

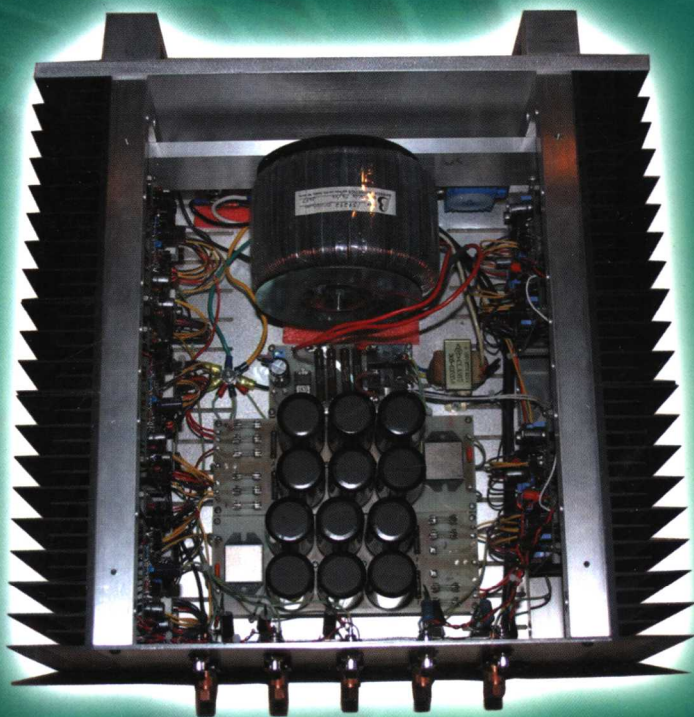
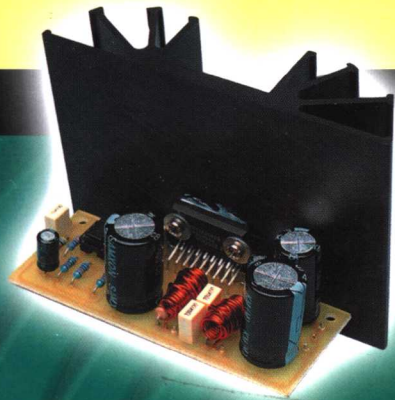
JICHENGDIANLU YINXIANG GONGFANG

集成电路音响功放

DIY



郑国川 主编



福建科学技术出版社
FUJIAN SCIENCE & TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

THE UNIVERSITY OF THE SOUTH PACIFIC

DIY



THE UNIVERSITY OF THE SOUTH PACIFIC

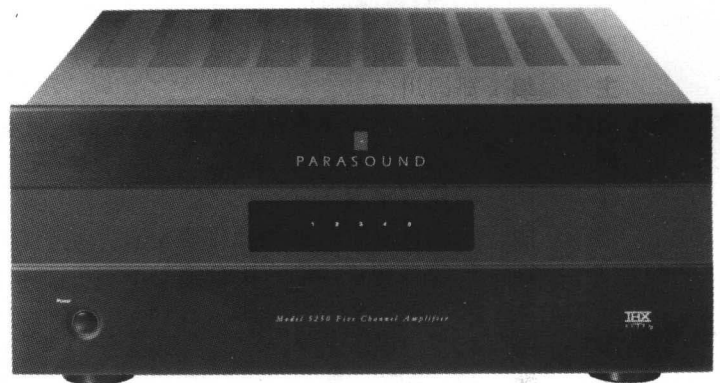
TN722.1/15

2007

集成电路音响功放

DIY

郑国川 主编



福建科学技术出版社

FUJIAN SCIENCE & TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

主 编：郑国川

编写人员：李洪英 李 泉 李旭辉 董莹颖 董自良 郑冀蓉 高素清
张金林 朱 梅 付 刚 廖 南 俸国良 高文俊 周惠芬
俸 宁 朱 麟 胡 波

图书在版编目 (CIP) 数据

集成电路音响功放 DIY/郑国川主编. —福州：福建科学技术出版社，2007.10

ISBN 978-7-5335-3034-1

I. 集… II. 郑… III. 音频放大器-集成电路-基本知识 IV. TN722.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 115867 号

书 名	集成电路音响功放 DIY
主 编	郑国川
出版发行	福建科学技术出版社 (福州市东水路 76 号, 邮编 350001)
网 址	www.fjstp.com
经 销	各地新华书店
排 版	福建科学技术出版社排版室
印 刷	福建二新华印刷有限公司
开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张	15
字 数	374 千字
版 次	2007 年 10 月第 1 版
印 次	2007 年 10 月第 1 次印刷
印 数	1—4 000
书 号	ISBN 978-7-5335-3034-1
定 价	24.00 元

书中如有印装质量问题，可直接向本社调换

前 言

不久前，笔者出版了《晶体管音响功放 DIY》一书，读者反映强烈，要求笔者继续编写有关集成电路音响功放制作方面的图书。应出版社之约，遂有本书的出版。

以晶体管制作的音响功放，电路中的某些功能电路，其原理不见得有多深奥，但组成、调试却十分复杂；而由集成电路为主要器件组装的音响功放，使装配、调试与维修都变得十分简单。这样的音响功放特别适合业余电子爱好者仿制。

