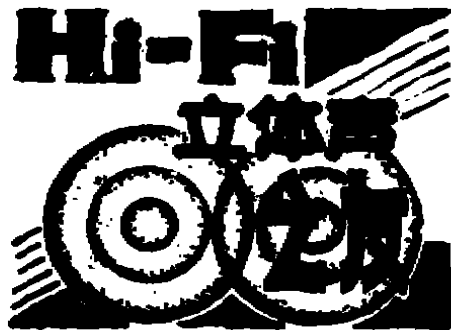


功率放大器, 单声道, 立体声技术



• Hi-Fi 制作室 •

2×60W 纯甲类双单声道

功率放大器

蔡 贤

〔编者按〕 纯甲类功率放大器音质之靓, 已使多少焊机派发烧友跃跃欲试, 然其制作工艺要求之高, 又让人举步唯艰。不过, 待你细细读完蔡先生这篇力作, 相信你不会再犹豫了。在实验制作的基础上, 蔡先生以其严密的原理分析、严格的选料过程、科学的印板设计, 向您奉献上这款能使您真正步入 Hi-End 境地的功放精品。

分体式放大器的使命无非是完成合并式放大器所无法实现的更高等级重放效果, 因此它应该是完全彻底再现“完美”的产品, 对任何方面都毫不妥协。这一点虽然是千真万确的结论, 但实际上仍然有必要在这一领域中增添一些具有相当实力的中坚机种。就分体式放大器中的后级功率放大器而言, 纯甲类(Class A)的组态正表现在它那适合作为中坚机种的魅力。

事实上, 纯甲类并不是什么新技术, 只不过伴随着音响器材的革命性发展, 将其优点真正展示出来, 并且应用在 Hi-End 的高级器材上而已。

整机特点

1. 纯甲类的放大组态, 使得整机的声音同时具有能量感和细致描写能力, 声像的实体感丰富。

2. 充沛的电源容量, 高电流的驱动能力, 在 8Ω 负荷时, 每声道输出最大功率为 60W; 到了 4Ω 负荷时, 却可以翻一番, 达到 120W; 负荷再减半为 2Ω 时, 输出功率将依比例增至 240W。

3. 在功率放大部分每声道使用 4 对功耗为 120W, 耐压 160V, 电流 12A 的东芝(TOSHIBA)大功率晶体三极管, 令其工作在极佳的小电流线性区, 稳定地

得到高音质。

4. 独特的散热方式, 使各个大功率晶体管的温度保持均一的稳定状态, 没有一般多管并联使用时声音混杂不清的特点。

5. 完全彻底的双单声道结构, 包括电源线也是两个声道各用一根; 声道分离度极佳。

6. 全功能的扬声器和功率管保护线路, 保证放大器和扬声器工作在安全区域内。

原理简介

如上所述, 在 8Ω 负荷时, 本机的输出功率为 2×60W, 如果保持所用的电源容量和大功率晶体管的数量不变, 只是将工作方式由甲类改为乙类(Class B), 即可轻易取得 2×200W 的输出功率, 但纯甲类却只能得到 60W 的输出, 为什么有那么大的差别呢?

这是因为乙类放大器和纯甲类放大器的电源功率天差地别之故。例如, 采用 400W 的电源时, 如果使用乙类放大, 理论上, 该放大器的最大输出功率可以达到 300W, 而使用纯甲类放大, 则只能得到 100W 的输出。同时, 电源变压器、整流电路以及滤波电容器等零件要占据整机重量的一大部分, 该放大器越是考究, 这一部分的容量就越大, 费用也随之增加。另外, 在机壳有限的很小空间内塞满发热量极大的纯甲类功放部分, 还必须使用卓越有效的散热冷却系统。由此可见, 从商品效益来看, 纯甲类放大器可谓是最蚀本的生意。因为在左右推销的规格参数上已经比别的功放差了一截, 既然如此, 为什么 Hi-End 产品还非搞这种吃力不讨好的纯甲类呢?

