

机匣螺栓连接分区域薄层单元建模方法

王 攀, 臧朝平

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要:机匣连接的螺栓预紧力大小对其动力学特性影响较大。为更准确反映其接触刚度随预紧力的变化情况,采用分区域薄层单元方法代替螺栓连接部分,并基于螺栓连接超模型刚度理论、赫兹接触理论以及 M-B 分形模型,推导出不同螺栓预紧力下分区域薄层单元的弹性模量,模拟机匣连接部分的轴向接触刚度,给出螺栓连接机匣简化建模方法。并以 1 个螺栓连接试验机匣为例,对比在不同螺栓预紧力下机匣仿真频率与模态试验频率,最大误差仅为 2.83%。结果表明:分区域薄层单元建模方法能够有效地对不同预紧力下的螺栓连接机匣进行简化建模。

关键词: 机匣;螺栓预紧力;分区域薄层单元;赫兹接触理论;M-B 分形模型

中图分类号: V232.5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.02.002

Modeling Method of Subarea Thin-layer Element for Casing Bolted Joints

WANG Pan, ZANG Chao-ping

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

Abstract: The pre-tightening force of the casing bolted joints had a great influence on the dynamic characteristics of the bolt. In order to reflect more accurately the change of contact stiffness with pre-tightening force, a thin-layer element method was used to replace the bolted joints structure. Based on the stiffness theory of bolted joints supermodel, Hertz contact theory and M-B fractal model, the elastic modulus of thin-layer element with different bolted pre-tightening force was derived. The axial contact stiffness of the casing joints part was simulated, and the simplified modeling method of the bolted joints casing was given. Taking a bolted joints test casing as an example, the maximum error was only 2.83%, compared with the simulation frequency and modal test frequency of the casing under different bolted pre-tightening force. The results show that the modeling method of the thin-layer element can effectively simplify the modeling of bolted joints casing under different pre-tightening forces.

Key words: casing; bolt pre-tightening force; subarea thin-layer element; Hertz contact theory; M-B fractal model

0 引言

螺栓连接结构凭借构造简单、实用性强等优点,被广泛应用于航空发动机机匣和转子结构的连接。在工程应用中,螺栓连接件在承受工作载荷之前,需要对螺栓施加一定的预紧力,使螺栓和被连接件之间产生相互作用力,从而产生不同的接触面连接刚度,进而影响结构的动力学响应。因此,螺栓连接结构建模方法的研究成为结构动力学研究领域的热点问题^[1]。螺栓连接的有限元模拟方法主要分为 2 类:非线性接触算法和界面单元法。前者需要迭代计算结构响应,

计算量较大。随着有限元法的发展, Liu 等^[2-3]建立了螺栓连接部件的精细有限元模型,但由于其自由度数目庞大,不适用于复杂的连接结构; Ahmadian 等^[4-6]运用薄层单元法将连接结构接触面等效为厚度很薄的实体单元,进行动力学建模,并运用优化算法修正薄层单元材料参数;马双超等^[7]将薄层单元法运用到航空发动机领域;姚星宇等^[8-9]给出薄层单元法在航空发动机机匣螺栓连接结构的建模原理,并研究了薄层单元材料参数对螺栓连接刚度的影响规律,但文献中并未考虑由于施加不同的预载荷使螺栓法兰连接结构实际接触面积变化,以及接触微凸体变形带来的刚度

收稿日期: 2018-03-30

作者简介: 王攀(1992),男,在读硕士研究生,研究方向为动力学不确定性、模型不确定参数识别以及模型修正; E-mail: 15605193693@163.com。

引用格式: 王攀, 臧朝平. 机匣螺栓连接分区域薄层单元建模方法[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 7-12. WANG Pan, ZANG Chaoping. Modeling Method of subarea thin-layer element for casing bolted joints[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 7-12.

