



Optimization Design of Viscoelastic  
Composite Structures

# 黏弹性复合材料结构 及其优化设计

© 杨加明 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 黏弹性复合材料结构 及其优化设计

## Optimization Design of Viscoelastic Composite Structures

杨加明 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

黏弹性复合材料结构及其优化设计/杨加明著. —北京:国防工业出版社,2018.7  
ISBN 978-7-118-11622-9

I. ①黏… II. ①杨… III. ①弹性材料-复合材料结构 IV. ①TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第113152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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$  字数 216千字

2018年7月第1版第1次印刷 印数 1-2000册 定价 68.00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,需要不断摸索、认真总结和及时改进,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	柳荣普					
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥			
秘书长	赵伯桥					
副秘书长	许西安	谢晓阳				
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	甘茂治	
(按姓氏笔画排序)	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

黏弹性阻尼材料是高分子聚合物和各种添加剂的复合体,阻尼性能主要源于聚合物的内耗,用其内耗来实现振动能的耗散。复合材料与一般金属材料相比,具有比强度和比刚度高、性能可设计等诸多优点,在航空航天结构中得到了广泛的应用,已经与铝合金、钛合金、合金钢一起成为航空航天的四大结构材料。

黏弹性阻尼复合材料结构是由复合材料和黏弹性阻尼材料黏合而成。相对于金属材料与阻尼材料复合而成的结构,黏弹性阻尼复合材料结构的固有频率、剪切应力应变和损耗因子的可设计性更强,从而更能充分发挥阻尼材料的潜能,提高减振降噪的效果,同时也符合结构阻尼材料的小型化、轻量化和高阻尼化的发展趋势。

本书在传统遗传算法的基础上,使用了新的自适应遗传算法,即最优保存策略和移民策略的应用及乘幂适应度函数的应用。改进后的自适应遗传算法在搜索精度、搜索效率、改善种群多样性及早熟现象方面具有明显的优越性,可以得到令人满意的最优解,这一算法适用于黏弹性复合阻尼结构的单目标或多目标优化设计。

本书共分为8章。第1章至第8章包括如下内容:各向异性材料的弹性力学基础;层合板与黏弹性阻尼材料的基本理论;黏弹性阻尼材料夹杂单层板的应变能分析;单层板夹杂黏弹性阻尼材料的应变能及阻尼性能分析;层合板夹杂双层黏弹性阻尼材料应变能及阻尼性能的分析;改进的遗传算法;黏弹性复合材料结构的优化设计;黏弹性复合材料结构的动态阻尼性能及优化设计。

作者对国防科技图书出版基金的资助表示感谢;对南昌航空大学科技处的帮助表示感谢。本书在编写过程中参考和引用了大量的国内外文献,在此谨向这些文献的作者表示诚挚的谢意。

鉴于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请同行批评指正。

杨加明

2018年3月8日

于南昌航空大学

# 目 录

第 1 章 各向异性材料的弹性力学基础 .....	1
1.1 各向异性材料的弹性力学基本理论 .....	1
1.2 各向异性材料的应力-应变关系 .....	4
1.3 具有一个弹性对称平面材料的应力-应变关系 .....	7
1.4 正交各向异性材料的应力-应变关系 .....	9
1.5 横观各向同性材料的应力-应变关系 .....	10
1.6 各向同性材料的应力-应变关系 .....	12
参考文献 .....	13
第 2 章 层合板与黏弹性阻尼材料的基本理论 .....	14
2.1 概述 .....	14
2.1.1 研究黏弹性复合材料结构的科学依据及意义 .....	14
2.1.2 国内外研究历史追溯 .....	15
2.2 层合板与黏弹性阻尼材料的基本理论 .....	16
2.2.1 基本假设 .....	16
2.2.2 层合板的应力-应变关系 .....	16
2.2.3 黏弹性阻尼材料 .....	18
2.3 Ritz 法 .....	20
参考文献 .....	22
第 3 章 黏弹性阻尼材料夹杂单层板的应变能分析 .....	25
3.1 黏弹性阻尼材料夹杂单层板的面内应变能 .....	25
3.1.1 基础理论 .....	25
3.1.2 利用平衡方程求横向切应力 .....	28
3.1.3 面内应变能 .....	30
3.2 黏弹性阻尼材料夹杂单层板的剪切应变能 .....	31

