

基于图论的多杆式栽植机构构型综合与方法研究

孙良^{1,2} 郑广辉¹ 叶治政¹ 俞高红^{1,2}

(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: 针对目前栽植机械中多杆式栽植机构构型有限的问题,借助图论型综合的方式,构建完备的多连杆栽植机构构型库。首先,在连杆机构运动链综合中,基于加权四次幂矩阵与加权最小距离矩阵的方法,获取拓扑图顶点相似特征码,根据不同顶点间特征码的唯一性,开展运动链拓扑图相似点识别与同构判别;其次,建立栽植机构构型筛选规则,利用相似点的特征实现功能点的选取,建立了6构件至9构件机构功能拓扑图图库,得到六杆一自由度构型14个,七杆二自由度构型17个,八杆一自由度构型510个,九杆二自由度构型917个;最后,在构型库中选取不同构件数下的构型进行运动学建模,优化获得适合栽植作业运动要求的新型六杆、七杆、八杆栽植机构尺寸,并进行运动仿真验证了构型综合方法的正确性,可为多样化种植机械的创新设计提供更多可选构型。

关键词: 栽植机构; 运动链; 相似识别; 同构判别; 图论

中图分类号: S223.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)05-0067-08

OSID:



Structural Synthesis and Innovative Design of Multi-link Planting Mechanism Based on Graph Theory

SUN Liang^{1,2} ZHENG Guanghui¹ YE Zhizheng¹ YU Gaohong^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

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

Abstract: In view of the limited configuration of multi-link planting mechanism at present, a complete multi-link planting mechanism library was constructed by means of graph theory. Firstly, based on the method of weighted fourth power matrix and weighted minimum distance matrix, the similarity feature code of vertices was obtained in the kinematic chain synthesis of linkage mechanism. In accordant with the uniqueness of the feature code, the similarity recognition and isomorphism identification of the kinematic chain were conducted. Secondly, the specific screen rule of the planting mechanism configuration was established based on similarity of vertices, and then the functional vertices for input link, output link and rack were determined. The mechanism topology library of six-link to nine-link was established; the number of 6-link 1-DOF KCs was 14, the number of 7-link 2-DOF KCs was 17, the number of 8-link 1-DOF KCs was 510, and the number of 9-link 2-DOF KCs was 917. Finally, the configuration of different links consisted of six-link to eight-link in the planting mechanism library was selected for kinematics modeling, and the new size of six-, seven- and eight-link planting mechanisms suitable for planting operation were obtained. The correctness of the configuration synthesis method was verified by comparing the theoretical results with the motion simulation results, which provided more optional configurations for the innovative design of diversified planting mechanism. The use of structural synthesis method is conducive to the innovative design of planting mechanism.

Key words: planting mechanism; kinematic chain; similarity recognition; isomorphism identification; graph theory

收稿日期: 2021-05-04 修回日期: 2021-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975534, 51675487)

作者简介: 孙良(1981—),男,教授,博士,主要从事农业机构设计与优化研究, E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

通信作者: 俞高红(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事农业种植机械设计与机构学研究, E-mail: yugh@zstu.edu.cn

0 引言

栽植机构是移栽机械的核心工作部件^[1]。不同的栽植方式往往需要配置合适的栽植机构,而农作物复杂多样化的农艺要求对低成本、个性化栽植机构的创新设计提出了挑战。因此,开展栽植机构数字化设计与综合研究,对探索发现更多具有优异作业性能的栽植机构构型具有重要意义。

多连杆栽植机构由于具有结构简单、可实现作业轨迹丰富等优势,目前广泛应用于水旱田栽植机械中。现有的多连杆栽植机构存在不同构件数下的多种构型。四杆机构是能满足植苗运动的最简单机构,唐宾等^[2]针对曲柄摇杆式分插机构^[3]运动惯性大、高速作业受限等缺点进行动力学分析,经过优化改进,提高了插秧的工作效率。何小晶等^[4]对双曲柄五杆栽植机构进行了运动学分析,通过人机交互的方式,探究各连杆长度对植苗轨迹的影响,得到一组运动轨迹与姿态良好的栽植机构。金鑫等^[5]添加凸轮构件,设计了一种凸轮-六杆式机构,用于导苗管式移栽机,保证了移栽过程中植苗的垂直姿态。日本对半自动蔬菜移栽机进行相应研究,提出了一种七杆式栽植机构。陈建能等^[6]对七杆式栽植机构进行参数分析与优化,得到一种多杆栽植机构,有立苗率优、加速度及波动范围小的优势。王斌^[7]、郑士永^[8]对多杆开沟式栽植机构使用遗传算法等方式进行设计优化,逐步改良了开沟式植苗机构。为调整栽植频率与整体前进速度的关系,尹文庆等^[9]提出一种八连杆栽植驱动机构,该机构适合蔬菜苗移栽且栽植情况良好。

综上所述,在栽植苗方面,不同杆件数都有其代表的机构,但从目前多连杆机构的应用情况看,栽植机构构型单一;国内学者更多从现有构型的优化设计着手,围绕尺度层面开展优化设计,但实际研究往往会受到构型约束。因此,进行栽植机构的构型综合研究可探索更多潜在可用的机构构型,对机构的创新设计至关重要。

