

DOI: 10.7511/jslx20230315002

改进的可移动变形组件拓扑优化方法

李鹏^{1,2}, 程文涛¹, 杜艺博¹, 丁瀛¹, 占金青¹

(1. 华东交通大学 机电与车辆工程学院, 南昌 330013;

2. 载运工具与装备教育部重点实验室, 华东交通大学, 南昌 330013)

摘要: 针对经典可移动变形组件法的优化结果易受组件初始化影响的不足, 设计了基于双循环机制的改进的 MMC 算法, 内循环基于可移动变形组件法, 实现快速寻优; 外循环基于组件贡献率设计俄罗斯轮盘赌算法, 然后选择、删除和替换部分组件, 最终将重新构造的结构引入内循环再次寻优。MBB 梁和短悬臂梁的优化算例表明, 相比于经典 MMC 算法, 改进的 MMC 方法虽然运算成本明显增加, 却较好地克服了组件初始化对寻优结果的影响, 并获得了更佳优化效果。

关键词: 拓扑优化; 可移动变形组件法; 有限元分析; 灵敏度分析; 俄罗斯轮盘赌

中图分类号: TP391.7; O242.21

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)05-0879-07

1 引言

结构拓扑优化设计是给定载荷和约束条件, 在给定设计域内寻求最优拓扑结构的传递路径及材料分布^[1]。其是获得轻量化和高性能化拓扑结构的最重要方法之一, 因此广泛应用于机械和材料等领域^[2,3]。

Bendsøe 等^[4]提出了基于均匀化理论的结构拓扑优化设计方法。该优化方法将含有方孔的微结构引入到复合材料的拓扑优化中, 以孔洞的边长和倾角作为设计变量, 通过分析材料的等效弹性模量找到最佳分布。Lee 等^[5]将基于均匀化理论的结构拓扑优化方法运用于电磁铁的微观结构和宏观结构的拓扑优化中。结果表明, 在小体积梯度结构下, 优化后的电磁铁功能具有更高的磁力。均匀化方法数学理论严谨, 能够计算出最佳性能的结构, 但其计算成本高^[6]。

变密度法是以设计域的单元密度为设计变量, 用 1 和 0 表示材料的有和无, 将连续体的拓扑优化问题转化为 0~1 的数值优化问题。在变密度法的基础上提出了利用幂律惩罚的方式使单元密度趋近于 0 或 1, 该优化方法为固体各向同性惩罚微结

构模型 SIMP (solid isotropic microstructures with penalization)^[7,8]或材料属性的合理近似模型 RAMP (rational approximation of material properties)^[9]。此后, Wang 等^[10]基于面向动态界面分析的数值方法, 提出了水平集方法 LSM (Level Set Method)。魏鹏等^[11]引入参数化水平集方法, 改善了 LSM 方法的拓扑寻优能力, 降低了其对初始化设计的依赖性。

此外, 结构拓扑方法还包括有, 进化结构法 (ESO)^[12]是根据进化策略, 通过在优化过程中不断去除设计域内的材料, 进而优化拓扑结构的传递路径, 最终获得最优拓扑结构, 但该方法的优化效率低; 泡泡法 (bubble method)^[13,14]在考虑拓扑优化形式的同时, 在设计域中不断地插入不同形状结构的孔洞 (bubble), 然后以孔洞的几何参数为设计变量, 对孔洞的形状、边界和位置进行优化, 最后得到最优拓扑结构。

目前, 拓扑优化方法多以隐式法描述拓扑结构, 不能直接获取显式的几何信息, 且优化结果易产生棋盘格和锯齿状边界等不光滑的结构。Zhang 等^[15,16]提出可移动变形组件法 MMC (Moving Morphable Components)。该优化方法将拓扑结构视为由若

收稿日期: 2023-03-15; 修改稿收到日期: 2023-05-28.

基金项目: 国家自然科学基金(52165016)资助项目.

作者简介: 李鹏* (1976-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师 (E-mail: ecjtulipeng@126.com).

引用本文: 李鹏, 程文涛, 杜艺博, 等. 改进的可移动变形组件拓扑优化方法[J]. 计算力学学报, 2024, 41(5): 879-885.

LI Peng, CHENG Wen-tao, DU Yi-bo, et al. Improved topology optimization method for moving morphable components [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(5): 879-885.

