特征驱动的结构拓扑优化方法

张卫红*, 周莹, 酒丽朋, 朱继宏

西北工业大学, 航宇材料结构一体化设计与增材制造装备技术国际联合研究中心, 西安 710072

* E-mail: zhangwh@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2019-02-14; 接受日期: 2019-04-09; 网络版发表日期: 2019-06-04

国家重点研发计划(编号: 2017YFB1102800)、国家自然科学基金(批准号: 11722219, 51790171, 11620101002)和陕西省重点研发计划(编号: 2017ZDXM-GY-059)资助

摘要 本文提出一种以特征作为结构拓扑优化基本设计要素的方法. 该方法从CAD特征设计概念出发, 通过采用隐式水平集函数建立结构的特征模型, 将结构拓扑优化转化为设计域内特征布局和形状优化问题, 避免了传统拓扑优化方法仅从力学性能角度寻优材料分布, 导致拓扑优化结果过于抽象、工程特征差的弊端. 本文针对给定体积约束条件下的结构柔顺度最小化问题, 发展了固定网格框架下结构响应分析与形状灵敏度分析计算方法, 理论上保证了灵敏度计算精度与结构水平集函数的数学表达形式无关. 最后以带孔悬臂梁结构与飞机发动机支架结构为例, 采用超椭圆/球特征设计要素验证了该方法的有效性与优越性.

关键词 拓扑优化, 特征设计, 水平集函数, 固定网格, 灵敏度分析

1 引言

高性能、轻量化是飞行器结构设计的永恒主题. 拓扑优化作为一种结构创新构型设计方法能够有效减轻结构重量、大幅提高结构承载能力^[1,2].

目前, 拓扑优化在飞行器结构设计应用中普遍采用密度变量法^[3,4]. 例如, A380机翼前缘结构设计^[5,6]采用单元伪密度作为拓扑优化基本设计元素, 通过伪密度变量优化得到力学性能优异的创新结构形式, 并在此基础上经过人为添加所需特征和反复修改校核局部细节尺寸与形状, 最终达到同时满足力学性能和工程特征两方面的设计需求. 显见这是一种先性能后特征的串行设计模式, 工程特征添加等人为修改因素在很

大程度上影响设计效率与结构力学性能结果.

同样, 传统的水平集方法^[7,8]采用高维水平集函数的零等值线描述光滑结构拓扑边界, 由于其边界演化方式过于自由, 也难以反映结构的工程特征设计意图. 因此, 如何实现集结构力学性能和工程特征的一体化设计成为该领域的重要发展方向, 正得到国内外广泛关注^[9,10].

事实上, 航空航天领域常见的复杂多组件结构系统属于典型的特征驱动设计问题. 例如, 飞行器设备舱包含机械设备单元、电子仪器单元、燃料箱、模块化子结构等特征组件, 如何实现特征组件的布局优化和支撑连接结构的构型设计是复杂多组件结构系统整体协同设计的关键^[11~13].

引用格式: 张卫红, 周莹, 酒丽朋, 等. 特征驱动的结构拓扑优化方法. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1177–1185

Zhang W H, Zhou Y, Jiu L P, et al. Feature-driven method for structural topology optimization (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 1177–1185, doi: 10.1360/SST-2019-0054

本文提出一种特征驱动的结构拓扑优化方法(以下简称“特征驱动拓扑优化”),将特征作为结构拓扑优化的基本设计要素,将结构看作特征互相连接构成的整体,通过特征的布局和形状优化实现结构全局受控式拓扑优化设计.该方法将特征贯穿于结构建模、分析和优化设计的整个流程,突破了传统拓扑优化方法中结构拓扑模型与CAD特征模型相互割裂的设计模式,从源头上保证了结构的特征属性.

2 特征驱动拓扑优化模型

考虑图1所示的受载结构和已知边界条件.拓扑优化旨在给定的设计域内寻找合理的结构形式,以获得最优的力学性能(如最大结构刚度)并满足减重指标需求.

