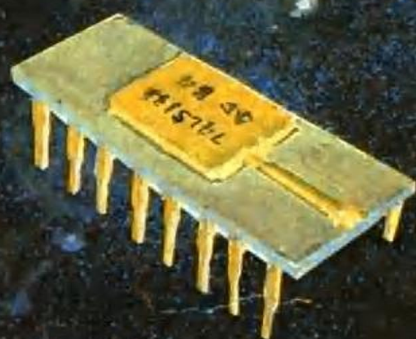




音响设备集成电路原理和应用

YINXIANGSHEBEI JICHENGDIANLU YUANLI HE YINGYONG

浙江科学技术出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了音频功率放大器、低噪声前置放大器、高频中频放大器、立体声解码器、电平显示驱动器、单片收音机、单片录音机和录音机电机稳速器等八大类音响设备集成电路。分别绘出了各类音响设备集成电路国内外近期典型产品的内电路和电性能参数；详细地分析了它们的内电路和应用电路的工作原理；完整地提供了它们的典型应用电路、元器件参数、应用实例及其代换。

本书可供从事音响设备制造、维修和使用人员参考，也可作为大中专院校音响和电子技术专业师生教学参考书，同时可供广大电子技术爱好者阅读。

音响设备集成电路原理和应用

潘瑞华 编著

*

浙江科学技术出版社出版

浙江教育印刷厂排版

浙江新华印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本：787×1092 1/16 印张：27 字数：660,000

1986年5月第一版

1986年5月第一次印刷

印数：1—11,080

统一书号：15221·111

定 价：4.50元

责任编辑：任路平

封面设计：潘孝忠

前 言

目前,国内外调频调幅收音机、各式录音机、音乐中心、音响组合机、扩音装置等音响设备中使用集成电路已日趋普遍。集成电路是现代电子技术的精华。它的广泛采用,不仅在性能、功能、可靠性诸方面为音响设备整机产品质量指标的提高奠定了基础,同时还为降低成本、简化设计、调试、维修手续开拓了新路子。

随着集成技术和音响技术的相互渗透、相互促进,音响设备集成电路发展之迅速、品种之繁多、电路之新颖是惊人的。本书系统地介绍了音频功率放大器、低噪声前置放大器、高频中频放大器、立体声解码器、电平显示驱动器、单片收音机、单片录音机和录音机电机稳速器等八大类音响设备集成电路;分别给出了各类音响设备集成电路国内外典型产品的内电路和电性能参数,详细地分析了它们的内电路和应用电路的工作原理,完整地提供了它们的典型应用电路、元器件参数、应用实例及其代换。

本书在分析问题,以定性分析为主,并辅以必要的定量分析,以便有助于提高读者应用理论知识分析和解决音响设备集成电路实际问题的能力。为了及时反映国内外的先进水平,书内所述近百种音响设备集成电路均属国内外近期产品。其中有些内容在国内书刊中还是首次发表。如果它对我国音响设备集成电路的应用和音响设备设计、调试、维修水平的提高能作出微薄的贡献,作者就十分欣慰了。

潘瑞华

1985年2月

目 录

第一章 音响设备集成电路基础	(1)
1—1 放大电路.....	(1)
一、单端直耦放大	
二、差分放大器	
三、有源负载放大	
1—2 双差分电路.....	(12)
一、双差分电路的工作原理	
二、双差分混频电路	
1—3 恒流源与稳压源偏置电路.....	(19)
一、常用恒流源电路	
二、横向管与恒流源	
三、稳压源偏置电路	
1—4 输出级的基本电路形式.....	(29)
一、单管射极跟随器	
二、互补输出电路	
三、BTL电路	
1—5 电平、增益、频率的自动控制.....	(40)
一、自动录音电平控制 (ALC) 电路	
二、自动增益控制 (AGC) 电路	
三、自动频率控制 (AFC) 电路	
第二章 音频功率放大器集成电路	(49)
2—1 单通道功率放大器集成电路.....	(49)
一、LA4100、LA4101、LA4102集成电路	
二、LA4110、LA4112集成电路	
三、LA4140集成电路	
四、LA4220集成电路	
五、TBA810S集成电路	
六、TBA820集成电路	
七、 μ PC2002集成电路	
八、LA4135集成电路	
九、SL33、SL34集成电路	
2—2 双通道功率放大器集成电路.....	(113)
一、LA4170、LA4175、LA4177集成电路	
二、AN7145 (L、M、H) 集成电路	
三、TA7232P集成电路	

四、TA7240P集成电路	
五、LA4120、LA4125、LA4125T集成电路	
六、SL36集成电路	
七、TA7236集成电路	
2—3 大功率功率放大器集成电路·····	(146)
一、STK084(G)、STK086(G)集成电路	
二、STK457、459、460、461、463、465集成电路	
三、TDA2006集成电路	
第三章 低噪声前置放大器集成电路·····	(160)
3—1 无ALC的单通道前置放大器集成电路·····	(160)
一、LA3110、LA3120集成电路	
二、LA3150集成电路	
3—2 有ALC的单通道前置放大器集成电路·····	(168)
一、LA3201集成电路	
二、LA3210集成电路	
3—3 无ALC的双通道前置放大器集成电路·····	(181)
一、LA3115、LA3122集成电路	
二、LA3155集成电路	
三、LA3160、LA3161集成电路	
四、HA1452集成电路	
五、AN7311集成电路	
3—4 有ALC的双通道前置放大器集成电路·····	(200)
一、LA3220集成电路	
二、TA7668集成电路	
第四章 高频、中频放大器集成电路·····	(208)
4—1 AM变频、中频放大集成电路·····	(208)
一、FS315、SL315、XG1101集成电路	
二、FD304、SL1018AM、TB1018集成电路	
4—2 AM/FM中频放大器集成电路·····	(215)
一、LA1201集成电路	
二、 μ PC1018C集成电路	
三、AN260集成电路	
4—3 AM/FM多功能高频、中频放大集成电路·····	(240)
一、TA7640AP集成电路	
二、TDA1220A集成电路	
三、TA7335P集成电路	
第五章 立体声解码器集成电路·····	(276)
5—1 调频立体声技术·····	(276)

一、调频立体声广播与接收	
二、导频制立体声复合信号	
三、调频立体声解码方式	
5—2 高Q线圈式立体声解码器集成电路	(287)
LA3300、LA3301集成电路	
5—3、锁相环式立体声解码器集成电路	(295)
一、LA3361集成电路	
二、TA7343P集成电路	
三、ULN—3809A集成电路	
四、LA3350集成电路	

第六章 电平显示驱动器集成电路 (329)

