

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.005

非匀速三插臂水稻高速插秧机参数分析与试验*

张敏^{1,2} 张文毅² 周长省¹ 祁兵² 纪要²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对三插臂分插机构理论分析不全面和增加插植臂数量导致株距适应范围缩小等问题, 提出了一种椭圆齿轮非匀速三插臂分插机构, 建立了该分插机构的运动学分析模型, 研究了分插机构回转箱体非匀速转动对栽插参数的影响, 理论分析得出非匀速转动不影响秧针的静态轨迹、取秧角度、推秧角度和轨迹高度, 传动系统中椭圆齿轮偏心率和初始相位角对秧针取秧点 y 方向的速度影响最大, 相位角为 0° 时, 取秧点 y 方向线速度达到最大。插秧穴口随着偏心率增大而增大, 初始相位角对插秧穴口的影响较复杂, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内随相位角增大而增大, 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内随相位角增大而减小。在室内进行了插植臂速度和移箱回数对伤秧率和切块均匀性的影响试验, 试验表明伤秧率随分插机构转速增加而增大且影响显著, 但移箱回数差异对伤秧率影响不显著。移箱回数差异对切块均匀性的影响显著, 移箱回数 18 回的切块均匀性明显高于对照组, 在移箱回数 21 回和 24 回时切块均匀性与对照二插臂的切块均匀性差异不大, 分插机构转速增加对秧苗切块均匀性有影响但影响不显著。田间对比试验表明, 非匀速三插臂分插机构栽植质量优于对照组, 伤秧率均随作业速度的提高而增大, 翻倒率和漂秧率也随作业速度的增加而增加但影响不显著, 作业速度变化对漏插率影响也不显著。

关键词: 水稻插秧机 分插机构 非匀速转动 椭圆齿轮 参数分析 试验

中图分类号: S223.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0032-07

Parameter Analysis and Experiment of Three Planting Bars of High-performance Rice Transplanter with Non-uniform Rotation

Zhang Min^{1,2} Zhang Wenyi² Zhou Changsheng¹ Qi Bing² Ji Yao²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: For no full analysis on the theories of three planting bars of transplanting mechanism and reducing the row spacing applicable range by increasing the quantity of planting bars, a non-uniform rotation three planting bars of transplanting mechanism was proposed. The kinematics analysis model was built based on its working principle, and the effects of transplanting parameters on non-uniform rotational speed were studied. The theoretical analysis was received that the non-uniform rotational speed had no effects on the static trajectory of planting hoe, taking seedling angle, pushing seedling angle and trajectory height. Eccentricity ratio and initial phase angle of the elliptic gears had great effects on the velocity with axis y at the point of taking seedling, the speed of taking seedling points with axis y reached the largest when the phase angle was 0° . The transplanting hole was increased with the increase of eccentricity ratio, the initial phase angle had relatively complex effects on the transplanting hole, which would get large with the increase of initial phase angle between $0^\circ \sim 90^\circ$, and get small with the increase of initial phase angle between $90^\circ \sim 180^\circ$. The effects of speed of transplanting bars and the movement times of seedling box on the damaged seedling rate and stripping-slicing homogeneities were tested in laboratory, the results indicated that the damaged seedling ratio was increased with the increase of

收稿日期: 2015-09-15 修回日期: 2015-10-10

* 公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203059)

作者简介: 张敏, 博士生, 农业部南京农业机械化研究所副研究员, 主要从事种植与收获机械研究, E-mail: zhm0912@126.com

通讯作者: 周长省, 教授, 博士生导师, 主要从事现代机械设计理论及方法研究, E-mail: chenxiangsc@126.com

revolving speed and the impact was significant, but the movement times had no significant impact on it. The movement times had significant impact on the stripping-slicing homogeneity, which was significantly higher than the matched group when the movement times was 18, the difference between the stripping-slicing homogeneities when the movement times equaled to 21 and 24 and the two contrast transplanting bars was little, but the revolving speed had effect on it and the impact was non-significant. Field contrast test indicated that the planting quality of the non-uniform rotation three planting bars was superior to that of the matched group, the damaged seedling rate was increased with the increase of work speed, the laid seedling hill rate and the floating seedling rate were also increased with the increase of work speed, but the impacts were non-significant, and the work speed had no effect on the missing planting hill rate.

Key words: Rice transplanter Transplanting mechanism Non-uniform rotation Elliptic gear
Parameter analysis Experiment

引言

水稻插秧机向着高速方向发展^[1-9],但随着插秧机作业速度的提高^[10-13],在株距一定的条件下,分插机构的转速也要相应提高^[14-16]。田间试验发现,分插机构较高的转速一方面使秧针在整个取栽过程中线速度增大,导致伤秧率增加、立苗不稳,影响水稻栽插质量及后期生长;另一方面也对分插机构传动精度和零部件强度提出更高要求。因此,研究适应高速作业的分插机构是实现插秧机高速作业的关键。

