doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.005

指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验

王金武　唐　汉　王金峰　沈红光　冯　鑫　黄会男
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为研究指夹式玉米精量排种器籽粒投送运移规律,提高排种器导种性能,建立了导种投送过程的运动学和动力学模型,分析了各因素对运移稳定性及投送落种轨迹的影响。采用多因素二次通用旋转组合试验研究了工作转速和倾斜角对排种均匀稳定性的影响,运用 Design - Expert 6.0.10 软件对试验数据进行优化分析得到其最佳工作条件。在此基础上,运用镜面反射成像原理,搭建了排种轨迹测定试验台,结合高速摄像与图像目标追踪技术对落种籽粒轨迹运移规律进行了研究。试验结果表明,在工作转速为 15 ~ 45 r/min、倾斜角为 0°工况下,籽粒正面轨迹及侧面轨迹的水平位移随工作转速增加而增加,株距变异系数随工作转速增加而降低;当工作转速大于 35 r/min 时,籽粒轨迹及落点位置分布逐渐离散,株距变异系数明显增加,其正面水平位移稳定在 12.9 ~ 14.3 mm 内,侧面水平位移稳定在 3.7 ~ 4.8 mm 内,平均株距变异系数为 15.13%。在工作转速为 30 r/min、倾斜角为 - 12° ~ 12°工况下,轨迹投种角随倾斜角的增加而减小,其整体角度稳定在 66.4° ~ 79.6°内。该研究为优化设计指夹式玉米精量排种器关键部件及配套导种管提供了参考。

关键词: 玉米; 指夹式精量排种器; 导种投送; 机理; 试验
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)01-0029-09

Analysis and Experiment of Guiding and Dropping Migratory Mechanism on Pickup Finger Precision Seed Metering Device for Corn

WANG Jinwu　TANG Han　WANG Jinfeng　SHEN Hongguang　FENG Xin　HUANG Huinan
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to improve the guiding migration performance of pickup finger precision seed metering device, the steady migratory mechanism of guiding-seed system was studied. The kinematics and dynamics models of guiding-seed and dropping-seed processes were established based on its working principle. The influences of various factors on dropping trajectory and migration stability were analyzed. The quadratic general rotary unitized design was carried out by taking the rotational speed of seed meter and tilt angle as experiment factors, and the seeding qualified index and variation coefficient as experiment indexes. Based on experimental data, a mathematical model was built by using the Design - Expert 6.0.10 software, and the experiment factors were optimized, the best combination was achieved. On this basis, a kind of dropping trajectory measuring test platform was designed and built based on the theory of mirror reflection. And then the three-dimensional space velocities of the falling corn were measured and analyzed by high-speed photography and target tracking technology. The single factor tests for factors, including rotational speed and tilt angle, were carried out and the corresponding regression equations were obtained by analysis. Experimental results showed that when the rotational speed was between 15 r/min and 45 r/min and the tilt angle was 0°, the horizontal displacements of trajectories of frontal and profile dropping seed were increased with the increase of rotational speed and the variation coefficient of seeding was decreased with the increase of rotational speed. As the rotational speed was greater than 35 r/min, the trajectories and landing positions of corn grains were gradually discrete and the variation coefficient of seeding was significantly increased, and its horizontal displacements of frontal trajectory were stabilized within the range of 12.9 ~ 14.3 mm, the horizontal displacements of profile

收稿日期: 2016 - 09 - 20　修回日期: 2016 - 11 - 20
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划项目(2014BAD06B04)
作者简介: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwuw@163.com
通信作者: 王金峰(1981—),男,副教授,主要从事田间作业机械研究,E-mail: jinfeng_w@126.com

trajectory were stabilized within the range of 3.7 ~ 4.8 mm, and the average variation coefficient was 15.13%. The dropping seed angle was decreased with the increase of tilt angle at rotational speed of 30 r/min and tilt angle of −12° ~ 12°. The results can provide guidance and direction for the research of mechanical precision seed metering device and its seed tube.

Key words: corn; pickup finger precision seed metering device; guiding and dropping seed; mechanism; experiment

引言

精密播种是利用精密播种机械将籽粒精准定量地播入土壤预定位置的先进技术[1],播种过程中籽粒在田间分布规律是由精准株距、播深和行距所组成的三维空间坐标所决定。精密排种器作为实现精密播种技术的核心部件,是国内外学者研究的重点与热点[2-4]。指夹式玉米精量排种器是一种通过夹持充种、振动清种、柔性导种及零速投种等多项环节共同作用进行播种作业的机械式排种器[5],因具有结构简单、破损率低、适应性好等优点被广泛应用于精密播种技术中。

目前国内外学者对指夹式玉米精量排种器的研究主要集中于取种执行部件的理论研究与改进设计[6-8],以提高其夹持单粒率,但对导种投送环节的相关研究较少。运移导种系统作为排种器最终作业部件,位于配套导种管上端,其将籽粒稳定投送至导种管壁将导种和投送环节串联为一体,其性能及运移规律直接影响机具播种质量。目前国内指夹式玉米精量排种器导种性能仍不稳定,籽粒与系统间存在滑移现象,运移过程中易造成籽粒在排种器与导种管连接处及导种管壁内发生碰撞异位,籽粒间运动自振幅度差异将导致籽粒由导种管投入种床时无法完全抵消与播种机具间的相对速度差,籽粒落入种床时间也各不相同,影响播种作业精度及稳定均匀性,造成实际田间作业无法得到理想播种性能[9-11]。因此,探究排种器导种投送机理,分析影响导种系统运移性能的主要因素,对排种器关键部件及配套导种管的优化设计具有实际意义。

近些年高速摄像与图像目标追踪技术在农业工程领域广泛应用,为玉米籽粒导投运移规律的研究提供了良好平台与手段[12-14]。本研究以所设计的指夹式玉米精量排种器为研究载体[5],对其运移投送机理进行分析,建立导种投送过程的运动学和动力学模型,研究各因素对运移稳定性及投送轨迹的影响。在此基础上,采用多因素试验分析工作转速与倾斜角对排种均匀稳定性影响,并运用镜面反射成像原理,搭建排种轨迹测定试验台,结合高速摄像与图像目标追踪技术对玉米籽粒的三维空间位移进行测定分析,归纳投送落种轨迹分布,研究籽粒轨迹运动规律。

