

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.05.001

张红梅, 张晨明, 朱晨辉, 等. 玉米免耕播种机振动特性及对排种器排种性能的影响[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 01-08

Zhang Hongmei, Zhang Chenming, Zhu Chenhui, et al. Analysis of vibration characteristics of corn no-till seeder and its influence on seed metering performance [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(5): 01-08

玉米免耕播种机振动特性及对排种器 排种性能的影响*

张红梅, 张晨明, 朱晨辉, 祝英豪, 李志杰, 李鹏昌

(河南农业大学机电工程学院, 郑州市, 450002)

摘要:为研究玉米免耕播种机振动特性以及振动对排种器漏播指数和重播指数的影响,搭建一套由振动加速度传感器、电荷放大器、USB采集卡组成的播种作业振动测试系统,在玉米免耕播种机免耕地表作业时进行振动测试采集播种作业的振动信号。因田间工作环境复杂,使用经典滤波法中的 IIR 滤波器滤除所采集振动信号中其他高频干扰信号,对田间采集振动信号进行时域分析,均方值作为时域分析指标值。结果表明:振动加速度均方根随着作业速度和旋耕机转速的增加呈线性增加,旋耕机转速和作业速度是引起玉米免耕播种机振动的主要因素,影响顺序为:旋耕机转速>作业速度。使用二次积分法对田间采集信号进行分析,得出播种机作业时最大振动位移为 16.004 mm,对振动信号进行频域分析,使用直接法求出功率谱密度。结果表明:玉米免耕播种机振动频率主要在 0~100 Hz 之间,频率分布与旋耕机转速影响较大。根据田间振动信号所得工作参数搭建振动试验台,以播种机振动频率、振动幅值、作业速度为试验因素,合格指数、漏播指数为评价指标进行 3 因素 3 水平响应面试验。结果表明:作业速度、振动幅值和振动频率对合格指数和漏播指数影响较为显著。各因素对合格指数影响顺序为:振动幅值、作业速度、振动频率;各因素对漏播指数影响顺序为:振动幅值、振动频率、作业速度。研究结果可为降低玉米免耕播种机振动和优化指夹式排种器提供理论参考。

关键词:玉米免耕播种机;指夹式排种器;振动;时频分析;排种性能

中图分类号:S223 文献标识码:A 文章编号:2095-5553(2024)05-0001-08

Analysis of vibration characteristics of corn no-till seeder and its influence on seed metering performance

Zhang Hongmei, Zhang Chenming, Zhu Chenhui, Zhu Yinghao, Li Zhijie, Li Pengchang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: In order to study the vibration characteristics of maize no-tillage seeder and the influence of vibration on the leakage index and reseeding index of the seeder, a vibration test system composed of vibration acceleration sensor, charge amplifier and USB acquisition card was set up. A vibration test was carried out to collect the vibration signal of the sowing operation during the no-tillage surface operation of the corn no-till planter. Due to the complex working environment in the field, the IIR filter in the classical filtering method was used to filter out other high-frequency interference signals of the collected vibration signals. The time domain analysis was carried out on the vibration signals collected in the field, and the mean square value was used as the time domain analysis index value. The analysis results showed that the root mean square of vibration acceleration increased linearly with the increase of operating speed and rotational speed of rotary tillage, and the rotational speed and operating speed of rotary tillage were the main factors that caused the vibration of corn no-till planter. The order of influence was: rotary tillage speed > working speed. Through using the quadratic integration method to analyze the collected signals in the field, it was concluded that the maximum vibration displacement of the planter was 16.004 mm. The vibration signal was analyzed in

收稿日期:2022年8月31日 修回日期:2022年12月5日

*基金项目:河南省现代农业产业技术体系玉米全程机械化专项(HARS-22-02-G4)

第一作者:张红梅,女,1977年生,河南驻马店人,博士,教授;研究方向为智能农业装备技术。E-mail: hmzh86022625@sina.com

通讯作者:朱晨辉,男,1989年生,河南开封人,博士,讲师;研究方向为农业机械化及其自动化。E-mail: zhuchenhui@126.com

the frequency domain, and the power spectral density was obtained by the direct method. The results showed that the vibration frequency of the corn no-till planter was mainly between 0–100 Hz. The frequency distribution and rotary tillage speed had a great influence. According to the working parameters obtained from the field vibration signal, a vibration test bench was built, and the vibration frequency, vibration amplitude and working speed of the seeder were used as test factors, and the pass index and missed seeding index were used as evaluation indicators to conduct a three-factor and three-level response surface test. The analysis results showed that the working speed, vibration amplitude and vibration frequency had significant effects on the pass index and missed broadcast index. The order of the influence of each factor on the qualification index was: vibration amplitude, working speed and vibration frequency, the order of each factor on the missed seeding index was: vibration amplitude, vibration frequency and working speed. The research results of this paper can provide theoretical reference for reducing the vibration of maize no-till seeder and optimizing the finger clip seed feeder.

