

# 基于改进多父辈遗传算法的农机调度优化方法

张帆, 罗锡文, 张智刚\*, 何杰, 张闻宇

(华南农业大学工程学院, 南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

**摘要:** 农机装备跨区作业存在作业任务重、转移范围大、作业时效性强等问题, 传统的农机调度缺乏科学合理的调配方案。该研究开展了基于改进遗传算法的多机协同作业任务调度方法研究。首先对多块农田需连续进行多种生产任务的问题进行分析, 建立在农机数量、转移距离、作业准备时间及作业时间等约束条件下的时间窗农机作业调度模型; 然后以最小化作业时间为优化目标, 提出改进多父辈遗传算法 (Improved Multi-parent Genetic Algorithm, IMPGA) 的优化方法求解农机作业规划方案; 最后根据新疆塔城地区的农田数据及随机生成的农田任务进行模拟与仿真, 并与标准遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 进行对比。结果表明: IMPGA 和 GA 均能有效解决多任务多农机作业分配问题, IMPGA 算法总体上优于 GA, 调度的最优时间和平均时间分别缩短 2.47% 和 2.70%。该研究可为农机跨区作业提供合理的调度方案, 也为规模化无人农场的生产经营提供科学依据。

**关键词:** 农业机械; 算法; 改进多父辈遗传算法; 农机调度; 时间窗

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.022

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0192-07

张帆, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于改进多父辈遗传算法的农机调度优化方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 192-198.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.022 <http://www.tcsae.org>

Zhang Fan, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Agricultural machinery scheduling optimization method based on improved multi-parents genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 192-198. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.022 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

传统农机跨区作业存在组织效率低、劳动生产率不高等问题, 造成资源浪费<sup>[1]</sup>。农机作业时效强, 特别是在农忙时节, 要求农机在规定时间内完成作业任务, 以确保粮食归仓和及时播种, 提高农机作业效率已经成为农业生产的首要问题。农机导航技术与物联网技术的兴起, 为农机规模化调度和农场规模化作业的实现提供了技术支撑, 加速了传统农机作业迈向智能农机作业的进程<sup>[2]</sup>, 也为无人农场的建设运营提供理论依据<sup>[3-4]</sup>。

在农业生产过程中, 随着对自动驾驶作业需求的不断增加, 实现多台同种或异种作业农机之间协同作业已成为农机导航研究的重点<sup>[5]</sup>。对于单作业任务而言, 国内外对农机的协同作业的研究重点主要集中收获农机与运输车辆之间的配合作业上<sup>[6]</sup>, 如 Lida 等<sup>[7]</sup>和 Noguchi 等<sup>[8]</sup>分别研究了农机车辆自动跟随作业与协同导航作业操作的问题。Zhang 等<sup>[9]</sup>开发了一套跟随式农机主从导航作业系统, 实现了从机对主机的辅助运输和加油等作业。针对多作业任务的需求, 通常要根据机器、人员以及作业任务等信息, 设计优化算法与决策策略, 科学地对机器和人员进行运营调配, 在保证所有作业任务及时完成的

前提下, 实现作业时间最短或作业成本最小<sup>[10-11]</sup>。

国内外许多学者对多农机执行多种作业任务的资源配置问题进行了研究。Jena 等<sup>[12]</sup>利用混合整数规划的方法确定甘蔗收获机的作业路径; Sethanan 等<sup>[13]</sup>以甘蔗收获机作业距离最小化和甘蔗收获产量最大化为目标, 提出了改进粒子群优化算法 (MO-GLNPSO) 解决甘蔗收获机路径规划问题; Pitakaso 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于时间窗的联合收获机分配与路由问题的领域搜索方法, 在联合收获机在任务共享的情况下, 最大限度地提高收获机的服务面积; Cerdeira 等<sup>[15]</sup>研究了一个具有附加集群约束、时间窗和城市处理时间约束的旅行商问题 (Traveling Salesman Problem, TSP) 的变换模型<sup>[16]</sup>, 并采用禁忌搜索和模拟退火思想相结合的算法对一个农机合作社几个联合收获机的作业路径进行了优化。国内方面, 曹如月等和张小花等类比旅行商问题<sup>[17-18]</sup>, 采用蚁群算法求解多机协同作业任务规划问题, 但未将农机在田间作业的约束进行综合考虑; He 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于禁忌搜索和遗传算法算子的混合算法以确定小麦的最优收获时间, 达到减少收获时间的目的; 王雪阳等<sup>[20]</sup>采用改进遗传算法对跨区域作业的农机调度问题进行了研究; Zhou 等<sup>[21]</sup>采用粒子群算法和遗传算法相结合的方法求解了农机调度服务问题。部分研究采用启发式算法, 如吴才聪等<sup>[22]</sup>针对单一农机的作业问题建立了时空调度模型, 并以动态规划的方式进行基于时间窗的分步求解, 最终完成整个模型的调度; Zhang 等<sup>[23-24]</sup>针对农机跨区紧急作业调度问题进行了模型设计, 并采用基于距离最近优先的多机多任务紧急调配和基于贡献度最大优先的多机多任务紧

收稿日期: 2021-03-14 修订日期: 2021-05-07

基金项目: 国家重点研发计划专项 (2020YFB1709604); 国家自然科学基金项目 (32071914); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2019A1515111152)

