

文章编号: 1005-0523(2024)04-0099-09



## 基于动态优先级的机坪车辆避冲突运行规划方法

包丹文<sup>1</sup>, 姚馨宇<sup>1</sup>, 刘建荣<sup>2</sup>, 陈卓<sup>1</sup>, 周佳怡<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

**摘要:**【目的】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。【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, 考虑保障车辆运行规则和物理特性, 建立了考虑行驶和等待时间最小化的混合整数规划模型。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。【结果】实验表明, 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%。【结论】所提方法满足了保障车辆差异化运行要求, 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。

**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

**本文引用格式:** 包丹文, 姚馨宇, 刘建荣, 等. 基于动态优先级的机坪车辆避冲突运行规划方法[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 99-107.

## Operation Planning Method for Airport Support Vehicle Collision Avoidance Based on Dynamic Priority

Bao Danwen<sup>1</sup>, Yao Xinyu<sup>1</sup>, Liu Jianrong<sup>2</sup>, Chen Zhuo<sup>1</sup>, Zhou Jiayi<sup>1</sup>

(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 510641, China)

**Abstract:** 【Purpose】To enable conflict avoidance operation planning for support vehicles in complex environments, a dynamic priority classification method is proposed. 【Method】This method prioritizes conflict avoidance based on levels of operation efficiency and risk. Additionally, a conflict avoidance operation planning model were established, along with a two-stage algorithm for global path optimization. A low time complexity conflict detection method was also proposed to ensure accuracy in solving large-scale complex problems quickly. 【Result】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%. 【Conclusion】The proposed method meets the requirements of ensuring differentiated vehicle operation, and realizes the function of conflict avoidance path planning in a mixed operation environment of vehicles and aircraft.

**Key words:** air transportation; operation path planning; conflict detection; mixed integer programming model; dynamic priority

**Citation format:** BAO D W, YAO X Y, LIU J R, et al. Operation planning method for airport support vehicle

收稿日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金民航联合重点项目(U2033203)

collision avoidance based on dynamic priority[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 99-107.

**【研究意义】**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,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。

**【研究进展】**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<sup>[1]</sup>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。Li<sup>[2]</sup>等<sup>[2]</sup>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<sup>[3]</sup>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<sup>[4]</sup>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<sup>[5]</sup>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。

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。李楠等<sup>[6]</sup>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等<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>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。上述方法由于模型变量多,较难获

得最优解,有部分学者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<sup>[9-11]</sup>。

**【创新特色】**冲突解脱研究成果不完全适用于机坪车辆,主要原因在于机坪车辆类型多、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,易产生车辆频繁停车等待等问题,降低了机坪运行安全水平。机场路径规划研究只针对滑行道路区域的航空器冲突,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。

**【关键方法】**本文针对机坪车辆与航空器混行环境中的冲突问题,提出了一种考虑动态优先级的避冲突运行规划方法,建立了混合整数规划模型,并通过设计全局路径优化的两阶段算法及改进的冲突探测方法,提高了模型的求解效率。

## 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,分别对应行李牵引车、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。

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 冲突判别方法

将保障车辆冲突定义为车辆在行驶中的时间和路径冲突,传统保障车辆冲突识别定义中未考虑车身物理尺寸,本文将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。

1) 计算车辆在路段  $e_{ij}$  的通行时间,如下

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

式中:  $t_{ij}$  为通过路段  $e_{ij}$  的时间;  $l_{ij}$  为路段  $e_{ij}$  的长度;  $v_0$  为车辆行驶速度。

2) 车辆  $a$  通行路段须满足以下要求

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

式中:  $T_{ija}^{in}$  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。

3) 检测各车辆行驶路径是否存在交叉,判别过程如下

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

式中:  $V$  为车辆行驶路径集;  $k_1, k_2$  均为车辆行驶路径。

4) 如图1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  $T_{ija}^{out}$  约束关系式为

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

式中:  $H_s$  为车辆与车辆的安全间隔距离;  $H_a$  和  $H_b$  分别为不同类别保障车辆的车身尺寸;  $v_0$  为保障车辆行驶速度。

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。如图2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,当满足约束关系时,说明车辆和航空器发生冲突,同理可得  $T_{ija}^{out}$ 。