众所周知, 纯甲类放大器的音质出类拔萃, 这是因为它有许多先天性的优点。在采用纯甲类推挽放大输出的情况下, 输出电路本身具有抵消奇次谐波失真的作用, 结果可以减少总的负反馈量, 从而减少因反馈引起的各种副作用。另外, 纯甲类在低电平线性极佳, 不存在开关失真的问题; 在输出功率发生急剧变化时, 电源的电流变化几乎等于零, 因而电源的调整率极佳; 况且, 由于在电路中始终保持留有非常大的电流, 所以对猝发性声音的瞬间升降能够迅速反应, 无措手不及之虑, 这种强大的驱动能力在推动扬声器时更能发挥其优越性。

相形之下, 乙类放大器电源的电流必须随输出功率而发生相应的增减, 这好比是在需要资金周转的时候, 才临时向银行贷款一样, 效率虽高, 但有速度迟缓的隐患, 这两种方案究竟哪一种较好, 应决定具体的要求。就 Hi-End 产品而言, 以音质第一, 则纯甲类肯定占绝对的上风。

图 1 是整机的原理图(见 24~25 页), 是完全独立

的两个单声道功率放大器。

这个电路的雏形源自日本 MARANTZ(马兰士)公司的 DMA-1, 其设计思想是 MARANTZ 公司自始至终坚持的“正负双电源、级间直耦”的传统功放模式。

第一级采用的双极晶体管不是常用的 NPN 管, 而是现今优质功放采用的 PNP 低噪声管, 这是由于 PNP 管在大电流与小电流情况下的放大倍数相差极小, 因此线性极佳, 且同一批三极管的离散线较小, 配队容易。

由于在第一级使用的是双极晶体管, 因而如何减小基极电流温漂所导致的直流漂移就成了设计上的关键, 见图 2 所示。三极管输入内阻相对于 R_1 、 R_2 来说大得多, 忽略不计(本身两管特性相同), 则输出的直流电压为

$$U_{DC} = R_1 \cdot I_{B1} - R_2 \cdot I_{B2} \quad (1)$$

假设 $R_1 = R_2$ (图 1 电路中 $R_1 = 47k$, $R_2 = 47k$), $I_{B1} = I_{B2}$, 则 $U_{DC} = 0$, 若基极电流有所变化时, 输出端将产生直流漂移。既然直流漂移的原因在于基极电流, 所以对策是减小基极电流即可, 同时也可在外环加上直流伺服电路。而减小基极电流的办法有三种: (1) 使用足够大的三极管; (2) 采用达林顿(Darlington)复合方式连接三极管; (3) 减小小集电极电流。

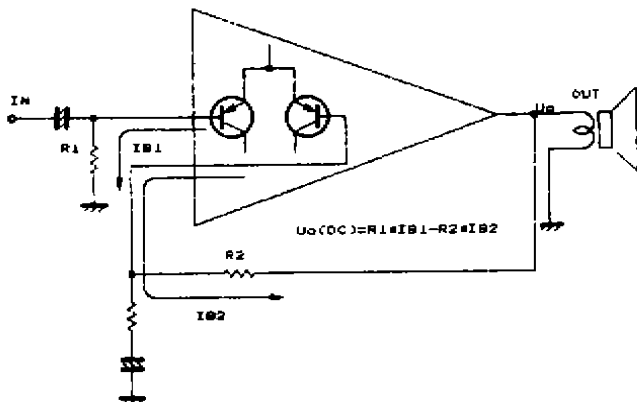


图 2 直流漂移

本机选用的是(1)(3)的方法, I_C 仅为 1mA(再小, 动态要受影响, 且增益提不高), 而且减小第一级的 I_C 有利于信、噪比的提高。

第二级是由 T107、T109、T115 组成的增益为 0dB 的电流镜像相位反转电路, 起到前后之间的缓冲作用, 减轻前后级的负担, 为了使 T109、T115 的工作状态接近, 特意在 T109 的回路中串入具有 Cascode 接法的 T107, 以提高 T109、T115 的线性, 减小高端失真。

