

汽轮发电机组轴系动力学灵敏度分析及响应预测

李德昊¹, 陈九如², 冀大伟², 陈钢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. 上海电气电站集团, 310016, 上海)

摘要: 针对汽轮机组轴系动态响应特性的快速预测问题,通过有限元建模与混合卷积神经网络(HCNet)相结合的方法,开展了轴系动力学响应的灵敏度分析和预测。首先,基于虚拟材料法建立了考虑联轴器不对中刚度特性的汽轮机组轴系有限元模型;其次,考虑联轴器参数不确定性,针对联轴器转动惯量、质量、平行不对中量与角度不对中量 4 个参数,采用拉丁超立方采样方法,计算了不同参数组合下的轴系动力学响应并开展了 Sobol 灵敏度分析;最后,提出了一种新型 HCNet 模型,实现了轴系频响特性的高效预测。研究结果表明:振动响应峰值对角度不对中更加敏感,其在添加一阶、二阶不平衡量下的一阶灵敏度指数与总灵敏度指数分别为 0.50、0.48 与 0.60、0.65,均显著高于其他参数。新型 HCNet 模型预测的轴系频响特性,其精度显著优于卷积神经网络、残差神经网络和 Transformer 这 3 种经典模型预测的轴系频响特性。该研究可为汽轮发电机组轴系动力学响应的快速预测与故障诊断提供理论支撑和分析方法。

关键词: 汽轮发电机组轴系;有限元建模;灵敏度分析;混合卷积神经网络

中图分类号: TK14 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604016 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0199-11

Dynamic Sensitivity Analysis and Response Prediction of Turbine Generator Shaft System

LI Dehao¹, CHEN Jiuru², JI Dawei², CHEN Gang², LI Pu¹, YUAN Qi¹

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

2. Shanghai Electric Power Generation Group, Shanghai 310016, China)

Abstract: In order to address the issue of rapidly predicting the dynamic response characteristics of turbine generator shaft systems, sensitivity analysis and prediction of shaft system dynamic responses were conducted through a method combining finite element modeling and a hybrid convolutional neural network (HCNet). First, a finite element model of the turbine generator shaft system was established based on the virtual material method, taking into account the misalignment stiffness characteristics of the coupling. Second, considering the uncertainty of coupling parameters, the Latin hypercube sampling method was applied for four parameters—coupling moment of inertia, mass, parallel misalignment, and angular misalignment—to compute the shaft system dynamic response under different parameter combinations, and Sobol sensitivity analysis was performed. Finally, a novel HCNet model was proposed, achieving efficient

收稿日期: 2025-09-03。 作者简介: 李德昊(2001—),男,硕士生;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: 2025-12-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251229.0841.002>

prediction of the shaft system frequency response characteristics. The results indicate that the peak vibration response is more sensitive to angular misalignment. Its first-order sensitivity index and total sensitivity index under the addition of first-order and second-order unbalanced masses are 0.50, 0.48, and 0.60, 0.65, respectively, both significantly higher than those of other parameters. The shaft system frequency response characteristics predicted by the new HCNet model are significantly more accurate than those predicted by three classical neural network models: convolutional neural networks, residual neural networks, and Transformers. This research provides theoretical support and analytical methods for the rapid prediction and fault diagnosis of the shaft system dynamic response in turbine generator sets.

Keywords: steam turbine generator unit shafting; finite element modeling; sensitivity analysis; hybrid convolutional neural network

汽轮发电机组轴系振动是影响机组安全稳定运行的关键问题之一。剧烈振动不仅可能引发轴系断裂,甚至导致机毁人亡的重大事故,造成巨大的经济损失。近年来,随着电力工业的快速发展,汽轮发电机组的单机容量不断增大,轴系结构日趋复杂,呈现出柔性、多支承、大跨距及高功率密度等典型特征。这一发展趋势使得机组振动诱因日益增多,且激振能量阈值降低,振动问题愈发突出。

在汽轮发电机组等大型旋转机械中,转子系统通常通过联轴器实现动力传递。然而,在实际运行中,由于安装误差、基础沉降、热变形^[1-2]等因素的影响,系统极易出现平行不对中、偏角不对中以及复合型不对中等故障形式。这类不对中故障会显著改变转子的受力状态与振动特性^[3-6],进而影响整个轴系的稳定运行。膜片联轴器作为旋转机械传动系统的核心部件,其动力学特性尤为关键。该类型联轴器凭借金属膜片的弹性变形能力,可有效补偿轴系间的轴向、角向和径向不对中误差,具有传递扭矩大、使用寿命长、无需润滑等显著优势,因而被广泛应用于燃气轮机、航空发动机及船舶推进系统等重要领域^[7-8]。然而,在实际运行中,由于制造误差、安装偏差、热变形等因素,膜片联轴器常面临不对中问题,进而引发轴系振动加剧、部件疲劳损伤甚至系统失效。据统计,旋转机械故障中超过60%与不对中问题相关^[9-10]。

在不对中故障的建模与分析方法方面,诸多研究学者已取得一系列重要进展。陈果等^[11]提出了基于刚度等效的联轴器不对中统一模型,通过理论推导与实验验证,揭示了平行不对中和偏角不对中故障中,典型的二倍频振动现象。孟凡刚等^[12]针对重型燃气轮机转子系统,建立了精细化的有限元模型,系统分析了不同类型不对中条件下的转子动态

响应,其结果表明,角度不对中对系统振动的影响尤为显著。于清文等^[13]构建了不对中转子的动力学相似模型,通过对比原型与模化系统的轴心轨迹与频域响应,证实了相似模型在复现不对中故障特征方面的有效性。董超等^[14]则聚焦于燃机动力涡轮转子中的套齿联轴器不对中问题,分析了故障对整机振动特性的影响,进一步验证了不对中故障所引发的倍频成分特征。

