

取秧侧向零偏移的空间轨迹再生稻分插机构设计与试验

孙良^{1,2} 姜凯雯^{1,2} 周斌^{1,2} 俞高红^{1,2} 崔荣江³ 薛向磊^{4,5}

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;

3. 杭州职业技术学院, 杭州 310018; 4. 浙江省农业科学院, 杭州 310018;

5. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 为了解决现有空间行星轮系式分插机构在再生稻宽窄行机械化种植取秧过程中出现侧向偏移量和侧向偏转角的技术难题, 本文提出一种具有局部平面轨迹特性的空间轨迹不等速行星轮系机构, 并开展基于取秧口和机构回转中心位置约束下的宽窄行分插机构综合研究。构建了基于关键位姿点(取秧起始点、取秧结束点、推秧点)的空间轮系机构运动综合模型, 利用关键位姿点求解机构杆长参数与空间交错轴信息, 并通过优选二杆相对角位移参数实现机构传动比分配。将不完全非圆齿轮副引入空间行星轮系机构, 利用间歇机构锁止弧约束行星轴, 实现机构取秧过程侧向零偏移量、侧向零偏转角的平面轨迹段。通过仿真分析与机构样机试验验证了机构实际作业性能与理论设计相一致, 结果表明: 分插机构取秧侧向零偏移量, 取秧侧向零偏转角, 推秧侧向总偏移量为 50.24 mm、取秧角为 5.18°、推秧角为 71.56°、推秧侧向角为 16.26°、插秧穴口宽度为 22.43 mm、轨迹高度为 289.76 mm, 满足预期设计要求。最后通过田间试验验证, 分插机构可实现等行距取秧口和既定机构回转中心下宽行(40 cm)与窄行(20 cm)间隔机插, 满足再生稻宽窄行种植要求。

关键词: 再生稻; 分插机构; 零偏移量; 零偏角; 宽窄行; 不完全非圆齿轮系

中图分类号: S223.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0101-08

OSID:



Design and Experiment of Regenerated Rice on Space Trajectory Transplantation Mechanism with Zero Lateral Offset

SUN Liang^{1,2} JIANG Kaiwen^{1,2} ZHOU Bin^{1,2} YU Gaohong^{1,2} CUI Rongjiang³ XUE Xianglei^{4,5}

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China

3. Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China

4. Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310018, China

5. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Southeast Hills and Mountains, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the technical difficulties of lateral displacement and lateral deflection angle in the process of mechanically seedling picking process in wide and narrow rows of regenerated rice using existing space planetary gear transplanting mechanisms, a spatial trajectory unequal velocity planetary gear train mechanism was proposed with local planar trajectory characteristics, and a comprehensive research on the wide and narrow row transplanting mechanism was carried out based on the constraints of the position of rice gate and mechanism's rotation center. A spatial gear train mechanism motion model based on key pose points (take seedling starting point, take seedling end point, push seedling point) was constructed, and the mechanism rod length parameters and spatial interleaved axis parameters was solved by using key pose points. The transmission ratio distribution of the mechanism was realized by optimizing the relative angular displacement parameters of the two rods. The incomplete non-circular gear pair was introduced into the space planetary gear system mechanism, and the intermittent mechanism was used to restrain the planetary axis to realize the plane trajectory segment with zero lateral offset and zero lateral

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2023-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001802)、国家自然科学基金项目(52375275、51975534)、浙江省科技计划项目(2022C02034、2023C02012)和浙江省自然科学基金项目(LY23E050013)

作者简介: 孙良(1981—),男,教授,博士,主要从事农业机械设计、机构运动学与动力学优化研究, E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

angle during process of taking seedlings. Through simulation analysis and prototype test of the mechanism, the actual operation performance of the mechanism was consistent with the theoretical design, and the operation performance parameters of the mechanism were verified as follows: the transplanting mechanism had zero lateral offset during the process of picking seedlings, and zero lateral offset angle during the process of picking seedlings, the total lateral offset of pushing seedlings was 50.24 mm, the picking angle was 5.18° , the pushing angle was 71.56° , the lateral angle of pushing seedlings was 16.26° , the width of the transplanting hole was 22.43 mm, and the trajectory height was 289.76 mm, which met the expected design requirements. Finally, the field experiment verified that the rice transplanting mechanism could achieve wide row (40 cm) and narrow row (20 cm) spacing plant under the equal distance taking position and the established rotation center of the mechanism, which met the requirements of wide row and narrow row planting.