音响专用集成电路以及混合工艺的厚膜电路开发应用由来已久。从目前来说，此类集成电路、混合厚膜电路大体上可分为两大类：一类属较早期产品，集成化规模不是很大，内部功能较单纯地趋向分立元件功能电路的简单集成，因而性能不是十分理想，外围电路也比较复杂；另一类是目前的较大规模的集成电路，由于生产工艺的提高，集成化规模的扩大，因而可将大部分外围元器件取消，以内部的功能取代，不仅简化了装调工艺，而且还使集成电路性能更稳定，对外围元器件的依赖性也大为降低。现在有些集成化放大器本身只有输入、输出端和正、负供电端子，即可正常工作并达到其标称的指标。

近年来，欧共体以 TDA 为型号的大功率集成化输出级，单片输出功率已突破 100W，而其他指标如频响非线性失真等，直逼 Hi-Fi 放大器的水平。本书收集部分传统的、口碑较佳的音响用集成电路，但更注重对代表时代潮流的新型音响集成电路的介绍。

笔者一生从事与电子专业有关的工作，而且有 50 余年的“发烧”历程。但因编写时间仓促，水平有限，难免有疏漏、谬误之处，欢迎同行指正。

参加本书资料收集、编写、录入、制图、校对的还有李洪英、李泉、李旭辉、董莹颖、董自良、郑冀蓉、高素清、张金林、朱梅、付刚、廖南、俸国良、高文俊、周惠芬、俸宁、朱麟、胡波（排名不分先后）等，在此一并致谢。

主 编
于成都

目 录

第一章 通用运放在音响放大器中的应用	(1)
一、集成运放.....	(1)
(一) 运放的特点	(1)
(二) 运放的基本特性和参数	(3)
(三) 音响放大器中运放的选择	(5)
(四) 运放在音响中基本应用电路	(8)
(五) 运放应用的特殊性.....	(10)
(六) 适用于高保真音响前级放大器的部分运放.....	(17)
二、通用运放在音响前级系统的应用	(20)
(一) 通过运放组成的增益控制器.....	(20)
(二) 运放组成有源音调控制器.....	(21)
(三) 运放用于频带切除.....	(23)
(四) 音调均衡器.....	(23)
三、通用运放驱动 SEPP 输出级	(26)
(一) 小功率集成化的 OCL 放大器	(26)
(二) 运放扩流组成 OCL 放大器	(27)
(三) μ A709 驱动的 OCL 45W 音响功放.....	(28)
四、典型运放应用电路	(30)
(一) 通用 Hi-Fi 前级放大器.....	(30)
(二) 有拾音器 RIAA 校正功能的立体声放大器	(31)
(三) 音响放大器的分频方案.....	(34)
第二章 音响前级专用集成电路	(41)
一、专用集成电路种类	(41)
(一) 多级直耦放大的集成化.....	(41)
(二) 专用音频前置放大的特殊运放.....	(42)
二、SEPP 输出级的集成化驱动器	(43)
(一) 50W OCL 输出级集成化驱动器 μ PC1225H	(44)
(二) 60W 高耐压 SEPP 功放驱动集成电路 AN7060	(46)
(三) 双路 60W OCL 驱动集成电路 AN7062	(48)
(四) 运放型音响前级集成电路驱动 SEPP OCL	(53)
三、有特殊用途的音响专用集成电路	(63)
(一) 专用音频控制集成电路.....	(63)
(二) Hi-Fi 音响专用多频点均衡器	(68)
(三) 延时混响集成器件——并非卡拉 OK 专利.....	(72)
四、环绕声及环绕声处理发展方向	(78)

(一) X-2-X 环绕声录放模式	(79)
(二) 多声道环绕声的 X-X-X 录放模式	(80)
(三) 长盛不衰的 2-2-X 模式多声道系统	(80)
第三章 新型集成化输出级	(82)
一、传统集成功放指标的不足之处	(82)
(一) 集成功放的最大输出功率	(82)
(二) 集成功放的非线性失真	(83)
(三) 准互补输出级的弊端	(83)
(四) 单端电压放大器的性能局限	(85)
(五) V_{CC} 范围过小而限制应用领域	(85)
二、新型集成功放及其特点	(86)
(一) OCL 为电路主流 准互补已成过去	(87)
(二) 多声道 大功率 高集成度	(87)
(三) 功能越来越多 V_{CC} 范围越来越宽 指标越来越高	(88)
(四) 超低功耗超高效率的移动功放 D 类放大器	(88)
(五) MOS FET 逻辑控制等项新技术的采用	(89)
三、新型集成功放介绍	(89)
(一) 厚膜功放 STK402-120	(90)
(二) 四声道集成功放 AN7560Z	(94)
(三) DC 音量控制的立体声放大器 LM4756	(95)
(四) 大功率多声道集成功放 LM478 X 系列	(97)
(五) 小功率移动设备集成功放 LM4854	(104)
(六) 移动电器双路音频功放 LM4809	(106)
(七) 用于显示设备音频功放 LM4940/4950	(107)
(八) 大功率 Hi-Fi 集成功放先驱 LM 系列	(109)
(九) 大功率 D 类功放驱动 LX1710/1711	(114)
(十) 高效低失真的 D 类新方案集成电路 TA2041	(117)
(十一) 双通道 T 级放大器前级驱动集成电路 TA3020	(120)
(十二) 新型集成功放 TDA729 X 系列	(123)
(十三) 飞利浦公司 H 类汽车用单片集成电路 TDA1560Q/1562Q	(129)
(十四) 四声道集成功放 TDA8580J	(131)
(十五) ST 公司两款新型 AB 类集成功放 TDA7384/7497	(136)
(十六) ST 公司的两种 D 类集成功放 TDA7481/7482	(138)
(十七) 自动转换输出模式的 TDA1565TH	(140)
(十八) 大功率 Hi-Fi 功放分离式集成电路 LM4702TA	(143)
第四章 集成电路在品牌功放中的应用	(148)
一、音响放大器各级的增益和电平值	(148)
二、前级小信号处理集成电路应用	(150)
(一) 模拟开关组成输入信号选择器	(151)
(二) 有二次输入选择功能的前级放大器	(152)