1 导种投送运移机理分析

1.1 排种器结构与工作原理

指夹式玉米精量排种器结构如图 1 所示,主要由排种轴、指夹压盘、调控凸轮、指夹盘(取种指夹和微调弹簧)、排种盘、导种端盖、导种带、导种带轮(Ⅰ、Ⅱ)、清种毛刷和导种护罩等部件组成,其工作过程分为充种、清种、导种和投种 4 个串联阶段,具体工作原理见文献[5]。

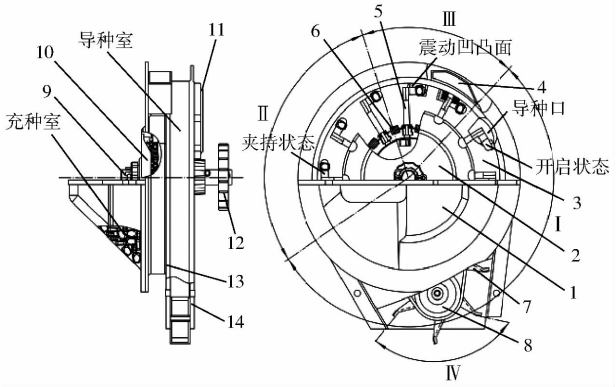


图 1 指夹式玉米精量排种器结构图

Fig. 1 Structure diagram of pickup finger precision seed metering device

1. 充种盖 2. 指夹压盘 3. 排种盘 4. 清种毛刷 5. 取种指夹 6. 微调弹簧 7. 导种带 8. 导种带轮 9. 排种轴 10. 调控凸轮 11. 窥视胶垫 12. 驱动链轮 13. 导种端盖 14. 护罩壳体
Ⅰ—充种区 Ⅱ—夹持区 Ⅲ—清种区 Ⅳ—投种区

1.2 平稳运移导种系统

为减缓高速播种过程中籽粒与导种管及土壤间的弹跳碰撞作用,提高播种精准度、均匀性和横纵直线度,降低投种点高度,在排种器后侧设计配置平稳导种系统,与播种机具工作末端导种管柔性配合,充分利用导种管引向作业,以二次投种方式抵消籽粒落入种沟瞬间的相对速度,实现籽粒的平稳运移投送,如图 2 所示(图中未标注配套导种管)。图中 D 为玉米种植株距,mm;v_0 为机具前进速度,m/s;ω 为排种轴旋转角速度,rad/s。

排种器导种系统主要由导种带、导种带轮(Ⅰ、Ⅱ)及导种护罩等部件组成。其中导种带作为导种系统的核心工作部件,直接影响排种器平稳运移作业性能(籽粒运移均匀性和投送轨迹)。导种带采

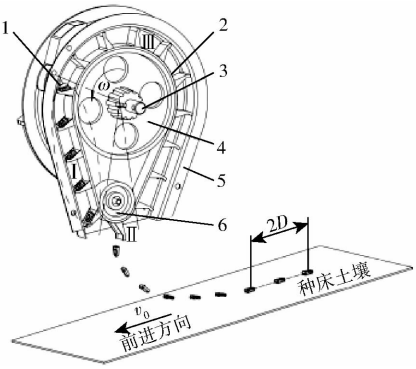


图 2　平稳运移导种系统结构简图

Fig. 2　Structure diagram of steady migratory guiding seed system

1. 导种口　2. 导种带　3. 排种轴　4. 导种带轮Ⅰ　5. 导种护罩　6. 导种带轮Ⅱ　Ⅰ—导种运移区　Ⅱ—投种抛送区　Ⅲ—空转行程区

用橡胶材料制作，其两侧设有微型种带护板，避免运动中因离心力及机械震动产生籽粒的相对滑移，其圆周上均匀等距配有 12 个倾斜导种叶片，与两侧护罩构成 12 个封闭导种室。根据导种系统作用区域将其分为导种运移区、投种抛送区和空转行程区 3 个阶段。

在导种过程中，排种轴驱动导种带轮Ⅰ（主动带轮）与导种带轮Ⅱ（从动带轮）同步转动，单粒籽粒由导种口进入导种室内，随导种带整体进行逆时针旋转运移，籽粒被平稳运送至投种点处进行反向投种抛送，减少与机具间相对速度，实现第 1 次籽粒运移作业。籽粒经导种带投送，在自身重力及导种管柔性接引作用下落入导种管内，通过导种管引向实现低位零速投种，实现第 2 次籽粒运移作业。

本文主要对排种器导种系统作业机理进行研究，建立运移投送过程运动学及动力学模型，对籽粒运移均匀性及精准度进行测定，得到其最佳工作条件，并结合高速摄像与图像目标追踪技术对籽粒投送轨迹分布进行测定提取，为导种系统及配套对接导种管优化设计奠定理论基础。

1.3　导种运移力学分析

为研究导种运移阶段籽粒平稳性，对此阶段籽粒运动状态进行力学分析，研究籽粒与导种叶片间相对平衡且不被甩离的临界条件。以排种轴旋转中心为坐标原点 O，建立空间直角坐标系 XYZ，如图 3 所示。当单粒籽粒由导种口进入导种室内，随导种带逆时针旋转运动，对玉米籽粒进行受力分析，籽粒受到导种带离心力 F_c、导种叶片支持力 F_N、导种叶片摩擦力 F_s和籽粒自身重力 G 所组成的空间力系共同作用。