Key words: regenerated rice; splitter mechanism; zero offset; zero deflection angle; wide and narrow rows; incomplete non-circular gear train

0 引言

再生稻的头季稻机械化收获过程中的高碾压率(约40%)是影响再生稻产量的一个主要因素。近年来随着再生稻种植面积不断扩大,降低机收碾压成为迫切需要解决的问题。目前除了窄履带、宽轨距和轻量化等收获技术研究外,研究水稻宽窄行种植模式及配套机插装备已成为降低作业碾压的一种重要手段^[1-2]。

将水稻宽行与窄行间隔栽插,不仅可以增大收获机履带行走行的行间距,而且秧苗宽窄行合理种植亦可增加苗间通风光照、减少倒伏与病害,实现水稻增产^[3-4]。目前,国内已有大量关于水稻宽窄行机插技术与装备的研究报道。根据插秧机分插机构的不同,可分为宽窄行布置式、斜置式、空间轮系式3类。

宽窄行布置式通过将等行距插秧机的分插机构根据宽窄行距要求作宽间距和窄间距布置,秧箱空置率增大,作业时放苗频率提高,且所用秧盘与现有育秧流水线不配套,限制了该类机器的推广^[5]。斜置式是指将插秧机同一传动箱上的2个平面轨迹分插机构作倾斜式布置,这种实现类型只需改变分插机构驱动箱传动形式,而秧箱部件、秧门及分插机构不变(如:万向节驱动式、交错斜齿轮驱动式、锥齿轮驱动式等类型)^[6-8]。但由于平面轨迹的整体倾斜,机构在取秧过程时,无法避免出现倾斜切割秧块伤根伤苗的现象,且随着侧向偏距增大而严重。空间轮系式则利用轮系行星轮输出轴与中心轴的空间位置特性(如圆柱-非圆锥齿轮、非圆齿轮-交错斜齿轮、非圆齿轮-圆锥齿轮等轮系构型)^[9-12],通过优化设计可实现空间插秧轨迹的分插机构,此类连续传动的空间非圆齿轮系机构相比前两种类型,对等行距插秧机实现宽窄行插秧改动更小,且只需通过更换分插机构即可实现等行距与宽窄行机插功能

的切换。但此类空间机构无法严格实现取秧过程的轨迹零侧向位移、零侧向偏转,也就是无法彻底解决斜取秧的问题。

江西中耕农业(锦禾技术)和沃德等农机生产企业开发的宽窄行插秧机利用改变取秧口位置以适当减小分插机构的倾斜度(即将宽窄行布置式和斜置式结合),改善了斜取秧的问题,但存在对插秧机改动大,且秧箱利用率低(如6行机一次性加秧由12盘减少到8盘),作业时放秧频繁等问题。在国外只有日本学者研究了空间轨迹分插机构^[13-15],但其主要用于水稻密植需要,且未见机器的推广应用,鲜见关于宽窄行插秧机的研究报道。

因此,为了解决国内再生稻宽窄行插秧机的空间行星轮系式分插机构斜取秧(取秧过程侧向位移、侧向偏转)的问题,本文利用不完全非圆齿轮间歇运动特性约束取秧过程行星轴相对于中心轴的位置关系,以实现局部平面轨迹特性的空间轨迹,保证分插机构取秧段侧向零偏移量、零偏转角。构建基于关键位姿点的空间行星轮系运动综合模型,并对分插机构进行结构设计、虚拟仿真与样机试验,验证宽窄行分插机构及宽窄行插秧机的作业可行性,实现只配置宽窄行分插机构便可使等行距插秧机实现宽窄行插秧的目的。

1 空间宽窄行分插机构求解模型

根据空间行星轮系式分插机构运动原理,将分插机构简化为空间2R机构^[16-20],如图1所示,分插机构的行星架为杆件 l_1 ,分插机构的栽植臂为杆件 l_2 ,其中杆件 l_1 绕输入轴 z 转动,杆件 l_2 绕输出轴 $S_i(i=1,2,3)$ 转动,杆件 l_1 始终垂直空间交错轴(输入轴 z 、输出轴 S_i),且空间交错轴夹角 τ 恒定,杆件 l_2 末端点(秧针末端点)形成运动轨迹。

根据宽窄行分插机构取秧侧向零偏移量、侧向零偏转角的设计要求,由空间2R机构形成的运动

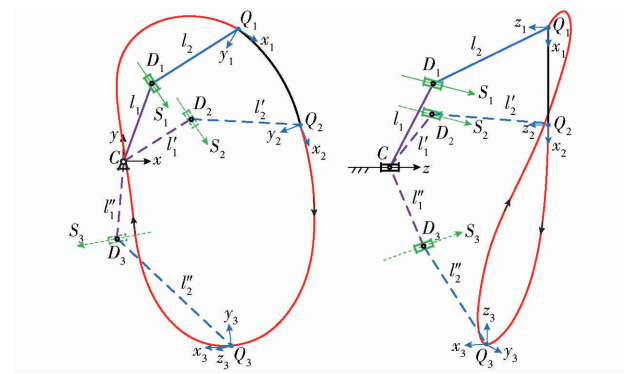


图 1 空间 2R 机构模型

Fig. 1 Spatial 2R mechanism model

轨迹需满足取秧段 Q_1Q_2 (取秧起始点 Q_1 至取秧结束点 Q_2) 侧向零偏移 ($Z_{Q1} = Z_{Q2}$), 取秧段 Q_1Q_2 为 xoy 平面运动轨迹。此时, 杆件 l_1 与杆件 l_2 相对静止仅绕输入轴 z 转动。根据再生稻宽窄行栽植的农业要求, 当空间 2R 机构结束取秧段平面运动后开始空间运动 (取秧结束点 Q_2 至推秧点 Q_3 再至取秧起始点 Q_1), 此时, 杆件 l_1 与杆件 l_2 绕输入轴 z 转动且杆件 l_2 绕输出轴 S_i 转动。

