

同种农机机群动态作业任务分配方法

王 猛, 赵 博, 刘阳春, 伟利国, 汪凤珠, 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: 为解决农机作业过程中因突发状况引起的作业时间增加、某些作业任务无法完成等问题, 该研究提出一种基于改进合同网算法的同种农机机群动态作业任务分配方法。基于农机性能参数和任务参数综合考虑用时最长农机的作业时间、农机机群油耗和路上的路程建立机群代价函数, 建立单个田块和地头相邻田块的路径规划方法, 参考合同网算法中的招-投标过程, 建立农机对任务进行投标的代价函数, 基于降低服务器计算量、减少通信次数、任务均衡分配和减小非作业路程等原则, 通过选择招标者、设定招标阈值、中标者任务再分配和农机间任务交换等方式改进合同网算法。在不同时间进行基于传统合同网算法和改进合同网算法的农机机群动态作业任务分配仿真试验和农场实际播种作业试验。仿真结果表明, 基于改进合同网算法的动态任务分配仿真结果比基于传统合同网算法的动态任务分配仿真结果机群时间代价降低 0.83%~12.89%, 与服务器通信次数降低 77.4%~85%。农场实际试验结果表明: 在不同的任务分配时间, 基于改进合同网算法的动态任务分配的机群时间代价比实际理论机群时间代价降低 30.20%~34.09%。本文提出的动态作业任务分配法能够满足农业生产中同种农机机群动态作业任务分配需求。

关键词: 农业机械; 算法; 任务分配; 代价函数; 改进合同网算法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.023

中图分类号: TP273; S24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0199-12

王猛, 赵博, 刘阳春, 等. 同种农机机群动态作业任务分配方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 199-210.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.023 <http://www.tcsae.org>

Wang Meng, Zhao Bo, Liu Yangchun, et al. Dynamic task allocation method for the same type agricultural machinery group[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 199-210. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.023 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国是农业大国, 农业机械化可极大提高农业生产效率、减轻农民体力劳动。随着农机合作社和农场作业模式的快速发展, 农机和土地都呈现集中的趋势, 如何更有效地规划机群作业, 提高作业效率, 对有作业窗口期要求的农业生产具有重大作用。

动态任务分配是机群作业领域的一个重要研究内容, 动态任务分配指机群作业过程中, 面对导致机群无法继续执行原有作业计划的意外情况时, 根据任务执行进度和机群位置, 对作业任务计划进行相应的调整使得机群能够继续执行并完成新的任务计划。动态任务分配方法在机器人搜索、无人机作战、水下机器人搜索和无人机搜索等领域有了较深入的研究和发展^[1-5]。研究人员对静态任务分配技术研究较多, 研究方法包括基于作业经验和效率的任务分配^[6-8]、基于聚类的任务分配^[9]、基于博弈论的任务分配^[10]和基于启发式算法的任务分配^[11-16]等, 对动态任务分配研究较少, 主要采用合同网算法, 动态任务分配比静态任务分配更加复杂^[17-20]。农机作业领域的相关研究有任务规划

和调度等。其中任务规划指规划农机执行任务的先后顺序和田块间的路径, 曹如月等^[21]采用蚁群算法解决机群作业任务规划, 使农机行驶的距离最短; Jensen 等^[22]研究了一台运粮车对多台收割机运粮的田块内和田间的路径规划方法, 使农机作业代价最小; 姚竟发等^[23]提出联合收割机多机无冲突协同作业路径优化算法, 缩短了矩形农田和梯形农田农机作业时间。农机调度是对一系列作业点选择合适的行车路径, 让农机有序地通过它们, 在满足作业点的时间窗和所需农机数约束条件下, 达到路程最小或收益最高^[24-28]。随着我国农机合作社和农场作业模式的快速发展和农机管控平台的开发^[28], 农机和土地趋于集中且参数可知趋势, 如何在合作社或农场土地范围内对多台农机进行有效的任务分配, 并在有突发状况条件下进行合理的任务再分配对具有强“农时”性的农业生成具有重要意义。

本研究以同种作业农机为研究对象, 以农机合作社或农场作业模式为作业场景, 综合考虑机群中作业时间最长的农机作业时间、农机机群的油耗和路上的路程建立机群代价, 以代价最小作为优化目标, 构建基于合同网算法的机群动态任务分配招投标流程和投标代价函数, 针对农机作业特点优化合同网算法以降低机群作业代价、得到最优动态任务分配结果。

1 机群系统体系结构

根据农机机群动态任务分配特点设计了农机机群作业的体系结构, 主要包括农机、服务器和客户端三个部

收稿日期: 2020-11-16 修订日期: 2021-04-19

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0700403)

作者简介: 王猛, 博士生, 研究方向为农机多机协同和自动驾驶技术。

Email: 854995120@qq.com

^{*}通信作者: 方宪法, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为农业机械化
和农业工程技术。Email: fangxf@caams.org.cn

分。其中农机安装车载计算机、北斗定位模块和无线自组网模块等,可实现自身定位和与其他农机通信;服务器中储存田块信息和农机信息并且具有计算功能;客户端可以选择和下发任务到指定作业机群。其结构如图 1 所示。

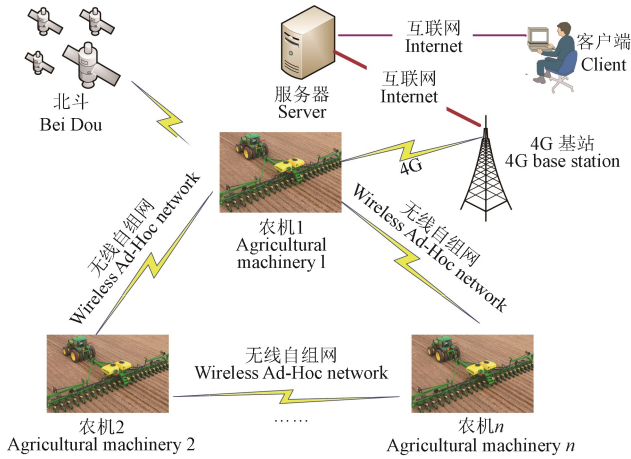


图 1 机群体系结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of agricultural machinery group

2 农机机群代价数学模型

2.1 基本假设

农机机群作业过程中,作业情况往往过于复杂,为突出动态任务分配问题,简化其他次要问题,做出农机作业的基本假设。

- 1) 作业机群为具有高精度定位与导航功能的同种作业农机。
- 2) 任务田块数量大于作业农机数量。
- 3) 每个任务田块只有 1 台农机作业,同一台农机可以在连续多个任务田块作业。
- 4) 不考虑其他补给或配合农机的调配。
- 5) 任务田块没有严格的作业时间窗口要求。
- 6) 农机机群从车库出发,完成全部任务后返回车库。
- 7) 机群的作业时间为机群中用时最长农机的作业时间。

2.2 目标函数

假设作业的农机数量为 m ,任务田块的数量为 n ,用 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 表示农机集合, $T=\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 表示任务田块集合,任务分配是指将任务田块集合 T 按一定的作业顺序分配给农机集合 A 。

农机作业过程中,对于农资、能源补给类车辆常以农机的路程为代价;对于需要在田间作业的农机常以农机作业的总时间为代价。本文考虑机群的作业时间、油耗和路程建立目标函数:

$$\min(f) = \alpha \left[\max(t_i), \sum_{i=1}^m c_i, \sum_{i=1}^m s_i \right]^T \quad (1)$$

式中 f 为机群代价函数, α 为系数向量, $\alpha=[1,0,0]$ 表示以机群作业时间为代价, $\alpha=[0,1,0]$ 表示以机群作业油耗为代价, $\alpha=[0,0,1]$ 表示以机群到达作业地块的路程为代价; t_i

