

双辐板涡轮盘/榫结构优化设计方法

陆 山, 赵 磊

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 提出双辐板涡轮盘/榫三维结构优化设计方法, 包括: 以盘/榫总质量作为目标函数, 分部管理的设计参数, 盘/榫结构分部快速优化/整体精细优化策略; 基于 ANSYS 软件, 建立了双辐板涡轮盘/榫结构优化设计平台。针对某高压涡轮转子, 设计了两种双辐板涡轮盘/榫模型, 分析了盘缘喉部半径、盘缘厚度参数对盘/榫危险区应力的影响。优化结果表明: 双辐板涡轮盘比单辐板涡轮盘应力分布更加均匀; 在满足结构强度约束条件下, 两种双辐板涡轮盘分别比单辐板涡轮盘减质 19.90% 和 17.35%; 对双辐板涡轮盘/榫模型进行优化, 采用该优化设计方法的计算时间仅为采用常规三维优化方法的 1/3, 表明其优化设计方法的合理性及高效性。

关 键 词: 双辐板涡轮盘; 盘/榫结构; 三维结构优化设计; 减质; 优化策略; 参数化建模

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

Structural optimization design method of twin-web turbine disk with tenon

LU Shan, ZHAO Lei

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A 3-D structural optimization design method for twin-web turbine disk with tenon was presented, covering strategies of partial speedy optimization/totally-subtle optimization for disk and tenon structure with total mass of disk with tenon as the objective function and the partial management of design parameters. The structural optimization design platform for twin-web turbine disk with tenon was established based on software of ANSYS. Two models of twin-web turbine disk with tenon were designed for a high-pressure turbine rotor. And the influence of basic parameters, such as radius of disk outside edge neck, thickness of disk outside edge, on the stresses of several critical points of disk with tenon was studied. According to the optimization results, the method presented is proved feasible, as the distribution of stress in twin-web turbine disks is more uniform than that in single-web turbine disk; the masses of two models of twin-web turbine disk are 19.90% and 17.35% lighter than that of the single-web turbine disk model under the condition of meeting structure strength criterions, while the calculational time for optimizing the twin-web turbine disk with tenon model by the method presented is just 1/3 of that by the conventional 3-D optimization method. It is demonstrated that the method presented is reasonable and highly efficient.

Key words: twin-web turbine disk; structure of disk with tenon;
3-D structure optimization design; mass decrease;
optimization strategy; parameterization modeling

收稿日期: 2013-01-18

作者简介: 陆山(1955—), 男, 浙江吴兴人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事发动机零件强度、寿命及可靠性数值分析方法及试验评估技术研究。

随着航空发动机推质比不断提高,高压涡轮负荷越来越重,传统涡轮盘结构形式在一定程度上很难满足未来先进发动机的高推质比需求,研究和发展涡轮盘新结构及其设计方法是发动机结构设计的一个重要内容。

近年来,国内外针对双辐板涡轮盘结构进行了初步的研究.双辐板涡轮盘^[1-2]是美国综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划第3阶段所涉及的待验证的高性能涡轮技术之一,国内亦有文献^[3-5]指出:由两个零件焊接成的双辐板涡轮盘,不仅减轻了质量,而且提高了涡轮环面积乘以速度平方的值. Cairo 等^[6-7]先后讨论了该结构在涡轮盘冷却和减质方面的优点及可行性.赵熙等^[8]采用简化模型对空心涡轮盘冷却结构的进气方式进行了研究.刘超^[9]开展了双辐板涡轮盘结构的拓扑优化设计方法研究,得到子午面优化的锥形.王营等^[10]对实心涡轮盘结构的空腔设计进行了初步探讨.栾永先^[11]对双辐板涡轮盘进行了强度分析,说明了其强度和质量方面的优势,但未进行结构的优化设计.陆山和李伦未^[12]提出双辐板涡轮盘轴对称结构优化设计方法并建立了相应结构优化设计通用平台,所得双辐板涡轮盘身比单辐板涡轮盘身可减质约25%,但是盘/榫连接部位未予以考虑.陶冶和陆山^[13]提出榫连轮盘/榫分部优化设计、总体协调的单辐板涡轮盘/榫整体结构优化设计方法,在优化效率方面具有借鉴意义.盘/榫部分的结构设计优劣较大地影响涡轮盘的盘缘负荷,进而影响整个轮盘的质量;另外以往盘和榫分开的结构设计^[12-14]不能够全面反映各部位之间的整体协调关系,且很难获得真正意义上的最轻解.因此,有必要建立盘/榫一体的双辐板轮盘结构优化设计方法。