6—1 LED电平显示原理	(329)
6—2 单列、双列五点LED电平显示驱动器集成电路	(333)
一、LB1405、LB1415集成电路	
二、N5405、N5115集成电路	
三、TA7666P集成电路	
四、SL322集成电路	
五、SL323集成电路	
六、SL325集成电路	
6—3 六、七、九点LED电平显示驱动器集成电路	(368)
一、SL326集成电路	
二、SL327集成电路	
三、LB1407、LB1417集成电路	
四、LB1409集成电路	

第七章 单片收音机集成电路 (384)

7—1 单片AM收音机集成电路TA7641	(384)
7—2 单片AM/FM收音机集成电路	(389)
一、ULN—2204A集成电路	
二、TA7613AP集成电路	

第八章 单片录音机和录音机电机稳速器集成电路 (405)

8—1 单片录音机集成电路	(405)
一、TA7225、TA7223、TA7628集成电路	
二、HA1361、 μ PC1350集成电路	
8—2 录音机电机稳速器集成电路LA5511、LA5512	(414)

附录一 国内外音响设备集成电路对照简表

附录二 国内音响设备集成电路主要生产厂一览表

主要参考书目

第一章 音响设备集成电路基础

随着集成技术的发展,国内外音响设备日趋集成化。它对音响设备体积的缩小、性能指标的提高、可靠性的增加、调试过程的简化都发挥了愈来愈明显的效果。特别是对于大批量生产和日常维修,更带来方便。目前,世界上为用于收音机、录音机、扩音机等音响设备设计制造的集成电路,在品种和产品数量上已占据模拟集成电路的首位。是模拟集成电路的一个重要而独立的分支。这类集成电路习惯上称为音响集成电路(AUDIO INTEGRATED CIRCUIT),简称音响IC。

常见的音响集成电路有功率放大集成电路、低噪声前置放大集成电路、高频中频放大集成电路、立体声解码器集成电路、电平指示驱动集成电路、单片收音机录音机集成电路和特殊功能集成电路。至今世界上约有近四十家公司和厂商生产六百余种型号的音响集成电路。已从七十年代的单一功能电路发展成为多功能复合电路,品种齐全,电路成熟,集成度也有很大提高。我国音响集成电路的生产,从无到有、从仿制到自行设计,已初具规模。特别是最近这两年发展很快,质量不断提高,品种已趋齐全。

根据集成工艺的生产实际和音响设备的客观要求,音响集成电路中常用的基本电路有:放大电路、双差分电路、恒流源电路、偏置电路、自动电平控制电路、互补输出电路。掌握这些基本电路的电路组成、工作原理和分析计算方法是我们学习、分析、应用音响集成电路的基础。

1—1 放大电路

在音响集成电路中,耦合电容和变压器的集成化十分困难,因此其放大电路多数采用直接耦合放大电路,而不采用变压器耦合放大电路,也很少采用阻容耦合放大电路。所谓直接耦合,就是用导线或电阻、二极管等元件,把前级放大器的输出与后级的输入直接相连。因此其级与级之间的直流工作状态是互有影响而并非独立的。

为了保证各放大级的晶体管均能处于放大工作状态,在音响集成电路的设计中采用了相应的级间耦合方式。使每一级放大电路不仅具有合适的静态工作点,而且具有足够的动态范围。由于直接耦合放大电路存在着零点漂移的特殊问题,因此在音响集成电路中较广泛地采用差分放大器,同时还采取一定的补偿方式。所谓零点漂移(Zero shift)是指放大器输入端短路时(即无信号输入时),输出电压偏离原来的起始点(某一额定值,一般多数为零电位)而上下漂动的现象。

在音响集成电路中所用放大电路常见的有单端直耦放大、差分放大和有源负载放大等电路。当然,按照其输入输出公共端子的不同,也有共发射极接法、共集电极接法和共基极接法三种基本组态的连接方式。

一、单端直耦放大

用同类型晶体管组成的单端直耦放大电路如图1—1所示。它们都是通过抬高第二级发射极电位的方法来实现级间耦合，以保证合适的工作点和所需的动态范围。其中图(a)是在 T_2 发射极串入电阻 R_e ，利用 T_2 管发射极电阻 R_e 上的电压降来抬高 T_2 管的发射极电位($V_{e2} = I_{e2} \cdot R_e$)。由于电阻 R_e 的存在，也起到电流串联负反馈的作用。提高了工作点和增益的稳定性。而对于增益和动态范围的大小却带来一定的损失。图(b)是利用二极管 D 的正向电压降 V_D 来抬高 T_2 管的发射极电位($V_{e2} = V_D$)。我们知道，处于正向偏置状态的二极管的动态电阻很小，因此它对信号传输的影响和损失甚微。克服了上述发射极串接电阻 R_e 所存在的问题。在音响集成块的实际电路中，往往用数个二极管正向串接使用，以使发射极电位抬高到所需的电平值($V_e = n \cdot V_D$)。图(c)是用反向串入稳压二极管 D_z 来抬高 T_2 管的发射极电位($V_{e2} = V_z$)，由于工作于稳压状态的稳压二极管的动态电阻更小，因此其电流串联负反馈作用可以忽略。电路中的电阻 R_{DZ} 是稳压管电路的限流电阻。以提供稳压二极管合适的工作电流，使其工作于稳压区域，保证其两端具有恒定的 V_z 稳压值。