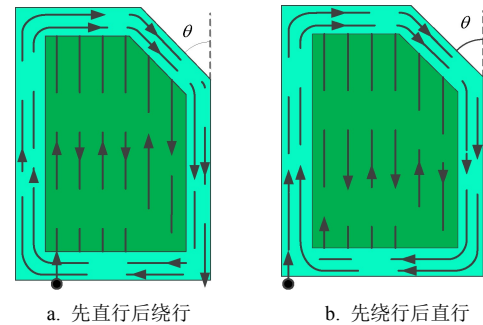
为农机 a_i 的作业时间, h ; c_i 为农机 a_i 的油耗, L ; s_i 为农机 a_i 路上的路程, km 。

当系数确定的情况下,当代价函数最小时,对应的任务分配方案即为该确定系数下多机协同最优分配方案。

2.2.1 田间路径规划

参考文献[29-31],以农田最长边为作业方向可有效提高作业效率,降低作业代价;满足半圆形调头时采用半圆形调头,不满足半圆形调头时采用弓形调头可提高调头效率,本文以不满足半圆形调头情况为例进行研究。

地头转弯区域分为种植农作物和不种植农作物 2 种情况,本文以种植农作物为例设置作业模式,根据文献[32],为实现作业区域的全覆盖,采用直行与绕行相结合的方式路径规划,如图 2 所示。



注: θ 为田块斜边与最长边的夹角, rad ; 点箭头表示农机进入田块的位置; 直线箭头表示农机的运动方向。下同。
Note: θ indicates the angle between the hypotenuse and the longest side of the field, rad ; point arrow indicates the position where the agricultural machinery enters the field; the straight arrow indicates the agricultural machinery movement direction. The same below.

图 2 直行和绕行相结合的路径规划

Fig.2 Path planning combining straight and detour methods

以图 2 所示的带斜边的多边形田块为例,根据文献[32],弓形路径调头中地头最小转弯地带宽度 E_{Π} 为

$$E_{\Pi} = (1.1 + \cos\theta)R + 0.5W + 0.5L_k \quad (2)$$

式中 R 为农机的最小转弯半径, m ; W 为作业幅宽, m ; L_k 为农机机组中心至最远农具作业部件的距离, m 。

为使绕行路径可以满足若干幅宽作业,令地头转弯地带宽度为农机幅宽的整数倍,则地头转弯宽度 E 为

$$E = k_E W \quad (3)$$

其中

$$k_E = \frac{E_{\Pi}}{W} \quad (4)$$

弓形路径调头过程中,根据几何关系,农机转弯跳过的最小路径 s_{min} 为

$$s_{min} = \left\lceil \frac{2R}{W} \right\rceil + 1 \quad (5)$$

根据文献[30, 33],采用弓形调头路径时实现作业区域全覆盖的最小路径数量 B_{min} 为

$$B_{min} = 2s_{min} + 1 \quad (6)$$

作业过程中,当田块剩余宽度小于农机作业幅宽时,收获机械可直接进行作业;播种机械等为避免重复作业可采用小型机械补耕或调整相邻作业行出种行数的方式,本研究中田块数量较多且分散,采用后种方式。农

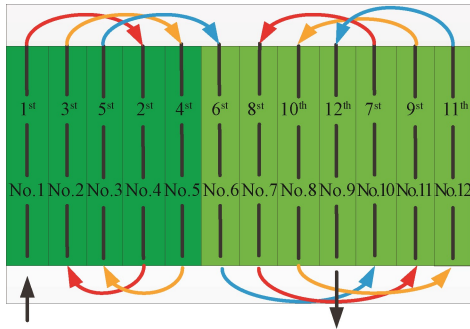
机在田块中总的纵向路径数量 N 为田块垂直于作业路径的宽度与作业幅宽的比值, 则 N 为

$$N = \left\lceil \frac{b_T}{W} \right\rceil \quad (7)$$

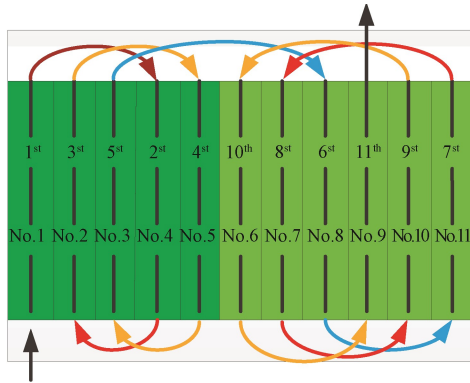
式中 b_T 为任务田块垂直于作业路径的宽度, m。

当 $(N-2k_E) \geq B_{min}$ 时, 满足弓形调头要求, 将农田划分为多个标准区块和 1 个非标准区块, 为使农机在每个区块都能完成全覆盖作业, 令标准区块路径数量为 B_{min} , 非标准区块数量 $B_N \geq B_{min}$, 采用弓形调头路径进行逐区块作业。图 3 所示为 $s_{min}=2$ 时的区块划分结果, 其中左侧为标准区块右侧为非标准区块。标准区块数量 k_s 为

$$k_s = \frac{N}{B_{min}} - 1 \quad (8)$$



a. 非标准区块为奇数时路径规划方法
a. Path planning method when non-standard block is odd



b. 非标准区块为偶数时路径规划方法
b. Path planning method when non-standard block is even number

注: 直线箭头表示农机进出田块的位置; 曲线箭头表示农机的转向路径; No. q 表示路径编号, $q=1,2,3,\dots$; i^{th} 表示对应路径的作业顺序号, $i=1,2,3,\dots$; 下同。
Note: The straight arrow indicates the position where the agricultural machinery enters and exits the field; the curved arrow indicates the turning path of the agricultural machinery; No. q indicates that the No. of the path, $q=1,2,3,\dots$; i^{th} indicates that the operation sequence No. of the path, $i=1,2,3,\dots$. The same below.

图 3 标准和非标准区块路径规划方法

Fig.3 Standard and non-standard block path planning methods

标准区块路径编号 $q_{i,j}$ 为

$$q_{i,j} = \begin{cases} B_{min}(j-1)+1, & i=1 \\ q_{i-1,j} + s_{min} + 1, & \text{mod}(i,2)=0 \\ q_{i-1,j} - s_{min}, & \text{mod}(i,2)=1 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $q_{i,j}$ 为田块中第 j 个区块内第 i 个顺序的路径编号。

非标准区块路径数量 B_N 为

$$B_N = N - B_{min} k_s \quad (10)$$

非标准区域跳过的路径数量 s_N 为

$$s_N = \begin{cases} \frac{B_N-1}{2}, & \text{mod}(B_N,2)=1 \\ \frac{B_N}{2}-1, & \text{mod}(B_N,2)=0 \end{cases} \quad (11)$$

非标准区块路径编号为

$$q_{i,j} = \begin{cases} B_{min}(j-1)+1, & i=1 \text{ 且 } \text{mod}(B_N,2)=1 \\ q_{i-1,j} + s_N + 1, & \text{mod}(i,2)=0 \text{ 且 } \text{mod}(B_N,2)=1 \\ q_{i-1,j} - s_N, & \text{mod}(i,2)=1 \text{ 且 } \text{mod}(B_N,2)=1 \\ B_{min}(j-1)+s_N+1, & i=1 \text{ 且 } \text{mod}(B_N,2)=0 \\ q_{i-1,j} + s_N + 1, & \text{mod}(i,2)=0 \text{ 且 } \text{mod}(B_N,2)=0 \\ q_{i-1,j} - s_N - 2, & \text{mod}(i,2)=1 \text{ 且 } \text{mod}(B_N,2)=0 \end{cases} \quad (12)$$

农机进入和离开田块位于同一端地头时, 作业路径数量为偶数, 位于不同端地头时则为奇数。若作业路径数量为偶数, 要实现农机进入和离开农田位置位于不同端地头、或作业路径数量为奇数要实现农机进入和离开农田位置位于同一端地头时, 需要在绕行区域增加一条空行路径。当 2 个需要作业的田块地头相邻, 且农机可以从地界处进入田块时, 令要进入的田块为目标田块, 正在作业的田块为当前田块, 为方便农机进入目标田块后经过最小的调整就能作业, 令当前田块的最后作业路径与目标田块的第 1 条作业路径横向偏差最小, 如图 4 所示, 其中 No.last (白色) 行为当前田块的最后作业行, 区块划分中不包括 No.last 行。

