

采用科尔莫哥罗夫-阿诺德网络的 端面齿盘拉杆转子预紧参数识别

冯建欣¹, 余沛炯², 魏佳明², 文思果¹, 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: 为解决端面齿盘拉杆转子在预紧状态下的拉杆振动参数识别问题,提出了基于加速度计附加质量的拉杆频率解谐方法。开展了拉杆弯曲固有频率对加速度计附加质量位置的灵敏度分析,进行顺序、交叉和正反序2轮预紧3种不同方式下的残余预紧力识别和拉杆模态实验。构建了附加质量的拉杆梁单元模型并采用科尔莫哥罗夫-阿诺德神经网络(KAN)实现了不同预紧力下的拉杆频响函数预测和参数识别。研究表明:拉杆共振频率随预紧力增大而增大,同时传感器附加质量会降低共振频率,最大降幅达8%;正反序2轮预紧可显著降低拉杆预紧力分散度约10%,优于顺序加载和交叉加载;KAN网络能够有效预测不同预紧状态下拉杆的频响函数,谐振频率预测误差小于4.2%,同时识别刚度能够准确反映预紧失谐下的拉杆振动模态特性,为实际工程中拉杆预紧参数识别提供了一种实验方法和计算模型。

关键词: 拉杆转子;模态实验;端面齿;科尔莫哥罗夫-阿诺德神经网络;参数识别

中图分类号: TK14 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202505016 **文章编号:** 0253-987X(2025)05-0168-10

Parameter Identification for Preloaded Tie-Bolt Rotors with Curvic Couplings Using Kolmogorov-Arnold Networks

FENG Jianxin¹, YU Peijiong², WEI Jiaming², Wen Siguo¹, 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: To identify the vibration characteristics of tie-rods in preloaded tie-bolt rotors with curvic couplings, a tie-bolt frequency detuning method based on accelerometer-added mass was proposed. An analysis was carried out to check the sensitivity of the bending natural frequency of the tie-rod to the position of the accelerometer-added mass. Residual preload identification and modal impact tests were performed for three different preloading methods: forward-sequence, cross, and forward-reverse-sequence two-round preloading. A tie-rod beam element model with added mass was established, and the Kolmogorov-Arnold networks (KAN) were employed to predict the frequency response function and identify parameters under different preload conditions. The results indicate that the resonance frequency of the tie-rod increases with the increase of preload, while the added mass of the sensor reduces the resonance frequency up to

8%。Forward-reverse-sequence two-round preloading significantly reduces the dispersion of the tie-rod preload by approximately 10%, outperforming forward-sequence and cross preloading. The KAN are able to effectively predict the frequency response function of the tie-rod under different preload states, with a prediction error of less than 4.2% for resonant frequencies. Moreover, the identified stiffness accurately reflects the vibration modal characteristics of the tie-rod under preload detuning. Therefore, the experimental method and computational model are reliable for identifying preloading parameters in practical engineering applications.

Keywords: tie-bolt rotor; modal tests; curvic coupling; Kolmogorov-Arnold neural network; parameter identification

燃气轮机是一种高温、高压、高转速透平旋转机械,具有高效、洁净、安全等特性。鼓盘式拉杆组合转子是燃气轮机中的关键部件,其结构设计主要包含两种类型:中心拉杆结构和周向拉杆结构,这种转子结构在燃气轮机运行中起着至关重要的作用,其设计形式直接影响着机组的整体性能和可靠性^[1-3]。周向拉杆转子各轮盘通过周向均布的多拉杆预紧组合,拉杆预紧力大小会对转子整体结构动力学特性产生较大的影响^[4]。随着服役时间的增加,转子中的某些拉杆预紧松弛引起的刚度损失,产生偏移轴线的不平衡质量易引起振动超标^[5],对转子安全稳定运行具有重要影响。因此,开展拉杆预紧力参数识别对拉杆转子安全性和可靠性具有重要意义。

在转子结构设计领域,尹泽勇等提出了一种多因素耦合的轴向预紧力确定方法。该方法通过整合紧度裕度、强度裕度以及装配关系等关键参数,构建了系统的预紧力确定准则体系。基于这一理论框架,研究者进一步建立了相应的预紧力优化数学模型,为转子结构的精确设计提供了理论支撑^[6]。祝梦洁等通过实验分析与有限元结合的方法研究了预紧失谐对固有频率的影响,表明拉杆转子的预紧力失谐量相同时,固有频率随失谐拉杆数量的增加而下降^[7]。毕红霞针对叶盘结构的振动特性开展了系统性研究,通过对比分析预紧力失谐与刚度失谐两种工况下的动力学响应,深入探讨了失谐效应对叶盘结构振动行为的影响机制。研究结果表明,预紧力失谐会显著改变叶盘结构的振动模式分布,导致振动能量在局部区域集中,形成明显的振动响应局部化现象^[8]。袁淑霞等建立了端面弧齿有限元分析模型,分析拉杆失谐对端面弧齿应力分布的影响^[9]。苏永雷等对初始预紧失谐程度相同的组合转子进行不平衡响应分析,获得预紧失谐组合转子退化特征^[10]。王奇等提出了一种等效接触层建模方法,系统探讨了拉杆预紧力衰减与周向失谐耦合作用下转子系统的动力学行为演变规律,表明随着预紧力失

