

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.013

齿轮-五杆取苗装置机构优化与试验验证*

崔巍^{1,2} 方宪法² 赵亮² 宋建农¹ 林金天² 董向前¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了解决鸭嘴移栽机的自动取苗问题,以齿轮-五杆机构为基础设计了自动取苗装置,通过仿真优化机构参数,获得了理想的取苗轨迹,并优化了机构的动力学特性。在此基础上设计了自动取苗试验台,通过试验验证了齿轮-五杆取苗机构的合理性和可行性。

关键词: 移栽机 取苗机构 优化 试验

中图分类号: S233.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0074-04

Structural Optimization and Experimental Verification of Geared Five-bar Linkage Seedling Pick-up Device

Cui Wei^{1,2} Fang Xianfa² Zhao Liang² Song Jiannong¹ Lin Jintian² Dong Xiangqian¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to achieve the automatically seedling pick-up of duck-billed transplanter, a geared five-bar linkage seedling pick-up device was introduced. The ideal pick-up trajectory was obtained by simulation and optimization of structural parameters. The dynamic characteristics of the proposed device were also optimized. On the basis of theoretical studies, a seedling pick-up bench was designed. Experiment results showed that geared five-bar linkage seedling pick-up device was feasible and rational.

Key words: Transplanter Seedling pick-up device Optimization Experiment

引言

移栽机根据取苗方式不同可分为半自动移栽机和自动移栽机。半自动移栽机受人工投苗速度的制约,工作效率低下,经济效益不明显,一直难以得到大面积推广,因此机械取苗的自动移栽机是今后移栽机发展的必然方向。自动取苗技术是自动移栽机研发的关键技术之一^[1-2]。

旱地移栽多为穴盘育苗,要求取苗爪轨迹有直线状尖角,即直线插入苗钵,并近似原轨迹拔出,才能最小程度破坏苗钵,将苗完整取出^[3-5]。此种轨迹形状较为复杂,继续沿袭插秧机取苗的四连杆机

构或者行星齿轮机构无法实现。而多杆多自由度连杆机构能实现较复杂的轨迹曲线,并且运动中速度变化连续,结构简单,因此本文以齿轮-五杆机构为基本结构,设计自动取苗装置,解决鸭嘴移栽机的自动取苗问题。

1 结构特点和工作原理

齿轮-五杆取苗装置由齿轮箱、曲柄Ⅰ、曲柄Ⅱ、连杆、取苗爪臂及取苗爪等组成,如图1所示。齿轮箱内两个齿轮啮合传动,大小相等,转向相反,分别驱动曲柄Ⅰ、曲柄Ⅱ整周转动。取苗爪在双曲柄、连杆以及取苗爪臂带动下运动,末端形成特殊运动轨

收稿日期: 2012-11-29 修回日期: 2013-01-07
* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB723704)
作者简介: 崔巍, 博士生, 中国农业机械化科学研究院工程师, 主要从事农业机械工程装备研究, E-mail: cuiwei607@163.com
通讯作者: 宋建农, 教授, 博士生导师, 主要从事农业装备工程及农业机械设计理论研究, E-mail: songjin@cau.edu.cn

迹,并在运动中不断变换姿态,以满足取苗和投苗要求。工作时,取苗爪运动至取苗位置,插入苗穴夹紧并将苗取出,带苗运动至投苗点将苗投出。

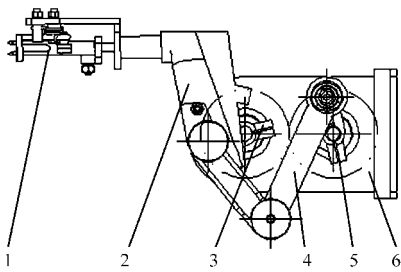


图 1 齿轮-五杆取苗机构造型

Fig. 1 Geared five-bar seedlings device

1. 取苗爪 2. 取苗爪臂 3. 曲柄 I 4. 连杆 5. 曲柄 II 6. 齿轮箱

2 取苗机构运动学模型

运动分析以曲柄 I、曲柄 II 为原动件,假设:①各零件无弹性变形,为刚性机构。②不考虑各转动副间的转动间隙。

建立如图 2 所示的坐标系,其中 O 点为坐标原点, O_1 点极坐标为 (l, ϕ_0) , 曲柄 I、曲柄 II、连杆长度分别为 l_1, l_2, l_3 , 取苗爪臂由 l_4, l_5 两段组成, 夹角为 θ , 取 D 点为参考点进行运动模型分析。原动件曲柄 I、曲柄 II 初始相位角分别为 0 和 ϕ , 角速度为 $\omega, -\omega$, 作匀速圆周运动。