改变影响整个装配体的动力学响应。

本文基于螺栓连接结构的超模型连接刚度计算公式^[10-12],运用赫兹接触理论以及 M-B 分形模型^[13-16],推导了不同预紧力螺栓连接简化模型连接参数的计算公式,并以 1 个螺栓连接试验机匣为例,对该简化模型的仿真频率与模态试验测试频率进行对比。

1 分区域薄层单元建模方法

1.1 分区域薄层单元

采用分区域薄层单元对螺栓连接部分进行简化建模,如图 1 所示。图中绿色部分代表预紧力影响较弱的法兰区域;红色部分代表预紧力主要影响的螺栓区域。

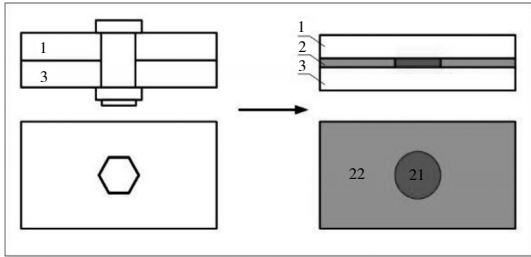


图 1 分区域薄层单元简化模型

把上安装法兰 1、薄层单元 2 和下安装法兰 3 视为串联的弹簧结构,可得薄层单元连接结构的轴向总刚度

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

式中: k_1 、 $k_{21}+k_{22}$ 和 k_3 分别为上安装法兰、薄层单元和下安装法兰的轴向刚度; k_{21} 和 k_{22} 分别为图 1 中红色部分薄层和绿色部分薄层的轴向刚度。

分区域薄层单元部分的轴向总刚度为

$$k_2 = k_{21} + k_{22} = \frac{E_{21}A_{21} + E_{22}A_{22}}{L_2} \quad (2)$$

式中: E_{21} 和 E_{22} 分别为图中红色区域和绿色区域的弹性模量; A_{21} 和 A_{22} 分别为图中红色部分和绿色部分的面积; L_2 为薄层的厚度。

1.2 薄层单元轴向总刚度

对螺栓连接结构件进行静力学分析,连接区域的应力分布集中在螺栓杆、螺母与被连接件接触的区域,如图 2 所示。其中螺栓连接结构的轴向连接刚度主要由螺栓连接的区域与预紧力作用的区域决定^[8-9]。

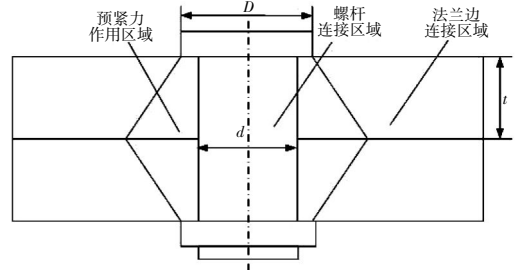


图 2 螺栓连接结构区域

螺栓连接区域的轴向刚度为

$$k_b = A_b E_b / L_{eq} = \pi d_b^2 E_b / (4 L_{eq}) \quad (3)$$

式中: A_b 为螺栓杆的截面面积; d_b 为螺栓杆的直径; E_b 为螺栓弹性模量; L_{eq} 为螺栓杆的当量长度。

对于螺栓预紧力作用区域,将被连接件的预紧力分布区域等效为切去顶端的锥形区域。可得该区域的连接刚度为

$$k_0 = \frac{\pi E_0 d \tan \alpha}{\ln \left[\frac{(D+d)(D-d+2t \tan \alpha)}{(D-d)(D+d+2t \tan \alpha)} \right]} \quad (4)$$

式中: E_0 为被连接件的弹性模量; t 为法兰边厚度; α 为半锥形角,与螺栓预紧力 F 大小有关。

由于整个螺栓预紧力作用区域中,上下 2 个被连接件为串联关系,则可知该区域的轴向连接刚度为

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{01}} + \frac{1}{k_{02}} \Rightarrow k_m = \frac{k_{01}k_{02}}{k_{01}+k_{02}} \quad (5)$$