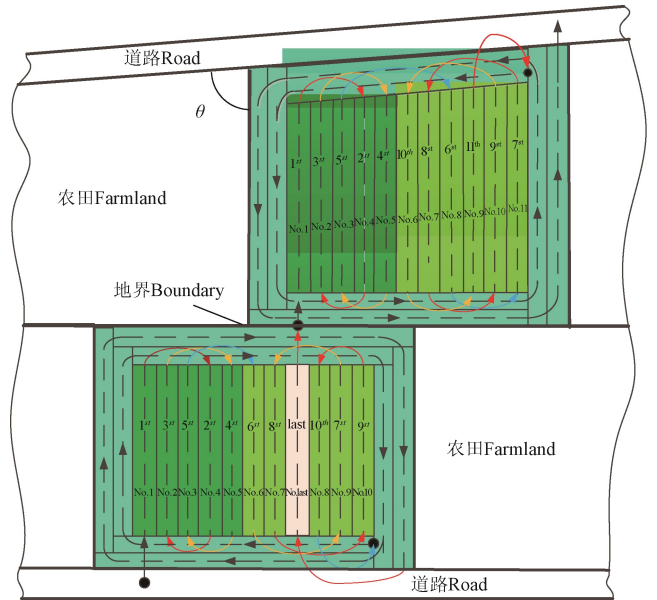


图 4 地头相邻田块的路径规划示意图

Fig.4 Schematic diagram of path planning for adjacent plots of land

根据文献[32], 弓形调头路径近似长度 S_{Π} 为

$$S_{\Pi} = \left(1.7 + \frac{\pi}{2} - \theta + \cot \theta \right) R + \frac{x}{\sin \theta} + L_k \quad (13)$$

式中 x 为调头中 2 条路径的距离, m。

$(N-2k_E) < B_{min}$ 时不满足弓形调头, 当 $N < 2k_E$ 时, 只采

用直行法作业方式和鱼尾调头路径；当 $N > 2k_E$ 且 $(N - 2k_E) < B_{min}$ 时，采用绕行法和直行法相结合的作业方式和鱼尾形调头路径。

鱼尾形调头路径最小转弯地带宽度 E_T 为

$$E_T = E_{\Pi} \quad (14)$$

鱼尾形调头路径近似长度 S_T 为

$$S_T = \left(5.3 + \frac{\pi}{2} - \theta + \cot \theta \right) R + L_k \quad (15)$$

2.2.2 农机作业时间

农机 a_i 的作业时间 t_i 主要由农机在路上的时间和农机在田块的时间 2 部分构成：

$$\begin{cases} t_i = t_{Ri} + t_{Fi} \\ t_{Ri} = \frac{S_i}{v_i} \end{cases} \quad (16)$$

式中 t_{Ri} 为农机 a_i 在路上的时间，h； t_{Fi} 为农机 a_i 在田块的时间，h； S_i 为农机 a_i 在路上的总路程，km； v_i 为农机 a_i 在路上的速度，km/h。

2.2.3 农机作业路上的总路程

建立 n 个任务田块间农机可行驶的实际最短距离矩阵，若将车库作为第 0 个任务，得到矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \cdots & d_{1,n+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n+1,1} & \cdots & d_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中 d_{ij} 为第 $i-1$ 个任务田块到第 $j-1$ 个任务田块之间的实际可行驶距离，km， $i, j=2, 3, \dots, n+1$ ，且 $i \neq j$ 。

如果 j, k 两个任务田块地头相邻，且农机可从地界直接驶入田块进行作业，则 $d_{j+1,k+1}=0$ 。

总路程 s_i 由 3 部分组成：农机 a_i 从车库到其第一个任务田块 T_j 的路程 $d_{1,j+1}$ 、农机从第 j 个任务田块 T_j 到下一个任务田块 T_k 的路程 $d_{j+1,k+1}$ 、农机从最后一个任务田块 T_l 回到车库的路程 $d_{l+1,1}$ ，其中 $j, k, l=1, 2, \dots, n$ 。具体计算如下：

$$s_i = \sum_{j=1}^n d_{1,j+1} x_{ij} + \sum_{l=1}^n d_{l,l+1} x_{il} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n d_{j+1,l+1} x_{ijk} \quad (18)$$

其中

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & T_j \text{ 是 } a_i \text{ 执行的第一个任务田块} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

$$x_{il} = \begin{cases} 1, & T_l \text{ 是 } a_i \text{ 执行的最后一个任务田块} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & T_j \text{ 和 } T_k \text{ 是 } a_i \text{ 按顺序执行的 2 个任务田块} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

农机在田块的作业时间 t_{Fi} 主要由作业时间、调头时间和直线空行时间构成：

$$t_{Fi} = \frac{\sum_{k=1}^N l_{i,j,k} + \sum_{k=1}^{2k_E} b_{i,j,k}}{v_{wi}} + \frac{\sum_{k=1}^{N_{i,j,t}} S_{i,j,k}}{v_{ti}} + \frac{l_B}{v_i} y_{ij} \quad (22)$$

式中 $l_{i,j,k}$ 为农机 a_i 在任务田块 T_j 的第 k 条直行路径的长

度，km； $b_{i,j,k}$ 为农机 a_i 在任务田块 T_j 中绕行的第 k 条横行路径的长度，km； $S_{i,j,k}$ 为农机 a_i 在任务田块 T_j 的第 k 条转弯路径的长度，km； $N_{i,j,t}$ 为农机 a_i 在任务田块 T_j 的调头数量； l_B 为农机 a_i 在任务田块 T_j 的空行直线路径长度，km； v_{wi} 为农机 a_i 的作业速度，km/h； v_{ti} 为农机 a_i 在田块的调头的速度，km/h。

其中

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{农机 } a_i \text{ 在任务田块 } T_j \text{ 中有直行空行路径} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

2.2.4 农机作业油耗

农机 a_i 的作业油耗 c_i 主要农机在路上的油耗和农机在田块的油耗由 2 部分构成：

$$\begin{cases} c_i = c_{Ri} + c_{Fi} \\ c_{Fi} = \left(\sum_{k=1}^N l_{i,j,k} + \sum_{k=1}^{2k_E} b_{i,j,k} \right) F_{wci} + \sum_{k=1}^{N_{i,j,t}} S_{i,j,k} F_{ci} + l_B F_{ci} y_{ij} \\ c_{Ri} = F_{ci} S_i \end{cases} \quad (24)$$

式中 c_{Ri} 为农机 a_i 在路上的油耗，L； c_{Fi} 为农机 a_i 在田块的油耗，L； F_{ci} 为农机 a_i 非作业状态下平均每公里的油耗，L/km； F_{wci} 为农机 a_i 作业状态下平均每公里油耗，主要由作业油耗、调头油耗和直线空行油耗构成，L/km。

3 动态任务分配

农机机群作业过程中，受一些因素的影响，机群无法继续执行原有作业计划，需要根据任务执行进度和机群状态进行动态任务分配。农机机群作业过程中需要进行动态任务分配的情况主要有：①新增作业任务；②作业过程中有农机出现故障无法继续作业；③原有作业任务中一些作业任务取消。其中情况①、②是多机作业过程中最常见的情况，本文主要针对情况①、②进行动态任务分配研究。

动态任务分配分为集中式和分布式，在本文的体系结构中，集中式任务分配由服务器负责整个机群的任务分配，分布式任务分配由整个机群联合处理进行任务分配。其中，在集中式任务分配中服务器处理所有计算，需要服务器具有强大的计算功能，对终端设备要求较低，当终端很多时会导致响应速度变慢；在分布式任务分配中所有终端都参与计算，对终端设备要求较高，处理能力强。考虑到目前农机终端计算机都有较强的计算能力，为减少服务器压力，采用分布式方式处理动态任务分配问题。

