

柳树插条自动喂入装置取料机构优化设计与试验

叶秉良^{1,2} 唐 涛^{1,2} 杨秋兰³ 莫灿林¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
3. 明新科技大学自然科学教育中心, 新竹 30401)

摘要: 针对我国柳树插条半自动扦插作业人工喂入劳动强度大和作业效率低的问题,提出一种实现有序出料、取料和送料功能的柳树插条自动喂入装置,并针对该装置进行取料机构的优化设计与相关试验研究。建立取料机构运动学模型和优化设计模型,应用自主开发的软件分析确定了取料机构参数的取值范围,进而利用 Matlab 软件的遗传算法工具箱实现取料机构的参数优化;完成取料机构结构设计,进行取料机构虚拟运动仿真验证;研制取料机构样机和柳树插条自动喂入装置试验台,开展取料机构高速摄像试验和柳树插条自动喂入试验,研究取料机构运动特性,检验自动喂入装置的工作性能。在自动喂入效率达到 55 株/min 时,柳树插条喂入成功率约为 83%,表明该装置具有应用于柳树插条自动扦插机的可行性。

关键词: 柳树插条; 自动喂入装置; 取料机构; 优化设计; 试验

中图分类号: TH112; S226.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)05-0093-07 **OSID:** 

Optimization Design and Tests of Picking Mechanism of Automatic Feeding Device for Willow Cuttings

YE Bingliang^{1,2} TANG Tao^{1,2} YANG Qiulan³ MO Canlin¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China
3. Natural Science Education Center, Minghsin University of Science and Technology, Hsinchu 30401, China)

Abstract: In order to solve the problems of high labor intensity and low efficiency of manual feeding in the semi-automatic cuttage operation for willow cuttings in China, a kind of automatic feeding device for willow cuttings that can realize the functions of orderly discharging, picking and feeding willow cuttings was proposed. The optimization design of the picking mechanism and related tests of the device was conducted in laboratory. The kinematics model and optimization design model of the picking mechanism were established, the self-developed software was used to analyze and determine the parameter range of the picking mechanism, and then the genetic algorithm toolbox of Matlab software was used to realize the parameter optimization of the picking mechanism. The structure design of the picking mechanism was completed, and the virtual motion simulation verification of the picking mechanism was carried out. The prototype of the picking mechanism and the test bench of the automatic feeding device were developed, and the high-speed camera test of the picking mechanism and feeding test of the automatic feeding device were carried out. The movement characteristics of the picking mechanism were studied, and the working performance of the device was inspected. When the automatic feeding efficiency reached 55 plants per minute, the success ratio of willow cuttings feeding was about 83%, which showed that the device had the feasibility of being applied to the automatic cuttage machine for willow cuttings.

Key words: willow cutting; automatic feeding device; picking mechanism; optimization design; test

0 引言

柳树具有适应环境能力强、生长速度快、管理成本低等优点,是能源林、防护林和用材林的重要树种^[1]。柳树插条的扦插育苗作业是柳树种植的重要环节。目前,我国柳树插条扦插作业主要依靠人工和半自动机械完成,劳动力成本高、扦插效率低^[2-3]。国内外学者对于花卉和蔬菜苗自动栽植机械的研究较多,提出了多种花卉自动扦插装置和蔬菜钵苗自动移栽机械^[4-7]。日本及欧美等发达国家的栽植机械自动化程度较高,如日本井关公司、洋马公司研制了全自动菊花扦插装置和自动蔬菜移栽机;国内华中农业大学和浙江理工大学等研究提出了藜蒿自动扦插机^[8]和行星轮系旋转式蔬菜钵苗自动栽植机构^[9-13]。由于扦插所用的柳树插条与花卉及蔬菜苗的物理机械性能差异很大,花卉和蔬菜苗自动栽植机械无法应用于柳树插条的扦插作业,因此,有必要开展柳树插条自动扦插机的研究工作。目前,转杯式半自动扦插机需要人工将柳树插条投入到旋转的投苗杯中^[14],耗时耗力且作业效率低,为此本文提出一种与转杯式半自动扦插机械配合作业的柳树插条自动喂入装置,并对其取料机构进行运动学建模与分析、优化设计、仿真验证,开展相关试验对机构性能加以验证。

1 整机结构与工作原理

1.1 自动喂入装置方案设计

根据柳树插条自动喂入装置自动有序出料、取料与送料的作业要求以及柳树插条几何物理参数(平均直径与长度分别为 10.6、120.3 mm),提出一种由机架、链板式出料装置、不完全齿轮机构、料仓、取料机构和输送带等组成的柳树插条自动喂入装置,其整体结构如图 1 所示。

