



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402769

引用格式:常鑫,马光辉,高建树,等.考虑碰撞概率的机场场面交叉口冲突预警方法[J].科学技术与工程,2025,25(11):4776-4785.

Chang Xin, Ma Guanghui, Gao Jianshu, et al. Collision warning method for unmanned aerial vehicles in airports based on collision probability [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4776-4785.

考虑碰撞概率的机场场面交叉口冲突预警方法

常鑫,马光辉,高建树*,杨威屏,范翔宇

(中国民航大学,天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室,天津 300300)

摘要 在智慧机场迅速崛起的背景下,自动驾驶车辆的广泛部署要求有一个高效的安全运行系统。为了开发一种基于碰撞概率的机场无人驾驶车辆碰撞预警方法,以 ADS-B 数据为基础,考虑在滑行道路段和交汇点处飞机与车辆的交互情况,分别对这两种交互环境进行碰撞概率方法分析;然后通过对单车预警仿真图进行分析设置不同级别的预警阈值,当碰撞概率 $0.3 \leq p(c) \leq 0.5$ 时,跟随车辆进入二级预警状态,车辆制动加速度取值范围为 $0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}^2$;当 $p(c) > 0.5$ 时,跟随车辆进入一级预警状态,车辆制动加速度取最大值为 2 m/s^2 ;并根据设定的预警阈值分别对同一滑行道路和交汇点处进行仿真分析;仿真测试显示,基于碰撞概率的预警方法能够计算出车辆在滑行道路上行驶发生碰撞的概率,并根据相对应的预警阈值进行减速制动,有效降低了碰撞事故的可能性;通过蒙特卡洛随机模拟实验,得到交叉口处不同驾驶方式下的碰撞概率变化图,利用分级预警进行仿真分析,仿真实验表明无论哪种驾驶方式,该预警算法都能有效避免碰撞冲突,进一步证明所提方法具有较高的适应性。所构建的基于碰撞概率的机场无人驾驶车辆碰撞预警方法,能够有效避免机场场面碰撞冲突的发生,同时显著提升无人驾驶车辆在机场环境中的安全性。

关键词 机场交通管控与运行;无人驾驶车辆;滑行道;交叉冲突;碰撞预警

中图法分类号 U8;

文献标志码 A

Collision Warning Method for Unmanned Aerial Vehicles in Airports Based on Collision Probability

CHANG Xin, MA Guang-hui, GAO Jian-shu*, YANG Wei-ping, FAN Xiang-yu

(Key Laboratory of Technology and Equipment of Tianjin Urban Air Transportation System,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] Under the context of the rapid rise of smart airports, the widespread deployment of autonomous vehicles requires an efficient safety operation system. In order to develop a collision warning method based on collision probability for airport unmanned driving vehicles, using ADS-B data as a foundation, considering the interaction between aircraft and vehicles at taxiway segments and intersections. The collision probability analysis was conducted for these two types of interactive environments. Through the analysis of single-vehicle warning simulation diagrams, different levels of warning thresholds were set. When the collision probability was $0.3 \leq p(c) \leq 0.5$, the following vehicle entered the secondary warning state, and the vehicle braking acceleration took a value range of $0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}^2$. When $p(c) > 0.5$, the following vehicle entered the primary warning state, and the vehicle braking acceleration took the maximum value of 2 m/s^2 , and carrying out simulation analysis for the same taxiway and intersection according to the set warning threshold, the simulation test showed that the collision warning method based on collision probability could calculate the probability of collisions occurring during vehicle movement on the taxiway, and perform deceleration braking according to the corresponding warning threshold, effectively reducing the possibility of collision accidents. Through Monte Carlo random simulation experiments, the collision probability change diagram under different driving modes at crossroads was obtained, and the effectiveness of the warning algorithm was verified by using hierarchical warnings for simulation analysis. The simulation experiment proved that regardless of the driving mode, the warning algorithm could effectively avoid collision conflicts, further proving that the proposed method had high adaptability. A collision probability-based collision warning method was constructs for airport unmanned driving vehicles, which can effectively avoid the occurrence of airport field collision conflicts. Meanwhile, it can significantly improve the safety of unmanned driving vehicles in the airport environment.

[Keywords] airport traffic control and operation; unmanned vehicles; taxiway; cross conflict; collision warning

收稿日期:2024-04-16 修订日期:2024-07-30

基金项目:天津市教委科研计划(2024KJ094)

第一作者:常鑫(1991—),男,汉族,河南南阳人,博士,讲师。研究方向:智能交通及交通安全。E-mail:xchang@cauc.edu.cn。

*通信作者:高建树(1966—),男,汉族,河南太康人,博士,研究员。研究方向:机场智能装备。E-mail:2909488508@qq.com。

随着科学技术的飞速发展,无人驾驶车辆已逐渐成为现代交通系统的重要组成部分。特别是在机场这种特殊环境中,无人驾驶车辆在提高运营效率和降低人力成本方面展现出巨大潜力^[1-2]。总体而言,无人驾驶技术在机场的应用能够提高机场运营效率、安全性和环境可持续性,为机场管理、航空公司和旅客带来了显著的益处,同时也能推动航空行业的技术创新和发展^[3]。

与此同时,机场内复杂多变的交通环境也给无人驾驶车辆的安全管理带来了前所未有的挑战。高密度的车辆运行、行人穿行以及各种服务车辆的频繁进出,使得机场成为一个高风险的交通环境,尤其是在碰撞风险管理方面。在此背景下,研究和开发一种有效的机场无人驾驶车辆碰撞预警方法显得尤为重要。目前,基于预警机制的车辆碰撞预警系统主要分为两种类型:一种是基于碰撞时间(time-to-collision, TTC)模型,另一种则是基于碰撞距离(distance-to-collision, DTC)模型;何永明等^[4]开发了一种基于DTC的超高速公路上高速智能车与前方低速车辆的紧急制动避撞控制模型,通过设置不同的车速、道路参数和传感器参数,研究了在特定道路附着系数下,不同车速组合情况下的制动策略。崔学荣等^[5]提出了一种基于位置信息的多车协同碰撞预警协议,通过协议选择首发和候选转发车,并采用基于临节点密度的信道竞争机制,提高无线信道通信质量。陈秀锋等^[6]建立了一种基于动态安全车距的改进FVD(full velocity difference)跟驰模型,该研究通过构建可变车头时距模型、应用小振幅扰动分析和长波展开进行线性稳定性分析,推导出改进模型的临界稳定性条件,提高了车辆行驶安全性。赵建东等^[7]提出了一种结合理论跟驰模型和深度学习的车辆跟驰行为预测模型,考虑跟驰车辆的DTC,通过差分进化算法对理论模型参数进行标定,并利用深度学习技术精确捕捉车辆交通特征进行组合预测。张爱平等^[8]提出了一种计算碰撞点位置及车辆到达该点时间的方法,算法考虑了交通信号灯控制下的不同碰撞场景,通过MATLAB实验验证了算法的效果,结果显示车辆的速度和位置变化对碰撞情况有显著影响。张高峰等^[9]提出了一种基于城市信号交叉口车辆跟驰行为特性,通过自然驾驶试验数据对车辆在不同运动模式下与跟驰速度的相关性进行分析,判断出车头间距的特征值与跟驰速度具有较强的相关性。