3.1 合同网算法

合同网算法 (CNP, Contract Net Protocol) 是处理分布式任务分配方法的常用算法，通过模仿经济行为的“招标-投标-中标”机制来实现任务分配^[34-36]，其基本流程如图 5 所示。

使用 CNP 解决农机机群任务分配过程中，服务器端作为招标者、农机端作为投标者。假设机群原分配任务及顺序为最优分配结果，动态任务分配过程中投标者计算投标值时，使用将招标任务插入原有任务序列的方法计算农机 a_i 执行新任务田块 T_j 的代价 Δf_i^j ，招标者选择 Δf_i^j 最小的招标者作为中标者。

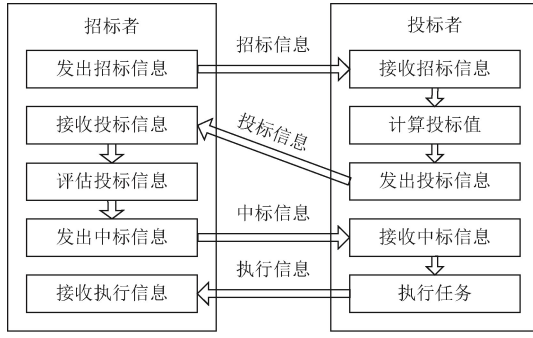


图5 合同网算法流程

Fig.5 Contract Net Protocol (CNP) algorithm process

农机 a_i 对任务田块 T_j 投标的代价函数 Δf_i^j 为

$$\Delta f_i^j = \alpha[(t_i^j - t_{\max})y(t_i), \Delta c_i, \Delta s_i]^T \quad (25)$$

其中 $y(t_i) = \begin{cases} 1, & t_i^j > t_{\max} \\ 0, & t_i^j \leq t_{\max} \end{cases} \quad (26)$

式中 t_i^j 为第 i 台农机添加任务田块 T_j 后所需作业的总时间, h ; t_{\max} 为招标开始前整个机群的机群工作时间, h ; Δc_i 为第 i 台农机添加任务 T_j 后所需油耗的增量, L ; Δs_i 为第 i 台农机添加任务 T_j 后路上路程的增量, km 。

当第 i 台农机中标任务田块 T_j 后整个机群代价 f' 为

$$f' = f + \Delta f_i^j \quad (27)$$

式中 f 为招标前机群的总代价。

3.2 改进合同网算法

3.2.1 任务分配结构设计

为减少服务器的计算量, 设计了基于农机间招-投标过程的动态任务分配方法。如图 6 所示, 服务器端设有管理者和公告板 2 个模块, 管理者可以与客户端和农机终端进行通信, 当有新任务需要动态分配时, 管理者通知相关农机读取公告板; 公告板接收管理者信息并展示, 起到信息共享作用; 农机终端可与管理者通信、读取公告板信息; 动态任务分配在农机终端之间进行。

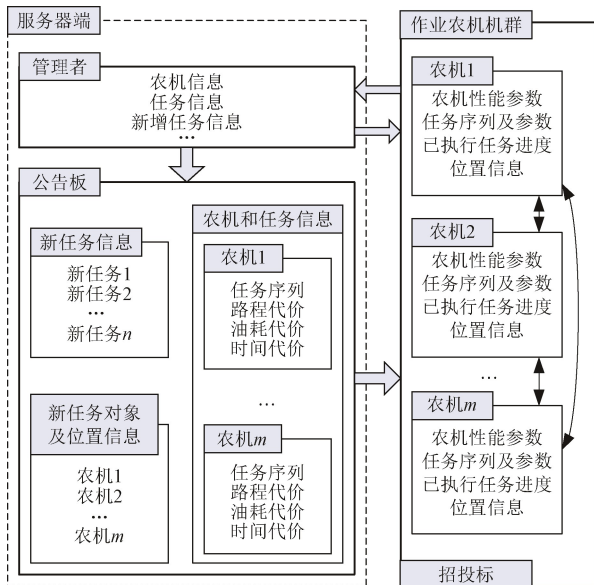


图6 基于公告板的合同网算法流程

Fig.6 Contract net protocol process based on bulletin board

3.2.2 算法改进

在设计动态任务分配结构中, 任务分配过程在正常作业的农机间进行, 所有作业的农机作为投标者, 其中一台农机既作为招标者又作为投标者。招投标过程中可能出现以下问题, 如果招标者距离其他投标者距离过远会加大丢包率, 影响任务分配效果; 如果招标者为最终的中标者, 多次招投标通信为无效通信; 在有新任务加入的情况下, 农机原有任务及序列可能不是最优分配。基于以上问题设计了几种改进基于公告板合同网算法的几种办法。

1) 选择招标者

任务分配的招投标过程由农机间无线网络完成通信, 选择招标者使招标者与投标者之间的直线距离和最短

$$b = \operatorname{argmin}_i \sum_{j=1}^m \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (28)$$

式中 (x_i, y_i) 为农机 a_i 当前位置的高斯平面坐标, m 。

2) 设定招标阈值

由于招标者自身也作为投标者, 为减少无效投标, 降低任务分配过程中农机间的通信, 采用设定招标阈值的方法, 招标者在对任务 T_j 进行招标前, 首先计算招标者自身执行该任务的最小代价 Δf^j 作为动态阈值。

$$\Delta f^j = \Delta f_{bid}^j = \alpha[(t_i^j - t_{\max})y(t_i), \Delta c_i, \Delta s_i]^T \quad (29)$$

式中 Δf_{bid}^j 为招标者执行新增任务 T_j 的代价。

投标者 a_i 接收招标信息并计算自身执行该任务的最小代价 Δf_i^j , 如果 $\Delta f_i^j < \Delta f^j$ 发送投标信息, 如果 $\Delta f_i^j \geq \Delta f^j$, 则不发送投标信息。

3) 中标者任务再分配

为使农机任务分配更加均衡, 减小农机间作业代价的差, 建立单机代价函数, 按中标农机作业代价从高到低的顺序依次作为招标者进行任务再分配, i 台农机的代价函数 f_i 为

$$f_i = \alpha[t_i, c_i, s_i]^T \quad (30)$$

按招标农机任务面积从小到大的顺序进行任务再分配, 农机 a_i 对任务田块 T_j 招标的阈值 Δf^j 为

$$\Delta f^j = \alpha[(t_{\max} - t_i^{-j})z(t_i), \Delta c_i, \Delta s_i]^T \quad (31)$$

式中 t_i^{-j} 为农机 a_i 去掉任务田块 T_j 后完成任务的时间, h ; Δc_i 为农机 a_i 去掉任务田块 T_j 后减少的油耗, L ; Δs_i 为农机 a_i 去掉任务田块 T_j 后减少的路程, km 。

其中 $z(t_i) = \begin{cases} 1, & t_i = t_{\max} \\ 0, & t_i \neq t_{\max} \end{cases} \quad (32)$

