

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2026.04.004

伍亚牛, 刘向东, 张佳喜, 等. 果园升降平台机械臂优化设计与运动学分析[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(4): 22-30

Wu Yaniu, Liu Xiangdong, Zhang Jiayi, et al. Optimization design and kinematics analysis of the robot arm of orchard lifting platform [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(4): 22-30

果园升降平台机械臂优化设计与运动学分析*

伍亚牛¹, 刘向东², 张佳喜¹, 张平³, 吴亚铖⁴

- (1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐市, 830052; 2. 新疆理工学院机电工程学院, 新疆阿克苏, 843100; 3. 新疆农业科学院农产品贮藏加工所, 乌鲁木齐市, 830091; 4. 塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆阿拉尔, 843000)

摘要:为使果园升降平台作业空间满足南疆核桃果园作业要求,根据园内核桃树的栽培模式与树形参数,对折臂式升降装置进行优化设计、计算与仿真。通过分析机械设备升降作业要求和树冠对作业空间的限制条件,建立尺寸优化设计数学模型;在此基础上,基于 D—H(Denavit—Hartenberg)参数法建立折臂式升降装置的连杆坐标系,利用 MATLAB 软件中的 Robotics Toolbox 对升降装置建立仿真模型,并对升降装置进行正向、逆向运动学分析;采用蒙特卡洛法模拟出升降装置的工作空间,并对升降装置进行轨迹规划仿真和分析。理论分析和仿真结果表明,优化后的折臂式果园升降装置结构合理,工作空间高度为 980~4 728 mm,符合果园作业任务要求,为后续物理样机的设计制造和升降装置动力学分析提供理论依据。

关键词:果园;升降平台;机械臂;优化设计;运动学分析;工作空间;轨迹规划

中图分类号:S224 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2026)04-0022-09

Optimization design and kinematics analysis of the robot arm of orchard lifting platform

Wu Yaniu¹, Liu Xiangdong², Zhang Jiayi¹, Zhang Ping³, Wu Yacheng⁴

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, 830052, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Aksu, 843100, China;
3. Institute of Agro-Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, 830091, China;
4. College of Mechanical Electrification Engineering, Tarim University, Alar, 843000, China)

Abstract: In order to make the working space of orchard lifting platform meet the working requirements of walnut orchard in southern Xinjiang, according to the cultivation mode and tree parameters of peach trees in the orchard, the optimal design, calculation and simulation of the half-arm lifting device were carried out. By analyzing the requirements of mechanical equipment lifting operation and the constraints of crown on working space, a mathematical model of size optimization design is established. On this basis, based on D—H(Denavit—Hartenberg) parameter method, the linkage coordinate system of the folding arm lifting device is established, and the simulation model of the lifting device is established by using Robotics Toolbox in Matlab software, and the forward and reverse kinematics analysis of the lifting device is carried out. The workspace of the lifting device is simulated by Monte Carlo method, and the trajectory planning simulation and analysis of the lifting device are carried out. Theoretical analysis and simulation results show that the optimized folding arm orchard lifting device has a reasonable structure. The height of the working space is 980—4 728 mm, which meets the requirements of orchard operation tasks and provides a theoretical basis for the subsequent design and manufacture of the physical prototype and the dynamic analysis of the lifting device.

Keywords: orchard; lifting platform; robot arm; optimization design; kinematics analysis; work space; trajectory planning

收稿日期:2024 年 7 月 23 日 修回日期:2025 年 2 月 19 日

* 基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1000102);新疆维吾尔自治区“天山英才”计划(新人社函[2021]37 号)

第一作者:伍亚牛,男,1997 年生,安徽安庆人,硕士研究生;研究方向为农业机械化。E-mail: 3130338497@qq.com

通讯作者:刘向东,男,1980 年生,新疆阿克苏人,博士,教授;研究方向为农业机械化。E-mail: iceast@foxmail.com

0 引言

新疆素有“瓜果之乡”的美誉,果树种类繁多,拥有丰富的林果资源^[1]。目前,新疆林果业生产已发展为农民脱贫致富的一条重要渠道,也是推进乡村振兴的有力支撑。在果园管理过程中,果实采摘和果树修剪等环节均属于劳动密集型作业,主要依靠果农攀爬树木或搭建扶梯来完成^[2]。传统的人工作业方式不仅劳动强度高、工作效率低,还容易造成果农高空坠落,产生大量的劳务纠纷^[3]。另外,人工劳动成本持续上升,进一步增大了林果机械化作业需求^[4]。现有的剪叉式升降平台作业空间难以满足修剪、采收的作业要求,而折臂式升降平台灵活的机械臂极大地拓展了平台作业空间,使设备可用于辅助人工管理果园,现已取得一定成效。

与工业折臂式升降平台作业场地相比,果树树冠空间限定了折臂式果园升降平台工作机构的作业空间。升降装置作为折臂式升降平台的主要执行部件,需要在较为狭窄的果园环境中将工作人员升至作业位置,而目前现有的工业折臂式升降平台体积大,不利于机械化操作^[5]。因此,升降装置的尺寸优化和运动学分析在折臂式果园升降平台的设计中占据重要地位。Solazzi等^[6]提出利用复合材料制造升降作业平台的机械臂,以减少机具工作机构质量。Celik等^[7]将一种基于计算机辅助设计和工程应用的设计算法用于牵引式升降机构臂架部件结构优化,使其达到减小机械臂质量、降低生产成本的目标。Zahid等^[8]将串联机械臂安装在移动平台上,并列移动平台和机械臂的运动学方程,实现机械臂工作空间的可视化和轨迹规划。针对作业平台机械臂参数优化和运动学分析方面,国内相关研究人员进行深入研究。李纯金等^[9]采用遗传算法对折臂机构的铰点位置进行优化,使液压油缸的最大受力得到明显降低;宋云飞等^[10]结合折臂式机构工作空间分析,对各构件的长度进行优化,提高机器的工作效率;李自贵等^[11]运用Adams/View软件建立参数化模型,对折臂式举升机构进行优化并仿真,改善工作机构的受力情况;高崇仁等^[12]提出应用响应面法对臂架变幅机构铰点位置进行优化设计,提高整机工作性能;崔永杰等^[13]对猕猴桃采摘平台建立开链运动模型,并采用蒙特卡洛法进行采摘平台工作空间分析,为后续设计方案提供理论基础;赵玲亚等^[14]通过D—H法建立水果采摘设备各连杆坐标系,并推导出正、逆运动学方程,为进一步研究提供理论依据。

