

基于静强和寿命可靠性的双辐板 涡轮盘/榫结构优化设计方法

由 于, 陆 山

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为保证双辐板涡轮盘/榫结构疲劳寿命及可靠性, 提出基于静强和寿命可靠性的涡轮盘/榫结构优化设计方法。采用盘身轴对称模型和涡轮盘/榫三维模型交替优化策略, 进行轮盘静强结构优化。结合材料应力-寿命数据, 对满足静强准则的涡轮盘/榫结构进行考虑尺寸效应的寿命可靠性分析, 并建立各危险区域给定可靠度的峰值应力-寿命曲线。基于涡轮盘/榫静强优化设计平台, 利用给定可靠度的应力-寿命曲线数据修改结构优化单点应力标准。在保证不出现轮盘破裂的前提下, 将轮盘寿命可靠性优化的复杂过程简化为基于应力标准的寻优过程。典型例优化结果表明: 静强优化后涡轮盘/榫的寿命不能满足设计要求; 经寿命可靠性优化后, 轮盘疲劳寿命较优化前增加了 47.28%, 满足寿命可靠性设计要求; 且在轮盘静强优化质量减轻 16.66% 的基础上, 再减轻 3.43%; 该方法在保证优化精度的条件下, 可大幅提高优化效率, 且易于工程设计中应用。

关 键 词: 双辐板涡轮盘/榫; 寿命可靠性; 结构优化设计; 静强准则; 尺寸效应

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

Optimization design method for twin-web turbine disk/tenon structure based on static strength and life reliability

YOU Yu, LU Shan

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to guarantee the fatigue life reliability of twin-web turbine disk/tenon, a method of optimization design based on static strength and life reliability was put forward. With introduction of the optimization strategy of the disk's axisymmetric model and the turbine disk/tenon three-dimensional model in turn, the static strength optimization was in progress. According to the material stress-life data, the life reliability of turbine disk/tenon structure already meeting the static strength criteria was analyzed in consideration of the size effect. Stress-life curves of different zones for a given reliability were established. The point stress criterion of the static strength optimization was modified according to the stress-life curves. On the premise that the disk wasn't broken, the complex optimization process based on life reliability was simplified based on stress standard. A typical example showed that the static strength optimization result could not meet the design requirements of life reliability. Through the life reliability optimization design, the structural life was prolonged by 47.28% and met the design requirement of reliability life. And on the basis of the turbine disk/tenon mass reduction by 16.66% during the static strength optimization, the total mass reduced 3.43% in life reliability optimization again. Under the conditions of ensuring the ac-

收稿日期: 2016-01-20

作者简介: 由于(1989—), 男, 硕士生, 研究方向为航空发动机结构强度、寿命和可靠性分析。

引用格式: 由于, 陆山. 基于静强和寿命可靠性的双辐板涡轮盘/榫结构优化设计方法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1388-1393.
YOU Yu, LU Shan. Optimization design method for twin-web turbine disk/tenon structure based on static strength and life reliability[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1388-1393.

curacy of the optimization. The method can significantly improve the optimization efficiency, enabling convenient engineering applications

Key words: twin-web turbine disk/tenon; life reliability; structural optimization design; static strength criteria; size effect

近年来,大多数涡轮盘结构设计仅以静强设计准则为约束^[1-3],轮盘的疲劳寿命及可靠性大多依赖结构设计完成后验算.据统计,许多机械零件的破坏断裂事故大多是由于交变的应力应变所引起的疲劳失效所致,此时其所受的循环应力应变水平往往低于根据静强分析所得的“安全载荷”.此外,根据结构等寿命设计理论^[4],涡轮盘各个危险部位的设计寿命应尽可能接近.

随着发动机推质比的不断提高,目前,镍基合金制造的单辐板高压涡轮盘的 AN^2 (其中 A 为轮盘子午面面积, N 为轮盘转速)值已经达到极限.普惠公司在综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划第Ⅲ阶段中验证了焊接的双辐板高压涡轮盘在结构传力路线和提高 AN^2 方面比常规高压涡轮盘有明显的优势;且其较单辐板高压涡轮盘质量减轻 17%,转速提高 9%^[5-6].针对双辐板涡轮盘这一结构,国内也展开了相关的研究.王营、余朝蓬^[7]通过结构拓扑优化得到了一种空心涡轮盘,即双辐板涡轮盘;栾永先^[8]说明了双辐板涡轮盘在质量和强度方面的优势;陆山、李伦未^[9]基于静强设计准则对轴对称模型双辐板涡轮盘进行了结构优化.但有关涡轮盘寿命可靠性设计的文献和报道却很少.高阳、杨昌军、白广忱等^[10]提出涡轮盘低循环疲劳可靠性设计方法,并基于此进行涡轮盘轴对称模型关键结构几何参数的反复修改,以满足涡轮盘的寿命可靠性设计指标,优化效果好,但计算量较大.而有关双辐板盘寿命可靠性结构设计研究尚鲜见公开报道.

