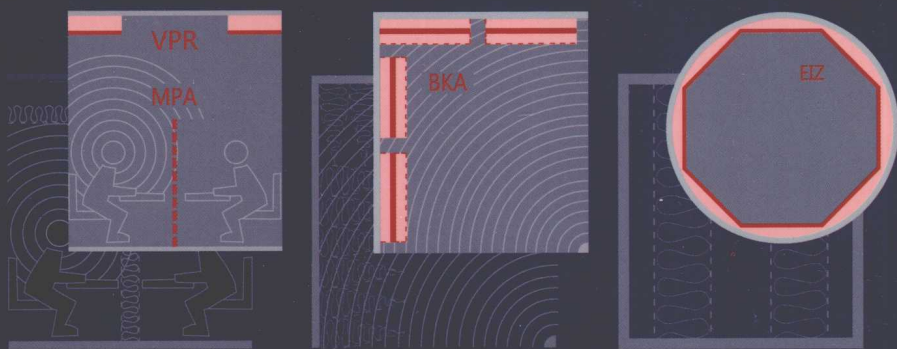


噪声控制与声舒适

理念、吸声体和消声器

[德] 赫尔姆特·富克斯 著
汪 涛 查雪琴 译
查雪琴 审校

疑难解决—创新产品—工程实例



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

疑难解决 - 创新产品 - 工程实例

噪声控制与声舒适

理念、吸声体和消声器

[德] 赫尔姆特·富克斯 著

汪 涛 查雪琴 译

查雪琴 审校

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

噪声控制与声舒适：理念、吸声体和消声器/（德）赫尔姆特·富克斯著；汪涛，查雪琴译．—北京：中国科学技术出版社，2012.7

ISBN 978-7-5046-6124-1

I. ①噪… II. ①富… ②汪… ③查… III. ①噪声控制－建筑材料－研究 ②建筑声学－建筑材料－研究 IV. ①TB535 ②TU112.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 142810 号

本社图书贴有防伪标志，未贴为盗版

Translation from the German language edition: *Schallabsorber and Schalldumpfer* by Helmut Fuchs. Copyright ©2010, Springer Berlin Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media. All Rights Reserved

著作权合同登记号：01-2012-4738

本书中文版由德国 Springer 出版社授权中国科学技术出版社独家出版，未经出版者许可不得以任何方式抄袭、复制或节录任何部分

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码：100081

电话：010-62173865 传真：010-62179148

<http://www.cspbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京华联印刷有限公司印刷

*

开本：720 毫米×1000 毫米 1/16 印张：34 字数：600 千字

2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

印数：1-2500 册 定价：88.00 元

ISBN 978-7-5046-6124-1/TB·87

中文版序

吸声处理是噪声控制的重要手段。随着声学材料的发展，可选择的产品日益增多，以应对不同条件下的需求。德国弗劳恩霍夫建筑物理研究所（FhG, IBP）富克斯（Fuchs）教授集 45 年的研究成果和实用经验，编写出版了这部专著。富克斯教授和他的研究所同仁们，在开发新型声学材料及其构造设计的研究、生产和推广应用方面成绩斐然。他们致力于无纤维化和高效吸声材料的研究，不仅应用于建筑行业，在工业产品领域如汽车声学测试室、气流管道消声等方面亦有所推广，国际上享有盛誉。关于这些研究成果，本书原著序中已有详述，不再赘言了。

本书德文初版自 2003 年问世以来，已修订过两次，可见内容随时在更新。如今根据 2009 年底的德文版译成中文出版，必将对我国从事噪声控制方面工作的人员提供许多有益的知识和经验。

