

第3章

晶体三极管及其放大电路

学习目标

- (1) 熟悉晶体三极管的结构和工作原理,掌握晶体三极管伏安特性。
- (2) 掌握晶体三极管共射极、共集极和共基极放大电路结构。
- (3) 学会晶体三极管放大电路直流偏置方法和电路分析方法。
- (4) 学会晶体三极管放大电路动态分析方法。
- (5) 熟悉晶体三极管基本放大电路特点。

1904年,J. A. Fleming 发明了二个电极的真空二极管;1906年, Lee De Forest 增加第三个电极,即控制栅,将其放置到真空二极管的阳极和阴极之间,真空三极管问世,随后真空管的应用大大地推动了无线电和电话的发展。早期,电子设备中用于信号放大的主要器件为真空三极管,然而真空三极管存在诸多难以克服的缺点,如功耗极高、可靠性低、速度受限、体积和质量大等。第二次世界大战期间,军事领域急需稳定可靠、快速灵敏的电学信号放大器件来替代真空三极管,这一需求便加快了新型放大器件的研制。1943年,美国贝尔实验室组建了一支实力强劲的固体物理研究小组,成员包括威廉·肖克利(William Shockley)、约翰·巴丁(John Bardeen)和沃尔特·布拉顿(Walter Brattain)。经过大量的研究,约翰·巴丁和沃尔特·布拉顿终于在1947年12月测试成功了世界上第一个晶体管,不久,威廉·肖克利又提出了“三明治”结构的晶体管,并通过实验成功验证了他的想法,1948年7月,贝尔实验室正式对外发布新闻公告,向世界展示了这一新型器件,自此电子工业进入晶体三极管时代,经过半个多世纪的发展,晶体三极管种类繁多,封装各异,在电子电路领域被广泛使用,彻底改变了电子电路结构,推动集成电路及大规模集成电路的诞生,让高速电子计算机的制造成为现实,为电子技术的飞速发展注入了强大动力,深刻影响了人类社会的工作和生活方式。

本章将介绍晶体三极管的工作原理及其构成的基本放大电路,并简要介绍晶体管的典型应用。

3.1 晶体三极管

晶体管由贝尔实验室的威廉·肖克利、约翰·巴丁和沃尔特·布拉顿三位科学家共同发明,为表彰他们的贡献,1956年给他们颁发了诺贝尔物理学奖。目前,晶体三极管均采用“三明治”结构,即双极结型晶体管(BJT),有些教科书简称晶体管或者三极管,本书称为晶体三极管。相比真空器件,晶体三极管的优势是功耗更低、器件更小更轻、可靠性更高、热损耗更低。本节介绍晶体三极管的结构和类型、晶体管的伏安特性、晶体管的工作状态和电气参数。

3.1.1 结构和类型

晶体三极管是三端器件,三个端子分别称为集电极(Collector)、基极(Base)和发射极(Emitter),各电极使用C(或者c)、B(或者b)、E(或者e)来标识。常用的晶体三极管根据制造器件的半导体材料不同,可分为硅管和锗管两类。从内部结构来看,晶体三极管

内部由两个 pn 结组成,如图 3.1 所示,发射极连接的发射区为高浓度重掺杂半导体,用于“发射”载流子;与基极连接的基区掺杂浓度较低,且比较薄;与集电极连接的集电区,由于要收集发射区过来的载流子,通常情况下设计成包围基区的结构。常见的平面型晶体三极管结构如图 3.2 所示。

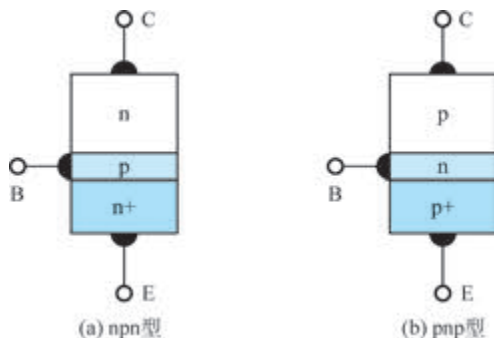


图 3.1 晶体三极管结构示意图

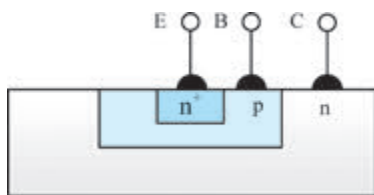


图 3.2 常见的平面型晶体三极管结构

根据晶体三极管内部的组成结构,将其分为 npn 和 pnp 两种类型,图形符号如图 3.3 所示。nnp 型和 pnp 型晶体三极管的符号利用发射极一端的箭头方向进行区分,该箭头也表示了工作在放大状态时发射极的电流方向,nnp 型和 pnp 型晶体三极管三个电极电流方向刚好相反。直观地看,晶体三极管内部形成了两个 pn 结,其中发射区与基区形成的 pn 结称为发射结 J_E ,集电区与基区形成的 pn 结称为集电结 J_C 。注意,晶体三极管中两个 pn 结并非简单地背向相接,其结构特点在外部偏置电压条件下将产生比较复杂的内部载流子运动。但从电流分配关系来看,根据基尔霍夫电流定律,三个电极的电流满足如下关系:

$$i_E = i_B + i_C \quad (3.1)$$

上式表明,发射极电流等于基极电流与集电极电流之和。

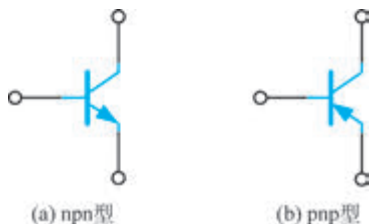


图 3.3 晶体三极管图形符号

【例题 3-1-1】 如图 3.1 中所示的 npn 型晶体三极管,每微秒有 10^8 个空穴从基区注入发射区,而发射区每微秒有 10^{10} 个电子注入基区,电流表测试基极的电流 i_B 为 $16\mu\text{A}$,试计算发射极电流 i_E 和集电极电流 i_C 。

解：发射极电流由净流入发射区的正电荷数目决定，其值为

$$\begin{aligned} i_E &= (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (10^8 / \mu\text{s}) - (-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (10^{10} / \mu\text{s}) \\ &= 1.602 \times 10^{-5} \text{ A} + 1.602 \times 10^{-3} \text{ A} \approx 1.618 \text{ mA} \end{aligned}$$

根据式(3.1)可知，集电极电流 $i_C = i_E - i_B = 1.602 \text{ mA}$ 。



晶体三极管
的伏安特性
及三种工作
状态

3.1.2 伏安特性

为了研究晶体三极管在三个电极外加电压时，各电极电流与外加电压之间的关系，即伏安特性，可以使用测量的手段。下面以 npn 晶体三极管为例，采用如图 3.4 所示的连接方式对晶体三极管三个电极进行偏置（需要说明，这不是晶体三极管唯一的外部电源偏置方式），这种连接方式可将晶体三极管视为二端口网络。发射极是输入端和输出端的公共端，故这种电路连接方式称为共射极连接。输入端电流为基极电流 i_B ，输入电压为基极与发射极之间的电压 u_{BE} ；输出端电流为集电极电流 i_C ，输出电压为集电极与发射极之间的电压 u_{CE} 。下面简述输入端电流与电压关系曲线和输出端电流与电压关系曲线的获取方法。

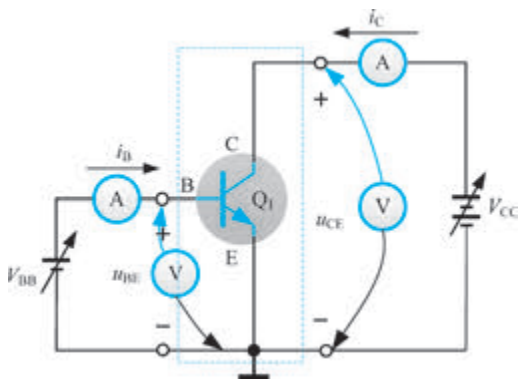


图 3.4 共射极特性测试电路

1. 输入特性

在图 3.4 中，晶体三极管的输入电流 i_B 与输入电压 u_{BE} 之间的关系称为输入特性。为了简化测量，在研究输入特性时常将输出电压恒定，仅考虑输入电压变化时对输入电流的影响。比如，首先假设 $u_{CE} = 0$ ，就可以获得 i_B 与输入电压 u_{BE} 之间的关系曲线 1；之后，增加 u_{CE} 电压，则可获得对应不同 u_{CE} 的多条输入特性曲线，测试结果如图 3.5(a) 所示。由图可以观察到输入特性曲线主要具有以下特点：

(1) 对于单条曲线来讲，输入电流 i_B 与输入电压 u_{BE} 之间的关系与二极管伏安特性曲线相似，考虑到基极与发射极内部为 pn 结，这种相似性是容易理解的。

(2) 特性曲线随电压 u_{CE} 增加而向右移，然而，当 $u_{CE} \geq 1\text{V}$ 以后，输入特性曲线几乎不再右移，表明此时基极电流 i_B 与 u_{CE} 近似无关。

2. 输出特性

晶体三极管的输出特性表示输出电流 i_C 与输出电压 u_{CE} 之间的关系。同样采用图 3.4 测试方法,首先设置合适的 u_{BE} 使输入电流 $i_B = i_{B1}$,改变 u_{CE} 电压即可获得集电极电流 i_C 与输出电压 u_{CE} 之间的关系;同理,增加基极电流 $i_B = i_{B2}$,可以获得第 2 条曲线,以此类推,就可以获得一簇上述曲线,测试结果如图 3.5(b)所示。由图可以观察到输出特性曲线具有以下特点:

(1) 当 u_{CE} 较低时(典型值小于 $0.2V$),集电极电流 i_C 随输出端电压 u_{CE} 增加而增加。

(2) 当 u_{CE} 较高时(典型值大于 $1V$),集电极电流 i_C 与输出端电压 u_{CE} 几乎无关,集电极电流大小由基极电流 i_B 决定,此时,晶体三极管的集电极电流表现出受基极控制的电流源特点,即电流控制电流源。

(3) 当基极电流近似为 0 时,集电极电流 i_C 也近似为零。

根据上述讨论,晶体三极管中各电极电流与各电极之间的电压存在非线性关系,这也可从图 3.5 所示的特性曲线中得到证实。

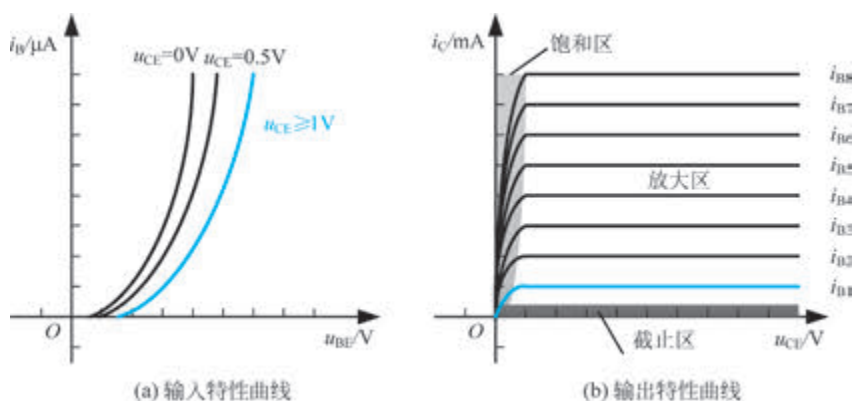


图 3.5 晶体三极管特性曲线

3.1.3 三种工作状态

由于晶体三极管内部有两个 pn 结,根据外部施加偏置电压情况,晶体三极管存在饱和、截止和放大三种工作状态,表 3.1 给出晶体三极管三种工作状态与其偏置电压关系。

表 3.1 晶体三极管三种工作状态与其偏置电压关系

发射结 J_E	集电结 J_C	工作状态
正偏	正偏	饱和状态
反偏	反偏	截止状态
正偏	反偏	放大状态

1. 饱和状态

对于硅晶体三极管,典型情况下, $|u_{CE}| \approx 0.2V$,称为饱和管压降,记作 U_{CES} ,

$|u_{BC}| \approx 0.5\text{V}$, 发射结和集电结均处于正偏状态。一般情况认为, 当 $|u_{CE}| \leq U_{CES}$ 时, 晶体三极管处于饱和区。此时, 该晶体三极管类似一个闭合的非理想开关, 开关的两端为集电极和发射极。饱和区是在输出特性曲线中靠近纵轴的区域, 如图 3.5(b) 所示。

2. 截止状态

晶体三极管工作在截止状态时, 工作点位于输出特性曲线电压轴附近, 如图 3.5(b) 所示。此时, 晶体三极管等效为一个关断的开关, 发射结和集电结均处于反偏状态; 集电极仅有极小的反偏漏电流流过。对于共射极偏置, 集电极电流 $i_C = I_{CEO} \approx 0$, 其中 I_{CEO} 为基极开路时流过集电极与发射极之间的电流, 该电流又称穿透电流; 对于共基极偏置, 集电极电流 $i_C = I_{CBO} \approx 0$, 其中 I_{CBO} 为发射极开路时流过集电极与基极之间的电流。

3. 放大状态

晶体三极管工作在放大状态时, 工作点位于输出特性曲线饱和区和截止区之间的平坦区域, 如图 3.5(b) 所示, 该区域又称有源区。此时, 集电极电流和基极电流之间近似呈线性关系, 因此放大区也称晶体三极管的线性区。定义共基极电流放大系数 α 和共射极电流放大系数 β :

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E} \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (3.3)$$

由热效应产生的漏电流具有如下关系:

$$I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO} \quad (3.4)$$

式(3.2)中, 显然 $\alpha < 1$, 表示从发射区注入基区的多数载流子被集电区收集的能力。式(3.3)表示晶体三极管直流电流放大特性, 若忽略漏电流, 则 $I_C \approx \beta I_B$ 。

需要说明: 式(3.2)~式(3.4)描述晶体三极管工作于放大区的电流关系, 即表明只有晶体三极管工作于放大区, 式(3.2)~式(3.4)才有意义; 而式(3.1)则适用于晶体三极管所有工作状态。

【例题 3-1-2】 确定【例题 3-1-1】中晶体三极管的直流共基极电流放大系数 α 和共射极电流放大系数 β , 假设漏电流可忽略, 且流动的电荷是恒定的。

解: 根据式(3.2)和式(3.3), 且 $I_{CEO} = I_{CBO} = 0$, 得到

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_E - I_B}{I_E} = \frac{1.618 - 0.016}{1.618} \approx 0.99$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_E - I_B}{I_B} = \frac{1.618 - 0.016}{0.016} \approx 99.125$$

3.1.4 电气参数

晶体三极管电气规格参数通常包括多个直流和交流工作电气参数。下面以晶体三极管 2N3904 为例来介绍这些常用参数, 这些参数主要分为晶体三极管极限参数, 以及晶

体三极管工作在截止状态、放大状态和饱和状态时的电气参数,其中晶体三极管工作于放大状态时,小信号交流参数影响放大电路的交流特性。

1. 极限参数

极限参数主要表征晶体三极管安全使用的范围,主要包括以下参数。

(1) 集电极-发射极电压 U_{CEO} : 基极开路时,集电极与发射极之间所加电压 U_{CE} ,将导致集电结 J_{C} 反偏、发射结 J_{E} 正偏。当 U_{CE} 过大超过该电压时,由发射区扩散到基区的多数载流子增多,会使得集电极电流过大,晶体三极管发生击穿。例如,2N3904 的 U_{CEO} 最大为 40V,见表 3.2。

(2) 集电极-基极电压 U_{CBO} : 发射极开路时,集电结所能够承受的最大反向电压,超过该值,晶体三极管的集电结将被击穿。例如,2N3904 的 U_{CBO} 最大为 60V。

(3) 发射极-基极电压 U_{EBO} : 发射结在集电极开路条件下所能够承受的最大反向电压,超过该值,晶体三极管的发射结将被击穿。例如,2N3904 的 U_{EBO} 最大为 6.0V。通常情况下, $U_{\text{EBO}} \ll U_{\text{CBO}}$ 。

