

高速可拆卸转子止口连接结构稳健性设计方法

岳 伟¹, 梅 庆², 张大义¹, 洪 杰¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 采用止口连接结构,提出了可拆卸转子结构设计方案。通过分析止口结构刚度损失模型,得到了连接机构对转子整体刚度的影响加速增加的特征。进而通过非线性有限元接触分析,得到其刚度稳健性设计方法。结果表明:增大止口局部刚度,连接结构设计时避免弯曲应变能集中,保证弯曲临界转速距工作转速有 20% 裕度,这样可以提高转子的刚度稳健性;止口连接设计为紧度配合,提高轴向压紧力,优化止口局部结构等方法,这样可以提高转子的接触状态稳健性。

关 键 词: 高速转子; 止口连接结构; 刚度损失; 接触状态; 稳健性设计

中图分类号: V23; O242.21

文献标志码: A

Robust design method of rabbet joint structure in high speed assemble rotor

YUE Wei¹, MEI Qing², ZHANG Dayi¹, HONG Jie¹

(1. School of Energy and Power Engineering,

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

2. Hunan Powerplant Research Institute,

Aero Engine (Group) Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A kind of assembly rotor connected by rabbet joint structure was introduced. Based on analyzing the stiffness loss model of rabbet joint structure, the effect of joint structure on the overall stiffness of the rotor was obtained. And then through the nonlinear finite element contact analysis, the rigidity robust design method was obtained. Results show that, by means of increasing the local stiffness of rabbet, avoid bending strain energy concentrated in the joint structure, and ensure 20% margin of the critical speed of bending from the working speed, the rigidity robust can be enhanced; by means of designing the rabbet with interference fit, improve the axial compression force and optimize the local structure of the rabbet, the contact state robust can be enhanced.

Key words: high rotation speed rotor; rabbet joint structure; stiffness loss; contact state; robust design

现代中小型涡轴发动机高速转子级间多为端齿连接结构,由长螺栓轴向拉紧,然而端齿连接结

构复杂,齿牙变形和接触面磨损严重,使转子产生较大的刚度损失和附加不平衡,限制了端齿连接

收稿日期: 2015-03-04

作者简介: 岳伟(1990—),男,硕士生,主要研究方向为航空发动机转子动力学。

引用格式: 岳伟,梅庆,张大义,等. 高速可拆卸转子止口连接结构稳健性设计方法[J]. 航空动力学报,2017,32(7):1754-1761. YUE Wei, MEI Qing, ZHANG Dayi, et al. Robust design method of rabbet joint structure in high speed assemble rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7): 1754-1761.

结构在高速转子的应用^[1]。近年来,高速转子级间出现了止口连接结构,通过圆柱面紧度配合定心,中心拉杆轴向拉紧,端面摩擦传扭,大大简化了转子结构,便于加工和装配,止口连接结构在高速下具有更好的抗变形能力,可以保证高速转子工作时各部件稳健连接^[2]。

20 世纪 90 年代,通用公司^[3]已对止口连接结构在高速中的使用进行了研究,并设计了专门的拉杆系统为其提供轴向压紧力以保证其工作稳定并便于装配和维修;德国 MTU(Motoren-und Turbinen-Union)公司^[4]在高速转子结构设计中也采用了止口连接结构,由于未使用螺栓结构,压气机长度和质量均得到了降低,轮盘无螺栓孔也使其可以在寿命不变的情况下设计得更薄;普惠公司推出的高涵道比齿轮传动涡扇发动机 PW1000G 将止口连接应用于大尺寸发动机的高压转子级间连接^[5],与其他结构配合形成了高结构稳健性、大刚度的可拆卸转子,很好地满足了设计要求。由于转子工作时承受离心力、气动力、温度、弯矩等复杂载荷^[1],其连接结构的稳健性会受到影响,主要表现在连接结构局部刚度和连接面的接触状态复杂变化,国内外对连接结构的影响已有一定的研究。Lasker 等^[6]在研究连接结构刚度对导弹刚度影响时,发现不同型号的导弹整体刚度损失可达 10%~50%;Segalman 等^[7]通过仿真和试验研究连接结构的刚度非线性和接触状态变化引起的能量损耗,提出了典型连接结构的动力学建模方法。国内尹泽勇等^[8]提出端齿梁元的概念用于计算端齿连接转子的整体刚度,研究结果表明端齿连接结构刚度使相应转子整体刚度降低,对结构的模态振型和共振频率均有较大影响;李俊慧等^[9]、刘书国等^[10]对影响套齿连接结构刚度的相关参数影响规律进行了分析,并通过仿真和试验方法研究了套齿连接面的接触状态受这些参数影响的变化规律;高进等^[11]深入研究转子的接触界面特性,计算了不同载荷下的接触刚度,结合试验研究得到连接结构接触界面刚度,进一步分析转子的动力学特性。

