

棉花移栽机旋转式取苗机构的运动学分析及虚拟试验

赵 雄^{1,2}, 沈 明^{1,2}, 陈建能^{1,2*}, 代 丽²

(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)

摘 要: 为了实现棉花移栽自动取苗, 针对棉花基质苗茎秆抗拉力远大于取苗力的特点, 该文提出高阶混合变性椭圆齿轮行星系夹苗式取苗机构, 并建立该机构的运动学数学模型, 分析夹苗式取苗工作的运动目标, 编写机构优化分析软件, 确定一组机构参数: 啮合齿轮中心距 58 mm, 第 1 级基椭圆的偏心率为 0.2, 二阶变形椭圆齿轮的主变形系数 0.9, 第 2 级基椭圆的偏心率为 0.14, 一阶变形椭圆齿轮的主变形系数 0.18, 初始时刻太阳轮标线的安装角为 $13\pi/18$ 、行星架 OA 边与太阳轮标线的夹角为 $\pi/2$ 、中间轴 A 上安装的第 2 中间轮与第 1 中间轮标线的夹角为 $7\pi/18$ 、行星架 AB 边相对与第 2 中间轮标线夹角为 $35\pi/36$ 、取苗爪 BE 边相对于第 1 行星轮标线夹角 $\pi/6$ 、取苗爪 BE 边与 BT 边夹角 $7\pi/18$ 、取苗爪 BT 边长度 150 mm, 工作轨迹的取苗段与苗箱夹角 91° 、取苗过程行星架转角 36° 、取苗过程苗与钵盘不干涉、取苗过程取苗爪摆角 5° 、入苗段与取苗段轨迹夹角为 85° 、投苗角 76° 、两取苗爪之间最小距离 49 mm。机构的虚拟试验表明, 该型取苗机构的工作轨迹和理论计算吻合, 满足夹苗式取苗工作要求, 取苗爪在取苗段速度较大利于快速取苗, 周期速度曲线平滑, 该研究结果为棉花基质育苗移栽自动取苗提供了参考。

关键词: 农业机械; 移栽; 棉花; 取苗机构; 高阶椭圆; 变性椭圆; 基质育苗

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.002

中图分类号: S223.92; TH112

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0013-08

赵 雄, 沈 明, 陈建能, 等. 棉花移栽机旋转式取苗机构的运动学分析及虚拟试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 13—20.

Zhao Xiong, Shen Ming, Chen Jianneng, et al. Kinematic analysis and virtual experiment of rotary pick-up mechanism on cotton transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 13—20. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国是世界主要产棉国之一, 棉花种植面积广。中国棉花种植技术主要经历了 3 个阶段, 一是种子直播, 二是棉花营养钵育苗移栽, 三是棉花基质育苗移栽^[1-3]。由于基质育苗移栽的优越性, 其已成为棉花种植的趋势, 但受移栽机技术水平限制, 目前中国棉花移栽主要依靠半自动移栽机完成, 需要依靠手工将基质苗投送到栽植苗机构, 移栽机的综合经济效益差, 棉花移栽的机械化程度低。随着基质育苗技术的成熟及棉花种植面积的增加, 社会

对高效棉苗移栽机的需求迫切, 研究自动取苗机构取代投苗手是当前农业领域热点问题。

机械式取苗主要有取苗爪夹钵或夹苗 2 种方式。日本和韩国的全自动移栽机的取苗机构采用带滑道或滑块的传动机构, 其取苗爪形成特殊的凸起段, 在凸起段取苗爪扎进钵体带出钵苗^[4-5]; 俞高红等研究一种非匀速间歇齿轮传动取苗机构, 该机构实现一种尖嘴形取苗轨迹, 取苗爪在尖嘴段夹钵并取苗^[6-9]; 赵雄等研究一种二阶自由非圆齿轮组成行星轮系取苗机构, 该机构实现了与非匀速间歇齿轮传动取苗机构类似带尖嘴形取苗轨迹^[10], 前述机构都是取苗爪夹钵的工作方式, 取苗爪进入钵体和离开穴盘经历时间长, 要求送苗装置在取苗爪取苗过程中做停歇运动^[11], 增加送苗装置的设计难度, 若采用取苗爪夹苗的方式取苗则能减少取苗过程经历时间, 送苗装置可以连续横向送苗, 为整机设计提供便利。

水稻钵苗的抗拉能力大大强于取苗力, 因此利用机构夹苗取苗的方式在水稻钵苗移栽中得到应

收稿日期: 2013-12-17 修订日期: 2014-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51205361, 51005214); 浙江省自然科学基金资助项目 (Y1110362); 浙江省自然科学基金资助项目 (R1110502); 浙江理工大学农业机械研究创新团队资助项目

