波失真(THD)的大小来判断。总谐波失真的 定义:在某一正弦信号输入下,输出波形因非线性而产生失真,其谐波分量的总有效值与基波分量 之比。

① 饱和失真

调节图 2.1 中的滑动变阻器,由于饱和失真时静态工作点偏高,也就是 *I*_{BQ}的值偏大,因此,应 调小滑动变阻器阻值。当输入信号峰值为 5mV,滑动变阻器的百分比为 10%时,输出端显示图 2.4 所示的饱和失真波形。

此时电路的静态工作点通过 Multisim 提供的直流工作点分析求得。选择菜单栏 "Simulation→ Analyses and Simulation",在弹出的仿真对话框中选择 "DC Operating Point",并将求三极管放大器 静态工作点所需的四个量添加为分析变量,如图 2.5 所示。







图 2.4 饱和失真波形

Analyses and Simulation		×
Active Analysis:		
Interactive Simulation	DC Operating Point	2
DC Operating Point	Output Analysis options Summary	
AC Sweep	Variables in circuit: Selected variables for analysis:	_
Transient	All variables All variables	-
DC Sweep	I(C2) I(C2) I(CE)	
Single Frequency AC	I(Q1[IE]) I(Q1[IS])	
Parameter Sweep		
Noise	I(RC) I(RF)	
Monte Carlo	I(RL) = < <u>Remove</u> < I(V1)	
Fourier	I(VI) P(C1) Edit expression	
Temperature Sweep	P(C2) P(CF) Add expression	
Distortion	P(Q1) P(RB1)	
Sensitivity	P(RB2) P(RC)	
Worst Case	P(RE) P(RL)	
Noise Figure	P(VI) P(VI)	
Pole Zero	<u>v(1)</u> -	
Transfer Function	Eilter unselected variables	
Trace Width	More options	
Batched	Add gevice/model parameter	
User-Defined	Delete selected variable Select variables to save	
	▶ Bun Save Gancel Hall	р .::

图 2.5 静态工作点变量选择

单击"Run"按钮,得到图 2.6 所示的仿真结果。

由图 2.6 可看出三极管的静态工作点为: $I_{BQ} = 51.58 \mu A$, $I_{CQ} = 4.73 m A$, $V_{BEQ} = 0.67 V$, $V_{CEO} = 0.15 V$ 。

② 截止失真

调节滑动变阻器,增大基极偏置电阻,那么基极的电流 *I*_B逐渐减小,同时集电极电流也逐渐减小并趋于零,从而使得集电极的电位越发接近直流电源电压 *V*_{CC},三极管近似于断路。因此,这时的输出信号非常小,甚至小于输入信号。图 2.7 是滑动变阻器选择在 100%下的静态工作点分析结果。

	DC Operating Point Analysis					
	Variable	Operating point value				
1	@qq1[ib]	51.57966 u				
2	@qq1[ic]	4.72976 m				
3	V(3)-V(6)	149.80887 m				
4	V(4)-V(6)	669.47515 m				

DC Operating Point Analysis					
Variable Operating point value					
1	@qq1[ib]	168.88651 n			
2	@qq1[ic]	35.84860 u			
3	V(3)-V(6)	11.91029			
4	V(4)-V(6)	538.52046 m			

图 2.6 饱和失真的静态工作点

图 2.7 截止失真的静态工作点

由图 2.7 可以看出三极管的静态工作点为: *I*_{BQ} = 0.17μA, *I*_{CQ} = 0.036mA, *V*_{BEQ} = 0.54V, *V*_{CEQ} = 11.91V。*I*_{BQ}、*I*_{CQ}的值均趋于零, *V*_{CEQ}也接近*V*_{CC}。三极管的*Q*点已经进入截止区,但由于集电极的电流很小,使得输出信号也非常小,若没有观测到较为明显的顶部失真现象,则可以适当增大输入信号,得到图 2.8 (a)所示的输出波形。还可以在输出端接入失真分析仪(Distortion Analyzer) ,得到图 2.8 (b)所示输出波形的总谐波失真(THD)值。



图 2.8 截止失真的仿真结果

(2) 正常放大状态下的分析

1) 静态分析

① 仿真分析

打开图 2.2 的电路, 放大电路要正常放大需要静态工作点处于放大区, 调节滑动变阻器使得静态 工作点尽量接近交流负载线的中心。选择直流工作点

分析 (DC Operating Point) 方法, 图 2.9 所示的静态工作点是滑动变阻器选择在 15%,即滑动变阻器接入电阻为 30kΩ时的仿真结果。

由图 2.9 可以看出三极管的静态工作点为: $I_{BQ} = 17.65 \mu A$, $I_{CQ} = 3.72 m A$, $V_{BEQ} = 0.66 V$, $V_{CEQ} = 2.7 V$ 。

