doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.018

基于非圆齿轮的甘薯水平移栽机构设计与试验

周海丽[1,2]　胡佳远[1]　肖骄华[1]　俞高红[1,3]　叶秉良[1,3]　赵　钧[1]

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 全省农业智能感知与机器人重点实验室, 杭州 310018;
3. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 针对国内甘薯移栽机构实现水平移栽轨迹的局限性,本文提出基于非圆齿轮的甘薯移栽机构设计方法。首先分析水平移栽农艺要求,规划包含取苗、入土、投苗等阶段的理想轨迹,选取 9 个关键位姿点作为 2R 开链机构求解的输入参数;将非圆齿轮移栽机构简化为平面 2R 开链机构,根据位姿点和圆心点参数建立近似多位姿运动综合方程,通过同伦算法求解机构参数,并引入杆长约束与轨迹优化,获得杆长最优解(杆 1 长 100 mm,杆 2 长 240 mm)。开发 Matlab 辅助优化软件,完成非圆齿轮节曲线设计与传动比两级分配,以此参数开展结构设计,并进行虚拟样机仿真分析,验证了甘薯移栽机构设计的正确性。设计甘薯移栽机构物理样机并开展田间试验,结果表明:甘薯苗栽植姿态符合轨迹规划,在栽植速率为 45、55、65 株/min 时,栽植深度、株距、土下水平长度合格率均达到 85% 以上,其中 45 株/min 时各项合格率均超过 90%,证明该机构的可行性与高效性,为甘薯机械化移栽提供了实用方案。

关键词: 甘薯; 水平移栽机构; 非圆齿轮; 辅助优化; 试验

中图分类号: S223.9+3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)07-0194-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Sweet Potato Horizontal Transplanting Mechanism Based on Non-circular Gears

ZHOU Haili[1,2]　HU Jiayuan[1]　XIAO Jiaohua[1]　YU Gaohong[1,3]　YE Bingliang[1,3]　ZHAO Jun[1]

(1. *College of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: In view of the limitations of domestic sweet potato transplanting mechanism on realizing horizontal transplanting trajectory, a sweet potato transplanting mechanism design method was proposed based on non-round gears. Firstly, the requirements of horizontal transplantation agronomics were analyzed, the ideal trajectory, including seedling extraction, soiling, seedling throwing and other stages was planned, and nine key pose points were selected as the input parameters for solving the 2R chain opening mechanism. The non-circular gear transplanting mechanism was simplified into a plane 2R chain opening mechanism, an approximate multi-pose motion comprehensive equation was established based on the parameters of the pose points and center points, the mechanism parameters were solved through the homoethic algorithm, and rod length constraints and trajectory optimization were introduced to obtain the optimal solution (rod 1 was 100 mm, rod 2 was 240 mm). Matlab assisted optimization software was developed to complete the non-circular gear joint curve design and two-stage transmission ratio allocation, structural design was carried out by using these parameters, and virtual prototype simulation analysis was performed to verify the correctness of the sweet potato transplanting mechanism design. The physical prototype of the sweet potato transplanting mechanism was designed and field experiments were carried out. The results showed that the planting posture of the sweet potato seedlings was in line with the trajectory plan. When the planting rate was 45 plants/min, 55 plants/min and 65 plants/min, the

收稿日期: 2025-09-03　修回日期: 2025-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(32201676、32171899)、浙江省自然科学基金项目(LD24E050007)和浙江理工大学基本科研业务费专项资金资助项目(25242164-Y)

作者简介: 周海丽(1989—),女,副教授,博士,主要从事智能农业装备设计与优化研究,E-mail: zhouhl@zstu.edu.cn

通信作者: 俞高红(1975—),男,教授,博士,主要从事机构学与移栽装备创新设计研究,E-mail: yugh@zstu.edu.cn

passing rate of the planting depth, plant spacing, and under-soil horizontal length reached more than 85%. Among them, the passing rate of each item exceeded 90% at 45 plants/min, indicating the feasibility and efficiency of the mechanism, and providing a practical solution for mechanized transplanting of sweet potatoes.

Key words: sweet potato; horizontal transplanting mechanism; non-circular gear; auxiliary optimization; experiment

0　引言

目前，我国超半数甘薯种植地区仍依靠人工或简易工具移栽，用工量占整个生产过程的 50% 以上，不仅劳动强度大、效率低，而且作业质量难以保障[1-2]，同时现有甘薯移栽机械存在与农艺融合度、栽植效率和成功率不高等问题[3]。

欧美甘薯移栽体系以高效率、大规模生产为核心，多采用链夹式或全自动移栽机[4-6]，如美国 Kennco[7] 和意大利 Checchi Magli 公司[8] 研制的大型多行移栽机型，由于我国甘薯移栽区域多为小地块、地势不平，该类机具不适合在我国大范围推广。日本聚焦小地块和丘陵地形，开发自走式移栽机[9-11]，如日本洋马 PH10A、井关 PVH103、久保田 KP103E 机型[12]，其设计的小型移栽机对我国丘陵山地甘薯移栽具有较大借鉴意义[13]，市面上也出现几款其仿型设计的甘薯移栽机。

国内甘薯机械化移栽虽起步较晚，但在不断探索研究本土化的甘薯机械移栽方案。现有甘薯移栽机型根据移栽机构原理的不同，可大致分为以下 3 类：链（带）夹式、多连杆式、齿轮箱式。胡良龙等[14] 研制的 2ZGF－2 型甘薯复式移栽机、南通富来威研制的 2ZL 型链夹式甘薯移栽机[15] 均采用了链（带）夹式移栽机构，该类移栽机构结构简单，易于研制，市面上出现较多，但存在土壤扰动较大，移栽速度受人工送苗限制等问题。山东农业大学研制的一种甘薯苗膜上侧插平栽装置[16] 和海南大学研制的一种甘薯水平移栽装置[17] 采用了多杆式移栽机构，该类移栽机构能实现斜插、水平、船底形等多种栽插方式，但存在机构可靠性不高，夹苗爪易伤苗、漏苗等问题。浙江理工大学研制的椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构[18]、变性椭圆齿轮行星轮系移栽机构[19] 则采用了齿轮箱式移栽机构，该类甘薯移栽机构具有结构紧凑、移栽轨迹多样、移栽效率较高等优势。另外国内还研制了其他各类新型移栽机，如：预处理苗带甘薯裸苗自动移栽机[20]、软夹轮压式甘薯移栽机[21]。目前国内甘薯移栽机构的实用方案依旧较少，样机的实际生产应用不多，仍需推进农机与农艺的结合。

