

文章编号:1000-8055(2012)01-0041-07

基于遗传算法的火焰筒浮动瓦块 热-结构耦合优化分析

高建辉, 温卫东, 崔海涛

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 以火焰筒浮动瓦块结构为研究对象, 将遗传算法和“穷举搜索法”相结合, 采用二步递进策略对浮动瓦块进行了热-结构耦合优化分析. 首先利用遗传算法对瓦块结构中安装螺栓杆的位置变量进行优化; 然后利用“穷举搜索法”对瓦块的厚度和螺栓杆直径进行优化. 通过优化分析得到了结构性能更优的瓦块结构方案, 使其最大应力比降低了 22.77%. 结果表明遗传算法和“穷举搜索法”相结合的优化方法应用在浮动瓦块的结构优化设计中是有效、合理的.

关 键 词: 火焰筒; 浮动瓦块; 热-结构耦合; 结构优化; 遗传算法

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Genetic algorithm model-based optimization for float-wall with thermal-structural coupled

GAO Jian-hui, WEN Wei-dong, CUI Hai-tao

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Taking the float-wall as the object of study, combined genetic algorithm with exhaustive search, the thermal-structure coupling optimization of float-wall was researched by the way of two-step progression. Using genetic algorithm to carrying out install position optimization; then, using exhaustive search to optimize the thickness and the bolt diameter. A float-wall has more excellent capability was obtained; the stress index was decreased by 22.77%. The results show that the optimal technology applied in optimal design of float-wall is effective and reasonable.

Key words: combustor; float-wall; thermal-structural coupled;
structure optimization; genetic algorithm

随着现代航空发动机的发展, 对航空发动机燃烧室性能提出了越来越高的要求, 而燃烧室火焰筒的工作环境也愈加恶劣. 燃烧室内采用浮动壁结构可以有效改善火焰筒的壁温结构、提高火焰筒的冷却效果, 同时这也是为了改进火焰筒壁面结构及提高空气冷却效率加强热保护而发展的先进技术^[1]. 冲击发散复合冷却浮动瓦块结构具

有最佳的冷却效果和紧凑的结构形式, 是未来燃烧室冷却的主要结构形式, 具有良好的发展前景^[2].

目前, 国内外对浮壁式火焰筒的研究工作主要集中在壁温分布和冷却效率等方面的数值仿真和试验研究^[3-12]. 而针对浮壁式火焰筒浮动瓦块结构的相关研究则比较少, 文献^[13-14]分别采用

收稿日期: 2011-06-22; 修订日期: 2011-08-30

作者简介: 高建辉(1979—), 男, 河南叶县人, 博士生, 主要从事结构强度与振动研究.

单亲遗传算法和模糊遗传算法对简单瓦块结构进行了常温下的优化分析。在浮动壁式火焰筒中,浮动瓦块是主要的承热件,瓦块结构的应力主要是由温度载荷引起的热应力。因此对瓦块结构进行有限元结构强度分析时必须考虑温度的影响,需要对瓦块结构进行热-结构耦合的有限元结构强度分析。

由于浮动瓦块结构比较复杂,瓦块的结构参数中既有连续变量(螺栓杆的位置等),又有离散变量(螺栓杆直径、瓦块厚度等),不仅涉及拓扑结构优化也包括几何尺寸的优化,采用传统的、单一的优化算法难以得到全局最优解。遗传算法^[15-16]在数值仿真优化问题中表现出了强大的功能,近年来在各领域的优化设计中应用越来越多。在瓦块结构中螺栓杆直径和瓦块厚度是离散取值且取值范围很小,因此本文采用二步递进策略,即首先采用改进的遗传算法,对浮动瓦块结构的螺栓位置进行拓扑结构优化;然后采用“穷举搜索法”,对瓦块厚度和螺栓杆直径进行几何尺寸优化。