季顺中等^[17]通过增加旋转式分插机构插植臂个数,在保持作业效率不变的条件下降低了分插机构的转速,并采用虚拟样机技术理论分析了三插臂分插机构对取秧线速度的影响。但随着插植臂个数的增加,分插机构在取栽过程中,同一插植臂在一个旋转周期中由跨过一穴秧苗增加到跨过多穴秧苗,增加插植臂数量不仅对取秧线速度有影响,对插秧株距和插秧穴口等参数也会有影响;另外,分插机构取栽过程还需和秧箱移动机构配合,在分插机构一个旋转周期中取秧次数也会增加,为了获得相同的取秧面积,必然需要更快的秧箱移动速度相配合。因此,影响三插臂分插机构高速作业的制约因素除取秧线速度外,还有栽插轨迹对株距适应性、秧箱移动回数和分插机构的速度匹配等。目前多插臂分插机构仅理论分析了增加插植臂会降低取秧线速度,关于插植臂旋转速度对栽植质量的影响和秧箱移动回数对取秧均匀性的影响等还未见报道。

本文提出一种非匀速三插臂分插机构,同时分析分插机构旋转箱体非匀速转动对三插臂分插机构运动规律的影响,并通过室内和田间试验研究取秧速度对取秧质量的影响以及秧箱移动回数与取秧质量的关系。

1 结构与工作原理

非匀速三插臂分插机构如图 1 所示,分插机构由 3 个插植臂组成并在圆周上均匀分布。每个插植臂分支由太阳轮、中间非圆齿轮和行星轮组成,其中太阳轮固定不动,插植臂箱体由一对位于株距变速箱内的非圆齿轮驱动实现非匀速转动,回转箱体转动带动与太阳轮啮合的中间非圆齿轮转动。非匀速三插臂分插机构的非圆齿轮均采用椭圆齿轮,其中插植臂回转箱体内的非圆齿轮为模数和偏心率相同的椭圆齿轮,传动系统中的椭圆齿轮的偏心率与插植臂回转箱体内的椭圆齿轮的偏心率不同,且椭圆齿轮有个初始安装相位角 c 。非匀速三插臂分插机构回转箱体的非匀速转动由设置在株距变速箱内的椭圆齿轮 1 和椭圆齿轮 2 实现,该对非圆齿轮同时驱动秧箱的横纵向移箱机构。

2 非匀速三插臂分插机构运动学模型

2.1 非匀速转动特性

设非匀速三插植臂箱体的回转中心为 $O(0, 0)$,逆时针方向为正,传动系统中椭圆齿轮 1 的转动角速度为 $-\omega$,三插植臂秧针尖 P 点的运动由随回转箱体的平动和绕行星轴 R 的不等速转动的合成,给回转箱体施加一个绕 O 点反转的角速度 $-\frac{d\varphi_H}{dt}$,则行星轮系转换为定轴轮系^[18]。根据定轴轮系的齿轮传动原理可得行星齿轮相对非匀速转动插植臂箱体的速比为

$$\frac{d\varphi_3^H}{d\varphi_1^H} = \frac{d\varphi_3 - d\varphi_H}{d\varphi_1 - d\varphi_H} = i_{31}^H \quad (1)$$

式中 φ_3 ——行星轮 3 的转角

φ_H ——插植臂箱体回转转角

i_{31}^H ——行星轮 3 与太阳轮 1 之间的传动比

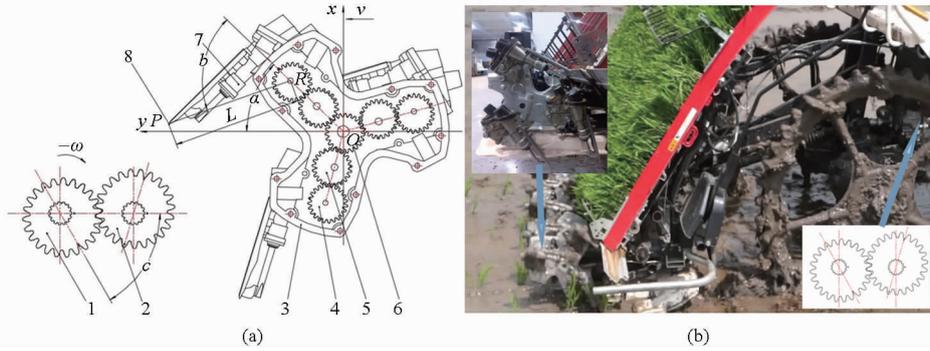


图1 非匀速转动三插臂分插机构

Fig. 1 Three planting bars of transplanting mechanism with non-uniform rotation

(a) 结构原理图 (b) 实物图

1. 椭圆齿轮1 2. 椭圆齿轮2 3. 回转箱体 4. 行星轮3 5. 中间轮2 6. 太阳轮1 7. 插植臂 8. 秧针尖

非匀速转动的回转箱体由椭圆齿轮1和椭圆齿轮2组成的传动系统驱动,则回转箱体的转动角速度与椭圆齿轮1的关系为

$$\frac{d\varphi_{\omega_1}}{d\varphi_H} = i_{12}^{\omega} \quad (2)$$

式中 φ_{ω_1} ——传动系统中椭圆齿轮1的转角

i_{12}^{ω} ——传动系统中椭圆齿轮1与椭圆齿轮2之间的传动比

联立式(1)和式(2)可求得行星轮3相对匀速转动的椭圆齿轮1的传动比关系为

$$\frac{d\varphi_3}{d\varphi_{\omega_1}} = (1 - i_{31}^H) \frac{1}{i_{12}^{\omega}} \quad (3)$$

