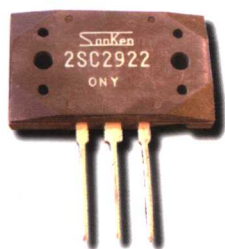


JINGTIGUAN YINXIANG GONGFANG

晶体管音响功放

DIY



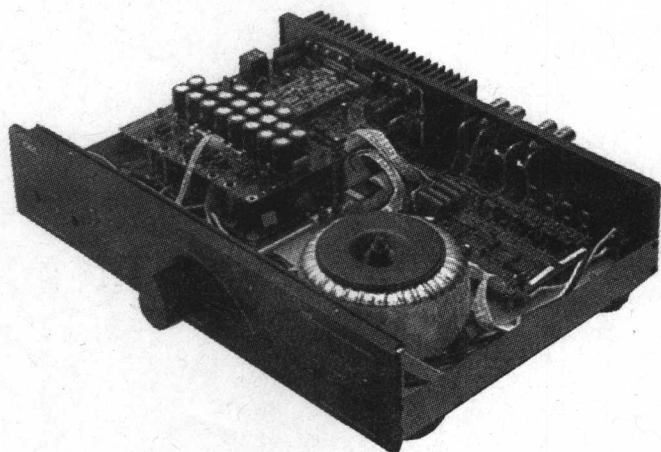
郑国川 李洪英



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

晶体管音响功放 DIY

郑国川 李洪英



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

图书在版编目 (CIP) 数据

晶体管音响功放 DIY/郑国川,李洪英著. —福州:
福建科学技术出版社. 2006. 11

ISBN 7-5335-2881-6

I. 晶… II. ①郑…②李… III. 晶体管放大器:
音频放大器—基本知识 IV. TN722. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 108730 号

书 名	晶体管音响功放 DIY
编 著	郑国川 李洪英
出版发行	福建科学技术出版社 (福州市东水路 76 号, 邮编 350001)
经 销	各地新华书店
排 版	福建科学技术出版社排版室
网 址	www. fjstp. com
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	11. 75
字 数	285 千字
版 次	2006 年 11 月第 1 版
印 次	2006 年 11 月第 1 次印刷
印 数	1—4 000
书 号	ISBN 7-5335-2881-6
定 价	20. 00 元

书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

前 言

目前，尽管市场上冠以 Hi-Fi 的放大器比比皆是，但在音响发烧友的“金耳朵”中真正达到 Hi-Fi 者却不多。音响有无 Hi-Fi 效果，并非几项测试数据所能概括，听音评价恰如美食家品尝菜肴，各有各的口味，主观听音评价更是如此。所谓众口难调，就是说即使是名牌产品，也极难做到面面俱到，人人满意。作为音响设备的生产者，为了使产品得到大多数消费者的认可，在产品设计上兼顾的是低成本和大多数人的使用习惯和要求，完全满足“金耳朵”们近乎苛刻的要求几乎是不可能的。因而，纵然是很有名气的音响，在发烧友手中被“摩机”也属常见。

随着国人生活水平的提高，发烧友队伍日渐扩大，但从目前情况看，处于初级者占多数。在这些发烧队伍中多以“摩机”为主，且只限于简单地换几个“补品”元器件。似乎认为，不论功放属于何种档次，只要换上东芝对管、五环电阻、WIMA 电容等就可以“Hi-Fi”了。编者认为，能根据自己偏爱选择适当性能特点的电路，同时根据电路要求合理选择元器件的发烧友，才可以称为发烧，而且是理性发烧。在这部分发烧友中，他们不只摩机，而且有装机能力，对音响相关知识有更强的求知欲。无论是初级还是理性发烧友，想找到适合自己的参考书还是一件不容易的事。纵观市场上音响方面的书刊，常见的有两类：一类是以教科书为主的纯理论著作，而另一类是通俗电子报刊。作为非专业人员的发烧友自然无暇也无必要系统攻读基础理论，而报刊中发烧文章往往是以“补品”为“万能”的盲目摩机为目的，也不会有真正理想的效果。因此，发烧友需要的是以实践经验为主、说明道理为辅的参考资料，使音响发烧友在追求音质至高境界而摩机、组装功放时，能达到根据自己主观偏爱选择性能不同的电路，同时根据电路特点理性选择元器件，最后根据电路要求采取合理的组装、调试过程。总而言之，编者提倡的是一切有序，不盲目发烧。

本人一生从事与电子有关的工作，且有 50 余年的发烧历程，但对编写此书仍感信心不足。应出版社的热心邀请，尽全力而为之，欠妥之处还望读者不吝赐教。

参与本书翻译、编写的还有江金林、邱国容、朱梅、付刚、张林、吴刚、何伟、董自良、董莹颖、黄玉彬、俸国良、廖南、高素清、郑冀容、李泉、李旭辉（排名不分先后）等，在此一并致谢。

编 者
于成都

目 录

第一章 概 述	(1)
一、声波的四大主观听感与相应物理量	(1)
(一) 音强.....	(1)
(二) 音调.....	(2)
(三) 音色.....	(3)
(四) 音品.....	(3)
二、音响功放七大指标	(4)
(一) 频响.....	(4)
(二) 谐波失真.....	(6)
(三) 信噪比.....	(6)
(四) 互调失真.....	(7)
(五) 瞬态响应.....	(7)
(六) 瞬态互调失真.....	(8)
(七) 阻尼特性.....	(8)
三、音响设备听音评价	(9)
(一) 听音环境的要求.....	(9)
(二) 听音评价的音源选择.....	(11)
(三) 听音效果与音响测试指标的关系.....	(12)
四、音响功放两大类型	(15)
(一) 音乐欣赏和双声道立体声功放.....	(16)
(二) 模拟立体声及伪立体声.....	(19)
(三) 形形色色的环绕声模式.....	(21)
第二章 前级放大器组成	(24)
一、音响功放前级放大器	(25)
(一) 晶体管放大器类别.....	(25)
(二) 音响功放基本放大电路.....	(27)
(三) 直接耦合前级电压放大器.....	(31)
(四) 复合晶体管应用.....	(33)
(五) 多级电压放大器.....	(36)
二、前级放大器信号选择及校正电路	(39)
(一) 信号源选择电路.....	(39)
(二) 各种输入信号的校正电路.....	(41)
三、前级放大器的控制电路	(49)
(一) 等响度控制器.....	(49)

