

文章编号:1006-2467(2019)06-0660-05

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.06.004

基于 Hertz 接触理论的叶片-机匣碰摩模型

赵 洋¹, 华一雄¹, 张执南¹, 柴象海²

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;

2. 中国航空发动机集团 商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 针对航空发动机的叶片-机匣碰摩现象,考虑旋转效应以及摩擦热效应,建立 Hertz 碰摩模型,分析碰摩径向形变量的影响因素.通过对比现有法向碰摩力模型的实验结果,验证所建立模型的准确性,并分析了旋转速度、机匣刚度、摩擦因数等参数对碰摩径向形变量的影响.通过叶片热固耦合仿真分析发现,摩擦热效应对部件的径向变形和应力分布具有一定的影响.

关键词: 径向形变量;法向碰摩力;旋转效应;摩擦热效应;碰摩模型

中图分类号: TH 113

文献标志码: A

A New Blade-Casing Rubbing Model Based on Hertz Contact Theory

ZHAO Yang¹, HUA Yixiong¹, ZHANG Zhinan¹, CHAI Xianghai²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of aircraft engine blade-casing rubbing, this paper established a blade-casing Hertz-rubbing model considering the rotation effect and friction thermal effect. The influence factors of rubbing radial deformation were analyzed. The accuracy of the model was verified by comparing with the experiment results of existing normal rubbing force model. Moreover, the influence of rotation speed, stiffness coefficient, friction coefficient on the rubbing radial deformation were also analyzed. The results of the thermo-solid coupling simulation analysis on blade showed that the friction thermal effect had a certain influence on the overall radial deformation.

Key words: radial deformation; normal rub-impact force; rotation effect; friction thermal effect; rubbing model

为了满足航空发动机对整体结构紧凑、气动效率高、耗油率低等结构性能方面的要求,叶尖间隙通常被设计得非常小^[1],但这种设计同时也提高了叶片和机匣之间发生碰摩的概率.由于航空发动机转速高、叶尖线速度大,一旦发生碰摩现象,可能会导致转子系统失稳,进而造成重大安全事故^[2].因此,

对于航空发动机叶片-机匣碰摩现象的研究具有重要的现实意义.

国内外学者从不同角度建立了各种碰摩模型以表征叶片-机匣碰摩现象. Padovan 等^[3]将叶片简化为等截面的悬臂梁,考虑叶片的一阶模态弯曲,推导出叶片与刚性机匣碰摩时的法向碰摩力模型,并给

收稿日期:2018-04-09

基金项目:国家重点研发计划(SQ2018YFB110268),上海市科委科研计划(17DZ1120000)资助项目

作者简介:赵 洋(1992-),男,硕士生,主要研究方向为多学科优化设计.

通信作者:张执南(1978-),男,副教授,博士生导师,电话(Tel.): 021-34208037;E-mail: zhinanz@sjtu.edu.cn.

- (1) 忽略热辐射以及热对流引起的热损失;
- (2) 碰摩的摩擦热全部转化成温度的变化;
- (3) 材料均为各向同性;
- (4) 摩擦因数不随温度发生变化.

基于上述假设建立模型. 柱坐标系下准静态热传导方程为

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = 0 \quad (6)$$

式中: K 为导热系数; T 为温度; \dot{Q} 为内热源密度, 内热源 \dot{Q} 满足

$$\dot{Q} = k_\mu F_n \omega (R_d + L) \quad (7)$$

k_μ 为摩擦因数.

