

文章编号:1006-2467(2021)11-1362-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.342

飞机地面除冰资源协同控制

李彪^{1,2}, 王立文¹, 邢志伟², 王思博², 罗谦³

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;
3. 中国民用航空局第二研究所 工程技术研究中心, 成都 610041)

摘要: 针对多并行除冰任务下分布式资源协同能力较弱及均衡性低的问题, 结合机场除冰资源配置及时空分布状态, 提出了一种基于多 Agent 协商的飞机地面除冰资源协同控制方法. 建立了多 Agent 除冰资源协同运行框架, 设计了面向全局协同联合体招投标机制的资源优化方法, 提升了整体任务均衡性. 在协同运行方案的基础上构建自治多 Agent 协同优化模型, 采用加入决策因子的模型预测控制方法生成自治协同控制策略, 并面向实际场景验证所提方法的可行性. 结果表明, 基于优化方案生成的初始化协同控制策略容错时间均值达 4.89 min, 与其他传统方法相比, 平均起飞容限最大提升 1.015 min, 平均利用率增加 15.28%, 保证了除冰资源的安全性及协同性.

关键词: 航空运输; 协同控制; 多 Agent 协商; 模型预测控制; 地面除冰资源

中图分类号: V 351.392; U 8 **文献标志码:** A

Cooperative Control of Aircraft Ground Deicing Resources

LI Biao^{1,2}, WANG Liwen¹, XING Zhiwei², WANG Sibao², LUO Qian³

(1. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China,
Tianjin 300300, China; 3. Engineering Technology Research Center, The Second Research
Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aimed at the problem of weak coordination and low balance of distributed resources under multiple parallel deicing tasks, a cooperative control method of aircraft ground deicing resources based on multi-agent negotiation was proposed, which combined airport deicing resource allocation and space-time distribution. A framework for collaborative operation of multi-agent deicing resources was established, and a resource optimization method for the bidding mechanism of a global collaborative consortium was designed to improve the overall task balance. Based on the operating plan, an autonomous multi-agent resource collaborative optimization model was constructed. The model predictive control method was applied to generate a collaborative control strategy, and the feasibility was verified in actual scenarios. The results demonstrate that the resource coordination and anti-interference ability of the proposed method are significantly enhanced while meeting the real-time requirements. Compared with the results obtained by other methods, the average takeoff tolerance is 4.89 min, increased by 1.015 min, and the average utilization rate is increased by 15.28%, which can ensure the safety and synergy of deicing resources.

收稿日期: 2020-10-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1601200), 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项项目(3122019094), 中国民航大学研究生科研创新项目(205014060219), 天津市研究生科研创新项目(2020YJSB098)

作者简介: 李彪(1993-), 男, 河北省张家口市人, 博士生, 从事机场运行安全保障技术研究.

通信作者: 王立文, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 022-24092885; E-mail: cauc_wlw@126.com.

Key words: air transportation; collaborative control; multi-Agent negotiation; model predictive control; ground deicing resources

随着世界经济逐步复苏,完善的交通体系依然发挥着重要作用.作为推动世界命运共同体建设的重要纽带,航空运输高速发展的态势长期内不会改变.飞机地面除冰是北方冬季冰雪低温条件下保障机场安全平稳运行的关键环节,其资源的优化及控制一直是国内外研究热点^[1].目前,国内外学者主要采用博弈论^[2-4]和智能算法^[5-6]研究除冰资源的相关问题.张伟等^[7]研究了面向航班延误的飞机除冰过程博弈机理并基于启发式算法优化求解,求解速率较慢.陈斌等^[8]分析了除冰参数的能量转换过程并结合遗传算法优化迭代以保证除冰效率.Fan等^[9]从除冰液回收为出发点,设计了数据驱动的飞机除冰管理框架并使用动态规划模型优化分配除冰机位.Slim等^[10]应用模糊集成式功能共振分析方法量化飞机除冰安全效能以指导车辆作业过程,但缺乏一体化协同约束.Ariyajunya等^[11]评估了沃斯堡机场环管系统的有效性,建立了基于决策树的除冰参数优化模型,未考虑与其他除冰资源的协同.

上述方法仍存在协同能力较差的不足之处,故本文面向除冰坪与车辆提出一种基于多 Agent 的飞机地面除冰资源协同控制方法,面向飞机离港计划构建地面除冰协同运行框架与优化模型并生成全局资源运行方案,以提升机场不利条件下的整体运行策略,并设计子系统的协同控优化模型及控制方法,通过仿真实验说明该方法的有效性.

1 飞机地面除冰资源全局协同优化

机场协同决策(A-CDM)是提升机场航班高密度条件下运行安全和效率的关键手段之一,其中信息共享及里程碑节点时间两个基础规范已在各枢纽机场推广并执行,针对不利条件下的协同运行,提出了飞机地面除冰资源分布式协同运行框架^[12],将问题视为全局和自治协同两个阶段,基于实际机场运行模式及约束分别建模求解.

全局协同运行的目标是除冰资源均衡性最优与正点率最高,设计改进招标式多 Agent 协商算法以获取面向短时离港计划的除冰资源协同运行方案.

自治协同运行以全局分配结果为主体,以最大化安全起飞裕度为目标,依据保持时间与对应资源的约束条件^[13],构建自治子系统的除冰资源优化模型并求解,保证本除冰区域内安全高效运行,协同运

行框架如图 1 所示,图中 n 为自治子系统编号.