针对国内甘薯水平栽植机构栽植效果差的问题，本文结合甘薯移栽机构的农艺要求和设计要求，提出了一种非圆齿轮甘薯移栽机构的设计方法。分析甘薯水平移栽的农艺要求，规划甘薯苗水平移栽理想轨迹；简化非圆齿轮移栽机构为空间开链 2R 机构，建立近似多位姿运动综合方程，基于同伦算法求解得到空间 2R 机构参数；开发近似多位姿综合方法辅助优化设计软件；进行甘薯移栽机构的结构设计、运动学虚拟仿真分析；完成实物装配和移栽试验，为甘薯机械化移栽提供技术支持。

1　农艺要求与机构运动学模型

1.1　农艺要求与轨迹规划

甘薯农艺要求根据种植地区的不同而变化，因此甘薯栽插的方式较多，直插法、斜插法、“船底形”栽插法和水平栽插法是几种常见的栽插方式[22]，其中水平栽插法具有入土节点多、抗旱力强、易发根、结薯多且大小均匀等优点。鉴于水平栽插法具有较好的栽植效果，并已在甘薯移栽中得到广泛应用[23]，本文将实现甘薯水平栽插农艺确定为移栽机构设计的主要农艺目标。明确水平栽插法农艺要求：甘薯苗根部两至三节水平栽入土中，如图 1 所示，垄面至甘薯苗最低点深度 h 为 50 ~ 70 mm，埋入土下薯节整体长度 L 为 150 ~ 200 mm、土下水平长度 l 为 90 ~ 120 mm，株距为 150 ~ 250 mm。甘薯栽种常用垄具体参数为：垄宽 D 为 800 ~ 1 000 mm，垄高 H 为 300 ~ 350 mm。

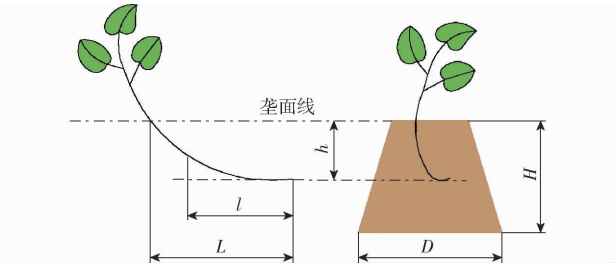


图 1　甘薯水平移栽农艺参数图

Fig. 1　Agronomic parameters for horizontal transplanting of sweet potatoes

结合农艺要求，规划甘薯水平移栽轨迹如图 2 所示，点 A 为取苗位置，夹苗爪距离甘薯苗根部顶端 2 ~ 3 cm 处闭合，实现对甘薯苗的夹取，$A-B-C$ 阶段为带苗过程，点 B 为入土点，$B-C$ 为土下运行

阶段，点 C 为投苗点，夹苗爪张开，甘薯苗脱离，$C-D$ 阶段为土下回程阶段，$D-A$ 阶段为土上回程阶段。在规划好的水平移栽轨迹上选取 9 个关键点位姿数据，如图 2 所示，位姿点 1 控制取苗位置，入土点 9 与投苗点 6 控制甘薯苗入土长度 L，入土点 9 与入土点 4 控制入土出土位置与角度，使得夹苗爪入土和出土角度与轨迹接近相切，从而减小夹苗爪在田垄中阻力，位姿点 5、7、8 辅助轨迹使入土与出土轨迹接近，位姿点 2、3 控制轨迹回程。具体位姿数据如表 1 所示，x_P、y_P 表示位姿点的横坐标与纵坐标，φ 表示经过该位姿点时杆件与横坐标轴所夹姿态角。

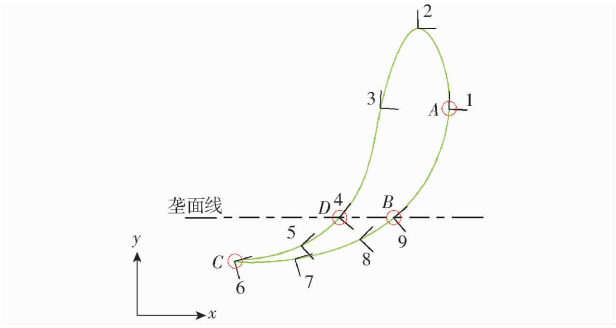


图 2 甘薯水平移栽静轨迹与位姿点

Fig. 2 Static trajectory and posture points of sweet potato horizontal transplanting

表 1 理想轨迹位姿点数据

Tab. 1 Ideal trajectory pose point data

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_P/mm	281.9	353.5	259.7	225.2	164.9	113.2	42.2	53.5	138.1
y_P/mm	190.2	355.3	357.7	284.1	190.2	149.0	133.7	123.3	121.5
φ/(°)	-79.3	-43.1	-34.7	-38.5	-59.3	-74.6	-92.7	-91.9	-105.6

1.2 机构近似多位姿运动学模型

本文设计的行星轮系甘薯移栽机构在不考虑非圆齿轮的传动啮合特性下，可将轮系机构简化为一般平面 2R 开链机构。如图 3 所示，其中杆 1 表示甘薯移栽机构的行星架；杆 2 表示移栽机构的移栽臂；点 A 表示甘薯移栽机构太阳轮中心点；点 B 表示甘薯移栽机构行星轮中心点；杆 2 末端与 x 轴有一个夹角，表示移栽臂末端的姿态角，用 φ 表示。