干个不同形状结构的组件,然后以组件的几何参数作为设计变量,通过更新组件的变量优化拓扑结构的传递路径和材料分布,最后获得最优拓扑结构。MMC方法能够便捷地对几何特征进行控制,且设计变量的数目独立于有限元网格的划分,计算成本低。然而,MMC优化结果易受组件初始化的影响。针对此问题,本文通过选择、删除和替换其中部分组件,以克服组件初始化对优化结果的影响。

2 改进的 MMC 算法

为弥补经典的 MMC 方法中优化结果易受组件初始化影响的不足,改进的 MMC 算法采用双循环机制,如图 1 所示。

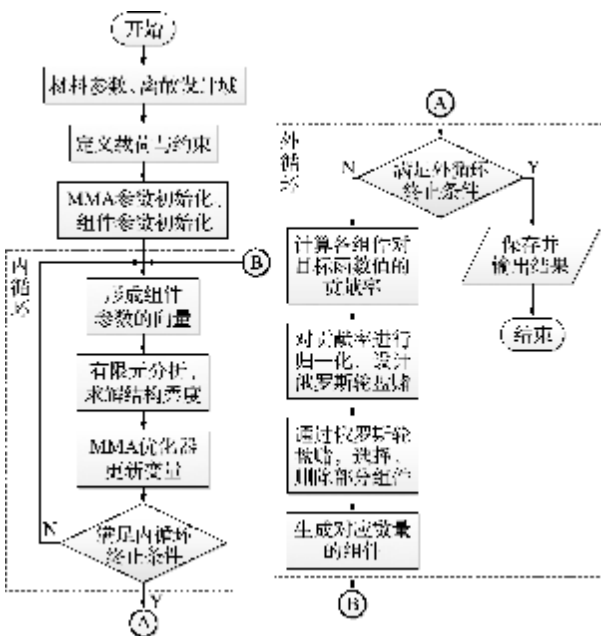


图1 算法迭代流程
Fig.1 Algorithm iteration flow chart

内循环采用经典 MMC 算法,根据组件初始化形成的参数向量,通过有限元分析计算目标函数的值,并利用 MMA 算法更新组件参数,然后计算组件参数更新后结构的目标函数值,直到连续 100 次内循环的最优目标函数值未更新,则跳出内循环进入外循环。

当连续 10 次外循环的最优目标函数值未更新,且优于第一次内循环(或外循环次数等于 50 次),则停止迭代,保存并输出结果;否则计算每个组件对目标函数值的贡献率,并设计俄罗斯轮盘赌,然后通过俄罗斯轮盘赌选择、删除和替换 1/5 的组件(若不为整数,则向下取整),最后代入内循环参与计算。

2.1 内循环

2.1.1 组件描述^[15]

MMC 利用欧拉描述以显式的超椭圆方程描述每一个组件^[15]。三维组件拓扑描述函数为

$$\chi(x, y, z) = \left(\frac{x'}{L_1}\right)^p + \left(\frac{y'}{L_2}\right)^p + \left(\frac{z'}{L_3}\right)^p - 1 \quad (1)$$

式中

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

且有

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_b \cdot c_t & -c_b \cdot s_t & s_b \\ s_a \cdot s_b \cdot c_t + c_a \cdot s_t & -s_a \cdot s_b \cdot s_t + c_a \cdot c_t & -s_a \cdot c_b \\ -c_a \cdot s_b \cdot c_t + s_a \cdot s_t & -c_a \cdot s_b \cdot s_t + s_a \cdot c_t & c_a \cdot c_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 L_1, L_2 和 L_3 分别为每个组件在 x', y' 和 z' 方向上的半轴长, (x_0, y_0, z_0) 为每个组件中心点坐标, p 为超椭圆方程的指数,一般取 $p=6$ 。式(3)中, $s_a = \sin\alpha, s_b = \sin\beta, s_t = \sin\theta, c_a = \sqrt{1-s_a^2}, c_b = \sqrt{1-s_b^2}, c_t = \sqrt{1-s_t^2}$ 。其中 α, β 和 θ 代表各个组件由全局坐标系 $O-x-y-z$ 转换为局部坐标系 $O-x'-y'-z'$ 的旋转角度。

2.1.2 基于 MMC 方法的三维结构拓扑优化

列式^[15]