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

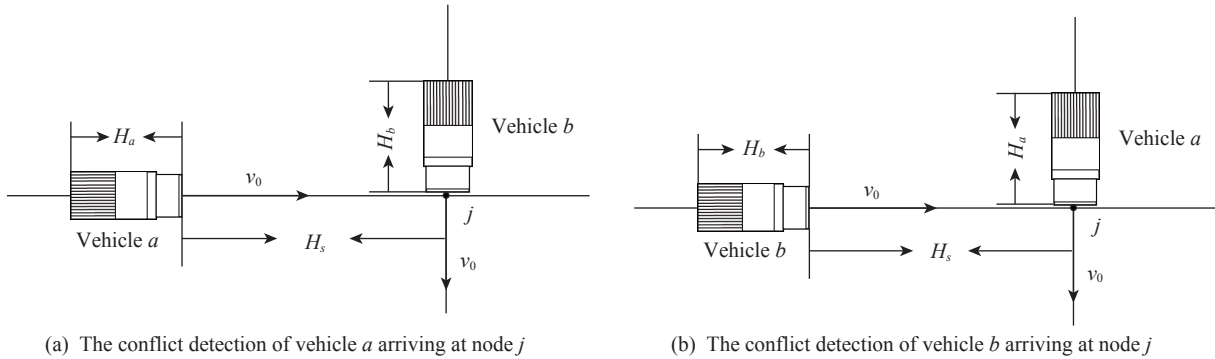


图1 车辆与车辆冲突探测示意图  
Fig. 1 Vehicle-to-vehicle conflict detection

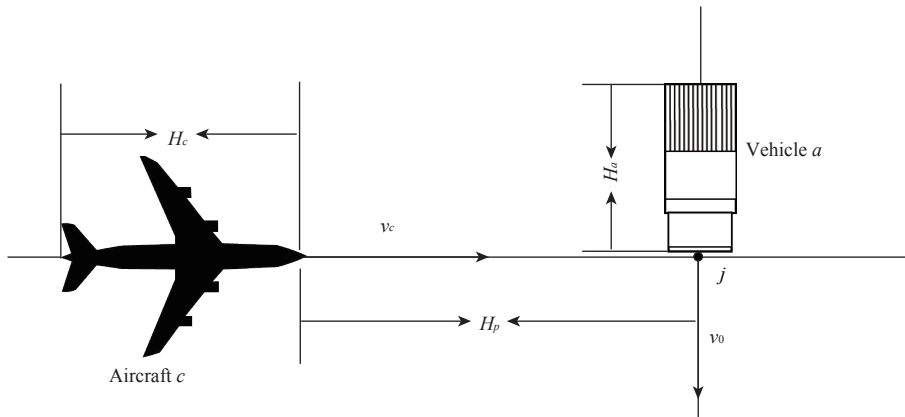


图2 车辆与航空器冲突检测  
Fig. 2 Vehicle and aircraft conflict detection

式中:  $H_p$  为车辆与航空器的安全间隔距离;  $H_c$  为航空器的长度尺寸。

### 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,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,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的冲突次数,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和提高车辆优先级,减少冲突等待时间。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,其动态优先级计算公式如下

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

式中:  $T_{ai}^j$  为车辆  $a$  执行  $j$  类作业时运行至节点  $i$  的运行时间,  $T_a^j$  为车辆  $a$  执行  $j$  类作业的总运行时间;  $d_{ai}^j$  为车辆  $a$  执行  $j$  类保障作业时在节点  $i$  产生的冲突等待时间,  $d_a^j$  为车辆  $a$  执行  $j$  类作业时的总冲突等待时间;  $M_{ai}^j$  为车辆  $a$  执行  $j$  类作业在节点  $i$  时作业任务的优先级,  $M_a^j$  为所有保障车辆的最高任务优先级;  $C_a$  为第  $a$  辆车的作业优先级,  $C$  表示最大作业优先级;  $\alpha$  为保障车辆的时间权重系数;  $\beta$  为任务紧急程度的权重系数;  $\gamma$  为车辆种类作业优先程度的权重系数;  $\sigma$  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<sup>[1]</sup>, 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  $F$ , 如下

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

式中:  $x_{ija}$  和  $w_{iaq}$  均为决策变量;  $t_{ij}$  为车辆行驶经过节点  $i$  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;  $\beta_i$  为各节点  $i$  的权重, 权重计算参考文献[12];  $w_{iaq}$  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

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

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

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

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



3) 机坪道路运行规则约束条件。机坪车辆道路为单向道路,保障车辆禁止掉头和超越前车,满足约束为

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

机坪进出口道路为双向道路,保障车辆禁止穿越停机坪,满足约束为

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

式中:  $e_{ij}$  为节点  $i$  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

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

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

式中:  $T_{ija}^{\text{in}}$  为第  $a$  辆车进入  $e_{ij}$  的时刻;  $T_{ija}^{\text{out}}$  为第  $a$  辆车离开  $e_{ij}$  的时刻;  $l_{ij}$  为路段  $e_{ij}$  的长度。

