

基于动态优先级的机场保障车辆避冲突运行规划方法

包丹文¹, 姚馨宇¹, 刘建荣², 陈卓¹, 周佳怡

(1. 南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210010; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 本文针对机坪车机混行环境, 提出了一种考虑动态优先级的避冲突运行规划方法。首先, 从作业效率和运行风险两个层面, 提出动态优先级计算方法, 完善了多类型保障车辆时变冲突风险划分的规则。其次, 建立了考虑行驶和等待时间最小化的混合整数规划模型, 实现了车辆和航空器混合运行环境下避冲突路径规划的功能。最后, 设计全局路径优化的两阶段算法进行求解, 并通过低时间复杂度的改进冲突探测方法, 弥补了传统方法求解大规模复杂问题在时效性方面的不足。实验表明, 所提的动态优先级结果满足保障车辆差异化运行要求。设计的算法在大、小规模场景均有较好的适用性, 相比对照算法, 冲突优化幅度提升 7.6%, 车辆与航空器冲突占比降低 7.5%。

关键词: 航空运输; 运行路径规划; 冲突探测; 混合整数规划模型; 动态优先级。

中图分类号: U8

文献标志码: A

Planning method for airport support vehicle collision avoidance operation path based on dynamic priority

Bao Danwen¹, Yao Xinyu¹, Liu Jianrong², Chen Zhuo¹, Zhou Jiayi¹

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. School of Transportation and Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 518055, China)

Abstract: To enable conflict avoidance operation planning for support vehicles in complex environments, a dynamic priority classification method has been proposed. This method prioritizes conflict avoidance based on two levels of operation efficiency and risk. Additionally, a conflict avoidance operation planning model has been established, along with a two-stage algorithm for global path optimization. A low time complexity conflict detection method has also been proposed to ensure accuracy while solving large-scale complex problems quickly. Experimental results show that the proposed model can reasonably plan vehicle conflict avoidance paths, with the two-stage algorithm based on dynamic priority strategy proving to be more effective in both large and small scale scenarios. Compared to the fixed-priority-based two-stage algorithm, the proposed approach improves conflict point reduction by 7.6% and reduces the vehicle-aircraft conflict ratio by 7.5%.

Key words: Air transportation; Operation path planning; Conflict detection; Mixed integer programming model; Dynamic Priority

随着中国民航业的快速发展,机场地面保障车辆数量急剧增加,导致车辆与航空器之间的冲突风险增加^[1],影响机坪运行效率和安全水平。目前,保障车辆的冲突安全控制仍然依赖于机场管制人员决策。并且机坪道路车机混合运行环境复杂,人工决策易面临冲突风险多、运行损失时间多等问题。因此有必要科学制定机场保障车辆避冲突运行路径,为机场地面管制提供可靠参考。

本节主要回顾了机场冲突解脱和路径规划两方面的研究文献,国内外学者以航空器为研究对象,进行了较多研究并取得一定研究成果。

在冲突解脱方面,既有研究多数遵循先到先服务的冲突解脱规则,对冲突点的航空器及车辆进行解脱。Deng 等^[2]研究了机场跑道和滑行道路径规划问题,设计了采用航空器速度优先和先到先服务规则的冲突解脱策略,对机场滑行道路径进行了有效优化。Liang 等^[3]针对机场平行跑道的航空器路径规划问题,以先到先服务为冲突解脱规则,采用随机爬山算法优化航空器滑行路径冲突。李慧盈等^[4]分析了航空器不同冲突类型的特征差异,并根据冲突特点采用先到先服务冲突解脱规则优化航空器场面滑行路径。许敖洋等^[5]在分析冲突类型差异性的基础上,进一步分析了滑行油耗对先到先服务冲突解脱策略的影响。也有学者采用固定优先级策略,按照事先给定的优先级进行冲突点的解脱。Zhao 等^[6]构建机场滑行区域划分模型,以航班任务时序和航空器类型为优先级,解脱航空器在滑行道的路径冲突。唐勇等^[7]基于空闲时间窗路径规划方法,以任务紧急程度为优先级,通过 MAS 系统求解滑行路径问题。何庶等^[8]以航空器类型为优先级,通过遗传算法求解侧向跑道机场滑行路径优化问题。

上述研究成果不完全适用于机坪车辆,主要由于机坪车辆类型多、规模大,车辆冲突风险随运行状态动态变化,难以事先确定优先级。采用固定优先级易造成冲突解脱过程中资源分配不均,导致产生车辆频繁停车等待等问题,降低了机坪运行安全水平。

在机场路径规划方面,既有研究主要以避免冲突为安全目标。多数学者研究航空器相遇冲突和交叉冲突,建立以无冲突、滑行时间或等待时间最小的混合整数规划模型^[9-10]。李楠等^[11]综合考虑了航空器的滑行距离、转弯次数和冲突风险因素,以时间成本和油耗为目标函数,采用改进 A*算法和启发式搜索算法求解航空器精确滑行路径。Murrieta^[12]

等以最少油耗为主要目标,采用粒子群算法,求解恶劣天气环境下航空器路径滑行问题。孙若飞等^[13]在滑行路径优化基础上,考虑航空器速度变化和污染物排放因素,提出基于遗传算法和 Yen 算法的场面滑行优化方法。姜雨等^[14]考虑航空器滑行富余时间因素,以航空器滑行时间和跑道排序时间为目标函数,采用改进遗传算法生成航空器滑行路径。上述方法由于模型变量多,较难获得最优解;也有部分学者则采用先预选,再优化的两阶段方法降低了无冲突路径求解难度^[15-17]。

上述研究只针对滑行道区域的航空器冲突,未涉及机坪区域航空器与车辆之间的冲突避让,不同类型保障车辆的物理尺寸和风险容忍度差异较大,有必要进一步研究机坪车机混合运行环境下的保障车辆避冲突路径规划问题。

1 问题描述

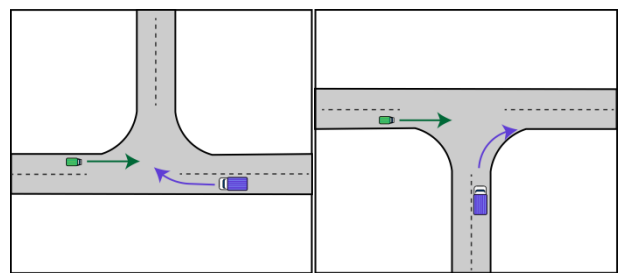
1.1 研究对象

在地面保障服务中,车辆承担着重要的运输和作业任务。机场地面保障服务主要包括装卸行李、客舱服务、加油和配餐等^[18],分别对应当行李牵引车、污水车、清水车、加油车、客梯车、升降平台车、加油车和配餐车等保障车辆。其中,客梯车和升降平台车等保障车辆,由于其停放位置接近作业区域,在机坪道路系统内活动范围较小,行驶时间较短,故在本文研究中不作考虑。

