

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.012

蔬菜钵苗移栽机取苗机构人机交互参数优化与试验*

叶秉良 刘安 俞高红 骆春晓

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 针对蔬菜钵苗自动取苗机构多目标优化设计问题,利用可视化人机交互优化方法进行求解。建立了移栽机取苗机构优化数学模型,编制基于 Visual Basic 的计算机辅助分析与优化软件,分析设计变量对目标和约束的影响,进而优化得到满足取苗要求的结构参数组合。利用 ADAMS 软件和高速摄像技术对取苗机构运动特性进行了移栽机仿真和台架试验验证。试验结果与理论分析结果基本一致,表明了机构运动学模型及其优化设计理论和方法的正确性和可靠性。通过取苗试验证明该机构能完成取苗作业,且取苗成功率为 80%。

关键词: 移栽机 蔬菜钵苗 取苗机构 参数优化 仿真 台架试验

中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0057-06

Parameters Optimization with Human-computer Interaction Method and Experiment of Vegetable Seedling Pick-up Mechanism

Ye Bingliang Liu An Yu GaoHong Luo Chunxiao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The human-computer interaction optimization method was applied to solve the complicate multi-objective optimization design problem of vegetable seedling automatic pick-up mechanism. After the mechanism optimization mathematic model was established, the Visual Basic-based computer-aided analysis and optimization software was developed. The design variables' impacts on the objectives and constraints were analyzed. The optimization combination of structural parameters meeting the seedling pick-up requirements was obtained. Then, the ADAMS software and high-speed digital video camera and image processing technique were used in simulation experiment and bench experiment for testing its kinematics characteristics. The basically consistency of experimental results and theoretical analysis results showed that the kinematics model and its optimization design theory and methods of the mechanism were correct and reliable. At last, it is proved through seedling pick-up experiment that the mechanism can successfully complete seedling pick-up operation with the success rate of 80%.

Key words: Planter Vegetable seedling Seedling pick-up mechanism Parameters optimization Simulation Bench experiment

引言

我国蔬菜(如西红柿、西兰花、茄子、辣椒等)钵苗移栽作业主要依靠人工完成。手工栽植不仅劳动

强度大、生产效率低,而且栽植质量差、生产成本高,难以实现大面积移栽,限制了我国蔬菜生产的进一步发展。因此,加大蔬菜栽植机械的研发力度,实现蔬菜栽植机械化已成为农业生产亟待解决的重大

收稿日期: 2012-09-18 修回日期: 2012-10-10

* 国家自然科学基金资助项目(51175477)、浙江省自然科学基金资助项目(Y1110691)、浙江省现代农业装备与设施产业创新团队资助项目(2009R50001、2011R09001)和机械设计理论浙江省重中之重学科与浙江理工大学重点实验室优秀青年人才培养基金资助项目(ZSTUMD2011B001)

作者简介: 叶秉良,副教授,博士生,主要从事机构创新和数值分析与综合研究,E-mail: zist_ybl@zstu.edu.cn

通讯作者: 俞高红,教授,主要从事农业机械设计和机构数值分析与综合研究,E-mail: yugh@zstu.edu.cn

课题。

自动移栽机构是蔬菜自动栽植机械的核心部件,一般由取苗和栽植苗两套机构组成。日本自动移栽机即是采用这种结构组合,利用机械手完成夹取栽植苗动作^[1]。目前半自动蔬菜移栽机所应用的钳夹式、链夹式、导苗管式和吊篮式等栽植苗机构已经比较成熟,而取苗机构的研究工作刚刚起步,在应用方面还是空白,成为制约自动移栽机发展的薄弱环节^[2~7]。

取苗机构的参数优化设计问题是一个复杂多目标非线性约束优化问题,利用惩罚函数法或遗传算法等进行求解存在一定的缺陷。例如,惩罚函数法在构造惩罚函数时,惩罚因子取得过大或过小都可能使算法过早收敛于非极值点而造成计算失败,或者使算法收敛性能很差而造成收敛速度慢^[8~9]。

因此,本文利用可视化的人机交互优化方法,开发取苗机构辅助分析与优化软件,借助基于人机交互方式的可视化分析与优化平台和专家经验,实现取苗机构的运动学参数优化,并利用 ADAMS 软件和高速摄像技术对机构进行仿真和台架试验,验证机构运动学模型的可靠性和优化设计方法的正确性。

