



轻质板壳结构设计的 振动和声学基础

卢天健 辛锋先 © 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

轻质板壳结构设计的 振动和声学基础

卢天健 辛锋先 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

轻质板壳结构被广泛地用作汽车、高速机车、舰船/潜艇及航空航天飞行器外壳及内部隔舱结构,其声振耦合特性的研究对降低交通工具舱内外噪声至关重要。在民用及国防工业领域减振降噪应用需求的牵引下,本书通过理论分析、实验验证和数值计算研究了汽车、高速机车、舰船/潜艇及航空航天飞行器中常用典型结构的声振耦合特性,建立了相对完善可靠的结构声振耦合特性理论表征体系,分析了关键结构参数对结构声振耦合特性的影响,揭示了弯曲波在结构中的传播规律及结构的声辐射/传声特性,提出了轻质、高强度、声辐射小及隔声性能优良的复杂板壳结构的创新优化设计概念,建立了综合结构质量、力学刚度和声振耦合特性的优化设计理论和判据,并结合该领域最新的国内外科研进展进行了系统的概括总结,为典型板壳/板腔结构在我国民用工业及国防工业中的应用奠定了理论基础、提供了实验依据及技术支撑。

本书既可作为高年级大学生和研究生的教材,也可作为相关研究人员和工程师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轻质板壳结构设计的振动和声学基础 / 卢天健, 辛锋先著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-030428-5

I. ①轻… II. ①卢…②辛… III. ①结构振动-研究②结构设计-声学-研究 IV. ①O327②TB5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 040500 号

责任编辑: 刘宝莉 周 炜 / 责任校对: 包志虹

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 15 1/4 插页: 2

字数: 288 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

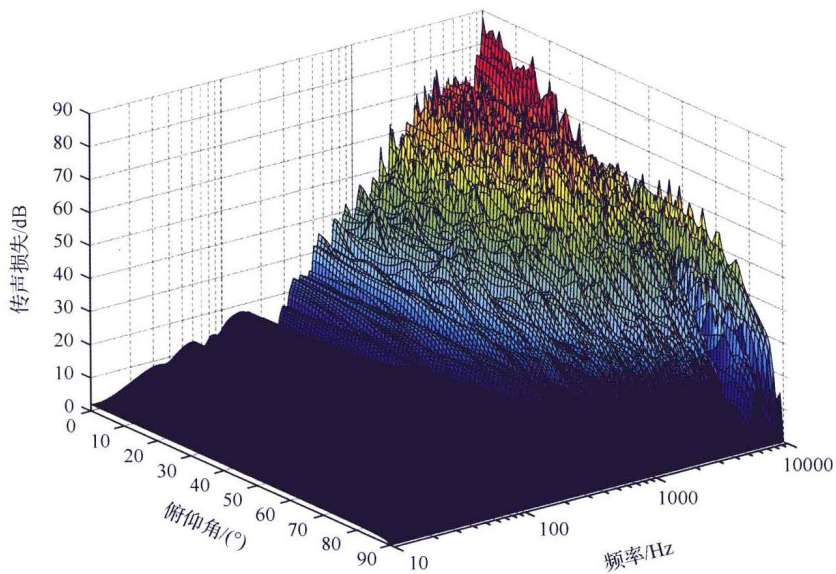
复杂板壳结构通常是具有多功能特性的轻质结构,具有质量轻、刚度大、抗冲击性能及散热性能优良等特性,在多个领域有着重要应用,如被广泛用于建筑、包装行业,特别是被广泛用作汽车、高速机车、舰船/潜艇及航空航天飞行器的外壳结构等。鉴于复杂板壳结构有着极为广泛和重要的应用,其结构振动和声场耦合问题日益受到人们的重视,其中一个重要方面就是结构声场的传入传出问题,如汽车、高速机车、航空航天飞行器舱外噪声透过板壳结构传入舱内及潜艇内部发动机噪声透过板壳结构传出舱外。因此,研究复杂板壳结构的声振耦合特性对优化设计结构从而降低噪声具有非常重要的现实意义。

本书的作者近年来一直致力于复杂板壳结构声振耦合特性的理论研究和实验研究,取得了较为可观的研究成果和经验。本书的内容主要是总结作者近年来的研究成果和学术心得,对汽车、高速机车、舰船/潜艇及航空航天飞行器上广泛涉及的几类典型板壳结构的声振耦合特性的理论研究方法及相关结论进行了系统的论述。

