

不同损伤片段识别方法对联合收割机底盘应力载荷加速编辑效果的影响

谷远洋¹ 杨子涵^{1,2} 刘旭柯¹ 张智豪¹ 郭志强^{1,2} 宋正河¹

(1. 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)

(2. 洛阳智能农业装备研究院有限公司, 洛阳 471000)

摘要:【目的】联合收割机作业工况复杂多变,缺乏适配其田间载荷特征的载荷谱加速编辑方法,制约了结构可靠性设计与耐久性试验效率提升。为解决该问题,应用时域损伤保留识别法、基于小波变换的包络线损伤识别法和基于时频分析的累积功率谱密度损伤识别法,分别对联合收割机后桥铰接点处的应变信号进行加速编制处理,以探究不同损伤识别方法对联合收割机底盘应力载荷加速编制效果的影响。【方法】首先,采集国产大型双纵轴流联合收割机底盘后桥铰接点垂向应力载荷,完成预处理与工况划分,明确各工况损伤贡献比例;其次,采用时域损伤识别法,确定最优2 s计算窗口区间,实现基于损伤分布的载荷片段筛选;然后,基于小波变换提取高频分量并进行包络线分析,识别高损伤载荷片段;最后,采用基于时频分析的累积功率谱密度损伤识别法,通过连续小波变换与功率谱叠加定位高能量损伤区域。【结果】结果表明,在伪损伤保留比例约98%的条件下,基于时频分析的累积功率谱密度损伤识别法的信号压缩比例达40.92%,加速效果较时域损伤识别法、基于小波变换的包络线损伤识别法分别提升12.45%和16.56%;该方法可完全剔除损伤占比仅0.7%的卸粮工况,但在高频段功率谱密度一致性方面存在不足,研究为农机领域载荷谱加速编辑提供参考。

关键词: 联合收割机; 载荷谱; 加速编辑; 小波变换; 损伤片段识别

中图分类号: S225.39; U270 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.005

0 引言

提质增效是我国现阶段农机装备发展的核心任务。联合收割机田间作业具有较强的季节性和作业窗口期特征,通常需要在满足天气和农作物成熟度条件下连续开展工作,因此,用户往往对其作业可靠性有着较强需求。据统计,当前我国联合收割机平均故障间隔时间为20~30 h,相比于国际先进农机装备企业产品,国产机型可靠性指标仍有明显差距^[1]。因此,针对联合收割机开展耐久性试验研究,进而指导产品结构的迭代优化设计,对现阶段我国联合收割机产品质量的可靠性提升具有重要意义。

近年来,我国农机装备企业全面转向正向设计开发,在农机装备耐久性试验验证领域,出现了许多新的技术手段^[2],为实验室环境下实现农机装备整机及关键零部件耐久性试验考核提供了技术支撑。作为载荷谱编辑过程中的关键环节,载荷谱加速编辑技术能够在保证耐久性试验结果相对一致的前提下,提高试验效率、节约试验成本^[3]。在车辆领域,融合载荷谱加速编辑方法的耐久性加速试验技术发展已较为成

熟,面向整车和关键零部件均已形成较完备的应用案例^[4-5]。而在农机装备领域,该项技术仍处于起步阶段,尚缺乏结合农机装备田间作业载荷特征开展的载荷谱加速编辑方法适用性研究。

围绕耐久性快速试验验证技术,已有诸多学者从载荷信号时域和频域角度开展了载荷谱加速编辑方法研究。以特定时间窗口对信号进行等距划分,按各窗口的损伤占比设定阈值并进行裁剪,是载荷谱时域加速编辑方法中广泛应用的经典方式^[6]。Stephens等^[7]分别采用应变幅值和Smith-Watson-Topper(SWT)损伤参数为阈值,对应变信号进行处理,删减信号中低于阈值的循环,达到加速编辑的目的。Mattetti等^[8]采取时域损伤识别法对位移信号进行加速处理,编辑的信号缩短了24%,伪损伤保留量为99%,加速效果显著且有效。

国内较早研究加速载荷谱编辑方法的林晓斌^[9]、金锋^[10]应用峰值提取方法并设置SWT损伤阈值,对低损伤循环进行删减,实现了对车辆载荷谱的加速编辑。于佳伟等^[11-13]采用时域信号压缩的方法对基于各

收稿日期: 2024-10-17 修回日期: 2025-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(32401717); 中国博士后科学基金项目(2023M733784)

作者简介: 谷远洋,男,1999年生,内蒙古兴安盟人,硕士; 主要研究方向为农机装备载荷谱; E-mail: guyuan yang@cau.edu.cn。

杨子涵(通信作者),男,1994年生,河北石家庄人,博士; 主要研究方向为农机装备试验验证方法与技术; E-mail: yangzihan@cau.edu.cn。

引用格式: 谷远洋,杨子涵,刘旭柯,等. 不同损伤片段识别方法对联合收割机底盘应力载荷加速编辑效果的影响[J]. 机械强度, 2026, 48(7): 40-48.

Gu Yuan yang, Yang Zihan, Liu Xuke, et al. Influence of different damage fragment identification methods on the effect of accelerated editing of stress loads on combine harvester chassis[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 40-48.



免费获取

路段最小标准差的组合谱进行加速处理,将伪损伤保留比例作为小载荷删除准则,并结合疲劳数据编辑技术,提出了一套载荷加速编辑方法;基于低载强化效应,提出了一种新的小载荷删除准则,并通过建立整车台架试验,验证了该载荷谱编制方法的可行性。

针对载荷谱频域加速编辑方法,郑国峰等^[14-16]基于小波变换,分别开展汽车零部件单轴与多轴加速耐久性载荷谱编辑方法的研究,并验证其在汽车加速耐久性试验中的可行性。Putra 等^[17-18]以汽车悬架系统零部件为研究对象,在利用小波变换识别损伤片段的基础上,引入模糊聚类方法对能量较低的损伤片段进行辨别,进一步提高了加速疲劳试验效率。董国疆等^[19]研究了基于 S 变换的汽车零部件疲劳载荷谱编辑法,并验证其适用于汽车零部件疲劳耐久性分析。