基于关键位姿点: 取秧起始点 Q_1 、取秧结束点 Q_2 、推秧点 Q_3 的位姿参数, 建立空间 2R 机构约束方程, 求解杆件 l_1 、 l_2 的杆长参数与空间交错轴参数方程为

$$Q_i = M_{li}Q_1 = \begin{bmatrix} R_i & P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

$$M_{li} = Q_iQ_1^{-1} = \begin{bmatrix} R_{li} & P_{li} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

$$D_i = M_{li}D_1 \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

$$S_i = R_{li}S_1 \quad (i=1,2,3) \quad (4)$$

式中 Q_i ——4×4 位姿矩阵

M_{li} ——4×4 位姿变换矩阵

R_i ——3×3 姿态矩阵

P_i ——位置向量

R_{li} ——3×3 姿态变换矩阵

P_{li} ——位置变换向量

D_i ——杆件 l_i 与输出轴 S_i 交点坐标

空间交错轴 z 、 S_i 的方向余弦方程为

$$z_x^2 + z_y^2 + z_z^2 = 1 \quad (z^T z = 1) \quad (5)$$

$$S_{1x}^2 + S_{1y}^2 + S_{1z}^2 = 1 \quad (S_1^T S_1 = 1) \quad (6)$$

根据空间交错角恒定原则, 可建立交错角约束方程

$$S_i^T z = S_i^T z \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

CD_i 始终垂直空间交错轴, 可建立垂直约束方程

$$z^T (D_i - C) = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

$$S_i^T (D_i - C) = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

式中 C ——杆件 l_i 与输入轴 z 交点坐标

根据杆件 l_i 杆长与空间交错角夹角方向恒定原则, 可建立定矩约束方程

$$z^T [(D_1 - C)S_1] = z^T [(D_i - C)S_i] \quad (i=1,2,3) \quad (10)$$

式中 D_i ——杆件 l_i 与输出轴 S_i 交点坐标

由理想栽植轨迹中的 3 个关键位姿点求解空间 2R 机构位姿变换矩阵, 建立含有输入轴的方向向量 $z(z_x, z_y, z_z)$ 、输出轴的方向向量 $S_i(S_{1x}, S_{1y}, S_{1z})$ 、公垂线交点的坐标向量 $C(C_x, C_y, C_z)$ 、公垂线交点的坐标向量 $D_i(D_{1x}, D_{1y}, D_{1z})$ 共 12 个未知参数的 12 个约束方程, 从而得到空间 2R 机构杆长与空间交错轴信息。

2 取秧零偏移零偏转轨迹规划

根据浙江小精农机公司生产的插秧机的回转中心距以及传统等行距 (300 mm) 秧门的相对位置等参数, 再结合再生稻宽窄行栽植农艺要求, 设计的分插机构轨迹及机构作业姿态 (图 2) 需满足如下要求^[21-23]:

(1) 为了解决空间行星轮系分插机构斜取秧问题, 分插机构取秧段 Q_1Q_2 需满足侧向零偏移量即 $Z_{Q1} - Z_{Q2} = 0$, 取秧段侧向零偏转角 (秧针轴线始终平行 xoy 面)。

(2) 根据再生稻宽行 400 mm、窄行 200 mm 的栽植模式, 分插机构取秧起始点 Q_1 至推秧点 Q_3 侧向偏移量需满足 $Z_{Q3} - Z_{Q1} = 50$ mm。

(3) 为保证栽植秧苗的“直立度”, 需满足取秧角 $0^\circ < \lambda_1 < 20^\circ$ (取秧起始点秧针与 x 轴夹角), 推秧角 $65^\circ < \lambda_2 < 80^\circ$ (推秧点秧针与 x 轴夹角), 推秧角与取秧角差值 $55^\circ < \lambda_2 - \lambda_1 < 70^\circ$ 。