Γ	DC Operating Point Analysis					
		Variable Operating point value				
	1	@qq1[ib]	17.64765 u			
	2	@qq1[ic]	3.71706 m			
	3	V(3)-V(6)	2.69853			
	4	V(4)-V(6)	662.05361 m			
L						

图 2.9 正常放大状态下的静态工作点

• 64 •

② 理论分析(估算法)

利用 Multisim 查看晶体三极管 2n2222A 的模型,电流放大倍数 β =220,同时理论估算发射结导 通的电压值,这里取 $V_{\text{BE}} = 0.7$ V。则

$$I_{BQ} = \frac{\frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{p} + R_{b2}} V_{CC} - V_{BE}}{(1 + \beta)R_{e}} = \frac{\frac{10}{5 + 30 + 10} \times 12 - 0.7}{(1 + 220) \times 0.5} = 17.79(\mu A)$$
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 3.91(mA)$$
$$V_{CE} \approx V_{CC} - I_{C}(R_{e} + R_{e}) = 2.21(V)$$

③ 分析研究

根据仿真分析和理论估算的数据对比,发现仿真分析中的电流放大倍数及发射结的导通电压随 着电路静态工作点变化而变化,比理论分析中的固定值更加符合实际电路,说明仿真实验对实际电 路的分析具有指导意义,并且静态工作点的值比理论估算更接近实际电路。因此,接下来应用仿真 获得的静态工作点的值,分析三极管小信号模型参数。

2) 三极管小信号模型参数确定

处于小信号线性放大器中的三极管可以用图 2.10 所示的 H 参数小信号模型代替。

① 小信号参数的物理意义

图 2.10 模型中 r_{be} 是指输出端交流电压短路,即 $v_{CE}=V_{CEQ}$ 时三极管 b-e 极间的输入电阻。它的物理意义是指当 $v_{CE}=V_{CEQ}$ 时, v_{BE} 对 i_B 的偏导数。从输入特性上看,就是 $v_{CE}=V_{CEQ}$ 那条输入特性曲线在 Q点处切线斜率的倒数,求解方法如图 2.11 所示。

$$r_{\rm be} = \left(\Delta v_{\rm BE} / \Delta i_{\rm B}\right)_{v_{\rm CE} = V_{\rm CEO}} \tag{2.1}$$

图 2.10 模型中的 β 是指输出端交流电压短路,即 $v_{CE}=V_{CEQ}$ 时,三极管的电流放大系数。它的物理意义是指当 $v_{CE}=V_{CEQ}$ 时, i_C 对 i_B 的偏导数。从输出特性上看,就是 Q 点附近的电流放大系数,求解方法如图 2.12 所示。

$$\beta = (\Delta i_{\rm C} / \Delta i_{\rm B}) \Big|_{V_{\rm eff}} = V_{\rm eff}$$
(2.2)



图 2.10 H 参数小信号模型

图 2.11 rbe的物理意义和求解方法

图 2.10 模型中的 r_{ce} 是指输入端交流电流开路,即 $i_{B}=I_{BQ}$ 时,三极管 c-e 间的输出电阻。它的物 理意义是指当 $i_{B}=I_{BQ}$ 时, v_{CE} 对 i_{C} 的偏导数。从输出特性上看, r_{ce} 是在 $i_{B}=I_{BQ}$ 的那条输出特性曲线上 O 点处切线斜率的倒数,求解方法如图 2.13 所示。

$$r_{\rm ce} = \left(\Delta v_{\rm CE} / \Delta i_{\rm C}\right)_{i_{\rm B} = I_{\rm PO}}$$
(2.3)

② 直流扫描分析小信号参数

由图 2.11、图 2.12 和图 2.13 可知三极管的小信号参数均与静态工作点有关,图 2.9 所示三极管

的静态工作点为: $I_{BQ} = 17.65 \mu A$, $I_{CQ} = 3.72 m A$, $V_{BEQ} = 0.66 V$, $V_{CEQ} = 2.7 V$ 。因此, 需要构建如 图 2.14 (a) 所示的绘制输入特性曲线的电路, 其中 c-e 间的电压源值取 $V_{CE}=V_{CEQ}$ 。



图 2.12 β 的物理意义和求解方法



图 2.13 rce 的物理意义和求解方法



图 2.14 绘制输入特性曲线的电路和直流扫描分析设置对话框

绘制好电路后,选择 Multisim 软件菜单栏 "Simulation→Analyses and Simulation",或者单击仿 真工具栏中的 Interactive 按钮,在弹出的仿真对话框中选择 "DC Sweep",变量 V_{BE} 如图 2.14 (b)