(三) 有平衡输入功能的继电器信号选择器	(154)
(四) JRC4558 组成 MIC 混合和放大器	(157)
(五) 杜比环绕声前级放大器	(158)
(六) 电压跟随器的应用	(160)
(七) 运放驱动 OCL 放大器的应用	(163)
(八) 雅马哈 RX-V690 大环路直流负反馈的 OCL	(165)
(九) 运放在电子分频放大器中的应用	(166)
三、新型集成化输出级的应用	(169)
(一) AD-5100 放大器的中置环绕声道功放	(169)
(二) AVK-200 放大器的中置和环绕声道功放	(171)
(三) TDA 系列组成全集成音响输出级	(173)
(四) 全集成化 5.1 声道放大器	(175)
(五) TDA20XX 系列用于环绕声输出级	(177)
第五章 集成化音响放大器的电源系统	(179)
一、音响放大器供电的特点	(179)
(一) 输出级供电整流电源的性能	(180)
(二) 整流滤波器的影响	(180)
(三) 输出级稳压供电的难点	(181)
(四) 改善整流电源负载调整率的方案	(184)
二、音响前级放大器的稳压供电	(189)
(一) 低压供电前级放大器的稳压电路	(189)
(二) 前级放大器高压供电的稳压	(191)
三、商品音响电源电路	(193)
(一) 电子滤波器供电前级电源	(193)
(二) 有限压调整和电子滤波功能的多路前级供电系统	(196)
(三) 三端稳压器组成反馈式电子滤波器	(198)
(四) 串联稳压器的应用	(199)
(五) 并联稳压器的运用	(200)
(六) 恒流源与并联稳压器的组合	(203)
(七) 名牌音响放大器供电系统借鉴	(204)
四、音响噪声的电源净化	(209)
(一) 音响内部噪声源及防止	(210)
(二) 音响设备外界噪声的防治	(222)

第一章 通用运放在音响放大器中的应用

作为有源放大器件，由电真空器件到半导体器件经历了 44 年的漫长岁月（1904~1948 年），毕竟由热电子放射到半导体的固体器件，两者关系甚少，纯属物种的特殊转变。而从半导体分立元件到集成电路只经过了短短的 11 年（1948~1959 年），毕竟两者本质相同，初期集成电路只是半导体器件组合形式的改变。1974 年后出现的大规模集成电路 LSI，以及后来的超大规模集成电路 SLSI，使集成电路特有的功能电路走向成熟，使性能指标远远超过分立元件、早期集成电路的水平。从上世纪以来，为了适应各种电子电路的应用，开发生产了大量通用型集成运算放大器（运算放大器以下简称运放），广泛用于各种功能电路的放大单元中。音响放大器中也广泛采用此类通用型运放，在此基础上还生产了专用于音响的改进型运放。

一、集成运放

运放是一种集成化的多级直耦放大器，既可用于交流也用于直流放大状态，设计理念是通用型多用途放大器，因而对电路的通用化有极大的兼容性。为了达到不同功能放大器的特殊要求，运放的应用离不开负反馈，对音响放大器来说更是如此。

（一）运放的特点

为在单晶硅片上制作的多级直接耦合放大器，对单片集成电路来说，内部集成了放大电路中所有的二、三极管和电阻。由于集成电路半导体晶片和工艺的限制，只能直接集成几十欧到几十千欧的电阻器；如需要更大或更小的电阻，则通过三极管形成导通电阻或恒流源电路来代替。单片集成电路中难以制造几十皮法以上的电容器，一般是将电路引出集成电路外，用外接元件的方式来解决。

所有器件和电阻器集成于同一晶片上，使器件的对称性极佳。以二、三极管来说，同一晶片上制造的三极管， V_{BE} 值相互差别不超出 $\pm 2\text{mV}$ ，相邻三极管的 β 值差别只有 $\pm 10\%$ 。集成化电阻器的绝对值误差一般只能达到设计值的 $\pm 20\%$ ，但同一晶片上各电阻之间的差值可以不超出 $\pm 3\%$ 。由此特点可以看出，运放的放大电路采用差分放大器，可以得到更为理想的特性。

一般集成化运放前级放大器均由差动放大电路组成，所以运放都有同相、反相 2 个输入端，同相输入端使输出端产生相位相同的输出，反相输入端使输出端产生相位相反的输出。

音响放大器中采用的运放属模拟集成电路，又称线性放大电路。线性放大电路的输入与输出端呈线性放大关系，与常见的数字集成电路有着极大的区别。数字集成电路的输入和输出关系只有高低电平的区别，而对高低电平的绝对值无关，因而没有高低电平的过渡期放大作用。以比较器为例，同相输入端输入电平只要超出反相输入端 0.6V 以上，输出端即跳变为接近集成电路 $+V_{CC}$ 值的高电平，而与输入端电压绝对值无关。如以分立元件电子电路的原理，可理解为数字电路类似触发器，而线性模拟运放则为线性放大器。