综上所述,对折臂式升降装置进行优化设计,一般以机械臂的“最小受力情况”和“最小质量”等目标建立优化函数并求解,且目前针对农业使用的折臂式果园

升降平台研究相对较少。因此,本文结合非标准化果园作业环境的特点,建立升降装置整体数学模型,并对升降装置的尺寸进行优化设计,使各段机械臂长度之和最小,并进行作业空间的求解和轨迹规划。

1 折臂式升降装置结构设计与分析

1.1 整机结构

折臂式果园升降作业平台的三维模型如图1所示,整机主要由履带式底盘、回转机构、升降机构、连杆机构、载人工作台、支撑架等组成。回转机构可以实现360°旋转。履带式驱动底盘与地面接触面积大,可以有效防止果园土壤硬化,其结构使底盘拥有较强的通过性,从而可以满足各种复杂的果园地形^[15,16]。

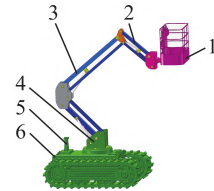


图1 折臂式果园升降作业平台三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of folding arm orchard lifting platform

1. 载人工作台 2. 连杆机构 3. 升降机构 4. 回转机构
5. 支撑架 6. 履带式底盘

工作时,履带式底盘内部的电池组提供动力来源,驱动行走机构使自身到达果园株间工作位置。升降机构通过液压控制系统调整载人工作平台的上升高度,由3组平行四边形连杆机构对载人工作平台进行自动调平,保持作业过程平稳。

1.2 升降作业范围

以新疆阿克苏地区核桃示范园作为研究对象,如图2所示,核桃园场景特征如下:(1)果园平均行距和株距为6 m和5 m,树木平均高度为9 m,平均冠幅为5.6 m,最低端侧枝平均离地高度为1.2 m。(2)由于工作人员自身和手中所持工具均可达到一定高度,且树木顶端部分无需作业处理,因此,设折臂式升降平台所能举升到的最大离地高度为4.5 m。(3)核桃园内土地较为平整,可视为平面。

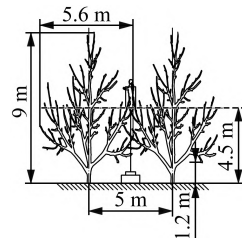


图2 升降作业正视图

Fig. 2 Elevation view of lifting operation

果园升降平台作业范围如图3所示,两个虚线圆

表示相邻两棵果树树冠,两圆的半径均为平均冠径的一半,其值为2.8 m,株距为5 m。机具的底座距果树植株中心为行距的一半,即3 m。图3是以俯视视角分析折臂式升降平台作业范围。虽然果树的树冠覆盖范围较广,但果园行距较大,机具能够在行间中部行驶。当机具停驻于株间中部时,工作人员可在两棵果树之间进行作业,不仅可以通过折臂式升降机构灵活避障,具有较大的作业半径,还可以利用回转机构对行间和株间两侧的树进行先后作业。若需满足作业范围,则折臂式机构伸出距离最远时,工作人员所使用工具的末端必须能够达到树体中心位置。由此可求出图3中机具中心离两棵果树中心的距离均为3.9 m。

假设工具长度为2 m,载人工作平台的长度为0.5 m,则升降装置机械臂需伸出的长度为1.4 m。从图3可以看出,半径为3.9 m的圆表示工具末端必须能达到的最远距离,半径为1.4 m的圆代表在满足作业范围的情况下,机械臂需伸出的长度。

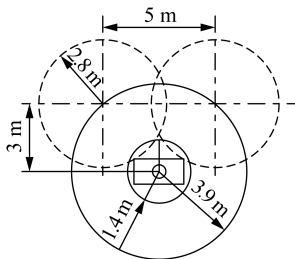


图3 升降作业俯视图

Fig. 3 Top view of lifting operation

综上,机械臂需举升的最大高度为距离地面4.5 m处,并且在任何高度位置,其作业半径需达到1.4 m,当满足此作业范围时,可通过升降装置的回转机构绕其底座转动相应的角度,则满足空间作业范围要求。

1.3 升降装置结构

折臂式升降装置结构如图4所示,主要由回转底座、下臂液压缸、下臂拉杆、作业下臂、下铰接板、上臂液压缸、作业上臂、上臂拉杆、连接架、飞臂、飞臂拉杆、飞臂变幅液压缸、上铰接板、连接块等组成。通过控制不同变幅液压缸伸缩来依次带动与之相连的机械臂等结构,以此将载人工作平台举升至指定高度。

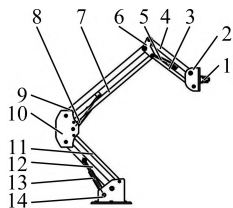


图4 折臂式升降装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of folding arm lifting device

