

VALVE AMPLIFIERS 电子管放大器

(第4版)

FOURTH EDITION

[英] Morgan Jones 著 薛国雄 译



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

VALVE AMPLIFIERS

电子管放大器

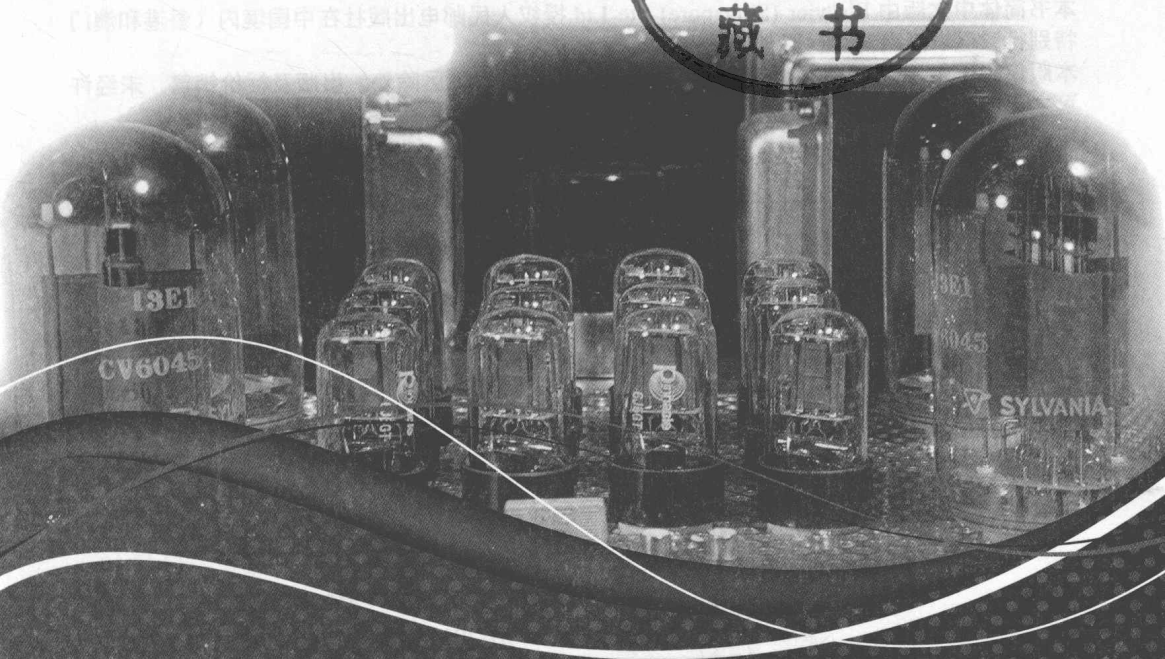
(第4版)

FOURTH EDITION

[英] Morgan Jones

著 薛国雄 译

藏书



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

电子管放大器：第4版 / (英) 琼斯 (Jones, M.) 著；
薛国雄译. — 北京：人民邮电出版社，2015.9
ISBN 978-7-115-39619-8

I. ①电… II. ①琼… ②薛… III. ①电子管放大器
IV. ①TN722

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第142020号

版权声明

Valve Amplifiers, Fourth Edition by Morgan Jones.
ISBN 978-0-08-096640-3

Copyright © 2012, by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright ©2012 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd., 3 Killiney Road, #08-01 Winsland House I, Singapore. All rights reserved. First Published 2012.

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授权人民邮电出版社在中国境内（香港和澳门特别行政区以及台湾地区除外）出版发行。

本版仅限于中国境内（香港和澳门特别行政区以及台湾地区除外）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

-
- ◆ 著 [美] Morgan Jones
 - 译 薛国雄
 - 责任编辑 房桦
 - 责任印制 周昇亮
 - ◆ 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>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本：700×1000 1/16
印张：41.75 2015年9月第1版
字数：791千字 2015年9月北京第1次印刷
- 著作权合同登记号 图字：01-2014-1125号

定价：139.00元

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

反盗版热线：(010)81055315

广告经营许可证：京崇工商广字第0021号

内容提要

本书从基本电子电路的工作原理入手，由浅入深地介绍电子管放大器电路的特点和设计方法，提供了电子管功放、电子管前置和电源电路的设计应用实例，并给出电子管的代码、元件值的规范标注、电阻色环表示法以及各种唱片的均衡特性要求等辅助资料。

