

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.016

# 油菜联合收获机割台振动对田间收获落粒影响分析

马丽娜<sup>1,2</sup> 魏俊逸<sup>1</sup> 黄小毛<sup>1,2</sup> 宗望远<sup>1,2</sup> 詹广超<sup>1</sup>

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 油菜联合收获机田间作业过程中, 割台碰撞和振动引起油菜角果和籽粒脱落, 导致割台落粒损失约占收获总损失(8%~10%)的50%, 为研究割台振动对田间收获落粒的影响, 以4LL-1.5Y型履带式油菜联合收获机为研究对象, 基于振源分析和在田间收获工况下对割台开展振动测试, 确定引起割台振动的关键激振源是发动机(27.53 Hz)和割刀(7.93~8.53 Hz), 然后基于Default Shaker液压振动台以0~40 Hz扫频方式确定出影响适收期“华油杂62”油菜角果籽粒脱落的最大频率段为5~10 Hz, 在该频率段内开展激振频率对油菜角果和籽粒脱落影响的单因素试验。结果表明, Default Shaker液压振动台激振频率为7 Hz时, 油菜植株在横向固定和纵向固定时, 其油菜角果和籽粒脱落率均为最大, 横向固定时油菜角果和籽粒脱落率最高达3.42%, 而传统往复式割刀激振频率在8.0 Hz左右, 位于5~10 Hz油菜角果和籽粒落粒最大的频率范围内, 割刀的往复运动会引起油菜角果和油菜籽粒大幅落粒, 因此割台振动也是造成油菜联合收获机割台落粒损失的重要原因之一。

**关键词:** 油菜联合收获机; 割台; 振动频率; 落粒损失

**中图分类号:** S225 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0134-05

## Analysis of Harvesting Losses of Rapeseed Caused by Vibration of Combine Harvester Header during Field Operation

MA Li'na<sup>1,2</sup> WEI Junyi<sup>1</sup> HUANG Xiaomao<sup>1,2</sup> ZONG Wangyuan<sup>1,2</sup> ZHAN Guangchao<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** During harvesting of rapeseed, the falling of siliques and seeds caused by colliding and vibration of the harvester header accounts for about 50% of total harvesting loss (8%~10%). To analyze the impact of vibration of header on the harvesting loss during field operation, an experimental study was conducted on the 4LL-1.5Y crawler rape combine harvester. Through vibration tests, the key vibration excitation sources were determined, which were the engine (27.53 Hz) and the cutter bar (7.93~8.53 Hz). Then, the frequency range causing the falling of siliques and seeds was determined using a Default Shaker hydraulic vibration system. The hydraulic shaker generated a frequency sweep from 0 Hz to 40 Hz on the “Huayouza 62” rapeseed stalks, and maximum falling occurred in the frequency range of 5~10 Hz. Single-factor experiments were conducted between the vibration excitation frequency and the falling of siliques and seeds. Results showed that when the frequency was 7 Hz, the stalks had maximum falling of siliques and seeds under both horizontal and vertical fixations. The maximum falling ratio was 3.42% when the stalks were under horizontal fixation. It can be concluded that the reciprocating cutter bar, whose excitation frequency was about 8.0 Hz, was the main vibration source causing harvesting losses. The research result can provide some reference for the optimization design of rapeseed and grain combine header cutter.

**Key words:** rapeseed combine harvester; header; vibration frequency; harvesting losses

收稿日期: 2020-08-02 修回日期: 2020-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805198)和国家自然科学基金面上项目(31671592)

作者简介: 马丽娜(1987—),女,讲师,博士,主要从事农业机械结构设计、分析及试验研究, E-mail: sunnylina@163.com

通信作者: 宗望远(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: zwy@mail.hzau.edu.cn