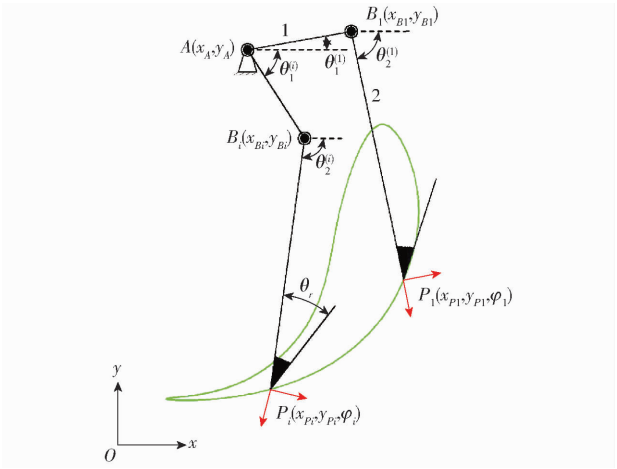


图 3 平面 2R 开链机构简图

Fig. 3 Schematic of planar 2R open chain mechanism

当要求机构末端夹苗爪从初始位姿运动到给定的第 $i(i=2,3,\cdots,N)$ 位姿时，有相对位移矩阵 $\boldsymbol{D}_{1i}$，即

$$\boldsymbol{D}_{1i}=\begin{bmatrix}\cos\varphi_{1i} & -\sin\varphi_{1i} & E_p\\ \sin\varphi_{1i} & \cos\varphi_{1i} & F_p\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\quad(i=2,3,\cdots,N)\tag{1}$$

其中

$$E_p=x_{Pi}-x_{Pi}\cos\varphi_{1i}+y_{P1}\sin\varphi_{1i}$$

$$F_p=y_{Pi}-x_{Pi}\sin\varphi_{1i}+y_{P1}\sin\varphi_{1i}$$

$$\varphi_{1i}=\varphi_1-\varphi_i$$

取圆心点 A 坐标$(x_A,y_A,1)$和圆心点 B 的坐标$(x_B,y_B,1)$为设计变量，以杆长不变这一条件作为约束，可建立平面 2R 开链机构的运动综合设计方程[24]，即

$$(\boldsymbol{B}_i-\boldsymbol{A})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{B}_i-\boldsymbol{A})=(\boldsymbol{B}_1-\boldsymbol{A})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{B}_1-\boldsymbol{A})\quad(i=2,3,\cdots,N)\tag{2}$$

其中

$$\boldsymbol{B}_i=\boldsymbol{D}_{1i}\boldsymbol{B}_1$$

当位姿数 $N>5$ 时，将式(2)展开后可得到一组超定非线性方程组，此时可以将该方程组转化为多元函数求极值的问题。设定一个目标函数 $F(\boldsymbol{x})$，即

$$\min F(\boldsymbol{x})=\sum_{j=2}^{N}(f_j(\boldsymbol{x}))^2\tag{3}$$

其中，$f_j(\boldsymbol{x})$为式(1)与式(2)联立所得方程组，$\boldsymbol{x}=(x_A,y_A,x_{B1},y_{B1})$。

根据求极值原理，要取极小值需对式(3)中的 4 个设计变量求一阶偏导数，再令其等于 0，为进一步得到满足实际移栽机构的最优解，需要添加一些额外符合实际的约束条件，如移栽机构的杆长和初始安装位置等，除引入实际约束条件外还可以将误差范围扩大以寻求更多符合条件的解。令式(3)中的 x_A为已知变量，并给定其范围区间$[x_{A\min},x_{A\max}]$和步长 l_{step}，同样分别对式(3)中 3 个设计变量求一阶偏导数，再令其等于 0，此时式(3)转变为

$$\begin{cases}\dfrac{\partial F_i(\boldsymbol{x})}{\partial y_A}=0\\ \dfrac{\partial F_i(\boldsymbol{x})}{\partial x_{B1}}=0\\ \dfrac{\partial F_i(\boldsymbol{x})}{\partial y_{B1}}=0\end{cases}\quad(i=(x_{A\max}-x_{A\min})/l_{\mathrm{step}})\tag{4}$$

最后使用同伦算法求解式(4)，得到全部解，依次将解代入检验是否满足要求，将结果保存几组最优的解。因给定过参数x_A的取值区间范围[$x_{A\min}$，$x_{A\max}$]和步长，此时可以将参数x_A的值在范围内改变，并保存对应结果的几组最优解。当求解完范围内所有值，最终得到的若干组解即为之前约束范围内的满足要求的全部解，进而可根据移栽机构实际需求从中选取最适合机构的参数方案。

2　移栽机构设计参数求解与优化

2.1　机构参数求解

在对甘薯移栽机构进行近似多位姿综合求解时，涉及的计算量较大、过程复杂繁琐，为简化操作、减少用户在设计过程中的计算时间，以提高机构设计效率，本文基于 Matlab 将近似多位姿综合设计方法通过编写程序的方式搭建优化辅助设计平台。该平台可实现综合-求解-优化-输出结果一体化功能，包括最终优化后符合要求的机构参数、非圆齿轮设计、复演的动-静轨迹和移栽过程中夹苗爪形成的穴口大小。图 4 为平面 2R 机构综合辅助优化平台的界面，其中主要有 4 个区域。①菜单操作栏，包含求解、解、运行、动画、齿廓生成 5 大模块。②机构参数显示区，点击求解和对应解显示出对应结果，l_a、l_b、l_c分别为杆 1、杆 2、夹苗爪长度，st1、st2、st3 分别为杆 1、杆 2、夹苗爪相对于 x 轴角位移增量；(x_a，y_a)、(x_b，y_b)分别为杆 1、杆 2 旋转中心的坐标，姿态角为杆 2 与夹苗爪夹角，n 为位姿点数据数量。③相对角位移增量显示区，即杆 1 与杆 2 经过位姿点时的相对角位移增量。④结果显示区，左边窗口显示机构静态与动态运行情况，右边 3 个窗口分别显示角位移曲线、传动比曲线、非圆齿轮节曲线。

