

涡轮榫接结构多层次设计优化方法

申秀丽^{1,2}, 张野¹, 龙丹¹, 董少静¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 针对航空发动机涡轮榫接结构设计优化, 根据不同的阶段和要求开展 3 个层次的优化: 二维模型榫接结构基本参数优化、三维带盘模型榫接结构优化以及叶盘结构的气动-结构强度多学科优化。3 个层次的优化是迭代进行的, 第 1 层次构建基本的结构参数, 第 2 层次建立在第 1 层次优化结果之上, 同时考虑与轮盘相互影响的重要参数。在第 2 层次不能达到最优或不满足要求的前提下, 开展第 3 层次的叶盘结构多学科优化研究, 通过调整流道等气动参数, 达到气动和结构强度两个学科相对最优。结果表明经过优化第 1 阶段榫接结构最大径向应力降低 12.7%, 第 2 阶段轮盘减质量 6.9%, 第 3 阶段气动和强度的综合优化效果提升 2.4%, 得到满足设计要求的榫接结构。

关键词: 涡轮; 榫接; 灵敏度分析; 多层次; 多学科优化

中图分类号: V231

文献标志码: A

Multi-level design and optimization of turbine joint structure

SHEN Xiu-li^{1,2}, ZHANG Ye¹, LONG Dan¹, DONG Shao-jing¹

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: For the optimization design of aero-engine turbine joint structure, a 3-step optimization method was developed based on different levels and requirements: basic parameter optimization for 2-D model of joint, joint structure optimization for 3-D model with disk and multidisciplinary optimization of aerodynamics and structural strength for disk. The 3-step optimization process was iterative; in the first step, the basic parameters were built; the secondary step was established on former results, while some important parameters influencing the disk can be taken into account. When the second step cannot meet the requirements or make the best result, the multidisciplinary optimization was conducted, the outlines of turbine flow path were designed according to aerodynamics analysis, and the 3-D turbine blades were introduced. Through the multidisciplinary optimization of aerodynamic and structural strength, the optimum solution can be obtained to realize the relatively best result of the two disciplines. The results show that, after the optimization the max radial stress of the joint structure dropped by 12.7% in the first step, the mass of turbine decreased by 6.9% in the second step and the comprehensive result of aerodynamic and structural strength increased by 2.4% in the third step while meeting the requirements of design.

Key words: turbine; joint; sensitivity analysis; multilevels; multidisciplinary optimization

航空发动机涡轮榫接结构是连接转子叶片与涡轮盘的关键部位,承受高温高离心力的工作条件,需要同时满足强度和疲劳寿命等严格要求,反之容易出现断裂、掉块等故障,造成灾难性后果。

根据相关资料统计,典型叶片故障中,超过 30% 是榫接结构断裂所造成,且故障原因多为设计因素^[1]。榫接结构的设计之所以困难,首先因为榫接结构十分精细,其应力大小对尺寸十分敏感,申秀丽等^[2]针对典型榫接关键参数对当量应力的灵敏度分析结果表明:某些关键参数仅仅变化 1% 就会导致应力变化 9% 以上。其次,榫接结构是连接叶片和轮盘的关键部位,受到自身结构外的多重影响,包括叶片结构及载荷、涡轮盘结构与载荷、涡轮气动流道与转速的影响^[3]等,实际工作情况复杂,难于准确判断。此外,榫接结构接触问题属于非线性问题,受到有限元求解精度的限制,尽管有学者提出接触应力的预测模型^[4],但是不能泛用在优化分析中,有待进一步改进。

针对榫接结构强度计算及优化问题, Song Wenbin 等^[5]通过二维参数化建模与有限元分析进行了设计优化,目标函数降低 20%。Meguid 等^[6]综合分析二维和三维涡轮盘枞树形榫接结构,认为二维计算没有考虑接触力沿厚度方向的变化以及拉削角的影响,准确性较差。

综合以上分析,在传统榫接结构优化方面如下问题有待解决:

1) 榫齿接触面接触问题。优化中需考虑因网格疏密带来的接触边界应力变化问题^[7],这将影响以最大当量应力最小为目标函数优化的分析精度。

2) 几何模型问题。单纯的二维模型或二维拉伸得到的三维模型不能准确地描述榫接结构拉削角、循环对称状态等一系列边界条件,应采用循环对称轮盘模型进行分析^[8]。

3) 多学科耦合问题。榫接结构是连接叶片和轮盘的关键结构,不仅与两者的工作状态相互影响,也受如气动等其他学科的影响^[3],通过调整流道、转速等气动参数,改变盘缘半径及叶片的离心载荷,从而调整影响榫接结构的应力响应。

针对上述三方面问题,本文提出一种多层次的、可以考虑叶盘结构和涡轮气动流道的多学科优化方法。

1 涡轮榫接结构多层次优化策略

将榫接结构优化分为 3 个层次:第 1 层次,基

于二维模型的榫接结构基本参数优化;第 2 层次,基于三维模型,考虑榫接和轮盘相关参数优化;第 3 层次,基于叶片流道和叶盘结构的多学科优化。

3 个层次是迭代进行的,榫接结构基本参数优化是研究的基础,用来初步确立榫接结构模型。在此基础上,进行带轮盘的榫接结构优化,此时不仅可以降低应力集中,还可实现轮盘减质量。最后进行带流道和叶片的榫接结构优化,运用多学科优化方法通过调整气动参数来改变流道尺寸和轮盘的负载,实现最优的榫接结构模型。3 个层次的优化流程见图 1。