作者简介: 张帆, 博士生, 研究方向为无人农场管控平台技术等。

Email: 554244189@qq.com

\*通信作者: 张智刚, 副教授, 博士, 研究方向为智能农机装备和无人农场技术。Email: zzg208@scau.edu.cn

急调度的启发算法进行了求解，完成了农机的调度任务。

上述研究对多农机在特定时间内完成同一种作业任务提供了很好的解决方案，但是对农机作业过程中多种任务连续作业的问题，如需连续进行耕整、播种和施肥等作业，无法提供科学合理的决策服务。本文主要研究多农机多任务的连续调度问题，综合考虑了调度损耗与作业损耗，通过采集的任务与农机的作业参数，建立农机调度模型，以作业时间最短为优化目标，利用改进的多父辈遗传算法进行农机作业任务序列规划，为解决多任务多农机的调度问题提供理论依据，也为开发基于无人农场智能农机管控平台提供决策参考。

## 1 多农机多任务作业调度问题

### 1.1 问题描述

随着3S技术<sup>[25]</sup>与农机自动驾驶技术<sup>[26]</sup>的不断发展，智能农机可通过移动互联网与云平台进行实时通讯，将农机的实时位置、速度、作业等信息上传至云端，这为农机的精准调度提供了数据参考与技术支持<sup>[27-28]</sup>。农机作业具有很强的时效性，特别是在农忙时节，需要在较短的时间内完成农田的耕整、播种、施肥等作业操作，而进行每种作业的农机具也各不相同，这就要求在有限的作业期限内做出科学的农机作业调度决策，在保证作业任务及时完成的前提下，实现作业成本最小化<sup>[29-30]</sup>。

在农机调度中，单机单任务的农机作业序列规划问题可类比成TSP问题进行分析，对农田空间分布和农机作业时间进行综合考虑；而对于多机多任务的农机作业序列规划问题，可描述为： $m$ 台能执行不同作业任务的农机需要在 $n$ 块农田上进行特定作业，指定每块农田特定的作业任务及顺序、每块农田作业参数及每台农机的参数，安排每台处于不同位置的农机在不同田块的作业任务和作业顺序，使整个农场的生产作业耗时达到最短。此外，本研究还综合考虑了农机从当前位置到目标田块的迁移时间，以及农机在达到目的地后作业准备时间。

### 1.2 数学规划模型

根据多机多任务调度问题的描述，对该问题的抽象模型定义如下：

1) 农田集合  $F=\{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ ，以  $F_i$  代表第  $i$  块农田，其属性描述为  $F_i=\{LocF_i, SF_i\}$ ，其中  $LocF_i$  和  $SF_i$  分别表示农田  $F_i$  的入口位置和面积， $i \in [1, m]$ ；

2) 农机集合  $M=\{M_1, M_2, \dots, M_r\}$ ，以  $M_j$  代表第  $j$  台农机，其属性描述为  $M_j=\{LocM_j, RS_j, WS_j, ReadyT_j\}$ ，其中， $LocM_j$  表示农机  $M_j$  的当前位置， $RS_j$  表示农机  $M_j$  地块转移过程中的平均行驶速度， $WS_j$  表示农机  $M_j$  的平均作业速度， $ReadyT_j$  表示农机作业前准备时间，且有  $j \in [1, r]$ ；

3) 农机集群  $MT=\{MT_1, MT_2, \dots, MT_n\}$ ，以  $MT_k$  代表第  $k$  种类型农机，表示为  $MT_k=\{Mk_1, Mk_2, \dots, Mk_a\}$ ， $a$  为第  $k$  种类型的农机总数，且有  $MT_1 \cup MT_2 \cup \dots \cup MT_n = M$ ， $k \in [1, n]$ ；

4) 作业任务序列的集合  $Task=\{Task_1, Task_2, \dots, Task_m\}$ ， $Task_i$  代表农田  $F_i$  的作业序列，并表示为

$Task_i=\{Task_{i1}, Task_{i2}, \dots, Task_{in}\}$ ， $Task_{ik}$  代表在农田  $F_i$  上进行第  $k$  种作业，且对应作业的农机类型为  $MT_k$ ， $k \in [1, n]$ 。

此外，农机调度还需满足下述条件：

- 1) 每台机器只能同时在某一块地上进行作业；
- 2) 在农机数量充足的条件且农田面积大于  $0.3 \text{ hm}^2$  时，每块地可安排多台同种作业任务的农机进行作业；
- 3) 为避免不同类型农机因作业任务不同而产生干扰，单块农田只进行同一种作业类型的作业，而需要多机协同完成同一作业任务的情况（如收获机与运粮车的协同收获作业），将其处理成同一类型作业任务；
- 4) 每块农田不同任务的作业顺序固定，须满足专门的作业规程，且每块农田的任务必须被执行。

上述调度问题在考虑农田作业任务要求的同时，还考虑农田与农机的相对位置关系，以最近距离农机优先作业为原则，求出每块农田上农机的作业顺序集  $S_i=\{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ir}\}$ ，并以  $S_{ij}$  表示农机  $M_j$  到农田  $F_i$  的调配方案，选取总调度时间最小为优化目标，调度模型表示如下：