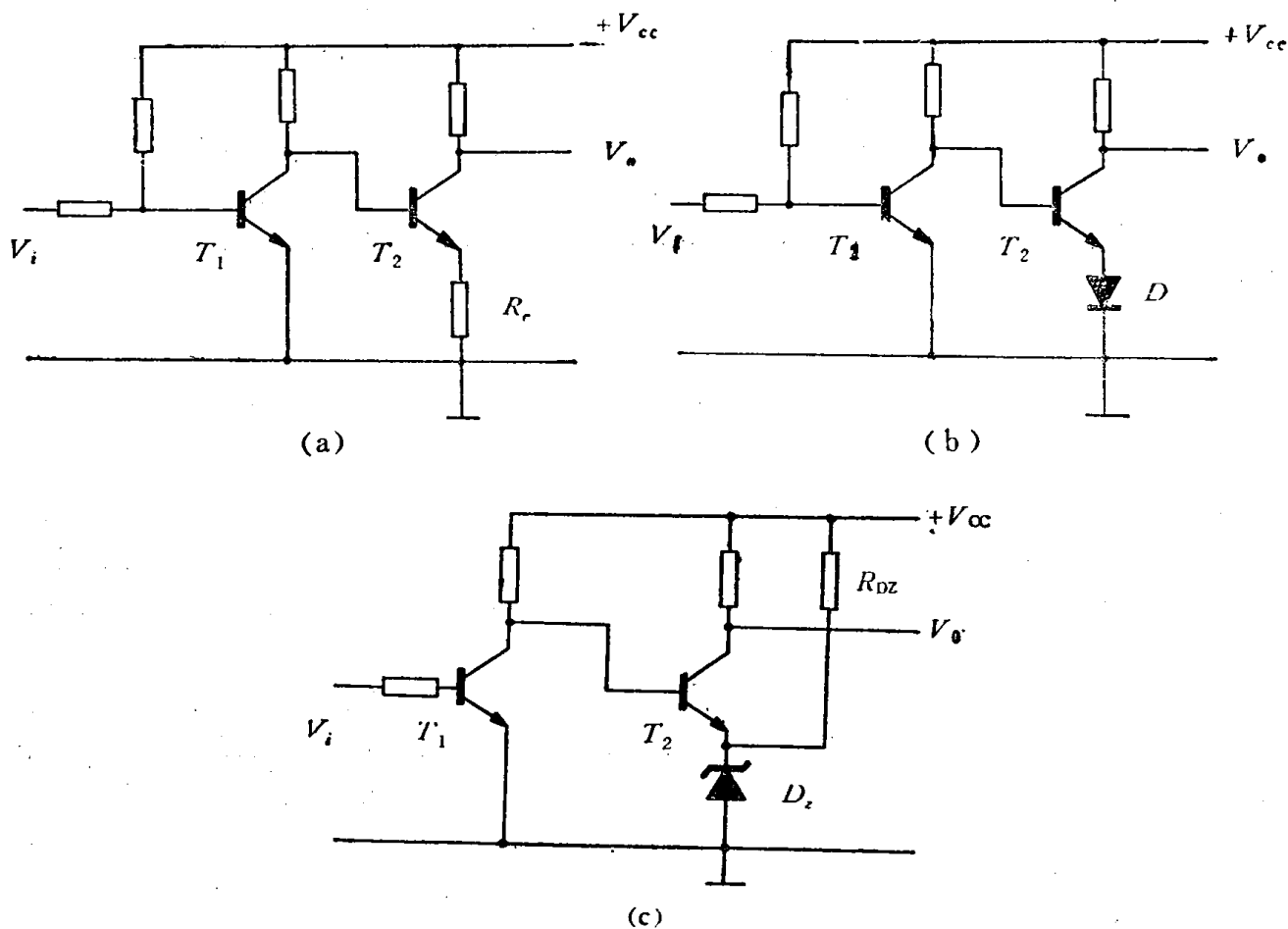


图 1—1

用 NPN 和 PNP 两种不同类型晶体管交替配合使用的单端直耦放大电路如图 1—2 所示。 T_1 管为 NPN 管， T_2 为 PNP 横向管(详见本章第三节内容)。利用 NPN 管和 PNP 管对电

源电压极性和各极电压极性的要求恰好相反这一显著特点, 交替配合使用。从而克服了同类型晶体管多级直耦放大时集电极电位逐级上升的缺点。电阻 R_{e2} 是 T_2 管的发射极电阻, 用以压低 T_2 管的发射极电位, 使之与 T_1 管集电极电位相吻合。有时为了提高 T_2 级增益, 常用二极管或稳压二极管代替 R_{e2} , 以削弱对信号所呈现的电流串联负反馈作用。电阻 R_{c1} 、 R_{c2} 分别是 T_1 、 T_2 管的集电极负载电阻。在音响集成电路的集成工艺中, 在制作 NPN 管的同时, 能够较方便地制作出 PNP 横向管, 因此这种 NPN - PNP 单端直耦放大电路常被采用。

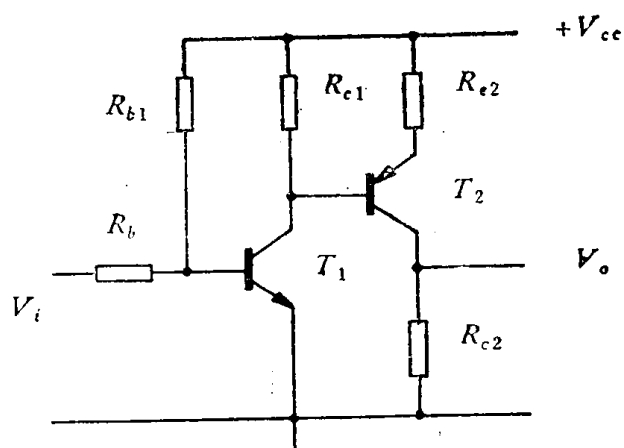


图 1-2

鉴于多级直耦放大电路中, 前级放大器输出端的漂移电压通过直接耦合, 可直接送到下一级放大器输入端进行逐级放大, 致使无输入信号时, 放大器的输出端也有“漂移信号”输出。而零点漂移的主要原因来自温度的变化。因此在音响集成电路的单端直耦放大电路中, 常采用补偿处理的方法来克服零点漂移。充分发挥集成工艺制作晶体管的方便, 在单端直耦放大电路中有意识地接入有关二极管、三极管。利用这些半导体器件参数随温度变化的特点来抵消放大电路中晶体管的温度漂移。由于集成工艺的一致性, 这种抵消补偿效果能做得相当理想。

图 1-3 就是利用基极回路接入反向工作的二极管的温度补偿电路。当温度升高时, 二极管 D 的反向电流增大, 对晶体管 T 的基极电流的分流作用加大, 从而使注入 T 管基极的电流 I_b 减小。 I_b 的减小引起 I_c 的下降。电路设计得当, 可抵消由于温度升高而引起 I_c 的增加量, 起到温度补偿克服该级电路的温度漂移。

