

面向轻量化结构设计的连续体拓扑优化研究进展

张磊^{1,2,3}, 寇若洋^{1,2}, 岳之斌^{1,2}, 董磊^{1,2}, 檀雪宁^{1,2}, 王国钦^{1,2}, 李霞^{1,2}

(1.天津理工大学 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384;
2.天津理工大学 机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384;
3.北京理工大学 工业制造创新设计工业和信息化部重点实验室, 北京 100081)

摘要:为清晰梳理机械结构轻量化设计中的连续体拓扑优化方法,对近年来国内外在该领域取得的主要研究成果进行了分析与评述。以轻量化设计为目标,通过文献可视化分析工具对结构迭代优化、边界描述及材料分布 3 种类型连续体拓扑优化方法及其应用进行聚类分析,得到连续体拓扑优化的研究趋势;重点分析了结构迭代优化方法中近似模型及深度学习模型的优势及应用,以及多尺度、多物理场和多参数下材料-结构一体拓扑优化在连续体拓扑优化设计研究进展;列举了连续体拓扑优化方法在航空装备、交通运输装备及兵器装备等领域进行轻量化结构设计的应用,并指出未来发展方向和趋势,为面向轻量化结构设计的连续体拓扑优化方法研究提供参考。

关键词:轻量化设计;连续体;拓扑优化;结构优化

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2025)04-0702-21

在产品设计中,可通过采用轻量化材料与结构优化设计等方法实现结构的轻量化,其中,结构优化分为尺寸优化、形状优化及拓扑优化。目前,尺寸优化及形状优化应用较为成熟,但结构初步设计方案确定后,限制了设计空间的范围且难以改变材料的分布,降低了优化设计结果的有效性。拓扑优化是根据载荷、约束条件及性能指标确定最优材料布局的一种优化设计方法,其本质是在无穷维空间中通过变系数微分方程实现拓扑函数 0~1 的控制^[1-3]。目前,离散体拓扑优化在处理具有明确结构框架的问题时更为有效,但当对连续体结构的设计参数进行选择时较敏感,优化结果不稳定且不易收敛。因此,在 1988 年,均匀化法开创了连续体拓扑优化的先河。连续体拓扑优化设计具有以下优势:①优化过程具有更大的设计自由度,可生成复杂的几何形状;②应力在结构中连续变化,产生更平滑的应力分布,可减少应力集中;③可实现从微观到宏观的多尺

度优化,在不同尺度材料分布上实现连续变化,得到最优解。近年来,连续体拓扑优化设计在航空航天、交通运输及兵器装备等多个领域中应用广泛^[4-5]。柴象海等^[6]以叶片空心率为约束条件,采用变密度法对航空发动机风扇叶片进行拓扑优化设计,叶片空心率提高至 45%,并提升了抗冲击性能;Xiong 等^[7]将灰色关联分析法与贡献分析法相结合,分别对汽车零件及车身前端结构进行拓扑优化设计,质量减小 4.98 kg;黄杰等^[8]采用多目标遗传算法和参数化模型相关联的优化设计方法对新能源汽车差速器壳体进行轻量化设计,质量减小了 10.3%;王普毅等^[9]将 Kriging 模型与灵敏度分析法相结合,以轻型车载高炮架为例,通过优化信息交互和代理模型进行几何重构,实现了箱架结构的多目标拓扑优化设计。

当前,连续体拓扑优化在轻量化设计中的应用存在一定的局限性,大多数文献仅以单一对象为设计目标,在多尺度、多物理场及多参数等因素的共同影响下,拓扑优化与其他优化方法相集成的研究文献较少。因此,通过分析机械结构拓扑优化设计的相关成果,对国内外以轻量化为设计目标的连续体拓扑优化方法及应用成果进行梳理,指出制造业领

收稿日期:2024-10-12

基金项目:国家自然科学基金(32171902)资助

作者简介:张磊(1981—),副教授

通信作者:寇若洋(2000—),硕士研究生

e-mail:1315663463@qq.com

域产品结构轻量化设计的发展趋势。

1 文献可视化分析

为全面了解拓扑优化在轻量化结构设计中的研究现状,进行文献计量分析。在 CNKI 及万方等中文数据库中对拓扑优化为主题的文献进行检索,获得 3 754 篇公开发表的中文论文。以“连续体”、“结构设计”及“拓扑优化”为主题词,以题名、关键词、

摘要及正文中是否含“轻量化”为限定条件,同时考虑发表源及学科类别,得到 340 篇有效文献,年度发文章趋势如图 1 所示。在 Web of Science 等外文数据库中以对拓扑优化为主题的文献进行检索,获得 4 388 篇公开发表的外文论文。以“topology optimization”及“continuum”为主题词,以题名、关键词、摘要及正文中是否含“lightweight”为限定条件,同时考虑发表源及学科类别,得到 393 篇有效文献,年度发文章趋势如图 2 所示。

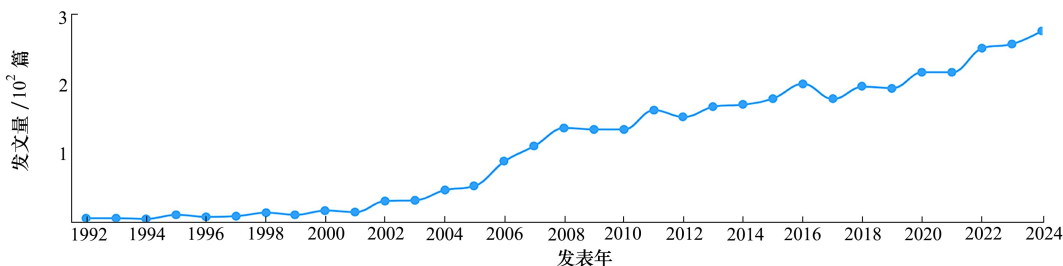


图1 面向轻量化结构设计的连续体拓扑优化研究中文文献年度发文量趋势统计图

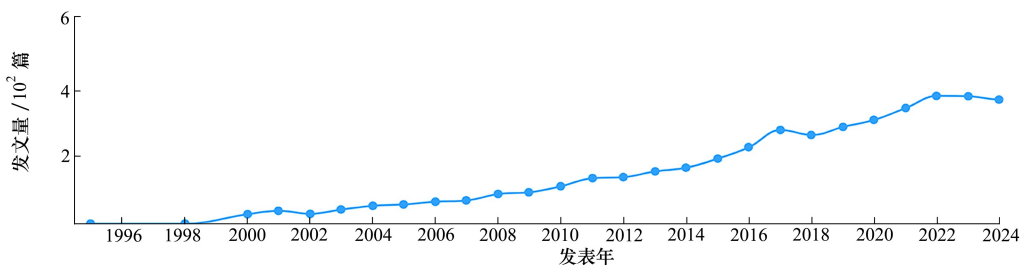


图2 面向轻量化结构设计的连续体拓扑优化研究外文文献年度发文量趋势统计图

由图 1~2 可知,发文量趋势清晰地反映出拓扑优化正逐渐吸引诸多学者的关注,已成为轻量化设计发展领域的焦点。基于文献的元数据及参考引证关系,采用 VOSviewer 软件对拓扑优化方面的文献进行进一步计量统计与分析,得到聚类视图和标签视图,如图 3~6 所示。高频出现的关键词主要包括

拓扑优化、连续体结构、结构优化、一体化设计、独立连续映射法、变密度法及多尺度等。连续体拓扑优化的研究趋势从独立连续映射法、有限元分析逐渐向多尺度、轻量化、增材制造及一体化设计等方向演变。

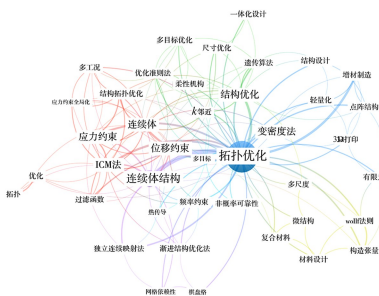


图3 中文文献中拓扑优化结构设计聚类视图

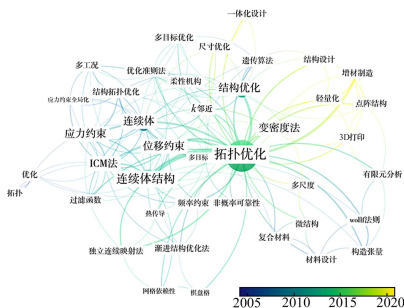
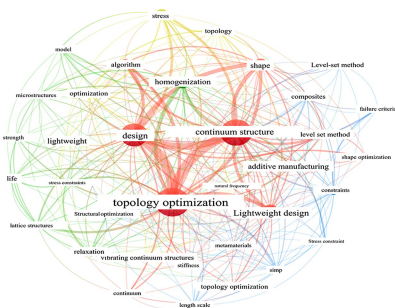


图4 中文文献中拓扑优化
结构设计标签视图



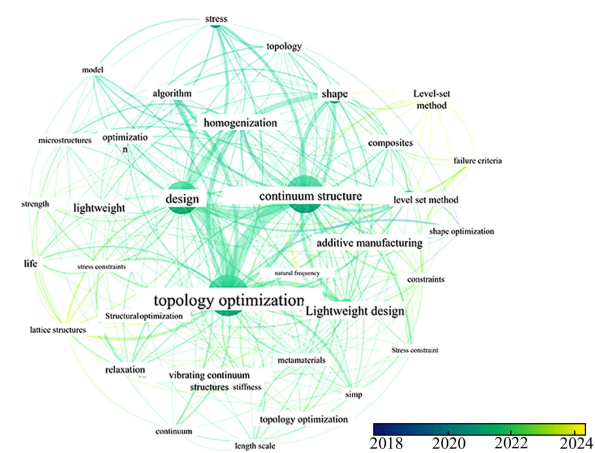


图 6 外文文献中拓扑优化结构设计标签视图

2 基于迭代优化策略的连续体拓扑优化设计

在连续体拓扑优化设计中,不同的描述函数和

表 1 基于迭代优化策略的连续体拓扑优化方法及特点

典型方法	基本思想	设计要求			拓扑优化结果特点
		设计变量	优化目标	约束条件	
ESO 法	为满足设计要求,将无效材料从结构中移除,得到最优材料布局	微结构空孔尺寸和空间	多种目标	频率、位移、应力等	有限元分析,删除无效结构单元,保留有效结构单元实现优化,直至达到最佳收敛条件,但存在局部最优及材料分布不连续等问题
ICM 法	将拓扑变量与设定的阈值相比,确定是否保留,直至迭代收敛	拓扑变量	单目标	频率、位移、应力等	无网格划分,自由度较高,但存在不光滑边界或棋盘格效应

2.1.1 渐进结构优化法

ESO 法根据实际工程要求对结构进行优化设计,在保证结构稳定性和耐久性的同时,可减少设计时间及成本,得到的拓扑优化结果可直接在有限元分析中使用。此外,ESO 法可从局部极值、阶梯状边界,以及网格敏感性与棋盘格效应等方面进一步优化。