本文在双辐板涡轮盘/榫结构静强优化基础上,基于光滑试棒的应力-寿命曲线结合应力寿命体方法,建立涡轮盘/榫特定部位的峰值应力-概率寿命曲线,并基于此进行双辐板涡轮盘/榫结构的概率寿命设计,以期获得满足寿命可靠性要求的最轻双辐板涡轮盘/榫结构设计,且大大提高设计效率,设计方法易于工程实施.

1 涡轮盘/榫结构优化数学模型和方法

1.1 优化数学模型

1) 设计变量

如图 1 所示,盘外缘轴向半长度 L_{rim} 和盘内径 R_{in} 已知;筛选其余 24 个独立参数作为本文的设计变量.

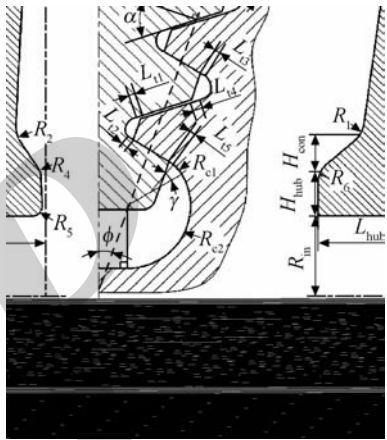


图 1 双辐板涡轮盘/榫特征参数
Fig. 1 Characteristic parameters of twin-web turbine disk/tenon

2) 状态变量

(1) 结构静强设计准则

根据涡轮盘身结构应力设计准则^[11],给出静强优化时各状态变量的约束下限值见后文双辐板涡轮盘/榫结构状态变量和目标函数优化结果中静强部分.

(2) 疲劳概率寿命设计准则

文献[11]指出:美国发动机结构完整性大纲(MILSTD1783)规定涡轮盘可靠度为 99.87%的使用寿命为 1500 个循环,而设计时应大于所给寿命的 2 倍,即 3000 个循环.

3) 目标函数

本文以涡轮盘/榫结构(不含叶片和缘板)的质量 M_t 为目标函数.

1.2 轮盘概率寿命预测方法及优化方案

1) 涡轮盘概率寿命预测方法

航空发动机轮盘作为较大尺寸构件,其工作时不同部位失效体积不同,用“寿命点方法”难以考虑失效体积的影响.文献[12]提出了考虑尺寸效应基于应力寿命模型的体方法,其主要思想是:“等应力等失效体积,则等寿命”.

取一模拟构件,将其危险部位分成 n 等分,根

据 Weibull 串联系统理论推导出每一小块体积的失效概率

$$P_f(V_i) = 1 - [1 - P_f(V_{ref})]^{V_i/V_{ref}} \quad (1)$$

其中 V_i 为构件 n 等分后每一小块的体积, V_{ref} 为标准试棒总体积(或等效参考体积), $P_f(V_{ref})$ 为标准试棒的失效概率, $P_f(V_i)$ 为构件每一小块的失效概率.

对于涡轮盘/榫任一危险区域,总可以划分为许多应力不等的小子块,如已知材料不同应力比下的应力-寿命曲线,通过式(1)关系可求得该危险区域每一小子块的失效概率,再根据串联系统理论,即可求得该危险区域的失效概率,进而求得整个涡轮盘/榫的失效概率.

2) 双辐板涡轮盘/榫结构可靠性优化设计方法

双辐板涡轮盘/榫结构优化设计方法主要分为两大部分:基于静强的结构优化设计和基于寿命可靠性的结构优化设计. 两者的主要差别在于所依据的考核点最大应力约束条件不同,而设计变量和目标函数的选取以及优化过程大致相同. 双辐板涡轮盘/榫结构优化设计方法主流程见图 2.

