

动手制作家庭影音系统丛书

数字功放和音箱 设计与制作

邹天汉 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

动手制作家庭影音系统丛书

数字功放和音箱设计与制作

邹天汉 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

数字功放和音箱设计与制作 / 邹天汉编著. —北京: 人民邮电出版社, 2004.8

(动手制作家庭影音系统丛书)

ISBN 7-115-12219-9

I. 数... II. 邹... III. ①数字技术—音频设备—功率放大器②扬声器系统

IV. ①TN722.7②TN912.26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 027455 号

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了家庭影音系统中 D 类功放和数字功放的设计原理与制作技术, 同时还介绍了各种不同造型、不同材质、不同用途的音箱的设计过程和制作技巧。

本书实用性强, 可供从事家庭影音系统器材设计与制作的技术人员、大中专院校相关专业的师生、电子制作爱好者和发烧友以及各种影音电器维修人员阅读参考。

动手制作家庭影音系统丛书 数字功放和音箱设计与制作

-
- ◆ 编 著 邹天汉
责任编辑 申 苹 唐素荣

 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
读者热线 010-67129264
北京汉魂图文设计有限公司制作
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销

 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14.75
字数: 353 千字 2004 年 8 月第 1 版
印数: 1-5 000 册 2004 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-12219-9/TN · 2272

定价: 20.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

丛书前言

以家庭影院为时代标志的现代家庭影音系统自 20 世纪 80、90 年代兴起后，马上得到广大民众，特别是青年一代的青睐，以惊人的速度进入千家万户和公共娱乐场所。随着数字电路和计算机技术的不断发展，家庭影音系统工程日趋成熟与完善，越来越多的电子爱好者期望能自己动手制作出体现自己意愿特色的家庭影音系统。

《动手制作家庭影音系统丛书》便是从这一基点出发，全面系统地介绍了家庭影音系统中各单元电路的基础知识和制作技巧，力争使读者阅读完本丛书后，既能从整体上了解当前流行的高、中、低档影音设备的制作原理，又能掌握其单元电路的制作技巧，从而实现动手制作家庭影音系统的想法。

本丛书共分四册。第一分册《影音源设计与制作》重点介绍家庭影音系统的组成、分类以及各种影音源的制作；第二分册《控制器和经典功放设计与制作》重点介绍影音系统中的控制电路与经典功放的设计制作技巧；第三分册《数字功放和音箱设计与制作》重点介绍 D 类功放、数字功放及音箱的设计制作技巧；第四分册《家庭影院设计与制作》重点介绍家庭影院的设计、配置、营造和制作技巧。本丛书在编写前作了精心的编排，分册既不重叠内容，彼此又有密切的关系，重点突出。

本丛书编写过程中参考了国内外部分有关影音电器制作方面的书籍和国内的一些著名刊物，如《无线电》、《电子报》、《高保真音响》、《电子制作》、《电子世界》、《家庭电子》、《无线电与电视》等，在此谨向相关作者和出版者表示诚挚的谢意。

本丛书适合从事家庭影音系统器材设计与制作工作的技术人员、大中专院校相关专业的师生、电子制作的爱好者和发烧友以及从事各种影音电器维修工作的人员阅读参考。

由于时间仓促，不足之处在所难免，希望广大读者批评指正。

作者

前 言

本书是《动手制作家庭影音系统丛书》的第三分册，全面系统地介绍了家庭影音系统中的 D 类功放和数字功放的设计原理与制作技术，同时还介绍了各种不同造型、不同材质、不同用途的音箱的设计过程与制作技巧。

D 类功放早在 20 世纪 60 年代就已出现，只是由于当时元器件的质量以及制作技术方面的条件得不到保障，D 类功放一直没有被应用于影音系统。随着电子技术的不断发展，特别是数字电路被广泛应用于影音系统后，D 类功放、数字功放的制作技术得到了长足的发展。现在许多人对 D 类功放、数字功放很热衷，已经设计制作出不少经典电路。