1 人机交互优化方法

人机交互优化方法是将人和计算机相结合,以便充分发挥人和计算机各自的优势,利用人定性认识的整体效应及计算机定量表达的逻辑推理能力,实现定性定量表达的有机结合,从而实现参数优化的一种方法。一般来说,构建一个具有友好可视化界面的人机交互优化系统要遵循数学建模、编制人机交互图形软件、分析变量对目标和约束的影响和优化结果等 4 个步骤,具体流程如图 1 所示^[8~11]。

2 偏心齿轮-非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构参数优化

2.1 优化设计数学模型

偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构简图如图 2 所示。它包括不完全间歇运动齿轮机构和偏心齿轮-非圆齿轮机构,由行星非圆齿轮、中间偏心齿轮、中间圆柱齿轮、不完全圆柱齿轮(中心轮)、行星架(齿轮盒)、凸锁住弧、凹锁住弧组成,且以中心轮对称布置。在该行星轮系中,取苗臂通过行星轮轴分别固结在行星非圆齿轮上,一方面随着行星架 H 绕中心轴 O 作圆周运动,另一方面相对行星架作非匀速间歇转动,因此通过确定合适的结构参数,其尖

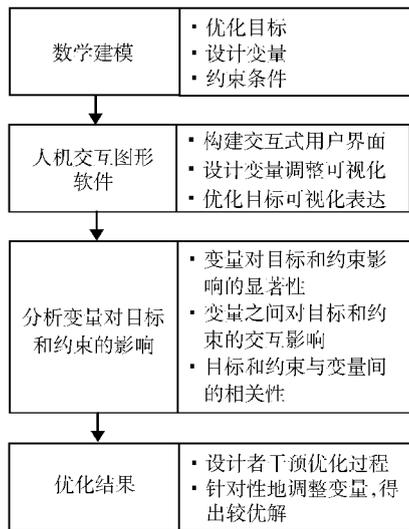


图 1 人机交互优化系统构建流程图

Fig. 1 Flowchart of human-computer interaction optimization system

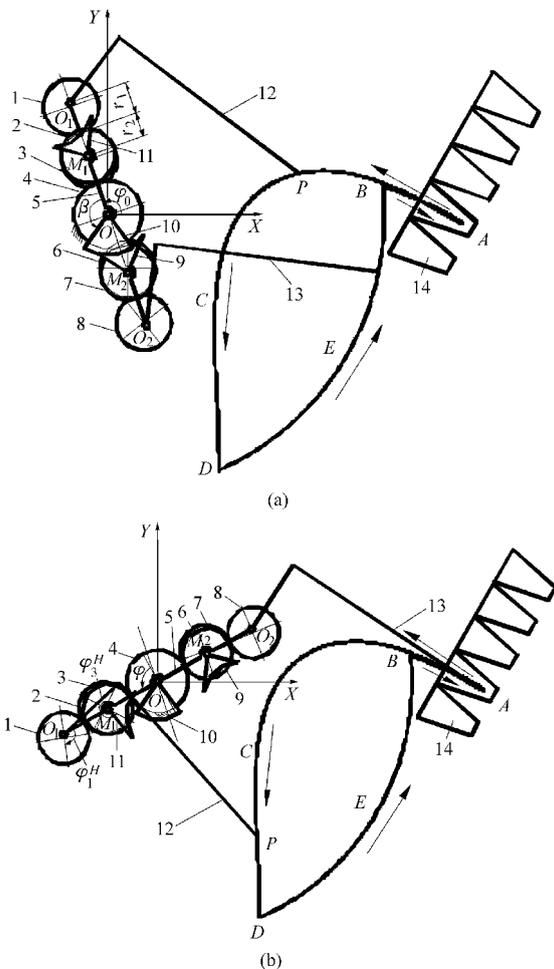


图 2 偏心齿轮-非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构简图
Fig. 2 Diagram of vegetable seedling pick-up mechanism of planetary gear train with eccentric gear and non-circular gear

(a) 机构初始位置 (b) 行星架转过 φ_H 角后机构的位置

1、8. 行星非圆齿轮 2、7. 中间偏心齿轮 3、6. 中间圆柱齿轮
4. 不完全圆柱齿轮 5. 行星架 9、11. 凹锁住弧 10. 凸锁住弧
12、13. 取苗臂 14. 钵苗盘

