

基于实测载荷谱的大马力拖拉机变速器动态损伤评估

贾 方^{1,2}, 张晋海¹, 郭晓博^{2,3}, 刘国强^{2,3}, 闫祥海^{1,3}, 查正维^{2,3}, 徐立友^{1,3*}

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 洛阳拖拉机研究所有限公司, 洛阳 471003;
3. 智能农业动力装备全国重点实验室, 洛阳 471039)

摘 要: 针对 Miner 损伤法则在损伤评估时只考虑应力幅值的局限性, 该研究提出一种考虑载荷梯度、频段损伤能量以及载荷峭度的动态损伤评估方法。首先搭建拖拉机车轮驱动扭矩测试系统, 通过扭矩传感器获取车轮处的扭矩载荷数据; 利用雨流计数法和统计方法得到了载荷的统计特性。随后对载荷梯度、频段损伤能量以及载荷峭度进行线性加权, 构建损伤谱指数; 基于网格搜索法和多载荷类型验证确定加权系数分别为 0.350、0.425、0.225。并通过 sigmoid 函数进行 s 型非线性压缩以抑制极端值的干扰; 随后将载荷循环时间中心在动态损伤强度指数窗口进行索引, 将时频特性融入循环损伤, 形成动态损伤评估框架。结果表明, 所提方法能有效计算载荷分频段损伤, 变速器轴载荷的归一化功率谱密度能量最高点为 0.1 Hz, 损伤最大频率为 0.43 Hz, 损伤值为 1.78×10^{-8} ; 传统 Miner 损伤法则的计算相对误差值为 51.11%, 本方法的损伤预测相对误差为 0.67%, 具有较高的损伤预测准确率和良好的可行性, 可为损伤评估方法的研究提供理论依据和新思路。

关键词: 载荷谱; 疲劳损伤; 频域; 拖拉机变速器; Miner 法则

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202509264

中图分类号: S232.3; U467.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2026)-12-0116-09

贾方, 张晋海, 郭晓博, 等. 基于实测载荷谱的大马力拖拉机变速器动态损伤评估[J]. 农业工程学报, 2026, 42(12): 116-124. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202509264 <http://www.tcsae.org>

JIA Fang, ZHANG Jinhai, GUO Xiaobo, et al. Dynamic damage assessment of high horsepower tractor transmission based on measured load spectrum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(12): 116-124. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202509264 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

变速器是传动系动力总成的核心部件, 其性能直接关系到拖拉机的工作效率与可靠性^[1-2]。为适应宽速域和重载工况, 现代拖拉机变速器结构日趋复杂, 其传动轴作为关键承力部件, 在复杂载荷下易引发疲劳失效^[3-4]。因此, 开展科学系统的疲劳损伤评估方法至关重要。

当前疲劳寿命分析方法众多, 如名义应力法^[5-7]、局部应力应变法^[8]、应力场强法^[9]、裂纹扩展理论^[10]以及基于能量准则^[11]的疲劳寿命分析方法等, 虽各有优势, 但在工程适用性上存在局限。其中, 基于名义应力法与 Miner 线性累积法则的模型, 因其物理意义明确、计算高效, 被确立为工程实践的主流方法与国际标准^[5-7,12-14]。然而, 传统 Miner 法则存在固有缺陷, 它未考虑载荷顺序效应, 且其损伤计算仅依赖于载荷幅值, 完全忽略了载荷的梯度、冲击以及频域分布等动态特性^[11]。

为弥补上述不足, 一系列修正 Miner 模型被提出。ZHAO 等^[15]采用双线性模型评估汽车后桥耐久性, 郭文华等^[16]则通过 Corten-Dolan 准则修正 Miner 法则以预测

桥梁寿命。另外还有 Grove-Manson 双线性损伤理论^[17]、模糊 Miner 法则^[18]、连续 Miner 法则^[19]等一系列修正模型, 这些模型修正主要集中在多模型融合、应力修正、大幅值识别、参数辨识寻优等方面, 仍然依赖单一的均幅值指标进行疲劳计算。然而, 现有模型难以量化高载荷梯度引发的材料过载效应^[20-21], 也普遍忽视了特定频段下, 高频小幅值载荷的累积损伤贡献^[11,22-23]。

针对上述问题, 本文以大马力拖拉机变速器轴为研究对象, 提出一种综合考量载荷动态特性与频域分布的损伤评估框架。本研究突破传统模型仅依赖幅值的局限, 将载荷梯度、时域峭度与频域损伤能量比等多维特征融合, 构建一个动态损伤强度指数, 并据此对 Miner 法则中的载荷表征进行修正, 最终实现对变速器轴在复杂工况下损伤状态的精准评估。

1 载荷采集与数据预处理

1.1 田间载荷谱获取

为获取实际载荷数据, 本文以某型号 162 kW 轮式拖拉机为试验平台, 其搭载的国 IV 发动机符合最新排放标准, 多挡位机械变速器采用主副变速与爬行挡设计, 可适应复杂田间作业需求。犁耕作为拖拉机作业中最常见的重负荷场景, 其载荷特性和操作模式是变速器轴损伤的典型诱因。因此本文聚焦犁耕工况 (田间试验如图 1 所示), 选择作业过程中最常使用的挡位 (中三挡快速挡, 大致速度范围为 11~15 km/h) 作为典型作业条件, 实时采集车轮驱动扭矩、侧向力、垂直载荷等关键参数。将测得的车轮驱动扭矩, 依次通过轮边减速行星机构、中

收稿日期: 2025-09-29 修订日期: 2025-11-14

基金项目: 中原科技创新青年拔尖人才计划项目; 河南省高校科技创新人才支持计划项目 (25HASTIT037); 国机集团青年科技基金 (QNJJ-ZD-2024-26)

作者简介: 贾方, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为拖拉机智能检测与装备研发。Email: franc_jia@sina.com

*通信作者: 徐立友, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为车辆新型传动理论。Email: xlyou@haust.edu.cn

央传动、分动箱、爬行挡、变速器等将其换算至变速器轴处的等效扭矩，以此作为变速器轴载荷输入进行后续的损伤分析与寿命评估。Kistler Roadyn Compact 采集系统通过高精度应变片阵列测量三维力与三维力矩，配套的信号放大器可实现数据实时调理与传输。采集仪型号为 NI-cRIO-9035，搭载 1.33 GHz 双核 Intel Atom 处理器、8 槽扩展插槽的 CompactRIO 嵌入式控制器，支持双千兆以太网、USB3.0 和 TSN 同步功能，适用于工业控制与监测场景。根据奈奎斯特采样定理设置采样频率为 200 Hz，抗混叠滤波器为低通滤波器，截止频率为 80 Hz，扭矩传感器集成于轮毂与车轴间，放大器通过屏蔽线缆与车载数据采集系统连接，确保恶劣田间环境下信号稳定传输。最终得到了目标车轮驱动轴扭矩载荷数据，总长度约 3 141 s。

