



北京工业学院电视教育小组 编

半导体电路基础

(第二册)

科学出版社

73.769

142

3-3

半导体电路基础

(第二册)

北京工业学院电视教育小组 编

科学出版社

1982



内 容 简 介

本书是为教育部和中央广播事业局共同举办的电视教育讲座编写的电子技术教材。

本书共分四册。第一册包括半导体器件,低频小信号放大电路,负反馈及低频功率放大电路。

第二册内容包括直流放大电路,整流和滤波电路,直流稳压电源及自激正弦波振荡器,最后还介绍了半导体电路实验和电子测量仪器。书末附有第一、二册的习题答案。

第三、四册为半导体脉冲数字电路。

本书可供具有中等文化程度的工人、知识青年阅读,也可供大专院校、中等专业学校有关专业的师生参考。

半 导 体 电 路 基 础

(第二册)

北京工业学院电视教育小组 编

责任编辑 张建荣

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年1月第一版 开本:787×1092 1/32

1982年1月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:0001—82,400 字数:332,000

统一书号:15031·208

本社书号:1281·15—7

定价: 1.20 元

前 言

本书是为无线电电子学、电子工程、信息科学和自动化等系本科生开设的一门电子技术课程。按照电路中有源器件工作的模型性质，从课程内容的系统性和科学性出发，通常把模拟电子线路分为《线性电子线路》和《非线性电子线路》两门课程。这样做有利于讲授和学习。中国科学技术大学电子工程与信息科学系从1982年起就一直按这种体系组织教学，十多年的教学实践证明，这种课程分类体系的教学效果是令人满意的。

随着集成电路和计算机技术的进展，不仅赋予了电子技术以新的内容，而且对电子技术的要求也越来越高。电子技术类课程也必须适应和服从于这种发展的要求，对课程内容作必要的改革和更新。有鉴于此，本书根据目前电子电路发展的特点以及我们多年的教学实践经验，参照了国家教委颁发的《高等院校工科电子线路课程(I)、(II)教学基本要求》，在前二版讲义(1981年张作生、戴蓓蓓编《线性电子线路》、1987年戴蓓蓓、钱志远编《线性电子线路》)的基础上，吸取了近年来国内、外同类教材的一些长处后编写的。

从课程的系统性和理论的完备性出发，本书仍以线性系统的复频域分析方法为主线贯串全书，对各种线性电子功能电路进行分析和讨论，使学生有较深入和清晰的电路与系统的概念。与此同时，我们仍强调了双极型晶体管、场效应晶体管和运算放大器的各类线性分析模型，使学生具有较强的电路分析和处理能力。

本书对于各类功能电路的介绍，着眼于基本原理和电路分析，突出电路的构成思想和应用，以加强学生对基本原理的理解和开拓思路，增强实用性。在内容上，增强了集成运算放大器的内容，包括集成运算放大器的内部电路构成原理、模型和特性参数，以及集成运算放大器组成的各类应用电路；尽量减少分立元件电路的内容。

考虑到当今电子电路的设计强调系统设计的思想，本书除了注意加强学生对系统分析的能力，同时加强了负反馈及稳定性在系统中作用的讨论。鉴于信号处理电路是构成现代电子系统的不可缺少的一个部分，本书第八章专门介绍了滤波函数和以集成运放为有源器件的各类有源RC滤波电路。

本书中列有较多的例题，以帮助学生学习和理解。此外，又选编了较大数量的习题，其中的一部分作为课程学习内容的复习，另一部分则作为课程内容的扩充和提高，以利于培养学生分析和解决问题的能力。