具体的典型优化过程如图 3 所示:首先,包括轮缘厚度和喉部倒圆半径的榫连接体所有 13 个设计变量的三维模型结构优化;其次,轮盘槽底(不包含喉部倒圆半径)以下盘身轴对称模型 11 个设计变量的优化设计,此时槽底以上的榫和叶片结构质量离心力以均布载荷施加到盘缘(即槽底半径);最后,缩小所有设计变量的优化区间,采用三维扇段模型对盘/榫 24 个设计变量进行最终的细节优化设计,以获得满足当前(静强或概率寿命)设计准则的最轻双辐板涡轮盘/榫结构.

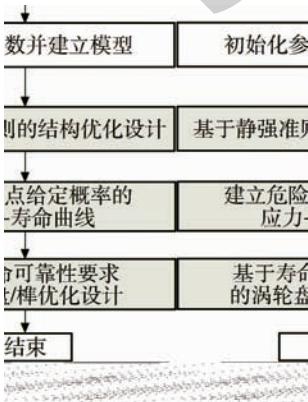


图 2 结构优化设计方案主流程图

Fig. 2 Main flow chart of structure optimization design

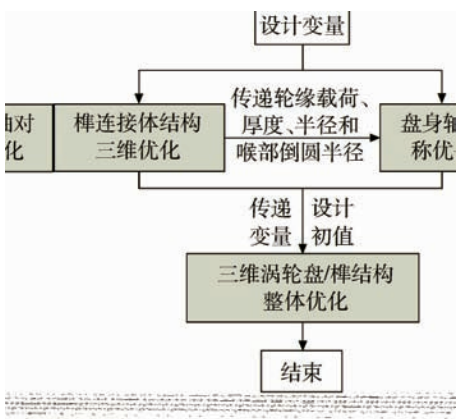


图 3 基于当前设计准则的涡轮盘/榫结构优化方法
Fig. 3 Optimization method of turbine disk/tenon structure based on current design criteria

2 算例分析

以某高压双辐板涡轮盘/榫结构优化设计为例,其主要设计参数如下:叶根半径为 298 mm,盘内径为 53.5 mm,盘缘宽度为 40 mm;轮盘材料选用 FGH96 粉末高温合金(材料参数见表 1);叶片材料选用 DD6^[3].

表 1 FGH96 材料属性

Table 1 Material properties of FGH96	
参数	数值
温度/℃	550
弹性模量 E/MPa	195.2
泊松比 μ	0.311
屈服极限强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	965
拉伸极限强度 σ_b/MPa	1400
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	8340

转速谱选用 0 r/min-17 000 r/min-0 r/min 近似低循环疲劳地坑试验三角载荷谱. 为了突出轮盘各部位失效体积的影响,且考虑到轮盘所用材料寿命数据有限,在此采用简化的 550℃ 均匀温度场.

2.1 基于静强的涡轮盘/榫结构优化设计
结果与分析

本文采用 8 节点 6 面体 3 维单元选取整体结构的 1/52 建立双辐板涡轮盘/榫循环对称模型,共划分 94 950 个节点,112 000 个单元. 三维涡轮盘/榫扇段模型施加循环对称约束和轴向刚体位移约束.

在用三维扇段模型进行弹塑性有限元分析的基础上,完成其基于表 2 中静强准则的结构优化设计. 结构静强优化后等效应力结果见图 4.

表 2 双辐板涡轮盘/榫结构状态变量和目标函数的优化结果

Table 2 Optimization results of state variables and objective function of twin-web turbine disk/tenon

变量(函数)	参数名称	安全系数 初始值	静强优化安全系数		寿命可靠性优化安全系数	
			优化结果	下限值	优化结果	下限值
三维涡轮盘/ 榫结构状态 变量	榫头最大等效应力安全系数	0.945	1.034	1.0000	1.0130	1.0000
	榫槽最大等效应力安全系数	0.891	0.905	0.9000	0.8970	0.8900
	E 区最大峰值应力安全系数		0.706		0.7550	0.7540
	F 区最大峰值应力安全系数		0.801		0.7920	0.7850
	G 区最大峰值应力安全系数		0.923		0.8550	0.7600
	H 区最大峰值应力安全系数		1.020		0.9890	0.8250
	I 区最大周向应力安全系数	1.123	1.217	1.0500	1.0880	0.8940
	I 区最大等效应力安全系数	1.122	1.242	1.0500	1.0380	0.9000
盘身子午面 状态变量	最大截面平均径向应力安全系数	1.409	1.371	1.3225	1.3239	1.3225
	子午面平均周向应力安全系数	1.445	1.362		1.3229	
	最大截面平均周向应力安全系数	1.240	1.219	1.1800	1.1860	1.18
目标函数	涡轮盘/榫质量/kg	90.802	75.671		73.0780	

注:安全系数下限值均基于屈服强度.

