

基于 4-CRR 并联机构的玉米穴播机运动学分析

高海豹 李瑞琴 宁峰平 李泽辉

(中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051)

摘要 提出了一种基于 4-CRR 并联机构的玉米穴播机。运用螺旋理论求解 4-CRR 并联机构的自由度, 采用修正的 Kutzbach-Grübler 公式进行验证; 采用等效平面投影法求解该机构的位置逆解, 推导出机构的 Jacobian 矩阵并对其进行了速度分析; 对应用于穴播机的 4-CRR 并联机构的杆长取值范围进行分析, 通过极限边界搜索法求解了杆长为 250 mm 的机构的工作空间。该机构动平台可实现沿 3 个坐标轴方向的平移运动, 工作空间内部连续, 可在穴播机下方形成一个 300 mm×300 mm 的可调整播种区域。基于 4-CRR 并联机构的穴播机可根据田间土壤情况的不同, 灵活调整播种位置, 改变种植密度, 达到玉米增产增收的效果。

关键词 4-CRR 并联机构 穴播机 工作空间 位置逆解

Kinematics Analysis of Corn Hill-seeder based on 4-CRR Parallel Mechanism

Gao Haibao Li Ruiqin Ning Fengping Li Zehui

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract A kind of corn hill-seeder based on 4-CRR parallel mechanism is presented. The degree of freedom of the 4-CRR parallel mechanism is solved by using screw theory, and verified by using the modified Kutzbach-Grübler formula. The inverse position solution of the mechanism is solved by using equivalent plane projection method, and the Jacobian matrix of the mechanism is derived to analyze its velocity. The value range of rod length of 4-CRR parallel mechanism applied to hill-seeder is analyzed. The workspace of the mechanism with a rod length of 250 mm is solved by the limit boundary search method. The moving platform of the mechanism can realize translation movements along the three coordinate axis directions. The interior of the workspace is continuous, and a 300 mm×300 mm adjustable seeding area can be formed below the hill-seeder. The hill-seeder based on 4-CRR parallel mechanism can flexibly adjust the sowing position and change the planting density according to the different soil conditions in the field to achieve the effect of increasing yield and income of corn.

Key words 4-CRR parallel mechanism Hill-seeder Workspace Inverse position solution

0 引言

合理密植是提高玉米产量的有效措施之一^[1], 玉米种植时根据条件的不同, 株距变化范围为 240 ~ 300 mm^{[2]98-99}。根据土壤情况的不同, 合理调整播种位置和玉米种植密度, 保证作物生长过程中的整齐度, 已经成为农作物丰产增收栽培技术的重要手段^{[2]99-100[3]}。目前, 机械式播种机在播种过程中不能够灵活调整行距与株距, 手持式播种器不利于大规模生产。因此, 可以考虑将并联机构应用于播种机的设计当中, 提高玉米的播种效率和播种质量。

并联机构具有刚度大、运动灵活、误差不累积等优势^[4-5], 在工业领域得到了广泛应用。余亮等^[6]对一种 T 型轴铰链 Delta 三平动并联机器人的构型设计进行了研究, 综合出多组三平动并联机器人机构。李坤全等^[7]根据空间三平移刚性并联机构的构型特点, 设计了两种结构形式不同的柔性并联机构。叶伟等^[8]设计了一种用于微创手术的远中心并联机构, 该机构能输出 2R1T 型运动, 且所有运动均通过远端固定中心。周毅钧等^[9]设计了一种 2RPS/2SPS 并联机构, 该机构具有 2T2R 型输出运动, 具有合理稳定的