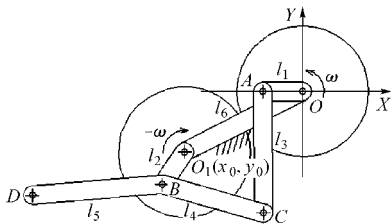


图 2 齿轮-五杆取苗机构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of geared five-bar seedlings pick-up mechanism

由封闭矢量法得^[6-7]

$$\mathbf{r}_C = \mathbf{r}_A + \mathbf{l}_3 = \mathbf{r}_B + \mathbf{l}_4$$

由各矢量向 X, Y 轴投影, 可得 C 点位置方程

$$\begin{cases} x_C = x_A + l_3 \cos \phi_1 = x_B + l_4 \cos \phi_2 \\ y_C = y_A + l_3 \sin \phi_1 = y_B + l_4 \sin \phi_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} x_A &= l_1 \cos \omega t & y_A &= l_1 \sin \omega t \\ x_B &= l_1 \cos(\phi - \omega t) & y_B &= l_2 \sin(\phi - \omega t) \end{aligned}$$

式中 $x_A, x_B, x_C, y_A, y_B, y_C$ —— A, B, C 点的横坐标和纵坐标

ϕ_1 —— C 点相对于 A 点的相位角

ϕ_2 —— C 点相对于 B 点的相位角

将式(1)移项整理并平方相加可得

$$A_0 \cos \phi_2 + B_0 \sin \phi_2 + C_0 = 0 \quad (2)$$

其中

$$A_0 = 2l_4(x_B - x_A)$$

$$B_0 = 2l_4(y_B - y_A)$$

$$C_0 = l_{AB}^2 + l_4^2 - l_3^2$$

$$l_{AB}^2 = (y_B - y_A)^2 + (x_B - x_A)^2$$

解式(2)可得

$$\phi_2 = 2 \arctan \left(\frac{B_0 \pm \sqrt{A_0^2 + B_0^2 - C_0^2}}{A_0 + C_0} \right) \quad (3)$$

将 ϕ_2 代入式(1)可求得 C 点坐标 x_C, y_C 。

又 $\mathbf{r}_D = \mathbf{r}_B + \mathbf{l}_5$, 由各矢量向 X, Y 轴投影, 又 $\phi_3 = \phi_2 - \theta$, 可得 D 点位置方程

$$\begin{cases} x_D = x_B + l_5 \cos \phi_3 = x_B + l_5 \cos(\phi_2 - \theta) \\ y_D = y_B + l_5 \sin \phi_3 = y_B + l_5 \sin(\phi_2 - \theta) \end{cases} \quad (4)$$

3 结构参数及取苗轨迹优化

要得到一组满足蔬菜钵苗自动取苗工作要求的结构参数, 实质上是寻求一组满足多目标优化的非劣解, 它属于一个多目标、多变量的复杂约束优化问题^[8]。优化参数时, 要考虑以下各优化目标要求: ①移栽爪取苗段轨迹近似直线, 尽量与苗钵垂直, 直线段长度不小于苗钵长度。②投苗角与取苗角尽量垂直, 以保证苗以竖直状态投出。③移栽爪在回程之前要完成推苗动作。④带苗段运动速度应小于回程段。

以所建立的运动数学模型为机构参数化关系的依据, 利用 Autodesk inventor 软件建立齿轮-五杆取苗装置的参数化模型, 如图 3 所示。优化的结构参数有: 各杆长度 $l_0 \sim l_5$, 两曲柄初始相位角 θ_1, θ_2 。

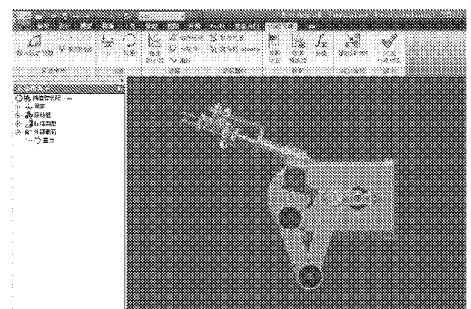


图 3 取苗装置建模仿真界面

Fig. 3 Simulation interface of seedlings pick-up device

根据目标要求, 不断改变结构参数, 通过人机交互方式, 优化出适合于自动取苗工作要求的取苗爪机构运动轨迹, 如图 4 所示。轨迹中, PMN 段为取苗段, 取苗爪沿轨迹 PM 插入苗钵, 到达 M 点后夹紧, 后沿 MN 运动将苗取出。 NQ 段为送苗段, 取苗爪带苗从苗盘位置运动到投苗位置。 QL 段为投苗段。机械手到达 Q 点时苗体呈竖直状态, 此时取苗叉缩回, 苗在 L 点之前被投出。 LP 段为回程段, 投苗后取苗叉快速回程至取苗位置, 继续取下一株苗。