本书也可作为非无线电类专业的研究生、大学生以及从事有关电子技术方面工作的工程技术人员、科研人员的参考用书。

全书共分十章，第一、五、六、七、八章由戴蓓蓓编写，第二、三、四、九、十章由钱志远编写。由于编者水平所限，难免有错误和不妥之处，恳请读者予以批评和指正。

编 者

一九九三年十月于合肥

目 录

第五章 直流放大电路	387
第一节 直流放大电路的特殊问题	387
第二节 差分放大电路	397
第三节 调制式直流放大电路	435
第四节 集成运算放大器简介	452
小结	469
思考题	470
练习题	472
附录 场效应管的工作原理和特性	474
第六章 整流和滤波电路	507
第一节 半波整流和电容滤波电路	508
第二节 全波整流和电容滤波电路	518
第三节 桥式整流和电容、电感滤波电路	526
第四节 倍压整流电路	539
第五节 整流滤波电路的设计	546
第六节 复合式滤波电路	550
第七节 小功率整流变压器的设计与制造	563
小结	582
思考题	583
练习题	585
附录 常用半导体整流二极管参数	586
第七章 半导体直流稳压电源	593
第一节 硅稳压管及其稳压电路	594
第二节 串联型半导体管直流稳压电源	607
第三节 串联型稳压电路性能的改进	628

电子测量仪器简介	790
一、万用表和电子伏特计	790
二、万用电桥和Q表	805
三、电子示波器	810
四、测量用信号源	818
五、电子计数器和数字式仪表	826
六、半导体管特性图示仪	836
七、仪表系统中常用的传感器	840
习题答案	843

5.2.8	输出级电路	(159)
5.2.9	典型集成运算放大器电路分析	(161)
5.3	集成运算放大器的特性参数	(164)
5.4	集成运放的电路模型	(167)
5.4.1	线性工作时的电路模型	(168)
5.4.2	理想运放的电路模型	(168)
5.4.3	运算误差源的电路模型	(169)
5.5	动态稳零原理	(170)
	习题	(172)
第六章	放大器中的反馈及稳定性	(177)
6.1	反馈的基本概念	(177)
6.1.1	概述	(177)
6.1.2	单环反馈放大器的理想模型	(178)
6.1.3	基本反馈方程式	(179)
6.2	负反馈放大器的四种组态	(180)
6.2.1	电压取样、电流相加型	(180)
6.2.2	电流取样、电流相加型	(181)
6.2.3	电压取样、电压相加型	(181)
6.2.4	电流取样、电压相加型	(182)
6.2.5	环外电阻的处理	(182)
6.3	负反馈对放大器性能的影响	(184)
6.3.1	改善增益的稳定性	(184)
6.3.2	扩展带宽	(185)
6.3.3	对非线性失真的改善	(186)
6.3.4	对信噪比的改善	(187)
6.3.5	对输入阻抗的影响	(187)
6.3.6	对输出阻抗的影响	(189)
6.4	负反馈放大器的分析方法	(191)
6.4.1	概述	(191)
6.4.2	单环方框图分析法	(192)
6.4.3	深度负反馈情况	(200)
6.5	几种常用的负反馈放大器	(201)
6.5.1	射极跟随器	(202)
6.5.2	共基放大器	(204)
6.5.3	两级电流并联负反馈放大器	(206)
6.5.4	两级电压串联负反馈放大器	(209)
6.5.5	多环负反馈放大器	(210)
6.6	反馈系统的稳定性及稳定性判断准则	(212)
6.6.1	反馈放大系统的稳定性	(212)
6.6.2	放大系统稳定性的判断方法	(216)

6.7 正弦振荡器的线性分析	(229)
6.7.1 概述	(229)
6.7.2 RC 振荡器	(232)
6.7.3 LC 振荡器	(235)
6.7.4 石英晶体振荡器	(238)
习题	(241)
第七章 集成运放电路	(248)
7.1 反相运放电路	(248)
7.1.1 基本形式	(248)
7.1.2 比例放大电路	(250)
7.1.3 积分电路	(251)
7.1.4 微分电路	(257)
7.1.5 对数和反对数运算电路	(258)
7.1.6 非线性函数产生电路	(265)
7.1.7 模拟计算机电路	(271)
7.2 同相运放电路	(272)
7.2.1 基本形式	(272)
7.2.2 同相运放电路应用举例	(273)
7.3 差动运放电路	(277)
7.3.1 基本形式	(277)
7.3.2 同相并联型差动运放电路	(279)
7.4 电容耦合运放电路	(282)
7.5 实际运放电路的输出误差	(285)
7.5.1 分析误差	(285)
7.5.2 失调误差	(290)
7.6 实际运放的频率响应和相位补偿	(291)
7.6.1 运放的开环频率特性	(292)
7.6.2 闭环稳定性	(292)
7.6.3 相位补偿	(294)
习题	(302)
第八章 有源 RC 滤波电路	(311)
8.1 低通滤波电路	(311)
8.1.1 低通特性	(311)
8.1.2 低通滤波函数	(313)
8.1.3 一阶滤波电路	(320)
8.1.4 二阶滤波电路	(321)
8.1.5 高阶低通滤波电路	(323)
8.2 高通滤波电路	(329)
8.2.1 低通/高通的变换	(329)
8.2.2 高通滤波电路	(330)

