

全国高等职业院校电工类专业教材

QUANGUO GAODENG ZHIYE JISHU YUANXIAO DIANGONGLEI ZHUANYE JIAOCAI

电子技术

DIANZI JISHU

 中国劳动社会保障出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/金柏芹主编. —北京:中国劳动社会保障出版社, 2004

全国高等职业技术学院电工类专业教材

ISBN 7-5045-4257-1

I. 电… II. 金… III. 电子技术 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 009131 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

出版人: 张梦欣

*

煤炭工业出版社印刷厂印刷装订 新华书店经销
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 320 千字

2004 年 4 月第 1 版 2007 年 1 月第 5 次印刷

定价: 24.00 元

读者服务部电话: 010-64929211

发行部电话: 010-64927085

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话: 010-64911344

前言

为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》，推进高等职业技术教育更好地适应经济结构调整、科技进步和劳动力市场的需要，推动高等职业技术学院实施职业资格证书制度，加快高技能人才的培养，劳动和社会保障部教材办公室在充分调研和论证的基础上，组织编写了高等职业技术学院系列教材。从2004年起，陆续推出数控类、电工类、模具设计与制造、电子商务、电子类、烹饪类专业教材，并将根据需要不断开发新的教材，逐步建立起覆盖高等职业技术学院主要专业的教材体系。

在高等职业技术学院系列教材的编写过程中，我们始终坚持了以下几个原则：一是坚持高技能人才的培养方向，从职业（岗位）分析入手，强调教材的实用性；二是紧密结合高职院校、技师学院、高级技校的教学实际情况，同时，坚持以国家职业资格标准为依据，力求使教材内容覆盖职业技能鉴定的各项要求；三是突出教材的时代感，力求较多地引进新知识、新技术、新工艺、新方法等方面的内容，较全面地反映行业的技术发展趋势；四是打破传统的教材编写模式，树立以学生为主体的教学理念，力求教材编写有所创新，使教材易教易学，为师生所乐用。

电工类专业教材主要包括《电工基础》《电子技术》《工程制图》《电气测量》《电气管理知识》《数控技术》《单片机原理与接口技术》《可编程控制技术》《工厂电气控制技术》《自动控制技术》《工厂变配电技术》《电机原理与维修》《变频技术》《高级维修电工基本技能训练》《高级维修电工专业技能训练》《高级维修电工综合技能训练》《高级电工技能训练》《电气设备安装技术》《高电压技术（2005年出版）》等，可供高职院校、技师学院、高级技校电气维修、企业供电等专业使用。教材的编写参照了《维修电工》以及其他相关的国家职业标准，有些教材还配套出版了习题册。

在上述教材编写过程中，我们得到有关省市劳动和社会保障部门、教育部门，以及高等职业院校、技师学院、高级技校的大力支持，在此表示衷心的感谢。同时，我们恳切希望广大读者对教材提出宝贵的意见和建议，以便修订时加以完善。

劳动和社会保障部教材办公室

2004年2月

简介

本书为全国高等职业技术学院电工类专业教材，供各类高职院校、技师学院、高级技校相关专业使用。主要内容有：放大电路基础、集成运算放大器、开关稳压电源、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲信号的产生与整形、晶闸管整流电路、逆变电路和斩波电路等。

本书也可用于高级技术人才培训。

本书由金柏芹主编，王兆晶副主编，金柏芹、王兆晶、陈立静、赵冬梅、徐秋慧、刘传顺、王伟超参加编写；姜林审稿。

目 录

第一章 放大电路基础	(1)
§ 1—1 基本组态放大电路	(1)
§ 1—2 差分放大电路	(9)
§ 1—3 互补对称功率放大电路	(12)
§ 1—4 放大电路的调整与测试	(16)
习题一	(20)
第二章 集成运算放大器	(22)
§ 2—1 集成运算放大器的组成及基本特性	(22)
§ 2—2 集成运算放大器的基本运算电路	(25)
§ 2—3 运算放大器的应用举例	(31)
§ 2—4 集成运算放大器应用电路的测试	(36)
§ 2—5 集成功率放大器及应用	(39)
习题二	(42)
第三章 开关稳压电源	(45)
§ 3—1 开关稳压电源的基本工作原理	(45)
§ 3—2 集成开关稳压电源的原理与应用	(49)
习题三	(55)
第四章 组合逻辑电路	(56)
§ 4—1 逻辑代数及逻辑函数的化简	(56)
§ 4—2 集成逻辑门电路	(65)
§ 4—3 组合逻辑电路的分析和设计	(72)
§ 4—4 典型组合逻辑电路功能部件及其应用	(77)
习题四	(88)

