

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407864

# 机坪行车道交叉口特种车辆运行控制策略

姬雨初 闫宗吉

(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

**摘要:**针对机场无人化、少人化的需求,对自动驾驶特种车辆在机坪行车道交叉口运行控制问题展开深入研究。首先,面向机坪行车道交叉口建立非常规交叉路口模型。在此基础上,针对特种车辆通过行车道进入机坪与其他特种车辆可能存在冲突的问题,首次将重决策与间隙理论结合,并对间隙理论进行改进,提出了一种基于间隙理论的特种车辆控制策略 LSGO。RSU 通过提出的控制策略计算特种车辆的最佳转向车道以及特种车辆队列之间的最优间隙,并结合车辆运动学模型提供执行命令。通过 LSGO 策略,可以有效避免车辆间冲突,并减少特种车辆通过交叉路口的时间。最后,在典型机坪与行车道场景下进行仿真,验证了该策略的功能和性能。仿真结果表明,采用提出的 LSGO 策略,特种车辆队列通过交叉路口的时间相较于传统控制策略最多可降低 29.2%,能耗最多可降低 11.6%。单车通过调整优化区和交叉口区的时间最多减少 20.5%。

**关键词:** 无信号交叉口;车辆避让;车联网;行为决策;机场;特种车辆

**中图分类号:** TP13;TN99 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Operation control strategy of specialized vehicles at apron lane intersection

Ji Yuchu Yan Zongji

(School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Aiming at the demand for unmanned and less manned airports, in-depth research is carried out on the operation control of autonomous specialized vehicles at the intersection of apron lanes. First, a non-conventional intersection model is established for the apron lane intersection. On this basis, the problem of possible conflicts between specialized vehicles entering the apron through the lanes and other specialized vehicles is the first time to combine decision and gap theory, improve the gap theory, and propose a specialized vehicle control strategy LSGO based on the gap theory. RSU calculates the optimal steering lanes for the specialized vehicles and the optimal gaps between the specialized vehicles' queues through the proposed control strategy and provides execution commands in combination with the vehicle kinematics model. With the LSGO strategy, inter-vehicle conflicts can be effectively avoided and the time for specialized vehicles to pass through intersections can be reduced. Finally, simulations are conducted in a typical apron and lane scenario to verify the functionality and performance of the strategy. The simulation results show that with the proposed LSGO strategy, the time for specialized vehicle queues to pass through intersections can be reduced by up to 29.2% and the energy consumption can be reduced by up to 11.6% compared with the traditional control strategy. The time for a single vehicle to pass through the adjustment optimization zone and the intersection zone is reduced by up to 20.5% compared with the traditional control strategy.

**Keywords:** unsignalized intersection; vehicle avoidance; internet of vehicles; behavioral decision making; airports; specialized vehicles

## 0 引言

随着机场运营向少人化、无人化方向发展,自动驾驶特种车辆(autonomous specialized vehicle, ASV)正受到日

益广泛的关注和认可。传统的特种车辆运行方式已显现出不足,需要与车路协同和智能驾驶技术相结合,以适应智能机场时代的需求<sup>[1-2]</sup>。引入智能化控制手段后,机场特种车辆可实现更精准的路线规划、更高效的行驶模式,从而提升机场内部交通管理的水平和效率。目前,香港

机场已开始进行无人特种车辆试运营,实现了无人行李牵引车在货运站、行车道区域运营以及无人巡界车的自动异常检测。然而,在运行时仍需安全员,当无人行李牵引车由行车道进入机坪时,首先减速停止前进,然后由安全员接管、操作进入停机坪。而法国图卢兹-布拉尼亚克机场运行4级自动行李牵引车,车上不再有监督人员,但尚未解决车辆进入停机坪时的运行控制问题。

目前的方案仅实现了ASV到达机坪处交叉口,而未考虑车辆自主进入机坪的情况。当今,机场普遍采用工作人员驾驶特种车辆对航空器进行保障。然而,在机坪与行车道相交的交叉路口,当一侧车流量较大时,可能会出现无法穿越的间隙,另一侧车辆需要减速停车或依赖驾驶员判断是否穿越该车流,容易导致冲突,进而引发交通事故。此外,仅进行车辆冲突避让的传统策略无法优化局部车辆通行时间,与建立高效机场运营的目标不符。为实现机场的无人化、少人化运行,有必要对ASV进入机坪时的控制策略进行深入研究<sup>[3-4]</sup>。

