

螺栓连接不确定性对机匣动力学特征影响研究

高原,王晓伟,杨志强

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:螺栓连接作为航空发动机中机匣装配结构的主要连接方式,其不确定参数的存在会对机匣装配结构的动力学特性产生影响。基于薄层单元理论对机匣结构进行简化建模,以拧紧力矩为不确定性参数为例,通过简化模型仿真计算在其影响下的机匣动力学特性,并与原始模型进行对比。结果验证了简化模型计算的准确性与高效性,为工程实践中计算分析螺栓连接不确定性对机匣动力学特性的影响以及结构动力学优化设计提供了计算方法和参考。

关键词:螺栓连接;不确定性;机匣;动力学特性

中图分类号:TH131 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0037-04

Research on Influence of Uncertainty of Bolt Connection on Dynamic Characteristics of Casing

GAO Yuan, WANG Xiaowei, YANG Zhiqiang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Despite the fact that bolted connection is the main connection mode of casing assembly structure in aero-engine, the existence of its uncertain parameters will affect the dynamic characteristics of casing assembly structure. Based on the zonal thin layer element theory, simplified modeling was carried out for the casing connection structure. Taking tightening torque as an example, the simplified model was used to simulate and calculate the dynamic characteristics of the casing under its influence. Comparison with the original model verified the accuracy and efficiency of the simplified model, which provides a method and reference for calculating and analyzing the influence of structural uncertainty of bolted connection on the dynamic characteristics of casing and optimization design of structural dynamics in engineering practice.

Keywords: bolt connection; uncertainty; casing; dynamic characteristic

0 引言

机匣是航空发动机的重要组件,而螺栓连接作为机匣连接采用的主要方式,一直是工程领域研究的重点。一般工程中对于螺栓的计算与设计,往往根据现有规范,从确定性的角度来进行分析。然而在实际工程中,在装配时会存在很多不确定参数,比如螺栓预紧力、结合面粗糙程度等。这些不确定参数都会对机匣装配结构的动力学特性产生不同程度的影响。准确分析螺栓连接不确定性参数对机匣动力学特性的影响,能够为结构动力学优化设计、安全系数的合理取值提供参考。

本文基于分区域薄层单元建模方法^[1-2],运用分形理论^[3-6]和螺栓连接结构的超模型连接刚度理论^[7-9],建立了螺栓连接结构简化模型,并以拧紧力矩不确定性参数为例,通过螺栓连接简化模型对机匣装配结构进行了动力学计算,并与未简化的原始机匣装配结构计算结果进行对比。结果表明:采用薄层简化螺栓建模在计算不确定性参数对机匣装配结构动力学方面具有准确性与高效性;受到拧紧力矩不确定性影响,机匣装配结构的动力学特性会在一定范围内产生波动。研究结果为工程实践中开展机匣结构动力学优化设计提供了计算方法和参考。

1 螺栓连接结构简化建模

由于机匣装配结构上螺栓数量众多,直接选择螺栓连接结构原始模型开展不确定性计算无疑会降低计算效率,耗费计算资源。所以考虑建立准确可靠的螺栓连接结构简化模型。本文采用了分区域薄层单元代替实体螺栓建模,模拟螺栓连接刚度,达到实体螺栓简化建模。薄层单元法的优点在于模型简单,便于计算,同时又可以准确模拟螺栓连接刚度在参数影响下的变化。

1.1 分区域薄层单元理论

分区域薄层单元模型如图 1 所示。深色圆形部分代表着螺栓预紧力主要影响的区域,其余浅色部分代表预紧力影响较弱的区域。薄层单元连接结构的轴向刚度可以看成是上连接件、薄层单元和下连接件的串联结构,表达式为

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_{21}+k_{22}} + \frac{1}{k_3}$$
$$\Rightarrow k_s = \frac{k_1(k_{21}+k_{22})k_3}{k_1(k_{21}+k_{22}) + (k_{21}+k_{22})k_3 + k_1k_3} \quad (1)$$

第一作者简介:高原(1996—),男,吉林四平人,硕士研究生,研究方向为结构强度与振动。

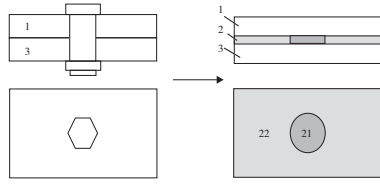


图1 分区域薄层简化模型

上连接件、薄层单元和下连接件的轴向刚度由 k_1 、 $k_{21}+k_{22}$ 和 k_3 表示;图中深色薄层和浅色薄层的轴向刚度分别由 k_{21} 和 k_{22} 表示。

