

基于空间轨迹的行星轮系移栽机构设计方法研究

王磊¹ 孙良^{1,2} 徐亚丹³ 俞高红^{1,2} 张委¹ 郑剑⁴

(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. 杭州职业技术学院, 杭州 310018; 4. 杭州杭氧透平机械有限公司, 杭州 310004)

摘要: 为使行星轮系移栽机构能够实现复杂空间轨迹、更好地满足水稻宽窄行钵苗移栽的农艺要求,提出一种基于一般空间连续封闭轨迹的不等速行星轮系移栽机构逆向设计方法。首先,将行星轮系移栽机构简化为空间开链三杆二自由度(2R)机构,以3次非均匀B样条曲线拟合的理想轨迹曲线为约束,建立空间开链2R机构运动学模型,分析其末端轨迹形成机理,利用空间几何关系求解机构的杆长和输出轴的相对位置;然后,由输入与输出轴间的相对角位移关系得到轮系机构的总传动比,通过依附不等速齿轮副缩减开链机构自由度,并根据齿轮副组合类型进行传动比分配与非圆齿轮节曲线的设计。在应用实例中,基于空间“8”字形移栽轨迹设计了一种由平面非圆齿轮与圆锥齿轮组合传动的水稻钵苗宽窄行移栽机构,并进行了虚拟样机仿真与物理样机试验,结果表明:仿真轨迹、样机测试轨迹与拟合轨迹基本一致,验证了理论方法的正确性和可行性。

关键词: 水稻钵苗; 宽窄行移栽; 行星轮系; 逆向设计; 空间轨迹

中图分类号: S223.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0051-09 OSID: 

Design Method of Transplanting Mechanism of Planetary Gear Train Based on Spatial Trajectory

WANG Lei¹ SUN Liang^{1,2} XU Yadan³ YU Gaohong^{1,2} ZHANG Wei¹ ZHENG Jian⁴

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China
3. Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China
4. Hangzhou Hangyang Turbine Machinery Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

Abstract: A reverse design method for transplanting mechanism of unequal speed planetary gear train based on general spatial continuous closed trajectory was proposed in order to make the planetary gear train transplanting mechanism achieve a complex spatial trajectory and better meet the agronomic requirements for transplanting rice seedlings in wide and narrow rows. First of all, the planetary gear train transplanting mechanism was simplified as a spatial three-bar two-degree-of-freedom (2R) open-loop mechanism, and the ideal transplanting trajectory curve fitted by the cubic non-uniform B-spline curve was used as a constraint to establish a spatial 2R mechanism kinematics model, the formation mechanism of the terminal trajectory was analyzed, the rod length and the relative position relationship between the rotation axis of the mechanism were solved by using the spatial geometric relationship. Secondly, the total transmission ratio of the planetary gear train mechanism was obtained from the relative angular displacement relationship between the input and output axes. The degrees of freedom of the spatial 2R mechanism were reduced by attaching to the unequal speed gear pair. The transmission ratio distribution and the pitch curve of the non-circular gear were designed according to the combination type of the gear pair. Finally, based on the spatial “8” shaped transplanting trajectory, a transplanting mechanism of rice seedling with wide and narrow rows driven by plane non-circular gear and bevel gear was designed in the application example, and the virtual prototype simulation and physical prototype test were carried out.

收稿日期: 2021-02-22 修回日期: 2021-03-31
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)、国家自然科学基金项目(51975534, 52075497)、浙江省公益性技术应用研究计划项目(LGN21E050001)、浙江省151人才培养计划项目和浙江省高校中青年学科带头人培养项目
作者简介: 王磊(1992—),男,博士生,主要从事农业机械设计与优化研究,E-mail: wanglei_zstu@163.com
通信作者: 孙良(1981—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计与优化研究,E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

The results showed that the simulation trajectory and test trajectory were basically consistent with the given trajectory, which verified the correctness and feasibility of the theoretical method.

Key words: rice pot seedling; wide-narrow-row transplanting; planetary gear train; reverse design; spatial trajectory

0 引言

非圆齿轮行星轮系移栽机构可由一套机构完成夹苗、拔苗、持苗和推苗等动作,其结构紧凑、工作平稳、成本低,并且可以设置多个移栽臂,从而实现高效移栽,已成为水旱田移栽机构研究的一个重要方向^[1-4]。

目前,非圆齿轮行星轮系移栽机构设计方法主要包括给定机构参数(结构参数、运动参数)再进行优化的正向设计^[5-7]和基于运动要求(轨迹、位姿)的逆向设计^[8-10]。正向设计对机构参数的选择盲目性大,需要依靠专家经验,并且非圆齿轮节曲线方程的确定,使其变传动比特性不能得到充分体现。逆向设计可获得一般性的非圆齿轮副,且能实现机构参数与传动比、轨迹之间的关联设计。国内外专家学者相继提出了多种非圆齿轮行星轮系机构逆向设计方法^[11-16],这些方法主要集中在设计简单平面与球面轨迹的非圆齿轮行星轮系机构,关于由复杂空间轨迹逆向设计行星轮系机构的研究鲜有报道。