1.1 全局多 Agent 除冰资源协同优化架构

针对除冰资源的分布式协同运行过程,建立面向全局协同运行的 Agent 模型,引入招投标机制作为中枢层,基于除冰资源运行规范优化多 Agent 协商模块完成除冰资源层和任务层的信息共享,结合机场运行态势生成全局协同运行方案,模型架构如图 2 所示.在全局模型中,各自治系统参与任务竞标的权力由机场运行模式及自治系统区位分布所决定,而资源配置方案是由跑道开放和气象条件共同确定.参与竞标的自治系统基于自身属性与配置均等优化分配除冰任务,协商中枢依照均衡原则及均等判决约束选择最优任务执行方,从而提升机场整体的除冰保障能力.

1.2 面向飞机离港计划的任务招标

定义除冰任务 Agent 集合 $\{M_i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$,其中任务 Agent 的元素数量 m 表示决策时段 T 内申请除冰作业的离港飞机数量;除冰坪 Agent 集合 $\{S_j \mid j = 1, 2, \dots, s\}$,表示共有 s 块除冰坪,且各除冰坪内按照机型的大小设置了 s_j 个匹配不同工艺的除冰机位;除冰车辆 Agent 集合 $\{V_j \mid j = 1, 2, \dots, s\}$,集合中 Agent 元素分布于各除冰坪中,且已经按当前气象条件下的除冰流程完成编队,其中 V_j 中有 v_j 个除冰车辆编队可参与协同控制.

除冰任务 M_i 通过控制 Agent 向全局中枢发送招标书并申请除冰资源 S_j 与 V_j ,招标书向量为 $B_i = [T_i \ D_i \ R_i \ A_i \ C_i \ G_j \ F_j \ P_j]$,其中 T_i 为预计推出时间, D_i 为计划离港时间, R_i 为起飞跑道, A_i 为机型, C_i 为除冰工艺(关车/慢车除冰), G_j 为除冰资源的保障能力得分, F_j 为综合补液能力得分, P_j 为平均正点率得分,相关表达式为

$$G_j = \frac{1}{s_j l_{\max} \tau_{\max}} \sum_{k=1}^{s_j} \sum_{l=1}^{l_k} \tau_i^k \tag{1}$$

$$F_j = \frac{1}{v_j \xi_{\max}} \sum_{k=1}^{s_j} \sum_{l=1}^{l_k} \xi_l^k \tag{2}$$

$$P_j = \frac{1}{s_j l_{\max}} \sum_{k=1}^{s_j} \sum_{l=1}^{l_k} \eta(k, l) \tag{3}$$

$$\eta(k, l) = \begin{cases} 1, & 0 < |D_{\Lambda, l}^k - D_l^k| \leq 15 \\ 0, & |D_{\Lambda, l}^k - D_l^k| > 15 \end{cases} \tag{4}$$