3.2.1 广义正交各向异性层在 $xz$ 方向的切应力应变能	32
3.2.2 广义正交各向异性层在 $yz$ 方向的切应力应变能	38
3.2.3 黏弹性阻尼层在 $xz$ 方向的切应力应变能	41
3.2.4 黏弹性阻尼层在 $yz$ 方向的切应力应变能	42
3.3 整个板的总应变能	43
3.4 结论	43
参考文献	43
<b>第4章 单层板夹杂黏弹性阻尼材料的应变能及阻尼性能分析</b>	<b>45</b>
4.1 基本假设	45
4.2 面内应力及应变能	46
4.2.1 广义正交各向异性层的面内应力及应变能	46
4.2.2 黏弹性层的面内应力及应变能	47
4.3 利用平衡方程求横向切应力	48
4.3.1 $xz$ 方向的切应力	48
4.3.2 $yz$ 方向的切应力	49
4.4 切应力应变能	49
4.4.1 $xz$ 方向切应力应变能	50
4.4.2 $yz$ 方向切应力应变能	52
4.5 结构的总应变能	54
4.6 损耗因子	54
4.7 算例分析	55
4.8 结论	63
参考文献	64
<b>第5章 层合板夹杂双层黏弹性阻尼材料应变能及阻尼性能的分析</b>	<b>65</b>
5.1 基本假设	65
5.2 面内应力及应变能	66
5.2.1 广义正交各向异性层的面内应变能	66
5.2.2 黏弹性层的面内应变能	67
5.3 利用平衡方程求横向切应力	67
5.3.1 $xz$ 方向的切应力	68



5.3.2	$yz$ 方向的切应力	68
5.4	切应力应变能	69
5.4.1	$xz$ 方向切应力应变能	69
5.4.2	$yz$ 方向切应力应变能	77
5.5	结构的总应变能	82
5.6	损耗因子	82
5.7	算例分析	83
5.8	结论	89
	参考文献	90
第 6 章	改进的遗传算法	91
6.1	基本遗传算法	92
6.1.1	遗传算法的生物学基础	93
6.1.2	遗传算法的特点	94
6.1.3	遗传算法的数学理论基础	95
6.1.4	基本遗传算法的实现	96
6.2	改进的遗传算法-最优保存策略和移民策略的应用	103
6.2.1	思路与流程	103
6.2.2	收敛性证明	105
6.2.3	搜索性能测试	106
6.2.4	小结	109
6.3	改进的遗传算法-乘幂适应度函数的应用	109
6.3.1	函数优化的应用举例	109
6.3.2	乘幂适应度函数的应用	111
6.3.3	改进后的自适应遗传算法性能测试	112
6.3.4	小结	116
	参考文献	116
第 7 章	黏弹性复合材料结构的优化设计	119
7.1	黏弹性复合材料结构阻尼性能优化设计	120
7.1.1	理论假设	120
7.1.2	层合板的应力应变关系	120