水稻钵苗宽窄行移栽是一种将水稻钵苗移栽和宽窄行种植优势相结合的种植方式,可有效提高水稻产量与质量^[17-18]。而实现水稻钵苗宽窄行机械化移栽要求移栽机构能够形成一定的空间轨迹。TATSUYA等^[19]首次将圆锥齿轮与非圆齿轮进行组合,通过参数优选得到适合日本水稻密植的空间轨迹。祝建彬等^[20]设计了一种斜齿交错-非圆锥齿轮行星轮系分插机构,用来实现水稻毯苗宽窄行插秧空间轨迹。SUN等^[21]基于空间位姿设计了一种平面非圆齿轮与交错斜齿轮组合传动的水稻钵苗宽窄行移栽机构,但该机构存在运动模型复杂、求解高次多项式方程繁琐、夹苗过程横向位移较大、影响夹苗成功率等问题。

为使行星轮系移栽机构能够实现复杂空间轨迹,更好地满足水稻钵苗宽窄行移栽的农艺要求,本文提出一种由一般空间连续封闭轨迹曲线逆向设计行星轮系机构的设计方法,包括建立基于给定空间轨迹的开链机构参数求解模型、总传动比求解、轮系组成分析与非圆齿轮设计等,并通过应用实例设计一种平面非圆齿轮与圆锥齿轮组合传动的水稻钵苗宽窄行移栽机构,以验证设计方法的正确性和可行性。

1 轮系机构简化与运动模型分析

由于单自由度两级传动(单行星架)行星轮系移栽机构运动轨迹为行星轮上某一点P所形成的,且一般情况下行星架的绝对运动为绕输入轴的平面转动,行星轮回转中心与机构末端点连线的绝对运动为往复摆动^[22]。如果不考虑轮系中传动齿轮的啮合性能,可将此类行星轮系移栽机构简化为一般性的空间三杆二自由度(2R)的开链机构^[23],如图1所示。

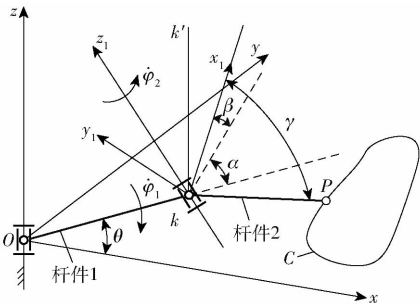


图1 空间开链2R机构
Fig. 1 Spatial 2R open-loop mechanism

图1中,杆件1表示轮系的行星架,杆件2表示栽植臂。以太阳轮回转中心O为原点,对空间开链2R机构建立坐标系xyz,z和z₁分别表示机构的输入和输出轴,杆件1绕输入轴z转动,杆件2相对杆件1绕输出轴z₁转动,在输入和输出轴的共同作用下机构末端点P形成轨迹C。利用D-H矩阵^[20]可建立空间开链2R机构末端点P的运动轨迹数学表达式

$$M_P = \begin{bmatrix} \cos(A + \alpha) & -\sin(A + \alpha) & 0 & a\cos A \\ \sin(A + \alpha) & \cos(A + \alpha) & 0 & a\sin A \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \cos\beta\cos B & -\cos\beta\sin B & -\sin\beta & b\cos\beta\cos B \\ \sin B & \cos B & 0 & b\sin B \\ \sin\beta\cos B & -\sin\beta\sin B & \cos\beta & b\sin\beta\cos B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $A = \theta - \varphi_1$ $B = \gamma + \varphi_2$
式中 θ ——杆件1的初始角
 β —— x_1 与 xoy 平面的夹角
 α —— x_1 在 xoy 平面的投影与杆件1的夹角

γ ——杆件 2 的位置角
 $a、b$ ——杆件 1、2 的长度
 φ_1 ——杆件 1 相对轴 z 的角位移
 φ_2 ——杆件 2 相对杆件 1 的角位移

角位移都以 2π 为周期。

对式(1)展开可得一个周期内空间开链 2R 机构末端点 P 的位移为

$$\begin{cases} x_p = b\cos(A + \alpha)\cos\beta\cos B - \\ \quad b\sin(A + \alpha)\sin B + a\cos A \\ y_p = b\sin(A + \alpha)\cos\beta\cos B + \\ \quad b\cos(A + \alpha)\sin B + a\sin A \\ z_p = b\sin\beta\cos B \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中除角位移参数 $\varphi_1、\varphi_2$ 外,其余参数在一个周期内均为常量,当杆件对应的角速度 $\dot{\varphi}_1$ 与 $\dot{\varphi}_2$ 具有不同关系时,机构末端点 P 所形成的轨迹具有以下几种类型:

(1)当 $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2$,且 $\beta = 0^\circ$ 或 $\beta = 180^\circ$ 时, $z_p = 0$, 转轴 z_1 与 z 相互平行,由式(2)可得

$$x_p^2 + y_p^2 = a^2 + b^2 + 2ab\cos(\alpha + B) \quad (3)$$

由于杆件 1 在 xoy 平面运动,又 $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2$,可知机构末端点 P 的轨迹为圆,半径为点 P 与点 O 之间的距离。

(2)当 $\dot{\varphi}_1$ 为常量,而 $\dot{\varphi}_2$ 在周期内变化时,由式(1)可得输出轴 z_1 的方向向量为

$$z_1 = \begin{bmatrix} \cos(A + \alpha)\sin\beta \\ \sin(A + \alpha)\sin\beta \\ \cos\beta \end{bmatrix}$$