1 浮动瓦块的热-结构耦合分析

1.1 浮动壁瓦块结构

浮动瓦块结构如图 1 所示,是双层壁结构,外层为冲击壁上面分布着垂直于壁面的冲击孔;内层为浮动壁(即气膜孔壁),与热燃气接触,上面密集分布着与壁面呈固定角度的气膜孔。由于实际瓦块结构比较复杂,本文研究中将瓦块结构简化为平板模型。图 2 所示为建立的瓦块结构模型,瓦块结构中包含 5 个螺栓杆和大量气膜孔。

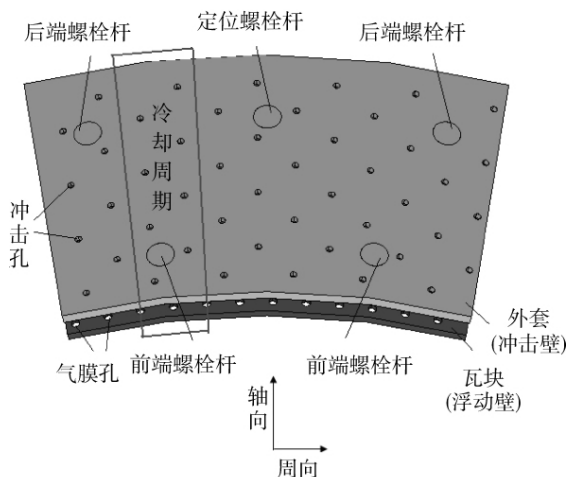


图 1 火焰筒浮动瓦块的结构示意

Fig. 1 Structure of the float-wall

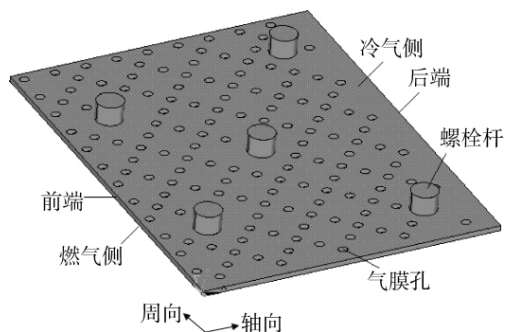


图 2 平板浮动瓦块三维参数化模型

Fig. 2 Three-dimensional(3-D) parameter model of the float-wall

1.2 浮动瓦块壁面温度的获取方法

由于在同一个浮动壁瓦块内,冷却结构沿瓦块周向周期性分布,且瓦块周向温度分布比较均匀^[11-12],因此本文截取火焰筒周向的一个冷却周期建立模型进行温度场仿真计算。同时,由于截取一段的周向角度很小,所以将分析模型简化为平板模型,如图 3 所示。

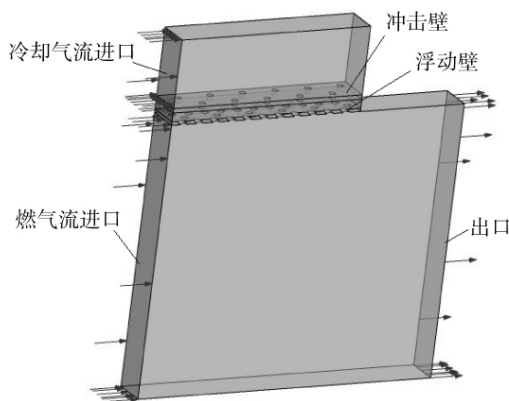


图 3 温度场计算的几何模型

Fig. 3 Geometry model for temperature analysis

浮动瓦块壁温场仿真计算的分析流程是:首先,建立 UG(Unigraphics)参数化模型;然后,采用 ICEM 软件对浮动壁式火焰筒模型进行结构化网格的划分;最后,采用 FLUENT 软件求解浮动壁结构模型的温度分布,并输出所需的浮动瓦块壁面温度。

1.3 结构的热-结构耦合分析方法

常用的热应力有限元分析过程可分为直接法和间接法。直接耦合法就是采用相关单元(单元的自由度既包括结构自由度又包括温度自由度)直接在模型结构上施加所有的热和结构的边界条件和载荷,直接求解,其求解过程和一般的结构分析