4) 农机间任务交换

农机执行任务过程中有部分代价发生在从一个任务到另一个任务的路程中, 进行合理的任务交换以减少总路程是降低整体代价的一个办法。

设农机 a_i 执行任务 T_j 的路程代价 f_s^{ij} 为

$$f_s^{ij} = s_i - s_i^{-j} \quad (33)$$

式中 s_i^{-j} 为农机 a_i 去掉任务 T_j 后的路程, km 。

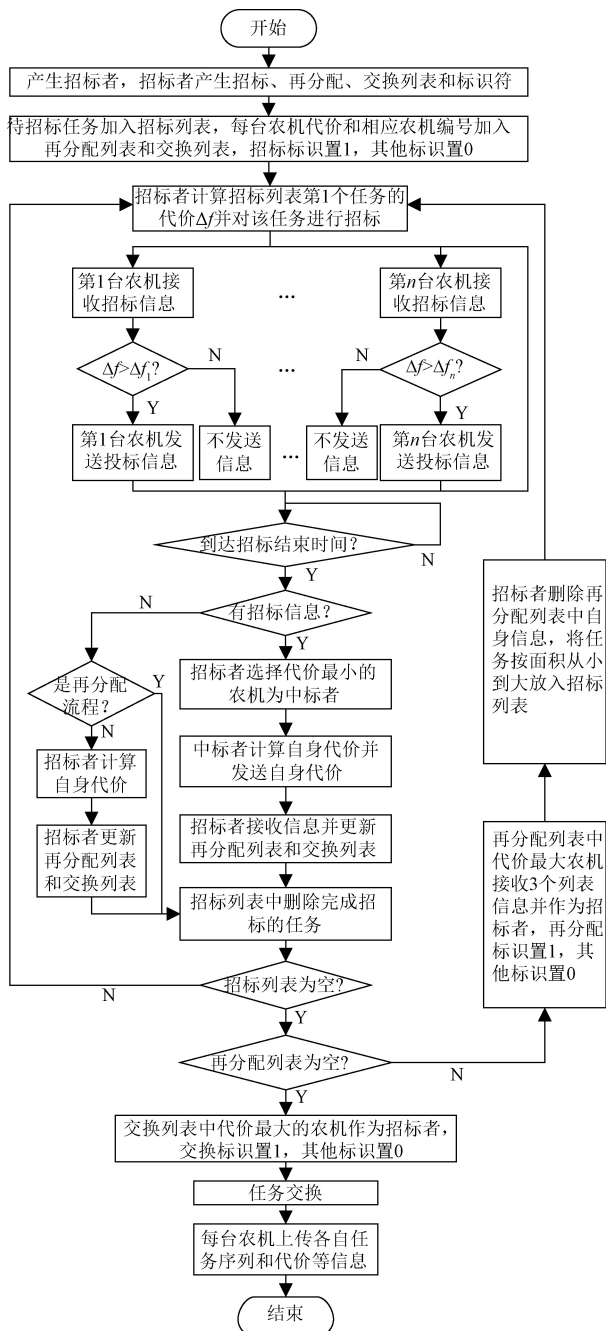
任务交换流程如下:

① 完成任务代价最大的农机 a_i 计算出最大路程代价 $\max(f_s^{ij})$ 和对应的任务田块 T_j 。

- ② 农机 a_i 作为招标者对任务田块 T_j 进行交换招标;
- ③ 其他工作正常的农机作为投标者, 投标者将任务田块 T_j 依次与自身未作业任务田块进行替换, 并使用 2-opt 进行优化, 计算替换后自身最小代价;
- ④ 如果替换后代价小于替换前, 该任务作为投标信息;
- ⑤ 招标者计算删除任务 j 后加入每个投标任后的代价, 并取最小代价 f_i^k 和对应的任务田块 T_k ;
- ⑥ 如果 $f_i^k < f_i$, 则对任务 j, k 交换, 并按各自优化后顺序执行任务。

3.3 基于改进合同网算法的任务分配流程

基于改进合同网算法的任务分配流程如图 7 所示。



注: Δf 为招标阈值; Δf_i 为农机 a_i 对任务的招标代价, $i=1,2,\dots,m$ 。
Note: Δf is the bidding threshold; Δf_i is the bidding cost of the agricultural machinery a_i , $i=1,2,\dots,m$.

图 7 改进合同网流程图

Fig.7 Flow chart of improved contract net protocol

4 仿真试验

由于农机油耗与农机牵引力正相关, 每公里油耗确定困难, 为验证改进合同网算法动态任务分配效果, 以 $\alpha=[1,0,0]$ 为例, 从中国农机开发的农业机械化精准作业平台选择包括多个较集中且平整地块参数作为仿真试验地块参数, 选择农机合作社常见拖拉机及机具参数作为仿真试验农机参数, 试验田块如图 8 所示, 共 15 个任务, 任务主要参数如表 1 所示, 田块较规则, 均为标准矩形田块; 共 4 台农机, 农机主要性能参数如表 2 所示。分别用传统合同网算法和改进合同网算法对新增任务情况和出现故障的情况进行动态任务分配仿真试验。



注: n 为任务田块编号, $n=1,2,\dots,15$ 。

Note: n is the number of task field, $n=1,2,\dots,15$.

图 8 动态任务分配电子地图

Fig.8 Dynamic task assignment electronic map

表 1 任务田块参数

Table 1 Task field parameters

任务序号 Task No.	最长边垂向宽度 Width perpendicular to longest side /m	斜边与最长边的夹角 Angle between hypotenuse and longest side/rad	面积 Area/m ²
1	130	$\pi/2$	19 500
2	100	$\pi/2$	15 000
3	56	$\pi/2$	8 400
4	80	$\pi/2$	12 000
5	145	$\pi/2$	18 125
6	105	$\pi/2$	13 125
7	40	$\pi/2$	6 000
8	62	$\pi/2$	9 300
9	34	$\pi/2$	5 100
10	110	$\pi/2$	16 500
11	86	$\pi/2$	12 900
12	75	$\pi/2$	11 250
13	65	$\pi/2$	9 750
14	160	$\pi/2$	20 000
15	120	$\pi/2$	15 000

4.1 有新任务加入情况的动态任务分配试验

假设农机 a_1, a_2 和 a_3 共同进行作业, 分别以 $\{T_1 \sim T_{10}\}$ 、 $\{T_1 \sim T_{11}\}$ 和 $\{T_1 \sim T_{12}\}$ 为原任务, $\{T_{11} \sim T_{14}\}$ 、 $\{T_{12} \sim T_{15}\}$ 和 $\{T_{13} \sim T_{15}\}$ 为新增任务。使用遗传算法将原任务进行静态任务分配, 原任务的多机协同代价分别为 7.63、8.57 和 9.22 h。实际作业过程中, 假设农机同时开始作业, 新增任务可能发生在农机作业后的各个阶段, 根据原有任务的作业时间, 假设当作业时间分别为 2、4、6 h 时进行新增任务的动态任务分配, 任务分配结果如表 3 所示。

表 2 农机性能参数
Table 2 Performance parameters of agricultural machineries

农机序号 Agricultural machinery No.	作业幅宽 Working width/m	作业速度 Working speed /(km·h ⁻¹)	无倒车调头速度 No reversing speed/(km·h ⁻¹)	有倒车调头平均速度 Average speed with reversing/(km·h ⁻¹)	路上速度 Speed on road/(km·h ⁻¹)	最小转弯半径 Minimum turning radius/m	农机中心至最远作业部件距离 Distance between agricultural machinery center and farthest operating part /m
1	6.9	10	8	3	10	5.5	7
2	5.5	10	8	3	10	4.6	6
3	3.7	10	8	3	10	4.3	4
4	3.7	10	8	3	10	4.3	4

表 3 新增任务情况下动态任务分配结果
Table 3 Dynamic task allocation results in the case of new tasks

