

柔性剪切蒙皮支撑结构的拓扑优化*

刘卫东, 朱 华, 周盛强, 白亚磊, 赵淳生

(南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 为了求解关于柔性剪切蒙皮支撑结构的多目标拓扑优化问题,提出了一种带有多重约束处理能力的位矩阵表示的非支配排序遗传算法。采用位矩阵作为遗传算法的染色体并引入基于矩阵操作的遗传算子,利用Ansys有限元分析获得结构质量、面内剪切性能和面外承载能力等目标。利用Matlab处理结构连通性和面内应变等约束并实现了基于矩阵的优化算法,获得了一系列可行的柔性剪切蒙皮支撑结构,在实际应用中可以根据需要选择合适的结构。从研究结果可以看出,该算法可以给多目标二维结构拓扑优化问题提供可行有效的解。

关键词 结构优化; 柔性剪切蒙皮; 拓扑优化; 遗传算法; 有限元方法

中图分类号 V11

引 言

变形机翼在飞行过程中能根据需要改变自身的构型获得最优的气动性能,成为近年来飞行器研究领域的热点^[1-5]。变后掠机翼属于大尺度变形机翼的一种,在飞行过程中能根据需要改变后掠角和机翼面积,从而获得较好的气动性能。1981年,前苏联试飞的Tu-160超音速轰炸机、Mig-23超音速战斗机等采用了变后掠翼,兼顾了低速和高速飞行时的气动性能。但是传统的刚性变后掠机翼由于机构复杂,质量较重和飞行成本高等缺点,逐步淡出研究领域。随着材料科学的不断发展,科学家们提出了结构简单、质量轻、可大幅降低飞行成本的柔性变后掠机翼概念。其中,最具代表性的是NextGen航空技术公司研制的柔性变后掠翼飞行器MFX-1^[6],适用于柔性变后掠机翼的柔性剪切蒙皮有助于在机翼后掠变形过程中维持机翼气动外形并传递气动载荷。Andersen提出了用于MFX-1上的柔性剪切蒙皮^[7],该蒙皮由金属丝状内部支撑结构和覆盖于外表的弹性硅橡胶组成,其中的金属丝状内部支撑结构作为气动载荷的主要承受部件,是根据经验选择的简单结构,缺乏理论指导。柔性剪切蒙皮支撑结构用于柔性变后掠机翼,首先,要有较轻的质量以降低飞行损耗;其次,要有较小的面内剪切模量以降低剪切变形

过程中的能量消耗;最后,柔性剪切蒙皮要具有足够的面外刚度以承受气动载荷,维持机翼外形;因此,如何获得能够同时满足上述3点要求的柔性结构成为柔性剪切蒙皮设计中的关键问题。

近年来,结构拓扑优化作为一种广义结构形状优化方法获得了大量关注。Bendsøe提出了一种获得广泛认可的固体各向同性微结构的罚函数(solid isotropic micro-structure with penalization method,简称SIMP)均匀化方法^[8]。Sigmund编写了用于柔度最小化设计的99行Matlab程序^[9]。Jakiela等提出了位数组表示的遗传算法^[10-15],用于解决连续结构拓扑优化问题。但是,上述方法均针对单目标拓扑优化问题,无法解决柔性剪切蒙皮支撑结构设计多目标问题。Olympio和Gandhi提出了一种实数编码的混合多目标遗传算法^[16],用于解决柔性蒙皮支撑结构的拓扑优化问题并获得了理想结果。Schoenauer指出,基因表示方法对于遗传算法至关重要^[17],该算法中基因表示方法有待进一步改善。

笔者首先提出了一种简单直观的位矩阵基因表示方法,将设计变量空间中的个体映射到位矩阵。非支配排序遗传算法II(non-dominated sorting genetic algorithm II,简称NSGAI)是一种经典的多目标优化算法,可以在设计变量空间快速地搜寻到Pareto前沿优解,利用它可以解决多目标问题。将NS-

* 国家自然科学基金资助项目(50905085,91116020);航空基金资助项目(20100112005)

收稿日期:2012-10-21;修改稿收到日期:2012-11-06

GAI 遗传算法和位矩阵基因表示相结合,利用 Ansys 有限元分析求解基因结构的目标值,将目标值传递到 Matlab 中进行处理,实现基于位矩阵编码的多目标遗传算法。该算法用于柔性剪切蒙皮支撑结构的拓扑优化获得了有效、可行的结果。