## 0 引言

油菜属于无花序作物,茎秆较粗、植株高大,分支多且相互缠绕、油菜籽粒细小,位于植株上部的角果已经完熟易炸裂,而下部的角果还处于乳熟或蜡熟<sup>[1-2]</sup>。油菜联合收获总损失率高,生产损失率一般为 8%~10%,其中割台损失约占收获总损失的 50%<sup>[3-4]</sup>,油菜联合收获割台籽粒损失严重,一直是机械化收获中难以突破的难点之一。割台籽粒损失主要是在联合收获过程中,油菜角果受到分禾器拉扯,拨禾轮弹指的拨动、牵拉梳刷以及螺旋输送器的撞击挤压,油菜角果极易开裂,造成割台碰撞落粒损失<sup>[5-6]</sup>。此外,割台振动激励频率穿越油菜植株固有频率共振周期带时,也会造成油菜角果开裂,形成割台振动落粒损失<sup>[7]</sup>。为降低割台碰撞落粒损失,普遍采用伸缩式割台<sup>[8-9]</sup>、加装立式侧向分禾切割器<sup>[10-11]</sup>、优化拨禾轮安装位置和线速度<sup>[6,12]</sup>、采用双动刀往复式切割器<sup>[13]</sup>或偏心圆弧锯齿刃圆盘式切割器<sup>[14]</sup>、改进割刀驱动器<sup>[3]</sup>等方法。而对于割台振动的研究主要集中在基于振动测试和模态分析<sup>[14-25]</sup>,获取割台主要激振源,优化割台机架结构<sup>[17,21]</sup>,使割台机架固有频率避开外部激振频率,避免割台产生共振出现局部微裂纹、疲劳断裂和磨损等情况,影响收获机割台的工作性能、使用寿命和可靠性,进而提高作业效率、提升驾驶员操作舒适性<sup>[24]</sup>,但目前尚未有油菜联合收获机割台振动对割台落粒损失影响研究的文献报道,也尚未确定出影响割台振动落粒损失的关键激振源。

本文以 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机为研究对象,在田间收获工况下对其割台开展振动测试,确定引起割台振动的关键激振源和激振频率,同时基于 Default Shaker 液压振动台测试不同激振频率下适收期“华油杂 62”油菜角果和油菜籽粒脱落情况,进而确定影响适收期“华油杂 62”油菜植株角果及油菜籽粒脱落的关键激振频率和激振源。

## 1 油菜联合收获机割台振源分析

选用 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机,对其割台主要振源进行分析。4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机割台振源主要来自于发动机、割刀、螺旋输送机、拨禾轮、升运装置、脱粒装置、清选装置以及路面激励等。其整机结构如图 1 所示。在田间作业工况下,利用胜利 VC6234P 型光电测速仪测定 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机主要工作部件的工作转速,其理论激振频率计算式为

$$f = \frac{n}{60}$$

式中  $f$ ——理论激振频率,Hz

$n$ ——田间工况下实际测得的主要工作部件转速,r/min

田间工况主要工作参数如表 1 所示。



图 1 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机整机结构图  
Fig. 1 4LL-1.5Y crawler rape combine harvester whole machine structure

1. 割刀 2. 拨禾轮 3. 螺旋输送机 4. 脱粒滚筒 5. 清选装置

表 1 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机田间收获工况主要工作参数

Tab. 1 Main working parameters of 4LL-1.5Y crawler rape combine harvester under field harvesting condition

部件名称	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	理论激振频率/Hz
发动机	1 800	30.0
螺旋输送机	148	2.5
拨禾轮	30.4	0.5
脱粒滚筒	750	12.5
割刀驱动轴	480	8.0

## 2 割台田间振动测试

### 2.1 试验数据采集及分析设备

采用 1A314E 型压电式加速度传感器,测试 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机田间收获作业工况下的振动情况,通过东华 DH5902 型动态信号采集仪进行信号采集,如图 2 所示,其主要性能指标如表 2 所示。



(a) 1A314E 型压电式加速度传感器 (b) DH5902 型动态信号采集仪

图 2 测试仪器

Fig. 2 Test instrument

### 2.2 振动测试方案

试验时间为 2019 年 5 月,试验地点为华中农业大学油菜试验田,在 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机田间收获作业工况下测试割台振动情况,如

