

基于 FEM – SPH 模型的番茄钵苗非圆行星轮系取苗机构设计与试验

辛 亮 王 航 庄智圆 孙国玉 张轶群 何泽宇

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对配置探出式取钵执行装置的大田番茄钵苗取苗机构存在未能有效控制根系损伤和作业效率低的问题, 本文采用数值模拟与仿真分析方法, 围绕取钵过程中的钵体损伤特性展开研究。在此基础上, 设计一种基于非圆齿轮行星轮系的番茄钵苗取苗机构。首先建立番茄钵苗及探出式取钵执行装置 FEM – SPH 耦合模型, 结合 ANSYS/LS – DYNA 软件取钵互作过程数值模拟仿真结果, 从取苗刀片接触力、钵苗应力变化分析钵体损伤规律与影响因素; 提出配置探出式取钵执行装置的双臂式番茄钵苗非圆齿轮行星系取苗机构, 开展基于 Catmull – Rom 样条曲线拟合方法的取苗机构反求设计研究, 并通过所开发的 Matlab 计算机辅助设计软件完成机构参数优化。新轨迹取苗过程数值模拟仿真结果表明, 取苗刀片扎入瞬间等效应力较原轨迹减少 4.4%, 应力变化更平缓, 初步验证机构可降低基质破碎及根系损伤风险。开展取苗机构物理样机台架测试与性能试验, 力学传感器测试结果表明, 刀片与土钵最大接触力与数值模拟平均相对误差为 3.76%, 4 种转速下成功率均在 94% 以上, 验证了双臂式番茄钵苗非圆轮系取苗机构数值模拟模型的正确性及机构设计的可行性。

关键词: 番茄钵苗; 取苗机构; 非圆行星轮系; 数值模拟仿真; FEM – SPH 模型

中图分类号: S223.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)15-0202-12 **OSID:** 

Design and Experiment of Non-circular Planetary Gear Transplanting Mechanism for Tomato Pot Seedling Based on FEM – SPH Model

Xin Liang Wang Hang Zhuang Zhiyuan Sun Guoyu Zhang Yiqun He Zeyu
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The in-field tomato seedling extraction mechanism equipped with a telescopic pot retrieval device suffers from issues of ineffective root damage control and low operational efficiency. Employing numerical simulation and computational analysis methods to investigate the pot damage characteristics during the extraction process, a novel tomato seedling extraction mechanism was designed, utilizing a planetary gear system with non-circular gears. Firstly, the FEM – SPH coupled model of tomato pot seedlings and the extensible type seedling pot picking device were established. Combined with the numerical simulation results of the pot-picking interaction process by using ANSYS/LS – DYNA software, the laws and influencing factors of pot damage were analyzed from the aspects of the contact force of the seedling picking blade and the stress change of the pot seedling. A double-arm non-circular gear planetary system seedling picking mechanism for tomato pot seedlings equipped with the extensible type seedling pot picking device was proposed. The reverse design research of the seedling picking mechanism based on the Catmull – Rom spline curve fitting method was carried out. The optimization of mechanism parameters was completed by using the self-developed Matlab computer-aided design software. The numerical simulation results of the seedling picking process with the trajectory showed that the equivalent stress at the moment the seedling picking blade penetrates was decreased by 4.4% compared with the original trajectory, and the stress change was smoother, which initially verified that the mechanism can reduce the risk of substrate fragmentation and root damage. Bench tests and performance tests of the physical prototype of the seedling picking mechanism were carried out. The test results of the force sensor showed that the average relative error between the maximum contact force between the blade and the soil

pot and the numerical simulation was 3.76% , and the success rate was above 94% at four rotational speeds, which verified the correctness of the numerical simulation model and the feasibility of the mechanism design of the double-arm non-circular gear train seedling picking mechanism for tomato pot seedlings.

Key words: tomato pot seedling; seedling picking mechanism; non-circular planetary gear system; numerical simulation; FEM - SPH model

0 引言

机械化钵育移栽作为我国大田番茄种植节本增效发展的重要途径与趋势^[1-4],核心取苗机构是决定能否实现全自动移栽及栽植质量的关键^[5-8]。然而,目前国内外学者大多集中在机构性能与取苗成功率方面研究^[9],面向降低取苗过程钵苗损伤且提升作业效率的机构研发较少,特别是缺乏开展影响移栽后生长品质及产量的取苗末端执行装置与穴盘钵土及根系相互作用研究,因此也制约了高效低损全自动移栽装备应用的进一步推进与发展。

对于旱地钵苗取苗机构的研究,欧美与日韩等国家发展较早且技术相对成熟^[10]。欧美机型主要面向大农场机械化移栽作业,取苗机构主要以多连杆滑道等机构配合针爪式末端执行装置^[11-12],采用电气化、气缸或气力协同控制实现整排秧苗的水平或垂直夹取运送^[13],多适用于设施农业或高密度规模化多行移栽。日韩机型则多是采用结构精密、小巧复杂的机械式夹苗取钵机构配合送秧装置完成独立单行取投苗作业^[14-16],主要形式有多连杆、滑道及行星轮系等机构组合配置机械夹爪,实现复杂取苗作业轨迹姿态及取投动作^[17],但秧苗损伤及作业效率问题有待提升。国内旱地大田自动化移栽取苗机构研发,根据不同地域及应用场景在国外各种实现机构形式的基础上进行再创新与优化设计,配合机械夹取式末端执行装置的系列行星轮系式取苗机构^[18-19]的提出为高效移栽提供了新途径。为了避免取钵过程对钵体及根系造成严重损伤,课题组提出了探出式取钵执行装置,不仅通过固定角度的取苗刀片完成取投苗工序,还能为复杂的轮系式取苗机构作业轨迹简化提供途径^[9]。然而,目前针对取钵式取苗装置的研究较少结合机构取苗过程的钵苗损伤分析进而进行机构优化与设计。

光滑粒子流体动力学方法(SPH),广泛应用于材料动态响应的数值模拟,已在土壤深松、旋耕以及种茎切割等方面发挥了重要作用,Hu 等^[20]构建的弹塑性本构 SPH 土壤-刀具相互作用模型,通过剪切破坏模型与接触算法模拟非黏性及黏性土壤切削过程;Yang 等^[21]通过 FEM - SPH 耦合算法数值模拟切割过程,揭示刀片受力及根系应力状态,为降低切割阻

力与宿根损伤率提供理论依据。上述研究表明,SPH 方法可较好地摆脱有限元网格束缚而解决取钵过程局部破损等模拟大变形问题,进而分析取苗过程钵苗土钵与根系发生的压缩、破碎、裂开等行为。

因此,本文拟从数值模拟仿真角度出发,结合探出式末端执行取钵装置前期研究基础,根据番茄钵苗移栽农艺要求,建立 FEM - SPH 耦合模型,并利用 ANSYS/LS - DYNA 对探出式取钵执行装置取苗作业过程及钵体损伤进行分析;基于 Catmull - Rom 样条曲线拟合方法提出双臂式番茄非圆齿轮行星轮系钵苗取苗机构并开展机构反求设计,通过计算机优化设计软件完成机构参数化,最终通过虚拟样机仿真、数值模拟及物理样机试验,验证理论模型的正确性,以及取苗机构实现降低钵苗损伤、提高作业质量与效率的可行性。

1 探出式取钵执行装置作业过程数值模拟仿真

1.1 作业过程及工作原理

课题组前期提出了配置于齿轮五杆式番茄钵苗取苗机构的探出式取钵执行装置^[9],作业过程如图 1 所示。

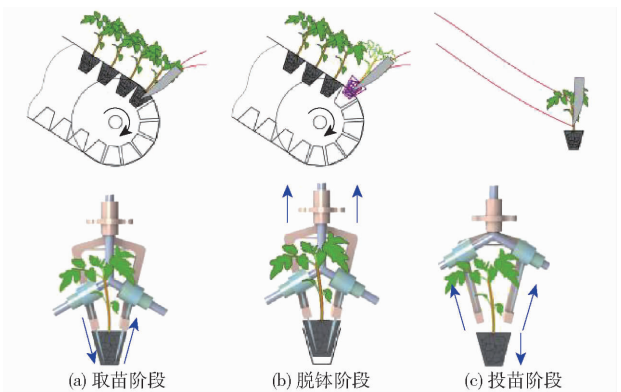


图 1 探出式取苗机构作业过程

Fig. 1 Working process of seedling picking mechanism

取苗阶段,移栽臂带动探出式取钵末端执行装置运行至取苗轨迹取钵位置,移栽臂内联动驱动杆使取苗刀片沿滑道以固定角度迅速顺着钵土两侧方向扎入钵体并保持,完成探出入钵过程,如图 1a 所示,由于取苗刀片角度不变,可避免主动夹紧、挤压导致土钵和根系破损的问题。

