

成排夹茎式大葱取苗机构优化设计与试验

赵雄^{1,2} 张城¹ 周振康¹ 夏旭东¹ 俞高红^{1,2}

(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)

摘要: 针对目前全自动大葱移栽机中投苗装置与接苗装置结构较复杂,取投苗效率不足的问题,本文开展一种基于非圆齿轮行星轮系成排夹茎双臂式大葱取苗机构研究。基于大葱夹茎式取送苗运动要求确定一种“8”字形取投苗轨迹与关键位姿,建立关键位姿和轨迹与机构参数的求解模型,求解获得机构运动学校较优解,构建机构中非圆齿轮拓扑优化设计和取苗臂配重块模型,通过动力学分析软件进行机构动力学优化,得到拓扑优化后取苗臂配重块的质量和质心向径分别为439.8 g和20.35 mm,最后制作了大葱取苗机构样机并进行取苗试验与动力学性能对比试验。试验表明:在转速20 r/min时(取苗效率400株/min)葱苗的取苗成功率为87%;转速15 r/min下(取苗效率300株/min)葱苗的取苗成功率可达91%,表明机构具有高效取投苗性能。动力学优化后大葱取苗机构左、右侧转速幅值分别下降了17.29%、24.38%,方差分别减少了55.31%、60.70%;转速差幅值下降了42.63%,方差下降了34.91%,有效改善了机构动力学性能。

关键词: 大葱移栽机; 取苗机构; 非圆齿轮; 动力学优化; 动力学试验

中图分类号: S223.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)19-0239-10

OSID:



Optimization Design and Experiment of Row Stem Clamped Scallion Seedling Harvesting Mechanism

Zhao Xiong^{1,2} Zhang Cheng¹ Zhou Zhenkang¹ Xia Xudong¹ Yu Gaohong^{1,2}

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

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

Abstract: Regarding the current issues of complex structures and low efficiency in seedling feeding and receiving devices of fully automatic scallion transplanters, the research and design of an integrated seedling picking and feeding mechanism for scallions was presented based on a non-circular gear planetary gear system, featuring a row of clamped stems and dual arm structure. Based on the kinematic requirements for gripping-stem scallion seedling pickup and delivery, a figure-eight pickup-placement trajectory with key pose parameters was defined, solving models for mechanism parameters were established based on trajectory and pose constraints, and a near-optimal kinematic solution was obtained. Under the dynamic simulation and analysis based on Adams software, a topology optimization design of non-circular gears and a model of seedling arm counterweight were constructed. The mass and centroid radius of the non-circular gears and seedling arm counterweight after topology optimization were 439.8 g and 20.35 mm, respectively. The seedling picking mechanism of scallion was tested and compared with the dynamic performance optimization. The tests indicated that at 20 r/min (400 seedlings/min), the scallion seedling pickup success rate reached 87%, while at 15 r/min (300 seedlings/min), it achieved 91%, indicating that the mechanism had high performance in seedling retrieval. The left and right rotation speed amplitudes of the onion seedling picking mechanism were decreased by 17.29% and 24.38%, respectively compared with that before optimization. The variance of the left and right rotation speeds of the scallion seedling picking mechanism was decreased by 55.31% and 60.70%, respectively compared with that before optimization. The amplitude of the speed difference was decreased by 42.63%

收稿日期: 2025-06-11 修回日期: 2025-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(3257150316)和浙江省自然科学基金项目(LD24E05007)

作者简介: 赵雄(1982—),男,教授,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: zhaoxiong@zstu.edu.cn

compared with that before optimization, and the variance of the speed difference was decreased by 34.91% compared with that before optimization, which verified the performance of the mechanism prototype.

Key words: scallions transplanter; seedling harvesting mechanism; non-circular gears; dynamic optimization; dynamic test

0 引言

大葱是一种常见的蔬菜作物,也是我国农业经济中占据重要地位的作物^[1-3]。随着大葱产量逐年增加,低水平的大葱机械化程度极大制约了大葱产业发展。移栽过程仍以人工为主,其存在劳动效率低下、移栽效果不佳的弊端。因此实现高效移栽、节约成本的全自动移栽方式是大葱产业化发展急需提升的薄弱环节。

目前国内外大葱移栽主要以半自动大葱移栽机为主,久保田公司研制的 KN-P6 型半自动大葱移栽机^[4],主要采用人工实现放苗动作,生产作业效率低下;骆驼牌 G-100 型链夹式移栽机^[5-6]通过链夹式的方式实现葱苗落入挠盘中,实现葱苗的栽植,优点是机构简单,缺点是在夹持时易产生抖动和夹持损伤,振动大。全自动大葱移栽机主要以日本的 2ZS-1 型大葱移栽机、山东农业大学挠盘式高效低损大葱自动移栽机等为主^[7]。虽然提高了投放苗的效率,但对于投苗装置与接放苗装置间配合要求高,容易影响投苗装置的顶出成功率,且单个周期内只实现单次取投苗动作,取投苗效率低于 200 株/min。

参考山东交通学院的徐高伟等^[8]五杆式丹参移栽机构作为研究对象,通过添加配重块的方式对移栽机构动力学性能进行改善。构建了动力学优化模型,以不同转速下振动力与振动力矩的方差最小化为目标,建立了多目标函数进行参数优化。根据优化得到的最佳参数制作样机,并通过动力学试验验证了添加配重块方案的正确性。

对成排同取的取苗机构研究中,目前俞高红团队^[9-10]提出适合密植移栽的 8 行同步取苗非圆齿轮行星轮系取苗机构。对于同排 8 株青菜苗取苗过程中,整体机构的质心易在运动过程中持续发生偏移,会产生较大的力学变化,易导致取苗效果不佳。

因此,本文针对当前全自动大葱移栽机在取投苗过程中易受投苗装置与接苗装置衔接偏差影响的问题,设计一种基于非圆齿轮行星轮系的取投苗一体化多行夹茎、双臂式大葱取苗机构。并对取苗机构进行动力学分析与性能优化,并通过取苗试验和动力学试验验证该机构能够实现高速旋转条件下的全自动取投苗功能,评估机构动力学优化对其性能

的提升效果。

1 大葱取苗机构轨迹设计要求

取苗机构的取投苗过程主要包括取苗、持苗、投苗和返程^[11-13]。取苗爪靠近葱苗的茎秆后收紧,将葱苗从穴盘中取出后持苗沿着设定的轨迹移动到输送带上进行投苗,最后沿轨迹回到原位,完成一次取投苗的过程。轨迹呈现“8”字形,如图 1 所示。