运放为独立的放大电路，输入和输出之间有一线性放大区。图 1-1 为运放的基本特性。因为运放大多采用差分放大作为前级，所以必然有同相输入端和反相输入端。基于差分放大器的原理，当同相输入电压和反相输入的电压值、相位相同时，输出电压将为零。此点构成图 1-1 直角坐标的原点。只有两输入端的差值才能形成相应的输出电压，故直角坐标的 x 轴表示的是同相输入 V_n 和反相输入 V_i 的差值。当此差值为正时，输出电压 V_o 为正。 $V_n - V_i$ 和 V_o 之间有一斜线表示的放大区，放大区的饱和点峰值为 $+V_{CC}$ ，放大曲线位于直角坐标第 I 象限。如果 $V_n - V_i$ 为负值，输出电压为负， V_o 和 $V_n - V_i$ 的曲线位于第 III 象限， V_o 为负值。采用正负对称电源供电，可以扩展放大特性的线性区，使输出信号远离饱和区和截止区。当然，也可以采用单电源供电，实际应用中需依输入信号的性质来选择。

通用运放为了能适应各种功能电路的放大，内部采用高增益放大器得到固有的高增益特性。根据多级放大器的理论，多级放大器随增益的提高必然使得频响变窄。为了满足不同电路设计的需要，使用者可加入负反馈，一则降低增益和稳定增益，二则可扩宽频响。

图 1-2(a) 为典型运放无负反馈时电压增益和频率关系。由图 1-2(a) 可见，当无负反馈时，运放的增益（称为开环增益，即负反馈环路开路时的电压增益）通常可达 $90 \sim 120\text{dB}$ （3 万 \sim 100 万倍）。在此高开环增益时频响曲线从几赫开始以 6dB/oct 斜率下降，到 1MHz 时电压增益为零。显然，不加负反馈是不能稳定工作的，即使作为直流放大也需要负反馈以稳定增益。交流放大器除稳定增益以外，还可以扩展频响。

图 1-2(b) 为加入反馈量不同的负反馈时运放的增益和频响的变化。负反馈量越大，放大器增益越低（对加入负反馈以后的增益称为闭环增益），但是，增益频率特性曲线越平坦。运放的上述特性曲线为理想化典型曲线，与实际特性是有差别的。如图 1-2(a) 中频率和增益的斜线为均匀的 6dB/oct 的直斜线，实际上当接近 1MHz 时增益急速下降，因而使曲线斜率远大于 6dB/oct 。此时如加入大反馈量的负反馈极易引起高频自激。

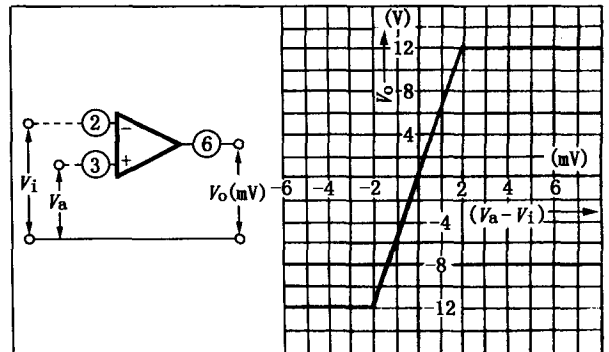


图 1-1 运放的基本特性

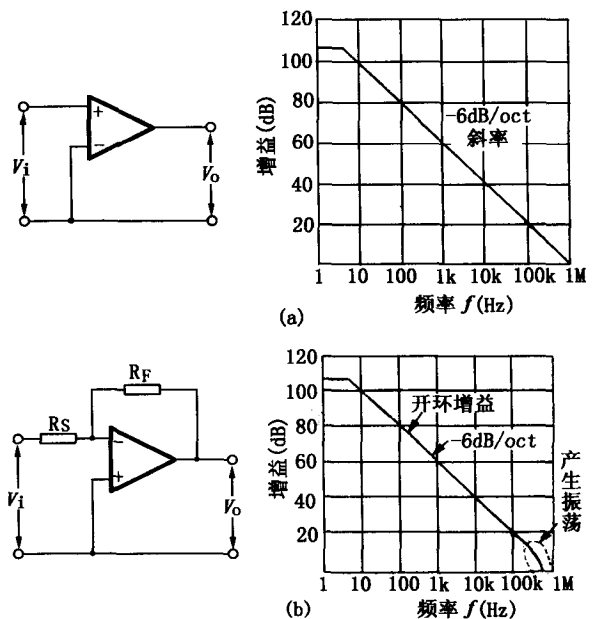


图 1-2 运放的开环特性与闭环特性

(二) 运放的基本特性和参数

为了对运放有较具体的认识，现将著名的优秀双运放 NE5532 的基本参数介绍如下。

NE5532 是美国 Signetics 公司产品，特点是低噪声、高增益，由于性能优异而风靡世界，各大电子公司纷纷推出以 5532 为序号的产品。NE5532 的出名源于在音响前级放大电路的优异表现，广泛用于高级音响、名牌专业音响以及 CD、DVD 播放机中作为模拟音频信号放大，被各国音响发烧友称为“运放之皇”。

