

文章编号:1000-8055(2012)06-1249-06

涡轮盘/榫整体结构优化设计方法

陶 冶, 陆 山

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 考虑到榫联接和轮盘子午面在结构设计时的相互影响, 针对典型的枞树型榫联接, 提出了通用的榫联接结构/轮盘子午面分步优化设计、总体协调的涡轮盘/榫整体结构优化设计方法。基于 ANSYS 优化平台及参数化建模技术, 筛选了优化设计变量, 以涡轮盘/榫整体结构总质量最小为优化目标, 以涡轮盘/榫联接结构关键应力为约束, 建立了涡轮盘/榫整体结构优化设计的数学模型。通过对某型发动机涡轮盘和榫联接结构设计方案进行结构优化设计, 在满足所有几何约束及强度要求的条件下, 二齿及三齿盘/榫结构优化后总质量都有明显降低, 说明涡轮盘/榫整体结构优化设计方法的合理性; 且二齿盘/榫结构的总质量较三齿盘/榫结构明显减小, 榫槽底部最大第一主应力也明显降低。任意榫齿数可选的通用涡轮盘/榫整体结构优化设计方法及平台可适用于不同涡轮的结构设计, 具有较强的工程实用性。

关 键 词: 涡轮盘/榫整体结构; 结构优化设计; 参数化建模; 有限元分析; 总质量最小
中图分类号: V232.3 **文献标志码:** A

Method of structural optimization design for turbine disk/tenon

TAO Ye, LU Shan

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Considering the effect between tenon joints and meridional section of disk in structure design, a general method of structural optimization design for turbine disk/tenon was presented, including designing tenon joints/meridional section of disk in stages and synthetically optimizing with coordination. Based on ANSYS platform and parametric modeling technique, optimization design variables were chosen and a mathematic model of structural optimization design for turbine disk/tenon was established for the purpose of getting minimum masses with all constrained stresses of turbine disk and tenon joints being met. The results of the structural optimization designs of turbine disk and tenon joints for an aero-engine show that the mass of two-tooth and three-tooth disk/tenon are both decreased obviously after optimization under the condition of meeting geometry and strength requirements, which verifies the rationality of the method; the results also reveal that the structure of two-tooth disk/tenon is less mass and the maximum first principle stress lower than that of three-tooth disk/tenon. This method and platform of structural optimization design for turbine disk/tenon with any number of teeth were applied to structure designs of different turbines, which demonstrated a high engineering application.

Key words: turbine disk/tenon; structural optimization design; parametric modeling; finite element analysis; minimum mass

收稿日期:2011-07-13网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120704.1152.201206.1249_008.html

作者简介:陶冶(1985—),男,重庆合川人,硕士生,主要从事航空发动机零件结构优化设计方法研究。

涡轮盘和榫联结构设计是航空发动机结构设计的重要环节,其设计的合理性直接关系到转子部件的强度、寿命及可靠性,并极大地影响发动机的推质比。由于榫头和榫槽结构位于轮盘外缘,在高转速下凸台及榫头体积产生的离心力很大^[1],因此,在保证几何约束和强度要求的条件下,尽量减小榫槽深度,可以设计出总体质量较小的轮盘,从而减小整个转子的质量。为此,国外对涡轮的榫联结构设计进行了广泛深入的研究,并形成了具有各自特点的榫联结构设计方法^[2-5],而国内对榫联结构的设计方法尚不够系统完善^[6]。

目前,国内外主要单独对轮盘或榫联结构进行优化设计,这样可能造成设计出的轮盘和榫联结构不能真实反映轮盘变形及受力特征,所得结果也并不一定是最优设计。因此,有必要将轮盘和榫联结构作为整体,建立合理的通用涡轮盘/榫整体结构优化设计方法,这在航空发动机涡轮设计中具有十分重要的意义。

本文通过对国内外目前使用的榫联结构和相关文献的分析研究,拟建立涡轮盘/榫整体结构方案设计方法;基于 ANSYS 优化平台和参数化建模技术,筛选优化设计变量,以涡轮盘/榫整体结构总质量最小为优化目标,以涡轮盘和榫联结构设计准则^[7-9]所规定的关键应力约束为状态变量,建立涡轮盘/榫整体结构优化设计的数学模型,拟形成任意齿通用涡轮盘/榫整体结构优化设计方法。通过对某型发动机涡轮盘和榫联结构设计方法进行结构优化设计,说明本文涡轮盘/榫整体结构优化设计方法的合理性。