脱钵阶段,取苗刀片保持固定角度随取苗机构沿取苗轨迹向远离钵盘方向运动,通过取苗刀片与土钵秧根之间的楔形接触增加摩擦力,将钵土与秧盘脱开直至钵体完全脱离秧盘,如图 1b 所示,由于脱钵过程移栽臂运动无大幅度角度摆动,可减少与秧盘发生搅动、干涉现象。

投苗阶段,被夹紧的钵苗随取苗机构继续运转至投苗位置实现垂直投苗姿态,此时驱动杆件回缩,取苗刀片沿滑道以原固定角度迅速收回,钵苗被推秧块顶住完成推秧投苗过程,如图 1c 所示,落入栽植器或穴坑中,机构回程进入下一个作业周期^[22-24]。

该取苗机构从工作原理角度虽可降低钵体破损程度实现取钵功能,但通过齿轮连杆机构回转一周实现单次取投苗工序,效率较低且振动较大,易造成取苗过程钵苗脱落、破损的风险,因此深入开展该探出式取钵执行装置与土钵和根系相互作用研究,分析影响取苗损伤规律及相关因素,可为开发新型提效降损式取苗机构提供理论依据与支撑。

1.2 取苗过程 FEM-SPH 有限元模型建立

由于取苗过程末端执行装置与秧苗根土相互作用为非透明状态,无法通过试验研究进行细致观察与探究,致使难以准确探究取苗互作过程中番茄根系与土钵的具体损伤情况,对后续机构的减损提效优化设计具有一定挑战。为此,本文从数值模拟仿真角度,分析土钵根系损伤规律及影响因素,从而进一步确定取苗机构末端执行装置的作业参数设置。

首先,利用 CT 扫描技术^[24]实现真实番茄苗钵根系模型的构建,进而完成苗钵根土复合模型建立。研究中使用 72 穴的穴盘育苗,穴盘规格为 530 mm × 270 mm,穴孔上部尺寸为 40 mm × 40 mm,下部尺寸为 15 mm × 15 mm,高度为 40 mm,底部为 7 mm 孔。育苗对象为“绿宝石”番茄苗,育苗基质由蛭石、草炭、珍珠岩按照比例 1:2:1 混合而成。CT 扫描部分切面如图 2a 所示。由于直接导出的钵苗根系形状较为繁杂,不利于后续模拟,因此对钵苗根系进行主体有效优化,经平滑表面处理,简化后保留的主根系模型如图 2b 所示。

机构取苗刀片使用探出式取钵执行装置,为减小网格划分与非必要计算,将取苗机构的取苗刀架、取苗伸缩杆和伸缩环等零件省去,仅对取苗刀片进行简化,如图 3 所示。番茄育苗穴盘模型建立省略其复杂结构特征,保留上部、下部及高度四棱台形状,厚度为 1 mm。

番茄钵苗基质由多种土壤颗粒组成,为离散颗粒和胶结介质的非连续体系,因此简化为由多种物质组成的复合土壤材料并赋予材料属性。

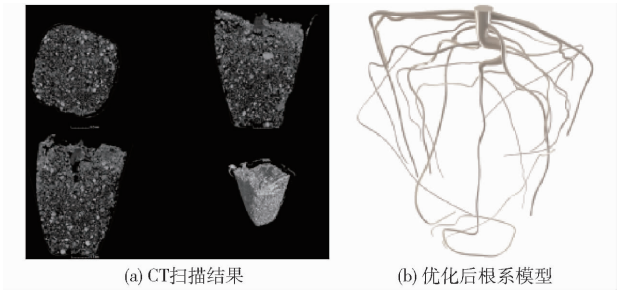


图 2 CT 扫描结果及简化后番茄根系模型
Fig. 2 CT scan results and simplified tomato root system diagrams



图 3 取苗刀片简化过程
Fig. 3 Simplification process of seedling-taking blade

番茄钵苗取苗过程为多种物质与零部件间的相互作用,其中涉及取苗刀片、番茄育苗基质、番茄根系、番茄育苗钵盘之间的互作耦合。因此,将上述处理模型分别导入到 Hypermesh 软件,将其有针对性地进行网格划分,包括将取苗刀片、番茄穴盘和番茄根系划分为四面体网格,番茄基质模型划分为六面体网格。将所划分好的网格保存为 *.k 格式的 k 文件,导入并应用 LS-PREPOST 软件中的“SphGen”功能,将六面体网格转化为 SPH 粒子。最终划分好的仿真模型网格共有 159 494 个节点,网格单元有 486 491 个,SPH 粒子有 32 420 个,SOLID 单元有 454 071 个,划分后的模型如图 4 所示。

通过前期研究发现,取苗过程取苗刀片、番茄钵盘和番茄根系变形很小,因此通过采用单点积分常应变体单元算法的拉格朗日单元,以及番茄基质的无网格粒子法 SPH 单元的方式,可有效避免网格大变形引起的畸变问题。并将原机构运动轨迹,添加 *BOUNDARY_MOTION_RIGID 关键字,使取苗刀片按照预定轨迹与姿态运转。番茄穴盘模型定义为全自由度约束,限制取苗刀片仅在一个方向旋转。根据取苗轨迹数据点数量,设置计算中止时间为 1.92 s,时间步长比例因子取 0.9。

1.3 仿真结果分析

全部设定好关键字后生成 *.k 后缀的关键字

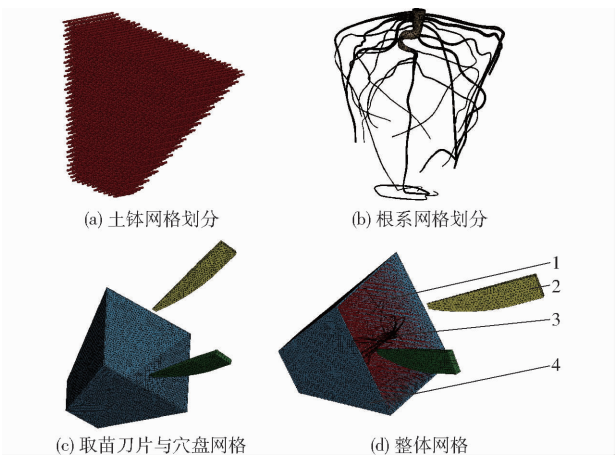


图 4 番茄取苗过程有限元模型

Fig. 4 Finite element models of tomato seedling picking process

1. 番茄土钵 2. 取苗刀片 3. 番茄根系 4. 育秧穴盘

文件,将关键字文件导入到 LS - DYNA 求解器中进行运算,完成后使用 LS - Prepost 4. 10 后处理软件进行模拟结果的读取。

1. 3. 1 取苗运动过程及等效应力分析

为了清晰观察取苗过程钵苗土钵运动情况及应力变化,在取苗刀片扎入土钵后,将番茄育苗穴盘设置为隐藏显示。选取取苗刀片运动过程中的各个关键位置及其等效应力。

取苗刀片准备扎入土钵前,土钵内未产生应力变化;刀片逐渐扎入土钵直至到达取苗深度,该过程中刀片扎入轨迹直接作用于钵苗土钵,突然的

应力变化使基质周边发生形变,随着应力传递对分布在基质中的根系造成拉扯,最大等效应力为 40. 1 MPa,如图 5a、5b 所示。

刀片随机构轨迹继续运动开始带动土钵脱离穴盘,该过程钵苗根系在脱离穴盘时与穴盘边缘或周围基质摩擦、拉扯,但取苗刀片相对于土钵运动变化趋势减小,应力值逐渐减小,此时最大应力为 37. 2 MPa,如图 5c 所示;运送钵苗过程土钵虽完全脱离穴盘,但随着刀片姿态角增大,土钵姿态变化的运动轨迹导致土钵受力方向改变,钵苗根系在基质内受到的扭转和弯曲应力使其最大等效应力增加,最大等效应力为 44. 9 MPa,如图 5d 所示。

