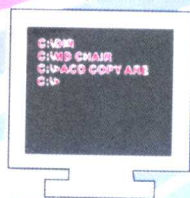


放大

电路

指南

Amplifier Circuits Guide



福建科学技术出版社

放大电路指南

周亦武 孙威娜 编著

福建科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

放大电路指南/周亦武·孙威娜编著. —福州: 福建
科学技术出版社, 2004.10
ISBN 7-5335-2433-0

I. 放… II. ①周…②孙… III. 晶体管放大器—
基本知识 IV. TN722

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 077826 号

书 名	放大电路指南
作 者	周亦武 孙威娜
出版发行	福建科学技术出版社 (福州市东水路 26 号 邮编 350001)
经 销	各地新华书店
排 版	福建科学技术出版社排版室
印 刷	人民日报社福州印务中心
开 本	850 毫米×1168 毫米 1/32
印 张	10.125
字 数	237 千字
版 次	2004 年 10 月第 1 版
印 次	2004 年 10 月第 1 次印刷
印 数	1—3 000
书 号	ISBN 7-5335-2433-0/TN·308
定 价	19.00 元



书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

前 言

放大电路是模拟电子电路的一个主要内容，在稳压、振荡、传感、执行、音响、调制解调等方面，担当重要角色。因为放大电路知识较为复杂多样，故其常常不易掌握。

与一般的教科书不同，本书简省了基本的电子学知识，着眼于放大电路有关内容，介绍了基本放大电路、负反馈放大电路、功率放大电路、运算放大电路等，内容简练且完备，实用而易学。在运算放大电路等部分，专门介绍了有关的器件使用、制作实例、设计方法、调试方法等，有助于读者实践水平的提高。

本书是在我社出版的《晶体管放大电路实践》和《运算放大器电路实践》的基础上重新组织、改编而成的。

本书适用于电子爱好者的入门、进阶，也适用于电子技术人员完善放大电路方面的基础知识。

限于我们的水平和时间，书中难免有疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2004 年 6 月

目 录

第一章 基本放大电路	(1)
第一节 晶体三极管单级低频放大电路	(1)
一、简单的交流放大电路	(1)
二、直流通路中静态工作点的设置与计算	(6)
三、共射极放大电路的交流通路	(12)
四、共射极基本放大电路的计算	(16)
五、放大电路的图解分析	(19)
六、静态工作点的稳定和三极管偏置电路 ..	(28)
七、单管放大电路的应用实例	(34)
第二节 场效应管基本放大器	(37)
一、结型场效应管基本放大器	(37)
二、绝缘栅场效应管基本放大器	(42)
三、场效应管放大器的偏置和电路形式	(51)
第二章 晶体三极管多级放大电路	(55)
第一节 多级放大电路的级间耦合方式	(56)
一、阻容耦合	(56)
二、变压器耦合	(57)
三、直接耦合	(59)
第二节 多级放大电路的输入与输出电阻	(60)
一、放大器输入电阻与输出电阻的概念	(60)
二、多级放大电路的输入电阻和输出电阻 ..	(61)
第三节 多级放大电路电压放大倍数的计算	(65)
一、电压放大倍数的计算方法	(66)

二、放大倍数的近似估算公式	(68)
三、分贝表示法	(73)
第四节 多级放大器的频率响应	(75)
一、频率特性的物理概念	(76)
二、单级阻容耦合放大器频率特性的图示	(78)
三、多级放大器的频率响应	(80)
第五节 直接耦合方式	(82)
一、克服工作点相互影响的方法	(82)
二、抑制零点漂移的方法	(85)
第三章 负反馈放大电路	(88)
第一节 反馈的基本概念	(88)
一、反馈	(88)
二、正反馈、负反馈及其判别方法	(90)
三、反馈的表达式——方框图	(91)
四、负反馈的连接方式	(92)
五、反馈系数与反馈深度	(95)
第二节 几种负反馈电路的实例	(97)
一、电压串联负反馈（射极输出器）	(97)
二、电流串联负反馈	(101)
三、电压并联负反馈	(104)
四、电流并联负反馈	(106)
第三节 负反馈对放大电路性能的改善	(109)
一、能提高放大倍数的稳定性	(109)
二、波形失真的改善	(111)
三、频带展宽	(112)
四、输入和输出阻抗的改变	(115)
五、抑制内部噪声	(115)

