



国防科技图书出版基金

复合材料结构振动与声学

Vibration and Acoustics of Composite Structures

孟 光 瞿叶高 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

复合材料结构振动 与声学

Vibration and Acoustics of Composite Structures

孟 光 瞿叶高 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

复合材料结构振动与声学 / 孟光, 瞿叶高著. —北京: 国防工业出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-118-11196-5

I. ①复… II. ①孟… ②瞿… III. ①复合材料结构-结构振动-研究 ②复合材料结构-声学-研究 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 055375 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 24 $\frac{3}{4}$ 字数 446 千字

2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 148.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

随着复合材料制造水平和材料各项性能指标的不断提高,由复合材料制造而成的结构部件已广泛地应用于航空航天和船舶舰艇等工程领域。工程中对复合材料的青睐,使得复合材料结构动力学和声学问题研究越来越受到人们的重视。准确地预测复合材料结构振动与声学特性是复合材料与结构一体化设计的关键。与常规均匀各向同性材料不同,复合材料具有各向异性、非均匀性等特点,导致复合材料结构振动与声学问题的建模、计算和分析要复杂和困难得多。以往针对均匀材料结构引入和发展的力学概念、理论和分析方法等有许多已不再适用于复合材料结构。进一步完善和发展复合材料结构振动与声学相关理论及分析方法,对于推动复合材料在工程中的应用具有重要意义。

复合材料在工程中的应用遵循着由小到大、由简到繁、从次承力结构到主承力结构的规律,这些结构大多可简化为梁、板、壳体或其组合形式。复合材料结构振动与声学问题研究虽已取得了很大进展,但遗憾的是,国内外出版的书籍对相关研究缺乏系统性的论述。想要了解、掌握该领域研究内容和方法的人们只能从零散的文献中去寻找和学习,非常不便。在复合材料蓬勃发展和广泛使用的今天,迫切需要一本系统地介绍复合材料结构振动和声学理论以及能提供解决实际问题方法的参考书。

复合材料结构振动和声学分析涉及的一个基本问题是结构理论模型的建立。概括地说,应用于复合材料结构力学分析的理论有三维弹性理论和简化理论两类。三维弹性理论是精确理论,对于解决复合材料深梁、厚板和厚壳问题是必需的,但是精确化的同时,也使得问题分析变得复杂。简化理论是在一定力学假设基础上由三维弹性理论退化得来的,由于引入的力学假设不同,因此形成了各式各样的结构理论。例如:在层合梁方面,有 Euler - Bernoulli 梁理论、Rayleigh 梁理论、Timoshenko 一阶剪切变形梁理论、高阶剪切变形梁理论、锯齿理论和分层理论等;在层合板方面,有 Kirchhoff 薄板理论、Reissner - Mindlin 一阶剪切变形板理论、高阶剪切变形板理论、锯齿理论和分层理论等;在层合壳体方面,有薄壳理论(包括 Love、Donnell、Reissner、Novozhilov、Vlasov、Sanders 和 Flügge 壳体理论等)、一阶剪切变形壳体理论、高阶剪切变形壳体理论、锯齿理论和分层理论等。这些梁、板和壳体理论研究成果分散于各类文献中,研究者们对这些理论在复合材料结构振动及声学问题中的适用性尚未有明确的结论。本书力图采

用广义高阶剪切锯齿理论将各种简化的层合梁、板及壳体理论统一起来,该理论中的位移场采用广义位移分布形函数和锯齿函数来描述层合结构的变形特征。通过调整或选择不同的位移分布形函数和锯齿函数,该理论可退化为目前广泛应用的各种梁、板及壳体理论。