谐拉杆数量的增加,转子的临界转速和固有频率降低^[11]。以上研究对转子本体开展了模态分析和振型响应计算,但对拉杆局部松动研究不多。

针对螺栓紧固件的松动识别,众多学者在传感器识别、冲击识别和视觉识别等方面开展了深入的研究。Meyer 和 Adams 研究了一种冲击测试方法,以识别结构内的松动螺栓。他们根据响应谱中的振幅提出了一个调制指数,并表明该指数随着螺栓扭矩的降低而增加^[12]。Amerini 等研究了一种振声测试方法,其中制定了两个指标来评估螺栓预紧状态,并提出了一种双曲正切函数来模拟实验数据^[13]。Milanese 等研究了螺栓连接的非线性行为,归因于螺栓的非线性边界刚度^[14]。Paez 等通过实验发现了螺栓连接的固有频率对边界刚度表现出非线性依赖性^[15]。Pan 等预测任一初始预紧力作用下螺栓组剩余预紧力的分布,并以最终剩余预紧力为目标,求解拟施加的初始预紧力^[16]。Guo 等采用智能垫圈跟踪螺栓预紧力^[17]。Liu 等提出了一种基于耦合层声波时差(ATD)分离的航空发动机紧固部件预紧应力测量方法,紧固件预紧应力的最大测量误差由13.016 MPa 降至4.738 MPa,有效提高了测量精度^[18]。Wang 等提出了一种基于非线性兰姆波和增量学习的螺栓预紧状态定量监测方法^[19]。Wang 等设计并制造了一种螺栓预紧力传感器,该传感器将应变片黏结在螺栓头顶部表面,通过监测螺栓头的应变情况来监测螺栓预紧力的大小^[20]。Guo 等通过对实际工程中螺栓预紧力的实验分析,揭示了螺栓预紧力对结构动力性能的影响,然后对实验数据进行分析,得到螺栓的最佳预紧力^[21]。Liu 等对螺栓连接进行了不同预紧力和激励幅值下的松动实验,采用3种涂层对螺栓进行处理,研究了不同涂层对螺栓抗松性能的影响^[22]。Wang 等基于分形接触理论,分析了不同预紧力下螺栓连接的切向阻尼,对拉杆松动进行精确定量监测^[23]。Xu 等提出了一种改进的螺栓松动监测时间反演方法,开展了螺栓松

动检测^[24]。Jiang 等提出了一种基于压电陶瓷传感器的主动传感方法,用于检测螺栓连接,无需在结构上永久安装传感器^[25]。Yang 等提出了一种利用卷积神经网络估计锚杆预紧力的方法,将冲击信号进行图像处理,利用图像训练后的卷积神经网络(CNN)模型检测选定螺栓的实际预紧力^[26]。综上所述,螺栓松动识别大多基于简单螺栓搭接结果,多螺栓松动耦合特性研究尚不充分。

端面齿盘拉杆转子是燃气轮机的重要部件,近年来发生了多起由于转子拉杆预紧松弛导致的转子振动加剧问题,造成巨大的安全隐患和经济损失。因此,有必要开展端面齿盘拉杆转子拉杆振动特性分析。已有研究主要针对预紧力下的拉杆转子或轮盘系统振动特性,较少针对拉杆局部模态,而实际重型燃气轮机的轮盘/拉杆质量比大,不同于航空发动机薄壁结构,表现出拉杆和轮盘振动解耦特性,因此,局部拉杆松动或预紧失谐,轮盘振动频率变化并不显著。本文针对端面齿盘周向拉杆转子,基于模态频率开展拉杆振动特性及预紧参数识别研究。

1 拉杆振动特性分析

1.1 有限元预应力模态分析

基于实际某燃气轮机透平转子模型,建立了缩比转子模型,如图 1 所示。转子由四级端面齿轮盘和两端轴头组成,通过 12 根 M10 的周向拉杆预紧连接,齿盘与轴头通过止口过盈连接,齿盘间通过弧形端面齿进行连接。转子质量为 18 kg,转子材料弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 850 kg·m⁻³。

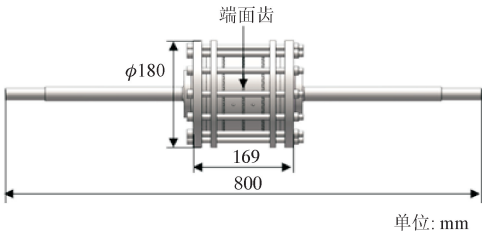


图 1 端面齿盘拉杆转子三维模型图

Fig. 1 3D model of curvic coupling of circumferential tie rotor

首先,采用三维有限元模型进行模态分析,止口过盈通过 Ansys 软件摩擦接触中的 Offset 功能进行设置,端面齿接触采用摩擦接触,拉杆、螺母与轴头的接触采用绑定接触,拉杆与端面齿轮盘拉杆孔及轴头拉杆孔之间存在间隙。采用预紧力单元对拉杆施加预紧力,开展预应力下的转子模态分析,网格数为 201 507,节点数为 366 081。图 2 展示了拉杆的一阶模态振型图,可以发现拉杆和转子本体振动

基本解耦,这是由于拉杆相比转子的质量和刚度均有较大差别。因此,实际测量中难以通过测量转子频率识别拉杆松动,这也是本文提出拉杆频率识别松动的原因。均匀预紧下转子拉杆在一阶模态下,83%应变能集中于拉杆本身,端面齿轮盘和轴头的应变能占比为 10%和 7%。

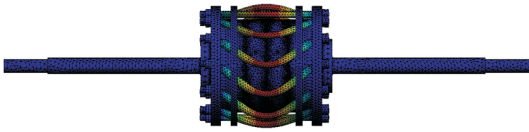


图 2 拉杆一阶模态振型

Fig. 2 First order modal shape diagram of rod

1.2 3 种预紧方式螺栓残余应力分析

在端面齿盘拉杆转子装配过程中,不同位置螺栓之间会产生弹性交互作用,不同加载方案会使装配后的螺栓预紧力存在一定的分散度。针对这一问题,研究了顺序加载、交叉加载、正反序 2 轮加载 3 种加载方式螺栓预紧力的分散度。

