

基于 UG、Workbench 平台航空发动机 多盘转子结构自动优化方法

张 坤, 陆 山
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

摘 要: 目前对航空发动机转子优化设计多限于单盘优化,且优化需要借助人工调整再优化。基于航空发动机转子优化设计常用软件平台数据交流方便和减少人工调整的考虑,提出了基于 UG、Workbench 平台航空发动机多盘转子结构自动优化方法。首先基于 UG 平台,对多盘转子结构进行参数化几何造型,借助生成的标准化模板,便于减少建模工作量及对同类盘的优化。然后基于 Workbench 平台,借助脚本语言(APDL、Python)二次开发完成对多盘转子结构状态变量提取,及自动优化流程控制。算例结果表明,在满足几何、强度要求条件下,优化后多盘转子结构质量减少了 33%,应力分布更为均匀,且验证该方法具有良好的稳定性及精度。

关 键 词: 多盘转子结构; 自动优化; UG 平台; Workbench 平台; 二次开发
中图分类号: V232.3 **文献标志码:** A

Automatic optimization method for multi-disk rotor structure of aero-engine based on UG and Workbench platform

ZHANG Kun, LU Shan
(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: At present, the optimization design of an aero-engine rotor is limited to single disk optimization, and the optimization needs to be performed by manual adjustment. In view of the convenience of aero-engine rotor data exchange between the optimization and model building software platforms and the reduction of manual adjustment, an automatic optimization method of multi-disk rotor structure of aero-engine based on UG and Workbench platform was proposed. Firstly, based on the UG platform, parametric geometrical modeling of multi-disk rotor structure can be made, and a standardized template was generated, in order to optimize the similar disk optimization problem. Then based on the Workbench platform, with APDL and Python redevelopment code, extraction of multi-disk rotor structure's state variables and automatic optimization of process control were completed. The results of a numerical example showed that under the condition of satisfying geometrical and strength requirements, the mass of rotor was reduced by 33%, and the stress distribution was more uniform. And the method was proved to be of good stability and precision.

Key words: multi-disk rotor structure; automatic optimization;
UG platform; Workbench platform; secondary development

众所周知,转子盘类件是航空发动机的质量大户,如何优化航空发动机转子盘类件是减小发动机质量,提高航空发动机推(功)质比的重要工作之一^[1]。

现代航空发动机压气机转子多是由多个轮盘通过鼓筒结构连接组成^[2]。在航空发动机工作时,它们之间存在力的传递,并在相互作用力下形成最终的应力分布,这种相互附加应力影响占总应力的 10%~20%^[3]。但目前,国内外多数研究主要集中在单盘结构优化^[4-8],关于多盘转子优化研究没有检索到外文文献,仅有四篇中文文献^[3,9-11],且均完成于 20 世纪 90 年代。其中,雷先华等^[3,9]基于 I-DEAS 软件编写了对压气机整体转子优化设计的程序,但其仅依靠各区域最大等效应力作为状态变量求解依据,且当时计算机和所用软件较现在落后。黄致建等^[10-11]同样基于 I-DEAS 软件编写了对压气机多级组合盘结构优化设计的程序,但其对盘单独有限元计算,并在盘鼓接触面进行变形协调计算,大大增加计算难度与机时,且盘、鼓分离形式目前已经基本淘汰。

在常见轮盘结构优化中有两种分析模型:三维循环对称模型^[4-5]和二维轴对称模型^[6,12-14]。三维循环对称模型优点是能够较好地模拟叶片模型与盘的连接,但三维循环对称模型单元与节点数太多,耗费计算机资源与机时。二维轴对称模型优点是计算单元与节点少,容易获得优化结果,但二维轴对称模型只能通过在轮缘上施加轮缘分布载荷来模拟轮缘凸块和叶片在离心力作用下对轮缘的作用,更适合于盘结构方案优化。鉴于多盘转子采用三维循环对称模型进行优化时模型单元和节点数过多,且关于多盘转子优化的文献全部使用二维轴对称模型,本文关于多盘转子结构优化的方法研究同样采用二维轴对称模型。