如果输出轴 z_1 与输入轴 z 相交,即杆件 1 与输入输出轴共面时,则有

$$\begin{vmatrix} a\cos A & a\sin A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \cos(A + \alpha) & \sin(A + \alpha)\sin\beta & \cos\beta \end{vmatrix} = a\sin\alpha\sin\beta = 0$$

由于输出轴 z_1 与输入轴 z 相交,故 $\beta \neq 0$,因此 $\alpha = 0$,此时点 P 的轨迹为球面封闭曲线,球心即为轴 z_1 与轴 z 的交点。

(3)当 $\dot{\varphi}_1$ 为常量, $\dot{\varphi}_2$ 作周期性变化,或 $\dot{\varphi}_1$ 和 $\dot{\varphi}_2$ 都作周期性变化,且 $\beta \neq 0, \alpha \neq 0$,即轴 z_1 与轴 z 异面时,点 P 的轨迹为一般空间封闭曲线。另外,由公式(2)可知,当杆件 2 绕转轴 z_1 相对杆件 1 转过 $-\gamma$ 和 $\pi - \gamma$ 时, z_p 分别达到周期内的最大值 $z_{p\max}$ (或最小值 $z_{p\min}$) 和最小值 $z_{p\min}$ (或最大值 $z_{p\max}$),而此时转轴 z_1 、杆件 2 和过点 k 与轴 z 具有相同方向的直线 kk' 共面,即直线 kk' 和轴 z_1 所在平面与杆件 2 和轴 z_1 所在平面的夹角分别达到最大值和最小值。

通过上述分析可知, $\dot{\varphi}_1$ 和 $\dot{\varphi}_2$ 不同的周期性变化特性,使得开链 2R 机构末端点 P 形成的轨迹形状具有多样性。

2 基于空间轨迹的开链机构参数求解

2.1 空间轨迹表示方法

为了方便、直观地表示任意空间轨迹,本文采用 3 次非均匀 B 样条曲线拟合方法^[24]对给定轨迹上的若干型值点数据进行拟合。

由 $n + 1$ 个多边形控制点定义的一条 3 次非均匀 B 样条曲线可以由分段有理 B 样条基函数表示^[25]为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) \quad (4)$$

式中, P_i 为控制顶点; u 为节点参数; $N_{i,k}(u)$ 是由节点矢量 $U = (u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1})$ 决定的 k 次规范 B 样条基函数。其递推公式为

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & (u_i \leq u \leq u_{i+1}) \\ 0 & (u < u_i \text{ 或 } u > u_{i+1}) \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \end{cases} \quad (5)$$

其中,规定 $0/0 = 0$ 。

由于运动轨迹为封闭曲线,若给定运动轨迹上一组有序型值点数据 $Q_i (i = 0, 1, \dots, q)$,为使 3 次非均匀 B 样条曲线通过给定的型值点,要求其首末端点分别与首末型值点一致,分段曲线的连结点需依次与曲线定义域内的节点一一对应,确定节点矢量 U 后可求出定义该 3 次非均匀 B 样条曲线的控制顶点,然后由控制顶点计算曲线各个点的坐标值,进而拟合出任意空间轨迹曲线^[13]。

2.2 空间开链机构杆长求解

基于空间轨迹的行星轮系反求,首先要求解简化模型空间开链 2R 机构的结构参数,即两杆的长度和输入输出轴之间的相对位置关系。

如图 2 所示,任意空间轨迹 C 位于参考系 xyz 中,假设轨迹 C 可由空间开链 2R 机构实现,点 o_1 为坐标系 z 轴上的任意一点,假设以点 o_1 为机构输入轴的回转中心,则转动副 o_1 到轨迹 C 上各点的直线距离为 L 。若点 n 和 m 分别为轨迹 C 上距离点 o_1 最近和最远的两个点,当空间开链 2R 机构末端运动到点 n 和 m 时,必然存在转动副位置 $k_1 (x_{k1}, y_{k1}, z_{k1})$ 和 $k_2 (x_{k2}, y_{k2}, z_{k2})$ 使得 $\triangle o_1 n k_2$ 和 $\triangle o_1 m k_1$ 垂直于 xoy 平面,令直线 $o_1 k_1$ 、 $o_1 k_2$ 长度为 a , $k_1 m$ 、 $k_2 n$ 长度为 b , δ_1 、 δ_2 分别为直线 $o_1 m$ 、 $o_1 n$ 与直线 $o_1 k_1$ 、 $o_1 k_2$ 的

夹角。则可建立关系式

$$b^2 - a^2 = L_{o_1m}^2 - 2aL_{o_1m}\cos\delta_1$$

(6)

$$b^2 - a^2 = L_{o_1n}^2 + 2aL_{o_1n}\cos\delta_2$$

(7)

$$\sin\delta_1 = \frac{|z_m - z_{o_1}|}{L_{o_1m}}$$

(8)

$$\sin\delta_2 = \frac{|z_n - z_{o_1}|}{L_{o_1n}}$$

(9)

式中 L_{o_1n} 、 L_{o_1m} ——点 o_1 与点 n 、 m 间的距离

联立式(6)~(9)可得空间开链 2R 机构的杆长

$$a = \frac{L_{o_1m}^2 - L_{o_1n}^2}{2(L_{o_1m}\cos\delta_1 + L_{o_1n}\cos\delta_2)}$$

