

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.003

喂入量扰动下联合收获机振动特性机理研究

丁翰韬^{1,2} 陈树人^{1,2} 周巍伟^{1,2} 梁润芝^{1,2}

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对喂入量变化引起各工作部件受到变载冲击和不平衡力,导致联合收获机工作时振动突变,影响整机工作稳定性与可靠性,本文基于联合收获机运动平衡方程和外界振动扰动信号相关性分析方法,通过开展田间工况下联合收获机变喂入振动试验,获取不同喂入量下主要工作部件的振动加速度信号。当喂入谷物呈现较强的阻尼特性时,振动加速度信号随之减弱,而收获机工作动力需求增加后,又会进一步导致振动信号增强的现象。通过快速傅立叶变换将加速度信号转换为频域信号,进一步掌握振幅的变化及激振频率特征。喂入量扰动导致的振动主要发生在低频激振频率范围,而喂入量表现出的阻尼特性对高频振幅起减弱作用。喂入量对脱粒滚筒振动影响最为明显,最大振幅由 17 μm 衰减至 2.8 μm ,变化量达 83.5%,而割台与输送槽的变化量分别为 55.8% 和 7.69%。脱粒滚筒的最大峰值点也由中频 195 Hz 附近左移至靠近低频的 117 Hz 附近。

关键词: 喂入量扰动; 联合收获机; 振动特性; 激振频率

中图分类号: S225.3; TB533⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)S2-0020-08

Mechanism Analysis of Combine Harvester's Vibration Characteristics under Feeding Interference

DING Hantao^{1,2} CHEN Shuren^{1,2} ZHOU Weiwei^{1,2} LIANG Runzhi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The change of the feeding amount will cause the various working parts to be subjected to variable load impact and unbalanced force, resulting in a sudden change in the vibration of the combine harvester when it is working. Aiming at the stability and reliability of the combine harvester, based on the combine harvester motion balance equation and the correlation analysis method of the external vibration disturbance signal, the vibration acceleration signal of the main working parts under different feeding amounts was obtained by carrying out the variable feeding vibration test of the combine harvester under field conditions. When the fed grains exhibited strong damping characteristics, the vibration acceleration signal was decreased accordingly. However, when the power demand of the harvester was increased, it would further lead to the phenomenon of increased vibration signal. The acceleration signal measured by the test was processed by quadratic integration, and the acceleration signal was converted into a frequency domain signal by fast Fourier transform. The change of amplitude and the characteristics of excitation frequency were obtained. The vibration caused by the disturbance of the feeding amount mainly occurred in the low frequency excitation frequency range, and the damping characteristic of the feeding amount reduced the high frequency amplitude. The feeding amount had the most obvious effect on the vibration of the threshing drum, and the maximum amplitude was attenuated from 17 μm to 2.8 μm , and the change degree could reach 83.5%. The change degree of header and the conveying trough was 55.8% and 7.69%, respectively. The maximum peak point of the threshing drum also moved left from the mid-frequency near 195 Hz to the low-frequency near 117 Hz.

Key words: feeding interference; combine harvester; vibration characteristics; excitation frequency

收稿日期: 2022-06-01 修回日期: 2022-08-01

基金项目: 江苏省现代农业装备与技术教育部重点实验室开放基金项目(MAET202118)

作者简介: 丁翰韬(1998—),男,硕士生,主要从事收获装备技术研究,E-mail: 390535573@qq.com

通信作者: 陈树人(1965—),男,教授,主要从事收获装备技术研究,E-mail: srchen@ujs.edu.cn

0 引言

由于联合收获机收获时工作环境的特殊性以及收获作物的生长特性^[1-3],工作时运动部件多、运动形式复杂,从而引起整机强烈振动^[4-5]。联合收获机自身激振源主要包括割台与输送槽、振动筛、脱粒滚筒、风机及发动机对机架的作用力^[6]。此外,联合收获机工作时受地形和作物密度影响,喂入量会因工况的不同发生突变,引起各工作部件受到变载冲击和不平衡力,扰动收获机各部件正常工作状态,引起收获机振型变化^[7-8]。进一步导致联合收获机强烈振动和结构件交变动应力变化,从而使得整机结构件疲劳破坏,严重影响联合收获机的工作性能和使用寿命。近年来,随着联合收获机向大型、高速、高效和智能方面发展,对联合收获机结构的振动问题加以研究就显得尤为迫切^[9]。

目前,国内外学者主要通过对割台、振动筛、脱粒滚筒、发动机等单一部件的振动时域和频域信号加以分析^[10-13],对比振动频率与模态振型,研究各工作部件振动的影响因素及其振动主频与模态参数之间的对应关系,并基于模态分析优化部件结构以实现减振目的^[14]。也有学者运用车辆工程领域中的 NVH 技术,以有限元分析和模态求解为基础,根据车辆动力学原理建立联合收获机多自由度动力学模型,通过优化驾驶台结构以及设计座椅悬架系统两方面提高联合收获机驾驶台舒适性^[15-16]。同时,已有学者根据相关研究提出,喂入量不同会影响联合收获机工作部件的振动强弱。王芬娥等^[17]提出小麦联合收获机的工作负荷具有明显的减振作用,随工作负荷增加,振动强度明显下降。高志朋等^[18]研究了联合收获机同一测点处不同喂入量下的振动强度,得出作物喂入割台和输送槽组成的腔体结构后,吸收了部分振动,但各工作部件测点处的振动随喂入量变化振动总量不同。赵胜华^[19]通过对滚筒脱粒过程的理论分析建立滚筒顶盖受力模型,得出横轴流脱粒滚筒顶盖受力信号与实时喂入量显著相关。