之后是一级由 T111 组成的开环增益为 54dB 的

电压放大级, 由于其负载是镜流电路, 故其输出电流的能力可达 $\pm 9mA$, 可充分驱动末级达林顿电流输出级稳定工作于纯甲类状态。

相位补偿电路的第一极点在 12kHz, 第二级点在 120kHz, 而零极点补偿频率为 860kHz, 见图 3 所示。闭环后的频率设定在 480kHz。

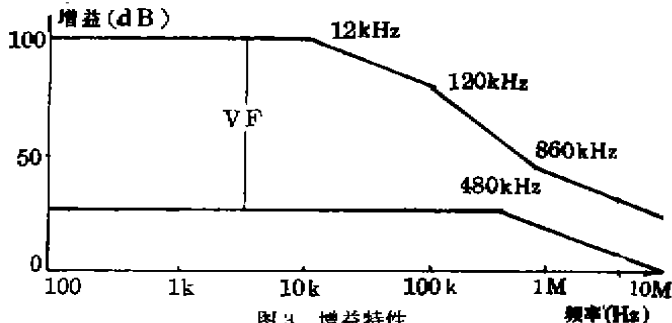


图 3 增益特性

由于第一级的开环增益为 46dB, 而第二级为 54dB, 所以整机的开环总增益达 100dB 之强, 而反馈量为 74dB, 因此整机闭环后的增益仅 26dB, 应该说反馈量相当深。那么, 在现今大量提倡浅反馈或无反馈的今天, 为什么还要加这么深的反馈量呢?

一般说来, 深反馈是与下述那些有害于音质的因素密切有关的: (1) 一旦放大器饱和, 则恢复正常状态的过程有时会拖得很长; (2) 硬失真; (3) 有可能产生不稳定、自激, 过渡特性恶化成瞬态互调失真。

然而, 本机针对上述三点, 采取了妥善的对策, 首先是就(1)而言, 由于本机级间全部直耦, 串联回路无电容, 即使饱和了, 只要过大输入一消失, 就能迅速地恢复为正常状态。其次是问题(2), 对此, 只要输出功率具有绝对不会因无论什么样的信号而进入饱和的足够余量, 或者干脆控制输入信号在限定值以内, 则根本不存在硬失真的问题。就(3)而言, 也由于级间全部直耦而不可能使低频段与过渡特性恶化, 对于高频段有关的类似问题则是通过由 R107、C105、C113、C115、R123、R126 等给出的极点补偿与充分加大 T111 的驱动电流解决的。

当然, 深反馈对音质的坏影响并不止是前述三点, 如果列举下去, 还是不少的。但不管是什么样的电路方式如果用挑剔的眼光来看, 总是会找出许多的缺点。重要的是, 对于级间全部直耦放大器特别是形似运算放大器型的级间全部直耦放大器来说, 深反馈所带来的好处已远远超过它所带来的坏处。

不看电路而泛论负反馈是没有意义, 尤其对于纯甲类功放而言, 负反馈是保证其稳定工作的重要条件。

功率放大则是由二级达林顿回路构成, 输出每一声道用了 4 对 $P_{om}120W$, $I_{om}12A$, $V_{ceo}160V$ 的东芝大功率三极管 2SC3280/2SA1301 构成。

甲类推挽的平均集电极电流不取决于信号大小,总是等于静态电流 I_{idle} , 而静态电流则设定为最大输出电流的 $1/2$, 即

$$I_{idle} = \frac{V_{om}}{2RL} = \frac{I_{om}}{2} \quad (2)$$

式中 V_{om} 为输出电压有效值, R_L 为负载电阻, I_o 为输出电流纯甲类工作的平均集电极损耗为

$$P_c = \frac{(1 - K^2/2)P_{omax}}{n} \quad (3)$$

式中振幅系数 $k = V_{om}/V_{cc}$, V_{cc} 为电源电压, P_{omax} 为最大输出功率, n 为推挽管并联的对数。

由(3)式表明, 甲类推挽的单边平均集电极损耗在无信号时取最大值, 其值等于最大输出功率。

由于本机在 2Ω 上最大功率 $240W$, 则输出电流为

$$I_{om} = \sqrt{P_{om}/R_L} = 10.95A \quad (4)$$

式中 P_{om} 为最大输出功率。

则: $I_{idle} = 5.477A$

由于是 4 管并联, 分摊到每一管的平均电流为

$$I_c = I_{idle}/n = 1.37A \quad (5)$$

由于要输出每声道 $240W(2\Omega)$ 的最大功率, 则每声道的管耗加起来为 $480W$, 两个声道合计 $960W$ 的静态功耗, 这部分功耗全部是以热量形式散发, 因此本机的散热是重要的问题(后一节详述), 这也就是为什么甲类功放难做的真正原因, 而且要做的话往往功率都不高的原因之所在。

被一个 $960W$ 的电炉烘烤着的功放能否稳定工作无疑是至关重要的。也是整机为什么采用深反馈的最主要的理由。事实上, 以纯甲类工作的顶级机种, 例如 THRESHOLD, KRELL, Mark Levinson, JEFF ROWLAN, AUDID RESEARCH 和 Accuphase 等, 无不都是深反馈的典范之作。当然仅仅有足够的负反馈是远不够的, 还必须在输出回路的偏置电压中增加温度补偿元件以自动调整末级电流, 如图 1 中的 T113。

