

机群协同作业路径动态优化*

姚竟发^{1, 2}, 刘静³, 滕桂法^{2, 4}, 张璠^{2, 4}, 范晓飞¹

(1. 河北农业大学机电工程学院, 河北保定, 071001; 2. 河北农业大数据重点实验室, 河北保定, 071001;
3. 保定理工学院基础课教学部, 河北保定, 071001; 4. 河北农业大学信息科学与技术学院, 河北保定, 071001)

摘要:随着我国农业机械化不断发展,智能农机应运而生,其作业路径被农机大数据中心实时监测、调控。合理的作业路径不仅可以提高作业效率,而且当车队运行状态或农田环境改变后,能实现精准作业,因此,研究如何动态优化车队协同作业具有十分重要的理论意义和实用价值。以总作业时间和作业时长综合最短为优化目标,同时避免作业冲突,构建机群协同作业路径动态优化模型,设计冲突检测规则,提出一种机群协同作业路径动态优化(DOFOP)算法。试验结果表明,当有农机发生故障时,重新优化后的作业时长、总作业时间比并排作业均减少 2.52%,平均作业农田能力 AEFC、农田效率 FE 比并排作业平均提高 2.63%、2.59%;当有农机作业速率发生改变时,重新优化后的作业时长、总作业时间比原作业分别降低 7.22%、2.73%,AEFC、FE 比原作业分别提高 7.99%、2.82%;当农田面积发生改变时,重新优化后的作业时长、总作业时间比原作业降低 6.26%、0.1%,AEFC、FE 比原作业分别提高 6.48%、0.1%。当机群作业状态发生改变时,DOFOP 算法能有效动态优化机群作业路径,提高机群作业效率,实现机群精准作业。

关键词:智能农机;机群;协同作业;动态优化;作业冲突

中图分类号:S24 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2021)06-0103-08

姚竟发, 刘静, 滕桂法, 张璠, 范晓飞. 机群协同作业路径动态优化[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 103-110

Yao Jingfa, Liu Jing, Teng Guifa, Zhang Fan, Fan Xiaofei. Dynamic optimization of cooperative operation path for agricultural machinery fleet [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 103-110

0 引言

随着我国农业机械化的快速发展,农业领域的“互联网+农机”智慧农业机械应运而生,如今农机作业基本上仍然是经验作业,如何提升农机精准作业和降低作业成本是首要任务。农机大数据中心实时定位农机作业位置、监测农机运行状态及农田状态,并通过客户端实时调控农机作业。机群协同作业时,一般按照优化算法预先规划好的路径进行作业,而在实际作业过程中,由于意外的机群运行状态或农田环境,经常偏离原作业路径,如果仍按原路径进行作业,不仅作业效率低,而且作业成本比较高。如何有效动态优化机群协同作业路径,节省作业成本,是目前亟待解决的问题。

为降低机群作业成本、提高作业效率,国内外学者对单机和多机作业路径优化问题展开研究。Hunt^[1]早在 2001 年就提出农机非作业行驶是影响农机作业效率的主要因素。随后 Oksanen 等^[2]、Hameed 等^[3]、

孟志军等^[4]研究了各种农田路径生成方法的效率,Bochtis 等^[5]将 VRP(Vehicle Routing Problem)问题模型引入农机作业路径优化中,对单农机作业路径优化进行了深入研究。Bochtis 等^[6]提出一种关于农田作业的理论模型,为后续研究奠定了理论基础。由于单农机体积较大,虽然经过路径优化,能提高作业效率,但是容易压实土壤^[7-8],不利于作物生长,同时单农机出现故障后影响作业进度。

提高作业效率的另一个途径是采用机群协同作业^[9]。Seyyedhasani 等^[10]以总作业时间和作业时长为综合最短为优化目标,使用禁忌算法 TS(Tabu Search)对 3 台农机进行作业路径优化,有效提高了机群作业效率,但是 Seyyedhasani 并没有对机群作业路径冲突展开研究。目前对机群协同作业冲突方面的研究较少, Li 等^[11]设计了一种基于冲突概率的 AVG(Automated Guided Vehicle)动态调整方法,张素云等^[12]针对自动集装箱码头水平运输中可能出现的自

收稿日期:2021 年 2 月 21 日 修回日期:2021 年 5 月 18 日

* 基金项目:河北省重点研发计划项目(19227210D、20327403D);河北省自然科学基金项目(G2018204093);河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2018012)

第一作者:姚竟发,男,1983 年生,河北衡水人,博士,讲师;研究方向为人工智能与数字农业。E-mail: knorray@163.com

通讯作者:范晓飞,男,1963 年生,河北张家口人,博士,教授,博导;研究方向为农业信息化与人工智能。E-mail: fanxiaofei@hebau.edu.cn

