

DOI: 10.3901/JME.2022.15.252

基于 EMD-POT 模型的拖拉机关键零部件载荷 时域外推方法*

杨子涵^{1,2} 宋正河^{1,2} 罗振豪^{1,2} 赵雪彦^{1,2} 尹宜勇^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院 北京 100083;

2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室 北京 100083)

摘要: 针对传统 POT 外推方法存在的两方面问题: 对非平稳载荷适应性不足以及缺少对外推重构环节的讨论, 提出基于经验模态分解-峰值超阈值(Empirical mode decomposition-peaks over threshold, EMD-POT)模型的载荷时域外推方法。首先, 以拖拉机传动轴为研究对象, 对其在犁耕工况下的实测数据进行载荷特性分析, 结果表明, 拖拉机作业状态的频繁转换是造成载荷非平稳的主要因素。其次, 针对第一个问题, 结合 EMD 方法, 在不考虑趋势载荷的情况下, 实现对主成分载荷的无损提取; 针对第二个问题, 提出外推负载筛选、阈值限定与极值排序相结合的方法, 实现外推载荷的精准重构。最后, 将外推后的主成分载荷与趋势载荷进行叠加实现载荷时域外推。将改进的外推方法与传统 POT 外推方法得到的结果进行对比, 结果表明, 改进方法能够显著解决传统方法在处理非平稳载荷时外推结果失真的问题, 提出的重构方法能够进一步提高外推与实测载荷循环的一致性, 均值和标准差的稳定性分别提高了 28.5%和 31.2%。损伤计算结果表明, 改进方法的累计损伤能够合理覆盖实测损伤, 相比于随机重构方法, 损伤一致性提高了 9.4%。外推结果可为仿真分析及可靠性试验提供更准确的负载输入, 进一步提高了载荷谱的编制精度。

关键词: 时域外推; 载荷特性; 经验模态分解; 超阈值模型; 载荷谱

中图分类号: U270

Time-domain Load Extrapolation Method for Tractor Key Parts Based on EMD-POT Model

YANG Zihan^{1,2} SONG Zhenghe^{1,2} LUO Zhenhao^{1,2} ZHAO Xueyan^{1,2} YIN Yiyong^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083;

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: To address the two problems of the traditional POT extrapolation method: the lack of adaptation to non-stationary loads and the lack of discussion on the extrapolation reconstruction method, a load time-domain extrapolation method based on the empirical mode decomposition-peaks over threshold (EMD-POT) model is proposed. First, the tractor drive shaft is used as the research object, and its load characteristics are analysed by the measured data under ploughing conditions. The results show that the change of tractor operating conditions is the main factor causing the non-stationary load. Second, for the first problem, the EMD method is combined to achieve lossless extraction of principal component loadings without considering trend loadings; for the second problem, a combination of extrapolated load screening, threshold qualification and extreme value ranking is proposed to achieve accurate reconstruction of extrapolated loads. Finally, the extrapolated stable load is superimposed on the trend load, and the load history after extrapolation is obtained. The results show that the improved method can significantly solve the problem of distortion of extrapolation results when dealing with non-stationary loads by the traditional method, and the proposed reconstruction method can further improve

* 国家重点研发计划(2017YFD0700301)和工信部(TC200H02D)资助项目。
20210819 收到初稿, 20220318 收到修改稿

the consistency of the extrapolated and measured load cycles, with the stability of the mean and standard deviation improving by 28.5% and 31.2% respectively. The damage calculation results show that the cumulative damage of the improved method can reasonably cover the measured damage, and the damage consistency is improved by 9.4% compared to the random reconstruction method.

Key words: time-domain extrapolation; load characteristics; EMD; POT method; load spectrum

0 前言

随着我国农业装备生产制造水平的提高,仅服务于局部地区的“小作坊”生产模式已逐渐被淘汰,现如今,企业必须以占领更广阔的市场为目标生产耐用可靠的机器^[1-2]。由于农业生产的特殊性,同一机器在不同地域的使用工况具有较大差异,因此,获取农业机械关键零部件全工况条件下的载荷历程、编制全寿命周期载荷谱对产品研发人员显得尤为重要。在产品研发初期,想要通过全工况条件下的试验获取全寿命周期的载荷谱是不现实的,并且需要耗费巨大的人力和物力。农业生产受自然因素影响具有很强的季节性,使想要直接获取农业机械关键零部件的全寿命载荷谱变得更加困难^[3]。为了能够仅通过短时测试推断出较为完整的负载信息,尤其是生命周期内可能出现的极限负载,就需要通过载荷外推的方式来实现。

载荷外推作为载荷谱编制过程中的重要环节,能够基于有限的测试,为载荷谱编制提供连续、准确的负载信息,有效减少零部件的测试时间及成本,加快产品研发进度^[4]。已有学者面向不同的工程问题研发了多种载荷外推方法,根据外推结果形式不同主要分为雨流矩阵外推和时域外推^[5]。雨流矩阵外推相关的研究起步较早且技术较为成熟,典型方法有基于混合分布的雨流外推方法^[6]和结合极值理论的非参数雨流外推方法^[7]。峰值超阈值(Peaks over threshold, POT)模型是一种对极值分布进行统计推断的工具,最初主要应用于对极端环境的建模预测^[8]。JOHANNESSON^[9]结合 POT 模型提出了载荷时域外推方法,即 POT 外推方法,该方法不仅能够避免因雨流域转换产生的误差,还能够保留载荷的时序信息,因此在工程领域得到了广泛应用^[10-11]。PATRICK^[12]针对风力发电机转子及塔架载荷展开研究,讨论了 3 种极值抽样模型对于外推结果的影响,结果表明 POT 模型外推效果最优。YANG 等^[13]利用 POT 外推方法对汽车前轮扭矩进行外推并编制程序载荷谱。HE 等^[14]提出基于 GRA-POT 模型的

时域外推方法,通过引入灰色理论对阈值定量评价,改善了数控机床载荷谱的外推精度。

上述研究选取的外推负载均为平稳载荷,然而在多数情况下,机器生命周期内承受的随机载荷是非平稳的。以拖拉机为例,作为应用最广泛的农业装备之一,在其生命周期内往往会经历犁耕、旋耕、播种等多种工况。即使在同一工况下,由于机具状态、土壤作物条件、拖拉机档位等因素的改变,关键零部件负载仍呈现出非平稳特征。随着研究的深入,杨子涵等^[15-16]发现传统 POT 外推方法并不适用于非平稳载荷,为了更加准确地获取全生命周期内,包含全部作业工况的载荷历程,需要探究非平稳载荷时域外推方法。文献[17-19]针对不同工况条件下的实测载荷进行了外推方法的讨论,但是所提出方法仅适用于工况数量小且循环方式单一的载荷。近年来又有学者将机器学习的相关方法应用于载荷外推^[20-21],由于对载荷样本要求较高并且仍需人工划分工况,因此未得到广泛应用。