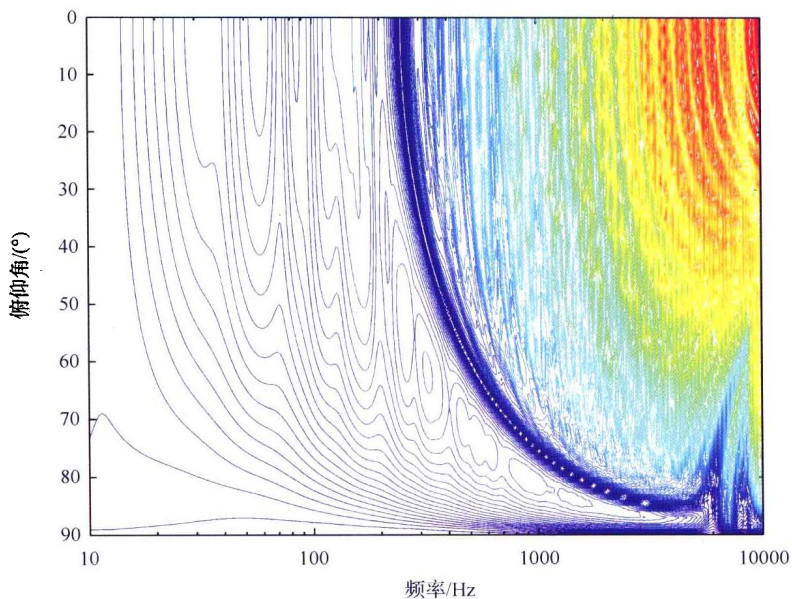
在应用科学领域通常存在一个两难的困境:系统可以经过简化来建立简洁但却足以反映真实系统物理本质的理论模型,在某种程度上这类理论模型往往学术及应用价值不高;工程上真正关心的系统通常十分复杂,建立符合实际情况的完善的理论模型往往面临艰巨的挑战甚至难于实现。本书针对轻质板壳结构振动和声学的理论研究,试图在这两者中间取得平衡,所以作者希望物理学家和应用数学家在看到本书的时候,能够原谅作者为了清楚定性地描述真实物理系统而对真实复杂系统在物理上所做的简化及适当地牺牲数学上的严谨性。

本书的完成要特别感谢国家重点基础研究发展计划 973 项目“超轻多孔材料及其构成结构多功能化应用的基础研究”(2011CB610300)、国家自然科学基金面上项目“外部流体加载作用下复杂周期加筋板壳结构的声振耦合特性”(11072188)、国家自然科学基金青年基金项目“面向高速列车减振降噪的车体结构振动与声学特性研究”(11102148)和高等学校学科创新引智计划资助项目“111 计划”(B06024)。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请前辈及同仁不吝赐教。

