

4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机割台振动分析

马丽娜^{1,2}, 魏俊逸¹, 黄小毛^{1,2}, 宗望远^{1,2*}, 詹广超¹

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

摘要: 针对油菜联合收获机振动剧烈, 整机稳定性、工作可靠性和驾驶舒适性较差等问题, 以 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机的割台为研究对象, 在道路运输 (仅发动机工作)、道路运输 (发动机与工作部件同时工作) 以及田间收获作业 3 种典型工况下, 在割台上选择 3 个测点, 利用 DHDAS 动态信号采集分析系统对油菜联合收获机割台振动进行了测试, 并基于时域分析、小波分析和频域分析对试验数据进行了处理。研究表明: 发动机、拨禾轮、割刀的振动是整机主要激振源, 但作物喂入割台后, 吸收了部分振动, 使得拨禾轮和割刀的振动总量分别下降了 23.5% 和 68.7%; 振动信号主要集中在 0~125 Hz 内, 油菜联合收获机割台上各激振力的激振频率以低频为主; 油菜联合收获机工作时发动机引起的一阶惯性振动频率为 29.18 Hz; 研究结果对提高油菜联合收获机工作的可靠性、降低收获损失、减轻驾驶员的疲劳具有重要意义。

关键词: 油菜联合收获机; 振动测试; 时域分析; 小波包变换; 频域分析

中图分类号: S225

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)04-0723-05

Vibration analysis of cutting table of 4LL-1.5Y crawler rape combine harvester

MA Lina^{1,2}, WEI Junyi¹, HUANG Xiaomao^{1,2}, ZONG Wangyuan^{1,2}, ZHAN Guangchao¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070;

2. Key Laboratory of Agriculture Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070)

Abstract: To deal with severe vibration, and poor stability, reliability and driving comfort of rape combine harvesters, the vibration of the cutting table on a 4LL-1.5Y crawler rape combine harvester was studied. Three measuring points were placed on the cutting table and tests were conducted under three typical working conditions: road transportation (engine working only), road transportation (engine and harvesting parts working simultaneously) and field harvesting operation. The vibration of the cutting table was tested by DHDAS dynamic signal acquisition and analysis system, and the experimental data were processed based on time domain analysis, wavelet analysis and frequency domain analysis. The results show that the vibration of the engine, pulley and cutter is the main exciting source of the whole machine, but the vibration of the pulley and cutter is partially absorbed after the crop is fed into the cutting table, which reduces the total vibration of the pulley and cutter by 23.5% and 68.7% respectively. The vibration signals are mainly in the range of 0-125 Hz, and the excitation frequencies of the exciting forces on the cutting table are mainly in the low-frequency range. The first-order inertial vibration frequency caused by the engine is 29.18 Hz when the rape combine harvester is working. The results of the study are significant for improving the reliability of the rape combine harvester, reducing harvesting losses and alleviating fatigue of the operator.

Key words: rape combine harvester; vibration test; time domain analysis; wavelet packet transform; frequency domain analysis

随着科技发展, 用户对联合收获机可靠性、安全性及舒适性的要求越来越高^[1]。为满足用户需求, 改善机械工作部件的振动问题, 提高农业收获机械

的性能, 已经在工程领域中逐渐被重视。目前国内外研究者对农用机械的振动研究^[2-4]主要集中在驾驶座椅振动和舒适性分析^[5-7]、往复式切割器的动力学

收稿日期: 2019-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(51805198)资助。

作者简介: 马丽娜, 博士, 讲师。E-mail: sunnylina@163.com

* 通信作者: 宗望远, 教授, 博士生导师。E-mail: zwy@mail.hzau.edu.cn

和振动特性分析^[8-9]、割台振动特性和模态分析^[10-13]、底盘机架模态分析^[14-15]、风机振动噪声分析^[16]、传感器振动特性分析^[17]等方面。而上述文献的研究对象主要集中在稻麦联合收获机和玉米联合收获机上，关于油菜联合收获机割台的振动特性分析研究较少。因此，本研究以 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机为研究对象，研究油菜联合收获机割台的振动特性，通过 DHDAS 动态信号采集分析系统进行 3 种工况下的振动测试，获得影响整机振动的主要激励源，对提高油菜联合收获机工作的可靠性、降低收获损失、减轻驾驶员的疲劳具有重要意义，也为油菜联合收割机工作部件的创新设计和参数优化提供参考。