运动学特性。郭强等^[10]设计了一种具有5自由度的4-SPRR-SPR并联机构,利用封闭矢量法建立了该机构的逆运动学方程。柴馨雪等^[11]设计了一种2-UPR-RPU并联机构,推导出了该机构的运动学方程,分析了机构的运动学奇异性,并给出其3类奇异位形。Zhang等^[12]设计了一种用于验证液压驱动的3自由度并联机构的动力学模型,并用Matlab/Simulink和Adams软件进行了仿真分析研究。Arian等^[13]提出了一种具有4自由度的冗余约束的并联机构,并对其进行了动力学分析。Chen等^[14]提出了一种3自由度多中心3-PUU并联机构,讨论了该机构的奇异性,对该机构进行了逆运动学求解和工作空间分析。Wang等^[15]设计了一种3-RUS/RRR冗余驱动并联机构,分析了该机构的灵巧性、奇异性、刚度和刚度等运动性能。

本文中提出了一种基于4-CRR并联机构的玉米穴播机,该穴播机在作业过程中可灵活调整株距与行距,且控制简单,能够满足自动化灵活播种的需要。

1 4-CRR并联机构自由度分析

4-CRR并联机构由4条CRR支链、动平台和静平台组成,如图1所示。静平台和动平台均为正方形,静平台与支链一端的C副相连,动平台与支链另一端的R副相连。每条CRR支链中C副轴线与R副轴线相互平行,且与邻近的CRR支链中的运动副轴线相互垂直。

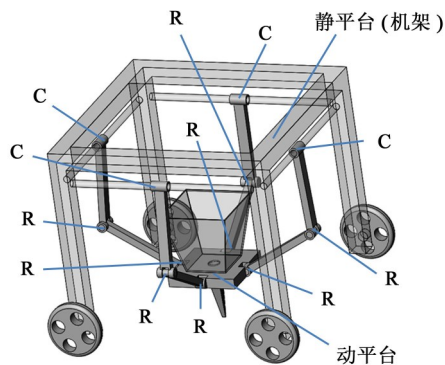


图1 基于4-CRR并联机构穴播机的三维模型

Fig. 1 3D model of hill-seeder based on 4-CRR parallel mechanism

为方便对机构的计算和分析过程进行描述,现对该机构建立坐标系,且运动副位置通过字母表示,如图2所示。将静平台形心 O_B 作为静坐标系原点建立静坐标系 $O_B-x_B y_B z_B$ (标记为 $\{O_B\}$), z_B 轴垂直于静平台竖直向下;将动平台形心 O_A 作为动坐标系原点建立动坐标系 $O_A-x_A y_A z_A$ (标记为 $\{O_A\}$), z_A 轴垂直于动平台竖直向下; $B_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示各条支

链中C副的位置, $D_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示各条支链中中间R副的位置, $A_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示各条支链中末端R副的位置,且位于动平台各边中点上, $\theta_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示各条支链中驱动副R副的转角。

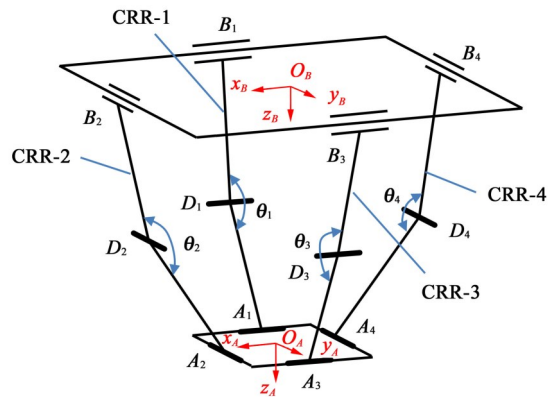


图2 4-CRR机构构型

Fig. 2 4-CRR mechanism configuration

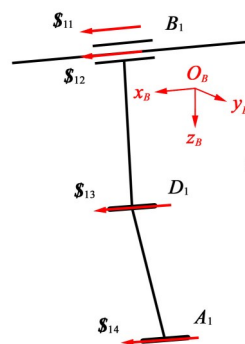


图3 CRR-1分支运动螺旋

Fig. 3 Motion helix of CRR-1 limb

运用螺旋理论对该机构自由度进行分析。首先,取支链CRR-1作为研究对象,如图3所示,写出其在静坐标系 $\{O_B\}$ 下的运动螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{11} = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{12} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ a) \\ \mathcal{S}_{13} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ b \ c) \\ \mathcal{S}_{14} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ d \ e) \end{cases} \quad (1)$$