对式(3)积分可求得行星齿轮3相对传动系统中匀速转动的椭圆齿轮1的转角为

$$\varphi_3 = \int_0^{\varphi_{\omega_1}} (1 - i_{31}^H) \frac{1}{i_{12}^{\omega}} d\varphi_{\omega_1} \quad (4)$$

根据椭圆齿轮定轴传动特性^[19],可得 i_{31}^H 和 i_{12}^{ω} 的传动比分别为

$$i_{31}^H = \frac{1 - k^2}{1 - 2k\cos\varphi_H + k^2} \quad (5)$$

$$i_{12}^{\omega} = \frac{1 - 2k_1\cos(\varphi_1 + c) + k_1^2}{1 - k_1^2} \quad (6)$$

其中

$$k = \frac{2k_2}{1 + k_2^2}$$

式中 k_1 ——传动系统中椭圆齿轮的偏心率

k_2 ——三插臂分插机构回转箱体内椭圆齿轮的偏心率

2.2 秧针运动

建立直角坐标系(图1),以非匀速三插臂分插机构其中一个插植臂为分析对象,设秧针尖P点与行星齿轮3回转中心的长度为L,插植臂箱体与y轴的初始夹角为 α ,插植臂与回转箱体的初始夹角为b,偏心椭圆齿轮的长轴半径为a。则秧针尖P点运动静轨迹位移方程为

$$\begin{cases} x_s = 4a\cos(\alpha - \varphi_H) + L\cos(\alpha - b - \varphi_3) \\ y_s = 4a\sin(\alpha - \varphi_H) + L\sin(\alpha - b - \varphi_3) \end{cases} \quad (7)$$

设插秧株距为S,对于图1所示的三插植臂分插机构,在1个回转周期内插秧3次,则可求得秧针尖P点的动轨迹位移方程为

$$\begin{cases} x_D = x_s + \frac{3\varphi_{\omega_1}S}{2\pi} \\ y_D = y_s \end{cases} \quad (8)$$

式(8)对时间求导,则得秧针尖P点的相对运动速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_s = 4a\sin(\alpha - \varphi_H) \frac{1}{i_{12}^{\omega}} \dot{\varphi}_{\omega_1} + L\sin(\alpha - b - \varphi_3) \cdot \\ \quad (1 - i_{31}^H) \frac{1}{i_{12}^{\omega}} \dot{\varphi}_{\omega_1} \\ \dot{y}_s = -4a\cos(\alpha - \varphi_H) \frac{1}{i_{12}^{\omega}} \dot{\varphi}_{\omega_1} - L\cos(\alpha - b - \varphi_3) \cdot \\ \quad (1 - i_{31}^H) \frac{1}{i_{12}^{\omega}} \dot{\varphi}_{\omega_1} \end{cases} \quad (9)$$

插秧机的作业速度变化不能影响插秧株距,插秧机的作业速度和分插机构的旋转速度需联动,则传动系统中椭圆齿轮1的旋转角速度为

$$\dot{\varphi}_{\omega_1} = \frac{2000v\pi}{3S} \quad (10)$$

式中 v ——插秧机作业速度,m/s

3 非匀速三插臂分插机构参数分析

非匀速三插臂分插机构回转箱体的非匀速旋转是由传动系统中的2个椭圆齿轮来确定的,影响2个椭圆齿轮传动关系的参数为椭圆齿轮的偏心率 and 安装初始相位角。由式(3)和式(7)可知,分插机构箱体非匀速转动只影响插植臂回转箱体的旋转速度,秧针尖的具体坐标位置还是由分插机构箱体内非圆齿轮参数和分插机构初始安装相位角决定,因

此非匀速转动对秧针的静态轨迹没有影响,分插机构回转箱体非匀速转动对取秧位置、取秧角度、推秧角度和轨迹高度均没有影响。

以椭圆齿轮偏心率 $k_2 = 0.18$ 、齿数 20、模数 2、插植臂箱体与 y 轴的初始夹角 α 为 21° 、插植臂与回转箱体的初始夹角 b 为 34° 、 L 为 162 mm 为一组参数固定不变,只变化驱动回转箱体的椭圆齿轮 1 和椭圆齿轮 2 的偏心率 k_1 ,设驱动系统中的椭圆齿轮初始相位角 c 为 0° ,以其中一个插植臂为分析对象,得株距 150 mm 时传动系统中不同椭圆齿轮偏心率 k_1 变化对秧针尖运动轨迹的影响如图 2 所示。

