

《高保真音响》系列丛书



高性能音频功率放大器

High Performance
Audio Power Amplifiers

[英] Ben Duncan 著
钟旋 薛国雄 译



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

《高保真音响》系列丛书

高性能音频功率放大器

[英] Ben Duncan 著
钟旋 薛国雄 译

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

高性能音频功率放大器 / (英) 邓肯 (Duncan, B.)
著; 钟旋, 薛国雄译. — 北京: 人民邮电出版社,
2010. 4

(高保真音响系列丛书)
ISBN 978-7-115-22295-4

I. ①高… II. ①邓… ②钟… ③薛… III. ①音频放
大器—基本知识 IV. ①TN722.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第019354号

版权声明

High Performance Audio Power Amplifiers Edition by Ben Duncan, ISBN 978-0-7506-2629-3
Copyright © 1996 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-243-3

Copyright © 2009 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd, 3 Killiney Road, #08-01 Winsland House I,
Singapore. All rights reserved. First Published 2009.

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 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(香港特别
行政区和台湾地区除外)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。

《高保真音响》系列丛书

高性能音频功率放大器

-
- ◆ 著 [英] Ben Duncan
 - 译 钟 旋 薛国雄
 - 责任编辑 邓 晨
 - ◆ 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>
 - 北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
 - 印张: 29.5
 - 字数: 559千字 2010年4月第1版
 - 印数: 1—4 000册 2010年4月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2009-0461 号

ISBN 978-7-115-22295-4

定价: 80.00 元

读者服务热线: (010) 67132837 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

内容提要

本书从模拟电路、声学、热学和音乐知识入手，介绍高保真功率放大器的设计理念、专业功率放大器的流行设计及专业功率放大器在录音棚里的运用与维修。全书内容共分 10 章，前 6 章从理论上分析了高保真功率放大器的特点，后 4 章从实际出发详细介绍了高保真功率放大器各项技术指标的测试方法，以及对于家用功放和专业功放应如何选型、配置、安装和维护。此书是音频功率放大器设计的综合指南的重要参考书，对在音频领域的从业人员和音频 DIY 爱好者都有所帮助。

序言

本书作者本·邓肯（Ben Duncan）多年来满怀热情为音频事业持续付出努力，并获得卓著成效。如果没有像他这样一些善于独立思考的人，社会的进步就不免因偏狭、单调和固执守旧的思想而放缓。

我与本·邓肯初识的时候，他的关于电路元件对音质影响的观点就吸引着我。根据他的建议，我们应当将不同介质类型的电容安装到电路上，然后进行实际试听。Turbosound 在无源式高通滤波网络设计中采纳了他的理论，完全使用价高的聚丙烯电容。这不仅说明本·邓肯对于音频领域的深入理解，也说明了他对整个业界的影响。他同时是个思维全面的思想者；我想，这世界上还没有什么未曾被他思考过，并考虑对音质的影响。那么，他是否在他有所成就的方面守口如瓶呢？一点也不。十多年来，他长期义务撰写大量稿件；只要读者曾经连续看过音频类刊物，就能明白这一点。

晶体管音频功率放大器刚刚出现的那段历史是值得纪念的。1971 年，我在为 Pink Fairies（也就是 Glastonbury 的前身）设计功放。在 HH TPA100 上尝试失败了 6 次以后，不知道为什么我就没有备件可用了。正当我无助地坐在旁边思考着该如何处理，正准备拿起烙铁时，机器又再一次发生故障——我都想换个职业做了。举这个悲惨的故事为例，是想说明早期音频功放的电压摆幅是非常有限的，可能会在演出上台之前那会儿突然坏掉。从那以后，音频设备进步多了。如今的音响师能够坐拥大量工作稳定、音质优异的音频设备，设备工作的电压如此之高，都能用于电焊了。

这部作品将与音频功率放大器有关的各个方面知识联系起来了，其中涉及的领域繁杂，既包括室内供电设计，也包括音质评价等。通过对本书的阅读，就算是普通人也知道在购买功放的时候有哪些注意事项，并能粗通功放设计了。书中对功放涉及的所有知识领域都做了介绍，应对人类的知识宝库有所贡献。