(4) 集电极最大允许电流 (I_{CM}): 在一定集电极电流范围内,晶体三极管的 β 值几乎不发生变化,但当集电极电流超过一定数值后,晶体三极管的 β 值发生明显下降,此时的电流定义为晶体三极管集电极所允许的最大电流 I_{CM} 。例如,2N3904 的额定电流 $I_{\text{C}} = 200\text{mA}$ 。

(5) 晶体三极管总功率耗散 P_{D} : 表示单个晶体三极管总共消耗的功率。当晶体三极管工作时,集电极电流 I_{C} 和集电极与发射极之间的电压 U_{CE} 均较大,所以晶体三极管总功率耗散近似等于 I_{C} 与 U_{CE} 的乘积。环境温度 $T_{\text{A}} = 25^{\circ}\text{C}$ 时,晶体三极管 2N3904 的极限总耗散功率 $P_{\text{D}} = 625\text{mW}$ 。

(6) 晶体三极管结温和存储温度范围 ($T_{\text{J}}, J_{\text{stg}}$): 表示晶体三极管安全工作的温度范围。例如,晶体三极管 2N3904 的结温和存储温度范围为 $-55 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

表 3.2 晶体三极管 2N3904 极限参数指标

参数名称	符号	参数值	单位
集电极-发射极电压	U_{CEO}	40	V
集电极-基极电压	U_{CBO}	60	V
发射极-基极电压	U_{EBO}	6.0	V
集电极最大允许电流(连续工作)	I_{CM}	200	mA
器件总耗散功率($T_{\text{A}} = 25^{\circ}\text{C}$)	P_{D}	625	mW
高于 25°C 时功率耗散随温度降低系数	r_{T}	5.0	mW/ $^{\circ}\text{C}$
结温和存储温度范围	$T_{\text{J}}, T_{\text{stg}}$	$-55 \sim 150$	$^{\circ}\text{C}$

2. 典型电气参数

表 3.3 给出了晶体三极管 2N3904 工作在截止状态、放大状态和饱和状态参数指标。

表 3.3 晶体三极管 2N3904 典型电气参数指标

指标	规格参数	符号	最小值	最大值	单位	
截止 状态 参数	集电极-发射极击穿电压	U_{CEO}	40	—	V	
	集电极-基极击穿电压	U_{CBO}	60	—	V	
	发射极-基极击穿电压	U_{EBO}	6.0	—	V	
	基极截止电流	I_{BL}	—	50	nA	
	集电极截止电流	I_{CEX}	—	50	nA	
放大 和饱 和状 态参 数	直流电 流增 益	$I_C = 0.1\text{mA}, U_{CE} = 1.0\text{V}$	h_{FE}	40	300	—
		$I_C = 1.0\text{mA}, U_{CE} = 1.0\text{V}$		70		
		$I_C = 10\text{mA}, U_{CE} = 1.0\text{V}$		100		
		$I_C = 50\text{mA}, U_{CE} = 1.0\text{V}$		60		
		$I_C = 100\text{mA}, U_{CE} = 1.0\text{V}$		30		
	集电极-发 射极饱 和电 压	$I_C = 10\text{mA}, I_B = 1.0\text{mA}$	U_{CE}	—	0.2	V
		$I_C = 50\text{mA}, I_B = 5.0\text{mA}$		—	0.3	
	基极-发 射极 饱 和电 压	$I_C = 10\text{mA}, I_B = 1.0\text{mA}$	U_{BE}	0.65	0.85	V
$I_C = 50\text{mA}, I_B = 5.0\text{mA}$		0.95				
小信 号参 数	电流增益带宽积 ($I_C = 10\text{mA}, U_{CE} = 20\text{V}, f = 100\text{MHz}$)	f_T	300	—	MHz	
	输出电容 ($U_{CB} = 5.0\text{V}, I_E = 0, f = 1.0\text{MHz}$)	C_{obo}	—	4.0	pF	
	输入电容 ($U_{EB} = 0.5\text{V}, I_C = 0, f = 1.0\text{MHz}$)	C_{ibo}	—	8.0	pF	
	输入阻抗 ($I_C = 1.0\text{mA}, U_{CE} = 10\text{V}, f = 1.0\text{kHz}$)	h_{ie}	1.0	10.0	k Ω	
	小信号电流增益 ($I_C = 1.0\text{mA}, U_{CE} = 10\text{V}, f = 1.0\text{kHz}$)	h_{fe}	100	400	—	
	输出电导 ($I_C = 1.0\text{mA}, U_{CE} = 10\text{V}, f = 1.0\text{kHz}$)	h_{oe}	1.0	40	μmhos	

注：1 μmhos =1000 μS 。

3.1.5 温度特性

晶体三极管内部物理结构中存在两个 pn 结,因此温度对它的影响是明显的。温度对晶体三极管性能的影响通常需要考虑以下三方面。

1. 温度对 U_{BE} 的影响

常温时,硅管的 $|U_{BE}| \approx 0.7\text{V}$,锗管的 $|U_{BE}| \approx 0.3\text{V}$ 。然而,当温度升高时,不管是硅管还是锗管,其 $|U_{BE}|$ 都会减小,温度系数为 $-2.5 \sim -2\text{mV}/^\circ\text{C}$,即温度每升高 1°C , $|U_{BE}|$ 都会减小 $2 \sim 2.5\text{mV}$ 。在输入特性曲线上,当温度升高时,输入特性曲线向左移。

2. 温度对 β 的影响

共射极放大系数 β 随温度升高而增大,变化规律为温度每升高 1°C , β 值增加 $0.5\% \sim 1\%$ 。在输出特性曲线上体现为当温度升高时,曲线之间的间隔将增大。

3. 温度对 I_{CBO} 的影响

集电极反向饱和电流 I_{CBO} 受少数载流子影响较大,而温度对掺杂半导体的影响主要表现在对少数载流子的影响,因此, I_{CBO} 随温度变化规律与二极管反向饱和电流随温度变化规律相似,即温度每升高 10°C , I_{CBO} 增大约 1 倍。

实际上,温度对 $|U_{BE}|$ 、 β 、 I_{CBO} 的影响常导致晶体三极管的集电极电流随温度的升高而增加。由于晶体三极管特性参数受温度影响较大,为了减小温度对电路性能的影响,在电路中需采取必要的措施来补偿或者消除温度带来的不利因素,这些电路技术将在后续章节中介绍。

3.2 晶体三极管直流偏置

晶体三极管内部 pn 结偏置在不同的状态下其工作状态是不同的,当晶体三极管用来放大信号时,应工作在放大状态,不能工作在开关状态,即饱和状态和截止状态。为使晶体三极管工作在放大状态,其内部发射结应正向偏置,集电结应反向偏置。本节将介绍晶体三极管的各种直流偏置电路。

3.2.1 基本电路结构

图 3.4 给出晶体三极管直流偏置的一种设置方式,即采用两个可调电源 V_{BB} 和 V_{CC} 直接对晶体三极管的发射结和集电结分别进行偏置,然而这种偏置方式对两个电源电压值有严格的要求。因此,需要增加一些电阻来设置晶体三极管的直流偏置,一种可行的方式如图 3.6 所示,电阻 R_B 、 R_C 和直流电源 V_{BB} 和 V_{CC} 一起对晶体三极管进行直流偏置。这个电路最大的缺点是需要两个直流电源,导致资源的浪费及电路成本的增加。实际上,选择 $V_{BB} = V_{CC}$ 的直流电源,以及合适的电阻 R_B 对发射结进行正偏,同样可以到达图 3.6 电路中对晶体三极管的偏置效果,这样,图 3.6 中的两个直流电源可合并成一个,如图 3.7(a) 所示。为了使电路更加简洁,常采用图 3.7(b) 的电路画法来表示晶体三极管的直流偏置情况。

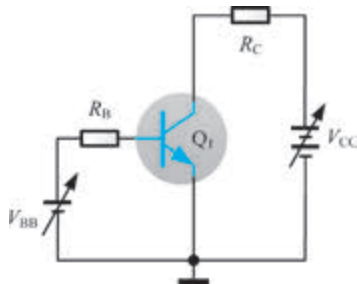


图 3.6 双电源和电阻直流偏置电路

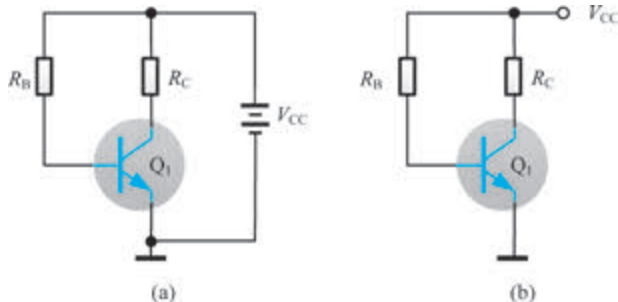


图 3.7 单电源直流偏置电路

下面对图 3.7(b) 电路进行分析。考虑到该电路仅有直流电源, 无交流信号, 故这种分析称为直流分析, 也称静态分析(由于电路中无交流信号, 电路中电流、电压均为直流量, 无变化, 故称静态)。静态分析常用的方法有图解法和估算法。

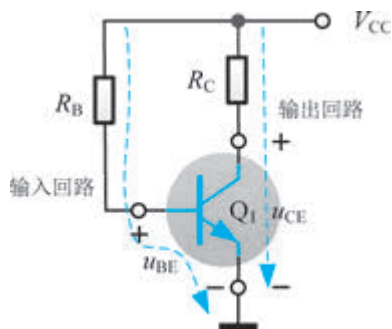


图 3.8 单电源直流偏置电路静态工作点分析示意图

1. 图解法

图解法是分析非线性电路最常见的一种方法。下面以图 3.7(b) 中电路为例介绍图解法分析放大电路的静态电压值和电流值。

图 3.8 给出了单电源直流偏置电路静态工作点分析的示意图。首先, 电源 V_{CC} 、电阻 R_B 、晶体三极管基极 B 和发射极 E 组成的回路, 称为输入回路, 如图 3.8 中左侧虚线路径所示。在输入回路中, 根据 KVL 可列写回路方程为

$$V_{CC} = i_B R_B + u_{BE} \quad (3.5)$$

式中: i_B 为晶体三极管基极电流; u_{BE} 为基极与发射极之间的电压。

由式(3.5)可得

$$i_B = \frac{V_{CC} - u_{BE}}{R_B} = \frac{V_{CC}}{R_B} - \frac{1}{R_B} u_{BE} \quad (3.6)$$

式(3.6)表明, i_B 与 u_{BE} 呈线性关系, 在直角坐标系中表现为一条直线, 其斜率为 $-1/R_B$, 该直线称为输入直流负载线; 同时, i_B 与 u_{BE} 还满足图 3.5(a) 所示的晶体三极管输入特性曲线。将式(3.6)所描述的输入直流负载线放入晶体三极管输入特性曲线的坐标系中, 其交点处电压值和电流值既满足式(3.6)所述直线方程, 也满足晶体三极管的输入特性曲线, 该交点 Q_i 称为静态工作点, 如图 3.9(a) 所示。 Q_i 点所对应的电流值和电压值即为基极的静态电流 I_{BQ} 和基极与发射极之间的静态电压 U_{BEQ} , 其中下标 Q 表示静态。需要说明的是, 这里假设了 $U_{CE} > 1V$, 晶体三极管工作于放大状态, 也就是输入特性曲线取最右侧曲线。

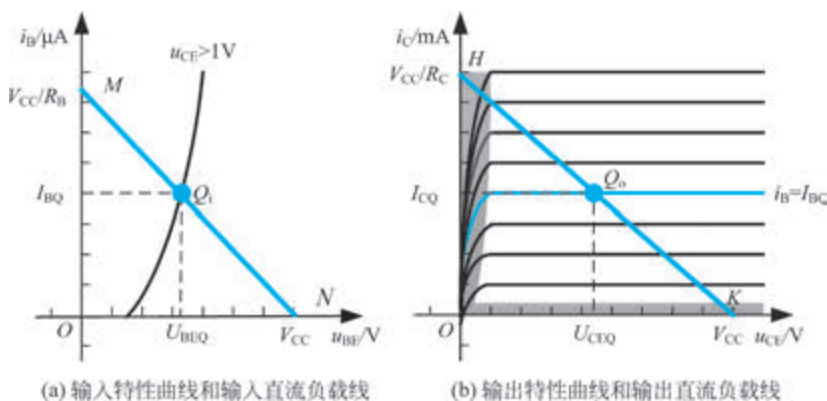


图 3.9 图解法求静态工作点

在图 3.8 中,电源 V_{CC} 、电阻 R_C 、晶体三极管集电极 C 和发射极 E 组成的回路,即图中右侧虚线路径,称为输出回路。在输出回路中,根据 KVL 可列写电压方程为

$$V_{CC} = i_C R_C + u_{CE} \quad (3.7)$$

同理,利用三极管的输出特性曲线以及式(3.7)所描述的直线方程可获得集电极静态电流 I_{CQ} 和集电极与发射极之间的静态电压 U_{CEQ} ,如图 3.9(b)所示。其中直线 HK 为式(3.7)所描述的直线,其斜率为 $-1/R_C$,该直线称为输出直流负载线。需要注意的是,静态工作点必须是直线 HK 与 I_{BQ} 所对应的输出特性曲线(图 3.9(b)中蓝色曲线)的交点,如图 3.9 所示的 Q_0 点。

总之,利用输入直流负载线和晶体三极管输入特性曲线、输出直流负载线和晶体三极管输出特性曲线,通过作图方式可以得到晶体三极管的静态工作点。

2. 估算法

考虑到晶体三极管基极与发射极之间内部为 pn 结,且 pn 结的导通压降近似为一个常数,我们猜想,在导通情况下,晶体三极管基极与发射极之间导通压降也近似为常数。实际上,经过大量测试发现,硅晶体三极管导通压降 u_{BE} 为 $0.6 \sim 0.7V$,锗晶体三极管 u_{BE} 为 $0.2 \sim 0.3V$,基于这样的特点,在计算晶体三极管的静态工作点时,完全可以认为 $u_{BE} \approx U_{BEQ}$,并代入式(3.5),得基极电流为

$$I_{BQ} \approx \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \quad (3.8)$$

常温时,硅管 U_{BEQ} 近似计算取 $0.7V$,锗管 U_{BEQ} 近似计算取 $0.3V$ 。

为了求出集电极静态电流,假设晶体三极管在外部偏置条件下工作于放大状态,根据晶体三极管各电极之间电流关系,其集电极静态电流为

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = \beta \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \quad (3.9)$$

集电极与发射极之间静态电压为

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C \quad (3.10)$$

为了满足前面假设晶体三极管工作于放大状态的条件,要求 $U_{CEQ} > 1V$ 。若 $U_{CEQ} < 1V$,则表明晶体三极管不满足前面的假设条件,式(3.9)将失效。此时,晶体三极管应工作于饱和状态,则集电极静态电流可用下式进行估算,即

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_C} \quad (3.11)$$

式中: U_{CES} 为饱和条件下晶体三极管集电极与发射极之间的饱和压降,硅晶体三极管典型值为 $0.1 \sim 0.3V$,计算时常取 $0.3V$; I_{CS} 为饱和电流。

晶体三极管静态工作点的图解法和估算法的优缺点:

图解法能够直观地观察到晶体三极管的静态工作点位于输入和输出特性曲线中的位置,尽管可以获得比较准确的解,然而作图过程烦琐,作图过程中的误差实际影响了静态工作点的精确度。此外,作图法需要已知晶体三极管的伏安特性曲线,这显然影响电路分析的效率,期望快速获得晶体三极管的静态工作点是不现实的。

估算法可快速获得晶体三极管的静态工作点,并能判断其工作状态,在实际电路分析中使用极为方便。但该分析方法得到的解存在误差,通常情况下其误差小于5%,作为手工理论计算方法,该误差是可以忽略的,若需要进一步提高电路分析的精度,则需要借助EDA仿真工具。注意,估算法在计算集电极电流时,存在假设条件,在计算分析完成后,需要对假设条件进行验证,否则,得到的结果可能是无效的。