所示,设置从 0.5V 变化至 0.7V,为了提高精确度,增 量(Increment)可以设置得小一些。输出变量(Output 选项卡)选择 I(Q1(IB)),单击"Run"按钮,得到图 2.15 所示的仿真结果。图中光标的放置参考图 2.11 中纵向的 虚线,图 2.15 中显示的 dx 就是式(2.1)中的 Δv_{BE} , dy 就是式(2.1)中的 Δi_B 。因此,此状态的三极管小信号 输入电阻为

$$r_{\rm be} = (\Delta v_{\rm BE} / \Delta i_{\rm B}) \Big|_{v_{\rm CE} = V_{\rm CEQ}} = dx / dy$$

= 11.6732mV / 7.1239µA ≈ 1.6kΩ (2.4)

三极管的β和r_{ce}均和输出特性曲线有关(绘制三极 管输出特性曲线在本书1.3.1节的直流扫描分析中有详细 介绍),构建图2.16(a)所示的电路,分析方法中选择"DC Sweep",直流扫描分析的参数设置如图2.16(b)所示, 设定自变量为电压源V_{CE},从0V变化到5V,每次增量为



图 2.15 输入特性曲线的仿真结果

0.001V; 设定参变量为电流源 *I*_B,初始值为 15.65μA,终止值为 19.65μA,增量为 2μA,所以共设置 了三个值: 15.65μA、17.65μA 和 19.65μA,而 17.65μA 正好就是静态工作点 *I*_{BQ}的值。

图 2.16(b) 所示对话框中的输出变量(Output 选项卡) 选择 I(Q1(IC)), 完成设置后, 单击"Run" 按钮, 得到如图 2.17 所示的仿真结果。将图中的光标 2 的横坐标放在 V_{CEQ}的位置, 参考图 2.12 纵向的虚线, 三极管此状态下的 β 为

• 66 •

$$\beta = (\Delta i_{\rm C} / \Delta i_{\rm B})|_{V_{\rm eff} = V_{\rm eff}} = (4.1392 - 3.2958) \text{mA} / (19.65 - 15.65) \mu \text{A} \approx 211$$



图 2.16 绘制输出特性曲线的电路图和参数设置对话框

图 2.17 的输出特性曲线还可以用于计算三极管的 r_{ce} ,图中显示的 dx 就是式(2.3)中的 Δv_{CE} , dy 就是式(2.3)中的 Δi_c ,则此状态下三极管的小信号输出电阻为

$$r_{\rm ce} = (\Delta v_{\rm CE} / \Delta i_{\rm C}) \Big|_{i_{\rm B} = I_{\rm BO}} = \mathrm{d}x / \mathrm{d}y = 709.9237 \,\mathrm{mV} / 25.4794 \,\mu\mathrm{A} \approx 28 \mathrm{k}\Omega$$
(2.6)



图 2.17 输出特性曲线仿真结果

3) 电压放大倍数的估算与测量

① 微变等效理论估算

图 2.1 所示放大器正常放大情况下的微变等效电路如图 2.18 所示。图中滑动变阻器放置在 15% 位置,三极管小信号参数取式 (2.4)、式 (2.5)、式 (2.6)得到的结果。



图 2.18 图 2.1 的微变等效电路

$$A_{\rm v} = -\frac{\beta r_{\rm ce} //R_{\rm C}}{r_{\rm be}} = -\frac{211 \times 28 //2 //2}{1.64} \approx -127$$

② 仿真和测量电压放大倍数

在输出电压不失真的情况下,电路的电压放大倍数常用示波器或电压表进行测量。用示波器仿 真测量输入和输出波形,如图 2.19 所示,依据电压放大倍数的定义进行估算,由于输入峰值为 1mV 的信号,因此测量的电压放大倍数为



$$A_{\rm v} = v_{\rm o} / v_{\rm i} = V_{\rm om} / V_{\rm im} \approx -129$$

图 2.19 示波器测量输入和输出电压波形

- 4) 放大电路输入电阻和输出电阻的估算与测量
- ① 微变等效理论估算

图 2.18 所示微变等效电路中,滑动变阻器放置在 15%位置,则

 $R_{\rm i} = (R_{\rm p} + R_{\rm b1}) / R_{\rm b2} / r_{\rm be} = (30 + 5) / 10 / 1.64 \approx 1.4 (\rm k\Omega)$

$$R_{\rm o} = r_{\rm ce} //R_{\rm C} \approx 1.87 (\mathrm{k}\Omega)$$

②使用电压表和电流表测量输入电阻和输出电阻

仿真测量输入、输出电阻可以采用定义分析。由定义 R_i = V_i / I_i,用输入电压有效值和输入电流 有效值的比值获得。因此在输入端接入电压表和电流表,如图 2.20 所示。