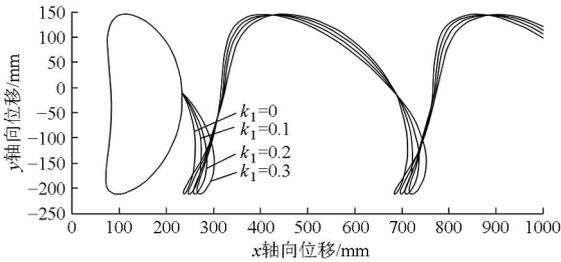


图 2 椭圆齿轮偏心率对秧针轨迹的影响

Fig. 2 Effect of eccentricity ratio of elliptical gear on trajectory of planting needle

由图 2 可知,在保持原有参数不变的条件下,在传动系统中增加一对椭圆齿轮,使分插机构旋转箱体实现非匀速转动,随着椭圆齿轮偏心率 k_1 的变大,在相同株距条件下,插秧穴口随着偏心率增大而增大。当株距为 150 mm,作业速度为 1.20 m/s 时,传动系统中椭圆齿轮偏心率 k_1 与秧针在取秧点和推秧点的速度关系如图 3 所示。

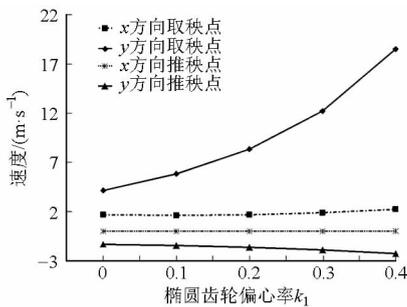


图 3 椭圆齿轮偏心率对取秧和推秧速度影响

Fig. 3 Effect of eccentricity ratio of elliptical gear on velocities of taking seedling and pushing seedling

由图 3 可知,随着传动系统中椭圆齿轮偏心率 k_1 的增大,插植臂秧针在取秧点和推秧点的速度都随着增加,但在取秧点 y 方向速度增加最明显。

保持非匀速三插臂分插机构插植臂椭圆齿轮参数和分插机构参数不变,设置驱动旋转箱体的椭圆齿轮 1 和椭圆齿轮 2 的偏心率 k_1 为 0.2,只改变椭圆齿轮初始相位角 c ,以其中一个插植臂为分析对

象,当株距为 150 mm 时不同椭圆齿轮初始相位角变化对秧针运动轨迹的影响如图 4 所示。

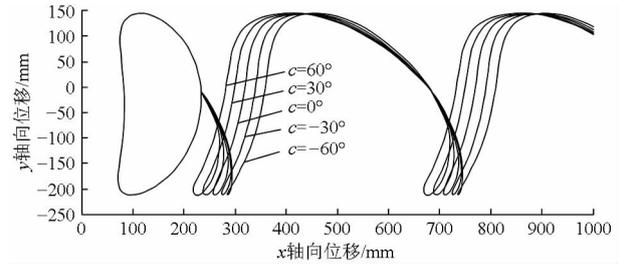


图 4 椭圆齿轮相位角对秧针轨迹影响

Fig. 4 Effect of phase angle of elliptical gear on trajectory of planting hoe

在保持传动系统中椭圆齿轮偏心率 k_1 不变的情况下,只改变 2 个齿轮安装的初始相位角 c ,对插秧穴口大小也有影响,因为初始相位角变化影响传动比,所以椭圆齿轮的初始相位角对插植臂秧针在取秧点和推秧点的速度也有影响。当椭圆齿轮偏心率 k_1 为 0.2,株距为 150 mm,作业速度为 1.20 m/s 时,初始相位角变化对插植臂秧针尖在取秧点和推秧点的速度以及插秧穴口大小的影响如图 5 所示。

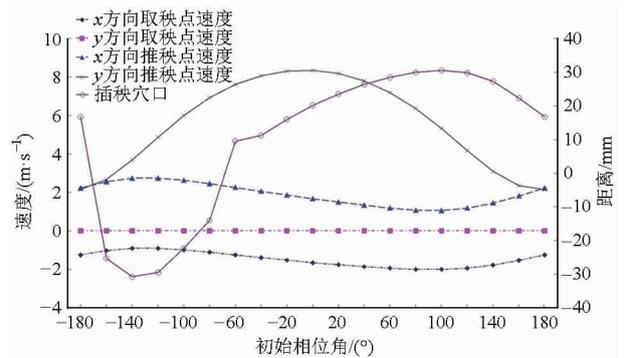


图 5 椭圆齿轮相位角对取推秧速度和插秧穴口影响

Fig. 5 Effect of phase angle of elliptical gear on velocities of taking seedling and pushing seedling and transplanter hole

由图 5 可知,在传动系统中椭圆齿轮 1 和偏心椭圆齿轮 2 的初始相位角从 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 变化,秧针在推秧点和取秧点 x 方向的速度变化不大,取秧点 y 方向的速度随初始相位角变化先增大后减小,当初始相位角为 0° 时秧针在 y 方向的取秧速度达到最大值;插秧穴口大小随初始相位角的变化较复杂,随着初始相位角的增大,插秧穴口有增有减,在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内,初始相位角与插秧穴口之间的关系比较明显,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内随初始相位角增大插秧穴口也增大,在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内随初始相位角增大插秧穴口减小。因此结合椭圆齿轮相位角 c 对 y 方向取秧点的速度和插秧穴口的影响,可实现非匀速三插臂分插机构在增大插秧穴口扩大株距适应性的同时不增加 y 方向的取秧线速度。

