

# 不同预紧力分散度条件下螺栓止口连接组件有限元分析

陈飞宇,李小强,董红瑞,平宇,李东升

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191)

**[摘要]** 螺栓止口连接是航空发动机中常见的连接形式,在现有工艺技术条件下,螺栓预紧力往往存在较大分散性,加剧了航空发动机力学性能的波动。利用 ANSYS Workbench 有限元软件对不同预紧力分散度条件下的螺栓止口连接结合面 Von Mises 等效应力分布及组件刚度进行了仿真计算。按照工程经验设置了 5 组预紧力分散度值,并针对每组分散度随机生成一组对应的螺栓预紧力数值,实现对工程实际中预紧力分散度情况的模拟。然后分析了结合面的应力分布情况,通过对组件分别施加轴向载荷、径向载荷和扭转载荷,获得了组件轴向刚度、径向刚度、扭转刚度变化曲线,最终得到预紧力分散度对螺栓止口连接组件刚度的影响规律,为预紧力分散度的控制提供了理论参考依据。

**关键词:** 航空发动机;螺栓止口连接;预紧力分散度;有限元分析;等效应力

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.063



陈飞宇

硕士研究生,主要研究方向为航空发动机装配连接工艺。

螺栓止口连接是航空发动机转静子结构系统中非常典型的连接形式之一,该结构往往是发动机传递载

荷的关键部位,因此螺栓止口连接组件的力学性能会极大影响到发动机结构系统的性能表现及稳定性。螺栓预紧力是影响螺栓止口连接组件力学性能的直接因素,由于目前国内发动机螺栓拧紧装配过程中多使用预紧力误差控制精度较差的力矩法,导致装配完成后螺栓轴向力存在很大的分散性,进而导致连接结构组件力学性能产生分散性,这种分散性的存在可能导致振动特性等整机性能分散度变大<sup>[1]</sup>。

目前,随着计算机技术与有限单元法技术的发展与成熟,越来越多的学者将有限元技术应用到了螺栓连接性能研究领域。Kim 等<sup>[2]</sup>在现有螺栓连接结构建模方法的基础上,提出了基于弹簧阻尼法的螺栓接触强度分析方法;Pedersen 等<sup>[3]</sup>研究了螺母、垫片等因素对螺杆刚度的

影响,利用有限元工具分析了螺杆安装边间隙对结构连接刚度的影响;Oskouei 等<sup>[4]</sup>通过对搭接螺栓连接结构的应力分析,得到了结构的应力分布,并在此基础上提出了螺栓连接刚度的理论表达。在国内,南宮自军等<sup>[5]</sup>应用接触理论和有限元方法,考虑了螺栓预紧力对连接刚度的影响,得到了求解螺栓预紧力的公式;王建军团队<sup>[6-8]</sup>提出了航空发动机螺栓连接薄层单元建模方法,在此基础上研究了航空发动机螺栓连接载荷、结构参数对连接刚度的影响规律;郭文新等<sup>[9]</sup>对不同螺栓个数和不同预紧力条件下结合面弯曲刚度进行了仿真分析,提出了等效刚度系数的概念来模拟高压转子螺栓连接装配技术。综合来看,目前的研究均是基于理论预紧力设计值条件下的,并没有考虑螺栓组结构实际存在的

预紧力分散度问题。

本文基于有限元法,针对航空发动机中典型连接结构形式,对螺栓止口连接组件进行了有限元建模,综合考虑实际工程中存在的预紧力分散度,进行了螺栓预紧力模拟加载;根据连接结构的受力特点,分析在轴向力、气压力及扭矩等载荷作用下组件的变形情况,得到了预紧力分散度对螺栓止口连接组件刚度性能的影响规律。

## 螺栓—止口连接结构有限元模型的建立

### 1 模型建立

航空发动机高压压气机转子的典型螺栓—止口连接结构如图1所示<sup>[10]</sup>,由九级盘、封严盘、鼓筒轴及螺栓螺母组成,九级盘与封严盘之间、鼓筒轴与封严盘之间分别形成两处螺栓止口配合,周向共有48组螺栓连接。在设计仿真组件模型时,参考上述螺栓止口连接结构形式。由于本文是规律性研究,为降低计算成本,对不影响计算结果的复杂结构进行合理简化,而保留关键连接关系,同时适当减少螺栓连接的数量,设计得到如图2、图3所示的仿真计算组件模型。