这个偏置电路所提供的偏压应是输出级 V_{BE} 与射极电阻上压降的总和:

$$V_{bias} = \sum |V_{BEK}| + 2V_E \quad (6)$$

本机输出级工作在甲类状态, 这时的静态电流如上算出为 $1.37A$, 并假定 V_{BE} 均为 $0.6V$, 则可算出偏压为:

$$V_{bias} = 2.4V + 2 \times 0.22 \times 1.37 = 3V$$

当然, 在上述计算中, $|V_{BE}|$ 被假设为 $0.6V$, 但它是具有大致为 $-2mV/^\circ C$ 的温度系数的, 因此, 如果

认为偏压与温度变化无关而保持电压恒定, 则在温度每升高 $1^\circ C$ 时, $2V_{BE}$ 的增大 $8mV$, 而使末级电流增大:

$$\Delta I_c = \frac{8mV}{2R_E} = 18.2mA$$

这就是说, 温度上升 $10^\circ C$ (纯甲类功放不可能仅上升 $10^\circ C$), 静态电流要增大 $182mA$, 这相当于设计值 $1.37A$ 的 13.3% 。

这当然不行, 因此必须在偏置电路下些功夫。办法是针对 $\sum |V_{BEK}|$ 的变化也让 V_{bias} 的值产生变化, 来使(6)式中的值保持相对恒定。这样做了以后末级电流 I_{idle} 当然也就保持恒定了, 图 1 中 T113 组成的并联调整稳压电路就具有温度系数为 $8mV/^\circ C$ (其值由 R129, VR101, R131 的中心比值决定) 的偏压, 而且还具有很小的输出阻抗, 有利于减小失真, 这里 T113 是紧贴在功率管的散热器上加以热耦合检测温度变化的, 在偏置电路中必须尽量采用经时变化小的电阻, 可变电阻 VR101 一旦调整完毕, 应用固定电阻替代。

通过上述的温度补偿, 在理论上应该是已经完全把静态电流给稳定住了, 但在实际使用中静态电流仍不免有某种程度的变动。原因在于, 输出级各管的 V_{BE} 是随着各管结温而变化的, 而温度补偿元件所检测的温度却不过是管壳温度而已, 因此必须在末级功率管的发射极串入电流反馈的电阻, 以使这种变动控制在最小范围内, 有效地防止晶体管的热击穿 (Thermal Runaway) 现象的产生, 该电阻的值是个关键, 太小, 则会完全没有效果, 应该取

$$R_E > \frac{\theta_{jc} \cdot V_{cc}}{500} \quad (7)$$

式中 θ_{jc} 是功率管的内部热阻, V_{cc} 为电源电压 (单边电压值)。

一般情况下的 R_E 值应取由(7)式算式算得的最小值的 $2 \sim 5$ 倍左右即可, 应该注意的是, 如果取值不必要地过大, 将会使最大输出下降, 所以不要大于 1Ω 。大多数 R_E 值在 $0.22 \sim 0.47\Omega$ 之间, 应采用渗碳电阻或水泥电阻, 而且是无感型的, 绝对不可使用薄膜电阻, 有因过大电流而起火的危险!

当然, 保护电路在这儿是必不可少的, 为了进一步提高保护电路的可靠性, 使用了日本 TOSHIBA (东芝) 公司的 OCL 功放及扬声器保护专用集成电路 TA 7317P, 其内部原理方框图见图 4 所示。它是 9 脚单列直插式塑封, 具有静音功能, 扬声器端子和接通断开工作时, 其电路都能通过继电器保护整机短路等过负荷时以及输出端子正或负的直流电压输出。功放的极限参数如下 ($T_a = 25^\circ C$):