第五章 时序逻辑电路	(92)
§ 5—1 集成触发器	(92)
§ 5—2 时序逻辑电路的分析方法	(101)
§ 5—3 计数器	(104)
§ 5—4 寄存器和移位寄存器	(116)
习题五	(121)
第六章 脉冲信号的产生与整形	(125)
§ 6—1 多谐振荡器	(125)
§ 6—2 单稳态触发器	(127)
§ 6—3 施密特触发器	(130)
§ 6—4 555 集成定时器及其应用	(133)
习题六	(139)
第七章 晶闸管整流电路	(140)
§ 7—1 电力半导体器件	(140)
§ 7—2 晶闸管单相可控整流电路	(148)
§ 7—3 晶闸管三相可控整流电路	(155)
§ 7—4 整流装置的调试步骤和方法	(162)
习题七	(166)
第八章 逆变电路和斩波电路	(168)
§ 8—1 有源逆变电路	(168)
§ 8—2 无源逆变电路	(174)
§ 8—3 脉宽调制 (PWM) 型逆变电路	(179)
§ 8—4 斩波电路	(183)
习题八	(187)
实验一 单管共发射极放大电路的测试	(188)
实验二 集成运算放大器的信号运算关系测试	(189)
实验三 电流控制型开关稳压电源的调整与测试	(191)
实验四 用集成逻辑门设计组合逻辑电路	(194)

实验五	计数器、译码器和显示器·····	(195)
实验六	555 定时器的应用 ·····	(197)
实验七	单相桥式全控整流及有源逆变电路实验·····	(198)

第一章

放大电路基础

用来对电信号进行放大的电路称为放大电路，习惯上称为放大器，它是使用最为广泛的电子电路之一，也是构成其他电子电路的基本单元电路。这里所指的“放大”是指在输入信号的作用下，利用有源器件的控制作用将直流电源提供的部分能量转换为与输入信号成比例的输出信号。因此，放大电路实际上是一个受输入信号控制的能量转换器。

放大电路有很多种类型，本章主要介绍以晶体三极管构成的各种基本单元放大电路的组成、工作原理、电路特点，及放大电路的调整与测试方法。

§ 1—1 基本组态放大电路

一、放大电路的基本知识

1. 放大电路的组成

放大电路由信号源、放大电路、负载和直流电源四部分组成，组成框图如图 1—1 所示。信号源可由将非电信号物理量变换为电信号的换能元件提供，也可是前一级电子电路的输出信号，它们都可等效为有内阻的电压源或电流源，如图 1—2 所示。

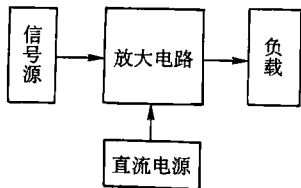


图 1—1 放大电路组成框图

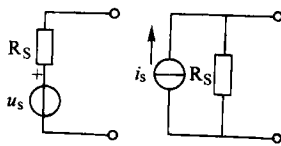


图 1—2 信号源等效电路

负载是接受放大电路输出信号的元件（或电路），它可由将电信号变成非电信号的输出换能元件构成，也可是下一级电子电路的输入电阻，一般情况下它们都可等效为一纯电阻 R_L （实际上它不可能为纯电阻，可能是容性阻抗也可能是感性阻抗，但为了分析问题的方便，一般都把负载用一纯电阻 R_L 来等效）。

直流电源用以供给放大电路工作时所需要的能量，其中一部分能量转变为输出信号输出，还有一部分能量消耗在放大电路中的电阻、器件等耗能元器件中。

基本单元放大电路由晶体三极管或 MOS 场效应管构成，但由于单元放大电路放大倍数较小，性能上往往达不到实际要求，所以，实际使用的放大电路是由基本单元放大电路组成的多级放大电路或是由多级放大电路组成的集成放大器件构成，这样才有可能将微弱的输入

信号不失真地放大，达到所需的数值。

2. 放大电路的主要性能指标

可以用许多性能指标来衡量一个放大电路的性能，如放大倍数、输入电阻和输出电阻等，可将一放大电路等效为如图 1—3 所示的一有源线性四端网络。图中 1~1' 端为放大电路的输入端， R_s 为信号源内阻， u_s 为信号源电压，输入电压与输入电流分别为 u_i 和 i_i 。2~2' 端为放大电路的输出端， R_L 为负载电阻， u_o 和 i_o 分别为输出电压和输出电流。