但在无人驾驶应用中仅仅依靠已经设定好的安全时间和安全距离还是难以准确应对机场这种

复杂多变的环境,马小龙等^[10]提出了一个创新的方法来估算高速公路上同一车道内前后车辆发生碰撞的可能性,这一方法从制动减速的角度出发。通过分析可能引发前后车碰撞的三种场景,该研究计算了在各种场景下需要的最小制动减速度的发生概率,并将这个概率定义作为碰撞发生的概率。金媛媛等^[11]提出了一种以安全距离和安全时间作为评价标准,基于模糊理论制定车辆风险判定规则,分别对直行路段和交叉口路段作为实验场景,构建不同碰撞场景下的车辆碰撞概率模型使用碰撞概率来对车辆间的碰撞风险程度进行评估。赵睿等^[12]提出了一种面向交通事故高发的无信号交叉口车辆碰撞预警方法,该方法基于车辆到基础设施V2I(vehicle-to-infrastructure)通信技术获取相关信息,用于筛选存在碰撞风险的车辆及相关冲突区域,并提出了两级冗余碰撞预警方法来提高行车安全。

基于以上研究,提出一种基于ADS-B(automatic dependent surveillance-broadcast)数据的碰撞预警方法,旨在通过分析和计算各种可能影响碰撞风险的因素,如车辆动态、环境变量和其他交通参与者的行为,来实现更为精确和高效的碰撞预防。通过对现有研究的深入分析和新技术的应用,不仅对提升机场无人驾驶车辆的安全性具有重要意义,同时也为智能交通系统的发展和无人驾驶技术的安全应用提供了新的思路和方法。在此基础上,将进一步探讨该预警方法的具体设计和实现过程,以及通过实验验证其有效性和实用性。

1 研究对象和数据来源

1.1 车辆及航空器运行特性分析

中国民用航空总局通过第191号令《民用机场运行安全管理规定》(CCAR-140),为进入机场飞行区的车辆,例如跑道巡逻车和滑行引导车,制定了严格的最高速度限制和最小安全距离要求。这些措施的目的是保障机场操作的安全性。虽然车辆与飞机之间的距离低于最小规定间隔不必然导致直接事故,但已构成安全隐患。因此,为防止潜在冲突和事故,民航局规定车辆在接近航空器时,必须主动采取避让行动,如减速或慢行,确保飞机有优先通行权^[13]。

然而,这些规定的有效实施依赖于两个关键条件:一是车辆驾驶员必须能够及时观察到航空器的位置;二是驾驶员需要能够主观判断与航空器的接近程度,并据此采取相应的减速避让措施。车辆因其较高的灵活性和机动性,在受限空间内可轻松进

行转向、倒车、紧急制动及加速等多种操作,而驾驶员在冲突识别与响应操作方面的表现各不相同。引入无人驾驶车辆于机场,能有效补充人类驾驶员在冲突感知与应对措施上的不足,从而增强机场的安全性和运作效率。通常,车辆与飞机在机动区内发生冲突的情形出现在使用同一滑行道口或交叉口的场合,如图 1 和图 2 所示。

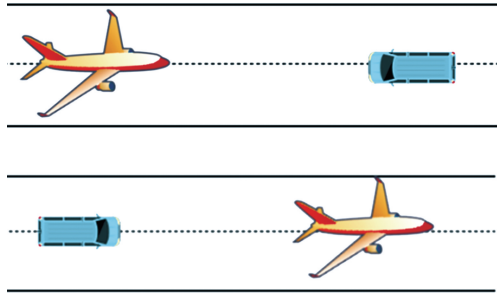


图 1 同一滑行道口
Fig. 1 On the same taxiway

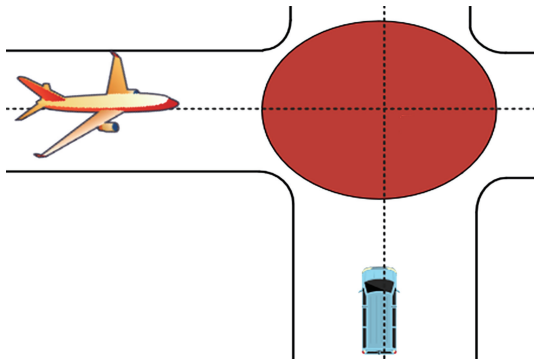


图 2 同一交叉口
Fig. 2 On the same intersection

1.2 数据获取方法

在机场飞行区内存在很多用于场面移动目标跟踪监视设备,该研究主要是自动驾驶车辆搭载 ADS-B

车载收发一体机及智能网络通信设备获取车辆行驶信息、周围飞机及车辆的行驶信息,并将接收到的 ADS-B 数据进行解析,最终获取的数据包括:时间、车辆或飞机编号、经纬度、速度、加速度以及航向等参数^[14-15],如表 1 为解析出的数据。

1.3 数据精度分析

为了提升车辆定位的精度和可靠性,在机场环境中,仅依靠 ADS-B 系统解析的位置数据可能不足以满足高精度的车辆定位需求^[16]。因此,通过将 ADS-B 系统解析得到的位置数据与网络 RTK (real-time kinematic) 数据进行高效融合,能够显著提高车载终端的定位精度。这种融合定位技术可以实现更高的精确度,使车辆定位的精度达到 10 cm 以内,同时确保速度精度达到 0.1 m/s。这样的提升对于确保机场内车辆的安全运行和避免潜在的碰撞风险至关重要,特别是在需要高度精确控制和监测的机场机动区域。