动引导车路径冲突问题,提出了一种多参数控制策略和改进的速度控制策略,有效地改进了 AVG 路径冲突。以上路径冲突研究均为自动化物流领域,没有针对农业领域机群作业路径冲突展开研究。机群协同作业过程中,意外的农机运行状态或农田环境会导致原作业出现偏差,Seyyedhasani 等^[13]提出在农机数量发生改变、农机作业速率发生改变以及农田面积发生改变三种情况下,将机群协同作业路径动态优化问题转换 D-MDVRP (Dynamic Vehicle Routing Problem with Multiple Depots) 问题,动态调整机群作业路径,始终确保作业路径最优。但以上研究没有考虑机群作业冲突问题^[14-18]。

本文以总作业时间和作业时长综合最短为优化目标,提出一种机群协同作业路径动态优化 DOFOP (Dynamic Optimization of Fleet Operation Path) 算法,在机群作业过程中,实时监测并动态调整机群作业路径,在作业路径无冲突前提下,确保机群协同作业路径的合理性。

1 模型构建

1.1 问题分析

作业路径动态调整需要实时监测机群作业状态,为机群协同作业提供科学、合理的作业路径。当机群运行状态或农田环境发生改变时,农机大数据中心利用物联网、GPS/北斗定位等信息技术,实时采集机群作业位置、行驶速率、作业时间、农田状态,使用相应的作业路径动态优化算法,重新为机群分配合理作业路径,如图 1 所示。

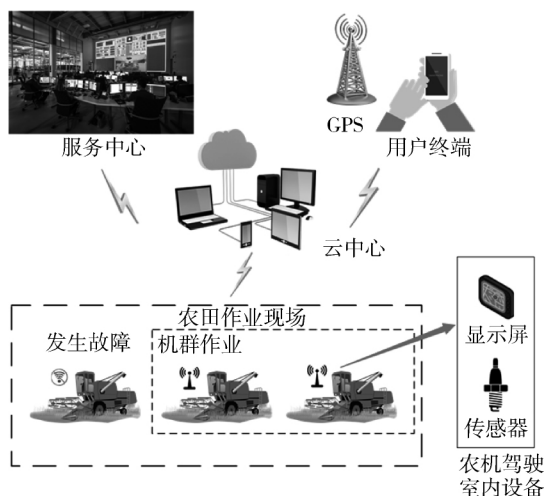


图 1 机群协同作业系统结构

Fig. 1 Architecture of cluster cooperative operation system

作业过程中,机群作业状态可能随时发生改变,主要包括:农机运行故障,导致机群数量发生改变;驾驶员熟练程度不同、作物长势差异等,导致农机作业速率

发生改变;农田某区域由于积水或作物长势等原因,原农田部分区域不能作业,作业面积发生改变。

当作业状态发生改变时,机群位于农田任意位置,需要将机群当前位置作为动态出发点,重新优化作业路径。为方便操作和避免增加处理节点,当机群数量减少时,视为该行未作业,重新优化路径时包括该作业行;其他作业状态发生改变时,机群总要将该行作业完(不考虑行间转向),因此将动态出发点移到该行作业结束地头;如果作业状态发生改变时,农机正处于地头,则动态出发点移至即将进入作业的行地头,因此,作业路径重新优化时,需要考虑当前作业行剩余作业时间。为了区分农田地头,如图 2 所示,将机群开始作业的地头称为 A 地头,另一端地头称为 B 地头。机群作业结束,可能从 A 地头返回,也可能从 B 地头返回。

本文以作业时长和总作业时间综合最短为优化目标,动态优化机群作业路径,同时确保作业无冲突,机群作业结束回到原出发点,该类问题可归为 D-MDVRP 问题^[19-26]。

- 出发点/结束点 — 第一台联合收割机 ——— 第一台联合收割机
未作业路径 已作业路径
- 动态出发点 — 第二台联合收割机 ——— 第二台联合收割机
未作业路径 已作业路径
- 路径节点 — 第三台联合收割机 ——— 第三台联合收割机
未作业路径 已作业路径

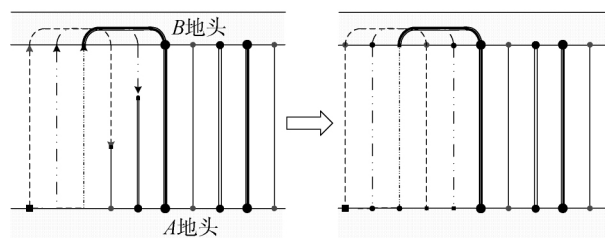


图 2 作业状态发生改变时动态出发点调整结果

Fig. 2 Results of dynamic starting point adjustment when operation status changes

1.2 模型参数

机群作业路径动态优化与天气、农机新旧程度、机手操作技术、农作物长势等有很大关系,同时与农机大数据中心软件、硬件等环境也有很大关系,是一个复杂优化问题。本文假设机群型号、新旧程度、机手操作技术相同,作业过程中不考虑中途返回、机手休息、天气等因素,机群从仓库出发、作业完成后返回仓库,农机发生故障后不考虑维修、返回、重新作业等情况,机群均在地头转弯,不考虑田间转弯情况。