总之,估算法在电路设计和分析中较为常用,图解法对于读者理解静态工作点概念是有帮助的,采用哪种方法分析电路需要根据实际要求来确定。

【例题 3-2-1】 试计算图 3.7(b)所示电路中晶体三极管的静态工作点,假设三极管为硅管,并确定晶体三极管工作状态。已知电路中各元件和电压参数分别为 $R_B = 680\text{k}\Omega$, $R_C = 3.3\text{k}\Omega$, $V_{CC} = 12\text{V}$, 其中,晶体三极管的共射极电流放大倍数 $\beta = 100$ 。

解: 根据式(3.8)可得

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \approx \frac{12\text{V} - 0.7\text{V}}{680 \times 10^3 \Omega} \approx 16.6 \mu\text{A}$$

假设图中晶体三极管工作于放大状态,则集电极电流为

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx 1.66\text{mA}$$

则集电极与发射极之间的电压为

$$U_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ} = 12\text{V} - 3.3 \times 10^3 \Omega \times 1.66 \times 10^{-3} \text{A} \approx 6.52\text{V}$$

显然, $U_{CEQ} = 6.52\text{V}$ 可以使图中晶体三极管的集电结反偏,晶体三极管工作于放大区。上述假设合理,计算结果有效。



直流偏置
电路的改进

3.2.2 直流偏置电路的改进

尽管图 3.7(b)所示的晶体三极管工作点偏置电路能够使其工作在放大状态,但从静态工作点的分析过程中发现,静态工作点的直流电压和电流与晶体三极管的参数密切相关,比如集电极电流与晶体三极管的 β 值有直接关系,与基极、发射极之间导通压降 U_{BE} 存在间接关系。然而, β 和 U_{BE} 与温度密切相关,当电路所处环境温度发生变化,或者晶体三极管自身因电流过大而发热时,静态工作点将发生变化,如果温度变化范围较大,静态工作点甚至会进入截止区或者饱和区,严重影响电路的工作状态。因此,减小温度对电路中晶体三极管静态工作点的影响是晶体三极管直流偏置电路需要重点关注的。那么,如何降低晶体三极管的静态工作点对温度的敏感性?这就需要研究晶体三极管静态工作点稳定方法。图 3.10 给出了单电源直流偏置电路的改进电路。

首先,为了减小晶体三极管静态工作点受 β 的影响,可尝试在晶体三极管的发射极增加电阻 R_E ,如图 3.10(a)所示。在输入回路中,根据 KVL 可得

$$V_{CC} = I_{BQ} R_B + U_{BEQ} + I_{EQ} R_E \quad (3.12)$$

假设晶体三极管工作在放大状态,则 $I_{EQ} = (1 + \beta) I_{BQ}$ 。因此,由式(3.12)可得

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta) R_E} \quad (3.13)$$

集电极电流为

$$I_{CQ} = \beta \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)R_E} \quad (3.14)$$

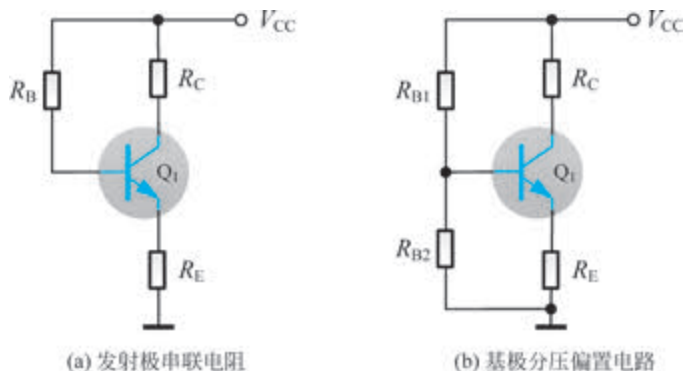


图 3.10 单电源直流偏置电路的改进

式(3.14)与式(3.9)对比,其分母中出现了 $(1 + \beta)R_E$,即分母和分子同时出现了与晶体三极管相关的参数 β ,因此,集电极电流受 β 值的影响减弱,一定程度上提高了静态工作点稳定性。然而,从式(3.14)中可以观察到,集电极电流受 β 的影响没有完全消除,为进一步减小 β 对静态工作点的影响,可以在晶体三极管的基极与地之间增加一个电阻,如图3.10(b)所示。为了简化分析,先假设在该偏置电路中,电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 的阻值不太高(典型值为几十千欧),电阻 R_{B1} 流过的电流 I_{RB1} 远大于晶体三极管的基极电流(典型值为几十微安),因此,基极电流 I_{BQ} 可忽略。在电路3.10(b)中,晶体三极管基极电位 U_B 近似由电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 分压决定,表示为

$$U_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad (3.15)$$

且有

$$I_{CQ} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{EQ} = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} \quad (3.16)$$

考虑到小信号晶体三极管的 β 通常较大,故图3.10(b)中晶体三极管集电极电流为

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} \quad (3.17)$$

将式(3.15)代入式(3.17)可得

$$I_{CQ} \approx \frac{\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} - U_{BEQ}}{R_E} \quad (3.18)$$

从式(3.18)中可以看出,晶体三极管集电极电流 I_{CQ} 与 β 相关性进一步减弱, β 对集电极电流的影响可以忽略不计。故集电极与发射极之间静态电压为

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}R_E \quad (3.19)$$

由于 $I_{EQ} \approx I_{CQ}$,式(3.19)可近似表示为

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) \quad (3.20)$$

从式(3.20)可知,晶体三极管集电极电流 I_{CQ} 的稳定有利于其静态工作点的稳定。

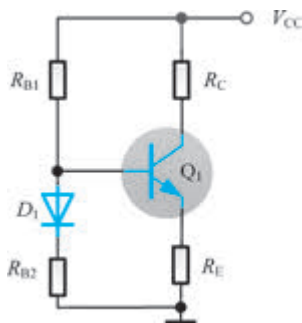


图 3.11 单电源直流偏置
温度补偿电路

直观上来看,通过对电路图 3.7(b)增加两个电阻,低成本地解决了晶体三极管集电极电流受 β 的影响大的问题。此外,从式(3.17)可以看到,晶体三极管集电极静态电流 I_{CQ} 还受到晶体三极管导通压降 U_{BEQ} 的影响, U_{BEQ} 对温度也非常敏感。为抑制温度通过 U_{BEQ} 影响晶体三极管的静态工作点,可以在电路中增加二极管来补偿 U_{BEQ} 的负温度系数,如图 3.11 所示。

仍然忽略晶体三极管的基极电流,基极电位可表示为

$$U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}(V_{CC} - U_{D1}) + U_{D1} \quad (3.21)$$

式中: U_{D1} 为二极管 D_1 的导通压降。

故集电极电流和发射极电流可近似为

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \frac{V_{CC} - U_{D1}}{R_E} + \frac{U_{D1} - U_{BEQ}}{R_E} \quad (3.22)$$

通常,二极管的导通压降 U_{D1} 与晶体三极管的 U_{BEQ} 近似相等,即 $U_{D1} \approx U_{BEQ}$ 。因此,式(3.22)可近似为

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \frac{V_{CC} - U_{D1}}{R_E} \quad (3.23)$$

式(3.23)中,通常情况下 $V_{CC} \gg U_{D1}$,故式(3.23)可以近似为

$$I_{CQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \frac{V_{CC}}{R_E} \quad (3.24)$$

因此,晶体三极管的集电极电流受 U_{BEQ} 的影响将被大大减弱。综上所述,图 3.11 所示放大电路的静态工作点受温度的影响可以忽略不计。

实际上,晶体三极管长期使用后其参数会发生变化(称为“老化”),也会影响放大电路静态工作点的稳定性;但“老化”过程比较缓慢,不是影响静态工作点的主要因素。在设计电路时,常将温度变化视为影响放大电路静态工作点稳定性的主要因素。

【例题 3-2-2】 试计算图 3.10(b)电路中的静态工作点,图中晶体三极管为硅管。电路中, $R_{B1} = 47\text{k}\Omega$, $R_{B2} = 15\text{k}\Omega$, $R_E = 2.2\text{k}\Omega$, $R_C = 3.3\text{k}\Omega$, $R_L = 1.5\text{k}\Omega$, $V_{CC} = 12\text{V}$, 晶体三极管的共射极电流放大系数 $\beta = 100$ 。

解法一: 将图 3.5(b)电路重画于图 3.12,在图中晶体三极管的基极 B 处,根据 KCL 有

$$I_B = I_1 - I_2$$

式中

$$I_1 = \frac{V_{CC} - U_B}{R_{B1}}$$

$$I_2 = \frac{U_B}{R_{B2}}$$

$$I_B = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} / (1 + \beta)$$

将上述三个电流表达式代入第一个等式,可解出 $U_B \approx 2.8\text{V}$ 。

因此,发射极电流为

$$I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} = \frac{2.8\text{V} - 0.7\text{V}}{2.2\text{k}\Omega} \approx 0.95\text{mA}$$

集电极电流为

$$I_{CQ} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{EQ} = \frac{100}{1 + 100} \times 0.95\text{mA} \approx 0.94\text{mA}$$

故

$$U_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ} - R_E I_{EQ} = 12\text{V} - 2.2\text{k}\Omega \times 0.95\text{mA} - 3.3\text{k}\Omega \times 0.94\text{mA} \\ \approx 6.81\text{V}$$

解法二(估算法): 在图 3.12 中,通常存在 $I_B \ll I_1$ (留给读者去验证),故基极电流可忽略不计。基极电位近似为

$$U_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{15\text{k}\Omega}{47\text{k}\Omega + 15\text{k}\Omega} \times 12\text{V} \approx 2.9\text{V}$$

发射极电流近似为

$$I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} = \frac{2.9\text{V} - 0.7\text{V}}{2.2\text{k}\Omega} = 1.0\text{mA}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = 1.0\text{mA}$$

故

$$U_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ} - R_E I_{EQ} = 12\text{V} - (2.2\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega) \times 1.0\text{mA} = 6.5\text{V}$$

对比采用上述两种方法获得的静态工作点的计算结果可以看到,发射极电流 I_{EQ} 误差为

$$\frac{1.0 - 0.95}{0.95} \times 100\% \approx 5.26\%$$

集电极与发射极电压 U_{CEQ} 的误差为

$$\frac{6.5 - 6.81}{6.81} \times 100\% \approx -4.6\%$$

误差均小于 10%,采用估算法获得的计算结果是满足精度要求的。通常情况下,对于电源电压大于 10V、晶体三极管 $\beta > 60$ 、分压电阻之和小于 100k Ω 的电路,往往采用估算法,可简化计算过程。

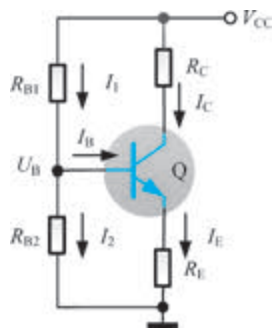


图 3.12 直流偏置电路静态工作点分析电路

3.3 晶体三极管放大电路

晶体三极管工作在放大状态时,可以作为放大器件使用。也就是说,如果将一个小幅度的正弦波信号 u_S 连接到晶体三极管的输入端,那么在其输出端可以获得幅度被放大的正弦波信号 u_O ,即输出信号的幅度大于输入信号的幅度。此外,在晶体三极管放大电路中,除了加入了交流信号,电路还需要与外部直流电源 V_{CC} 进行连接,直流电源除了为电路中的晶体三极管提供合适的工作点(让晶体三极管工作于放大状态)外,还可以为外部负载提供交流能量。换句话说,晶体三极管放大的输出功率来自直流电源 V_{CC} ,晶体三极管的作用是将外部直流电能转换为交流电能。图 3.13 给出了晶体三极管放大电路框图。

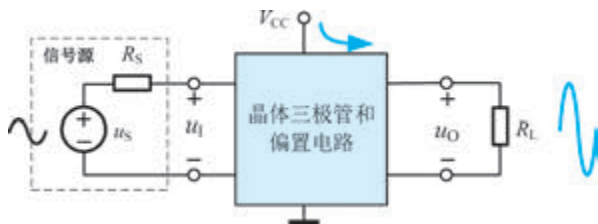


图 3.13 晶体三极管放大电路框图

3.3.1 晶体三极管放大电路的三种基本接法

根据输入信号和负载与晶体三极管三个电极的连接方式,晶体三极管可构造共射极(Common Emitter, CE)放大电路、共集极(Common Collector, CC)放大电路和共基极(Common Base, CB)放大电路三种基本放大电路类型,其典型电路结构如图 3.14 所示。其中,输入信号和负载与放大电路连接方式分别采用电容耦合,这种连接方式的优点是隔离了彼此之间的直流电;为了把耦合电容(图中 C_1 和 C_2)对交流信号的影响降到最低,通常采用较大容值的电解电容(典型值为微法量级)以减小容抗;此外,为减小共射极放大电路中 R_E 对交流信号的影响,在电路中放置电容 C_E ,这样做可降低晶体三极管发射极到地之间的交流阻抗,通常称 C_E 为旁路电容,如图 3.14(a)所示;同理,在图 3.14(c)中,电容 C_B 具有相同的作用。

图 3.14(a)中,输入信号通过耦合电容 C_1 从晶体三极管的基极进入,从其集电极输出并通过耦合电容 C_2 连接到负载电阻 R_L 上,该电路称为共射极放大电路,简称 CE 放大电路。

图 3.14(b)中,输入信号通过耦合电容 C_1 从晶体三极管的基极进入,从其发射极输出并通过耦合电容 C_2 连接至负载电阻 R_L 上,该电路称为共集极放大电路,简称 CC 放大电路。

图 3.14(c)中,输入信号通过耦合电容 C_1 从晶体三极管的发射极进入,从其集电极输出并通过耦合电容 C_2 连接到负载电阻 R_L 上,称该电路为共基极放大电路,简称 CB 放大电路。

注意,在图 3.14 中,考虑到电解电容具有极性,阳极(标识“+”端)应连接高电位,阴极连接低电位,不能接反,否则会损坏电解电容。

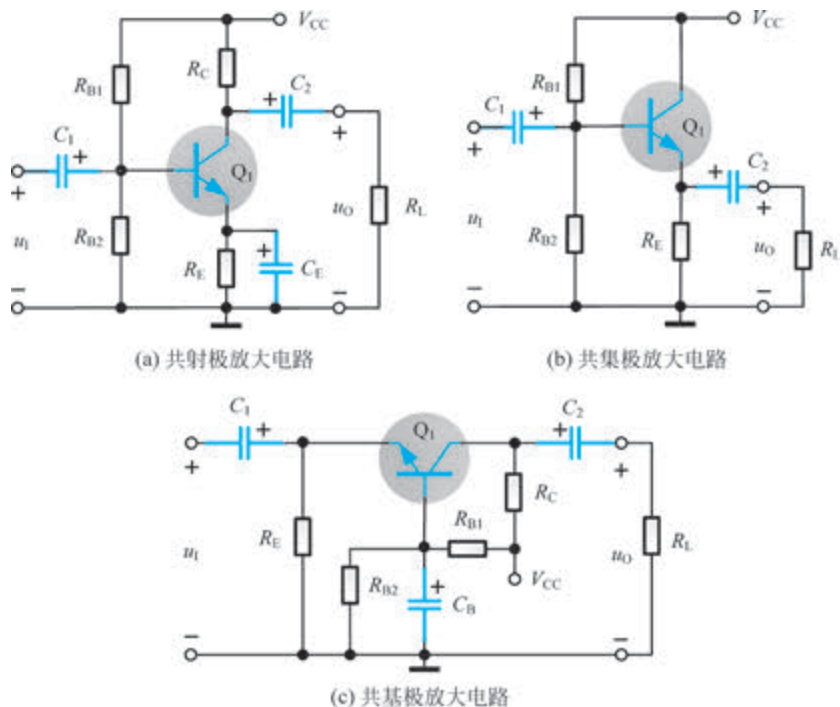


图 3.14 晶体三极管构成放大电路的三种基本接法

3.3.2 共射极放大电路动态分析

在放大电路中,当输入信号 $u_1 \neq 0$ 时,晶体三极管各电极的电流和电极之间的电压将在静态值的基础上,叠加交流分量,放大电路处于动态工作状态。本节的电路分析将突出放大电路中信号的变化,通常称为放大电路的动态分析。由于晶体三极管工作在放大状态下才能正常放大交流信号,因此,放大电路的动态分析是在静态分析的基础上,确保晶体三极管工作在放大状态下,再分析放大电路中各节点处电流和电压的交流分量之间的关系。放大电路的动态分析通常采用图解法和等效电路法。为简单起见,下面将以图 3.15 所示共射极放大电路为例介绍放大电路的动态分析方法。