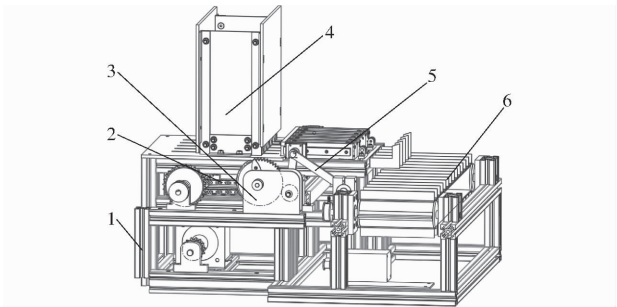


图 1 扦插柳树插条自动喂入装置结构图

Fig. 1 Scheme of automatic feeding device for cutting willows

1. 机架 2. 链板式出料装置 3. 不完全齿轮机构 4. 料仓 5. 取料机构 6. 输送带

自动喂入装置采用链板式出料装置将柳树插条从料仓中有序地推入取料机构末端执行器内。由于

从料仓推入取料机构末端执行器中需要一定的时间,为防止柳树插条卡堵,利用不完全齿轮机构实现链板式出料装置与取料机构的配合作业。当不完全齿轮机构处于锁止状态时,取料机构保持静止,此时出料推板将柳树插条从料仓推出并送至取料机构末端执行器内,然后不完全齿轮机构开始啮合,取料机构开始送料,当取料机构末端执行器运动至输送带上方时,末端执行器内的柳树插条掉落到输送带的分隔槽中,最后通过输送带有序地喂入到半自动扦插栽植装置的转杯内,从而完成自动喂入作业。

1.2 取料机构结构与工作原理

为避免在取料、送料和放料过程中因链板式出料装置与输送带之间的速度不匹配而导致柳树插条卡堵、倾转、在输送带上无序排列等问题,本文提出一种六杆式取料机构,该机构主要由曲柄、连杆、摇杆、末端执行器、滑块和机架等组成,其运动简图如图 2 所示。

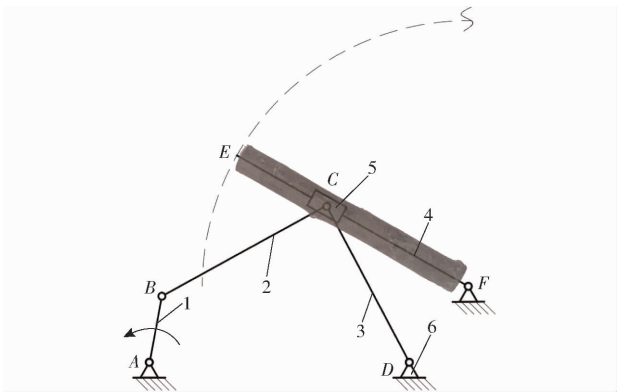


图 2 取料机构运动简图

Fig. 2 Kinematic diagram of picking mechanism

1. 曲柄 2. 连杆 3. 摇杆 4. 末端执行器 5. 滑块 6. 机架

取料机构运动过程分为取料、送料、放料和回程 4 个阶段。在取料阶段,机构静止不动,柳树插条从料仓被推入到其末端执行器内;随后进入送料和放料阶段,此时不完全齿轮机构开始啮合,通过曲柄轴带动曲柄逆时针匀速转动^[15-16]。在曲柄的带动下,连杆带动滑块沿末端执行器往复移动,进而使末端执行器绕其转动中心 F 作往复摆动运动,末端执行器处于输送带上方时柳树插条被有序放在带上;最后进入回程阶段,机构回到取料初始位置,开始下一个工作循环。通过优化取料机构参数,使其末端执行器摆动角位移为 180° ,其端点形成半圆弧形运动轨迹,进而保证从料仓推出后的柳树插条按照预期的运动轨迹被有序送至输送带上,完成后续的喂入作业。