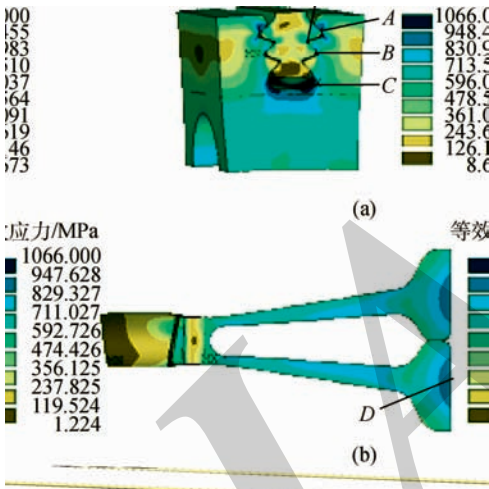


图 4 结构静强优化后等效应力云图

Fig. 4 Contour of equivalent stress after structure static strength optimization

静强优化后,全盘最大等效应力出现在图 4 中的榫槽底根部 C 点,其安全系数为 0.905;同时榫槽区域 A 和 B 以及榫头最大等效应力点 T 点等效应力安全系数均接近设计下限值,分别为 0.924,0.941 和 1.034. 此外,全盘其他区域等效应力值均小于材料的屈服强度,盘心 D 区最大等效应力的安全系数为 1.242. 表 2 静强栏中其他应力约束条件均大于其下限值,即优化结果满足静强设计准则,且涡轮盘/榫整体质量较初始值减轻了 16.66%.

2.2 双辐板涡轮盘/榫结构疲劳寿命可靠性分析

在涡轮盘/榫基于静强结构优化设计的基础上,对轮盘及榫槽进行考虑尺寸效应的疲劳寿命

可靠性分析. 将模型分为榫槽上区 E、槽底 F 区、喉部 G 区、辐板 H 区和盘心 I 区五部分,见图 5.

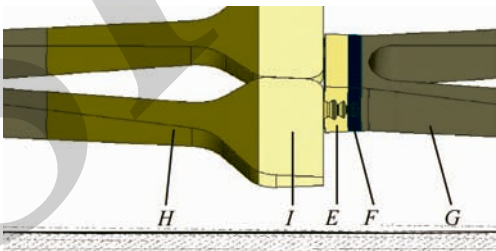


图 5 疲劳寿命可靠性分析模型

Fig. 5 Analysis model on fatigue life reliability

根据 FGH96 材料寿命试验数据^[14],拟合得到 FGH96 光滑试棒 550℃应力比 $R=-1$ 和 $R=0.05$ 的峰值应力和概率寿命的曲线公式分别为

$$\lg N = -7.105 \lg S_{\max} + 25.27 + \epsilon \tag{2}$$

其中 $\epsilon \sim N(0, \sigma_\epsilon)$, $\sigma_\epsilon = 0.1169$

$$\lg N = -9.254 \lg S_{\max} + 32.97 + \eta \tag{3}$$

其中 $\eta \sim N(0, \sigma_\eta)$, $\sigma_\eta = 0.2365$

利用式(2)和式(3)通过线性插值可得到应力比介于 $-1 \sim 0.05$ 之间的任意应力-寿命曲线.

有限元分析采用对称循环应力-应变曲线^[15],见式(4).

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \tag{4}$$

其中循环强度系数 K' 为 1477.1 MPa;循环应变硬化指数 n' 为 0.05697.

采用应力体方法,分析得到各个区域的峰值应力及可靠度 $R=99.87\%$ 时的疲劳概率寿命 $N_{R=99.87\%}$ 见表 3 优化前结果.

表 3 寿命可靠性优化前后各个区域峰值应力和疲劳寿命

Table 3 Peak stress and fatigue life of each areas before and after life reliability optimization

区域	峰值应力/MPa			$N_{R=99.87\%}$ /个循环	
	优化前	优化后	上限值	优化前	优化后
E	1 366	1 278	1 280	2 098	3 472
F	1 205	1 219	1 230	3 499	3 318
G	1 045	1 129	1 270	22 628	12 815
H	946	976	1 170	26 620	23 196
I	780	888	1 080	112 661	42 694
涡轮盘/榫				2 096	3 087

由表 3 优化前结果可见,涡轮盘/榫结构的疲劳寿命主要受制于各危险区域中的最短寿命. 涡轮盘/榫结构中寿命最薄弱区域出现在榫槽 E 区和 F 区,且 E 区疲劳概率寿命小于规定的下限值;而在轮盘 G 区、H 区和 I 区,结构的寿命远大于概率寿命设计要求,还可进一步优化.