1 振动试验原理

油菜联合收获机振动试验的基本原理如图 1 所示。DH5902 动态信号采集仪通过安装在 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机上的三向加速度传感器检测测点处的振动信号并将电荷信号传送到 DH5902 动态信号分析系统中，经 MATLAB 分析与处理便可得到相应振动信号的频谱特性。

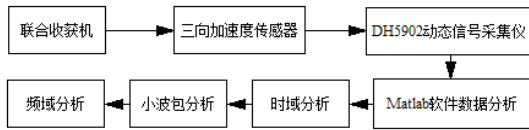


图 1 振动试验原理图

Figure 1 Schematic diagram of vibration test

2 试验设备及性能指标

2.1 试验对象

试验对象为 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机，其整机结构如图 2 所示，主要结构参数如表 1 所示。



图 2 整机结构

Figure 2 Whole machine structure

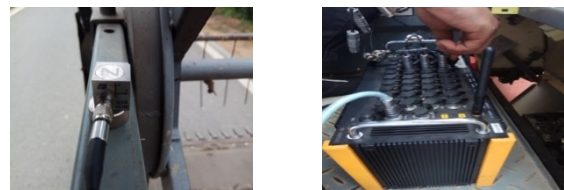
2.2 试验数据采集及分析设备

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在道路运输（仅

发动机工作）、道路运输（发动机工作部件同时工作）以及田间收获作业 3 种典型工况下的振动情况，通过东华 DH5902 型动态信号采集仪进行信号采集，如图 3 所示，其主要性能指标如表 2 所示。

表 1 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机主要结构参数
Table 1 Main structural parameters of 4LL-1.5Y crawler rape combine harvester

主要参数 Main parameter	数据 Data
整机结构 Whole machine structure	履带自走式
外形尺寸(长×宽×高)/mm Shape size (length * width * height)	5 240×2 820×2 500
结构重量/kg Structural weight	2 450
割台幅宽/m Width of header	2
发动机型号 Engine Model	新柴 498BT
12 小时标定功率/转速 kW·r ⁻¹ ·min ⁻¹ 12-hour calibration of power/speed	45/2 500
最小离地间隙/mm Minimum ground clearance	240
脱粒装置形式 Threshing device form	双轴流



a. 加速度传感器
a. Accelerometer
b. DH5902 信号采集仪
b. Signal acquisition instrument

图 3 测试仪器

Figure 3 Test instrument

表 2 主要设备性能参数

Table 2 Main equipment performance parameters

设备名称 Device name	主要指标 Main indicator	参数值 parameter value
1A314E 型压电式 加速度传感器 Model 1A314E piezoelectric acceleration sensor	量程/g 轴向灵敏度/mV/g 最大横向灵敏度/% 频率响应 X 向/Hz 频率响应 Y 向/Z 向/Hz 分辨率/g	±50 100 <5 0.5~5 000 0.5~7 000 0.000 4
DH5902 型动态 信号采集仪 DH5902 Dynamic signal acquisition instrument	通道 采样带宽 满度值/mV 失真度/%	32 16 位 100 kHz ±200~±20 000 <0.5