1) 局部极值。局部极值是指在同一个结构优化过程中选取不同初始值时,得到的拓扑优化结果无法确保局部最优,会出现对有效材料单元的误判情况。为解决该问题,Querin 等^[12]将 ESO 法与渐进密度进化算法相结合,得到一种可消灭无效材料单元,且对误判的有效材料单元进行恢复的双向渐进结构优化法 (bi-directional evolutionary structural opti-

mization,BESO),使优化结果更符合工程实际需要;Yang 等^[15]将 BESO 法与灵敏度分析法相结合,对平面矩形板进行拓扑优化设计,通过一系列对比试验,证明了该方法的有效性;Huang 等^[16]将 BESO 法与材料属性有理近似模型相结合,提高了自质量载荷作用下结构的拓扑优化效率及收敛最优解的能力;滕晓燕等^[17]采用 BESO 法对船舶结构纵桁结构进行轻量化设计,相比于传统油船,质量减小 28.6%,单位长度内货舱区的质量减小 5.4%;武星等^[18]提出一种将双向渐进结构优化法与快速非支配排序遗传算法相结合的拓扑优化设计方法,与 BESO 法相比,该算法在相同约束条件下能有效提高结构刚度。

2.1 迭代优化方法

常见的迭代优化法包括渐进结构优化法 (evolutionary structural optimization, ESO)^[11-13]和独立连续映射法 (independent continuous mapping, ICM) 等,其特点是将结构区域划分为许多小的单元,以零和非零值对每个单元进行编码,确定单元是否保留,直至其拓扑优化结果迭代收敛^[14]。基于迭代优化策略的连续体拓扑优化方法及特点如表 1 所示。

2) 阶梯状边界。ESO 法通过在设计域内对材料单元进行增删,使结构逐渐迭代为最优的布局形

式,且优化后的边界呈阶梯状分布。为解决阶梯状边界的问题,Mirzendehdel 等^[19]将水平集法与 ESO 法相结合,提出一种各向异性材料结构拓扑优化方法,通过数值算例验证了该方法的有效性;Wang 等^[20-21]提出结构边界单元自适应策略和积木博弈策略,有效地解决了 BESO 方法中结构边界不光滑问题,降低了制造过程中的几何误差。

3) 网格敏感性与棋盘格效应。在同一设计空间中,采用不同的网格尺寸进行优化设计时,所得的优化结果不同,且结构单元会出现棋盘格效应。因此,为解决优化结果中网络敏感性与棋盘格效应等问题,将自适应网格技术引入拓扑优化设计中,精确控制拓扑优化结果的几何形状,并通过密度插值模型有效控制灰色单元的数量,保证拓扑优化结果的清晰。此外,采用固定网格有限元技术可降低对初始迭代点的依赖,更有利于获取全局拓扑优化设计最优解。

由上述文献可知,ESO 法可有效解决载荷分布对载荷施加的依赖问题,并根据多种不同的设计要求和约束条件,得到结构拓扑优化结果。而 BESO 法可通过单元应变能或应力大小对误判的有效材料单元进行再次确定,使优化过程更合理,材料布局结果更理想。为解决拓扑优化结果的边界不光滑等问题,ESO 法与其他方法的有效结合尤为关键,进一步提高该方法的适用性将成为进一步研究的重点。

2.1.2 独立连续映射法

ICM 法由隋允康^[22]于 1996 年提出,该方法的核心思想是将初始设计区域划分为适当数量且充分的子域,每个子域由多个基单元组成,从而构建由多个基单元组成的结构框架。在优化过程中,通常将质量最小化作为目标函数,位移作为约束条件,单元相对密度作为拓扑变量 ρ_i ,取值范围为 0 ~ 1。其中,当 $\rho_i = 1$ 时,表示该单元完全由材料填充;当 $\rho_i = 0$ 时,表示该单元为无材料填充;而 $0 < \rho_i < 1$ 则表示该单元存在部分材料。在 ICM 法中,为简化计算过程,提高优化效率,在 N 个单元子域内,将离散模型映射为连续的数学模型,如(1)式所示。

$$\begin{aligned} \text{find } \boldsymbol{\rho} &= (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_N)^T \\ \min W &= \sum_{i=1}^N f_w(\rho_i) w_i^0 \\ \text{s.t. } \begin{cases} U_j \leq [U_0], & j = 1, 2, \dots, J \\ \boldsymbol{F} = \boldsymbol{KU} \end{cases} \end{aligned} \tag{1}$$

式中: N 为单元数; W 为模型结构的总质量; $f_w(\rho_i)$

为过滤函数; w_i^0 为第 i 个单元的固有质量; J 为自由度数; U_j 为第 j 个自由度对应的位移值; $[U_0]$ 为许用位移; $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{KU}$ 为结构静力学平衡方程,其中, $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{U}$, $\boldsymbol{K}$ 分别为结构整体外力向量、位移向量及刚度矩阵。

叶红玲等^[23]建立了以应变能约束代替应力约束的优化模型,算例表明,选择适当的过滤函数幂指数可提高拓扑优化效率;隋允康等^[24]提出一种高效收敛的相关映射函数,可提高 ICM 方法的收敛效率;李宏宇等^[25]将独立连续映射法和序列二次规划法相结合,以结构单元密度为设计变量,以质量最小为设计目标,以位移为约束条件,对风力发动机叶片进行了轻量化设计,其质量减小 166 kg。

综上,ICM 法在设计过程中具有良好的数值稳定性、高效性及一致性。但由于该方法在从连续模型向离散模型的转换过程中,需选择合适的设计变量、过滤函数及离散化策略,结构离散化体系尚未成熟,如何发展并完善该方法在实际工程应用中的广泛适用性,成为下一步研究的方向。

2.2 迭代优化模型

迭代优化模型可针对离散数据的回归或插值,建立数学模型,通过拟合精度判断模型的有效性,并以该模型为依据对设计空间进行预测。因此,选择合适的迭代优化模型可提高优化效率。随着连续体拓扑优化设计的发展,代理模型及神经网络模型成为拓扑优化设计中的重要部分。

1) 代理模型。代理模型是一种基于有限数据集构建的近似模型,具有结构简单及计算效率高等特点^[26],在结构轻量化设计中应用广泛。凌静秀等^[27]采用 Kriging 模型和多目标遗传算法对轮胎成型机辊压支架进行了轻量化设计,支架质量减小 4.96%;贾连辉等^[28]将 Kriging 代理模型和过序列二次规划法相结合,对盾构机的前中盾结构进行轻量化设计,使其质量减小 3.1%;李作轩等^[29]通过高斯过程代理模型对结构设计进行了评估,并采用遗传算法对无人车辆的车身结构进行了轻量化设计,其质量比初始方案减小 14.12%;焦阿允等^[30]将代理模型技术、多目标遗传算法和序列二次规划算法相结合,对火箭炮底架进行轻量化设计,优化后的底架质量减小 15.2%;Xiong 等^[31]将粒子群优化算法、径向基函数代理模型及改进灰色关联分析算法相结合,对车身进行拓扑优化设计,其质量减小 7.92 kg,且静态全局扭转刚度和动态一阶扭转频率分别提高 0.56% 和 1.18%;陈超磊等^[32]采用径向基

函数和 Kriging 代理模型对加肋圆锥壳结构进行拓扑优化设计,使其质量减小 9.40%;Yang 等^[33]将代理模型技术与蛻螂优化算法相结合,对爬墙机器人的胶黏剂模组进行轻量化设计,与优化前相比,质量减小 11.7%。

综上所述,当面对复杂机械结构的优化设计问题时,为得到广泛的设计空间,代理模型方法可通过少量的样本信息拟合出设计变量与性能响应的关系,从而替代复杂的仿真计算,以达到缩短设计周期、减少设计成本的目的。然而,其优化过程涉及大量设计变量,模型数据庞大,代理模型无法完全捕捉到复杂模型的所有细节,导致预测精度下降。如何在减少建立模型成本的同时,提高优化结果的精度成为未来的研究热点。

2) 神经网络模型。神经网络模型是一种由多个神经元组成的数学模型,用于模拟人脑中神经元的运作方式,通过预训练模型提高深度神经网络在计算机视觉等领域中的性能已成为当今深度学习的人工智能技术与应用的发展趋势。随着神经网络技术的发展,神经网络模型被应用于拓扑优化设计研究中。将神经网络模型与拓扑优化方法相结合,可

在新的初始条件下提高拓扑优化设计效率。Sosnovik 等^[34]提出一种将深度学习技术与序列固体各向同性材料惩罚模型(solid isotropic material with penalization, SIMP)相结合的方法,将拓扑优化问题转化为图像分割问题,提高了优化效率;Zheng 等^[35]通过 SIMP 法生成的数据集对 U-Net 模型进行训练,将约束条件与边界条件输入网络模型后得到结构的最优三维拓扑构型;Chandrasekhar 等^[36]将 SIMP 法与神经网络模型相结合,采用神经网络的激活函数替代 SIMP 的密度函数,使其拓扑优化结果边界清晰,同时提高了优化效率。综上所述,由于神经网络模型的非线性映射及自适应学习等性能优异,将神经网络模型引入拓扑优化可提高设计效率。然而,神经网络模型结构较为复杂,需庞大的参数规模和计算成本,限制了深度学习的应用范围。因此,卷积轻量化是解决上述问题的关键手段,卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)因在图像特征提取及目标检测方面的卓越表现,已成为计算机视觉领域的研究热点之一^[37]。通过训练神经网络模型,可生成具有良好性能的拓扑结构,同时提高了设计效率。神经网络架构优化方法如表 2 所示。

表 2 神经网络模型架构优化方法

方法	思想描述	适用层级	训练方式	优点	缺点
剪枝	根据参数、通道、卷积核及卷积层的重要性,删除网络中的连接及节点	神经元卷积核卷积层、全连接层	重新训练及预训练模型	鲁棒性强,能直观理解网络轻量化,非结构化剪枝可压缩模型大小且不易丢失精度	剪枝程度难以平衡,自动化剪枝对计算资源要求较高
架构搜索	根据搜索策略,在搜索空间内寻找最符合性能评估策略的神经网络架构	卷积层、全连接层	重新训练	操作简单,适用范围较广,可找到最优的神经网络架构	网络复杂时需要的计算资源大,训练时间长
知识蒸馏	将已训练好的模型数据提取至另一个更为精炼的模型中	卷积层、全连接层	重新训练	泛化能力强,适用于中小型数据集且性能良好	蒸馏过程较复杂,应用场景单一,仅能重新训练,且训练时间较长
卷积核设计	将卷积核架构进行优化设计,使卷积运算量减小	卷积层	重新训练	计算和内存资源的需求小,移动端部署难度低,并可通过一次性训练得到轻量化模型	应用要求高,扩展性、结合性及鲁棒性较弱

由上述文献可知,将神经网络模型引入拓扑优化设计中,通过少量的样本信息拟合出设计变量与性能响应间的关系,可替代复杂的仿真计算,缩短产品的设计周期,提高设计效率。然而,由于深度学习

具有一定的不稳定性,模型训练过程中需考虑网络架构设计、参数优化和模型训练成本。如何在不牺牲网络性能的前提下,提高计算效率,并减少计算机内存占用,完善神经网络算法在拓扑优化中的广泛

