

马瑞峻, 马宏震, 伍恩慧, 等. 考虑动态能耗的无人机采收菠萝田间收集点优化配置研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(3): 343-353.

MA Ruijun, MA Hongzhen, WU Enhui, et al. Study on optimal allocation of field collection points for pineapple harvesting by uav considering dynamic energy consumption[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(3): 343-353.

## 考虑动态能耗的无人机采收菠萝田间 收集点优化配置研究

马瑞峻, 马宏震, 伍恩慧, 陈 瑜, 李呈辉, 洪苑乾

(华南农业大学 工程学院, 广州 510642)

**摘 要:** 为了深化无人机在田间菠萝采收和运输过程中的应用, 探索无人机悬停放置菠萝到收集箱中的技术方案。无人机的续航能力限制菠萝采收工作的完成, 而对续航能力影响最大的因素是无人机的载重, 提出在田间设立菠萝收集点, 并确定收集点的最优设立数量及位置, 以确保菠萝采收工作的有效完成。在研究方法上, 基于 K-means 算法寻找最佳收集点位置及分组方式, 建立无人机采收菠萝的能耗及成本模型, 通过编写程序对模型进行求解, 并以无人机续航能力为约束条件, 确定了无人机采收菠萝的最大覆盖范围和菠萝采摘数量。通过比较不同设立数量和位置的收集点方案, 得出综合最优的结果。在不更换无人机电池的情况下, 1 台农业无人机采收菠萝约 480 个, 采收面积约 44 m<sup>2</sup>。随着收集点设立数量增加, 无人机总路程和总能耗呈稳步下降状态, 总成本呈稳步上升状态, 分析发现 667 m<sup>2</sup> 菠萝地设立 15 个固定位置的收集点时总能耗、总路程和总成本达到均衡最优。无人机采收菠萝的收集点配置优化方案, 可为应用无人机进行田间作物采收及运输时收集点的数量和选址提供建设性意见。

**关键词:** 菠萝; 农业无人机; 动态能耗; 收集点配置; 续航能力

中图分类号: S252.9

文章编号: 1000-1700(2024)03-0343-11

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on Optimal Allocation of Field Collection Points for Pineapple Harvesting by UAV Considering Dynamic Energy Consumption

MA Ruijun, MA Hongzhen, WU Enhui, CHEN Yu, LI Chenghui, HONG Yuanqian

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** This study investigates the application of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) in the harvesting and transportation of pineapples in agricultural fields, specifically focusing on the method of UAVs hovering to deposit pineapples into collection bins. The operational range of UAVs, significantly impacted by the weight they carry, limits the efficiency of pineapple harvesting tasks. This study proposes the establishment of pineapple collection points within the fields and determines the optimal number and placement of these points to facilitate efficient harvesting operations. This study utilizes the K-means algorithm to determine the most favorable locations and grouping for the collection points. It also develops models for calculating the energy consumption and cost associated with UAV-based pineapple harvesting. By coding these models to solve the models and address the constraints related to UAV endurance, the study ascertains the maximum operational area and the quantity of pineapples that can be harvested by a UAV. Through comparative analysis of various design involving different numbers and placements of collection points, the study determines the most effective strategy,

收稿日期: 2024-01-10

基金项目: 广东省科技计划项目(2021B1212040009)

第一作者: 马瑞峻(1970-), 男, 博士, 教授, 从事智能化农业机械开发、传感器技术及光谱检测技术研究, E-mail: maruijun\_mrj@163.com

that without battery replacement, a single agricultural UAV is capable of harvesting approximately 480 pineapples over an area of about 44 m<sup>2</sup>. With the increase of number of collection points, the UAV's total travel distance and energy consumption decrease steadily, whereas the total cost gradually rises. The analysis reveals that the establishment of 15 fixed collection points within a pineapple field of 667 m<sup>2</sup> achieves an optimal balance of total energy consumption, travel distance, and cost. The collection point configuration optimization scheme proposed in this study offers constructive recommendations for the number and location of collection points in using UAVs for crop harvesting and transportation tasks in agricultural fields.

**Key words:** pineapple; agricultural drones; dynamic energy consumption; collection point configuration; endurance

据不完全统计,我国现有农业无人机服务公司2 000多家,早在2015年,我国无人机保有量就已超过2 300架,全年作业面积超过66.67万hm<sup>2</sup>。农业无人机在生产活动中极大克服了传统农业生产环境下存在的诸多弊端与不足,使农业生产的灵活性与技术性显著增强。专家预测未来10年内应用无人机进行农业作业所得到的产值会大于200亿元<sup>[1]</sup>。无人机采收是农业无人机应用新兴发展的领域,起降点的选址分配是采收运输农作物的中心环节,是保证采收运输安全、高效的关键。