传统密度变量法基于单元伪密度变量优化结构拓扑模型,将结构拓扑优化看作设计域内材料0~1取值最优分布问题,忽略了结构的特征属性.而特征驱动拓扑优化从CAD特征设计理念出发,将结构看作由一定数量特征互相连接构成的整体,通过特征平移、旋转、缩放和变形等基本几何操作实现结构拓扑变化.该方法以选取特征的几何参量,如中心位置、倾斜角、尺寸和形状等作为拓扑设计变量,独立于结构有限元模型及其网格的离散分割.

在线弹性假设条件下,特征驱动拓扑优化问题的数学模型可以表述为

$$\begin{aligned} & \text{Find } \mathbf{d} = (\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_n), \\ & \text{Min } J = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mathbf{E}_{ijkl} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}(\mathbf{u}) \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}(\mathbf{u}) d\Omega, \\ & \text{s.t. } \begin{cases} \int_{\Omega} \mathbf{E}_{ijkl} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}(\mathbf{u}) \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}(\mathbf{v}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{f} \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Gamma_N} \boldsymbol{\tau} \mathbf{v} d\Gamma, \\ V = \int_{\Omega} 1 d\Omega \leq V^*, \\ \mathbf{d}_i \leq \mathbf{d}_i \leq \bar{\mathbf{d}}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

式中, J 为结构柔顺度. $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{v}$ 分别表示结构位移场和运动许用虚位移场. $\mathbf{g}$ 为 Dirichlet 边界 Γ_D 上的给定位移. $\mathbf{f}$ 和 $\boldsymbol{\tau}$ 分别为作用在结构区域 Ω 上的体积力和作用在 Neumann 边界 Γ_N 上的面力. $\mathbf{E}_{ijkl}$ 是实体材料的弹性张量. $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变张量. V^* 为给定体积约束上限. n 为特征数目. 特征设计变量 $\mathbf{d}_i$ 的变化范围为 $[\mathbf{d}_i, \bar{\mathbf{d}}_i]$.

图2给出了特征驱动拓扑优化流程.该方法在拓扑设计变量定义、结构的特征模型建立、特征模型的力学响应分析和特征设计变量的灵敏度分析等关键步骤均与传统密度变量法不同.

3 特征驱动拓扑优化实现方法

3.1 结构特征模型的隐式水平集函数

理论上,任意几何体均可采用显式参数函数或隐式水平集函数两种方式描述,其中隐式水平集函数由于具有灵活处理拓扑变化的能力而被广泛应用于结构拓扑优化设计.因此本工作采用隐式水平集函数描述结构的特征模型.

鉴于结构几何轮廓边界的复杂性,一般难以直接给出其水平集函数的解析表达式.根据CAD中构造实体几何法的基本思想,结构的特征模型可以通过基本特征之间的布尔运算得到.相应地,结构特征模型的水平集函数亦可以通过基本特征水平集函数之间的代数运算得到.

假设 n 个特征对应的区域 $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$ 分别采用水平集函数 $\Phi_i(\mathbf{x}) \geq 0, i=1, 2, \dots, n$ 定义,则它们布尔并和布尔交的水平集函数分别对应于 $\{\Phi_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 的最大和最小值函数^[14].此外, R 函数^[15]、KS 函数^[16]和 Ricci 函数^[14]作为最值函数的变体或近似,均可用于水平集函数的代数运算.表1列出了4种代数运算的数学

图1 结构建模与拓扑优化. (a) 结构拓扑优化基本问题; (b) 密度变量法; (c) 特征驱动拓扑优化

图 2 特征驱动拓扑优化流程

表达式及其微分性质.

假设某结构包含 n_1 个实体特征和 n_2 个孔洞特征, 分别采用水平集函数 $\Phi_i(\mathbf{x}) \geq 0, i=1, 2, \dots, n_1$ 和 $\Psi_j(\mathbf{x}) \geq 0, j=1, 2, \dots, n_2$ 定义, 则结构特征模型的水平集函数可以表述为

$$\Phi = (\Phi_1 \vee \Phi_2 \vee \dots \vee \Phi_{n_1}) \wedge (\Psi_1 \wedge \Psi_2 \wedge \dots \wedge \Psi_{n_2}) \wedge \Phi_{\text{des}}, \quad (2)$$

