

集成运算放大器及其应用

郝 春 民

七 机 部

一院十七所情报室
七〇八所一室
六九一厂技术科

1 9 7 8 . 2 . 3 .

写在前面的话

—

随着生产和科学实验的发展，特别是火箭、导弹、飞船等航天技术的发展，半导体集成电路也得到了飞跃的进步，半导体数字电路，半导体线性电路如雨后春笋，大量涌现，已经进入了正式大量应用的时期。对许多电子电路来说，如果不考虑电路的集成化，许多问题就不能解决，这是因为集成电路有下列的优点：（1）小型化，（2）可靠性高，（3）性能好，（4）功耗低，（5）成本低。在线性集成电路中又以集成运算放大器为主体。国外自1965年首先制成 $\mu A 709$ 单片集成电路运算放大器以来，美、英、日等资本主义国家，先后生产了高增益、低漂移，高阻抗，低功耗、高电压，快速度等各式各样的集成运算放大器，品种之繁多，数量之大不亚于半导体三极管。近年来，由于线性电路应用于以电视接收机为中心的民用电子设备，所以，线性电路的产量在有的资本主义国家竟超过了数字电路。一般说来，在工业和国防上所使用的线性电路还是以集成运算放大器为多。

集成运算放大器的应用范围是十分广泛的，在线性电路的应用中，它可以做直流放大，交流放大，功率放大，有源校正网络（有源滤波），隔离级，信号发生器，等。在脉冲电路中，可以做脉冲放大，脉冲整形，比较器，脉冲发生器等。在数据处理和测量中，可以做比例器，加法器，减法器，积分器，乘法器，除法器以及各种函数发生器等。因此，集成运算放大器打入了原来的电子学的各个应用领域，如自动控制，数据处理，通讯，信号产生，稳压电源等等。

为了适应我国的社会主义革命和社会主义建设的发展，在毛主席党中央的领导下，在敬爱的周总理的关怀下，在“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”总路线的指引下，我国电子工业部门的工人，技术人员和干部，以独立自主，自立更生的精神，尽量采用先进技术，努力赶上和超过世界先进水平，使我国的半导体集成技术从无到有，从低到高，从少到多，有了一个突飞猛进的发展。我国自行设计和制造的百万次大型电子计算机成功的运行，标志着我国数字集成电路达到了一个新的水平。我国的线性集成电路，自1968年首先研制成BG301单块集成运算放大器以来，先后制成8FC2、FC3、X52、X54、BG308、4E312等中增益、高增益、低功耗、高电压、高速度等几个品种，产量逐年提高，质量不断改进，成本大幅度下降。高阻抗，低漂移等种类的集成运算放大器不久也将与使用者见面。总之，集成运算放大器已经在我国的工业、国防、以及民用产品中开始普遍应用了。其他种类的线性集成电路，如集成稳压源，集成比较器，彩色电视接收机中的各种线性电路等等，也正在生产或研制。打倒“四人帮”，生产力大解放。为了实现工业、农业、国防和科学技术的四个现代化，我国社会主义革命和建设将会飞快的发展。同样，我国的半导体集成技术也会来一个大发展。在线性集成电路中的集成运算放大器的品种会更加齐全，产量会急剧增加，成本会非常低廉。那时，集成运算放大器会象目前的半导体三极管一样，大量普及，应用在生产，科学实验和人民的日常生活的各个方面。

一九七〇年三月，我和组内几个同志，在工作中开始应用集成运算放大器，到一九七四年底，工作进行了一个阶段。当时，一些从事这方面工作的同志要求和敦促我写一点资料给他们。自己也认为工作一段后，有必要从业务上总结一下。所以，从一九七五年三月开始，写了《集成运算放大器及其应用》一文，于一九七五年五月完成初稿。

初稿完成后，只送给我的大学老师童诗白教授，我们长张德仁同志以及几个朋友，他们在技术上提出了不少非常宝贵的意见，同时还对我说了些鼓励的话。特别是赵德仁同志对这篇资料看得非常认真，仔细，不仅修改了技术上的错误，甚至修改了错别字，符号和标点。至此，这篇资料的本来任务就完成了。

以华主席为首的党中央，一举粉碎了“四人帮”，科技人员精神大解放。一九七七年一月，我所情报室，七〇八所一室，六九一厂技术科，为了满足越来越多使用集成运算放大器同志的需要，为了普及集成运算放大器的应用，打算印刷出版这篇资料。尽管自己业务水平低，写的这篇资料，不全面，不系统，理论性不强，同时从时间上已经隔了两年，有些过时，但为了对越来越多应用集成运算放大器的同志起一个抛砖引玉的作用，我还是同意了。一九七七年一月对初稿进行了一些修改。

本资料第一章叙述了集成运算放大器的原理；第二章介绍了它的基本参数和测试方法；第三章讨论了集成运算放大器的应用基础。以上三章都是为应用集成运算放大器做准备。从第四章到第九章是集成运算放大器的各种应用。这里应当指出，有关集成运算放大器的应用是十分广泛的，这里只是简单介绍，并未包括全部，有的部分虽然写了也未展开进一步讨论。第十章简略地说明了在使用集成运算放大器经常遇到的一些问题以及如何对待。

最后，还要说明的是这篇资料是应当属于集体和同志们的，因为我和同志们在工作中一起从事集成运算放大器的应用，工作中，大家共同讨论研究，共同试验，共同总结经验。在工作中，室主任，组长，特别是最早和我一起应用集成运算放大器的余洪儒、刘学明、万宏婉等许多同志，对我给予了很大帮助。没有集体的工作，没有同志们的帮助，我也是写不出这篇资料的。第三，这篇资料的印刷出版得到了十七所，七〇八所，六九一厂的领导大力支持和帮助，在印刷出版过程中，六九一厂的吴忠弟同志，七〇八所的孙明新同志，十七所张培康同志做了大量工作，付出了辛勤的劳动。特别是吴忠弟同志，不仅对资料提出了宝贵的修改意见，而且对资料的出版发行，做了大量的繁重的工作。在此，对这些同志们表示衷心的感谢。