上述研究主要集中在对联合收获机单工作部件的模态测试、振动测试、载荷测试、静力学分析等方面,可以解决单个工作部件的动平衡和振动问题,虽然已有学者开始提出喂入量影响部件振动问题,但重点同样在单一工作部件的优化分析上,对于整机多工作部件在负载时机架强烈振动问题的研究还不多见。本文基于联合收获机平衡方程和振动信号的相关性分析,通过开展田间工况下联合收获机变喂入振动试验,分析喂入量扰动下联合收获机振动信

号变化规律,探索喂入量扰动对整机振动影响规律,以期降低联合收获机整机振动提供参考。

1 联合收获机信号分析方法与主要振源分析

1.1 联合收获机运动平衡方程推导

运动模型及平衡方程是了解物体运动的基础,通过各部件间的力学平衡关系建立收获机主要装置的平衡方程,为联合收获机后续振动分析提供基础。平衡方程推导时由牛顿第二定律建立运动平衡方程,此时合外力 $p(t)$ 等于所受所有外界其他力之和,即

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (1)$$

式中 m ——质量系数

c ——阻尼系数

k ——刚度

u ——部件位移

但联合收获机在工作时为运转状态,在进行动力平衡建立平衡方程时需将其假定为理想平衡状态,为弥补运动缺失,在考虑受力时除了结构支撑力、约束力和阻尼力等实际作用力外,根据 D'Alembert 原理,额外引入由运动产生的惯性力

$$p(t) - f_l - f_d - f_s = 0 \quad (2)$$

式中 f_l ——主动力 f_d ——阻尼力

f_s ——约束反力

$f_l = m\ddot{u}$, $f_d = c\dot{u}$, $f_s = ku$, 将各装置的动力学问题转化为静力学问题。当谷物进入联合收获机后,满足整体约束条件的静止状态下存在虚位移 du ,进一步将方程优化为

$$p(t)\delta u - f_l\delta u - f_d\delta u - f_s\delta u = 0 \quad (3)$$

为了兼顾收获机各装置间的振动特性与稳态下的平衡方程,同时考虑实际工况下喂入量变化对受力状态的影响,各装置分析时引入外界或相联装置对该装置的激励力,此时平衡状态下的合外力 $p(t)$ 等于联合收获机整机所受的外界激振力及喂入量进入收获机后的阻尼力之和。

1.2 喂入量扰动下振动信号分析方法

喂入量引起的振动信号属于外界扰动信号的一种,需要与联合收获机自身激振信号区分开。振动信号相关性分析主要包括自相关分析和互相关分析,二者皆属于时域分析。自相关函数表达信号某瞬间数值与另一个瞬间数值的相似程度,可用于检测联合收获机工作时的周期性振动信号^[20]。自相关函数还可用于诊断联合收获机工作时所受外界扰动信号,从而可以判断产生振动的原因,计算公式为

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (4)$$

式中 $R(\tau)$ ——自相关函数, m^2/s^4

τ ——两信号时间差, s

$x(t)$ ——测量的振动加速度时域信号, m/s^2

T ——测量时间, s

两个随机信号的互相关函数表示这两个信号之间的关联程度。计算公式为^[21]

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (5)$$

式中 $y(t)$ ——另一个随机信号的时域函数, m/s^2

$R_{xy}(\tau)$ ——互相关函数, m^2/s^4

其中 $y(t)$ 离散信号短时傅里叶计算公式为

$$STFT_f(n, k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(m)g(n-m)e^{-j\frac{2\pi k}{N}m} R_N(k) \quad (6)$$

其中 $R_N(k) = \begin{cases} 1 & (k=0, 1, \dots, N-1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$

式中 N ——采样点数, 即窗宽

n ——窗的中心位置

$f(m)$ ——所截取的加速度信号

短时傅里叶变换通过移动一个固定的窗函数来截取信号, 得到信号幅值和频率随时间的变化关系, 但由于分辨率的关系往往不能同时兼顾时间与频率。因此处理数据时需合理选择窗函数类型和窗宽^[22-23]。

1.3 履带式谷物联合收获机基本结构及振源分析

联合收获机在作业过程中需完成谷物的切割、输送、脱粒、清选及收集功能, 不同作物所需的切割装置可能有所差异, 脱粒清选过程中为达到不同效果, 工作装置的设置安装也会有所不同。本文以沃得集团生产的锐龙 4LZ-6.0EK(Q) 型履带自走全喂入式联合收获机为研究对象, 开展田间工况下联合收获机变喂入振动试验。4LZ-6.0EK(Q) 型联合收获机主要工作装置包括驾驶室、履带式行走底盘装置、割台装置、输送装置、脱粒装置、清选装置等, 如图 1 所示。割台装置包括拨禾轮、割刀及螺旋输送机, 试验机型脱粒装置为单纵向轴流滚筒, 清选装置包括振动筛与离心风扇。

田间作业时, 作物由拨禾轮带动进入割台装置, 经割刀切断后由螺旋输送机聚集通过输送槽向上输送。进入脱粒装置后, 籽粒由滚筒脱下落入清选装置, 在振动筛与离心风扇共同作用后送入粮箱。整个作业过程中, 联合收获机主要振源有发动机、螺旋输送机、割刀、输送槽、脱粒滚筒等。为保证各工作部件良好的作业性能及效率, 联合收获机在田间收获时发动机始终保持额定转速, 通过手柄调节行走速度, 但发动机转速不变。

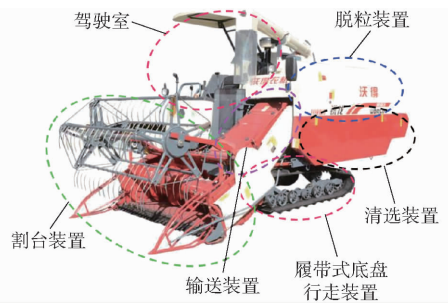


图 1 试验机型整机构成图

Fig. 1 Introduction of test model

2 田间工况下联合收获机变喂入振动试验

2.1 不同前进速度及不同割幅分析

在田间收获的过程中, 由于水稻种植区域的差异及作业时间的限制, 联合收获机割幅与前进速度往往需要调整, 从而导致喂入量变化, 由此带来收获机振动差异。为探索喂入量对联合收获机振动特性影响, 在江苏省镇江市新丰镇田间开展联合收获机不同工况下收获试验。通过改变田间收获时联合收获机割幅与前进速度, 实现喂入量的动态变化。

