

再生稻空间直取大偏移轮系宽窄行分插机构设计与试验

徐亚丹¹ 诸杨华^{2,3} 薛向磊⁴ 王磊^{2,3} 孙良^{2,3} 俞高红^{2,3}

(1. 杭州职业技术学院吉利汽车学院, 杭州 310018; 2. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018;
3. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018; 4. 浙江省农业科学院, 杭州 310018)

摘要: 为了解决再生稻生产过程中,收获机履带碾压头季稻稻桩的问题,本文从机械栽植角度入手,在单位种植面积有效株数一定的条件下,通过合理增大栽植行距以增大履带行走行距。提出一种可实现大偏移、直取秧和小侧向穴口移栽轨迹的空间行星轮系分插机构。首先,结合栽植农艺规划宽窄行移栽轨迹并确定其上若干关键位置与姿态,建立了空间 2R 开链机构 3 精确位姿空间几何约束设计方程,采用同伦算法进行求解;然后,基于求解参数拟合、优化得到开链机构输入轴与输出轴相对角位移曲线,确定机构传动比与非圆齿轮节曲线,复演得到满足移栽要求的空间轨迹;最后,通过依附非圆齿轮副将开链机构两转轴运动耦合,设计得到一种由平面非圆齿轮与斜齿轮组合传动的轮系式再生稻宽窄行分插机构,并进行虚拟仿真与样机试验,结果表明样机实际运动轨迹姿态与理论设计基本一致;取苗至推苗横向偏移量 ΔS_1 为 65.59 mm、侧向推苗角 γ_1 为 16.13°、侧向穴口宽度 ΔS_3 为 23.69 mm,满足再生稻宽窄行移栽要求,验证了轮系式宽窄行分插机构设计的可行性。

关键词: 再生稻; 分插机构; 行星轮系; 大偏移; 宽窄行

中图分类号: S223.91 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0083-08 OSID: 

Optimal Design and Experiment on Gear Train Wide and Narrow Row Transplanting Mechanism of Spatial Direct Extraction and Large Offset of Ratooning Rice

XU Yadan¹ ZHU Yanghua^{2,3} XUE Xianglei⁴ WANG Lei^{2,3} SUN Liang^{2,3} YU Gaohong^{2,3}

(1. Geely Automotive Institute, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China
2. College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
3. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China
4. Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problem of the first season rice pile rolled by the track of the harvester in the production process of ratooning rice, a spatially planetary gear train planting mechanism with large deviation, direct harvesting and small lateral hole transplanting trajectory was proposed, starting from the perspective of mechanical planting with the condition of the effective number of strains per unit planting area and the crawler walking row distance by reasonably increasing the planting row spacing. Firstly, planning the wide and narrow rows trajectory and determining the key position posture by combining with planting agronomy, geometric equations for key 3 poses containing spatial constraints were established by constructing a simplified spatially open-chain 2R mechanism model. The parameters were solved by using homotopy algorithm. Then, the relative angular displacement relationship between the input and output axis of the open chain mechanism was obtained based on fitting and optimizing parameters. The mechanism drive ratio and the non-circular gears pitch curve were determined. The spatial trajectory that meets the transplanting requirements was recovered. Finally, a kind of wide and narrow rows transplanting mechanism of ratooning rice was designed by coupling the motion of the two rotating axes of

收稿日期: 2022-04-14 修回日期: 2022-07-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51975534)、浙江省重点研发计划项目(2022C02048)、浙江省公益性技术应用研究计划项目(LGN21E050001)和杭州市农业与社会发展一般项目(20201203B92)
作者简介: 徐亚丹(1981—),女,副教授,主要从事农业机构设计与优化研究,E-mail: xuyadan2005@163.com
通信作者: 孙良(1981—),男,教授,主要从事农业机构设计与优化研究,E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

the open chain mechanism with the non-circular gear pair, which was driven by the plane non-circular gear and helical gear. Virtual simulation and prototype test were carried out, and the results showed that the actual motion trajectory and attitude of the prototype were basically consistent with the theoretical design. The spatial track satisfying the characteristics of wide and narrow rows transplanting of regenerative rice with large offset from taking seeding to pushing seeding ΔS_1 was 65.59 mm, side push seedling angle γ_1 was 16.13° and side hole width ΔS_3 was 23.69 mm, which verified the feasibility of gear train wide and narrow rows transplanting mechanism design.

Key words: ratooning rice; transplanting mechanism; gear train; large offset; wide and narrow rows

0 引言

再生稻是采用一定的栽培管理措施,使头季水稻收割后稻桩上的休眠芽萌发生长成穗而再收获一季的水稻种植模式^[1-2],已成为了我国光温资源一季有余两季不足稻区及“双改单”稻区提高复种指数、增加收获面积、稳定稻谷总产量的一种有效种植制度^[3]。然而现有插秧机普遍采用 300 mm 的行距,与水稻收获机履带宽度及轨距不匹配,收获时无法避免对稻桩的碾压,不利于机械收获作业且影响下一茬产量^[4]。虽然通过减小履带宽度、调整履带轨距可解决底盘对行碾压的问题,但过小的履带宽度必然增大履带底盘的接地比压,机器下陷严重,不适用于喂入量较大的收获机^[5]。

在不改变传统插秧机秧箱结构、配套育秧流水线的前提下实现插秧机的宽窄行栽植^[6-8],即在等行距 300 mm 秧门下,完成宽行与窄行种植。解决该问题的关键在于研发一种具有空间直取秧、大偏移、小侧向穴口插秧轨迹的分插机构。井上强^[9]针对日本水稻密植要求提出了通过更改平面分插机构在移栽机上的布置方式(秧门间距发生变化)来实现水稻密植,行间距由 300 mm 变为 210 mm;小西达也等^[10-11]突破平面运动轨迹的限制,研制了空间轨迹的毯苗摆臂式密植和锯齿形密植分插机构,解决了等秧门间距下的水稻密植问题,但这类分插机构结构复杂,未见推广应用。

