

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.06.002

复杂机场“机-车-场道”交通仿真模型研究

苏佳明^{1,2,3}, 胡明华^{1,2}, 尹嘉男^{1,2,3}, 刘颖俐^{1,2}

(1. 南京航空航天大学空中交通管理系统全国重点实验室, 南京 211106; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 3. 中国民用航空局民航机场安全与运行工程技术研究中心, 北京 101318)

摘要: 机场场面运行涉及多运行主体以及复杂运行环境, 在机场结构相对固定的前提下, 机场场面逐渐成为空中交通网络运行效率提升的瓶颈区域。提出了一种基于 Nagel-Schreckenberg (NS) 元胞自动机的机场场面运行模型, 即 Airport surface operations model (ASOM)。ASOM 考虑了 4 项航空器运行特征以及车辆与航空器在机场场面的协同运行机制, 可在精准刻画机场场面区域航空器滑行道以及车辆行车道结构的同时, 高精度模拟机场场面多类型航空器以及车辆运行过程, 实现复杂机场“机-车-场道”协同仿真。使用深圳宝安国际机场的真实机场结构数据以及广播式自动相关监视 (Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B) 数据进行案例分析, 仿真结果与真实运行的数据之间的误差平均值 (Average magnitude of error, AME) 小于 6%, 证明了 ASOM 可以准确写实刻画机场场面运行。

关键词: 空中交通管理; 机场场面交通建模; 元胞自动机; 协同机制

中图分类号: V355 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2024)06-0994-08

An “Aircraft-Vehicle-Surface” Traffic Simulation Model in Complex Airports

SU Jiaming^{1,2,3}, HU Minghua^{1,2}, YIN Jianan^{1,2,3}, LIU Yingli^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. Engineering Research Center of Airport Safety and Operations, Civil Aviation Administration of China, Beijing 101318, China)

Abstract: Airport surface operations involve multiple operational entities and complex operating environments. Given its relatively fixed structure, the airport surface has gradually become a bottleneck area for improving the efficiency of air traffic network operations. This paper proposes an airport surface operations model (ASOM) based on the Nagel-Schreckenberg (NS) cellular automaton. ASOM considers four aircraft operational characteristics and the cooperative operational mechanism between vehicles and aircraft. It accurately characterizes the aircraft taxiways and vehicle operation path structures while providing high-precision “aircraft-vehicle-surface” coordination simulation. Case studies are conducted using real airport structural data and surface monitoring data from Shenzhen Bao'an International Airport, and the average magnitude of error (AME) between the simulation results and the real operational data is less than 6%, demonstrating the accuracy and applicability of ASOM in depicting airport surface operations.

Key words: air traffic management; airport surface traffic modeling; cellular automata; cooperative mechanism

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52002178); 江苏省自然科学基金项目 (BK20190416); 民航机场安全与运行工程技术研究中心开放课题 (KFKT2023-02)。

收稿日期: 2023-10-23; **修订日期:** 2023-12-27

通信作者: 尹嘉男, 男, 副研究员, E-mail: j.yin@nuaa.edu.cn。

引用格式: 苏佳明, 胡明华, 尹嘉男, 等. 复杂机场“机-车-场道”交通仿真模型研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 994-1001. SU Jiaming, HU Minghua, YIN Jianan, et al. An “aircraft-vehicle-surface” traffic simulation model in complex airports[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 994-1001.

随着全球航空运输市场蓬勃发展,机场建设规模日益庞大,复杂机场作为飞行繁忙地区的航空枢纽和主干航线网络的关键节点,正面临严峻的机场拥堵、航班延误,以及由此引发的一系列社会问题^[1]。复杂机场场面运行涉及航空器、保障车辆等多运行主体,存在航空器滑行道、车辆运行车道等交织纵横复杂的运行环境,加之航空器(车辆)在机场场面上的控制几乎完全掌握在飞行员(驾驶员)的手中,航空器(车辆)的运动存在许多不确定性,机场场面区域逐渐成为提升空中交通网络运行效率的瓶颈^[2]。因此,在复杂运行环境下,如何对机场场面运行区域进行精准建模,快速写实刻画航空器以及车辆的运行轨迹,识别化解多类型机场场面运行冲突,充分利用机场有限资源,有效提升机场场面运行效率,最终实现机场场面运行扩容增效与排堵保畅,已成为全球航空运输业迫切需要解决的重点和难点问题。

