

无线电精汇

Classic Audio Power Amplifier Design And DIY Projects

经典音频功率放大器 设计与制作

■《无线电》编辑部 编

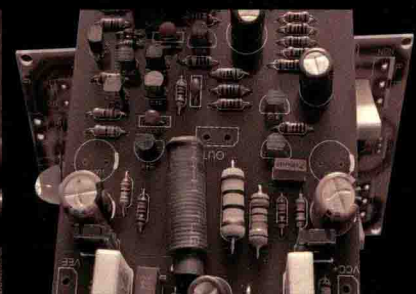
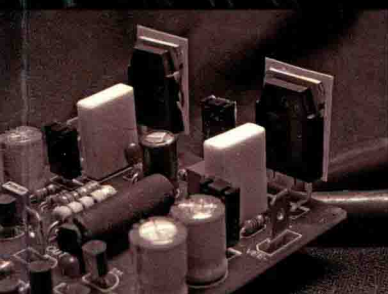
50 例

A类 B类 A-B类 D类

前级 后级 混合级 耳放

晶体管功放 电子管功放 电路布局 元器件选型 装配详解 听音感受

独特的设计思路 详尽的DIY资料 经典的制作方案



 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

无线电精汇

Classic Audio Power Amplifier Design And DIY Projects

经典音频功率放大器 设计与制作 50例

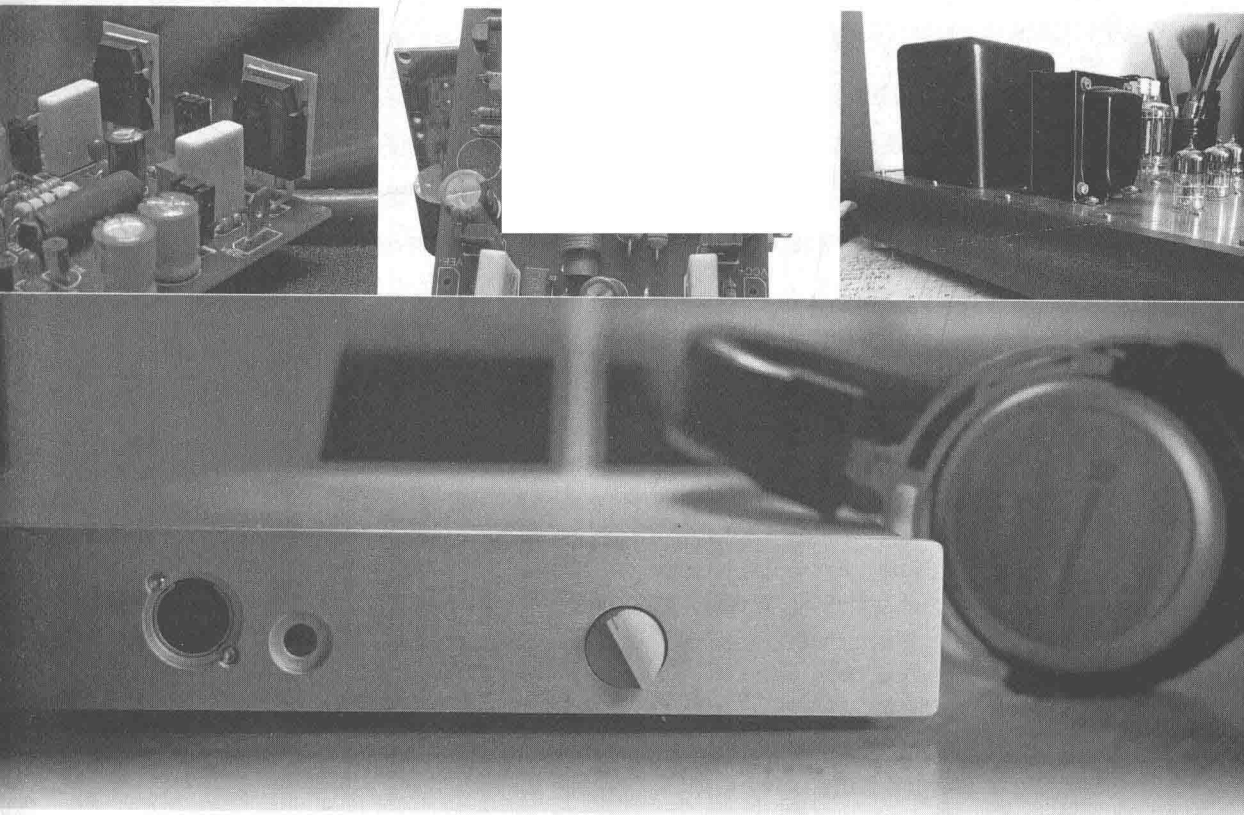
■《无线电》编辑部 编

A类 B类 A-B类 D类

前级 后级 混合级 耳放

晶体管功放 电子管功放 电路布局 元器件选型 装配详解 听音感受

独特的设计思路 详尽的DIY资料 经典的制作方案



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

经典音频功率放大器设计与制作50例 / 《无线电》编辑部编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2018. 6
(《无线电》精汇)
ISBN 978-7-115-48120-7