1. 连接块 2. 上铰接板 3. 飞臂拉杆 4. 飞臂 5. 飞臂变幅液压缸
6. 连接架 7. 上臂拉杆 8. 上臂液压缸 9. 作业上臂 10. 下铰接板
11. 下臂拉杆 12. 作业下臂 13. 下臂液压缸 14. 回转底座

结合图1和图4可知,折臂式升降装置的结构为关节串联式空间开链型机构。果园工作平台升降装置的空间开链结构共有4个转动关节,在调平机构末端安装了载人工作台。在操作机具时,通过对作业上臂、作业下臂和飞臂的调节,实现载人工作台的升降。

2 机械臂尺寸优化设计

2.1 优化参数的确定

在 XOZ 平面内,以地面水平线为 X 轴,机具中心所在的竖直直线为 Z 轴,建立机具作业简化模型,如图5所示,升降机构位于机具的上半部分,其底部离地面 $f=600$ mm,设升降底座的高度为 h 。已知整机的中心离果树中心的距离 $D=3\ 000$ mm,机具最大升降高度 $H=4\ 500$ mm,在任何高度下最大作业半径至少需要达到 $R_{\max}=1\ 400$ mm。令作业下臂的转角为 σ ,作业上臂的转角为 β ,当机具处于完全折叠情况时, $\sigma=\beta=0^\circ$ 。在一般作业过程中,飞臂处于水平状态。在图5中,虚线表示作业下臂的初始状态,与升降底座正好构成矩形的2个邻边,阴影部分则表示这个矩形所在的区域。

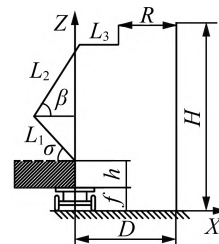


图5 目标作业空间主视图

Fig. 5 Main view of the target workspace

由于飞臂处于水平状态时,本身的长度对机械臂末端点可达区域的范围大小并无影响,仅影响其可达区域的相对位置,故结合图5,利用MATLAB绘制出作业上臂和作业下臂在平面范围内工作空间离散点分布图,如图6所示,其中黑线表示作业下臂,绿线表示作业上臂, X 轴表示地面。

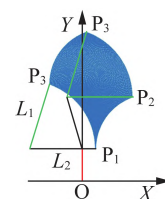


图6 机械臂工作空间离散点分布图

Fig. 6 Distribution diagram of discrete points

in workspace of manipulator

在图6中, P_1 点的垂直高度为机具初始情况下的最高高度,此时作业上臂和作业下臂均处于完全折叠状态,也是升降机构在通常作业过程中达到的最低高度,其

值等于 f 与 h 之和。当作业下臂处于水平状态,而作业上臂处于完全展开状态时,作业上臂的转角 β 达到最大值,其末端点为 P_4 ;当两机械臂均处于最大伸展状态时,两臂的转角均达到最大,作业上臂的末端点为 P_3 ;当作业下臂完全展开,作业上臂处于水平状态时,作业下臂的转角 σ 达到最大值,作业上臂的末端点为 P_2 。由图 6 可知,当飞臂保持水平状态时,为了满足机具的工作要求,只需最低点处大于一定的作业半径,且最高点处大于作业高度 H 和一定的作业半径,则其余各处均可以达到所需的工作区域。

结合图 5 和图 6,根据折臂式果园升降平台对树体的作业要求,升降机构共有 6 个优化尺寸变量,分别为:作业下臂长度 L_1 、作业上臂长度 L_2 、飞臂长度 L_3 、升降底座高度 h 、作业下臂的转角最大值 σ_{\max} 、作业上臂的转角为 β_{\max} 。将 L_1 、 L_2 、 L_3 、 h 、 σ_{\max} 、 β_{\max} 作为优化设计变量,得到变量矩阵 X 如式(1)所示。

$$X = [x(1), x(2), x(3), x(4), x(5), x(6)]^T \\ = [L_1, L_2, L_3, h, \sigma_{\max}, \beta_{\max}]^T \quad (1)$$

2.2 建立目标函数

针对非标准化果园中的作业环境,以保证折臂式升降机构在工作空间内安全、可靠地完成相关作业任务为目标,根据设计要求建立所需的目标函数,采用多目标优化方式对升降装置各部分的尺寸进行优化。在满足作业要求的情况下,定义完全折叠时阴影部分的面积为目标函数,使折臂式升降装置在初始状态下所占的空间尽量小。因此,优化目标函数如式(2)所示。

$$f_1(X) = \min S_{\text{阴影}} = \min (h \times L_1) \quad (2)$$

式中: $S_{\text{阴影}}$ ——图 5 中阴影部分的面积。

同时,为减轻折臂式果园升降平台的升降装置的质量,在满足机具的工作要求前提下机械臂及其他构件的结构尺寸应尽量小,即升降装置的构件长度之和应达到最小。因此,可将升降装置的各构件的总长度最小作为优化目标函数,如式(3)所示。

$$f_2(X) = \min (L_1 + L_2 + L_3 + h) \quad (3)$$

确定上述 2 个目标函数后,可以通过对 2 个目标函数进行分别加权,将 2 个优化目标函数转化为单一目标优化函数,即依据各目标函数的重要程度给予权重系数,组成一个新的目标函数^[17],如式(4)所示。

$$f_3(X) = \min [w_1 \cdot f_1(X) + w_2 \cdot f_2(X)] \quad (4)$$

式中: w_1 、 w_2 —— $f_1(X)$ 、 $f_2(X)$ 相对于统一目标函数 $f_3(X)$ 的权重。

由于在实际制造中,构件的长度对整体机构质量的减轻作用十分有限,目标函数式(2)的权重系数较低^[18],因此,此处取 $w_1=0.6$, $w_2=0.4$ 。