本人在 20 世纪 90 年代曾有机会两次访问弗劳恩霍夫建筑物理研究所，和富克斯教授、查雪琴教授以及该所其他研究人员交往多年，我在阅读本书各章节尤其是它的前言时，强烈地感受到：他们将科研成果推广应用的同时，还落实于产业化，使声学材料事业蓬勃发展，并从工业界获得了专利费，支持了 80% 以上的研究经费，促进了产、学、研三方面进步的良性循环。不禁使我回忆起 2000 年秋，85 岁高龄的中国科学院声学研究所马大猷院士特意召我去北京，花了一整天时间商谈微穿孔吸声材料在国内的产业化发展问题，并起草了技术转让和后续支持等文件。马先生深感自己年迈，活动能力受限，希望我协助他多为微穿孔吸声材料产业化出力，联系有志于声学材料发展的厂商，共同来创建和推动这一事业。于是我与一家国内规模较大、从事噪声控制工程多年的生产厂商，告以马老的愿望。

该厂兴冲冲地派了两名厂级干部前往，正值我在北京参加第一届中德声学创新技术研讨会。当他们得知此行不能接获大量产品订单，而是要共商作较大投入的长远规划时，兴趣大减。与马老只见了一面，不告而别，令人沮丧不已。此事之发生，其实带有普遍性。说明我国产业界对中长期研究发展缺乏必要的意识和信心，同时，也不可否认国内产业体制不健全，给厂商带来的困扰。为什么 1993 年德国自从波恩联邦国会大厦引入中国独创的微穿孔板，处理了大厅声学难题后不久，弗劳恩霍夫建筑物理研究所继而不懈地努力推广应用，在德国很快就出现了许多家生产各具特色的微穿孔产品供应商。他们既有知识产权和专利权的保护，又有产业贷款经济资助的渠道，使中小企业获得发展新技术成为可能。因此，如没有根本性改变，我国的上述种种落后现象，从产业上是很难赶上国际先进水平的，对科学技术的发展也会带来不利的影响。我们期待着这一现状早日得以改进。

同济大学声学研究所教授

王季卿

2012 年 6 月

中文版前言

我与中国的同行交流及合作，可以追溯到 1979 年。那一年，我从基础理论研究，转到从事应用技术研究的弗劳恩霍夫建筑物理研究所（FhG, IBP），从那以后，交流及合作就越来越多了。我不仅在专业上获益良多，也对中国的文化十分景仰。20 世纪 90 年代以后，随着中国经济的飞速发展，本书所述及的应用技术和设计思想，也开始在中国受到重视和采用，在建造声学试验室的概念及装置方面尤为突出。在此期间，我们做了大量不同大小的项目，有些对于声学的要求，还超过了欧洲同行，特别是汽车工业领域的委托方。有关的新技术和理念，也在此推动下得以迅速采用。这主要是由于 FhG 在德国的专利合作伙伴法斯特设备制造公司（Faist Anlagenbau）和他的合资伙伴朗德科技有限公司密切合作的结果。汽车工业测试室是包括了多个专业相互交叉的复杂项目，因此他们为客户负责有关声学系统的全部咨询，对于项目的最后成功，具有重要的意义。就消声室的吸声装修而言，从确定所有供货细节、土建结构的配合设计以及室内安装，直至声学试验室测量设备的配备和正常运营，全过程认真负责地工作，也是项目成功的关键。在此期间，在中国已成功地建造了 60 间以上使用替代型吸声体的高标准声学试验室。在本书德文第 3 版出版后，在准备英文版的过程中，想到中国的广大用户和应用声学的同行，应有更方便他们阅读的中文版。

作者真诚感谢朗德科技公司的大力支持，使中文版得以顺利诞生。能与中国的同行交流，作者深感欣慰。这里还要深深感谢中文版的译者查雪琴教授和汪涛硕士的辛勤工作。最后，非常感谢中国科学技术出版社，他们在出版编辑工作中的认真态度令人敬佩。

关于作者和同事们的研发工作的指导思想和与工业界合作开发的工作方式（F&E：研究和开发），已详尽地在英文版前言中叙述，此处不再重复。作为本书翻译蓝本的德文第3版，为它三年前写的前言，出版后与读者的交流中又有一些新的感受，并写在英文版的前言中，因此便以此替代了德文版的前言。