调度目标：

$$\min T = \max \{T_{F_1}, T_{F_2}, \dots, T_{F_m}\} \quad (1)$$

约束条件：

$$T_{F_i} = \sum_{k=1}^n [(\text{trans}T_{ik} + \text{work}T_{ik} + \text{ready}T_{ik}) \times z_{ik}] = \sum_{k=1}^n [(\max(\text{trans}T_{i1} \times z_{i1}, \text{trans}T_{i2} \times z_{i2}, \dots, \text{trans}T_{ir} \times z_{ir})) + (S_{F_i} - \sum_{j=1}^r (\text{trans}T_{ik} - D_{ij} \times t_{ij} / E_k) \times E_k) / (\sum_{i=1}^r z_{ij} \times E_k) \times z_{ik} + \text{ready}T_{ik}] \quad (2)$$

$$z_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{农机集群 } MT_k \text{ 到农田 } F_i \text{ 进行作业} \\ 0, & \text{农机集群 } MT_k \text{ 未到农田 } F_i \text{ 作业} \end{cases} \quad (3)$$

$$\forall i=1, 2, \dots, m \quad \forall k=1, 2, \dots, n$$

$$t_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{农机 } M_j \text{ 到农田 } F_i \text{ 进行作业} \\ 0, & \text{农机 } M_j \text{ 未到农田 } F_i \text{ 作业} \end{cases} \quad (4)$$

$$\forall i=1, 2, \dots, m \quad \forall j=1, 2, \dots, r$$

$$\sum_j t_{ij} \geq Y_i, \quad \forall j=1, \dots, r \quad (5)$$

式中  $T$  为任务总时间， $h$ ； $T_{F_i}$  为第  $i$  块农田的作业总时间， $h$ ，其中  $i=1, 2, \dots, m$ ； $\text{trans}T_{ik}$  为农机集群  $MT_k$  到农田  $F_i$  的转移时间， $h$ ，其取值为农机集群  $MT_k$  中每台农机出发去农田  $F_i$  的转移过程中所耗时间的最大值； $\text{ready}T_{ik}$  为农机群  $MT_k$  中每台农机到达农田  $F_i$  作业前的准备时间， $h$ ； $\text{work}T_{ik}$  为农机集群  $MT_k$  在农田  $F_i$  的作业总时间， $h$ ； $S_{F_i}$  为农田  $F_i$  的面积大小， $\text{hm}^2$ ； $D_{ij}$  为农机  $M_j$  当前位置到农田  $F_i$  的距离， $\text{km}$ ，文中采用农机  $M_j$  到农田  $F_i$  两点之间的距离进行简要计算； $E_k$  为第  $k$  种类型农机的工作效率，即每小时的作业面积， $\text{hm}^2/\text{h}$ ； $z_{ik}$  表示农机群  $MT_k$  是否在田块  $F_i$  进行作业，其中  $k$  与任务  $Task_{ik}$  相对应，当农田中  $F_i$  中有任务需要被执行的任务  $k$  时， $z_{ik}$  取值为 1，否则为

0;  $t_{ij}$  表示农机  $M_j$  是否到农田  $F_i$  进行作业, 若该农机的田间转移时间大于当前已经到达农田  $F_i$  的农机集群  $MT_k$  完成农田任务总时间, 则当前农机不参与该地块的作业, 此时  $t_{ij}$  置于 0, 否则为 1;  $Y_i$  为农田  $F_i$  的任务数量。式 (5) 表示农田  $F_i$  的每个任务都允许有多台农机参与, 且每个任务必须被执行。

## 2 IMPGA 算法原理

基于上述数学模型, 本文提出了基于时间窗的改进多父辈遗传算法求解多任务多农机调度问题, 算法流程如图 1 所示。

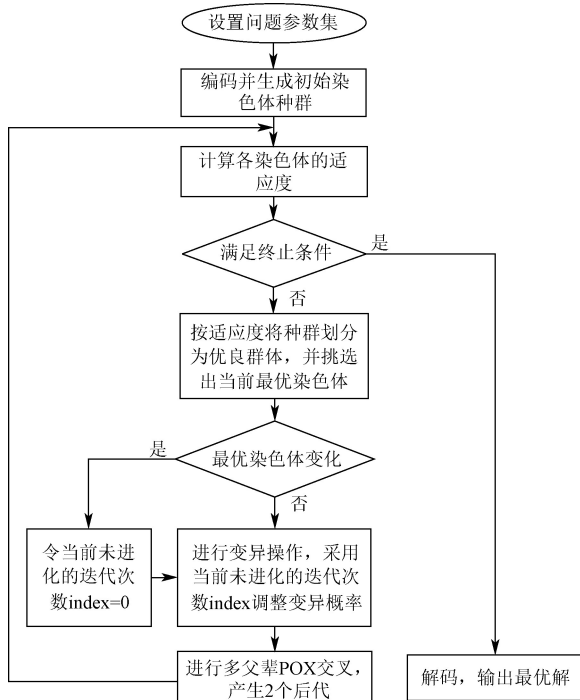


图 1 改进多父辈遗传算法流程图

Fig.1 Flowchart of IMPGA (Improved Multi-parent Genetic Algorithm)

具体算法步骤如下:

1) 初始化问题参数集。录入农机、农田、作业任务等基础信息, 同时设置种群规模数  $PopulationNumber$  和迭代次数  $Iteration$ ;

2) 编码。基于农田序号的编码并初始化种群。

对于  $m$  块农田有  $r$  种作业任务情况下的作业调度问题, 每条染色体的基因数量为  $\sum_i^m N_i$  个 ( $N_i$  表示农田  $F_i$  的任务个数), 使用农田编号进行编码, 农田编号在染色体中出现的频次代表农田作业任务号, 第  $x$  次出现的作业序号代表该农田的第  $x$  个作业任务。如在一个  $2 \times 2$  的调度问题中, 农田集合  $F=\{F_1, F_2\}$ , 对应的任务集合  $Task=\{(1,2), (2,3)\}$ , 则随机分布的编码共有 6 种类型, 如  $[1\ 2\ 1\ 2]$  或  $[1\ 1\ 2\ 2]$  等。

3) 适应度函数计算。以作业时间最短为优化目标, 则遗传算法的适应度函数为

$$f=1/T \quad (6)$$

式中  $f$  为染色体适应度, 依据公式 (1) ~ (5) 对每个染

色体的适应度值进行计算。

4) 个体选择。由于种群中优秀的父代个体中的基因质量更好, 为了保证优秀个体基因的遗传, 加速寻优结果的收敛速度, 按适应度值将种群划分成优秀和良好 2 种种群, 其中优秀种群占总群体规模的  $1/3$ , 良好种群占  $2/3$ , 从优秀群体里随机选取个体 Parent1, 从良好群体随机选取个体 Parent2 和 Parent3。

5) 变异。算法设计可调整的变异概率, 当在进行多次迭代之后, 如果种群中最优染色体的适应度没有发生变化, 则调整变异概率, 若发生进化, 则截至当前未进化的代数  $index$  置为 0 并重新开始累积, 调整的变异概率用函数表示为:

$$P_m = P_{m0} + index / Iteration \times 100\% \quad (7)$$

式中  $p_m$  为当前变异概率, %;  $p_{m0}$  为初始变异概率, %;  $index$  为截至当前未进化的代数。

6) 多父辈 POX 交叉。本文采用黄明等<sup>[31]</sup>提出的多父辈 POX 交叉方式, 用优秀个体 Parent1 分别与良好个体 Parent2 和 Parent3 进行交叉, 产生后代 Child1 和 Child2, 以  $3 \times 3$  的调度问题为例来说明交叉过程, 如图 2 所示。首先假定有 3 个选择的染色体序列 Parent1、Parent2 和 Parent3, 且有 2 个非空互余的基因子集 Gene1 {1, 2} 和 Gene2 {3}; 分别将 Parent1 中 Gene1 和 Gene2 进行分离, 并将分离的基因原位置于 O, O 表示该位置暂时为空, 再将 Parent2 和 Parent3 进行处理, 分别保留 Gene2 和 Gene1; 最后分别将 Parent1 中保留的 Gene1 和 Parent2 中保留的 Gene2 进行交叉, 即按从前到后的顺序将 Parent1 中属于 Gene1 的基因依次放入 Parent2 中, 生成 Child1, 同理将 Parent1 中属于 Gene2 的基因依次放入 Parent3 中, 生成 Child2。至此, 多父辈的 POX 交叉的过程结束。

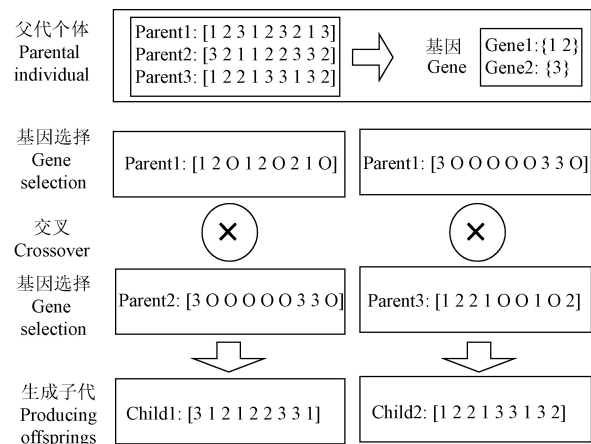


图 2 多父辈 POX 交叉过程的示例图

Fig.2 The example diagram of multi-parent pox crossover process

7) 迭代进化。判断是否满足算法结束条件, 若不满足, 则返回至步骤 3) 迭代; 若满足终止条件, 则算法终止, 输出最优结果, 并将最优结果进行解码。

解码是步骤 2) 的编码逆变换过程, 用实例来描述解码过程如下: 在一个  $2 \times 2$  的调度问题中, 农田集合  $F=\{F_1, F_2\}$ , 对应的任务集合  $Task=\{(1,2), (2,3)\}$ , 农机集合为  $MT=\{MT_1, MT_2, MT_3\}$ , 其中  $Task$  中的 1 代表平地作

