

DSGFS

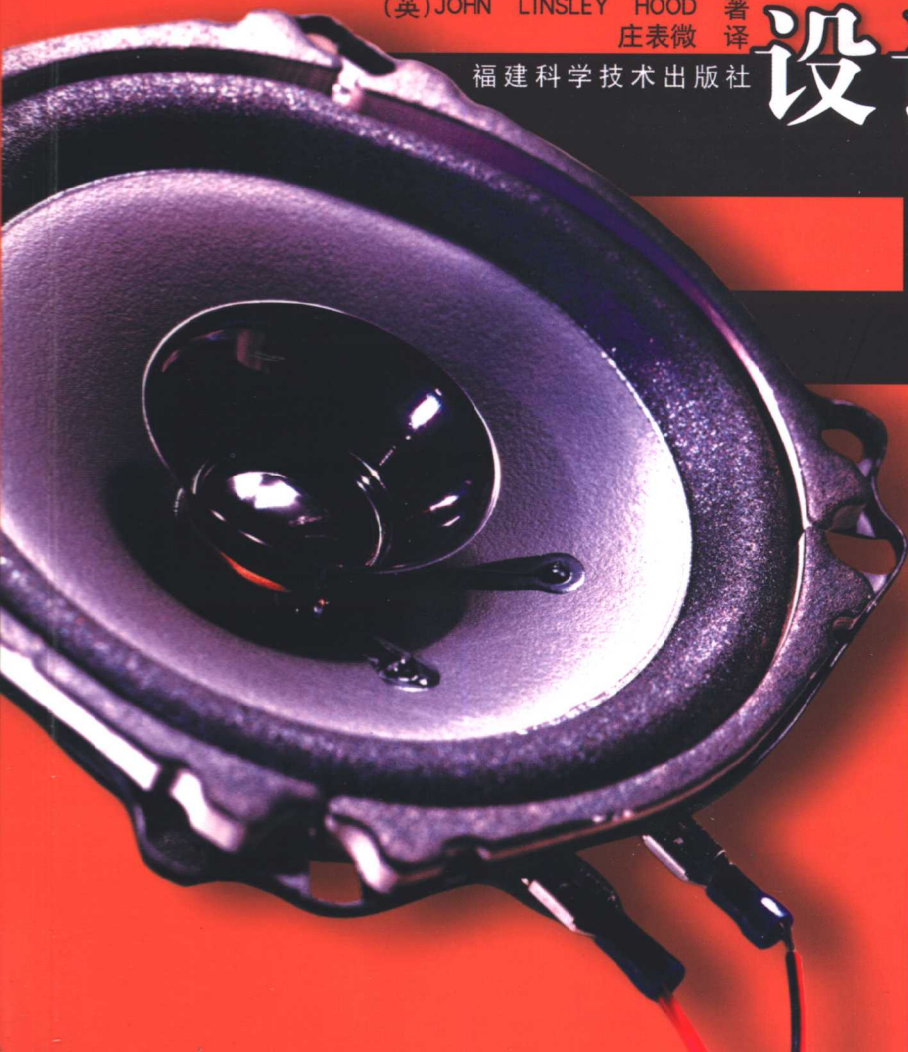


胆石功放 设计

(英) JOHN LINSLEY HOOD 著

庄表微 译

福建科学技术出版社





胆石功放 设计

(英) JOHN LINSLEY HOOD 著
庄表微 译

福建科学技术出版社

著作权合同登记号:图字 13-2004-028

This edition of Valve and Transistor Audio Amplifiers (ISBN 0 7506 3356 5) by John Linsley Hood is published by arrangement with Elsevier Ltd, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX51GB, England.