1.2.1 问题形式化描述

根据对机群作业路径动态优化问题分析,形式化描述如下。

1) 设 $A_t = \{f_w, f_l, N_{lf}\}$ 表示机群作业 t 分钟后,作业状态发生改变时,剩余的未作业农田。 f_w 表示农

田宽度, f_l 表示农田长度, 集合 $N_{tf} = \{r_1, r_2, \dots, r_{|N_{tf}|}\}$ 表示联合收割机作业 t 分钟后, 作业状态发生改变时的剩余作业行。

2) 设 $V_t = \{N_m, r_{\min}, w, h_{tsi}, z_{tsij}, e_{tsij}, v_f, v_w, v_t, b_{ts}\}$ 表示作业 t 分钟后的联合收割机。 N_m 表示联合收割机数量; $r_{\min}$ 表示联合收割机最小转弯半径; w 为联合收割机作业幅宽; $h_{tsi}, z_{tsij}, e_{tsij}$ 分别为作业 t 分钟后, 第 s 台联合收割机按照重新优化的路径到达第 i 行地头的时、从第 i 行到第 j 行的转弯时间、从第 i 行结束进入第 j 行的时间; v_f, v_w, v_t 分别为联合收割机空行驶速度、作业速度和转弯速度; b_{ts} 表示作业 t 分钟后, 重新优化路径时第 s 台联合收割机的动态出发点, 当联合收割机位于农田内, b_{ts} 表示如下

$$b_{ts} = \begin{cases} ia & \text{联合收割机位于 A 地头} \\ ib & \text{联合收割机位于 B 地头} \end{cases} \quad (1)$$

当联合收割机位于地头时, b_{ts} 表示如下

$$b_{ts} = \begin{cases} ja & \text{联合收割机位于 A 地头} \\ jb & \text{联合收割机位于 B 地头} \end{cases} \quad (2)$$

3) ρ_{ts} 表示作业 t 分钟后, 第 s 台联合收割机从第 i 行当前位置到第 i 行地头作业结束的时间, 表示如下

$$\rho_{tsi} = \begin{cases} h_{tsi} - t & \text{第 } s \text{ 台联合收割机在农田内} \\ e_{tsij} - t & \text{第 } s \text{ 台联合收割机位于地头} \end{cases} \quad (3)$$

1.2.2 模型构建

作业 t 分钟后, 多联合收割机作业路径动态优化问题由有向图 $G_t = \{N_t, E_t\}$ 表示, N_t 表示作业 t 分钟后的相关节点, 包括三类节点, 农田作业行节点 N_{tf} 、农机动态出发点 N_{tw} (包括新增联合收割机)、结束点 N_d ; E_t 为连接两节点的边集合。

通过上述分析, 节点间包括三类时间: 联合收割机行内作业时间和行间转弯时间、从动态出发点到达待作业行地头时间、作业结束返回仓库时间。

作业 t 分钟后, 机群总作业时间

$$c_{all} = \sum_{i \in N_{tf}} \sum_{j \in N_{tf}} c_{ij} x_{ij} + \sum_{s \in V_t} \rho_{ts} \quad (4)$$

式中: i, j ——农田作业行;

c_{ij} ——第 i 行的作业时间;

x_{ij} ——联合收割机从第 i 行到第 j 行的转弯时间。如果存在从第 i 行到第 j 行的作业路径, 则 x_{ij} 为 1, 否则为 0。

作业 t 分钟后, 作业时长

$$c_{last} = \max_{s \in V_t} \sum_{i \in N_{tf}} \sum_{j \in N_{tf}} c_{ij} x_{ijs} + \rho_{ts} \quad (5)$$

作业 t 分钟后, 本文优化目标 T_c 表示如下

$$\min T_c = \min \left(z c_{last} + (1 - z) \frac{c_{all}}{N_m} \right), 0 \leq z \leq 1 \quad (6)$$

式中: z ——权重变量。

2 机群协同作业路径动态优化算法

机群按照原路径进行作业, 作业过程中, 农机大数据中心实时对作业状态进行监测。在 t 时刻, 监测到机群作业状态改变, 获取剩余作业行及每台农机当前作业行剩余作业时间 ρ_{ts} 。DOFOP 算法以机群当前作业行节点为动态出发点, 以剩余作业行为染色体编码, 根据作业时间矩阵, 重新为机群分配作业路径, 如果计算的路径中没有作业冲突, 则当前作业路径即为最优作业路径, 否则重新计算新作业路径。

2.1 初始解优化策略

机群协同作业路径动态优化问题属于 VRP 问题, 随作业行数增加, 算法从随机初始解中寻优难度呈指数增长。DOFOP 算法引入改良圈算法, 对初始解进行改良优化。改良圈算法原理为: 根据 $G_t = \{N_t, E_t\}$, 先将 t 时刻 DOFOP 算法随机初始化的作业路径 $R_t = \langle r_0, r_1, r_2, \dots, r_i, r_j, r_{j-1}, r_{j-2}, \dots, r_{i+1}, r_{j+1}, r_{j+2}, r_{|N_{tf}|}, r_0 \rangle$ 作为 Hamilton 圈, 采用最邻近算法, 对 R_t 进行遍历并修改 R_t , 得到总作业时间更小的另一个 Hamilton 圈。但是最终最邻近算法求解的 Hamilton 圈并不是最优解。