Keywords: corn no-tillage seeder; finger-clip seed metering device; vibration; time-frequency analysis; seeding performance

0 引言

玉米免耕播种机在田间地表的不平度、机具的振动载荷、拖拉机行走速度等多种因素导致了玉米的均匀性与合格指数降低^[1, 2]。

近几年,国内外学者对振动对播种性能的影响进行了研究。张涛等^[3]通过对田间作业时免耕播种机排种器振特性测试与分析,运用离散元软件模拟了玉米种群的运动规律。王奇等^[4]建立免耕播种机的振动特性模型,求解其稳态振动响应。Liu 等^[5]采用正交试验的方法对播种机振动特性进行研究,结果表明播种机作业前进速度为 7 km/h 时振动较大。廖宜涛等^[6]通过振动台架试验发现吸种负压和振动频率对气力式排种器合格指数影响较大。黄与霞等^[7]通过振动试验,得出振动幅值、作业速度与振动频率对勺轮式排种器播种质量的影响。

玉米免耕播种机在开沟器前增加了圆盘锯齿开沟器装置,作业时振动对播种质量影响较大。本文以带旋耕刀的免耕播种机作为研究对象,通过对整机工作原理及结构的分析,采集播种机实际田间工作时的振动信号进行振动的影响因素分析,并在实验室搭建振动试验台,探究各因素对指夹式排种器播种质量的影响,为改进播种机整体结构和优化指夹式排种器提供理论依据。

1 免耕播种机结构和工作原理

玉米免耕播种机如图 1 所示。主要由机架、旋耕装置、播种排肥装置和覆土镇压装置组成,由四点悬挂和万向节联轴器与拖拉机相连。旋耕装置采用了圆盘锯齿开沟器,通过内翻刀和外翻刀形成一定夹角,将残留的秸秆进行二次粉碎翻到背垄上,使种子着床到净土上,保证种子出苗率。播种装置是由种箱和肥箱、排种器和排肥器、输种管、开沟器组成。图 2 为指夹式排种器结构。

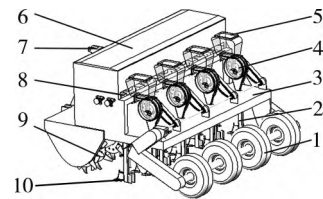


图 1 玉米免耕播种机

Fig. 1 Corn no-till planter

- 1.镇压轮 2.排种管 3.播种机机架 4.指夹式排种器 5.种箱
6.种箱与肥箱 7.四点悬挂装置 8.外槽轮式排肥器
9.圆盘锯齿开沟器 10.排肥管

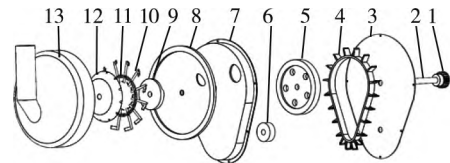


图 2 指夹式排种器结构

Fig. 2 Main structure of the finger clip type seed metering device

- 1.齿轮 2.排种轴 3.导种带后盖 4.导种带 5.大轮
6.小轮 7.导种带前盖 8.种盘 9.排种凸轮
10.指夹 11.伸缩弹簧 12.指夹压盘 13.种盖

2 免耕播种机田间测试

1) 机具与地表相关参数。2021 年 6 月 12 日在河南省周口市商水县河南农业大学商水试验田进行田间测试,前茬作物为小麦,土壤特质为潮土,拖拉机选用 CHERY RC1004 4×4 轮式拖拉机,机具与地表相关参数见表 1。

2) 测试方法。本次振动测试试验使用单向电荷型加速度传感器,灵敏度为 100.08 mV/g,加速度可测范围为 -50~+50 g,采样率设置为 1 000 Hz(采样时间间隔为 0.001 s),PC 计算机的 DAQ 软件控制数据采集过程^[8]参数如表 2 所示。

3) 试验方案。本次振动测试选用加速度传感器^[9],固定在种箱后方,如图 3 所示。因机械式排种器作业速度最佳在 2~6 km/h 之内,作业速度 v 选择 2 km/h、4 km/h、6 km/h,拖拉机转速选择 1 500~2 300 r/min。旋耕机转速 n' 选择 280~320 r/min。

表 1 田间振动试验机具和地表特征参数
Tab. 1 Field vibration test equipment and surface characteristic parameters

参数	数值
拖拉机 发动机额定转速/(r·min ⁻¹)	2 300
拖拉机 动力输出转速/(r·min ⁻¹)	760/850
拖拉机 作业速度/(km·h ⁻¹)	0~10
外形尺寸(长×宽×高) /(mm×mm×mm)	1 680×2 280×1 340
刀轴转速/(r·min ⁻¹)	280~320
免耕播种机 整机重量/kg	860
免耕播种机 播种行距/mm	590/560
免耕播种机 播种行数	4
免耕播种机 播种株距/mm	135~269
免耕播种机 播深/mm	80~120
地表 留茬高度/mm	134.2
地表 土壤含水率/%	8.55
地表 土壤坚实度/(kg·cm ⁻³)	11.65
地表 秸秆残留量/kg	1.1