综上所述,时域加速编辑方法和频率加速编辑方法的本质差异在于对原始载荷信号中的低损伤片段的识别方式不同。时域损伤识别法计算简便且适用性强,然而受固定窗口区间的限制,其区间大小及窗口截断边界势必会引入分析误差。相比于时域损伤识别,包络线损伤识别法能够根据信号包络线的趋向性实现对损伤片段的有效划分,该方法不受限于固定的分析区间,但为了保证包络线幅值与损伤量之间的关联一致性,通常需要在原始载荷特征分量的基础上开展分析。基于时频分析的损伤识别法是以载荷信号的时频幅值谱为依据,对加速片段进行识别,受时频域分辨率和物理量纲差异的影响,该方法的辨识精度依赖于对时频幅值谱的量化分析结果与载荷信号真实损伤分布之间的一致性。

为探究联合收割机适用的载荷谱加速编辑方法,以联合收割机底盘垂向应力载荷为研究对象,对田间收获作业工况下后桥铰接点处实测应变分别应用时域损伤识别法、基于小波变换的包络线损伤识别法、基于时频分析的累积功率谱密度损伤识别法进行加速编辑,系统分析边界条件设定对不同方法加速编辑效果的影响,并结合收割机作业工况特征,对加速编辑结果进行对比和验证,讨论不同方法的优劣及适用性,为联合收割机耐久性加速试验提供方法和技术支撑。

1 载荷谱采集

1.1 测试系统构建

以国产某大型双纵轴流联合收割机为试验样机。测点选取在底盘后桥与机体的铰接点处,以监测后桥对其承载的机身各工作部件的支撑力变化^[20]。使用应变计和采集仪组成测试系统,测试系统相关硬件参数如表 1 所示,图 1 所示为测点处区域结构及应变计安装示意图。

表 1 测试系统传感器及硬件参数

Tab. 1 Sensor and hardware parameters of the test system

测试硬件	型号	规格参数
应变片	BE-350-3BB (11-Q30)	电阻值 350 Ω
		灵敏度系数取值范围为 2.079~2.121
采集仪	SoMat cDAQ	32 通道 EBRG
		采样率 ≤ 100 kHz

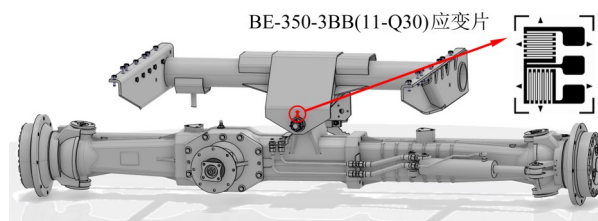


图 1 应变片粘贴位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the strain gauge pasting position

1.2 载荷特性分析

经去除毛刺、去除漂移等预处理后的载荷时域信号如图 2 所示。数据样本总长 608 s,采样频率为 1 024 Hz。根据联合收割机田间实际作业情况进行工况的划分,作业流程可分为启动调整收割位置、正常收割、田间掉头、满仓田间行走、卸粮及卸粮完成后的空仓田间行走,各工况分别对应图 2 中的载荷片段 1~6。

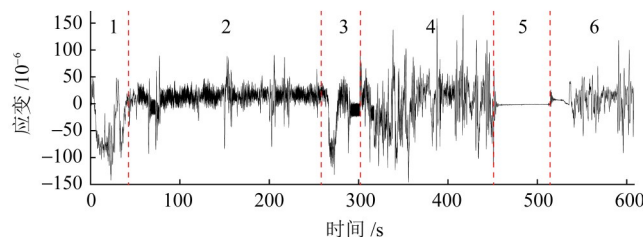


图 2 底盘后桥铰接点处原始应变载荷谱

Fig. 2 Original strain load spectrum at rear axle hinge point of the chassis

图 3 所示为联合收割机各作业工况的时间占比。在此基础上,对各工况所对应的载荷样本的统计特征进行分析,并结合 S-N 曲线计算各工况所造成的测点部位损伤贡献比例,结果如表 2 所示。由表 2 可知,联合收割机实际田间作业情况下,不同工况所对应的载荷样本统计特征存在着显著差异,致使各工况对应的损伤占比也较为悬殊。

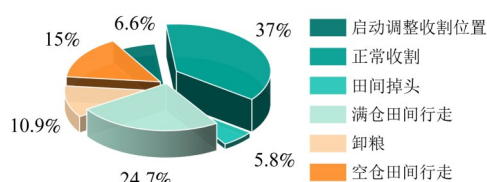


图 3 联合收割机各作业工况时间占比

Fig. 3 Time proportion of each working condition of the combine harvester

由于满仓田间行走工况车速较高且机体自重达到最大,因此,满仓田间行走工况虽然统计时长不及

正常收割工况,却是损伤占比最高的作业工况。正常收割工况条件下,车速较为稳定,各作业部件同步高速运转,使载荷呈现出频率成分较高但振幅较小的特点。对比空仓和满仓田间行走结果可知,粮仓的自重变化导致后桥承载情况有较大差异。此外,虽然启动时的调整工况和卸粮工况具有一定的时间占比,但相比于完整作业周期,其损伤贡献远不及其他工况。

表2 各作业工况统计参数及损伤占比

Tab. 2 Statistical parameters and damage proportion of each working condition

工况	均值/ 10 ⁻⁶	标准差/10 ⁻⁶	均方根/ 10 ⁻⁶	损伤占 比/%
1-启动调整收割位置	46.99	42.09	63.08	2.5
2-正常收割	12.77	16.41	20.79	30.9
3-田间掉头	21.03	38.20	43.60	5.5
4-满仓田间行走	0.38	43.25	43.25	52.2
5-卸粮	6.97	22.61	23.66	0.7
6-空仓田间行走	-1.20	7.22	7.32	8.2

综上所述,联合收割机田间作业各工况统计特征及损伤占比差异显著,因此,有必要选取合适的载荷谱加速编辑方法对载荷测试样本进行优化,保留损伤较大的工况,并对损伤占比较小工况进行合理删减。

2 载荷谱加速编辑方法

2.1 时域损伤识别法

时域损伤识别法是载荷谱加速编辑过程中应用最广泛的技术手段。其原理是对原始信号进行加窗处理,等间距划分成一系列离散的载荷片段,进而结合材料的S-N曲线分别计算每个窗口内载荷损伤值,根据设定的损伤保留比例,通过删减无损伤或小损伤载荷对应的时间历程,实现对原始载荷时域信号的加速编辑。完整的分析流程如图4所示。

