

燃气轮机拉杆转子跨尺度接触界面建模与模态分析

文思果¹, 李德昊¹, 余沛垌², 魏佳明², 李浦¹, 袁奇¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 杭州汽轮动力集团有限公司先进动力研究院, 310016, 杭州)

摘要: 针对燃气轮机拉杆转子接触界面刚度弱化和弧形端面齿磨轮加工与平面加工的统计差异性,提出了一种拉杆转子跨尺度接触界面建模方法,并分析了宏观几何参数和微观界面参数对界面效应的影响。首先,引入 t Location-Scale 分布表征弧形端面齿面微凸体高度分布,并基于实际弧形端面齿盘、齿面测量数据,印证了 t Location-Scale 分布的合理性和优越性;然后,建立了考虑材料完整变形过程的弧形端面齿跨尺度接触刚度模型,通过端面齿接触等效材料法,开展了某实际燃气轮机转子建模和模态分析;最后,开展了国内某周向拉杆重型燃气轮机转子模态敲击实验,对比传统统计学模型和未考虑接触效应仿真模型与实验结果,所提方法的仿真结果与真实结果吻合较好,前四阶模态的相对误差分别为 2.61%、0.63%、0.03% 和 4.78%,误差相较于未修正前,分别提升了 1.25%、2.92%、1.72% 和 1.55%。结果表明,所提方法对于弧形端面齿接触界面建模优于其他模型,为弧形端面齿周向拉杆转子提供了一种高效、准确的跨尺度建模方法。

关键词: 弧形端面齿; t Location-Scale 分布; 接触刚度; 拉杆转子; 模态实验

中图分类号: TK14 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202506014 **文章编号:** 0253-987X(2025)06-0133-11

Cross-Scale Contact Interface Modeling and Modal Test Validation of Gas Turbine Tie-Bolt Rotors

WEN Siguo¹, LI Dehao¹, YU Peijiong², WEI Jiaming², LI Pu¹, YUAN Qi¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The Advanced Power Research Institute, Hangzhou Steam Turbine Power Group, Hangzhou 310016, China)

Abstract: Aiming at the weakening of the contact interface stiffness of gas turbine tie rod rotor and the statistical difference between the curvic couplings grinding wheel and plane machining, a cross-scale contact interface modeling method of tie rod rotor is proposed, and the influence of macro-geometric parameters and micro-interface parameters on interface effects is analyzed. First, the t Location-Scale distribution was introduced to characterize the height distribution of the micro convex of the tooth surface of the curvic couplings, and the rationality and superiority of the t Location-Scale distribution was confirmed based on the actual measurement data of the tooth surface of the curvic couplings face. Then, the cross-scale contact stiffness model of curved end teeth considering the complete deformation process of the material was established. The rotor

收稿日期: 2024-12-09。 作者简介: 文思果(2002—),男,博士生;李浦(通信作者),男,副研究员,博士生导师。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(12372058)。

网络出版时间: 2025-02-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250221.1044.002>

modeling and modal analysis of a real gas turbine were carried out by means of the equivalent material contact method with end teeth. Finally, a domestic rotor modal percussion experiment of a circular tie bar heavy-duty gas turbine was carried out. Compared with the traditional statistical model and the simulation model without considering the contact effect, the simulation results of the proposed method were in good agreement with the real results, and the relative errors of the first four modes were 2.61%, 0.63%, 0.03% and 4.78%, respectively. The error was increased by 1.25%, 2.92%, 1.72% and 1.55%, respectively. The results showed that the proposed method was superior to other models in modeling the contact interface of curvic couplings. Therefore, it has been proven as an efficient and accurate cross-scale modeling method for the circumferential tie rod rotors of curvic couplings.

Keywords: curvic couplings; t Location-Scale distribution; contact stiffness; tie-rod rotors; modal experiment

重型燃气轮机是一种高效、高功率的热力机械装置,在发电、船舶推进以及工业领域发挥着核心驱动作用^[1]。拉杆组合式转子具有刚度大、重量轻和便于布置冷却通道等优点,被广泛应用于燃气轮机中。该结构通过轮盘间的接触界面传递力和扭矩,并依靠轴向预紧力进行装配,因此有必要建立准确的考虑接触界面影响的拉杆组合式转子动力学模型^[2]。

根据传扭方式,拉杆转子的轮盘连接结构可分为平面摩擦传扭和端面齿传扭。端面齿盘连接具有自定心和传扭大等优点,在多款型号重型燃气轮机中得到了应用^[3]。根据齿面形状可将端面齿分为平面齿和弧形齿:平面齿主要用于传动,由侧铣刀加工而成^[4];弧形齿主要用于燃气轮机和航空发动机盘轴连接,通过砂轮或齿盘在磨床加工而成。

拉杆转子轮盘结构的不连续性会使转子系统的刚度弱化,进而造成建模和动力学特性表征的误差。由于加工不可能达到完全光滑,接触界面的动力学效应往往是跨尺度的,目前针对粗糙表面的研究主要基于分形模型和统计学模型。分形理论强调表面粗糙度具有自相似性和分形特性,利用粗糙度和分形维数描述接触特性^[5]。王世军等^[6]提出了一种结合面接触刚度的侧接触分形模型。Zhang等^[7]考虑分形粗糙表面的弹性和塑性变形的影响来预测分形粗糙表面的界面接触刚度。Liu等^[8]提出了一种考虑摩擦力的修正分形法向接触刚度模型。王颜辉等^[9]推导了基于分形理论的微凸体不同变形状态,得出了变形阶段的法向接触刚度模型。统计学模型源于Greenwood等^[10]基于粗糙表面微凸体服从高斯分布和弹性变形的假设,建立的GW模型,其主要利用粗糙高度分布的标准差、粗糙平均半径和名义

接触面积上的粗糙密度来表征粗糙表面。Nayak^[11]给出了对应的计算方法。Chang等^[12]在此基础上建立了弹塑性统计模型。Zhao等^[13]基于变形阶段曲线连续平滑的条件,提出了满足弹性、弹塑性和塑性变形的ZMC模型。此外,Kogut等^[14]利用有限元,研究了弹塑性阶段的变形规律,提出了KE模型。Jackson等^[15]考虑几何和材料影响,发展了JD模型。

对于拉杆转子轮盘接触界面研究,文献^[16]通过弹簧单元模化,建立了转子动力学模型。张子阳等^[17]结合有限元模型进一步进行了刚度修正。Yuan等^[18]建立了考虑接触界面二维有限元模型,开发了临界转速计算的程序。Mayer等^[19]利用有限元对螺栓连接接触界面进行分段建模,并用于模态分析。一些研究者考虑结合粗糙接触理论和拉杆转子连接结构结合研究其动力学特性。Oh等^[20]结合有限元和接触理论建立了一种中心拉杆刚度建模方法。Huang等^[21]基于分形理论考虑了Hirth齿接触的中心转子的接触效应,并通过模态响应进行实验验证,但其并未考虑接触的弹塑性阶段。Gao等^[22]基于GW模型考虑了多种接触状态下的接触界面等效刚度。Yu等^[23]基于KE模型分析了接触角对弧形端面齿连接的接触刚度的影响,但缺少预紧力作用影响分析和实验验证。