(1) 放大倍数 放大倍数是衡量放大电路放大能力的指标，它有电压放大倍数、电流放大倍数和功率放大倍数等表示方法，其中电压放大倍数应用最多。

放大电路的输出电压 u_o 与输入电压 u_i 之比，称为电压放大倍数 A_u ，

即
$$A_u = u_o / u_i$$

放大电路的输出电流 i_o 与输入电流 i_i 之比，称为电流放大倍数 A_i ，

即
$$A_i = i_o / i_i$$

放大电路的输出功率 P_o 与输入功率 P_i 之比，称为功率放大倍数 A_p ，

即
$$A_p = P_o / P_i$$

工程上常用分贝 (dB) 为单位来表示放大倍数，称为增益，它们的定义分别为

电压增益
$$G_u (\text{dB}) = 20 \lg |A_u|$$

电流增益
$$G_i (\text{dB}) = 20 \lg |A_i|$$

功率增益
$$G_p (\text{dB}) = 10 \lg |A_p|$$

例如，某放大电路的电压放大倍数 $|A_u| = 1\,000$ ，则电压增益为 60 dB。

(2) 输入电阻 放大电路的输入电阻是从输入端 1~1' 向放大电路看进去的等效电阻，它等于放大电路输出端连接实际负载电阻 R_L 后，输入电压 u_i 与输入电流 i_i 之比，

即
$$R_i = u_i / i_i$$

对于信号源来说， R_i 就是它的等效负载，如图 1—4 所示。由图可得

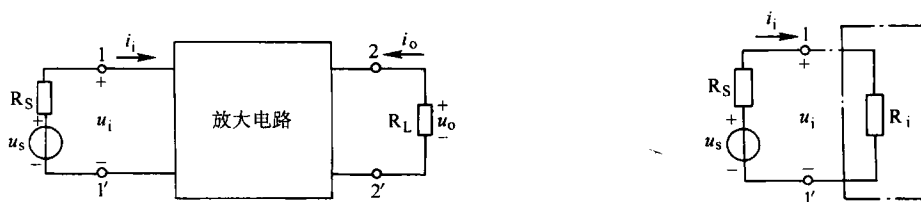


图 1—3 放大电路四端网络表示

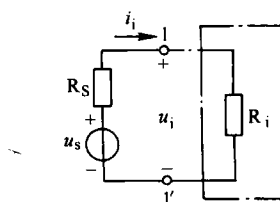


图 1—4 放大电路输入等效电路

$$u_i = u_s \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

可见， R_i 的大小反映了放大电路对信号源的影响程度。 R_i 越大，放大器对输入电压的衰减程度越小。

例 1—1 已知信号源 $u_s = 10 \text{ mV}$ ， $R_s = 500 \Omega$ 。当 R_i 分别等于 $4 \text{ k}\Omega$ 、 400Ω 、 40Ω 时，试求输入电流和输入电压的大小。

解：当 $R_i = 4 \text{ k}\Omega$ 时

$$i_i = \frac{u_s}{R_s + R_i} = \frac{10 \times 10^{-3}}{(0.5 + 4) \times 10^3} = 2.2 (\mu\text{A})$$

$$u_i = \frac{u_s R_i}{R_s + R_i} = \frac{10 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^3}{(0.5 + 4) \times 10^3} = 8.8 (\text{mV})$$

当 $R_i = 400 \Omega$ 时

$$i_i = \frac{u_s}{R_s + R_i} = \frac{10 \times 10^{-3}}{500 + 400} = 11.1 (\mu A)$$

$$u_i = \frac{u_s R_i}{R_s + R_i} = \frac{10 \times 10^{-3}}{500 + 400} \times 400 = 4.4 (\text{mV})$$

当 $R_i = 40 \Omega$ 时

$$i_i = \frac{u_s R_i}{R_s + R_i} = \frac{10 \times 10^{-3}}{500 + 40} = 18.5 (\mu A)$$

$$u_i = \frac{u_s R_i}{R_s + R_i} = \frac{10 \times 10^{-3}}{500 + 40} \times 40 = 0.74 (\text{mV})$$

例 1—1 说明, R_i 越大, 放大电路从信号源吸取的电流 (即输入电流 i_i) 就越小, 信号源内阻 R_s 上的压降就越小, 其实际输入电压 u_i 就越接近于信号源电压 u_s , 当 $R_i \gg R_s$ 时, $u_i \approx u_s$ 通常称为恒压输入。同样, 当要求恒流输入时, 则必须使 $R_i \ll R_s$ 。若要求获得最大功率输入, 则要求 $R_i = R_s$, 这就是通常所说的阻抗匹配。

(3) 输出电阻 对负载 R_L 而言, 放大电路的输出端可等效为一个信号源, 如图 1—5 所示。图中 u_{ot} 为等效信号源电压, 它等于负载 R_L 开路时, 放大电路 2~2' 端的输出电压。 R_o 为等效信号源的内阻, 它是在输入信号源电压短路 (即 $u_s = 0$), 且保留 R_s 时, 由输出端 2~2' 两端向放大电路看进去的等效电阻, 该电阻也称为输出电阻。