在观察收获机田间作业后, 设置四分之一割幅、半割幅及满割幅 3 种工况, 如图 2 所示。收获机按四分之一割幅前进时约喂入 3 簇水稻, 按半割幅前进时约喂入 6 簇水稻, 按满割幅前进时约喂入 12 簇水稻, 如图 3 所示。在割幅保持恒定情况下, 进行田间试验时使收获机按不同作业速度前进。将等割幅收获的稻田分成 3 段 21 m 的等长距离, 首先进行预



图 2 联合收获机田间不同割幅设置

Fig. 2 Different cutting width settings of combine harvester



图 3 四分之一割幅幅宽

Fig. 3 Comparison of cutting width

试验,通过秒表记录前进时间,慢速工作段前进了 50.64 s,中速工作段前进了 26.96 s,高速工作段前进了 17.69 s,由此将联合收获机割台加速度信号划分为慢速前进段、中速前进段、高速前进段 3 类。慢速前进段速度约 0.414 7 m/s,中速前进段速度约 0.778 9 m/s,高速前进段速度约为 1.187 1 m/s,由此进行田间作业。假设田间种植水稻在产量密度方面不存在太大差异,一簇水稻采样均值质量为 320 g,满割幅下所对应的喂入量分别为 1.60、3.01、4.60 kg/s。

2.2 试验过程及传感器位置分布

试验开展前将三向加速度传感器布置在联合收获机上,一次测量一个工作部件的加速度信号,由于割台左端分布有带传动,为保证试验器材的可靠性,第 1 个传感器贴于割台底板,第 2 个传感器贴于割台右侧板,第 3 个传感器贴于割台背板右侧,第 4 个传感器贴于割台背板左侧靠近输送槽入口位置,如图 4 所示。每个传感器测量 XYZ 三轴的加速度,共 12 个通道,测量联合收获机割台在田间作业时不同喂入量情况下振动加速度变化情况。输送槽部位传感器按收获机前进方向为正向绕输送槽顺时针安装,分别布置于输送槽顶端、输送槽左侧板、输送槽底端及输送槽右侧板。同时,为研究割台振动向输送槽的传递,在割台与输送槽连接处也安装 4 个传感器以获取加速度信号变化。在研究喂入量对脱粒滚筒振动影响规律时,考虑到输送槽对脱粒滚筒的振动传递,以及避免收获机工作时传感器安装位置的安全性,4 个加速度传感器分别安装在输送槽与脱粒滚筒连接处、输送槽后方脱粒滚筒前板处、脱粒滚筒顶盖以及脱粒滚筒外侧板。将信号采集仪固定于收获机顶端平台,传感器与信号采集仪接线固定在收获机外壳体及无运转工作部件处,如图 4 所示。



图 4 割台传感器安装位置

Fig. 4 Location of header sensor installed

传感器稳定安装于工作部件后启动收获机,首先采集空载信号并进行信号平衡与校正。待振动加速度信号稳定后进行收割作业,从四分之一割幅开

始进行田间收获。在割幅保持稳定的情况下,每 21 m 调整一次收获速度,使得一次割幅稳定的前进过程中经历慢速、中速及高速 3 种工况,一种割幅状态为一次信号采集周期。四分之一割幅振动信号采集结束后,在稻田尽头调转收获机前进方向,返程过程中按半割幅进行收获作业,同样经历 3 种速度工况,采集该割幅下的振动加速度信号变化,如图 5 所示。满割幅收获作业同样以该方式开展。3 种割幅下振动信号采集结束后,在其他工作部件重新安装传感器,采集振动信号前再次进行信号平衡与校正,进行变割幅变速收获作业。



图 5 联合收获机田间试验

Fig. 5 Field test process of combine harvester

3 喂入量扰动下联合收获机振动信号分析

3.1 加速度信号对比及二次积分处理

为了便于区分,在记录仪采集的信号中编号为 A 的 3 条曲线分别表示第 1 个传感器测得的 XYZ 三轴振动加速度信号,编号为 B 的 3 条曲线分别表示第 2 个传感器测得的三轴振动加速度信号,编号为 C 的 3 条曲线分别表示第 3 个传感器测得的三轴振动加速度信号,编号为 D 的 3 条曲线分别表示第 4 个传感器测得的三轴振动加速度信号。传感器编号及对应加速度测量方向如表 1 所示。

当喂入量发生变化时部件加速度信号均随之发生不同程度波动,如图 6 所示。图中横坐标为采样时间,纵坐标为加速度。随着前进速度的增大,割台及输送槽总体振动信号均呈现逐步增加趋势,而割台与输送槽连接处及脱粒滚筒则呈现先增大后减小趋势。通过观察加速度信号外部变化趋势可知,尽管随着速度的增加喂入量不断增大,但各工作部件均出现一段加速度信号减小的趋势。当水稻喂入量积累到一定程度后,可呈流体态在收获机内部运动,由水稻自身重量与摩擦带来的阻尼力对系统不断做负功,使得系统的力学能转化成内能,能量逐渐减少,而导致振动的强度逐渐减弱。当喂入水稻呈现