1 涡轮盘/榫整体结构优化设计方法

本文涡轮盘/榫整体结构优化设计方法是建立在 ANSYS 有限元分析的基础上。一般情况下,在进行涡轮盘和榫联结构方案设计之前,叶身已由气动设计定型,流道参数也已经给定,由此,可以得到涡轮盘和榫联结构方案设计所需的已知条件。在进行涡轮盘/榫整体结构方案设计时,应当首先进行榫头/榫槽结构方案设计,再由得到的载荷条件、几何约束,结合设计准则进行轮盘子午面结构方案设计,然后采用参数化建模技术,建立三维涡轮盘/榫整体结构模型,最后基于 ANSYS 优化平台进行优化设计,得到给定设计条件下的最优结果。

1.1 榫头/榫槽结构方案初步设计方法

在涡轮叶片榫头/轮盘榫槽的结构方案初步

设计中,榫体部分主要考虑拉伸应力的强度要求,榫齿部分主要考虑挤压应力和切应力的强度要求^[10]。由于榫齿较短,类似于材料力学理论中的深梁,所以弯曲强度不是主要问题,但也应当在方案设计中得以体现。文献^[9]给出了关于涡轮榫头/榫槽屈服极限的几个重要的设计准则,见表 1 和表 2。

表 1 安全系数

Table 1 Definition of safety factors

基于屈服强度	基于极限强度
$n_1 = \sigma_{0.1} / \bar{\sigma}$	$n_b = \sigma_b / \bar{\sigma}$

表 2 榫联结构应力约束安全系数下限

Table 2 Safety factors of constrained stresses of tenon joints

项目	n_1
榫槽颈部平均拉伸应力	2.50
榫头颈部平均拉伸应力	2.50
榫齿齿面平均挤压应力	2.50
榫齿弯曲应力	2.50

同时,文献^[9]还指出,为了满足相应的剪切应力设计准则,榫齿最大剪切应力不应大于相应材料剪切强度的 1/2.5。此外,考虑到寿命可靠性问题,还应考虑榫联结构的最大等效应力和第一主应力约束,本文榫槽最大第一主应力暂按安全系数 $n_1 = 1.05$ 约束,榫头最大等效应力暂按安全系数 $n_1 = 1.25$ 约束^[7-9]。

文献^[1]的研究表明,榫头最小齿颈宽度小于齿距是一种不好的设计;另外,上侧角与下侧角之和应当小于 90° ;除非盘的材料性能比叶片材料性能好得多,通常槽颈最小宽度不应小于榫头颈部最小宽度。文献^[11]的研究表明,较大的楔形角将使榫槽边界节点应力分布不均,出现较大的应力突变,为不合理设计。这些都可以作为榫联结构方案设计的几何约束。

通过对国内外目前使用的榫联结构和相关文献^[1-6,11]的研究,本文初步确定了榫联结构独立变量及其可行域见表 3。

考虑叶根在高温状态下工作,局部区域产生的塑性变形使各齿受力均匀化,在进行叶根结构方案设计时,可近似假设各齿均匀承担整个叶片的总离心力载荷(等强度设计原则),并假定齿工作面载荷为法向载荷,沿工作面均匀分布^[12]。

表 3 榫联结构独立变量可行域

Table 3 Independent variables' feasible region of tenon joints

参数含义	参数符号	上限	下限
半楔形角/(°)	φ	10	20
上侧角/(°)	β	15	25
下侧角/(°)	α	20	40
槽底倒圆半径(上)/mm	R_{c1}	0.8	1.6
槽底倒圆半径(下)/mm	R_{c2}	1.4	2.5

至此,可由给定的已知条件、设计准则及几何约束,建立合理的结构方案设计方法,设计得到所需的形状参数,并创建二维枞树型榫头/榫槽型面模型,然后将二维型面沿拉削角方向进行拉伸,即可得到三维枞树型榫头/榫槽结构模型. 榫头/榫槽二维参数化模型见图 1 和图 2,形状参数说明见表 4. 建模完成过后,使用 ANSYS 内部命令分别提取榫头、榫槽底部以上结构的质量和质心,再结合转速即可得到榫头/榫槽结构所产生的总离心力载荷.