2.3 涡轮盘/榫结构寿命可靠性优化设计

针对涡轮盘/榫结构的 5 部分,分别选取轮盘设计寿命附近几个不同载荷工况,利用应力疲劳概率寿命分析体方法,得出涡轮盘/榫各个区域 $R=99.87\%$ 的峰值设计应力-寿命曲线,如图 6 所示.

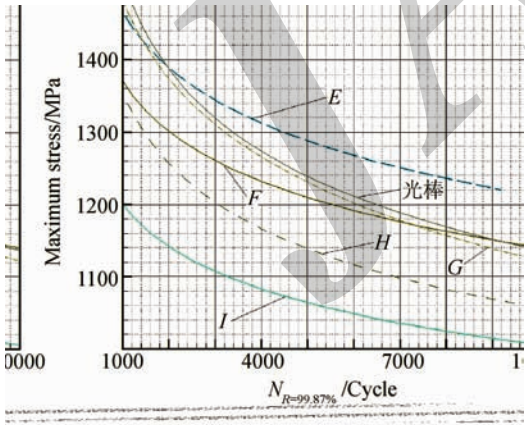


图 6 不同区域可靠度为 99.87% 的峰值设计应力-寿命曲线

Fig. 6 Peak design stress-life curves of different areas at the reliability of 99.87%

由图 6 可知,由于失效体积和应力比的影响,对应同一峰值应力,不同区域寿命差别较大,特别是盘心 I 区与榫槽 E 区差一个量级. 因此,对于特定结构,需考虑其失效体积和应力比的影响.

根据涡轮盘寿命可靠性设计要求和图 6 的应

力-寿命曲线,重新确定不同危险区峰值设计应力上限见表 3 峰值应力上限值一栏. 在寿命可靠性结构优化设计中:首先,防止轮盘出现破裂失效,约束轮盘子午面平均周向应力和最大截面平均径向应力;其次,保证涡轮盘/榫具有规定疲劳概率寿命时各危险区域应力条件约束(见表 2 寿命可靠性安全系数下限),并以此作为寿命可靠性结构优化设计的状态变量,以结构所有设计变量的静强优化结果为初值,以涡轮盘/榫质量为目标函数,进行三维涡轮盘/榫模型和轮盘轴对称模型的寿命优化.

优化结果见表 2 寿命可靠性部分,优化后涡轮盘/榫结构峰值应力分布如图 7 所示.

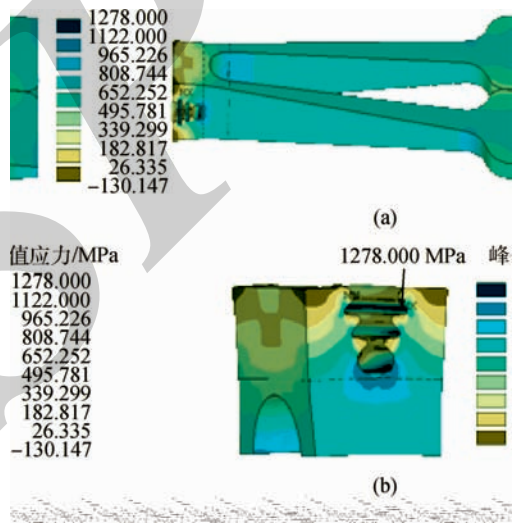


图 7 寿命可靠性优化后峰值应力云图

Fig. 7 Peak stress contour after life reliability optimization

由表 3 可知,E 区峰值应力较 F 区大,而 E 区的寿命却比 F 区长,进一步说明了失效体积和应力比对疲劳寿命的影响.