音箱是家庭影音系统中不可缺少的一部分，本书详细介绍了音箱以及与之连体的分频器的制作方法，希望读者阅读后，能独立设计制作出有较高水准的功放电路和音箱。

本册书所介绍的内容详细、完整，既有理论方面的知识，又有设计制作方面的经验，对喜欢动手的爱好者和发烧友有一定的启迪和帮助。

由于水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

目 录

| | |
|---|----|
| 第 1 章 D 类音频功率放大器 | 1 |
| 1.1 D 类功放的设计与制作 | 1 |
| 1.1.1 D 类功放的设计原理 | 1 |
| 1.1.2 D 类功放的制作 | 5 |
| 一、D 类功放电路综述 | 6 |
| 二、Driver 公司的 D 类功放 LSI | 8 |
| 1.1.3 D 类功放电路介绍与简单计算 | 9 |
| 1.2 典型 D 类功放的制作 | 13 |
| 1.2.1 高效率 D 类音频放大器 | 13 |
| 1.2.2 D 类 170W 音频功放 LM4651/LM6452 | 16 |
| 一、内部结构及主要特点 | 16 |
| 二、主要电气特性及性能指标 | 17 |
| 三、典型应用 | 18 |
| 1.2.3 分立件 50W D 类功放 | 21 |
| 1.2.4 TDA7482 单片 25W 音频 D 类功放 | 22 |
| 1.2.5 免滤波 D 类音频功放 | 23 |
| 1.2.6 HIP4080A 集成电路 D 类功放 | 27 |
| 1.2.7 用时基电路构成的 D 类功放 | 28 |
| 1.2.8 复方 D 类功放 | 29 |
| 第 2 章 数字音频功率放大器 | 31 |
| 2.1 数字功放制作原理 | 31 |
| 2.1.1 概述 | 31 |
| 2.1.2 技术特点 | 32 |
| 2.1.3 工作原理 | 32 |
| 2.1.4 数字功放与模拟功放的区别 | 34 |
| 一、数字功放与 D 类功放的区别 | 34 |
| 二、数字功放和普通模拟功放的区别 | 34 |
| 三、数字功放和“数字化”功放、“数码”功放的区别 | 35 |
| 2.2 多 Δ 增量调制数字脉冲音频功率转换器 | 36 |
| 2.2.1 概述 | 36 |
| 2.2.2 技术特点 | 37 |
| 一、技术手段 | 37 |
| 二、特点及主要指标 | 37 |
| 2.2.3 编码过程与编码器模型 | 37 |

| | | |
|--------------|----------------------------|-----------|
| 2.3 | 高效数字功放 DDX-2000/2060 | 39 |
| 2.3.1 | 电气特性 | 39 |
| 2.3.2 | 引脚排列及功能 | 41 |
| 2.3.3 | 工作原理 | 42 |
| | 一、DDX-2000 控制器 | 42 |
| | 二、DDX-2060 功率器件 | 44 |
| 2.3.4 | 应用电路 | 45 |
| 第 3 章 | 音箱的设计与制作 | 48 |
| 3.1 | 音箱的主要技术参数 | 48 |
| 3.2 | 设计音箱需用的扬声器参数的测量 | 54 |
| 3.3 | 几种主要音箱的设计 | 57 |
| 3.3.1 | 封闭式音箱的设计 (I) | 57 |
| | 一、封闭式音箱的特点 | 57 |
| | 二、扬声器的选择 | 57 |
| | 三、设计方法 | 58 |
| | 四、设计实例 | 59 |
| | 五、设计中应注意的问题 | 60 |
| | 六、音箱的调整 | 61 |
| 3.3.2 | 封闭式音箱的设计 (II) | 61 |
| | 一、设计方法 | 61 |
| | 二、高效率类和高声顺类扬声器 | 62 |
| | 三、设计程序 | 62 |
| | 四、 Q_c 与低音特性的关系 | 63 |
| | 五、应用吸音材料改善阻尼状态 | 64 |
| | 六、表述空气负载状态的 α | 64 |
| 3.3.3 | 倒相式音箱的设计 (I) | 64 |
| | 一、倒相式音箱的特点 | 64 |
| | 二、扬声器的选择 | 65 |
| | 三、设计方法 | 65 |
| | 四、设计实例 | 68 |
| | 五、设计中应注意的问题 | 68 |
| | 六、倒相式音箱的调整 | 69 |
| 3.3.4 | 倒相式音箱的设计 (II) | 70 |
| | 一、频率与阻抗特性 | 70 |
| | 二、设计依据 | 70 |
| | 三、设计程序 | 72 |
| | 四、最终音箱内容积 V_b' 的计算 | 74 |
| 3.3.5 | 组合扬声器系统 (组合音箱) 的设计 | 74 |