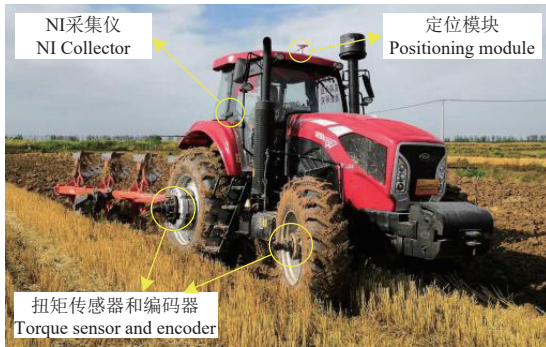


图 1 田间试验

Fig.1 Field experiment

1.2 降噪与趋势项去除

由于田间试验得到的数据存在噪声等干扰，为了防止异常值和噪声信号影响损伤评估效果，需要对采集得到的信号进行预处理^[24]。受传感器温漂、信号传输等情况会引起信号波形偏移，使得载荷数据呈现非平稳特性，影响功率谱密度分析。选取同一工况下作业过程稳定、信号传输正常的原始载荷数据进行预处理，本文通过专业载荷处理软件 nCode 进行信号降噪和趋势项去除，预处理后的信号如图 2 所示。

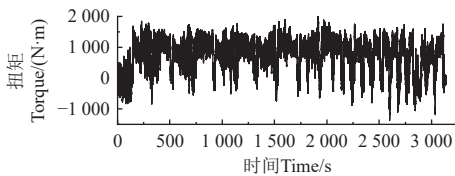


图 2 预处理后犁耕扭矩载荷谱

Fig.2 Pre-processed plowing torque load spectrum

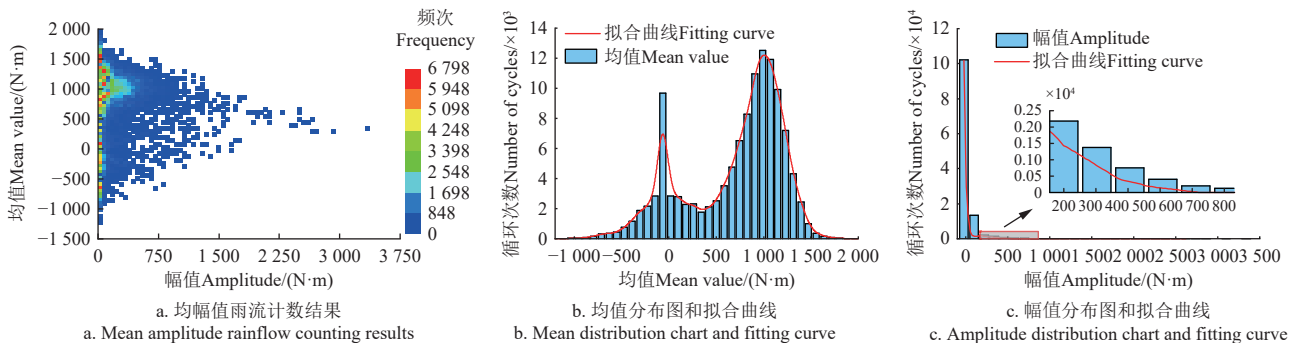


图 4 载荷信号雨流计数结果

Fig.4 Load signal rainflow counting result

2 载荷统计特性分析

载荷信号分布统计是疲劳损伤评估的基础，通过统计分布可量化应力波动的概率特性，明确载荷的集中趋势、离散程度及极端值出现规律，为 S-N 曲线、Miner 累积损伤理论等模型提供关键输入参数，确保损伤计算的物理合理性^[25]。对载荷信号进行分布统计，结果如图 3 所示。

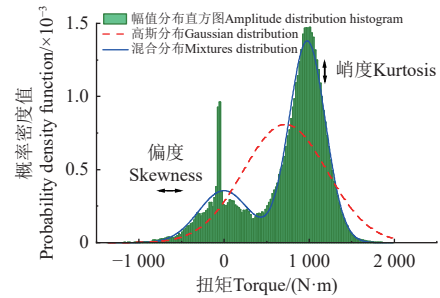


图 3 载荷信号分布图

Fig.3 Load signal distribution diagram

一般认为拖拉机轴类载荷信号服从高斯分布，但是由图 3 可知，拖拉机变速器轴载荷信号服从混合分布，具有尖峰脉冲和重尾分布特征，其极端载荷事件的发生概率显著高于高斯信号，这类极端事件会直接引发局部应力集中，加速微观裂纹萌生与扩展，导致实际疲劳损伤速率超出基于高斯假设的模型预测值，增加结构早期失效风险^[26]。概率密度函数的分布形状是以矩的形式定义的，一阶矩是均值，二阶矩是方差，标准正态分布只有两阶矩构成。偏度作为三阶统计量，表征分布的不对称性；信号峭度作为四阶统计量，反映信号波形的尖峰程度，高峭度值对应更多异常突发的极端载荷事件，易在结构薄弱部位产生应力集中，放大局部损伤效应，会扭曲均值应力修正的准确性，导致疲劳寿命预测出现系统性偏差，影响结构安全评估的可靠性。

雨流计数法作为疲劳寿命预测领域的常规技术手段，能够从多变的时域载荷信号中精准识别并提取有效循环载荷特征。该方法不仅能系统解析循环应力的幅值分布与频次统计，并且适用于多种疲劳评估规范及理论模型^[27]。通过雨流计数处理，可以将原始复杂载荷历程转化为标准化的应力循环序列对，从而为后续疲劳损伤计算、寿命估算等分析环节提供结构化的基础数据支撑，确保分析流程的科学性与可靠性。载荷信号雨流计数结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 载荷雨流计数均值范围为 $-1\,400 \sim 2\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, 整体符合混合高斯分布, 幅值范围在 $0 \sim 3\,400\text{ N}\cdot\text{m}$, 整体符合威布尔分布, 但幅值大都集中在 $800\text{ N}\cdot\text{m}$ 之内, 尤其是 $200\text{ N}\cdot\text{m}$ 以下的小幅值载荷居多。虽然单次小载荷幅值造成的损伤较小, 在很多载荷谱加速研究中会忽略小载荷所造成的损伤^[28], 但是有研究表明当小载荷幅值的累积频次达到一定程度, 也会对结构造成较大的损伤, 同时小载荷幅值存在加固作用, 会影响整体的损伤评估^[23,29]。

3 动态损伤评估

3.1 损伤谱指数构造与动态特征提取

3.1.1 时域峭度与载荷梯度计算

峭度作为量化载荷分布尖峭程度的统计指标, 在冲击识别与高峰异常检测领域具有典型应用价值。尤其在机械冲击性疲劳场景中, 常呈现以峰值载荷为主导的疲劳破坏模式, 这类破坏因载荷分布的极端集中性而更具破坏力^[30]。拖拉机在恶劣工况下运行时, 常面临来自田埂、石块等异物的冲击载荷, 变速器作为承受此类载荷的核心部件, 其疲劳特性更需重点关注。结合载荷统计特性分析, 将峭度指标纳入考量范畴, 可以捕捉峰值载荷的异常突增特征, 从而提升冲击识别精度与疲劳破坏预警的可靠性。峭度 K_i 定义为

$$K_i = \frac{\frac{1}{L_w} \sum_{i=1}^n (x_i[n] - \mu_i)^4}{\sigma_i^4} \quad (1)$$