若保证籽粒与导种叶片间相对平衡，避免籽粒被甩离导种叶片影响抛送落种状态，在导种带转动平面 XOZ 沿籽粒相对叶片滑移方向各力间应满足

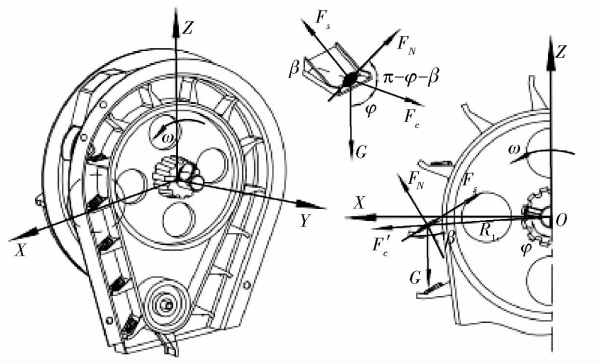


图 3　导种运移过程受力分析图

Fig. 3　Diagram of mechanical analysis in guiding seed phase

$$F'_c + G\cos\varphi + F_N\cos(\pi - \beta - \varphi) \leqslant F_s\cos\beta \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} F'_c \approx F_c \\ F_c = m\omega^2 R_1 \\ F_N = G\sin\beta \\ F_s = F_N\mu \end{cases} \quad (2)$$

式中　m——籽粒质量，mg

φ——导种叶片相对旋转角，(°)

β——导种叶片结构倾斜角，(°)

μ——籽粒与导种叶片间摩擦因数

R_1——导种带轮Ⅰ半径，mm

F'_c——玉米籽粒所受离心力切向分量，其分量夹角较小，大小近似为离心力，N

将式(1)和式(2)合并可得

$$m\omega^2 R_1 + G\cos\varphi \leqslant mg\sin\beta(\mu\cos\beta + \cos(\beta + \varphi)) \quad (3)$$

为求解临界滑移状态下排种转速极限值，将式(3)进行整理得

$$\omega \leqslant \sqrt{\frac{g\sin\beta(\mu\cos\beta + \cos(\beta + \varphi)) - g\cos\varphi}{R_1}} \quad (4)$$

由于排种器整体结构一定（见文献[5]），即其导种带轮Ⅰ半径 R_1为 50 ~ 60 mm，叶片旋转角 φ 为 60° ~ 110°，叶片倾斜角 $\beta \leqslant 22.3°$，将以上参数代入式(4)中，可得在工况条件下，当排种器工作转速小于 49.5 r/min 时，籽粒与导种带间保持相对静止平衡状态，不发生相对滑移。因此，在后续多因素试验中所设定工作转速因素水平值将小于此临界值，以寻求最佳因素组合条件。

1.4　籽粒投送落种位移分析

玉米籽粒在三维空间中投送落种轨迹是研究导种投送运移机理的重要参考，合理的运移轨迹有利于导种系统第 1 次投送至导种管时，籽粒速度大小

及方向的平稳过渡,保证籽粒流对应顺序及间隔一致,减少籽粒与管壁间弹跳碰撞,提高籽粒着床时均匀性及精准性。因此,对导种系统投送后籽粒落种轨迹进行分析。

当单粒籽粒在投种点处被抛送离开倾斜导种叶片时,在平行于导种带转动平面(正面)籽粒将产生与机具前进方向相反、初速度为 v_x 的正向水平匀速运动,在重力作用下籽粒将产生竖直向下的匀加速运动(加速度 $g=9.8\ \mathrm{m/s^2}$),同时由于籽粒质心在导种带上位置与导种带中心线位置具有一定偏差,投送瞬间将受到离心力分量突变,在垂直于导种带转动平面(侧面)籽粒将产生初速度为 v_y 的侧向水平匀速运动,综合上述因素共同作用,籽粒投送落种轨迹为空间三维抛物线。

对投送落种过程玉米籽粒进行运动学分析,在导种带转动平面建立直角坐标系 XPZ,坐标原点 P 与初始投种点相重合,在垂直于转动平面建立直角坐标系 YQZ,坐标原点 Q 与导种带中心点相重合,如图 4 所示。籽粒的运动轨迹为

$$\begin{cases} X = v_x t \\ Y = v_y t \\ Z = v_z t + gt^2/2 \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$\begin{cases} v_x = v_1 \cos\theta \\ v_1 = \omega R_1 \end{cases} \tag{6}$$

式中 X——正面水平方向位移,mm

Y——侧面水平方向位移,mm

Z——竖直方向位移,mm

θ——籽粒投送速度与水平间夹角,(°)

t——籽粒投送运动时间,s

v_1——导种带线速度,m/s

v_x——投种速度正面水平方向分量,m/s

v_y——投种速度侧面水平方向分量,m/s

v_z——投种速度竖直方向分量,m/s

忽略投送过程中空气阻力影响,根据动量定理可得

$$F_c t_0 = m v_y = m \frac{(\omega R_1)^2}{R_2} t_0 \tag{7}$$

将式(5)~(7)合并,进行整理可得籽粒空间轨迹位移为

$$\begin{cases} X = v_1 t\cos\theta = \omega R_1 t\cos\theta \\ Y = \dfrac{(\omega R_1)^2}{R_2} t_0 t \\ Z = \omega R_1 t\sin\theta + gt^2/2 \end{cases} \tag{8}$$

式中 t_0——籽粒脱落导种带叶片所用时间,s

R_2——导种带轮Ⅱ半径,mm

通过对导种投送运移过程进行动力学与运动学分析可知,当排种器导种系统整体结构一定时,导种系统对籽粒运移投送稳定性及落种轨迹主要与排种器工作转速、籽粒投送速度与水平间夹角、籽粒脱落导种带时间等因素有关,影响着播种精准性与均匀性。因此,在后续试验阶段,将通过多因素试验研究导种系统工况下运移精准性及均匀性,并结合高速摄像与图像目标追踪技术对籽粒投送落种轨迹分布进行测定提取。