目前,航空发动机结构设计均采用 UG 建模,其结构强度及结构优化方面的分析计算多用 ANSYS 经典版^[4,7,12-13]。近年来,ANSYS 公司推出了支持与 CAD 软件数据交流的 ANSYS Workbench 平台。但关于用 Workbench 做分析的文献较少^[8],且停留在 Workbench 的 GUI (graphical user interface)功能应用上。为便于工程设计中 CAD 与 CAE 数据双向交流及提高优化效率,本文通过对以往优化方法综合技术创新,

研究了基于 UG、Workbench 平台航空发动机多盘转子自动优化方法。

1 基于 UG 的几何模型建立

1.1 几何模型建立

本文多盘转子优化所采用的几何模型由 UG 8.0 软件建立。多盘转子模型的子午面轮廓如图 1 所示。

多盘转子结构为某高压压气机转子前两级子午面结构,从上往下依次是高压一级轮盘及鼓筒和二级轮盘及鼓筒。由于篇幅有限,本文仅给出了与优化相关的尺寸,以“DS”开头则为设计变量,F1 代表盘 1、鼓筒 1,F2 代表盘 2、鼓筒 2,R 为径向,H 为厚度方向,X、Y 分别为坐标系中 x 、 y 的方向。其中一级轮盘六个设计变量,一、二级间鼓筒一个设计变量,二级轮盘五个设计变量,二级后鼓筒一个设计变量。辐板与轮毂过渡段倒圆大

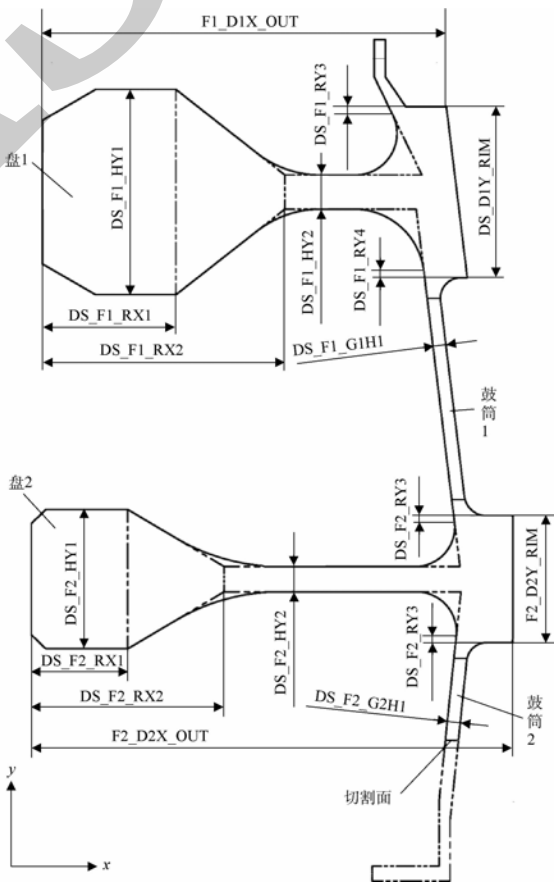


图 1 多盘转子结构子午面几何形状
Fig. 1 Meridian surface of the multi-disk rotor structure

小定义为与辐板径向长度相关。为便于计算把多盘转子模型划分为四个区域计算,由于不明鼓筒 2 后端的载荷情况,对鼓筒 2 采取了对半切除,在切割面施加对称约束以模拟真实的工况。

本文所采用设计变量除两个鼓筒厚度(DS_F1_G1H1、DS_F2_G2H1)外,其余均为无量纲设计变量,以便于确定设计变量范围。其中盘几何尺寸中,沿转子轴向尺寸均表示为同一盘的轮缘宽度(F1_D1Y_RIM 或 F2_D2Y_RIM)乘以对应设计变量系数值;沿盘径向尺寸均表示为同一盘的轮盘外缘到轮盘内侧距离(F1_D1X_OUT 或 F2_D2X_OUT)乘以所对应设计变量系数值。