1. 图解法

为了直观地观察到放大电路中各节点处的波形变化,将采用图解法对共射极放大电路进行动态分析。图解法是利用放大电路的输入、输出特性曲线通过作图的方式来表示电路中的波形

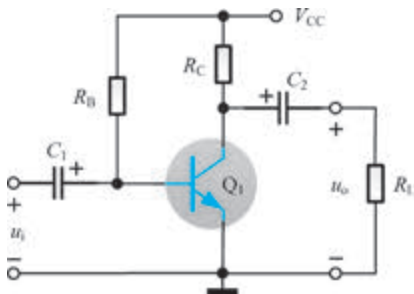


图 3.15 共射极放大电路

变化。动态分析时,输入信号通常采用正弦波电压信号,即 $u_i = U_{im} \sin \omega t$, 并假设信号频率较高,图 3.15 中耦合电容的容抗均可忽略不计,在动态分析时,耦合电容对交流信号可视为短路。例如,输入正弦波频率 $f_i = 1\text{kHz}$, 耦合电容 C_1 和 C_2 均为 $10\mu\text{F}$, 其容抗约 16Ω , 该容抗较小,上述假设是合理的。

首先,为了简化分析,假设放大电路负载开路,即 $R_L \rightarrow \infty$; 然后,对负载电阻 $R_L \neq \infty$ 的情况进行作图分析。

1) 负载 $R_L \rightarrow \infty$, 即负载开路

图 3.16 给出当负载开路时,晶体三极管 Q_1 各电极电压和电流的示意图。输入信号 $u_i = U_{im} \sin \omega t$, C_1 的容抗忽略不计, Q_1 的基极与发射极之间电压 u_{BE} 在静态工作点 U_{BEQ} 的基础上叠加了输入的正弦信号 u_i , 即 $u_{BE} = U_{BEQ} + u_i$ 。 u_{BE} 的变化势必引起晶体三极管的基极电流在 I_{BQ} 附近变化。在晶体三极管输入特性曲线的静态工作点附近,特性曲线近似满足线性条件(图解法分析时,可视为线性),因此,基极与发射极之间电压 u_{BE} 发生小幅度变化时,基极交流电流 i_b 的变化规律与交流输入电压 u_i 的变化规律相似。随着 u_{BE} 瞬时值的改变,基极电流沿晶体三极管的输入特性曲线以静态工作点为中心上下移动,图像上表现为在 I_{BQ} 的基础上叠加交流分量 i_b , 即 $i_B = I_{BQ} + i_b$, 如图 3.17(a) 所示。晶体三极管工作于放大状态,且假定 β 恒定,集电极电流交流分量 i_c 与基极电流交流分量 i_b 具有线性关系,即 $i_c = \beta i_b$ 。

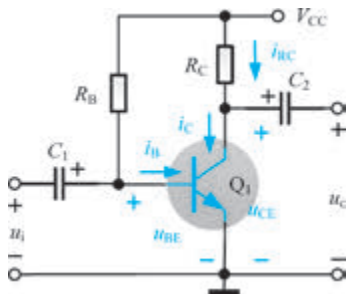


图 3.16 负载电阻 $R_L \rightarrow \infty$, 放大电路中各电极电压与电流示意图

在图 3.16 所示电路中,负载开路条件下,电阻 R_C 上的电流 i_{RC} 与集电极电流 i_c 相等,且集电极电流 $i_c = I_{CQ} + i_c$ 。动态时,工作点将在 i_c 与 u_{CE} 平面上的静态工作点 Q 附近移动。在图 3.16 中,晶体三极管集电极与发射极之间电压可表示为

$$u_{CE} = V_{CC} - R_C i_c \quad (3.25)$$

实际上,工作点的移动轨迹是沿着式(3.25)确定的直线,这条直线称为负载开路时的交流负载线,交流负载线过静态工作点,并交横坐标于 K 点,其坐标为 $(V_{CC}, 0)$ 。集电极电流变化时,集电极与发射极之间电压 u_{CE} 波形变化如图 3.17(b) 所示。从图中可以看到,当集电极电流中的交流分量从静态工作点处增加时, u_{CE} 中的交流分量减小; 当集电极电流中的交流分量从静态工作点处减小时, u_{CE} 中的交流分量增加; 由于耦合电容 C_2 的存在,输出电压 u_o 等于 u_{CE} 中的交流分量 u_{ce} 。通过作图,可得图 3.16 所示共射极放大电路的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_{om}}{U_{im}} \quad (3.26)$$

式中： u_i 和 u_o 分别为输入电压和输出电压交流瞬时值； U_i 和 U_o 分别为输入电压和输出电压交流有效值； U_{im} 和 U_{om} 分别为输入电压和输出电压交流幅值。

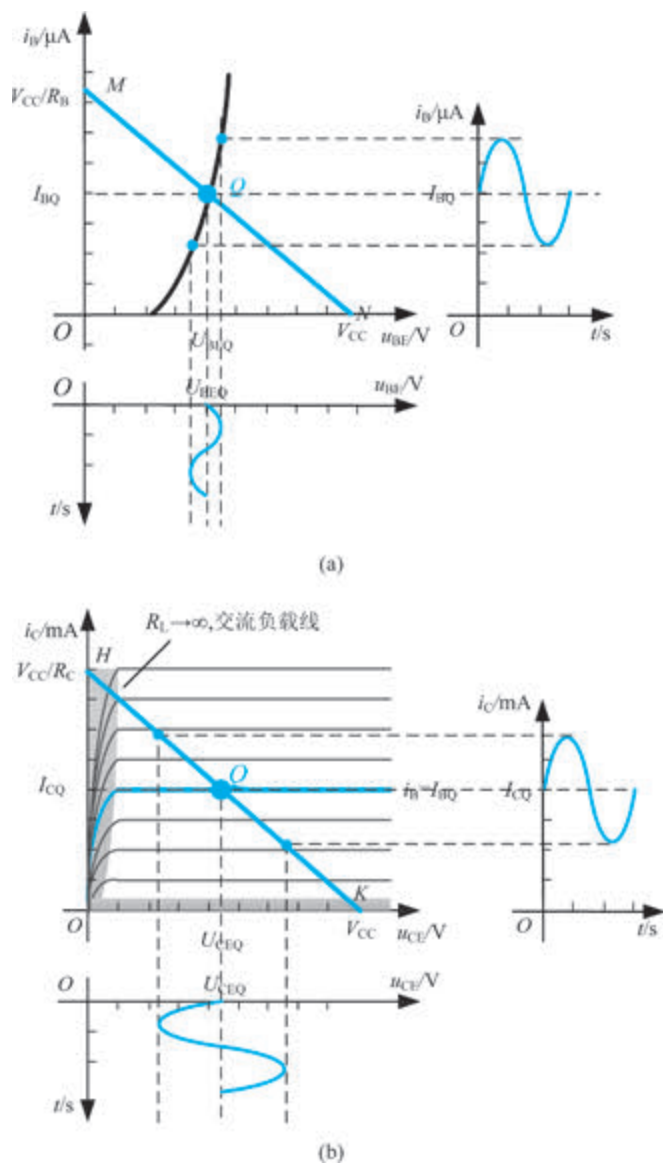


图 3.17 共射极放大电路 $R_L \rightarrow \infty$ 时,图解法动态分析

从图 3.17 可知,共射极放大电路输入电压 u_i 与输出电压 u_o 相位相反,即输入正弦电压信号 u_i 为正半周时,输出电压 u_o 为负半周;输入正弦电压信号 u_i 为负半周时,输出电压 u_o 为正半周,如图 3.18 所示。

下面讨论几种特殊情况下输入和输出波形关系:

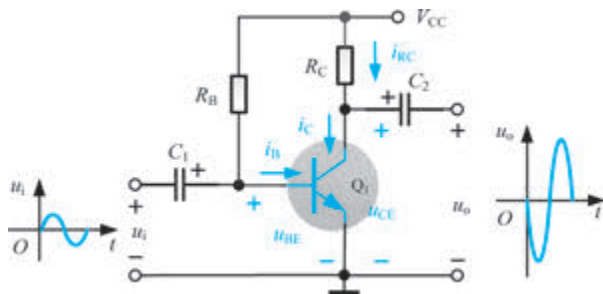


图 3.18 负载电阻 $R_L \rightarrow \infty$, 放大电路输出电压与输入电压之间相位关系



共射放大电路输出电压的失真分析

(1) 输入电压信号 u_i 幅度过大。在输入特性曲线上, 输入信号过大, 会导致基极电流与输入电压的非线性增加, 甚至 u_{BE} 过低, 进入死区; 在输出特性曲线上, 输入信号过大, 基极电流幅度增加导致集电极电流的幅度也大幅增加, 输出电压会进入饱和区和截止区, 产生饱和失真和截止失真, 如图 3.19(a) 所示。

(2) 静态工作点设置过高。当输出特性曲线上 Q 点位置过高, 输出电压交流分量的负半周进入饱和区, 产生饱和失真, 如图 3.19(b) 所示。

(3) 静态工作点设置过低。当输出特性曲线上 Q 点位置过低, 输出电压交流分量的正半周进入截止区, 产生截止失真, 如图 3.19(c) 所示。

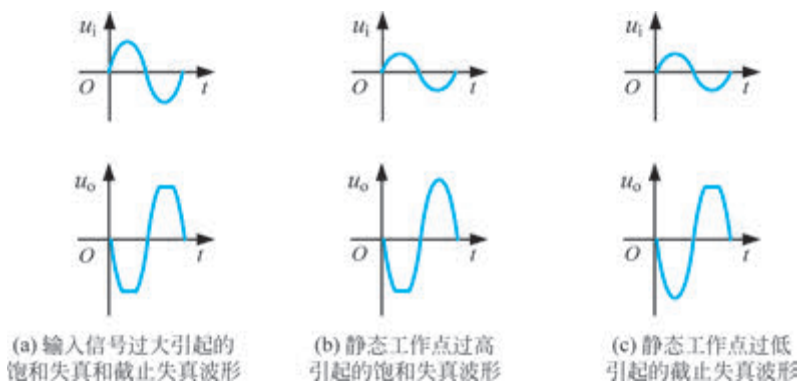


图 3.19 共射极放大电路输出 u_o 波形失真现象

通常情况下, 对于放大电路来讲, 输出电压的动态范围是一个非常重要的参数。根据第 2 章对输出电压动态范围的定义, 考虑到正弦波信号具有对称性, 故静态工作点的位置对输出电压动态范围的影响非常大。负载开路条件下, 在图 3.16 中, 共射极放大电路正半周最大输出电压的幅度为 $V_{CC} - U_{CEQ}$, 负半周最大的幅度为 $U_{CEQ} - U_{CES}$, 其中 U_{CES} 为三极管的饱和压降。假设, 图中三极管的静态工作点 U_{CEQ} 设置在 $V_{CC} + U_{CES}$ 电压的一半, 那么, 放大电路的输出动态范围 $U_{opp} = V_{CC} - U_{CES}$; 如果静态工作点偏离上述值, 输出电压动态范围就由 $V_{CC} - U_{CEQ}$ 和 $U_{CEQ} - U_{CES}$ 中最小值决定, 即 $U_{opp} = 2 \times \min(V_{CC} - U_{CEQ}, U_{CEQ} - U_{CES})$ 。



共射放大电路输出电压的动态范围

2) 负载电阻 $R_L \neq \infty$, 即输出端连接负载电阻

图 3.20 给出了负载电阻 $R_L \neq \infty$ 的共射极放大电路。首先, 由于输出耦合电容的存

在,负载电阻 R_L 上无直流分量,因此,放大电路的静态工作点不受负载电阻 R_L 的影响,静态工作点在输入输出特性曲线上的位置与 $R_L \rightarrow \infty$ 时的静态工作点位置相同。当输入信号 $u_i = U_{im} \sin \omega t$ 时,同理,输入耦合电容和输出耦合电容的容抗忽略不计,交流信号叠加在静态工作点上,不同的是在输出端由于输出耦合电容和负载电阻 R_L 的存在,负载电阻上将存在交流电流 i_o 分量,如图 3.20 所示。

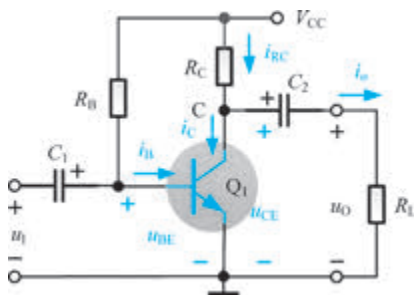


图 3.20 负载电阻 $R_L \neq \infty$, 共射极放大电路集电极处电流示意图

在输入特性曲线上,基极电流与输入电压之间的关系与上述放大电路无负载电阻 R_L 时一样,如图 3.21(a)所示。在图 3.20 中,晶体三极管的集电极与发射极之间的电压表示为

$$u_{CE} = V_{CC} - R_C i_{RC} \quad (3.27)$$

在 Q_1 的集电极 C 处,利用 KCL 可得

$$i_{RC} = i_C + i_o = I_{CQ} + i_c + i_o \quad (3.28)$$

$$i_o = \frac{u_o}{R_L} = \frac{u_{ce}}{R_L} \quad (3.29)$$

因此,式(3.27)可重写为

$$u_{CE} = V_{CC} - R_C I_{CQ} - R_C \left(i_c + \frac{u_{ce}}{R_L} \right) \quad (3.30)$$

式(3.30)中,令 $U_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ}$,则集电极与发射极之间电压 u_{CE} 的交流分量可表示为

$$u_{ce} = -R_C \left(i_c + \frac{u_{ce}}{R_L} \right) \quad (3.31)$$

由式(3.31)可得

$$u_{ce} = -R_C // R_L i_c \quad (3.32)$$

因此

$$u_{CE} = V_{CC} - R_C I_{CQ} - R_C // R_L i_c \quad (3.33)$$

$$u_{CE} = V_{CC} - R_C I_{CQ} + R_C // R_L I_{CQ} - R_C // R_L I_{CQ} - R_C // R_L i_c \quad (3.34)$$

定义

$$\begin{aligned} V'_{CC} &= V_{CC} - R_C I_{CQ} + R_C // R_L I_{CQ} \\ &= U_{CEQ} + I_{CQ} R_C // R_L \end{aligned} \quad (3.35)$$

则式(3.34)可重写为

$$u_{CE} = V'_{CC} - R_C // R_L (I_{CQ} + i_c) = V'_{CC} - R_C // R_L i_c \quad (3.36)$$

式(3.36)表示放大电路接入负载电阻时, u_{CE} 与集电极电流 i_C 之间的关系。由式(3.36)可知, 该直线斜率为 $-1/(R_C//R_L)$, 且与输出特性曲线横坐标交于 $U_{CEQ} + I_{CQ}(R_C//R_L)$ (图 3.21(b)中表示为 K' 点); 同时, 该直线仍然经过静态工作点 Q , 如图 3.21(b)所示。