4 参数试验

4.1 试验样机及方案

试验样机:基于洋马 VP6D 型乘坐式插秧机底盘和秧箱移动机构等零部件,替换株距调节变速箱为非匀速传动齿轮箱,秧箱移动机构更换为 18/21/24(相对于常规两插臂分插机构为 12/14/16 回)3 种回数的传动箱体,根据设计的椭圆齿轮非匀速三插臂分插机构调节秧箱位置和角度。

试验方案:通过对分插机构的动静态轨迹分析可获得非匀速三插臂分插机构非匀速对株距、取插秧线速度等参数的影响。但分插机构参数对伤秧率、秧苗切块均匀性、田间栽植质量等的影响理论不易分析。采用对比试验和双因素试验方法,分析分插机构转速和秧箱移箱回数对伤秧率的影响,分析移箱机构回数变化对毯状苗切块均匀性的影响,通过田间对比试验,对比分析非匀速三插臂分插机构与对照常规二插臂插秧机的栽植质量。

4.2 试验条件和测试方法

试验条件:试验采用毯状盘育秧苗,苗高 205.7 mm,插前均匀度合格率 96.4%,空格率 3.2%,土厚 20.6 mm。试验于 2015 年 7 月 1 日在江苏盐城大冈镇进行,伤秧率和切块均匀性试验在室内进行,田间对比试验的试验田泥脚深度平均 182 mm,泥面与水面距离平均 23 mm,插秧深度 26 mm。

测试方法:伤秧率、漂秧率等栽植质量试验方法按文献[20-21]进行测试,秧苗切块均匀性采用称量法对每次取秧的秧块进行称量,求取切块质量的变异系数^[22-23],试验 3 次取平均值,田间对比试验进行 2 次取平均值。室内试验和田间栽植质量试验如图 6 和图 7 所示。



图 6 室内试验

Fig.6 Laboratory test

4.3 试验结果及分析

4.3.1 插植臂速度和秧箱移箱回数对伤秧率的影响

在室内分别进行非匀速三插臂分插机构和对照常规二插臂分插机构在移箱回数 18 回和三插臂分插机构在不同取秧回数和取秧速度下对伤秧率的影



图 7 田间试验

Fig.7 Field experiment

响试验,插秧株距设置为 12 cm。图 8 为移箱回数 18 回取秧面积相同时三插臂与对照二插臂分插机构在相同株距和机具前进速度下的伤秧率对比图,图 9 为三插臂分插机构在不同转速和不同移箱回数下的伤秧率图。

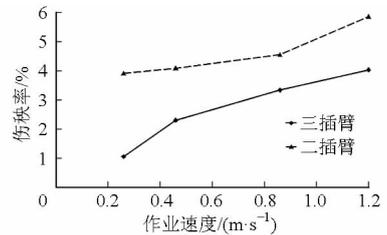


图 8 伤秧率对照曲线

Fig.8 Control curves of damaged seedling rate

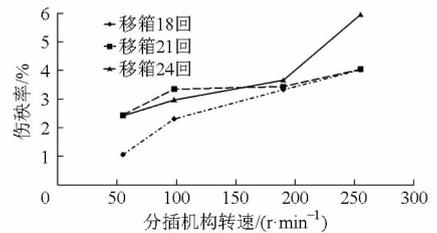


图 9 三插臂不同回数的速度伤秧率曲线

Fig.9 Effect of movement times and velocity of three planting bars on damaged seedling rate

由图 8 可见,机具前进速度、移箱回数和取秧面积相同条件下非匀速三插臂分插机构的伤秧率均低于对照常规二插臂分插机构,机具作业速度 0.26 m/s 时,三插臂的伤秧率为 1.06%,二插臂的伤秧率为 3.91%,2 种类型分插机构的伤秧率均随速度的增加而增大,当机具作业速度达到 1.20 m/s 时,三插臂分插机构的伤秧率增大到 4.03%,二插臂分插机构的伤秧率增大到 5.86%。运用 SPSS 软件采用 SNK 多重比较检验法对 2 种类型分插机构在不同速度下进行伤秧率方差分析,分析表明插植臂类型引起的伤秧率差异达到显著水平 ($P = 0.011 < 0.05$),速度差异引起的伤秧率差异也达到显著水平 ($P = 0.048 < 0.05$)。

由图 9 可见,在相同转速下移箱回数增加,伤秧率增大,这是由于增加移箱回数每次取秧面积减小,

增加了伤秧几率。同样运用 SPSS 软件采用 SNK 多重比较检验法对三插臂分插机构不同回数和转速对伤秧率的影响进行方差分析,分析表明,虽然随移箱回数增加伤秧率有所增大但差异不显著($P = 0.1 > 0.05$),转速增加对伤秧率的影响达到极显著($P = 0.007 < 0.01$)。