目前,针对航空器的交通建模研究已经取得了显著成果^[3],学者们已成功研发了一系列软件工具,用以实现航空器场面运行仿真。例如 Surface Management Systems (SMS)^[4] 和 Total Airspace and Airport Modeler (TAAM)^[5] 等一些机场场面交通仿真模型软件已被广泛应用于机场运行评估、机场容量评估等领域。然而,航空器滑行的速度在这两种仿真软件中均被假设为定值,与复杂机场运行实际不符。虽然 Surface Operations Simulator and Scheduler (SOS2)^[6] 与 Surface Traffic Limitations Enhancement (STLE)^[7] 仿真软件考虑了航空器滑行的加速和减速过程,但并没有对加速度以及减速度的大小进行限制,与复杂机场运行同样存在差异。学者针对机场场面多运行主体的研究目前处于起步阶段,研究内容主要集中于优化的模型^[8] 以及求解算法^[9],很少关注机场场面交通建模。拥挤场景下的交通建模是公路交通运输领域的一个热门课题,其中, Nagel-Schreckenberg (NS) 模型受到了学者的广泛关注^[10]。NS 模型是基于元胞自动机的离散仿真模型。目前已有研究实现了应用 NS 模型的复杂机场航空器滑行建模,考虑了航空器滑行速度特征,精准刻画航空器在机场场面的滑行活动^[2]。但是,鲜有研究在场面交通建模时考虑各类保障车辆在内的多运行主体,并针对车道滑行道并行交织的复杂机场运行环境,考虑航空器、车辆的协同运行机制。现有研究尚未涉及针对复杂机场滑行道与保障车辆车道纵横交织的结构特点、航空器与保障车辆运行的耦合特点进行交通建模。当机场位于高峰运行时段,多类型航空器以及保障车

辆在机场场道极易产生冲突并发生拥堵^[11],机场场面交通建模问题就显得至关重要。因此,为了准确写实刻画多类型主体在机场场面的协同运行情况,评估场面运行效率,以适配最优的机场场面运行策略,本文针对复杂机场场面区域,提出了基于 NS 元胞自动机的复杂机场“机-车-场道”交通仿真模型,即 Airport surface operation model (ASOM),该模型立足于实际机场运行情况,考虑了4项航空器运行特征以及车辆与航空器在机场场面的协同运行特征,以期设计和优化机场场面的“机-车-场道”协同控制策略提供有力工具。

1 问题描述

一段时间以来,随着航空业的快速发展,复杂机场场面运行交通建模已成为一个备受关注的领域。传统的机场场面运行交通建模主要关注航空器之间的运行和协调,而往往忽略场面上的运行车辆。事实上,这些车辆在机场场面的运行中起着至关重要的角色。复杂机场场面通常包含各种物体,如交通网络(跑道、滑行道和车道)、建筑结构(航站楼)和移动物体(飞机、汽车)^[12]。以拥有双跑道、多航站楼的典型复杂机场深圳宝安国际机场为例,绘制机场场面结构如图1所示。航空器滑行道与车辆运行车道在机场场面中纵横交织,形成一个错综复杂的网络。航空器需要从停机位滑行道到起飞或降落的滑行道上,而车辆则负责将乘客、货物和燃料等必需品运送到适当的位置。因此,为了准确对复杂机场场面交通进行建模,确保机场场面的安全和高效运行,需要综合考虑航空器和车辆的运动。

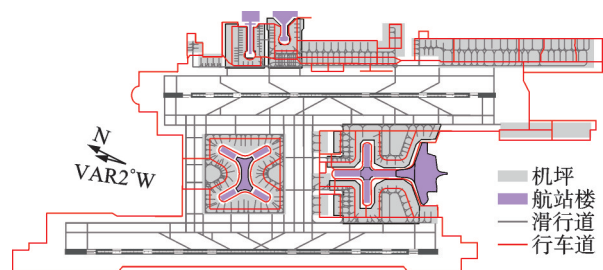


图1 深圳宝安国际机场场面结构

Fig.1 Ground structure of Shenzhen Bao'an International Airport

多运行主体的交通建模面临着许多挑战。首先,航空器和运行车辆的运动是相互依赖的,彼此之间的冲突和协调需要进行准确的建模和仿真;其次,机场场面的运行受到许多因素的影响,包括航班计划^[13]和交通流量^[14]等,这些因素的变化会直接影响到航空器和运行车辆的运行策略和路径规