1 位矩阵基因表示的 NSGAI

1.1 位矩阵基因表示

现有的应用于拓扑优化的遗传算法往往采用实数或者二进制向量编码,通过编解码程序实现从设计变量空间到遗传基因空间的映射。本研究提出利用位矩阵来实现该映射。将设计区域均匀离散化,设定离散后的单元中只存在两种状态:充满材料或者为空。若单元充满材料,设定对应值为1;若单元为空,设定对应值为0,得到一个位图如图1所示。将该位图写成矩阵形式,得到设计区域对应的矩阵基因。

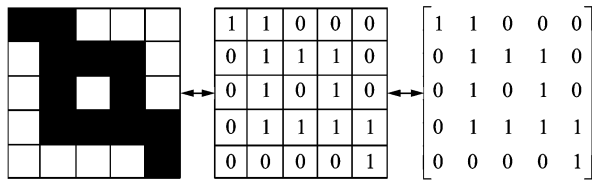


图1 位矩阵表示

1.2 交叉算子

作为主要的遗传算子,交叉算子通过交换父代的基因来获得新的个体。传统的实数或二进制交叉算子往往针对一维基因设计,对于二维基因需要设计对应的二维交叉算子。本研究采用随机子矩阵交叉算子,在两个父代位矩阵基因中相同的随机位置获得两个随机位子矩阵,交换两个随机位子矩阵获得新的子代位矩阵,如图2所示。

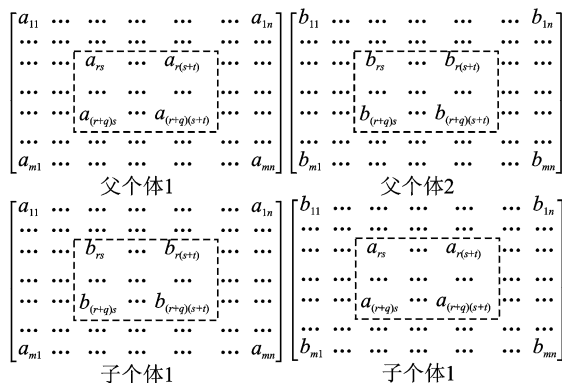


图2 交叉算子

1.3 变异算子

变异算子是遗传算法的辅助算子。对于位基因表示的遗传算法,随机位翻转是常用的变异方法。在本研究中首先生成一个位矩阵,其中1元素随机分布且所占元素比例为预设变异范围,通过将父代位矩阵和上述位矩阵异或操作,得到新的子代位矩阵作为新的个体,如图3所示。

$$\begin{matrix}
 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \text{XOR} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \text{父个体} & & \text{变异范围为0.3的} & & \text{子个体} \\
 & & \text{随机分布矩阵} & &
 \end{matrix}$$

图3 变异算子

1.4 其他算子

选择算子采用经典的赌轮盘算子。非支配排序方法和精英策略采用 Deb 提出的算法。终止策略采用最大代数法,即当迭代次数达到预先设定的最大代数时算法终止。

2 拓扑优化算法实现

2.1 个体过滤

利用材料分布方法进行拓扑优化常常带来网格依赖性的问题。为了降低结构的网格依赖性、使结构便于加工,需要对分析区域中的材料区域按照一定的半径过滤,使区域规整。Matlab 提供了不同类型的图形学过滤算子:扩张、腐蚀、开运算及闭运算。其中:扩张运算会消除小的空白区域;腐蚀运算可以消除小的材料块;开运算是先腐蚀后扩张;闭运算是先扩张后腐蚀。将开运算和闭运算结合,采用先开后闭的混合运算可以达到较好的过滤效果。

2.2 个体连通性分析

将个体区域中同时具有边界条件和载荷作用的材料块定义为传力路径。拓扑优化希望结构的传力路径数 $n=1$,即区域中有且仅有一条传力路径。若 $n=0$,表明区域中不存在传力路径;若 $n>1$,表明区域中超过一条传力路径,这两种个体都是不合理结构,应当在迭代过程中淘汰。连通性分析采用 Matlab 中的 bwlablel 函数来标注个体分析区域中的材