过程类似,只是在选用单元时要注意选用热-结构单元。此方法一般用于热与结构耦合是双向的情况。间接耦合方法是先选用特定的热分析单元(该热单元能与结构单元相互转化),施加温度边界条件和温度载荷,进行热分析,计算温度场分布;然后将该热单元类型转化为结构静应力分析中相应的结构单元类型,施加结构边界条件和结构载荷,并读入热分析所获得的温度场分布结果作为体载荷,进行结构分析获得结果。该结果即为耦合结果。

根据本文研究结构的实际情况,温度场与应力场的相互作用非线性程度不高,因此本文采用间接法进行热应力有限元计算。利用 ANSYS 软件及其 APDL (ANSYS parameter design language) 开发程序实现瓦块结构的热-结构耦合分析,分析过程主要分为节点温度求解和结构应力求解两部分,其分析流程见图 4。

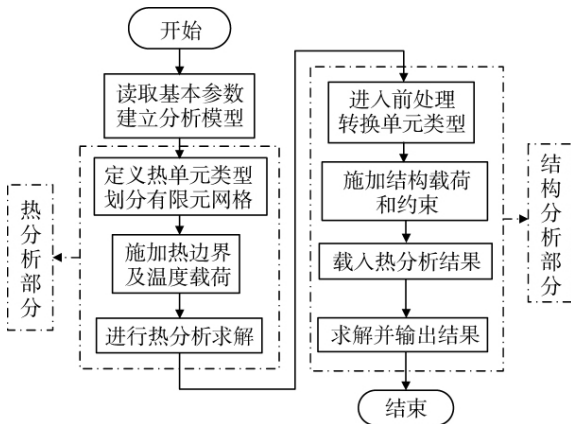


图 4 热-结构间接耦合分析方法流程

Fig. 4 Analysis flow chart in heat-flow indirect coupling

以结构的边界条件和载荷以及热分析所得节点温度来计算单元刚度矩阵 $[k]^e$ 、单元节点载荷 $\{P\}^e$ 、单元节点热载荷 $\{P\}_T^e$, 根据位移约束条件, 利用平衡条件及变分原理推导整体刚度矩阵 $[K]$ 和载荷向量 $\{P\}$, 其中 $[K] = \sum [k]^e$, $\{P\} = \sum \{P\}^e + \sum \{P\}_T^e$ 应用 $[K] \cdot \{\delta\} = \{P\}$, 求得节点位移 $\{\delta\}$, 由单元节点位移 $\{\delta\}^e$ 及温升 $\{\Delta T\}^e$, 计算获得总应变 $\{\varepsilon\}$ 及热应变 $\{\varepsilon\}_T$, 则应力 $\{\sigma\} = [K] \cdot (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon\}_T)$ 。

2 精英保留自适应遗传算法优化方法

2.1 浮动瓦块优化问题的数学模型

浮动瓦块优化的目标是使瓦块结构的应力和

Z 向位移更加均匀。定义应力比 $Q = \sigma / [\sigma]^T$, σ 为单元应力, $[\sigma]^T$ 为单元对应温度下材料的许用应力。因此, 优化目标函数为瓦块应力比和 Z 向位移的组合。约束条件为尺寸约束、最大应力比和最大 Z 向位移约束。综上所述, 建立瓦块结构的优化模型如下:

$$\begin{cases} \min f(x) = (Q_{\max} - Q_{\min}) + Q_{\text{stdv}} + \frac{(U_{Z\max} - U_{Z\min}) + U_{Z\text{stdv}}}{[U_Z]}, x \in D \\ \text{s. t. } Q_{\max} < 1.0 \\ |U_Z|_{\max} < [U_Z] \\ x_i^{(l)} \leq x_i \leq x_i^{(u)} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中 $Q_{\max}$, $Q_{\min}$ 和 Q_{stdv} 分别为应力比的最大值、最小值和标准差; $U_{Z\max}$, $U_{Z\min}$ 和 $U_{Z\text{stdv}}$ 分别为结构 Z 向位移的最大值、最小值和标准差; $[U_Z]$ 为结构 Z 向允许位移, 本文取 0.1 mm; $|U_Z|_{\max}$ 为结构在 Z 向的绝对最大位移; $x_i^{(l)}$ 和 $x_i^{(u)}$ 分别为第 i 个变量的最小和最大取值。