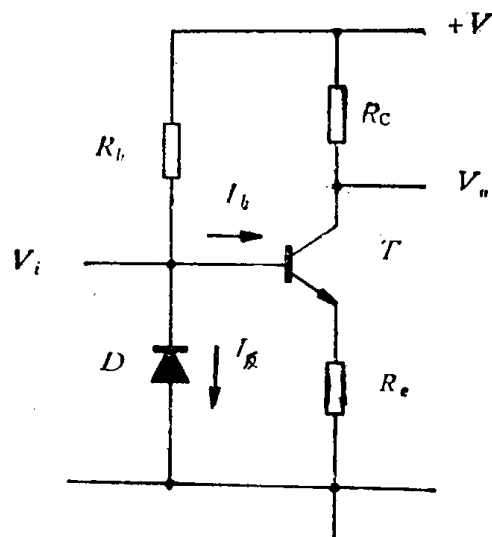


图 1-3

图 1-4 是利用基极回路接入正向工作的二极管进行温度补偿的电路。温度升高时, 晶体管 T_1 的发射结电压 V_{be1} 减小, 而晶体二极管 D 的 PN 结正向压降 V_D 也要减小。当 V_D 的减小量 $\Delta V_D / \Delta T$ 和 V_{be1} 的减小量 $\Delta V_{be1} / \Delta T$ 相近时, 两者的变化可以抵消, 起到满意的温度补偿效果。为了使 $\Delta V_D / \Delta T = \Delta V_{be1} / \Delta T$, 在音响集成电路中, 往往将同时制作的另一只晶体三极管 T_2 的集电极和基极相短接, 作为二极管来代替图 1-4 (a) 中的二极管 D 。利用发射结二极管 T_2 的温度特性和晶体管 T_1 发射结温度特性的工艺一致性, 获得良好的补偿效果, 减小温度漂移。电路如图 1-4 (b) 所示。

对于共发射极接法单端直耦放大电路, 它的电压增益

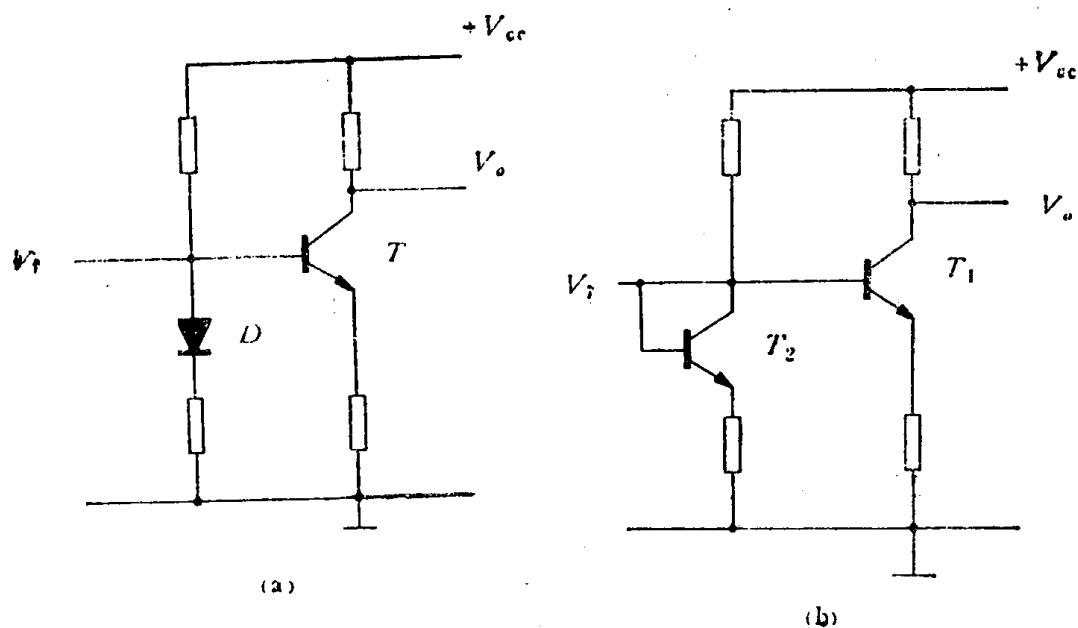


图 1—4

$$A_v = - \frac{h_{fe} R_L'}{h_{ie}}$$

式中 $R_L' = R_C // R_L // \frac{1}{h_{oe}}$

$$h_{ie} = r_{bb'} + (1 + h_{fe}) \frac{26}{I_{cQ}}$$

对于低频晶体管 $r_{bb'}$ 约为 200~300 欧姆，高频晶体管 $r_{bb'}$ 约为 30 欧姆左右。当工作于小信号放大状态时， I_{cQ} （或 I_{bQ} ）较小，满足

$$(1 + h_{fe}) \frac{26}{I_{cQ}} \gg r_{bb'}$$

故可认为

$$h_{ie} \approx (1 + h_{fe}) \frac{26}{I_{cQ}} = \frac{26}{I_{bQ}}$$

放大器的输入电阻

$$R_i \approx R_b // h_{ie}$$

当 R_b 足够大时，可近似认为

$$R_i \approx h_{ie} \approx \frac{26}{I_{bQ}}$$

可见，当 I_{bQ} 增大（工作点电流增大）时，使 h_{ie} 减小，将引起放大器输入电阻的降低。

二、差分放大器

差分放大器的典型电路如图 1—5 所示。它是由两个结构完全对称的单管共发射极放大电路组成。它的发射极连在一起， R_e 为发射极耦合电阻。因此又称为发射极耦合差分放大电路，简称“射耦对”。由于集成工艺生产的一致性，电路两边元器件参数和特性可做得完全

一致，无论是温度变化或电源变化所引起的漂移，在差分放大器的输出端（ T_1 、 T_2 管的集电极之间）都可以得到理想的抑制。从而有效地克服了直耦放大所存在零点漂移的特殊问题。至今差分放大器已成为音响集成电路中的主要电路形式之一。

差分放大器有两个输入端和两个输出端，根据输入信号源情况和输出端所接负载情况的不同，可以有双端输入双端输出、单端输入双端输出、双端输入单端输出、单端输入单端输出四种连接方式。

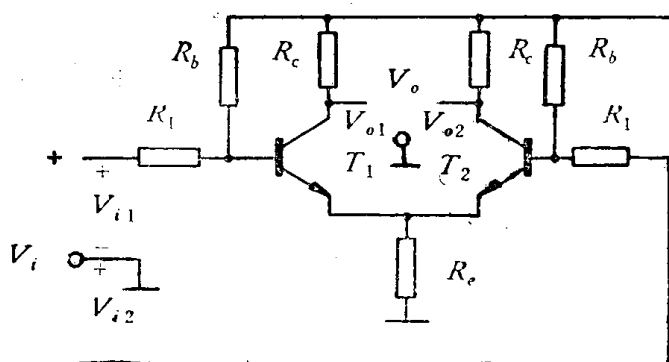


图 1—5

习惯上将差分放大器两个输入端所加的大小相等、相位相反的信号称为差模信号（difference-mode）。而将所加大小相等、相位相同的信号称为共模信号（common-mode）。因此，对于由温度和电源变化所引起的漂移信号，鉴于音响集成电路工艺的一致性，均可以用共模信号来等效。当两个输入端所加信号为任意信号时，我们均可采用迭加原理将其分解为差模信号和共模信号的合成。设 V_{i1} 、 V_{i2} 为两个任意值输入信号。我们可将其分解为一对共模信号（ V_{ic} ）和一对差模信号（ V_{id}' ）之和。