间隙理论的核心思想是通过适当调整车辆间距,确保冲突方向的车辆能够安全通过两车之间的间隙,以实现快速通过交叉路口的目标。当前,国内外已有多位学者对基于间隙穿行的车辆控制理论进行了深入研究。柴琳果等<sup>[5]</sup>提出了一种基于间隙理论的联网无人驾驶车辆在无信号交叉路口的控制方法,该方法将车辆间隙最小的无碰撞位置作为车辆的目标位置进行避让。然而,该方法存在占用车道过长的问题,不适用于车道长度较短的环境。潘福全等<sup>[6]</sup>提出了一种基于间隙理论的交叉路口控制策略,建立了冲突区域范围计算模型和车辆状态调整数学模型,并进行仿真验证。研究表明,该策略能显著降低车辆通过交叉口的行程时间和延误时间,有效降低车辆污染物排放与油耗。Tachet等<sup>[7]</sup>提出了一种基于间隙控制的交叉路口管理系统(slot-based intersections, SIs),相较于红绿灯控制交通流,该系统可以提高交通效率,将交叉路口的容量提高一倍,并显著减少车辆延误。Xu等<sup>[8]</sup>将不同车道上的车辆投影到虚拟车道中,并构建虚拟排,引入了包含两种通信模式的通信拓扑结构,提高了虚拟排的跟车性能,实现了分布式无冲突协作控制。Zhao等<sup>[9]</sup>提出了一种基于多智能体安全强化学习的新型车路协同控制框架SRL-CLCADI,用于解决自动驾驶车辆在全方向交叉口的协作控制问题。该方法将协作控制过程建模为约束马尔可夫博弈,并提出基于投影的多智能体约束策略优化算法,在确保安全的同时最大化性能。Chen等<sup>[10]</sup>将可接受间隙比作绿灯时间,将不可接受间隙比作红灯时间,并设计了车辆避让策略,同时考虑了车辆长度及其对下游车辆的影响。Dai等<sup>[11]</sup>设计了考虑个别车辆通行时间的车辆通行策略,以避免部分车辆长时间延误。然而,上述基于间隙理论的交叉

路口车辆控制研究主要针对城市无信号交叉口,忽视了特殊的交叉路口情况。面对机坪环境中多转向车道选择和入口车道较短的情况,现有的SIs控制仍然存在改进的空间。

基于上述研究背景,为了实现ASV无碰撞、无减速、无停车情况下通过机场交叉路口,并减少由于工作人员操作限制引起的车辆延误,本文对机坪行车道交叉口特种车辆运行控制策略展开研究,提出了特种车辆车道选择与间隙优化运行控制策略(lane selection and gap optimization, LSGO)。仿真结果证明特种车辆可以安全高效通过机坪与行车道交叉路口。

## 1 机坪与行车道场景模型

机坪行车道场景与城市无信号交叉口有所不同。如图1所示,包括供航空器停放、装卸货物和航空器维修的机坪,以及供机场特种车辆和航空器移动与运输的行车道。本文将两条行车道分别标记为lane1与lane2。机场特种车辆,包括牵引车、加油车、污水处理车及摆渡车等,用于航空器的牵引、加油、污水处理和乘客运输等任务<sup>[12-13]</sup>。根据车辆的作业任务,可分为两种情况:1)经过机坪交叉路口而不进入机坪;2)经过机坪交叉路口进入机坪。鉴于连续机坪同时作业的情况较少,本文仅研究服务单个机坪的情况。

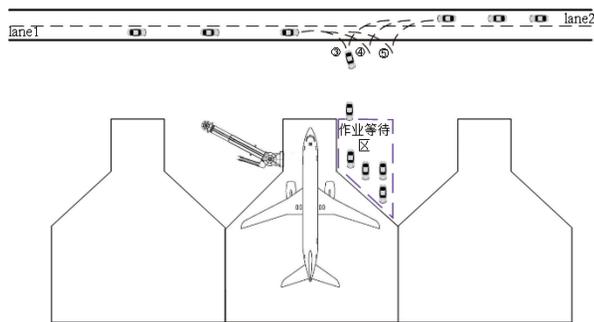


图1 机坪行车道交叉口

Fig. 1 Intersection of apron and lane

特种车辆进入机坪时,首先驶入特种车作业等待区,然后根据需求及时为航空器提供服务。考虑到ASV由行车道驶入机坪时的入口较宽,为了提高交叉口运行效率,本文设定3条特定路径供特种车辆转弯进入机坪,分别记作转向车道Crosslane3、转向车道Crosslane4和转向车道Crosslane5,以便与行车道区分。

考虑ASV运行控制需求,本文对机坪附近行车道进行了划分,包括检测计算区、调整优化区和交叉口区,具体划分如图2所示,并对各区域功能进行了说明<sup>[14-15]</sup>。

在检测计算区,车辆向路边单元(road side unit,

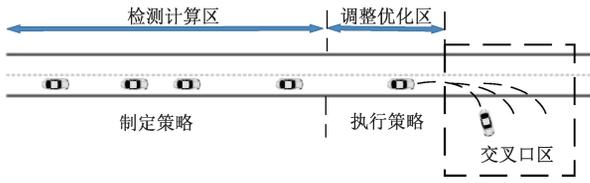


图 2 区域划分

Fig. 2 Zoning

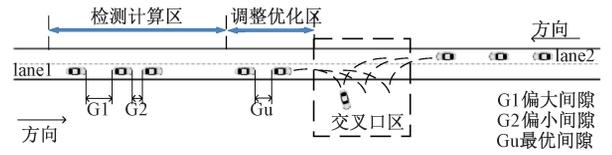


图 3 车辆间隙

Fig. 3 Vehicle clearance

RSU)以固定频率(0.1 s/次)发送速度、位置和航向等状态信息,假设通信无延迟且无丢包现象。基于这些信息,RSU 通过本文策略确定车辆队列中特种车辆的数量,检测冲突,计算特种车辆在约束条件下的无冲突最优目标位置。当第 1 辆特种车辆进入调整优化区时,RSU 以 0.1 s/次的频率逐步发送控制命令给每辆特种车,特种车队开始执行车辆运行策略,调整自身位置到达目标位置。在交叉口区,车速保持不变。若车辆无需进入机坪,则按照巡航速度  $v_c$  通过,若车辆需要进入机坪,则在该区域转弯进入。特种车辆离开交叉口区后,RSU 会自动判定车辆已驶离交叉口。