本文基于 ANSYS 平台,建立双辐板涡轮盘/榫三维结构优化设计方法及平台.为了解决三维多设计变量优化费时的问题,采用盘/榫结构分部快速优化/整体精细优化的高效优化策略.最后以某高压涡轮盘为典型算例,进行双辐板涡轮盘/榫的结构优化设计,对设计方法及平台进行验证。

1 优化设计方法

1.1 设计参数和目标函数

根据双辐板涡轮盘/榫的结构及受力特征,在图1中除了盘内径 R_{in} 、盘外缘半宽度 L_{out} 和支撑环半宽度 W_r 为给定量,不作为设计参数,其余22

个独立变量作为优化设计参数,其中 η_b 为支撑环与轮毂接触面的冷态间隙角,设计变量榫槽拉削角 θ 未在图1中示出。

目标函数为双辐板涡轮盘/榫的总质量 m_t (含支撑环)。

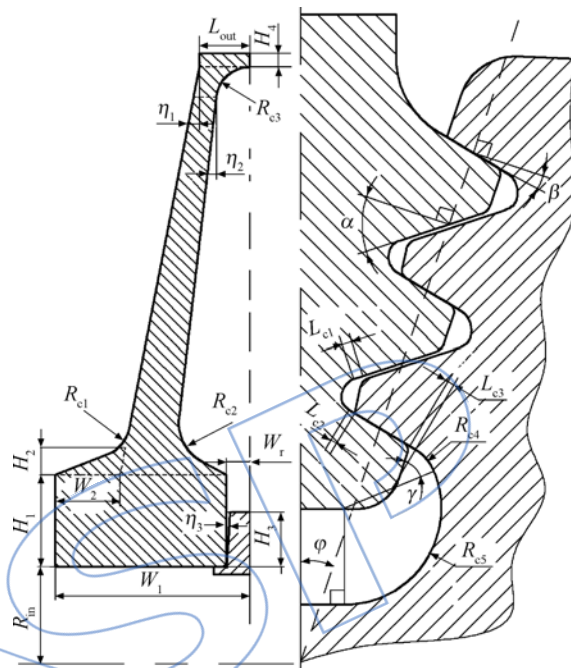


图1 双辐板涡轮盘/榫设计参数

Fig. 1 Design parameters of twin-web turbine disk with tenon

1.2 强度设计准则应力约束条件

基于榫连接体和盘身结构强度设计准则应力约束条件^[15],选定双辐板涡轮盘/榫强度标准应力安全系数下限,见表1.表中 n_b 为基于极限强度的安全系数, $n_{0.2}$ 为基于屈服强度的安全系数。

表1 双辐板涡轮盘/榫应力安全系数下限

Table 1 Low limit of stress safety factor of twin-web turbine disk with tenon

应力名称	$n_{0.2}$	n_b
榫头/榫槽最大等效应力	1.05	
辐板最大截面平均径向应力/ 轮盘子午面平均周向应力	1.33	1.67
辐板最大截面平均周向应力	1.18	
盘内径最大周向应力/等效应力	1.05	
支撑环/全盘最大等效应力	1.05/1.02	

1.3 双辐板涡轮盘/榫结构优化策略

双辐板涡轮盘/榫结构优化策略分两大部分:
①盘缘厚度的榫连接部分所有设计参数的三维扇段模型优化设计;②喉部 R_{c3} (含)以下盘身部分所有设计参数的轴对称模型优化,此时盘缘以上部分叶片和榫槽质量载荷换算成分布载荷加到槽底半径.之后重新回到三维扇段模型,采用上述两部分优化结果作为设计参数初值,缩小所有设计参数优化区间,进行总体三维精细优化及收敛性验证.如需做支撑环冷却孔细节结构设计,也在第三步中进行.本文将前两步分部优化称为分部快速优化,将第三步的优化称为总体精细优化,其框图如图2和图3所示.

