

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106589

基于虚拟样机的主轴变速箱故障研究

刘洋¹ 肖茂华²

(1.东南大学成贤学院 南京 210088; 2.南京农业大学 南京 210095)

摘要:针对主轴变速箱振动信号受外界影响较大从而导致故障诊断准确率较低的情况,提出基于虚拟样机采集转速信号来进行主轴箱故障诊断。首先搭建了主轴变速箱动力学虚拟样机,基于赫兹接触理论设置齿轮副接触参数,通过对比理论转速证实模型仿真的正确性;然后基于虚拟样机模拟主轴箱3种常见典型故障类型,分析不同工况下各轴输出转速变化趋势;最后基于仿真样本建立KNN故障诊断模型,为提高诊断准确率,对Z-Score方法进行改进。结果表明,改进后的故障模型诊断准确率显著提升,实现了对变速箱常见故障的正确诊断。

关键词: 主轴变速箱;虚拟样机;故障诊断;KNN 标准化方法

中图分类号: TP206.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2040

Research on failure of main shaft gearbox based on virtual prototype

Liu Yang¹ Xiao Maohua²

(1. Southeast University Chengxian College, Nanjing 210088, China;

2. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The vibration signal of the main shaft gearbox is greatly affected by external factors, which leads to a low fault diagnosis accuracy rate. Proposes to diagnose the fault of the spindle box based on the speed signal collected by the virtual prototype. Firstly, the virtual prototype of main gearbox is built, and the contact parameters of gear pairs were set based on Hertz contact theory, and the accuracy of the model simulation is verified by comparing the theoretical speed. Secondly, by simulating the common fault types of a variety of gearboxes, the trend of the output speed of each shaft under different working conditions is analyzed. Finally, a KNN fault diagnosis model is established based on simulation samples, and the Z-Score method is improved. The results show that the diagnosis accuracy of the improved fault model is significantly improved, which realizes the correct diagnosis of common faults of the gearbox.

Keywords: the main gearbox; virtual prototype; fault simulation; KNN normalization

0 引言

主轴变速箱是数控机床的主要组成部分,对机床的加工精度及运行稳定稳定性有着重要影响^[1-2],对主轴变速箱的常见故障进行诊断十分必要。

许多学者已在主轴箱故障诊断相关领域进行了研究。文献[3]提出了一种基于GSO-LVQ神经网络的主轴变速箱滑移齿轮故障诊断方法,提取主轴变速箱滑移齿轮振动信号特征并进行PCA降维,引入GSO算法获得LVQ神经网络初始权值向量,实现了对主轴箱滑移齿轮故障的有效诊断。文献[4]通过采集主轴振动信号,利用近似解析小波包变换和径向基(RBF)神经网络,建立刀具磨损状态下的多特征向量样本数据库训练RBF神经网络,实现了对刀具磨损状态的精确识别。文献[5]提出一种新型智能优化

算法为多元函数粒子群优化算法,能够快速识别齿轮箱中故障齿轮位置,提高了故障诊断的准确性。文献[6]对数控机床的常见机械故障进行了分析探讨,对主轴箱目前常见的故障诊断方法进行了总结归纳。

通过对主轴变速箱故障研究的总结分析,主轴变速箱常见的故障诊断方法多是依托于物理样机,通过采集振动信号借助智能算法进行模式识别,但振动信号往往受外界影响较大,从而导致诊断准确率低;同时采集物理样机数据往往需要耗费大量时间和成本。

虚拟样机技术为主轴箱故障诊断提供了新的思路,借助虚拟样机进行主轴变速箱的故障模拟^[7],获取试验难以采集的数据来进行故障诊断,有助于快速模拟多类型故障,节省成本,为主轴变速箱故障诊断方法研究提供参考^[8]。

本文以搭建主轴变速箱虚拟样机为基础,模拟齿轮断

收稿日期:2021-05-05

齿、轴 1 齿间异物、轴 4 齿间异物等故障类型,分析不同故障类型下各轴转速的变化趋势;基于 KNN 算法建立故障诊断模型,为提高诊断准确率,对样本预处理方法进行改进,最终实现了对变速箱常见故障的正确诊断,为数控机床主轴变速箱虚拟样机建模及常见故障研究提供参考。