料块,返回个体区域中的传力路径数 n ,通过施加罚值来淘汰不合理结构。

2.3 目标值求解

2.3.1 边界载荷条件

设定研究的柔性剪切蒙皮支撑结构形状为正方形,安装在正方形铰链机构中,如图4所示。正方形铰链机构发生剪切变形时,带动柔性剪切蒙皮支撑结构剪切变形。设蒙皮结构左边固定,其余三边在铰链机构作用下产生变形。假设整个蒙皮结构由周期性排列的单元结构组成,取出一个单元结构进行研究,由于载荷和边界条件的对称性,为了节省计算资源,将一个单元结构按照对称性分为4个小块,取其中一块进行详细研究。

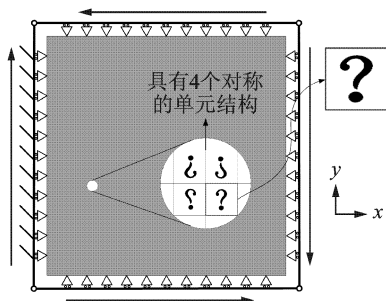


图4 柔性剪切蒙皮整体结构

图5为取出的1/4单元结构承受两种不同载荷工况作用的示意图。图5(a)为结构承受剪切作用时的载荷和边界条件,其中,左边界简支,其余三边加载剪切作用产生的强制位移。图5(b)为面法向气动载荷作用时的边界和载荷条件(表面高弹材料将均布气动压力传递到结构上),此时下边界和右边界设定为简支,面法向作用均布压强载荷 P_z 。

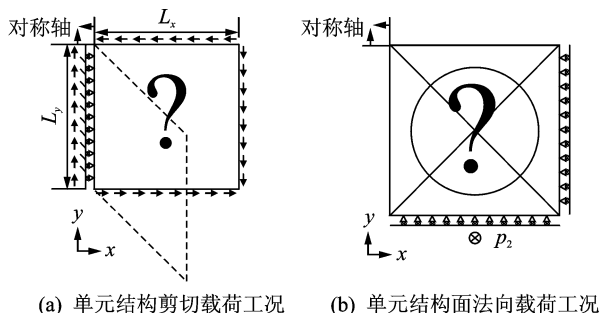


图5 单元结构载荷工况

2.3.2 优化目标设定

1) 质量目标:飞行器质量越大,所需的升力越

大,飞行过程中消耗的能量越多。为了减少能量消耗,结构需要选用质量较轻的结构,因此将单元质量 m 设定为优化目标之一。

2) 面内剪切性能:在相同材料属性条件下,结构变形的难易程度和结构的等效剪切模量(G_{morph})相关, G_{morph} 越小,剪切变形所消耗的能量越少,结构越容易变形;因此将结构等效剪切模量设定为优化目标之一。另外,结构达到预设的整体应变 ϵ_{global} 时,局部-整体应变比 $\bar{\epsilon} = \epsilon_{\text{local}}^{\text{max}} / \epsilon_{\text{global}}$ 越小,可以选择的材料范围越宽,因此将 $\bar{\epsilon}$ 设为优化目标之一。考虑到结构安全性,为保证结构在达到预设整体应变时不发生破坏,需要将 $\bar{\epsilon}$ 上限设定为不超过1的数,本研究中设定 $\bar{\epsilon} \leq 0.5$ 。

3) 面法向承载性能:支撑结构在气动载荷 P_z 作用下产生的面法向位移 δ 越小,维持机翼外形的能力越强;因此,将 δ 设为优化目标之一。

综合以上3点,柔性剪切蒙皮支撑结构优化目标设定为一个具有4个优化目标、一个约束条件的优化问题。优化目标和约束条件如下

$$\text{最小化 } \mathbf{F}_{\text{obj}} = \begin{cases} m \\ \delta \\ G_{\text{morph}} \\ \bar{\epsilon} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{约束条件 } \bar{\epsilon} \leq 0.5 \quad (2)$$

2.3.3 Ansys 求解和无量纲化

由于蒙皮支撑结构厚度相对于面内尺寸较小,选用shell63单元建模计算。施加两种工况下的边界条件和载荷,计算得到个体的优化目标 \mathbf{F}_{obj} 。由Ansys计算得到的目标值向量 \mathbf{F}_{obj} 带有单位,为便于遗传算法运算,将它们无量纲化。

