

电声技术译丛 

AAP Audio Amateur Press

带式扬声器 原理与制作

Ribbon Loudspeakers Theory and Construction

[美] Justus V. Verhagen 著

朱慰中 缪暑金 译

王以真 校

带式扬声器专著

深入了解带式扬声器的结构及特点



人民邮电出版社

POSTS & TELECOM PRESS

电声技术译丛 

AAP Audio Amateur Press

带式扬声器

原理与制作

[美] Justus V. Verhagen 著 朱慰中 缪暑金 译 王以真 校

Ribbon Loudspeakers
Theory and Construction

人民邮电出版社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

带式扬声器原理与制作 / (美) 维哈根
(Verhagen, J. V.) 著 ; 朱慰中, 缪暑金译. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2011. 8
(电声技术译丛)
ISBN 978-7-115-21107-1

I. ①带… II. ①维… ②朱… ③缪… III. ①扬声器
—理论②扬声器—制作 IV. ①TN643

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第064268号

版权声明

Ribbon Loudspeakers Theory and Construction Edition by Justus V. Verhagen, PH.D. ISBN 1-882580-44-3
Copyright© 1998 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。

电声技术译丛

带式扬声器原理与制作

-
- ◆ 著 [美] Justus V. Verhagen
译 朱慰中 缪暑金
校 王以真
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: 12.5
字数: 252 千字 2011 年 8 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2011 年 8 月北京第 1 次印刷
著作权合同登记证 图字: 01-2010-3998 号

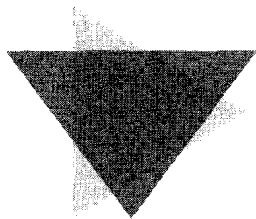
ISBN 978-7-115-21107-1

定价: 49.00 元

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

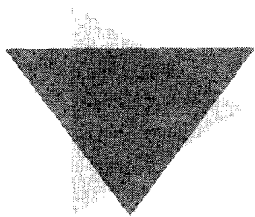
反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号



内 容 提 要

本书从电磁学及声学的基础知识和基本原理入手,详细地介绍了带式扬声器的结构、工作原理及音质特点等。对扬声器换能过程进行了等效电路分析。对扬声器的号筒设计也进行了详尽的描述。文中阐述了生产制作带式扬声器的过程及工艺规范。并且介绍了许多实际应用的产品。最后还列出了有关带式扬声器的各种专利文献及参考资料。对于从事扬声器设计、制作和经营人员,厅堂场馆音响人员,大专院校音响专业师生具有实用参考及指导价值。



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，中国大门打开了，我们看到了世界各国最优秀的电声产品、制造设备、测试仪器和手段、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，自己独特的内容很少，对测试设备、设计软件我们仅是使用者，我们只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，使你的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。

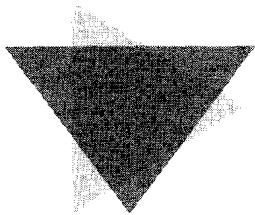
希望这套《电声技术译丛》能在提高中国电声软实力方面起到一定作用。国外电声方面出版的书籍本来不多，国内技术人员也不大容易见

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

2010年12月



审 稿 序

此书由美国新罕布什尔州的 Audio Amateur Press (音频爱好者出版社) 于 2003 年出版, 这是世界最近出版的一本带式扬声器专著, 也是第一本带式扬声器的专著。

此书的作者 Justus V. Verhagen 为哲学博士。此书的译者朱慰中教授是中央电视台的资深电声专家, 有深厚的英语水平, 著有《实用音响录音技术》等多本专著。

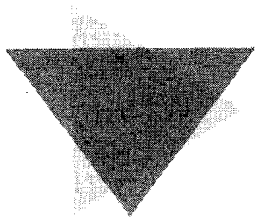
带式扬声器以优异的音质引起人们的关注。1999 年我以《前度刘郎今又来——带式扬声器述评》为题, 发表过长篇文章, 在《音响世界》上连登了 2 期。我在文中写到“带式扬声器制作困难, 价值昂贵, 为什么还费力去研究、去制作呢? 关键在于它的音质, 即所谓飘逸自然、通灵剔透, 在聆听一些高频乐器时尤为出色……”

读者阅读这本书时会发现, 这是一本很实用的书, 既有带式扬声器的理论分析, 又有磁路、振膜的具体介绍, 还有市场上出售的各国带式扬声器的分析。如果你想了解更多的情况, 书中还介绍有关带式扬声器的网站、参考文献、专利等。这种编写方法, 别开生面, 而且特别方便读者, 更是方便中国读者。这些都是值得我们学习与借鉴的。

