

电声技术译丛 **无线电**

AAP Audio Amateur Press

# 扬声器系统 设计与制作进阶

「修订版」

## SPEAKER Building

201

[美] Ray Alden 著

钟旋 译

王以真 审



扬声器系统设计的综合教程  
含11个设计范例, 包括5.1家庭影院系统的制作  
理解扬声器原理的好帮手  
理论与实践结合的典范

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

电声技术译丛 

AAP Audio Amateur Press

# 扬声器系统 「修订版」 设计与制作进阶

[美] Ray Alden 著 钟旋 译 王以真 审

# SPEAKER Building 201

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目(CIP)数据

扬声器系统设计与制作进阶：修订版 / (美) 奥尔登 (Alden, R.) 著；钟旋译。— 2版。— 北京：人民邮电出版社，2014.9

(电声技术译丛)

ISBN 978-7-115-36398-5

I. ①扬… II. ①奥… ②钟… III. ①扬声器系统设计②扬声器系统—制作 IV. ①TN643

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第156064号

## 版权声明

Speaker Building 201 Edition by Ray Alden, ISBN 1-882580-45-1

Copyright © 2004 by Audio Amateur Incorporated, Peterborough NH 03458-0876 USA.

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form except by written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by Audio Amateur Incorporated and POSTS & TELECOM PRESS.

本书简体中文版由 Audio Amateur 公司授权人民邮电出版社出版发行。未经出版者书面许可，不得以任何形式复制或抄袭本书的任何部分。  
版权所有，侵权必究。



- 
- ◆ 著 [美] Ray Alden
  - 译 钟 旋
  - 审 王以真
  - 责任编辑 周 明
  - 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>  
北京艺辉印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本：800×1000 1/16  
印张：18  
字数：363千字 2014年9月第2版  
印数：3 001-6 000册 2014年9月北京第1次印刷
- 著作权合同登记号 图字：01-2010-3996号

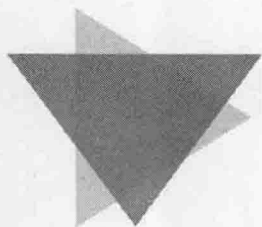
---

定价：69.00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

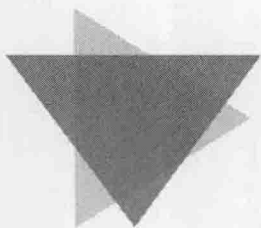


# 内 容 提 要

本书从电磁理论入手，循序渐进地对扬声器系统的构造及基本性能做了比较完整的分析。对其中的数学分析做了简单有效的处理，使这部分内容阅读起来既不困难，也能充分说明其物理概念。作者讲述了数学的重要性，同时给出了详细的算例和基于 PC 或网络的计算方法。

本书涵盖了扬声器单元的基本参数，封闭式扬声器箱体、敞开式扬声器箱体、超低音音箱、二分频器、三分频器的设计方法和应用实例，并介绍了相关的硬件、软件以及分频器优化和测试技术，最后还展示了 11 种扬声器系统以及构造技术。

本书适合音响 DIY 发烧友和从事专业音响设计的研发人员阅读。



# 丛 书 序

人民邮电出版社策划、组织出版一套《电声技术译丛》，第一批有 4 本译作，以后将推出更多译作。这是一件为中国电声界造福的好事。

中国已是一个电声大国，正在向电声强国迈进。我们坚持科学发展观，提升创新能力，这里要做很多工作，付出很多努力，其中最重要的一条，要赶上世界电声最高技术水平，就要将世界电声的理论与技术学到手，弄清各国电声发展的优势与软肋。高屋建瓴、兼收并蓄、海纳百川、融会贯通、吸取精华，结合中国实际，就会有所进步、有所突破、有所创新，最终成就中国电声强国伟业。

