

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.002

基于多变异分组遗传算法的多机协同作业静态任务分配

王 猛 赵 博 刘阳春 汪凤珠 伟利国 方宪法

(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为解决农业机械(简称农机)多机协同作业前的任务分配问题,提出了基于多变异分组遗传算法的同种农机多机协同作业静态任务分配方法。首先,根据农机合作社实际作业模式,基于农机性能参数和任务参数,综合考虑机群的作业时间、作业油耗和路程代价等因素,建立了多机协同代价函数;根据多机协同作业特点,构建了多变异分组遗传算法,设计了两段式编码、分组交叉算子和多种变异算子,并建立了农机多机协同作业静态任务分配模型;通过仿真试验对比分析了算法的性能,并采用不同的代价权重进行了任务分配仿真试验;最后,采用不同的权重对实际深松作业进行任务分配试验,对本文提出算法进行了验证。结果表明:在不同权重下,基于多变异分组遗传算法的多机协同静态任务分配的机群代价比实际作业代价降低了 29.48% ~ 55.00%,选取合理权重的静态任务分配具有较高的分配效率和分配性能,能够满足实际多机协同作业中任务分配的要求。

关键词: 农业机械; 多机协同作业; 静态任务分配; 多变异分组遗传算法

中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0019-10

OSID:



Static Task Allocation for Multi-machine Cooperation Based on Multi-variation Group Genetic Algorithm

WANG Meng ZHAO Bo LIU Yangchun WANG Fengzhu WEI Liguo FANG Xianfa

(State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Agricultural machinery cooperative operation often face the situation that multiple agricultural machines work together to complete multiple tasks in a working season. Reasonable task allocation before the operation can significantly improve the efficiency of the group's operations and shorten the operating time. In order to solve the problem of static task allocation for multi-machine cooperation of the same kind of agricultural machinery, a static task allocation method of multi-machine cooperation based on multi-variation group genetic algorithm (MGGa) was studied. Firstly, according to the operation mode of agricultural machinery cooperatives and considering the operating time, the operating fuel consumption and the distance cost of the group comprehensive, a multi-machine cooperative cost function was established based on agricultural machine performance and task parameters. Secondly, based on the characteristics of multi-machine cooperative operation, a MGGa was designed and a static multi-machine cooperative task allocation model was established. Then, simulation experiment was carried out to compare and analyze the performance of the algorithm. And different weights were used for task allocation simulation experiments. Finally, practical experiment was carried out with different weights to verify the practicability of the algorithm by assigning tasks to actual deep loosening operations. Practical experiment results showed that the MGGa based task assignment multi-machine collaboration cost was 29.48% ~ 55.00% lower than the actual work cost, which indicated that the MGGa based agricultural multi-machine cooperative static task allocation method had better distribution efficiency and higher distribution performance, and met the requirements of actual needs of agricultural multi-machine cooperative task allocation.

Key words: agricultural machinery; multi-machine cooperation operation; static task allocation; multi-variable group genetic algorithm

收稿日期: 2020-08-25 修回日期: 2020-09-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700403)

作者简介: 王猛(1987—),男,博士生,主要从事农机多机协同和自动驾驶技术研究, E-mail: 854995120@qq.com

通信作者: 方宪法(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化和农业工程技术研究, E-mail: fangxf@caams.org.cn

0 引言

农业生产一般具有很强的“农时”性和严格的作业窗口期。随着农机自动驾驶技术的发展和推广,智能农机及其导航技术已成为智慧农业的重要组成部分,多台农机或多种农机的协同作业技术可发挥机群作业优势、提高农机作业效率,已逐渐成为新的研究热点^[1-3]。

多机协同作业技术在机器人、无人机等领域已进行了较多的研究,任务分配是其研究热点之一,即给定一个机器人(或无人机)集合、一个任务集合及系统性能评价指标,为每个子任务寻找一台合适的机器人(或无人机)负责执行该子任务,且使机器人(或无人机)系统完成任务集合中的全部任务时所获得的收益最大^[4]。通过对多机作业进行任务分配可以加快机群任务执行速度、降低系统消耗,并提高工作效率^[5-15]。多机协同任务分配技术在机器人工业生产、水下机器人搜索、无人机作战和无人机灾难搜索等领域已进行了较深入的试验研究和应用^[16-20]。多机协同任务分配技术在农业领域研究较少,相比于无人机或机器人的任务分配问题,农机作业情况更加复杂,农机需依次到达目的地,并且在目的地完成作业。JENSEN等^[21]提出1台运粮车为多台收获机运粮的路径规划方法,多台收获机在不同的地块进行收获作业,运粮车根据自身速度和收获机的作业位置、作业路径和作业速度等参数,通过Dijkstra算法规划运粮车田间和田内路径,实现了行驶距离和用时的最优,该方法不仅实现了运粮车田间的路径规划,也实现了田内的路径规划,具有较高的参考价值。以前,农机常常分散在农村多个机主手中,农机数量和性能与需要作业的任务地块参数未知,不具备任务分配条件。我国农机合作社的发展和农机作业远程平台的研发为农机任务分配技术提供了必要性和可行性条件^[22-23]。

本文根据我国农机合作社农机实际作业模式,综合考虑机群的作业时间、作业油耗和路程代价等因素,构建多机协同目标函数,根据多机协同作业特点构建多变异分组遗传算法,设计两段式编码、分组交叉算子和多种变异算子,优化目标函数,降低系统代价,以实现多机协同静态任务分配。