2.3 约束条件

在优化设计过程中,约束条件一般依据设定要求给定的结构参数范围列出相应的等式或不等式^[19]。对折臂式升降装置进行优化时,要综合考虑其作业空间约束、结构约束和行程约束等。

1) 为保证折臂式果园升降平台工作机构最大升降高度 $H \geq 4\ 500$ mm。结合图 5 建立果园升降作业平台最大离地高度约束函数,如式(5)所示。

$$G_1(X) = f + h + L_1 \sin \sigma_{\max} + L_2 \sin \beta_{\max} \geq H \quad (5)$$

2) 为保证折臂式果园升降平台工作机构所需最大作业半径 $R_{\max}=1\ 400$ mm。结合图 5 对折臂式果园升降平台最大作业半径建立优化约束函数,如式(6)所示。

$$G_2(X) = -L_1 \cos \sigma_{\max} + L_2 \cos \beta_{\max} + L_3 \geq R_{\max} \quad (6)$$

3) 由图 1 可知,从整机结构上看,作业上臂的长度应大于作业下臂的长度,为避免两机械臂互相干涉,故令两者差值大于 400 mm。结合图 5 对折臂式升降机构杆长差值建立优化约束函数,如式(7)所示。

$$G_3(X) = L_2 - L_1 \geq 400 \text{ mm} \quad (7)$$

4) 根据图 2 和图 3 可知,为使机具在林间行驶时尽量不与树体相接触,则须使机具在折叠状态时的高度小于树体最低端侧枝的平均高度。在此基础上,对整机的高度建立优化约束函数,如式(8)所示。

$$G_4(X) = f + h \leq 1\ 200 \text{ mm} \quad (8)$$

5) 结合图 1 和图 5 可知,为使机具在初始状态下,其飞臂末端与地面保持一定的距离,取此距离的最小值为 200 mm,则对整机的结构建立优化约束函数,如式(9)所示。

$$G_5(X) = f + h - L_3 \geq 200 \text{ mm} \quad (9)$$

6) 根据折臂式果园作业平台底盘的尺寸和升降机构布置要求,同时为达到果园升降作业平台的作业高度与半径等设计技术指标,在优化设计中需给定各机械臂长度和升降底座高度的允许变化范围,如表 1 所示。另外,通过查阅折臂式升降平台的相关资料发现,作业上臂和作业下臂的转角为 $0^\circ \sim 70^\circ$,故设定此取值范围。

表 1 各变量的初值及允许变化范围

Tab. 1 Initial value and allowable range of each variable

变量	初始值	变化范围
作业下臂长度/mm	2 000	(1 000, 2 300)
作业上臂长度/mm	2 500	(2 400, 3 000)
飞臂长度/mm	820	(600, 1 000)
升降底座高度/mm	420	(300, 600)
作业下臂转角/(°)	70	(0, 70)
作业上臂转角/(°)	60	(0, 70)

2.4 最优参数的求解

果园升降作业平台的升降装置参数优化属于单目标多元非线性函数的极值问题,这类问题可以通过MATLAB中的遗传算法工具箱来解决^[20]。将目标优化函数和约束函数式(5)~式(9)以及相应的参数范围输入至遗传算法工具箱^[21]。设置初始种群个体数目为100,遗传代数为500,交叉概率为0.9,变异概率为0.01,运行遗传算法进行最优参数求解,结果如表2所示。

表2 遗传算法所得优化结果

Tab. 2 Optimization results obtained by genetic algorithm

设计变量	数值
下臂长度 L_1/mm	1 836.9
上臂长度 L_2/mm	2 465.1
飞臂长度 L_3/mm	786.4
升降底座高度 h/mm	386.6
下臂转角最大值 $\sigma_{\max}/(^{\circ})$	67.7
上臂转角最大值 $\beta_{\max}/(^{\circ})$	56.4

2.5 结果分析

对优化结果进行圆整可得: $L_1=1\ 830\ \text{mm}$, $L_2=2\ 460\ \text{mm}$, $L_3=780\ \text{mm}$, $h=380\ \text{mm}$, $\sigma_{\max}=67^{\circ}$, $\beta_{\max}=57^{\circ}$ 。将各个设计变量在优化前和优化后的结果进行对比,如表3所示。与优化前的升降装置相比较,优化后的升降装置的作业下臂长度、作业上臂长度、飞臂长度、升降底座高度、作业下臂转角最大值、作业上臂转角最大值分别减小8.50%、1.60%、4.88%、9.52%、4.29%、5.00%,且前四者的总长度减小290 mm。

表3 优化前后尺寸和角度对比

Tab. 3 Comparison of dimensions and angles before and after optimization

设计变量	优化前	优化后	改变量
作业下臂长度 L_1/mm	2 000	1 830	-170
作业上臂长度 L_2/mm	2 500	2 460	-40
飞臂长度 L_3/mm	820	780	-40
升降底座高度 h/mm	420	380	-40
作业下臂转角最大值 $\sigma_{\max}/(^{\circ})$	70	67	-3
作业上臂转角最大值 $\beta_{\max}/(^{\circ})$	60	57	-3

3 升降装置运动学分析

3.1 D—H坐标及其参数

升降装置末端工作空间反映了机械臂的作业范围,也是衡量升降装置工作能力的重要指标^[22]。升降装置可以简化成一个具有4个转动关节的串联机构。因此,该升降机构具有4个自由度。