1 主轴变速箱虚拟样机建模

1.1 三维模型搭建

主轴变速箱由电动机驱动,常见主轴转速范围为 42~980 r/min,取转速 104 r/min,计算各级齿轮参数。基于 UG 绘制主轴变速箱三维模型,如图 1 所示。

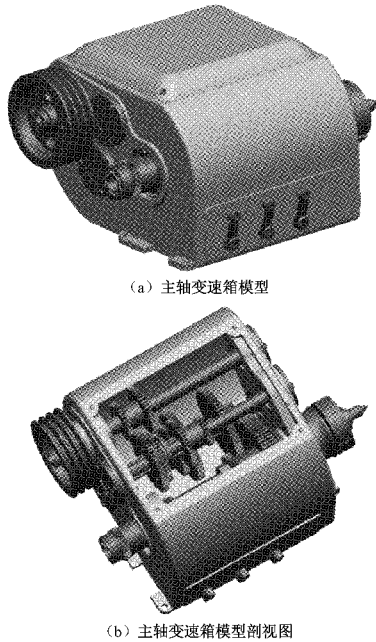


图 1 主轴变速箱三维模型

1.2 动力学虚拟样机建模

将主轴变速箱三维模型另存为 .x_t 格式导入 RecurDyn 软件,搭建动力学仿真模型^[9-10],添加约束副,主轴变速箱各轴之间通过齿轮传动,主要约束为旋转副,在两轴齿轮副之间设置接触副,基于赫兹接触理论计算接触参数。

根据赫兹理论^[11-12],假设接触的两物体:1)材料是均质的;2)接触区域尺寸远小于物体尺寸;3)作用力与接触面垂直(接触区域无摩擦);4)变形在材料弹性极限范围内。那么两物体之间法向接触力 f_n 的计算公式为:

$$f_n = k\delta^{m_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\dot{\delta}|^{m_2} \delta^{m_3} \quad (1)$$

式中: k 为接触刚度系数; c 为阻尼系数; δ 为接触穿透深度; $\dot{\delta}$ 为接触穿透深度的导数(接触点的相对速度); m_1 、 m_2 、 m_3 分别为刚度指数、阻尼指数、凹痕指数(当穿透值较小时避免接触力出现负值的情况,默认情况下为 0)。刚度指数 m_1 的设置主要根据经验,金属材料之间接触刚度指数为 1.5;塑料材料之间接触刚度指数为 2;橡胶材料之间接触刚度指数为 1.1。阻尼系数 $c = K/1\ 000$ 。

齿轮传动之间的接触可以视为球与球之间的接触,如图 2 所示,在受到外部载荷的作用下,球的接触区域为圆形。

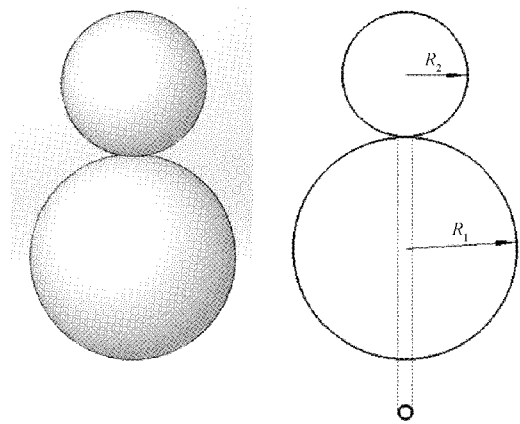


图 2 球接触及其接触面

根据赫兹接触理论接触相对位移 δ :

$$\delta^3 = \frac{9}{16} \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) P^2 \quad (2)$$

接触区域圆的半径 a :

$$a^3 = \frac{3}{4} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) P^2 \quad (3)$$

其中, R_1 、 R_2 为两球体半径,mm; μ_1 、 μ_2 为两球体材料泊松比; P 为外部载荷,N。

根据胡克定律,应力 σ 为:

$$\sigma = E\epsilon \quad (4)$$

因此式(2)可以转化为:

$$P = K\delta^{1.5} \quad (5)$$

其中,接触刚度 K :

$$K = \sqrt{\frac{16}{9} \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} \frac{1}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (6)$$