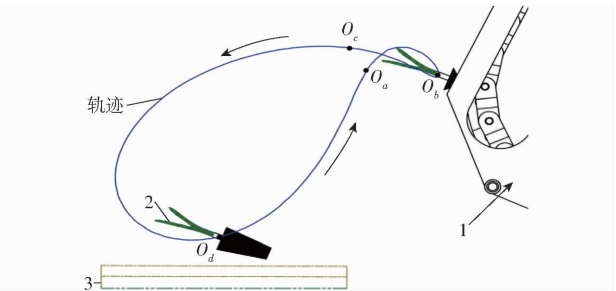


图 1 大葱取苗机构工作示意图

Fig.1 Scallion seedling picker schematic

1. 秧箱 2. 葱苗 3. 输送带

根据大葱移栽的作业要求及相关研究,对上述的取投苗过程关键位置进行分析:

(1) $O_aO_bO_c$ 段为取苗夹茎段:取苗爪运动到葱苗茎秆预设的理想夹取位置(点 O_b),取苗爪闭合后夹紧葱苗茎秆,将其从穴盘中拔出直至完全脱离穴盘(点 O_c),完成葱苗的取苗动作。

(2) O_cO_d 段为持苗-投苗段:点 O_d 为投苗点,在该段轨迹中曲率不能变化过大,以免影响葱苗在夹持过程中稳定性。在到达点 O_d 时,取苗爪张开,葱苗在重力的作用下掉落到输送带上,完成投苗动作。

(3) O_dO_a 段为返程段:取苗爪保持张开,葱苗夹取部件恢复原位,为下一次取投苗做准备。

结合大葱取苗机构的工作示意图和取投苗过程中的工作要求,得出以下设计要求:

(1) 通常秧箱的角度为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。较大的秧箱倾角有利于葱苗小角度的夹取,但在机器运转过程中易受到振动,因此秧箱倾角不宜过大。综合考虑确定秧箱的倾角为 55° 。

(2) 考虑到穴盘的深度为 42 mm(钵体长度略小于该深度),葱苗钵体需在取苗夹茎段完全脱离穴盘,因此, O_bO_c 段需大于 42 mm。

(3) 取苗爪完成 2 次抓取动作,要求前后取苗

爪间不干涉。

2 四位姿开链 2R 杆组综合

2.1 工作原理

大葱取苗机构主要由行星架、非圆齿轮副、取苗臂和夹取部件组成,夹取部件由取苗爪、架秧杆和架杆组成,在取苗臂内的拨叉与凸轮之间的作用下,实现取投苗动作,如图 2 所示。

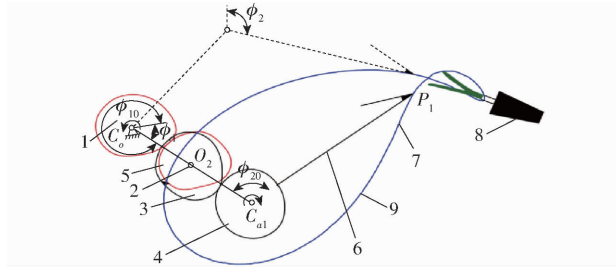


图 2 大葱取苗机构简图

Fig. 2 Scallion seedling picker sketch

1. 太阳轮 2, 3. 中间轮 4. 行星轮 5. 行星架 6. 取苗臂
7. 夹取部件 8. 葱苗 9. 轨迹

在取苗作业过程中,太阳轮与机架保持固定,行星架绕 C_0 逆时针旋转,通过行星架上的非圆齿轮相互啮合传动,使得取苗臂绕 C_{a1} 顺时针旋转,取苗爪依次通过所设定的位姿,期间取苗爪在推苗杆的作用下实现张开闭合动作,实现一个周期内大葱取苗机构的轨迹运动以及取投苗动作。

2.2 四位姿开链 2R 杆组综合

2.2.1 四位姿开链 2R 杆组数学模型

大葱取苗机构在简化后为行星轮系机构,即轮系机构与 2R 开链杆组(行星架与取苗臂相对转动)的复合:行星架(曲柄)记作 L_1 ,其旋转中心(圆心点)记作 C_o ,取苗臂(连杆)记作 L_2 ,其旋转中心(圆心点)记作 C_a ,如图 3 所示。

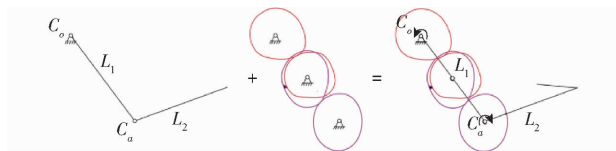


图 3 大葱取苗机构简化模型

Fig. 3 Scallion seedling picker simplified model

针对这一机构运动综合问题,依据“8”字形取投苗轨迹的形成规则及其特性,在图 1 中选定取苗爪所必须经过的 4 个关键位姿点^[14-15](起始点 A、取苗点 B、出钵点 C 以及投苗点 D),构建四位姿开链 2R 杆组理想设计模型,获得机构参数解域,结合 2R 开链杆组与非圆齿轮行星轮系复合设计方法,得出机构参数。

在图 4 中,开链 2R 杆组中,曲柄绕设定连杆的平面 π ,第 $f(f=1,2,3,4)$ 个位置可通过连杆平面上

的点 P 以及直线 PZ 的方位角确定,即点 P 为 $P_f(x_f, y_f)$, P_fZ_f 的方位角为 β_f 。

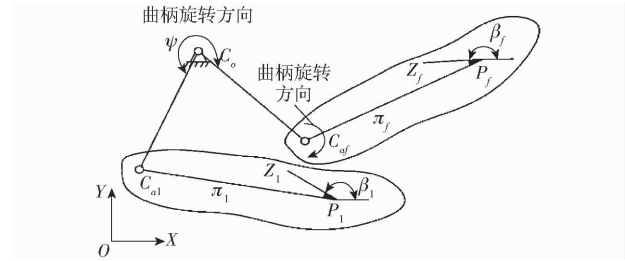


图 4 刚体平面运动示意图

Fig. 4 Rigid body planar motion schematic

如图 4 所示,连杆的平面 π 可由刚体一般位移矩阵 B_{1f} 得出。

$$B_{1f} = \begin{bmatrix} B_{11f} & B_{12f} & B_{13f} \\ B_{21f} & B_{22f} & B_{23f} \\ B_{31f} & B_{32f} & B_{33f} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} B_{11f} &= \cos B_{1f} & B_{12f} &= -\sin B_{1f} \\ B_{13f} &= x_f - x_f \cos B_{1f} \\ B_{21f} &= \sin B_{1f} & B_{22f} &= \cos B_{1f} \\ B_{23f} &= y_f - x_f \sin B_{1f} - y_f \cos B_{1f} \\ B_{31f} &= 0 & B_{32f} &= 0 & B_{33f} &= 1 \\ \beta_{1f} &= \beta_f - \beta_1 \end{aligned}$$