2.2 作业路径冲突检测

作业 t 分钟时, 设第 s 台和第 s' 收割机分别位于第 i 行和第 i' 行, 当前行剩余作业时间分别为 ρ_{ts} 和 $\rho_{ts'}$, 作业完成当前行后位于同一地头, 并分别转向第 j 行和第 j' 行进行作业, 转弯时间窗分别为 $[e_{tsi} + (\rho_{tsi} - t), e_{tsi} + z_{tsij} + (\rho_{tsi} - t)]$ 和 $[e_{ts'i'} + (\rho_{ts'i'} - t), e_{ts'i'} + t_{ts'i'j'} + (\rho_{ts'i'} - t)]$, 如果转弯路径、转弯时间窗同时出现重叠, 则第 s 台和第 s' 台联合收割机作业路径冲突。

2.3 作业状态监测

农机作业状态是被时刻监测的, 当农机出现故障时, 监控设备立即感知并上传状态信息。虽然作业状态是被时刻感知的, 但是为了农机便于操作, 本文算法要求农机在地头调整作业路径, 具有一定的滞后性。

2.4 行作业剩余时间的计算

由于当农机作业状态改变时, 需要计算从状态改变到地头作业路径的调整时间, 本文称其为行作业剩余时间, 在重新优化作业路径时, 需要将该时间考虑在内。行作业剩余时间的计算方式为, 当农机作业状态改变时, 监控设备记录作业状态改变时间, 行作业时间减去该行已作业时间即为行作业剩余时间。

2.5 作业结束的判断

作业结束应该以最后一台农机作业结束为依据, 因此, 作业完成时间应为该农机的作业时间, 同样, 该

判断也是监控设备时刻进行监控的。

DOFOP 算法具体流程如图 3 所示。

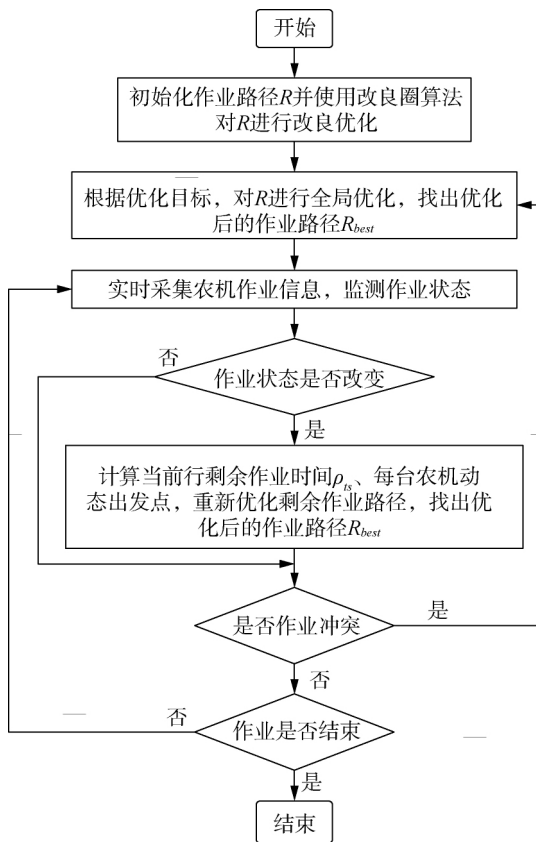


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

3 机群协同作业试验

3.1 试验条件

试验选用 4 台约翰迪尔 W210 联合收割机, 其作业幅宽 $w=4$ m, 最小转弯半径 $r_{\min}=3.8$ m, 空行驶速度 $v_f=5.47$ m/s, 作业速度 $v_w=2.78$ m/s, 转弯速度 $v_t=2.22$ m/s。

试验选用的农田位于内蒙古自治区呼伦贝尔市陈巴尔虎旗(49°28′40.0″N 120°00′21.2″E, 49°28′53.6″N 120°01′00.6″E), 农田地头长 278.05 m, 宽 852 m, 面积约为 23.69 hm², 机群仓库距离农田 894.29 m, 如图 4 所示。

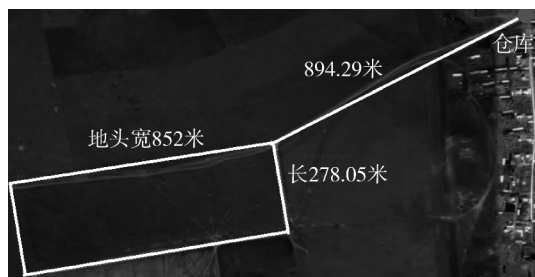


图 4 作业农田

Fig. 4 Farmland for operation

DOFOP 算法选用的种群规模为 500、交叉概率为 0.9、变异系数为 0.1、迭代次数为 500。由于作物收获时, 机手和农户更关注农田的作业时长, 将式(6)优化目标中的权重变量 z 设定为 0.6。