1.2 模型扩展

本文在构建几何模型时,兼顾到了对同类优化问题的扩展。由盘 1 轮缘前段半径、轮缘倾角、轮缘宽度、盘心半径,盘 2 轮缘半径、轮缘宽度、盘心半径,盘间距等组成基本几何参数组。优化其他类似转子时,仅需通过修改基本几何参数组,即可对多盘转子初始几何模型快速修改更新。

2 多盘转子优化数学模型

本文优化目标为多盘转子质量最小,约束条

件为应力约束和少量几何约束,数学模型^[15]如下:

$$\min \quad m(X)$$
$$\text{s. t.} \quad g_i(X) \geqslant Y_i, \quad i = 1, \cdots, l$$
$$H_j \geqslant x_j \geqslant L_j, \quad j = 1, \cdots, k$$

其中 $m(X)$ 为转子质量函数, $g_i(X)$ 为状态变量、 Y_i 为对应下限(见表 1), $X=R^k$ 为设计变量集, $H_j、L_j$ 为对应设计变量 $x_j(x_j \in X)$ 上、下界(见表 2), $l、k$ 分别为状态变量、设计变量个数。由于本文 $m(X)、g_i(X)$ 函数存在明显非线性,所以优化问题为非线性优化,这也是本文优化算法选择的依据。

依据压气机盘及鼓筒优化评定标准^[16],制定出状态变量 $g_i(X)$ 及下限值 Y_i 如表 1 前两列所示(几何约束将在算例中详述)。基于 Workbench Mechanical 模块 APDL 二次开发^[17],编写各状态变量的求解模块并集成宏函数,并通过调用宏函数计算提取优化模型中各状态变量值。与 ANSYS 经典模块有别, Mechanical 模块 APDL 仅可对有限元模型节点和单元操作,且须借助 Named Selections 命名需操作的节点或单元组。

表 1 各状态变量下限及初始值
Table 1 Lower limits and initial value of state variables

$g_i(X)$	Y_i	初始值	
		盘鼓组 1	盘鼓组 2
盘内径周向应力屈服储备系数	1.0520	1.2803	1.2501
子午面平均周向应力屈服储备系数	1.2500	1.7297	1.6605
子午面平均周向应力极限拉伸强度储备系数	1.5400	1.9321	1.8548
最大平均离心径向应力屈服储备系数	1.2500	1.6131	1.5830
辐板周向平均应力屈服储备系数	1.1800	1.5289	1.4585
最大平均离心径向应力极限拉伸强度储备系数	1.5400	1.8018	1.7682
鼓筒平均周向应力屈服储备系数	1.2500	1.7498	1.6280
鼓筒平均周向应力极限拉伸强度储备系数	1.5400	1.9545	1.8184
鼓筒等效应力极限拉伸强度储备系数	1.0520	1.9867	1.5297
鼓筒中心线最大周向应力屈服强度储备系数	1.0520	1.6576	1.5011
鼓筒截面平均轴向应力屈服强度储备系数	1.2500	6.8086	6.8843

注:规定以产生 0.1%残余变形的应力值为其屈服值。

3 多盘转子优化策略

本节基于 Python^[18]的 Workbench 操作平台

二次开发,实现对轮盘优化设计的无人工干预自动优化设计流程控制。

鉴于多盘转子优化的设计变量较多,且不同

盘鼓之间设计尺寸与状态变量相关性较小,如果采用以往的整体优化方法将影响优化效率。为提高优化效率,本文提出将多盘转子优化分为盘 1 和鼓筒 1、盘 2 和鼓筒 2 两个盘鼓组分别交替优化的策略。本文所采用优化策略的流程图如图 2、图 3 所示。本文算例数值试验验证:交替优化策略比整体优化策略时间上节约 23.25%。

如图 2 所示,Python 程序调用事前已生成的转子优化模版,该优化模版为参数化描述的多盘转子初始模型;然后调用优化初始文件中的数据替换优化模版中的参数,并选择本次优化的盘鼓组对象,进入优化阶段。该方法避免转子结构设计人员定义各设计变量的重复工作。