3 振源分析

由振动理论可知，联合收获机可以看成是一个多自由度的弹性系统，在各种激励力的作用下产生振动与变形^[18]。联合收获机正常工作时，发动机和

各工作部件的工作转速均处于中低速范围, 联合收获机的振动频率以低频为主, 当这些激振频率与联合收获机自身的固有频率耦合时, 整机就会产生强烈共振。

表 3 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

部件名称 Main components	转速 r·min ⁻¹ Rotating speed	理论振动频率/Hz Vibration frequency in theory
发动机 Engine	1 800	30
割台搅龙 Header auger	148	2.47
拨禾轮 Reel wheel	30.4	0.5
脱粒滚筒 Threshing cylinder	750	12.5
割刀驱动轴 Drive shaft of cutter	500	8.3

联合收获机的振源主要来自于发动机、割台、输送脱粒清选装置以及路面激励等。联合收获机在田间作业时发动机需在额定转速下运转, 以保证各工作部件作业质量和作业效率。因此, 在发动机额定转速 1 800 r·min⁻¹ 工作时, 采用胜利 VC6234P 型光电测速仪测出 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机主要部件转速, 并利用式 (1) 计算出各工作部件理论振动频率, 如表 3 所示。

$$f = \frac{n}{60} \quad (1)$$

式中 f 为理论激振频率, Hz; n 为测量的各部件驱动轮的转速, r·min⁻¹。

4 联合收获机振动试验

4.1 试验方案

为研究 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机整

机振动特性, 试验选择道路运输 (仅发动机工作)、道路运输 (发动机工作部件同时工作) 以及田间收获作业 3 种工况, 具体方案见表 4, 进行整机振动测试, 测试现场如图 4 所示。

表 4 振动测试方案

试验工况 Testing condition	工作状态 Work status	发动机转速 /r·min ⁻¹ Engine speed	地面状况 Ground condition
1	道路运输 (仅发动机工作)	1 800	水泥路面
2	道路运输 (发动机和工作部件同时工作)	1 800	水泥路面
3	田间收获	1 800	田间



a. 道路运输试验
a. Road transport test



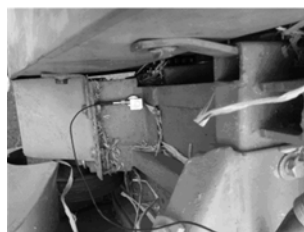
b. 田间收获试验
b. Field harvest test

图 4 测试现场

Figure 4 Testing scene

4.2 测点布置与信号采集

考虑到发动机、割台、路面激励是联合收获机产生振动的激励源, 因此在进行联合收获机割台振动分析时, 应着重对这些激振源进行振动测试, 试验测点布置如图 5 所示, 传感器中 X、Y、Z 通道如图 6 所示。为了确保测试波形精确及其稳定性, 在 DHDAS 动态信号分析系统中设置采样频率为 1 000 Hz (采样间隔为 1 ms), 分析频率 390.625 Hz, 频域线数 3 200 (频域间隔为 0.122 Hz), 采样时间 120 s^[9]。



a. 测点1搅龙
a. Measuring point 1 auger



b. 测点2拨禾轮
b. Measuring point 2 reel wheel



c. 测点3割刀
c. Measuring point 3 cutter

图 5 测点位置

Figure 5 Testing point position

4.3 振动试验结果与分析

4.3.1 时域分析 基于 DH5902 型动态信号采集仪

采集的割台上 3 个测点的振动时域信号进行数据处理与分析, 测点 1、测点 2 和测点 3 三个方向上的

振动加速度均方根值如表 5 所示。

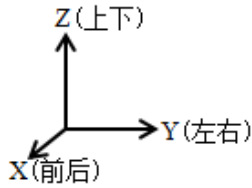


图 6 传感器方向
Figure 6 Sensor direction

从表 5 可以看出：

(1) 对比工况 1 和 2，油菜联合收获机的工作部件运行后，各工件的振动总量显著增大，搅龙、拨禾轮、割刀分别增加 94.5%、125.5%和 120.4%，表明工作部件对整机稳定有显著影响。