改革开放 30 多年以来，我们看到了世界各国最优秀的电声产品、制造设备、测试仪器 and 手段、标准与新理念……外国产品走进来，中国人走出去。我们打开了眼界、开拓了思路，使我们的硬实力产生了跳跃式的发展。但是我们的软实力还不够强，我们对电声理论研究的投入很少，成果就更少，我们除了解读外国人的发明、专利、创新外，自己独创的内容很少，对测试设备、设计软件我们仅是使用者，我们仍在国外优质电声产品面前徘徊，还有人对外国产品盲目崇拜……

追赶世界电声技术先进水平，扩充提高中国电声的软实力，这一光荣而艰巨的任务，落在中国电声技术人员及相关人员的肩上。

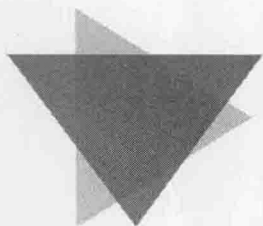
一名优秀的电声技术人员，应该是一个学习型的人才。对电声新技术、新发展要时刻关注，充满好奇心与求知欲，使自己的能力与时俱进，使自己技术水平的提高速度高于产品的发展速度。这需要决心、耐心与热心，要有责任感与使命感。

希望这套《电声技术译丛》能在提高中国电声软实力方面起到一定作用。国外电声方面出版的书籍本来不多，国内技术人员也不大容易见到，而翻译出版的书更是凤毛麟角。这套《电声技术译丛》也许在内容上还不能完全满足各方面要求，欢迎读者提出宝贵意见。

古人讲“多见者博、多闻者智”，这也是本丛书策划者、出版者、译者的希望。

王以真

2012 年 6 月



# 审 稿 序

《Speaker Building 201》一书在 2004 年 10 月由美国音响爱好者出版社（Audio Amateur Press）出版。该出版社位于美国东北部的新罕布什尔州，近年来出版了很多关于扬声器系统和音响技术方面的书籍。

本书作者 Ray Alden 是美国纽约 Stuyvesant 高等学院的数学教授，现已退休。Ray Alden 在学院讲授扬声器系统方面的课程，该课程为毕业生就业提供很多信息。据说该学院在当地相当有名气。

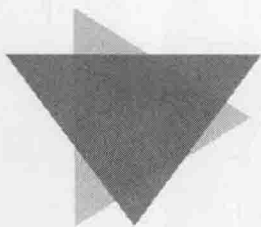
《Speaker Building 201》共有 12 章，154 页，售价 34.95 美元。这本书主要讲述扬声器系统的综合设计，并给出了 11 个扬声器系统设计的实例，其中包括 5.1 声道的家庭影院系统等。作者 Ray Alden 不仅严谨而且幽默，如第 4 章的标题是“打开潘多拉魔盒”，我们知道在希腊神话中，潘多拉是宙斯下令让火神赫淮斯托斯用黏土制造的世界上的第一个女人。众神亦加入，使她拥有更诱人的魅力。根据神话，潘多拉出于好奇打开这个“魔盒”，释放出人世间的的所有邪恶——贪婪、虚无、诽谤、嫉妒、痛苦等。当她再盖上盒子时，只剩下希望在里面。我想作者在这里有两层含义：一是打开音箱相当打开潘多拉盒子，盒子里还有希望，这个希望意味着科学与音乐。另一层含意是作者推崇互联网的神奇，将其比作现代的潘多拉之盒。作者介绍利用互联网可以方便地设计音箱。

这本书的中文译名令人颇费思索、踌躇不决。因为全书讲的不是扬声器，而是音箱，所以译成扬声器系统。

对于这本书，本书的编辑 T.Dell,Jr 认为，这是他 35 年编辑生涯中遇到的一本好书，可以与 Vance Dickason 的《Loudspeaker Design Cookbook》（该书已经由人民邮电出版社出版了中文版《扬声器系统设计手册》，该书已有 8 种语言版本，在全球销量超过 100 000 册）一样受到读者欢迎。