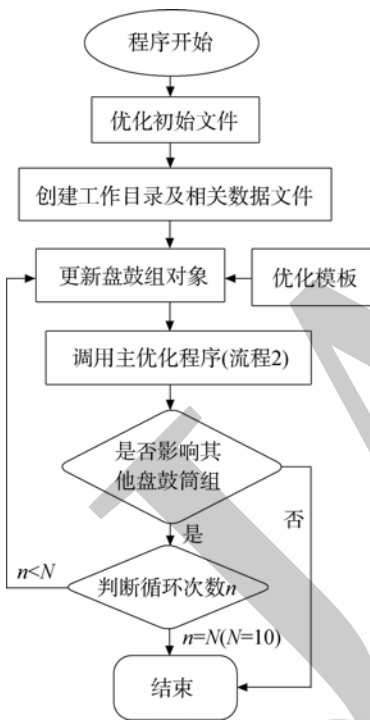


图 2 主流程图(流程 1)
Fig. 2 Main flow chart (flow 1)

如图 3 所示,进入优化阶段,首先对该盘鼓对象进行综合优化,综合优化算法包括筛选法、遗传法、序列二次规划法,程序在已生成的响应面上用每种优化算法优化一次,并对其优化结果进行比较选出下一步优化的初始点,计算出下一步优化的可行域(从第二次优化以后,优化可行域将以优化的初始点为中心,各设计变量取值范围为设计变量取值总范围的一半,命名为子可行域)。综合优化的目的是在总的设计变量可行域内寻找出更为接近最优解的备选优化结果,为后续的一阶优化提供优化初始点。综合优化算法包含多种算法

也是为了满足不同非线性优化问题的需要,避免落入局部最优,增强本优化方法的通用性、稳定性。对于已知响应面规律的优化,可根据已得优化结果或经验指定程序只选用其中一种或二种优化算法。综合优化阶段结束的准则为优化结果点落在子可行域空间内部或者设计变量在可行域边缘。

如图 3 所示,盘鼓组对象进入一阶优化阶段,本文优化算法选择基于梯度的序列二次规划算法,如果备选优化结果点未达到本盘鼓组优化的最终要求,则把得到的备选优化结果点加入样本空间中,重新生成修正响应面,再次用序列二次规划法寻优,并得到新的备选优化结果点。如此往复循环,直到备选优化结果点达到本盘鼓组优化最终要求,结束本阶段,图中 A 为最大允许修改响应面次数。本阶段优化收敛要求:①所有状态变量均大于等于给定下限;②优化目标函数收敛,收敛的准则是优化目标函数变化连续三次小于 0.1%。

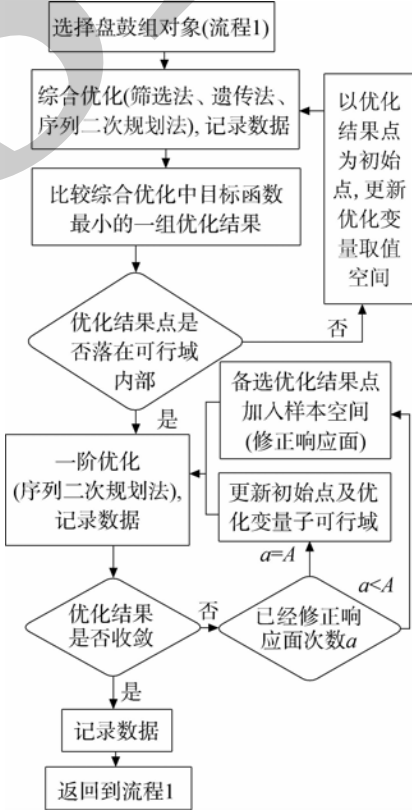


图 3 子优化程序流程图(流程 2)
Fig. 3 Sub-optimization program flow chart (flow 2)

如图 2 所示,由于本优化程序对多盘转子优化采取分组优化,故每一盘鼓组优化结束后都需判断本次优化对其他盘鼓组应力影响。如果影响较大,则重新对其他盘鼓组进行优化。需要说明