I. ①经… II. ①无… III. ①音频功放 IV. ①TN722. 7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第079662号

内 容 提 要

《经典音频功率放大器设计与制作 50 例》是“《无线电》精汇”丛书中的一本, 精选了 50 个经典的音频放大器设计与制作项目, 包括晶体管放大器、电子管放大器、集成电路放大器、混合式放大器等类型。实例中, 既有经典的大功率音频放大器制作项目, 也有近年来流行的小功率耳机放大器制作项目。

音频放大器是音响发烧友必不可少的听音设备, 设计、制作音频放大器也成为很多爱好者或专业人士热衷的项目。本书精选的实例内容丰富、实用性强, 是近年来音频放大器制作领域的优秀作品, 值得读者学习与借鉴。

本书不仅适合电子爱好者、音响 DIY 发烧友和音响设计专业人士阅读, 还可以为大中专学校师生开展电子科技实践活动提供有益的参考。

-
- ◆ 编 《无线电》编辑部
责任编辑 周 明
责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京市艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 23.75 2018 年 6 月第 1 版
字数: 488 千字 2018 年 6 月北京第 1 次印刷
-

定价: 89.00 元

读者服务热线: (010) 81055339 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

前言

无线电制作向来都是无线电爱好者、特别是DIY一族的最爱。《无线电》杂志自1955年创刊以来，历经60余年、出版600余期，刊登了大量知识性、趣味性、可操作性俱佳的无线电制作文章，伴随着一代又一代无线电爱好者成长，拥有了一批又一批无线电和电子技术的粉丝。现在很多从事电子技术工作的专家、教授都出自当年的青少年无线电爱好者。有的无线电爱好者虽然没有从事电子技术专业工作，但他们能把自己的专长运用到工作中，使电子技术在其他领域得到了广泛的应用和发展。《无线电》杂志为自己在“科普、创新、实作、分享”当中不懈努力、得到众多粉丝认可感到欣慰。

电子科学技术的发展是一个国家科学技术进步的重要标志之一。普及无线电和电子科学技术既是国家科学技术发展的需要，也是培养新世纪科技人才的需要，更是《无线电》杂志义不容辞的职责。为此，我们适时地把《无线电》杂志上介绍过的、优秀的制作类文章，认真精选汇编成书，以方便广大读者，延伸《无线电》杂志的科普服务功能。

2001年我们汇编出版了第一本《无线电制作精汇》，精选汇集了《无线电》杂志发表的7大类382个制作项目。其后我们汇编的“《无线电》精汇”系列图书一直受到读者的欢迎并重印。

新的“《无线电》精汇”系列在原来的基础上做了调整，紧跟时代步伐，及时补充了新内容。新版系列图书中既有传统的经典无线电与电子制作，又有体现时代特征的单片机应用开发制作项目和符合“大众创业，万众创新”精神的开源硬件制作项目。这些项目既可以用于业余和课外电子制作活动，又可以用于开发创新智能电子产品。

“《无线电》精汇”系列图书内容丰富、信息量大、涵盖技术领域宽广、资料齐全、实用性强，并不断增添最新的优秀作品，是广大电子技术人员、科研人员、电子爱好者的重要参考手册，也是大中专学校学生开展电子科技实践活动的得力指导书籍。

《无线电》编辑部

目录

经典篇

第一章 晶体管放大器

- 1 分体式“可变声道”功放的设计与制作 4
- 2 200W 超平衡功率放大器的设计与制作 13
- 3 打造精品 Audio 功放 27
- 4 小甲诞生全记录
——25W 晶体管甲类 Hi-Fi 功率放大器 40
- 5 一款为书架箱设计的“胆味”晶体管功放 49
- 6 打造超强的 Hi-Fi 桌面功放 60

第二章 电子管放大器

- 7 威廉逊放大器自制详解 70
- 8 低成本靓声电子管放大器 81
- 9 电子管功放 DIY——“鱼与熊掌兼得” 88
- 10 低内阻三极管 6C19 功率放大器 96
- 11 一款 805 单端甲类功放的设计制作 104
- 12 冰蓝色音乐之光
——6P6 推挽电子管放大器 111
- 13 FU-29 “准超三极管”单端功放 118

第三章 集成电路放大器

- 14 超强高性能的小功率纯后级 LPUHP 126
- 15 我的 LM4780 功放制作实战 135
- 16 桌面功放的设计与制作 143
- 17 性能优良的多媒体数字功率放大器的
设计与制作 156
- 18 使用开关电源的高保真功放 164
- 19 用 TA2020 制作一款高品质数字功放 176
- 20 三世同堂的 OCL 功放：原理、历史与制作 183
- 21 用 TEA2025 做个桌面小功放 196
- 22 私人订制——声音不俗的 LM4766T 桌面功放 200

第四章 混合式放大器

- 23 纯后级 A 类混合功放的制作 208
- 24 IRS2092 试用记——大功率 D 类功放制作实战 218
- 25 “A10”的诞生——一部功放整机的设计制作 225
- 26 2×100W 甲乙类胆石组合功放的制作 233