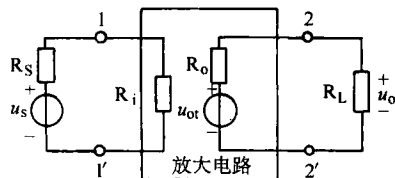


图 1—5 放大电路的等效信号源

由于 R_o 的存在, 放大电路实际输出电压为

$$u_o = u_{ot} \frac{R_L}{R_L + R_o} \quad (1-1)$$

式 (1—1) 表明, R_o 越小, 输出电压 u_o 受负载 R_L 的影响就越小, 若 $R_o = 0$, 则 $u_o = u_{ot}$, 它的大小将不受 R_L 大小的影响, 称为恒压输出。当 $R_L \ll R_o$ 时即可得到恒流输出。因此, R_o 的大小反映了放大电路带负载能力的大小。

必须指出, 以上所讨论的放大电路输入电阻和输出电阻都不是直流电阻, 而是在小信号情况下线性运用的交流电阻, 用符号 R_i 和 R_o 表示, 同时, 在一般情况下, 放大电路的 R_i 和 R_o 不仅与电路参数有关, R_i 还与 R_L 有关, R_o 还与 R_s 有关。

(4) 输出功率和效率

放大电路的最大输出功率是指在输出信号基本不失真的情况下, 能够向负载提供的最大功率, 用 P_{om} 表示。若直流电源提供的功率为 P_{DC} , 放大电路的输出功率为 P_o , 则放大电路的效率 η 为

$$\eta = \frac{P_o}{P_{DC}} \quad (1-2)$$

η 越大, 放大电路的效率越高, 电源的利用率也就越高。

二、三种基本组态放大电路

由晶体三极管可构成共发射极、共集电极和共基极三种基本组态放大电路, 其中共发射

极放大电路应用较广。与此相对应,由场效应管可构成共源、共漏、共栅三种组态的放大电路,其中共栅放大电路应用较少。场效应管放大电路的主要优点是输入电阻极高、噪声低、热稳定性好等,但其电压放大倍数较低,故常用作多级放大器的输入级。由于场效应管放大电路的组成原则与晶体三极管放大电路相同,这里只介绍由晶体管组成的三种组态放大电路。

1. 共发射极放大电路

(1) 电路的组成 由NPN型三极管构成的共发射极分压式放大电路如图1—6所示。其中, u_s 是待放大的输入信号源, R_s 是其内阻。 C_1 、 C_2 为耦合电容,起到隔直通交的作用,它们在一定频率信号的作用下容抗很小,在低频放大电路中,常采用有极性的电解电容器。

直流电源 V_{CC} 通过 R_{B1} 、 R_{B2} 、 R_C 、 R_E 使三极管获得合适的偏置,为三极管的放大作用提供必要的条件。 R_{B1} 、 R_{B2} 分别为上下基极偏置电阻, R_E 称为发射极电阻, R_C 称为集电极负载电阻,将三极管集电极电流的变化转换成集电极电压的变化,从而实现信号的电压放大。电容 C_E 称为发射极旁路电容,用于短路交流,以减小交流信号在 R_E 电阻上的损耗,使 R_E 对放大电路的电压放大倍数不产生影响。因此,要求它对信号频率的容抗越小越好,在低频放大电路中, C_E 通常也采用电解电容器。

(2) 静态分析 将图1—6所示电路中所有电容均断开即可得到该放大电路的直流通路,如图1—7所示。

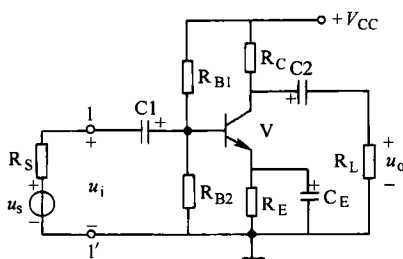


图 1—6 共发射极放大电路

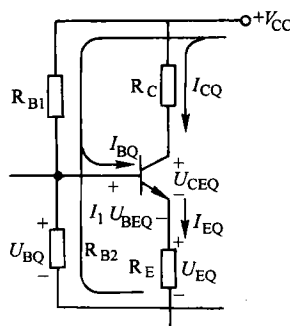


图 1—7 共发射极放大电路的直流通路

当流过 R_{B1} 、 R_{B2} 的直流电流 I_1 远大于基极电流 I_{BQ} 时,可得到三极管基极直流电压 U_{BQ} 为

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad (1-3)$$

由于 $U_{EQ} = U_{BQ} - U_{BEQ}$,所以三极管发射极直流电流为

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E} \quad (1-4)$$

三极管集电极、基极的直流电流分别为

$$I_{CQ} \approx I_{EQ}, I_{BQ} \approx I_{EQ}/\beta \quad (1-5)$$

晶体管之间的直流管压降为

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}R_E \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) \quad (1-6)$$

式(1—3)至式(1—6)为放大电路静态工作点电流、电压的近似计算公式。由于三极管的 β 、 I_{CBO} (I_{CEO})和 U_{BE} 等参数都与工作温度有关,当温度升高时, β 和 I_{CBO} (I_{CEO})增大,而管压降 U_{BE} 下降。这些变化都将引起放大电路静态工作电流 I_{CQ} 的增大;同样,若