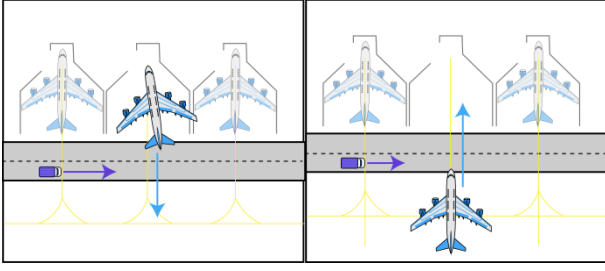
因此本文将行李牵引车、污水车、清水车、加油车、配餐车 5 种主要保障车辆作为冲突风险控制的研究对象,并根据保障车辆携带设备和物料的特殊性,将行李牵引车和加油车确定为关键保障车辆,研究保障车辆避冲突运行规划方法。

1.2 冲突类型定义

本文将保障车辆冲突定义为在车辆在行驶中的时间 T 和路径 V 冲突,机坪区域的车辆冲突类型如图 1 所示。当多个车辆或航空器,在时间和路径上均发生冲突时,即在同一节点下车辆或航空器的时间窗产生重叠的情况视为冲突。



(a) Type of vehicle-vehicle conflict



(b) Type of conflict between vehicle and aircraft

图1 机坪区域主要的交通冲突类型

Fig.1 Main types of traffic conflict in the apron area

在此基础上，传统保障车辆冲入识别定义中未考虑车身物理尺寸，本文将其纳入冲突识别过程，本文研究的冲突类型主要为车辆与车辆冲突、车辆与航空器冲突两种，具体识别过程如下所示。

首先，计算车辆在路段 e_{ij} 的通行时间，如式(1)所示，其中 t_{ij} 为通过路段 e_{ij} 时间， l_{ij} 为路段 e_{ij} 的长度， v_0 为车辆行驶速度。

$$t_{ij} = \frac{l_{ij}}{v_0} \quad (1)$$

其次，车辆 a 通行路段需满足式(2)要求， T_{ija}^{in} 为 a 车辆在路段 e_{ij} 的驶入时间， T_{ija}^{out} 为车辆 a 驶出路段 e_{ij} 的时间。

$$T_{ija}^{in} + t_{ij} \leq T_{ija}^{out} \quad (2)$$

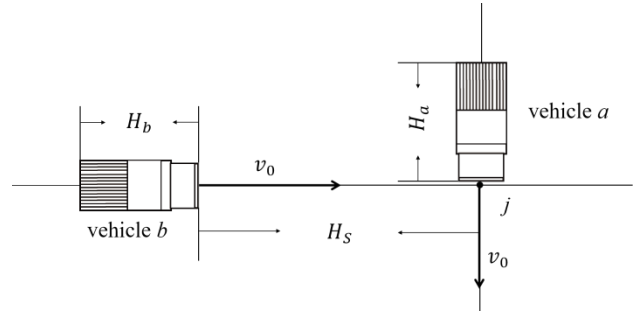
然后，检测各车辆行驶路径是否存在交叉，判别过程如式(3)所示，其中 V 表示车辆行驶路径集， k_1, k_2 为车辆行驶路径。

$$V(k_1, k_2) = V_{k_1} \cap V_{k_2} \quad (3)$$

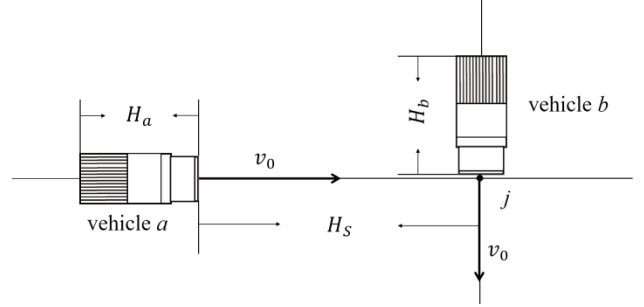
最后，如图2所示，考虑车辆抵达道路交叉口的先后次序，判断车辆 a 进入路段时间 T_{ija}^{in} 或驶出路段时间 T_{ija}^{out} 是否满足约束关系。以 T_{ija}^{in} 为例，若满足式(4)约束关系式，则检测存在冲突，根据式(4)同理可得 T_{ija}^{out} 约束关系式。

其中 H_s 和 H_a 分别为车辆与车辆、车辆与航空器的安全间隔距离； H_1 和 H_2 为不同类别保障车辆的车身尺寸， H_c 为航空器的长度尺寸， v_0 为保障车辆行驶速度。

$$\begin{cases} T_{ijb}^{in} - T_{kja}^{in} < \frac{H_a + H_s}{v_0}, T_{ija}^{in} \leq T_{kjb}^{in} \\ T_{ija}^{in} - T_{kjb}^{in} < \frac{H_b + H_s}{v_0}, T_{ija}^{in} > T_{kjb}^{in} \end{cases} \quad (4)$$



(a) The conflict detection of vehicle a arriving at node j



(b) The conflict detection of vehicle b arriving at node j

图2 车辆与车辆冲突探测示意图

Fig.2 Vehicle-to-vehicle conflict detection

根据民航局颁布的《运输机场运行安全管理规定》，航空器相较各类型保障车辆，在机坪区域拥有最高优先通行权，因此，如图3所示，当发生冲突时，区别于车辆与车辆冲突检测逻辑，航空器需要优先通行，若车辆 T_{ija}^{in} 或 T_{ija}^{out} 满足约束要求，则产生冲突。如式(5)所示，以 T_{ija}^{in} 为例，当满足约束关系式，说明车辆和航空器发生冲突，同理可得 T_{ija}^{out} 。

$$\left| T_{ija}^{in} - T_{kjc}^{in} \right| < \frac{v_0 H_c + v_c H_p}{v_0 v_c} \quad (5)$$

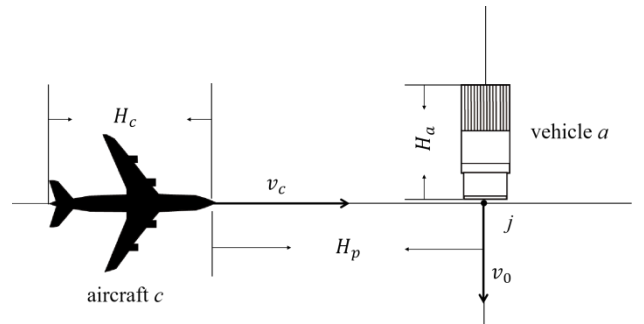


图3 车辆与航空器冲突检测

Fig.3 Vehicle and aircraft conflict detection

1.3 冲突动态优先级划分方法

车辆冲突解脱策略包括停车等待策略和固定优先级策略，停车等待策略是指车辆在路口发生冲突时，车辆按照先到先服务的规则，进行冲突解脱。固定优先级是指发生冲突时，车辆按照任务的先后顺序，进行冲突解脱。然而，在机坪实际运行中，保障车辆类型多、规模大、运行时间长，车辆冲突