希望中国读者能从本书中得益，更望以此为起点，与中国同行进一步交流，共同在未来世界的噪声控制和取得良好的声舒适性工作中有更多进展。

赫尔姆特·富克斯（H. V. Fuchs）

柏林 2012年3月

英文版前言

几乎没有哪一门工程技术像声学技术那样，如此广泛地应用于生活、工作、居住、娱乐和体育等各个领域。各式各样的吸声器，安装在室内墙面上或管道中，已经成为噪声控制或提高声舒适性的必不可少的措施。这对于科学家、研发者和生产厂家都是长期的挑战。本书将要叙述空气声吸声器的理论和技术的现状，涵盖内容广泛领域的要求和实例。噪声辐射所带来的负面影响，几乎随着人类的各项技术革新同时出现。因此，降低噪声，也必然成为噪声大的机器和设备生产厂家不可回避的问题。然而，不去寻找设备内在因素的问题，常把声学技术的改进措施视作是另加的成本，是没有相应收益的工作。建筑师和营造商都很少意识到有必要在规划中作出必要的让步，反而将建筑物和室内噪声控制的费用，作为额外开支放在一边（因此往往会被忽略）。因此，无怪乎从事噪声降低或提高声学舒适性的工程师，对自身工作的价值也相应看低了。声学，在科研工作中，被看作“不赚钱的技术”（“breadless art”），不值得费力去做那可可有可无的事儿。特别是在一些新办大学所设的专业，把声学视作为非实用的理论，只在有关环境的专业才需学习。只有少数人设想，声学可以提供重要的创新机会，甚至可发展成能盈利的新科技，会创造就业机会并建立新的机构。在此情况下，德国弗朗劳恩霍夫建筑物理研究所（Fraunhofer IBP）在过去 25 年多时间里，从工业界获得了大量资助（超过 80%），不免令人对此感到有些惊讶。能实现这一点，是因为工作人员并不仅仅满足于给声学问题做出科学的解释，还要通过分析和一系列试验，找到解决的办法，在试验室做出样品后，登记专利，发表大量著作，并加强宣传。换句话说，要把新技术交给不大会创新的“技术员”，让他将新产品推向市场。例如表 1 中的方式 2，声学家们将做出的“半成品”最终发表在杂志和著作中，如同博物馆中的一件非卖艺术品。声学家们应该把他们的知识更好地为经济和工业服务的，如方式 1，可以做监理、咨询的或任何客户所需要的事。但这个方式，研究和开发也没有真正结合，很难导致切实的协作与合作，分享市场的成功。而另一种富有成效的工作方式，如建筑物

理研究所 (IBP) 所采用的。该所曾拥有超过 20 多名科学家、工程师和技术员, 如表 1 中方式 3 的研发。他们在处理亟待解决的声学技术问题时, 创造了适用的创新的概念、方法、材料和构件来解决这些问题。在开发新产品的样品并在示范项目中应用后, 即寻找工业生产的合作者, 并且与他们签订长期的使用许可证和专业知识的合作协议。

在方式 3 开发工作指导下, 已经研发了 15 种以上先进的无纤维吸声体 (图 1), 成为 “ALFA” 系列产品。这些新型的吸声体和消声器很快便满足了市场上某些特定的需要, 而这个市场早在 40 ~ 50 年前, 已由建筑材料所占有。然而, 即使在钱包不很满和建筑业务停滞的不景气的时期, 这些吸声体和消音器除了减少噪声污染之外, 还使十多个以上的中小企业能生产新的产品。中小企业依靠它出色的灵活性和创造性, 已有 5 个以上公司, 运用创新的声学元件及最佳的知识产权保护, 在与常规产品的竞争中占了上风, 成为既是创新者又是解决问题者, 其中有些公司已成为同类产品市场中的 “潜在冠军”。然而, 某些标准和准则以及传统技术, 往往会阻碍了创新技术的迅速实施。

此外, 有些创新产品与常规的纤维/多孔吸声材料有极大的不同, 这也使其他专家格外小心。由于长时间缺乏一个全面的汇总说明, 各种降噪原则和抑制噪声的产品都会展示各自的优缺点。也由于主要是德国国内的合作和应用项目, 因此最初涉及的主要是德国的出版物, 以致不能得到全球声学工作者的注意。本书试图填补这个缺口, 期望得到迟到的交流。