国内外针对选址分配进行了大量研究。物流设施选址问题最早由WEBER等<sup>[2]</sup>为寻找制造工厂建址的最佳位置及使运输和劳动力成本降到最低提出,开始考虑中间材料与成品之间的运输距离成本。此后研究学者开始注意选址与成本之间的关系,还有一些学者对选址问题进行算法的研究。ZHANG等<sup>[3]</sup>在处理二手产品逆向物流,将剩余材料反向流回公司问题时提出应用人工蚁群(artificial bee colony algorithm, ABC)算法来解决收集中心的选址问题,以达到运输成本最低的目的。无人机技术的逐渐成熟推动了其在物流、环境、农业、国防等领域的广泛应用<sup>[4]</sup>。物流无人机逐渐走进人们的视野,应用无人机进行即时配送已在相关企业展开试运行,美团助力的“最后一公里”末端配送服务无人机已在深圳、北京等测试场完成超过40万架的飞行测试<sup>[5]</sup>。无人机起降点的选址也成为学者们关注的对象。BRIAN等<sup>[6]</sup>为了节约包裹从偏远地区运送到市区配送中心的运输时间,结合无人机的性能参数及包裹的需求量等,建立了配送中心选址优化模型。布谷鸟算法最初是学者YANG等<sup>[7]</sup>提出的,尝试用此解决各类中心选址问题。赵世安等<sup>[8]</sup>通过加入NEH领域搜索使布谷鸟算法得到了优化,并应用其进行配送中心选址问题的处理,证明该改进算法对于处理配送中心选址问题是可行的。钱欣悦等<sup>[9]</sup>考虑无人机性能、所处配送环境等的影响,认为物流无人机的配送中心选址需依靠遗传算法,并提出配送满意度问题,通过成本及满意度曲线建模,确定配送中心位置。张连奎<sup>[10]</sup>基于元胞自动机相关理论方法,提出一种城区末端网点选址模型。该模型根据收入、费用等因素建立评价体系,并利用遗传算法对最佳选址点进行求解。DBSCAN算法<sup>[11-12]</sup>确定配送中心需要精细划分网格,并针对不同区域设置不同的半径,半径的确定对聚类结果影响较大。很多学者对无人机的起降点选址及每个起降点大小进行了研究<sup>[13-15]</sup>,由于应用的场景不同,所涉及的应用方法也不同,有的应用排队法,有的应用整数规划法等。除了对起降点的大小研究,JEONG等<sup>[16]</sup>结合日常通勤的实际情况,选择应用垂直机场来进行空中交通的研究,为了最大地降低垂直机场噪音对人们的影响,应用K-means算法来确定机场的选址。褚衍昌等<sup>[17]</sup>使用K-means聚类方法来确定在混合卡车—无人机配送系统中无人机的起飞和着陆点,这种方法根据接近性和操作限制将客户位置分成多个组,优化配送路线,将原始问题分解为更小、更易管理的任务,降低了计算复杂性并加速了解决过程。张荣等<sup>[18]</sup>选用聚类算法讨论了使用无人机和车辆对生鲜农产品进行组合配送路线的优化。采用模糊K均值聚类方法选择配送中心,基于最小总成本优化配送路线并结合蚁群算法提高配送效率同时降低成本。通过改进聚类效果并降低了配送成本,证明了所提出的优化方法在实际应用中的有效性。许菱等<sup>[19]</sup>研究了在农村电商物流背景下,无人机与车辆协同配送路径的优化问题。采用带约束的自适应K-means算法确定车辆停靠点,随后通过改进遗传算法来优化无人机和车辆的配送路径。研究旨在降低农村物流末端配送的成本并提高效率。刘苏晴<sup>[20]</sup>研究了5G网络环境下,“无人机+车辆”模式在应急物资配送中的优化方案,提出了改进的K-means算法来优化配送地点的聚类过程,从而更有效地规划无人机与车辆的配送路径,实现成本最小化与效率最大化。通过对不同模型的建立与求解,旨在找出最优的配送策略,确保在灾难发生

后能迅速、高效地完成物资配送。彭勇等<sup>[21]</sup>探讨了在城市物流配送模式中公交辅助无人机的应用,通过K-means算法和贪婪算法结合来构造初始解,进而采用智能通用变领域搜索算法(SGVNS)优化无人机和公交车的配送路线。确保配送效率和成本最小化的同时,克服城市交通限制对物流配送效率的影响,并对不同数据集的测试验证了所提算法的有效性和优越性。

综合以上关于选址分配研究文献,发现目前对农业采收无人机起降点的研究有很大的空白。国内外学者很少考虑无人机的运营成本以及生产中的投入成本等问题,但农民作为低收入人群,能否承担采收成本是一个非常重要的问题。因此,本研究结合农业生产实际,考虑一个收集点收集多个菠萝,应用K-means算法确定收集点的位置及分组方式,建立无人机采收菠萝能耗及成本模型,以无人机从采收点到收集点所需能耗、成本和飞行距离综合最优为目标,设计开发相应程序进行计算验证,对结果进行比较得到最佳收集点位置和设立数量。以广东省湛江市徐闻县曲界镇“菠萝的海”景区为例,制定合理的无人机采收菠萝收集点选址策略,为应用无人机采收菠萝提供切实、最优的采收方案,给农业生产提供科学帮助。

## 1 无人机采收菠萝模式介绍

无人机采收菠萝模式中,将每个菠萝的所在位置视为1个独立的采收点,而无人机则从指定的收集点出发,完成对多个散布在田间的菠萝采收任务。在此过程中,无人机被配置为每次仅采收并携带单一菠萝回归至收集点。该作业模式涵盖3个关键组成部分:收集点、菠萝采收点和专门执行菠萝采收任务的无人机。执行菠萝采收的无人机配备了由本研究团队设计的专用菠萝采收机械臂<sup>[22]</sup>。

菠萝整体采收与运输流程的步骤为:起初,无人机从田间采收菠萝并将其运送到预设的收集点。鉴于菠萝种植通常较为密集,大型机械设备难以直接进入田间进行收集作业,因此,采收后的菠萝需要通过人力从田间搬运至临近马路的位置。最终阶段,菠萝被装载至运输车辆中,并被运往市场进行销售。菠萝采收与运输的完整过程如图1。

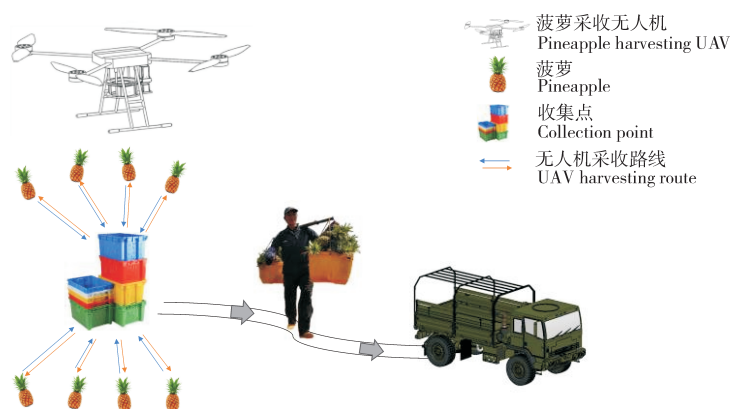


图1 无人机采收菠萝流程图

Figure 1 General flow chart of pineapple harvesting by drone

## 2 无人机采收菠萝收集点配置研究

无人机采收菠萝收集点配置研究旨在探讨菠萝采收过程中收集点的位置选择和数量设置等问题。首要考虑的是确定收集点的最佳选址,以确保其能够有效覆盖所需的采集区域,并在此基础上计算出相应的飞行路程和成本等数据,从而为收集点数量的确定提供依据。无人机的能耗受多种因素影响,其中无人机的载重对其续航能力影响最为显著。因此,本研究重点关注无人机的载重对能耗的影响,并旨在确定最优的收集点位置及数量配置方案,以达到所需成本、能耗和总路程的最佳平衡结果。