表1 传感器编号及对应加速度方向

Tab.1 Sensor numbers and corresponding acceleration directions

| 传感器编号 | 工作部件 | | | |
|-------|-----------|------------|-----------|--------------|
| | 割台 | 割台输送槽连接处 | 输送槽 | 脱粒滚筒 |
| A-1-X | 割台底板 X 轴 | 左上方支撑梁 X 轴 | 输送槽上板 X 轴 | 输送槽滚筒连接处 X 轴 |
| A-2-Y | 割台底板 Y 轴 | 左上方支撑梁 Y 轴 | 输送槽上板 Y 轴 | 输送槽滚筒连接处 Y 轴 |
| A-3-Z | 割台底板 Z 轴 | 左上方支撑梁 Z 轴 | 输送槽上板 Z 轴 | 输送槽滚筒连接处 Z 轴 |
| B-1-X | 割台右侧板 X 轴 | 右上方支撑梁 X 轴 | 输送槽左侧 X 轴 | 脱粒滚筒前板 X 轴 |
| B-2-Y | 割台右侧板 Y 轴 | 右上方支撑梁 Y 轴 | 输送槽左侧 Y 轴 | 脱粒滚筒前板 Y 轴 |
| B-3-Z | 割台右侧板 Z 轴 | 右上方支撑梁 Z 轴 | 输送槽左侧 Z 轴 | 脱粒滚筒前板 Z 轴 |
| C-1-X | 割台右背板 X 轴 | 右下方支撑梁 X 轴 | 输送槽底板 X 轴 | 脱粒滚筒顶盖 X 轴 |
| C-2-Y | 割台右背板 Y 轴 | 右下方支撑梁 Y 轴 | 输送槽底板 Y 轴 | 脱粒滚筒顶盖 Y 轴 |
| C-3-Z | 割台右背板 Z 轴 | 右下方支撑梁 Z 轴 | 输送槽底板 Z 轴 | 脱粒滚筒顶盖 Z 轴 |
| D-1-X | 割台左背板 X 轴 | 左下方支撑梁 X 轴 | 输送槽右侧 X 轴 | 脱粒滚筒侧板 X 轴 |
| D-2-Y | 割台左背板 Y 轴 | 左下方支撑梁 Y 轴 | 输送槽右侧 Y 轴 | 脱粒滚筒侧板 Y 轴 |
| D-3-Z | 割台左背板 Z 轴 | 左下方支撑梁 Z 轴 | 输送槽右侧 Z 轴 | 脱粒滚筒侧板 Z 轴 |

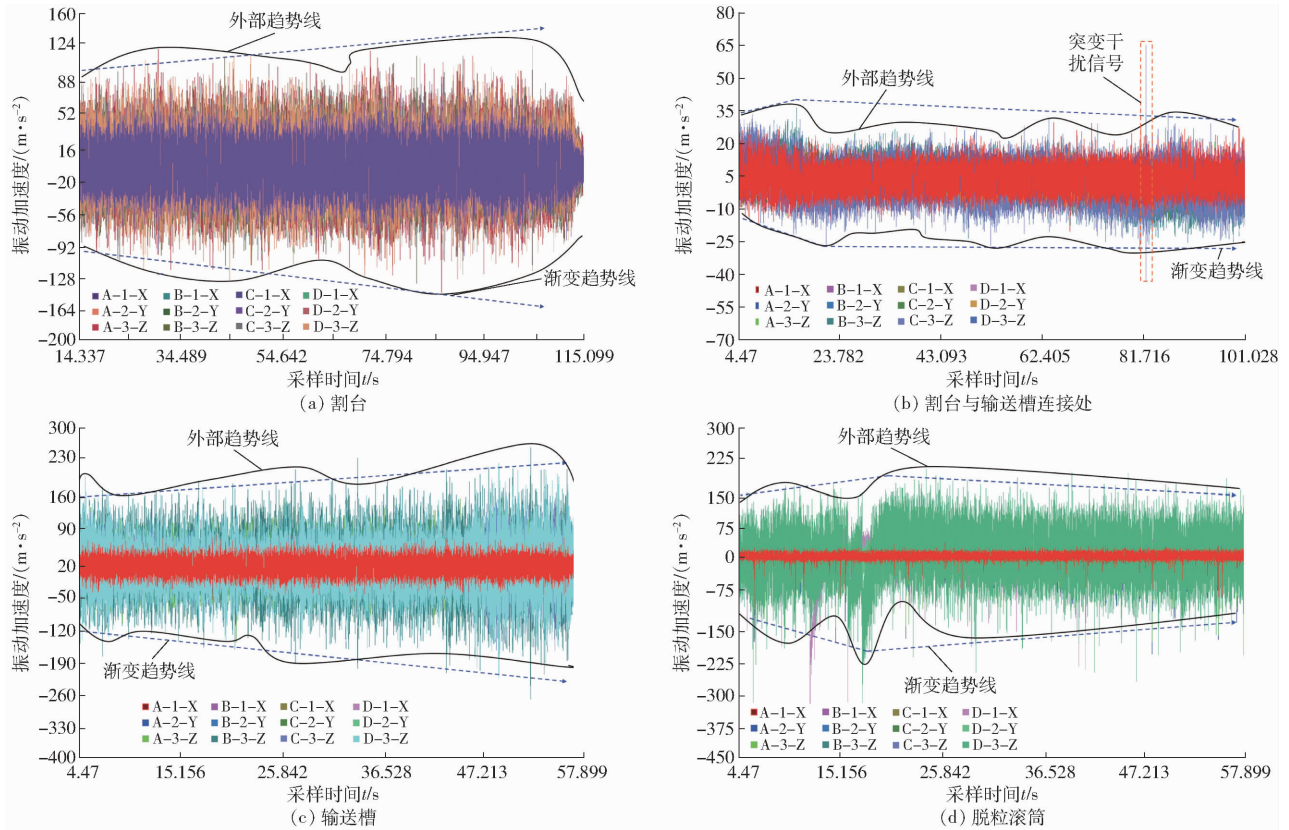


图6 田间试验各工作部件加速度变化曲线

Fig.6 Acceleration signal change of each working part during field test

较强的阻尼特性时,振动加速度信号也随着减弱,但由于喂入量的不断增大收获机工作的动力需求也不断提高,此时各工作装置不再是稳定状态,由此又会导致振动信号增强的现象。在割台与输送槽连接处以及脱粒滚筒两个位置,振动信号均出现先增强后减弱趋于平稳的现象。原因是割台与输送槽连接处存在割台对输送槽的振动传递,而脱粒滚筒处则存在输送槽对脱粒滚筒的振动传递。当喂入量发生变化时振动传递信号也突然改变,导致这两个位置稳