## 2 特种车辆运行控制策略

### 2.1 问题描述

在 ASV 联网环境下,特种车辆通过车辆到基础设施(vehicle to infrastructure, V2I) 通信技术与道路设施单元 RSU 建立连接,从而实现集中式控制方式对特种车辆进行规划控制<sup>[16-17]</sup>。一架航空器通常只需要大约 10 辆特种车辆进行服务,这些车辆在进入机坪之前会与其他通过同一机坪行车道交叉口的车辆形成一个车辆队列。因此,本研究假设存在特种车辆集合  $V$ ,按照进入调整优化区的顺序排列为  $V = \{V_1, \dots, V_N\}$ ,其中特种车辆  $V_n$  的作业任务是在  $[t_1, t_2]$  时刻进入机坪进行作业。在  $t_i$  时刻  $V_n$  的状态  $X_n(t_i)$  如式(1)所示。

$$X_n(t_i) = [x_n(t_i) \quad y_n(t_i) \quad v_n(t_i) \quad \theta_n(t_i)]^T \quad (1)$$

式中:  $(x_n, y_n)$  为特种车辆  $V_n$  的位置;  $v_n$  为特种车辆  $V_n$  的速度;  $\theta_n$  为特种车辆  $V_n$  的航向角。

当有机坪保障任务的特种车辆  $V_n$  转弯进入机坪时,可能会与其他特种车辆发生冲突。为确保特种车辆能够快速通过交叉口区并避免碰撞,本文考虑改变转向车道和调整车辆间隙两种方法。车辆间隙示意图如图 3 所示,其中  $G_1$  表示偏大间隙;  $G_2$  表示偏小间隙;  $G_u$  表示最优间隙。无论是偏大间隙还是偏小间隙,都需要调整到最优间隙。

### 2.2 车辆运动模型

首先,建立特种车辆  $V_n$  的运动学模型<sup>[18-19]</sup>为:

$$x_n(t_{i+1}) = x_n(t_i) + v_n(t_i) \cdot T \cdot \cos\theta_n(t_i) \quad (2)$$

$$y_n(t_{i+1}) = y_n(t_i) + v_n(t_i) \cdot T \cdot \sin\theta_n(t_i) \quad (3)$$

式中:  $T = t_{i+1} - t_i, i \geq 0$  为时间步长。

为简化分析,本文采用弧转向模型和匀速行驶模型对车辆轨迹进行预测与控制。特种车辆下一时刻状态由当前位置、航向角、速度和加速度决定,基于式(1)特种车辆状态的状态方程为:

$$X_n(t_{i+1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T\cos\theta_n(t_i) & 0 \\ 0 & 1 & T\sin\theta_n(t_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n(t_i) \\ y_n(t_i) \\ v_n(t_i) \\ \theta_n(t_i) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_n T \\ v_n(t_i) T/r \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $X_n(t_{i+1})$  为车辆下一时刻状态;  $a_n$  为特种车辆加速度;  $r$  为转弯半径。

在本文所给出的机坪模型中,车辆运动可简化为直线和转弯两种运动模式。没有保障任务的特种车辆在行车道直线运动,而有机坪保障任务的特种车辆则直线运动至交叉口区后转弯进入机坪。根据式(4),在车辆直线运动时,  $r$  趋近于无穷大,故  $v_n(t_i) T/r$  为 0,因此车辆下一时刻航向角为:

$$\theta_n(t_{i+1}) = 0 \quad (5)$$

在车辆转弯时,有:

$$\theta_n(t_{i+1}) = \theta_n(t_i) + v_n(t_i) \cdot T/r \quad (6)$$

### 2.3 特种车辆车道选择与间隙优化运行控制算法

本文对交叉口内部的冲突点进行了简化,并将存在的冲突点分为分流冲突点、交叉冲突点和合流冲突点 3 类。交叉口区内的冲突模型如图 4 所示。

本文的控制系统考虑在机坪附近设置具有群体决策能力的 RSU,对附近车辆进行集中控制。考虑到交叉口区域存在 3 条转向车道,结合间隙理论,本文提出了 LSGO 策略,其基本思想是对于转弯时与其他车辆无冲突的特种车辆,调整车辆位置以使其与前车保持最小安全间隔,此时最小安全间隔即为最优间隙;对于存在分流冲突的特种车辆,同样调整车辆位置以保持最小安全间隔;对于存在交叉冲突与合流冲突的特种车辆,优先考虑改