近年来,人工智能与深度学习技术的快速发展为动力设备智能诊断提供了新的技术路径^[15-16]。其中,基于神经网络的复杂多物理场快速预测方法已成为研究热点。在旋转机械动力学分析领域,虽然传统有限元方法具有较高的计算精度,但其庞大的计算成本严重制约了其在工程中的实际应用。为突破这一瓶颈,各类数据驱动模型被广泛应用于振动特性预测。卷积神经网络(CNN)凭借其局部感受野特性,在频响曲线空间特征提取方面表现出色。Qian等^[17]研究了1D CNN在单跨转子轴承系统中的应用,通过实验验证了CNN在识别轴裂纹故障中的有效性。基于自注意力机制的Transformer模型能够有效建立全局依赖关系。唐杰等^[18]将时序卷积网络与Transformer神经网络相结合,有效提升了航空管路无扩口接头退化预测的精度和效率。具有残差连接特性的残差神经网络(ResNet)架构通过缓解梯度消失问题,在振动预测中展现出优势。Zhang等^[19]提出了一种结合ResNet和迁移学习的模型,用于旋转机械剩余寿命的预测,该模型通过跳过连接解决了梯度消失问题,提高了模型性能。

然而,现有研究多集中于转子本身的响应预测,针对汽轮发电机组整体轴系,在考虑膜片联轴器等弹性元件的质量、转动惯量及不对中等参数不确定性的条件下,进行振动响应的快速预测的动力学分

析尚不充分。本文针对汽轮机发电机组轴系动力学特性展开了系统研究。首先,基于应变能等效原理,采用虚拟材料法建立了汽轮发电机组轴系有限元模型,在仅考虑弯曲振型下,将三维联轴器等效为离散梁单元模型。通过对比虚拟材料法与集中质量法计算得到的振动响应曲线,验证所建模型与计算结果的可靠性。其次,基于汽轮发电机组轴系有限元模型,采用拉丁超立方采样方法,生成128组参数组合,通过Sobol灵敏度分析揭示角度不对中量对振动响应的主导作用。最后,为克服传统有限元方法计算时间长,效率低,难以满足实时评估需求的问题,本文提出了一种新型混合卷积神经网络(HCNet)架构,实现了考虑联轴器不确定性参数的汽轮发电机组轴系动力学响应曲线的高效评估。该方法融合有限元仿真与深度学习技术,为含参数不确定性的旋转机械振动分析提供了新的解决方案。

1 轴系有限元模型分析

1.1 轴系有限元建模

本文采用离散梁单元模型对汽轮发电机组轴系进行建模,该方法能有效表征转子的弯曲振动特性,是旋转机械动力学分析的标准方法。图1为汽轮发电机组轴系离散梁单元模型。

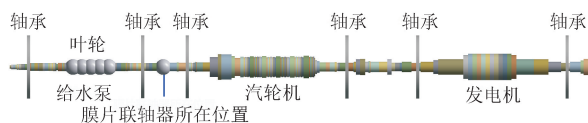
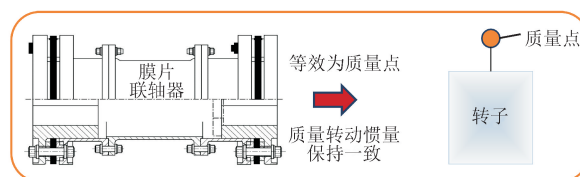


图1 汽轮发电机组轴系离散梁单元模型

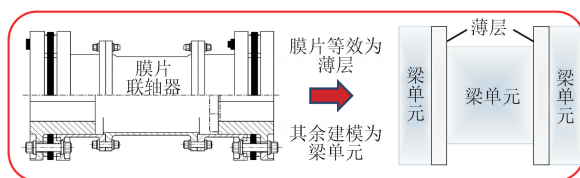
Fig.1 Discrete beam element model of turbine generator shaft system

轴系动力学模型的准确性,取决于联轴器等关键连接部件的等效建模方式。常见的联轴器有限元建模方法主要有两种:集中质量法与虚拟材料法,如图2所示。集中质量法是将联轴器等效为一个与转子相连的集中质量点,其参数(质量、转动惯量)需与实际部件保持一致。该方法建模简便,但无法反映联轴器的柔性及其对系统耦合动力学的影响。虚拟材料法是将柔性膜片组件等效为一个可参数化的虚拟薄层梁单元,并通过改变其弹性模量来模拟膜片的刚度特性;联轴器的其余刚性部分(如轮毂、法兰)则采用与转子一致的标准梁单元建模^[20-22]。该方法的优势在于能更真实地反映柔性联轴器的物理本

质及其对两侧转子的耦合作用。尤其适用于膜片联轴器这类通过金属膜片传递扭矩并补偿不对中的柔性联轴器^[23]。为准确研究膜片联轴器对轴系动力学的影响,本文对上述两种方法进行了对比分析,以选定适用于后续灵敏度分析的基准模型。



(a)集中质量法



(b)虚拟材料法

图2 联轴器建模方法对比

Fig.2 Comparison of coupling modeling methods

1.2 有限元模型验证

本文采用的虚拟材料法的核心理论基础是应变能等效原理与梁的弯曲理论。在材料力学中,构件的弯曲刚度由弹性模量 E 和截面惯性矩 I 共同决定,记为 EI 。在仅考虑弯曲振型的前提下,一段长度为 L 的梁单元,在弯矩 M 作用下的应变能 V_e 可表达为

$$V_e = \frac{M^2 L}{2EI} \quad (1)$$

式(1)表明:在几何尺寸长度 L 与截面惯性 I 确定的前提下,调节材料的弹性模量 E 即可改变构件的等效弯曲刚度 EI 。基于这一原理,本文将膜片联轴器中的柔性膜片组件等效为一个虚拟的薄层梁单元,如图3所示。通过改变虚拟薄层单元的弹性模量 E ,即可有效模拟因平行不对中和角度不对中引起的刚度特性变化^[24-26]。

基于上述方法,针对轴系中不同型式的联轴器,采用了不同的建模策略:汽轮机与给水泵之间的膜片联轴器采用虚拟材料法进行等效,即通过修正弹性模量模拟联轴器刚度特性;汽轮机与发电机之间的联轴器为刚性联轴器,其在正常对中状态下刚度损失极小,通过和转子相同的梁单元进行等效。膜片联轴器的主要参数如表1所示。