式中: τ_i^k 为近邻单位决策时段 T 内 S_j 除冰坪 Agent

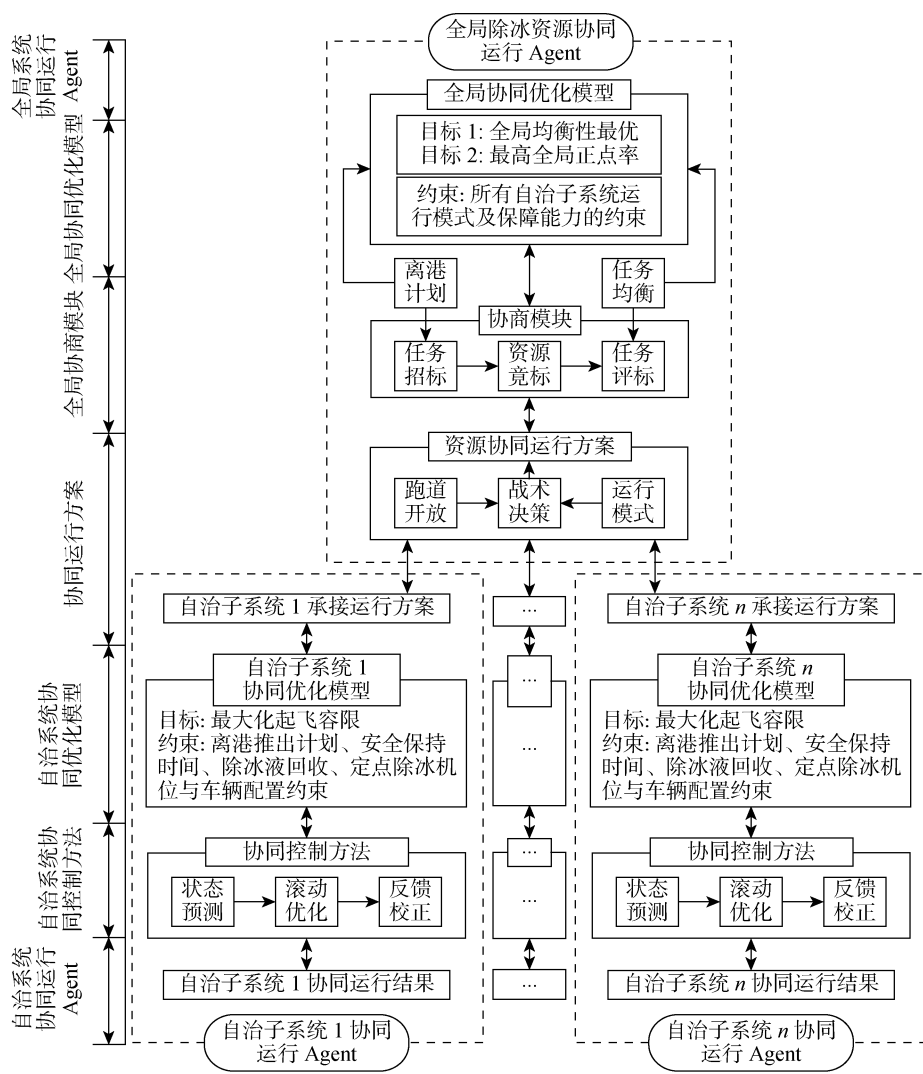


图 1 基于改进招标式多 Agent 协商的除冰资源协同运行框架

Fig. 1 Frame for collaborative operation of deicing resources based on improved bidding multi-Agent negotiation

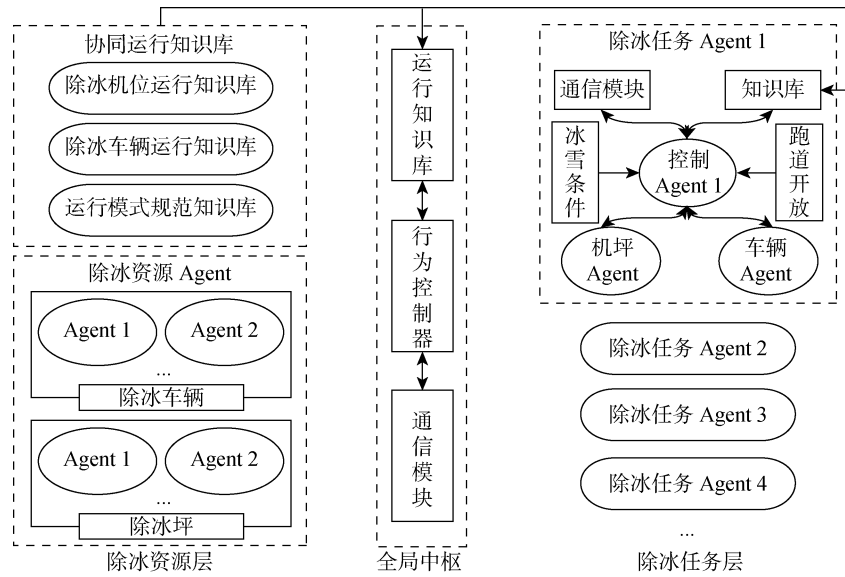


图 2 全局除冰资源运行 Agent 模型

Fig. 2 Agent model of global deicing resource operation

元素内第 k 个除冰机位完成第 l 个任务所需的时间;
 l_k 为完成总任务量; l_{\max} 和 τ_{\max} 分别为除冰机位单位
时间内完成的最大任务量和安全作业时间; ξ_i^k 为各
任务除冰液消耗量; v' 为该时段内可参与除冰坪
Agent 元素 S_j 协同运行的除冰车辆编队数量; ξ_{\max}
为编队最大补液量; $\eta(k, l)$ 为决策变量,判别最终
任务是否延误; $D_{\lambda, l}^k$ 和 D_l^k 分别为除冰任务的实际时间
和计划离港时间.

1.3 除冰资源竞标与评标

全局中枢接收到来自控制 Agent 的招标书 B_i
后转发至除冰资源层中的 S_j 和 V_j ,结合机场运行模式,
通过变量 R_i, A_i, C_i 确定参与竞标的 S_j 和 V_j . 无法
参与的除冰车辆 Agent 元素可基于空间分布与其中一
个或多个竞标者组成联合体 V_j' ,除冰资源层向中枢
返回包含除冰坪、除冰车辆和综合得分 σ_j 的竞标书
向量 $b_i = [S_j, V_j', \sigma_j]$, 其中

$$\sigma^j = \frac{1}{3}(G_j + F_j + P_j) \tag{5}$$

否则返回竞标书为空,由除冰指挥人员指定资源执行
该任务.

收到竞标应答后,全局中枢需重点考虑竞标者的
自身条件,首先要保证任务的均衡,即 S_j 承接任务的
时空特征服从均匀分布且联合体 V_j' 满足任务需求,
其次筛选出综合得分最高的竞标书,并宣布对应资源
为中标者,完成全局协同优化与匹配过程,算法描述
如下.

输入 除冰任务招标书 B_i
除冰资源 Agent 集合

输出 任务资源协同运行方案

(1) 全局中枢接收招标书

(2) 查询协同运行知识库并定向发送招标书

(3) IF 存在满足变量 R_i 和 A_i 的除冰坪

(4) 计算各除冰坪内满足工艺 C_i 机位的均衡率 e^j

(5) 计算满足条件除冰资源的综合得分 σ^j

(6) FOR 满足条件的除冰资源

(7) IF e^j 为各除冰坪 Agent 的最大值

(8) IF σ^j 为满足条件的最大值

(9) 宣布单独中标

(10) ELSE 查询未参与竞标资源

(11) 组成联合体计算 σ^j

(12) IF σ^j 为最大值

(13) 宣布联合体中标

(14) ELSE 放弃竞标

(15) END IF

(16) END IF

(17) ELSE 整合形成联合体竞标

(18) 计算联合体综合得分 σ^j

(19) 宣布得分最高联合体中标

(20) END IF

(21) END FOR

(22) ELSE 返回竞标书为空,人工干预

(23) END IF

(24) 全局中枢结合中标结果形成运行方案

其中,除冰坪内满足任务工艺 C_i 机位的均衡率 e^j 表示
在决策时段 T 内接收的任务数量在时间上服从均匀分
布,即

$$e^j = \frac{1}{N^{C_i} N^{k_1}} \frac{1}{T^*} \times \sum_{k_2=1}^{N^{k_1}} T' + \left(|D_{k_2} - \tau_{\max}| - \frac{k_2 T}{N^{k_1} - 1} \right)$$