继续运送过程逐渐平稳,土钵最大等效应力为 21. 83 MPa,直至运行到 1. 91 s 时,刀片缩回准备投苗,此时取苗刀片姿态角变化幅度减小,土钵最大等效应力逐渐减小,最大等效应力为 17. 0 MPa,如图 5e 所示;最后,取苗刀片完全缩回,钵苗脱离取苗刀片的束缚,最大等效应力减小,最大等效应力降至 15. 8 MPa。

1. 3. 2 接触力分析

通过刀片与番茄根系及土钵间接触应力开展损伤规律分析,具体变化曲线如图 6 所示。

取苗阶段 $t \in [0, 0. 09]$ s 时,两力变化曲线均出现了接触力尖峰,这是由于取苗刀片在快速且直接扎入土钵瞬间对根系以及基质冲击力瞬间上升。因此,取苗轨迹角度或深度控制不当,会对根系造成较

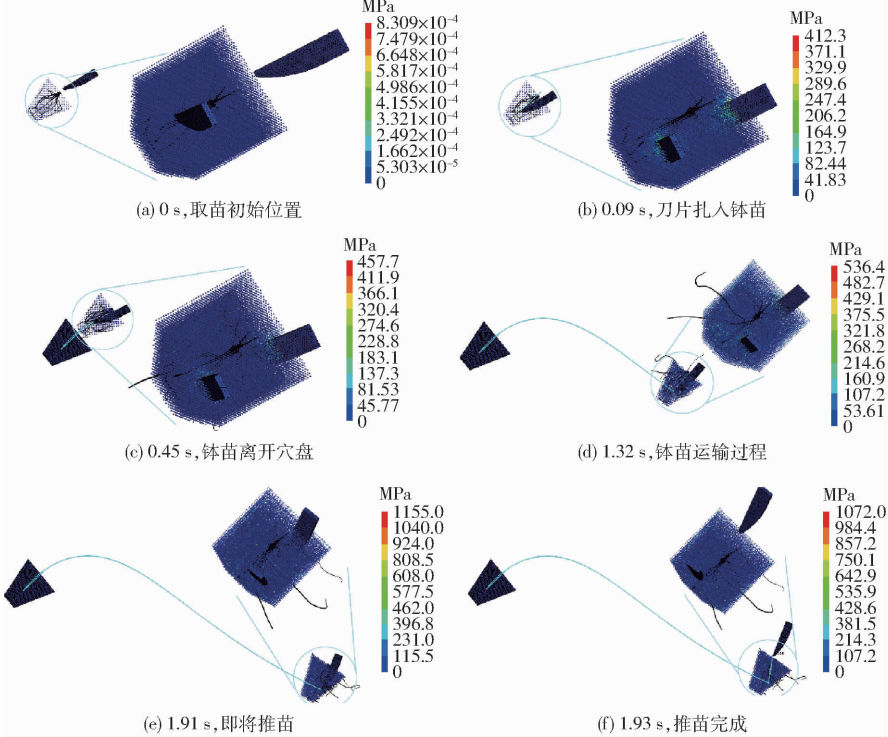


图 5 番茄钵苗取苗过程等效应力变化

Fig. 5 Equivalent stress changes during tomato pot seedling picking process

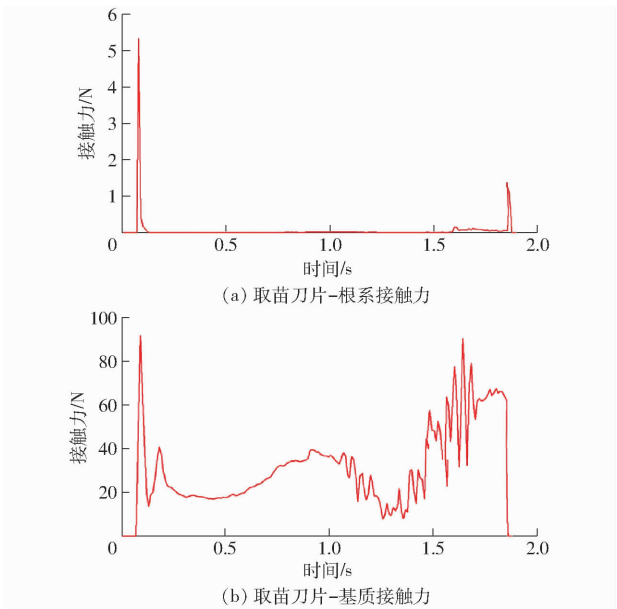


图 6 取苗过程接触力分析

Fig. 6 Contact force analysis during tomato pot seedling picking process

大的挤压与切割损伤,进而导致部分根系断裂或严重变形。在该阶段取苗臂应尽可能垂直插入钵体,并从开始取苗到完全取出过程中其摆角变化应尽量小,避免造成根系与土钵的损伤。

运输阶段 $t \in [0.09, 1.89]$ s 时,取苗轨迹相对稳定,取苗刀片对根系作用力较小,但该阶段取苗刀片与土钵基质间的接触力呈现波动上升趋势,这是由于该阶段取苗刀片由取苗角过渡到推苗角的姿态发生剧烈变化,使取苗刀片与土钵基质持续磨损钵苗基质,造成根系周围基质结构松动,根系的稳定性被破坏,接触力不断增加,在接近推苗阶段,取苗刀片姿态角变化更加剧烈。因此,需进一步提升并保持机构在送苗阶段后期轨迹与姿态变化的平稳性,避免在送苗阶段对钵苗造成二次损伤。

推苗阶段 $t \in [1.89, 1.92]$ s 时,取苗刀片与根系间接触力出现小尖峰,原因是推苗时机、运动轨迹、姿态角不合理导致该阶段取苗刀片运动轨迹出现突变,使取苗刀片推出钵苗时产生额外拉力直接作用于钵苗,严重时会导致根系从基质中被过度拉扯甚至拔出及断裂。因此,取苗臂尽量保持竖直状态,以减小投苗过程钵苗因轨迹姿态突变引起土钵破损及根系撕扯。

综上,带苗作业内取苗刀片与钵苗根系、土钵基质的接触作用力变化是造成钵苗根系与基质损伤的主要原因。本次仿真分析明确了取苗、运输、推苗 3 个阶段中轨迹参数、姿态变化与钵苗损伤程度的内在关联。为后续移栽机构轨迹优化提供了运动约束条件与核心优化目标。

2 非圆轮系运动学建模与反求设计

2.1 番茄钵苗取苗机构设计要求

基于探出式番茄钵苗取苗过程损伤规律及对现有多数取苗轨迹特性的对比分析,结合取苗末端执行装置作业时的姿态控制需求,为了满足提高取苗作业效率同时降低机构运动造成钵土损伤的要求,提出配置探出式取钵执行装置的双臂式番茄钵苗非圆齿轮行星轮系取苗机构,机构逆时针旋转一周完成 2 次取苗、送苗、投苗、回程 4 个作业工序循环,作业示意如图 7 所示。

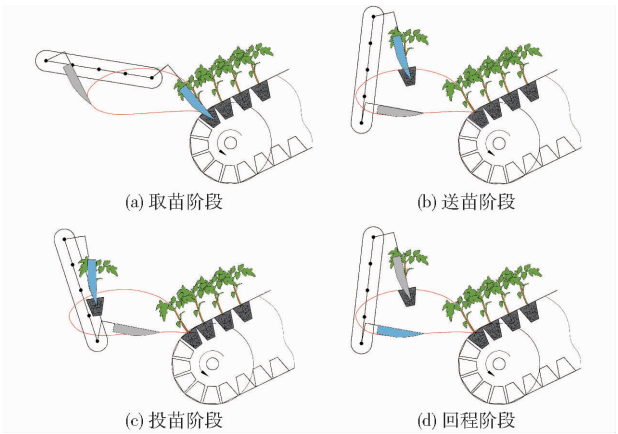


图 7 双臂式非圆轮系取苗机构作业过程

Fig. 7 Process of double-arm non-circular gear train seedling picking mechanism

为了实现探出式双臂取苗理想运动轨迹,拟采用反求设计方法开展非圆齿轮行星轮系取苗机构的研究,取苗末端执行机构的作业要求为:当取苗臂运动到取苗位置时,要求取苗末端执行机构的取苗刀片快速探出,取苗刀片以垂直钵体表面的姿态进入钵苗,取苗完成后刀片应保持探出状态,并在运苗过程中尽可能确保取苗臂姿态与轨迹变化平稳,运行到投苗位置时,取苗臂尽可能保持垂直状态,取苗刀片缩回,钵苗自由落体进入栽植器内。