(4) 推秧侧向角 $\lambda_3 < 20^\circ$ (推秧点秧针与 y 轴夹角)。

(5) 插秧穴口宽度 $10 \text{ mm} < d < 30 \text{ mm}$ 。

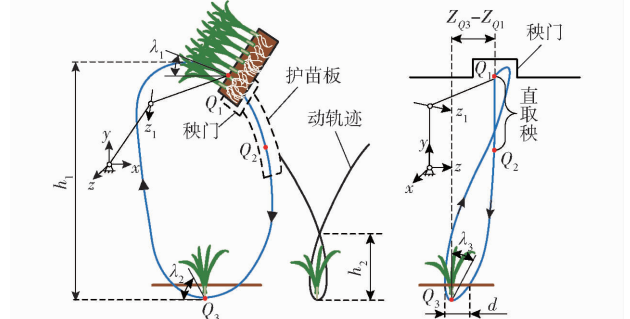


图 2 再生稻宽窄行理想栽植轨迹

Fig. 2 Ideal planting trajectory for wide and narrow rows of regenerated rice

(6)分插机构动轨迹形成的环扣高度 h_2 需大于秧苗高度,栽植轨迹高度 h_1 大于 265 mm。

3 直取式分插机构设计

3.1 机构参数求解

根据目标插秧机秧门位置和轨迹栽植位置参数,在规划的理想轨迹中提取描述取秧起始点 Q_1 、取秧结束点 Q_2 、推秧点 Q_3 的 3 个点齐次矩阵^[24-27]

$$Q_1 = \begin{bmatrix} -0.673\ 0 & 0.739\ 6 & 0 & 141.938\ 8 \\ 0.739\ 6 & 0.673\ 0 & 0 & 129.756\ 1 \\ 0 & 0 & -1 & -193.763\ 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} -0.213\ 2 & 0.977\ 0 & 0 & 187.903\ 8 \\ 0.977\ 0 & 0.213\ 2 & 0 & 40.198\ 2 \\ 0 & 0 & -1 & -193.763\ 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} -0.374\ 7 & -0.192\ 6 & -0.906\ 9 & 108.938\ 1 \\ 0.850\ 1 & -0.461\ 9 & -0.253\ 1 & -145.945\ 5 \\ -0.370\ 1 & -0.865\ 8 & 0.336\ 8 & -143.677\ 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

基于确定的 3 个齐次矩阵求解空间 2R 机构运动学模型,即通过计算含有 12 个未知数的 12 个方程得到 2 组实数解(表 1)。综合考虑行星架安装位置与栽植臂尺寸等参数,选择实数解 1 作为本机构的参数。由第 1 组解可以确定空间 2R 机构杆长参数 $l_1 = 80.17\text{ mm}$, $l_2 = 120.52\text{ mm}$,输入轴与输出轴空间交错角 $\tau = 19.34^\circ$ 。

表 1 空间 2R 机构参数

Tab. 1 Space 2R mechanism parameters

机构参数	方程组实数解 1	方程组实数解 2
z_x	0	0
z_y	0	0
z_z	1	1
S_{1x}	0.321 1	0.044 5
S_{1y}	-0.081 1	0.975 6
S_{1z}	0.943 6	0.214 9
C_x	-0.188 4	-2.254 4
C_y	0.175 1	-0.815 1
C_z	-172.901 0	-129.777 8
D_{1x}	39.461 9	146.030 9
D_{1y}	69.853 5	-7.582 7
D_{1z}	-172.901 0	-129.777 8

根据空间 2R 机构杆长与交错角参数复演可得二杆机构的 4 个相对角位移(取秧起始点 1、取秧结束点 4、推秧点 8、运动周期连接点 13),结合分插机构理想运动轨迹中,轨迹高度 $h_1 > 265\text{ mm}$ 、运动形

成的环扣高度 h_2 大于秧苗高度、插秧穴口宽度 $10\text{ mm} < d < 30\text{ mm}$ 等农艺要求,将上述 4 个点设定为栽植轨迹定点(图 3),同时在栽植轨迹中再增加 9 个插值点,通过对 9 个插值点的调节,可进行栽植轨迹的形状与姿态的局部调整,其目标是优化齿轮传动部分传动比的光顺性,进而实现图 3 所述的再生稻宽窄行空间栽植轨迹。

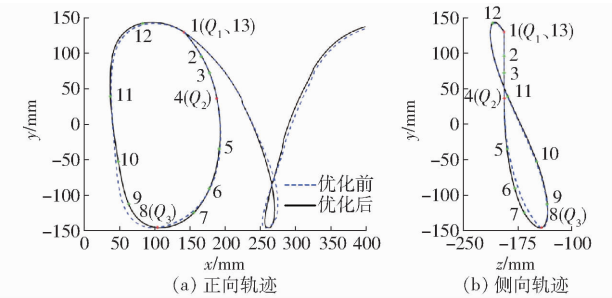


图 3 空间 2R 机构复演栽植轨迹
Fig. 3 Planting trajectory of space 2R mechanism

根据取秧段侧向零偏移量、零偏转角的农艺要求,分插机构取秧运动过程中,行星架(l_1)角位移 θ_1 与移栽臂(l_2)角位移 θ_2 如图 4 所示,栽植臂(l_2)角位移增量 $\Delta\theta$ 为零,此时二杆总传动比无穷大(图 5)。