CONTENTS

耳放篇

第五章 晶体管耳机放大器

- 27 PANDA MK2 升级版耳放套件 244
- 28 JLH1969 OTL 耳放制作 249
- 29 8 管 OTL 耳放 255
- 30 场效应管耳机放大器 DIY 手记 258
- 31 TW-J9 小型晶体管耳机放大器 265
- 32 为 HA-1 耳放搭配电源 269

第六章 电子管耳机放大器

- 33 发现被埋没的靓管之旅——电子管耳放 274
- 34 用 6C16 制作靓声耳机放大器 277
- 35 6N1 耳放 281
- 36 高性能耳机放大器 285
- 37 电子管耳机放大器的制作 290

第七章 集成电路耳机放大器

- 38 完美的 TPA6120 超级耳机放大器 296
- 39 DIY 经典 47 耳放 304
- 40 制作高保真耳机放大器
——对于 47 耳放的完美改进 308
- 41 晶莹剔透的 47 耳放 320
- 42 13 种改造方案玩透“47 耳放” 323
- 43 打造一款非主流耳机放大器——E2 338
- 44 UCP2 耳放 343
- 45 简单实用的小功率耳放 347
- 46 C&C-PRO 超级 4 合 1 耳放 DIY 350
- 47 打造一款高驱动力 OP+BUF 构架的耳放 354
- 48 相约月亮女神
——装一台 Artemis 全平衡耳放 359

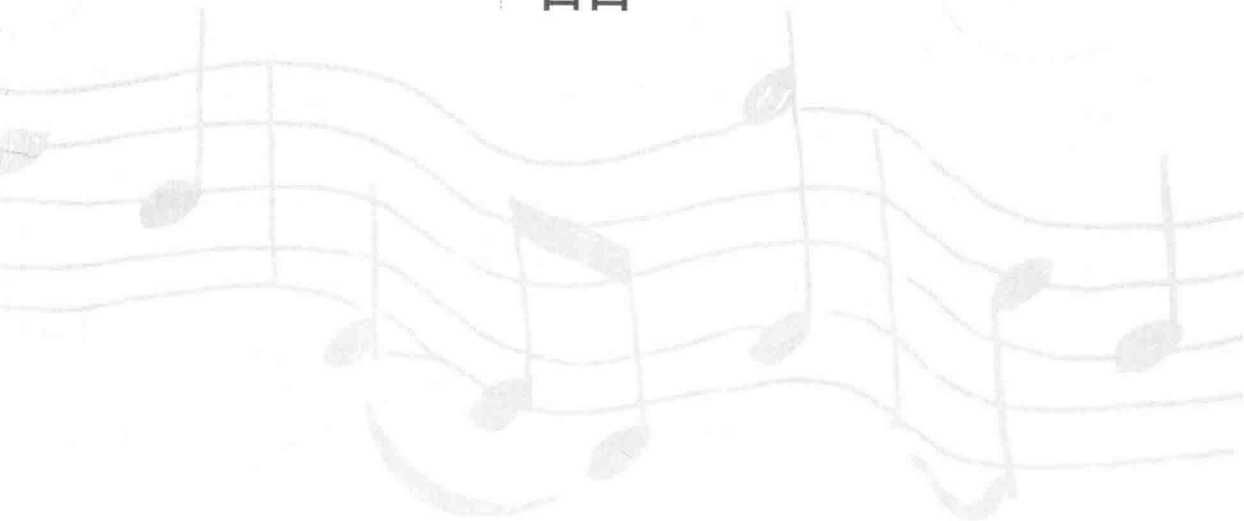
第八章 混合式耳机放大器

- 49 “B2” 小耳放的设计 366
- 50 超平衡耳放的设计与制作 369

经典篇

第一章

晶体管放大器





分体式“可变声道” 功放的设计与制作

自从研制了第一台“可变声道”Hi-Fi功放以来，我对此的兴趣日益浓厚。该功放内设有多组高精度的放大器，这些放大器可并联工作或独立输出，在确保实现优秀的双声道Hi-Fi音质的基础上，还能完美支持多声道的高保真性能，将各种高保真音乐碟片都播放出最佳音质，这也是吸引我持续研制这种功放的原因之一。

这种功放结构没有名机实例可供参照，为了做好它，我已试制了不少这类合并式功放，积累了丰富的经验。这次制作更高级的分体式“可变声道”Hi-Fi功放，希望实现几个设想：一是用全对称放大电路和无负反馈技术制作出音质优秀的作品；二是利用分体机内宽阔的空间，大量地使用精品元器件，让功放的音色尽善尽美。最后，用这台分体功放组建多声道PC Hi-Fi系统，自由