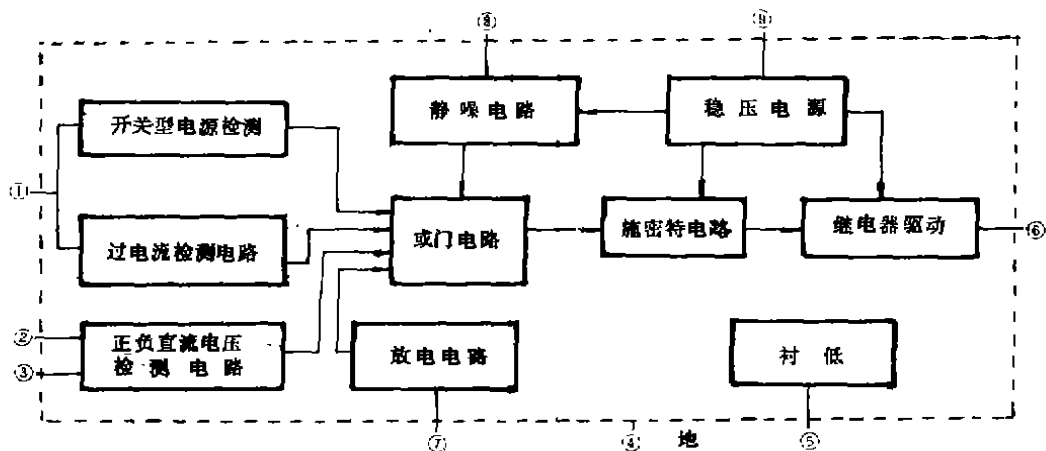


图4 TA7317P 内部框图

V_{CC}	60V
I_D	130mA
P_T	500mW
T_{op}	-20 ~ +75℃
T_{stg}	-55 ~ +155℃

这个保护电路的电源接通的静音时间为6s,其直流输出检测电压起控值在 $\pm 1.1V$ 左右,而负荷和短路或过载后的恢复时间约为3.5s左右。

至于电源,应该是本机最重要的部分,其容量应比最大功耗再大1倍,亦即每声道的变压器容量为600~1000VA,而电解的容量单边必须大于40,000 μF ,用一系列小电解并联而成则效果较单只大电解更佳。

工艺结构

这台纯甲类后级功率放大器是一个典型的模块式(MODULE)结构设计,中间是前后两个800VA的环形变压器坐镇,作为防震对策之一,同时可以取得较低的重心,见图5所示,两块功放板分别竖起固定于后板上,电源及保护板则于变压器和面板之间的空间固定,而功率管的印板则直接固定于散热器前的铝片上,注意,这里左右声道的所有印板是左右对称的,这样可以取得极好的一致性,图6是整机的左右声道功放板,图7是左右声道功率三极管的安装板(见23~26页),上面的是左声道印板,下面的是右声道印板,图8是电源滤波及保护印板,每一边电解电容由2只22000 $\mu F/50V$ 并联而成,左右声道共8只,图9则是整流电路,它直接反装于底板上(即焊接面朝上),这样大功率整流桥的散热就由底板完成了,图10是电源开关板,这里的开关合二为一,由双联开关完成,所以只有一块印板,挑剔的读者也可以把它分成两个开关。