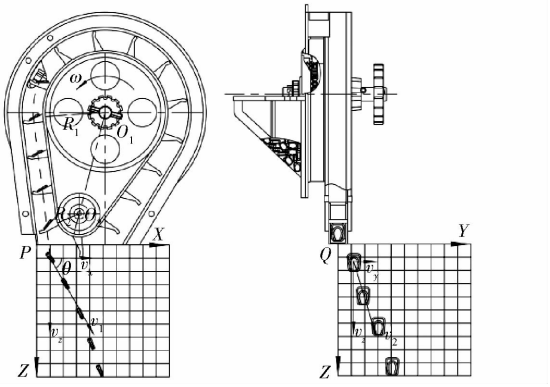


图 4 投送过程运动学分析

Fig. 4 Kinematics analysis in dropping seed phase

2 试验材料与方法

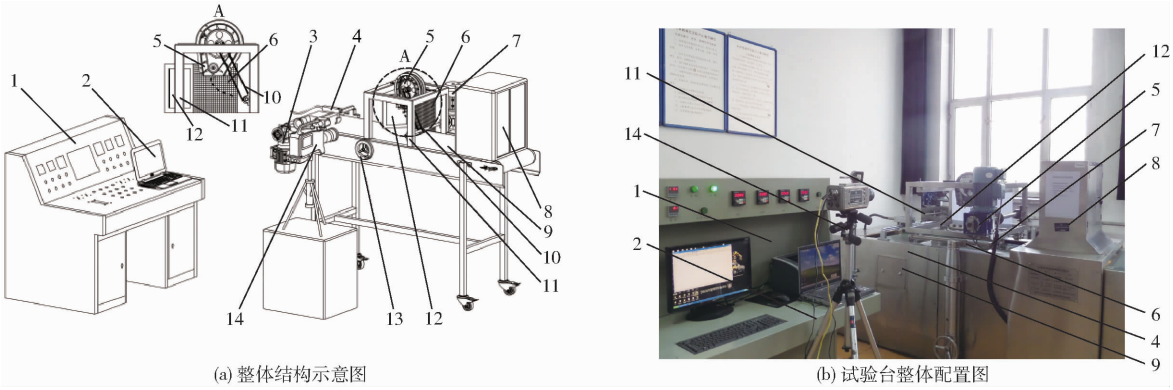
2.1 试验材料

试验材料为黑龙江省广泛种植的"德美亚 1 号"玉米品种,经人工分级清选处理,保证供试籽粒饱满、无损伤及虫害,测定其千粒质量为 281.12 g,密度均值为 1.154 g/cm^3,平均几何尺寸为:长度 9.27 mm、宽度 7.40 mm、厚度 4.11 mm(对 100 粒籽粒进行测量取平均值)。

2.2 试验条件

试验地点为东北农业大学排种性能实验室,试验装置主要由 JPS-12 型排种器性能检测试验台(黑龙江省农业机械工程科学研究院)、Phantom V9.1 高速摄像仪(美国 Vision Research 公司,Nikon 镜头,图像处理程序为 Phantom 控制软件)、指夹式玉米精量排种器、PC 计算机(美国惠普 HP 公司)、空间网格面板和反射镜面板等搭建组成,如图 5 所示。

为便于对排种器导种系统工作性能及玉米籽粒运移轨迹进行分析,将导种系统进行可视化处理,将原有金属护罩改为有机玻璃材质,并将排种器固定在安装台架上。试验时,种床带相对于排种器反向运动,模拟播种机前进运动状态,喷油泵将油喷于种床带上,玉米籽粒从排种口落至涂有油层的种床带上,通过摄像处理装置进行实时检测并采集数据,以实现准确测量各项排种性能指标[15-17]。



(a) 整体结构示意图　　(b) 试验台整体配置图

图 5　排种轨迹测定试验台

Fig. 5　Test platform for dropping trajectory measurement

1. 排种试验控制器　2. 计算机　3. 种床运行电动机　4. 喷油泵　5. 指夹式精量排种器　6. 空间网格面板　7. 排种驱动电动机　8. 图像采集处理装置　9. 种床带　10. 传动系统　11. 安装台架　12. 反射镜面板　13. 台架倾斜手柄　14. 高速摄像仪

为防止拍摄角度对籽粒轨迹位移数据采集时产生影响，将高速摄像仪固定于水平位置。为得到籽粒抛送过程中实际位移变化，应保证各组试验中高速摄像仪与籽粒运动平面的垂直距离一致，在籽粒运动平面内放置丁字尺作为标定。为全面分析运移过程中玉米籽粒的三维空间位移量，应从导种带转动平面（正面）和垂直于转动平面（侧面）进行拍摄，仅依靠一台高速摄像仪无法完成三维空间上的数据采集。因此根据镜面反射成像原理，设计空间网格面板和反射镜面板间呈 135°夹角定位，模拟三维空间坐标系 *XYZ*，在空间网格面板粘贴单位刻度为 5 mm 的坐标网格纸，以便高速摄像对玉米籽粒三维空间位移量进行测定，减少因仪器不足带来的不便，提高试验测量精确度。

2.3　试验方法

由上述导种运移投送机理分析可知，籽粒运移投送稳定性及落种运动轨迹与排种器工作转速、投送速度与水平间夹角、籽粒脱落导种带时间等因素有关。鉴于籽粒脱落时间极短（各组试验近似相同）且难以控制，为提高台架试验可操作性及准确性，本研究选取工作转速及投种水平角度为试验因素，分别进行多因素排种稳定性试验和单因素高速摄像投送落种轨迹测定试验。通过调节 JPS－12 型排种试验台电动机变频器频率控制排种器工作转速平稳运转，将投种水平角度转换为排种器导种系统投种端面与台架水平面间夹角（即倾斜角），通过控制台架倾斜手柄调节排种器倾斜角。

为研究导种系统投种稳定性与均匀性，采用二因素五水平通用旋转组合试验研究排种器最佳作业性能，根据前期理论分析、单因素预试验及田间实际播种作业需求，配合各因素可控有效范围，设定试验因素水平如表 1 所示。参考 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》，选取试验指标为合格指数和变异系数，以评价排种器排种稳定性。试验时，通过排种器性能检测试验台数据采集系统对各工况下性能指标进行测定，保证各组试验测定籽粒数量超过 1 000 粒，其他各项参数保持恒定。