点 P 就能在这 2 种运动的共同作用下,按照要求的轨迹和姿态运动。不完全间歇运动齿轮机构和偏心齿轮-非圆齿轮机构分别是形成 DEB 段圆弧轨迹和 $BABCD$ 段工作轨迹的关键^[12~13]。取苗臂的推苗和取苗动作,采用凸轮摆杆机构和双摇杆滑块机构组合实现,通过凸轮驱动拨叉摆动,在弹簧的共同作用下驱动推苗杆上、下移动,实现取苗针的夹紧与松开动作如图 3 所示。

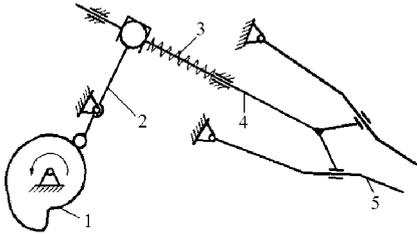


图3 取苗臂机构运动方案图

Fig. 3 Diagram of vegetable seedling pick-up mechanism kinematic principle

1. 凸轮 2. 拨叉 3. 弹簧 4. 推苗杆 5. 取苗针

2.1.1 优化目标和约束条件

根据移栽农艺要求和钵苗盘尺寸,偏心齿轮-非圆齿轮行星系蔬菜钵苗自动取苗机构的取苗臂尖点 P 要实现取苗工作轨迹(图 2),满足蔬菜钵苗自动取苗,且能够适应多品种蔬菜钵苗的取苗工作要求,在进行结构参数优化时必须考虑以下主要优化目标和约束条件:①取苗轨迹高度一般约为 190 mm 较为合适。②取苗时近似直线段的取苗轨迹长度约为 60mm,且取苗针插入钵穴内的轨迹长度约为 35mm。③取苗时要求近似直线段轨迹接近垂直于钵苗盘。④为避免取苗时取苗臂与钵穴干涉,取苗针进入和退出钵穴时的角度差控制在 30° 之内。⑤推苗角与取苗角的角度差值接近于钵苗盘的倾角(约为 $45^\circ \sim 50^\circ$)。⑥取苗臂与钵苗盘之间不能产生干涉。⑦2 个取苗臂之间不能产生干涉。

2.1.2 机构运动学模型

根据偏心齿轮-非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构运动简图和所建立的直角坐标系(图 2),以一侧结构为例,建立该取苗机构的运动学模型,建模分析过程详见文献[10],以下仅列出机构主要运动特性曲线的数学模型:

行星非圆齿轮旋转中心 O_1 相对机架的位移为

$$\begin{cases} X_{O_1} = (R_4 + R_3 + A) \cos(\varphi_H + \varphi_0) \\ Y_{O_1} = (R_4 + R_3 + A) \sin(\varphi_H + \varphi_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_3 ——中间圆柱齿轮节圆半径
 R_4 ——不完全圆柱齿轮节圆半径
 A ——偏心齿轮和非圆齿轮传动中心距
 φ_H ——行星架逆时针转过角位移

φ_0 ——行星架初始角位移

中心距 A 可由下式计算得出

$$\int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{R_2^2 - e^2 \sin^2 \varphi_2^H - e \cos \varphi_2^H}}{A - (\sqrt{R_2^2 - e^2 \sin^2 \varphi_2^H - e \cos \varphi_2^H})} d\varphi_2^H = 2\pi \quad (2)$$

式中 R_2 ——偏心齿轮节圆半径和偏心距

e ——偏心齿轮偏心距

φ_2^H ——偏心齿轮相对行星架角位移

取苗臂尖点 P 相对机架位移为

$$\begin{cases} X_P = X_{O_1} + S \cos(\alpha_0 + \varphi_1^H + \varphi_H + \varphi_0) \\ Y_P = Y_{O_1} + S \sin(\alpha_0 + \varphi_1^H + \varphi_H + \varphi_0) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\varphi_1^H = \begin{cases} \frac{R_4}{R_3} \varphi_H - \frac{AR_4}{R_3} \int_0^{\varphi_H} \frac{d\varphi_H}{A - r_2} & (0 \leq \varphi_H < \beta) \\ \frac{R_4}{R_3} \beta - \frac{AR_4}{R_3} \int_0^\beta \frac{d\varphi_H}{A - r_2} & (\beta \leq \varphi_H < \beta + \alpha) \\ \frac{R_4}{R_3} (\varphi_H - \alpha) - \frac{AR_4}{R_3} \left(\int_0^\beta \frac{d\varphi_H}{A - r_2} + \int_{\beta+\alpha}^{\varphi_H} \frac{d\varphi_H}{A - r_2} \right) & (\beta + \alpha \leq \varphi_H \leq 2\pi) \end{cases} \quad (4)$$

