

声学技术系列 无线电
SPEECH TECHNOLOGY SERIES

实用 扬声器测量

[美] Joseph D'Appolito 著 陈延坤 刘国军 译



国际公认的声频权威专著
设计与制作扬声器系统宝典

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

电声技术译丛 

AAP Audio Amateur Press

实用扬声器测量

[美] Joseph D' Appolito 著 姜波译 王以真 审

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

实用扬声器测量 / (美) 阿波利托 (Appolito, J. D.)
著; 姜波译. -- 北京: 人民邮电出版社, 2011. 9
(电声技术译丛)
ISBN 978-7-115-25432-0

I. ①实… II. ①阿… ②姜… III. ①扬声器—测量
IV. ①TN643

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第083156号

版权声明

TESTING LOUDSPEAKERS Edition by Joseph D' Appolito, ISBN 1-882580-17-6

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

实用扬声器测量

-
- ◆ 著 [美] Joseph D' Appolito
 - 译 姜 波
 - 审 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>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 800×1000 1/16
印张: 19
字数: 434千字 2011年9月第1版
印数: 1-3000册 2011年9月北京第1次印刷
著作权合同登记号 图字: 01-2010-3997号

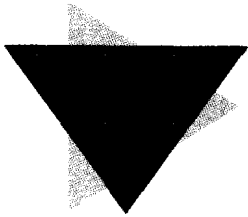
ISBN 978-7-115-25432-0

定价: 68.00元

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

反盗版热线: (010)67171154

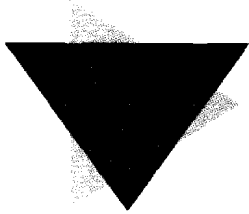
广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号



内容提要

本书为美国当代最著名的电声测量专家 Joseph D'Appolito 所著。本书分为模拟设备测量和数字设备测量两部分。第一部分使用模拟设备来测量扬声器的阻抗、T/S 参数、低频封闭箱及频率响应等；第二部分以数字测试系统 MLSSA 和 CLIO 为例，详细介绍了相关的计算机电声数据采集分析系统，引用大量测量实例并给出大量的实际测量图表。

对于扬声器爱好者来说这是一本关于扬声器测量的权威专著。



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，使自身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。

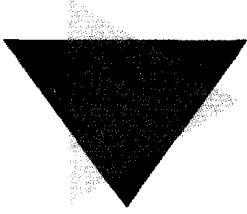
希望这套《电声技术译丛》在提高中国电声软实力方面能起到一定作用。国外电声方面出版的书籍本来不多，国内技术人员也不大容易见到，而翻译出版的书更是凤毛麟角。这套《电声技

术译丛》也许在内容上不能完全满足各方面的要求，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

国内关于电声测量的书已出版了多本，最早是李宝善先生的《音频测量》，最近的是万英年的《声频测量技术》，其间还有电声测量专著问世。这些书涉及的面比较广，而扬声器的测量只是其中的一个章节。这本《实用扬声器测量》共 7 章，专讲扬声器测量，当然会引起扬声器技术人员的极大关注与兴趣。

扬声器的测量是分析和研究扬声器不可缺少的手段，是设计扬声器不可或缺的工具。在扬声器生产过程中，测量更是生产质量的保证。

在扬声器测量中，要求一致性与可比性，测量方法规范有工厂标准、国家标准、国际标准（IEC）等，这就要用测量仪器与测量方法去保证测量的一致性与可靠性。而我们对扬声器的认识远没有终结，因此会不断出现新的测试方法、测试仪器、测试指标和参数，以此来加深对扬声器的理解与认识。

《实用扬声器测量》1998 年第一版由美国 Audio Amateur Press 出版。该出版社位于美国东部的新罕布什尔州，出版过多本音响及扬声器方面的书籍。

本书作者 Joseph D'Appolito 先生是电气工程学士（BEE）、电子工程师（EE），被麻省理工学院等授予博士学位，是国际公认的声频权威专家之一，主要从事扬声器系统的设计，他使用计算机工具和各种性能测试设备，设计了许多高性能的扬声器系统，其中包括法国 Focal 的 5 点声源的 ARIA5，这个产品被巴黎的 HiFi Video 杂志推荐为 1991 年优秀产品。他首创了适合重金属乐团所用的扬声器结构（被称为 D'Appolito 结构），这种扬声器至今仍被欧洲和北美 12 家公司采用。他还设计了 Mitey Mike（微型传声器）及后续的 Mitey Mike II，这是用于扬声器测量的精密传声器。此外他还开发了 TopBox 扬声器设计软件。