结合取苗机构设计要求与数值模拟得出的约束条件初步规划机构轨迹,如图 8 所示,主要包括取苗阶段Ⅰ、送苗阶段Ⅱ、投苗阶段Ⅲ、回程阶段Ⅳ,分别

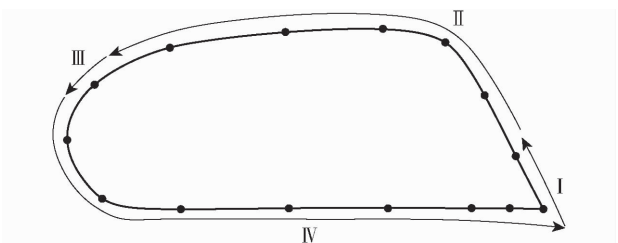


图 8 取苗机构运动阶段示意图

Fig. 8 Schematic of movement stages of seedling-taking mechanism contact

为 $I \rightarrow II \rightarrow III \rightarrow IV$ ，根据配置要求及前期研究基础^[25]，选取 16 个首末重合的关键位置点，作为轨迹优化设计的初始参数。

2.2 非圆齿轮系取苗机构工作原理

为实现理想取苗运动轨迹同时确保机构运转平稳、结构小巧，利用探出式取钵执行装置可实现取苗轨迹末端额外探出特性，提出双臂回转式非圆齿轮行星轮系机构。该机构主要由太阳轮、中间轮、行星轮、行星架、取苗臂等组成，如图 9 所示。其中太阳轮与机架固接，铰接于行星架旋转中心 O_1 上同轴固接的中间轮 2 与中间轮 3 分别与太阳轮和铰接于行星架旋转中心 O_2 的行星轮相互啮合，取苗臂固接于行星轮。

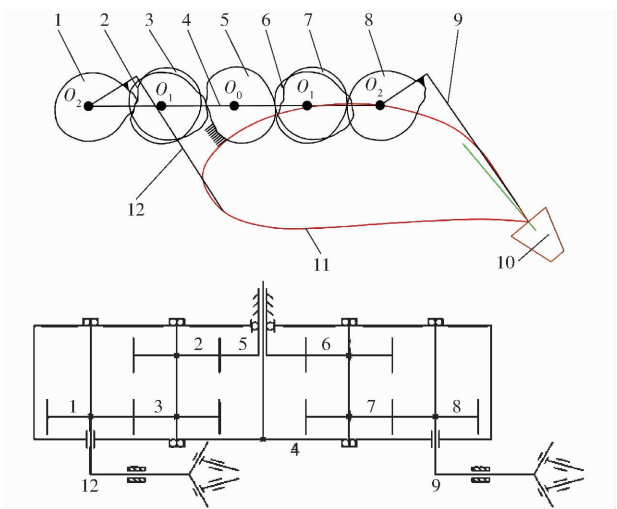


图 9 行星轮系机构简图

Fig. 9 Kinematic diagram of planetary gear system

1、8. 行星轮 2、3、6、7. 中间轮 4. 行星架 5. 太阳轮 9、12. 取苗臂 10. 钵苗 11. 取苗轨迹

机构运转时，动力输入带动行星架绕 O_0 进行逆时针匀速旋转，使铰接于行星架的中间轮、行星轮绕各自旋转中心做不等速转动，进而使取苗臂获得不等速摆动形成取苗轨迹与姿态，探出末端执行装置则由取苗臂运转时内部相对旋转控制，实现适时探出取苗、回缩投苗等工序。

2.3 Catmull-Rom 样条曲线的拟合方法

非圆轮系取苗机构的轨迹是基于二维绘图软件初步规划所得，仅具备少量特征点，难以直接反求非圆齿轮节曲线。为此，需借助数学方法对该轨迹进行拟合，以补充数据点，为后续非圆齿轮节曲线的反求提供依据。

为构造一条穿过 K 个点的 Catmull-Rom 样条曲线，需使用 $K+2$ 个控制点，首尾两点用于控制曲线形状而不被穿过。每个曲线段由连续 4 个控制点确定，整体形成一条通过所有目标点的连续曲线。

为简便计算，使用预先计算常数 a_0 、 b_0 、 c_0 、 d_0 表

示曲线 $q(t)$ ，即

$$q(t) = r[t_1 + t(t_2 - t_1)] = a_0 t^3 + b_0 t^2 + c_0 t + d_0 \quad (1)$$

因此

$$\begin{cases} q(0) = r(t_1) = q = d_0 \\ q(1) = r(t_2) = q_2 = a_0 + b_0 + c_0 + d_0 \\ q'(0) = (t_2 - t_1)r'(t_1) = n_1 = c_0 \\ q'(1) = (t_2 - t_1)r'(t_2) = n_2 = 3a_0 + 2b_0 + c_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 n_1, n_2 ——起点 q_1 和终点 q_2 的切线斜率
 t_1, t_2 ——本段样条起止原始节点参数， $t_1 < t_2$
 t ——归一化插值参数，取 $[0, 1]$
 r ——原始 Catmull-Rom 样条曲线

为了易于后续软件编写，将上面推导过程简化，

得

$$\begin{cases} q(0) = q_{i-1} \\ q(1) = q_i \\ q'(0) = s(q_i - q_{i-2}) \\ q'(1) = s(q_{i+1} - q_{i-1}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} d_0 = q_{i-1} \\ a_0 + b_0 + c_0 + d_0 = q_i \\ c_0 = s(q_i - q_{i-2}) \\ 3a_0 + 2b_0 + c_0 = s(q_{i+1} - q_{i-1}) \end{cases} \quad (4)$$

假设规划好的取苗轨迹上的特征点为 q_i ，将 q_i 代入式(3)、(4)计算即可得出插值后的轨迹曲线。

2.4 反求设计各数量关系分析与求解

将非圆齿轮行星轮系取苗机构转化为平面 2R 机构模型，太阳轮转动中心点 O 与行星轮转动中心点 B 连线为曲柄，行星轮转动中心点 B 和取苗臂尖点 P 连线为摆杆。

曲柄即行星架长度为 l_1 ，摆杆即取苗臂长度为 l_2 ，太阳轮转动中心 O 与取苗臂尖点 P 之间的长度为 l_3 。因此，根据前期理想取苗轨迹等关键数据，计算行星架长度 l_1 与取苗臂长度 l_2 ，行星架与取苗臂之间最小角度为 0° ，机构所能达到的最远点即为 $l_{3,\max}$ ，最大角度为 180° ，最近点为 $l_{3,\min}$ 。

如图 10 所示，设取苗轨迹 $q(s)$ 上任意点 P 坐标为 (x_p, y_p) ，则

$$l_3 = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \quad (5)$$

$$l_1 + l_2 = l_{3,\max} \quad (6)$$

$$l_1 - l_2 = l_{3,\min} \quad (7)$$

$$l_2 = \frac{l_{3,\max} - l_{3,\min}}{2} \quad (8)$$

$$l_1 = \frac{l_{3,\max} + l_{3,\min}}{2} \quad (9)$$

根据机构的连续运动原则，对于轨迹上的任意

点 $P(x_p, y_p)$, 可以得到唯一的 φ_1 与 φ_2 , 即

$$\varphi_1 = \varphi_3 \pm \varphi_4$$

(10)

$$\varphi_2 = \arctan \frac{y_p - y_{o2}}{x_p - x_{o2}}$$

(11)

$$\varphi_3 = \arctan \frac{y_p}{x_p}$$

(12)

$$\varphi_4 = \arccos \frac{l_1^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_1 l_3}$$

(13)

式中 φ_1 ——行星架的绝对夹角
 φ_2 ——取苗臂的绝对夹角
 φ_3 —— OP 连线的绝对夹角
 φ_4 —— OP 连线的绝对夹角与行星架的绝对夹角的和

