

涡轮盘优化设计中的热边界载荷控制效果研究

丁水汀, 孙贺兴, 李 果

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力国家级重点实验室
适航技术研究中心, 北京 100191)

摘 要: 针对航空发动机涡轮盘结构优化设计,在等热负荷及等冷能耗量前提下,采用热边界载荷控制构建轮盘上有利的温度分布,以 ISIGHT 软件为基础搭建的集建模-CFD 分析-FE(有限元)分析-优化设计在同一流程下的多学科优化设计平台为工具,研究热边界载荷优化在涡轮盘优化设计中的应用效果.结果表明:热边界载荷的优化可以实现质量减轻和应力水平同时下降的目的,下降水平决定于热边界载荷分配系数,当热边界载荷分配系数取 0.1 和 0.2 时,盘心最大等效应力下降值分别为 5.93% 和 12.01%,质量下降值分别为 1.25% 和 2.24%.

关 键 词: 涡轮盘; 结构优化设计; 热边界载荷; ISIGHT 软件平台; 应力水平

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Control effect study on thermal boundary loading in optimization design of turbine disk

DING Shui-ting, SUN He-xing, LI Guo

(Airworthiness Technologies Research Center,
National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: For the optimization design of aeroengine turbine disk structure, the reasonable temperature and stress distribution was obtained by changing the thermal boundary loading coefficients of rim and hub under the constant heating and cooling condition. An optimization design process including modeling, CFD analysis, FE (finite element analysis) was developed based on ISIGHT software which is used to solve fluid-heat-structure coupling problems and the effect of optimization design of turbine disk structure imposed on thermal boundary loading was explored. Result shows that the optimization result varies from the different thermal boundary loading coefficients. The maximum equivalent stress of disk hub decreases 5.93% and 12.01% respectively, the mass of disk decreases 1.25% and 2.24% respectively when the thermal boundary loading coefficients of 0.1 and 0.2.

Key words: turbine disk; optimization design; thermal boundary loading;
ISIGHT software; stress level

对轮盘上能量主动组织和管理可以重构部分区域的温度梯度,从而控制轮盘的应力水平并实现最大应力水平的下降,这对挖掘冷却技术的潜

力和提高轮盘的安全性有很大的意义^[1-2]. 基于这种思想,美国和欧洲都开展了积极探索:法国赛峰集团主要是改变盘腔结构,将轮盘内缘改为凹形

收稿日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51306008)

作者简介: 丁水汀(1967—),男,辽宁铁岭人,教授、博士生导师,博士,主要从事动力机械及工程热物理方面的研究.

结构、锯齿状或在内缘处增加孔板;美国主要是改变轮盘结构,提出了双辐板结构^[3-4]。无论哪种方案,都是通过热边界载荷控制以达到减轻质量和减小应力水平的目的。在我国,也出现了针对双辐板涡轮盘结构^[5-7]和内嵌热管的涡轮盘结构^[8]的热边界载荷理论的研究。从数值模拟和实验研究揭示了轮盘等效应力和热边界载荷分配系数的关系^[9-10]。丁水汀等^[10]针对稳态条件下的等厚度轮盘,采用理论分析方法建立了轮盘内、外缘加热能量与盘上温度分布和应力分布的关联,后来又进一步推出了变厚度轮盘应力与能量分布的相关公式^[11]。并不是热边界载荷控制都能达到减轻质量和减小应力水平的目的,热边界载荷分配系数有一定的适用范围,丁水汀等^[12]又根据等厚度轮盘最大等效应力的位置将内、外缘加热量组合分为4个区域。虽然“热边界载荷控制”思想的理论研究取得了一定的进展,但将这种思想应用于轮盘的优化设计中的研究还没展开。

本文正是在热边界载荷控制已取得的理论研

究的基础上,探索其在变厚度盘结构优化设计中的应用效果。由于涡轮盘优化设计中涉及流热固耦合问题,国内已有的研究中多为建立工作流程和设计框架^[13-15],缺乏解决这类问题的通用方法。本文基于 ISIGHT 软件平台,将参数化建模-CFD 分析-FE(finite element)分析串联在一起,将优化流程通用化。进一步通过改变盘心和盘缘的热边界载荷分配系数,研究热边界载荷控制在简单变厚度盘轮廓线优化设计的效果。