(二) 音调控制器	(51)
(三) 电子衰减器组成音量控制电路	(55)
四、典型音响前级电路的组成	(60)
(一) 驱动 50W 后级的音响前级电路	(61)
(二) 高级前置放大器的电路组成	(64)
(三) 两级直耦小信号放大器元件数值及估算	(66)
第三章 功率放大器及其驱动级	(70)
一、晶体管功放特点	(70)
(一) 输出功率	(70)
(二) 功放效率	(71)
(三) 非线性失真	(71)
(四) 功率/频带特性	(71)
(五) 功率管的特殊性	(71)
二、功率放大器的类别和电路组成	(72)
(一) 单端推挽 (SEPP) 电路	(72)
(二) 单端推挽 OTL 输出级设计	(74)
(三) 驱动级的设定	(76)
(四) 从 OTL 到 OCL 放大器	(79)
(五) SEPP 放大器实用电路分析	(85)
三、特殊类别音响放大器——D 类放大器	(96)
(一) D 类放大器组成及工作原理	(97)
(二) 集成化 D 类放大器实用数据	(99)
第四章 场效应管音响放大器	(114)
一、结型场效应管	(114)
(一) J FET 特性	(114)
(二) J FET 检测和配对	(117)
(三) J FET 偏置和放大电路	(118)
(四) J FET 放大器元件选择	(119)
二、金属氧化物绝缘栅场效应管	(120)
(一) MOS FET 特性	(120)
(二) MOS FET 检测	(121)
(三) MOS FET 引发功放“革命”	(123)
(四) MOS FET 参数及其应用	(125)
三、MOS FET 组成输出级	(128)
(一) 元件作用和估算	(129)
(二) MOS FET 输出级器件选择	(130)
(三) MOS FET 输出级驱动	(132)
(四) 音响功放中输出管互换	(138)
第五章 晶体管功放制作调试	(142)
一、晶体管功放电路和结构选择	(142)

(一) 4类主要器件选择	(142)
(二) 电路选择原则	(144)
(三) 元器件选择和检测	(146)
(四) 印刷电路板选择和设计	(151)
(五) 电源变压器及阻流圈安装	(153)
二、晶体管功放焊接和初调	(156)
(一) 元器件焊接	(156)
(二) 功能单元连接点选择	(158)
三、晶体管功放调整	(159)
(一) 加电压初调	(160)
(二) 动态调试	(161)
附录 1 音响放大器专用对管参数一览表	(163)
附录 2 音响放大器常用场效应对管参数一览表	(175)

第一章 概述

音响放大器是音响器材中的关键部分，声频信号转换为相应的电信号以后，经音响放大器放大，最后由扬声器还原为声波。音响放大器工作在声频范围内，还原后的声波能不能和放大前信号保持一致的声学特征，做到只提高声波幅度而不改变任何声学特性，这是衡量音响放大器的基本标准。

声波是一种振动波，是能量的一种形式。具有一定能量的声波在人的耳膜上施加压力，使耳膜随之振动，经听觉神经的传导使人产生声音的主观感觉。评价音响放大器的优劣，实质上是对放大器输出的声波进行鉴定，以确定放大后输出声音与放大前的原始声音有无差别。理想的电声设备的基本要求是，在设定的放大作用时输出声波与原始声音只有声音强度的增大，而无任何添加成分，同样也不允许有任何成分被删除。

为了详细地研究音响器材，不仅要对声电转换器件的性能和放大器的性能进行深入探讨，而且还要对声波的传播特性、人耳的听音特性以及各种声源的特性进行研究。对于音响技术来说，它横跨了声学 and 电子学两大领域，形成一门独立的科学——电声学。音响爱好者属非专业音响工作者，当然无暇深入钻研复杂的电声技术（似乎也无此必要）。但是，为了对音响器材做出正确的评价，必须对声学的基本知识以及形成声音特征的几大要素有所了解。否则，即使音响听之令人赏心悦“耳”，却难以形容好在何处，而劣质音响听之不快也不知劣在何处。在此情况下摩机、装机、调校必然都是盲目的，不可能达到目的。个别发烧友在劣质音响中换了几只电阻电容，而称“音效大为改善”，只能说是自得其乐，如果让其说有什么明显的效果却是说不清的。

为了做到理性发烧，本章首先对声音组成要素和听音效果的关系作简单的介绍，其次介绍各种不同结构音响放大器的组成，使读者在目前音响功放种类繁多的条件下，理性选择适合自己的放大器。

一、声波的四大主观听感与相应物理量

声波为一个多维空间的物理量，通常以声强、音调、音色、音品（包络形式）四大要素，评价声波的特征。人耳的听音以这四大要素判别声音的效果，评价音质的好坏。这四大要素属于人的听音主观感受，实际对应的是声音组成的4个物理量。音响放大器要高保真，首先在放大系统中使这四大要素保持原有的组成和特点，即使音强被放大器增强了，但各种不同频率的声音仍保持原有的比例，以达到只放大不失真的目的。