国内农机企业根据宽窄行要求在秧箱中插入宽隔板改变秧箱宽度,并按宽窄行形式布置分插机构^[12]。由于更改了传统移栽机的部件,且窄秧盘育秧与传统流水线育秧不匹配,因此难以大力推广。文献[13-15]在不改变传统育秧流水线的前提下设计了倾斜式宽窄行分插机构,改变了传动箱与分插机构之间动力连接方式,通过斜齿交错啮合、万向节连接、锥齿啮合等方式将分插机构斜置,不改变传统移栽机秧门的位置,其轨迹与地面形成“八”字形,达到宽窄行种植效果。但存在斜取秧伤根、取秧量不均匀等问题。孙良等^[16-18]将空间非圆齿轮副引入行星轮系分插机构,提出了空间轨迹行星轮系

分插机构设计思路。祝建彬等^[19]设计了一种斜齿交错非圆行星轮系分插机构,实现了内偏式空间轨迹,同时满足直取秧和小穴口插秧要求,但在试验过程中发现,轨迹内偏式栽插大苗(苗高大于 20 cm)时倒苗现象比较严重。

因此,为了更好地解决空间行星轮系式宽窄行分插机构设计兼顾直取秧式、轨迹向外大偏移、侧向小穴口的问题,同时实现宽行 430 mm,窄行 170 mm 间隔栽植的设计目标,即侧向偏移量为 65 mm 的空间轨迹宽窄行分插机构设计需求,本文对基于移栽作业轨迹上若干关键点位姿信息的空间行星轮系机构进行研究,设计具有空间直取秧、侧向大偏移及小穴口宽窄行分插机构,以期解决再生稻生产过程中收获机履带碾压头季稻稻桩的问题。

1 移栽轨迹规划

再生稻宽窄行移栽轨迹特征如图 1 所示,水稻毯苗宽窄行分插机构的轨迹规划步骤为^[20-21]:

(1)“斜取秧”时秧针撕苗会影响周边秧苗的根须,还会造成取秧不均匀和在毯苗起始位位置和结束位置取不到秧苗的问题。取秧时刻秧针相对毯状苗的位置角 δ ,不仅影响毯苗两端秧块的均匀性,也易引起秧针与秧箱、秧门以及护苗板的干涉;而 ε 是由于取秧过程中秧针运动轨迹倾斜所致, ε 越大秧爪对秧根的损伤越严重,影响秧苗返青,从而影响产量。因此在设计再生稻宽窄行星轮系分插机构时,为保证秧苗从秧箱顺利取出并减少伤苗率,达到

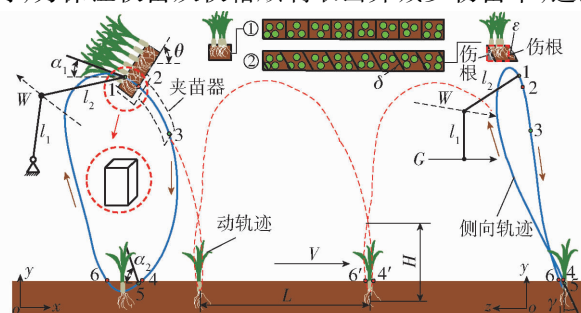


图 1 再生稻宽窄行移栽轨迹特征

Fig. 1 Characteristics of transplanting track of ratooning rice in wide and narrow rows

“直取秧”效果,从结构设计的角度上减小 δ ,使其在取秧时刻正对秧门($\delta=0^\circ$),在规划空间移栽轨迹时尽量减少取秧阶段秧针在 z 向距离上的偏移以此减小 ε ,即:轨迹位置1到位置2表示秧针取苗阶段,其 z 向偏移量满足 $0\leq|z_2-z_1|\leq 5\text{ mm}$;位置2到位置3表示秧苗在护苗器中的夹紧过程,其 z 向偏移量满足 $0\leq|z_3-z_2|\leq 10\text{ mm}$ 。

(2)推秧时秧针与 y 轴的夹角(推秧侧向偏角 γ_1)影响秧苗直立度,角度过大秧苗容易倒伏。在保证直取秧的前提下(秧针在位置1正对秧门),推秧侧向偏角 γ_1 应在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 。

(3)从位置1到位置3表示秧针完成取苗且秧苗被夹苗器夹紧这一过程,为避免移栽臂发生大幅度转动与护苗板干涉损坏秧苗,在此阶段秧针姿态位移变化需尽量小。所以从位置1到位置3轨迹的 z 向偏移量应尽量小,满足 $0\leq|z_3-z_1|\leq 15\text{ mm}$;而从位置1到位置5所表示的轨迹总偏移量与宽窄行的偏移量有关,本文所涉及的水稻宽窄行移栽模式宽行行距430 mm,窄行行距170 mm,即取苗点1到推苗点5的 z 向偏移量为 $z_5-z_1=65\text{ mm}$ 。

(4)为了保证植苗效果,分插机构在运动过程中,移栽轨迹形成的前进穴口长度($x'_6-x'_4$)应在10~25 mm之间;侧向穴口宽度(z_6-z_4)应在10~30 mm之间。

(5)在分插机构运动过程中,为保证秧苗的株间距,秧苗栽植距离 L 应在180~200 mm之间;为防止秧苗被移栽臂推倒,动轨迹所形成的环扣高度 H 应大于秧苗高度。

水稻移栽质量与移栽臂在取苗起始、取苗结束、推苗这3个关键位置的姿态密切相关。这3个位姿点分别对应图1中的点1、3、5。根据图1所示参考系,可用 4×4 的齐次矩阵描述这3个点的位置与姿态^[22-24],本文将通过这3个空间位姿点求解再生稻毯苗宽窄行分插机构的参数。

