椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构运动机理分析*

俞高红¹ 刘炳华¹ 赵 匀¹ 孙 良¹ 谢永良²

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江经济职业技术学院, 杭州 310018)

【摘要】 简述了椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构,分析了该机构的工作机理和结构特点,建立了该 机构的运动学模型。基于 Visual Basic 6.0 开发了该移栽机构计算机辅助分析与优化软件,通过人机交互方式优化 出满足蔬菜钵苗自动移栽机构工作要求的结构参数,最后进行了机构三维建模与仿真,仿真结果与理论分析结果 一致。

关键词:蔬菜钵苗移栽机 自动移栽机构 椭圆齿轮 优化 中图分类号: S223.94; TH112.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0053-05

Kinematic Principle Analysis of Transplanting Mechanism with Planetary Elliptic Gears in Automatic Vegetable Transplanter

Yu Gaohong¹ Liu Binghua¹ Zhao Yun¹ Sun Liang¹ Xie Yongliang²

Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
 Zhejiang Technical Institute of Economics, Hangzhou 310018, China)

Abstract

A rotary transplanting mechanism with planetary elliptic gears used to transplant seedlings for automatic vegetable transplanter was described. Work principle and structural features of the mechanism were analyzed. The kinematics model was established. Based on Visual Basic 6.0, the software of aided analysis and parameters optimization for rotary transplanting mechanism were developed. Kinematics property was analyzed and simulated. Though conversations in human-computer, structural parameters of the transplanting mechanism were optimized and meet the demands of transplanting seedlings. Finally, 3-D mechanism model and simulation analysis were carried out, and the results of simulation accorded with theoretical analysis.

Key words Vegetable transplanter, Automatic transplanting mechanism, Elliptic gears, Optimization

引言

移栽机构是蔬菜移栽机的核心工作部件,分为 半自动移栽机构和自动移栽机构。半自动移栽机构 是由手工实现分苗和取苗(即手工喂苗),种植苗操 作由机械完成,这样的作业不仅导致工作效率大大 下降,且漏苗、缺苗率大大增加;而自动移栽机构从 分苗、取苗到种植苗操作都是由机械自动完成,工作 效率较高^[1~3]。目前,国际上所推广的蔬菜移栽机 构基本为半自动移栽机构,日本的农业机械化程度 很高,有自动移栽机构用于生产,但其结构比较复杂,制造成本高^[4-5]。

椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构是一 种旋转式自动移栽机构,由驱动箱与移栽臂两部分 组成,机构转动一周,取苗两次。

1 结构特点和工作原理

椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构简图 如图1所示,其驱动部分由4个全等的椭圆齿轮、 2个圆柱齿轮、1个不完全圆柱齿轮以及凸锁止弧和

收稿日期:2010-06-02 修回日期:2010-08-11

^{*} 浙江省自然科学基金重点项目(Y1110691)和浙江省现代农业装备与设施产业创新团队项目(2009R50001)

作者简介: 俞高红,教授,主要从事农业种植机械设计与机构学研究, E-mail: yugh@ zstu. edu. cn

凹锁止弧组成,不完全圆柱齿轮的几何中心为O, 2个圆柱齿轮的旋转中心分别为 M_1 和 M_2 ,4个椭圆 齿轮的旋转中心分别为 O_1 、 M_1 、 O_2 、 M_2 。



图 1 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构简图
Fig. 1 Diagram of automatic vegetable transplanting mechanism with the planetary elliptic gears
(a)机构初始位置
(b)行星架转过φ角后机构位置
1.行星架 2、8.行星椭圆齿轮 3、7.中间椭圆齿轮 4、6.圆 柱齿轮 5.不完全圆柱齿轮 9、11.凹锁止弧 10.凸锁止弧

12、13. 移栽臂 14. 钵苗盘

工作时,不完全圆柱齿轮(太阳轮)固定不动, 圆柱齿轮4(以一侧齿轮结构为例)在行星架的带动 下与不完全圆柱齿轮啮合,实现间歇齿轮传动。当 圆柱齿轮4转到不完全圆柱齿轮的无齿部分时,则 由固接在不完全圆柱齿轮上的凸锁止弧与固接在 圆柱齿轮4上的凹锁止弧配合,防止圆柱齿轮4相 对行星架(即齿轮盒)转动。圆柱齿轮4与不完全 圆柱齿轮组成间歇传动机构,针尖V形成 DEB 段 圆弧轨迹。另外,圆柱齿轮4 通过中间轴与中间 椭圆齿轮3 固接,运动由圆柱齿轮4 传递给中间椭 圆齿轮3,行星椭圆齿轮2(行星轮)与中间椭圆齿 轮3 啮合,实现非匀速传动,从而使得行星轮相对 行星架作非匀速转动,针尖V形成 BABCD 段工作 轨迹。