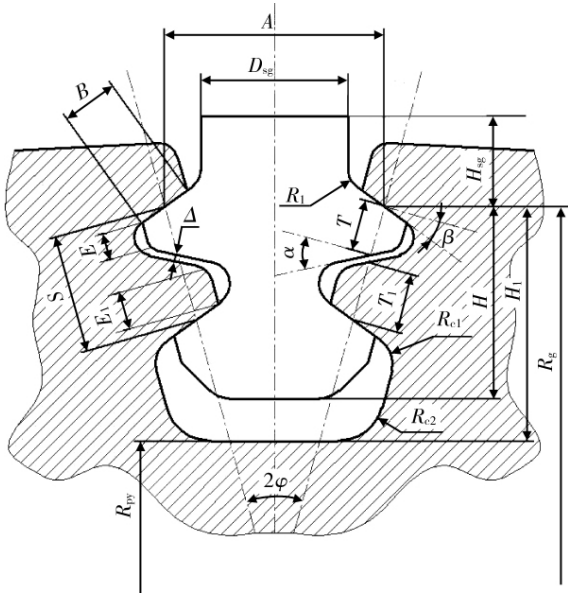


图 1 二齿型榫联结构模型

Fig. 1 Model of two-tooth tenon joints

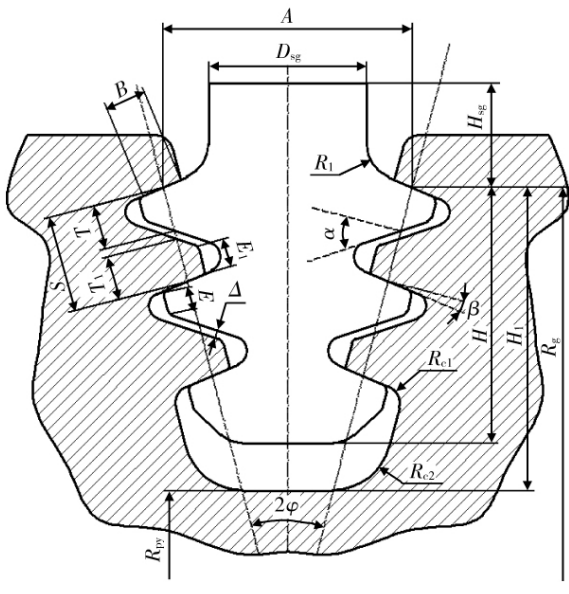


图 2 三齿型榫联结构模型

Fig. 2 Model of three-tooth tenon joints

表 4 涡轮榫联结构的形状参数

Table 4 Characteristic parameters of turbine tenon joints

参数符号	参数说明	参数符号	参数说明
φ	半楔形角	E	榫头齿侧面宽
β	上侧角	E_1	榫槽齿侧面宽
α	下侧角	H	榫头高
R_{c1}	榫槽底部转接圆角半径(上)	H_1	榫槽深度
R_{c2}	榫槽底部转接圆角半径(下)	D_{sg}	伸根缩颈宽
R_1	伸根倒圆角	H_{sg}	伸根高
A	榫头肩宽	R_{py}	盘外缘半径
B	接触面长度	R_g	轮缘半径
S	齿距	θ	拉削角
T	榫头齿厚	D_z	榫联结构轴向宽度
T_1	榫槽齿厚	N	榫头数(即叶片数)
Δ	榫齿间隙	Z	榫齿齿数

1.2 涡轮盘子午面结构方案初步设计方法

鉴于航空发动机盘类零件的重要性,结构设计时需满足相应的结构设计准则^[7-9],其中第一条“足够的应力储备”是众多影响因素的综合指标,在轮盘结构设计中应予以首先满足^[13].经过筛选的轮盘结构方案初步设计时应满足的约束应力对应的安全系数下限见表 5.

表 5 涡轮盘结构约束应力安全系数下限
Table 5 Safety factors of constrained stresses
of turbine disk

项目	n_b	n_1
子午面平均周向应力	1.67	1.33
最大截面平均径向应力	1.67	1.33
辐板最大截面平均周向应力		1.18
盘内径最大周向应力		1.05

此外,考虑到寿命可靠性问题,还应考虑轮盘最大等效应力和第一主应力约束.本文辐板喉道处最大第一主应力暂按安全系数 $n_1 = 1.15$ 约束,盘心最大等效应力暂按安全系数 $n_1 = 1.05$ 约束^[7-9].