1 热边界载荷控制的作用机理

1.1 简单轮盘及变厚度轮盘在不同热边界载荷下的温度、应力分布

丁水汀等在其研究中针对稳态下的等厚度的旋转自由盘,给定轮盘内、外缘的边界热流量及轮盘侧面与盘腔冷气的第3类边界条件,获得了轮盘内、外缘边界热流量与盘上温度分布、应力分布的关联方程,其中 von-Mises 等效应力方程式如下所示^[9]:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{r-total} &= \underbrace{\left[\frac{3+\mu}{8} \rho \omega^2 \left(r_e^2 + r_i^2 - \frac{r_e^2 r_i^2}{r^2} - r^2 \right) \right]}_{\text{Centrifugal}} + \underbrace{\frac{E\alpha}{r^2} \left\{ C_1 \left[\frac{r I_1(r)}{W^2} - \frac{r_i I_1(r_i)}{W^2} \right] \right\}}_{\text{Thermal}} + \\ &\quad \underbrace{\frac{E\alpha}{r^2} \left\{ C_2 \left[\frac{-r K_1(r)}{W^2} + \frac{r_i K_1(r_i)}{W^2} \right] + \frac{1}{2} t_l (r^2 - r_i^2) \right\}}_{\text{Thermal}} + \underbrace{\frac{E\alpha}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) C_3}_{\text{Thermal}} \\ \sigma_{\theta-total} &= \underbrace{\left[\frac{3+\mu}{8} \rho \omega^2 \left(r_e^2 + r_i^2 + \frac{r_e^2 r_i^2}{r^2} - \frac{1+3\mu}{3+\mu} r^2 \right) \right]}_{\text{Centrifugal}} + \underbrace{\frac{E\alpha}{r^2} \left\{ C_1 \left[\frac{r I_1(r)}{W^2} - \frac{r_i I_1(r_i)}{W^2} \right] \right\}}_{\text{Thermal}} + \\ &\quad \underbrace{\frac{E\alpha}{r^2} \left\{ C_2 \left[\frac{-r K_1(r)}{W^2} + \frac{r_i K_1(r_i)}{W^2} \right] + \frac{1}{2} t_l (r^2 - r_i^2) \right\}}_{\text{Thermal}} - \\ &\quad \underbrace{E\alpha \left[C_1 I_0(Wr) + C_2 K_0(Wr) + t_l \right]}_{\text{Thermal}} + \underbrace{\frac{E\alpha}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) C_3}_{\text{Thermal}} \end{aligned} \right.$$

其中 $I_0(Wr)$ 与 $K_0(Wr)$ 为 0 阶贝塞尔函数, C_1 , C_2 为与 Q_e 和 Q_i 有关的待定系数, $\sigma_{r-total}$ 为总径向应力, $\sigma_{\theta-total}$ 为总周向应力。

在此基础上,丁水汀等又将变厚度盘看成由 n 段等厚度盘组成,交界面上传热量相同、力平衡和周向位移连续得到了变厚度盘内、外缘边界热流量与盘上温度分布、应力分布的关联方程^[11]。这为将热边界载荷控制思想应用到轮盘设计中提供了理论基础。

1.2 热边界载荷控制在应用中的限制因素

在轮盘的设计过程中,轮盘上最大等效应力的大小和位置是一个重点考虑的因素。稳态、定转速

条件下的简单等厚度轮盘,盘心和盘缘的热载荷分配系数决定了轮盘的温度分布和应力分布。李焯根据最大等效应力的大小和出现的位置,将轮盘内外缘热载荷的组合分配为4个区域,分区图如图1所示,图中 Q_e 表示盘缘加热量,状态1区域等效应力的最大值出现在轮盘内缘,也是本文研究所在的区域^[12]。虽然等厚度盘的分区图与变厚度盘的分区图存在一定差异,但也为本文热边界载荷分配系数 φ (轮盘盘心加热热流 q_i 与盘缘加热热流 q_e 的比值) 的选择提供了理论参考。本文研究的前提是为保证本文研究所选的区域在状态1范围内,最终确定优化设计中的 φ 取 0, 0.1 和 0.2 三种情况。