式中 β_{1f} ——连杆平面第 f 位置相对于第 1 位置的转角

β_f ——连杆平面第 f 位置相的转角

β_1 ——连杆平面第 1 位置的转角

设待求的第 1 位置圆心和圆点矢量分别为 $C_o(x_o, y_o)$ 和 $C_{a1}(x_{a1}, y_{a1})$ 。第 $f(f=1,2,3,4)$ 位置圆点矢量为 $C_{af}(x_{af}, y_{af})$, 则有

$$\begin{bmatrix} C_{af} \\ 1 \end{bmatrix} = B_{1f} \begin{bmatrix} C_{a1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于有限分离四位姿问题,由式中刚体一般位移矩阵 B_{1f} 和曲柄固定杆长约束条件得到相应的约束公式

$$D_f x_0 + F_f y_0 + G_f = 0 \quad (f=2,3,4) \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} D_f &= C_{f1} x_{a1} - C_{f2} y_{a1} + C_{f3} \\ F_f &= C_{f2} x_{a1} + C_{f1} y_{a1} + C_{f4} \\ G_f &= C_{f5} x_{a1} + C_{f6} y_{a1} + C_{f7} \\ C_{f1} &= 1 - B_{11f} & C_{f2} &= B_{12f} \\ C_{f3} &= -B_{13f} & C_{f4} &= -B_{23f} \\ C_{f5} &= B_{11f} B_{13f} + B_{21f} B_{23f} \\ C_{f6} &= B_{12f} B_{13f} + B_{22f} B_{23f} \\ C_{f7} &= \frac{B_{13f}^2 + B_{23f}^2}{2} \end{aligned}$$

把 x_0 和 y_0 视作待解的未知数,基于线性代数相容原则,可得

D_2 F_2 G_2

D_3 F_3 G_3

D_4 F_4 G_4

$=0$

(4)

将 D_f 、 F_f 、 G_f 代入公式 (4) 中可得

$C_{21}x_{a1}-C_{22}y_{a1}+C_{23}$ $C_{22}x_{a1}+C_{21}y_{a1}+C_{24}$ $C_{25}x_{a1}+C_{26}y_{a1}+C_{27}$

$C_{31}x_{a1}-C_{32}y_{a1}+C_{33}$ $C_{32}x_{a1}+C_{31}y_{a1}+C_{34}$ $C_{35}x_{a1}+C_{36}y_{a1}+C_{37}$

$C_{41}x_{a1}-C_{42}y_{a1}+C_{43}$ $C_{42}x_{a1}+C_{41}y_{a1}+C_{44}$ $C_{45}x_{a1}+C_{46}y_{a1}+C_{47}$

$=0$

(5)

简化展开式 (5), 各未知项的系数用三阶行列式对角线上的元素来表示整个行列式, 例如

C_{21} C_{22} C_{26}

C_{31} C_{32} C_{36}

C_{41} C_{42} C_{46}

$=|C_{21}$ C_{32} $C_{46}|$

令

$S_1=|C_{21}$ C_{32} $C_{45}|$

$S_2=|C_{21}$ C_{32} $C_{46}|$

$S_3=|C_{21}$ C_{32} $C_{47}|+|C_{21}$ C_{34} $C_{45}|+|C_{23}$ C_{32} $C_{45}|$

$S_4=|C_{21}$ C_{32} $C_{47}|+|C_{24}$ C_{32} $C_{46}|+|C_{23}$ C_{31} $C_{46}|$

$S_5=|C_{21}$ C_{34} $C_{46}|+|C_{24}$ C_{32} $C_{45}|+|C_{23}$ C_{31} $C_{45}|+|C_{23}$ C_{32} $C_{46}|$

$S_6=|C_{21}$ C_{34} $C_{47}|+|C_{23}$ C_{32} $C_{47}|+|C_{23}$ C_{34} $C_{45}|$

$S_7=|C_{24}$ C_{32} $C_{47}|+|C_{23}$ C_{31} $C_{47}|+|C_{23}$ C_{34} $C_{46}|$

在对式 (5) 进行简化后, 可以将其作为一个三次方程组进行求解, 在对其进一步整理可得到布尔梅斯特圆点曲线方程

$S_1x_{a1}^3+S_2y_{a1}^3+S_1x_{a1}y_{a1}^2+S_2x_{a1}^2y_{a1}+$

$S_3x_{a1}^2+S_4y_{a1}^2+S_5x_{a1}y_{a1}+S_6x_{a1}+$

$S_7y_{a1}+S_8=0$

(6)

在依据杆件尺寸约束及运动缺陷判断方法, 通过限定圆心的范围, 将求解出的解集中所有不符合要求的解剔除后, 按照步长分别依序连接圆点和圆心, 即可形成关于圆点和圆心有限空间区域内的布尔梅斯特曲线^[16-17], 如图 5 所示。

依据上述大葱取苗机构的作业要求及轨迹设计目标, 对取苗爪在一个工作循环中的关键位姿进行规划, 并确定其 4 个关键位姿对应的空间坐标及姿态角, 具体参数如表 1 所示。

2.2.2 开链 2R 杆组与非圆齿轮行星轮系复合设计

因在持苗-投苗段轨迹中曲率不能变化过大, 在出钵点 O_c 和投苗点 O_d 之间增加 2 个额外控制位置点, 保证该段轨迹的平滑性。利用三次非均匀 B 样条曲线^[18-19]插补方法求解轮系一个周期内的“行

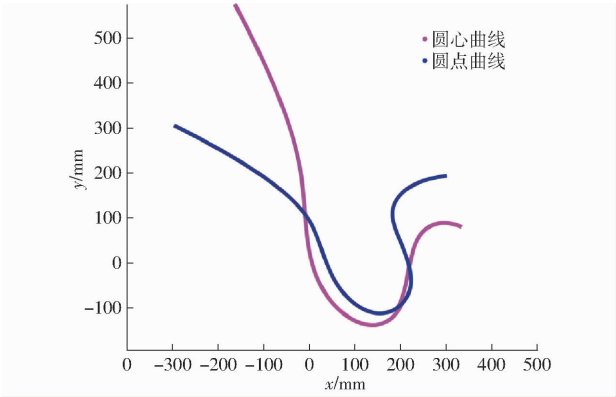


图 5 有限空间内的布尔梅斯特曲线

Fig. 5 Burmester curves within a limited space

表 1 四位置坐标与姿态角

Tab. 1 Values of coordinates and attitude angles for four positions

位姿点	横坐标 x/mm	纵坐标 y/mm	姿态角 $\theta/(^{\circ})$
O_a (起始点)	212.28	-6.93	187.53
O_b (取苗点)	252.87	-30.27	153.31
O_c (出钵点)	210.28	2.59	130.73
O_d (投苗点)	103.91	-126.75	154.12

星架(曲柄)-取苗臂(连杆)”转角关系曲线。根据转角曲线关系及公式

$i_{total}=\frac{d\varphi_2}{d\varphi_1}$

(7)