表2 设备主要性能参数

Tab.2 Main equipment performance parameters

设备名称	参数	数值
1A314E 型压电式 加速度传感器	量程/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	$\pm 500$
	轴向灵敏度/( $\text{mV}\cdot(\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^2)$ )	10
	最大横向灵敏度/%	<5
	频率响应/Hz	0.5 ~ 7 000
	分辨率/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	0.004
DH5902 型动态 信号采集仪	通道	32
	采样带宽/kHz	100(16 位)
	电压满度值/mV	$\pm 20\ 000$
	失真度/%	<0.5

图3所示。试验测点分别布置在割刀(测点1)、拨禾轮(测点2)、螺旋输送机(测点3)与割台连接架上,如图4所示。传感器中X、Y、Z通道方向如图5所示。采样频率为200 Hz(采样间隔为5 ms),采样时间120 s。



图3 测试现场

Fig.3 Testing scene



图4 测点位置

Fig.4 Testing point position

## 2.3 试验结果分析

### 2.3.1 时域分析

对田间收获作业工况下割台3个测点的加速度信号进行时域数据处理与分析,测点1、测点2和测点3在X、Y、Z 3个方向上的振动加速度均方根如表3所示。

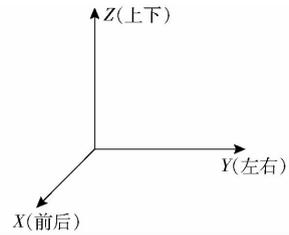


图5 传感器方向

Fig.5 Sensor direction

表3 各测点不同方向加速度均方根

Tab.3 Root mean square value of acceleration in different directions of each measuring point

测点	$\text{m/s}^2$		
	X	Y	Z
1	34.62	109.77	47.21
2	25.98	66.93	32.41
3	26.11	18.91	19.82

由表3可知,测点1,即割刀处,割台在X、Y、Z 3个方向上振动加速度均方根均最大,相对于拨禾轮、螺旋输送机,割刀振动最为剧烈;割刀在Y方向,即左右方向,振动加速度均方根达109.77  $\text{m/s}^2$ ,说明割刀往复运动是引起割台振动的最主要振源。

### 2.3.2 频域分析

对田间收获工况下割台3个测点的加速度信号进行频域数据处理与分析,得3个测点的激振频率与振幅,如表4所示。

对比分析表1和表4可知,割台上的主要激振频率有7.93、27.53、42.87、8.53、8.20 Hz,其他频率则基本是在上述频率基础上的倍频。发动机理论激振频率为30.0 Hz,割刀理论往复运动频率为8.0 Hz,田间作业工况下,工作部件实际运行速度是波动的,27.53 Hz接近发动机理论激振频率,7.93 ~ 8.53 Hz接近割刀理论激振频率,因此引起割台振动的主要激励是发动机和割刀。工作部件在田间作业过程中,受作物流的影响,其运动速度是一个波动量,相应的其激振频率也会出现小幅波动。

## 3 油菜植株振动落粒测试试验

### 3.1 试验材料与试验设备

2019年5月,选用华中农业大学油菜试验田收获期“华油杂62”油菜植株进行试验。

试验设备采用Default Shaker液压振动台(其性能参数见表5)、电子天平和电子秤。Default Shaker液压振动台在竖直方向振动,即提供一个竖直方向的加速度。

将油菜植株分别横向固定和纵向固定于Default Shaker液压振动台上,如图6所示。但油菜

表 4 各测点前 6 阶激振频率与振幅

Tab. 4 Frequency and amplitude of the first six orders of vibration at each measuring point