由于本人业务水平有限，又是七五年业余时间仓促写成，虽然经过一次修改，也不够全面、系统，而谬误之处更是不可避免，敬请读者提出批评指正，不胜感谢。

作者

一九七七年九月定稿于西安

目 录

写在前面的话	(1)
第一章 集成运算放大器的原理	(1)
第一节 生产斗争和科学实验对集成运算放大器的要求	(1)
第二节 什么是集成运算放大器	(2)
第三节 差分放大电路	(6)
第四节 差分放大电路的不对称性	(8)
第五节 恒流源	(9)
第六节 缓冲电路	(10)
第七节 电平配置电路和输出级	(11)
第八节 对 BG301 集成运算放大器的分析	(13)
第九节 对 8FC2 集成运算放大器的分析	(15)
第十节 对 XFC2 集成运算放大器的分析	(17)
第十一节 对 X54 集成运算放大器电路的简单分析	(20)
第二章 集成运算放大器的基本参数和测试	(22)
第一节 开环电压放大倍数	(22)
第二节 最大输出电压幅度	(23)
第三节 输入失调电压和失调电流	(24)
第四节 输入失调电压和失调电流的温度漂移	(25)
第五节 注入基极电流	(25)
第六节 共模输入电压范围	(26)
第七节 共模抑制比	(26)
第八节 静态功耗	(26)
第九节 输出阻抗	(27)
第十节 输入阻抗	(27)
第十一节 电源电压灵敏度	(28)
第十二节 电压转换速率	(28)
第十三节 最大输出电流	(29)
第十四节 开环增益带宽和单位增益带宽	(29)
第三章 集成运算放大器的应用基础	(31)
第一节 理想运算放大器	(31)
第二节 集成运算放大器反相输入端工作	(33)
第三节 集成运算放大器同相输入端工作	(38)
第四节 集成运算放大器带负载工作时的影响	(42)

第四章 集成运算放大器做放大应用	(44)
第一节 反相输入端比例运算.....	(44)
第二节 同相输入端比例运算.....	(48)
第三节 差动放大运算.....	(53)
第四节 电压——电流变换器.....	(53)
第五节 交流放大器.....	(56)
第五章 集成运算放大器做有源校正网络	(61)
第一节 集成运算放大器反相输入端综合网络.....	(61)
第二节 集成运算放大器同相输入端综合网络.....	(64)
第三节 集成运算放大器做成负阻抗变换器综合网络.....	(67)
第四节 积分器.....	(73)
第六章 集成运算放大器做稳压电源和恒流电源	(77)
第一节 稳压源.....	(77)
第二节 恒流电源.....	(80)
第七章 集成运算放大器做检波和相敏整流	(82)
第一节 直线检波器.....	(82)
第二节 取绝对值电路.....	(83)
第三节 相敏整流放大器.....	(85)
第八章 集成运算放大器非线性应用	(87)
第一节 集成运算放大器非线性应用原理.....	(87)
第二节 限幅器.....	(88)
第三节 比较器.....	(89)
第四节 单稳态触发器.....	(91)
第九章 集成运算放大器做信号发生器	(93)
第一节 正弦信号发生器.....	(93)
第二节 方波多谐振荡器.....	(95)
第十章 集成运算放大器应用中的问题	(97)
第一节 集成运算放大器的电源保护.....	(97)
第二节 输入端的保护.....	(97)
第三节 自激振荡的消除.....	(98)
第四节 调零问题.....	(99)
第五节 集成运算放大器的温度漂移.....	(99)
第六节 提高集成运算放大器的输入阻抗和输出能力.....	(100)
附录 1 目前国内生产的集成运算放大器的品种和它的基本参数	(102)
附录 2 应用集成运算放大器的反向端综合有源网络时的四端网络 和二端网络短路转移阻抗表	(105)
附录 3 同相端综合有源网络表	(111)
附录 4 主要参考资料	(116)

第一章 集成运算放大器原理

在前面，我们已经说过，集成运算放大器的应用是十分广泛的。那末，什么是集成运算放大器呢？它为什么有如此广泛的应用呢？它的原理是怎样的？这些问题在本章中将给予简要的叙述。

第一节 生产斗争和科学实验对集成运算放大器的要求

集成运算放大器的产生和其它新技术、新产品一样，是由于生产斗争和科学实验的需要。毛主席指出：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也是在不断发展的，永远不会停止在一个水平上”。

下面，我们以飞行器控制系统对放大器的要求为例，来简单的说明一下。大家知道，在飞行器控制系统中，被控制对象，如飞机、导弹，它本身的固有特性，用数学模型表示，即它的频率特性，如果不加以控制，会使飞行器在飞行过程中出现不稳定，如乱翻跟斗，所以，对飞行器必须加控制。为了控制飞行器，首先要有敏感元件，把飞行器的姿态测量出来，并给出电信号。对飞行姿态的电信号还要加以校正和放大，校正和放大的信号推动舵机，纠正飞行器的姿态，同时舵机的位置经传感器给出信号，反馈给前面，与敏感飞行器姿态的信号相比较，这个控制系统的方框图表示如图 1-1.1。

实际上，因为飞行器有三种飞行姿态，俯仰、偏航和滚动，而要控制这三种姿态就要求有几个舵机，每个舵机又能控制两种姿态（俯仰和滚动，偏航和滚动），这样，在图 1-1.1 中的放大器部分是比较复杂的，下面图 1-1.2 表示放大器和舵机的框图。从图 1-1.2 中可以看出，在飞行器控制系统中，对放大器要求：

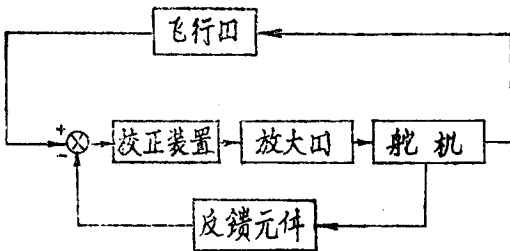


图 1-1.1

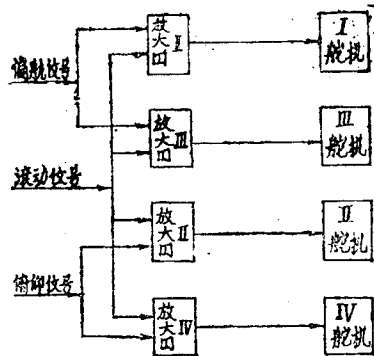


图 1-1.2

1. 能够综合二个信号（实际系统要求远远不止两个）；
2. 能够实现准确的放大倍数，因为放大倍数不准确飞行器也不能很好地飞行。

那末，一般的放大器是否能够满足这两项要求？不能的。因为，第一，由于两个信号都是从敏感元件给出来的，它们有一个公共地点，所以，不能像把两个干电池串接起来那样，把两个信号串接起来，给放大器的输入端。否则，将把两个信号源短路。第二，众所周知，一般放大器的放大倍数是很不准确的，也是不稳定的。这是因为放大器的放大倍数随器件本身的参数（如晶体管的 β ）差异而不同，随器件参数受环境的影响而变化。