综上,本文以拖拉机传动轴为研究对象,提出了基于经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)的非平稳载荷分解方法,在此基础上,针对传统 POT 外推方法中随机重构所造成的模拟精度不高的问题,提出了改进的外推载荷重构方法。最后,通过实例分析验证了本文所述方法的有效性和稳健性。

1 试验方案

为使测取的拖拉机传动轴载荷信号更具代表性,需选用通用性较好的拖拉机型号搭配田间作业典型工况。对于拖拉机而言,犁耕作业时牵引负荷较大,对拖拉机的可靠性要求较高,同时犁耕也是农业生产中最重要的作业方式,因此,本文选取犁耕工况作为拖拉机田间作业典型工况开展研究。试验选取 LX2204 型拖拉机为研究对象,挂接机具为 KUHN 公司生产 MULTI-MASTER153T 型翻转型。参照 GB/T14225—2008《铧式犁》对作业环境及作业质量进行检测,主要参数如表 1 所示,经检验作业质量符合国家标准。

表 1 作业环境及作业质量参数

参数	内容
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	25.6
环境湿度(%)	21
土壤种类	砂土
深度 5 cm 处土壤含水率(%)	6.28
深度 10 cm 处土壤含水率(%)	9.84
深度 15 cm 处土壤含水率(%)	12.20
耕作幅宽/m	2.1
耕作深度/mm	320
碎土率(%)	99.2

拖拉机田间作业时处于开放复杂的环境,在土壤、作物的随机载荷作用下整机振动会增加,测试设备应具有良好的抗振性能,此外,传动轴为旋转部件,需选取便于安装固定且能够实现信号稳定传输的传感器。本试验选用 TQ201 型无线扭矩节点进行数据的同步采集,使用 BF350-3BA 型半桥应变片组成采集电路,利用无线扭矩节点中封装的发射器与笔记本端的接收器进行实时通信实现传动轴扭矩信号的发射和接收,分辨率为 $\pm 0.1 \mu\text{e}$,采样频率为 100 Hz,为提高采集系统精度,采集过程中利用巴特沃斯滤波的方式对数据进行抗混叠滤波,传感器布置方案如图 1 所示。

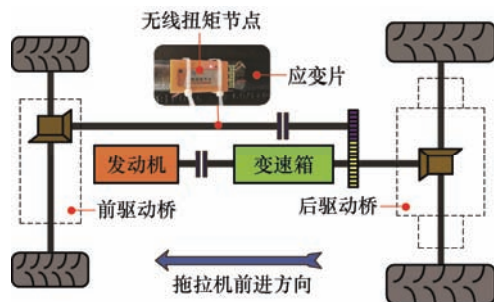


图 1 传感器布置方案

2 载荷特性分析

结构由于承受随机载荷作用发生疲劳破坏是产品研发人员进行可靠性设计时考虑的主要问题。对于拖拉机而言,由于其作业状态随着土壤条件、机具状态、驾驶员操纵行为的改变在动态变化,零部件承受的随机载荷往往是不稳定的,因此编制的载荷谱必须能够反映这一特性。本文以拖拉机传动轴载荷为例来说明拖拉机运行特性及零部件的负载

特性。图 2 为拖拉机前传动轴在一次完整犁耕作业时测取的载荷历程,挡位为中三挡,耕作速度为 5~10 km/h,样本长度为 40 min。

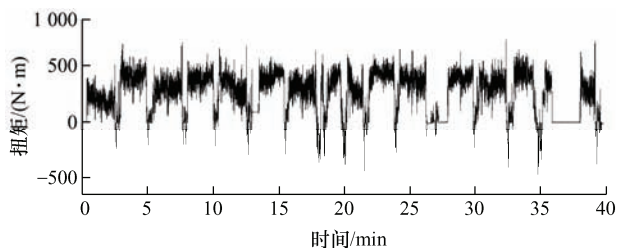


图 2 拖拉机传动轴载荷时间历程

可以看出整个负载历程是非平稳的,负载依次由犁耕部分和田间调整部分循环构成。犁耕部分由于牵引阻力的增加导致扭矩增大,犁具入土和出土时载荷波动较为剧烈,一般会达到扭矩的峰值。当拖拉机行驶至地块边缘时,犁具切换为提升状态并进行翻转,以便进行拖拉机的转向和倒车操作,使拖拉机前进方向与下一作业行平齐,将这一过程统称为田间调整部分。田间调整部分载荷受地形和驾驶员操作习惯影响较大,具体反映在调整时长不固定和倒车次数不固定,扭矩会出现交替反转的现象。

可见,在同一工况下,拖拉机的工作状态也是在不断切换的,由于犁具每次入土深度不完全一致,且土壤性质具有差异性,导致每个犁耕部分的统计特征具有差异,如图 3 所示,这是造成载荷非平稳的主要原因。

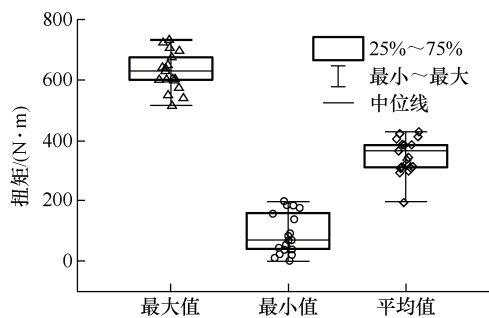


图 3 犁耕部分统计特征

将载荷时间历程进行雨流计数处理,结果如图 4a 雨流矩阵所示。从图 4 中可以划分出 3 个主要区域:区域 a 的数据量最大,为全部犁耕部分载荷循环;区域 b 为全部田间调整部分构成的载荷循环;区域 c 代表犁耕部分和田间调整部分切换过程中产生的大载荷循环,这部分负载会对疲劳损伤产生较大贡献。利用传统时域外推方法中具有代表性的 POT 外推方法^[7]对拖拉机传动轴载荷进行外推,为保证对比结果的公平性,采用与