(x_{o2}, y_{o2}) ——行星架旋转中心节曲线方程

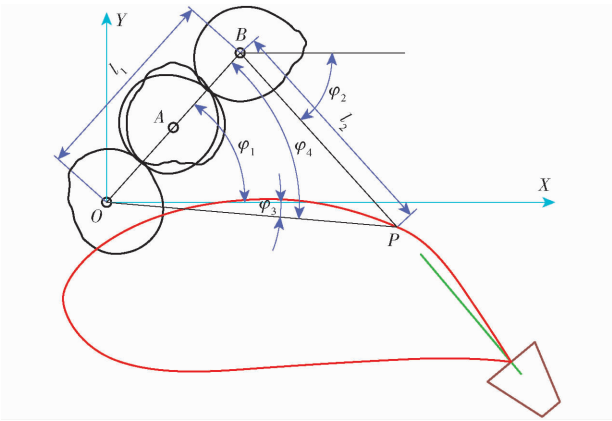


图 10 非圆齿轮行星轮系取苗机构简图
Fig. 10 Simplified diagram of seedling-taking mechanism with non-circular gear planetary train

取苗臂尖点 P 在由取苗轨迹最远点以逆时针方向向轨迹最近点运动过程中 $\varphi_1 = \varphi_3 + \varphi_4$; 取苗臂尖点 P 在由取苗轨迹最近点以逆时针方向向轨迹最远点运动过程中 $\varphi_1 = \varphi_3 - \varphi_4$ 。

因此可以得到轨迹上每一点 $P(x, y)$ 对应的 φ_1 与 φ_2 , φ_1 与 φ_2 之间的关系式为 $\varphi_2 = f(\varphi_1)$ 。

本文行星轮系工作时逆时针旋转, 角速度为 ω , 求解传动比需转化为定轴轮系, 对行星架施加反向角速度 $-\omega$, 太阳轮固定 (绝对转角为 0°), 整理得总传动比 i 为

$$i = \frac{d\varphi_1}{d(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

(14)

计算求得机构总传动比后, 对机构单级传动比进行分配, 因此将总传动比开方得到第 1 级传动比, 由总传动与第 1 级传动比的比值得到第 2 级传动比, 所以, 第 1 级齿轮传动比 i_1 为

$$i_1 = \sqrt{i}$$

(15)

引入调节系数 k 对第 1 级传动比进行调节, 调节后的第 1 级传动比 i'_1 为

$$i'_1 = \frac{i_1}{k}$$

(16)

$$k = \frac{2\pi}{\int_0^{2\pi} \frac{1}{i} d\varphi_1^h}$$

(17)

式中 φ_1^h ——太阳轮极角

第 2 级传动比 i_2 为

$$i_2 = \frac{i}{i'_1}$$

(18)

得到两级非圆齿轮传动比后, 可根据传动比与节曲线之间关系计算得到非圆齿轮节曲线方程, 因此太阳轮极径 r_1 为

$$r_1 = \frac{a}{1 + i'_1}$$

(19)

第 1 中间轮极径 r_2 为

$$r_2 = a - r_1$$

(20)

第 2 中间轮极径 r_3 为

$$r_3 = \frac{a}{1 + i_2}$$

(21)

行星轮极径 r_4 为

$$r_4 = a - r_3$$

(22)

太阳轮的极角 φ_1^h 为

$$\varphi_1^h = \varphi_1$$

(23)

第 1 中间轮极角 φ_5 为

$$\varphi_5 = \int_0^{\varphi_1^h} \frac{1}{i'_1} d\varphi_1^h$$

(24)

第 2 中间轮极角 φ_6 为

$$\varphi_6 = \int_0^{\varphi_2^h} \frac{1}{i'_2} d\varphi_2^h$$

(25)

行星轮极角 φ_7 为

$$\varphi_7 = \int_0^{\varphi_3^h} \frac{1}{i'_2} d\varphi_3^h$$

(26)

式中 i'_2 ——调节后的第 2 级传动比

a ——两级齿轮中心距

φ_2^h —— φ_2 相对行星架转角

φ_3^h —— φ_3 相对行星架转角

根据上述计算, 将其转换为直角坐标方程, 太阳轮节曲线方程为

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + r_1 \cos \varphi_1 \\ y_1 = y_0 + r_1 \sin \varphi_1 \end{cases}$$

(27)

式中 (x_1, y_1) ——太阳轮节曲线方程

(x_0, y_0) ——太阳轮旋转中心位置坐标

取两级齿轮中心距 a 为行星架长度的一半, 第 1 中间轮与第 2 中间轮的转动中心 (x_a, y_a) 为

$$\begin{cases} x_a = \frac{l_1}{2} \cos \varphi_1 \\ y_a = \frac{l_1}{2} \sin \varphi_1 \end{cases}$$

(28)

第 1 中间轮节曲线为

$$\begin{cases} x_2 = x_a + r_2 \cos \varphi_5 \\ y_2 = y_a + r_2 \sin \varphi_5 \end{cases} \quad (29)$$

式中 (x_2, y_2) ——第 1 中间轮节曲线坐标

第 2 中间轮节曲线为

$$\begin{cases} x_3 = x_a + r_3 \cos \varphi_6 \\ y_3 = y_a + r_3 \sin \varphi_6 \end{cases} \quad (30)$$

式中 (x_3, y_3) ——第 2 中间轮节曲线坐标

行星轮转动中心 (x_b, y_b) 为

$$\begin{cases} x_b = l_1 \cos \varphi_1 \\ y_b = l_2 \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (31)$$

行星轮节曲线为

$$\begin{cases} x_4 = x_b + r_4 \cos \varphi_7 \\ y_4 = y_b + r_4 \sin \varphi_7 \end{cases} \quad (32)$$

式中 (x_4, y_4) ——行星轮节曲线坐标

机构的动力施加于机构行星架上,施加一个逆时针方向的恒定角速度 ω 。取苗臂尖点 P 的运动方程为

$$\begin{cases} x_p = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \\ y_p = l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (33)$$

3 优化设计软件开发及参数优化

为了优化出理想的番茄钵苗取苗机构运动轨迹、姿态及非圆齿轮节曲线,本文利用 Matlab 软件开发模块进行非圆齿轮行星轮系取苗机构辅助优化设计软件的开发。该软件可以实现参数变化时非圆齿轮行星轮系运动过程实时动态模拟、重要数据输出及参数优化功能。

3.1 优化目标

根据番茄钵苗取苗农艺要求、机构运转特性以及前期研究经验总结,提出以下 7 个运动学优化目标:取苗角在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间;取苗刀片进出钵前后的角度差小于 45° ;推苗角与取苗角角度差在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间;轨迹整体高度大于 100 mm;两臂之间最小距离大于 40 mm;推苗角在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 之间;取苗臂短臂长度与长臂长度比值小于 0.5。

3.2 优化软件设计

基于番茄取苗机构反求计算运动学模型以及所建立的优化目标函数,开发计算机可视化动态优化辅助设计软件,利用 Matlab App Designer 模块,将机构轨迹参数在 Matlab 中分配环境变量,结合运动学理论模型以及计算机图形学理论编写成取苗机构辅助优化设计软件,如图 11 所示。