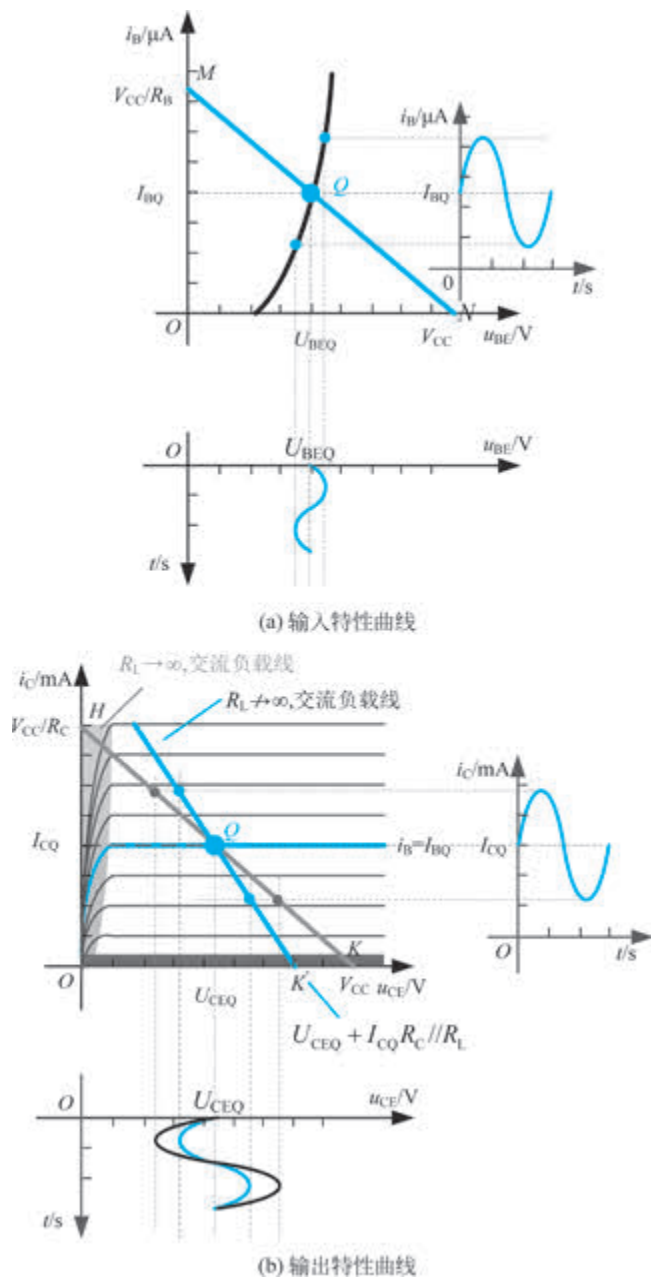


图 3.21 共射极放大电路 $R_L \neq \infty$ 时, 图解法动态分析

当放大电路输入端输入交流电压信号 u_i 后, 工作点将沿交流负载线 (QK') 在静态工作点 Q 附近上下变化。由图 3.21(b) 可以看到, 输出电压 u_o 与输入电压 u_i 相位仍然相

反；需要特别强调的是，如果输入电压 u_i 的幅度相同，与负载电阻 $R_L \rightarrow \infty$ 相比，负载电阻 $R_L \neq \infty$ 时，其输出电压幅度减小，可以理解为有负载 R_L 时，交流负载线的斜率更陡，当然也可视为负载电阻值减小，导致输出电压降低。当负载电阻 $R_L \neq \infty$ 时，其输出电压动态范围由 $U_{CEQ} - U_{CES}$ 和 $I_{CQ}(R_C // R_L)$ 的大小来决定，通常，动态范围 $U_{opp} = 2 \times \min(U_{CEQ} - U_{CES}, I_{CQ}(R_C // R_L))$ 。

2. 等效电路法

等效电路法的核心是将放大电路中的晶体三极管模型化。实际上，晶体三极管工作在不同的状态下等效电路模型是不同的。我们主要关注晶体三极管工作在放大状态下的模型，三极管常见的模型是混合 π 模型，为了简化分析，采用 r_e 模型。对于共射极结构来讲，假设晶体三极管的输入端口电压为交流小信号 u_{be} ，输入电流为 i_b ，如图 3.22(a) 所示。考虑到晶体三极管的输入端基极和发射极之间本质上是一个正偏的 pn 结，发射极输出电流为 i_c ，在发射结正偏条件下，晶体三极管的输入端可简化为正偏的二极管；此外，为了建立输出特性，需要在这个网络中增加集电极电流源，如图 3.22(b) 所示，根据前面讨论可知，增加的集电极电流源为基极电流控制的电流源，即 $i_c = \beta i_b$ 。图 3.22(b) 所示电路网络中输入端和输出端存在直接的联系，因此使用极不方便，可以利用其等效阻抗来代替图 3.22(b) 中的二极管，二极管的小信号等效阻抗 $r_d = U_T / I_D$ ，因此，在这里使用 $r_e = U_T / I_{EQ}$ 来表示发射结的小信号等效阻抗，如图 3.22(c) 所示。

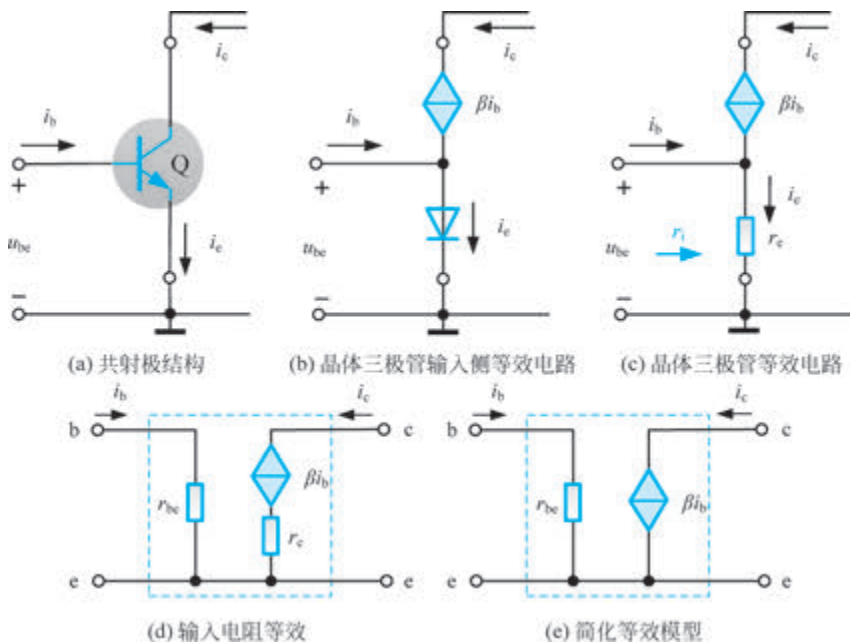


图 3.22 晶体三极管小信号等效模型

根据晶体三极管小信号输入电阻的定义可得

$$r_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_{be}}{i_b} = r_{be} \quad (3.37)$$

由于

$$u_{be} = i_e r_e = (1 + \beta) i_b r_e \quad (3.38)$$

故

$$r_{be} = (1 + \beta) r_e = (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} \approx \beta r_e \quad (3.39)$$

考虑到晶体三极管的基区掺杂浓度较低,基区体电阻不能忽略不计,若计入基区体电阻 $r_{bb'}$,式(3.39)可修正为

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} \quad (3.40)$$

其中: $r_{bb'}$ 典型值为 $200 \sim 300 \Omega$ 。因此,从晶体三极管的基极看进去的小信号等效阻抗为 r_{be} ,如图 3.22(d)所示,集电极电流 i_c 仍然等于基极电流 i_b 的 β 倍。在该等效电路中发现晶体三极管的输入端和输出端没有连接关系,但存在电流控制关系。在图 3.22(d)中,由于 r_e 与受控电流源串联,且 r_e 较小,因此 r_e 可省略,图 3.22(d)的电路模型进一步可简化为图 3.22(e)所示简化模型。在电路分析中,图 3.22(e)的简化模型使用非常方便。

上面获得了晶体三极管小信号等效模型,下面将利用该模型对共射极放大电路进行动态分析,并计算其交流参数,这些交流参数主要包括放大电路的电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

为了对图 3.15 共射极放大电路进行小信号交流分析,假设放大电路中晶体三极管工作在放大区,该器件可视为线性器件,因此,图 3.15 的共射极放大电路可视为线性电路。根据叠加定理,在进行交流分析时可将电路中的直流电源置零,仅考虑交流信号输入,因此,在图 3.15 中可将直流电源 V_{CC} 置零以简化交流参数的分析;此外,对交流信号来讲,电路中的耦合电容可视为短路,如图 3.23(a)所示;将图 3.23(a)进一步简化,可以得到图 3.23(b)的交流通路。将图 3.23(b)中 Q_1 利用图 3.22(e)所示晶体三极管小信号简化等效模型替换,并得到共射极放大电路小信号交流等效电路图,如图 3.24 所示。

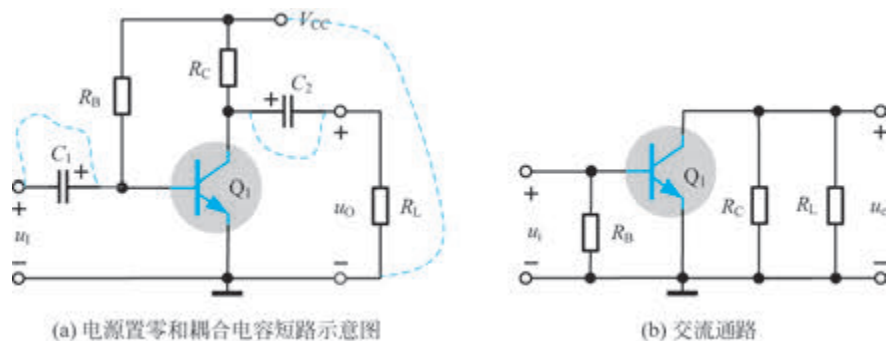


图 3.23 共射极放大电路交流通路

1) 电压放大倍数

根据电压放大倍数的定义,利用图 3.24 的等效电路,共射极放大电路电压放大倍数可表示为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R_C // R_L}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}} \quad (3.41)$$

式中: \dot{U}_i 和 \dot{U}_o 分别为正弦输入电压 u_i 与输出电压 u_o 的相量; 负号“ $-$ ”表示共射极放大电路输出电压 u_o 与输入电压 u_i 相位相反,该相位关系与图解法得到的结果一致。

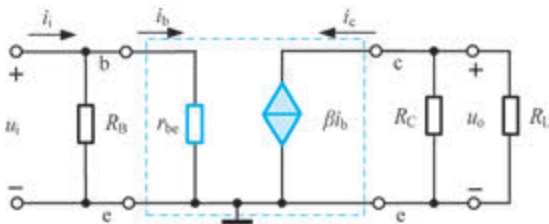


图 3.24 共射极放大电路小信号交流等效电路图

2) 输入电阻

输入电阻为从放大电路输入端看进去的等效电阻。根据图 3.24 所示的等效电路,共射极放大电路输入电阻可表示为

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{\frac{U_i}{R_B} + \frac{U_i}{r_{be}}} = R_B // r_{be} \quad (3.42)$$

实际电路中, $R_B \gg r_{be}$, 故式(3.42)中输入电阻 $R_i \approx r_{be}$ 。因此,共射极放大电路的输入电阻较小。

3) 输出电阻

输出电阻为负载开路时从放大电路输出端看进去的等效电阻。在计算输出电阻时,需将输入信号置零。根据上述分析可得到求解输出电阻的等效电路,如图 3.25 所示。由于输入端短路,基极电流 $i_b=0$,故集电极电流 $i_c=0$,共射极放大电路输出电阻可表示为

$$R_o = \frac{U}{I} \Big|_{\substack{R_L \rightarrow \infty \\ U_i = 0}} = R_C \quad (3.43)$$

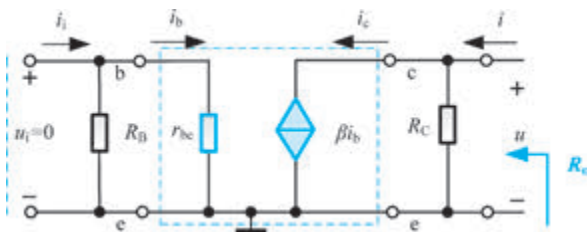


图 3.25 求解共射极放大电路输出电阻等效电路

【例题 3-3-1】 电路如图 3.26 所示,其中 $\beta=100$ 。

- (1) 忽略基区体电阻 $r_{bb'}$, 计算 r_{be} ;
- (2) 计算电压放大倍数;
- (3) 计算放大电路的输入电阻和输出电阻。

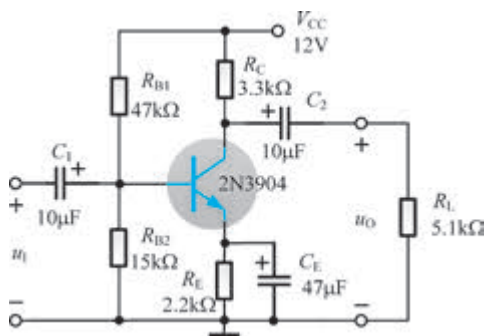


图 3.26 共射极放大电路

解: (1) 根据【例题 3-2-2】静态工作点分析结果 $I_{EQ}=0.95\text{mA}$, $U_T=26\text{mV}$, 故

$$r_{be} = (1+\beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} = (1+\beta) \frac{26\text{mV}}{0.95\text{mA}} \approx 2.76\text{k}\Omega$$

(2) 求解电压放大倍数。

首先画出图 3.26 的交流通路,如图 3.27 所示,然后将图 3.27 中的 2N3904 替换为图 3.22(e)中的小信号等效模型,如图 3.28 所示。

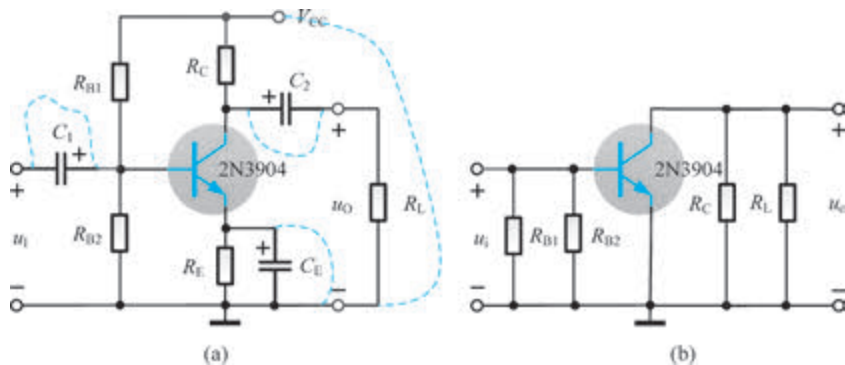


图 3.27 图 3.26 所示放大电路的交流通路

在图 3.28 中,根据电压放大倍数的定义可得

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}} = -\frac{100 \times \frac{3.3\text{k}\Omega \times 5.1\text{k}\Omega}{3.3\text{k}\Omega + 5.1\text{k}\Omega}}{2.76\text{k}\Omega} \approx -72.6$$

(3) 根据放大电路输入电阻的定义可得

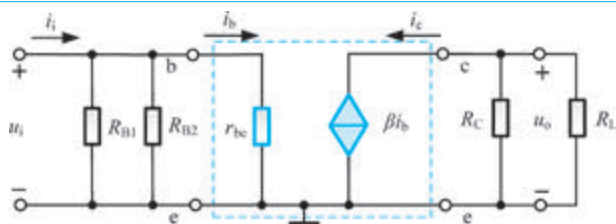


图 3.28 图 3.26 所示放大电路的小信号交流等效电路图

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

$$= \frac{47\text{k}\Omega \times 15\text{k}\Omega \times 2.76\text{k}\Omega}{47\text{k}\Omega \times 15\text{k}\Omega + 47\text{k}\Omega \times 2.76\text{k}\Omega + 15\text{k}\Omega \times 2.76\text{k}\Omega} \approx 2.22\text{k}\Omega$$

图 3.29 给出了计算输出电阻的等效电路,根据放大电路输出电阻定义可得

$$R_o = R_C = 3.3\text{k}\Omega$$

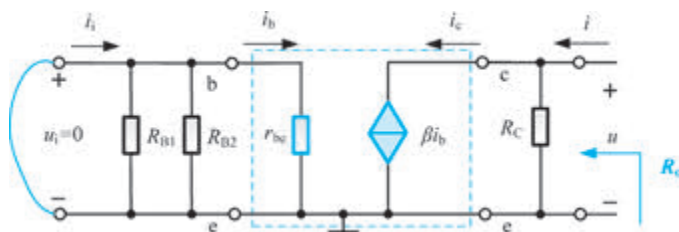


图 3.29 图 3.26 所示放大电路计算输出电阻等效电路

3.3.3 共集极放大电路动态分析

共集极放大电路是晶体三极管基本放大电路中的典型代表,由于输出从晶体三极管的发射极引出,共集极放大电路又称射极输出器。下面将对图 3.14(b)的电路进行小信号动态分析。首先画出图 3.14(b)所示电路的交流通路,如图 3.30 所示。将图中 Q_1 使用图 3.22(e)的小信号简化模型替换,得到图 3.14(b)共集极放大电路的小信号交流等效电路,如图 3.31 所示。