式中 φ_1 ——相对初始位置的转角
 φ_2 ——连杆相对初始位置的转角
 i_{total} ——总传动比

求解第一开链 2R 杆组在曲柄转动 2π 角度下所形成轨迹区段的总传动比, 使得机构实现设定的“8”字形取苗轨迹。

本文设计中采用两级非圆齿轮传动, 来确保整个传动系统能够满足实际需求。因此两级非圆齿轮组分摊总传动比, 通过总传动比进行开方处理并引入调整系数 b 令两组非圆齿轮节曲线周长一致, 可以得到第 1 级非圆齿轮子传动比 i_{1n} 为

$i_{1n}=i_1b$

(8)

第 2 级非圆齿轮子传动比 i_2 为

$i_2=\frac{i_{total}}{i_{1n}}$

(9)

基于非圆齿轮啮合的基本原理, 可以根据子传动比进行非圆齿轮的节曲线求解。针对太阳轮节曲线, 相关的参数计算公式为

$r_3=\frac{ci_{1n}}{1+i_{1n}}$

$\phi_3=\varphi_1$

(10)

式中 r_3 ——太阳轮极径
 c ——非圆齿轮组中心距

ϕ_3 ——太阳轮极角

同理可以计算得到第 1、第 2 中间轮和行星轮节曲线的相关参数。通过节曲线坐标转化为直角坐标获得非圆齿轮齿廓。

根据表 1 的四位置坐标与姿态角,结合总传动比、子传动比分配等,即可确定一组符合要求的机构设计参数,如表 2 所示。

表 2 开链 2R 杆组机构参数取值

Tab.2 Parameters values of open-chain 2R bar group mechanism

机构参数	取值
圆心点坐标 C_0/mm	(0.036 0, 0.266 1)
圆点坐标 C_{a1}/mm	(79.462, -76.539)
曲柄 L_1 长度 r^*/mm	110.04
连杆 L_2 长度 l^*/mm	150.31
曲柄初始相位 $\varphi_{11}/(^{\circ})$	43.42
连杆初始相位 $\varphi_{12}/(^{\circ})$	108.47

3 大葱取苗机构动力学分析与优化

3.1 大葱取苗机构的动力学优化方案

非圆齿轮相较于传统的齿轮,具备质心不在旋转中心的特性。对于机构运行的平稳性具有不利的影响。本文的取苗机构采用两端同步运行,夹取部件架设在两端的相应取苗臂之上,实现同行同步取苗,在旋转过程中会产生惯性力,对机构运行的平稳性具有不利影响。

因此,本文借助动力学仿真结果,得到非圆齿轮有限元分析所需的载荷,对非圆齿轮进行拓扑优化。通过减重设计,使非圆齿轮的质心靠近旋转中心。

取苗机构采用对称设计,因此两端取苗臂与夹取部件可作为一个共同的部件看待,在行星架旋转过程中,该部件在不同的姿态下质心位置是变化的。当单独将其视为围绕行星轴旋转的问题时,仅需将该部件的质心调整至与行星轴共轴的位置,则取苗机构整体的质心位于太阳轴(旋转轴)的轴线上。通过在取苗臂添加配重块的方式,消除或降低不平衡惯性力,减少取苗机构的振动,达到优化动力学性能的目的,使得机构运行更平稳。

3.2 非圆齿轮拓扑优化设计

在 Adams^[20] 软件中进行大葱取苗机构的动力学仿真,得到各个非圆齿轮承受的最大力矩。太阳轮所能承受的最大力矩为 17.555 N·m,第 1 中间轮所能承受的最大力矩为 13.109 N·m,第 2 中间轮所能承受的最大力矩为 13.109 N·m,行星轮所能承受的最大力矩为 16.301 N·m。

通过在 ANSYS 中结合非圆齿轮的工作情况,进

行静态结构分析后,发现非圆齿轮在变形和应力的表现上都具备充足的优化条件。对此,在满足实际使用情况下,在 ANSYS 中对非圆齿轮进行拓扑优化^[21]。对优化区域进行划分(将齿廓截曲线的等距线内和与轴孔分割线外的区域作为优化区域,其他区域作为排除区域),以等效(Von-Mises)应力不超过最大许用应力作为约束条件,将质心作为本次的优化目标,得到优化后的结果。

目标函数定义为非圆齿轮质心位置与目标点之间的距离最小。假设目标点的坐标为 (X_i, Y_i) ,将非圆齿轮划分为 N 个单元,每个单元的中心坐标为 $(X_i, Y_i) (i = 1, 2, \cdots, N)$ 。

数学模型表示为

$$\text{Minf}(n_j) = \sum_{j=1}^N [(x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2]$$

$(0 < n_j \leq 1)$

(11)

式中 n_j ——设计变量,代表各单元的相对密度或材料分布, $j = 1, 2, \cdots, N$

约束条件为

$$\sigma_{\text{Von-Mises}_i} \leq \sigma_{\text{max}} \quad (\forall i = 1, 2, \cdots, N)$$

式中 $\sigma_{\text{Von-Mises}_i}$ ——第 i 单元的 Von-Mises 应力

σ_{max} ——最大许用应力

从实际加工、使用和美观性方面考虑,再对其进行修模处理。在 Solidworks 2022 中对上述模型进行修改,如图 6 所示。

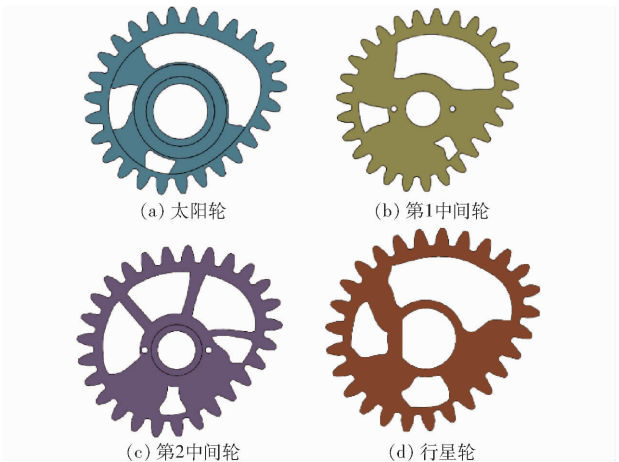


图 6 各非圆齿轮优化结果

Fig.6 Optimization results of non-circular gears

再将修模后的非圆齿轮模型导入 ANSYS 中进行相同的静态结构分析,并将修模后与修模前的非圆齿轮进行对比,发现总变形与应力表现上相较于修模前略有增大,但都在允许范围内。