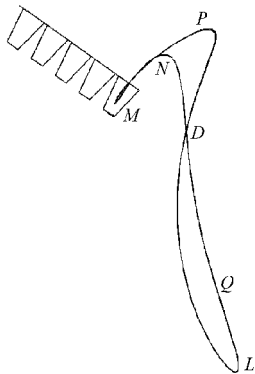


图4 优化取苗轨迹图
Fig.4 Optimized curves of seedling

4 动力学特性优化

连杆机构运动中存在无法平衡的惯性力,高速运转时会引起相关组件的剧烈振动。采用加弹性阻尼方式平衡机构运动中的部分惯性力,优化动力学特性。

由齿轮箱、曲柄Ⅰ、曲柄Ⅱ、连杆、取苗机械手组成的五杆机构中,取苗机械手质量远大于其他运动杆件,因此整个机构运动时产生的振动主要由此部分的惯性力引起。利用 Autodesk inventor 软件,对取苗机械手质心作运动分析,得出加速度曲线如图5所示,运动周期为0.5 s。由图可知,机械手质心在4个运动周期的加速度变化情况。每个运动周期中,有3个较大的峰值,分别称为峰值1、峰值2和峰值3。其中峰值1、峰值2加速度方向接近,其惯性力可用一个弹性阻尼平衡,峰值3处的惯性力用单独的弹性阻尼平衡。结合结构需要,在装置中按图6所示方式设置减振弹簧。

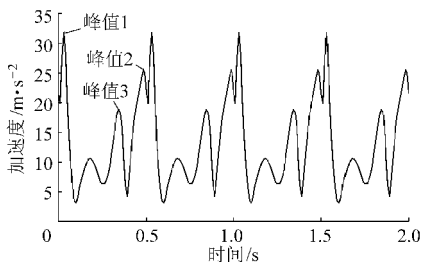


图5 取苗机械手质心加速度曲线
Fig.5 Centroid acceleration curve of seedlings manipulator

5 验证试验

5.1 试验台设计

在现有半自动鸭嘴移栽机基础上设计了自动取苗试验台^[9],主要由试验台架、支撑轮、取苗装置、送苗装置、栽植机构组成,如图7所示。整机由支撑轮驱动,支撑轮动力经链传动传给栽植机构,栽植机构再将动力分为两路,分别传至取苗装置和送苗装

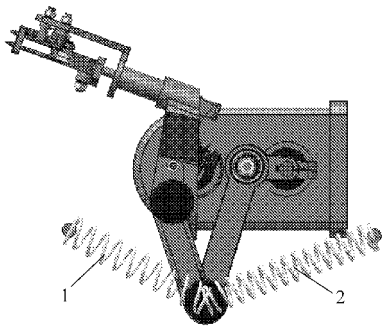


图6 减震弹簧阻尼设置示意图
Fig.6 Damp settings of torsional spring
1. 弹簧1 2. 弹簧2

置。送苗装置通过横向和纵向间歇进给将苗准确送至取苗点;取苗爪沿图4所述轨迹完成取苗、送苗、投苗以及回程动作;被投出的苗落入鸭嘴栽植器内,并随其栽入地下。

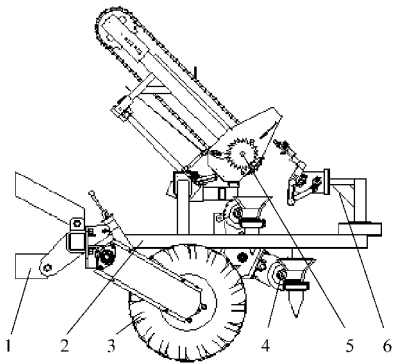


图7 自动取苗试验台
Fig.7 Automatic seedling pick-up bench
1. 试验台挂接架 2. 试验台架 3. 支撑轮 4. 栽植机构 5. 送苗装置 6. 取苗装置

5.2 试验

在中国农业机械化科学研究院的土壤植物机器系统技术国家重点实验室内进行了轨迹验证试验及弹性阻尼平衡惯性力的对比试验。

5.2.1 轨迹验证试验

采用高速摄影装置得出了取苗爪的真实运动轨迹,如图8所示。试验证明,实际得到的取苗爪运动轨迹与仿真轨迹基本一致,验证了机构设计与仿真分析结果的一致性。

5.2.2 弹性阻尼平衡惯性力对比试验

为了考察按照图6所示设置弹性阻尼能否有效减小惯性力对机构的影响,设计了单因素4个水平试验。齿轮-五杆机构高速运转时产生的惯性力会导致试验台架以支撑轮为中心上下振动,此振动会明显影响挂接点处竖直方向力的大小,因此选取挂接点处竖直方向的力作为评价惯性力大小的标准。力越大,说明机架振动越剧烈,取苗装置产生的惯性力