但是，NE5532 并非专为音响放大而设计，从该公司发表的技术资料可以看出，应属典型的通用运放。

NE5532 有多种封装形式，NE5532N/AN 为 8 脚 DIP 塑封，NE5532FE 则为 8 脚陶瓷封装，NE5532D 为 16 脚 SOL 塑封。NE5532N/AN 极限参数如表 1-1 所示，交流参数如表 1-2 所示，直流参数如表 1-3 所示。

表 1-1 NE5532N/AN 极限参数

供电电压 (V_{CC})		$\pm 22V$
输入电压 (V_{IN})		$\pm V_{CC}$
差分输入电压 (V_{DIFF})		$\pm 0.5V$
工作温度 (T_a)		$0 \sim +70^\circ C$
功耗 (P_D)	N、D 封装	1.2W
	F 封装	1W

表 1-2 NE5532N/AN 交流参数 ($T_a = 25^\circ C$, $V_{CC} = \pm 18V$)

参数名称	符号	测试条件	NE5532/5532A			单位
			最小值	典型值	最大值	
输出阻抗	R_{OUT}	闭环增益 $A_v = 30dB$, $f = 1kHz$, $R_L = 600\Omega$		0.3		Ω
增益	A_v	$f = 1kHz$		2.2		V/mV
增益带宽积	GBW	$C_L = 100pF$, $R_L = 600\Omega$		10		MHz
转换速率	SR			9		V/ μs
功率带宽		$V_o = \pm 10V$		140		kHz
		$V_o = \pm 14V$, $R_L = 600\Omega$, $V_{CC} = \pm 18V$		100		kHz

表 1-3 NE5532N/AN 直流参数

参数名称	符号	测试条件	SE5532/5532A			NE5532/5532A			单位
			最小值	典型值	最大值	最小值	典型值	最大值	
输出失调电压	V_{os}			0.5	2		0.5	4	mV
	$\Delta V_{os}/\Delta T$	超温		5			5		$\mu V/^\circ C$
输出失调电流	I_{os}			10	100		10	150	nA
	$\Delta I_{os}/\Delta T$	超温		200			200		pA/ $^\circ C$
输入电流	I_n			200	400		200	800	nA
	$\Delta I_n/\Delta T$	超温		5			5		nA/ $^\circ C$

续表

参数名称	符号	测试条件	SE5532/5532A			NE5532/5532A			单位
			最小值	典型值	最大值	最小值	典型值	最大值	
供电电流	I_{CC}			8	10.5		8	16	mA
共模输入	V_{CM}		± 12	± 13		± 12	± 13		V
共模抑制比	CMRR		80	100		70	100		dB
电源抑制比	PSRR			10	50		10	100	$\mu\text{V}/\text{V}$
大信号电压增益	A_{VOL}	$R_L \geq 2\text{k}\Omega, V_o = \pm 10\text{V}$	50	100		25	100		V/mV
		超温	25			15			
		$R_L \geq 600\Omega, V_o = \pm 10\text{V}$	40	50		15	50		V/mV
		超温	20			10			
输出幅度	V_{OUT}	$R_L \geq 600\Omega$	± 12	± 13		± 12	± 13		V
		超温	± 10	± 12		± 10	± 12		
		$R_L \geq 600\Omega, V_{CC} = \pm 18\text{V}$	± 15	± 16		± 15	± 16		V
		超温	± 12	± 14		± 12	± 14		
		$R_L \geq 2\text{k}\Omega$	± 13	± 13.5		± 13	± 13.5		V
		超温	± 12	± 12.5		± 10	± 12.5		
输入阻抗	R_i		30	300		30	300		k Ω
输出短路电流	I_{SC}		10	38	60	10	38	60	mA

1. 开环电压增益 A_{od}

运放输入第一级采用差分放大器，因此， A_{od} 应称之为开环差模电压增益，表示运放输出端对差模输入的敏感程度。为了提高差模输入对输出电压的控制能力，运放 A_{od} 理想值为无穷大，以达到两个输入电压只要有微小的差值即可得到变化幅度相当大的输出电压。实际上，目前大多数运放 A_{od} 在 100dB 以上，高级运放可达到 140dB 以上。根据 A_{od} 的定义，其值应为：

$$A_{od} = \Delta V_o / \Delta (V_n - V_i)$$

式中输入、输出电压均为绝对值， A_{od} 为电压放大倍数。

2. 输入失调(offset)电压

虽然单晶片运放的差分输入级被制作于晶片上相距很近的范围， β 值、 V_{BE} 值以及集成电阻值仍有 $\pm 3\%$ 左右的误差。因此，当差分放大器两输入端差值为零时，使 $V_o \neq 0$ 而仍有一定漂移 (drift) 零值的输出电压。此偏移电压反映的是差分放大器对管不平衡的程度。为了表征这种失调的程度，不同产地的运放有不同的表达方式：一种是输入失调电压，意思是当 $V_o \neq 0$ 时，需在输入端加入补偿电压使 $V_o = 0$ 。此输入补偿电压的值称为输入失调电压，常用 V_{os} 表示。另一种方式是使 $V_n - V_i = 0$ ，直接测试输出电压偏移的值称为输出偏移电压，用 V_d 表示。对理想运放而言，显然是 $V_{os} \cdot A_{od} = V_d$ 。