式中: N^{C_i} 为除冰坪内满足工艺机位数; N^{k_1} 为已承
接任务数; D_{k_2} 为承接第 k_2 个任务的计划离港时间;
 T' 为当前时刻; T^* 为均衡性最大容限. 最后,优化
结果随除冰任务 Agent 元素输出协同运行方案,作为
自治子系统的输入.

2 自治多 Agent 除冰资源协同控制方法

2.1 自治协同优化模型

自治系统除冰资源协同运行多 Agent 模型图如
图 3 所示,自治系统除冰资源协同运行多 Agent 模型
以承接的运行方案为主体,并且以相应资源为被控对
象,建立面向除冰任务的资源动态协同控制方法^[14].

飞机地面除冰实际作业过程中,为确保航班准
点起飞,需保证除冰结束与计划起飞时间的差值(即
起飞容限)最大,为移交塔台后序的队列处理提供裕
度,因此模型的目标函数为

$$\max \sum_{i_1=1}^{N_1} (D_{i_1} - D'_{i_1}) \tag{6}$$

式中: N_1 为自治系统 n 承接任务总数; D_{i_1} 和 D'_{i_1} 分
别为第 i_1 项除冰任务的计划起飞时间和预计除冰结
束时间,忽略推出到除冰结束之间滑出等待随机干
扰,则

$$D'_{i_1} = T_{i_1} + \bar{\tau}_{\text{taxi}} + \tau_{\max} \tag{7}$$

式中: T_{i_1} 为第 i_1 项除冰任务的计划推出时间; $\bar{\tau}_{\text{taxi}}$
为该自治系统近邻时段 T 内滑出与等待时间的平均

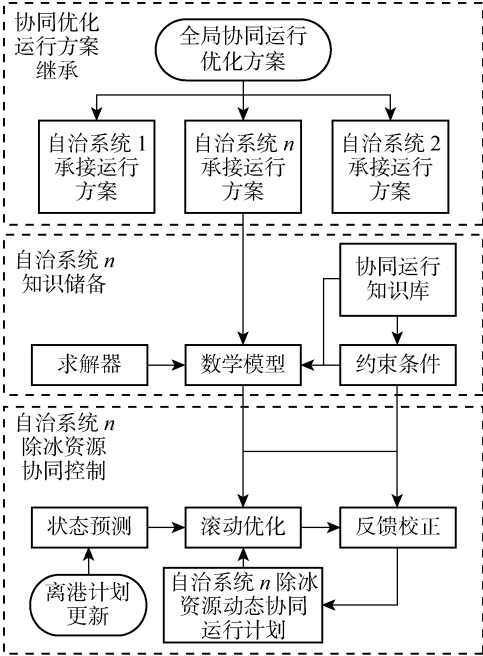


图 3 自治系统除冰资源协同运行多 Agent 模型

Fig. 3 Multi-agent model of collaborative operation of deicing resources in autonomous system

值。 D_{i_1} 和 T_{i_1} 根据地面保障过程演化态势在机场协同决策系统中不断更新,因而不在于本文的研究范畴。

自治系统协同优化数学模型的约束条件源于机场除冰运行标准,从安全、匹配、配置实现资源约束。安全约束主要体现在不同冰雪条件下飞机起飞容限小于安全保持时间 τ_b 以避免二次结冰,且同一机位前后任务不能冲突的同时留有一定的缓冲时间 τ_c :

$$D_{i_1} - D'_{i_1} < \tau_b \tag{8}$$

$$\left. \begin{aligned} D'_{i_2} - D'_{i_1} + \tau_{\max} &> \tau_c \\ D'_{i_1} - \tau_{\max} - D'_{i_0} &> \tau_c \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

式中: D'_{i_0} 和 D'_{i_2} 分别为第 i_1 项除冰任务前后紧邻的预计完成时间。匹配约束为了保证任务机型、工艺与除冰资源相一致以符合安全要求,即

$$\left. \begin{aligned} A_{i_1} &= A_{j'} \\ C_{i_1} &= C_{j'} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

式中: A_{i_1} 为除冰任务机型; $A_{j'}$ 为执行机位所能满足机型; C_{i_1} 为任务所需工艺; $C_{j'}$ 为所能满足工艺,其中各决策变量表达式为($A_{j'}$ 同 A_{i_1} , $C_{j'}$ 同 C_{i_1} , 不再赘述)

$$A_{i_1} = \begin{cases} 0, & \text{C、D 类飞机} \\ 1, & \text{E 类及以上} \end{cases} \tag{11}$$

$$C_{i_1} = \begin{cases} 0, & \text{慢车} \\ 1, & \text{关车 / 兼容} \end{cases} \tag{12}$$

