

粘弹性阻尼结构拓扑优化研究进展

易少强,赵晓明,刘健鑫

(武警海警学院机电管理系,浙江 宁波 315801)

摘要:粘弹性材料广泛的应用于振动控制工程中,融入轻量化设计元素对粘弹性阻尼结构进行拓扑优化设计已经成为被动阻尼技术研究的一个重要方向。在系统概括均匀化法、变密度法和渐进结构优化法设计思路的前提下,重点梳理了粘弹性阻尼结构拓扑优化设计的研究成果,总结了在数值仿真方面存在的不足,提出关键技术值得改进的方向,旨在拓宽拓扑优化方法在粘弹性阻尼结构优化设计中的应用前景。

关键词:粘弹性材料;轻量化;阻尼结构;拓扑优化;被动阻尼技术

中图分类号:O327

文献标志码:A

文章编号:1673-9981(2022)06-0971-05

引文格式:易少强,赵晓明,刘健鑫.粘弹性阻尼结构拓扑优化研究进展[J].材料研究与应用,2022,16(6):971-975.

YI Shaoqiang,ZHAO Xiaoming,LIU Jianxin. Research Progress on Topology Optimization of Viscoelastic Damping Structures [J]. Materials Research and Application,2022,16(6):971-975.

振动在我们日常生活中早已司空见惯,其身影渗透于航空航天、交通运输、船舶与海洋等工业部门,但是绝大多数振动具备一定的危害性,如航空发动机涡轮叶片共振和颤振容易引起疲劳断裂的危险^[1],观测卫星调整姿态时引起的振动会影响遥感器的成像质量^[2],船舶机舱内旋转机械产生的振动会恶化舱室的可居住性^[3],海洋钻井平台在风浪和海流反复冲击下产生的振动容易诱发安全事故^[4]。随着现代科学技术的跨越式发展,各工业部门的机械设备呈现出多样化的发展趋势,一方面朝着大型化、高速化方向发展,另一方面又朝着精密化、轻量化方向发展,使得振动的治理问题更加的棘手。

粘弹性材料兼顾弹性固体蓄积能量、粘性流体耗散能量的本领,当受到外界振荡激励的作用时其内部有拉伸变形、弯曲变形和剪切变形的力学行为,其中作用于弹性成分的机械能以位能的方式蓄积起来,作用于粘性成分的机械能以热能的方式消耗掉,从而使该材料具有减振降噪的作用^[5]。通过粘弹性材料来控制结构的振动是一种有效的被动阻尼技术,工程上应用粘弹性材料主要是通过敷设在被减振结构上,形成粘弹性阻尼结构。经典的粘弹性阻

尼结构主要包括自由型阻尼结构(简称ULD)和约束型阻尼结构(简称CLD),其结构简图如图1所示。粘弹性阻尼结构有益于振动的控制,但是额外的引入附加质量,有违结构轻量化的设计要求,而且工程应用中发现粘弹性材料的用量与结构的减振效果并不是单纯的正相关,因此对粘弹性阻尼结构进行优化设计成为被动阻尼技术研究的热点。利用连续体结构拓扑优化技术优化粘弹性材料的布局,既能提