针对以上问题,本文以多连杆栽植机构为研究对象,基于图论和组合优化理论,开展适用于栽植作业的连杆式栽植机构自动综合方法研究,通过对9构件内的拓扑图进行相似点识别^[10-12]、同构判别^[13-14]、功能点(机架、输入与输出点)选取,得到机构功能拓扑图;依据栽植机构运动特征,在拓扑图层面上提出筛选规则,得到特定杆件数下的所有可用构型,建成机构功能拓扑图图库。最后,选取西兰花幼苗栽植的农艺要求作为机构设计的约束条件,从某杆件数下机构功能拓扑图中挑选一种构型,进

行栽植机构参数调试并获得期望轨迹。

1 拓扑图构型综合

拓扑图是点线组成的对实际物体的抽象图形,可准确表示物体内组成部分的连接关系^[15]。在机械设计领域中表示机构连接关系及相关性质的图称为运动链拓扑图。运动链拓扑图上的点,按照一定的规律标注数字。其中,单色拓扑图实心点代表构件,线条代表运动副。图1a所示单铰运动链对应单色拓扑图如图1b所示。

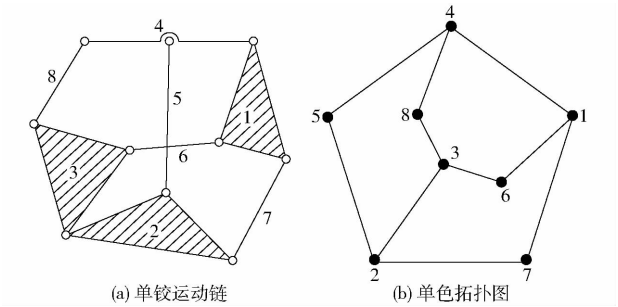


图1 运动链及其对应拓扑图

Fig. 1 Kinematic chain and its topological graph

1.1 构型综合过程

为获取运动链拓扑图,采用胚图插点法^[16-19]综合不可分离单色运动链拓扑图。考虑到多连杆机构在栽植机械中的实际应用要求,主要开展9构件内的连杆机构运动链的综合研究,且设定所有构件均为连杆,所有运动副均为转动副。

为实现栽植机构的创成,在获取拓扑图后,通过对运动链拓扑图选取功能点得到9杆内所有机构功能拓扑图^[20],并使用功能点组表示所选取功能点的位置。图2a所示拓扑图功能点组为(1,4,3)。其中第1位数字表示机架位置点,在拓扑图中用实心圆标注;第2位数字表示输入位置点,在拓扑图中用三角形标注;第3位数字表示输出位置点,在拓扑图中用矩形标注。在功能点选取过程中,由于受拓扑图相似性的影响,存在机构功能拓扑图同构情况。如图2所示,顶点4与顶点5互为相似点,3种功能点位置均相同或相似,因此,图2a与图2b为同构机构功能拓扑图。互为同构的拓扑图,能实现相同的

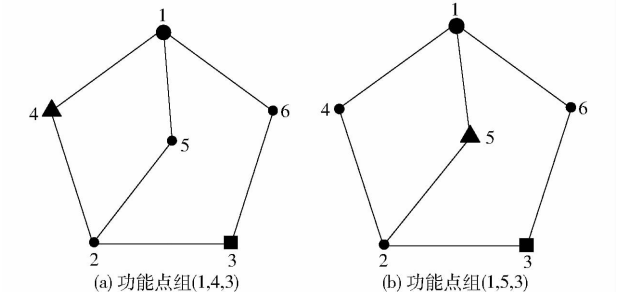


图2 同构的机构功能拓扑图

Fig. 2 Isomorphic mechanism topological graphs

运动效果,需要在拓扑图综合过程中除去。对机构功能拓扑图进行相似点识别与同构判别是避免同构出现的可行方法之一。

1.2 相似性判别及应用

为识别拓扑图中的相似点,判别拓扑图间的同构,提出一种加权四次幂及加权最小距离矩阵的方法。为更好地展示相似点识别的过程,以图3所示七杆式栽植机构^[21]及对应拓扑图为例,阐述相似点识别与同构判断的过程。

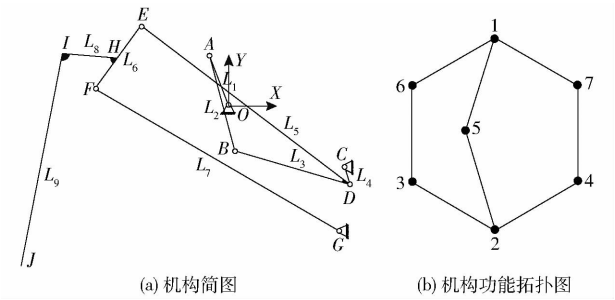


图3 七杆式栽植机构

Fig.3 Transplanting mechanism with seven links

(1)提取拓扑图并获取邻接矩阵

如果顶点*i*与顶点*j*相连,则邻接矩阵*A*中,*i*行*j*列元素*a_{ij}*与*i*列*j*行元素*a_{ji}*为1,即满足

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & (i \text{ 与 } j \text{ 邻接}) \\ 0 & (i \text{ 与 } j \text{ 不邻接}) \end{cases} \quad (1)$$

则图3中机构的邻接矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(2)计算加权矩阵

在拓扑图中,为表征运动副对应线条的特征,可在线条边上赋予数值,即赋权^[22],也称加权。根据邻接矩阵*A*,可将每个顶点度数(即与顶点关联边的数目)的倒数作为加权数,记为本行(列)的元素,元素为0的位置则保持不变,将元素写入矩阵对应位置中,得到加权矩阵。该矩阵组成元素满足

$$a_{ij}^q = \begin{cases} 1/d & (i \text{ 与 } j \text{ 邻接}) \\ 0 & (i \text{ 与 } j \text{ 不邻接}) \end{cases} \quad (2)$$