温度下降, I_{CQ} 将减小。由此可见, 放大电路的静态工作点会随工作温度的变化而漂移, 这不但会影响放大倍数等性能, 严重时还会造成输出波形的失真, 甚至使放大电路无法正常工作, 分压式偏置电路可以较好地解决这一问题。

若图 1—7 所示电路满足

$$I_1 \geq (5 \sim 10) I_{BQ}$$

$$U_{BQ} \geq (5 \sim 10) U_{BEQ}$$

由式 (1—3) 可知, U_{BQ} 由 R_{B1} 、 R_{B2} 的分压而固定, 与温度无关。这样当温度上升时, 由于 I_{CQ} (I_{EQ}) 的增加, 在 R_E 上产生的压降 $I_{EQ}R_E$ 也要增加, $I_{EQ}R_E$ 的增加部分回送到基极—发射极回路, 因 $U_{BEQ} = U_{BQ} - I_{EQ}R_E$, 而 U_{BQ} 固定, U_{BEQ} 随之减小, 迫使 I_{BQ} 减小, 从而牵制了 I_{CQ} (I_{EQ}) 的增加, 使 I_{CQ} 基本维持恒定, 这就是负反馈作用。它是利用直流电流 I_{CQ} (I_{EQ}) 的变化而实现的, 所以称为直流电流负反馈。

由以上分析不难发现在分压式电流负反馈偏置电路中, 更换不同参数的三极管, 其静态工作点电流 I_{CQ} 可基本维持恒定。

(3) 动态分析 在图 1—6 所示电路中, 由于 C_1 、 C_2 、 C_E 的容量均较大, 对交流信号可视为短路, 直流电源 V_{CC} 的内阻很小, 对交流信号也可视为短路, 这样便可得到如图 1—8a 所示的交流通路。然后再将晶体管 V 用高电平小信号电路模型代入, 便得到放大电路的小信号等效电路, 如图 1—8b 所示, 由图可求得放大电路的下列性能指标关系式。

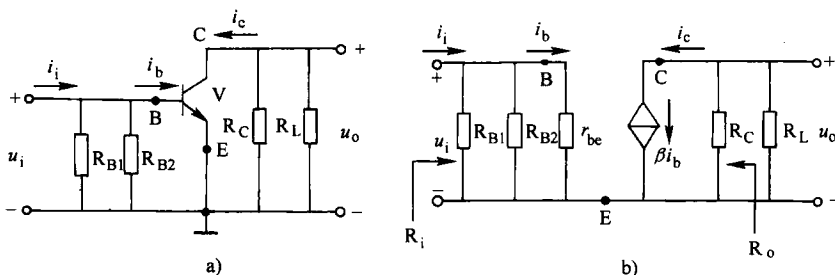


图 1—8 共发射极放大电路的交流小信号等效电路

a) 交流通路 b) 小信号等效电路

1) 电压放大倍数 由图 1—8b 可知

$$u_o = -\beta i_b (R_C \parallel R_L) = -\beta i_b R'_L$$

$$u_i = i_b r_{be}$$

式中, $R'_L = R_C \parallel R_L$, 所以放大电路的电压放大倍数等于

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-\beta i_b R'_L}{i_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (1-7)$$

式中负号说明输出电压 u_o 与输入电压 u_i 反相。

2) 输入电阻 由图 1—8b 可得

$$i_i = \frac{u_i}{R_{B1}} + \frac{u_i}{R_{B2}} + \frac{u_i}{r_{be}} = u_i \left(\frac{1}{R_{B1}} + \frac{1}{R_{B2}} + \frac{1}{r_{be}} \right)$$

所以, 放大电路的输入电阻等于

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{1}{\frac{1}{R_{B1}} + \frac{1}{R_{B2}} + \frac{1}{r_{be}}} = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be} \quad (1-8)$$

3) 输出电阻 由图 1—8b 可见, 当 $u_i = 0$ 时, $i_b = 0$, 则 βi_b 开路, 所以, 放大电路的输出电阻等于

$$R_o = R_C \quad (1-9)$$

例 1—2 在图 1—6 所示电路中, 已知三极管 $\beta = 100$, $r_{bb'} = 200 \Omega$, $U_{BEQ} = 0.7 \text{ V}$, $R_s = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{B1} = 62 \text{ k}\Omega$, $R_{B2} = 20 \text{ k}\Omega$, $R_C = 3 \text{ k}\Omega$, $R_E = 1.5 \text{ k}\Omega$, $R_L = 5.6 \text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 15 \text{ V}$, 各电容的容量足够大。试求: (1) 静态工作点; (2) U_u 、 R_i 、 R_o 。