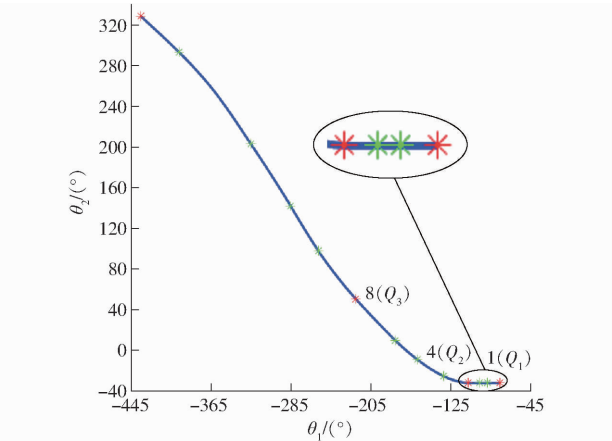


图 4 角位移曲线
Fig. 4 Angular displacement curve

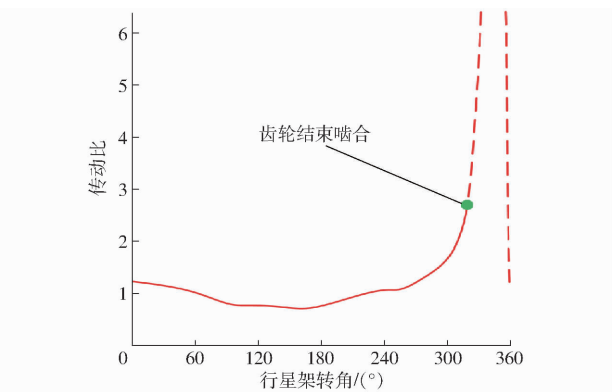


图 5 总传动比曲线
Fig. 5 Total transmission ratio curve

根据分插机构取秧段时,杆件(l_2)角位移增量 $\Delta\theta$ 为零,以及机构总传动比无穷大等参数信息,分插机构取秧运动过程中,以凹凸锁止弧啮合代替不完全非圆齿轮啮合进而约束行星轴转动,分插机构实现取秧段平面运动轨迹。

分插机构由行星架和栽植臂两部分组成,行星架内以不完全非圆太阳轮为对称中心,分布两对相同的齿轮。如图 6 所示,不完全非圆太阳轮固定在机架上并空套传动轴(输入轴),凸锁止弧与太阳轮缓冲弧固连不完全非圆太阳轮;不完全非圆中间轮、中间斜齿轮、凹锁止弧、中间缓冲弧通过花键固连中间轴;行星斜齿轮与栽植臂固连行星轴(输出轴)。当分插机构在取秧段 Q_1Q_2 时,凹凸锁止弧啮合代替不完全非圆齿轮啮合,分插机构作平面运动轨迹。当不完全非圆齿轮啮合时带动中间轴上固连的中间斜齿轮与行星轴上的行星斜齿轮啮合,分插机构作空间运动轨迹。

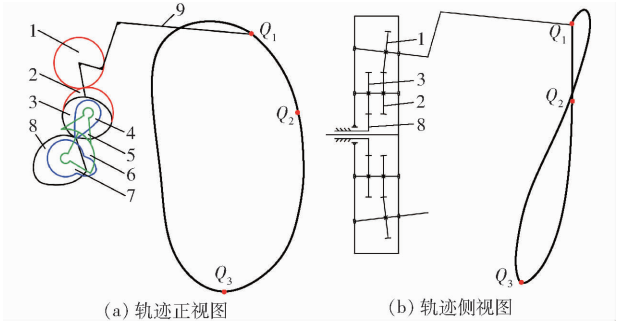


图 6 机构原理图
Fig. 6 Mechanism schematics

1. 行星斜齿轮 2. 中间斜齿轮 3. 不完全非圆中间轮 4. 中间轮缓冲弧 5. 凹锁止弧 6. 凸锁止弧 7. 太阳轮缓冲弧 8. 不完全非圆太阳轮 9. 栽植臂

通过优化角位移曲线获得最优的不完全非圆齿轮节曲线,为了保证不完全非圆太阳轮与不完全非圆中间轮顺利啮合,不完全非圆太阳轮有齿部分的节曲线周长与不完全非圆中间轮有齿部分的节曲线周长相等^[28-30](图 7),以便顺利完成啮合。计算式为

$$\int_0^{\mu_1} r_1(\beta_1) d\beta_1 = \int_0^{\mu_2} r_2(\beta_2) d\beta_2 \quad (11)$$

$$a = r_1 + r_2 \quad (12)$$

$$\int_0^{\mu_1} r_1(\beta_1) d\beta_1 = \int_0^{\mu_2} (a - r_1(\beta_1)) d\beta_2 \quad (13)$$