7.1.3	黏弹性复合材料结构总应变能计算 .....	123
7.1.4	黏弹性复合材料结构应变能损耗因子计算 .....	124
7.1.5	三层黏弹性复合材料结构应变能损耗因子优化设计 .....	126
7.1.6	五层黏弹性复合材料结构应变能损耗因子优化设计 .....	127
7.1.7	小结 .....	129
7.2	黏弹性复合材料结构强度优化设计 .....	130
7.2.1	正交各向异性材料的强度指标 .....	130
7.2.2	正交各向异性材料的强度理论 .....	131
7.2.3	黏弹性复合材料结构强度计算 .....	133
7.2.4	黏弹性复合材料结构强度优化设计 .....	134
7.2.5	小结 .....	136
7.3	黏弹性复合材料结构阻尼-强度优化设计 .....	136
7.3.1	多目标优化的概念 .....	137
7.3.2	多目标优化的遗传算法 .....	138
7.3.3	适应度函数的构建 .....	139
7.3.4	黏弹性复合材料结构阻尼-强度优化设计 .....	140
7.3.5	小结 .....	141
	参考文献 .....	142
<b>第8章</b>	<b>黏弹性复合材料结构的动态阻尼性能及优化设计 .....</b>	<b>144</b>
8.1	复合材料层合板的动态非线性分析及优化设计 .....	146
8.1.1	理论准备 .....	146
8.1.2	控制方程的推导 .....	149
8.1.3	层合板的自由振动 .....	151
8.1.4	算例与分析 .....	152
8.1.5	复合材料层合板基频的优化设计 .....	154
8.1.6	小结 .....	156
8.2	黏弹性复合材料结构动态阻尼性能及优化设计 .....	156
8.2.1	理论准备 .....	156
8.2.2	控制方程的推导 .....	158
8.2.3	数值计算及结果分析 .....	160

8.2.4 黏弹性复合材料结构阻尼性能的优化设计 .....	162
8.2.5 小结 .....	164
8.3 附录 .....	164
8.3.1 式(8.17)中刚度矩阵 $[S]$ 和质量矩阵 $[M_a]$ 中的元素 .....	164
8.3.2 式(8.31)中刚度矩阵 $[S]$ 和质量矩阵 $[M_a]$ 中的元素 .....	167
参考文献 .....	169

# Contents

<b>Chapter 1 Foundation of Elasticity of Anisotropic Materials</b> .....	1
1.1 Fundamental Theory of Elasticity of Anisotropic Materials .....	1
1.2 The Stress-strain Relationship of Anisotropic Materials .....	4
1.3 The Stress-strain Relationship of the Materials Possessing an Elastic Symmetry Plane .....	7
1.4 The Stress-strain Relationship of Orthotropic Materials .....	9
1.5 The Stress-strain Relationship of Transversely Isotropic Materials .....	10
1.6 The Stress-strain Relationship of Isotropic Materials .....	12
References .....	13
<b>Chapter 2 Basic Theory of Laminated Plates and Viscoelastic Damping Materials</b> .....	14
2.1 Introduction .....	14
2.1.1 Scientific Basis and Significance of Viscoelastic Composite Structures .....	14
2.1.2 Historical Retrospect of Domestic and Foreign Research .....	15
2.2 Basic Theory of Laminated Plates and Viscoelastic Damping Materials .....	16
2.2.1 Basic Hypotheses .....	16
2.2.2 The Stress-strain Relationship of Laminated Plates .....	16
2.2.3 Viscoelastic Damping Materials .....	18
2.3 Ritz Method .....	20
References .....	22
<b>Chapter 3 Strain Energy Analysis of Viscoelastic Damping Materials Mixed with a Single-layer Plate</b> .....	25
3.1 In-plane Strain Energy of Viscoelastic Damping Materials	

Mixed with a Single-layer Plate .....	25
3. 1. 1 Basic Theory .....	25
3. 1. 2 Using Equilibrium Equations to Calculate Transverse Shear Stress .....	28
3. 1. 3 In-Plane Strain Energy .....	30
3. 2 Shear Strain Energy of Viscoelastic Damping Materials	
Mixed with a Single-layer Plate .....	31
3. 2. 1 Shear Strain Energy of Generalized Orthotropic Layer in $xz$ Direction .....	32
3. 2. 2 Shear Strain Energy of Generalized Orthotropic Layer in $yz$ Direction .....	38
3. 2. 3 Shear Strain Energy of Viscoelastic Damping Layer in $xz$ Direction .....	41
3. 2. 4 Shear Strain Energy of Viscoelastic Damping Layer in $yz$ Direction .....	42
3. 3 Total Strain Energy of the Whole Plate .....	43
3. 4 Conclusions .....	43
References .....	43

**Chapter 4 Analysis of Strain Energy and Damping Properties of Unidirectional Composites with an Interleaved Viscoelastic Damping Layer** .....