采用统计学模型可以有效描述界面的刚度和阻尼能量耗散特性。Zhao等^[24]针对平面接触的轮盘引入了偏态分布。对于弧形端面齿,其加工方式不同于大多数金属结合面,并且磨料磨损和加工划痕因素无法避免,基于传统的高斯分布,无法准确描绘真实的齿面微观形貌。

本文构建弧形端面齿接触界面跨尺度研究,基于多组弧形端面齿实测数据,引入 t Location-Scale 分布表征微凸体表面高度分布,推导考虑材料完整变形过程的多尺度接触力学模型。通过建立端齿界面等效材料层方程,表征端齿连接轮盘接触效应。研究界面微观参数和齿面几何参数在预紧力作用下,界面刚度弱化和等效材料层物性参数的影响。以国内某周向拉杆重型燃气轮机转子为实验对象,开展模态敲击实验,通过对比传统统计学模型和未考虑接触效应仿真模型与实验结果,验证了所提方法的有效性和准确性。

1 粗糙表面接触机理

1.1 粗糙接触理论

金属加工表面往往呈现宏观光滑均匀和微观局部非均匀接触的特性,微观局部的实际接触面积远小于宏观的名义接触面积,微凸体承担着设计的工作载荷。对于单个的微凸体,其接触力学特性一般可以分为弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。

根据 Hertz 球接触理论^[25],接触面法向接触载荷 f_e 可以表示为

$$f_e = \frac{4}{3}ER^{1/2}\delta^{3/2} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; R 为等效平均半径; δ 为变形量。

临界弹性变形量 δ_c 可以表示为

$$\delta_c = \left(\frac{\pi KH}{2E}\right)^2 R \quad (2)$$

式中: $K = 0.454 + 0.41v$, v 为泊松比; H 为材料的硬度。

根据有限元分析^[14],弹塑性变形第 1 阶段($\delta_c < \delta < 6\delta_c$)的接触力 f_{ep1} 可表示为

$$f_{ep1} = 1.03f_e \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right)^{1.425} \quad (3)$$

弹塑性变形第 2 阶段($6\delta_c < \delta < 110\delta_c$)的接触力 f_{ep2} 可表示为

$$f_{ep2} = 1.40f_e \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right)^{1.263} \quad (4)$$

根据文献[26]的研究,在塑性变形阶段,由方程得到的接触力 f_p 简化式为

$$f_p = 4.6f_e C(v) \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right) \quad (5)$$

$$C(v) = \frac{8.88 - 10.13(v^2 + 0.089)}{6.82 - 7.83(v^2 + 0.586)} \quad (6)$$

式中: $C(v)$ 为泊松比函数。

1.2 微凸体接触机制

通过对粗糙度分布高度的概率密度函数进行积分,可以建立宏观接触模型。然而,与在圆盘表面加工不同,弧形端面齿的加工采用的是磨轮工艺,其通过磨粒与工件表面的接触形成微小的切削力。由于磨粒的随机性,磨削表面可能会出现波纹和局部不规则性。此外,加工过程中不可避免的磨料损耗和加工划痕等因素,也会对表面形貌产生影响。因此,实际的高度分布常伴有“尖峰”和“厚尾”等特性,传统正态分布难以准确拟合真实的高度分布。

针对这一问题,本文引入了 t Location-Scale 分布^[27],作为表征弧形端面齿表面高度分布的模型。该分布能够更好地描述加工表面的随机性和复杂性,从而提高宏观接触模型的精度和适用性。假设随机变量 x 服从 t Location-Scale 分布,其参数为位置参数 μ 、尺度参数 $\sigma > 0$ 、自由度 $\rho > 0$,则其概率密度函数为

$$f(x, \mu, \sigma, \rho) = \frac{\Gamma(\rho+1)/2}{\sqrt{\rho\pi\sigma}\Gamma(\rho/2)} \left(1 + \frac{1}{\rho} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)^{-(\rho+1)/2} \quad (7)$$

为了验证 t Location-Scale 分布对弧形端面齿表面形貌拟合的有效性,本文使用实际加工的弧形端面齿进行高度分布采样。利用 SJ-210 表面形貌测试仪,对一个具有 48 对齿的实际弧形端面齿轮盘进行采样,并统计接触面的分布特性。通过随机采集 9 组齿面数据,每组采集 3 次,总计 216 000 个采集点,得到表面微凸体高度变化的曲线,如图 1 所示。

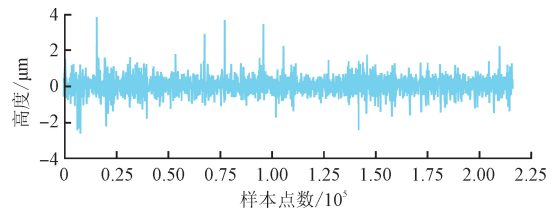


图 1 表面微凸体高度变化

Fig. 1 Surface micro convex height change

对所有的采集样本进行分布拟合和比对,如图 2 所示,可知 t Location-Scale 分布的拟合效果优于正态分布。具体而言, t Location-Scale 分布不仅能够较好地捕捉高度分布中的“厚尾”特性,还在分布趋势的“腰部”区域展现出更高的拟合精度,该分布在峰值区域的拟合表现更具优势,进一步说明其在描述数据特征的适用性和优越性。

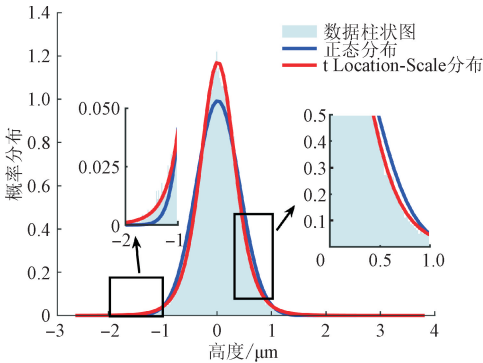


图 2 表面微凸体高度变化的拟合曲线
Fig. 2 Fitting curve of the height change of the surface micro-convex