取料机构的末端执行器是实现取料机构功能的重要构件,其结构简图如图 3 所示,主要由直线导

轨、转轴、顶板、分隔板、盖板和接料槽等组成。该构件内部利用分隔板等间距地分隔成与料仓出料口数量相等的5个接料槽,且在每个接料槽顶部利用扭簧连接转轴实现盖板的打开和闭合动作;外侧通过直线导轨与滑块连接,当动力传输至曲柄摇杆机构时,连杆带动末端执行器两侧的滑块实现有效的翻转。在取料阶段,柳树插条从出料口被推入末端执行器的接料槽内,此时末端执行器上的盖板闭合;在运料阶段,柳树插条在盖板闭合的接料槽内随着末端执行器同步转动;在放料阶段,末端执行器上的盖板接触到安装在机架上的顶板时,盖板在顶板的作用下打开,使末端执行器内的柳树插条被有序地放置在输送带上;在回程过程中,盖板与顶板脱离接触,转轴在扭簧的作用力下带动盖板恢复闭合状态。

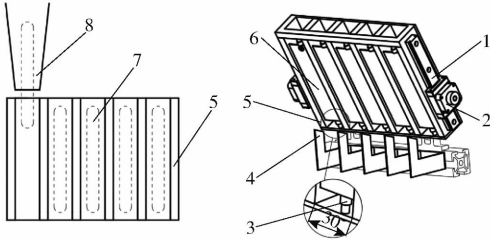


图3 取料机构末端执行器结构简图

Fig.3 Structure diagram of end effector of picking mechanism

1. 直线导轨 2. 滑块 3. 转轴 4. 顶板 5. 分隔板 6. 盖板
7. 接料槽 8. 出料口

2 取料机构运动学模型

图4所示为取料机构运动分析图。以点A为坐标原点建立笛卡尔直角坐标系^[17-19]。其中,点D位于x轴正方向,与点A处于同一水平线;点F的位置根据取料机构末端执行器的结构确定,作为已知参数。

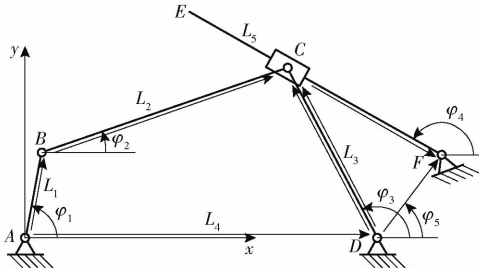


图4 取料机构运动分析图

Fig.4 Motion analysis diagram of picking mechanism

根据封闭图形ABCD建立位置矢量方程

$$\mathbf{I}_{AB} + \mathbf{I}_{BC} = \mathbf{I}_{AD} + \mathbf{I}_{DC} \quad (1)$$

转化为解析方程

$$\begin{cases} L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos \varphi_2 = L_4 + L_3 \cos \varphi_3 \\ L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin \varphi_2 = L_3 \sin \varphi_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_1 ——曲柄AB长度

L_2 ——连杆BC长度

L_3 ——摇杆CD长度

L_4 ——机架AD长度

φ_1 ——曲柄AB与x轴正向夹角

φ_2 ——连杆BC与x轴正向夹角

φ_3 ——摇杆CD与x轴正向夹角

由式(2)消去 φ_3 并化简得到方程

$$A \sin \varphi_2 + B \cos \varphi_2 = C \quad (3)$$

其中

$$A = -2L_1L_2 \sin \varphi_1$$

$$B = 2L_2L_4 - 2L_1L_2 \cos \varphi_1$$

$$C = L_1^2 + L_2^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_1L_4 \cos \varphi_1$$

求解方程(3)得到连杆BC的角位移

$$\varphi_2 = 2 \arctan \frac{A - \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{B + C} \quad (4)$$

进而得到摇杆CD的角位移

$$\varphi_3 = \arctan \frac{L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin \varphi_2}{L_3} \quad (5)$$

点B的位移方程

$$\begin{cases} x_B = L_1 \cos \varphi_1 \\ y_B = L_1 \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (6)$$

点C的位移方程

$$\begin{cases} x_C = x_B + L_2 \cos \varphi_2 \\ y_C = y_B + L_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (7)$$

同理,根据封闭图形CDF得到位置矢量方程

$$\mathbf{I}_{DF} = \mathbf{I}_{DC} + \mathbf{I}_{CF} \quad (8)$$

转化为解析方程

$$\begin{cases} L_{DF} \cos \varphi_5 = L_3 \cos \varphi_3 - L_{CF} \cos \varphi_4 \\ L_{DF} \sin \varphi_5 = L_3 \sin \varphi_3 - L_{CF} \sin \varphi_4 \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$L_{DF} = \sqrt{(x_F - L_4)^2 + y_F^2}$$

$$L_{CF} = \sqrt{(x_B + L_2 \cos \varphi_2 - x_F)^2 + (y_B + L_2 \sin \varphi_2 - y_F)^2}$$