第四章 功率放大电路	(117)
第一节 晶体三极管功率放大电路	(117)
一、单管甲类功率放大电路	(119)
二、双电源乙类互补功率放大电路 (OCL)	(127)
三、甲乙类互补功率放大电路	(134)
四、单电源互补功率放大电路 (OTL) ...	(140)
五、集成功率放大电路	(144)
第二节 场效应管功率放大电路	(146)
一、单场效应管功率放大电路	(146)
二、双场效应管推挽功率放大电路	(151)
三、OTL 功率放大电路	(155)
四、OCL 功率放大电路	(156)
五、BTL 功率放大电路	(157)
第五章 运算放大电路	(160)
第一节 基本特性及其测试	(160)
一、什么是运算放大器	(160)
二、主要技术参数	(163)
三、简易测试	(172)
第二节 运算放大器电路设计	(174)
一、基本原理及基本电路	(174)
二、电路设计	(185)
第三节 运算放大器实用电路分析	(196)
一、信号放大电路	(196)
二、有源滤波电路	(204)
三、信号发生电路	(210)
四、信号处理电路	(220)

五、调节电路·····	(232)
第六章 运算放大器电路实践 ·····	(238)
第一节 失调及调整·····	(238)
第二节 自激振荡及消振·····	(244)
第三节 保护电路·····	(247)
一、抗差模输入电压保护电路·····	(247)
二、过载保护电路·····	(248)
三、电源保护·····	(249)
第四节 高频或脉冲电路中使用运放的注意事项 ·····	(250)
第五节 安装调试中可能出现的问题及解决办法 ·····	(251)
一、调零不灵·····	(252)
二、出现自激振荡现象·····	(252)
三、电路有严重的漂移现象·····	(253)
四、制作印刷线路板应注意的问题·····	(253)
五、焊接和敷线·····	(253)
第六节 集成运放的选用·····	(254)
一、熟悉集成运放的性能参数·····	(254)
二、集成运放的代换·····	(255)
三、引线的识别·····	(256)
四、部分运算放大器管脚排列图·····	(257)
五、部分国产运算放大器典型接线图·····	(262)
第七节 运算放大器应用电路及制作·····	(264)
一、单电源反相放大器·····	(264)
二、单电源同相放大器·····	(266)
三、简单音频电压放大器的应用·····	(266)

四、光电放大器·····	(268)
五、有线对讲机·····	(270)
六、有源音调控制放大器·····	(272)
七、音程均衡器·····	(274)
八、简单的 OCL 扩音机 ·····	(275)
九、电流—电压转换器·····	(277)
十、具有限流特性的电压—电流变换器·····	(277)
十一、简单的电压—频率转换器·····	(278)
十二、正弦波、矩形波发生器·····	(280)
十三、具有三角波和方波输出的压控振荡器 ·····	(281)
十四、峰值检波器·····	(283)
十五、阻抗变换电路·····	(284)
十六、可燃气体报警器·····	(285)
十七、水位声光报警监视仪·····	(286)
十八、定时报警器·····	(288)
十九、触摸报警器·····	(289)
二十、电子温度计·····	(290)
二十一、精密电子温度计·····	(292)
二十二、环境噪声检测器·····	(293)
二十三、具有线性度校正的铂电阻测温电路 ·····	(294)
二十四、音频电路测试仪·····	(296)
二十五、无表头的晶体管 β 测试仪·····	(297)
二十六、简易低频信号源·····	(299)
二十七、拍手开关·····	(300)
二十八、光电继电器·····	(302)

二十九、环境控制 LED 发光亮度	(303)
三十、彩照冲洗恒温器	(304)
三十一、基本消除了纹波的稳压电源	(305)
三十二、4~20V 连续可调的稳压电源	(306)
三十三、高精度标准电压源	(308)
三十四、正、负电压分隔电路	(309)
三十五、集成运放收音机中频放大器	(310)
三十六、集成运放收音机检波电路	(311)
三十七、集成运放收音机低频放大电路	(313)