转子螺栓止口连接仿真计算模型由4部分组成,分别是九级盘模拟件、封严盘模拟件、鼓筒轴模拟件、螺栓螺母模拟件,通过螺栓螺母模拟件实现“一串三”连接,结合面处共有周向均布的16个M10螺栓,同时各零件之间分别利用止口结构进行定心,共有两处,止口结合面处均为过盈配合,过盈量为0.1mm,仿真模型局部连接结构如图3所示。图4为有限元网格模型,为提高网格质量,使用Hypermesh有限元软件进行网格划分及前处理,有限元模型单元类型为SOLID185,单元数为188065,节点数为75050。

### 2 材料属性

根据航空发动机设计手册,该高

压压气机转子轴和螺栓的材料选择GH4169,材料的特征参数见表1。

### 3 螺栓预紧力计算

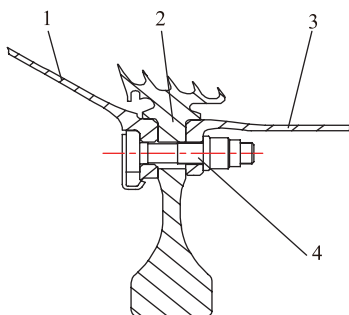
依据一般合金钢螺栓连接预紧力的计算公式 $F_0 = (0.5 \sim 0.6) \sigma_s A_s$ 计算螺栓预紧力<sup>[11]</sup>。GH4169材料的屈服极限 $\sigma_s$ 为1030MPa, $A_s$ 为螺栓公称应力截面积,跟螺栓的中径、小径、螺距等参数有关,经计算MJ10×1.25螺纹的公称应力截面积 $A_s = 60.577 \text{mm}^2$ ,故求得螺栓预紧力 $F_0$ 的范围是31197~37436N,因此螺栓预紧力设计值应小于37436N。

### 4 边界条件

根据转子有限元模型的结构特

点,在计算中需要添加的边界条件共有3部分,具体包括组件端面固定约束、螺栓预紧力以及外部载荷。

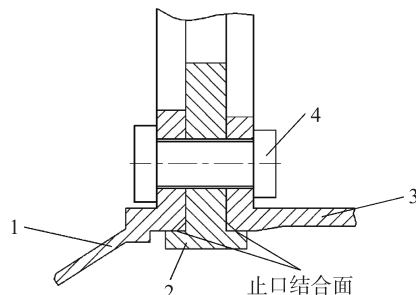
在仿真中需要对螺栓预紧力分散度进行模拟。工程中常用的螺栓拧紧控制方法包括扭矩法、扭矩转角法、屈服点法等<sup>[12]</sup>,依据经验,各控制方法带来的预紧力误差范围见表2<sup>[13]</sup>。据此,本文设置了5个预紧力分散度梯度,分别是0、5%、15%、25%、50%,标准预紧力设计值满足上文计算得到的预紧力范围(31197~37436N)即可,故取值35000N。针对每个预紧力分散度,使用rand()随机函数分别生成一