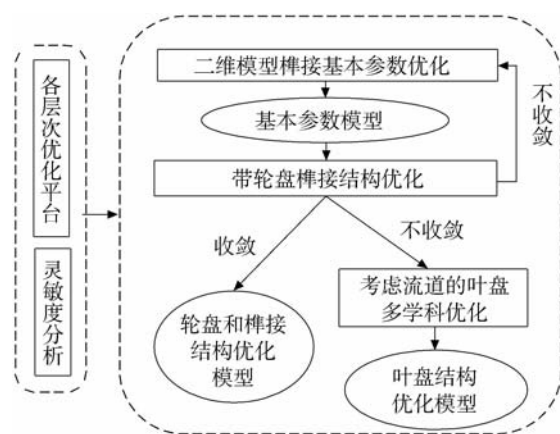


图 1 榫接结构优化方法流程图

Fig. 1 Flow chart of optimization of joint structure

榫接结构优化中的设计参数包括榫接结构基本参数和与轮盘相关的参数。基本参数主要决定榫齿的形状,在优化的 3 个阶段都有所体现。轮盘相关参数决定了榫接与轮盘的相互关系,只应用在优化的第 2,3 阶段。

1.1 榫接结构基本参数

图 2 为某三齿枞树形榫接结构基本参数,主要包括:榫头径宽(W_j)、榫头高度(H_j)、榫头齿距($T_{c1} + T_{c2}$)、榫槽齿宽(T_{c2})、榫头榫槽底部间隙(H_g)、上侧角(A_t)、下侧角(A_d)、楔形角(A_s)、榫头底部圆角半径(R_t)和榫槽底部圆角半径(R_c)等。

1.2 与轮盘相关的参数

图 3、图 4 为涡轮盘基本参数,包括盘缘宽度(W_2)、盘缘高度(H_2)、拉削角(A_x)、盘心高度(W_1)和盘心宽度(H_1)。其中盘缘高度与榫槽高度($H_j + H_g$)正相关。

榫接结构优化目标函数包括最大应力最小和总质量最轻两种。选用最大应力最小作为目标函

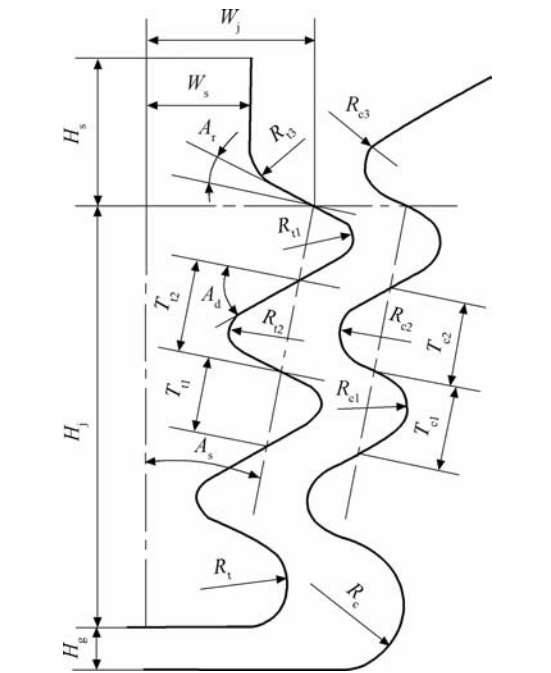


图 2 榫接结构基本参数

Fig. 2 Basic parameters of joint structure

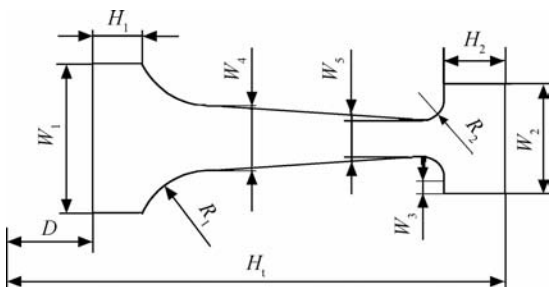


图 3 轮盘基本参数

Fig. 3 Basic parameters of disks

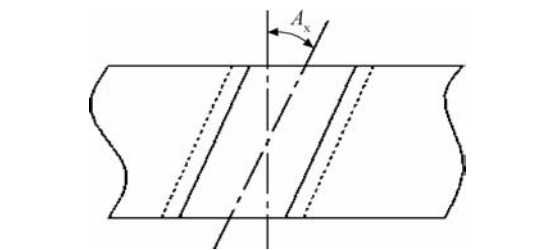


图 4 榫接结构拉削角

Fig. 4 Broaching angle of joint structure

数主要为了降低应力集中,在优化的 3 个阶段都可以选用,在进行三维分析时,虽然目标函数只选择了最大应力最小,质量仍要考虑,通常取质量为约束条件来衡量优化效果;选用总质量最轻为目标函数是为了减少轮盘质量,只在三维分析中使

用.在优化过程中将应力作为约束条件.