本文在高速旋转的涡轴发动机燃气发生器转子引入止口连接结构,提出可拆卸转子结构设计方案,分析了连接结构刚度损失对转子力学特征的影响,基于止口连接结构的力学模型和参数化建模分析,研究了结构参数和载荷参数对止口连接结构刚度和接触状态的影响规律,从而提出高速转子连接结构稳健性设计方法。

1 高速转子止口连接结构

在航空涡轴发动机结构优化设计方面,如何保证可拆卸转子在高转速下稳健工作是一个重要的研究方向。本文为研究转子连接结构稳健性设计方法,设计了采用止口连接的转子结构方案如图 1,设计转速为 45 000 r/min。由于高转速下,转子涡轮盘外缘切向速度高,压气机前三级叶盘连接均采用新型止口连接,其他各级叶盘采用传统端齿连接结构。转子整体结构为 4 级轴流、1 级离心、2 级涡轮,采用长拉杆将各级部件轴向拉紧。

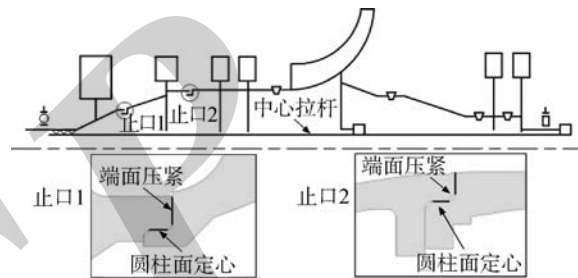


图 1 高速转子止口连接结构

Fig. 1 Rabbet joint structure of high rotation speed rotor

从图 1 可以看出,止口连接结构由拉杆系统将止口连接端面轴向压紧,通过端面摩擦力传递扭矩,圆柱面紧度配合定心。在中心拉杆轴向压紧力的作用下,各部件连接为一个整体转子。

2 止口连接结构分析

2.1 力学模型

该高速转子设计用于涡轴发动机,其止口连接结构受力状态分析和结构等效力学模型如图 2,影响止口局部刚度和连接面接触状态的参数主要分为两类,结构参数:几何尺寸、止口紧度、轴向预紧力;载荷参数:离心载荷和弯矩载荷。

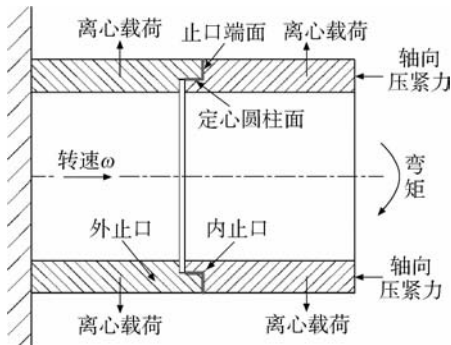


图 2 止口连接结构力学模型

Fig. 2 Mechanical model of rabbet joint structure

2.1.1 轴向压紧力

由于高速转子工作时受到复杂载荷作用,为了保证各部件可靠连接,采用长拉杆与螺母配合提供轴向压紧力。轴向压紧力 F 下止口界面受力如图 3,图中 p 为定心圆柱面正压力, f 为圆柱面间的摩擦力, F_n 为端面正压力。

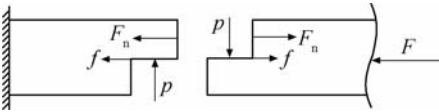


图 3 轴向压紧力下止口连接界面受力分析
Fig. 3 Mechanical analysis of rabbet connection interface under axial preload

2.1.2 止口紧度

转子工作时连接界面可能发生变形不协调的情况,为防止其径向分离和周向相对位置变化,需要在装配时使内外止口为紧度配合,使止口连接结构能够传递扭矩和一定的轴向力。紧度配合为 δ 的止口受力变形如图 4,配合时由于内外止口发生径向变形,止口存在定心圆柱面正压力 p 和切向应力 σ_t ,受载荷作用两者大小发生变化,从而对连接结构刚度和接触状态产生影响。

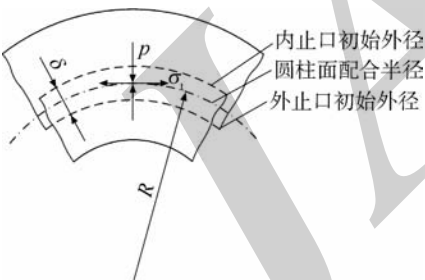


图 4 止口紧度配合时受力分析
Fig. 4 Mechanical analysis of rabbet connection interface under interference fit