分位数-分位数(Q-Q)图和概率-概率(P-P)图可有效描述数据分布的尾部偏差和数据在分布中的

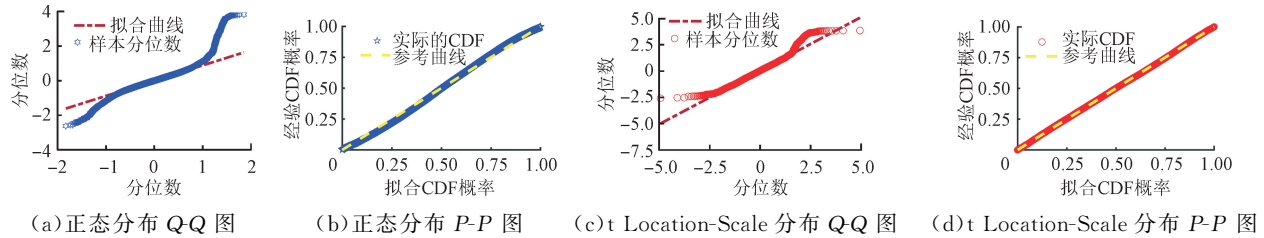


图 3 高度值数据拟合 Q-Q 图与 P-P 图

Fig. 3 Fitting Q-Q and P-P plots to height value data

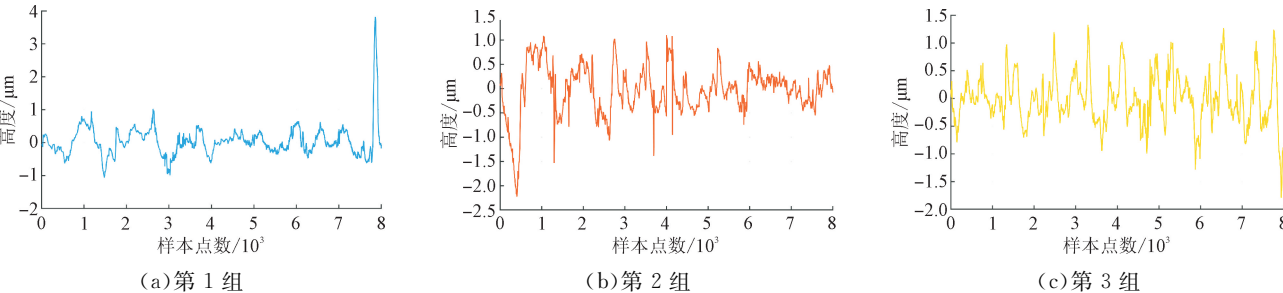
为了更准确地验证 t Location-Scale 分布在弧形端面齿表面高度分布拟合中的有效性,本文对采集的每个齿面样本进行了统计分析和分布拟合,所得样本曲线和拟合结果分别如图 4、5 所示。从图 5 可以看出,在所有采集的齿面数据中,t Location-Scale 分布的拟合效果均优于正态分布,t Location-Scale 分布在捕捉齿面高度分布特征方面具有更高的适用性和可靠性。接触面的总接触力和接触刚度的表达式为

$$F_n = \frac{4}{3} \eta ER^{1/2} A_n \left[\int_h^{h+\delta_c} (s-h)^{1.5} f(s) ds + 1.03 \delta_c^{-1.425} \int_{h+6\delta_c}^{h+110\delta_c} (s-h)^{2.925} f(s) ds + \right.$$

$$1.4 \delta_c^{-1.263} \int_{h+6\delta_c}^{h+110\delta_c} (s-h)^{2.763} f(s) ds + 4.6 C(v) \delta_c^{-1} \int_{h+110\delta_c}^{\infty} (s-h)^{2.5} f(s) ds \Big] \quad (8)$$

$$k_n = \frac{4}{3} \eta ER^{1/2} A_n \left[1.5 \int_h^{h+\delta_c} (s-h)^{0.5} f(s) ds + 1.03 \delta_c^{-1.425} 2.925 \int_{h+6\delta_c}^{h+110\delta_c} (s-h)^{1.925} f(s) ds + 1.4 \delta_c^{-1.263} 2.763 \int_{h+6\delta_c}^{h+110\delta_c} (s-h)^{1.763} f(s) ds + 4.6 C(v) \delta_c^{-1} 2.5 \int_{h+110\delta_c}^{\infty} (s-h)^{1.5} f(s) ds \right] \quad (9)$$