（一）音强

所谓音强是指人耳感觉到的声音强弱，即俗称的声音大小。声波既然是能量的一种形式——声能，直接做功是通过声波对物体产生的压力，因而与音强对应的声波的物理量是声波的振幅，振幅越大的振动波，在单位面积上产生的压力越大，作用于耳膜产生相应的振

动，经听觉神经传导使人感觉到声音增大或减小，所以改变音强就可以通过改变声波的幅度得以实现。

通常声强用声压来表示，声波在空气中的传播是在均匀的空气压强中叠加声波产生的周期性压缩和扩张的变化。声压以符号 P 表示，单位为 Pa（帕）。1Pa 即在 1m^2 的面积上产生 1N 的力所具有的压强，即 $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2=10\text{dyn}/\text{cm}^2$ 。760mm 汞柱的一个标准大气压，压强约为 10^5Pa 。可见，声压的绝对值是极小的。

声压与声波的能量成正比，所以声波的声压越大，受声波冲击物体产生的位移或形变越大。以此推论，似乎声压与声音强度有正比关系，但此物理原理并不适用于生理学。至今的科学研究，对生物的生理活动还不能与物理原理挂钩。音量或音强的最终量度是人耳对音强的主观生理感受，实际测试证明，人耳的听音系统感受的音强，并非简单的只与声压成正比关系，彻底了解人耳的听音特性，是音响系统所有器材和电路设计的重要依据。根据声学研究证明，人耳对音强的主观感受有以下特点。

1. 声压与主观音强的非线性关系

人耳对音强感觉的变化与声压变化的对数成比例，即如果要想使主观听音的音量增大一倍，则必须使声压增大十倍，这种关系恰好使声压以 10 为底的对数表示时，则基本符合人耳的特性。因此，声压常用对数表示，而且将人耳对 1kHz 可听到的阈值 $2\times 10^{-4}\mu\text{bar}$ （微巴）定为声压的 0dB。声压的变化用与 0dB 的相对值即声压级以 dB 数表示。同时，为了适应人耳对响度的对数特性，音响的音量控制设备指示位置与输出电压符合人耳这一要求。

2. 人耳听音响度的频率特性

上述听音响度特性，包括人耳可听到的最低声压（称为听阈）还与声波的频率有关，所以人耳听阈 $2\times 10^{-4}\mu\text{bar}$ ，这是对 1kHz 的声波而言。人耳听阈对各种不同频率的声波差别是极大的，说明人耳对声压相同而频率不同的声波感受的听音响度并不相同。因为，所谓听阈只不过是人耳对声波感到有响度感的最低声压值，也即听阈表示的是人耳对声波产生响度感的灵敏度。由人耳灵敏度曲线可知，1kHz 声波的听阈为 0dB，而频率降低为 500Hz，或频率升高为 7kHz，听阈的声压级（声压与 0dB 的相对数）则为 6dB 左右。当高低端频率为 400Hz 和 12kHz 时，则听阈升高为 10dB。人耳听音灵敏度与频率的关系为一下凹的曲线，下凹的最低点为最高灵敏度，在 600Hz~4kHz 之间。而随频率的升高或降低，人耳听音灵敏度急剧降低，对 200Hz 和 15kHz 以外的高低频率范围，人耳听音灵敏度降低到 20dB 以上。

设想，如果音响功放有 20Hz~20kHz 平直的频率特性，由于人耳的上述特性，将使听音过程中感到高、低音严重欠缺。为了补偿人耳的这种频率特性，大多数音响放大器都设有不小于 15dB 的高、低音控制，以弥补听音高低音响度的不足。

人耳的上述频率特性，还与声压绝对值的大小有关。当声压较高时，人耳感到音量大，有足够的响度，尤其是低音成分。但当将音量减小时，人耳听音响度减小，人耳对低音灵敏度急剧下降。所以喜欢听大提琴、低音鼓伴奏的人总是将音量调得很大，一旦音量减小，虽然高、中、低音声压按比例同时降低，但由于人耳对低音的听音灵敏度降低，必然感到低音不足。根据人耳的这一特点，高档放大器中常采用等响度控制器，在调低音量的同时，同步提升低音，以使人耳感到音调不随音量减小而改变。

（二）音调

音调是指人耳对声波音调高低的主观感觉。音调对应的声振动波的物理量是声波的频

率，频率高的声音人耳感觉音调高，频率低的声音人耳则感觉音调低。人耳对此频率与音调的感觉只能说变化基本是一致的。实际上，人耳对音调变化的感觉也是对数关系，尽管频率变化很大，但人耳感觉到的变化要小得多。所以音调控制量不直接用频率变化表示，而采用频率变化比值的对数 dB 表示，以适应人耳对音调感觉的对数特性。

音调这一生理感觉，虽然与频率这一客观物理量有着近似对应关系，但也并非绝对对应关系。实际上，音调的感觉与声压级和声音组成也有关。如果有两组频率相等的正弦波单音，当声压不同时人耳会感到音调有差别。为此，音响放大器中设置音调控制器的一个基本原则是，调整音调只改变高频或低频所占比例，而不改变中段频率的声压。