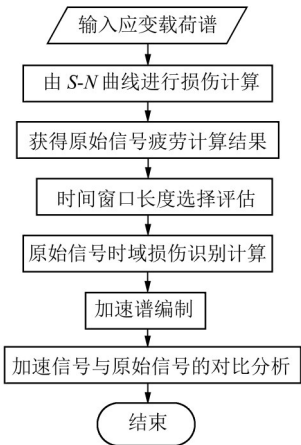


图4 时域损伤识别法流程图

Fig. 4 Flow chart of the time-domain damage identification method

为了计算应变通道的损伤值,需要获得材料的S-N曲线。本研究的联合收割机后桥铰接点的材料为Q235普通结构碳素钢,其材料属性如表3所示。

表3 Q235钢材料属性参数

Tab. 3 Material property parameters of the Q235 steel

材料	密度/(kg/ m ³)	疲劳强度系 数/MPa	抗拉强度/ MPa	屈服强 度/MPa	泊松比
Q235	7 850	900	370~500	235	0.29

经查《机械设计手册》^[21],可得Q235抗拉强度为

$$R_m = 500 \text{ MPa} \tag{1}$$

根据材料力学,后桥铰接点的疲劳强度参数可由式(2)~式(4)估算得到。

对称弯曲疲劳极限(10⁶循环)估计为

$$R_{sb} = 0.5 R_m \tag{2}$$

寿命为10³循环的疲劳强度极限估计为

$$R_{1000} = 0.85 R_m C_R \tag{3}$$

疲劳极限修正为

$$R_f = R_{sb} C_L C_D C_R / K_f \tag{4}$$

式中, R_m 为Q235的抗拉强度; C_L 为载荷系数,取0.86; C_D 为尺寸系数,取1; C_R 为可靠性水平系数,取0.7; K_f 为应力集中系数,取1.5。

由式(2)~式(4)计算得出, R_{1000} 为297.5 MPa, R_f 为100.3 MPa。

S-N曲线在高周疲劳区间的斜率b为

$$b = \frac{\lg R_{1000} - \lg R_f}{\lg 10^3 - \lg 10^6} \tag{5}$$

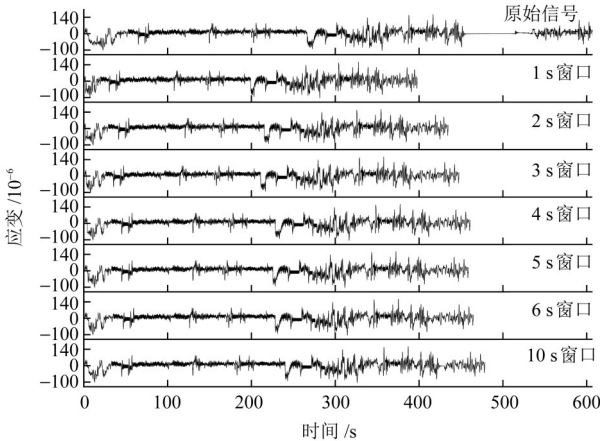
得到高周疲劳区间S-N曲线第1段的斜率 $b_1 = -0.1574$,反斜率 K_1 为6.3573,高周疲劳区间的S-N曲线可表示为

$$\lg S = -0.1574 \lg N + 2.9457 \tag{6}$$

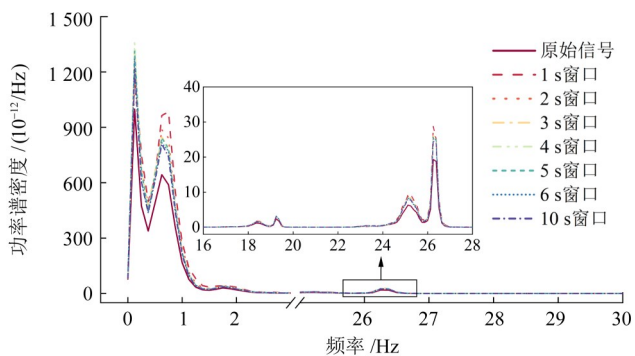
S-N曲线第2段的反斜率 $K_2 = 2K_1 - 1$,为11.7146;斜率 $b_2 = -0.0854$,疲劳极限以下的S-N曲线可表示为

$$\lg S = -0.0854 \lg N + 2.9285 \tag{7}$$

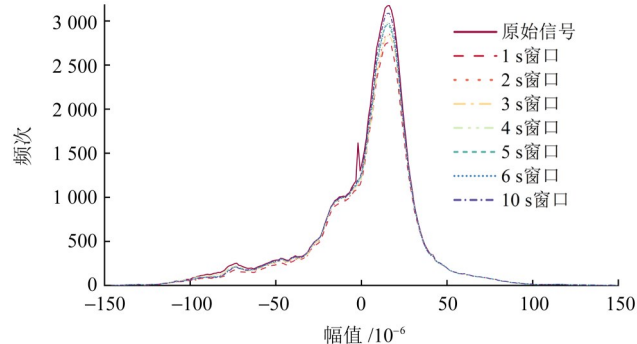
研究表明,窗口的区间长度会对加速结果产生直接影响^[22]。当窗口过小时,时域信号的过度离散将导致边界处截断误差增大,影响加速编辑前、后信号频域一致性;窗口设定过大,则会降低对损伤片段识别的分辨率,导致加速效果不佳。将伪损伤保留比例阈值设定为98%,得到不同窗口区间所对应的载荷加速编辑结果。图5所示为不同窗口加速载荷谱多特征对比。



(a) 不同窗口加速载荷谱的长度对比



(b) 不同窗口加速载荷谱的功率谱密度对比



(c) 不同窗口加速载荷谱的穿级计数对比

图 5 不同窗口加速载荷谱多特征对比

Fig. 5 Multi-feature comparison of the accelerated load spectra with different windows

由图 5 可知,时域损伤识别法能够得到与原始载荷信号较为一致的频域特征,并且随着窗口区间的增大,加速信号与原始信号的频域特征一致性更好;随着窗口区间增大,加速信号与原始信号的穿级计数一致性同样提高。1 s 窗口可以得到时间最短的加速信号,但其功率谱密度与穿级计数均与原始信号存在一定的偏差。综合考虑加速编辑效果和时频域特征一致性后,将时域损伤识别法的计算窗口区间设定为 2 s。图 6 所示为底盘测点疲劳损伤时域分布特征。

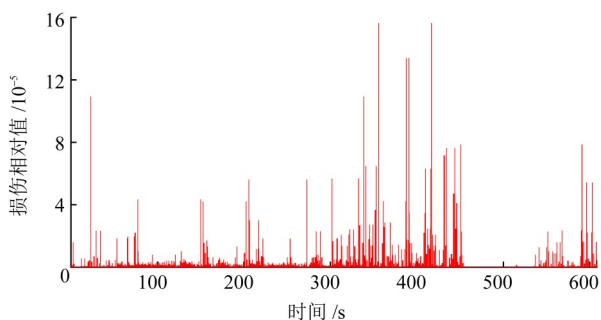


图 6 底盘测点疲劳损伤时域分布特征

Fig. 6 Time-domain distribution characteristics of the fatigue damage at chassis measuring point