2 碰撞概率模型构建

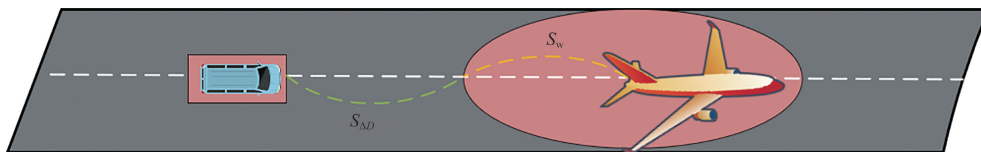
2.1 同一滑行道口碰撞概率分析

机场滑行道上同向移动目标间的碰撞事故主要以飞机和车辆为主,飞机和车辆有多种速度改变形式,图 3 中显示了在同一滑行道上飞机和车辆的一种冲突场景。为了避免产生的冲突现象^[17],首先,利用车载 ADS-B 一体机和其他传感器收集本车的位置、速度、加速度以及航向角等动态信息,并获取基于本车坐标系下的其他移动目标的位置数据。接下来,通过无迹卡尔曼滤波技术对飞机和车辆位置信息进行处理,估计出当前位置的最优值。最后,通过坐标变换技术,把飞机和车辆的位置信息转换成以本车为原点的笛卡尔坐标系下的坐标。

表 1 ADS-B 数据格式示意

Table 1 Indicates the ADS-B data format

ICAO 地址	国家	经度/(°E)	纬度/(°N)	高度/m	航向/(°)	速度/(km·h ⁻¹)
78062e	中国	31.230 3	121.326 2	0.0	341.1	73.915
78064e	中国	36.789 0	118.152 3	0.0	321.2	194.921
7802b3	中国	30.674 5	121.277 9	0.0	163.0	145.243



S_w 表示受飞机尾流影响需保持的安全间距; $S_{\Delta D}$ 表示车辆察觉飞机速度变化后,车辆与飞机的制动距离差值

图 3 同一滑行道口冲突

Fig. 3 Conflict with the same taxiway

2.1.1 场面机动目标制动距离

根据运动学规律^[18-20],移动目标的制动过程可划分为3个阶段:驾驶员发现冲突并立即制动;进行制动操作至制动力最大;保持最大制动力做匀减速运动直至停止。其制动过程如图4所示。

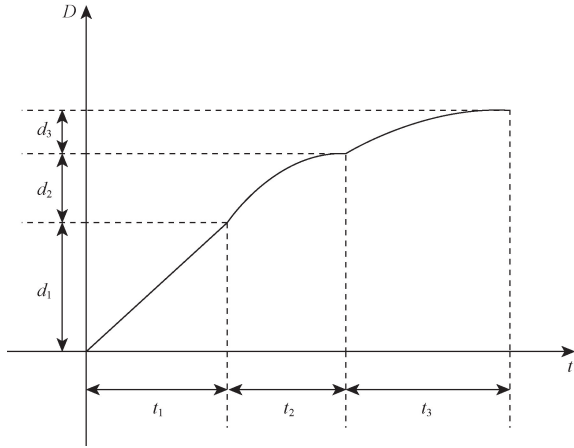


图4 移动目标的制动过程

Fig. 4 Braking process of moving target

假设车辆制动初始速度为 v_1 , 最大加速度为 a_1 。

(1) t_1 阶段: 驾驶员发现冲突并立即制动阶段。

t_1 为驾驶员的反应时间, 移动目标未产生制动力, 所以移动目标仍以初始速度行驶, 可得在该阶段移动目标行驶的距离 d_1 为

$$d_1 = v_1 t_1 \quad (1)$$

(2) t_2 阶段: 进行制动操作至制动力最大阶段。

在制动阶段, 制动力逐渐增大至最大, 做变减速运动, 即

$$\frac{dv}{dt} = kt \quad (2)$$

式(2)中: $k = -\frac{a_1}{t_2}$, 对式(2)进行积分可得

$$\int dv = \int kt dt \quad (3)$$

积分结果为

$$v = v_1 + \frac{1}{2} kt^2 \quad (4)$$

$$\frac{ds}{dt} = v_1 + \frac{1}{2} kt^2 \quad (5)$$

式(5)中: s 为 t_2 阶段内某时刻 t 的制动距离, 对式(5)两边进行积分, 可得

$$\int ds = \int \left(v_1 + \frac{1}{2} kt^2 \right) dt \quad (6)$$

则有

$$s = v_1 t + \frac{1}{6} kt^3 \quad (7)$$

则在制动力增长阶段, 目标行驶的距离 d_2 为

$$d_2 = v_1 t_2 - \frac{1}{6} a t_2^2 \quad (8)$$

(3) t_3 阶段: 保持最大制动力做匀减速运动直至停止阶段。

在制动力不变阶段, 设此时的初速度为 v_e , 则

$$v_e = v_1 + \frac{1}{2} kt_2^2 = v_1 - \frac{a_1}{2} t_2 \quad (9)$$

此阶段目标所行驶的距离 d_3 为

$$d_3 = \frac{v_e^2}{2a_{\max}} = \frac{v_1^2}{2a_1} - \frac{v_1 t_2}{2} + \frac{a_1 t_2^2}{8} \quad (10)$$

从驾驶员反应到制动结束过程行驶距离由 d_1 、 d_2 和 d_3 组成, 则车辆制动距离 D_1 为

$$D_1 = v_1 \left(t_1 + \frac{t_2}{2} \right) + \frac{v_1^2}{2a_1} - \frac{a_1 t_2^2}{24} \quad (11)$$

在跟随飞机行驶过程中, 跟随车辆需在飞机意外减速时迅速采取刹车措施。为防止与飞机发生碰撞, 跟随车辆须保持一定的安全距离。跟随车辆在察觉到飞机速度发生变化时, 即刻进入警觉状态, 进而响应飞机的减速行为, 该响应从飞机开始减速的第二阶段起效。基于此情境的分析, 假设飞机制动初始速度为 v_2 , 最大加速度为 a_2 , 可以估算出前方飞机所需的制动距离 D_2 为

$$D_2 = \frac{v_2 t_2}{2} + \frac{v_2^2}{2a_2} - \frac{a_2 t_2^2}{24} \quad (12)$$

$$S_{\Delta D} = D_1 - D_2 = v_1 t_1 + (v_1 - v_2) \frac{t_2}{2} +$$

$$\left(\frac{v_1^2}{2a_1} - \frac{v_2^2}{2a_2} \right) - \frac{a_2 t_2^2}{24} \quad (13)$$