同时,由于除冰液回收的复杂性,各除冰机位预期利用率需尽可能匹配,即

$$\left| \frac{N'_{j_1} \tau_{\max}}{T} - \frac{1}{s_j} \sum_{j_1=1}^{s_j} \frac{N'_{j_1} \tau_{\max}}{T} \right| < 0.2 \tag{13}$$

式中: N'_{j_1} 为时段 T 第 j_1 个除冰机位预计完成任务的数量。

配置约束指除冰机位和车辆的工作总量不能超过方案配置,即

$$\sum_{j_1=1}^{s_j} N'_{j_1} \tau_{\max} < s_j T \tag{14}$$

$$\sum_{j_2=1}^{v'_j} N'_{j_2} \tau_{\max} < 0.5 v'_j T \tag{15}$$

式中: N'_{j_2} 为第 j_2 个除冰编队预计完成任务数; v'_j 为配置除冰车辆数。式(15)中将编队调度及补液时间理想化为除冰时间。

2.2 除冰资源协同控制方法

基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)设计了除冰资源协同控制方法框架,如图 4 所示,图中: r 为迭代次数, E 为优化时段, MPC 相关参数根据机场冰雪条件下运行流程及标准确定,同时为减少迭代次数和复杂度,在传统 MPC 中加入优化决策因子作为触发机制^[15],基本步骤如下:

步骤 1 由全局运行方案导入自治系统承接除冰任务及其属性,并获取除冰资源时空分布与配置参数,根据机场运行模式进行初始化。

步骤 2 在机场协同决策系统中查询决策时段内所有承接任务的计划推出与离港时间,根据式(7)~(16)所构建的协同优化模型初步生成除冰资源运行计划。

步骤 3 随时间演化更新状态,计算各除冰任务的决策因子 δ_{i_1} ,用于判断各除冰任务是否需要再优化,即

$$\delta_{i_1} = \frac{|D'_{i_1} - \hat{D}'_{i_1}|}{0.5 \tau_c} \tag{16}$$

式中: \hat{D}'_{i_1} 为除冰任务估计时间(或实际结束时间)。

步骤 4 判断各除冰任务的 δ_{i_1} 是否大于 1,若已完成或正在完成任务(飞机已推出)的 δ_{i_1} 大于 1,则对应除冰机位的后续任务及资源全部进入滚动优化空间 Θ 重新求解,若为待完成任务(飞机未实际推出),则仅该任务及对应资源导入至 Θ 。

步骤 5 基于协同优化模型再次面向 Θ 迭代求解,若为空解,则将未完成任务对应的前后邻接待完成除冰任务及资源导入至 Θ ,对滚动优化空间 Θ 内的任务及资源再次求解,直至存在最优解。

步骤 6 以最优解反馈校正除冰资源的协同控制策略,并根据生成的优化计划调整全局协同运行方案和除冰等待排序^[16]。

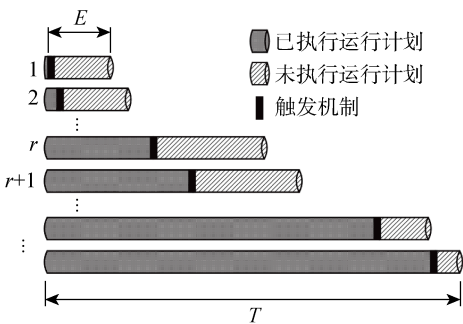


图 4 除冰资源协同控制方法基本框架

Fig. 4 Basic framework of collaborative control method for deicing resources

步骤 7 在决策时段 T 内随优化时段 E 的推进及 A-CDM 系统中共享离港信息的动态更新重复步骤 3~6。

3 算例分析

3.1 仿真实验数据及参数设置

以国内某机场为场景展开分析,除冰资源空间分布如图 5 所示,除冰资源配置情况见表 1,同时假设该机场目前在气温 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 小雪的条件下由南向

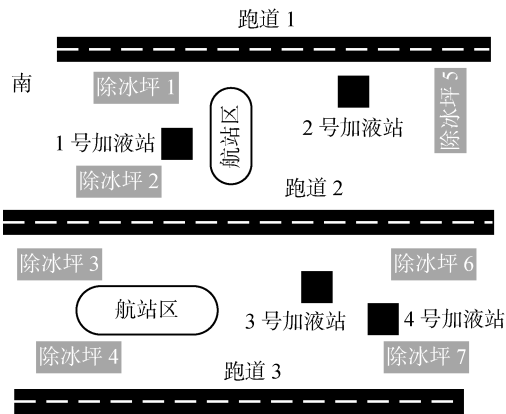


图 5 除冰资源空间分布示意图

Fig. 5 Spatial distribution of deicing resources

表 1 机场除冰资源配置

Tab. 1 Allocation of deicing resources at the airport

除冰坪 编号	除冰机位 数量/个	兼容除冰 机位/个	除冰车量 编队数/个
1	4	2	4
2	6	3	6
3	5	3	5
4	3	3	6
5	6	3	9
6	4	3	5
7	4	3	5

北运行模式且不考虑跑道关闭,启用 1~4 号除冰坪,由 A-CDM 系统中导入任务计划。

根据实际运行场景和标准可知,除冰工艺的不同导致除冰资源的作业时长不一致,由先验数据可知,不同工艺的除冰安全时间存在差异,其中关车除冰为 13 min,慢车除冰为 6 min,平均滑行等待时间为 3.35 min,缓冲时间为 3 min。