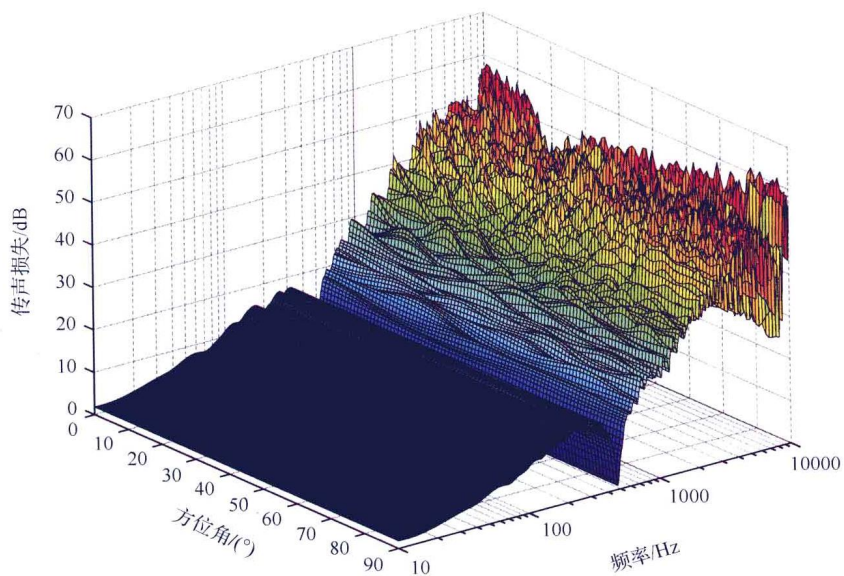


(a) 全视图

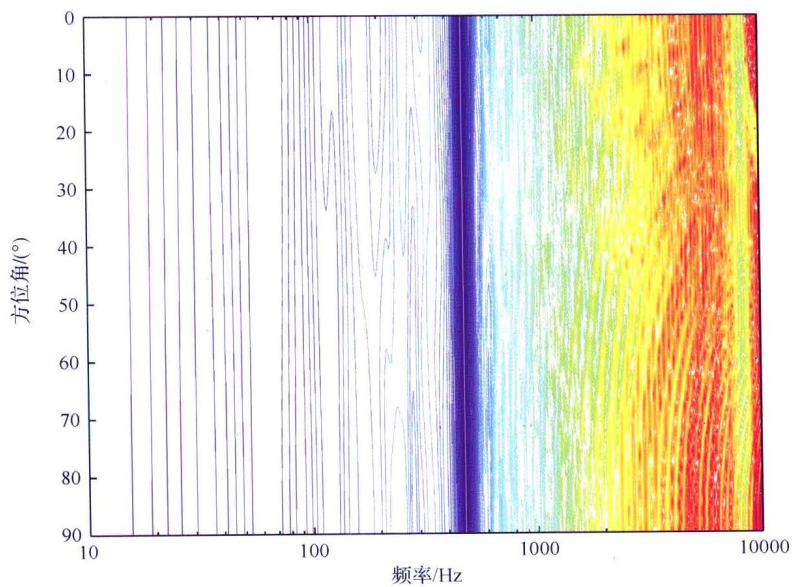


(b) 等高线视图

图 4.13 简支双板空腔结构传声损失随入射声波俯仰角和入射声波频率变化的三维视图及其相应的等高线视图



(a) 全视图



(b) 等高线视图

图 4.14 简支双板空腔结构传声损失随入射声波方位角和入射声波频率变化的三维视图及其相应的等高线视图

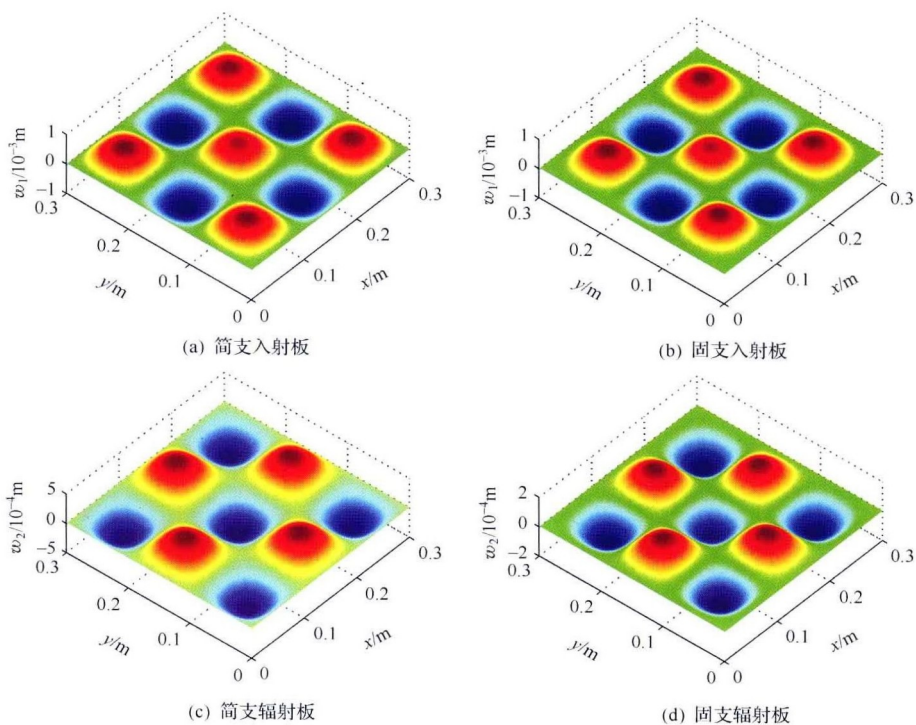