适用性成为下一步的研究方向。

3 基于边界描述的连续体拓扑优化设计

传统的连续体拓扑优化结果常出现边界不光滑等现象,为解决这一问题,通常需对优化方案进行二次顺滑处理,从而得到符合实际生产需求的优化结果。然而,基于边界描述的拓扑优化设计方法可省略二次处理这一步骤,直接通过边界演化控制结构边界的变形,从而实现结构的拓扑优化设计。目前,基于边界描述的拓扑优化方法主要分为隐式边界和

显式边界 2 类。隐式边界通过隐式函数或等值面来描述,具有无需重新划分网格并同时描述结构的拓扑和形状优化等优点。与隐式边界描述方法相比,显式边界描述方法是通过直接定义边界上的所有点来表示物体的边界,结构边界通过组件的几何参数直接描述。水平集法为典型的隐式边界描述方法,而移动可变形组件法 (moving morphable components, MMC) 则为一种显式边界描述方法,该方法通过一系列移动可变形的组件实现结构的边界演化。对隐式和显式边界描述的连续体拓扑优化方法及特点进行对比,如表 3 所示。

表 3 隐式和显式边界描述的连续体拓扑优化方法及特点对比

分类	典型方法	基本思想	设计要求			拓扑优化结果
			设计变量	优化目标	约束条件	
隐式边界	水平集法	通过水平集函数灵活地描述结构边界形状和拓扑变化	表征单元有无状态变量	多目标	柔度、体积、位移等	平面结构难以产生新的孔洞,边界平滑
显式边界	移动可变形组件法	通过设计域中一系列组件或孔洞边界的尺寸及位置等几何信息,得到不同工况下的最优承载路径	微结构的几何参数	多目标	柔度、体积、位移等	显式几何表达、复杂度增加,边界平滑

3.1 隐式边界拓扑优化

隐式边界拓扑优化是一种先进的结构设计方法,通过优化设计域内材料的分布来提高结构性能。该方法将材料密度等连续变量引入有限元分析结果,通过迭代求解的方式使设计目标达到最小化质量并符合性能的要求,避免了传统拓扑优化设计中的棋盘格效应。

水平集法作为描述边界的隐式表达法,是一种研究曲线及曲面演化过程中追踪运动边界的方法,在图像处理及力学等领域中应用广泛^[38-43]。水平集函数 $\phi(x,t)$ 为标量函数, (x,t) 为结构设计域内的节点坐标,其等值线表示几何对象的边界。通过对水平集函数的演化和变形,可实现对优化对象边界的连续或光滑描述。水平集法优化前后的 CAD 模型对比如图 7 所示。

由图 7 可知,水平集法通过在设计空间中追踪一个动态的界面来实现结构的优化布局,该方法可处理复杂的拓扑变化,适用于连续体拓扑优化问题,其优化模型如(2)式所示。

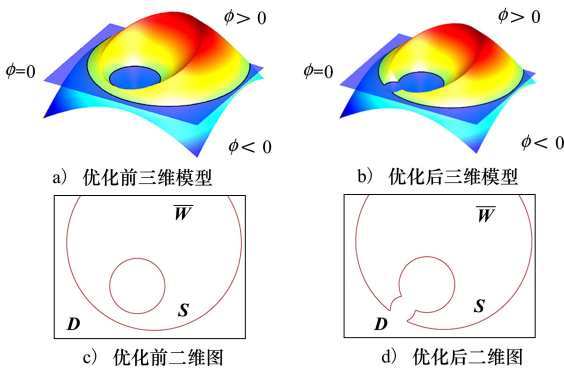


图 7 水平集法优化前后 CAD 模型对比示意图

$$\begin{cases} \phi(x,t) > 0, x \in \bar{W} \\ \phi(x,t) = 0, x \in S \\ \phi(x,t) < 0, x \in D/\bar{W} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\bar{W}$ 为结构实体材料所占有的区域; S 为边界, $S = \{x | \phi(x,t) = 0\}$, 在二维问题中为零等值面; D 为计算区域,包括结构优化过程中所有可能的构型。

由于水平集法在模型描述方面有诸多优势,

Sethian 等^[40]将水平集法应用于结构拓扑优化设计中,通过单元结构边界的拆分和合并实现单元数目的增减,达到结构优化目标。

在拓扑优化设计中,优化结果通常表现为结构内部的孔洞结构,这些结构的形成是通过材料分布和形态演化过程中的优化算法决定的。相较于其他拓扑优化方法,水平集法的优势主要在于可保证拓

扑结构具有清晰的边界和完整的几何信息,且适用于多种设计目标优化,但其存在形式复杂、计算效率低等问题。为解决此问题,诸多学者将理论算法与之结合,使优化设计空间中的孔可自行生成,从而提高设计效率^[44]。与水平集法相结合的其他理论算法及其应用现状如表 4 所示。

表 4 与水平集法相结合的其他理论算法及其应用现状

理论算法	应用现状
数学规划法	文献[45]采用数学规划法对电池组及支架进行拓扑优化设计,提出一种考虑应力和温度约束的热耦合载荷下的水平集拓扑优化方法
多尺度拓扑优化	文献[46]提出了一种双尺度分层设计思想,宏观采用惩罚值为 1 的 SIMP 法获取密度场分布并对其分层,再基于宏观结果,采用水平集法优化微结构构型
惩罚函数法	文献[47]采用水平集函数隐式地描述不规则的构件形状,并采用惩罚函数法处理构件间的互不覆盖约束条件,结果表明,该方法能以更小的计算量实现内嵌构件布局的联合优化
参数化水平集法	文献[48]将伴随向量法、参数化水平集法及优化准则法相结合,对约束阻尼结构进行拓扑优化设计,结果表明,该方法可提高优化效率
径向基函数	文献[49]采用径向基函数对用于更新水平集函数的速度场进行插值,并引入 Hamilton-Jacobi 方程中,采用三步分裂法求解,在不牺牲数值稳定性的前提下,提高优化效率
形状灵敏度法	文献[50]采用水平集方法和形状灵敏度结构优化,将拓扑导数与形状导数相结合,实现了优化过程中的单元自动开孔,提高了水平集法的收敛速度
加性算子分裂法	文献[51]采用加性算子分裂法求解水平集法拓扑优化中的水平集方程,提高了优化过程的收敛速度,无需在优化过程中对水平集函数进行频繁初始化,使优化过程能够产生新孔,降低了优化结果对初始值的依赖性
周长正则化处理法	文献[52]采用 2 个水平集函数及其对应的水平集确定结构的压力边界并进行基于水平集法的拓扑优化设计,同时采用周长正则化处理方法,保证了最优的结构设计

由表 4 可知,水平集法作为一种隐式边界拓扑优化设计方法,可有效地解决传统拓扑优化方法的边界不光滑等问题。水平集法通过水平集函数描述结构的拓扑变化,结合多种数值方法对设计问题进行求解,可灵活应对不同类型的设计目标。在学术研究领域,尽管水平集方法在界面演化和拓扑变化的描述上具有显著优势,但其在实际应用中仍面临若干挑战。水平集法的计算复杂性较高,对初始条件的依赖性强,处理三维图像和复杂结构时存在效率低及优化结果不稳定等问题。目前,由于水平集法实现方式多样,缺乏统一的标准和框架,其优化过程的参数敏感性和复杂性,应用程序的形成具有较大挑战,限制了水平集法的应用潜力。因此,如何在不影响优化效率的同时,提高优化结果的稳定性是水平集法发展的重要方向。

3.2 显式边界拓扑优化

由于隐式拓扑优化结果经后处理才可与 CAD 系统建立联系,不仅增加了计算成本,而且隐式模型

无法将边界约束条件准确施加于优化模型中,导致优化结果较依赖于已产生的孔洞,难以产生新的孔洞,缺乏灵活的显式几何信息。而显式拓扑优化通过处理边界问题可有效地解决上述问题。2014 年,Guo 等^[53]提出的 MMC 法为典型的显式拓扑优化方法,该方法将空间中可移动和变形的结构单元进行显式参数化设计,通过组件旋转及交叉等移动方式实现结构的拓扑优化,其基本原理如图 8 所示。

Weiss 等^[54]将 SIMP 法和 MMC 法相结合,采用数据驱动的约束函数预测出不同形状和方向上微小特征的最小可制造尺寸;廉睿超等^[55]将 SIMP 优化结果映射为 MMC 初始布局,提出一种拓扑描述函数模型和尺寸约束拓扑优化模型,通过引入厚度变量控制结构的最大或最小尺寸;李佳霖等^[56]以刚度最大化为设计目标,采用 MMC 法对运载火箭的传力机架结构进行拓扑优化设计,在满足强度及刚度要求的同时,实现了对结构的轻量化设计;张军峰等^[57]将 MMC 法与变密度法相结合,通过 Otsu 阈值

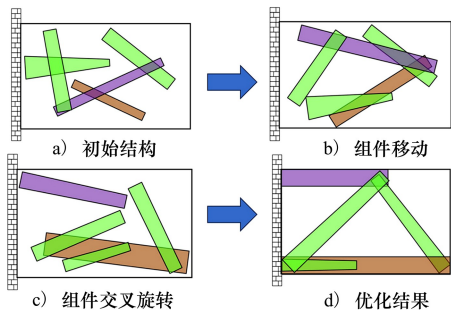


图 8 MMC 法基本原理

处理方法反映出拓扑结构信息,彻底消除了 SIMP 方法中的灰度单元,通过数值算例证明了该方法的有效性。

综上所述,MMC 法基于显式拓扑优化的统一框架,可适应不同类型的结构设计需求,但当前对 MMC 法的研究有限,需对其应用范围进一步研究。MMC 法虽提高了计算效率,但随着初始组件数量的增加,中间迭代计算较为耗时。因此,MMC 法如何应用于大型复杂工程领域的设计优化成为未来的研究热点。

4 基于材料-结构一体化的连续体拓扑优化设计

在机械结构中,有些主承载零部件需满足极端耐热、高精度及轻量化等多种设计要求,材料与结构分离的设计方式无法充分挖掘材料和结构的性能潜力。因此,基于材料-结构一体化的连续体拓扑优化设计如何从尺度、物理场及参数等多方面综合考虑,突破材料-结构一体拓扑优化设计的技术瓶颈,对材料与结构的交互作用进行精确调控,是实现高性能零部件制造的关键^[58]。

4.1 多尺度结构一体化拓扑优化

在对材料微结构的观察中发现,微观尺度材料的结构通常以多胞形态进行分布,而材料的性能直接由单胞的微结构决定,因此,在多个尺度上对结构构型进行研究,可充分挖掘结构在不同尺度上的性能潜力^[59]。在连续体拓扑优化设计中,最早出现的均匀化法^[60]及变密度法^[61]考虑了微观及宏观不同尺度间的关联和耦合模型,可实现结构信息的跨尺度传递和交换。均匀化法和变密度法均以材料体积为约束条件,柔顺度最小化为设计目标,通过密度变