希望通过此书，帮助你理解扬声器系统的一些未解之谜，将理论与实际应用完美地结合起来。

王以真  
2012 年 6 月



# 译者序

扬声器领域的一个明显的特点就是企业和个人（发烧友）都较活跃。写扬声器的技术和学术书籍其实不少。早些时候有王以真老师译介的山本武夫《扬声器系统》（现已再版），最近则有中国科学院声学研究所沈壕老师翻译的 Eargle《扬声器与音箱设计手册》。但针对音响爱好者的水平和实际，讲解扬声器设计和制作的书籍则很少。人民邮电出版社在 1980 年出版过陈俊林、丁永生两位先生的《音箱设计》，但现已绝版。

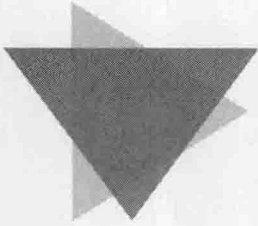
音响爱好者的实际需求是，在家庭工作环境相对简陋的条件下，通过一般难度的计算和制作，得到成本、音质相符合的音箱。学术书籍都从声波波动方程讲起，并不符合这种需求。而 Ray Alden 先生的这本《扬声器系统设计与制作进阶》（英文名 *Speaker Building 201*）则刚好满足爱好者的需要。作者在扬声器行业有 30 年从事设计和教学工作的经历。

这本书的好处是面向实际、面向读者。写书的目的，是教人怎么挑单元、怎么做箱子。从书的体例可以看出，它介绍扬声器系统是从基本结构和扬声器单元的规格书讲起，非常实际。随后讲解了参数的含义、闭箱到开口箱设计、分频器等。书的结尾讲解音箱木工工艺，以方便动手较少的读者。另一方面，在数学推导上是能省则省。好多人毕业后就把公式还给老师了。而本书中对指数、对数之类的初中数学知识也有回顾，真忘了的话，对照着看看也方便。另外，公式稍复杂的地方，就引用网络上的免费计算工具，这样读者就不用深究细节了。

本书主体部分介绍了各种主流音箱的制作方法。市售音箱价格动辄万元，而读者用这个数字的一小部分作为预算，就能制作出音质相仿的音箱。书后同时附有 11 个设计案例，让读者对音箱的组成和配合有直观的理解。美国民众数学水平太低，达不到中国初中数学水平。因此，本书中的某些式子推导得异常详细，略显啰唆，请读者见谅。

钟旋

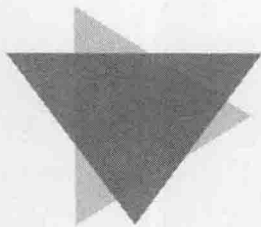
2012 年 6 月



# 献 词

献给父亲 Renato Giacomelli Alden, 母亲 Venetia Ricca Alden, 妻子 Diane Craig Alden,  
叔叔 Mario Giacomelli, 侄子 Luigi Giacomelli、Rosetta Giacomelli、Fernando Passani 和  
Raffaella Passani。





## 致 谢

感谢 Joseph D'Appolito 博士、Tom Roberts 和 Robert Bullock 博士帮助我测试、制图、做滤波器优化和写分频器公式。感谢 Leo Hamel 协助制作音箱。感谢 Kathleen Micklow、Diane Aldell 和 Jacqueline Lhoumeau 帮助编辑。感谢《Audio Amateur》杂志的 Ed Dell——正是在他的鼓励下，我才开始编写这本书。

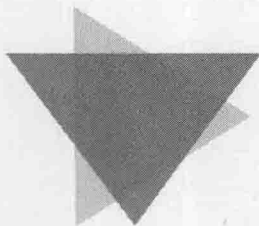
感谢 Parts Express 公司的 Darren Kuzma、Karl Keyes、Aaron Hineline 和 Jeffrey Stahl 的帮助。感谢 Madisound 公司的 Larry Hitch 和 Brian Kane。感谢 David Harris 针对 BassBox 和 X-Over 软件提供的帮助。感谢 Elliot Zalayet 的贡献。