的是本次优化将跳过综合优化阶段,直接采用一阶优化。如果影响在允许范围内,且所有优化结果符合收敛要求,优化程序结束,多盘转子优化得到最终结果。对其他盘鼓组影响的判断准则:①其他盘鼓组合所有状态变量均大于等于给定下限;②在本盘鼓组优化前后其他盘鼓组各状态变量变化量小于 0.2%。

4 算例分析

4.1 优化约束条件

以某型压气机结构设计分析为例,优化分析基本几何尺寸:盘 1 轮缘前段半径为 212 mm、轮缘宽度为 46 mm、盘心半径为 103 mm,盘 2 轮缘半径为 230 mm、轮缘宽度为 34 mm、盘心半径为 100 mm,盘间距为 104 mm。

优化载荷条件包括盘 1 轮缘均布载荷 70 MPa,盘 2 轮缘均布载荷 59 MPa,工作转速为 15 400 r/min 以及温度为 270 ℃。本算例中多盘转子结构所有盘与鼓筒材料相同,均为 TC11。本算例多盘转子结构的子午面初始轮廓如图 1 所示。

根据盘结构几何限制及经验给出本文优化算例各设计变量取值的上下界,如表 2 所示;本算例初始模型各状态变量初始值参见表 1 后两列。

表 2 设计变量数据
Table 2 Data of design variable

设计变量	x_j	L_j	H_j
DS_F1_RX1	0.33	0.1	0.35
DS_F1_RX2	0.6	0.45	0.66
DS_F1_RY3	0.05	0.01	0.2
DS_F1_RY4	0.04	0.01	0.2
DS_F1_HY1	1.2	0.8	1.3
DS_F1_HY2	0.2	0.1	0.4
DS_F1_G1H1/mm	3.5	2	5
DS_F2_RX1	0.2	0.1	0.25
DS_F2_RX2	0.4	0.3	0.5
DS_F2_RY3	0.05	0.01	0.25
DS_F2_HY1	1.1	0.6	1.2
DS_F2_HY2	0.2	0.1	0.35
DS_F2_G2H1/mm	3.5	2	5

4.2 多盘转子优化结果分析

多盘转子优化结果见图 4、表 3、表 4。由表 4 可知,经过多盘转子优化,子午面平均周向应力极

限拉伸强度储备系数和最大离心径向应力极限拉伸强度储备系数处于下限值(1.54)附近,说明这两项是制约各盘鼓组中盘优化减少质量的最主要因素,与预测相符。盘鼓组 2 中鼓筒平均周向应力极限拉伸强度储备系数处于下限值(1.54)附近,与其对应的盘鼓组 1 的鼓筒平均周向应力极限拉伸强度储备系数未能达到下限,原因如表 4 所示,盘鼓组 1 中关于鼓筒设计变量 DS_F1_G1H1 已经达到了下界 2 mm(出于对鼓筒振动抑

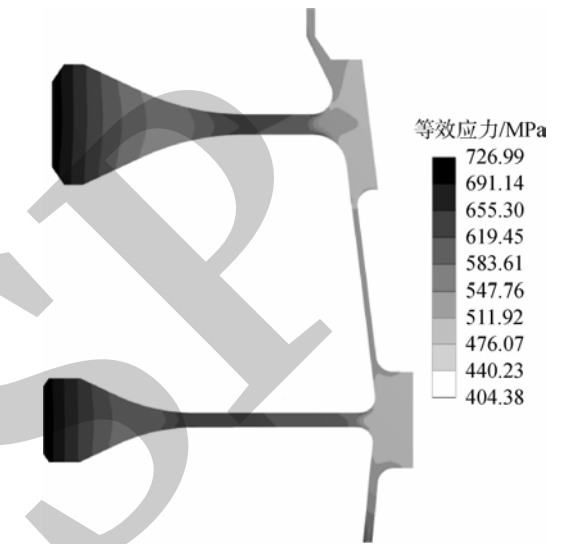


图 4 优化后多盘转子结构等效应力云图
Fig. 4 Equivalent stress contour of multi-disk rotor structure after optimization