### 2.1 收集点选址方法

菠萝收集点的选址主要依靠聚类算法来实现,现常用的聚类算法可依据思想方式进行分类,大致

可分为:基于划分的聚类算法、基于密度的聚类算法、基于层次的聚类算法、基于网格的聚类算法和基于模型的聚类算法共5类。

(1)划分聚类算法是一类通过对聚类中心的迭代来实现“簇内点足够近,簇间点足够远”的目标的算法。代表性的算法包括K-means、K-近邻算法和K-medoids。这些算法的优点在于时间和空间复杂度低,能够有效处理大规模数据集。然而,它们也存在一些缺点,比如容易陷入局部最优解,而且对初始聚类中心的选取非常敏感。

(2)密度聚类算法是一种通过计算数据样本分布的疏密情况,将高密度区域的点划分为同一个簇的方法。其中,DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)算法是一种典型的密度聚类算法,能够对复杂形状的簇和噪声数据有较好的聚类效果。然而,需要注意的是,密度聚类算法的结果很大程度上取决于所选择的参数,因此对参数的选择具有较大的影响。

(3)层次聚类算法是一种通过对数据集在不同层次上进行划分来获得树状聚类结构的方法。代表性的层次聚类算法包括BIRCH、CURE和CHAMELEON。这些算法具有快速的处理速度,并且能够有效地解决非球形簇的聚类问题。然而,它们可能存在一个数据分配错误会导致连带性错误的问题。

(4)网格聚类算法是一种将数据空间划分为网格单元,并在这些单元上进行簇划分的方法。代表性的网格聚类算法包括STING和CLIQUE。这些算法处理速度快,与数据对象个数无关,但也存在一些缺点,例如对参数敏感、无法处理不规则分布的数据,以及处理精度不高。

(5)模型聚类算法是一种将数据集划分为若干模型,利用一个判断机制来寻找数据与给定模型的最佳拟合,以完成聚类任务的方法。代表性的模型聚类算法包括高斯混合模型和神经网络SOM模型。这些算法能够以概率的形式表现数据点所属的簇,并且每一类的特征也可以用参数来表达。然而,这些算法的处理效率不高,在数据量较少时可能会导致聚类效果较差。

结合本研究目标,即确定使无人机采收能耗、成本和飞行路程均衡最优的收集点数量及位置,K-means聚类算法是最为常用且知名度最高的聚类算法,适用于大规模数据集,本研究菠萝数据集庞大,K-means聚类算法能够快速对数据进行聚类分析,在处理大量菠萝采收点数据时具有高效性。K-means算法的原理简单,易于理解和实现,它通过迭代优化聚类中心和分类标签,直到满足收敛条件或达到预设的迭代次数。它计算速度快、复杂程度低且聚类效果良好,能够满足本研究需求,遂选择K-means聚类算法确定收集点的选址及分组方式。

采用K-means算法在无人机采收菠萝收集点的配置研究中具有明显的优势,这些优势不仅体现在算法本身的高效率和简洁性上,而且在于它能够为无人机采收操作提供更优化的逻辑支持。(1)提高采收效率。通过K-means算法对采收点进行优化聚类,可以有效地将菠萝田分为若干个采收区域,每个区域都有一个收集点。这样可以最小化无人机从采收点到收集点的总飞行距离,从而减少无人机的飞行时间和能耗,显著提高整体的采收效率。(2)降低能耗成本。由于K-means算法帮助实现了更合理的收集点布局,无人机在执行采收任务时需要的能量更少,这直接降低了能源消耗,对于长期运营来说,能够大幅度降低成本。(3)适应性强。K-means算法可以根据实际菠萝田的大小、形状和菠萝分布情况灵活调整,为各种不同情况的田地提供个性化的收集点配置方案。(4)数据驱动决策。采用K-means算法使得收集点的配置更加依赖于实际数据,相较于经验判断,能够提供更加科学、合理的配置方案,减少人为误差,提高决策的准确性。(5)易于实施和扩展。K-means算法的简单性保证了它容易被实施在各种规模的农业生产中,不仅适用于菠萝采收,同样适用于其他作物的采收工作。此外,算法的扩展性使其能够轻松适应作物种植模式和技术的变化。

K-means算法的过程包括初始化阶段、分配阶段、更新质心阶段和终止条件判定。初始化阶段为通过随机选择K个点作为起始聚类中心,即初始质心,来开始聚类过程。分配阶段为根据最短距离原则,每个菠萝采收点被分配到与其最近的聚类中心所代表的簇中。此步骤采用距离度量方法来确定每个点到各聚类中心的距离,进而形成K个新的簇。随后,基于这些新形成的簇,重新计算以确定每个簇的新质心。此过程中,原有的聚类中心将被新计算的质心所替代。更新质心阶段是对于每个新形成的簇,选取一个点作为新的质心,该点是簇内所有点到该点的综合距离平均值最小的点。这一步骤旨在优化簇内的凝聚度,确保每个簇的质心能够代表簇内成员的中心位置。终止条件判定为重复

上述分配和更新质心的过程,直到满足算法的终止条件。终止条件通常为质心不再发生变化,或者算法已经执行了预定的最大迭代次数。

## 2.2 无人机采收菠萝能耗及成本模型建立

相关问题可以描述为:先需建设  $m$  个收集点满足需求,顶点集  $N=\{1,2,3,\dots,n\}$  表示收集点和菠萝采收点的集合,由于采收方式的限制,每个需求的需求量  $q_i$  均为 1,不同节点之间的距离为  $d_{ij}$ 。

2.2.1 相关假设 在无人机进行菠萝采收时,其飞行路线涉及到收集点与菠萝采收点之间的往返。为有效应对可能出现的各种情况和条件,需事先制定相关假设。相关假设为:(1)无人机具有自主避障功能,通过飞控对无人机进行命令调动使其避免在飞行途中与其他物体发生碰撞;(2)不考虑天气等自然因素对无人机能耗的影响;(3)保证所有采收点具有相同优先级。

2.2.2 能耗及成本模型建立符号说明 无人机采收菠萝能耗模型的各个变量符号定义如表1、表2和表3。

表1 集合变量定义

Table 1 Set variable definition

集合变量 Aggregate variable	变量说明 Variable description
$I=\{i i=1,2,3,\dots,n\}$	试验区域菠萝 $i$ 的集合 The set of pineapples $i$ in the experimental area
$J=\{j j=0,1,2,3,\dots,n,n+1\}$	收集点 $j$ 的集合 The set of collection points $j$
$K=\{k k=1\}$	农业无人机 $k$ 集合 The set of agricultural UAV $k$