定工作状态失衡。随着喂入量的逐渐稳定,失稳的工作状态又恢复正常,振动信号也逐步趋于平稳。同时,喂入量的冲击响应也容易导致尖锐的突变干扰信号。

通过统计不同割幅下工作部件的最大值、最小值、平均值、标准差及均方根值进一步量化加速度信号变化情况,同时通过记录传感器编号获取主要振动位置及振动变化方向。由表2可知,割台振动强烈通道为A-3-Z,割台与输送槽连接处振动强烈

通道为 C-3-Z, 输送槽振动强烈通道为 B-3-Z, 脱粒滚筒振动强烈通道为 D-3-Z。随着割幅的增加, 割台 A-3-Z 处振动加速度信号由 27.673 m/s^2 增强至 31.695 m/s^2 , 割台与输送槽连接处 C-3-Z 振动加速度信号由 6.555 m/s^2 增强至 7.105 m/s^2 , 输送槽 B-3-Z 处振动加速度信号由 52.763 m/s^2 增强至 57.426 m/s^2 , 脱粒滚筒 D-3-Z 处振动加速度信号由 46.292 m/s^2 增强至 51.272 m/s^2 , 再衰减至 48.511 m/s^2 。随着喂入量的不断增加, 振动加速度信号也不断增强, 但主要振动位置并不因割幅的变化而发生变化, 即喂入量主要影响振动加速度大

小, 并不影响振动位置与振动传递方向。随着喂入量的增强脱粒滚筒的振动信号呈现先增强后减弱的趋势。随着谷物逐渐喂入, 输送槽对脱粒滚筒的振动传递、脱粒滚筒内部籽粒与壁板的冲击以及脱粒元件的回转运动逐渐增强, 致使振动信号不断增强。当喂入量达到一定程度后, 籽粒所表现出的阻尼特性大于籽粒对壁板的冲击甚至进一步减小了回转件导致的振动, 此时振动信号出现减弱趋势。同时, 随着喂入量的增加, 脱粒滚筒逐渐达到最大工作量, 内部间隙被水稻填充, 稳定的工作状态也会使振动趋于平稳。

表 2 不同割幅下各工作部件振动加速度信号变化

Tab. 2 Variation of vibration acceleration signal of each working part under different cutting widths m/s^2

| 部件及工况 | | 传感器编号 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 标准差 | 均方根 |
|-----------|--------|-------|---------|----------|--------|--------|--------|
| 割台 | 四分之一割幅 | A-3-Z | 124.912 | -142.613 | -2.012 | 27.600 | 27.673 |
| | 半割幅 | A-3-Z | 131.352 | -135.411 | -0.117 | 28.168 | 28.168 |
| | 满割幅 | A-3-Z | 166.173 | -161.382 | -2.460 | 31.599 | 31.695 |
| 割台与输送槽连接处 | 四分之一割幅 | C-3-Z | 59.664 | -53.743 | -0.536 | 6.533 | 6.555 |
| | 半割幅 | B-3-Z | 33.326 | -29.420 | 1.129 | 6.598 | 6.694 |
| | 满割幅 | C-3-Z | 73.397 | -71.657 | -0.966 | 7.039 | 7.105 |
| 输送槽 | 四分之一割幅 | B-3-Z | 245.827 | -277.779 | -0.316 | 52.762 | 52.763 |
| | 半割幅 | B-3-Z | 248.054 | -231.239 | -0.053 | 54.858 | 54.857 |
| | 满割幅 | B-3-Z | 240.425 | -253.700 | -0.216 | 57.426 | 57.426 |
| 脱粒滚筒 | 四分之一割幅 | D-3-Z | 188.940 | -345.714 | -1.231 | 46.276 | 46.292 |
| | 半割幅 | D-3-Z | 199.744 | -458.754 | -7.592 | 50.707 | 51.272 |
| | 满割幅 | D-3-Z | 203.406 | -446.364 | -2.754 | 48.433 | 48.511 |

3.2 喂入量扰动下振幅与激振频率分析

通过加速度信号正负值及最大加速度均方根值所在传感器编号, 可判断振动传递方向及振动强烈点所在位置。将试验测得的加速度信号进行二次积分处理, 通过快速傅立叶变换 (FFT) 将加速度信号转化为频域信号, 进一步掌握振幅变化及激振频率特征。在各部件振幅信号变化图中, 由上至下分别为部件四分之一割幅、半割幅及满割幅对应的振幅与激振频率, 如图 7 所示。割台半割幅时振幅最大, 随着割幅的变化第一峰值点对应的激振频率基本不变, 在半割幅时出现峰值点右移, 满割幅时振幅减弱。割台与输送槽连接处则相反, 满割幅时振幅最大, 半割幅时峰值点激振频率则向低频移动。输送槽振幅对应峰值大部分集中在高频区间, 随着喂入量增大高频振幅基本稳定, 低频区间则出现振幅增强现象, 同时峰值点振动向更高频延伸, 激振源明显增多。喂入量对脱粒滚筒振动影响最为明显, 在四分之一割幅时最大振幅接近 $17 \mu\text{m}$, 而在半割幅时振幅却衰减至 $2.8 \mu\text{m}$, 随着割幅的进一步增加, 最大振幅又增强至 $13 \mu\text{m}$ 。半割幅时由于振幅明显减弱, 低频激振频率变得更加突出, 激振区间大幅拓

宽, 同时也导致激振频率所对应的激振点显著增加, 在较宽的一段频率区间上振幅保持在同一水平范围。随着喂入量的进一步增加, 低频振幅明显增强, 甚至最大峰值点由四分之一割幅的中频 195 Hz 附近左移至靠近低频的 117 Hz 附近。