3.3 取苗臂配重块设计

将取苗机构非圆齿轮的质心尽可能靠近旋转中心,意味着在取苗机构旋转过程中,已经可以将其看成一个近似平衡的部件。但在运行过程中,取苗臂

与夹取部件在旋转过程中,质心位置会随着相位姿态改变而不停变动。由于其产生不平衡惯性和惯性力矩,不仅会增大取苗机构零部件间摩擦,而且易使机构产生振动,降低动力学性能。

现对夹取部件与取苗臂构建平衡模型^[22-24],如图 7 所示。将两端的取苗臂所在的平面(配重块质心所在的平面)作为平衡基面 I 和 II。因为取苗臂作为压铸件,轻量化的难度大,因此本文采用添加配重的方式来实现平衡。

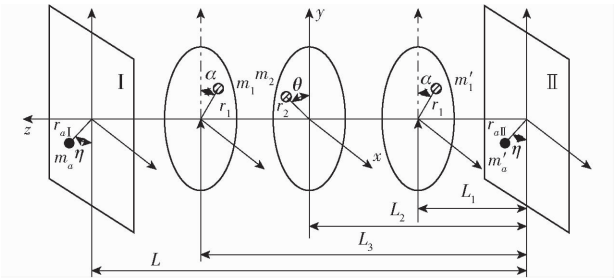


图 7 机构平衡模型

Fig. 7 Balancing model of mechanism

由于夹取部件与两端的取苗臂是对称设计,因此将对称中心作为原点 O , 构建坐标系, 则左侧取苗臂质心为 (x_1, y_1, z_1) , 右侧取苗臂质心为 (x'_1, y'_1, z'_1) , 夹取部件质心为 (x_2, y_2, z_2) , 平衡基面 I 平衡质量质心为 (x_{aI}, y_{aI}, z_{aI}) , 平衡基面 II 平衡质量质心为 $(x_{aII}, y_{aII}, z_{aII})$, 并计算出总质心坐标 (x_c, y_c, z_c) 为

$$\begin{cases} x_c = \frac{r_1 m_1 + r_1 m'_1 - r_2 m_2 - r_{aI} m_a - r_{aII} m'_a}{m_1 + m'_1 + m_2 + m_a + m'_a} \\ y_c = \frac{r_1 m_1 + r_1 m'_1 + r_2 m_2 + r_{aI} m_a + r_{aII} m'_a}{m_1 + m'_1 + m_2 + m_a + m'_a} \\ z_c = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中 r_1 ——取苗臂质心到回转中心的径向距离
 r_2 ——夹取部件质心到回转中心的径向距离
 m_1 ——左侧取苗臂质量
 m'_1 ——右侧取苗臂质量
 m_a ——基面 1 平衡质量
 m'_a ——基面 2 平衡质量
 m_2 ——夹取部件质量
 r_{aI} 、 r_{aII} 分别为平衡基面 I、II 上平衡质量质心到回转中心的半径。

根据力矩平衡条件,总力矩需满足

$$\begin{cases} \sum M_x = 0 \\ \sum M_y = 0 \\ \sum M_z = 0 \end{cases} \quad (14)$$

即: $M_x = \sum m_i (y_i - y_c)$, M_y 、 M_z 同理。

结合取苗臂的配重块需满足的设计条件: 安装位置需设计在易于安装的位置; 安装后不能影响原

有取苗部件取放苗的动作空间; 配重块的质心位于平衡基面上。

基于以上设计条件,在取苗臂壳体端内侧作为配重块安装位置,并通过螺丝进行固定。确定配重块的质心位置后,计算出最佳安装半径与质量: $r_{aI} = r_{aII} = 20.35 \text{ mm}$; $m = 439.8 \text{ g}$ 。

因左右为对称设计,图 8 右侧取苗臂为例展示了取苗臂上配重块安装位置。

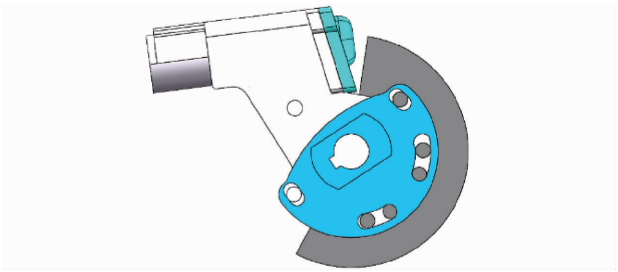


图 8 取苗臂上配重块安装位置

Fig. 8 Counterweight mounting position on picker arm

4 试验

4.1 物理样机空转试验

基于前文的结构设计,电机安装在电机支座上,通过带轮与主动轴连接,为整个试验平台提供动力,在大葱取苗机构的两侧分别连接角位移传感器,作为试验数据采集装置。试验平台如图 9 所示。

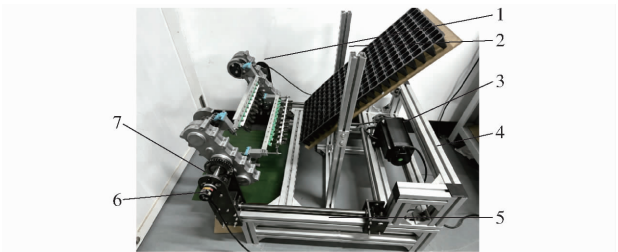


图 9 大葱取苗机构试验平台

Fig. 9 Test platform for scallion seedling picking mechanism

1. 大葱取苗机构 2. 穴盘 3. 电机 4. 机架 5. 传动机构
6. 角位移传感器 7. 输送带

在不放穴盘情况下进行大葱取苗机构的空转试验,通过高速摄像机录制大葱取苗机构秧针末端在一个周期内的运动。将录制的视频导入 PR 软件中,将秧针尖点作为追踪点,绘制秧针末端的实际运动轨迹。与图 10a、10b 中的理论轨迹和仿真轨迹进行对比。发现三者整体上基本保持一致,符合要求。说明机构在实际工作中可以实现预设的“8”字形取苗运动轨迹。

4.2 取苗试验

选取穴盘上穴口规格为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 下穴口规格为直径 10 mm 的圆底,整体深度为 42 mm ,穴数