(2) 工况 2 下，油菜联合收获机拨禾轮、割刀的振动明显强于搅龙，表明油菜联合收获机主要振源为拨禾轮、割刀，次要振源为搅龙。

(3) 对比工况 2 和 3，田间收获中由于作物流的喂入，一定程度减少了负荷的波动以及作用于其上的不平衡力，使其油菜联合收获机拨禾轮、割刀的振动总量有所削弱，分别减少了 23.5%、68.7%。

4.3.2 小波包分析 为研究振动信号频率的集中频段，对工况 2 下测点 1 的 Y 向振动信号进行小波包变换。为清晰准确的获得各节点小波包系数的大小，对信号处理后每个节点的小波包系数进行能量提取，由图 7 可见，原信号主要能量集中在前两个频率段，即 0~62.5 Hz、62.5~125 Hz，因此选择在 0~125 Hz 频率段内对振动信号进行频域分析。

表 5 不同工况下 3 个测点不同方向振动加速度均方根值

Table 5 Vibration acceleration root mean square value of different directions of 3 testing points under different working conditions

试验工况 Testing condition	方向 Direction	振动加速度均方根值/m·s ⁻² Vibration acceleration root mean square value		
		测点 1 Measuring point 1	测点 2 Measuring point 2	测点 3 Measuring point 3
1	X	11.39	14.62	15.54
	Y	9.51	31.29	18.52
	Z	11.92	22.51	16.34
2	X	23.18	32.82	31.91
	Y	20.64	66.28	45.16
	Z	20.01	55.16	33.98
3	X	21.14	24.98	20.91
	Y	33.78	55.43	13.26
	Z	19.57	37.53	0.55

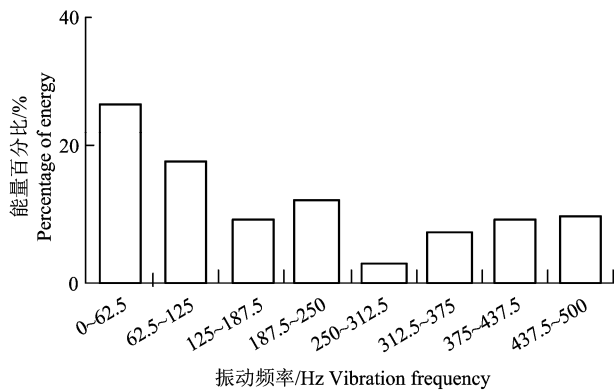


图 7 每个节点的能量提取图
Figure 7 Energy extraction graph for each node

4.3.3 频域分析 为研究油菜联合收获机田间收获时的振动特性，在 0~125 Hz 内对工况 2、3 下测点的振动信号进行频域分析，频谱图中测点 1 振幅的前 6 阶峰值及对应的振动频率如表 6 所示。

从表 6 得出：

(1) 由工况 2 和 3 可知，发动机引起的一阶惯

性振动频率为 29.18 Hz，二阶惯性振动频率为 58.36 Hz，发动机是引起油菜联合收获机割台振动的最主要振源。

(2) 对比分析工况 2 和 3 可知，田间收获时联合收获机割台中充满了油菜作物，对割台振动起了吸振作用，相比于工况 2 未收获作物，田间收获时割台振动有所下降。

5 结论

油菜联合收获机割台主要振源为发动机、拨禾轮、割刀，次要振源为搅龙，设计时可以考虑优化发动机橡胶悬置元件的刚度和阻尼，以降低整机及割台振动，进而提高机器稳定性。

油菜联合收获机田间收获作业时，作物喂入割台后，吸收了部分振动，使得拨禾轮、割刀的振动总量分别下降了 23.5%和 68.7%。

基于小波包变换得出油菜联合收获机割台的振动频率主要集中在 0~62.5 Hz、62.5~125 Hz 两个

表 6 工况 2 和 3 下测点 1 的前 6 阶振动频率与振幅

Table 6 The first six vibration frequencies and amplitudes of testing point one under 2 and 3 working conditions