对于结构质量 m ,将其除以区域充满材料时的结构质量 m_{full} ,得到

$$\bar{m} = \frac{m}{m_{\text{full}}} \quad (3)$$

对于面外法向位移 δ ,无量纲化为

$$\bar{\delta} = \frac{\delta E L_z^3}{P_z L^4} \quad (4)$$

其中: E 为原材料弹性模量; L_z 为 z 方向厚度; P_z 为面法向压强; L 为分析区域边长。

对于面内等效剪切模量 G_{morph} 可以通过结构整体应变能(δU)计算得出

$$\bar{G}_{\text{morph}} = \frac{2\delta U}{EV\epsilon_{\text{global}}^2} \quad (5)$$

其中: E 为原材料的弹性模量; V 为整体材料区域的体积。

经过无量纲化后个体目标值向量为

$$\bar{\mathbf{F}}_{\text{obj}} = \begin{cases} \bar{m} \\ \bar{\delta} \\ \bar{\epsilon} \\ \bar{G}_{\text{morph}} \end{cases} \quad (6)$$

2.4 多重约束处理

对于满足连通性分析要求的个体可以按照目标值求解的方法求其目标值。对于不满足连通性要求的个体需要进行约束处理。另外,对个体进行 Ansys 分析求得的目标值可能不满足应变约束条件 $\bar{\epsilon} \leq 0.5$ 。本研究对不满足连通性要求和应变约束条件要求的个体添加罚函数,以便在后续的迭代中将其淘汰。

$$\bar{\mathbf{F}}_{\text{obj}} = \begin{cases} \bar{\mathbf{F}}_{\text{obj}} & (n = 1) \\ \bar{\mathbf{F}}_{\text{obj}} + \Gamma & (n \neq 1 \text{ or } \bar{\epsilon} > 0.5) \end{cases} \quad (7)$$

其中: Γ 为罚值,由于经过无量纲化处理后的目标值较小,这里 Γ 取为一个大数。

2.5 拓扑优化算法流程

图 6 为整个拓扑优化的算法流程。初始种群大

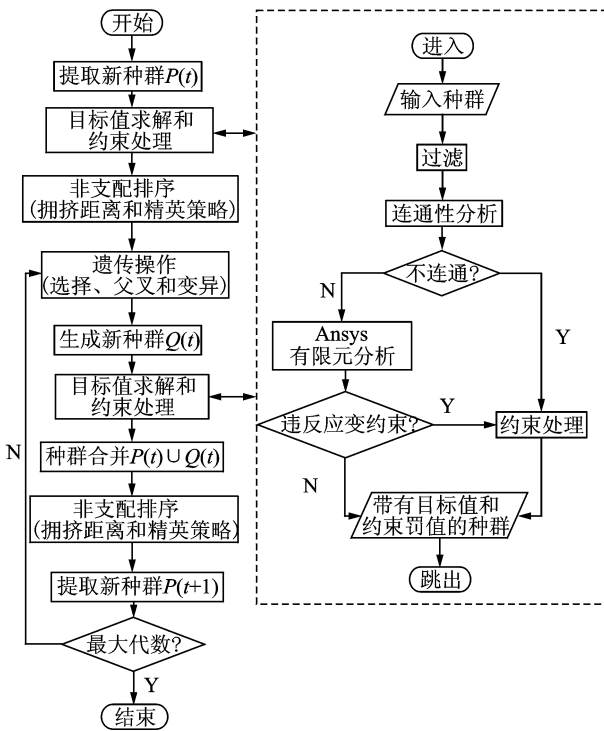


图 6 拓扑优化算法流程

小设置为 20。个体离散为 20×20 个单元,映射到 20×20 的位矩阵。由于遗传操作的随机性,生成的新种群中有部分个体在约束处理中被淘汰,为了尽量增加种群中合理可用新个体的数量、加快搜索效率,将交叉和变异概率设为 100%,即每个选中的父代个体都参与交叉和变异。变异范围设定为