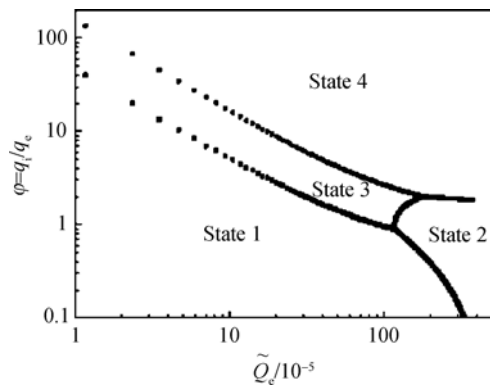


图 1 轮盘承受热边界载荷时的应力分区图

Fig. 1 Zones of stress states of disk imposed on thermal boundary loadings

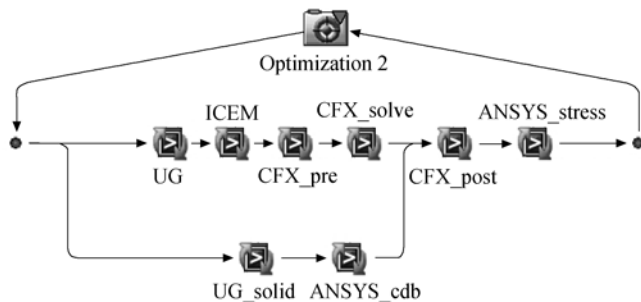
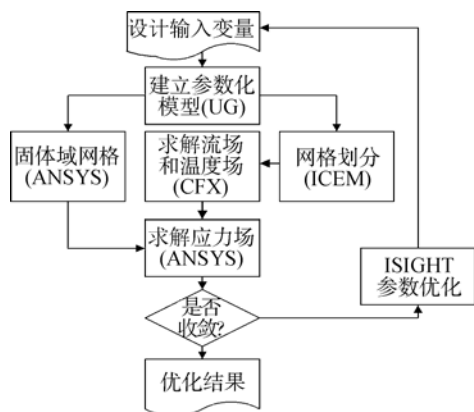


图 2 优化流程图

Fig. 2 Procedure of the optimization

3 热载荷在结构设计中的应用

3.1 计算模型

计算模型采用图 3 所示的简化的空心变厚度轮盘, 转速 ω 为 628 rad/s, 盘心和盘缘给定不同

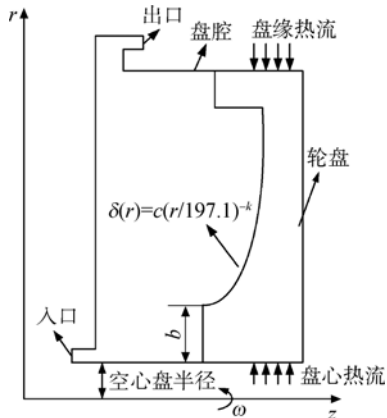


图 3 变厚度旋转盘腔的模型示意图

Fig. 3 Model of variable thickness rotating cavity and disk

2 多学科优化设计平台的搭建

本文基于 ISIGHT 软件平台, 利用其自身的软件二次开发接口, 将 UG 建模-CFD 分析-FE 分析-优化模块集成在一起完成优化设计工作. 图 2 给出了优化流程图和在 ISIGHT 平台中各软件间的具体连接图. 为实现参数化优化过程, 建模、画网格和 CFD 分析都使用了软件的录制功能, ISIGHT 与所用软件连接均通过批处理命令来完成. 实验分析 (DOE) 过程与优化过程流程一样, 前者只需将 optimization 2 组件换为 DOE 组件即可.

比例的加热热流, 冷却气体从入口进入, 经盘腔冷却辐板后再从出口流出, 辐板曲线采用幂函数形式, 曲线表达式为 $\delta(r)=c(r/197.1)^{-k}$, 其中 r 为距旋转轴的距离, 下缘板厚度 b 表示. 考虑到旋转轮盘的对称性, 为简化计算, 取模型的 1/60 进行优化计算, 切面采用旋转对称边界条件.