对于无偏移调整端的运放，为了在无输入差值时使输出电压为零，则只有采用在输入端加入 V_{os} 的方式调整 $V_o=0$ 。对有些有专用偏移调整端子的运放来说，偏移调整不在输入端进行，所以用 V_d 来表示。无论 V_{os} 还是 V_d 都与环境温度有关，因此，精密运放还给出输入失调电压或输出偏离电压的温漂，以表征运算此项参数与温度的关系。在音响放大器中，运放极少工作于直耦输入输出状态，大多用于交流信号放大，可以不考虑温漂要求（全直耦 DC、OCL 放大器除外）。

3. 输入偏置电流 I_B

输入偏置电流用以表示差分输入电流值的大小， I_B 太大将使输入电阻降低，而且信号源的输出电阻对静态工作点影响增大。对用于前级电压放大的运放来说，希望 I_B 越小越好。高级运放的 I_B 只有几个 nA。常用的 $\mu A741$ 为 200nA，采用金属氧化物场效应差分对管的 CA3130E 为 5pA。

4. 差模输入电阻 r_{id}

输入电阻构成对前级电路的分流， r_{id} 表示差分对管对输入电路的分流大小。运放的输入电阻一般都有 $1M\Omega$ 以上，以 MOS FET 作差分放大前级的运放 r_{id} 可达 $10^6 M\Omega$ 。

5. 共模抑制比 $CMRR$

共模抑制比用以表示差分放大输入级各项参数的对称性，一般运放可达 90dB，高级运放可达 100dB 以上。

6. 单位增益带宽 f_c

单位增益带宽指开环电压增益 A_{od} 下降为 0dB 时的频率，用以表示运放增益 0dB 的带宽，即表示放大倍数为 1 时的频率，那么增益带宽 f_c 即为此频率值。

（三）音响放大器中运放的选择

运放从 1964 年开始，发展极为迅速，由于技术的进步，运放的各项指标日渐提高，而直逼理论上的理想运放的要求。为了满足通用运放的使用要求，理想的运放应有以下特性：开环差模电压增益 $A_{od} \approx \infty$ ，输入电阻 $r_{id} \approx \infty$ ，输入失调电压 $V_{os} \approx 0$ ， $0 \sim \infty$ 频率响应呈平直特性。

1. 不同年代的运放

实际的运放性能总是与理想要求有一定差距，但通用运放从 1965 年开始经 4 代产品升级已逐步趋于理想。

第一代运放以 $\mu A709$ 为代表，特点是采用微电流恒流源、共模负反馈，使输入电阻、失调电压、开环增益等指标大幅度地改善，达到并远超过普通分立元件组成的直耦放大器的水平。1965 年推出的单晶片运放 $\mu A709$ ，根据美国仙童公司（Fairchild，现有时音译为飞兆公司）发表的资料， $A_{od} = 45000$ 倍， $r_{id} = 250k\Omega$ ，最大输出电压 14V，最大输出电流为 20mA。

第二代通用运放为仙童公司开发的 $\mu A741$ 为代表的系列产品，主要改进是内部放大器采用有源恒流源负载，使开环增益大幅提高，因而放大级数由 3 级减少为 2 级，放大器的相移得到改善，只接入 20~30pF 小电容可达到完满的相位校正，输出电路中还加入短路保护电路，防止过流损坏。 $\mu A741$ 自 1966 年开发至今，应用广泛且长盛不衰，现在世界各大电子公司都生产了不同前缀的 XX741，性能大同小异。

第三代运放以 AD508 为代表，这一时期生产开发的运放采用超 β 管作为输出级， β 值达

到 1000~5000, 从而使输入偏置电流大幅下降, 输入电阻进一步提高, 开环增益、共模抑制比等指标进一步趋于理想, 增益带宽积达到 30MHz 以上。

第四代运放以 1973 年开发的 HA2900 为代表, 采用 LSI 制造工艺, 输入级采用 MOS FET 作为差分对管, 输入电阻 r_{id} 达到 100M Ω 以上。内设自动稳定输出零电压的电路, 使 V_{os} 降低到 60 μ V 以下。

不同时代的典型运放代表型号, 其特性差别可见表 1-4。

表 1-4 不同生产年代运放特性

品种类型			通用型					高速	高阻	大功率	精密
			原始型	第一代	第二代	第三代	第四代				
名称	符号	单位	μ A702	μ A709	μ A741	AD508	HA2900	μ A772	CA3140	μ A791	μ A747
输入失调电压	V_{os}	mV	1~10	2.0	2~10		0.06	10	30~50	3	5
输入失调电流	I_{os}	nA	500~5000	100	50~100	0.3	0.5	100	0.1~0.4		0.2
输入基极电流	I_b	nA	2500~10000	300	200	6	1	500	0.7~2	100	0.5
V_{os} 温漂	d_{vos}/d_T	μ V/ $^{\circ}$ C	10~30	5	20~30	0.3~0.6	0.6		10		10
I_{os} 温漂	d_{ios}/d_T	nA/ $^{\circ}$ C	5~50			0.003			5		5
开环差模增益	A_{od}	dB	60~66	93	100~106	140		94	80~86	94	94
共模抑制比	CMRR	dB	70~80	90	80~86	130	120	80	70~80		70
输入共模电压	V_{ion}	V	+0.7~ -3.5	\pm 10	\pm 13	\pm 15		+14 -12	+11 -15		\pm 15
输入差模电压	V_{idm}	V		\pm 5	\pm 30				\pm 8		\pm 30