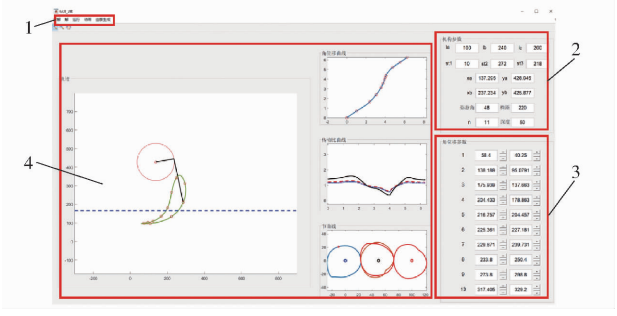


图 4　平面 2R 机构综合辅助优化平台的界面

Fig. 4　Interface of comprehensive auxiliary optimization platform for planar 2R mechanisms

1. 菜单操作栏　2. 机构参数显示区　3. 相对角位移增量显示区　4. 结果显示区

选取 1.1 节的 9 个位姿数据输入软件中，并得到如表 2 所示求得的 6 组符合要求的实数解。结合甘薯移栽实际情况，如安装位置应位于轨迹左上方、杆 1 长度过长会导致行星轮系中心距过大，从而使行星架体积和质量过大、杆 2 长度应和杆 1 长度成一定比例，过长导致移栽臂弯曲过大影响夹苗爪末端夹苗，甚至会与送苗装置发生干涉。杆 1 适宜长度为 90 ~ 110 mm，杆 2 适宜长度为 200 ~ 260 mm。综合考虑以上因素，结合表 2 中的坐标点以及求得的杆长，解 5 的参数为本文所设计的甘薯移栽机构最优解，平面 2R 开链机构初始位置角 θ_{1i}、θ_{2i}、杆 1 和杆 2 长度 L_1、L_2 分别为 358.75°、281.97°和 100、240 mm。

表 2　平面 2R 开链机构求解结果

Tab. 2　Solution results of planar 2R open chain mechanism　　mm

解	x_A	y_A	x_B	y_B
1	-20.47	378.85	64.76	416.61
2	91.21	253.31	-2.45	9.38
3	41.22	352.89	108.43	467.84
4	56.62	380.16	138.28	439.92
5	137.29	428.04	237.23	425.87
6	-104.92	345.07	-13.04	380.68

2.2　轨迹复演优化

在齿轮传动约束下，非圆行星轮系运作过程中不可出现移栽臂回摆现象，即相对角位移需要满足单调性要求。机构达到 N 个位姿有相应的 N 组相对角位移，相对角位移计算式为

$$\begin{cases}\Delta\theta_{1i}=\theta_{1i}-\theta_{11}\\ \Delta\theta_{2i}=\theta_{2i}-\theta_{21}-\Delta\theta_{1i}\end{cases}\quad(i=2,3,\cdots,N)\qquad(5)$$

式中　$\Delta\theta_{1i}$——行星架相对于 x 轴角位移增量

$\Delta\theta_{2i}$——移栽臂相对于行星架角位移增量

计算得到 9 个位姿点，通过式(5)计算得到的相对角位移参数代入 2R 开链机构，复演生成如图 5a 所示运行轨迹，从图 5a 中可以看出，轨迹底部存在一个小环扣，需要对初步得到的轨迹进行优化。通过分析，可采取在 6 ~ 7 段和 8 ~ 9 段之间增加两个型值点，观察移栽轨迹的变化趋势并结合 1.1 节对理想轨迹的设计要求来优化复演轨迹，以获得符合甘薯水平理想移栽轨迹。将第 10 个点的角位移增量进行增减，观察轨迹变化趋势：当第 10 个点的角位移增量减小时(图 5b 黄色线条轨迹)，曲线的环扣变大，不利于调整整体轨迹；当第 10 个点的角位移增大时(图 5b 绿色线条轨迹)，环扣消失，第 10 个点向第 11 个点逼近，且曲线向圆滑方向过渡。因此，将第 10 个点的角位移增量增大调整，并通过相邻几个点配合调整，最终优化轨迹如图 5c 所示，对应理想轨迹位姿点相对角位移如表 3 所示。图 5 为机架静止状态运行轨迹，移栽机构需搭配移动底盘

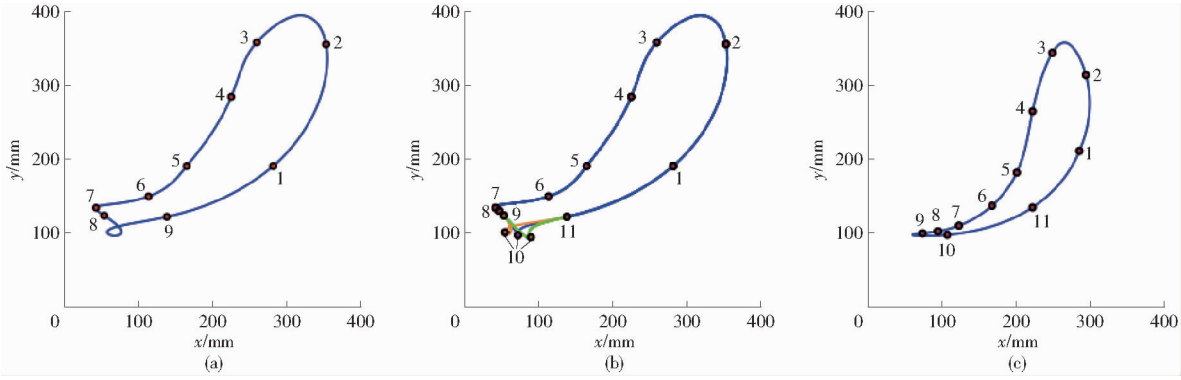


图 5 参数优化过程与结果

Fig. 5 Parameter optimization process and results

表 3 理想轨迹位姿点相对角位移

Tab. 3 Relative angular displacement of ideal trajectory pose points

相对角位移	理想轨迹位姿点										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta\theta_{1i}$/(°)	0	58.40	138.19	175.94	204.43	216.76	225.36	229.67	233.80	273.80	317.41
$\Delta\theta_{2i}$/(°)	0	40.25	95.08	137.66	178.86	204.46	227.18	239.73	250.40	298.80	329.20