则车辆与飞机需要保持的最小安全距离为

$$S_{\min B} = S_r + S_{\Delta D} + S_e + S_w \quad (14)$$

临界预警距离为

$$S_B = S_r + S_{D1} + S_e + S_w \quad (15)$$

式中: S_r 为移动目标安全尺寸; S_{D1} 表示移动目标车辆的制动距离; S_e 为接收信号的延时误差产生的行驶距离。

2.1.2 碰撞概率的计算

由于交通事故的出现均是一种概率, 而非固定数值, 碰撞风险与车辆间的跟随距离并非成直线关系, 其概率值介于 0 ~ 100%^[21-22]。当飞机与车辆保持安全的距离时, 它们通常能够安全地行驶而很少发生事故, 这种情况下发生碰撞的可能性相对较小(概率小于 5%)。然而, 如果前方飞机突然遇到紧急情况, 使得两目标之间的距离减少到低于最安全刹车距离, 那么碰撞的可能性就会急剧上升, 事故概率可高达 100%。基于这种碰撞概率的变化, 本文中采取了分

段函数的方法来进行概率计算。即

$$P(c) = \begin{cases} 0, & S_1 \geq S_B \\ \frac{S_1 - S_B}{S_{\min B} - S_B} \times 100\%, & S_{\min B} < S_1 \leq S_B \\ 1, & S_1 < S_{\min B} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: S_1 为两机动目标实际跟随距离; S_B 为车辆 A 临界预警距离; $S_{\min B}$ 为车辆 A 最小安全制动距离;

2.2 同一交叉口碰撞概率

机场地面运动的特殊性质决定了其与其他交通领域存在显著的差异。场面上飞机和特种车辆的各类尺寸、滑行速度以及多样化的运动路径,使得交叉路口的安全性问题变得尤为复杂。下面针对机场飞行区滑行道交叉路口冲突热点区域进行分类研究,通过计算车辆和飞机在交叉路口的碰撞概率采取相应的预警手段,确保飞机和车辆安全运行。如图 5 所示为常见的交叉口冲突热点区域发生的冲突情况。

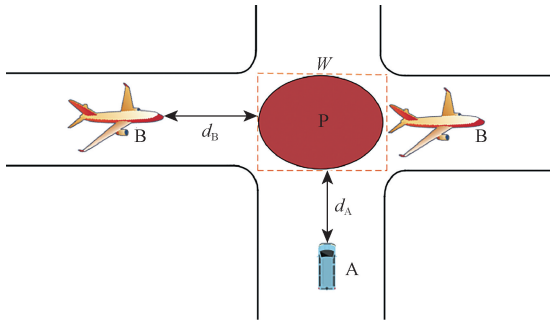


图 5 同一交叉口冲突

Fig. 5 Conflict at the same intersection

2.2.1 交叉路口处碰撞概率的分析

在机场场面运行环境中,若飞机与车辆在交叉口处相遇,飞机通过优先级大于车辆的通过优先级,如图 5 所示,假设以飞机 B 在前,车辆 A 在后, P 表示在交叉路口的冲突热点区域,其中飞机先到达冲突点,则 A、B 发生碰撞的条件是为

$$t_B - t_A \leq \Delta t \quad (17)$$

式(17)中: t_B 飞机 B 从当前位置到离开交叉路口的时间, s; t_A 车辆 A 从当前位置到离开交叉路口的时间, s; Δt 为临界时间间隔,在保证安全的前提下,车辆 A 等待飞机 B 完全通过交叉路口的最小时间间隔, s。

设交叉路口处长宽均为 W , L_A 为车辆 A 的长度, d_A 为车辆前端距离交叉路口的距离,则车辆 A 从当前位置到完全行驶出冲突热点区域所需要经过的距离为 $d_A + L_A + W$, L_B 为飞机 B 的长度, d_B 为飞机前端距离交叉路口的距离,飞机 B 从当前位置到完

全行驶出冲突热点区域所需要经过的距离为 $d_B + L_B + W$; v_A 、 v_B 分别为当前时刻车辆 A、B 的行驶速度,则得到车辆 A、B 从当前位置到行驶出冲突热点区域的时间为

$$\begin{cases} t_A = \frac{d_A + L_A + W}{v_A} \\ t_B = \frac{d_B + L_B + W}{v_B} \end{cases} \quad (18)$$

车辆在行驶时的速度具有随机性,所以根据上述公式和可知 A、B 两运动目标离开冲突区域的时间也具有不确定性。对于车辆 A 来说,每一个车速 v 都对应着一个车辆 A 离开冲突区域的时间 t ,这个时间 t 的上下限由车辆 A 能达到的最大行驶速度 v_{\max} 和 v_{\min} 决定,即

$$t_A \in \left\{ t \mid \frac{d_A + L_A + W}{v_{A\max}} \leq t \leq \frac{d_A + L_A + W}{v_{A\min}}, t \in N \right\} \quad (19)$$

定义 A 车离开冲突热点区域时间集合 T_A , 则其可以表示为

$$T_A = \{ t \mid t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, t \in N \} \quad (20)$$

对于某一时刻任何一个元素 $v \in v_A$ 都有一个 $t \in T_A$, 集合 v_A 和集合 T_A 满足一一对应的关系。

同理可得飞机 B 的速度集合 v_B 、离开冲突区域的时间集合 T_B 。

由以上分析可知, A、B 两运动目标的离开行为时间受到每一时刻速度影响,不同时刻的速度对应不同的离开行为时间。

2.2.2 碰撞概率的计算

定义 1 (碰撞判定规则) 设 A、B 两运动目标从当前位置到离开所需时间分别是 t_A 、 t_B , 若某一时刻 $|t_A - t_B| > \Delta t$ 则判定两运动目标不会发生碰撞。

定义 2 事件 M 为 A 车离开交叉口之后, 飞机 B 到达交叉口; 事件 N 为飞机 B 离开交叉口之后, A 车到达交叉口; 交叉口的长和宽均为 W , 则事件 M 可以用公式进行表达为

$$\begin{aligned} P(M) &= P\left(\frac{d_A + L_A + W}{v_A} < \frac{d_B}{v_B}\right) \\ &= P\left(v_B < \frac{d_B}{d_A + L_A + W} v_A\right) \end{aligned} \quad (21)$$