表2 决策变量定义

Table 2 Decision variable definition

决策变量 Decision variable	变量说明 Variable description
$Y_j$	0,1 变量,表示收集点是否在 $j$ 点选址,其中, $y_j=1$ 为收集点在 $j$ 点选址,否则,不在 0,1 variable, indicating whether the collection point is located at point $j$ . Where $y_j=1$ denotes the collection point is located at point $j$ , otherwise, it is not
$Y_{ij}$	0,1 变量,表示菠萝 $i$ 是否被分配到收集点 $j$ 的覆盖范围,其中, $y_{ij}=1$ 为菠萝要采收到收集点 $j$ , 否则,不是 0,1 variable, indicating whether pineapple $i$ is assigned to the coverage area of collection point $j$ . Where $y_{ij}=1$ denotes the pineapple is to be harvested and assigned to collection point $j$ , otherwise, it is not
$W_j$	0,1 变量,表示收集点 $j$ 的购买成本是否付清,其中, $W_j=1$ 表示收集点 $j$ 的购买成本已付清,且已投入使用,否则,没有 0,1 variable, indicating whether the purchase cost of collection point $j$ has been paid. Where $W_j=1$ denotes that the purchase cost of collection point $j$ has been paid and is in use, otherwise, it is not
$B_{ij}^k$	0,1 变量,表示收集点 $j$ 与试验区域菠萝 $i$ 形成的路径在可飞空域上 0,1 variable, indicating whether the path formed between collection point $j$ and pineapple $i$ in the experimental area is in the flyable airspace

2.2.3 无人机采收菠萝的能耗及成本模型 根据问题描述与假设,考虑无人机综合运营成本和能耗等,无人机采收菠萝的能耗及成本模型建立如下。

$$F(x) = 2C_1 D_{ij} + C_2 + EC_e \quad (1)$$

式(1)表示使用成本和飞行成本之和。

$$C_1 = \sum_{k \in K} C_f^k \quad (2)$$

式(2)表示农业无人机运行成本。

$$C_2 = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} W_j Y_j C_j^i \quad (3)$$

式(3)表示收集点的购买成本。

$$E = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} P_{\max} \cdot \frac{D_{ij}^k W + D_{ji}^k (W + L_{ji}^k)}{370(P_{\max} - e)\eta Y} \quad (4)$$

式(4)表示飞行能耗<sup>[23]</sup>分别是收集点到菠萝的空载能耗以及采收后返回的满载能耗。

$$H_{\min} < H^k < H_{\max}, \forall k \in K \quad (5)$$

式(5)表示采收无人机飞行高度要保持在指定的低空域飞行范围内。

表3 参数变量定义

Table 3 Parameter variable definition

参数变量 Parameter variable	变量说明 Variable Description	参数变量 Parameter variable	变量说明 Variable Description
$C_f^j$	收集箱的购买成本 Purchase cost of the collection bin	$C_f^k$	农业无人机的购买成本 Purchase cost of the agricultural UAV
$C_e$	单位电价成本 Unit electricity cost	$C_f^a$	单位距离维修成本 Unit distance maintenance cost
$C_f^b$	单位距离折旧费用 Unit distance depreciation cost	$C_f^c$	单位距离电池维护费用 Unit distance battery maintenance cost
$E_{ij}^k$	无人机 $k$ 从收集点 $j$ 到菠萝采收点 $i$ 之间的飞行能耗 Flight energy consumption of UAV $k$ from collection point $j$ to pineapple harvesting point $i$	$E_{ji}^k$	无人机 $k$ 从菠萝采收点 $i$ 到收集点 $j$ 之间的飞行能耗 Flight energy consumption of UAV $k$ from pineapple harvesting point $i$ to collection point $j$
$N_d$	农业无人机数量 Number of agricultural UAVs	$L_d$	无人机装载的重量上限 Maximum weight capacity of the UAV
$L_{ij}^k$	无人机从收集点 $j$ 到菠萝采收点 $i$ 所载荷的菠萝重量 Weight of pineapples carried by the UAV from collection point $j$ to pineapple harvesting point $i$	$L_{ji}^k$	无人机从菠萝采收点 $i$ 到收集点 $j$ 所载荷的菠萝重量 Weight of pineapples carried by the UAV from pineapple harvesting point $i$ to collection point $j$
$D_{ij}^k$	无人机 $k$ 从收集点 $j$ 到菠萝采收点 $i$ 的距离 Distance traveled by UAV $k$ from collection point $j$ to pineapple harvesting point $i$	$D_{ji}^k$	无人机 $k$ 从菠萝采收点 $i$ 到收集点 $j$ 的距离 Distance traveled by UAV $k$ from pineapple harvesting point $i$ to collection point $j$
$T_{ij}^k$	无人机 $k$ 从收集点 $j$ 到菠萝采收点 $i$ 的时间 Time taken by UAV $k$ from collection point $j$ to pineapple harvesting point $i$	$T_{ji}^k$	无人机 $k$ 从菠萝采收点 $i$ 到收集点 $j$ 的时间 Time taken by UAV $k$ from pineapple harvesting point $i$ to collection point $j$
$V_{ij}$	无人机从收集点 $j$ 到菠萝采收点 $i$ 的飞行速度 Flight speed of the UAV from collection point $j$ to pineapple harvesting point $i$	$W$	农业无人机自重 Own weight of the agricultural UAV
$N_j$	收集点的建设数值阈值 Construction numerical threshold value of the collection point	$\eta$	螺旋桨动力传递效率 Propeller power transmission efficiency
$Y$	无人机飞行升阻比 UAV flight lift-to-drag ratio	$e$	无人机电子元器件能耗 Power consumption of electronic components in the UAV
$H_{\max}$	允许飞行的最大飞行高度 Maximum allowable flight altitude	$E_{\max}$	无人机电池最大能耗量 Maximum energy consumption of the UAV battery