式中, a, b, c, d, e 与运动副的方向和位置有关。

对式(1)求反螺旋,即为支链CRR-1的约束螺旋,即

$$\begin{cases} \mathcal{S}'_{11} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}'_{12} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0) \end{cases} \quad (2)$$

同理,可求得另外3条CRR支链的约束螺旋,支链CRR-2的约束螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}'_{21} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}'_{22} = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (3)$$

支链CRR-3的约束螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{31}^r = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_{32}^r = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0) \end{cases} \quad (4)$$

支链CRR-4的约束螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{41}^r = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_{42}^r = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (5)$$

求取式(2)~式(5)公共的反螺旋, 可得该机构动平台的运动螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1 = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_2 = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0) \\ \mathcal{S}_3 = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表示该机构动平台仅具有沿 x 轴、 y 轴、 z 轴3个方向上的平动, 即该机构具有3个移动自由度。

采用修正的Kutzbach-Grübler公式对该机构自由度进行验证, 即

$$F = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v + \zeta \quad (7)$$

式中, F 为机构的自由度; d 为机构的阶数; n 为包括机架在内的总构件数目; g 为运动副数目; f_i 为第 i 个运动副的自由度数; v 为并联冗余约束; ζ 为局部自由度数。

由式(2)~式(5)可知, 该机构具有1个公共约束, 故 $d=5$; 有2个冗余约束, $v=2$; 无局部自由度 $\zeta=0$, $n=10$, $g=12$ 。

$$F = 5(10 - 12 - 1) + 16 + 2 + 0 = 3 \quad (8)$$

综上, 该机构具有沿 x 轴、 y 轴、 z 轴3个方向上的平动, 可实现播种过程中播种位置的灵活调整, 满足播种机合理密植的作业要求。

2 4-CRR并联机构的运动学逆解分析

2.1 位置逆解

机构的位置逆解为已知机构结构尺寸和动平台位姿, 求解输入参数的过程。

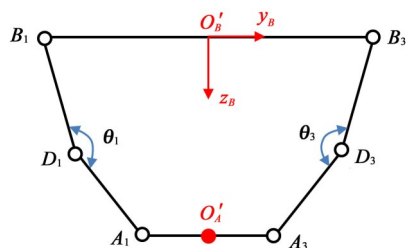


图4 CRR-1和CRR-3在 $O_B-y_B-z_B$ 上的投影图

Fig. 4 Projection of CRR-1 and CRR-3 on $O_B-y_B-z_B$ plane

该机构动平台位姿为 $(x, y, z; \alpha, \beta, \gamma)$, 其

中, (x, y, z) 为动坐标系原点 O_A 在静坐标系中的坐标。由于该机构仅具有沿 x_B 轴、 y_B 轴、 z_B 轴3个方向上的平动, 所以, 在运动过程中, $\alpha=0, \beta=0, \gamma=0$, 即动平台位姿为 $(x, y, z; 0, 0, 0)$ 。取静平台边长为 l_B , 动平台边长为 l_A , CRR支链中的刚性连杆长度均为 l 。由于支链CRR-1和支链CRR-3的运动副轴线均垂直于平面 $O_B-y_B-z_B$, 所以, 可以根据支链CRR-1、支链CRR-3、动平台和静平台在 $O_B-y_B-z_B$ 平面上的投影来计算输入参数 θ_1 和 θ_3 。其中, C副投影为R副, 各连杆的长度均与实际长度相等, A_1A_3 为动平台投影, 其长度为 l_A , B_1B_3 为定平台投影, 其长度为 l_B , 且 A_1A_3 始终与 B_1B_3 平行, 由投影得到的等效平面机构如图4所示。等效平面机构中的静坐标系 $O'_B-y_B-z_B$ 是由机构中的静坐标系 $O_B-x_By_Bz_B$ 投影得到, 动坐标系原点 O_A 的投影点为 $O'_A(y, z)$ 。根据等效平面机构的几何关系可得