通过人机交互,对番茄钵苗取苗机构的运动轨迹以及传动比曲线开展优化工作,调节后的轨迹与传动比变化曲线如图 12 所示,经过系列计算与调

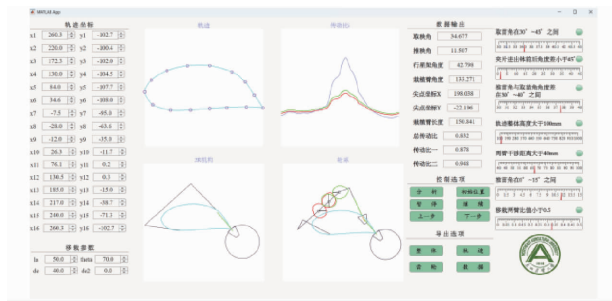


图 11 辅助优化设计软件界面

Fig. 11 Interface of auxiliary optimization design software

整,得到了一组符合要求与优化目标的轨迹参数和机构参数组合: $X_1 = 260.3 \text{ mm}$, $Y_1 = -102.7 \text{ mm}$, $X_2 = 220 \text{ mm}$, $Y_2 = -100.4 \text{ mm}$, $X_3 = 172.3 \text{ mm}$, $Y_3 = -102 \text{ mm}$, $X_4 = 130 \text{ mm}$, $Y_4 = -104.5 \text{ mm}$, $X_5 = 84 \text{ mm}$, $Y_5 = -107.7 \text{ mm}$, $X_6 = 34.6 \text{ mm}$, $Y_6 = -108 \text{ mm}$, $X_7 = -7.5 \text{ mm}$, $Y_7 = -95 \text{ mm}$, $X_8 = -28 \text{ mm}$, $Y_8 = -63.6 \text{ mm}$, $X_9 = -12 \text{ mm}$, $Y_9 = -35 \text{ mm}$, $X_{10} = 26.3 \text{ mm}$, $Y_{10} = -11.7 \text{ mm}$, $X_{11} = 76.1 \text{ mm}$, $Y_{11} = 0.2 \text{ mm}$, $X_{12} = 130.5 \text{ mm}$, $Y_{12} = 0.3 \text{ mm}$, $X_{13} = 185 \text{ mm}$, $Y_{13} = -15 \text{ mm}$, $X_{14} = 217 \text{ mm}$, $Y_{14} = -38.7 \text{ mm}$, $X_{15} = 240 \text{ mm}$, $Y_{15} = 71.3 \text{ mm}$, $X_{16} = 260.3 \text{ mm}$, $Y_{16} = 102.7 \text{ mm}$, $l_a = 50 \text{ mm}$, $\theta = 70^\circ$, $\delta = 40^\circ$, $\delta_2 = 0^\circ$ 。

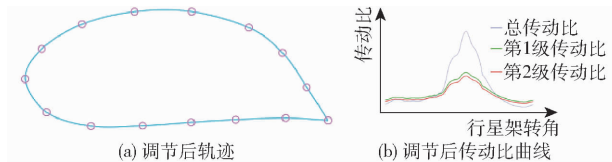


图 12 调节后轨迹及传动比变化曲线

Fig. 12 Trajectory and transmission ratio change curves after adjustment

4 取苗机构模拟仿真与试验

4.1 取苗机构虚拟仿真试验

根据辅助优化设计软件获得的机构参数组,对取苗机构进行结构设计,将建立的非圆齿轮行星轮系取苗机构三维模型导入到 RecurDyn 软件中进行虚拟仿真。根据机构工作原理,设置机构转速为 80 r/min,时间为 1 s,步长为 0.01 s。将 RecurDyn 虚拟仿真得到的机构运动轨迹曲线与理论运动轨迹进行对比,如图 13 所示,通过对比发现,虚拟仿真轨迹与理论轨迹基本一致,且取苗刀片尖点水平与垂直方向速度误差在允许范围内且运动趋势保持一致。

4.2 优化后取苗机构数值模拟仿真对比分析

对优化后机构仿真结果进行提取,并将育苗穴盘隐藏,取苗刀片及番茄钵苗在各个关键运动位置时的等效应力如图 14 所示。对比取苗运动过程最大等效应力,新取苗轨迹在扎入番茄钵苗瞬间最大

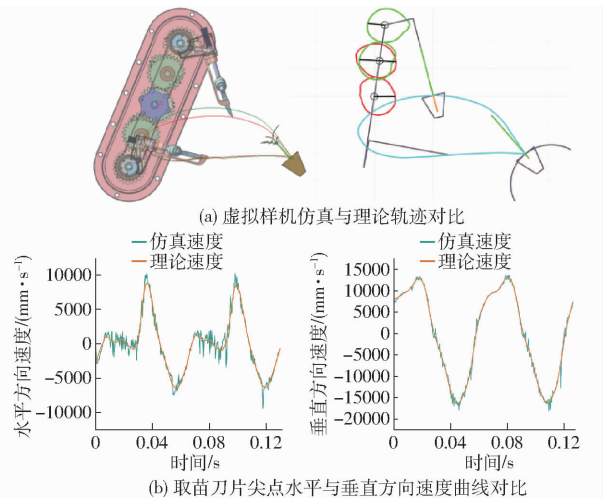


图 13 取苗机构虚拟样机仿真轨迹结果对比

Fig. 13 Comparison between virtual prototype of seedling-taking mechanism and simulation trajectory results

等效应力降为 38.3 MPa,而在关键取钵脱离钵盘过程,刀片与钵苗间相对转动减小,在 0.35 s 时,钵苗最大等效应力为 36.8 MPa,且在向投苗位置送苗过程刀片角度越来越接近竖直状态,更有利于后续投苗运动。因此,从取苗过程中的最大等效应力角度,优化后机构实现轨迹均小于原轨迹,更有利于确保钵苗根系与土钵的完整度、减少钵土内部的损伤。

从接触力角度分析,取苗时刻,取苗刀片与土钵

的接触力瞬时峰值由原来 90 N 降至不到 5 N,可有效避免瞬时高峰冲击对土钵及根系结构的损害;送苗阶段,接触力曲线由波动显著且后期出现大范围升降突变,改善为不存在剧烈突变,持续过程更加均匀与平稳,说明该阶段可实现更稳定的夹持送苗;从刀片与根系接触力变化来看,整体过程最大接触力相较原轨迹均有一定程度的降低,如图 15 所示。

4.3 番茄钵苗取苗机构台架试验验证

为进一步检验机构设计合理性以及机构实际作业性能,研制物理样机进行台架试验,试验台架如图 16 所示。

首先,开展取苗机构台架空转试验,获取取苗尖点轨迹,如图 17 所示,对比分析优化软件理论轨迹、虚拟样机仿真轨迹和物理样机台架试验轨迹,得出各轨迹在误差允许范围内保持一致。

将钵苗放入试验台架秧箱上,机构转速设定为 20 r/min,用以分析取苗机构在各个阶段姿态,选取机构运转平稳的一个完整作业周期,截取各关键点的图像,如图 18 所示,从性能角度分析,取苗机构可以一次性完成取苗、送苗、投苗工序,各个阶段轨迹和姿态均满足农艺设计要求。

通过力学传感器测试取苗过程中刀片与钵体接触力并与数值模拟对比分析,测试系统安装示意图

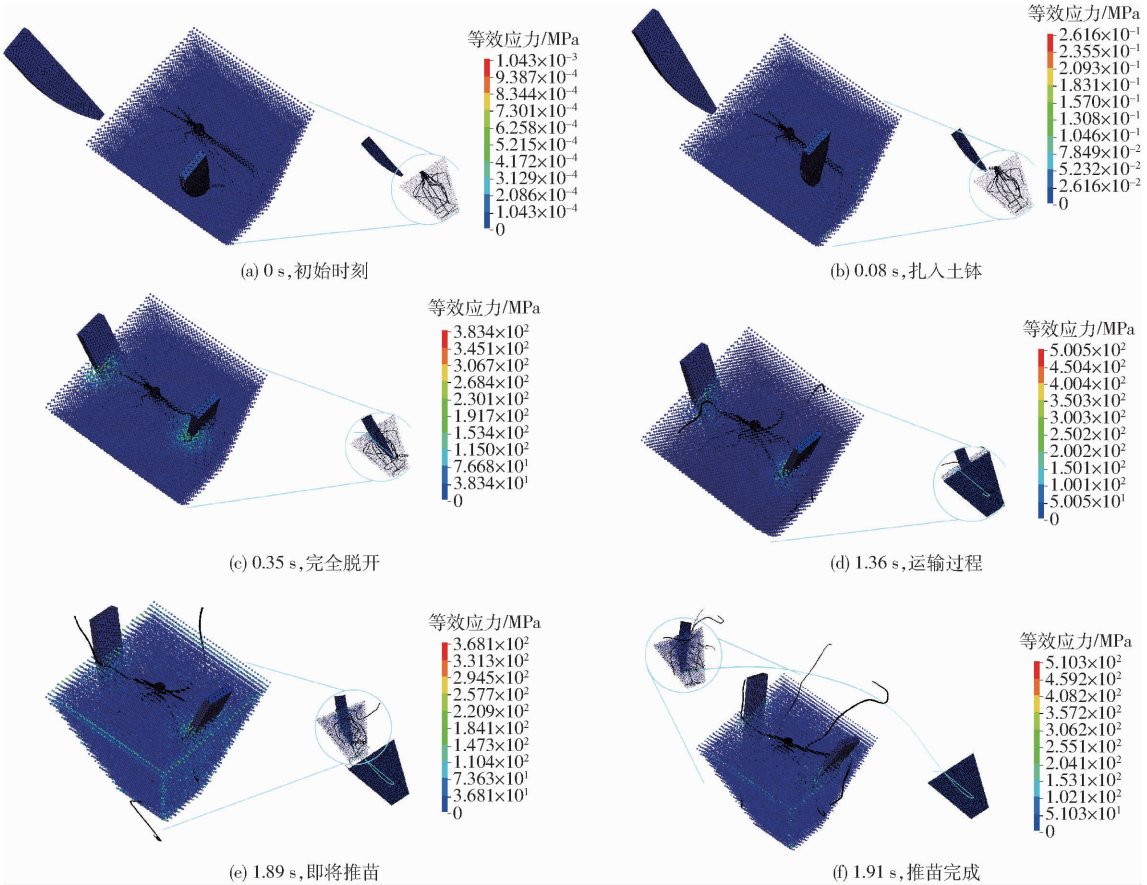


图 14 优化后取苗机构取苗过程应力变化

Fig. 14 Stress variation during seedling picking process along motion trajectory of non-circular gear planetary