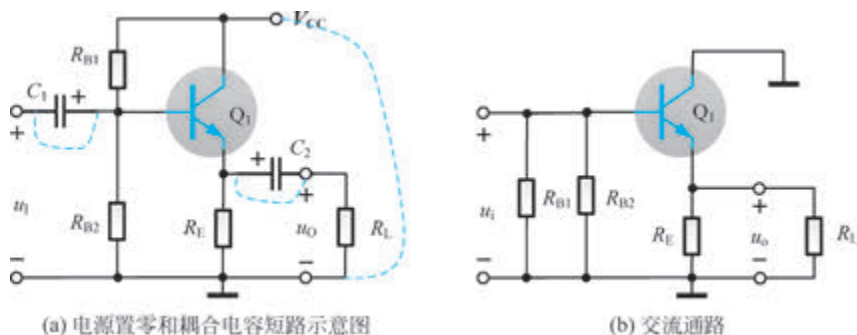


图 3.30 共集极放大电路交流通路

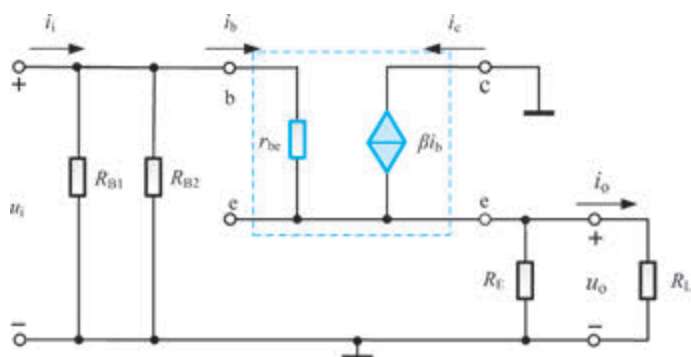


图 3.31 共集极放大电路小信号交流等效电路

1. 电压放大倍数

根据电压放大倍数的定义,利用图 3.31 的等效电路,共集极放大电路电压放大倍数可表示为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1+\beta)R_E // R_L}{r_{be} + (1+\beta)R_E // R_L} \quad (3.44)$$

通常情况下, $r_{be} \ll (1+\beta)R_E // R_L$, 上式中电压放大倍数 $\dot{A}_u \approx 1$, 表示输出电压 u_o 与输入电压 u_i 近似相等, 且相位相同, 因此, 共集极放大电路也称为电压跟随器。从电压放大角度来讲, 共集极放大电路无电压放大能力。

2. 电流放大倍数

从上面分析可得, 共集极放大电路无电压放大能力, 我们尝试分析该电路对于电流的放大能力。电流放大倍数定义为输出端负载流过的电流与输入电流之比。根据图 3.31 可得

$$\begin{aligned} \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} &= \frac{(1+\beta)\dot{I}_b \frac{R_E}{R_E + R_L}}{\frac{\dot{I}_b r_{be} + (1+\beta)\dot{I}_b (R_E // R_L)}{R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_L)]}} \\ &= \frac{R_{B1} // R_{B2}}{R_{B1} // R_{B2} + r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_L)} \frac{R_E}{R_E + R_L} \times (1+\beta) \end{aligned} \quad (3.45)$$

式中通过选择合适的电路参数, 使得电阻 $R_{B1} // R_{B2}$ 与 $(1+\beta)R_E // R_L$ 数量级相等, 电阻 R_E 与 R_L 数量级相等。由于 $\beta \gg 1$, 共集极放大电路电流放大倍数 $\dot{A}_i > 1$, 共集极放大电路具有电流放大能力。

3. 输入电阻

根据图 3.31 的等效电路以及输入电阻的定义, 共集极放大电路的输入电阻可表示为

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_L)] \quad (3.46)$$

上式表明,共集极放大电路的输入电阻较大。通常情况下,共集极放大电路输入电阻大于共射极放大电路的输入电阻。

4. 输出电阻

图 3.32 给出计算共射极放大电路输出电阻的等效电路,输出电阻可表示为

$$R_o = \frac{U}{I} \Big|_{R_L \rightarrow \infty} = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta} \quad (3.47)$$

式中: $\beta \gg 1$, 共集极放大电路输出电阻 R_o 非常小(为几欧至几十欧)。

相比共射极放大电路,共集极放大电路的输出电阻较小,负载驱动能力更强。实际上,由于共集极放大电路的负载驱动能力强,共集极放大电路常用于功率放大电路中。

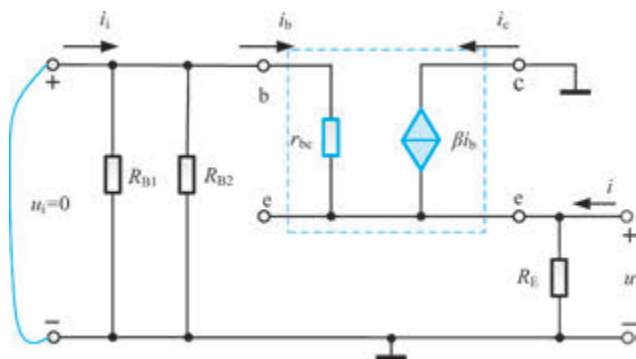


图 3.32 计算共集极放大电路输出电阻等效电路

【例题 3-3-2】 电路如图 3.33 所示,图中晶体三极管的 $\beta=100$ 。

- (1) 忽略基区体电阻,计算 r_{be} ;
- (2) 计算电压放大倍数和电流放大倍数;
- (3) 计算放大电路的输入电阻和输出电阻。

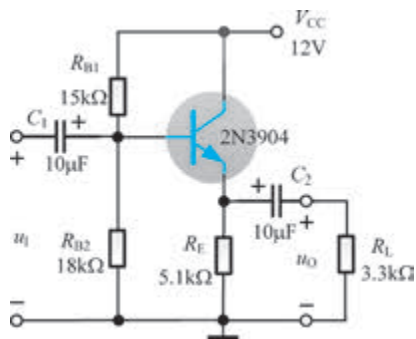


图 3.33 共集极放大电路

解: (1) 为了计算 r_{be} , 首先要计算发射极静态电流 I_{EQ} 。在图 3.33 中, 晶体三极管的 β 较大, 且分压电阻值之和较小, 可采用估算法近似计算 I_{EQ} 。基极电位可表示为

$$U_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{18\text{k}\Omega}{18\text{k}\Omega + 15\text{k}\Omega} \times 12\text{V} \approx 6.55\text{V}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} = \frac{6.55\text{V} - 0.7\text{V}}{5.1\text{k}\Omega} \approx 1.15\text{mA}$$

$$r_{be} = (1 + \beta) \frac{U_T}{I_E} = (1 + 100) \times \frac{26\text{mV}}{1.15\text{mA}} \approx 2.28\text{k}\Omega$$

(2) 图 3.33 的放大电路交流小信号等效电路与图 3.31 一样,不再重画。根据放大电路电压放大倍数的定义可得

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \frac{(1 + \beta)R_E // R_L}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \\ &= \frac{(1 + 100) \frac{5.1\text{k}\Omega \times 3.3\text{k}\Omega}{5.1\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega}}{2.28\text{k}\Omega + (1 + 100) \frac{5.1\text{k}\Omega \times 3.3\text{k}\Omega}{5.1\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega}} \approx 0.99 \end{aligned}$$

根据式(3.45)可得

$$\begin{aligned} \dot{A}_i &= \frac{R_{B1} // R_{B2}}{R_{B1} // R_{B2} + r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \frac{R_E}{R_E + R_L} \times (1 + \beta) \\ &\approx \frac{R_{B1} // R_{B2}}{R_{B1} // R_{B2} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \frac{R_E}{R_E + R_L} \times (1 + \beta) \\ &= \frac{\frac{15\text{k}\Omega \times 18\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega + 18\text{k}\Omega}}{\frac{15\text{k}\Omega \times 18\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega + 18\text{k}\Omega} + (1 + 100) \frac{5.1\text{k}\Omega \times 3.3\text{k}\Omega}{5.1\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega}} \times \frac{5.1\text{k}\Omega}{5.1\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega} \times (1 + 100) \\ &\approx 2.38 \end{aligned}$$

(3) 在图 3.31 中,输入电阻为

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$$

式中: $r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L) \approx 204.6\text{k}\Omega$, 因此,输入电阻为

$$R_i \approx 7.87\text{k}\Omega$$

在图 3.32 中,输出电阻为

$$R_o = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta} \approx \frac{r_{be}}{1 + \beta} = \frac{2.28\text{k}\Omega}{101} \approx 22.6\Omega$$

3.3.4 共基极放大电路动态分析

共基极放大电路是晶体三极管三种基本放大电路之一,下面将对图 3.14(c)的电路进行分析。根据放大电路的小信号动态分析方法,首先画出图 3.14(c)的交流通路,如图 3.34 所示,将图中晶体三极管 Q_1 使用图 3.22(e)的小信号简化模型替换,得到图 3.14(c)共基极放大电路的小信号交流等效电路,如图 3.35 所示。下面将对共基极放

大电路进行小信号交流分析。

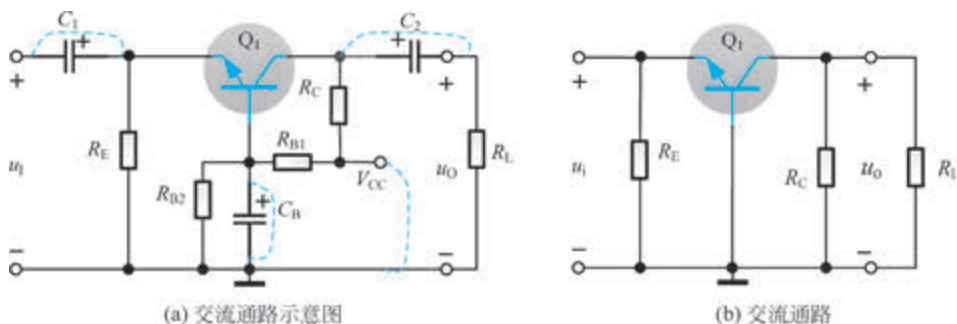


图 3.34 共基极放大电路交流通路

1. 电压放大倍数

根据电压放大倍数的定义,利用图 3.35 的等效电路,共基极放大电路电压放大倍数可表示为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R_C // R_L}{-\dot{I}_b r_{be}} = \frac{\beta R_C // R_L}{r_{be}} \quad (3.48)$$

通常情况下,上式中电压放大倍数 $\dot{A}_u \gg 1$ 。因此共基极电压放大电路具有电压放大能力,且相位相同。

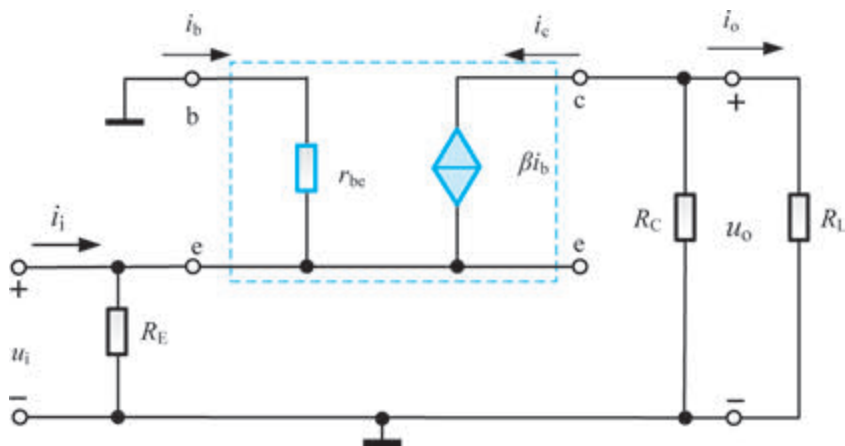


图 3.35 共基极放大电路小信号交流等效电路

2. 输入电阻

根据图 3.35 所示的等效电路以及输入电阻的定义,共基极放大电路的输入电阻可表示为

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta} \quad (3.49)$$

式中,通常情况下 $\beta \gg 1$,且 $R_E \gg r_{be}/(1 + \beta)$,故共基极放大电路的输入电阻近似等于 $r_{be}/(1 + \beta)$ 。因此,共基极放大电路输入电阻较小,一般来讲,共基极放大电路输入电阻

小于共射极放大电路的输入电阻。

3. 输出电阻

图 3.36 给出共基极放大电路输出电阻计算的等效电路。

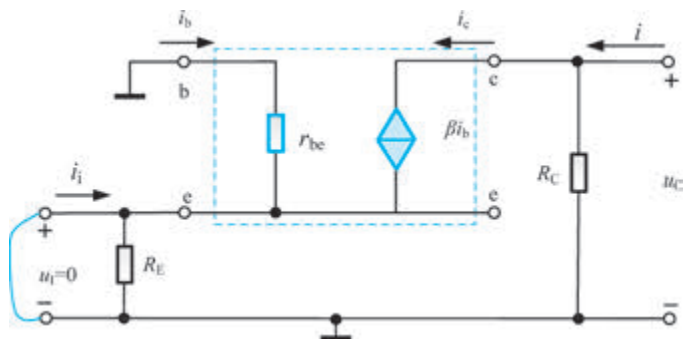


图 3.36 共基极放大电路输出电阻计算等效电路

输出电阻可表示为

$$R_o = \frac{U}{I} \Big|_{R_L \rightarrow \infty, U_i = 0} = R_C \quad (3.50)$$

从上式可以得到结论,共基极放大电路的输出电阻与共射极放大电路的输出电阻相等。

【例题 3-3-3】 电路如图 3.37 所示,图中晶体三极管的 $\beta=100$ 。

- (1) 计算 r_{be} ;
- (2) 计算电压放大倍数;
- (3) 计算放大电路的输入电阻,输出电阻。

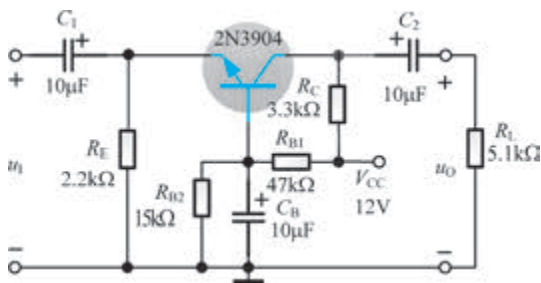


图 3.37 共基极放大电路

解: (1) 图 3.37 放大电路的直流通路与【例题 3-3-1】相同,其静态工作点计算结果也相同,故 $r_{be}=2.76\text{k}\Omega$ 。

(2) 图 3.37 的放大电路交流小信号等效电路与图 3.35 一样,因此不再重复画。根据放大电路电压放大倍数的定义可得

$$A_u = \frac{\beta R_C // R_L}{r_{be}} = \frac{100 \times \frac{5.1\text{k}\Omega \times 3.3\text{k}\Omega}{5.1\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega}}{2.76\text{k}\Omega} \approx 72.6$$

(3) 输入电阻为

$$R_i = R_E // \frac{r_{be}}{1+\beta} \approx \frac{r_{be}}{1+\beta} \approx 27.3\Omega$$

输出电阻为

$$R_o = R_C = 3.3\text{k}\Omega$$

3.4 晶体三极管典型应用

晶体三极管工作在放大状态下可用来放大信号,也可构成恒流源,工作于饱和和截止状态时,常可作为模拟开关使用。下面将给出晶体三极管典型应用电路。

3.4.1 小信号共射极电压放大电路

晶体三极管用来放大输入电压信号,电路如图 3.38 所示,主要包括信号源、晶体三极管放大电路和负载电阻 R_L 。信号源与放大电路,以及放大电路与负载之间采用电容耦合方式进行连接,电容耦合最大的优点是各部分之间直流电相互独立且低频噪声可以被有效滤除,缺点是耦合电容会衰减低频信号。信号源由交流电压源 u_s 和内阻 R_S 组成;放大电路采用典型的分压偏置共射极放大电路,电阻 R_E 用来稳定静态工作点;旁路电容 C_E 用来减小电阻 R_E 对交流放大倍数的影响;晶体三极管采用常见的器件 2N3904;负载利用电阻 R_L 来模拟。由于该放大电路的直流通路与 3.3 节所述共射极放大电路相同,该电路的静态工作点分析不再赘述,下面仅对该放大电路的交流参数进行理论分析。

