

基于Workbench的航空发动机双辐板涡轮盘强度分析及结构优化

屈帅斌^{1*}, 胡宋健^{1,2}, 郝方周¹, 陈航¹, 陈嘉骏¹, 宋超³

¹南昌航空大学飞行器工程学院, 江西 南昌

²南方科技大学力学与航空航天工程系, 广东 深圳

³南昌航空大学通航(民航)学院, 江西 南昌

收稿日期: 2023年6月20日; 录用日期: 2023年7月11日; 发布日期: 2023年7月21日

摘要

应用workbench商业有限元分析软件对双辐板涡轮盘和传统涡轮盘进行了强度分析, 结果表明: 双辐板涡轮盘在质量方面具有优势, 但在强度方面略逊于传统涡轮盘, 接下来采用参数化直接优化的方法对双辐板涡轮盘进行结构优化, 结果表明该优化方法使得双辐板涡轮盘在重量和强度方面均得到提升。

关键词

双辐板涡轮盘, 航空发动机, 参数化结构优化, 强度分析

Workbench Based Strength Analysis and Structural Optimization of Twin Spoke Turbine Disks in Aircraft Engines

Shuaibin Qu^{1*}, Songjian Hu^{1,2}, Fangzhou Hao¹, Hang Chen¹, Jiajun Chen¹, Chao Song³

¹School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

²Department of Mechanics and Aerospace Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen Guangdong

³General Aviation (Civil Aviation) College, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Received: Jun. 20th, 2023; accepted: Jul. 11th, 2023; published: Jul. 21st, 2023

*通讯作者。

文章引用: 屈帅斌, 胡宋健, 郝方周, 陈航, 陈嘉骏, 宋超. 基于 Workbench 的航空发动机双辐板涡轮盘强度分析及结构优化[J]. 动力系统与控制, 2023, 12(3): 165-172. DOI: 10.12677/dsc.2023.123018

Abstract

The strength analysis of double spoke turbine discs and traditional turbine discs was conducted using Workbench commercial finite element analysis software. The results showed that double spoke turbine discs have advantages in quality, but slightly inferior in strength to traditional turbine discs. Next, a parameterized direct optimization method was used to optimize the structure of double spoke turbine discs. The results showed that this optimization method improved the weight and strength of double spoke turbine discs.

Keywords

Double Spoke Turbine Disk, Aircraft Engine, Parameterized Structure Optimization, Strength Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航空发动机是飞机的核心部件之一，涡轮盘是航空发动机中重要的旋转部件之一。双辐板涡轮盘是一种广泛应用于航空发动机中的结构，具有轻质化、高刚度、高可靠性等优点；同时冷气流入前后辐板组成的盘腔，经过内部盘腔对流换热后从盘缘流出，有效降低了涡轮盘的工作温度[1]；其强度分析及结构优化对于保障发动机安全稳定运行至关重要。国内目前已开展部分研究。由于、陆山等人通过静强和寿命可靠性对双辐板涡轮盘进行了优化设计[2]；陆山等人基于静强设计准则对双辐板涡轮盘进行了结构优化[3]；苏运来提出并建立了基于 ANSYS-MATLAB 双平台的双辐板涡轮盘强度及寿命可靠性优化设计方法和平台[4]；张猛创针对于带有导流肋板的新型双辐板涡轮盘进行了多学科多目标设计优化[5]；毕绍康通过自编程优化平台运用遗传算法优化双辐板涡轮盘强度结构分布[6]。

本文基于 workbench 平台，对航空发动机双辐板涡轮盘进行了强度分析及结构优化研究。首先，介绍了涡轮盘在航空发动机中的作用，以及双辐板涡轮盘的结构特点和工作原理；然后，详细说明了涡轮盘的强度分析方法和 workbench 模拟流程，包括几何建模、网格划分、边界条件设置等；接着，进行了双辐板涡轮盘强度分析，并对结果进行了讨论和分析；最后，针对分析结果提出了结构优化方案，并使用 workbench 包括优化方法对双辐板涡轮盘进行了优化设计。

本文的主要目的是基于 workbench 平台，建立双辐板涡轮盘三维结构优化设计方法，最后以某型整体式涡轮叶盘为典型算例进行双辐板涡轮盘的结构优化设计，对设计方法及平台进行验证。