此外, 轮盘材料采用合金钢, 本文重点研究热边界载荷条件下涡轮盘的优化方法, 故暂不考虑材料属性随温度的变化, 有关温度的变化影响将在之后的分析中加以分析. 本文中所用的材料物理参数如表 1 所示, 表中 α , λ , E , μ , ρ 和 c_p 分别表示线膨胀系数、导热系数、弹性模量、泊松比、密度

表 1 轮盘材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of disk material

参数	数值	参数	数值
$\alpha/10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	14.7	μ	0.3
$\lambda/(\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}))$	47	$\rho/(\text{kg}/\text{mm}^3)$	7840
$E/10^5 \text{ MPa}$	1.54	$c_p/(\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$	470

和比定压热容。

3.2 边界条件的确定

对 CFD 分析网格划分采用 ICEM 软件来完成。由于优化过程无法像单步计算那样对模型进行细致的分网,故计算模型用适应性较好的非结构化四面体网格划分,并对流体域在流固交界面的近壁区域进行适当的加密处理以保证计算的准确性。用软件自带的录制功能记录分网过程代码。流场和温度场的计算用 CFX 软件完成,湍流模型选用 K-Omega 模型,收敛标准为全场最大残差小于 10^{-5} 。CFX 自带的 Session 命令记录操作过程,记录文件用于完成自动优化。在流场计算过程中的计算边界条件如表 2 所示。为研究不同热边界载荷分配系数对轮盘轮廓线设计的影响,本文分别计算了盘心和盘缘加热量分配比例不同的 3 种情况,如表 3 所示。其中 Q_e 和 q_e 分别为盘缘加热量和盘缘加热热流, Q 和 q_i 分别为盘心加热量和盘心加热热流。

表 2 模型的计算边界条件

Table 2 Computational boundary condition of model

计算边界条件	数值或说明
进口气体流量/(kg/s)	0.0135
进口气体温度/K	300
轮盘转速/(rad/s)	628
出口气体压力	标准大气压
盘腔及轮盘对称面处理	绝热,无滑移

表 3 盘心加热量占总加热量的比例

Table 3 Ratio of heating energy of disk hub

φ	Q_e/W	$q_e/(W/m^2)$	Q/W	$q_i/(W/m^2)$
0	600	19084.08	0	0
0.1	540	17175.67	60	8266.97
0.2	480	15267.27	120	16533.95

3.3 优化设计变量和约束条件的确定

本文主要为得到辐板曲线的最优形式,设计变量只有曲线表达式 $\delta(r) = c(r/197.1)^{-k}$ 中的参数 c , k 和随曲线变化而变化的 b 。设计变量的个数决定着优化的复杂程度,为简化计算,固定曲线与盘外缘的连接点,得到变量 c 和 k 间的关系。考虑参数间的相关性,本着变量最少的原则,实际优化过程中设计变量只取 k 一个。设计过程中,轮盘的

最大等效应力不得超过材料的许用应力,本文所选的约束条件为全盘的最大等效应力 $\sigma_{\max}$ 。

3.4 优化设计策略的确定

为了探索热边界载荷控制对轮盘设计的影响,本文将盘心加热后的优化结果和盘心没有加热的优化结果进行对比,分别计算了 $\varphi=0, 0.1$ 和 0.2 三种情况的优化结果。优化过程所选的约束条件为全盘的最大等效应力,选用 $\varphi=0$ 时的最小值作为约束值。优化过程分两部分完成,实验设计(DOE)和全局优化。DOE 分析是计算 $\varphi=0$ 条件下,通过改变 k 的值获得轮盘盘心的最大等效应力的值,确定其中的最小的值作为下一步全局优化的约束值。全局优化是分别计算盘心和盘缘加热量不同情况下轮盘的优化结果,并由此来判断热边界载荷效应对轮盘设计的影响。全局优化采用遗传算法,这主要是因为它具有更好的全局寻优能力,避免落入局部最优解^[16-17]。

3.5 设计空间的确定

本文的设计变量只有变量 k ,其设计空间主要有轮盘的几何结构确定。由于辐板曲的径向线长度不能超过轮盘的内、外缘,确定 k 的大致取值范围到 $0.75 < k < 100$ 。在计算过程中发现,当 $k > 2.3$ 时,辐板曲线上的强度差较大,不符合等强度设计原则^[7],从而将 k 的设计空间缩小到 $0.75 < k < 2.35$ 。