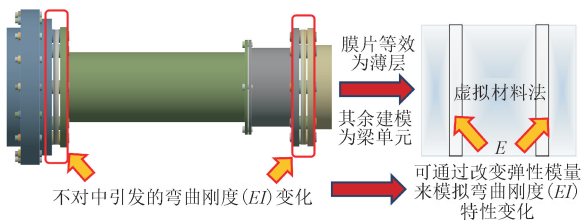


图 3 虚拟材料法模拟刚度特性变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stiffness property variation simulated by virtual material method

表 1 膜片联轴器主要参数

Table 1 Main parameters of diaphragm coupling

参数	数值
质量/kg	127.50
转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	7.50
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 930.00
弹性模量/Pa	2.00×10^{11}

为验证虚拟材料法的可靠性,依据 API 617 标准,本研究通过施加一阶和二阶不平衡量对汽轮发电机组轴系进行不平衡响应有限元仿真计算。汇总两种建模方法对应的振动响应曲线如图 4 所示,对比分析表明:集中质量法和虚拟材料法计算得到的不平衡响应曲线整体趋势一致,且两种方法识别出的汽轮机一阶临界转速($219.87 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$)和二阶临界转速($518.27 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$)吻合良好。

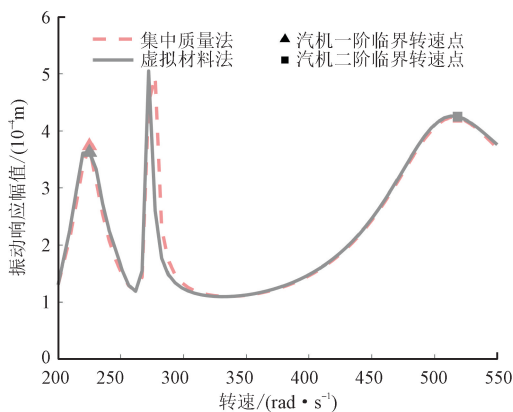


图 4 两种联轴器等效建模结果对比

Fig. 4 Comparison of equivalent modeling results for the two types of couplings

图 5 与图 6 分别给出了这两个临界转速下对应的归一化振型。上述一致性验证了虚拟材料法在计算临界转速与振动响应上的可靠性。然而,相较于集中质量法,虚拟材料法在有限元建模中不仅能便

捷地兼顾质量与刚度分布,还可更真实地反映联轴器两侧轴系的动力学耦合效应。因此,后续均采用该方法进行灵敏度分析。

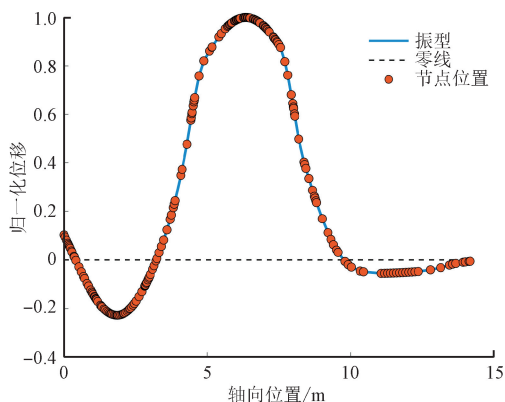


图 5 轴系机组汽轮机一阶振型曲线

Fig. 5 First-order vibration mode shape curve of the turbine in the shaft system unit

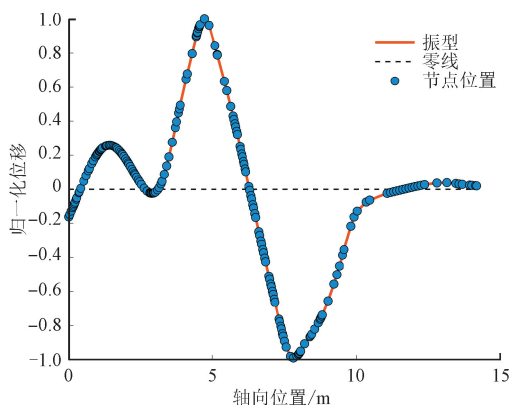


图 6 轴系机组汽轮机二阶振型曲线

Fig. 6 Second-order vibration mode shape curve of the turbine in the shaft system unit

2 考虑膜片联轴器的汽轮机轴系机组敏感性分析

影响膜片联轴器工作状态的不确定性因素主要包括:几何尺寸、材料属性、工作载荷和对中状态等。根据其工作特点,选取膜片联轴器的质量 m_c 、转动惯量 I_c 、平行不对中量 x_c 及角度不对中量 θ_c 。这 4 类随机因素作为输入参数,设定这些参数均服从正态分布,变异系数 ρ 为 0.01。4 种输入参数的样本均值如下:转动惯量 I_c 为 $7.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、质量 m_c 为 127.5 kg 、平行不对中量 x_c 为 0 mm 、角度不对中量 θ_c 为 0° 。

根据采样标准,按照各输入参数的概率密度随

机生成 1×10^5 组备选样本集。同时,通过拉丁超立方采样法(LHS),在给定的区间内,对各个参数采样

128 组^[27]数据,作为初始样本集,样本和 LHS 采样点的分布见图 7 所示。

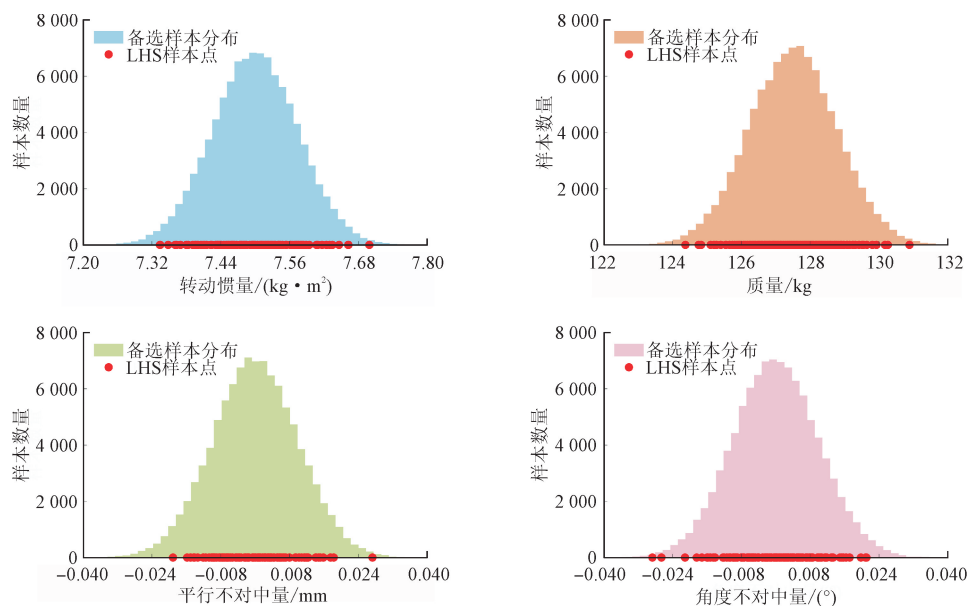


图7 膜片联轴器4种输入参数的样本和LHS采样点分布

Fig. 7 Samples and LHS sampling point distribution of four input parameters for diaphragm couplings