D'Appolito 先生也是美国 AES（Audio Engineering Society）会员和《Speaker Builder》杂志的主编，他曾在学术会议及专业杂志上发表过 30 多篇论文，同时也为杂志写了大量有关扬声器设计

和测量方面深入浅出的文章，充分体现出他在扬声器系统和分频网络设计方面的深厚功底。Joseph D'Appolito 博士同时在全世界各地广泛从事技术咨询工作，其中包括美国、加拿大等。了解作者的背景，这对我们阅读此书是有帮助的。

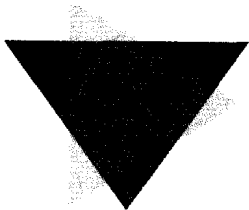
这本书的另一个特点是，既讨论了在消声室中的测量，又讨论了在非消声室用计算机辅助进行的测量。消声室（自由空间）的测量是一种主流、标准的测量方法，一般电声测量书籍都有介绍。非消声室测量是一种非主流、非标准的测量方法，但由于成本低、设备简单，却是一种比较常用的方法。中国扬声器及音箱生产厂家，可以不拥有消声室，但不能没有一套计算机辅助测试系统。但是一般的电声测量书籍对此语焉不详。

作者还用了一章（第 7 章）的篇幅来讨论计算机辅助测试的一些问题。扬声器的计算机辅助测试软件和工具很多，在国内常见的有 LMS、MLSSA、CLIO、DAAS、NTI、ETANI、KLIPPEL 等。大家都在用，但是它们的测试能力与测试精确度是不一致的，对这些扬声器的计算机辅助测试软件和工具的讨论和验证是不够的。作者着重分析介绍了 MLSSA 和 CLIO，这也说明作者有一定眼光。如果作者介绍某种不入流的软件，就会影响我们对作者、对这本书的看法。

对于中国的读者而言，这本书对测试方法的标准强调得不够，应予关注。

本书由姜波先生翻译，人民邮电出版社出版。姜波先生是从事电声测试工作的，起笔行文得心应手。本书出版，将会受到电声界的欢迎。

王以真
2011 年 3 月



译者的话

本书为美国当代最著名的电声测量专家 Joseph D' Appolito 所著。本书分为模拟设备测量和数字设备测量两部分。第一部分使用模拟设备来测量扬声器的阻抗、T/S 参数、低频封闭箱及频率响应等；第二部分以数字测试系统 MLSSA 和 CLIO 为例，详细介绍了相关的计算机电声数据采集分析系统，引用大量测量实例并给出大量的实际测量图表。

扬声器测量是电声测量的重要部分，在现有的电声测量书籍中，扬声器测量通常只作为章节简单介绍其测量原理和方法，没有一本完全介绍扬声器测量的书籍能供读者参考。Appolito 博士所著的《实用扬声器测量》是第一本全面综合的介绍扬声器测量的书籍。本书最大的特点是，不仅仅包括了扬声器单元和系统的测量方法，同时针对扬声器的复杂原理，全书引用了大量的实际测量实例。

关于扬声器的测量，在生产中可以分作两种类型：一种为研究设计型测量，另一种为产品质量控制型测量。扬声器系统的研发生产，应当从扬声器单元的研究设计型测量开始，根据测量得到的数据进行计算机辅助设计生产，最终利用电声测量对产品质量进行控制。

Appolito 是国际公认的声频权威专家之一，特别是在扬声器系统设计领域更是无人不知，他创造性的提出了 MTM 扬声器构造。利用计算机测量设备，他设计了大量成功的扬声器系统，其中 5 点声源的 ARIA 系统被法国 HifiVideo 杂志评选为 1991 年的年度扬声器大奖。同时他设计了 MiteyMike 及其升级版 MiteyMikeII 测量传声器。Appolito 博士还开发了 TopBox 扬声器设计软件。他还是众多杂志的编辑，同时发表了大量的期刊和会议论文。

本书共分为 7 章，从内容上可以分为模拟设备测量和数字设备测量两部分。前半部分用常见的模拟设备来测量扬声器的阻抗，T/S 参数，低频封闭箱，频率响应等；后半部分以计算机测试系统 MLSSA 和 CLIO 为例，详细介绍了相关的计算机电声数据采集分析系统。本书大量引用实际测量例子，给出详细的测量过程，同时列举了丰富的实际测量结果图表，对扬声器测量进行全面，