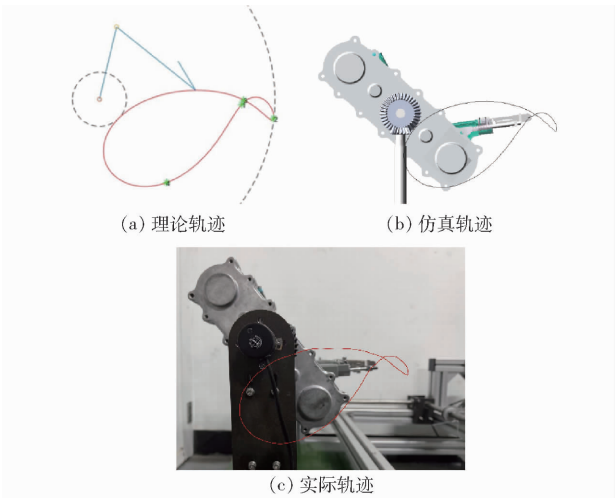


图 10 实际轨迹同理论、仿真轨迹对比

Fig. 10 Comparison among actual, theoretical, and simulated trajectories

为 200 个(10×20 排列),底部开有小圆孔。试验选用葱龄 30 d 左右,长势相近的“章丘大梧桐”品种穴盘葱苗,基质主要成分为:泥灰、珍珠岩、蛭石。

本次取苗试验中取苗、投苗点如图 11 所示,以取苗成功率、取苗效率以及观察取苗点和投苗点葱苗夹取部件夹取葱苗和投落葱苗的动作进行验证。其中,葱苗从穴盘中完整取出,落在输送带上的姿态符合要求,视为取苗成功。试验过程中分别记录转速在 15、20、25 r/min 时的数据。整理后得到的统计结果如表 3 所示。

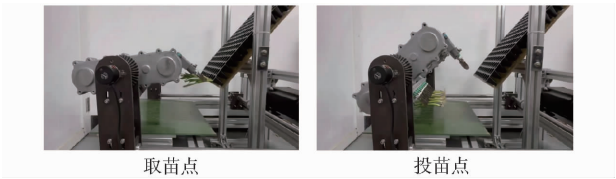


图 11 大葱取苗机构试验实物图

Fig. 11 Scallion seedling picker test diagram

表 3 取苗试验结果
Tab.3 Seedling picking test results

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	葱苗数/ 株	取苗成功 数/株	取苗失败 数/株	成功率/ %
15	400	364	36	91
20	400	348	52	87
25	400	304	96	76

在取苗试验过程中,葱苗夹取部件在取苗点和投苗点时呈现的姿态与预设理论姿态基本一致,并在投苗时,夹取部件能同一时刻松开,使葱苗能准确落到输送带中。在设计目标转速 20 r/min 时(取苗效率 400 株/min),葱苗的取苗成功率为 87%;转速 15 r/min 下(取苗效率 300 株/min),葱苗的取苗成功率可达 91%,表明机构具有高效取投苗性能。

分析发现,造成取苗失败的主要原因有:

(1)通过推苗杆的前后运动来控制葱苗夹取部件的取苗爪张开、闭合,而推苗杆的向后运动产生闭合动作主要依赖于弹簧的回复力来实现。因此在两边取苗臂内的弹簧状态和弹簧恢复力本身存在差异,取苗机构发生较快旋转时,因两边弹簧回复性能的差异,影响葱苗夹取部件中每组取苗爪的开合状态。同时因葱苗茎秆直径不同,每组取苗爪在抵达设计取苗点位置时,夹取时机有所不同,尤其是葱苗茎秆较细的情况下,更易错失最佳夹取时机,从而影响到葱苗夹取部件的取苗效果。

(2)取苗机构和传动机构中的零部件在加工和装配过程中存在误差,导致到达大葱取苗机构两端时取苗臂转动的同步性有微小差异。

4.3 动力学性能测试

在仿真的分析中,转速是因支反力的波动而变化的。因此,在动力学试验中,可以将转速的波动作为优化的参考数据。在基于上文搭建的动力学试验平台,大葱取苗机构的两侧连接角位移传感器可以检测到机构在一个工作周期内转速随着时间的变化关系,并将其作为动力学试验数据,进行动力学性能优化前后对比。分别采集在采用动力学优化方案(取苗臂配重块添加和非圆齿轮替换)前后的大葱取苗机构左右侧转速曲线并记录下来,如图 12 所示。

在设定 20 r/min 转速时,根据大葱取苗机构在动力学优化前后的两侧转速曲线,计算出曲线的幅值和方差,结果见表 4。

对动力学优化前后的两侧转速曲线的图像和表格数据分析。实际大葱取苗机构的转速波动与仿真试验中的转速波动基本一致,验证了该优化思路的实用性。

大葱取苗机构经动力学优化后的转速曲线波动均有所下降,两侧转速幅值与方差较动力学优化前都有所减少,其中,大葱取苗机构左侧转速较优化前幅值下降了 17.29%;大葱取苗机构右侧转速较优化前幅值下降了 24.38%;大葱取苗机构左侧转速较优化前方差减少了 55.31%;大葱取苗机构右侧转速较优化前方差减少了 60.70%。说明大葱取苗机构的动力学性能在经过优化后得到改善,验证了该优化方案的正确性。

通过对大葱取苗机构单侧转速优化前后的分析,已经验证了优化方案的正确性。但由于大葱取苗机构为两端同步旋转的方式,为进一步验证该方案的正确性,还需计算出大葱取苗机构左右两端优化前后同时刻的转速差进行对比,如图 13 所示。

可以通过优化前后左右转速差的图像和数据对

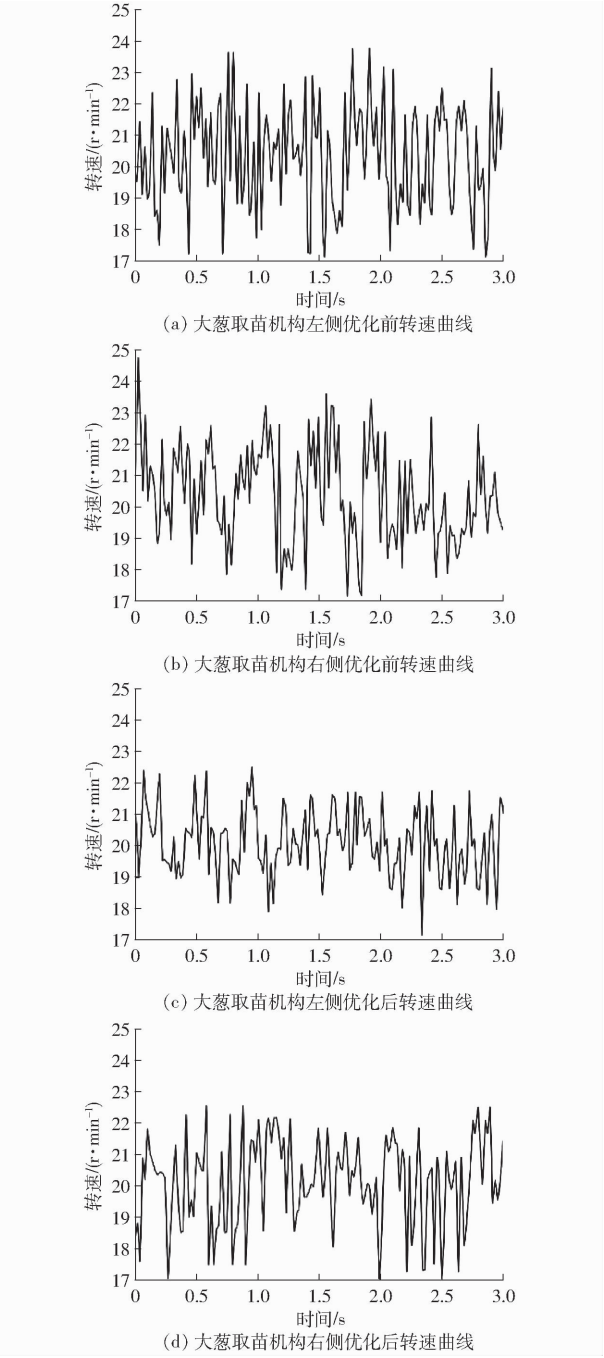


图 12 20 r/min 下机构优化前后左右两侧转速曲线
Fig. 12 Before and after optimized left/right speed curves at 20 r/min