运行,底盘运行速度 v 等于移栽株距 s 除以机构运行周期 t,株距 s 为 200 mm,周期 t 设置为 1 s,得到底盘运行速度,即移栽机构水平速度为 200 mm/s,同时设置栽植深度为 50 mm,将参数代入软件运行得到移栽机构动轨迹运行结果,如图 6 所示。分析机构动轨迹运行结果可知,移栽动轨迹各项农艺参数均符合 1.1 节确立的农艺目标,理论轨迹规划合理。

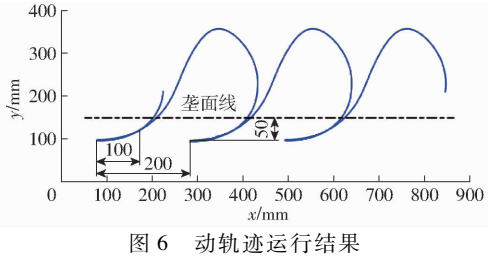


图 6 动轨迹运行结果

Fig. 6 Dynamic track operation results

2.3 非圆齿轮参数设计

根据 2.2 节得到的相对角位移数据可计算出甘薯移栽机构的总传动比,然后基于总传动比进行分配[25]。甘薯移栽机构的总传动比为

$$I = \left| \frac{W_0 - W_1}{W_2 - W_1} \right| \tag{6}$$

式中 I——移栽机构总传动比

W_0——太阳轮角速度

W_1——行星架角速度

W_2——移栽臂角速度

因行星轮系采用的是非圆齿轮传动,一级非圆齿轮传动对这对非圆齿轮要求较高,在分配传动比时,尽可能使分配后的两级传动比差别小[26],各级传动比计算式为

$$\begin{cases} i_1 = K\sqrt{I} \\ i_2 = I/i_1 \end{cases} \tag{7}$$

式中 i_1——第 1 级非圆齿轮传动比

i_2——第 2 级非圆齿轮传动比

K——曲线峰值调整系数

图 7 所示为分配后的两级子传动比,可见分配后的两级子传动比较接近,分配结果合理。

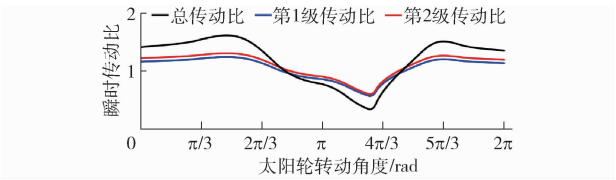


图 7 两级子传动比曲线

Fig. 7 Two-stage transmission ratio curves

在行星轮系移栽机构第 1 级、第 2 级传动比参数的基础上,进一步求解非圆齿轮的节曲线。如图 8 所示,设齿轮副的中心距为 a,主动非圆齿轮 1 的转角为 φ_1,从动非圆齿轮 2 的转角为 φ_2,则有

$$i_1 = \frac{r_2(\varphi_2)}{r_1(\varphi_1)} \tag{8}$$

其中

$$r_1(\varphi_1) = \frac{a}{1 + i_1} \tag{9}$$

式中 $r_1(\varphi_1)$——主动非圆齿轮 1 的节曲线向径

$r_2(\varphi_2)$——从动非圆齿轮 2 的节曲线向径

则从动非圆齿轮 2 的节曲线方程为

$$r_2(\varphi_2) = a - r_1(\varphi_1) \tag{10}$$

其中

$$\varphi_1 = \int_0^{\varphi_2} i_1 \mathrm{d}\varphi_2 \tag{11}$$

$$\varphi_2 = \int_0^{\varphi_1} i_1 \mathrm{d}\varphi_1 \tag{12}$$

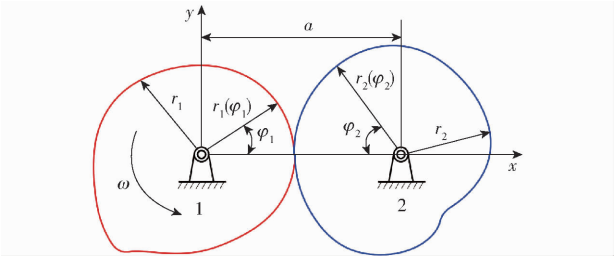


图 8　非圆齿轮简图

Fig. 8　Schematic of non-circular gear

将分配后的两级传动比代入节曲线求解方法中可求得甘薯移栽机构的行星轮系两级传动的非圆齿轮节曲线，如图 9a 所示。将上述得到的非圆齿轮节曲线导入到课题组现有齿廓生成软件中，得到两级非圆齿轮，如图 9b 所示。