托尼·安德鲁斯（Tony Andrews）

1996 年 3 月于英国萨里

献给 Amy 和 Jake,

也献给很多优秀的音乐家，他们的作品激励我努力工作

前言

在此之前，从未有哪本书像本书一样，汇集如此之多的电子、音频、工程、音乐和实践操作方面的知识。事实上，无论在哪个层面，专门关于音频功率放大器的书籍本来就不多。

从电子学的角度讲，功率放大器用于驱动扬声器发声，是音频系统中较难设计的一个部分。设计的难度如此之高，以致在其诞生 75 年后，相关的设计方案仍然千姿百态（相比之下，基本是同时产生的洗衣机在设计方面已经趋同）。虽然拜金主义已经盛行了百年之久，但是高雅质朴的音乐仍然与人们心中超越逻辑的感性相通。在音频功放的领域，虽然有大量人才埋头苦干，但我们对这方面的了解仍是一知半解。这个领域的更高层面涉及如此之多的数学，以致许多技术人员弄不清概念，甚至完全不理解问题的总体结构。

在 20 世纪音频技术迅速发展的浪潮中，音频功率放大器是种不太起眼但又很关键的设备。想想看，如果没有音频功放，会是怎样的境况：没有设备驱动扬声器，也就没有了高保真音响、收音机和电视。没有扩声器材，我们没法举办比乡村宴会更大的节日庆典，活动场馆的规模也大不过 2 000 人的圆形剧场；电影院和演播厅无法工作，电声乐器也无法使用。音频的录制、处理和放大技术还催生了音乐广播和有声电影，使其更加生动感人，同时也降低了成本，使之广为流传。于是，20 世纪成为有史以来最热闹的时代。但是，如果音频功放未被发明，这些都将不复存在，人们由声音获得的情感和从音乐中领略的精神决不会像今天这般浓烈。

书名中“高性能”的含义是，本书不讨论低性能产品——也就是经销商为了好卖，有意在制作上打折扣，降低音质、功能和可靠性的产品——尤其是所谓“消费级”或“M.I”器材。在高端与低端器材之间，这是更自然的一条判断标准，比“专业-家用”的分类来得清楚明确。所有真正热爱音乐的人对音质的要求差不多是同样的。但是，要针对他们每家的具体室内环境，做大量工作，才能实现同样出色的效果。“高性能”并不意味着高价格或多宣传。书中涉及的放大器有价值 135 英镑的，也有 13 500 英镑的（1996 年币值），放大功率有 25W 的和 2 500W 的，可以被运用在家庭、演播室、运动场或露天场所——无论如何，只要其设计的初衷是忠实重放音乐及其细节的，即被本书视为“高性能”功放。

统揽全书，读者将会发现，本书的一些章节总体介绍了功放领域，如胆机以及“零反馈”放大器等只需作简单说明的方面；另外的部分则集中讲解现代有整体负反馈的晶体管功率放大器，并给出了相当多的细节。这种详略相间的结构属有意为之——作者删减了关于生僻类别的介绍以控制篇幅，对非主流设计有兴趣的读者可以查看很多近来出版的书籍。

读者将会发现，本书详细阐述了音频功放的诸多细节，而这正是往往为其他同类书籍所忽视的。

本·邓肯 (Ben Duncan)

1996 年 1 月于英国牛轭湖

致谢

作者感谢下列设计师、理论家、教师、数学家、工艺师、声学工程师、音乐家、朋友及同事。其中很多人堪称音频界的大师。感谢他们为本书所做的评阅和校对工作（校对者用“*”标出）；另一方面，他们中的任何人都不应为本书中的错误而受到指责，作者愿意负全部责任。“E”表示的是协助绘图的人。

英国

* Andy Salmon, MS&L.
Bill Bartlett.
Bill Huston, Aanvii Audio.
* Bruce Hofer, Audio Precision.
E Charlie Soppelsa, Rauch Precision.
Chris Hales, C-Audio.
* Chris Marshman, YEC.
E Danny Cooklin, Turbosound.
David Dykes.
* Dave Newson.
* David Cole, Turbosound.
David Heaton, Audio Synthesis.
E David Neale, BSS Audio.
Prof. Malcolm Omar Hawksford, University
of Essex, Dept. of Electronics.
* Duncan Werner, Music technology
Course leader, & colleagues,
University of Derby, Dept. of
Electronics.
Eddie Cooper, Audio Precision.
* Gary Ashton, Fuzion.
Graham Lust.