(10)

$$b = \sqrt{L_{o_1m}^2 + a^2 - 2aL_{o_1m}\cos\delta_1}$$

(11)

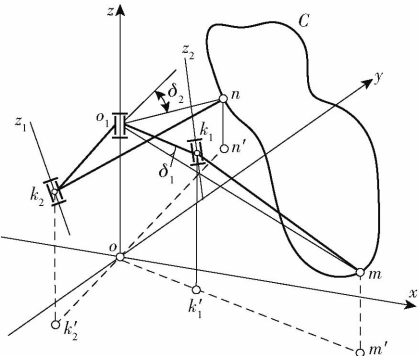


图 2 杆长求解示意图

Fig. 2 Schematic of rod length solution

2.3 空间开链机构输出轴位置求解

如图 3 所示,若点 $h(x_h, y_h, z_h)$ 和 $j(x_j, y_j, z_j)$ 分别为轨迹 C 上具有 z 向坐标最大值和最小值的两个点,当空间开链 2R 机构末端点分别运动至点 h 和 j 时,图 2 中转动副 k_1 和 k_2 分别运动至 $k_3(x_{k_3}, y_{k_3}, z_{k_3})$ 和 $k_4(x_{k_4}, y_{k_4}, z_{k_4})$ 位置。如果输入轴 z 和输出轴 z_2 为异面轴,则轴 z_2 、直线 k_3h 与直线 k_3z'' 位于同一平面内且垂直于 xoy 平面,同时轴 z_1 、直线 k_4j 与直线 k_4z' 也位于同一平面内且垂直于 xoy 平面(其中直线 k_3z'' 、 k_4z' 均平行于 z 轴),即在空间开链 2R 机构的单个运动周期内,直线 k_4j 与 k_4z' 、 k_3h 与 k_3z'' 在同一侧的夹角 ζ_1 和 ζ_2 达到机构在周期内的极值。令

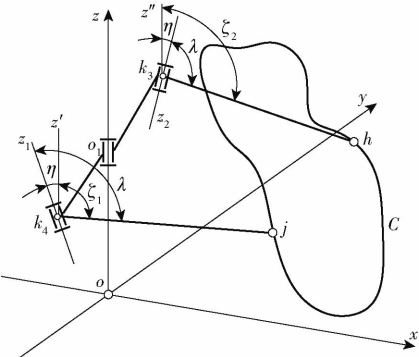


图 3 输出轴位置确定示意图

Fig. 3 Schematic of output shaft position determination

$z_{z'} = z_j, z_{z''} = z_h$, 有

$$k_4z' = |z_{k_4} - z_{z'}| = b\cos\xi_1$$

(12)

$$k_3z'' = |z_{k_3} - z_{z''}| = b\cos\xi_2$$

(13)

由于杆 o_1k_3 和 o_1k_4 在 xy 平面内运动,则点 k_3 和 k_4 的 z_{k_3} 、 z_{k_4} 值可由点 o_1 的坐标值 z_{o_1} 确定,此时,可由式(12)、(13)分别求得 ξ_1 、 ξ_2 。

在空间开链 2R 机构运动过程中,轴 z_2 (或 z_1) 与直线 k_3z'' (或 k_4z') 的相对位置不变,轴 z_1 (或 z_2) 与直线 k_4j (或 k_3h) 的相对位置不变,即夹角 η 和 λ 均为常量,其值可由 ξ_1 、 ξ_2 确定,即

$$\lambda = \frac{\xi_1 + \xi_2}{2}$$

(14)

$$\eta = \begin{cases} \frac{\xi_1 - \xi_2}{2} & (\xi_1 \geq \xi_2) \\ \frac{\xi_2 - \xi_1}{2} & (\xi_1 < \xi_2) \end{cases}$$

(15)

从而可以确定开链 2R 机构输入和输出轴之间的相对位置关系。

但由于给定轨迹并不一定满足异面轴传动条件,即在图 3 中点 h 和 j 具有 z 坐标最大和最小值时,转轴 z_2 、直线 k_3h 与直线 k_3z'' 并非满足共面的条件,而转轴 z_1 、直线 k_4j 与直线 k_4z' 也可能不位于同一平面内。若如此,可以先假设在点 h (或 j) 时轴 z_2 、直线 k_3h 与直线 k_3z'' (或轴 z_1 、直线 k_4j 与直线 k_4z') 三线共面,由于轴 z_2 (或轴 z_1) 与直线 k_3h (或 k_4j) 构成的面相对于轴 z_2 (或轴 z_1) 与直线 k_3z'' (或 k_4z') 构成的面绕轴 z_2 (或 z_1) 转动,那么在轨迹 C 上必然存在一个点 j' (或 h'),使得三线再次共面。具体计算时可先以拟合轨迹上 z 向坐标的最大值和最小值点初步确定输出轴位置角 λ' 、 η' ,然后在轨迹上寻找 j' (或 h') 点,最终获得满足交错轴运动要求的输出轴位置角 λ 、 η 。该方法虽然能求解输出轴的位置角,但获得的轨迹和期望轨迹之间会存在一定的差异,可在具体应用时进行判断与优化。