业,使用农机群 $MT_1$ 进行作业,同理,2和3分别代表播种作业和施肥作业,相应地使用 $MT_2$ 和 $MT_3$ 进行作业,当染色体编号为[1 2 1 2]时,表示的农田作业次序为 $F_1-F_2-F_1-F_2$ ,则农机调度流程为 $MT_1-MT_2-MT_2-MT_3$ 。在确定农机集群的调度流程后,还需对 $MT_k$ 进行解码。对于任意序列 $MT_k$ 的解码可描述如下:考虑农机数量充足的情况,对处于不同位置的农机,当选择农机集群 $MT_k$ 去同一目标农田 $F_i$ 进行作业任务 $T_k$ 时,本文以基于最短路径的贪婪算法选择作业的农机台数,具体过程为:①在农机集合 $M$ 中筛选农机类型为 $k$ 的农机集合 $MT_k$ ,分别计算农机 $M_{ki}$ 到农田 $F_i$ 之间距离,并按增序进行排列;②以农田 $F_i$ 的面积 $SF_i$ 为调度约束,依据公式(3)~(5)选择可作业农机,判断某台农机能否加入该农田作业的准则是:若该农机的田间转移时间大于当前已加入集群作业农机完成农田任务总时间,则当前农机不参与该地块的作业。

### 3 IMPGA 算法验证

#### 3.1 试验数据

本文的农田数据采自新疆塔城地区,依据实际作业环境设置仿真作业任务,以验证算法的性能和稳定性。算法的运行环境为:处理器 Inter(R)i5-7500 3.4GHz,内存 8G,操作系统 Windows10,编程语言 Java。表1为部分作业农田的基本信息,主要包括农田面积、农田入口经纬度与作业类型。表2为可用农机装备的基本信息,如农机作业效率和路面行驶速度,此外包括每台农机的初始位置经纬度及准备时间,准备时间即农机达到农田后需要进行作业准备的时间,如作业人员就位、装料、加油、机器作业参数调整等作业前准备所需消耗的时间。

表1 部分作业农田的基本信息

Table 1 Basic information of part of farmland

农田编号 Fields No.	面积 Area/hm <sup>2</sup>	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	作业任务 Operation tasks
$F_1$	15.53	84.395 279	45.037 498	0,1,2,3
$F_2$	20.87	84.488 611	44.884 444	0,1,2
$F_3$	17.80	84.299 722	45.068 611	1,2,3
$F_4$	28.87	84.407 281	44.826 279	0,1,2,3
$F_5$	17.13	84.835 709	44.806 248	0,1,2
$F_6$	20.67	84.518 471	44.793 961	0,2,3

注:作业任务中0代表耕整地,1代表起垄,2代表播种,3代表施肥。  
Note: The working task 0 represents tillage and cultivating, 1 represents ridging, 2 represents sowing, 3 represents fertilization.

表2 可用农机的基本信息

Table 2 Basic information of available agricultural machine

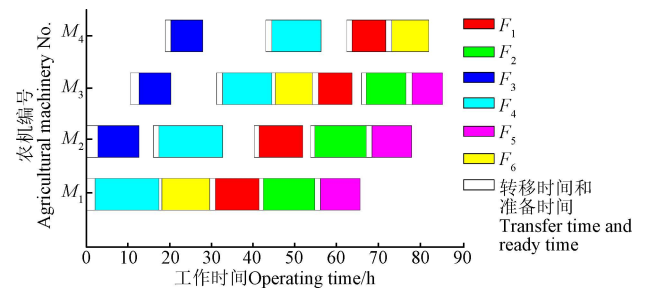
农机编号 Agricultural machinery No.	作业任务 Operation tasks	作业效率 Operation efficiency/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	行驶速度 Run speed/(km·h <sup>-1</sup> )	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	准备时间 Ready time/h
$M_1$	0	1.8	30	84.245 277	44.384 500	0.4
$M_2$	1	1.8	30	84.387 470	44.434 444	0.4
$M_3$	2	2.33	28	84.619 163	44.708 057	0.5
$M_4$	3	2.33	28	84.574 219	44.953 335	0.5
$M_5$	0	1.8	30	84.478 057	44.621 666	0.4
$M_6$	1	1.8	30	84.698 324	44.766 101	0.4
$M_7$	2	2.33	28	84.478 057	44.621 666	0.5
$M_8$	3	2.33	28	84.698 324	44.766 101	0.5
$M_9$	3	2.33	28	84.488 611	44.884 444	0.5
$M_{10}$	0	1.8	30	84.698 324	44.766 101	0.4

注:农机编号为对应作业任务机具,作业任务0-3分别对应旋耕机,起垄机,播种机,施肥机。

Note: The agricultural machinery No. is the machine corresponding to the operation task, and the operation tasks 0-3 correspond to the rotary tiller, ridging machine, seeder and fertilizer respectively.