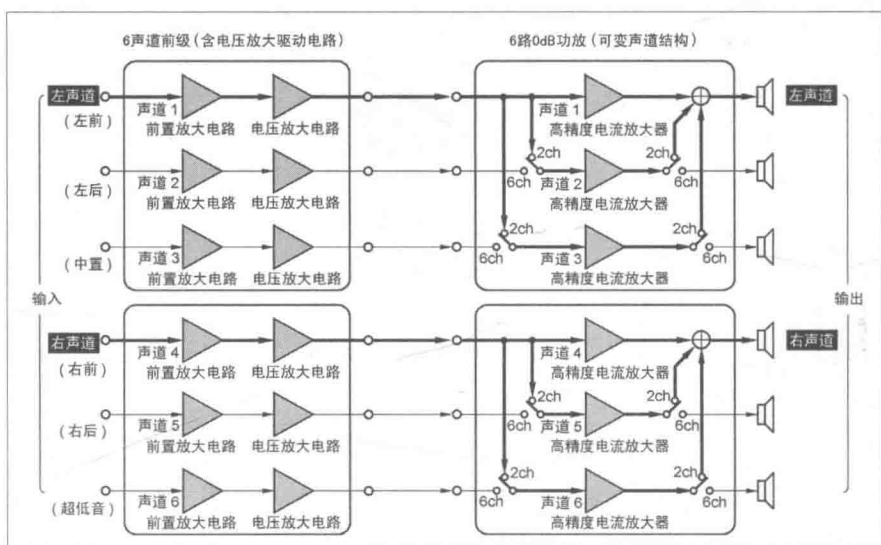


图1.1 分体式可变声道功放原理框图

自在地享受各种 Hi-Fi 音乐。

1.1 设计思路

随着科技的发展，Hi-Fi 音乐的来源十分广泛，以无损音乐为主的 PC Hi-Fi 更成为当前的热点。丰富多样的音乐早已不限于双声道立体声了，因此，制作一台完美兼顾双声道和多声道音质的 Hi-Fi 功放是充满乐趣和挑战的事情。

在 Hi-Fi 功放中，功率放大级含有功率管、散热片、滤波电容和变压器等大体积的元器件，占了功放的大部分成本。现有功率放大级电路结构是固有的，在设计之初就已决定了功放声道数量和功能特性，要么设计双声道 Hi-Fi 功放，要么做 5.1 声道（或更多声道）AV 功放，二者选其一。5.1 声道 AV 功放在播放 Hi-Fi 音乐时，只有两个主声道在工作，其余声道的功率元器件均闲置着。靠主声道有限的功率元器件和散热器，很难实现高电流输出和甲类放大等 Hi-Fi 功放常用的技术，不利于提高音质。而双声道 Hi-Fi 功放是无法表现多声道音乐的，这就形成了 Hi-Fi 和 AV 两种不同特点的音响系统。

我构思的“可变声道”功放的功率放大级是可活动的，当播放立体声音乐时，其多个功率放大级电路可合并成为双声道 Hi-Fi 功放。所有大功率管、散热片、滤波电容都在两个主声道里工作，最大输出电流可跃升数倍，输出内阻显著降低，可轻松地推动低阻抗音箱。此时所有散热片共同发挥作用，输出管可工作在大电流甲类放大状态，彻底消除交越失真和开关失真，将音质提升到极致。而在播放多声道音乐时，功放的多个功率放大级切换成各自独立工作，成为多声道 Hi-Fi 功放，可高质量地播放环绕立体声音乐。这样设计就使双声道与多声道的性能自然地融合在一起了。

按照以上思路，我设计了这台分体式“可变声道”Hi-Fi 功放，整机原理框图如图 1.1 所示，前级有 6 个前置放大电路和 6 个电压放大驱动电路，每个声道的电路完全相同。后级功放由 6 个高精度电流放大器电路组成（以下简称 0dB 功放电路），在每个 0dB 功放电路前后分别设有信号切换电路，控制这些 0dB 放大器合并输出或独立输出，组成了“可变声道”结构。由于采用无负反馈设计 0dB 功放电路，取消了前后级间的环路反馈连线，简化了电路，这种功放的结构也更加明朗。

1.2 电路原理

1.2.1 6 声道前级设计特点

与通常的 Hi-Fi 前级不同，这台分体机的前级中包含了前置放大电路和电压放大驱动级，前级一步完成了整个功放的电压增益，后级则采用无负反馈 0dB 功放电路，只放大电流推动扬声器。

无负反馈电路对元器件品质是非常挑剔的，这在无形中就增加了制作成本，因此这类设计往往只在昂贵的高级 Hi-Fi 功放中见到，如国产 Hi-Fi 名机钟神 JA-10/JA-200、瑞士的 darTZeel 108 等。

前级中前置放大电路（见图 1.2）主要由运放构成，采用运放做前置放大具有性能高、失真小、音质好的优点，许多 Hi-Fi 名机都采用运放来担任前置放大，而且运放的一致性很好，更适合于多声道前级。

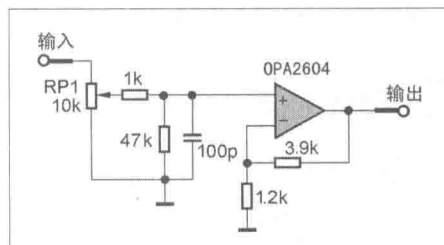


图1.2 前级中前置放大电路

电压放大驱动级电路是功放的电压放大部分（见图 1.3），它采用两级差分全对称放大电路，输入信号经两级放大就可获得足够的开环增益，有利于简化补偿，提高稳定性。输出部分由 VT9、VT10 构成，VD1 ~ VD4 为输出管提供 2.5V 的偏置电压，使 VT9、VT10 工作在甲类状态，具有很低的失真和很强的驱动能力。前置放大级和电压放大级设计在一起，使得输出到后级的信号电压幅度很大，具有很好的抗干扰能力，有利于提高信噪比，让声音细节展现无遗。