（三）音色

音色是指除频率以外的声音特色。每种乐器、每个人即使发出相同频率的音符，但人耳可轻而易举地分辨出不同乐器和不同人物的声音，这种区别即为音色不同所致。与音色这一主观听感对应的是声波的波形不同所致。发声的物体发出的振动波多由基波和高次谐波组成，频率高于基波整倍数的谐波与基波相加，使声波包含了谐波成分。各种发声体的发声原理不同，外形、质地的不同，使之产生谐波的成分、比例都不同。即使是人的发声，也会因声带结构、尺寸以及口腔的形状、周围肌肉组织等的差别，使谐波成分有所不同。不同的谐波组成，改变了声波的特色。谐波总是伴随着基波的振动而产生，两者合成后使基波的波形发生改变。由于谐波的次数与比例不同，与基波混合后的波形也不同，从而具有不同的音色。由于高次谐波构成不同声源发声的音色，在音响技术中无论电声转换，还是声频放大环节，对声波的处理放大过程中都应该将高次谐波和基波同时毫无遗漏地进行处理，否则将破坏原有的音色。

既然是高次谐波，谐波频率往往为基波频率的整倍数，所以人耳可听到的频率范围虽然只有 18Hz~18kHz，但是音响器材的频率应远超过此范围，否则无音色可言。当用频率范围过窄的声频放大器播放音乐时，本来圆润而深沉的低音鼓声会变成与敲桌子一样毫无生气、干巴巴的声音。比如用劣质电话机通话，甚至连你最熟悉的人的声音也不能分辨。因此，目前的 Hi-Fi 音响中将频响扩展到 0Hz（直流）~100kHz 是有根据的。

（四）音品

音品是区别不同声源特征的另一要素。各种不同声源的谐波组成不同而具有不同的音色，而音品是指声波波形的包络。波形包络线为声波中每个周期峰值间的连线，该连线突出地表现了声波的外轮廓，对人耳听音感受有不同于音色的特殊感觉。实际上，人耳听到的声音并非对声波逐个周期产生听感，必须有一定强度的连续声波作用于人耳，此连续声波即为声波波形的包络。产生这种听音效果的原因是，人耳对声音的感觉需要近 100ms 的时间（随频率升高可减少为 50ms）。

听音时间与音量也有关。各种声源波形的包络均不相同，从而构成不同声源的特征。波形包络是在每个音乐（或音节）起始的上升沿过程和结束时下降沿过程中，对音乐特征起决定影响的，而每个音节的稳态过程，波形由谐波成分及振幅比例决定音色。如果将钢琴发生的声波录下，进行倒放音（以尾作头重放），则钢琴色将变得像小型管乐，如果是语言的倒放音则失去可懂度。究其原因是，倒放音使每个音节的包络、上升沿和下降沿被互换。

二、音响功放七大指标

为了使声音重放有较高的保真度，作为音响主要环节的放大器必须能对上述声波的四大要素予以无失真的放大，此为高保真的最基本要求。为此，音响放大器的以下七大指标是对放大器质量的基本概括。

（一）频响

频响是指放大器的频率响应。频率响应不够宽，必然形成频率失真，将严重破坏声波的音色，使音调调整失去作用。

在放大器设定的工作频率范围内，对各频率信号的放大量应该是均匀的，但由于放大电路中电容、电感的阻抗成分的存在，将使放大量随频率变化。一般频响表示的方式是在给出的频率范围内，对放大量的最大允许差值以 dB（分贝）标出，如一般表示为 20Hz~20kHz（ ± 3 dB）。因此，比较不同放大器的频响，不仅看最低频率和最高频率的范围，更重要的是放大量的不均匀度。例如，频响为 20Hz~20kHz、不平衡度 ± 3 dB 的放大器并不比 50Hz~16kHz（ ± 0.5 dB）的放大器有更好的音效。有的生产商打出极宽的频响范围，但未给出在此范围内放大器的允许偏差，那么这种频响标志是毫无意义的。

放大器的频响有两种测量和标注方式。一种是电信号输出的频响，测试的是放大器输出电信号幅度的不均匀性。对成套的音响设备来说，这种测试和标注的频响曲线系指放大器本身输出电信号的频响，而非放音频响，最终放音频响则取决于扬声器的电声转换频响曲线以及放大器和扬声器的配合。成套音响设备若只标出放大器的电信号频响，而不提供放音频响，则怀疑电声转换系统——扬声器、音箱有不便说明的不理想之处，或者商家有意误导消费者也未可知。

名牌成套音响标出的多为放声的频响曲线，可使消费者省去另配扬声器的麻烦。提到此，不要以为一台电信号频响理想的音响放大器，配接名牌扬声器或成品音箱即会有理想的放声频响曲线。实际上，无论放大器、扬声器的档次有多高，价格有多贵，总难免有一定的频响不平衡度，尤其是扬声器还音曲线起伏较大。在名牌音响器材生产中，两者搭配时可以采取互补的方式予以校正，使起伏被填平，但这对消费者或发烧友来说是难以完成的事。例如，扬声器和音箱即使按设计生产的合格产品，在频响范围内出现放音声压较大的起伏，如系某一频率附近出现声压下凹，则可通过调整放大器电路参数使相同频率附近出现一定的上凸，通过电信号频响校正放声曲线，以使音响设备的放声频响更理想。这种装配调试过程没有相应的设备是难以实现的。

音响设备的放声频响与音质的高保真直接相关，但是一味地追求宽频响也有不利因素。放大器的频响越宽，提高整机增益越困难，同时产生其他失真的可能性越大。因此，采用频响范围也应权衡利弊，量力而行。虽然宽频响与放大器音效直接相关，但有的情况下也可以在有限的频响范围内得到较好的音响效果。

音响界前辈经多年来的实际测评，发现人耳对高低音域的对称性相当敏感。对这种对称性的听音要求有两种异曲同工的说法：其一是放大器在其频响范围内，以人耳灵敏度最高的中音频 800~1200Hz，使低音区和高音区的频率延伸保持对称、平衡。相对于中音频率，高音频率的延伸必须使低音频率有等量的延伸。此处的等量不是指高音或低音的频率绝对值，