风险会不断变化,且不同类型保障车辆具有不同的运行特性。直接采用上述策略可能导致车辆资源分配不均,影响机坪运行效率。

本文从动态优先级和风险控制两方面着手,一方面,优先安排车辆种类优先级高、任务紧急程度高的车辆通行;另一方面,考虑风险随时间的动态变化因素,对于关键保障车辆,赋予其较高风险系数,降低其在初始路径中冲突次数,减少冲突启-停次数;对于普通保障车辆,通过运行累计时长刷新车辆优先级,提供优先级,减少冲突等待时间,其中。

因此,本文将保障任务优先级、车辆种类优先级、运行时间优先级均纳入动态优先级计算中,当第 a 辆保障车辆执行 j 类保障作业任务,运行至 i 节点时,其动态优先级计算式如下所示:

$$DP_{ai}^j = \alpha \times \sigma \frac{T_{ai}^j + d_{ai}^j}{T_a^j + d_a^j} + \beta \frac{M_{ai}^j}{M_a^j} + \gamma \frac{C_a}{C} \quad (6)$$

式中, T_{ai}^j 表示车辆 a 执行 j 类作业时运行至节点 i 的运行时间, T_a^j 表示车辆 a 执行 j 类作业的总运行时间; d_{ai}^j 表示车辆 a 执行 j 类保障作业时在节点 i 产生的冲突等待时间, d_a^j 表示车辆 a 执行 j 类作业时的总冲突等待时间; M_{ai}^j 表示车辆 a 执行 j 类作业在节点 i 时,作业任务的优先级, M_a 表示所有保障车辆的最大任务优先级; C_a 表示第 a 辆车的作业优先级, C 表示最大作业优先级。 α 为保障车辆的时间权重系数, β 为任务紧急程度的权重系数, γ 为车辆种类作业优先程度的权重系数, σ 为车辆风险差异化权重系数, $\alpha, \beta, \gamma, \sigma \in (0,1)$ 。

2 模型构建

2.1 模型参数

$R = Y \cup U$ 为总路径网络节点集合, $Y = \{1, 2, \dots, |Y|\}$ 为道路节点集合, $U = \{1, 2, \dots, |U|\}$ 为机坪节点集合; $Q = A \cup C$ 为交通实体集合, $A = \{1, 2, \dots, |A|\}$ 为保障车辆集合, $C = \{1, 2, \dots, |C|\}$ 为航空器集合。

2.2 模型假设

现实问题中的航班任务临时变动、车辆个体差异、车辆负重对运行速率的影响等因素均会对车辆实际运行带来影响。为了简化这类因素,本文作出如下假设。

(1)各类型保障车辆平均行驶速度为 v_0 ,且不考虑加减速、转弯以及负载对车辆速度的影响。

(2)航空器位置信息精确可靠,不考虑定位误差因素对冲突的影响。

(3)航班保障任务不发生临时改动,各保障作业所需时间确定。

2.3 保障车辆避冲突路径规划模型

本文参考传统机场场面无冲突路径规划模型^[16],引入各保障车辆车身长度因素和机坪车辆运行规则约束条件,对各类保障车辆行驶路径全局寻优。构建的保障车辆避冲突路径规划模型如下所示:

2.3.1 保障车辆避冲突路径规划目标函数

安全和效率是机坪运行管理过程中的重要目标。本文构建以车辆行驶时间成本和冲突时间成本为总成本的目标函数。

$$F = \min \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^R t_{ij} x_{ija} + \sum_{q=1}^Q \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^R \beta_i w_{iaq} \quad (7)$$

式中, x_{ija} 和 w_{iaq} 为决策变量; t_{ij} 为车辆行驶经过路段节点 i 至 j 的时间; x_{ija} 为第 a 辆保障车辆从节点 i 到节点 j 时为1,否则为0; β_i 为各路段节点 i 的权重,计算参考文献^[19]; w_{iaq} 为车辆 a 与交通实体 q 发生冲突时在节点 i 处产生的冲突等待时间。

2.3.2 保障车辆避冲突路径规划约束条件

1) 车辆路径规划基本约束条件

机场保障车辆执行每次任务作业时在各个节点至多行驶一次,满足约束为

$$\sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^R x_{ija} = 1, \forall i \in R \quad (8)$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{j=1}^R x_{ija} = 1, \forall j \in R \quad (9)$$

2) 任务分配约束条件

在机场地面保障服务作业中,一次地面保障作业对应一辆保障车辆,满足约束为

$$\sum_{a=1}^A x_{ija} = 1, \forall i, j \in R \quad (10)$$

3) 机坪道路运行规则约束条件

根据《运输机场运行安全管理规定》有关规则,保障车辆在飞行区机坪道路行驶过程中禁止掉头和穿越机坪,满足约束为

$$e_{ij} \neq e_{ji}, \forall i, j \in Y \quad (11)$$

式(11)表示机坪车辆道路为单向道路,以满足保障车辆不得掉头和超越前车的运行需求。

$$e_{ij} = e_{ji}, \forall i \in Y, \forall j \in U \quad (12)$$

式(12)表示机坪进出口道路为双向道路,以满足保障车辆不穿越机坪行驶的安全需求,式中 e_{ij} 表示节点 i 至 j 的路段。

4) 路段时间约束条件

保障车辆在机坪道路各路段行驶的时间关系需满足如下约束

$$t_{ij} = \frac{l_{ij}}{v_0}, \forall i, j \in R \quad (13)$$

$$T_{ija}^{in} + t_{ij} \leq T_{ija}^{out}, \forall i, j \in R \quad (14)$$

式中, T_{ija}^{in} 为第 a 辆车进入 e_{ij} 的时刻; T_{ija}^{out} 为第 a 辆车离开 e_{ij} 的时刻; l_{ij} 表示路段 e_{ij} 的长度。

5) 避冲突约束条件

在车辆与车辆冲突类型下, 根据冲突检测式(4), 车辆在不发生冲突情况下驶入节点 j 的时间关系为

$$\left| T_{ija}^{in} - T_{kjq}^{in} \right| \geq \frac{H+H_s}{v_0}, \forall a, q \in A \quad (15)$$

式中, H 表示优先到达路点车辆的车身长度; H_s 表示车辆间的安全间隔距离; v_0 为车辆行驶速度。

进一步考虑避冲突因素, 在式(15)中引入冲突等待时间 w_{iaq} , 低优先级车辆在冲突节点前执行冲突等待操作。车辆与车辆冲突下避冲突需满足约束为

$$\left| (T_{ija}^{in} + w_{iaq}) - (T_{kjq}^{in} + w_{iaq}) \right| \geq \frac{H+H_s}{v_0}, \forall a, q \in A \quad (16)$$

式中, w_{iaq} 表示在节点 i 处, 车辆 a 与交通实体 q 发生冲突时, 车辆 a 产生的冲突等待时间。

$$\left| T_{ija}^{out} - T_{kjq}^{out} \right| \geq \frac{H+H_s}{v_0}, \forall a, q \in A \quad (17)$$