1—九级盘; 2—封严盘; 3—鼓筒轴; 4—螺栓螺母组件

图1 高压压气机转子九级盘处螺栓止口连接结构

Fig.1 Bolted rabbet joint structure of high pressure turbine



1—九级盘模拟件; 2—封严盘模拟件; 3—鼓筒轴模拟件; 4—螺栓螺母模拟件

图3 螺栓止口连接仿真组件示意图

Fig.3 Structural representation of simulation component

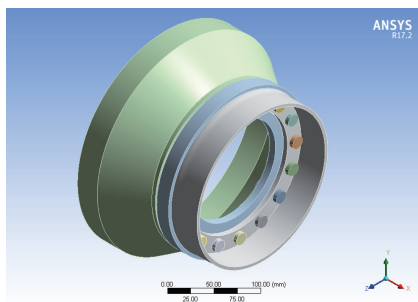


图2 仿真组件模型

Fig.2 CAD model of simulation component

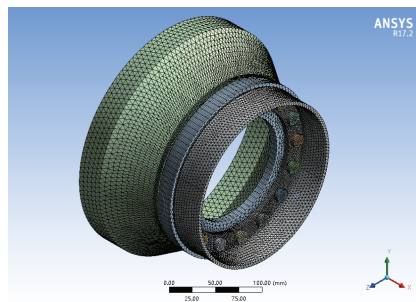


图4 有限元网格模型

Fig.4 Finite element grid of simulation component

表1 材料特征参数

Table 1 Material characteristic parameter

材料	弹性模 /GPa	泊松比	密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	强度极限 /MPa	屈服极限 /MPa
GH4169	199.9	0.3	8.24	1280	1030

表2 不同拧紧方法预紧力误差对比

Table 2 Comparison of pre-tightening force error of different methods

控制方法	预紧力误差 /%
扭矩法	25~50
扭矩-转角法	15~25
屈服点控制法	3~5

组(16个)螺栓所对应的预紧力计算值,见表3。

螺栓预紧力使用 ANSYS Workbench 中的“bolt pretension”功能进行加载,通过设置不同的载荷步来实现预紧力与载荷的分步加载。固定约束施加在九级盘模拟件端面上,轴向拉力载荷、径向拉力载荷、扭矩载荷则加载到鼓筒模拟件的自由端,如图5所示。

### 有限元分析结果与讨论

#### 1 预紧力分散度对结合面等效应力的影响

转子结构系统关键结合面连接状态是影响转子组件力学性能的关键性因素。不同预紧力分散度条件下结合面 Von Mises 等效应力进行计算,结果如图6、图7所示。

由计算结果分析可知,随着螺栓预紧力分散度增加,结合面上每个螺栓孔周围的 Von Mises 等效应力分布产生了明显变化,不同方向上螺栓孔处的等效应力分布差异性逐渐增大。同时,结合面上的最大 Von

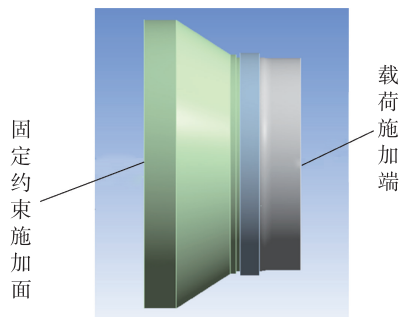


图5 约束与载荷施加示意图

Fig.5 Application of constraints and loads

表3 螺栓组预紧力随机值

Table 3 Random value of bolt pre-tightening force

螺栓编号	预紧力分散度 /%				
	0	5	15	25	50
1	35000	34777	32449	27893	27530
2	35000	33636	30656	29655	25991
3	35000	33264	31819	30125	30716
4	35000	33639	31840	32780	32744
5	35000	33307	33810	34287	23438
6	35000	34511	34638	29112	31830
7	35000	33568	32246	30336	32655
8	35000	33749	34977	33060	19700
9	35000	33611	30374	32579	24667
10	35000	34275	34455	31794	34417
11	35000	34562	34695	30600	20039
12	35000	33535	33496	33357	23921
13	35000	34395	31802	33352	29264
14	35000	33373	34979	34472	24904
15	35000	34549	30506	34890	32645
16	35000	33355	33902	28097	21197

