

# 考虑阶梯型接触应力分布的航空螺栓连接 等效振动仿真模型

夏 阳<sup>1,2</sup>, 宋泽洋<sup>1,2</sup>, 冯楚涵<sup>3</sup>, 王友涛<sup>4</sup>, 袁运博<sup>5</sup>, 赵 广<sup>5</sup>

- (1. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 力学与航空航天学院 辽宁 大连 116024;
3. 大连理工大学 白俄罗斯国立大学联合学院 辽宁 大连 116024;
4. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司 贵阳 550014;
5. 大连理工大学 能源与动力学院 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 螺栓连接因其结构简洁和高可靠性,在航空设备装配中被广泛应用。螺栓连接的动态特性对装配结构的动力学行为有着显著影响,而采用详细有限元模型进行螺栓振动特性分析时计算量巨大,难以适用于复杂装配结构的分析。为解决这一问题,提出了一种阶梯型双环形薄层单元螺栓连接等效单元模型,以模拟螺栓连接面的应力分布状态。该模型由结合上部、双环形薄层单元和结合下部三部分组成,通过螺栓应力分布确定薄层单元尺寸,再通过赫兹接触理论,推导出圆环薄层单元的关键参数,包括厚度、弹性模量、泊松比和密度。随后,通过与典型航空工装的振动试验数据进行对比,验证了该模型在动力学特性仿真中的准确性。结果显示,与传统的虚拟材料法相比,提出的模型显著提高了仿真效率,且振动频率仿真误差控制在 10% 以内,表明该模型可有效用于螺栓连接结构的动力学仿真分析。

**关 键 词:** 航空工装; 螺栓连接; 阶梯型薄层单元; 振动仿真; 扫频试验

中图分类号: V214.41; TP391.99; TB115.1

文献标志码: A

## Equivalent vibration simulation model for aerospace bolted joints considering stepped contact stress distribution

Xia Yang<sup>1,2</sup>, Song Zeyang<sup>1,2</sup>, Feng Chuhan<sup>3</sup>, Wang Youtao<sup>4</sup>, Yuan Yunbo<sup>5</sup>, Zhao Guang<sup>5</sup>

- (1. State Key Laboratory of Structural Analysis,  
Optimization and CAE Software for Industrial Equipment,  
Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;
2. School of Mechanics and Aerospace Engineering,  
Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;
3. Dalian University of Technology and Belarusian State University Joint Institute,  
Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;
4. Guizhou Liyang Aviation Power Company, Limited,  
Aero Engine Corporation of China, Guiyang 550014, China;
5. School of Energy and Power Engineering,  
Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

收稿日期: 2025-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(12572390, U2541288)

作者简介: 夏阳(1987—),男,副教授,博士,研究领域为数值模拟方法。

通信作者: 袁运博(1993—),男,副教授,博士,主要从事传动系统动力学与故障诊断研究, E-mail: [yuanyunbo@dlut.edu.cn](mailto:yuanyunbo@dlut.edu.cn)

引用格式: 夏阳,宋泽洋,冯楚涵,等. 考虑阶梯型接触应力分布的航空螺栓连接等效振动仿真模型[J]. 航空动力学报, 2026, 41(11): 20250162.

Xia Yang, Song Zeyang, Feng Chuhan, et al. Equivalent vibration simulation model for aerospace bolted joints considering stepped contact stress distribution[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(11): 20250162.

**Abstract:** Bolted connections are widely used in aerospace equipment assembly due to their structural simplicity and high reliability. The dynamic characteristics of bolted connections significantly influence the dynamic behavior of assembled structures. While detailed finite element models can analyze vibration characteristics, their computational cost is often prohibitively high, making them unsuitable for analyzing complex bolted assemblies. To address this issue, this study proposes an equivalent bolted connection unit model, which simplifies the bolted connection into a stepped double-ring thin-layer unit to simulate the stress distribution at the bolted interface. The model consists of three parts: the upper joint, the double-ring thin-layer unit, and the lower joint. The size of the thin-layer unit model is determined based on the bolt stress distribution, and key parameters of the ring-shaped thin-layer unit—including thickness, elastic modulus, Poisson's ratio, and density—are derived using Hertzian contact theory. The accuracy of the proposed model in simulating dynamic characteristics is validated through comparison with vibration experimental data from a typical aerospace tooling structure. The results demonstrate that, compared to the traditional virtual material method, the proposed model significantly improves simulation efficiency while maintaining vibration frequency simulation errors within 10%. This indicates that the model is effective for dynamic simulation analysis of bolted connection structures.