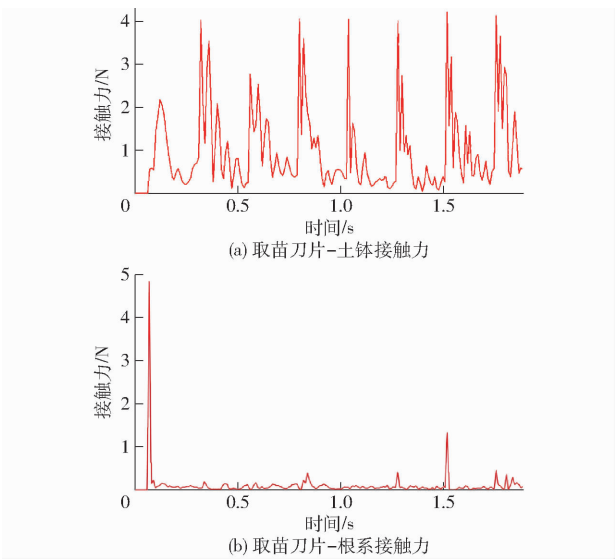


图 15 优化后取苗刀片与根系、土钵接触力变化曲线
Fig.15 Contact forces between blade and root, pot during optimized seedling-taking process

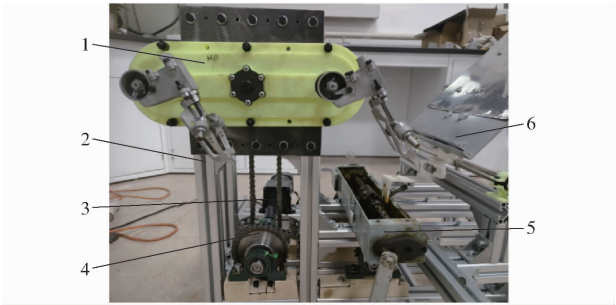


图 16 试验台架装配示意图
Fig.16 Assembly diagram of test bench

1. 取苗机构物理样机 2. 试验台架 3. 电动机 4. 传动机构
5. 送秧机构 6. 秧箱

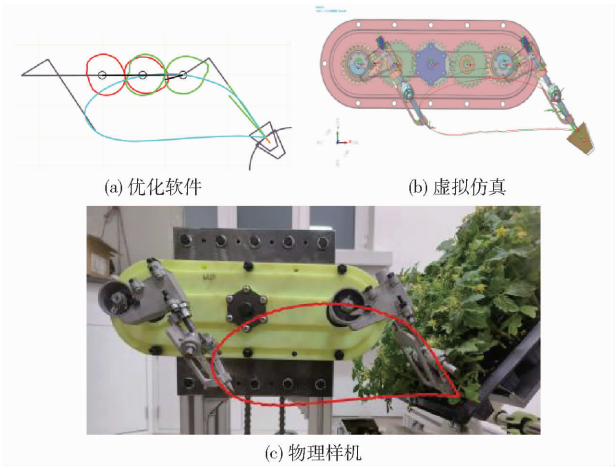


图 17 取苗机构轨迹对比结果

Fig.17 Comparison of seedling picking mechanism trajectories
如图 19 所示。试验前在上位机软件中的桥接形式选择单桥(1/4 桥),对应变片进行标定校准,同时对数据读取间隔时间、数据存储和力单位等进行选择。对取苗机构进行 36 组接触力测试试验,试验结果如图 20 所示。



图 18 物理样机作业关键点图像

Fig.18 Images of key points of physical prototype operation

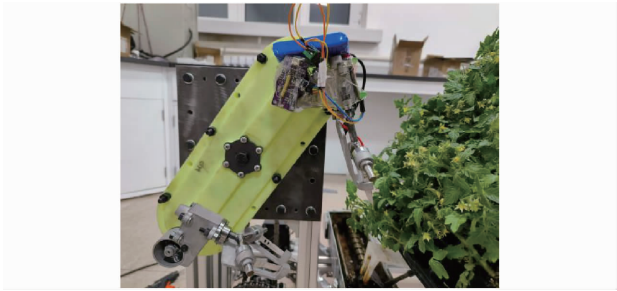


图 19 测试系统安装示意图

Fig.19 Installation diagram of test system

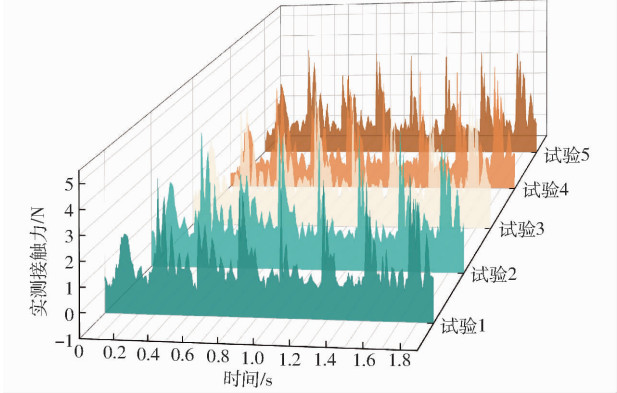


图 20 接触力测试试验结果

Fig.20 Contact force test results

根据试验结果可以看出,在取苗过程中刀片与番茄土钵接触力变化趋势基本一致,部分曲线在取苗作业过程中出现了轻微振动,主要原因是取苗臂取苗推苗作业是通过取苗推杆进行探出缩回过程,弹簧作用力使取苗臂在部分取推苗时产生抖动。

通过试验获得最大接触力平均值与数值模拟仿真获得最大接触力进行对比分析,其中数值模拟得到的最大接触力为 4.229 4 N,接触力测试试验获得的最大接触力平均值为 4.070 2 N,刀片与土钵最大

接触力与数值模拟仿真模型的模拟值平均相对误差为 3.76%,误差范围间接验证了数值模拟模型的正确性。

最后进行取苗机构性能试验,测试非圆齿轮行星轮系取苗机构在转速为 20、30、40、50 r/min 下的取苗性能试验。在取苗试验过程中记录每个转速下的取苗成功数量、取苗失败数量、推苗失败数量,试验最后统计数据如表 1 所示。

表 1 取苗试验结果统计
Tab.1 Statistics of seedling picking test results

转速/ (r·min ⁻¹)	秧苗数 量/株	取苗失败 数量/株	推苗失败 数量/株	成功数 量/株	成功 率/%
20	72	3	0	69	95.8
30	70	2	1	67	95.7
40	72	2	2	68	94.4
50	71	1	2	68	95.8

通过试验数据分析与结果表明,机构在满足最大接触力要求范围内,取苗成功率均大于 94%,满足整体移栽要求。试验中取苗失败原因主要包括:番茄茎叶生长过长造成了带苗现象;送苗装置在送苗过程中存在送苗不到位现象,使得取苗机构在取苗过程中存在取苗点偏移。

5 结论

(1)通过建立 FEM-SPH 耦合模型对原有取苗机构取苗过程进行数值模拟仿真,分析钵苗损伤规律与影响因素,提出双臂式非圆齿轮行星轮系取苗机构,采用反求法建立取苗轨迹与轮系的数学关联,实现了机构特定作业轨迹与姿态的精准控制,为移栽机构的低损化设计提供了量化分析方法与理论支撑。

