



# 黏弹性约束层合结构 动态阻尼参数建模及优化研究

孙宝 李占龙 王军 · 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

# 黏弹性约束层合结构动态 阻尼参数建模及优化研究

孙 宝 李占龙 王 军 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

黏弹性约束层合结构动态阻尼参数建模及优化研究/孙宝,李占龙,王军著. —武汉:武汉大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-307-19788-6

I. 黏… II. ①孙… ②李… ③王… III. 阻尼减振—研究  
IV. O328

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 284447 号

责任编辑:李 晶

责任校对:邓 瑶

装帧设计:吴 极

---

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: whu\_publish@163.com 网址: www.stmpress.cn)

印刷: 北京虎彩文化传播有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 9.5 字数: 165 千字

版次: 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19788-6 定价: 78.00 元

---

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

## 黏弹性约束层合结构 动态阻尼参数建模及优化研究



孙宝，男，汉族，1981年3月生，太原科技大学应用科学学院教师，2015年毕业于太原科技大学机械工程学院机械设计理论专业并获工学博士学位，研究方向为阻尼减振理论及其工程应用、最优化理论及其应用。发表学术论文10余篇，其中被SCI/EI收录5篇，参与国家自然科学基金、山西省自然科学基金等省部级科研项目5项，山西省高等学校教学改革创新项目1项，主持太原科技大学博士科研启动项目1项。

# 前 言

绝大多数工程车辆在“非路面”行驶作业时,凹凸不平的地面会对其产生剧烈的振动冲击,剧烈的振动及恶劣的噪声环境已经成为影响工程机械结构及内部设备性能、寿命及可靠性等的重要因素。因此,如何对振动进行有效的控制,减少工程车辆受剧烈振动及由此引起的诸多问题,保证结构系统的正常工作,已经成为当前我国高品质工程车辆开发研制亟须解决的一类重要问题。

阻尼技术已成为工程结构中减振降噪常用的一种手段。经研究发现,目前工程车辆减振结构中大多采用了一种典型的约束阻尼层合结构。约束阻尼处理技术使振动能量转化为热能并耗散掉,该技术改善了工程车辆的附着性能,有效降低了振动噪声水平,从而提高了工程车辆的驾驶舒适性。为此,本书在研究履带式工程车辆黏弹性悬架及井下防爆胶轮车发动机阻尼减振器两种结构的基础上开展了一系列创新性的研究工作。

本书针对黏弹性约束阻尼层合结构的阻尼特性开展了一系列的理论分析、实验研究以及相应的工程应用。本书所提出的理论和方法可为我国工程车辆所用高品质阻尼缓冲减振结构的研究提供一定的参考,也可为其他类型车辆或实际工程中减振结构的设计与改进等领域的研究提供一种新的思路与方法。

本书由孙宝主笔,完成全书的编写工作,李占龙、王军参与了本书实验部分的操作。孙大刚教授、燕碧娟副教授、宋勇、章新、刘世忠、张文军、韩斌慧等老师在本书编写过程中给予了指导和帮助,并且认真审阅了全书,提出了不少宝贵意见,在此表示由衷的感谢。

本书的部分研究工作得到了国家青年科学基金资助项目“管状层间过渡阻尼结构物理-机械参数耦联机理研究”(51405323)、山西省回国留学人员科

研资助项目“基于物理-机械参数耦联特性的  $N$  组合层黏弹性悬架阻尼分析”(2012-073)、太原科技大学博士科研启动项目“ $N$  组合层黏弹性悬架阻尼特性及其多目标优化分析”(20162005)的支持,特此致谢。