其中 L_w 为时间窗样本数; n 为窗口内的采样点序号; $x_i[n]$ 为第 i 个时间窗口内的第 n 个采样点的信号值; μ_i 和 σ_i 分别为窗内信号值的均值和标准差, 定义如下:

$$\mu_i = \frac{1}{L_w} \sum_{i=1}^n x_i[n] \quad (2)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{L_w} \sum_{i=1}^n (x_i[n] - \mu_i)^2} \quad (3)$$

梯度作为量化载荷变化速率的核心指标, 能够精准刻画载荷随时间或空间分布的剧烈程度, 动态冲击速率越快、强度越剧烈, 越易诱发微裂纹加速扩展, 形成瞬时应力集中与疲劳损伤的叠加效应。在拖拉机犁耕等振荡性显著的作业场景中, 载荷变化速度与绝对载荷水平具有同等重要的耐久性影响权重, 前者决定冲击损伤的瞬时累积速率, 直接影响微裂纹扩展的临界阈值, 后者则通过峰值载荷的持续作用, 关联疲劳破坏的长期演化路径。载荷梯度 G_i 用来度量相邻窗口均值的变化速率, 定义为

$$G_i = \frac{|T_{i+1} - T_i|}{\Delta t} \quad (4)$$

其中 T_i 为 i 时刻的扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; Δt 为采样间隔, s 。

需要说明的是, 偏度在损伤分析中影响较小, 主要因其物理机制关联性弱, 损伤事件多表现为瞬时能量骤增或频率调制, 更直接关联峭度或功率谱峰值; 而偏度仅描述信号分布不对称性, 难以量化损伤核心特征。此

外, 偏度对噪声敏感, 易受测量系统非线性或随机振动干扰, 导致误判。在多模态场景中, 偏度难以解耦多损伤源贡献, 功能被峭度等更敏感指标覆盖。工程应用中, 优先选择与损伤机制直接相关的指标, 偏度因冗余性及鲁棒性不足, 实际应用价值有限, 因此本文不考虑信号的偏度指标。

3.1.2 窄带频谱自适应能量分析

功率谱密度作为频域疲劳分析的核心内容, 描述了信号功率在频率轴上的分布, 反映了不同频率成分对总功率的贡献, 可以很好地定位能量集中区域。但是在某些情况下, 虽然功率谱密度显示某个频率的能量较低, 但信号的峭度较高也可能导致快速损伤。因此通过一阶功率谱矩即载荷中心频率来定义能量分布重心, 通过频率带宽量化能量扩散范围, 同时峰值频率能精准捕捉变速器齿轮啮合等窄带离散谐振信号。三者协同通过峰值对孤立尖峰的敏感性与载荷中心频率对宽带拖尾的稳健性互补抗噪, 加权后既能在齿轮共振时凸显清晰谱峰, 又能在路谱工况能量展宽时合理表征重心, 且仅需一次功率谱密度计算与加权求和即可实现。为度量受损相关能量在窄带内的集中度, 先在窗口 i 内通过峰值频率和载荷中心频率组合估计主导频率 $\hat{f}_i$:

$$\hat{f}_i = \frac{f_{peak,1}^{(i)} + f_{peak,2}^{(i)}}{2} \quad (5)$$

式中 $f_{peak,1}^{(i)}$ 为峰值频率, 通过短时傅里叶变换将时域信号转换为频域复数谱, 经模平方并归一化得到功率谱密度曲线, 随后在离散频率点集上搜索曲线的最大值, 该最大值对应的频率即为峰值频率, 定义为

$$f_{peak,1}^{(i)} = \arg \max \text{PSD}_i(f) \quad (6)$$

式中 $\text{PSD}_i(f)$ 为第 i 个窗口的功率谱密度; $f_{peak,2}^{(i)}$ 为载荷中心频率, 是频率 f 与功率谱密度乘积的积分除以总功率, 定义为

$$f_{peak,2}^{(i)} = \frac{\sum_f f \cdot \text{PSD}_i(f)}{\sum_f \text{PSD}_i(f)} \quad (7)$$

通过式 (5) 可以计算得出主导频率范围为 $0.17 \sim 2.62\text{ Hz}$ 。通过带宽定义自适应窄带, 频段区间的上限 $f_L^{(i)}$ 和下限 $f_H^{(i)}$ 分别为

$$\begin{aligned} f_L^{(i)} &= \max\{f_{\min}, \hat{f}_i - \delta f\} \\ f_H^{(i)} &= \min\{f_{\max}, \hat{f}_i + \delta f\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ 分别为载荷信号功率谱密度分布区间的最小值和最大值, 经计算取 $0 \sim 50\text{ Hz}$; $\delta f = \max(\hat{f}_i / Q, \Delta f_{\min})$ 为半带宽; Q 为品质因数; $\Delta f_{\min}$ 为频率分辨率下限, 取 0.1 Hz 。

设定品质因数 Q 的目的是为了通过调节 Q 值得到近似恒定的半带宽, 避免固定带宽在高频或低频时造成过宽或过窄。根据带通滤波器的特性^[31] 以及拖拉机信号的处理经验, 建议 Q 值范围为 $1 \sim 20$, 根据低频低 Q 、高频高 Q 的原则可以初步得到半带宽的范围在 $0.131 \sim 0.17\text{ Hz}$ 之间。随后以 0.01 为步长, 遍历不同值对能量累积计算的影响, 结果显示, 当半带宽值分别为 0.131 、 0.14 、 0.15 、 0.16 、 0.17 时, 对应的标准差分别为 0.042 、

0.028、0.021、0.035、0.003 9，因此取最小标准差值所对应的半带宽值为 0.15 Hz，此时的 Q 值可以通过正比关系拟合得出，最终 Q 值范围为 1.13~17.47。定义损伤能量比 E_i 为

$$E_i = \frac{\sum_{f_L^{(i)}}^{f_H^{(i)}} \text{PSD}_i(f) \Delta f}{\sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} \text{PSD}_i(f) \Delta f} \quad (9)$$

式中 Δf 为频率分辨率，Hz。

3.1.3 动态损伤强度指数与非线性映射

由于载荷梯度 G_i 、峭度 K_i 以及损伤能量比 E_i 的量纲不同，为了避免因某些窗口的极端值导致修正系数过大或过小，引起损伤评估结果的失真，通过截断函数将峭度、损伤能量比、梯度 3 种动态特征统一为量纲一致的驱动指标，以保证修正幅度在物理合理区间内，归一化计算式如下：

$$K_i^* = \text{clip}\left(\frac{K_i - 3}{5}, 0, 1\right) \quad (10)$$

$$E_i^* = \text{clip}(E_i, 0, 1) \quad (11)$$

$$G_i^* = \text{clip}\left(\frac{G_i}{G_{95}}, 0, 1\right) \quad (12)$$

其中 G_i^* 、 K_i^* 、 E_i^* 分别为归一化后的载荷梯度、峭度、损伤能量比； $\text{clip}(x, 0, 1) = \min[\max(x, 0), 1]$ ， G_{95} 为梯度 95% 分位数。