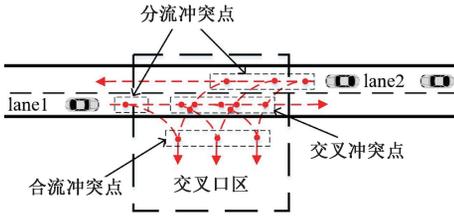


图4 冲突点

Fig.4 Conflict point

变转向车道避免冲突,若通过此方式无法避免,则通过调整车辆间隙至最优间隙实现避免。

为了避免发生分流冲突及追尾事件,同一车道上的两辆特种车必须保持最小安全间隔,此时最优间隙:

$$G = \Delta d \quad (7)$$

为了避免发生交叉冲突与合流冲突,先到达同一冲突点的特种车辆  $V_n$  与后到达车辆  $V_{n+1}$  的时间间隔必须大于或等于最小安全时间间隔。

$$t_{n+1} \geq t_n + \Delta t_n \quad (8)$$

其中,

$$\Delta t_n = (s_n + w_{n+1} + \varepsilon) / v_n \quad (9)$$

式中:  $t_n$  为前一车辆特种车到达冲突点的时刻;  $t_{n+1}$  为后一车辆特种车到达冲突点的时刻;  $\Delta t_n$  为安全时间间隔;  $v_n$  为特种车辆  $V_n$  速度;  $s_n$  为车辆  $V_n$  长度;  $w_{n+1}$  为车辆  $V_{n+1}$  宽度;  $\varepsilon$  为安全松弛因子,如图5(a)和(b)所示。

特种车辆  $V_{n+1}$  与  $V_{n+2}$  的最小安全时间间隔为:

$$\Delta t_{n+1} = (s_{n+1} + w_{n+2} + \varepsilon) / v_{n+1} \quad (10)$$

因为在交叉口区内特种车辆的速度相同且不会改变,即  $v_n = v_{n+1} = v_c$ ,故此时  $V_n$  与  $V_{n+2}$  的最优间隙:

$$G = s_n + s_{n+1} + w_{n+1}/2 + w_{n+2}/2 + 2\varepsilon \quad (11)$$

在执行策略的过程中,当车辆队列的第1辆特种车  $V_1$  由检测计算区进入调整优化区后,其他车辆  $V_n$  做匀加/减速运动到达目标位置  $x_n(t_{i+3})$ 。为了提高特种车辆控制的稳定性,  $V_n$  的速度控制采用改进T型曲线速度规划。 $V_n$  的速度规划如图6所示。

当车辆需要加速才能到达目标位置时,可使用以下公式表达。同样,当特种车辆需要减速才能到达目标位置时,其原理与之相同,可类似推导得到。在加速运动阶段,定义  $v_n(t_{i+1})$  为车辆  $V_n$  经加速后的速度,可计算为:

$$v_n(t_{i+1}) = v_c + a_n \cdot T_{n,1} \quad (12)$$

式中:  $T_{n,1}$  为加速时间。

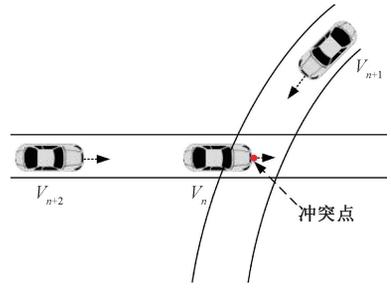
当特种车由匀速运动恢复到巡航速度运动时,定义  $T_{n,3}$  为减速时间:

$$T_{n,3} = (v_c - v_n(t_{i+2})) / d \quad (13)$$

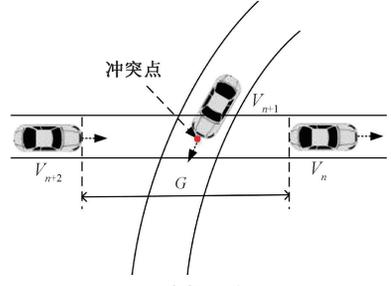
式中:  $d$  为特种车减速度。

在匀速行驶阶段,定义  $T_{n,2}$  为加速后匀速行驶时间:

$$T_{n,2} = S_{n,2} / (v_c - v_n(t_{i+1})) \quad (14)$$



(a) 车辆  $V_n$  与  $V_{n+1}$   
(a) Vehicles  $V_n$  and  $V_{n+1}$



(b) 车辆  $V_{n+1}$  与  $V_{n+2}$   
(b) Vehicles  $V_{n+1}$  and  $V_{n+2}$

图5 通过同一冲突点的车辆最优间隙

Fig.5 The optimal gap between vehicles passing through the same conflict point

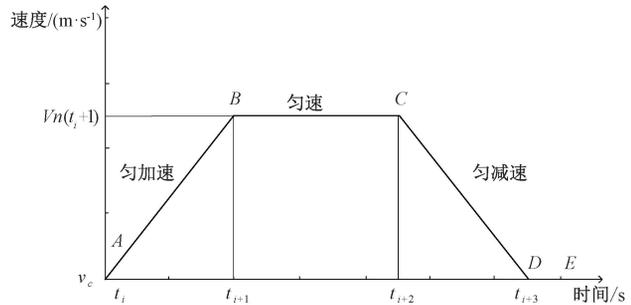


图6 特种车辆速度变化示意图

Fig.6 Schematic diagram of speed changes for special vehicles

式中:  $d_n$  为第  $n$  辆特种车目标位置  $x_n(t_{i+3})$  与当前位置的距离;  $S_{n,2}$  为特种车匀速行驶时比巡航速度行驶时多行驶的路程:

$$S_{n,2} = d_n - (S_{n,1} - v_c \cdot T_{n,1}) - (S_{n,3} - v_c \cdot T_{n,3}) \quad (15)$$