$$\text{即 } V_{i1} = V_{ic} + V_{id}'$$

$$V_{i2} = V_{ic} - V_{id}'$$

$$\text{可见 } V_{ic} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2}$$

$$V_{id}' = \frac{V_{i1} - V_{i2}}{2}$$

例如：当输入信号 $V_{i1} = 2\text{mV}$ ， $V_{i2} = 1\text{mV}$ 。则可分成

$$V_{ic} = \frac{2 + 1}{2} = 1.5\text{mV}$$

$$V_{id}' = \frac{2 - 1}{2} = 0.5\text{mV}$$

$$\text{即 } V_{i1} = (1.5 + 0.5)\text{mV} \quad V_{i2} = (1.5 - 0.5)\text{mV}$$

这对差分放大器性能的分析将带来方便。

图 1—5 所示为双端输入双端输出差分放大电路。当输入差模信号时（ $V_{i1} = -V_{i2}$ ），流过发射极电阻 R_e 的信号电流大小相等、方向相反。因此发射极耦合电阻 R_e 对差模信号而言可视为短路。所以其差模电压增益

$$\begin{aligned} A_{vd} &= \frac{\text{差模双端输出电压}}{\text{差模双端输入电压}} = \frac{V_o}{V_i} \\ &= \frac{V_{o1} - V_{o2}}{V_{i1} - V_{i2}} = \frac{2V_{o1}}{2V_{i1}} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} \\ &= \frac{-h_{fe} R_L'}{R_i + h_{ie}} \end{aligned}$$

可见，在双端输入、双端输出的情况下，差分放大器的电压增益和一个单管的共发射极放大

器相同。式中 $R_L' = R_c // \frac{R_L}{2}$ 。

它对差模信号所呈现的输入电阻，俗称差模输入电阻，以 R_{id} 表示。可见

$$R_{id} = 2(R_1 + h_{ie})$$

若无外接电阻 R_1 ，则

$$R_{id} \approx 2h_{ie}$$

当输入共模信号时 ($V_{i1} = V_{i2}$)，两管流过发射极耦合电阻 R_e 的信号电流的大小和方向相同。因此对于共模信号而言，射耦电阻 R_e 起着二倍于 R_e 阻值的电流串联负反馈作用。再则，在实际电路中， R_e 值选得较大。所以每一管对共模信号的电压增益 $A_{vc1} = A_{vc2} \ll 1$ 。而对于图 1—5 所示双端输出电路的共模电压增益

$$A_{vc} = \frac{V_{oe}}{V_{ic}} = \frac{V_{oe1} - V_{oe2}}{V_{ic}} \approx \frac{0}{V_{ic}} = 0$$

因此它对等效于共模信号的漂移信号能起很好的抑制作用。射耦电阻 R_e 好比从发射极拖出的一个尾巴， R_e 愈大、稳定性能愈好，相当于尾巴愈长。所以这种电路又称为“长尾式差分放大器电路”。

为了衡量差分放大器对差模信号的放大和对共模信号的抑制能力，往往以共模抑制比 CMRR* 表示。并定义为差分放大器的差模增益与共模增益之比，

即
$$CMRR = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right|$$

或用对数形式（单位为分贝）表示为

$$CMRR = 20 \lg \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad (\text{dB})$$

CMRR 愈大，说明差分放大器对共模信号的抑制能力愈强。在理想对称的情况下，对于双端输出时的 CMRR 可视为无穷大。

图 1—6 (a) 是双端输入单端输出的典型差分放大器电路。输入信号从 T_1 、 T_2 管基极加入，输出信号从 T_2 管集电极取出。因此其差模电压增益

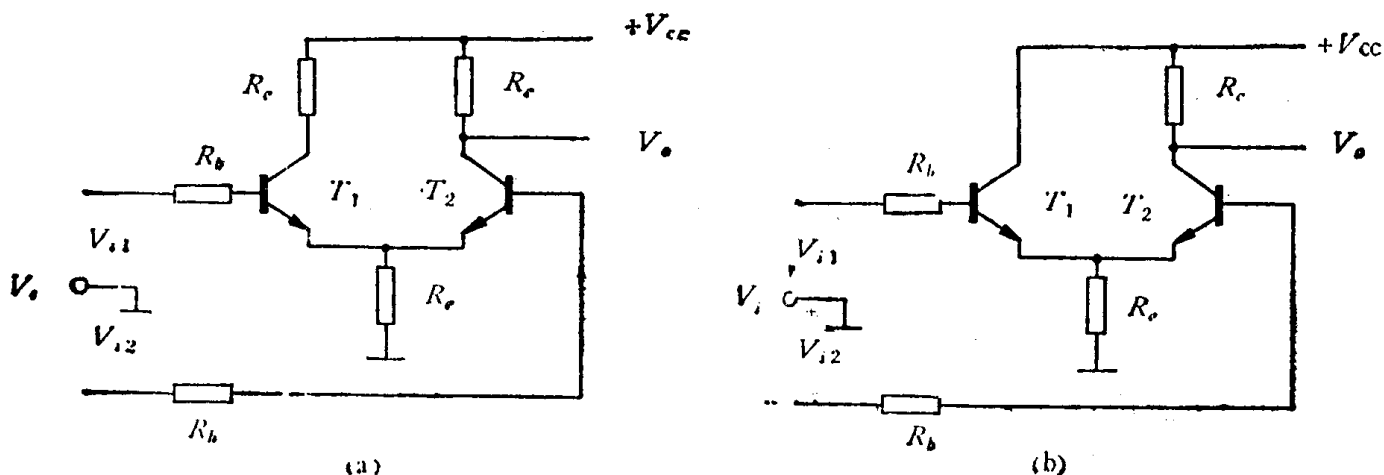


图 1—6

* CMRR—“Common Mode Rejection Ratio”

$$\begin{aligned}
 A_{vd} &= \frac{\text{差模单端输出电压}}{\text{差模双端输入电压}} = \frac{V_{o2}}{V_i} \\
 &= \frac{V_{o2}}{V_{i1} - V_{i2}} = \frac{V_{o2}}{-2V_{i2}} = -\frac{1}{2} \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{fe} R_L'}{R_b + h_{ie}}
 \end{aligned}$$