感谢 Michael D'Alleve、Bruce and Audrey Molsky、Tim and Diane Arnold、Kathy Micklow 和 Mary Magnusson 做的听音和评价工作。感谢 Slovenian Jura Stok 提供了第 1 章的 6 幅音箱插图。感谢澳大利亚的 Isaac Narajos 公开了 FCT 在线计算工具，同时感谢世界其他角落编写同类免费软件的人们。感谢 Kurt Otto Friedrichs 博士一家人鼓励我学习研究生数学。感谢 Bill 和 Ray Chaleff 教给我木工活。

感谢猫咪 Casper 的陪伴。我写作第一本书的时候，它在我的口袋里睡觉。我写这本，也就是第二本书的时候，它催我偶尔起来喂食，让我不觉得特别疲劳。最后，感谢世界上还有音乐这么美好的东西，感谢我们人人都能制作重放音乐的工具——扬声器。

有两个方法能让你忘记世界上的种种悲剧——听音乐和陪猫玩。

——Albert Schweitzer

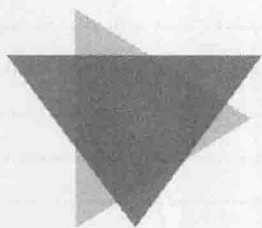


## 作者的话

每个人对音箱产生爱好的起因是不同的，不过多少都和音乐有关。WAMM 公司的 David Wilson 设计的音箱如今能卖到 1.2 万~22.5 万美元。他回忆自己最开始认识扬声器的情况：

“那是 1958 年圣诞节的时候，我才 14 岁，在颂歌声中昏昏欲睡。唱歌的人一直不停地唱，我开始觉得奇怪，朝窗户外看，我才发现邻居为了开玩笑，在外面架设了 Klipschorn 音箱。音箱中传出的歌声把我给骗了。从此以后我就开始喜欢上音箱。”（来自《Fortune Small Business》杂志，2003 年第 6 期）

我对音箱制作的喜爱开始于 1974 年。当时我在 Bobby Patterson 的位于弗吉尼亚州的录音室里听了他做的一对音箱，从此开始了与扬声器系统的 30 年不解情缘。Bobby 是用 McGhee Radio 买来的零件做的音箱，但对我而言，它的音质比很多市售高级音箱都好。从 Courant Institute of Mathematics 毕业后，我在 Stuyvesant 技术高中教学 28 年。1982 年，一些学生认为数学太抽象，希望看到一些实际的应用，我就开了制作扬声器系统的选修课，获得了良好反响。为了帮助学校以外的人学习音箱制作知识，我于 1995 年出版了《高级扬声器系统》(Advanced Speaker Systems)。该书绝版后，Audio Amateur 的 Ed Dell 先生又鼓励我写作本书。写完书之后，我会继续回到自己热爱的音乐和艺术中去。



# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 历险开始了 .....	1
1.2 如何使用本书 .....	2
1.3 制作一对扬声器系统的步骤 .....	3
1.4 选择扬声器单元 .....	4
1.5 扬声器简史 .....	5
1.6 怎样购买扬声器 .....	7
1.7 音乐的来历 .....	8
1.8 扬声器单元的结构和组成部分 .....	10
1.9 说明书 .....	13
1.10 最重要的 3 个参数 .....	15
1.11 扬声器单元的属性 .....	15
1.12 振膜和支撑系统的参数 .....	15
1.13 扬声器单元的电路参数和机电参数 .....	16
1.14 增加灵敏度——一项明智的投资 .....	18
1.15 把扬声器装入箱体 .....	18
1.16 音箱的分类 .....	21
1.17 挑选一个低频音箱 .....	23
1.18 其他设计因素 .....	24
1.19 音色问题 .....	27
参考文献 .....	27
<b>第 2 章 扬声器的三大指标和闭箱设计</b> .....	28
2.1 扬声器单元中的各种作用力 .....	28