本书初版于 1995 年，经多次改版重印，目前发行至第 4 版，在海外被誉为近 40 年来最佳的电子管放大器设计制作专著，在亚马逊网站上获得读者高达 4.5 星的好评。在全球最有影响力的音响 DIY 论坛 (DIYAudio) 上，此书被列为电子管放大器书籍的首选。在欧美，本书是音响制作者几乎人手一册的技术宝典，是音响爱好者学习电子管音频放大器设计的必备之书。

译者序

长期以来，电子管放大器以其迷人的音色，俘获了众多音响爱好者的心。随着半导体技术的兴起和发展，电子管已被全面取代，电子管的黄金时代早就一去不复返。但在音响领域，尤其是 Hi-Fi 音响界，电子管放大器仍牢牢占据一席之地，并曾一度回潮，影响延续至今。在很多音响爱好者心目中，电子管的声音依然是高品质声音的代名词。

与晶体管相比，电子管体积大、寿命短、效率低、不耐震动、耗电量大、输出电流小，总之是缺点多多；采用电子管的放大器，工作电压高，体积大而笨重。但到目前为止，电子管仍是线性最佳、原生失真最小的有源放大器件，晶体管无法与之比肩。正由于有这种与生俱来的天然优势，电子管放大器即使采用简单的电路，仍具备获得高品质声音的潜质。

与晶体管放大器相比，电子管放大器在制作上，具有简单、容易、收效好的特点，因而深受广大爱好者的欢迎。电子管放大器一是电路简单，容易入门；二是声音底子好，容易得到较为满意的效果；三是使用元件少，元件品质对声音的影响更为明显。因此，更换元件后的声音变化更大，令制作富于乐趣；四是调试方便，装制成功率高。电子管放大器各级电路之间通常有较好的隔离，既方便了检测和查错，又容易进行工作点的调整。电子管本身能耐受短时的过载，不会像晶体管电路那样出现多米诺骨牌效应，瞬间造成一大片元件的损坏，严重挫伤制作者的热情。当电路出现异常时，电子管发红的阳极还可为制作者提供警示。

电子管的工作特性异于常见的半导体器件，其电路设计自成一格。但由于电子管作为有源电子器件，早早退出了主流工业界的历史舞台，因此，数十年来的国内外图书出版市场，介绍电子管电路设计知识的书籍几乎已经绝迹，研究电子管音响电路的专著更是少之又少。有心于电子管放大器制作的爱好者，只能从早期书刊中汲取营养。可由于时代的不同、所学知识与实际应用的脱节，这些爱好者的努力往往是事倍功半。

本书原名为《Valve Amplifiers》，是电子管音响领域中硕果仅存的专著之一。自出版以来，本书一直在欧美国家中享有盛誉，被人们称作是电子管放大器设计制作的圣经。在国外音响制作爱好者云集的 DIYaudio 网站论坛上，凡有网友发帖要求推荐电子管音响设计书籍的，其他网友回帖时，几乎无一例外地把本书放在

强烈推荐之列，可以说，已经到了“言必称希腊”的地步。本书的引进出版，在填补国内图书市场在电子管音响方面的空白之余，无疑为广大电子管音响爱好者带来了福音。

本书作者 Morgan Jones，是英国 BBC 公司的一位退休工程师，个人履历并不算很显赫。但其过人之处在于，他能在纷繁复杂的电子管技术知识中撷取精华、化繁为简，把重要的知识内容，整编成一份营养丰富、容易吸收的大餐，奉献给读者。作者身为一名电子工程师，不仅拥有丰富的理论与实践知识，而且在业余时间，还是一位喜欢鼓捣电子管放大器的爱好者。他深知广大爱好者的渴望与要求，明白哪些知识正是大家的所需。在他的笔下，本书不是各种电子管技术知识的胡乱粘贴与堆砌，而是一份结构严谨、条理清晰、齐全完备、易于学习的设计制作教程，个中内容均已经过作者的消化整理，因此，更易被读者吸收掌握。

从全书内容看，与其说作者是一位理论高深的学者，不如说，他更像是一名知识渊博、具有大量实干经验的指导老师——他还著有一本专门介绍电子管放大器实装技术的《Building Valve Amplifiers》(电子管放大器的制作)。对待理论知识，他略去了冗长复杂的数学推导，只使用浅显的语言进行解释，直截了当地把原因和结论告诉读者。而对待设计制作的实务知识，却又不嫌繁琐地进行详细介绍。为加深读者的理解，作者还给出大量的应用实例，引导读者进行抽丝剥茧式的设计实践，就像遇到设计任务时所做的那样，一步一步地进行解答。阅读此部分内容时，让人有身临设计其境的感觉，好像有一位经验老道的长者站在旁边，正耐心地向你进行手把手的技术指导。