图 4.25 板的(3,3)阶模态振型图

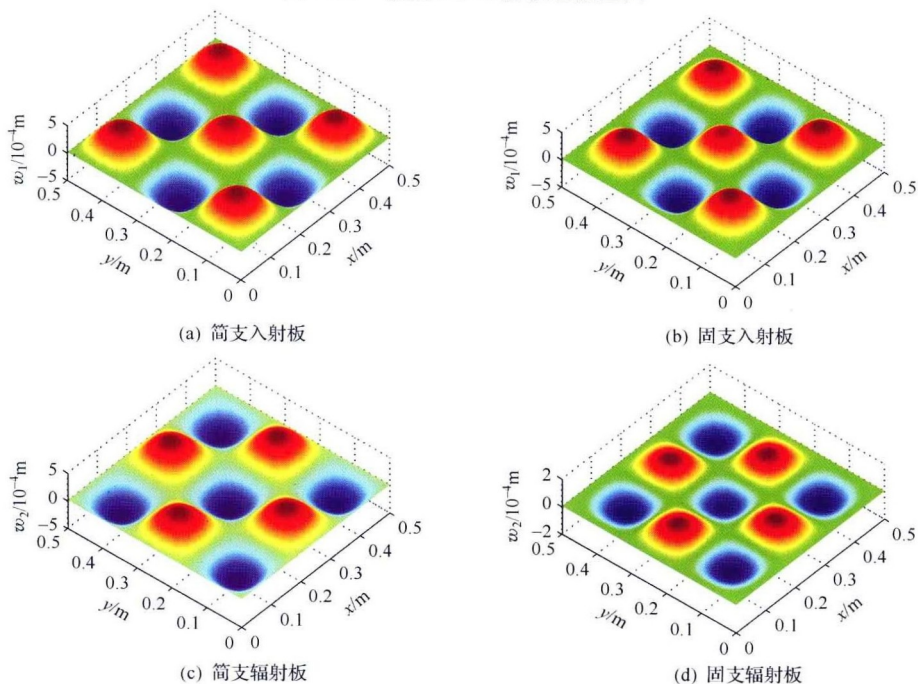
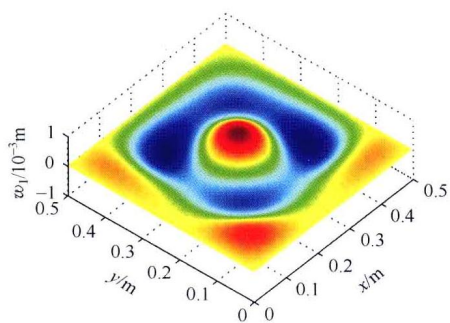
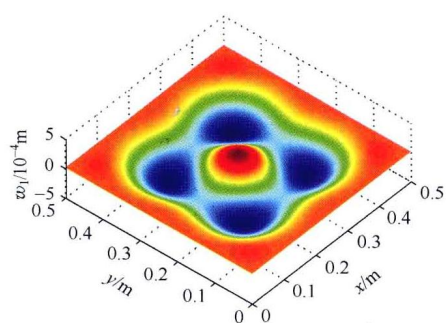


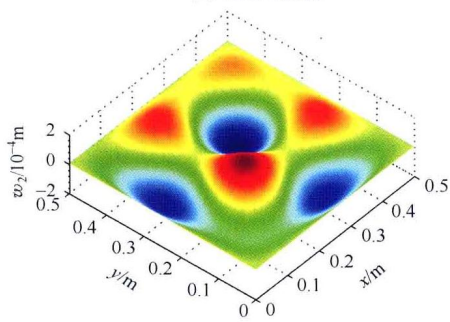
图 4.28 板在垂直入射声波激励下的模态位移图($\varphi=0^\circ, \theta=45^\circ$)