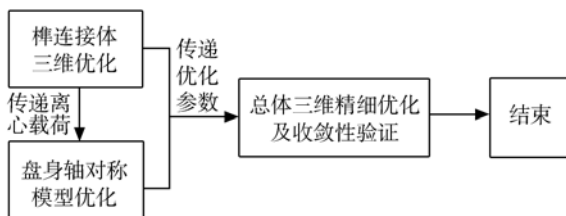


图2 双辐板涡轮盘/榫优化设计主流程图

Fig. 2 Main flowchart of optimization design for twin-web turbine disk with tenon

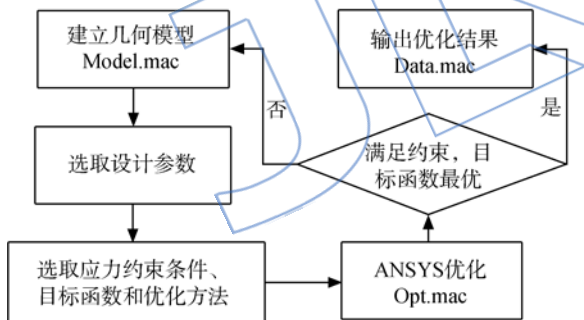


图3 分部或总体优化设计子流程图

Fig. 3 Sub-flowchart of partial or total optimization design

基于 ANSYS 软件算法处理器描述语言 (APDL) 模块,按上述优化方法建立了双辐板涡轮盘/榫结构强度优化分部快速优化/总体精细优化通用软件平台,榫连接部位可选择任意 2~5 对齿进行结构设计.

2 优化设计算例

某高压涡轮带有 52 个叶片,涡轮盘采用 1/52 三维扇段模型,空心叶片/轮盘三维实体模型见图 4. 温度场采用二次插值公式近似轮盘径向温度分

布^[15],盘心温度为 350 °C,盘外缘温度为 650 °C. 对叶片/轮盘扇段模型施加循环对称约束,轮毂外侧一点施加轴向刚体位移约束. 取设计转速为 15 720 r/min,盘内径 R_{in} 为 53.5 mm,叶根半径为 298 mm,支撑环半宽度 W_s 为 5 mm,根据叶根轴向尺寸,选取盘外缘半宽度 L_{out} 为 20 mm. 轮盘材料选用 FGH96 (参数见表 2),密度为 8 370 kg/m³,支撑环材料选用 GH4169 (屈服强度参数见文献[12]),密度为 8 240 kg/m³,叶片材料选用 DZ22 (屈服和极限强度参数见文献[13]),密度为 8 560 kg/m³.

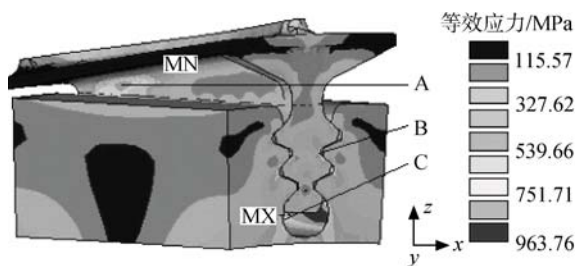
表2 FGH96 材料属性

Table 2 Material properties of FGH96

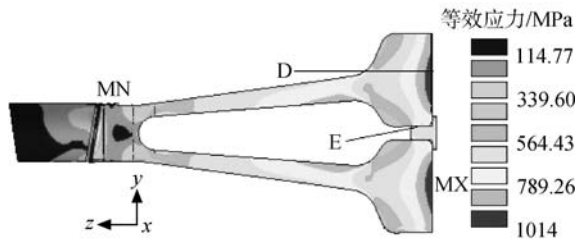
参数	数值	
温度/°C	350	600
热膨胀系数 $\alpha/10^{-6} \text{ K}^{-1}$	13.82	13.91
弹性模量 E/MPa	185	168
屈服极限强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	1071	1028
拉伸极限强度 σ_b/MPa	1465	1382

2.1 双辐板涡轮盘/榫(带支撑环)结构优化设计

基于以上高压涡轮转子,以盘心带支撑环的双辐板涡轮盘/榫模型 1 为例,探讨第 1 节中优化设计方法的应用. 经前两步分部快速优化设计后应力云图见图 4 (图中 MX 和 MN 分别代表最大



(a) 榫连接体和叶根模型



(b) 轮盘/榫/叶片一体模型

图4 分部快速优化后等效力云图和应力集中区域
Fig. 4 Contour of equivalent stress and stress focus areas after partial speedy optimization

值和最小值)。

图 4 中接触面 E 区的安全系数升高了 9.13%; 榫连接体和盘身其他设计参数变化均不超过 $\pm 1\%$ 。总体精细优化后与原模型(初值)相比, 轮盘质量减少了 10.88%。另外榫槽底部和盘心的最大等效应力安全系数已经接近下限, 说明优化后质量已接近下限, 从而说明本文盘/榫结构优化设计方法的合理性。