后续新方法外推过程相一致的预处理和阈值选取方法。将外推载荷与原始载荷分别进行雨流计数并编制载荷谱如图 4b 所示。可以看出外推载荷与原始载荷具有很大差异, 尤其是在循环频次较低的部分。这是由于传统方法没有考虑到原始载荷是由具有显著统计特征差异的载荷片段组合而成, 因此外推结果会发生失真。在下文中, 将用上述一致的实测载荷数据来证明本文提出方法的有效性和可靠性。

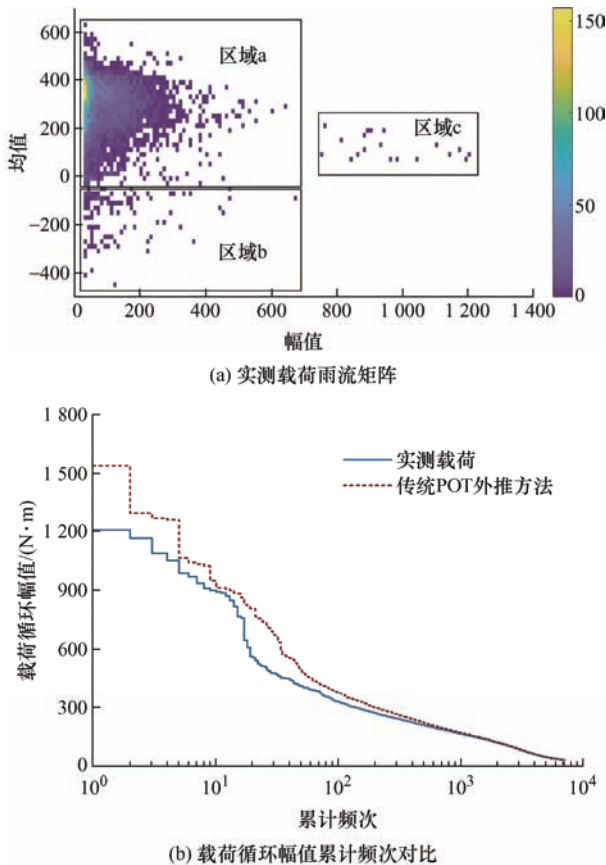


图4 载荷数据分析

3 时域载荷外推

3.1 载荷信号预处理

众所周知, 采样频率过高会造成数据点的冗余, 为了提高分析效率, 便于疲劳试验中数据的加载, 需要在执行外推操作前对数据进行筛选和精简。首先, 对原始载荷进行峰谷值的提取, 得到转折点序列。如图 5a 所示, 载荷样本点数目由 240 000 缩减至 64 673。由图可知, 在田间调整部分, 由于驾驶员需要频繁切换拖拉机和机具状态, 造成许多怠速情况下的小载荷循环。雨流计数法是一种有效的数据处理方法, 能够进一步从转折点序列中滤除幅值小于给定阈值范围的小载荷循环, 本文将雨流阈值

设定为 30 N·m。如图 5b 所示, 滤除小载荷循环后, 转折点数目进一步减少至 14 096。经过预处理后, 数据点总压缩率达到 94% 以上。

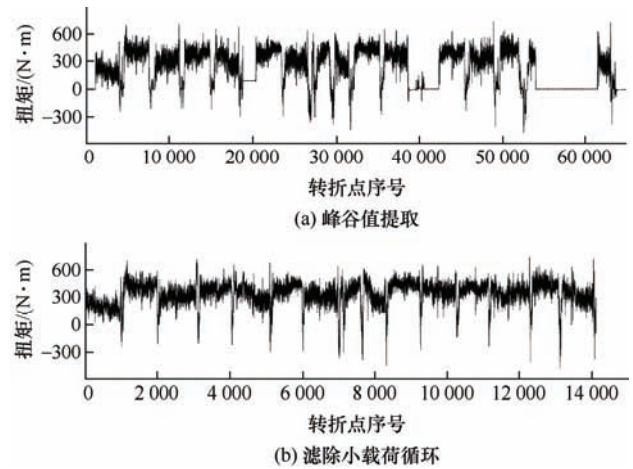


图5 实测载荷信号预处理

3.2 载荷信号分解

EMD 是 HUANG 等^[22-23]提出的一种时域信号处理方法。由于分解基于数据的局部特征时间尺度, 具有自适应和高效的特点, 因此适用于非线性和非平稳过程信号分析, 在信号处理和故障诊断领域得到了广泛应用。

EMD 能够将一个复杂的非平稳信号分解为有限个本征模态函数(Intrinsic mode function, IMF)和一个残余函数之和的形式

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中, $r_n(t)$ 为残余函数, $c_j(t)$ 为各个 IMF 分量, 分量需满足以下两个条件。

(1) 在整个数据段, 极值点数目和过零点数目必须相等或相差不超过 1。

(2) 在任何一点, 由局部极大值点形成包络线和局部极小值形成的包络线的均值为 0。

利用 EMD 方法对预处理后的载荷信号进行分解, 如图 6 所示, 载荷被分解为 10 个 IMF 分量和 1 个残余函数。

从图 6 中可以看出, 前面几个 IMF 分量涵盖了犁耕片段和田间调整片段中主要的载荷信息, 我们将其命名为主成分载荷, 而后面的 IMF 分量及残余函数主要反映了犁耕片段和田间调整片段衔接过程中载荷的整体变化趋势, 我们将其命名为趋势载荷。其中, 趋势载荷是造成整体载荷历程非平稳的主要原因。为了准确识别趋势载荷, 首先, 计算出各个 IMF 分量的标准差如图 7 所示。