由图 7 和表 2 可得,优化后,榫连接 E 区和 F 区峰值应力的安全系数均大于各自的下限值;而在盘体部分 G 区、H 区和 I 区,由于轮盘子午面平均周向应力和最大截面平均径向应力限制,此 3 区单点应力约束不处于临界,概率寿命裕度较大,即最终盘体结构优化为强度约束主控. 经验证,双辐板涡轮盘/榫最终优化得到的结构可靠度为 99.87% 的疲劳寿命为 3 087 个循环(见表 3),满足轮盘疲劳寿命可靠性要求;且双辐板涡轮盘/榫质量较静强优化后质量减轻 3.43%(见表 2). 由表 2~表 3 可见,基于强度和寿命可靠性的涡轮盘/榫结构优化结果与仅基于强度优化的结果有

较大改变,后者寿命可靠度满足要求,且进一步减轻质量,说明本文提出的基于寿命可靠性的双辐板涡轮盘/榫结构优化设计方法有效性,且易于工程应用.

3 结 论

1) 采用概率寿命分析体方法,对结构强度优化后的双辐板涡轮盘/榫进行寿命可靠性分析,结果表明:基于静强设计的双辐板涡轮盘/榫可靠度为 99.87%的疲劳寿命仅为 2096 个循环,不能满足 EDG-3 中对轮盘寿命设计要求.

2) 利用标准试棒疲劳寿命数据,采用概率寿命分析体方法,建立了轮盘不同区域峰值应力-概率寿命曲线数据库,可对盘类零件结构设计最大应力标准的确定提供数据支持.

3) 提出利用轮盘不同区域峰值应力-概率寿命曲线,结合轮盘结构静强(基于应力标准)优化平台,实现轮盘静强和寿命可靠性同步优化的方法.该方法易于工程设计中应用,在保证优化精度的条件下,可大幅提高优化效率.

4) 对双辐板涡轮盘/榫结构进行基于静强和寿命可靠性优化设计.寿命可靠性优化后,涡轮盘/榫结构整体疲劳寿命较优化前提升了 47.28%,满足轮盘可靠性寿命设计要求,且在轮盘静强优化质量减轻 16.66%的基础上,再减轻 3.43%.

参考文献:

[1] 孙杰,孙志刚,刘存,等.考虑强度和位移约束的涡轮盘优化设计[R].贵阳:中国航空学会第 14 届发动机结构强度振动学术研讨会,2008.

[2] 杨喜关,罗贵火.某涡轮盘应力计算及优化设计分析[J].现代机械,2008(4):12-14.

YANG Xiguan, LUO Guihuo. The stress calculation and the optimizing designing of a turbine disc[J]. Modern Machinery, 2008(4): 12-14. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 李荐名.预定寿命设计与等寿命设计的理论及方法研究[J].机械设计与制造,2002(5):2-3.

LI Jianming. The theoretic and method of pre-design life and equivalent life design[J]. Machinery Design and Manufacture, 2002(5): 2-3. (in Chinese)

[5] CAIRO R R. Twin-web rotor disk: US005961287A [P]. 2005-11-23.

[6] 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.

[7] 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 and Manufacture, 2010(5): 4-6. (in Chinese)

[8] 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 dual-web turbine disk [J]. Aeroengine, 2012, 38(5): 38-41. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 高阳,杨昌军,白广忱,等.涡轮盘低循环疲劳可靠性设计方法[J].航空发动机,2011,37(1):3-7.

GAO Yang, YANG Changjun, BAI Guangchen, et al. Reliability design of turbine disk low cycle fatigue [J]. Aeroengine, 2011, 37(1): 3-7. (in Chinese)

[11] 吕文林.航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告):第 2 册 轮盘[R].北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997.

[12] 陆山,张鸿,唐俊星,等.考虑尺寸效应的轮盘应力疲劳概率寿命分析方法[J].航空动力学报,2011,26(9):2040-2043.

LU Shan, ZHANG Hong, TANG Junxing, et al. Analysis method for the stress fatigue probability life of a disk considering size effect [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2040-2043. (in Chinese)

[13] 《航空发动机设计用材料数据手册》编委会.航空发动机设计用材料数据手册:第 4 册 [M].北京:航空工业出版社,2010.

[14] 张鸿.FGH96 盘 LCF 概率寿命体方法分析及模拟件试验研究[D].西安:西北工业大学,2011.

ZHANG Hong. Volume method analysis for low cycle fatigue reliability of FGH96 disk and research on experiment of simulate specimen [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011. (in Chinese)

[15] 鲁华平,陆山,唐俊星.非对称循环疲劳寿命研究及涡轮盘概率寿命分析[J].机械强度,2007,29(1):92-96.

LU Huaping, LU Shan, TANG Junxing. Research on the unsymmetrical cyclic fatigue life and reliable life analysis of a turbine disk [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1): 92-96. (in Chinese)