量进行多尺度结构设计,从而实现结构整体性能的优化。因此,多尺度结构优化设计被认为是未来轻量化结构创新设计的关键技术路径^[62]。

4.1.1 周期多尺度结构优化

周期多尺度结构指由一种或多种微结构单元以周期形式排列而成的多尺度结构。为实现周期多尺度的结构优化,面向多尺度几何微结构的设计需求,Gu 等^[63]提出一种改进的 SIMP 法,该方法可对宏观结构进行划分,形成不同密度的子区域,进而对宏观结构和各子域微结构同时进行拓扑优化设计;Wu 等^[64]将骨状多孔结构离散化,对其进行多尺度微结构设计,得到一种生成骨状多孔结构。而微观结构设计涉及多尺度优化设计,增加了设计的复杂性,提高了精确性要求,对设计人员的专业技能要求较高。如何简化多尺度结构拓扑优化设计流程及实现微结构的轻量化设计是需考虑的问题。

为解决上述问题,诸多学者将晶格结构引入周期多尺度结构设计中,如图 9a) 所示。晶格结构是一种由周期性排列的晶胞等结构基元组成的三维空间点阵^[65]。Li 等^[66]将数值投影法与渐进均匀化法相结合,在不改变晶格大小和形状的情况下,使优化后的晶格结构具有更强的抗折弯能力;Wang 等^[67]采用 SIMP 法对舵翼结构进行拓扑优化设计,并对其实体与晶格的混合结构进行几何重构,优化后的固体-晶格混合结构舵翼刚度及固有频率显著提高,如图 9b) 所示;任利民等^[68]对点阵边界处进行参数化设计,确保了载荷向连接结构高效地传递,如图 9c) 所示;徐赣君等^[69]根据有限元分析结果,对梁模型强度不足的节点进行了参数化设计,其振幅减小了 20.9%,承载能力提高了 30%;Moon 等^[70]根据 3D Kagome 结构、3D 金字塔晶格结构和六角菱形晶格结构的分析结果,设计了一种翼型桁架晶格结构,提高了无人机机翼的柔性及机动性,轻量化机翼如图 9d) 所示。

由上述文献可知,将周期多尺度结构引入产品的微结构中,可有效提升产品的力学性能。通过拓扑优化方法和增材制造等技术,在提高复杂几何结构强度及刚度的同时,实现结构的轻量化。周期多尺度结构优化需通过材料科学、力学及计算机辅助设计等多学科优化方法,实现从设计到制造的全流程优化。目前,随着金属泡沫、纳米复合材料等新材料的开发,将增材制造等先进制造技术与其材料特性相结合,可进一步推动多尺度结构优化的发展。

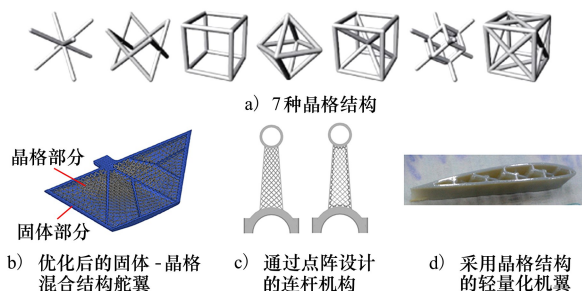


图9 晶格结构及其应用

4.1.2 多尺度并行优化

多尺度并行优化是指以最小柔度为设计目标,基于拓扑优化理论及方法探索不同尺度上的结构特性,实现结构并行优化。例如,Liu^[71]基于均匀化理论建立了结构与材料尺度的连接,实现了构型与微观材料微结构的并行优化设计;Yan等^[72]通过均匀化法及双向渐进结构优化法实现了多尺度并行优化设计,以多个数值算例证明了该方法的有效性;Li等^[73]基于均匀化理论,宏观上采用变密度法对结构进行拓扑优化设计,微观上采用水平集法进行微结构设计,得到层次分明的多孔晶格结构;Wang等^[74]采用水平集法建立了结构-材料多尺度拓扑优化设计模型,通过数值算例证明了该模型设计方案的有效性;Sivapuram等^[75]采用水平集法对多尺度结构进行优化设计,实现了多尺度一体拓扑优化设计;Hao等^[76]采用渐进均匀化法对运载火箭燃料箱进行了拓扑优化设计,实现了多尺度的屈曲优化设计;Li等^[77]采用水平集法对新型功能梯度细胞复合材料进行拓扑优化设计,并通过均匀化法确定了微观组织的有效性能。由上述文献可知,在设计过程中,考虑结构的复杂几何形状及微观材料分布的同时,拓扑优化方法可实现结构及材料的多尺度并行优化设计。此外,随着人工智能技术及纳米新材料的发展,可通过集成设计方法提高结构性能,将宏观结构、多类微观结构及拓扑优化相结合,引入密度插值模型实现高效的多尺度拓扑优化设计。

密度插值模型可通过描述单元刚度与密度间的关系,选择适当的插值函数将问题中出现的物理量表示为连续设计变量的函数,通过改变设计域内材料密度的分布,减少优化结果的灰度单元,从而实现多尺度结构的拓扑优化设计。密度插值模型需将每个单元设定为不同材料密度的个体,通过单元相对密度的变化得到优化结果^[78]。SIMP模型及有理近

似模型(rational approximation of material properties, RAMP)为常用的密度插值模型,由于具有适用性强和易于数值实现等特点,在连续体拓扑优化中应用广泛。在SIMP模型中,惩罚因子 p 每次收敛后,都将从上界增加至下界。随着 p 的增大,结构的材料密度值向两端收敛,从而重新分配拓扑优化单元。与SIMP模型不同,RAMP模型具有非零灵敏度,可在具有载荷的情况下解决与低密度值相关的数值问题。SIMP和RAMP模型分别采用幂函数和有理函数建立设计变量 x_i 与弹性模量 E 间的关系,其模型如(3)式所示。

$$\begin{cases} \Delta E = E_0 - E_{\min} \\ E_p(x_i) = E_{\min} + x_i^p E \\ E_q(x_i) = E_{\min} + \frac{x_i}{1 + q(1 - x_i)} E \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_p, E_q 分别为SIMP及RAMP模型插值后结构的弹性模量; E_0 为实体部分的弹性模量; $E_{\min}$ 为孔洞部分的弹性模量,通常情况下,设 $E_{\min} = E_0/1\,000$; p, q 分别为2种模型中的惩罚因子。设 $E_0 = 1$,则SIMP和RAMP的插值函数如图10所示。

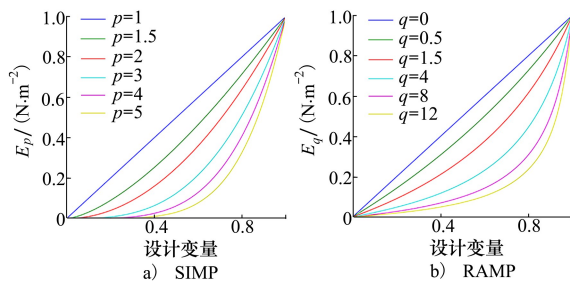


图10 SIMP及RAMP的插值函数

SIMP及RAMP插值模型在拓扑优化方法中广泛应用。彭显昌等^[79]将SIMP模型与变密度法相结合,对电动汽车变速箱壳体进行拓扑优化设计,优化后的壳体刚度得到提高,且质量减小7.5%;林丹益^[80]采用变密度法对汽车发动机支架进行拓扑优化设计,质量减小了48.5%;董伟等^[81]提出一种点阵-加肋板式拓扑优化设计方法,优化后的飞行器设备安装板在刚度提高的同时,位移响应峰值减小73.81%。在求解连续体拓扑优化设计问题时,确定合适的材料插补方案是一个重要的任务^[82]。在拓扑优化设计中,SIMP插值模型的理论及应用体系较为完善,具有较好的鲁棒性及稳定性。但在遇到过滤半径大及惩罚因子较为敏感的优化问题时可出现

棋盘格效应,导致优化后的结构制造难度增加。因此,为使优化后的结构满足可制造的要求,张国锋等^[83]提出一种改进敏度过滤方法,可有效消除棋盘格效应和网格依赖性,提高优化效率;Shi等^[84]将径向基函数与SIMP法相结合,解决了优化结果的棋盘格问题,提高了计算效率。

多尺度并行优化实现了对宏观结构与复合微观结构的并行优化设计。对宏观层级优化,可确定结构整体布局;对微观层面优化可实现微结构的拓扑构型,充分发挥了微观层面上结构的性能优势^[81]。在工程应用中,多尺度并行优化一般应用于关键结构的设计中,针对其设计要求及环境的多样性,如何进一步完善该方法的广泛适用性,成为下一步的研究方向。

4.2 多物理场结构一体化拓扑优化

高性能结构优化设计是一种具有挑战性的工作,受力、热、声、磁等多种物理因素的影响,结构的耐热、降噪、抗风及水流等约束条件成为设计中需考虑的关键问题。拓扑优化作为机械装备结构创新设计的先进方法^[85],在无初始设计条件的情况下,通过合理给定区域内多种材料的分布,得到创新的结构构型,满足所需的功能要求。因此,拓扑优化设计常被用于解决复杂物理场中的结构创新设计问题。李绍春等^[86]提出一种结构阻尼一体化设计方法,不仅增大结构阻尼,还衰减振动能量,有效抑制了试验设备的振动响应;Yang等^[87]应用OpenFAST软件对风力机进行了仿真分析,结果表明在稳定风及湍流工况下,叶片及塔架结构具有良好的稳定性;Xu等^[88]以等效热导率及弹性应变能最小为设计目标,对一体化热防护结构单元进行拓扑优化设计,优化后的热防护结构在减小质量的同时,具有更低的表面温度。

综上所述,在一体化拓扑优化设计中,材料选择和结构设计不再是独立的环节,通过对材料力学、热学、电学等特性与结构的拓扑形状同步优化,能更好地实现所需的产品性能。对于多物理场中高性能结构的拓扑优化设计,虽然诸多学者采用优化设计方法获得了优化方案,验证了其结构减重的可行性,但受产品工作环境因素限制,较常用的轻量化技术在高性能结构设计中应用仍然较少。

4.3 多参数结构一体化拓扑优化

多参数一体拓扑优化设计将制造工艺、复合材料、拓扑优化和参数优化相结合,通过调整材料的分布和布局使结构的受力路径更加合理,减少材料的浪费,实现结构的轻量化设计。马芳武等^[89]以厚度及材料参数为设计变量,采用折衷规划法对汽车车架进行一体化设计,使其质量减小14.5%;汪永嘉等^[90]采用自适应响应面法对汽车保险杠前防撞梁进行轻量化设计,质量减小20.5%;谷先广等^[91]采用铝合金材料及熔模真空吸铸工艺对电动汽车结构进行了拓扑优化设计,在满足设计要求的同时,前副车架及仪表板横梁的质量分别减小36.6%和30.8%;吴勃夫等^[92]采用铸铝材料-结构-性能一体拓扑优化设计方法对汽车车门进行了轻量化设计,下沉刚度工况位移减小42.6%,质量减小21.2%;成艾国等^[93]以某新能源车型的尾门为研究对象,提出一种结构拓扑-玻璃纤维增强复合材料-参数一体化轻量化设计方法,优化后的尾门质量减小27.2%;Tao等^[94]采用Kriging模型和多目标粒子群优化算法优化三维编织碳纤维翼子板的材料和结构参数,使其质量减小了39%;Ning等^[95]采用热塑性复合材料和热成形加工技术替代铝制部件,对公交车顶盖进行材料-结构-工艺一体拓扑优化设计,在满足结构刚度和强度要求的基础上,质量减小39%。由上述文献可知,多参数结构一体拓扑优化设计需综合考虑材料、结构、工艺等参数,在产品开发中,应将材料选择、结构设计、性能要求和制造工艺进行集成式设计,实现产品在这些参数中的最优平衡,避免设计过程中的资源浪费。未来,多参数一体拓扑优化设计需加强跨学科合作,推动设计方法的创新,并结合环境等因素的影响,实现可持续设计,使其在工程领域中发挥重要作用。