$$L_{ji} < L_{ji}^k, \forall k \in K \tag{6}$$

式(6)表示采收无人机每次行程载荷不得超过其最大载荷。

$$E_{ij}^k + E_{ji}^k < E_{\max}^k, \forall k \in K \tag{7}$$

式(7)表示无人机总能耗不能超过其搭载的电池所能提供的能量。

$$W_j y_{ij} y_j D_{ij} < L_{\max} \tag{8}$$

式(8)表示试验区域内的所有菠萝均处于各收集点的覆盖范围内。

$$y_{ij} L_{ij} < Z_{\max} \tag{9}$$

式(9)表示收集点所覆盖的试验区域菠萝总数不得超过收集点的容量。

$$y_j x_j < N_j \tag{10}$$

式(10)表示收集点的数量不能超过预先选址的数量。

$$C_f^k = C_f^a + C_f^b + C_f^c \tag{11}$$

式(11)表示无人机使用成本由单位距离维修费用、折旧费用以及电池维护费用3部分组成。

2.2.4 模型求解 在本研究中,采用MATLAB编程环境对无人机在农业应用中进行采收作业的能耗、路径长度以及成本进行了模拟与分析。该过程涵盖了从输入无人机的物理参数(如重量和螺旋桨效率)到通过计算模型求解各个收集点所需的总能耗、总行程距离和总成本的全过程。能耗和成本模型

求解流程及主要代码概述如下。

(1)数据准备阶段。通过读取数据文件,获取无人机中心位置数据、采收点位置数据以及相关的需求数据,如采收点需要采集的菠萝重量。

(2)距离计算。对于每个收集点,计算其与对应收集点位置之间的欧氏距离  $C = \sqrt{(B(:,1) - p.center(1,1))^2 + (B(:,2) - p.center(1,2))^2}$ 。

(3)成本与能耗计算。基于距离以及其他相关参数计算各种成本和能耗:  $C1(:,1) = (p.need(:,1) + 33.6) * \sqrt{diff\_x.^2 + diff\_y.^2} / 846.702756$ ;  $C2(:,1) = 1.88 * \sqrt{diff\_x.^2 + diff\_y.^2}$ ;  $C3(:,1) = (p.need(:,1) + 33.6) * \sqrt{diff\_x.^2 + diff\_y.^2} / 1075.3125$ 。

(4)汇总与分析。对所有作业点进行汇总,计算总距离、总成本以及总能耗。

### 3 案例研究与应用

#### 3.1 收集点及无人机相关参数设置

本研究选用试验室已有的大疆mg-1p农业无人机搭载采摘设备完成菠萝采收工作,无人机性能参数,广州市农业用电价格,无人机运营的详细参数及收集点的相关参数设置如表4。

表4 农业无人机参数设置

Table 4 Agricultural drone parameter settings

项目/单位 Project/Item	参数 Parameter	数值 Value
无人机购买成本 UAV purchase cost/元	$C_f^k$	20 000
标准起飞重量 Standard takeoff weight/kg	$L_d$	23.8
无人机电池电量 UAV battery capacity/kWh	$E_{max}$	0.044 4
商用电价 Commercial electricity price/(元·kWh <sup>-1</sup> )	$C_e$	1.27
无人机最大飞行功率 Maximum UAV flight power/kW	$P_{max}$	6.4
无人机电子元器件能耗 Power consumption of electronic components in the UAV/W	$e$	200
螺旋桨动力传递效率 Propeller power transmission efficiency	$\eta$	0.75
飞行升阻比 Flight lift-to-drag ratio	$Y$	4
无人机自身重量(已计算电池、采收器重量)/kg UAV own weight (battery and harvester weight included)	$W$	16.8
最大飞行高度 Maximum flight altitude/m	$H_{max}$	2 000
单位距离维修成本 Unit distance maintenance cost/(元·km <sup>-1</sup> )	$C_f^a$	0.35
单位距离折旧成本 Unit distance depreciation cost/(元·km <sup>-1</sup> )	$C_f^b$	0.66
收集箱购买成本 Purchase cost of the collection bin/元	$C_f^c$	100

#### 3.2 试验田选取及田间菠萝图像处理

在本研究中,采用DJI Phantom 4,一款小型多旋翼无人机,来获取菠萝种植区的高分辨率影像。通过拍摄多幅照片并利用图像拼接技术,成功地构建一个大约1 hm<sup>2</sup>的菠萝田的全貌图像,并从中截取0.067 hm<sup>2</sup>面积的具体区域作为试验研究对象。利用Python编程语言配合OpenCV图像处理库,对获取的图像进行了深入分析,通过在图像中以蓝点标注菠萝的具体位置,进而精确提取菠萝位置的坐标数据,为后续试验研究提供了准确的基础数据。相关的田间选取和菠萝定位提取过程如图2。

#### 3.3 无人机采收菠萝能耗及成本模型结果分析

本研究选取湛江市徐闻县曲界镇作为研究对象,以探讨无人机在菠萝采收过程中的收集点配置问题。尽管农业无人机具有诸多优势,如高效率、低成本和环境友好等,然而其能源消耗问题仍然是本研究关注的重点。尤其是考虑到电池容量的限制,无人机的飞行时间和采收范围均受到一定的制约。为了解决这一挑战,对采收过程进行了全面的规划,首先对每个采收点的采收区域进行了精确划分,以避免无人机在飞行过程中发生不必要的重复飞行。这一举措最大限度地减少了能源消耗和电池损耗,从而提高了无人机的采收效率和飞行时间利用率。

由于本研究所需数据量较大,难以对所有试验所需菠萝进行采收并进行重量测量,因此采用随机采收试验田菠萝并测量其重量的方法获取试验所需数据。测量结果显示,所采集的菠萝平均果重约为0.6 kg,即所有菠萝的重量数据均随机分布在0.3~1.0 kg之间。同时,本研究选用了具备智能充电和电池容量管理功能的无人机,通过对其进行定期充电和电池容量管理,以确保无人机在采收过程中不