2 空间2R机构运动综合模型

若不考虑齿轮副约束,如图2所示,将单行星架空间轮系分插机构简化为空间开链2R机构^[25]。 l_1 为轮系的行星架长度,即太阳轮轴心到行星轮轴心的距离; l_2 为行星轮轴心到移栽臂秧针尖点 C 的距离。 $G=(G, A\times G)$ 和 $W=(W_i, B_i\times W_i)$ 分别表示分插机构的输入轴和输出轴,其中 G 为输入轴的方向向量, A 为输入轴上的一点, W_i 为输出轴的方向向量, B_i 为输出轴上的一点, A 和 B_i 分别为两轴的公垂线与各自轴的交点,输入轴和输出轴的夹角为 σ 。机构运动时,杆件1绕输入轴 G 转动,杆件2相

对杆件1绕着输出轴 W 转动,在输入轴和输出轴的共同作用下移栽臂秧针尖点 C 形成轨迹 M 。

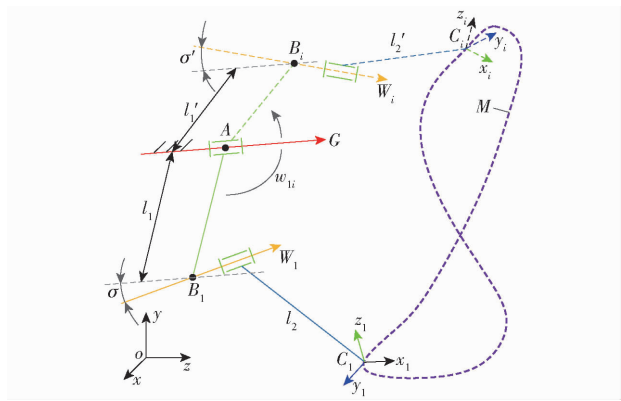


图2 空间2R机构运动轨迹图

Fig. 2 Trajectory diagram of spatial 2R mechanism

$C_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示轨迹 M 上的点,选定 n 个点设计其位姿为

$$T_i = \begin{bmatrix} R_i & d_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 R_i —— 3×3 姿态矩阵

d_i —— 3×1 位置向量

选第1个位姿点 T_1 为参考点,空间开链2R机构从 C_1 运动至 $C_i (i=2, 3, \dots, n)$ 的刚体相对位移矩阵表示为

$$T_{1i} = T_i T_1^{-1} = \begin{bmatrix} R_{1i} & d_{1i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

空间2R机构在运动过程中,根据其输入轴 G 与输出轴 W_i 的交错角 σ 恒定不变,即 $\sigma=\sigma'$,得到角度约束方程

$$W_i^T G = W_1^T G \quad (i=2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

机构在转动过程中始终保持杆长不变($l_1=l'_1$),得到定杆长约束方程

$$(B_1 - A)^T (B_1 - A) = (B_i - A)^T (B_i - A) \quad (i=2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

直线 BA 的运动平面应同时垂直于两转动轴线,即

$$G^T (B_i - A) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$W_i^T (B_i - A) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中 $B_i = T_i B_1$, $W_i = R_i W_1 (i=2, 3, \dots, n)$ 。

为保证 G 轴与 W_i 轴夹角方向恒定,需要增加等矩约束方程

$$G^T [(B_1 - A) W_1] = G^T [(B_i - A) W_i] \quad (i=2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

根据方向余弦公式,输入轴 G 的方向向量 G 、转动轴 W_i 的方向向量 W_i 都应满足方向向量约束

$$GG^T - 1 = 0 \quad (8)$$

$$W_i W_i^T - 1 = 0 \quad (9)$$

分析可知,空间 2R 链由输入轴 G 和输出轴 W_1 以及它们的公垂线与各自的交点 A 、 B_1 定义,将其设为 $\boldsymbol{G}=(g_x, g_y, g_z), \boldsymbol{W}_1=(w_x, w_y, w_z), \boldsymbol{A}=(a_x, a_y, a_z), \boldsymbol{B}_1=(b_x, b_y, b_z)$ 。建立含有 12 个未知参数的空间 2R 机构约束方程,因为等距约束方程(7)中含有定杆长约束方程(4),所以在联立约束方程时只需建立等矩约束方程即可。联立方程(3)、(5)~(7)可得 $4n$ 个约束方程。当 $n=3$ 时约束方程个数等于未知数个数,可实现空间 2R 机构参数的精确求解。

3 分插机构设计

3.1 分插机构参数求解

依据水稻毯苗宽窄行分插机构取苗、带苗、植苗等动作设计要求,确定移栽臂在取苗起始、护苗结束、推苗这 3 个关键位置时的 4×4 位姿齐次矩阵 $\boldsymbol{T}_1, \boldsymbol{T}_2, \boldsymbol{T}_3$;其中 $\boldsymbol{T}_1, \boldsymbol{T}_2$ 共同约束取苗过程(包括秧针在夹苗器内)的轨迹姿态特征, $\boldsymbol{T}_3$ 主要约束推苗位置、推苗角以及推苗姿态变化。

在全局坐标系下具有 x_i, y_i, z_i 3 个局部坐标轴描述其姿态,在全局坐标系下 x_i 的投影与 x, y, z 坐标轴的夹角表示为 1×3 的向量 $\boldsymbol{R}_{xi}$,同理可得 $\boldsymbol{R}_{yi}, \boldsymbol{R}_{zi}$ 。 $\boldsymbol{d}_i$ 表示在全局坐标系下点的位置,如表 1 所示。