5) 避冲突约束条件。保障车辆与保障车辆的避冲突运行需满足约束为

$$|(T_{ija}^{\text{in}} + w_{iaq}) - (T_{kjq}^{\text{in}} + w_{kja})| \geq \frac{H + H_s}{v_0}, \forall a \in A, \forall q \in C \quad (15)$$

$$|T_{ija}^{\text{out}} - T_{kjq}^{\text{out}}| \geq \frac{H + H_s}{v_0}, \forall a \in A, \forall q \in C \quad (16)$$

式中:  $H$  为优先到达路点车辆的车身长度;  $H_s$  为车辆间的安全间隔距离。

保障车辆与航空器的避冲突运行需满足约束为

$$|(T_{ija}^{\text{in}} + w_{ia,q}) - T_{kjq}^{\text{in}}| \geq \frac{v_0 H_c + v_c H_p}{v_0 v_c}, \forall a \in A, \forall q \in C \quad (17)$$

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

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。

5) 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

$$w_{iaq} > 0 \Rightarrow w_{iqa} = 0, \forall a \in A, \forall q \in C \quad (19)$$

### 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

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, AGA)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 AGA-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。

#### 3.2 自适应遗传算法设计

1) 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。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。

2) 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

$$\begin{cases} f_u = \frac{1}{f_w} \\ f_w = \min \left\{ \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^R [t_{ij} x_{ija} + \max(0, h_{ijaq})^2] \right\} \\ h_{ijaq} = \begin{cases} (H + H_s)/v_0 - |T_{ija}^{\text{in}} - T_{ijq}^{\text{in}}|, \forall a \in A, q \in C \\ (v_0 H_c + v_c H_p)/v_0 v_c - |T_{ija}^{\text{in}} - T_{ijq}^{\text{in}}|, \forall a \in A, q \in C \\ 0, [(v_0 H_c + v_c H_p)/v_0 v_c - |T_{ija}^{\text{in}} - T_{ijq}^{\text{in}}| < 0] \cup \\ [(H + H_s)/v_0 - |T_{ija}^{\text{in}} - T_{ijq}^{\text{in}}| < 0] \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

3) 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,本文借鉴文献[13]引入自适应交叉和变异概率。

### 3.3 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<sup>[12]</sup>,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。具体步骤如下:

1) 以所有经过检测节点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;

2) 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 $\theta$ 向量;

3) 在更新时间窗集合 $V$ 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。

## 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,截至2021年底,旅客运输量达1 759.9万人次,位居全国机场第13名。机坪面积约110万 $m^2$ ,整体规模位于华东地区机场第2位。其中T1航站楼机坪面积44.7万 $m^2$ ,T1航站楼承担31家航空公司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,其车辆道路网络连通性较好,车辆行驶道路多样化,因此本文选取T1航站楼处的机坪区域作为研究场地,构建的拓扑路网图如图3所示,图中共有229个节点、31个机坪节点。

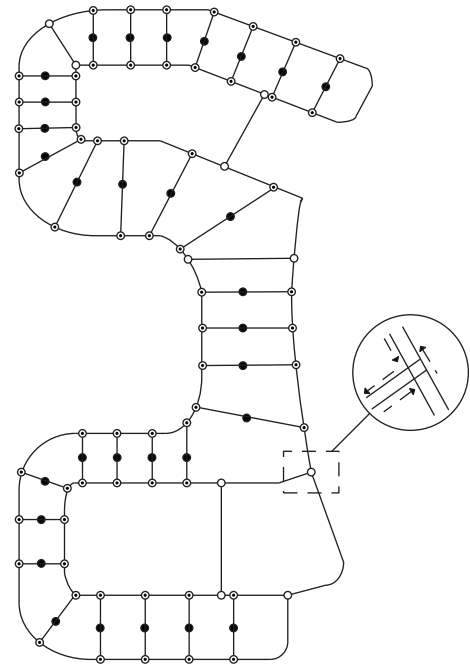


图3 场景设置示意图

Fig. 3 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,在路径规划阶段,如表1所示,选择遗传算法(genetic algorithm, GA)作为对比算法。为验证本文构建的改进冲突检测方法有效性,冲突检测分别采用传统冲突检测方法和改进冲突检测方法。在冲突检测阶段,以路径阶段AGA的结果数据作为本阶段的输入数据,选择停车等待策略(parking waiting strategy, PWS)和固定优先级策略(priority conflict relief strategy, PCRS)作为对比策略。