3 轮系机构转化与非圆齿轮设计

3.1 轮系机构齿轮组合分析

求解得到开链 2R 机构结构参数后,可通过在开链 2R 机构上依附不等速齿轮副将其自由度约束为 1^[14]。行星轮系移栽机构的设计以简单、高效、易实现为原则,因此本文的轮系组成分析主要针对单自由度两级齿轮传动的行星轮系机构。

(1)由上文分析可知,当给定轨迹 C 为平面封闭曲线,即输入与输出轴平行时, $\delta_1 = \delta_2 = 0$,该轨迹对应的开链 2R 机构杆长为

运动(伸向钵盘)准备取秧,在点2~3段迅速夹紧秧苗,为了提高夹苗成功率,初步设计点1和点3之间的 z 向位移小于3 mm;经过点3~4段后将秧苗连带土钵从钵盘中拔出,此段要求两点之间的距离大于钵盘深度20 mm;点4~8轨迹段为持苗过程,至点9取苗爪松开秧苗,推秧部件作用于营养土钵并将秧苗推入田中,点2与点9之间要求有50 mm的 z 向位移;随后取苗爪再此向点1运动,为下次取秧做准备。

4.2 行星轮系移栽机构设计

基于4.1节提出的空间移栽轨迹,选择开链2R机构在点 $o_1(0,0,0)$ 处与机架构成转动副,此时轨迹上距离点 o_1 最近和最远点分别为点12和点3,由式(8)~(11)可分别求解出开链2R机构中两杆的长度 $a=75.31\text{ mm}$ 、 $b=214.27\text{ mm}$ 。

点1为拟合轨迹上 z 向坐标最小的点(j 点),点11为轨迹上 z 向坐标最大的点(h 点),由式(12)~(15)可求得输出轴位置角 $\lambda=66.47^\circ$ 、 $\eta=8.78^\circ$,从而确定输出轴的位置。

因取苗环节的轨迹要求复杂,在反求传动比再现空间轨迹时选择点1为求解起始点。在已知开链2R机构具体参数的条件下,从型值点1开始由开链机构复演拟合轨迹,计算杆件的相对角位移,从而获得输出轴与输入轴间的传动比曲线(如图6所示)。

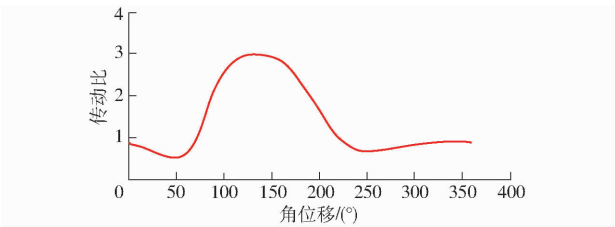


图6 总传动比变化曲线

Fig. 6 Change curve of total transmission ratio

在得到机构总传动比曲线后,由3.1节可知通过依附不同类型不等速齿轮副缩减开链2R机构自由度,可获得多种能够实现空间轨迹的行星轮系移栽机构。本文采用结构简单、加工装配方便的平面非圆齿轮与圆锥齿轮组合传动,将平面非圆齿轮副置于第1级,圆锥齿轮副置于第2级,如图7所示。

由文献[21]可知平面齿轮与锥齿轮组合的行星轮系机构需采用折线布置。机构在图7所示初始位置时, l 为机构输出轴在 xoy 平面上的投影直线, h 为输出轴与 xoy 平面的交点。由于轮系第2级为圆锥齿轮副,且中间圆锥齿轮与中间平面非圆齿轮同轴布置,因此中间轴与行星轴相交(交点即为圆锥齿轮副的锥顶点),又因为行星轮系第1级为平面非圆齿轮副,所以中间轴平行于输入轴(即 z 轴),则

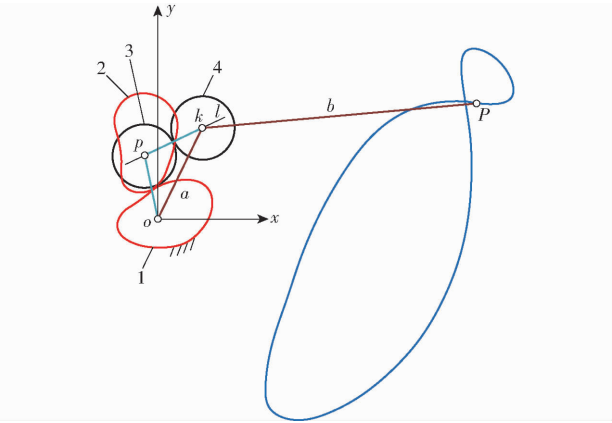


图7 中间轴位置分析

Fig. 7 Analysis of intermediate shaft position

1. 中心平面非圆齿轮 2. 中间平面非圆齿轮 3. 中间圆锥齿轮 4. 行星圆锥齿轮

中间轴在 xoy 平面上的投影为点 p ,且必定位于直线 l 上。点 p 位置的变化意味着平面非圆齿轮副中心距和圆锥齿轮副锥距的变化,应当根据轮系结构特点、齿轮节曲线的优劣对其进行优化。并且,移栽机构工作效果除轨迹影响外还对取苗推苗处的姿态有一定的要求,比如取苗角和推苗角要在一定范围内,其差值要近似于秧箱安装角等。