同理事件 N 可以写为

$$\begin{aligned} P(N) &= P\left(\frac{d_B + L_B + W}{v_B} < \frac{d_A}{v_A}\right) \\ &= P\left(v_B < \frac{d_B + L_B + W}{d_A} v_A\right) \end{aligned} \quad (22)$$

分析式(22)、式(23)可知, 车辆不发生碰撞的概率为

$$P(Q) = P(M \cup N) \tag{23}$$

由于事件 M 和事件 N 不可能同时发生,因此上式公式可以写为

$$P(Q) = P(M) + P(N) \tag{24}$$

飞机和车辆在接近交叉路口时的速度具有随机性,受到驾驶员行为的影响,具体表现为驾驶员以怎样的概率来选择一个行驶速度。目前有两种不同的速度分布,分别是均匀分布和高斯分布,根据机场内移动目标在交叉口处的行驶规律,驾驶员在改变速度时受到上一时刻速度的影响,通常会以一个较大的概率选择上一时刻加速度附近的其他速度,用一个较小的概率选择与上一时刻速度差距比较大的速度,综合考虑,本文中采用均匀分布的情况。

则车辆 A 和飞机 B 的速度密度函数分别可表示为

$$\begin{cases} f(v_A) = \begin{cases} \frac{1}{v_{Amax} - v_{Amin}}, & v_{Amin} \leq v_A \leq v_{Amax} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ f(v_B) = \begin{cases} \frac{1}{v_{Bmax} - v_{Bmin}}, & v_{Bmin} \leq v_B \leq v_{Bmax} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \tag{25}$$

式(25)中: v_{Amax} 和 v_{Amin} 分别为车辆 A 基于当前时刻能达到的最大速度和最小速度,同理 v_{Bmax} 和 v_{Bmin} 为飞机 B 的最大和最小速度,车辆 A 和飞机 B 在滑行道路上的最大速度不能超过 50 km/h,车辆 A 和飞机 B 均是相互独立的,所以不发生碰撞概率可写为

$$P(Q) = \iint S f(v_A, v_B) dv_A dv_B \tag{26}$$

S 表示的区域如图 6 所示。机场飞行区内飞机和车辆在接近交叉口时都会进行减速,以车辆 A 为例,车辆 A 减速至最小速度 v_{Amin} 所行驶的最小距离为

$$X_{min} = (v_A^2 - v_{Amin}^2) / 2a_{Amax} \tag{27}$$

式(27)中: a_{Amax} 为车辆 A 采取的最大制动加速度,

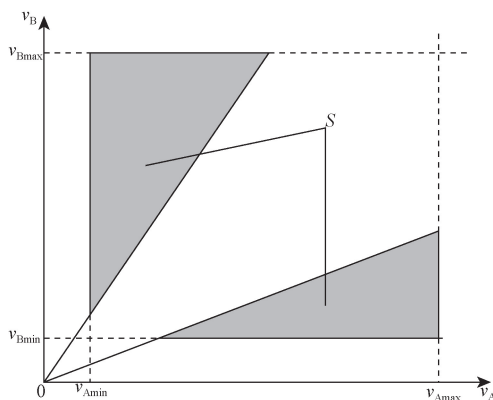


图 6 积分区域 S

Fig. 6 Integration region S

如果 $X_{min} > X_A$, 表示车辆只进行减速行驶,如果 $X_{min} \leq X_A$, 车辆 A 的速度变化过程为先减速到最小速度 v_{Amin} 后匀速行驶,由于在交叉口车辆可能会减速至车辆的速度为 0,所以可将飞机和车辆在交叉口处的最小速度为 0,则最小速度可表示为

$$v_{Amin} = \begin{cases} \sqrt{v_A^2 - 2a_{Amax}X_A}, & X_{min} < X_A \\ 0, & X_{min} > X_A \end{cases} \tag{28}$$

同理可以计算飞机 B 在交叉口处的最小速度。从而计算出车辆和飞机在交叉口处发生碰撞的概率。

3 仿真实验验证和结果分析

为了确定合适的分级预警阈值,需要通过 Matlab 对路段单车模型进行分级阈值测试,设定前方为交叉口冲突热点或前方车辆是静止不动的,车辆以匀速模式向前行驶,改变车辆的速度进行多次仿真,如图 7 所示为碰撞概率随时间的变化图。

根据单车预警仿真图可看出,碰撞概率 $p(c)$ 在 0.3 时波动较大,在 0.5 之后呈线性增长,故本文设置二级预警状态:①当碰撞概率 $0.3 \leq p(c) \leq 0.5$ 时,跟随车辆进入二级预警状态;②当 $p(c) > 0.5$ 时,跟随车辆进入一级预警状态。

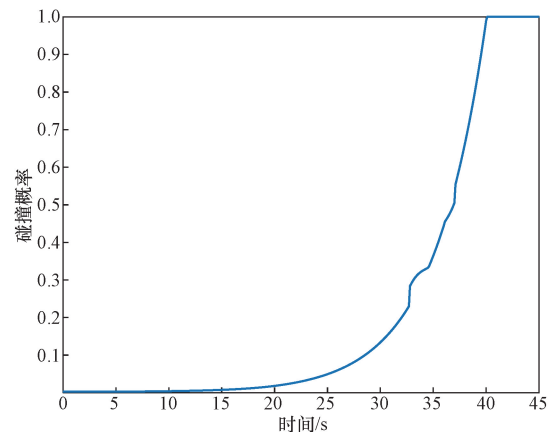


图 7 单车预警仿真

Fig. 7 Bicycle early warning simulation

3.1 同一滑行道上仿真分析

在滑行道路段实验仿真场景中,以跟随车辆作为研究目标。目标车辆在滑行路段中同时采集自车和前方飞机的运行数据,并将采集的数据进行卡尔曼降噪处理,处理后的数据会通过滑行道路段车辆预警模型进行安全分析判断车辆当前时刻所处的安全状态。在本文中,为了仿真实验的可操作性,设定整个仿真实验过程中飞机一直保持匀速行驶,跟随车只能通过制动减速进行避撞。一旦跟随车辆出现预警情况,车辆会根据相应预警等级减速制动,直到车辆重新进入安全状态。当车辆处于二