8.3	带通滤波电路	(334)
8.3.1	带通滤波特性	(334)
8.3.2	低通/带通变换	(336)
8.3.3	二阶带通电路	(338)
8.4	带阻滤波电路	(342)
8.4.1	带阻滤波特性	(342)
8.4.2	低通/带阻变换	(343)
8.4.3	二阶带阻电路	(343)
8.5	全通滤波电路	(346)
8.5.1	全通滤波特性	(346)
8.5.2	全通滤波电路	(349)
8.6	通用滤波电路	(352)
8.7	灵敏度	(355)
	习题	(358)
第九章	小信号调谐放大器	(361)
9.1	调谐放大器的性能指标	(361)
9.1.1	调谐放大器的频率特性	(361)
9.1.2	调谐放大器的性能指标	(362)
9.2	LC 并联谐振回路	(363)
9.2.1	并联谐振电路的传递函数	(363)
9.2.2	线圈 Q 值和电容损耗角	(364)
9.2.3	信号源内阻和负载阻抗的影响	(365)
9.2.4	并联谐振回路的接入方式	(366)
9.3	单调谐放大器	(369)
9.3.1	晶体管 y 参数模型	(369)
9.3.2	单调谐放大器	(369)
9.3.3	单调谐放大电路设计举例	(371)
9.4	多级单调谐放大器	(374)
9.4.1	窄带近似	(374)
9.4.2	同步调谐	(375)
9.4.3	参差调谐	(376)
9.5	调谐放大器的稳定性	(378)
9.5.1	有源器件固有稳定条件	(378)
9.5.2	调谐放大器的振荡原因	(380)
9.5.3	多级调谐放大器的稳定性和统调性	(381)
9.5.4	共发-共基级联调谐放大器	(381)
9.5.5	中和法	(383)
9.5.6	失配法	(384)
9.5.7	失配法设计举例	(386)
9.6	集中选频滤波式调谐放大器	(390)

9.6.1	概述	(390)
9.6.2	集中选频滤波器	(391)
	习题	(392)
第十章	噪声	(396)
10.1	放大器的噪声源	(396)
10.1.1	电阻热噪声	(396)
10.1.2	噪声等效电路	(397)
10.1.3	散弹噪声	(397)
10.1.4	分配噪声	(398)
10.1.5	闪烁噪声($1/f$ 噪声)	(399)
10.1.6	晶体三极管噪声	(399)
10.1.7	场效应管噪声	(399)
10.2	噪声计算	(399)
10.2.1	均方迭加性	(399)
10.2.2	等效噪声带宽	(400)
10.2.3	噪声温度	(401)
10.3	噪声系数	(401)
10.3.1	噪声系数概念	(401)
10.3.2	E_n-I_n 噪声模型	(402)
10.3.3	多级放大器的噪声	(403)
	习题	(404)

第五章 直流放大电路

前面我们详细地讨论了低频交流信号的放大电路。但在自动控制系统和一些电子测量仪器中，所要放大的信号并不都是变化较快的交流信号，有很多是变化极为缓慢的、非周期性的信号，有时甚至是直流信号，或者说，需要放大的信号下限频率为零。很明显，要放大这样的信号，不能再用前面讨论过的阻容耦合或变压器耦合的交流放大器了，因为这种缓变信号将被耦合电容所隔断或被变压器的初级线圈所短路。因此，常常采用直接耦合放大电路实现对缓变信号的放大。所谓直流放大器就是能够放大直流或变化十分缓慢信号的放大器，或者说，直流放大器是下限频率为零的放大器。