本文所提出的飞机除冰资源协同控制方法基于 MATLAB 编程实现,同时,参考该机场冰雪条件下运行预案,设置协同优化控制决策时段为 1 h,优化时段和迭代次数由优化决策因子实时计算结果判定,根据历史数据可知在外部条件和运行模式下,不间断作业下单位时间内 1~4 号除冰坪的最大保障能力如图 6 所示。

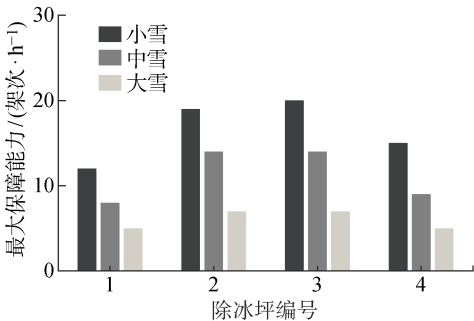


图 6 不间断作业除冰坪的最大保障能力

Fig. 6 Maximum guarantee capacity of uninterrupted operation deicing stands

3.2 仿真结果及分析

根据前一时段除冰任务的完成情况及效果计算各除冰坪的综合得分见表 2,可知综合表现最优的为 2 号除冰坪,表现最差的是 4 号除冰坪。

表 2 除冰资源综合得分情况

Tab. 2 Comprehensive score of deicing resources

除冰坪 编号	保障能力	综合补 液能力	平均 正点率	综合得分
1	74.688	90.053	83.333	82.691
2	81.429	86.010	85.714	84.384
3	78.889	80.230	87.143	82.087
4	57.708	88.820	86.667	77.732

由历史数据可知,按照飞机预计推出时刻排序下一时段共有 55 个飞机地面除冰任务(记为 $M_1 \sim M_{55}$),基于除冰任务属性及资源综合得分开展下一时段招标和竞标,各除冰任务均衡情况如图 7 所示,在机场安全约束的条件下的协同优化结果见表 3。

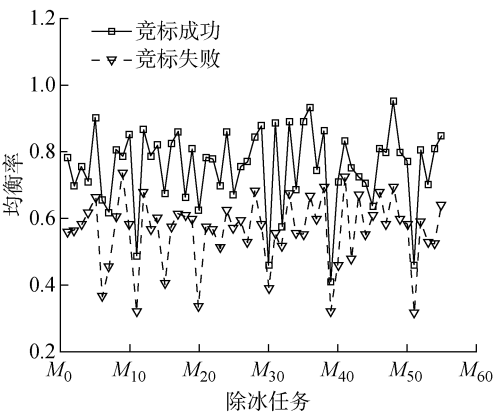


图 7 各除冰任务均衡率

Fig. 7 Equilibrium rate of each deicing task

表 3 下一时段除冰资源协同优化运行方案

Tab. 3 Collaborative optimization operation plan for deicing resources in next period

除冰坪	单独除冰任务	联合体 除冰任务	联合 编队
S_1	$M_4, M_6, M_{11}, M_{15},$ $M_{20}, M_{30}, M_{39},$ M_{49}, M_{54}	$M_{21}, M_{32},$ M_{40}, M_{51}	V_5
S_2	$M_1, M_5, M_8, M_{10}, M_{13},$ $M_{16}, M_{26}, M_{31}, M_{35},$ M_{42}, M_{44}, M_{55}	$M_{19}, M_{29}, M_{36},$ M_{38}, M_{48}, M_{53}	V_5
S_3	$M_2, M_7, M_9, M_{12}, M_{14},$ $M_{22}, M_{33}, M_{34}, M_{41},$ M_{43}, M_{47}, M_{52}	M_{18}, M_{28}, M_{37}	V_6
S_4	$M_3, M_{17}, M_{23}, M_{24},$ M_{45}, M_{46}, M_{50}	M_{25}, M_{27}	V_7

由表 3 可确定各自治系统下一时段的除冰任务,并基于上述结果得到各系统或联合体除冰资源协同控制策略。

针对 2 号除冰坪的优化方案验证协同控制方法,以当前时刻(10:40)从 A-CDM 系统中导出的预计推出和起飞时间,生成该自治系统的初始化策略,如图 8 所示,图中 $V(x,y)$ 表示第 x 个除冰车集合的第 y 个除冰车编队(配置情况见表 1)。同时计算各机位的平均容错时间:

$$t_{\text{tol}} = \frac{1}{2(N'_{j_1} - 1)} \sum_{j_2=1}^{N'_{j_1}-1} t_{j_2}^{j_1} \quad (18)$$

式中: $t_{j_2}^{j_1}$ 为第 j_1 个除冰机位前后近邻任务的第 j_2 个间隔时间。2 号除冰坪的策略容错结果如图 9 所示,由图可知,各机位的 t_{tol} 均大于 2 min 且均值为 4.89 min,满足系统稳定性要求。