**Keywords:** aviation tooling; bolted connections; stepped thin-layer element; vibration simulation; sweep frequency experiment

螺栓连接具有结构简洁、可靠性高等优点,在航空机械装配结构中广泛应用于零部件的连接。螺栓连接应力和连接刚度对装配结构的动态特征具有较大的影响。影响螺栓接触应力的因素有很多,其中包括螺栓连接的表面粗糙度<sup>[1]</sup>、螺栓预紧力<sup>[2]</sup>、连接表面加工参数等影响因素。因此,螺栓应力在多重因素的影响下具有复杂的非线性特征,是目前接触仿真研究的热点之一。螺栓连接处刚度变化对工装的模态特性的影响较大,局部刚度的非线性特性影响装配结构整体刚度的分布和动力特性<sup>[3-5]</sup>。

在进行航空装配结构动态特性分析时,现有的有限元软件工具缺乏直接分析非线性连接结构模态的能力<sup>[6]</sup>,因此采用的分析策略通常为简化连接部位的建模技术,将非线性结构转换为线性模型。通常采用的简化方式有三种,分别是等效刚度简化模型<sup>[7-8]</sup>、等效螺栓模型<sup>[9-11]</sup>、线性薄层单元模型<sup>[12-13]</sup>。石川千等<sup>[7]</sup>提出了一种线性等效刚度模型,用于替代非线性刚度连接处的分析计算。该方法通过构建广义弹簧单元,简化了点式连接结构的建模过程,基于非线性振动和结构动力学理论,提出了一种计算等效刚度的方法。与传统方法相比,该模型充分考虑了螺栓预紧力和接触效应的影响,显著提高了仿真模型的分析精度,但其适用范围有限,且参数确定过程较为复杂。Kim 等<sup>[11]</sup>提出并定义了 4 种有限元螺栓模

型连接刚度,然而他们的研究未能探讨结构参数对连接刚度的影响,且将非线性系统简化为线性分析,这限制了模型的精度和适用性。为了减少计算量,赵广等<sup>[12]</sup>基于在模态分析中接触刚度的识别方式,提高在粗糙表面模态分析中表面接触刚度的识别精度,采用薄层单元等效接触表面的接触特性,通过权衡不同阶次模态,捕捉了各阶固有频率的整体变化模式。随着螺栓预紧力的提高,接触刚度呈现出整体的非线性增长趋势,同时,接触刚度的识别精度也随之提高。构建了螺栓连接结构中预紧力、表面粗糙度接触刚度与固有频率之间的相互关系,但是当螺栓预紧力较小时,其试验和仿真误差较大。

由于传统薄层单元的特征参数识别不够准确,很多学者从微观角度去研究螺栓连接处的接触机理。Greenwood、刘勇、田红亮等<sup>[14-16]</sup>基于统计学方法,提出了 GW 接触模型,利用随机变量描述微观表面形貌中微凸体的高度分布。该模型假设微凸体顶端呈球状且曲率半径相同,高度服从高斯分布,微凸体间的弹性接触和变形相互独立。随后, Majumdar 等人<sup>[17-18]</sup>提出了 M-B 模型,结合机械加工表面的自仿射分形特性,基于分形维数  $D$  和分形表面粗糙度参数  $G$  提高模型精度。该模型指出,结合面负载越低,塑性变形比例越高。在此基础上, Jiang 等人<sup>[19]</sup>结合分形几何学<sup>[20-21]</sup>和赫兹接触理论<sup>[22-23]</sup>,深入分析了铣削、磨削和刮研

三种加工技术下表面粗糙度、微凸体弹塑性变形及单个微凸体接触刚度, 进一步丰富了接触力学在实际工程中的应用。他们采用了构造函数法来计算表面轮廓的关键参数, 并通过理论推导得出的接触刚度与试验中在不同载荷条件下获得的刚度数据相吻合, 进一步验证了 M-B 接触模型的合理性。李鹏等<sup>[24]</sup> 基于赫兹基础理论和分形接触理论, 并将螺栓连接处进行简化, 推导出非线性虚拟材料的弹性模量、密度、泊松比之间的关系, 建立了非线性虚拟材料模型, 在此推导关系的基础上, 设计出了一种分块式薄层单元来验证其有效性。

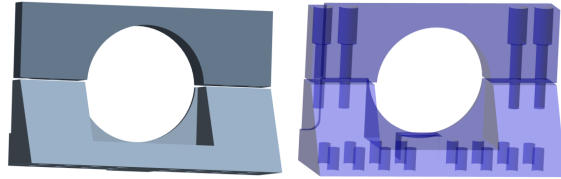
为了精确识别等效刚度动态参数, Chen 等<sup>[25]</sup> 构建两自由度非线性动力学模型, 引入三次非线性刚度项与黏滞阻尼, 有效刻画螺栓预紧力变化导致的刚度跃变情况。Tian 等<sup>[26]</sup> 以模态置信准则残差和固有频率误差构建目标函数, 采用循环算法全局优化弹性模量、切变模量等薄层单元本构参数。崔方圆等<sup>[27]</sup> 提出参数自迭代逆向识别框架, 融合模态试验、有限元分析与优化算法, 解决材料批次差异导致的参数不确定性。Xu 等<sup>[28]</sup> 通过螺栓间距与预紧力的应力场分析, 优化薄层单元材料参数, 也取得了良好的效果。

本文在应用螺栓连接材料的泊松比、密度、弹性模量与接触应力非线性关系的基础上, 提出了一种阶梯型双环形薄层单元等效模型, 以准确模拟螺栓连接面的应力分布状态。通过对比采用非线性接触理论推导求出的薄层单元特征参数和航空工装扫频试验反求的薄层单元特征参数, 以及典型航空工装模态分析结果和扫频试验结果, 验证了所提出的环形薄层单元的准确性。相比于传统的薄层单元, 本文方法可以准确模拟螺栓连接面应力状态, 提高精度, 同时简化模型的构建过程, 有效缩减了计算量。