$$R_m = 0.1(1 - 0.5\text{curGen}/\text{maxGen}) \quad (8)$$

其中: curGen 为当前代数; maxGen 为预设最大代数,本研究将 maxGen 设定为 10^5 。

3 结果与讨论

通过优化得到一系列满足要求的构型如图 7 所示,证实本研究提出的算法可以快速有效地寻找到符合要求的结构材料分布。可以看出,20 种构型形状差别较大,表明 NSGAI 的全局搜索能力较强,对应解的目标值如图 8 所示。其中,各个解的目标值均符合应变约束要求。可以看出,质量较大的结构具有较好的面法向承载能力,但是面内剪切性能不如质量较小的结构。值得注意的是,由于多目标问题的特点,缺乏最优的衡量标准,这 20 个解都是相对较优

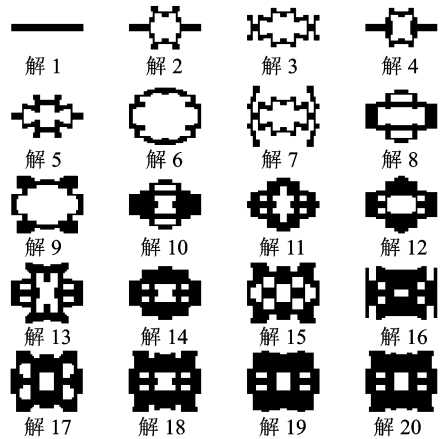


图 7 拓扑优化解的构型

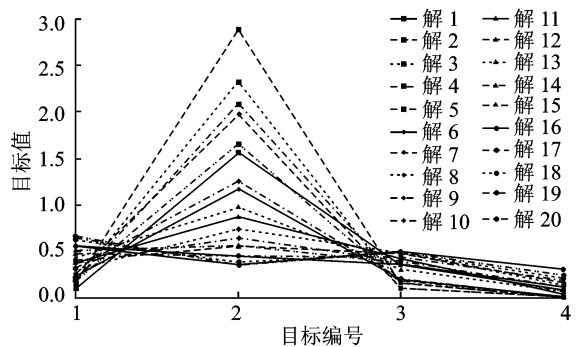


图 8 拓扑优化解的目标值

的解,可以根据实际需要选择合适的解。其中,解1具有最小的质量,解20具有最好的面法向承载能力,解7具有最好的应变特性,解3具有最小的等效面内剪切模量。图9~12分别为这4种结构的示意图

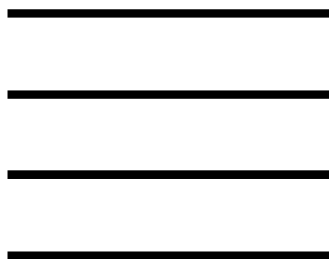


图9 解1的结构示意图

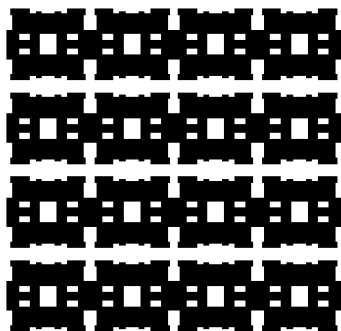


图10 解20的结构示意图

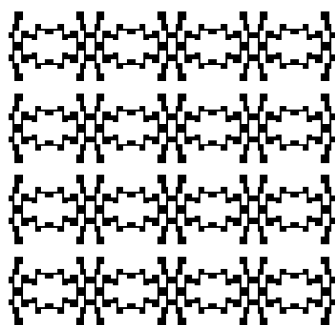


图11 解7的结构示意图

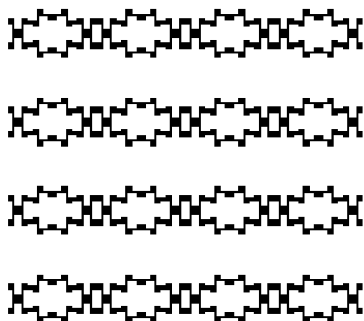


图12 解3的结构示意图

(4×4 个单元)。图9所示的纤维状结构接近于 Andersen 提出的用于 MFX-1 上的柔性剪切蒙皮丝状支撑结构。图11和图12所示的结构局部区域不够光滑,可以通过增加迭代次数、引进局部优化算法或者通过进一步尺寸优化使结构更加完善。