所有印板通过接插件予以连接(除了交流电源外),同时应注意线位粗细,以适合不同的电流。

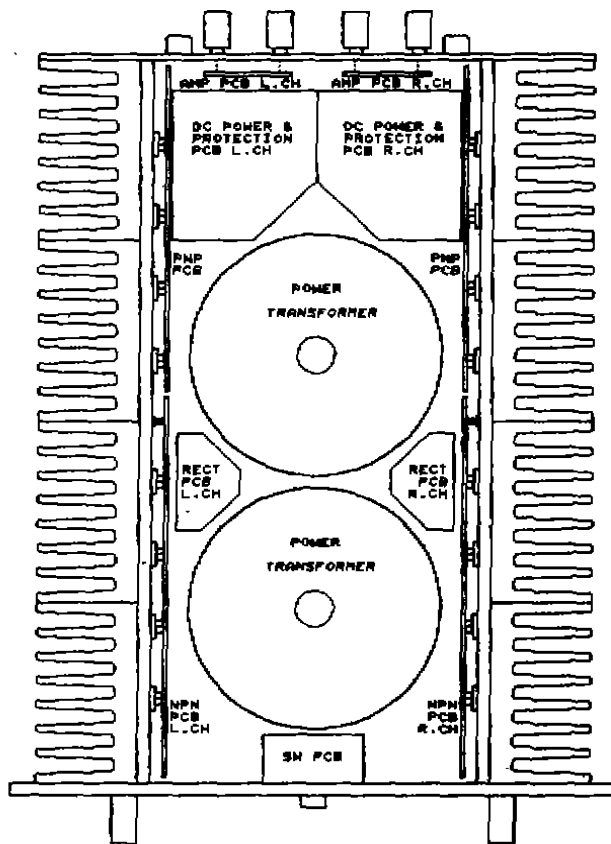


图5 整机安装

本机在空载时耗电力约为960W,这些流过功率放大部分的每个晶体管的电流平均不超过1.37A。在左右声道的大型散热器与功率管之间,应安装厚度为10mm以上的铝板,这种厚铝板的在大功率晶体管与散热器之间起了热缓冲的作用,各个大功率晶体管器件所发出的热量,因厚铝板的缓冲作用而在一定的温度条件下分散开了,从而慢慢地向散热器传导,最后被自然冷却,这种使放大元件保持温度均一的稳定状态,是