| | |
|-----------------------|-----|
| 一、组合音箱的特点 | 74 |
| 二、扬声器的选配 | 74 |
| 三、家用两分频音箱的设计 | 77 |
| 四、三分频封闭式音箱的设计 | 78 |
| 五、箱体的制作工艺 | 80 |
| 六、设计中应注意的问题 | 85 |
| 3.3.6 变阻尼音箱的设计与制作 | 85 |
| 3.3.7 低音炮音箱的设计与制作 | 87 |
| 3.4 各种典型音箱的制作 | 89 |
| 3.4.1 有源音箱 | 89 |
| 一、可直接驳接各种音源设备的有源音箱 | 89 |
| 二、立体声有源一体化音箱 | 91 |
| 三、单(双)声道高保真有源音箱 | 94 |
| 四、有重低音的有源音箱 | 95 |
| 3.4.2 家庭影院 AV 系统音箱 | 96 |
| 一、一对“AV”系统主音箱 | 96 |
| 二、高质量 AV 系统中置环绕音箱 | 99 |
| 三、适合于 AC-3 的落地式环绕音箱 | 99 |
| 四、迷宫式 AV 音箱 | 100 |
| 五、索威 Diamond8.0A 同轴音箱 | 102 |
| 六、家庭影院带通超低音音箱 | 106 |
| 七、SRS 有源防磁音箱 | 109 |
| 3.4.3 Hi-Fi 系统音箱 | 111 |
| 一、多声室背向反射式音箱 | 111 |
| 二、被动式超低音音箱 | 113 |
| 三、三角形书架式音箱 | 114 |
| 四、蛋形混凝土音箱 | 116 |
| 五、小口径扬声器重放超低音音箱 | 118 |
| 六、号筒式超重低音音箱 | 119 |
| 七、表现全面的三分频落地音箱 | 121 |
| 八、分体式音箱 | 123 |
| 九、合体倒相式音箱 | 125 |
| 3.4.4 硬质材料音箱 | 126 |
| 一、采用花岗岩与木板制作的高级音箱 | 126 |
| 二、传输线式的石材音箱 | 127 |
| 三、便于自制的人造大理石音箱 | 128 |
| 四、别具一格的玻璃音箱 | 131 |
| 五、用筒形射灯铁壳制作的环绕音箱 | 132 |
| 3.4.5 无线遥传音箱和多媒体音箱 | 133 |

| | |
|---------------------------|------------|
| 一、无线遥传有源重低音音箱 | 133 |
| 二、环绕音箱的无线传输系统 | 134 |
| 三、公共娱乐场所舞台音箱 | 135 |
| 四、多媒体有源音箱 | 136 |
| 五、薄型壁挂式音箱 | 137 |
| 六、Hi-Fi 电脑有源音箱 | 140 |
| 七、一款优质 PC 音箱的设计与制作 | 141 |
| 八、一款电脑用带通式低音炮的设计 | 143 |
| 3.4.6 自然材质音箱 | 144 |
| 一、高密度陶瓷音箱 | 144 |
| 二、用 PVC 管快装的音箱 | 147 |
| 三、竹筒音箱 | 149 |
| 3.5 新技术扬声器的设计与应用 | 150 |
| 3.5.1 传统扬声器中的新技术 | 150 |
| 一、磁路与音圈的改进与应用 | 150 |
| 二、业余同轴扬声器及音箱的制作 | 156 |
| 3.5.2 新技术扬声器的设计与制作 | 158 |
| 一、NXT (平面) 扬声器与传统喇叭的结构特点 | 158 |
| 二、Martin Logan 静电扬声器的结构特点 | 159 |
| 三、静电平板式扬声器及音箱的制作 | 162 |
| 四、超轻、超薄、超小型卡片式扬声器的特点和应用 | 167 |
| 五、WM 带式扬声器的特点和应用 | 174 |
| 第 4 章 分频器的设计与制作 | 176 |
| 4.1 分频器的设计 | 176 |
| 4.1.1 分频器的作用和分类 | 176 |
| 4.1.2 分频点 f_c 的选择 | 177 |
| 4.1.3 定阻型功率分频器的衰减和相移 | 182 |
| 一、一阶功率分频器高音通道单元电路 | 184 |
| 二、一阶功率分频器低音通道单元电路 | 185 |
| 三、二阶功率分频器低音通道单元电路 | 186 |
| 四、二阶功率分频器高音通道单元电路 | 187 |
| 4.1.4 滤波型功率分频器的衰减和相移 | 191 |
| 一、二阶滤波型分频器低音通道单元电路 | 192 |
| 二、二阶滤波型高音通道单元电路 | 193 |
| 三、T 型或 π 型滤波分频器低音通道电路 | 193 |
| 四、T 型或 π 型滤波分频器高音通道电路 | 194 |
| 五、滤波型分频器中音通道电路 | 195 |
| 4.1.5 前级 (RC) 分频器的设计原理和特性 | 197 |
| 一、一阶有源低通分频电路 | 197 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 二、一阶有源高通分频器电路 | 198 |
| 三、一阶前级有源带通分频器电路 | 199 |
| 四、二阶有源低通分频器电路 | 199 |
| 五、二阶 RC 有源高通分频电路 | 200 |
| 六、二阶前级 RC 带通滤波分频电路 | 200 |
| 4.1.6 分频器幅度均衡、相位均衡及扬声器阻抗的补偿 | 203 |
| 一、分频器幅度均衡 | 203 |
| 二、相位差的均衡 | 203 |
| 三、扬声器阻抗的补偿 | 205 |
| 4.2 分频器元器件的选取与制作 | 205 |
| 一、电阻的选取 | 205 |
| 二、电容器的选取 | 206 |
| 三、电感线圈的计算与制作方法 | 206 |
| 四、分频器线圈简易算法 | 208 |
| 五、前级双频道 RC 分频网络设计诺模图 | 208 |
| 4.3 LC 型分频器的制作与调整 | 209 |
| 一、测试仪调整法 | 209 |
| 二、万用表调整法 | 211 |
| 4.4 几款典型分频器和分频放大器 | 211 |
| 4.4.1 LC 型分频器 | 211 |
| 一、24dB/oct 功率二分频电路 | 211 |
| 二、多电容并联滤波型分频器 | 212 |
| 三、采用多重播线的分频器 | 212 |
| 四、分频器/接线盒合二为一的分频器 | 213 |
| 4.4.2 RC 型前级分频器 | 214 |
| 一、采用自举电路的晶体管前级分频器 | 214 |
| 二、电子管分频电路 | 215 |
| 三、带音量扩展的电子管分频器 | 216 |
| 四、双频段全 VMOS 管电流分频电路 | 217 |
| 五、能滤除噪音的电子分频器 | 217 |
| 六、简单的二分频/立体声两用放音电路 | 218 |
| 七、有源二分频 Hi-Fi 放音电路 | 219 |
| 八、三阶有源滤波二分频电路 | 219 |
| 九、电流负反馈式前级分频电路 | 220 |
| 十、功放分频同在一级的分频电路 | 221 |
| 十一、三阶有源三分频电路 | 222 |
| 十二、前级三分频与二分频组合放音电路 | 222 |
| 十三、滤波/运算型电子分频器 | 224 |
| 十四、电子管输出变压器分频的放大电路 | 224 |