## 1 薄层单元模型

### 1.1 螺栓连接结构等效模型

螺栓连接结构广泛应用于航空部件的安装固定, 例如在工装设计中, 通过螺栓将工装的两部分连接起来。典型航空工装螺栓连接孔如图 1(a) 所示, 圆环通过左右两侧的螺栓固定在底座上, 组合成一个圆环型固定装置, 在结合处布置两个半径为 5.5 mm 的螺栓孔, 如图 1(b) 所示, 深色部分为螺栓孔。工装的材料为铝合金, 其各项参数如表 1 所示。



(a) 工装三维图 (b) 工装三维透视图

图 1 典型工装三维模型图

Fig. 1 Three-dimensional model of typical tooling

表 1 典型工装材料参数

Table 1 Material parameters of typical tooling

| 参数                      | 数值     |
|-------------------------|--------|
| 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 2 780  |
| 弹性模量/MPa                | 72 000 |
| 泊松比                     | 0.32   |

### 1.2 阶梯型圆环薄层单元模型

在分析单螺栓节点的应力分布状态时, 首先需要关注紧固件与被连接件结合面的支承面应力分布。其支撑面如图 2 所示。

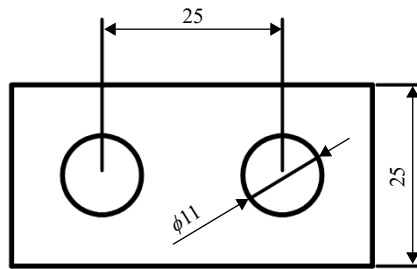


图 2 工装螺栓孔示意图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of bolt holes on the tooling (Unit: mm)

对航空工装进行有限元静力学分析, 在结合面处, 添加一块覆盖整个结合面的薄层单元, 将螺栓预紧力设置为 54.2 kN。薄层单元的压力应力分布情况如图 3 所示, 在螺孔附近环形区域应力状态较为一致, 在螺母覆盖范围外应力下降。

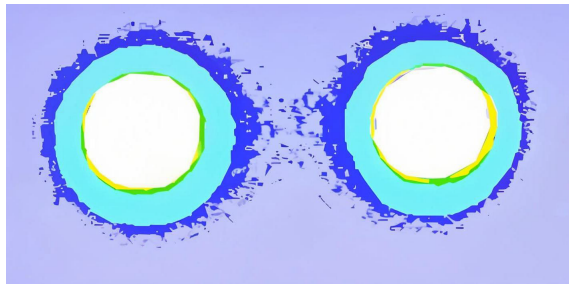


图 3 螺栓连接处应力云图

Fig. 3 Stress clouds in bolted joints

目前,学术界提出了几种主要的应力分布假设,包括均布型、正弦型、直线型和指数型。根据 Nassar 等的研究<sup>[29]</sup>,这些假设分别适用于不同的工况。其中,指数型应力分布特别适用于考虑支承面受载变化情况。由于螺栓节点在初始预紧力松弛过程中,预紧力会持续变化,且支承面的结合状态对预紧力松弛具有重要影响,同时这种应力分布也更好的拟合了仿真的结果,图 4 展示了典型指数型应力分布图。

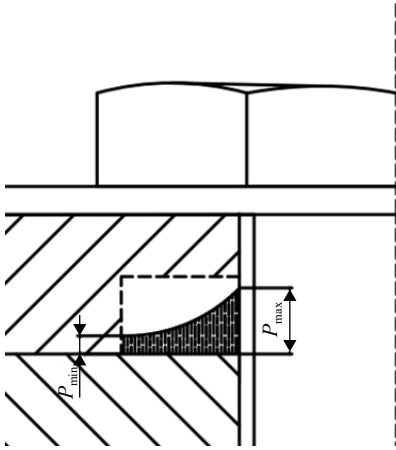


图 4 应力分布示意图

Fig. 4 Schematic of stress distribution

指数型应力分布中,支承面上所受应力随着远离螺栓孔而呈指数型衰减,其数学关系如下:

$$P = P_{\max} e^{-ar'} \quad (1)$$

式中  $P$  为分布在支承面上的一点应力,  $P_{\max}$  为螺栓孔处支承面应力,同时也是支承面上的最大应力。 $r'$  是支承面上据螺栓孔边缘的距离,  $a$  为指数参数, Nassar 等<sup>[30]</sup>指出支承面的名义摩擦半径如下:

$$r_m = \frac{(\gamma+1)}{2} r_i \quad (2)$$

其中  $\gamma$  为支承面接触半径与螺栓孔径之比,  $r_i$  为螺栓孔径。

为了计算方便且体现出接触应力分布的非线性特征,将此指数型应力分布模型简化为两个层次的阶梯式应力分布模型,示意图如图 5 所示。

其中应力分为  $P_1$  和  $P_2$  两个部分,简化成两个层次的阶梯式应力分布,同时需要保证总的接触力不变。原指数分布的支承面应力  $F$  可以表示为

$$F = \int_0^{r_m} P(r') \cdot 2\pi r' dr' = 2\pi P_{\max} \int_0^{r_m} r' e^{-ar'} dr' \quad (3)$$