表 1 关键 3 位姿点的参数

Tab.1 Parameters of key three pose points

位姿点	$\boldsymbol{R}_{xi}$	$\boldsymbol{R}_{yi}$	$\boldsymbol{R}_{zi}$	$\boldsymbol{d}_i$
1	$\begin{bmatrix} -0.952\ 3 \\ 0.190\ 6 \\ 0.238\ 4 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} -0.240\ 1 \\ 0.950\ 0 \\ 0.199\ 5 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0.188\ 5 \\ -0.247\ 2 \\ 0.950\ 4 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 172.495\ 8 \\ 179.127\ 5 \\ -179.839\ 5 \end{bmatrix}$
2	$\begin{bmatrix} -0.937\ 1 \\ 0.266\ 1 \\ 0.266\ 0 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0.314\ 2 \\ 0.925\ 0 \\ 0.213\ 5 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0.152\ 2 \\ -0.271\ 1 \\ 0.950\ 4 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 239.221\ 3 \\ 93.368\ 9 \\ -167.049 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} -0.484\ 0 \\ 0.865\ 2 \\ 0.131\ 4 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} -0.818\ 5 \\ 0.500\ 6 \\ 0.281\ 7 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} -0.309\ 5 \\ 0.028\ 8 \\ 0.950\ 5 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 170.410\ 8 \\ -202.121\ 2 \\ -114.088\ 2 \end{bmatrix}$

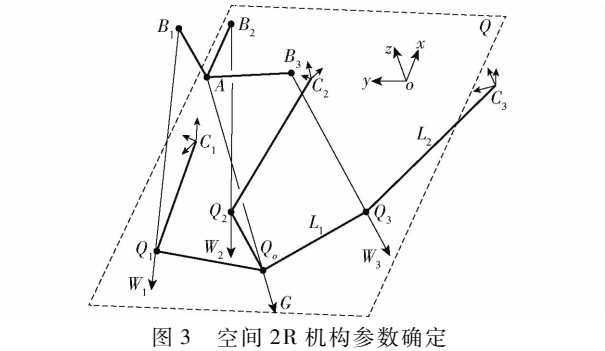
将 $\boldsymbol{T}_1, \boldsymbol{T}_2, \boldsymbol{T}_3$ 代入开链 2R 机构的约束方程组,利用多胞体同伦算法软件 HOM4PS 2.0 求解获得空间 2R 机构参数的 2 组实数解,如表 2 所示。综合考虑分插机构行星架安装位置和移栽臂尺寸等要求,选择第一组解为初始设计参数。

但该组解中杆 1 长度 $l_{AB_1}=71.63\text{ mm}$,杆 2 长度 $l_{B_1C_1}=275.89\text{ mm}$,杆 2 长度不合理的情况下若设计成移栽臂易发生干涉现象。因此需要沿空间 2R 机构的输入轴 G 建立投影平面 Q (图 3),固定点 A 在平面 Q 上的投影为点 Q_0 ,将铰链点 B_i 沿着转动轴 W_i 的方向投影到平面 Q 上形成点 Q_i ,连接 Q_0 和 Q_i 即为新的杆 1 杆长 L_1 (行星架长度),连接点 Q_i 和

表 2 方程参数实数解

Tab.2 Real number solutions of equation parameters

空间 2R 机构参数		方程实数解	
		1	2
$\boldsymbol{G}$	g_x	0	0.092 5
	g_y	0	0.229 6
	g_z	1	0.968 9
$\boldsymbol{A}$	a_x	-0.166 5	-76.395 4
	a_y	0.196 1	50.698 4
	a_z	46.899 1	503.904 0
$\boldsymbol{W}_1$	w_x	-0.187 5	-0.966 5
	w_y	0.248 2	0.174 1
	w_z	-0.950 4	-0.188 8
$\boldsymbol{B}_1$	b_x	56.911 2	-38.386 0
	b_y	43.470 1	215.403 4
	b_z	46.960 4	461.246 5



在杆长不变的情况下,构建空间 2R 机构并复演末端点 C 的轨迹,空间 2R 机构可依次经过点 $C_i(i=1,2,3)$ 。图 5a 为空间 2R 机构在 xoy 平面的复演情况,图 5b 为空间 2R 机构在 yoz 平面的复演情况。再生稻宽窄行行星轮系分插机构的行星架(杆 1)在一个转动周期($0 \sim 2\pi$)内作匀速转动,而移栽臂(杆 2)相对行星架(杆 1)作变速转动。由于行星轮系式分插机构移栽臂和行星架之间的运动不能出现回转现象,所以回转周期内两者的相对角位移需具有单调性。如图 5 所示,杆 2 与杆 1 的相对角位移为单调的情况下,灰色区域为 2R 机构的工作空间;轨迹线 1、2、3 分别为不同单调相对角位移下,空间 2R 机构形成的空间移栽轨迹。