表 4 20 r/min 下大葱取苗机构优化前后转速对比
Tab. 4 Speed comparison of scallion seedling picker before/after optimization at 20 r/min

参数	幅值/ ($r \cdot \min^{-1}$)	方差/ ($r^2 \cdot \min^{-2}$)
左侧优化前转速	6.65	2.73
左侧优化后转速	5.50	1.22
右侧优化前转速	7.67	5.14
右侧优化后转速	5.80	2.02
左侧优化后转速降低百分比/%	17.29	55.31
右侧优化后转速降低百分比/%	24.38	60.70

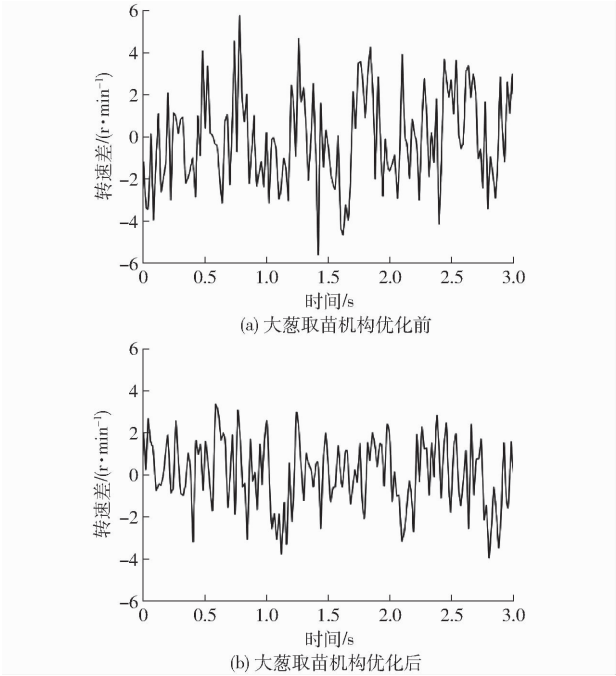


图 13 大葱取苗机构优化前后左右转速差对比曲线
Fig. 13 Left-right speed difference comparison of scallion seedling picker before/after optimization

比(表 5)进一步观察到,在优化后的左右转速差的波动是降低的,幅值和方差曲线也是下降的,说明机构在优化后运行的更加平稳,振动更小,充分说明了动力学优化的正确性。

表 5 大葱取苗机构优化前后左右转速差对比
Tab. 5 Left-right speed difference comparison of scallion seedling picker before/after optimization

参数	幅值/($r \cdot \min^{-1}$)	方差/($r^2 \cdot \min^{-2}$)
优化前左右转速差	5.09	11.43
优化后左右转速差	2.92	7.44
降幅/%	42.63	34.91

5 结论

(1)提出一种适合大葱取苗机构作业的“8”字形的取投苗轨迹,开展基于四位姿开链 2R 杆组和非圆齿轮行星轮系复合设计,设计出一组满足设计目标的最佳参数。

(2)针对取苗机构的质心在运动过程中持续发生偏移且在较高的转速下取、投苗作业时会产生较大的力学变化问题,拓扑优化了非圆齿轮结构,确定取苗臂配重块的质量和质心向径分别为 439.8 g 和 20.35 mm。

(3)开展大葱取投苗试验,主轴转速 20 r/min 时(取苗效率 400 株/min)葱苗的取苗成功率为 87%;转速 15 r/min 下(取苗效率 300 株/min)葱苗的取苗成功率可达 91%,表明机构具有高效取投苗性能。

(4)开展了大葱取苗机构的动力学优化前后试验,发现在动力学优化后,大葱取苗机构左右两侧转速差的幅值和方差分别下降了 42.63%、34.91%,验证了该动力学优化方案有助于改善取苗机构的受力情况,提高取苗机构取投苗的作业质量。