1 多机协同场景

农机多机协同作业静态任务分配指农机机群作业前将作业任务和任务顺序分配给指定农机的过程。以某个作业季农机合作社中常见作业场景为

例,即合作社的多台同种农机同时从车库出发,分别完成各自多个指定的任务后又回到车库。用集合 $\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 表示 m 台作业农机;用集合 $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 表示 n 个作业任务。第 i 台农机的性能参数表示为 $a_i = \{v_{wi}, d_i, w_i, v_i, t_{ii}, c_{wi}, c_{vi}\}$ ($i = 1, 2, \dots, m$),其中 v_{wi} 表示第 i 台农机作业的平均速度(km/h), d_i 表示第 i 台农机的作业幅宽(m), w_i 表示第 i 台农机的平均作业能力(m^2/h), v_i 表示第 i 台农机非作业状态行驶平均速度(km/h), t_{ii} 表示第 i 台农机作业中每次调头的平均时间(h), c_{wi} 表示第 i 台农机作业时单位时间的平均油耗(L/h), c_{vi} 表示第 i 台农机非作业状态行驶单位时间的平均油耗(L/h);第 j 个任务的参数表示为 $T_j = \{x_{1j}, y_{1j}, x_{2j}, y_{2j}, x_{3j}, y_{3j}, x_{4j}, y_{4j}, d_{Tj}, l_{Tj}, S_j\}$ ($j = 1, 2, \dots, n$),其中 (x_{1j}, y_{1j}) 、 (x_{2j}, y_{2j}) 、 (x_{3j}, y_{3j}) 和 (x_{4j}, y_{4j}) 分别表示任务 T_j 地块4个顶点的坐标, d_{Tj} 表示任务 T_j 垂直作业路径的宽度, l_{Tj} 表示任务 T_j 平行作业路径的长度, S_j 表示任务 T_j 的作业面积,如图1所示。

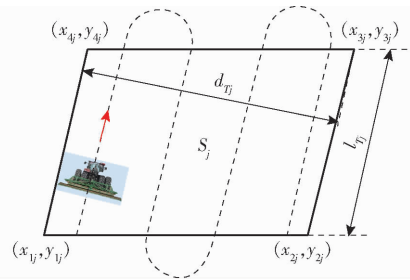


图1 任务参数示意图

Fig. 1 Task parameters schematic diagram

2 多机协同代价数学模型

2.1 多机协同作业基本假设

农机协同作业实际情况复杂,为了简化问题,方便计算,根据农机合作社的作业特点设定的基本假设如下:①农机性能参数和任务参数已知。②需要作业的任务数量大于农机的数量。③每个任务地块只能有一台农机作业,单台农机可以完成多地块作业。④每个任务地块分配给指定农机后,任务地块路径规划结果已知。⑤每个作业任务面积适中。⑥农机同时从车库出发,完成分配的全部任务后回到车库。⑦全部农机完成分配的任务回到车库后认为任务全部完成。

2.2 多机协同代价函数

农机完成作业任务的代价包括农机到达指定任务和回到车库的路程、总的作业时间和油耗等,并根据每个部分的重要程度定义该部分的权重。

对于 m 台农机, n 个作业任务的情况,给出以下目标函数

$$\min f = \alpha \left(\sum_{i=1}^m s_i \right) + \beta \left(\sum_{i=1}^m c_i \right) + \gamma (\max(t_i)) \quad (1)$$

式中 f ——多机协同代价

s_i ——第 i 台农机完成作业任务时路上的总路程

α, β, γ ——权重, $\alpha, \beta, \gamma \in [0, 1]$

c_i ——第 i 台农机完成任务的油耗

t_i ——第 i 台农机完成任务的时间

(1) 总路程 s_i 由 3 部分组成: 农机 a_i 从车库到其第 1 个任务 T_j 的路程 $s(a_i, T_j)$; 农机 a_i 从其第 j 个任务 T_j 到下一个任务 T_k 的路程 $s(a_i, T_j T_k)$; 农机 a_i 从其最后一个任务 T_l 回到车库的路程 $s(a_i, T_l)$, 其中 $j, k, l \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

$$s_i = \sum_{j=1}^n s(a_i, T_j) x(a_i, j) + \sum_{l=1}^n s(a_i, T_l) x(a_i, l) + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n s(a_i, T_j T_k) x(a_i, jk) \quad (2)$$

其中

$$x(a_i, j) = \begin{cases} 1 & (T_j \text{ 是 } a_i \text{ 执行的第 1 个任务}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

$$x(a_i, l) = \begin{cases} 1 & (T_l \text{ 是 } a_i \text{ 执行的最后 1 个任务}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (4)$$

$$x(a_i, jk) = \begin{cases} 1 & (T_j, T_k \text{ 是 } a_i \text{ 按任务分配顺序执行的任务}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

(2) 油耗 c_i 由 3 部分组成: 农机路上油耗、作业过程中调头油耗和作业油耗。

$$c_i = \frac{s_i}{v_i} c_{vi} + \sum_{j=1}^n k_{ij} t_{ii} c_{vi} y(a_i, j) + \sum_{j=1}^n \frac{S_j}{w_i} c_{wi} y(a_i, j) \quad (6)$$

$$y(a_i, j) = \begin{cases} 1 & (T_j \text{ 是 } a_i \text{ 执行的作业}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (7)$$

$$k_{ij} = \left\lceil \frac{b_{T_j}}{b_i} \right\rceil \quad (8)$$

式中 k_{ij} ——第 i 台农机在第 j 个任务地块作业行数

$\lceil \cdot \rceil$ ——向上取整运算符

(3) 完成任务时间 t_i 由 3 部分组成: 农机路上时间、农机作业时间和农机田间调头时间。

$$t_i = \frac{s_i}{v_i} + \sum_{j=1}^n \frac{S_j}{w_i} y(a_i, j) + \sum_{j=1}^n k_{ij} t_{ii} y(a_i, j) \quad (9)$$