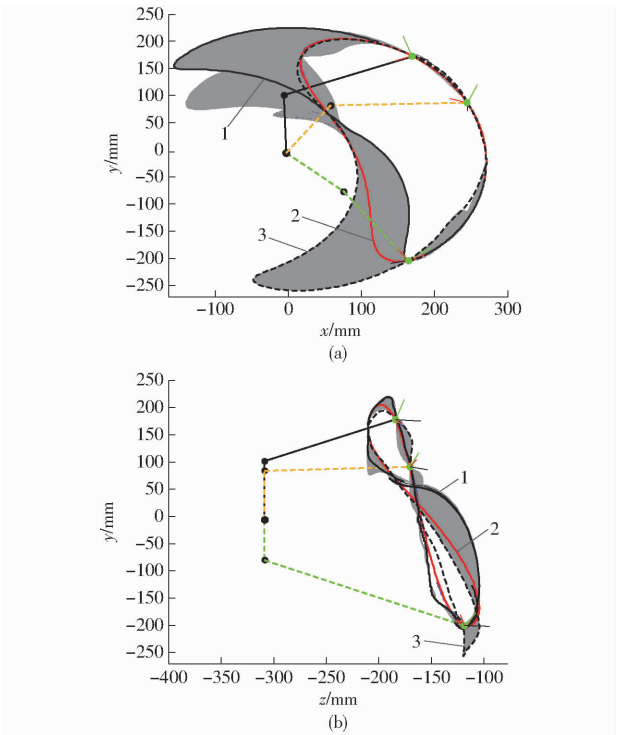


图 5 分插机构可行域

Fig.5 Feasible area of transplanting mechanism

图 5 中 3 条移栽轨迹线分别对应的相对角位移和传动比曲线如图 6、7 所示。如图 6 所示 3 条轨迹线的相对角位移均单调且都经过给定的关键 3 个位姿点;由图 5 可知,轨迹线 1 空回程段弧度过大,有可能造成移栽臂与秧箱的碰撞,且在推苗时侧向穴口较大。轨迹线 3 在推苗后继续向下运动,轨迹最低点后移,影响植苗效果;如图 7 所示,轨迹线 1 的传动比差值较大,轨迹线 3 的传动比波动较多,均不利于非圆节曲线的生成,非圆齿轮凹凸性较差。综合移栽轨迹和传动比,最终选择轨迹线 2 作为符合设计要求的移栽轨迹。

3.3 非圆齿轮节曲线优化

通过机构总传动比 I 和一级非圆齿轮中心距

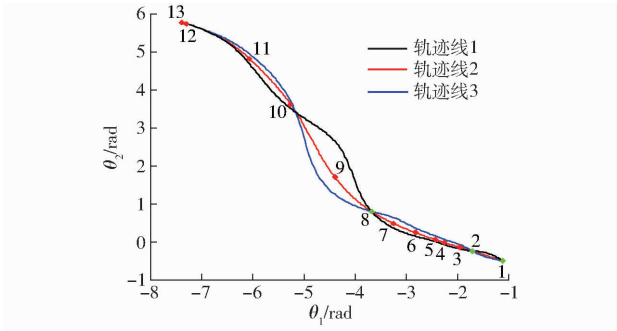


图 6 相对角位移曲线对比

Fig.6 Comparison of relative angular displacement curves

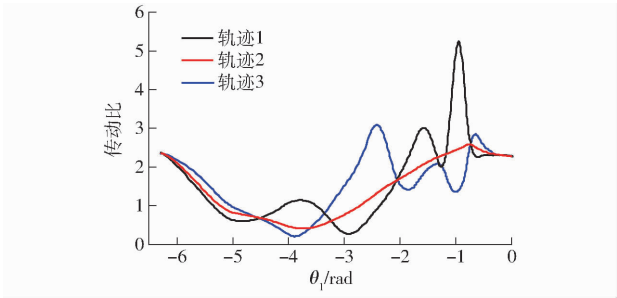


图 7 传动比曲线对比

Fig.7 Comparison diagram of transmission ratio curve

$L_1/2$ 得到非圆齿轮曲率半径 ρ , 根据 ρ 可判别非圆齿轮的凹凸性^[26]。

经计算,太阳轮凸性指标 $p_1 \in [-0.5047, 2.5760]$, 中间非圆齿轮的凸性指标 $p_2 \in [-0.5030, 2.5785]$, 因此选取 $p_1 = -0.5047$ 作为一级非圆齿轮的凸性指标,并在此数值附近寻找其他凸性指标差的点。根据这些点反推到传动比所对应的点,进而找到相对角位移曲线上所对应的点,其所在区域在图 6 轨迹线 2 中型值点 3~4 之间、5~6 之间和 6~7 之间。

在凸性较差点对应的角位移型值点所在区域,分别设置 3 个黑心点 X_1 、 X_2 和 X_3 。调节这 3 个型值点的横坐标达到优化非圆齿轮节曲线的效果。根据角位移曲线的单调性,该 3 个型值点横坐标满足

$$\begin{cases} \mu_3 \leq X_1 \leq \mu_4 \\ \mu_5 \leq X_2 \leq \mu_6 \leq X_3 \leq \mu_7 \end{cases}$$

式中 μ_i ——角位移曲线中型值点 3~7 横坐标

可以计算 X_1 、 X_2 和 X_3 对应点及其附近的向径之差并建立优化目标函数

$$f(X_1, X_2, X_3) = Y$$

$$\text{其中 } Y = \sum_j^M (|r_{1(j+20)} - r_{1j}| + |r_{1(j-20)} - r_{1j}| + |r_{2(j+20)} - r_{2j}| + |r_{2(j-20)} - r_{2j}|)$$

其中 $r_{1(j+20)} - r_{1j}$ 和 $r_{1(j-20)} - r_{1j}$ 分别表示太阳轮节曲线上第 j 点与附近两个点的向径之差; $r_{2(j+20)} - r_{2j}$ 和 $r_{2(j-20)} - r_{2j}$ 分别表示中间轮非圆齿轮节曲线上第 j 点与附近两个点的向径之差。

适应度函数的收敛性和每代对应的适应度如图 8 所示。如表 3 所示,通过多次优化计算和数据结果筛选最终得到的一组最优值, X_1 、 X_2 和 X_3 的上下限值分别为图 6 所示的角位移曲线上型值点 3 ~ 4 之间、5 ~ 6 之间和 6 ~ 7 之间的横坐标。

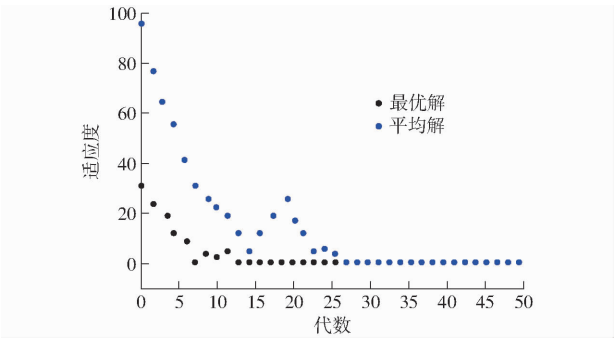


图 8 遗传算法适应度
Fig. 8 Convergence diagram of genetic algorithm

表 3 遗传算法优化后参数值

Tab.3 Parameter values optimized by genetic algorithm

参数	最优解	上限值	下限值
X_1	-1.911 6	-1.674 9	-2.230 0
X_2	-2.561 0	-2.401 6	-2.790 2
X_3	-3.316 6	-2.790 2	-3.645 3