式中:  $S_{n,1}$  为加速阶段行驶的路程;  $S_{n,3}$  为减速阶段行驶的路程,分别为:

$$S_{n,1} = v_c \cdot T_{n,1} + 0.5 \cdot a_n \cdot (T_{n,1})^2 \quad (16)$$

$$S_{n,3} = v_n(t_i + T_{n,3}) \cdot T_{n,3} + 0.5 \cdot d \cdot (T_{n,3})^2 \quad (17)$$

通过上述公式,在速度改变次数最少的情况下,车辆可以到达目标位置。

在调整控制周期内,LSGO 策略对所有车辆的加速度

与航向角进行规划与控制。其输出的控制命令为在控制周期内每个时刻的加速度与航向角  $U = [u(t_i), u(t_{i+1}) \dots]$ , 定义  $u(t_i)$  如式(18)所示。

$$u(t_i) = \begin{bmatrix} a_1, a_2, \dots, a_n \\ \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

该算法的伪代码如下。

算法 1: 特种车车道选择与间隙调整避让算法

```

输入: (x, y), v_c, \theta
输出: U
1 for n=1, 2, \dots, N
2 while t_{n-1} \ge t_n - \Delta t //判断车辆之间是否存在冲突
3 if lane(n) = lane(n-1) //如果位于相同行车道
4 x_n(T_0) = x_n(T_0) - 0.5; //车辆目标位置-0.5 m
5 else
6 if V_n 的作业任务为转向进入停机坪
7 if Crosslane(n) = 5
8 X_n(T_0) = X_n(T_0) - 0.5;
9 else
10 Crosslane(n) = Crosslane(n) + 1;
11 end if
12 else
13 x_n(T_0) = x_n(T_0) - 0.5;
14 end if
15 end if
16 end while
17 while x_{n+1}(T_0) - x_n(T_0) \ge \Delta d 且 t_{n+1} \ge t_n + \Delta t
//同一行车道的车辆间距大于最小车辆间距且不与其他
18 车辆冲突
19 x_n(T_0) = x_n(T_0) - 0.5;
20 end while
21 根据式(3)、(11)~(16)计算 U
22 end for
23 return U
    
```

关系。仿真过程为从车辆队列中第 1 辆特种车辆驶入调整优化区,直至其离开进入交叉口区。由图 7 可以看出特种车辆间隙调整的过程,例如, lane1 上  $V_3$  与  $V_4$  通过增大间隙,使得 lane2 行车道上的  $V_5$  和  $V_6$  顺利转向进入机坪。同时,由于设置了 3 条转向车道,故极大地减少了车辆间隙调整的次数。

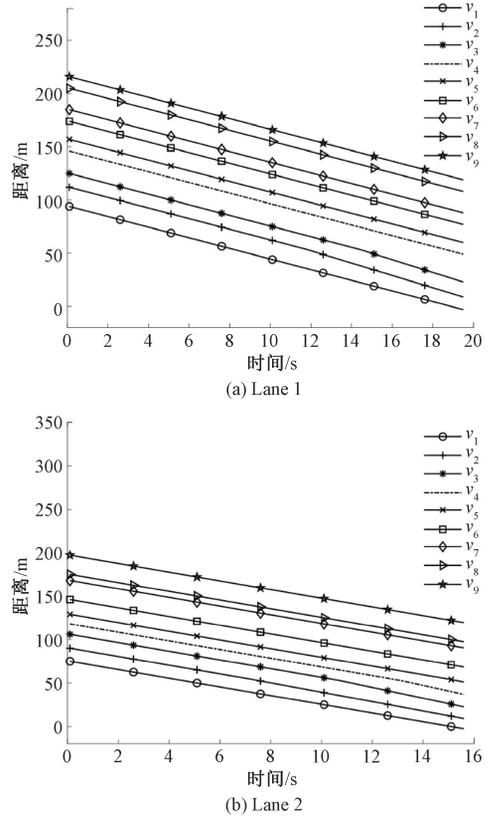


图 7 特种车距离交叉口时间-距离

Fig. 7 Specialized vehicles time-distance from intersection

### 3 仿真与实验

本文以实际机场为对象,在 MATLAB 中建立了机坪行车道模型等可视化仿真环境,以验证设计的机坪行车道交叉口特种车辆运行控制策略。具体来说,考虑共有 18 辆特种车辆同时驶向同一个机坪行车道交叉口,其中 10 辆特种车需要进入机坪作业,并且车辆到达检测计算区的时间间隔服从泊松分布。在此假设下,车辆的巡航速度为 5 m/s,初始加速度为 0 m/s<sup>2</sup>。此外,机坪环境参数设计如下:1)各区域宽度,检测计算区  $L_d = 200$  m,调整优化区  $L_o = 20$  m,交叉口区  $L_i = 28$  m;2)特种车速度限制,  $v_{max} = 10$  m/s,  $v_{min} = 0$  m/s;3)特种车辆加减速,  $a_{max} = 2$  m/s<sup>2</sup>,  $d_{max} = -5$  m/s<sup>2</sup>。