$$r_1(\beta_1) = \frac{a}{1 + i_{12}} \quad (14)$$

$$r_2 = a - r_1(\beta_1) = \frac{ai_{12}}{1 + i_{12}} \quad (15)$$

式中 μ_1 ——不完全非圆太阳轮有齿部分所对圆心角
 μ_2 ——不完全非圆中间轮有齿部分所对圆心角

- a ——不完全非圆太阳轮与不完全非圆中间轮的中心距
 r_1 ——不完全非圆太阳轮节曲线半径
 r_2 ——不完全非圆中间轮节曲线半径
 β_1 ——齿轮啮合时行星架角位移
 β_2 ——齿轮啮合时不完全非圆中间轮角位移
 i_{12} ——齿轮总传动比

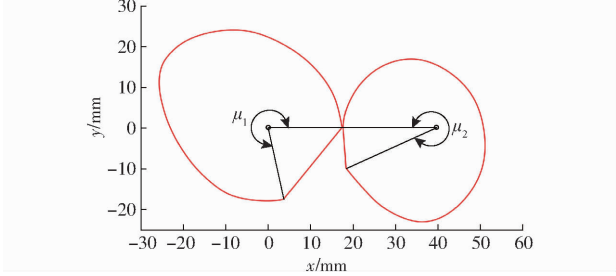


图 7 不完全非圆齿轮节曲线
Fig. 7 Incomplete non-circular gear pitch curve

3.2 锁止弧和缓冲弧设计

考虑锁止弧脱离啮合即不完全非圆齿轮开始啮合时刻,不完全非圆齿轮啮合首齿之间存在偏角导致无法直接啮合,同时分插机构结束平面轨迹向空间轨迹运动转换时易产生刚性冲击,需要设计相匹配的缓冲弧弥补偏角并缓解刚性冲击。

如图 8 所示,分插机构取秧段 Q_1Q_2 运动过程中,凹凸锁止弧啮合代替不完全非圆齿轮啮合,分插机构由取秧起始点 Q_1 绕输入轴转动角度 v_1 至取秧结束点 Q_2 时,缓冲弧开始接触并使分插机构绕输入轴转动的同时,栽植臂再绕输出轴转动。有

$$v_1 = \sigma_2 - \sigma_1 \quad (16)$$

$$v_2 = 2\pi - \mu_1 \quad (17)$$

式中 v_1 ——分插机构取秧段转动角度
 v_2 ——凸锁止弧圆心角
 σ_1 ——取秧起始点秧针与 x 轴夹角
 σ_2 ——取秧结束点秧针与 x 轴夹角

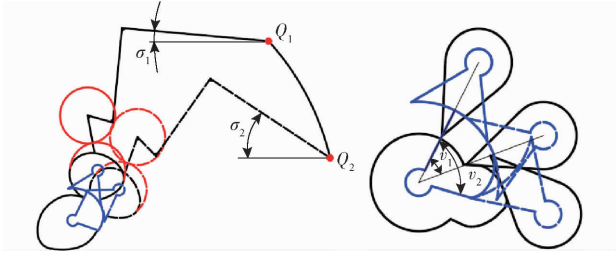


图 8 分插机构结构图
Fig. 8 Structure diagram of planting mechanism

4 分插机构仿真试验

为了验证理论设计的合理性,根据求解参数设计行星轮系宽窄行分插机构,并将分插机构三维模型进行虚拟仿真试验,得到仿真运动轨迹如图 9 所示。分

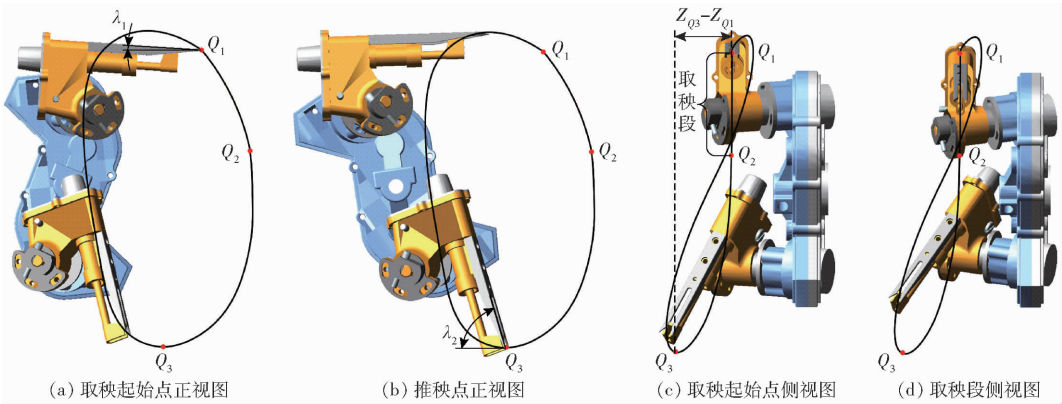


图9 仿真轨迹

Fig.9 Simulation trajectories

插机构取秧段运动过程中,栽植臂侧向零偏移量、侧向零偏转角。

通过对仿真结果中一个栽植臂的侧向位移进行分析,得到其侧向偏移量曲线(图10)。分插机构取秧过程中,侧向位移曲线呈水平位移线,再次验证分插机构取秧段侧向零偏移量、侧向零偏转角。