三插臂和对正常二插臂的差异主要是三插臂在相同株距和机具作业速度下转速低于二插臂分插机构,由此可得出分插机构转速增加伤秧率也随之增加,增加移箱回数取秧面积减小伤秧率有所增加,但移箱回数差异对伤秧率影响不显著。

4.3.2 插植臂速度和移箱回数对切块均匀性的影响

在室内进行毯状苗切块称量试验,称量每个切块的质量,求解每个参数下秧块质量的变异系数,以变异系数作为切块均匀性的评价指标。图 10 为移箱回数 18 回相同取秧面积时非匀速三插臂与对照二插臂分插机构在相同株距和机具作业速度下的切块均匀性差异对比图,图 11 为三插臂分插机构在不同转速和不同移箱回数下的切块质量变异系数图。

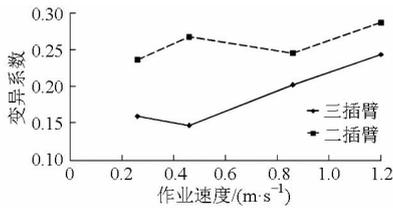


图 10 切块均匀性差异对照曲线

Fig. 10 Control curves of stripping-slicing homogeneity

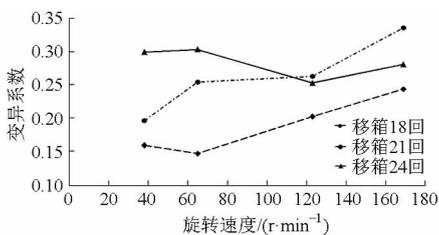


图 11 三插臂不同回数和速度对切块均匀性影响

Fig. 11 Effect of movement times and velocity of three planting bars on stripping-slicing homogeneity

由图 10 可见,在株距 12 cm,机具作业速度、移箱回数和取秧面积相同条件下非匀速三插臂分插机构的秧苗切块均匀性高于对正常二插臂分插机

构,机具作业速度 0.26 m/s 时,三插臂的切块质量变异系数为 0.159%,对照二插臂的秧苗切块质量变异系数为 0.236%,2 种类型的分插机构秧苗切块均匀性变异系数随速度增加不呈增加趋势,当机具作业速度达到 1.20 m/s 时,三插臂分插机构的切块质量变异系数为 0.243%,二插臂分插机构的切块质量变异系数为 0.287%。运用 SPSS 软件采用 SNK 多重比较检验法对 2 种类型分插机构在不同速度下秧苗切块均匀性进行方差分析,分析表明插植臂类型引起的切块质量差异达到显著水平($P = 0.031 < 0.05$),速度变化差异引起的切块均匀性差异不显著($P = 0.224 > 0.05$)。

由图 11 可见,在相同转速下移箱回数增加,切块均匀性不完全随移箱回数增加而增大,运用 SPSS 软件采用 SNK 多重比较检验法对非匀速三插臂分插机构在不同回数和转速下的切块均匀性进行方差分析,分析表明,移箱回数差异对切块均匀性的影响达到显著水平($P = 0.032 < 0.05$),对移箱回数单个因素变化进行多重比较表明,18 回移箱回数与 21 回和 24 回移箱回数差异对切块均匀性影响显著,但 21 回和 24 回移箱回数变化对秧苗切块均匀性影响不显著。转速增加对切块均匀性影响不显著($P = 0.277 > 0.05$)。

在相同转速条件下,为获得相同的切块面积,与三插臂配合的移箱机构运动速度较二插臂移动速度快。试验分析表明增大移箱速度没有影响切块均匀性,在 18 回移箱回数下还明显提高了切块均匀性,非匀速三插臂分插机构在移箱回数 21 回和 24 回时切块均匀性变差但变异系数与对照二插臂的切块均匀性差异不大;分插机构转速增加秧苗切块均匀性变差但影响不显著。

4.3.3 田间栽植质量对比试验

在田间分别对非匀速三插臂试验样机和对照常规二插臂插秧机进行田间栽植质量对比试验,当秧箱移箱回数为 18 回,取秧深度相同,插秧株距为 12 cm,分别在 0.25、0.68、1.20 m/s 3 个作业速度下进行漏插率、伤秧率、翻倒率和漂秧率试验,试验进行 2 次取平均值,得非匀速三插臂样机和对照二插臂插秧机在不同作业速度下的栽植质量对比如表 1 所示。

表 1 田间栽植质量对比

Tab.1 Comparison of field transplanting quality

作业速度/(m·s ⁻¹)	漏插率		伤秧率		翻倒率		漂秧率	
	三插臂	二插臂	三插臂	二插臂	三插臂	二插臂	三插臂	二插臂
0.25	0.694	0.926	2.052	3.862	0	0	0	0
0.68	1.389	1.157	3.831	6.271	1.389	1.157	0	0.101
1.20	0.926	0.926	4.253	9.638	2.951	3.001	0.101	0.303