4 结果及分析

4.1 DOE 分析

DOE 分析的目的主要是确定约束变量全盘最大等效应力的值。DOE 算法选用全因子设计,给定变量 k 的值为从 $0.8 \sim 2.3$ 间所有小数点后两位的值,其计算过程图如图 4 所示。纵坐标是全盘的最大等效应力。由于 DOE 分析过程中所给 k 的范围是从 $0.8 \sim 2.3$ 顺序增大的,从图 4 可以看出,随着 k 值得增大,全盘最大等效应力 $\sigma_{\max}$ 的值经历了先减小后增大的过程,最小值为 85.86 MPa,且在 $k=1.27$ 时取得,故确定约束变量全盘最大等效应力的值为 85.86 MPa。

4.2 轮盘结构

全局优化过程中分别计算了 3 种热边界载荷分配系数不同情况下的优化结果。优化过程中的目标函数为轮盘体积 V 和盘心处的最大等效应力 $\sigma_{\max}$ 。图 5 为 $\sigma_{\max}$ 的收敛历史图。从图 5 可以看出,3 种热边界载荷分配系数不同情况下轮盘盘

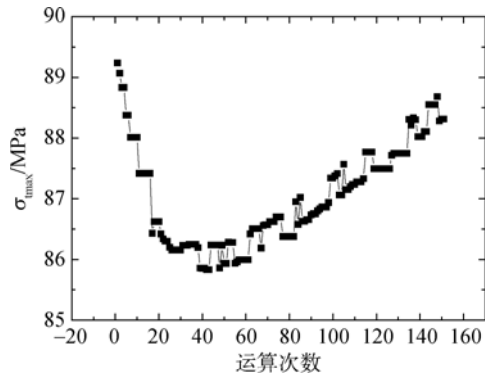


图 4 DOE 计算过程图

Fig. 4 Calculation procedure of DOE

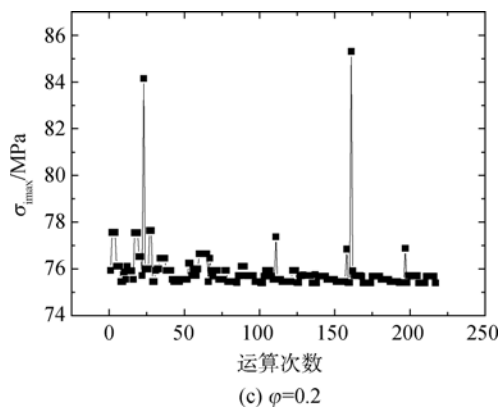
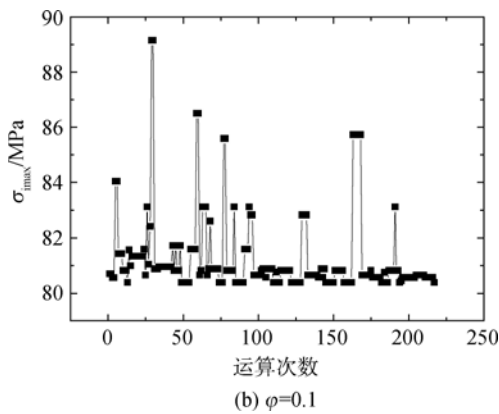
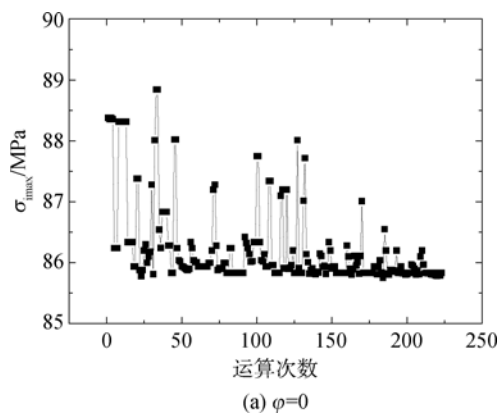


图 5 盘心最大等效应力收敛历史图

Fig. 5 Convergence history of $\sigma_{\max}$

心最大等效应力经过了 225 次迭代过程都达到了收敛效果. 为缩短优化时间, CFX 分析中将第 1 次的收敛结果作为计算过程的初始值, 最终 3 种工况条件下的优化时间都在 32 h 左右.

表 4 给出了热边界载荷分配系数不同情况下变量 b , c 和 k 的优化值. 从表中的数据可以看出, 在模型初始变量尺寸相同、盘心和盘缘的总加热量相同时, 盘心加热量占总加热量的比值不同, 设计变量的最佳优化尺寸也不相同, 且也不同于 $\varphi=0$ 时的尺寸. 这说明轮盘的热边界载荷控制对轮盘轮廓线的设计有一定的影响.