由于航空器在机坪运行中具有最高优先级, 当车辆与航空器冲突发生时, 保障车辆执行冲突等待操作。同理可得车辆与航空器避冲突约束为

$$\left| (T_{ija}^{in} + w_{i,a,q}) - T_{kjq}^{in} \right| \geq \frac{v_0 H_c + v_c H_p}{v_0 v_c}, \forall a \in A, \forall q \in C \quad (18)$$

$$\left| T_{ija}^{out} - T_{kjq}^{out} \right| \geq \frac{v_0 H_c + v_c H_p}{v_0 v_c}, \forall a \in A, \forall q \in C \quad (19)$$

式中, H_c 为航空器长度, H_p 为车辆与航空器间的安全距离, v_c 为航空器滑行速度。

6) 冲突等待时间唯一性约束条件

在一次避冲突过程中, 有且仅有一辆保障车辆执行冲突等待操作, 满足约束为

$$w_{i,a,q} > 0 \Rightarrow w_{i,q,a} = 0, \forall a, q \in A \quad (20)$$

3 基于自适应遗传-动态优先级策略的两阶段算法

3.1 两阶段算法

在传统无冲突路径规划研究中, Dijkstra 算法、A*算法作为常用方法仅识别最短路或次短路径下车辆冲突情况, 缺少对不同路径方案下成本的比选优化, 导致其得到的成本不为最优结果。由于机场保障车辆种类多, 各类保障车辆行驶路径不同, 传统路径规划算法不符合保障车辆避冲突路径规划要求。

因此, 本文针对建立的模型, 从全局路径寻优角度出发, 选择自适应遗传算法(Adaptive Genetic Algorithm, IAGA)求解全局下的最优车辆路径, 基于动态优先级冲突解脱策略(Dynamic Priority Conflict Relief Strategy, DPCRS)求解最优车辆路径下的避冲突路径规划问题。建立 IAGA-DPCRS 两阶段算法, 从全局角度搜索最优路径。第一阶段为保障车辆路径优化问题, 考虑直接求解避冲突模型复杂性, 在本阶段求解结果允许存在冲突路径。基于低时间复杂度的冲突检测方法, 通过遗传算法求解数学模型得到优化路径。第二阶段为保障车辆冲突解脱问题, 针对优化后路径下存在的冲突点, 设计动态优先级解脱策略, 计算车辆在冲突点处的优先级, 通过比选优先级确定车辆优先通行顺次, 以求解保障车辆多样化安全需求的冲突解脱问题。

3.1.1 自适应遗传算法设计

i. 染色体编码与初始化解:

本文算法采用 0-1 二进制编码方式, 编码的长度为有保障作业任务需求的机坪数量。因此编码长度由有任务需求的机坪数量决定。根据机坪系统的保障车辆运行规则, 机坪有两个可供选择的车辆进出通道。因此, 如图 4 所示, 在染色体编码设置时, 0 表示为机坪车辆上部进出通道, 1 表示为机坪车辆下部进出通道。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1	0	1	1	1	1	0	0	1

图 4 染色体编码示意图

Fig.4 Chromosomal coding

ii. 适应度函数

在遗传算法中, 通过适应度函数计算种群个体的适应度值, 从而寻找最优解。由于保障车辆的种类繁多, 数量庞大, 直接求解包含冲突约束的路径规划模型可能会导致路径死锁, 进而无法得到可行解。因此, 本文在算法的第一阶段, 允许冲突的发生, 并将冲突约束条件转化为目标函数, 以此作为适应度函数, 具体如下。

$$\left\{ \begin{array}{l} f_u = \frac{1}{f_{(u)}} \\ f_{(u)} = \min \left\{ \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^R [t_{ij} x_{ija} + \max(0, h_{ijaq})^2] \right\} \\ h_{ijaq} = \begin{cases} (H+H_s)/v_0 - |T_{ija}^{in} - T_{ijq}^{in}|, \forall a \in A, q \in A \\ (v_0 H_c + v_c H_p)/v_0 v_c - |T_{ija}^{in} - T_{ijq}^{in}|, \forall a \in A, q \in C \\ 0, [(v_0 H_c + v_c H_p)/v_0 v_c - |T_{ija}^{in} - T_{ijq}^{in}| < 0] \vee \\ [(H+H_s)/v_0 - |T_{ija}^{in} - T_{ijq}^{in}| < 0] \end{cases} \end{array} \right. \quad \square 21 \square$$

iii. 选择、交叉和变异:精英选择策略易陷入局部最优解,为尽可能减少陷入局部最优解可能性,选择轮盘赌选择策略。为提高算法性能,提高遗传算法搜索能力和收敛性能,文本借鉴文献^[20]引入自适应交叉和变异概率,计算式如下:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{mean})}{(f' - f_{mean})[1 + e^{(-t*s)/(T*NIND)}]}, f' \geq f_{mean} \\ p_{c1}^{1 + e^{(-t*s)/(T*NIND)}}, f' \leq f_{mean} \end{cases} \quad \square 22 \square$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f_{max} - f)}{(f_{max} - f_{mean})[1 + e^{(-t*s)/(T*NIND)}]}, f \geq f_{mean} \\ p_{m1}^{1 + e^{(-t*s)/(T*NIND)}}, f \leq f_{mean} \end{cases} \quad \square 23 \square$$

式中: f_{max} 个体的最大适应度值; f_{max} 为种群最大适应度; f_{mean} 为种群平均适应度; S 为最优解未改变的个体数; t 为当前迭代数; T 为最大迭代数; $NIND$ 为种群大小。

3.1.2 低时间复杂度的改进冲突检测方法设计

现有研究中,针对重叠节点处的多冲突时间检测问题,采用的是两两循环比较方法^[13],即多次循环比较两个待检测时间窗是否满足约束关系。这种方法的时间复杂度为平方阶 $O(n^2)$,在求解大规模复杂算例时不利于提高效率。

因此,本文基于“空间换时间”原则,设计了一种低复杂度的冲突时间检测方法,其时间复杂度为线性阶 $O(n)$,能更有效地求解大规模复杂问题。以待检测节点 p 为例,具体步骤如下:

i. 以所有经过检测节点 p 车辆的时间窗为集合 V ,提取时间窗集合 V 中最小值,将所有车辆时间窗减去最小值并加 1,得到并更新集合 V 中的各车辆时间窗。

ii. 提取新时间窗集合中的最大值,以最大值的数值为维数,初始化一个该维数下的 0 向量。

iii. 在更新后时间窗集合 V 中进行遍历搜索,根据时间窗的数值,依次在对应维数位置加 1,当新向量中出现数字 2 时,即为出现时间冲突,产生车辆冲突。

iv. 计算冲突时间时,将向量中大于 1 的数累加,得到的值即为冲突时间。

3.2 求解步骤

两阶段算法具体求解步骤如下:

Step1 生成初始预路径。输入任务数据,通过 Dijkstra 算法,计算每辆保障车辆最短任务路径 k ,集合 K 中包括任务路径信息,依据约束条件 (1) 和 (2) 计算保障车辆经过节点时间 T 。