行星椭圆齿轮的绝对运动为随着行星架绕中心 轴 0 的圆周运动和相对行星架的非匀速间歇转动 的合成运动。通过行星轮轴与行星轮固结的一对移 栽壁,一方面随着行星架作圆周运动,另一方面随着 行星椭圆齿轮相对行星架作非匀速间歇转动。在这 两种运动的共同作用下,移栽臂针尖 V 按要求的姿 态运动,通过确定合适的结构参数,形成蔬菜钵苗 自动取苗的工作轨迹。从图 1a 的机构初始安装位 置开始,当行星架转过不同的角位移时,形成不同 的工作段轨迹:在0°~110°时,形成 BC 段轨迹,即 移栽爪持苗轨迹;在110°~126°时,形成 CD 段轨 迹,即推苗轨迹,在移栽爪到达 D 点之前时,移栽 爪张开,在推苗杆的作用下,钵苗落入与之相对应 的植苗器中;在126°~201°时,形成 DEB 段轨迹, 即移栽爪复位轨迹,为下一次取苗作准备;在 201°~258°时,形成 BA 段轨迹,即移栽爪进入钵 盘的轨迹,其中在移栽爪到达A点时,移栽爪夹紧 钵苗;在258°~360°时,形成AB段取苗轨迹,此时 移栽爪已夹紧钵苗,并从钵盘内取苗。以上5段 轨迹组成蔬菜钵苗自动移栽所要求的整个取苗与 推苗工作轨迹。

2 移栽机构运动学模型

该机构是以行星架为主动件,速度分析时行星 架转速约为100 r/min,在建立该移栽机构运动学模 型时,假设:①各构件不发生弹性变形,作刚性机构 分析。②不考虑各转动副的转动间隙和齿轮啮合的 侧隙,以及凹、凸锁止弧的配合间隙。③进行速度分 析时,不考虑机构启动和停止的过渡阶段,假定行星 架角速度 ϕ 为常数。

2.1 不完全圆柱齿轮传动模型分析

不完全圆柱齿轮与共轭圆柱齿轮啮合实现间歇 传动,是移栽轨迹形成的关键所在。图 2 为不完全 圆柱齿轮与圆柱齿轮啮合关系。在图 2 中,不完全 圆柱齿轮的节圆半径为 R_1 ,圆柱齿轮的节圆半径为 R_2 ,凸锁止弧的半径为 R_3 、圆心角为 α 。不完全圆柱 齿轮有齿部分的节圆曲线对应的圆心角为 $2\pi - \alpha$, 节圆曲线弧长为 $(2\pi - \alpha)R_1$,圆柱齿轮 2 的节圆曲 线弧长要与不完全圆柱齿轮有齿部分的节圆曲线弧 长相等,即 $2\pi R_2 = (2\pi - \alpha)R_1$,得 $R_2 = R_1 \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi}\right)$ 。凹锁止弧对应的中心角为

$$\theta = 2 \arctan\left(\frac{R_3 \sin\frac{\alpha}{2}}{R_1 + R_2 - R_3 \cos\frac{\alpha}{2}}\right)$$





图 2 不完全圆柱齿轮与圆柱齿轮啮合示意图 Fig. 2 Incomplete gear and complete gear engagement

1. 不完全圆柱齿轮 2. 凸锁止弧 3. 凹锁止弧 4. 圆柱齿轮

2.2 移栽机构的位移模型

< D

建立直角坐标系 XOY(图1),设方向轴 OO₁ 为 行星架转动初始边,行星架从初始位置开始逆时针 转过角度 φ 时(其相对于初始边逆时针为正,顺时 针为负),以一侧机构为例分析移栽机构位移模型。