第 1 章 D 类音频功率放大器

D 类音频功率放大器也称为丁类音频放大器，简称 D 类功放，它以 90% 的高效得到业内人士的交口称誉。其实，早在 50 年前，就有人提出制作 D 类功放的构想，只因当时作为 D 类功放基本器件的开关器件性能欠佳，很难克服此类放大器所带来的噪声与波形失真，因此限制了它的发展与应用。

随着半导体技术的进步，特别是高性能、大功率开关器件的大量涌现，D 类功放又重新获得人们的青睐。

1.1 D 类功放的设计与制作

德州仪器公司的 TPA005D02，ST 微电子公司的 TDA7408、TDA7481，美国 MAXIM（美信）集成产品公司的 MAX4295、MAX4297 等 D 类功放和 TACT 音响公司的黄金时代（MILLENNIUM）用于数字音源的功放，把 D 类功放引入到音频放大的领域。

1.1.1 D 类功放的设计原理

在音响领域里人们一直坚守着 A 类功放的阵地。认为 A 类功放声音最为清新透明，具有很高的保真度。但是，A 类功放的低效率和高损耗却是它无法克服的先天顽疾。B 类功放虽然效率提高很多，但实际效率仅为 50% 左右，在小型便携式音响设备如汽车功放、笔记本电脑音频系统和专业超大功率功放场合，仍感效率偏低不能令人满意。所以，效率极高的 D 类功放，因其符合绿色革命的潮流正受着各方面的重视。

由于集成电路技术的发展，原来用分立元件制作的很复杂的调制电路，现在无论在技术上还是在价格上均已不成问题。而且近年来数字音响技术的发展，人们发现 D 类功放与数字音响有很多相通之处，进一步显示出 D 类功放的发展优势。

D 类功放是放大元件处于开关工作状态的一种放大模式。无信号输入时放大器处于截止状态，不耗电。工作时，靠输入信号让晶体管进入饱和状态，晶体管相当于一个接通的开关，把电源与负载直接接通。理想晶体管因为没有饱和压降而不耗电，实际上晶体管总会有很小的饱和压降而消耗部分电能。这种耗电只与管子的特性有关，而与信号输出的大小无关，所以特别有利于超大功率的场合。在理想情况下，D 类功放的效率为 100%，B 类功放的效率为 78.5%，A 类功放的效率才 50% 或 25%（按负载方式而定）。

D 类功放实际上只具有开关功能，早期仅用于继电器和电机等执行元件的开关控制电路中。然而，开关功能（也就是产生数字信号的功能）随着数字音频技术研究的不深入，用

于 Hi-Fi 音频放大的道路却日益畅通。20 世纪 60 年代，设计人员开始研究 D 类功放用于音频的放大技术，70 年代 Bose 公司就开始生产 D 类汽车功放。一方面汽车用蓄电池供电需要更高的效率，另一方面空间小无法放入有大散热板结构的功放，两者都希望有 D 类这样高效的放大器来放大音频信号。其中关键的一步就是对音频信号的调制。