得到太阳轮凸性指标 $p'_1 \in [0.404\ 5, 2.576\ 0]$, 中间非圆齿轮凸性指标 $p'_2 \in [0.413\ 0, 2.578\ 5]$, 因此选取 $p'_1 = 0.404\ 5$ 作为优化后一级非圆齿轮凸性指标, 与上述所得凸性指标 $p_1 = -0.504\ 7$ 比较, 从图 9 可以看出, 优化后相对角位移曲线变化不明显; 从图 10 可以看出, 非圆齿轮节曲线的凸性变好, 圆度变优。

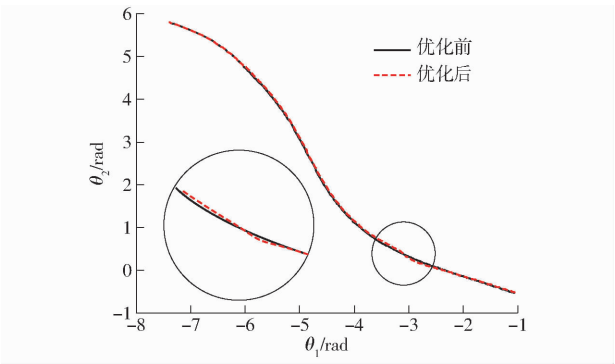


图 9 优化前后角位移对比
Fig. 9 Comparison of angular displacement before and after optimization

利用优化后的参数复演移栽轨迹。如图 11 所示, 移栽轨迹在优化目标区域发生明显变化: xoy 平面内轨迹更为圆滑, $yo z$ 平面内轨迹的侧向穴口略微增大。虽然优化后移栽轨迹发生变化, 但优化轨迹经过给定的空间 3 个关键位姿点; 虽然侧向穴口略

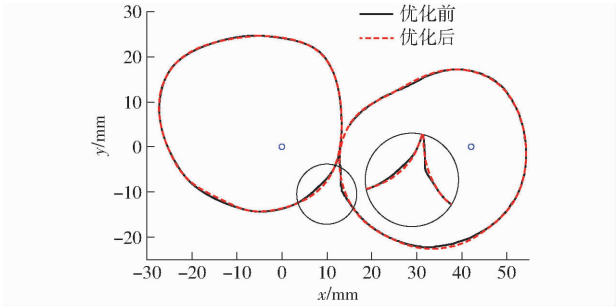


图 10 优化前后节曲线对比
Fig. 10 Comparison of pitch curves before and after optimization

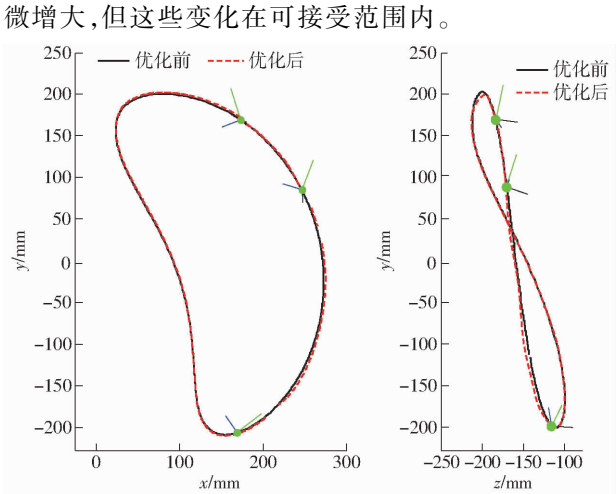


图 11 优化前后移栽轨迹对比
Fig. 11 Comparison of transplanting trajectories before and after optimization

4 分插机构仿真与试验

4.1 轨迹与姿态验证

对机构进行虚拟仿真, 当分插机构处于取秧阶段, 移栽臂取苗角 α_1 为 1° ; 当分插机构取苗结束离开夹苗器时, 移栽臂角度 α_2 为 26.54° , 且该点与取苗点的 z 向偏移量 ΔS_2 为 13.34 mm ; 分插机构在推苗过程中, 移栽臂推苗角 α_3 和推苗侧向角 γ_1 分别为 75.26° 和 16.13° , 移栽轨迹取苗点和推苗点的 z 向偏移量 ΔS_1 为 65.59 mm , 分插机构形成的侧向穴口宽度 ΔS_3 为 23.69 mm 。对比图 12 与图 11 发现, 秧针末端尖点形成的移栽轨迹与优化后的理论轨迹基本一致, 仿真所得分插机构空间关键 3 位姿及移栽轨迹与理论数据基本一致, 从而验证了分插机构仿真的正确性。

在空转试验过程中用高速摄像机分别在空转试验台正面及侧面跟踪拍摄移栽臂秧针尖点的位置和姿态, 记录拍摄实物样机在 xoy 平面和 $yo z$ 平面的运动轨迹。然后将生成的视频导入图像视频后处理软件 PCC, 以移栽臂秧针尖点为追踪目标点, 逐帧描绘其在高速运转情况下所形成的空间移栽轨迹。如

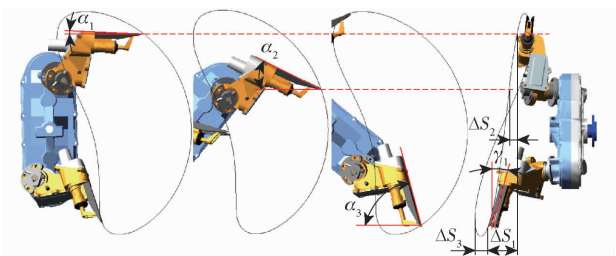


图 12 移栽机构关键 3 位姿仿真

Fig. 12 Simulation of key three positions and postures of transplanting mechanism