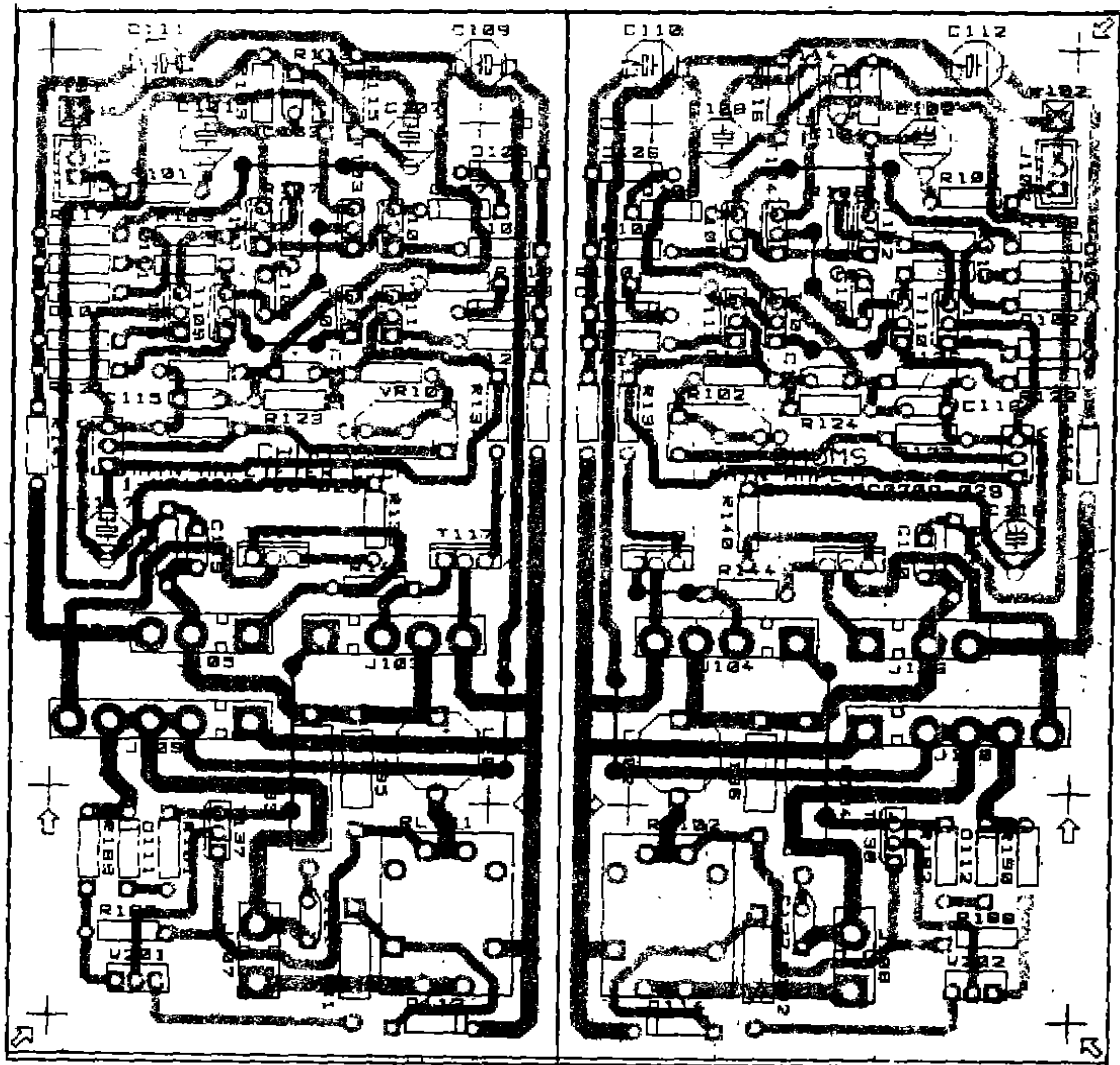


图 6 功放板

三极管参数表

TYPE NO.	VCE0	IC	PC	hFE	FT(MHz)	COB MAX.(TYP.)	NOTE
2SC2706	150	0.05	0.6	80-240	200	(1.8)/(2.8)	HIGH VOLTAGE
2SC3421	120	1	10	80-240	120	15/50	AUDIO DRIVE
2SC3280	160	12	120	55-140	30	220/480	AUDIO OUT
2SA970	120	0.1	0.3	200-700	10	4	LOW FREQ. AMP
2SC2740	120	0.1	0.3	200-700	100	3	LOW NOISE
2SC3954	40	3	1.5	500MHz	220	20	GENERAL PURPOSE

二极管参数表

TYPE NO.	VRM	IO	ISUR	VF	IR	NOTE
	(V)	(A)	(A)	(V)	(A)	
2EV820	200	25	300	1.05	10	RECTIFICATION
1SS135	40	0.11	0.3	1.2	0.8	SWITCH
40068	100	0.75		1.4		RECTIFICATION

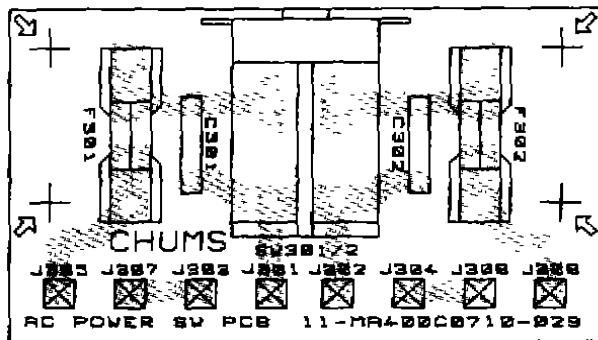


图9 整流电路

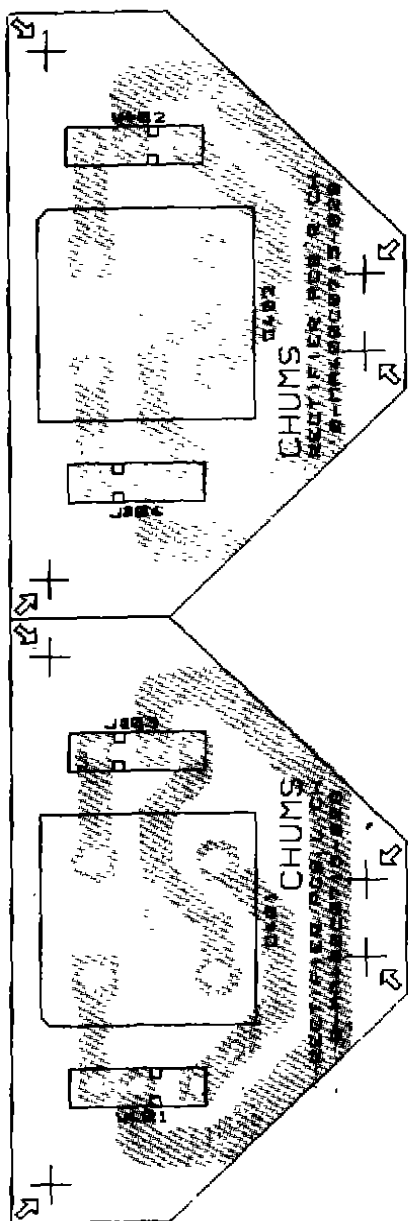


图10 电源开关板

美国的 THRESHOLD 公司生产的纯甲类放大器惯用的手法,以保证多管并联时能够平衡地进行并联工作。

温控三极管应紧贴散热器安装。

元件选择

本机的晶体三极管和二极管的参数见表1所示,读者可自行参考决定代用品;一般以选用日本 TOSHI-BA(东芝)公司生产的晶体管为佳,因其音色非常温暖醇和,较日本 SANKEN(三肯)公司的晶体管冷艳清丽更耐听更自然。