新增任务 New tasks	时间 Time/h	方法 Methods	农机 a_1 Agricultural machinery a_1	农机 a_2 Agricultural machinery a_2	农机 a_3 Agricultural machinery a_3	与服务器通信次数 Number of communicated with server	机群代价 Cost of machinery group/h
$T_{11} \sim T_{14}$	2	传统合同网算法	1→2→4→6→12→14	7→8→10→9→11	3→5→13	40	12.94
		改进合同网算法	1→9→4→6→5	7→8→11→12→10→2	3→14→13	6	11.99
	4	传统合同网算法	1→2→14→4→6→12	7→8→10→9→11	3→5→13	40	13.12
		改进合同网算法	1→2→14→4→6	7→8→10→9→12→11	3→5→13	6	12.06
	6	传统合同网算法	1→2→14→4→6→12	7→8→10→9→11	3→5→13	40	13.12
		改进合同网算法	1→2→14→4→6	7→8→10→9→12→11	3→5→13	6	12.06
$T_{12} \sim T_{15}$	2	传统合同网算法	5→14→10→9→12→11	2→1→3→4→13	6→15→8→7	40	13.15
		改进合同网算法	5→14→10→12→11	2→1→9→13→4→3	6→15→8→7	6	12.57
	4	传统合同网算法	5→10→9→12→11→14	2→1→3→4→13	6→8→15→7	40	13.41
		改进合同网算法	5→10→12→11→14	2→1→9→13→4→3	6→8→15→7	6	12.81
	6	传统合同网算法	5→10→14→9→12→11	2→1→3→4→13	6→8→15→7	40	13.67
		改进合同网算法	5→10→14→7→11	2→1→3→4→12→13	6→8→15→9	6	12.78
$T_{13} \sim T_{15}$	2	传统合同网算法	1→3→11→9→12→13→15	7→8→14→6→5	4→10→2	30	13.27
		改进合同网算法	1→3→6→15→8→12	7→9→11→14→5	4→10→13→2	6	12.53
	4	传统合同网算法	1→3→11→9→12→13→15	7→8→6→5→14	4→10→2	30	13.27
		改进合同网算法	1→3→11→12→13→15	7→8→6→5→14	4→10→9→2	6	13.16
	6	传统合同网算法	1→3→11→9→12→13→15	7→8→6→5→14	4→10→2	30	13.27
		改进合同网算法	1→3→11→12→13→15	7→8→6→5→14	4→10→9→2	6	13.16

$\{T_1 \sim T_{10}\}$ 为原任务 $\{T_{11} \sim T_{14}\}$ 为新增任务时，动态任务分配前的任务分配结果为农机 a_1 田块作业顺序为 1→2→4→6，农机 a_2 田块作业顺序为 7→8→10→9，农机 a_3 田块作业顺序为 3→5，动态任务分配结果表明，基于改进合同网算法比基于传统合同网算法的动态任务分配农机机与服务器通信次数较少 85%，机群多机协同时间代价降低 7.34%~8.05%。

$\{T_1 \sim T_{11}\}$ 为原任务 $\{T_{12} \sim T_{15}\}$ 为新增任务时，动态任务分配前的任务分配结果为农机 a_1 田块作业顺序为 5→10→9→11，农机 a_2 田块作业顺序为 2→1→3→4，农机 a_3 田块作业顺序为 6→8→7，动态任务分配结果表明，基于改进合同网算法比基于传统合同网算法的动态任务分配农机机与服务器通信次数较少 85%，机群多机协同时间代价降低 4.41%~6.67%。

$\{T_1 \sim T_{12}\}$ 为原任务 $\{T_{13} \sim T_{15}\}$ 为新增任务时，动态任务分配前的任务分配结果为农机 a_1 田块作业顺序为 1→3→11→9→12，农机 a_2 田块作业顺序为 7→8→6→5，农

机 a_3 田块作业顺序为 4→10→2，动态任务分配结果表明，基于改进合同网算法比基于传统合同网算法的动态任务分配农机机与服务器通信次数较少 80%，机群多机协同时间代价降低 0.83%~5.58%。

由任务分配结果可知，在不同时刻执行新增任务的动态任务分配，基于改进合同网算法的结果都优于基于传统合同网算法的结果，在新增任务试验情况下农机与服务器的通信次数降低 80%~85%，机群时间代价降低 0.83%~8.05%，均有较明显降低。试验结果表明，在新增任务情况下，基于改进合同网算法的动态任务分配方法性能更加优秀。

4.2 有农机出现故障情况的动态任务分配试验

播种作业过程中，故障农机所在作业行及作业行中间的未作业行由故障农机修复后完成作业；收获类作业将未作业区域全部规划进行作业。以收获作业为例假设作业开始前将任务 $T_1 \sim T_{15}$ 分配给农机 $a_1 \sim a_4$ ，任务分配结果为：农机 a_1 的田块作业顺序为 15→5→1→3；农机 a_2

的田块作业顺序为 13→12→8→14; 农机 a_3 的田块作业顺序为 2→4→6→7; 农机 a_4 的田块作业顺序为 9→10→11; 机群作业时间代价为 10.26 h。分别假设开始作业 1、3、5 h 后农机 a_3 发生故障, 对农机 a_3 未完成的任务进行

动态任务分配, 任务分配结果如表 4 所示, 基于改进合同网算法比基于传统合同网算法的动态任务分配农机与服务器通信次数较少 77.4%, 机群多机协同时间代价降低 1.77%~12.89%。

表 4 有农机故障情况下动态任务分配结果
Table 4 Dynamic task allocation results in the case of agricultural machinery failure

时间 Time/h	方法 Methods	农机 a_1 Agricultural machinery a_1	农机 a_2 Agricultural machinery a_2	农机 a_3 Agricultural machinery a_3	与服务器通信次数 Number of communicated with server	机群代价 Cost of machinery group /h
1	传统合同网算法	15→6→5→2→1→3	13→12→4→8→14	9→10→11→7	31	13.81
	改进合同网算法	15→10→4→6→5→3	13→12→14→8→2	9→11→7→1	7	12.03
3	传统合同网算法	15→5→4→2→1→3	13→12→8→14→6	9→10→11→7	31	12.97
	改进合同网算法	15→5→11→3→1→2	13→12→4→8→14	9→10→6→7	7	12.74
5	传统合同网算法	15→5→4→2→1→3	13→12→8→14→6	9→10→11→7	31	12.97
	改进合同网算法	15→5→3→1→2→6	13→12→11→8→14	9→10→4→7	7	12.65

由任务分配结果可知, 在有农机出现故障的情况下基于改进合同网算法的动态任务分配结果比基于传统合同网算法的动态任务分配结果机群时间代价平均降低 5.86%, 最高降低 12.89%, 农机与服务器间的通信次数降低 77.4%, 均有较明显降低。试验结果表明, 在有农机出现故障情况下, 基于改进合同网算法的动态任务分配方法性能更加优秀。

仿真结果表明, 传统合同网算法和改进合同网算法都可以用来处理动态任务分配问题。其中, 使用改进合同网算法可以得到更好的任务分配效果并且减少农机与服务器间的通信次数, 同时, 在使用改进合同网算法的任务分配过程中, 服务器只执行简单的通信而不参与任务分配的计算, 将全部计算和部分通信放在农机终端计

算机, 充分利用了农机终端计算机的计算能力, 大大减轻了服务器负担, 因此, 基于改进合同网算法的动态任务分配方法具有明显优势。

5 实际播种作业试验

为验证本文基于改进合同网算法的动态任务分配方法在实际作业场景中的有效性, 进行实际播种作业试验。图 9 为内蒙古兴安农垦吐列毛杜农场一区某日播种作业情况, 3 台播种机共完成 11 个田块任务。根据中国农机院农机合作社管理云服务平台得到播种机性能参数和任务参数, 3 台播种机所用拖拉机型号分别为约 2 台翰迪尔 2204 拖拉机和 1 台约翰迪尔 1854 拖拉机, 主要性能参数如表 5 所示, 11 个任务参数如表 6 所示。