复合材料结构振动和声学研究中的另一个基本问题是寻求结构振动与声学问题的解。由于结构材料、几何形状、边界条件和载荷情况等复杂性,能够采用解析法来求解的复合材料结构振动和声学问题极为有限。解决工程实际问题的有效途径是采用数值方法,其中结构振动方面的数值方法以有限元法为主,而声学方面则以边界元法为主。虽然有限元法在复合材料结构分析方面取得了巨大的成功,但还存在一些不足。例如,高阶剪切变形理论是分析复合材料梁、板及壳体振动问题的一类非常有效的结构理论,但基于此类理论构造的有限元单元通常要求位移的一阶导数在单元交界面上满足连续性条件,使得单元形函数的构造变得很困难。本书介绍了一种结构分区建模与分析方法,该方法采用分区变分法来放松子域分区界面位移协调条件,取消了子域界面位移协调关系对位移场变量的变分限制,使得子域位移展开函数的选取变得十分简单,克服了传统有限元法中板壳单元形函数不易构造的困难。在复合材料结构声学方面,本书给出了频域和时域声学谱边界元法以及分区变分-谱边界元混合法,它们为流体中复合材料结构声学问题的研究提供了准确、有效的分析工具。

本书的主要内容是在作者从事复合材料结构振动与声学研究的成果基础上,经过加工、提炼而系统集成的。在内容安排上,本书有三条主线:一是结构理论主线,介绍了复合材料直梁、曲梁、板和壳体的广义高阶剪切锯齿理论和三维弹性理论;二是结构振动主线,介绍了纤维增强复合材料和功能梯度材料直梁、曲梁、矩形板、圆板、壳体和复杂组合结构的分区变分建模与振动分析问题;三是结构声学主线,介绍了声学谱边界元法、分区变分-谱边界元混合法以及它们在复合材料结构声振耦合问题和实际工程问题中的应用。本书共分为8章,具体内容安排如下:

第1章介绍了复合材料的基本概念,讨论了各种复合材料梁、板和壳体结构理论的特点,并综述了复合材料结构振动与声学问题的研究进展情况。第2章介绍了各向异性材料弹性体的基本方程,包括弹性体应力、应变、几何关系、本构关系、运动方程和边界条件等。第3章介绍了线弹性动力学的各种变分原理,包括最小势能原理、Hamilton变分原理、广义变分原理、修正变分原理和分区Nitsche变分法。第4章介绍了复合材料层合直梁、曲梁、板及壳体的广义高阶剪切锯齿理论,讨论了如何由广义高阶剪切理论退化得到各种常见的梁、板和壳体理论;同时还基于分区变分法分析了层合直梁、曲梁、矩形板和壳体的振动问题,讨论了各种简化结构理论的适用性。第5章介绍了基于分区变分法和三维

弹性理论的层合长方体、圆板和壳体的动力学建模与分析问题。第6章介绍了功能梯度材料梁、矩形板、圆板和壳体的振动建模与分析问题。第7章介绍了频域和时域声学边界积分方程和谱边界元法,讨论了边界积分方程的非唯一解问题和奇异积分的处理方法。第8章讨论了弹性结构的声振耦合问题,介绍了声振耦合分析的分区变分-谱边界元混合法,讨论了典型复合材料板壳结构的声辐射特性,同时还提供了该方法在具体工程中的应用实例。

本书可作为高等院校力学专业和航空航天、船舶、机械、土木工程等专业高年级大学生以及研究生课程的参考书,也可供从事复合材料结构设计、振动与噪声分析的研究人员参考。希望本书能使读者更好地理解和掌握复合材料结构理论、振动与声学方面的理论知识,并学到解决具体工程问题的方法。由于作者水平有限,书中难免有疏漏及不足之处,衷心希望读者批评指正。

衷心感谢国防工业出版社和国防科技图书出版基金的支持和资助,衷心感谢上海宇航系统工程研究所和空间结构与机构重点实验室(筹)对本书的大力支持,衷心感谢上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室和舰船设备噪声与振动控制技术重点学科实验室提供试验条件支持。