(4) 将车库作为起点, 即第 1 个点, n 个任务依次作为第 2 到 $n+1$ 个点, 任意两点间实际可行驶的最短距离的矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \cdots & d_{1,n+1} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n+1,1} & \cdots & d_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $d_{i,j}$ ——第 $i-1$ 个任务点到第 $j-1$ 个任务点之间可行驶的最短距离 ($i, j = 2, 3, \dots, n+1, i \neq j$), km

如果 j, k 2 个任务地头相邻且作业过程中农机可从地头连接处进入地块, 如图 2 所示, 则该 2 个任务点之间的最短距离为 0。矩阵 D 是一个对角线为 0 的对称矩阵, 第 1 行 $d_{1,j}$ ($j = 2, 3, \dots, n+1$) 表示农机从车库到第 $j-1$ 个任务点的距离。



图 2 任务地头相邻情况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of adjacent situation at task site

式(2)中 $s(a_i, T_j) = d_{1,j+1}$, $s(a_i, T_l) = d_{1,l+1}$ 。农机进入任务地块的方式分为从路上进入和从地头连接处进入, 令 $x = 0$ 表示农机从路上进入任务地块, $x = 1$ 表示农机从地头连接处进入任务地块; 令 $y = 0$ 表示农机在该任务完成后回到路边, $y = 1$ 表示农机在该任务完成后回到地头连接处。农机进入第 1 个任务地块时从路上进入, 第 i 台农机在第 j 个任务地块作业完成后的位置

$$y_{ij} = (k_{ij} + x_{ij}) \% 2 \quad (11)$$

式中 x_{ij} ——第 i 台农机进入第 j 个任务地块的标识

$\%$ ——求余运算符

当 $d_{j+1,k+1} \neq 0$ 时, 农机 a_i 从任务 j 到任务 k 的距离为

$$s(a_i, T_j T_k) = d_{j+1,k+1} + y_{ij} l_{T_j} \quad (12)$$

$$x_{ik} = 0 \quad (13)$$

当 $d_{j+1,k+1} = 0$ 时, 任务 j, k 地头相连, 此时农机 a_i 从任务 j 到任务 k 的距离为

$$s(a_i, T_j T_k) = |y_{ij} - 1| l_{T_j} \quad (14)$$

$$x_{ik} = 1 \quad (15)$$

3 任务分配方法

将 n 个任务有序分配给 m 台农机, 每台农机至少分配 1 个任务, 共 $n! C_{n-1}^{m-1}$ 种可能。当 n 较大时, 无法使用穷举法来获得最优任务分配, 此时常用启

发式算法得到一个可行解^[24-26],本文采用遗传算法求该问题的可行解。

遗传算法通常包括选择、交叉和变异3个基本步骤,本文提出一种多变异分组遗传算法,设计了两段式编码,采用了轮盘赌选择染色体的方法,设计了交叉和多种变异算子,有效地解决了多机协同任务分配问题。

3.1 算法设计

3.1.1 编码

根据文献[24]设计了两段式编码,如图3所示。第1段表示任务的排序, n 个任务由1到 n , n 个数字表示,共 n 位;第2段表示分组的位置,共 $m-1$ 位($n=12, m=3$)。第 i 台农机的任务用集合 C_i 表示,则某一个父代染色体由集合 $p = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 表示。

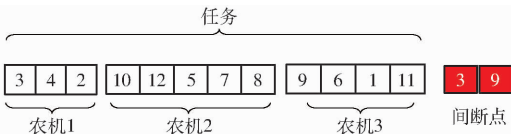


图3 任务编码分组示意图

Fig.3 Task coding grouping schematic diagram

3.1.2 选择算子

定义适应度函数,适应度越高的染色体表示任务分配效果越好。适应度函数

$$f_{\text{Fit}} = \frac{1}{f} \quad (16)$$

(1) 交叉算子选择

采用轮盘赌选择法选择种群中进行交叉的个体。

(2) 最优个体保留

为提高算法效率采用最优个体保留方法。最优个体保留步骤:①找出当前群体中适应度最高的个体和适应度最低的个体。②若当前群体中最佳个体适应度比迄今为止最佳个体的适应度高,则以当前种群中的最佳个体作为迄今为止最佳个体。③用迄今为止最佳的个体替换当前群体中最差的个体。

3.1.3 交叉算子

分组交叉算子设计过程如图4所示,其实现方式如下:①用轮盘赌方法选择2个父代,同时产生1到 m 的随机序列。②按随机序列的顺序进行分组遗传,设随机序列第1个数为 k ,产生随机数 $R_r \in [0, 1)$,如果 $R_r < 0.5$ 则第1个父代的第 k 组作为子代的第 k 组,如果 $R_r \geq 0.5$ 则第2个父代的第 k 组作为子代的第 k 组。③从2个父代中删除子代中包含的任务,按照步骤②方式进行序列第2到 m 位代表的组数进行分组交叉遗传。④将未参与交叉运算的剩余任务随机插入到子代中得到最终的