电阻电容以用名牌补品元件为上上选,因为毕竟这是一台以音质取胜的纯甲类功放。

散热器每声道用了4块高250mm,宽150mm,厚80mm的铝制品,因此内衬的厚铝板的长度则为4倍的宽度,即600mm,高也是250mm,厚度为10~20mm,能厚则厚。

变压器是两个800VA的空载电压29~31V×2的环形功率变压器(负载时为28.5×2左右)。

印板的板材以选用FR4的玻璃纤维环氧板基的印刷电路板并经热风整平工艺处理。

前后面板均以厚8~15mm的厚铝板制成。

制作调整

制作时应认真仔细,这无疑对调整是有帮助的,本机的调整处只有末级静态电流一个地方。

调整VR101,使末级每一管子的静态电流1.37A,即在R151、R155、…的0.22Ω(3W)上测得301mV左右,每5分钟测量并调整一次,直到该值稳定为止,一般需1~2小时,然后再关机冷却后重新开机测量调整。

测量中点输出是否为0V,偏差在±10mV以内。

其实测指标如下:

RMS输出功率:61W(20Hz~20kHz,0.012%THD,8Ω)

频率范围:10Hz~100kHz ±0.5dB(1W,8Ω)

15Hz~33kHz ±0.5dB(60W,8Ω)

总谐波失真:0.01%(20Hz~2kHz,60W,8Ω)

信噪比:99.2dB(输入接600Ω,未加权)

听音评价

就本机而言,所用器材如图11所示连接。

所用的唱片如下:

- 1.《HIGH TECH CLASSICS》,片号PHILIPS的426-689-2;

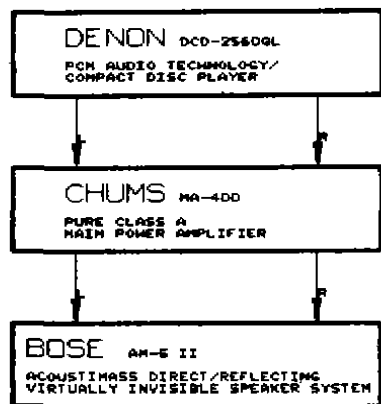


图 11 器材连接

2. ENYA 的《SHEPHERD MOONS》，片号 WEA 的 9031-75572-2;

上海市农工商星火音像电器公司

著名专家免费提供音响、视频、灯光系统的技术咨询。

专业设计、安装、调试会堂、舞厅、剧场、体育场、宾馆、娱乐厅、PTV、KTV 包房的音响、视频、灯光系统。

按用户要求提供多种方案，实行设计、配套、验机、发运、安装、调试、售后服务、培训一条龙服务。

音响器材保用一年，终身维修，对部分省市联销点实行定期巡回跟踪服务，服务内容详见信函。

主营：美国 HALFER、KLIPSCH、JBL、BOSE、JAMO 专业民用音响器材。

经营：天龙、力士、索尼、先锋、松下等名品音响器材。

联系人：何小中 传真：3730808

地址：西藏南路 547~551 号

电话：3730808、3281930

开户银行：南办中华路分理处

帐号：219-00200889

《无线电与电视》

1992 年合订本发行消息

由本刊编辑部编辑的《无线电与电视》1992 年合订本不仅荟集了本刊 1992 年出版的所有文章，而且还充实了“日本名牌 CD 唱机性能一览表”等珍贵内容，全书篇幅增加，共计 312 页，定价 9.00 元。

除全国各地新华书店购买外，特设下列特约经销点以供广大读者购买和邮购（邮购价 10.00 元）。

△ 上海科学技术出版社邮购组

地址：瑞金二路 450 号 邮编：200020

△ 福州文化教育书店

地址：福州市达道路（图书馆院内）

邮编：350009

△ 广州佳能录象机维修中心

地址：广州市北京路 203 号 邮编：510115

△ 广东省科普器材公司服务部

地址：佛山市卫国路 84 号之六 邮编：518000

△ 南京市南鲸音响中心

地址：南京太平南路文昌巷 7 号

邮编：210002

△ 杭州先达音响公司

地址：杭州市湖墅南路 15 号 邮编：310005

△ 成都智慧书店

地址：成都市外西铁路新村 31 栋 2 门

△ 上海视听音响电器商行

地址：浦东开发区福康路 46 号 邮编：200120

△ 珠海市惠威电子厂经营部

地址：珠海拱北联安路 77 号 2 楼

邮编：519020