而是指“倍频程”。当高频延伸达到几个倍频程时，低音区延伸倍频程需与之相等。按此规律设定频率范围，则会在有限频响范围内得到令人满意的效果。

所谓倍频程，是指频率增大1倍，称之为1个倍频程，含义类似音乐中的八度音阶。如频率 $f_2/f_1=2$ ，即称为 f_2 与 f_1 相距1个倍频程。如按此平衡规律，以800Hz中音频率为准，选择频响低端频率为50Hz，则50Hz的第一个倍频程频率为100Hz，相对2~4个倍频程频率为200Hz、400Hz、800Hz，也就是说到800Hz中音、低音区有4个倍频程的范围。按平衡的要求，中音800Hz到高端截止频率也需有4个倍频程，则1~4个倍频程的频率将为1.6kHz、3.2kHz、6.4kHz、12.8kHz。因此，对低档次放音设备选择50Hz~12.8kHz的窄频响范围，也可使放大器有较理想的音效，听音者既不会感到高低音不足，也不会感到高低音欠缺。

如果不按上述规律，根据个人偏爱低音的特点选择20Hz为低频截止频率，若高音截止频率仍为12.8kHz，则听音感觉会明显感到声音发闷，缺乏高音。事实上，目前流行的书架式音箱组成的台式音响，正是利用人耳的这一听音特性开发的。书架式音箱，无论低音扬声器还是箱体，低频响应特性必然较差，造成声压频响特性向下延伸的困难，此时只要控制高频响的声压，使之与低端平衡，则人耳感觉高、低音是均衡的。此平衡规律被广泛的应用于小型音响和便携式音响中。

与上述原理类似的另一种说法是，频宽等式的概念。当由于受某种条件限制而必须限制放音频带时，为了得到均衡的高低音，频响低端频率 f_L 和频响高端频率 f_H 之积应在400000~600000之间。对于一般音响放大器而言，如果 $f_L=20\text{Hz}$ ， $f_H=20000\text{Hz}$ ，则 $f_L \cdot f_H=400000$ 。如一般低档放大器，频响为55Hz~12kHz，则乘积为660000，均在此频率范围之内。其实频宽等式与上述高低端倍频程对称原理是一件事物的两种表示方式，结果是相同的，只不过中音频两端倍频程平衡原理更有说服力。

上述听音规律是20世纪中期，由欧洲音响界众多专家通过实验结果得出的。此结论表明的是人耳的听音生理特征，无道理可言，从20世纪50年代起被音响界公认，而且被一些音响器材生产厂广泛利用，同时也对音响放大器的电路设计提供参考原则。

例如放大器的音调控制器，如果采用单一控制电路，在提升低音时必然同时压缩高音，而采用分开的高、低音控制电路则结果稍有不同，提升低音时相对地对高音衰减比较小。很明显，采用此类音调控制的结果必然使音响的上述平衡性被破坏，结果是使放音中感到缺少高音或低音。此点也正是音调控制器的设计初衷，以满足个别听音者的偏好，或使某些本身频响不平衡信号源通过调整音调达到平衡。

如果是对某些音源的带外切除，则不能采用单独衰减高音或低音的方式，否则会破坏平衡，不仅影响放音效果，而且还会使噪声增大。例如，现代音响中的调谐器输入功能，当接收AM广播时信号本身频带宽度不超出100~6000Hz，若采用频响20Hz~20kHz（±1dB）的功放播放，低端和高端均会引入过大的干扰噪声。在这种情况下，低档次的音响只有通过压缩高音的办法降低高端噪声，但同时破坏了频响平衡，低端引入的噪声无法抑制。而高档音响中却采用频带切除方式，当接收AM广播时切除100Hz以下、6000Hz以上的频率，既衰减了噪声，又使放音频响保持一定的平衡。因为 $100 \times 6000 = 600000$ ，恰好符合频宽等式的原则。若按倍频程中音800Hz为准，两侧均为3个倍频程。由此也说明，AM广播在有限允许带宽范围内， f_L 、 f_H 的选择也符合上述人耳听音特性。尽管AM广播频带较窄，但仍有一定的可听度。

同样的例子也适合用于 78 转唱片放音的频带切除电路。但是必须说明的是，无论倍频程对称原理还是频宽等式原理， f_L 、 f_H 的频率不是放大器的输出，而是声输出频响。无论上述哪种说法，并非是说明只要符合频宽等式不必扩展频响即可有高保真效果，只是在符合人耳听音条件下，对既无需过高频响指标、又有一定音效的权宜之计。实际上，在符合上述两种平衡原则范围内达到高保真效果仍以宽频响为重要指标。

（二）谐波失真

频率高于基波的高次整数倍谐波成分，是各种发声体形成特有音色的必要组成成分，没有谐波将使声音变得单调，而使听音者失去“听其声知其人”的可能。但是，音响设备的声电转换、放大过程中是不希望产生谐波的，否则额外产生的谐波将使声波变形，失去音响器材“保真”的性能。通常称这种失真为谐波失真。谐波失真产生的原因，是声频设备在信号电声转换或放大过程中，元器件的非线性所导致的。如放大器的非线性产生信号削波、元件性能退化产生的振荡，都会使得输出端产生谐波，结果使原有信号波形发生畸变，形成谐波失真。除此之外，放大器线性不良，电感、电容元件的电压、电流瞬时相位差，铁心变压器的磁心饱和等都可形成谐波失真。