如图 3 展示了拉杆编号,顺序加载为按螺栓序号从小到大依次加载螺栓预紧力,交叉加载顺序为 1→7→4→10→2→8→5→11→3→9→6→12,正反顺序 2 轮加载首先按照既定顺序施加 50%的额定预紧力完成首轮正向加载,随后立即进行反向顺序加载,直至达到 100%的额定预紧力值。端面齿盘拉杆转子螺栓加载方案如表 1 所示。

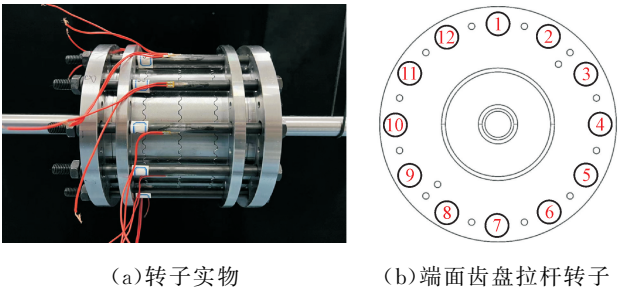


图 3 拉杆编号图

Fig. 3 Rod number diagram

表 1 端面齿盘拉杆转子螺栓加载方案

Table 1 Bolt loading schemes for tie-bolt rotors with curvic couplings

加载方案	加载序号
顺序加载	1→2→3→4→5→6→7→8→9→10→11→12
交叉加载	1→7→4→10→2→8→5→11→3→9→6→12
正反序	1→2→3→4→5→6→7→8→9→10→11→12
2 轮加载	12→11→10→9→8→7→6→5→4→3→2→1

通过应变片测量拉杆预紧力,分别以 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 的扭矩预紧拉杆,通过应变测量换算得到的螺栓预紧力数据分析如表 2 所示。根据实验数据可以看出,正反序 2 轮加载螺栓预紧力的分散度最低,标准差最小,交叉加载次之,顺序加载最差。

表 2 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 螺栓加载实验数据
Table 2 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ bolt loading test data

加载方案	拉杆预紧力 平均值/kN	分散度/%	标准差/kN
顺序加载	16.79	22.40	3.76
交叉加载	16.49	15.05	2.48
正反序 2 轮加载	17.21	14.21	2.45

开展不同预紧顺序下的有限元分析,分载荷步对螺栓施加预紧力,例如 Ansys 软件中,顺序加载方案分为 12 个载荷步,螺栓在施加载荷前的载荷步使用 Adjustment,使用 Load 施加载荷,施加载荷后使用 Lock 锁定载荷。

表 3 展示了螺栓加载有限元预紧力数据,从仿真结果可以看出:正反序 2 轮加载螺栓预紧力的分散度最低为 1.44% ,标准差最小为 0.26 kN ;交叉加载次之,分散度为 2.54% ,标准差为 0.45 kN ;顺序加载最差,分散度为 2.68% ,标准差为 0.51 kN 。由于螺栓在第一次加载时会受到弹性交互作用的影响,导致载荷发生变化,而在第 2 轮加载时,反转顺序的加载方式能够有效修正第 1 次加载过程中的载荷波动,从而减弱了弹性交互作用的影响,与实验结果趋势吻合。但在实际预紧过程,力矩扳手的预紧偏差较大,故实验的拉杆预紧力分散度比仿真结果的拉杆预紧力分散度大 15% 左右。

表 3 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 螺栓加载有限元模型数据

Table 3 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ bolt loading finite element model data

加载方案	拉杆预紧力 平均值/kN	分散度/%	标准差/kN
顺序加载	17.83	2.86	0.51
交叉加载	17.80	2.54	0.45
正反序 2 轮加载	18.85	1.44	0.26

1.3 附加质量灵敏度分析

在实验过程中,需要通过在拉杆上吸附加速度传感器来测量拉杆的频率,传感器的附加质量对频率影响显著。为研究加速度传感器不同吸附位置对拉杆一阶模态频率的影响,基于 1.1 节建立的有限元模型,分别在拉杆不同位置添加与加速度传感器质量(7.468 g)相同的质量点,质量点位置对一阶模态频率的影响如图 4 所示,可见传感器吸附位置越

靠近拉杆中间,拉杆的一阶模态频率降低会越明显,一阶模态频率最大降低 120 Hz 左右。随着预紧力的增加,拉杆一阶模态频率也随之增加。附加质量与拉杆质量比对拉杆一阶模态频率的影响如图 5 所示,图 5 中标注了实验所用的加速度传感器与拉杆质量比的位置,质量比小于 0.4 ,拉杆一阶模态频率随质量比增大而减小,质量比大于 0.4 ,拉杆一阶模态频率趋于平稳。

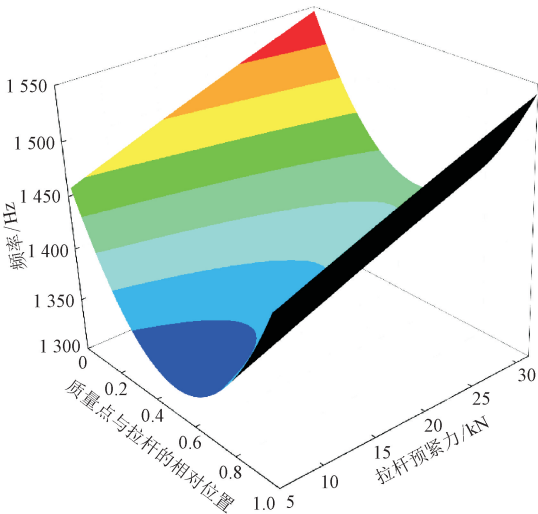


图 4 质量块对拉杆一阶模态频率影响
Fig. 4 Effect of mass position on the first-order modal frequency of tie-bolt