研究以结构柔度作为目标函数,以拓扑结构的实体材料体积上限作为约束函数。仅考虑各向同性材料时,对应的优化列式^[15]为

$$\text{Find } D = ((D^1)^T, \dots, (D^i)^T, \dots, (D^N)^T)^T, u(x)$$

$$\text{Minimize } C = \int_D H[\chi^S(x; D)] f \cdot v dV + \int_D t \cdot v dV$$

$$\text{s.t. } \int_D H[\chi^S(x; D)] \mathbb{E} : \epsilon(u) : \epsilon(v) dV =$$

$$\int_D H[\chi^S(x; D)] f \cdot v dV + \int_{\Gamma_t} t \cdot v dS, \forall v \in u_{ad}$$

$$V = \int_D H[\chi^S(x; D)] dV \leq \bar{V}, D \in U_D$$

$$u = \bar{u} \text{ on } \Gamma_u \quad (4)$$

式中 f 为拓扑结构的体积力, t 为拓扑结构在 Neumann 边界 Γ_t 上的表面力, \bar{u} 为拓扑结构在 Dirichlet 边界上的位移。 u 和 v 分别为各个组件的位移和定义在各个组件所占区域上且满足 $u_{ad} = \{v | v \in H_1(D), v = 0 \text{ on } \Gamma_u\}$ 的试探函数。 $\mathbb{E} = E^S / (1 + v^S) [I + v / (1 - 2v^S) \delta \otimes \delta]$ 为拓扑结构实体材料的四阶弹

性张量,其中 \mathbb{I} 和 δ 分别为拓扑结构实体材料的四阶单位张量和二阶单位张量, E 和 ν 分别代表拓扑结构实体材料的杨氏模量和泊松比, \bar{V} 为拓扑结构实体材料的体积上限, H 为 Heaviside 函数。

2.1.3 三维有限元分析^[15]

MMC 方法需要准确的数值进行计算,因此研究采用代理材料模型对拓扑结构进行有限元分析^[15]。首先将整个设计域划分为若干个八节点单元格;然后对每个单元格的节点进行编号,并赋予其在 x, y 和 z 轴方向的三个自由度;最后计算出每个单元格节点的拓扑描述函数 TDF (Topology Description Function) 值。因此,编号为 e 的单元格的刚度矩阵为

$$\mathbf{K}_e = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_e^* \mathbf{B} dV \quad (e=1, \dots, NE) \quad (5)$$

$$\mathbf{D}_e^* = \rho_e \mathbf{D}_0 \quad (6)$$

$$\rho_e = \sum_{i=1}^8 H(\chi^S)_i^c / 8 \quad (7)$$

式中 \mathbf{K}_e 为第 e 个单元格的刚度矩阵, NE 为设计域中单元格的总数, Ω_e 为第 e 个单元格的体积, \mathbf{B} 为拓扑结构的应变矩阵, ρ_e 为第 e 个单元格的体积与单元格总体积之比, \mathbf{D}_0 为第 e 个单元格的第 i 个节点上的拓扑描述函数值,其中 $\chi^S = \max(\chi^1, \dots, \chi^n)$ 。此外为了避免整个拓扑结构的刚度矩阵出现奇异,令 $\rho_e = 1 \times 10^{-6} (\Omega_e \subset X/\Omega^S)$ 。

2.1.4 灵敏度分析^[15]

在 MMC 框架^[15]下,式(4)中目标函数(柔度)对各个组件的设计变量 d^i 的变分为

$$\Delta \chi^i C = - \int_D \delta^i(\chi^S) \mathbb{E} : \boldsymbol{\varepsilon}(u) : \boldsymbol{\varepsilon}(\omega) \Delta \chi^i dS \quad (i=1, \dots, n) \quad (8)$$

式中 ω 为在求解伴随位值问题后得到的伴随位移场,当柔度最小时,取 $\omega = u_0 \delta$ 为 Dirac delta 函数。 δ 为 Dirac delta 函数,且 $\delta^i(\chi^S) = \min(\delta(\chi^i), \delta(\chi^S))$; 当且仅当 $x \in \partial \Omega_i \cap \Omega_s$ 时, $\delta^i(\chi^S) \neq 0$ 。 χ^i 对组件的设计变量 $D^i = (x_0^i, y_0^i, z_0^i, L_1^i, L_2^i, L_3^i, s_a^i, s_b^i, s_i^i)^T$ 的变分为

$$\Delta \chi^i = A^i \Delta x_0^i + B^i \Delta y_0^i + C^i \Delta z_0^i + D^i \Delta L^i + E^i \Delta W^i + F^i \Delta H^i + G^i \Delta s_a^i + H^i \Delta s_b^i + I^i \Delta s_i^i \quad (9)$$