由表1可见,非匀速三插臂分插机构与对照常规模二插臂分插机构在相同取秧面积、株距和作业速度条件下,伤秧率均随着作业速度的提高而增大,三插臂分插机构的插秧机的伤秧率明显低于对照二插臂的常规高速插秧机;翻倒率和漂秧率也随作业速度的增加而增加,采用SNK多重比较检验法进行方差分析表明三插臂与常规二插臂差异和速度差异对漂秧率和翻倒率的影响不显著,作业速度变化对漏插率影响也不显著。

5 结论

(1)采用椭圆齿轮实现分插机构回转箱体非匀速转动,随着椭圆齿轮偏心率增大,插秧穴口增大,但取秧点 y 方向的速度增加明显;椭圆齿轮初始相位对插秧穴口、取秧点和推秧点的线速度均有影响,在初始相位角为 0° 时,取秧点 y 方向速度达到最大,随着初始相位角的增大,插秧穴口有增有减,利用椭圆齿

轮偏心率和初始相位角对取秧点速度和插秧穴口的影响关系,可使非匀速三插臂分插既获得较大株距适应范围同时又不增加秧针在取秧点 y 方向的速度。

(2)分插机构伤秧率随转速增加而增大且影响显著,增加秧箱移箱回数取秧面积减小伤秧率增加,但移箱回数差异对伤秧率影响不显著。

(3)移箱回数差异对秧苗切块均匀性影响显著,非匀速三插臂分插机构在移箱回数18回下明显提高了切块均匀性,在移箱回数21回和24回时切块均匀性变差但变异系数与对照二插臂的切块均匀性差异不大。分插机构转速增加秧苗切块均匀性变差但影响不显著。

(4)非匀速三插臂分插机构的田间栽插质量优于对照二插臂分插机构,伤秧率均随作业速度的提高而增大,翻倒率和漂秧率也随作业速度的增加而增加但影响不显著,作业速度变化对漏插率影响也不显著。

参 考 文 献

- Weise Günther, Nagasaka Yoshisada, Taniwaki Ken. Research note (PM—power and machinery): an investigation of the turning behaviour of an autonomous rice transplanter[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000,77(2):233–237.
- Thomas V. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002,37(4):395–410.
- Nagasaka Yoshisada, Umeda Naonobu, Kanetai Yutaka, et al. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004,43(3):223–234.
- 包春江, 李宝筏. 日本水稻插秧机的研究进展[J]. 农业机械学报, 2004,35(1):162–166.
Bao Chunjiang, Li Baofa. Research development of rice transplanter in Japan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(1):162–166. (in Chinese)
- Bae K Y, Yang Y S. Design of a non-circular planetary-gear-train system to generate an optimal trajectory in a rice transplanter[J]. Journal of Engineering Design, 2007,18(4):361–372.
- 张敏, 周省长, 张文毅. 前插式双控差速行星系分插机构运动特性及参数分析[J]. 中国农业大学学报, 2014,19(2):169–173.
Zhang Min, Zhou Changsheng, Zhang Wenyi. Kinematical properties and parameter analysis of forward double controlled transplanting mechanism with differential planetary system[J]. Journal of China Agricultural University, 2014,19(2):169–173. (in Chinese)
- 李革, 李辉, 方明辉, 等. 旋转式分插机构非圆齿轮参数反求法求解[J]. 农业机械学报, 2011,42(8):46–49.
Li Ge, Li Hui, Fang Minghui, et al. Non-circular gear parameters of rotary transplanting mechanism calculated by reverse method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(8):46–49. (in Chinese)
- 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014,45(8):44–53.
Yu Xiaoxu, Zhao Yun, Chen Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):44–53. (in Chinese)
- 孙良, 祝建彬, 张国凤, 等. 水稻插秧机异形非圆锥齿轮宽窄行分插机构研究[J]. 农业机械学报, 2015,46(5):54–61.
Sun Liang, Zhu Jianbin, Zhang Guofeng, et al. Wide-narrow distance transplanting mechanism with special shaped non-circular bevel gears for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):54–61. (in Chinese)
- 尹建军, 赵匀, 张际先. 高速插秧机差速分插机构的工作原理及其CAD/CAE[J]. 农业工程学报, 2003,19(3):90–94.
Yin Jianjun, Zhao Yun, Zhang Jixian. Working principle and CAD/CAE of the separating-planting mechanism with differential elliptical gear system of high-performance rice transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(3):90–94. (in Chinese)
- 赵匀, 赵雄, 张玮炜, 等. 水稻插秧机现代设计理论与方法[J]. 农业机械学报, 2011,42(3):65–68.
Zhao Yun, Zhao Xiong, Zhang Weiwei, et al. Modern design theory and method of rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):65–68. (in Chinese)
- 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.