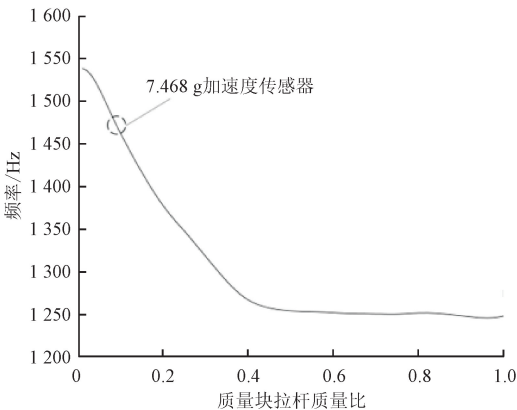


图 5 质量比对拉杆一阶模态频率影响
Fig. 5 Effect of mass ratio on the first-order modal frequency of tie rod

计算不同拉杆预紧力下附加质量对拉杆一阶模态频率的影响,结果如图 6 所示。不同预紧力下,考虑附加质量的拉杆一阶模态频率下降 40 Hz 左右。因此,实际计算模型需要考虑加速度传感器附加质量的影响,通过加速度计附加质量的方式,可以解耦被测拉杆与其他 11 根拉杆的模式频率。

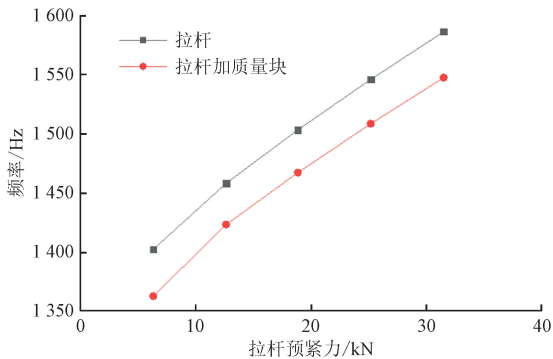


图 6 不同拉杆预紧力下质量块对一阶模态频率影响

Fig. 6 Effect of mass on first order modal frequencies under different tension bar preloads

2 拉杆转子模态实验

端面齿盘拉杆转子是燃气轮机的重要部件,拉杆预紧力不均破坏转子的对称性。对转子进行模态敲击实验,同时改变 12 根拉杆的预紧力,对不同预紧力下转子拉杆的振动特性进行测试分析。

转子通过 12 根周向拉杆将 4 个齿盘及 2 个轴头紧固,齿盘与轴头通过止口过盈连接,齿盘间通过弧形端面齿进行连接,弧形端面齿一对齿由凹齿与凸齿组成。图 7 展示了转子模态实验实物图,端面齿盘拉杆转子通过两条吊绳悬挂进行静态敲击实验,令吊绳方向为 Y 方向,垂直于纸面方向为 X 方向,将印制电路板 (PCB) 加速度传感器固定在拉杆上,加速度传感器测量敲击中产生的加速度信号,利用鲁汶测试系统(LMS)数据采集器将加速度信号进行采集,并传输到计算机中进行存储以及后处理。采用力锤进行敲击,敲击方向选择 X 方向,消除由于吊绳对转子产生的附加刚度影响。敲击时尽量敲击转子轮盘或轴头的同一位置,且敲击角度尽量保持锤击头与敲击平面垂直,以消除在敲击过程中导致的实验误差。响应点为拉杆上靠近第一级轮盘的位置,做到不同拉杆测量位置相同的响应点。

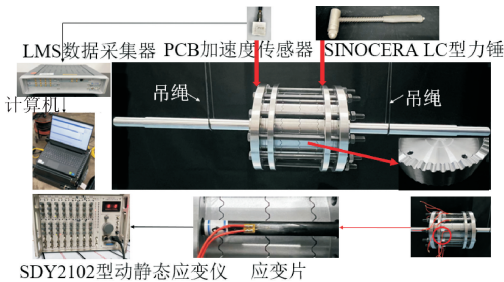


图 7 转子敲击实验实物图

Fig. 7 Diagram of rotor impact test

图 8 展示了转子模态实验流程,通过力矩扳手对 12 根拉杆施加预紧力。考虑实验过程中,交叉预紧拉杆存在拉杆预紧力分散度,为探究拉杆预紧失谐对拉杆振动特性的影响,对模型拉杆施加实验过程中 30 N·m 交叉预紧方案下拉杆的预紧力,采用应变片测得的 12 根拉杆的真实预紧力按照拉杆序号 1~12 依次为 19.01、17.91、17.44、15.87、11.62、16.81、20.89、14.61、14.14、16.18、14.29、19.16 kN。