用先进的高效吸声体的室内壁面吸声层, 首先在工业界的汽车及其供应厂的研发中心的声学测试室迅速应用。不必惊奇, 这里聚集了大量声学工作者, 也受到管理上层的重视, 因为降噪和声舒适性在汽车领域的发展中占有重要的地位。

在本书第一版 (2004 年) 中主要介绍了复合板共振吸声器 (VPR) 和宽频带复合吸声器 (BKA) 在消声室中的应用 (第 12 章)。这些吸声体很薄, 而且具有很高的吸声效率, 使它应用于也同样在频繁语言交流的房间中, 如办公室、学校、会议室、音乐厅等, 深受人们的欢迎。在本书第二版中的基础部分, 增加了微穿孔吸声体 (MPA) 系列, 也增写了室内声学应用实例 (第 11 章)。

消声器的研发也取得极大进展。在与工业界合作方紧密协作下, 特别在低频消声和应付污浊液体对消声器的腐蚀方面有明显的改进。还扩展了板式共振器部分, 增加干涉消声器和有源消声器。增加了第三个应用范围, 即第 13 章中关于室内通风设备和通风系统中节能和降低运营费用的

“管道内衬吸声层”。

英文第一版是按德文第三版翻译的，它总结了作者 40 年有关声学の研究、教学和咨询等方面的应用经验。主要目的仍然是寻求创新的解决方法，解决实际中的问题。本书不仅包括了在试验室中实现（有时得到政府的资助）的先进替代产品，而且也有具体项目中的应用效果。还有声学构件的样品，在此期间也都发展为价格合理的市场产品，而且都受到专利的保护。书中科学原理及公式的推导只是为了使读者更好地应用这些技术、措施和材料。

在每一章末，列出该章节内容涉及的参考文献。其中专业杂志如：《建筑物理（*Bauphysik*）》，《噪声控制（*Lärmbekämpfung*）》，《健康与工程师（*Gesundheits - Ingenieur*）》，《科学工作者（*Arbeitswissenschaft*）》，《室内声学装修（*Trockenbau - Akustik*）》，《管弦乐队（*Orchester*）》，《咨询工程师（*Beratende Ingenieure*）》，《声学（*Acustica*）》，《应用声学（*Applied Acoustics*）》和《噪声控制工程（*Noise Control Engineering*）》等对研发成果的发表提供了帮助，使读者了解这些技术上的进步。读者建设性的回应和意见，鼓励我将再次修改和扩大第 11 章，增加了一些理论的分析 and 一种新型墙角吸收体，作为改善语言交流型房间的噪声环境的高性价比解决方案。如同前面几个版本，这是一个不小的工作进展。因此，我再次欢迎读者的批评指正。

本书出版物所有成绩的取得，都该真挚地感谢以前我领导的弗劳恩霍夫建筑物理研究所（Fraunhofer IBP）的研究人员：阿克曼（U. Ackermann），弗罗姆霍尔德（W. Frommhold）和埃科尔特（D. Eckoldt）（负责管道消声器），查雪琴（X. Zha）和德罗特烈夫（H. Drotleff）（负责室内声学）和莱斯特纳（P. Leistner）和布兰德施泰特（P. Brandstätter）（负责噪声控制）以及他们的团队。还要特别感谢英文版翻译者尼豪斯夫人（M. Nierhaus）的艰苦努力。