数据标准化优化过程中,为了便于比较,所有数据进行标准化处理.见表 1,表达式中包含单位.表达值公式如下(以质量为例):

表达值 = (计算值 / 标准值) × a

例:标准值为 100 kg,计算为 200 kg,表达值为 2a.

表 1 数据标准化明细
Table 1 Details of data standardization

符号	参数名称
<i>a</i>	质量/kg
<i>b</i>	应力/MPa
<i>c</i>	转速/(r/min)
<i>d</i>	长度/mm
<i>e</i>	角度/(°)
<i>f</i>	温度/°C

2 榫接结构优化中接触问题的处理

接触面的网格疏密划分程度影响计算精度和优化时间,接触面的计算精度主要影响接触面的应力分布,对榫接结构其他部位的影响不大.

申秀丽等^[9]、魏大盛等^[10]探讨了接触区应力的收敛性.随着有限元网格数的增加,边界应力出现无穷大的趋势.同时,计算时间也急剧增加.对此 Gean 等^[11]提出过一种预测程序,但是不能泛用.

为了提高计算精度,通过与光弹试验对比选择恰当的网格精度.这样可以避免细化网格所带来的计算时间过长和过细的网格所导致接触边界应力过大而出现误差较大的问题.光弹试验结果及应力分布见图 5.其中横坐标表示从接触区中部到接触边界的无量纲距离(*L*),纵坐标表示无量纲应力(*σ*)水平.

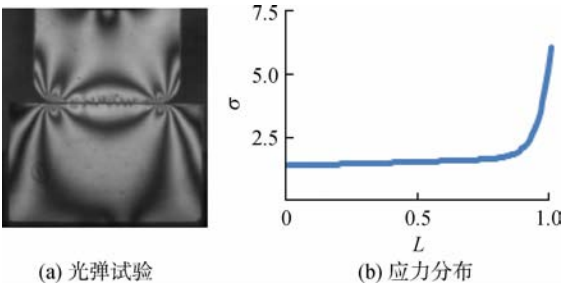


图 5 接触光弹试验及应力分布
Fig. 5 Photoelastic experiment of contact and its stress distribution

将试验结果与有限元分析结果进行对比发现,当每个单元网格加密到接触区长度约 1/35 时,与试验结果相比相对误差最小,为 0.93%。因此在榫接结构基本参数优化时选用相对稀疏的网格计算接触应力,此后再针对该问题细化网格进行验算。接触应力只作为参考,不作为约束条件。

3 榫接结构基本参数优化

榫接结构基本参数优化,在实际研究工作中应用最多,可提供初步的结构模型,也可三维待优化模型提供原始榫接结构。

优化模型的建立包括选取设计变量,设置约束条件以及确定目标函数。

根据灵敏度分析,选取对径向应力和接触应力影响最大的参数作为设计变量。其初值选取及取值范围如表 2 所示。其他灵敏度较小的参数表中未列出。

表 2 基本参数优化中设计变量的初值选取及取值范围
Table 2 Initial value and ranges of the design variables in basic parameter optimization

设计变量	下限值	初值	上限值	灵敏度
W_j	$0.889d$	d	$1.056d$	0.0472
T_{t1}	$0.389d$	$0.4d$	$0.411d$	0.3040
T_{t2}	$0.478d$	$0.489d$	$0.5d$	0.1103
T_{c2}	$0.433d$	$0.444d$	$0.456d$	0.0123
H_g	$0.167d$	$0.222d$	$0.278d$	0.2170
H_j	$2.167d$	$2.222d$	$2.278d$	0.1071
A_d	$0.9e$	e	$1.1e$	0.0556
A_t	$0.338e$	$0.375e$	$0.413e$	0.1747
A_s	$0.25e$	$0.275e$	$0.325e$	0.1564
R_c	$0.278d$	$0.333d$	$0.389d$	0.3898
R_t	$0.195d$	$0.233d$	$0.272d$	0.1033

根据某强度准则和工程经验,选定优化最大径向应力 σ_r 约束上限为 $2.16b$ 。

二维设计优化主要考虑最大应力。故本文选取最大径向应力(σ_r)最小为目标函数,接触应力作为参考。

优化的数学模型如下:

$$\begin{cases} \min \sigma_{\max}(\mathbf{X}) & \mathbf{X} = (R_c, W_j, \dots, H_j)^T \\ \text{s. t.} & x_{i\text{-down}} \leq x_i \leq x_{i\text{-up}} \quad i = 1, 2, \dots, 11 \\ & \sigma_r(\mathbf{X}) - 2.16b \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $x_{i\text{down}}$, $x_{i\text{up}}$ 分别为设计变量取值的上下限。优化前后的设计变量变化如表 3。

表 3 第 2 步优化前后设计变量变化
Table 3 Design variables before and after optimization in the second step