2. 涡轮盘有限元模型建立

2.1. 涡轮盘模型

本文研究的轮盘结构为整体式涡轮叶盘，针对新型涡轮盘结构的实际引用，需要对其在使用中的强度进行仿真，模型如图 1 所示。

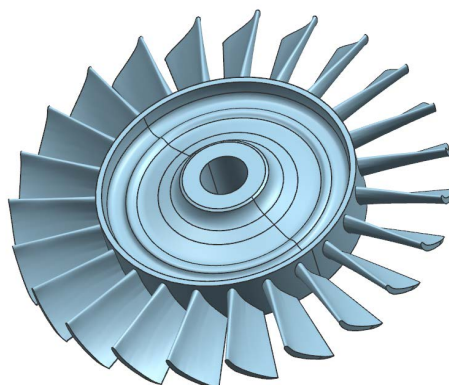


Figure 1. UG model of integral turbine blades
图 1. 整体式涡轮叶盘 UG 模型图

2.2. 材料设置

本文计算案例中的涡轮盘采用较成熟的 K41b 镍基铸造高温合金，考虑了材料性能随温度场的变化，材料热属性设置如下表 1 所示。

Table 1. Thermal properties of K418b material
表 1. K418b 材料热属性

$\theta/^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	10.2	11.9	13.8	15.4	17.1	18.8	20.5	22.1	23.8	25.7
$\theta/^\circ\text{C}$	27~100		27~200		27~300		27~400		27~500	
$\alpha/10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$	10.2		11.9		13.8		15.4		17.1	
$\theta/^\circ\text{C}$	27~600		27~700		27~800		27~900		27~100	
$\alpha/10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$	18.8		20.5		22.1		23.8		25.7	

2.3. 温度场设置

涡轮盘工作时受离心力、气动力与热载荷的共同作用，载荷复杂，同时旋转刚化作用及高温环境会对轮盘固有频率产生显著影响。因此为了更准确的求解涡轮盘工作时应力分布，必须采用多物理场耦合的算法[7]。

本文采用间接热固耦合计算方法，计算中考虑工作热应力和自转离心力的影响，采用软件中稳态热的计算模块计算涡轮盘的温度场分布，利用间接耦合法将所有单元转换为强度分析模块单元。计算中涡轮盘采用较成熟的 K418b 合金，采用非线性计算方法，参照某涡轮盘的温度分布，根据经验数据，涡轮转子轮心内径处温度为 383 K (100°C)，轮缘温度为 1183 K (900°C)，由于没有给出涡轮转子部件中具体的温度场分布参数，所以本项目中按照工程经验，涡轮转子部件的温度场沿转子方向按三次方规律分布：即

$$T = a \times R^3 + b$$

其中 T 表示温度， R 表示转子半径， a 和 b 为待求常数。

根据已知条件：

$$\begin{cases} T_1 = 100^\circ\text{C}, R_1 = 4 \\ T_2 = 900^\circ\text{C}, R_2 = 21.85 \end{cases}$$

$a = 3.18 \times 10^{-5}$, $b = 397.11$, 再带入方程中, 可求出温度沿转子半径方向的分布规律, 即:

$$T = 0.077 \times R^3 + 95.06$$

计算得出涡轮盘的温度场分布如下图 2 所示。

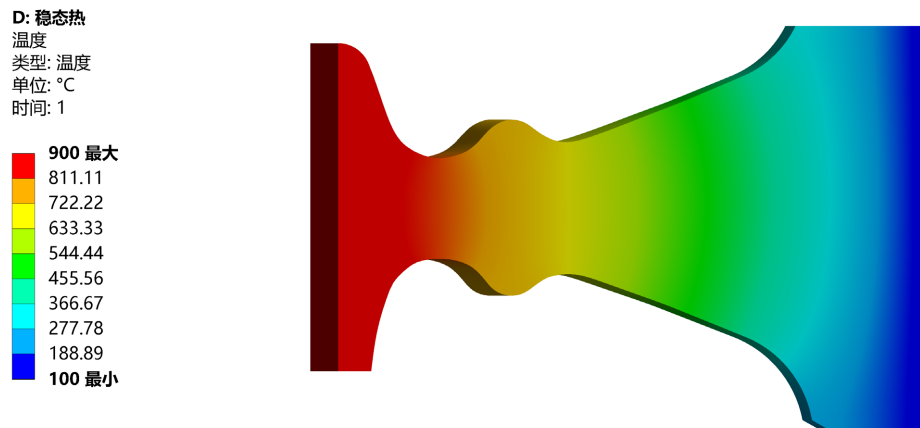


Figure 2. Temperature field of turbine disk

图 2. 涡轮盘温度场

2.4. 边界条件设置

计算中考虑了工作叶片离心拉力、热应力和自转离心力的影响, 工作叶片离心拉力以载荷形式施加在轮盘相应位置[8]。

$$F = n \times m \times r \times \omega^2$$

其中 F 为叶片离心拉力; n 为叶片个数; m 为单个叶片的质量; r 为叶片质心半径; w 为轮盘工作角速度; 经过计算得出

$$F = 453.41 \text{ N}$$

工作中叶片的离心拉力以压力载荷的形式施加在对应位置, 具体数值为:

$$P = F/s = 0.079 \text{ MPa}$$

整个涡轮盘的唯一边界为循环对称边界, 将涡轮盘的周向端面分别加循环对称约束, 在涡轮盘中加圆柱形约束。

3. 涡轮盘强度分析

3.1. 原整体涡轮盘与双辐板涡轮盘强度分析

整体涡轮盘有 23 个叶片, 考虑到涡轮盘结构的对称性以及计算的简便性, 仅选取 1/23 涡轮盘模型进行强度分析计算。

3.2. 强度分析结果

传统涡轮盘与双辐板涡轮盘强度分析如下图 3、图 4 所示。

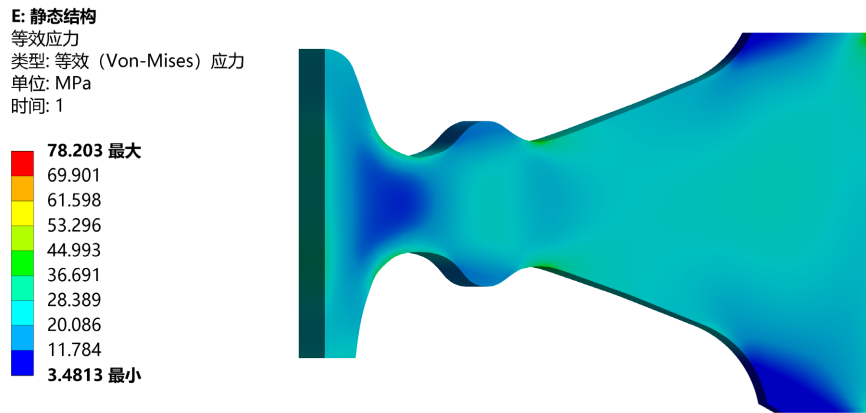


Figure 3. Equivalent stress distribution of traditional turbine disk
图 3. 传统涡轮盘等效应力分布图

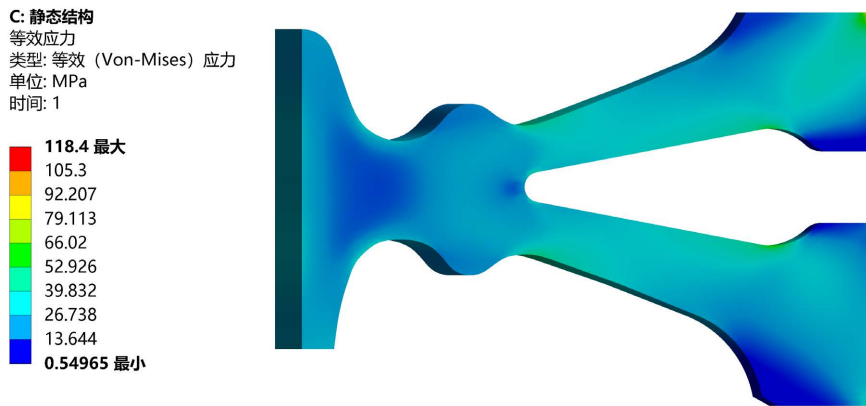


Figure 4. Equivalent stress distribution of double spoke turbine disk
图 4. 双辐板涡轮盘等效应力分布图