详细，实用的介绍。

本书的第 1 章是对扬声器测量的总括，介绍了本书各个章节的主要内容。第 2 章介绍了低频直接辐射式扬声器系统的历史，T/S 参数，并给出其物理原理，提供了测量方法。第 3 章通过阻抗曲线来分析扬声器的低频特性，讨论了扬声器单元安装在箱体后（封闭箱和倒相箱）系统共振频率、密闭箱阻尼、 Q 值和系统效率的变化，讨论了箱体填充物对扬声器系统的影响，以及其他相关参数。本章同时对传输式扬声器系统进行了简单的讨论，分析了阻抗曲线的一些不规则现象。第 4 章深入讨论了影响扬声器声学测量的各种因素，讨论了扬声器的频率响应数据，阻抗数据，为扬声器的分频设计提供了数据。本章还讨论了测量传声器的类型，以及哪种传声器更适于测量扬声器。对测量的声学环境和障板理论进行讨论。最后讨论了如何采用测量技术和测量信号来消除环境对测量的影响。第 5 章介绍了扬声器轴向频率响应和偏轴向频响，给出了动圈扬声器两分频和三分频系统，带式高音两分频扬声器系统对应频率响应测量实例。同时对分频器对于扬声器系统的影响做了研究。本章最后简单讨论了重低音扬声器的能量响应。

第 6 章和第 7 章为基于计算机系统的扬声器测量。其中第 6 章是关于时域、频域和傅里叶变换的，本章接受起来比较困难，但本章的内容十分重要。只有充分理解了本章的内容，才能够理解计算机声学数据采集系统是如何操作运算的。最后的第 7 章以 MLSSA 和 CLIO 两个测量软件为例，详细的介绍了计算机辅助测试的一些问题。

希望本书中文版的出版，对爱好者设计扬声器系统有所帮助。对于制造商来说，本书介绍的内容虽然详细实用，但与 IEC、AES 等国际标准的对应性不是很强，建议这部分读者参考相关的国际标准或与之对应的 GB 国标，提高产品的标准符合性。我们对扬声器的认识远没有终结，以后还会不断出现更多新的测试方法，评价手段和测量设备，希望本书的内容，对读者深入理解认识扬声器能够发挥一些作用。

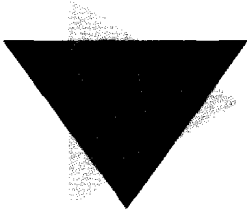
本书的内容虽然与我从事的电声测试工作相近，但由于译者水平的局限性，理解原文不可避免存在不恰当、甚至错误之处，敬请读者指正。

本书翻译的完成，首先要感谢人民邮电出版社的信任和支持。特别感谢电子三所翁泰来老师的指导帮助，为本书翻译提供了大量宝贵又难得的扬声器测量标准和资料。感谢王以真老师对本书的审核和宝贵意见。同时还要感谢国家广播电视产品质量监督检验中心的张伟、韩捷两位老师，感谢她们多年来在电声测量领域对我的教导、支持和信任。最后感谢电声行业中多年来给予我帮助和支持的各位老师。

姜波

2011 年 3 月

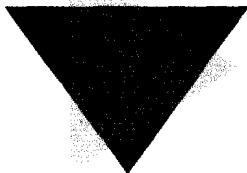
仅以本书献给我生命中的至亲：
我的妻子 Ligia，
我的女儿 Daniela 和 Nina，
还有我的外孙女 Emma 和 Isabella，
是他们的支持和关爱鼓励着我完成本书的。



感谢

本书的出版要感谢 Richard Campbell 发挥的重大作用，作为一名 AES 的会员及咨询公司的主管，Dick 教授阅读了本书草稿的每个章节，指出了书中的许多错误，并给出了很多很好的建议。建议的及时提出，为该书的出版节约了大量时间。

由于译者水平的局限性，理解原文不可避免存在不恰当甚至错误之处，敬请读者指正。

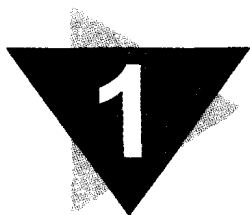


目 录

第 1 章 扬声器测量简介	1
1.1 为什么要写关于扬声器测量方面的书	2
1.2 扬声器测量应包含的内容	2
1.3 背景知识要求	2
1.4 本书概要	3
参考文献	9
第 2 章 扬声器单元测量	10
2.1 简介	11
2.2 简史	11
2.3 Thiele/Small 参数	12
2.4 扬声器单元阻抗曲线	14
2.5 扬声器单元简易模型	15
2.6 关于 T/S 参数	24
2.7 通过阻抗曲线确定基本的 T/S 参数	26
2.8 测量 V_{AS}	46
2.9 其他 T/S 参数	53
2.10 中高频扬声器单元的 T/S 参数	59
2.11 概括	60
参考文献	60
附录 A	62
附录 B	65

