

通用过渡圆弧改进设计与榫齿连接结构 多变量优化

雷 驰, 温卫东, 崔海涛

(南京航空航天大学 能源与动力学院

江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 为了得到更加优良的榫齿连接结构形式,降低榫齿连接结构应力集中水平,提高其疲劳强度,研究了双圆弧过渡对榫齿连接结构应力的影响,推导了通用双圆弧过渡的尺寸关系式,为过渡圆弧的改进与优化提供了理论上的支持.通过对二齿涡轮枳树形榫齿连接结构过渡圆弧的改进,并进行了应力评估,证明了双圆弧过渡结构确实能降低结构的应力集中水平.基于 Isight 软件平台,利用二次序列非线性优化(NLQPL)方法对榫齿连接结构进行了多变量优化,得到了更加优良的结构形式,最大等效应力下降了 19.98%.

关 键 词: 过渡圆弧; 榫头; 榫槽; 多变量优化; 涡轮盘

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

General transition arcs redesign and multivariable optimization of tenon-mortise joints

LEI Chi, WEN Wei-dong, CUI Hai-tao

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: In order to obtain a better structure type and reduce stress concentration to achieve better fatigue strength, the dual arcs transition on tenon-mortise joints was examined to find out its influence on stress distribution. Geometric restrictions on dual arcs transition were derived to support design optimization and modifications. Dual arcs transition were employed on two-teeth tenon-mortise joints of turbine disk and the stress assessment on the structure was performed. The dual arcs transition was proved effective in reducing stress concentration and improving structure strength. Multivariable optimization is carried out based on Isight platform using non-linear quadratic programming language (NLQPL) method. Better structural parameters are achieved to reduce stress concentration, and the maximum stress decreases by 19.98%.

Key words: transition arc; tenon; mortise; multivariable optimization; turbine disk

枳树形榫齿连接以其质量轻、材料利用率高、拆装方便等特点广泛运用于燃气涡轮机的涡轮部件中^[1],而在实际运用中,由于涡轮盘的工作环境

极其恶劣,榫齿连接的过渡圆弧处是疲劳裂纹的高发处^[2],所以研究如何减小该区域的应力水平对于提高涡轮盘乃至燃气涡轮机的寿命有着非常

重要的作用^[3].

通常情况下,机械结构中的过渡圆弧都采用单圆弧过渡的构型,这种过渡方式自然、简单,而且加工方便.但是单圆弧过渡处的应力无法良好分散,产生较大的应力集中.最早在压力容器的封头设计中开始使用双圆弧代替单圆弧的封头,也就是广泛采用的蝶形封头^[4],后来职玉山等^[5]开始了将双圆弧封头改进成三圆弧乃至多圆弧封头的尝试.受此启发,徐倩等^[6]进行了在机械结构上将涡轮盘原始的单圆弧过渡改进成双圆弧过渡的尝试,得到了多圆弧过渡确实能降低应力集中的结果;并比较了双圆弧和三圆弧过渡的应力水平差异,得到双圆弧和三圆弧应力水平差距不大的结论.而三圆弧的加工极其困难,保证3个圆弧同时相切工艺上难以实现,由此认为过渡圆弧为双圆弧过渡最为有效.

1 双圆弧过渡连接的几何关系

双圆弧连接的理论条件,徐倩、周正贵等^[6-7]等做过部分几何的推导,但是都没有给出通用的单双圆弧过渡解析几何模式.单圆弧过渡连接的几何模式如图1所示.

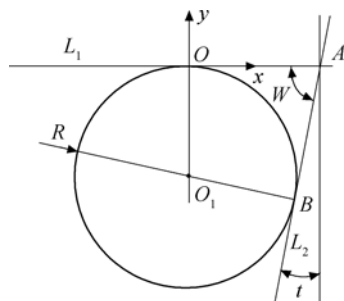


图1 单圆弧过渡连接的几何模式

Fig. 1 Geometric model of single arc transition

双圆弧是从单圆弧出发进行改进,所以应该从单圆弧过渡连接开始分析.对于单圆弧过渡,圆弧 O_1 分别与 L_1, L_2 相切于 O, B 两点.其中两切点 O, B 位置已知,直线 L_2 与直线 L_1 的夹角 W 已知;要求得过渡圆弧半径 R 以及过渡圆弧圆心 O_1 坐标.由此可知,双圆弧过渡连接的几何模式如图2所示.