其中*d*是*i*、*j*两顶点中最大的点度数,*q*表示对元素加权。由此得到的加权邻接矩阵为

$$A^q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.33 & 0.33 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0 & 0 \\ 0 & 0.33 & 0 & 0 & 0 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.50 \\ 0.33 & 0.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0 & 0.50 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0 & 0 & 0.50 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(3)获取加权四次幂矩阵^[23]

计算加权矩阵的四次幂得到

$$(A^q)^4 = \begin{bmatrix} 0.179 & 0.074 & 0.134 & 0.134 & 0.037 & 0.019 & 0.019 \\ 0.074 & 0.179 & 0.019 & 0.019 & 0.037 & 0.134 & 0.134 \\ 0.134 & 0.019 & 0.183 & 0.120 & 0.077 & 0.012 & 0.012 \\ 0.134 & 0.019 & 0.120 & 0.183 & 0.077 & 0.012 & 0.012 \\ 0.037 & 0.037 & 0.077 & 0.077 & 0.099 & 0.077 & 0.077 \\ 0.019 & 0.134 & 0.012 & 0.012 & 0.077 & 0.183 & 0.120 \\ 0.019 & 0.134 & 0.012 & 0.012 & 0.077 & 0.120 & 0.189 \end{bmatrix}$$

(4)计算加权最小距离矩阵

寻找顶点*i*到达顶点*j*所经过的最短路径,并按线条中的赋权值求和得到最小距离元素,记入矩阵中对应位置,得到加权最小距离矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.66 & 0.83 & 0.83 & 0.33 & 0.33 & 0.33 \\ 0.66 & 0 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0.83 & 0.83 \\ 0.83 & 0.33 & 0 & 0.66 & 0.66 & 0.50 & 1.16 \\ 0.83 & 0.33 & 0.66 & 0 & 0.66 & 1.16 & 0.50 \\ 0.33 & 0.33 & 0.66 & 0.66 & 0 & 0.66 & 0.66 \\ 0.33 & 0.83 & 0.50 & 1.16 & 0.66 & 0 & 0.66 \\ 0.33 & 0.83 & 1.16 & 0.50 & 0.66 & 0.66 & 0 \end{bmatrix}$$

(5)相似点的判断规则

提取上述特征矩阵中每行编码组成一组行向量,分别进行降序排列,得到对顶点的两种特征码。特征码表征点在图中的固定位置、连接关系。如果同一拓扑图中两点代表的四次幂特征码与最小距离特征码都相同,则两个点互为相似点,反之,则不是相似点。

例如,为识别顶点1与2和顶点1与3的相似性,分别取加权四次幂矩阵与加权最小距离矩阵第1行、第2行与第3行;均降序排列后,得到顶点1、2、3的两种特征码,如表1所示。

表1 3个顶点的特征码

Tab.1 Feature codes of three vertices

顶点序号	四次幂特征码	最小距离特征码
1	[0.179,0.134,0.134,0.074,0.037,0.019,0.019]	[0.83,0.83,0.66,0.33,0.33,0.33,0]
2	[0.179,0.134,0.134,0.074,0.037,0.019,0.019]	[0.83,0.83,0.66,0.33,0.33,0.33,0]
3	[0.183,0.134,0.120,0.077,0.019,0.012,0.012]	[1.16,0.83,0.66,0.66,0.50,0.33,0]

对比发现,顶点 1 与 2 的特征码相同,顶点 1 与 3 特征码不同,因此,顶点 1 与 2 相似,顶点 1 与 3 不相似。同样,对全部特征码依次对比之后,整理归纳出拓扑图中所有点的相似信息并组成相似点集。如图 3 中拓扑图相似点集为: $\{[1,2];[3,4,6,7];[5]\}$ 。

除顶点相似外,在构型综合过程中,存在大量拓扑图同构问题。如图 4,3 个拓扑图标号或形状不同,但图 4a 中每个顶点都可在图 4b、4c 中找出与之对应的点,3 个拓扑图互为同构。同构是图与图之间的性质相同,而相似点是图中点与点的性质相同,两者有一定的联系,因此,依据相似点的识别方式可以判断拓扑图之间的同构。同构判别的过程是将特征矩阵每行中的元素降序排列之后,再进行行间降序排列^[24]。将变形后拓扑图的特征码矩阵进行对比,矩阵相同即为同构,反之为异构。

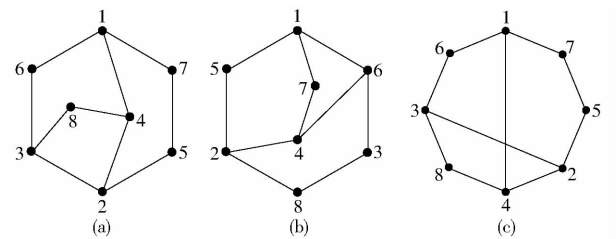


图 4 同构的拓扑图
Fig. 4 Isomorphic topological graphs

2 拓扑图构型筛选

拓扑图中功能点的合理选取是机构创成的关键,为避免因功能点选取而出现基本环中过约束等问题,建立机构筛选规则,以删除此类不合理构型。

2.1 筛选规则

通过构型分析总结,得到拓扑图层面上的筛选规则:

(1) 每个基本环中的自由度 F 必须小于输入构件数 r ,即存在某基本环中 $F < r$ 的环内过约束问题,机构不能运动,应当删去。如图 5 所示,在环 1-6-4-2-1 中,未选取输入点之前,环内自由度 $F = 1$,若在此构型四杆环内选取两个输入位置点,会导致局部自由度等于 -1,构型过约束,此构型存在缺陷应去除。

(2) 当基本环中自由度 F 等于输入杆件数 r 时,则不得同时包含机架位置点、输入位置点与输出位置点 3 种功能点;否则其他环中构件不能对输出杆运动产生影响,此类构件重复多余,机构不合理。如图 6a 所示,当 5、6 为输入位置点时,在环 1-6-3-2-5-1 中自由度等于输入构件数,环内形成独立运动。若 3 作为输出杆时,环内包含 3 种功能点,

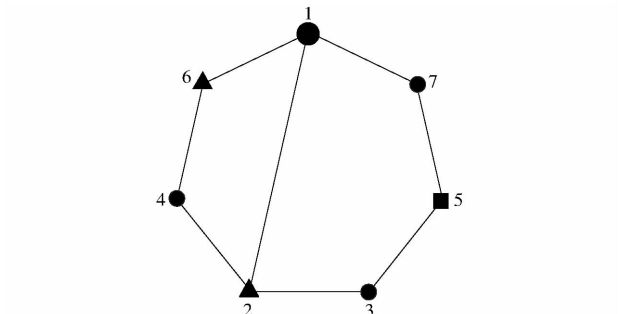


图 5 过约束的机构功能拓扑图
Fig. 5 Overconstrained mechanism topological graph

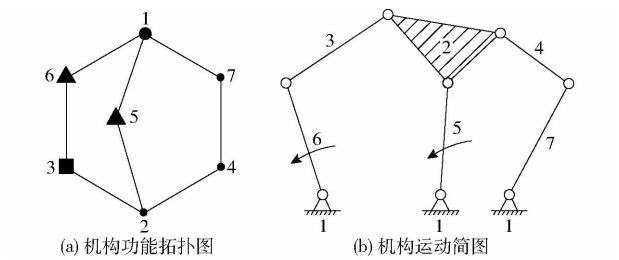


图 6 机构功能拓扑图及对应机构运动简图
Fig. 6 Mechanism topological graph and corresponding kinematic sketch of mechanism

使得杆 4 与杆 7 对输出杆的运动不产生影响,此类构型应当去除。

(3) 为保证输出杆上轨迹不为单一严格的圆形,拓扑图中机架位置点与输出位置点的距离必须大于 1;机架位置点与输入位置点距离必须等于 1。如图 7 所示,机架位置点为 1,输出位置点为 7 时,无论最终植苗点在输出杆上的位置如何改变,静轨迹只能形成机架为圆心的圆或圆弧。

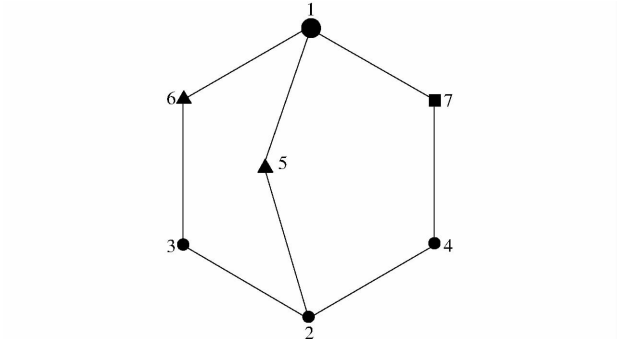


图 7 未满足功能点位置要求的机构功能拓扑图
Fig. 7 Mechanism topological graphs that cannot meet functional point location requirements

2.2 机构功能拓扑图筛选

将筛选规则应用于机构功能拓扑图的创成中,并依据提出的相似点识别方式,将拓扑图顶点的相似关系应用到机构功能拓扑图绘图过程中。具体需要进行 3 次相似性的判断,当邻接矩阵导入计算机之后,首先判断相似点,选择相似点组中的第一个元素(顶点)作为机架位置点,并将邻接矩阵对应位置元素标记为 2。由于筛选规则中机架与输入杆之间

位置关系的限制,要划定当前与机架位置点距离为 1 的点,作为可选输入点。

由于二自由度机构创成过程中相似点特性变异的影响,会存在如图 8 所示九杆二自由度拓扑图特例。通过相似点识别得此图相似点集为 $\{[1]; [2,3]; [4,5,6,7]; [8,9]\}$,在不考虑环内过约束的情况下,若选取点 1 作为机架点,按筛选规则,只能在 $[4,5,6,7]$ 中选取 2 个顶点作为一种输入组合,如选顶点 4、7 为输入点。但实际上,顶点 1 作为机架位置点时,存在 4、7 与 4、6 两组不相似的输入组合。因此,对于多自由度构型,只进行相似点识别会出现输入点组合漏选情况。

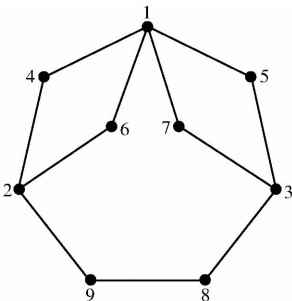


图 8 相似点特例

Fig. 8 Special case of similar vertices

为避免上述问题的出现,在综合过程中,选取输入位置点时,采取先选点、后同构判别的策略。即先对所有输入组合对应构型进行标记,之后对所有构型进行同构判别,筛选掉同构构型,得到可行输入组合。经程序实践验证,此方法可有效避免以上错误情况的出现。