表 1 布尔并与布尔交对应的几何与代数运算

布尔运算	$\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_n$	$\Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_n$	微分性质
维恩图			—
最值函数	$\Phi = \max(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)$	$\Phi = \min(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)$	在 $\Phi_i = \Phi_j$ 处不可微分
R函数	$\Phi = \Phi_1 \vee \Phi_2 \vee \dots \vee \Phi_n$ $\Phi_i \vee \Phi_j = \Phi_i + \Phi_j + \sqrt{\Phi_i^2 + \Phi_j^2}$	$\Phi = \Phi_1 \wedge \Phi_2 \wedge \dots \wedge \Phi_n$ $\Phi_i \wedge \Phi_j = \Phi_i + \Phi_j - \sqrt{\Phi_i^2 + \Phi_j^2}$	在 $\Phi_i = \Phi_j = 0$ 处不可微分
KS函数	$\Phi = \frac{1}{p} \ln \left(\sum_{i=1}^n e^{p \cdot (\Phi_i - \Phi_{\max})} \right) + \Phi_{\max}, \quad p > 0$ $\Phi_{\max} = \max(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)$	$\Phi = -\frac{1}{p} \ln \left(\sum_{i=1}^n e^{-p \cdot (\Phi_i - \Phi_{\min})} \right) + \Phi_{\min}, \quad p > 0$ $\Phi_{\min} = \min(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)$	处处可微
Ricci函数	$\Phi = (\Phi_1^p + \Phi_2^p + \dots + \Phi_n^p)^{\frac{1}{p}}, \quad p > 0$	$\Phi = (\Phi_1^{-p} + \Phi_2^{-p} + \dots + \Phi_n^{-p})^{-\frac{1}{p}}, \quad p > 0$	处处可微

式中, Φ_{des} 为设计域 Ω_{des} 的水平集函数. 设计域作为拓扑优化的工作窗口, 只有其内部的结构为有效结构区域.

3.2 固定网格框架下结构的力学响应分析

本文将虚拟区域法^[17]与拓扑优化相结合, 采用固定网格对结构的特征模型进行力学响应分析. 如图3所示, 将结构嵌入到比设计域 Ω_{des} 更大的规则区域D内, 并将D离散为不随结构拓扑构型变化的正四边形计算网格, 以此避免优化迭代过程中网格重新划分, 提高计算效率.

此时, 结构拓扑优化问题(1)可以等价转化为

$$\begin{aligned} &\text{Find} \quad \mathbf{d} = (\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_n), \\ &\text{Min} \quad J(\mathbf{u}, \Phi) = \frac{1}{2} \int_D \mathbf{E}_{ijkl} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}(\mathbf{u}) \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}(\mathbf{u}) H(\Phi) d\Omega, \\ &\text{s.t.} \quad \begin{cases} a(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \Phi) = l(\mathbf{v}, \Phi), \\ V = \int_D H(\Phi) d\Omega \leq V^*, \\ \mathbf{d}_i \leq \mathbf{d}_i \leq \bar{\mathbf{d}}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \Phi) = \int_D \mathbf{E}_{ijkl} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}(\mathbf{u}) \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}(\mathbf{v}) H(\Phi) d\Omega, \quad (4)$$

$$l(\mathbf{v}, \Phi) = \int_D \mathbf{f} \mathbf{v} H(\Phi) d\Omega + \int_{\Gamma_N} \boldsymbol{\tau} \mathbf{v} d\Gamma, \quad (5)$$

式中, $H(\Phi)$ 是Heaviside函数, 满足 $H(\Phi)=1, \Phi \geq 0; H(\Phi)=0, \Phi < 0$.

图3 虚拟区域法

虚拟区域法的实质是将定义在结构区域 Ω 内物理场扩展到区域 D 内. 将区域 D 内的位移场离散为

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = w(\mathbf{x})\mathbf{N}\mathbf{A} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{N}\mathbf{A} + \mathbf{g}(\mathbf{x}), \quad (6)$$

式中, $w(\mathbf{x})$ 为定义Dirichlet边界条件的权函数, 满足在边界 Γ_D 上 $w(\mathbf{x})=0$. $\mathbf{N}$ 为插值形函数矩阵. $\mathbf{A}$ 为插值节点自由度组成的向量. 值得注意的是, 若采用多项式形函数, 则插值节点自由度 $\mathbf{A}$ 定义在网格节点上; 若采用B样条形函数, 则插值节点自由度 $\mathbf{A}$ 定义在B样条控制点上.