第一节 直流放大电路的特殊问题

采用直接耦合放大电路，解决了缓变信号的放大问题，但是也带来了需要认真解决的新问题。一是直流电位的相互牵制问题；二是多级直流放大电路的零点漂移问题。现分别讨论如下。

一、直流电位相互牵制问题

为了弄清直接耦合放大电路各级之间直流电位的相互影响，现在我们讨论如图 5-1 所示的两个参数相同单级放大电路直接耦合时的情形。

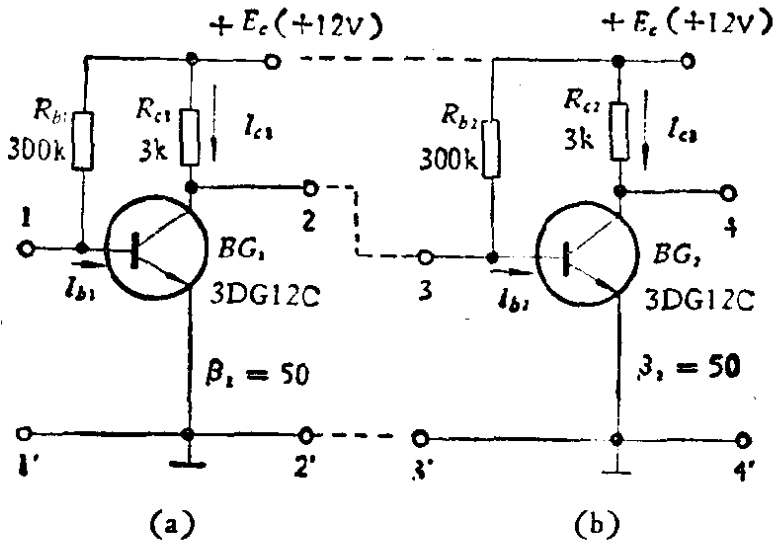


图 5-1 单级放大电路

第二章我们已经讨论了固定偏置电路的静态工作点的计算。若两只管子的特性相同,则由电路参数可知,两个放大电路静态基极电位应是相同的,即认为 $U_{b1} = U_{b2} \approx 0.7V$; 两个放大电路的静态集电极电位也应是相同的,即 $U_{c1} = U_{c2}$, 其中

$$\begin{aligned}
 U_{c1} &= E_c - R_{c1}I_{c1} = E_c - R_{c1}\beta_1 I_{b1} \\
 &= E_c - R_{c1}\beta_1 \frac{E_c - U_{be1}}{R_{b1}} \\
 &= 12 - 3 \times 10^3 \times 50 \times \frac{12 - 0.7}{300 \times 10^3} \approx 6.3V
 \end{aligned}$$

若将图 5-1(a) 放大电路的输出端 2-2' 与图(b)放大电路的输入端 3-3' 分别连接起来,并共用一个电源(如图中虚线所示)时,直流电位会发生怎样的变化? 对放大电路的工作有什么影响呢?

很明显,当两个单级放大电路直接耦合后, BG_1 的集电极电位就是 BG_2 的基极电位,即 $U_{c1} = U_{b2}$ 。由于三极管输入特性曲线很陡,所以 BG_2 的基极与发射极之间的电压 U_{be2} 不会有很大的增加,必然迫使第一级管子 BG_1 的集电极电位下降

到 BG_2 的基极电位, 即 $U_{c1} = U_{b2} \approx 0.7V$, 此时, BG_1 的管压降 $U_{ce1} \approx 0.7V$. 可见, 直接耦合的结果, 由于直流电位的相互影响, 使第一级管子 BG_1 处于接近饱和的状态.