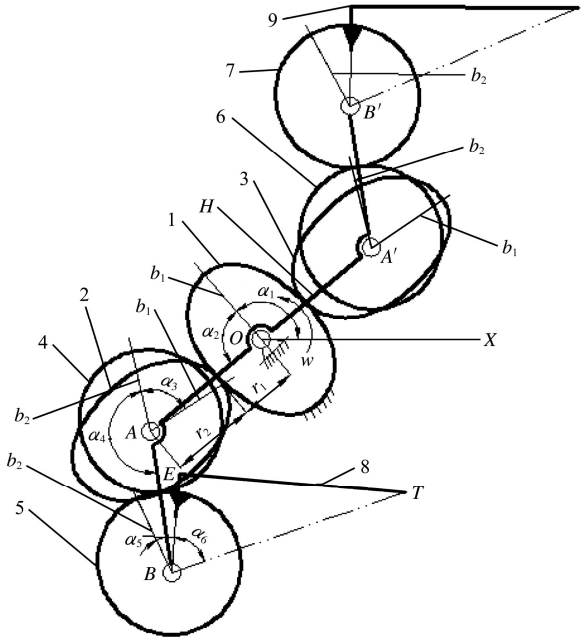
作者简介: 赵 雄 (1982—), 男, 湖北黄梅人, 讲师, 博士生, 主要从事机构分析、设计和优化的研究。杭州 浙江理工大学机械与自动控制学院, 310018。Email: zhaoxiong@zstu.edu.cn

*通信作者: 陈建能 (1972—), 男, 福建人, 教授, 博士生导师, 主要从事机械设计及理论研究。杭州 浙江理工大学机械与自动控制学院, 310018。Email: jiannengchen@zstu.edu.cn

用^[12-14]；棉花基质苗茎秆最小抗拉力 44.128 N，最大拔苗力 4.446 N^[15]，宗望远等截取 30 mm 长棉苗茎秆做两端支撑、中点压弯试验，试验表明在施压点位移小于 5 mm 的情况下茎秆不会折断^[16]，棉苗的物理特性为夹苗式取苗方式提供了基础。本文基于已有的二阶自由非圆齿轮行星系传动，提出高阶混合变性椭圆齿轮行星系夹苗式取苗机构，针对旋转式取苗机构的多目标优化的问题，编写了高阶混合变性椭圆齿轮行星系取苗机构的计算机辅助分析软件，并利用该软件分析得到该型取苗机构的合适参数，以为棉花基质育苗移栽自动取苗提供参考。

1 结构及工作原理

高阶混合变性椭圆齿轮行星系夹苗式取苗机构简图如图 1 所示。



1. 太阳轮 2. 第 1 中间轮 3. 第 3 中间轮 4. 第 2 中间轮 5. 第 1 行星轮 6. 第 4 中间轮 7. 第 2 行星轮 8、9. 取苗爪
1. Sun gear 2. First middle gear 3. Third middle gear 4. Second middle gear 5. The first planetary gear 6. The fourth middle gear 7. The second planetary gear 8, 9. Pick-up seedling claw

注：b₁、b₂ 为齿轮的标线；H 为行星架；T 为取苗爪端点；O 为中心轴；A 为第 1 中间轴；B 为第 1 行星轴；A' 为第 2 中间轴；B' 为第 2 行星轴；OA 为行星架转角 φ 为零位置；ω 为太阳轮转动角速度，rad/s；其他参数说明见表 1。

Note: b₁ and b₂ are mark line of gears; H is planetary shelf; T is endpoint of planetary shelf; O is rotary center shaft; A is the first middle shaft; B is the first planetary shaft; A' is the second middle shaft; B' is the second planetary shaft; the position of OA which is named φ=0 shown in figure; ω is the angular velocity of sun gear, rad/s. Other parameters are showed in Table 1.

图 1 高阶混合变性椭圆齿轮行星系取苗机构初始位置图
Fig.1 Initial position of planetary gearing system with blended high-order deformed elliptic gears

表 1 高阶混合变性椭圆齿轮行星系取苗机构参数
Table 1 Parameters of planetary gearing system with blended high-order deformed elliptic gears

符号 Symbol	参数名称 Mechanism parameters
α_1/rad	太阳轮标线的安装角
α_2/rad	行星架 OA 与太阳轮标线的夹角
α_3/rad	第 2 中间轮标线与第 1 中间轮标线的夹角
α_4/rad	行星架的 AB 边相对第 2 中间轮标线的角度（初始位置时刻）
α_5/rad	取苗爪 BE 边相对于第 1 行星轮标线的夹角
α_6/rad	取苗爪中 BE 与 BT 夹角
r_1/mm	太阳轮的啮合半径
r_2/mm	第 1 中间轮的啮合半径