测点	阶数	X		Y		Z	
		振幅/( $m \cdot s^{-2}$ )	激振频率/Hz	振幅/( $m \cdot s^{-2}$ )	激振频率/Hz	振幅/( $m \cdot s^{-2}$ )	激振频率/Hz
1	1	4.603	7.93	5.062	42.87	4.961	27.50
	2	1.972	3.43	4.553	49.50	3.285	8.53
	3	1.159	25.43	4.127	55.17	2.713	4.00
	4	0.938	36.20	3.741	15.13	2.175	34.77
	5	0.894	45.33	3.741	7.93	2.006	47.00
	6	0.846	55.67	3.020	66.60	1.615	69.74
2	1	3.184	27.53	4.976	27.53	5.891	8.53
	2	1.766	5.07	4.629	7.93	2.812	4.17
	3	1.612	8.20	4.120	4.17	1.552	27.53
	4	1.182	17.03	2.404	111.50	1.514	37.30
	5	1.132	34.33	2.042	72.34	2.006	47.00
	6	0.966	16.33	1.577	56.67	1.033	65.10
3	1	2.051	27.50	2.594	27.53	2.501	8.20
	2	1.465	8.20	2.509	4.17	1.840	27.37
	3	0.959	16.33	1.545	8.53	1.246	55.07
	4	0.888	38.57	1.082	54.87	1.182	2.50
	5	0.720	54.87	0.926	25.93	0.971	37.77
	6	0.643	69.74	0.643	17.30	0.840	21.47

表 5 Default Shaker 液压振动台主要性能参数

Tab. 5 Main parameters of Default Shaker hydraulic vibration table main parameters

参数	数值/形式
最大负载/kg	500
最大加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )	39.2
最大速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	0.5
最大位移/mm	100
位移范围/mm	$\pm 100$
频率范围/Hz	0.1 ~ 100
振动方向	垂直

率范围内开展油菜角果与籽粒脱落单因素试验,确定油菜角果与油菜籽粒大幅脱落的最大影响频率。每次试验运行时间为 180 s,每组试验重复 3 次。

### 3.2.1 扫频试验

由于油菜联合收获机割台振源一阶激振频率主要集中在 40 Hz 以内,因此基于 Default Shaker 液压振动台对油菜植株施加 0 ~ 40 Hz 的扫频激励。

在激振频率小于 5 Hz 以及大于 10 Hz 时,油菜植株在激励作用下,振幅较小且仅有轻微落粒;而激振频率在 5 ~ 10 Hz 时,油菜植株剧烈摆动,油菜角果和籽粒大幅脱落。

### 3.2.2 油菜角果和籽粒脱落单因素试验

以油菜角果和籽粒脱落率(脱落角果和籽粒质量占总角果与籽粒质量的百分比)为试验指标,分别在油菜植株横向固定和纵向固定两种方式下开展单因素试验,测试激振频率 5 ~ 10 Hz 时油菜角果和籽粒脱落情况,在试验台下方铺细纱网进行籽粒和角果收集。每次试验运行时间为 180 s,每组试验重复 3 次,试验结果如图 7 所示。

由图 7 可知,Default Shaker 液压振动台激振频率在 7 Hz 时,油菜植株横向固定与纵向固定其油菜角果和籽粒脱落率均为最大。横向固定时油菜角果和籽粒脱落率最高达 3.42%。

传统往复式割刀的激振频率在 8.0 Hz 左右,位于 5 ~ 10 Hz 油菜角果和籽粒落粒最大的频率范围内,因此割刀的往复运动会引起油菜角果和油菜籽粒大幅落



图 6 液压振动试验

Fig. 6 Hydraulic vibration test

收获时割台对油菜植株的振动主要是左右振动和前后振动,所以将植株横向固定更符合实际。

## 3.2 试验方法

基于 Default Shaker 液压振动台对油菜植株施加振动激励,开展 0 ~ 40 Hz 扫频试验,确定油菜角果与油菜籽粒出现大幅脱落频率范围;进而在该频

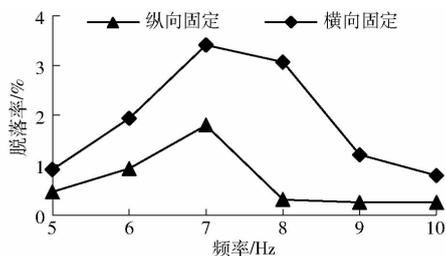


图7 不同频率下油菜角果和籽粒脱落率

Fig. 7 Abscission rate of rape plant under different frequencies

粒,割刀是引起割台振动落粒损失的最主要振源。

## 4 结论

(1)田间收获作业工况下,发动机对割台一阶

激振频率为 27.53 Hz,割刀实际激振频率为 7.93 ~ 8.53 Hz,二者是引起割台振动的主要激振源,而拨禾轮、螺旋输送器等工作部件对割台振动影响较小。