初始样本采集完成后,对汽轮发电机组轴系开展不平衡响应批处理计算。将初始样本集中的数据作为4种不确定性输入参数代入汽轮发电机组轴系有限元模型,其中,平行不对中与角度不对中由于无法直接输入,因此被转换为对应的等效弹性模量参数后再代入模型进行计算,并提取汽轮机转子在临界转速处的响应峰值。

采用Sobol灵敏度分析法对上述膜片联轴器的4种不确定性输入参数进行了全局灵敏度分析,基于方差分解理论,Sobol方法通过以下公式量化参数敏感性。

一阶灵敏度指数(主效应)表达式为

$$S_i = \frac{V_i}{V} = \frac{\text{Var}[E(Y | X_i)]}{\text{Var}(Y)} \quad (2)$$

总灵敏度指数(包含交互效应)表达式为

$$S_{Ti} = 1 - \frac{\text{Var}[E(Y | X_{\sim i})]}{\text{Var}(Y)} \quad (3)$$

式中: S_i 为一阶灵敏度指数; X_i 为第 i ($i = 1, 2, 3, 4$) 个输入参数; V_i 为第 i 个输入引起的输出方差; V 为总方差; $X_{\sim i}$ 表示除 X_i 外的所有参数; S_{Ti} 为总灵敏度指数; Y 为输出变量; $\text{Var}(\cdot)$ 表示方差; $E(\cdot | \cdot)$ 表示条件期望。4种不确定性输入参数的分布严格遵循正态分布采样标准(变异系数 $\rho = 0.01$)。

图8~图11展示了膜片联轴器关于4种不确

定性输入参数的一阶灵敏度指数及总灵敏度指数的分布情况,在4种不确定性输入参数中,角度不对中对轴系机组的影响最明显,其次是平行不对中。通过Sobol全局灵敏度分析对4种不确定性输入参数的影响评估表明:各参数对轴系动力学响应的影响程度存在显著差异,在添加一阶不平衡量的情况下,角度不对中量 θ_c 的一阶灵敏度指数为0.50,总灵敏度指数为0.60,均显著高于其他参数。平行不对中量次之,其一阶灵敏度指数为0.25,总灵敏度指数为0.3,而转动惯量 I_c 和质量 m_c 的影响相对较小。

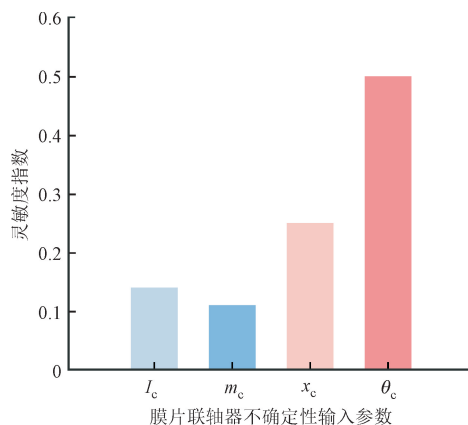


图8 一阶临界转速的一阶灵敏度指数

Fig. 8 First-order sensitivity index of first-order critical speed

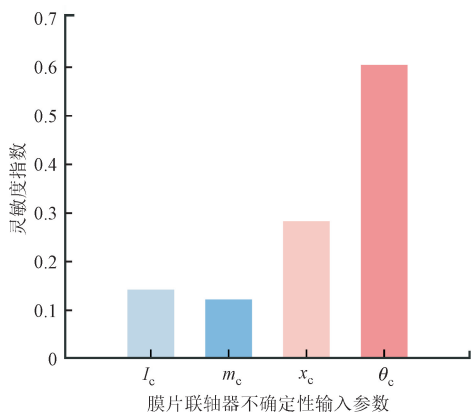


图 9 一阶临界转速的总灵敏度指数

Fig. 9 Overall sensitivity index of first-order critical speed

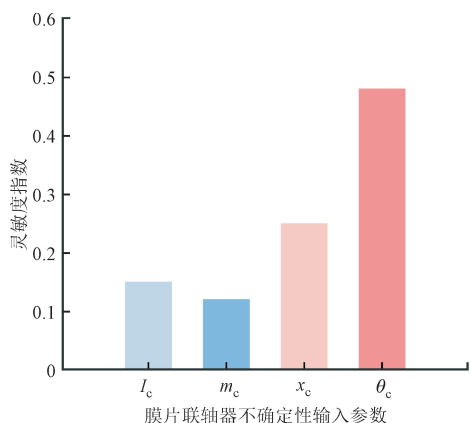


图 10 二阶临界转速的一阶灵敏度指数

Fig. 10 First-order sensitivity index of second-order critical speed

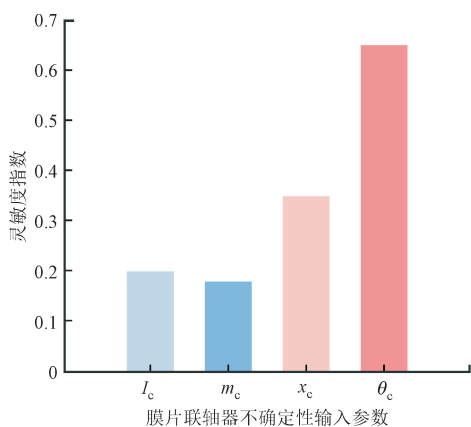


图 11 二阶临界转速的总灵敏度指数

Fig. 11 Overall sensitivity index of second-order critical speed

通过对比一阶振动响应和二阶振动响应的灵敏度分析发现:一阶临界转速的峰值灵敏度呈现显著

的方向性特征,其中角度不对中量 θ_c 对一阶临界转速峰值的影响最大,其总灵敏度指数明显高于其他参数,这表明汽轮机组轴系系统一阶临界转速对轴线角向偏差具有极强的耦合特性。而二阶临界转速的总灵敏度指数分布则呈现差异化趋势:角度不对中的一阶灵敏度指数相对一阶稍有下降,但其贡献度仍保持首要地位;平行不对中、质量与转动惯量的敏感度略微提升,反映出高阶模态对径向偏移及结构惯量耦合效应的逐步显现。该现象可解释为:低阶振型以整体偏转为主,对角度不对中引发的力矩不平衡更为敏感;而随着模态阶次升高,轴系局部弯曲变形加剧,使得平行偏移及质量分布的影响权重得以提升。