轮盘外缘所载荷主要由叶片和榫头/榫槽结构的离心力载荷组成,由于涡轮盘相对较厚,因此在结构方案设计时暂不考虑弯扭问题和由气动载荷引起的振动问题.在进行轮盘结构方案初步设计时,由于不涉及结构细节,可将轮盘简化为轴对称模型,即重点考虑其子午面形状设计及优化.根据目前航空发动机常用涡轮盘结构和相关资料^[14]的研究,辐板喉道倒圆半径可行域初步取为 3~10 mm.相关方案初步设计方法及流程参见文献^[13].

1.3 涡轮盘/榫整体结构优化

榫联结构和轮盘子午面结构方案初步设计完成后,得到涡轮盘/榫整体结构建模所需的形状参数,再运用参数化建模技术,即可生成三维涡轮盘/榫整体结构初始模型.根据涡轮盘/榫整体结构的形状特点,选取半楔形角 φ 、上侧角 β 、下侧角 α 、榫槽底部转接圆角半径 R_{c1} (上)和 R_{c2} (下)、涡轮盘辐板喉道倒圆半径 R_f 作为主要优化设计变量,以轮盘和榫联结构设计准则规定的关键应力约束作为状态变量,以涡轮盘/榫整体结构总质量 m 为目标函数.

本文选取单榫轮盘圆弧扇段模型,这样有利于减少计算时间.模型施加的主要约束包括:在盘内径处施加轴向位移约束,在轮缘施加周向位移约束,对扇段模型切割面施加循环对称约束,在榫头/榫槽的接触面上添加接触对,采用修正的拉格朗日乘法,对接触对进行非线性面接触分析.

ANSYS 优化设计模块提供了两种优化方法:零阶方法和一阶方法,本文首先采用零阶方法在全局设计空间进行粗略优化,然后再采用一阶方法在局部设计空间进行细致优化,直到找到最满意的解.在优化分析过程中,需要不断考察设计序列结果.如果不能满足设计要求,则应返回调整设计变量的约束区间,重新进行优化分析,直到找到满意的解集;如果仍不能满足设计要求,则应返回考察涡轮盘和榫联结构的几何设计参数、所选材料及载荷条件等,进行必要修改后再重新进行结构方案设计及优化分析.

2 算例分析

本文模型的叶片材料选用 DZ22,弹性模量取定向结晶方向,轮盘材料选用 ZSGH4169,材料性能数据分别选取 850 °C 和 650 °C 时的值^[15].方案设计选取某型机设计参数作为已知条件,包括:设计转速为 12885 r/min,在榫头伸根顶部截面施加伸根以上部分总离心力分布载荷为 190.2 MPa,榫联结构拉削角为 15°,榫联结构轴向宽度为 40 mm,榫头伸根高度为 5 mm,轮缘半径为 250 mm,盘心半径为 80 mm,榫头数为 68^[6].由于轮盘外缘得到了榫联结构的刚化作用,如果将轮盘外缘径向厚度作为优化设计变量,则对于以减重作为优化目标的问题,其总是趋向于相应约束区间的下限值,故将其视为已知尺寸(本文暂取为 8.0 mm).

根据前述方法,针对航空发动机典型的二齿和三齿涡轮盘/榫整体结构,建立了基于 ANSYS 优化平台的涡轮盘/榫整体结构优化设计程序.经过优化设计分析,得到二齿和三齿涡轮盘/榫整体结构的优化设计结果,见表 6.

由表 6 可见,在满足所有几何约束及强度要求的条件下,经过优化设计,二齿涡轮盘/榫整体结构榫槽深度减少了 12.85%,总质量降低了 8.49%,而三齿涡轮盘/榫整体结构榫槽深度减少了 13.22%,总质量降低了 8.03%,说明了本文涡轮盘/榫整体结构优化设计方法的合理性.