2.2	扬声器单元的谐振频率 $f_s$	30
2.3	$Q$ 值	33
2.4	等效体积 $V_{AS}$	35
2.5	利用“三大指标”设计闭箱系统	36
2.6	公制和英制的转换	37
2.7	闭箱设计用到的公式	38
2.8	计算闭箱设计的谐振频率 $f_{cb}$	38
2.9	闭箱系统的 $Q$ 值, 即 $Q_{TC}$	40
2.10	频响的峰值	40
2.11	峰值出现的频率	41
2.12	低频截止到-3dB 的频率 $f_3$	41
2.13	从结果中简化频响曲线	42
2.14	找到合适的 $Q_{TC}$ 值	42
2.15	问题: “为什么我不能在一个小箱子里用 12 英寸的低频扬声器单元?”	43
2.16	解答	43
2.17	图形解释	44
2.18	最佳的长方体音箱	45
2.19	如何增大箱体体积	46
2.20	从 $Q_{TC}=0.707$ 计算 $V_B$	46
2.21	图解方法	47
	参考文献	48
<b>第 3 章</b>	<b>开口箱设计</b>	<b>49</b>
3.1	“完美的”开口箱设计公式	52
3.2	计算开口箱截止频率	53
3.3	导声管的调制频率 $f_B$	54
3.4	用于调频的导声管直径	54
3.5	计算导声管的长度	55
3.6	设计小型音箱	55
3.7	更改音箱的 $f_B$	57
3.8	重新计算导声管的长度	57
3.9	小型箱体导致的谐振峰	57
3.10	散射的损失	58
3.11	选择开口箱还是闭箱?	58

参考文献	61
<b>第 4 章 打开潘多拉的魔盒</b>	<b>62</b>
4.1 用软件设计音箱	62
4.2 闭箱尺寸的计算和性能指标	65
4.3 公制/英制转换器	67
4.4 Speaker Box Designer V1	70
4.5 WinISD	73
参考文献	76
<b>第 5 章 特殊应用</b>	<b>77</b>
5.1 多扬声器单元系统	77
5.2 为什么多扬声器系统的参数会变化	79
5.3 设计多扬声器单元的开口箱	80
5.4 大型的多单元扬声器系统	82
5.5 推挽设计	83
5.6 MTM 系统	84
5.7 双音圈扬声器单元	86
5.8 多个双音圈单元组成的系统	88
5.9 追求高声压级	90
参考文献	91
<b>第 6 章 低频扬声器系统</b>	<b>92</b>
6.1 简单的超低频扬声器系统	93
6.2 等压负载设计	95
6.3 “推挽式 (Push-Pull)” 扬声器对	96
6.4 双音圈超低频扬声器	97
6.5 把它们组装在一起	98
6.6 超重低频系统的回顾	100
6.7 带通式超低频扬声器系统	101
6.8 设计简单的带通扬声器系统	102
6.9 6 阶带通超低频扬声器系统	105
6.10 设计 4 阶带通超低频扬声器系统的其他软件	105
6.11 一种新型超低频带通扬声器系统	108
6.12 超低频扬声器系统与房间的体积	108
参考文献	109