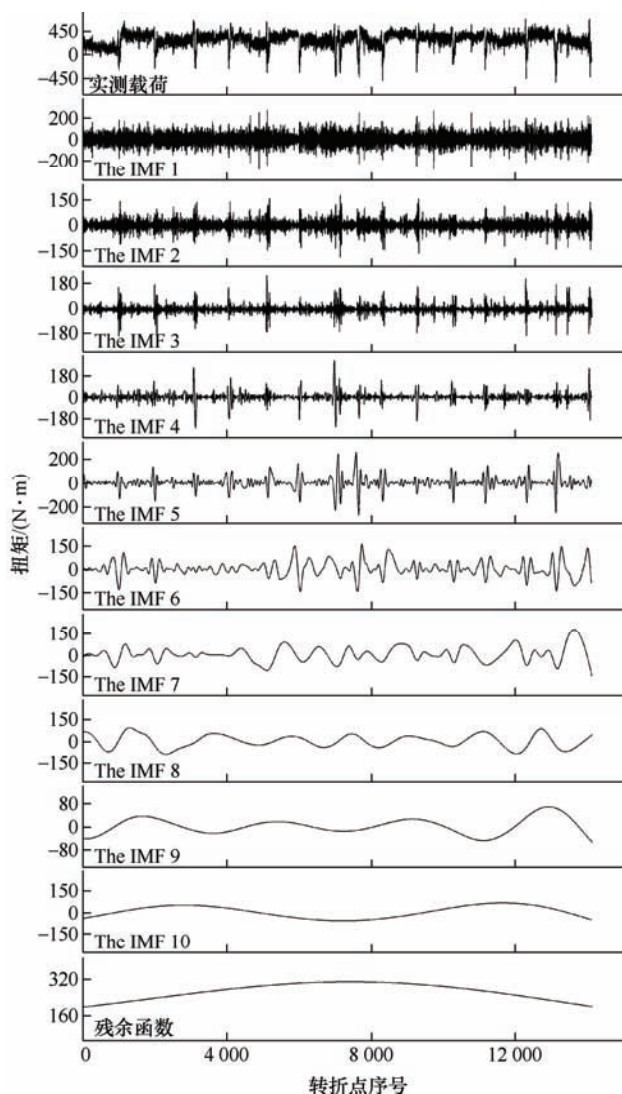


图6 实测载荷 EMD 分解结果

由图7可知,各IMF分量的标准差呈现出先减小后增大的趋势。这与客观实际相符,随着主成分载荷被分解,标准差会逐渐减小,由于趋势载荷波动幅值较大,造成标准差的增大。基于此,本文将标准差最小的IMF分量和之前的IMF分量作为主成分载荷 $X_{\text{main}}(t)$,将其余IMF分量和残余函数作为趋势载荷 $X_{\text{trend}}(t)$ 。

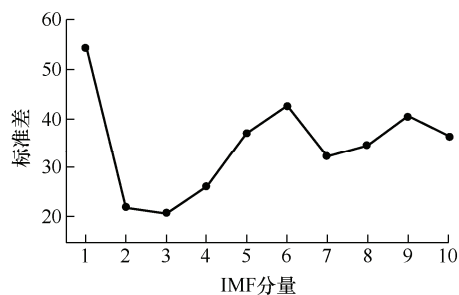


图7 各IMF分量标准差

$$X_{\text{main}}(t) = \sum_{j=1}^3 c_j(t) \quad (2)$$

$$X_{\text{trend}}(t) = X(t) - X_{\text{main}}(t) = \sum_{j=4}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (3)$$

需要说明的是,式(2)和式(3)并不具有通用性,不同的划分方法会对结果产生直接影响,其中,能否准确识别载荷历程中的非平稳负载是影响外推结果准确性的重要因素。本文基于拖拉机田间作业载荷特征分析将各IMF分量标准差与趋势载荷建立了关联,该方法对于具有相同特征的拖拉机关键零部件载荷是适用的,但是在处理其他类型负载时,还需要结合各IMF分量进行具体分析,以便合理地划分主成分载荷与趋势载荷。

至此,拖拉机传动轴非平稳载荷被成功分解为主成分载荷和趋势载荷,如图8所示,原始载荷可以完全看作分解后载荷的叠加,因此分解是无损的。对于拖拉机关键零部件负载,机具与土壤间相互作用力以及路面不平度的实时变化是造成载荷随机性和不确定性的主要原因,这部分负载即对应分解后的主成分载荷。相比于主成分载荷,趋势载荷主要反映的是拖拉机机组作业形态切换、档位变化以及行进方向改变产生的负载变化,此类负载虽然变化量级较大,但是通常可以根据力学分析进行求解,此外趋势载荷受驾驶员的操作行为影响较大,因此并不属于随机负载范畴。综上,为使外推过程更加符合极值理论的应用条件,本文对趋势载荷予以保留,仅对主成分载荷进行外推。

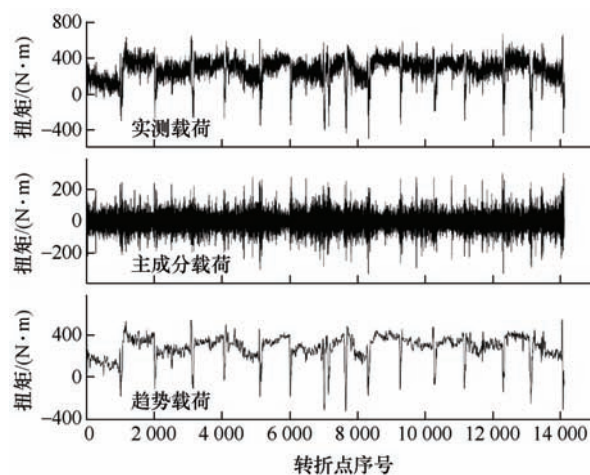


图8 实测载荷分解结果

3.3 外推模型建立

极限载荷会对零部件的疲劳损伤产生重要影响,因此在外推过程中需要考虑极限载荷,通常使用统计学方法来描述载荷极值出现的概率,本文采用POT模型对极值进行建模描述。

POT 外推方法的示意图如图 9 所示，实线代表从原始信号中分离出的主成分载荷，虚线表示外推后的极值载荷。水平线表示定义的阈值水平。首先，将超出阈值的样本全部提取出来，然后选择合适的分布对样本进行拟合，基于特征分布将随机生成的外推载荷替换原始载荷实现载荷外推。