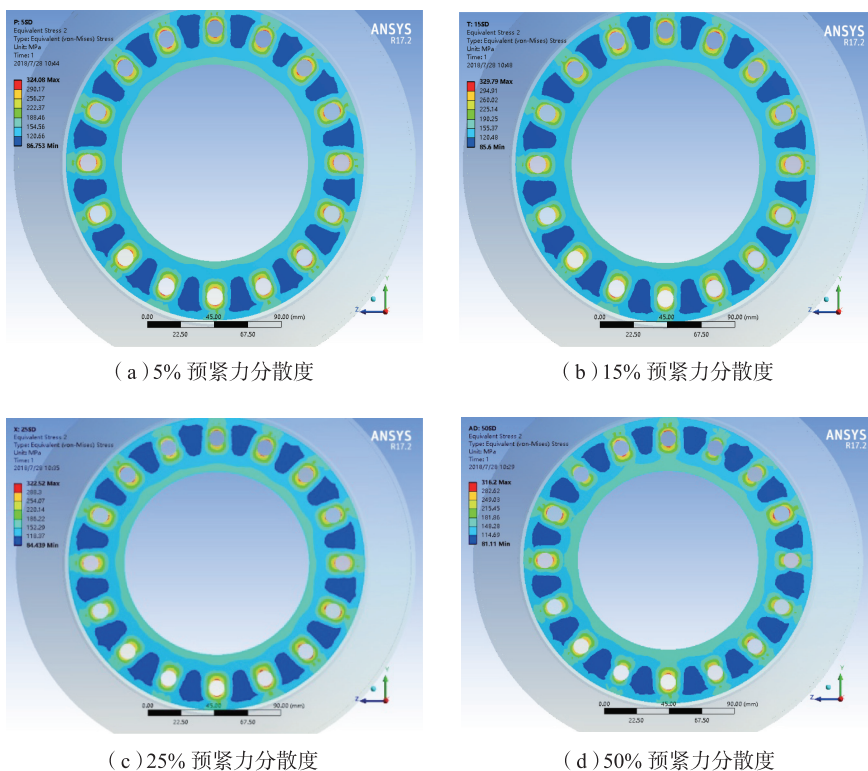


图6 不同预紧力分散度条件下结合面的Von Mises等效应力云图

Fig.6 Von Mises equivalent stress nephogram of the joint surface under dispersed pre-tightening force

Mises 等效应力产生了较为明显的波动。对于航空发动机这种高精精密机械而言,关键连接位置处结合面应力状态的波动会直接影响连接组件的力学性能,进而可能影响发动机整机性能表现,而这种影响往往容易被忽略。

## 2 预紧力分散度对组件轴向刚度的影响

螺栓连接质量是转子组件轴向刚度的重要保证,螺栓组预紧力的不均匀性会导致轴向刚度产生分散性,进而引起力学性能波动等问题。为了探究预紧力分散度对转子组件轴向刚度的影响规律,对每种分散度条件下的转子组件施加 250~500kN 递增的轴向拉力,计算转子组件自由端端面的轴向位移,如图 8 所示,进而得到端面轴向位移与轴向载荷的关系曲线,计算结果如图 9 所示。曲线斜率的倒数即可用来描述组件轴向刚度,计算结果见表 4,图 10 为轴向刚度随预紧力分散度的变化曲线。

根据以上图表分析可知,在仿真试验中,随着预紧力分散度的增加,组件轴向刚度出现显著降低的现象。由于此仿真设计的预紧力分散度条件是预紧力值均小于设计值,考虑工程实际中可能存在预紧力超出设计值的情况,因此组件刚度也可能出现随预紧力分散度增大而增加的情况。总之,转子组件轴向刚度会随着预紧力分散度增加而发生波动,而且趋势明显。由于航空发动机在工作状态时处于高温高压的环境,装配状态下轴向刚度不一致产生的影响可能会被进一步放大,不利于发动机性能稳定。

## 3 预紧力分散度对组件径向刚度的影响

转子径向刚度会影响到工作状态下转子的挠曲变形,是转子组件关键的性能指标。预紧力的分散性会

带来径向刚度的不均匀性,因此为探究预紧力分散性对径向刚度的影响规律,对每种预紧力分散度条件下的转子组件分别进行 8 个方向径向载荷的加载,如图 11 所示,径向载荷大小为 100kN,径向刚度用径向载荷与径向位移的比值来表征,计算结果见表 5。

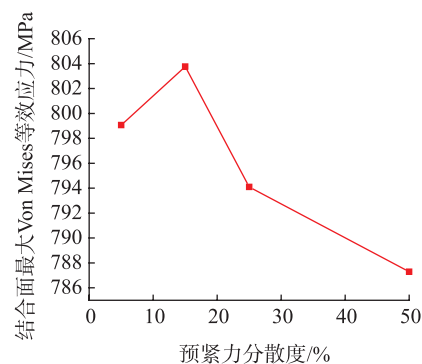


图7 结合面最大 Von Mises 等效应力随预紧力分散度的变化

Fig.7 Variation of Von Mises equivalent stress with pre-tightening force dispersion increased