表 2 设备的主要参数
Tab. 2 Main parameters of the equipment

设备名称	参数	数值
CT1010L 加速度 传感器	灵敏度/(mV·g ⁻¹)	100
	测量范围/g	50
	工作温度范围/°C	-20~120
	频率范围/Hz	1~5 000
	横向灵敏度/%	<5
电荷 放大器	幅值特性/%	<1
	电荷输入量/pC	10 ⁶
	灵敏度/(mV·g ⁻¹)	100.08
	失真度/%	<1
采集卡	工作温度范围/°C	-54~+121
	输出电压/V	5
	最大采样率/(kS·s ⁻¹)	500
	通道	8
	输入电压/V	10
	分辨率/位	12



图 3 传感器安装位置
Fig. 3 Sensor mounting location

通过更换拖拉机不同挡位调整作业速度和旋耕机转速,在拖拉机带动免耕播种机平稳工作时开始测试,采集 15 s 的振动数据。每种工况下进行 5 次重复试验,后续振动信号由 Matlab 进行滤波和时频分析,振动测试现场如图 4 所示。



图 4 免耕播种机振动测试
Fig. 4 No-till seeder vibration test

3 振动信号处理

3.1 滤波处理

在实际采集过程中,因大田工作环境复杂所以数据采集的振动信号包含了很多的噪声部分,使用经典滤波法中的 IIR 滤波器对信号进行滤波处理,减少干扰信号对真实数据的影响^[8]。

IIR 滤波器结构带有反馈环路,又称为递归型滤波器。IIR 滤波器的 N 阶差分方程如式(1)所示。

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) - \sum_{i=1}^N a_i y(n-i) \quad (1)$$

式中: $x(n)$ ——输入序列;

$y(n)$ ——输出序列;

a_i, b_i ——滤波器系数;

N ——滤波器阶数。

经过 Z 变换,可得

$$Y(z) = \sum_{i=0}^M b_i z^{-i} X(z) - \sum_{i=1}^N a_i z^{-i} Y(z)$$

设 $N=M$,于是得到 IIR 滤波器系统函数

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^N b_i z^{-i}}{1 - \sum_{i=1}^N a_i z^{-i}}$$

$$= a_0 \frac{\prod_{i=1}^N (1 - c_i z^{-1})}{\prod_{i=1}^N (1 - d_i z^{-1})}$$

式中: c_i ——零点;

d_i ——极点;

a_0 ——常数。

滤波前与滤波后信号如图 5 所示。

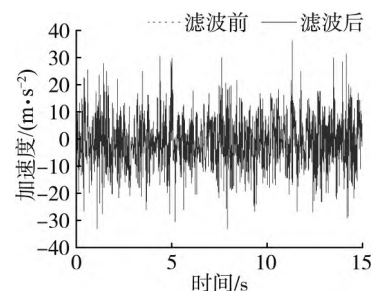


图 5 滤波前与滤波后的信号
Fig. 5 Signals before and after filtering

$H(z)$ 的设计要确定系数或零极点,以使滤波器满足给定性能指标,可以明显看出,滤波后的波形较滤波前更加平滑。

3.2 时域处理

采集的信号如图 6 所示,时域特征参数中的振动加速度均方根 RMS 作为评价振动幅值的标准^[10-13]。

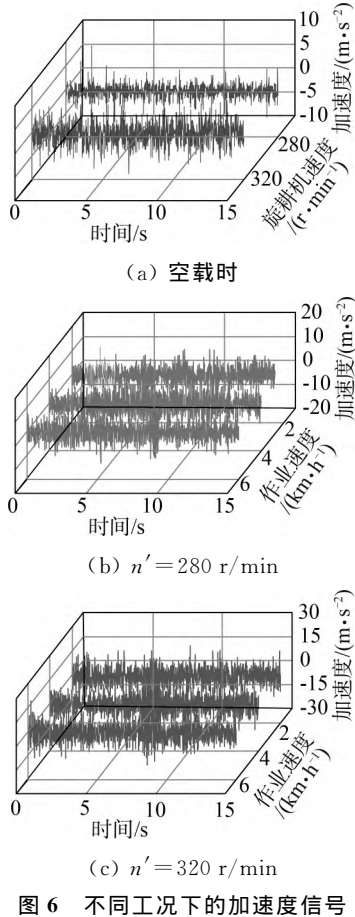


图 6 不同工况下的加速度信号

Fig. 6 Acceleration signal under different working conditions

RMS 计算方法是时间序列所有幅值的平方和,然后在取平均值后再去平方根。 RMS 计算如式(2)所示。各个工作参数的 RMS 值如表 3 所示。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{N}} \quad (2)$$