要满足即能实现两个信号的综合，又能实现准确的放大倍数，大家自然会想到运算放大器，它能够满足这两项要求。但是，分立元件的运算放大器，如电子管的，它体积大，且不可靠，特别是飞行器在飞行过程中的恶劣条件（如振动、温度变化等）使电子管不能可靠的工作。所以电子管式的运算放大器是不太适合做飞行器控制系统中的放大器的。分立元件的晶体管运算放大器的缺点不仅是体积大，尤其严重的问题是它的温度漂移很大，为了改善温度漂移需做成差分式的运算放大器，但要选用参数一致的差分对晶体管又是很困难的，所以，分立元件的晶体管运算放大器很难满足飞行器在飞行过程中环境温度从摄氏负几十度到正几十度的变化时的漂移指标。

阶级斗争，生产斗争和科学实验要求人们去研制一种精度高，漂移小，体积小，重量轻的放大器，这样，集成运算放大器就应运而生了。

第二节 什么是集成运算放大器

什么是集成运算放大器呢？毛主席说：“就人类认识的秩序来说，总是由认识个别和特殊的事物，逐步扩大到认识一般的事物。”下面，我们就以XFC2高增益集成运算放大器这一个别事物为例，概括地说明一下，什么是集成运算放大器。

我们大家都知道，集成运算放大器的大小尺寸与一般小功率晶体管差不多（如BG301，8FC2，FC54与3DG12是一样大小），不同的是集成运算放大器的腿儿——引出端比晶体管多。图1-2.1是XFC2的示意图。引出端的数法，从图1-2.1(a)底视图上可以看出，顺时针数为1，2，3，……14。每个引出端的作用和图1-2.2XFC2的电原理图中的1，2，3……14相对应。每个引出端的作用如下：

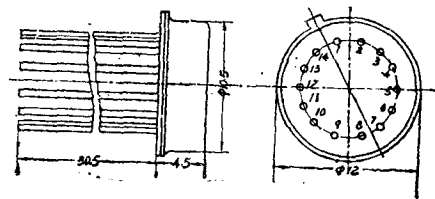


图 1-2.1(a)(b)

2：为反相输入端，从该端加输入信号，输出端信号是被放大的输入信号，其相位与输入端信号的相位相反，即差 180° 。

3：为同相输入端，从该端加输入信号，输出端信号是被放大的输入信号，其相位与输入端信号的相位相同。

2端和3端为一组输入端。同样，1端和14端为另一组输入端，其中1为反相输入端，14为同相输入端，但这一组输入端的输入阻抗要低，一般不用。

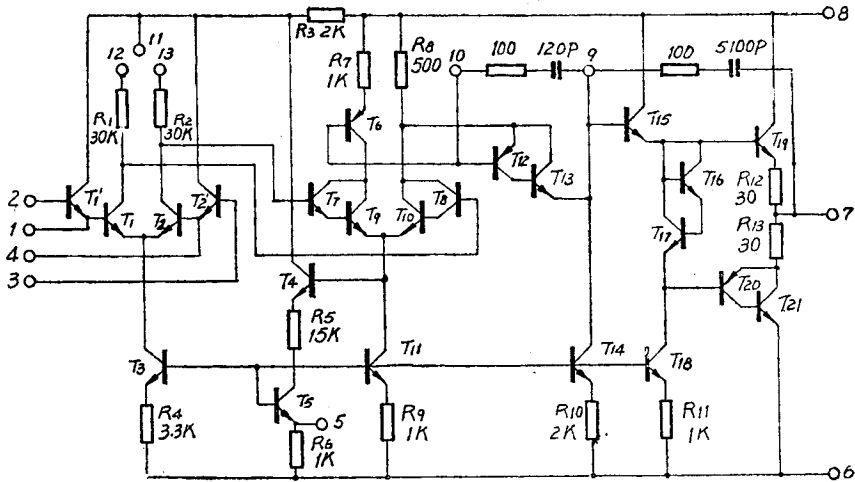


图 1-2.2

7: 为输出端, 在输入端加信号, 此端有输出信号, 且此信号是被放大的输入端的信号。放大倍数约几十万倍。

8: 为正电源端, 在此端接入正电源, 一般为 +15 伏电压。

6: 为负电源端, 在此端接入负电源, 一般为 -15 伏电压。

9 和 10: 为两个补偿端, 在这两端接入电阻和电容串联网络 (其数值大小视应用情况而定), 可以消除自激振荡。同样 9 和 7 端也为一组补偿端, 接入电阻和电容串联网络, 以便消除自激振荡。

11、12、13: 这三端为调零端, 其中 11 端接电位器的中间, 12 和 13 端接电位器的两边。当输入端不加信号, 而输出端有一定的直流输出时, 调节电位器, 可以使输出端电位为零。当不需要调零时, 把 11、12、13 三端接在一起。

我们把 XFC2 解剖, 进一步看看它的内部构造。图 1-2.4 是 XFC2 的剖视示意图。从这个图上, 我们可以看出, XFC2 是由管座、管帽, 内引线, 芯片 (又称管芯) 四部分组成的。其中管座是由底座, 玻璃缘绝子, 管腿组成。芯片粘在管座上。内引线把芯片上铝引线端, 也就是 XFC2 电路的引出端, 和管腿联接起来。管帽的作用是把芯片密封起来, 起保护作用。

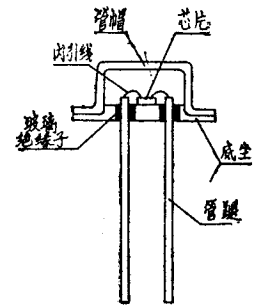


图 1-2.3

芯片, 又称为管芯, 是集成运算放大器的核心部分, 芯片的好坏也就决定了放大器电气参数的好坏, 因为在芯片上是一个运算放大器的完整的电路。集成运算放大器芯片的制作与数字电路的芯片制作是一样的, 要经过切割、研磨、抛光、氧化、光刻、扩散、外延, 蒸发等几十道工序, 而每一道工序都有它自己的丰富内容。在这里我们只是简单介绍一下, 使读者有一个印象, 要想深入了解芯片的制造过程,