设计变量	初值	优化值	变化量/%
W_j	d	$0.952d$	4.8
T_{t1}	$0.4d$	$0.408d$	2.0
T_{t2}	$0.489d$	$0.481d$	-1.6
T_{c2}	$0.444d$	$0.453d$	2.0
H_g	$0.222d$	$0.213d$	-4.1
H_j	$2.222d$	$2.267d$	2.0
A_d	e	$0.959e$	-4.1
A_t	$0.375e$	$0.395e$	5.3
A_s	$0.275e$	$0.268e$	-0.5
R_c	$0.333d$	$0.324d$	-2.7
R_t	$0.233d$	$0.227d$	-2.6

优化后目标函数由优化前的 $2.24b$ 降低到 $2.02b$,符合约束条件,达到了优化目的。径向应力云图见图 6(几何模型为示意图),该模型最大值位于榫槽二齿圆角。

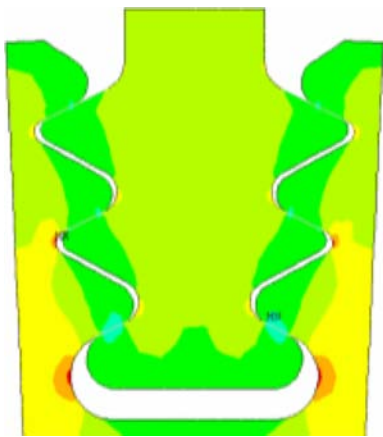


图 6 榫接结构径向应力分布
Fig. 6 Radial stress distribution of joint structure

4 带轮盘榫接结构优化

带轮盘榫接结构优化是在基本参数优化的基础上进行的,首先在带轮盘三维榫接结构优化模型中对二维优化结果进行验证,见图 7,最大径向应力由 $2.36b$ (二维模型的最大径向应力为 $2.24b$)降低到 $2.06b$ (二维模型的最大径向应力

为 2.02*b*). 最大周向应力产生在盘心,大小不变. 可见,基本参数优化能在降低径向应力方面提供指导.

涡轮盘材料选用某粉末冶金^[12],叶片采用某单晶材料^[13]. 温度场计算模型如图 8 所示. 该模型最低温度位于盘心,为 0.773*f*;最高温度位于榫头伸根,为 1.142*f*.

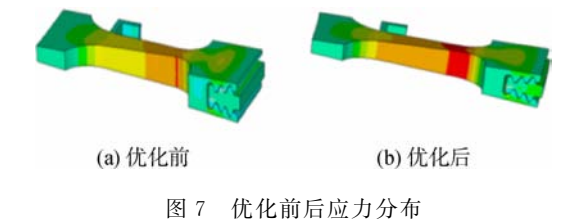


Fig. 7 Stress distribution before and after optimization

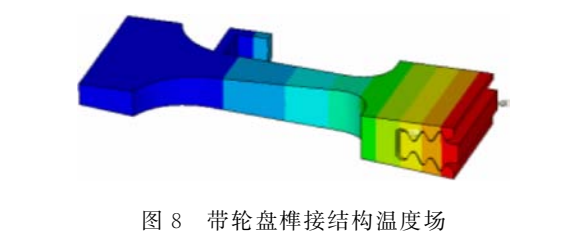


Fig. 8 Temperature field of joint structure with disk

通过灵敏度分析,选取对最大周向应力与质量影响最大的参数作为设计变量. 选用设计变量及变化范围如表 4.

表 4 第 2 步设计变量的初值选取及取值范围
Table 4 Initial value and ranges of the design variables in the second step

设计变量	下限	初值	上限	灵敏度
W_j	0.889 <i>d</i>	0.952 <i>d</i>	0.978 <i>d</i>	0.0513
T_{t1}	0.4 <i>d</i>	0.408 <i>d</i>	0.420 <i>d</i>	0.0011
T_{t2}	0.489 <i>d</i>	0.481 <i>d</i>	0.513 <i>d</i>	0.0271
T_{c2}	0.444 <i>d</i>	0.453 <i>d</i>	0.467 <i>d</i>	0.0414
H_g	0.167 <i>d</i>	0.213 <i>d</i>	0.278 <i>d</i>	0.0723
H_j	2.222 <i>d</i>	2.267 <i>d</i>	2.333 <i>d</i>	0.0459
A_d	0.9 <i>e</i>	0.959 <i>e</i>	<i>e</i>	0.0381
A_t	0.375 <i>e</i>	0.395 <i>e</i>	0.425 <i>e</i>	0.02
A_s	0.25 <i>e</i>	0.268 <i>e</i>	0.3 <i>e</i>	0.0503
R_c	0.311 <i>d</i>	0.324 <i>d</i>	0.356 <i>d</i>	0.0466
R_t	0.218 <i>d</i>	0.227 <i>d</i>	0.249 <i>d</i>	0.0381
R_j	32.31 <i>d</i>	32.33 <i>d</i>	32.35 <i>d</i>	0.0798
R_{c2}	0.156 <i>d</i>	0.167 <i>d</i>	0.178 <i>d</i>	0.0658

续表				
设计变量	下限	初值	上限	灵敏度
A_x	0.025 <i>e</i>	0.333 <i>e</i>	0.375 <i>e</i>	0.0649
W_2	6.667 <i>d</i>	7.222 <i>d</i>	7.778 <i>d</i>	0.067
H_1	2.222 <i>d</i>	2.778 <i>d</i>	3.333 <i>d</i>	0.0545
H_2	4.444 <i>d</i>	4.819 <i>d</i>	5.556 <i>d</i>	0.0376

根据某强度准则和工程经验,选定优化最大径向应力(σ_r)约束上限为 2.16*b*,周向应力 σ_θ 约束上限为 2.644*b*.