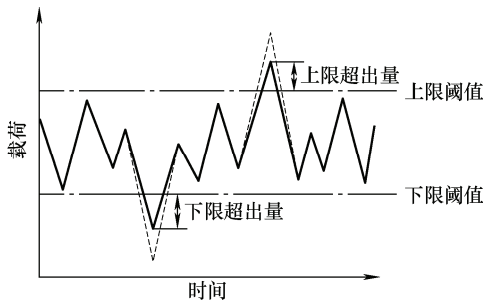


图 9 POT 外推方法示意图

根据极值理论，通常将极值样本所服从的分布设定为广义极值分布(Generalized extreme value distribution, GEVD)和广义帕累托分布(Generalized pareto distribution, GPD)。研究表明，当阈值充分大时，超出量分布更倾向于服从 GPD 分布^[8, 24]，本文选取 GPD 分布对基于 POT 模型提取的超出量进行拟合。式(4)和式(5)分别为 GPD 的分布函数和概率密度函数。

$$G(z; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} 1 - (1 + \xi \frac{z}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}} & \xi \neq 0, x > \mu \\ 1 - \exp(-\frac{z}{\sigma}) & \xi = 0, x > \mu \end{cases} \quad (4)$$

$$g(z; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} (1 + \xi \frac{z}{\sigma})^{-\frac{1+\xi}{\xi}} & \xi \neq 0, x > \mu \\ \frac{1}{\sigma} \exp(-\frac{z}{\sigma}) & \xi = 0, x > \mu \end{cases} \quad (5)$$

式中， $z = x - \mu$ 为超出量， x 为扭矩观测值， μ 为阈值； σ 为尺度参数； ξ 为形状参数。

通常选取超出量数目与载荷总循环数目的平方根相等时所对应的阈值作为外推阈值，再通过超出量均值函数图验证阈值的合理性^[9]。由此选取上限、下限阈值分别为 75.1 N·m 和 -62.9 N·m。利用 GPD 对超出量分布进行拟合，结果如表 2 所示。

表 2 GPD 拟合结果

超出量	阈值/(N·m)	形状参数	尺度参数	R^2
上限	75.1	0.080 2	31.600 1	0.99
下限	-62.9	0.014 7	33.973 9	0.99

经检验，上限阈值和下限阈值对应超出量的

GPD 拟合结果均在 99% 置信概率下通过了 KS (Kolmogorov-Smirnov) 检验。分别绘制超出量分布直方图和累计分布函数 (Cumulative distribution function, CDF) 图如图 10 所示，拟合的 GPD 分布曲线与极值样本累计曲线一致性较高，拟合效果良好。

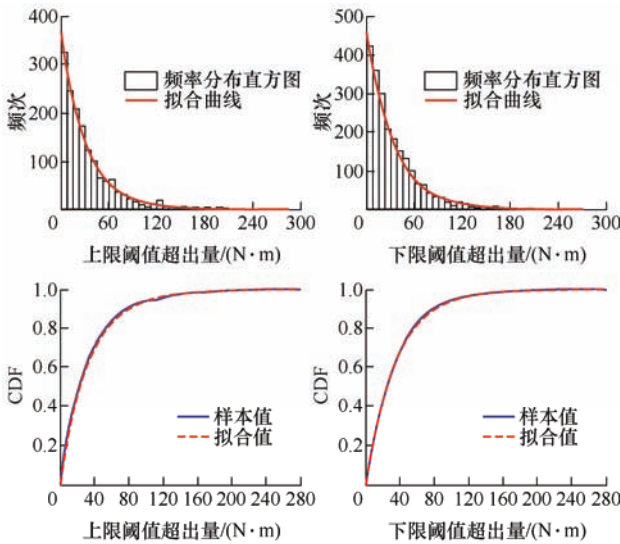


图 10 超出量分布直方图与 CDF 图

3.4 载荷极值重构

根据有限的实测载荷推断生命周期内可能出现的载荷极值是外推的重要环节，传统 POT 外推方法缺少对外推重构环节的讨论，简单地进行随机重构会降低外推结果的稳定性，基于此，本文提出了改进的外推载荷重构方法，主要流程如图 11 所示。

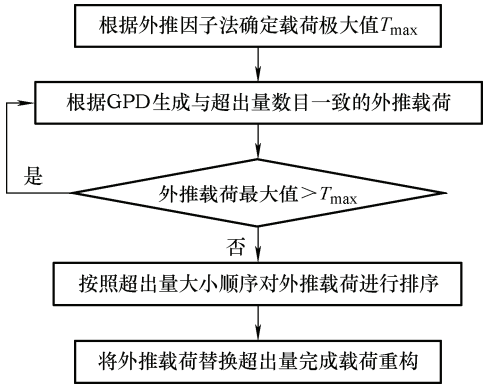


图 11 改进的外推载荷重构方法流程图

虽然外推模型能够较好地拟合超出量的分布规律，但是根据 GPD 函数性质，随机生成的超出量仍可能出现数值异常大的情况，因此，在重构环节之前需要对外推载荷添加约束条件，避免奇异值的产生。拓展因子法作为一种改进的极值推断方法，能够有效解决超越概率法对载荷谱极值推断的局限性，本文选用拓展因子法中的曲线拓展法^[25]对实测载荷谱极大值进行推断。

工程上一般将载荷极大值出现的概率设定为 $1/10^6$, 根据式(6)可以确定曲线平移的拓展因子 γ 为 141.9。

$$\gamma = H / H_0 \quad (6)$$

式中, H 为目标累计频次, 取 10^6 ; H_0 为实测载荷的最大累计频次。首先, 根据拓展因子将实测载荷的循环累计频次曲线平移形成拓展曲线, 利用样条函数对拓展曲线进行插值拟合, 拟合曲线在幅值坐标轴上的截距即为载荷循环幅值的最大值, 如图 12 所示。

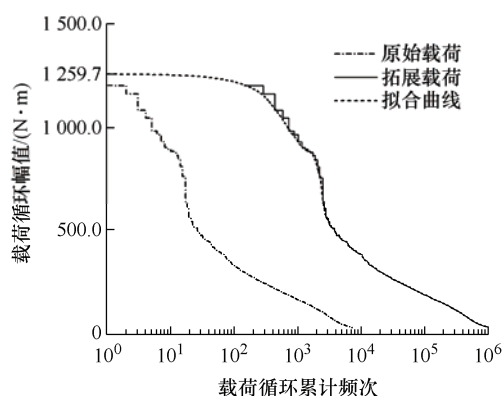


图 12 曲线拓展法求载荷循环幅值极大值

根据原始载荷与拓展载荷拟合曲线的极大值之差 ΔT , 确定上限阈值对应的外推载荷极大值为 408.95 N·m, 下限阈值对应的外推载荷极大值为 -386.52 N·m。对生成的外推载荷极大值进行检验, 直至筛选出符合要求的外推载荷。