本书中文简体字版由英国 Elsevier 公司正式授权出版、发行

图书在版编目 (CIP) 数据

胆石功放设计 / (英) 胡德著; 庄表微译. —福州:

福建科学技术出版社, 2004. 8

ISBN 7-5335-2415-2

I. 胆… II. ①胡…②庄… III. ①音频设备—电子管放大器: 功率放大器—设计②音频设备—晶体管放大器: 功率放大器—设计
IV. TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 046023 号

书 名	胆石功放设计
著 者	(英) JOHN LINSEY HOOD
译 者	庄表微
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
印 刷	人民日报社福州印务中心
开 本	850 毫米×1168 毫米 1/32
印 张	8.375
字 数	194 千字
版 次	2004 年 8 月第 1 版
印 次	2004 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5335-2415-2/TN·305
定 价	17.00 元

书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

前 言

我的一位朋友经常喜欢这样评论工程师：工程师只要 5 英镑就愿意做普通人需要 50 英镑才肯做的事情。可想而知，我的这位老朋友一定是一个工程师。我想，这对大多数从事工程实践的人是一个切合实际的评价。一个工程设计人员的首要任务是寻求一个先进、有效、廉价的方法，以达到明确的具体目标。只有找不到这样满意的方法，他才会去寻求更为复杂、费钱的方法。

在音频放大器领域，自从人类第一次试图通过电话线把声音传递到远处以来，如何把微弱的电压信号放大，在技术上一直有巨大的吸引力。随着无线电广播的普及，大批量音响设备的生产，更多的人从事电信号放大技术的研究。虽然经过多年的改进，但是当人耳最终收听声音时，仍然与生活中的真实声音（这是工程师一直想复制的）有一些差距。在声音仿真领域，虽然许多问题的起因不在电子电路和放大器，但它们之间毕竟存在一些差异，存在有待改进的空间。

本书的重点是简要介绍有 50 年发展历史的音频放大器设计。作者希望本书的内容对音频放大器用户或者未来的设计人员有帮助。在本书中作者也对音频放大器领域现存的问题进行探讨，希望介绍的一些方法能有助于解决这些问题。

我坚信，解决问题的惟一方法是不断地制作、分析和记录，以备今后使用，放大器电气性能的许多测试均可以作为改进的依据。不过不要忘记，最终评判的结果是听众的耳朵。所以在仪器测试完成，结果满意以后，应该对音响设备的声音质量加以评

价，让尽可能多的有兴趣人群发表意见，对他们的意见进行认真分析。

试听评价工作往往很困难，因为我们很难消除一些人无意的偏见。他们常常对音响设备选定方法以及测听方法提出不同意见。所以音响设备的测试必须在测评小组或者确定测试项目的人均不知道需要测试的器件是什么的情况下进行。

如果不同的器件，它们的电气性能测试完全相同，但感觉的音质有明显的差异，就应该对电气性能测试的范围和类型仔细审核，看看有无类似的性能因素被漏测，或者对残留缺陷的比较方面有无加权不妥的情况。这在具体的放大器电路设计时经常会出现。

也有更为复杂的情况：有些人对并不明显的性能差异，或者细小的电气缺陷（往往不是同一种缺陷）反应特别敏感。所以，由于任何一种器件都有一些性能缺陷，每一个听众都可能会有各自的意见，认为某一种器件音质最好，或者最接近原声。

这时工程师最需要做的事情就是，找出性能差异产生的原因，或者协助决定改进的办法，以便找到一个绝大多数人能够接受的性能。

确定放大器电气性能标准比较简单，即对任何一种不带音频频率以外分量的信号波形（音频频率可以定义为 $10\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ ），在放大器的输入端和输出端测得的波形，除了波幅不同外，其他应完全相同。这里放大器也可以是其他电路，放大器的输出端与负载连接。

为了达到上述目标，必须满足以下条件：

(1) 放大电路的恒幅带宽 ($\pm 0.5\text{dB}$) 在有负载和各种要求的增益与输出幅度水平时，至少为 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 。

(2) 放大电路的增益和信噪比必须适当，以得到一个适当幅

度的输出信号，信号中的噪音或者其他非信号分量在各种使用条件下，必须是听不见的。

(3) 输出波形中的谐波失真和互调失真分量，当输入信号由一个或者多个可听频率的纯正弦波形组成时，不得超过一定的水平（实际上很难有明确定义。因为允许的波形失真量与它们的频率有关。同样，对于谐波失真，其允许的失真量与它们的阶数有关，即要看它们是二次、三次、四次还是五次谐波，一般认为所有的失真分量不要超过 0.02%，在二次谐波的特殊场合，只要低于 0.05% 就是听不见的）。