<b>第 7 章 二分频电路</b> .....	110
7.1 电感和电容 .....	111
7.2 电容和电感的相位特性 .....	113
7.3 1 阶二分频电路 .....	117
7.4 1 阶分频器的电路图 .....	118
7.5 2 阶二分频电路 .....	118
7.6 2 阶分频器的电路图 .....	120
7.7 设计中需要特别注意的地方 .....	120
7.8 在 2 阶二分频滤波器设计中运用 $A$ 值和 $Q$ 值 .....	123
7.9 3 阶二分频电路 .....	124
7.10 网络上的分频器计算软件 .....	125
7.11 阻抗补偿 .....	127
7.12 两个阻抗补偿的实例 .....	128
7.13 高频部分的衰减 .....	129
7.14 理论联系实际 .....	132
参考文献 .....	132
<b>第 8 章 三分频电路</b> .....	133
8.1 为何采用三分频? .....	133
8.2 设计误区 .....	135
8.3 $f_{LM}$ 和 $f_{HM}$ 的计算方法 .....	135
8.4 使用预设频率比的 2 阶全通式三分频电路设计 .....	136
8.5 Bullock 的 2 阶全通 (Linkwitz-Riley) 三分频计算公式 .....	140
8.6 变形带通电路 .....	142
8.7 Bullock 的 2 阶等功率 (Butterworth) T-bandpass 三分频电路 .....	145
8.8 2 阶等功率 (Butterworth) T-bandpass 三分频电路的带通形状参数 .....	145
8.9 2 阶等功率 (Butterworth) T-bandpass 三分频电路的电路元件 .....	146
8.10 计算更高阶次的三分频电路参数 .....	146
8.11 用软件简化计算 .....	148
参考文献 .....	149
<b>第 9 章 硬件和软件</b> .....	150
9.1 用 Woofer Tester 做设计 .....	151
9.2 阻抗补偿 .....	151
9.3 对并联的两个低频扬声器进行阻抗补偿 .....	154

9.4	BassBox 软件	156
9.5	将扬声器单元的参数导入 BassBox Pro	157
9.6	各种低频响应的模拟图形	161
9.7	最大值：功率、振膜位移和导声孔振动速度	164
9.8	阻抗和相位信息	166
9.9	相位信息的重要意义	168
9.10	X-OVER PRO 软件	168
9.11	用 X-OVER PRO 软件设计三分频扬声器系统	170
	参考文献	176
<b>第 10 章</b>	<b>分频器的优化和测量技术</b>	<b>177</b>
10.1	复数的含义	179
10.2	专业设计方法	180
10.3	普通爱好者如何设计？	181
10.4	你能预测这些设计的结果吗？	183
10.5	什么样的分频器最合适？	188
10.6	针对 Vifa 扬声器的分频器优化	191
10.7	业余设计者的分频器优化	197
10.8	脱离消声室环境进行频响测试	197
	参考文献	205
<b>第 11 章</b>	<b>11 个扬声器系统设计实例</b>	<b>206</b>
11.1	演示系统的总结	207
11.2	分频器电路图的格式	208
11.3	订购散装零件	209
11.4	系统 1: Silver Flute	210
11.5	系统 2: Popcorn	212
11.6	系统 3: Em-Tee-Em	217
11.7	系统 4: Gabriel	219
11.8	系统 5: Vader	221
11.9	系统 6: Dapp	223
11.10	系统 7: Fellini	226
11.11	系统 8: Basso	229
11.12	系统 9: The Titan	230
11.13	系统 10: Mr.Bones	235

11.14 系统 11: Spike.....	239
<b>第 12 章 音箱箱体制作工艺.....</b>	<b>245</b>
12.1 计算箱体尺寸.....	245
12.2 选择音箱材料.....	247
12.3 加工中密度板.....	248
12.4 切割 4 英尺×8 英尺板材.....	249
12.5 4 种拼接音箱的简单方式.....	252
12.6 更细致的木工工艺.....	253
12.7 开扬声器孔以及导声孔.....	255
12.8 制作分频器.....	258
12.9 第 11 章中扬声器的制作工艺细节.....	259
参考文献.....	267



# 第1章 绪论



我没有那么聪明，我只是和问题一起待得太久了而已。

——阿尔伯特·爱因斯坦

## 1.1 历险开始了

笔者写这本书的初衷，是服务初级和中级的音响爱好者。这个群体对于音乐如此看重，以至于在商场购买的普通扬声器系统已经无法满足他们的需求了。同时，这个群体在技术上有自立的性格，有决心独自完成扬声器系统的设计和制造。本书中包含了足够的基础知识和材料，能令入门级的读者从一开始就大步跃进，最终制造出一流的音响系统。我希望这对于读者是一段愉快的学习过程；当然，和学其他的东西一样，只有付出才会有回报。