由此可得整个螺栓连接区域的连接总刚度 k_s

$$k_s = n(k_b + k_m) \quad (6)$$

1.3 法兰区域刚度

1.3.1 赫兹接触理论

法兰接触面实质上由 2 个粗糙表面组成,粗糙表面的微凸体在外载荷作用下发生变形,如图 3 所示。根据赫兹公式^[13-14]可得微凸体法向载荷和弹性变形的关系

$$\bar{P} = \frac{4}{3} E \sqrt{R} w^{1.5} \quad (7)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \quad (8)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

式中: E 为 2 个接触面的等效弹性模量; R 为 2 个微凸体的等效接触半径; w 为接触点的法向变形量。微凸体接触区域的接触面积可以表示为 $a' = 2 \pi R w$ 。

轴向载荷 $\bar{P}$ 对法向位移 w 求导,求解出微小接

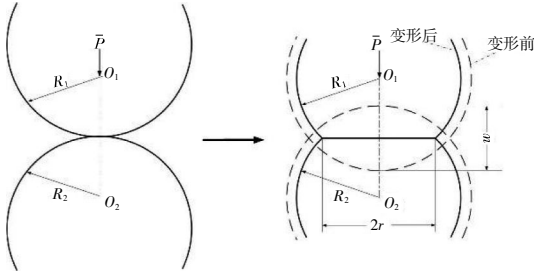


图3 法向外载荷作用下的微凸体变形

触点的刚度为

$$k_n = \frac{\partial P}{\partial w} = 2E\sqrt{Rw} = 2E\sqrt{\frac{a'}{2\pi}} \quad (10)$$

具有截面积的微凸体的变形^[13-14]为

$$w = G_0^{D-1} a'^{1-0.5D} \quad (11)$$

将式(11)带入 $a' = 2\pi R w$, 可得微接触点顶端的曲率半径

$$R = \frac{a'}{2\pi w} = \frac{1}{2\pi} G_0^{1-D} a'^{0.5D} \quad (12)$$

通过对大量试验数据进行拟合^[15], 可得金属表面机械加工后的分形维数 D 、特征尺寸系数 G 与加工表面粗糙度 R_a 之间的关系式分别为

$$D = \frac{1.54}{R_a^{0.042}} \quad (13)$$

$$G_0 = 10^{\frac{5.26}{R_a^{0.042}}} \quad (14)$$

1.3.2 M-B 分形模型

粗糙表面中微凸体的近似分布形式如图4所示。根据 M-B 分形模型^[13-14], 微凸体截面积为 a' 的接触点大小分布函数 $n(a')$ 为

$$n(a') = 0.5D\psi^{1-0.5D} a_L^{0.5D} a'^{-1-0.5D} \quad (15)$$

式中: ψ 为加权系数

$$\psi^{1-0.5D} - (1+\psi^{-0.5D})^{\frac{D-2}{D}} = \frac{2-D}{D} \quad (16)$$

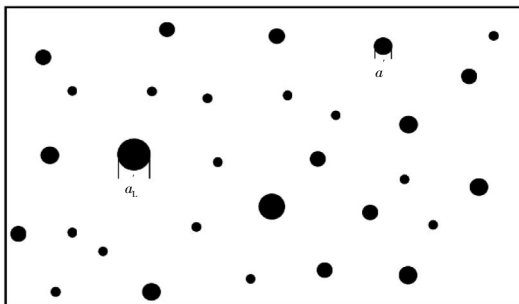


图4 接触表面微凸体分布

在接触面处, 区分弹塑性变形临界面积 a_c' 为

$$a_c' = \frac{G_0^2}{(0.5\kappa\Phi)^{2/(D-1)}} \quad (17)$$

式中: $\kappa = H/\sigma_s$; $\Phi = \sigma_s/E$; H 为较软材料的硬度; σ_s 为较软材料的屈服强度。

当 $a' < a_c'$ 时, 接触点为塑性形变; 当 $a' > a_c'$ 时, 接触点为弹塑性形变。

微凸体的法向塑性形变载荷与接触面积关系为

$$p = 0.5\kappa\delta_s a' \quad (18)$$

综上所述, 赫兹公式描述的单个微凸体的接触刚度、M-B 分形接触模型以及结合面的法向接触刚度, 可由单个接触点的刚度式(10)根据尺寸分布 $n(a')$ 积分得到

$$K = \frac{2ED}{\sqrt{2\pi}(1-D)} \psi^{1-0.5D} a_L^{0.5D} [a_L^{0.5-0.5D} - a_c^{0.5-0.5D}] \quad (19)$$