第一章 基本放大电路

第一节 晶体三极管单级低频放大电路

为了说清原理，我们先对有关物理量符号做了一定的规定。
下面以三极管的发射极电流为例，表示如下：

I_E ——发射极静态电流

i_e ——发射极电流交流分量

i_E ——发射极总电流

I_e ——发射极电流交流分量的有效值

I_{em} ——发射极电流交流分量的最大值

ΔI_E ——发射极电流变化量

在不至于混淆的情况下，电流、电压均用其有效值来表示。

一、简单的交流放大电路

(一) 共射极基本放大电路的组成

最基本的放大电路是图 1-1-1 所示的单管放大电路。它是一个最基本的共射极放大电路，由晶体管、电阻、电容、电源等组成。待放大的输入信号加在晶体管的基极—发射极之间，输出信号从集电极—发射极之间取出。发射极为输入回路与输出回路的公共端，故称这种放大电路为共发射极放大电路。电路中各元件的名称及作用分述如下。

晶体三极管是电路中的放大元件，在图 1-1-1 中采用 NPN

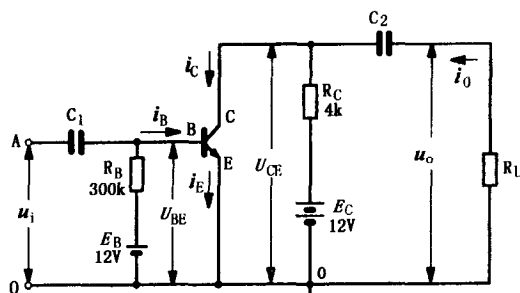


图 1-1-1 共射极基本放大电路

型半导体三极管。它利用基极电流对集电极电流的控制作用，将电源供给的直流能量转换为交流能量，从而实现对输入信号的放大。

E_C 是集电极回路的直流电源（一般在几伏到几十伏的范围），它的负端接发射极，正端通过电阻 R_C 接集电极，以保证集电结为反向偏置，并为输出信号提供能量。集电极电阻 R_C 除上述作用外，它还可以将三极管集电极电流 i_c 的变化转变为集电极电压 u_{CE} 的变化。

E_B 是基极回路的直流电源，它的负端接发射极，正端通过基极电阻 R_B 接基极，以保证发射结为正向偏置，并通过基极电阻 R_B ，由 E_B 供给基极一个合适的基极电流 I_B （常称为偏流）。

电容 C_1 和 C_2 称为隔直电容或耦合电容（一般在几微法至几十微法的范围），它们在电路中的作用是“通过交流、隔断直流”。因为交流信号能够对电容器反复充、放电，使电容器 C_1 、 C_2 表现为对线路中的交流电流的阻碍作用很小，即容抗很小，可使交流信号畅通地通过放大电路；对于直流电流，电容器在充电结束后电流为零，相当于“开路”，所以说起到隔断直流的作用。所以一方面，电容 C_1 把输入交流信号耦合到三极管的基极，

电容 C_2 将三极管的输出信号耦合到负载上；另一方面，利用它们把放大器的基极输入端与信号源之间的直流通路，以及放大器集电极输出端与负载之间的直流通路隔开，以免它们相互影响。

外接负载 R_L 是单管放大电路的终端负载（例如喇叭）。在多级放大电路中则是下一级的输入电阻。

（二）共射极基本放大电路的简化

在图 1-1-1 中，采用了两个电源 E_C 和 E_B 供电，称为双电源供电电路。这在应用时不方便。由于 E_C 和 E_B 的负极是连接在一起的，因此可用电源 E_C 代替 E_B ，这种放大电路称为单电源供电电路，如图 1-1-2 (a) 所示。

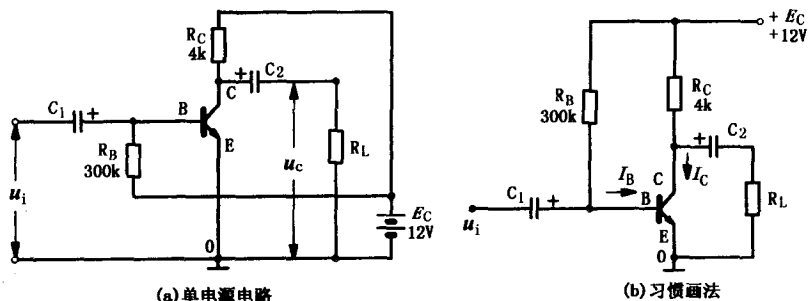


图 1-1-2 共射极基本放大电路的简化及习惯画法

在单电源供电电路中，集电极电阻 R_C 一般在几千欧到几十千欧的范围，基极电阻 R_B 一般在几十千欧到几百千欧的范围。

在半导体电路中，习惯上常把输入电压、输出电压以及直流电源 E_B 、 E_C 的共同端点（O 点）称为“地”，用符号“ $\perp$ ”表示（注意实际上这一点并不真正接到大地上），并以地端作为零电位点（参考电位点）。这样，电路中各点的电位实际上就是该点与地之间的电压（即电位差）。例如 U_C 就是指集电极对地的