根据接触刚度公式,对各组件之间的接触刚度进行计算,将参数圆整后在模型中初步设置,如表 1 所示。

表 1 接触参数设置

Base 部件	Action 部件	接触类型	接触刚度	接触阻尼系数	动摩擦系数	静摩擦系数	最大穿透深度	刚度指数
主动齿轮	从动齿轮	面接触	15 000	1.5	0.09	0.15	1	1.5

添加电机驱动速度 1 440 r/min, 运行仿真, 在实际生产中, 相对于其他物理信号各轴转速测量较为方便, 因此本文选择各轴转速为研究对象, 分析不同工况下各轴转速的变化情况。正常状态下的各轴输出转速如图 3 所示(轴的序号按照动力传动方向进行排序), 由图 3 可知, 在 0.18 s 后主轴输出转速稳定在 104 r/min, 与理论输出转速相符, 证明了虚拟研究仿真的正确性。

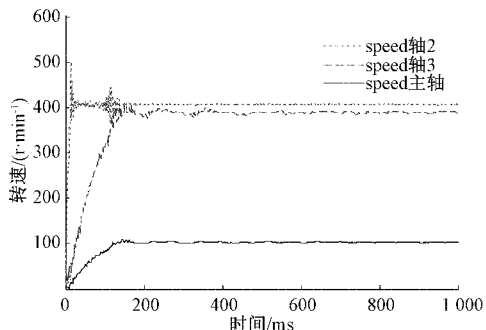


图 3 正常状态下的各轴输出转速

2 主轴变速箱常见故障模拟

齿轮损坏是主轴变速箱常见的故障之一, 本文以齿轮断齿、轴 2 齿间异物、主轴齿间异物 3 种工况为例进行虚拟样机模拟。

2.1 齿间杂物

齿轮磨损是齿轮常见的失效形式, 由齿面间异物引起的磨粒磨损是齿轮模式的重要形成原因之一。在模型中添加异物, 异物形状及可能存在位置由多种可能, 本文以球形异物为例, 建立轴 2 齿间异物和主轴齿间异物两种工况模型。在齿根处添加异物, 直径为 1 mm, 如图 4 所示。

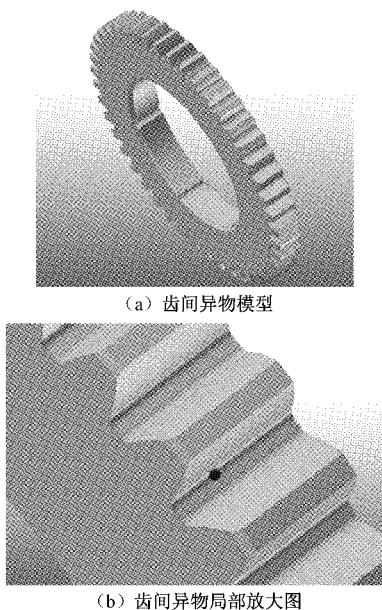


图 4 齿间异物添加

运行仿真, 得到不同位置齿间存在异物时主轴输出速度曲线, 如图 5 所示。

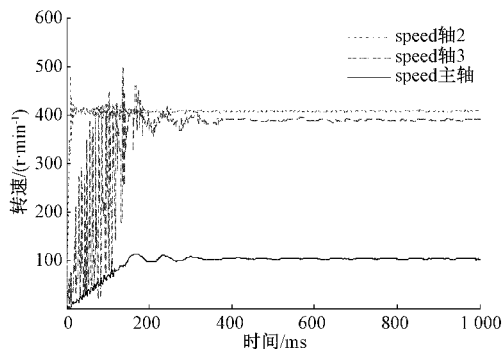


图 5 轴 2 齿间异物模型的各轴输出转速

由图 5 可知, 轴齿间存在异物时, 轴 2 转速基本不变, 轴 3 启动速度波动较大, 在 0.25 s 后趋于平稳, 主轴启动段的输出转速也存在轻微波动情况。