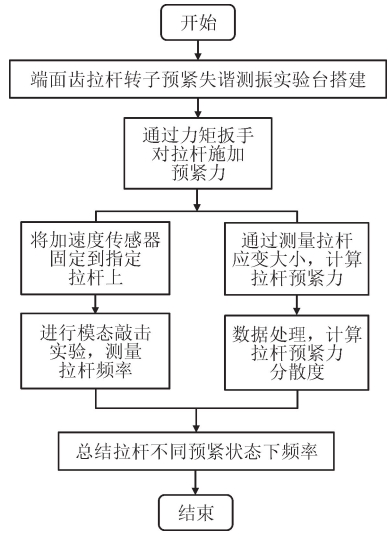


图 8 转子模态实验流程

Fig. 8 Flow chart of rotor pre tightening detuning vibration measurement test

3 实验及仿真结果分析

对于 30 N·m 预紧拉杆,其中一根拉杆的频响函数如图 9 所示。图 9 中出现很多峰值是由于敲击转子过程中其他拉杆的振动或者转子本身振动引起

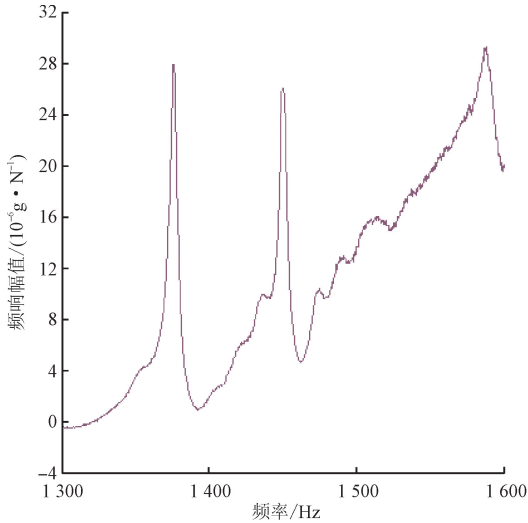


图 9 30 N·m 预紧状态拉杆频响函数

Fig. 10 Frequency response diagram of 30 N·m pre tensioned rod

的频率,实验数据通过 Testlab 软件处理,使用 Polymax 功能寻找频响函数的极点,实验结果与有限元仿真结果的相对误差为 0.27%。

图 10 展示了 30 N·m 交叉预紧拉杆,实验测得的每根拉杆的一阶模态频率,可以看出由于力矩扳手的预紧误差及不同位置螺栓之间产生的弹性交互作用等因素,交叉加载方案会存在一定程度的拉杆预紧不均即预紧失谐现象,预紧力最大拉杆与最小拉杆的一阶模态频率相差 70 Hz 左右。单根失谐拉杆的一阶模态应变能分布如图 11~12 所示。

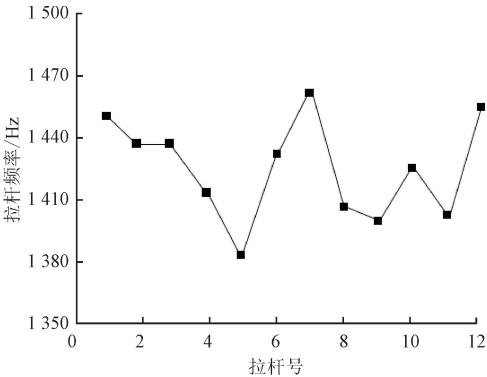


图 10 30 N·m 交叉预紧拉杆的一阶模态频率
Fig. 10 First modal frequency of 30 N·m cross pre-tightened tie rod

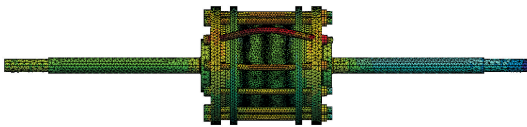


图 11 一阶振型及应变能分布
Fig. 11 First vibration mode and strain energy distribution

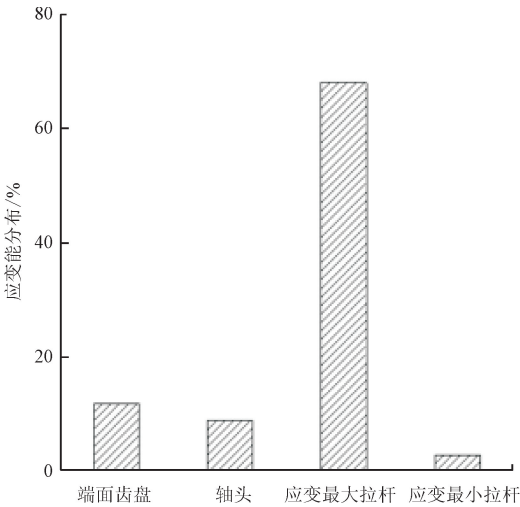


图 12 一阶振型下转子应变能占比
Fig. 12 Strain energy proportion of rotor in the first vibration mode

4 基于科尔莫哥罗夫-阿诺德网络 (KAN) 的拉杆预紧参数预测

4.1 样本数据构造

考虑模态实验中的加速度传感器附加质量,采用附加质量的预应力梁模型等效预紧拉杆,拉杆两端面刚度通过拉伸和扭转弹簧表征,如图 13 所示。样本数据的输入变量为拉杆的一阶模态频率及振幅,输出变量为拉杆两端的横向刚度、扭转刚度及拉杆预紧力。

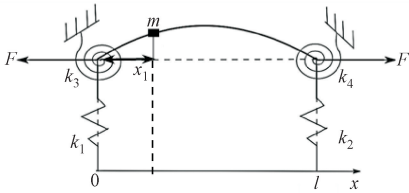


图 13 拉杆等效梁模型
Fig. 13 Equivalent beam model for rods

原始数据是在不同横向刚度 $k_{1,2}$ 、扭转刚度 $k_{3,4}$ 和拉杆预紧力 F 下,通过有限元计算提取出来的梁模型的一阶模态频率 f 及其振幅 φ 。本文共使用了 64 组数据,其中 51 组为训练集,13 组为预测集。其中某一组部分样本原始特征数据如表 4 所示,横向刚度为 $9 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$,扭转刚度为 $4 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}/(^{\circ})$,拉杆预紧力为 17 500 N。