式中 L_{DF} ——杆DF长度

L_{CF} ——杆CF长度

φ_4 ——杆EF与x轴正向夹角

φ_5 ——杆DF与x轴正向夹角

求解方程组(9)得到杆EF的角位移

$$\varphi_4 = \arctan \frac{L_3 \sin \varphi_3 - L_{DF} \sin \varphi_5}{L_3 \cos \varphi_3 - L_{DF} \cos \varphi_5} \quad (10)$$

点E的位移方程

$$\begin{cases} x_E = x_F + L_5 \cos \varphi_4 \\ y_E = y_F + L_5 \sin \varphi_4 \end{cases} \quad (11)$$

式中 L_5 ——杆EF长度

点E的速度方程

$$\begin{cases} \dot{x}_E = -\dot{\varphi}_4 L_5 \sin \varphi_4 \\ \dot{y}_E = \dot{\varphi}_4 L_5 \cos \varphi_4 \end{cases} \quad (12)$$

点E的合速度方程

$$v_E = \sqrt{\dot{x}_E^2 + \dot{y}_E^2} \quad (13)$$

3 取料机构优化设计

3.1 优化目标与设计变量

图 5 为取料机构在取料、运料和放料 3 个关键时刻的运动简图。从图中可知,在取料机构正常运转的一个运动周期内,其末端执行器 EF 的理想角位移应为 180° ,即取料机构在取料时刻与放料时刻

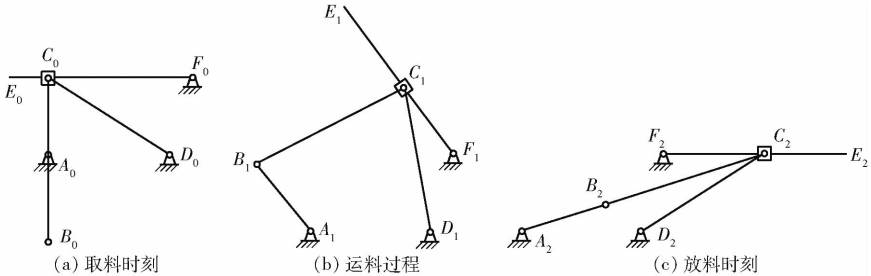


图 5 取料机构关键时刻运动简图

Fig. 5 Kinematic diagrams of picking mechanism at critical moments

由机构运动学模型和优化目标函数分析可知,取料机构中杆 EF 的长度 L_5 对取料机构末端执行器 EF 的角位移没有影响,只需考虑其结构和布局是否合理,避免发生运动干涉。因此,取料机构的设计变量确定为曲柄 AB 的长度 L_1 、连杆 BC 的长度 L_2 、摇杆 CD 的长度 L_3 和机架 AD 的长度 L_4 。

3.2 约束条件

(1)曲柄摇杆机构 $ABCD$ 要满足杆长条件,即最短杆与最长杆的长度之和小于或等于其它两杆的长度之和,曲柄为最短杆且与机架相邻,可得

$$L_1 + L_2 \leq L_3 + L_4 \tag{15}$$

(2)为使取料机构传动性能较好、运转轻便且效率高,机构最小传动角应满足

$$\gamma_{\min} \geq [\gamma] \tag{16}$$

其中
$$\gamma_{\min} = \arccos \frac{L_2^2 + L_3^2 - (L_4 - L_1)^2}{2L_2L_3}$$

式中 $[\gamma]$ ——机构许用传动角,取 40°

(3)根据取料机构应用场合的空间限制,确定各设计变量的约束条件

$$L_{\min} \leq L_i \leq L_{\max} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \tag{17}$$

基于 VB 软件编写了取料机构的计算机辅助分析软件,其界面如图 6 所示。应用该软件对取料机构的结构尺寸、位置、运动状态进行分析,调整输入各设计变量数值,分析在不同参数下取料机构末端执行器的角位移变化情况,确定该取料机构设计变量的约束条件

$$\begin{cases} 77 \text{ mm} \leq L_1 \leq 81 \text{ mm} \\ 136 \text{ mm} \leq L_2 \leq 147 \text{ mm} \\ 127 \text{ mm} \leq L_3 \leq 138 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \leq L_4 \leq 106 \text{ mm} \end{cases} \tag{18}$$