2.2 自适应交叉率、变异率

本文利用 Visual C++ 2008 语言编写精英保留自适应遗传算法 (EAGA) 的优化主程序, 对浮动瓦块结构中螺栓杆位置进行优化, 优化流程见图 5。采用精英保留策略可以保证在优化过程中最佳个体不被破坏, 确保获得理论上全局最优的优化结果; 同时, 本文研究中构造自适应函数的主要思想是在遗传过程中, 让交叉率和变异率随着种群的适应度值进行自我调整, 当种群个体适应度趋于一致, 即趋于局部最优时, 使得它们增大, 而当种群个体适应度比较分散时, 使得它们减小。具体确定方法如下:

自适应交叉率 p_c

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{c1} & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (2)$$

自适应变异率 p_m

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ p_{m1} & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $f_{\max}$ 表示群体的最大适应度值, f_{avg} 表示每代群体的平均适应度值; f 表示要变异个体的适应度值, f' 表示要交叉的个体中较大个体的适应度值; p_{c1} , p_{c2} , p_{m1} , p_{m2} 为常数。

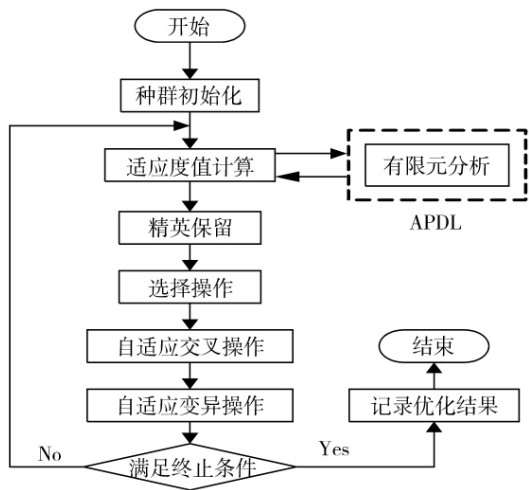


图 5 EAGA 优化的流程图
Fig. 5 Optimization flow of EAGA

3 浮动瓦块优化算例及结果分析

瓦块的初始结构见图 6, 螺栓杆在瓦块上对称分布. 优化变量取值范围为见表 1. 采用 ANSYS 软件对瓦块进行有限元热-结构耦合分析, 浮动瓦块的材料为 M951; 对定位螺栓(中间螺栓)进行固定约束, 对其余 4 个螺栓进行 Z 向位移约束; 在瓦块冷气侧(上表面)和燃气侧(下表面)分别施加压力 p_1, p_2 ; 热分析选用 SOLID87 单元, 结构分析选用 SOLID92 单元, 对瓦块结构划分的网格数量约为 15 万.

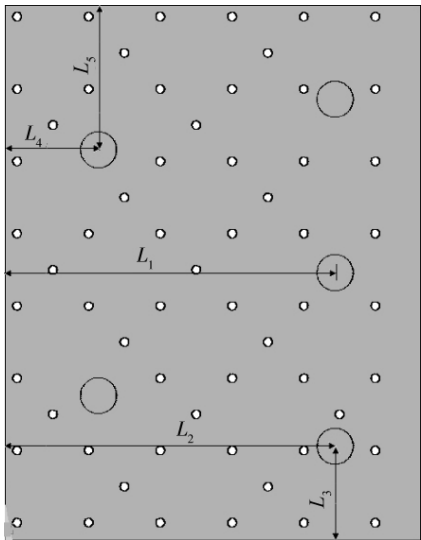


图 6 浮动瓦块的初始结构
Fig. 6 Original structure of the float-wall

在对瓦块结构进行热-结构耦合分析时, 获得准确的瓦块壁面温度分布是关键. 本文中采用

FLUENT 软件进行热-流耦合仿真计算获取瓦块结构的温度场和瓦块表面的压力载荷. 温度场计算中, 燃气流进口总压为 2.925 MPa、进口温度为 2000 K; 冷气流进口总压为 3.00 MPa、进口温度为 850 K. 计算得到瓦块壁面温度见图 7, 表面的平均压力 $p_1=2.940$ MPa, $p_2=2.925$ MPa.