基于最小势能原理可得到如下离散形式的结构平衡方程:

$$\mathbf{K}\mathbf{A} = \mathbf{F}, \quad (7)$$

式中, 结构总体刚度矩阵和载荷向量分别为

$$\begin{cases} \mathbf{K} = \int_D [\mathbf{L}\mathbf{N}]^T \mathbf{D} [\mathbf{L}\mathbf{N}] H(\Phi) d\Omega, \\ \mathbf{F} = \int_D \mathbf{N} \mathbf{f} H(\Phi) d\Omega + \int_{\Gamma_N} \mathbf{N} \boldsymbol{\tau} d\Gamma \\ - \int_D [\mathbf{L}\mathbf{N}]^T \mathbf{D} [\mathbf{L}\mathbf{g}] H(\Phi) d\Omega, \end{cases} \quad (8)$$

其中, L 为应变-位移算子. 在数值计算上述积分时, 积分点可以选择网格中心, 也可以采用均匀细分^[18]、三角形细分^[19]和四叉树细分^[20]等策略对积分点进行细化, 从而在不增加自由度的前提下提高结构响应分析精度.

3.3 特征设计变量的灵敏度分析方法

灵敏度分析是基于梯度信息实现优化迭代过程的关键步骤. 假设优化过程中Dirichlet边界和Neumann边界不可设计, 结构柔顺度关于特征设计变量的灵敏度通过下式计算:

$$\frac{\partial J}{\partial d} = -\frac{1}{2} \mathbf{A}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial d} \mathbf{A}, \quad (9)$$

其中, 式(8)中结构刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 的导数为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial d} &= \int_D [\mathbf{L}\mathbf{N}]^T \mathbf{D} [\mathbf{L}\mathbf{N}] \frac{\partial H}{\partial \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial d} d\Omega \\ &= \int_{\partial\Omega} [\mathbf{L}\mathbf{N}]^T \mathbf{D} [\mathbf{L}\mathbf{N}] \frac{\partial \Phi}{\partial d} \frac{1}{\|\nabla \Phi\|} d\Gamma, \end{aligned} \quad (10)$$

值得强调的是, 上述灵敏度计算精度与水平集函数 Φ 的数学表达形式无关. 实际上, 对等式 $\Phi(\mathbf{x}, d)=0$ 两端关于设计变量 d 求导可得

$$\frac{\partial \Phi}{\partial d} + \nabla^T \Phi \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial d} = 0. \quad (11)$$

因此, 有以下关系成立:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial d} \frac{1}{\|\nabla \Phi\|} = - \left(\frac{\nabla \Phi}{\|\nabla \Phi\|} \right)^T \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial d} = -\mathbf{n}^T \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial d}, \quad (12)$$

其中, $\mathbf{n}$ 为结构边界上的单位法线向量, 指向实体区域.

将式(12)代入式(10), 则结构刚度矩阵的灵敏度式(10)可以等价改写为

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial d} = - \int_{\partial\Omega} [\mathbf{L}\mathbf{N}]^T \mathbf{D} [\mathbf{L}\mathbf{N}] \mathbf{n}^T \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial d} d\Gamma. \quad (13)$$

在结构边界 $\partial\Omega$ 上 $\mathbf{n}$ 和 $\partial \mathbf{x} / \partial d$ 不依赖于水平集函数形式, 因此本文采用式(9)和(10)计算结构灵敏度.