由于 Miner 法则的线性累积原则，为了保证理论框架的可兼容性，同时为了直接表达各分量对总损伤指数的贡献程度，方便解释和物理关联，对 3 个特征量进行线性加权，以免非线性组合带来的过拟合和数值不稳定性问题。本文在构造加权函数的时候选择加和形式，以避免单一分量信号主导，当某个分量趋于 0 的时候，整体损伤谱指数 (damage spectrum index, DSI) 会造成塌陷，掩盖其他特征的贡献，同时加和形式意味着 DSI 可以分解为不同损伤机理的贡献，与实际工程需要相符。DSI 构造公式如下：

$$\text{DSI} = \omega_K K_i^* + \omega_E E_i^* + \omega_G G_i^* \quad (13)$$

式中 ω_K 、 ω_E 、 ω_G 分别为峭度、损伤能量比、梯度特征的权重系数。

不同的权重系数会得到不同的计算结果，因此必须选取最优的权重系数。可以将权重系数的选择转化成多目标优化问题，以各载荷类型总损伤与基准真实损伤的总体误差最小作为目标。3 个权重系数范围均在 0~1 之间，计算量相对较小，因此采用网格搜索法对权重系数组合进行遍历，首先约束权重系数的取值范围和搜索步长，在所有权重系数范围内构建网格，通过交叉验证法对网格内所有的权重系数组合进行计算，将最优权重系数组合设定为最终模型权重系数。为了兼顾运算速度和权重系数精度，将搜索步长设置为 0.025，3 个权重系数与均方根误差的映射关系如图 5 所示。

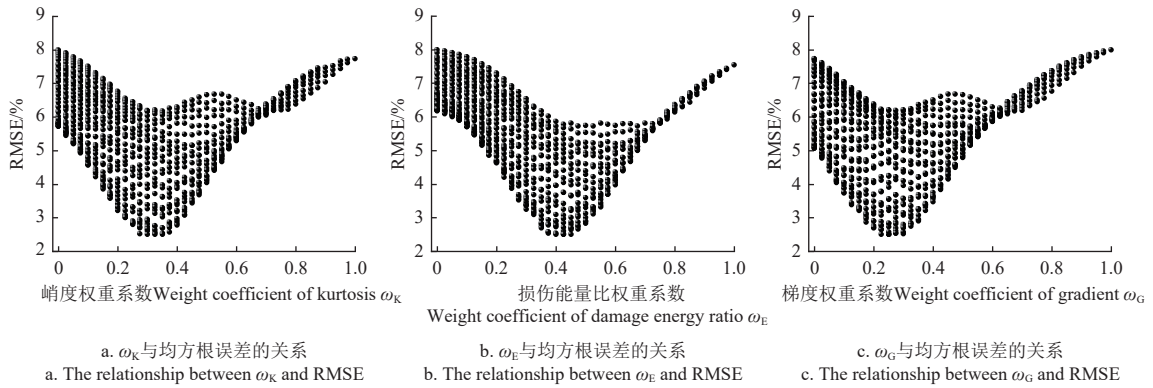


图 5 DSI 中不同峭度、损伤能量比、梯度的权重系数与均方根误差的关系

Fig.5 The relationship between the weight coefficients of different kurtosis, damage energy ratio, gradient and root mean square error in DSI

本文使用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和绝对百分比误差 (absolute percentage error, APE) 定量评估不同权重系数组合的优劣。不同载荷类型下的绝对百分比误差 APE_x 定义为

$$\text{APE}_x = \frac{|D_{\text{fused},x} - D_{\text{bench},x}|}{D_{\text{bench},x}} \times 100\% \quad (14)$$

式中 $D_{\text{fused},x}$ 为 x 载荷类型下融合特征幅值修正后的损伤值， $D_{\text{bench},x}$ 为 x 载荷类型下的基准损伤真值， x 包含平稳载荷、冲击载荷、共振载荷、混合载荷。均方根误差定义为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{(\text{APE}_A^2 + \text{APE}_B^2 + \text{APE}_C^2 + \text{APE}_D^2)}{4}} \quad (15)$$

式中下标 A、B、C、D 分别代表平稳载荷、冲击载荷、共振载荷和混合载荷。

本研究所选取的 4 种典型载荷类型包含拖拉机在作业过程中传动系所承受的各类载荷。首先，不同的土壤条件主要影响作用于挂接机具的外负载激励谱。本文所设计的“冲击载荷”与“混合载荷”正是为了体现此类由坚硬土壤或异物导致的外部负载剧烈变化所引发的瞬态及复杂动态响应。因此，本文模型对这 4 种载荷类型的有效评估，表明其对于由土壤条件改变所引发的主要振动模式已具备一定的代表能力。其次，作业速度与变速器挡位的变化，在动力学层面最终表征为系统输入转速与负载扭矩水平的改变。本研究中的“平稳载荷”用于验证模型在恒定工作点下的稳态性能，而“共振载荷”则

通过主动激励揭示了系统在关键频率下的动态特性，这在一定程度上覆盖了因速度变化而可能触及的共振风险。

由图 5 数据可知，均方误差范围处于 2.498%~8% 区间，其中 3 个权重系数的最小均方误差值分布较为集中，且彼此间差异较小。鉴于权重系数选取对结构损伤评估结果影响显著，为避免计算载荷数据因对单一权重过度敏感而导致权重系数失真，现选取 10 组 RMSE 最小的权重系数组合，具体权重系数组合详见表 1。

表 1 网格搜索法 RMSE 最小的 10 组权重系数组合

Table 1 The ten minimum weight coefficient combinations for grid search method RMSE

组合 Combination	ω_k	ω_E	ω_G	RMSE/%
1	0.275	0.425	0.300	2.513
2	0.300	0.450	0.250	2.500
3	0.325	0.425	0.25	2.503
4	0.325	0.450	0.225	2.642
5	0.350	0.400	0.250	2.498
6	0.350	0.425	0.225	2.500
7	0.375	0.375	0.250	2.573
8	0.375	0.425	0.200	2.714
9	0.375	0.400	0.225	2.762
10	0.400	0.375	0.225	2.784

表 2 不同权重系数组合在 4 种载荷类型中的绝对百分比误差

Table 2 Absolute percentage error of different weight coefficient combinations in four operating conditions