将式(11)(12)、带入式(7), 加上塑性形变载荷(18), 根据尺寸分布积分, 得到结合面的法向弹塑性总载荷

$$P = \frac{4D}{3\sqrt{2\pi}(3-D)} E G_0^{(D-1)} \psi^{1-0.5D} a_L^{0.5D} (a_L^{1.5-D} - a_c^{1.5-D}) + \frac{D}{2(2-D)} \kappa \sigma_s \psi^{1-0.5D} a_L^{0.5D} a_c^{1-0.5D} (D \neq 1.5) \quad (20)$$

$$P = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} E G_0^{0.5} \psi^{0.25} a_L^{0.75} \ln \frac{a_L}{a_c} + \frac{3}{2} \kappa \sigma_s \psi^{0.25} a_L^{0.75} a_c^{0.25} \quad (D=1.5) \quad (21)$$

接触面的总刚度 K 和总载荷 P 均是最大接触面积 a_L 的函数, 因此由式(19)和(20)或式(21)建立法向接触刚度 K 和法向载荷 P 之间的隐函数关系。给定 P , 可以确定最大微凸体的接触面积 a_L , 便可计算得到 K 。

1.4 分区域薄层单元弹性模量

根据工程经验, 对于螺杆直径为 d 的螺栓, 拧紧力矩 M 和预紧力 F 之间相互换算的经验公式为

$$M \approx 0.2Fd \quad (22)$$

法兰的法向总载荷 P 即为所有螺栓的总预紧力, 从而确定法兰法向接触刚度 K 作为分区域薄层单元中的法兰区域刚度。再由螺栓连接部分的总刚度 k_s 确定出螺栓区域刚度。之后, 结合式(23)和式(24)可以求解出分区域薄层单元的弹性模量

$$E_{22} = \frac{K \cdot L_2}{A_{22}} \quad (23)$$

$$E_{21} = \frac{(k_s - K) \cdot L_2}{A_{21}} \quad (24)$$

2 螺栓连接机匣试验

2.1 机匣静力学分析

对于如图 5(a)所示的螺栓连接机匣,由 36 个 M6 螺栓连接。根据超模型的建模方法,采用实体螺栓结构建立机匣连接件的超模型。为了后续的静力学分析,确定半锥形角。设定超模型网格尺寸为 3 mm,采用 2 阶 4 面体单元划分网格,如图 5(b)所示。该连接模型共有 148 万个节点,444 万个自由度。

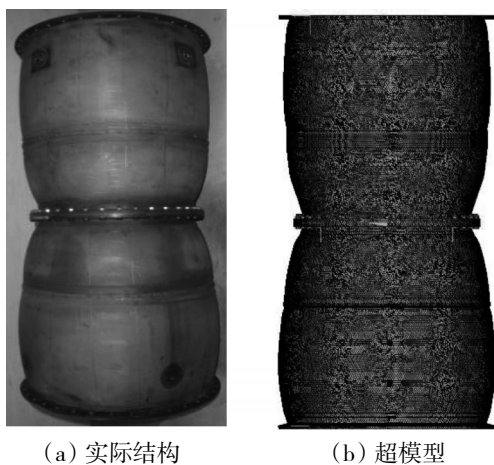


图 5 连接机匣

在连接螺栓上分别施加 3、5、7、9、11 N·m 的预紧力,确定半锥形角,根据式(6)计算总刚度 k_s ,见表 1。

表 1 不同预紧力下机匣连接件轴向总刚度

预紧力矩 /N·m	预紧力 /N	半锥形角 /rad	轴向总刚度 /N/m
3	2500	0.083	4.67E+10
5	4167	0.113	4.83E+10
7	5833	0.134	4.95E+10
9	7500	0.158	5.08E+10
11	9167	0.161	5.09E+10