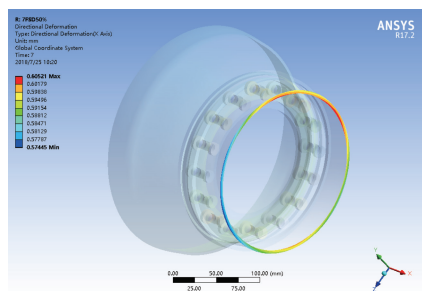


图8 转子组件端面轴向位移云图

Fig.8 Axial displacement nephogram of the component end surface

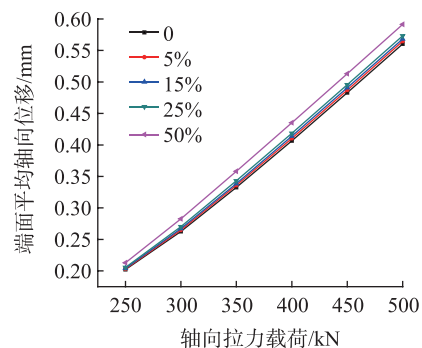


图9 轴向拉力与组件端面平均轴向位移关系曲线

Fig.9 Relation curve of the tensile force and axial displacement

带来

图 12 为不同预紧力分散度条件下转子组件径向刚度的变化曲线,分析可知,随着预紧力分散度的增加,转子组件径向刚度逐渐降低,并在图 11 所示的 8 个方向上的波动越来越大,即径向刚度不均性逐渐增加。并且可以看到,当预紧力分散度在 0~15% 变化时,转子组件径向刚度降低并不十分明显,当预紧力分散

表4 轴向刚度计算值

Table 4 Calculated value of axial stiffness

预紧力分散度/%	轴向刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )
0	694.4
5	684.9
15	680.2
25	675.6
50	657.8

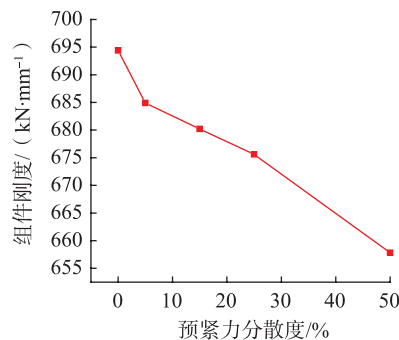


图10 组件刚度与预紧力分散度关系曲线

Fig.10 Relation curve of component axial stiffness and the dispersion of pre-tightening force

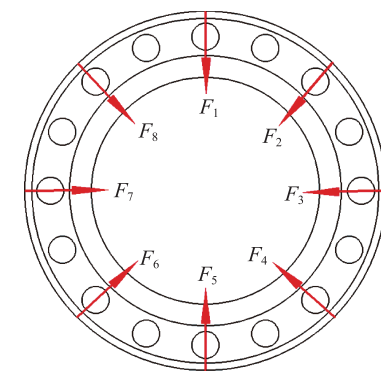


图11 径向加载示意图

Fig.11 Application of radial load

表5 径向刚度计算值  
Table 5 Calculated value of radial stiffness

预紧力 分散度 /%	径向刚度 / (kN·mm <sup>-1</sup> )							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	279.7	279.8	278.7	279.9	279.7	279.1	278.8	279.8
5	277.5	276.5	277.6	276.2	277.4	276	277.3	277.3
15	275.2	273.8	274.5	274.6	275.1	273.3	275.5	274.6
25	269.2	267.9	270	271.2	270.6	269.3	269.8	272.5
50	258.4	257.2	259	260.4	258.4	256.7	258.6	260.2

度达到 25% 及以上时,转子组件径向刚度显著降低,并且径向刚度不均性明显增加。径向刚度的不均性及其分布的不均性会使处于旋转工作状态的转子组件的挠曲变形不均匀性增加,这可能会影响到转子的动力学性能,加剧航空发动机的振动现象。

#### 4 预紧力分散度对组件扭转刚度的影响

转子是航空发动机中传递扭矩的重要部件,因此转子组件的扭转刚度会对系统性能产生影响。为研究预紧力分散度对转子组件扭转刚度的影响规律,对每种预紧力分散度条件下的转子组件分别施加 30000N·m 的扭矩载荷,计算组件的旋转角度,用扭矩载荷与转角的比值来表征组件的扭转刚度,计算结果见表 6。