书中介绍国际市场上各种带式扬声器时, 多次提到中国金瑯公司的 G3 带式扬声器。金瑯公司依靠自己的技术力量, 潜心研发带式扬声器, 解决了带式振膜制造、阻抗变压器、磁路结构关键技术, 他们的产品不但在国内受到欢迎, 而且还出口到国外。可见, 只要是好产品, 就会被承认、被肯定。

王以真

2010 年 12 月



感 谢

首先，我要特别感谢 NXT 公司研究部主任 **Graham Bank** 博士，非常感谢他为我们理解和设计带式扬声器所做的贡献。本书中到处体现了他大量的研究成果。我还要感谢 **Graham** 博士为我们所做的有趣的访谈而做出的大量奉献。

其次，我要感谢 **John Whittaker** 为我提供他所收集的大量的资料清单，因为这是一项特别复杂的工作。多谢他为此做过许多深入的探讨。他所演示的“音频业余爱好者”绝不是“业余爱好者”的档次。

再之，我要感谢扬声器制造商（**Aurum Cantus**，**Celestion** 以及 **Bohlender-Graebener**）在提供他们的驱动单元的详尽资料方面的通力协作。他们的产品都是因为高质量而深受欢迎。我期盼他们是竞争性市场上的优胜者。

我还要感谢牛津大学的 **Peter Goldsmith** 先生提供了带式褶皱机，并为磁性带式缝宽效应作了详尽的分析。

此外，还要感谢 **Catrin A. Radcliffe**、**M. Sc.** 以及 **Karin J. Wallace**、**M. Sc** 等仔细地阅读了原稿并纠正了许多错误。感谢音频业余爱好者出版社社长 **Ed Dell Jr.**、**Dennis Brisson**、**Tina Hoppock** 及其他同事为本书的出版所给予的帮助。这一优秀出版物会给音频 **DIY** 世界留下深刻的印象。

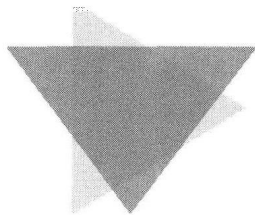
最后，我要着重指出的是，感谢众多自己动手做音响的爱好者们提供一个极好的论坛来进行意见反馈、评论并提出好主意。我期待这一工作会对大家有益，并祝大家在探索中有所成就！

“天下没有免费的午餐。”

“尽量简单。”

“要领先的秘诀在于入门，而入门的秘诀在于把你复杂的压倒性的任务，分解成许多小块的可执行的任务，然后逐个加以完成。”

马克·吐温



目 录

第 1 章	带式扬声器——原理与结构	1
1.1	带式扬声器——原理与结构	1
1.2	参考文献	3
第 2 章	带式扬声器	4
2.1	基本结构	4
2.2	基本工作机理	7
2.3	历史	11
2.3.1	Gerlach 和 Schottky 发明带式扬声器	11
2.3.2	历史背景	15
2.4	参考文献	19
第 3 章	磁学	22
3.1	电磁学	22
3.2	铁磁性	23
3.3	永久磁体	24
3.4	负载线	25
3.5	商用磁体	28
3.6	温度	29
3.7	建模制作	30
3.7.1	简单的模型	30
3.7.2	有限单元的建模	31
3.8	磁感应强度的测量	38
3.9	磁感应强度的均匀性	39
3.10	带式扬声器的磁路概述	42

3.11 参考文献	43
第4章 带式振膜	44
4.1 采用哪类金属	44
4.2 金属振膜的尺寸规格	48
4.3 加皱纹或不加皱纹	50
4.4 金属振膜的端接	56
4.5 无变压器带式扬声器	56
4.6 音频变压器	58
4.7 薄铝原材料	60
4.8 参考文献	61
第5章 等效电路分析	63
5.1 引言	63
5.2 带式扬声器用迁移模拟的开发	65
5.3 进入到声学区域的变换	65
5.4 SPL (声压级) 的计算	66
5.5 阻抗模拟	69
5.6 模型的使用	70
5.7 轴外响应	73
5.8 低频截止频率	75
5.9 振膜—磁体之间的缝隙	76
5.10 偶极子磁体缝隙的声学效应	82
5.11 单极空腔谐振器的声学	84
5.12 静磁式驱动单元的简单模型	92
5.13 参考文献	93
第6章 声学因素	95
6.1 号筒耦合	95
6.1.1 号筒设计原理	95
6.1.2 带式扬声器的指数型号筒设计实例	99
6.2 直接辐射的带式扬声器	101
6.3 边界衍射	102
6.4 障板的影响	107
6.5 单极性与双极性辐射的比较	108
6.6 单极式带式扬声器：音箱后壁的吸声处理	111