表 1 浮动瓦块的优化设计变量列表
Table 1 Variables of the float-wall

参 数	参数取值/mm	
	上限	下限
定位螺栓轴向位置 L_1	45.5	12.5
后端螺栓轴向位置 L_2	45.5	32.5
后端螺栓周向位置 L_3	27.0	5.0
前端螺栓轴向位置 L_4	21.5	10.0
前端螺栓周向位置 L_5	27.0	5.0
螺栓杆直径 D	8.0	6.0 5.0
瓦块厚度 H	1.2	0.8

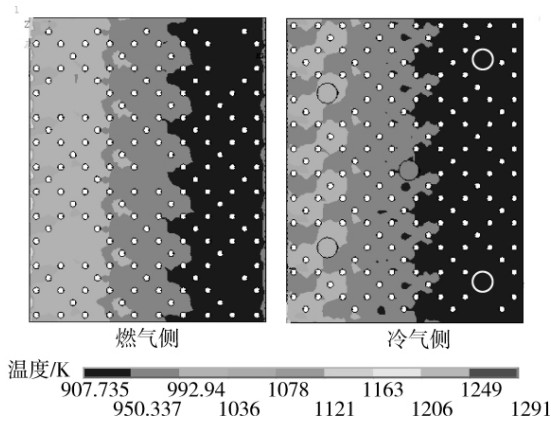


图 7 浮动瓦块的壁温分布
Fig. 7 Temperature of float-wall

螺栓杆位置的拓扑结构优化:

第一步, 取螺栓杆直径 $D=5.0$ mm、瓦块厚度 $H=1.0$ mm 不变, 对螺栓杆位置进行拓扑结构优化. 优化中对变量采用二进制编码, 其他参数为: $p_{c1}=0.9, p_{c2}=0.6, p_{m1}=0.1, p_{m2}=0.001$; 种群规模 40, 最大代数 100. 计算中出现 15 代不进化时, 停止计算.

图 8 给出了优化过程中最佳个体适应度、最大应力比和最大 Z 向位移等相关参数的进化曲线. 从图中可以看出:

1) 优化初始阶段进化比较显著, 5 代左右进化趋缓, 20 代左右开始收敛. 由于采用了精英保

留策略,最佳个体适应度值呈上升趋势,结构不断进化。

2) 进化早期,最大应力比和 Z 向最大位移下降剧烈,结构进化比较明显。由于适应度中同时考虑了应力比和 Z 向位移的影响,所以会出现参数的高低震荡。最大应力比和 Z 向最大位移总体呈下降趋势,并随着遗传算法的搜索迅速收敛。

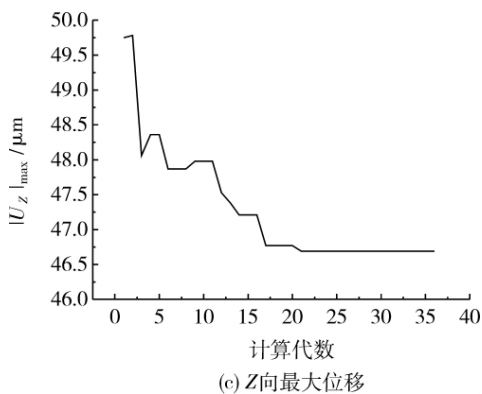
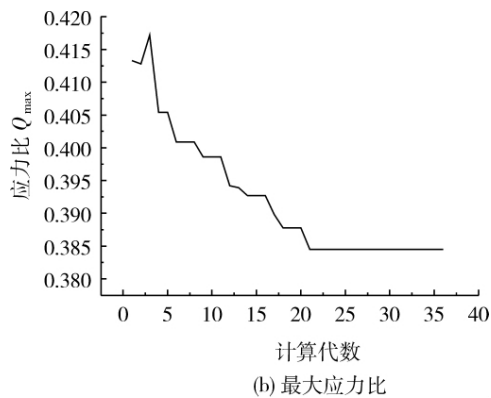
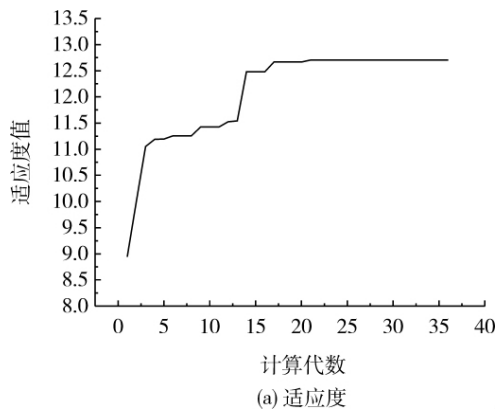