2.2 包络线损伤识别法

包络线分析方法常用于识别机械设备的运行故障,提取监测信号的包络线变化特征,从而实现对运行设备的损伤评估和故障诊断^[23]。对于频率成分单一且相对平稳的随机信号而言,包络线幅值大小与信号时域损伤分布之间存在相关性。因此,可设定阈值

对满足包络线幅值特征的片段进行提取,实现对载荷谱的加速编辑。

利用包络线对载荷损伤片段进行识别时,由于原始载荷数据往往是多工况交替组合的数据集,为减小包络线的识别误差,通常先对原始数据进行分解。载荷测试样本为涵盖联合收割机多种作业工况的数据集,频率成分复杂且具有明显的非平稳特征,故采用工程上常用的小波变换对载荷进行分解,再对小波变换后重构得到的多层高频小波分量进行包络线分析。在此基础上,对包络线幅值进行阈值划分,通过包络线的单调性,确定当前分量及阈值水平下保留的信号片段,如图 7 所示。最后,将同一阈值水平下各分量的保留结果取并集,拼接形成加速编辑结果。基于包络线损伤识别的加速编辑方法技术流程如图 8 所示。

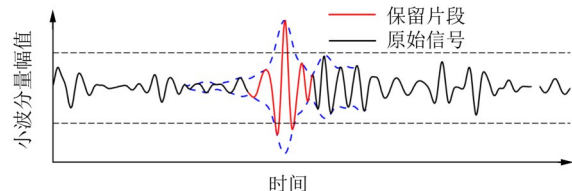


图 7 包络线损伤识别法原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the envelope damage identification principle

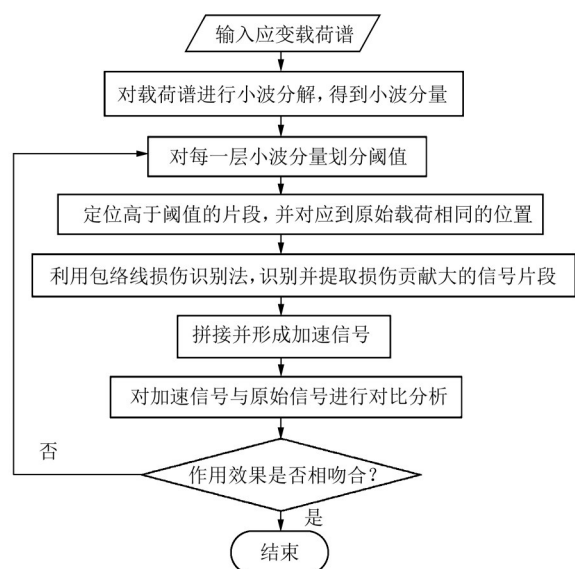


图 8 包络线损伤识别法流程图

Fig. 8 Flow chart of the envelope damage identification method

2.3 累积功率谱密度损伤识别法

研究表明,损伤强度通常与载荷谱所包含的能量成正比。当信号的能量集中在较窄的频率范围内时,信号所造成的损伤贡献^[24-26]往往更高。

功率谱密度可以有效描述信号在频域上的能量分布情况。作为一种基于时频分析的损伤识别方法,累积功率谱密度损伤识别法能够通过对不同载荷信号成分的功率谱密度进行计算和比较,实现对时域信号中损伤或异常片段的有效辨识。该方法的技术流

程如图9所示。

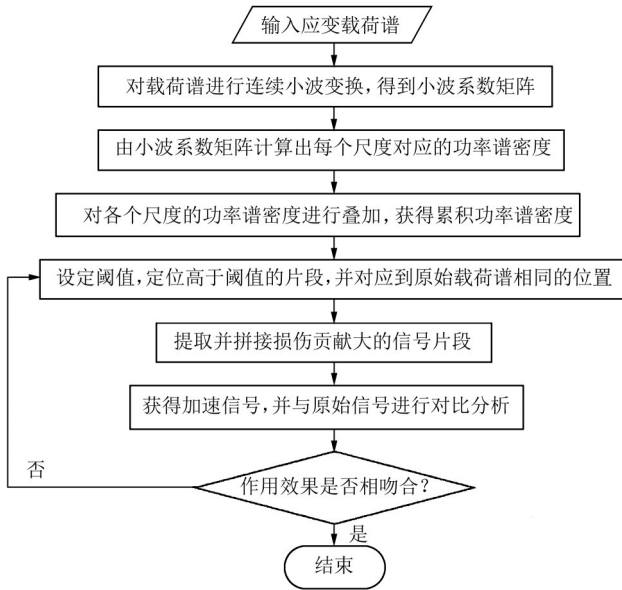


图9 累积功率谱密度损伤识别法流程图

Fig. 9 Flow chart of the accumulative power spectral density damage identification method

1) 对载荷信号进行连续小波变换, 得到小波系数矩阵。图10为小波系数矩阵所对应的小波时频图。连续小波变换的理论计算式为

$$C_{WT}(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \pi^{-1/4} e^{-i w_0 n} e^{-\frac{(t-n)^2}{2m^2}} dt \quad (8)$$

式中, $f(t)$ 为所分析信号; w_0 为小波的中心频率; n 为控制小波的平移参数; m 为控制小波的尺度参数。

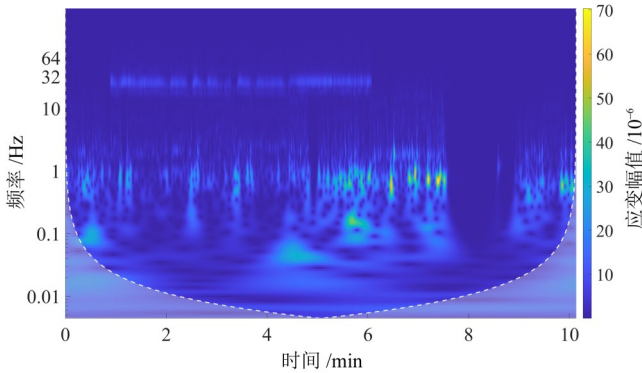


图10 底盘测点载荷信号小波时频图

Fig. 10 Wavelet time-frequency diagram of the load signal at chassis measuring point