表 4 部分样本原始特征数据

Table 4 Original feature data of partial samples	
f/Hz	φ/mm
1 005	0.036 0
1 010	0.036 5
1 015	0.037 0
1 020	0.037 5
1 025	0.038 0
1 030	0.038 5
1 035	0.039 1
1 040	0.039 6
1 045	0.040 2
1 050	0.040 8
1 055	0.041 5
1 060	0.042 2

为了提高模型性能和训练效率,对样本数据进行归一化处理。将数据转换到一个标准范围内,使数据在训练过程中更稳定,从而提高神经网络收敛性,本文使用最小-最大归一化将数据线性地缩放到 $[0,1]$ 之间,表达式如下

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中： x 为原始数据； $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为数据的最小值和最大值。经过归一化处理后的样本数据如表 5 所示， f' 、 φ' 分别为归一化后的一阶模态频率和振幅。

表 5 归一化处理后的样本特征数据

Table 5 Normalized sample feature data

f'	φ'
0	0.010 5
0.005 0	0.010 7
0.010 1	0.010 8
0.015 1	0.010 9
0.020 1	0.011 1
0.025 1	0.011 2
0.030 2	0.011 4
0.035 2	0.011 6
0.040 2	0.011 7
0.045 2	0.011 9
0.050 3	0.012 1
0.055 3	0.012 3

4.2 模型结构和算法设计

科尔莫哥罗夫-阿诺德网络是建立在柯尔莫果洛夫-阿诺尔德定理基础上的一种网络。具体而言，该网络适用于一个光滑函数： $f:[0,1]^n \rightarrow \mathbf{R}$

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} \Phi_q \left(\sum_{p=1}^n \varphi_{q,p}(x_p) \right) \quad (2)$$

式中： $\varphi_{q,p}:[0,1] \rightarrow \mathbf{R}$ ； $\Phi_q:\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ 。KAN 网络基于柯尔莫果洛夫-阿诺尔德定理构建，与传统多层感知机(MLP)不同，KAN 网络的非线性变换作用于基向量对，并将它们映射到更高维空间。表明高维函数可以通过多个一维函数的组合来表示。KAN 网络类似于两层神经网络，但不同之处在于它没有使用传统的线性组合，而是直接对输入特征进行非线性激活，而激活函数是可学习的。在多层 KAN 网络中，其结构如图 14 所示，其中激活层利用 B-spline 函数，并通过调整控制点的数量来拟合不同的函数形态^[27]。

4.3 损失函数和优化算法

在神经网络训练中，损失函数与优化算法共同作用于模型的学习与改进。损失函数用于量化预测结果与真实值之间的差异，为模型性能提供客观评价。通过最小化损失值，指导模型参数优化。本文

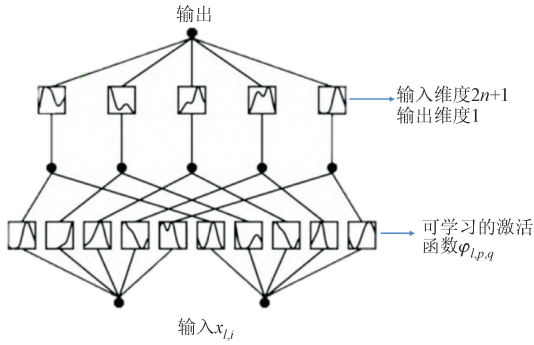


图 14 KAN 网络架构示意图

Fig. 14 Schematic diagram of KAN network architecture

采用均方误差(MSE)损失函数，其连续可导的性质适合梯度下降优化算法，且对大误差敏感，计算式为

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3)$$

式中： L 是损失； N 是样本数量； y_i 是第 i 个样本的真实值； $\hat{y}_i$ 是第 i 个样本的预测值。

优化算法通过调整神经网络参数来最小化损失函数，从而提升模型性能。本文采用自适应学习率优化算法 Adam，该算法结合了梯度下降与动量的思想，通过利用梯度的一阶矩(即动量)和二阶矩(即方差)，动态地调整每个参数的学习速率，其表达式为

$$\begin{cases} m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中： t 为迭代步数； m_t 为梯度一阶矩估计； β_1 为超参数，控制梯度的一阶矩，一般取为 0.9； v_t 为梯度二阶矩估计； β_2 为超参数，控制梯度的二阶矩，一般取为 0.999。

为了使得参数能正常更新，需要做如下的偏差修正

$$\begin{cases} \hat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \\ \hat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\hat{m}_t$ 和 $\hat{v}_t$ 即为修正的梯度一阶估计值和二阶估计值。Adam 算法对神经网络参数进行更新的公式如下

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \alpha \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t} + \epsilon} \quad (6)$$

式中： α 为神经网络模型的学习率； ϵ 为防止除零误差常数，取为 10^{-8} 。

在构建预测模型后,设置了一些超参数以进行模型训练。具体设置为:学习率为 0.001,迭代次数为 500,批次大小为 16。图 15 展示了 KAN 预测模型在训练过程中的损失函数变化情况。从图 15 中可以看出,KAN 模型在前 10 次迭代中损失函数迅速下降,后续训练中趋于较低且稳定的值。

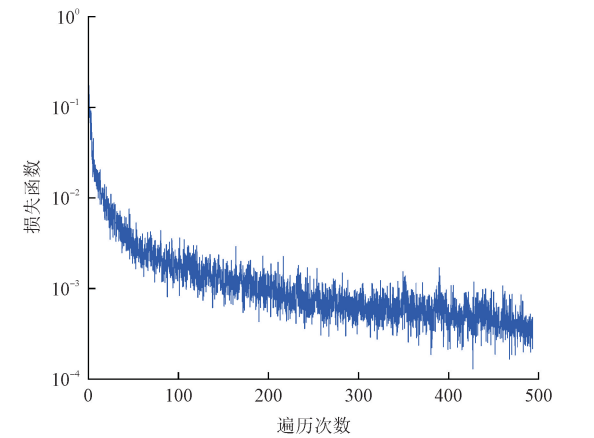


图 15 预测模型训练过程损失函数降低情况
Fig. 15 Loss function reduction during the training process of the prediction model