由电压表和电流表数值可得到

$$R_{\rm i} = V_{\rm i} / I_{\rm i} = 0.707 \,{\rm mV} / 0.542 \,{\mu}{\rm A} \approx 1.3 \,{\rm k}{\Omega}$$

输出电阻的测量电路如图 2.21 所示,根据定义求放大器的输出电阻,首先要对放大器输入端所加的信号源做处理:如果信号源是电压源则令 V_s =0,即将电压源短路;如果信号源是电流源则令 I_s =0,即将电流源开路。其次还要将负载 R_L 去掉,并在输出端加一个测试电压源 V_o 。这样若输出端电流为 I_o ,则输出电阻 $R_o = V_o / I_o$ 。

由电压表和电流表数值可得到:

$$R_{\rm o} = V_{\rm o} / I_{\rm o} = 0.707 \,\mathrm{mV} / 0.377 \,\mu\mathrm{A} \approx 1.875 \,\mathrm{k\Omega}$$



图 2.20 输入电阻测量电路



图 2.21 输出电阻测量电路

③ 使用交流扫描分析(AC Sweep)测量输入电阻和输出电阻

在图 2.20 的输入电阻的测量电路中,选择菜单栏 "Simulation→Analyses and Simulation",在弹出的对话框中选择 "AC Sweep",频率参数设置和输出变量设置如图 2.22 所示。

		AC Sweep		9
		Frequency parameters Output	Analysis options Summary	
		Variables in circuit:		Selected variables for analysis:
AC Sweep		All variables	•	All variables 🔹
Frequency parameters Output Analysis option Start frequency (FSTART): 1 Stop frequency (FSTOP): 1 Sweep type: Decade Number of points per decade: 10 Vertical scale: Linear	s Summary Hz GHz	[(1)] I(2) I(2)	Add > Add > E Edit expression	<pre>v(c))((C1) </pre>

图 2.22 测量输入电阻的频率参数设置和输出变量设置对话框

设置完成后,单击"Run"按钮得到图 2.23 所示的仿真结果,从结果中可以看出放大电路的输入电阻也是频率的函数,在频率为 10kHz 时,输入电阻为 1.3051kΩ,与电压表和电流表分析结果

一致。

同理,在图 2.21 的输出电阻测量的电路中,选择"交流扫描分析 (AC Sweep)",在参数设置对 话框中设置频率参数,并将输出变量设置为输出电压与输出电流的比值。单击"Run"按钮得到 图 2.24 所示的仿真结果,从结果中可以看出放大电路的输出电阻也是频率的函数,在频率为 10kHz 时,输出电阻为 1.8752kΩ,与电压表和电流表分析结果一致。



图 2.23 交流扫描分析测量输入电阻的仿真结果

- 5) 测量电路的频率特性
- ① 使用交流扫描分析测量通频带

打开图 2.1 所示的共射放大电路,注意滑动变阻器仍放置于 15%的位置。选择菜单栏"Simulation→ Analyses and Simulation",在弹出的仿真对话框中选择"AC Sweep",注意在频率参数设置(Frequency Parameters)选项卡中纵坐标刻度(Vertical Scale)项 需要选择"Decibel",表示幅频特性纵坐标以分贝为 单位。输出(Output)选项卡中,选择待分析的输出 电路节点 V(7),也就是负载两端的电压。单击"Run" 按钮得到图 2.25 所示的仿真结果。

由图 2.25 可看出,图 2.1 共射放大电路的中频 增益约为 42.4dB,光标 1 和光标 2 对应于图中中频 增益下降 3dB 时的位置,从而得到下限频率为 x1 的 坐标值,约为 2.17kHz,上限频率为 x2 的坐标值, 约为 33.16MHz,通频带宽度就是 dx 的值,约为 33.15MHz。

④ 使用波特图仪测量频率特性

同样打开图 2.1 电路,接上波特图仪,如图 2.26(a)所示,输入端和输出端均连接波特图仪,运行仿真即可得到图 2.26(b)和图 2.26(c)所示的幅频特性曲线,以及图 2.26(d)所示的相频特性曲线。