3 基于 HCNet 的轴系机组振动响应预测模型

基于有限元的 Sobol 分析需消耗大量计算资源,难以满足实时评估需求。为此,本节提出混合卷积神经网络模型,利用有限元计算得到的 4 种不确定性输入参数-响应数据集,并开展振动响应曲线预测研究,4 种不确定性输入参数-响应数据集如图 12 所示。

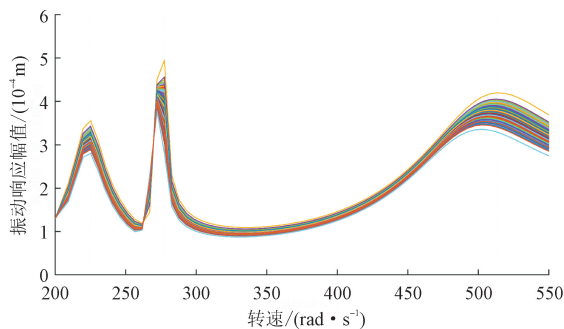


图 12 膜片联轴器不确定性输入参数响应曲线

Fig. 12 Response curves of diaphragm coupling to uncertain input parameters

3.1 模型结构和算法设计

图 13 展示了 HCNet 的混合卷积网络结构,该模型包含输入层、特征扩展层、混合卷积层、瓶颈层、上采样路径以及输出层。其中,输入层包括 4 种不确定性参数,它们共同决定了振动响应的动态特性与系统行为,是影响预测准确性的关键因素。为消除量纲差异并加速网络训练收敛,4 种不确定性输入参数在送入 HCNet 前均进行归一化处理,将其线性缩放至 $[0,1]$ 区间。归一化公式为

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

式中: X_{norm} 为不确定输入参数归一化后的值; X 为不确定性输入参数; X_{max} 和 X_{min} 分别为不确定性输入参数在整个训练数据集中的最大值和最小值。

特征扩展层输入形式为 $[B, 4]$ 的张量, 其中 B 是批处理大小, 通过 2 个全连接层将 4 维特征扩展到 256 维, 再将扩展后的特征重塑为 $[B, 1, 256]$, 以便进行一维卷积。混合卷积层由 4 个卷积模块级联组成, 其中第 1 个模块采用常规卷积, 后 3 个模块采用深度可分离卷积结构。每个模块包含卷积、批归一化、ReLU 激活和步长为 2 的最大池化操作, 在提取多尺度特征的同时逐步压缩序列长度、扩大感受野。瓶颈层由两个 1×1 卷积块构成, 主要用于高层特征的通道变换与信息整合, 不进行空间维度的操作。上采样路径由 4 个上采样模块组成, 每个模块使用线性插值上采样配合 3×1 卷积进行局部特征细化, 逐步恢复时间分辨率至目标长度 400; 输出层采用 1×1 卷积与 Sigmoid 激活函数, 最终输出形状为 $[B, 400]$ 的振动响应预测曲线。

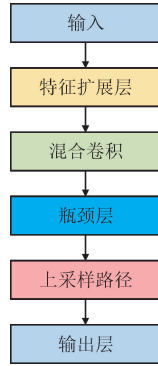


图 13 HCNet 模型结构

Fig. 13 HCNet model structure

由于神经网络模型的学习结果需要通过误差评价指标进行衡量, 我们首先通过均方误差 E_{MSE} 、均方根误差 E_{RMSE} 、平均绝对误差 E_{MAE} 、决定系数 R^2 以及一致性相关系数 E_{CCC} 对测试集所有结果进行评价。其中, 一致性相关系数 E_{CCC} 表达式为

$$E_{\text{CCC}} = 1 - \frac{1/n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sigma_y^2 + \sigma_{\hat{y}}^2 + (\mu_y - \mu_{\hat{y}})^2} \quad (5)$$

式中: n 为样本数; y_i 为第 i 个样本的真实值; $\hat{y}_i$ 为第 i 个样本的预测值; σ_y 为真实值的标准差; $\sigma_{\hat{y}}$ 为预测值的标准差; μ_y 为真实值的均差; $\mu_{\hat{y}}$ 为预测值的均差。

3.2 损失函数和优化算法

在神经网络的训练过程中, 损失函数与优化算

法共同作用于模型的学习与优化过程。损失函数作为一种量化评估工具, 用于衡量神经网络预测输出与真实值之间的差异, 其核心作用在于为模型参数优化提供明确的梯度指导。本文采用均方误差 E_{MSE} 作为损失函数。该函数具有良好的数学性质: 不仅连续可导, 适用于基于梯度的优化算法, 而且对较大预测误差具有较高敏感性, 从而能够有效引导模型重点关注误差较大的样本, 加速收敛并提升泛化能力^[28-29]。