式中: η 为两个接触表面之间的接触凹凸不平的数量^[14]; A_n 为接触面积。



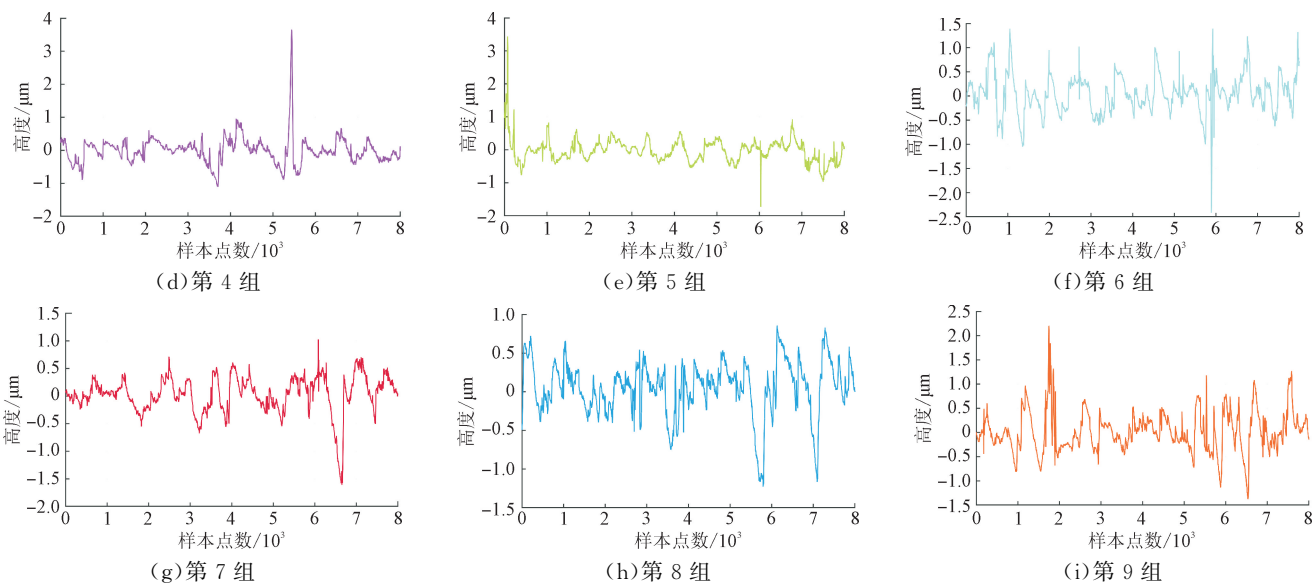


图 4 采集的 9 组齿面高度分布数据样本

Fig. 4 Sample of nine sets of tooth height distribution data collected

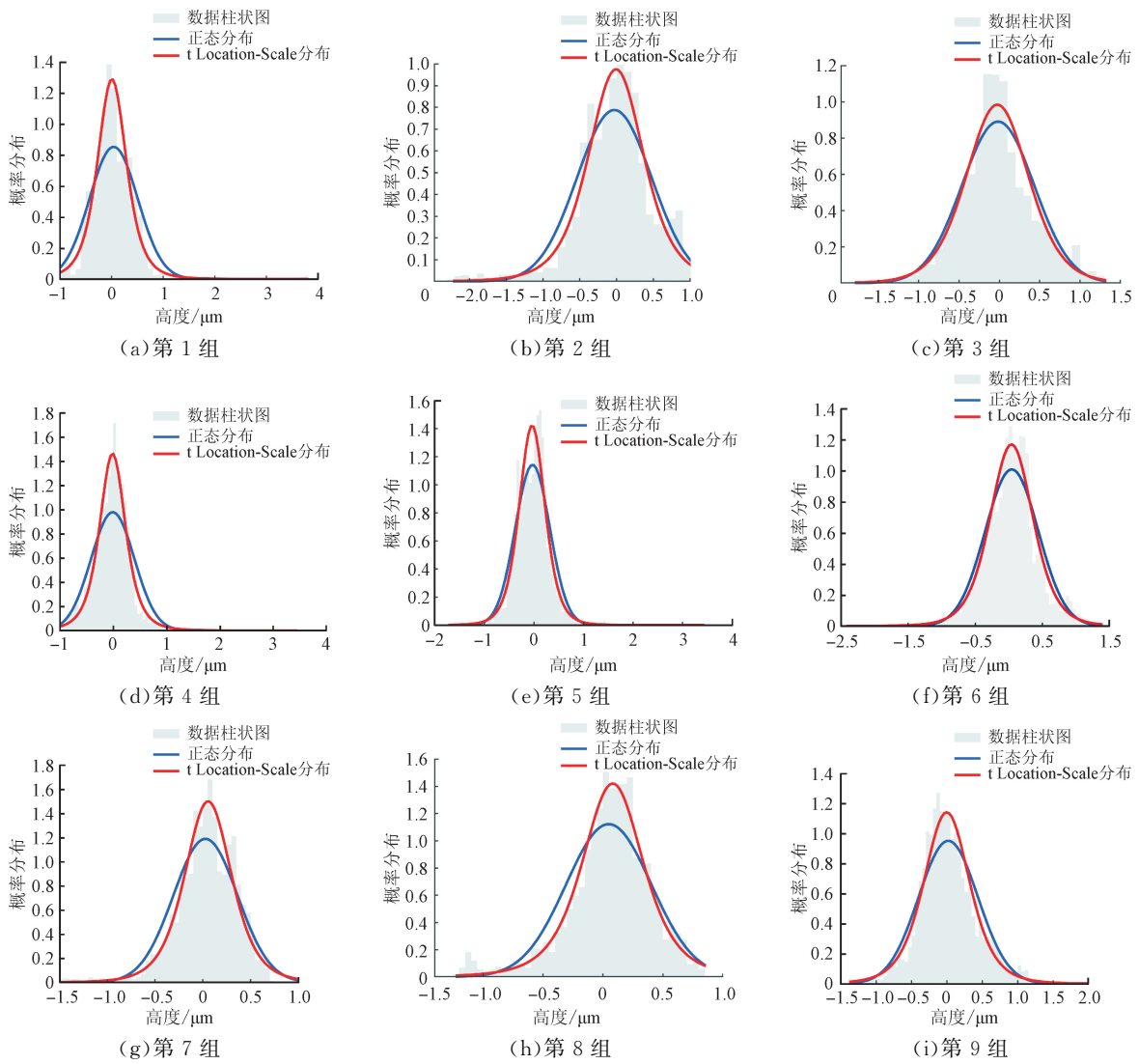


图 5 采集的 9 组齿面高度分布数据样本拟合

Fig. 5 Fitting performance of nine sets of data samples collected for tooth height distribution

2 弧形端面齿跨尺度接触建模

2.1 弧形端面齿几何接触机制

在弧形端面齿加工过程中,圆的半径及其圆心决定了加工工具在平面上任意点 c 的路径与圆的垂直相交特性。弧形端面齿的形状主要受点 c 到零件中心 O 的距离 $r_{WG,O}$,以及点 c 到加工工具 O_{WG} 中心的距离的影响 $r_{WG,c}$ 。此外,弧形端面齿的几何形状由接触角、齿轮齿数以及刀具抛光接触面的宽度 b 共同决定,加工示意图如图6所示。

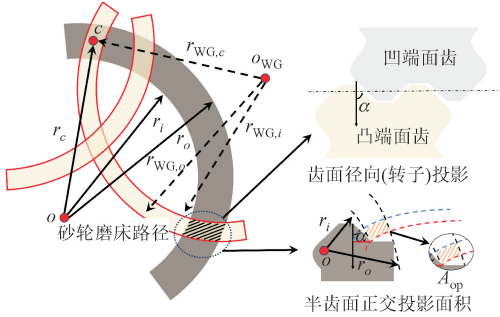


图6 弧形端面齿加工示意图

Fig. 6 Curvic tooth machining diagram

正交投影接触面积 A_{op} 可以通过将剖面乘以齿轮齿总数的两倍来获得。一旦确定了 A_{op} ,垂直于接触面的接触面积 A_n 为

$$A_n = \frac{A_{op}}{\sin \alpha} \quad (10)$$

在 Hertz 接触中,法向接触刚度与切向接触刚度之间的关系可表示为

$$\frac{K_t}{K_n} = \frac{2(1-\nu)}{\nu} \quad (11)$$

式中: K_t 为切向刚度; K_n 为法向刚度。结合几何关系,可以得到转子轴向的刚度

$$k_z = \frac{d\sigma_z}{d\Delta z} = k_n \sin^2 \alpha + k_t \cos^2 \alpha \quad (12)$$

$$F_z = F_n \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (13)$$

2.2 弧形端面齿盘拉杆转子接触等效特性

拉杆转子结构的不连续性、界面接触不平整性和盘间局部微观形体变形效应会转子系统的刚度弱化。在机械结合面建模中,等效材料法因其简单且具有较强通用性而被广泛应用。该方法通过将材料层定义为各向同性材料,并通过调整其弹性模量、泊松比和密度等参数,来有效模拟接触效应对转子刚度的影响,方法的具体示意如图7所示。

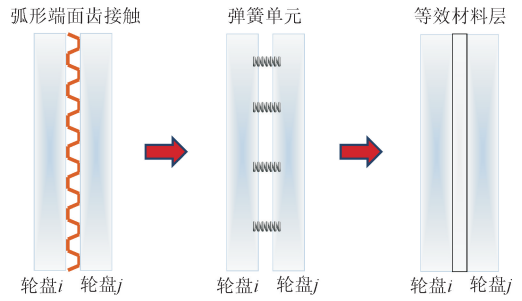


图7 等效材料法的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the equivalent material method