为了表示音响设备的谐波失真程度，以各次谐波失真成分的电压值几何和占原有声波的电压比值作为失真度的量化表示。如以 U_1 表示基波的信号电压， U_2 、 U_3 表示二次、三次谐波电压，以声波中总电压值基波和各次谐波电压的几何和为分母，以各次谐波的几何和为分子，求出的百分比即为失真度。电压值不用简单的代数和而用几何和的原因是，因为即使声波为单一正弦波也是矢量，不能以代数和计算。

谐波失真的测试需采用复杂的仪器设备，尤其是测试中需要本身失真度极小的音频信号发生器，比较精密的带阻滤波器等，业余条件下是难以具备的。如需对功放或整个音响设备的失真度进行评价，可以选择音域较宽、音质较好的 CD 碟片，以自行听音作大概的判定，但要求主观听音评价需有一定的素质和必要的声学知识。

（三）信噪比

通过音响设备播放出扩大了音量，但同时也产生了一定的噪声。噪声的来源一是音响设备本身产生的噪声，二是由电源或其他途径经放大后混入的噪声。噪声可分为 3 类。其中一类是交流声。高增益放大器由市电供电，或者在有市电供电的附近使用，都难免有或大或小的交流声。另一类是白噪声，指幅度不大，但连续性较强的、平稳的“沙沙”声或“啦啦”声。此类噪声为元器件通电后产生的噪声，以半导体器件的白噪声为主。还有一类是冲击噪声，指连续的、不定时的冲击噪声，其中大多数来自电网，通过功放供电电源传入信号放大系统。有时也由信号源或低电平信号线传入放大系统。

噪声有两种表示法。一种是以各种噪声的总和与信号电平比值的 dB 数，表示的是相对于信号噪声的大小，称为信噪比。另一种是以音响设备在额定输出功率（或电压）时的噪声输出绝对值，以毫伏（mV）表示。在商品功放指标中选择其中一种方式。

国外生产的音响放大器也有采用非线性失真和信噪比的综合表示法，将非线性失真和信噪比都以和总信号中所占百分比表示，以两者之和占信号电平的比，通常以 $THD+N$ 表示。这种表示法对消费者有一定的误导，因为噪声对听音的影响是在小信号输入时，若将音量调整大则噪声输出明显增大。例如在听交响乐时，动态范围可达 90dB，当音量低潮片段

音乐声极小，各种噪声突显，这是极为破坏听音气氛的。

与此相反，非线性失真总是随信号输出增大而增大的，小信号输入时失真度极小甚至可忽略。为此，噪声的测量是在功放音量调整到较大位置、不加输入信号时进行的；而非线性失真的测量是在功放额定输出功率的 $1/10$ 或 $1/5$ 时进行的。

（四）互调失真

无论各种声源少有为单频正弦波信号，大都为基波和谐波组成的各种不同的频率成分，然而音乐演奏中同时发声者不只一种，频率组成就更加复杂。各种频率的信号混合时产生差拍，形成原声源中没有的和频率和差频率成分，这种失真称为互调失真。由互调失真产生的新的和频和差频幅度占总信号电压的百分比，用以衡量互调失真的量级。差拍和混频是两个不同的概念，当无非线性元件存在时，两种频率成分产生差拍，但并无新的差拍频率产生。如果差拍的过程中有非线性过程，则将产生新的差拍频率。所以，放大器不工作于非线性区时，不会产生这种互调失真。当放大器的输出超过一定值时，某些频率成分的幅度超出线性区而产生新的互调频率。因此，互调失真的测试条件与放大器输出额定功率有关。所谓放大器输出额定功率，是指各种失真限定在一定范围内时的输出功率。

互调失真不仅由放大器的非线性产生，电声转换器件也会有声波差拍特有的互调失真。声波在空气中是以疏密波传导的压力波，差拍作用无需“非线性检波”过程，可直接使人耳感到差拍频率的存在。例如，用一个 1000Hz 的音叉和一个 1003Hz 的音叉同时敲击而发出的 1000Hz 和 1003Hz 单音，但人耳在听到这两个频率声音的同时，还感到有每秒 3Hz 的起伏，虽非新的频率成分，但也干扰了听音。这种差拍干扰在放音中是人耳特性形成的，特别对点音源（全频带扬声器）最为明显，而对于演奏音乐现场各种乐器的分布面宽则不明显。与此相对应的采用不同频率范围的扬声器有相近的效果，扬声器本身也具特有的互调失真。根据人耳特性，各种不同频率的声源，发声频率低的声源总是有较大的振幅，以弥补人耳对低频率灵敏度过低的特点。

根据目前多数电动扬声器的结构，磁场的磁隙部分总是比较短，以此提高磁隙的磁场强度。当各种不同频率、不同幅度的音频电流同时进入音圈时，低音频大幅度信号音圈位移加大，音圈的水平中心线与磁隙中心不重合瞬间扬声器灵敏度降低，如果在此期间其他乐器发出的频率较高、幅度较小的信号，扬声器的灵敏度降低将使此信号发声较小。随着低频峰值过后，音圈复位，灵敏度又恢复，由此而产生低音频对高音频的幅度调制。这种互调失真使大幅度信号有时调制过头甚至产生小信号的暂时湮没。例如，当交响音乐中大低音鼓敲响瞬间，可明显感到其他乐器的声音中断。

目前，为了降低扬声器的这种特殊互调失真，在采用高、中、低音分开专用各自通道的扬声器以外，各扬声器生产厂还采用大音圈长冲程的可动系统。大音圈可减少纸盆对振动力的分解，而长冲程则使磁隙在垂直方向延长，同时音圈的绕线分布也延长，在大振幅时音圈中心线偏离磁隙中心范围减小，扬声器灵敏度不变，以降低扬声器电声转换过程中的互调失真。