Harry Day, Reddingwood Electronics.
Heather Lane, AES.
E Ian McCarthy, MC 2 Audio.
Prof Jack Dinsdale
E Jerry Mead, Mead & Co.
John Hurd.
* John Newsham, Funktion One.
* Lawrence Dickie.
Dr. Keith Holland, ISVR.
Keith Persin, Profusion.
Ken Dibble, Ken Dibble Associates.
* Matt Dobson, Coastal Acoustics.
* Mark Dodd, Celestion.
* Martin Coiloms, Colioms
Electroacoustics.
Martin Rushent.
Michael Gerzon.
* Neil Grant, Harris-Grant Associates.
Norma Lewis, senior assistant, BDR.
Norman Palmer, De Aston.
Paul Freer, Lynden Audio.
Paul Hoiden, ATMC.
Paul Jarvis.
Paul McCailum, Wembley Loudspeakers.

Paul Reaney.
 Peter Baxandali.
 Peter Brotzman, Britannia Row Prods.
 Phil Newell.
 Phil Rimmer.
 * Richard Vivian, Turbosound.
 * Richard Dudley, B&W Loudspeakers.
 * Russ Andrews, RATA.
 Stan Gould, BSS Audio.
 Stephen Woolley, Fender Electronics.
 ⚡ Steve Harris, Hi-Fi News.
 Steve Smith, Sound Department.
 * Terry Clarke, MC 2 Audio.
 * Tim Isaac, ATC.
 * Toby Hunt, Funktion One Research.
 * Tony Andrews, Funktion One.
 Vince Hawtin, fanatic.

美国

Adam Savitt-Maitland.

Bill Steele, Spectrum Software.
 Bob Carver.
 ⚡ Brian Gary Wachner, BGW.
 Dan Parks, NSC.
 Ed Dell, Audio Amateur Pubis.
 Harvey Rosenberg, NYAL.
 Joe Buxton, Analog Devices.
 John Atkinson, Stereophile.
 John Szymanski.
 ⚡ Patrick Quilter, QSC.
 Roger Cox, Fender.
 Skip Taylor & Larry Hand. Peavey.
 ⚡ Tim Chapman, Crest Audio.
 * Walt Jung, Analog Devices.

其他地区

Colin Park, ARX Systems, Australia.
 Conrad Eriksen, Norway.
 Tommy Jenving, Sweden.

对下列提供了图片和产品信息组织，也表示感谢：

A.Foster & Sons, British Standards Institution, Canford Audio, Citronic, Crown Inc., Electronics World, Hi-Fi News & Record Review, Lincolnshire County. Library Service, MAJ Electronics, National Physical Laboratory, Peter Gilyard-Beer, Pro Mon Co, SB, SoundTech, Stereophile magazine, Studio Sound & Broadcast Engineering, Spectrum Software.

表示方法

为了将音频功率放大器的各个方面说得透彻明白，就要用到各个领域中的多个专有名词。本书英文版很多名词用黑体表示，为了方便读者，在很多时候用括号对名词含义作了说明。

在每章末尾附有参考文献，是按照文中出现的顺序排列的。“扩展阅读”部分列出了没有专门引用，但是很有帮助的文獻。

对在世界各地含义不同的那些词语，一般都专门做了说明。本书中的 dB 表

示的都是相对于最大输出的值。如果是电压，就是-dB (vr)，或缩写为 dBr。如果描述的是功率，就用 dBw，不过这样的时间很少。

“高性能音频功率放大器”写起来太长，在很多时候都简写为“功放”或“音频功放”了。

在书中进行的很多讨论中，都假定读者了解关于计算机的知识。在工程界，计算机的应用是越来越广泛了。

参考文献和扩展阅读

没有标出年月号的一般是书籍而非杂志，如果有 ISBN 号码，也一并标出。一期杂志对应两个月的时候，只写出前面那个月份。

杂志不定期发行的时候，是按照季度算期数的。Q2 就代表第 2 期。

出版物

要获得以下各种与音频相关的出版物或其影印本，可以跟出版商联系：

AN	Application Note
EPD	Electronic Product Design (UK)
EPR*	Electronic Power Review (UK)
ETI	Electronics Today International (UK, Austr.)
EW, EW+WW	Electronics World, formerly <i>Electronics & Wireless World</i> , formerly <i>Wireless World</i> , formerly <i>The Marconigraph</i> , (UK).
HFN, HFN/RR	Hi-Fi News & Record Review (UK).
H&SR*	Home & Studio Recording (UK).
ISBN	International Standard Book No.
JAES	Journal of the Audio Engineering Society.
LCCCN	Library of Congress Cataloguing card No. (USA)
L&SI	Lighting & Sound International (UK).
Q	Annual Quarter (1-4, or more).
S&VC	Sound & Video Contractor (USA).
TAA	The Audio Amateur (USA).
WW	Wireless World (UK). See EW, above.