$A^i, B^i, C^i, D^i, E^i, F^i, G^i, H^i$ 和 I^i 的具体表达式可参考 Guo 等^[15]的研究。由式(9)可知,目标函数对每个组件的设计变量 d^i 的偏导数为

$$\frac{\partial C}{\partial d_0^i} = - \int_D \delta^i(\chi^S) \mathbb{E} : \boldsymbol{\varepsilon}(u) : \boldsymbol{\varepsilon}(\omega) U^i dV \quad (10)$$

式中 $U^i = A_i, B_i, \dots, I_i, d_0^i$ 为组件设计变量 $D_0^i = (x_0^i, y_0^i, z_0^i, L_1^i, L_2^i, L_3^i, s_a^i, s_b^i, s_i^i)^T$ 的任意一项。同理,约束函数对每个组件设计变量 d^i 的偏导数为

$$\partial V / \partial d_0^i = - \int_D \delta^i(\chi^S) U^i dV \quad (11)$$

2.2 外循环

如图 1 所示,当连续 100 次内循环的最优目标函数值未更新,则进入外循环。当连续 10 次外循环的最优目标函数值未更新,且优于第一次内循环(或外循环次数等于 50 次),则停止迭代;否则,计算每个组件对目标函数值的贡献率,即

$$R_i = (C - C_i) / C \quad (12)$$

式中 C 为经典 MMC 算法得到的目标函数值(柔度), C_i 为删除第 i 根组件后得到的目标函数值, R_i 为第 i 根组件对目标函数值的贡献率。此时, R_i 的值域为 $(-\infty, 0)$, 组件对目标函数值的贡献越大, R_i 越小。

为了使组件对目标函数值的贡献越大,在俄罗斯轮盘中选中的概率越低。首先将 R_i 进行归一化,计算归一化后的贡献率 X_i , 即

$$X_i = (R_i - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) \quad (13)$$

式中 R_{\max} 与 R_{\min} 分别为贡献率的最大值和最小值。此时组件对目标函数值的贡献越大, X_i 越小。然后以 X_i 作为第 i 根组件在俄罗斯轮盘中选中的概率,建立俄罗斯轮盘。最后通过俄罗斯轮盘赌随机删除 1/5 的组件(如果不为整数,则向下取整),并随机生成对应数量的组件及其参数(新生组件设计变量的变化范围为 $x_0^i = (0, L), y_0^i = (0, W), z_0^i = (0, H), L_1^i = (0, L), L_2^i = (0, W), L_3^i = (0, W), s_a^i = 0, s_b^i = (-1, 1), s_i^i = 0; L, W$ 和 H 分别为设计域的长宽高,如图 2 所示),作为下一次内循环的组件设计参数向量。

3 数值算例

为验证改进算法的有效性,分别采用改进的 MMC 方法和经典 MMC 方法,以不同设计域下的 MBB 梁为研究算例,对比两种算法的最优拓扑结构及其目标函数值(其中,经典 MMC 方法的迭代终止条件与改进的 MMC 方法中内循环的终止条件一致)。

MBB 梁为对称结构,所以可以采用半结构的 MBB 梁进行拓扑优化设计,以减少运算成本。半结构的 MBB 梁如图 2 所示。设计域尺寸为 $L \times W \times H$, 在左上角受均匀向下的载荷,设置载荷 $F =$

100 N。左侧面为铰链约束,右下角为全约束。设置算例中的有限元单元尺寸为 0.5,依据不同的长宽比对设计域进行有限元网格划分。设置组件材料的弹性模量 $E = 3 \times 10^9$,泊松比 $\nu = 0.3$,给定的体积约束上限为 $V \leq 0.4D$ 。在不同设计域中,经典算法和改进算法的最优拓扑结构及其目标函数值列入表 1。

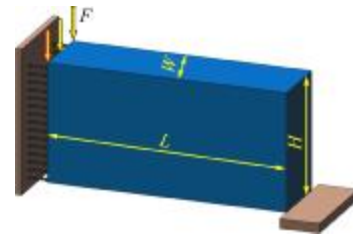


图 2 三维 MBB 梁算例
Fig. 2 3D MBB beam

表 1 MBB 梁拓扑优化结果和目标函数值对比

Tab. 1 Comparison of MBB beam topology optimization results and objective function values