式中 S ——行星非圆齿轮旋转中心 O_1 到取苗臂尖点 P 的距离

α_0 ——行星非圆齿轮旋转中心 O_1 和取苗臂尖点 P 的连线与行星架 M_1O_1 在初始位置的角位移

φ_1^H ——行星非圆齿轮相对行星架的角位移

β ——行星架转动初始边 OO_1 到凸锁住弧起始边的角位移

α ——凸锁住弧所对应的圆心角

行星非圆齿轮旋转中心 O_1 相对机架速度为

$$\begin{cases} \dot{X}_{O_1} = -\omega_H (R_4 + R_3 + A) \sin(\varphi_H + \varphi_0) \\ \dot{Y}_{O_1} = \omega_H (R_4 + R_3 + A) \cos(\varphi_H + \varphi_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中 ω_H ——行星架角速度

取苗臂尖点 P 相对机架速度为

$$\begin{cases} \dot{X}_P = \dot{X}_{O_1} - S(\dot{\varphi}_1^H + \omega_H) \sin(\alpha_0 + \varphi_1^H + \varphi_H + \varphi_0) \\ \dot{Y}_P = \dot{Y}_{O_1} + S(\dot{\varphi}_1^H + \omega_H) \cos(\alpha_0 + \varphi_1^H + \varphi_H + \varphi_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\dot{\varphi}_1^H$ ——行星非圆齿轮相对行星架角速度

该机构优化涉及的运动学参数较多,在对机构运动学模型进行分析后,可确定优化设计变量为 $R_2, e, R_3, R_4, S, \alpha_0, \varphi_0, \beta$ 等。上述运动学模型与优化变量之间具有明显的非线性和耦合性特点。

2.2 编制人机交互优化软件

该取苗机构辅助分析与优化软件采用 Visual Basic 6.0 编制,其人机交互主界面如图 4 所示。通

过该人机交互界面,不仅能够计算机屏幕上直接输入和调整参数值,还可在屏幕上实时看到参数值调整后的目标数据和运动轨迹图形。可输入和调整的参数(优化变量)有:偏心齿轮的节圆半径 R_2 和偏心距 e 、圆柱齿轮节圆半径 R_3 、不完全圆柱齿轮节圆半径 R_4 、行星非圆齿轮旋转中心 O_1 到取苗臂尖点 P 的距离 S 、 O_1P 连线与行星架 M_1O_1 在初始位置的角位移 α_0 、行星架的初始角位移 φ_0 、行星架转动初始边 OO_1 到凸锁住弧起始边的角位移 β 等。显示输出内容有:取苗机构运动特性的目标数据,如取苗角、推苗角、轨迹高度、取苗角与推苗角的角度差和取苗针初始角位移等;与该取苗机构相配合工作的参数(钵苗盘位置、取苗机构的安装高度);显示的图形有:取苗臂尖点的运动轨迹、取苗和推苗位置时取苗臂的姿态以及钵苗位置等。

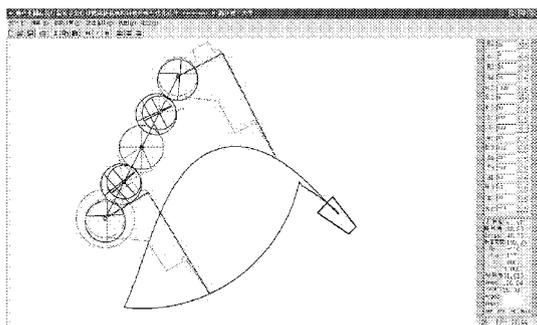


图4 优化软件人机交互主界面

Fig. 4 Human-computer interaction main interface of optimization software

2.3 设计变量对结果的影响分析

利用该软件还可以方便地分析设计变量对优化目标和取苗臂运动的影响,进而可为优化得出合适的取苗轨迹提供依据^[12~13]。

偏心齿轮节圆半径 R_2 及其偏心距 e 、不完全圆齿轮半径 R_4 、中间圆柱齿轮半径 R_3 对轨迹的形状产生影响。当 R_2 增大时轨迹的高度和宽度均增大,变得高且胖;而当 e 增大时轨迹的高度减小,角度差变小。当 R_4 增大或者 R_3 减小时轨迹高度和宽度均增大,变得高且胖,角度差增大。行星非圆齿轮旋转