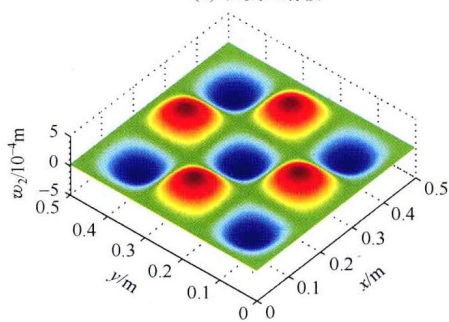
(a) 简支入射板



(b) 固支入射板

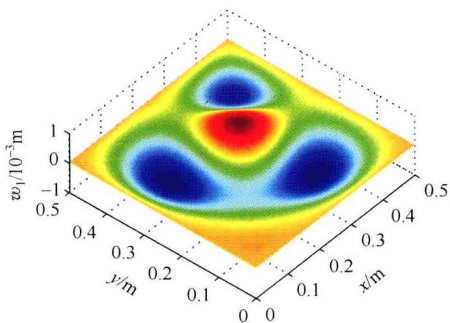


(c) 简支辐射板

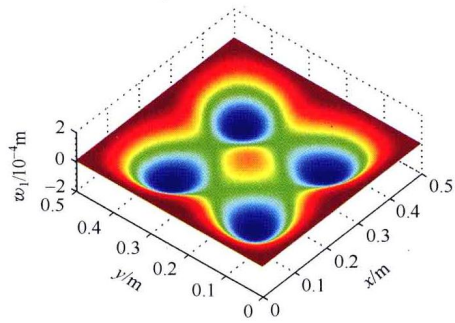


(d) 固支辐射板

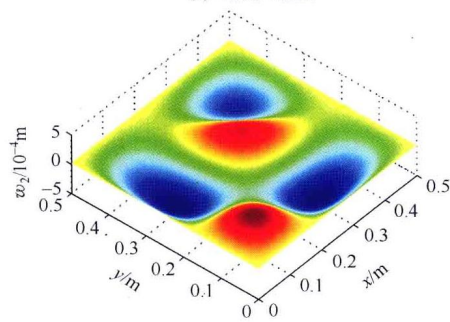
图 4.30 板在斜入射声波激励下的模态位移图 ($\varphi = 30^\circ, \theta = 45^\circ$)



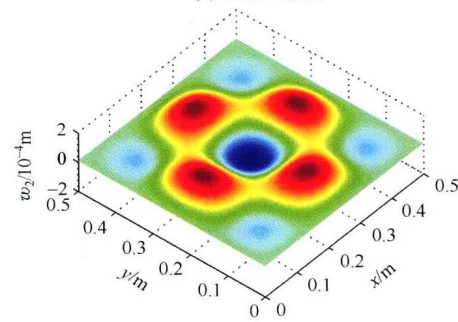
(a) 简支入射板



(b) 固支入射板



(c) 简支辐射板



(d) 固支辐射板

图 4.32 板在斜入射声波激励下的模态位移图 ($\varphi = 60^\circ, \theta = 45^\circ$)

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和依据	1
1.2 研究思路及研究内容	3
1.2.1 研究目标及研究思路	3
1.2.2 研究内容及结构安排	4
第 2 章 轻质夹层板壳结构的制备工艺	8
2.1 蜂窝结构层芯轻质结构	9
2.2 波纹加筋板层芯轻质结构.....	10
2.3 PMI 泡沫层芯轻质结构	11
2.4 复合结构层芯轻质结构.....	12
2.5 三维点阵结构层芯轻质结构.....	12
第 3 章 轻质板壳结构振动和声学性能的研究概况	14
3.1 声辐射及传声损失定义.....	14
3.2 国内外研究进展.....	15
3.2.1 单层加筋板壳结构	16
3.2.2 中间为空腔的双层板壳结构	19
3.2.3 层芯为各向同性/异性/黏弹性材料的三明治夹层板	22
3.2.4 层芯为加筋板的三明治夹层板壳	24
3.2.5 层芯为多孔泡沫材料或蜂巢结构的三明治夹层板	29
3.2.6 外部流场作用下板壳结构的声振耦合性能.....	32
3.2.7 轻质板壳结构优化设计及主被动控制	35
3.3 总结评论.....	37
第 4 章 有限大双板空腔结构声振耦合特性的理论与实验研究	39
4.1 引言.....	39
4.2 简支双板空腔结构的声振耦合特性.....	40
4.2.1 简支声振耦合理论模型及求解	40
4.2.2 能量描述.....	44
4.2.3 数值结果收敛性检验	45
4.2.4 简支理论模型验证	45