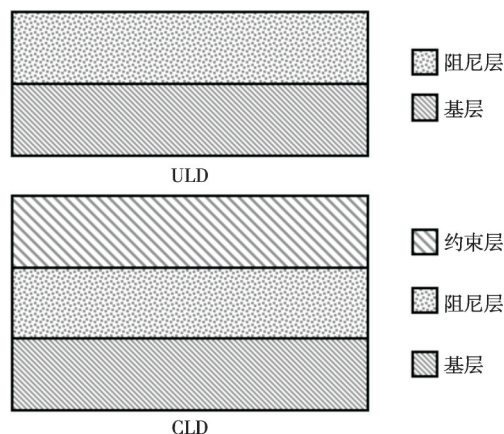


图1 粘弹性阻尼结构

Figure 1 Viscoelastic damping structures

收稿日期:2022-09-20

作者简介:易少强(1993-),男,湖北应城人,硕士,助教,主要研究方向为舰船机械振动与噪声控制,E-mail:ysqlychee@163.com。

高粘弹性材料的利用率、契合结构轻量化设计的理念,又能改善系统的阻尼性能并满足结构的振动指标,为此国内外许多学者对粘弹性阻尼结构的拓扑优化进行了持续的探索。

本文在国内外学者对粘弹性阻尼结构拓扑优化的有限元仿真计算与实验研究的基础上,总结粘弹性阻尼结构拓扑优化设计比较活跃的方法,分析各优化方法对粘弹性阻尼结构材料配置的优化思路,并总结各优化方法的优劣,从而为粘弹性阻尼结构拓扑优化的实际应用提供依据。

1 均匀化法

1988年,Bendsøe和Kikuchi等^[6]将均匀化理论应用到连续体结构拓扑优化领域,其优化思想是用含有孔洞的胞单元表征结构的拓扑性,以胞单元孔洞的几何尺寸为设计变量,孔洞的尺寸为“0”表示该胞单元为实体结构,孔洞的尺寸为“1”表示该胞单元无材料配置,从而将复杂的拓扑优化问题转化为胞单元孔洞的形状参数优化问题。

Yi等^[7]采用均匀化法,探索指定工作频率范围内粘弹性阻尼结构的振动特性,并采用SLP提高算法的鲁棒性,但优化的数值结构不够稳定而限制了工程应用。杨德庆等^[8]利用NASTRAN-OPTISHAPE软件对两短边固支的自由型阻尼板进行频率的拓扑优化设计,同时采用LMS/SYSNOISE软件进行声辐射分析,提出采用拓扑优化设计粘弹性材料的配置有利于结构的减振降噪,该理论可以指导船舶声学隐身设计。Mohammed等^[9]通过逆均匀化法来优化粘弹性阻尼结构的材料配置,使优化后系统的模态损耗因子得到提高。王明旭等^[10]构建约束型阻尼圆柱壳体的多目标优化的数学模型,通过模态置信准则实现模态跟踪,避免模态振型的错乱,得到优化后的材料布局。房占鹏等^[11]提出约束型阻尼板的细观拓扑优化方法,并与传统的均匀化方法进行对比,结果表明考虑基层、约束层约束的代表体元法准确性更高。

理论上均匀化法能严密推导粘弹性阻尼结构的基本方程,但较多的设计变量,使求解计算过于繁琐,同时胞单元的灵敏度分析过于复杂,出现的数值不稳定现象,也限制均匀化法的推广应用,但这依然不影响利用均匀化法对粘弹性阻尼结构的最佳拓扑构型进行预测研究。

2 变密度法

1993年,Mlejnek等^[12]提出变密度法,通过假设材料的密度可变而引入密度插值函数,使单元的伪密度与弹性模量建立某种相关性,进而将结构的拓扑优化问题转化为材料密度的分布问题。变密度法中的插值模型包括固体各向同性材料惩罚模型(简称SIMP)^[13-14]和材料属性有理近似模型(简称RAMP)^[15]。SIMP和RAMP插值模型通过惩罚因子的引入,使连续变量 $[0,1]$ 的伪密度更加趋于离散变量“0-1”,进而使拓扑优化的结果更加逼近理想的拓扑构型。