请阅读有关半导体集成电路工艺方面的书籍。

制造芯片首先是要把园棒状的单晶硅切割成很薄的园片，一般称为大园片，大园片经过研磨和抛光，然后利用氧化、光刻、扩散、外延、蒸发等工艺，在大园片上按照一定图形的结构做出运算放大器的电路来。一个运算放大器的电路尺寸很小，一般是一平方毫米到几个平方毫米，视电路中的元器件多少而定。所以在一个大园片上可以制作几十到几百个电路。做好电路的大园片经过初测，找出有性能电路，把不合格的电路用漆涂掉，然后用划片机把每个电路划开。初测合格的电路即芯片粘在管座上，利用压焊机把芯片上电极引线用内引线和管腿联接起来，最后进行封帽。封帽后进行测试，称为成品测试，并分档。最后还要经过喷漆、打印、老化、筛选等，这样一个正式产品才算完工了。

在一个芯片上有几十个晶体管，二极管和电阻，这些元器件之间必须是相互隔离的，但是又要按电路的要求相互连接起来，从而完成运算放大器的功能。对于元件之间的隔离，目前，国内集成运算放大器用两种隔离方法，一种是介质隔离，即用二氧化硅作介质，把各个元件包围起来。由于二氧化硅绝缘性能好，各个元件之间相互影响小，击穿电压也高。但这种隔离方法工艺复杂，成本高。另一种是PN结隔离方法，即利用PN结单向导电的特性，用两个背靠背的PN结，把元器件围起来，使元件之间相互隔离。这种方法制造工艺简单，成本低。但由于PN结处于反偏之下，有反向漏电，元器件之间有寄生影响，抗核辐射能力差。为了使芯片上各个元件之间相互连接，对于晶体管来说，它的发射极，基极，集电极必须处在同一个平面上，这与分立元件晶体管是完全不同的。下面我们以PN结隔离工艺为例，简单说明一下，芯片上的晶体管，二极管和电阻是如何制作的。

第一步：准备好研磨、抛光好的P型硅片，称之为衬底。第二步：予先氧化，就是把衬底在一千多度的高温下，通入氧气，使衬底表面上形成一层二氧化硅(SiO_2)。第三步：在二氧化硅上光刻隐埋层窗口。所谓光刻，就是在二氧化硅层上涂上一层感光胶，在感光胶上面放上开有窗口的掩膜，进行曝光。曝光后，放在显影液中，没有感光的胶，可以用显影液去掉，露出二氧化硅，而感光的胶不溶解于显影液，且有耐酸腐蚀作用，保护二氧化硅。这时把衬底放在氢氟酸腐蚀液中，把露出的二氧化硅腐蚀掉，形成窗口。第四步：扩散埋层。在高温下将杂质锑扩散到开出的窗口里面去，形成 N^+ 埋层，同时去掉二氧化硅层。第五步：外延。在第四步的基础上，外延生长一层N型硅，这一层N型硅很重要，它是做晶体管和电阻的基础。第六步：氧化。在外延生长的N型硅上，氧化形成一层二氧化硅，为光刻隔离区做准备。第七步：光刻隔离区。形成隔离窗口。第八步：隔离扩散。把浓磷从隔离窗口扩散进去，通过外延层深到衬底，从而把外延层分割成小岛，称隔离岛。第九步：基区氧化，又称一次氧化。第十步：光刻基区的窗口。第十一步：基区扩散，又称硼扩散，将杂质硼扩散到基区窗口里去，在隔离岛的外延层上形成P型区。同时，进行发射区氧化，为光刻发射区做准备。第十二步：光刻发射区窗口。第十三步：发射区扩散，将杂质磷扩散到发射区窗口里，形成 N^+ 型区。第十四步：引线孔氧化。第十五步：光刻引线孔的窗口。第十六步：蒸铝。就是说在硅片表面上蒸发上一层薄铝。第十七步：反刻铝引线，把不需要的铝去掉，而留下按电路要求相互联接二个元件之间的铝条，并合金化，使硅片和铝良好接触。图1-2.4示意出上述的过程。1-2.4(17)中左边隔离岛上是一个电阻，它是由P型区做成的。中间隔离岛是一个晶体管。右边隔离岛上是一个二极管。其中晶体管的集电极接电阻一端，