(2)提出优化目标并建立目标函数,基于 Matlab 软件开发模块开发计算机辅助优化设计软件,实时显示取苗机构运动状态并通过人机交互实现机构参数优化。

(3)研制双臂式番茄钵苗非圆齿轮行星轮系取苗机构物理样机与试验台架,并与理论与虚拟样机仿真轨迹进行对比,验证了机构轨迹的一致性;通过对最大接触力对比分析得出两者之间的平均相对误差为 3.76%,验证了数值模拟的正确性;取苗性能试验结果表明,取苗机构在转速为 20、30、40、50 r/min 的条件下成功率分别为 95.8%、95.7%、94.4% 和 95.8%,验证了双臂式番茄钵苗非圆轮系取苗机构设计的合理性与可行性,为大田番茄钵苗高效低损移栽装备的研发提供了解决方案。

参 考 文 献

[1] 张学东,刘立晶,宁义超,等.蔬菜移栽机顶夹式取苗装置末端执行器设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):115-124,134.
Zhang Xuedong, Liu Lijing, Ning Yichao, et al. Design and experiment of end effector of seedling taking by jacking and clamplng of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 115-124, 134. (in Chinese)

[2] 任玲,崔建谱,张聪华,等.基于改进蚁群算法的穴盘苗补苗移栽路径规划方法[J].农业机械学报,2025,56(8):293-302,379.
Ren Ling, Cui Jianpu, Zhang Conghua, et al. Path planning method for hole tray seedling transplanting based on improved ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 293-302, 379. (in Chinese)

[3] 孙永珍,贺靖,魏芳,等.“十三五”我国番茄产业发展及其国际竞争力评价[J].中国瓜菜,2023,36(1):112-116.
Sun Yongzhen, He Jing, Wei Fang, et al. Evaluation on the development and international competitiveness of China's tomato industry during the 13th Five-Year Plan period[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(1): 112-116. (in Chinese)

[4] 李红双,马健峰.基于反转运动规律的蔬菜移栽机凸轮取投苗传动机构研究[J].农业机械学报,2025,56(11):223-233,263.
Li Hongshuang, Ma Jianfeng. Cam-driven seedling picking and placing transmission mechanism of vegetable transplanters based on reverse motion law[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 223-233, 263. (in Chinese)

[5] 邱硕,于博,计东,等.辣椒苗夹茎式双排自动取投苗装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(3):115-121,152.
Qiu Shuo, Yu Bo, Ji Dong, et al. Design and experiment of double row stem clipping type automatic picking and throwing device for pepper seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 115-121, 152. (in Chinese)

[6] 赵翔烽,颜华,别琼,等.基于 EDEM-RecurDyn 的移栽机取苗爪取苗仿真与试验[J].农业机械学报,2024,55(增刊1):197-206.
Zhao Xiangfeng, Yan Hua, Bie Qiong, et al. Calibration of seedling pot particle parameters and simulation and experimentation of seedling picking claw based on EDEM-RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 197-206. (in Chinese)

[7] 韩长杰,杨宛章,王荣峰,等.夹茎式番茄钵苗取苗机构设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(21):1-9.

Han Changjie, Yang Wanzhang, Wang Rongfeng, et al. Design and experiment of seedling picking mechanism by stem clipping for tomato plug seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 1-9. (in Chinese)

[8] 赵斌栋,王吉奎,任玲,等. 伸缩片式番茄移栽机取苗器设计[J]. 农机化研究,2022,44(4): 80-85,200.

Zhao Bindong, Wang Jikui, Ren Ling, et al. Design of stretchable style pick-up device for tomato transplanters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(4): 80-85, 200. (in Chinese)

[9] 辛亮,王明成,孙国玉,等. 番茄钵苗移栽探出式取钵机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3): 96-105.

Xin Liang, Wang Mingcheng, Sun Guoyu, et al. Design and experiment of extensible type of picking seedling pot mechanism for tomato pot seedling transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 96-105. (in Chinese)

[10] 周脉乐. 回转式膜上辣椒钵苗移栽机构的优化设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.

Zhou Maile. Optimized design and experimental study of the rotary pepper pot seeding transplanting mechanism on agricultural plastic film[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[11] Yang Q,Huang G, Shi X, et al. Design of a control system for a mini-automatic transplanting machine of plug seedling[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,169:105226.

[12] 彭宇峰,郑文鑫,陈献勇,等. 移栽机及其关键技术研究进展[J]. 农业装备与智能技术,2025(1): 1-8.

Peng Yufeng, Zheng Wenxin, Chen Xianyong, et al. Research and progress on transplanters and its key technologies[J]. Agricultural Equipment & Intelligent Technology, 2025(1): 1-8. (in Chinese)

[13] 刘建博,邱硕,田素博. 蔬菜移栽机研究进展[J]. 中国农机装备,2023(9): 48-55.

Liu Jianbo, Qiu Shuo, Tian Subo. Research status of vegetable transplanter[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(9): 48-55. (in Chinese)

[14] 刘凯华,刘威,祝露,等. 国内外蔬菜移栽机械发展现状与路径[J]. 现代农业装备,2025,46(3): 1-8.

Liu Kaihua, Liu Wei, Zhu Lu, et al. Current status and development of vegetable transplanting machinery[J]. Modern Agricultural Equipment, 2025, 46(3): 1-8. (in Chinese)

[15] 王吉岱,李法德,张晓辉,等. 非圆齿轮-连杆组合传动式蔬菜钵苗移栽机构设计[J]. 农业工程学报,2019, 35(10): 28-35.

Wang Jidai, Li Fade, Zhang Xiaohui, et al. Design of non-circular gear linkage combination driving type vegetable pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 28-35. (in Chinese)

[16] Ji D, Liu L, Zeng F, et al. Design and experimental study of a traction double-row automatic transplanter for solanum lycopersicum seedlings[J]. Horticulturae, 2024, 10: 692.

[17] 彭泽辉,杨发展,赵烁,等. 穴盘苗自动化移栽机取苗机构研究进展[J]. 中国农机化学报,2025,46(4): 22-28.

Peng Zehui, Yang Fazhan, Zhao Shuo, et al. Research progress on taking mechanism of automatic transplanter for pot hole seedling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4): 22-28. (in Chinese)

[18] 俞高红,李小琴,徐岳平,等. 蔬菜穴盘苗取栽一体式移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(6): 341-350.

Yu Gaohong, Li Xiaoqin, Xu Yueping, et al. Design and experiment of integrated transplanting mechanism for taking and planting vegetable pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 341-350. (in Chinese)

[19] 马晓晓,李华,曹卫彬,等. 番茄钵苗移栽机自动取苗装置作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(10): 46-55.

Ma Xiaoxiao, Li Hua, Cao Weibin, et al. Optimization and experiment of working parameters of automatic seedling picking device for tomato seedlings transplanting[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 46-55. (in Chinese)

[20] Hu M, Gao T, Dong X, et al. Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH)[J]. Soil and Tillage Research,2023,229:105671.

[21] Yang W, Zhao W, Liu Y, et al. Simulation of forces acting on the cutter blade surfaces and root system of sugarcane using FEM and SPH coupled method[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2021,180:105893.

[22] 王系林. 基于混合多位姿行星轮系取苗机构的设计与试验[D]. 杭州:浙江理工大学,2024.

Wang Xilin. Design and experiment of seedling pick-up mechanism with planetary gear train based on hybrid multi-pose[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2024. (in Chinese)

[23] 叶海平,郑志坚. 仙人球自动移栽机末端执行器的设计与试验[J]. 中国农机化学报,2025,46(2): 20-26,34.

Ye Haiping, Zheng Zhijian. Design and experiment of end effector for cactus automatic transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(2): 20-26, 34. (in Chinese)

[24] 刘洋,毛罕平,韩绿化,等. 基于 Micro-CT 的黄瓜苗坨夹取破损检测及取苗参数优化[J]. 农业工程学报,2018, 34(12): 27-34.

Liu Yang, Mao Hanping, Han Lühua, et al. Plug damage detection and parameter optimization of picking up cucumber seedlings from tray cells based on Micro-CT[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 27-34. (in Chinese)

[25] 俞高红,王系林,刘建刚,等. 蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1): 94-103.

Yu Gaohong, Wang Xilin, Liu Jiangang, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot peedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 94-103. (in Chinese)