获取与实测载荷外推模型一致且满足极大值要求的外推载荷之后, 需要对原始超出量进行替换, 传统 POT 外推方法往往基于拟合的 GPD 按照随机生成的载荷顺序进行替换, 忽略了载荷顺序对外推结果的影响。本文首先对实测载荷和外推载荷按照幅值大小分别进行排序, 同步保留实测载荷的原始相位信息, 然后参照相位信息对外推载荷进行还原, 按照还原后载荷顺序对原始超出量进行替换, 最终实现载荷重构, 图 13 为排序方法示意图。

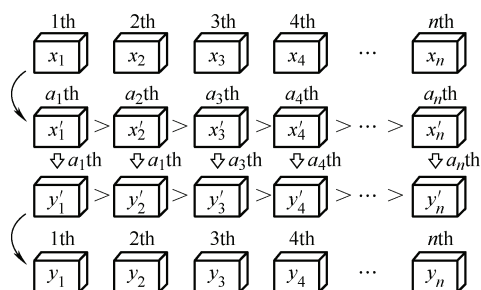
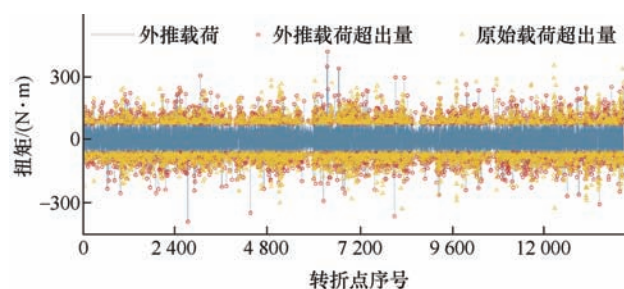


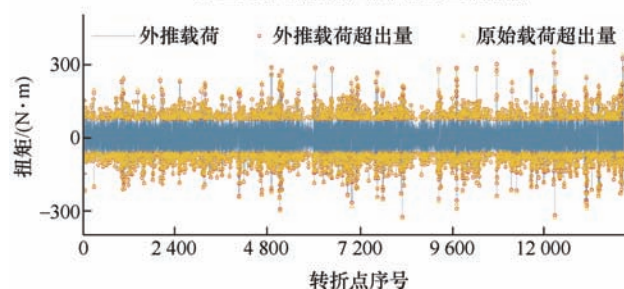
图 13 排序方法示意图

分别利用改进后的外推重构方法和传统 POT 外推中的随机重构方法对外推载荷进行重构, 主成分载荷的外推结果如图 14a、14b 所示, 将外推后的主成分载荷与趋势载荷叠加得到完整的外推载荷历程如图 14c、14d 所示。

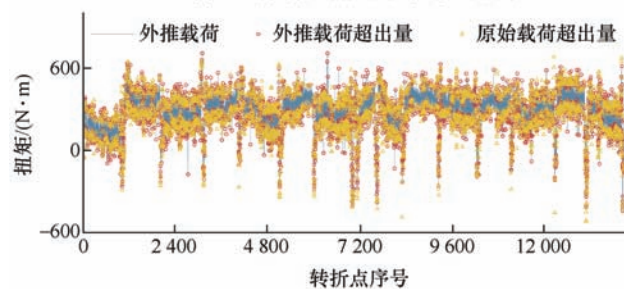
至此, 外推过程已全部完成, 由图 14 可知, 本文所述方法能够保留原始载荷的非平稳特征, 对应拖拉机不同作业状态下的载荷片段中的极值载荷均得到了有效外推, 在此基础上, 改进的载荷重构方法能够得到与实测载荷超出量分布更为一致的外推结果, 进一步提高了外推精度。



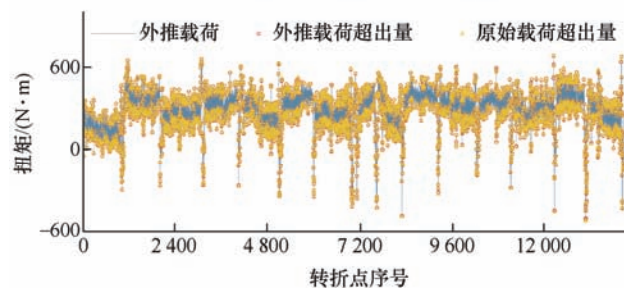
(a) 主成分载荷外推结果-随机重构方法



(b) 主成分载荷外推结果-改进重构方法



(c) 完整外推结果-随机重构方法



(d) 完整外推结果-改进重构方法

图 14 外推结果时域对比

4 结果分析与讨论

对实测载荷历程(15a)与分别使用传统 POT 外推方法(15b)、随机重构方法(15c)、改进重构方法(15d)进行等长度外推后得到的外推载荷历程进行雨流计数, 均幅值频次矩阵如图 15 所示。

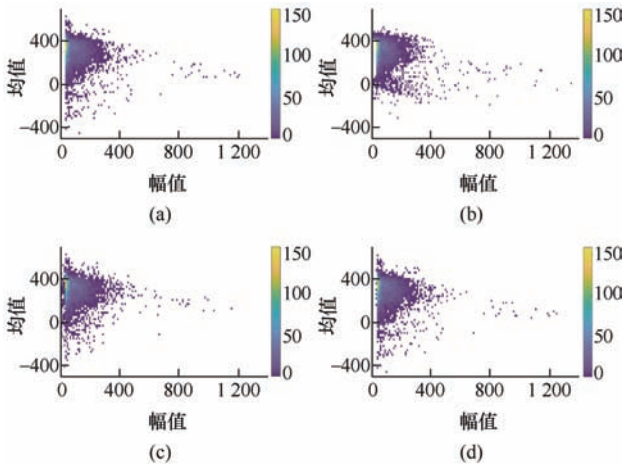


图 15 外推结果雨流域对比

由图 15b 可知, 传统 POT 外推方法没有考虑趋势载荷对外推结果的影响, 外推方法的随机性导致载荷均值分布更为集中, 在幅值分布上会出现不满足极大值要求的异常幅值。由图 15c、15d 可知, 随机重构方法能够外推得到超出量较大主成分载荷, 但是会打破原始超出量与趋势载荷之间的关联, 导致最终外推结果的幅值分布反而被压缩, 代表不同作业状态的分布区域特征不明显。与传统方法相比, 改进的重构方法所得到的外推结果与实测载荷雨流分布的一致性最高。

进一步利用上述雨流矩阵结果绘制幅值累计频次曲线, 不同外推方法的对比结果如图 16 所示。由图 16 可知, 本文所述方法能够得到更为理想的外推结果, 改进的重构方法能够对异常幅值进行筛选并结合原始超出量分布对生成的极值载荷进行排序, 合理外推实测载荷中未曾出现的大载荷循环, 外推效果更好。