2.1.3 离心载荷

如图 5,转子在较高的工作转速时,轴段和叶盘的离心载荷使转子发生径向变形,由于内外止口两部分所受离心载荷大小不同,其连接界面的径向位移互不相等(若 $F_{\omega 1} < F_{\omega 2}$,则 $\Delta r_1 < \Delta r_2$),内外止口连接界面会产生相应的定心圆柱面正压力 p 和力矩 T (协调力),界面发生相对滑移,从而导致连接结构的局部弯曲刚度和接触状态发生变化。

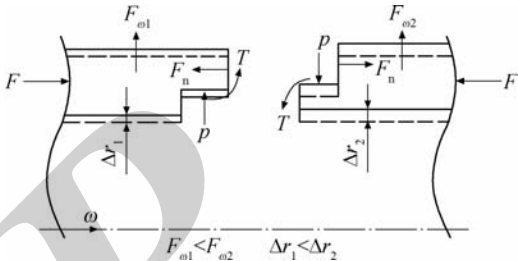


图 5 离心载荷作用下止口结构受力与变形分析
Fig. 5 Mechanical and deformation analysis of rabbet structure under centrifugal load

2.1.4 弯矩载荷

高速转子旋转时的不平衡力会在轴上产生弯矩载荷,转子在机动飞行时产生陀螺效应在轴上也产生弯矩,在弯矩载荷的作用下,止口连接结构的接触状态和弯曲刚度发生变化。

止口随弯矩载荷变化时其受力状态变化如图 6。假设在轴向压紧力作用下端面的初始正压力均匀分布,如图 6(a);转子工作时,止口结构受到弯矩作用,端面受力分布发生变化,受到弯矩作用的一侧受力增加,另一侧受力减小,如图 6(b);弯矩过大时,端面可能发生分离,如图 6(c),此时连接结构稳健性被破坏。

2.2 连接结构刚度损失

由于止口连接结构在界面上只能承受压力而

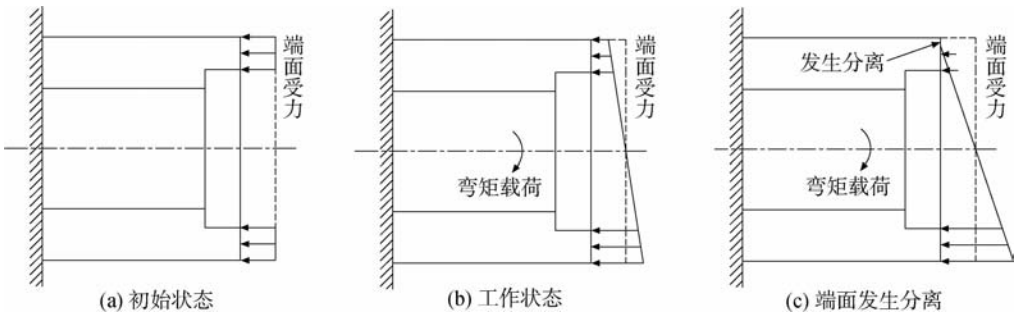


图 6 弯矩作用下止口端面受力状态
Fig. 6 Mechanical state of rabbet end surface under bending moment

不能承受拉力,以及接触界面的非连续性,连接结构存在刚度弱化。此外,高速转子止口连接结构在工作状态下,其连接界面受到离心载荷、轴向压紧力和弯曲力矩等诸多因素作用,连接面相对接触位置和接触力变化,界面存在径向和周向的错位,从而使转子存在不平衡量;另一方面,高速转动下,连接结构的这种接触位置和接触力的周期变化会导致连接界面产生微动磨损,造成长拉杆的预变形和轴向预紧力减小,从而导致连接结构弯曲刚度发生一定损失。

在定量分析止口刚度时,为了描述不同参数下止口连接结构受连接界面的存在而产生的弯曲刚度损失程度,引入无量纲量刚度损失系数的概念^[12],其定义为

$$\eta_i = (k_0 - k_s)/k_0 \quad (1)$$

式中 k_s 为考虑结构间接触面影响的连接结构实际刚度, k_0 为结构接触面为固结时的连接结构刚度。

2.3 连接界面微动损伤

由于高速转子工作时连接界面接触状态的变化,连接结构接触面间存在微动磨损^[13],导致连接结构刚度损失和转子不平衡量的产生。

止口连接界面接触应力和滑移造成的微动磨损量与界面在磨损过程所产生的能量相关,本文采用文献[14]中单位面积摩擦功 F_d 的概念进行定量评估, F_d 较大的部位磨损量大,其表达式为