赫尔姆特·富克斯（H. V. Fuchs）

柏林 2011 年 12 月

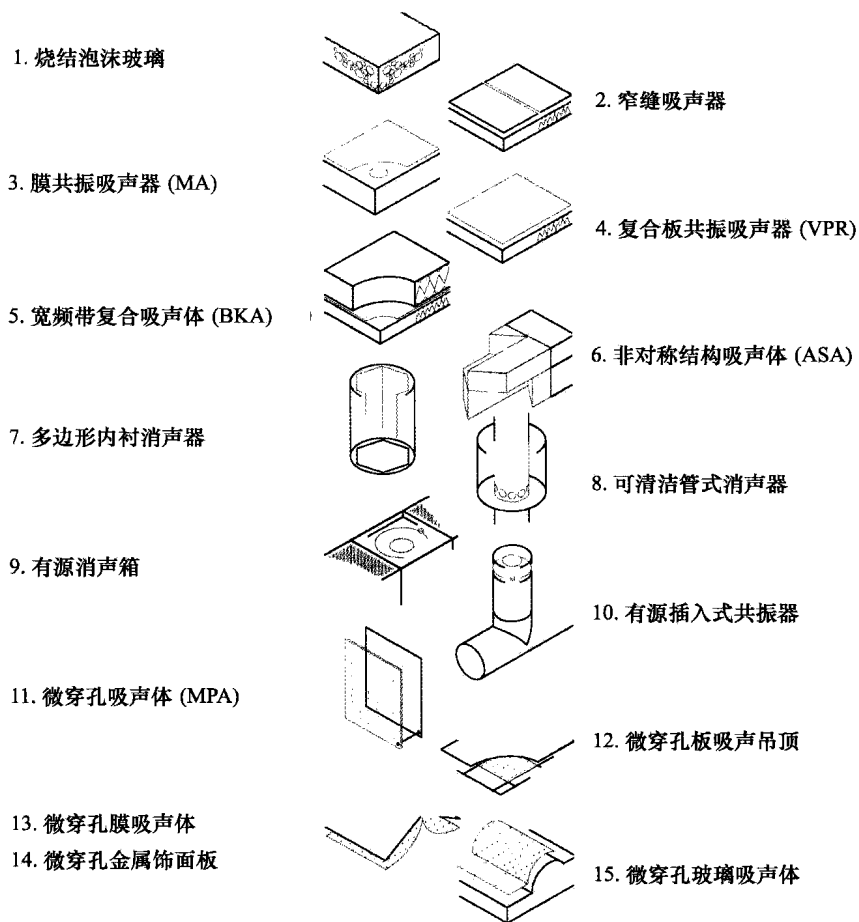


图 1 替代型无纤维吸声材料 (ALFA), 广泛应用于室内声学 and 噪声控制

表 1 德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会（FhG）研究工作的创新成果，通过与工业界技术服务（DL）、订立专利使用许可合同、专业技术和合作协议（LV）走向市场的几种方式

阶段	步骤		方式1		方式2		方式3	
			FhG	工业	FhG	工业	FhG	工业
研发	1	问题	→ 服务	①	①		①	
		答案		↓	↓		↓	
	2	应用		②	②		②	
		知识保护		↓	↓		↓	
	3	测试	→ 服务	③	③		③	
		样品		↓	↓			
检验	4	适应性	→ 服务	④			专利合同	④
		市场		↓				↓
	5	耐久性		⑤				⑤
		造型		↓				↓
	6	演示	→ 服务	⑥				⑥
		媒体		↓				↓
市场化	7	数量		⑦				⑦
		价格		↓				↓
	8	可替代性		⑧				⑧
		市场竞争		↓				↓
	9	交流		⑨				⑨
		合作		↓				↓
	10	渗透		⑩				⑩
		多样化						

符号	单位	名称
θ		对称角
α		吸声系数
$\bar{\alpha}$		平均吸声系数
$\bar{\alpha}_E$		室内各装置的平均吸声系数
α_{Eyr}		艾润吸声系数，式 (11.9)
α_R		最大可能吸声系数
α_a	dB km^{-1}	吸收损失 (空气中)，表 3.2
α_e		有效吸声系数，式 (2.8)
α_p		实际吸声系数，图 11.31
α_s		混响室法吸声系数 (赛宾吸声系数)，式 (3.15)
α_w		计权吸收系数，图 11.31
δ	10^{-6} m	边界层厚度，式 (4.13)
δ, δ_n	s^{-1}	半值宽度，式 (2.3)
$\Delta\phi$	Hz	带宽
ΔL	dB	(声) 压级差
ΔL_Q	dB	声源噪声减低量
Δp	Pa	压差，压力损失
$\Delta\sigma$	m	行程差
Δt	mm	管端修正
ε		适配关系，式 (4.7)
ε	$\text{€}/\text{kWh}$	能源价格
ζ		压力损失系数，式 (13.25)
η		损失因数
η		频率参量，式 (13.7)
η	$\text{g m}^{-1} \text{ s}^{-1}$	空气的黏滞性
η		效率
η		(机械的) 风机效率，式 (13.28)
η_R		空间利用系数，式 (12.15)
ϑ	$^\circ$	辐射角
λ	m	波长
λ_0	m	低端波长
μ		设备满载率
μ		设备使用率
μ		衰减指数，式 (4.6)
μ		泊松比