### 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12~18辆;大规模算例下,保障作业数

表1 算法特征

Tab.1 Algorithm characteristics table

Name	Features	
	Conflict detection	Resolution methods
P	Traditional conflict detection method	Genetic algorithm
GA	GA improved conflict detection method	Genetic algorithm
AGA	AGA improved conflict detection method	Adaptive genetic algorithm

量在 150~200 个,车辆使用数量在 16~30 辆。表 2 中列出了每组算例中以冲突等待时间  $G$ 、关键车辆启-停次数  $F$ 、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  $L_i$  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 2 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 3 600 s。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

Scene	N	A	AGA					GA					P	PWS		PCRS		DPCRS	
			M/s	T/s	$L_i$ /%	$Y_c$	D/%	M/s	T/s	$L_i$ /%	$Y_c$	D/%	T/s	G/s	F	G/s	F	G/s	F
S1	80	12	7 264	1 684	11	0.15	15	7 721	1 841	10	0.21	10	3 482	105	4	97	1	102	1
S2	80	15	7 183	1 618	10	0.20	20	7 640	1 813	12	0.20	15	3 421	102	3	80	0	87	0
S3	80	18	7 295	1 716	14	0.32	18	7 756	1 887	12	0.22	10	3 582	115	4	105	1	109	2
S4	90	15	7 164	1 221	12	0.34	22	7 626	1 369	10	0.24	14	*	120	5	96	3	98	2
S5	90	18	7 452	1 532	17	0.40	21	7 956	1 608	12	0.30	16	*	132	8	118	2	128	1
L1	140	30	10 321	2 885	41	0.64	36	13 532	3 057	37	0.51	28	*	170	8	126	4	142	2
L2	140	33	10 248	2 742	36	0.63	40	13 298	3 021	35	0.52	32	*	169	11	128	3	136	1
L3	140	36	10 629	3 031	41	0.65	39	13 746	3 309	40	0.53	30	*	174	9	135	5	128	2
L4	180	33	11 242	3 150	45	0.82	40	14 683	3 372	44	0.74	29	*	228	15	156	5	162	3
L5	180	36	11 137	3 314	44	0.89	41	14 557	3 514	42	0.82	32	*	200	12	142	4	158	2

1) 运行时间指标  $T$  结果分析。根据图 4,AGA 算法和 GA 算法都能在规定时间内进行求解。其中,AGA 算法平均求解时间为 2 289.3 s,比 GA 算法平均求解时间降低了 189.8 s。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  $L_i$  及目标成本  $M$  指标结果分析。AGA 算法相较于 GA 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  $Y_c$  低于 0.4 时,路径变更幅度  $L_i$  较小,成本改善并不显著。这是由于当车辆与航空器的冲突类型占据主导地位时,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,所提算法相对对比算法,目标成本函数值优化效果明显,降低了 24.6%。进一步分析小规模场景 S1, S2, S3 和大规模场景 L1, L2 发现,当保障任务数量不变时,适量增加保

障车辆数量可以降低目标成本  $M$ 。

3) 冲突优化幅度  $D$  指标结果分析。AGA 算法在 10 组算例中,相较于 GA 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 4 所示,在大、小规模场景下,AGA 算法的车辆冲突比和冲突优化幅度结果均大于 GA 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。

4) 冲突等待时间  $G$  和关键车辆启-停次数  $F$  指标结果分析。动态优先级解脱策略相较停车等待策略有明显的优势,冲突等待时间平均降低了 21.9%,车辆冲突启-停次数平均降低了 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-停次数平均降低了 14.3%;在大规模场景下,尽管冲突等待时间平均上升了 5.7%,但关键车辆的启-停次数平均降低了 52.4%,风险降低更明显。而在机场实际运行中,更看重风险水平。