王明旭等^[16]以模态阻尼比为目标函数,以阻尼层粘弹性材料敷设置量50%为约束条件,构建约束型阻尼板拓扑优化模型,通过MAC矩阵来纠正模态振型阶次随节点拓扑变量改变而发生的错乱,并给出复杂结构优化前的预处理方式,具有较强的工程应用价值。Kim等^[17]运用RAMP插值模型对自由型阻尼圆柱壳体的拓扑构型展开研究,并与振型法、应变能分布法的优化结果进行对比,结果显示拓扑优化法优化效果最好,模态损耗因子提升了61.14%。李攀等^[18]以模态损耗因子为目标函数、以约束阻尼材料敷设置量50%为约束条件,构建悬臂约束型阻尼板拓扑优化模型,结果表明优化后结构第一阶、第二阶和第三阶模态损耗因子显著提升,第一阶频响幅值明显降低,且数值结果与实验数据基本吻合。贺红林等^[19]以模态损耗因子倒数的加权和最小化为目标函数,以阻尼层粘弹性材料敷设置量、结构动态特性变动量为约束条件,构建约束型阻尼板拓扑优化模型,采用ANSYS和MATLAB进行联合仿真计算,通过改进的OC法提高寻优的效率,进而使约束型阻尼板的阻尼性能更优。文献^[20]以模态损耗因子加权和为目标函数,以材料敷设置量和频率变动量为约束条件,以单元伪密度值为设计变量,构建自由型阻尼板拓扑优化模型,通过改进的准则法改善迭代计算发散等问题,改善迭代计算的稳定性。郑伟光等^[21]以模态损耗因子最大化为目标函数,以材料敷设置量为约束条件,分别构建自由型阻尼板和约束型阻尼板拓扑优化模型,通过引入Helmholtz PDE滤波器,控制灰度单元、棋盘格数值不稳定现象,提高拓扑构型的清晰度。

应用变密度法对粘弹性阻尼结构进行拓扑优化时,优化中的设计变量较少,计算求解的效率得到了提升,容易获得最优解。但是单元的伪密度会出现

$[0, 1]$ 之间的中间值,容易产生灰度单元,影响结构的加工制造,因此改进密度插值函数,控制数值不稳定现象,成为变密度法研究的重点。

3 渐进结构优化法

谢亿民等^[22]在力学准则法的启迪下,提出渐进结构优化法(简称ESO)的设计理念,并使之发展成熟。其核心思想是确定合适准则来评价单元的贡献率,逐渐删除低效的单元,保留高效的单元,实现单元的优胜劣汰,进而使结构朝最优方向发展。针对单元的筛选,ESO在进化策略上的评价机制为基于单元贡献率均等的思想进化和基于单元灵敏度均等的思想进化,广泛应用于应力、位移等静力学结构的优化设计,以及模态频率、模态损耗因子等动力学结构的优化设计。

郭中泽等^[23]分别建立自由型阻尼矩形板和约束型阻尼矩形板有限元模型,以第一阶模态损耗因子最大化为优化目标,以阻尼层粘弹性材料敷设置量50%为约束条件,对阻尼层粘弹性材料进行优化配置。为了研究约束型阻尼结构阻尼层单元与对应的约束层单元的材料布局,文献^[24]改进模态损耗因子灵敏度表达式,采用灵敏度滤波技术控制棋盘格式和网络依赖性,获得边界清晰的约束型阻尼结构拓扑构型,提高了该优化设计方法的工程实用性。李以农等^[25]采用粘弹性材料的复常模量模型来分析约束型阻尼梁的优化问题,该拓扑优化模型的目标函数为模态阻尼比最大化,约束条件为约束阻尼材料敷设置量,最终迭代优化得到粘弹性材料的最优配置,并与全覆盖约束型阻尼梁的振动特性进行对比,验证拓扑优化方法的可靠性。李超等^[26]采用APDL编写自由型阻尼圆柱壳体和约束型阻尼圆柱壳体的拓扑优化命令流,分别仿真计算获得其中三阶模态损耗因子均值最大的圆柱壳体的最优拓扑布局。柳承峰等^[27]分别构建两端固支和自由状态下约束型短圆柱壳体的动力学优化模型,为解决实际加工应用的难题,采用灵敏度过滤法,获得实用性较好的规整拓扑布局。房占鹏等^[28]以悬臂约束型阻尼板、四边固定约束型阻尼板为拓扑优化的研究对象,以结构的动态响应最小为优化目标,以附加材料的敷设置率为约束条件,考虑到结构模态阻尼比在迭代优化过程中的影响,对目标函数的灵敏度计算方式进行了改进,通过对比改进前后优化模型的仿真结果和试验结果,验证改进算法的有效性。贺红林等^[29]综合ANSYS和MATLAB的优势,充分考虑