$$A_1(y-l_A/2, z), A_3(y+l_A/2, z), B_1(-l_B/2, 0), B_3(l_B/2, 0)$$

由余弦定理可得输入参数 θ_1 和 θ_3 的表达式为

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \arccos \frac{2l^2 - z^2 - (-\frac{l_B}{2} + \frac{l_A}{2} - y)^2}{2l^2} \\ \theta_3 &= \arccos \frac{2l^2 - z^2 - (\frac{l_B}{2} - \frac{l_A}{2} - y)^2}{2l^2} \end{aligned} \quad (9)$$

同理, 可得输入参数 θ_2 和 θ_4 的表达式分别为

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \arccos \frac{2l^2 - z^2 - (\frac{l_B}{2} - \frac{l_A}{2} - x)^2}{2l^2} \\ \theta_4 &= \arccos \frac{2l^2 - z^2 - (-\frac{l_B}{2} + \frac{l_A}{2} - x)^2}{2l^2} \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)和式(10)即为该4-CRR机构的位置逆解。

2.2 速度分析

根据位置逆解推导该4-CRR机构的速度雅可比矩阵, 求解驱动副角速度与动平台移动速度的关系。

将式(9)和式(10)变换, 去掉反余弦函数, 对等式两边求导, 并写成矩阵形式, 有

$$J_t \dot{\theta} = J_x v_p \quad (11)$$

式中,

$$J_t = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta_4 \end{bmatrix}, \quad \dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}$$

$$J_x = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{l_B}{2} + \frac{l_A}{2} - y & -\frac{z}{l^2} & 0 \\ \frac{l_B}{2} - \frac{l_A}{2} - x & 0 & -\frac{z}{l^2} & 0 \\ 0 & \frac{l_B}{2} - \frac{l_A}{2} - y & -\frac{z}{l^2} & 0 \\ -\frac{l_B}{2} + \frac{l_A}{2} - x & 0 & -\frac{z}{l^2} & 1 \end{bmatrix}, \quad v_p = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中, 向量 $\dot{\theta}$ 中的各分量为驱动副转角对时间求导而得到的驱动副角速度; v_p 中分量 $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$ 、 $\dot{z}$ 分别为动平台沿 x_B 轴、 y_B 轴、 z_B 轴 3 个方向上的移动速度。

当 J_i 非奇异时, 根据式(11)可得该 4-CRR 并联机构的雅可比矩阵 J 为

$$J = J_i^{-1} J_x \quad (12)$$

在播种机作业过程中, 可根据田间实际情况和播种机前进速度调整 4-CRR 并联机构的驱动角速度, 进而达到对多播种机的精准控制。有

$$\sqrt{2l^2 - 2l^2 \cos \theta_1} + \sqrt{2l^2 - 2l^2 \cos \theta_3} = l_B - l_A \text{ 或} \\ \sqrt{2l^2 - 2l^2 \cos \theta_2} + \sqrt{2l^2 - 2l^2 \cos \theta_4} = l_B - l_A \quad (13)$$

当满足式(13)时, 动平台与静平台处于同一平面, 该机构处于奇异位置, 但在播种机播种过程中动平台一直位于静平台下方, 故此奇异位置不会出现, 对播种机无影响。