常用的串联式机械臂运动学分析方法是D—H参

数法,其核心是通过各个杆件之间的参数描述机构的运动关系^[23]。根据已设计的升降机构底座、作业上臂、作业下臂和飞臂尺寸,在进行运动学分析时,按D—H坐标系法建立果园升降装置的坐标系,如图7所示。 $o_0x_0y_0z_0$ 为与地面连接的基础坐标系,旋转底座作为第1连杆。从升降装置的结构可知, $o_i x_i y_i z_i$ 坐标系与第*i*个连杆固连,且各坐标系原点均在两杆件相连接处中心位置。根据D—H坐标系建立法则,将第*i*+1关节处的旋转轴线方向作为第*i*个坐标系的 z_i 轴, z_i 轴与 z_{i+1} 轴的公垂线方向作为第*i*个坐标系的 x_i 轴,根据右手坐标系法确定 y_i 轴,以此类推,建立各关节处的局部坐标系^[24]。 a_2, a_3, a_4 表示连杆长度,分别为 z_1 轴线和 z_2 轴线公法线的长度、 z_2 轴线和 z_3 轴线公法线的长度、 z_3 轴线和 z_4 轴线公法线的长度; d_1 表示偏移距离,是 x_0 轴线到 x_1 轴线沿 z_0 轴测量的距离; θ_1 为回转机构的关节转角, $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 分别为升降机构的作业下臂、作业上臂、飞臂的关节转角^[25]。升降装置的D—H连杆坐标参数如表4所示。

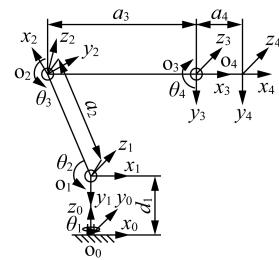


图7 串联机械臂机构及其连杆坐标系
Fig. 7 Serial manipulator mechanism and its linkage coordinate system

表4 升降装置的D—H参数表

Tab. 4 D—H parameter table of lifting device

连杆 <i>i</i>	偏移距离 d_i/mm	连杆长度 a_i/mm	扭转角 $\alpha_i/(^{\circ})$	关节转角 $\theta_i/(^{\circ})$
1	980	0	-90°	θ_1
2	0	1 830	0	θ_2
3	0	2 460	0	θ_3
4	0	780	0	θ_4

注: α_i 为第*i*个升降机构杆件的旋转角度,即以 x_i 轴为旋转轴,从 z_{i-1} 轴旋转到 z_i 轴的角度,根据旋转矢量方向的右手定则决定其正或负。

3.2 升降装置正运动学分析

根据升降装置的结构示意图可知,升降装置是由4个转动关节将相邻的两个连杆连接起来所构成的一个运动链。在升降装置各个杆件上建立各自的坐标系,在此基础上可通过齐次变换表示各杆件之间的相对位姿^[26]。依据所建立的连杆坐标系以及各连杆坐标系间的变换矩阵推导升降装置的正运动学方程,为后续升降装置的空间分析提供重要的理论基础。由坐标系变换的链式法则,可得第(*i*-1)坐标系到坐标系*i*

的变换矩阵^[27], 计算如式(10)所示。

$${}_{i-1}A = \begin{bmatrix} \cos \theta_i - \sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由第 i 坐标系相对于第 $i-1$ 坐标系的变换矩阵和连杆坐标参数可推导出 0_1A 、 1_2A 、 2_3A 、 3_4A , 如式(11)~式(14)所示。

$${}^0_1A = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^1_2A = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^2_3A = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^3_4A = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & a_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & a_4 \sin \theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将 0_1A 、 1_2A 、 2_3A 、 3_4A 按顺序右乘, 即可获得升降装置末端关于基坐标系 ${}_{0_0}x_0y_0z_0$ 的总变换矩阵 0_4A , 如式(15)所示。

$${}^0_4A = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A {}^3_4A = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & r_x & p_x \\ n_y & o_y & r_y & p_y \\ n_z & o_z & r_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: R ——升降装置末端关于基坐标系 ${}_{0_0}x_0y_0z_0$ 的姿态矩阵;

P ——升降装置末端关于基坐标系 ${}_{0_0}x_0y_0z_0$ 的位置向量。

姿态矩阵确定升降装置的姿态, 位置向量确定升降装置机械臂末端的位置^[28]。

运用机器人学的相关知识, 根据齐次坐标变换的运算规律, 得到局部坐标系 ${}_{0_4}x_4y_4z_4$ 到 ${}_{0_0}x_0y_0z_0$ 的姿态矩阵 R , 如式(16)所示。

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & -\cos \theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & -\sin \theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & \cos \theta_1 \\ -\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & -\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

同时, 可解得局部坐标系 ${}_{0_4}x_4y_4z_4$ 到 ${}_{0_0}x_0y_0z_0$ 的位

置向量 $P = [p_x \ p_y \ p_z]^T$, 即

$$P = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cdot [a_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_2] \\ \sin \theta_1 \cdot [a_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_2] \\ d_1 - a_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin \theta_2 - a_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.3 升降装置逆运动学分析

给定升降装置末端位姿, 即 R 和 P 已知, 求出各关节变量 θ_i 即可计算出升降装置的逆解。逆向运动学的求解方法可分为解析法和数值法两大类, 由于解析法相对于数值法计算速度更快、效率更高, 因此采取解析法对升降装置进行逆运动学分析。

1) 求解关节转角 θ_1 。将式(15)两边同乘 ${}^0_1A^{-1}$ 可得

$${}^0_1A^{-1} \cdot {}^0_4A = {}^1_2A \cdot {}^2_3A \cdot {}^3_4A = {}^1_4A \quad (18)$$

由式(11)可得

$${}^0_1A^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

由式(18)可得

$${}^1_4A = \begin{bmatrix} R' & P' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$R' = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & -\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$P' = \begin{bmatrix} a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \cos \theta_2 + a_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ a_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \sin \theta_2 + a_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