1.4 叶片机匣变形

对于纯弹性碰摩模型, 叶片-机匣碰摩侵入量为两者纯弹性径向位移的总和, 满足

$$\delta = u_{br} + u_{cr} \quad (8)$$

考虑摩擦热效应时, 碰摩侵入量为弹性和热应变下径向位移的总和, 即

$$\delta = f(u_{br}, u_{br}^T, u_{cr}, u_{cr}^T) \quad (9)$$

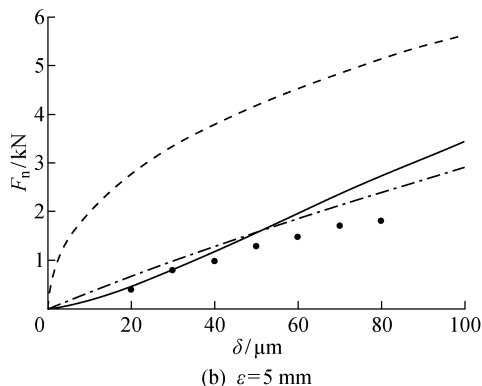
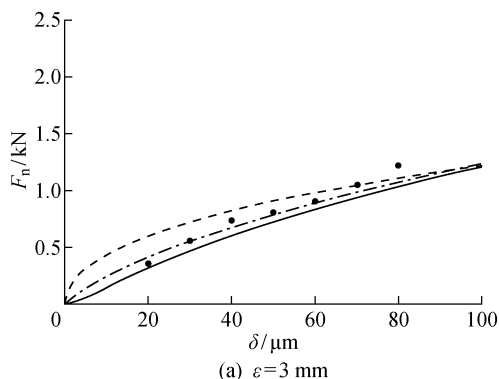
式中: u_{br}, u_{cr} 为叶片、机匣的纯弹性径向位移; u_{br}^T, u_{cr}^T 为叶片、机匣的热应变径向位移.

2 叶片-机匣 Hertz 模型

2.1 叶片-机匣碰摩模型对比

针对叶片-机匣碰摩现象, 本文只考虑纯弹性形变, 建立了一种新的 BC-Hertz 碰摩模型. 根据式 (4)、(5) 和 (8), 对侵入量与法向碰摩力、碰摩刚度、旋转角速度、叶片厚度等参数间的关系进行分析. 基于 Ma 等^[6]的实验结果, 对比验证 BC-Hertz 模型与 Jiang 模型^[5]、Ma 模型^[6]的准确性. 其中, 叶片厚度 ε 分别取 3 mm (薄叶片) 和 5 mm (厚叶片), 转速为 1 000 r/min.

图 2 所示为法向碰摩力与侵入量的关系. 对比结果表明: 对于薄叶片, Jiang 模型, Ma 模型, BC-Hertz 模型与文献^[6]的实验结果均吻合较好; 而对于厚叶片, Jiang 模型与实验结果误差较大, BC-Hertz 模型在侵入深度较小时与实验结果误差较小, 而在侵入深度较大时也具有较好的一致性. 由于 Jiang 模型考虑机匣为刚性体, 当叶片厚度较小时, 叶片刚度与机匣刚度相比而言其值较小, 机匣的变形不明显, 所以在薄叶片的情况下误差较小; 当叶片厚度增加时, 叶片刚度变大, 机匣变形不能忽略, 而 BC-Hertz 模型和 Ma 模型均考虑了机匣变形对法向碰摩力的影响, 所以在厚叶片的情况下也与实验结果吻合较好.



• 实验结果, --- Jiang 模型, -.- Ma 模型, —— 本文模型

图 2 法向碰摩力与侵入量的关系

Fig. 2 Normal rubbing force under different penetration depth

2.2 工况参数对碰摩力的影响

在发动机叶片-机匣碰摩过程中, F_n 与 k_μ 、 δ 、 k_h 及 ω 之间的变化关系如图 3 ~ 6 所示. 由图可知, F_n 随 k_μ 的增大而减小, 随 k_h 、 ω 及 δ 的增大而增大.

在不同侵入深度下, k_μ 和 k_h 与 F_n 之间的关系分别如图 3 和 4 所示. 由图 3 可见: F_n 及其曲线斜率随 k_μ 的增大而逐渐减小, 即 F_n 变化趋缓; 当 $k_\mu = 0.1 \sim 0.2$ 时, F_n 降幅明显; 当 $k_\mu > 0.2$ 时, F_n 降幅减小. 另外, 当 δ 较大时, F_n 受 k_μ 影响显著; 当 k_μ 较小时, F_n 受 δ 影响显著.