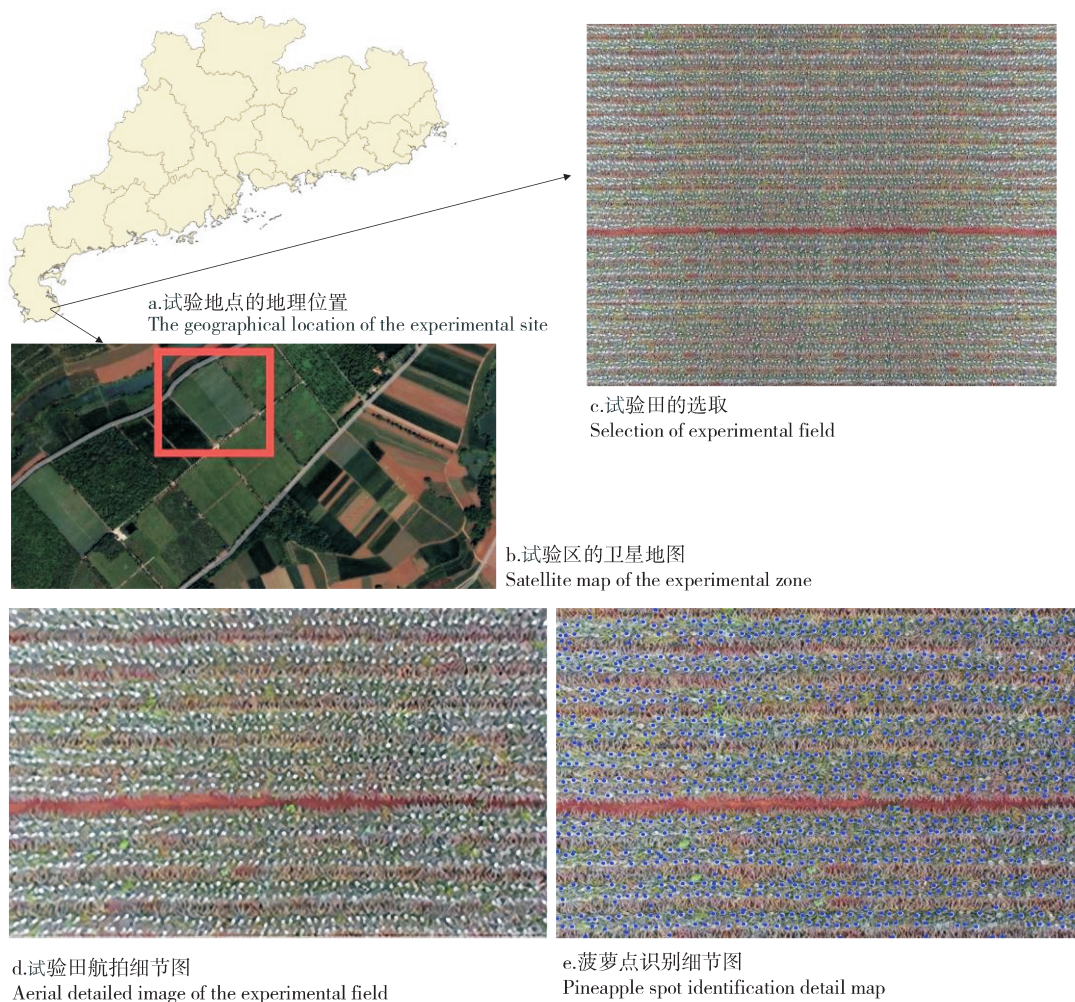


图2 无人机采收菠萝试验田选择及坐标识别图

Figure 2 Selection and coordinate identification map of pineapple harvesting experiment field by UAV

会出现能量不足的情况,从而保证无人机能够持续进行长时间的飞行和采收工作。

通过进行详尽的建模分析及数据计算后,本研究发现,在0.067 hm<sup>2</sup>的菠萝试验田中设立12个收集点时,无法确保每个收集点所需覆盖的菠萝采收任务在无人机的电池容量范围内完成,因此无法实现整个采收流程。因此,为了在不更换无人机电池的前提下完成采收任务,0.067 hm<sup>2</sup>菠萝田至少需要设置13个收集点。在这种配置下,无人机最多能采收大约480个菠萝,覆盖的采收面积大约为44 m<sup>2</sup>(图3)。通过对这些数据的分析,本研究有效地评估了无人机能耗对执行农业采收任务的影响,进而

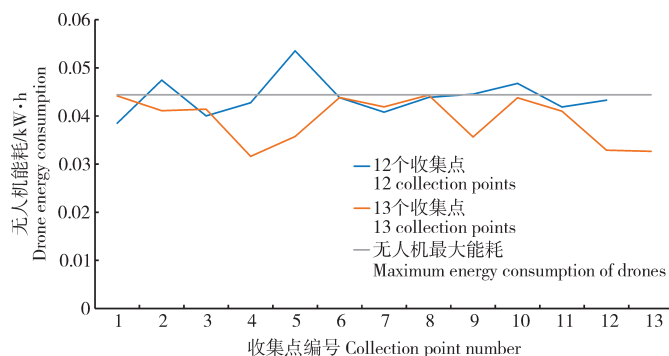


图3 设立不同数量收集点能耗与最高能耗对比

Figure 3 Comparison of energy consumption of collection points numbers with the maximum energy consumption

实现了采收过程的自动化与智能化,为农业无人机的应用提供了重要的理论和实践基础。

经程序计算,通过对无人机采收菠萝的能耗、成本等进行计算,旨在找到收集点的最佳设置数量。经过试验计算,以设立15个收集点为例,按每个收集点所负责采收菠萝的数量从少到多对收集点进行排序,不同收集点内无人机的总路程及总成本随采收菠萝个数的增加呈逐步上升趋势,但由于菠萝到收集点的距离不同,存在虽采摘菠萝个数增多但总路程及总成本降低的情况(图4)。所以,在不考虑收集点成本的情况下,仅依靠菠萝采收数量确定采收区域划分并不一定能够最大限度地提高采收效率,因此还需对其进行进一步的考量和分析。

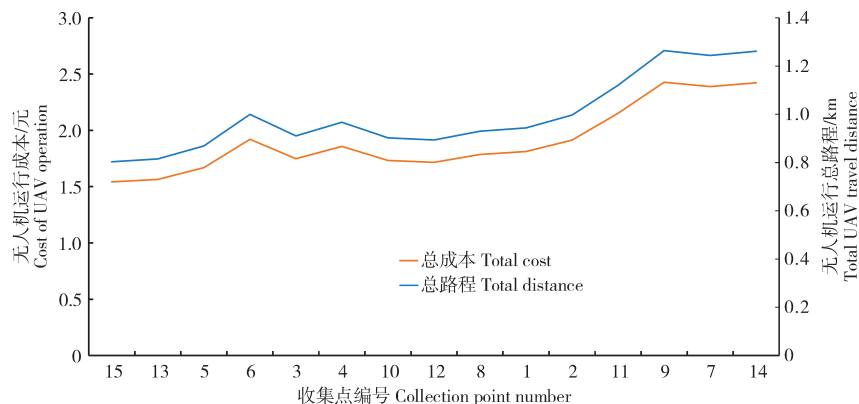


图4 不同收集点的总路程与无人机综合运营成本变化

Figure 4 Changes in total distance and comprehensive operation costs of drones for different collection sites