为准确描述振幅及激振频率变化, 统计前 5 个峰值点对应的激振频率和幅值, 结果如表 3 所示。四分之一割幅及半割幅工况下, 割台 194 Hz 激振频率时振幅最大。喂入量变为满割幅后, 最大振幅对应的激振频率变为 131.84 Hz 。四分之一割幅时最大振幅为 $7.69 \mu\text{m}$, 半割幅时最大振幅为 $3.40 \mu\text{m}$, 满割幅时最大振幅为 $4.75 \mu\text{m}$ 。在观察加速度信号时, 喂入量并未在割台部位表现出阻尼特性。由快速傅立叶变换 (FFT) 及积分后, 通过观察振幅则发现, 在割台部位喂入量也呈现阻尼特性, 降低了割台在半割幅时的振幅。割台与输送槽连接处的激振频率区间较窄, 集中在 $50 \sim 190 \text{ Hz}$ 范围。随着喂入量的增加, 振幅由 $2.21 \mu\text{m}$ 逐步提升至 $2.99 \mu\text{m}$ 。输送槽激振频率区间同样较为集中, 分布于 $200 \sim 351 \text{ Hz}$ 范围, 喂入量由四分之一割幅变化至满割幅时, 最大峰值点向低频移动, 但变化范围不大, 由

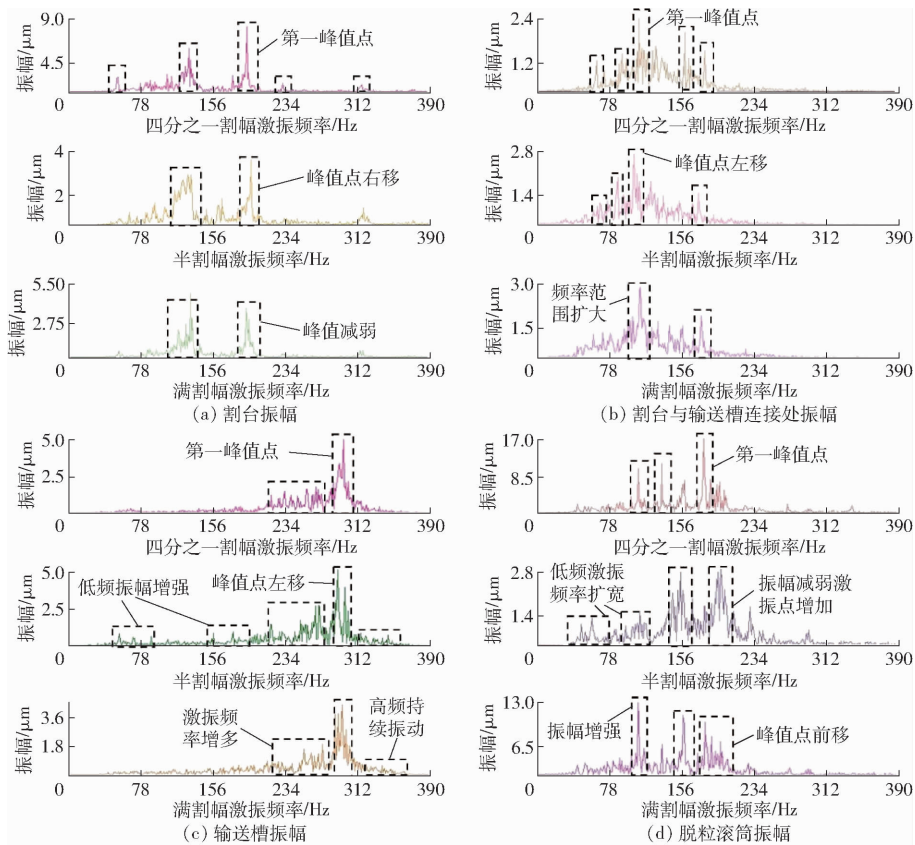


图7 田间试验各工作部件振幅信号变化曲线

Fig. 7 Amplitude signal change of each working part during field test

表3 不同割幅下各工作部件振幅及激振频率

Tab.3 Amplitude and excitation frequency changes of each working part under different cutting widths

| 部件及工况 | 峰值点1 | | 峰值点2 | | 峰值点3 | | 峰值点4 | | 峰值点5 | | |
|-----------|--------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|------|
| | 频率/Hz | 幅值/ μm | 频率/Hz | 幅值/ μm | 频率/Hz | 幅值/ μm | 频率/Hz | 幅值/ μm | 频率/Hz | 幅值/ μm | |
| 割台 | 四分之一割幅 | 194.34 | 7.69 | 131.84 | 5.05 | 133.79 | 3.90 | 127.93 | 3.03 | 125.00 | 2.33 |
| | 半割幅 | 196.29 | 3.40 | 128.91 | 2.63 | 131.84 | 2.61 | 124.02 | 2.37 | 119.14 | 1.84 |
| | 满割幅 | 131.84 | 4.75 | 192.38 | 3.65 | 195.31 | 2.90 | 133.79 | 2.89 | 126.95 | 2.48 |
| 割台与输送槽连接处 | 四分之一割幅 | 111.33 | 2.21 | 161.13 | 1.71 | 116.21 | 1.51 | 114.26 | 1.25 | 129.88 | 1.23 |
| | 半割幅 | 110.35 | 2.52 | 90.82 | 1.69 | 119.14 | 1.33 | 112.31 | 1.24 | 108.40 | 1.23 |
| | 满割幅 | 113.28 | 2.99 | 178.71 | 1.67 | 104.49 | 1.55 | 131.84 | 1.45 | 144.53 | 1.38 |
| 输送槽 | 四分之一割幅 | 296.88 | 4.68 | 292.97 | 2.94 | 302.73 | 1.85 | 286.13 | 1.83 | 299.81 | 1.80 |
| | 半割幅 | 294.92 | 4.46 | 292.97 | 3.83 | 291.02 | 3.50 | 297.85 | 3.20 | 283.20 | 2.30 |
| | 满割幅 | 294.92 | 4.32 | 291.99 | 2.97 | 304.69 | 2.81 | 268.56 | 2.47 | 302.73 | 2.39 |
| 脱粒滚筒 | 四分之一割幅 | 179.69 | 10.24 | 109.38 | 7.95 | 157.23 | 6.47 | 159.18 | 6.39 | 134.77 | 6.29 |
| | 半割幅 | 200.20 | 2.41 | 197.27 | 2.32 | 156.25 | 2.32 | 195.31 | 2.11 | 204.10 | 1.78 |
| | 满割幅 | 109.38 | 11.04 | 157.23 | 8.80 | 180.67 | 8.00 | 197.27 | 6.32 | 134.77 | 5.57 |