因此,为获得较优的移栽效果,在确定了理想移栽轨迹和开链2R机构结构参数的前提下,基于Matlab GUI开发了平面非圆齿轮-圆锥齿轮行星轮系钵苗宽窄行移栽机构优化设计软件,其运行界面如图8所示,主要包括模块:菜单栏①;设计参数区②;工具区③;图形显示区④;优化目标显示区⑤;优化结果显示区⑥。

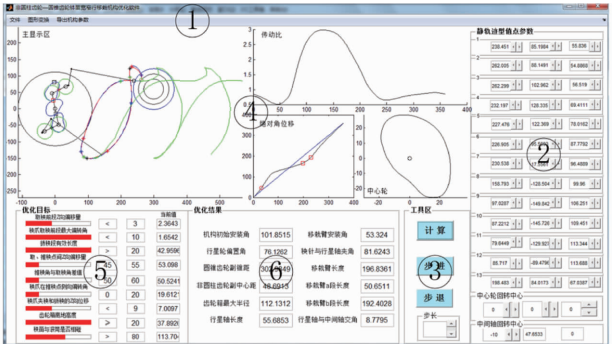


图8 软件运行界面

Fig. 8 Software running interface

通过调整相关设计参数,得到移栽机构中心轴回转中心点坐标为 $(-10\text{ mm}, 47.65\text{ mm}, 0\text{ mm})$,并求得输出轴与中间轴交点为 $(-10\text{ mm}, 47.65\text{ mm}, -302.99\text{ mm})$,平面非圆齿轮副中心距为48.69 mm,由此求得平面非圆齿轮副节曲线,如图9所示。移栽机构的主要参数优化结果见表2,图10为参数示意图。

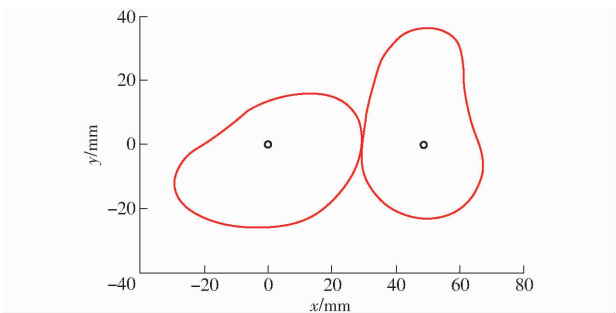


图 9 平面非圆齿轮节曲线

Fig. 9 Pitch curve of plane non-circular gear

表 2 移栽机构主要参数

Tab. 2 Main parameters of transplanting mechanism

参数	数值
机构初始安装角 $\theta/(^{\circ})$	101.85
行星轮偏置角 $\varepsilon/(^{\circ})$	76.13
移栽臂安装角 $\mu/(^{\circ})$	53.32
行星轴与中间轴交角 $\delta/(^{\circ})$	8.78
平面非圆齿轮副中心距 a_1/mm	48.69
圆锥齿轮副锥距 a_2/mm	302.98
行星轴长度 l_{ef}/mm	55.69
移栽臂长度 l_{fc}/mm	196.84

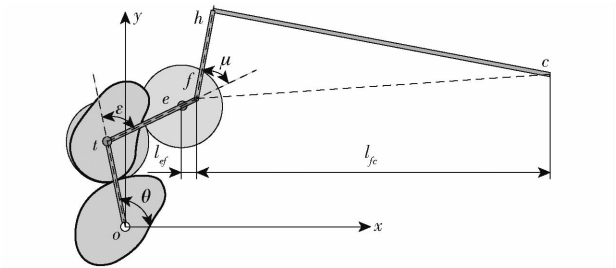


图 10 移栽机构主要参数示意图

Fig. 10 Schematic of transplanting mechanism parameters

根据优化后的移栽机构参数再现机构运动轨迹,如图 11 所示,可以看出机构再现轨迹与拟合轨迹存在一定的偏差,这主要是由于 2.3 节中提到的拟合轨迹不满足异面轴传动条件造成的,即该移栽轨迹上具有 z 向坐标最大值和最小值的点分别为点 11 和点 1 时,输出轴 z_2 、直线 k_3h 、直线 k_3z'' 、转轴 z_1 、直线 k_4j 、直线 k_4z' 不同时满足位于同一平面的条件,在求解时先以拟合轨迹上点 11 和点 1 确定了输出轴位置角的初始值 λ' 、 η' ,然后计算得到点 h' 坐标值,并由点 h' 、点 1 及杆长计算得到输出轴的位置角 λ 和 η 。虽然以此求得的参数使机构复演的轨迹和期望轨迹之间存在一定的差异,但由图 11 可以看出,再现移栽轨迹在取秧过程和推秧过程都基本符合宽窄行钵苗移栽要求,并不影响水稻钵苗宽窄行移栽质量。