图 13 所示,将实际空间移栽轨迹图像导出并与虚拟样机仿真轨迹进行对比分析,发现二者形状基本一致。比较宽窄行轮系分插机构的空间移栽轨迹与理论轨迹、虚拟样机仿真轨迹,发现轨迹形状基本一致。存在细微的偏差可能是由于齿轮间隙、加工精度、装配误差等问题导致,偏差在合理范围内。空转试验验证了基于空间移栽轨迹关键 3 位姿的宽窄行轮系分插机构参数反求方法正确性和机构设计可行性。

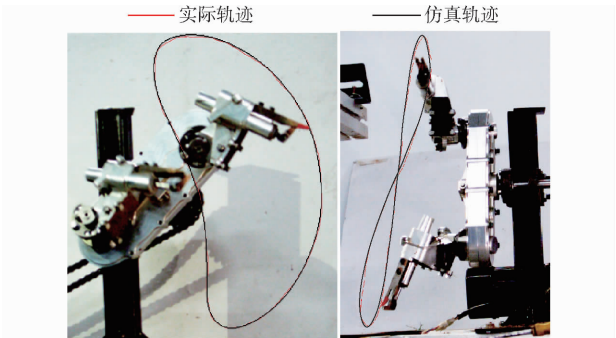


图 13 实际轨迹与仿真轨迹对比

Fig. 13 Comparison between actual trajectory and simulation trajectory

4.2 取苗试验

试验时将秧苗放置在秧箱上,将装配好的样机安装在试验台上,调节试验台电机的输出转速以控制再生稻宽窄行分插机构在转速 45、60、90 r/min 下取苗,因设计的分插机构为双臂式,所以取苗速度为 90、120、180 次/min。

通过高速摄像机拍摄实际移栽过程中秧针的位置姿态(图 14),利用 PCC 视频处理软件中的两点法测角度,以 x 轴正向为基准测得的仿真角度分别为 179.12°、103.26°和 73.55°,经过换算得到实际取苗角、推苗角、推苗侧向偏角和取推苗差角分别为 0.88°、76.74°、16.45°和 75.86°,与仿真角度(1°、

75.26°、16.13°和 74.26°)基本一致,验证了分插机构取推苗位姿满足设计要求。

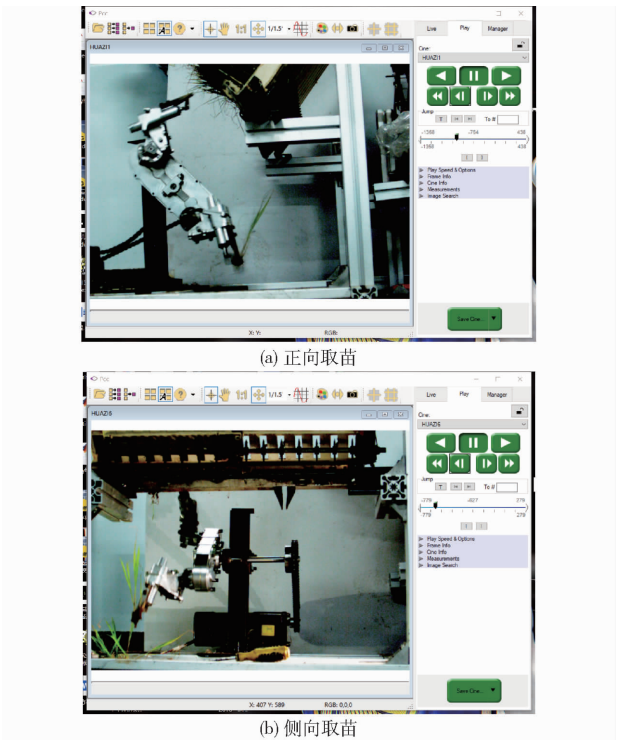


图 14 取苗试验高速摄像结果

Fig. 14 High-speed camera results of taking seedling tests

5 结论

(1)根据再生稻大偏移量宽窄行插秧种植要求,规划设计了符合要求的空间移栽轨迹;并以其上 3 个关键位姿数据为约束,建立了空间 2R 开链机构几何约束求解模型,采用同伦算法求解得到符合要求的机构参数。

(2)基于求解得到的机构参数,拟合得到开链机构输入与输出轴相对角位移曲线,确定机构总传动比,复演得到满足移栽要求的空间轨迹,并基于遗传算法对非圆齿轮节曲线进行了优化,在不改变关键轨迹段的情况下得到了合理的非圆齿轮节曲线。

(3)设计了一种非圆齿轮与交错斜齿轮组合传动的空间行星轮系宽窄行分插机构,虚拟仿真与样机试验结果表明,机构实际运动轨迹姿态与理论设计基本一致;其取苗至推苗横向偏移量 ΔS_1 为 65.59 mm、侧向推苗角 γ_1 为 16.13°、侧向穴口宽度 ΔS_3 为 23.69 mm,满足再生稻宽窄行移栽要求,验证了轮系式宽窄行分插机构设计可行性。

参 考 文 献

[1] 蒋鹏,周虹,徐富贤,等. 川东南轻简栽培方式再生稻产量构成特征和经济效益分析[J]. 中国稻米, 2021, 27(1): 80-84. JIANG Peng, ZHOU Hong, XU Fuxian, et al. Analysis on yield components and economic efficiency of ratoon rice under simplified cultivation in southeast Sichuan Province[J]. China Rice, 2021, 27(1): 80-84. (in Chinese)

[2] 王尚明,张崇华,胡萍,等. 基于头季稻+再生稻产量的再生稻关键技术试验[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(20): 89-97.