子代。

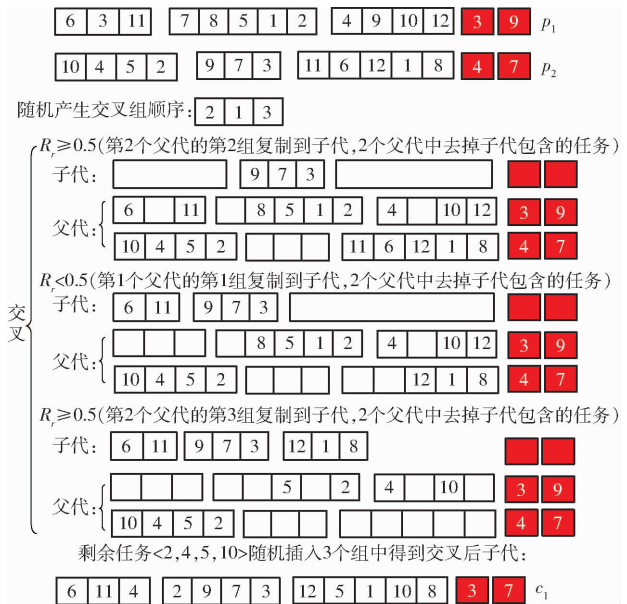


图4 交叉算子过程

Fig.4 Crossover operator process

3.1.4 变异算子

为了加快进化过程,增加基因多样性,提高遗传算法效率,提出几种变异算子。

3.1.4.1 组间转移变异算子

设计了组间转移变异算子(ITVO),过程如图5所示。①在某条染色体随机选取2个不同的组作为移出组和移入组 $O_{\text{group}}, I_{\text{group}} \in \{1, 2, \dots, m\}$ 。②如果移出组 O_{group} 中任务数量大于1,则随机从移出组和移入组选取2个点 $O_{\text{point}}, I_{\text{point}}$ 作为移出任务位置和移入任务位置。③将移出任务位置 O_{point} 对应的任务移动到移入位置 I_{point} 对应的任务前完成组间转移,并相应修改分组间断点的值。

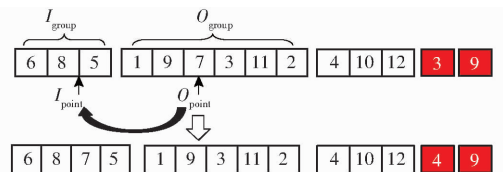


图5 组间转移变异算子示意图

Fig.5 Schematic of transfer mutation operator between groups

3.1.4.2 组间交换变异算子

为了提高染色体多样性,加快算法的收敛,设计了一种组间交换算子(IEVO),交换算子的实现形式如图6所示。①从染色体的第1到 m 组分别随机选择用做交换任务的点。②移除选中点的任务。③将移除的任务进行排序,并按排列后的顺序插入到交换任务点。

3.1.4.3 2-opt局部优化变异算子

2-opt属于局部搜索算法,是解决组合优化问题的有效工具,该算法的实现方式:①在染色体的某

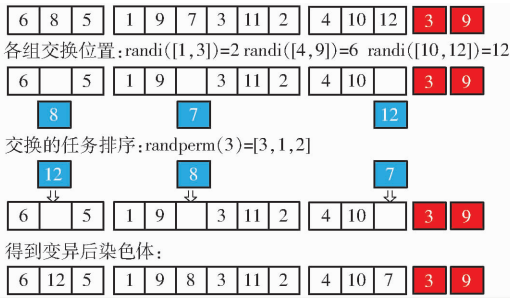


图 6 组间交换变异算子

Fig. 6 Inter-group exchange mutation operator

组内随机选取 2 个点 i, j 。② i 前的路径不变添加到新路径中,将 i 到 j 之间的路径翻转其编码后添加到新路径,将 j 之后的路径不变添加到新路径。

2-opt 算法示意图如图 7 所示,该示意图中基因分组间断点为 3、9,2-opt 优化组在第 2 组,2-opt 变异点为 4、8。

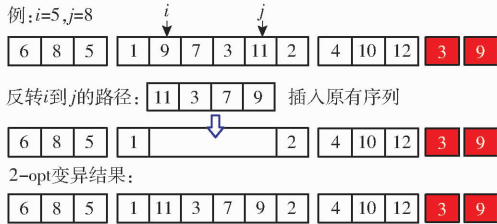


图 7 2-opt 算法示意图

Fig. 7 2-opt algorithm diagram

3.1.4.4 突变算子组合

将 3 种变异算子组合成多变异算子网络,如图 8 所示,每个节点表示一个算子,有向边表示上一个算子结束后选择下一个算子的概率。

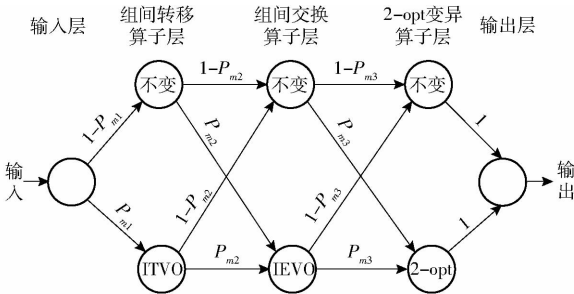


图 8 多变异算子网络

Fig. 8 Multi-variation operator network

3.2 算法流程

本文设计算法的流程如图 9 所示,具体为:

(1) 根据编码方式产生数量为 N 的初始种群作为父代,计算每个父代的适应度,定义分组交叉概率 P_c 、组间转移变异概率 P_{m1} 、组间交换变异概率 P_{m2} 、2-opt 局部优化变异概率 P_{m3} 和迭代次数 K 。

(2) 基于轮盘赌方法选择 2 个父代,产生随机数 $R_r \in [0, 1)$,如果 $R_r < P_c$ 执行分组交叉算子,如果 $R_r > P_c$,适应度较好的父代直接复制到子代,计算子代适应度和种群数量,如果子代种群数量小于