载荷类型 Load type	绝对百分比误差 Absolute percentage error/%									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
平稳载荷 Stable load	1.26	3.22	9.88	3.25	7.83	6.18	9.88	5.94	2.57	7.62
冲击载荷 Impact load	9.87	4.83	7.45	5.78	2.56	4.07	7.45	8.25	8.32	6.49
共振载荷 Resonant load	3.40	5.14	8.66	2.24	8.53	1.97	8.66	3.87	4.95	9.83
混合载荷 Mixed load	5.77	3.52	5.01	9.63	4.78	4.12	5.56	7.93	5.07	4.56
平均 Average	5.08	4.18	7.75	5.23	5.93	4.09	7.89	6.5	5.22	7.13

结合表 1 和表 2 可知，第 5 组权重系数组合的 RMSE 最小为 2.498%，但在不同载荷类型进行验证时，其平均 APE 为 5.93%。相比之下第 6 组 RMSE 为 2.500%，4 个载荷类型平均 APE 仅为 4.09%。因此选取第 6 组的权重系数组合作为最优权重系数，峭度、损伤能量比、梯度的权重系数分别为 0.350、0.425、0.225。最优权重系数组合 4 种载荷类型的损伤值如图 6 所示。

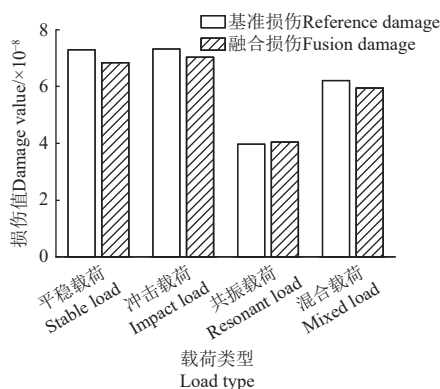


图 6 最优权重系数在 4 种载荷类型下的损伤值对比

Fig.6 Comparison of damage values of optimal weight parameters under four loads

当载荷梯度、损伤能量比和峭度任一项大幅提高时，DSI 非线性跃升。为了平衡信号不同幅度的贡献，抑制极端值的干扰，同时保留关键细节，提升特征提取的鲁棒性和准确性，通过 sigmoid 函数进行 S 形非线性压缩：

单一的载荷类型无法全面验证权重系数的普适性，为确保所选取的权重系数具备广泛代表性，本研究选取平稳随机载荷、高冲击载荷、共振载荷及混合复杂载荷 4 种典型载荷类型进行验证。具体操作中，将 4 组载荷数据分别代入前述 10 组 RMSE 最小权重系数组合的计算模型，得到各载荷类型下的修正损伤结果。随后，将计算结果与对应载荷类型的损伤真值进行逐项对比，通过绝对百分比误差公式计算 2 组数据的差异程度，最终形成包含 4 种载荷类型、10 组权重系数组合的误差分析矩阵（详细误差数据如表 2 所示）用于验证的损伤真值基于实测载荷数据与材料 S-N 曲线计算得到。首先对不同载荷类型下的扭矩时间历程进行雨流计数，获得各级应力幅值与循环次数；随后根据典型轴类材料的 S-N 曲线，计算等效应力下的累计疲劳损伤；最后将该损伤值与台架试验寿命区间进行校准得出。该验证方法通过多载荷类型交叉验证，有效规避了单一载荷类型可能存在的偶发性偏差，确保权重系数组合在不同载荷特征下的稳定性和可靠性，为结构损伤评估提供更具备普适性的参数支撑。

$$DSI_i = \frac{1}{1 + \exp[-k(DSI - c)]} \quad (16)$$

式中 DSI_i 为非线性压缩后的损伤谱指数； c 为阈值，决定 sigmoid 的拐点位置； k 为斜率，控制阈值附近曲线的陡峭程度。

通过对历史载荷数据的统计分析，大约 80%~90% 的载荷属于稳态区，只有 10%~20% 的载荷数据属于突变或者冲击区，若按照一般中位数选取会导致过度压缩，造成损伤敏感性降低。由前文分析结果可知，载荷数据的分布存在明显的偏移，这样操作可以使 sigmoid 的中心与数据主分布区对齐，避免造成信息损失。为研究 DSI 的影响，选取 0.80、0.85、0.90 和 0.95 四个不同的 c 值进行分析，当 c 为 0.80 时，曲线提前饱和，过度压缩中低能量段，导致丢失细节信息；当 c 为 0.85 时，压缩略平缓，但是仍有过早触发的趋势，可能会低估高能量区域的损伤敏感度；当 c 为 0.95 时，压缩延后，异常点主导性增强，导致模型不稳定，损伤估计波动较大。当 c 为 0.90 时，既能保留主要能量结构，又能有效抑制极端点，因此确定 $c=0.90$ 为阈值，本文取 $c=0.83$ 。

同时兼顾过渡区的带宽，过渡区太窄会导致数据轻微抖动造成大幅度跳动，从而产生虚假的损伤峰；过渡区太宽时，高载荷点和中等载荷点差异不明显，失去了非线性映射的意义。本文根据工程经验对比了不同 k 值的压缩效果，过渡区覆盖阈值 5%~10% 的范围，对比结果如图 7 所示。

可以看出， $k=5$ 时曲线整体较为平缓，几乎为线性，

无法有效凸显出超过阈值的数据；随着 k 值增大，曲线变陡峭，当 $k=15$ 时，曲线在阈值附近快速过渡，既能区分出高载荷，又能保持平滑；当 $k=25$ 时，曲线接近阶跃函数，导致阈值附近极度敏感，容易造成过放大，最后选定 $k=15$ 。

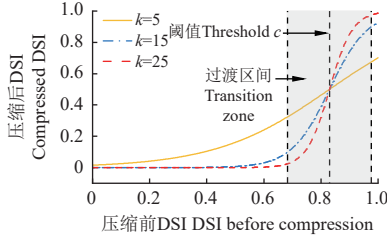


图 7 $c=0.83$ 时不同斜率 k 的 DSI 压缩效果

Fig.7 Compression effect of DSI(damage spectrum index) with different slope k when $c=0.83$

压缩之后的 DSI 与载荷梯度、损伤能量比、峭度的映射系如图 8 所示。

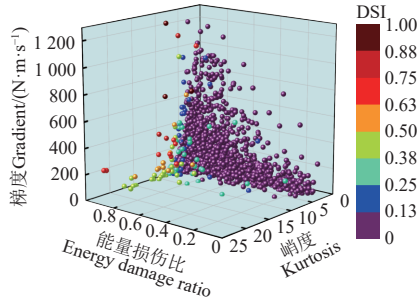


图 8 DSI 与梯度、损伤能量比、峭度的映射

Fig.8 Mapping of DSI to gradient, damage energy ratio, and kurtosis

从图 8 中可以看出，经过变换压缩可以很好地识别出对损伤贡献较大的载荷片段。绝大部分的载荷峭度在 8 以下，极少数载荷峭度值超过 15，需要对这部分载荷进行特别关注；损伤能量比在 0~1.0 之间都有分布，大部分集中在 0.6~1.0 之间，由于载荷信号为窄带信号，在对不同频段信号进行区间划分时，区间宽度选择越大损伤能量比越接近 1.0，在分析时可以根据信号范围去选取合适的区间；载荷梯度大部分集中在 400 N·m/s 以下，少部分梯度值达到了 1 000 N·m/s 左右。