选取总质量(*m*)最小为目标函数.
优化的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min m(\mathbf{X}) \quad & \mathbf{X} = (R_c, W_j, \dots, A_x)^T \\ \text{s. t.} \quad & x_{i\text{down}} \leq x_i \leq x_{i\text{up}} \quad i = 1, 2, \dots, 17 \\ & \sigma_r(\mathbf{X}) - 2.16b \leq 0 \\ & \sigma_\theta(\mathbf{X}) - 2.644b \leq 0 \end{aligned} \tag{2}$$

设计变量的变化情况见表 5. 目标函数的变化情况见表 6.

表 5 第 2 步设计变量优化前后对比
Table 5 Design variables before and after optimization in the second step

设计变量	初值	优化值	变化量/%
W_j	0.952 <i>d</i>	0.904 <i>d</i>	−5.04
T_{t1}	0.408 <i>d</i>	0.42 <i>d</i>	2.94
T_{t2}	0.481 <i>d</i>	0.513 <i>d</i>	6.65
T_{c2}	0.453 <i>d</i>	0.467 <i>d</i>	3.09
H_g	0.213 <i>d</i>	0.214 <i>d</i>	0.47
H_j	2.267 <i>d</i>	2.333 <i>d</i>	2.91
A_d	0.959 <i>e</i>	0.972 <i>e</i>	1.36
A_t	0.395 <i>e</i>	0.408 <i>e</i>	3.29
A_s	0.268 <i>e</i>	0.278 <i>e</i>	3.73
R_c	0.324 <i>d</i>	0.345 <i>d</i>	6.48
R_t	0.227 <i>d</i>	0.228 <i>d</i>	0.44
R_j	32.33 <i>d</i>	32.31 <i>d</i>	−0.06
R_{c2}	0.167 <i>d</i>	0.166 <i>d</i>	−0.60
A_x	0.333 <i>e</i>	0.113 <i>e</i>	−66.07
W_2	7.222 <i>d</i>	6.222 <i>d</i>	−13.85
H_1	2.778 <i>d</i>	2.722 <i>d</i>	−2.02
H_2	4.819 <i>d</i>	4.928 <i>d</i>	2.26

表 6 目标函数优化前后的变化及约束条件的校核

Table 6 Contractions and objective functions before and after optimization

目标函数	初值	优化值	变化量/%
最大径向应力	2.06 <i>b</i>	1.88 <i>b</i>	−8.73
最大周向应力	2.74 <i>b</i>	2.52 <i>b</i>	−8.03
质量(无叶片)	8.02 <i>a</i>	7.47 <i>a</i>	−6.9

经过优化,轮盘质量减少 6.9%,各项应力水平符合要求,达到了优化目的.

添加温度场后,最大周向应力产生在盘心位置,榫接部位的周向应力有较大幅度的下降.这说明在分析过程中,榫接部位的周向应力可以作为一个次要考察因素.

5 考虑气动流道的榫接结构优化

随着航空发动机设计水平不断提高,涡轮前温度和转速越来越高,在进行轮盘榫接结构优化后,整体结构往往还不能满足强度要求或没有达到最优.这时要通过调整气动参数来改变流道高度和气动负载,进而降低现有结构的应力水平,优化整体结构.

其多学科优化流程如图 9 所示,主要包括气动流道设计、转子参数化建模、强度计算和多学科优化四部分.

由于流道尺寸对转子强度的影响很大,流道越高,相同转速下转子应力越大,此时强度对流道高度的约束也增大.故本文着重分析涡轮流道尺

寸对榫接结构的影响.根据给定的总体性能参数和气动设计参数,进行气动一维、 S_2 反问题气动设计优化,计算涡轮流道内外径,并估算出流道的叶栅气动效率,设计的流道显示界面如图 10 所示.在优化时保证涡轮流量、落压比和功率不变,以气动设计参数如运动反力度、载荷系数、流量系数为设计变量,气动效率为约束条件,得到使整体最大应力最小的涡轮气动流道^[14].

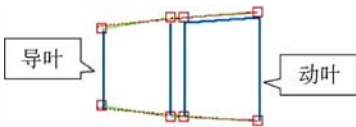


图 10 流道设计显示界面

Fig. 10 Visual interface of the flow paths design

在进行转子整体参数化建模时^[15],根据气动设计得到的流道内径设定涡轮盘的盘缘半径.方案阶段不考虑叶型的优化,只随流道高度变化改变内外径.本文采用 ANSYS 软件自带的 APDL (ANSYS parametric design language) 语言实现转子静强度分析.