图 1-1 是 D 类功放的基本结构，可分为三个部分：

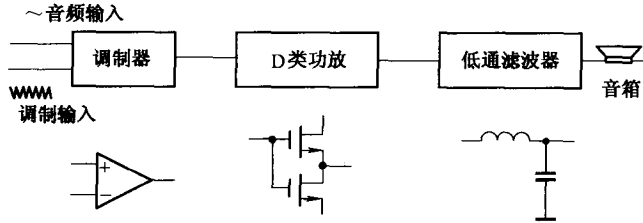


图 1-1 D 类功放基本结构

第一部分为调制器，最简单的只需用一只运放构成比较器即可完成。把原始音频信号加上一定直流偏置后放在运放的正输入端，另通过自激振荡生成一个三角形波加到运放的负输入端。当正端上的电位高于负端三角波电位时，比较器输出为高电平，反之则输出低电平。若音频输入信号为零、直流偏置置三角波峰值的 1/2，则比较器输出的高低电平持续的时间一样，输出就是一个占空比为 1:1 的方波。当有音频信号输入时，正半周期间，比较器输出高电平的时间比低电平长，方波的占空比大于 1:1；负半周期间，由于还有直流偏置，所以比较器正输入端的电平还是大于零，但音频信号幅度高于三角波幅度的时间却大为减少，方波占空比小于 1:1。这样，比较器输出的波形就是一个脉冲宽度被音频信号幅度调制后的波形，称为 PWM（Pulse Width Modulation 脉宽调制）或 PDM（Pulse Duration Modulation 脉冲持续时间调制）波形。音频信息被调制到脉冲波形中。

第二部分就是 D 类功放，这是一个脉冲控制的大电流开关放大器，把比较器输出的 PWM 信号变成高电压、大电流的大功率 PWM 信号。能够输出的最大功率由负载、电源电压和晶体管允许流过的电流来决定。

第三部分需把大功率 PWM 波形中的声音信息还原出来。方法很简单，只需要用一个低通滤波器。但由于此时电流很大，RC 结构的低通滤波器电阻会耗能，不能采用，必须使用 LC 低通滤波器。当占空比大于 1:1 的脉冲到来时，C 的充电时间大于放电时间，输出电平上升；窄脉冲到来时，放电时间长，输出电平下降，正好与原音频信号的幅度变化相一致，所以原音频信号被恢复出来，见图 1-2。

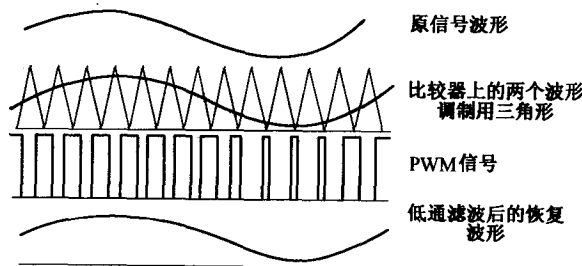


图 1-2 模拟 D 类功放工作原理

D类功放设计考虑的角度与AB类功放完全不同。此时功放管的线性已没有太大意义，更重要的是开关响应和饱和压降。由于功放管处理的脉冲频率是音频信号的几十倍，且要求保持良好的脉冲前后沿，所以管子的开关响应要好。另外，整机的效率全在于管子饱和压降引起的管耗。所以，饱和压降小不但效率高，功放管的散热结构也能得到简化。若干年前，这种高频大功率管的价格昂贵，在一定程度上限制了D类功放的发展。现在小电流控制大电流的MOSFET已普遍运用于工业领域，特别是近年来UHC MOSFET已在Hi-Fi功放上应用，器件的障碍已经消除。

调制电路也是D类功放的一个特殊环节。要把20kHz以下的音频调制成PWM信号，三角波的频率至少要达到200kHz。频率过低达到同样要求的THD标准，对无源LC低通滤波器的元件要求就高，结构复杂。频率高，输出波形的锯齿小，更加接近原波形，THD就小，而且可以用低数值、小体积和精度要求相对差一些的电感和电容来制成滤波器，造价相应降低。但此时晶体管的开关损耗会随频率上升而上升，无源器件中的高频损耗、射频的趋肤效应都会使整机效率下降。更高的调制频率还会出现射频干扰，所以调制频率也不能高于1MHz。

同时，三角波形的形状、频率的准确性和时钟信号的抖动都会影响到以后复原的信号与原信号不同而产生失真。所以要实现高保真，出现了很多与数字音响保真相同的考虑。

还有一个与音质有很大关系的因素就是位于驱动输出与负载之间的无源滤波器。该低通滤波器工作在大电流下，负载就是音箱。严格地讲，设计时应把音箱阻抗的变化一起考虑进去，但作为一个功放产品指定音箱是行不通的，所以D类功放与音箱的搭配中更有发烧友驰骋的天地。实验证明，当失真要求在0.5%以下时，用二阶Butterworth最平坦响应低通滤波器就能达到要求。如要求更高则需用四阶滤波器，这时成本和匹配等问题都必须加以考虑。

近年来，一般应用的D类功放已有集成电路芯片，用户只需按要求设计低通滤波器即可。上面提到的TPA005D02有2W RMS功率输出/4Ω负载，THD+N已达0.5%，是上一世纪70年代D类功放8%~10%的THD+N所望尘莫及的。TDA7582提供的功率已高达25W，足够任何便携式音响产品使用。