Step2 路径交叉和时间窗重叠检测。依据约束条件 (3) 判断车辆行驶节点集合中相同的节点,相同节点集合 M 。当集合不为空集时,进一步根据约束条件 (4) 和 (5) 判断是否满足约束关系,若满足则发生冲突。

Step3 优化已有路径。采用自适应遗传算法,根据 4.1.1 节步骤,详细设置编码、初始种群、适应度函数、交叉和变异规则,计算不同路径下的总冲突时间,选择生成结果中总冲突时间最小的优化路径。

Step4 解脱优化后路径的车辆冲突。针对优化后路径存在的冲突点,基于动态优先级解脱策略,计算冲突点各车辆动态优先级指标,安排高优先级车辆优先通过冲突节点。每执行一次冲突解脱后,更新一次路网时间窗,直到解脱所有冲突点,为保障车辆规划一条避冲突运行路径。

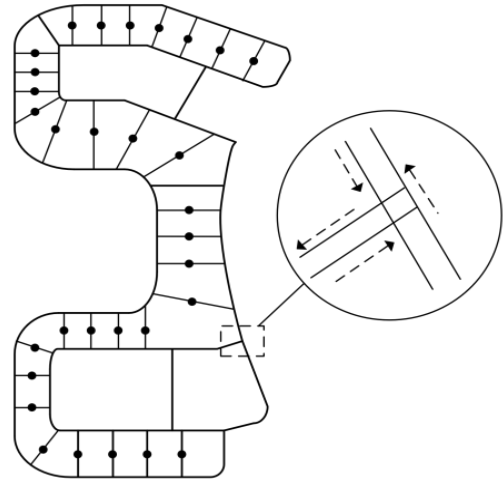
4 实例分析

4.1 场景定义

本文选取了南京禄口机场为研究对象,南京禄口机场作为国内大型枢纽机场,截止 2021 年底,旅客运输量达 1759.9 万人次,位居全国机场第 13 名。机坪面积约 110 万平方米,整体规模位于华东地区机场第二位。其中 T1 航站楼机坪面积 44.7 万平方米, T1 航站楼承担 31 家航空公司的国内航线飞机的保障服务,具有航班密集、机坪使用频率高、机坪区域运行复杂的特点,并且 T1 航站楼的车辆道路网络联通性较好,车辆行驶道路不为单一路径,为本文路径选择奠定良好基础,因此本文选取 T1 航站楼处的机坪区域作为研究道路环境对象,构建拓扑路网图,如图 5 所示,图中有 229 个节点、31 个机坪节点。



(a) Satellite remote sensing map of Lukou Airport



(b) Node topology diagram of Lukou Airport

图5 场景设置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the scene setting

4.2 实验参数

为了验证两阶段算法在各阶段和整体的有效性,在路径优化阶段选择遗传算法(Genetic Algorithm, GA)作为对比算法;在冲突解脱策略阶段选择停车等待策略和固定优先级策略(Priority Conflict Relief Strategy, PCRS)作为对比策略;为验证本文构建的改进冲突检测方法有效性,采用传统冲突检测方法和改进冲突检测方法,据此设置算法 P 和算法 GA-PCRS 为对比算法,算法特征如表 1 所示。

表 1 算法及策略特征

Tab.1 Algorithm and policy characteristics table

算法	特征	
	冲突检测	解决策略
P	传统方法	遗传算法和停车等待策略
GA-PCRS	改进方法	遗传算法和固定优先级策略
IAGA-DPCRS	改进方法	自适应遗传算法和动态优先级策略

4.3 运算结果

根据机场实际高峰和平峰下的保障作业数量(N)、各类保障车辆使用数量(A)的统计数据,对场景进行划分,其中 S1-S5 为小规模算例, L1-L5 为大规模算例。小规模算例下,保障作业数量在 100 以内,车辆使用数量在 12 至 18 辆;大规模算例下,保障作业数量在 150 至 200 个,车辆使用数量在 30 至 16 辆。表中列出了每组算例中最优解成本(M)、算法运算时长(T)、路径变更幅度(优化后变更路径数量除以总路径数量,用 L_t 表示)、车辆冲突比(车辆冲突点数除以总冲突点数,用 Y_c 表示)、冲突优化幅度(优化后冲突点减少的数量除以初始解中冲突点的数量 D)等参数。

表中各指标的结果取每组算例运行 10 次结果的平均值,考虑可计算性和求解时效性需求,本文将最大求解时间设置为 3600 秒。如果超出规定时间仍未得出结果,则将结果记为“*”。具体计算结果见表 2。

表 2 算例对比结果

Tab.2 Example comparison results

场景编号	N	A	IAGA-DPCRS					GA-PCRS					P
			M/s	T/s	$L_t/\%$	Y_c	$D/\%$	M/s	T/s	$L_t/\%$	Y_c	$D/\%$	
S1	80	12	7264	1684	11%	0.15	15%	7721	1841	10%	0.21	10%	3482
S2	80	15	7183	1618	10%	0.20	20%	7640	1813	12%	0.20	15%	3421
S3	80	18	7295	1716	14%	0.32	18%	7756	1887	12%	0.22	10%	3582
S4	90	15	7164	1221	12%	0.34	22%	7626	1369	10%	0.24	14%	*
S5	90	18	7452	1532	17%	0.40	21%	7956	1608	12%	0.30	16%	*
L1	140	30	10321	2885	41%	0.64	36%	13532	3057	37%	0.51	28%	*
L2	140	33	10248	2742	36%	0.63	40%	13298	3021	35%	0.52	32%	*
L3	140	36	10629	3031	41%	0.65	39%	13746	3309	40%	0.53	30%	*
L4	180	33	11242	3150	45%	0.82	40%	14683	3372	44%	0.74	29%	*
L5	180	36	11137	3314	44%	0.89	41%	14557	3514	42%	0.82	32%	*