4.3 移栽机构仿真与试验

为了进一步验证理论方法的正确性和水稻钵苗

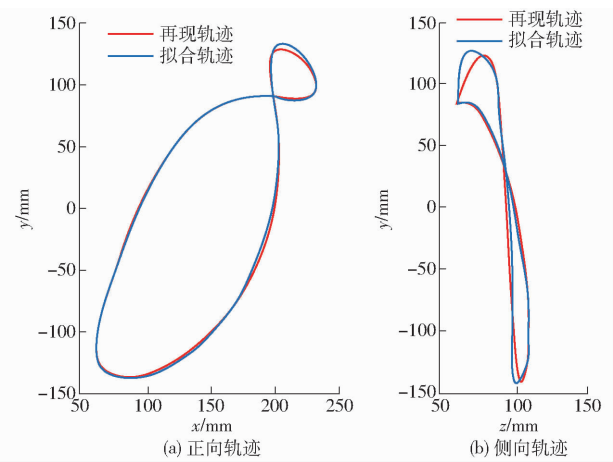


图 11 移栽轨迹对比

Fig. 11 Comparison of transplanting trajectories

宽窄行移栽机构设计的合理性,根据求解的机构结构参数和非圆齿轮节曲线,对水稻钵苗宽窄行移栽机构进行结构设计与三维建模,并在 Adams 软件中完成虚拟样机的仿真试验,得到移栽臂尖点的仿真运动轨迹,如图 12 所示。

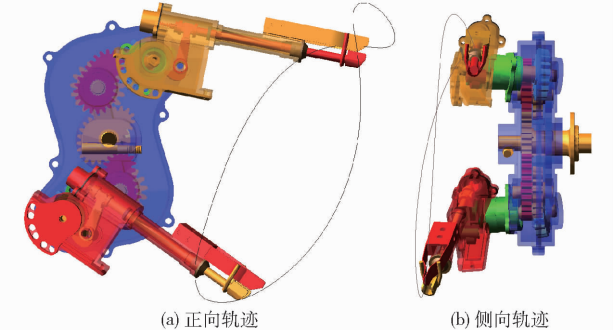


图 12 仿真轨迹

Fig. 12 Simulation trajectory

利用 3D 打印技术加工移栽机构物理样机,并进行了空转试验,通过高速摄像机 (Phantom 系列) 拍摄样机运动过程,再应用 Blaster's MAS 图像分析软件捕获移栽臂末端点轨迹曲线,得到移栽机构实际运动轨迹如图 13 所示。

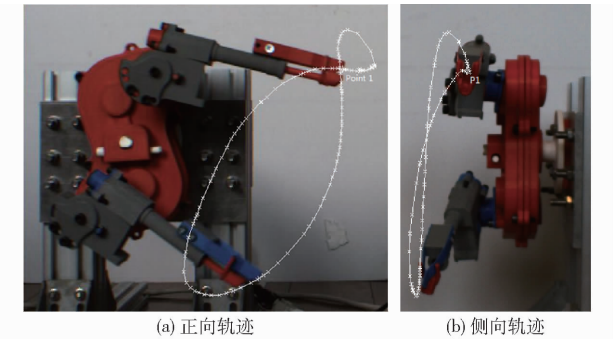


图 13 实际运动轨迹

Fig. 13 Physical prototype trajectory

通过对比分析可知,所设计的夹苗式水稻钵苗宽窄行移栽机构的实际运动轨迹、仿真轨迹与理论

复演轨迹基本一致,符合水稻钵苗宽窄行移栽的设计要求,验证了本文所提出设计方法的正确性和应用该方法设计夹苗式水稻钵苗宽窄行移栽机构的合理性。

5 结论

(1)提出了一种基于一般空间封闭轨迹曲线的行星轮系移栽机构逆向设计方法,建立了空间开链 2R 机构的运动学模型,根据杆件的空间几何关系求解得到了开链 2R 机构的结构参数,并由开链机构输入与输出轴间的相对角位移关系得到了轮系机构

的总传动比,根据齿轮副组合类型进行传动比分配与非圆齿轮节曲线求解,从而实现单自由度两级传动行星轮系机构的设计。

(2)根据水稻钵苗宽窄行移栽农艺要求,结合 B 样条拟合方式获得理想移栽轨迹,利用本文提出的方法设计了一种平面非圆齿轮-圆锥齿轮组合传动的空间行星轮系水稻钵苗宽窄行移栽机构,并进行了虚拟仿真与样机试验,结果表明:实际运动轨迹、仿真轨迹与拟合的理想轨迹基本一致,可以满足水稻钵苗宽窄行移栽要求,验证了理论方法的正确性和可行性。

参 考 文 献

- [1] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):44-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)
- [2] 吕志军,单伊尹,王杰,等. 蔬菜移栽装备研究现状和钵苗移栽装备展望[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(11):30-34.
LÜ Zhijun, SHAN Yiyin, WANG Jie, et al. Research progress of vegetable transplanting machine and prospects of seedling-picking machinery of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(11):30-34. (in Chinese)
- [3] JIN X, LI S J, YANG X J, et al. Developments in research on seedling auto-picking device of vegetable transplanter[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 364:375-379.
- [4] 孙伟,冯江,蒋亦元. 非圆齿轮系大蒜直立移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8):73-82.
SUN Wei, FENG Jiang, JIANG Yiyuan. Optimal design and experiment of vertically transplanting mechanism with non-circular gears system for garlic[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):73-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.008. (in Chinese)
- [5] 崔巍,赵亮,刘立晶,等. 二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2):79-84,98.
CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Analysis and experiment of rotary pick-up mechanism on seedling pick-up device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup. 2):79-84,98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s210&journalid=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.010. (in Chinese)
- [6] 许春林,吕志军,辛亮,等. 全自动草莓钵苗移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8):97-106.
XU Chunlin, LÜ Zhijun, XIN Liang, et al. Optimization design and experiment of full-automatic strawberry potted seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):97-106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190811&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.011. (in Chinese)
- [7] XUE X, LI L, XU C, et al. Optimized design and experiment of a fully automated potted cotton seedling transplanting mechanism[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4):111-117.
- [8] 陈建能,黄前泽,王英,等. 钵苗移栽机非圆齿轮行星轮系栽植机构参数分析与反求[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8):18-26.
CHEN Jianneng, HUANG Qianze, WANG Ying, et al. Parametric analysis and inversion of transplanting mechanism with planetary non-circular gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8):18-26. (in Chinese)
- [9] ZHAO X, CHU M, MA X, et al. Research on design method of non-circular planetary gear train transplanting mechanism based on precise poses and trajectory optimization[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(12):1-12.
- [10] 李革,应孔月,张继钊,等. 基于秧针静轨迹的分插机构非圆齿轮求解[J]. 机械工程学报, 2016, 52(1):64-71.
LI Ge, YING Kongyue, ZHANG Jizhao, et al. Computation method of non-circular gear based on seedling needle tip point's static trajectory in transplanting mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(1):64-71. (in Chinese)
- [11] BAE K Y, YANG Y S. Design of a non-circular planetary-gear-train system to generate an optimal trajectory in a rice transplanter[J]. Journal of Engineering Design, 2007, 18(4):361-372.