由图 4 可见: 随着 k_h 的增大, F_n 增大, 而其曲

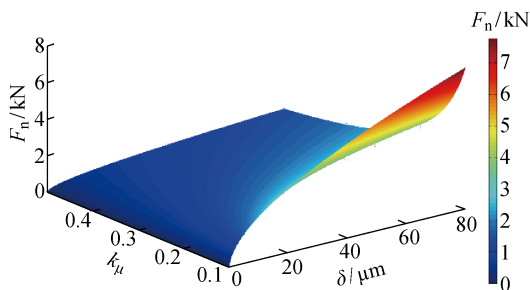


图 3 法向碰摩力与摩擦因数和侵入量的关系

Fig. 3 Normal rubbing force under parameters of penetration depth and friction coefficient

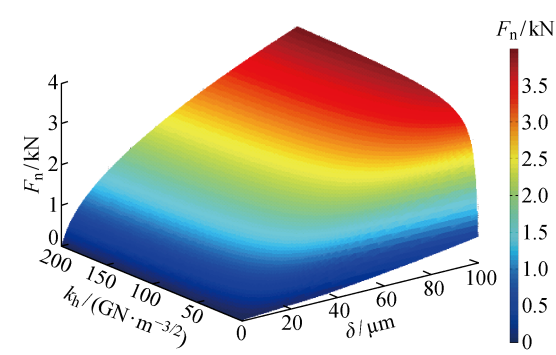


图 4 法向碰摩擦力与刚度系数和侵入量的关系

Fig. 4 Normal rubbing force under parameters of penetration depth and stiffness coefficient

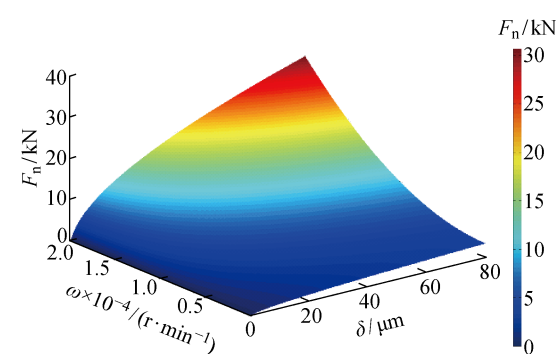


图 5 法向碰摩擦力与侵入深度和旋转速度的关系

Fig. 5 Normal rubbing force under parameters of penetration depth and rotation speed

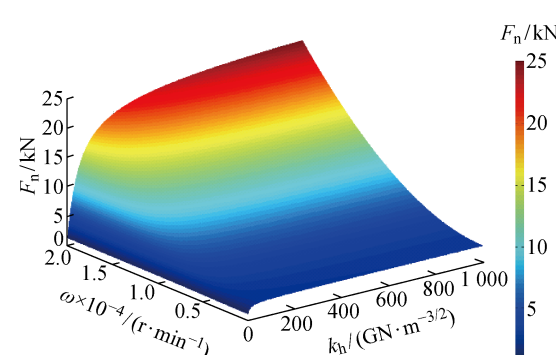


图 6 法向碰摩擦力与刚度系数和旋转速度的关系

Fig. 6 Normal rubbing force under parameters of stiffness coefficient and stiffness coefficient

线斜率逐渐减小,即 F_n 变化趋缓,并趋于定值;当 δ 较大时, F_n 受 k_h 影响显著;当 k_h 较大时, F_n 受 δ 影响显著。

在不同 ω 下, δ 和 k_h 与 F_n 之间的关系分别如图 5 和 6 所示。由图 5 可见:当 ω 增加时, F_n 增大,且随着 ω 增加, F_n 增幅变大;当 δ 较大时, F_n 受 ω 影响显著;当 ω 较大时, F_n 受 δ 影响显著。