设计域	组件数量	初始化	经典 MMC 算法			改进的 MMC 方法			目标函数值提升率 /%		
			最优拓扑结构	柔度 $\times 10^{-3}$	迭代次数	耗时 $\times 10^2$ s	最优拓扑结构	柔度 $\times 10^{-3}$		外循环环数	耗时 $\times 10^4$ s
30×4×10	6			26.08	355	4.423		17.78	17	0.5001	31.56
	12			16.49	220	2.302		16.05	20	0.8965	2.69
	18			15.45	155	2.408		15.41	15	0.4718	0.019
40×4×20	6			7.306	472	8.767		7.109	12	7.344	2.70
	12			6.372	315	6.619		6.351	12	1.010	0.33
	18			6.387	226	5.481		6.096	12	1.155	4.56
50×4×20	6			12.39	222	3.305		11.45	13	0.9164	7.59
	12			9.94	257	6.802		9.94	50	6.641	0
	18			9.61	356	10.49		9.61	50	8.234	0

为验证本文方法的适用性和正确性,通过短悬臂梁算例对改进的 MMC 方法和经典 MMC 方法进行数值分析。短悬臂梁的长宽高为 $L \times W \times H$;在设计域的右侧面中间均匀分布竖直向下的载荷 $F = 100 \text{ N}$;左侧面为全约束。内置微管网载体的拓扑结构实体材料的弹性模量 $E = 3 \times 10^9 \text{ Pa}$;泊松比 $\nu = 0.3$,给定的体积约束上限为 $V \leq 0.4D$ 。短悬臂梁算例如图 3 所示。在不同设计域中,经典算法和改进

算法的最优拓扑结构及其目标函数值列入表 2。

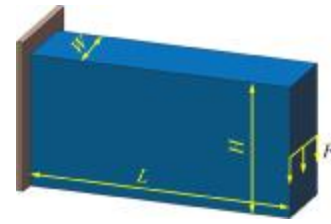


图 3 三维 MBB 梁算例
Fig. 3 3D MBB beam

表 2 短悬臂梁拓扑优化结果和目标函数值对比

Tab. 2 Comparison table of short cantilever beam topology optimization results and objective function values

设计域	组件数量	初始化	经典 MMC 算法			改进的 MMC 方法				目标函数值提升率 /%	
			最优拓扑结构	柔度 $\times 10^{-3}$	迭代次数	耗时 $\times 10^2 \text{ s}$	最优拓扑结构	柔度 $\times 10^{-3}$	外循环环数		耗时 $\times 10^3 \text{ s}$
$30 \times 4 \times 10$	6			20.92	131	1.218		17.75	13	3.791	15.15
	12			18.34	262	3.857		16.77	15	4.385	8.56
	18			19.98	213	2.616		16.30	18	5.376	18.42
$40 \times 4 \times 20$	6			5.606	246	4.475		5.569	15	22.26	0.66
	12			4.966	265	5.800		4.911	12	19.98	1.11
	18			8.206	188	4.570		5.892	21	30.34	28.20
$50 \times 4 \times 20$	6			10.44	171	6.895		10.43	12	10.072	0.10
	12			11.85	220	5.686		11.10	20	22.71	6.33
	18			8.37	190	5.467		8.37	50	100.6	0

由表 1 和表 2 分析可知,

(1) 在相同设计域和组件初始化条件下,改进的 MMC 算法获得的优化结果不劣于经典 MMC 算法,MBB 梁和短悬臂梁算例的目标函数值平均下降了 5.49% 和 8.72%。

(2) 在经典的 MMC 算法中,优化结果依赖于组件的初始化。以设计域为 $30 \times 4 \times 10$ 的 MBB 梁和短悬臂梁算例为例,组件初始化不同,最优拓扑结构及目标函数值相差较大,最大的目标函数值是最小的目标函数值的 1.69 倍和 1.14 倍。

(3) 在改进的 MMC 算法中,组件初始化对优化结果的影响较小。以设计域为 $30 \times 4 \times 10$ 的 MBB 梁和短悬臂梁算例为例,组件初始化不同,最优拓扑结构及其目标函数值相差不大,最大的目标函数值是最小的目标函数值的 1.15 倍和 1.09 倍。

4 结 论

研究针对经典可移动变形组件法优化结果依赖于组件初始化的不足,通过选择、删除和替换部分组件,使得改进的 MMC 算法能够获得相较于经典 MMC 方法更优的结果。

改进的 MMC 算法采用双循环机制对组件变量进行更新。内循环基于 MMC 方法,实现快速寻优。外循环通过比较各组件对目标函数值的贡献度,设计俄罗斯轮盘赌,选择、删除和替换部分组件,然后将重新构造的结构引入内循环再次寻优。