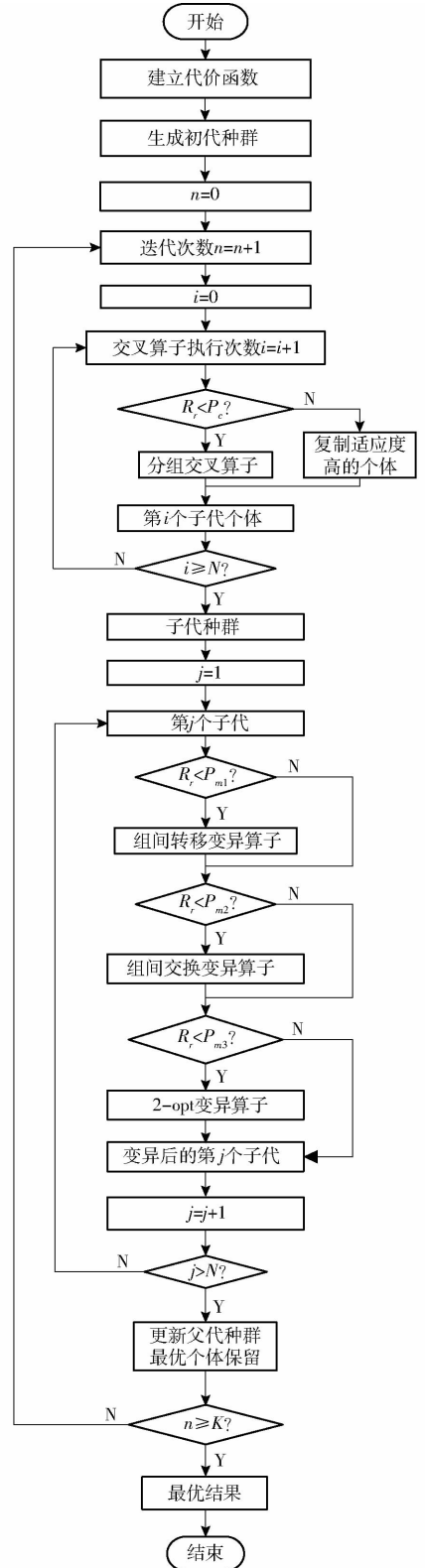


图 9 静态任务分配流程图

Fig. 9 Flow chart of static task assignment

N ,重复步骤(2)。

(3) 从子代第 1 个个体开始,产生随机数 $R_r \in [0, 1)$,如果 $R_r < P_{m1}$,则该个体执行组间转移变异算子,否则该个体保持不变;产生随机数 $R_r \in [0, 1)$,如果 $R_r < P_{m2}$,则该个体执行组间交换变异算子,否则该个体保持不变;产生随机数 $R_r \in [0, 1)$,

如果 $R_f < P_{m3}$, 则该个体执行 2-opt 变异算子, 计算变异后的适应度, 如果适应度增加则执行 2-opt 变异, 如果适应度不变或减少则不执行 2-opt 变异, 否则该个体保持不变; 重复步骤 (3), 到最后一个子代个体被执行。

(4) 将此时的子代作为当前种群, 计算变异后每个个体的适应度, 执行最优个体保留方法。

(5) 判断是否达到迭代次数, 如果未达到迭代次数, 执行步骤 (2); 如果达到迭代次数, 则选择当前种群适应度最高的个体作为该任务分配的解。

4 仿真分析

为了确定算法参数并验证算法的有效性, 设计了 12 个任务地块和 3 台农机的仿真试验, 假设任务分配过程中, 任务地块作业路径方向与任务地块现有实际作业路径方向相同。确定参数过程中取目标函数式 (1) 中系数 $\alpha = 0$ 、 $\beta = 0$ 、 $\gamma = 1$, 即直接用完成任务时用时最长的农机作业时间作为机群代价优化目标函数, 试验任务电子地图如图 10 所示。图中 1~12 表示任务地块编号。



图 10 试验任务电子地图

Fig. 10 Test mission electronic map

3 台农机的性能如表 1 所示, 根据平台得到任务参数如表 2 所示。

表 1 农机性能参数

Tab. 1 Performance parameters of agricultural machineries

农机序号	作业幅宽/ m	作业能力/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	路上速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	作业状态油耗/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	非作业状态油耗/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	调头时间/ h
1	6.9	7 000	10	7	3.0	0.004
2	5.5	5 000	10	5	2.5	0.003
3	3.7	4 000	10	4	2.0	0.002

多变异遗传算法包括 P_c 、 P_{m1} 、 P_{m2} 和 P_{m3} 4 个参数, 采用正交试验方法研究每个参数对算法的影响, 每个参数取 4 个水平, 根据单个算子优化试验结果, 选择交叉算子概率 P_c 取值 0.4~1, 间隔 0.2; 组间转移变异算子概率 P_{m1} 取值 0.4~1, 间隔 0.2; 组间

表 2 任务参数

Tab. 2 Task parameters

任务序号	宽度/m	长度/m	面积/ m^2
1	130	150	19 500
2	100	150	15 000
3	56	150	8 400
4	80	150	12 000
5	145	125	18 125
6	105	125	13 125
7	40	150	6 000
8	62	150	9 300
9	34	150	5 100
10	110	150	16 500
11	86	150	12 900
12	75	150	11 250

交换变异算子概率 P_{m2} 取值 0.4~0.7, 间隔 0.1; 2-opt 变异算子概率 P_{m3} 取值 0.4~1, 间隔 0.2。

根据参数的水平选择正交试验表 $L_{16}(4^5)$, 计算 20 次每种组合计算结果的平均值作为该种组合的优化结果, 迭代次数为 1 000 次, 通过计算极差得到参数对结果的影响从大到小依次是 P_{m2} 、 P_{m3} 、 P_{m1} 和 P_c , 取使计算结果得到最小值的参数水平: $P_{m2} = 0.7$ 、 $P_{m3} = 1$ 、 $P_{m1} = 0.6$ 和 $P_c = 0.6$ 。

为验证算法的有效性, 分别采用确定参数后的多变异分组遗传算法 (MGGA) 与文献 [23] 改进的分组遗传算法 (IGGA-SS) 和文献 [24] 多染色体遗传算法 (MGA) 对试验任务进行仿真试验, 迭代次数取 1 000 次, 重复 20 次, 每次迭代的值取 20 次试验的平均值, 得到图 11 所示结果。可以看到多变异遗传算法可以在较小的迭代次数下得到较优的结果。