不同拧紧力矩下机匣连接件总刚度的变化如图 6 所示。从图中可见,轴向连接刚度曲线的斜率随着拧紧力矩的增大逐渐减小,说明随着拧紧力矩的增大,机匣螺栓法兰连接部分逐渐趋于刚性。

2.2 螺栓连接机匣简化

根据分区域薄层单元建模方法,去除机匣连接件法兰边上的螺栓孔,把螺栓等效为如图 7 所示的分区域薄层单元。

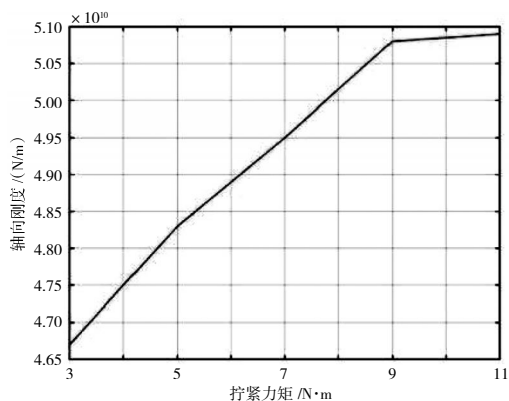


图 6 轴向刚度随拧紧力矩的变化

最终建立的机匣连接件简化模型如图 8 所示。采用 2 阶 4 面体单元,设定网格尺寸为 10 mm。该简化模型共有 14 万个节点,42 万个自由度,与超模型相比,连接机匣模型规模降低到原来的 1/10。

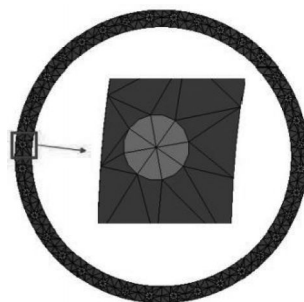


图 7 薄层单元建模

根据式(23)和式(24)确定不同预紧力下的分区域薄层单元的弹性模量,见表 2。

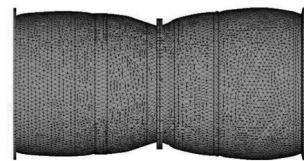


图 8 螺栓连接机匣简化模型

表 2 薄层单元的弹性模量

扭矩 /N·m	E_{21} /GPa	E_{22} /GPa
3	1.540E+10	4.471 E+07
5	1.597 E+10	7.763 E+07
7	1.633 E+10	1.112 E+08
9	1.677 E+10	1.452 E+08
11	1.670 E+10	1.794 E+08

2.3 螺栓机匣试验测试

在连接螺栓上施加 3~11 N·m 的拧紧力矩时,测试连接机匣的模态频率如图 9 所示。采用力锤激励,加速度传感器测量;采集激励信号和响应信号,通过频响分析软件对测得的频响函数进行分析,并提取连接机匣前 8 阶频率。



图 9 连接试验机匣模态试验

2.4 结果对比

在螺栓拧紧力矩分别为 3、7、11 N·m 时,分区域

薄层单元模型仿真频率与机匣试验频率见表 3。从表中可见,连接机匣试验频率随着拧紧力矩增大而加快,第 3、4 阶频率变化最为明显,说明螺栓预紧力大小对连接机匣的动力学响应有较大影响。简化模型仿真频率与机匣试验频率相比,最大误差仅为 2.83%,满足工程设计要求。由此可见,分区域的薄层单元建模方法能准确地模拟在不同预紧力下螺栓连接结构的刚度变化,建立有效的连接结构有限元模型。