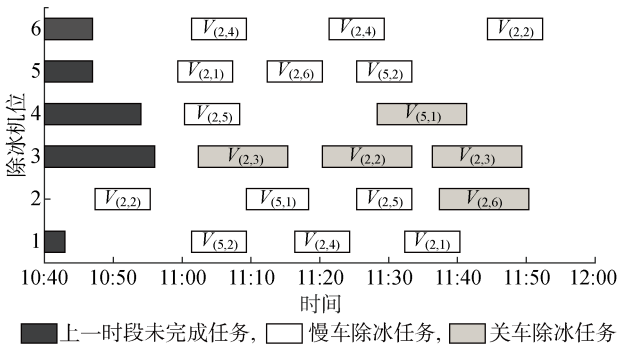


图 8 初始化协同控制策略

Fig. 8 Initialized cooperative control strategy

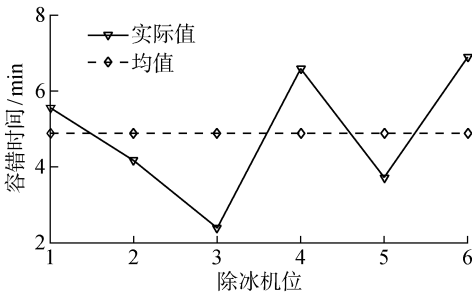


图 9 初始化策略容错时间

Fig. 9 Fault tolerance time for initialization strategy

随着机场运行过程的推进,由优化决策因子触发滚动优化,控制策略也会相应改变,本时段运行结果如图 10 所示。优化决策因子的加入简化了传统 MPC 方法的计算复杂度,将求解时间控制在了动态过程可接受的范围内。

计算滚动优化过程生成控制策略的平均容错时间变化如图 11 所示,可知所提方法的在保证各除冰机位任务分配均衡的基础上整体提升了自治系统的容错时间,控制策略随时间演化的表现比实际运行较好,满足系统稳健性的要求。

为验证所提方法(I)的协同优化能力,选取各除

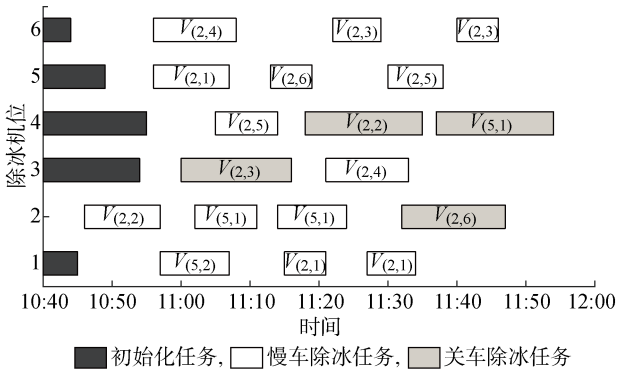


图 10 协同控制运行仿真结果

Fig. 10 Simulation results of cooperative control operation

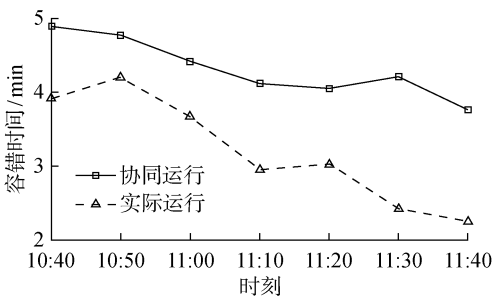
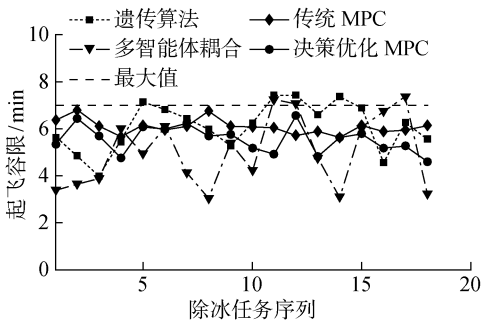


图 11 平均容错时间变化趋势
Fig.11 Trend of average fault tolerance time

冰坪的执行任务时长均方根误差 r_i 、均衡率均值 \bar{e} 两个仿真优化参数与文献[7]中的博弈机理模型(II)及文献[8]中的除冰参数模型(III)对比,所得仿真结果见表 4.由表 4 可知,所提方法 r_i 均值相比 II 降低了 1.015 min, \bar{e} 相比 III 增大了 0.244,有效提升了除冰资源优化的协同性和均衡性.

为验证所提方法的安全性和协同能力,计算各除冰机位的平均起飞容限和机位利用率,并与传统



MPC、遗传算法^[8]、多智能体耦合^[12]仿真结果对比,如图 12 所示.由图 12 可知,所提方法加入了面向状态演化预测的 MPC 滚动优化和决策优化机制后,相较于其他传统方法起飞容限最大提升 1.052 min 且各除冰任务在安全保持时间内且呈现出均衡状态,除冰机位平均利用率最大提升了 15.28%.

表 4 仿真优化参数对比结果

Tab.4 Comparison results of simulation optimization parameters

除冰坪		S_1	S_2	S_3	S_4
r_i	I	9.24	11.51	9.46	11.57
	II	9.87	12.27	10.80	12.86
	III	10.22	12.74	10.14	11.04
\bar{e}	I	0.609	0.660	0.666	0.712
	II	0.571	0.613	0.457	0.608
	III	0.404	0.557	0.388	0.321

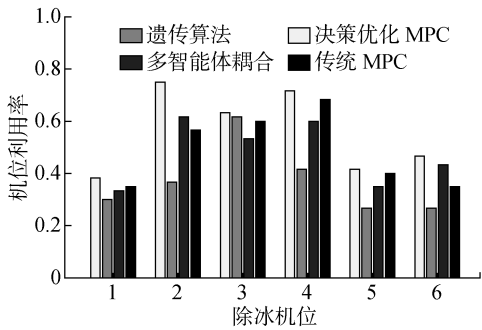


图 12 协同控制效果对比
Fig.12 Comparison of collaborative control effects

4 结语

本文以飞机地面除冰资源分布式时空配置来刻画协同运行框架,建立了建立面向全局协同运行的多 Agent 模型,提出了基于个体与联合体协商的除冰资源协同优化方法,以提升并行除冰任务的处理能力与效率.所设计的自治子系统多 Agent 模型在保障承接运行方案的同时,完善了对应目标函数和约束条件并基于改进的 MPC 求解,所得结果在协同性和稳健性上更具优势.未来将研究随机扰动下的飞机地面除冰资源协同优化及作业编队控制,以增强协同控制方法的稳定性.