级预警状态时,车辆采用较小的减速度减速;处于一级预警状态时,车辆以最大制动加速度进行减速,通过 Simulink 搭建的滑行道路段碰撞预警的仿真环境进行仿真分析。

受飞机尾流的影响,设定初始时刻飞机和跟随车的初始间距设为 300 m,仿真时间设置为 30 s。仿真开始后,初始时刻飞机速度为 8 m/s,并以 0.7 m/s^2 的制动加速度进行减速至 3 m/s 之后进行匀速运动,车辆速度为 7 m/s 匀速前进,设定当碰撞概率 $0.3 \leq p(c) \leq 0.5$ 时,跟随车辆进入二级预警状态;当 $p(c) > 0.5$ 跟随车辆进入一级预警状态,以最大制动加速度进行减速,并进行仿真分析,仿真结果如图 8 所示。

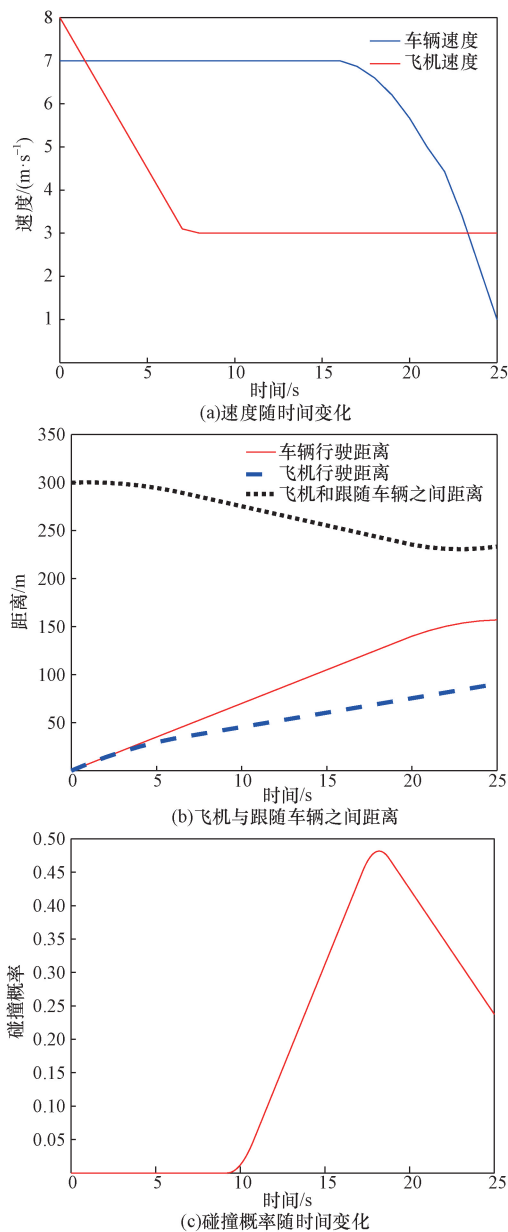


图 8 同一滑行道路仿真结果

Fig 8 Simulation results of the same taxiway

从图 8 中可以分析出跟随车大约在 15 s 之前碰撞概率未达到碰撞概率预警值,因此车速一直保持不变,由于两车之间的距离逐渐缩小,跟随车的碰撞预警概率在不断增大;大约在 15 s 之后车辆进入了二级预警状态,车辆开始出现了减速,在 15 ~ 18 s 由于临界预警距离开始逐渐减小,碰撞概率仍然处于上升,18 ~ 23 s 跟随车和飞机之间的间距又开始逐渐增大,碰撞概率不断下降,23 s 后车辆重新回到安全状态。预警整体试验效果良好。

3.2 同一交叉口处仿真分析

在交叉口实验仿真场景中,碰撞概率与不同时刻通过交叉口的时间有关,通过 Matlab 编程实现交叉口碰撞概率的仿真实验,选取飞机和车辆作为研究对象,对影响碰撞概率算法的参数进行讨论。首先设置实验的控制变量仍为运动目标的速度,不同方向上的飞机和车辆距离交叉口的初始距离设置为 100 m,在滑行道上行驶的飞机和车辆其最大速度范围为 0 ~ 50 km/h。初始时刻的飞机和车辆的速度为 (20 ~ 40 km/h) 某一相同的速度,根据车辆(目标车)和飞机的速度设置了实验仿真条件。交叉口实验场景相关参数如表 2 所示。

根据表 2 中的相关参数进行仿真分析,设置初始时刻车辆和飞机的速度相同为 25 km/h,仿真时间为 20 s,本文中设置二级预警状态:①当碰撞概率 $0.3 \leq p(c) \leq 0.5$ 时,跟随车辆进入二级预警状态;②当 $p(c) > 0.5$ 跟随车辆进入一级预警状态,并进行相应的仿真实验,仿真结果如图 9 所示。

从图 9 中可以分析出:初始时刻飞机和车辆离交叉口较远,碰撞概率为 0,当车辆和飞机不断接近交叉口时,碰撞概率不断上升,车辆正常行驶在 12 s 左右,两目标距离交叉口很近,碰撞概率急速上升,达到二级碰撞预警后进行制动减速,由于距离交叉口较近,碰撞概率先上升后下降,18 s 后飞机通过交叉口,碰撞预警为 0,整体效果良好。

考虑飞机和车辆在遇到交叉口时均会提前进行

表 2 交叉口实验场景相关参数
Table 2 Relevant parameters of intersection experiment scene

参数	数值
车辆前端到交叉口的距离/m	100
飞机前端到交叉口的距离/m	100
车辆的长度/m	4.5
飞机的长度/m	40
滑行道路宽度/m	60
飞机通过交叉口的平均时间/s	10
车辆通过交叉口的平均时间/s	8
路面状况	路面干燥