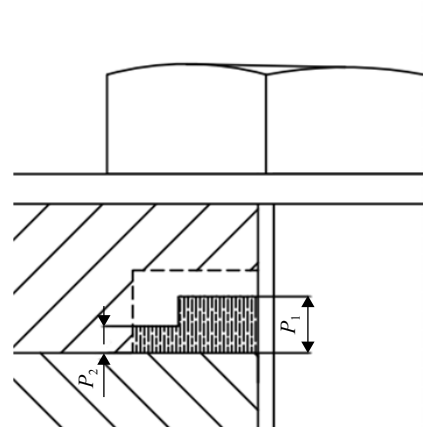


图 5 阶梯型应力分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stepped stress distribution

应力求解半径是从 0 到  $r_m$ , 代入得到支撑面应力  $F$  为:

$$F = 2\pi P_{\max} \left( -\frac{r_m}{a} e^{-ar_m} + \frac{1}{a^2} (e^{-ar_m} - 1) \right) \quad (4)$$

新的阶梯式应力分布,分为两个区域,内部区域半径范围是从  $r' = 0$  到  $r' = r_1$ , 应力为  $P_1$ , 外部区域半径范围是从  $r' = r_1$  到  $r' = r_m$ , 应力为  $P_2$ 。

根据指数型分布的总应力与阶梯型分布的总应力相等,得到:

$$\pi r_1^2 P_1 + \pi (r_m^2 - r_1^2) P_2 = F \quad (5)$$

为了简化,可以假设高应力区的半径  $r_1$  和低应力区  $r_2$  呈一个比例,即  $r_1 = k \cdot r_2$ , 其中  $k$  是一个介于 0 和 1 之间的常数。 $k$  值的确定是根据得到仿真结果中不同应力区域的圆半径进行确定(见图 3)这样,可以将上述方程简化为:

$$\frac{P_{\max} \cdot 2}{a^2 \cdot r_2^2} (1 - e^{-a \cdot r_2} (1 + a \cdot r_2)) = P_1 \cdot k^2 + P_2 \cdot (1 - k^2) \quad (6)$$

根据标准螺栓速查表确定  $P_{\max}$  大小,仿真结果确定  $P_1$  和  $P_2$  的大小,为了确定  $r_1$  和  $r_2$  的大小,还需要确定比例因子  $k$  的大小,假设是高应力区和低应力区的应力比等于它们的面积比,即:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{1 - k^2}{k^2} \quad (7)$$

根据公式(7)反求出:

$$k = \sqrt{\frac{P_2}{P_1 + P_2}} \quad (8)$$

针对图 2 所示螺栓连接方式,根据计算可确定小圆环内径为 5.5 mm, 圆环外径为 8.5 mm, 大

圆环内径为 8.5 mm, 外径为 10 mm, 如图 6 所示。

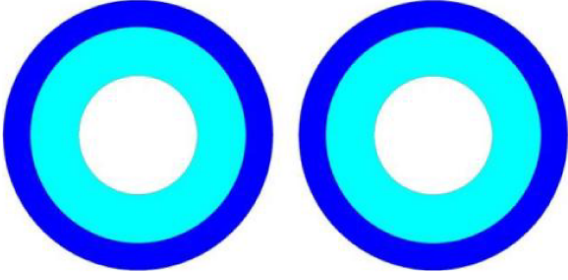


图 6 阶梯型圆环薄层单元

Fig. 6 Stepped circular thin layer unit

## 2 螺栓等效模型参数

### 2.1 薄层单元的弹性模量、泊松比和密度

环形薄层单元的定义属性包括: 薄层单元厚度、泊松比、密度、弹性模量。本节通过推导公式, 对环形薄层单元的特征参数进行推导和计算。赫兹基础理论和分形接触理论已经被很多学者应用到螺栓结合研究中, 李鹏等<sup>[24]</sup>认为对于螺栓连接部分, 其上下两个部分实际上是两个粗糙表面靠螺栓连接在一起, 微观方面, 可以看成其表面由很多半径不同的微凸体接触组成, 如图 7 所示。若粗糙界面上每对微凸结构间的接触力学特征均可通过一组弹簧-阻尼元件进行表征, 则结合部的动态特性可等效为无数弹簧-阻尼元件构成的系统。因此可以借助结合部的刚度与阻尼等特性参数, 对结合部兼具弹性与阻尼特性、同时具备能量存储与耗散能力的“柔性联结”本质特征进行量化描述。

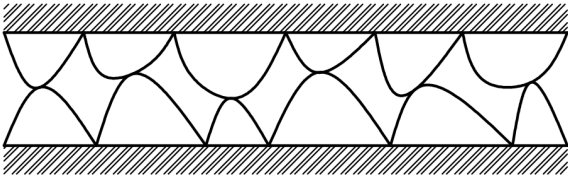


图 7 微观表面接触

Fig. 7 Microscopic surface contact

定义微观中单个微凸体的变形为  $d$  单个为微凸替的等效曲率半径为  $R$ , 则其法向力  $f$  和接触面积分别为:

$$f = \frac{4}{3} ER^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}} \quad a = \pi R d \quad (9)$$