表 4 设计变量的优化结果

Table 4 Optimization results of design variables

φ	设计变量		
	b/mm	c	k
0	36.4	4.81	1.27
0.1	30.6	4.88	1.19
0.2	27.5	4.93	1.13

图 6 为 φ 值不同时轮盘优化后辐板的外形的轮廓图, r 为距旋转轴的距离, δ 为辐板的厚度. 图 6 中可以更加直观的看出, φ 值不同, 优化后的辐板曲线段的形状不同, 且 φ 值越大, 辐板曲线段的厚度越小. 从而说明热边界载荷分配系数会对轮盘优化后的体积有一定影响. 忽略材料密度的影响, 热边界载荷分配系数会对轮盘优化后的质量有一定影响.

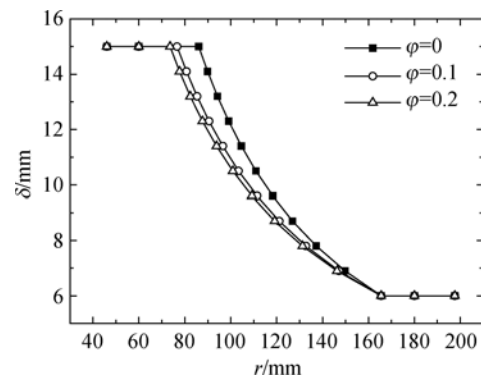


图 6 优化后的轮廓图

Fig. 6 Optimization results of profiles

4.3 温度及应力分布

图 7 和图 8 分别给出了盘心和盘缘热边界载荷分配系数不同情况下, 整个轮盘上的温度分布规律图和温度分布云图, 图中 MX 表示最大值,

MN 表示最小值. 由两图可知, 由于盘心和盘缘加热总量一定, 当 $\varphi=0$ 时, 热量全部加在盘缘, 盘心加热量为零, 轮盘温度由盘缘到盘心逐渐降低. 当 $\varphi>0$ 时, 由于盘心和盘缘同时加热, 轮盘温度出现两端温度高、中间温度低的规律, 又由于本文所选的盘心加热量占盘缘加热量的比值较小, 故盘心温度明显低于盘缘温度. 且 φ 值越大, 盘心加热量的占加总加热量的比值越高, 故盘心温度越高, 盘缘温度越低, 对轮盘上热应力和等效应力的影响也就越大. 由于盘腔内冷却气体的存在, 靠近盘腔一侧的温度比轮盘对称面一侧的温度略低.

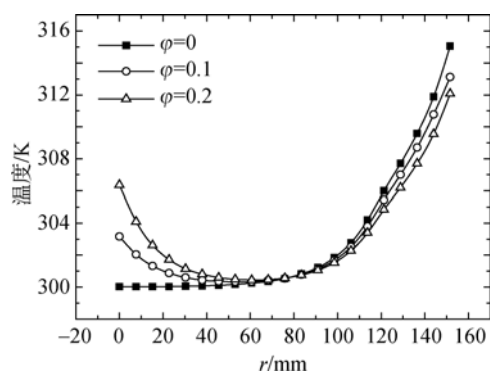


图7 热边界载荷分配系数不同情况下温度分布图
Fig. 7 Temperature distribution of different thermal boundary loading coefficients

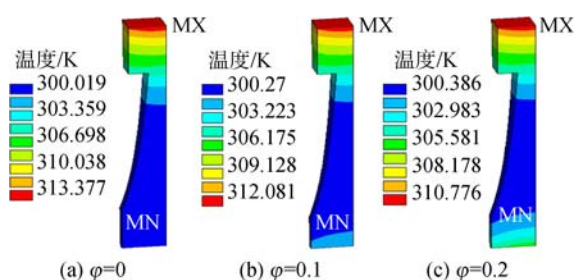


图8 热边界载荷分配系数不同情况下温度云图
Fig. 8 Temperature contours of different thermal boundary loading coefficients