296.88 Hz 左移至 294.92 Hz, 而振幅则由 4.68 μm 逐步降低至 4.32 μm 。输送槽由于不充分的工作量会产生晃动, 同时逐渐增加的喂入量会改变输送槽负重, 致使回转波动不稳定。当喂入量达到满负荷后, 输送槽趋于平稳作业, 振动逐渐减弱。四分之一割幅时脱粒滚筒存在 3 个明显的振幅激励点, 分别为 179.69、109.38、157.23 Hz, 所对应的 3 个振幅为 10.24、7.95、6.47 μm 。半喂入时的第一峰值点明显变化, 不再是 179.69 Hz, 向低频与高频转化为两个

峰值区间, 分别为 200.20 Hz 区间及 156.25 Hz 峰值区间。但半喂入情况下的振幅明显减弱, 仅为 2.41 μm 。

由此可知喂入量的阻尼特性在脱粒滚筒部件表现尤为明显, 无论在加速度曲线或是振幅曲线均可明显观察到。满割幅情况下, 由于水稻茎秆及稻穗对脱粒滚筒壳体的冲击, 主要激振频率向更低频变化。脱粒滚筒喂入量最大振幅变化程度达 83.5%, 割台喂入量最大振幅变化程度达 55.8%, 输送槽

喂入量最大振幅变化程度达 7.69%。通过对田间喂入量变化下各部件加速度及振幅信号观察分析,可知喂入量变化对联合收获机各部件振动存在阻尼效应。且在脱粒滚筒处阻尼特性表现得尤为显著,当水稻喂入联合收获机后由于整株水稻的摩擦及收获机整体质量变化导致的阻尼特性并不明显。但当水稻经过脱粒滚筒脱粒后,在脱粒滚筒中稻粒呈现出类似流体状在脱粒滚筒运动,此时的流体阻力、摩擦力甚至重力导致的阻尼特性显著增强,进而使脱粒滚筒加速度与振幅信号明显变化。

4 结论

(1)当喂入量发生变化时各部件振动加速度信号均随之发生不同程度波动。割台及输送槽总体振动信号呈现逐步增加趋势,而割台与输送槽连接处及脱粒滚筒则呈现先增大后减小趋势。当喂入谷物

呈现较强的阻尼特性时,振动加速度信号随着减弱,但由于喂入量的不断增大,致使联合收获机各工作装置偏离稳定工作状态,由此又会导致振动信号增强的现象。

(2)通过快速傅立叶变换(FFT)将加速度信号转换为频域信号,进一步掌握振幅变化及激振频率特征。随着喂入量增大高频振幅基本稳定,但低频区间则出现振幅增强现象。同时,峰值点振动向更高频延伸,激振源明显增多。其中,喂入量对脱粒滚筒振动影响最为明显,最大振幅由 17 μm 衰减至 2.8 μm ,变化程度达 83.5%,而割台与输送槽的变化程度分别为 55.8% 和 7.69%。由于振幅明显减弱,脱粒滚筒低频激振频率更加突出,激振区间大幅拓宽,最大峰值点由中频 195 Hz 附近左移至低频 117 Hz 附近。由此可知喂入量阻尼特性在脱粒滚筒部件表现尤为明显,无论是加速度曲线或是振幅曲线均可明显观察到。