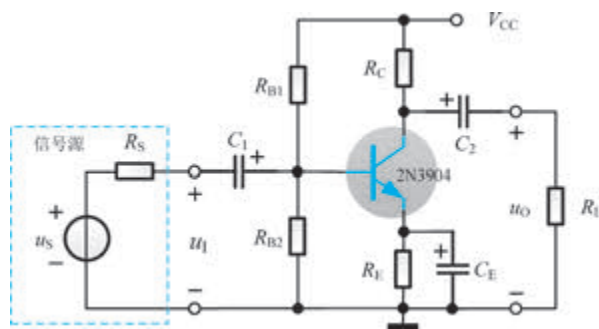


图 3.38 共射极小信号电压放大电路

根据放大电路小信号交流分析步骤及方法,应先画出放大电路的交流等效电路,如图 3.39 所示。

在图 3.39 中,放大电路输入电压与信号源电压之间的关系为

$$\dot{U}_i \approx \frac{R_{B1} // R_{B2} // r_{be}}{R_S + R_{B1} // R_{B2} // r_{be}} \dot{U}_s \quad (3.51)$$

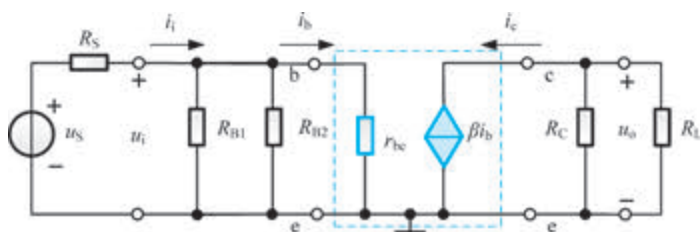


图 3.39 共射极小信号电压放大电路交流等效电路

由于

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \times \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \quad (3.52)$$

将式(3.51)代入式(3.52),可得

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{R_{B1} // R_{B2} // r_{be}}{R_s + R_{B1} // R_{B2} // r_{be}} \times \dot{A}_u \quad (3.53)$$

式中

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_C // R_L}{r_{be}}$$

实际上,由于 $R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$,式(3.53)可重写为

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \times \dot{A}_u \quad (3.54)$$

从式(3.54)可知,放大电路的输入电阻 R_i 越大,该电路能将电压信号源的信号放大得更大;另外,电压信号源内阻越小,越有利于信号放大。实际上,为了从电压信号源中获取更多的电压信号分量,常需要提高放大电路的输入电阻。然而,提高输入电阻往往会降低电压放大倍数,因此在设计电路时提高输入电阻和增大电压放大倍数常需要折中考虑。

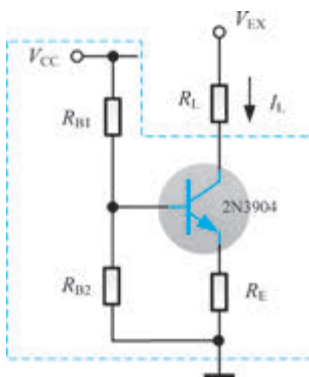


图 3.40 简单的恒流源电路实现

3.4.2 晶体三极管恒流源

恒流源是模拟电路中常见的单元电路之一,理想恒流源的特点是其电流大小与负载电阻和输入电压无关,即当负载电阻或外部电压发生变化时,电流源的电流大小恒定。实际电流源,负载和输入电压或多或少会影响电流源中电流的大小,或者说在一定条件下,负载电阻和输入电压几乎不影响电流源电流大小。图 3.40 给出简易恒流源实现电路,主要由虚线框内的晶体三极管、电阻 R_E 、基极偏置电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 组成。

在图 3.40 中,忽略三极管的基极电流,则三极管基极电位为

$$U_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad (3.55)$$

负载电流等于晶体三极管的集电极电流,因此,负载电流为

$$I_L = \frac{\beta}{1 + \beta} I_E = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \quad (3.56)$$

将式(3.55)代入式(3.56),由于 $\beta \gg 1$,式(3.56)可近似为

$$I_L \approx \frac{\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} - U_{BE}}{R_E} \quad (3.57)$$

从式(3.57)可知,该电流与负载电阻 R_L 和外部电源 V_{EX} 近似无关。注意,上述分析和计算的过程假设了晶体三极管工作在放大状态,即 R_L 与外加电源 V_{EX} 必须保证晶体三极管工作在放大状态,式(3.57)才有效。

3.4.3 晶体三极管模拟开关

当晶体三极管工作在截止区和饱和区时,可以作为模拟开关使用,其典型电路如图 3.41 所示。输入信号从晶体三极管的基极进入,为了防止晶体三极管的基极流过太大电流,放置电阻 R_B 限制基极电流,但该电阻阻值不宜过大,否则,晶体三极管不易进入饱和区;同时为了能够使晶体三极管工作在饱和区,与集电极连接的电阻 R_C 值较大。

假设输入信号 u_1 典型的波形如图 3.42(a)所示,当输入信号在时间段 $0 \sim t_1$ 时, $u_1 \approx 0V$,由于存在死区电压,显然晶体三极管工作于截止状态,集电极电流 $i_C = 0$,输出电压 $u_O \approx V_{CC}$;当输入信号在时间段 $t_1 \sim t_2$ 时, $u_1 = V_{CC}$,晶体三极管基极电流 $i_B \approx (V_{CC} - U_{BEQ})/R_B$ 。若基极电流较大,使得与集电极相连的电阻 R_C 两端的电压过大,晶体三极管极易进入饱和区,特别是当集电极电位近似等于三极管的饱和压降 U_{CES} 时,即 $u_O \approx U_{CES}$ 。输出电压波形如图 3.42(b)所示。在图 3.41 中,可以简单将晶体三极管视为开关器件,当输入为低电平时,开关断开,输出电压为高电平(V_{CC});当输入为高电平(V_{CC})时,开关闭合,输出为低电平($u_O \approx U_{CES}$)。图 3.41 电路实现了逻辑门电路中的非门功能。

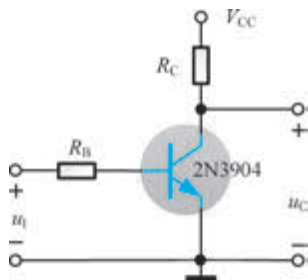


图 3.41 晶体三极管作为模拟开关使用

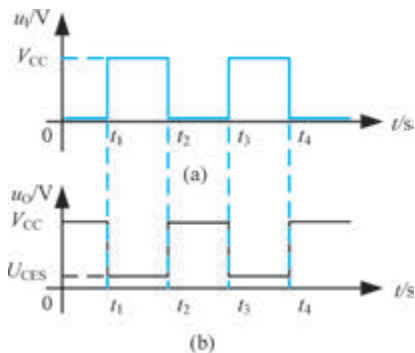


图 3.42 输入输出电压波形

下面给出晶体三极管作为开关使用的实例电路。

【例题 3-4-1】 电路如图 3.43 所示,电源电压 $V_{CC}=5V$ 。输入电压为方波周期信号,低电平为 $0V$,高电平为 $5V$,周期为 $1ms$,占空比为 50% ,请利用 Multisim 软件仿真得到电路中输出电压 u_O 与输入电压 u_1 的波形关系。

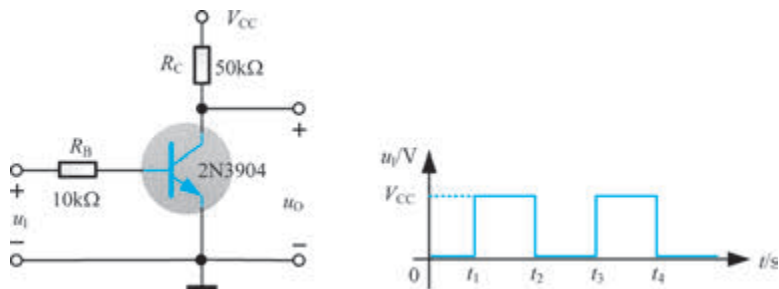


图 3.43 晶体三极管作为模拟开关使用

解: 仿真电路图和仿真结果如图 3.44 所示。

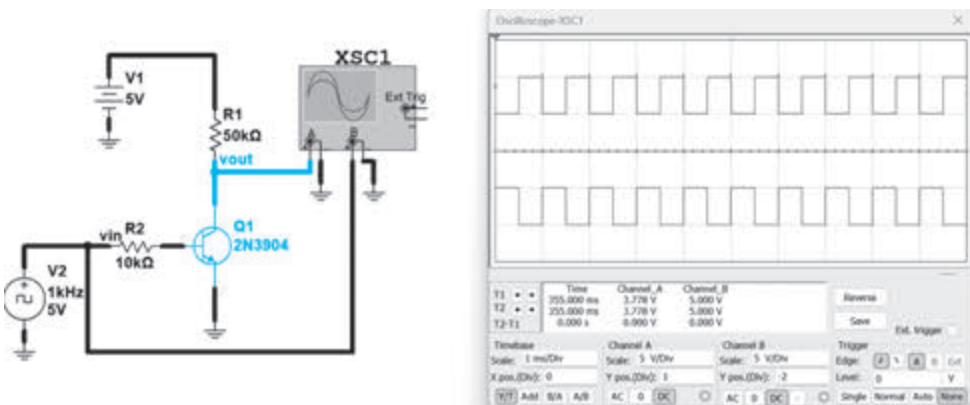


图 3.44 Multisim 仿真电路和仿真结果

3.5 Multisim 仿真实例

3.5.1 静态工作点稳定电路

为了验证 3.2 节中所述电路在稳定晶体三极管静态工作点中所起到的作用,下面给出典型实例电路供读者做仿真实践。

图 3.45 给出了固定式和分压式偏置电路仿真原理图,电路参数如图中所示。为比较两个偏置电路温度特性,下面将对图 3.45 所示电路进行温度扫描仿真。利用 EDA 仿真软件 Multisim14 对电路进行仿真,在软件的菜单栏找到 Simulate/Analysis and Simulation/Temperature Sweep 仿真设置对话框,设置包括:

- (1) 分析参数(Analysis Parameters): 扫描起始温度(Start) $0^{\circ}C$,扫描停止温度

(Stop)125℃,温度扫描类型(Sweep Variation Type)Linear。

(2) 输出变量设置: 左侧显示出了电路中各支路电流和节点电压名,点选温度扫描输出变量,选择图 3.45 所示电路中的 vc_fixed 和 vc 端进行扫描。

(3) 分析选项(Analysis options): 选择默认项。

(4) 温度扫描设置汇总(Summary): 在这个下拉菜单中可以看到上面全部设置的结果。

温度扫描设置完成后,单击下面的 Run 按钮,得到图 3.45 电路的温度扫描仿真结果,如图 3.46 所示。

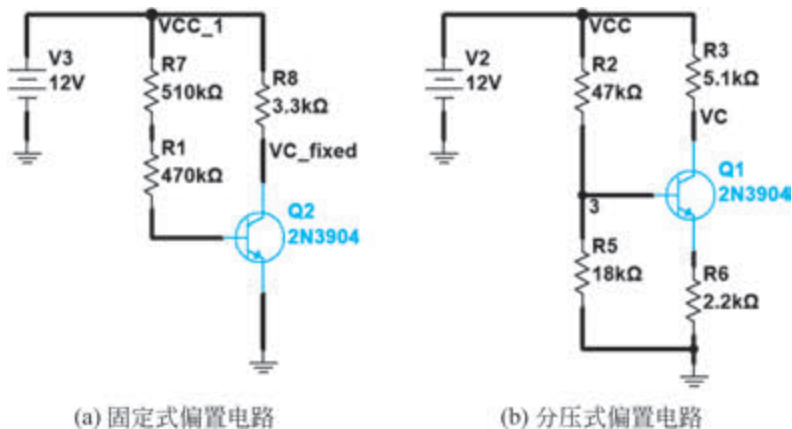


图 3.45 固定式和分压式偏置电路仿真原理图

从图 3.46 的仿真结果可知: 当温度为 25℃时,两电路中的晶体三极管的集电极电位 vc_fixed 和 vc 近似相等,约为 6.14V; 当温度为 85℃时, vc_fixed 和 vc 分别为 4.27V 和 5.85V。显然,固定式偏置电路静态工作点随温度变化更大,而分压式偏置电路静态工作点随温度变化较小,这与前面理论分析一致。

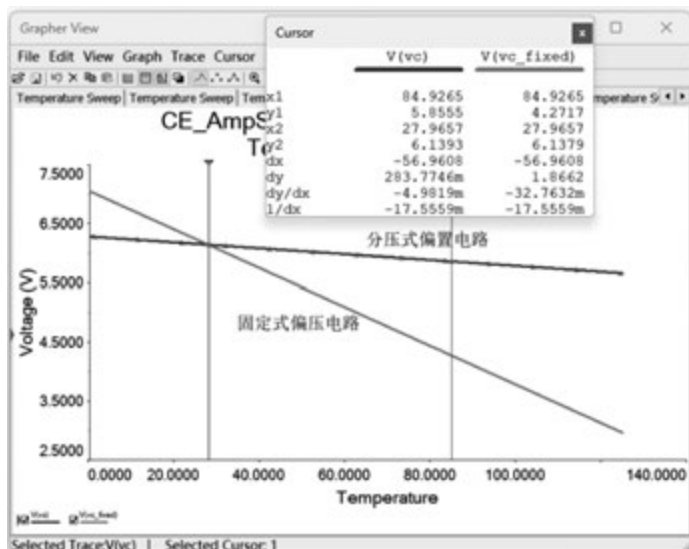


图 3.46 温度扫描仿真结果

3.5.2 共射极放大电路

图 3.47 给出了共射极放大电路仿真原理图,放大电路采用分压式偏置电路稳定静态工作点,输入信号设置为幅度 10mV、频率 1kHz 的正弦电压信号,使用示波器观察输出电压波形。图 3.48 给出了图 3.47 所示电路的瞬态仿真结果,从图中可以看出,输出电压无明显失真,输出电压幅度近似为 1V,则该放大电路电压放大倍数近似为 100 倍。

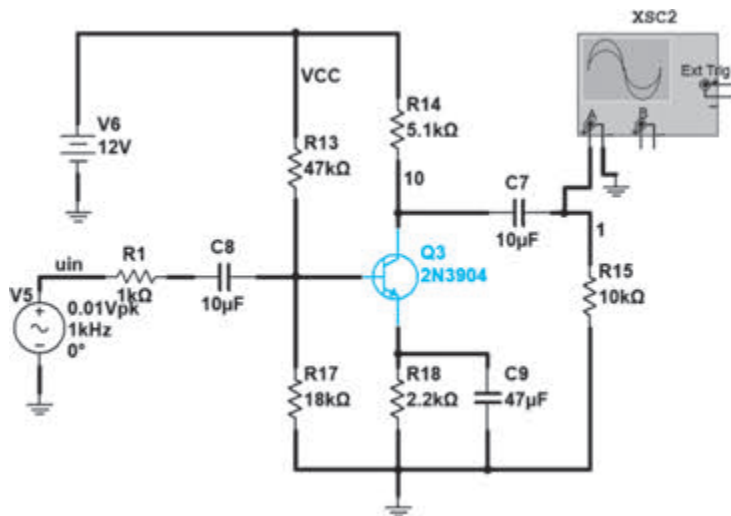


图 3.47 共射极放大电路仿真原理图

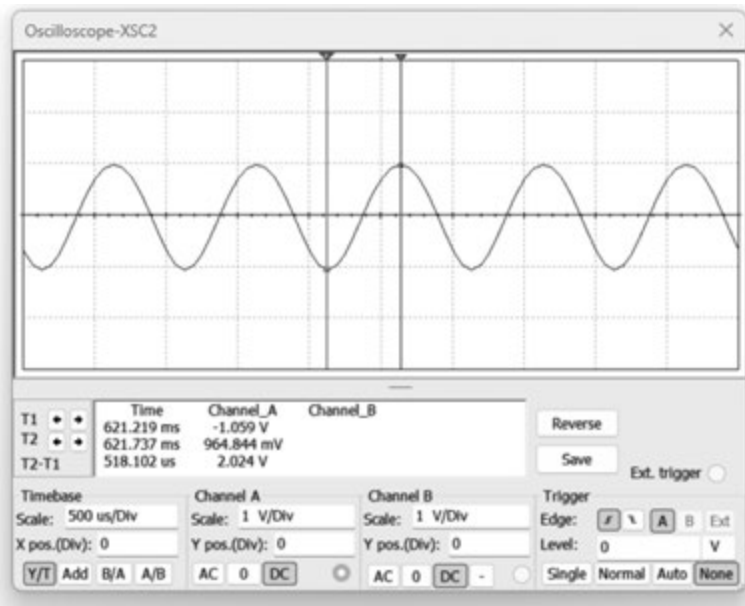


图 3.48 共射极放大电路瞬态仿真结果

3.6 本章小结

本章首先介绍晶体三极管的结构和类型、工作原理、伏安特性；然后重点介绍晶体三极管放大电路的三种基本接法，以及放大电路静态工作点分析和动态分析方法；最后简单介绍晶体三极管的典型应用。本章知识点小结如下：