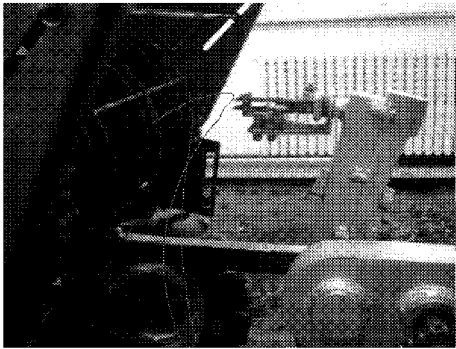


图8 高速摄影得出的取苗爪运动轨迹
Fig.8 Seedling claw's trajectory given by high-speed photography

越大。数据采集利用实验室内的六分力测力装置，此装置在与农具挂接处安置了3个方向的测力传感器。试验设计4种配置：①不加弹簧。②只加弹簧1。③只加弹簧2。④同时加2根弹簧。

设置曲柄转速为70 r/min。每种配置下分别做3次独立试验，每次试验机具前进50 m，传感器取46个值，试验结果取其平均值，如表1所示。

从表1可以看出，同时加两根弹簧的情况下竖直方向的力明显小于其他3种情况，说明此时机架振动较小。

为了验证不同配置对纵向力的影响是否有显著差异，对试验结果进行方差分析，如表2所示。

对显著性水平 $\alpha=0.01$ ，查表求得 $F_{0.99}(2,9)=8.02$ ，因为 $F=176>8.02$ ，所以在不同配置下纵向力的大小有显著差异。

表1 试验结果

Tab.1 Experiment results				N
因素	试验1	试验2	试验3	平均值
配置1	85.0	91.0	86.5	87.5
配置2	92.6	104.4	100.0	99.0
配置3	99.8	111.3	106.2	105.7
配置4	40.9	39.5	46.8	42.4

表2 方差分析

Tab.2 Analysis of variance				
方差来源	平方和	自由度	均方	F
因素	7 323.5	2	3 661.8	
误差	187.0	9	20.8	176
总和	7 510.5	11		

试验证明依据理论分析结果加上2个弹性阻尼后，由惯性力引起的振动明显减弱，整机运转平稳。

6 结论

(1)通过数学解析的方法得到了齿轮-五杆取苗机构取苗爪末端的位移模型。

(2)对机构三维建模后进行运动仿真，根据穴盘苗取苗要求通过调整结构参数获得了理想的取苗轨迹，并利用高速摄影验证了机构设计与仿真分析结果的一致性。

(3)通过运动仿真分析机构运动中惯性力的分布情况，结合结构需要设置弹性阻尼平衡部分惯性力。试验证明弹性阻尼有效地减小了惯性力对试验台架的冲击。

参 考 文 献

1 韩长杰,张学军,杨宛章,等. 旱地钵苗自动移栽技术现状与分析[J]. 农机化研究,2011,33(11):238~240.
Han Changjie, Zhang Xuejun, Yang Wanzhang, et al. Present status and analysis of dry-land auto-transplanting seedling technique [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(11):238~240. (in Chinese)

2 胡敏娟. 穴盘苗自动移栽关键技术的研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.
Hu Minjuan. Research on the key technology for automatic plug seedling transplanting [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2011. (in Chinese)

3 洋马农机株式会社. 移植机:中国,99118740.7 [P]. 1999-09-14.

4 洋马农机株式会社. 蔬菜移植机:中国,01133037.6 [P]. 2002-05-01.

5 浙江理工大学. 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构:中国, 201010104378.8 [P]. 2010-07-07.

6 于红英,唐德威,王建宇. 平面五杆机构运动学和动力学特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(6):940~941.
Yu Hongying, Tang Dewei, Wang Jianyu. Analysis of the kinematic and dynamic characteristics of a planar five-bar mechanism [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007,39(6):940~941. (in Chinese)

7 Djurovic Milan D, Vukobratovic Miomir K. A contribution to dynamic modeling of cooperating manipulation[J]. Mechanism & Machine Theory, 1990,25(4):407~415.

8 俞高红,刘炳华,赵匀,等. 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构运动机理分析[J]. 农业机械学报,2011,42(4):53~57.
Yu Gaohong, Liu Binghua, Zhao Yun, et al. Kinematic principle analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears in automatic vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(4):53~57. (in Chinese)

9 崔巍,赵亮,宋建农,等. 吊杯式移栽机栽植器运动学分析与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):35~38.
Cui Wei, Zhao Liang, Song Jiannong, et al. Kinematic analysis of the dibble-type planting devices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):35~38. (in Chinese)

10 赵匀. 农业机械计算机辅助分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社,1998.

11 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.