（五）瞬态响应

瞬态响应是指声波突发性上升到下降过程的适应能力。如果放大器的瞬态响应差，当输入一个标准方波时，放大后的方波前沿会变成斜线，或在平顶的起点形成上冲，下降的后沿

不仅成斜线下降，而且还有拖尾或振铃，波形的改变将使听音感到失真。如连续冲击的鼓声会成模糊的声音，分不清鼓点。实际上，方波的失真是上升沿和下降沿时间延长，陡度变缓是放大器高频响应差所致，方波平顶期变成倾斜线则属低频特性差，方波截止期的振铃则为放大器有振荡的倾向，形成被信号触发后的衰减振荡。

瞬态响应度与听音的分辨力关系极大，尤其是在欣赏摇滚乐时，瞬态响应差会使音效变成一片“轰隆隆”声，毫无细节可言。从方波测试中显示的瞬态特性与波形分析相结合得出结论：标准的矩形波是由基波正弦波和无数高次谐波合成的，数学公式符合傅立叶级数，说明包含高次谐波次数越多，方波失真越小。依此原理，改善瞬态响应的唯一方法是展宽放大器的频带。事实证明，当放大器频响展宽到 $0\sim 50\text{kHz}$ 以上，检测 $1\sim 10\text{kHz}$ 的方波输出，在示波器上无明显的变形。因此，目前国外已采用方波作为输入信号检测放大器的频响。

（六）瞬态互调失真

上述的互调失真概念，是20世纪40年代将声音重放的测试指标和主观听音评价统一而提出的，当时认为谐波失真的测试历来用单频正弦波输入状态下进行的，而实际的声源无论音乐还是语言都是多频率的复杂波形，因而产生测试结果不能和听音效果一致。几十年过去了，实践证明，互调失真和谐波失真息息相关，但对音质评价和测试结果的不一致仍未得到完满的解决。于是，20世纪70年代后，又提出瞬态互调失真的概念，特点是一改测量过程中单频正弦波输入的方式而采用方波脉冲输入。方波脉冲实质上包括基波频率正弦波与多次谐波的合成。当采用连续的、有一定间歇期限的方波输入放大器时，示波器观察输出波形如果无明显的变形，说明连续方波瞬态响应良好。此时由功放输出的钢琴短促的跳跃音符时，声音的清晰度明显较高。

当放大器瞬态响应差导致输入方波放大后变形时，说明放大过程中产生谐波分量的畸变，新产生的谐波和放大器中原有信号谐波相互调制而产生的失真称为瞬态互调失真。放大器产生瞬态互调失真最常见的原因是：在晶体管功放中为了改善失真度及温度稳定性，往往采用大反馈量的负反馈。为了避免引起功放自激，则必然增设高频相位滞后补偿，以电容器充电电压的滞后特性使高音相位滞后，破坏振荡条件。为了避免采用大容量补偿电容器，在大环路反馈中补偿电容均设于阻抗较高的前级小信号放大器中，当突发的输入信号加到前级时，补偿电容充电产生了信号延迟。在延迟时间内后级放大器无输出，也就无负反馈信号，放大器增益瞬间增大，使输入过载。如果在脉冲波形上同时叠加输入正弦波信号，必将使得进入晶体管的非线性区，从而产生严重失真。这种失真对高频、大音量信号输出最易发生，人耳也极易感觉到。

为了测试瞬态互调失真，将功放输入峰-峰值为4:1的一个方波和正弦波，在输出端用频谱仪分析互调失真分量，该互调失真分量与正弦波信号峰值的比则为瞬态互调失真。

（七）阻尼特性

阻尼特性是指放大器对扬声器的电阻尼特性。当输出信号使扬声器音圈产生位移时，扬声器音圈同时切割磁力线产生感应电流。此感应电流形成的磁场、磁隙和磁力线的相互作用又可以产生新的位移，即使输出信号已停止，音圈的振动并不会立即停止，形成一定的衰减振动。此衰减振动将使扬声器声音含糊不清。阻尼不良的扬声器使声波产生额外的失真，此失真并非扬声器的质量不佳，因为扬声器的可动系统有一定的弹性和顺性是必需的，欲使衰

减振动尽快结束，只有靠放大器对扬声器的阻尼作用。

功放输出级的内阻越低，对音圈感应电流的分流越大，阻尼作用越好。一般用阻尼系数 f_D 表示： $f_D = \text{功放级输出阻抗} / \text{输出级等效内阻}$ 。当采用 OCL、OTL 电路时，功放级输出阻抗即为扬声器的音圈阻抗。而输出阻抗相同的功放，由于电路设计、工作状态的不同，内阻也不同，对优质晶体管功放而言， f_D 可达到 1.5~100。内阻较大的五极管输出级， f_D 则不超过 12。

上述音响放大器的七项指标，是目前音响放大器测试中的主要项目。随着音响技术的进步，特别是音源载体的迅速发展，促使音响放大器的音效也不断地改善，测试数据对其效果的综合性表达能力更感到不足。如何使测试结果的客观评价与人的主观评价相统一，是音响界半个世纪以来孜孜不倦追求的目标。随着电子技术的迅猛发展，将会出现更有说服力的测试指标和更完善的测试方法。虽然目前音响效果的主、客观评价尚有差距，即测试数据完善无缺的放大器，主观听音评价不一定是理想的，但是可以肯定的是，如果上述主要项目中有几项过差，听音过程中会明显感到不尽如人意。也就是说，测试数据完美的放大器，不一定是音效最好的，但测试项目不合格的放大器绝不会有满意的听音效果。结论是客观评价是基础，主观听音是最后定论。