双极结型晶体三极管(BJT)又称晶体三极管，内部有两个pn结，即发射结和集电结；晶体三极管有三个电极，即集电极、基极和发射极；晶体三极管有两种类型，即npn型和pnp型；根据制作晶体三极管的材料不同，晶体三极管又分为硅管和锗管等。

晶体三极管根据发射结和集电结的偏置状况，有三种工作状态，即放大状态、饱和状态和截止状态。三极管的伏安特性分为输入特性和输出特性，在输出特性曲线上，分为三个特性区，即放大区(有源区)、饱和区和截止区，三个区对应晶体三极管的三种工作状态；晶体三极管工作在放大状态时，集电极电流受到基极电流的近似线性控制，可视为小电流线性控制大电流。

晶体三极管构成单管放大电路有三种接法构成三种基本放大电路，即共射极放大电路、共集极放大电路和共基极放大电路。共射极放大电路电压放大倍数较大，输出电压和输入电压相位相反；共集极放大电路无电压放大能力，但可以放大输入电流，同时共集极放大电路的输入电阻大；共基极放大电路无电流放大能力，但可以放大电压，输出电压与输入电压相位相同，此外，其输入电阻较小。

放大电路分析分为静态分析和动态分析。放大电路静态分析主要目的是判断电路中晶体三极管是否工作在放大状态，设置合适的静态工作点有利于获得更大的输出电压动态范围。静态分析的方法有图解法和估算法。放大电路的动态分析是在静态分析的基础上，分析放大电路在输入交流信号时电路中各交流分量之间的关系。动态分析方法包括图解法和等效电路法。动态分析的目的是求解放大电路的交流参数，典型的交流参数包括放大倍数、输入电阻和输出电阻。

晶体三极管放大电路中由于静态工作点设置偏高或偏低，会产生饱和失真或截止失真；输入信号过大，输出信号可能同时出现饱和失真和截止失真。

对放大电路进行动态分析时，等效电路法分析步骤：首先画出放大电路的交流通路；然后使用等效模型替换交流通路中的晶体三极管，得到放大电路的小信号等效电路；最后根据放大电路交流参数的定义分别计算各个交流参数。

晶体三极管典型应用包括放大交流小信号、产生恒定电流、作为开关使用等。需要强调的是，前面两个应用要求晶体三极管工作在放大状态，作为开关使用时，晶体三极管工作于饱和状态和截止状态。

习题

1. 选择合适的答案填入括号中。

(1) 晶体三极管工作在放大状态时，其发射结()，集电结()。

- A. 正偏,正偏 B. 正偏,反偏 C. 反偏,正偏 D. 反偏,反偏

(2) 晶体三极管工作在放大状态时,其基极电流 I_B 从 $20\mu\text{A}$ 增加 $30\mu\text{A}$,集电极电流 I_C 从 2mA 变成 3mA ,则晶体三极管的 β 为()

- A. 50 B. 80 C. 100 D. 150

2. 判断下列说法是否正确,正确的说法在括号内打“√”,错误的说法在括号内打“×”。

(1) 晶体三极管的集电区和发射区半导体掺杂类型相同,因此在使用过程中集电极和发射极是可以互换的。()

(2) 放大电路中,静态是指输入信号为零时电路的状态。()

(3) 放大电路中,动态是指直流电源为零时电路的状态。()

(4) 引起静态工作点不稳定的因素有温度、器件老化、电源波动等,其中温度是静态工作点不稳定的主要因素。()

(5) 共射极放大电路的放大倍数为负值。()

(6) 共集极放大电路无电压放大能力,因此该电路作用不大。()

(7) 共集极放大电路的输出电阻较小,可以作为功率放大电路使用。()

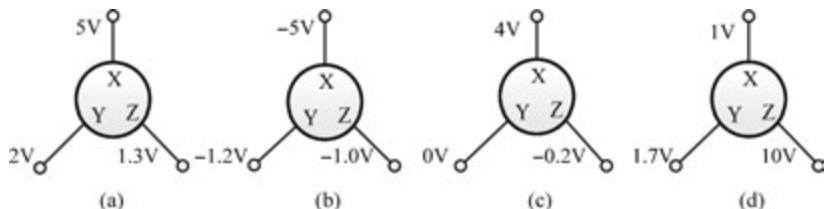
(8) 饱和失真是放大电路静态工作点设置过高引起的。()

(9) 截止失真和饱和失真不会在放大电路中同时出现。()

3. 在放大电路中测得四只晶体三极管各极电位与“地”之间的电压如习题图 3.1 所示。试判断各晶体三极管的三个管脚 X、Y、Z 各是什么电极,各晶体三极管是硅管还是锗管,是 pnp 还是 npn 型号。



习题 3



习题图 3.1

4. 计算习题图 3.2 中晶体三极管的静态工作点,假设晶体三极管均为硅管,并判断其工作状态。

5. 共射极放大电路如习题图 3.3 所示, $\beta=100, r_{bb'}=200\Omega, U_{CES}=1\text{V}$ 。

(1) 计算晶体三极管的发射极电流 I_{EQ} 和集电极与发射极之间电压 U_{CEQ} ;

(2) 画出该放大电路交流通路和小信号微变等效电路图;

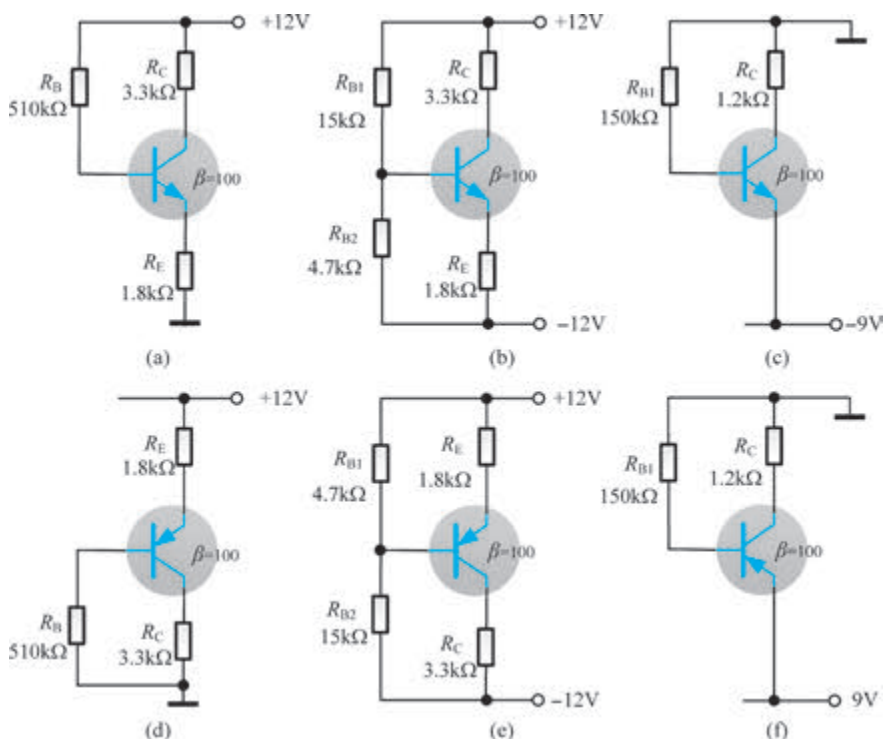
(3) 计算该放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ;

(4) 计算输出电压动态范围 U_{opp} 的值;

(5) 假设输入信号为正弦波,为保证输出电压不失真,计算输入信号 u_i 的幅度最大值。

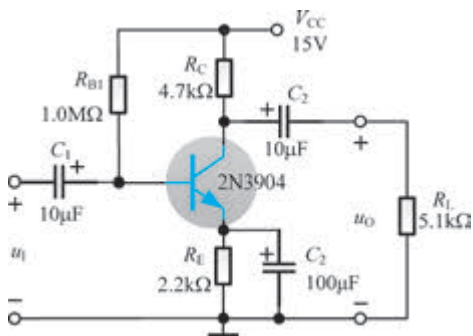
6. 共射极放大电路如习题图 3.4 所示, $\beta=100, r_{bb'}=200\Omega$ 。

(1) 计算晶体三极管的发射极电流 I_{EQ} 和集电极与发射极之间电压 U_{CEQ} ;

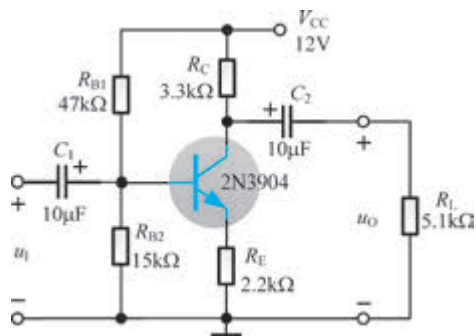


习题图 3.2

- (2) 画出该放大电路交流通路和小信号微变等效电路图；
- (3) 计算该放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。



习题图 3.3



习题图 3.4

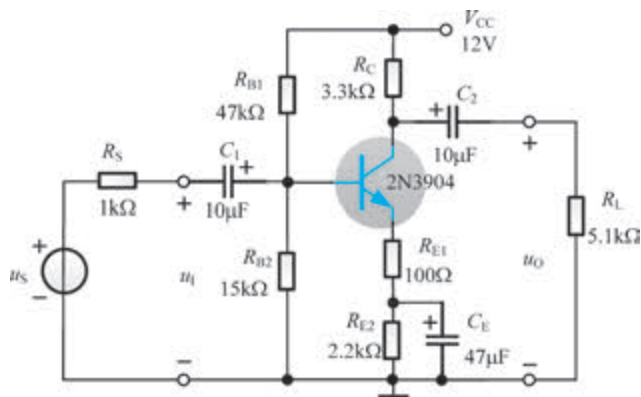
7. 共射极放大电路如习题图 3.5 所示, $\beta=100$, $r_{bb'}=200\Omega$ 。

- (1) 计算晶体三极管的发射极电流 I_{EQ} 和集电极与发射极之间电压 U_{CEQ} , 并判断晶体三极管工作状态；
- (2) 画出该放大电路交流通路和小信号微变等效电路图；
- (3) 计算该放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u , 以及输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ；



习题 7

(4) 假设输入信号 $u_s = 20\sin\omega t$ (mV), 则输出信号 u_o 的幅度为多少?



习题图 3.5



习题 8

8. 共射极放大电路如习题图 3.6 所示, $\beta = 100, r_{bb'} = 200\Omega$ 。

- (1) 计算晶体三极管的集电极与发射极之间电压 U_{CEQ} , 判断晶体三极管工作状态;
- (2) 画该放大电路交流通路和小信号微变等效电路图;

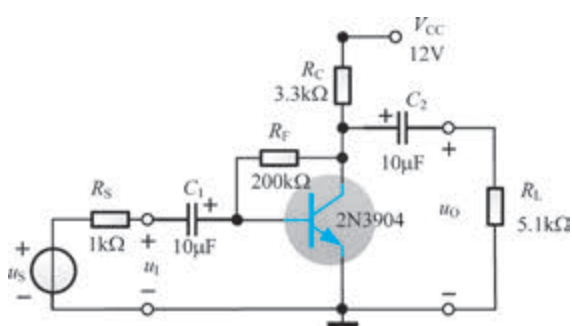
(3) 计算该放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

9. 共集极放大电路如习题图 3.7 所示, $\beta = 100, r_{bb'} = 200\Omega$ 。

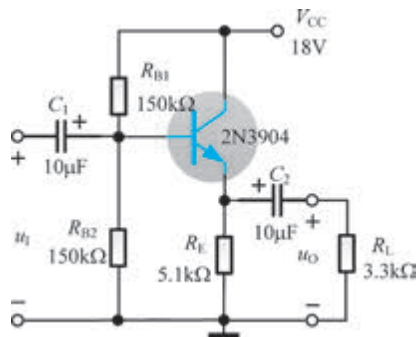
- (1) 计算晶体三极管的发射极电流 I_{EQ} 和集电极与发射极之间电压 U_{CEQ} ;
- (2) 画该放大电路交流通路和小信号微变等效电路图;

(3) 计算该放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u , 以及输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ;

(4) 当 $R_L = 1.0k\Omega$ 时, 重新计算放大电路的电压放大倍数 \dot{A}_u , 以及输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。



习题图 3.6

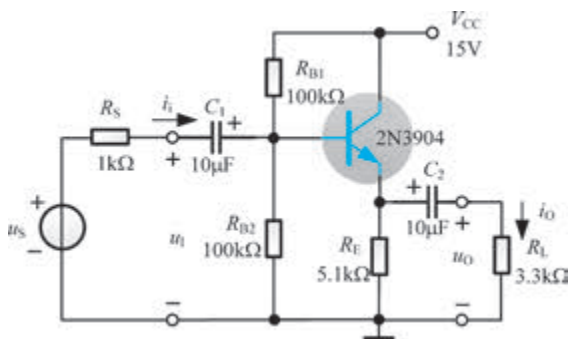


习题图 3.7

10. 共集极放大电路如习题图 3.8 所示, $\beta = 100, r_{bb'} = 200\Omega$ 。

- (1) 分析该电路静态工作点, 计算晶体三极管的发射极电流 I_{EQ} 和集电极与发射极之间电压 U_{CEQ} ;
- (2) 画该放大电路交流通路和小信号微变等效电路图;

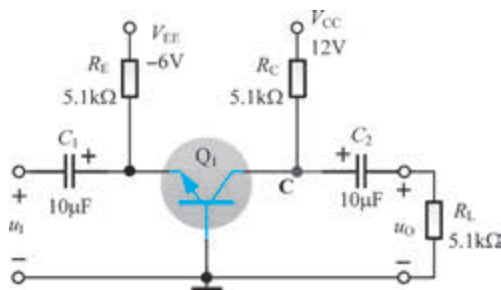
- (3) 计算该放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u , 以及输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ;
- (4) 当输入 $u_s = 2\sin 2\pi ft$ (V), $f = 1.0\text{kHz}$, 计算输出电压幅度;
- (5) 计算该放大电路的电流放大倍数 \dot{A}_i 。



习题图 3.8

11. 共基极放大电路如习题图 3.9 所示, 假设图中晶体三极管为锗管, $\beta = 100$, $r_{bb'} = 100\Omega$ 。

- (1) 分析该电路静态工作点, 计算晶体三极管发射极电流 I_{EQ} 和集电极电位 U_{CQ} ;
- (2) 画出该放大电路交流通路和小信号微变等效电路图;
- (3) 计算该放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u , 以及输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ;
- (4) 当负载电阻 $R_L = 2.2\text{k}\Omega$ 时, 重新计算该放大电路的电压放大倍数 \dot{A}_u 。



习题图 3.9