多学科优化基于 iSIGHT 优化平台,系统建模采用全集成优化(FIO)建模^[16-17],优化算法采用序列二次规划(NLPQL)优化算法.优化流程如图 11 所示.设计优化变量包括载荷系数、流量系数、转速等气动设计参数,约束条件为最大径向应力和最大周向应力,以气动效率和整体质量最小为目标函数.

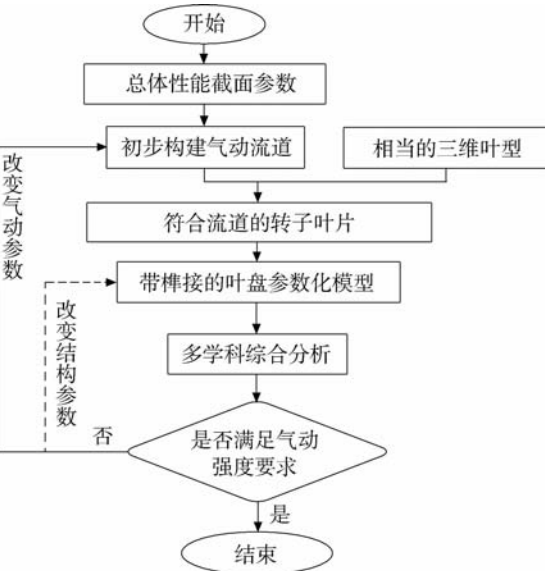


图 9 多学科优化流程

Fig. 9 Flow chart of multidisciplinary optimization process

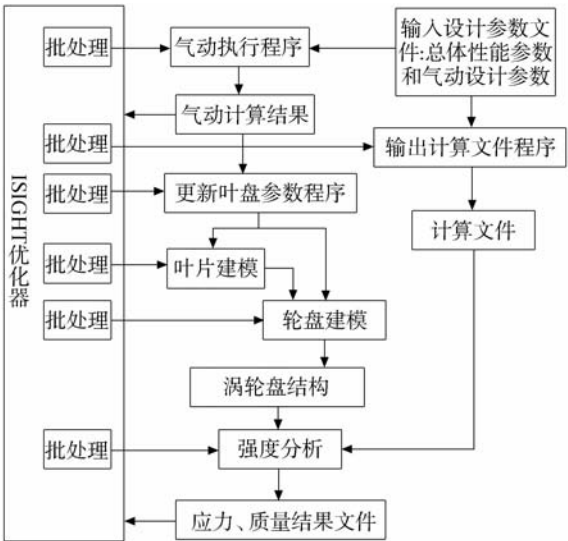


图 11 多学科全集成优化流程

Fig. 11 Optimization process of multidisciplinary

优化过程中温度场与前述一致。

根据气动分析,选取载荷系数 μ 、转速 n 为设计优化变量.再根据前述灵敏度分析,选择轮盘参数盘心宽度 W_1 、盘心高度 H_1 、盘缘高度 H_2 和盘缘宽度 W_2 作为设计优化变量,其初值选取及取值范围如表 7.

表 7 第 3 步设计变量的初值选取及取值范围

Table 7 Initial value and ranges of the design variables in the thrid step

设计变量	下限	初值	上限
n	105 <i>c</i>	110 <i>c</i>	115 <i>c</i>
μ	1.6	1.702	2.0
W_1	7.222 <i>d</i>	7.778 <i>d</i>	8.333 <i>d</i>
H_1	2.667 <i>d</i>	2.722 <i>d</i>	3.111 <i>d</i>
H_2	4.222 <i>d</i>	4.928 <i>d</i>	5 <i>d</i>
W_2	6.111 <i>d</i>	6.222 <i>d</i>	6.667 <i>d</i>

根据某强度准则和工程经验,选定优化最大径向应力 σ_r 约束上限为 $2.16b$,周向应力 σ_θ 约束上限为 $2.644b$.

目标函数的选取充分考虑气动和结构强度两学科的影响,在气动上,在保证满足流量、功率等设计要求的前提下,效率是衡量气动性能好坏的重要标准;在结构设计时,在保证满足强度要求的条件下,涡轮质量最小是结构设计的最终目标.故本文选取质量和效率为目标函数.但为校核优化效果,对效率和质量进行权重计算,引入综合评价函数 $F^{[18]}$,表达式如下:

$$F(\mathbf{X}) = \omega_1 \frac{1}{\eta(\mathbf{X})} + \omega_2 \frac{m(\mathbf{X})}{m(\mathbf{X}_0)}$$

(3)

其中 $\eta(\mathbf{X})$ 为效率函数; $m(\mathbf{X})$ 为质量函数; $m(\mathbf{X}_0)$ 为初始质量函数; ω_1, ω_1 为权因子.