前级采用了 2 个洼田式高速稳压电源，每个稳压电源为 3 个声道的前级板供电，左右两侧完全独立供电，充分保证左右声道的信号分离度。

1.2.2 可变声道后级的设计特点

新型 OdB 功放电路是本机的核心电路（见图 1.4），由共基极放大器构成直耦合电路，后接达林顿电路。其中 VT1、VT2 是共基极放大管，也是偏置管，VT1、VT2 分别与输出管 VT5、VT6 紧

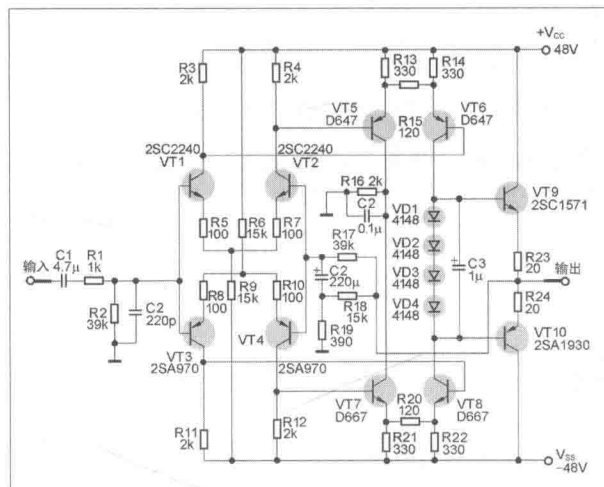


图1.3 电压放大驱动级电路

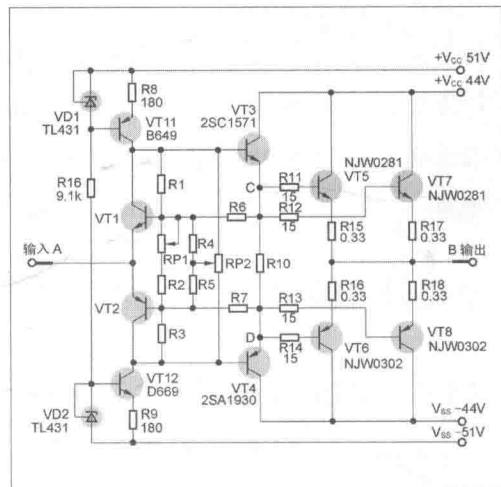


图1.4 新型OdB功放电路

贴在一起,实现准确的温度补偿。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 RP_1 是偏置电阻,调节 RP_1 可以改变输出管的工作点, R_6 、 R_7 是反馈电阻,反馈输出管的基极电压。

OdB电路中共基极管 VT_1 、 VT_2 的实际增益接近于1,其主要作用在于传递输入信号电流,并在输入信号电压上叠加上正负偏压,将输出管 VT_5 、 VT_6 、 VT_7 、 VT_8 的基极电压准确地钳制在输入信号 $\pm 0.7V$ 的范围内,使所有输出管的基极电压都与输入信号保持同步。由于 VT_1 、 VT_2 通过反馈电阻 R_6 、 R_7 与功率管共享基极偏压,当输出管基极电压有轻微漂移时, VT_1 、 VT_2 的负反馈环路会强烈地抵消各种漂移的趋势,保持输出管的基极电压稳定同步。

当OdB功放电路并联工作时,各功放的输入端并联在一起共享输入信号。各声道 VT_1 、 VT_2 的发射极的输入信号电压完全相同,迫使输出管基极电压与输入信号保持同步,这样每个OdB电路的输出电压也完全一致了。而工作温度、元器件离散性等因数引起的偏差,可用误差校正电路消除,保证功率管基极电压的同步精度,使输出电流更均衡。其中, RP_1 可改变输出管的偏压,独立调节每组输出管的静态电流。 RP_2 可微调输出的中点电压,将每个OdB电路输出的中点电压调节成相同值,消除OdB电路输出端之间的电压差值。实际制作中,在输入端并联时各个OdB电路输出端的电压差值可调节成0mV,经长时间使用后,实测中点电压的最大差值未超过 $\pm 1.5mV$,比功率管直接并联的差值还小。OdB功放电路的输出管偏压控制精度很高,静态电流很稳定。由开机时的冷态到正常工作状态,散热片的温升达 $20^{\circ}C$ 以上,而实测输出管的静态偏流的变化未超过9%,显示出该电路的良好性能。

1.2.3 放大器并联使用存在的问题及对策

让功率放大器精确稳定地并联工作是件富有挑战性的事情。并联工作的放大器需要有很好的 consistency,普通的功放电路很难达到这样精密的要求,采用功放并联技术的商品机十分少见。因为放大器并联时其输出端会相互形成负载,放大器除了输出正常的负载电流外,还可能因互为负载而产生有害的“短路电流”。特别是功率放大器的输出内阻极低,若某一放大器的输出电压有微小的偏差,就会引起较强的短路电流,轻则造成放大器振荡发热,影响音质,重则可能瞬间烧毁输出管。这是功放并联电路面临的主要风险和难点,也是我最有兴趣研究的问题。只有设计极为精密、可靠并具备优良的一致性和稳定性的功放电路,才能使每一时刻的输出电压完全一致、输出内阻相同、输出电流均衡,从而获得并联输出的优点。