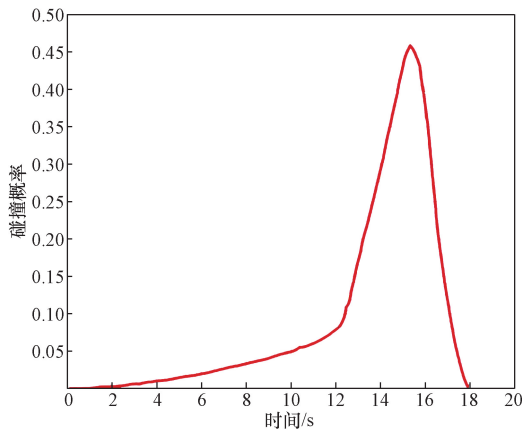


图9 交叉口碰撞概率仿真结果

Fig.9 Simulation results of intersection collision probability

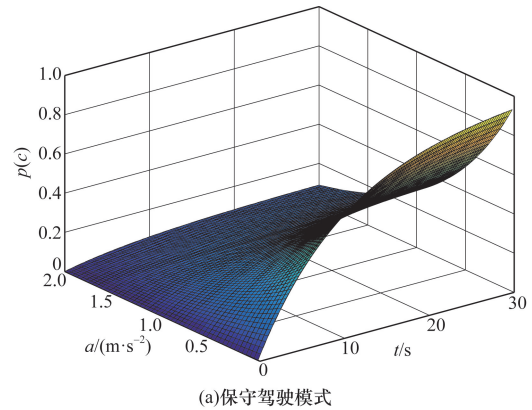
减速行驶,可根据制动加速度的制动频率对应不同的驾驶方式,在相同制动加速度条件下减速越频繁,说明驾驶方式越保守,反之则越激进,根据制动减速频率可将驾驶方式分为激进、保守和稳定;设定仿真初始条件与表2中相同,仿真过程重复200次取平均值并进行仿真分析,观察车辆在不同驾驶模式下与飞机发生碰撞概率 $p(c)$ 随时间 t 和制动加速度 a 的变化趋势。

从图10中可以看出,在相同的制动加速度下,激进驾驶方式下碰撞概率随时间的增长上升速率较快,发生碰撞的可能性大,保守驾驶模式下安全性相对较高,稳定驾驶介于两者之间。制动加速度的大小与车辆发生碰撞的概率成反比,说明较大的制动加速度可以产生较大的安全时间间隔,从而降低碰撞概率。本文中通过设置二级预警状态,选取3种驾驶模式下的制动加速度为 0.5 m/s^2 ,并进行相应的仿真实验,仿真结果如图11所示。

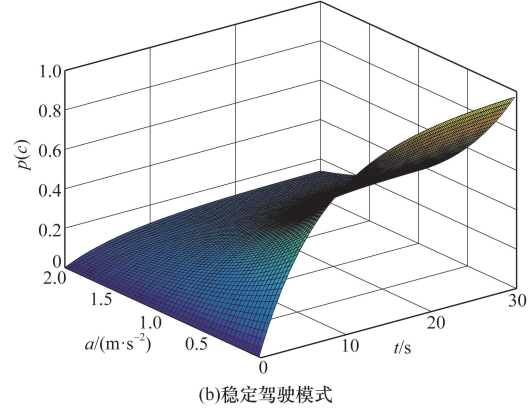
从图11中可以看出,在分级预警的作用下3种模式下碰撞概率随时间变化的图像,激进驾驶方式下车辆发生碰撞的概率上升速度较快,在达到一级预警之后,车辆进行紧急制动,碰撞概率停滞上升后迅速下降。保守驾驶模式下减速频率较高,未达到碰撞预警的设定值,安全性高,但牺牲了车辆的运行效率,稳定驾驶方式能在满足低风险水平的同时兼顾运行效率;无论哪种驾驶方式,该预警算法都能有效地进行预警操作,避免发生碰撞,证明了本文提出的碰撞预警算法的广泛适应性。

4 结论

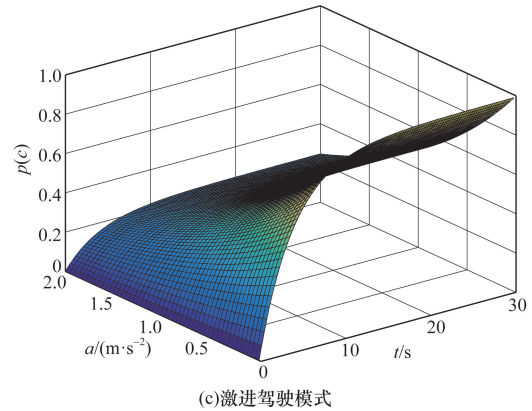
该研究成功开发了一种基于碰撞概率的机场无人驾驶车辆碰撞预警方法。考虑到机场飞行区内飞机与车辆存在的冲突场景并进行单独分析,通过避让原则、冲突感知和碰撞概率的计算,建立车辆



(a)保守驾驶模式



(b)稳定驾驶模式



(c)激进驾驶模式

图10 不同驾驶模式下仿真结果

Fig.10 Simulation results under different driving modes

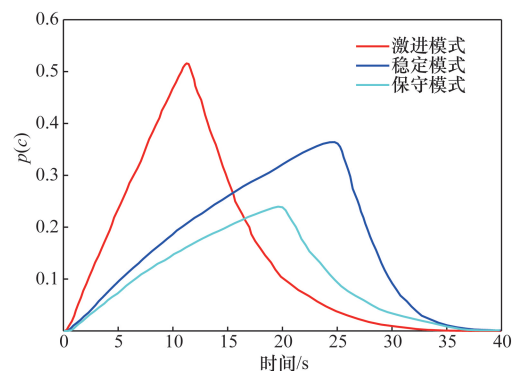


图11 不同驾驶模式下碰撞概率变化图

Fig.11 Variation of collision probability under different driving modes

与飞机碰撞评估模型。

进行仿真实验验证,通过单车预警仿真分析设定分级预警值,然后对滑行道路段和交汇点处的仿真实验分析,研究发现该方法显著提升了无人驾驶车辆在机场环境中的安全性。在模拟的机场滑行道行驶中,使用本预警系统的无人驾驶车辆在面临潜在碰撞风险时,能够及时调整行驶速度,有效避免与其他车辆或航空器的碰撞。

机场交通规则规定在交叉路口需要进行减速,该研究基于减速频率进行仿真实验,考虑交叉口处不同驾驶方式对碰撞概率的影响,针对不同驾驶方式下进行分级预警,从仿真图中分析可知,无论哪种驾驶方式,都能有效避免碰撞冲突,进一步证明所提方法具有较高的适应性。

当前研究主要集中在单车预警和特定的滑行道仿真实验,缺乏对多飞机多车辆协同工作的深入研究,未覆盖机场交通场景中所有移动目标,在后续的研究中,引入多飞机多车互动模型,研究多移动目标在复杂交通环境中的碰撞概率以及协同预警策略,优化无人驾驶车辆在机场内的整体安全性和工作效率。