表 1　试验因素编码

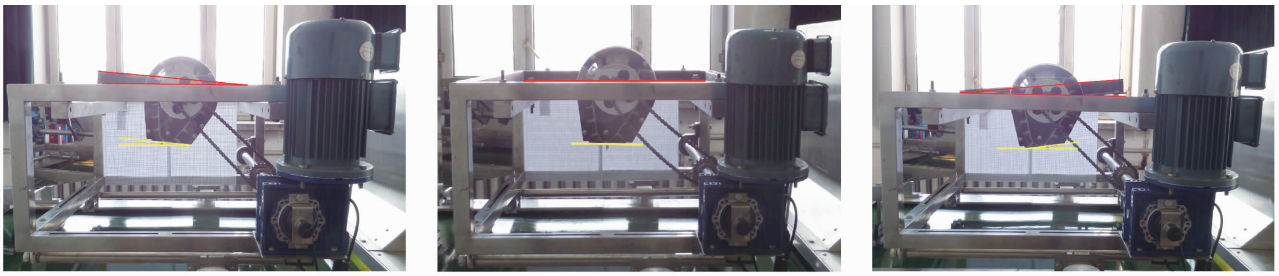
Tab. 1　Factors and levels of experiments

编码	试验因素	
	工作转速 x_1/(r·min^{-1})	倾斜角 x_2/(°)
1.414	45.0	12.0
1	40.6	8.5
0	30.0	0
－1	19.4	－8.5
－1.414	15.0	－12.0

在此基础上，结合高速摄像与图像目标追踪技术对较优工况下籽粒三维空间投送轨迹分布进行测定提取，采用单因素试验研究各倾斜角（－12°～12°）及工作转速（15～45 r/min）对落种轨迹的影响。试验时，高速摄像仪正对空间网格面板摆放，对空间网格面板和反射镜面板内玉米籽粒位移进行测定，观察并分析导种系统对玉米籽粒的运移投送轨迹特性，每组试验重复 3 次，对 100 粒玉米籽粒下落位移进行统计，单因素角度调节如图 6 所示。

2.4　籽粒轨迹追踪后处理

轨迹测定过程中，设定高速摄像仪拍摄帧率为 1 000 帧/s，采集域为 512 mm×512 mm，曝光时长为 990 μs，调整排种器工作转速和倾斜角至指定值进行试验，通过摄像机将所采集籽粒运动轨迹图像实时存储于计算机内，待试验结束后保存为.cin 格式视频文件。利用 Phantom 控制软件主系统窗口对视频文件进行图像目标追踪，并提取不同帧图像中玉米籽粒质心点坐标，绘制出各工作条件下玉米籽粒抛送轨迹。由于两帧图片间过渡时间较短，对种子质心点坐标值进行处理时存在一定误差，因此将两



(a) 倾斜角 12° (b) 倾斜角 0° (c) 倾斜角-12°

图 6 单因素倾斜角试验

Fig. 6 Single-factor tests at different tilt angles

帧图片间距调大些,减少因数据采集造成的误差。

为准确记录籽粒三维空间位移变化,在空间网格参照平面内以排种器导种带投种初始点 O 为坐标原点,在正面建立直角坐标系 XOZ,在反射镜平面以导种带中心点 O'为坐标原点,在侧面建立直角坐标系 $YO'Z$,在网格参考面板中记录籽粒对应坐标值(x_0,z_0),反射镜面中对应坐标为(y_0,z_0)。同时利用 Phantom 控制软件的 Angle measurements 命令在网格参照平面内选取曲线点 P(与导种管理论接触点,本试验默认此点高度 60 ~ 80 mm)、坐标原点 O 及水平坐标 X,测定正面投种轨迹曲线斜率,即此工况下籽粒轨迹投种角 θ,此参数为导种管改进设计的重要依据[18-19]。由于玉米籽粒具有一定几何尺寸,记录时测定籽粒的质心坐标,以距籽粒中心点最近的网格线为标定基准,具体测定方式如图 7 所示。

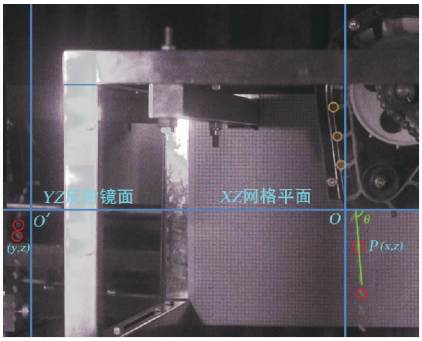


图 7 高速摄像籽粒坐标点测定

Fig. 7 Coordinate measurement of corn grains by high-speed photography

3 试验结果与分析

3.1 多因素试验结果与分析

试验方案与结果如表 2 所示,试验参数设计值与实际值误差小于 1.3%,可近似以排种器工作转速和倾斜角的设计值对结果进行分析。

通过 Design-Expert 6.0.10 软件对试验数据回归分析,进行因素方差分析,筛选出较为显著影响因素,进而得到性能指标与因素编码值间回归方程。

$$y_1 = 82.92 - 3.76X_1 + 0.089X_2 - 0.061X_1^2 - 1.68X_2^2 - 0.25X_1X_2 \quad (9)$$

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Design and results of tests

序号	试验因素		性能指标	
	工作转速 X_1	倾斜角 X_2	合格指数 y_1/%	变异系数 y_2/%
1	1	1	76.56	16.59
2	1	-1	77.13	16.21
3	-1	-1	83.92	13.84
4	-1	1	84.34	14.18
5	1.414	0	78.01	17.07
6	-1.414	0	88.96	9.01
7	0	1.414	79.95	18.11
8	0	-1.414	80.56	18.56
9	0	0	83.23	14.03
10	0	0	82.87	14.47
11	0	0	83.01	13.56
12	0	0	81.92	13.29
13	0	0	82.55	14.04

$$y_2 = 13.88 - 2.02X_1 + 0.01X_2 - 0.54X_1^2 - 2.11X_2^2 - 0.01X_1X_2 \quad (10)$$