优化算法负责通过调整神经网络的参数, 使得损失函数的值最小化。采用自适应学习率优化算法 Adam 来更新神经网络的参数。

构建预测模型后, 设置超参数进行模型训练。具体为: 学习率为 0.001, 迭代次数为 500, 批处理大小为 20。为了验证模型的可靠性和优越性, 分别对比 HCNet、Transformer、CNN 和 ResNet 这 4 种预测模型损失函数的变化趋势, 其结果如图 14 所示。图中, 横轴表示迭代次数 (即训练轮数); 纵轴表示损失函数值, 并采用对数刻度。通过对总体趋势分析可知: 所有模型的损失函数值随着遍历次数的增加而逐渐减小, 这表明模型在训练过程中均逐渐收敛。其中, HCNet 的损失函数值在整个训练过程中都显著低于其他模型。通过对收敛速度分析可知, HCNet 收敛速度最快, 损失函数值在早期阶段迅速下降, 并稳定在较低的损失值上。Transformer、CNN 收敛速度相对较快, 但不如 HCNet, 虽然它们的损失函数值在训练后期趋于稳定, 但仍然略高于 HCNet。ResNet 收敛速度较慢, 尤其在训练初期, 损失函数值下降较慢, 尽管最终也趋于稳定, 但损失值较高。通过对最终损失值分析可知: HCNet 最终损失值最低, 表明其在训练结束后具有最好的性能;

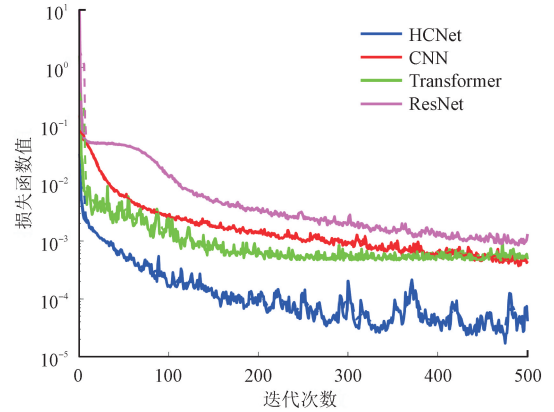


图 14 预测模型训练过程损失函数的变化

Fig. 14 Changes in loss function during prediction model training process

Transformer 和 CNN 最终损失值次之,但仍优于 ResNet;而 ResNet 最终损失值最高,表明其在训练结束后性能相对较差。上述结果证明,HCNet 在收敛速度、精度和鲁棒性方面均显著优于现有主流神经网络模型,是复杂汽轮发电机组轴系振动响应预测任务的最优解。

4 预测结果与分析

基于轴系机组的有限元模拟结果,采用添加二阶不平衡量的振动响应数据构建数据集。选取数据集的 20% 作为测试集,80% 作为训练集,数据样本总量为 128。

4.1 预测指标量化结果

为了验证该模型对于汽轮发电机组轴系振动响应曲线的预测效果,对各项指标的测试结果进行评价。图 15 以雷达图形式直观对比了各模型在不同评价指标上的表现。由图可知,HCNet 在绝大多数指标上均显著优于对比模型,展现出优异的预测精度与鲁棒性。具体而言,HCNet 的 E_{MAE} 为 0.003 7 m,明显低于其他模型,这表明其预测值与真实值之间的绝对偏差最小,能够更精确地捕捉数据中的细微变化;HCNet 的 E_{MSE} 和 E_{RMSE} 分别为 $3.317 6 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 和 0.005 7 m,进一步说明了 HCNet 在控制误差平方和及降低预测偏差方面具有显著优势,尤其适用于复杂数据集的建模需求。此外,HCNet 的决定系数 R^2 高达 0.999 4,接近理想值 1.000 0,反映出其预测结果与真实值之间具有极强的线性相关性;HCNet 的一致性相关系数 E_{CCC} 为 0.999 7,也充分体现了该模型在保持预测值与真实值间一致性方面的卓越性能,尤其在对高相关性数据的处理中表现出良好的可靠性。综上所述,HCNet 在误差控制和

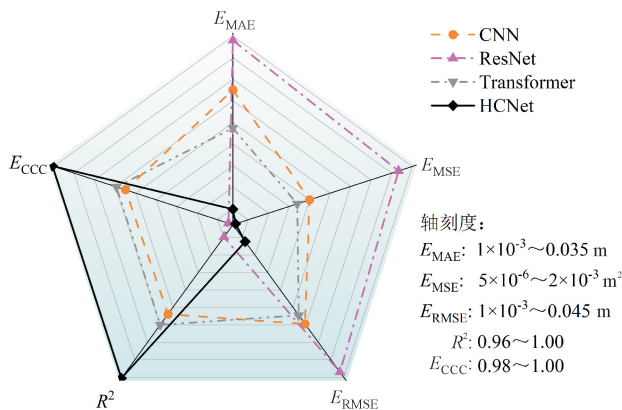


图 15 模型训练结果的误差评价

Fig. 15 Error evaluation of model training results

预测一致性方面均表现优异,为轴系机组振动响应预测提供了一种高效可靠的新方法,具有较强的理论意义和工程应用前景。

为了进一步对比各模型的训练结果,对测试集数据进行拟合。图 16 展示了各个模型预测结果的拟合表现。HCNet 的斜率为 1.000 1 接近于 1,截距为 0.002 3,接近于 0, R^2 高达 0.999 4,这表明预测值与目标值几乎完全重合,说明 HCNet 在消除系统偏差和控制随机误差方面表现优异,预测结果与真实值高度一致,其预测能力接近理想。