三、音响设备听音评价

音响设备的测试数据属音响本身发声的客观存在的声学物理量，无论测试数据如何理想，最终结果还是取决于人耳的听觉。但是，随着音源、听音环境的不同，听音者听觉和心理因素的差别，还是会有不同的听感。听音属人听觉的生理过程，虽然人耳听音特性有共性（如听音频响范围），听音响度的频率特性均大致符合等响度曲线和对数关系的响度感，但是，人与人之间也有极大区别，即使听觉完全正常的健康人，各有独特的偏好，加以经历、文化程度、音乐素养的区别，听音评价也就众说纷纭了。看来，听音评价还需要规范化，才能得出较客观公正的结论。

（一）听音环境的要求

声波属典型的机械振动波，具有方向、反射、吸收等特性，也具有振动波特有的差拍、驻波等现象。为了规范听音环境，对声学物理量的测试和专业听音评价，均在声学试验室或专用于听音的听音室中进行。这种听音室对房间的声学特性，如噪声、混响时间、吸收系数、室内驻波等有严格的要求。为了达到上述声学特性，还对听音室的房屋结构、体积、形状以及建筑材料都附加严格的要求。这种要求显然对业余音乐爱好者是不可能具备的，但为了营造一个比较有利的听音环境，起居室也必须适当改造，使之尽量符合声学特性的要求，通常需注意以下几点。

首先是室内混响时间的重要性。混响效果对音乐气氛的烘托是极为重要的，完全无混响效果的音乐，如在空旷的郊外举办的音乐会一样，不只显得听音无活力，而且感到声音发虚，不实在，再强的低音也难以感到有震撼效果。各种音源载体的录制均在有标准混响时间的录音室中进行，因此音乐软件内已含有一定的混响效果。在软件播放时，听音环境的混响时间应低于录制软件时的混响时间，使听音环境的混响效果既可发挥软件混响效果，又不因混响时间延长破坏音乐的效果。混响时间过长会使听音浑浊，由于方向性被破坏，还会使立

体声的声象定位飘浮不定。混响时间是声波在室内直达声和反射声的传播过程形成的，因而混响时间与室内容积（内体积立方米）和吸声特性有关。如果房间体积较大或呈长条形，则应采取必要的隔音措施，避免声波在室内形成混响时间过长，造成声音模糊，严重时出现类似回声的效果。

常见的音乐软件在录制时大多采用 0.5s 左右的混响时间（根据不同的音乐稍有差别），重放时听音室的混响时间应限制在 0.5s 左右。当房间墙壁之间距离超过 4 米，室内家具较少比较空旷，而且墙壁质地坚实，表面光滑的水泥墙（包括地板、天花板在内），形成室内混响时间大多超过 1s。这种情况下，声压较大的声波经多次反射声强仍较足，不但使声音浑浊，当音乐中短促的冲击声时可感到明显的一连串“回声”，而且由扬声器发出的直达波还会与各种次数不同的反射波形成驻波，破坏听音效果。

这种居室条件下，改善听音环境的主要目的是减小混响时间，增大房间六面体（四堵墙壁+天花板+地板）的吸声性能，有条件时可以改变房间结构，尽量减小声反射面（墙壁、家具）的平行结构，可减小声波来回多次反射，对避免驻波的产生有利。无条件改变结构，则可进行吸音处理，降低反射声的能量。由于居室条件、家具摆放均不同，对此难以给出具体方案。细心的发烧友可能注意到，比较高档的电影院、剧场、音乐厅的布局，有的厅堂并非正方形或长方形，有时将左右墙壁、天花板、地板之间形成一定不平行的夹角，即使是长方形或正方形放映厅，墙壁、天花板上也特别加入表面粗糙的斜坡状装饰面料。因为粗糙的表面将形成声波的漫射，从而达到吸声效果，减小反射声和混响时间。此外，不平行的六面体可避免声波多次反射形成驻波。对于比较空旷的大居室可以效仿其原理，利用家具或厚绒布帘作为吸声物体，也可用于改变听音区结构。以上措施可以灵活搭配采用。

相反，房间容积过小，家具林立，也会使混响时间过短，甚至使音乐软件设置的 0.5s 以下的混响时间也难以发挥。这种条件下，首先是适当调整家具摆设，增大混响时间，减小家具、墙壁对声波传播的吸收和遮挡。

但是，要使混响时间达到 0.5s 左右，对一般家庭来说几乎难以实现，这也是很多发烧友都有所体会的。尽管自己的音响价格不菲，但无论看大片还是听音乐，与电影院的效果大相径庭，甚至在声学特性并不讲究的茶楼听音，也感到远比家中效果好。这里主要的原因就是混响时间不当，其次才是电子混响器的应用。

在有限的居室空间内，欲得到理想的混响效果是比较困难的，对听音要求较高的发烧友，可以在音响放大器中加入电子混响器。现代的电子混响器由 BBD 组成全集成化电路，原理和卡拉 OK 的混响相同，区别是混响时间调整范围限定在 0.5~2s 以内，避免出现回声现象。严格地说，电子混响器设定过长的混响时间，在居室不大的条件下是不合适的。居室面积窄小，听音位置距扬声器比较近，直达声传播时间极短。为了避免混响效果出现回声现象，空间混响时间也要相应缩短，否则直达声和反射声时间差别增大，对突发声也会出现类似回声的效果。

当然，通过电子混响器改善效果也并非易事，混响和回声的形成原理上并无区别，只是量和质的关系：调整合适的混响时间，可以烘托音乐气氛；不同的音乐采用不同的混响时间，可以突出该音乐的气势。但是，如果不合理地延长混响时间，使人耳可以明显的分辨出直达声和反射声，则不称为混响而是回声。量变形成质变，显然不适合音乐欣赏。