由于作者水平和时间所限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

著 者

2018年3月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	(1)
1.1 研究背景及意义 .....	(1)
1.2 国内外关于层合结构的研究进展 .....	(4)
1.3 层合结构阻尼特性的多目标优化 .....	(8)
1.4 研究思路及拟采取的技术路线 .....	(12)
<b>2 层合结构阻尼特性分析</b> .....	(14)
2.1 层合结构的阻尼减振技术 .....	(14)
2.2 层合结构阻尼性能分析的变形能理论 .....	(17)
2.3 薄阻尼层合结构阻尼特性分析 .....	(22)
2.4 中厚阻尼层合结构阻尼特性分析 .....	(31)
2.5 层合结构阻尼特性分析的修正模态应变能法 .....	(40)
2.6 本章小结 .....	(48)
<b>3 层合结构阻尼特性分析的多目标优化算法</b> .....	(50)
3.1 多目标优化问题的基本概念 .....	(50)
3.2 拟态物理学多目标优化算法 .....	(52)
3.3 基于序值与拥挤度的拟态物理学多目标优化算法 .....	(56)
3.4 拟态物理学多目标共轭梯度混合算法 .....	(66)
3.5 本章小结 .....	(73)
<b>4 层合结构阻尼层橡胶力学性能参数的测试</b> .....	(74)
4.1 黏弹性橡胶的阻尼机理及本构模型 .....	(74)
4.2 橡胶材料力学性能参数的测试原理 .....	(76)
4.3 橡胶材料的单轴拉伸实验 .....	(77)
4.4 橡胶材料力学性能参数的测试结果 .....	(85)
4.5 本章小结 .....	(87)

<b>5 层合结构阻尼层橡胶动态性能测试</b> .....	(88)
5.1 黏弹性橡胶材料的动态性能理论.....	(88)
5.2 影响黏弹性阻尼橡胶动态性能的主要因素.....	(90)
5.3 阻尼橡胶的动态性能测试实验.....	(92)
5.4 本章小结.....	(98)
<b>6 黏弹性层合结构阻尼参数建模及多目标优化分析</b> .....	(99)
6.1 层合结构的传热理论及温度场数学模型.....	(99)
6.2 黏弹性悬架的应力场与温度场建模.....	(104)
6.3 黏弹性悬架阻尼参数建模及多目标优化.....	(107)
6.4 本章小结.....	(115)
<b>7 井下胶轮车发动机阻尼减振器的实车振动测试</b> .....	(116)
7.1 井下防爆胶轮车的起源与发展.....	(116)
7.2 发动机新型阻尼减振器力学建模与实体模型.....	(117)
7.3 新型阻尼减振器阻尼特性的理论分析.....	(119)
7.4 新型阻尼减振器的实验测试.....	(121)
7.5 新型阻尼减振器实车振动测试原理及实验分析.....	(122)
7.6 本章小结.....	(131)
<b>8 结论与展望</b> .....	(132)
8.1 结论.....	(132)
8.2 展望.....	(134)
<b>参考文献</b> .....	(136)



# 1 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

近年来,随着我国经济建设的快速发展,大型建设工程项目均已进入一个快速发展的阶段。这些工程项目对高品质工程机械/车辆的需求也与日俱增,中国正从一个工程车辆的制造大国向着制造强国迈进。但我国现有高品质工程车辆的技术水平与国际先进水平相比,仍存在着一定差距(宋勇,2013)。绝大多数工程车辆,包括煤矿机械中使用比较广泛的一类井下工程车辆在“非路面”行驶作业时,会受到凹凸不平的地面对其剧烈的振动与冲击。剧烈的振动将影响其工作精度,缩短寿命,导致噪声污染水平的提高,甚至危害驾乘人员的身心健康,容易导致疲劳驾驶,从而造成严重的安全隐患。可见,复杂的振动及噪声环境已经成为影响工程机械及其内部设备性能、寿命及可靠性等的重要因素(Hong O S,2005;Mc Bride D I et al,2003)。因此,如何对振动进行有效的控制,减少工程车辆受剧烈振动及其引起的诸多问题,保证结构系统的正常工作,已经成为当前我国高品质工程车辆研制急需解决的一类重要问题。

现代工程车辆按其行走机构的不同,主要分为轮胎式与履带式两种类型。以轮胎式为主的一类煤矿井下工程车辆具有操作简便、机动灵活、爬坡能力强、承载能力大等优点,已在地形复杂、巷道低窄的采煤作业中得到了广泛的应用(图 1-1)(李飞,2005)。以履带式为主的工程车辆由于其行走机构接地比相对较小,附着性能优越,且能发挥出较大的牵引力,具有较强的爬坡能力,因而可用于各种不同的工作环境中(图 1-2)。我们知道,以轮胎式为主的煤矿井下工程车辆的振动源主要来自发动机,目前此类工程车辆的发动机普遍采用橡胶悬置系统,其减振元件大多采用由普通橡胶材料制成的单层结构的一种橡胶缓冲垫(图 1-3)。这种简单的阻尼处理技术容易导致系统结构损耗因子偏低,从而无法快速、有效地减少发动机因路面不平而造成的剧烈振动,减振效果很有限。