薄层单元部分总的轴向刚度为

$$k_{21}+k_{22}=\frac{E_{21}A_{21}+E_{22}A_{22}}{L_2} \quad (2)$$

式中: E_{21} 、 E_{22} 分别为薄层单元深色部分和浅色部分弹性模量; A_{21} 、 A_{22} 分别是两部分的面积; L_2 为薄层的厚度。

联立根据以上公式可得

$$E_{21}=\frac{[k_s(k_1k_{22}+k_{22}k_3+k_1k_3)-k_1k_{22}k_3]L_2}{(k_1k_3-k_s k_1-k_s k_3)A_{21}} \quad (3)$$

式中 k_{22} 由分形理论求解可得。

1.2 薄层单元弹性模量的求解

由于篇幅有限,这里省略分形理论的推导过程,通过分形理论获得的结合面法向载荷为

$$P=\begin{cases} \frac{2^{3-0.5D}D}{3\sqrt{\pi}(3-D)}EG_0^{(D-1)}\psi^{1-0.5D}a_L^{0.5D}(a_L^{1.5-D}-a_c^{1.5-D})+ & D \neq 1.5 \\ \frac{D}{2-D}\kappa\sigma_s\psi^{1-0.5D}a_L^{0.5D}a_c^{1-0.5D} & \\ \frac{2^{1.25}}{\sqrt{\pi}}EG_0^{0.5}\psi^{0.25}a_L^{0.75}\ln\frac{a_L}{a_c}+3\kappa\sigma_s\psi^{0.25}a_L^{0.75}a_c^{0.25} & D = 1.5 \end{cases} \quad (4)$$

式中: D 为分形维数; E 为物体弹性模量; a_L 为最大微凸体的接触面积; G_0 为物体接触表面的分型粗糙度参数; $\psi=a_b/a_L$, a_b 为非零扩展域的上限; σ_s 为屈服强度; κ 为待定常数; a_c 为弹塑性变形临界面积。

结合面的法向接触刚度

$$K_0=\frac{2ED}{\sqrt{\pi}(1-D)}\psi^{1-0.5D}a_L^{0.5D}(a_L^{1-0.5D}-a_c^{1-0.5D}) \quad (5)$$

给定 a_L 值,就可以确定 P 与 K_0 值。根据刚度与弹性模量关系式求解出法兰区域薄层弹性模量以及螺栓区域弹性模量。

$$E_{22}=\frac{K_0 \times L_2}{A_{22}} \quad (6)$$

$$E_{21}=\frac{(k_2-K_0) \times L_2}{A_{21}} \quad (7)$$

式中: L_2 为薄层厚度; A_{22} 为法兰区域面积; A_{21} 为螺栓区域面积。两者求解公式如下:

$$A_{21}=\frac{n\pi d_1^2}{4} \quad (8)$$

$$A_2=\pi(r_w^2-r_n^2) \quad (9)$$

$$A_{22}=A_2-A_{21} \quad (10)$$

式中: r_w 为薄层外径; r_n 为薄层内径; A_2 为薄层总面积; d_1

为螺母公称直径。

2 机匣装配结构不确定性动力学计算

以某型航空发动机风扇-压气机装配机匣为例,采用薄层单元法对螺栓连接结构进行简化建模,结合生产装配单位提供相关工程实践数据,选取拧紧力矩为不确定性参数,计算获得机匣螺栓连接刚度、等效薄层单元弹性模量,最终得到机匣装配结构动力学特性分布,并与未简化机匣原始模型对比,验证薄层简化建模方法在计算不确定性参数对机匣动力学特性影响的准确性(本文研究的机匣全部螺栓拧紧力矩的变化是同步的,即没有考虑不同拧紧力矩的装配顺序和布局)。

2.1 螺栓连接机匣薄层参数计算

已知机匣螺栓连接拧紧力矩确定值为 8 Nm,由于装配加工等原因,实际上拧紧力矩值在确定值附近波动,其不确定性服从正态分布,根据该发动机设计研究所和装配单位提供大量实际工程数据,具体参数如表 1 所示。