下面再来看看进入Hi-End市场的TACT“黄金时代”数字功放采用的新技术。图1-3是该款数字功放的组成框图。

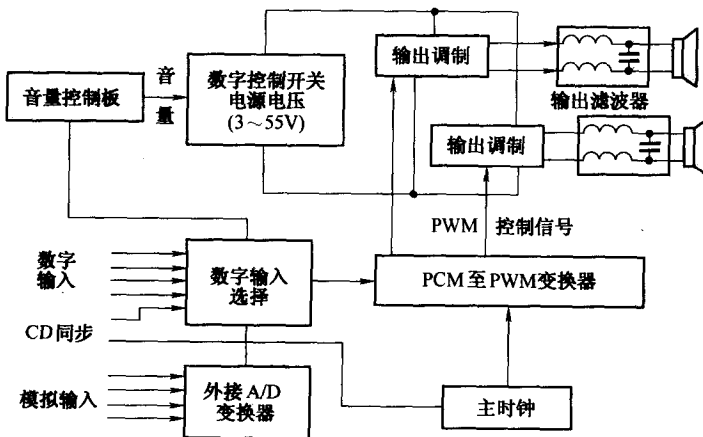


图 1-3 黄金时代接数字音源 D 类功放组成框图

该机采用数字调制技术，直接把CD输出的PCM数字信号变成PWM码。这是一种DSP

运算，只要正确读出原码，就可无误差地运算出新的 PWM 码。

TACT 公司在这款数字功放中还采用了公司开发的等比特变换技术。框图中看不到模拟电路的传统负反馈结构，它是在 DSP 中把输出脉冲的宽度进行再计算，然后去补偿从 PWM 变换到模拟输出时出现的非线性失真。变换器也采用了 CD 的超取样和噪声整形技术。先把 PCM 信号通过八倍超取样数字滤波器，然后把数据的 16bit 字长截尾到 8bit，以重建动态范围。而从截去的最后 8bit 中产生一个校正信号，用以进行噪声和失真的补偿，最终把噪声和失真推到可听域以外的频段。

从 PCM 码直接变换到 PWM 码的一大好处是 CD 的数码输出不再需要进行 D/A 变换。无论从降低造价还是“简单即好”的发烧理念来看都是有利的。D/A 变换器是影响数字音频还原质量的一大关键，而“黄金时代”的 D 类功放把 CD 解码器的整个工序完全顶替，对整个还原系统的保真度十分有利。“黄金时代”功放只有数字音频输入口，不设模拟输入，要求周边设备定位档次较高。对于数字音频直接由转盘供给信号，不考虑中低档 CD 唱机输入。若是 LP 等模拟音源再后接一个数字音频导向器或 A/D 转换器等，则可避免系统中出现 A/D 和 D/A 变换等互补的多余环节。

但直接数字输入需要解决音量控制方法，PCM 码是满幅度量化的，音量处于 0dB 位置。

传统放大器的音量控制是以改变输入信号幅度来实现的。对于 D 类功放来说有以下两点：第一，必须把 PCM 码经 D/A 变换成模拟量再加以衰减；第二，大信号输入时用三角形波对其调制，调制的幅度能充分利用，信噪比最高，而小信号时调制幅度小，调制噪声占有的比重上升，可用的动态范围没有充分利用，实际信噪比较低。

当然也可把衰减网络放到输出的大电流电路中，但却白白消耗大量电能，D 类功放的高效率全部丧失。“黄金时代”采用改变电源电压的方法来控制音量。整机由开关电源供电，音量调节实际上是通过改变开关电源振荡脉冲的占空比来改变输出电压。当电源电压为满幅度时，电源通过低通滤波器加到负载上的功率最大。若占空比下降到原来的 1/2，电压就降至原来的一半，负载上的功率就降至 1/4。但对原信号的调制还是在满信号输入时进行，所以音频信号的动态、细节分辨率都得到充分利用。

这台以 Hi-End 定位出现的 D 类功放，其全新电路程式与独特的 Hi-End 造型引起音响界的重视。实际测试后发现其频响曲线在高频端与负载有假负载时高端起伏很大，见图 1-4 (a)。THD+N 在几千赫处有明显上升，而 10kHz 以后又迅速下降，表现出数字滤波器的特点，见图 1-4 (b)。而阻尼因子在低端明显高于高端，见图 1-4 (c)。所有这些都是因为 D 类功放测试时已包括了与分频器相似的无源低通滤波器，它的特性远不如晶体管的输出特性那样平坦。