图 8 参数进化曲线

Fig. 8 Parameter evolution curves

厚度和螺栓杆直径的几何尺寸优化:

第二步,在螺栓杆位置优化的基础上,对瓦块厚度和螺栓杆直径进行全值域搜索优化分析。图

9 给出了所有取值点的适应度结果。

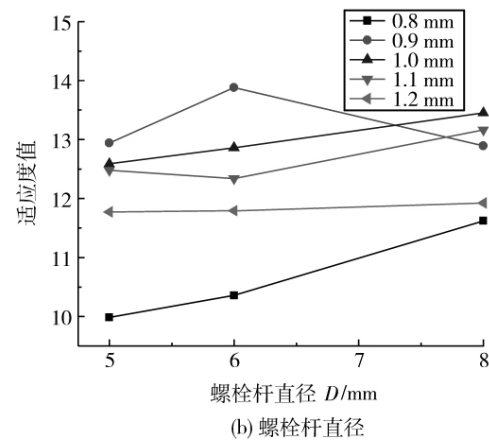
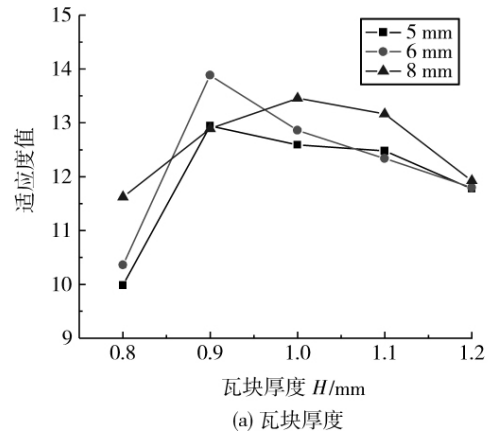


图 9 适应度值随参数的变化曲线

Fig. 9 Variation of the fitness with the parameter

从图 9 中可以看出:在螺栓杆直径不变时,随着瓦块厚度的增大,适应度先增加后减小;螺栓杆直径的增加对瓦块适应度值的影响规律不明显,但螺栓杆直径越大,瓦块厚度变化对瓦块适应度值的影响曲线越平缓。总体而言,瓦块厚度和螺栓杆直径对环形瓦块的性能影响较为明显。

优化结果分析

表 2 和图 10、图 11 给出了瓦块结构的优化结果。对优化结果分析可以得到以下结论:

1) 优化变量的最终取值都在其取值范围内部;与原始瓦块结构相比,优化获得的瓦块结构的 Mises 应力比和 Z 向位移极值均有所下降,分布更加均匀;表明优化过程是有效的,优化结果也是合理的。

2) 两步优化中, Z 向最大位移均有所下降,最小位移则变化不明显;瓦块结构的最大应力比和平均应力比都有下降,最大应力比下降了

22.77%;表明优化后结构的 Z 向位移和应力均得到了改善;

3) 两步优化中,平均应力比变化不大,这与

瓦块的应力主要是由温度载荷引起的相吻合,因为优化前后瓦块结构的温度分布是相同的.