由图 6 可见:当 k_h 较大时, F_n 受 ω 影响显著;当

ω 较小时, F_n 几乎不受 k_h 的影响;当 ω 较大时, F_n 受 k_h 影响显著。

3 摩擦热效应

假定叶片和机匣之间的热分布权重系数为 0.5,在 Abaqus 软件中建立仿真模型,对叶片进行热固耦合分析。设叶片转速 $\omega=3\,000\text{ r/min}$,法向碰摩力 $F_n=1\text{ kN}$,摩擦因数 $k_\mu=0.2$,叶片厚度 $\varepsilon=3\text{ mm}$ 。叶片的摩擦热效应材料参数如表 1 所示,其中: λ 为导热率; α 为膨胀系数; C 为比热容。

表 1 摩擦热效应材料参数表	
Tab. 1 Parameters for calculating friction thermal effect	
参数	取值
E/GPa	200
μ	0.3
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8\,200
$\lambda/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	14.3
$\alpha\times 10^6/\text{K}^{-1}$	12.9
$C/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	486

纯弹性和考虑热效应下的叶片应力分布如图 7 所示。由图 7(a)可知,纯弹性载荷下叶片的最大应力发生在叶根背部;由图 7(b)可知,考虑摩擦热时的最大应力发生在碰摩接触区域。纯弹性和考虑热效应下的叶片径向变形情况如图 8 所示。由图 8(a)可知,纯弹性变形下的最大径向变形量为 $3.13\text{ }\mu\text{m}$;由图 8(b)可知,考虑摩擦热效应下的最大径向变形量为 $3.56\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,在分析碰摩模型中径向形变量

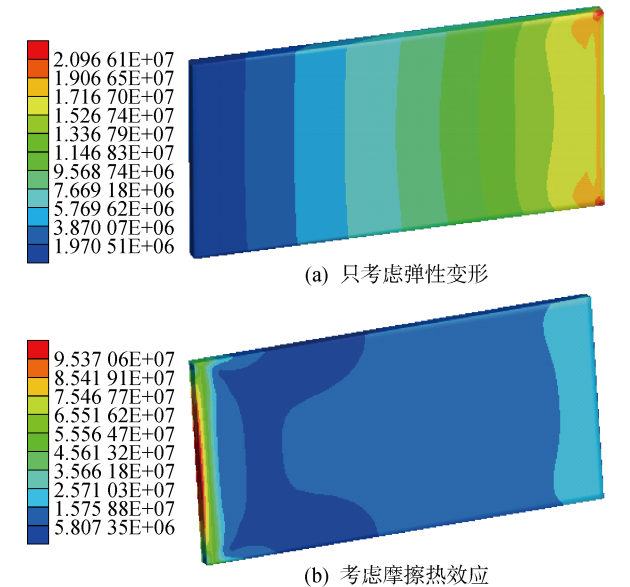


图 7 叶片应力云图(Pa)

Fig. 7 Mises of blade (Pa)

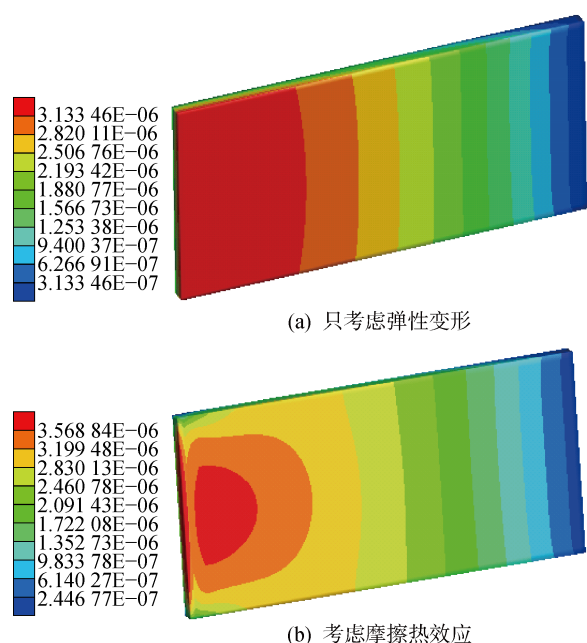


图8 叶片径向变形量(m)