从译者的角度看，本书确实是集电子管放大器设计制作技术之大成的一本好书，尤其见长于设计知识的全面性和易学性。只要掌握此书的内容，就可以顺利进行电子管放大器电路的设计。在这一点上，与 Douglas Self 所著、由译者翻译的《音频功率放大器设计手册》有较大的区别。《音频功率放大器设计手册》是一本关于晶体管功放设计的专著，见长于对功放专有电路的深入分析和研究，但对晶体管电路基础知识讲解较少，需要读者通过其他渠道来获取。

本书篇幅较长，共分为 7 章，并带 1 个附录。

第 1 章介绍有关电路分析的基本知识。从数学符号讲起，直至运算放大器的应用。尽管书中有言，有经验的读者可跳过此章，但建议读者有空细看一下。因为作者选材角度独特，举例生动，有助于读者温故知新、开阔视野，进一步加深对电路知识的理解。

第 2 章介绍电子管应用的基本单元电路。其中，既有传统的共阴极放大、级联放大和阴极跟随器电路，又有较为“现代”的 White 式阴极跟随器、 μ 式跟随器、 β 式跟随器、SRPP 放大、差分对以及恒流源电路，使读者能跟上时代的步伐，掌握电子管新老技术知识的综合运用。这一章中，还对电子管工作点的设计选取

方法，作了较为详细的介绍。

第3章介绍失真测量知识、噪声来源及低失真电路设计技术。除了介绍失真测量原理和控制噪声产生的方法外，作者还针对低失真电路设计的需求，从交直流工作点的选取、电路参数的控制、各种偏置方法的比较、电子管的选择等多个方面，深入进行了研究。为做好电子管的选择，作者一共对多达529个（以管内所含三极管的数量计）的电子管样本，进行失真率的实测，为我们提供了直观的第一手数据资料。

第4章介绍元器件知识。前半部分讲述电阻、电容、电感、变压器的制造技术及使用要点，后半部分介绍电子管的内部构造及相关知识。这一章的篇幅虽有限，但写作目标明确，注重满足实际应用层面的需求。译者留意到，其介绍的生产制造技术细节，比一些专门介绍电子元器件的技术手册还详细，有用信息量更大。

第5章介绍电源电路的设计。前半部分，重点介绍整流、滤波电路的设计方法，以及晶体管、集成块、电子管稳压电路。后半部分，则以前置放大器整机的实际需求为例，详细讲解了2个完整电源电路的设计全过程，引导读者提高电源设计方面分析问题和解决问题的能力。

第6章介绍功放电路的设计。这一章由3个部分构成。第一部分，研究功放的各级电路以及防止出现振荡的措施。第二部分，分析解说历史上经典的3台功放线路，包括威廉逊放大器、Mullard 5-20放大器和Quad II放大器。第三部分，针对功放的3种主要类型，相应给出整机设计的实例。所举的功放例子均为作者的原创设计，分别是“Scrapbox Challenge”6.8W单端功放、“Bulwer-Lytton”可增减输出管2~16W推挽功放和“Crystal Palace”40W大功率推挽功放。

第7章介绍前置放大器的设计。其编写安排类似于介绍电源电路的第5章。前半部分，主要讲述前置放大器各个组成电路的设计概要，包括输入选择、音量控制、平衡控制、音调控制、线路放大级、唱头放大电路及其RIAA均衡网络。后半部分，重点以作者原创的3台前置放大器为例，作详细的设计讲解。这3台前置放大器分别是“基本型”RIAA前置放大器、EC8010输入级与 μ 式跟随器构成的RIAA前置放大器和全平衡胆石混合式RIAA前置放大器。

附录提供与电子管放大器设计制作有关的信息和资料。包括电子管数据资料的获取途径、电子管型号命名规则、元件标准值、电阻色环代码、塑料电容代码、模拟唱盘的使用、各种唱片均衡特性要求以及购买元件的注意事项等。

原书初版于1995年，现在所译的是2012年的第4版。为尽量保持原书风貌，译者对于原书多处出现的原理上的错误，在进行更正的同时，还注明和保留了作者的原意。为帮助读者正确理解和运用本书知识，译者在翻译中适当加入了一些注释，其中对QBASIC小程序添加了较多的注释内容，因为这种计算机语言当前