试验工况 Testing condition	阶数 Series	X 方向		Y 方向		Z 方向	
		振动频率/Hz Freq	振幅/m·s ⁻² Amp	振动频率/Hz Freq	振幅/m·s ⁻² Amp	振动频率/Hz Freq	振幅/m·s ⁻² Amp
2	1	8.67	3.80	8.67	5.94	8.91	6.13
	2	28.32	2.37	25.27	3.59	27.96	4.46
	3	17.58	2.14	56.89	2.36	4.27	4.23
	4	55.92	1.11	5.13	3.31	17.58	1.98
	5	13.31	0.73	3.05	1.92	55.92	1.35
	6	2.20	0.68	17.58	1.17	2.08	0.87
3	1	29.18	8.07	5.37	5.32	29.18	3.78
	2	4.40	2.27	4.40	3.12	58.36	2.27
	3	58.23	2.15	29.18	2.97	17.58	1.72
	4	3.05	1.18	58.23	1.31	5.50	1.47
	5	18.56	0.81	21.85	0.80	2.69	1.12
	6	10.87	0.72	10.87	0.72	13.19	1.02

频率段。油菜联合收获机割台上各激振力的激振频率以低频为主,割台结构设计时应考虑其固有频率,以避免机器发生共振。

油菜联合收获机工作时,发动机引起的一阶惯性振动频率为 29.18 Hz,二阶惯性振动频率为 58.36 Hz。田间收获作业过程中,作物喂入油菜联合收获机内部,能够使得工作部件激振频率形成混叠。

参考文献:

- [1] 姜蕾. 联合收割机振动试验研究[J]. 农业机械, 2011(7): 119-121.
- [2] 张洪伟, 张以都, 王锡平, 等. 基于 ANSYS 参数化建模的农用车车架优化设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 35-38.
- [3] 李小华, 沈贝, 蔡忆昔, 等. 4105 型柴油机曲轴计算模态与试验模态的振型相关性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 51-55.
- [4] 李建平, 赵匀, 臧少锋, 等. 有序抛秧振动输送机构的模态分析与试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 115-117.
- [5] KOCIOLEK A M, LANG A E, TRASK C M, et al. Exploring head and neck vibration exposure from quad bike use in agriculture[J]. Int J Ind Ergon, 2018, 66: 63-69.
- [6] Goglia V, Gospodarić Z, Ružica B L, et al. Vibration transmitted to small agricultural tractor driver[C]// Aktualni Zadaci Mehanizacije Poljoprivrede. Zagreb, 2004.
- [7] 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.
- [8] CHUAN-UDOM S. Development of a cutter bar driver for reduction of vibration for a rice combine harvester[J]. Asia-Pacific J Sci Technol, 2010, 15(7): 572-580.
- [9] 王健康, 吴明亮, 任述光, 等. 往复式切割器传动机构运动动力学分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 190-194.
- [10] 朱聪玲, 程志胜, 王洪源, 等. 联合收获机割台振动问题研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 59-61.
- [11] 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(S1): 86-89.
- [12] 李青林, 陈翠英, 马成祺. 4LYZ-2 油菜收获机割台框架有限元模态分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 54-56.
- [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, 2013, 46(10): 3959-3967.
- [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.
- [15] 姚艳春, 杜岳峰, 朱忠祥, 等. 基于模态的玉米收获机车架振动特性分析与优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 46-53.
- [16] SUN Z, WANG L, PAN Z. Analyses of vibration characteristics of power fan for the 4ztl-1800 pneumatic conveying combine stripper harvester[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(3): 693-699.
- [17] 李耀明, 梁振伟, 赵湛. 籽粒损失监测传感器敏感板振动特性与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 104-111.
- [18] 方同, 薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1998.
- [19] 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.