由图 2.26(b)和(c)同样得到了上限频率约为 33.14MHz,下限频率约为 2.17kHz,通频带宽 度约等于上限频率,与交流扫描分析的结果几乎一致。

6) 分析研究

根据理论分析的静态工作点、电压增益、输入电阻和输出电阻的数据,比对仿真测量的数据,可知仿真分析数据与理论估算数据基本一致,说明仿真实验对实际电路的分析具有一定的指导意义。

同时通过 Multisim 提供的虚拟仪器电压表、电流表测量输入、输出电阻以及波特图仪测量频率



图 2.24 交流扫描分析测量输出电阻的仿真结果



图 2.25 图 2.1 共射放大器的幅频特性和 相频特性曲线仿真结果

特性,比对交流扫描分析的仿真结果,可知两种结果数据基本一致,说明仿真软件提供多种方式供 用户选择,以获得用户需要的结果,指导实际电路设计。



图 2.26 使用波特图仪测频率特性

4. 实验报告内容

(1)给出满足一定技术指标的分压式单管共射放大电路原理图。

(2)给出电路饱和失真和截止失真时输出电压的波形图,以及两种状态下三极管的静态工作点,分析出现失真的原因。

(3)调节静态工作点,使得电路工作在不失真状态。

① 给出三极管静态工作点的测量值。

② 给出测量三极管输入、输出特性曲线和测量 β、r_{be}、r_{ce}值的实验图,并给出测量结果。

③ 给出输出波形图,求出放大倍数,并与理论计算值进行比较。

④ 给出输入电阻和输出电阻的测量结果,并和理论计算值进行比较。

⑤ 给出电路的幅频特性和相频特性图,并得出下限截止频率 $f_{\rm H}$ 、上限截止频率 $f_{\rm H}$,以及带宽 BW 的值。

5. 思考题

(1) 设计一个放大电路应注意哪些原则?

(2)温度对放大电路有什么样的影响? (可以使用温度扫描分析(Temperature Sweep)结果来 说明)

(3) 耦合电容 C_1 、 C_2 和旁路电容 C_e 对放大电路的频率特性有什么影响?(可以使用参数扫描分析(Parametric Sweep)结果进行说明)

(4)设计的共射放大电路在保持静态工作点不变的前提下,改变信号的输入端和输出端,分别 连接成共集组态的放大电路和共基组态的放大电路,测量电压增益、输入电阻、输出电阻,以及通 频带,并列表进行比较。

2.2 差分放大电路设计与仿真

差分放大电路(差分放大器,简称差放)是模拟集成电路中的重要单元电路,常作为直接耦合 多级放大电路的第一级,这是因为它具有放大差模信号、抑制共模信号的良好品质,能很好地抑制 直接耦合多级放大电路中的零点漂移现象。

差分放大电路分为两种:长尾式差分放大电路和带恒流源的差分放大电路。前者电路简单,但 在单端输出时,尾部的电阻需要取值比较大才能实现较大的共模抑制,在集成电路中受到限制,因 此在单端输出时,一般多采用带恒流源的差分放大电路。

1. 实验目的

(1) 掌握差分放大电路的工作原理。

(2) 进一步熟悉使用 Multisim 14.0 仿真工具辅助电路分析。

(3) 理解差分放大电路对温漂的抑制作用。

(4) 掌握差分放大电路放大直流小信号时主要性能指标的分析。

(5) 掌握分析差分放大电路传输特性曲线的方法。

2. 实验要求

(1) 设计一个差分放大电路,要求空载时双端输出的差模增益 Avp 至少大于 20。

(2)利用温度扫描分析检测差分放大电路静态工作点的温漂特性。

(3) 电路输入 10mV 的直流差模小信号,分别测试双端输出时的差模增益 A_{VD} 和单端输出时的 差模增益 A_{VD1}。

(4) 电路输入 1V 的直流共模信号,分别测试双端输出的共模增益 Avc 和单端输出的共模增益 Avc1。

(5) 测量差分放大电路的传输特性曲线。

3. 实验内容

打开 NI Multisim 14.0,在绘图区中绘制如图 2.27 所示的差分放大电路。

(1) 观测交流小信号下的差模电压增益

注意图 2.27 的示波器连接方式,通道 A 的 "+" "-" 端分别连在两个输入端上,测量差分放大器两个输入端的电压差,也就是差模输入信号的波形,通道 B 的 "+" "-" 端分别连在两个输出端上,测量差分放大器两个输出端的电压差,也就是差模输出信号的波形。运行仿真,示波器上的波形如 图 2.28 所示。