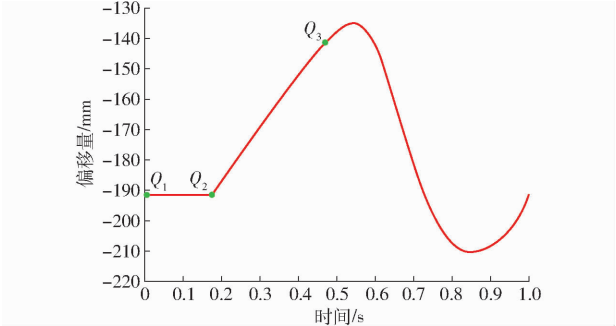


图10 仿真轨迹侧向偏移量变化曲线

Fig.10 Lateral change curve of simulation trajectory

5 样机试验

5.1 空间轨迹试验

对空间行星轮系宽窄行分插机构进行样机加工与试验。如图11所示,通过高速摄像获得分插机构正向轨迹(xoy)、侧向轨迹($yozy$),并利用视频处理软件对栽植轨迹中关键位置点信息进行测量。结果显示分插机构取秧侧向零偏移量、取秧侧向零偏转角,推秧侧向总偏移量为50.24 mm、取秧角为5.18°、推秧角为71.56°、推秧侧向角为16.26°、插秧穴口宽度为22.43 mm、轨迹高度为289.76 mm,实际运动轨迹与仿真运动轨迹基本一致,满足预期设计要求。

5.2 分插机构田间试验

为了验证空间行星轮系宽窄行分插机构实际取秧效果,对分插机构进行取秧试验。将分插机构安装在插秧机上进行取秧试验,取秧试验显示分插机构可在不同转速下顺利完成栽植作业且所取秧块大

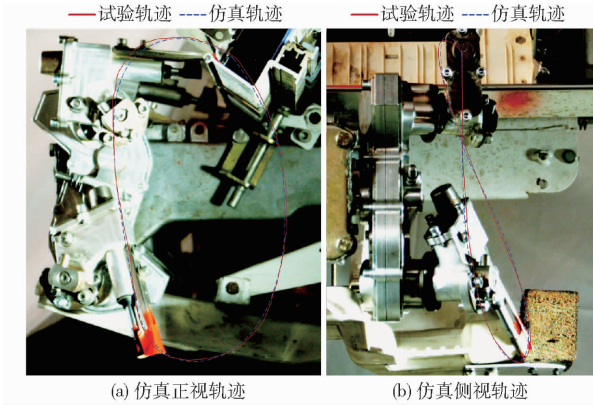


图11 仿真轨迹与实际轨迹对比

Fig.11 Comparison between simulated trajectory and actual trajectory

小均匀(图12)。



图12 分插机构取秧试验

Fig.12 Planting mechanism taking seedling test

为了验证分插机构实际宽窄行栽植效果,采用苗龄约为20 d、苗高约为10 cm的秧苗进行田间试验(图13)。



图13 秧苗宽窄行栽植

Fig.13 Wide and narrow row planting of seedlings

通过宽窄行插秧机田间机插试验,并测量多组移栽水稻秧苗间距,秧苗宽行约40 cm,窄行约20 cm(图14)。栽植结果满足取秧与推秧侧向偏移量5 cm的移栽要求。

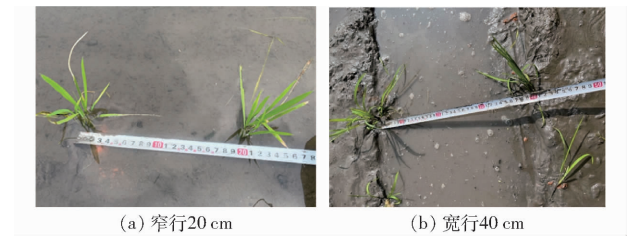


图 14 秧苗宽窄行栽植效果

Fig. 14 Wide and narrow rows of seedlings

6 结论

(1)针对目前空间行星轮系宽窄行分插机构存在的斜取秧问题(取秧段侧向偏移量、取秧段侧向偏转角),采用了一种具有局部平面轨迹的空间插秧轨迹设计思想,基于分插机构取秧过程传动比无穷大特性,引入间歇机构不完全非圆齿轮副,实现取