太阳轮 1、第 1 中间轮 2 和第 3 中间轮 3 为二阶变性椭圆齿轮，第 2 中间轮 4、第 4 中间轮 6 和第 1 行星轮 5、第 2 行星轮 7 均为一阶变性椭圆齿轮。由于机构中相啮合的齿轮都满足主动轮转 1 周从动轮也转 1 周，图中的齿轮 1、齿轮 2、齿轮 3 节曲线参数一致；齿轮 4、齿轮 5、齿轮 6、齿轮 7 的节曲线参数一致^[17-22]。取苗爪 8、9 布置在中心轴 O 两侧，以取苗爪 8 为例说明其传动原理，工作时太阳轮 1 固定不动，动力驱动行星架 H 逆时针转动，齿轮 1 和齿轮 2 的啮合驱动与中间轴 A 固联的齿轮 2、齿轮 4 相对行星架 H 逆时针转动，齿轮 4 的运动通过齿轮副带动与行星轴 B 固联的齿轮 5 相对行星架顺时针转动，取苗爪 8 与行星轴 B 固联，取苗爪 8 的绝对运动为行星架的转动与行星轮绕行星架转动的复合运动，齿轮 1 和齿轮 2 为二阶变形椭圆齿轮，其传动比曲线为周期性二次波动，使得取苗爪 8 做周期性 2 次摆动，实现取苗爪特殊的轨迹。

2 运动学模型的建立

2.1 角位移分析

行星架 H 任意位置转角 φ (rad)，图 1 所示为机构的初始安装位置 φ=0，行星架 H 逆时针转动为角度正方向，若运动周期 φ ∈ [-α₂, 2π - α₂]，则任一时刻行星架 OA 边相对于齿轮 1 的标线 b₁ 转角 φ₁ (rad)：

$$\varphi_1 = \varphi + \alpha_2 \tag{1}$$

齿轮 1、齿轮 2 为二阶变性椭圆齿轮，其节曲线以 π 为周期变化，当 (0 ≤ φ₁ ≤ π) 时主动轮 1 极角节曲线方程为：

$$\begin{cases} p_1 = a/2(1 - k_1^2) \\ r_{11} = p_1/(1 - k_1 \cos 2 \cdot m_{11} \varphi_1) \quad (0 \leq \varphi_1 \leq \pi/2m_{11}) \\ r_{12} = p_1/(1 - k_1 \cos(2 \cdot m_{12}(\pi - \varphi_1))) \quad (\pi/2m_{11} \leq \varphi_1 \leq \pi) \end{cases} \tag{2}$$

式中: k_1 为第1级基椭圆的偏心率; a 为第1级啮合齿轮的中心距, 即 OA 长度, mm; m_{11} 为二阶变形椭圆齿轮的主变形系数; r_{11} , r_{12} 为齿轮半周期节曲线与极角相对应的极径, mm; 为保证在 $\varphi_1 = \pi/2m_{11}$ 处极径的连续性, 二阶变形椭圆齿轮的从变形系数满足 $m_{12} = m_{11}/(2m_{11}-1)$ 。

根据齿轮啮合的基本条件及高阶变性椭圆的性质得到从动轮相对行星架 AO 边转角 φ_2 (rad):

$$\begin{cases} \tan(m_{11}\varphi_2) = \\ \left(\frac{a-p_1+ak_1}{a-p_1+ak_1}\right)^{1/2} \tan(m_{11}\varphi_1) \quad (0 \leq \varphi_1 \leq \pi/2m_{11}) \\ \tan(m_{12}(\pi-\varphi_2)) = \\ \left(\frac{a-p_1+ak_1}{a-p_1+ak_1}\right)^{1/2} \tan(m_{12}(\pi-\varphi_1)) \quad (\pi/2m_{11} \leq \varphi_1 \leq \pi) \end{cases} \quad (3)$$

进而得到齿轮2的标线 b_1 相对行星架 AO 边转角 φ_{21} (rad):

$$\varphi_{21} = \varphi_2 - \pi \quad (4)$$

由式(1)~式(4)计算图1所示 $\varphi=0$ 时刻, 齿轮2标线 b_1 相对行星架 AO 边转角 φ_{21}^0 ; 行星架上 AB 边相对于 AO 边角度 γ (rad):

$$\gamma = \alpha_3 + \alpha_4 + \varphi_{21}^0 \quad (5)$$

由于齿轮4与齿轮2同时固定于中间轴 A , 得到齿轮4的标线 b_2 相对行星架 AO 边转角 φ_{41} (rad):

$$\varphi_{41} = \varphi_{21} + \alpha_3 \quad (6)$$

转化得到齿轮4的标线 b_2 相对行星架 AB 边转角 φ_{42} (rad):

$$\varphi_{42} = \gamma - \varphi_{41} \quad (7)$$

齿轮4和齿轮5同为一阶变性椭圆齿轮, 齿轮节曲线一致。主动轮4节曲线极径与极角 φ_4 的表达式为:

$$\begin{cases} p_2 = a/2(1-k_2^2) \\ r_{41} = p_2/(1-k_2 \cos m_{21}\varphi_4) \quad (0 \leq \varphi_4 \leq \pi/m_{21}) \\ r_{42} = p_2/(1-k_1 \cos(m_{22}(2\pi-\varphi_4))) \quad (\pi/m_{21} \leq \varphi_4 \leq 2\pi) \end{cases} \quad (8)$$