为直观地分析试验指标与因素间关系,运用 Design-Expert 6.0.10 软件得到响应曲面,如图 8 所示。

根据上述回归方程和响应曲面图可知,排种器工作转速与倾斜角间存在交互作用。由图 8a 可知,当倾斜角一定时,合格指数随工作转速增加而降低;当工作转速一定时,合格指数随倾斜角增加而先增加后降低;当工作转速变化时,合格指数的变化区间较大,因此工作转速是影响合格指数的主要因素。由图 8b 可知,当倾斜角一定时,变异系数随工作转速增加而增加;当工作转速一定时,变异系数随倾斜角增加而先降低后增加;当倾斜角变化时,变异系数的变化区间较大,因此倾斜角是影响变异系数的主要因素。

在此基础上,为得到试验因素最佳水平组合,即排种器最佳工作参数组合,对试验进行优化设计。建立参数化数学模型,结合试验因素的边界条件,对合格指数和变异系数回归方程进行分析,得到其非线性规划的数学模型为

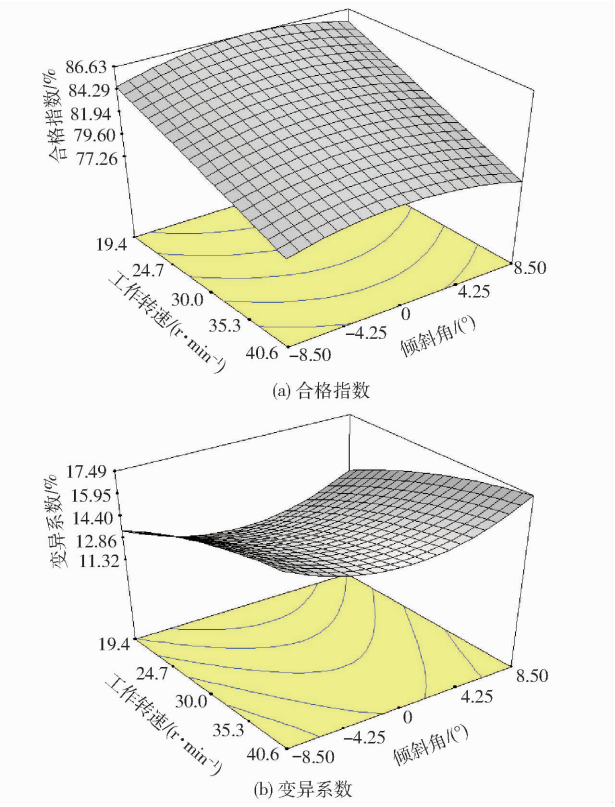


图 8　各因素对试验性能参数的响应曲面

Fig. 8　Response surfaces of seeding qualified index to factors

$$\begin{cases} \max\ y_1 \\ \min\ y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.414 \leqslant X_1 \leqslant 1.414 \\ -1.414 \leqslant X_2 \leqslant 1.414 \\ 0 < y_1(X_1, X_2) \leqslant 1 \\ 0 < y_2(X_1, X_2) \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

当工作转速为 27.6 r/min，倾斜角为 0.2°时，排种器作业性能最优，排种稳定性及均匀性最好，其合格指数为 87.03%，变异系数为 10.98%。根据优化结果进行试验验证，合格指数为 86.92%，变异系数为 10.02%，与优化结果基本一致，误差在可接受范围内。在实际作业过程时，在保证播种质量的同时应提高排种器作业效率，同时减少其倾斜程度。本试验主要通过多因素试验研究排种器导种系统作业过程中运移稳定性及均匀性，探求其最佳工作条件，为单因素试验测定籽粒投送落种轨迹奠定基础。

3.2　单因素试验结果与分析

结合高速摄像与图像目标追踪技术，以排种器工作转速和倾斜角为试验因素进行单因素试验，对不同工况条件下投送落种轨迹进行测定分析。将各帧图片内籽粒质心点坐标值记录到 Excel 软件中，即可得出不同工作状态下籽粒运移规律与趋势。图 9 为倾斜角 −12°、0°、12°，工作转速 15 ~ 45 r/min 工况条件下玉米籽粒运移投送落种坐标分布。

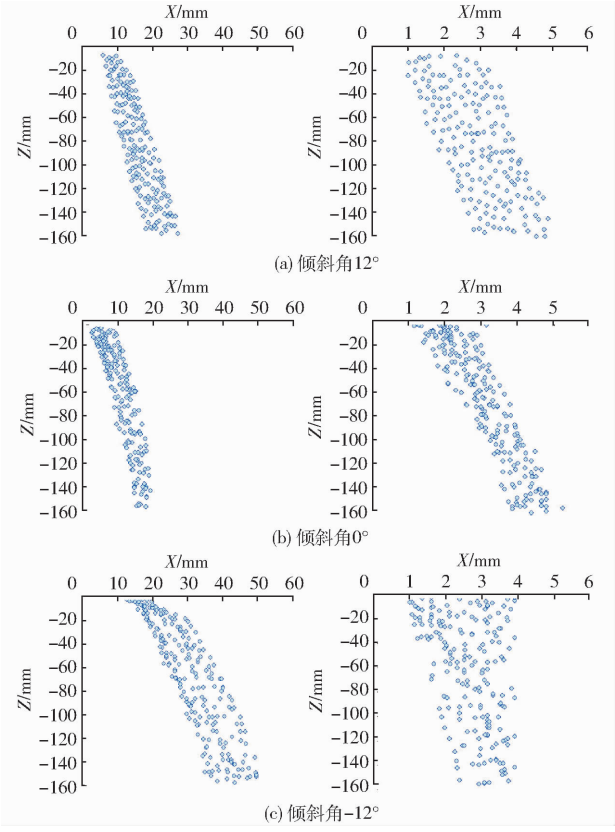


图 9　籽粒坐标位置概率分布图

Fig. 9　Probability distribution graphs of corn grain coordinates

3.3　工作转速对运移投送轨迹影响

当工作转速为 15 ~ 45 r/min、倾斜角为 0°时，籽粒正面轨迹水平位移量整体稳定在 1.1 ~ 17 mm 内，侧面轨迹水平位移整体稳定在 0.7 ~ 5.9 mm 内，且各组试验中籽粒与导种带间均未发生相互滑移。分析可知，工作转速对运移投种轨迹具有显著性影响，各投种轨迹曲线均为正态分布。在倾斜角 −12° ~ 12°范围内均表现为：随工作转速增加，导种带及玉米籽粒线速度水平分量逐渐增加，籽粒抛物线轨迹开口变大，其正面水平位移与侧面水平位移随之增大。