第 3 章 扬声器系统低频阻抗测量	66
3.1 简介	67
3.2 确定 f_{SB}	67
3.3 闭箱内的扬声器	71
3.4 闭箱内填充物的测量	75
3.5 单谐振开口箱系统的扬声器	81
3.6 传输线箱阻抗	88
3.7 阻抗数据的反常点	89
参考文献	93
第 4 章 扬声器单元声学测量	94
4.1 介绍	95
4.2 频率响应曲线	95
4.3 扬声器测量所使用的传声器	98
4.4 声学环境与影响	101
4.5 扬声器测量技术与测量信号	113
4.6 频响曲线的模拟平滑	123
4.7 两个例子	131
4.8 最后评论	134
参考文献	135
附录 A	136
第 5 章 多单元扬声器系统声学测量	137
5.1 简介	138
5.2 多扬声器单元组合	138
5.3 地面反射	140
5.4 两分频系统举例	142
5.5 实例 5.4: 三单元三分频扬声器系统	163
5.6 实例 5.5: 采用带式高频扬声器的两分频扬声器系统	167
5.7 实例 5.6: 重低频扬声器系统	173
5.8 总结	176
参考文献	176
第 6 章 时域、频域和傅里叶变换	178
6.1 简介	179
6.2 脉冲响应	181

6.3	周期信号与傅里叶级数	184
6.4	抽样与抽样定理	192
6.5	离散信号傅里叶变换	197
6.6	脉冲响应的快速傅里叶变换	207
6.7	脉冲响应测量	213
6.8	时间与相位	216
6.9	定义扬声器单元的声学相位中心	224
	参考文献	228
第 7 章	计算机基于声学数据采集系统的扬声器测量	230
7.1	简介	231
7.2	MLSSA 与 CLIO 系统	231
7.3	阻抗与 L/C 测量	234
7.4	Thiele/Small 参数测量	243
7.5	扬声器系统设计与评价	248
7.6	针对扬声器系统设计的测量	259
7.7	针对扬声器系统特性的分析和评价的测量	267
7.8	其他实例	278
7.9	总结	286
	参考文献	287



扬声器测量简介

- 为什么要写关于扬声器测量方面的书
- 扬声器测量应包含的内容
- 背景知识要求
- 本书概要
- 参考文献

1.1 为什么要写关于扬声器测量方面的书

关于扬声器设计及制造的书籍和文章有很多，从入门级的发烧友杂志，到书籍（例如：《扬声器系统设计手册》）^[1]，直至刊登工程和科技论文的专业学术期刊，但关于扬声器测量的资料，只能在期刊论文、教科书、制造商的手册和测量标准中找到，这些资料的条理性不强。

在期刊和杂志的文章中，扬声器测量结果常用来证明论文观点的正确与否。在这种情况下，没有详细阐述测量过程，而且也没有讨论测量的准确性。对于发烧友和技术人员来说，到现在还没有一本扬声器测量方面系统的参考书籍，这正是本书的写作目的。

1.2 扬声器测量应包含的内容

扬声器是一个复杂的电、力、声换能器，它将输入的电功率转换成机械振动，振动以声波的形式辐射出去。扬声器是一门包含了电学、力学以及声学的交叉学科。只有了解原理后，选择合适的测量方法，排除外界环境对测量的影响，才能获得真实测量结果。

扬声器测量不能只满足于简单了解，必须通过丰富的例子，从电学、力学、声学理论上去深化理解。选择恰当的测量方法可以减小误差，并且通过测量可以获得扬声器的大量信息。

为了完成这个目标，本书的内容必须具有指导性，需要解释扬声器测量所需要的背景知识。为了思路清晰，书中列举了大量的真实测量实例，每个章节包含 60~80 甚至更多的典型图表。在很多情况下，读者可以按照详细的规程，参照中间过程，获得最后结果。

1.3 背景知识要求

本书的前提是需要读者掌握《扬声器系统设计手册（*The Loudspeaker Design Cookbook*）》一书中所讲述的扬声器系统设计的基本原理，包括扬声器单元的 Thiele/Small 参数、低频直接辐射扬声器的构造、闭式扬声器箱、开口式扬声器箱、带通式扬声器箱和传输线式扬声器箱。读者应该对各种分频网络和多单元扬声器系统有一定的了解。当然读者也必须了解最基础的术语：电压、电流、阻抗、电感、电容、电抗、频率、位移、速度、加速度、阻尼、质量和声压等。

在测量时数学也是不可或缺的，测量结果大部分都是数值。同时尽量使用简化的方程式，但很多方程式是对原理表达最好的例子。读者不需要计算，但要有一些代数基础，需要熟练地掌握指数和对数，要会用计算器求对数、平方。

有了这些基础，你所需要的其他概念和原理在文中都能找到详尽的例子。