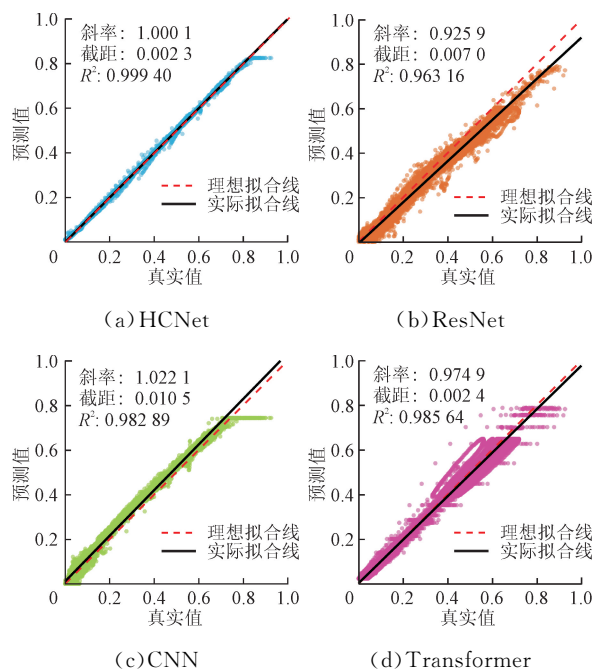


图 16 各模型预测拟合效果比较

Fig. 16 Comparison of the fitting performance of the predictions of each model

ResNet 的斜率为 0.925 9 明显偏低,导致整体预测值低估, R^2 为 0.963 2,相对来说偏低,且仍有部分方差未被捕捉。这表明 ResNet 在预测过程中存在系统性偏差,未能完全捕捉到目标值的变化趋势。CNN 的斜率为 1.022 1 略高于 1,存在轻微的高估倾向,截距为 0.010 5, R^2 为 0.982 9。尽管 R^2 较高,但斜率和截距的偏差揭示了 CNN 在预测过程中存在一定的系统性误差。Transformer 的斜率为 0.974 9 略低于 1,导致预测值的轻微低估,截距为 0.002 4, R^2 为 0.985 6。虽然其 R^2 较高,但斜率和截距的偏差表明 Transformer 在预测过程中存在一定的系统性误差和随机误差。该结果与误差指标分析结论一致,共同证实了 HCNet 在消除系统偏差、控制随机误差及稳定性上的全面优势,其余模型

则因架构局限性存在可量化的预测失真。

4.2 振动响应预测结果

为进一步验证 HCNet 的预测结果有效性,选取测试集中的具体案例进行分析,采用 HCNet、CNN、Transformer、ResNet 模型预测的和有限元分析得到的振动响应曲线如图 17 所示。

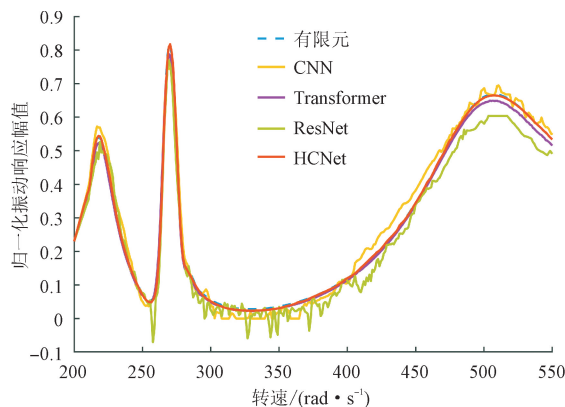


图 17 模型预测结果与有限元分析结果对比

Fig. 17 Comparison of model prediction results with finite element results

由图 17 可知,HCNet 在预测精度和稳定性方面表现出显著优势。首先,HCNet 的预测曲线与有限元方法的结果最为接近,尤其是在关键的峰值和低谷部分,这表明 HCNet 能够更准确地捕捉系统的动态特性。其次,HCNet 的预测曲线较为平滑,没有出现剧烈的波动,显示出其在预测过程中的高稳定性。相比之下,其他神经网络模型(CNN、Transformer 和 ResNet)在某些时间点上存在较大的偏差和波动,尤其是在峰值附近,这可能会影响其在实际应用中的可靠性。HCNet 通过多级可分离卷积架构实现了振动响应曲线的高效预测,该模型在保证精度的同时,显著提升了计算效率,对含联轴器的轴系机组振动响应数据,仅需 1.8 ms 即可完成预测,较传统方法提升了计算效率,具有重要的工程应用价值。

5 结 论

本文通过有限元仿真和数据驱动建模相结合的方法,开展了汽轮发电机组轴系动力学敏感性分析和响应预测研究,得到如下结论。

(1) 基于虚拟材料法和等效质量法建立了考虑联轴器刚度特性的汽轮机轴系有限元模型,并开展了临界转速和不平衡响应分析。验证了虚拟材料法在等效建模中的有效性,揭示了联轴器刚度对轴系动态特性的影响规律。

(2) 针对膜片联轴器 4 种不确定性输入参数开展了动力学响应 Sobol 灵敏度分析,研究结果表明:角度不对中对轴系动力学特性的影响最为显著,其一阶灵敏度指数和总灵敏度指数均远高于其他参数,尤其在低阶振型(如一阶临界转速)中表现出极强的方向敏感性,这说明轴线角向偏差会显著加剧轴系振动的不平衡性。平行不对中的影响次之,而转动惯量和质量的作用相对较小。

(3) 提出了一种混合卷积神经网络(HCNet)模型,实现了轴系频响特性的高效预测,通过对比典型神经网络模型(如 CNN、Transformer 和 ResNet)的预测结果,HCNet 在均方误差 E_{MSE} 、均方根误差 E_{RMSE} 、平均绝对误差 E_{MAE} 和决定系数 R^2 等指标上均表现最优,其预测结果与有限元仿真吻合,该模型在保证精度的同时,显著提升了计算效率,为轴系动态响应预测提供了一种快速准确的代理模型。

参考文献:

- [1] 徐宁,王庆超,刘占生,等. 基于热弹耦合的涡轮转子瞬态热冲击研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(7): 936-942.
XU Ning, WANG Qingchao, LIU Zhansheng, et al. Transient thermal impact research on turbine rotors based on thermoelastic coupling [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(7): 936-942.
- [2] 王军利,陆正午,李庆庆,等. 基于热分析的双螺杆压缩机转子的应力疲劳研究 [J]. 机械强度, 2021, 43(4): 928-935.
WANG Junli, LU Zhengwu, LI Qingqing, et al. Research on stress fatigue of twin screw compressor rotor based on thermal analysis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(4): 928-935.
- [3] MOGHE S M, MAHURE A N. Study of vibration response of coupling under misalignment condition: a review [J]. International Journal of Research in Advent Technology, 2017, 5(4): 50-53.
- [4] WANG Nanfei, JIANG Dongxiang. Vibration response characteristics of a dual-rotor with unbalance-misalignment coupling faults: theoretical analysis and experimental study [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 125: 207-219.
- [5] BING Hankun, LUO Xun, CHEN Shuai, et al. Study on the dynamics model of the misaligned coupling-rolling bearing-double rotor systems [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3126(1): 012012.
- [6] HUANG Yong, PENG Fei. Vibration behavior of