4.4 预测结果与分析

选取测试集的数据进行模型效果检验,验证模型预测的有效性。其中预紧力最小拉杆(11.62 kN)和预紧力最大拉杆(20.89 kN)的频响函数预测曲线如图 16 所示,预测值与真实值的频响函数曲线可以很好地拟合,一阶模态频率误差较小,在曲线上升与下降阶段预测值出现明显抖动,但对拉杆横向刚度和扭转刚度预测的影响较小,幅值最大相对误差为 4.2%。

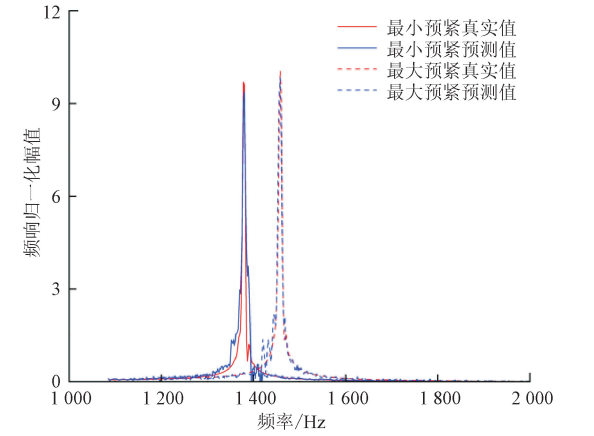


图 16 拉杆频响曲线预测图
Fig. 16 Prediction chart of the frequency response curve for tie rod

结合实验测得的拉杆频响函数曲线,基于预训练的网络模型,建立优化求解方程,通过粒子群优化算法,求得拉杆的接触刚度,所求结果如表 6 所示,随着拉杆预紧力的降低,横向刚度和扭转刚度会出现不同程度的弱化情况,符合工程实际。

表 6 不同预紧状态拉杆的接触刚度

Table 6 Contact stiffness of rod under different preload conditions				
拉杆号	频率/ Hz	预紧力/ kN	$k_1, k_3 /$ ($10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)	$k_2, k_4 /$ ($10^7 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot (^\circ)^{-1}$)
1	1 450	19.01	9.02	4.00
2	1 436	17.91	8.90	3.99
3	1 436	17.44	8.91	3.98
4	1 412	15.87	8.54	3.90
5	1 381	11.62	8.16	3.87
6	1 431	16.81	8.60	3.98
7	1 461	20.89	9.22	4.02
8	1 405	14.61	8.48	3.90
9	1 399	14.14	8.44	3.89
10	1 423	16.18	8.56	3.96
11	1 402	14.29	8.44	3.89
12	1 455	19.16	9.02	4.00

5 结 论

本文开展了端面齿盘拉杆转子预紧识别研究,得到的结论如下。

(1)开展端面齿盘拉杆转子有限元仿真,随着拉杆预紧力的增大,拉杆的一阶模态频率随之增大。传感器质量会使拉杆的一阶模态频率偏小,传感器吸附位置越靠近拉杆中间,对拉杆一阶模态频率的降低会越明显,最大为 8% 左右。在不同的拉杆预紧力下,附加质量使拉杆的一阶模态频率降低大约 2.7% 左右。开展了 3 种加载方案对螺栓预紧力分散度影响的有限元仿真分析和实验研究,结果表明,相比于顺序加载和交叉加载,正反序 2 轮加载能降低拉杆预紧力分散度 10% 左右。

(2)提出了附加质量的预应力梁单元模型,开展了不同边界条件下的动态响应计算,建立了 KAN 神经网络,开展了拉杆梁单元频响函数预测,结果表明,针对模态实验得到的最大预紧力和最小预紧力频响函数,KAN 均能准确预测谐振频率,振幅最大相对误差为 4.2%。

(3)基于KAN网络,开展了预应力梁单元的边界支撑刚度识别,结果表明,随着预紧力的增加,识别得到的横向刚度和扭振刚度均增加,预测的频响函数和实验结果吻合较好,为实际拉杆转子预紧失谐提供了一种实验分析方法。

参考文献:

- [1] 黄锐, 邓博. 国内外燃气轮机转子结构特点及9FA型燃机的模态分析[J]. 中国电力教育, 2006(S3): 60-64.
HUANG Rui, DENG Bo. Structural characteristics of gas turbine rotors at home and abroad modal analysis of 9FA gas turbine [J]. China Electric Power Education, 2006(S3): 60-64.
- [2] 张颖. GE9FA重型燃气轮机建模与控制研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [3] 袁奇, 高进, 李浦, 等. 重型燃气轮机转子结构及动力学特性研究综述[J]. 热力透平, 2013, 42(4): 294-301.
YUAN Qi, GAO Jin, LI Pu, et al. A review for structure and dynamic characteristics of heavy-duty gas turbine rotor [J]. Thermal Turbine, 2013, 42(4): 294-301.
- [4] 刘昕, 袁奇, 欧文豪. 燃气轮机周向拉杆转子拉杆应力分析和改进设计[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 104-110.
LIU Xin, YUAN Qi, OU Wenhao. Strength analysis and design improvement of the tie rods in circumferentially distributed rod fastening rotors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 104-110.
- [5] 李玥潇, 王奇, 杨树华, 等. 预紧力失谐对拉杆转子稳态响应的影响规律研究[J]. 风机技术, 2023, 65(6): 36-40.
LI Yue Xiao, WANG Qi, YANG Shuhua, et al. Influences of pre-tightening detuning on steady-state response of tie-rod rotor [J]. Chinese Journal of Turbo-machinery, 2023, 65(6): 36-40.
- [6] 尹泽勇, 胡柏安, 吴建国, 等. 端齿连接转子轴向预紧力的确定[J]. 航空动力学报, 1996, 11(4): 355-357.
YIN Zeyong, HU Baian, WU Jianguo, et al. Determination of axial preloads of rotors with curvic couplings [J]. Journal of Aerospace Power, 1996, 11(4): 355-357.
- [7] 祝梦洁, 张锁怀, 丁鑫. 分布式拉杆转子预紧失谐对固有频率的影响[J]. 机床与液压, 2020, 48(13): 17-21.
ZHU Mengjie, ZHANG Suohuai, DING Xin. Effects of pre-tightening detuning on the natural frequency of distributed tie-rod rotor [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(13): 17-21.
- [8] 毕红霞. 含预紧力失谐的叶盘结构振动局部化问题研究[J]. 机械设计, 2013, 30(4): 74-78.
BI Hongxia. Vibration response localization of bladed disk with pretightening mistuning [J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(4): 74-78.
- [9] 袁淑霞, 张优云, 蒋翔俊, 等. 拉杆失谐模型及其对端面弧齿应力分布的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(5): 64-69.
YUAN Shuxia, ZHANG Youyun, JIANG Xiangjun, et al. Analysis of bolt preload mistuned model and its impact on stress distribution of curvic couplings [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(5): 64-69.
- [10] 苏永雷, 王艾伦, 曾海楠. 拉杆松弛导致预紧失谐组合转子性能退化研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(20): 21-26.
SU Yonglei, WANG Ailun, ZENG Hainan. Performance degradation of mistuned combined rotor considering rod relaxation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(20): 21-26.
- [11] 王奇, 贾睿东, 杨树华, 等. 拉杆转子预紧力建模及其诱发振动局部化研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 3020-3030.
WANG Qi, JIA Ruidong, YANG Shuhua, et al. Modelling of pre-tightening force in rod-fastened rotors and it induced vibration localization [J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 3020-3030.
- [12] MEYER J J, ADAMS D E. Theoretical and experimental evidence for using impact modulation to assess bolted joints [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 81(1): 103-117.
- [13] AMERINI F, MEO M. Structural health monitoring of bolted joints using linear and nonlinear acoustic/ultrasound methods [J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(6): 659-672.
- [14] MILANESE A, MARZOCCA P, NICHOLS J M, et al. Modeling and detection of joint loosening using output-only broad-band vibration data [J]. Structural Health Monitoring, 2008, 7(4): 309-328.
- [15] PAEZ T L, BRANSTETTER L J, GREGORY D L. Modal randomness induced by boundary conditions [C]//Aerospace Technology Conference and Exposition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1985: 851930.
- [16] PAN Wujia, LI Xianmu, SUN Lele, et al. General prediction model of residual pretightening force of bolt

- group with one-step and multi-step pretightening and analysis of influencing factors from the perspective of elastic interaction [J]. *Engineering Computations*, 2023, 40(4): 921-956.
- [17] GUO Keke, ZHAO Yongfeng, WANG Wenlian. A passive and wireless smart washer for monitoring bolt pretightening force [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(3): 035903.
- [18] LIU Enxiao, LIU Yongmeng, TAN Jiubin. Pretightening stress measurement method of aero-engine fastening components based on acoustic time difference separation of the coupling layers [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 204: 110811.
- [19] WANG Tiantian, TIAN Longzhen, YANG Jinsong, et al. A quantitative monitoring method for the pretightening state of bolts based on nonlinear Lamb waves and incremental learning [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2024, 39(8): 2150-2169.
- [20] WANG Tao, TAN Bohai, LU Guangtao, et al. Bolt pretightening force measurement based on strain distribution of bolt head surface [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 33(4): 04020034.
- [21] GUO Dengqi, ZHOU Xianqi, CHEN Zili, et al. Analysis on influences of fastening bolt pretightening force on dynamic behaviors of structures [J]. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2021, 14(2): 1-7.
- [22] LIU Jianhua, OUYANG Huajiang, FENG Zhiqiang, et al. Study on self-loosening of bolted joints excited by dynamic axial load [J]. *Tribology International*, 2017, 115: 432-451.
- [23] WANG Furui, HUO Linsheng, SONG Gangbing. A piezoelectric active sensing method for quantitative monitoring of bolt loosening using energy dissipation caused by tangential damping based on the fractal contact theory [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(1): 015023.
- [24] XU Chao, WU Guannan, DU Fei, et al. A modified time reversal method for guided wave based bolt loosening monitoring in a lap joint [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, 38(4): 85.
- [25] JIANG Jinwei, HO S C M, TIPPITT T, et al. Feasibility study of a touch-enabled active sensing approach to inspecting subsea bolted connections using piezoceramic transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(8): 085038.
- [26] YANG Zhuodong, HUO Linsheng. Bolt preload monitoring based on percussion sound signal and convolutional neural network (CNN) [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2022, 37(4): 464-481.
- [27] 常绍波, 陈泽伟, 余建庚, 等. 基于 KAN 与动态上采样器的流场预测模型 [J]. *计算物理*, 2024, 41(6): 804-813.
- CHANG Shaobo, CHEN Zewei, YU Jiangeng, et al. Flow field prediction model based on KAN and dynamic upsample [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2024, 41(6): 804-813.

(编辑 武红江)