图 7(a)和(b)分别为在某次交通流量为 900 vhc/h 时,行车道 1 和 2 上特种车辆距离交叉口区的距离-时间

#### 3.1 车辆通行效率对比分析

图 8 所示为在不同交通流量下每辆特种车在调整优化区和交叉口区的平均通行时间,交通流量范围从 600 vhc/h 增长至 1 800 vhc/h,并从仿真中得出每辆特种车在不同交通流量下车辆平均通行时间及变化趋势。本文提出的 LSGO 策略会调整车辆之间过大间隙,当特种车辆靠近交叉口区时,其可能还在加速缩小间距,故通过交叉口的时间最短,这也是其平均通行时间会震荡的原因。文献[10]中自动车速引导策略会提前调整 lane2 车道上车辆的速度避免冲突,但并不会优化车辆间距,故通行时间较短。而传统策略是特种车辆接近交叉口区时才开始调整,严重增加了特种车辆通行时间。在传统策略控制下,交通流量较小时,特种车辆有较大的间隙调整车距,所以冲突避让对其他车辆影响较小,车辆平均通行时

间较短。然而,当交通流量较大时,大部分特种车辆都会受到其他特种车辆避让的影响,因此平均通行时间延长。由图8可知,相比于传统策略,LSGO策略控制下的单车在不同交通流量下的平均通行时间分别减少了12.5%,13.5%,15.1%,16.5%,18.7%,18.4%,20.1%和20.5%。

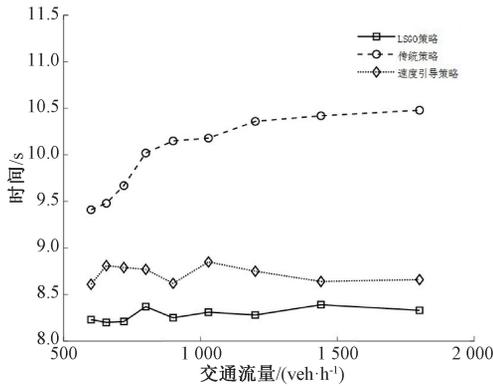


图8 不同流量下车辆平均通行时间

Fig. 8 Average travel time of vehicles under different flow rates

图9所示为在不同车流间距下车辆队列通过交叉口区的时间,即从第1辆车进入交叉口区开始计时,到最后1辆车离开交叉口区。由图9可知,随着车流间距的增大,车辆队列通过时间也随之增加。但LSGO策略增加的幅度更缓慢,主要原因是LSGO策略通过压缩特种车辆队列的长度,将车辆间距调整为最小安全间隔。但是不管在哪种车流间距下,传统策略和速度引导策略的时间都远远高于LSGO策略,在车流平均间距从5m增长到25m的仿真实验中,LSGO策略控制的车辆队列通过时间与传统策略相比分别减少了29.1%,29.2%,22.5%,27.9%,28.8%,28.0%,20.0%,22.6%和24.6%,在车流平均间距为7.5m时最多降低29.2%。

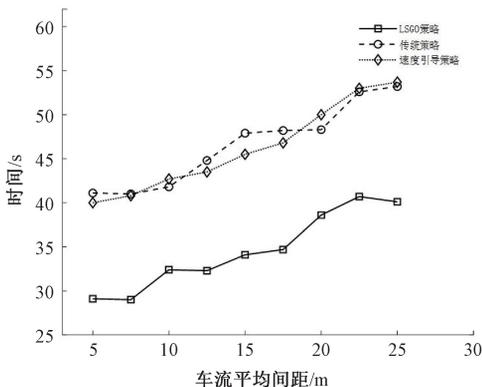


图9 不同车流间距下全体车辆通行时间

Fig. 9 The passage time of all vehicles under different traffic flow intervals

### 3.2 能量消耗对比分析

目前各大机场特种车辆控制方式仍为传统策略,利用Wu等<sup>[20]</sup>提出的电动汽车能耗测量与估算模型,在车流平均间距较小的情况下,将LSGO策略与其进行对比。图10所示为两种控制方式下车辆能耗在不同车流平均间距下的对比。相较于传统控制策略,运用基于间隙理论的LSGO策略下的特种车辆队列通过交叉口区的能耗最多降低11.6%。本文的控制策略对于建设“绿色机场”具有重要意义。

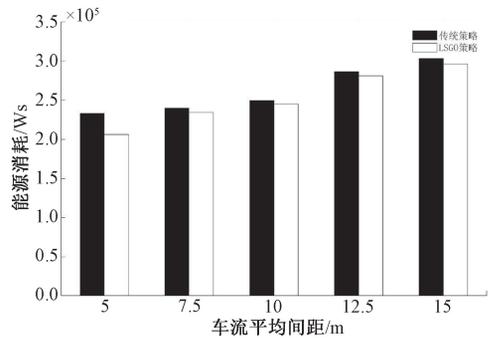


图10 不同车流间距下特种车能耗

Fig. 10 Energy consumption of special vehicles under different traffic flow spacing