由图 6 可知, 主轴齿间存在异物时, 主轴启动段的输出转速存在轻微波动情况, 在 0.5 s 后逐渐趋于平稳。

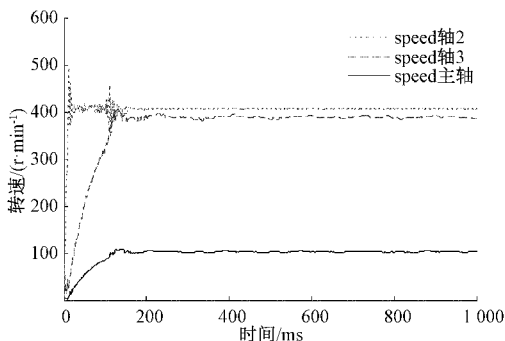


图 6 主轴齿间异物模型的各轴输出转速

根据以上结果可知, 当某一齿轮副之间存在异物时, 从动齿轮轴及其后传动齿轮启动速度存在波动, 波动大小与齿轮大小有关, 速度波动一定时间后趋于平稳, 对主动齿轮轴及其之前的传动轴速度影响不大。

2.2 齿轮断齿

断齿是一种较为严重的齿轮失效形式, 一般在齿根处发生, 通常是由局部承载过大引起, 断齿后的齿轮依然具有传递动力的能力, 但噪声和振动明显增加, 易进一步引起其他失效。在模型中轴 3 上齿轮采用布尔减的方式切除轮齿, 如图 7 所示。

运行仿真, 得到齿轮断齿时各轴输出速度曲线, 如图 8 所示, 由图 8 可知, 轴 3 上齿轮断齿后, 轴 3、主轴启动段波动较大, 在 0.25 s 后逐渐趋于稳定。

3 基于 KNN 近邻算法的齿轮箱故障诊断

本文所采用故障数据为仿真所得数据, 异常波动性数据较少, 特征变化趋势较为明显, 因此选用 KNN 近邻算法进行故障诊断。与其他算法相比, KNN 算法具有结构简单、理论成熟、准确率高等优势。

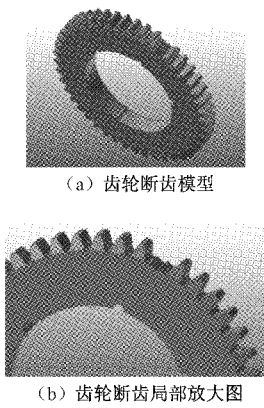


图 7 齿轮断齿

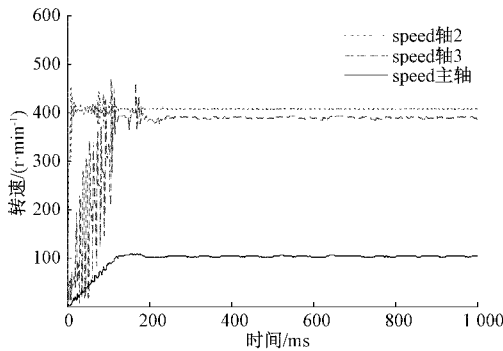


图 8 轴 3 齿轮断齿模型的各轴输出转速

3.1 K 近邻分类原理

本文采用 KNN 近邻算法进行变速箱故障诊断。KNN 算法是 NN 算法的拓展算法,基于样本间的距离获取距离待测样本最近的 k 个邻近样本的类别^[13-15],从而对待测样本的类别进行识别,这种方法不需要进行模型训练,但受距离衡量方法和 k 值影响较为明显。K 近邻法常用衡量距离为 LP 距离或 Minkowski 距离。

设特征空间 χ 是 n 维实数向量空间 R^n , 则:

$$x_i, x_j \in \chi, x_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(n)})^T,$$

$$x_j = (x_j^{(1)}, x_j^{(2)}, \dots, x_j^{(n)})^T$$

x_i, x_j 的 L_p 距离定义为:

$$L_p(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^n (|x_i^{(1)} - x_j^{(1)}|^p)^{\frac{1}{p}} \quad (7)$$

其中, $p \geq 1, p = 1$ 时称为曼哈顿距离 (Manhattan distance), 当 $p = 2$ 时,称为欧氏距离 (Euclidean distance), 当 $p = \infty$ 时,称为各个坐标距离的最大值。本文采用欧氏距离作为样本距离衡量方法, 即:

$$L_2(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^n (|x_i^{(1)} - x_j^{(1)}|^2)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