$$F_d = \mu \sigma_n \Delta \quad (2)$$

式中 μ 为接触面摩擦因数, σ_n 为法向接触应力, Δ 为接触面相对滑动位移。

2.4 转子连接结构的稳健性

转子连接结构的稳健性是指转子工作时,其连接界面上的损伤积累不会引起连接结构力学特征较大的改变,其内容主要包括刚度稳健性和接触状态稳健性。

刚度稳健性指在工作过程中刚度不会发生大的突变,不会因连接刚度的变化引起转子系统振动特性的变化;接触状态稳健性指工作过程中各接触面应力和滑移不超出设计要求,多次工作循环后连接结构接触面磨损给转子带来的附加不平衡量在允许值内。本文将从这两个方面进行止口连接结构稳健性设计方法研究。

3 连接结构对转子力学特性的影响

根据前文分析及文献[1],连接结构的存在对

转子刚度有一定的弱化作用,转子工作时连接界面接触状态的变化又会进一步造成连接结构的刚度损失,导致转子等效刚度的变化,从而转子的动力特性发生变化。本节将定量评估连接结构对转子力学特性的影响,以说明转子结构设计中连接结构稳健性设计的必要性。

3.1 有限元建模及约束

在研究转子振动特性时,如果考虑连接结构造成的刚度损失,可以使仿真结果进一步接近试验值。然而复杂的接触模型会使工作量繁重,尤其是对于转子结构,需要简化结构模型。因此,本文建立的转子有限元模型的连接结构接触面采用固结,通过调节模型中各连接结构的局部连接区域的弹性模量模拟连接结构刚度损失。

采用 Solid 185 单元建立高速转子三维实体模型,如图 7,调节 2 处止口及 4 处端齿连接结构的材料参数,其局部连接区域的弹性模量为材料本身的弹性模量与刚度损失系数之积,计算时各连接结构刚度损失系数范围为 0~0.9^[15]。考虑转子原有的支承方式,左侧滚珠轴承处施加简化的轴向、径向和周向约束,右侧滚棒轴承处施加简化的径向和周向约束。

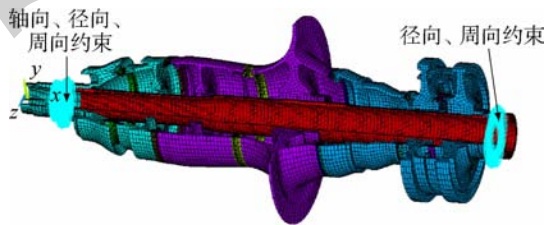


图 7 高速转子有限元模型

Fig. 7 Finite element model of high rotation speed rotor

3.2 转子等效刚度变化

研究连接结构刚度损失对转子等效刚度的影响,可以评估考虑连接结构时转子系统刚度和抗变形能力的变化。由于压气机出口截面距支承较远且其变形对部件效率的影响最大,选取此处为特征截面计算转子等效刚度。在特征截面处加载横向载荷,计算得到相应的横向位移值,加载的横向载荷与位移的比值则是转子的等效刚度。本文引入转子的等效刚度修正系数用以描述转子考虑受连接结构影响时的等效刚度,可表示为

$$\eta_p = K_s/K_0 \quad (3)$$

式中 K_s 为转子考虑连接结构时的等效刚度, K_0 为转子不考虑连接结构时的等效刚度。

图 8 为本文设计的转子在不同连接结构刚度损失时的等效刚度变化。随着连接结构的刚度损失的加剧,转子整体等效刚度加速损失的趋势;连接结构较小的刚度损失对转子等效刚度影响不大,而当连接结构刚度损失到一定程度时,由于多个连接结构串联,其对转子整体刚度的影响为叠加效果,对转子整体刚度有很大影响。

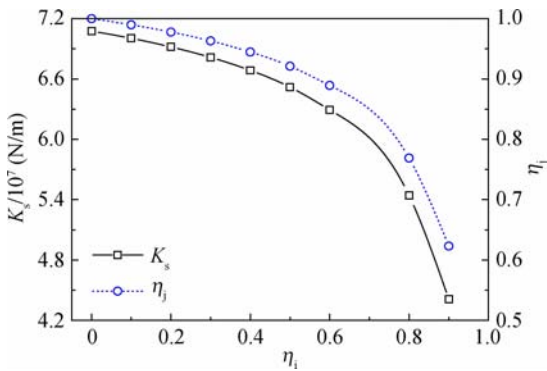


图 8 考虑连接结构时转子的等效刚度变化
Fig. 8 Variation of rotor equivalent stiffness considering the joint structure