### 3.3 实验验证

为了进一步验证LSGO策略的有效性,本文搭建了等比例缩小的机坪与行车道实验场景。其系统架构如图11所示,包含自动驾驶实验平台、服务器、无线接入点(access point, AP)。其中,自动驾驶实验平台用于模拟机场ASV。该平台使用后驱阿克曼转向底盘,主控板使用英伟达AGX nano,控制系统基于机器人操作系统(robot operating system, ROS)系统,使用惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)及同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)定位实现室内场景的定位。自动驾驶实验平台收到任务命令与RSU速度指令后,控制车辆执行指令。服务器与无线AP用于模拟RSU单元,用于实现信息交换和协调,连接自动驾驶实验平台。服务器接收车辆的位置、速度信息后,使用本研究提出的LSGO策略计算、生成下一时刻的加速度信号,使用消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)协议,通过无线AP将速度指令发送给自动驾驶实验平台。

根据本文提出的LSGO策略,对车辆行车道行驶、交叉口交汇转弯、进入机坪作业等待区的全流程进行了9组实验验证,如图12所示。图12(a)为ASV在行车道上行驶,根据LSGO策略选择转向车道与调整车辆间隔。图12(b)中,在机坪与行车道交汇处,当ASV获取进入

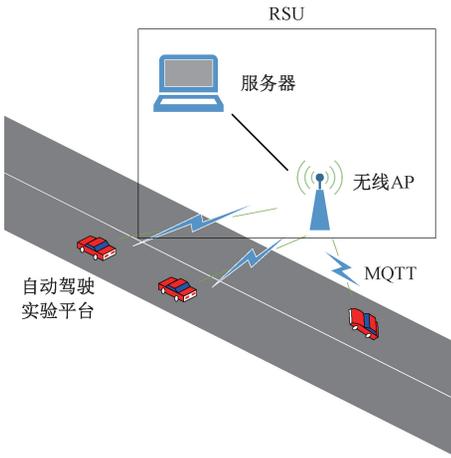
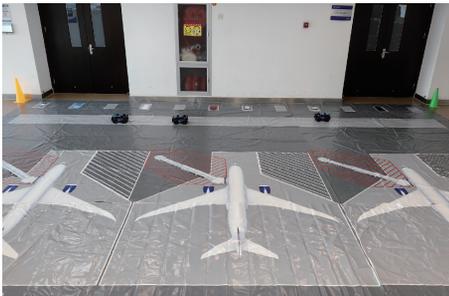
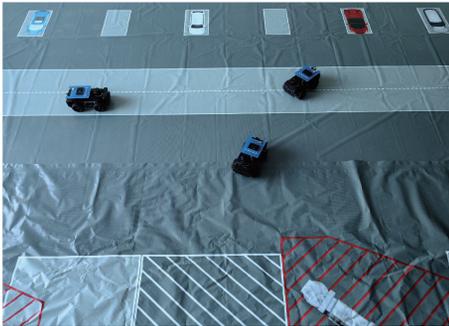


图 11 系统架构

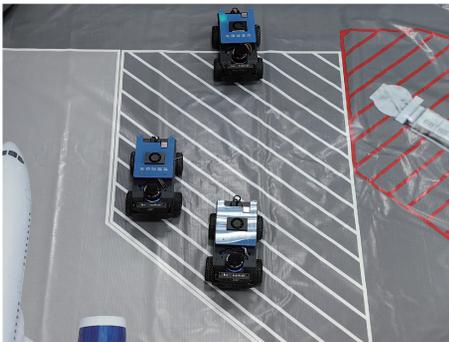
Fig. 11 System architecture



(a) 行车道行驶  
(a) Travel in the lane



(b) 交叉口转弯  
(b) Turning at intersection



(c) 进入作业等待区  
(c) Access to the operational waiting area

图 12 车辆运行状态

Fig. 12 Vehicles operating status

机坪作业指令后,根据本文策略选择的转向车道转弯进入机坪。由于合理的车道选择与车辆间距调整,避免了交叉口处的停车等待。图 12(c)为 ASV 驶入机坪,其他车辆等待作业的场景。实验结果表明,不同初始条件下的 ASV 均能安全快速通过机坪行车道交叉口区域,验证了本文算法的有效性。

### 4 结 论

本文基于改进间隙理论针对机坪行车道交叉路口提出了一种 ASV 交叉路口控制策略。提出的策略设计了避让原则,旨在减少速度改变次数的同时提高交叉路口通行效率,从而使 ASV 通过交叉路口的时间减少。实验结果表明,该策略在多个场景下均能表现出良好的性能。相较于传统的控制策略,LSGO 策略使特种车辆队列通过交叉口区的总时间最多减少 29.2%,能耗最多降低 11.6%,单车通过调整优化区和交叉口区的时间最多减少 20.5%。本文提出的控制策略不仅适用于机场环境,还可推广至港口码头、物流园区等场景。针对机场环境,后续工作将会考虑设计能耗最小,摆渡车乘客乘坐舒适性多目标优化控制策略。

### 参考文献

[ 1 ] LOKHANDWALA M, CAI H. Dynamic ride sharing using traditional taxis and shared autonomous taxis: A case study of NYC[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 97: 45-60.

[ 2 ] YU CH H, SUN W L, LIU H X, et al. Managing connected and automated vehicles at isolated intersections: From reservation-to optimization-based methods [ J ]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 122: 416-435.

[ 3 ] LIU ZH, SUO CH ZH, LIU Y T, et al. Deep learning-based localization and perception systems: Approaches for autonomous cargo transportation vehicles in large-scale, semiclosed environments [ J ]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2020, 27(2):139-150.