同理,对已标记机架与输入位置点的构型识别相似点并选取输出点位置。对应整理 3 种功能点位置,组成功能点组。其中,多自由度构型中,中间位置数字表示多输入位置点序号。如图 7 所示七杆二自由度构型中,功能点组合为 $(1,5,6,7)$,其中点 1 为机架位置点,点 5、6 为双输入位置点,点 7 为输出位置点。机构功能拓扑图筛选流程图如图 9 所示。

2.3 机构创新构型选取

经过上述筛选过程,得到机构功能拓扑图图库。为验证筛选构型的正确性,以七杆二自由度机构为例,进行栽植苗机构的创新设计。列举所有七杆二自由度构型,共得出 14 组筛选结果。在该类新机构的分析中选取一种与日本井关半自动蔬菜移栽机构(图 10a)不同的构型,即图 10b 所示机构功能拓扑图。9 杆内机构功能拓扑图筛选结果如表 2 所示。

3 栽植机构应用实例

使用选取的七杆二自由度构型,对其中构件赋

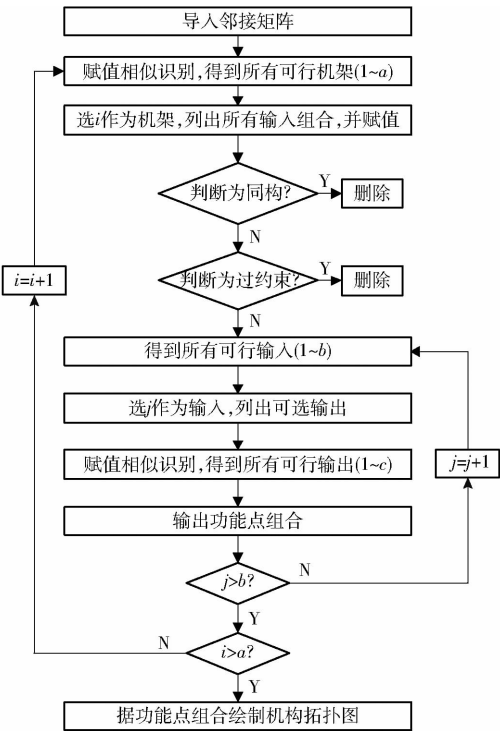


图 9 机构功能拓扑图筛选流程图

Fig. 9 Flow chart of screening mechanism topological graph

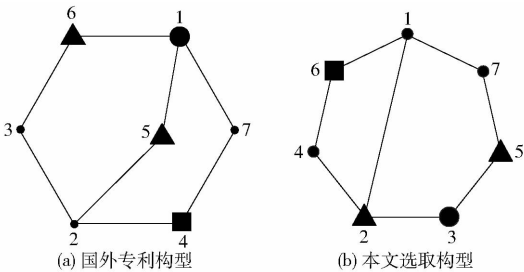


图 10 两种七杆二自由度构型筛选结果

Fig. 10 Two seven-link two-DOF screen results

表 2 9 杆内机构功能拓扑图筛选结果

Tab.2 Screen results of mechanism topological graph in 9-link

杆数	拓扑图数	筛选结果
6	2	14
7	3	17
8	16	510
9	35	917

予长度,得到末端输出位置的轨迹,调整杆长等条件达到植苗要求。理论上,得到的所有构型均可调整得到可行轨迹。但由于拓扑图不展示杆件长度等信息,在转换为实际机构过程中,机构可能会存在回路缺陷。因此为验证机构功能拓扑图的可用性,本文在 6、7、8 杆构型库中各选取一种筛选结果,进行实例分析。

以西兰花幼苗作为栽植对象,进行栽植苗机构设计。为满足有效零速投苗^[25]与作物大株距植苗运动轨迹参数需求^[26-28],现规定基本的园艺要求:

株距设定为 450 mm; 植苗深度不小于 30 mm; 夹嘴植苗位置进入地面和离开地面与前进方向地面夹角至少保证在 70°~110°之间; 夹嘴植苗最低点与前进方向地面夹角在 80°~100°之间。

3.1 机构运动学分析与模型建立

以七杆二自由度机构为例, 阐述构型转换为机构的方法与过程。为方便运动学分析, 将机构简图中相关参数说明列于表 3 中。

表 3 机构简图相关参数说明

Tab.3 Parameters description of mechanism diagram			
符号	含意	符号	含意
L_{OA}	杆 1 OA 长度	θ_1	曲柄 OA 初始相位角
L_{OB}	杆 1 OB 长度	θ_2	连杆 AC 角位移
L_{AC}	杆 2 AC 长度	θ_3	连杆 CD 角位移
L_{AG}	杆 2 AG 长度	θ_4	连杆 GF 角位移
L_3	连杆 CD 长度	θ_5	曲柄 ED 初始相位角
L_4	连杆 GF 长度	θ_6	连杆 FB 角位移
L_5	曲柄 ED 长度	θ_{HI}	连杆 GF 与 HI 夹角
L_6	连杆 FB 长度	θ_{IJ}	连杆 HI 与 IJ 夹角
L_{HI}	末端杆 HI 长度	L_{IJ}	末端杆 IJ 长度
α	曲柄 OA 与 OB 夹角	β	连杆 AC 与 AG 夹角
X_E	点 E 横坐标	Y_E	点 E 纵坐标
b_{HI}	连杆 HI 与 X 轴夹角	b_{IJ}	连杆 IJ 与 X 轴夹角
H	连杆 GF 中点	J	栽植点
n	输入构件转速	h	株距