当工作转速为 15 ~ 35 r/min、倾斜角为 0°时，籽粒正面轨迹水平位移量整体稳定在 1.1 ~ 12.9 mm 内，侧面轨迹水平位移整体稳定在 0.7 ~ 4.8 mm 内，籽粒运移投送轨迹及落点位置较集中，波动性较小，株距间变异系数较小。工作转速大于 35 r/min 时，籽粒轨迹及落点位置分布逐渐离散，株距变异系数明显增加，此时正面水平位移稳定在 12.9 ~ 14.3 mm 内，侧面水平位移稳定在 3.7 ~ 4.8 mm 内。在各组试验中，籽粒侧向位移受工作转速影响较大，侧向轨迹分布离散不均，籽粒正面水平位移变异系数均小于侧面水平位移坐标。造成此种现象的主要原因可能是随工作转速增加，排种器侧向振动增大，导致籽

粒在惯性作用下与排种壳体间发生轻微碰撞,造成籽粒运动轨迹变化。

对工作转速为 15 ~ 45 r/min、倾斜角为 0°工况时籽粒投种角及株间变异系数进行测定分析,结果如表 3 所示。分析可知,投种角和株间变异系数随工作转速增加而减小,籽粒轨迹投种角整体稳定在 62.3° ~ 80.7°内,株间变异系数整体稳定在 8.99% ~ 17.97% 内。通过 SPSS 软件对两者的相关系数进行显著性检验,其伴随概率 P 皆小于 0.01,投种角 Y_t 和株间变异系数 Y_c 随工作转速变化的回归方程决定系数 R^2 分别为 0.943 和 0.982,其相关函数分别为

$$Y_t = -0.607\,9x + 90.95 \quad (12)$$

$$Y_c = -0.003\,6x^2 + 0.486\,5x + 2.960\,2 \quad (13)$$

表 3 各工作转速下投种角与株间变异系数测定结果

Tab.3 Measurement results of dropping seed angle and variation coefficient at different rotational speeds

工作转速/(r·min⁻¹)	轨迹投种角均值/(°)	变异系数均值/%
15	80.7	8.99
20	78.6	11.86
25	75.9	13.16
30	74.1	14.28
35	71.8	15.23
40	65.7	16.43
45	62.3	17.97

3.4 倾斜角对运移投送轨迹影响

当工作转速为 30 r/min、倾斜角为 -12° ~ 12°时,籽粒正面轨迹水平位移量整体稳定在 2 ~ 45 mm 内,侧面轨迹水平位移整体稳定在 1.1 ~ 5.1 mm 内。当工作转速 30 r/min,倾斜角小于 -8°或大于 8°时,籽粒与导种带发生轻微滑移运动,影响运移轨迹稳定分布。

分析可知,倾斜角对运移投种轨迹具有显著性影响。在试验过程中倾斜角的变化使得籽粒并未在同一位置进行初始投种,投种点在 0 ~ 4 mm 高度范围内波动,对籽粒正面水平轨迹影响相对较小,落点位置较集中,对侧面水平落点位置影响较大,轨迹波动性较大。造成此种现象的主要原因可能是随倾斜角改变,籽粒投种角发生较大变化,且不同初始投种点导致初速度不同,在投种下落过程中籽粒姿态发生改变,使得运动轨迹侧面位移增大,稳定性下降。

对工作转速为 30 r/min、倾斜角为 -12° ~ 12°工况下籽粒投种角及株间变异系数进行测定分析,结果如表 4 所示。分析可知,投种角随倾斜角的增大而减小,株间变异系数随倾斜角增大而先减小后增大,籽粒轨迹投种角整体稳定在 66.4° ~ 79.6°,株间变异系数整体稳定在 14.28% ~ 18.26% 内。投种角 Y_t 和株间变异系数 Y_c 随倾斜角变化的回归方程决定系数 R^2 分别为 0.978 和 0.974,其相关函数分别为

$$Y_t = -0.513\,4x + 73.557 \quad (14)$$

$$Y_c = -0.024\,7x^2 + 0.020\,4x + 14.605 \quad (15)$$

表 4 各倾斜角下投种角与株间变异系数测定结果

Tab.4 Measurement results of dropping seed angle and variation coefficient at different tilt angles

倾斜角/(°)	轨迹投种角均值/(°)	变异系数均值/%
-12	79.6	17.87
-8	77.0	16.03
-4	75.7	15.19
0	74.1	14.28
4	72.4	14.94
8	69.7	16.71
12	66.4	18.26

4 结论

(1)以指夹式玉米精量排种器为研究载体,对其导种运移投送机理进行分析,建立导种投送过程的运动学及动力学模型,分析各因素对运移稳定性及投送落种轨迹的影响。

(2)采用多因素二次通用旋转组合试验研究排种器工作转速及倾斜角对排种均匀稳定性的交互影响,运用 Design - Expert 6.0.10 软件对试验结果进行分析,对回归数学模型进行多因素优化。试验结果表明,当工作转速为 27.6 r/min,倾斜角为 0.2°时,排种器排种稳定性及均匀性最优,合格指数为 86.92%,变异系数为 10.02%,验证了排种器运行工作参数的合理性。

(3)运用镜面反射成像原理,搭建了排种轨迹测定试验台,结合高速摄像与图像目标追踪技术对投送落种过程中玉米籽粒三维空间位移进行测定分析,以工作转速和倾斜角为试验因素进行了籽粒投送轨迹运移规律的研究。试验结果表明,在工作转速为 15 ~ 45 r/min、倾斜角为 0°工况下,籽粒正面轨迹及侧面轨迹的水平位移随工作转速增加而增加,株距变异系数随工作转速增加而降低;当工作转速大于 35 r/min 时,籽粒轨迹及落点位置分布逐渐离散,株距变异系数明显增加,其正面水平位移稳定在 12.9 ~ 14.3 mm 内,侧面水平位移稳定在 3.7 ~ 4.8 mm 内,平均株距变异系数为 15.13%。在工作转速为 30 r/min、倾斜角为 -12° ~ 12°工况下,轨迹投种角随倾斜角的增加而减小,其整体角度稳定在 66.4° ~ 79.6°内。