的末端执行器 EF 与水平面间夹角的差值应等于 180° 。因此,可确定优化目标函数为

$$\min F(\varphi_4) = |\varphi_{4s} - \varphi_{4q}| - 180^\circ \tag{14}$$

式中 φ_{4s} ——放料时刻杆 EF 与水平面间夹角,即放料角

φ_{4q} ——取料时刻杆 EF 与水平面间夹角,即取料角

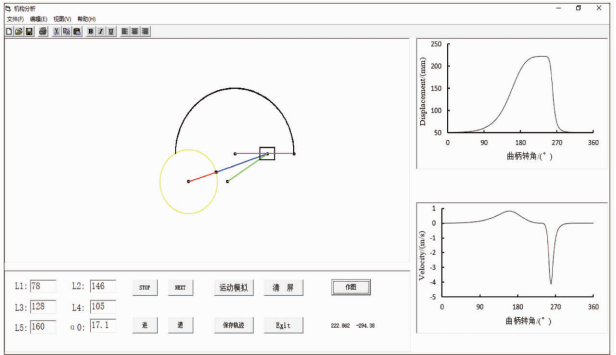


图 6 取料机构辅助分析软件交互界面

Fig. 6 Interactive interface of picking mechanism aided-analysis software

3.3 优化结果与分析

利用 Matlab 遗传算法工具箱对取料机构进行参数优化^[20-23],当遗传算法经过 40 次迭代后优化结束,此时设计参数 $L_1 = 77 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 147 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 127 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 105 \text{ mm}$,目标函数 $F(\varphi_4) = 0.5^\circ$ 。将得到的最优参数输入到分析软件交互界面的参数输入区,分析得到取料机构末端执行器点 E 的轨迹、位移和速度变化曲线,如图 7 所示。

由图 7 可知,在取料机构的取料、运料、放料和回程 4 个阶段中, ab 段为取料机构的取料阶段,此时机构处于静止状态,速度为零,确保柳树插条从料仓被平稳地推入取料机构末端执行器内; bc 段为运料阶段,在柳树插条被顺利推入取料机构末端执行器后,速度不断增大,提高了取料机构的作业效率; cd 段为放料阶段,为了使末端执行器内的柳树插条顺利地落到输送带上,取料机构末端执行器具有较小的冲击,速度不断减小,最终为 0; df 段为回程阶段,取料机构在完成放料作业后,利用机构的急回运动特性减少回程所需的时间,提高作业效率,其中

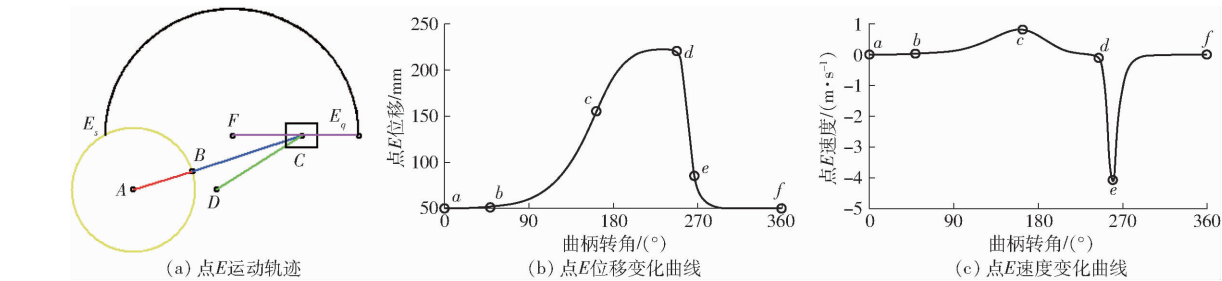


图 7 取料机构末端执行器运动曲线

Fig. 7 Motion curves of end effector of picking mechanism

de 段速度不断增大,同时为了保证取料机构末端执行器在取料时处于静止状态,在进入取料准备阶段时,ef 段速度不断减小,最终为零。

4 取料机构运动学仿真

应用 SolidWorks 建立取料机构的三维模型,并导入到 Adams 中进行取料机构的运动学仿真,末端执行器点 E 的运动轨迹如图 8 所示。图 9 为取料机构运动学仿真得到末端执行器点 E 的位移、速度变化曲线。