Table 2. Comparison and analysis of strength results between traditional and double spoke turbine discs
表 2. 传统、双辐板涡轮盘强度结果对比分析

	重量/g	辐板 Misses 等效应力 (MPa)	辐板最大平均周向应力 (MPa)	辐板最大平均径向应力 (MPa)
传统涡轮盘	3.063	78.203	30.578	93.592
双辐板涡轮盘	2.587	118.4	46.321	142.19
降幅	0.476 (15.54%)	-40.197 (-51.40%)	-15.743 (-51.48%)	-48.598 (-51.93%)

由表 2 分析可得：双辐板涡轮盘在重量上相较于传统涡轮盘具有一定优势，但在结构强度上平均应力提高，对于涡轮盘整体的使用寿命以及安全性造成一定影响；因此本文对该案例涡轮盘进行结构优化，旨在优化双辐板涡轮盘重量以及强度，同时对设计方法及平台进行验证。

4. 双辐板涡轮盘参数化结构优化

4.1. Workbench 参数化重量与强度双向优化方法

双辐板涡轮盘结构优化策略：选定盘腔结构参数作为可优化的对象，选择合适的优化方法以及目标

函数，本案例中选择涡轮盘重量降低、平均应力降低双向优化目标，通过 ANSYSworkbench 建立优化平台，可对任意双辐板涡轮盘进行结构设计优化(图 5)。

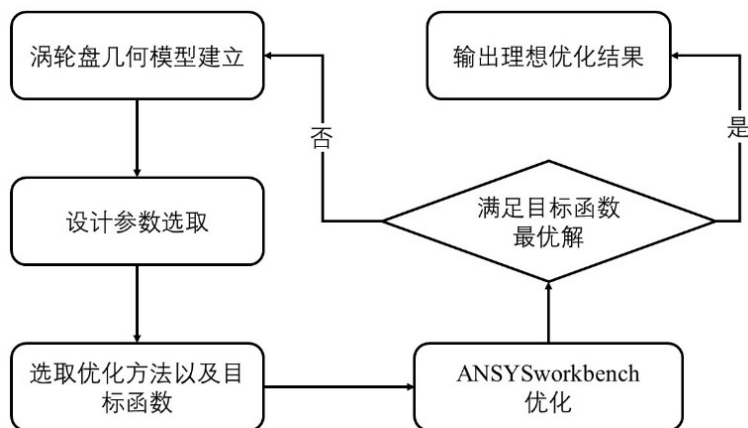


Figure 5. Flow chart of parameterized structure optimization method
图 5. 参数化结构优化方法流程图