图2中 O_2 为小圆弧圆心, O_1 为大圆弧圆心,其中大圆弧与直线 L_2 相切于 B 点,小圆弧与 L_1 相切于 O 点,过渡圆弧的相接条件应与单圆弧过渡连接相同,即:①切点 O 点位置确定;②切点 B

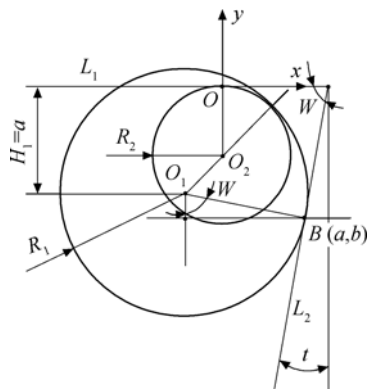


图2 双圆弧过渡连接的几何模式

Fig. 2 Geometric model of dual arc transition

点位置确定;③两直线夹角 W 确定.下面将推导双圆弧过渡结构的几何关系.为了体现 O 点位置已知,可将坐标系移至 O 点,以 L_1 为 x 轴,垂直于 L_1 为 y 轴建立坐标系,可以发现小圆弧 O_2 的半径直线与 y 轴重合,即 O_2 点坐标为 $(0, -R_2)$.设 B 点的坐标为 (a, b) ,大圆弧圆心 O_1 坐标为 (x_1, y_1) 于是有以下关系:

$$\begin{cases} x_1 = -R_1 \sin W \\ y_1 = -R_1 \cos W \end{cases} \quad (1)$$

即可写出两圆周解析方程如下:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = R_1^2 \\ x^2 + (y + R_2)^2 = R_2^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $x_1 = -R_1 \sin W$, $y_1 = -R_1 \cos W$.

求解上述方程极其复杂,所以本文采用圆周内切的必要条件进行判断,即两圆心间的距离需等于两圆半径之差.数学形式为

$$|O_1 O_2| = R_1 - R_2 \quad (3)$$

转换为本例中,即为

$$[0 - (a - R_1 \sin W)]^2 + [-R_2 - (b - R_1 \cos W)]^2 = (R_1 - R_2)^2 \quad (4)$$

式(4)是双圆弧过渡连接几何协调的必要条件.在设计和优化中的双圆弧过渡榫齿连接结构参数 R_1, R_2 的取值范围,都必须满足此方程式,这样才能保证双圆弧过渡榫齿连接结构几何封闭、协调,相互不发生干涉.显而易见,当 $R_1 = R_2$ 时,双圆弧过渡退化成单圆弧过渡连接.

2 榫齿连接结构的过渡圆弧改进

本文采用某型机的动力涡轮的二齿榫头结构^[1],来进行说明和比较.将齿间过渡圆弧由单圆弧过渡改进为双圆弧过渡榫齿连接结构,得到的结构示意图如图3所示.

图3中可以看出双圆弧为一大一小两个圆弧

组成,图4为榫齿连接结构过渡段大小圆弧分布图.图5为单双圆弧过渡比较图.