- laminated couplings based on angular misalignment and nonlinear stiffness characteristics [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2025, 178: 105175.
- [7] 刘加春. 新型膜片联轴器应用研究 [J]. *日用电器*, 2015(9): 40-48.
- LIU Jiachun. Application research on the new type disc coupling [J]. *Electrical Appliances*, 2015(9): 40-48.
- [8] 柳溢沛, 王正峰. 膜片联轴器刚度特性研究 [J]. *内燃机与配件*, 2024(23): 41-43.
- LIU Yipei, WANG Zhengfeng. Research on stiffness characteristics of diaphragm coupling [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2024(23): 41-43.
- [9] 秦波, 崔海旭, 王建国, 等. 风电机组膜片联轴器平行不对中动力学特性分析 [J]. *机械设计与制造*, 2021, 368(10): 155-158.
- QIN Bo, CUI Haixu, WANG Jianguo, et al. Dynamic characteristics analysis of parallel misalignment of diaphragm coupling in wind turbine [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2021, 368(10): 155-158.
- [10] 梁曾凯, 刘明政, 王念先, 等. 基于联轴器不对中的磁悬浮双转子系统不平衡响应分析 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2024, 62(9): 96-101.
- LIANG Zengkai, LIU Mingzheng, WANG Nianxian, et al. Analysis of unbalanced response of magnetic suspended dual-rotor system based on coupling misalignment [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2024, 62(9): 96-101.
- [11] 陈果, 杨默晗, 李伦绪, 等. 转子支承不对中故障建模与机理分析 [J]. *航空发动机*, 2023, 49(3): 75-88.
- CHEN Guo, YANG Mohan, LI Lunxu, et al. Modeling and mechanism analysis of rotor-bearing misalignment fault [J]. *Aeroengine*, 2023, 49(3): 75-88.
- [12] 孟凡刚, 黄延忠, 冯永志, 等. 重型燃气轮机转子不对中故障动力学数值仿真研究 [J]. *热能动力工程*, 2021, 36(6): 51-56.
- MENG Fangang, HUANG Yanzhong, FENG Yongzhi, et al. Dynamic numerical simulation of rotor misalignment fault of heavy duty gas turbine [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36(6): 51-56.
- [13] 于清文, 王菲, 卢良文, 等. 联轴器不对中转子系统的故障再现方法 [J]. *航空发动机*, 2022, 48(6): 98-104.
- YU Qingwen, WANG Fei, LU Liangwen, et al. A method for fault reproduction of rotor system with coupling misalignment [J]. *Aeroengine*, 2022, 48(6): 98-104.
- [14] 董超, 邵增德, 王晓伟, 等. 燃机动力涡轮转子不对中对整机振动影响研究 [J]. *汽轮机技术*, 2022, 64(5): 347-350.
- DONG Chao, SHAO Zengde, WANG Xiaowei, et al. Study on vibration of gas turbine power rotor with misalignment [J]. *Turbine Technology*, 2022, 64(5): 347-350.
- [15] 夏雪, 闫恩来, 李喜武. Transformer 在时间序列预测中的应用综述 [J]. *信息技术与信息化*, 2024(3): 124-128.
- XIA Xue, YAN Enlai, LI Xiwu. Overview of the application of Transformer in time series prediction [J]. *Information Technology and Informatization*, 2024(3): 124-128.
- [16] 孟祥福, 石皓源. 基于 Transformer 模型的时序数据预测方法综述 [J]. *计算机科学与探索*, 2025, 19(1): 45-64.
- MENG Xiangfu, SHI Haoyuan. Survey of Transformer-Based model for time series forecasting [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2025, 19(1): 45-64.
- [17] QIAN Bing, CAI Yinhui, RAN Yinkang, et al. Non-linear mechanical response analysis and convolutional neural network enabled diagnosis of single-span rotor bearing system [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 10321.
- [18] 唐杰, 孙茹. 航空管路无扩口管接头寿命预测方法研究 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2025, 39(2): 154-162.
- TANG Jie, SUN Ru. Study on life prediction method of aviation flareless pipe joint [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2025, 39(2): 154-162.
- [19] ZHANG Hao, ZHANG Qiang, SHAO Siyu, et al. Sequential network with residual neural network for rotatory machine remaining useful life prediction using deep transfer learning [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020(1): 8888627.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 钱徐芹, 温华兵, 曾林锡, 等. 基于四端参数法的膜片联轴器等效建模及参数影响分析 [J]. *船舶工程*, 2022, 44(3): 78-83.

- QIAN Xuqin, WEN Huabing, ZENG Linxi, et al. Equivalent modeling and parameter influence analysis of diaphragm coupling based on Four-Terminal parameter method [J]. Ship Engineering, 2022, 44(3): 78-83.
- [23] American Petroleum Institute. Special-purpose couplings for petroleum, chemical, and gas industry services; API STD 671[S]. Washington, DC, USA: API, 2020.
- [24] 申屠留芳, 孙成龙, 巩尊国. 叠片联轴器角向刚度的研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(14): 1897-1901. SHEN TU Liufang, SUN Chenglong, GONG Zun-guo. Study on angular stiffness of a laminated membrane coupling [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(14): 1897-1901.
- [25] HRISTOV H, TENEV S, MEHMEDOV I. A study of the dynamic stiffness of flexible couplings with a rubber-metal element type SEGME [J]. Engineering Proceedings, 2024, 60(1): 26.
- [26] 洪运, 王旦, 农苏, 等. 束腰型膜片联轴器刚度阻尼仿真与试验分析 [J]. 机械传动, 2024, 48(4): 116-125.
- HONG Yun, WANG Dan, NONG Su, et al. Simulation and experimental analysis of stiffness and damping of the waist type diaphragm coupling [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(4): 116-125.
- [27] 罗宇轩, 李金星, 赵名星, 等. 采用 AK-MCS 的燃气轮机轮盘疲劳寿命预测及可靠性评估 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(4): 107-116. LUO Yuxuan, LI Jinxing, ZHAO Mingxing, et al. Research on the method of low-cycle fatigue life prediction and reliability evaluation of gas turbine discs based on AK-MCS [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(4): 107-116.
- [28] 王竹晴. 基于神经网络的锂离子电池 RUL 预测方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [29] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization [EB/OL]. (2017-01-30) [2017-08-13]. <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.
- (编辑 刘懿莹)