小波的中心频率和尺度参数之间的关系为

$$w_0 = 1/(2\pi m) \quad (9)$$

选取 Morlet 小波作为小波基函数。采用较高的尺度参数 ($m=1, 2, \dots, 256$) 以获得更好的时间和频率分辨率; 采用默认情况下的平移参数 n (即离散数据点数量)。

2) 基于小波系数矩阵进一步计算得到功率谱密度幅值在时频域的分布情况。将不同尺度下的功率谱密度计算结果进行累加, 进而得到载荷信号的累积

功率谱密度在时域上的统计分布情况, 如图11所示。

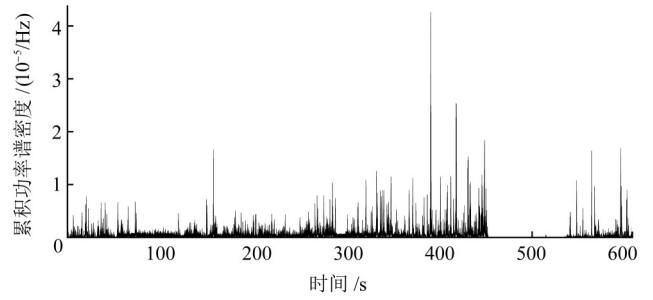


图11 原始信号累积功率谱密度时域分布

Fig. 11 Time-domain distribution of the accumulative power spectral density of the original signal

3) 通过设定合适的阈值对累积功率谱密度 (Accumulated Power Spectral Density, APSD) 计算结果中低于阈值的片段进行删减, 拼接得到加速载荷谱, 阈值设定规则如下: APSD 的最大值量级较大, 所以以 APSD 的最小值为基础, 等梯度进行阈值的递加。

4) 根据伪损伤保留目标和统计特征参数的一致性, 对不同阈值所对应的载荷信号加速编辑结果进行评估, 筛选出满足试验目标要求的加速载荷谱。

3 结果分析与讨论

3.1 边界条件设定

由于各种方法的损伤识别基本原理不同, 导致载荷加速后的结果不尽相同, 且同一方法因参数的设置差异也会产生不同的结果。因此, 在保证损伤一致性的条件下, 开展不同方法间的加速结果对比。将加速信号相对于原始信号损伤保留量的选取阈值设定为 98%, 即将加速信号的损伤量不低于原始信号的 98% 视为达到加速标准。基于上述判定标准, 分别得到不同方法所对应的加速编辑结果。

将时域损伤识别法、基于小波变换的包络线损伤识别法、基于时频分析的累积功率谱密度损伤识别法所得到的编辑结果分别记为加速信号 I、加速信号 II 和加速信号 III。图12所示为原始信号与各加速信号的时域对比和工况保留情况。将原始信号中被删减部分的信号时长与原始信号时长的比值定义为加速信号压缩比例^[27-28]。各加速信号的压缩比例与损伤保留量如表4所示。

由图12可知, 从信号的压缩效果来看, 基于时频分析的累积功率谱密度损伤识别法在相同的伪损伤保留条件下, 能够得到时间更短的加速信号结果, 压缩比例为 40.92%。经加速编辑后, 加速信号 I 和加速信号 III 均将工况 5 完全删减, 该工况为整车原地卸粮工况, 目标测点在该工况下几乎不存在应变波动, 因此对该工况的完整删减是合理的, 对加速编辑结果

的损伤保留比例影响较小。加速信号Ⅱ仍保留了部分工况 5 中的低损伤片段,是 3 种方法中时间缩减比例最小的加速结果,压缩比例为 24.36%。

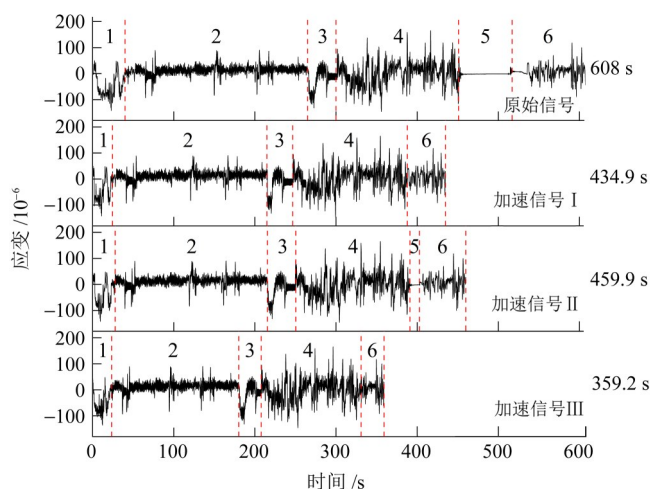


图 12 原始信号与加速信号时域对比

Fig. 12 Time-domain comparison of the original signal and the accelerated signals

表 4 加速信号压缩比例与伪损伤保留量

Tab. 4 Compression ratio and pseudo-damage retention of the accelerated signals

信号类型	压缩比例/%	损伤保留量/%
加速信号 I	28.47	98.41
加速信号 II	24.36	98.59
加速信号 III	40.92	98.48

3.2 工况保留比例分析

对 3 种方法加速编辑结果中各工况在原始信号中对应工况的时间占比进行分析,结果如表 5 所示。

表 5 加速信号各工况时间保留比例

Tab. 5 Time retention ratio of each working condition in accelerated signals

工况	加速信号 I	加速信号 II	加速信号 III
1-启动调整收割位置	61.33	62.50	58.50
2-正常收割	84.58	84.44	82.40
3-田间掉头	90.86	99.5	78.86
4-满仓田间行走	93.51	92.72	81.52
5-卸粮	0	19.70	0
6-空仓田间行走	51.70	62.53	31.10

由载荷特征分析结果(表 2)可知,在各工况中,满仓田间行走工况所造成的损伤占比最大,高达 52.1%;卸粮工况所造成的损伤占比最低,仅为 0.7%。因此,原始信号经过加速编辑后,工况的保留比例差异会对加速效果产生直接影响。