图 1-1 井下防爆胶轮车



图 1-2 传统履带式推土机

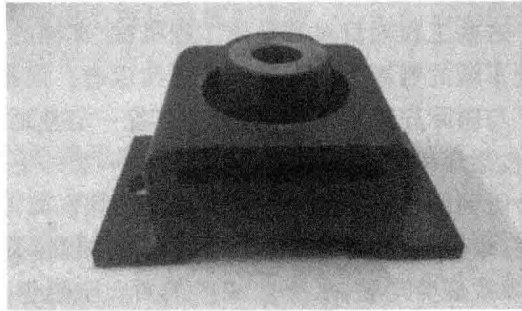


图 1-3 单层结构的橡胶缓冲垫

履带式工程车辆因地面引起的振动冲击主要经行走机构传递到整个车身和驾驶室,在作业过程中各种结构会受到剧烈的冲撞,很大程度上影响了车辆的平顺性与舒适性。例如,传统的履带式推土机(图 1-2)大多采用刚性支重轮结构,机重几乎由支重轮来承担,而来自地面的反作用力直接由支重轮来传至机身,特别是在推土机翻越障碍物时,会出现单侧某一支重轮受力为其均值的数倍,甚至 10 多倍的情况。其行走机构易产生剧烈的振动和冲击,并且此现象随推土机整机功率的加大会愈加突出。

因此,针对井下工程车辆发动机悬置系统所采用的单层结构橡胶缓冲垫,如果可以引入约束处理技术研制出新的阻尼减振器,可有效降低发动机的振动水平,改善发动机的使用工况。同样可将该技术应用于履带式工程车辆悬架机构中(图 1-4)。例如在某型履带式推土机上应用黏弹性悬架机构,经测试,由地面传至机身的振动约减小了 50%,作业生产率提高了 30%,黏弹性机构寿命大于 4000 h。该推土机悬架行走系中安装黏弹性悬架的结构示意图如图 1-5 所示。