普通的功放电路放大级数多,开环增益高,不利于提高一致性。若在输入级产生了微小偏差,会被放大电路放大数十倍(增益系数),使放大器输出端产生更大误差电压,所以开环增益较高的功放并联的难度也大大增加。在实际应用中,比较成熟的方法是精选稳定性高、一致性好的功率集成电路并联,如美国Hi-End名牌Jeff Rowland Model 10、11、12等型号。采用多枚LM3886

集成电路并联，每枚 IC 的电路中设有增益微调电位器，输出端还串联有均流电阻，用以均衡输出电流，让多枚集成电路并联使用，取得顶尖的音质效果。而常规的分立元器件功放很难达到并联工作所必须的一致性和稳定性，即使是名牌功放也不宜盲目地并联使用，因为同样有烧毁功放的危险。

本机设计的 0dB 功放电路无电压增益，电路简练，一致性和稳定性良好。更为重要的是，该电路可精细地调控输出管的偏流、中点电压、输出内阻等功能，主动消除各项偏差，取得更好的均流效果，为分立元器件制作可并联功放提供了基础。在实际制作中发现该电路性能稳定，对元器件的离散性不太敏感，一般使用中点和偏流这两项调节就可以了。当播放音乐时，3 路 0dB 功放电路并联在一起，每路 0dB 功放只承担 $1/3$ 的负载电流，显著降低了末级功率管的输出电流摆幅，减少了非线性失真。同时，分立元器件功放很容易实现高电流输出和甲类放大状态，这也是 IC 并联功放不易做到的，因此更有潜力获得理想的音质。

1.3 制作过程

绘制印制电路板是相当重要的过程，新颖的理念和优良的音质要靠设计合理的电路板来实现。设计音质好、工艺漂亮的 Hi-Fi 功放要花不少功夫，设计多声道功放则更为复杂。其结构紧凑、元器件密度高，要妥善解决电磁兼容性和均匀散热等问题，可变声道功放综合了以上的技术要求。要一步设计出音质好、可靠、实用的功放有相当的难度，由于前期试制了许多这类合并机，积累