3.1.1 改变机群数量

设机群分别作业 26 min、50 min、70 min 时, 被监测到第 2 台联合收割机 M_2 发生故障, 作业状态发生改变, 机群数量由 4 台变为 3 台, 需要为剩余 3 台联合收割机重新优化作业路径。

1) 作业 26 min 时, 机群作业情况统计如表 1 所示。

表 1 26 min 后 M_2 作业发生故障时作业统计

Tab. 1 Operation statistics in case of M_2 failure after 26 minutes

联合收割机	已完成行数	待作业行数	正在作业行	正在作业行剩余作业时间/s
M_1	13	40	27a	76.32
M_2	12	38	133b	49.73
M_3	11	42	194a	23.37
M_4	12	41	84b	48.99

注: 表中 a 表示 A 地头, b 表示 B 地头。下同。

2) 作业 50 min 时, 机群作业情况统计如表 2 所示。

表 2 50 min 后 M_2 作业发生故障时作业统计

Tab. 2 Operation statistics in case of M_2 failure after 50 minutes

联合收割机	已完成行数	待作业行数	正在作业行	正在作业行剩余作业时间/s
M_1	26	27	53b	8.77
M_2	26	24	161b	87.75
M_3	25	28	166a	61.39
M_4	26	27	56b	87.01

3) 作业 70 min 时, 机群作业情况统计如表 3 所示。

表 3 70 min 后 M_2 作业发生故障时作业统计

Tab. 3 Operation statistics in case of M_2 failure after 70 minutes

联合收割机	已完成行数	待作业行数	正在作业行	正在作业行剩余作业时间/s
M_1	38	15	77b	75.64
M_2	37	13	183a	49.05
M_3	36	17	144b	22.69
M_4	37	16	34a	48.32

3.1.2 改变机群作业速率

设机群分别作业 26 min、50 min、70 min 时, 监测

到第 2 台联合收割机 M_2 作业速率发生改变,作业进度比原计划提前 20%。

1) 作业 26min 时,机群作业情况统计如表 4 所示。

表 4 26 min 后 M_2 速率发生改变时作业统计

Tab. 4 Operation statistics when M_2 rate changed after 26 minutes

联合收割机	已完成行数	待作业行数	正在作业行	正在作业行剩余作业时间/s
M_1	13	40	27a	76.32
M_2 (原作业)	12	38	133b	49.73
M_2 (速率改变后)	15	35	139a	54.44
M_3	11	42	194a	23.37
M_4	12	41	84b	48.99

2) 作业 50 min 时,机群作业情况统计如表 5 所示。

表 5 50 min 后 M_2 速率发生改变时作业统计

Tab. 5 Operation statistics when M_2 rate changed after 50 minutes

联合收割机	已完成行数	待作业行数	正在作业行	正在作业行剩余作业时间/s
M_1	26	27	53b	8.77
M_2 (原作业)	26	24	161b	87.75
M_2 (速率改变后)	31	19	171a	15.61
M_3	25	28	166a	61.39
M_4	26	27	56b	87.01

3) 作业 70 min 时,机群作业情况统计如表 6 所示。

表 6 70 min 后 M_2 速率发生改变时作业统计

Tab. 6 Operation statistics when M_2 rate changed after 70 minutes

联合收割机	已完成行数	待作业行数	正在作业行	正在作业行剩余作业时间/s
M_1	38	15	77b	75.65
M_2 (原作业)	37	13	183a	49.04
M_2 (速率改变后)	46	4	201b	53.63
M_3	36	17	144b	22.69
M_4	37	16	34a	48.31

3.1.3 改变农田作业面积

设机群作业过程中,被监测到农田第 79 行到第 90 行区域(共 12 行,约 1.33 hm²)不能作业。按照原作业路径,当作业到第 19.78 min 时, M_4 作业完成第 90 行时首先到达该区域,作业状态发生改变,需要为机群重新优化作业路径,此时机群作业统计如表 7 所示。

表 7 19.78 min 后农田作业面积减少时的作业统计

Tab. 7 Operation statistics of farmland operation area reduction after 19.78 minutes

联合收割机	已完成行数	待作业行数	正在作业行	正在作业行剩余作业时间/s
M_1	9	38	19a	27.33
M_2	8	42	125b	0.73
M_3	8	45	200b	79.94
M_4	8	39	92b	0

3.2 评价指标

当机群作业状态发生改变后,DOFOP 算法重新优化作业路径,为机群分配合理作业路径。评价机群作业性能的指标主要为有效农田作业能力(Effective Field Capacity, EFC)、农田效率(Field Efficiency, FE)两个指标。本文通过 $AEFC$ 、 FE 、总作业时间和作业时长 4 个指标来评价机群协同作业路径动态优化结果。