不同预紧力分散度条件下转子组件扭转刚度的变化曲线如图 13 所示,分析可知,随着预紧力分散度的增加,扭转刚度逐渐减小,特别是预紧力分散度从 15% 变化到 25% 时,扭转刚度急剧降低。同样考虑到工程实际中可能存在预紧力超出设计值的情况,因此组件扭转刚度也可能随预紧力分散度增大而增加。总之,转子组件扭转刚度会随着预紧力分散度增加而发生明显波动,这种波动会导致结构系统力学性能的波动,进而影响到发动机整机性能的一致性

与稳定性。

### 结论

基于 ANSYS Workbench 有限元软件建立了典型螺栓止口转子连接结构模型,在不同预紧力分散度条件下,获得了结合面 Von Mises 等效应力变化云图,并根据有限元节点位移数据计算出了组件的轴向刚度、径向刚度和扭转刚度数值,并绘制出组件刚度随螺栓预紧力分散度的变化曲线。

通过对有限元计算结果进行分析可知,随着螺栓止口转子连接组件预紧力分散度的逐步增加,组件结合面等效应力分布不均匀性增加,组件轴向刚度、扭转刚度产生明显波动,径向刚度不均性逐渐增加,组件刚度的不一致性将会导致结构系统力学性能发生波动。

由于螺栓止口转子连接组件结合面应力分布及组件刚度受螺栓组预紧力分散度变化的影响较大,因此为提高螺栓止口转子连接组件力学性能的一致性和稳定性,非常有必要采用先进的装配工艺方法与检测手段对螺栓组预紧力进行合理有效控制。根据本文有限元仿真分析结果,综合考虑目前实际的工艺及软硬件技术条件,建议将航空发动机关键连接部位螺栓组预紧力分散度控制在预紧力设计值的 5%~15% 范围内。

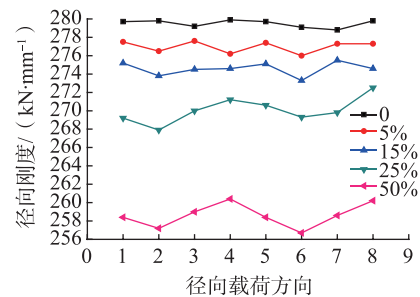


图12 不同预紧力分散度条件下径向刚度变化

Fig.12 Variation of component radial stiffness with the pre-tightening force dispersion increased

表6 扭转刚度计算值  
Table 6 Calculated value of torsional stiffness

预紧力分散度 /%	扭转刚度计算值 / (kN·m·(°)⁻¹)
0	320.4
5	315.2
15	310.5
25	276.6
50	273.5

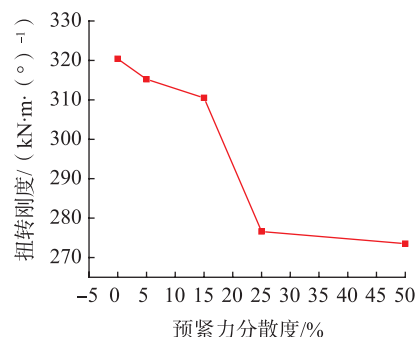


图13 不同预紧力分散度条件下的扭转刚度变化

Fig.13 Variation of component torsional stiffness with the pre-tightening force dispersion increased

### 参考文献

[1] 刘永泉,王德友,洪杰,等.航空发动机整机振动控制技术分析[J].航空发动机,2013,39(5):1-8.

LIU Yongquan, WANG Deyou, HONG Jie, et al. Analysis of whole aeroengine vibration control technology[J]. Aeroengine, 2013, 39(5):

1-8.

[2] KIM J, YOON J C, KANG B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(5): 895-911.

[3] PEDERSEN N L, PEDERSEN P. On prestress stiffness analysis of bolt-plate contact assemblies[J]. Archive of Applied Mechanics, 2008, 78(2): 75-88.

[4] OSKOU EI R H, KEIKHOSRAVY M, SOUTIS C. Estimating clamping pressure distribution and stiffness in aircraft bolted joints by finite-element analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2009, 223(7): 863-871.