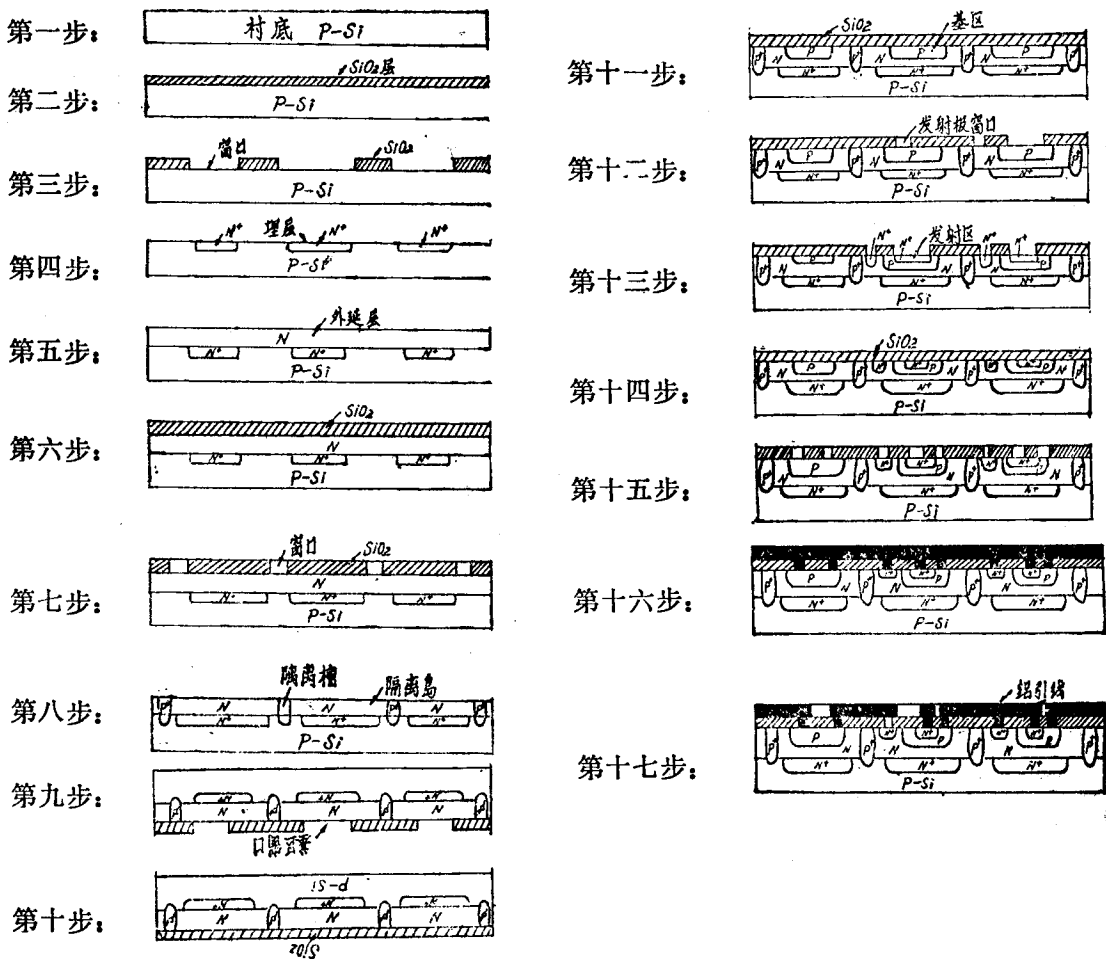


图 1-2.4

晶体管的基极接二极管的负极。

从以上的介绍可以看出，集成运算放大器与分立元件的晶体管差分放大器一样，都是放大倍数很高的直流感应器，这种放大器根据接入不同的外部电路，形成深度负反馈，可以进行各种运算，这时称之为闭环状态，而没有接入外部反馈时，称之为开环状态。

集成运算放大器与分立元件的晶体管差分放大器的区别在于，集成运算放大器是在一块半导体材料的基片上，用特殊结构和工艺，做成许多有源元件（如晶体管、二极管）和许多无源元件（如电阻，电容等），并使这些元器件之间的电性能相互隔离，在芯片的表面上，按电路的规定，又把元器件之间相互连接起来，从而完成整个运算放大器的功能。而分立元件的晶体管放大器只是把分立的有源器件（晶体管、二极管）和分立的无源元件（电阻、电容）按电路的规定，用导线把分立的元器件相互连接起来，实现整个运算放大器的功能。

从上面的介绍可以看出，集成运算放大器有下列几个特点：

1. 漂移小。由于整个运算放大器的同类性质的元件是在同一硅片上，由同样的工艺方法制造出来的，所以，各个元件的偏差往往在同一个方向，即要大都大，要小都小，这样同

类元件的参数就比较对称，这对于差分放大器是很合适的。所以，集成运算放大器都做成差分形式。正因为如此，集成运算放大器的失调电压和它的温度漂移很小。失调电压一般在10个毫伏以内，失调电压的漂移一般在每度（摄氏） $10\mu\text{V}$ 左右，而分立元件的运算放大器失调电压的漂移大约是每度（摄氏） $100\mu\text{V}$ 。集成运算放大器的失调电压的温度漂移比分立元件的运算放大器大约低一个数量级。

2. 体积小，重量轻。这个特点是很明显的，所以集成运算放大器特别适应于要求小型化的地方，如导弹、飞船等。

3. 可靠性高。由于制造集成运算放大器的工艺特点，各元器件之间的连线短，焊点少，从而提高了可靠性，一般说来，集成运算放大器的可靠性要比分立元件的晶体管运算放大器高一个数量级。

4. 用有源器件代替无源元件。由于工艺上制造有源器件（晶体管、二极管）比较容易，而制造无源元件，特别是阻值太大或太小的电阻和电容比较困难*，所以，对大阻值的电阻一般尽可能用晶体管或二极管来代替，但也不尽然，有时用外接办法，而电容一般为外接。

第三节 差分放大电路

集成运算放大器的品种是很多的，电路形式也是多种多样的，但是，它们都是由一些基本的电路组成。这些基本电路是差分放大电路，恒流源，单管放大电路，缓冲电路，电平移动电路，输出级。如果对这些基本电路能够掌握它的基本原理，那末，对于任何集成运算放大器的电路原理都可以进行分析。在下面几节中，我们对这些基本电路进行介绍。

差分放大电路是集成运算放大器的基本电路，一般它做为输入级以及第二级放大（如8FC2，FC3，4E312）。差分放大电路的基本形式如图1-3.1。

在图1-3.1中， T_1 和 T_2 是两个性能一致的晶体管。

R_{C1} 和 R_{C2} 分别是 T_1 和 T_2 的负载电阻，
 R_{B1} 和 R_{B2} 分别是 T_1 和 T_2 的偏置电阻，

* 集成运算放大器中的电阻一般为扩散电阻，电阻阻值为，

$$R \approx R_0 \frac{L}{W} \quad (1-2.1)$$

式中， R_0 ——薄层电阻，又称方块电阻，单位是欧姆/方，

L ——电阻条的长度，单位是厘米，

W ——电阻条的宽度，单位是厘米

所以，如果电阻的阻值太大，则电阻条的长度要长，电阻条长占的面积就大。如果电阻的阻值太小，则电阻条的宽度要宽，占的面积也大。一般集成运算放大器的电阻的阻数为几十欧姆到几十千欧姆。

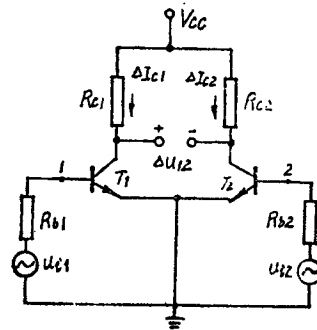


图 1-3.1 差分放大电路

Δu_{i1} 和 Δu_{i2} 分别是 T_1 和 T_2 的输入信号;

Δu_{i2} 是输出信号, 它是 Δu_{c1} 和 Δu_{c2} 之差。

下面分析差分放大电路的放大倍数。设 T_1 和 T_2 的单管电压放大倍数分别为 K_1 和 K_2 , 则:

$$K_1 = \frac{\Delta u_{c1}}{\Delta u_{i1}} = - \frac{\beta_1 R_{c1}}{R_{b1} + r_{be1}} \quad (1-3.1)$$

$$K_2 = \frac{\Delta u_{c2}}{\Delta u_{i2}} = - \frac{\beta_2 R_{c2}}{R_{b2} + r_{be2}} \quad (1-3.2)$$

如果 T_1 和 T_2 的参数是完全一样的, 即:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \beta_2 = \beta \\ r_{be1} &= r_{be2} = r_{be} \end{aligned} \right\} \quad (1-3.3)$$

$$\text{又} \quad \left. \begin{aligned} R_{c1} &= R_{c2} = R_c \\ R_{b1} &= R_{b2} = R_b \end{aligned} \right\} \quad (1-3.4)$$