已不大流行。此外，为了方便读者日后查阅本书内容，译者特整理出本书的实用电路目录和 QBASIC 小程序目录，放在本书末尾的附录 B 中。

由于译者水平有限，错误和疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

薛国雄

2012 年 8 月 20 日于广东新会

2015 年 4 月 12 日修订

前言

将近 40 年前，作者购买了他的第一台电子管放大器，一共花了 3 英镑，而这些钱是经过很长时间才积攒下来的。作者口袋里的钱增加后，有了新的想法，因而就开始动手自制电子管放大器。

关于电路设计，虽然有许多知识来源，但音频应用所涉及的电子书籍，实际上是很缺乏的。至于那些高保真（Hi-Fi）书籍，则几乎都只限于在理论表层上作浅显的介绍。因此，作者花了大量时间到图书馆查阅资料，收集音频设计所需的知识。这本书就是作者历年艰苦努力的成果，定位于电子管放大器的现代设计，尽量写得简明易懂，避免出现深奥的理论与复杂的数学运算。尤其重要的是，其写作对象是有实际需要的读者，他们的装备往往只有一块廉价的科学型计算器、一把电钻和一把（温控）烙铁。

作者起初攻读声学工程学士学位，学习一年后中途退学，加入 BBC（英国广播公司）工程部，任职为一名技术助理。在那里，他受到了优异的课程教育，成长为一名高级工程师，后因该公司裁减冗员而离职。近些年来，他在大学任教，开设了英国第一门媒体技术（荣誉）学士学位课程。看着所教的学生通过课堂学习——而不是依靠函授与考试，一个个地顺利毕业，桃李满园的感觉让他得到了极大的满足。

在此之前，作者被吸收为国际声频工程学会（Audio Engineering Society，简称 AES）的会员，并已设计制作出数量众多的电子管前置放大器、电子管功率放大器，以及扬声器、唱臂和一对静电耳机。

从本书英文第一版的出版之日算起，至今已有 18 年。对属于过时的电子管应用技术而言，也有了很大改变。

计算机技术在家庭应用中的广泛普及使得测量测试的成本大大降低。既可以运用计算机（微处理器）的强大处理能力来进行测量测试，也可以借助计算机技术来实现目的。像 FFT（Fast Fourier Transform，快速傅里叶变换）这种能够实现频谱分析的技术，现已成为人们的常用工具，从专业的工程师到聪明的业余爱好者，都懂得去加以运用。而 20 年之前，仅有世界级的大公司才具备这样的测量测试条件。本书新版的重要修订，就是得益于频谱分析测量测试技术的引入，其应用程度只受限于作者的时间。计算机辅助设计软件现在也有免费提供——比

如由 Duncan Munro 编制的 PSUD2 线性电源设计软件就是一个范例。

现在已进入互联网时代，网上交易的发展造就了电子管的全球化市场。以前那些较难寻觅的电子管，如使用八脚锁式底座（Loctal）的欧洲“SQ”（Special Quality，特选品质）电子管，以及前苏联的末代电子管等，只要爱好者有足够的耐心，都可以通过互联网的世界性渠道购买得到。也因此，我们在作出选择时，不用再受囿于传统的音频用管范围。还有更好的情况出现：现在有许多 20 世纪 50 年代的二手技术书籍在互联网上销售，而这些书籍是你原来认为不可能再找寻得到的。

数字化电子技术的大量应用，令电子管的供应状况得到了大大改善，但具有反讽意味的是，也正是它扼杀了模拟元器件。由于原材料缺乏供应，电容受到的影响最为严重。聚碳酸酯电容已于 2001 年停产，银云母电容和聚苯乙烯电容均已成为濒危品种。控制部件到处被数字编码装置所取代，机械开关的应用范围因此受到了很大限制，电位器也面临着同样的命运。令人觉得特别难受的是，作者发现，制造半导体器件的主要厂家正停止齐纳稳压管的生产，这导致其应用大为缩减。

或许是因为存在这样的问题，电子管和模拟唱片现已成为特定的设计理念标志，出现在电视广告中，与当今的数字化形成反衬。由于网上音乐节目提供商大肆宣扬其方便性，有意将音质放在次要位置，迫使 CD 唱机制造厂家在宣传中，一再强调其产品音质上所具有的优势（尽管没有人提及，但 CD 唱机实际上也具有较好的方便性，因为它不像电脑那样，在操作系统崩溃后就会丢失所有自己存储的音乐资料）。当今唯一可靠的高品质声音来源，其实就是 CD 唱片和模拟唱片——如果返回至 20 世纪 80 年初，则是 FM 广播和模拟唱片。