所以其单个微凸体的应力函数为:

$$\sigma = \frac{f}{a} = \frac{4ER^{\frac{1}{2}}d^{\frac{3}{2}}}{\pi R d} = \frac{4}{3} E \left( \frac{d}{R} \right)^{\frac{3}{2}} = \frac{4}{3} E \varepsilon \quad (10)$$

再根据弹性模量的定义, 单个微凸体的弹性模量为:

$$e = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{2}{3\pi} E \varepsilon^{-\frac{1}{2}} = \frac{2}{3\pi} E \sqrt{\frac{R}{d}} \quad (11)$$

利用环形薄层单元的实际接触面积与加权平均弹性模量, 能够算出其等效弹性模量。当微凸体出现塑性变形时, 弹性模量为零; 若微凸体仅发生弹性变形, 即平截面积处于  $a'_c$  和  $a'_L$  之间, 其等效弹性模量为:

$$E = \frac{\sqrt{2}}{6\pi\sqrt{\pi}A_0} DE G^{1-D} \psi^{1-0.5D} a'_L{}^{0.5D} (a'_L{}^{0.5} - a'_c{}^{0.5}) \quad (12)$$

其中  $D$  为分形维数, 值为 1.28,  $G$  为分形表面粗糙度, 大小为  $3.5 \times 10^{12}$ ,  $\psi$  为域扩展系数, 大小为 2.05。

泊松比的定义为:

$$\nu = \frac{E}{2G_\tau} - 1 \quad (13)$$

但是薄层单元的切变模量  $G_\tau$  是未知量, 因此为了求得薄层单元的泊松比要求其切变模量, 单个微凸体的切变模量可表示为:

$$g_\tau = \frac{16}{\pi} / \sqrt{1 - \left( \frac{\beta}{f_\tau} G' \right)} \quad (14)$$

其中  $f_\tau$  为静摩擦因数,  $\beta$  为剪切力和预紧力之比。圆环薄层单元的等效切变模量由实际接触面积和加权平均切变模量决定。当平截面积在  $a'_c$  和  $a'_L$  之间时, 就能得到切变模量和实际接触面积, 其等效切变模量为:

$$G_\tau = \frac{\int_{a'_c}^{a'_L} g_\tau n(a') da'}{A_0} = \sqrt[3]{1 - \frac{\beta}{f_\tau}} \cdot \frac{8DG'\psi^{1-0.5D}}{\pi A_0(2-D)} a'_L{}^{0.5D} (a'_L{}^{1-0.5D} - a'_c{}^{1-0.5D}) \quad (15)$$

表面微凸体发生塑性变形的标准是其平截面积  $a'_c$ , 当平截面积超过这个标准, 塑性变形发生, 这时薄层单元的等效切变模量  $G_\tau$  为零, 可以计算出虚薄层单元的泊松比:

$$\nu = \frac{E}{2G_\tau} - 1 = \frac{\sqrt{2}E^*G^{1-D}(2-D)(a'_L{}^{0.5} - a'_c{}^{0.5})}{96\sqrt[3]{1 - \frac{\beta}{f_\tau}}G'\sqrt{\pi}(a'_L{}^{1-0.5D} - a'_c{}^{1-0.5D})} - 1 \quad (16)$$

螺栓结合部由表面微凸体组成, 这些微凸体在总质量中占比很小。所以螺栓结合处的动态特征基本不受环形薄层单元密度的影响。基于实际接触面积与名义接触面积的比值, 提出了一个简化的薄层单元密度定义:

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \cdot \frac{A_r}{A_0} = \frac{(\rho_1 + \rho_2) D \psi^{1-0.5D} a_L'^{0.5D} (a_L'^{1-0.5D} + a_c'^{1-0.5D})}{4(2-D) A_0} \quad (17)$$

## 2.2 薄层单元厚度

薄层单元的特征参数, 除了上述所确定弹性模量、泊松比、等效密度, 所采用薄层单元的厚度同样会对螺栓连接处的动态特征产生影响, 为了获得薄层单元的厚度, 本文假设在螺栓连接处接触面积为  $A_0$ , 平均压力为  $P_E$ , 螺栓连接处刚度<sup>[31]</sup>与力  $F$  的函数关系为

$$F = P_E A_0 = \frac{E A_0}{h} \delta = K_N \delta \quad (18)$$

在式(18)中,  $h$  为薄层单元的厚度,  $E$  为薄层单元的弹性模量,  $\delta$  为螺栓连接处的刚度,  $K_N$  为螺栓连接处的法向接触刚度, 根据式(17)可以求出薄层单元的厚度表达式为:

$$h = \frac{E A_0}{K_N} \quad (19)$$

从式(19)可以看出, 薄层单元的厚度和其弹性模量  $E$  成正比关系, 其螺栓连接处的法向接触刚度  $E_N$  成反比关系。

进一步结合等效刚度理论<sup>[32]</sup>, 可推导出厚度  $h$  随接触压强  $p$  增大而增加的非线性关系。所以为了建立螺栓连接处非均匀分布的薄层单元, 薄层单元的厚度应保持一致。该理论模型反映了薄层单元在承载状态下的自适应特性, 但其预测精度需通过实际结构响应验证。为验证式(12)的适用性并量化厚度对动态特性的影响, 建立工装螺栓连接结构的有限元参数化模型。通过控制薄层单元厚度  $h$  的梯度变化(0.2~3.0 mm), 分析其 1、2 阶模态频率的响应规律。