图 11 为图 10b 所对应的七杆二自由度机构简图。建立如图所示平面参考系, 设构件 1 和 5 为机构输入构件, 且具有相同速度 (大小和方向)。

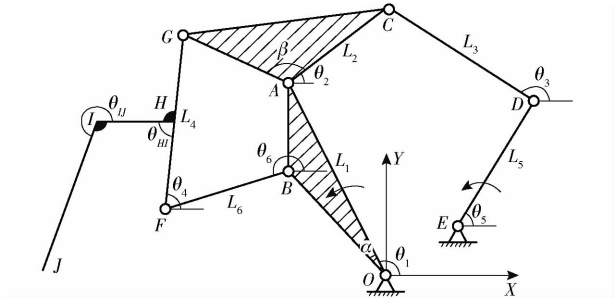


图 11 机构运动简图

Fig. 11 Kinematic sketch of mechanism

依据机构运动简图, 初步建立基本环矢量方程

$$\boldsymbol{L}_{OA} + \boldsymbol{L}_{AC} = \boldsymbol{L}_{OE} + \boldsymbol{L}_{ED} + \boldsymbol{L}_{DC} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{L}_{OA} + \boldsymbol{L}_{AG} = \boldsymbol{L}_{OB} + \boldsymbol{L}_{BF} + \boldsymbol{L}_{FG} \tag{4}$$

将矢量方程转化为解析式形式

$$\begin{cases} L_{OA}\cos\theta_1 + L_{AC}\cos\theta_2 = X_E + L_5\cos\theta_5 + L_3\cos\theta_3 \\ L_{OA}\sin\theta_1 + L_{AC}\sin\theta_2 = Y_E + L_5\sin\theta_5 + L_3\sin\theta_3 \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} L_{OA}\cos\theta_1 + L_{AC}\cos(\theta_2 + \beta) = \\ L_{OB}\cos(\theta_1 + \alpha) + L_6\cos\theta_6 + L_4\cos\theta_4 \\ L_{OA}\sin\theta_1 + L_{AC}\sin(\theta_2 + \beta) = \\ L_{OB}\sin(\theta_1 + \alpha) + L_6\sin\theta_6 + L_4\sin\theta_4 \end{cases} \tag{6}$$

列出栽植点 J 静轨迹方程为

$$\begin{cases} x_J = L_{OB}\cos(\theta_1 + \alpha) + L_6\cos\theta_6 + \\ 0.5L_4\cos\theta_4 + L_{HI}\cos b_{HI} + L_{IJ}\cos b_{IJ} \\ y_J = L_{OB}\sin(\theta_1 + \alpha) + L_6\sin\theta_6 + \\ 0.5L_4\sin\theta_4 + L_{HI}\sin b_{HI} + L_{IJ}\sin b_{IJ} \end{cases} \tag{7}$$

3.2 新型机构参数与仿真结果

基于上述运动学模型, 编写辅助设计程序^[29-31], 优化获得新型七杆二自由度栽植机构参数如下: $L_{OA} = 75\text{ mm}$, $\theta_1 = 40^\circ$, $L_5 = 54\text{ mm}$, $\theta_5 = 50^\circ$, $L_{AC} = 75\text{ mm}$, $L_{OB} = 56\text{ mm}$, $L_6 = 93.5\text{ mm}$, $L_4 = 56\text{ mm}$, $L_{AG} = 128.1\text{ mm}$, $L_3 = 63.1\text{ mm}$, $L_{IJ} = 200\text{ mm}$, $\theta_{IJ} = 300^\circ$, $L_{HI} = 240\text{ mm}$, $\theta_{HI} = 230^\circ$, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 169.1^\circ$, $X_E = 44.9\text{ mm}$, $Y_E = -27.7\text{ mm}$, $n = 1\text{ r/s}$, $h = 450\text{ mm}$ 。

上述参数对应机构静、动轨迹如图 12 所示。

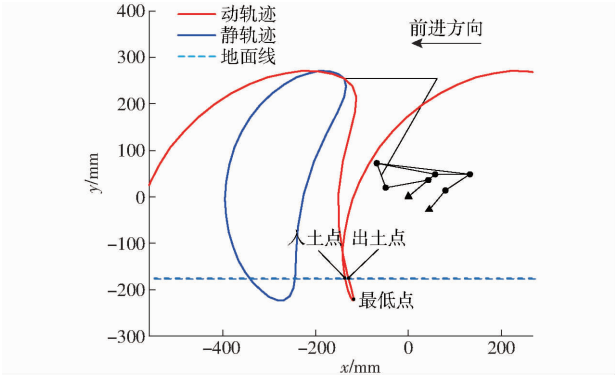


图 12 七杆栽植机构理论轨迹

Fig. 12 Seven-link theoretical result

该机构株距 $h = 450\text{ mm}$; 前进方向地面与夹嘴植苗最低点夹角 $\alpha_1 = 88^\circ$; 前进方向与夹嘴植苗入土点夹角 $\alpha_2 = 83.1^\circ$; 与出土点夹角 $\alpha_3 = 85.3^\circ$; 植苗最低点与地面距离, 即植苗深度 $l = 32\text{ mm}$, 基本满足西兰花植苗所需园艺要求。图 13 所示为机构仿真轨迹, 其与理论轨迹一致, 进一步验证了机构设计的正确性。