令 ${}^0_1A^{-1} \cdot {}^0_4A = {}^1_4A$ 两端元素(3,4)对应相等可得

$$-\sin \theta_1 \cdot p_x + \cos \theta_1 \cdot p_y = 0 \quad (23)$$

由此可解得

$$\theta_1 = \arctan \frac{p_y}{p_x} \quad (24)$$

2) 求解关节转角 θ_3 。令式 ${}^0_1A^{-1} \cdot {}^0_4A = {}^1_4A$ 两端元素(1,4)、(2,4)、(2,1)、(2,2)对应相等可得

$$\begin{cases} p_x \cdot \cos \theta_1 + p_y \cdot \sin \theta_1 = a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \cos \theta_2 + a_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ d_1 - p_z = a_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \sin \theta_2 + a_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ -n_z = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ -o_z = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{cases} \quad (25)$$

综上所述可以得出

$$\begin{cases} a_4 \cdot o_z + p_x \cdot \cos \theta_1 + p_y \cdot \sin \theta_1 = a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \cos \theta_2 \\ a_4 \cdot n_z + d_1 - p_z = a_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \sin \theta_2 \end{cases} \quad (26)$$

将式(25)和式(26)分别两边平方再相加可对

θ_2 进行消元,从而得到

$$\cos \theta_3 = \frac{A^2 + B^2 - a_3^2 - a_2^2}{2 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad (27)$$

其中, $A = (a_4 \cdot o_z + p_x \cdot \cos \theta_1 + p_y \cdot \sin \theta_1)^2$, $B = (a_4 \cdot n_z + d_1 - p_z)^2$ 。令 $D = \cos \theta_3$,通过三角代换可得

$$\theta_3 = \arctan \frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D} \quad (28)$$

$$\begin{cases} (a_3 \cdot \cos \theta_3 + a_2) \cdot \cos \theta_2 - a_3 \cdot \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_2 = a_4 \cdot o_z + p_x \cdot \cos \theta_1 + p_y \cdot \sin \theta_1 \\ (a_3 \cdot \cos \theta_3 + a_2) \cdot \sin \theta_2 + a_3 \cdot \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_2 = a_4 \cdot n_z + d_1 - p_z \end{cases} \quad (30)$$

令 $a_3 \cdot \cos \theta_3 + a_2 = k_1$, $a_3 \cdot \sin \theta_3 = k_2$, $\sin \theta_2 = x = a$, $\cos \theta_2 = y = b$, $a_4 \cdot o_z + p_x \cdot \cos \theta_1 + p_y \cdot \sin \theta_1 = b_1$, $a_4 \cdot n_z + d_1 - p_z = b_2$,则有

$$\begin{cases} k_1 y - k_2 x = b_1 \\ k_1 x + k_2 y = b_2 \end{cases} \quad (31)$$

计算式(31)得

$$\begin{cases} \cos \theta_2 = y = \frac{k_1 \cdot b_1 + k_2 \cdot b_2}{k_1^2 + k_2^2} = b \\ \sin \theta_2 = x = \frac{k_1 \cdot b_2 - k_2 \cdot b_1}{k_1^2 + k_2^2} = a \end{cases} \quad (32)$$

解得

$$\theta_2 = \arctan \frac{a}{b} \quad (33)$$

4) 求解关节转角 θ_4 。令式 ${}^1_0A^{-1} \cdot {}^0_4A = {}^1_4A$ 两端元素(1,1)和(2,1)对应相等可得

$$\begin{cases} n_x \cdot \cos \theta_1 + n_y \cdot \sin \theta_1 = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ -n_z = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{cases} \quad (34)$$

由式(34)可解得

$$\theta_4 = \arctan \left(-\frac{n_z}{n_x \cdot \cos \theta_1 + n_y \cdot \sin \theta_1} \right) - \theta_2 - \theta_3 \quad (35)$$

3.4 仿真模型建立

在此次建模过程中,采用 Robotics Toolbox 中的 Link 函数构建升降装置的连杆,并利用 SerialLink 函数将 4 个杆件连接成一个整体,从而建立升降装置的仿真模型,如图 8 所示。在图 8 中,利用 MATLAB 软件中的机器人工具箱,将升降装置的位姿设为 $\theta_1 = 0, \theta_2 = -113^\circ, \theta_3 = 113^\circ, \theta_4 = 0$ 。

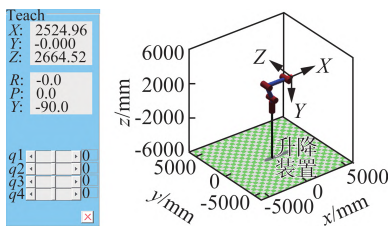


图 8 升降装置的仿真模型

Fig. 8 Simulation model of lifting device

由式(27)可知 θ_3 有两种可能的值,由于升降装置自身结构对关节变量 θ_3 限定了转动范围,因此只能选取其中一种解,即

$$\theta_3 = \arctan \frac{\sqrt{1 - D^2}}{D} \quad (29)$$

3) 求解关节转角 θ_2 。利用三角函数公式,由方程组(26)可得

4 升降机构工作空间仿真与轨迹规划

4.1 工作空间仿真与分析

由于在机具作业过程中,其飞臂通常处于水平状态,故此仿真只针对作业上臂、作业下臂和升降底座进行分析,将此三者看作 3 段串联机械臂。采用蒙特卡洛法在 MATLAB 软件中可获得 3 段串联机械臂的工作空间点云图,如图 9 所示。