中心 O_1 到取苗臂尖点 P 的距离 S 仅对取苗段轨迹的形状有影响,当 S 增大时取苗角变小,角度差和轨迹高度增大。

取苗臂初始安装角 α_0 既影响轨迹的空间姿态,又影响轨迹的形状。当 α_0 绝对值增大时,轨迹顺时针旋转,且宽度增大、变得斜且胖,取苗轨迹变短、取苗角增大、推苗角和角度差均变小、轨迹高度变小。行星架初始安装角 φ_0 仅影响轨迹的空间姿态,而不影响轨迹形状。当 φ_0 增大时轨迹逆时针旋转,变得比较直,取苗角、推苗角和角度差越小,轨迹高度增大。行星架初始边 OO_1 到凸锁住弧起始边的角位移 β 主要控制锁住弧的起始工作位置,影响轨迹的形状和锁住弧工作结束后到取苗结束时的轨迹长度(或取苗轨迹长度),而不影响轨迹的空间姿态。当 β 增大时轨迹的高度和宽度均增大、变得高且胖,并且取苗轨迹变短。

2.4 优化结果

优化后主要参数为: $R_2 = 24 \text{ mm}$, $e = 4 \text{ mm}$, $R_3 = 20 \text{ mm}$, $R_4 = 26 \text{ mm}$, $S = 152 \text{ mm}$, $\alpha_0 = -128^\circ$, $\varphi_0 = 90^\circ$, $\beta = 122^\circ$ 。取苗轨迹高度为 192 mm ;近似直线段的取苗轨迹长度约为 60.55 mm ,取苗臂苗针插入钵穴内近似直线段轨迹的长度为 37 mm ;推苗角与取苗角的角度差等于 48.36° ;取苗时取苗针进入和退出钵穴时的角度差为 29.5° ;取苗臂与钵苗盘、两个取苗臂之间均不会产生干涉,满足取苗工作要求。取苗臂尖点的运动轨迹和速度变化线分别如图5a和图6a所示(取苗机构转速为 80 r/min)。

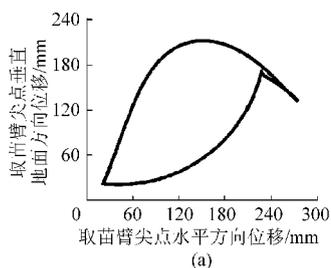
3 蔬菜钵苗取苗机构试验

3.1 机构仿真

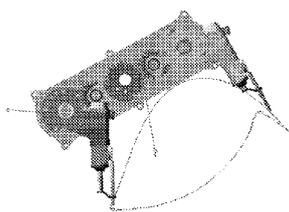
根据取苗机构优化后的结构参数进行设计,利用几何建模能力强的UG软件建立该机构的三维实体模型,添加约束形成虚拟装配模型并导入到ADAMS软件进行运动仿真,得到取苗臂尖点运动轨迹和速度的仿真结果,分别如图5b和图6b所示。

3.2 机构台架试验

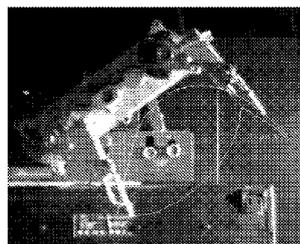
根据优化结果,构建通用的取苗机构试验台,进



(a)



(b)



(c)