4.2. 双辐板涡轮盘参数化优化设计变量

在 UG 软件中对双辐板涡轮盘盘腔结构进行参数化设置：本案例采用的双辐板涡轮盘盘腔内为对称结构，故设置一侧盘腔内结构基本轮廓参数为设计变量(图 6)。

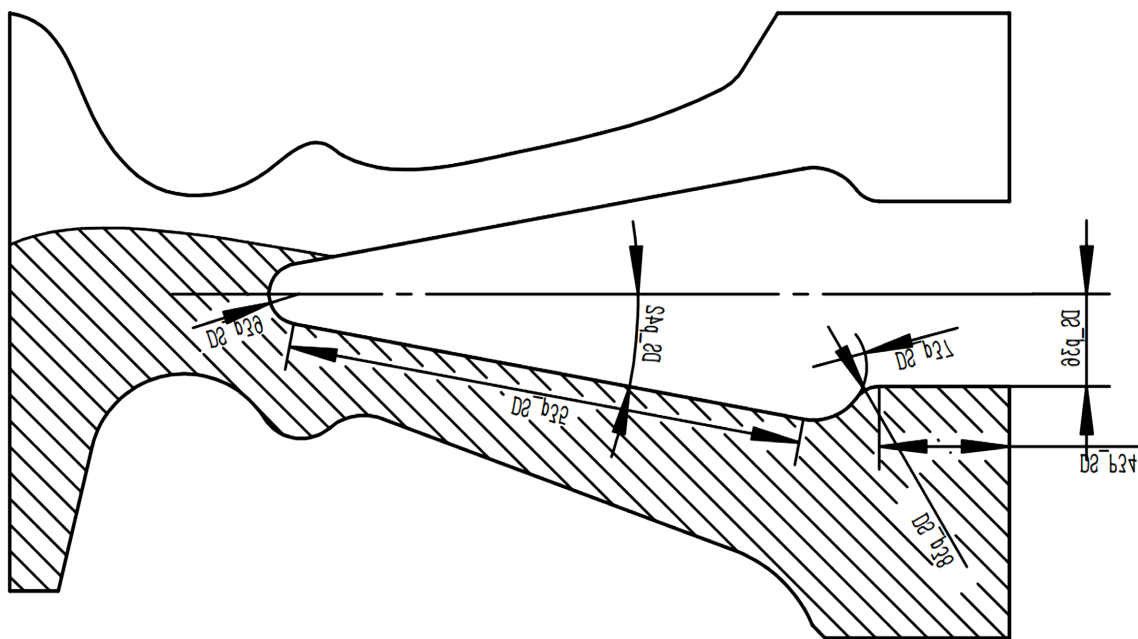


Figure 6. Characteristic parameters of double spoke turbine disk
图 6. 双辐板涡轮盘特征参数图

4.3. 双辐板涡轮盘优化结果

通过平台优化分析，得到优化结果如表 3、图 7 所示：

Table 3. Analysis and comparison of optimization results for double spoke turbine discs
表 3. 双辐板涡轮盘优化结果分析对比

	重量/g	辐板 Misses 等效应力	辐板最大平均周向应力	辐板最大平均径向应力
优化后双辐板涡轮盘	2.417	97.29	42.915	116.68
初始双辐板涡轮盘	2.587	118.4	46.321	142.19
传统涡轮盘	3.063	78.203	30.578	93.592
降幅(相较于初始双辐板涡轮盘)	0.17 (6.57%)	21.11 (17.83%)	3.406 (7.35%)	25.51 (17.94%)
降幅(相较于传统涡轮盘)	0.646 (21.09%)	-19.09 (-24.4%)	-12.34 (-40.4%)	-23.09 (-24.6%)