3 4-CRR 机构工作空间分析

3.1 CRR 支链杆长分析

当机构结构参数静平台边长 l_B 、动平台边长 l_A 以及机架高度 h 已知时, 取 CRR 支链中的刚性连杆长度均为 l , 为了使播种机具有 $l_w \times l_w$ 的可调整工作区域, 则对 4-CRR 支链的连杆长度 l 有一定要求。由于 4-CRR 机构的动平台位于静平台下方, 且鸭嘴式打孔器固定于动平台中心 O_A 处, 且机构的工作空间受机架高度的限制, 工作空间的最低端为穴播机进行播种作业的区域, 则穴播机的可调整工作区域位于工作空间最低端的平面上。当动平台中心处于工作区域的边界极限位置时, 其中一条 CRR 支链的输入角度处于极限值 π , 即该支链完全伸展, 此时是 CRR 支链中杆长最短的情形, 杆长为 $l_{\min}$ 。以支链 CRR-3 完全伸展时的情况为例进行分析, 如图 5 所示。

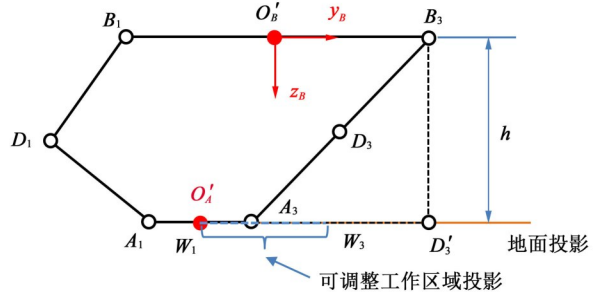


图 5 CRR 支链杆长极限位置投影

Fig. 5 Projection of limit position of CRR branch link length

图 5 中, W_1W_3 部分为可调整工作区域投影, 此时, $l_{\min}$ 满足表达式为

$$l_{\min} = \sqrt{h^2 + \left(\frac{l_B + l_w - l_A}{2}\right)^2} \quad (14)$$

当 CRR 支链中的刚性连杆长度过长, 会出现如图 5 中的虚线 $A_3D'_3B_3$ 的情况。此时, 杆长为 $l_{\max}$, CRR 支链中的中间 R 副 (D'_3) 与地面接触, 播种时会产生阻碍, 不利于穴播机的播种作业; 当 CRR 支链中的杆长超出该长度, 由几何关系可知, D'_3 将位于地面以下, 这种情况穴播机将无法完成播种。故 $l_{\max}$ 满足的表达式为

$$l_{\max} = \frac{h^2 + \left(\frac{l_B + l_w - l_A}{2}\right)^2}{l_B + l_w - l_A} \quad (15)$$

式(14)和式(15)对已知机架高度 h 、动平台边长 l_A 、动平台边长 l_B , 设计带有 $l_w \times l_w$ 的可调整工作区域的用于穴播机的 4-CRR 并联机构具有重要意义, 能够有效选取 CRR 支链中刚性连杆的长度 l , 并可验证已经存在的 4-CRR 机构是否符合要求。

3.2 工作空间分析

并联机构的可达工作空间是一个衡量机构运动性能的重要指标, 对路径规划有着重要意义。

为使穴播机下方具有 300 mm×300 mm 的正方形可调整区域, 取 CRR 支链中的刚性连杆长度均为 l , $l_B=600$ mm, $l_A=200$ mm, 机架高度为 460 mm, 可调整工作区域边长 $l_w=300$ mm。根据式(14)和式(15)可得: $l_{\min}=230.1$ mm, $l_{\max}=477.3$ mm。现对 CRR 支链杆长取 $l=250$ mm 进行工作空间分析。

采用极限边界搜索法对该机构的工作空间进行搜索, 由于鸭嘴式开穴器固定于动平台中心 O_A , 因此, 选择动平台中心, 即 O_A 点, 作为参考点研究该 4-CRR 机构的工作空间。将运动副约束关系和机构结构尺寸导入 Matlab 中, 设定驱动副转角最大值为 π 、最小值为 0, 求解出的工作空间如图 6 所示。