6.7	参考文献	111
第 7 章	自制双极驱动带式线性声源	113
7.1	制作音箱框架	113
7.2	选择带式结构	116
7.2.1	制作基带	116
7.2.2	制作铝箔	117
7.3	制作带式振膜	118
7.4	外观装饰	120
7.5	怎样做声测试	121
7.6	改良升级	123
7.7	组合扬声器	127
7.7.1	分频器	129
7.7.2	数字分频器	129
7.7.3	家用音响如何适配这些专业的音频设备	130
7.8	参考文献	133
第 8 章	商品实例	134
8.1	概述	134
8.2	Celestion 3000 扬声器	134
8.2.1	简介	134
8.2.2	带式扬声器的结构	135
8.2.3	磁路结构	137
8.2.4	声学结构及性能	138
8.3	Aurum Cantus G3 扬声器	141
8.3.1	简介	141
8.3.2	结构	142
8.3.3	磁路	144
8.3.4	声学测试	146
8.4	Bohlender-Graebener Neo8 扬声器	146
8.4.1	简介	146
8.4.2	结构	147
8.4.3	磁路	149
8.4.4	声学测试	151
8.5	参考文献	154

第 9 章 格雷厄姆·班克博士访谈录	155
9.1 个人信息	155
9.2 有关带式扬声器	156
9.3 磁结构	157
9.4 关于振膜	158
9.5 声学结构	159
9.6 建模的问题	160
9.7 建议	161
9.8 商用问题	161
第 10 章 相关资源汇总	162
10.1 杂志	162
10.2 免费在线资源	163
10.3 商业在线资源	165
第 11 章 带式扬声器和静磁扬声器的专利与论文	169
11.1 带式扬声器专利（按专利序号）	169
11.1.1 美国专利	169
11.1.2 非美国专利	171
11.2 静磁扬声器专利	172
11.2.1 美国专利	172
11.2.2 非美国专利	174
11.3 带式扬声器、静磁扬声器论文	174
11.3.1 带式扬声器论文（以发表时间为序）	174
11.3.2 静磁式扬声器论文	177
11.4 日本专利 No. 57 041 099 以及 57 109 494 的 英语译文	178
11.4.1 日本专利 No. 57 041 099 的英语译文	178
11.4.2 日本专利 No. 57 109 494 的英语译文	180
附录 常用计量单位的转换	184

第 1 章

带式扬声器——原理与结构

1.1 带式扬声器——原理与结构

优良音质的扬声器通常是把大量工程方法的应用,以及艺术创作与主观评价加以精心结合的产物。其中总是需要做多方面的折衷,为了得到所期望的最佳应用,扬声器制造者的任务就是如何权衡各项参数。完美的声学换能器是不存在的,因为还没有一种完美的性能或是转换功能。它们的特性与换能器装置所辐射的声场环境密切相关。况且又是在审听者主观偏爱的基础上加以评价,因而与他们的癖好也相关,例如所与偏爱的声源素材,不同的声音质量的出版物,审美观点及成本等都有重要的关联。

带式扬声器是一种值得称道的换能器。首先,它们可以看做最为简单的电磁式电动机:一条窄窄的导体轻松地悬挂在磁场中间。而且被认为在高端家用音频应用方面最为有效,因为它们具有高保真性能:优良的音质以及高频成分的可扩展性等。在商用驱动单元以及自己动手做这两方面,带式扬声器具有充分的应用前景。

带式扬声器通常会与静磁式(等磁力线、平面磁场)驱动单元相混淆(参阅第 2.1 章节有关它们结构方面的详述)。带式扬声器的振膜只是被夹住在它的顶部和底部,而静磁式驱动单元的振膜则被夹住在所有边缘。虽然这一差异似乎并不经意,但对于带式扬声器的工作模式却是非同小可。虽然在各种各样的实例中都讨论过静磁式驱动单元(2.1、5.12 及 8.4 章节),并列出了与它们有关的作者及专利(第 11

章)，静磁式扬声器对扬声器爱好者来说也具有吸引力，他们乐于自己动手来制作。

带式扬声器与静电式扬声器在声音质量、商用产品的档次方面进行比较，则不分上下，而在音频市场的占有率方面，带式扬声器则稍显逊色。两者都使用了较为昂贵的部件：一个带有音频升压变压器和高压供电电源（ESL），一大块的永久磁体或较小块的稀土磁体以及可选用的音频降压变压器（带式扬声器）。两者（并不互相排斥）都有众多的爱好者支持它们的开发、销售以及具体实施。在它们中间可以遇到一些最为优良的扬声器产品。

这并不表明，拥有圆状音圈以及圆锥体或球顶式振膜的大量存在的声学换能器，不能满足许多不带偏见的设计师。相反，这些也能产生极佳的音质，事实上，我首选的就是其中的低频换能器。不过，对高频而言，我有相当多的理由宁可选择带式扬声器。它们之中的某一个单元完全可以满足实际应用的需求：你尽可以用少量的工具（第7章）从零开始制作一只带式扬声器，而要制作球顶式扬声器，由于其结构的复杂性而几乎不可能实现。所以把带式扬声器与电动式扬声器相结合，可以制作出优秀的组合系统。