直接耦合后, 第二级的偏流电阻也不再仅仅是 R_{b2} 了, 第一级集电极电阻 R_{c1} 同时也起着第二级偏流电阻的作用, 并且由于 R_{c1} 比 R_{b2} 小得很多, 它对第二级的影响是很大的, 使第二级的静态基流大大增加, 因而使 BG_2 处于深度饱和状态. 如果管子允许的耗散功率较小, 而且集电极电阻 R_{c2} 也较小时, 甚至还可能使三极管 BG_2 烧毁.

图 5-1 的两级放大电路, 如果用耦合电容连接成交流放大电路, 每级的静态工作点相互独立, 则可正常工作. 但是直接耦合后, 由于直流电位的相互影响, 致使放大电路不能正常工作. 当然如果事先将 BG_1 的集电极电位 U_{c1} 调整到 $0.7V$, 直接耦合后放大电路虽然能够工作, 但是动态范围也还是很小的. 所以, 直接耦合放大电路必须很好地解决直流电位相互牵制的问题.

为了使图 5-1 的放大电路直接耦合后能够正常工作, 只要把第二级 BG_2 管子的发射极电位垫高, 也就是使 BG_2 基极电位提高到 BG_1 集电极电位的高度即可, 当然也应使 $U_{be2} \approx 0.7V$.

垫高发射极电位的方式很多, 经常采用的是在发射极上接电阻的方法, 如图 5-2 所示. 发射极电阻 R_e 的阻值应由三极管 BG_1 集电极电位 U_{c1} 和第二级管子 BG_2 的射极电流 I_{e2} 所决定, 即

$$R_e = \frac{U_{c1} - U_{be2}}{I_{e2}}$$

这种直接耦合的放大电路, 其优点是元件少, 结构简单, 在集成电路中被广泛采用. 它的缺点是由于 R_e 的负反馈作

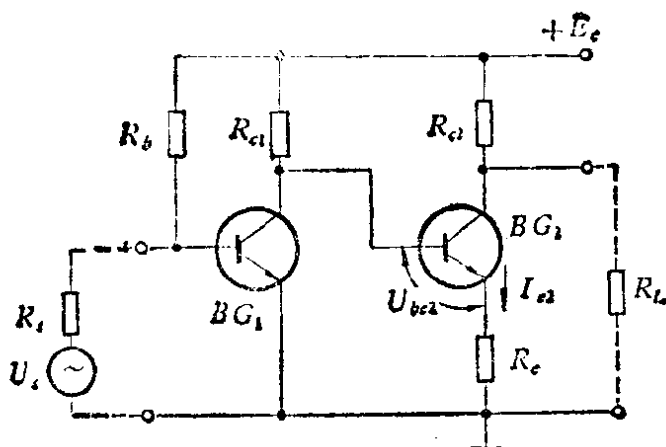


图 5-2 直接耦合放大电路

用使放大器的放大倍数下降。

现在要问,能不能在 R_e 两端并联一个电容器来消除这种负反馈作用呢? 请读者自己给出答案。

为了解决既要垫高射极电位,又不使放大倍数因深度负反馈而下降太多,通常用稳压管(其特性在第七章详述)代替 R_e ,因为在满足稳压管一定工作电流的范围内,稳压管两端的电压是稳定的,因而可以垫高发射极电位,而且在正常工作条件下稳压管的动态内阻很小,所以负反馈作用也就很小了,放大倍数下降的也很少。如果需要垫高的电位不是太高,还可以用二极管代替 R_e ,因为二极管的正向电压不高,而且正向的动态电阻也很小,所以有时利用二极管垫高射极电位,也可以达到要求。

应该指出,在利用 NPN 型三极管的直接耦合放大电路中,正常工作状态时,各级的集电极电位总是高于它本级的基极电位,当级数增多,集电极电位逐级升高,这一方面要求电源提供更高的电压,另一方面输出端可能偏离所要求的初始直流电位。这些都是实际中需要解决的问题。