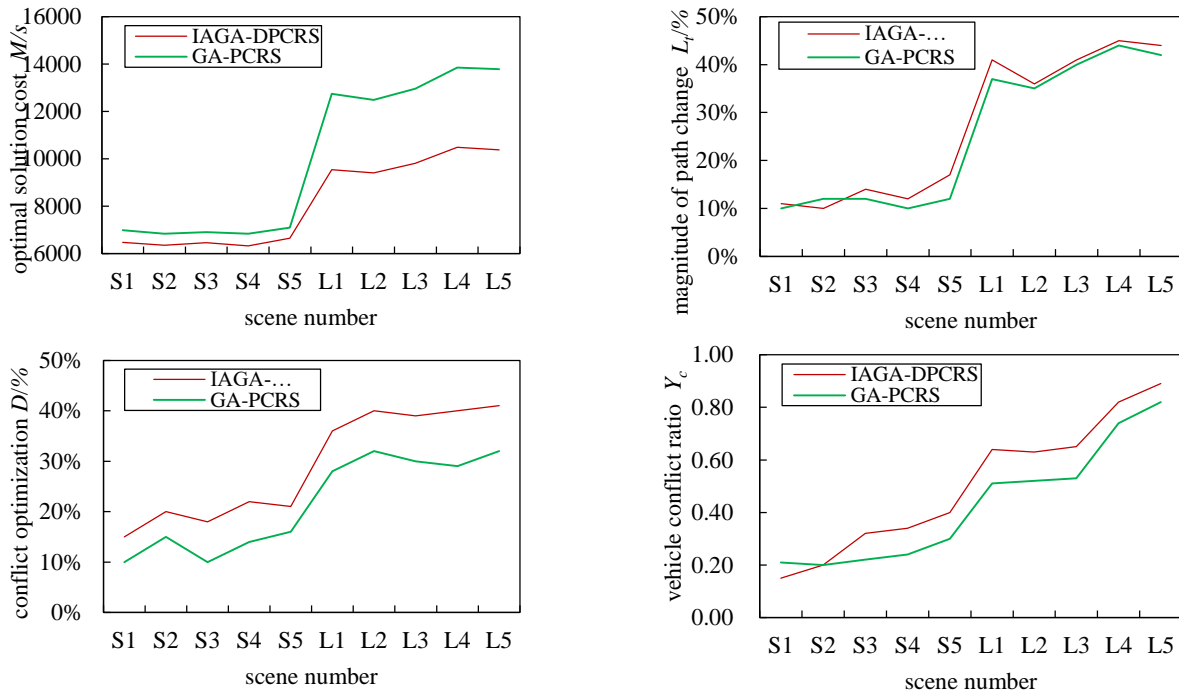


图6 指标结果对比图

Fig. 6 Comparison of index results

1、结果分析

(1) 运行时间指标 T 结果分析

根据图6所示, IAGA-DPCRS 算法和 GA-WCRS 算法都能在规定时间内进行求解。其中, IAGA-DPCRS 算法平均求解时间为 2289.3 秒, 比 GA-WCRS 算法平均求解时间降低了 189.8 秒。采用传统冲突探测方法的 P 算法, 求解时间过长, 仅在规定时间内完成对 5 个小规模算例组中的 3 个算例进行求解。因此, 在大、小规模场景下, 本文提出的冲突检测方法能快速求解保障车辆避冲突路径规划问题。

(2) 冲突比 Y_c 、路径变更幅度 L_c 及目标成本 M 指标结果分析

IAGA-DPCRS 算法相较于 GA-WCRS 算法, 能有效减少车辆与航空器冲突, 车辆与航空器冲突占比平均减少 7.5%。小规模算例表明, 当车辆冲突比 Y_c 在 0.4 以下时, 路径变更幅度 L_c 较小, 所提算法目标成本 M 相较对比算法改善并不显著, 平均降低 7.5%。这是由于当车辆与航空器的冲突类型占据主导地位, 多个路段被完全占用, 算法缺少可选择的优化路径, 导致优化效果不明显; 大规模算例表明, 在车辆冲突比高于 0.5 时, 所提算法相较对比算法, 目标成本函数值优化效果明显, 降低 24.6%。进一

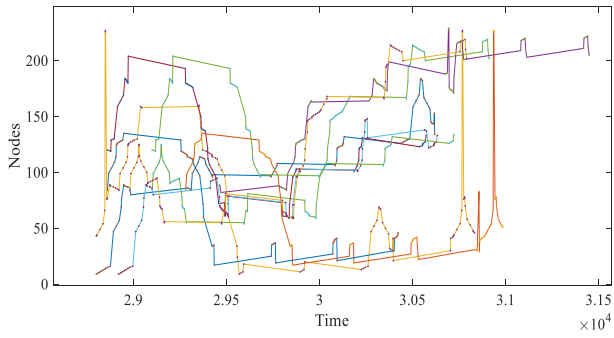
步的分析小规模场景 S1、S2、S3 和大规模场景 L1、L2 发现, 当保障任务数量不变时, 增加保障车辆数量可以降低目标成本函数值 M 。

(3) 冲突优化幅度指标结果 D 分析

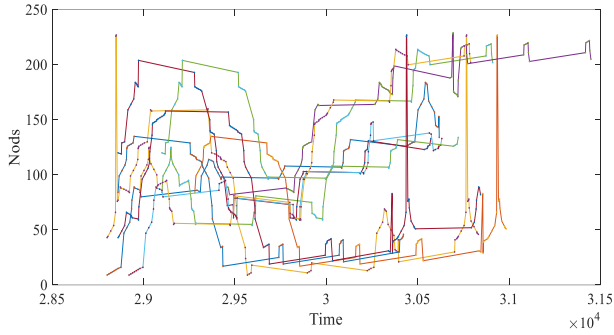
IAGA-DPCRS 算法在 10 组算例中, 相较于 GA-WCRS 算法, 平均冲突优化幅度提高了 7.6%, 在大规模场景下提升了 9.0%。如图 7 所示, 在大、小规模场景下, IAGA-DPCRS 算法的车辆冲突比和冲突优化幅度结果均大于 GA-WCRS 算法, 证明本文提出的路径优化算法具有降低原始路径冲突点、减少车辆与航空器冲突的两方面优势。

2、冲突路径优化分析

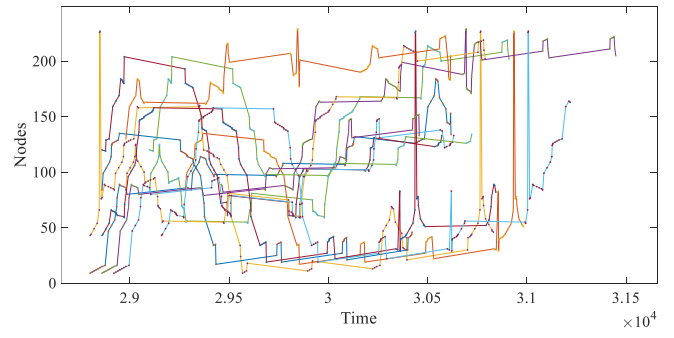
通过对各评价指标结果分析得到, 所提算法相较 IAGA-DPCRS 算法, 在求解大规模问题时具有明显的优势性, 并且场景 L3 的任务作业量和保障车辆使用数量更符合南京禄口机场在高峰时段下的运行特征。因此选取场景 L3 进行冲突路径优化的具体分析, 在 180 保障作业数量和 36 辆保障车辆的大规模场景下, 如图 7 的时间-节点图所示, 优化后的路径中存在 58 个冲突点, 相较于 Dijkstra 算法生成的最短路径中的 95 个冲突点, 冲突次数减少 41%。



(a) Time-node result for vehicles 1 to 10



(b) Time-node result for vehicles 11 to 21



(c) Time-node result for vehicles 22 to 36

图7 场景 L3 路径优化后时间-节点结果图

Fig. 7 Time-node result after path optimization

5 动态优先级策略优势分析

为验证本文提出的策略的优势性，选取停车等待策略、固定优先级策略为对照组，算例设置参照 4.2，其余参数设置不变。为衡量保障车辆风险运行情况，根据车辆运行特性和行驶规范要求，以冲突等待时间和关键车辆启-停次数为评价指标，比选研究各策略在机场保障车辆避冲突路径规划时间和风险成本的优劣。