由于 DSI 是一种局部损伤敏感度指标，而材料疲劳通常是每个应力循环消耗一部分寿命。因此为将时频域的动态特性体现在循环损伤中，计算得到第 j 个循环的时间中心，在窗口中心序列中找到最近的 DSI 窗口索引 $\hat{i}$ ，并取其邻域求平均值：

$$\overline{DSI}_j = \frac{1}{|N_j|} \sum DSI_i \quad (17)$$

式中 $\overline{DSI}_j$ 为第 j 个应力循环对应的损伤谱指数平均值； $N_j = \{\max(1, \hat{i}-2), \dots, \min(N_w, \hat{i}+2)\}$ ； N_w 为总的窗口数量； $\hat{i}$ 为时间窗口索引。

3.2 融合损伤修正

将变速器轴简化为等截面直杆，扭矩循环可换算为轴类构件的切应力，圆实心轴的扭矩与切应力的关系：

$$\tau = \frac{16M}{\pi D^3} \quad (18)$$

式中 τ 为切应力，Pa； M 为实测转矩，N·m； D 为等截面杆的直径，m；

由于 Miner 损伤法则在使用时要求载荷的均值为 0，但实际变速器转矩均值不为 0，会导致损伤估计出现偏差，因此需要依据等损伤原则，通过 Goodman 公式将载荷转换为等效 0 均值应力幅值：

$$S_j = \sigma_b S_{a,j} / (\sigma_b - |S_{m,j}|) \quad (19)$$

式中 S_j 为等效 0 均值应力幅值，MPa； σ_b 为拉伸强度极限，MPa； $S_{a,j}$ 为第 j 个切应力幅值，MPa； $S_{m,j}$ 为第 j 个切应力均值，MPa。

变速器轴的材料为 20CrMnTi 钢，其 S-N 曲线方程^[32]如下：

$$\lg N = 11.28 - 0.016S \quad (20)$$

其中 N 为失效循环次数； S 为应力幅值，MPa。

依据 DSI 的值对循环幅值进行放大：

$$S'_j = S_j \cdot \exp(\lambda \cdot \overline{DSI}_j) \quad (21)$$

其中 S'_j 为放大后的幅值； λ 为放大因子，实际放大部分函数用 $F(\lambda) = \exp(\lambda \cdot \overline{DSI}_j)$ 表示，不同 λ 取值对 $F(\lambda)$ 的影响如图 9 所示。当 $\lambda=0.1$ 时，曲线几乎接近线性，仅有轻微的非线性放大；当 $\lambda=0.2$ 时，曲线出现明显的指数上升趋势，能区分不同 $\overline{DSI}_j$ 下的循环；当 $\lambda=0.3$ 时，指数弯曲加剧，放大效应增强，容易强化局部危险；当 $\lambda=0.5$ 时，曲线急剧上升，导致高 $\overline{DSI}_j$ 循环主导整体损伤评估。综合考虑放大效果与模型稳定性，既能反映高损伤循环的影响，又能避免过度夸大局部损伤，取 $\lambda=0.2$ 。

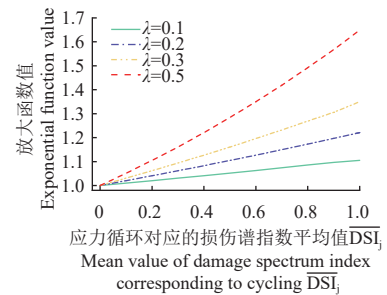


图 9 不同放大因子 λ 下的放大函数值

Fig.9 The exponential function value under different exponential factor λ

将修正后的幅值带入 Miner 模型进行融合损伤计算，计算式如下：

$$D_{fused} = \sum_j \frac{n_j}{N(S'_j)} \quad (22)$$

其中 D_{fused} 为融合损伤； j 为幅值等级； $N(S'_j)$ 为修正后幅值对应的频次，通过 S-N 曲线得到； n_j 为第 j 级载荷对应的频次。

3.3 损伤结果对比验证

为方便对比，将实际损伤值、相对损伤值、归一化功率谱密度绘制在同一张图中，根据第 3.1 和 3.2 节中的方法得到的分频段损伤结果如图 10 所示。

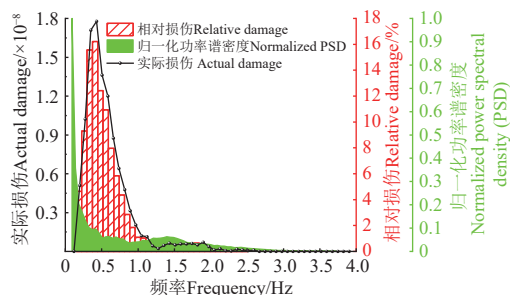


图 10 不同频带损伤分布

Fig.10 Damage distribution in different frequency bands

从图 10 可以看出,融合模型计算得到的实际损伤随着频率的增加呈现明显衰减趋势。在 0~1.0 Hz 的低频段损伤水平最高,达到 10^{-9} ~ 10^{-8} 的数量级,其中损伤最大频率为 0.43 Hz,损伤值为 1.78×10^{-8} ;随着频率的增加,损伤逐渐下降,至 2.5 Hz 以上趋近于 0。这一规律表明,低频成分在整个载荷谱中占据主导地位,是造成疲劳损伤的主要来源。这与实际拖拉机在典型犁耕工况中低频、大幅度载荷循环占主导的特征高度吻合。相对损伤表示各频率区间在整体损伤中的相对贡献比例,揭示了不同频带在总损伤累积中的作用大小。结果显示,相对损伤主要集中在 0~1.0 Hz 区间,最大值接近 18%,之后迅速下降至 2% 以下。这意味着,虽然高频段也存在能量输入,但其对损伤的贡献相对有限。与此同时,归一化功率谱密度结果表明,0.5 Hz 处虽然能量较小,但此处是损伤值最大的位置,验证了小幅值载荷在损伤累积中的作用。值得注意的是,中高频段虽存在能量输入,但其对损伤的贡献并不成比例,说明能量与损伤之间并非简单的线性关系,需要通过融合模型引入梯度、峭度与能量比等动态因子进行修正。

通过本文方法和传统 Miner 法则计算得到 3 141 s 的损伤结果如图 11 所示,疲劳累积损伤量分别为 $D_1 = 8.664 \times 10^{-5}$ 和 $D_2 = 5.772 \times 10^{-5}$,计算得到两种方法的疲劳寿命分别为 $T_1 = (1/D_1) \times 3\,141 = 10\,067$ h 和 $T_2 = (1/D_2) \times 3\,141 = 15\,111$ h。根据企业调研和用户反馈,该款机型变速器轴疲劳失效前工作时间约为 10 000 h 左右,传统 Miner 法则的相对误差为 51.11%,本文方法的相对误差仅为 0.67%,可以相对准确地预测零件的疲劳寿命。