4 结 论

1) 以单元质量、面内剪切性能、面法向承载性能为优化目标,以连通性约束和局部-全局应变比为优化约束条件,利用位矩阵表示的 NSGAI 算法对柔性剪切蒙皮结构进行多目标拓扑优化,可以快速得到多种优化的构型。由于多目标问题的特点,没有绝对最优的衡量标准,这些构型都是各具优势的解,在实际工程应用中可以根据需要选用合适的构型。

2) 在拓扑优化中,位矩阵表示方法相对于传统编码更简单直观,更具有图形学意义;可以省去传统编码方法必不可少的编码解码程序,不需要考虑传统遗传操作过程中可能出现的个体上、下限溢出的情况,简化迭代运算。

3) 位矩阵表示的 NSGA II 用于拓扑优化的全局搜索,可以快速搜索到相对较优的个体,但是存在精度不足的缺点,通过增加迭代代数、引入局部优化算法或者对其结果进行尺寸优化等手段可以获得最优解。

4) 本研究提出的拓扑优化算法利用 Matlab 调用 Ansys 进行静力学计算,充分利用了 Matlab 的数值计算和 Ansys 的有限元分析能力。值得注意的是,考虑到 Ansys 的有限元计算能力,该算法不仅仅可用于多目标静力学二维拓扑优化,还能用于多目标动力学二维拓扑优化等复杂问题。

参 考 文 献

- [1] Bartley-Cho J D, Wang D P, Martin C A, et al. Development of high-rate, adaptive trailing edge control surface for the smart wing phase 2 wind tunnel model [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15: 279-291.
- [2] Sofla A Y N, Meguid S A, Tan K T, et al. Shape morphing of aircraft wing: status and challenges [J]. *Materials and Design*, 2010, 31(3): 1284-1292.

- [3] Barbarino S, Bilgen O, Ajaj R M, et al. A review of morphing aircraft[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(9): 823-877.
- [4] Icardi U, Ferrero L. Preliminary study of an adaptive wing with shape memory alloy torsion actuators[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(10): 4200-4210.
- [5] Diaconu C G, Weaver P M, Mattioni F. Concepts for morphing airfoil sections using bi-stable laminated composite structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2008, 46(6): 689-701.
- [6] Flanagan J, Strutzenberg R, Myers R, et al. Development and flight testing of a morphing aircraft [C]// *Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Honolulu, Hawaii;AIAA, 2007;1707.
- [7] Andersen G R, Cowan D L, Piatak D J. Aeroelastic modeling, analysis and testing of a morphing wing structure [C] // *Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Honolulu, Hawaii; AIAA, 2007;1734.
- [8] Bendsøe M P. Optimal shape design as a material distribution problem[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1989, 1(4): 193-202.
- [9] Sigmund O. A 99 line topology optimization code written in MATLAB[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 21(2): 120-127.
- [10] Jakiela M J, Chapman C, Duda J, et al. Continuum structural topology design with genetic algorithms[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 186 (2-4): 339-356.
- [11] Chapman C, Jakiela M. Genetic algorithm-based structural topology design with compliance and topology simplification considerations [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1996, 118 (1): 89-98.
- [12] Chapman D, Saitou K, Jakiela M J. Genetic algorithms as an approach to configuration and topology design [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1994, 116 (4): 1005-1012.
- [13] Wang S Y, Tai K. Structural topology design optimization using genetic algorithms with a bit-array representation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, 194: 3749-3770.
- [14] Wang S Y, Tai K. Graph representation for structural topology optimization using genetic algorithms [J]. *Computers & Structures*, 2004, 82: 1609-1622.
- [15] Kudva J N. Overview of the DARPA smart wing project [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15(4): 261-267.
- [16] Olympio K R, Gandhi F. Skin designs using multi-objective topology optimization [C] // *49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Schaumburg, Illinois;AIAA, 2008;1793.
- [17] Schoenauer M. Shape representations and evolutionary schemes, in: *Evolutionary Programming [C] // Proceedings of the Fifth Annual Conference on Evolutionary Programming*. San Diego;MIT Press, 1996: 121-129.



第一作者简介:刘卫东,男,1986年10月生,博士研究生。主要研究方向为机械设计及理论、压电作动器在流动控制中的应用。

E-mail:314116796@qq.com