表 2 浮动瓦块的结构优化结果
Table 2 Optimization results of the float-wall

	厚度/ mm	直径/ mm	螺栓杆位置/mm					应力比 Q		Z 向位移/ μm	
			L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	最大	平均	最大	最小
优化前	1.0	5.0	46.0	46.0	13.0	13.0	20.0	0.404	0.0357	37.7	-50.1
第一步	1.0	5.0	35.8	42.8	18.8	12.9	13.4	0.384	0.0346	21.5	-47.0
第二步	0.9	6.0	35.8	42.8	18.8	12.9	13.4	0.312	0.0335	18.9	-47.8

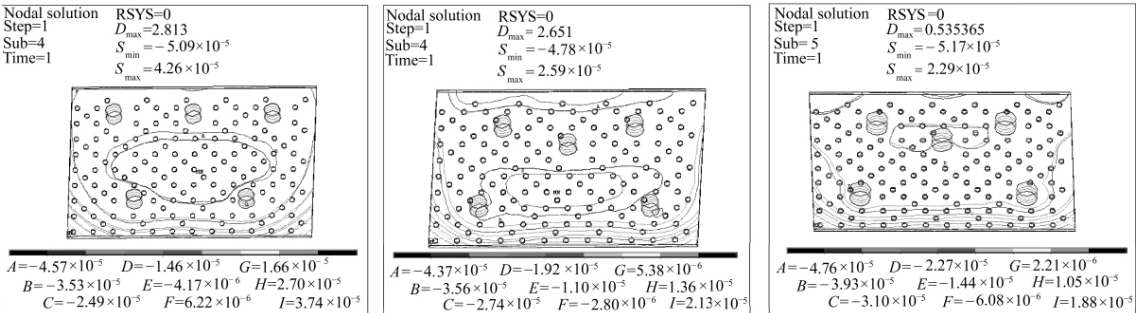


图 10 浮动瓦块的 Z 向位移等值线(单位:m)

Fig. 10 Displacement in Z directional of the float-wall(unit:m)

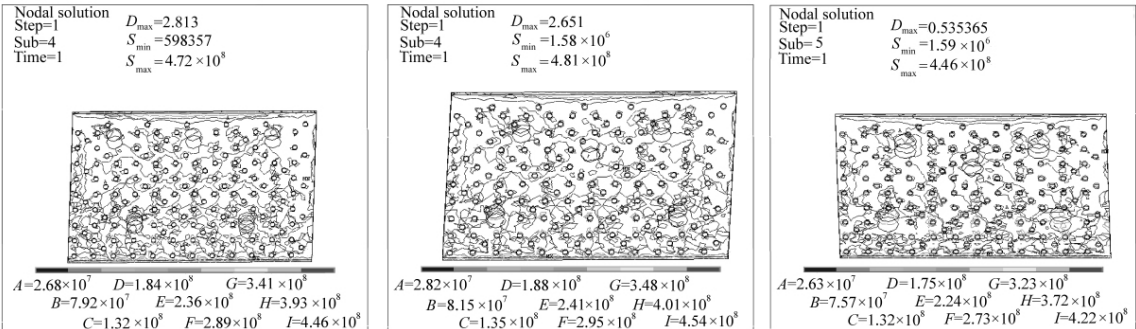


图 11 浮动瓦块的 Mises 应力等值线(单位:Pa)

Fig. 11 Stress contours of the float-wall(unit:Pa)

4 结 论

本文将遗传算法和“穷举搜索法”相结合,采用二步递进策略对浮动瓦块进行了热-结构耦合优化分析,得到了结构性能更优的瓦块结构,结果表明:

1) 将基于精英保留自适应遗传算法和“穷举搜索法”相结合,可以有效地对连续变量和离散变量进行优化,实现浮动瓦块结构中螺栓杆位置的拓扑结构优化和瓦块厚度、螺栓杆直径的几何尺寸优化.

2) 通过本文的优化工作,得到了性能更优的瓦块结构,使其最大应力比降低了 22.77%,表明本文遗传算法和“穷举搜索法”相结合的优化方法对浮动瓦块结构的优化设计是有效的.

3) 浮动瓦块结构中,在螺栓杆直径不变时,随着瓦块厚度的增大适应度先增加后减小;在瓦块厚度不变时,随着螺栓杆直径的增加对瓦块适应度值的影响规律不明显,但螺栓杆直径越大,瓦块厚度变化对瓦块适应度值的影响曲线越平缓.