表 3 冲突解脱策略对比结果

Tab.3 Conflict relief strategy contrast results

场景编号	N	A	停车等待策略			固定优先级策略			动态优先级策略		
			Y_c	冲突等待时间/s	关键车辆启-停次数	Y_c	冲突等待时间/s	关键车辆启-停次数	Y_c	冲突等待时间/s	关键车辆启-停次数
S1	80	12	0.21	105	4	0.21	97	1	0.15	102	1
S2	80	15	0.20	102	3	0.20	80	0	0.20	87	0
S3	80	18	0.22	115	4	0.22	105	1	0.32	109	2
S4	90	12	0.24	120	5	0.24	96	3	0.34	98	2
S5	90	15	0.30	132	8	0.30	118	2	0.40	128	1
L1	140	25	0.51	170	8	0.51	126	4	0.64	142	2
L2	140	28	0.52	169	11	0.52	128	3	0.63	136	1
L3	140	31	0.53	174	9	0.53	135	5	0.65	128	2
L4	180	34	0.74	228	15	0.74	156	5	0.82	162	3
L5	180	36	0.82	200	12	0.82	142	4	0.89	158	2

1、策略优势性分析

如表 3 所示，动态优先级解脱策略相较于停车等待策略有明显的优势，冲突等待时间平均降低 21.9%，车辆冲突启-停次数平均降低 79.7%。表明“先到先服务”的冲突解脱规则不适用于车辆冲突频繁的大规模复杂机坪场景。

相较于固定优先级策略，动态优先级策略在大小规模场景下均有良好的实用性。在小规模场景下关键车辆的启-停次数平均降低 14.3%；在大规模场景下，尽管冲突等待时间平均上升 5.7%，但关键车辆的启-停次数平均降低 52.4%，风险降低更明显，而在机场实际生产运行中，更看重风险水平。

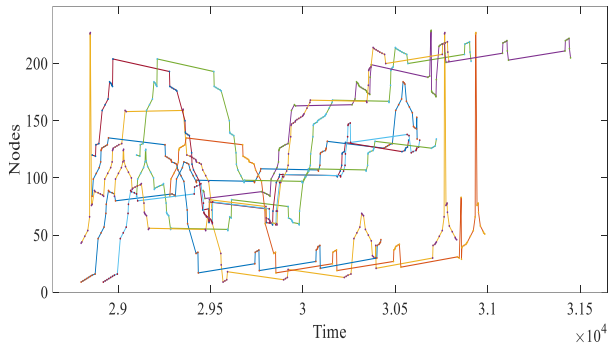
值得注意的是，在小规模场景中，三种冲突解

脱策略的冲突等待时间结果相差较小。这是由于在小规模场景中，车辆冲突类型主要以车辆与航空器为主。按照现行机坪车辆运行规则，在该类型冲突下，车辆需要等待，因此冲突等待时间的可改善空间较小。

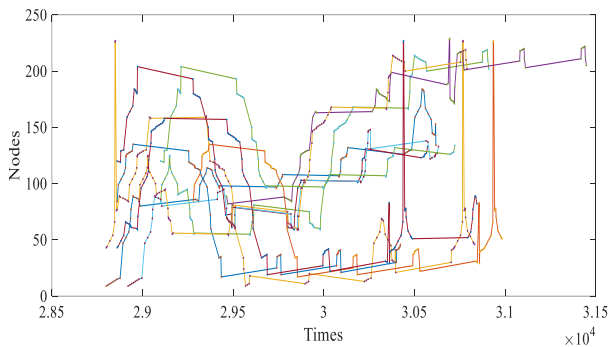
2、冲突路径解脱分析

在大规模冲突场景 L3 下，针对优化后路径存在的冲突点，通过采用动态优先级策略对所有冲突点进行解脱，以生成保障车辆避冲突运行路径。所提策略通过对优化后的路径执行 14 次冲突等待操作，其中关键保障车辆等待 2 次，产生了 129 秒冲突等待时间，实现了对多类型保障车辆避冲突路径规划，生成的避冲突路径下的时间-节点部分结果如

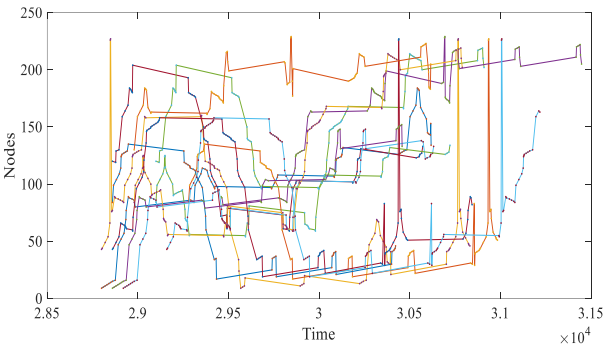
图8所示。



(a) Time-node result for vehicles 1 to 10



(b) Time-node result for vehicles 11 to 21



(c) Time-node result for vehicles 22 to 36

图8 场景 L3 车辆冲突解脱后时间-节点结果图

Fig.8 Time-node result after conflict relief

如图9所示从完成作业总时间来看,加油车未受到任何冲突解脱策略的影响,这是因为加油车已在第一阶段生成优化路径不存在冲突点。如表3所示,通过动态优先级冲突解脱策略,关键车辆启-停次数从停车等待策略的9次和固定优先级策略的5次降为2次。相较停车等待策略,所提策略对于冲突等待时间和关键车辆启-停次数均有明显的改善;尽管相较固定优先级策略,会略微增加运输总运输时间,上升1.2%,但如表3所示,所提策略的车辆冲突启停次数有了明显的下降,降低了42.9%。

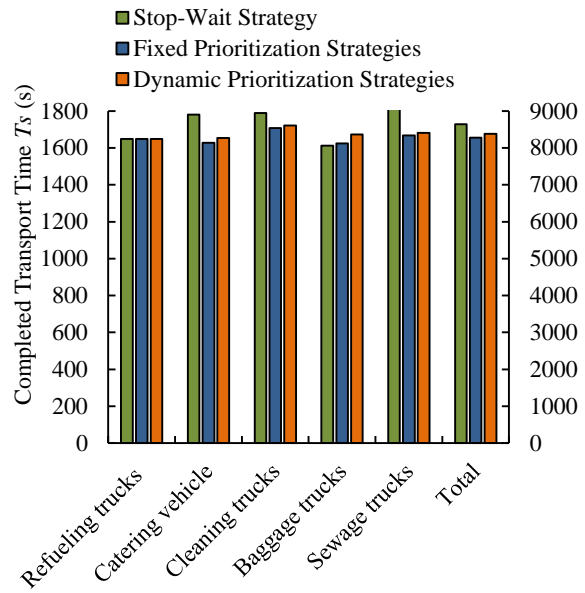


图9 保障车辆完成作业总时间

Fig.9 Total time of support vehicle transportation

6 结论

本文介绍了一种机场保障车辆避冲突路径规划算法,并评估了不同规模场景下的效果。本文提出的算法相比传统路径规划算法,能有效减少车辆与航空器冲突发生次数,以降低航空器运行风险,并减少车辆冲突等待时间,以提高机场保障车辆运行效率。具体内容包括:1)提出动态优先级冲突解脱策略,以满足车辆风险安全要求;2)提出一种低时间复杂度的改进冲突探测方法,有效解决传统方法在求解大规模问题的不足;3)设计改进的自适应遗传算法,并结合动态优先级策略,得到各保障车辆的避冲突运行路径;