3.3 转子动力特性变化

转子可拆卸的连接结构对其动力特征的影响主要是临界转速和应变能分布状态发生变化。将转子有限元模型设置为柔性支承,对于固结的转子模型,转子系统的前三阶共振转速下,对应的模态振型如图 9、表 1,表中 n_r 表示共振转速, n_w 表示工作转速。

前两阶共振转速下转子弯曲应变能占转子-支承系统总应变能比例(即弯曲应变能系数)小于 20%,即大部分应变能被支承结构吸收,转子系统在通过共振转速时,结构不会产生较大损伤^[1];第 3 阶共振转速下转子弯曲应变能系数大于 20%,此时其应变能主要集中在转子上,对连接结构有很大影响。考虑连接结构刚度损失时转子系统的弯曲共振转速相对于转子 100%工作转速的裕度明显降低(图 10),由于此时大部分应变能在转子上,止口连接承受较大的弯矩载荷导致刚度损失加剧,使得弯曲共振转速相对于转子 100%工作转速的裕度进一步降低。

因此,高速转子动力特性在考虑连接结构刚度损失的影响下会产生明显变化。需要提高高速转子连接结构的稳健性,研究连接结构参数设计方法,使连接结构刚度损失和附加不平衡在允许值内,从而降低对转子系统动力特性的影响。

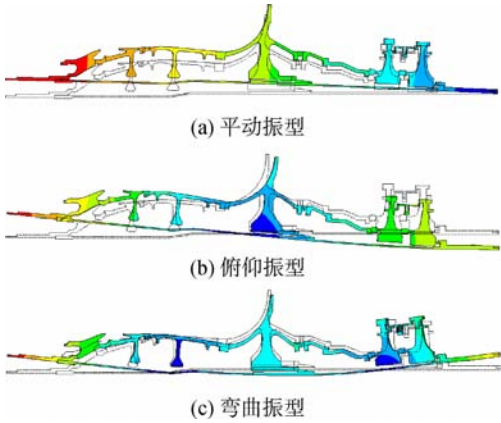


图 9 转子系统前三阶模态振型

Fig. 9 First three orders modal shape of rotor system

表 1 转子系统前三阶模态及弯曲应变能系数
Table 1 First three orders modal and bending strain energy of rotor system

阶次	振型	$\frac{n_r}{n_w} \times 100\% / \%$	弯曲应变能系数 / %
第 1 阶	平动	15.60	7.26
第 2 阶	俯仰	40.40	13.44
第 3 阶	弯曲	126.00	86.47

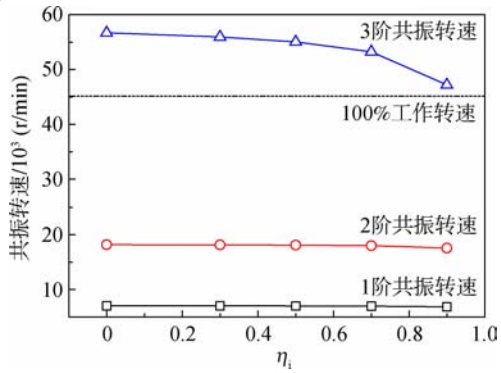


图 10 考虑连接结构时转子前三阶共振转速变化
Fig. 10 Variation of first three orders resonance speed considering the joint structure

4 高速转子止口连接结构稳健性设计

4.1 刚度稳健性设计

根据前文分析的连接结构刚度损失对转子力学特性的影响,为设计稳健的转子连接结构,本节研究影响刚度损失的因素及规律,定量分析连接结构刚度损失对转子力学特性的影响规律^[16],从

而提出连接结构稳健性设计方法。

4.1.1 有限元建模

根据高速转子止口连接的结构和受力特点对其简化,应用 ANSYS 软件的 Solid185 单元建立内外止口配合的参数化分析模型(图 11)。连接界面的接触模型采用非线性接触单元 Target170 和 Contal74 建立。转子支承采用左端滚珠轴承、右端滚棒轴承的结构,由长拉杆拉紧转子各部件,因此在止口连接有限元模型中左侧全约束,右侧侧施加均布轴向力模拟其轴向压紧力。图 11 中 A 点施加横向力,右端面上所有节点的横向自由度耦合,求得 A 点横向位移,该横向力与位移之比即为止口连接结构实际刚度 k_s 。由于计算量较大,建模和结果后处理均通过 ANSYS 参数化设计语言实现。