将输出波形的峰值与输入波形的峰值相比,得到图 2.27 的差模增益约为 100 倍,满足设计要求。

• 72 •



图 2.27 差分放大器的仿真实验电路



图 2.28 图 2.27 电路输入输出波形

(2) 检测静态工作点温漂特性

选择 Multisim 软件菜单栏 "Simulation→Analyses and Simulation",在弹出的仿真对话框中选择 "Temperature Sweep",得到图 2.29 所示的温度扫描分析的参数设置对话框。图中设置扫描的基本分 析类型为直流工作点分析 (DC Operating Point),并且选择以列表数据点的方式设置温度值为 25℃和 100℃。在输出变量 (Output) 中设置差分管 Q1 集电极的静态电压,即图 2.27 的 V(5)。

单击"Run"按钮,得到图 2.30 所示的仿真结果。

由图 2.30 可求得两个温度下 V_C的电压差为ΔV_C = 5.64119-5.58776 = 0.05343(V),相对变化量 约为 0.9%。也就是说温度从 25℃上升到 100℃时,差分放大电路静态的输出电压仅比 25℃时的输出 电压下降了 0.9%左右,温度漂移的确很小。

a al cois a susan abava			-				
analysis parameters	Jutput	Analysis options	Summary				
Sweep parameters		<u> </u>					
Sweep parameter:		Sel	ected variables for a	nalysis:			
		All	variables	-			
Temperature	•	_ <u>v(</u>	5)				
			Present value:	27 °C			
			Description:	Temperature sweep	of the circuit.		
Points to sweep							
Sweep variation typ	e:		Value list:	25,100		*	°C
Liet	-						
以列表数据.	点的	方式设置温度	度变量			-	
				*	Þ		
More Options	一选	择基础分析	类型				
Analysis to sweep	DC	Operating Point		▼ Edit ar	alvsis		
			C Disalau	where a much 2	形形卡日初	化	古仕E
			UISDIAY R	esuits on a draph i 😭	ルシルシエレモリ	5171	長知フ

图 2.29 温度扫描分析的参数设置对话框

为了说明差放对温漂的抑制特性,这里对上一个实验(图2.1所示)的传统共射放大器也同样进 行温度分析,同样选择温度扫描分析(Simulation→Analyses and Simulation→Temperature Sweep"), 并且同样按图 2.29 进行参数设置,同样选择三极管的集电极静态电压作为研究对象,即设置图 2.1 的 V(3)作为输出变量。单击"Run"按钮,得到图 2.31 所示的仿真结果。

差分放大电路 Temperature Sweep							
	Variable, Temperature setting Operating point value						
1	V(5), Temperature=25	5.64119					
2	2 V(5), Temperature=100 5.58776						

	分压式共射放大电路 Temperature Sweep					
Variable, Temperature setting Operating point value						
1	V(3), Temperature=25	4.57875				
2	V(3), Temperature=100	4.08906				

图 2.30 差分放大电路集电极电压的温漂情况 图 2.31 传统共射放大电路集电极电压的温漂情况

由图 2.31 可求得两个温度下 V_C的电压差为ΔV_C = 4.57875-4.08906 = 0.48969(V),相对变化量 约为 10.6%。也就是说温度从 25℃上升到 100℃时,传统共射放大器静态的输出电压比 25℃时的输 出电压下降了 10.6%左右,但差分放大电路仅下降了 0.9%,足以说明差分放大电路对电路的温度漂 移的确有着很强的抑制作用。

(3) 分析输入直流差模小信号下的电压增益

差分放大电路不仅可以放大交流小信号,也可以放大直流小信号。将输入信号修改为一对幅度 值为±10mV的差模直流信号,并增加一个负载,如图2.32所示,使用电压表测量输入和输出的差模 电压,从而得到双端输出时的差模增益为

$$A_{\rm VD} = \frac{V_{\rm Od1} - V_{\rm Od2}}{V_{\rm Id1} - V_{\rm Id2}} = \frac{-0.686}{0.02} = -34.3$$

图 2.32 所示电路中,由于输入是直流小信号,直流小信号经过差分放大器放大后仍然是直流信 号,在三极管的输出端集电极上和静态工作点 Vc叠加。当输出信号从两个管子的集电极输出时,差 分对管的集电极静态工作点 Vc由于相同而相抵消。但是当负载仅接在其中一个管子的集电极,即单 端输出时,需要注意此时的集电极电压既包含放大的直流小信号,还包含无小信号输入时静态工作 点 Vc 的值。因此,采用如图 2.33 的处理方式获得单端输出时的差模输出电压。



图 2.32 测量双端输出的差模增益

从而得到单端输出时的差模增益为

$$A_{\rm VD1} = \frac{V_{\rm Od1}}{V_{\rm Id1} - V_{\rm Id2}} = \frac{-0.508}{0.02} = -25.4$$