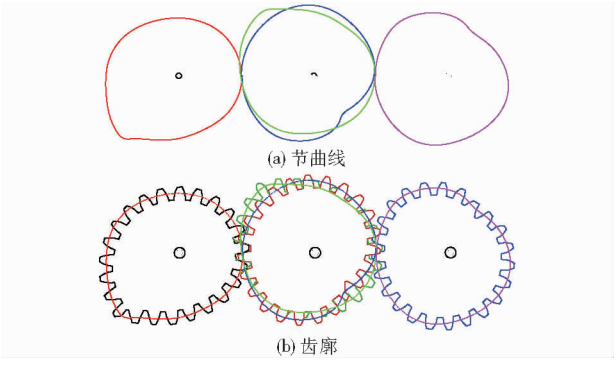


图 9　非圆齿轮节曲线与齿廓

Fig. 9　Pitch curves and tooth profile of non-circular gear

3　移栽机构结构设计与虚拟样机仿真

3.1　结构设计

根据所得非圆齿轮齿廓线和杆 2 杆长，在 Solidworks 软件中完成甘薯移栽机构结构设计，得到如图 10 所示移栽机构三维模型。

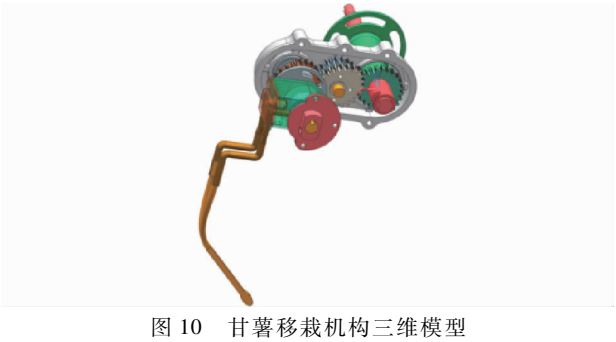


图 10　甘薯移栽机构三维模型

Fig. 10　Three-dimensional model of sweet potato transplanting mechanism

为保证移栽过程可靠夹苗，提出一种采用端面凸轮-摆杆式的夹苗臂，结构简单、夹-投稳定，图 11 所示为新移栽臂的结构简图，其组成包括端面凸轮、凸轮轴、微型轴承、弹簧、夹苗爪、销轴。端面凸轮与凸轮轴通过六边形轴连接，使其与凸轮轴一起转动，凸轮轴与行星架固接在一起，当行星架转动时，凸轮轴带动端面凸轮转动，夹苗爪通过连接在凸轮壳上的销轴形成转动副，两个夹苗爪的开端处各装有一个微型轴承，微型轴承与端面凸轮滚动接触以减小摩擦力，两个夹苗爪通过弹簧连接，保证夹苗爪上微型轴承能够始终与端面凸轮接触。当端面凸轮转动到远休止角时，端面凸轮远休止面将夹苗爪顶开，夹苗爪末端闭合，此时处于夹苗阶段；端面凸轮继续转动，到近休止角时，夹苗爪在弹簧拉力作用下，夹苗爪被拉紧使其与端面凸轮的近休止面接触，夹苗爪末端张开，此时夹苗爪处于投苗阶段。

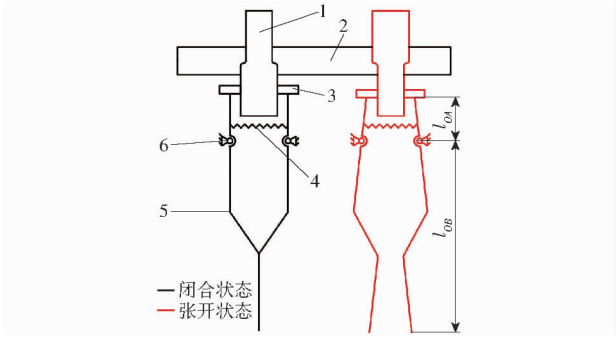


图 11　移栽臂机构简图

Fig. 11　Schematic of transplanting arm mechanism

1. 端面凸轮　2. 凸轮轴　3. 微型轴承　4. 弹簧　5. 夹苗爪　6. 销轴

凸轮行程与夹苗爪单边张开量的比值等于机架到凸轮长度 l_{OA} 与机架到夹苗爪末端长度 l_{OB} 的比值，由 2.1 节已知夹苗爪长度 $L_2 = 240$ mm，结合甘薯苗末端直径以及可能存在弯曲现象，将夹苗爪最大张开量设置为 50 mm，单边张开量为 25 mm，可计算出端面凸轮的行程为 2 mm、机架到凸轮长度为 17.78 mm 以及机架到夹苗爪末端长度为 222.22 mm，最终夹苗爪部分与非圆齿轮结合，绘制得到移栽机构整体结构，如图 12 所示。

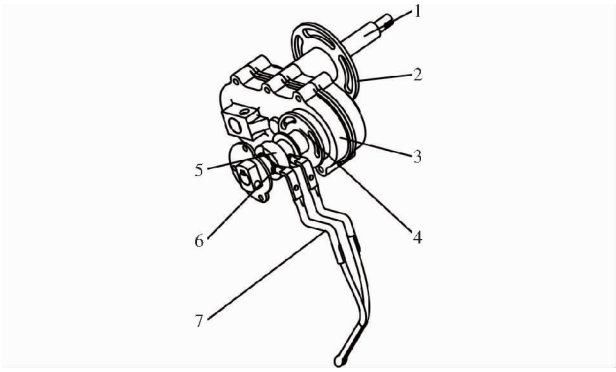


图 12　移栽机构整体结构图

Fig. 12　Overall structure diagram of transplanting mechanism

1. 传动轴　2. 法兰　3. 行星架（齿轮箱）　4. 凸轮轴　5. 凸轮　6. 微型轴承　7. 夹苗爪

3.2 虚拟样机仿真

将构建完成的三维模型导入 Adams 仿真软件中进行运动学仿真分析，之后将仿真软件运行得到的仿真轨迹坐标点导出并在 AutoCAD 软件中进行绘制，最后进行仿真轨迹与理论轨迹对比，验证夹苗爪处凸轮的准确性。根据图 13、14 仿真结果表明：理论移栽轨迹与仿真移栽轨迹基本重合，非圆齿轮齿廓设计运行准确；凸轮行程设计合理，夹苗爪取放苗轨迹位置精准，设计结果符合理论效果。