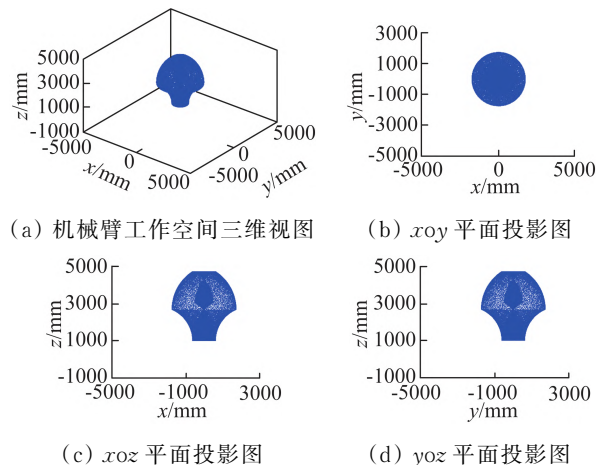


图 9 三段串联机械臂工作空间点云图

Fig. 9 Point nephogram of workspace of three-segment serial manipulator

除去飞臂水平距离,回转底座、作业上臂、作业下臂三段串联机械臂仅需达到的最大作业半径 $R'_{\max} = 620 \text{ mm}$ 。结合图 6 和图 9 可知,当机械臂末端达到最高处和最低处时其作业半径大于 R'_{\max} ,则在任何高度处,机械臂末端可达到的最大作业半径必大于 R'_{\max} 。由图 9(c)和图 9(d)可知,三段串联机械臂末端点在 x 轴和 y 轴正向运动最远距离均能达到 1745 mm ,沿 z 轴正向运动可达到的最大高度为 4728 mm ,在机械臂末端点位于最上端和最下端时,其回转半径分别达到 624 mm 和 630 mm ,均大于 R'_{\max} 。因此,此升降装置的作业空间不仅符合作业高度要求,同时也满足不同升降高度下作业半径要求,故所设计的升降装置可以满足作业任务。

4.2 轨迹规划仿真与分析

利用 MATLAB 软件中的 jtraj 函数对升降装置进行轨迹规划,从而得到 4 个关节转角的角位移、角速度和角加速度图像。取升降装置完全折叠状态为初始位置,即此时各关节转角为 $[0, -\pi, \pi, \pi/2]$,设定最终各关节转角为 $[-\pi/6, 5\pi/6, 5\pi/9, \pi/4]$,其轨迹规划仿真如图 10 所示,升降装置各个关节转角的角位移、角速度以及角加速度曲线如图 11 所示。

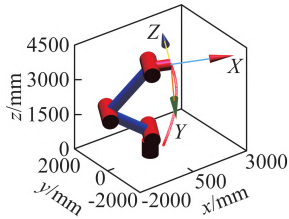


图 10 升降装置轨迹规划仿真

Fig. 10 Trajectory planning simulation of lifting device

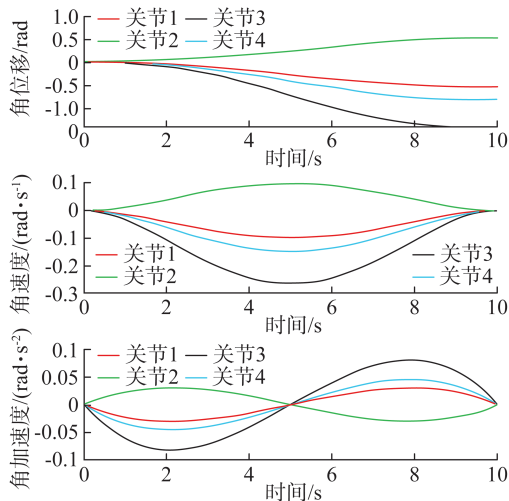


图 11 各关节轨迹规划曲线图

Fig. 11 Each joint trajectory planning curve image

从图 11 可以看出,各关节转角的角位移、角速度以及角加速度曲线整体平滑,没有突变区域,并且初、末速度和加速度均为 0,说明升降装置能够从完全折叠位置平稳到达作业位置。因此,在本次轨迹规划过程中,升降装置保持连续稳定的作业状态,各关节处无刚性冲击,升降装置参数设计比较合理。

5 结论

1) 利用遗传算法工具箱对折臂式升降作业平台工作机构进行优化设计,求得升降底座的高度为 380 mm,作业上臂、作业下臂和飞臂的长度分别为 2 460 mm、1 830 mm 和 780 mm,作业下臂转角最大值和作业上臂转角最大值分别为 67° 和 57° 。

2) 运用标准 D-H 参数法对升降装置进行正运动学分析和逆运动学分析。利用机器人工具箱并采用蒙

特卡洛法对升降装置的工作空间进行仿真,其工作空间的高度为 980~4 728 mm,各高度处的水平范围满足作业半径需求,故仿真结果表明,设计的折臂式升降平台满足核桃示范园的作业空间要求,为后续折臂式升降平台样机的设计和动力学分析提供一定的理论基础。