如图 8 所示, 当  $h < 0.8$  mm 时, 薄层单元对结构刚度贡献微弱, 连接近似为刚性, 模态频率变化小于 2%; 当  $h \geq 0.8$  mm 时, 随着  $h$  增加, 工装 1、2 阶模态频率显著下降, 表明薄层单元对柔性连接的模拟效果增强。上述规律与式(19)中的理论趋势一致, 验证了模型的有效性。基于仿真结

果与试验数据的对比, 最终选取  $h = 2$  mm 作为优化厚度, 以平衡计算效率与精度。

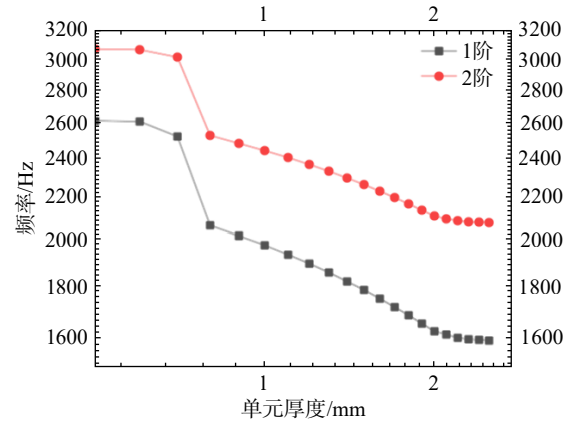


图 8 薄层单元厚度和工装第 1、2 阶模态的关系

Fig. 8 First- and second-order modal frequencies of the tooling under different thin-layer element thicknesses

## 3 薄层单元可行性验证

### 3.1 振动试验

航空产品要经历的环境试验项目有振动试验。产品振动试验要用环试工装, 它能连接产品和振动台, 传递载荷。试验时, 工装、产品、振动台是一个动力学系统, 工装的特性对试验有显著影响。工装设计不合理, 可能会让产品在低频时因为工装共振而过试验, 高频时响应衰减过度而欠试验, 本次试验采用振动试验台, 测量时, 扫频仪器设定的频率测量范围为 0~3 000 Hz, 圆环上部与圆环底座通过 7 颗螺钉进行连接, 圆环底座通过多颗螺钉固定在试验台上, 传感器安装在工装环的轴向和径向, 如图 9 所示。

测点一位于环的径向位置, 测点二位于环的轴向位置。试验结果可得工装前三阶模态, 如表 2 所示。

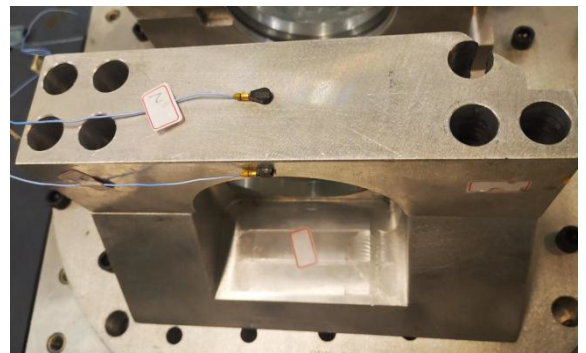


图 9 工装振动试验

Fig. 9 Vibration test setup for the tooling

表 2 工装前三阶固有频率  
Table 2 First three natural frequencies of the tooling

| 阶数  | 固有频率/Hz |
|-----|---------|
| 1 阶 | 1 289   |
| 2 阶 | 1808    |
| 3 阶 | 2 305.5 |

根据螺栓连接结构动力学仿真所得不同区域的应力值,求得其对应的薄层单元参数,如表 3 所示,随后进行结构模态仿真,验证本文所提出模型的有效性和准确性。

表 3 薄层单元不同区域特征参数  
Table 3 Characterization parameters of different regions of the thin-layer unit

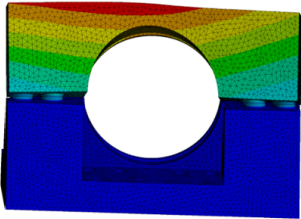
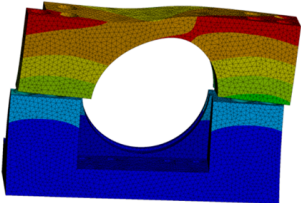
| 位置 | 弹性模量/Pa | 等效密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 泊松比   |
|----|---------|---------------------------|-------|
| 内环 | 2.50    | 2 778                     | 0.322 |
| 外环 | 2.37    | 2 769                     | 0.319 |

仿真分析中采用有限元分析软件 ANSYS 进行计算。仿真模型中的边界条件设置与工装的工况保持一致。工装的使用工况是底部固定,工装上下圆环采用螺栓连接。仿真中工装模型底部进行刚性约束,圆环与圆环底座之间的螺栓连接处用阶梯型环形薄层单元进行替代,薄层单元与工装的圆环接触面进行绑定设置,模拟实际情况中的螺栓连接。通过有限元分析,得到此航空工装的前三阶振型图,如表 4 所示。