参考文献:

[1] FUKUYAMA S. Dynamic game-based approach for optimizing merging vehicle trajectories using time-ex-

panded decision diagram[J]. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2020, 120: 102766.
[2] 崔艾军,邢志伟.飞机地面除冰运行合作博弈模型研究[J]. **中国民航大学学报**, 2015, 33(1): 9-12.
CUI Aijun, XING Zhiwei. Cooperative game model for aircraft ground deicing operation[J]. **Journal of Civil Aviation University of China**, 2015, 33 (1): 9-12.
[3] 邢志伟,李斯,罗谦.机场道面除冰雪车辆队形控制模型[J]. **交通运输工程学报**, 2019, 19(4): 182-190.
XING Zhiwei, LI Si, LUO Qian. Formation control model of airport pavement deicing vehicles[J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2019, 19(4): 182-190.
[4] DASZCZUK W B. Measures of structure and operation of automated transit networks[J]. **IEEE Trans-**

- actions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(7): 2966-2979.
- [5] LIU F, LIU X Z, MOU M J, *et al.* Safety assessment of approximate segregated parallel operation on closely spaced parallel runways[J]. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2019, 32(2): 463-476.
- [6] 肖春华, 林伟, 杨升科, 等. 结冰云雾参数对冰与固壁间剪切强度影响的初步研究[J]. **航空动力学报**, 2019, 34(12): 2627-2634.
- XIAO Chunhua, LIN Wei, YANG Shengke, *et al.* Preliminary study on influence of icing cloud parameters on ice shear strength on solid wall[J]. **Journal of Aerospace Power**, 2019, 34(12): 2627-2634.
- [7] 张伟, 李彪. 飞机地面除冰运行调度模型研究[J]. **中国民航大学学报**, 2017, 35(5): 22-25.
- ZHANG Wei, LI Biao. Research on dispatching model of aircraft ground deicing[J]. **Journal of Civil Aviation University of China**, 2017, 35(5): 22-25.
- [8] 陈斌, 焦琳青, 杨亚磊, 等. 复杂多约束条件下航班除冰延误机理及资源优化配置[J]. **控制理论与应用**, 2020, 37(5): 1069-1079.
- CHEN Bin, JIAO Linqing, YANG Yalei, *et al.* Flight deicing delay mechanism and resource optimization configuration under complex and multiple constraints[J]. **Control Theory & Applications**, 2020, 37(5): 1069-1079.
- [9] FAN H Y, TARUN P K, CHEN V C P, *et al.* Data-driven optimization for dallas fort worth international airport deicing activities[J]. **Annals of Operations Research**, 2018, 263(1/2): 361-384.
- [10] SLIM H, NADEAU S. A mixed rough sets/fuzzy logic approach for modelling systemic performance variability with FRAM[J]. **Sustainability**, 2020, 12(5): 1918.
- [11] ARIYAJUNYA B, TARUN P K, CHEN V C P, *et al.* Modeling the impact of airport deicing/anti-icing activities on the dissolved oxygen levels in the receiving waterways [J]. **Journal of Water Management Modeling**, 2018, 26(441): 1-8.
- [12] 张红颖, 周子林, 李彪. 基于多 Agent 的通航运力资源协同调度[J]. **交通运输系统工程与信息**, 2020, 20(1): 214-221.
- ZHANG Hongying, ZHOU Zilin, LI Biao. Collaborative schedule of general aviation resource based on multi-agent[J]. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, 2020, 20(1): 214-221.
- [13] JANSSEN S, SHARPANSKYKH A, CURRAN R. Agent-based modelling and analysis of security and efficiency in airport terminals[J]. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2019, 100: 142-160.
- [14] 王静, 潘开灵, 刘翱, 等. 云制造平台下订单可分解的协同生产计划模型及求解[J]. **上海交通大学学报**, 2018, 52(12): 1655-1662.
- WANG Jing, PAN Kailing, LIU Ao, *et al.* The model and solution for collaborative production planning with order splitting in cloud manufacturing platform[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2018, 52(12): 1655-1662.
- [15] 李冰, 成卫, 晏永廷, 等. 基于 MP 与 MPC 相结合的分布式交通信号控制研究[J]. **交通运输系统工程与信息**, 2019, 19(5): 86-93.
- LI Bing, CHENG Wei, YAN Yongting, *et al.* Distributed traffic signal control based on combination of MP and MPC[J]. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, 2019, 19(5): 86-93.
- [16] 徐长安, 倪少权, 陈钉均. 基于两阶段算法的运行图与天窗协同优化[J]. **西南交通大学学报**, 2020, 55(4): 882-888.
- XU Chang'an, NI Shaoquan, CHEN Dingjun. Collaborative optimization for timetable and maintenance window based on two-stage algorithm[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2020, 55(4): 882-888.

(本文编辑:陈晓燕)