图5 取苗臂尖点运动轨迹比较

Fig. 5 Kinematic lotus of seedling pick-up arm cusp

(a) 理论分析 (b) 仿真 (c) 台架试验

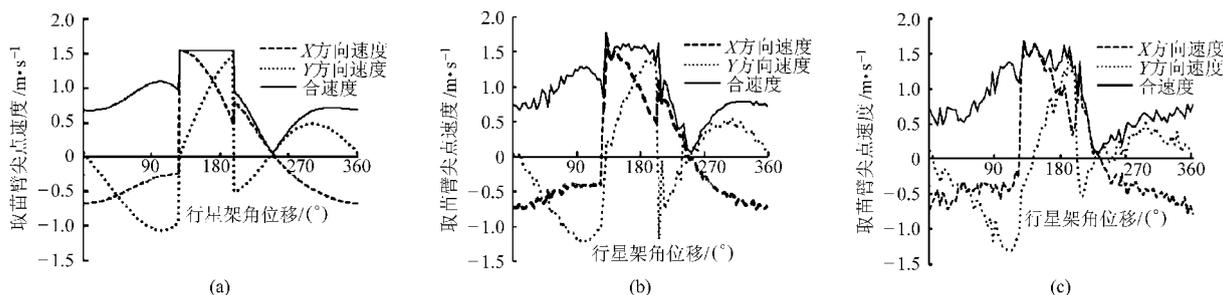


图6 取苗臂尖点速度曲线比较

Fig. 6 Comparison of velocity curve of seedling pick-up arm cusp

(a) 理论分析 (b) 仿真 (c) 台架试验

行机构的台架试验^[16],该试验台由电动机驱动中心轴转动,进而带动取苗机构作逆时针转动(图7)。试验秧苗为番茄幼苗(钵苗盘为 8×16 穴),平均茎秆长10 cm,每株幼苗平均有13片叶子,根部与培养土高度为2.5 cm。通过取苗试验可知,取苗臂能按照设计的姿态运动,能完成取苗时夹紧苗和推苗时释放苗动作,取苗成功率为80%,其取苗不成功的原因在于,番茄苗根部太细,土壤水分偏多,导致取出时容易脱落。

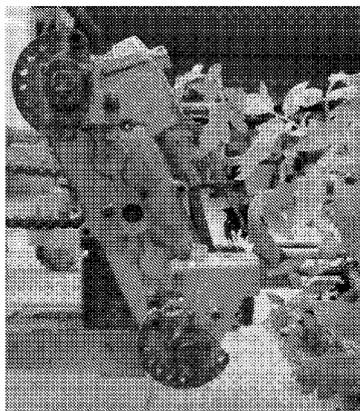


图7 取苗试验

Fig. 7 Seedling pick-up test

试验时利用高速摄像分析系统对偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构的运动过程进行拍摄,摄像

频率为250帧/s,并通过Blaster's MAS图像分析软件进行运动学特性分析,得到取苗尖点运动轨迹和速度的台架试验结果,分别如图5c和图6c所示。

将试验结果与理论分析结果进行比较,可以发现试验所得到的取苗运动轨迹和速度与理论分析结果基本一致,其中产生误差的主要原因:①动力由多级链传动输入,输入速度不是始终恒定。②使用Blaster's MAS记录尖点位置时,标志点因反光无法看清楚而导致点的拾取存在误差。③试验台是非刚性固定,正常工作时,试验台会有一定的振动。但以上误差都在误差范围内,表明上述设计理论和方法以及机构运动学模型是正确和可靠的。

4 结论

(1) 利用人机交互优化方法进行偏心齿轮-非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构的参数优化,得到一组满足取苗要求的结构参数,并得出了取苗臂尖点运动特性的理论分析结果。

(2) 根据优化设计结果,利用ADAMS软件和高速摄像技术对机构运动特性进行了试验验证。试验结果与理论分析结果一致,验证了机构建模及设计理论和方法的正确性和可靠性。

参 考 文 献

- 1 Tsuga K. Development of fully automatic vegetable transplanter [J]. JARQ—Japan Agricultural Research Quarterly, 2000, 34:21 ~ 28.
- 2 王君玲,高玉芝,李成华. 蔬菜移栽生产机械化现状与发展方向[J]. 农机化研究, 2004(2): 42 ~ 43.
- 3 Suggs C W, Thomas T N, Eddington D L, et al. Self-feeding transplanter for tobacco and vegetable crops[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1987, 3(2): 148 ~ 152.
- 4 Shaw L N. Automatic transplanter for vegetables[J]. Proc. Fla. State Hort. Soc., 1997, 110:262 ~ 263.
- 5 Choi W C, Kim D C, Ryu I H, et al. Development of seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 45(1): 13 ~ 19.
- 6 Dong Feng, Bai Xueyuan, Zha Jianwen, et al. Feeding mechanism of belt conveyer type seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1): 74 ~ 77.
- 7 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- 8 孙良,赵匀,姚佳明,等. 非匀速空间行星轮系宽窄行分插机构分析与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 41 ~ 46, 71. Sun Liang, Zhao Yun, Yao Jiaming, et al. Analysis and optimization of wide - narrow distance transplanting mechanism with spatial planetary gear train of variable speed transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,