针对不同数量的收集点,本研究进行了总路程、总能耗和总成本的试验计算和分析。具体而言,本研究针对设置13~18个收集点的情况,对总路程和总成本进行了详尽的计算,并对数据进行了无量纲化处理以便更好地比较和分析。所得的计算结果如图5。

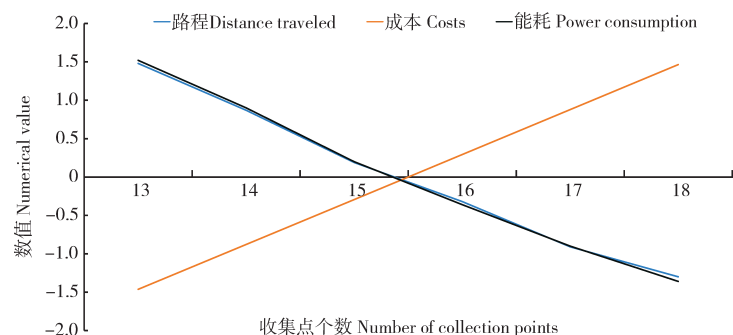


图5 不同数量收集点结果对比

Figure 5 Comparison of results of different numbers of collection sites

通过对图5中不同数量收集点的总能耗、总路程和总成本进行分析,可以观察到一个有趣的趋势。随着收集点数量的增加,无人机的总路程和总能耗呈现出递减的趋势,而总成本则呈现递增的趋势。这3个趋势在设立15个收集点附近呈现出相互交错的状态。因此,从提高综合效率和节约经济成本的角度出发,认为在0.067 hm<sup>2</sup>菠萝田设立15个收集点是相对完美的选择。这样的选择不仅可以保证采收效率,还能尽可能地降低采收成本,实现采收过程的最优化。

0.067 hm<sup>2</sup>菠萝地的试验田划分情况如图6。采用K-means聚类算法,将0.067 hm<sup>2</sup>菠萝试验田分割成15个区域,通过算法确定的簇心位置即作为收集点,目的是确保无人机的总飞行距离达到最小。基于模型的计算,发现在湛江市徐闻县的0.067 hm<sup>2</sup>菠萝地中,当设立15个收集点时,可以实现均衡的最优结果。

在经济成本的考虑中,收集点所需的收集筐购买成本为人民币1 500元,无人机的购买成本为人民币20 000元。考虑到无人机及收集筐可进行重复利用,从而在计算中去除这部分的购买成本。在

这种配置下,无人机进行菠萝采收及运输的成本计算为28.7元,其飞行能耗为0.48 kWh,总飞行距离为14.92 km。这一分析表明,通过科学的收集点布局和合理的资源配置,可以有效降低无人机采收菠萝的经济和能源成本,同时提高作业效率。

传统的菠萝采摘方式存在着严重的采摘人员老龄化问题,且采摘成本相对较高。人工采摘的成本为0.15~0.20元·斤<sup>-1</sup>,占据了整个菠萝生产成本的25%。一般情况下,菠萝的每公顷产量约为133 kg,而采用优良品种并进行科学管理后,每公顷产量可提高至约266 kg。据此推算,每公顷菠萝田的人工采摘成本约为15 000元,0.067 hm<sup>2</sup>菠萝田人工采摘成本高达1 005元,远远高于应用无人机采收菠萝所需的成本。

在本研究中,采用单台无人机对0.067 hm<sup>2</sup>菠萝田进行采收,共分为15次采摘块,并且每次仅采摘1个菠萝进行运输。以第3号收集点为例,运用遗传算法对采摘路径进行了模拟,并绘制了相应的路线图如图7。

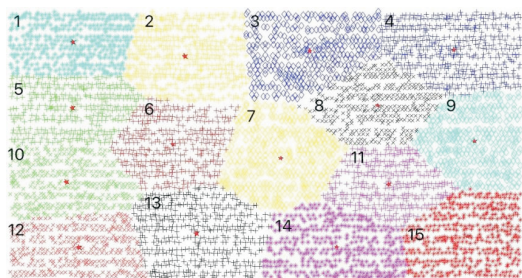


图6 收集点的位置及区域划分

Figure 6 Location and zoning of collection points

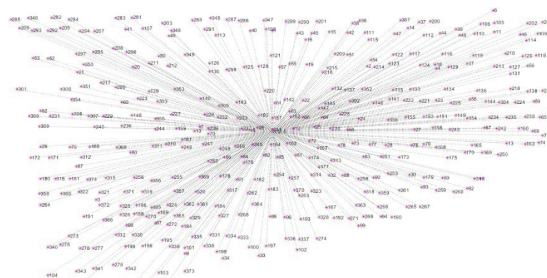


图7 3号收集点的无人机采收路线图

Figure 7 Drone pickup route of collection point 3

#### 4 讨论与结论

无人机采收菠萝相比人工采收具有显著优势。无人机能够连续高效地工作,显著减少对人工劳动力的需求和工作时间,降低了人工采收的相关费用,从而显著提高了总体经济效益。此外,与大型机械采收相比,无人机表现出更高的灵活性和机动性,能够在复杂地形和狭小空间中进行精细作业。无人机的作业精准度较高,借助先进的传感器和图像处理技术,能够精准识别和采摘菠萝,从而减少了采收损耗。在使用和维护成本方面,无人机也表现出明显优势。无人机的运行成本较低,且易于维护,进一步降低了长期使用的经济负担。环保方面,无人机的优势更为突出。由于其重量轻、能耗低,无人机对土壤的压迫和破坏较小,有助于保持农田土壤的结构和健康。而人工采收和大型机械作业往往会对土壤造成压实和破坏,影响其长期健康。因此,无人机采收菠萝不仅提高了采收效率和经济效益,还在环境保护和可持续农业发展方面具有重要意义。