秧段轨迹的平面运动特性,进而满足分插机构取秧过程的侧向零偏移量、侧向零偏转角的设计要求。

(2)利用规划期望轨迹中的关键位姿点(取秧起始点、取秧结束点、推秧点)的齐次矩阵,求解了空间轮系简化模型,即空间 2R 机构参数,并通过轨迹点插值所得参数复演栽植轨迹,再通过调节相对角位移曲线与传动比曲线获得最优的不完全非圆齿轮节曲线,并设计出给定秧门和回转中心条件下的空间直取秧式行星轮系宽窄行分插机构。

(3)开展的空间行星轮系宽窄行分插机构仿真与机构轨迹测试试验验证了机构设计的正确性;通过机构取秧试验与田间机插试验,进一步验证了具有平面轨迹段的空间行星轮系分插机构可以实现再生稻宽窄行机插所需的取秧过程侧向零偏移量、侧向零偏转角,满足水稻宽窄行种植实际需求。

参 考 文 献

[1] 周芑,刘伟健,曾山. 再生稻收获机后桥转向系统设计与试验[J]. 农机化研究,2023,45(12):125-129.
ZHOU Peng, LIU Weijian, ZENG Shan. Design and test of rear axle steering system of triangular crawler reclaimed rice harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(12): 125-129. (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] 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-narrow row cultivation techniques on ratooning rice [J]. China Rice, 2019, 25(2): 72-74. (in Chinese)

[4] 林席跃,雷正平,伍先群,等. 机收再生稻履带窄幅化改制及宽窄行配套栽插减损效果研究初报[J]. 中国农学通报,2022,38(23):150-155.
LIN Xiyue, LEI Zhengping, WU Xianqun, et al. The damage reduction effect of narrowing harvester track and wide-narrow row planting in the mechanized harvesting of ratooning rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022,38(23): 150-155. (in Chinese)

[5] 吴亦鹏,杨永涛,吴昌浩,等. 一种宽隔板苗箱宽窄行手扶插秧机:ZL201020135597.9[P]. 2010-03-20.

[6] 赵匀,孙良,赵雄,等. 齿轮驱动倾斜式宽窄行插秧机栽植机构:ZL201010143797.2[P]. 2011-09-21.

[7] 孙良,赵匀,俞高红,等. 一种万向节驱动倾斜式宽窄行插秧机栽植机构:ZL201020155132.9[P]. 2010-11-24.

[8] 张国凤,姚佳明,孙良,等. 端面齿轮传动宽窄行栽植机构:ZL201110437688.6[P]. 2012-06-13.

[9] 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)

[10] 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)

[11] 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)

[12] 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 transplanting mechanism with planetary gear train composed of helical gears and noncircular bevel gears[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(11): 21-29. (in Chinese)

[13] 井上强. 苗植付装置:9-19209[P]. 1997-08-12.

- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张春林,赵自强. 高等机构学[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
- [17] 徐亚丹,诸杨华,薛向磊,等. 再生稻空间直取大偏移轮系宽窄行栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 83-90.
XU Yadan, ZHU Yanghua, XUE Xianglei, et al. Optimal design and experiment on gear train wide and narrow row transplanting mechanism of spatial direct extraction and large offset of ratooning rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 83-90. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] SUN L, ZHOU Y, HUANG H, et al. Analysis and design of a spatial planetary noncircular gear train for rice seedling transplanting based on three given positions[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(1): 165-176.
- [20] SUH C H. On the duality in the existence of 2R links for three positions[J]. Journal of Engineering for Industry, 1969, 91(1): 129-134.
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 1-20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1-20. (in Chinese)
- [24] PEREZ A, MCCARTHY J M. Clifford algebra exponentials and planar linkage synthesis equations[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(5): 931-940.
- [25] SUH C H, RADCLIFFE C W. Synthesis of plane linkages with use of the displacement matrix[J]. Journal of Engineering for Industry, 1967, 89(2): 206-214.
- [26] 王磊,孙良,徐亚丹,等. 基于遗传算法的三臂轮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)
- [27] 俞高红,金也,常数数,等. 夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 100-108.
YU Gaohong, JIN Ye, CHANG Shushu, et al. Design and test of clipping-plug type transplanting mechanism of rice plug-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 100-108. (in Chinese)
- [28] 俞高红,陈志威,赵匀,等. 椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 32-39.
YU Gaohong, CHEN Zhiwei, ZHAO Yun, et al. Study on vegetable plug seedling pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 32-39. (in Chinese)
- [29] 叶秉良,易卫明,俞高红,等. 不完全非圆齿轮传动钵苗移栽机构缓冲装置研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 69-75.
YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Buffer device of transplanting mechanism for plug seedlings based on transmission with incomplete non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 69-75. (in Chinese)
- [30] 俞亚新,骆春晓,俞高红,等. 椭圆-不完全非圆齿轮行星系取苗机构参数优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 62-68.
YU Yaxin, LUO Chunxiao, YU Gaohong, et al. Parameters optimization of pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 62-68. (in Chinese)