划。为了解决这些问题,需要开发一种综合考虑航空器和运行车辆的复杂机场场面运行仿真模型,准确模拟航空器和运行车辆的运动,并考虑到它们之间的相互作用和冲突。此外,模型还应该能够根据实际情况进行调整,以适应不同的航班计划和交通流量。通过使用复杂机场场面运行仿真模型,评估和优化机场场面的运行效率和安全性,研究不同的运行策略和控制方法,从而减少场面拥堵和延误,实现资源的优化利用。

2 NS元胞自动机模型

NS元胞自动机模型是一个离散时空模型,可以有效仿真模拟复杂的现象,在道路交通领域被广泛应用^[10]。图2以1条车道上车辆运行的典型NS元胞自动机为例,对NS元胞自动机模型进行描述。如图2所示,将车道划分为等长的元胞,规定每个元胞中只能包含1辆车,且每辆车的速度都是一个非负整数。在单位时间内,每辆车都会根据其速度移动一定的元胞数目。假设所有的车都在同一方向上运动,其位置和速度在每个时间段内都会更新。位置更新的计算规则如下:

(1) 移动规则

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中 $v_i(t)$ 和 $x_i(t)$ 分别表示车辆 i 在时间 t 的速度和位置。车辆 i 在下一个时刻的位置取决于当前位置的速度。速度按照下述加速规则进行更新。

(2) 加速规则

$$v_i(t+1) = \min(v_{\max}, v_i(t) + 1) \quad (2)$$

式中 v_{\max} 为交通参数。车辆速度每次递增1个单位,但不能超过最大速度 v_{\max} 。

(3) 冲突避免规则

为了避免前后车辆相撞,增加冲突避免规则为

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= x_{i-1}(t+1) - x_i(t+1) - 1 \\ v_i(t+1) &\geq x_{i-1}(t+1) - x_i(t+1) \end{aligned} \quad (3)$$

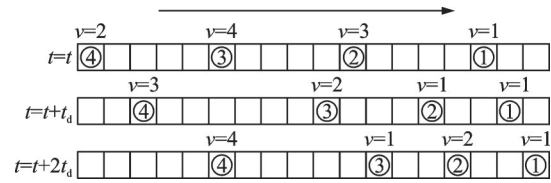


图2 NS元胞自动机模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the NS model

在图2所示的案例中,由于车2($t = t + t_d$)和车3($t = t + 2t_d$)均与前车的间隔过小,车2($t = t + t_d$)与车3($t = t + 2t_d$)适用冲突避免规则进行减速。 t_d 表示1个单位时间变化量。

(4) 随机速度规则

为了表达交通的不确定性,车辆以概率 p 随机进行减速

$$v_i(t+1) = \max(0, v_i(t+1) - 1) \quad (4)$$

基于以上规则,定义了车辆的初始位置和速度后,在随后的每一个单位时间内进行车辆的运动学计算,迭代更新下一个时刻的位置和速度,以实现复杂现象的运动学模拟。

3 机场场面运行仿真模型

为了使NS元胞自动机模型能够反映机场场面交通的特点,在第2节所述NS元胞自动机模型中加入航空器以及车辆的运行特征,构建ASOM,使之更加准确地描述复杂机场内多运行主体的运动情况。

3.1 航空器运行特征

(1) 航空器的起飞和着陆

使用同一跑道的航空器必须满足最低间隔的要求,以遵守安全规定。航空器的起飞、着陆时间间隔与航空器的类型相关。参照FAA(Federal Aviation Administration)和ICAO(International Civil Aviation Organization)实施的安全规定^[15],航空器跑道间隔如表1所示。

表1 航空器跑道使用间隔

Table 1 Aircraft runway use interval

状态	机型	后机进场				后机离场			
		中型机	B757	重型机	A380	中型机	B757	重型机	A380
前机进场	中型机	69	69	60	60	75	75	75	75
	B757	157	157	96	96	75	75	75	75
	重型机	157	157	96	96	75	75	75	75
	A380	180	180	120	120	180	180	120	120
前机离场	中型机	60	60	60	60	60	60	60	60
	B757	60	60	60	60	120	120	90	90
	重型机	60	60	60	60	120	120	90	90
	A380	180	180	120	120	180	180	120	120