作者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 复合材料概述	1
1.1.1 复合材料的定义和分类	1
1.1.2 纤维增强复合材料	3
1.1.3 功能梯度材料	6
1.2 复合材料结构理论	7
1.2.1 复合材料层合梁理论	8
1.2.2 复合材料层合板理论	9
1.2.3 复合材料层合壳体理论	11
1.3 复合材料结构振动研究方法	12
1.3.1 复合材料梁振动	13
1.3.2 复合材料板振动	15
1.3.3 复合材料壳体振动	16
1.4 复合材料结构声学研究方法	18
第2章 各向异性体弹性力学基础	21
2.1 直角坐标系中的弹性体基本方程	21
2.1.1 应力和应变	21
2.1.2 本构关系	24
2.1.3 应力和应变坐标变换	31
2.1.4 运动微分方程与边界条件	34
2.2 曲线坐标系中的弹性体基本方程	35
2.2.1 曲线坐标系	36
2.2.2 几何方程	37
2.2.3 本构关系	39
2.2.4 运动微分方程与边界条件	40

第3章 线弹性动力学的变分原理	42
3.1 最小势能原理	42
3.2 Hamilton 变分原理	45
3.3 广义变分原理	47
3.3.1 Hellinger - Reissner 变分原理	47
3.3.2 Hu - Washizu 变分原理	49
3.4 修正变分原理	51
3.4.1 修正 Hamilton 变分原理	51
3.4.2 分区修正变分原理	52
3.5 分区 Nitsche 变分法	56
3.5.1 分区 Nitsche 变分泛函	56
3.5.2 弹性体离散动力学方程	58
3.5.3 数值算例	61
第4章 层合梁、板及壳体 Zig - zag 理论与振动	65
4.1 一维层合直梁	66
4.1.1 Zig - zag 理论位移场	66
4.1.2 基本微分方程	71
4.1.3 分区力学模型	78
4.1.4 数值算例	80
4.2 一维层合曲梁	87
4.2.1 Zig - zag 理论位移场	88
4.2.2 基本微分方程	89
4.2.3 分区力学模型	95
4.2.4 数值算例	97
4.3 二维层合板	100
4.3.1 Zig - zag 理论位移场	100
4.3.2 基本微分方程	102
4.3.3 分区力学模型	111
4.3.4 数值算例	114
4.4 二维层合壳体	117
4.4.1 壳体基本概念	117
4.4.2 Zig - zag 理论位移场	119
4.4.3 基本微分方程	121

4.4.4	分区力学模型	137
4.4.5	数值算例	140
第5章	层合梁、板及壳体三维弹性理论与振动	153
5.1	层合长方体	153
5.1.1	基本方程	153
5.1.2	分区力学模型	156
5.1.3	数值算例	161
5.2	层合圆板	175
5.2.1	基本方程	175
5.2.2	分区力学模型	177
5.2.3	数值算例	181
5.3	层合壳体	183
5.3.1	基本方程	183
5.3.2	分区力学模型	187
5.3.3	数值算例	190
第6章	功能梯度材料梁、板及壳体振动	204
6.1	功能梯度材料的物性参数	204
6.1.1	Voigt 混合律	205
6.1.2	Mori - Tanaka 模型	208
6.2	功能梯度材料直梁	208
6.2.1	分区力学模型	208
6.2.2	数值算例	210
6.3	功能梯度材料矩形板	215
6.3.1	基于高阶剪切理论的分区力学模型	215
6.3.2	基于三维弹性理论的分区力学模型	219
6.3.3	数值算例	220
6.4	功能梯度材料圆板	224
6.4.1	分区力学模型	224
6.4.2	数值算例	225
6.5	功能梯度材料壳体	227
6.5.1	分区力学模型	227
6.5.2	数值算例	229