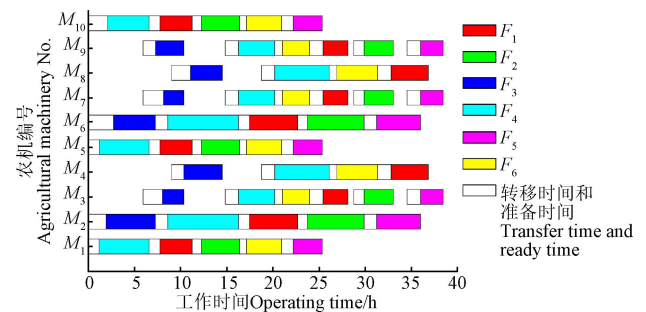
#### 3.2 结果与分析

对上述农田的作业任务采用改进的遗传算法进行仿真调度试验,选取种群规模为300,进化500代,初始变异概率0.05。完成每种作业农机只有1台时,选取农田数量为6,此时作业任务数量为20个,使用改进遗传算法进行运算得出最优调度方案,再通过Matlab生成甘特图,如图3a所示,其中甘特图白色部分代表农机在田块之间的转移时间与准备时间之和,其他颜色代表了农机在不同农田的作业时间,该调度方案的总完工时间为85.42 h。同理,当执行每种作业任务的农机数量为多台时,调度结果如图3b所示,该调度方案的总完工时间为38.45 h。



a. 单农机在6块农田作业任务下的调度结果

a. Scheduling results of a single agricultural machine under six field tasks



b. 多农机在6块农田的作业任务下的调度结果

b. Scheduling results of multi machinery under six field tasks

图3 调度结果甘特图

Fig.3 Gantt chart of scheduling results

为了验证改进遗传算法的有效性和稳定性,首先考虑执行每种作业任务的只有1台时(以下简称单农机作业),选取农田数量为5、10、15和20块的作业任务,分别使用IMPGA和GA进行调配运算10次,调度结果如表3所示。由表3可知,当执行每种任务的农机数量为1台时,改进的遗传算法的最优解、平均解均优于标准遗传算法,其调度时间的最优解和平均解分别缩短2.24%和3.16%,且改进遗传算法的平均标准偏差小,证明了改进遗传算法的鲁棒性好于标准遗传算法;为验证IMPGA的收敛性,对比最优解出现的迭代次数可以发现,除农田数量为15时IMPGA出现的次数大于IG之外,其余农田数量相同的条件下IMPGA均能更早找到最优解,而对比平均值发现,GA最优解平均出现的迭代次数为298.5,而IMPGA为255.8,IMPGA比GA收敛更快。此外,通过对比算法运行时间可知,2种算法的运行时间均随着任务数量的增加而增加,改进遗传算法的平均运行时间比标准遗传算法的平均运行时间长2.36 s。

表 3 单农机作业下 IMPGA 与 GA 的调度结果对比

Table 3 Comparison of results between IMPGA and GA under single number machinery

算法 Algorithms	任务编号 Task No.	农田数量 Field quantity	任务个数 Task number	最优时间 Optimal time/h	平均时间 Average time /h	标准偏差 Standard solution/%	最优解迭代次数 Iterations of optimal solution	运行时间 Running time/s
GA	$T_{05}$	5	17	75.92	96.01	0.16	309	19.02
	$T_{10}$	10	34	143.43	149.46	4.39	192	34.04
	$T_{15}$	15	48	209.12	215.73	5.07	272	45.37
	$T_{20}$	20	65	283.31	296.85	6.71	421	61.60
IMPGA	$T_{05}$	5	17	75.92	95.95	0.04	43	18.91
	$T_{10}$	10	34	139.41	143.08	2.78	183	35.20
	$T_{15}$	15	48	198.58	204.70	3.24	337	48.76
	$T_{20}$	20	65	280.13	287.39	5.40	460	66.60

由表 4 可知, 当执行每种作业任务的农机多于 1 台时, 作业任务完工总时间小于农机数量为 1 台的结果。在农机数量相同时, 改进遗传算法的调配结果仍优于标准遗传算法的结果: 在农田数量为 5 时, 2 种算法均能求得最优解; 在农田数量为 10 时, 使用改进遗传算法求取调度的最优时间和平均时间分别缩短 3.77% 和 3.56%; 农田数量为 15 时, 最优时间和平均时间分别缩短 1.63% 和

3.76%; 农田数量为 20 时, 最优时间和平均时间分别缩短 4.46% 和 3.47%。此外, 随着农田数量增多时, 算法运行时间增加, 且改进遗传算法的平均运行时间比标准遗传算法的运行时间长 8.92 s。

总之, 本文改进的遗传算法在总体上优于标准遗传算法, 其调度的最优时间和平均时间分别能平均缩短 2.47% 和 2.70%, 能满足农机作业调度的任务需求。

表 4 多农机作业的 IMPGA 与 GA 调度结果对比

Table 4 Comparison of results between IMPGA and GA under multi-type machinery

农田数量 Field quantity	农机数量 Machinery quantity	IMPGA			GA		
		最优时间 Optimal time/h	平均时间 Average time/h	运行时间 Running time/s	最优时间 Optimal time/h	平均时间 Average time/h	运行时间 Running time/s
5	6	67.87	67.87	40.46	67.87	67.87	38.78
5	10	37.47	37.47	81.08	37.47	37.47	76.87
10	6	119.65	122.04	119.18	119.86	122.68	113.06
10	10	68.17	70.44	156.32	73.59	75.42	148.98
15	6	178.70	179.40	162.67	182.45	186.23	154.86
15	10	101.27	103.46	216.89	102.50	107.60	206.24
20	6	244.79	248.99	219.21	250.73	257.84	205.19
20	10	137.86	144.65	294.76	147.51	149.92	275.24