[5] 南宮自軍, 姜晉慶, 張鋒. 固体火箭发动机连接结构接触应力研究 [J]. 推进技术, 1997, 18(4): 54-57.

NANGONG Zijun, JIANG Jinqing, ZHANG Duo. Study on contact stress of flanged connection structure in SRM[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(4): 54-57.

[6] 姚星宇, 王建军. 航空发动机螺栓连接载荷与结构参数对连接刚度影响规律 [J]. 推进技术, 2017, 38(2): 424-433.

YAO Xingyu, WANG Jianjun. Effects of load and structure parameters of aero-engine

bolted joints on joint stiffness[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(2): 424-433.

[7] 翟学, 翟庆刚, 王建军, 等. 基于有限元的螺栓连接参数化建模技术研究 [J]. 推进技术, 2016, 37(7): 1364-1371.

ZHAI Xue, ZHAI Qinggang, WANG Jianjun, et al. Parameterized modeling technology of bolted joints based on finite element[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(7): 1364-1371.

[8] 姚星宇, 王建军, 翟学. 航空发动机螺栓连接薄层单元建模方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2269-2279.

YAO Xingyu, WANG Jianjun, ZHAI Xue. Modeling method of bolted joints of aero-engine based on thin-layer element[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(12): 2269-2279.

[9] 郭文新, 么宇辉, 李韵, 等. 螺栓连接对高压转子结合面弯曲刚度的影响 [J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(1): 52-57.

GUO Wenxin, YAO Yuhui, LI Yun, et al. The influence of bolt joint characteristics on bending stiffness of rotor joint surface[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(1): 52-57.

[10] 陈光, 洪杰, 马艳红. 航空燃气涡轮发动机结构 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 32-45.

CHEN Guang, HONG Jie, MA Yanhong. Structure of aviation gas turbine engine[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010: 32-45.

[11] 王海涛. 带预紧力螺栓连接的机匣刚度分析 [J]. 航空发动机, 2010, 36(3): 33-35.

WANG Haitao. Casing stiffness analysis of pre-tightening force bolt joint[J]. Aeroengine, 2010, 36(3): 33-35.

[12] 金健生, 沈豪, 胡小山. 螺栓先进拧紧技术在轨道交通装备中的应用及展望 [J]. 机车车辆工艺, 2018(4): 18-19.

JIN Jiansheng, SHEN Hao, HU Xiaoshan. Application and prospect of advanced bolt tightening technology in rail transit equipment[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2018(4): 18-19.

[13] 林湖. 发动机关键螺栓紧固理论与实验研究 [D]. 上海: 上海海运学院, 2002.

LIN Hu. Theoretical and experimental study of critical bolt fastening of engine[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2002.

通讯作者: 李小强, 工学博士, 副教授, 研究方向为飞机先进制造工艺与技术装备、材料精密塑性成形工艺与装备技术, 目前主要围绕航空航天轻质结构精密成形与装配理论与技术进行研究, E-mail: littlestrongcn@163.com.

## Finite Element Analysis of Bolted Rabbet Joint Structure Under Dispersed Pre-Tightening Force

CHEN Feiyu, LI Xiaoqiang, DONG Hongrui, PING Yu, LI Dongsheng

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** Bolted rabbet joint structure is commonly used in aero-engine, and bolt pre-tightening force is usually dispersed after assembled under the current process technology, which can aggravate the unsteadiness of mechanical properties. This paper analyzes the Von Mises equivalent stress of the joint interface and stiffness of the bolted rabbet joint structure with FEA software ANSYS Workbench. Five levels of bolt pre-tightening force dispersion were set up by engineering experience, then a group of pre-tightening forces were randomly generated for each of the dispersion level to simulate the pre-tightening force in engineering condition. The stress distribution of joint interface, the axial stiffness, the radial stiffness and the torsional stiffness were calculated, and related mathematical relation curves were plotted. Finally, the influence rules of bolt pre-tightening force dispersion on the bolted rabbet joint structure were summarized which can provide a theoretical reference for the control of bolt pre-tightening force dispersion.

**Keywords:** Aero-engine; Bolted connection; Pre-tightening force dispersion; FEA; Equivalent stress

(责编 李丹)