续表

品种类型			通用型					高速	高阻	大功率	精密
			原始型	第一代	第二代	第三代	第四代				
名称	符号	单位	$\mu A702$	$\mu A709$	$\mu A741$	AD508	HA 2900	$\mu A772$	CA3140	$\mu A791$	$\mu A747$
差模 输入 电阻	r_{id}	M Ω	0.008~ 0.020	0.25	2		100		10^3		0.3
最大 输出 电压	V_{opp}	V	$\pm 4 \sim \pm 4.5$	± 14	$\pm 8 \sim \pm 12$			± 12	$\pm 10 \sim$ ± 12	± 22	± 12
-3dB 带宽	f_h	Hz	300k		7						7
单位 增益 带宽	GBW	MHz			1		3			0.75	
静态 功耗	P_D	mW	150	80	50	75		300	120	15W	85
静态 电流	I_o	mA		2.7						1.2A	
转换 速率	SR	V/ μs		2	0.5	1.2	2.5	≥ 40			0.5

2. 具有特殊指标的运放

目前已有的运放中除通用型小功率运放以外，还开发了部分有特殊指标的运放，以适应不同用途。常见适合音频放大的有下述几种。

(1) 适用 DC 前级放大的高阻型运放

此类运放的前级输入差分放大器采用 J FET 或 MOS FET，使输入电阻达 $10^9 \Omega$ 以上，同时差分放大器采用不同导电沟道的对管，采用内部提供偏置，使两种导电沟道的场效应管偏置电压的电流相互抵消，在静态时输入电流近似为 0，用于 DC 放大器前级，可以取消输入信号的耦合电容。如常见的 MOS FET 运放 CA3130E 输入偏流仅为 5pA，输入电阻则达 1.5T Ω ，增益带宽乘积达 15MHz，堪称理想的差分放大器。

(2) 高压型运放

线性运放输出模拟信号电压的幅度直接与供电电压相当，原理和分立元件电阻电容耦合放大器相同。如果采用单电源供电，为了避免输出信号失真，则输出信号峰值应不超过 V_{cc} 供电的 70%~80%。双电源供电的运放则不超过正负电源绝对值的 70%~80%。大功率音响放大器对前级放大器除要求有足够的电压增益以外，还要求有足够的动态范围，输出幅度足够的驱动信号。所以，对线性运放来说，提高供电电压是有重大意义的。初期的线性运放

供电电压为 9V 以下，后来由于工艺改进提高为 $\pm 12V$ 、 $\pm 22V$ 。例如，被音响发烧友称为发烧级运放的 NE5532，正负供电电压为 $\pm 22V$ ，增益带宽乘积达 10MHz，采用负反馈电路后使闭环电压增益达到 50 倍，高端截止频率也在 200kHz 以上。

(3) 功率型运放

通用运放均为小功率集成电路，一般输出电流在 20mA 左右。随着集成电路工艺的进步，输出十几瓦的功率型单片音频放大器，已经相当普遍。而近年来更开发了几十瓦甚至近百瓦的集成化（不包括混合厚膜工艺产品）单片音频放大器或开关电源驱动器。而且不同于厚膜电路的是，此类大功率音响集成化输出级各项指标均已达到或接近分立元件音频输出级的指标（特性见表 1-4）。

除上述不同时期生产的运放和特种运放以外，目前市场上各种运放型号难以统计，对音响放大器的应用选择，主要的是以下几项指标（依指标的重要性排序）：输入失调电压 $\leq 2mV$ ，最大温漂 $< 5\mu V/^\circ C$ ，速率 $> 6V/\mu s$ ，增益带宽 $> 5MHz$ ，噪声电压 $< 0.707mV$ 。

上述指标只是基本要求，是按上世纪 80 年代前的音响技术要求而提出的，目前属保守的条件。

能满足以上条件的通用运放型号极多，但是受发烧友青睐的是 LT1028、LT1057、HA5112、OP248 以及号称发烧运放的 NE5532、NE5534、NE5535 等型号，各项指标都超过上述要求。

(四) 运放在音响中基本应用电路

运放作为音响信号放大，有 3 种基本应用方式：反相放大电路（又称倒相放大器）、同相放大电路、差分放大器。以下分述基本电路组成和比较简单的基本参数估算方法。

1. 反相放大电路的应用

图 1-3(a) 为基本应用电路，明显特征是放大器 I/O 特性工作于直角坐标的第 II、IV 象限，在电路中只加入输入电阻 R_S 和负反馈电阻 R_F 。当在电路输入端加入输出电压 V_i 时， V_i 经 R_S 和运放输入电阻 R_i ，在运放两输入端形成 V_g 。可见， V_g 即正相输入端和反相输入端的电压差，即前述的 $(V_n - V_p)$ 输入端电压关系为：