图9和图10分别给出了热边界载荷分配系数不同的情况下, 轮盘盘心的最大等效应力分布规律图和分布云图. 由两图可知, 当 $\varphi=0$ 时, 轮盘的等效应力 (σ_{von}) 经历了由盘心到盘缘先减小后增大的过程. 盘心离心应力占主要作用, 等效应力最大. 盘缘热应力占主要作用, 等效应力有一定程度的增加. 当 $\varphi>0$ 时, 由于热应力的影响, 盘心和盘缘的等效应力都有不同程度的下降, 整个轮盘的应力梯度更小. φ 值越大时, 盘心和盘缘等效应力下降的更多, 应力分布越缓和. 由于温度场的作

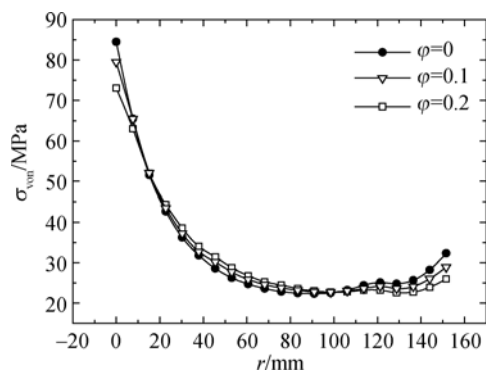


图9 热边界载荷分配系数不同情况下等效应力分布图
Fig. 9 Equivalent stress distribution of different thermal boundary loading coefficients

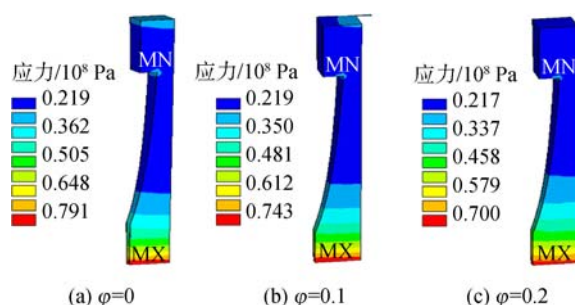


图10 热边界载荷分配系数不同情况下等效应力云图
Fig. 10 Equivalent stress contours of different thermal boundary loading coefficients

用结果, 轮盘靠近盘腔一侧的等效应力比靠近对称面一侧的等效应力略低.

表5给出了轮盘在3种热边界载荷分配系数不同情况下轮盘盘心最大等效应力和轮盘体积的优化结果.

表5 轮盘体积和盘心最大等效应力的优化结果

Table 5 Optimization results of volume of disk and the maximum equivalent stress of disk hub

参数	热边界载荷分配系数		
	$\varphi=0$	$\varphi=0.1$	$\varphi=0.2$
$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	85.86	80.76	75.55
V/mm^3	21120	20856	20647

表6给出了 $\varphi=0.1$ 和 $\varphi=0.2$ 情况下轮盘盘心最大等效应力和轮盘体积的优化结果与 $\varphi=0$ 时优化结果相比值下降的百分比. 由表6可知, 当 $\varphi=0.1$ 时, 盘心最大等效应力和轮盘体积值下降的百分比分别为 5.93% 和 1.25%; 当 $\varphi=0.2$ 时, 盘心最大等效应力和轮盘体积值下降的百分比分别为 12.01% 和 2.24%. 即在一定范围内, 增大盘心的加热热量所占的百分比可使轮盘盘心的最大

等效应力和轮盘体积值同时减小,且盘心加热热量的百分比越大,下降值越大。

表 6 优化前后轮盘体积和盘心最大等效应力变化

Table 6 Variation of volume of disk and maximum equivalent stress of disk hub comparison with and without optimization

参数	热载荷分配系数	
	$\varphi=0.1$	$\varphi=0.2$
$\sigma_{\max}$ 下降的百分比/%	5.93	12.01
V 下降的百分比/%	1.25	2.24

5 结 论

1) 本文基于 ISIGHT 软件平台,针对涡轮盘优化过程中涉及的流热固耦合问题,提出了一种简单通用的优化方法,并用此方法完成了不同热边界载荷分配系数情况下的简单变厚度轮盘轮廓线的优化工作。