基于变形前后材料应变能相等的原理,可得等效弹性模量

$$E_{equ} = (l_i + l_j) \left(\frac{l_i}{E_i A_m} + \frac{l_j}{E_j A_m} + \frac{A_m}{k_{m,n} \cos \alpha} + \frac{A_m}{k_{m,t} \sin \alpha} + \sum_{u=1}^N \frac{l_i + l_j}{E_{u,rod} A_{u,rod}} \right)^{-1} \quad (14)$$

式中: $E_i, E_j, E_{u,rod}$ 分别为第 i, j 个轮盘和第 u 个拉杆的弹性模量; l_i, l_j 为第 i, j 个轮盘的厚度; A_m 为第 m 个接触层的面积; $A_{u,rod}$ 为第 u 个螺栓的横截面积; N 为拉杆数; $k_{m,n}, k_{m,t}$ 分别为第 m 个接触层的等效法向和切向刚度。

基于等效前后的横向应变守恒,可得等效的泊松比和剪切模量

$$\nu_{equ} = \frac{E_{equ}}{l_i + l_j} \left(\frac{(\nu_i l_i + \nu_j l_j)}{l_i + l_j} + \frac{(\nu_i + \nu_j) (A_m / 2k_{m,n} \cos \alpha + A_m / 2k_{m,t} \sin \alpha)}{l_i + l_j} \right) \quad (15)$$

$$G_{equ} = E_{equ} / 2(\nu_{equ} + 1) \quad (16)$$

式中: ν_i, ν_j 分别为第 i, j 个轮盘的泊松比。

3 弧形端面齿盘接触刚度参数研究结果与讨论

本文研究了宏观齿面几何参数和微观接触界面参数对法向接触刚度和等效材料层物性参数的影响。对于法向接触刚度考虑的宏观齿面几何参数为接触角 α ,微观接触界面参数为尺度参数 σ 和等效圆半径 R 。对于等效材料层物性参数研究的参数为接触角 α 、转子几何参数轮盘厚度 l 和微观接触界面参数临界接触高度 h ,分析模型的其他参数如表1所示。

表 1 分析模型参数
Table 1 Analyzing model parameters

参数	数值
弹性模量 E/GPa	201
泊松比	0.3
硬度系数	300
尺度参数 σ/m	1.57×10^{-6}
位置参数 μ/m	0.83×10^{-6}
自由度 ρ	6.106 56
等效圆半径 R/m	11.78×10^{-6}
微凸体接触数 η/m	7.15×10^8
接触角 $\alpha/(\text{^\circ})$	20~40
接触面积 A_{op}/m^2	0.018 2

3.1 宏观参数敏感性分析

首先研究宏观齿面几何参数为接触角 α 对单位面积接触刚度的影响,选取的接触角为 $20^\circ\sim 40^\circ$,选取的间隔为 5° 。压力角对接触刚度的影响如图 8 所示,可知伴随着接触角的增大,单位面积的法向刚度 k_n 逐渐增大,并且伴随着接触角的增大, k_n 的变化更加剧烈,但满足 k_n 的斜率随接触压力 p 的增大而减小的规律。在压力为 $10\sim 70\text{ MPa}$ 时, k_n 的取值与文献[28]的计算值和实验值在同一数量级(10^{13}),在 $0\sim 300\text{ MPa}$ 时, k_n 的取值与文献[29]的计算值在同一数量级。

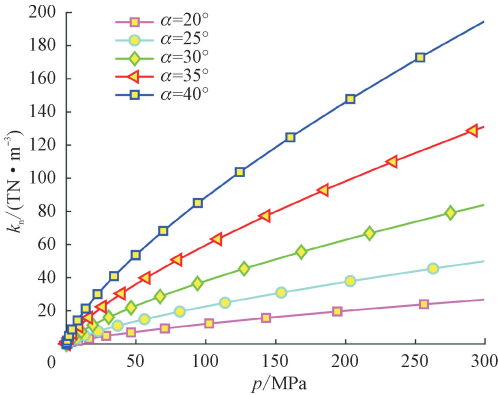
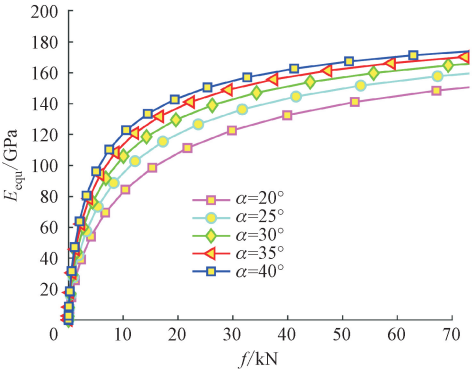


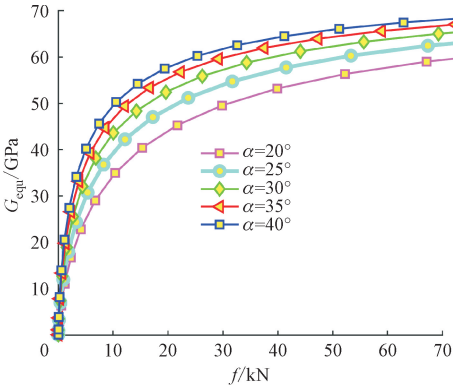
图 8 压力角对接触刚度的影响

Fig. 8 Effect of pressure angle on pairwise contact stiffness

研究宏观齿面几何参数接触角 α 对等效材料层的弹性模量和剪切模量的影响,如图 9 所示,在同等的预紧力下,等效材料层的弹性模量和剪切模量伴随则接触角的增大而增大,并在预紧力为 70 kN 时,达到饱和状态。当接触角为 40° 时,弹性模量为 174 GPa ,减少了 13.4% ,剪切模量为 68.5 GPa ,减少了 11.39% 。