圆柱齿轮4相对行星架逆时针转过的角位移为

$$\varphi_{41} = \begin{cases} \frac{R_1}{R_2} \varphi & (0 \le \varphi < \beta) \\ \frac{R_1}{R_2} \beta & (\beta \le \varphi < \beta + \alpha) \\ \frac{R_1}{R_2} (\varphi - \alpha) & (\beta + \alpha \le \varphi \le 2\pi) \end{cases}$$
(1)

式中 β——行星架初始边 OO₁ 到凸锁止弧起始边 的角位移

$$\pm r_1 = \frac{b^2}{a + c\cos\varphi_{41}} \tag{2}$$

式中 r₁——中间椭齿轮转动中心到中间椭圆齿轮 与行星椭圆齿轮啮合点的距离

a、b、c----椭圆齿轮半长轴、半短轴和半焦距

$$r_{2} = 2a - r_{1} = \frac{2a^{2} + 2ac\cos\varphi_{41} - b^{2}}{a + c\cos\varphi_{41}}$$
(3)

用极坐标方程表示行星椭圆齿轮2啮合位置,则有

$$r_2 = \frac{bk}{1 - \sqrt{1 - k^2} \cos\varphi_{21}}$$
(4)

其中

得
$$\cos\varphi_{21} = \frac{-bk + r_2}{r_2\sqrt{1 - k^2}}$$
 (5)

 $k = \frac{b}{a}$

式中 r2---行星椭齿轮转动中心到中间椭圆齿轮

与行星椭圆齿轮啮合点的距离
k——椭圆齿轮短轴与长轴比值
将式(2)与式(3)代入式(5),得

$$\cos\varphi_{21} =$$

$$\left\{\frac{a}{c} - \frac{b^2 \left[a + \cos\left(\frac{R_1}{R_2}\varphi\right)\right]}{c \left[2a^2 + 2a\cos\left(\frac{R_1}{R_2}\varphi\right) - b^2\right]} \qquad (0 \le \varphi < \beta)$$

$$\left\{\frac{a}{c} - \frac{b^2 \left[a + \cos\left(\frac{R_1}{R_2}\beta\right)\right]}{c \left[2a^2 + 2a\cos\left(\frac{R_1}{R_2}\beta\right) - b^2\right]} \qquad (\beta \le \varphi < \beta + \alpha)$$

$$\left[\frac{a}{c} - \frac{b^2 \left[a + \cos\left(\frac{R_1}{R_2}(\varphi - \alpha)\right)\right]}{c \left[2a^2 + 2a\cos\left(\frac{R_1}{R_2}(\varphi - \alpha)\right)\right]} \qquad (\beta + \alpha \le \varphi < 2\pi)$$

移栽爪尖点 V 相对机架的位移为

$$\begin{cases}
X_{v} = (R_{1} + R_{2} + 2a)\cos(\varphi + \varphi_{0}) + \\
S\cos(\alpha_{0} + \varphi_{21} + \varphi + \varphi_{0}) + \\
Y_{v} = (R_{1} + R_{2} + 2a)\sin(\varphi + \varphi_{0}) + \\
S\sin(\alpha_{0} + \varphi_{21} + \varphi + \varphi_{0}) + \\
Sin(\alpha_{0} + \varphi_{21} + \varphi + \varphi_{0}) + \\
式中 \quad \varphi_{0} - 7 星架初始角位移
\end{cases}$$
(7)

2.3 移栽机构的速度模型

对式(1)求导得圆柱齿轮4相对行星架的角速 度为

$$\begin{array}{l} \cdot \\ \varphi_{41} = \begin{cases} \frac{R_1}{R_2} \omega & (0 \leq \varphi < \beta, \beta + \alpha \leq \varphi \leq 2\pi) \\ 0 & (\beta \leq \varphi \leq \beta + \alpha) \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