4 特征驱动拓扑优化数值算例

本文数值算例采用优化平台Boss-QuattroTM^[21]中的GCMMA全局收敛移动渐近线算法^[22]实现, 优化收敛条件为“当两相邻迭代步设计变量的相对变化量小于 ε 或者当前迭代步大于给定的最大迭代步数时, 优化迭代停止”, 即

$$\text{当 } \max \left(\left| \frac{\mathbf{d}^{(k)} - \mathbf{d}^{(k-1)}}{\mathbf{d}^{(k-1)}} \right| \right) < \varepsilon \text{ 或 } k > N_{\text{iter}}^{\max} \text{ 时,} \quad (14)$$

优化迭代停止,

其中, k 表示当前迭代步, $\mathbf{d}^{(k)}$ 为第 k 个迭代步的设计变量值, ε 为一个极小正数, $N_{\text{iter}}^{\max}$ 为给定的最大迭代步数.

4.1 带孔悬臂梁结构

考虑图4所示的带孔悬臂梁结构. 其左端固定、右下角施加 $F=1\text{ N}$ 的集中力. 所用材料的杨氏模量和泊松比分别为 $E=1\text{ MPa}$ 和 $\nu=0.3$. 结构厚度为 1 mm , 结构体积约束上限为 2700 mm^3 . 在平面应力假设下, 对该结构进行特征驱动拓扑优化. 假设初始结构拓扑包含24个超椭圆实体特征, 每个超椭圆实体特征的长半轴和短半轴的初始尺寸为12和3 mm, 并分别采用最值函数、R函数、KS函数和Ricci函数计算结构特征模型的水平集函数. 图5给出了结构特征模型及其高维水平集函数模型的构造过程.

将结构嵌入 $90\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的区域内, 并将该区域剖分为 90×60 的正四边形网格. 采用3次B样条函数作为结构位移场的插值函数, 并结合二叉树细分策略细

图4 带孔悬臂梁结构

化被边界剖分单元的积分点. 图6给出了基于最值函数、R函数、KS函数和Ricci函数的特征模型所对应

图5 (网络版彩图)带孔悬臂梁结构的初始模型. (a) CAD特征模型; (b) 最值函数; (c) R函数; (d) KS函数; (e) Ricci函数

图 6 (网络版彩图)带孔悬臂梁结构拓扑优化结果. (a) 密度变量法; (b)~(e) 基于最值函数、R函数、KS函数和Ricci函数的特征驱动拓扑优化结果

的拓扑优化结果. 同时, 也给出了文献[23]中采用密度变量法获得的优化结果. 表2列出了两种拓扑优化方法给出的柔顺度和体积优化结果. 可见采用超椭圆实体特征可以得到与密度变量法基本一致的拓扑优化结果. 然而, 前者在优化过程和优化结果中保留了超椭圆特征.

在此, 值得强调特征驱动拓扑优化仅需 $24 \times 5 = 120$ 个特征设计变量, 与密度变量法的5400个伪密度变量相比, 设计变量数目大幅减少.

4.2 飞机发动机支架结构

考虑图7所示的飞机发动机支架结构^[24]. 耳片和螺栓孔处有6个非设计圆孔特征区域, 其余为可设计区域. 耳片中心受倾角为 42° 的拉力 $F = 4.2258 \times 10^4$ N作用, 结构底部的4个螺栓孔面固定. 所用材料为Ti-6Al-4V, 其杨氏模量和泊松比分别为 $E = 113.8$ GPa和 $\nu = 0.342$. 该支架结构内部拓扑优化要求体积减小80%. 优化收敛条件中 $\varepsilon = 0.01\%$ 且 $N_{\text{iter}}^{\text{max}} = 150$. 本文采用308个

超椭圆孔洞特征对该支架结构进行拓扑优化设计, 并采用KS函数计算结构特征模型的水平集函数, 如图8所示.

将支架结构嵌入 $116.84 \text{ mm} \times 187.96 \text{ mm} \times 71.12 \text{ mm}$ 的六面体区域内, 并将该区域剖分为 $46 \times 74 \times 28$ 的正六面体网格. 采用线性形函数, 并根据每个六面体单元中点相对结构轮廓边界的位置折算单元刚度. 支架结构的拓扑演化过程如图9所示, 优化后结构由连接耳片和4个螺栓孔的承力杆件组成且表面光滑. 图10给出了结构柔顺度和体积的迭代收敛曲线, 表明该方法可以稳定收敛. 该算例若采用密度变量法需要多达上万个伪密度设计变量, 而本方法仅需 $308 \times 9 = 2772$ 个特征设计变量, 体现出本方法在解决实际工程优化问题的优势.