优化的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{X}) \quad & \mathbf{X} = (\mu, n, \cdots, W_2)^T \\ \text{s. t.} \quad & x_{\text{down}} \leq x_i \leq x_{\text{up}} \quad i = 1, 2, \cdots, 6 \\ & \sigma_r(\mathbf{X}) - 2.16b \leq 0 \\ & \sigma_\theta(\mathbf{X}) - 2.644b \leq 0 \end{aligned}$$

(4)

其中综合评价函数中叶盘结构总质量为 $8.9a$. 则

$$F = 0.3 \times \frac{1}{\eta(\mathbf{X})} + 0.7 \times \frac{m(\mathbf{X})}{8.9a}$$

(5)

图 12 为优化前后涡轮流道和涡轮盘的对比.其中虚线为优化前模型,实线为优化后模型.

表 8~表 10 分别为优化前后设计变量、约束条件、目标函数值的对比.

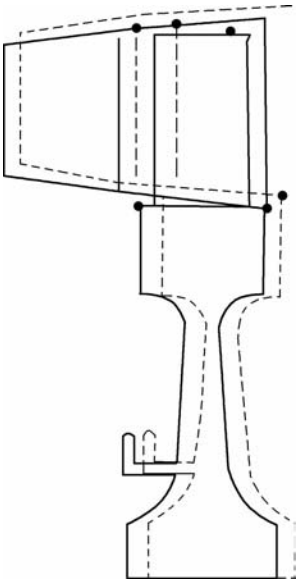


图 12 优化前后涡轮流道与轮盘结构对比图
Fig. 12 Turbine flow path and turbine structure before and after optimization

表 8 第 3 步设计变量优化前后对比

Table 8 Comparison of design variables before and after optimization in the third step

设计变量	初值	优化值	变化量/%
n	110 <i>c</i>	110.0004 <i>c</i>	0.0004
μ	1.702	1.721	1.1
W_1	7.778 <i>d</i>	7.691 <i>d</i>	-1.1
H_1	2.722 <i>d</i>	2.856 <i>d</i>	4.9
H_2	4.928 <i>d</i>	4.358 <i>d</i>	-11.6
W_2	6.222 <i>d</i>	6.324 <i>d</i>	1.6

表 9 第 3 步约束条件优化前后对比

Table 9 Comparison of contractions before and after optimization in the third step

约束条件	初值	优化值	变化量/%
最大径向应力	1.9 <i>b</i>	1.992 <i>b</i>	4.84
最大周向应力	2.56 <i>b</i>	2.56 <i>b</i>	0

表 10 第 3 步目标函数优化前后对比

Table 10 Comparison of objective functions before and after optimization in the thrid step

目标函数	初值	优化值	变化量/%
质量	8.90 <i>a</i>	8.60 <i>a</i>	-3.4
质量(无叶片)	7.47 <i>a</i>	7.18 <i>a</i>	-3.9
气动效率	0.9050	0.9049	-0.01
综合评价函数	1	0.976	-2.4

由图 12 与表 8 可看出,优化后,涡轮流道下降,叶片高度降低.其中转速的变化很小,主要受载荷系数增大的影响.同时盘型参数也有了较大的变化.

优化后结构应力分布如图 13、图 14.

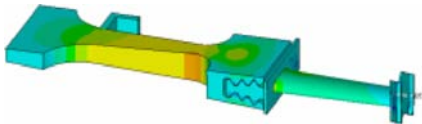


图 13 第 3 步优化后径向应力云图

Fig. 13 Radial stress contour after optimization in the third step

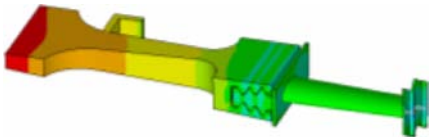


图 14 第 3 步优化后周向应力云图

Fig. 14 Circular stress contour after optimization in the third step

由表 9、表 10 可看出,在满足约束条件的同时,优化后涡轮转子整体质量下降了 3.4%,而危险截面处的平均应力虽然有小幅度增大,但是仍满足约束条件,优化效果明显.但与此同时,气动效率有 0.01% 的损失.总的来说,经过多目标多变量优化后,效率和质量的综合权重函数减小 2.4%,而这意味着气动和强度的综合优化效果提升了 2.4%.

6 结 论

本文针对某涡轮榫接结构,进行了 3 个层次的优化分析,表 11 列举了部分有代表性参数的变化.其中榫接基本参数与轮盘相关参数分别参与了优化的 1,2 和 2,3 两个阶段.可见,部分参数根据其相互关系围绕最优值呈振荡变化.

本文优化实现了涡轮流道尺寸和涡轮结构强度的多学科多变量设计优化,取得了较好的优化效果.得到以下结论:

- 1) 榫接结构二维基本参数优化能有效地降低径向应力(12.7%),起到初步设计的作用.
 - 2) 优化过程中,榫接接触区域无需划分过密的网格,一方面能减少计算时间,另一方面可提高计算精度.
 - 3) 带盘榫接结构优化能够降低轮盘质量(6.9%).同时各项应力水平有所降低.
 - 4) 在考虑温度场的优化分析中,榫接部位周向应力是相对次要的考察因素.
 - 5) 气动和强度的多学科优化效果提升 2.4%,优化效果明显.故采用多学科设计优化方法可以提高航空发动机设计水平,具有优越的工程应用前景.
- 本文针对榫接结构优化进行了有益的探索,但在分析中仍然存在需要改进之处,例如强度准则的应用,叶片气动载荷和热载荷对榫接结构的影响,叶型对榫接结构的影响等.均有待于进一步的研究和完善.