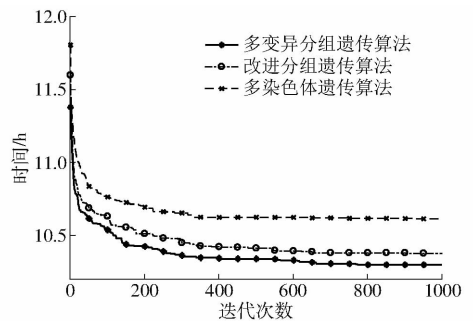


图 11 3 种算法对比结果

Fig. 11 Comparison results of three algorithms

针对 3 种算法进行 9、12、15 个任务的任务分配试验, 分别使用多变异遗传算法 (MGGA)、改进分组遗传算法 (IGGA-SS) 和多染色体遗传算法 (MGA) 对几种任务分配问题独立做 250、500、750、1 000 次迭代试验, 每个算法每次迭代 20 次取平均值, 得到的平均时间代价和平均用时如表 3 所示。

表 3 3 种算法对几种问题的解

Tab. 3 Three algorithms for several problems

问题	算法	250 次迭代		500 次迭代		750 次迭代		1 000 次迭代	
		时间/s	代价/h	时间/s	代价/h	时间/s	代价/h	时间/s	代价/h
$m = 3$ $n = 9$	MGGA	3. 322	7. 056	6. 420	7. 011	9. 286	6. 959	12. 603	6. 966
	IGGA - SS	2. 595	7. 280	4. 997	7. 193	7. 262	7. 146	9. 380	7. 155
	MGA	1. 278	7. 197	2. 571	7. 147	3. 774	7. 038	5. 051	7. 160
$m = 3$ $n = 12$	MGGA	3. 118	10. 377	6. 036	10. 302	9. 029	10. 278	12. 196	10. 278
	IGGA - SS	2. 513	10. 477	4. 919	10. 403	7. 144	10. 370	9. 471	10. 357
	MGA	1. 528	10. 664	2. 458	10. 593	3. 672	10. 640	5. 042	10. 625
$m = 3$ $n = 15$	MGGA	3. 290	13. 011	6. 467	12. 928	9. 420	12. 875	12. 454	12. 841
	IGGA - SS	2. 818	13. 087	5. 506	13. 039	7. 980	12. 989	10. 174	12. 907
	MGA	1. 356	13. 542	2. 691	13. 454	4. 063	13. 408	5. 297	13. 400
$m = 4$ $n = 15$	MGGA	4. 425	10. 751	8. 645	10. 716	12. 912	10. 611	16. 832	10. 629
	IGGA - SS	3. 723	10. 864	7. 063	10. 760	10. 256	10. 704	13. 437	10. 650
	MGA	1. 428	11. 144	2. 802	11. 117	4. 187	11. 093	5. 545	11. 021

由表 3 可知：相同迭代次数下，多变异遗传算法 (MGGA) 运行时间最长、效果最优，最小代价降低 1% ~ 5%；在分组数量和迭代次数相同条件下，随着任务数量的增加多变异遗传算法 (MGGA) 运行时间未出现明显的增加；在相同运行时间条件下，多变异遗传算法 (MGGA) 可以在较低的迭代次数下得到最优结果；对不同数量的任务和分组，多变

异遗传算法 (MGGA) 具有很好的鲁棒性；在得到相同结果的条件多变异遗传算法 (MGGA) 可减少 50% 以上的迭代次数和减少 30% 以上的运行时间。

为得到更为全面的仿真结果，选择 12 个任务和 3 台农机分别以不同的权重进行仿真试验，试验结果如表 4 所示。

表 4 不同权重的仿真结果

Tab. 4 Simulation results of different weights

权重	任务分配结果			$\sum s_i/km$	$\sum c_i/L$	$\max(t)/h$	f
	农机 1	农机 2	农机 3				
$\alpha = 1$ $\beta = 0$ $\gamma = 0$	7→8→9→11→12→ 10→4→6→5	3	1→2	13. 280	154. 103	16. 271	13. 280
$\alpha = 0$ $\beta = 1$ $\gamma = 0$	3	2→1	5→6→4→10→12→ 11→9→8→7	13. 280	153. 323	27. 596	153. 323
$\alpha = 0$ $\beta = 0$ $\gamma = 1$	5→4→2→1	11→12→10→9	3→7→8→6	22. 480	156. 101	10. 277	10. 277
$\alpha = 0. 1$ $\beta = 0. 1$ $\gamma = 0. 8$	11→12→10→9→8→ 7	1→2→4	5→6→3	16. 680	154. 799	10. 510	25. 556
$\alpha = 0. 2$ $\beta = 0. 2$ $\gamma = 0. 6$	3→5→6→10→4	11→12→9→8→7	2→1	16. 500	154. 824	10. 827	40. 761
$\alpha = 0. 3$ $\beta = 0. 3$ $\gamma = 0. 4$	11→12→10→9→8→ 7	3→4→6→5	1→2	14. 080	154. 128	10. 979	54. 854
$\alpha = 0. 4$ $\beta = 0. 4$ $\gamma = 0. 2$	7→8→9→10→12→ 11	3→1→2	5→6→4	13. 880	154. 083	11. 542	69. 494

由表 4 可知，代价的权重越大任务分配后该代价越小，在不同权重条件下，总油耗代价变化较小，

总路程代价和最长作业时间代价变化较大。当 γ 取值较大、 α 和 β 取值较小时可以得到各个代价较均

衡的任务分配效果,此时的任务分配结果更加符合实际农机作业情况。

5 实际深松作业验证试验

为验证本文提出的任务分配方法在实际作业中的效果,对实际作业情况进行任务分配试验。图12为吉林省公主岭市一合作社某日深松作业情况,该合作社共3台深松设备,该日共完成23个任务。设备性能参数和任务参数如表5、6所示,数据来源于“农业机械化精准作业平台”的实际作业数据。