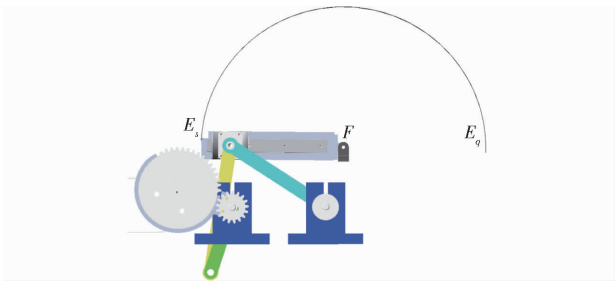


图 8 取料机构运动学仿真

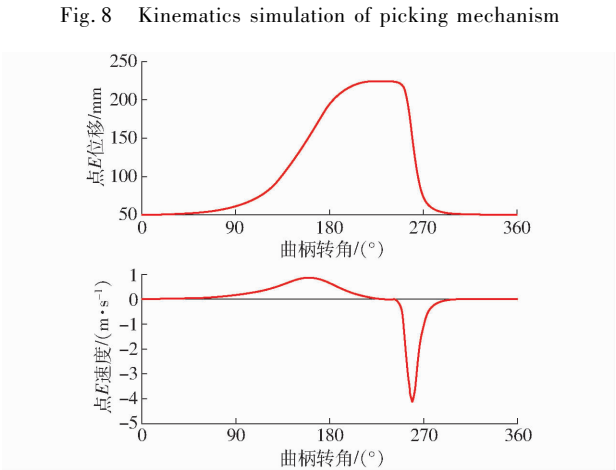


图 9 取料机构运动学仿真曲线

比较图 7a 和图 8 的机构运动轨迹,以及图 7b、7c 和图 9 的位移、速度变化曲线的理论和仿真结果,可知两者基本一致,验证了取料机构运动学建模和优化设计的正确性。

5 样机试验

根据取料机构的三维模型进行机械加工,完成

取料机构的装配和调试并研制自动喂入装置试验台(图 10)进行样机试验,研究取料机构运动特性,检验自动喂入装置的工作性能。

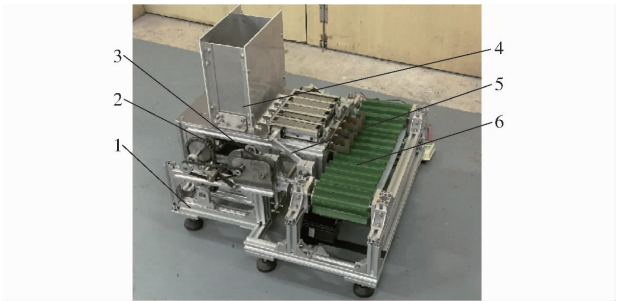


图 10 自动喂入装置试验台

Fig. 10 Test bench of automatic feeding device

1. 机架 2. 链板式出料装置 3. 不完全齿轮机构 4. 料仓 5. 取料机构 6. 输送带

5.1 取料机构高速摄像试验

采用佳能 80D 型单反摄像机拍摄记录取料机构运转时的影像,拍摄帧数设定为 180 f/s。为了方便捕捉取料机构的运动轨迹,在取料机构末端执行器的点 E 处添加一个标记点,将录制好的视频导入到 Photoshop 图像分析软件中,利用该软件得到每帧图像,并根据所标记的点描绘出点 E 的运动轨迹。

图 11 为取料机构末端执行器的试验轨迹。通过对比理论轨迹(图 11 白色实线所示)和试验轨迹(图 11 蓝色虚线所示)发现,两者基本吻合,表明该取料机构运动特性能够满足工作要求。

5.2 柳树插条自动喂入试验

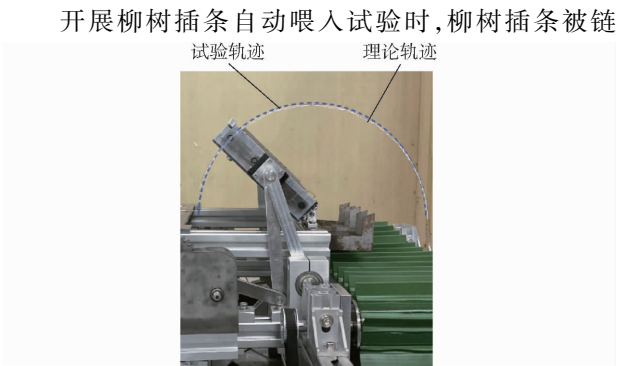


图 11 取料机构末端执行器运动轨迹

Fig. 11 Motion track of end effector of picking mechanism

板式出料装置推入取料机构末端执行器中,通过不完全齿轮机构啮合带动取料机构将柳树插条放置在输送带上,再通过输送带喂入到现有扦插栽植装置转杯内。由于链传动的传动比为 2.7,不完全齿轮机构传动比为 1,设定试验台电机转速为 30 r/min,则取料机构曲柄转速约为 11 r/min,自动喂入作业效率达到 55 株/min。进行 3 组重复试验,每组试验选取 100 株柳树插条并计算柳树插条喂入成功率