直接耦合多级放大电路,除了各级之间直流电位相互影响之外,在接入信号源或负载时(如图 5-2 虚线所示),由于信

号源内阻或负载电阻的分流作用，也会影响放大电路的直流电位。特别是放大电路输入端与输出端的初始直流电位偏离零电位很远时，影响更为严重。这种输入端与输出端初始直流电位不为零的直接耦合放大电路，作为专用设备中的放大环节是可以的，因为在专用设备中放大电路的输入信号源和负载都是固定的，可以事先考虑到初始电位不为零这一条件来设计整个系统。但是作为通用设备中的直流放大器则往往是不适宜的。例如，通用示波器等设备中的直流放大器，如果放大器的初始直流电位不为零，那么示波器用于观察不同电路的波形时，相当于接入具有不同内阻的信号源，由于信号源内阻对直流放大器的影响，有可能使示波器在一些场合不能正常工作，这显然是不能允许的。因此，作为通用设备中的直流放大器通常要求它的输入端与输出端初始直流电位为零。这样，只有当有信号输入时，输入端与输出端的电位才随之变化。怎样才能使输入端与输出端初始直流电位为零呢？

使直流放大电路输入端与输出端初始直流电位为零，在单电源放大电路中是有困难的，因此，一般都采用双电源电路。图 5-3 所示的两级直流放大电路，就是采用了正电源 E_1 和负电源 E_2 的双电源供电。通过反复调整偏流电阻 R_{b1} 和发射极电位器 R_w ，可以使放大电路有合适的工作点，还能使输入端的直流电位对地为零。

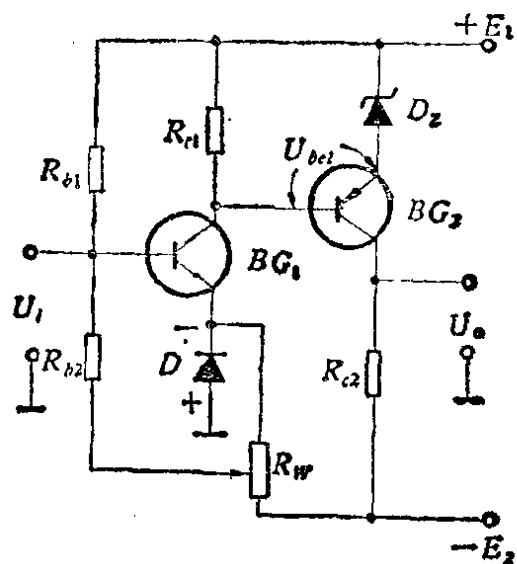


图 5-3 输入端与输出端初始直流电位为零的电路

由于 BG_1 是 NPN 型三极管，在正常工作状态时，其集电

极电位比基极电位高得多；而 BG_2 是 PNP 型三极管，在正常工作状态下，其集电极电位比基极电位低得多。利用 NPN 型三极管与 PNP 型三极管相互搭配使用，使多级直流放大器的直流电位得到调整。避免了用同一类型三极管的多级放大器要求过高的电源电压，以及使输出端的初始直流电位偏离零值。

选择合适的稳压管 D_z ，使稳压管上的电压 U_{D_z} 与 U_{be2} 之和等于 R_{c1} 上的电压降，使 BG_2 有合适的工作点。再调整电阻 R_{c2} 的阻值，就可以使放大电路输出端的初始直流电位为零。

应该指出， BG_1 发射极所接二极管 D 是处于正向导通状态。如果选择二极管的特性使它与三极管 BG_1 发射结 ($e-b$) 的特性相似，则二极管两端的电压 U_D 与三极管的 U_{be1} 是大小相等，极性相反。因此，二极管可以起到温度补偿作用。

综上所述，直接耦合放大电路直流电位的相互牵制、相互影响是设计和使用时必须注意解决的问题。通过上面的分析可以看出，只要认真对待，这个问题也并不难解决。真正需要用大力解决的还是多级直流放大电路的零点漂移问题。

二、多级直流放大电路的零点漂移

1. 什么叫做直流放大电路的零点漂移

在第二章里，我们已经讨论了阻容耦合交流放大电路的工作点稳定问题。我们知道，当温度变化时，三极管的参数也发生变化，因而引起放大电路工作点的缓慢移动，但在阻容耦合交流放大电路中，各级工作点的缓慢变化不会通过隔直流电容加到下一级去，更不会逐级放大，所以只要采用一定形式