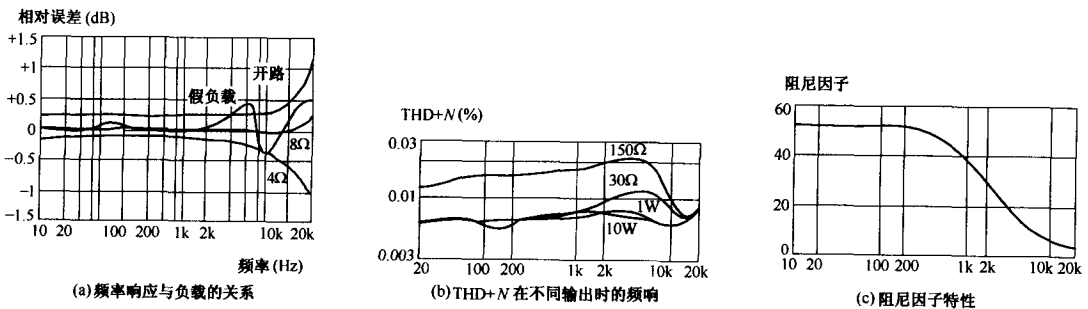


图 1-4 黄金时代 D 类功放频响、失真度与阻尼因子曲线

尽管这样的曲线粗看起来比不上一般的 Hi-Fi 功放，但实际听感却进入了 Hi-End 行列。许多业内人士认为其动态大，解析力和透明感都属一流，是一款非常适合音乐欣赏的顶级功放，仅仅逊色于一些高档的电子管系统，如：First Sound Reference II 无源前置放大器和 Quicksilver Audio Silver 60 单声道电子管功放的组合。音箱配合方面高灵敏度的音箱显不出差别，灵敏度较低的音箱“黄金时代”的动态就略显不足。

TACT “黄金时代”的额定功率 (RMS) 为 150W/8Ω, 250W/4Ω、2Ω 或 1Ω, 实测功率高达 300W。THD + N 在 20Hz~20kHz、150W/8Ω 条件下，小于 0.015%。总之，D 类功放用于音频放大已没有任何技术或性能上的障碍。

1.1.2 D 类功放的制作

D 类功放大多通过将输入信号振幅在时间轴上的变化进行“量化”处理的基本模式来实现信号的模数变换。这种模数变换的方式通常有 PWM (脉宽调制) 和 $\Delta\Sigma$ 调制方式，其优点是能改善整机噪声特性和实现宽带信号传输。

PWM 电路的工作原理简述如下：每隔一定的时间间隔，即对模拟信号振幅的大小进行取样，并在一定周期的脉宽内将其转换成数字信号来驱动输出级的功率开关器件，得到数字化的脉宽调制波，放大后将该调制波通过低通滤波器还原，在扬声器上得到模拟信号。该过程的基准取样信号是三角波，通过该取样信号与控制输入的模拟信号振幅进行比较，实现模数转换，得到 PWM 信号。由此可见，D 类功放的核心器件就是 PWM 调制器。

表 1-1 列出了几种功放电路的电源效率、失真度及信噪比等几项指标。由表 1-1 可见，D 类功放具有较高的电源利用率。

表 1-1 几种功放电源效率、失真度及信噪比

| 功放类别 | A 类 | AB 类 | D 类 |
|-------|-------|---------|------|
| 电源效率 | 15% | 30%~40% | 80% |
| THD+N | <0.1% | 0.1%~5% | >1% |
| S/N | 80dB | 60~80dB | 60dB |

表 1-2 是 AB 类与 D 类功放在音乐信号与正弦波信号激励下的工作效率比较，由表中可见，D 类功放的工作效率远远大于 AB 类功放。

表 1-2 AB 类与 D 类功放工作效率比较

| 电平 (dB) | | 工作效率 | |
|---------|-------------|------|-----|
| | | AB 类 | D 类 |
| 全电平输出 | 15dB 音乐信号输入 | 19% | 75% |
| | 3dB 正弦波信号输入 | 63% | 86% |
| *正常电平输出 | 15dB 音乐信号输入 | 6% | 30% |
| | 3dB 正弦波信号输入 | 25% | 73% |

注*：指幅度为峰值电平 40% 的输出电平。

由表 1-1、表 1-2 可知，在通常情况下，D 类功放的电源效率比 AB 类功放的高得多，这一优势在利用蓄电池作功放电源时尤为明显。

但 D 类功放却存在电磁辐射的问题。D 类功放产生频率为 200~500kHz 的高速开关信号，大量高次谐波向四周辐射，将严重影响其他电器的正常工作，因此，如何预防该种电路的高频辐射干扰就成了不能忽视的问题。在高频电路中采取的各种防辐射措施，如接线尽可能短、加强屏蔽、增加高频滤波器、电缆输出可靠接地等都可以派上用场。

一、D类功放电路综述

D 类功放电路结构框图如图 1-5 所示。由 PWM 调制器、半桥开关器件的 MOS FET、LC 低通滤波器和扬声器负载等组成。由图 1-5 中可见，输出端的 PWM 信号，再经 R_1 、 C_R 构成的积分器反馈后与基准信号进行比较，基准信号为输入音频信号的取样信号，其频率下限应是最高音频信号频率的两倍以上，上限为 500kHz。输出端 LC 组成的低通滤波器滤除输出信号中的调制脉冲信号成分。