图 2.32 和图 2.33 均可将开关连接到 R_{ee} 上,将带恒流源的差分放大器变成长尾式差分放大器,从显示的结果看,差模增益变化不大。



图 2.33 测量单端输出的差模电压增益

(4) 分析输入直流共模小信号下的电压增益

将输入信号修改为一对幅度值为 1V 的共模直流信号,并增加一个负载,如图 2.34 所示,由于 差放是完全对称的两个共射放大电路,因此共模输入时,双端输出也是对称的,双端输出时的共模 增益几乎为零:

$$A_{\rm VC} = \frac{V_{\rm Oc1} - V_{\rm Oc2}}{V_{\rm Ic}} \approx 0$$



图 2.34 测量双端输出的共模增益

与测量单端输出的差模增益相同,测量单端输出的共模增益也需要将无小信号输入时的静态工作点电压去除,如图 2.35 所示,得到带恒流源差分放大器的单端输出共模增益:

$$A_{\rm VC1} = V_{\rm Oc1} / V_{\rm Ic} = -0.028 / 1 = -0.028$$



图 2.35 测量单端输出的共模增益

若将图 2.35 中的开关放置到左端,将带恒流源的差放变成长尾式差放,重新观察电压表,电压表显示 - ▲ -0.248 → -,得到该长尾式差放的单端输出的共模增益为-0.248,表明带恒流源的差分放 大电路对共模信号的抑制能力更强。

(5) 测量差放的传输特性曲线

放大电路输出电压与输入电压之间的关系称为电压传输特性,即 $v_o = f(v_i)$ 。如果将差分放大电路的差模输入信号 v_{id} 作为输入信号,令其幅度从零逐渐增大或减小,输出端 v_{od} 也将出现对应的变化,得到的曲线就是差分放大路的电压传输特性曲线。绘制电压传输特性曲线可以借助 Multisim 的直流扫描(DC Sweep)分析方法。

打开图 2.32,由于直流扫描分析的自变量只能是电路中的某一个直流电源,于是将图中的 v_{idl} 改为 V_i ,并使 $v_{id2} = 0$ 。选择 Simulation→Analyses and Simulation→DC Sweep"得到如图 2.36 所示的直流扫描分析参数设置对话框,设置差模输入信号 V_i 从-800mV 变化至 800mV,增量设置为 1mV,输出变量设置为差分对管的集电极电位 V(2)和 V(5)。

DC Sweep					3
Analysis parameters	Output	Analysis options	Summar	у	
Source:	VI		-		Selected variables for analysis:
Start value:			-0.8	v	
Stop value:		[0.8	v	V(5)
Increment:		[0.001	۷	
					Use source 2

图 2.36 直流扫描分析的参数设置对话框

单击"Run"按钮,得到如图 2.37 所示的仿真结果。从仿真结果可以看出,当|v_{id}|在 100mV 之内时,差模传输特性可以近似看成直线,这可视为该差分放大器的线性放大区域。当|v_{id}|超过 200mV 之后,差分放大器中的管子一个导通,另一个截止,差分放大器处于非线性区域。

若要增大差分放大器的线性放大区域,可以将射极电阻 R_w 的阻值变大,比如从原来的 100 Ω 增大至 500 Ω ,仿真参数设置不变,重新运行仿真,得到图 2.38 所示的传输特性曲线,明显看到线性区域增大了。



图 2.37 差分放大电路的电压传输特性曲线

图 2.38 增大射极电阻后的电压传输特性曲线

4. 实验报告内容

(1) 给出自行设计的差分放大电路原理图,测量其空载时的差模增益。

(2)给出差分放大电路对温漂抑制特性的分析过程。

(3)给出测量双端输出和单端输出差模增益的电路,求出差模增益的值,并说明单端输出时从 Q1 管输出和从 Q2 管输出的不同。 (4)给出测量双端输出和单端输出共模增益的电路,求出共模增益,并计算共模抑制比。

(5)给出长尾式差分放大电路的原理图,列表比较长尾式和恒流源式差分放大技术指标的差别, 并说明二者的特点。

(6)给出电压传输特性曲线,并对曲线进行必要的说明。

5. 思考题

(1)观察长尾式差分放大电路和恒流源式差分放大电路技术指标的差别,思考它们的差模小信 号等效电路是一致的,为什么差模增益仍有差别呢?

(2) 恒流源式差分放大电路中的恒流源在电路中起什么作用?

(3) 怎样提高差分放大电路的共模抑制比和减小零点漂移?