(a) 预紧力与等效弹性模量的关系

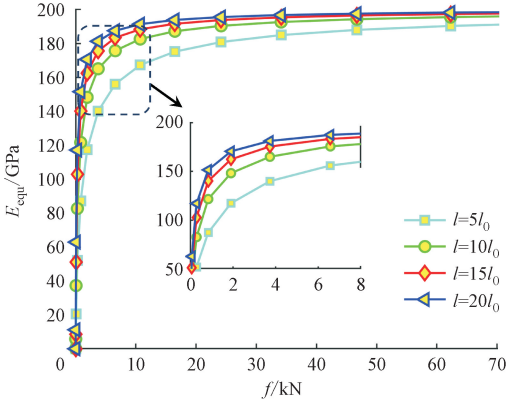


(b) 预紧力与等效剪切模量的关系

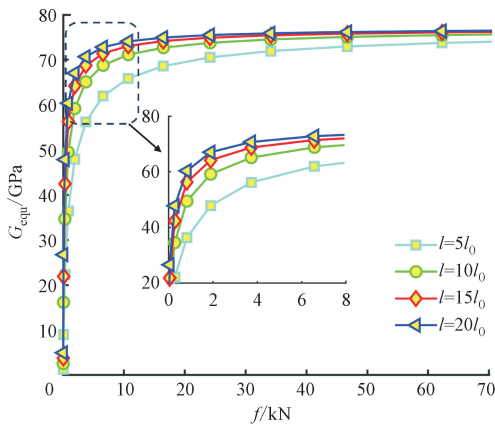
图 9 端齿压力角对等效弹性和剪切模量的影响

Fig. 9 Effect of end tooth pressure angle on the elasticity and shear modulus of equivalent material layers

研究宏观转子几何参数轮盘厚度 l 对等效材料层的弹性模量和剪切模量的影响,并假设两个接触轮盘的厚度相同,如图 10 所示。定义轮盘厚度 $l_0 = 0.0098$,选取的参数为 $1\sim 20$ 倍的 l_0 ,间隔为 $5l_0$ 。在同等的预紧力下,等效材料层的弹性模量和剪切模量伴随则轮盘厚度的增大而增大,并在预紧力达为 70 kN 时,达到饱和状态。当轮盘厚度为 $20l_0$ 时,弹性模量的值为 198.22 GPa ,减少了 1.38% ,剪切模量的值为 76.39 GPa ,减少了 1.19% 。



(a) 预紧力与等效弹性模量的关系



(b) 预紧力与等效剪切模量的关系

图 10 轮盘厚度对等效弹性和剪切模量的影响

Fig. 10 Effect of wheel thickness on the elasticity and shear modulus of equivalent material layers

3.2 微观参数敏感性分析

研究微观接触界面参数尺度参数 σ 对接触刚度的影响,如图 11 所示,定义 $\sigma_0 = 1.57 \times 10^{-6}$,选取 $5 \sim 25$ 倍的 σ_0 ,间隔为 $5\sigma_0$ 。可以看出,相同接触压力 p 下,表面法向接触刚度随表面粗糙程度增加而减小。尺度参数 σ 对应传统 GW 模型的高度标准差参数,因此这与文献[24]对表面粗糙度参数与法向接触刚度的敏感性分析结论保持一致。

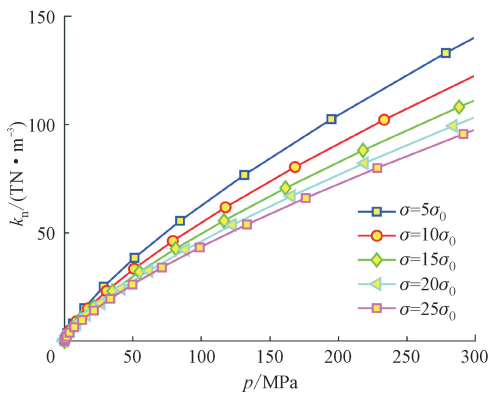


图 11 微凸体高度分布的标准差对接触刚度的影响

Fig. 11 Effect of the standard deviation of the height distribution of microconvex bodies on the contact stiffness

研究微观接触界面参数等效曲率半径 R 对接触刚度的影响,如图 12 所示,定义 $R_0 = 1.57 \times 10^{-6}$,选取 $5 \sim 25$ 倍的 R_0 ,间隔为 $5R_0$ 。可以看出,相同接触压力 p 下,表面法向接触刚度随等效曲率半径增加而减小。这是因为等效曲率半径的增大导致触摸压力作用下的接触面积增大,从而需要更大的外部载荷才能发生变形。

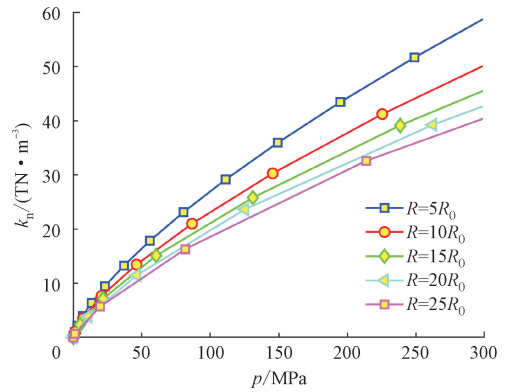
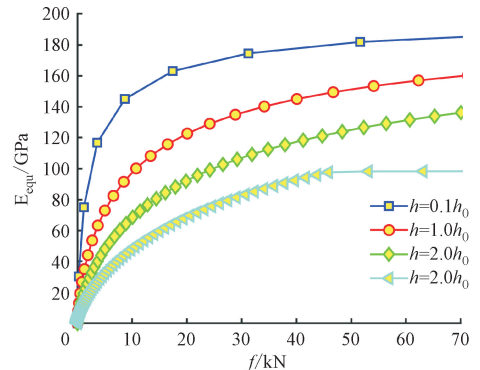


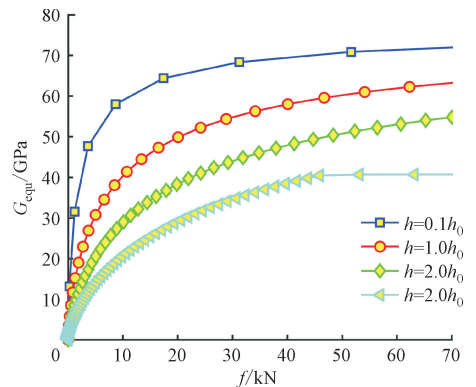
图 12 微凸体的等效曲率半径对接触刚度的影响

Fig. 12 Effect of the equivalent radius of curvature of a microconvex body on the contact stiffness

研究微观接触界面参数临界接触高度 h 对等效材料层的弹性模量和剪切模量的影响,如图 13 所示, h 表征了粗糙表面可发生变形的微凸体最小高度。定义轮盘厚度 $h_0 = 5.8925 \times 10^{-6}$,选取参数为 $0.1, 1, 1.5, 2$ 倍的 h_0 。在同等的预紧力下,等效材料层的弹性模量和剪切模量伴随则轮盘厚度的增大而减少,并且伴随着 h 的增大,达到饱和状态的时间得以提前。当轮盘厚度为 $0.1h_0$ 时,弹性模量为 181.85 GPa,减少了 9.52% ,剪切模量为 70.89 GPa,减少了 8.31% 。



(a) 预紧力与等效弹性模量的关系



(b) 预紧力与等效剪切模量的关系

图 13 临界接触高度对等效弹性和剪切模量的影响

Fig. 13 Effect of critical contact height on the elasticity and shear modulus of equivalent material layers