则:

$$K_1 = K_2 = K = - \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}} \quad (1-3.5)$$

加在差分放大电路中 1 端和 2 端之间的输入信号为 Δu_i , 即:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{i1} &= \frac{1}{2} \Delta u_i \\ \Delta u_{i2} &= - \frac{1}{2} \Delta u_i \end{aligned} \right\} \quad (1-3.6)$$

$$\text{那末, } \Delta u_{c1} = k \Delta u_{i1} = \frac{1}{2} k \Delta u_i \quad (1-3.7)$$

$$\Delta u_{c2} = k \Delta u_{i2} = - \frac{1}{2} k \Delta u_i \quad (1-3.8)$$

$$\Delta u_{i2} = \Delta u_{c1} - \Delta u_{c2} = k \Delta u_i \quad (1-3.9)$$

所以, 差分放大电路的电压放大倍数用 K_{GM} 表示为:

$$K_{GM} = \frac{\Delta u_{i2}}{\Delta u_i} = - \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}} \quad (1-3.10)$$

式 (1-3.10) 是差分放大电路, 在差分输入, 差分输出时放大倍数的公式。如果差分放大电路是差分输入, 而单端输出, 这时的放大倍数为:

$$K_{GM} = \frac{\Delta u_{c1}}{\Delta u_i} = - \frac{1}{2} \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}} \quad (1-3.11)$$

大家知道, 对于直流放大器来说, 漂移问题是很重要的指标, 如当温度变化, 或电源电压波动时, 输出端的信号也随之而变化, 称之为漂移。而这个漂移信号经多级放大后可能是很大的。对于图 1-3.1 这种差分放大电路, 如果两个晶体管的参数完全一致, 当温度变化或电源电压波动时引起的漂移, 在输出端是可以抵消的。因为, 当 Δu_{c1} 增加一个以 u_δ 时, Δu_{c2} 也增加一个 u_δ , 所以, Δu_{i2} 仍为零。但是, 如果图 1-3.1 是单端输出时, 即 Δu_{c2} 输

出时，那末，这个电路产生的漂移与普通的直流放大器是一样的，而一般的集成运算放大器总是单端输出。所以说，图 1-3.1 这个电路是有缺陷的。在集成运算放大器中，一般不用图 1-3.1 电路，而是加以改进，在 T_1 和 T_2 的发射极接一个公共电阻 R_e ，如图 1-3.2 示。

我们看一下公共电阻 R_e 的作用是怎样的。 R_e 对于差分输入，差分输出是不起什么作用的。因为，如果和图 1-3.1 的信号一样，即 T_1 管上加 $\frac{1}{2}\Delta u_i$ 使 I_{c1} 增加一个 $+\Delta I_{c1}$ ，它在 R_e 产生的压降为 $+\Delta I_{c1}R_e$ ，在 T_2 管上加 $-\frac{1}{2}\Delta u_i$ 使 I_{c2} 有一个 $-\Delta I_{c2}$ ，它在 R_e 上产生的压降为 $-\Delta I_{c2}R_e$ ，如果 T_1 和 T_2 的参数对称的话，即 $|\Delta I_{c1}| = |-\Delta I_{c2}|$ ，则在 R_e 上产生的压降是相互抵消的。所以，这时图 1-3.2 和图 1-3.1 是一样的，丝毫不影响放大倍数。

但是，如果是单端输出，有没有 R_e 可就不一样了。如对温度的漂移，有 R_e 时，当温度上升，引起 I_{c1} 增加一个 ΔI_{c1} ， I_{c2} 也同样增加一个 ΔI_{c2} ，在 R_e 上产生的压降为 $(\Delta I_{c1} + \Delta I_{c2})R_e$ ，而 R_e 上的压降增加使 u_{be1} 和 u_{be2} 均减小，而 u_{be1} 和 u_{be2} 的减小又分别使 I_{b1} 和 I_{b2} 减小， I_{b1} 和 I_{b2} 的减小，又使 I_{c1} 和 I_{c2} 减小，以致使 I_{c1} 和 I_{c2} 维持近似不变，这样，即使单端输出 Δu_{c2} 也会近似不变。而图 1-3.1 在前面已分析过，它的温度漂移却是 $\Delta I_{c2} R_{c2}$ 。

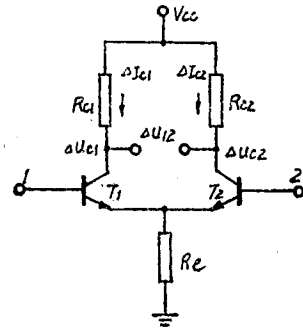


图 1-3.2

第四节 差分放大电路的不对称性

在前面的分析中，对于差分放大电路我们都假定 T_1 和 T_2 晶体管的参数是完全一样的，电阻 R_{c1} 和 R_{c2} 也是一样的，即所有参数都是对称的。但这一假设不是十分确切的，因为半导体集成技术虽然可以使参数尽量对称，但要做到完全对称无论如何是不可能的。这种不对称性，即使差分放大器不加任何信号，在差分输出端也会有一定的输出信号。为了衡量对称性的好坏，我们在 T_1 和 T_2 的输入端上，加上一个相位相同、幅度大小相等的一个信号，称这个信号为共模输入信号，差分放大器此时称为共模状态，称此时的输出信号为共模输出信号(如图 1-4.1 示)。这时

$$K_{CM} = \frac{\Delta u_{12}}{\Delta u_i} \quad (1-4.1)$$

K_{CM} 叫共模增益；
 u_i 叫共模输入信号；
 Δu_{12} 叫共模输出信号。

差分增益与共模增益之比，叫共模抑制比，它反应了差分放大电路参数的对称情况，是一个重要指标。共模抑制比一般用 CMRR 表示，

$$CMRR = \frac{K_{DM}}{K_{CM}} \quad (1-4.2)$$

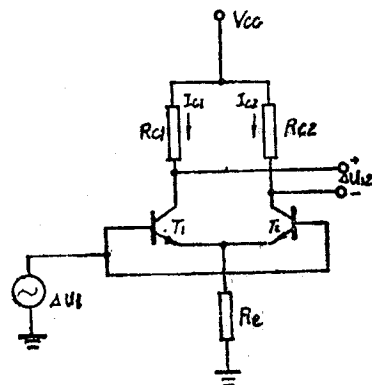


图 1-4.1

在第三节我们讨论的 R_e 的作用，可以把温度的变化所引起的 I_{c1} 和 I_{c2} 的变化看成为是在 T_1 和 T_2 的基极加了一个共模信号，对于共模信号来说， R_e 越大，在 R_e 上产生的压降越大，负反馈作用也就越强，使共模增益减小，即提高了共模抑制比。