在仿真过程中,当航班间使用跑道时间发生冲突时,未满足间隔的起飞航班 $v_i(t)=0$ 。

(2) 航空器的滑行间隔

航空器在机场场面的滑行过程需要满足一定的间隔要求,以保证安全运行。虽然在实际运行中航空器的滑行间隔取决于机场实际情况,但本文假设航空器的滑行间隔是定值。由于航空器比元胞单元要大得多,不同类型的航空器占据的元胞数量有所不同。因此,本文基于航空器的尺寸大小设置航空器的滑行间隔,如表 2 所示,其中 x_0 是实际的最小分离间隔, Δx 表示航空器尺寸的差异。

表 2 航空器滑行最小间隔

Table 2 Aircraft minimum taxi interval

航空器类型	间隔
A380	x_0
重型/B757	$x_0 - \Delta x$
中型	$x_0 - 2\Delta x$

(3) 航空器的动力学模型

如前所述,航空器在滑行过程中会进行逐渐的加速和减速。在传统 NS 模型中,减速是无限大的。对 NS 模型中的航空器减速过程进行修正,将最大减速设置为 1 元胞/单位时间²。假设航空器当前速度为 v ,航空器减速至速度为 0 需要经历 x_{stop} 个元胞的长度,则 x_{stop} 可计算为

$$x_{stop} \leq \frac{v(v+1)}{2} \quad (5)$$

因此,NS 模型中的避免碰撞公式则可被取代为

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= \min(v_i(t)-1, d_{stop}-1) \\ d_{stop} &\leq v_i(t)(v_i(t)+1)/2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中 d_{stop} 表示为避免冲突而与前一架航空器保持的最小安全距离。如果 $d_{stop} > v_i(t)(v_i(t)+1)/2$, $v_i(t+1)$ 遵循式(2,4)进行变化。

(4) 航空器通过交叉路口

在滑行道的交叉路口,航空器可能需要降低其速度以避免冲突。因此,定义了航空器通过滑行道交叉路口的最大速度 v_{curve} 。为了实现航空器在交叉路口的平稳减速,航空器需要在通过交叉路口前 d_{curve} 个元胞时开始进行减速, d_{curve} 与 v_{curve} 之间的关系为

$$d_{curve} \leq \frac{v(v+1)}{2} - \frac{v_{curve}(v_{curve}+1)}{2} \quad (7)$$

d_{curve} 以及航空器的滑行速度关系为

$$\begin{cases} v_i(t+1) = v_i(t) - 1 \\ d_{curve} \leq v_i(t)(v_i(t)+1)/2 - v_{curve}(v_{curve}+1)/2 \end{cases} \quad (8)$$

式中,当 $d_{curve} > v_i(t)(v_i(t)+1)/2 - v_{curve}(v_{curve}+1)/2$ 时, $v_i(t+1)$ 遵循式(2,4,6)进行变化。

3.2 车辆运行特征

车辆在车道运行过程中会进行逐渐的加速和减速。当车辆在车道与其他车辆发生冲突时,其减速过程需要进行平滑处理。因此,对 NS 模型中的车辆减速过程进行了修正。本文将车辆的最大减速设置为 1 元胞/单位时间²。假设车辆当前速度为 v_k ,减速至速度为 0 需要经历 α_{stop} 个元胞的长度,则 α_{stop} 大小可计算为

$$\alpha_{stop} \leq \frac{v_k(v_k+1)}{2} \quad (9)$$

因此,NS 模型中的避免碰撞表达式为

$$\begin{aligned} v_k(t+1) &= \min(v_k(t)-1, \alpha_{stop}-1) \\ \alpha_{stop} &\leq v_k(t)(v_k(t)+1)/2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中 α_{stop} 为避免冲突而与前一车辆保持的最小安全距离。当 $\alpha_{stop} > v_k(t)(v_k(t)+1)/2$ 时, $v_k(t+1)$ 遵循式(2,4)进行变化。