研究结果表明,在相同设计域和组件初始化条件下,经典 MMC 算法容易受组件初始化的影响,陷入局部最优,改进的 MMC 算法则以增加时间成本为代价,降低了组件初始化对优化的影响,其优化结果不劣于经典 MMC 算法。

参考文献(References):

- [1] 文桂林,陈高锡,王洪鑫,等.含自重载荷的功能梯度材料结构时域动力学拓扑优化设计[J].中国机械工程,2022,33(23):2774-2782. (WEN Gui-lin, CHEN Gao-xi, WANG Hong-xin, et al. Time-domain dynamic topology optimization design of functionally gradient material structures with dead load[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(23): 2774-2782. (in Chinese))
- [2] 占金青,汪庭威,段丁强,等.基于多相材料的完全解耦柔顺机构拓扑优化设计[J].华东交通大学学报,2022,39(6):77-83. (ZHAN Jin-qing, WANG Ting-wei, DUAN Ding-qiang, et al. Topological design of fully decoupled compliant mechanisms with multiple materials[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2022, 39(6): 77-83. (in Chinese))
- [3] 方菲,刘平安.直流道消防炮的开发设计与实验[J].华东交通大学学报,2022,39(6):84-89. (FANG Fei, LIU Ping-an. Development design and test of fire monitor with straight flow channel [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2022, 39(6): 84-89. (in Chinese))
- [4] Bendsøe 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.
- [5] Lee D, Kim D, Lee J. Topology optimization of functionally graded structure for improving the magnetic force of electromagnets[J]. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 2021, 45(3): 239-245.
- [6] Geers M G D, Kouznetsova V G, Brekelmans W A M. Multi-scale computational homogenization: Trends and challenges[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2010, 234(7): 2175-2182.
- [7] Rozvany G I N, Bendsøe M P, Kirsch U, et al. Layout optimization of structures [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1995, 48(2): 41-119.
- [8] 朱继宏,韦畅,侯杰,等.形状记忆合金结构拓扑优化设计方法研究[J].计算力学学报,2021,38(4):452-461. (ZHU Ji-hong, WEI Chang, HOU Jie, et al. Study on topology optimization design method of shape memory Alloys [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(4): 452-461. (in Chinese))
- [9] Stolpe M, Svanberg K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, 22(2): 116-124.
- [10] 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.
- [11] 魏鹏,范海坚,李雪平,等.基于参数化水平集方法的微结构拓扑优化设计[J].计算力学学报,2021,38(4):471-478. (WEI Peng, FAN Hai-jian, LI Xue-ping, et al. Topology optimization design of microstructure based on Parameterized Level Set method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(4): 471-478. (in Chinese))
- [12] Zhang J Q, Chen Y G, Zhai J Y, et al. Topological

- optimization design on constrained layer damping treatment for vibration suppression of aircraft panel via improved Evolutionary Structural Optimization [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, **112**: 106619.
- [13] Yu D Y, Cai S Y, Gao T, et al. A 168-line MATLAB code for topology optimization with the adaptive bubble method (ABM) [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, **66**(1):10.
- [14] 蔡守宇,张卫红,高 彤,等. 基于固定网格和拓扑导数的结构拓扑优化自适应泡泡法[J]. *力学学报*, 2019, **51**(4): 1235-1244. (CAI Shou-yu, ZHANG Wei-Hong, GAO Tong, et al. Adaptive bubble method for structural topology optimization based on fixed mesh and topological derivatives[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, **51**(4): 1235-1244. (in Chinese))
- [15] Zhang W S, Liu Y, Du Z L, et al. A moving morphable component based topology optimization approach for rib-stiffened structures considering buckling constraints[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2018, **140**(11):111404.
- [16] 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.

Improved topology optimization method for moving morphable components

LI Peng^{1,2}, CHENG Wen-tao¹, DU Yi-bo¹, DING Ying¹, ZHAN Jin-qing¹

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Key Laboratory of Conveyance and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to solve the problem that the optimization result of the classical moving morphable components (MMC) is easily affected by the component initialization, the improved MMC based on the double cycle mechanism is designed. The inner loop is based on the classical MMC to realize fast optimization. The outer loop implements the Russian roulette algorithm based on the component contribution rate, then selects, deletes and replaces some components, and finally introduces the reconstructed structure into the inner loop for further optimization. The optimization examples of an MBB beam and a short cantilever beam show that, compared with the classical MMC, the improved MMC can overcome the influence of component initialization on optimization results, and obtain better optimization results, although the operation cost is significantly increased.

Key words: topology optimization; moving morphable components; finite element analysis; sensitivity analysis; Russian roulette algorithm