参 考 文 献

- [1] Arnold E, Al-Jarrah O Y, Dianati M, et al. A survey on 3D object detection methods for autonomous driving applications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(10): 3782-3795.
- [2] 钱玉宝, 余米森, 郭旭涛, 等. 无人驾驶车辆智能控制技术发展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 3846-3858.
Qian Yubao, Yu Misen, Guo Xutao, et al. Development of intelligent control technology for driverless vehicles [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 3846-3858.
- [3] 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 Feng, Tang Xiaopeng, Liu Bingfei. Optimal scheduling method of unmanned water vehicles in airport flight area [J]. Traffic Information and Safety, 2022, 40(2): 82-90.
- [4] 何永明, 冯佳, 权聪, 等. 基于联合仿真的超高速公路车辆制动避撞系统[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(10): 19-28.
He Yongming, Feng Jia, Quan Cong, et al. Braking collision avoidance system for vehicles on super expressway based on co-simulation [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(10): 19-28.
- [5] 崔学荣, 钮铭坤, 李娟, 等. 基于位置信息的多车协同碰撞预警协议[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4534-4539.
Cui Xuerong, Niu Mingkun, Li Juan, et al. Multi-vehicle collaborative collision warning protocol based on location information [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(11): 4534-4539.
- [6] 陈秀锋, 赵凤阳, 王成鑫, 等. 基于动态安全车距的车辆跟驰模型及稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2105-2110.
Chen Xiufeng, Zhao Fengyang, Wang Chengxin, et al. Vehicle following model and stability analysis based on dynamic safety vehicle distance [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 2105-2110.
- [7] 赵建东, 焦岚馨, 赵志敏, 等. 考虑侧向车换道影响的理论和数据组合驱动的车辆跟驰模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 10-19.
Zhao Jiandong, Jiao Lanxin, Zhao Zhimin, et al. Vehicle following model driven by combination of theory and data considering the influence of lateral lane change [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(6): 10-19.
- [8] 张爱平, 李德敏, 张光林, 等. 基于碰撞点时间估计的车辆碰撞预警算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(2): 53-57, 63.
Zhang Aiping, Li Demin, Zhang Guanglin, et al. Vehicle collision warning algorithm based on time of collision point estimation [J]. Computer Engineering, 2019, 45(2): 53-57, 63.
- [9] 张高峰, 凌云洁, 龙岩松, 等. 基于自然驾驶数据的信号交叉口车辆跟驰行为特征分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15690-15699.
Zhang Gaofeng, Ling Yunjie, Long Yansong, et al. Analysis of vehicle following behavior characteristics at signal intersections based on natural driving data [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15690-15699.
- [10] 马小龙, 余强, 刘建蓓. 基于路侧毫米波雷达的车辆碰撞概率计算方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1): 57-66.
Ma Xiaolong, Yu Qiang, Liu Jianbei. Based on side outline of millimeter wave radar vehicle collision probability calculation method [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 57-66.
- [11] 金媛媛, 刘明剑, 牛浩骅, 等. 基于交叉路口碰撞概率的车辆碰撞预警方法研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(9): 7-12, 18.
Jin Yuanyuan, Liu Mingjian, Niu Haoyuan, et al. Research on vehicle collision warning method based on intersection collision probability [J]. Scientific and Technological Innovation and Application, 2022, 12(9): 7-12, 18.
- [12] 赵睿, 李云, 胡宏宇, 等. 基于V2I通信的交叉口车辆碰撞预警方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(4): 1019-1029.
Zhao Rui, Li Yun, Hu Hongyu, et al. Vehicle collision warning method based on V2I communication [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2023, 53(4): 1019-1029.
- [13] 张璐瑶. 面向机场滑行引导的安全告警模型研究与系统设计 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
Zhang Luyao. A safety warning model in the airfield to guide research and system design [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [14] 李敏. 机场场面移动目标监视和避撞技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
Li Min. Research on moving target surveillance and collision avoidance technology of airport scene [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [15] 耿文博, 董兵. 基于ADS-B的通用航空监视系统规划[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(22): 9-12.

- Geng Wenbo, Dong Bing. Planning of general aviation surveillance system based on ADS-B[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2022, 12(22): 9-12.
- [16] 陈盛祝, 韩丙同, 贾少才等. 基于 ADS-B 和 WEB 的雷达精度分析系统[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 208-214.
Chen Shengzhu, Han Bingtong, Jia Shaocai, et al. Based on the analysis of the radar precision of ADS-B and WEB system[J]. Computer Measurement and Control, 2024, 32(5): 208-214.
- [17] 余洲, 张兆宁. 基于模糊数的机场滑行冲突预测方法[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 90-95.
Yu Zhou, Zhang Zhaoning. Airport taxi conflict prediction method based on fuzzy number[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2023, 33(3): 90-95.
- [18] 吴振亚, 王明辉, 张瑞平, 等. 一种基于 ADS-B 的雷达误差实时融合校正算法[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 102-106, 115.
Wu Zhenya, Wang Minghui, Zhang Ruiping, et al. A real-time radar error fusion correction algorithm based on ADS-B[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 102-106, 115.
- [19] Chen Y M, Hu C, Qin Y C, et al. Path planning and robust fuzzy output-feedback control for unmanned ground vehicles with obstacle avoidance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2021, 235(4): 933-944.
- [20] 孙航, 李志军, 张琳琳, 等. 基于 OEDR 和 ODC 的自动驾驶汽车实际道路测试评价技术研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(6): 842-850.
Sun Hang, Li Zhijun, Zhang Linlin, et al. Research on practical road test and evaluation technology of autonomous vehicle based on OEDR and ODC[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(6): 842-850.
- [21]]Hu C, Zhao L, Cao L, et al. Steering control based on model predictive control for obstacle avoidance of unmanned ground vehicle[J]. Measurement and Control, 2020, 53(3/4): 501-518.
- [22] 魏凌涛, 王翔宇, 邱彬, 等. 基于自适应预瞄路径的自动驾驶车辆寻迹和避障控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(6): 184-193.
Wei Lingtao, Wang Xiangyu, Qiu Bin, et al. Tracking and obstacle avoidance control of autonomous vehicle based on adaptive preview path[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(6): 184-193.