5 连续体拓扑优化设计应用领域

5.1 航空装备

在航空装备领域,飞行器的性能是衡量其技术先进性和市场竞争力的重要指标。为满足速度、航程、载重能力、安全性及经济性等性能要求,飞行器须采用先进的方法进行设计及校核,连续体拓扑优化作为面向轻量化结构设计的重要拓扑优化方法,可快速生成多个可行设计方案,缩短结构设计周期,同时,在保证结构强度和刚度的前提下,最大限度地

减少材料使用,降低能耗并提高运载效率。近年来, 术^[96]。连续体拓扑优化在航空装备领域中的应用连续体拓扑优化已成为提升飞行器性能的关键技 现状如表 5 所示。

表 5 连续体拓扑优化在航空装备领域中的应用现状

应用对象	研究现状
无人机	原帅超等 ^[97] 以质量最小化和应力最小化为优化目标,采用变密度法对无人机承载接头进行拓扑优化设计,在满足强度及刚度要求的同时,质量减小了 13.3%
	姚正康等 ^[98] 以最小柔度为优化目标,采用 SIMP 法及变密度法对多栖无人飞行器机身结构进行了拓扑优化设计,质量减小了 19.2%
	李鹏等 ^[99] 采用变密度法对某四旋翼植保无人机机臂折叠机构进行拓扑优化设计,优化后机臂折叠机构的质量由最初的 231.54 g 减小为 204.21 g
	王志鹏等 ^[100] 采用变密度法对四旋翼无人机结构进行了拓扑优化设计,质量减小了 42.5%
飞机	牛西茜等 ^[101] 将可分离凸逼近对偶优化算法与变密度法相结合,对飞机襟翼进行拓扑优化设计,质量减小了 23%
	王凤等 ^[102] 采用变密度法对航空发动机支架进行拓扑优化设计,提高固有频率的同时质量减小 22.6%
	赵知辛等 ^[103] 将变密度法与优化准则法相结合,对飞机前起落架扭力臂进行拓扑优化设计,在满足强度与刚度条件的基础上,扭力臂的质量减小 25.4%
	Fei 等 ^[104] 提出一种全局联动驱动优化的策略,采用多起点算法对起落架下拉杆进行拓扑优化设计,优化后的质量减小了 16.79%

5.2 交通运载装备

在交通运载装备领域,随着对能源效率与环 量化的拓扑优化设计领域中取得了丰富的成果,轨道交通及汽车工程领域已将拓扑优化设计作为重点可持续要求的提高,运载装备的轻量化设计成为车 研究方向^[106]。文中列举了连续体拓扑优化在交通辆研发的重要内容^[105]。国内外科研人员在面向轻 运载装备领域中的应用现状,如表 6 所示。

表 6 连续体拓扑优化在交通运载装备领域中的应用现状

应用领域	研究现状
轨道交通	Lee 等 ^[107] 采用 SIMP 法及正交阵列法对列车车体的盖板和肋板进行了拓扑优化设计,质量减小 14%
	Yao 等 ^[108] 对铁路浮层结构进行轻量化设计,质量减小了 15.2%,并提升其隔声效果
	李娅娜等 ^[109] 将 SIMP 法与子结构法相结合,对列车车体座椅支架进行拓扑优化设计,质量减小 49%
	郑若瑜 ^[110] 通过 OptiStruct 软件,采用超单元法对地铁车体进行了拓扑优化设计,其质量减小 13.45%
汽车工程	廖莺等 ^[111] 采用独立连续映射法对汽车后副车架进行了拓扑优化设计,质量减小 1.84 kg,减重率约 7.4%
	张东东等 ^[112] 建立了商用车前轴结构的 Res-CB-Unetsh 神经网络模型,采用变密度法对其进行拓扑优化设计,质量减小了 6.83%,并提高了计算效率
	刘英杰等 ^[113] 以空调压缩机连接支架为例,采用变密度法对其进行拓扑优化设计,在满足要求的同时,质量减小 43.8%
	Kiani 等 ^[114] 对白车身进行动力学和静力学分析,采用多目标拓扑优化法对其进行轻量化设计,在结构强度满足设计要求的同时,减小了车身质量
	张峰等 ^[115] 采用 Optistruct 软件对车身进行了拓扑优化设计,根据分析结果,保证性能目标的前提下,质量减小约 2.311 kg
	Yana 等 ^[116] 采用折衷规划法、正交试验法及层次分析法对不锈钢点焊车进行了多目标拓扑优化设计,优化后的焊点数量减少了 17.8%
	Hartmann 等 ^[117] 采用变密度法对动力电池包箱体进行拓扑优化设计,使其一阶模态频率高于整车的激励频率,同时箱体质量减小了 20%
	苏永雷等 ^[118] 建立了汽车副车架的组合代理模型,采用 SIMP 法对其进行了拓扑优化设计,在实现轻量化设计的同时,提高了其一阶扭转模态频率
	李艳星等 ^[119] 采用各向同性材料惩罚函数对中型氢燃料电池货车车架进行多目标拓扑优化设计,其质量减小了 7.8%

5.3 兵器装备

随着现代战争形态的演变,对武器系统的快速部署、机动性和战场适应性提出了更高的要求。轻量化设计能显著提高武器系统的性能,使其能够快速响应战场变化,适应多变的作战环境。通过对结

构进行拓扑优化设计,实现最优材料布局的同时,减小设计目标质量,是目前兵器工程领域中较为常见的方法。文中列举了连续体拓扑优化在兵器装备领域中的应用现状,如表 7 所示。

表 7 连续体拓扑优化在兵器装备领域中的应用现状

应用对象	研究现状
火炮	葛世程等 ^[120] 应用 HyperWorks 软件,采用 SIMP 法及折衷规划法对野战火箭炮装填系统进行拓扑优化设计,得到了满足设计要求的拓扑结构
	张新建等 ^[121] 采用层次分析法和折衷规划法对火炮上架结构进行了拓扑优化设计,降低了其质量,并提高了刚度
	孙玲庆等 ^[122] 对火炮翻板机构进行了轻量化设计,优化后的模型最大位移及最大应力均大幅度降低,并减小了质量
舰载发射装置	陈延伟等 ^[123] 通过新材料应用和结构拓扑优化设计等方法,将某型舰载发射装置现有的 15 根小立柱优化为 6 根大立柱支撑架构,并优化了壁厚尺寸,使其质量减小了 21.7%
武器站	刘浩等 ^[124] 采用变密度法对无人武器站进行拓扑优化设计,质量减小了 11.1%

5.4 其他领域

随着全球化和工业化的快速发展,工程领域面临着日益增长的效率和性能要求,通过拓扑优化设计实现机械结构的轻量化已成为提高产品竞争力、促进可持续发展的关键方法。蒋君侠等^[125]采用变密度法对龙门立柱进行拓扑优化设计,质量减小了 12.5%;郑小飞等^[126]采用 Ansys 软件中的 Topology Optimization 模块对爬杆机器人进行拓扑优化设计,爬杆机器人的整机质量减小 7.6%;尹浇钦等^[127]建立了双主轴卧式加工中心横梁的 Kriging 模型,采用遗传算法及变密度法对其进行拓扑优化设计,优化后的横梁质量减小了 20.3%;Xu 等^[128]采用变密度法对冲压模具结构进行拓扑优化设计,在满足设计要求的同时,质量减小 50%;Song 等^[129]采用变密度法对机械臂进行拓扑优化设计,在提高强度及刚度的同时,质量减小 29.65%;Suryo 等^[130]采用变密度法对臂式挖掘机进行了线性静态分析和拓扑优化设计,质量减小了 3.7%;马超等^[131]以乘员与保护结构间安全距离最大化及质量最小化为目标,对挖掘机滚翻保护结构进行了多目标优化设计。

6 结 论

连续体拓扑优化方法理论及应用日益成熟,研

究范围和领域不断增大。文中探讨了国内外面向轻量化设计的连续体拓扑优化方法研究进展,对结构迭代优化、边界描述及材料分布 3 种类型的拓扑优化方法进行了总结,列举了拓扑优化方法在航空、交通运输载及兵器装备等领域的应用,指出未来轻量化设计的发展方向,并得到如下结论:

- 1) 将基于边界描述的拓扑设计方法与其他方法相结合,可直接通过边界演化控制结构边界的变形,从而实现结构的最优布局。
- 2) 代理模型可模拟复杂的系统或函数,而神经网络模型以其强大的非线性拟合能力而著称。将代理模型及神经网络模型引入拓扑优化设计中,可降低计算成本,缩短优化周期,提高优化效率。
- 3) 连续体拓扑优化设计可通过优化结构在设计域内的布局来实现结构性能最大化。在结构一体拓扑优化设计中,多类微结构的引入可充分挖掘不同尺度上结构的性能潜力。多尺度一体拓扑优化实现了结构多尺度连接的互通性,对结构的整体性能和稳定性至关重要,有效解决了多物理场环境下的高性能结构设计问题。

通过文中研究,得到面向轻量化设计的连续体拓扑优化设计趋势:

- 1) 拓扑优化设计的适用性。拓扑优化方法的理论较为成熟,但实际工程需求通常较为复杂,需满

足多种优化目标。为满足多样化的实际工程要求,连续体拓扑优化设计方法需进行相应的创新。目前,连续体拓扑优化逐步将多学科优化、增材制造、复合材料一体化成形等技术进行结合,综合考虑制造工艺及新材料的协同优化,从而满足工程实际应用中的多种设计要求。

2) 智能化拓扑优化设计策略。随着拓扑优化方法的广泛应用,面对多样化的设计要求,产品设计模型数据庞大,通过将神经网络等深度学习模型引入产品设计,建立高稳定性、高适用性及多功能的拓

扑优化设计流程,替代复杂的仿真计算,为实现实时的高性能计算、人工智能化拓扑优化设计提供可能。

3) 一体化绿色设计与制造。随着制造业的发展,绿色优化设计成为趋势,因此,拓扑优化设计需综合考虑产品材料的选择及制造工艺,实现设计参数的最优平衡,减少对资源的消耗。

总之,科学技术的进步深刻地影响着拓扑优化设计的新趋势。随着新材料的迭代创新及人工智能等前沿技术的发展,未来,拓扑优化设计将逐渐应用于更复杂的产品设计领域中,带来更多的技术创新。

参考文献:

- [1] LI T W, KU X P, BAKAR A Z N. Topology optimization of swing arm for FSAE EV racing cars[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2923(1): 012007
- [2] ZHU B L, ZHANG X M, ZHANG H C, et al. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 143: 103622
- [3] DEATON J D, GRANDHI R V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 49(1): 1-38
- [4] SIVAPURAM R, DUNNING P D, KIM H A. Simultaneous material and structural optimization by multiscale topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(5): 1267-1281
- [5] JUNG T, LEE J, NOMURA T, et al. Inverse design of three-dimensional fiber reinforced composites with spatially-varying fiber size and orientation using multiscale topology optimization[J]. Composite Structures, 2022, 279: 114768
- [6] 柴象海, 张执南, 阎军, 等. 航空发动机风扇叶片冲击加强轻量化设计[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(2): 186-192
CHAI Xianghai, ZHANG Zhinan, YAN Jun, et al. Lightweight design for improving aeroengine fan blade impact resistance capability[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2020, 54(2): 186-192 (in Chinese)
- [7] XIONG F, WANG D, MA Z, et al. Lightweight optimization of the front end structure of an automobile body using entropy-based grey relational analysis[J]. Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(4): 917-934
- [8] 黄杰, 阮景奎, 张一兵, 等. 基于多目标遗传算法的差速器壳体轻量化设计[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(3): 269-275
HUANG Jie, RUAN Jingkui, ZHANG Yibing, et al. Lightweight design of differential case based on multi-objective genetic algorithm[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(3): 269-275 (in Chinese)
- [9] 王普毅, 范天峰, 张太平, 等. 武器装备轻量化结构正向设计方法及应用[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(6): 150-158
WANG Puyi, FAN Tianfeng, ZHANG Taiping, et al. A forward design method and application for lightweight structure of weaponry[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(6): 150-158 (in Chinese)
- [10] SIGMUND O, MAUTE K. Topology optimization approaches: a comparative review[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, 48(6): 1031-1055
- [11] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization[J]. Computers & Structures, 1993, 49(5): 885-896
- [12] QUERIN O M, STEVEN G P, XIE Y M. Evolutionary structural optimization(ESO) using a bidirectional algorithm[J]. Engineering Computations, 1998, 15(8): 1031-1048
- [13] HUANG X, XIE Y M. Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2007, 43(14): 1039-1049
- [14] 李恕民. 基于骨架提取算法的结构拓扑与尺寸混合优化方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2022
LI Shumin. Research on hybrid optimization method of structural topology and size based on skeleton extraction algorithm[D].

- Guangzhou: Guangzhou University, 2022 (in Chinese)
- [15] YANG X Y, XIE Y M, STEVEN G P. Evolutionary methods for topology optimization of continuous structures with design dependent loads[J]. *Computers & Structures*, 2005, 83(12/13): 956-963
- [16] HUANG X, XIE Y M. Evolutionary topology optimization of continuum structures including design-dependent self-weight loads [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, 47(8): 942-948
- [17] 滕晓燕, 孙利. 油船货舱结构拓扑优化工程应用[J]. *应用力学学报*, 2017, 34(5): 944-949
TENG Xiaoyan, SUN Li. Engineering application of topology optimization in structural design for cargo tank region of oil tanker [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(5): 944-949 (in Chinese)
- [18] 武星, 封硕, 齐峻, 等. 考虑质量约束的多相材料结构拓扑优化新方法[J]. *计算力学学报*, 2023, 40(3): 484-490
WU Xing, FENG Shuo, QI Jun, et al. A novel approach to topology optimization of multi-material structures considering mass constraint[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, 40(3): 484-490 (in Chinese)
- [19] MIRZENDELDEL A M, RANKOUHI B, SURESH K. Strength-based topology optimization for anisotropic parts[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 104-113
- [20] WANG H X, LIU J, WEN G L. An adaptive mesh-adjustment strategy for continuum topology optimization to achieve manufacturable structural layout[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2019, 117(13): 1304-1322
- [21] WANG H X, LIU J, WEN G L. An efficient evolutionary structural optimization method with smooth edges based on the game of building blocks[J]. *Engineering Optimization*, 2019, 51(12): 2089-2108
- [22] 隋允康. 建模·变换·优化——结构综合方法新进展[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996
SUI Yunkang. Modelling Transformation and optimization new developments of structural synthesis method[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1996 (in Chinese)
- [23] 叶红玲, 沈静娴, 隋允康. 过滤函数对应力约束连续体结构拓扑优化的影响分析[J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(3): 321-330
YE Hongling, SHEN Jingxian, SUI Yunkang. Analysis of effects of different filter functions on topology optimization of continuous structure with stress constraint[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39(3): 321-330 (in Chinese)
- [24] 隋允康, 彭细荣. 结构拓扑优化 ICM 法中高效率收敛映射函数 MFHEC 的选取[J]. *固体力学学报*, 2024, 45(2): 253-265
SUI Yunkang, PENG Xirong. Selecting mapping function with highly efficient convergence(MFHEC) for ICM method of structural topology optimization[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2024, 45(2): 253-265 (in Chinese)
- [25] 李宏宇, 孙鹏文, 张兰挺, 等. 基于 ICM 的风力机叶片多相材料拓扑优化设计[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 261-266
LI Hongyu, SUN Pengwen, ZHANG Lanting, et al. Topology optimization design for multiphase materials of wind turbine blade based on ICM[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2021, 42(12): 261-266 (in Chinese)
- [26] LI X, YANG Q, WANG Y, et al. Development of surrogate models in reliability-based design optimization: a review[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2021, 18(5): 6386-6409
- [27] 凌静秀, 李浩宇, 王乾廷, 等. 基于 Kriging 模型和 MOGA 的轮胎成型机辊压支架的轻量化研究[J]. *现代制造工程*, 2023(10): 126-134
LING Jingxiu, LI Haoyu, WANG Ganting, et al. Structural optimization and lightweight of tyre forming machine rolling support [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2023(10): 126-134 (in Chinese)
- [28] 贾连辉, 李晓科, 袁文征, 等. 基于拓扑优化和 Kriging 模型的前中盾结构轻量化设计[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(23): 2888-2897
JIA Lianhui, LI Xiaoke, YUAN Wenzheng, et al. Lightweight design of front and middle shield structures based on topology optimization and Kriging model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(23): 2888-2897 (in Chinese)
- [29] 李作轩, 贾良跃, 郝佳, 等. 基于多工况关联的无人车辆车身结构轻量化优化设计[J]. *兵工学报*, 2023, 44(11): 3529-3542
LI Zuoxuan, JIA Liangyue, HAO Jia, et al. Lightweight optimization design of unmanned vehicle body structure based on multi-working conditions correlation[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(11): 3529-3542 (in Chinese)
- [30] 焦阿允, 马新谋, 李魁武. 火箭炮底座多目标优化设计[J]. *火炮发射与控制学报*, 2022, 43(3): 50-55
JIAO Ayun, MA Xinmou, LI Kuiwu. Multi-objective optimization design of under frame of rocket launcher[J]. *Journal of Gun*

- Launch & Control, 2022, 43(3): 50-55 (in Chinese)
- [31] XIONG F, ZOU X H, ZHANG Z G, et al. A systematic approach for multi-objective lightweight and stiffness optimization of a car body[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(6): 3229-3248
- [32] 陈超磊, 王志祥, 雷勇军, 等. 基于序列近似优化方法的加筋圆锥壳结构优化设计[J]. 载人航天, 2023, 29(3): 362-371
- CHEN Chaolei, WANG Zhixiang, LEI Yongjun, et al. Structure optimization design of stiffened conical shells based on sequential approximate optimization method[J]. Manned Spaceflight, 2023, 29(3): 362-371 (in Chinese)
- [33] YANG P, SUN L Y, ZHANG M L, et al. A lightweight optimal design method for magnetic adhesion module of wall-climbing robot based on surrogate model and DBO algorithm[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(4): 2041-2053
- [34] SOSNOVIK I, OSELEDETS I. Neural networks for topology optimization[J]. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2019, 34(4): 215-223
- [35] ZHENG S, HE Z Z, LIU H L. Generating three dimensional structural topologies via a U-Net convolutional neural network[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 159: 1-15
- [36] CHANDRASEKHAR A, SURESH K. TOuNN: topology optimization using neural networks[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63(3): 1135-1149
- [37] 范丽丽, 赵宏伟, 赵浩宇, 等. 基于深度卷积神经网络的目标检测研究综述[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1152-1164
- FAN Lili, ZHAO Hongwei, ZHAO Haoyu, et al. Survey of target detection based on deep convolutional neural networks[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(5): 1152-1164 (in Chinese)
- [38] XIA Q, WANG M Y, SHI T L. Topology optimization with pressure load through a level set method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 283: 177-195
- [39] WANG M Y, WANG X, GUO D. A level set method for structural topology optimization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, 192(1/2): 227-246
- [40] SETHIAN J A, WIEGMANN A. Structural boundary design via level set and immersed interface methods[J]. Journal of Computational Physics, 2000, 163(2): 489-528
- [41] 郭旭, 赵康. 基于拓扑描述函数的连续体结构拓扑优化方法[J]. 力学学报, 2004(5): 520-526
- GUO Xu, ZHAO Kang. A new topology description function based approach for structural topology optimization[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2004(5): 520-526 (in Chinese)
- [42] 庄春刚, 熊振华, 丁汉. 基于水平集方法和 von Mises 应力的结构拓扑优化[J]. 中国机械工程, 2006(15): 1589-1595
- ZHUANG Chungang, XIONG Zhenhua, DING Han. Structural topology optimization based on level set method and von Mises stress[J]. China Mechanical Engineering, 2006(15): 1589-1595 (in Chinese)
- [43] OSHER S J, SANTOSA F. Level set methods for optimization problems involving geometry and constraints: I. frequencies of a two-density inhomogeneous drum[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 171(1): 272-288
- [44] MEI Y, Wang X. A level set method for structural topology optimization and its applications[J]. Advances in Engineering Software, 2004, 35(7): 415-441
- [45] KAMBAMPATI S, GRAY J S, KIM H A. Level set topology optimization of structures under stress and temperature constraints [J]. Computers & Structures, 2020, 235: 106265
- [46] HUANG H, DING W, JIA H, et al. Multiscale fail-safe topology optimization for lattice structures[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 206(3): 112693
- [47] 张维声, 孙国, 郭旭, 等. 基于水平集描述的结构拓扑与构件布局联合优化新方法[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 22-27
- ZHANG Weisheng, SUN Guo, GUO Xu, et al. A level set-based approach for simultaneous optimization of the structural topology and the layout of embedding structural components[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 22-27 (in Chinese)
- [48] 吴永辉, 张东东, 陈静月, 等. 基于参数化水平集法的约束阻尼结构动力学拓扑优化[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(4): 349-359
- WU Yonghui, ZHANG Dongdong, CHEN Jingyue, et al. Dynamic topology optimization for constrained layer damping structures using parametric level set method[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2021, 43(4): 349-359 (in Chinese)