4.2.5	空气腔厚度的影响	47
4.2.6	板平面结构尺寸的影响	50
4.2.7	声波入射俯仰角及方位角的影响	52
4.3	固支双板空腔结构的声振耦合特性	57
4.3.1	固支声振耦合理论模型及求解	57
4.3.2	传声损失定义	60
4.3.3	固支理论模型验证	61
4.3.4	有限大结构与无限大结构的对比	61
4.3.5	板的厚度对结构传声损失的影响	63
4.3.6	空腔厚度对结构传声损失的影响	64
4.3.7	声波入射角对结构传声损失的影响	64
4.4	实验测量研究	67
4.4.1	传声损失实验测量研究	67
4.4.2	实验测量结果与理论模型验证	69
4.4.3	简支和固支边界条件的关系	72
4.5	本章小结	78
第5章	外部流场作用下板壳结构声振耦合特性的理论研究	80
5.1	引言	80
5.2	外部平均流作用下简支单板的传声特性	81
5.2.1	气动弹性薄板在外部流体作用下的振动	82
5.2.2	流固界面上的位移连续性条件	84
5.2.3	传声损失定义	86
5.2.4	入射声场中平均流的影响	86
5.2.5	透射声场中平均流的影响	89
5.2.6	入射声场和透射声场都存在平均流情况下声波入射角的影响	92
5.3	外部平均流作用下无限大双板结构的传声特性	94
5.3.1	板振动方程	95
5.3.2	流固耦合条件	96
5.3.3	传声损失定义	98
5.3.4	无限大板的特征阻抗	98
5.3.5	传声损失曲线上波峰波谷的物理解释	99
5.3.6	马赫数的影响	102
5.3.7	声波入射俯仰角的影响	106
5.3.8	声波入射方位角的影响	107
5.3.9	板曲率及舱内压力的影响	108

5.4 本章小结	109
第6章 波纹层芯夹层板结构声振耦合特性的理论研究	111
6.1 引言	111
6.2 波纹层芯夹层板结构的声振耦合特性	112
6.2.1 结构振动及传声理论模型	112
6.2.2 理论模型验证	115
6.2.3 声波入射角对夹层板结构声振耦合特性的影响	117
6.2.4 层芯结构对夹层板结构隔声性能的影响	118
6.2.5 传声损失曲线存在波峰波谷的物理机制	121
6.2.6 综合力学和声学性能的结构优化设计	124
6.3 本章小结	126
第7章 正交加筋夹层板结构声振耦合特性的理论研究	127
7.1 引言	127
7.2 正交加筋夹层板结构的声辐射理论	129
7.2.1 结构振动理论模型	129
7.2.2 控制方程求解	133
7.2.3 结构远场声辐射	135
7.2.4 理论模型验证	136
7.2.5 加筋板惯性效应的影响	137
7.2.6 点激振位置的影响	138
7.2.7 加筋板周期间距的影响	140
7.3 正交加筋夹层板结构的传声理论	141
7.3.1 结构振动及传声的解析公式	141
7.3.2 声压方程和速度连续性条件	145
7.3.3 虚功原理的应用	146
7.3.4 总体控制方程	148
7.3.5 传声损失定义	150
7.3.6 空间谐波级数解收敛性检验	151
7.3.7 理论模型验证	152
7.3.8 声波入射角的影响	153
7.3.9 加筋板惯性效应的影响	154
7.3.10 加筋板周期间距的影响	155
7.3.11 空气传声和结构传声的对比	155
7.4 本章小结	157

第 8 章 填充吸声材料夹层板结构声振耦合特性的理论研究	159
8.1 引言	159
8.2 填充吸声材料夹层板结构的声辐射理论	160
8.2.1 简谐点力激励下的结构振动响应	160
8.2.2 声压方程与流固耦合条件	162
8.2.3 结构远场声辐射	167
8.2.4 数值结果收敛性检验	167
8.2.5 结构流固耦合效应的影响	168
8.2.6 多孔纤维吸声材料的影响	171
8.3 填充吸声材料夹层板结构的传声理论	171
8.3.1 结构振动和传声理论模型	172
8.3.2 结构周期特性的应用	174
8.3.3 虚功原理的应用	176
8.3.4 总体控制方程	177
8.3.5 理论模型验证	179
8.3.6 流固耦合效应对结构传声的影响	180
8.3.7 综合结构质量、力学刚度和传声损失的结构优化设计	182
8.4 本章小结	184
第 9 章 结论与展望	186
9.1 本书的主要工作与创新	186
9.2 研究展望	191
参考文献	193
附录 A 方程式(4.69)的具体表达式	208
附录 B 四种声学共振模态	210
附录 C 波纹层芯的等效刚度	213
附录 D 方程式(7.57)的具体表达式	215
附录 E 方程式(7.118)的具体表达式	219
附录 F 方程式(8.25)的具体表达式	223
附录 G 方程式(8.71)的具体表达式	226