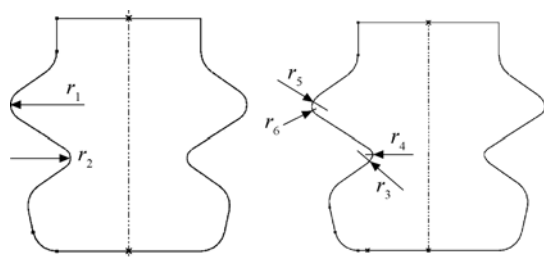


图3 单双圆弧过渡榫齿连接结构示意图

Fig. 3 Sketch of single and dual arc transition on tenon-mortise joints

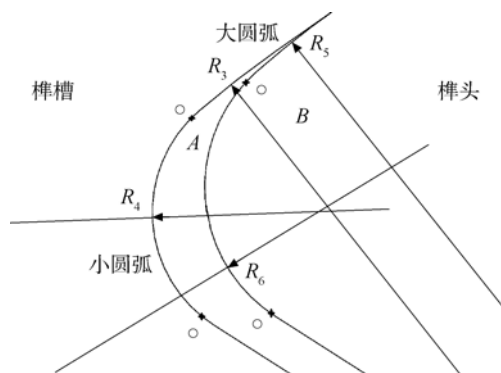


图4 榫齿连接结构过渡段大小圆弧分布图

Fig. 4 Detailed sketch of dual arc transition on tenon-mortise joints

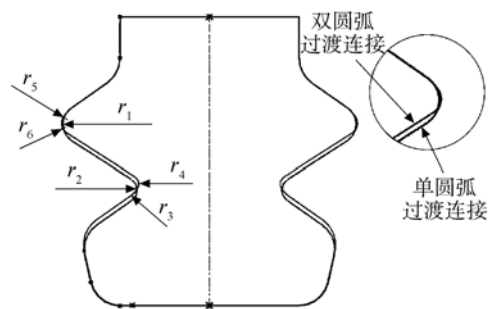


图5 单双圆弧过渡榫齿连接结构比较图

Fig. 5 Comparison between single and dual arc transition on tenon-mortise joints

3 榫齿连接结构过渡圆弧改进前后静强度评估

本文采用工程有限元分析软件 ANSYS 来进行接触非线性分析^[8].设计工况^[9]为额定转速为 20900 r/min,除去榫头的叶片离心力为 13152 N.涡轮叶片所用材料为 K403;轮盘所用材料为

GH4169,650℃时材料属性如表1所示^[10].

表1 K403和GH4169材料属性

Table 1 Material properties of K403 and GH4169

材料	$\rho/$ (kg/m ³)	$E/$ GPa	μ	$\sigma_b/$ MPa	$\alpha_1/$ 10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹
K403	8100	180	0.34	975	13.0
GH4169	8240	146	0.33	1130	15.1

由于需要评估双圆弧对等效应力的降低效果,本文先计算了采用单圆弧过渡榫齿连接结构静强度.然后,按照式(4)给出的条件,选定了一组双圆弧过渡的榫齿连接结构,分别进行计算.两组计算时所用的尺寸数据如表2所示.

表2 单双圆弧过渡榫齿连接结构尺寸表

Table 2 List of geometric parameters of single and dual arc transition on tenon-mortise joints

圆弧尺寸	榫齿连接结构	
	单圆弧过渡	双圆弧过渡
齿间过渡圆弧半径 r_3/mm	0.67	3
齿间过渡圆弧半径 r_4/mm	0.67	0.31
接触过渡圆弧半径 r_5/mm	0.56	6
接触过渡圆弧半径 r_6/mm	0.56	0.33

图6为单圆弧过渡榫齿连接结构等效应力云图.

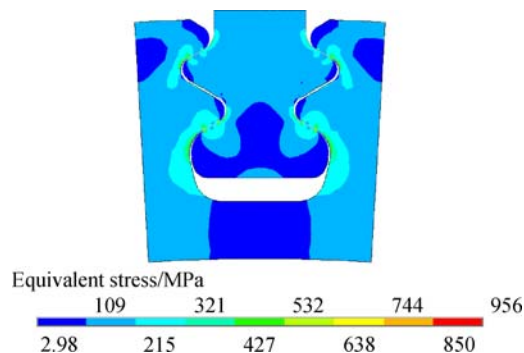


图6 单圆弧过渡榫齿接结构等效应力云图

Fig. 6 Equivalent stress contour of tenon-mortis joint which applied single arc transition

可以看出,在单圆弧过渡榫齿连接结构的过渡圆弧区域有严重的等效应力集中,最大等效应力出现在底齿的接触边缘.榫头齿间过渡圆弧的最大等效应力为 750 MPa,榫槽齿间过渡圆弧最大等效应力为 724 MPa,整个结构最大等效应力为 956 MPa.

将单圆弧过渡改为双圆弧过渡之后得到的榫齿连接结构等效应力结果如图 7.