式中: φ_4 为以齿轮转轴为中心、齿轮标线为始边逆时针转动的角度 ($0 \leq \varphi_4 \leq 2\pi$); k_2 为第2级基椭圆的偏心率; a 为第二级啮合齿轮的中心距 (行星架 AB 边长度, 等于 OA 边长度), mm; m_{21} 为单阶变形椭圆齿轮的主变形系数; r_{41} 和 r_{42} 为极角在不同区域齿轮节曲线的极径, mm; 为保证齿轮的封闭性, 单阶变形椭圆齿轮的从变形系数满足 $m_{22} = m_{21}/(2m_{21}-1)$ 。

齿轮4的标线 b_2 相对行星架 AB 边转角 φ_{42} 与

从动轮5相对行星架 BA 的转角 φ_{52} 关系为:

$$\begin{cases} \tan(m_{21} \cdot \varphi_{52}/2) = \frac{1+k_2}{1-k_2} \tan(m_{21} \cdot \varphi_{42}/2) \\ (0 \leq \varphi_{42} \leq \pi/m_{21}) \\ \tan(m_{22} \cdot (2\pi - \varphi_{52})/2) = \frac{1+k_2}{1-k_2} \tan(m_{22} \cdot (2\pi - \varphi_{42})/2) \\ (\pi/m_{21} \leq \varphi_{42} \leq 2\pi) \end{cases} \quad (9)$$

进而得到齿轮5标线 b_2 相对行星架 BA 边转角 φ_{5H} (rad):

$$\varphi_{5H} = \varphi_{52} - \pi/m_{21} \quad (10)$$

综上分析得到齿轮5标线 b_2 的绝对运动转角 φ_5 (rad):

$$\varphi_5 = \alpha_1 + \alpha_2 + \gamma + \varphi + \varphi_{5H} - 2\pi \quad (11)$$

2.2 位移分析

在以 O 轴建立的直角坐标系中, 行星轴 B 坐标表达式:

$$\begin{cases} x_B = a \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \varphi) + a \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \varphi - \pi + \gamma) \\ y_B = a \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \varphi) + a \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \varphi - \pi + \gamma) \end{cases} \quad (12)$$

取苗爪端点 T 的坐标:

$$\begin{cases} x_T = x_B + s \cdot \cos(\varphi_5 - \alpha_5 - \alpha_6) \\ y_T = y_B + s \cdot \sin(\varphi_5 - \alpha_5 - \alpha_6) \end{cases} \quad (13)$$

式中: s 为去取苗爪端点 T 到行星轴 B 的距离, mm。

2.3 速度分析

工作过程中行星架逆时针匀速转动, 其转动的角速度 $w = \dot{\varphi}$ 为常数, rad/s。由式(2)根据行星架转角 φ 所处范围选定 r_{11} 或 r_{12} 作为主动轮1的啮合半径 r_1 (mm), 同样方法确定第2级变性椭圆齿轮主动轮4啮合半径 r_4 (mm) 的取值。

齿轮5相对于行星架的转速 w_{5H} (rad/s):

$$w_{5H} = \dot{\varphi}_{5H} = \frac{r_1 r_4}{(a-r_1)(a-r_4)} \quad (14)$$

齿轮5相对于行星架逆时针转动, 齿轮5的绝对转速 $\dot{\varphi}_5$ (rad/s):

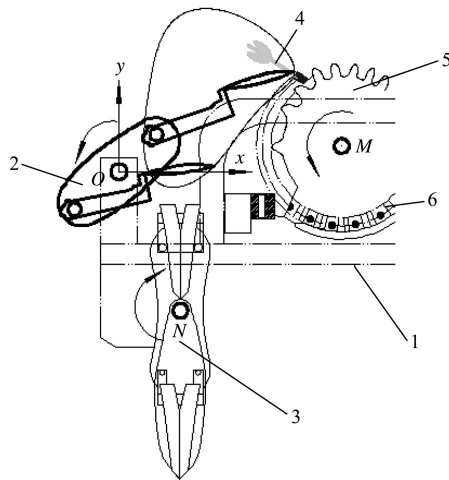
$$\dot{\varphi}_5 = w + \dot{\varphi}_{5H} \quad (15)$$

对式(12)和式(13)求导求得取苗爪端点 T 的速度方程。

3 取苗运动目标分析及机构参数优化

3.1 取苗运动目标分析

在全自动移栽机中取苗机构、栽植苗机构和苗箱的布置如图2所示。



1. 机架 2. 取苗机构 3. 栽植苗机构 4. 穴盘苗 5. 送苗链轮 6. 穴盘

1. Machine frame 2. Pick-up mechanism 3. Transplanting mechanism 4. Plug seedling 5. Chain wheel of transporting part 6. Plug

注: 以取苗机构的动力输入轴 O 建立坐标系; 箭头表示 3 个动力输入轴的转向; O 、 M 、 N 为机构的动力输入轴。

Note: Establish a coordinate system by input shaft O of pick-up seedling mechanism; the arrows indicate the three power input shaft; O , M and N are the input shaft of different mechanism.