Contents

Foreword

1. Introduction	1
1.1 Background and Motivation	1
1.2 Aim and Scope	3
1.2.1 Targets	3
1.2.2 Structure of the Book	4
2. Fabrication of Lightweight Sandwich Structures	8
2.1 Honeycomb Core Sandwich	9
2.2 Corrugated Core Sandwich	10
2.3 PMI Foam Core Sandwich	11
2.4 Composite Core Sandwich	12
2.5 Lattice-Truss Core Sandwich	12
3. Fundamental Theory and State of the Art for Vibroacoustic Research	14
3.1 Definition of Sound Radiation and Transmission Loss	14
3.2 Advances in Vibroacoustic Research	15
3.2.1 Single-Leaf Rib-Stiffened Structures	16
3.2.2 Double-Leaf Partitions	19
3.2.3 Isotropic/Anisotropic/Viscoelastic Core Sandwich Structures	22
3.2.4 Rib-Stiffener Core Sandwich Structures	24
3.2.5 Cellular Foam/Honeycomb Core Sandwich Structures	29
3.2.6 Elastic Structures Immersed in Fluid Flow	32
3.2.7 Optimal Design and Initiative/Passive Control	35
3.3 Summary	37
4. Vibroacoustic Responses of Finite Double-Panel Partitions	39
4.1 Introduction	39
4.2 Sound Transmission through Simply Supported Double-Panel Structures	40
4.2.1 Vibroacoustic Theoretical Modeling and Solution	40
4.2.2 Energy Description	44
4.2.3 Convergence Check for Numerical Results	45

4. 2. 4	Model Validation	45
4. 2. 5	Effects of Air Cavity Thickness	47
4. 2. 6	Effects of Panel Geometrical Dimensions	50
4. 2. 7	Effects of Incident Elevation Angle and Azimuth Angle	52
4. 3	Sound Transmission through Clamp Mounted Double-Panel Structure	57
4. 3. 1	Vibroacoustic Theoretical Modeling and Solution	57
4. 3. 2	Defination of Sound Transmission Loss	60
4. 3. 3	Model Validation	61
4. 3. 4	Finite Versus Infinite Double-Panle Partition	61
4. 3. 5	Effects of Panle Thickness on STL	63
4. 3. 6	Effects of Air Cavity Thickness on STL	64
4. 3. 7	Effects of Incident Angle on STL	64
4. 4	Experimental Measurements	67
4. 4. 1	Sound Transmission Measurements	67
4. 4. 2	Experimental Results and Model Validation	69
4. 4. 3	Relationships Between Clamped and Simply Supported Boundary Conditions	72
4. 5	Summary	78
5.	Vibroacoustic Responses of Structures Imerged in Convected Fluids	80
5. 1	Introduction	80
5. 2	Sound Transmission through Finite Aeroelastic Panels in Convected Fluids	81
5. 2. 1	Aeroelastic Panel Dynamics and Interactions with Convected Fluids ...	82
5. 2. 2	Displacement Continuity Condition at Fluid-Panel Interfaces	84
5. 2. 3	Defination of Sound Transmission Loss	86
5. 2. 4	Effects of Mean Flow in Incident Field	86
5. 2. 5	Effects of Mean Flow in Transmitted Field	89
5. 2. 6	Effects of Incident Elevation Angle	92
5. 3	Mean Flow Effect on Sound Transmission through Double-Leaf Aeroelastic Plates	94
5. 3. 1	Formulation of Plate Dynamics	95
5. 3. 2	Consideration of Fluid-Structure Coupling	96
5. 3. 3	Defination of Sound Transmission Loss	98
5. 3. 4	Characteristic Impedance of an Infinite Plate	98