然而,本文的算法优化可能增加了个别行驶车辆的作业成本,这是需要进一步研究的问题。因此,未来的研究可以探讨如何在保证全局风险安全要求的同时,进一步降低个别车辆的作业成本,以提高整体效率。

参考文献:

[1] 肖琴, 罗帆. 机场场面交通冲突风险演化的 SD 模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(06): 187-193.
Xiao Q, Luo F. An SD model of the evolution of traffic conflict risk in airport scenes [J]. Transportation System Engineering and Information, 2018, 18(06): 187-193.

[2] Deng W, Zhang L, Zhou X, et al. Multi-strategy particle swarm and ant colony hybrid optimization for airport

- taxiway planning problem[J]. *Information Sciences*, 2022, 612: 576-59.
- [3] Liang M, Delahaye D, Marechal P. Conflict-free arrival and departure trajectory planning for parallel runway with advanced point-merge system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 207-227.
- [4] 李慧盈, 张明, 刘思涵等. 基于冲突类型差异的航空器场面滑行路径规划[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2022, 46(03): 400-405.
- Li H Y, Zhang M, Liu S H, et al. Taxi path planning of aircraft scene based on conflict type difference [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition)*, 2022, 46 (03): 400-405.
- [5] 许敖洋, 赵浩然, 马雪等. 基于最少油耗的航空器冲突解脱方法研究[J]. *科技创新与应用*, 2023, 13(10): 17-20.
- Xu A Y, Zhao H R, Ma X, etc. Research on aircraft conflict relief method based on minimum fuel consumption [J]. *Scientific and Technological Innovation and Application*, 2023, 13 (10): 17-20.
- [6] Zhao N, Li N, Sun Y, et al. Research on Aircraft Surface Taxi Path Planning and Conflict Detection and Resolution[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 1-12.
- [7] 唐勇, 胡明华, 黄荣顺等. 基于空闲时间窗和多 Agent 的 A-SMGCS 航空器滑行路由规划[J]. *航空学报*, 2015, 36(05): 1627-1638.
- Tang Y, Hu M H, Huang R S, et al. A-SMGCS aircraft taxi routing planning based on idle time window and multi-Agent [J]. *Aeronautical*, 2015, 36 (05): 1627-1638.
- [8] 何庶, 卢朝阳, 王颜颜等. 侧向跑道机场滑行路径优化[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(20): 8695-8701.
- He S, Lu C Y, Wang Y Y, et al. Optimization of airport taxi path of side runway [J]. *Science, Technology and Engineering*, 2021, 21 (20): 8695-8701.
- [9] 高伟, 崔昞昕, 康道驰. 面向节能减排的机场地面运行优化研究[J]. *交通信息与安全*, 2019, 37(4): 128-135.
- Gao W, Cui X, Kang D C. Research on airport ground operation optimization for energy saving and emission reduction [J]. *Traffic Information and Safety*, 2019,37 (04): 128-135.
- [10] Quast K, Kaup A. AUTO GMM-SAMT: An automatic object tracking system for video surveillance in traffic scenarios[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2011, 2011: 1-14.
- [11] 李楠, 孙瑜, 焦庆宇等. 基于多目标速度剖面的航空器滑行路径规划[J]. *飞行力学*, 2020, 38(06): 87-94.
- Li N, Sun Y, Jiao Q Y, et al. Aircraft glide path planning based on the multi-target velocity profile[J]. *Flight Mechanics*, 2020, 38 (06): 87-94.
- [12] Murrieta-Mendoza A, Botez R M, Ruiz H, et al. Particle swarm optimization with required time of arrival constraint for aircraft trajectory[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2020, 13(01): 269-291.
- [13] 孙若飞, 李杰, 万莉莉等. 基于速度分配的航空器绿色滑行优化[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(16): 6752-6758.
- Sun R F, Li J, Wan L L, et al. Aircraft green taxi optimization based on speed allocation [J]. *Science, Technology and Engineering*, 2022, 22 (16): 6752-6758.
- [14] 姜雨, 刘振宇, 胡志韬等. 大型机场进场航空器联合调度模型[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(01): 205-215.
- Jiang Y, Liu Z Y, Hu Z T, et al. Joint dispatching model for aircraft entering large airports [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2022, 22 (01): 205-215.
- [15] Yang L, Wang S, Liang F, et al. A Holistic Approach for Optimal Pre-Planning of Multi-Path Standardized Taxiing Routes[J]. *Aerospace*, 2021, 8(9): 241.
- [16] Zhang T, Ding M, Zuo H. Improved approach for time - based taxi trajectory planning towards conflict - free, efficient and fluent airport ground movement[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018, 12(10): 1360-1368.
- [17] Hao S, Cheng S, Zhang Y. A multi-aircraft conflict detection and resolution method for 4-dimensional trajectory-based operation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(7): 1579-1593.
- [18] 冯明端, 肖雪, 周航. 机场地面保障多车型车辆联合调度模型研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2023, 47(01): 67-72.
- Feng M D, Xiao X, Zhou H. Research on the joint dispatching model of airport ground support [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering edition)*, 2023, 47 (01): 67-72.
- [19] 丁文浩, 胡明华, 江斌. 基于熵权法的平行跑道多模式进场效能分析[J]. *华东交通大学学报*, 2023, 40(01): 44-51.
- Ding W H, Hu M H, Jiang B. Efficiency analysis of parallel runway multimodal approach based on entropy weight method [J]. *Journal of East China Jiao Tong University*, 2023, 40 (01): 44-51.
- [20] 范厚明, 牟爽, 岳丽君. 考虑冲突和拥堵的自动导引车调度与路径规划协同优化[J]. *计算机应用*, 2022, 42(7):

2281-2291.

Fan H M, Mou S, Yue L J. Automatic guided vehicle scheduling and path planning collaborative optimization considering conflict and congestion [J]. Computer Applications, 2022, 42 (07): 2281-2291.



第一作者: 包丹文(1982—), 男, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向为交通运输规划与管理。2004年本科毕业于东南大学, 2007年硕士毕业于东南大学, 2013年博士毕业于东南大学。E-mail: baodanwen@nuaa.edu.cn。



通信作者: 姚馨宇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通运输工程。E-mail: yxycw@nuaa.edu.cn。