为验证本文所述方法的可靠性, 选取均值和标准差作为特征值, 对实测载荷重复进行等长度外推, 针对每项特征值进行 10^4 次外推并分别与实测载荷特征值进行对比, 结果如图 17 所示。由图 17 可知, 改进重构方法对应外推结果特征值的总体偏差均小于随机重构方法, 随机重构方法导致外推载荷历程中的下限超出量过于保守, 使外推结果的标准差偏差整体倾向于负值区间, 结果表明, 对超出

量进行合理排序能够有效弥补这一缺陷, 改进重构方法能够使外推结果的均值稳定性提高 28.5%, 标准差稳定性提高 31.2%。

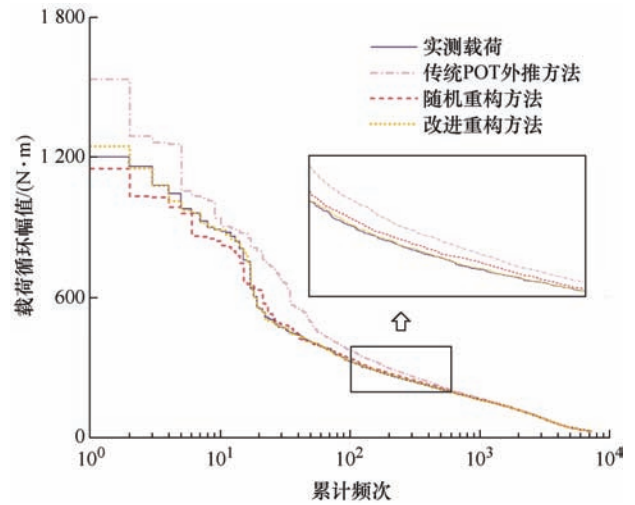


图 16 载荷循环幅值累计频次对比

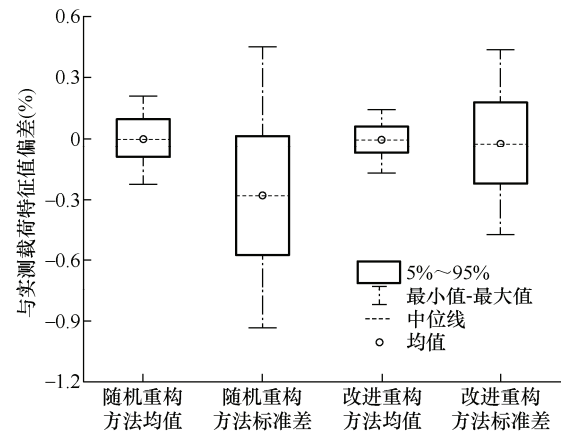


图 17 外推载荷特征值对比

在产品研发过程中, 载荷外推结果往往被用于零部件的疲劳分析或基于损伤理论编制用于台架加速试验的程序载荷谱, 外推方式对零部件的疲劳损伤计算结果有显著影响, 并最终影响载荷谱精度, 因此, 本文进一步对外推载荷造成的疲劳损伤进行对比分析。

根据 Miner 线性累计损伤理论可知, 造成结构疲劳损伤的主要因素为载荷幅值及其作用频次^[26]。本文仅考虑扭矩载荷对传动轴疲劳损伤的影响, 根据材料 S-N 曲线建立轴表面最大剪应力循环幅值与失效循环次数之间的对应关系, 由式(7)计算出外推载荷造成的总体累计损伤值 D 。

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{i,f}} \quad (7)$$

式中, D_i 为第 i 级载荷造成的累计疲劳损伤; k 为

载荷等级数; n_i 为第 i 级载荷对应的循环频次; N_{if} 为第 i 级载荷对应的失效循环次数。

表 3 为拖拉机传动轴材料属性参数。本文使用耐久性分析软件 Ncode 开展疲劳分析相关工作, 利用不同外推方法分别对原始载荷历程进行 10 次等长度外推, 并计算出外推载荷与原始载荷对传动轴造成的损伤比, 如图 18 所示。

表 3 传动轴材料属性

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg/m ³)	屈服强度 /MPa
41Cr4	210	0.3	7 800	660

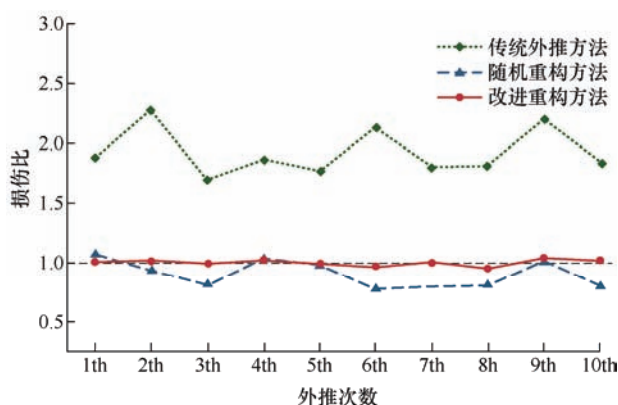


图 18 外推结果损伤比

由图 18 可知, 传统 POT 外推方法会导致外推结果具有较大的损伤比, 累计损伤最高可为实测载荷的 2 倍以上, 并且损伤结果具有较大的波动范围, 稳定性较差。本文提出的先分解后外推的思路能够有效解决传统 POT 外推方法在处理非平稳载荷时外推结果失真的问题, 在此基础上, 改进的重构方法能够进一步提高外推结果精度, 损伤比更接近于 1 且稳定性更高。由于在外推过程中重构了极值载荷, 因此结果中包含有外推载荷损伤高于原始载荷损伤的情况, 进一步验证了本文所述方法的有效性。

需要注意的是, 本文开展的实例分析主要用于验证提出的外推方法, 由于拖拉机作业工况种类繁多, 农田环境开放复杂, 不同驾驶员的操作习惯及熟练程度均具有较大差异, 因此, 仅凭借单次作业工况所采集的数据难以反映出整个作业季以及生命周期内的负载特征。在实际应用中, 首先应获取拖拉机关键零部件在不同工况下、不同作业季、不同作业模式以及不同土壤环境条件下的载荷样本数据, 再根据企业设定的产品投放到目标市场的功能性需求, 制定详细的外推方案。基于此, 才能够最终得到产品全生命周期的动态载荷谱。