图12 作业任务编码

Fig.12 Operation tasks coding

表5 农机性能参数

Tab.5 Performance parameters of agricultural machineries

农机序号	作业幅宽/ m	作业能力/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	路上速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	调头时间/ h
1	3.9	14 040	7	0.011
2	3.9	14 040	7	0.014
3	3.9	19 656	13	0.005 6

3台深松设备实际作业情况如图13所示,第1台深松设备的作业顺序14→15→22→20→18→6→8,第2台深松设备的作业顺序10→11→17→12→13→4→3→2→1,第3台深松设备的作业顺序16→23→21→19→5→7→9。机群的理论多机协同作业时间为12.57 h,理论总路程为7.0 km。



(a) 深松机1任务14→15→22→20→18→6→8



(b) 深松机2任务10→11→17→12→13→4→3→2→1



(c) 深松机3任务16→23→21→19→5→7→9

图13 实际作业情况

Fig.13 Actual operation

表6 任务参数

Tab.6 Task parameters

任务序号	宽度/m	长度/m	面积/ m^2
1	3.9	251	980
2	35	225	7 786
3	27	235	6 486
4	11	243	2 220
5	50	180	5 753
6	35	180	4 800
7	78	100	10 406
8	152	100	10 600
9	66	162	8 666
10	78	268	14 853
11	249	190	31 666
12	101	200	11 180
13	46	60	1 546
14	23	85	2 120
15	335	150	35 000
16	89	225	7 553
17	500	140	43 240
18	31	120	2 393
19	35	120	3 986
20	70	200	5 920
21	156	200	31 433
22	156	240	21 553
23	70	240	14 120

分别以不同的权重进行静态任务分配,任务分配结果如表7所示。

由试验结果可知,在不同的权重条件下多机协同代价均有明显下降,代价的权重越大,任务分配后该代价越小。当总路程代价权重较小、时间代价权重较大时,多机协同任务分配后路程代价和时间代价均有明显下降,且路程和时间代价较为均衡,各农机分配到的任务较为平均,该种情况符合农业生产实际作业需求;当总路程代价权重较大、时间代价权重较小时,多机协同任务分配后路程代价明显降低,时间代价降低不明显甚至增加,此时会出现一些农机执行大量任务其他农机执行极少量任务的情况,

表 7 不同权重下试验结果

Tab. 7 Experiment results under different weights

权重	任务分配结果			$\sum s_i /$ km	$\max(t) /$ h	路程缩短 比例/%	时间缩短 比例/%	代价缩短 比例/%
	农机 1	农机 2	农机 3					
$\alpha = 0$ $\beta = 0$ $\gamma = 1$	3→8→11→12→10→ 2→1	6→5→23→21→20→ 16→7	9→15→18→19→ 22→17→13→14→4	6.70	8.06	4.29	35.88	35.88
$\alpha = 0.3$ $\beta = 0$ $\gamma = 0.7$	3→8→11→12→10→ 2→1	6→5→23→21→20→ 16→7	11→17→23→16→ 7→8→3	6.02	8.10	14.00	35.56	31.39
$\alpha = 0.5$ $\beta = 0$ $\gamma = 0.5$	1→2→6→22→21→ 20→19→18→5	4→9→15→14→13→ 12→10	2→7→8→15→14→ 17→12→13→11→ 10→4	5.80	8.13	17.14	35.32	29.48
$\alpha = 0.7$ $\beta = 0$ $\gamma = 0.3$	1	9→5→18→19→20→ 21→22→23→16→	2→7→8→15→14→ 17→12→13→11→	4.26	11.19	39.14	10.98	41.83
$\alpha = 1$ $\beta = 0$ $\gamma = 0$	2	3→4→9→14→8→ 15→6→7→5→18→ 19→20→21→22→ 23→16→17→12→ 13→11→10	1	3.15	28.45	55.00	-126.33	55.00

该种情况不符合农业生产实际作业需求。由于时间代价包含了一个农机的总路程和总任务面积等信息,因此,时间代价权重取值较大时会得到时间和总路程较均衡的任务分配结果,该结果较符合实际农业生产需求。试验结果表明,基于多变异分组遗传算法的多机协同静态任务分配方法可有效解决多机协同静态任务分配问题。

6 结论

(1)对同种作业农机多机协同静态任务分配问题进行了研究,构建了多机协同作业代价函数模型。

(2)设计了分组交叉算子和 3 种变异算子对遗传算法进行改进,提出了基于多变异分组遗传算法

的多机协同静态任务分配方法。

(3)对基于多变异分组遗传算法的多机协同静态任务分配方法和参考算法进行对比,结果表明,多变异分组遗传算法对于不同数量的任务和分组都具有很好的任务分配效果,当迭代次数相同时,可降低 1%~5% 的代价,计算出相同代价可降低 50% 以上的迭代次数和 30% 以上的运行时间。

(4)选取不同的权重分别进行仿真分析和实际作业场景试验分析,得到不同权重系数下的任务分配结果,实际作业场景试验任务分配后,多机协同代价比实际作业代价降低了 29.48%~55.00%,表明基于多变异分组遗传算法的多机协同静态任务分配方法可较好地解决多机协同静态任务分配问题。

参 考 文 献

- [1] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2020,51(4):1-18. ZHANG Man, JI Yuhuan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001. (in Chinese)
- [2] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(8):1-17. XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180801&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [3] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020,51(1):1-18. LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200101&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.001. (in Chinese)
- [4] 蔡自兴. 多移动机器人协同原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
- [5] 申正,黄剑辉,叶骞. 基于改进遗传算法的射电望远镜主动面布线优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(6):1387-1392.