附加材料的用量以及结构动态特性,构建左右两端固支自由型阻尼板的拓扑优化模型,采用绕单元敏度均匀化技术克服棋盘格等数值不稳定现象,通过虚拟单元简化计算单元敏度均化的难度,使用逻辑删除技术来减小计算量,最后通过阻尼比体积密度指标评价优化的效果。陶结等^[30]运用Hamilton变分原理研究四边固支约束型阻尼板的动力学优化问题,分别构建复合模态、单模态、单元顺序删除的拓扑优化模型,对三种优化结果的对比,得到复合模态优化后结构的阻尼特性更佳的结论。贺红林等^[31]将模态应变能法运用到四边简支约束型阻尼板的动力学优化中,对结构模态参量进行灵敏度分析,构建多目标拓扑优化模型,解决了稳定结构动力学特性进行粘弹性阻尼材料布局的问题。

与均匀化法和变密度法相比,ESO在进化过程中单元的状态是完全离散化的“0-1”状态,物理概念相对明确,但同时优化过程不够稳定,容易产生局部最优解等问题。Querin等^[32]拓展ESO的进化路径,衍生出双向渐进结构优化法(简称BESO),该方法一方面删除效率较低的单元,另一方面在高效率设计区域添加单元,从而弥补了ESO删除单元的不可逆性。BESO进化策略的实现主要是依靠低效率区域单元的删除和高效率区域单元的添加,而后者是BESO的关键所在,BESO添加高效单元的方式有构造待添加单元位移函数法^[33]、直接在高贡献率区域添加单元^[34-35]、人工材料单元添加方法^[36]、基于单元特性改变的方法^[37]和单元替换准则法^[38]。

彭梁^[38]将BESO应用到船舶薄板类阻尼结构的优化设计中,通过对比优化前后结构频率响应发现,最优拓扑布局的结构第一峰值达到原结构的75%左右,第二峰值达到原结构的95%左右,表明BESO在船舶薄板类阻尼结构优化设计的可行性。房占鹏等^[39]构建悬臂约束型阻尼板的拓扑优化模型,通过ESO和BESO的优化结果的对比,得到BESO的优化效果更好的结论。贺红林等^[40]采用左右两短边固定约束型阻尼板为拓扑优化的对象,目标函数选择模态阻尼比最大化,约束条件为阻尼层粘弹性材料敷设置量,设计变量为阻尼层单元状态,引入单元的增加与删除的准则,采用独立网格滤波技术,使棋盘格现象得到有效的控制,使优化配置后的结构实用性更强。王鑫^[41]考虑阻尼层粘弹性材料的温度和频率相关性,采用半功率法对粘弹性材料进行阻尼特性测试,建立粘弹性材料的数学模型,进而构建频变约束型阻尼板拓扑优化模型,联合Isight、MATLAB和NASTRAN对优化模型进行求

解。通过变量模型和常量模型的优化结果的对比,发现变量模型的优化效率更高,而且优化的材料布局更有利于工程的应用。李申芳^[42]对工程薄壁约束型阻尼结构进行拓扑优化设计,研究对象选择悬臂梁与四边固支约束型阻尼板,采用单目标的优化思路,运用有限元仿真计算与模态试验进行拓扑布局,仿真结果表明:悬臂约束型阻尼结构敷设为50%时,一阶、二阶模态损耗因子降低不超过50%;四边固支约束型阻尼结构敷设为50%时,第一阶、第二阶模态损耗因子降低接近30%;频率响应实验结果表明,优化后的约束型阻尼结构与完全敷设的约束型阻尼结构的频率响应值的差值最大为6.2 dB,检验了优化的有效性和可靠性。