参考文献:

- [1] 梁春华. 现代典型军民用涡扇发动机的先进技术[J]. 航空科学技术, 2004, 90(2): 20-24.
LIANG Chunhua. Modern typical military and civilian use advanced technology of turbofan engine[J]. Aviation Science and Technology, 2004, 90(2): 20-24. (in Chinese)
- [2] 赵清杰, 李彬. 浮动瓦块冷却结构在燃烧室中的应用和发展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2001, 14(1): 10-13.
ZHAO Qingjie, LI Bin. Application and development of floating panel cooling structure in combustors[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2001, 14(1): 10-13. (in Chinese)
- [3] Andrews G E, Khalifa I M, Asere A A, et al. Full coverage effusion film cooling with inclined holes[R]. ASME GT95-274, 1995.
- [4] Cho H H, Rhee D H, Goldstein R J. Effect of hole arrangements on local heat/mass transfer for impingement/effusion cooling with small hole spacing[R]. ASME GT2004-53685, 2004.
- [5] Rhee D H, Choi J H, Cho H H. Flow and heat (mass) transfer characteristics in an impingement/effusion cooling system with crossflow[R]. ASME GT2002-30474, 2002.
- [6] 林宇震, 俞文利, 刘高恩, 等. 冲击加发散双层壁冷却方式压降分配对斜孔内对流换热影响的研究[J]. 航空学报, 2003, 24(2): 97-101.
LIN Yuzhen, YU Wenli, LIU Gaoen, et al. Influence of pressure drop distribution on the convection heat transfer inside the inclined hole of impingement/effusion cooling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(2): 97-101. (in Chinese)
- [7] 许全宏, 林宇震, 刘高恩. 冲击/发散复合冷却方式发散壁换热系数研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): 213-218.
XU Quanhong, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Study of the effusion wall film heat transfer coefficients of impingement/effusion double wall cooling method[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 213-218. (in Chinese)
- [8] 陈焱, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 致密微孔壁绝热冷却效果研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(增刊 2): 25-28.
CHEN Yan, JI Honghu, HU Yaping, et al. Investigation of adiabatic cooling effectiveness of an effusion cooled plate[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(Suppl 2): 25-28. (in Chinese)
- [9] 宋双文, 杨卫华, 胡好生, 等. 冲击+逆向对流+气膜冷却传热特性的研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1418-1421.
SONG Shuangwen, YANG Weihua, HU Haosheng, et al. Experimental study of the heat transfer characteristics of combined cooling of impingement+reversed[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9): 1418-1421. (in Chinese)
- [10] 唐庆如. 冲击加多斜孔双层壁对流与冲击换热优化研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 375-379.
TANG Qingru. A study of optimization of convection and heat transfer of impingement/effusion double wall[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 375-379. (in Chinese)
- [11] 李彬, 吉洪湖, 江义军. 冲击-发散冷却火焰筒浮动瓦片三维壁温计算分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 370-374.
LI Bin, JI Honghu, JIANG Yijun. Numerical analysis of 3D temperature field of an impingement-effusion cooled flame tube floating tile[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 370-374. (in Chinese)
- [12] 李彬. 冲击-致密微孔浮动壁火焰筒冷却研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
LI Bin. Investigation of impingement/effusion float-wall cooling of fame tube[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [13] 张宏建. 燃烧室浮动壁结构优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
ZHANG Hongjian. Structure optimization method of the float-tile[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [14] 石炜. 模糊遗传算法-有限元与浮动壁结构优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
SHI Wei. FGA-FEM method and structure optimization of float-wall in combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [15] 孙明华, 崔海涛, 温卫东. 基于精英保留遗传算法的连续结构多约束拓扑优化[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 732-737.
SUN Minghua, CUI Haitao, WEN Weidong. Topology optimization of continuum structure under multiple onstraints using genetic algorithm with elitist strategy[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 732-737. (in Chinese)
- [16] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2911-2916.
GE Jike, QIU Yuhui, WU Chunming, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(10): 2911-2916. (in Chinese)