对式(6)求导得行星椭圆齿轮2相对行星架的 角速度为

$$\varphi_{21} = \begin{cases} \frac{\varphi_{21}}{R_2 \left[2a^2 + 2a\cos\left(\frac{R_1}{R_2}\varphi\right) - b^2 \right]^2 \sin\varphi_{21}} & (0 \le \varphi < \beta) \\ 0 & (\beta \le \varphi < \beta + \alpha) \\ \frac{b^4 R_1 \omega \sin\left(\frac{R_1}{R_2}(\varphi - \alpha)\right)}{R_2 \left[2a^2 + 2a\cos\left(\frac{R_1}{R_2}(\varphi - \alpha)\right) - b^2 \right]^2 \sin\varphi_{21}} & (\beta + \alpha \le \varphi \le 2\pi) \end{cases}$$

$$(9)$$

对式(7)求导得移栽爪尖点 V相对机架的运动

速度为

56

$$\begin{cases} \dot{X}_{v} = -\omega (R_{1} + R_{2} + 2a) \sin(\varphi + \varphi_{0}) - \\ S(\dot{\varphi}_{21} + \omega) \sin(\alpha_{0} + \varphi_{21} + \varphi + \varphi_{0}) \\ \dot{Y}_{v} = \omega (R_{1} + R_{2} + 2a) \cos(\varphi + \varphi_{0}) + \\ S(\dot{\varphi}_{21} + \omega) \cos(\alpha_{0} + \varphi_{21} + \varphi + \varphi_{0}) \end{cases}$$
(10)

3 参数优化

3.1 优化目标与变量

要得到一组满足蔬菜钵苗自动移栽工作要求的 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^[6-8]。优化参数时,要考虑以下各优化目标要求: ①移栽爪插入钵穴内近似直线段轨迹的长度(不小 于 40 mm)。②推苗角与取苗角的角度差值,约为钵 苗盘的倾斜安装角度。③取苗轨迹要求与钵苗箱几 乎垂直。④移栽爪在回程之前要完成推苗动作。 ⑤整个轨迹必须要有一定高度等。

优化变量有:不完全圆柱齿轮半径 R_1 、圆柱齿 轮半径 R_2 、椭圆齿轮长半轴 a、短轴与长轴之比 k、 行星架初始边 OO_1 到凸锁止弧起始边的角位移 β 、 行星架初始安装角 φ_0 、移栽爪相对行星架初始安装 角 α_0 、行星轮中心 O_1 到移栽爪尖点 V的距离 S 等。

3.2 辅助分析优化软件

通过移栽机构的优化目标可以看出:移栽机构 的优化问题是一个复杂的多目标优化问题,各个优 化目标之间具有如下关系^[9-11]:

(1)强耦合性——某个参数的变化,同时会影响几个目标函数。

(2)非线性——各参数与目标之间不具备线性 函数关系。

(3)模糊性——总目标要求分解到各个目标不 是唯一值,而是一个范围,即该范围内的值都能满足 机构运动学要求。此外,各目标之间加权系数无法 用具体数值来表示。

因此,本文基于 VB 可视化开发平台,开发蔬菜 钵苗自动移栽机构辅助分析与优化软件,采用人机 交互的优化方法,对移栽机构进行结构参数优化。 图 3 为移栽机构运动模拟分析界面,通过此功能模 块,可以分析各优化变量对移栽轨迹和输出参数值 的影响,并了解两个移栽臂之间的干涉情况。

输出参数包括取苗角、推苗角、轨迹高度、苗针 初始角位移、从初始位置到推苗位置行星架的转角 以及行星轮轴相对行星架的转角(确定凸轮的安装 位置)等。



Fig. 3 Interface of kinematic simulation

根据优化目标,凭借专家经验,通过人机交互方式,确定一组较优参数为: $R_1 = 24 \text{ mm}, R_2 = 19 \text{ mm}, a = 20.405 \text{ mm}, k = 0.99, \beta = 130°, <math>\varphi_0 = 88°, \alpha_0 = -124°, S = 170 \text{ mm}_{\circ}$

3.3 速度分析

根据辅助分析优化软件得到的机构参数进行移 栽爪尖点 V 的速度分析。图 4 为移栽爪尖点 V 的速 度变化曲线(一个工作周期)。从移栽机构初始安 装位置开始计算,通过辅助分析优化软件可以得到: 在取苗结束位置(即移栽爪夹紧钵苗时),行星架转 角为 258°,速度为零;在推苗开始位置(即移栽爪张 开),行星架转角为 121°,此时速度值较大,在到达 轨迹最低点之前完成推苗,有利于将钵苗推入植苗 器中;在 126°~201°之间,锁止弧起作用,移栽臂相 对于行星架不转动,移栽臂与行星架一体绕太阳轮 中心作匀速圆周运动,移栽爪尖点速度表现为一段 水平直线。