止口结构有限元模型的基本参数如表 2,主要研究关键几何参数和装配参数对止口连接弯曲刚度的影响规律。

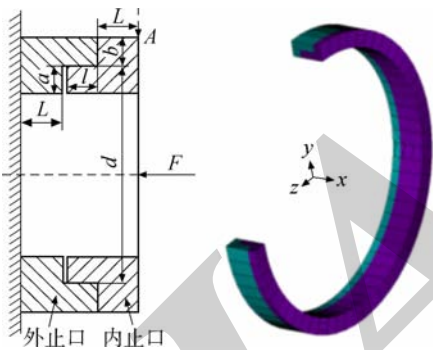


图 11 止口简化结构及有限元模型

Fig. 11 Simplified structure and finite element model of rabbet

表 2 止口基本结构参数

Table 2 Basic structure parameters of rabbet

参数	数值	参数	数值
a/mm	3	弹性模量/GPa	210
b/mm	3	泊松比	0.30
l/mm	3	摩擦因数 μ	0.15
L/mm	3	止口紧度 δ/mm	0.03
d/mm	100	轴向压紧力 F/kN	80

4.1.2 止口结构刚度损失

图 12 显示了压紧段长度 l 和定心圆柱面直径 d 对止口结构的刚度损失系数的影响。可以看出, l 越大, d 越小, 止口连接结构的刚度损失系数越小, 对止口连接结构的刚度稳健性越有利。

但两者的实际设计值还应考虑到转子结构设计与装配的需求。

止口结构刚度损失系数随主要装配参数的变化如图 13 所示, 刚度损失随止口紧度的增大而增加, 随轴向压紧力的增大而减小。

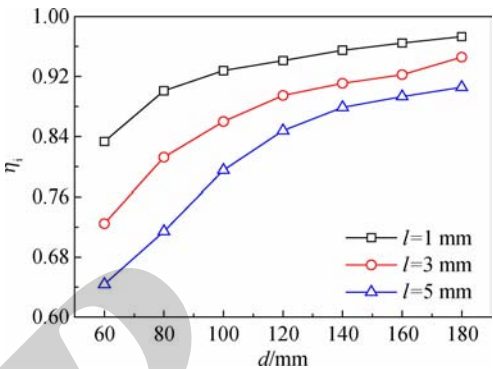


图 12 不同几何参数下的止口结构刚度损失

Fig. 12 Stiffness loss of rabbet structure under different geometric parameters

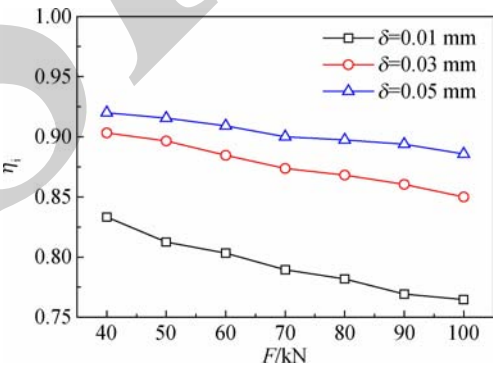


图 13 不同紧度和轴向压紧力下止口结构刚度损失

Fig. 13 Stiffness loss of rabbet structure under different interference fit and axial preload

如图 13, 当止口紧度增大时, 定心圆柱面正压力 p 增大, 这对止口连接结构的弯曲刚度有一定的增强作用。而由于定心圆柱面传递的轴向力 $f=\mu p$ 随之增加, 由于 $F=f+F_n$, 在止口结构轴向压紧力 F 不变的情况下, 端面承受正压力 F_n 减小, 这对止口弯曲刚度有更为显著的弱化作用。因此, 增大止口紧度时刚度损失增加。

综上, 减小止口紧度、增大轴向压紧力可以提高止口的连接刚性。由于转子工作时受较大的离心载荷作用, 内外止口定心圆柱面发生相对变形, 因此止口连接结构的紧度应保证圆柱面不分离; 中心拉杆的压紧力设计应满足其强度储备要求。

4.1.3 刚度稳健性设计方法

根据本节分析, 要提高止口连接结构的刚度

稳健性,可采取以下措施:

- 1) 止口位置应选择在转子弯曲刚度较大的部位,并基于仿真结果优化止口结构尺寸;
- 2) 避免应变能集中在转子非承力区域,以减少对连接结构的影响;
- 3) 转子结构设计时应避免弯曲临界转速进入转子工作转速范围,至少留有 20% 的裕度^[14],以减小连接结构对转子整体动力特性的影响。