4. 1 Basic Hypotheses .....	45
4. 2 In-plane Stress and Strain Energy .....	46
4. 2. 1 In-plane Stress and Strain Energy of Generalized Orthotropic Layers .....	46
4. 2. 2 In-plane Stress and Strain Energy of Viscoelastic Layer .....	47
4. 3 Calculation of Transverse Shear Stress by Equilibrium Equations .....	48
4. 3. 1 Shear Stress in $xz$ Direction .....	48
4. 3. 2 Shear Stress in $yz$ Direction .....	49
4. 4 Shear Strain Energy .....	49
4. 4. 1 Shear Strain Energy in $xz$ Direction .....	50
4. 4. 2 Shear Strain Energy in $yz$ Direction .....	52
4. 5 The Total Strain Energy of the Structures .....	54
4. 6 Loss Factor .....	54
4. 7 Examples .....	55
4. 8 Conclusions .....	63
References .....	64

<b>Chapter 5 Strain Energy and Damping Analysis of Composite Laminated Plates with Two Interleaved Viscoelastic Layers</b> .....	65
5.1 Basic Hypotheses .....	65
5.2 In-plane Stress and Strain Energy .....	66
5.2.1 In-plane Strain Energy of Generalized Orthotropic Layers .....	66
5.2.2 In-plane Strain Energy of Viscoelastic Layer .....	67
5.3 Calculation of Transverse Shear Stress by Equilibrium Equations .....	67
5.3.1 Shear Stress in $xz$ Direction .....	68
5.3.2 Shear Stress in $yz$ Direction .....	68
5.4 Shear Strain Energy .....	69
5.4.1 Shear Strain Energy in $xz$ Direction .....	69
5.4.2 Shear Strain Energy in $yz$ Direction .....	77
5.5 The Total Strain Energy of the Structures .....	82
5.6 Loss Factor .....	82
5.7 Examples .....	83
5.8 Conclusions .....	89
References .....	90
<b>Chapter 6 Improved Genetic Algorithms</b> .....	91
6.1 The Basic Genetic Algorithm .....	92
6.1.1 Biological Basis of Genetic Algorithm .....	93
6.1.2 The Characteristics of Genetic Algorithm .....	94
6.1.3 Mathematical Theory Foundation of Genetic Algorithm .....	95
6.1.4 The realization of the Basic Genetic Algorithm .....	96
6.2 Improved Genetic Algorithm– the Application of Optimal Preservation Strategy and Immigration Strategy .....	103
6.2.1 Thinking and Routing .....	103
6.2.2 Convergence Analysis .....	105
6.2.3 Test of Searching Property .....	106
6.2.4 Preliminary Summary .....	109
6.3 Improved Genetic Algorithm–the Application of the Power	