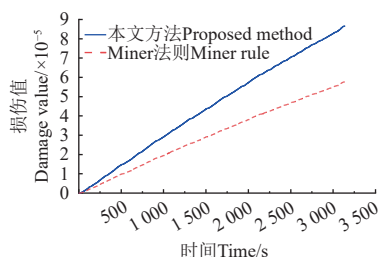


图 11 两种方法损伤值对比

Fig.11 Comparison of damage values between two methods

4 结 论

本文对拖拉机变速器轴损伤评估方法进行了研究,提出一种基于实测载荷谱的大马力拖拉机变速器动态损

伤评估方法。通过短时傅里叶变换对信号进行频带划分,依据峰值频率和载荷中心频率得到整段信号的主导频率,定量的表示某个频率带对疲劳损伤的贡献强度;同时结合峭度和梯度指标构建了损伤谱指数,随后利用损伤谱指数对幅值进行修正,最后通过 Miner 法则进行损伤评估。主要研究结论如下:

1) 相较于时域损伤评估方法只考虑幅值对损伤的影响,本方法将应力场强理论中的梯度指标、反映冲击载荷的峭度指标和频域损伤评估的方法结合起来,精确描述拖拉机变速器轴的损伤特性。同时使线性损伤法则的研究不再局限于加载顺序和统计分析的角度,为未来损伤评估方法的研究提供了理论依据和新思路。

2) 利用扭矩传感器获取了变速器轴的扭矩载荷并对其进行了载荷特性分析,随后通过实测载荷谱对本文所提的方法进行了验证。以变速器轴实际疲劳损伤作为真值,传统 Miner 法则的计算误差值为 51.11%,本方法的计算误差为 0.67%。

需要指出的是,本研究在确定权重系数时所选取的 4 种验证载荷类型虽然隐含了对土壤、速度、挡位等参数变化的动力学响应,但尚未在连续变化的土壤条件、作业速度及变速器挡位下进行直接的、系统性的参数验证。这是本研究的一个局限性,同时也是未来工作的重要方向。另外,本方法的验证目前主要依赖于调研获得的单一使用寿命经验值。尽管对比结果初步验证了模型的正确性,但尚未对更广泛的载荷类型下测得的实际损伤数据进行充分对比。因此,该方法在实际损伤定量验证方面的普适性仍有待未来通过更全面的试验数据进一步确认和提升。

[参 考 文 献]

- [1] XU W, ZHU Y, ZHANG Y, et al. Multi-objective optimization design of the transmission system parameters of a dual-motor-driven electric tractor based on improved deep deterministic policy gradient algorithm[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(2): 100-114.
- [2] KIM J. Real-time torque estimation of automotive powertrain with dual-clutch transmissions[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(6): 2269-2284.
- [3] SHAO X, YANG Z, MOWAFY S, et al. Load characteristics analysis of tractor drivetrain under field plowing operation considering tire-soil interaction[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 227: 105620.
- [4] 刘新猛, 胡职梁, 谢里阳, 等. 汽车变速器疲劳寿命的研究与发展综述[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 689-696. LIU Xinmeng, HU Zhiliang, XIE Liyang, et al. Review on research and development of fatigue life of automotive transmission[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(6): 689-696. (in Chinese with English abstract)
- [5] 温昌凯, 谢斌, 杨子涵, 等. 基于功率密度的大功率拖拉机变速箱壳体疲劳分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 389-396, 404. WEN Changkai, XIE Bin, YANG Zihan, et al. Fatigue analysis of high-power tractor gearbox housing based on power density[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural

- Machinery, 2019, 50(6): 389-396,404. (in Chinese with English abstract)
- [6] 闫祥海, 周志立, 贾方. 拖拉机动力输出轴动态转矩载荷谱编制与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 74-81.
YAN Xianghai, ZHOU Zhili, JIA Fang. Compilation and verification of dynamic torque load spectrum of tractor powertake-off[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 74-81. (in Chinese with English abstract)
- [7] YAN X, ZHANG J, ZHANG J, et al. Methodology for compiling torque load spectra of tractor power take-off shafts based on nonlinear damage accumulation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, 314: 110685.
- [8] WANG L W, SHANG D G, LI D H, et al. Local stress-strain estimation for tenon joint structure under multiaxial cyclic loading at non-isothermal High Temperature[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(4): 2720-2731.
- [9] 赵雪彦, 张青岳, 温昌凯, 等. 基于田间实测载荷的拖拉机转向驱动桥壳疲劳寿命分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 373-381.
ZHAO Xueyan, ZHANG Qingyue, WEN Changkai, et al. Fatigue life analysis of tractor steering drive axle housing based on field measured loads[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 373-381. (in Chinese with English abstract)
- [10] 林枫, 梁晨, 季晨, 等. 某船用燃气轮机涡轮盘疲劳裂纹扩展寿命预测研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(6): 156-164.
LIN Feng, LIANG Chen, JI Chen, et al. Study on fatigue crack growth life prediction of marine gas turbine disk[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 156-164. (in Chinese with English abstract)
- [11] WEN C K, LIU Z Y, WU G W, et al. Digital twin-driven fatigue life prediction framework of mechanical structures using a power density theory: Application to off-road vehicle front axle housing[J]. *Measurement*, 2023, 220: 113352.
- [12] FAN W, LI Z, YANG X. A spectral method for fatigue analysis based on nonlinear damage model[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 182: 108188.
- [13] YAN Y. Load characteristic analysis and fatigue reliability prediction of wind turbine gear transmission system[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 130: 105259.
- [14] WEN C, XIE B, SONG Z, et al. Methodology for designing tractor accelerated structure tests for an indoor drum-type test bench[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 205: 1-26.
- [15] ZHAO L H, CAI H C, WANG T, et al. Durability assessment of automotive structures under random variable amplitude loading[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(4): 1687814018771766.
- [16] 郭文华, 王雪娇, 余炳兴. 基于车轨桥耦合模型的重载铁路预应力混凝土 T 梁剩余疲劳寿命分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(12): 4806-4816.
GUO Wenhua, WANG Xuejiao, YU Bingxing. Residual life evaluation of heavy haul railway prestressed concrete T-beams based on train-track-bridge coupling model[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(12): 4806-4816. (in Chinese with English abstract)
- [17] MANSON S S, HALFORD G R. Re-examination of cumulative fatigue damage analysis: An engineering perspective[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, 25(5/6): 539-571.
- [18] 胡楷, 谷正气, 米承继, 等. 基于模糊理论的矿用自卸车车架疲劳寿命估算[J]. 汽车工程, 2015, 37(9): 1047-1052.
HU Kai, GU Zhengqi, MI Chengji, et al. Frame fatigue life estimation of mining dump truck based on fuzzy theory[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(9): 1047-1052. (in Chinese with English abstract)
- [19] AHMADI A, ZENNER H. Lifetime simulation under multiaxial random loading with regard to the microcrack growth[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(9): 954-962.
- [20] 於之杰, 王向盈, 孙启星, 等. 基于应变梯度理论的跨尺度冲击损伤和疲劳研究[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(7): 156-168.
YU Zhijie, WANG Xiangying, SUN Qixing, et al. Cross-scale approach for impact damage and fatigue based on the strain gradient theory[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(7): 156-168. (in Chinese with English abstract)
- [21] WU J Y. A geometrically regularized gradient-damage model with energetic equivalence[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 328: 612-637.
- [22] PENG K, ZHOU J, ZOU Q, et al. Effect of loading frequency on the deformation behaviours of sandstones subjected to cyclic loads and its underlying mechanism[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 131: 105349.
- [23] XI L, SONGLIN Z. Strengthening and damaging under low-amplitude loads below the fatigue limit[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(2): 341-345.
- [24] GU J, TIAN F, SHI J, et al. Noise reduction and analysis of leaf electrical signals of strap-leaved plants based on VMD-EWT[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 226: 109441.
- [25] 王玲, 宗建华, 王禹, 等. 基于最优分布拟合的拖拉机三点悬挂牵引力载荷谱编制与台架试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 41-49.
WANG Ling, ZONG Jianhua, WANG Yu, et al. Compilation and bench test of traction force load spectrum of tractor three-point hitch based on optimal distribution fitting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 41-49. (in Chinese with English abstract)
- [26] TRAPP A, WOLFSTEINER P. Fatigue assessment of non-stationary random loading in the frequency domain by a quasi-stationary Gaussian approximation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 148: 106214.
- [27] WU S D, SHANG D G, LIU P C, et al. Fatigue life prediction based on modified narrowband method under broadband random vibration loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 159: 106832.
- [28] 杨子涵, 黄胜操, 朱华英, 等. 基于优选小波分量的收获机作业部件载荷谱加速编辑方法[J]. 农业工程学报, 2025, 41(2): 58-65.
YANG Zihan, HUANG Shengcao, ZHU Huaying, et al. Accelerated editing for the load spectrum of harvester operational units using optimal wavelet components[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(2): 58-65. (in Chinese with English abstract)
- [29] 郑松林, 梁国清, 王治瑞, 等. 考虑低幅锻炼载荷的某轿车摆臂载荷谱编制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16): 147-154.
ZHENG Songling, LIANG Guoqing, WANG Zhirui, et al.