* *Journals believed to be no longer published*

目录

第1章 简介和基本知识	1
1.1 音频功率放大器的用途	1
1.2 音频功率放大器的主要问题	1
1.3 音频的概念	2
1.4 音频的特点	2
1.5 声重放系统对音质的影响	3
1.6 声重放的目的	3
1.7 人的听觉	4
1.8 “客观性”的局限, 主观测试的基础	5
1.9 为什么重放音频要用到功率放大器?	6
1.10 音乐基础	7
1.11 对声品质的主观描述	9
1.11.1 音调	9
1.11.2 泛泛描述音调的说法	10
1.11.3 总体描述音质的名词和形容词	10
1.11.4 动态特性	11
1.11.5 空间感	12
1.11.6 造成困扰的声响	13
1.12 音乐节目的性质与范畴	13
1.13 音乐的低音和次声成分	14
1.14 音乐的高频和超声内容	16
参考文献	17
扩展阅读	18
第2章 音频功率放大器的各种指标	19
2.1 功率放大器的类型	19
2.2 扬声器	21
2.2.1 关于扬声器单体的基础知识	21
2.2.2 扬声器的灵敏度和效率	25

2.2.3 扬声器箱体的类型和效率	26
2.2.4 扬声器配置	27
2.3 电子电声器件之间的相互关系	32
2.3.1 从音频功放端口看扬声器	32
2.3.2 扬声器对功放的要求	35
2.3.3 从音频功放的角度看无源分频网络	38
2.4 功率放大器的电压源性能	40
2.4.1 扬声器的 EIA 与 AES 测量标准	40
2.4.2 输出功率的要求	41
2.4.3 扬声器失效的情况	43
2.4.4 更高的功率——专业声重放的追求	44
2.4.5 有源系统的功率要求	46
2.5 电流输出上的要求	46
参考文献	48
扩展阅读	49
第 3 章 输入接口的界面和处理	51
3.1 输入	51
3.1.1 功率放大器输入灵敏度和增益要求	51
3.1.2 输入阻抗 (Z_{in})	54
3.2 射频干扰屏蔽	60
3.3 平衡输入	61
3.3.1 平衡设计的要求	61
3.3.2 抗共模干扰 (CMR)	62
3.4 次声保护和高通滤波	64
3.5 保护功率放大器	70
3.6 什么是功率放大器的处理功能?	72
3.6.1 增益控制 (面板上的衰减器)	72
3.6.2 遥控增益控制 (机器控制)	76
3.6.3 遥控增益控制的影响因素	79
3.6.4 压缩和限幅	80
3.6.5 过载问题	80
3.6.6 防止过载的途径	80
3.6.7 软削峰方法 (Soft-Clip)	81
3.7 计算机控制	82
参考文献	83

扩展阅读	84
第4章 功率放大器的电路拓扑结构、类别和工作模式	85
4.1 简介	85
4.2 锗和早期的半导体结	89
4.2.1 类似电子管的电路设计	89
4.2.2 变压器耦合的推挽电路	90
4.2.3 电路的子拓扑结构——达林顿 (darlington)	92
4.2.4 无输出变压器的推挽电路 (OTL)	93
4.2.5 电路的子拓扑结构——二极管偏置	94
4.2.6 互补式推挽 OTL 电路	94
4.2.7 准互补电路: 没有竞争力的电路	96
4.2.8 电路的子拓扑结构——并联设计	97
4.3 硅晶体管	98
4.3.1 Lin 电路拓扑结构	98
4.3.2 电路的子拓扑结构——长尾对差分放大器 (LTP)	101
4.3.3 电路的子拓扑结构—— V_{be} 倍增器 ($V_{be}X$)	102
4.3.4 电路的子拓扑结构——双极型晶体管的三重结构电路 (BJT 管的复合)	103
4.3.5 电路的子拓扑结构——双电源 ($\pm V_s$)	106
4.3.6 Lin 电路的后续设计	106
4.4 关于对称性的最后讨论	109
4.4.1 电路拓扑的新发展	110
4.4.2 集成电路功率放大器	112
4.4.3 运算放大器电路拓扑	114
4.4.4 功率管的串接	117
4.5 桥接电路介绍	119
4.6 归类	124
4.6.1 A 类	125
4.6.2 A 类功放的其他形式	130
4.6.3 A 类功放滑动偏置和 π 模式	130
4.6.4 “超级 A 类”功放	132
4.6.5 动态偏置和 stasis 电流自举电路	133
4.6.6 持续高偏置 (sustained plateau biasing)	133
4.6.7 B 类和 A-B 类功率放大器	134
4.6.8 A-B 类功放的发展沿革	138