MP3 时代成长起来的读者请注意：熠熠闪光的 120mm 直径 CD 唱片，其播放音乐（比如贝多芬第九交响曲）的音质，要远胜于你下载的压缩文件。试几次——你可能就会喜欢上它。

献词

作者将此书献给英国广播公司已日渐减少的工程师同事们，特别是英国广播公司南安普敦（Southampton）分部的同事们，以及伍德·诺顿（Wood Norton）分部的同事们。在那里，作者有许多美好的回忆。

致谢

特别要感谢 Euan MacKenzie。身处远地的他临时接到通知后，就肩负起繁重的校对工作，并且又快又好地完成了任务。

热离子真空管在电子管历史当中占据的时间并不长，因此，作者十分感激 Stuart Yaniger 最近几年在这方面所作的无私指导和教诲。

参加每年举办一次的欧洲真空三极管节（European Triode Festival），看到很多设计制作极为出色的展品，令作者十分享受，也因此认识了不少有相同爱好的朋友，作者不再感到孤单。谢谢第一个邀请我的 Christian，更感谢组织者能成功地举办这项活动，并使其保持良好的发展势头。

最后，还要感谢那些热心读者，花费时间和精力去查找书中错误，为作者提供了十分有用的信息反馈。

目录

第 1 章 电路分析基础	1
1.1 数学符号	1
1.2 电子及相关规定	2
1.2.1 电池与灯泡	4
1.2.2 欧姆定律	4
1.2.3 功率	5
1.2.4 基尔霍夫定律	6
1.2.5 电阻的串联与并联	7
1.3 分压器	10
1.3.1 等效电路	11
1.3.2 戴维南等效电路	11
1.3.3 诺顿等效电路	14
1.3.4 单位与倍乘系数	15
1.3.5 分贝	16
1.4 交流	17
1.4.1 正弦波	17
1.4.2 变压器	19
1.4.3 电容、电感与电抗	21
1.4.4 滤波器	23
1.4.5 时间常数	25
1.4.6 谐振	26
1.4.7 RMS 与功率	27
1.4.8 方波	28
1.4.9 方波波形与瞬变	29
1.4.10 随机噪声	32
1.5 有源器件	34
电子流动与通常所称的电流流动	34
1.6 硅二极管	34

电压基准	35
1.7 双极型晶体管	37
1.7.1 共发射极放大电路	39
1.7.2 输入输出电阻	41
1.7.3 射极跟随器	42
1.7.4 双管的达林顿接法	43
1.8 关于双极型晶体管的结构	43
1.9 反馈	44
1.9.1 反馈公式	44
1.9.2 反馈公式应用的实际限制	45
1.9.3 反馈术语及输入输出阻抗	46
1.10 运算放大器	47
1.10.1 反相器及虚地加法器	47
1.10.2 同相放大器及电压跟随器	49
1.10.3 积分器	50
1.10.4 电荷放大器	50
1.10.5 直流失调	52
参考文献	52
推荐阅读	52
第2章 基本单元电路	54
2.1 三极管的共阴极放大电路	54
2.1.1 选择工作点所受的限制	57
2.1.2 工作点及相关状况	59
2.1.3 动态参数(交流参数)	61
2.1.4 阴极偏置	64
2.1.5 阴极偏置电阻没有被旁路时对交流状况的影响	65
2.1.6 阴极退耦电容	66
2.1.7 栅漏电阻值的选取	68
2.1.8 输出耦合电容值的选取	70
2.1.9 密勒电容	71
2.1.10 减小前一级电路的输出电阻	72
2.1.11 导栅(束射)三极管	72
2.2 四极管	74
2.3 束射四极管与五极管	75
2.3.1 五极管特性曲线的背后含义	76