4.2 接触状态稳健性设计

转子连接结构接触状态的变化,主要表现在连接界面接触应力和滑移量的周期性变化,其综合作用使转子连接刚度损失和连接面微动损伤增加,多次累积后可能产生较大的不平衡量。止口连接转子通过中心拉杆提供轴向力,其定心圆柱面主要用于相连部件的定心,保证工作时连接可靠,转子在减速阶段可能发生鼓筒与轮盘径向变形不协调,因此需要在装配时保证有一定的止口紧度^[2];端面为转子工作时部件间的承载面,提高连接结构稳健性需要提高其接触状态稳定性。

本节通过建立接触仿真模型,研究止口连接界面接触状态在不同轴向压紧力下的变化规律,进而提出接触状态稳健性设计方法。

4.2.1 有限元建模

细化转子第 2、第 3 级盘止口连接界面的网格适当,采用非线性接触单元建立有限元模型(如图 14),其他连接简化为一体结构,转子的支承方式不变。对转子整体模型加载转速,并计算出相应的叶片离心载荷以均布载荷的方式施加在相应位置的节点,转子右端面施加预紧力。

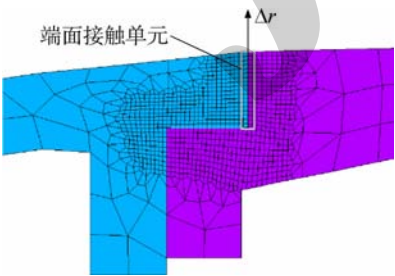


图 14 止口连接界面单元细化
Fig. 14 Refinement of element on surface of rabbet structure

4.2.2 止口端面接触状态

在 100% 转速下,改变有限元模型中施加在转子上的轴向压紧力,以接触端面单元与定心圆柱面的距离为纵坐标,端面接触单元的平均接触应力变

化如图 15,端面接触单元的滑移量变化如图 16,可以看出:在轴向压紧力 F 的作用下,端面内侧单元应力增大,滑移量较小;增大压紧力时,止口端面上各单元的接触应力随之增加,滑移量减小。

根据止口端面各单元的法向接触应力和接触滑移,求得各单元的单位面积摩擦功 F_d 如图 17 所示。由图可知:转子压紧力较大时止口端面靠

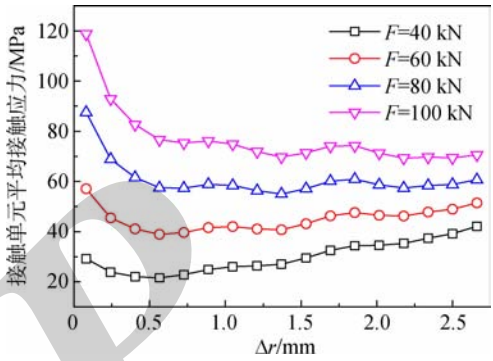


图 15 不同轴向压紧力下端面各单元接触应力
Fig. 15 Element contact stress of end surface under different axial preload

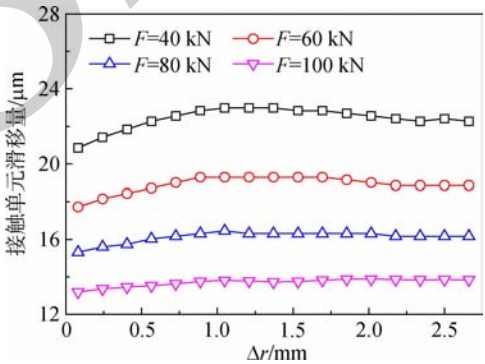


图 16 不同轴向压紧力下端面各单元的接触滑移量
Fig. 16 Element contact sliding distance of end surface under different axial preload

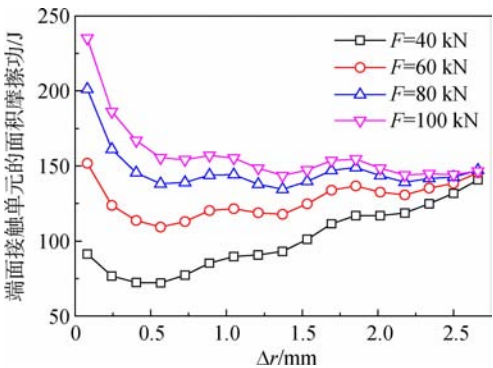


图 17 不同轴向压紧力下端面各单元的单位面积摩擦功
Fig. 17 Element F_d of end surface under different axial preload

近内径的部位先发生磨损,压紧力较小时靠近外径的部位先发生磨损;轴向压紧力增大时,端面上各单元的单位摩擦功均增加,使微动磨损程度加深。

因此,为了避免端面内外径部位出现应力集中或局部损伤,可以加工倒角或圆角;增加轴向压紧力可以减小端面滑移,从而减小转子工作后端面滑移不能完全恢复时产生的不平衡量,但其前提是保证接触面的应力水平和磨损量不超出允许范围。