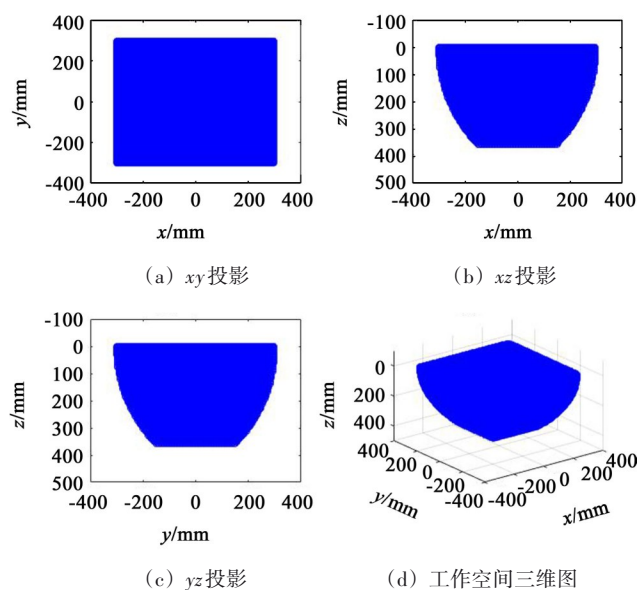


图6 4-CRR并联机构工作空间

Fig. 6 Workspace of the 4-CRR parallel mechanism

由图6中可知,工作空间保持连续,且无空洞,形状接近四棱凸台。在工作空间下方形成了一块 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的区域,考虑该4-CRR机构在穴播机主体上的安装位置,该区为穴播机灵活调整播种位置提供了有利条件,使得穴播机在前进过程中,即便不转向的情况下,也可在其下方 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的区域内灵活播种。

4 穴播机实例分析

对基于4-CRR并联机构的玉米穴播机进行仿真模拟,如图7所示。穴播机主体在轮子的驱动下沿直线前进,速度为 1 m/s ,依次对5个播种位置进行播种。1号和2号播种孔之间的距离为 300 mm ,2号和3号播种孔之间的距离为 280 mm ,3号和4号播种孔之间的距离为 280 mm ,4号和5号播种孔之间的距离为 260 mm ,其中,3号播种孔与另外4个播种孔不在同一条直线上。