图 2 全自动移栽机执行机构布局图

Fig.2 Layout diagram of operating mechanism on automatic transplanting machine

取苗机构轨迹最右端点设置为苗的夹紧点, 机构轨迹的最右端点应与穴盘苗基质的最高点接近以增加夹苗的成功率; 机构轨迹最下端为投苗工作段, 依据取苗爪尖点与栽植苗机构水平方向最小速度差设定投苗点, 结合取苗爪的姿态确保成功的交接苗; 轨迹最底部至夹紧点之间部分称为入苗段, 夹苗点至轨迹最高段称为取苗段。取苗机构的工作需要考虑轨迹与棉苗的位置、取苗爪与送苗装置的配合、取苗爪的姿态变化等多个运动目标, 机构参数优化时具体设定以下几点:

1) 取苗段轨迹倾角: 取苗爪在轨迹的最右端夹紧棉苗茎秆, 之后取苗爪向远离穴盘的方向运动, 取苗段轨迹与苗箱垂直最佳;

2) 取苗过程经历时间: 取苗爪从夹紧棉苗到将棉苗从穴盘完全带出过程, 行星架转动的角度;

3) 取苗过程苗基质与穴盘干涉量: 在取苗过程中送苗装置依然有横向移动, 棉苗基质与穴盘之间的干涉应尽可能小;

4) 取苗摆角: 即取苗段取苗爪的摆动角, 取苗爪以定姿态取出幼苗为理想状态;

5) 入苗段与取苗段轨迹夹角: 取苗爪在夹苗点附近入苗段和取苗段轨迹之间夹角, 该角度应小于 90° , 尽可能使得夹苗点能尽量靠近棉苗茎秆的

底端;

6) 投苗角: 取苗爪将棉苗运送至栽植苗机构上方投苗时刻, 棉苗应靠近铅垂方位, 便于准确落入栽植苗机构;

7) 两取苗爪之间最小距离: 取苗爪夹取棉苗后棉苗与取苗爪一起运动, 在两取苗爪运动过程中已带出的棉苗基质部分不能与另一取苗爪干涉, 2 取苗爪之间最小距离至少应大于基质的深度 (一般为 45 mm)。

3.2 机构参数优化

根据高阶混合变性椭圆齿轮行星系取苗机构的运动分析模型, 建立机构的人机交互分析优化软件 (图 3), 利用该软件, 将各个运动目标数值化输出, 使得设计者能快速判断机构参数的优劣, 利用软件将计算机的计算能力与设计者的逻辑思维能力相结合^[23-26], 实现机构多参数、多目标优化问题的求解。

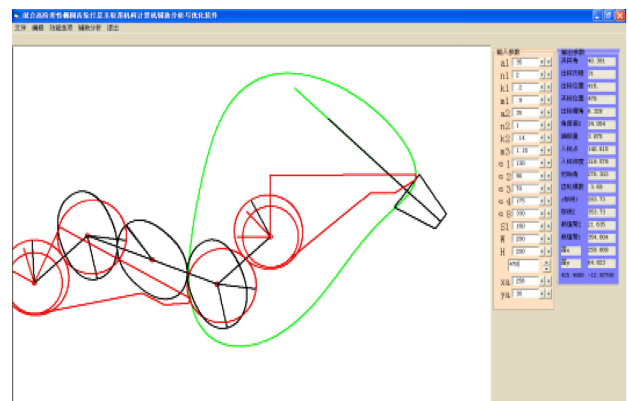


图 3 高阶混合变性椭圆齿轮行星系取苗机构人机交互优化分析软件

Fig.3 Optimization software of human-computer interaction of planetary gearing system with blended high-order deformed elliptic gears

棉花基质钵体的大小按标准 128 穴钵盘尺寸确定 (穴盘孔径上口 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 孔径下口 $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$, 穴孔深 45 mm)。经优化得到一组参数: 啮合齿轮中心距 a 为 58 mm , 第 1 级基椭圆的偏心率 k_1 为 0.2 , 二阶变形椭圆齿轮的主变形系数 m_{11} 为 0.9 , 第 2 级基椭圆的偏心率 k_2 为 0.14 , 一阶变形椭圆齿轮的主变形系数 m_{21} 为 0.18 , 初始时刻太阳轮标线的安装角 α_1 为 $13\pi/18$ 、行星架 OA 与太阳轮标线的夹角 α_2 为 $\pi/2$ 、中间轴 A 上安装的第 2 中间轮与第 1 中间标线的夹角 α_3 为 $7\pi/18$ 、行星架 AB 相对与第 2 中间轮标线夹角 α_4 为 $35\pi/36$ 、取苗爪 BE 边相对于第 1 行星轮标线夹角 α_5 为 $\pi/6$ 、取苗爪

BE 边与 BT 边夹角 α_6 为 $7\pi/18$ 、取苗爪 BT 边长度 s 为 150 mm。

行星架初始位置逆时针转动 124° ，取苗爪到达轨迹的最右点（夹紧点），轨迹的取苗段与苗箱夹角 91° ；取苗爪将基质苗完全带出穴盘过程行星架转角 36° ，取苗段送苗装置横向移动 8.5 mm，苗的基质下小上大，苗带离穴盘过程空出的横向空间 11 mm，苗的基质与穴盘不发生运动干涉；取苗段取苗爪的摆角为 5° ；轨迹的入苗段和取苗段夹角约为 85° ，为取苗爪夹紧棉苗最底部茎秆提供了条件；行星架转动 280° 取苗爪开始投苗，投苗角为 76° ；2 取苗爪之间最小距离 49 mm，前取苗爪上夹取的苗与后取苗爪不会发生干涉。