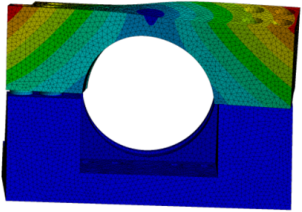
3.2 结果对比

将双环形薄层单元法得到的前三阶频率仿真结果分别与传统虚拟材料法仿真结果、工装振动

表 4 航空工装前三阶模态仿真振型  
Table 4 Aerospace tooling front third-order modal simulation of vibration patterns

| 阶数                    | 仿真振型                                                                                |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 阶<br>频率为 1 243 Hz   |  |
| 2 阶<br>频率为 1 947.3 Hz |  |

续表

| 阶数                    | 仿真振型                                                                                |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 阶<br>频率为 2 115.8 Hz |  |

试验结果进行对比,如表 5 所示,表格中传统法指传统虚拟材料法。

结果显示误差均在 10% 以内,双环形薄层单元法的最大误差出现在第 3 阶,为-8.22%,但相较于传统法(17.78%)误差幅度减少了 9.56 个百分点,但误差仍比前两阶要大,可能是因为高阶频率对非线性效应(如油膜力突变、碰摩刚度软化)更为敏感,传统法因忽略这些因素导致显著高估,而双环形法通过薄层单元的多尺度建模更真实反映系统动力学特性。

表 5 前三阶频率结果对比

Table 5 Comparison of first three order frequency results

| 阶数      | 1 阶     | 2 阶     | 3 阶     |
|---------|---------|---------|---------|
| 振动试验/Hz | 1 289   | 1 808   | 2 305.5 |
| 阶梯型/Hz  | 1 243   | 1 947.3 | 2 115.8 |
| 传统法/Hz  | 1 475.9 | 2 093.5 | 2 715.6 |
| 阶梯型误差 % | -3.49   | 7.70    | -8.22   |
| 传统法误差 % | 14.49   | 15.79   | 17.78   |

4 结 论

本文针对航空装备中螺栓连接的仿真分析方法开展研究,基于薄层单元法,提出了一种阶梯型薄层单元模型,将环形薄层单元分为内环和外环两个部分,用于仿真分析中替代螺栓结构。将接触面的接触阻尼因素纳入考量,根据螺栓连接处的应力分布情况,并基于分形—赫兹理论,计算出了双环形薄层单元的尺寸、弹性模量,泊松比,密度特征参数。根据等效刚度的理论,结合仿真结果与试验数据,确定薄层单元的厚度。依托螺栓连接结构固有特性测试与薄层单元仿真分析,完成了接触刚度的精准辨识,为准确获取螺栓连接结构固有特性给出了可行途径。

为了验证双环形薄层单元的可行性,设计了薄层单元模态试验,仿真结果与航空工装振动试验结果进行对比,薄层单元法将误差维持在 10%

以内,最大误差为-8.22%,最小误差仅为 3.49%,而且本文提出的阶梯型薄层单元模型结果远远优于传统虚拟材料仿真方法。

本文提出的阶梯型薄层单元等效分析模型考虑了螺栓连接的接触特性和接触力分布特征,具有广泛适用性,计算结果证明本文提出薄层单元法在系统动力学分析中展现出比传统虚拟材料法更强的工程适用性和理论完备性,为航空装配结构设计提供了更可靠的仿真工具。