(2)激振频率在 5 ~ 10 Hz 时,油菜植株出现剧烈摆动,角果和籽粒出现大幅脱落。Default Shaker 液压振动台激振频率在 7 Hz 时,横向固定时油菜角果和籽粒脱落率高达 3.42%。

(3)传统往复式割刀的激振频率在 8.0 Hz 左右,位于 5 ~ 10 Hz 油菜角果和籽粒落粒最大的频率范围内,割刀的往复运动会引起油菜角果和油菜籽粒大幅落粒。因此割台振动也是造成油菜联合收获机割台落粒损失的重要原因之一。

## 参 考 文 献

- [1] SZPRYNGIEL M, WESOŁOWSKI M, SZOT B. Economical technology of rape seed harvest[J]. Teka Komisji Motoryzacji I Energetyki Rolnictwa, 2004; 19 - 29.
- [2] 罗海峰, 汤楚宙, 官春云, 等. 适应机械化收获的田间油菜植株特性研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(13): 61 - 66. LUO Haifeng, TANG Chuzhou, GUAN Chunyun, et al. Plant characteristic research on field rape based on mechanized harvesting adaptability [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(13): 61 - 66. (in Chinese)
- [3] 冉军辉, 沐森林, 李海同, 等. 油菜联合收获机往复式双动割刀行星轮驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 17 - 25. RAN Junhui, MU Senlin, LI Haitong, et al. Design and test of planet gear driver of reciprocating double-acting cutter for rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 17 - 25. (in Chinese)
- [4] 吴崇友, 肖圣元, 金梅. 油菜联合收获与分段收获效果比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 10 - 16. WU Chongyou, XIAO Shengyuan, JIN Mei. Comparison on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 10 - 16. (in Chinese)
- [5] LUIGI P, ALBERTO A, ALESSANDRO S, et al. The harvest of oilseed rape (*Brassica napus* L.): the effective yield losses at on-farm scale in the Italian area[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 46(1): 453 - 458.
- [6] HOBSON R N, BTUCE D M. Seed loss when cutting a standing crop of oilseed rape with two types of combine harvester header [J]. Biosystems Engineering, 2002, 81(3): 281 - 286.
- [7] SOMCHAI C U. Development of a cutter bar driver for reduction of vibration for a rice combine harvester[J]. KKKU Res. J., 2010, 15(7): 572 - 580.
- [8] 徐立章, 李耀明, 马朝兴, 等. 4LYB1 - 2.0 型油菜联合收获机主要部件的设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 54 - 57, 88. XU Lizhang, LI Yaoming, MA Chaoxing, et al. Design of main working parts of 4LYB1 - 2.0 rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 54 - 57, 88. (in Chinese)
- [9] 王金双, 熊永森, 徐中伟, 等. 纵轴流联合收获机关键部件改进设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 25 - 31. WANG Jinshuang, XIONG Yongsen, XU Zhongwei, et al. Improved design and test of key components for longitudinal axial flow combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 25 - 31. (in Chinese)
- [10] KOŠUTIĆ S, ZIMMER R. Experience in oil seed rape harvesting[C]//Proceedings of the Union of Scientists Rouse, 2006: 503 - 507.
- [11] 关卓怀, 吴崇友, 王刚, 等. 油菜联合收割机双向电驱动分行竖割刀设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 1 - 8. GUAN Zhuohuai, WU Chongyou, WANG Gang, et al. Design of bidirectional electric driven side vertical cutter for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 1 - 8. (in Chinese)
- [12] 杨毅. 油菜角果抗裂角性表征方法和油菜割台拨禾轮优化设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [13] 陈霓, 龚永坚, 陈德俊, 等. 全喂入联合收获机双动刀切割器与驱动机构研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 60 - 63, 29. CHEN Ni, GONG Yongjian, CHEN Dejun, et al. Double knife section reciprocating cutter and drive mechanism for combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 60 - 63, 29. (in Chinese)
- [14] 李仲恺, 谢方平, 刘科, 等. 油菜收获圆盘式切割器的设计与性能试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(1): 83 - 88. LI Zhongkai, XIE Fangping, LIU Ke, et al. Design and performance evaluation of a disc cutter for rape harvest[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2014, 40(1): 83 - 88. (in Chinese)
- [15] 陈树人, 卢强, 仇华铮. 基于 LabVIEW 的谷物联合收获机割台振动测试分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 86 - 89, 98. CHEN Shuren, LU Qiang, QIU Huazheng, et al. Header vibration analysis of grain combine harvester based on LabVIEW[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 86 - 89, 98. (in Chinese)