v		指向性因数, 集束性指数
Ξ	Pa s m^{-2}	流阻率, 式 (4.4)
ρ	kg m^{-3}	密度
ρ		反射系数
ρ_0	kg m^{-3}	(空气) 密度
ρ_w	kg m^{-3}	墙体单位体积重量
σ		穿孔率
σ		材料的多孔性, 式 (4.2)
σ		管道截面突变
τ		透射 (传播) 系数
τ_F		膜的透射系数
χ		材料的结构因数, 式 (4.3)
ω	s^{-1}	角频率
A	m^2	(等效) 吸声量
A		A 计权
A_E	m^2	物件的吸声量
A_p	m^2	观众的吸声量
AAWT		空气动力学 - 声学风洞
ALFA		替代型无纤维吸声体
AL_{cons}	%	辅音清晰度损失, 式 (11.18)
ASA		非对称结构吸声体, 第 12.6 节
ASK		有源消音箱, 第 8.1 节
ATC		空气动力学测试中心
a	mm	窄缝吸声器的缝间距
B	m	消声器宽度
BHKW		热电力组合
BJA		宽频带复合吸声体, 第 10.2 节
BMW		巴伐利亚汽车制造厂
BR		低音比, 式 (11.10)
B'	Pa m^3	(单位面积) 弯曲劲度, 式 (5.9)
b	mm	窄缝吸声器的缝宽
C, C_{tr}	dB	ISO 717 适配值频谱
C_{50}	dB	清晰度指数, 式 (11.15)
C_{80}	dB	明晰度指数, 式 (11.14)
CAD		计算机辅助设计
c	m s^{-1}	声速
c_0	m s^{-1}	空气中声速
c_D	m s^{-1}	纵波速

D	dB	传播路径中的阻尼或隔离
D*	dB	消声器的特性消声量, 式 (13.6)
D'	dB m ⁻¹	消声器 (单位长) 消声量, 式 (13.4)
D _a	dB	空气中声波传播损失
D _a	dB	消声器的传播损失, 式 (13.37)
D _d	dB	消声器的传递损失, 式 (13.36)
D _e	dB	消声器的插入损失, 式 (13.33)
D _e	dB	消声箱的插入损失, 式 (3.24)
D _i	dB	损失, 隔离
D _s	dB	隔离指数
DB		德国铁路公司
DC		戴姆勒 - 克莱斯勒汽车公司
DI	dB	指向性指数
DIN		德国标准局
DLR		德国航空航天局
DL2	dB	VDI 3760 距离倍增的声压级递减
DLf	dB	VDI 3760 自由场传输中的声压级提升
d	mm	建筑构件的厚度
d	mm	与墙的距离, 式 (5.3)
d	mm	消声器内吸声层厚度
d	mm	消声片的 (半) 厚度
d _α	mm	阻尼材料的厚度
d'	m	双层 (构造) 的层间距
E	Pa	弹性模量
E _d	Pa	阻尼层的弹性模量
EDT	s	早期衰变时间
EIZ		多角形内装修, 第 10.6 节
EK	T € a ⁻¹	能源价格, 式 (13.32)
EL	MWh a ⁻¹	(电) 能, 式 (13.31)
e	mm	空腔隔断间距, 式 (6.14)
F		(频率) 失调; 失谐, 式 (5.6)
F ₀	m ²	净底面积
FA		薄膜吸声器, 第 5.1 节
FhG		德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会
FKFS		斯图加特机动车及动力研究所
f	Hz	频率
f ₁	Hz	下限频率
f ₀	Hz	消声室的下限频率