由表 3 可知,当作业速度 $v=0$ 时,播种机未进入免耕地表工作,此时播种机在拖拉机带动下进行空转,所以 RMS 值较小。当旋耕机转速一定时, RMS 值随着播种机作业速度的增加呈线性增大,最大增长幅度为 1.37。当作业速度一定时, RMS 值随着旋耕机转速的增加呈线性增大, $v=2$ km/h 和 $v=4$ km/h 时增长幅度较为接近, $v=6$ km/h 时增长幅度最大为 1.45。

由此可得,作业速度和旋耕机转速对玉米免耕播种机的振动加速度影响显著。主要原因为土地的坚实度对播种机有激励作用,当作业速度和旋耕机转速增

大,圆盘开沟器对土壤的切削力逐渐增大,未耕地的土壤对播种机的作用力也增大,使播种机的振动变得剧烈。旋耕机转速和作业速度对振动加速度呈现正相关,旋耕机转速的改变比作业速度对振动加速度的影响大。圆盘锯齿开沟器与免耕播种机是刚性连接,旋耕刀引起的振动直接影响播种机的播种质量。

表 3 不同工况下的 RMS 值

Tab. 3 RMS values under different working conditions

旋耕机转速 $n'/(r \cdot \min^{-1})$	作业速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	均方根 RMS $/(m \cdot s^{-2})$
280	0	2.5
	2	8.5
	4	9.7
	6	11.3
320	0	5.5
	2	11.9
	4	12.5
	6	16.4

由图 7 可知,在作业速度 $v=6$ km/h 和旋耕机转速 $n'=320$ r/min 时播种机振动最剧烈。为进一步开展台架试验,通过 Matlab 对加速度进行二次积分,把加速度积分为位移,播种机振动最大位移为 16.004 mm^[14-16]。结果如图 8 所示。

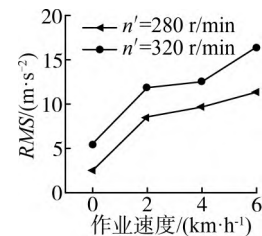


图 7 不同旋耕机转速和不同作业速度的 RMS

Fig. 7 RMS of different rotary tillage rotation speed and different speed

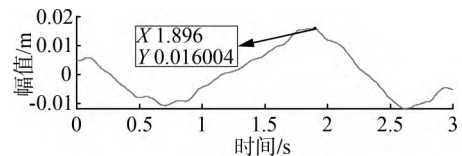


图 8 播种机振动最大位移

Fig. 8 Maximum displacement of the seeder vibration

3.3 频域处理

田间测得的振动信号为离散随机信号,离散随机信号是时域上的无线信号,并不具备可积条件,不能直接进行傅里叶变换。所以使用经典谱估计的自相关法求得功率谱密度函数^[17]。随机信号的自功率谱密度函数是该随机信号自相关函数的傅里叶变换。

离散随机信号 $x(n)$ 的自相关函数如式(3)所示。

$$R_x(m) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} x(n)x(n+m) \quad (3)$$

式中： $R_x(m)$ ——自相关函数；
 n ——某一时刻；
 m ——时移。

根据维纳—辛钦定理可知，自相关函数与功率谱密度是一对傅里叶变换，即

$$\begin{cases} R_x(m) = \int_a^b S_x(f) e^{i2\pi fm} df \\ S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(m) e^{-i2\pi fm} dm \end{cases}$$

对 $R_x(m)$ 求傅里叶变换得到 $x(n)$ 的功率谱

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(m) e^{-i2\pi fm} dm \quad (4)$$

使用 Matlab 对离散随机信号进行功率谱密度 PSD 求解如图 9 所示^[18, 19]。免耕播种机的振动频率分布在 0~100 Hz 之间，在 $n' = 280$ r/min 和 $n' = 320$ r/min 的工况下，作业速度并不影响振动频率的分布。由地表不平引起的振动频率主要分布在低频 0~20 Hz 之间；本次选用的旋耕机转速为 280 r/min 与 320 r/min，转换成频率为 4.67~5.33 Hz^[8]。每个旋耕刀由 6 个刀片组成，当刀轴转 1 周时，实际上会产生 6 次振动，转换成旋耕刀振动基频为 28.02~31.98 Hz，二倍频为 56.04~63.96 Hz，三倍频为 84.06~95.94 Hz。因此旋耕机转速是播种机振动频率分布的主要影响因素。

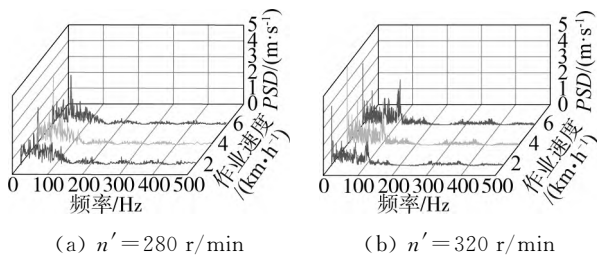


图 9 各个工况的功率谱密度图

Fig. 9 Power spectral density plot for each operating condition

4 指夹式排种器排种试验

4.1 振动试验台

田间作业振动对其播种效果影响较大，垂直方向振动对指夹式排种器播种效果影响较大，因此为探究指夹排种器在垂直方向振动下的播种性能，本文搭建了垂直方向振动试验台来模拟田间作业环境下的振动。姜鑫铭^[20]通过对比试验得出，电机驱动排种器比链轮驱动更能提高播种合格指数，所以振动试验台的传动方式选择电机驱动方式。