3.3 燃气轮机拉杆转子模态实验验证

为了验证计算的准确性和精度,以某燃气轮机转子为研究对象,进行实验模态分析,确定燃机转子的固有频率和模态振型。实验总计设计 7 个测点,测点的具体位置和实验的转子剖面简化示意图如图 14 所示。使用龙门吊将转子吊起,在水平方向进行激振,使用加速度传感器在水平方向进行拾振。利用 LMS 采集器对信号进行采集并上传至上位机分析。

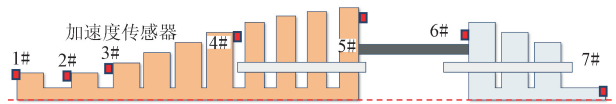


图 14 实验转子剖面简化示意图

Fig. 14 Simplified diagram of rotor section of experimental

3.4 模型仿真与验证

为了分析接触界面对转子固有特性的影响,研究利用有限元的方法,构建 Timoshenko 梁单元转子模型,将转子离散化为固体质量节点,对于接触界面,通过材料等效,建立额外的薄层,针对平面接触,薄层的厚度取 0.001,针对端面齿接触,薄层的厚度取全齿高。构建离散运动学方程,求解广义特征值

问题,求得固有频率与系统振型。为了验证方法的有效性,实验对比了未采取界面刚度修正的计算结构(下文简称未修正模型)和文献[27]传统正态分布拟合高度分布的方法。其中未修正模型,是根据转子的原有结构参数,基于静态弯矩作用下的应变能守恒,进行轴向分段,并求得转子的刚度直径。进而依据刚度直径建立梁单元模型,并添加同样的薄层的单元,但薄层的刚度与转子相同,即未考虑接触面刚度弱化,进而计算的自由模态频率,两种修正方法采用的界面参数和转子几何参数均相同,仿真与实验对比的固有频率如表 2 所示。燃机转子的前四阶固有频率分别为 71.14、149.19、211.09、298.63 Hz。不考虑端面齿接触效应的仿真结果与实验结果的偏差较大,相对误差分别为 3.86%、3.55%、1.75% 和 6.33%。使用文献[27]方法取得的相对误差分别为 3.13%、1.27%、0.42% 和 5.17%,基于本文方法,取得了更优的效果,相对误差分别为 2.61%、0.63%、0.03% 和 4.78%。各个模态的精度都取得了提升,相较于未修正前,分别提升了 1.25%、2.92%、1.72% 和 1.55%,相较于文献[27]方法提升了 0.52%、0.64%、0.39% 和 0.39%。

表 2 不同方法的仿真固有频率与实验结果对比

Table 2 Comparison of simulation and experimental results for natural frequency

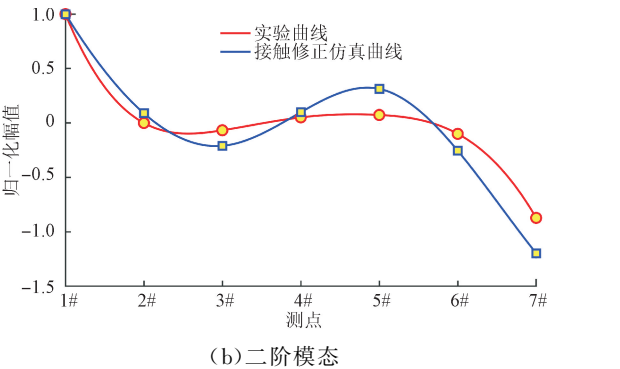
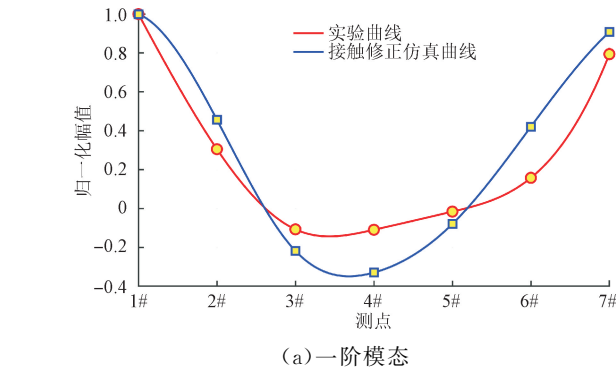
阶数	实验频率/Hz	仿真频率/Hz			相对误差/%		
		未修正方法	文献[27]方法	本文方法	未修正方法	文献[27]方法	本文方法
1	71.14	73.89	73.37	73.00	3.86	3.13	2.61
2	149.19	154.49	151.09	150.13	3.55	1.27	0.63
3	211.09	214.80	211.98	211.16	1.75	0.42	0.03
4	298.63	317.54	314.06	312.91	6.33	5.17	4.78

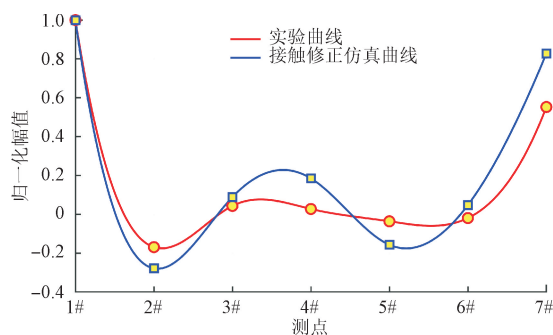
图 15 展示了各个测点实验测试的前 4 阶模态振型和使用本文所提方法的前 4 阶模态振型,可以看出模态振型的变化趋势和静止节点位置,合理且符合典型特征,仿真结果的模态振型与实验结果基本一致。为了直观的展现测量数据与修正曲线沿轴

线分布的连续变化趋势,对测点数据 x 进行了插值,并对幅值进行了归一化,即

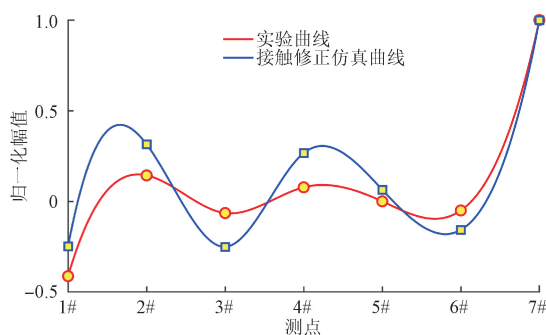
$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(17)





(c) 三阶模态



(d) 四阶模态

图 15 模态振型的实验和仿真结果

Fig. 15 Experimental and simulation results of modal shapes

4 结 论

(1) 拉杆转子轮盘连接的弧形端面齿为磨轮加工,本文引入 t Location-Scale 分布表征了弧形齿面微凸体高度分布,经由实验测量数据研究,所提分布的拟合效果在多组数据中均优于正态分布。研究表明,弧形端面齿表面微凸体高度分布具有“厚尾”和“尖峰”特性, t Location-Scale 分布在捕捉齿面高度分布特征方面具有更高的适用性和可靠性。