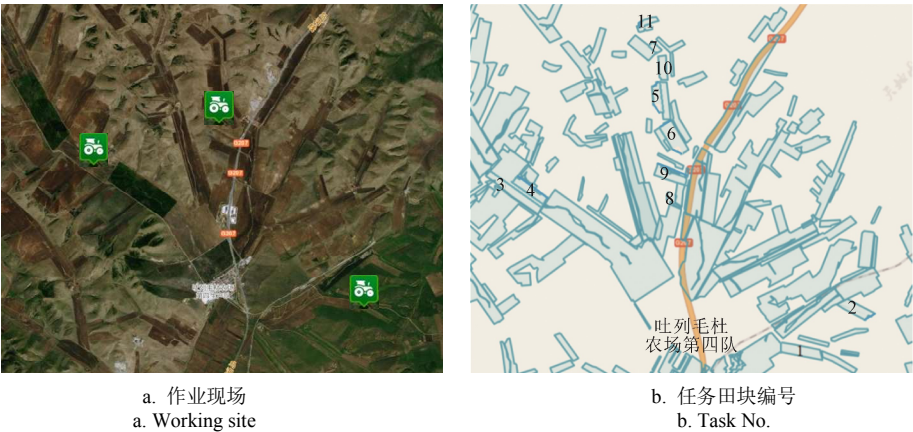


图 9 实际播种作业场景
Fig.9 Actual seeding operation scene

表 5 播种机主要性能参数
Table 5 Main performance parameters of seeders

播种机 序号 Seeder No.	作业幅宽 Working width/m	作业速度 Working speed (km·h ⁻¹)	无倒车调头速度 No reversing speed/(km·h ⁻¹)	有倒车调头平均速度 Average speed with reversing/(km·h ⁻¹)	路上速度 Speed on road/ (km·h ⁻¹)	最小转弯半径 Minimum turning radius/m	农机中心至最远作业部件距离 Distance between agricultural machinery center and farthest operating part /m
1	8.0	10	8	3	10	5.1	7
2	8.0	10	8	3	10	5.1	7
3	8.0	10	8	3	10	5.9	4

表 6 任务参数
Table 6 Task parameters

任务序号 Task No.	最长边垂向宽度 Vertical width of longest side/m	斜边与最长边的夹角 Angle between hypotenuse and longest side/rad	面积 Area/m ²
1	200	$4\pi/9$	200 000
2	250	$\pi/3$	170 000
3	100	$\pi/2$	160 000
4	120	$\pi/2$	132 000
5	110	$\pi/6$	88 000
6	390	$\pi/6$	325 650
7	85	$5\pi/12$	29 750
8	200	$\pi/2$	60 000
9	230	$\pi/2$	149 500
10	250	$\pi/2$	162 500
11	70	$5\pi/12$	28 000

3 台播种机执行任务的实际作业田块顺序分别为 1→2→8→9→10→11、6→7 和 3→4→5，如图 10 所示，其

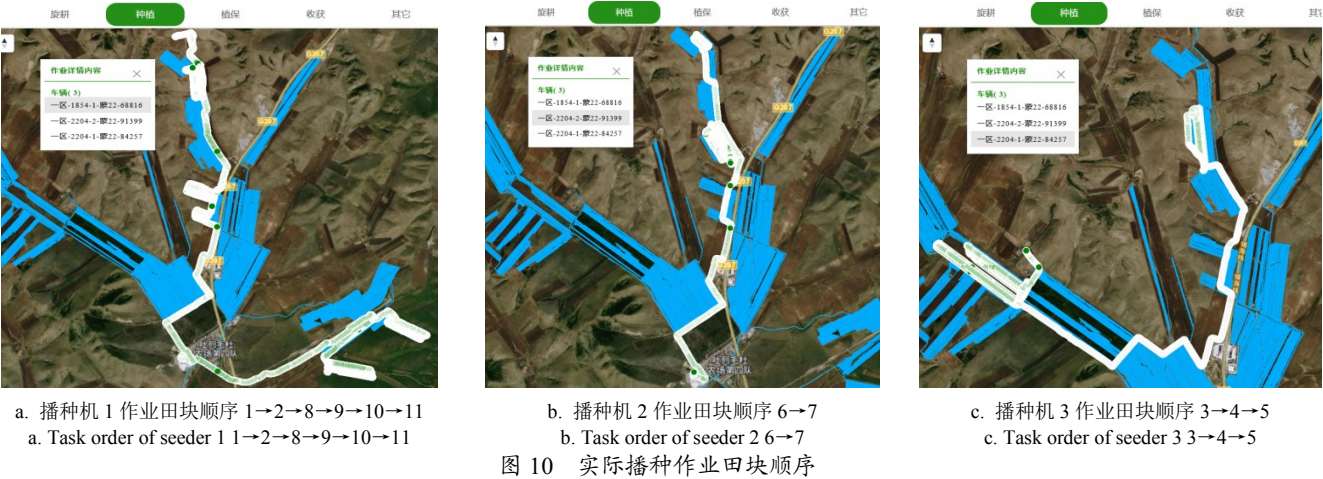


Fig.10 Field sequence of actual planting operations

由试验结果可知，在不同时间执行动态任务分配均可得到较优的任务分配结果，任务分配后机群代价比实际作业理论机群代价降低 30%以上。因此，基于改进合同网的动态任务分配方法可以较好的解决实际作业情况下有突发情况的动态任务分配问题。

6 结 论

- 1) 本文对同种作业农机机群动态任务分配问题进行了研究，以机群中用时最长农机的作业时间、机群的油耗和机群的路程为代价建立代价函数和目标函数。
- 2) 提出了基于合同网算法的动态任务分配方法和改进合同网算法的 4 种方法，包括基于直线距离和最短的招标者选择方法、基于招标者作业能力的阈值设定方法、基于最小面积的任务再招标方法和基于路程最大的任务交换方法。
- 3) 选择适当田块作为任务田块，分别对有新任务增加的情况和农机出现故障的情况进行了基于合同网算法和基于改进合同网算法的动态任务分配仿真试验，仿真结果表明基于改进合同网算法的动态任务分配结果比基于传统合同网的动态任务分配结果农机与服务器通信次

中亮色区域为相应播种机该日作业田块。3 台播种机的理论作业时间分别为 14.14、5.78 和 6.50 h。播种机 1 率先完成任务 1 和任务 2 回到车库后接到新增任务 8、9、10 和 11，造成任务分配不均衡播种机 1 作业时间过大，导致机群作业代价增加。

假设 3 台播种机同时出发作业，当作业时间分为 2、4、6 h 时进行基于改进合同网算法的动态任务分配试验，结果如表 7 所示。当作业时间分别为 2、4、6 h 时，经过基于改进合同网算法的多机协同动态任务分配机群时间代价比实际作业理论机群时间代价降低 30.20~34.09%。

表 7 不同时间下试验结果
Table 7 Experiment results at different times

时间 Time/h	a_1	a_2	a_3	代价 Cost/h
2	1→2→4	6→7→11→10	3→5→9→8	9.32
4	1→2→5	6→7→11→10	3→4→8→9	9.32
6	1→2→10	6→7→8→11	3→4→5→9	9.87