5 结论

本文提出了一种特征驱动拓扑优化方法. 该方法

表 2 带孔悬臂梁结构拓扑优化结果的柔顺度和体积

参数	密度变量法	特征驱动拓扑优化			
		最值函数	R函数	KS函数	Ricci函数
柔顺度 (mJ)	51.8925	53.8339	53.8020	53.8641	53.7202
体积 (mm^3)	2700.44	2699.50	2699.00	2699.57	2699.59

图 7 (网络版彩图)飞机发动机支架结构. (a) CAD模型; (b) 结构受载及边界条件

图 8 (网络版彩图)飞机发动机支架结构的初始特征模型

图 9 (网络版彩图)飞机发动机支架结构特征驱动拓扑优化过程。(a)~(e)分别为第5步、第8步、第15步、第60步和最终优化结果

图 10 (网络版彩图)飞机发动机支架结构的特征驱动拓扑优化收敛曲线

将结构视为由基本特征通过布尔运算得到的整体结果,且基本特征采用隐式水平集函数描述.通过基本特征水平集函数之间的代数运算,计算出结构特征模型

的水平集函数.结构特征模型的力学响应分析以固定网格为基础,并由此解析推导出结构柔顺度相对特征设计变量的灵敏度.优化结果表明:采用不同隐式水平集函数建立的结构特征模型得到的拓扑优化结果基本一致,阐明了最值函数、R函数、KS函数和Ricci函数均可有效用于结构特征建模.与传统密度变量法和水平集方法相比,特征驱动拓扑优化方法将结构拓扑模型与CAD特征模型关联,将特征贯穿于结构建模、分析和优化的整个流程,实现了结构拓扑优化和CAD特征设计的有效结合,充分反映了实际应用中结构的工程特征设计理念.此外,拓扑设计变量不依赖于结构网格剖分,极大地降低了设计空间变量维数,在求解大规模工程问题时优势突出.然而,优化目标和约束函数关于特征设计变量的非线性程度高,导致特征驱动下得到的拓扑优化结果对特征数目和布局的依赖性强.后续工作将重点研究如何借助拓扑导数^[25,26]弱化或消除优化结果对初始特征数目和布局的依赖性.

参考文献

- 1 Sigmund O, Maute K. Topology optimization approaches. *Struct Multidisc Optim*, 2013, 48: 1031–1055
- 2 Zhu J H, Zhang W H, Xia L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Arch Computat Methods Eng*, 2015, 23: 595–622
- 3 Bendsøe M P. Optimal shape design as a material distribution problem. *Struct Optim*, 1989, 1: 193–202
- 4 Zhou M, Rozvany G I N. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Comput Methods Appl Mech*