(4) 有电抗负载的放大电路，它的线性度和电气稳定性应该适当，以保证瞬变波形或者不连续波形不会明显变形，例如在快速方波或者矩形波场合。条件是这种波形不会产生输入或者输出的过载；放大电路不可出现振铃振荡（叠加的干扰振荡）。方波测试时理想的电路应该无波形过冲；信号应该在还原时间 $20\mu\text{s}$ 内恢复至无失真电压水平， $\pm 0.5\%$ 。

(5) 放大电路向典型负载输出功率时（记住，典型负载在音频频谱的某些部分的阻抗可能会高于或者低于它的名义阻抗），输出功率必须适当，以满足不同的要求。

(6) 如果放大电路处在过负载运行状态，电路就须保持稳定，削顶波形应该整齐无失真，应该在尽可能短的时间内（当然是少于 $20\mu\text{s}$ ），恢复至正常的信号波形水平。

以上这些规范，即使在高质量的固态电路设计中可能也很难满足，任何变压器耦合的系统更是难以满足。对于放大电路还有一些实际的要求，例如：放大电路应该高效利用电能，这样当放大电路装入外壳时，发热就不会成为问题；放大电路应该经济高效，体积小，使用可靠。

实际上上述所有的性能要求不可能全部满足，这就意味设计

人员不得不对某些性能进行折衷，即用某方面较好的性能替代另一个不那么好的性能。我个人认为，在进行典型的电抗性负载测试时（准确地说是模拟测试），放大器的谐波失真或者互调失真的总量（产品说明书中常有此数据），只要低于 0.05%，放大器的性能能够优于瞬变状态时的性能，对音色质量的要求就不是那么重要。这种测试时放大器的性能就很少或者从来没有报道过，在本书的合适章节我会告诉读者，放大器某些潜在的性能缺陷能够得到补偿。

著 者

目 录

第一章 有源元件	(1)
一、电子管	(1)
二、固态器件	(12)
第二章 无源元件	(29)
一、电感线圈和变压器	(29)
二、电容器	(35)
三、电阻器	(40)
四、开关与接插件	(44)
第三章 电子管电压放大级	(46)
一、电子管放大电路的组态	(46)
二、栅偏压电路种类	(47)
三、阴极偏压电阻的计算	(50)
四、板极负载种类	(50)
五、栅地放大电路	(52)
六、栅地—阴地放大器	(53)
七、差动放大电路	(54)
八、阴极跟随输出放大器	(54)
九、 μ 跟随放大电路	(55)
十、电子四极管、射束电子管、电子五极管	(56)

十一、负载特性曲线簇	(59)
第四章 电子管音频放大器设计	(63)
一、单端工作方式与推挽工作方式	(65)
二、分相电路	(67)
三、输出级使用的电子管	(71)
四、输出变压器与阻抗匹配	(72)
五、输出负载阻抗的影响	(76)
六、有效输出功率	(76)
第五章 负反馈	(79)
一、负反馈的优点	(81)
二、电路稳定性问题	(82)
三、串联负反馈与并联负反馈	(84)
四、负反馈环路对输入阻抗的影响	(86)
五、负反馈环路对输出阻抗的影响	(89)
六、负反馈对谐波成分的影响	(90)
七、电子管负反馈电路	(91)
八、巴克山达的负反馈音调控制电路	(93)
九、频响的均衡化	(95)
十、采用负反馈的滤波电路	(97)
第六章 电子管音频放大器实例	(102)
一、麦金托什放大器	(103)
二、威廉逊放大器	(104)
三、分布负载系统	(107)
四、夸德的阴极负反馈电路	(109)