3.2 特征提取

结合模型仿真结果,发现不同故障模型的转速曲线在 0~180 ms 时间段内的波动情况差异较为明显,180~1 000 ms

时间段内转速趋于平稳,1 000 ms 后基本平稳,因此采取分段的方式提取特征,各段提取特征主要包括均值、标准差、最大值、最小值、偏度、峰度。为保证学习样本的多样性,微调仿真模型的接触参数,获取正常、轴 1 异物、轴 4 异物、断齿四种类型各 11 条仿真样本,其中训练样本 6 条,测试样本 5 条。

为避免特征数量级区别过大导致分类误差,需要对提取特征进行归一化处理。本文采用 Z-Score 标准化方法进行数据预处理,标准化公式为:

$$x^* = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (9)$$

其中, \bar{x} 为原始数据的均值, σ 为原始数据的标准差。

3.3 变速箱故障诊断

基于 MATLAB 建立 KNN 诊断模型,输入分训练样本与测试样本,设定邻近样本数量 $k (2 \leq k \leq 9)$, 获取不同 k 值对应的诊断准确率如图 9 所示。根据不同 k 值的诊断结果,取 $k = 4$ 。

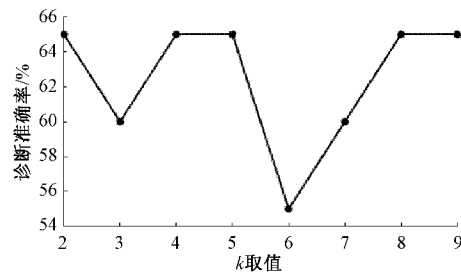


图 9 不同 k 值对应的诊断准确率

根据诊断结果可知,变速箱故障诊断正确率较低,观察训练样本发现,标准化后的各个特征之间区别较小,可能导致特征变化趋势被削弱,诊断正确率较低,对比标准化前后的诊断分类结果如图 10、11 所示。由图可知,标准化前,诊断错误样本 2 个,正确率 90%,标准后诊断错误样本 7 个,正确率 65%,轴 4 异物故障类型与健康类型难以区分,数据标准化处理后诊断准确率下降,需要对标准化方法进行研究。

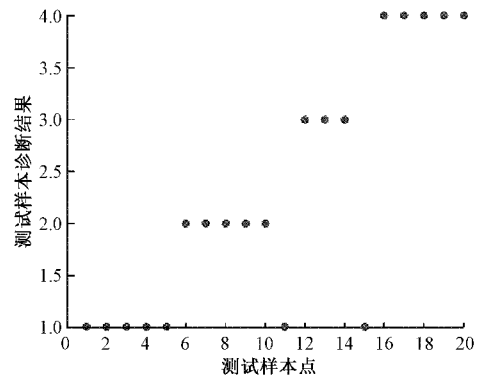


图 10 数据标准化前诊断结果

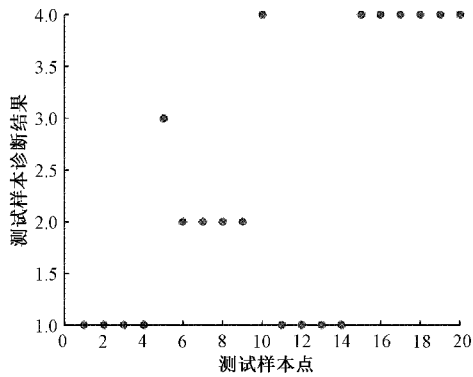


图 11 数据标准后前诊断结果

3.4 基于改进标准化方法的 KNN 故障诊断

为使标准化后的特征仍能保持较大差异,提高诊断正确率,本文采用一种基于健康数据进行标准化的数据预处理方法,健康数据样本仍采用 Z-Score 方法进行标准化处理,故障数据以健康数据均值、标准差为基础进行标准化处理,即:

$$x_{故障}^* = \frac{x - x_{健康}}{\sigma_{健康}} \quad (10)$$

以健康数据的均值、标准差为基础对故障数据进行标准化,可以在保证健康样本与故障样本变化趋势的基础上,避免部分特征数量级过大造成的误诊断。基于改进标准化方法对变速箱故障进行诊断,结果如图 12、13 所示,可知在 $k=4$ 时,诊断准确率达到 100%,调整 k 的取值,发现不同 k 值对应的诊断正确率均高于传统标准化后的诊断正确率,证明了改进标准化方法的有效性。