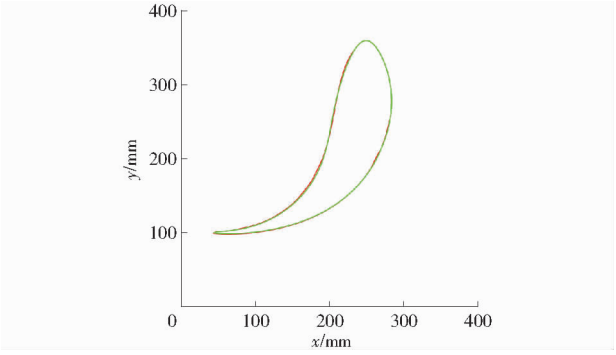


图 13 轨迹仿真结果

Fig. 13 Trajectory simulation results

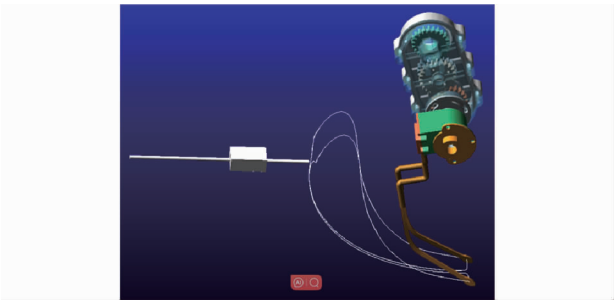


图 14 Adams 仿真结果

Fig. 14 Adams simulation results

4 移栽机构样机试验

为进一步验证甘薯水平移栽机构的可行性，将移栽机构搭载到甘薯移栽机上，样机如图 15 所示。移栽试验条件：选用烟薯 25，甘薯苗长度为 250 ~ 300 mm，直径 3 ~ 5 mm，设定移栽机栽植深度 50 mm，株距 200 mm。试验 3 种不同栽植速率，分别为 45、55、65 株/min，每个速率栽植 60 株。根据 1.1 节中规划的甘薯水平移栽农艺目标，分别测定每一组的栽植深度合格率（栽植深度 50 ~ 70 mm 合格）、株距合格率（株距 180 ~ 220 mm 合格）、甘薯苗土下水平长度合格率（长度 90 ~ 120 mm 合格），并统计栽植的综合成功率（栽植深度、株距、土下水平长度均合格），测定结果如表 4 所示。



图 15 甘薯移栽机样机

Fig. 15 Sweet potato transplanter prototype

表 4 不同栽植速率下各项参数合格率

Tab. 4 Qualified rate of various parameters at different planting rates %

栽植速率/（株·min^{-1}）	栽植深度合格率	株距合格率	土下水平长度合格率	综合成功率
45	91.6	90.0	93.3	86.7
55	88.3	88.3	90.0	85.0
65	86.6	85.0	91.6	80.0

在栽植速率为 45、55、65 株/min 时，栽植深度、株距、土下水平长度合格率均达到 85% 以上，其中 45 株/min 时各项合格率均超过 90%，随着速率上升，栽植深度和株距合格率都有所下降。根据试验现场观察发现：①夹苗爪对土壤有扰动作用，速度较快时夹苗爪有将土壤扬起现象，进而带动甘薯苗抬升。②夹苗爪运行时存在开合不精确现象，主要由于工件加工存在误差、凸轮控制处存在缝隙，进而影响夹苗爪开闭时间。实地栽植效果图如图 16 所示。



(a) 栽植深度测定

(b) 栽植株距测定

(c) 土下水平长度测定

图 16 甘薯苗各项栽植农艺参数测定

Fig. 16 Determination of agronomic parameters for various planting of sweet potato seedlings

5 结论

（1）根据甘薯移栽机构的设计要求及甘薯移栽的农艺要求，规划了一条能够实现水平移栽的轨迹，

通过近似多位姿综合初步反求出机构参数，杆 1 长度为 100 mm、杆 2 长度为 240 mm，并进行角位移参数正向优化轨迹，得到符合要求的甘薯水平移栽轨迹。

（2）基于辅助软件优化后得到的机构参数对甘薯移栽机构轮系进行了设计，包括求得了总传动比曲线、分配后的两级传动比曲线、非圆齿轮节曲线与非圆齿轮齿廓。

（3）建立移栽机构三维模型，进行仿真分析验证机构可行性，仿真轨迹与理论轨迹重合。实地进行甘薯移栽机性能试验，在栽植速率为 45、55、65 株/min 时，栽植深度、株距、土下水平长度合格率均达到 85% 以上，其中 45 株/min 时各项合格率均超过 90%。移栽机构移栽效果良好，满足甘薯苗移栽作业要求。

参 考 文 献

[1] 胡良龙，田立佳，计福来，等. 甘薯生产机械化作业模式研究[J]. 中国农机化学报，2014，35(5)：165－168.
HU Lianglong, TIAN Lijia, JI Fulai, et al. Research on mechanized operation mode of sweet potato production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5): 165－168. (in Chinese)

[2] 胡良龙，计福来，王冰，等. 国内甘薯机械移栽技术发展动态[J]. 中国农机化学报，2015，36(3)：289－291.
HU Lianglong, JI Fulai, WANG Bing, et al. Development trends of sweet potato mechanical transplanting technology in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 289－291. (in Chinese)

[3] 武广伟，王瑞雪，李鑫，等. 国内外甘薯移栽技术装备研究现状及展望[J]. 农机化研究，2024，46(7)：1－8.
WU Guangwei, WANG Ruixue, LI Xin, et al. Research status and prospects of sweet potato transplanting technology and equipment at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(7): 1－8. (in Chinese)

[4] 严伟. 甘薯苗带式移栽关键技术与装备研究[D]. 北京：中国农业科学院，2024.
YAN Wei. Research on key technology and equipment for sweet potato seedling belt transplanting[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024. (in Chinese)

[5] SHAO Y Y, ZHANG H D, XUAN G T, et al. Simulation and experiment of a transplanting mechanism for sweet potato seedlings with 'boat-bottom' transplanting trajectory[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(3): 96－101.

[6] LIU Z, LV Z, ZHENG W, et al. Trajectory control of two-degree-of-freedom sweet potato transplanting robot arm[J]. IEEE Access, 2022, 10: 26294－26306.

[7] 美国 Holland Transplanter 传统蔬菜（甘薯）移栽机[Z/OL]. 2024－09－25. https://www.transplanter.com/shop-equipment/Conventional-Transplanters-c-174894639.

[8] 意大利 Checchie Magli 2 行牵引式甘薯移栽机[Z/OL]. 2024－09－25. https://www.checchiemagli.com/en/transplanter/foxdrive-r14/.

[9] 朱斌彬. 带夹式甘薯裸苗移栽机的设计与仿真[D]. 泰安：山东农业大学，2017.
ZHU Binbin. Design and simulation of a clamp-type sweet potato seedling transplanter[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[10] QI Z Y, XU L, SHI X Y, et al. Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter[J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 147: 131－145.