五、巴克山达放大器	(111)
六、巴克山达的 5W 功放电路	(115)
七、雷德福 (Radford) 放大器	(115)
八、利科 (Leak) TL/12 放大器	(118)
九、姆拉德的 5/10 放大器	(118)
十、通用电气公司的音频放大电路	(121)
十一、通用电气公司的 912+ 功放电路	(123)
十二、布利莫的 25P1 放大器	(123)
十三、索纳伯的音频放大电路	(126)
第七章 固态音频放大器基础	(131)
一、晶体管	(131)
二、晶体管的偏置电路	(134)
三、级增益的计算	(135)
四、晶体管的基本电路组态	(137)
五、射极跟随输出电路	(139)
六、极限热耗散功率	(140)
七、结型场效应管	(141)
八、绝缘栅管 (MOS 场效应管)	(145)
九、功率晶体管与功率绝缘栅管用于放大器输出的比较	(147)
十、U 型和 D 型绝缘栅管	(148)
十一、实用的电路单元	(150)
十二、电路模块	(152)
十三、信号转换速率的极限	(154)

第八章 早期固态音频放大器设计 (156)

- 一、Lin, H. C. 的放大电路 (158)
- 二、准互补跟随输出电路的不对称问题 (161)
- 三、听众疲劳问题 (164)
- 四、可供选择的电路方案 (166)
- 五、甲类工作状态 (171)
- 六、全互补电路 (173)
- 七、增益级电路的设计 (175)
- 八、高频补偿技术 (177)
- 九、电路的对称性与信号转换速率 (180)
- 十、输出电流的稳定性 (181)

第九章 当今功率放大器设计 (184)

- 一、有待解决的设计问题 (184)
- 二、功率绝缘栅管与功率晶体管对比 (185)
- 三、绝缘栅管的频率响应 (185)
- 四、绝缘栅管的线性度 (187)
- 五、晶体管、绝缘栅管的跨导 g_m (191)
- 六、推挽输出电路的静态电流稳定性问题 (192)
- 七、其他静态电流控制电路 (194)
- 八、夸德的电流转储放大器 (196)
- 九、桑德曼的 S 状态放大电路 (197)
- 十、Technics 公司的 AA 级电路 (198)
- 十一、电压放大级增益与整体总谐波失真的关系 (199)
- 十二、主要电压增益级的电路结构 (203)
- 十三、输入输出信号的隔离 (205)

十四、负反馈对信号失真的影响·····	(206)
十五、增益电路结构的对称性·····	(207)
十六、负反馈与放音质量·····	(208)
十七、功放机的输出级·····	(210)
十八、输出直流偏置电压的控制·····	(212)
第十章 前置机 ·····	(214)
一、唱片重放时的频响均衡特性·····	(214)
二、唱片重放时的频响均衡电路·····	(215)
三、实用 RIAA 均衡电路 ·····	(220)
四、极低噪声输入电路·····	(223)
五、低噪声器件·····	(226)
六、前置机的基本电路方案·····	(230)
七、音调控制与滤波电路·····	(231)
八、信号通道的切换和遥控·····	(235)
九、电压控制的电路增益·····	(235)
十、数字信号输入·····	(239)
第十一章 供电电源 ·····	(241)
一、大功率电源·····	(241)
二、固态整流电源·····	(243)
三、大电流供电电源·····	(245)
四、半波与全波整流电路·····	(245)
五、抑制直流供电线路杂波的方法·····	(246)
六、稳压电路·····	(247)
七、串联型稳压电路·····	(248)
八、过流保护电路·····	(250)

第一章 有源元件

电子放大器由有源元件和无源元件组成。电子管、晶体管、集成电路等属于有源元件，它们可以从适当电压的供电线路上吸收电流，然后利用这个电流产生或者改变某种电信号。电容、电阻、电感、电位器、开关等均为无源元件，它们不会向电路输入另外的电能，但是会在有源元件的输入或者输出电压和电流上起作用，以控制它们的工作方式。两种元件中，有源元件内容更丰富，也更有趣，所以先介绍有源元件。

一、电子管

热阴电子管（简称电子管，也称真空管）是由受热的阴极（安装在密封的真空玻璃或者金属管内）和其他的电极（例如板极和栅极，装在阴极的周围）组成。它可以完成各种不同的功能。电子管的分类主要根据内部的电极数。有两个电极的电子管（一个板极，一个阴极）称为电子二极管；有三个电极（一个板极，一个阴极，一个栅极）的电子管称为电子三极管；有四个电极（一个板极，一个阴极，两个栅极）的电子管称为四极管；以此类推。