表 3 优化前后设计变量对比
Table 3 Comparison of design variables before and after optimization

设计变量	优化前	优化后
DS_F1_RX1	0.3300	0.1000
DS_F1_RX2	0.6000	0.4500
DS_F1_RY3	0.0500	0.2000
DS_F1_RY4	0.0400	0.2000
DS_F1_HY1	1.2000	0.9358
DS_F1_HY2	0.2000	0.1553
DS_F1_G1H1/mm	3.5	2.0000
DS_F2_RX1	0.2000	0.1000
DS_F2_RX2	0.4000	0.3032
DS_F2_RY3	0.0500	0.2500
DS_F2_HY1	1.1000	0.8671
DS_F2_HY2	0.2000	0.1507
DS_F2_G2H1/mm	3.5	3.1680

制的考虑)。在满足几何与各种强度约束的条件下,多盘转子优化后质量(20.07 kg)比优化前质量(29.96 kg)减小了 33%。多盘转子结构的优化后的等效应力分布如图 4 所示。

4.3 优化方法稳定性检验

为验证本文优化策略及所编程序的稳定性,

本文通过改变多盘转子优化的初始点分别为设计变量初始值、上界或下界,重新优化得到如表 5 的优化结果。从优化结果的各设计变量值及目标函数(质量)可以看出,从可行域内的任何点出发,本文的自动优化程序均能收敛并找到最优解,说明本文多盘转子结构自动优化程序合理且稳定性良好。

表 4 优化前后状态变量对比
Table 4 Comparison of state variables before and after optimization

$g_i(X)$	Y_i	盘鼓组 1		盘鼓组 2	
		优化前	优化后	优化前	优化后
盘内径周向应力屈服储备系数	1.0520	1.2803	1.0738	1.2501	1.0629
子午面平均周向应力屈服储备系数	1.2500	1.7297	1.3822	1.6605	1.3804
子午面平均周向应力极限拉伸强度储备系数	1.5400	1.9321	1.5439	1.8548	1.5419
最大离心径向应力屈服储备系数	1.2500	1.6131	1.3816	1.5830	1.3818
辐板周向应力屈服储备系数	1.1800	1.5289	1.2338	1.4585	1.1886
最大离心径向应力极限拉伸强度储备系数	1.5400	1.8018	1.5432	1.7682	1.5435
鼓筒平均周向应力屈服储备系数	1.2500	1.7498	1.4588	1.6280	1.3814
鼓筒平均周向应力极限拉伸强度储备系数	1.5400	1.9545	1.6295	1.8184	1.5430
鼓筒等效应力极限拉伸强度储备系数	1.0520	1.9867	1.8250	1.5297	1.4067
鼓筒中心线最大周向应力屈服强度储备系数	1.0520	1.6576	1.4332	1.5011	1.2918
鼓筒截面平均轴向应力屈服强度储备系数	1.2500	6.8086	3.8962	6.8843	6.2300

表 5 不同初值情况转子优化结果对比
Table 5 Comparison of optimized results with different initial values

变量	手动优化最优点	初始点为下界的最优点	初始点为初值的最优点	初始点为上界的最优点
DS_F1_RX1	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
DS_F1_RX2	0.4500	0.4500	0.4500	0.4500
DS_F1_RY3	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
DS_F1_RY4	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
DS_F1_HY1	0.9359	0.9332	0.9358	0.9358
DS_F1_HY2	0.1553	0.1552	0.1553	0.1553
DS_F1_G1H1/mm	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
DS_F2_RX1	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
DS_F2_RX2	0.3032	0.3000	0.3032	0.3032
DS_F2_RY3	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
DS_F2_HY1	0.8671	0.8738	0.8671	0.8671
DS_F2_HY2	0.1507	0.1509	0.1507	0.1507
DS_F2_G2H1/mm	3.1680	3.1657	3.1680	3.1680
$M(X)/\text{kg}$	20.0655	20.0523	20.0649	20.0649