选出图 4 中的 4 个应力集中区(A, B, C, D 区), 以模型 1 叶片/轮盘总体优化最优解为参考点, 分析各区的最大等效应力安全系数随盘缘喉部半径 R_{c3} 和盘缘厚度 H_4 两个参数的变化趋势如图 5~图 6 所示, 其中纵坐标为各考察区最大等效应力归一化安全系数(大于 1 为安全)。同时图中还给出盘/榫质量随设计参数的变化。Limit 表示各考察区最大等效应力归一化安全系数下限

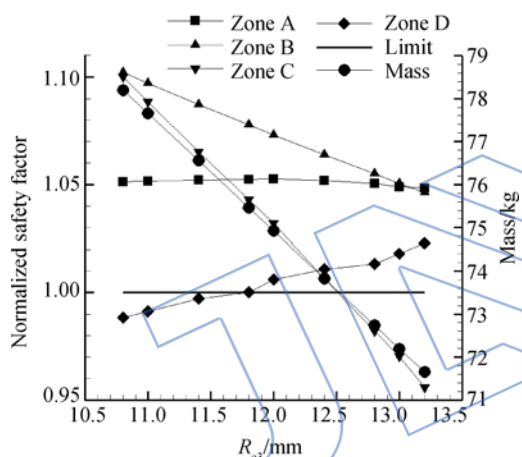


图 5 归一化安全系数与盘缘喉部半径的关系
Fig. 5 Normalized safety factor vs. radius of disk outside edge neck

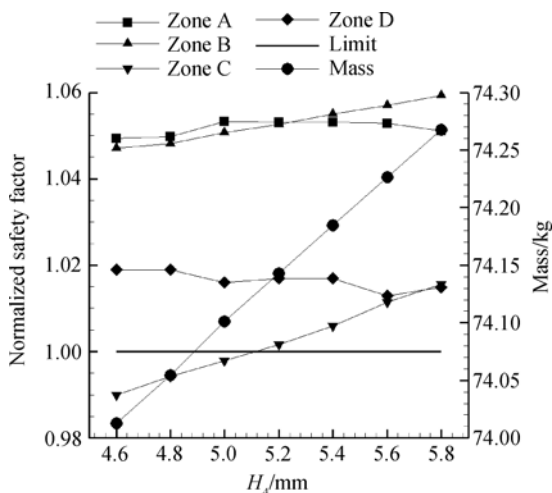


图 6 归一化安全系数与盘缘厚度的关系
Fig. 6 Normalized safety factor vs. thickness of disk outside edge

值, 其数值为 1, 在此线之上为安全。

由图 5 可以看出, 在最优解的邻域内, 盘缘喉部半径 R_{c3} 对榫头齿根倒圆 B 区、槽底倒圆 C 区和盘心 D 区的安全系数均有较明显的影响, 而对叶根缘板下倒圆 A 区的安全系数几乎没有影响。槽底倒圆 C 区的安全系数随着盘缘喉部半径的增大下降得最快, 且很快低于屈服极限; 盘/榫的质量随着盘缘喉部半径的增大也有明显的下降。原因是: 盘缘喉部半径增大, 辐板变薄, 使得榫槽底部的应力集中程度加重, 槽底安全系数减小; 盘缘喉部半径的增大使得辐板厚度减小, 减轻了盘/榫的质量, 间接地缓解了盘心的最大等效应力。对于该模型, 最佳盘缘喉部半径范围为 11.5~12.4 mm。

由图 6 可以看出, 在最优解的邻域内, 增大盘缘厚度 H_4 , 槽底倒圆 C 区的安全系数有明显的上升趋势, 而叶根缘板下倒圆 A 区、榫头齿根倒圆 B 区、盘心 D 区的安全系数变化幅度较小; 同时盘/榫的质量随着盘缘厚度的增大有所增加。因此, 增大盘缘厚度可明显缓解榫槽底部的应力集中现象, 且盘/榫的质量代价较小。对于本模型, 盘缘厚度的下限为 5 mm。

2.2 分部快速优化/总体精细优化方法的效率分析

本文尝试选用整体模型对 22 个设计参数进行常规三维优化设计, 并同时满足 11 个状态参数, 且保证盘/榫质量达到最小值, 发现其设计难度大, 优化时间长, 一旦寻优不成功, 重新调整设计变量区间, 将会浪费大量的计算时间。采用本文的盘/榫分步快速优化/总体精细优化方法耗时仅为常规三维优化方法的 1/3(见表 3)。