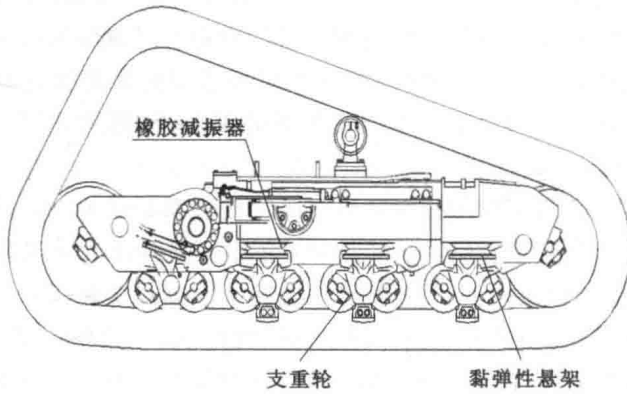


图 1-4 装有黏弹性悬架的履带式行走系

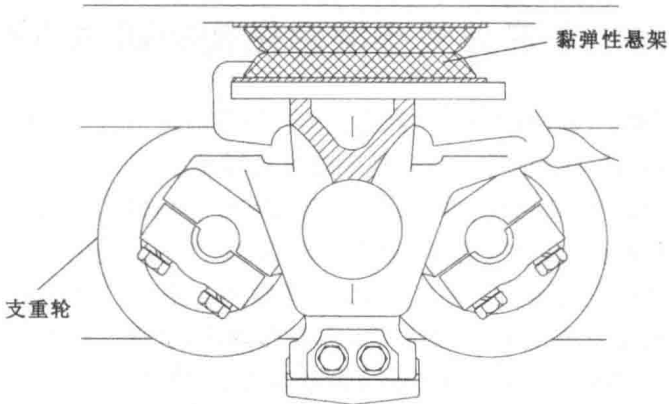


图 1-5 黏弹性悬架结构示意图

履带式工程车辆作业时,黏弹性悬架随行走机构作复合运动,并使得“机械-行走机构-地面”为较贴切的姿态(孙大刚等,1994,1997,2002)。发动机阻尼减振器与黏弹性悬架是一种由金属件与橡胶缓冲件紧密黏结而成的一种黏弹性约束阻尼层合结构,简称层合结构。该结构能承受工程车辆的重载负荷,并且具有很好的缓冲减振性能。约束阻尼处理技术将一种高分子黏弹性材料应用于层合结构中,利用其高阻尼特性,当材料拉压交替变形时,其内部分子产生相互挤压、摩擦及相对位移和错动,从而使振动能量转化为热能并耗散掉。该技术改善了工程车辆的附着性能,从而有效降低了振动噪声水平,最终提高了工程车辆的驾驶舒适性。

美国 Caterpillar 和日本 Komatsu 等著名的工程车辆跨国公司均使用了黏弹性悬架结构。相关阻尼处理技术的成功应用已经成为国际高品质工程车辆的一项标志性技术。然而,国内关于黏弹性悬架的研究报道颇为鲜见。为满足国内外市场对大马力高品质工程机械的需求,有必要对层合结构的特性开展研究。

常见履带式工程车辆所用黏弹性悬架的研究基础可视为一种具有两弹性层的黏弹性约束阻尼层合结构。为此,本书针对该结构的阻尼特性及相关阻尼参数的优化开展研究。相关成果可为工程人员对多弹性层约束阻尼层合结构的阻尼性能、结构设计及改进等问题的研究提供一定的理论参考,并且也可为我国能够拥有自主知识产权的高品质工程机械的研制及开发提供一定的思路与方法。

## 1.2 国内外关于层合结构的研究进展

阻尼技术对振动与噪声的控制在社会经济建设中的各个领域都有着广泛应用。关于机械结构的减振问题,约束阻尼处理技术是一种常用且有效的方式。目前国内外针对层合结构动力学及阻尼特性等领域的研究基本以理论分析为基础,分为解析法与数值法(戴德沛,1986)。解析法包括复刚度法、变形能法等。数值法主要包括模态应变能法、有限单元法等。这些方法主要从阻尼材料耗能机理的研究出发,建立相关的数学模型,并在此模型上构建合理的有限元分析模型来反映层合结构的力学振动特性,从而进一步为层合结构阻尼性能的优化分析及结构设计、改进等问题的研究提供一定的理论基础。

### 1.2.1 层合结构阻尼特性的研究进展

关于约束阻尼层合结构动力学的分析及阻尼性能的研究,国外学者做了较为深入的工作。早期理论包括 1959 年 Kerwin 将阻尼层放置于两平板中构造成一种三层约束阻尼系统,研究阻尼层在三层结构中所形成的阻尼减振效应;1965 年 Di Taranto 给出了含弹性层与黏弹性层的阻尼梁在有限长度下受到弯曲变形所产生的振动分析理论;1969 年 Mead 和 Markus 利用有限元软件分析了阻尼夹层简支梁的弯曲振动模态。约束阻尼层合结构利用阻尼层的黏弹特性达到吸收、消耗结构振动能量的目的,故这种方式称为被动式约束阻尼层合结构。许多学者利用这一方式进而修正或推广了上述早期经典理

论,主要包括 1972 年 Yan 和 Dowell 提出的板与梁结构的相关理论; Trompette 等(1977)给出了局部敷设黏弹性约束阻尼层梁的振动分析及阻尼性能研究;1978 年 Douglas 和 Yang 建立了横向压缩阻尼数学模型,并将该模型应用于黏弹性夹层梁结构的振动测试分析中;同年,Rao 考虑了夹层梁的剪切应变能及弯曲变形能,推导出夹层梁的运动方程,并获得了在不同边界条件下的微分方程数值解;1988 年 Lall 等研究了部分覆盖夹层梁对固有频率和结构损耗因子的影响;Johnson 等利用复特征值法与模态应变能法研究了阻尼夹层梁的阻尼特性;Roy 等(1993)针对一种约束阻尼层圆形板进行了相关阻尼性能的分析;Cao 等(1995)考虑了黏弹性材料随频率变化的特性,提出一种可利用有限元摄动法来分析计算约束阻尼结构的模态固有频率与结构损耗因子的思路及方法,且该方法容易在大型有限元程序中实现;Rongong 等(2000)对模态应变能法做了进一步的改进,提出一种计算模态损耗因子更为精确的方法(rongong modal strain energy, RMSE);Wang Horng Jou 等(2002)研究了对称与非对称黏弹性夹层环形板复合阻尼结构的振动与阻尼性能;Denys J Mead(2007)给出了评价约束阻尼与自由阻尼层与板的结构损耗因子的精确计算方法;Tewari V K(2010)针对约束阻尼结构的振动特性及阻尼性能研究了拖拉机驾驶室内座椅的舒适性;Lima A D 等(2010)对约束阻尼层合结构进行了频率响应的灵敏度分析,分析过程中考虑了黏弹性阻尼材料的温频效应。