解: ①静态工作点的计算

根据式 (1—3) ~ (1—6) 可求得静态工作点为

$$U_{BQ} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{20}{62 + 20} \times 15 \approx 3.7(\text{V})$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E} = \frac{3.7 - 0.7}{1.5 \times 1000} \approx 2(\text{mA})$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{2 \times 10^{-3}}{100} \approx 2 \times 10^{-5}(\text{A}) = 20 \mu\text{A}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 15 - 2(3 + 1.5) = 6(\text{V})$$

② A_u 、 R_i 、 R_o 的计算

先求三极管的输入电阻:

$$r_{be} = r_{b'b} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 200 + 101 \times \frac{26}{2} \approx 1.5(\text{k}\Omega)$$

由式 (1—7) 至式 (1—9) 可得

$$A_u = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}} = -100 \times \frac{3 \times 5.6 / (3 + 5.6)}{1.5} \approx -130$$

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = \frac{1}{1/62 + 1/20 + 1/1.5} \approx 1.36(\text{k}\Omega)$$

$$R_o = R_C = 3(\text{k}\Omega)$$

综上所述, 单级共发射极放大电路输出电压 u_o 与输入电压 u_i 反相, 输入电阻和输出电阻大小适中。由于共发射极放大电路的电压、电流、功率增益都比较大, 因而应用广泛, 适用于一般放大或多级放大电路的中间级。

2. 共集电极放大电路

(1) 电路组成和静态工作点 共集电极放大电路如图 1—9a 所示。图 1—9b、图 1—9c 分别是它的直流通路和交流通路。由交流通路看, 三极管的集电极是交流地电位, 输入信号 u_i 和输出信号 u_o 以它为公共端, 故称为共集电极放大电路。同时由于输出信号 u_o 取自发射极, 因此又叫做射极输出器。

直流电源 V_{CC} 经偏置电阻 R_B 为三极管发射结提供正偏压, 由图 1—9b 可列出输入回路的直流方程为

$$V_{CC} = I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + I_{EQ}R_E = I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + (1 + \beta)I_{BQ}R_E$$

由此可求得共集电极放大电路的静态工作点电流为

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)R_E} \quad (1-10)$$

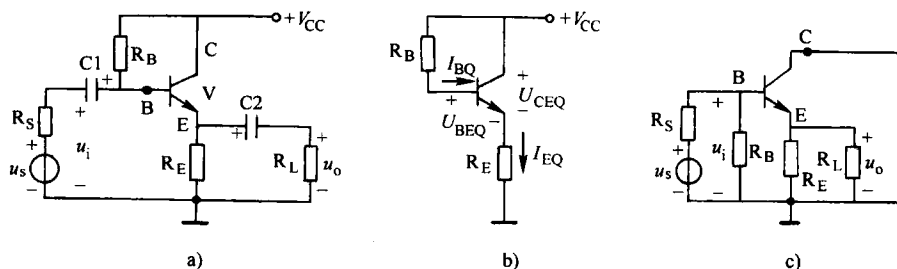


图 1—9 共集电极放大电路
a) 电路 b) 直流通路 c) 交流通路

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx I_{EQ} \quad (1-11)$$

由图 1—9b 集电极回路可得

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ} R_E \quad (1-12)$$

(2) 动态分析 根据图 1—9c 所示交流通路可画出放大电路小信号等效电路如图 1—10 所示, 由图可求得共集电极放大电路的各性能指标。

1) 电压放大倍数 由图 1—10 可得

$$u_i = i_b r_{be} + i_e (R_E // R_L) = i_b r_{be} + (1 + \beta) i_b R'_L$$

$$u_o = i_e (R_E // R_L) = (1 + \beta) i_b R'_L$$

式中, $R'_L = R_E // R_L$

因此, 电压放大倍数为

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L} \quad (1-13)$$

一般有 $r_{be} \ll (1 + \beta) R'_L$, 因此, $A_u \approx 1$ 这说明共集电极放大电路的输出电压与输入电压不但大小近似相等 (u_o 略小于 u_i), 而且相位相同, 即输出电压有跟随输入电压的特点, 故共集电极放大电路又称“射极跟随器”。

2) 输入电阻 由图 1—10 可得从晶体管基极看进去的输入电阻为

$$R'_i = r_{be} + (1 + \beta) R'_L$$

因此, 共集电极放大电路的输入电阻为

$$R_i = R_B // R'_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R'_L] \quad (1-14)$$

3) 输出电阻 放大电路的输出电阻是把信号源 u_s 短路后, 从输出端看进去的等效电阻。由图 1—10 知, R_s 与 R_B 并联再与 r_{be} 串联, 该条支路上的电阻等效为 $R'_B = R_s // R_B + r_{be}$ 。因该条支路上的电流为 i_b , 所以 R'_B 的值需折合到电流为 $i_e = (1 + \beta) i_b$ 的支路上, 即相当于 $\frac{R'_B}{1 + \beta}$ 与 R_E 并联。因此, 共集电极放大电路的输出电阻为

$$R_o = R_E // \frac{R'_B}{1 + \beta} \quad (1-15)$$

例 1—3 在图 1—9a 所示的共集电极放大电路中, 已知三极管 $\beta = 120$, $r_{be} = 200 \Omega$, $U_{BEQ} = 0.7 \text{ V}$, $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_B = 300 \text{ k}\Omega$, $R_E = R_L = R_s = 1 \text{ k}\Omega$ 。试求该放大电路的静态工