有效农田作业能力为评价单位时间内机群作业的农田面积,与机群作业速度、非作业时间有很大的关系,计算方式如式(7)所示。

$$EFC = \frac{A_f}{C_{last}} \quad (7)$$

式中: A_f —— 农田面积。

根据式(7),在农田面积一定的情况下,提高 EFC 需要减少作业时长 C_{last} ,即最后完成作业的机群所需作业时间。 $AEFC$ (Average Effective Field Capacity)用来表示机群的平均有效农田作业能力,计算方式如式(8)所示。

$$AEFC = \frac{EFC}{N_m} \quad (8)$$

农田效率为机群理论总作业时间和实际总作业时间的比值,主要用来衡量算法对机群非作业时间的优化程度,计算方式如式(9)所示。

$$FE = \frac{C_{theoretical}}{C_{all}} \quad (9)$$

式中: $C_{theoretical}$ —— 机群理论总作业时间;

C_{all} —— 实际总作业时间。

$C_{theoretical}$ 为联合收割机在农田内的作业时间,面积一定的情况下,理论总作业时间是固定的,而实际总作业时间除了 $C_{theoretical}$ 外,还包括机群地头转弯所需的非作业时间,计算方式如式(10)所示。

$$C_{theoretical} = \sum_{i \in N_j} C_{ii} \quad (10)$$

如要提高 FE ,需尽可能缩短 C_{all} ,即减少地头转弯所需时间。

4 结果与分析

4.1 改变机群数量

机群作业过程中,由于第 2 台联合收割机 M_2 发生

故障,为与重新优化后的作业路径进行对比,本文分别在机群作业 26 min、50 min 和 70 min 后,采用三台联合收割机对剩余作业路径进行并排作业。并排作业时,为避免冲突,机群按照作业顺序依次延后 30 s。机群作业状态发生改变后,重新优化后的机群作业与机群并排作业对比结果如表 8 所示。重新优化后的作业

表 8 农机发生故障后的优化结果

Tab. 8 Dynamic optimization results of operation path for agricultural machinery fleet after failure

参数	并排作业			优化后		
	26 min	50 min	70 min	26 min	50 min	70 min
AEFC/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	3.46	3.37	3.15	3.55(2.6%)	3.42(1.48%)	3.27(3.81%)
FE/%	86.97	84.83	80.73	89.71(3.15%)	87.04(2.61%)	82.35(2.01%)
c_{last}/s	6 203.8	4 195.61	2 587.37	6 060.62(-2.31%)	4 138.18(-1.37%)	2 487.09(-3.88%)
c_{all}/s	18 515.95	12 498.16	7 557.08	17 950.64(-3.05%)	12 179.95(-2.55%)	7 408.45(-1.97%)

注:括号内数值为重新优化后的作业结果与机群并排作业结果对比提高率。

分析表 8 可知,重新优化的作业路径明显优于并排作业。联合收割机 M_2 在作业 26 min、50 min、70 min 后发生故障,DOFOP 算法重新优化后的作业时长比并排作业分别降低了 2.31%、1.37%、3.88%,平均降低了 2.52%;总作业时间在机群作业 26 min 时优化最大,比并排作业降低了 3.05%,平均降低了 2.52%;如果作业面积相同,EFC、AEFC 与作业时长 c_{last} 相关,因此,算法对机群作业 70 min 后的优化最大,比并排作业降低了 3.81%,平均提高了 2.63%;随着作业时间的增加,由 FE 与总作业时间 c_{all} 相关,同样随作业时间增加,与并排作业的总作业时间相比,优化提高率呈

表 9 农机作业速率改变后的优化结果

Tab. 9 Optimization results of agricultural machinery operation after rate change

参数	原作业			优化后		
	26 min	50 min	70 min	26 min	50 min	70 min
AEFC/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	4.49	4.14	3.37	4.59(2.52%)	4.44(7.27%)	3.84(14.19%)
FE/%	87.33	83.85	74.22	89.07(1.99%)	85.34(1.78%)	77.71(4.70%)
c_{last}/s	4 700.99	3 255.64	2 060.99	4 585.62(-2.45%)	3 034.93(-6.78%)	1 804.94(-12.42%)
c_{all}/s	18 095.09	12 047.09	7 007.09	17 741.43(-1.95%)	11 837.5(-1.74%)	6 692.48(-4.49%)

注:括号内数值为重新优化后的作业结果与机群并排作业结果对比提高率。

分析表 9 可知,机群在作业 26 min、50 min、70 min 后,DOFOP 算法重新优化后的作业时长与原作业时长相比,分别降低了 2.45%、6.78%、12.42%,平均降低了 7.22%;由于 DOFOP 算法改变了机群原作业路径,增加了地头转弯时间,因此优化后的作业路径与原作业相比,总作业时间优化不大,分别降低了 1.95%、1.74%和 4.49%,平均降低了 2.73%。EFC、AEFC 与作业时长有关,与原作业相比,优化后的 AEFC 也较明显提高,平均提高 7.99%;FE 与总作业时间相关,与原作业相比,FE 有小幅提高,平均提高