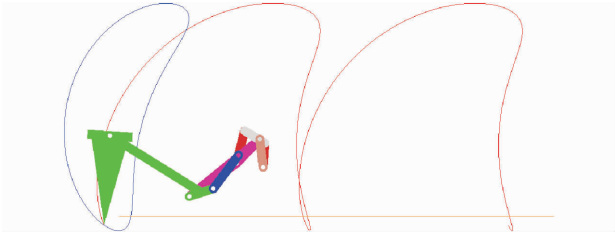


图 13 七杆栽植机构仿真轨迹

Fig. 13 Simulation result of seven-link planting mechanism

同样, 对六杆一自由度机构及八杆一自由度进行综合, 并各选一种构型进行栽植机构运动学建模与仿真分析, 结果如图 14、15 所示。其中, 株距均为 450 mm; 距离植苗最低点均为 32 mm; 其他运动参数均满足西兰花幼苗植苗的园艺要求。

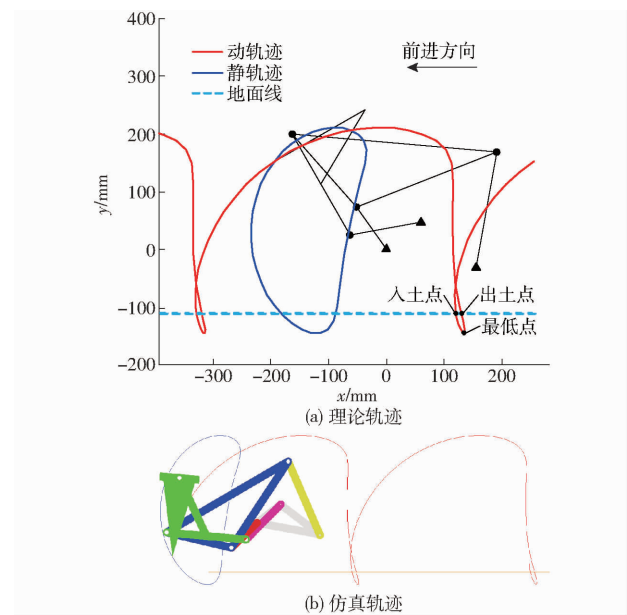


图 14 六杆机构理论与仿真轨迹

Fig. 14 Six-link theoretical result and simulation result

4 结论

- (1)为使栽植机构设计满足复杂多样化农艺要求,通过基于相似点识别及特征码信息的同构判别与功能点选取的多连杆机构创成方式,综合并构建 6 至 9 杆的多连杆机构构型库。
- (2)结合机构运动要求,建立了拓扑图层面机

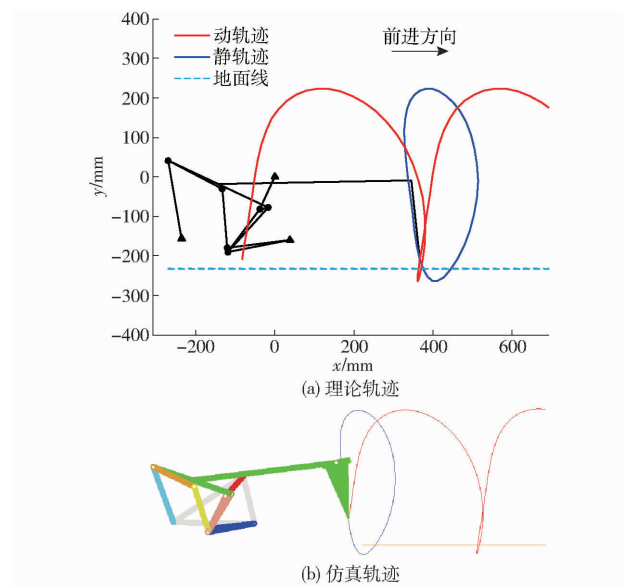


图 15 八杆栽植机构理论与仿真轨迹

Fig. 15 Eight-link theoretical result and simulation result

构功能拓扑图的筛选规则,并在构型库中筛选出适合于栽植机构设计的六杆一自由度机构 14 个,七杆二自由度机构 17 个,八杆一自由度机构 510 个,九杆二自由度机构 917 个。

- (3)依据西兰花幼苗栽植农艺要求,在机构功能拓扑图图库中选择 3 种不同于现存机构的构型。通过运动学建模及参数优选,得到符合期望要求的运动轨迹,验证了栽植机构构型综合方法的正确性。

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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. (in Chinese)

[2] 唐宾,时胜德. 曲柄摇杆式分插机构的动力学分析[J]. 农机化研究, 2009, 31(10): 52-56.
TANG Bin, SHI Shengde. Dynamic analysis of crank-rocker-type plug-in mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(10): 52-56. (in Chinese)

[3] 陈建能,赵匀. 水稻插秧机分插机构的研究进展[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 23-27.
CHEN Jianneng, ZHAO Yun. Research advances in transplanting mechanism of rice transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 23-27. (in Chinese)

[4] 何小晶,孙新城,陈建能,等. 双曲柄五杆栽植机构运动学分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 198-204.
HE Xiaojing, SUN Xincheng, CHEN Jianneng, et al. Kinematic analysis on double crank five-link planting mechanism[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2016, 35(2): 198-204. (in Chinese)

[5] 金鑫,姬江涛,杨传华,等. 凸轮-六杆式导苗机构设计及仿真[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 137-144.
JIN Xin, JI Jiangtao, YANG Chuanhua, et al. Design and simulation of cam-six rod pilot mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 137-144. (in Chinese)