表1 拧紧力矩正态分布参数

参数	均值	方差
拧紧力矩/Nm	8	0.04

首先以确定参数为例,开展螺栓连接机匣薄层单元参数计算。 k_s 为螺栓连接结构连接刚度,其计算公式为

$$k_s=n(k_b+k_m) \quad (11)$$

式中: k_b 为螺杆轴向刚度; k_m 为螺栓预紧力作用轴向刚度; n 为螺栓数量。由于篇幅原因, k_b 与 k_m 的具体推导过程省略。

$$k_b=A_bE_b/L_{eq}=\pi d_b^2E_b/(4L_{eq}) \quad (12)$$

$$L_{eq}=L+\left(1.95-\frac{\beta}{2}-\nu\right)d_b \quad (13)$$

式中: A_b 为螺杆截面积; d_b 为螺杆直径; E_b 为螺杆弹性模量; L_{eq} 为螺杆当量长度; L 为螺孔长度; β 为无量纲系数; ν 为螺杆泊松比。

$$\frac{1}{k_m}=\frac{1}{k_{01}}+\frac{1}{k_{02}}\Rightarrow k_m=\frac{k_{01}k_{02}}{k_{01}+k_{02}} \quad (14)$$

式中 k_{01} 、 k_{02} 分别是上、下被连接件的刚度。

$$k_{0i}=\frac{\pi E_{0i}d \cdot \tan\alpha}{\ln\left[\frac{(D+d)(D-d+2t \cdot \tan\alpha)}{(D-d)(D+d+2t \cdot \tan\alpha)}\right]} \quad (15)$$

式中: E_{0i} 是被连接件的弹性模量; t 为被连接件厚度; α 为半锥形角。

一般对于螺杆直径为 d 的螺栓,拧紧力矩 M 和预紧力 F 的经验公式为

$$M=0.2Fd \quad (16)$$

将拧紧力矩与螺纹公称直径代入式(16),求得预紧力为 10^4 N。结合螺栓连接机匣的结构尺寸参数,代入式(11)求得连接刚度 k_s 为 5.51×10^9 N/m。由式(1)求得薄层总刚度 k_2 为 4.67×10^9 N/m,根据分形理论求得 K_0 为 7.77×10^8 N/m,代入式(6)和式(7)求得螺栓区域弹性模量 E_{21} 为

1.551×10^{10} Pa, 法兰区域弹性模量 E_{22} 为 9.85×10^7 Pa。

进一步开展不确定性参数下的薄层单元参数计算。采用蒙特卡洛法对拧紧力矩进行 1 000 次抽样, 利用

Matlab 将每组拧紧力矩值代入上述计算过程求得连接刚度、薄层法兰区域弹性模量和螺栓区域弹性模量分布如图 2 所示。

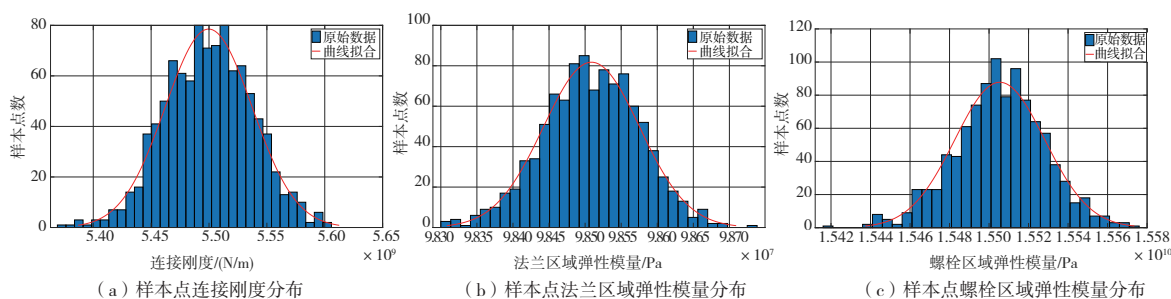


图 2 拧紧力矩样本点分布曲线

从图 2 中得知拧紧力矩在假定正态分布区间时, 其对应的螺栓连接刚度、法兰区域弹性模量、螺栓区域弹性模量近似服从正态分布, 其中连接刚度分布区间为 $[5.4 \quad 5.6] \times 10^9$ N/m, 法兰区域弹性模量分布区间为 $[9.83 \quad 9.87] \times 10^7$ Pa, 螺栓区域弹性模量分布区间为 $[1.542 \quad 1.558] \times 10^{10}$ Pa。