作点及 A_u 、 R_i 、 R_o 。

解：由式 (1—10) 至式 (1—12) 求得放大电路的静态工作点为

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = \frac{12 - 0.7}{(300 + 121 \times 1) \times 1000} \approx 0.027 \text{ (mA)}$$

$$I_{EQ} \approx I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 120 \times 0.027 = 3.2 \text{ (mA)}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_E = 12 - 3.2 \times 1 = 8.8 \text{ (V)}$$

三极管的输入电阻为

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 200 + 121 \times \frac{26}{3.2} \approx 1180 \Omega = 1.18 \text{ (k}\Omega\text{)}$$

所以，电压放大倍数为

$$A_u = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L} = \frac{121 \times 0.5}{1.18 + 121 \times 0.5} \approx 0.98$$

输入电阻为

$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L] = 300 // (1.18 + 121 \times 0.5) \approx 51.2 \text{ (k}\Omega\text{)}$$

输出电阻为

$$R_o = R_E // \frac{R'_B}{1 + \beta} = \frac{1 \times [1.18 + 300 \times 1 / (300 + 1)] / 121}{1 + [1.18 + 300 \times 1 / (300 + 1)] / 121} \approx 18 \text{ (}\Omega\text{)}$$

综上所述，共集电极放大电路具有电压放大倍数小于 1 而接近于 1、输出电压与输入电压同相、输入电阻大、输出电阻小等特点。共集电极电路没有电压放大作用，但由于其输入电阻很大而输出电阻很小，故该电路多用于多级放大电路的输入级、输出级或缓冲级。

3. 共基极放大电路

(1) 电路组成与静态工作点

共基极放大电路如图 1—11 所示，交流信号通过晶体三极管基极旁路电容 C_2 接地，输入信号 u_i 由发射极引入，输出信号 u_o 由集电极引出，它们都以基极为公共端，因此称为共基极放大电路。

共基极放大电路的直流通路如图 1—12a 所示，与共发射极放大电路一样，所以静态工作点的求法也相同。

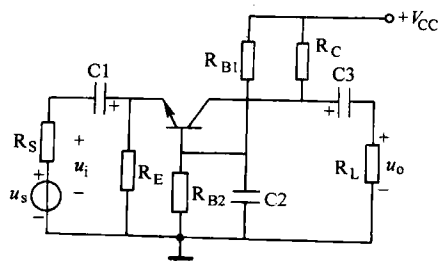


图 1—11 共基极放大电路

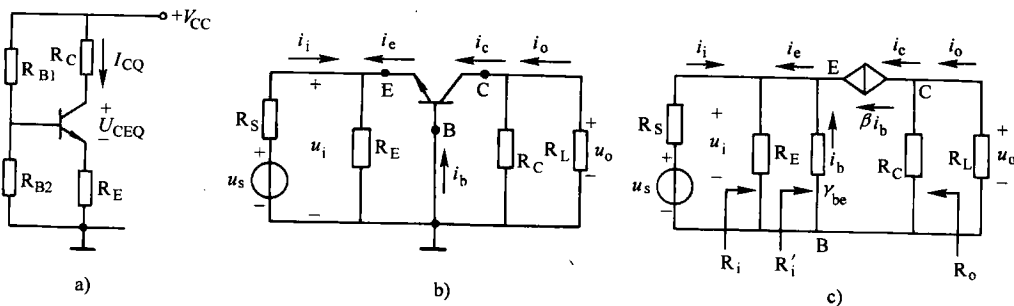


图 1—12 共基极电路的等效电路

a) 直流通路 b) 交流通路 c) 小信号等效电路

(2) 动态分析

交流通路如图 1—12b 所示, 其小信号等效电路如图 1—12c 所示。由图可得共基极放大电路的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c R'_L}{-i_b r_{be}} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (1-16)$$

其中, $R'_L = R_C // R_L$

放大电路的输入电阻为

$$R_i = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta} \quad (1-17)$$

放大电路的输出电阻为

$$R_o = R_C \quad (1-18)$$

综上所述, 共基极放大电路具有输出电压与输入电压同相、电压放大倍数高、输入电阻小、输出电阻大等特点。因输出电流与输入电流接近相等, 故没有电流放大作用。共基极放大电路有较好的高频特性, 因此, 广泛用于高频或宽带放大电路中。