许多国内学者也进行了大量的研究,戴德沛(1986)采用变形能理论分析了一种两弹性层约束阻尼结构的阻尼性能,但该理论需要大量的经验数据;陈前等(1990)引入了对偶保守结构的概念,针对层合阻尼结构利用模态应变能法计算了模态损耗因子;陈国平等(1996)对附加阻尼梁的振动分析进行了研究,引入位移模式并考虑了附加部分对原结构阻尼性能的影响;吕刚等(1999)对传统的模态应变能法进行了改进,将黏弹性材料的模量用复模量的绝对值替换,提出一种改进的模态应变能法(absolute value modal strain energy, AVMSE);王正兴等(2000)采用复特征值法在阻尼状态下求解运动方程,得到的特征值与特征向量均为复数,计算复杂性极高;李军强(2001)提出了一种弹性-黏弹性复合结构,利用扩阶状态变量分析了该结构的动态响应;刘广璞等(2001)研究了温度对不同阻尼参数的阻尼层合结构的声压级影响;刘天雄等(2002)对约束阻尼层合板进行了有限元建模分析,并与经典的 GHM 法进行了实验对比;王慧彩(2003)采用直接积分的方法求解了弹性-黏弹性复合结

构的动态响应,通过与实际测量相对比,验证了其精确性;张海燕(2005)利用有限元软件,考虑了黏弹性材料的时温特性,研究了一种大型复合夹层结构物理参数对结构阻尼特性的影响;申颜利等(2008)利用模态应变能法(modal strain energy, MSE)找出阻尼结构的模态参数,计算简单、快速。虽然避免了特征值的计算复杂性问题,但随着黏弹性成分的提高,该方法的误差增大,往往使得计算结果比精确解要偏小;张静(2010)采用复模态分析方法与阻尼子结构模型缩聚的方法对重复矩阵特征值中的复数计算问题进行了研究;李军(2010)建立了有源约束层阻尼板的动力学模型,并利用降阶处理的方法准确表达了该结构的动力特性,最后采用一种 PID 控制手段对结构的振动效果进行了仿真控制;刘正山等(2010)提出了一种新的迭代动态压缩法,明确表达了系统的质量矩阵、刚度矩阵及阻尼矩阵,从而将含有阻尼因素的动力学方程进行了降阶处理;王宜(2010)采用虚功方程对约束阻尼结构的固有频率和模态振型进行了研究,并分析了其中阻尼层材料的布置、尺寸及覆盖率对圆柱壳体振动阻尼特性的影响;吕毅宁等(2010)从变形能角度出发,设计并提出一种车身地板的附加阻尼结构,分析给出了该整体结构在各阶模态下阻尼比的计算公式;杨青等(2010)针对约束阻尼结构进行了频响分析,分析中采用了正弦扫描与随机激励、激振的方法;罗涵(2010)采用一种缝合方式解决了复合阻尼结构中约束层和阻尼层的连接问题,从而大大提高了复合阻尼结构的弯曲性能与冲击性能;盛佳等(2011)推导了正交各向异性矩形板的固有振型,基于应变能和动能求解了阻尼复合板的各阶振动频率;王延庆等(2011)考虑阻尼、动态弹性模量、几何非线性等因素建立了薄壁圆柱壳系统的振动方程,计算并获得了该系统参数变化所导致的非线性振动响应变化规律,结果表明激励力的大小对系统的共振响应影响较大,而对阻尼的变化影响较小。