结果与机群并排作业结果对比提高率 R_{index} (表 8 括号中百分比)。提高率计算方式如式(11)所示。

$$R_{\text{index}} = \frac{(I_{\text{optimize}} - I_{\text{origin}})}{I_{\text{origin}}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: I_{origin} —— 优化前作业指标;

I_{optimize} —— 优化后作业指标。

递减趋势,平均提高 2.59%。

4.2 改变机群作业速率

机群作业过程中,被监测到其中 1 台联合收割机作业速率变快,如果仍然按原路径作业,该联合收割机会提前完成作业而处于闲置状态,而其它联合收割机仍在进行作业。作业时长取决于最后完成作业的联合收割机所需时间,DOFOP 算法为机群分配的作业路径较合理,因此,其中 1 台联合收割机作业速率发生改变对作业时长影响不大,但是总作业时间会明显减少。DOFOP 重新优化后的作业时长、总作业时间与原作业对比结果如表 9 所示。

2.82%。

4.3 改变农田面积

农田作业面积改变后,如果不重新优化作业路径,联合收割机 M_1 作业行数减少 6 行,联合收割机 M_4 作业行数减少 6 行,因此 M_1 与 M_4 作业时间明显缩短,而其联合收割机作业时间不变,造成 M_1 与 M_4 提前完成作业而闲置。DOFOP 算法重新优化后作业路径与原作业对比结果如表 10 所示。

从表 10 可知,农田面积改变后,DOFOP 重新优化剩余作业路径,机群作业时长比原作业降低了 6.26%,

相应的 $AEFC$ 提高了 6.48%，改善了因 M_1 与 M_4 提前完成作业而闲置问题；与作业速率改变情况类似，机群按照重新优化的作业路径作业，额外增加了地头转弯时间，与原作业的总作业时间相比，总作业时间降低了 0.1%，相应的 FE 提高了 0.1%。

表 10 农田面积改变后的优化结果

Tab. 10 Optimization results after the change of farmland area

参数	原作业	优化后	$R_{index}/\%$
$AEFC/(\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	3.24	3.45	6.48
$FE/\%$	88.47	88.57	0.1
c_{last}/s	5 068.93	4 751.63	-6.26
c_{all}/s	18 539.99	18 519.63	-0.1

5 结论

以最小化作业时长与总作业时间为优化目标，在机群或农田作业状态发生改变时，使用 DOFOP 为机群动态优化作业路径，引入改良圈算法，对初始解进行了改良优化，提高了寻优效率，当有农机出现故障时，监控设备立即感知并上传状态信息，算法及时调整机群作业路径，同时算法能有效避免机群间的作业路径冲突，使用 DOFOP 算法优化的机群作业路径结论如下。

1) 当作业过程中有联合收割机发生故障时，DOFOP 算法重新优化剩余作业路径，优化后的作业时长、总作业时间比并排作业平均降低了 2.52%、2.52%， $AEFC$ 、 FE 比并排作业平均提高了 2.63%、2.59%。

2) 当作业过程中有联合收割机速率发生改变时，DOFOP 算法重新优化剩余作业路径，优化后的作业时长、总作业时间比原作业平均降低了 7.22%、2.73%， $AEFC$ 、 FE 比原作业平均提高了 7.99%、2.82%。

3) 当作业过程中农田作业面积发生改变时，DOFOP 算法重新优化剩余作业路径，优化后的作业时长、总作业时间比原作业平均降低了 6.26%、0.1%， $AEFC$ 、 FE 比原作业平均提高了 6.48%、0.1%。

参 考 文 献

[1] Hunt D. Farm power and machinery management [M]. Ames, Iowa: Blackwell Pub Professional, 1995.

[2] Oksanen T, Visala A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(8): 651-668.

[3] Hameed I A., Bochtis D D, Sørensen C G, et al. Automated generation of guidance lines for operational field planning [J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(4): 294-306.

[4] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 农田作业机械路径优化方法[J].

农业机械学报, 2012, 43(6): 147-152.

Meng Zhijun, Liu Hui, Wang Hua, et al. Optimal path planning for agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 43(6): 147-152.

[5] Bochtis D D, Vougioukas S G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(1): 1-12.

[6] Bochtis D D, Sørensen C G. The vehicle routing problem in field logistics part I [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(4): 447-457.

[7] Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions [J]. Soil and tillage research, 2005, 82(2): 121-145.

[8] Bochtis D D, Sørensen C G, Green O. A DSS for planning of soil-sensitive field operations [J]. Decision Support Systems, 2012, 53(1): 66-75.

[9] Bochtis D D, Sørensen C G, Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review [J]. Biosystems Engineering, 2014, 126:69-81.

[10] Seyyedhasani H, Dvorak J S. Using the vehicle routing problem to reduce field completion times with multiple machines [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 134: 142-150.

[11] Li Junjun, Xu Bowei, Octavian P, et al. Impact analysis of travel time uncertainty on AGV catch-up conflict and the associated dynamic adjustment [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018: 1-11.