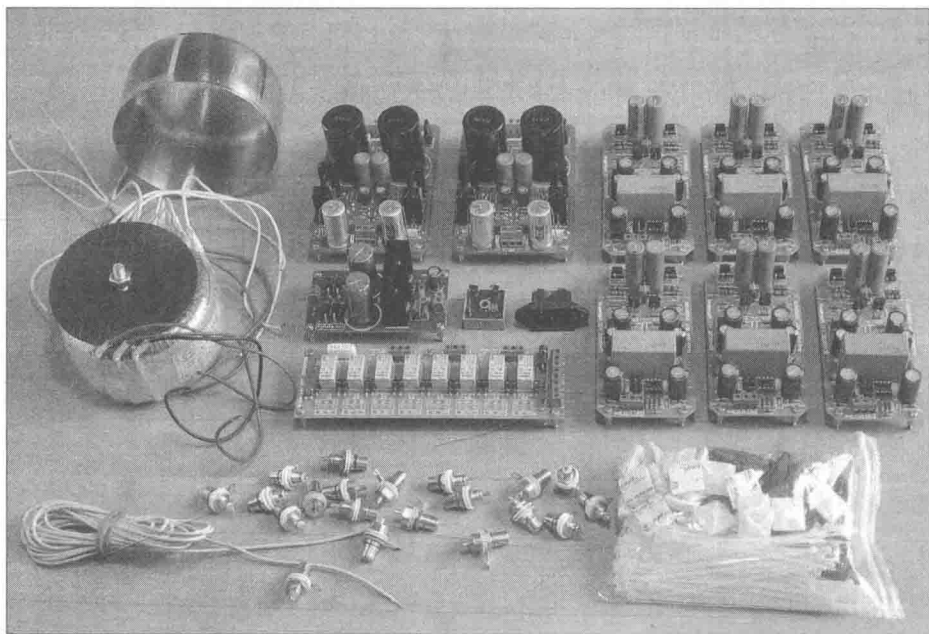


图1.5 前级内电路板按左右方向排列

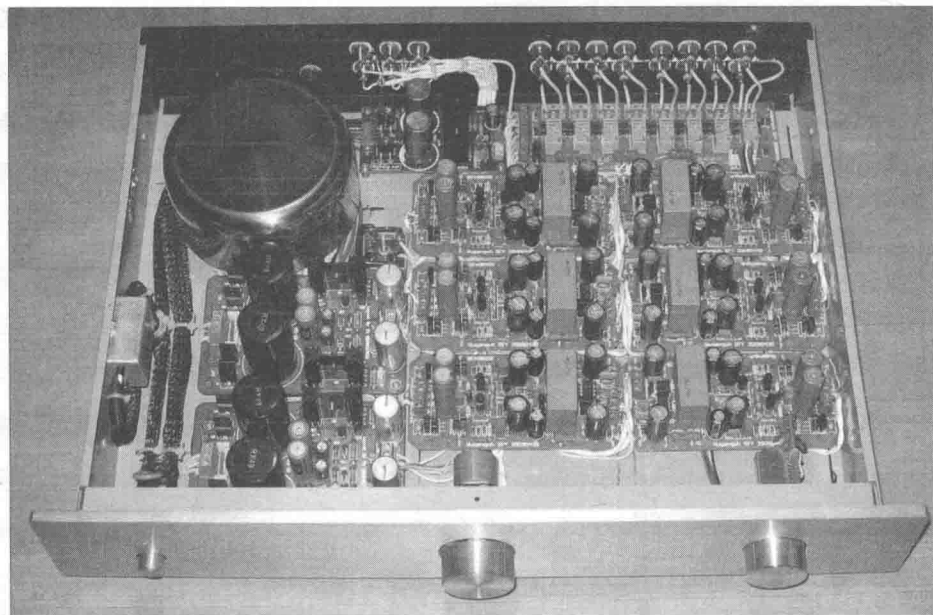


图1.6 前级电路板安装在前级中部和右侧

了许多的经验和方案,各种线路和布局已多次实验过,就使得分体机的电路板设计变得水到渠成了。本机全部采用单面板设计,没有多层板过孔脱落等问题,各个元器件的排列经过仔细考虑,尽可能让音频信号走线最短化,不必大面积覆铜也能取得良好的信噪比。主要电路板有前级电压放大板、后级功放板、输出保护板,除此之外还有输入信号切换板和控制板等。

前级内的电路板按左右方向排列布局,每声道一片电压放大板,总共6片(见图1.5),分别安装在前级中部和右侧(见图1.6),输入信号切换板靠近RCA信号输入端,变压器及稳压板安装在靠左侧,使干扰源远离信号放大区域,有利于提高信噪比。在实际制作中着重追求音质效果,大量使用了各种精品元器件(见图1.7)。信号耦合电容采用瑞典的RIFA 420系列MKP电容,反馈电容采用日本ELNA棕神音频专用电解电容。其他部位使用了美国丝碧、美国化工、德国WIMA、英国NOVER等名牌电容。电阻主要使用美国DALE军品金属膜电阻和美国AB碳质电阻。音量控制采用日本松下6联音量电位器,机内连线全部使用特氟龙镀银信号线,减少信号损失。由于信号切换继电器的线圈紧靠着最微弱的输入信号,这里使用了两级稳压电源为信号切换继电器供电,消除了线圈串扰的可能性。前级电源变压器采用特制的160VA环形变压器,并用优质硅钢带加强磁屏蔽,再扣上漂亮的不锈钢的变压器罩。前级内的220V电源线均套上带屏蔽的避振网,并串接了日本TDK电源滤波器,减少振动和干扰。

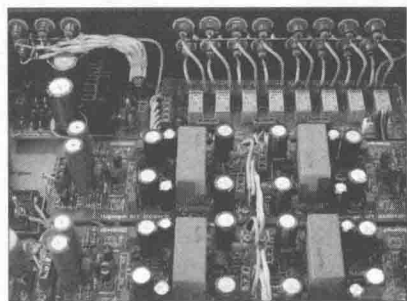


图1.7 考究的元器件

后级采用 AR998 大型机箱，规格为宽 485mm × 深 490mm × 高 180mm，机箱净重 17.5kg。内部采用对称布局，两侧巨大的散热器上各安装 1 块后级功放板（见图 1.8），每块板上含有 3 个声道 0dB 功放电路，输出保护板安装在扬声器接线端子附近。机箱的中部安装了 2 个特制的 800VA 低磁漏无噪声专利变压器，每个重量达到 9.7kg，各负责 3 个声道的供电，使功放的左右两侧电路板完全独立供电，彻底保证了左右声道分离度指标。

后级功放（见图 1.9 左）使用了总计 140000 μ F 的滤波电容，共 24 只安森美大功率管。功放板上无极电容主要有德国 WIMA、ERO，荷兰 PHILIPS 等品牌，电解电容主要采用英国 NOVER、德国 ROE（见图 1.10）、美国化工等品牌。小容量电容主要采用日本双信高精度银云母电容，电阻主要用美国 DALE 金属膜电阻。机内音频接线均采用英国鲨鱼 OFC 高级线材，采用特氟龙镀银信号线传递输入信号。功放设有软启动线路，避免了开机的冲击电流，保护电路采用单独的电源供电，由微电脑程序控制，动作灵敏可靠，妥善地保护音箱的安全。后级重 43.5kg，前级 7.5kg，整机总重 51kg。后级输出额定功率为：80W × 2 或 80W × 6（甲乙类）。

当听立体声音乐时，后级所有功率元器件（12 对输出管、6 对推动管）全部合并并在两个主声道。每声道 6 对大功率管并联工作在甲类状态，可承受 60A 峰值输出电流，推动低阻抗音箱轻松自如，达到极好的音质。在听多声道音乐时，功放切换成 6 声道等功率功放，每声道两对大功率管，最大输出电流仍然高达 20A。面积巨大的外置式散热器，可承受 6 个声道同时工作的高热量，每个声道依然具有 Hi-Fi 功放的音质，可高质量地播放多声道音乐。