由表 5 可知,加速信号Ⅱ保留了 19.7%的卸粮工况,而该工况在完整信号中的损伤贡献很小,说明该方法针对载荷样本中的低损伤片段存在识别误差,但

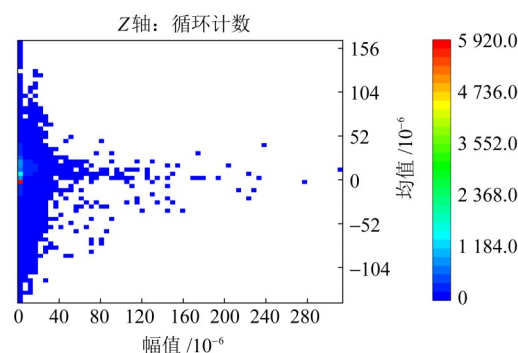
从工况保留完整性角度来看,该法具有一定合理性。针对损伤占比较大的满仓田间行走工况,3 种方法均保留了原始信号中的较多成分。其中,加速信号 I 对该工况的保留比例最大,为 93.51%。综合考虑工况保留的合理性及工况保留比例,加速信号Ⅱ的加速效果要优于加速信号 I 和加速信号Ⅲ。

3.3 载荷谱统计参数对比

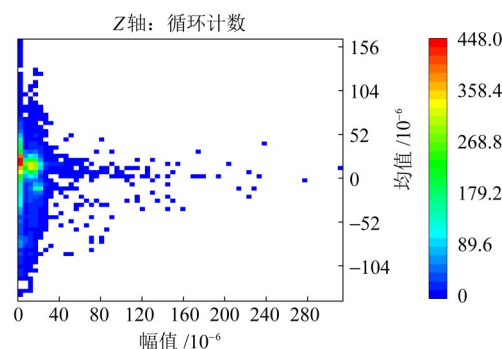
载荷谱的加速编辑效果会直接影响耐久性试验周期及结果,故进一步从雨流统计特征、穿级计数结果和统计参数等对加速信号与原始信号展开评估。

3.3.1 雨流统计特征分析

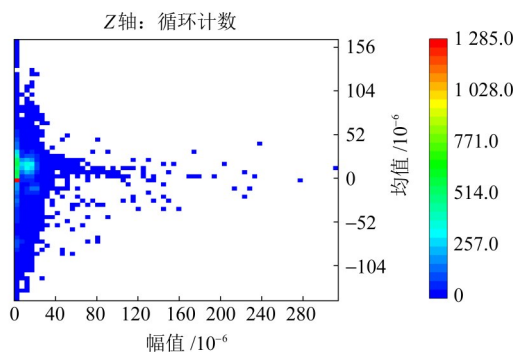
分别对各加速信号和原始信号进行雨流计数,结果如图 13 所示。由图 13 可知,各加速信号与原始信号的均-幅值统计分布特征具有相似性,3 种载荷谱加速编辑方法均对低幅值载荷循环进行了不同程度的删减。其中,加速信号 I 和加速信号Ⅲ对于均值在 0 附近的低幅值载荷循环的删减效果更为明显。



(a) 原始信号



(b) 加速信号 I



(c) 加速信号 II

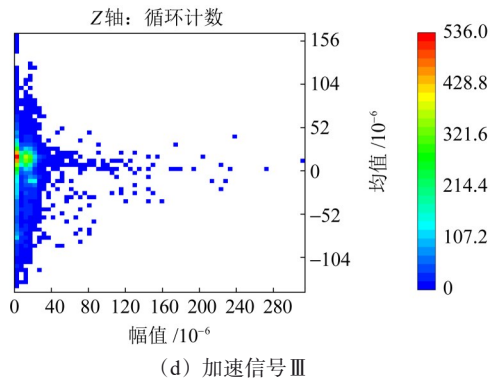


图 13 原始信号与加速信号的雨流计数分布对比

Fig. 13 Comparison of the rain flow counting distribution of the original signal and the accelerated signals

3.3.2 穿级计数分析

载荷谱幅值域穿级计数分析统计了数据采样点上升或者下降穿过给定幅值等级的频次,可有效反映各个载荷幅值水平的分布情况。图 14 所示为原始信号与 3 种加速信号的穿级计数结果。

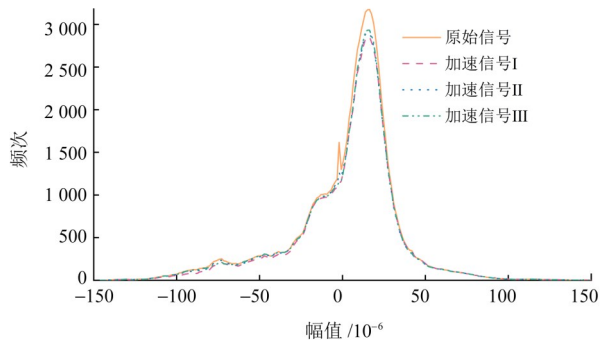


图 14 原始信号与加速信号穿级计数对比

Fig. 14 Comparison of the level-crossing counting of the original signal and the accelerated signals

由图 14 可知,与原始信号相比,3 种损伤识别方法的加速信号在大幅值范围内的穿级计数统计结果几乎一致,说明它们均较好地保留了高幅值载荷循环的时域波动情况。针对停车卸粮工况所对应的幅值为 0 处的小载荷波动,相比于加速信号 II,加速信号 I 和加速信号 III 对该成分的删减更为彻底。另外,在幅值 $10 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 峰值范围内,3 种方法所得加速信号的穿级计数结果均低于原始信号,加速信号 I 的变化程度最为突出。

3.3.3 统计参数分析

载荷统计参数是评判载荷相似性的特征指标。均值反映信号零值附近聚集程度与整体偏移程度;均方根值表征载荷平均能量高低;峰值系数为峰值与均方根值之比,体现峰值相对整体能量的占比水平。用均值、均方根和峰值系数对加速编辑前、后的信号统计特征差异进行分析,原始信号与 3 种加速信号的统计参数如表 6 所示。

由表 6 可知,加速信号 II 的均值与原始信号更为接近;加速信号 III 的均方根值高于原始信号及其余 2 种加速信号,说明其所含平均能量更高;3 种加速信号

与原始信号的峰值系数的误差均较小,但加速信号 III 的峰值系数相对偏低,表明信号的峰值不明显、振幅变化相对平缓。

表 6 原始信号与加速信号统计参数对比

Tab. 6 Comparison of statistical parameters of the original signal and the accelerated signals

信号类型	统计参数		
	均值/ 10^{-6}	均方根/ 10^{-6}	峰值系数
原始信号	1.43	32.95	5.01
加速信号 I	3.27	35.29	4.67
加速信号 II	1.93	34.79	4.75
加速信号 III	0.69	36.52	4.52

3.4 频域特征对比

收割机部件的功率谱密度从能量的角度反映出载荷对部件产生的效果。通过对比信号的功率谱密度,可以得到载荷谱在加速前、后的能量保留情况。计算 3 种加速信号与原始信号的功率谱密度,结果如图 15 所示。