表 11 优化的 3 个层次
Table 11 Three steps in optimization

变量	第 1 层优化前	第 1 优化后	第 2 层优化前	第 2 层优化后	第 3 层优化前	第 3 层优化后
榫头高度	2.222 <i>d</i>	2.267 <i>d</i>	2.267 <i>d</i>	2.333 <i>d</i>	2.333 <i>d</i>	
榫槽底部 圆角半径	0.333 <i>d</i>	0.324 <i>d</i>	0.324 <i>d</i>	0.345 <i>d</i>	0.345 <i>d</i>	
楔形角	0.275 <i>e</i>	0.268 <i>e</i>	0.268 <i>e</i>	0.278 <i>e</i>	0.278 <i>e</i>	
盘缘轴向宽度			7.222 <i>d</i>	6.222 <i>d</i>	6.222 <i>d</i>	6.324 <i>d</i>
盘心高度			2.778 <i>d</i>	2.722 <i>d</i>	2.722 <i>d</i>	2.856 <i>d</i>
盘缘高度			4.819 <i>d</i>	4.928 <i>d</i>	4.928 <i>d</i>	4.358 <i>d</i>
转速					110 <i>c</i>	110.0004 <i>c</i>
载荷系数					1.702	1.721
质量(无叶片)			8.02 <i>a</i>	7.47 <i>a</i>	7.47 <i>a</i>	7.18 <i>a</i>

参考文献：

[1] 李伟. 航空发动机叶片失效分析中的共性问题[J]. 燃气涡轮试验研究, 2002, 15(2): 28-30.
LI Wei. Common characteristics in failure analysis of aero-engine blade[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(2): 28-30. (in Chinese)

[2] 申秀丽, 齐晓东. 航空发动机枞树形榫头/榫槽结构形状优化[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 231-236.
SHEN Xiuli, QI Xiaodong. Shape optimization of aero engine fir-tree tenon/mortise structure[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 231-236. (in Chinese)

[3] 申秀丽, 龙丹. 航空发动机初步设计阶段涡轮流道多学科优化分析方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1369-1375.
SHEN Xiuli, LONG Dan. Research on multi-disciplinary design optimization of aeroengine turbine flow path in the preliminary design phase[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1369-1375. (in Chinese)

[4] Gean M C, Farris T N. Mechanics modeling of firtree dovetail contacts[R]. AIAA-2008-2176, 2008.

[5] SONG Wenbin, Keane A. Turbine blade fir-tree root design optimization using intelligent CAD and finite element analysis[J]. Computers and Structures, 2002, 80(24): 1853-1867.

[6] 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.

[7] Sinclair G B, Cormier N G, Griffin J H, et al. Contact stresses in dovetail attachments: finite element modeling[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 182-189.

[8] Anandavel K, Prakash R V. Effect of three-dimensional loading on macroscopic fretting aspects of an aero-engine blade-disc dovetail interface[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1544-1555.

[9] 申秀丽, 周莹舫. 圆弧齿榫接结构数值计算研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 611-616.
SHEN Xiuli, ZHOU Yinglu. Numerical calculation and analysis of arc tooth tenon joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 611-616. (in Chinese)

[10] 魏大盛, 王延荣. 枞树形榫接结构接触应力的有限元分析及建模的研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010, 23(2): 5-9.
WEI Dasheng, WANG Yanrong. On the FEM modeling and contact analysis of fir-tree attachment in blade disk assemblies[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(2): 5-9. (in Chinese)

[11] Gean M C, Farris T N. Finite element analysis of the mechanics of blade/disk contacts[J]. AIAA-2005-1907, 2005.

[12] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册: 第 5 卷 粉末冶金材料 精密合金与功能材料[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[13] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册: 第 2 卷 变形高温合金 铸造高温合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[14] 彭译琰, 刘刚, 桂幸民, 等. 航空燃气涡轮机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[15] 《航空发动机设计手册》总编委员会. 航空发动机设计手册: 第 10 册 涡轮[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[16] 王奕首, 史彦军, 滕弘飞. 多学科设计优化研究进展[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(6): 751-756.
WANG Yishou, SHI Yanjun, TENG Hongfei. Development in multidisciplinary design optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(6): 751-756. (in Chinese).

[17] Alexandrov N M, Lewis R M. Algorithmic perspectives on problem formulations in MDO[C]// Proceedings of the 8th AIAA/NASA/USAF/ISSM0 Multidisciplinary Analysis and Optimization Symposium. Reston, VA, USA: AIAA, 2000: 10-21.

[18] 田文正. 涡轮叶片多学科设计优化中热和结构强度设计问题研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
TIAN Wenzheng. Thermal and structural design on multi-disciplinary design optimization of turbine blade[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)