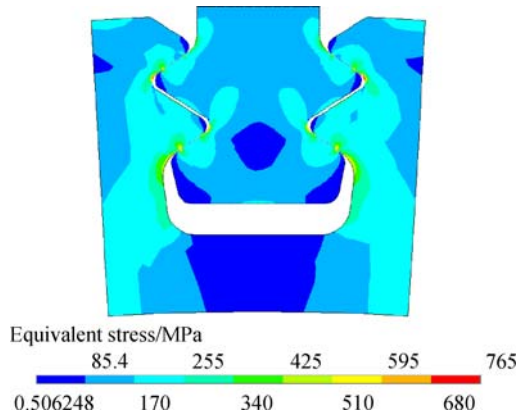


图 7 双圆弧过渡榫齿连接结构等效应力云图
Fig. 7 Equivalent stress contour of tenon-mortise joint which applied dual arc transition

经过了改进之后,整个等效应力分布均匀,蓝色的过低等效应力区明显减小,说明对材料的利用率有所上升.榫头齿间过渡圆弧区域的最大等效应力下降到了 704 MPa,榫槽齿间过渡圆弧区域的最大等效应力反而有所上升为 752 MPa,整个结构的最大等效应力下降到了 765 MPa,表 3 为改进前后特征位置最大等效应力评估.

表 3 单双圆过渡榫齿连接结构特征位置最大等效应力比较

Table 3 Maximum equivalent stress assessment of particular locations on single and dual arc transition

特征位置	榫齿连接结构		最大等效应力变化百分比/%
	单圆弧过渡	双圆弧过渡	
榫齿连接结构最大等效应力/MPa	956	765	-19.98
榫头齿间过渡圆弧最大等效应力/MPa	751	704	-6.2
榫槽齿间过渡圆弧最大等效应力/MPa	724	752	+3.7

从表 3 可以看出,从单圆弧过渡改进为双圆弧过渡榫齿连接结构的最大等效应力减小效果还是十分明显的.最大等效应力下降了 19.98%,榫头齿间过渡圆弧最大等效应力下降了 6.2%.然而,榫槽齿间过渡圆弧最大等效应力反而有所上升 3.7%,这是由于选取的双圆弧结构尺寸并不是最优值造成的.

双圆弧过渡榫齿连接结构在本文中主要在 3 个方面发挥降低等效应力水平的作用:①双圆弧过渡能适当增大榫齿连接结构最小颈宽的宽度,使承载面积增大从而降低等效应力水平;②采用双圆弧过渡能够在过渡段提供更加平滑的等效应力过渡,减小传力的方向变化,从而减小等效应力集中;③双圆弧过渡能在接触部分降低接触等效应力水平.其中②为主要原因.

4 榫齿连接结构多变量优化设计

当榫齿连接结构的形状确定之后,采用单圆弧过渡榫齿连接结构的圆弧尺寸也就随之确定,而双圆弧过渡榫齿连接结构的大小圆弧尺寸可以在一定范围内变动.从第 3 节的分析发现,任意选取的双圆弧榫齿连接结构尺寸并不一定会使所有位置的等效应力水平下降.又由于构件形状复杂,无法获得弹性力学理论最优解.所以应当对双圆弧榫齿连接结构尺寸进行优化,以得到最优的尺寸值.由式(4)可知,双圆弧的尺寸与角度、切点位置等存在耦合关系,所以不能简单地任意改变双圆弧的尺寸.为此决定将榫齿连接结构的角度参数也纳入优化模型之内.本文提取了描述榫接结构角度的参量^[11],分别为上侧角、下侧角、楔形角、槽底倾角共 4 个角度参量.如图 8 所示.

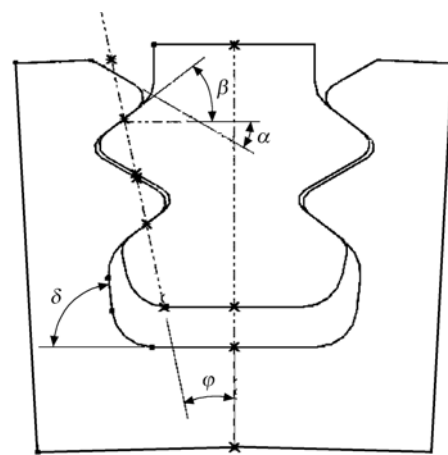


图 8 角度参数位置示意图
Fig. 8 Diagrammatic sketch of angle parameters

本文采用软件 Isight^[12]来整合优化流程,软件 Isight 自带丰富的优化算法,还能够方便地集成 CAD 与 CAE 软件.为了实现自动 CAD 和 CAE,首先利用软件 UG 提供的二次开发 application programming interface (API) 函数^[13],用 C++ 编写模型更新程序 UGmodel.exe.然后利