5.3.5	Physical Interpretation for the Appearance of STL Peaks and Dips	99
5.3.6	Effects of Mach Number	102
5.3.7	Effects of Incident Elevation Angle	106
5.3.8	Effects of Incident Azimuth Angle	107
5.3.9	Effects of Panel Curvature and Cabin Internal Pressurization	108
5.4	Summary	109
6.	Vibroacoustic Responses of Sandwich Structures with Corrugated Cores ...	111
6.1	Introduction	111
6.2	Sound Transmission through Sandwich Structures with Corrugated Cores	112
6.2.1	Vibroacoustic Theoretical Modeling	112
6.2.2	Model Validation	115
6.2.3	Effect of Incidence Angle on STL	117
6.2.4	Effects of Core Topology on STL	118
6.2.5	Physical Interpretation for the Existence of STL Peaks and Dips	121
6.2.6	Optimal Design for Combined Mechanical and Acoustical Performances ...	124
6.3	Summary	126
7.	Vibroacoustic Responses of Orthogonally Rib-Stiffened Sandwich Structures	127
7.1	Introduction	127
7.2	Sound Radiation Theory of Orthogonally Rib-Stiffened Sandwich Structures	129
7.2.1	Analytical Formulation of Panel Vibration	129
7.2.2	Solution of Governing Equations	133
7.2.3	Far Field Radiated Sound Pressure	135
7.2.4	Validation of Theoretical Modeling	136
7.2.5	Influences of Inertial Effects Arising from Rib-Stiffener Mass	137
7.2.6	Influence of Excitation Position	138
7.2.7	Influence of Rib-Stiffener Spacings	140
7.3	Sound Transmission Theory of Orthogonally Rib-Stiffened Sandwich Structures	141
7.3.1	Analytic Formulation of Panel Vibration and Sound Transmission	141
7.3.2	Acoustic Equation and Velocity Continuity Condition	145
7.3.3	Virtual Work Principle	146
7.3.4	Governing Equations	148

7.3.5	Definition of Sound Transmission Loss	150
7.3.6	Convergence Check for Space-Harmonic Series Solution	151
7.3.7	Validation of Theoretical Modeling	152
7.3.8	Influence of Sound Incident Angles	153
7.3.9	Influence of Inertial Effects Arising from Rib-Stiffener Mass	154
7.3.10	Influence of Rib-Stiffener Spacings	155
7.3.11	Influence of Airborne and Structure-Borne Paths	155
7.4	Summary	157
8.	Vibroacoustic Responses of Rib-Stiffened Structures with Cavity Absorption	159
8.1	Introduction	159
8.2	Sound Radiation of Rib-Stiffened Sandwich Structures with Cavity Absorption	160
8.2.1	Structural Dynamic Responses to Time-Harmonic Point Force	160
8.2.2	Acoustic Equation and Fluid-Structure Coupling	162
8.2.3	Far Field Sound Radiated Pressure	167
8.2.4	Convergence Check for Numerical Solution	167
8.2.5	Influence of Air-Structure Coupling Effect	168
8.2.6	Influence of Fibrous Sound Absorptive Filling Material	171
8.3	Transmission Loss of Rib-Stiffened Sandwich Structures with Cavity Absorption	171
8.3.1	Analytic Formulation of Panel Vibration and Sound Transmission	172
8.3.2	Application of Structural Periodicity	174
8.3.3	Virtual Work Principle	176
8.3.4	Governing Equations	177
8.3.5	Model Validation	179
8.3.6	Effects of Fluid-Structure Coupling on Sound Transmission	180
8.3.7	Optimal Design for Combined Structure Mass, Bending Stiffness and STL	182
8.4	Summary	184
9.	Conclusions and Suggestions	186
9.1	Summary of Main Contents	186
9.2	Future Research Directions	191
	References	193
	Appendix A Derivation of Equation (4.69)	208
	Appendix B Four Different Types of Acoustic Phenomenon	210

Appendix C	Equivalent Stiffness of Corrugated Core	213
Appendix D	Derivation of Equation (7.57)	215
Appendix E	Derivation of Equation (7.118)	219
Appendix F	Derivation of Equation (8.25)	223
Appendix G	Derivation of Equation (8.71)	226