尽管有高质量的换能以及简化结构上的潜在可能，但是还缺乏理论与实践方面信息的整合。据我所知，静电式扬声器至少有3本出版物发行（Wagner, 1987; Sanders, 1995; 以及 Fikier, 1993）。此外，还发表过一些综合的书篇（Baxandall, 1994），以及一个综合的范例（de Visschere, 1995）。除了本书以外，据我所知，还未见有关带式扬声器方面的著作发表。

写作本书共有5个目的：

第一，把分散在各处的专业和业余文章、博士研究、访谈、国际专利、商用产品评论以及文献（第10、11章）等大量的资料加以集中。同时也提供历史上的分析（第2章2.3节）。这些参考资料积累了近10年至15年间出现在图书馆资料库、网页、新闻媒体、电子邮件清单以及专利搜索引擎（第10章）等有关这些扬声器方面的有价值的研究。如果文章中有任何疏漏，请及时告知我，我乐意加以完善。

第二，介绍给读者使用物理学上的信息进行带式扬声器的设计优化：与磁路有关的磁学与电磁学的基础物理学（第3章），关于带式振膜的电子和机械方面的出版物（第4章）以及声学方面的出版物（第

6 章)。

第三,描述用等效电路模型对各种电、磁、机械及声学参数如何影响带式扬声器的频率响应(第2章2.2节与第5章),这样有助于理解复杂难懂的问题并能计算带式扬声器的所期望的性能指标。

第四,详细说明作者本人制作先进的带式扬声器线性声源以及进行声学测量的方法(第7章)。这是一种很容易的而且费用便宜的制作,为读者自己开始设计制作带式扬声器提供了简便的方法。为了提供更多的主意,在第8章对两只带式扬声器和一个静磁式驱动单元给出了更为详尽的描述,并在第3章3.10节给出了所有带式扬声器有插图的磁路的概述。在第3章的3.7节中给出了使用任何可利用的有限单元方法软件,来对磁路制作模型的实践进行指导,这样可对某种设计做出快速的创建及评价。此外,在3.8节还讲述了测量磁通密度的方法。

最后,有幸与天蓝色带式扬声器的设计者及初始发明家 Graham Bank 博士进行交流,他拥有数个带式扬声器专利。在第9章,他将乐意就带式扬声器在技术层面上的相关问题做深度的交流。

我希望任何对带式扬声器感兴趣的人士能在本书中找到有益的参考。我邀请大家与出版社联系,为改善材料方面提出各种有益的建议。

作者于 2003 年 4 月

1.2 参考文献

1. Baxandall, J. (1994). Electrostatic Loudspeakers, Chapter 3 in Loudspeakers and Headphone Handbook. Borwick, J., ed. Focal Press, Oxford, 2nd ed.
2. Fikier, E. (1993). Elektrostatische Luidsprekers Zelf bouwen of zelf kopen. Elektuur BV, Beek, 1st ed.
3. Sanders, R.R. (1995). Electrostatic Loudspeaker Design Cookbook. Audio Amateur Press, Peterborough, 1st ed.
4. de Visschere, P. (1995). Accurate Model for the Push-Pull Electrostatic Loudspeaker. JAES 43(7/8), pp. 563–572.
5. Wagner, R. (1987). Electrostatic Loudspeaker Design and Construction. TAB Books Inc., Blue Ridge Summit, 1st ed.

第2章

带式扬声器

2.1 基本结构

带式扬声器的结构要比球顶式扬声器简单得多,因此更容易自己动手制作。图 2.1 与图 2.2 画出了它们的基本结构 (Eargle, 1997)。球顶式高频扬声器所组成的磁路,通常是把带有一个铁磁体极板的杆状磁体位于前方和一个中心同心的极靴上。球顶本身是由像金属材料(铝、钛、镁、铍等)制成的半球形结构,或是由浸渍织物的“软”材料所组成的。球顶远离中心的边缘上连接一个小小的圆柱形音圈,音圈位于由两块极靴限定的磁缝隙内。空气具有很低的导磁系数,因此要求缝隙的误差应尽可能地小,缝隙的宽度约 1mm。由此可以达到强磁场 [约 1 特斯拉 (T), 或 10 000 高斯 (Gs)]。

图 2.1 电动式、球顶式高频扬声器的横截面图。图中灰色部分表示软磁性材料。蜷曲的箭头表示磁场线。在音圈的两侧,洛伦兹力远离高音头并作用于导体上。