振动试验台如图 10 所示。振动试验台主要有排种器性能检测仪、弹性联轴器、传动轴、弹簧、万向节、指夹式排种器、凸轮、指夹式排种器安装架、三脚架、电机变频器、异步电机组成^[21]。

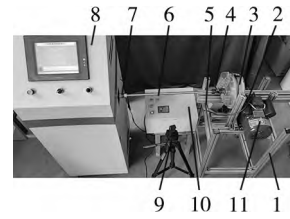


图 10 振动试验台

Fig. 10 Vibration test bench

- 1.排种器安装架 2.凸轮 3.指夹式排种器 4.万向节
- 5.弹簧 6.传动轴 7.弹性联轴器 8.排种器性能检测仪
- 9.三脚架 10.变频器 11.异步电机

4.2 试验条件

试验地点在河南农业大学现代农业装备中心。试验材料为未分型的“郑单 958”玉米品种。千粒重为 307 g，含水率为 13.2%。种子做药剂处理，外观呈现绿色；为观察玉米种子在排种过程中的姿态，改装指夹式排种器，更换排种器后壳为透明亚克力板。

4.3 试验方法

田间试验结果为免耕播种机最大振动位移为 16 004 mm，振动频率分布在 0~100 Hz 之间。作业速度、振动频率和振动幅值等作为试验因素，开展指夹式排种器排种器性能台架试验，设定试验因素如表 4 所示。

表 4 排种器振动测试试验因素与指标
 Tab. 4 Maximum displacement of the seeder vibration

水平	因素		
	作业速度 /(km·h ⁻¹)	振动幅值 /mm	振动频率 /Hz
-1	2	5	20
0	4	10	50
1	6	15	80

采用三因素三水平进行多因素试验，参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》，以播种合格指数、漏播指数作为考核指标，株距设置为 25 mm。每组重复 3 次，取平均值作为试验结果记录分析，评价指标计算如式(5)、式(6)所示。通过延迟摄影技术观察玉米种子在指夹式排种器中的运动轨迹。

$$Y_1 = \frac{n_1}{Z} \times 100\% \quad (5)$$

$$Y_2 = \frac{n_2}{Z} \times 100\% \quad (6)$$

式中： Y_1 ——合格指数；

Y_2 ——漏播指数；

Z ——每次试验的总种子数，每次试验玉米种子数为 250 粒；

n_1 ——相邻两粒玉米种子之间的粒距为理论粒距的 0.5~1.5 倍之间的种子数；

n_2 ——相邻两粒或多粒玉米种子之间粒距大于1.5倍理论粒距的种子数。

试验方案如表5所示, X_1, X_2, X_3 为作业速度、振动幅值、振动频率的编码值。试验结果经过 Design-Expert 软件处理可得方差分析结果见表6。

对表6数据进行多元拟合,建立合格指数和漏播指数与编码自变量的二次多项式回归方程如式(7)和式(8)所示。

$$Y_1 = 80.88 - 4.74X_1 - 8.81X_2 - 2.28X_3 - 2.2X_1X_2 + 1.02X_1X_3 + 0.42X_2X_3 + 1.78X_1^2 - 4.42X_2^2 - 1.89X_3^2 \quad (7)$$

$$Y_2 = 12.68 + 1.63X_1 + 5.09X_2 + 1.64X_3 + 0.75X_1X_2 + 0.2X_1X_3 + 0.82X_2X_3 - 0.9X_1^2 + 2.52X_2^2 + 0.37X_3^2 \quad (8)$$

由表6可知,播种合格指数和漏播指数的模型显著性 P 值均小于 0.01,说明回归模型拟合极显著。合格指数的失拟项 P 值为 0.0595,漏播指数的失拟项 P 值为 0.5743。两个指数的失拟项均大于 0.05。合格指数的 R^2 为 0.9812,漏播指数的 R^2 为 0.9907。均接近于 1。说明模型与实际情况拟合程度较好。

表5 试验方案与结果
Tab. 5 Test scheme and result

序号	因素水平			性能参数	
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	0	90.7	8.3
2	1	-1	0	83.2	10.2
3	-1	1	0	78.1	16.9
4	1	1	0	61.8	21.8
5	-1	0	-1	87.3	9.5
6	1	0	-1	78.2	12.2
7	-1	0	1	81.3	11.7
8	-1	0	1	76.3	15.2
9	0	-1	-1	85.5	9.3
10	0	1	-1	69.2	17.9
11	0	-1	1	79.5	11.6
12	0	1	1	64.9	23.5
13	0	0	0	81.6	12.6
14	0	0	0	80.8	13.5
15	0	0	0	81.2	11.8
16	0	0	0	79.4	12.4
17	0	0	0	81.4	13.1