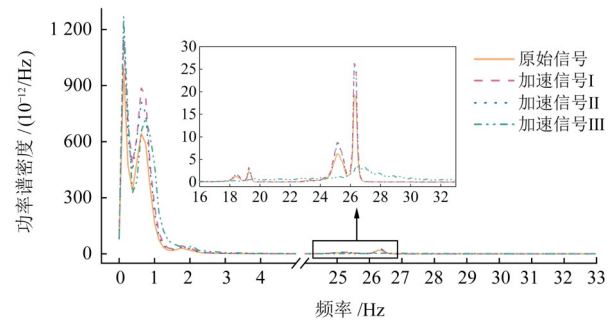


图 15 原始信号与加速信号的功率谱密度对比

Fig. 15 Comparison of the power spectral density of the original signal and the accelerated signals

由图 15 可知,3 种加速信号与原始信号的频带大致在 0~4 Hz 和 22~28 Hz,能量主要均分布在低频范围内。在低频 0~4 Hz,3 种加速信号与原始信号具有基本一致的幅值与变化趋势及相似的能量分布;但在高频 22~28 Hz,加速信号 III 的变化趋势及幅值与原始信号具有较大差距。从功率谱密度的一致性分析可得,加速信号 I、加速信号 II 在信号高频处的一致性效果要优于加速信号 III。

4 结论

应用时域损伤保留识别法、基于小波变换的包络线损伤识别法和基于时频分析的累积功率谱密度损伤识别法,对联合收割机后桥铰接点处的应变信号进行加速编辑处理,探究不同损伤识别方法对联合收割机底盘应力载荷加速编辑效果的影响,结论如下:

1) 通过对原始信号进行工况划分及各工况的损伤计算,得出各工况的损伤占比情况。结果表明,满仓田间行走工况的时间占比小,但损伤贡献较大。

2) 基于小波变换的包络线损伤识别法针对小幅值平稳载荷的识别效果不佳,加速信号时间压缩比例较低,但在工况完整性方面,较其他两种方法存在优势。时域损伤识别法与基于时频分析的累积功率谱

密度损伤识别法能够有效保留损伤占比大的工况,适用于联合收割机载荷谱加速编辑。

3)在98%损伤保留比例条件下,基于时频分析的累积功率谱密度损伤识别法对信号的缩减比例最佳,但在统计参数、功率谱密度等方面与时域损伤识别法相比各有优劣。实际应用时,应结合台架试验目标和加载效果进一步开展适用性评估。

参考文献(References)

- [1] 周晶,青平. 国产农机装备质量评价研究:基于华中地区农户调查数据的分析[J]. 中国工程科学,2019,21(5):60-66.
Zhou Jing, Qing Ping. Study on quality evaluation of domestic agricultural machinery equipment: an analysis based on the farmer survey data from Central China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5):60-66. (In Chinese)
- [2] 杨林,党明,董成举,等. 农机装备可靠性现状分析及发展建议[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2021,39(2):1-6.
Yang Lin, Dang Ming, Dong Chengju, et al. Reliability status analysis and development suggestions of agricultural machinery equipment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(2):1-6. (In Chinese)
- [3] 白云鹤. 工信部、农业部、发改委联合印发《农机装备发展行动方案(2016—2025)》[N]. 中国农机化导报,2016-12-26(001).
Bai Yunhe. The Ministry of Industry and Information Technology, the Ministry of Agriculture, and the National Development and Reform Commission jointly issued the "Action Plan for the Development of Agricultural Machinery and Equipment (2016-2025)" [N]. China Agricultural Mechanization Herald, 2016-12-26 (001). (In Chinese)
- [4] 石锋,王红钢,刘再生,等. 路谱台架试验研究[J]. 振动与冲击,2012,31(19):10-14.
Shi Feng, Wang Honggang, Liu Zaisheng, et al. Road spectrum rig test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(19):10-14. (In Chinese)
- [5] 邱炎. 四立柱振动台架在车辆疲劳试验中的应用[J]. 机电技术,2013,36(1):58-59.
Qiu Yan. Application of four-column shaking table frame in vehicle fatigue test[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2013, 36(1):58-59. (In Chinese)
- [6] 花菲菲,郑松林,冯金芝,等. 基于时域损伤编辑法的整车道路模拟试验谱编制[J]. 机械强度,2015,37(5):964-971.
Hua Feifei, Zheng Songlin, Feng Jinzhi, et al. Spectrum compilation for vehicle road simulation test based on time correlated fatigue analysis with damage editing method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(5):964-971. (In Chinese)
- [7] Stephens R I, Dindinger P M, Gunger J E. Fatigue damage editing for accelerated durability testing using strain range and SWT parameter criteria[J]. International Journal of Fatigue, 1997, 19(8/9):599-606.
- [8] Mattetti M, Molari G, Vertua A. New methodology for accelerating the four-post testing of tractors using wheel hub displacements[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129:307-314.
- [9] 林晓斌. 加速疲劳试验的疲劳编辑技术[J]. 中国机械工程,1998,9(11):27-30.
Lin Xiaobin. Fatigue editing technology of accelerated fatigue test[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(11):27-30. (In Chinese)
- [10] 金锋. 加速疲劳试验的疲劳编辑技术探讨[J]. 上海汽车,1999(2):17-21.
Jin Feng. A discussion on fatigue editorial technology for speedy fatigue test[J]. Shanghai Auto, 1999(2):17-21. (In Chinese)
- [11] 于佳伟,郑松林,冯金芝,等. 某轿车前副车架服役载荷模拟试验加速方法研究[J]. 机械工程学报,2016,52(22):112-120.
Yu Jiawei, Zheng Songlin, Feng Jinzhi, et al. Research on accelerated testing method for the service-simulation fatigue test of automotive front sub-frame[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(22):112-120. (In Chinese)
- [12] 于佳伟,郑松林,赵礼辉,等. 整车室内道路模拟试验用载荷谱的编制方法研究[J]. 机械工程学报,2015,51(14):93-99.
Yu Jiawei, Zheng Songlin, Zhao Lihui, et al. Research on spectrum development methodology for vehicle indoor road simulation test [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14):93-99. (In Chinese)
- [13] 于佳伟,郑松林,赵子顺,等. 一种新的加速耐久性试验谱编制方法[J]. 机械强度,2016,38(2):356-363.
Yu Jiawei, Zheng Songlin, Zhao Zishun, et al. A new spectrum development methodology for accelerated durability test [J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(2):356-363. (In Chinese)
- [14] 郑国峰,上官文斌,韩鹏飞,等. 基于小波变换的汽车零部件加速耐久性载荷谱编辑方法研究[J]. 机械工程学报,2017,53(8):124-131.
Zheng Guofeng, Shangguan Wenbin, Han Pengfei, et al. Study of load spectrum edition method based on the wavelet transform to the accelerated durability test of the vehicle component[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8):124-131. (In Chinese)
- [15] 郑国峰. 典型汽车部件载荷谱及加速耐久性编辑与实验方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2017:74-85.
Zheng Guofeng. Studies on load spectrum and accelerated durability test methods to typical automotive parts[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017:74-85. (In Chinese)
- [16] 郑国峰,上官文斌,韩鹏飞,等. 基于小波变换的汽车零部件加速耐久性多轴载荷谱编辑方法研究[J]. 机械工程学报,2017,53(8):124-131.
Zheng Guofeng, Shangguan Wenbin, Han Pengfei, et al. Study of multi-axis load spectrum edition method based on the wavelet transform to the accelerated durability test of the vehicle components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8):124-131. (In Chinese)
- [17] Putra T E, Abdullah S, Schramm D, et al. Reducing cyclic testing time for components of automotive suspension system utilising the wavelet transform and the Fuzzy C-Means[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 90:1-14.
- [18] Putra T E, Abdullah S, Schramm D, et al. The need to generate realistic strain signals at an automotive coil spring for durability simulation leading to fatigue life assessment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 94:432-447.
- [19] 董国疆,韩杰,张永强,等. 基于S变换的汽车零部件疲劳载荷谱编辑法研究[J]. 中国公路学报,2021,34(5):204-214.
Dong Guojiang, Han Jie, Zhang Yongqiang, et al. Fatigue load spectrum editing method for vehicle parts based on S transform[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5):204-214. (In Chinese)
- [20] 杨昊东,剡昌锋,谢和平,等. 电驱动矿用自卸车轮毂驱动系统动态疲劳可靠性分析[J]. 机械强度,2024,46(3):717-727.