电压。所以习惯上又将图 1-1-2 (a) 画成图 1-1-2 (b) 的形式。

(三) 放大电路中的直流通路和交流通路

放大电路在正常工作时，电路中总是同时存在着直流电流分量和交流电流分量。由于电容和电感等电抗性元件是放大电路的基本元件，它们对直流电和交流电的作用迥然不同，所以直流电流和交流电流在放大电路中的通路是不一致的。

对于直流通路来讲，电感器的电阻可以忽略，因此可把它视为短路。电容器可以视为开路（即直流电不能通过它）。把图 1-1-2 (a) 所示电路中的电容都视为开路，并略去无关部分，便可得出图 1-1-3 (a) 所示的直流通路。由图可知，在输入端， E_C 经 R_B 、基极、发射极形成基极偏流回路。在输出端， E_C 经 R_C 、集电极、发射极构成集电极电流回路。

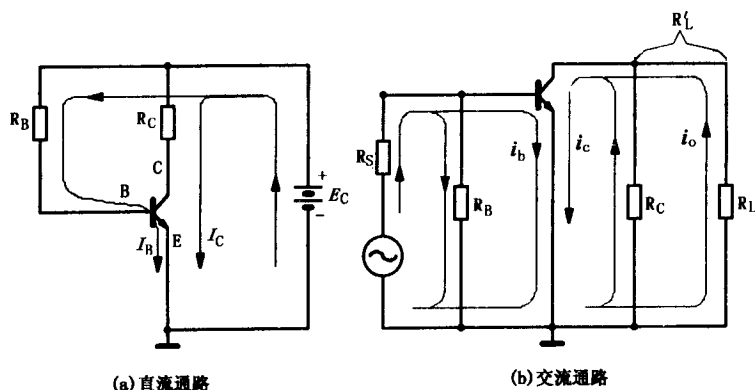


图 1-1-3 放大器的直流通路和交流通路

对于交流通路来讲，一般须考虑电容器的容抗和电感器的感抗。在信号频率范围内，若电路中电容的容抗很小时就可把它视为短路。一般耦合电容的电容数值都很大，它所具有的容抗很

小，当交变电流通过时，产生的压降可忽略不计，所以耦合电容在交流通路中均可视为短路。在信号频率的范围内，若电感的感抗很大就可将其视为开路（也就是说交流电流不能通过它）。电路中直流电源的内阻通常很小，当交变电流通过时，电源两端的交流电压降也可视为零，因此在画交流通路时，直流电源也可视为短路。图 1-1-3(b) 为图 1-1-2(a) 的交流通路电路图。

（四）放大电路的放大倍数

放大倍数是放大电路的一个基本指标。它是衡量放大电路放大微弱信号能力的指标，习惯上用增益来表示。为了说清楚放大倍数的物理意义，我们在这里先介绍一下放大电路的方框图表示。

任何一个单级或多级放大电路，都可以用图 1-1-4 的方框图来表示。

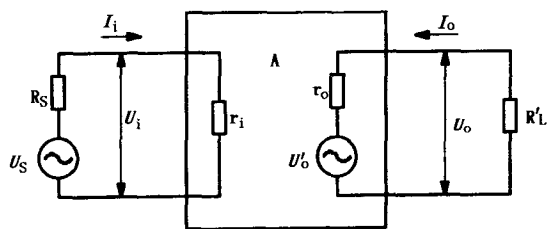


图 1-1-4 放大器的方框图

图中 A 代表所研究的放大器。输入端在内阻为 R_s 的信号源 u_s 的作用下，产生输入电压 u_i 及输入电流 i_i ，经放大后在输出端输出电压 u_o 和电流 i_o 。输入信号和输出信号既可以是电压量，也可以是电流量。为简单起见，我们这儿假设输入与输出的信号均是简单的正弦交流信号，并用 U_i 、 U_o 分别代表输入和输出的正弦电压的有效值， I_i 、 I_o 分别代表输入和输出正弦电流的有效