4 结构设计与仿真

根据优化结果对蔬菜钵苗自动移栽机构进行结构设计,运用三维建模软件 UG 6.0 对该机构进行 三维实体建模并进行虚拟装配。将装配体导入到计 算机仿真软件 ADAMS 进行仿真,移栽爪尖点 V 的 轨迹仿真结果如图 5a 所示。将该虚拟仿真结果得 到的轨迹与理论分析结果所得到的轨迹放置在同一 坐标系中进行比较,如图 5b 所示,可以看出两者轨 迹基本重合,检验了三维机构设计与理论分析结果 的一致性。



5 结论

(1)分析了椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移 栽机构的结构特点和运动机理,并建立了该机构的 运动学模型。

(2) 基于可视化 VB 开发平台和运动学模型, 开发了移栽机构辅助分析与优化软件,分析了运动 学特性。

(3)根据优化分析软件,通过人机交互方式,优 化出适合蔬菜钵苗自动移栽要求的结构参数。

(4) 基于 UG 6.0 对机构进行三维建模并装配, 并用 ADAMS 进行动态仿真,验证了机构设计的有 效性与正确性。

参考文献

- 范云翔,杨子万,林玉祥,等. 全自动移栽机落苗系统的计算机仿真[J]. 农业机械学报,1994,25(4):26~30.
 Fan Yunxiang, Yang Ziwan, Lin Yuxiang, et al. Computer simulation of seedling dropping system of the full automatic transplanter[J]. Tansactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1994, 25(4):26~30. (in Chinese)
- 2 董锋,耿端阳,汪遵元.带式喂人钵苗栽植机研究[J].农业机械学报,2000,31(2):42~45. Dong Feng, Geng Duanyang, Wang Zunyuan. Study on block seedling transplanter with belt feeding mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2000,31(2):42~45. (in Chinese)
- 3 Choi W C, Kim D C, Ryu I H, et al. Development of seedling pick-up device for vegetable transplants [J]. Transactions of the ASAE,2001,45(1): 13 ~ 19.
- 4 李其昀,鲁善文,李丽华. 滑道分钵轮式栽植器的试验研究[J]. 农业机械学报,2001,32(2):30~33. Li Qiyun, Lu Shanwen, Li Lihua. Experimental study on a slideway parting-bowl-wheel transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2001,32(2):30~33. (in Chinese)
- 5 王文明,窦卫国,王春光,等. 2ZT-2型甜菜移栽机移植系统的参数分析[J]. 农业机械学报,2009,40(1):69~73.
 Wang Wenming, Dou Weiguo, Wang Chunguang, et al. Parameter analysis of the planting process of 2ZT 2 beet transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(1):69~73. (in Chinese)
- 6 李革,赵匀,俞高红.椭圆齿轮行星系分插机构的机理分析和计算机优化[J].农业工程学报,2000,16(4):78~81. Li Ge, Zhao Yun, Yu Gaohong. Theoretical analysis and parameters optimizing of separating-planting mechanism with planetary elliptic gears[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(4):78~81. (in Chinese)
- 7 赵匀.农业机械分析与综合[M].北京:机械工业出版社,2009.
- 8 俞高红,谢仁华,赵匀.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. 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)
- 9 Brewer H L. Conceptual modeling automated seeding transfer from growing trays to shipping modulus [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(4): 1043 ~ 1051.
- 10 俞高红,钱孟波,赵匀,等. 偏心齿轮-非圆齿轮行星系分插机构运动机理分析[J]. 农业机械学报,2009,40(3):81~84. Yu Gaohong, Qian Mengbo, Zhao Yun, et al. Analysis of kinematic principle of transplanting mechanism with eccentric gears and non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3):81~84. (in Chinese)
- 11 李革,陈孝明,俞高红,等.基于 VB 的旋转式分插机构运动干涉判别方法[J].农业机械学报,2007,38(11):44~47. Li Ge, Chen Xiaoming, Yu Gaohong, et al. Distinguishing method for motion interference of rotary transplanting mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(11):44~47. (in Chinese)
- 12 张国凤,王俊军,陈建能,等. 基于 UG 和 VB. NET 的蔬菜移栽装置数字化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):61~64. Zhang Guofeng, Wang Junjun, Chen Jianneng, et al. Digital design of vegetable transplanter based on UG and VB. NET[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):61~64. (in Chinese)