[12] 张素云, 杨勇生, 梁承姬, 等. 自动化码头多 AGV 路径冲突的优化控制研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(2): 83-89.

Zhang Suyun, Yang Yongsheng, Liang Chengji, et al. Optimal control of multiple AGV path conflict in automated terminals [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(2): 83-89.

[13] Seyyedhasani H, Dvorak J S. Dynamic rerouting of a fleet of vehicles in agricultural operations through a dynamic multiple depot vehicle routing problem representation [J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 63-77.

[14] Yu B, Ma N, Cai W, et al. Improved ant colony optimization for the dynamic multi-depot vehicle routing problem [J]. International Journal of Logistics Research and Applications, 2013, 16(2): 144-157.

[15] Luo J, Chen M R. Multi-phase modified shuffled frog leaping algorithm with extremal optimization for the MDVRP and the MDVRPTW [J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 72: 84-97.

[16] Tang X, An H, Wang C. Conflict-avoidance-oriented airport surface-taxiing guidance lights system model [J].

- Journal of Guidance Control and Dynamics, 2012, 35(2): 674–681.
- [17] Kharchenko V, Vasyliov D, Vasyliov V. Synthesis of conflict-free aircraft flight trajectories using multi-criteria dynamic programming [J]. Aviation, 2017, 21 (2): 35–41.
- [18] Zhang Z, Guo Q, Chen J, et al. Collision-free route planning for multiple AGVs in automated warehouse based on collision classification [J]. IEEE Access, 2018, 6(99): 26022–26035.
- [19] Juan A A, Pascual I, Guimarans D, et al. Combining biased randomization with iterated local search for solving the multidepot vehicle routing problem [J]. International Transactions in Operational Research, 2014, 22 (4): 647–667.
- [20] Levin A, Yovel U. Local search algorithms for multiple-depot vehicle routing and for multiple traveling salesman problems with proved performance guarantees [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2014, 28 (4): 726–747.
- [21] Ghilas V, Demir E, Woensel T V. A scenario-based planning for the pickup and delivery problem with time windows, scheduled lines and stochastic demands [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 91: 34–51.
- [22] Chen Z L, Li S, Tirupati D. A scenario-based stochastic programming approach for technology and capacity planning [J]. Computers & Operations Research, 2002, 29(7): 781–806.
- [23] Ouaddi K, Benadada Y, Mhada F Z. Ant colony system for dynamic vehicle routing problem with overtime [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2018, 9(6): 306–315.
- [24] Mohammed M A, Ghani M K A, Hamed R I, et al. Solving vehicle routing problem by using improved K-nearest neighbor algorithm for best solution [J]. Journal of Computational Science, 2017, 21: 232–240.
- [25] Azadeh A, Farrokhi-Asl H. The close-open mixed multi depot vehicle routing problem considering internal and external fleet of vehicles [J]. Transportation Letters, 2017, 11(2): 78–92.
- [26] Shao S, Guan W, Bi J. Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(3): 202–212.

Dynamic optimization of cooperative operation path for agricultural machinery fleet

Yao Jingfa^{1, 2}, Liu Jing³, Teng Guifa^{2, 4}, Zhang Fan^{2, 4}, Fan Xiaofei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding, 071001, China;

2. Hebei Province Key Laboratory of Agricultural Big Data, Baoding, 071001, China;

3. Basic Teaching Department, Baoding University of Technology, Baoding, 071001, China;

4. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding, 071001, China)

Abstract: With the development of agricultural mechanization, intelligent agricultural machinery emerges as time requires. The operation path of the fleet is monitored and regulated by a big data center of agricultural machinery in real-time. A reasonable operation path can improve the efficiency of operation and achieve accurate operation when the fleet operation state or farmland environment changes. Therefore, it is of great theoretical significance and practical value to study how to optimize the cooperative operation of the fleet dynamically. In this paper, the optimization aims to minimize the total time and completion time of operation and avoid job conflicts. Firstly, a dynamic optimization model of the fleet cooperative operation path is constructed, and the conflict detection rules are designed. Then, a dynamic optimization algorithm, DOFOP, is proposed. The test results showed that when there was a failure of agricultural machinery, the completion time and total time of the re-optimized operation were reduced by 2.52% compared to the parallel operation, and the AEFC and FE were increased by 2.63% and 2.59% on average compared to the parallel operation. When there was a change in the operation rate of agricultural machinery, the operation time and total operation time of the re-optimized operation were reduced by 7.22% and 2.73%, respectively, and the AEFC and FE were lower than the original operation. When the farmland area changed, the operation time and total operation time decreased by 6.26% and 0.1%, and the AEFC and EF increased by 6.48% and 0.1%, respectively. When the operation status of the fleet changes, the DOFOP algorithm can effectively and dynamically optimize the operation path of the fleet, improve the efficiency of the fleet operation, and achieve the precise operation of the fleet.

Keywords: intelligent agricultural machinery; fleet; collaborative operation; dynamic optimization; operation conflict