2.2 拧紧力矩不确定性机匣动力学计算

对风扇-压气机装配机匣在拧紧力矩不确定性下进

行动力学计算, 采用薄层单元法进行机匣连接件简化建模, 根据工程实践经验, 薄层厚度为 1 mm, 为保证不增加原结构轴向长度, 在风扇机匣和压气机机匣法兰边各取 0.5 mm 组成薄层单元。薄层内外径与原连接结构法兰内外径相同, 分别为 101.61 mm 和 113.65 mm。单个螺栓区域直径与螺母公称直径相同为 4 mm。共有 20 个区域(与螺栓数量一致)。薄层的密度和泊松比与原始结构保持一致, 薄层和机匣均采用 SOLID187 四面体单元网格划分, 建立的机匣分区域薄层单元简化有限元模型如图 3 所示。

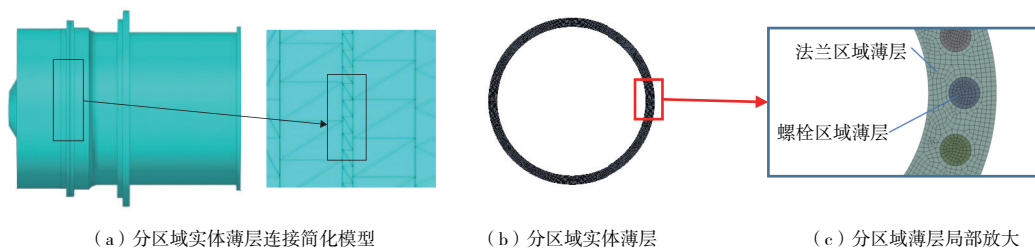


图 3 机匣薄层连接模型

计算拧紧力矩 1 000 个样本点下, 即将 2.1 节各组螺栓区域弹性模量与法兰区域弹性模量代入装配机匣简化模型进行动力学计算, 获得风扇压气机简化连接机匣前两阶模态频率分布; 将 2.1 节抽取的 1 000 组拧紧力矩值代入未简化的原始机匣装配结构, 计算前两阶模态频率分

布; 同时开展螺栓连接机匣动力学测试试验, 由于不具备大量试验件开展不确定性试验, 所以采用反复拆装进行模拟, 共进行 50 次试验(图 4), 其中一组频响函数如图 5 所示, 整理三者计算结果对比如图 6 所示(本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