- WANG Shangming, ZHANG Chonghua, HU Ping, et al. Experimental research on key technology of ratooning rice based on yield of first season rice plus ratooning rice[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(20): 89–97. (in Chinese)
- [3] 肖森. 再生稻头季机收对再生季产量和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- XIAO Sen. Effects of machine harvesting in the first season of ratooning rice on yield and quality in ratooning season[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [4] 雷志强. 履带式再生稻收割机底盘的设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- LEI Zhiqiang. Design and test of chassis of crawler type reclaimed rice harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [5] 郑常, 彭少兵. 预留机收行种植对再生稻头季和再生季产量和米质的影响[C]//中国作物学会第十九届中国作物学会学术年会论文摘要集, 2020.
- [6] 朱德泉, 储婷婷, 武立权, 等. 宽窄行配置对机插中晚稻生长特性及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 102–112.
- ZHU Dequan, CHU Tingting, WU Liquan, et al. Effects of wide and narrow row configuration on growth characteristics and yield of machine inserted middle and late rice[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 102–112. (in Chinese)
- [7] 周巍, 王万洪, 郑普兵, 等. 宽窄行栽培技术在再生稻上的应用研究[J]. 中国稻米, 2019, 25(2): 72–74.
- ZHOU Wei, WANG Wanhong, ZHENG Pubing, et al. Application of wide and narrow row cultivation technology in ratooning rice[J]. China Rice, 2019, 25(2): 72–74. (in Chinese)
- [8] 王洁, 周有炎, 邢志鹏, 等. 南粳9108机插秧宽窄行种植方式适宜密度探讨[J]. 中国稻米, 2016, 22(6): 98–101.
- WANG Jie, ZHOU Youyan, XING Zhipeng, et al. Discussion on the suitable density of wide and narrow row planting mode of Nanjing 9108 machine transplanting[J]. China Rice, 2016, 22(6): 98–101. (in Chinese)
- [9] 井上强. 苗植付装置: 9–19209[P]. 1997–08–12.
- [10] 小西达也, 名本学, 大内久本, 等. 田植机的苗植装置: 9–19209[P]. 1997–01–21.
- [11] 小西达也, 津贺幸之介, 富田宗树, 等. 插秧机用锯齿形分插机构的开发研究[J]. 农业机械学会志, 1998, 60(5): 91–99.
- [12] 吴亦鹏, 杨永涛, 吴昌浩, 等. 一种有宽隔板苗箱的宽窄行手扶插秧机: ZL201020135597.8[P]. 2010–03–19.
- [13] 赵匀, 孙良, 赵雄, 等. 齿轮驱动倾斜式宽窄行插秧机分插机构: ZL201010143797.2[P]. 2011–09–21.
- [14] 孙良, 赵匀, 俞高红, 等. 一种万向节驱动倾斜式宽窄行插秧机分插机构: ZL201020155132.9[P]. 2010–11–24.
- [15] 张国凤, 姚佳明, 孙良等. 端面齿轮传动宽窄行分插机构: ZL201110437688.6[P]. 2012–06–13.
- [16] 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)
- [17] 孙良, 赵匀, 姚佳明, 等. 非匀速空间行星轮系宽窄行分插机构分析与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 41–46, 71.
- SUN Liang, ZHAO Yun, YAO Jiaming, et al. Analysis and optimization of wide-narrow distance transplanting mechanism with spatial planetary gear train of variable speed transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 41–46, 71. (in Chinese)
- [18] 俞高红, 马成稳, 孙良, 等. 插秧机后插旋转式宽窄行分插机构设计与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 50–55, 65.
- YU Gaohong, MA Chengwen, SUN Liang, et al. Design and optimization of backward rotary transplanting mechanism in wide-narrow row planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 50–55, 65. (in Chinese)
- [19] 祝建彬, 孙良, 刘晓龙, 等. 斜齿交错-非圆锥齿轮行星系水稻宽窄行分插机构设计与优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 21–29.
- ZHU Jianbin, SUN Liang, LIU Xiaolong, et al. Design and optimization of rice wide and narrow row transplanting mechanism with helical staggered non bevel gear planetary system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 21–29. (in Chinese)
- [20] 许春林, 单伊尹, 辛亮, 等. 探出开孔式高速水稻膜上插秧机分插机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 79–87.
- XU Chunlin, SHAN Yiyin, XIN Liang, et al. Design and experiment of high-speed rice transplanter with extensible mulch cutting mechanism in mulching cultivation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 79–87. (in Chinese)
- [21] 王磊, 孙良, 徐亚丹, 等. 基于遗传算法的三臂轮系式栽植机构多位姿运动综合[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 70–77.
- WANG Lei, SUN Liang, XU Yadan, et al. Multi-pose motion synthesis of three-arm gear train planting mechanism based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 70–77. (in Chinese)
- [22] BOTTEMA D, ROTH B, VELDKAMP G R. Theoretical kinematics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(1): 222–223.
- [23] ROTH B. The design of binary cranks with revolute, cylindric, and prismatic joints[J]. Journal of Mechanisms, 1968, 3(2): 61–72.
- [24] TSAI L W, ROTH B. A note on the design of revolute-revolute cranks[J]. Mechanism and Machine Theory, 1973, 8(1): 23–31.
- [25] 王磊, 孙良, 徐亚丹, 等. 基于空间轨迹的行星轮系移栽机构设计方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 51–59.
- WANG Lei, SUN Liang, XU Yadan, et al. Design method of transplanting mechanism of planetary gear train based on spatial trajectory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 51–59. (in Chinese)
- [26] LEE T L, LI T Y, TSAI C H, et al. HOM4PS–2.0: a software package for solving polynomial systems by the polyhedral homotopy continuation method[J]. Computing, 2008, 83(2): 109–133.