表6 正交试验的方差分析
Tab. 6 ANOVA of orthogonal experiments

方差来源	合格指数				漏播指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	874.23	9	40.54	<0.0001	284.97	9	82.84	<0.0001
X_1	179.55	1	74.94	<0.0001	21.13	1	55.27	0.0001
X_2	526.50	1	219.76	<0.0001	207.06	1	541.74	<0.0001
X_3	41.41	1	17.28	0.0043	21.45	1	56.12	0.0001
X_1X_2	19.36	1	8.08	0.0249	2.25	1	5.89	0.0457
X_1X_3	4.20	1	1.75	0.2270	0.16	1	0.41	0.5383
X_2X_3	0.72	1	0.30	0.6000	2.72	1	7.12	0.0321
X_1^2	13.42	1	5.60	0.0499	3.43	1	8.97	0.0201
X_2^2	74.81	1	31.22	0.0008	26.79	1	70.1	<0.0001
X_3^2	15.04	1	6.28	0.0407	0.58	1	1.53	0.2562
残差	16.77	7			2.68	7		
失拟	13.86	3	5.91	0.0595	0.96	3	0.76	0.5743
误差	3.09	4			1.71	4		
总和	891.00	16			284.64	16		

对于合格指数,回归项 X_1, X_2 的 P 值小于 0.0001,影响极显著; $X_3, X_1X_2, X_1^2, X_2^2, X_3^2$ 的 P 值小于 0.05,影响显著。对于漏播指数,回归项 X_2, X_3^2 的 P 值小于 0.0001,影响极显著; $X_1, X_3, X_1X_2, X_2X_3, X_1^2$ 的 P 值小于 0.05,影响显著。把不显著的回归项去除掉。对合格指数和漏播指数方程重新拟合,回归方程如式(9)和式(10)所示。

$$Y_1 = 80.88 - 4.74X_1 - 8.81X_2 - 2.28X_3 -$$

$$2.2X_1X_2 + 1.78X_1^2 - 4.42X_2^2 - 1.89X_3^2 \quad (9)$$

$$Y_2 = 12.68 + 1.63X_1 + 5.09X_2 + 1.64X_3 + 0.75X_1X_2 + 0.82X_2X_3 - 0.9X_1^2 + 2.52X_2^2 \quad (10)$$

根据回归曲线和表中的数据可得,影响合格指数的顺序为:振动幅值、作业速度、振动频率;漏播指数的顺序为:振动幅值、振动频率、作业速度;为探究试验指

标和各因素的影响关系,使用响应面法求解各因素之间的交互关系。固定一个因素为0水平。得到另外两因素响应面如图11所示。

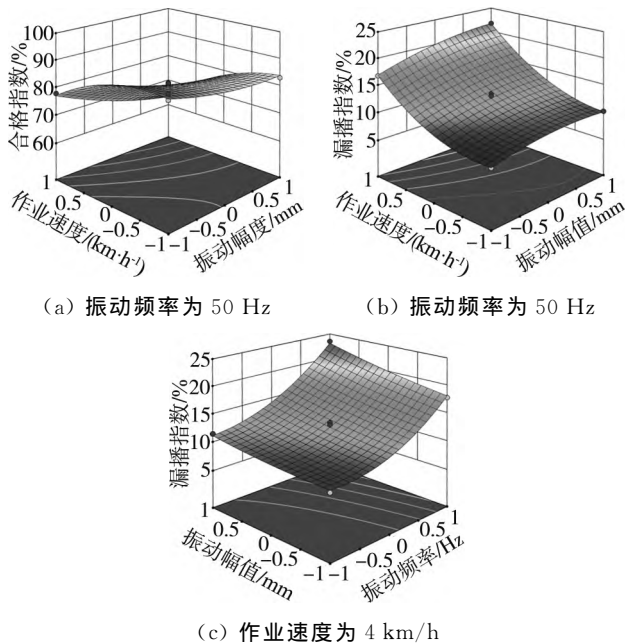


图11 各因素对指标的响应面结果

Fig. 11 Result of the response surface of each factor to the indicator

作业速度和振动幅值对合格指数有交互作用。当振动幅值一定时,合格指数随着作业速度的增加而降低,且降低趋势逐渐增大;当作业速度一定时,合格指数随着振动幅值的增加而降低,且降低趋势逐渐减小的。振动幅值分别与作业速度和振动频率对漏播指数有交互作用。当振动幅值一定时,漏播指数随着作业速度的增大而增大,且上升趋势逐渐增大的;漏播指数随着振动频率的增大而增大的,且上升趋势逐渐增大;当作业速度和振动频率一定时,漏播指数随着振动幅值的增大而增大的,且上升趋势是平稳增大的。图12为通过延迟摄影功能拍摄漏播现象。