5 结论

为克服传统 POT 外推方法的局限性, 本文提出了基于 EMD-POT 模型的载荷时域外推方法, 该方法能够更好地适用于非平稳载荷, 在此基础上改进的重构方法能够进一步提高外推结果的稳定性。以拖拉机犁耕工况下的传动轴载荷为例, 验证了本文所述方法的有效性。外推结果能够为仿真分析及可靠性试验提供更为准确的负载输入, 进一步提高载荷谱编制的精度。

(1) 对犁耕工况下负载进行时域和雨流域分析, 结果表明, 拖拉机田间作业时工作状态之间的转换是造成载荷非平稳的主要原因。

(2) 本文所述方法能够有效解决传统 POT 外推方法在处理非平稳载荷时外推结果失真的问题, 改进的重构方法能够进一步提高外推与实测载荷循环的一致性, 其中均值稳定性提高了 28.5%, 标准差稳定性提高了 31.2%。

(3) 损伤计算结果表明, 本文所述方法能够得到与原始测量载荷更为一致的累计损伤结果, 相比于随机重构方法, 改进重构方法的损伤一致性能够提高 9.4%。

参 考 文 献

- [1] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(8): 1-17.
- [2] PARAFOROS D S, GRIEPENTROG H W, VOUGIOUKAS S G. Modeling and simulation of a four-rotor rake loading for predicting accumulated fatigue damage: A Markov regime-switching approach[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(2): 317-325.
- [3] WEN C, XIE B, LI Z, et al. Power density based fatigue load spectrum editing for accelerated durability testing for tractor front axles[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 73-88.
- [4] LIU X, ZHANG M, WANG H, et al. Fatigue life analysis of automotive key parts based on improved peak-over-threshold method[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 43(8): 1824-1836.
- [5] WANG J, CHEN H, LI Y, et al. A review of the extrapolation method in load spectrum compiling[J].

- Journal of Mechanical Engineering, 2016, 62(1): 60-75.
- [6] NAGODE M, KLEMENC J, FAJDIGA M. Parametric modelling and scatter prediction of rainflow matrices[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(6): 525-532.
- [7] JOHANNESSON P, THOMAS J J. Extrapolation of rainflow matrices[J]. Extremes, 2001, 4(3): 241-262.
- [8] 李昕雪, 王迎光. 不同外推方法求解近海风机的极限载荷[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(6): 844-848.
- LI Xinxue, WANG Yingguang. Comparison of different statistic extrapolation methods in calculation of extreme load of offshore wind turbines[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(6): 844-848.
- [9] JOHANNESSON P. Extrapolation of load histories and spectra[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2006, 29(3): 209-217.
- [10] LI S, CUI W, PAIK J K. An improved procedure for generating standardised load-time histories for marine structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2016, 230(2): 281-296.
- [11] 尹宜勇, 付宁善, 廖频, 等. 基于 DTW 距离的拖拉机传动轴载荷样本长度计算方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 54-60.
- YIN Yiyong, FU Ningshan, LIAO Pin, et al. Calculation method of load sample size for tractor drive shafts based on dynamic time warping distance[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12): 54-60.
- [12] RAGAN P, MANUEL L. Statistical extrapolation methods for estimating wind turbine extreme loads[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130(3): 031011.
- [13] YANG X, LIU X, TONG J, et al. Research on load spectrum construction of bench test based on automotive proving ground[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2017, 46(1): 244-251.
- [14] HE J, ZHAO X, LI G, et al. Time domain load extrapolation method for CNC machine tools based on GRA-POT model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(9): 3799-3812.
- [15] 杨子涵, 宋正河, 尹宜勇, 等. 基于 POT 模型的大功率拖拉机传动轴载荷时域外推方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 40-47.
- YANG Zihan, SONG Zhenghe, YIN Yiyong, et al. Time domain extrapolation method for load of drive shaft of high-power tractor based on POT model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 40-47.
- [16] YANG Z H, SONG Z H, ZHAO X Y, et al. Time-domain extrapolation method for tractor drive shaft loads in stationary operating conditions[J]. Biosystems Engineering, 2021, 210: 143-155.
- [17] PARAFOROS D S, GRIEPENTROG H W. Switching Markov chains for modelling the loads of a four-rotor swather under different operating modes[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 5392-5397.
- [18] WANG J, ZHANG J, LIANG Y, et al. A cyclic simulation approach for the generation of the non-stationary load histories of engineering vehicles[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(5): 1547-1554.
- [19] CERRINI A, JOHANNESSON P, BERETTA S. Superposition of manoeuvres and load spectra extrapolation[C]// Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2006, 5: 255-262.
- [20] QIN C J, SHI G, TAO J, et al. Precise cutterhead torque prediction for shield tunneling machines using a novel hybrid deep neural network[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 151: 107386.
- [21] POIRIER M, GAGNON M, TAHAN A, et al. Extrapolation of dynamic load behaviour on hydroelectric turbine blades with cyclostationary modelling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 193-205.
- [22] 胡芑庆, 陈徽鹏, 程哲, 等. 基于经验模态分解和深度卷积神经网络的行星齿轮箱故障诊断方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 9-18.
- HU Niaoqing, CHEN Huipeng, CHENG Zhe, et al. Fault diagnosis for planetary gearbox based on EMD and deep convolutional neural networks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 9-18.
- [23] ALVANITOPOULOS P F, ANDREADIS I, ELENAS A. Interdependence between damage indices and ground motion parameters based on Hilbert-Huang transform[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 21(2): 025101.
- [24] MAZAS F, HAMM L. A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(5): 385-394.
- [25] 陈道云, 孙守光, 李强. 高速列车载荷谱推断及扩展方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 151-155.

- CHEN Daoyun, SUN Shouguang, LI Qiang. Study on deduction and extend of high-speed train load spectrum[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 151-155.
- [26] 杨广雪, 李广全, 周君锋, 等. 高速动车组牵引拉杆载荷特性研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 200-206.
- YANG Guangxue, LI Guangquan, ZHOU Junfeng, et al. Study on traction rod load characteristics of high speed train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 200-206.
-
- 作者简介:** 杨子涵, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为农机装备结构可靠性。
E-mail: yangzihan@cau.edu.cn
- 宋正河(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为农机装备试验验证方法与技术。
E-mail: songzhenghe@cau.edu.cn