数减少 77.4%~85.0%，机群时间代价均降低 0.83%~12.89%。

4) 进行实际播种新增任务情况下动态任务分配试验，由试验结果可知，在不同的时间执行基于改进合同网算法新增任务的动态任务分配，任务分配后机群时间代价比真实机群理论时间代价降低 30.20%~34.09%。试验结果表明，基于改进合同网的农机机群动态任务分配方法可以解决机群作业过程中有突发情况且无严格作业时间窗口的动态任务分配问题。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 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 with English abstract)
- [3] 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 with English abstract)
- [4] Wei C, Hindriks K V, Jonker C M. Dynamic task allocation for multi-robot search and retrieval tasks[J]. Applied Intelligence, 2016, 45(2): 383-401.
- [5] Miao Y, Zhong L, Yin Y, et al. Research on dynamic task allocation for multiple unmanned aerial vehicles[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2017, 39(4): 466-474.
- [6] Ezercan Kayır 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.
- [7] Lee D. Resource-based task allocation for multi-robot systems[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 103: 151-161.
- [8] 余敦辉, 袁旭, 张万山, 等. 基于动态阈值的时空众包在线分配算法[J]. 计算机应用, 2020, 40(3): 658-664.
- Yu Dunhui, Yuan Xu, Zhang Wanshan, et al. Spatiotemporal crowdsourcing online task allocation algorithm based on dynamic threshold[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(3): 658-664. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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.
- [10] 舒萧, 王时龙, 康玲, 等. 面向云制造的有限资源多任务调度博弈[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(3): 1-11.
- Shu Xiao, Wang Shilong, Kang Ling, et al. Multi-task scheduling game with limited resources for cloud manufacturing[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(3): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [11] Zhang H, Luo H, Wang Z, et al. Multi-robot cooperative task allocation with definite path-conflict-free handling[J]. IEEE Access, 2019, 7: 138495-138511.
- [12] Zhang X, Tan Y, Yang Z. Resource allocation optimization of equipment development task based on MOPSO algorithm[J]. JSEE, 2019, 30(6): 1132-1143.
- [13] 王健, 郭建胜, 慕容政, 等. 带有专家信度的无人机任务分配最小风险问题[J]. 控制与决策, 2019, 34(9): 2036-2040.
- Wang Jian, Guo Jiansheng, Murong Zheng, et al. Minimum-risk problem of unmanned aerial vehicle task allocation with expert belief degree[J]. Control and Decision, 2019, 34(9): 2036-2040. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 with English abstract)
- [15] 张哲, 吴剑, 何诚. 多无人机多目标协同近距任务分配研究[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 with English abstract)
- [16] 宫金良, 王伟, 张彦斐, 等. 基于农田环境的农业机器人协同作业策略[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 11-19.
- Gong Jinliang, Wang Wei, Zhang Yanfei, et al. Cooperative working strategy for agricultural robot groups based on farmland environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张伟, 王乃新, 魏世琳, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289-297.
- Zhang Wei, Wang Naixin, Wei Shilin, et al. Overview of unmanned underwater vehicle swarm development status and key technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(2): 289-297. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵良辉. 无拍卖的动态 Agent 调度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(11): 2893-2899.
- Zhao Lianghui. Dynamic agent scheduling model without contract net protocol[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(11): 2893-2899. (in Chinese with English abstract)
- [19] 韩俊樱, 张振宇, 孔德仕. 移动群智感知中面向用户区域的分布式多任务分配方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(2): 358-362.
- Han Junying, Zhang Zhenyu, Kong Deshi. Distributed multi-task allocation method for user area in mobile crowd sensing[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(2): 358-362. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张珂, 张利国. 基于移动边缘计算的 GI/GI/1 排队建模与调度算法[J]. 自动化学报, 2020: 1-11.
- Zhang Ke, Zhang Ligu. GI/GI/1 queuing model and task

- scheduling for mobile edge computing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020: 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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]. *农业机械学报*, 2017, 48(S1): 52-57.
- Cao Ruyue, Li Shichao, Wei Shuang, et al. Remote monitoring platform for multi-machine cooperation based on web-GIS[J]. *Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(S1): 52-57. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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.
- [23] 姚竟发, 滕桂法, 霍利民, 等. 联合收割机多机协同作业路径优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 12-18.
- Yao Jingfa, Teng Guifa, Huo Limin, et al. Optimization of cooperative operation path for multiple combine harvesters without conflict[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(17): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- [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.
- [25] 王涛, 刘飞, 高羽佳, 等. 基于遗传算法与 WiFi 聚类算法结合的北斗农机精准调度[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2020, 41(4): 426-433.
- Tao Wang, Liu Fei, Gao Yujia, et al. Precise scheduling of Beidou agricultural machinery based on combination of genetic algorithm and WiFi clustering algorithm[J]. *Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition*, 2020, 41(4): 426-433. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王文权. 带时间窗农机调度问题模型及算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Wang Wenquan. Research on Models and Algorithms for Agricultural Machinery Scheduling Problem with Time Window[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘振宇, 梁建平. 基于 BDS 的农机精确调度和高效作业平台设计与应用[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(10): 97-102.
- Liu Zhenyu, Liang Jianping. Design and application of precision scheduling and efficient operation platform for agricultural machinery based on BDS[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(10): 97-102. (in Chinese with English abstract)
- [28] 董胜, 袁朝辉, 谷超, 等. 基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 1-11.
- Dong Sheng, Yuan Zhaohui, Gu Chao, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(8): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [29] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 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*, 2012, 43(6): 147-152. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhou L. Simulation Modelling for In-field Planning of Sequential Machinery Operations in Cropping Systems[D]. Aarhus: Aarhus University, 2015.
- [31] 吴才聪, 王东旭, 陈智博, 等. SF2104 拖拉机自主行驶与作业控制方法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 42-48.
- Wu Caicong, Wang Dongxu, Chen Zhibo, et al. Autonomous driving and operation control method for SF2104 tractors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(18): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [32] 陈济勤. 农业机器运用管理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [33] 段涛. 矩形农田的拖拉机导航路径规划设计[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Duan Tao. Design of Path Planning for Tractor Navigation in Rectangular Farmland[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [34] Smith R G. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1980, C-29(12): 1104-1113.
- [35] Xu L, Weigand H. The evolution of the contract net protocol[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2001, 2118(1): 257-264.
- [36] 郭超, 熊伟, 刘呈祥. 合同网协议改进研究现状与展望[J]. *装备学院学报*, 2016, 27(6): 82-89.
- Guo Chao, Xiong Wei, Liu Chengxiang. Prospects and current researches on improvement of contract net protocol[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2016, 27(6): 82-89. (in Chinese with English abstract)

Dynamic task allocation method for the same type agricultural machinery group

Wang Meng, Zhao Bo, Liu Yangchun, Wei Ligu, Wang Fengzhu, Fang Xianfa^{*}

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

Abstract: A multi-robot system often needs to change the robot's behavior in response to dynamic environments, particularly in the field of multiple tasks in sustainable agriculture. Dynamic task allocation is therefore an essential requirement to improve the overall system performance for the same group type of multiple agricultural machineries. However, some challenges remained on the agricultural machinery group to efficiently determine the task assignments under local observations in some unexpected conditions. In this study, a dynamic task allocation strategy was proposed for the same type of agricultural machinery group using an improved Contract Net Protocol (CNP). A cost function was established for the task assignment and performance using the maximum operating time in the longest machinery, the fuel consumption, and the distance on the road of the agricultural machinery group. A path planning was developed to combine the straight and the bypass in the field operation for the single and adjacent fields using the highest efficiency of agricultural machinery. A task bidding was constructed for the cost function of agricultural machinery referring to the CNP bidding process. Some specific approaches were utilized in the improved CNP to balance tasks with fewer server calculations, communication time, and non-operational distances, ranging from the selection of tenderee, the setting of the bidding threshold and the task redistribution for successful bidder to the task exchange between agricultural machinery. A systematic simulation of dynamic task allocation was carried out for the newly added tasks and the failure of agricultural machinery, where the operating time was taken as the operating cost, while the agricultural machinery with different performances was taken as the same group. A field experiment was implemented on the multi-machine cooperative dynamic task allocation at different times, where different numbers of tasks were used as original tasks, while some were used as new tasks in the newly added tasks. All tasks were selected as the original tasks in the failure of agricultural machinery. The simulated results showed that in the case of newly added tasks, the improved NCP performed 0.83%-8.05% lower than the traditional CNP, while the number of communications with the server was reduced by 80%-85%. In the case of failure of agricultural machinery, the improved NCP performed 1.77%-12.89% lower than the traditional CNP, while the number of communications with the server was reduced by 77.4%. The simulated data demonstrated that the improved NCP behaved a much better performance on the multi-machine cooperative dynamic task allocation, compared with the traditional NCP. Finally, the seeding operational data of a farm was selected to verify in the Hinggan League of Inner Mongolia of western China. The operation day was selected with the case of newly added tasks. A multi-machine cooperative dynamic task allocation was also performed on the improved CNP at various moments of task allocation on the daily operation. A systematic analysis was made to compare the work time of that day before and after dynamic task assignment using the improved CNP. Specifically, the improved CNP reduced the cost by 30.20%-34.09% under different times of dynamic task allocation, indicating a better performance and higher efficiency in the dynamic task allocation for precision agricultural production.

Keywords: agricultural machinery; algorithms; task allocation; cost function; improved contract net protocol