3.3 航空器-车辆协同机制

在机场场面的运行中,航空器在机场活动中尤为重要。为了确保其正常运行和安全性,将其优先级设为较高。当航空器与车辆在滑行道与车道的交叉路口相遇时,航空器无需减速,可以直接通过,而车辆则需要遵守停车避让的规则。这种优先机制确保了航空器和车辆之间的安全协同,为航空器提供足够的空间和时间,以便顺利通过交叉路口。车辆在接近交叉路口时,应适时降低速度并停车,以确保航空器的安全通过,避免潜在的冲突和事故风险。因此,车辆通过与滑行道交叉路口的速度为 0。为了实现在交叉路口的平稳减速,车辆需要在通过交叉路口前 m 个元胞时开始进行减速, m 的计算方法为

$$m \leq \frac{v_k(v_k+1)}{2} \quad (11)$$

m 以及车辆的速度关系为

$$\begin{cases} v_k(t+1) = v_k(t) - 1 \\ m \leq v_k(t)(v_k(t)+1)/2 \end{cases} \quad (12)$$

式中,当 $m > v_k(t)(v_k(t)+1)/2$ 时, $v_k(t+1)$ 遵循式(2,4,10)进行变化。

4 案例分析

采用深圳宝安国际机场 2019 年某月的真实航

班计划数据进行仿真,以机场 T3 机坪、16 号跑道的进离港航班为研究对象,如图 3 所示。

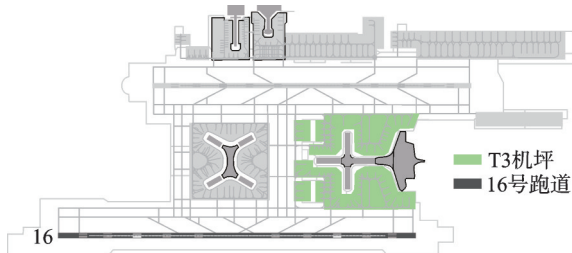


图3 T3机坪以及16号跑道位置

Fig.3 Locations of apron T3 and runway 16

基于真实运行数据,分别可视化一架近机位航班、一架远机位航班与相关车辆运行路径,如图 4 所示,其中星号处为“机-车”“车-车”的冲突热点区域。

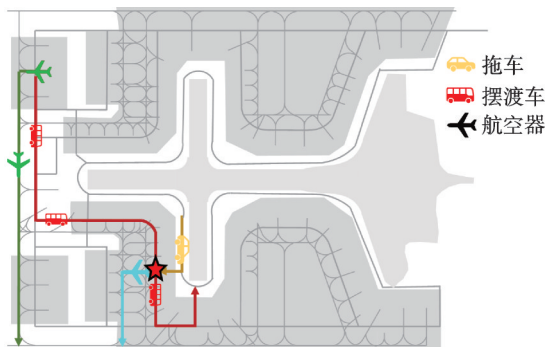


图4 多类型运行冲突示意图

Fig.4 Diagram of a multi-type conflict

本文选取具有代表性的场面保障车辆,在 ASOM 中加入进场旅客摆渡车、离场旅客摆渡车以及拖车 3 类车型进行仿真验证实验。选取每日 7:30~10:30 的早高峰时段进行仿真。航空器数据格式如表 3 所示。

表3 航空器数据格式

Table 3 Flight data format

航班号	停机位	机型	航空器类型	进/离	预计撤轮挡/着陆时间
CA1501	P371	C	中型机	进场	8:15
CZ6798	P302	D	中型机	离场	8:20
CZ3473	P328	E	重型机	离场	8:25

4.1 仿真参数设置

在使用 ASOM 进行机场场面交通仿真之前,需要对仿真参数进行设置,相关参数包括结构参数以及运行参数。首先设置仿真结构参数,即确定单位元胞的大小、最小分离间隔 x_0 以及航空器尺寸差异 Δx 。参考文献[2]将单位元胞大小设置为 5 m,单位时间间隔设置为 5 s。由于 A380、重型机、中

型机的长度分别约为 70、55 和 40 m,将 x_0 设置为 70 m(14 个元胞), Δx 设置为 15 m(3 个元胞)。立足于机场运行实际,航空器在场面滑行阶段最小间隔为 50 m^[16-17],因此将 d_{stop} 设置为 50 m(10 个元胞);同理,车辆在行驶过程中与前一车辆保持的最小安全距离为 5 m,将 α_{stop} 设置为 5 m(1 个元胞)。同时参考文献[2,10]将航空器速度随机慢化概率以及车辆速度随机慢化概率 P 均设为 0.3。有关航空器以及车辆在各个阶段的最大运行速度参数均需要设置,基于机场运行实际,各阶段滑行速度参数设置如表 4 所示。