- [Eng](#), 1991, 89: 309–336
- 5 Krog L, Tucker A, Rollema G, et al. Application of topology, sizing and shape optimization methods to optimal design of aircraft components. In: Proceedings of 3rd Altair UK HyperWorks Users Conference. 2002
 - 6 Krog L, Tucker A, Kemp M, et al. Topology optimisation of aircraft wing box ribs. In: Proceedings of 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. New York, 2004
 - 7 Wang M Y, Wang X M, Guo D M. A level set method for structural topology optimization. [Comput Methods Appl Mech Eng](#), 2003, 192: 227–246
 - 8 Allaire G, Jouve F, Toader A M. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. [J Comput Phys](#), 2004, 194: 363–393
 - 9 Zhang W S, Yuan J, Zhang J, et al. A new topology optimization approach based on moving morphable components (MMC) and the ersatz material model. [Struct Multidisc Optim](#), 2016, 53: 1243–1260
 - 10 Zhang S L, Gain A L, Norato J A. Stress-based topology optimization with discrete geometric components. [Comput Methods Appl Mech Eng](#), 2017, 325: 1–21
 - 11 Zhu J H, Zhang W H, Beckers P, et al. Simultaneous design of components layout and supporting structures using coupled shape and topology optimization technique. [Struct Multidisc Optim](#), 2008, 36: 29–41
 - 12 Zhang W H, Xia L, Zhu J H, et al. Some recent advances in the integrated layout design of multicomponent systems. [J Mech Des](#), 2011, 133: 104503
 - 13 张卫红, 郭文杰, 朱继宏. 部件级多组件结构系统的整体式拓扑布局优化. [航空学报](#), 2015, 36: 2662–2669
 - 14 Ricci A. A constructive geometry for computer graphics. [Comput J](#), 1973, 16: 157–160
 - 15 Shapiro V. Theory of R-functions and applications: A primer. Technical Report. Cornell: Cornell University, 1991
 - 16 Kreisselmeier G, Steinhauser R. In flight tests of a parameter insensitive controller. [Forschungsber Dtsch Forsch Versuchsanst Luft Raumfahrt](#), 1979
 - 17 Ramiere I, Angot P, Belliard M. A fictitious domain approach with spread interface for elliptic problems with general boundary conditions. [Comput Methods Appl Mech Eng](#), 2007, 196: 766–781
 - 18 Parvizian J, Düster A, Rank E. Finite cell method: h- and p-extension for embedded domain problems in solid mechanics. [Comput Mech](#), 2007, 41: 121–133
 - 19 van Miegroet L, Duysinx P. Stress concentration minimization of 2D filets using X-FEM and level set description. [Struct Multidisc Optim](#), 2007, 33: 425–438
 - 20 Cai S Y, Zhang W H, Zhu J H, et al. Stress constrained shape and topology optimization with fixed mesh: A B-spline finite cell method combined with level set function. [Comput Methods Appl Mech Eng](#), 2014, 278: 361–387
 - 21 Radovicic Y, Remouchamps A. BOSS QUATTRO: An open system for parametric design. [Struct Multidisc Optim](#), 2002, 23: 140–152
 - 22 Svanberg K. A globally convergent version of MMA without linesearch. In: Proceedings of First World Congress on Structural Multidisciplinary Optimization. Goslar, 1995
 - 23 Sigmund O. A 99 line topology optimization code written in Matlab. [Struct Multidisc Optim](#), 2001, 21: 120–127
 - 24 Morgan H D, Levatti H U, Sienz J, et al. GE jet engine bracket challenge: A case study in sustainable design. In: KES Transactions on Sustainable Design and Manufacturing I. Sustainable Design and Manufacturing, 2014. Shoreham-by-sea: Future Technology Press, 2014. 95–107
 - 25 Burger M, Hackl B, Ring W. Incorporating topological derivatives into level set methods. [J Comput Phys](#), 2004, 194: 344–362
 - 26 Allaire G, Gournay De F, Jouve F, et al. Structural optimization using topological and shape sensitivity via a level set method. [Control Cybernet](#), 2005, 34: 59–80

Feature-driven method for structural topology optimization

ZHANG WeiHong, ZHOU Ying, JIU LiPeng & ZHU JiHong

State IJR Center of Aerospace Design and Additive Manufacturing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

We propose a new method by which features are regarded as the basic design primitives for structural topology optimization. This method originates from the concept of feature-based design in CAD community. Implicit level-set functions such as Max-Min function, R function, KS function or Ricci function are used to describe the feature model of a structure. Structural topology optimization is converted into layout and shape optimization of features within the prescribed design domain. This method makes it possible to avoid the drawbacks of traditional topology optimization methods that seek the material distribution only for the optimization of mechanical performance and thus result in abstract topology optimization results with the lack of engineering features. The minimum compliance problem subjected to volume constraint is considered. Structural response analysis and sensitivity analysis are formulated within the framework of fixed mesh. It is shown that the sensitivity accuracy is independent of the mathematical expressions of the related level-set function. Finally, a holed cantilever beam structure and aero-engine bracket structure are studied as numerical examples. By means of super-elliptical/super-ellipsoidal features, the effectiveness and advantage of the developed method are demonstrated.

topology optimization, feature-based design, level-set function, fixed mesh, sensitivity analysis

doi: [10.1360/SST-2019-0054](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0054)