- 2012,43(10):41~46,71. (in Chinese)
- 9 叶秉良,俞高红,陈志威,等. 偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构的运动学建模与参数优化[J]. 农业工程学报,2011,27(12):7~12.
Ye Bingliang, Yu Gaohong, Chen Zhiwei, et al. Kinematics modeling and parameters optimization of seedling pick-up mechanism of planetary gear train and non-circular gear[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12):7~12. (in Chinese)
- 10 滕弘飞,王奕首,史彦军. 人机结合的关键支持技术[J]. 机械工程学报,2006,42(11):1~9.
Teng Hongfei, Wang Yishou, Shi Yanjun. Key supporting techniques of human-computer cooperation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(11):1~9. (in Chinese)
- 11 路甬祥,陈鹰. 人机一体化系统科学体系和关键技术[J]. 机械工程学报,1995,31(1):1~7.
Lu Yongxiang, Chen Ying. Academic architecture and key techniques of the humachine system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1995,31(1):1~7. (in Chinese)
- 12 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)
- 13 俞高红,谢仁华,赵匀,等. 椭圆齿轮传动后插旋转式分插机构运动分析与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(5):45~48,29.
Yu Gaohong, Xie Renhua, Zhao Yun, et al. Kinematic analysis and experiment of backward rotary transplanting mechanism with elliptical gears transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5):45~48,29. (in Chinese)
- 14 俞高红,马成稳,孙良,等. 插秧机后插旋转式宽窄行分插机构设计与优化[J]. 农业机械学报,2012,43(8):50~55,65.
Yu Gaohong, Ma Chengwen, Sun Liang, et al. Design and optimization of backward rotary transplanting mechanism in wide-narrow row planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):50~55,65. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 47 页)

- 6 翟长远,朱瑞祥,随顺涛,等. 车载式变量施药机控制系统设计与试验 [J]. 农业工程学报,2009,25(8):123~124.  
Zhai Changyuan, Zhu Ruixiang, Sui Shuntao, et al. Design and experiment of control system of variable pesticide application machine hauled by tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(8):123~124. (in Chinese)
- 7 张迎新,雷道振,陈胜,等. 单片微型计算机原理、应用及接口技术[M]. 北京:国防工业出版社,2004:96~98.
- 8 洪志全,洪学梅. 现代计算机接口技术[M]. 北京:电子工业出版社,2008:82~84.
- 9 梁春英,衣淑娟,王熙,等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. 农业机械学报,2010,41(7):158~160.  
Liang Chunying, Yi Shujuan, Wang Xi, et al. PID control strategy of the variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):158~160. (in Chinese)
- 10 于永,戴佳,常江. 51 单片机 C 语言常用模块与综合系统设计实例精讲[M]. 北京:电子工业出版社,2007:74~131.
- 11 王利霞,张书慧,马成林,等. 基于 ARM 的变量喷药控制系统设计 [J]. 农业工程学报,2010,26(4):115~116.  
Wang Lixia, Zhang Shuhui, Ma Chenglin, et al. Design of variable spraying system based on ARM [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(4):115~116. (in Chinese)
- 12 张书慧,齐江涛,廖宗建,等. 基于 CPLD 的变量施肥控制系统开发与应用[J]. 农业工程学报,2010,26(8):200~201.  
Zhang Shuhui, Qi Jiangtao, Liao Zongjian, et al. Research and application of control system for variable rate fertilizer applicator based on CPLD [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(8):200~201. (in Chinese)
- 13 Sawyer J E. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application[J]. Production of Agriculture, 1994, 22(7):195~206.
- 14 王金武,刘亚华,王金峰,等. 全椭圆齿轮行星系液态肥深施机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):60~65,59.  
Wang Jinwu, Liu Yahua, Wang Jinfeng, et al. Optimization design and experiment of liquid-fertilizer applying deep-fertilization mechanism for planetary elliptic gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):60~65,59. (in Chinese)
- 15 严海军,初晓一. 喉管直径对文丘里施肥器性能影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):359~363.  
Yan Haijun, Chu Xiaoyi. Numerical simulation for influence of throat diameter on Venturi injector performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(4):359~363. (in Chinese)