表 6 二齿和三齿涡轮盘/榫整体结构优化设计结果

Table 6 Optimum results of two-tooth and three-tooth turbine disk/tenon

参数含义	参数符号	二齿型盘/榫结构		三齿型盘/榫结构	
		优化前	优化后	优化前	优化后
半楔形角/(°)	φ	12.5	16.5	12.5	13.0
上侧角/(°)	β	20.0	21.5	20.0	15.5
下侧角/(°)	α	25.0	35.0	25.0	39.0
榫槽底部转接圆角半径(上)/mm	R_{c1}	0.8	1.29	0.8	1.58
榫槽底部转接圆角半径(下)/mm	R_{c2}	1.6	1.87	1.6	1.96
涡轮盘辐板喉道倒圆半径/mm	R_f	5.0	3.55	5.0	5.83
榫槽深度/mm	H_1	9.65	8.41	10.97	9.52
最大齿面平均挤压应力/MPa	σ_c	242.253	218.892	239.778	223.476
榫头最大等效应力/MPa	$\sigma_{e,st}$	611.469	591.177	635.90	626.353
榫槽最大第一主应力/MPa	$\sigma_{f,sc}$	809.824	776.438	942.052	889.982
涡轮盘辐板喉道最大第一主应力/MPa	$\sigma_{f,fb}$	784.509	745.382	874.70	833.147
盘心最大等效应力/MPa	$\sigma_{e,px}$	741.475	716.255	801.133	779.653
盘/榫整体结构总质量/kg	m	28.543	26.12	30.541	28.09

由分析结果可知,对本文模型设计条件,二齿和三齿涡轮盘/榫整体结构优化前后的最大等效应力和最大第一主应力都发生在榫槽底部过渡圆弧 R_{c2} 处,如图 3 和图 4。虽然优化后该处的应力水平没有得到有效降低,但是始终保持在弹性范围内,未发生塑性屈服,满足了结构静强度设计要求。同时,由表 6 可见,优化后二齿和三齿结构的

最大齿面平均挤压应力都有所降低,且满足相应的设计准则。优化后二齿盘/榫整体结构的榫槽深度较三齿盘/榫结构小 11.66%,总质量也要少 7.01%;而且二齿盘/榫整体结构的榫槽底部最大第一主应力也较三齿型盘/榫整体结构降低了 12.76%,这说明对本文设计载荷,二齿涡轮盘/榫整体结构具有优越性。

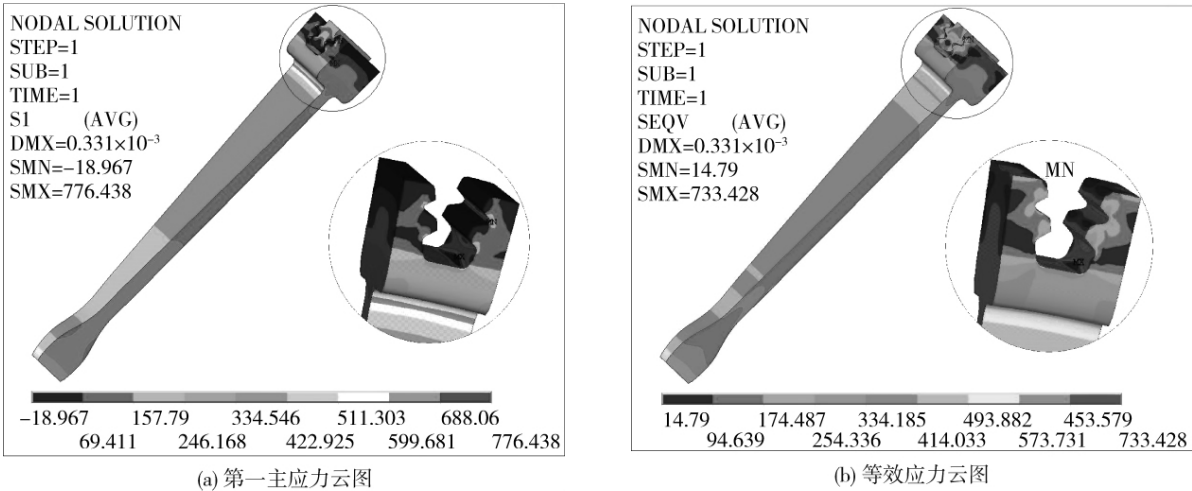


图 3 二齿盘/榫结构应力云图(单位:MPa)

Fig. 3 Stress contour of two-tooth disk/tenon (unit:MPa)