### 1.2.2 层合结构优化的研究进展

除了上述对层合结构动力学特性及阻尼性能的研究外,国内外许多学者对层合结构的优化方面也做了大量的研究工作。Marcelin J 等(1995)对局部覆盖梁的阻尼处理位置采用遗传算法进行了优化分析,但该方法并未给出直观的构型图,仅对位置参数进行了相关的讨论;Chen Y 等(2002)将约束阻尼层合结构以结构阻尼比为最优目标,对四边简支梁的阻尼处理位置、阻尼处理面积等参数进行了优化分析;Ray M C 等(2004)建立了约束阻尼处理圆柱壳结构的有限元模型,利用频率响应函数来反映对称结构阻尼处理的效果;

Alvelid M(2008)通过最速下降法对矩形板的 PCLD 阻尼处理位置进行了优化分析,取得了良好的减振效果;Rohan P 等(2004)采用有限元拓扑优化软件对约束阻尼结构梁的阻尼层进行了形状的优化,计算过程采用了模态应变能法,该方法设置目标函数使得结构梁的第一阶模态损耗因子最大;Zheng H 等(2006)对约束阻尼层合板的阻尼效果进行了优化分析,重点在于讨论约束层与阻尼层厚度之间的关系及对整个结构阻尼性能的影响;Mohammed A A (2004)对三明治结构的梁与圆盘进行了拓扑优化,其理论与实验数据呈现出很好的吻合效果,结果表明对于低频振动,无须采用主动控制也可以得到很好的减振效果;Alvelid M(2008)在指定模态下,利用模态应变能法对弯曲薄板进行了阻尼处理,并优化分析了该弯曲薄板的阻尼处理位置;Lepoittevin G E G 等(2010)针对阻尼梁提出了一种提高其模态损耗因子的方法,并利用下山单纯形法对不同模态下的切割位置进行了优化分析;Araújo A L 等(2010)考虑了黏弹性阻尼材料的温频特性,提出一种阻尼复合结构阻尼最大化的优化设计方案;Mao Z 等(2010)对阻尼结构的阻尼处理位置进行了优化分析,研究了多约束条件下阻尼结构的动力学优化问题,最终建立了一种快速而有效的优化方法。

杨雪等(2003)研究了二层阻尼结构阻尼参数对层合结构阻尼性能产生的影响,结果表明层合结构存在一个各层的最优厚度比,可提高整体结构的阻尼效果;孙大刚等(1997,2002)、董峰等(2002)对多层管状组合结构的阻尼参数进行了动态优化,也为该结构在大型履带式工程车辆上的应用提供了一定的理论参考;赵小波等(2007)对弹性-黏弹性层合结构的振动响应进行了分析,并采用 Matlab 软件对该复合结构进行了优化设计;谭峰(2010)利用 ANSYS 软件对黏弹性约束阻尼结构的各层厚度进行了优化分析,获得了一系列有效的结论;林松(2007)首先对两种阻尼材料进行了相关的动态频率、位移及温度的扫描实验,并对三种阻尼复合结构开展了相关的优化设计分析,最后开发了一种阻尼复合结构优化设计的软件平台,对实现优化工作的快速化、高效化起到了积极的作用;郑成龙等(2012)针对一种 CLD 矩形板分析研究了其振动特性,优化过程中考虑了黏弹性层厚度与部分材料参数的随机性影响;郑玲等(2010)、李以农等(2010)引入拓扑优化的渐进算法对约束阻尼结构进行了优化设计,并提出一种新的拓扑优化模型,优化过程中以模态阻尼比为最大优化目标,约束阻尼胞单元为设计变量,阻尼材料用量为约束条件;王旭明等(2010)以模态阻尼比为目标函数,阻尼处理体积为约束函数,研究分析了约束

阻尼层模态阻尼比的灵敏度,设计并提出了一种新的结构拓扑优化方法。可以看出:关于层合结构的优化问题均采用拓扑优化方法并以结构的模态损耗因子或模态的阻尼比为优化目标,对约束阻尼结构中阻尼处理的位置、面积、厚度等阻尼参数进行了优化,最终获得了满足约束条件下约束阻尼处理的最佳位置。