Fitness Functions .....	109
6.3.1 Application Examples of Function Optimization .....	109
6.3.2 The Application of the Power Fitness Functions .....	111
6.3.3 Performance Tests of the Improved Adaptive Genetic Algorithm .....	112
6.3.4 Preliminary Summary .....	116
References .....	116
<b>Chapter 7 Optimization Design of Viscoelastic Composite Structures .....</b>	<b>119</b>
7.1 Optimal Design of Damping Properties of Viscoelastic Composite Structures .....	120
7.1.1 Basic Hypotheses .....	120
7.1.2 The Stress-strain Relationship of Laminated Plates .....	120
7.1.3 Calculation of the Total Strain Energy of Viscoelastic Composite Structures .....	123
7.1.4 Loss Factors of Strain Energy for Viscoelastic Composite Structures .....	124
7.1.5 Optimal Design of Loss Factors of Strain Energy for Three-layer Viscoelastic Composite Structures .....	126
7.1.6 Optimal Design of Loss Factors of Strain Energy for Five-layer Viscoelastic Composite Structures .....	127
7.1.7 Preliminary Summary .....	129
7.2 Optimization Design for Structural Strength of Viscoelastic Composite Materials .....	130
7.2.1 The Strength Index of Orthotropic Materials .....	130
7.2.2 The Strength Theory of Orthotropic Materials .....	131
7.2.3 Structural Strength for Viscoelastic Composite Materials .....	133
7.2.4 Optimization Design of Structural Strength for Viscoelastic Composite Materials .....	134
7.2.5 Preliminary Summary .....	136
7.3 Optimization Design of Damping-strength for Viscoelastic Composite Structures .....	136
7.3.1 The Concept of Multi-objective Optimization .....	137
7.3.2 Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization .....	138

7.3.3	Formation of the Fitness Functions .....	139
7.3.4	Optimal Design of Damping–strength for Viscoelastic Composite Structures .....	140
7.3.5	Preliminary Summary .....	141
References	.....	142

<b>Chapter 8</b>	<b>Dynamic Damping Performance and Optimal Design for Viscoelastic Composite Structures .....</b>	<b>144</b>
8.1	Dynamically Nonlinear Analysis and Optimal Design of Composite Laminated Plates .....	146
8.1.1	Theoretical foundation .....	146
8.1.2	Derivation of the Governing Equations .....	149
8.1.3	Free Vibrations of Laminated Plates .....	151
8.1.4	Examples and Analysis .....	152
8.1.5	Optimal Design for the Base Frequency of Composite Laminated Plates .....	154
8.1.6	Preliminary Summary .....	156
8.2	Dynamic Damping Performance and Optimal Design for Viscoelastic Composite Structures .....	156
8.2.1	Theoretical Foundation .....	156
8.2.2	Derivation of the Governing Equations .....	158
8.2.3	Numerical Calculation and Result Analysis .....	160
8.2.4	Optimal Design of Damping Properties for Viscoelastic Composite Structures .....	162
8.2.5	Preliminary Summary .....	164
8.3	Appendix .....	164
8.3.1	Elements in the Stiffness Matrix $[S]$ and Mass Matrix $[M_a]$ of the Equation (8.17) .....	164
8.3.2	Elements in the Stiffness Matrix $[S]$ and Mass Matrix $[M_a]$ of the Equation (8.31) .....	167
References	.....	169



# 第 1 章 各向异性材料的弹性力学基础

## 1.1 各向异性材料的弹性力学基本理论

在一般空间问题中, 包含有 15 个未知函数, 即 6 个应力分量, 6 个应变分量和 3 个位移分量, 它们都是  $x, y, z$  直角坐标变量的函数。对于空间问题, 在弹性体区域内部, 要考虑静力学、几何学和物理学三方面条件, 分别建立三套方程; 并在给定的约束或面力边界上, 建立位移边界条件或应力边界条件。然后在边界条件下求解这些方程, 得出应力分量、应变分量和位移分量。

对于笛卡儿坐标系  $x, y, z$ , 三个正交平面上的应力为<sup>[1]</sup>

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

根据切应力互等定理,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{xy} = \tau_{yx}$ , 因此应力分量共 6 个:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ 。

弹性体在载荷作用下发生变形, 可用应变张量来表示其变形:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

把  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  叫线应变;  $\varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{xy}$  叫张量切应变, 定义

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2}\gamma_{yz}; \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2}\gamma_{xz}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\gamma_{xy} \quad (1.3)$$

式中  $\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$ ——工程切应变, 应变分量也是 6 个。

在空间坐标系中, 任一点有三个方向的位移  $u, v, w$ 。

空间问题的 3 个平衡(运动)微分方程<sup>[2]</sup>为