## 参考文献:

- [1] 马奔奔. 基于多尺度粗糙接触力学的无垫圈螺栓连接密封性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
Ma Benben. Sealing analysis for bolted joint systems without gaskets based on multi-scale rough contact mechanics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [2] 李森浩. 盘鼓结构中螺栓扭矩—转角法拧紧工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.  
Li Senhao. Study of bolt torque-angle tightening process in disc and drum structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [3] 栾宇, 刘松, 关振群, 等. 小变形下螺栓法兰连接结构的静刚度非线性特性[J]. 强度与环境, 2011, 38(3): 29-35.  
Luan Yu, Liu Song, Guan Zhenqun, et al. The nonlinear character of static stiffness in the structure with bolted flanged connection under small deformation[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2011, 38(3): 29-35. (in Chinese)
- [4] 何国军, 竺润祥, 尹云玉, 等. 考虑连接刚度的导弹固有特性分析[J]. 强度与环境, 2006, 33(1): 14-17.  
He Guojun, Zhu Runxiang, Yin Yunyu, et al. Analysis on inherent behavior considering the connecting rigidity of missiles[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2006, 33(1): 14-17. (in Chinese)
- [5] Zhang Ouqi, Poirier J A. New analytical model of bolted joints[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(4): 721-728.
- [6] 邹元杰. Bush 有限单元原理及其在航天器结构建模中的应用[J]. 航天器工程, 2010, 19(1): 99-105.  
Zou Yuanjie. Bush finite element principle and its application in building structural models for spacecraft[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(1): 99-105. (in Chinese)
- [7] 石川千, 周徐斌, 张永涛, 等. 点式连接航天器等效刚度模态分析方法[J]. 航天器工程, 2016, 25(1): 31-39.  
Shi Chuanqian, Zhou Xubin, Zhang Yongtao, et al. Modal analysis of spacecraft with dotted joints based on equivalent stiffness[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(1): 31-39. (in Chinese)
- [8] 程来, 宋言明, 李贺, 等. 基于等效接触区域的螺栓连接结构模态分析[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(2): 44-47.  
Cheng Lai, Song Yanming, Li He, et al. Modal analysis based on the equivalent contact area of the structure with bolt connections[J]. *Machine Design & Research*, 2012, 28(2): 44-47. (in Chinese)
- [9] Liu S G, Wang J, Hong J, et al. Dynamics design of the aero-engine rotor joint structures based on experimental and numerical study: GT2013-95029[R]. Glasgow: ASME Turbo Expo 2013.
- [10] 樊宁. 航空发动机连接结构刚度非线性及其对转子动力学影响[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.  
Fan Ning. Nonlinear stiffness of aero-engine joint structures and its influence on rotor dynamics[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 赵广, 金鑫, 崔颖, 等. 基于模态应变能的接触刚度识别方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(9): 147-153.  
Zhao Guang, Jin Xin, Cui Ying, et al. Contact stiffness identification method based on modal strain energy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(9): 147-153. (in Chinese)
- [13] 黄开放, 金建新. 基于虚拟材料方法的螺栓预紧力模拟的研究[J]. 机械设计与制造, 2012(8): 148-150.  
Huang Kaifang, Jin Jianxin. Research on bolt preload simulation based on virtual material method[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012(8): 148-150. (in Chinese)
- [14] Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1966, 295(1442): 300-319.
- [15] 刘勇, 夏天, 陈志英, 等. 粗糙表面统计接触模型的提出与发展[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(3): 395-406.  
Liu Yong, Xia Tian, Chen Zhiying, et al. The development of statistical contact model for rough surface[J]. *Tribology*, 2020, 40(3): 395-406. (in Chinese)
- [16] 田红亮, 方子帆, 赵春华, 等. 依据修正 GW 理论的结合部法向接触研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 38-42, 47.  
Tian Hongliang, Fang Zifan, Zhao Chunhua, et al. Normal contact of joint interface using revised GW theory[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(6): 38-42, 47. (in Chinese)
- [17] Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. *Journal of Tribology*, 1991, 113(1): 1-11.
- [18] Majumdar A, Bhushan B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces[J]. *Journal of Tribology*, 1990, 112(2): 205-216.
- [19] Jiang Shuyun, Zheng Yunjian, Zhu Hua. A contact stiffness model of machined plane joint based on fractal theory[J]. *Journal of Tribology*, 2010, 132: 011401.
- [20] 孙洪泉. 分形几何与分形插值[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
Sun Hongquan. Fractal geometry and fractal interpolation[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [21] Xu Longjun, Peng Tiefeng, Zhang Dingyue, et al. Fractal desulfurization kinetics of high-sulfur coal[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, 22(1): 111-114.
- [22] Gao Qifeng, Wu Xiongxi, Li Zesong. Failure analysis of rolling bearings based on explicit dynamic method and theories of hertzian contact[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, 19(6): 1645-1654.
- [23] Yang Hongping, Che Xiaowei, Yang Cheng. Investigation of normal and tangential contact stiffness considering surface asperity interaction[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, 72(3): 379-388.
- [24] 李鹏, 杨成, 刘秀宇, 等. 基于非线性虚拟材料法的栓接结合部动态特性分析[J]. 导航与控制, 2023, 22(3): 106-115.  
Li Peng, Yang Cheng, Liu Xiuyu, et al. Dynamic analysis of bolted joint based on nonlinear virtual material method[J]. *Navigation and Control*, 2023, 22(3): 106-115. (in Chinese)
- [25] Chen Zhe, Zhao Qijun, Zhou Guochen. Research on the simulation method for equivalent stiffness of bolted connection thin plate

- structures[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2024, 2024: 8648996.
- [26] Tian Yu, Qian Hui, Cao Zhifu, et al. Identification of pre-tightening torque dependent parameters for empirical modeling of bolted joints[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(19): 9134.
- [27] 崔方圆. 螺栓结合部动态特性等效建模与参数识别方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- Cui Fangyuan. Investigation on equivalent modeling and parameter identification method of dynamic characteristics of bolted joint[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [28] Xu Z H, Liu D, Hong Z Y, et al. An improved modeling method for thin layer elements of aeroengine bolted connections[J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(7): 100-106.
- [29] Nassar S A, El-khiamey H, Barber G C, et al. An experimental study of bearing and thread friction in fasteners[J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127(2): 263-272.
- [30] Nassar S A, Matin P H, Barber G C. Thread friction torque in bolted joints[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2005, 127(4): 387-393.
- [31] 马雅丽, 刘国超, 危家勇, 等. 基于有限元法改进螺栓连接刚度模型[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021(3): 45-48.
- Ma Yali, Liu Guochao, Wei Jiayong, et al. Improvement of bolt connection stiffness model based on finite element method[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2021(3): 45-48. (in Chinese)
- [32] 贾文锋, 张学良, 温淑花, 等. 基于虚拟材料的结合面建模与参数获取方法[J]. *太原科技大学学报*, 2013, 34(5): 347-351.
- Jia Wenfeng, Zhang Xueliang, Wen Shuhua, et al. A method for modeling and parameter acquisitions of joints based on virtual materials[J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2013, 34(5): 347-351. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)