- [49] LIN Y, ZHU W, LI J, et al. Structural topology optimization using a level set method with finite difference updating scheme[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 63: 1839-1852
- [50] ALLAIRE G, GOURNAY F D, JOUVE F, et al. Structural optimization using topological and shape sensitivity via a level set method[J]. *Control & Cybernetics*, 2005, 34(1): 59-80
- [51] 罗俊召, 陈立平, 罗震. 基于半隐式格式的水平集法连续体结构形状和拓扑优化方法[J]. *固体力学学报*, 2008, 29(2): 175-180
- LUO Junzhao, CHEN Liping, LUO Zhen. A level set method for topology optimization using aosscheme[J]. *Chinese Journal of Solid State Mechanics*, 2008, 29(2): 175-180 (in Chinese)
- [52] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 79(1): 12-49
- [53] GUO X, ZHANG W S, ZHONG W L. Doing topology optimization explicitly and geometrically-a new moving morphable components based framework[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, 81(8): 081009
- [54] WEISS B M, HAMEL J M, GANTER M A, et al. Data-driven additive manufacturing constraints for topology optimization[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2021, 143(2): 021001
- [55] 廉睿超, 敬石开, 李营, 等. 考虑最小尺寸精确控制的 SIMP 和 MMC 混合拓扑优化方法[J]. *力学学报*, 2022, 54(12): 3524-3537
- LIAN Ruichao, JING Shikai, LI Ying, et al. A hybrid topology optimization method of SIMP and MMC considering precise control of minimum size[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(12): 3524-3537 (in Chinese)
- [56] 李佳霖, 赵剑, 孙直, 等. 基于移动可变形组件法(MMC)的运载火箭传力机架结构的轻量化设计[J]. *力学学报*, 2022, 54(1): 244-251
- LI Jialin, ZHAO Jian, SUN Zhi, et al. Lightweight design of transmission frame structures for launch vehicles based on moving morphable components(MMC) approach[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 54(1): 244-251 (in Chinese)
- [57] 张军峰, 廖靖宇, 刘恩海. 基于 SIMP-MMC 结构尺寸精确控制拓扑优化方法[J]. *机械强度*, 2022, 44(1): 102-110
- ZHANG Junfeng, LIAO Jingyu, LIU Enhai. Topology optimization method based on SIMP-MMC for structure size precise control [J]. *Mechanical Strength*, 2022, 44(1): 102-110 (in Chinese)
- [58] 张卫红, 周涵, 李韶英, 等. 航天高性能薄壁构件的材料-结构一体化设计综述[J]. *航空学报*, 2023, 44(9): 30-46
- ZHANG Weihong, ZHOU Han, LI Shaoying, et al. Material-structure integrated design for high-performance aerospace thin-walled component[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(9): 30-46 (in Chinese)
- [59] 陈小前, 赵勇, 霍森林, 等. 多尺度结构拓扑优化设计方法综述[J]. *航空学报*, 2023, 44(15): 25-60
- CHEN Xiaolian, ZHAO Yong, HUO Senlin, et al. A review of topology optimization design methods for multi-scale structures [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44 (15): 25-60 (in Chinese)
- [60] 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
- [61] BENDSOE M P, SIGMUND O. Material interpolation schemes in topology optimization[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999, 69(9/10): 635-654
- [62] PLOCHER J, PANESAR A. Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: towards next-generation lightweight structures[J]. *Materials & Design*, 2019, 183: 108164
- [63] GU X C, HE S M, DONG Y H, et al. An improved ordered SIMP approach for multiscale concurrent topology optimization with multiple microstructures[J]. *Composite Structures*, 2022, 287: 115363
- [64] WU J, AAGE N, WESTERMANN R, et al. Infill optimization for additive manufacturing-approaching bone-like porous structures [J]. *IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics*. 2018, 24(2): 1127-1140
- [65] XIONG J, MINES R, GHOSH R, et al. Advanced micro-lattice materials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(9): 1253-1264
- [66] LI D, LIAO W, DAI N, et al. Anisotropic design and optimization of conformal gradient lattice structures[J]. *Computer-Aided Design*, 2020, 119: 102787
- [67] WANG C, ZHU J, WU M, et al. Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to

- aerospace vehicle components[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 386-398
- [68] 任利民, 戴宁, 程筱胜, 等. 点阵结构填充模型的边界强化设计方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(5): 594-599
REN Limin, DAI Ning, CHENG Xiaosheng, et al. Method of boundary strengthening design for lattice structure filling model [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(5): 594-599 (in Chinese)
- [69] 徐赣君, 戴宁. 基于节点增强的功能点阵设计方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(13): 1537-1544
XU Ganjun, DAI Ning. Functional lattice structures design method based on strengthening nodes[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(13): 1537-1544 (in Chinese)
- [70] MOON S K, TAN Y E, HWANG J, et al. Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2014(1): 223-228
- [71] LIU K. Concurrent topology optimization of structures and materials[D]. West Lafayette: Purdue University, 2013
- [72] YAN X, HUANG X, ZHA Y, et al. Concurrent topology optimization of structures and their composite microstructures[J]. Computers and Structures, 2014, 133: 103-110
- [73] LI H, LUO Z, ZHANG N, et al. Integrated design of cellular composites using a level-set topology optimization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 309: 453-475
- [74] WANG Y, WANG M Y, CHEN F. Structure-material integrated design by level sets[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(5): 1145-1156
- [75] SIVAPURAM R, DUNNING P D, Kim H A. Simultaneous material and structural optimization by multiscale topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(5): 1267-1281
- [76] HAO P, WANG B, TIAN K, et al. Fast procedure for non-uniform optimum design of stiffened shells under buckling constraint [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 55: 1503-1516
- [77] LI H, LUO Z, GAO L, et al. Topology optimization for functionally graded cellular composites with metamaterials by level sets [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 328: 340-364
- [78] GUO X, ZHANG W, ZHONG W. Doing topology optimization explicitly and geometrically——a new moving morphable components based framework[J]. Journal of Applied Mechanics, 2014, 81(8): 081009
- [79] 彭显昌, 蔡文奇, 林志斌, 等. 电动汽车变速箱壳体静态分析及拓扑优化设计[J]. 机械传动, 2021, 45(7): 74-81
PENG Xianchang, CAI Wenqi, LIN Zhibin, et al. Static and dynamic analysis and topological optimization of gearbox housing in electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(7): 74-81 (in Chinese)
- [80] 林丹益. 一种汽车发动机支架拓扑优化设计[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(3): 179-181
LIN Danyi. Topological optimization of one automobile engine mount[J]. Machine Design & Research, 2018, 34(3): 179-181 (in Chinese)
- [81] 董伟, 李扬, 辛克浩, 等. 基于拓扑优化的点阵-加筋板式结构设计方法[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(6): 1233-1239
DONG Wei, LI Yang, XIN Kehao, et al. A method of designing plate structure consisting of lattices and stiffeners based on topology optimization[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(6): 1233-1239 (in Chinese)
- [82] WANG H, CHENG W M, DU R, et al. Improved proportional topology optimization algorithm for solving minimum compliance problem[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(2): 475-493
- [83] 张国锋, 徐雷, 李大双, 等. 连续体结构拓扑优化敏度过滤研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(6): 29-32
ZHANG Guofeng, XU Lei, LI Dashuang, et al. Research on sensitivity filtering of continuum topology optimization[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(6): 29-32 (in Chinese)
- [84] SHI S, ZHOU P, LYU Z. A density-based topology optimization method using radial basis function and its design variable reduction[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64: 2149-2163
- [85] BENDSOE M P. Optimal shape design as a material distribution problem[J]. Structural Optimization, 1989, 1(4): 193-202
- [86] 李绍春, 易美军. 结构阻尼一体化复合材料蒙皮构件[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(增刊1): 98-103
LI Shaochun, YI Meijun. Structural-damping integrated composite components[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(suppl.1): 98-103 (in Chinese)
- [87] YANG Y, BASHIR M, MICHAILIDES C, et al. Development and application of an aero-hydro-servo-elastic coupling framework for analysis of floating offshore wind turbines[J]. Renewable Energy, 2020, 161: 606-625

- [88] XU Q, LI S, MENG Y. Optimization and re-design of integrated thermal protection systems considering thermo-mechanical performance[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(15): 6916
- [89] 马芳武, 王卓君, 杨猛, 等. 汽车后副车架轻量化概念设计方法研究[J]. *汽车工程*, 2021, 43(5): 776-783
MA Fangwu, WANG Zhuojun, YANG Meng, et al. Research on lightweight conceptual design method of vehicle rear subframe [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(5): 776-783 (in Chinese)
- [90] 汪永嘉, 董红顺, 张代胜, 等. 保险杠前防撞梁材料-结构一体化轻量化设计[J]. *重庆理工大学学报*, 2022, 36(7): 86-93
WANG Yongjia, DONG Hongshun, ZHANG Daisheng, et al. Material-structure integrated lightweight design of bumper front anti-collision beam[J]. *Journal of Chongqing University of Technology*, 2022, 36(7): 86-93 (in Chinese)
- [91] 谷先广, 陈红林, 俞陆新, 等. 精密铸铝件一体化设计及在车身轻量化中的应用[J]. *汽车工程*, 2024, 46(1): 179-186
GU Xianguang, CHEN Honglin, YU Luxin, et al. Integrated design of precision aluminum castings parts and its application in lightweight vehicle body[J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(1): 179-186 (in Chinese)
- [92] 吴勃夫, 吴姚烨, 贝璟, 等. 铸铝一体化车门的多目标可靠性优化设计[J]. *工程设计学报*, 2024, 31(2): 188-200
WU Bofu, WU Yaoye, BEI Jing, et al. Multi-objective reliability optimization design for cast aluminum integrated car door[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2024, 31(2): 188-200 (in Chinese)
- [93] 成艾国, 王超, 陆日进, 等. 复合材料尾门结构的拓扑-参数一体化轻量化设计[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(10): 1824-1833
CHENG Aiguo, WANG Chao, LU Rijin, et al. Holistic topology and parameter lightweight design of composite tailgate structures [J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(10): 1824-1833 (in Chinese)
- [94] TAO W, LIU Z, ZHU P, et al. Multi-scale design of three dimensional woven composite automobile fender using modified particle swarm optimization algorithm[J]. *Composite Structures*, 2017, 181: 73-83
- [95] NING H, PILLAY S, VAIDYA U K. Design and development of thermoplastic composite roof door for mass transit bus[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(4): 983-991
- [96] GU Xiaojun, YANG Kaike, WU Manqiao, et al. Integrated optimization design of smart morphing wing for accurate shape control [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 135-147
- [97] 原帅超, 王建峰, 段宇航, 等. 基于变密度法的 SLM 增材制造无人机承载接头结构拓扑优化设计[J]. *工程科学学报*, 2025, 47(1): 56-65
YUAN Shuaichao, WANG Jianfeng, DUAN Yuhang, et al. Topological optimization design of SLM additive manufactured unmanned aerial vehicle bearing joint structure based on variable density method[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2025, 47(1): 56-65 (in Chinese)
- [98] 姚正康, 龚鹏, 姬书得. 基于拓扑优化的多栖无人飞行器机身结构轻量化设计[J]. *机械设计*, 2024, 41(9): 58-65
YAO Zheng kang, GONG Peng, JI Shude. Lightweight design of multi-habitat unmanned aerial vehicle's fuselage based on topology optimization[J]. *Journal of Machine Design*, 2024, 41(9): 58-65 (in Chinese)
- [99] 李鹏, 石永康, 郭稳敏, 等. 四旋翼植保无人机机臂折叠机构轻量化设计[J]. *农机化研究*, 2024, 46(6): 116-121
LI Peng, SHI Yongkang, GUO Wenmin, et al. Lightweight design of arm folding mechanism of quad-rotor plant protection UAV [J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(6): 116-121 (in Chinese)
- [100] 王志鹏, 刘辉, 操建. 四旋翼无人机机架结构多性能约束拓扑优化设计[J]. *机械设计与研究*, 2022, 38(6): 173-176
WANG Zhipeng, LIU Hui, CAO Jian. Multi-performance constraint topology optimization design of quadrotor UAV frame structure[J]. *Machine Design & Research*, 2022, 38(6): 173-176 (in Chinese)
- [101] 牛西茜, 李昕莹, 李佩泽. 基于变密度法的飞机襟翼拓扑优化设计[J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(3): 101-106
NIU Xixi, LI Xinying, LI Peize. Topology optimization design of aircraft flap based on variable density method[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(3): 101-106 (in Chinese)
- [102] 王凤, 张博, 王超, 等. 航空发动机支架增材制造轻质设计研究[J]. *机械设计与制造*, 2022(10): 157-160
WANG Feng, ZHANG Bo, WANG Chao, et al. Optimization design of aero engine support based on additive manufacturing [J]. *Machine Design & Manufacture*, 2022(10): 157-160 (in Chinese)
- [103] 赵知辛, 王琨, 汪杰, 等. 飞机起落架的动力学分析与拓扑优化研究[J]. *机械设计与制造*, 2021(10): 81-85
ZHAO Zhixin, WANG Kun, WANG Jie, et al. Dynamic analysis and topology optimization of aircraft landing gear[J]. *Machin-*