图 4 为行星架转速为 80 r/min 时取苗爪尖点的速度曲线，从速度图可知，在行星架转角 $124^\circ \sim 160^\circ$ 的取苗段，取苗爪尖点合速度在 $0.4 \sim 0.8$ m/s 变化。文中速度曲线与旋转式不完全齿轮取苗机构速度曲线相比较^[27]，本文速度曲线无跳跃点，有利于机构的平稳运行，同时文中曲线的取苗段速度大，有利于机构快速从穴盘带出基质苗。

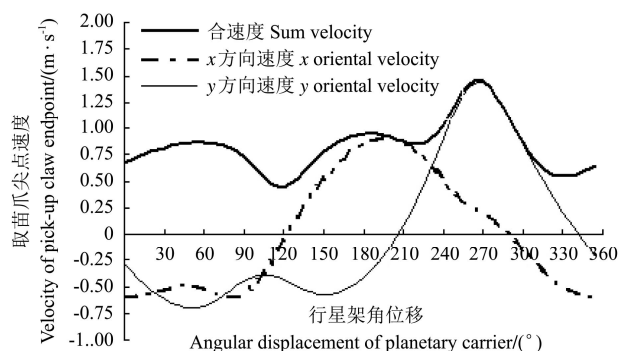


图 4 取苗爪尖点速度曲线图

Fig.4 Velocity curve of pick-up claw's endpoint

4 机构的虚拟试验

根据软件得到机构参数，建立机构的三维模型，其中齿轮 1、齿轮 2、齿轮 3 齿数定为 21，模数为 2.82 mm；齿轮 4、齿轮 5、齿轮 6、齿轮 7 的齿数为 21，模数为 2.752，完成机构的虚拟装配并在 ADAMS 软件中对高阶混合变性椭圆齿轮行星系取苗机构进行虚拟仿真，图 5 机构的虚拟仿真轨迹，该轨迹与图 3 所示的理论轨迹基本一致；图 6 为利用 ADAMS 获得的取苗爪尖点的速度曲线，由于齿轮传动采用碰撞副，齿轮齿面数据的光顺性对速度曲线产生影响，仿真速度曲线存在局部的波动，总体比较图 6 曲线与图 4 趋

势和数值大小一致，验证了理论模型和分析的正确性。

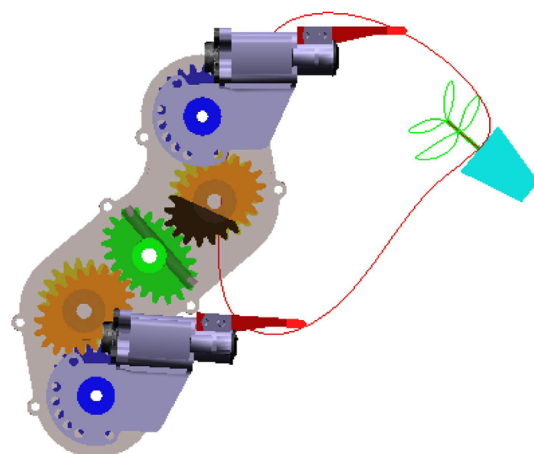


图 5 虚拟样机仿真图

Fig.5 Image of mechanism virtual experiment

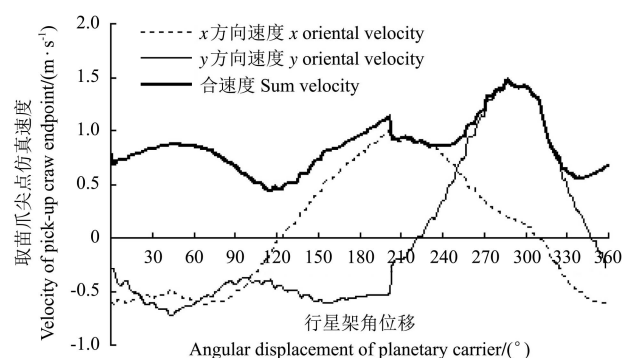


图 6 取苗爪尖点虚拟试验速度图

Fig.6 Velocity curve of pick-up claw's endpoint by virtual experiment

5 结 论

1) 针对棉花基质育苗的物理特性，提出棉花移栽夹苗式取苗方式，建立高阶混合变性椭圆齿轮行星系取苗机构运动分析模型，通过软件优化，得到一组参数：啮合齿轮中心距为 58 mm，第 1 级基椭圆的偏心率为 0.2，二阶变形椭圆齿轮的主变形系数为 0.9，第 2 级基椭圆的偏心率为 0.14，一阶变形椭圆齿轮的主变形系数为 0.18，初始时刻太阳轮标线的安装角为 $13\pi/18$ 、行星架 OA 与太阳轮标线的夹角为 $\pi/2$ 、中间轴 A 上安装的第 2 中间轮与第 1 中间标线的夹角为 $7\pi/18$ 、行星架 AB 相对与第 2 中间轮标线夹角为 $35\pi/36$ 、取苗爪 BE 边相对于第 1 行星轮标线夹角为 $\pi/6$ 、取苗爪 BE 边与 BT 边夹角为 $7\pi/18$ 、取苗爪 BT 边长度 150 mm。机构轨迹取苗段与苗箱夹角 91° 、取苗过程行星架转角 36° 、取苗过程苗与钵盘不干涉、取苗摆角 5° 、入