如果掌握了电子管内部各电极的功能，电极不同组合对电子管特性的影响，对了解电子管的工作原理以及如何得到最佳性能就很有帮助。为此对各电极及其功能做详细说明。

（一）阴极

各种电子管的阴极均在电子管的中心，使电子管工作的电子

由此产生。阴极有整体式和分体式两种。整体式（又叫直热式）阴极是由一段短的电丝，一段折成 V 字形的镍丝组成，底部由两根硬线支承，顶部有小弹簧拉紧，参见图 1-1 (a)。分体式（又叫间接加热式）阴极有一个金属管，通常是镍管，管内有发热灯丝，灯丝为镍丝或者钨丝，参见图 1-1 (b)。不论阴极是直热式的灯丝，或者是间接加热的金属管，它们的功能和工作原理是相同的。但是它们也有差别：直热式灯丝的效率更高，从灯丝加热到可以发射电子的工作温度，对于灯丝表面有氧化物涂层的结构，工作温度大约为 775°C 。

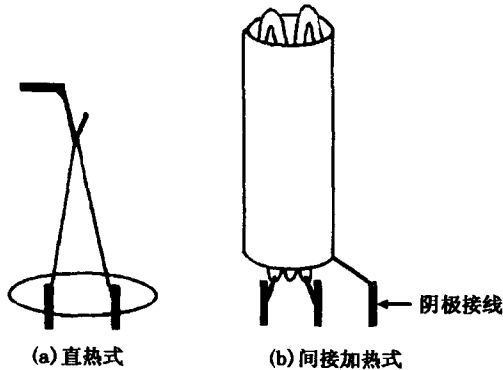


图 1-1 电子管阴极的构造

也可以采用纯钨丝做阴极，但它需要加热到 2500°C 才工作，所以需要消耗更多的电能，而且还有其它问题产生，例如阴极变脆。事实上低功率或者中等功率的电子管均采用有氧化物涂层的阴极。氧化物是氧化钙、氧化钡和氧化锶的混合物，涂在镍基灯丝的表面上。制造电子管时，这些化学物质、金属碳酸盐、少量的添加剂（通常是稀土元素）通过粘接剂调制成糊状，涂在阴极上面。金属碳酸盐在电子管抽真空的最后阶段还原成为金属氧

化物。

电子管在使用过程中，氧化物涂层与被加热的镍阴极管（或者直热式灯丝）之间会产生化学反应。碱性的金属氧化物局部被还原成为自由金属，然后慢慢地扩散到阴极的表面，形成电子发射层。从阴极发射电子的多少直接与加热温度有关。加热温度要根据对电子管的性能要求以及寿命预期综合考虑。因为阴极的加热温度高，激活的阴极金属会通过蒸发消失，寿命就变短。根据需要，适当降低阴极的工作温度，仍然可以保持适当的电子发射水平。

阴极受热就会发射电子，在阴极周围形成电子云。这是阴极体内的电子受到热激发，使电子逸出金属表面，又受到阴极正电荷的吸引产生的。阴极的正电荷通过阴极失去电子形成。

（二）板极

在结构最简单的电子管中（如电子二极管），阴极被一个金属管或者盒包围，这个金属管或者盒就是板极（又称阳极）。板极通常由金属镍制成。如果板极相对阴极处在正电压，它就会从空间电荷中吸引电子。电流的大小与板极相对阴极的距离、阴极的有效面积、板压以及阴极温度有关。对于固定的阴极温度和板压，通过板压 V_a 和电流 I_a 就可以计算出板极内阻 R_a ，参见计算式：

$$R_a = dV_a / dI_a$$

阴极的电子在板压的作用下，加速轰向板极，电子冲击板极的动能会转变成为热能，使板极的温度升高。这样产生的热量通常可以忽略，但对于功率整流管或者功率输出管，就要注意工作电流与电压不要超过产品说明书的额定值。最坏的情况是，如果电子管有内在缺陷，板极过热时电子管内残留在细孔的气体就会释放出来，影响电子管的真空度，这样就会导致其他问题产生。