- Compilation of automotive lower control arm spectrum based on the low-amplitude training load[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(16): 147-154. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郑国峰, 杨江波, 刘雪莱, 等. 基于证据理论的载荷谱多域信息融合与加速编辑[J]. *工程力学*, 2025: 1-13.
- ZHENG Guofeng, YANG Jiangbo, LIU Xuelai, et al. Multi-domain information fusion of load spectra and accelerated editing based on dempster-shafer's theory[J]. *Engineering Mechanics*, 2025: 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李永安, 曹剑馨, 侯婧端. 基于文桥振荡器的高 Q 带通滤波器设计[J]. *兰州理工大学学报*, 2024, 50(5): 101-104.
- LI Yongan, CAO Jianxin, HOU Jingyuan. Design of high-Q band-pass filter using Wen-bridge Oscillator[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2024, 50(5): 101-104.
- [32] 刘宇希, 郑程. 连杆用 20CrMnTi 钢根据疲劳 S—N 曲线进行安全性设计的探讨[J]. *理化检验 (物理分册)*, 2015, 51(6): 402-405, 409.

Dynamic damage assessment of high horsepower tractor transmission based on measured load spectrum

JIA Fang^{1,2}, ZHANG Jinhai¹, GUO Xiaobo^{2,3}, LIU Guoqiang^{2,3}, YAN Xianghai^{1,3}, ZHA Zhengwei^{2,3}, XU Liyou^{1,3*}

(1. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Luoyang Tractor Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471003, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China)

Abstract: Conventional Miner's linear cumulative damage can focus only on the stress amplitude. In this study, a dynamic damage assessment was proposed for the high-horsepower tractor using the measured load spectrum. The research object was taken as the transmission shaft of a 162 kW four-wheel drive wheeled tractor. Multidimensional parameters were integrated to employ a dynamic weight allocation. A framework of the damage assessment was also established using the loads in the time domain, energy distribution in the frequency domain, and fluctuation features. Firstly, a torque test was developed using the transmission shaft of a tractor. The high-precision strain torque sensors were integrated with the wireless data acquisition. Torque fluctuation signals were captured under various conditions in real time, such as field operations and road transportation. The wheel torque signals were measured in the field, and then converted into the equivalent torque at the transmission shaft, according to the wheel-side planetary reduction mechanism, central transmission, transfer case, creeper gear, and gearbox. Subsequently, the rainflow counting was applied to identify the load cycles in the torque data. Statistical features of the loads were derived from high-confidence data for subsequent analysis. A composite model of the "three-dimensional linear weighting-nonlinear compression" was proposed to construct the damage indicator. Furthermore, three indicators—load gradient, frequency-band damage energy, and load kurtosis—were linearly weighted. The weighting parameters of these three indicators were optimized using a grid search algorithm. The root mean square error and absolute percentage error were employed to quantitatively evaluate the performance of different parameter combinations. The optimal weight allocation was determined as 0.350, 0.425, and 0.225. An S-shaped compression mapping with the sigmoid function was introduced to mitigate the influence of extreme values on the assessment, effectively balancing the sensitivity and robustness. The center of the load cycle time was indexed within the intensity index window of the dynamic damage. Time-frequency features were integrated into the cyclic damage for the amplitude correction. A hazardous threshold with the dynamic damage intensity index represented the exponential amplification of the cyclic amplitudes. The Goodman formula was then used to convert the torque signals into equivalent zero-mean stress amplitudes. And the S-N curve of the transmission shaft was applied to compute the damage. As such, a systematic assessment was realized on the dynamic damage. Experimental results demonstrate that the improved model effectively calculated the damage over the load bands. The peak normalized power spectral density energy occurred at 0.1 Hz, while the maximum damage frequency band was at 0.43 Hz, with a damage value of 1.78×10^{-8} . There was no coincidence between the peak power spectral density energy and the maximum damage. The theoretical correctness of the improved model was validated because the conventional approach only considered the amplitude. The relative error of the conventional Miner's damage rule was 51.11%, whereas the relative error of the damage prediction was only 0.67%. The high accuracy and feasibility exhibited in the damage prediction. The linear damage models were advanced beyond the loading sequence and statistical analysis, thus providing the theoretical basis and insights for future assessment of the damage. Furthermore, a three-dimensional space of the damage feature was incorporated with the load gradient, frequency-band energy, and load kurtosis. The multidimensional parameter mechanism can be directly applied to the life prediction of the rotating machinery, such as the transmission shafts and gearboxes, or the damage assessment in the structural domains, such as the composite materials and additive manufacturing components. The finding can provide a theoretical and quantitative tool for the intelligent operation and prediction.

Keywords: load spectrum; fatigue damage; frequency domain; tractor gearbox; Miner's rule