Fig.8 Radial deformation of blade (m)

与碰摩力、转速等因素的关系时,摩擦热效应的影响不可忽略,并且需考虑摩擦热效应对叶片材料结构的影响。

4 结论

基于 Hertz 接触理论推导了叶片-机匣碰摩模型,相比于现有模型,该模型考虑了叶片弯曲变形、旋转特性对碰摩力的影响以及在发生碰摩时法向碰摩力与变形量的非线性关系;通过对比其他学者的模型及其相关实验结果,验证了 BC-Hertz 碰摩模型的准确性。基于 BC-Hertz 模型可获得法向碰摩力与不同参数的三维曲面图,并可分析不同参数对法向碰摩力的影响;建立叶片热固耦合仿真模型,对比了纯弹性碰摩模型和热碰摩模型的差异。主要结论如下:

(1) 当摩擦因数增加时,法向碰摩力逐渐减小,且曲线斜率逐渐减小;当摩擦因数在 0.1~0.2 之间时,法向碰摩力降幅明显;当摩擦因数大于 0.2 时,法向碰摩力降幅减小。

(2) 当刚度系数变大时,法向碰摩力增大,且曲线斜率逐渐减小,法向碰摩力的增幅逐渐减小;当刚度系数达到一定程度后,法向碰摩力趋于固定值。

(3) 摩擦热效应将在接触区域附近产生较大的热应力,增大部件的径向位移,在实际工程中应考虑

叶片-机匣碰摩产生的摩擦热对叶尖间隙以及叶片材料结构的影响。

参考文献:

- [1] 胡延青,申秀丽. 航空发动机叶尖径向间隙研究进展综述[J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 60-67.
HU Yanqing, SHEN Xiuli. Overview on aeroengine radial tip clearance [J]. *Aeroengine*, 2014, 40(1): 60-67.
- [2] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIME S B, *et al.* Sealing in turbomachinery [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(2): 313-349.
- [3] PADOVAN J, CHOY F K. Nonlinear dynamics of rotor/blade/casing rub interactions [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1987, 109(4): 527-534.
- [4] 刘杨,太兴宇,陈亚哲,等. 非线性油膜力作用下的碰摩转子系统动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2013, 3: 35-37.
LIU Yang, TAI Xingyu, CHEN Yazhe, *et al.* Dynamic analysis of rubbing rotor system supported on non-linear oil film bearings[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013, 3: 35-37.
- [5] JIANG J, AHRENS J, ULBRICH H, *et al.* A contact model of a rotating rubbing blade[C]// *Proceedings of the Fifth International Conference on Rotor Dynamics*. Darmstadt, Germany: [s. n.], 1998: 478-489.
- [6] MA H, TAI X Y, HAN Q K, *et al.* A revised model for rubbing between rotating blade and elastic casing[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 337: 301-320.
- [7] 赖少将,李舜酩,闻静. 航空发动机叶片-机匣碰摩摩擦热效应仿真分析[J]. 航空发动机, 2017, 43(1): 21-26.
LAI Shaojiang, LI Shunming, WEN Jing. Simulation analysis of friction thermal effect of aeroengine blade to case rub-impact [J]. *Aeroengine*, 2017, 43(1): 21-26.
- [8] 江俊,陈艳华. 转子与定子碰摩的非线性动力学研究[J]. 力学进展, 2013, 43(1): 132-148.
JIANG Jun, CHEN Yanhua. Advances in the research on nonlinear phenomena in rotor/stator rubbing systems[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(1): 132-148.

(本文编辑:石易文)