哪些参数造成差分放大电路的不对称性呢？从图 1-4.1 可以看出，主要是 T_1 和 T_2 不对称，而 T_1 和 T_2 的不对称即 u_{be1} 和 u_{be2} 不一样， β_1 和 β_2 不等，以及 I_{cbo1} 和 I_{cbo2} 不等造成的，其次是 R_{c1} 和 R_{c2} 不等，也造成参数不对称。差分放大电路的参数不对称不仅是在输入端不加信号时，有一个非零的输出，更严重的是因为象 u_{be} 和 β 是温度的函数，这些参数的不对称将造成温度漂移。所以，集成运算放大器在电路设计上和工艺制造上如何保证参数对称是一个很重要的问题。

第五节 恒流源

在第四节的分析中，我们知道图 1-3.2 中的 R_e 增大，不仅可以减小单端输出的温度漂移，而且可以提高共模抑制比。所以，我们在电路中总希望 R_e 尽量做得大些。但是，事物

是复杂的，我们“不仅要看到事物的正面，也要看到它的反面”。实际上， R_e 做得大， R_e 上的直流压降就大，为了保证输出电压有较大幅度（一般称动态范围），必须增加电源电压。所以增加 R_e 提高共模抑制比，与要求大的动态范围有矛盾。还有，集成电路中的电阻是扩散电阻，正如在第二节所述那样，扩散电阻不能做得太大，否则在芯片上占的面积太大。

为了解决上述的矛盾，我们找到了晶体管，大家知道，晶体管的输出特性如图 1-5.1 示。

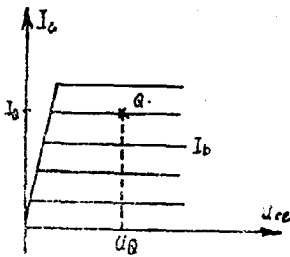


图 1-5.1

Q 点是静态工作点，这时直流电阻为：

$$R_{直} = \frac{u_Q}{I_Q} \quad (1-5.1)$$

对于交流信号来说，它的负载阻抗线仍通过 Q 点，由于晶体管在放大区有恒流特性即， u_{ce} 变化很大，而 I_c 变化很小，这样，对信号的交流电阻就很大。所以用晶体管做恒流源代替大电阻 R_e ，即可以提高共模抑制比又不至于减小动态输出范围。更重要的是在集成电路中，晶体管很容易制造，面积又比较小，所以说，在集成电路中，在遇到大电阻的情况下，一般用晶体管来代替，这是集成电路与分立元件电路不同点之一。

图 1-5.2 是具有恒流源偏置的差分放大电路，虚源框中是恒流源偏置电路， T_3 代替图

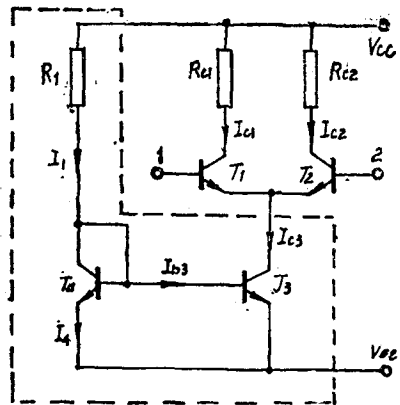


图 1-5.2

1-3.2 中的 R_e , T_4 接成二极管, 与 R_1 一起来确定 T_3 的工作点。 T_3 和 T_4 尽量做成特性一致, 即

$$u_{be3} = u_{be4} = u_{be} \quad (1-5.2)$$

则

$$I_1 = \frac{V_{cc} - u_{be} - V_{ee}}{R_1} \quad (1-5.3)$$

$$I_1 = I_4 + I_{b3} \quad (1-5.4)$$

忽略 T_3 的反向漏电流,

$$I_{c3} \approx \beta_3 I_{b3} \quad (1-5.5)$$

由于

$$I_{b3} \ll I_{c3}$$

$$I_{c3} \approx I_1 = \frac{V_{cc} - u_{be} - V_{ee}}{R_1} \quad (1-5.6)$$

从式(1-5.6)可以看出, 只要选定合适的 R_1 就可以决定需要的 I_{c3} 了。

在图 1-5.2 中采用恒流源偏置电流, 不仅提供一定的 I_{c3} 的电流, 从而也决定了差分放大管 T_1 和 T_2 的工作电流 I_{c1} 和 I_{c2} , 并且还起稳定 T_1 和 T_2 的工作点的作用。比如说, 当温度升高时, u_{be4} 增加, u_{be3} 也增加, I_{c3} 、 I_{c1} 和 I_{c2} 均增加了。但 u_{be4} 增加使 I_1 减小, I_1 减小使 I_{b3} 减小, 而 I_{b3} 减小又使 u_{be3} 减小, u_{be3} 减小使 I_{c3} 减小, I_{c3} 减小使 I_{c1} 和 I_{c2} 减小, 以致维持 I_{c1} 和 I_{c2} 不变, 这样就稳定了 T_1 和 T_2 的工作点, 减小温度漂移, 提高共模抑制作用。

第六节 缓冲电路

目前的集成运算放大器都是差分输入, 单端输出的, 所以, 经差分放大以后, 一般都还经过单管放大, 而单管放大电路是人们所熟知的共发射极放大电路, 这里就不赘述了。在各级放大器之间, 为了阻抗匹配 (因为晶体管放大电路输入阻抗较低, 而输出阻抗较高), 都要加缓冲级 (或叫隔离级), 缓冲级电路是人们所共知的射极跟随器, 如图 1-6.1。

这个电路的输入电阻为晶体管在共发射极输入阻抗 r_{be} 加上 $(\beta + 1)R_e$ 即

$$R_{\lambda} = r_{be} + (\beta + 1)R_e \quad (1-6.1)$$

一般晶体管的 r_{be} 约在一千欧姆左右, 它的 β 值在几十到一、二百。如果一个晶体管的 $\beta = 60$, 接成射极输出器, $R_e = 1k\Omega$, 那么这个缓冲电路的输入阻抗约为 $60k\Omega$ 。