用软件 ANSYS 脚本 ANSYS parametric design language (APDL) 语言编写数值分析及结果输出程序^[14], 以软件 Isight 为平台^[15], 对二齿枞树形榫齿连接结构进行优化的流程如图 9 所示。

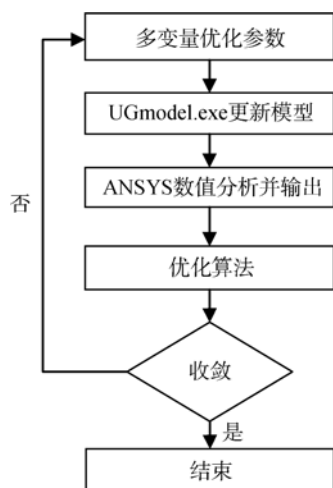


图9 优化流程图

Fig. 9 Process of optimization

由于榫头、榫槽榫齿接触边缘及齿间过渡圆弧区域等效应力集中比较严重, 经常产生裂纹^[16]. 理论和实验证明, 减小此处的等效应力水平, 将增加枞树形榫齿连接结构的疲劳寿命^[17]. 所以本文采用最大等效应力最小作为目标函数, 同时应结合式(4)所给出条件, 合理选取参数变化范围^[18]. 于是可得到优化的数学模型如下:

$$\text{Find } \min (\sigma_e, \sigma_e, \sigma_e, \sigma_e, \sigma_e, \sigma_e) = \sigma_{e, \max}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 32.5^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ \\ 32.5^\circ \leq \alpha \leq 34^\circ \\ 10^\circ \leq \varphi \leq 12.5^\circ \\ 80^\circ \leq \delta \leq 85^\circ \\ 2 \text{ mm} \leq r_3 \leq 5 \text{ mm} \\ 0.25 \text{ mm} \leq r_4 \leq 0.34 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \leq r_5 \leq 8 \text{ mm} \\ 0.3 \text{ mm} \leq r_6 \leq 0.38 \text{ mm} \\ \sigma_{e, \max} \leq 780 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6)$$

由于本文参与优化的变量很多, 遗传算法等需求的代数和计算次数很大, 从而会导致整个优化过程消耗大量的时间. 所以本文采用 NLPQL 算法, 该算法基于梯度, 在设计点的搜索上有方向性, 所以能更快收敛到最小值. 优化后等效应力云图如图 10 所示。

优化前后整体结果比较如表 4~表 5 所示。

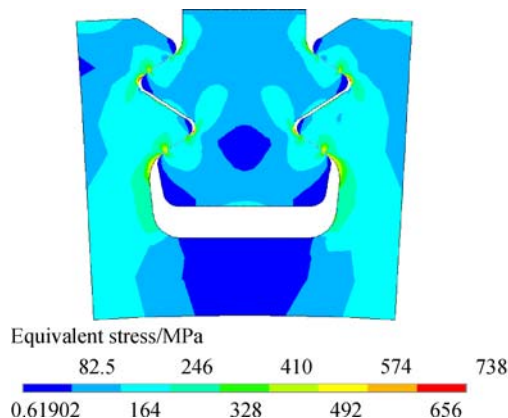


图10 优化后的榫齿连接结构等效应力云图

Fig. 10 Equivalent stress contour of optimized dual arc transition on tenon-mortise joints

表4 优化前后尺寸结果比较

Table 4 Comparison of geometric parameter before and after optimization

参数	未优化结构	多参数优化后结构
上侧角 / (°)	30.5	35
下侧角 / (°)	30.5	32.5
楔形角 / (°)	12.23	12.25
槽底倾角 / (°)	77.5	82.5
齿间过渡圆弧半径 r_3 / mm	3	2.83
齿间过渡圆弧半径 r_4 / mm	0.31	0.32
接触过渡圆弧半径 r_5 / mm	6	6.5
接触过渡圆弧半径 r_6 / mm	0.33	0.34

表5 优化前后静强度结果比较

Table 5 Comparison of stress results before and after optimization

参数	未优化结构	多参数优化后结构	最大等效应力变化百分比 / %
榫齿连接结构最大等效应力 / MPa	765	738	-3.5
榫头齿间过渡圆弧最大等效应力 / MPa	704	687	-2.4
榫槽齿间过渡圆弧最大等效应力 / MPa	752	738	-1.9