- two-phase flow in supercritical antisolvent process[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2012, 63:16–24.
- 11 Julien D, Stéphane V, Arnaud E, et al. Numerical investigations in Rayleigh breakup of round liquid jets with VOF methods[J]. *Computers & Fluids*, 2011, 50:10–23.
- 12 余留芳, 张金阳, 刘志农. 旋转喷头喷射外流场计算流体力学仿真分析[J]. *清洗世界*, 2011, 27(5): 15–18, 28.
Yu Liufang, Zhang Jinyang, Liu Zhinong. Rotating nozzle outflow field computational fluid dynamics simulation analysis[J]. *Cleaning World*, 2011, 27(5): 15–18, 28. (in Chinese)
- 13 王启武. 高压喷嘴的流场仿真分析[J]. *钢铁研究*, 2009, 37(4): 8–10.
Wang Qiwu. Simulation and analysis for flow field of high-pressure nozzle[J]. *Research on Iron & Steel*, 2009, 37(4): 8–10. (in Chinese)
- 14 Shinjo J, Umemura A. Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 36(7): 513–532.
- 15 韩迎龙, 李进贤, 曹琪, 等. 高压水射流撞击推进剂壁面稳态流场的数值模拟[J]. *火炸药学报*, 2010, 33(5): 55–59.
Han Yinglong, Li Jinxian, Cao Qi, et al. Numerical simulation on steady flow field of high pressure water-jet impacting propellant wall [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(5): 55–59. (in Chinese)
- 16 Lebas R, Menard T, Beau P A, et al. Numerical simulation of primary break-up and atomization: DNS and modelling study[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35(3): 247–260.
- 17 伊吉明, 白富强, 常青, 等. 撞击式射流速度特性及液滴粒度特性试验[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(6): 519–524.
Yi Jiming, Bai Fuqiang, Chang Qing, et al. Experiment on velocity and size distribution of droplets produced by an impinging liquid jet[J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(6): 519–524. (in Chinese)
- 18 朱英, 黄勇, 王方, 等. 横向气流中的液体圆形射流破碎实验[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(10): 2261–2265.
Zhu Ying, Huang Yong, Wang Fang, et al. Experiment on the breakup of round liquid jets in cross airflows[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(10): 2261–2265. (in Chinese)
- 19 万云霞, 黄勇, 朱英. 液体圆柱射流破碎过程的实验[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(2): 208–214.
Wan Yunxia, Huang Yong, Zhu Ying. Experiment on the breakup process of free round liquid jet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2): 208–214. (in Chinese)
- 20 曹建明, 蹇小平, 李跟宝, 等. 平面液体层碎裂过程实验研究[J]. *实验力学*, 2010, 25(3): 2261–2265.
Cao Jianming, Jian Xiaoping, Li Genbao, et al. Experimental investigation on break up process of planar liquid jet film[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(3): 2261–2265. (in Chinese)
- 21 李生勇, 李谋渭, 王邦文, 等. 圆形冲击射流破碎现象的实验和数值模拟研究[J]. *冶金设备*, 2006(4): 22–24, 44.
Li Shengyong, Li Mouwei, Wang Bangwen, et al. Numerical simulation on the breakup of round impinging jet[J]. *Metallurgical Equipment*, 2006(4): 22–24, 44. (in Chinese)
- 22 Nguyen Van Lanh. Based on Pro/E reconstruct sprinkler structure and investigations on internal flow characteristic of the sprinkler by numerical simulation and experiment methods [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011.

(上接第 38 页)

- 13 代丽, 孙良, 赵雄, 等. 基于运动学目标函数的插秧机分插机构参数优化[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 35–42.
Dai Li, Sun Liang, Zhao Xiong, et al. Parameters optimization of separating-planting mechanism in transplanter based on kinematics objective function[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(3): 35–42. (in Chinese)
- 14 李革, 李辉, 杨爱茜, 等. 傅立叶曲线非圆齿轮系分插机构运动学分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 126–131.
Li Ge, Li Hui, Yang Aiqian, et al. Kinematic analysis on Fourier curve non-circular gears transplanting mechanism [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 126–131. (in Chinese)
- 15 赵伟康, 高阳, 薛永风, 等. 前插式直齿双控制分插机构设计与运动分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8): 48–50.
Zhao Weikang, Gao Yang, Xue Yongfeng, et al. Design and kinematic analysis of double controlled forward transplanting mechanism with spur gears [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8): 48–50. (in Chinese)
- 16 张敏, 周省长, 张文毅. 相位不同椭圆齿轮行星系分插机构运动分析[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(1): 141–144, 120.
Zhang Min, Zhou Changsheng, Zhang Wenyi. Kinematic analysis of transplanting mechanism with differ phase elliptic gears transmission [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(1): 141–144, 120. (in Chinese)
- 17 季顺中, 李双, 陈树人, 等. 基于 ADAMS 的高速插秧机三插臂分插机构运动仿真[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(增刊): 82–85.
Ji Shunzhong, Li Shuang, Chen Shuren, et al. Research in kinematical simulation of three separating-planting bar of high-performance rice transplanter based on ADAMS [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(Supp.): 82–85. (in Chinese)
- 18 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- 19 姚文席. 非圆齿轮设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- 20 GB/T 6243—2003 水稻插秧机 试验方法[S]. 2003.
- 21 GB/T 20864—2007 水稻插秧机 技术条件[S]. 2007.
- 22 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 23 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.