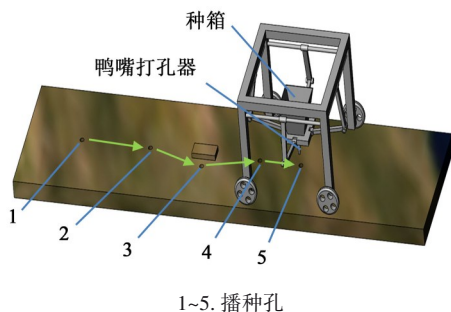


图7 基于4-CRR机构的玉米穴播机

Fig. 7 Corn hill-seeder based on 4-CRR mechanism

该穴播机完成了5个播种孔上的准确播种,说明该穴播机能够在前进速度不变的情况下灵活调整播

种距离;3号播种孔的成功播种说明,该穴播机能够灵活避障。该穴播机能够实现对株距和播种密度的及时调整,提高了播种作业的效率和质量,具有很强的实用价值。

5 结语

提出了一种基于4-CRR并联机构的玉米穴播机。通过螺旋理论得出4-CRR并联机构具有3个移动自由度,该机构具有的自由度符合穴播机灵活播种的需要;采用等效平面投影法求解了4-CRR并联机构的位置逆解,并推导了4个驱动副的角速度与动平台移动速度之间的关系,对实际穴播机的速度规划具有重要的理论指导意义;基于玉米播种要求和工作空间,提出了4-CRR并联机构的杆长确定方法,获得杆长取值范围。依据播种要求和杆长取值范围,选取了4-CRR并联机构的尺寸,求解了该机构的工作空间,该穴播机下方具有一块 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的可调整区域,满足玉米播种的行距和株距要求。通过仿真模拟,证明了该穴播机的可行性与实用性。该玉米穴播机对提高玉米播种质量,促进增产增收具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 杨吉顺,高辉远,刘鹏,等.种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J].作物学报,2010,36(7):1226-1233.
YANG Jishun, GAO Huiyuan, LIU Peng, et al. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36 (7) : 1226-1233.
- [2] 段巍巍,李慧玲,肖凯,等.密度对玉米光合生理特性和产量的影响[J].玉米科学,2007,15(2):98-101.
DUAN Weiwei, LI Huiling, XIAO Kai, et al. Effects of density on photosynthetic physiological characteristics and yield of maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(2):98-101.
- [3] 张永科,黄文浩,何仲阳,等.玉米密植栽培技术研究[J].西北农业学报,2004,13(4):98-103.
ZHANG Yongke, HUANG Wenhao, HE Zhongyang, et al. Study on close planting of maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2004, 13(4):98-103.
- [4] 叶鹏达,尤晶晶,仇鑫,等.并联机器人运动性能的研究现状及发展趋势[J].南京航空航天大学学报,2020,52(3):363-377.
YE Pengda, YOU Jingjing, QIU Xin, et al. Status and development trend of motion performance in parallel robot [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3):363-377.
- [5] LI Ruiqin, MENG Hongwei, BAI Shaoping, et al. Stability and gait planning of 3-UPU hexapod walking robot [J]. Robotics, 2018, 7 (3):1-17.
- [6] 余亮,张龙,王鹏,等.一种三平动并联机构的设计与运动学分析[J].机械传动,2020,44(2):61-67.