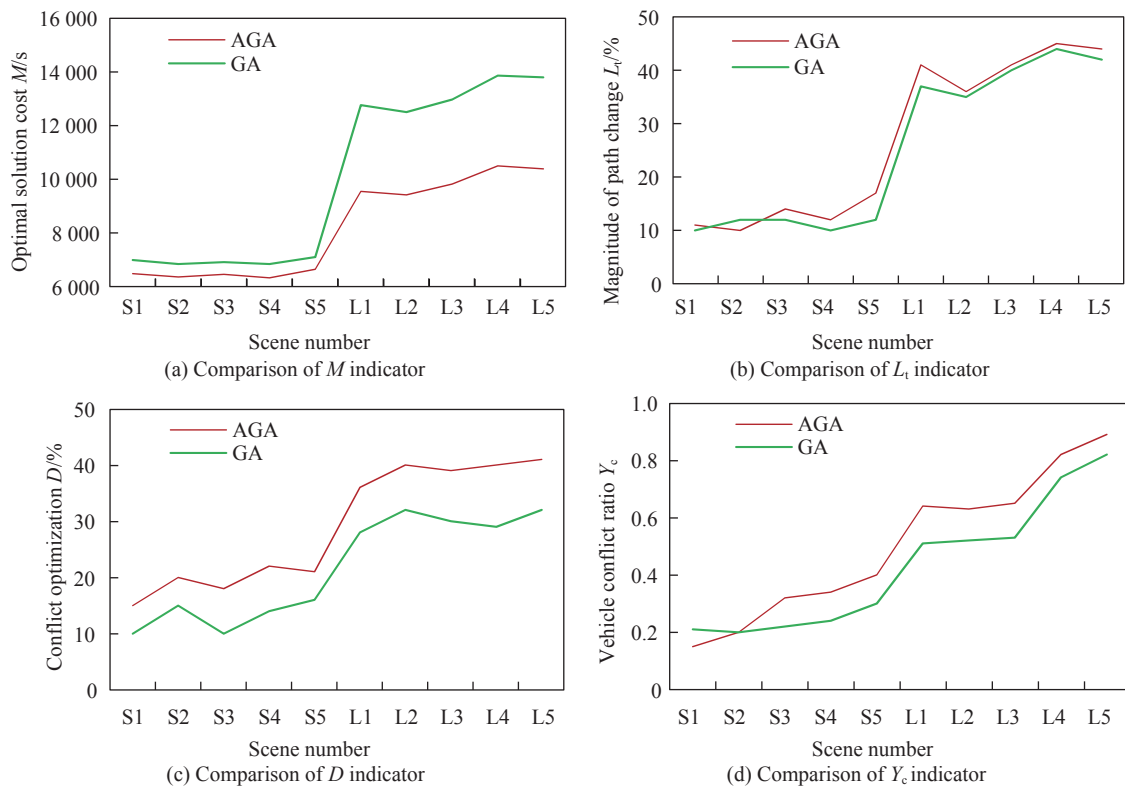


图4 指标结果对比图

Fig. 4 Comparison of index results

值得注意的是,在小规模场景中,3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。根据机坪运行规则,航空器的通行优先级高于车辆,因此冲突等待时间的可改善空间较小。

## 5 结论

本文介绍了一种机场保障车辆避冲突路径规划方法,并评估了不同规模场景下的效果。主要结论如下。

1) 本文针对机场保障车辆与航空器混合运行的特点,综合考虑车辆运行规则和物理特性,构建了以行驶和等待时间最小化为目标的混合整数规划模型,以满足混合运行环境中不同类型保障车辆的安全运行需求。

2) 本文提出的引入动态优先级冲突解脱策略的两阶段算法相比传统路径规划算法,有效减少车辆与航空器冲突发生次数从而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。

3) 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] 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.
  - [2] 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.
  - [3] 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(3): 400-405.
- LI H Y, ZHANG M, LIU S H, et al. Aircraft taxiing path planning based on differences in conflict types[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation



- Science & Engineering), 2022, 46 (3): 400-405.
- [4] 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, et al. Research on aircraft conflict resolution methods based on minimum fuel consumption[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13 (10): 17-20.
- [5] 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: 9951206.
- [6] 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(6): 87-94.  
LI N, SUN Y, JIAO Q Y, et al. Aircraft taxiing path planning based on multi-target speed profile[J]. Flight Dynamics, 2020, 38 (6): 87-94.
- [7] 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(1): 269-291.
- [8] 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. Optimization of aircraft green taxi based on speed allocation[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (16): 6752-6758.
- [9] 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(1): 205-215.  
JIANG Y, LIU Z Y, HU Z T, et al. Coordinated scheduling model of arriving aircraft at large airport[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22 (1): 205-215.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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(1): 44-51.  
DING W H, HU M H, JIANG B. Multi-mode approach effectiveness analysis of parallel runways based on entropy weight method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40 (1): 44-51.
- [13] 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. Collaborative optimization of automated guided vehicle scheduling and path planning considering conflict and congestion[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42 (7): 2281-2291.



第一作者:包丹文(1982—),男,副教授,博士,硕士生导师,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。

(责任编辑:吴海燕)