(三) 控制栅极

阴极被金属丝网包围（实际应用中通常是一个螺旋线圈），金属丝网通过点焊固定在两个支承杆之间，这就是栅极的结构，参见图 1-2。通过调整施加在栅极上的电压，可以控制从阴极流向板极的电流。如果加在栅极上的是正电压，就会有更多的电子从阴极被吸引出来，继续流向板极。反之，如果加在栅极上的是负电压，它就会排斥电子从阴极发射出来，流向板极的电流就会减少。

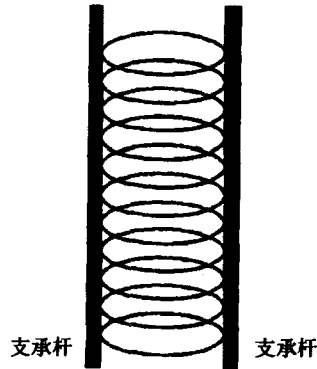


图 1-2 控制栅极的构造

电子管的控制栅极是最有用的装置。只要在栅极上施加较小的电压，就可以控制较大的板流，而且只要栅极的电压相对阴极是负电压，栅极电路就不会有电流，它的有效输入阻抗在低频率时几乎可以忽略不计。利用这种相对较小的栅极控制电压，调节相对高压大电流的能力，就可以把电子管作为放大器使用，把

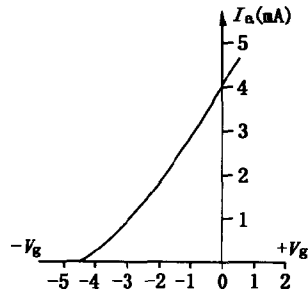


图 1-3 电子三极管的板流栅压特性曲线

小的电信号放大。由于栅极电压 V_g 与板流 I_a 之间近似成线性关系（参见图 1-3），所以经过放大以后的信号失真较小。电子管的理论放大系数（在板极负载阻抗极高条件下），用希腊字母 μ 表示。

然而在较复杂的电子管里，可能会有几个栅极设置在板极和阴极之间，距离阴极最近的栅极对板流的影响最大，所以称之为控制栅极。

栅极控制板流的有效程度与栅极、板极相对阴极的距离有关。如果栅极距离阴极较近，板极距离阴极较远，栅极控制板流的有效性就大， μ 值就大。反之，如果栅极距离板极较远、板极距离阴极较近， μ 值就小。不幸的是，电子管的板极内阻 R_a 也与板极、阴极的位置有关。如果板极、阴极之间的距离增大， R_a 也就增大。另外栅极螺旋线圈的螺距也会影响板极内阻，螺距减小，板极内阻就会增大。反之亦然。

简单的电子管放大器（参见图 1-4）的级增益（ M ），可以用下列公式表述：

$$M = \mu R / (R + R_a)$$

所以对于低阻抗电子管，例如 6SN7（典型参数为 $I_a = 9\text{mA}$ ， $R_a = 7.7\text{k}\Omega$ ， $\mu = 20$ ），它的板—栅、栅—阴距离较近，栅极螺旋线圈的螺距也较大。这种电子管的板流会很大，但放大系数较小。

对于高阻抗电子管，例如 6SL7（典型参数为 $I_a = 2.3\text{mA}$ ， $R_a = 44\text{k}\Omega$ ， $\mu = 70$ ），图 1-4 简单的电子管放大器它的级增益较低，除非采用高的板极负载电阻（ R ），但这又要求有高的供电电压。

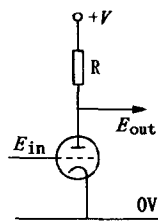


图 1-4 简单的电子管放大器

（四）空间电荷

真空管的阴极加热以后就会有电子云（又称空间电荷）产生，它就像电子存储库可以不断提供电子给板流使用。当栅极电压为负时，电子云的存在变得尤为重要。这时电子云有效地充斥于栅极与阴极之间的空间，形成主要的电子源。