图12 延迟摄像漏播情况

Fig. 12 Delayed camera missed broadcast

根据各因素对合格指数和漏播指数的影响结果分析可得,对比无振动和振动条件下,振动的增加会使合格指数明显减小。对比三因素发现振动幅值是影响合格指数和漏播指数的主要因素,振动幅值的增加会使合格指数和漏播指数减小趋势增大。主要原因为:种子运动过程中受到重力、离心力、摩擦力和振动所给的竖直

力的作用,当振动幅值增大时,种子所受的垂直加速度增大,使种子从指夹中脱落,产生漏播现象。如何使种子在振动条件下不脱落,是优化排种器结构的有效途径。试验结果为指夹式排种器优化提供理论依据。

5 结论

1) 搭建一套玉米免耕播种机振动测试系统,在免耕播种机工作时进行振动测试,并采集振动数据,分析不同作业速度和不同旋耕机转速信号。结果表明,旋耕机转速和作业速度对振动加速度影响较显著,旋耕机转速的振动加速度均方根最大增大倍数为1.45,作业速度的振动加速度均方根最大增大倍数为1.37,旋耕机转速比作业速度对播种机振动更显著。通过对振动加速度二次积分,播种机最大振动位移为16 004 mm。

2) 不同工况下频域分析结果表明,免耕播种机的振动频率分布在0~100 Hz,振动频率分布与旋耕机转速有关,与作业速度影响较小,旋耕刀振动基频为28.02~31.98 Hz,二倍频为56.04~63.96 Hz,三倍频为84.06~95.94 Hz。在旋耕装置与播种机主体之间增加减震装置是降低播种机振动的有效途径。

3) 搭建振动试验台并开展排种器振动试验,把作业速度、振动幅值、振动频率作为主要试验因素,合格指数、漏播指数作为试验指标进行三因素三水平响应面试验。通过二次回归正交组合试验可得,作业速度、振动幅值和振动频率对合格指数和漏播指数影响显著。合格指数影响顺序为:振动幅值、作业速度、振动频率;漏播指数的顺序为:振动幅值、振动频率、作业速度。为优化指夹排种器关键部件,减小排种器漏播情况提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] 伊力达尔·伊力亚斯,朱思洪,徐刚,等.拖拉机前桥悬架参数匹配及其对振动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(10):29-36.
Yilidaer · Yiliyasi, Zhu Sihong, Xu Gang, et al. Front axle suspension parameters match and its impact on vibration characteristics of tractor [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 29-36.
- [2] 程远盛,李晓勤,孙帅帅,等.田间长波路面不平度表达和分级的新方法[J].振动与冲击,2022,41(11):180-188.
Cheng Yuansheng, Li Xiaoqin, Sun Shuaishuai, et al. A new method for expression and classification of long wave road surface unevenness in field [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(11): 180-188.
- [3] 张涛,刘飞,赵满全,等.基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律[J].农业工程学报,2016,32(22):

- 27—35.
- Zhang Tao, Liu Fei, Zhao Manquan, et al. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(22): 27—35.
- [4] 王奇, 朱龙图, 李名伟, 等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 9—18.
- Wang Qi, Zhu Longtu, Li Mingwei, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 9—18.
- [5] Liu Y Q, Zhao M Q, Liu F, et al. Vibration test and analysis of no-tillage planter on the maize stubble surface [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1061—1062: 788—793.
- [6] 廖宜涛, 齐天翔, 廖庆喜, 等. 气力式油菜精量联合直播机振动特性及对排种性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1184—1196.
- Liao Yitao, Qi Tianxiang, Liao Qingxi, et al. Vibration characteristics of pneumatic combined precision rapeseed seeder and its effect on seeding performance [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(5): 1184—1196.
- [7] 黄与霞, 韩丹丹, 韩哲, 等. 振动对匀轮式排种器排种性能的影响试验 [J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(5): 896—905.
- Huang Yuxia, Han Dandan, Han Zhe, et al. Experiment on the influence of vibration on the seeding performance of the scoop-wheel seed meter [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(5): 896—905.
- [8] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 48—55.
- [9] 耿令新, 李康, 庞靖, 等. 基于时频和功率谱密度的移栽机振动特性测试与分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 23—30.
- Geng Lingxin, Li Kang, Pang Jing, et al. Test and analysis of vibration characteristics of transplanting machine based on time frequency and power spectral density [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 23—30.
- [10] 高文英, 林静, 李宝筏, 等. 秸秆深埋还田机振动特性分析与结构优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(4): 970—980.
- Gao Wenyong, Lin Jing, Li Baofa, et al. Vibration characteristics analysis and structural optimization of straw deep bury returning machine [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(4): 970—980.
- [11] Kuş E. Field-scale evaluation of parameters affecting planter vibration in single seed planting [J]. Measurement, 2021, 184(109959).
- [12] 赵瑞堃. 基于 MATLAB 的 FIR 和 IIR 数字滤波器的设计[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [13] 桂水荣, 陈水生, 万水. 基于路面一致激励车桥耦合非平稳随机振动分析[J]. 振动·测试与诊断, 2018, 38(5): 908—915, 1077.
- [14] 徐庆华. 试采用 FFT 方法实现加速度、速度与位移的相互转换[J]. 振动·测试与诊断, 1997(4): 30—34.
- [15] 林楠, 李东升, 李宏男. 基于零初值的测试加速度积分速度与位移的方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(6): 602—614.
- [16] 王体强, 王永志, 袁晓铭, 等. 加速度积分位移方法影响因素与可靠性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1): 82—88, 107.
- [17] 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.
- Yao Yanchun, Du Yuefeng, Zhu Zhongxiang, et al. Vibration characteristics analysis and optimization of corn combine harvester frame using modal analysis method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 46—53.
- [18] 散望龙, 杨会民, 王学农, 等. 振动方式和频率对杏树振动采收响应的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 10—17.
- San Yunlong, Yang Huimin, Wang Xuenong, et al. Effects of vibration mode and frequency on vibration harvesting of apricot trees [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(8): 10—17.
- [19] 韩万水, 马麟, 院素静, 等. 路面粗糙度非一致激励对车桥耦合振动系统响应影响分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 81—90.
- Han Wanshui, Ma Lin, Yuan Sujing, et al. Analysis of the effect of inconsistent stimulus of surface roughness on vehicle-bridge coupling vibrations [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 81—90.
- [20] 姜鑫铭. 玉米免耕播种机精确播种关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [21] Hostens I, Anthonis J, Kennes P, et al. PM—power and machinery: Six-degrees-of-freedom test rig design for simulation of mobile agricultural machinery vibrations [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 77(2): 155—169.