- Yang Haodong, Yan Changfeng, Xie Heping, et al. Dynamic fatigue reliability analysis of wheel hub drive system for electric drive mining dump truck [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2024, 46 (3): 717-727. (In Chinese)
- [21] 成大先. 机械设计手册: 第1卷[M]. 5版. 北京: 化工出版社, 2012: 3-12.
Cheng Daxian. *Handbook of Mechanical Design: Volume 1* [M]. 5th ed. Beijing: Chemical Industry, 2012: 3-12.
- [22] 钟响亮. 多轴随机振动加速疲劳载荷谱编制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 27-41.
Zhong Xiangliang. *Research on accelerated fatigue spectrum editing methods of multi axial random vibration* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 27-41. (In Chinese)
- [23] 汪灏, 陈卓, 杜璞玉, 等. 运载火箭测试数据分析与故障诊断方法[J]. *计算机测量与控制*, 2024, 32(6): 14-19.
Wang Hao, Chen Zhuo, Du Puyu, et al. Data analysis and fault diagnosis methods for launch vehicles [J]. *Computer Measurement & Control*, 2024, 32(6): 14-19. (In Chinese)
- [24] Wen C K, 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.
- [25] Pratumnopharat P, Leung P S, Court R S. Wavelet transform-based stress-time history editing of horizontal axis wind turbine blades [J]. *Renewable Energy*, 2014, 63: 558-575.
- [26] Putra T E, Abdullah S, Schramm D. Effect of cycle amplitude removal of fatigue strain loadings associated to signal energy characteristics [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 116: 104723.
- [27] Johannesson P, Speckert M. *Guide to load analysis for durability in vehicle engineering* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [28] Abdullah S, Giacomini J A, Yates J R. A mission synthesis algorithm for fatigue damage analysis [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2004, 218(3): 243-258.

Influence of different damage fragment identification methods on the effect of accelerated editing of stress loads on combine harvester chassis

GU Yuanyang¹ YANG Zihan^{1,2} LIU Xuke¹ ZHANG Zhihao¹ GUO Zhiqiang^{1,2} SONG Zhenghe¹

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

(2. Luoyang Smart Agricultural Equipment Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: [Objective] The operating conditions of combine harvesters are complex and variable. No load spectrum accelerated editing method adapted to their field load characteristics is available, which restricts the improvement of structural reliability design and durability test efficiency. Three different damage fragment identification methods were applied to the accelerated editing of chassis stress loads of combine harvesters. To solve the aforementioned problems, the time-domain damage retention identification method, the wavelet transform-based envelope damage identification method and the time-frequency analysis-based cumulative power spectral density damage identification method were employed. The strain signals measured at the hinge positions of the combine harvester rear axle were separately subjected to accelerated spectrum compilation processing by the three aforementioned methods, and the influences of different damage identification approaches on the accelerated compilation performance of stress load spectra for the combine harvester chassis were explored. [Methods] Firstly, vertical stress loads at the hinge point of the rear axle of the chassis of a domestic large double axial flow combine harvester were collected. Preprocessing and working condition division were completed to clarify the damage contribution ratio of each working condition. Secondly, the time-domain damage identification method was adopted. The optimal 2 s calculation window interval was determined to realize the screening of load fragments based on damage distribution. Then, high-frequency components were extracted based on wavelet transform. Envelope analysis was performed to identify high-damage load fragments. Finally, the accumulative power spectral density damage identification method based on time-frequency analysis was adopted. High-energy damage regions were located through continuous wavelet transform and power spectrum superposition. [Results] The results show that under the condition of pseudo-damage retention ratio of about 98%, the signal compression ratio of the accumulative power spectral density damage identification method based on time-frequency analysis reaches 40.92%. The acceleration effect is improved by 12.45% and 16.56% respectively compared with the time-domain damage identification method and the envelope damage identification method based on wavelet transform. The grain unloading condition with a damage ratio of only 0.7% can be completely eliminated, but deficiencies exist in the consistency of power spectral density in the high frequency band. Reference can be provided for the accelerated editing of load spectrum in the field of agricultural machinery.

Key words: Combine harvester; Load spectrum; Accelerated editing; Wavelet transform; Damage fragment identification

Corresponding author: YANG Zihan, E-mail: yangzihan@cau.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China(32401717); China Postdoctoral Science Foundation Project (2023M733784)

Received: 2024-10-17 Revised: 2025-01-13

(编辑: 李凯阳)