5 结 论

本文主要贡献如下:

1) 提出并建立了基于 UG、Workbench 平台航空发动机多盘转子结构自动优化方法,实现了工程设计中 UG 建模与 Workbench 应力分析及优化软件间对接及数据交流。

2) 基于 Workbench Mechanical 结构分析模块,利用 APDL 二次开发,提取计算状态变量,以实现优化约束。

3) 利用 Workbench 平台 Python 语言二次开发,实现对轮盘优化设计模型无人工干预自动优化设计全流程控制。

4) 通过修改本文多盘转子模板基本几何尺寸及设计变量可行域,可方便地实现对其他同类多盘转子结构的优化。

参考文献:

- [1] DAVID P G, MARK G T. Rapid low fidelity turbomachinery disk optimization[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(5): 779-791.
- [2] 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.
- [3] 雷先华, 江和甫, 王旅生. 整体压气机转子结构优化设计[J]. 航空动力学报, 1997, 12(1): 40-42, 106.
LEI Xianhua, JIANG Hefu, WANG Lüsheng. Structure optimized design of overall compressor rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(1): 40-42, 106. (in Chinese)
- [4] SHEN X L, DONG S J, QI X D. The fluid-thermal-structure coupled analysis and optimization of turbine mortise/disc[R]. ASME Paper 2012-GT-9551, 2012.
- [5] QI X D, SHEN X L. Multidisciplinary design optimization of turbine disks based on ansys workbench platforms [C]// Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology. Shanghai: Procedia Engineering, 2014: 1275-1283.
- [6] TONG M T. A computer code for gas turbine engine weight and disk life estimation[R]. ASME Paper 2002-GT-30500, 2002.
- [7] 陆山, 鲁冯杰. 基于 ANSYS 的整体叶盘结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1218-1224.
LU Shan, LU Fengjie. Structure optimization design for blisk based on ANSYS[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1218-1224. (in Chinese)
- [8] 范志强, 马枚, 王荣桥. 航空发动机整体叶盘优化设计[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 13(4): 27-30.
FAN Zhiqiang, MA Mei, WANG Rongqiao. Optimum design for blisk of aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2000, 13(4): 27-30. (in Chinese)
- [9] 雷先华, 江和甫, 王旅生. 整体压气机转子优化设计系统[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1995(3): 17-20.
LEI Xianhua, JIANG Hefu, WANG Lüsheng. Optimization design system for whole compressor rotor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1995(3): 17-20. (in Chinese)
- [10] 黄致建, 郝艳华, 郑光华. 多级组合盘的整体结构最优化设计[J]. 航空动力学报, 1994, 9(3): 245-248, 331.
HUANG Zhijian, HAO Yanhua, ZHENG Guanghua. Whole structure optimization design for multi-level combination disk[J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 9(3): 245-248, 331. (in Chinese)
- [11] 黄致建. 多级组合盘的整体结构最优化设计[J]. 航空发动机, 1992(5): 58-65.
HUANG Zhijian. Whole structure optimization design for multi-level combination disk[J]. Aeroengine, 1992(5): 58-65. (in Chinese)
- [12] 陆山, 李伦未. 航空发动机高负荷涡轮盘双幅板结构优化设计[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] 李伦未, 陆山. 基于 ANSYS 的多辐板风扇盘结构优化设计技术[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2245-2250.
LI Lunwei, LU Shan. Structure optimum design techniques for multi-web fan disk based on ANSYS[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2245-2250. (in Chinese)
- [14] 章胜, 赵明, 陆山, 等. 基于等强度理论的轮盘优化设计方法研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(9): 1322-1326.
ZHANG Sheng, ZHAO Ming, LU Shan, et al. Research on an optimal method of disks based on the equivalent strength theory[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(9): 1322-1326. (in Chinese)
- [15] 张可村, 李换琴. 工程优化方法及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [16] 《航空发动机设计手册》总编委会. 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, 2001.
- [17] 尚晓江, 邱峰, 赵海峰. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [18] 董付国. Python 程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

(编辑: 陈 越)