论文精选：玉米免耕播种机振动特性及对排种器排种性能的影响

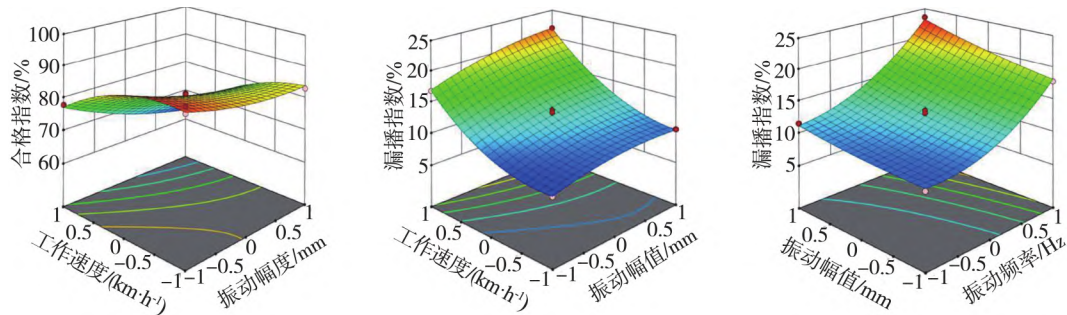
研究概况

为研究玉米免耕播种机振动特性以及振动对排种器漏播指数和重播指数的影响,搭建一套由振动加速度传感器、电荷放大器、USB采集卡组成的播种作业振动测试系统,在玉米免耕播种机免耕地表作业时进行振动测试采集播种作业的振动信号。因田间工作环境复杂,使用经典滤波法中的 IIR 滤波器滤除所采集振动信号其他高频干扰信号,对田间采集振动信号进行时域分析,均方值作为时域分析指标值。结果表明:振动加速度均方根随着作业速度和旋耕转速的增加呈线性增加,旋耕转速和工作速度是引起玉米免耕播种机振动的主要因素,影响顺序为:旋耕转速>工作速度。使用二次积分法对田间采集信号进行分析,得出播种机作业时最大振动位移为 16.004 mm,对振动信号进行频域分析,使用直接法求出功率谱密度,结果表明:玉米免耕播种机振动频率主要在 0~100 Hz 之间,频率分布与旋耕转速影响较大。根据田间振动信号所得工作参数搭建振动试验台,以播种机振动频率、振动幅值、工作速度为试验因素,合格指数、漏播指数为评价指标进行 3 因素 3 水平响应面试验,分析结果表明:工作速度、振动幅值和振动频率对合格指数和漏播指数影响较为显著。各因素对合格指数影响顺序为:振动幅值、工作速度、振动频率;各因素对漏播指数的顺序为:振动幅值、振动频率、工作速度;本文研究结果可为降低玉米免耕播种机振动和优化指夹式排种器提供理论参考。

该研究第一作者为河南农业大学机电工程学院的张红梅讲师。

主要技术指标

振动测试试验条件		振动信号处理方法		排种器振动测试 试验因素 RSM	作业速度 X_1 /($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	振动幅值 X_2 /mm	振动频率 X_3 /Hz
拖拉机转速 /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 500~2 300	滤波处理	IIR 滤波器	-1	2	5	20
旋耕刀转速 /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	280~320	时域处理	振动加速度 均方根(RMS)	0	4	10	50
振动数据采集 时间/s	15	频域处理	自相关法	1	6	15	80



各因素对指标的响应面结果图