的平均值。

图 12 为自动喂入装置在出料、取料、运料以及

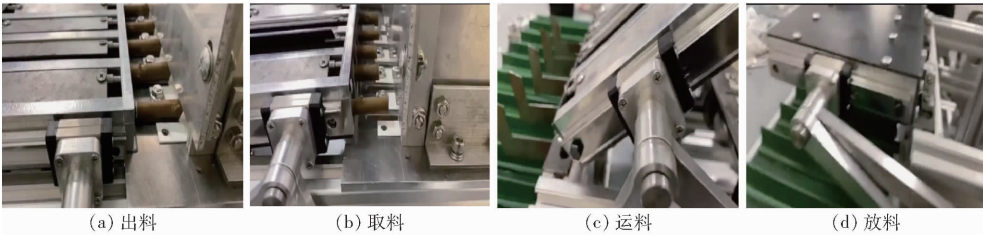


图 12 自动喂入装置关键运动时刻状态

Fig. 12 Key movement moment status of automatic feeding device

表 1 柳树插条自动喂入试验结果

Tab.1 Test results of automatic feeding of willow cuttings

试验序号	样本插条数	喂入插条数	喂入成功率/%
1	100	82	82
2	100	86	86
3	100	80	80
平均值	100	83	83

6 结论

(1)提出一种与柳树插条转杯式半自动扦插机配套作业的自动喂入装置,建立了其取料机构的运动学模型,基于 VB 开发了取料机构的计算机辅助分析软件,应用 Matlab 的遗传算法优化得到一组最

放料作业时刻的状态。自动喂入试验结果如表 1 所示。由表 1 可知,柳树插条自动喂入 3 组试验的平均成功率为 83%,表明自动喂入装置具有应用于自动扦插机的可行性。分析试验过程,影响柳树插条自动喂入成功率的主要因素有:由于柳树插条具有特殊的不规则几何外形,导致一小部分柳树插条由于其突出的枝芽在链板式出料装置推出的过程中卡在了料仓底部,未能成功推出;在放料过程中,由于输送带 T 型挡板热熔加工和安装的误差,造成输送带分隔槽内的柳树插条分布不均而导致喂入失败。

优参数 $L_1 = 77\text{ mm}$ 、 $L_2 = 147\text{ mm}$ 、 $L_3 = 127\text{ mm}$ 、 $L_4 = 105\text{ mm}$,进而得到取料机构末端执行器点 E 的运动轨迹及位移和速度变化曲线。

(2)根据取料机构的最优参数完成了其结构设计,进行取料机构虚拟样机运动仿真,点 E 的仿真轨迹与理论轨迹以及位移和速度变化曲线的理论结果和仿真结果基本一致,验证了取料机构运动学建模和优化设计的正确性。

(3)设计了取料机构样机和自动喂入装置试验台,开展取料机构的高速摄像运动学试验,试验运动轨迹与理论运动轨迹基本一致;进行柳树插条自动喂入试验,在自动喂入效率达到 55 株/min 时,柳树插条平均喂入成功率为 83%,表明该装置具有应用可行性。

参 考 文 献

[1] 廖维建, 蒋凡, 李付仲, 等. 竹柳扦插育苗技术研究[J]. 安徽农业科学, 2014,42(28):9811-9812.
LIAO Weijian, JIANG Fan, LI Fushen, et al. Primary study on the cutting breeding of *Salix maizhokunggensensis*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014,42(28):9811-9812. (in Chinese)

[2] 李益, 陶佳. 不同扦插方式对旱柳生长特征的影响[J]. 安徽农业科学, 2019,47(20):115-119.
LI Yi, TAO Jia. Effects of different cutting methods on *Salix matsudana koidz.* growth characteristics[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019,47(20):115-119. (in Chinese)

[3] 李春高. 我国造林机械的现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2012,40(10):4-10.
LI Chungao. Status and development trend of China's afforestation machinery [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2012,40(10):4-10. (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 situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):44-53. (in Chinese)

[5] 赵德金, 艳玲, 文龙. 国内外树木移植机械的研究现状与发展趋势[J]. 安徽农业科学, 2014,42(18):6064-6067.
ZHAO Dejin, YAN Ling, WEN Long. Current research situation and development trend of tree spade at home and abroad[J].