本文主要研究应用无人机采收菠萝过程中田间收集点的优化配置问题,选取位于湛江市徐闻县曲界镇的“菠萝的海”景区作为实验田。首先,利用OpenCV图像处理技术对菠萝的位置进行精确识别,以获取菠萝的坐标数据。其次,采用K-means聚类算法对菠萝田进行区域划分及最优收集点的位置选择。K-means算法对菠萝田进行有效的区域划分,以保证每个区域内菠萝到该区域收集点的距离相较其他收集点为最短距离。再次,针对应用无人机进行菠萝采收工作,考虑无人机的自身性能、飞行路径和负载等因素,将无人机采收菠萝所需的能耗及采收成本作为优化目标,建立了一个综合的能耗及成本模型。通过综合对比不同路径、能耗及成本数据,确定最佳的收集点设置数量。实验结果表明,合理的收集点配置显著提升了无人机采收菠萝的效率和经济效益,并为无人机在农业中的应用提供了科学依据和实用参考。实验结果表明:在不更换电池的情况下,一架农业无人机最多采收菠萝数约为480个,收地面积约为44 m<sup>2</sup>。0.067 hm<sup>2</sup>菠萝地使用无人机进行菠萝采收时,至少需要设立13个收集点,最优应划分建立15个收集点依次进行菠萝采收,确定每个收集点的位置,构成每次只采收1个菠萝的无人机采收网络。应用无人机进行菠萝采收,0.067 hm<sup>2</sup>菠萝地使用一架无人机进行采收,

在不考虑收集箱和无人机的购买成本的情况下,0.067 hm<sup>2</sup>菠萝田应用无人机进行菠萝采收所消耗成本仅为28.7元,最优总路程为14.92 km,无人机总能耗为0.48 kWh,远远低于人工采收成本。

未来,可进一步优化无人机采收菠萝方式,适当提高无人机单次采收个数,在不超过无人机的最大载荷的情况下,采收多个菠萝后运输至收集点,这样可以减少运输总路程,从而节约能耗。后续分析更多无人机能耗影响因素使能耗模型更加精细化,且进一步优化选址后进行采收的路线规划。

#### 参考文献:

- [1] 张梅生. 农业植保无人机的现状及产业发展探究[J]. 南方农业,2020,14(21):156-157.
- [2] WEBER A, FRIEDRICH C J. Alfred Weber's theory of the location of industries[J]. *Journal of Political Economy* 1930,38(2):232-234.
- [3] ZHANG S Z, LEE C K M. Optimization of facility location problem in reverse logistics network using Artificial Bee Colony algorithm[C]//2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Bangkok, Thailand: IEEE, 2013:1348-1352.
- [4] OTTO A, AGATZ N, CAMPBELL J, et al. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey[J]. *Networks*, 2018,72(4):411-458.
- [5] 刘晓鹏. 美团无人机助力“最后一公里”配送[J]. *中国物流与采购*, 2022(18):28-29.
- [6] BRIAN GERMAN, DASKILEWICZ MATTHEW, HAMILTON THOMAS-K, et al. Cargo delivery in by passenger eVTOL aircraft: A case study in the San Francisco Bay Area[C]//2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, Florida. Reston, Virginia: AIAA, 2018:2006.
- [7] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via Lévy flights[C]//2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), Coimbatore, India: IEEE, 2009:210-214.
- [8] 赵世安, 屈迟文. 改进的布谷鸟算法求解物流配送中心选址问题[J]. *数学的实践与认识*, 2017,47(3):206-213.
- [9] 钱欣悦, 张洪海, 张芳, 等. 末端配送物流无人机起降点选址分配问题研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021,45(4):682-687,693.
- [10] 张连奎. 基于元胞自动机的城市末端配送网点选址研究[D]. 延吉: 延边大学, 2018.
- [11] MARTIN ESTER, KRIEGEL HANS-PETER, SANDER JORG, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[J]. *Knowledge Discovery and Data Mining*, 1996,96(34):226-231.
- [12] MARTIN ESTER, KRIEGEL HANS-PETER, SANDER JORG, et al. Incremental clustering for mining in a data warehousing environment[C]//Very Large Data Bases. Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1998:323-333.
- [13] GUERREIRO N M, HAGEN G E, MADDALON J M, et al. Capacity and throughput of urban air mobility vertiports with a first-come, first-served vertiport scheduling algorithm[C]//AIAA Aviation 2020 Forum. Virtual Event. Reston, Virginia: AIAA, 2020:2903.
- [14] VASCIK P D, HANSMAN R J. Development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors[C]//AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego, California. Reston, Virginia: AIAA, 2019:0526.
- [15] VENKATESH N, PAYAN A P, JUSTIN C Y, et al. Optimal Siting of sub-urban air mobility (sUAM) ground architectures using network flow formulation[C]//AIAA Aviation 2020 Forum. Virtual Event. Reston, Virginia: AIAA, 2020:2921.
- [16] JEONG J, SO M, HWANG H Y. Selection of vertiports using K-means algorithm and noise analyses for urban air mobility (UAM) in the Seoul metropolitan area[J]. *Applied Sciences*, 2021,11(12):5729.
- [17] 褚衍昌, 王雪婷. 卡车搭载无人机的同时取送货路径规划研究[J]. *计算机应用与软件*, 2023,40(12):56-63.
- [18] 张荣, 庞梦荻, 刘斌. 生鲜农产品车辆和无人机组组合配送路径优化及效果测试[J]. *河南农业大学学报*, 2024,58(1):96-105.
- [19] 许菱, 杨林超, 朱文兴, 等. 农村电商物流下无人机与车辆协同配送路径优化研究[J]. *计算机工程与应用*, 2024,60(1):310-318.
- [20] 刘苏晴. 5G网络环境下的“无人机+车辆”应急物资配送优化方案[J]. *信息系统工程*, 2023(5):112-115.
- [21] 彭勇, 任志. 公交辅助无人机的城市物流配送模式研究[J/OL]. *计算机工程与应用*, 2023:1-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20230510.1001.002.html>.
- [22] 马瑞峻, 马创立, 詹佳豪, 等. 一种夹切一体的菠萝采收器. 采收方法以及采收机器人. 202111287512.7[p]. 2021-12-14.
- [23] LIU Y, LIU Z, SHI J M, et al. Two-echelon routing problem for parcel delivery by cooperated truck and drone[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020,51(12):7450-7465.