4.2.3 接触状态稳健性设计方法

通过有限元分析结果,得到止口连接结构的接触状态稳健性设计方法如下:

- 1) 止口连接需要采取紧度配合,保证圆柱面配合的定心作用;
- 2) 连接界面内侧有倒角或圆角、适量提高轴向压紧力,可减小应力集中,减少界面的微动损伤;
- 3) 可以在止口内侧加工翻边(如图 1 中止口 2),保证止口径向刚度,减小转子工作时连接界面的滑移。

5 结论与展望

本文提出了级间采用止口连接结构的可拆卸转子设计方案,基于止口的结构和力学特征,研究了止口连接结构的刚度和接触状态变化规律,提出了可拆卸转子连接刚度稳健性和接触状态稳健性设计方法。

此外,本文的研究是对止口连接结构稳健性设计方法的初步研究,转子结构设计中止口几何尺寸、传力路线等的最优解尚未解决,以后将对这些问题进行进一步研究。

参考文献:

[1] 朱梓根,刘廷毅,欧园霞. 航空涡轴、涡桨发动机转子系统结构设计准则[R]. 北京:北京航空航天大学,2000.

[2] WASCHKA W,RÜD K,HUMHAUSER W,et al. ATF1-HDV:design of a new 7 stage innovative compressor for 10—18 klbf thrust [R]. International Society for Air Breathing Engines,ISABE-2005-1266,2005.

[3] NASTUK J A,WILLIAMS C L. High pressure gas generator rotor tie rod system for gas turbine engine; US5537814[P]. 1996-07-23.

[4] ENGBER M,RÜD K,ARDEY S,et al. Advanced technologies for next generation regional jets-survey of research activities at MTU aero engines[R]. International Society for Air Breathing Engines,ISABE-2007-1282,2007.

[5] BENJAMIN D,KAPSZUKIEWICZ D R,LUND B C,et al. Gas turbine engine with tie shaft for axial high pressure

compressor rotor;US12/720720[P]. 2010-03-10.

[6] LASKER G,MALONEY J G,SHELTON M T Structural dynamic properties of tactical missile joints;Phase 3[J]. Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine,1974,10(4):297-332.

[7] SEGALMAN D J,GREGORY D L,STARR M J,et al. Handbook on dynamics of jointed structures[R]. Albuquerque:Sandia National Laboratories,2009.

[8] 尹泽勇,欧园霞,李彦,等. 端齿轴段刚度及其对转子动力特性的影响[J]. 振动工程学报,1993,6(1):63-67.

YIN Zeyong,OU Yuanxia,LI Yan,et al. Stiffness of a shaft section with curvic couplings and its effect on dynamic characteristic of a rotor[J]. Journal of Vibration Engineering,1993,6(1):63-67. (in Chinese)

[9] 李俊慧,马艳红,洪杰. 转子系统套齿结构动力学设计方法研究[J]. 航空发动机,2009,35(4):36-39.

LI Junhui,MA Yanhong,HONG Jie. Dynamic design method of spline joint structure for rotor system[J]. Aero-engine,2009,35(4):36-39. (in Chinese)

[10] LIU Shuguo,MA Yanhong,ZHANG Dayi,et al. Studies on dynamic characteristics of the joint in the aero-engine rotor system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2012,29(5):120-136.

[11] GAO Jin,YUAN Qi,LI Pu,et al. Effects of bending moments and pretightening forces on the flexural stiffness of contact interfaces in rod-fastened rotors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2012,134(10):1492-1494.

[12] WU Fayong,LIANG Zhichao,MA Yanhong,et al. Bending stiffness and dynamic characteristics of a rotor with spline joints[R]. San Diego,CA:ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition,2013.

[13] 洪杰,杨鑫,陈璐璐,等. 基于接触状态分析的叶冠阻尼评估与改进设计[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(5):681-687.

HONG Jie,YANG Xin,CHEN Lulu,et al. Damping assessment and improving design of blade shrouds based on contact states[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2012,38(5):681-687. (in Chinese)

[14] RUIZ C,BODDINGTON P. An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint[J]. Experimental Mechanics,1984,24(3):208-217.

[15] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册:第 19 册 转子动力学及整机振动[M]. 北京:航空工业出版社,2000.

[16] 吴长波,崔海涛,梁恩波,等. 小型航空发动机转子连接刚性分析与验证[J]. 燃气涡轮试验与研究,2012,25(3):12-15.

WU Changbo,CUI Haitao,LIANG Enbo,et al. Joint rigidity analysis and experimental study on rotor of a small aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2012,25(3):12-15. (in Chinese)