- SHEN Zheng, HUANG Jianhui, YE Qian. An improved genetic algorithm based routing optimization on active surface of radio telescope[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018,49(6):1387-1392. (in Chinese)
- [6] 吕龙, 胡海洋, 李忠金, 等. 基于蚁群算法的工作流系统优化任务分配[J]. *计算机集成制造系统*, 2018,24(7):1723-1735. LÜ Long, HU Haiyang, LI Zhongjin, et al. Optimizing task allocation in workflow system based on ant colony optimization[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018,24(7):1723-1735. (in Chinese)
- [7] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划[J/OL]. *农业机械学报*, 2019,50(增刊):34-39. CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(Supp.):34-39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2019s006&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.006. (in Chinese)
- [8] 李娟, 张昆玉. 基于改进合同网算法的异构多 AUV 协同任务分配[J]. *水下无人系统学报*, 2017,25(6):418-423. LI Juan, ZHANG Kunyu. Heterogeneous multi-AUV cooperative task allocation based on improved contract net algorithm[J]. *Journal of Unmanned Undersea System*, 2017,25(6):418-423. (in Chinese)
- [9] 张立, 王茜竹, 赵春江, 等. 基于心智与扩展合同网的半自治多智能体任务分配[J]. *计算机集成制造系统*, 2015,21(11):2885-2892. ZHANG Li, WANG Qianzhu, ZHAO Chunjiang, et al. Semi-autonomous multi-agent task allocation method based on extended contract net and mental model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015,21(11):2885-2892. (in Chinese)
- [10] ZHANG J, WANG G, SONG Y. Task assignment of the improved contract net protocol under a multi-agent system[J]. *Algorithms*, 2019,12(4):70.
- [11] EZERCAN K H H. Experienced task-based multi robot task allocation[J]. *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 2017,18(4):864-875.
- [12] LEE D. Resource-based task allocation for multi-robot systems[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018,103:151-161.
- [13] 李红. 多 AGV 的多任务分配与路径规划研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2019. LI Hong. Research on multi-task assignment and path planning of AGVs [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [14] 张哲, 吴剑, 何诚. 多无人机多目标协同近距离任务分配研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2020,40(3):69-74. ZHANG Zhe, WU Jian, HE Cheng. Collaborative close mission planning on multi-UAV and multi-target[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2020,40(3):69-74. (in Chinese)
- [15] DAI W, LU H, XIAO J, et al. Multi-robot dynamic task allocation for exploration and destruction[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020,98(2):455-479.
- [16] ELANGO M, NACHIPPAN S, TIWARI M K. Balancing task allocation in multi-robot systems using K-means clustering and auction based mechanisms[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010,38:6486-6491.
- [17] 张子迎, 吕骏, 徐东, 等. 能量均衡的围捕任务分配方法[J]. *国防科技大学学报*, 2019,41(2):107-114. ZHANG Ziyang, LÜ Jun, XU Dong, et al. Method of capturing task allocation based on energy balance[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019,41(2):107-114. (in Chinese)
- [18] 李明龙, 杨文婧, 易晓东, 等. 面向灾难搜索救援场景的空地协同无人群体任务规划研究[J]. *机械工程学报*, 2019,55(11):1-9. LI Minglong, YANG Wenjing, YI Xiaodong, et al. Swarm robot task planning based on air and ground coordination for disaster search and rescue[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019,55(11):1-9. (in Chinese)
- [19] JANATI F, ABDOLLAHI F, GHIDARY S S, et al. Multi-robot task allocation using clustering method[J]. *Robot Intelligence Technology and Applications 4*, 2017,447:233-247.
- [20] 刘振, 李伟, 任建存. 多基地多UCAV任务分配建模及求解方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019,49(1):88-93. LIU Zhen, LI Wei, REN Jiancun. Modeling of multi-base multi-UCAV task allocation and its solving method[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019,49(1):88-93. (in Chinese)
- [21] JENSEN M A F, BOCHTIS D, SØRENSEN C G, et al. In-field and inter-field path planning for agricultural transport units[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012,63(4):1054-1061.
- [22] 曹如月, 李世超, 魏爽, 等. 基于 Web-GIS 的多机协同作业远程监控平台设计[J/OL]. *农业机械学报*, 2017,48(增刊):52-57. CAO Ruyue, LI Shichao, WEI Shuang, et al. Remote monitoring platform for multi-machine cooperation based on Web-GIS[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(Supp.):52-57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s009&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.009. (in Chinese)
- [23] 刘阳春, 苑严伟, 张俊宁, 等. 深松作业远程管理系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(增刊):43-48. LIU Yangchun, YUAN Yanwei, ZHANG Junning, et al. Design and experiment of remote management system for subsoiler[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(Supp.):43-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.007. (in Chinese)
- [24] BAGHEL A S. A new grouping genetic algorithm approach to the multiple traveling salesperson problem[J]. *Soft Computing*, 2009,13:95-101.
- [25] 王勇臻, 陈燕, 于莹莹. 求解多旅行商问题的改进分组遗传算法[J]. *电子与信息学报*, 2017,39(1):198-205. WANG Yongzhen, CHEN Yan, YU Yingying. Improved grouping genetic algorithm for solving multiple traveling salesman problem[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017,39(1):198-205. (in Chinese)
- [26] 叶多福, 刘刚, 何兵. 一种多染色体遗传算法解决多旅行商问题[J]. *系统仿真学报*, 2019,31(1):36-42. YE Duofu, LIU Gang, HE Bing. Multi-chromosome genetic algorithm for multiple traveling salesman problem[J]. *Journal of System Simulation*, 2019,31(1):36-42. (in Chinese)