2.3 负反馈放大器设计与仿真

几乎所有的实用放大电路都要视实际需要引入不同的负反馈,以改善放大电路某些方面的性能。 要设计一个负反馈放大器,首先需要保证未接反馈的基本放大电路已经工作在放大区,这样才能根据需求引入不同组态的负反馈。

其次需要了解负反馈的四种组态:电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈和电流 并联负反馈的接入特点。最后要知道负反馈对性能影响的具体情况:

- (1) 直流负反馈可以稳定静态工作点。
- (2)串联负反馈使放大器输入电阻增大; 并联负反馈使放大器输入电阻减小; 电压负反馈使放大器输出电阻减小; 电流负反馈使放大器输出电阻减小;
- (3)负反馈可以使放大器的增益稳定性提高。
- (4) 负反馈可以使放大器的通频带展宽。
- (5)负反馈可以使由基本放大器引起的非线性失真有所改善。

1. 实验目的

- (1) 熟悉两级放大电路的设计方法。
- (2) 掌握在放大电路中引入负反馈的方法。
- (3) 掌握放大器性能指标的测量方法。
- (4) 加深理解负反馈对电路性能的影响。

(5) 进一步熟悉利用 Multisim 仿真软件辅助电路设计的过程。

2. 实验要求

(1)设计一个正常放大的两级电压放大电路,要求电压增益大于100。

(2)测试两级放大电路动态技术指标,包括电压增益、输入电阻、输出电阻及通频带。

(3)给两级放大电路引入电压串联负反馈,测试引入反馈后电路的电压增益、输入电阻、输出 电阻及通频带,分析反馈前后的变化。

(4) 分析负反馈前后对非线性失真的影响。

多级放大电路的级间耦合方式主要有阻容耦合、直接耦合和变压器耦合等。集成电路内部均采 用直接耦合方式,直接耦合方式有着更多的实际意义。因此本实验以设计直接耦合为例来说明。直 接耦合具有低频特性好,能够放大变化缓慢的信号,便于集成的优点,但是它的缺点是各级静态工 作点相互影响,前一级的温漂会直接传到后一级,因此需要解决各级间直流电位的设置和电路的温 漂问题。

解决各级直流电位的匹配,可以采用抬高后一级发射极电位,使后级的基极电位与前级的集电 极电位相匹配,这种办法适用于级数不多时;如果级数较多,逐级抬高电位的结果也会降低电路的 放大能力。另一种办法就是前后级使用异型三极管,因为工作在放大状态的晶体管,NPN 管要求集 电极电位高于基极电位,而 PNP 管则要求集电极电位低于基极电位,因此前后级相互搭配可以方便 地配置工作点。

解决温漂问题,第一级放大器的设计采用 2.2 节中的差分放大电路,因为差分放大电路中使用特性相同的晶体管,它们温漂相互抵消,差分放大电路的共模抑制比越大,它抑制温漂的能力越强。

由此确定如图 2.39 所示的两级放大电路作为本实验的仿真电路,第一级采用差分放大电路,第 二级采用 PNP 管构成的共射放大电路。

(1) 两级放大电路的静态工作点分析

打开 NI Multisim 14.0,在绘图区内绘制如图 2.39 所示的电路图,断开负反馈的开关,使电路工 作在开环状态。选择菜单栏"Simulation→Analyses and Simulation",在弹出的仿真对话框中选择"DC Operating Point",并将两级放大电路中起放大作用的三极管 Q1、Q2、Q3 的静态工作点均添加至分 析变量列表中(如图 2.40(a)所示),单击"Run"按钮,得到图 2.40(b)所示的仿真结果,可以 看出三个放大管均处于放大区中。



图 2.39 直接耦合两级放大电路的仿真电路

将电路输入端(图 2.39 中节点 11)和输出端(图 2.39 中节点 13)接到示波器上,得到图 2.41 所示的波形,可以看出输出波形不失真,且放大倍数高于 100 倍。







图 2.41 两级放大电路的输入输出波形

(2) 放大电路开环下动态性能的仿真

同样在图 2.39 的开关断开状态下,按照 2.1 节分析单管共射放大电路动态指标的方法,分析两级放大电路的动态指标。放大器的电压增益可以根据图 2.41 所示的示波器波形的峰值比值求得,或者通过在输入端和输出端分别接电压表测出有效值后求得。

而输入电阻、输出电阻及通频带,均可根据交流扫描分析获得相应的频率特性曲线,读取相应的数据获得(步骤和方法详见 2.1 节)。图 2.42 给出了相应的仿真结果,读者可以将测量结果填入表 2.1 中。



图 2.42 开环时的输入电阻、输出电阻及电压增益的幅频特性