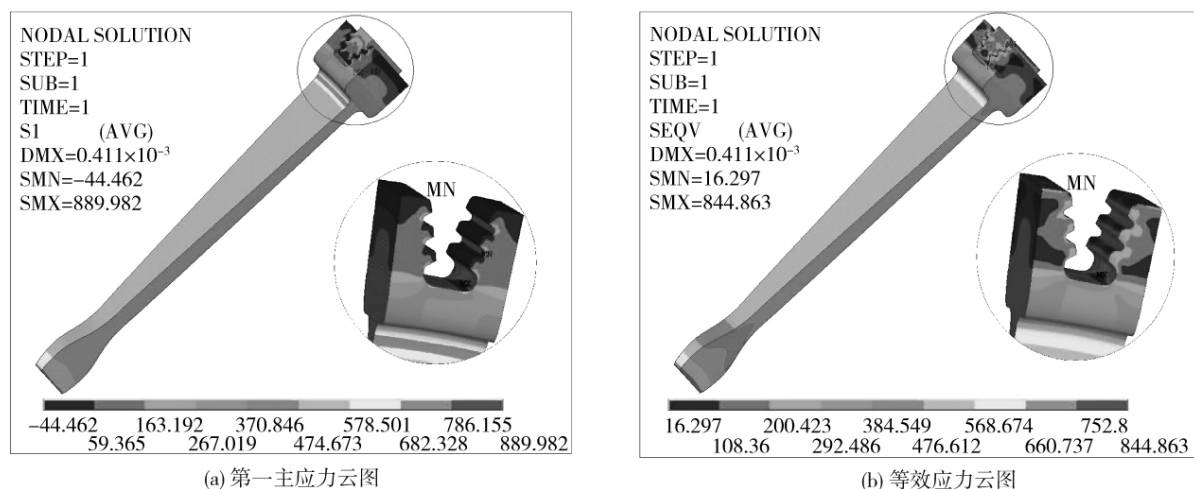


图4 三齿盘/榫结构应力云图(单位:MPa)

Fig. 4 Stress contour of three-tooth disk/tenon (unit:MPa)

3 结 论

本文基于 ANSYS 优化平台和参数化建模技术,提出了任意榫齿数可选的通用涡轮盘/榫整体结构优化设计方法.针对某型发动机涡轮盘和榫联结构设计方法,进行了涡轮盘/榫整体结构优化设计分析,得出结论:在满足涡轮盘和榫联结构所有几何约束和强度要求的条件下,优化后二齿涡轮盘/榫整体结构的总质量降低了 8.49%,三齿涡轮盘/榫整体结构的总质量降低了 8.03%,说明了本文涡轮盘/榫整体结构优化设计方法的合理性;对本文模型,二齿盘/榫整体结构较三齿盘/榫整体结构可减轻质量 7.01%,且榫槽底部最大第一主应力可降低 12.76%,说明二齿涡轮盘/榫整体结构具有优越性.此外,本文涡轮盘/榫整体结构优化设计方法中的榫齿数可在正整数中任意取值,作为方案设计,本文提出的通用的航空发动机涡轮盘/榫整体结构优化设计方法,具有较强的工程实用性.

参考文献:

- [1] 陈开军,马枚.航空发动机叶片榫头优化设计研究[J].航空动力学报,1995,10(2):190-192,204.
CHEN Kaijun,MA Mei. Optimization of turbine blade fir-tree roots[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(2): 190-192, 204. (in Chinese)
- [2] Meguid S A, Kanth P S, Czekanski A. Finite element analysis of fir-tree region in turbine discs[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 35(4): 305-317.
- [3] Song W, Keane A J, Rees J, et al. Local shape optimisation of turbine disc fir-trees using NURBS[R]. AIAA Paper 2002-5486, 2002.

- [4] Song W, Keane A J. An efficient evolutionary optimisation framework applied to turbine blade fir-tree root local profiles[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2005, 29(5): 382-390.
- [5] Gean M C, Farris T N. Mechanics modeling of fir-tree dovetail contacts[R]. AIAA Paper 2008-2176, 2008.
- [6] 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)
- [7] 岳承熙, 吕文林. 航空涡轮、涡扇发动机结构设计准则: 第二册 轮盘[M]. 北京: 中国航空工业总公司发动机系统工程局, 1997.
- [8] 航空发动机设计手册编委会. 航空发动机设计手册: 第 18 册 叶片轮盘及主轴强度分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 1999.
- [9] 罗尔斯·罗伊斯公司. EGD-3 Spey MK202 发动机应力标准[M]. 丁爱祥, 吴君, 译. 北京: 国际航空编辑部, 1979.
- [10] 吕文林. 航空发动机强度计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [11] 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)
- [12] 俞茂铮. 用有限元方法确定涡轮机枞树型叶根的合理结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [13] 陆山, 陶冶, 鲁冯杰. 轮盘结构方案设计及重量预估[C]. 第十五届发动机结构强度与振动学术交流会论文集. 杭州: 中国航空学会, 2010: 372-379.
- [14] 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.
- [15] 北京航空材料研究所. 航空发动机设计用材料数据手册[M]. 北京: 中国航空发动机总公司, 1990.