4 总结与展望

在粘弹性阻尼结构概念设计阶段,引入拓扑优化设计环节,能够兼顾结构振动控制与轻量化设计的技术指标,降低结构设计的经验依赖。随着拓扑优化设计的发展,均匀化法、变密度法和渐进结构优化法在粘弹性阻尼结构优化设计中的应用也更加广泛,但仍然有值得改进的方面,比如插值函数模型、灵敏度分析、优化求解算法、数值不稳定抑制技术,因此可以进一步研究以下几个方面:

(1)考虑粘弹性材料的温度和频率的相关性,构建高效的变频粘弹性阻尼结构拓扑优化模型,使拓扑构型更好的指导工程应用。

(2)拓宽拓扑优化方法进行粘弹性阻尼结构优化设计的领域,提升垫高阻尼结构、异型阻尼结构、分段阻尼结构等类型结构的应用前景。

(3)复杂结构拓扑优化面临着高计算成本的现实问题,改进拓扑优化的关键技术,提升优化设计的效率。

参考文献:

[1] 彭海,唐驾时.考虑阻尼效应的航空发动机转子叶片的振动分析[C].西安:西北工业大学,2012.

[2] 徐鹏,黄长宁,王涌天,等.卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J].宇航学报,2003,24(3):259-263.

[3] 朱石坚,何琳.船舶减振降噪技术与工程设计[M].北京:科学出版社,2002.

[4] 刘国昊,刘吉.深水海洋钻井平台振动特性研究[J].机械研究与应用,2014,27(5):14-16.

[5] 周云.粘弹性阻尼减震结构设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2006.

[6] BENDSOE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization

method [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1988, 71(2): 197-224.

- [7] YI Y M, PARK S H, YOUN S K. Design of microstructures of viscoelastic composites for optimal damping characteristics [J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37(35): 4791-4810.
- [8] 杨德庆,柳拥军,金咸定.薄板减振降噪的拓扑优化设计方法[J].船舶力学,2003,7(5):91-96.
- [9] AL-AJMI Mohammed. Homogenization and topology optimization of constrained layer damping treatments [D]. Maryland: University of Maryland, College Park, 2004.
- [10] 王明旭,陈国平.基于均匀化方法的约束阻尼柱壳结构动力学性能优化[J].中国机械工程,2011,22(8):892.
- [11] 房占鹏,冉凯文,田淑侠,等.约束阻尼板的黏弹性阻尼层细观拓扑优化设计[J].郑州大学学报(工学版),2022,43(4):60-66.
- [12] MLEJNEK H P, SCHIRRMACHER R. An engineer's approach to optimal material distribution and shape finding [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1993, 106(1-2): 1-26.
- [13] ROZVANY G I N, BENDSOE M P, KIRSCH U. Layout optimization of structures [J]. Applied Mechanics Review, 1995, 48(2):411-419.
- [14] RIETZ A. Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(2): 159-163.
- [15] STOLPE M, SVANBERG K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 22(2): 116-124.
- [16] 王明旭,陈国平.基于变密度方法约束阻尼层动力学性能优化[J].南京航空航天大学学报,2010,42(3):283-287.
- [17] KIM S Y, MECHEFSKE C K, KIM I Y. Optimal damping layout in a shell structure using topology optimization [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(12): 2873-2883.
- [18] 李攀,郑玲,房占鹏. SIMP 插值的约束层阻尼结构拓扑优化[J].机械科学与技术,2014,33(8):1122-1126.
- [19] 贺红林,袁维东,夏自强,等.约束阻尼结构的改进准则法拓扑减振动力学优化[J].振动与冲击,2017,36(9):20-27.
- [20] 贺红林,夏自强,袁维东.基于改进优化准则法的自由阻尼结构动力学拓扑优化[J].中国机械工程,2018,29(13):1531-1539.
- [21] 郑伟光,陈姗姗,许恩永,等. Helmholtz PDE 敏度过滤技术的阻尼层拓扑优化设计[J].机械设计与制造,