## 4 结 论

考虑实际农田作业情况, 本文分析了针对连续作业任务的农机作业任务规划问题, 在农机随机分布的情况下, 以作业时间最短为优化目标, 建立了基于农业生产中多机执行多任务的调度模型。在考虑农机田间转移时间和作业准备时间的前提下, 采用改进遗传优化算法对多机多任务的农田作业问题进行调配, 通过与标准遗传算法相对比, 结果表明: 改进的多父辈遗传算法能有效解决多任务农机的作业分配问题, 在迭代次数相同的情况下, 尽管 IMPGA 比 GA 运行时间长 8.92 s, 但 IMPGA 求解调度方案的最优时间和平均时间分别能缩短 2.47% 和 2.70%, 节约了时间成本, 满足农机运维和无人农场生产运营实际作业的调度需求。

后续研究将考虑多台农机同时作业, 某台农机发生故障时如何对农机重新进行作业分配的问题; 此外, 随着农机自动驾驶技术和物联网技术的不断发展, 研究内容还将与智能无人农机管控平台集成, 逐步实现无人农场农机的智能化任务调度、自动化路径规划以及生产作业的全程管控。

## [参 考 文 献]

- [1] 罗锡文, 廖娟, 邹湘军, 等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 1-14.  
Luo Xiwen, Liao Juan, Zou Xiangjun, et al. Enhancing agricultural mechanization level through information technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(20): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1-20.  
Li Daoliang, Yang Hao. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1-20. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12.  
Li Daoliang, Li Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [4] Köksal Ö, Tekinerdogan B. Architecture design approach for

- IoT-based farm management information systems[J]. Precision Agriculture, 2019, 20(5): 926-958.
- [5] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
- Hu Jingtao, Gao Lei, Bai Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [6] Sørensen C G, Bochtis D D. Conceptual model of fleet management in agriculture[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(1): 41-50.
- [7] Lida M, Kudou M, Ono K, et al. Automatic following control for agricultural vehicle[C]//6th International Workshop on Advanced Motion Control Proceedings. Nagoya: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000: 158-162.
- [8] Noguchi N, Will J, Reid J, et al. Development of amaster-slave robot system for farm operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1-19.
- [9] Zhang P, Qiao J F, Zhang H Y. Path planning and tracking for agricultural master-slave robot system[C]//2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering. Chengdu: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010: 55-58.
- [10] 魏铁涛, 屈香菊. 多机协同与多目标分配任务规划方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(8): 917-920, 924.
- Wei Tietao, Qu Xiangju. Route planning method for multiple vehicles coordinated target assignment[J]. Journal of Beijing University of Aero-nautics and Astronautics, 2009, 35(8): 917-920, 924. (in Chinese with English abstract)
- [11] 余伶俐, 焦继乐, 蔡自兴. 一种多机器人任务规划算法及其系统实现[J]. 计算机科学, 2010, 37(6): 252-255.
- Yu Lingli, Jiao Jile, Cai Zixing. Multi-robot mission planning algorithm and its system implementation[J]. Computer Science, 2010, 37(6): 252-255. (in Chinese with English abstract)
- [12] Jena S D, Poggi M. Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 230(2): 374-384.
- [13] Sethanan K, Neungmatcha W. Multi-objective particle swarm optimization formechanical harvester mechanical harvester route planning of sugarcane field operations[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 252(3): 969-984.
- [14] Pitakaso R, Sethanan K. Adaptive large neighborhood search for scheduling sugarcane inbound logistics equipment and machinery under a sharing infield resource system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 313-325.
- [15] Cerdeira P A, Carpentier L, Amiama C. Optimised forage mechanical harvester routes as solutions to a traveling salesman problem with clusters and time windows[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 110-123.
- [16] 袁豪. 旅行商问题的研究与应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- Yuan Hao. Research and Application of Traveling Salesman Problem[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 34-39.
- Cao Ruyue, Li Shichao, Ji Yuhan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张小花, 叶文超, 陈宗乐, 等. 基于物联网的农机应急调度系统研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(6): 150-156.
- Zhang Xiaohua, Ye Wenchao, Chen Zongle, et al. Research on emergency scheduling system of agricultural machinery based on internet of things[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(6): 150-156. (in Chinese with English abstract)
- [19] He P F, Li J, Wang X. Wheat harvest schedule model for agricultural machinery cooperatives considering fragmental farmlands[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 226-234.
- [20] 王雪阳, 苑侗侗, 苑迎春, 等. 带时间窗的农机调度方法研究[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39(6): 117-123.
- Wang Xueyang, Yuan Tongtong, Yuan Yingchun, et al. A study on method of agricultural scheduling with time-window[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2016, 39(6): 117-123. (in Chinese with English abstract)
- [21] Zhou R, Wen J, Li X, et al. A Collaborative service decision-making method for the delivery management of PSS[J]. Procedia CIRP, 2015, 30: 427-432.
- [22] 吴才聪, 蔡亚平, 罗梦佳, 等. 基于时间窗的农机资源时空调度模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 237-241.
- Wu Caicong, Cai Yaping, Luo Mengjia, et al. Time-windows based temporal and spatial scheduling model for agricultural machinery resources[J]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 237-241. (in Chinese with English abstract).
- [23] Zhang F, Gao Y, Li Y. Research on Cross-Regional Emergency Scheduling and Allocating Strategies[J]. International Journal of Grid and Distributed Computing, 2016, 9(5): 89-98.
- [24] 张璠, 滕桂法, 苑迎春, 等. 农机跨区作业紧急调配算法适宜性选择[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 47-53.
- Zhang Fan, Teng Guifa, Yuan Yingchun, et al. Suitability selection of emergency scheduling and allocating algorithm of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(5): 47-53. (in Chinese with English abstract)
- [25] 姚强, 郭彩霞, 吕斌, 等. 基于 3S 的农机调度算法设计[J]. 农业网络信息, 2018(4): 25-28.
- Yao Qiang, Guo Caixia, Lv bin, et al. Design of agricultural machinery scheduling algorithm based on 3S[J]. Agriculture Network Information, 2018(4): 25-28. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张智刚, 王进, 朱金光, 等. 我国农业机械自动驾驶系统研究进展[J]. 农业工程技术, 2018, 38(18): 23-27.
- [27] 刘传茂, 王熙. 农机数据采集传输系统的设计与实现: 基于 CAN 总线[J]. 农机化研究, 2016, 12(38): 207-211.
- Liu Chuanmao, Wang Xi. Design and implementation of