因此, 本文提出的双辐板涡轮盘/榫分部快速优化/总体精细优化方法, 无论是在优化时间上, 还是在逼近最优解的程度上, 都具有优势, 说明本文提出的优化方法效率高、可操作性强。

表 3 优化设计方法效率分析

Table 3 Efficiency analysis of optimization design method

	常规三维 优化方法	本文优化方法		
		榫连接 体优化	盘身 优化	总体精 细优化
变量数目/个	22	11	11	22
迭代次数/次	310	75	125	6
优化时间/h	15.5	3.75	1.04	0.3
合计优化时间/h	15.5	5.09		

2.3 三种盘/榫模型结构优化设计结果对比分析

为了验证本文优化方法的合理性,选用相同的材料和载荷条件,选定 3 对齿榫连接,对带支撑环(模型 1)和不带支撑环(模型 2)的双辐板涡轮盘/榫和单辐板涡轮盘/榫(模型 3)进行了优化设计,其等效应力见图 7~图 9。

由图 7~图 9 可以看出,涡轮盘的主传力路径总是从叶根沿着辐板传递到盘心,双辐板涡轮盘是双路径传递,榫连接部位应力集中区域靠近进气边和排气边,喉部顶端部位的应力水平较低;而单辐板涡轮盘是单路径传递,榫连接部位应力集中区靠近榫槽轴向中间部位。在轮毂区域,双辐



图 7 模型 1 的等效应力云图

Fig. 7 Contour of equivalent stress of model 1

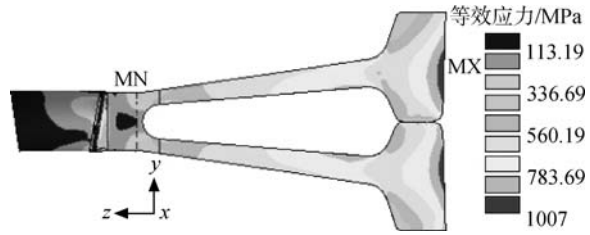


图 8 模型 2 的等效应力云图

Fig. 8 Contour of equivalent stress of model 2



图 9 模型 3 的等效应力云图

Fig. 9 Contour of equivalent stress of model 3

板盘体比单辐板盘体的应力梯度小,应力分布更均匀,材料利用率高。

由表 4 模型 1 的数据可见,总体精细优化与

表 4 双辐板涡轮盘/榫结构优化设计结果

Table 4 Structural optimization design results of twin-web turbine disk with tenon

参数	符号	区间 下限	区间 上限	初值	模型 1		模型 2	模型 3
					分部快 速优化	总体精 细优化	总体精 细优化	总体精 细优化
设计 参数	$\beta/(^{\circ})$	10	20	15	12.406	12.415	12.345	12.798
	$\alpha/(^{\circ})$	30	40	35	36.613	36.615	34.601	36.350
	$\varphi/(^{\circ})$	10	20	15	18.529	18.536	17.378	13.874
	榫连 接体 $\theta/(^{\circ})$	0	10	5	3.571	3.562	3.786	3.256
	$\gamma/(^{\circ})$	0	30	15	24.764	24.549	28.613	24.984
	L_{c3}/mm	1	4	2	2.349	2.349	2.013	1.998
	R_{c4}/mm	0.5	3	1.5	1.564	1.566	1.020	1.7283
	R_{c5}/mm	2	6	4	3.362	3.358	3.415	3.2049
	H_1/mm	20	50	35	33.042	33.053	33.340	35.010
	W_1/mm	50	100	75	72.862	72.855	75.331	67.784
盘体	H_3/mm	15	25	18	13.484	13.497		
	R_{c3}/mm	8	12	11	12.596	12.655	11.896	13.025
	H_4/mm	2	6	4	5.205	5.205	5.198	2.3426
	$\eta/(^{\circ})$	0	0.1	0.05	0.013	0.032		
	榫连 N_b			1.056	1.050	1.046	1.132	1.068
状态 参数	接体 N_c			1.043	1.014	1.008	1.007	1.030
	盘体 N_d			1.014	1.024	1.002	1.013	1.017
	N_e			0.833	1.189	1.297		
目标函数	涡轮盘 M_t/kg			83.210	74.352	74.154	76.513	92.576

注:设计参数的标注见图 1 和图 2,状态参数中 N_b 、 N_c 、 N_d 、 N_e 分别为 B、C、D、E 区最大等效应力归一化安全系数(大于 1 为安全)。