(2) 本文基于统计学理论建立了考虑微凸体变形弹塑性的端面齿面接触刚度建模方法,并建立了弧形端面齿接触界面的等效材料层,定量研究了宏观齿面几何参数和微观接触界面参数对法向接触刚度和对等效材料层物性参数的影响,并证明了所提分布参数对接触刚度影响的合理性。

(3) 以国内某周向拉杆重型燃气轮机转子为实验对象,开展模态敲击实验,通过对比传统统计学模型和未考虑接触效应仿真模型与实验结果。结果表明,本文所提方法的仿真结果与真实结果的吻合情况最好,前四阶模态的相对误差分别为 2.61%、0.63%、0.03% 和 4.78%,相较于未修正前,分别提升了 1.25%、2.92%、1.72% 和 1.55%,相较于文献 [27] 方法提升了 0.52%、0.64%、0.39% 和 0.39%。模态振型也与实测数据吻合,可为研究端面齿盘拉杆转子动力学建模研究提供思路。

参考文献:

[1] 余春华, 阙晓斌, 吴宏. 重型燃气轮机压气机技术发展趋势 [J]. 动力工程学报, 2024, 44(9): 1317-1327.
YU Chunhua, QUE Xiaobin, WU Hong. Technology development trend of heavy-duty gas turbine compressor [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(9): 1317-1327.

[2] LI Pu, YUAN Qi. Determination of contact stiffness and damping of a tie-bolt rotor with interference fits using model updating with thin-layer elements [J]. Shock and Vibration, 2020, 2020(1): 8872401.
[3] 李浦, 袁奇. 拉杆转子接触界面参数识别和动力学研究进展 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(10): 39-52.
LI Pu, YUAN Qi. Research progress on interface parameter identification and dynamics of tie-bolt rotors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(10): 39-52.
[4] CROCCOLO D, DE AGOSTINIS M, FINI S, et al. On Hirth ring couplings: design principles including the effect of friction [J]. Actuators, 2018, 7(4): 79.
[5] WANG Runqiong, ZHU Lida, ZHU Chunxia. Research on fractal model of normal contact stiffness for mechanical joint considering asperity interaction [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 134: 357-369.
[6] 王世军, 刘鑫, 范凌松, 等. 一种考虑微凸体接触角分布的结合面侧接触分形模型 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(12): 190-200.
WANG Shijun, LIU Xin, FAN Lingsong, et al. A fractal model for lateral contact of joint considering contact angle distribution between asperities [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(12): 190-200.
[7] ZHANG Dayi, XIA Ying, SCARPA F, et al. Interfacial contact stiffness of fractal rough surfaces [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 12874.
[8] LIU Peng, ZHAO Han, HUANG Kang, et al. Research on normal contact stiffness of rough surface considering friction based on fractal theory [J]. Applied Surface Science, 2015, 349: 43-48.
[9] 王颜辉, 张学良, 温淑花, 等. 机械结合面法向接触刚度分形理论模型 [J]. 机械强度, 2020, 42(3): 648-

- 653.
- WANG Yanhui, ZHANG Xueliang, WEN Shuhua, et al. Fractal theoretical model of normal contact stiffness of mechanical joint interfaces [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2020, 42(3): 648-653.
- [10] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P, BOWDEN F 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.
- [11] NAYAK P R. Some aspects of surface roughness measurement [J]. *Wear*, 1973, 26(2): 165-174.
- [12] CHANG W R, ETSION I, BOGY D B. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces [J]. *Journal of Tribology*, 1987, 109(2): 257-263.
- [13] ZHAO Yongwu, MAIETTA D M, CHANG L. An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow [J]. *Journal of Tribology*, 2000, 122(1): 86-93.
- [14] KOGUT L, ETSION I. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2002, 69(5): 657-662.
- [15] JACKSON R L, GREEN I. A finite element study of elasto-plastic hemispherical contact against a rigid flat [J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127(2): 343-354.
- [16] 饶柱石, 夏松波, 汪光明. 粗糙平面接触刚度的研究 [J]. *机械强度*, 1994, 16(2): 72-75.
- RAO Zhushi, XIA Songbo, WANG Guangming. A study of contact stiffness of flat rough surfaces [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 1994, 16(2): 72-75.
- [17] 张子阳, 谢寿生, 钱征文, 等. 拉杆结构中弹簧刚度和有限元模型刚度融合修正方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(11): 53-56.
- ZHANG Ziyang, XIE Shousheng, QIAN Zhengwen, et al. Fusion stiffness modification of spring and FE model of rod fastening rotor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(11): 53-56.
- [18] YUAN Qi, GAO Rui, FENG Zhenping, et al. Analysis of dynamic characteristics of gas turbine rotor considering contact effects and pre-tightening force [C]// *ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air*. New York, USA: ASME, 2008: 983-988.
- [19] MAYER M H, GAUL L. Segment-to-segment contact elements for modelling joint interfaces in finite element analysis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(2): 724-734.
- [20] OH J, KIM B J, PALAZZOLO A. Three-dimensional solid finite element contact model for rotordynamic analysis: experiment and simulation [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2021, 143(3): 031007.
- [21] HUANG Gancai, LIU Chao, JIANG Dongxiang. Dynamic modeling and experimental modal analysis for the central rod-fastened rotor with Hirth couplings based on fractal contact theory [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2024, 146(10): 101015.
- [22] GAO Jin, YUAN Qi, LI Pu, et al. Effects of bending moments and pretightening forces on the flexural stiffness of contact interfaces in rod-fastened rotors [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134(10): 102503.
- [23] YU Y, LEE B, CHO Y. Analysis of contact and bending stiffness for curvic couplings considering contact angle and surface roughness [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part E Journal of Process Mechanical Engineering*, 2019, 233(6): 1257-1267.
- [24] ZHAO Runchao, XU Yeyin, ZHAO Zhiqian, et al. Multi-scale contact induced period-doubling vibrations in rotor systems: numerical and experimental studies [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 195: 110251.
- [25] POPOV V L. *Contact mechanics and friction* [M]. Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [26] LI L, ETSION I, TALKE F E. Contact area and static friction of rough surfaces with high plasticity index [J]. *Journal of Tribology*, 2010, 132(3): 031401.
- [27] WU Jie, XU Degang, LEI Yifan, et al. Semi-solid metal slag thickness distribution identification based on statistical temporal fusion of multisource image for robotic operation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-16.
- [28] ZHANG Yanchun, DU Zhaogang, SHI Liming, et al. Determination of contact stiffness of rod-fastened rotors based on modal test and finite element analysis [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(9): 094501.
- [29] 袁奇, 李浦. 燃气轮机拉杆转子结构动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2021.

(编辑 赵炜)