参 考 文 献

1 翟建波,夏俊芳,周勇. 气力式杂交稻精量穴直播排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):75 - 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160111&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.011.
ZHAI Jianbo, XIA Junfang, ZHOU Yong. Design and experiment of pneumatic precision hill-drop drilling seed metering device for hybrid rice [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 75 - 82. (in Chinese)

2 YANG L, HE X T, CUI T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4):1 - 9.

3 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(1):46 - 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140108&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008.
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):46 - 52. (in Chinese)

4 曹秀英,廖宜涛,廖庆喜,等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):77 - 84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150911&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.011.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device foe rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):77 - 84. (in Chinese)

5 王金武,唐汉,周文琪,等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):68 - 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010.
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):68 - 76. (in Chinese)

6 周祖良,钱简可. 指夹式玉米精密播种排种器[J]. 农业机械学报,1986,17(1):47 - 53.
ZHOU Zuliang, QIAN Jianke. The structure design of the picker finger seed metering units of precision corn seed drill [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1986, 17(1):47 - 53. (in Chinese)

7 李洪刚. 仿生指夹式排种器[D]. 长春:吉林大学,2010.
LI Honggang. Bionic pinch of metering device [D]. Changchun:Jilin University, 2010. (in Chinese)

8 王金武,唐汉,王奇,等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):43 - 50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 43 - 50. (in Chinese)

9 陈学庚,钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(22):8 - 15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8 - 15. (in Chinese)

10 赵金辉,杨学军,刘立晶,等. 基于 PLC 的播种机开沟器力学性能测试装置[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(增刊):29 - 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2014s105&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.005.
ZHAO Jinhui, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Mechanical performance testing device for planter openers based on PLC[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2014, 45(Supp.): 29 - 34. (in Chinese)

11 张晓冬,李成华,李建桥,等. 铲式玉米精密播种机振动特性模型建立与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):88 - 93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140215&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.015.
ZHANG Xiaodong, LI Chenghua, LI Jianqiao, et al. Mathematic vibration model of spade punch planter of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):88 - 93. (in Chinese)

12 KOCHER M F, COLEMAN J M, SMITH J A, et al. Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(2): 177 - 183.

13 姜楠,衣淑娟,张延河. 钉齿式轴流装置脱粒过程高速摄像分析[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):52 - 56.
JIANG Nan, YI Shujuan, ZHANG Yanhe. High-speed photography analysis of threshing process on axial flow device with nails teeth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):52 - 56. (in Chinese)

14 余佳佳,丁幼春,廖宜涛,等. 基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析[J]. 华中农业大学学报,2014,33(3):103 - 108.
YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(3): 103 - 108. (in Chinese)

(下转第 46 页)

planting mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 46 - 53. (in Chinese)

12 赵匀. 机构数值分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

13 孙桓,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

14 陈建能. 椭圆齿轮行星系分插机构的动力性能分析、参数优化及实验验证[D]. 杭州:浙江大学,2004.
CHEN Jianneng. Dynamics performance analysis, parameters optimization and proof for transplanting mechanism with planetary elliptic gears [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)

15 王英,陈建能,周丽莎,等. 步行式插秧机共轭凸轮推秧装置动力学分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(10):47 - 52, 100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20121009&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.009.
WANG Ying, CHEN Jianneng, ZHOU Lisha, et al. Dynamic analysis and experiment of conjugate cam seedling-pushing device applied on walking-type rice transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 47 - 52, 100. (in Chinese)

16 CHEN Jianneng, ZHAO Yun, YU Gaohong, et al. Establishment and verification of dynamics model of seedling-pushing device in transplanting mechanism with planetary elliptic gears[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5):71 - 76.

17 叶秉良,李丽,俞高红,等. 蔬菜钵苗旋转式取苗机构动力学分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):70 - 78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140612&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.012.
YE Bingliang, LI Li, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and test of rotary pick-up mechanism for vegetable pot-seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 70 - 78. (in Chinese)

18 叶秉良,朱浩,俞高红,等. 旋转式水稻钵苗移栽机构动力学分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5): 53 - 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160508&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.008.
YE Bingliang, ZHU Hao, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and tests of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 53 - 61. (in Chinese)

19 陈建能,赵匀,李革,等. 椭圆齿轮行星系分插机构动力学特性的试验[J]. 农业机械学报,2006,37(1):40 - 42, 46.
CHEN Jianneng, ZHAO Yun, LI Ge, et al. Study of dynamic characteristics of transplanting mechanism with elliptic planetary gears through experiment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 40 - 42,46. (in Chinese)

20 雷英杰,张善文,李续武,等. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2014.

(上接第 37 页)

15 曹成茂, 秦宽,王安民,等. 水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):66 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150110&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.010.
CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experment on rice hill seeder with air-blowing special hole and scoop-wheel [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1): 66 - 72. (in Chinese)

16 赵晓顺,于丽华,张晋国,等. 槽缝气吸式小麦精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):48 - 51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130210&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.010.
ZHAO Xiaoshun, YU Lihua, ZHANG Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(2):48 - 51. (in Chinese)

17 刘佳, 崔涛,张东兴,等. 机械气力式组合式玉米精密排种器[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2):43 - 47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20120209&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.009.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2): 43 - 47. (in Chinese)

18 鞠锡庆. John Deere 7000 型精密播种机的导种管分析[J]. 农业机械学报,1981,12(2):78 - 82.
JU Xiqing. Analysis of seed spouts of John Deere 7000 precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1981,12(2): 78 - 82. (in Chinese)

19 耿端阳,李玉环,孟鹏祥,等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):38 - 45. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160506&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.006.
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5): 38 - 45. (in Chinese)