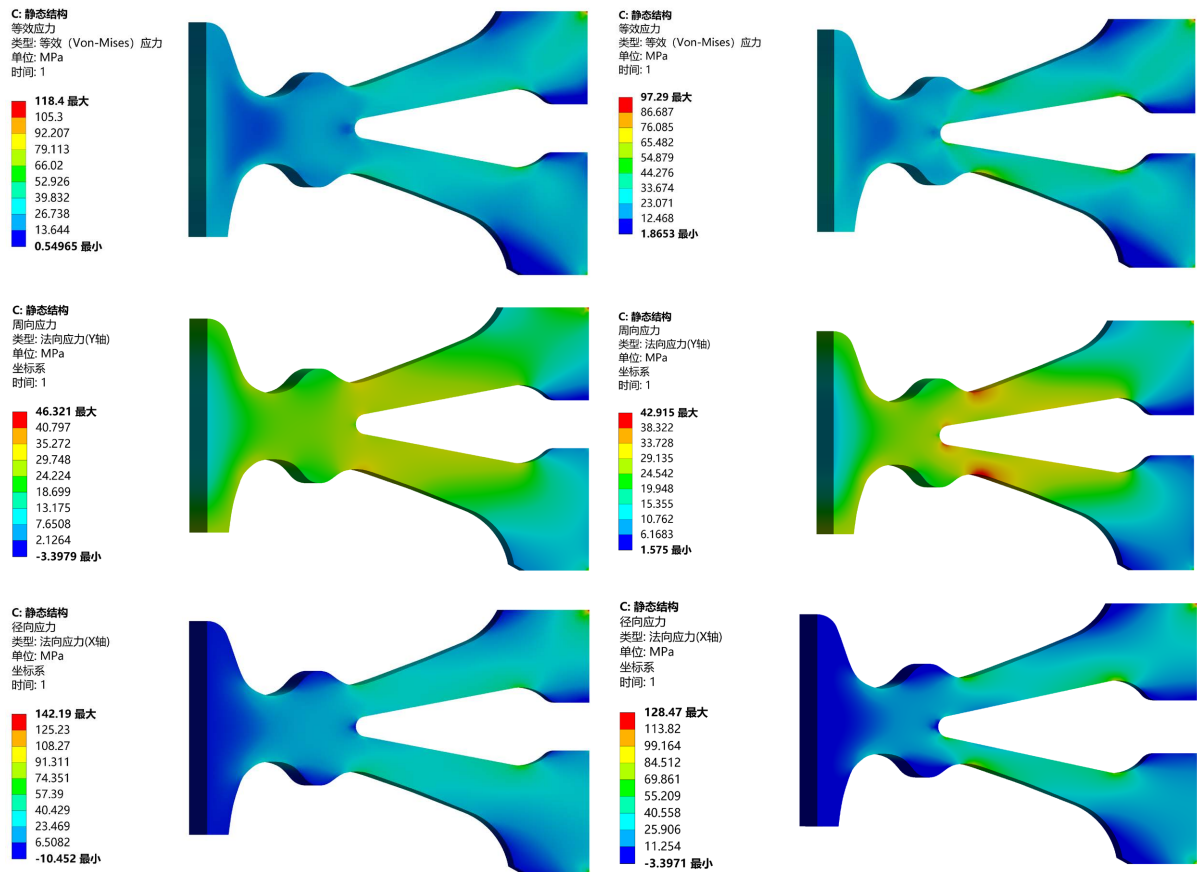


Figure 7. Strength analysis results of the original double spoke turbine disk (left) after optimization (right)
图 7. 原双辐板涡轮盘强度分析结果(左)优化过后双辐板涡轮盘强度分析结果(右)

分析可得：优化过后的双辐板涡轮盘相较于之前有较大改变：最大等效应力由原来的 118.4 MPa 降低为 97.29 MPa；辐板最大周向应力由原有的 46.32 MPa 降低为 42.915 MPa；辐板最大径向应力由原有的 142.19 MPa 降低为 128.41 MPa；进一步增强了涡轮盘结构可靠性；同时涡轮盘的重量也有原有的 2.587 g 降低为 2.417 g，涡轮盘质量减轻，对于发动机的推重比提高具有重要意义通过上述数据分析，说明本文提出的优化设计方法有效性，且易于工程应用。

5. 总结

- 1) 提出双辐板涡轮盘结构整体参数化优化方法：以降低盘总质量、辐板 Misses 等效应力为目标函数

进行强度重和量的双向优化；采用本文的优化方法：涡轮盘的强度和重量均得到优化提升，可操作性强。

2) 对于典型的整体双辐板涡轮盘进行结构优化，通过对比分析可得出以下结论：优化后的双辐板涡轮盘相较于未优化的双辐板涡轮盘和传统涡轮盘重量分别降低了 6.57% 和 21.09%；辐板 Misses 等效应力相较于未优化的双辐板涡轮盘降低了 17.83%。

3) 上述计算模型仅是方案设计的初始模型，若要开展实际工程应用，需以改正模型为基础开展结构优化工作，提高涡轮盘工作时的安全系数。

参考文献

- [1] 李磊, 杨子龙, 唐仲豪, 等. 具有盘腔扰流柱群的双辐板涡轮盘对流换热特性分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(8): 63-70. <https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.08.010>
- [2] 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. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2017.06.015>
- [3] 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. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2014.04.018>
- [4] 苏运来. 双辐板盘典型应力特征概率寿命模型及寿命可靠性自动优化设计方法[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [5] 张猛创. 双辐板涡轮盘多学科非概率可靠性设计优化[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [6] 毕绍康. 双辐板涡轮盘流热固耦合计算及优化设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [7] 任众, 朱东华, 许开富. 多场环境下涡轮盘的强度与振动安全性仿真优化研究[J]. 火箭推进, 2016, 42(6): 36-42.
- [8] 栾永先. 双辐板涡轮盘结构强度分析[J]. 航空发动机, 2012, 38(4): 38-41.