苗段与取苗段轨迹夹角为 85° 、投苗角 76° 、两取苗爪之间最小距离 49 mm。

2) 通过机构的虚拟仿真验证了运动学模型的正确性, 仿真结果与理论计算结果吻合, 证明旋转式取苗机构性能满足夹苗式取苗运动要求; 该型取苗机构在取苗段速度大, 有利于快速从穴盘带出基质苗, 速度的连续性好, 为机构的良好性能奠定基础。后续还需要通过样机试验对夹苗力、夹紧量作进一步取苗试验。

3) 高阶混合变性椭圆齿轮行星系取苗机构由二阶变性椭圆和一阶变性椭圆组成, 机构具有 12 个参数, 运动规律设计灵活; 机构包含 7 个完整的非圆齿轮, 齿轮的节曲线形状只有 2 种, 齿轮制造方便。

[参 考 文 献]

- [1] 夏俊芳, 王树才, 许绮川. 我国棉花营养钵移栽机械现状与发展趋势[J]. 中国农机化, 2002(1): 36—37.
- [2] 熊耐新, 全腊珍, 邹运梅, 等. 我国棉花移栽机的现状与发展趋势[J]. 湖南农机, 2010, 37(1): 1—3.
Xiong Naixin, Quan Lazhen, Zou Yunmei, et al. Present situation and developing trend of the cotton transplanter in China[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2010, 37(1): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [3] 唐海明, 陈金湘, 熊格生, 等. 棉花育苗技术的研究现状及展望[J]. 江西农业学报, 2007, 19(6): 31—34.
Tang Haiming, Chen Jinxiang, Xiong Gesheng, et al. Status and prospect of cotton seedling technique in China[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2007, 19(6): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [4] 伊藤尚胜, 清水修一, 和田俊郎, 等. 移植机[P]. 中国专利: ZL99118740.7, 2000-05-03.
- [5] 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.
- [6] 俞高红, 刘炳华, 赵匀, 等. 椭圆齿轮行星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 with English abstract)
- [7] 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 with eccentric gear and non-circular gear[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [8] 俞高红, 陈志威, 赵匀, 等. 椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 32—39.
Yu Gaohong, Chen Zhiwei, Zhao Yun, et al. Study on vegetable plug seedling pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 32—39. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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.
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. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵雄, 陈建能, 杨茂祥, 等. 二阶自由非圆齿轮行星系钵苗移栽机取苗机构[J]. 农业机械学报, 2014, 30(4): 123—127.
Zhao Xiong, Chen Jianneng, Yang Maoxiang, et al. Seedling pick-up mechanism of planetary gear train with two-order general non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 30(4): 123—127. (in Chinese with English abstract)
- [11] 裴利钢. 蔬菜钵苗自动移栽机送苗装置的设计与分析[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
Qiu Ligang. Design and Analysis of Vegetable Plug Seedling Transport Mechanism of Automatic Transplanter[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech university, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [12] 宋建农, 王萍, 魏文军, 等. 水稻秧苗抗拉力学特性及穴盘拔秧性能的力学试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 10—13.
Song Jiannong, Wang Ping, Wei Wenjun, et al. Experimental research on tensile strength of rice seedlings and force of pulling out seedlings from trays[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈恒高, 田金和, 宋来田. 机械手式水稻抛秧机的研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(3): 48—52.
Chen Henggao, Tian Jinhe, Song Laitian. Study on rice seedling throwing transplanter of manipulator type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 48—52. (in Chinese with English abstract)
- [14] 宋建农, 庄乃生, 王立臣, 等. 21 世纪我国水稻种植机械化发展方向[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(2): 30—33.
Song Jiannong, Zhuang Naisheng, Wang Lichen, et al. The development tendency of Chinese rice planting