[6] 陈建能,王伯鸿,张翔,等. 多杆式零速度钵苗移栽机植苗机构运动学模型与参数分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 7-12.
CHEN Jianneng, WANG Bohong, ZHANG Xiang, et al. Kinematics modeling and characteristic analysis of multi-linkage transplanting mechanism of pot seeding transplanter with zero speed[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 7-12. (in Chinese)

[7] 王斌. 开沟式栽植机构的优化设计与试验分析[D]. 杭州:浙江理工大学, 2019.
WANG Bin. Optimization design and test analysis of ditching planting mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019. (in Chinese)

[8] 郑士永. 多杆扶苗式开沟栽植机构的设计与试验分析[D]. 杭州:浙江理工大学, 2017.
ZHENG Shiyong. Design and test analysis of multi rod supporting seedling planting mechanism of ditching[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)

[9] 尹文庆,刘海马,胡飞,等. 旱地栽植机八连杆栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 51-60.
YIN Wenqing, LIU Haima, HU Fei, et al. Optimization design and experiment on eight-linkage planting mechanism of dryland

- transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 51–60. (in Chinese)
- [10] SUN L, CUI R, YANG W, et al. Automatic synthesis of the complete set of contracted graphs for planar kinematic chains with up to seven independent loops[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 156: 104144.
- [11] DING H, HOU F, KECSKEMÉTHY A, et al. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(11): 1588–1600.
- [12] DING H, ZI B, HUANG P, et al. The whole family of kinematic structures for planar 2- and 3-DOF fractionated kinematic chains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 70: 74–90.
- [13] RAJNEESH K R. A new algorithm of links labelling for the isomorphism detection of various kinematic chains using binary code[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 131: 1–32.
- [14] RAJNEESH K R, SUNIL P. Kinematic chains isomorphism identification using link connectivity number and entropy neglecting tolerance and clearance[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 123: 40–65.
- [15] 卢开澄. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984: 3–20.
- [16] DING H, HUANG P, YANG W, et al. Automatic generation of the complete set of planar kinematic chains with up to six independent loops and up to 19 links[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 75–93.
- [17] YANG W, DING H, KECSKEMÉTHY A, et al. A new method for the automatic sketching of planar kinematic chains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 121: 755–768.
- [18] YANG W, DING H, LAI X, et al. Automatic synthesis of planar simple joint mechanisms with up to 19 links[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 113: 193–207.
- [19] 丁华锋, 黄真, 刘力改, 等. 运动链拓扑图绘制及特征描述获取的计算机实现[J]. 燕山大学学报, 2006, 30(1): 10–13. DING Huafeng, HUANG Zhen, LIU Ligai, et al. Computerized sketching of topological graphs of kinematic chains and obtaining of characteristic representations[J]. Journal of Yanshan University, 2006, 30(1): 10–13. (in Chinese)
- [20] 卢副伟. 基于图论的凿岩机器人钻臂机构构型综合与创新设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019. LU Fuwei. Structural synthesis and innovative design of drilling arm mechanism of rock drilling robot based on graph theory [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 褚金奎, 张然, 邹炎火. 平面机构拓扑结构理论及在机构创新设计中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 13–18.
- [23] SUN L, CUI R, YE Z, et al. Similarity recognition and isomorphism identification of planar kinematic chains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 145: 103678.
- [24] HE L, LIU F, SUN L, et al. Isomorphic identification for kinematic chains using variable high-order adjacency link values[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(10): 4899–4907.
- [25] 付鹏洋, 胡建平, 刘发, 等. 齿轮连杆凸轮组合式栽植机构仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 52–56. FU Pengyang, HU Jianping, LIU Fa, et al. Simulation analysis and experiment for gear-linkage-cam combination planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 52–56. (in Chinese)
- [26] 俞高红, 廖振飘, 徐乐辉, 等. 大株距行星轮系蔬菜钵苗栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 38–44. YU Gaohong, LIAO Zhenpiao, XU Lehui, et al. Optimization design and test of large spacing planetary gear train for vegetable pot-seedling planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 38–44. (in Chinese)
- [27] 尹大庆, 张诺一, 周脉乐, 等. 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 65–72. YIN Daqing, ZHANG Nuoyi, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 65–72. (in Chinese)
- [28] 陈建能, 王伯鸿, 任根勇, 等. 蔬菜移栽机放苗机构运动学模型建立与参数分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 48–53. CHEN Jianneng, WANG Bohong, REN Genyong, et al. Kinematics modeling and parameters analysis of seven-linkage vegetable seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 48–53. (in Chinese)
- [29] 肖名涛, 孙松林, 罗海峰, 等. 双平行多杆栽植机构运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 25–33. XIAO Mingtao, SUN Songlin, LUO Haifeng, et al. Kinematic analysis and experiment of dual parallelogram multi-pole planting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 25–33. (in Chinese)
- [30] 廖庆喜, 刘明峰, 张照, 等. 油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 49–56. LIAO Qingxi, LIU Mingfeng, ZHANG Zhao, et al. Multi-objective optimization design of double five-link transplanting mechanism for rape pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 49–56. (in Chinese)
- [31] 胡建平, 潘杰, 张晨迪, 等. 行星轮栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 78–86. HU Jianping, PAN Jie, ZHANG Chendi, et al. Optimization design and experiment on planetary gears planting mechanism of self-propelled transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 78–86. (in Chinese)