2) 本文分别计算了 φ 值为 0, 0.1 和 0.2 三种不同情况下的优化结果。结果表明:采用不同热边界载荷分配系数的优化设计,轮盘的优化结果不同;和 $\varphi=0$ 时的优化结果相比,当 $\varphi=0.1$ 和 $\varphi=0.2$ 时,轮盘盘心最大等效应力下降幅度分别为 5.93% 和 12.01%。轮盘体积即轮盘质量下降幅度分别为 1.25% 和 2.24%。

参考文献:

- [1] 付德斌,丁水汀,陶智,等.一种基于热管理的热端部件轻量化研究[J].航空动力学报,2011,26(4):814-821.
FU Debin, DING Shuiting, TAO Zhi, et al. Study on heated components mass reduction based on thermal management [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 814-821. (in Chinese)
- [2] 李果.航空发动机热端部件的主动热应力控制机理研究[D].北京:北京航空航天大学,2012.
LI Guo. Study on an active control thermal stresses method in heated components of aero-engine[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [3] Hallinger C C, Kervistin R. System for controlling heat expansion and thermal stress in a gas turbine disk; US, 4741153[P]. 1988-05-03.
- [4] Harding B R, Curtiss D H. Contoured disk bore; US, 7241111[P]. 2003-07-28.
- [5] 陆山,赵磊.双辐板涡轮盘/榫结构优化设计方法[J].航空动力学报,2014,29(4):875-880.
LU Shan, ZHAO Lei. Structural optimization design method of twin-web turbine disk with tenon[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 875-880. (in Chinese)
- [6] 董少静,申秀丽,唐滨鹏,等.高推质比双辐板涡轮盘结构研究及光弹试验验证[J].航空动力学报,2015,30(1):114-120.
DONG Shaojing, SHEN Xiuli, TANG Binpeng, et al. Structure research and photoelastic test verification of twin-web turbine disk with high thrust-weight ratio[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 114-120. (in Chinese)
- [7] 陆山,李伦未.航空发动机高负荷涡轮盘双辐板结构优化设计[J].推进技术,2011,32(5):631-636.
LU Shan, LI Lunwei. Twin-web structure optimization design for heavy duty turbine disk based for aero-engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(5): 631-636. (in Chinese)
- [8] DING Shuiting, LUO Bin. Control of stress in aeroengine turbine disk using radially rotating heat pipe[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2014, 28(3): 1-12.
- [9] DING Shuiting, LI Guo, DENG Mingchun. Experimental study of an actively managed thermal loading method in turbine disk [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2013, 27(1): 39-49.
- [10] DING Shuiting, LI Guo, LUO Bin. Active control thermal-loading method to ameliorate stress in aeroengine turbine disk[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2013, 27(2): 274-285.
- [11] 丁水汀,王子尧,李果.变厚度涡轮盘上能量与应力分布的关联分析[J].航空动力学报,2015,30(2):341-348.
DING Shuiting, WANG Ziyao, LI Guo. Correlation analysis of energy and stress distribution on variable thickness turbine disks[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(2): 341-348. (in Chinese)
- [12] DING Shuiting, LI Ye, LI Guo. An evaluation of thermal loadings to ameliorate stress in a rotating disk[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2014, 28(4): 667-678.
- [13] 安喆,陈志英.涡轮盘片多学科优化系统设计与实现研究[J].机械制造与研究,2010,39(2):21-23.
AN Zhe, CHEN Zhiying. Research on design and realization of MDO system for turbine blade and disk[J]. Machine Building and Automation, 2010, 39(2): 21-23. (in Chinese)
- [14] 梅小宁,杨树兴.复杂系统的多学科设计优化综述[J].工程设计学报,2010,17(3):173-185.
MEI Xiaoning, YANG Shuxing. Review of multidisciplinary design optimization for complex systems[J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(3): 173-185. (in Chinese)
- [15] 张承齐,何爱杰,张卫红,等.基于 BOSS 平台的热力耦合场涡轮盘优化设计[J].燃气涡轮试验与研究,2008,21(2):53-56,43.
ZHANG Chengqi, HE Aijie, ZHANG Weihong, et al. Optimization of turbine disc in heat and strength coupling condition on BOSS platform[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(2): 53-56, 43. (in Chinese)
- [16] 巩敦卫,郝国生,周勇,等.交互式遗传算法原理及其应用[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [17] 巩敦卫,孙晓燕.协同进化遗传算法理论及应用[M].北京:机械工业出版社,2009.

(编辑:王碧琚)