- mechanization in the 21st century[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(2): 30—33. (in Chinese with English abstract)
- [15] 熊耐新. 棉花裸苗移栽机构设计与实验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- Xiong Naixin. Design and Research on Cotton Seedlings Transplanting Mechanism[D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zong Wangyuan, Huang Xiaomao, Xu Aiying, et al. Bending and shearing characteristics of cotton seedling stem[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.2): 118—124.
- 宗望远, 黄小毛, 徐爱英, 等. 棉花幼苗茎秆弯曲及剪切性能试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 2): 118—124. (in English with Chinese abstract)
- [17] 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 17—56.
- [18] 赵匀, 黄巨明, 张国凤, 等. 变形椭圆齿轮分插机构运动分析与优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 48—52, 61.
- Zhao Yun, Huang Juming, Zhang Guofeng, et al. Kinematic analysis and optimization of transplanting mechanism with deformable elliptic gears transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 48—52, 61. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张锐, 吴序堂, 聂钢, 等. 高阶变性椭圆齿轮的研究与设计[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 726—730.
- Zhang Rui, Wu Xutang, Nie Gang, et al. Study and design on high-order deformed elliptic gears[J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2005, 39(7): 726—730. (in Chinese with English abstract)
- [20] 徐洪广, 赵匀, 张允慧, 等. 水稻钵苗移栽机变性卵形齿轮分秧机构的运动机理分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 9—15.
- Xu Hongguang, Zhao Yun, Zhang Yunhui, et al. Analysis on kinematic principle for seedling-picking machinery of rice transplanter with deformed oval gears[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 9—15. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈建能, 黄前泽, 王英, 等. 钵苗移栽机椭圆齿轮行星系植苗机构运动学建模与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 6—12.
- Chen Jianneng, Huang Qianze, Wang Ying, et al. Kinematics modeling and analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for pot seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 6—12. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈建能, 王英, 黄前泽, 等. 钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 52—56, 92.
- Chen Jianneng, Wang Ying, Huang Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 52—56, 92. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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 with English abstract)
- [24] 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 with English abstract)
- [25] 武传宇, 赵匀, 陈建能. 水稻插秧机分插机构人机交互可视化优化设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 46—49.
- Wu Chuanyu, Zhao Yun, Chen Jianneng. Optimization design of rice transplanter separating-planting mechanism with visualization human-computer interaction method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 46—49. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵匀, 俞高红, 武传宇, 等. 机构数值分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [27] 叶秉良, 刘安, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗移栽机取苗机构人机交互参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 57—62.
- Ye Bingliang, Liu An, Yu Gaohong, et al. Parameters optimization with human-computer interaction method and experiment of vegetable seedling pick-up mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 57—62. (in Chinese with English abstract)

Kinematic analysis and virtual experiment of rotary pick-up mechanism on cotton transplanter

Zhao Xiong^{1,2}, Shen Ming^{1,2}, Chen Jianneng^{1,2*}, Dai Li²

(1. College of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Picking seedling tache in plug seedlings of cotton transplanting is completed manually at present. As a result, the efficiency of cotton transplanting is limited. In order to realize automatic pick-up in seedlings in cotton transplanting, a new kind of seedling pick-up mechanism was designed which adapts with the characteristics of the stems' matrix tensile force of the cotton seedlings in nursery medium which is much larger than the fetching seedling force. A new form of planetary gearing system that is composed with blended high-order deformed elliptic gears was introduced. Mechanism kinematics mathematical model was established, the objective of clipping seedling type working with seeding pick-up mechanism were set according to the demand of the clipping seedling type. Working and the demand of coordination between the seeding pick-up mechanism and seeding box, seeding transplanting mechanism, and optimize analysis of software were compiled to determine the parameters of institutions: the center distance of the meshing gear is 58 mm, the eccentricity ratio of first stage second order deformation elliptical gear is 0.2, the major deformation coefficient of first stage second order deformation elliptical gear is 0.9, the eccentricity ratio of second stage single deformation elliptical gear is 0.14, and the major deformation coefficient of second stage single deformation elliptical gear is 0.18. The installation angle of the mark line on the fixed sun gear 1 is $13\pi/18$, the angle of planetary carrier OA and the mark line on the sun gear 1 is $\pi/2$, the first middle gear and the second middle gear are installed on the middle shaft A , the first middle gear that the meshing with sun gear, the angle of mark lines on the second middle gear and the first middle gear is $7\pi/18$. At the initial position, the angle of the planetary carrier AB and the mark line of the second middle gear is $35\pi/36$, the first planetary gear that the meshing with the second middle gear, the first planetary gear and the picking-up seedling claw are installed on the planetary shaft B , the angle of picking-up seedling claw BE and the mark line of the first planetary gear is $\pi/6$, the angle of BT to BE which on the picking-up seedling claw is $7\pi/18$ and the BT length is 150 mm, the angle between the fetching seedling section of the trajectory to the seedlings box is 91° , the rotational angle of the planetary carrier is 36° and no interference between the seedling and the potting during the process of fetching seedlings, picking-up the seedling claw swing angle is 5° , and the angle between the fetching seedling section to the claw approach seedlings section is 85° , pushing the seedlings angle is 76° , the minimum distance between two pick-up seedling claws is 48.6 mm. The virtual experiment indicated that the mechanism's work trajectory is in agreement with theoretical calculations, well meets the demand of the seedling fetching process, the seedlings claws have a rapid fetching speed in fetching the seedling section which is beneficial to rapid fetching seedlings, cycle speed curve smoothing, and provides a viable solution for automatic fetching of cotton seedling in nursery medium.

Key words: agricultural machinery; transplants; cotton; pick-up mechanism; high-order elliptic; deformed elliptic; seedling nursery in medium

(责任编辑: 张俊芳)