f_H	Hz	赫姆霍兹共振频率, 式 (6.2)
f_{MPA}	Hz	MPA 的共振频率, 式 (9.7)
f_R	Hz	共振频率
f_S	Hz	施罗德频率
f_c	Hz	截止频率, 式 (7.12), 式 (13.15)
f_d	Hz	VPR 的基频, 式 (5.11)
f_m	Hz	(频带) 中心频率
f_o	Hz	消声特性曲线的 (右) 拐角频率, 式 (13.8)
f_u	Hz	消声特性曲线的 (左) 拐角频率, 式 (13.9)
G	dB	强度指数
GK		允许噪声评价曲线 (德国广播, 电视)
H	m	消声器的高度, 第 13.1 节
HOAI		建筑师和工程师的工作费用标准 (德国)
h	m	空间高度
h_{eff}	m	隔离屏有效高度, 第 3.8 节
IACC		耳间 (听觉) 互相关系数
IBP		德国弗劳恩霍夫建筑物理研究所
IDMT		德国弗劳恩霍夫数字媒体技术研究所
IIS		德国弗劳恩霍夫集成电路研究所
ISE		无关声效果
ISO		国际标准化组织
K	€	土建投资
K_0	dB	ISO 3745 传输校正
K_1	dB	ISO 3745 外界噪声校正
K_2	dB	ISO 3745 房间影响校正
K_S	$m^2 n^{-1}$	面积参数, 式 (10.1), 式 (11.26)
K_V	$m^3 n^{-1}$	体积参数, 式 (10.2)
K_W	$W m^{-3}$	热参数, 式 (10.3)
K_m		MPA 的 (声质量) 系数, 式 (9.5)
K_r		MPA 的 (声阻尼) 系数, 式 (9.6)
k_C		能量使用因数, 图 11.14
k_E		回声因数, 式 (11.20)
k_T		混响因数, 式 (11.19)
k_{PL}		位置因数, 式 (11.21)
$k_{f,h}, k_{f,t}$		频率因数, 图 11.21
$\bar{L}$	dB	平均响度级
L	dB	声压级
L	m	长度, 例如消声器的

LF		侧向（声）能成分
L_0	dB	无指向性声源的声压级
L_{EX}	dB	暴露声级，式（11.38），表 11.4
$L_{EX, 8h}$	dB	8 小时 ~ 1 天的平均暴露声级
$L_{EX, 40h}$	dB	40 小时 ~ 1 周的平均暴露声级
L_S	dB	干扰声级
L_W	dB	声功率级
L_a	m	共振器空腔的长度
L_b	m	共振器空腔的宽度
L_e	dB	外部噪声级
L_{eq}	dB	连续噪声的等效声级
L_i	dB	照射声级
L_x	dB	声级分布
l	m	棱长
l_R	m	室内棱长
l_m	m	平均自由程，式（11.5）
l_x, l_y, l_z	m	房间尺寸
M	$\text{Pa s}^2 \text{ m}^{-1}$	声质量，式（8.3）
MA		膜共振吸声器，第 6.3 节
MPA		微穿孔吸声体，第 9 章
m		截面比
m		消声（器内）片的厚度与片间距之比，式（13.1）
m	10^{-3} m^{-1}	（空气中）耗损率
m''	kg m^{-2}	面密度
m_A'	kg m^{-2}	可振动空气面密度
m_F''	kg m^{-2}	薄膜面密度
m_H''	kg m^{-2}	吸声材料表面换算的声质量
m_P''	kg m^{-2}	振动薄板的面密度
m_S''	kg m^{-2}	窄缝内空气面密度，式（6.6）
m_W''	kg m^{-2}	墙的面密度
N	kW	功率
N		简正频率数，式（2.6）
N	Pa m^{-1}	弹性，挠度，式（8.3）
NGF	m^2	净地面积
NR		噪声评价曲线
NRC		ISO 1996，ISO 噪声评价曲线
NVH		噪声、振动与平顺性
N_{el}	kW	（电）功率，式（13.29）