- TONG Shuiguang, SHEN Qiang, TANG Ning, et al. Numerical simulation and optimization test of mixed flow field in axial flow cleaning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 135 - 142. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160719&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160719&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.019. (in Chinese)
- [27] 李树兵. 风筛式清选装置试验分析与预测研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.  
LI Shubing. Experimental analysis and prediction research on air and screen cleaning device [D]. Zibo: Shandong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [28] 陈立. 油菜联合收获机清选装置的设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.  
CHEN Li. Design and experimental study on cleaning device of rape combine harvester [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [29] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [30] 于昭洋, 胡志超, 曹明珠, 等. 切流式花生全喂入联合收获机清选机构设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 29 - 37.  
YU Zhaoyang, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of cleaning mechanism of cutting flow type peanut full feed combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 29 - 37. (in Chinese)
- [31] 王立军, 冯鑫, 武振超, 等. 玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 115 - 123.  
WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of cross flow stepped vibrating screen for corn combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 115 - 123. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181013&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181013&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.013. (in Chinese)

(上接第 138 页)

- [16] 姚艳春, 宋正河, 杜岳峰, 等. 玉米收获机割台振动特性及其主要影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 40 - 49.  
YAO Yanchun, SONG Zhenghe, DU Yuefeng, et al. Analysis of vibration characteristics and its major influenced factors of header for corn combine harvesting machine [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 40 - 49. (in Chinese)
- [17] 李耀明, 李有为, 徐立章, 等. 联合收获机割台机架结构参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 30 - 37.  
LI Yaoming, LI Youwei, XU Lizhang, et al. Structural parameter optimization of combine harvester header frame [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 30 - 37. (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] 蒋亚军, 廖宜涛, 秦川, 等. 4SY-2.9 型油菜割晒机机架振动分析及改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 53 - 60.  
JIANG Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, 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. (in Chinese)
- [20] 马丽娜, 魏俊逸, 黄小毛, 等. 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机割台振动分析[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(4): 723 - 727.  
MA Lina, WEI Junyi, HUANG Xiaomao, et al. Vibration analysis of cutting table of 4LL-1.5Y crawler rape combine harvester [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(4): 723 - 727. (in Chinese)
- [21] 李耀明, 庞靖, 徐立章, 等. 基于振动激励溯源的谷物联合收获机清选筛制造缺陷定位[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 10 - 17.  
LI Yaoming, PANG Jing, XU Lizhang, et al. Manufacturing defect location of cleaning screen of grain combine harvester based on vibration excitation tracing [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(5): 10 - 17. (in Chinese)
- [22] EBRAHIMI R, ESFAHANIAN M, ZIAEI-RAD S. Vibration modeling and modification of cutting platform in a harvest combine by means of operational modal analysis [J]. Measurement, 2013, 46(10): 3959 - 3967.
- [23] PANG J, LI Y, JI J, et al. Vibration excitation identification and control of the cutter of a combine harvester using triaxial accelerometers and partial coherence sorting [J]. Biosystems Engineering, 2019, 185: 25 - 34.
- [24] CHEN S, ZHOU Y, TANG Z, et al. Modal vibration response of rice combine harvester frame under multi-source excitation [J]. Biosystems Engineering, 2020, 194: 177 - 195.
- [25] 徐立章, 李耀明, 孙朋朋, 等. 履带式全喂入水稻联合收获机振动测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 49 - 55.  
XU Lizhang, LI Yaoming, SUN Pengpeng, et al. Vibration test and analysis of tracked full-feed rice combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 49 - 55. (in Chinese)