可见,在双端输入单端输出的情况下,差分放大器的电压增益为单管共发射极放大电压增益的一半。输入输出信号之间的相位关系视由那一差分对管集电极取出而定。式中 $R_L' = R_c // R_L$ 。它对差模信号所呈现的差模输入电阻

$$R_{id} = 2(R_b + h_{ie})$$

在音响集成电路的实际电路中,对于无信号输出一侧的集电极电阻 R_c 往往省掉不接,如图 1—6(b) 所示。因为它对差分放大器的差模电压增益 A_{vd} 、差模输入电阻 R_{id} 等性能指标均无影响。当然集电极电路的对称性差了一点。但是,由于输入电路对称,它们的 V_{BE} 、 h_{ie} 、 h_{fe} 相等,在忽略晶体管内部反馈时,可以认为两管的集电极电流仍是近似相等而对称的。

图 1—7(a) 是单端输入单端输出的典型差分放大器电路。其差模电压增益

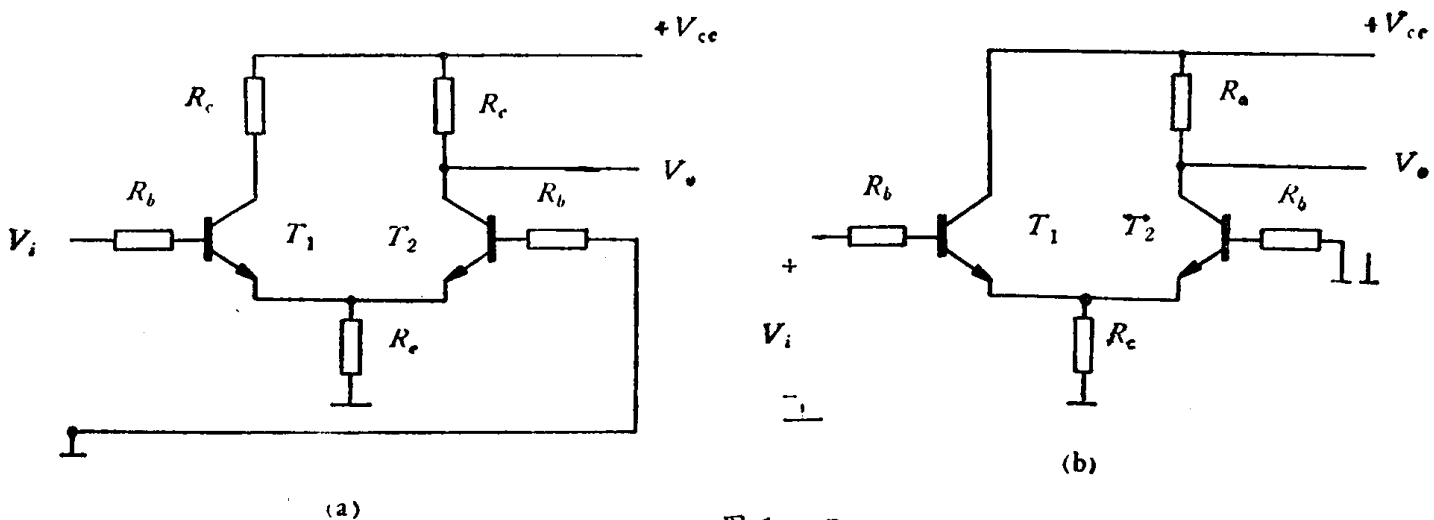


图 1—7

$$\begin{aligned}
 A_{vd} &= \frac{\text{差模单端输出电压}}{\text{差模单端输入电压}} = \frac{V_o}{V_i} \\
 &= \frac{V_{o2}}{-2 \cdot (-\frac{1}{2} V_{i2})} = -\frac{1}{2} \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{fe} \cdot R_L'}{R_b + h_{ie}}
 \end{aligned}$$

可见,在单端输入单端输出的情况下,差分放大器的电压增益也为单管共发射极放大电压增益的一半。输入输出信号之间的相位关系也视由那一差分对管集电极取出而定。式中 $R_L' = R_c // R_L$ 。它的差模输入电阻

$$R_{id} = 2(R_b + h_{ie})$$

在实际的音响集成电路中,对于无信号输出一侧的集电极电阻 R_c 也常常省掉不接,如图

1—7(b)所示。

图1—8是单端输入双端输出差分放大器的典型电路。其差模电压增益

$$\begin{aligned} A_{vd} &= \frac{\text{差模双端输出电压}}{\text{差模单端输入电压}} = \frac{V_o}{V_i} \\ &= \frac{V_{o1} - V_{o2}}{2 \cdot \frac{1}{2} V_i} = \frac{2 V_{o1}}{2 V_{i1}} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} \\ &= - \frac{h_{fe} \cdot R_L'}{R_b + h_{ie}} \end{aligned}$$

可见，在单端输入双端输出的情况下，差分放大器的电压增益与单管共发射极放大的电压增益相同。式中 $R_L' = R_c // \frac{R_L}{2}$ 。它的差模输入电阻

$$R_{ic} = 2(R_b + h_{ie})$$

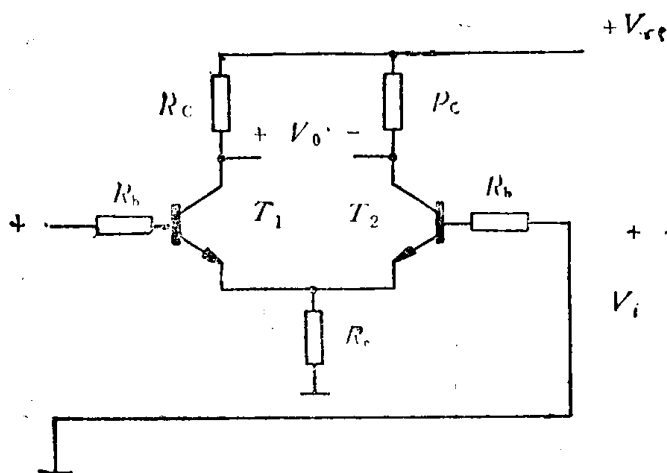


图 1—8

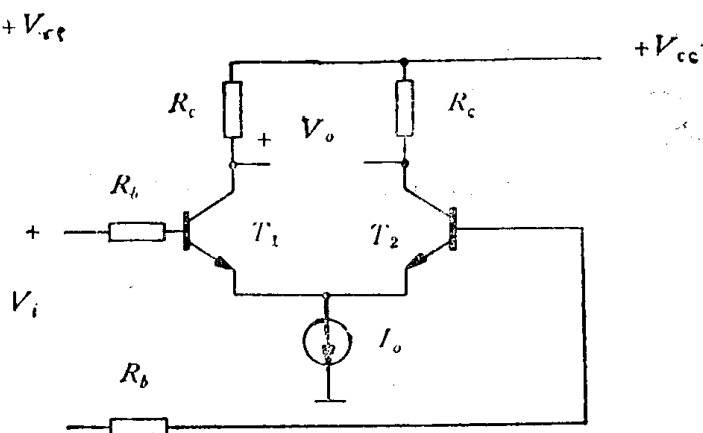


图 1—9

在音响集成电路中，为了进一步提高差分放大器的共模抑制比CMRR，常采用恒流源代替发射极耦合电阻 R_e ，组成图1—9所示具有恒流源的典型差分放大器。这是由于恒流源的动态电阻近似无穷大，而直流电阻很小，因此既提高了对共模信号的抑制能力，又不影响差放的直流工作状态。