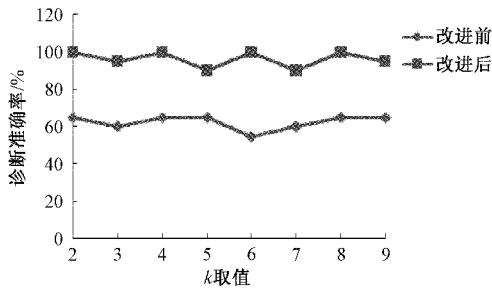


图 12 改进标准化方法前后诊断准确率

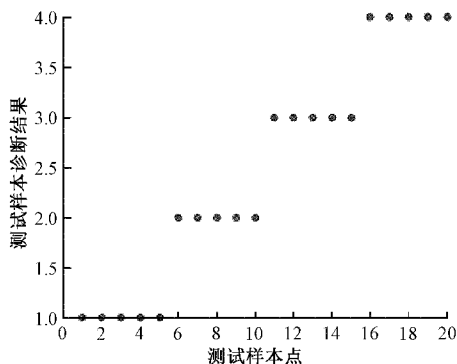


图 13 $k=4$ 时测试样本诊断结果

4 结 论

本文提出了一种以虚拟样机为基础的主轴变速箱故障研究方法,搭建主轴变速箱动力学虚拟样机,基于赫兹接触理论设置模型接触参数,仿真得到正常、轴 1 异物、轴 4 异物、断齿 4 类故障下的各轴转速,基于仿真样本建立 KNN 主轴变速箱故障诊断模型,采用改进标准化方法提高诊断准确率,最终实现了主轴箱常见故障的正确诊断。本文的研究为后续数控机床主轴变速箱虚拟样机建模及其故障诊断研究提供参考。

参考文献

- [1] 魏彦杰, 胡凯, 钟勤建, 等. HW 变速箱主轴齿轮隔片断裂故障分析与改进[J]. 重型汽车, 2017(2): 29-31.
- [2] 徐菁, 杨勇. 数控机床中主轴变速箱的设计[J]. 科技传播, 2014, 6(1): 109,107.
- [3] 谢昭灵, 夏士伟, 陈云. 基于 GSO-LVQ 神经网络的加工中心主轴变速箱滑移齿轮故障诊断[C]. 面向增材制造与新一代信息技术的高端装备工程管理国际论坛征文汇编, 2020:181-191.
- [4] 王建军, 曹新城. 基于主轴振动信号的铣刀磨损监测研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(2): 103-108.
- [5] 任彬, 李思雯, 杨绍普, 等. 基于多元函数粒子群的齿轮箱检测优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 26-35.
- [6] 王廷猛, 安汝伟, 张太勇, 等. 数控机床机械故障诊断方法及探讨[J]. 内燃机与配件, 2019(4): 156-157.
- [7] GIL G, NIKVRAVESH P E. Flexible multibody simulation using hybrid integration scheme [J]. Multibody System Dynamics, 2016, 37(1): 3-13.
- [8] 陈林邦, 苏龙. XK2420 龙门镗铣床典型故障维修[J]. 设备管理与维修, 2019(11): 31-32.
- [9] 董少君, 马超, 栾忠权, 等. 行星齿轮传动系统故障动力学仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 80-85.
- [10] RUI D K, ANDRÉ M D, DANIEL P M, et al. Usability studies on building early stage architectural models in virtual reality [J]. Automation in Construction, 2019, 103:104-116.
- [11] 田红亮, 陈甜敏, 郑金华, 等. 平行轴圆柱副接触分析[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 8-15.
- [12] 高大华, 刘玉霞. 基于赫兹理论的推力球轴承设计与计算[J]. 现代制造技术与装备, 2017(3): 43-44.
- [13] 张波, 韩光谱, 冯丞科, 等. 基于特征相关分析的内燃机故障诊断方法[J]. 机械工程与自动化, 2020(5): 128-129,132.
- [14] 钱小毅. 基于 k 近邻与规则挖掘的风电机组故障诊断研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2020.
- [15] 樊存佳, 汪友生, 边航. 一种改进的 KNN 文本分类算法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 39-43.

作者简介

刘洋, 讲师, 硕士, 主要研究方向为工程力学、机电控制。
E-mail: njliuy163@163.com