参 考 文 献

- [1] 金诚谦,蔡泽宇,杨腾祥,等.基于空占比测量的谷物联合收获机产量监测系统研究[J].农业机械学报,2022,53(5):125-135. JIN Chengqian, CAI Zeyu, YANG Tengxiang, et al. Design and experiment of yield monitoring system of grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5):125-135. (in Chinese)
- [2] 李青林,宋玉莹,姚建成,等.稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化系统研究[J].农业机械学报,2021,52(5):92-101. LI Qinglin, SONG Yuying, YAO Chengjian, et al. Intelligent design and optimization system for cleaning device of rice and wheat combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5):92-101. (in Chinese)
- [3] 徐立章,李洋,李耀明,等.谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J].农业机械学报,2019,50(10):1-16. XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):1-16. (in Chinese)
- [4] 刘宏新,李金龙,郭丽峰,等.联合收获机知识组织与知识库系统研究[J].农业机械学报,2021,52(2):381-393. LIU Hongxin, LI Jinlong, GUO Lifeng, et al. Knowledge organization and knowledge base system of combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):381-393. (in Chinese)
- [5] 倪昕东,陈度,王书茂,等.基于数字车间的联合收获机制造品质终检系统研究[J].农业机械学报,2020,51(12):166-174. NI Xindong, CHEN Du, WANG Shumao, et al. End-of-line inspection system of combine harvester manufacturing quality based on digital workshop [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):166-174. (in Chinese)
- [6] CHEN S R, ZHOU Y P, TANG Z, et al. Modal vibration response of rice combine harvester frame under multi-source excitation [J]. Biosystems Engineering, 2020, 194: 177-195.
- [7] 孙意凡,刘仁杰,欧颢,等.基于功率测量的联合收获机喂入量检测方法研究[J].农业机械学报,2020,51(5):118-123. SUN Yifan, LIU Renjie, OU Hao, et al. Analysis and comparison of feed rate detection methods of combine harvester based on power detection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):118-123. (in Chinese)
- [8] TANG Z, ZHANG B, WANG M, et al. Damping behaviour of a prestressed composite beam designed for the thresher of a combine harvester [J]. Biosystems Engineering, 2021, 204(4-5):130-146.
- [9] 姬江涛,徐龙蛟,庞靖,等.微型谷物联合收割机割台最小振幅点分析及挂接点优化[J].农业工程学报,2017,33(12):28-33. JI Jiangtao, XU Longjiao, PANG Jing, et al. Analysis of minimum amplitude points and optimization of connection position for header of micro grain combine [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12):28-33. (in Chinese)
- [10] 陈树人,韩红阳,卢强.4LZ-2.0型联合收获机割台模态分析[J].农业机械学报,2012,43(增刊1):90-94. CHEN Shuren, HAN Hongyang, LU Qiang. Modal analysis of header for type 4LZ-2.0 combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp. 1):90-94. (in Chinese)
- [11] 庞凤斌,孟繁昌,方宇鹏.3060型联合收割机发动机减振系统的研究[J].农业机械学报,2000,31(6):72-74. PANG Fengbin, MENG Fanchang, FANG Yupeng. Study on vibration isolation system of a 3060 combine engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6):72-74. (in Chinese)
- [12] 张浩天.水稻联合收获机脱粒滚筒受扰振动特性及隔振方法研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [13] EBRAHIMI R, ESFAHANIAN M, ZIAEI-RAD S. Vibration modeling and modification of cutting platform in a harvest combine by means of operational modal analysis (OMA) [J]. Measurement Journal of the International Measurement Confederation, 2013, 46(10):3959-3967.

- table[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 132 - 140. (in Chinese)
- [16] 樊晨龙, 崔涛, 张东兴, 等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊1): 239 - 248.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp. 1): 239 - 248. (in Chinese)
- [17] LIANG Z W, XU L Z, BAERDEMAEKER J D, et al. Optimisation of a multi-duct cleaning device for rice combine harvesters utilising CFD and experiments[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 25 - 40.
- [18] LIANG Z W, LI Y M, BAERDEMAEKER J D, et al. Development and testing of a multi-duct cleaning device for tangential-longitudinal flow rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 95 - 106.
- [19] 王立军, 于泳涛, 张帅, 等. 蚯蚓运动特征仿生筛筛上玉米脱出物运动特性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 158 - 166.
WANG Lijun, YU Yongtao, ZHANG Shuai, et al. Motion characteristics of maize mixture on bionic screen based on earthworm motion characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 158 - 166. (in Chinese)
- [20] 王立军, 刘伟腾, 李懿航, 等. 大喂入量玉米籽粒收获机清选系统双层筛孔抖动板研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 92 - 102.
WANG Lijun, LIU Weiteng, LI Yihang, et al. Research of double-layer jitter plates with holes in large-feeding mass cleaning system of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 92 - 102. (in Chinese)
- [21] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27 - 35.
WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 27 - 35. (in Chinese)
- [22] 王学农, 边博, 吐鲁洪·吐尔迪, 等. 巴旦木物料壳仁风选装置试验及参数优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 299 - 306.
WANG Xuenong, BIAN Bo, TUIUHONG·Turdi, et al. Experiments and parameter optimization of almond shell and kernel air separation device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 299 - 306. (in Chinese)
- [23] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 117 - 125, 247.
DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117 - 125, 247. (in Chinese)
- [24] WANG L J, DING Z J, MENG S, et al. Kinematics and dynamics of a particle on a non-simple harmonic vibrating screen[J]. Particuology, 2017, 32: 167 - 177.
- [25] 李金澎. 蓖麻蒴果脱壳过程仿真与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
LI Jinpeng. Simulation and experiment on castor shelling process[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 27 页)

- [14] 李耀明, 孙朋朋, 庞靖, 等. 联合收获机底盘机架有限元模态分析与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 38 - 46, 301.  
LI Yaoming, SUN Pengpeng, PANG Jing, et al. Finite element mode analysis and experiment of combine harvester chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 38 - 46, 301. (in Chinese)
- [15] 王亚丁. 履带式联合收获机驾驶台振动分析与结构优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [16] 张武. 汽车动力总成悬架系统关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [17] 王芬娥, 曹新惠, 郭维俊, 等. 联合收获机主驾驶座振动强度及其频率结构试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 62 - 65.  
WANG Fene, CAO Xinhui, GUO Weijun, et al. Research on vibration strength and frequency structure of main driver seat of the wheat combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 62 - 65. (in Chinese)
- [18] 高志朋, 徐立章, 李耀明, 等. 履带式稻麦联合收获机田间收获工况下振动测试与分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 48 - 55.  
GAO Zhipeng, XU Lizhang, LI Yaoming, et al. Vibration measure and analysis of crawler-type rice and wheat combine harvester in field harvesting condition[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 48 - 55. (in Chinese)
- [19] 赵胜华. 基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒喂入量测量系统设计[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [20] JIANG Y, LIAO Y, QIN C, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY - 2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 53 - 60.
- [21] 庞靖. 履带式谷物联合收获机振动源-响应分析与传递主路径辨识[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [22] BANERJEE S, BALAMURUGAN V, KRISHNAKUMAR R. Ride comfort analysis of math ride dynamics model of full tracked vehicle with trailing arm suspension[J]. Procedia Engineering, 2016, 144: 1110 - 1118.
- [23] BERMEJO M, SANTOS A P, GOICOLEA J M. Development of practical finite element models for collapse of reinforced concrete structures and experimental validation[J]. Shock and Vibration, 2017: 1 - 9.