- [12] GUO L S, ZHANG W J. Kinematic analysis of a rice transplanting mechanism with eccentric planetary gear trains[J]. Mechanism & Machine Theory, 2001, 36(11-12): 1175-1188.
- [13] 赵雄, 王川, 杨茂祥, 等. 非圆齿轮行星轮系自动取苗机构逆向设计分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 30-36. ZHAO Xiong, WANG Chuan, YANG Maoxiang, et al. Reverse design and analysis of automatic seedling pick-up mechanism with non-circular gear planetary train[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 30-36. (in Chinese)
- [14] 孙良, 祝建彬, 陈建能, 等. 基于球面曲线的空间非匀速行星轮系分插机构逆向设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 9-17. SUN Liang, ZHU Jianbin, CHEN Jianneng, et al. Reverse design of transplanting mechanism with spatial planetary gear train based on spherical curve[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 9-17. (in Chinese)
- [15] 吴国环, 俞高红, 叶秉良, 等. 行星轮系水稻钵苗移栽机构正反求设计方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 85-93, 102. WU Guohuan, YU Gaohong, YE Bingliang, et al. Forward-reverse design method for rice potted-seedling transplanting mechanism with compound planetary gear train[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 85-93, 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002010&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.010. (in Chinese)
- [16] YE J, ZHAO X, WANG Y, et al. A novel planar motion generation method based on the synthesis of planetary gear train with noncircular gears[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(2): 4939-4949.
- [17] 张委. 直取式水稻钵苗宽窄行移栽机构研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017. ZHANG Wei. Study on vertically-grasping rice pot seedling and wide-narrow distance transplanting mechanism [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)
- [18] 辛亮. 斜置回转式水稻宽窄行钵苗移栽机构机理分析与性能研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. XIN Liang. Mechanism analysis and performance research of the inclined rotary rice wide-and-narrow row potted seedling transplanting mechanism [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [19] TATSUYA K, KOHNOSUKE T, MUNEKI T, et al. Development of zigzag planting mechanism for rice transplanter (Part 2) [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1999, 61(1): 179-185.
- [20] 祝建彬, 孙良, 刘晓龙, 等. 斜齿交错-非圆锥齿轮行星系水稻宽窄行分插机构设计与优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 21-29. ZHU Jianbin, SUN Liang, LIU Xiaolong, et al. Design and optimization of transplanting mechanism with planetary gear train composed of helical gears and noncircular bevel gears[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 21-29. (in Chinese)
- [21] SUN L, ZHOU Y, HUANG H, et al. Analysis and design of a spatial planetary noncircular gear train for rice seedling transplanting based on three given positions[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(1): 165-176.
- [22] 孙良, 胡艺翔, 邢子勤, 等. 基于近似多位姿的轮系式钵苗移栽机构运动综合[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 103-111. SUN Liang, HU Yixiang, XING Ziqin, et al. Motion synthesis of rotary pot seedling transplanting mechanism based on approximate multi-pose[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 103-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.011. (in Chinese)
- [23] 孙良, 徐亚丹, 黄恒敏, 等. 基于节曲线凸性判别的行星轮系移栽机构解析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 83-92. SUN Liang, XU Yadan, HUANG Hengmin, et al. Solution and analysis of transplanting mechanism with planetary gear train based on convexity of pitch curve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 83-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.010. (in Chinese)
- [24] 夏成林, 邬弘毅, 郑兴国, 等. 带多个形状参数的三次均匀 B 样条曲线的扩展[J]. 工程图学学报, 2011, 32(2): 73-79. XIA Chenglin, WU Hongyi, ZHENG Xingguo, et al. Extension of uniform cubic B-spline curves with multiple shape parameters [J]. Journal of Engineering Graphics, 2011, 32(2): 73-79. (in Chinese)
- [25] 李学艺, 王钊, 连小珉, 等. 基于周期性延伸的三次 B 样条闭曲线插值[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 251-254. LI Xueyi, WANG Zhao, LIAN Xiaomin, et al. Interpolation of cubic B-spline closed curve based on periodic extension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 251-254. (in Chinese)