- ery Design & Manufacture, 2021(10): 81-85 (in Chinese)
- [104] FEI Chengwei, LIU Haotian, ZHU Zhengzheng, et al. Whole-process design and experimental validation of landing gear lower drag stay with global/local linked driven optimization strategy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 318-328
- [105] 张磊, 许师康, 陈洁, 等. 列车车体轻量化设计研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(24): 177-196
ZHANG Lei, XU Shuaikang, CHEN Jie, et al. Research progress in lightweight design of train body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(24): 177-196 (in Chinese)
- [106] SHIFERAW M, TEGEGNE A, ASMARE A, et al. An overview of the role of composites in the application of lightweight body parts and their environmental impact[J]. Engineering Solid Mechanics, 2023, 11(4): 419-426
- [107] LEE H, JUNG S, JANG H, et al. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(4): 1283-1296
- [108] YAO D, ZHANG J, WANG R, et al. Lightweight design and sound insulation characteristic optimisation of railway floating floor structures[J]. Applied Acoustics, 2019, 156: 66-77
- [109] 李娅娜, 于海玲, 邱广宇. 基于子结构和模式重复的地铁车辆座椅支架拓扑优化[J]. 计算机辅助工程, 2018, 27(2): 43-46
LI Ya'na, YU Hailing, QIU Guangyu. Topology optimization of metro vehicle seat support based on substructure and mode repetition[J]. Computer Aided Engineering, 2018, 27(2): 43-46 (in Chinese)
- [110] 郑若瑜. 基于超单元法的地铁车辆铝合金车体轻量化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016
ZHENG Ruoyu. Study on the lightweight of metro car body using superelement technology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016 (in Chinese)
- [111] 廖莺, 李峰, 李志. 概念设计阶段铝合金后副车架轻量化设计[J]. 汽车工程, 2020, 42(12): 1737-1743
LIAO Ying, LI Feng, LI Zhi. Lightweight design of aluminum rear subframe in conceptual design stage[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(12): 1737-1743 (in Chinese)
- [112] 张东东, 张乐迪, 李亮亮, 等. 基于深度学习的商用车前轴结构拓扑优化应用[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(4): 104-110
ZHANG Dongdong, ZHANG Ledi, LI Liangliang, et al. Application of deep learning in topological optimization for structure of commercial vehicle front axle[J]. Mechanical Design and Research, 2024, 40(4): 104-110 (in Chinese)
- [113] 刘英杰, 胡强, 赵新明, 等. 汽车发动机连接支架拓扑优化及增材制造研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(18): 2238-2247
LIU Yingjie, HU Qiang, ZHAO Xinming, et al. Research on topology optimization and additive manufacturing of engine connection brackets[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(18): 2238-2247 (in Chinese)
- [114] KIANI M, SHIOZAKI H, MOTOYAMA K. Simulation-based design optimisation to develop a lightweight body-in-white structure focusing on dynamic and static stiffness[J]. International Journal of Vehicle Design, 2015, 67(3): 219-236
- [115] 张峰, 程建勇, 董立强, 等. 基于 SFE CONCEPT 的某平台改款车型车身结构轻量化设计[J]. 机械设计, 2022, 39(11): 106-111
ZHANG Feng, CHENG Jianyong, DONG Liqiang, et al. Lightweight design of body structure of a platform's modified vehicle based on SFE CONCEPT[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(11): 106-111 (in Chinese)
- [116] LI Y, DI M, ZHANG Z. Research on multi-condition topology optimization design of stainless steel spot welding vehicle considering weight coefficient[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022(1): 1-6
- [117] HARTMANN M, ROSCHITZ M, KHALIL Z. Enhanced battery pack for electric vehicle; noise reduction and increased stiffness[J]. Materials Science Forum, 2013, 2530(765): 818-822
- [118] 苏永雷, 张志飞. 副车架静刚度修正方法及多层级拓扑优化[J]. 汽车工程, 2023, 45(11): 2157-2164
SU Yonglei, ZHANG Zhifei. Correction method of static stiffness and multi-level topology optimization for subframe[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(11): 2157-2164 (in Chinese)
- [119] 李艳星, 王铁, 吉志勇, 等. 中型氢燃料电池货车车架多目标拓扑优化设计[J]. 机械强度, 2022, 44(5): 1128-1133
LI Yanxing, WANG Tie, JI Zhiyong, et al. Multi-objective topology optimization design of hydrogen-fueled truck frame[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5): 1128-1133 (in Chinese)
- [120] 葛世程, 郭着雨, 梁熙, 等. 野战火箭炮装填系统柔性机构多目标拓扑优化[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(6):

922-928

GE Shicheng, GUO Zhuoyu, LIANG Xi, et al. Optimizing multi-objective topology of compliant mechanism of field-artillery rocket loading system[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(6): 922-928 (in Chinese)

- [121] 张新建, 顾克秋, 刘更喜. 某火炮上架多工况拓扑优化设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(3): 56-60
ZHANG Xinjian, GU Keqiu, LIU Gengxi. Topology optimization of the upper carriage of a gun under multiple working conditions[J]. Journal of Gun Launch and Control, 2019, 40(3): 56-60 (in Chinese)
- [122] 孙玲庆, 李志刚, 王思杰. 某火炮翻板机构回转臂的结构优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 224-227
SUN Lingqing, LI Zhigang, WANG Sijie. Structural optimization design of swing arm of certain artillery flap mechanism[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 224-227 (in Chinese)
- [123] 陈延伟, 王贝, 刘佳琳, 等. 舰载导弹发射装置轻量化技术研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(14): 159-164
CHEN Yanwei, WANG Bei, LIU Jialin, et al. Research on lightweight technology of a shipborne missile launcher[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(14): 159-164 (in Chinese)
- [124] 刘浩, 徐宏斌, 李正宇, 等. 无人武器站的轻量化设计[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(2): 64-67
LIU Hao, XU Hongbin, LI Zhengyu, et al. Lightweight design of unmanned weapon Station[J]. Journal of Missile, Arrow and Guidance, 2021, 41(2): 64-67 (in Chinese)
- [125] 蒋君侠, 廖海鹏. 重载智能堆垛装备刚度建模与结构优化[J]. 浙江大学学报, 2021, 55(10): 1948-1959
JIANG Junxia, LIAO Haipeng. Stiffness modeling and structure optimization of heavy duty intelligent stacking equipment[J]. Journal of Zhejiang University, 2021, 55(10): 1948-1959 (in Chinese)
- [126] 郑小飞, 黄镇海, 马小龙, 等. 基于 SIMP 方法的爬杆机器人结构优化与分析[J]. 工程设计学报, 2023, 30(3): 342-352
ZHENG Xiaofei, HUANG Zhenhai, MA Xiaolong, et al. Structure optimization and analysis of pole-climbing robot based on SIMP method[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(3): 342-352 (in Chinese)
- [127] 尹尧钦, 高自成, 李立君, 等. 双主轴卧式加工中心横梁结构综合优化设计[J]. 机床与液压, 2024, 52(14): 94-99
YIN Jiaoqin, GAO Zicheng, LI Lijun, et al. Comprehensive optimization design of beam structure for double spindle horizontal machining center[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(14): 94-99 (in Chinese)
- [128] XU T, WU H, XUE F, et al. Structural design of stamping die of advanced high-strength steel part for automobile based on topology optimization with variable density method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121: 8115-8125
- [129] SONG Xinke, CHEN Demin, QU Baohua. Topology optimization of robotic arm for gas drainage pipeline installation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2383(1): 012014
- [130] SURYO H S, HARTO H, YUNianto B. Optimization of CAT 374D L arm excavator structure topology design using finite element methods[J]. ROTASI, 2020, 22(2): 79-86
- [131] 马超, 鹿鹏程, 邱娜, 等. 挖掘机滚翻保护结构的耐撞性分析及轻量化设计[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(4): 363-366
MA Chao, LU Pengcheng, QIU Na, et al. Crashworthiness analysis and lightweight design of a rollover protective structure of an excavator[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(4): 363-366 (in Chinese)

Research progress on continuum topology optimization for
lightweight structure design

ZHANG Lei^{1,2,3}, KOU Ruoyang^{1,2}, YUE Zhibin^{1,2}, DONG Lei^{1,2}, TAN Xuening^{1,2},
WANG Guoqin^{1,2}, LI Xia^{1,2}

- 1.Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2.National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

3. Key Laboratory of Industrial Manufacturing Innovation Design, Ministry of Industry and Information Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract: In order to sort and study the continuum topology optimization methods in the lightweight design of mechanical structures, the main research results achieved in this field at home and abroad in recent years are analyzed and reviewed. With the goal of lightweight design, three types of continuum topology optimization methods, namely, multi-scale structure, iterative structural optimization and boundary description, and their applications, are reviewed by clustering analysis; the advantages and applications of approximation models and deep learning models in iterative structural optimization are analyzed, as well as the progress of research on the integration of materials-structures in the optimization of continuum topology design under multi-physical fields and multi-parameters, and the lightweight structural design methods are listed. It also lists the applications of lightweight structural design methods in the fields of aerospace, rail transportation, automotive engineering and weapon engineering, and points out the future development direction and trend of lightweight design, which provides a reference for the lightweight design of mechanical structures.

Keywords: lightweight design; continuum; topology optimization; structure optimization

引用格式:张磊, 寇若洋, 岳之斌, 等. 面向轻量化结构设计的连续体拓扑优化研究进展[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(4): 702-722
ZHANG Lei, KOU Ruoyang, YUE Zhibin, et al. Research progress on continuum topology optimization for lightweight structure design[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(4): 702-722 (in Chinese)