- YU Liang, ZHANG Long, WANG Peng, et al. Design and kinematics analysis of a 3-DOF translational parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(2): 61-67.
- [7] 李坤全, 文睿. 空间三平移全柔性并联机构构型设计[J]. 机械传动, 2018, 42(6): 86-89.
- LI Kunquan, WEN Rui. Configuration design for spatial 3-DOF translation fully compliant parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(6): 86-89.
- [8] 叶伟, 谢镇涛, 李秦川. 一种可用于微创手术的并联机构运动学分析与性能优化[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 103-112.
- YE Wei, XIE Zhentao, LI Qinchuan. Kinematics analysis and performance optimization of a parallel manipulator for minimally invasive surgery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 103-112.
- [9] 周毅钧, 陈业富, 苏荣海. 2RPS/2SPS 并联机构及运动学分析[J]. 机械传动, 2020, 44(6): 115-120.
- ZHOU Yijun, CHEN Yefu, SU Ronghai. 2RPS/2SPS parallel mechanism and kinematics analysis[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(6): 115-120.
- [10] 郭强, 崔国华, 张帆, 等. 5 自由度 4-SPRR-SPR 并联机构的运动学与工作空间分析[J]. 机械传动, 2019, 43(12): 97-102.
- GUO Qiang, CUI Guohua, ZHANG Fan, et al. Kinematics and work-space analysis of 4-SPRR-SPR 5-DOF parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(12): 97-102.
- [11] 柴馨雪, 项济南, 李秦川. 2-UPR-RPU 并联机构奇异分析[J]. 机
- (上接第 78 页)
- [6] 郑阳平. “智能+”在制造业转型升级中的应用综述[J]. 机床与液压, 2020, 48(11): 185-188.
- ZHENG Yangping. Overview of the application of "smart+" in the transformation and upgrading of manufacturing industry[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(11): 185-188.
- [7] 关永瀚, 姚燕安, 刘超. 单自由度八面体概率滚动机器人[J]. 机械工程学报, 2020, 56(7): 44-51.
- GUAN Yonghan, YAO Yan'an, LIU Chao. Single-degree-of-freedom octahedral probabilistic rolling robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(7): 44-51.
- [8] 刘坤, 吉硕, 孙震源, 等. 仿生运动康复机器人结构设计与优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(3): 1144-1152.
- LIU Kun, JI Shuo, SUN Zhenyuan, et al. Structural design and optimization of bionic motion rehabilitation robot[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(3): 1144-1152.
- [9] 徐洪伟. 行走运动仿生机器人结构设计与优化[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 1-8.
- XU Hongwei. Structure design and optimization of walking motion bionic robot[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 1-8.
- [10] CHEN G, ZHANG W. Comprehensive evaluation method for performance of unmanned robot applied to automotive test using fuzzy logic and evidence theory and FNN[J]. Computers in Industry, 2018, 98: 48-55.
- [11] BAJRAMI X, KOPACEK P, SHALA A, et al. Modeling and control of a humanoid robot[J]. E & I Elektrotechnik Und Informationstechnik, 2013, 130(2): 61-66.
- 械工程学报, 2015, 51(13): 144-151.
- CHAI Xinxue, XIANG Ji'nan, LI Qinchuan. Singularity analysis of a 2-UPR-RPU parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 144-151.
- [12] ZHANG B, LIU F, LI J D, et al. Dynamic analysis and control research of a 3-DOF hydraulic driven parallel mechanism[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2020, 13(2): 156-170.
- [13] ARIAN A, ISAKSSON M, GOSSELIN C. Kinematic and dynamic analysis of a novel parallel kinematic Schönflies motion generator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 147: 1-14.
- [14] CHEN Z M, LI M, KONG X W, et al. Kinematics analysis of a novel 2R1T 3-PUU parallel mechanism with multiple rotation centers[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 152: 1-18.
- [15] WANG C Z, FANG Y F, GUO S, et al. Design and kinematical performance analysis of a 3-RUS/RRR redundantly actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2013, 5(4): 1-11.
- 收稿日期: 2021-07-11
- 基金项目: 山西省重点研发计划(201803D421028, 201903D421051)
- 作者简介: 高海豹(1993—), 男, 河南周口人, 硕士研究生; 主要研究方向为并联机构学与机器人学。
- 通信作者: 李瑞琴(1964—), 女, 山西太原人, 博士, 教授; 主要研究方向为并联机构学与机器人学。
- [12] 马晓赞, 姚力. 不同跟高的增高鞋垫对人体足底压力和稳定极限的影响研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2017, 23(3): 66-71.
- MA Xiaoyun, YAO Li. Research on the effect of different heel heights insoles on human plantar pressure and stability limit[J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Natural Science Edition), 2017, 23(3): 66-71.
- [13] 胡艳凯, 郑劭, 侯昭, 等. 一种单驱动机器人腰部结构的运动学分析[J]. 机械传动, 2018, 42(9): 75-79.
- HU Yankai, ZHENG Meng, HOU Zhao, et al. Kinematics analysis of the waist structure of a single-drive robot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(9): 75-79.
- [14] 朱红娟. 基于旋量理论的五自由度焊接机器人正运动学分析研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 150-152.
- ZHU Hongjuan. Research on positive kinematics analysis of five-degree-of-freedom welding robot based on screw theory[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2019, 48(1): 150-152.
- [15] 刘伟达, 曾凯, 张皓天. 基于 ADAMS 软件的小型机器人设计与仿真[J]. 机械制造, 2018, 56(12): 39-42.
- LIU Weida, ZENG Kai, ZHANG Haotian. Design and simulation of small robots based on ADAMS software[J]. Mechanical Manufacturing, 2018, 56(12): 39-42.
- 收稿日期: 2020-12-12 修回日 2021-01-07
- 基金项目: 陕西国防工业职业技术学院 2021 年校本项目(Gfy21-67)
- 作者简介: 胡艳凯(1990—), 男, 河北廊坊人, 硕士, 讲师; 主要研究方向为机器人结构设计与仿真。
- 付慧(1992—), 女, 甘肃天水人, 硕士, 助教; 主要研究方向为机械设计制造及自动化。