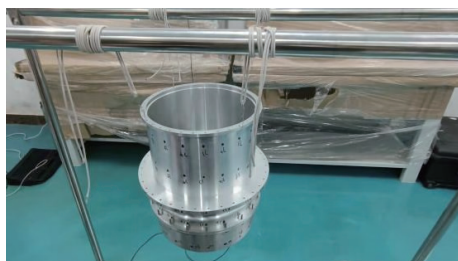


图 4 螺栓连接机匣动力学试验

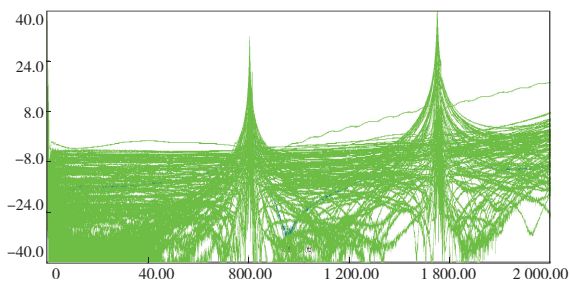


图 5 机匣测试频响函数

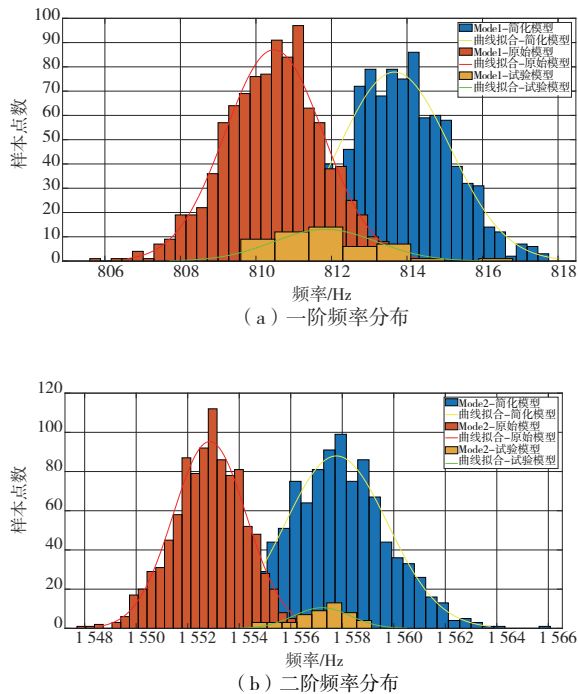


图6 原始机匣、简化机匣及试验机匣前两阶频率分布

从图4—图6可以看出,简化装配机匣在受到拧紧力矩不确定性波动影响下,一阶频率波动范围约为810~818 Hz,二阶频率波动范围约为1 552~1 565 Hz,且都近似服从正态分布;原始装配机匣在受到拧紧力矩不确定性波动影响下,一阶频率波动范围约为806~814 Hz,二阶频率波动范围约为1 550~1 557 Hz,且都近似服从正态分布;试验机匣一阶频率波动范围约为810~814 Hz,二阶频率波动范围约为1 554~1 559 Hz,且都近似服从正态分布。通过对比说明薄层简化螺栓建模在计算不确定性参数对机匣装配结构动力学特性方面具有很高的准确性;螺栓拧紧力矩不确定性波动下会对机匣装配结构动力学产生影响,这为工程实践中开展机匣动力学设计优化工作提供参考。

3 结语

航空发动机机匣在采用螺栓连接装配时参数受到加工、装配等影响会存在不确定性,这些不确定参数会对机匣装配结构的动力学特性产生一定影响。由于篇幅有限,本文选取拧紧力矩为不确定性参数进行研究,采用薄层单

元简化螺栓连接,针对某风扇-压气机连接机匣做了相关动力学分析,并与原始机匣连接结构及试验测试结果对比分析,得到以下结论:

- 1) 试验机匣、原始装配机匣和简化机匣在拧紧力矩不确定性参数影响下动力学频率值范围基本一致,且都近似服从正态分布,说明薄层简化螺栓建模在计算不确定性参数对机匣装配结构动力学特性方面具有很高的准确性;
- 2) 采用薄层单元简化建模时,当假定拧紧力矩值符合正态分布时,其对应的螺栓连接刚度、法兰区域弹性模量、螺栓区域弹性模量近似服从正态分布;
- 3) 从装配机匣前两阶频率波动范围可以看出,螺栓拧紧力矩不确定性对机匣装配结构动力学会产生影响。

本文通过建立螺栓连接不确定性对机匣动力学特性影响分析流程,为工程实践中开展结构动力学优化设计提供了计算方法和参考此方法可用于判断是否需要在设计装配中采取提高加工精度及二次拧紧螺栓等方法来降低其不确定性分布,以满足工程实践的标准要求。

参考文献:

- [1] AHMADIAN H, JALALI H. Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 1041-1050.
- [2] SHIRYAYEV O V, PAGE S M, PETTIT C L, et al. Parameter estimation and investigation of a bolted joint model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 307(3/4/5): 680-697.
- [3] WANG S, KOMVOPOULOS K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime: part I—elastic contact and heat transfer analysis [J]. Journal of Tribology, 1994, 116(4): 812-822.
- [4] WANG S, KOMVOPOULOS K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime: part II—multiple domains, elastoplastic contacts and applications [J]. Journal of Tribology, 1994, 116(4): 824-832.
- [5] 陈奇. 基于分形理论的汽车变速箱齿轮接触强度研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2010.
- [6] 温淑花, 张学良, 武美先, 等. 结合面法向接触刚度分形模型建立与仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 197-202.
- [7] 赵帅. 螺栓联接对航空发动机机匣振动特性影响的研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2012.
- [8] 赵丹, 艾延廷, 翟学, 等. 法向接触刚度对螺栓连接结构振动模态的影响研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 54-57.
- [9] 殷越. 螺栓联接的发动机机匣结构的刚度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.

收稿日期: 2021-10-27