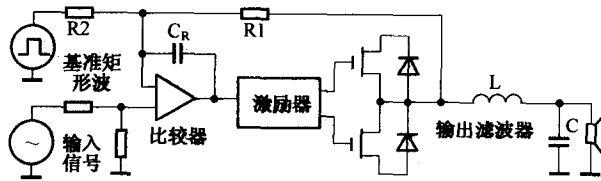


图 1-5 D 类功放的基本电路结构

电路设计时，如果取样频率选择不当，会导致输出波形的变化，动态范围变窄，工作中当电感 L 出现磁饱和时，信号失真度将会骤然增大。

1. 补偿型 PWM 调制方式

此调制方式为 PWM 常见的类型。为了充分抑制 PWM 方式输出信号中的纹波，当取样频率较高时，要求低通滤波器有足够的带外衰减量，其中的一种电路如图 1-6 所示。该电路在 PWM 调制器中设置反馈环路，有效地抑制了输出信号中的脉冲成分。输出端采用小型变压器作为检测器件，检测出的输出脉冲信号与音频输入信号进行比较后的误差信号对电压控制器起反馈调节作用，大大减少了残留的 0 脉冲成分。图 1-6 中的延时电路 D 对输入——输出信号间的延迟进行补偿；延时电路 T 对 PWM 调制和开关器件的延时进行补偿。

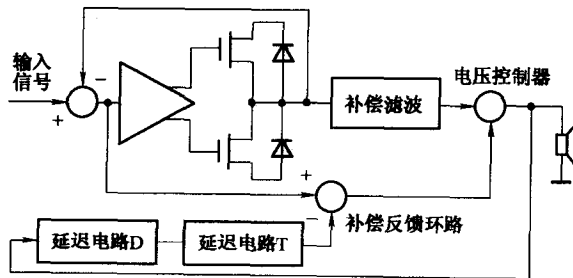


图 1-6 反馈环路式 PWM 调制方式电路框图

2. $\Delta\Sigma$ 调制方式

$\Delta\Sigma$ 调制是 1bit 调制的经典方式。这种方式的优点在于取样频率非常高，量化脉冲分散在很宽的频带中，信号频带内的脉冲密度低。两级 $\Delta\Sigma$ 量化脉冲发生电路框图如图 1-7 所示。

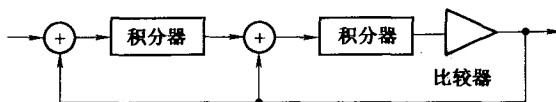
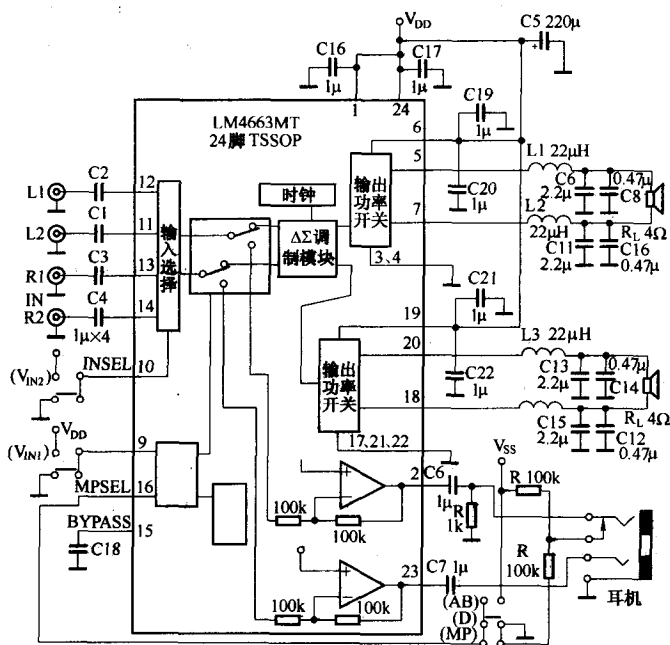
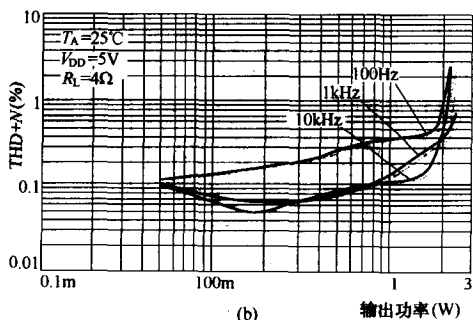


图 1-7 PWM $\Delta\Sigma$ 调制方式电路框图

量化脉冲发生器的组合可以降低噪声。该电路使频带内的残余脉冲分布在很宽的频带里，在使用滤波器后，抑制噪声能力大为提高。为了得到更好的动态特性，增加量化次数是行之有效的方法。图 1-8 (a) 是 4 次量化脉冲发生器 LSI 芯片的内部电路框图及应用电路。它的输出失真特性曲线如图 1-8 (b) 所示。这种实用芯片对 D 类功放的开发和普及大有帮助。该芯片的型号为 LM4663MT，采用 24 脚 TSSOP 封装。



(a)



(b)

图 1-8 4 次量化脉冲 LSI 芯片框图及其失真特性曲线