差分放大器的差模传输特性是指差分放大器在输入差模信号时，输出电流 I_{c1} 、 I_{c2} 随差模输入电压 $V_d = V_{i1} - V_{i2}$ 变化的特性。习惯上常以横轴为输入量、纵轴为输出量的直角坐标系中的曲线来表示，如图1—10所示。

我们知道晶体管发射极电流 I_e 与发射结电压 V_{be} 之间存在下列关系

$$I_e = I_{es} \left(e^{\frac{q V_{be}}{k T}} - 1 \right) = I_{es} \left(e^{\frac{V_{be}}{V_T}} - 1 \right)$$

在室温时($T = 300K$)，电压温度当量 $V_T = \frac{kT}{q} \approx 26mV$ ，当晶体管处于放大状态时，发

射结正偏电压 $V_{be} \gg V_T$ ，即 $e^{\frac{V_{be}}{V_T}} \gg 1$

故 $I_e = I_{es} \cdot e^{\frac{V_{be}}{V_T}}$

由于集成工艺的一致性，差分对管特性对称无异。因此

$$I_o = I_{c1} + I_{c2} = I_{c1} \left(1 + \frac{I_{c2}}{I_{c1}} \right)$$

$$= I_{c1} \left[1 + e^{\frac{V_{be2} - V_{be1}}{V_T}} \right]$$

$$= I_{c2} \left[1 + e^{\frac{V_{be1} - V_{be2}}{V_T}} \right]$$

$$I_{c1} = \alpha I_{c1} = \frac{\alpha I_o}{1 + e^{\frac{V_{be2} - V_{be1}}{V_T}}}$$

$$I_{c2} = \alpha I_{c2} = \frac{\alpha I_o}{1 + e^{\frac{V_{be1} - V_{be2}}{V_T}}}$$

而 $V_{id} = V_{i1} - V_{i2} \approx V_{be1} - V_{be2}$ (设 $R_b = 0$)

所以

$$\left. \begin{aligned} I_{c1} &\approx \frac{\alpha I_o}{1 + e^{-V_{id}/V_T}} \\ I_{c2} &\approx \frac{\alpha I_o}{1 + e^{V_{id}/V_T}} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式(1-1)称作差模传输特性方程。图1-10是其差模传输特性曲线。图中横坐标表示以

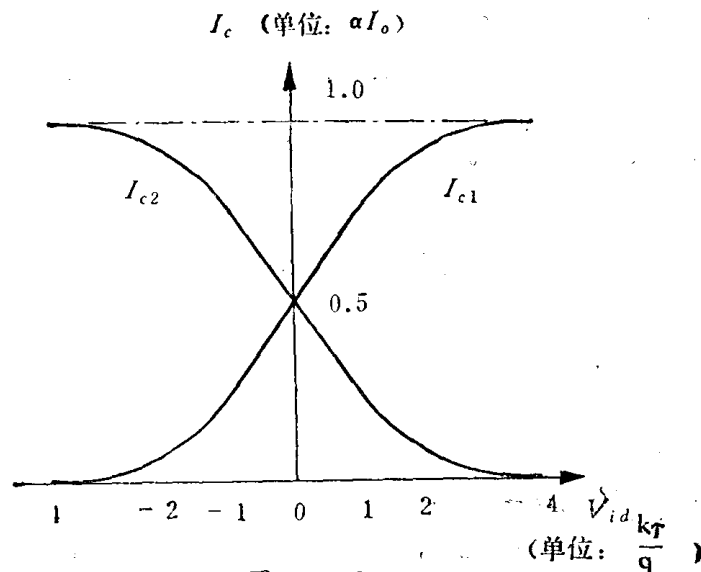


图1-10

$\frac{kT}{q} = V_T$ 为单位的差模输入电压 V_{id} ，纵坐标表示以 αI_o 为单位的集电极电流 I_c (I_{c1} 、 I_{c2})。可见，当 $V_{id} > 0$ 时， I_{c1} 随 V_{id} 的增大而增大，而 I_{c2} 却随 V_{id} 的增大而减小。当 $V_{id} < 0$ 时， I_{c1} 减小、 I_{c2} 增大。但两者之和始终不变并等于 αI_o 。在室温 $T = 300K$ 时，当 $V_{id} > |\pm 194 mV| = |\pm 4 \cdot \frac{kT}{q}|$ 左右时，差分对管集电极电流 I_{c1} 、 I_{c2} 将不随 V_{id} 的变化而变化，趋于基本恒定（接近于 αI_o 或为零）。这表明差分放大器在足够幅度信号输入时，

具有理想的双向硬限幅特性。因此，它常被用来作为限幅器。在音响集成电路的高中频放大集成电路中，就是利用这一点来实现调频中频的限幅放大。当 $V_{id} = 0$ 时，差分放大器处于平衡状态，每个集电极均流过 $0.5 \alpha I_0$ 的电流。在平衡状态的工作点附近， $V_{id} = 0 \sim$

$|\pm \frac{kT}{q}| = |\pm 26\text{mV}|$ 的范围内，差模输入电压 V_{id} 和集电极电流 $I_c (I_{c1}, I_{c2})$ 呈线性关系。这就是差分放大器用作小信号线性放大的输入范围。这时两管集电极电流分别为

$$I_{c1} \approx \frac{\alpha I_0}{2} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{V_{id}}{V_T} \right]$$

$$I_{c2} \approx \frac{\alpha I_0}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{V_{id}}{V_T} \right]$$