第7章 声学边界积分方程和谱边界元法	240
7.1 理想流体介质的声波方程	241
7.1.1 连续性方程	241
7.1.2 运动方程	243
7.1.3 状态方程	244
7.1.4 声场波动方程与边界条件	245
7.1.5 声场 Helmholtz 方程与边界条件	247
7.2 频域声场边界积分方程	249
7.2.1 基本解	249
7.2.2 声辐射边界积分方程	251
7.2.3 声散射边界积分方程	256
7.2.4 边界积分方程数值离散	258
7.2.5 数值算例	271
7.3 频域轴对称声场边界积分方程	273
7.3.1 轴对称声场边界积分方程	273
7.3.2 边界积分方程数值离散	276
7.3.3 数值算例	281
7.4 时域声场边界积分方程	282
7.4.1 基本解	282
7.4.2 时域边界积分方程	284
7.4.3 边界积分方程数值离散	289
第8章 复合材料结构声振耦合系统	294
8.1 弹性体频域声振耦合系统	294
8.1.1 弹性体分区模型	296
8.1.2 声场谱边界元离散	297
8.1.3 弹性体声振耦合方程	300
8.1.4 数值算例	302
8.2 旋转壳体频域声振耦合系统	304
8.2.1 壳体分区模型	304
8.2.2 声场谱边界元离散	305
8.2.3 壳体声振耦合方程	308
8.3 复合材料壳体频域声振耦合问题	310
8.3.1 圆柱壳振动与声辐射	310

8.3.2	圆锥壳振动与声辐射	316
8.3.3	球壳振动与声辐射	319
8.4	加筋壳体频域声振耦合问题	324
8.4.1	加筋壳体声振模型	325
8.4.2	圆锥壳-加筋圆柱壳-圆锥壳	329
8.4.3	半球壳-加筋圆柱壳-半球壳	335
8.5	梁-弹性支撑-加筋壳体声振耦合问题	347
8.5.1	螺旋桨-轴-艇体声振耦合模型	347
8.5.2	螺旋桨-轴-艇体声振耦合响应	351
8.6	弹性体时域声振耦合系统	355
8.6.1	弹性体时域声振方程	355
8.6.2	数值算例	357
	参考文献	359
	附录 与本书内容相关的著者论文列表	373

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Introduction to Composite Materials	1
1.1.1	Definition and Classification of Composite Materials	1
1.1.2	Fiber – Reinforced Composite Materials	3
1.1.3	Functionally Graded Materials	6
1.2	Theories of Composite Laminated Structures	7
1.2.1	Composite Laminated Beam Theories	8
1.2.2	Composite Laminated Plate Theories	9
1.2.3	Composite Laminated Shell Theories	11
1.3	Methods for Vibration Analysis of Composite Structures	12
1.3.1	Vibration of Composite Beams	13
1.3.2	Vibration of Composite Plates	15
1.3.3	Vibration of Composite Shells	16
1.4	Methods for Structural Acoustics of Composite Structures	18
Chapter 2	Anisotropic Elasticity	21
2.1	Equations of Elasticity in Cartesian Coordinates	21
2.1.1	Stresses and Strains	21
2.1.2	Constitutive Equations	24
2.1.3	Coordinate Transformations of Stresses and Strains	31
2.1.4	Equations of Motion and Boundary Conditions	34
2.2	Equations of Elasticity in Curvilinear Coordinates	35
2.2.1	Curvilinear Coordinate System	36
2.2.2	Strain – Displacement Equations	37
2.2.3	Constitutive Equations	39
2.2.4	Equations of Motion and Boundary Conditions	40

Chapter 3	Variational Principles of Linear Elastodynamics	42
3.1	The Principle of Minimum Potential Energy	42
3.2	Hamilton's Principle	45
3.3	Generalized Variational Principles	47
3.3.1	Hellinger – Reissner's Principle	47
3.3.2	Hu – Washizu's Principle	49
3.4	Modified Variational Principles	51
3.4.1	Modified Hamilton's Principle	51
3.4.2	Subregion Variational Principle	52
3.5	Nitsche's Subregion Variational Method	56
3.5.1	Nitsche's Subregion Variational Functional	56
3.5.2	Discretization of Equations of Motion	58
3.5.3	Numeircal Cases	61
Chapter 4	Zig – zag Theories and Vibrations of Composite Laminated Beams, Plates and Shells	65
4.1	One – Dimensional Composite Laminated Straight Beams	66
4.1.1	Displacement Field of Zig – zag Theory	66
4.1.2	Governing Equations	71
4.1.3	Sub – Domain Model of Straight Beam	78
4.1.4	Numerical Cases	80
4.2	One – Dimensional Composite Laminated Curved Beams	87
4.2.1	Displacement Field of Zig – zag Theory	88
4.2.2	Governing Equations	89
4.2.3	Sub – Domain Model of Curved Beam	95
4.2.4	Numerical Cases	97
4.3	Two – Dimensional Composite Laminated Plates	100
4.3.1	Displacement Field of Zig – zag Theory	100
4.3.2	Governing Equations	102
4.3.3	Sub – Domain Model of Plate	111
4.3.4	Numerical Cases	114
4.4	Two – Dimensional Composite Laminated Shells	117
4.4.1	Basic Concepts of Shells	117
4.4.2	Displacement Field of Zig – zag Theory	119