前两步分部快速优化相比,支撑环与轮毂接触面的冷态间隙角 η_b 增加了 1.46 倍。表 4 中最终轮盘优化设计结果显示,模型 1 和模型 2 质量比模型 3 分别降低了 19.90% 和 17.35%,说明了高负荷涡轮盘应用双辐板结构在减质方面的优势明显,比文献[12]的轴对称模型优化减质 25% 更接近实际。

3 结 论

1) 提出双辐板涡轮盘/榫结构优化设计方法:以盘/榫总质量作为目标函数,分部管理设计参数,盘/榫结构分部快速优化/整体精细优化策略。采用本文优化方法,典型算例优化时间仅为常规三维优化方法计算时间的 1/3,且可操作性强。

2) 对于典型高负荷涡轮转子,以静强度应力标准为设计准则,优化设计了两种双辐板涡轮盘/榫结构。通过对比分析得出以下结论:双辐板涡轮盘比单辐板涡轮盘应力分布更加均匀;两种双辐板涡轮盘比单辐板涡轮盘质量分别降低了 19.90% 和 17.35%。

3) 双辐板涡轮盘槽底应力集中区在靠近进气边和排气边两端;单辐板涡轮盘槽底应力集中区靠近榫槽中间部位。

4) 本文双辐板涡轮盘/榫三维结构优化结果比盘体轴对称优化及单独榫连接体优化结果更符合实际要求。

参考文献:

- [1] Koop W. The integrated high performance turbine engine technology (IHPTET) program[R]. ISABE 97-7175, 1997.
- [2] Ballal D R, Zelina J. Progress in aero engine technology (1939-2003)[J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(1): 43-50.
- [3] 梁春华. IHPTET 计划的最新进展[J]. 国际航空, 2004(2): 58-60.
LIANG Chunhua. Advance of IHPTET[J]. International Aviation, 2004(2): 58-60. (in Chinese)
- [4] 李兆庆. 大型军用航空发动机的先进涡轮技术[J]. 航空科学技术, 2007(4): 12-15.
LI Zhaoqing. Turbine technology of large military aircraft engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2007(4): 12-15. (in Chinese)
- [5] 胡晓煜. 美国全面实施下一代军用航空发动机技术发展计划 VAATE[J]. 国际航空, 2007(12): 40-43.
HU Xiaoyu. US'new advanced turbine engine technology development program VAATE[J]. International Aviation, 2007(12): 40-43. (in Chinese)
- [6] Cairo R R. Twin-web rotor disk: United States, US005961287A[P]. 2005-11-23.
- [7] Cairo R R, Sargent K A. Twin web disk: a step beyond convention[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(2): 298-302.
- [8] 赵熙, 徐国强, 罗翔, 等. 等重量空心盘冷气布置方案[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(5): 527-531.
ZHAO Xi, XU Guoqiang, LUO Xiang, et al. Cooling structure on double-web turbine disk with equal mass scheme [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(5): 527-531. (in Chinese)
- [9] 刘超. 涡轮盘结构拓扑与形状优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
LIU Chao. Research on structure topology and shape optimal method of turbine disk[D]. Nanjing: Nanyang University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [10] 王营, 余朝蓬. 航空发动机涡轮盘结构优化设计[J]. 机械设计与制造, 2010(5): 4-6.
WANG Ying, YU Zhaopeng. Optimization design for the turbine disk of a gas engine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(5): 4-6. (in Chinese)
- [11] 栾永先. 双辐板涡轮盘结构强度分析[J]. 航空发动机, 2012, 38(5): 38-41.
LUAN Yongxian. Structure strength analysis of dual-web turbine disk[J]. Aeroengine, 2012, 38(5): 38-41. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 陶冶, 陆山. 涡轮盘/榫整体结构优化设计方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1249-1254.
TAO Ye, LU Shan. Method of structural optimization design for turbine disk/tenon[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1249-1254. (in Chinese)
- [14] 申秀丽, 齐晓东, 王荣桥, 等. 航空发动机涡轮榫接结构齿形基本参数研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 735-744.
SHEN Xiuli, QI Xiaodong, WANG Rongqiao, et al. Research on the dentiform basic parameters of aero-engine turbine joint structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 735-744. (in Chinese)
- [15] 吕文林. 航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告): 第二册 轮盘[R]. 北京: 中国航空工业总公司发动机系统工程局, 1997.