[11] 黄晓财，宋广鹏，高翔，等. 日本小型农机的现状与发展分析[J]. 现代农业装备，2023，44(6)：16－23，69.
HUANG Xiaocai, SONG Guangpeng, GAO Xiang, et al. Analysis of the current situation and development of small agricultural machinery in Japan[J]. Modern Agricultural Equipment, 2023, 44(6): 16－23, 69. (in Chinese)

[12] 刘凯华，李沐桐，岳丹丹，等. 甘薯移栽机械化技术的现状与发展[J]. 南方农机，2024，55(增刊 1)：31－35.

[13] 严伟，张文毅，胡敏娟，等. 国内外甘薯种植机械化研究现状及展望[J]. 中国农机化学报，2018，39(2)：12－16.
YAN Wei, ZHANG Wenyi, HU Minjuan, et al. Current status and prospects of sweet potato planting mechanization research at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(2): 12－16. (in Chinese)

[14] 胡良龙，王冰，王公仆，等. 2ZGF－2 型甘薯复式栽植机的设计与试验[J]. 农业工程学报，2016，32(10)：8－16.
HU Lianglong, WANG Bing, WANG Gongpu, et al. Design and test of 2ZGF－2 sweet potato compound transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 8－16. (in Chinese)

[15] 南通富来威农业装备有限公司. 行距可调的三行复式作业甘薯移栽机：CN201621015280.4[P]. 2017－04－19.

[16] 朱倩. 甘薯苗膜上侧插平栽装置的设计与试验[D]. 泰安：山东农业大学，2024.
ZHU Qian. Design and experiment of the side-to-side planting device for sweet potato seedlings[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[17] 张云鹏. 甘薯水平移栽装置的设计与试验研究[D]. 海口：海南大学，2023.
ZHANG Yunpeng. Design and experimental research on horizontal transplanting device for sweet potatoes[D]. Haikou: Hainan University, 2023. (in Chinese)

[18] 周海丽，颜梦莹，薛洪彬，等. 椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构的设计与试验[J]. 浙江理工大学学报（自然科学版），2025，53(1)：96－104.

ZHOU Haili, YAN Mengying, XUE Hongbin, et al. Design and experiment of sweet potato transplanting mechanism with elliptical gear planetary gear train[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Science Edition), 2025, 53(1): 96 - 104. (in Chinese)

[19] 邓斌. 甘薯苗变性椭圆齿轮行星轮系移栽机构设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
DENG Bin. Design and experiment of sweet potato seedling transplanting mechanism with modified elliptical gear planetary gear train[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)

[20] 武广伟,安晓飞,颜丙新,等. 基于预处理苗带甘薯裸苗自动移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 1): 99 - 109.
WU Guangwei, AN Xiaofei, YAN Bingxin, et al. Design and experiment of automatic transplanter for sweet potato seedlings based on pre-treated seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 99 - 109. (in Chinese)

[21] 秦宽,魏新钊,李光耀,等. 软夹轮压式甘薯移栽机设计与试验[J]. 东北农业大学学报,2024,55(4):73 - 84.
QIN Kuan, WEI Xinzhao, LI Guangyao, et al. Design and experiment of soft clamp wheel pressure sweet potato transplanter [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(4): 73 - 84. (in Chinese)

[22] 穆桂脂,王千翼,郑德慧,等. 甘薯横向水平复式移栽机栽苗装置设计及试验[J]. 农业工程学报,2023,39(24):1 - 10.
MU Guizhi, WANG Qianyi, ZHENG Dehui, et al. Design and experiment of sweet potato horizontal duplex transplanter seedling planting device[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 1 - 10. (in Chinese)

[23] WOODARD A J, SCHULTHEIS J R, JENNINGS K M, et al. Horizontal planting orientation can improve yield in organically grown sweet potato[J]. HortScience, 2024, 59(1): 36 - 42.

[24] 芦泽鹏. 打捆机器人高能效优化设计与能耗分析[D]. 太原: 太原理工大学,2022.
LU Zepeng. High-efficiency optimization design and energy consumption analysis of baling robot[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022. (in Chinese)

[25] 封雨鑫,钟菲,余强. 连续小线段的高精度 B 样条曲线拟合方法[J]. 自动化技术与应用,2022,41(6):15 - 20.
FENG Yuxin, ZHONG Fei, YU Qiang. High-precision B-spline curve fitting method for continuous small line segments[J]. Automation Technology and Applications, 2022, 41(6): 15 - 20. (in Chinese)

[26] 赵宏平,郭彩芬. 一种匀变非圆齿轮设计方法及其传动特性研究[J]. 机械传动,2021,45(11):109 - 115,133.
ZHAO Hongping, GUO Caifen. Research on a design method of uniformly variable non-circular gear and its transmission characteristics[J]. Mechanical Transmission, 2021, 45(11): 109 - 115,133. (in Chinese)

(上接第 174 页)

[25] 张晗, 闫宁, 吴旭东, 等. 在线式玉米单粒种子检测分选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 159 - 166.
ZHANG Han, YAN Ning, WU Xudong, et al. Design and experiment of online maize single seed detection and sorting device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 159 - 166. (in Chinese)

[26] PEARSON T. Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1): 12 - 18.

[27] 颜丙新, 武广伟, 付卫强, 等. 基于 EDEM 的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 47 - 54.
YAN Bingxin, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Influencing factors of corn implantation distribution for high-height planting based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 47 - 54. (in Chinese)

[28] 何晓宁, 王如正, 杨紫奥, 等. 毛刷带式玉米高速导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 17 - 27.
HE Xiaoning, WANG Ruzheng, YANG Ziao, et al. Design and experiment for the high-speed maize seed guiding device with brush belt[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(8): 17 - 27. (in Chinese)

[29] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36 - 42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 - 42. (in Chinese)

[30] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34 - 41.
CUI Tao, LIU Jia, YANG Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 34 - 41. (in Chinese)

[31] MARKAUSKAS D, RAMIREZ-GOMEZ Á, KACIANAUSKAS R, et al. Maize grain shape approaches for DEM modelling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 247 - 258.

[32] 杜双奎. 试验优化设计与统计分析 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2020.