4. 4. 3	Governing Equations	121
4. 4. 4	Sub – Domain Model of Shell	137
4. 4. 5	Numerical Cases	140
Chapter 5 Three – Dimensional Theory of Elasticity and Vibration of Composite Laminated Beams, Plates and Shells		153
5. 1	Composite Laminated Rectangular Parallelepipeds	153
5. 1. 1	Governing Equations	153
5. 1. 2	Sub – Domain Model	156
5. 1. 3	Numerical Cases	161
5. 2	Composite Laminated Circular Plates	175
5. 2. 1	Governing Equations	175
5. 2. 2	Sub – Domain Model	177
5. 2. 3	Numerical Cases	181
5. 3	Composite Laminated Shells	183
5. 3. 1	Governing Equations	183
5. 3. 2	Sub – Domain Model	187
5. 3. 3	Numerical Cases	190
Chapter 6 Vibrations of Functionally Graded Beams, Plates And Shells		204
6. 1	Material Properties of Functionally Graded Materials	204
6. 1. 1	Voigt's Rule of Mixture	205
6. 1. 2	Mori – Tanaka's Model	208
6. 2	Functionally Graded Straight Beams	208
6. 2. 1	Sub – Domain Models of Beams	208
6. 2. 2	Numerical Cases	210
6. 3	Functionally Graded Rectangular Plates	215
6. 3. 1	Sub – Domain Models Based on Higher – order Shear Deformation Theory	215
6. 3. 2	Sub – Domain Models Based on Three – Dimensional Theory of Elasticity	219
6. 3. 3	Numerical Cases	220
6. 4	Functionally Graded Circular Plates	224
6. 4. 1	Sub – Domain Models of Circular Plates	224

6.4.2	Numerical Cases	225
6.5	Functionally Graded Shells	227
6.5.1	Sub - Domain Models of Shells	227
6.5.2	Numerical Cases	229
Chapter 7 Boundary Integral Equations of Acoustics and Spectral		
	Boundary Element Methods	240
7.1	Wave Equation of Ideal Fluid	241
7.1.1	Conservation of Mass	241
7.1.2	Equations of Motion	243
7.1.3	Equations of State	244
7.1.4	Wave Equations and Boundary Conditions	245
7.1.5	Helmholtz Equation and Boundary Conditions	247
7.2	Frequency - Domain Boundary Integral Equations of Acoustics	249
7.2.1	Fundamental Solution	249
7.2.2	Boundary Integral Equations for Acoustic Radiation	251
7.2.3	Boundary Integral Equations for Acoustic Scattering	256
7.2.4	Discretization of Boundary Integral Equations	258
7.2.5	Numerical Cases	271
7.3	Frequency - Domain Boundary Integral Equations for Acoustic Fields with Axisymmetric Boundaries	273
7.3.1	Boundary Integral Equation for Axisymmetric Problems	273
7.3.2	Discretization of Boundary Integral Equations	276
7.3.3	Numerical Cases	281
7.4	Time - Domain Boundary Integral Equations of Acoustics	282
7.4.1	Fundamental Solution	282
7.4.2	Time - Domain Boundary Integral Equations	284
7.4.3	Discretization of Boundary Integral Equations	289
Chapter 8 Vibro - Acoustic Coupling Systems of Composite		
	Structures	294
8.1	Vibro - Acoustic Coupling System of Elastic Body in Frequency - Domain	294
8.1.1	Sub - Domain Model of Elastic Body	296
8.1.2	Spectral Boundary Element Discretization of	