- Journal of Anhui Agricultural Science, 2014,42(18):6064–6067. (in Chinese)
- [6] ZAMBELLI F. Equipment for continuously feeding boxes or containers stacked in a flat tubular configuration to a packaging machine which also operates continuously; US9688430 B2[P]. 2017–06–17.
- [7] LIN J, YAN W, LIN J. The large-scale sugarcane stripper with automatic feeding[J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology, 2012,4(14):2183–2185.
- [8] 汲文峰, 吴启明, 黄海东, 等. 基于振动机理的藜蒿扦插机分苗机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 21–27.
- JI Wenfeng, WU Qiming, HUANG Haidong, et al. Design and experiment of seedling separation device of *Artemisia arborescens* transplanter based on vibration mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1): 21–27. (in Chinese)
- [9] ZHAO X, ZHANG X, WU Q, et al. Research and experiment of a novel flower transplanting device using hybrid-driven mechanism[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(2):92–100.
- [10] YE B, YI W, YU G, et al. Optimization design and test of rice plug seedling transplanting mechanism of planetary gear train with incomplete eccentric circular gear and non-circular gears [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017,10(6):43–55.
- [11] YE B, ZENG G, DENG B, et al. Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(3):70–78.
- [12] 叶秉良, 李丽, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗旋转式取苗机构动力学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2014,45(6):70–78.
- YE Bingliang, LI Li, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and test of rotary pick-up mechanism for vegetable pot-seedling [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):70–78. (in Chinese)
- [13] 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]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):74–82. (in Chinese)
- [14] 朱赞彬, 李蒙, 任毛飞, 等. 苗木开沟移栽一体机:CN112840990A[P]. 2021–05–28.
- [15] 宋占华, 肖静, 张世福, 等. 曲柄连杆式棉秆切割试验台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011,42(增刊):162–167.
- SONG Zhanhua, XIAO Jing, ZHANG Shifu, et al. Design and experiment on crank-connecting rod cotton stalk cutting test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.):162–167. (in Chinese)
- [16] 俞高红, 陈志威, 叶秉良, 等. 一种新型非匀速间歇机构的研究[J]. 中国机械工程, 2012,23(23):2778–2782,2787.
- YU Gaohong, CHEN Zhiwei, YE Bingliang, et al. Study on a new non-uniform and intermittent mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2012,23(23):2778–2782,2787. (in Chinese)
- [17] JONG-WON K, TAEWON S, JONGWON K. A new design methodology for four-bar linkage mechanisms based on derivations of coupler curve[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 100:138–154.
- [18] BULATOVIC R R, MIODRAGOVIC G, BOŠKOVIC M S. Modified Krill Herd (MKH) algorithm and its application in dimensional synthesis of a four-bar linkage[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016,95:1–21.
- [19] 赵雄, 崔海洋, 代丽, 等. 混合驱动五杆花卉盘栽机构的优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(15):34–40.
- ZHAO Xiong, CUI Haiyang, DAI Li, et al. Optimal design and experiment of hybrid-driven five-bar flower potted-seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(15):34–40. (in Chinese)
- [20] 代丽, 孙良, 赵雄, 等. 基于运动学目标函数的插秧机分插机构参数优化[J]. 农业工程学报, 2014,30(3):35–42.
- DAI Li, SUN Liang, ZHAO Xiong, et al. Parameters optimization of separating-planting mechanism in transplanter based on kinematics objective function[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(3):35–42. (in Chinese)
- [21] 尹文庆, 刘海马, 胡飞, 等. 旱地栽植机八连杆栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(10):51–60.
- YIN Wenqing, LIU Haima, HU Fei, et al. Optimization design and experiment of eight-linkage planting mechanism of dryland transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10):51–60. (in Chinese)
- [22] 徐高伟, 刘宏新, 荐世春, 等. 基于五杆机构的丹参膜上移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(9): 55–65.
- XU Gaowei, LIU Hongxin, JIAN Shichun, et al. Design and test of transplanting mechanism on mulch-film of *Salvia miltiorrhiza* based on five-bar mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(9): 55–65. (in Chinese)
- [23] 陈建能, 高巧玲, 陶红连, 等. 移树机大臂机构多目标参数优化及试验[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(1):62–68.
- CHEN Jianneng, GAO Qiaoling, TAO Honglian, et al. Multi-objective parameter optimization and experiment of tree transplanting machine's arm[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2018, 39(1):62–68. (in Chinese)