值，那么定义：

1. 电压放大倍数 K_{uu}

放大器的输出电压与输入电压之比，称为电压放大倍数，常用 K_{uu} 表示，即

$$K_{uu} = \frac{U_o}{U_i} \quad (1-1-1)$$

考虑到信号源内阻不等于零，则 $U_i < U_s$ ， U_s 为信号源的交流电压的有效值。故放大器对信号源电压的实际放大倍数应为输出电压与源电压之比，称为源电压放大倍数 K_{us} ，即

$$K_{us} = \frac{U_o}{U_s} \quad (1-1-2)$$

由图 1-1-4 可知，考虑了 R_s 后 $U_i = \frac{r_i}{r_i + R_s} U_s$ ，

$$(1-1-3)$$

所以源电压放大倍数与电压放大倍数之间的关系为：

$$K_{us} = \frac{r_i}{r_i + R_s} K_{uu} \quad (1-1-4)$$

2. 电流放大倍数 K_{ii}

放大器的输出电流与输入电流之比，称为电流放大倍数，用 K_{ii} 表示。即

$$K_{ii} = \frac{I_o}{I_i} \quad (1-1-5)$$

3. 功率放大倍数 K_p

负载 R_L 上的输出功率与放大器输入功率之比，称为功率放大倍数。用 K_p 表示。即

$$K_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{U_o I_o}{U_i I_i} = K_{uu} K_{ii} \quad (1-1-6)$$

在本书中，因为电压放大倍数 K_{uu} 出现的频率很高，在不至于混淆的情况下，我们就将 K_{uu} 用 K 表示。

二、直流通路中静态工作点的设置与计算

(一) 为什么要设置静态工作点

放大电路的“静态”是指当放大电路没有输入信号时，放大

器的直流工作状态。这个工作状态可由放大电路中 I_B 、 I_C 和 U_{CE} 这三个物理量的大小来表示，即由 I_B 、 I_C 、 U_{CE} 这三个数据来表示。在描述电路工作状态的几何坐标平面上可以找到对应于这三个数据的一个点，这个点所表示的直流工作状态就称为静态工作点，用字母 Q 表示。

为什么要设置静态工作点？简单地说，是为了尽可能地减小放大电路的“非线性失真”。输出信号的“失真”的现象如图 1-1-5 所示。所谓非线性，是指放大管的电流、电压放大量之间的关系不是简单的线性比例关系，不能用线性方程来描述。

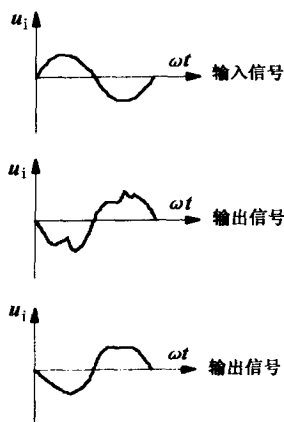


图 1-1-5 输出信号的非线性失真

产生非线性失真的重要原因之一，是由于三极管处在不适当的直流工作状态。

下面具体对这一问题进行说明。如果我们故意把图 1-1-1 中的 E_B 和 R_B 都撤去，则图 1-1-1 就画成电路图 1-1-6 (a)。在没有交流信号输入时，即是说在静态时， I_B 、 I_C 都几乎为零，这时 R_C 两端没有电压降，因此 $U_{CE} = E_C$ 。当输入交流信号 u_i 直接加在晶体管的 B-E 两极之间时，晶体管的发射结可以看做一个单向导电的二极管。在信号的正半周，由于晶体管的输入特性总存在着一定的死区，所以只有当 u_i 的瞬时值足够大时，才能产生相应的基极变化电流 i_b ，而通常放大器的输入信号是不可能有这么大的，于是基极电流 i_b 就产生了畸变。当 u_i 处于负半周时，加在 B-E 两极之间的电压是负的，发射结反向偏置，所以在信号的负半周， u_i 虽然在变化，但这时相应的 i_b 却始终为零。没