4.7 更高类别功放的介绍	143
4.7.1 G类功放	145
4.7.2 H类放大器	149
4.7.3 G类和H类功放的对比	150
4.8 模拟功放之后	153
4.8.1 D类放大器	154
4.8.2 “数字式”放大器	159
4.9 各类功放总结	161
4.10 控制模式的介绍	163
4.10.1 负反馈模式	163
4.10.2 其他的误差纠正模式	169
4.11 结论	172
参考文献	172
扩展阅读	176
第5章 功率级的特点	179
5.1 总述	179
5.1.1 在高电压下工作	179
5.1.2 在大电流下工作	180
5.2 功放中的功率器件	180
5.2.1 双极型晶体管 (BJT)	181
5.2.2 MOSFET (增强型功率 FET)	187
5.2.3 绝缘栅双极型功率管 (IGBT)	194
5.3 识别大信号	195
5.4 射频稳定性	202
5.4.1 功率级, 重要的电路排布要求	202
5.4.2 重要的节点	203
5.5 输出电压和电流的限制	204
5.5.1 电压—电流输出能力	209
5.5.2 电压—电流输出限制 (过载保护)	211
5.5.3 描述电压—电流能力	222
5.5.4 通过保险丝保护音频功放	223
5.6 限幅指示	226
5.6.1 跟内部有关的过驱动特性	227
5.6.2 输出稳定性和输出网络电路 (OPN)	228
5.6.3 射频保护	230

5.7 输出端的直流偏移	230
5.8 输出接口	233
5.9 输出级和散热要求	235
5.9.1 热交换	237
5.9.2 热保护	239
5.10 逻辑系统	241
5.11 输出变压器	241
参考文献	242
扩展阅读	243
第6章 供电	245
6.1 市电供电 (50/60Hz)	245
6.1.1 50/60Hz 电磁干扰因素	249
6.1.2 浪涌的处理	251
6.1.3 50/60Hz 自适应式电源	252
6.1.4 50/60Hz “非主动式” 稳压电源	253
6.2 各声道的电源分配	254
6.2.1 放大器桥式电路的优点	256
6.2.2 三相交流供电	256
6.3 脉冲宽度调制电源 (PWM PSU)	257
6.3.1 高频电源 (高频开关电源 SMPS)	258
6.3.2 谐振式电源	261
6.3.3 适应性更强的供电单元	264
6.3.4 高频开关电源总结	265
6.4 供电单元的效率	266
6.5 电源保险丝	268
参考文献	271
扩展阅读	271
第7章 功放的指标及其测试方法	273
7.1 为何要用到指标	273
7.1.1 指标的类别	273
7.1.2 音频功放的标准	275
7.2 测试的理由	275
7.2.1 测试及其目标实现	276
7.2.2 实时测试信号	276
7.2.3 测试设备的革命	281

7.3 物理环境的要求	281
7.3.1 市电电压的测量和调整	282
7.3.2 功放的预处理	283
7.3.3 测试用负载	284
7.4 频率响应(带宽)	289
7.4.1 增益和平衡	291
7.4.2 输出阻抗(Z_o)	292
7.4.3 阻尼因数	294
7.4.4 相位响应	295
7.5 噪声的来源	297
7.5.1 噪声频谱	298
7.5.2 穿透和串扰(通道的隔离)	299
7.5.3 共模噪声抑制比(CMR)的测试	301
7.5.4 测试共模噪声抑制比(CMR)的方法	302
7.6 输入阻抗 Z_{in}	303
7.7 谐波失真简介	303
7.7.1 谐波的音乐意义	305
7.7.2 总谐波失真(THD和THD+N)	309
7.7.3 单个谐波的分析(IHA)	313
7.7.4 互调失真(IMD)	315
7.7.5 动态互调失真(DIM 30/100)	318
7.7.6 各式各样的互调失真测试	319
7.7.7 其他失真测试	319
7.8 输出功率(P_o)	320
7.8.1 电压输出能力(V_o , MOL)	322
7.8.2 动态输出性能	322
7.8.3 限幅的对称性	324
7.8.4 动态范围	324
7.9 动态测试	324
7.9.1 上升时间(小信号起始时间)	324
7.9.2 转换速率(压摆率、大信号情况)	325
7.9.3 峰值输出电流能力	329
参考文献	329
扩展阅读	331