完成后的制作如图 1.9 所示，功放刚调试正常时就有很好的信噪比，音量开到最大时 6 个声

道噪声都很小，功放的音质和解析力也很好，各项表现符合预期。由于这台功放的设计制作和用料都下足了

功夫，我对它的期望值自然也很高，希望它能发出各个方面都能精准完美的

声音！之后一段较长的时间

里，我对比聆听了多款

名牌 Hi-Fi 器材，并按

照自己的理解精细地调

整功放的每一项声音细

节，其间搭配了多款音

箱。初期使用了博良牧

歌、KEF IQ30、丹拿 Focus

140 等书架箱试音。后期则用 KEF XQ40、芬

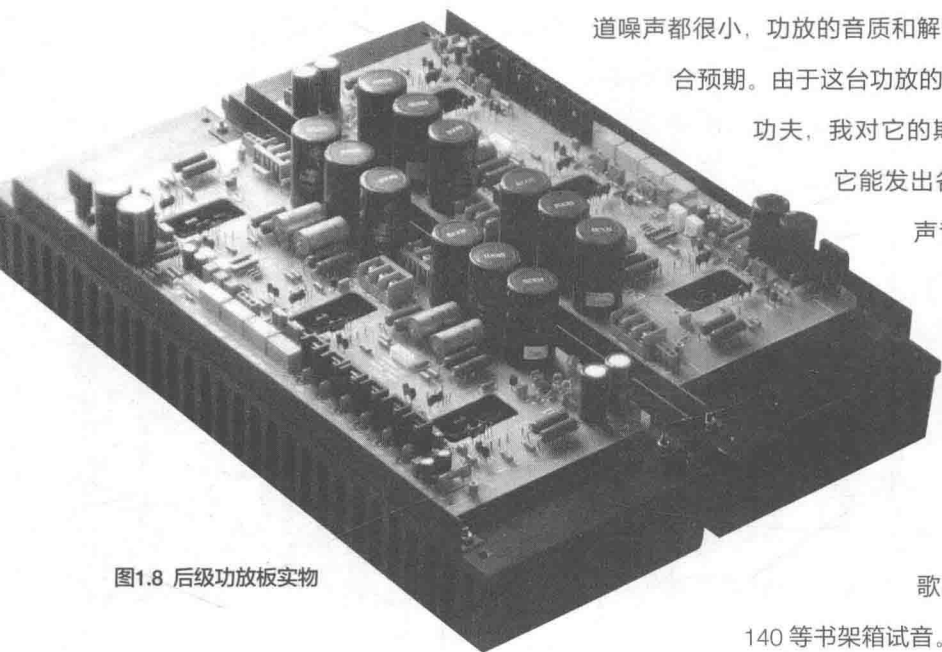


图1.8 后级功放板实物

兰之声 Amphon Argon3 L、丹拿 Contour S3.4 等落地箱听了很长时间，历经多轮调试修正，最终将这台分体式功放的声音调整到满意的地步。

1.4 实际试听

实际试听时使用了 OPPO 蓝光播放机、HTPC、1704K×4 音频解码器（接蓝光机的数字同轴输出）、KEF XQ 40 系列音箱、10 英寸有源低音炮以及高清投影机等设备。

起初试听了一些 Hi-Fi 音乐，分体功放的声音明快活泼，高频纯净纤细，中频饱满润泽，低频深沉有力，表现出宽阔的声场和良好的动态。相比之下，现场的名牌 Hi-Fi 功放在气势、力度和细腻度反而显得稍弱。

感受了优美的音乐，接下来用蓝光机播放安德烈·波切利音乐会、蔡琴演唱会及其他的 DTS 音乐碟，试了一下多声道音乐的表现力。

安德烈·波切利用激情洋溢充满活力的歌声娓娓倾诉，那优雅自信的神采令人入迷。同样用 AV 功放看这段时，声音细节被“吃掉了”不少，欢呼的冲击力减弱，临场感稍欠。用普通的 Hi-Fi 功放播放这一段时，声音细腻柔和、乐感丰富，但声场在两个主音箱之间，是二维平面的，与环绕声的感染力相距甚远。

多声道音乐得到了有力的表现，再用这台功放试验了高清电影《阿凡达》等电影。播放影片时这台功放推动了丹拿 Contour S3.4 主音箱，音质相当好，解析力高，力度强劲，充分发挥了丹拿音箱的优势。

总的来说，这台功放音质良好、性能稳定、可靠实用，这台分体式可变声道功放算是制作成功了。

1.5 器材搭配及使用方法

可变声道 Hi-Fi 功放与传统的 Hi-Fi 功放特性不同，与之搭配音源和音箱需要作出调整，以便可变声道 Hi-Fi 系统发挥出最佳的性能。由于市场上各类产品纷繁复杂，现考虑了几种简洁的器材搭配，仅供参考。



图1.9 完成后的制作



图1.10 德国ROE电解电容