参 考 文 献

- [1] 陈大军,侯加林,施国英,等. 国内旱地移栽机技术现状分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(7): 98-102.
Chen Dajun, Hou Jialin, Shi Guoying, et al. Analysis on the current situation of technology of domestic dryland transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(7): 98-102. (in Chinese)
- [2] 刘丹丹,高洪伟,王方艳,等. 章丘大葱种植农艺及机械化生产技术[J]. 农业工程, 2017, 7(1): 15-18,47.
Liu Dandan, Gao Hongwei, Wang Fangyan, et al. Planting agronomy and mechanization production technology of scallion in Zhangqiu[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(1): 15-18,47. (in Chinese)
- [3] 辛竹琳,崔彦娟,杨小微,等. 全球蔬菜产业现状及中国蔬菜育种发展路径研究进展[J]. 分子植物育种, 2022, 20(9): 3122-3132.
Xin Zhulin, Cui Yanjuan, Yang Xiaowei, et al. Current situation of global vegetable industry and research progress of vegetable breeding development path in China[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(9): 3122-3132. (in Chinese)
- [4] 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 status and prospects of transplanting machinery development[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. (in Chinese)
- [5] 张吉强,李天华,牛子孺,等. 半自动组合式大葱移栽机的设计与研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(8): 86-90,95.
Zhang Jiqiang, Li Tianhua, Niu Zirui, et al. Design and research of semi-automatic combined scallion transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 86-90,95. (in Chinese)
- [6] 倪有亮,金诚谦,刘基. 全自动移栽机取送苗系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 10-19.
Ni Youliang, Jin Chengqian, Liu Ji. Design and experiment of system for picking up and delivering seedlings in automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 10-19. (in Chinese)
- [7] 张德学,张军强,闵令强,等. 我国大葱生产全程机械化进程及配套设备概述[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 197-204.
Zhang Dexue, Zhang Junqiang, Min Lingqiang, et al. Overview of the whole mechanization process and related equipment of scallion production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 197-204. (in Chinese)
- [8] 徐高伟,宋裕民,褚瑞霞,等. 添加配重的五杆式丹参移栽机构动力学优化设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(2): 15-21.
Xu Gaowei, Song Yumin, Chu Ruixia, et al. Dynamic optimization design and experiment of a five-bar *Salvia miltiorrhiza* transplanting mechanism with counterweights[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(2): 15-21. (in Chinese)
- [9] 俞高红,李成虎,汪应萍,等. 小株距高密度蔬菜植苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 96-105,138.
Yu Gaohong, Li Chenghu, Wang Yingping, et al. Design and experiment of transplanting mechanism for high density vegetables with small plant spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 96-105,138. (in Chinese)
- [10] 叶秉良,唐涛,俞高红,等. 组合式非圆齿轮行星轮系取苗机构动力学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 74-82.
Ye Bingliang, Tang Tao, Yu Gaohong, et al. Dynamics analysis and tests on seedling pick-up mechanism of planetary gear train of combined gear transmission with non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 74-82. (in Chinese)
- [11] 崔海洋. 基于 2R 开链杆组解域综合的行星轮系移栽机构设计方法与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2018.
Cui Haiyang. Design method and experimental research on transplanting mechanism of planetary gear system based on solution region synthesis of 2R open chain linkage group[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018. (in Chinese)
- [12] 李晓涛,马晓晓,周文静,等. 穴盘苗整排顶苗机构的优化设计与仿真分析[J]. 新疆农机化, 2022(5): 5-8.
Li Xiaotao, Ma Xiaoxiao, Zhou Wenjing, et al. Optimization design and simulation analysis of whole-row seedling top mechanism of plug seedling[J]. Agricultural Mechanization in Xinjiang, 2022(5): 5-8. (in Chinese)
- [13] 龙新华,韩长杰,张静,等. 机械取喂苗装置驱动机构的设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(1): 90-96.
Long Xinhua, Han Changjie, Zhang Jing, et al. Design and test of the drive mechanism of mechanical feeding seedling device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(1): 90-96. (in Chinese)
- [14] 钱卫香,韩建友. 四位置导引机构解域分析及综合方法[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(10): 1163-1168.
Qian Weixiang, Han Jianyou. Solution region analysis and synthesis method of 4-position rigid-body guidance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(10): 1163-1168. (in Chinese)
- [15] 杨通,韩建友. 复合四位置刚体导引机构综合的研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 203-207,196.

Yang Tong, Han Jianyou. Rigid-body guidance mechanism synthesis through four mixed positions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 203–207, 196. (in Chinese)

[16] 曹阳, 韩建友. 基于解域的四位置空间 RCCC 机构综合[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 399–405.
Cao Yang, Han Jianyou. Synthesis of RCCC linkage to visit four given positions based on solution region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 399–405. (in Chinese)

[17] 钱卫香, 韩建友. 四位置导引机构解域分析及稳健性评价方法[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(6): 17–21.
Qian Weixiang, Han Jianyou. Solution region analysis and robust penalty method of 4-position rigid body guidance [J]. Mechanical Design and Research, 2008, 24(6): 17–21. (in Chinese)

[18] Dhawan S, Kapoor S, Kumar S. Numerical method for advection diffusion equation using FEM and B-splines [J]. Journal of Computational Science, 2012, 3(5): 429–437.

[19] Arora G, Singh B K. Numerical solution of Burgers’ equation with modified cubic B-spline differential quadrature method [J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 224: 166–177.

[20] 李袁迪, 张立强, 郭鹏程, 等. 基于 ADAMS 的油茶嫁接机关键结构设计及仿真[J]. 农机化研究, 2025, 47(7): 205–212.
Li Yuandi, Zhang Liqiang, Guo Pengcheng, et al. Design and simulation of key structures of a *Camellia oleifera* grafting machine based on ADAMS [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(7): 205–212. (in Chinese)

[21] 高志远, 晏芙蓉. 基于 ANSYS Workbench 的行星齿轮减速器仿真分析[J]. 机电工程技术, 2024, 53(9): 104–107.
Gao Zhiyuan, Yan Furong. Simulation analysis of a planetary gear reducer based on ANSYS Workbench [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(9): 104–107. (in Chinese)

[22] 徐建勇, 严辉, 周永光. 缝纫机针杆刺布机构的惯性力优化平衡研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(30): 1–6.

[23] 孙杨波, 高媛, 钱峰, 等. 高速压力机机构综合平衡优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(7): 1–4.
Sun Yangbo, Gao Yuan, Qian Feng, et al. Optimization design on comprehensive balance of high-speed press mechanism [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021(7): 1–4. (in Chinese)

[24] 刘家成, 葛正浩, 李杰, 等. 二级往复小型空压机动平衡优化设计与试验验证[J]. 机械强度, 2023, 45(6): 1445–1451.
Liu Jiacheng, Ge Zhenghao, Li Jie, et al. Optimal design of dynamic balance of two-stage reciprocating small air compressor and coupling vibration test analysis of motor [J]. Mechanical Strength, 2023, 45(6): 1445–1451. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 225 页)

[27] 黄文岳, 魏新华, 汪岸哲, 等. 基于模糊快速滑模的农用牵引车辆直线路径跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 415–422.  
Huang Wen Yue, Wei Xin Hua, Wang An Zhe, et al. Straight-line path tracking control of agricultural traction vehicles based on fuzzy fast sliding mode [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 415–422. (in Chinese)

[28] Han M, He H, Cao J, et al. Learning based model predictive path tracking control for autonomous buses [C] // Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 2024: 2680–2687.

[29] Gao W, Mynuddin M, Wunsch D C, et al. Reinforcement learning-based cooperative optimal output regulation via distributed adaptive internal model [J]. IEEE transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 33(10): 5229–5240.

[30] 祝青园, 程家琪, 陈轩伟, 等. 无人驾驶铰接转向车辆路径跟踪控制研究综述[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 1–21.  
Zhu Qingyuan, Cheng Jiaqi, Chen Xuanwei, et al. A review of path tracking control for unmanned articulated steering vehicles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 1–21. (in Chinese)

[31] Li M, Cao Z, Li Z. A reinforcement learning-based vehicle platoon control strategy for reducing energy consumption in traffic oscillations [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(12): 5309–5322.

[32] Wang P, Li H, Chan C Y. Continuous control for automated lane change behavior based on deep deterministic policy gradient algorithm [C] // Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 2019: 1454–1460.

[33] Liu Y, Liu Z, Wang G, et al. Flexible multi-UAV formation control via integrating deep reinforcement learning and affine transformations [J]. Aerospace Science and Technology, 2025, 157: 109812.

[34] Obradovic J, Krizmancic M, Bogdan S. Decentralized multi-robot formation control using reinforcement learning [C] // Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, IEEE, 2023: 1–7.

[35] Wang H, Li J, Tao H, et al. Autonomous dynamic formation for maritime target tracking using multi-agent reinforcement learning [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 154: 110904.