3) 对升降装置进行轨迹规划仿真和分析,结果表明,升降装置能够从初始位置到达作业位置,进一步验证设计参数的合理性。

参 考 文 献

- [1] 徐嘉翊,黄雪,罗华平,等. 方位和品质对南疆果品空间特性光谱影响及反演方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(3): 910-918.
- [2] 张鲁云,孟祥金,段爱国,等. 特色林果业作业平台设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 72-77. Zhang Luyun, Meng Xiangjin, Duan Aiguo, et al. Design and experiment of operation platform for characteristic forest and fruit industry [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 72-77.
- [3] 赵雄,曹功豪,张鹏飞,等. 三自由度苹果采摘机械臂动力学分析与轻量化设计[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 88-98. Zhao Xiong, Cao Gonghao, Zhang Pengfei, et al. Dynamic analysis and lightweight design of 3-DOF apple picking manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 88-98.
- [4] 刘大为,谢方平,李旭,等. 小型果园升降作业平台的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 113-121. Liu Dawei, Xie Fangping, Li Xu, et al. Design and experiment of small lifting platform in orchard [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 113-121.
- [5] 赵伟,陈永生,曹天陞,等. 死鸡捡拾机械臂设计及运动学分析[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 131-136. Zhao Wei, Cheng Yongsheng, Cao Tianbi, et al. Design and kinematics analysis of robotic arm used for picking up dead chickens [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 131-136.
- [6] Solazzi L, Scalmana R. New design concept for a lifting platform made of composite material [J]. Applied Composite Materials, 2013, 20(4): 615-626.
- [7] Celik H K, Rennie A E W, Akinci I. Design and structural optimisation of a tractor mounted telescopic boom crane [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(3): 909-924.
- [8] Zahid T, Kausar Z, Shah M F, et al. Workspace design and trajectory planning of a five degree of freedom mobile welding manipulator for spherical objects [J]. IEEE

- Access, 2021, 9: 73843—73856.
- [9] 李纯金, 褚月桥, 周海波. 基于遗传算法随车起重机折叠臂架铰点位置优化[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014, 28(1): 30—36.
- [10] 宋云飞, 贺利乐, 李赵兴. 折臂式弃料机械手的参数优化与动态仿真分析[J]. 机械设计, 2015, 32(2): 51—55.
- [11] 李自贵, 马俊, 晋民杰, 等. 基于ADAMS的折臂式随车起重机工作机构优化设计[J]. 机械设计, 2015, 32(8): 36—40.
- [12] 高崇仁, 孙迪, 王余贤, 等. 运用响应面法的高空作业车臂架变幅三铰点位置优化[J]. 机械设计与制造, 2019(12): 84—88.
- [13] 崔永杰, 马利, 何智, 等. 基于最优空间的猕猴桃双臂并行采摘平台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 132—143.
- Cui Yongjie, Ma Li, He Zhi, et al. Design and experiment of dual manipulators parallel harvesting platform for kiwifruit based on optimal space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 132—143.
- [14] 赵玲亚, 王英健, 赵子开. 圆形水果采摘机械手运动学分析与仿真[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 24—29.
- Zhao Lingya, Wang Yingjian, Zhao Zikai. Kinematics analysis and simulation of round fruit picking manipulator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 24—29.
- [15] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1—20.
- Zheng Yongjun, Jiang Shijie, Chen Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1—20.
- [16] 崔志超, 管春松, 陈永生, 等. 温室用小型多功能电动履带式作业平台设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 48—57.
- Cui Zhichao, Guan Chunsong, Chen Yongsheng, et al. Design of small multi-functional electric crawler platform for greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 48—57.
- [17] 赵津, 黄信念, 卢静, 等. 基于遗传算法的钢拱架安装机作业平台调平系统优化设计[J]. 中国工程机械学报, 2022, 20(3): 189—193, 204.
- [18] 邓援超, 张立, 杨超, 等. 折叠式电动车折叠机构方案设计及尺寸优化[J]. 机械设计与制造, 2021(7): 246—249, 254.
- [19] 孙永国, 金欣, 薛冬, 等. 基于NSGA-II的滑油泵叶轮结构优化设计[J]. 中国机械工程, 2024, 35(3): 559—569.
- [20] 王先伟, 吴明晖, 周俊, 等. 名优茶采摘机器人机械手结构参数优化与仿真[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(7): 84—89.
- Wang Xianwei, Wu Minghui, Zhou Jun, et al. Optimization and simulation of structural parameters of manipulators for high-quality tea picking robots [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(7): 84—89.
- [21] 樊桂菊, 李钊, 毛文华, 等. 基于工作空间的果园作业平台结构参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 34—42, 265.
- Fan Guiju, Li Zhao, Mao Wenhua, et al. Structure parameter optimization and experiment of orchard platform based on workspace [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 34—42, 265.
- [22] 赵修琪, 卢继霞, 陈相如, 等. 五自由度镀膜机械臂的运动学分析与仿真[J]. 机械设计与制造, 2022(1): 257—261.
- [23] 杨铭涛, 梁喜凤. 番茄枝叶裁剪机械臂设计与运动学分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 8—14.
- Yang Mingtao, Liang Xifeng. Design and kinematics analysis of a tomato branch and leaf cutting manipulator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4): 8—14.
- [24] 贾良飞, 马朝锋, 刘凯. 基于蒙特卡罗法的硬岩掘进机辅助渣渣装置工作空间分析[J]. 机械传动, 2020, 44(4): 74—79.
- [25] Karupusamy S, Maruthachalam S, Veerasamy B. Kinematic modeling and performance analysis of a 5-DoF robot for welding applications [J]. Machines, 2024, 12(6): 378.
- [26] 桂林, 古劲, 张宾, 等. 一种五自由度修剪机器人结构设计与分析[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(3): 191—198.
- Gui Lin, Gu Jin, Zhang Bin, et al. Structural design and analysis of a 5-DOF pruning robot [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3): 191—198.
- [27] 贾梦实, 张莲洁, 顿国强, 等. 自走式草莓施药机设计与轨迹仿真可靠性分析[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(7): 85—90, 117.
- Jia Mengshi, Zhang Lianjie, Dun Guoqiang, et al. Design and trajectory simulation reliability analysis of a self-propelled strawberry applicator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 85—90, 117.
- [28] 李扬, 程维明, 宫成文, 等. 5-DOF机械臂运动学分析及运动轨迹规划[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9): 16—21.
- Li Yang, Cheng Weiming, Gong Chengwen, et al. Kinematics analysis and motion trajectory planning of 5-DOF manipulator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 16—21.