$$V_i = I_i \cdot R_S + V_g$$

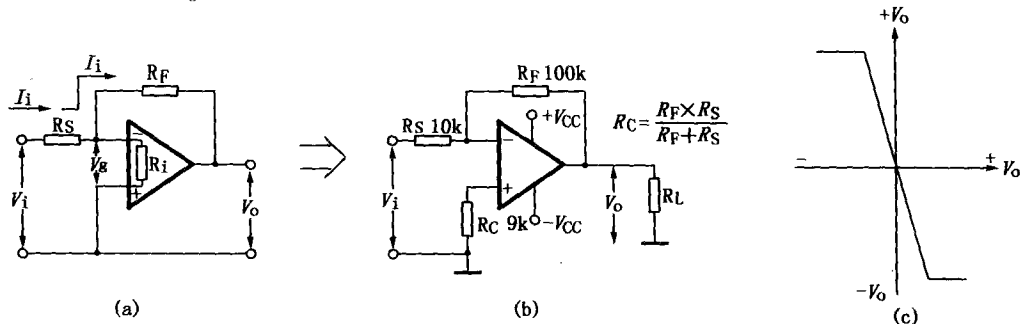


图 1-3 运放组成反相放大器及输入输出特性

当不引入负反馈时，运放的开环电压增益极大，导致 V_g 即使非常小也可形成足够的输出电压。所以，可将 V_g 视为近似 0V，在上式中达到可忽略的程度，此条件下则可认为 $V_i = I_i \cdot R_S$ 。此假设并非 V_g 可以等于 0V，如 $V_g = 0V$ ，则放大器输出电压也为 0V。忽略

V_g 的存在, 只是说与 I_i 、 R_s 相比电压值小到可以忽略的程度, 即输入电流 I_i 几乎只与 R_s 相关。事实上, 运放的输入电阻 R_i 非常大, 即 $R_i \gg R_s$ 。当无负反馈、 R_F 开路时, 运放的 V_g 近似等于信号源电势。由于运放的开环增益十分大, 显然开环应用是不现实的。因此, 加入 R_F , 将输出电压 V_o 经 R_F 加到运放反相输入端, 从而形成并联电压负反馈放大器。当 $R_i \geq R_s$ 时, 输入电流 I_i 必然只经 R_F , 忽略 V_g 的极小值, 则输出电压 $V_o = I_i \cdot R_F$ 。由此可得出, 负反馈反相放大器的电压增益 A_v 为:

$$A_v = V_o / V_i = (-I_i \cdot R_F) / (I_i \cdot R_s) = -R_F / R_s$$

即运放的闭环电压增益 A_v 只与 R_F 、 R_s 之比相关。此结论的前提是, 运放有近似理想的特性: 当运放开环增益极大而近似为无穷大时, 负反馈放大器的闭环电压增益几乎与器件的开环增益无关, 只取决于负反馈电路的反馈系数 (此点与分立元件负反馈放大器基本原理是一致的)。

上述公式推导过程中设 $V_g \approx 0$, 虽只为分析方便, 但与实际情况并无多大出入。试想, 任何运放开环增益都在 10^4 倍左右, 而采用 15V 供电的运放, 最大输出电压可认为是 V_{CC} 的 80%, 即 $V_o = 12V$ 。在此条件下, $V_g \times 10^4 = V_o$, 故 V_g 只有 1.2×10^{-4} , 几乎是 0V。

图 1-3(a) 为基本电路, 实际应用电路如图 1-3(b) 所示。该电路与图 1-3(a) 相比需注意以下几点: 首先是 R_F 、 R_s 的比值确定了放大器的闭环电压增益, 除用于闭环增益 1 倍 0dB 的倒相放大器以外, R_F 必然为 R_s 的 A_v 倍, 即 $R_F = R_s \cdot A_v$ 。其他是并联电压负反馈放大器的输入等效阻抗近似为 R_s 、 R_F 的并联值, 当闭环增益 $A_v \geq 1$ 时, $R_F \geq R_s$, 则等效输入阻抗可近似认为等于 R_s 。

在反相放大器的实用电路中, 信号从反相输入端输入, 负反馈电压也同时加入反相输入端, 因而使反相输入端等效输入阻抗为 R_s 、 R_F 的并联值。为了使运放中差分放大器正反相输入端有近似相等的输入阻抗, 常在同相输入端接入阻抗平衡电阻 R_c , 其值与反相输入端输入阻抗相等, 即:

$$R_c = R_s \cdot R_F / (R_s + R_F)$$

根据运放增益带宽的关系, 当通过选择负反馈系数确定闭环增益以后, 负反馈放大器的带宽应为运放的增益带宽除以闭环增益 A_v 。

以常用的 NE5532A 为例, 增益带宽为 10MHz, 即使将闭环增益设定为 100 倍, 运放实际带宽也可达 100kHz。由此可得出, 若是采用运放设计音响高增益放大器作为小信号前级, 增益带宽最好在 10MHz 以上。如 $\mu A741$ 等, 所谓精密放大器增益带宽只有 1MHz, 用于音响放大器并不理想。

按上述关系, 图 1-3(b) 的应用电路闭环电压与元件数值的关系如表 1-5 所示。

表 1-5 图 1-3(b) 的应用电路闭环电压与元件数值的关系

A_v	R_s	R_f	R_c	Z_i
-1 倍	10k Ω	10k Ω	5k Ω	5k Ω
-10 倍	10k Ω	100k Ω	9k Ω	10k Ω
-100 倍	1k Ω	100k Ω	\approx 1k Ω	1k Ω
-1000 倍	1k Ω	1M Ω	\approx 1k Ω	1k Ω

2. 运放同相放大电路的应用

音响放大器中除特殊要求以外, 对输入、输出的相位关系并无严格要求。但如果是双声道立体声放大器, 则必须保持两声道输出信号为同相位, 否则会形成声像定位的混乱。因此, 无论同相放大还是反相放大, 对音频放大器来说只是负反馈方式的差别以及放大器参数的差异。