§ 1—2 差放大电路

差放大电路又称差动放大电路, 它的输出电压与两个输入电压之差成正比。它在电路和性能方面具有很多优点, 因而广泛用于集成电路中。

一、差放大电路的组成及静态分析

图 1—13a 所示为基本差放大电路, 由两个完全对称的共发射极电路组成, 采用双电源 V_{CC} 、 V_{EE} 供电。输出信号 u_{i1} 、 u_{i2} 从两个三极管的基极加入, 称为双端输入, 输出信号从两个集电极之间取出, 为双端输出。 R_{EE} 为差放大电路的公共发射极电阻, 用来抑制零点漂移并决定晶体管的静态工作点电流。 R_C 为集电极负载电阻。

差放大电路的直流通路如图 1—13b 所示, 由于电路对称, 两只三极管的静态工作点相同。由图知

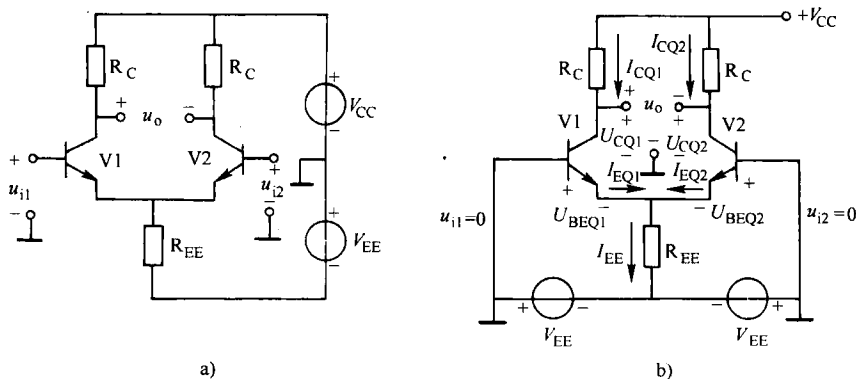


图 1—13 基本差放大电路

a) 电路 b) 直流通路

$$V_{EE} = U_{BEQ1} + I_{EE}R_{EE}$$

所以

$$I_{EE} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ1}}{R_{EE}}$$

两管的集电极电流均为

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_{EE}} \quad (1-19)$$

两管集电极对地电压为

$$U_{CQ1} = V_{CC} - I_{CQ1}R_C, U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ2}R_C \quad (1-20)$$

两管集电极之间的输出电压为

$$u_o = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$$

所以, 差分放大电路在输入信号为零时, 输出也为零。

二、动态分析

1. 差模电压放大倍数

差模输入是指在差分放大电路两个输入端加入大小相等、极性相反的输入信号, 如图 1—14a 所示, $u_{i1} = -u_{i2}$ 。

此时差模输入电压为

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 2u_{i1}$$

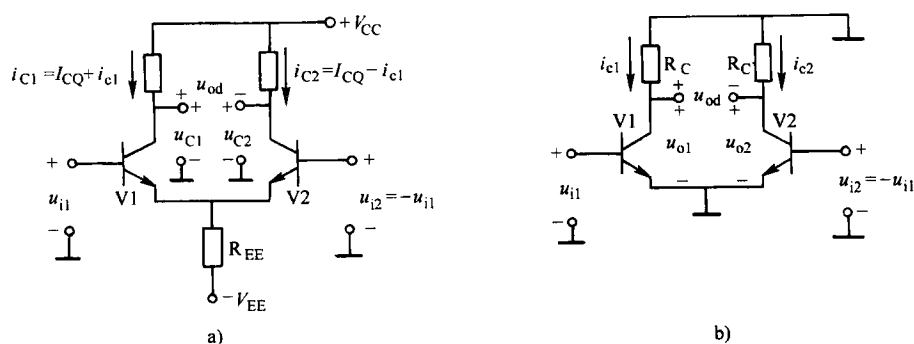


图 1—14 差分放大电路差模信号输入

a) 差模信号输入 b) 差模信号交流通路

u_{i1} 使 V1 管产生的增量集电极电流 i_{c1} 与 u_{i2} 使 V2 管产生的增量集电极电流 i_{c2} 大小相等、极性相反, 因此, V1、V2 管集电极的增量电压 $u_{o1} = -i_{c1}R_C$, $u_{o2} = -i_{c2}R_C$ 也是大小相等、极性相反。所以, 两管集电极之间的差模输出电压为

$$u_{od} = u_{o1} - u_{o2} = u_{o1} - u_{o2} = 2u_{o1}$$

由于两管集电极增量电流大小相等、方向相反, 流过 R_{EE} 时相抵消, 即在差模输入信号的作用下, R_{EE} 两端压降几乎不变, 对差模信号来说 R_{EE} 相当于短路, 由此得差分放大电路的差模信号交流通路如图 1—14b 所示。

差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{2u_{o1}}{2u_{i1}} = A_{ud1}$$

该式表明, 差分放大电路双端输出时的差模电压放大倍数等于单管的差模电压放大倍