综上所述,国内外学者无论是对层合结构阻尼特性还是对结构的优化问题,尤其是对结构动力学参数、相关机械-阻尼参数等方面的优化分析都做了大量的研究工作,并获得了一系列富有成效的结果。但同时也发现上述文献对结构优化分析问题所采用的优化目标相对比较单一,且大多利用了有限元软件,基本属于一种数值分析的方法。从理论上讲,相比单目标优化问题,多目标优化问题所考虑的因素更多、更为全面,且采用多目标优化方法得到的结果也更为准确。为此,对于一个工程优化问题,如何将优化目标增多,且综合考查在多个目标函数下结构阻尼特性的优化效果势必成为一个值得关注的问题。

## 1.3 层合结构阻尼特性的多目标优化

### 1.3.1 多目标优化算法的研究进展

多目标优化问题的求解方法主要包括古典多目标优化方法、基于遗传算法的多目标优化方法及基于粒子群算法的多目标优化方法。

#### (1) 古典多目标优化方法。

古典多目标优化方法的基本思想是将多个优化目标综合为一个目标函数,从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题。在优化过程中动态调整几个目标函数间的相互关系,进而反映出多个优化目标,最终求解得到较好的解集。常见的古典多目标优化方法如下。

① 线性加权法,目前对权重系数的分配,许多学者提出了改进及调整措施,主要有随机权重方法、固定权重方法及适应性权重方法等(L A Zadeh, 1963; A M Geoffrion, 1968)。

② 约束法。由于上述线性加权法难以解决目标空间中凹区域的问题,针对这一缺陷,Haimes等(1971)提出了一种 $\epsilon$ 约束法( $\epsilon$ -constraint method)。该方法思想简单,可操作性较强。但实际中的很多问题,无法获得相应的先验知识,所以在很大程度上限制了该方法的应用。



## (2) 基于遗传算法的多目标优化方法。

作为一种启发式的搜索算法,进化算法能够很好地模拟种群中所有个体搜索群体信息的学习过程。该方法并不需要对多目标优化问题进行数学上的整理,在运行过程中能通过全部个体信息共享操作完成,从而可较好地适用于求解多目标优化问题。1967年,Roesnberg最早提出可利用遗传搜索算法来求解多目标优化问题,但并未给出具体算法。第一个应用遗传算法求解多目标优化问题的是 Schaffer,他于1985年提出矢量评价遗传算法(vector evaluated genetic algorithm,VEGA);20世纪90年代以后,求解多目标优化问题的遗传算法相继被提出。Fonseca等(1993)提出了一种多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm,MOGA);Horn等(1994)提出了一种小生镜遗传算法(niched pareto genetic algorithm,NPGA);Srinivas等(1994)提出了一种非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm,NSGA)。上述三种算法的基本思想都是基于非劣分类的个体选择策略及利用种群多样性的保持策略来进行操作,通常将这些算法统称为第一代进化多目标算法(MOEA)(公茂果等,2009)。

目前最具代表性的多目标进化算法主要包括基于非支配排序的遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm 2,NSGA 2)(Deb K et al,2000)、柏拉图关于外部归档的进化策略算法(pareto archived evolution strategy,PAES)(Knowles J D et al,1999)等。

## (3) 基于粒子群算法的多目标优化方法。

随着演化计算的发展,群体智能算法也相继被开发出来,其中粒子群算法(particle swarm optimization,PSO)尤为常见。1999年 Moore 和 Chapman首次提出 PSO 算法可解决多目标优化问题,然而此思想并未公开发表,此后利用 PSO 解决多目标优化问题开始受到学者们的关注。2002年 Coello 和 Ray 等正式提出了一种可解决多目标优化问题的粒子群多目标优化算法(multi-objective particle swarm optimization,MOPSO)。由于多个优化目标处理方式及种群最优解的选取方式不同,基于这一思想,可以将多目标粒子群优化算法主要分为基于目标函数的排序法、聚集函数法及基于 Pareto 支配的多目标优化算法等。

目前国内外关于多目标优化算法的研究主要集中于基于 Pareto 的方法。该方法借鉴了遗传算法解决多目标优化问题的成功经验,将进化过程的更新分为存储进化基本种群的 population 和存储进化过程中精英个体的 archive