图 1-6.1 的射极输出器的输出阻抗为 R_e 与 $\frac{1}{\beta}r_{be}$ 的并联值, 即:

$$R_{\text{出}} = \frac{R_e \cdot \frac{r_{be}}{\beta}}{R_e + \frac{r_{be}}{\beta}} \quad (1-6.2)$$

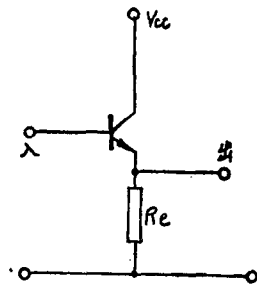


图 1-6.1

如果射极输出器的 $R_e \gg \frac{r_{be}}{\beta}$ 时,

则
$$R_{出} \approx \frac{r_{be}}{\beta} \quad (1-6.3)$$

例如, 一个晶体管 $\beta = 50$, $r_{be} = 1k\Omega$, 与 $R_e = 1k\Omega$ 组成一个射极输出器, 那末, 它的输出阻抗 $R_{出}$ 为

$$R_{出} \approx \frac{1k\Omega}{50} = 20\Omega \quad (1-6.4)$$

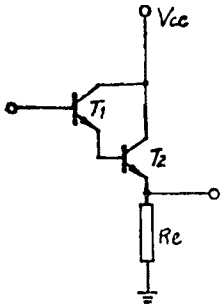


图 1-6.2

从上述的例子可以看出, 射极输出器的输入阻抗比较高, 而输出阻抗比较低, 适合用在级与级之间的隔离, 即缓冲电路。

在集成电路中, 晶体管的 β 一般能做到几十, 更大的 β 值就不太容易做, 所以为了能更好的隔离两级, 需要提高射极输出器的输入阻抗, 为此, 常常使用复合管组成射极输出器, 如图 1-6.2。

这种用复合晶体管组成的射极输出器, 它的输入阻抗近似为:

$$R_{入} = \beta_1 \beta_2 R_e \quad (1-6.5)$$

式中: β_1 为 T_1 的 β 值。

β_2 为 T_2 的 β 值。

如果 T_1, T_2 的 β 值都是 50, R_e 为 $1k\Omega$, 则这种射极输出器的输入阻抗约为 $250k\Omega$, 这就比较大了。

第七节 电平配置电路和输出级

大家知道, 交流放大器, 它的级与级之间是由隔直电容器隔开的, 所以, 它的各级之间的静态工作点是互不影响的。但是, 对于直流放大器, 各级之间不能用隔直电容器隔开, 而必须直接耦合。这样各级之间的静态工作点就相互影响。集成运算放大器, 通常都采用 NPN 型晶体管, 共发射极接法做为放大级, 信号由基极加入, 从集电极输出, 而 NPN 型晶体管的集电极电平总是高于基极的, 这样, 第一级的集电极接第二级的基极, 第二级的集电极接第三级的基极, …… 如此下去, 到多级放大后, 最后一级的输出端电平很高, 在电源电压一定的情况下, 输出电压的幅度将大大地下降, 甚至不能工作。所以, 为了在没有输入信号时输出端保持零电平, 除了接入正负电源外, 还需要加入电平配置电路。

集成运算放大器一般都是用硅 NPN 型晶体管, 所以, 所谓电平配置电路, 就是把输出电平降低。为使电平降低, 电路形式有很多种, 如两个电阻分压, 但是这种方法在把直流电平降低的同时, 也衰减了信号, 一般不宜采用。另一种方法是在第六节中讲的射极输出器, 它可以降低 0.7 伏左右的电平, 如 BG301 就是采用的这种电平配置电路。还有一种是利用恒流源, 另一种是利用硅 PNP 晶体管。下面我们着重介绍一下用恒流源的电平配置电路和利用硅

PNP 晶体管的电平配置电路。

图 1-7.1 是利用恒流源的电平配置电路：

对于直流信号：
$$U_2 = U_1 - I_1 R_1 \quad (1-7.1)$$

对于交流信号：
$$u_1 = u_2 \quad (1-7.2)$$

所以对于直流信号来说， U_2 比 U_1 降低了 $I_1 R_1$ 电平，而对于交流信号则没有降低，图 1-7.2 是用晶体管组成恒流源的实际电路，其中， R_2 ， T_1 和 T_2 ， R_3 ， R_4 构成一个恒流源。

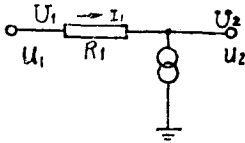


图 1-7.1

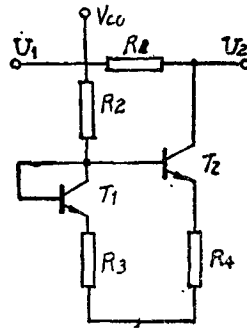


图 1-7.2

用 PNP 晶体管构成的电平配置电路如图 1-7.3。

在图 1-7.3 上， T_1 是硅 NPN 型晶体管，做为放大用，它的集电极电压 U_{c1} 总高于 u_{b1} ， T_2 为硅型 PNP 晶体管，它除了移动电平之外，兼有放大作用，因为， u_{b2} 等于 u_{c1} ，而 PNP 型的晶体管的集电极电压总是低于它的基极电压的， T_2 也是接成共发射极状态，由集电极输出，有放大作用，这样，即移动了电平，又对交流信号放大。但是这种电路也有它的缺点，就是在半导体集成技术上，硅 PNP 型的晶体管，在工艺制作上比较困难， β 值都比较低，一般在 0.5~4 左右，特征频率也不易做高，只能在低频下使用。

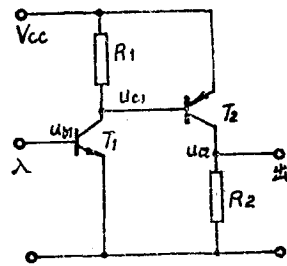


图 1-7.3

集成运算放大器的输出级一般采用硅 NPN 型晶体管和硅 PNP 型晶体管组成互补对称输出如图 1-7.4。

在图 1-7.4 中， T_1 为硅 NPN 晶体管， T_2 为硅 PNP 晶体管。因为硅 PNP 型晶体管的 β 值一般都比较小，为了输出较大的电流，PNP 往往采用复合管，如图 1-7.5。

在图 1-7.5 中， T_1 和 T_3 为硅 NPN 型晶体管， T_2 为硅 PNP 型晶体管， T_2 和 T_3 组成硅 PNP 型的复合晶体管。