超出此范围，输入—输出线性关系变坏，输出信号开始出现失真。这在选用、调试、设计有关音响集成电路时，应引起足够重视。

差分放大器在小信号运用时，集电极电流受基极输入电压的线性控制，我们称这种控制能力为差分放大器的跨导，并用 g_m 表示。反映在传输特性上，它就是差模传输特性曲线的斜率。在工作点附近，差模传输特性曲线斜率最大，跨导是一个常数。对于单端输出时的差分放大器的跨导可求得为

$$g_{m'} = \left. \frac{d I_c}{d V_{id}} \right|_{V_{id}=0} = \frac{\alpha q I_0}{4 k T} \approx \frac{1}{2 r_e}$$

对于双端输出时的差分放大器的视在等效跨导可求得为

$$g_m = 2 g_{m'} = \frac{\alpha q I_0}{2 k T} \approx \frac{1}{r_e}$$

可见，差分放大器的跨导 g_m 与温度 T 有关。温度升高、跨导减小。而更重要的是跨导 g_m 与差分对管的工作电流($I_{c0} = \frac{1}{2} I_0$)的大小有关。加大工作电流可以提高跨导，增大差放的电压增益。因此在音响集成电路中，往往运用具有恒流源的差分放大器。通过控制恒流源电流 I_0 的大小改变差分对管的工作电流。从而达到控制差分放大器增益的目的，组成常见的自动增益控制电路。

有时我们也以跨导 g_m 的形式来表示差分放大器的差模电压增益 A_{vd} ，这是因为

$$\begin{aligned} A_{vd} &= \frac{d V_{od}}{d V_{id}} = \frac{d (V_{c1} - V_{c2})}{d V_{id}} = \frac{-2 d I_c \cdot R_c}{d V_{id}} \\ &= -2 g_{m'} R_c = -g_m R_c \end{aligned}$$

即，差分放大器的差模电压增益 A_{vd} ，可表示为其跨导 g_m 与负载电阻 R_c 的乘积。因此差分放大器的输出电压

$$V_o = A_{vd} \cdot V_{id} = -g_m \cdot R_c \cdot V_{id}$$

$$\approx -\frac{1}{r_e} \cdot R_c \cdot V_{id}$$

$$\approx -20 I_0 \cdot R_c \cdot V_{id}$$

(室温 $T = 300\text{K}$)

对于图1—11所示电路，以另一输入电压 V_{i2} 控制 T_3 管的电流 I_0 。并设串有射极电阻 R_e 的 T_3 管的跨导为 g_{m3} ，则

$$I_0 \approx g_{m3} \cdot V_{i2}$$

因此其输出电压

$$V_o = -20g_{m3}V_{i1} \cdot V_{i2} \cdot R_c$$

亦即差分放大器的输出电压 V_o 与 V_{i1} 、 V_{i2} 的乘积有关，具有乘法运算的功能。在音响集成电路中，有时就应用这一乘法运算性能，利用差分放大器实现混频、变频功能。

综上所述，差分放大器在音响集成电路中已远远超出小信号线性放大和大信号限幅器的应用范围，而被广泛地用作混频、变频、振荡、检波、自动增益控制等电路环节，成为最基本最常用的电路方式。

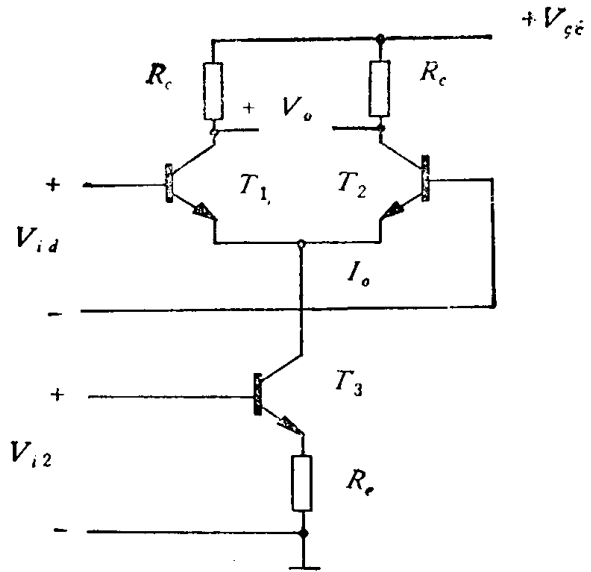


图 1—11

三、有源负载放大

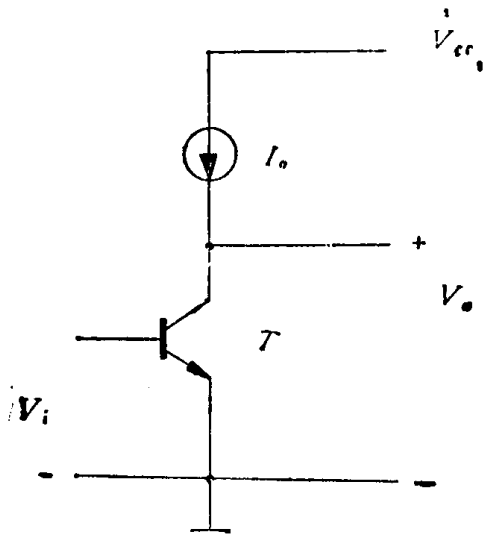


图 1—12

以共发射极接法为例，无论单端直耦放大电路或差分放大电路，其电压增益均与所用集电极负载电阻 R_c 及跨导 g_m 的大小有关。因此要提高电压增益，就得设法增大集电极负载电阻 R_c 。但是，在电源电压一定的条件下，集电极负载电阻 R_c 的增大，必然减小工作电流，使跨导 g_m 减小。得不到明显提高电压增益的效果。同时随着 R_c 的增大，使动态范围减小，晶体管易进入饱和状态。而且集成电路制作大阻值电阻较困难。因此在音响集成电路中常采用一个具有恒流源性质的有源元件来代替集电极负载电阻，组成图 1—12 所示有源负载放大电路。

这是由于恒流源 (I_o) 对于交流信号来说，它的交流动态电阻 ($r = \frac{\Delta V}{\Delta I} \approx \frac{\Delta V}{0} \rightarrow \infty$) 可视为很大；而对直流信号来说，它的直流电阻 ($R = \frac{V}{I_o}$) 可做得很小。因此利用其交流动态电阻很大的特点有效地提高了放大器电路的电压增益，同时又利用其直流电阻很小的特点保证了在一定电源电压下直流工作状态的稳定。

最简单的具有恒流源性质的有源元件就是常见的工作于线性放大状态的晶体管。从晶体管的输出特性 ($V_{ce} - I_c$)，如图 1—13 (a) 所示。当晶体管 T 的静态工作点 Q 选在输出特性曲线的平坦部分的某一点。这时晶体管集电极和发射极之间所呈现的直流电阻

$$R = \frac{V_{ceQ}}{I_{cQ}}$$