- agricultural machinery data acquisition and transmission system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 12(38): 207-211. (in Chinese with English abstract)
- [28] Fountas S, Sorensen C G, Tsiropoulos Z, et al. Farm machinery management information system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 110: 131-138.
- [29] Luo X W, Zhang L Y. The optimal scheduling model for agricultural machinery resources with time-window constraints[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2016, 15(4): 721-731.
- [30] Edwards G, Sørensen C G, Bochtis D D, et al. Optimised schedules for sequential agricultural operations using a Tabu Search method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 117: 102-113.
- [31] 黄明, 王佳, 梁旭. 双阈值控制的遗传算法求解作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 329-332. Huang Ming, Wang Jia, Liang Xu. Genetic algorithm controlled by two thresholds for job shop scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2007, 13(2): 329-332. (in Chinese with English abstract)

## Agricultural machinery scheduling optimization method based on improved multi-parents genetic algorithm

Zhang Fan, Luo Xiwen, Zhang Zhigang<sup>\*</sup>, He Jie, Zhang Wenyu

(College of Engineering, South China Agricultural University/Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** A great challenge has posed on the trans-regional operation of agricultural machinery, including many tasks, strong timeliness and relatively fixed operational sequence. Therefore, a scientific and reasonable deployment scheme is still lacking to efficiently maintain operations for the production tracking in agricultural machinery in recent years. This study aims to optimize the cooperative scheduling for the multi-task and multi-machine assignment in a large-scale farm using improved multi-parent genetic algorithm (GA). Firstly, the basic locations of farmland and agricultural machinery were easily acquired and stored, as well as the task requirements distributed by farmers, with the aid of agricultural Internet of Things (IoTs) and navigation system. A multi-machine coupled with multi-tasks was analyzed, where the actual continuous operation was required to be completed in a specified time on a farm, for example, the tillage, sowing, and fertilization. Some parameters were also initialized, including the operation sequence, and the number of agricultural machines. A scheduling model was then built using a time window under the boundary conditions of multi-type machines, the distance of operation deployment, the time of preparation and operation. Besides, the model must also satisfy the following basic rules: 1) Each machine can only work on one field at the same time; 2) each field can be arranged with multiple agricultural machineries of the same task if the agricultural machineries are sufficient; 3) the operation sequence of different tasks in each farmland is fixed for the special operational procedures, while the tasks in each farmland must be executed. After that, taking the minimum operation time as the optimization goal, a feasible scheduling system was proposed using the improved multi-parent genetic algorithm (IMPGA) for the task planning. The field ID was used as the gene in the process of encoding, while the frequency of ID in the chromosome corresponded to the task of field, as the task process cannot be changed. Two parts were divided after generating primary population, remarked as the excellent and good group. The population propagates were then used in the strategy of multi-parent crossover, where a relatively superior individual was chosen from the excellent group to intersect with two good individuals chosen from the good one. The mutation probability was designed to be adjustable, when the fitness of optimal chromosome in the population cannot change after several iterations. Finally, the performance of Java-based IMPGA was verified using a series of real farmland datasets, randomly generated farmland tasks, and agricultural machinery in the Tacheng Prefecture of Xinjiang of western China. The MATLAB software was also used to generate job deployment. The experimental results showed both GA and IMPGA effectively performed the multi-task and multi-machinery assignments. Both GA and IMPGA achieved the optimal solution, when the number of fields was 5. The optimal and average solutions of IMPGA increased by 3.77% and 3.56%, respectively, when the number of fields was 10. The optimal and average solutions of IMPGA increased by 1.63% and 3.76%, respectively, when the number of farmlands was 15. The optimal solution and the average solution of IMPGA were improved by 4.46% and 3.47%, respectively, when the number of farmlands was 20. The total average quality of optimal and average solutions of IMPGA increased by 2.47% and 2.70%, respectively, indicating a better performance of IMPGA deployment. This finding can provide a reasonable scheduling scheme for the cross-regional operation of agricultural machinery in the production of the large-scale unmanned farms.

**Keywords:** agricultural machinery; algorithms; improved multi-parent genetic algorithm(IMPGA); agricultural machinery scheduling; time window