表 3 在拧紧力矩为 3、7、11 N·m 时分区域薄层单元简化模型的模式频率

模态阶次	3 N·m 时的模式频率 /Hz		误差 /%	7 N·m 时的模式频率 /Hz		误差 /%	11 N·m 时的模式频率 /Hz		误差 /%
	试验	计算		试验	计算		试验	计算	
1	238.22	238.60	0.16	239.30	238.86	-0.18	239.44	238.98	-0.19
2	238.82	238.78	-0.02	239.94	239.02	-0.38	240.28	239.13	-0.48
3	280.17	278.62	-0.55	290.26	286.50	-1.30	296.65	291.40	-1.78
4	281.14	279.62	-0.54	295.49	287.12	-2.83	299.32	291.85	-2.50
5	387.77	393.23	1.41	391.59	394.03	0.62	393.83	394.56	0.19
6	388.20	393.40	1.34	393.24	394.12	0.22	394.47	394.63	0.04
7	612.12	609.36	-0.45	612.42	609.52	-0.47	613.19	609.62	-0.58
8	613.06	616.54	0.57	613.86	616.66	0.46	614.52	616.75	0.36

3 结论

本文基于螺栓连接超模型的刚度理论、赫兹接触理论以及 M-B 分形模型,考虑螺栓的数量和法兰边的接触,建立了分区域薄层单元的螺栓连接简化建模方法,推导了不同预紧力下分区域薄层单元弹性模量的计算公式。通过模态试验验证了不同螺栓预紧力简化建模方法的正确性,得到如下结论:

螺栓预紧力对机匣连接部分的法向接触刚度影响较大,随预紧力的增大,法向接触刚度增加,之后逐渐趋于平稳;连接机匣的各阶固有频率也逐步加快,之后也趋于平稳。

本文连接接触的建模,没有考虑连接接触非线性阻尼的影响,但为进一步在此方面深入探索螺栓连接动力学的问题奠定了基础。

参考文献:

[1] Shuguo L, Yanhong M, Dayi Z, et al. Studies on dynamic characteristics of the joint in the aero-engine rotor system [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 29: 120-136.

[2] Liu S G, Wang J, Hong J, et al. Dynamics design of the aero-engine rotor joint structures based on experimental and numerical study[R]. ASME 2010-GT-22199.

[3] 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.

[4] Ahmadian H, Jalali H. Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2007, 21(2): 1041-1050.

[5] Shiryayev O V, Page S M, Pettit C L, et al. Parameter estimation and investigation of a bolted joint model [J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 307(3-5): 680-697.

[6] Boeswald M, Link M, Meyer S. Experimental and analytical investigations of non-linear cylindrical casing joints using base excitation testing [C]/IMAC-XXI. Conference & Exposition on Structural Dynamics. Kissimmee: Society for Experimental Mechanics, 2003: 1-9.

[7] 马双超. 航空发动机机匣模型确认与动力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

MA Shuangchao. Structure dynamic analysis and model validation of aero-engine casings [D]. Nanjing :Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.(in Chinese)

[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. (in Chinese)

[9] 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. (in Chinese)

[10] 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.

ZHAO Shuai. Study of effects of bolt connection on aeroenging case vibrational behavior [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012. (in Chinese)

[11] 赵丹, 艾延廷, 翟学, 等. 法向接触刚度对螺栓连接结构振动模式的影响研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 54-57.

ZHAO Dan, AI Yanting, ZHAI Xue, et al. Effect of normal contact stiffness on vibration modes of bolted structure [J]. Aeroengine, 2012, 38(3): 54-57. (in Chinese)

- [12] 殷越. 螺栓联接的发动机机匣结构的刚度研究 [D]. 辽宁大连:大连理工大学, 2016.
- YIN Yue. Study of stiffness of aeroengine casing with bolted joints [D]. Liaoning Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] Wang S, Komvopoulos K A. 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- CHEN Qi. Research on gear contact strength analysis of automobile gearbox by fractal theory [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [16] 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.
- WEN Shuhua, ZHANG Xueliang, WU Meixian, et al. Fractal model and simulation of normal contact stiffness of joint interfaces and its simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 197–202. (in Chinese)

(编辑: 贺红井)