- 2022,374(4): 142-145.
- [22] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization [J]. *Computers & Structures*, 1993, 49(5):885-896.
- [23] 郭中泽, 陈裕泽, 侯强, 等. 阻尼材料布局优化研究 [J]. *兵工学报*, 2007, 28(5): 638-640.
- [24] 郭中泽, 陈裕泽, 邓克文, 等. 基于 ESO 的约束阻尼板拓扑优化设计研究 [J]. *机械设计*, 2006, 23(10): 3-6.
- [25] 李以农, 谢熔炉, 王宜, 等. 约束阻尼结构拓扑优化设计的进化算法 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2010, 33(8): 1-6.
- [26] 李超, 李以农, 施磊, 等. 圆柱壳体阻尼材料布局拓扑优化研究 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(4): 48-52.
- [27] 柳承峰, 李以农, 郑玲, 等. 约束层阻尼短圆柱壳拓扑优化分析及实验研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(18): 49-53.
- [28] 房占鹏, 郑玲, 唐重才. 指定频带简谐激励下约束阻尼结构拓扑优化 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(14): 135-141.
- [29] 贺红林, 周楠兰, 袁维东. 基于复合模态阻尼比的阻尼板渐进法减振优化 [J]. *工程设计学报*, 2015, 22(4): 351-358.
- [30] 陶结, 贺红林, 刘尧弟, 等. 面向结构抗振设计的阻尼板黏弹材料布局优化 [J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2016(1): 1-9.
- [31] 贺红林, 陶结, 刘尧弟, 等. 基于渐进法的约束阻尼结构拓扑多目标动力学优化 [J]. *中国机械工程*, 2016, 27(17): 2310.
- [32] QUERIN O M, STEVEN G P, XIE Y M. Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm [J]. *Engineering Computations: Int J for Computer-Aided Engineering*, 1998, 15(8):1031-1048.
- [33] YANG X Y, XIE Y M, STEVEN G P, et al. Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization [J]. *AIAA Journal*, 1999, 37(11): 1483-1488.
- [34] YOUNG V, QUERIN O M, STEVEN G P, et al. 3D and multiple load case bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) [J]. *Structural optimization*, 1999, 18(2): 183-192.
- [35] QUERIN O M, YOUNG V, STEVEN G P, et al. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimisation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 189(2): 559-573.
- [36] 荣见华, 姜节胜, 颜东煌, 等. 基于人工材料的结构拓扑渐进优化设计 [J]. *工程力学*, 2004, 21(5): 64-71.
- [37] 郭中泽, 陈裕泽, 张卫红, 等. 基于单元材料属性更改的结构渐进拓扑优化方法 [J]. *机械科学与技术*, 2006, 25(8): 928-931.
- [38] 彭梁. 双向渐进结构拓扑优化方法的改进及应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [39] 房占鹏, 郑玲. 约束阻尼结构的双向渐进拓扑优化 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(8): 165-170.
- [40] 贺红林, 陶结, 刘尧弟, 等. 粘弹阻尼抗振结构双向渐进法拓扑动力学优化 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 339-345.
- [41] 王鑫. 粘弹性约束阻尼结构拓扑优化及其在车身中的应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [42] 李申芳. 基于双向渐进结构优化法的约束阻尼拓扑优化研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.

Research Progress on Topology Optimization of Viscoelastic Damping Structures

YI Shaoqiang, ZHAO Xiaoming, LIU Jianxin

(Department of Electromechanical Management, China Coast Guard Academy, Ningbo 315801, China)

Abstract: Viscoelastic materials are widely used in vibration control engineering, and the topological optimization design of viscoelastic damping structures by integrating lightweight design elements has become an important direction for the research of passive damping technology. Under the premise of systematically summarizing the design ideas of homogenization method, variable density method and evolutionary structural optimization method, the research results of the topological optimization design of viscoelastic damping structures were summarized, the shortcomings in numerical simulation were summarized, and the direction of key technologies worthy of improvement was proposed, aiming to broaden the application prospect of topology optimization methods in the optimal design of viscoelastic damping structures.

Keywords: viscoelastic; lightweight; damping structure; topology optimization; passive damping technology

(学术编辑: 孙文)