榫齿连接结构最大等效应力进一步下降了 3.5%, 榫头齿间过渡圆弧最大等效应力进一步下降了 2.4%, 榫槽齿间过渡圆弧最大等效应力较

优化前下降了 1.9%,但仍然高于单圆弧过渡,这是因为优化后榫接结构的最大等效应力位置发生了变化,从接触边缘移到了该过渡圆弧处。榫齿连接的各个部分等效应力都有所下降,说明优化是非常有效的。

5 结 论

1) 本文推导了通用双圆弧过渡的尺寸关系式,为今后过渡圆弧的改进与优化提供了理论上的支持。

2) 本文通过对二齿涡轮枳树形榫齿连接结构过渡圆弧的改进并进行了应力评估,证明了双圆弧过渡榫齿连接结构确实能降低榫齿连接结构的等效应力集中水平,对整个结构的强度有良好的提升作用。

3) 本文利用 Isight 平台,利用 NLQPL 对榫齿结构进行了多参数优化,得到了更加优良的榫齿连接结构形式。

参考文献:

- [1] 刘长福,邓明.航空发动机结构分析[M].西安:西北工业大学出版社,2006.
- [2] 郑旭东,尉夺魁,王兆丰,等.某型航空发动机涡轮叶片和轮盘榫齿裂纹故障力学分析[J].航空发动机,2005,31(3):35-38.
ZEHGN Xudong, YU Duokui, WANG Zhaofeng, et al. Mechanical analysis of crack failures in turbine blade and disk serration of an aero-engine[J]. Aeroengine, 2005, 31(3): 35-38. (in Chinese)
- [3] CUI Haitao, MA Haiquan, WEN Weidong. Reliability-based shape optimization of tenon/mortise in aero-engines with contact[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(4):193-197.
- [4] 桂康宁.对冷旋压近似椭圆形封头等效代替标准椭圆形封头的浅见[J].金陵石油化工,1998(2):15-18.
- [5] 职玉山,王仲人.三圆弧椭圆封头及其参数优化[J].机械工程师,1998(2):4-6.
- [6] 徐倩,崔海涛.涡轮盘结构的低应力优化设计分析[R].北京:中国航空学会第九届小型发动机学术交流会,2012.
- [7] 周正贵.压气机叶片自动优化设计[J].航空动力学报,2002,17(3):305-308.
- ZHOU Zhenggui. Automatic design optimization of compressor blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3):305-308. (in Chinese)
- [8] 温卫东,高德平.榫头/榫槽接触问题边界元分析[J].航空动力学报,1992,7(2):117-120,192.
WEN Weidong, GAO Deping. Analysis of tenon and mortise contact problems of boundary element methods[J]. Journal of Aerospace Power, 1992, 7(2):117-120, 192. (in Chinese)
- [9] 方昌德.世界航空发动机手册[M].北京:航空工业出版社,1996.
- [10] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册[M].北京:中国标准出版社,2001.
- [11] 赵海.涡轮榫头/榫槽结构设计方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.
ZHAO Hai. Research on design method of turbine tenon/mortise[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [12] 胡殿印,彭苗娇,王荣桥.树脂基复合材料风扇叶片的优化设计[J].航空动力学报,2012,27(7):1630-1637.
HU Dianyuan, PENG Miaoqiao, WANG Rongqiao. Optimization design of resin-based composite fan blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7):1630-1637. (in Chinese)
- [13] 黄勇,张博林,薛运锋,等.UG二次开发与数据库应用基础与典型范例[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [14] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [15] 赖宇阳,姜欣. Isight 参数优化与实例详解[M].北京:北京航空航天大学出版社,2012.
- [16] 秦宁京.航空燃气涡轮发动机结构及强度计算[M].北京:北京科学教育编辑室,1962.
- [17] 杨兴宇,阎晓军,赵福星,等.某型航空发动机涡轮盘低循环疲劳寿命分析[J].机械强度,2004,26(S):229-233.
YANG Xingyu, YAN Xiaojun, ZHAO Fuxing, et al. Low cycle fatigue life of an aeroengine gas turbine disk[J]. Mechanical Strength, 2004, 26(S):229-233. (in Chinese)
- [18] 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)