[ 4 ] 张凤, 汤晓鹏, 刘兵飞. 机场飞行区无人驾驶清水车优化调度方法 [ J ]. 交通信息与安全, 2022, 40(2): 82-90.

ZHANG F, TANG X P, LIU B F. An optimization method for scheduling autonomous potable water service vehicles at airfields [ J ]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(2): 82-90.

[ 5 ] 柴琳果, 蔡伯根, 上官伟, 等. 基于间隙理论的智能车交叉口运行控制方法 [ J ]. 系统仿真学报, 2019,

- 31(9):1875-1882.
- CHAI L G, CAI B G, SHANGGUAN W, et al. Operation control method for connected and autonomous vehicles at intersection [J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(9):1875-1882.
- [ 6 ] 潘福全, 张游, 张丽霞, 等. 车路协同下基于间隙理论的交叉口智能控制策略[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1):44-52.
- PAN F Q, ZHANG Y, ZHANG L X, et al. Intelligent control strategy of intersection based on gap theory under vehicle-infrastructure cooperative environment [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2022, 41(1):44-52.
- [ 7 ] TACHET R, SANTI P, SOBOLEVSKY S, et al. Revisiting street intersections using slot-based systems[J]. *PLoS One*, 2016, 11(3):1-9.
- [ 8 ] XU B, LI S E, BIAN Y G, et al. Distributed conflict-free cooperation for multiple connected vehicles at unsignalized intersections [J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2018, 93:322-334.
- [ 9 ] ZHAO R, WANG K, LI Y, et al. Centralized cooperative control for autonomous vehicles at unsignalized all-directional intersections: A multi-agent projection-based constrained policy optimization approach [J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 267: 126153.
- [ 10 ] CHEN W Q, LIU Y. Gap-based automated vehicular speed guidance towards eco-driving at an unsignalized intersection. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2019, 7(1):147-168.
- [ 11 ] DAI P L, LIU K, ZHUGE Q F, et al. A convex optimization based autonomous intersection control strategy in vehicular cyber-Physical systems [C]. *Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People, & Smart World Congress. IEEE*, 2017.
- [ 12 ] 卢飞, 宋佳佳. 基于非支配排序的机场特种车辆调度[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(21): 9152-9159.
- LU F, SONG J J. Research on airport special vehicle scheduling based on non-dominated sorting [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(21):9152-9159.
- [ 13 ] 高伟, 王俊义. 机场特种服务保障车辆优化调度研究[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(4):17-23.
- GAO W, WANG J Y. Research on optimization and scheduling of airport special service support vehicles [J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(4):17-23.
- [ 14 ] 常玉林, 张成祥, 张鹏, 等. 车联网环境下基于间隙优化的无信号交叉口车速控制方法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2021, 35(3):10-17, 60.
- CHANG Y L, ZHANG CH X, ZHANG P, et al. A speed control method of non-signalized intersection based on gap optimization under connected vehicle environment [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(3):10-17, 60.
- [ 15 ] 肖金壮, 余雪乐, 周刚, 等. 一种面向室内 AGV 路径规划的改进蚁群算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(3):277-285.
- XIAO J ZH, YUE X L, ZHOU G, et al. An improved ant colony algorithm for indoor AGV path planning [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(3):277-285.
- [ 16 ] 刘平, 李振鹏, 蒋平, 等. 一种新的 V2I 下车速规划与模型预测控制方法 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(7):27-33.
- LIU P, LI ZH P, JIANG P, et al. A new vehicle speed planning and model predictive control method under V2I [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2022, 41(7):27-33.
- [ 17 ] SHAH G, TIAN D, MORADI-PARI E, et al. AROW: V2X-based automated right-of-way algorithm for cooperative intersection management [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(9):10983-10999.
- [ 18 ] JING S, ZHAO X, HUI F, et al. Cooperative CAVs optimal trajectory planning for collision avoidance and merging in the weaving section [J]. *Transportmetrica B*, 2020, 9(11):1-18.
- [ 19 ] 赵倩楠, 黄宜庆. 融合 A\* 蚁群和动态窗口法的机器人路径规划 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(2):28-38.
- ZHAO Q N, HUANG Y Q. Robot path planning based on A\* ant colony and dynamic window algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(2):28-38.
- [ 20 ] WU X, FREESE D, CABRERA A, et al. Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 34: 52-67.

### 作者简介



姬雨初,2008 年于中国矿业大学获得学士学位,2011 年于中国矿业大学获得硕士学位,2014 年于天津大学获得博士学位,现为中国民航大学讲师,主要研究方向为无线通信系统、物联网技术、机场运行理论、机场特种设备。

E-mail: jiyuchu@126.com

**Ji Yuchu** received his B. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2008, M. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2011, and Ph. D. degree from Tianjin University in 2014. Now he is a lecturer at Civil

Aviation University of China. His main research interests include wireless communication systems, internet of things technology, airport operation theory and airport special equipment.



闫宗吉(通信作者),2022 年获得唐山学院学士学位,现为中国民航大学硕士研究生,主要研究方向为无信号交叉路口车辆运行控制。

E-mail: y18232253659@163.com

**Yan Zongji** (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Tangshan University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Civil Aviation University of China. His main research interest includes vehicles operation control at unsignalized intersections.