2.3.2 小信号五极管 EF86 的运用	77
2.4 级联接法	80
2.5 电荷放大器	88
2.6 阴极跟随器	89
2.7 源、吸收源及相关术语	93
2.8 共阴极放大电路用作恒流源	95
五极管用作恒流源	96
2.9 带有源负载的阴极跟随器	98
2.10 White 式阴极跟随器	99
2.10.1 自分相 White 式阴极跟随器的电路分析	99
2.10.2 White 式阴极跟随器用作输出级	102
2.11 μ 式跟随器	103
2.11.1 交流负载线的重要应用	106
2.11.2 μ 式跟随器上臂管子的选择	107
2.11.3 μ 式跟随器的不足之处	107
2.12 SRPP (并联调整推挽) 放大电路	109
2.13 β 式跟随器	112
2.14 阴极耦合放大器	114
2.15 差分对	116
2.15.1 差分对电路的增益	118
2.15.2 差分对电路的输出电阻	118
2.15.3 差分对的 AC 平衡及阴极共接处的信号呈现	119
2.15.4 共模抑制比 (CMRR)	119
2.15.5 电源抑制比 (PSRR)	121
2.16 晶体管恒流源	122
2.16.1 晶体管恒流源用作电子管的有源负载	125
2.16.2 通过选择晶体管来优化恒流源的 r_{out}	129
2.16.3 场效应管恒流源	131
2.16.4 采用耗尽型场效应管 DN2540N5 的恒流源	132
参考文献	135
推荐阅读	136
第 3 章 动态范围: 失真与噪声	139
3.1 失真	139
3.1.1 失真的涵义	139
3.1.2 非线性失真的测量	140

3.1.3	失真测量及其正确运用	141
3.1.4	测量的选择	142
3.1.5	谐波失真测量的进化	143
3.1.6	谐波的权重	143
3.1.7	累加与变换	145
3.1.8	其他变换方式	145
3.1.9	噪声与 THD+N	146
3.1.10	频谱分析仪	146
3.2	数字化方面的有关概念	147
3.2.1	取样	147
3.2.2	量程变换	148
3.2.3	量化	149
3.2.4	数字的进制系统	149
3.2.5	精度	150
3.3	快速傅里叶变换 (FFT)	150
3.3.1	周期性条件	150
3.3.2	加窗	151
3.3.3	作者是如何测量失真的	152
3.4	以低失真为目标的设计方法	152
3.5	信号幅度	153
	级联接法与失真	155
3.6	栅极电流	156
3.6.1	处于接触电势时栅流带来的失真	156
3.6.2	栅流和音量控制引致的失真	158
3.6.3	带有栅流的工作方式 (A2 类)	158
3.7	通过控制电路参数来降低失真	160
3.8	通过相互抵消来降低失真	162
3.8.1	差分对的失真抵消	164
3.8.2	推挽工作的失真抵消	166
3.8.3	西电公司的谐波均衡电路	166
3.8.4	谐波均衡电路产生的副作用	168
3.9	直流偏置	170
3.9.1	电阻式阴极偏置	170
3.9.2	栅极偏置 ($R_k=0$)	171
3.9.3	充电电池式阴极偏置 ($r_k=0$)	172

3.9.4	二极管式阴极偏置($r_k \approx 0$)	173
3.9.5	恒流源式阴极偏置	176
3.10	电子管的选择	177
3.10.1	哪些电子管的设计确实是以低失真为目标的	177
3.10.2	外壳喷碳	179
3.10.3	电子偏转	179
3.10.4	通过测试寻找低失真电子管	180
3.10.5	测试电路	180
3.10.6	测试电平及频率	181
3.10.7	测试结果	182
3.10.8	测试结果评述	183
3.10.9	约定性称呼	185
3.10.10	其他中 μ 值管	185
3.10.11	加权失真结果	186
3.10.12	测试结果综述	187
3.11	级间耦合	187
3.11.1	响应中断	188
3.11.2	变压器耦合	189
3.11.3	低频提升网络	190
3.11.4	电平转移与 DC 耦合	191
3.11.5	用于驱动动圈耳机的 DC 耦合 A 类放大器	193
3.11.6	诺顿电平转移器的使用	196
3.12	失真与负反馈	198
3.13	碳质电阻与失真	202
3.14	噪声	202
3.15	来自电阻的噪声	202
	来自电阻性音量控制器的噪声	203
3.16	来自放大器件的噪声	204
3.16.1	栅极电流噪声与泊松分布	205
3.16.2	静电计与栅极电流	206
3.17	DC 电压基准的噪声	209
3.17.1	作者如何测量 DC 电压基准的噪声	209
3.17.2	充气稳压管噪声的测量	211
3.17.3	充气稳压管噪声与工作电流的关系	211
3.17.4	半导体电压基准噪声的测量与叠加使用	212