表4 航空器滑行速度参数

Table 4 Aircraft taxi speed parameters km/h

所处阶段	v_{max}
快速脱离道	90 (约 25 元胞/单位时间)
主滑/联络道	50 (约 14 元胞/单位时间)
机坪区域	30 (约 8 元胞/单位时间)
停机位滑入/推出	18 (约 5 元胞/单位时间)
滑行道交叉路口	36 (约 10 元胞/单位时间)

同样基于机场运行实际,各阶段车辆运行速度参数设置如表 5 所示。

表5 车辆运行速度参数

Table 5 Vehicles operation speed parameters km/h

所处阶段	v_{max}
跑道入口区域	20(约 6 元胞/单位时间)
主滑/联络道附近区域	40(约 11 元胞/单位时间)
机坪区域	30(约 8 元胞/单位时间)

4.2 仿真结果分析

采用 Intel i7-9700KF8C8T 处理器,内存 16 GB 计算机,选取某日的航班数据,使用 MATLAB R2016a 编程实现仿真验证。早离场高峰时段内部分离场航空器滑行距离随时间的变化趋势如图 5 所示,部分进场航空器滑行距离随时间的变化趋势如图 6 所示,其中不同颜色曲线表示不同航空器。

根据图 5 中的结果,不难发现离场航空器在推出过程中速度较慢,而在主滑行阶段速度较快,同时离场航空器在交叉路口等位置减速过程较为平滑,与实际运行情况相符的同时,保证了与其他航空器的安全分离。由图 6 可知,进场航班在跑道脱离时速度较快,停入停机位过程的速度较慢,在遇到冲突后的减速过程相对平滑,确保了与其他航空器的安全分离。ASOM 仿真结果所体现的进离场航空器运行特点与实际相符。

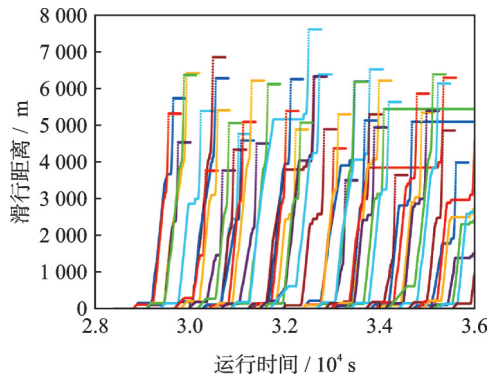


图 5 早离场高峰时段离场航班滑行距离仿真结果

Fig.5 Simulation results of departing flights during early departure peak hours

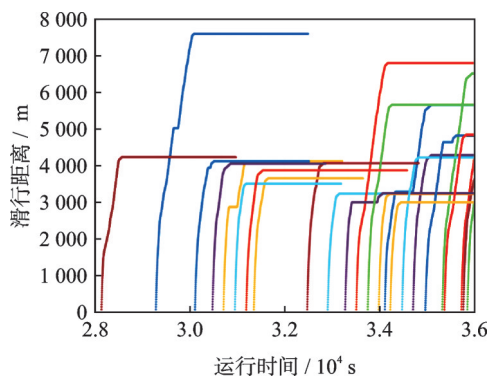


图 6 早离场高峰时段进场航班滑行距离仿真结果

Fig.6 Simulation results of arrival flights during early departure peak hours

为了检验 ASOM 的通用性,选取 4 个典型日进行仿真,分别统计离场航空器以及进场航空器的滑行时间与真实数据的误差平均值(Average magnitude of error, AME)以及最大误差值(Maximum error, MAXE),结果如表 6 所示。

表 6 ASOM 仿真结果与真实数据对比

Table 6 Comparison of ASOM simulation results with real data					
航空器类型	误差	日期 1	日期 2	日期 3	日期 4
离场航空器	AME	27.6	25.8	21.7	29.7
	MAXE	89.7	102.9	97.3	110.5
进场航空器	AME	13.8	14.0	13.6	12.9
	MAXE	80.6	105.2	88.3	92.5

由表 6 可知,在 4 个典型日下,ASOM 均表现出了良好的仿真性能。离场航空器滑行时间 AME 均维持在 30 s 以内,对比 4 个典型日真实离场航空器平均滑行时间 8 min 35 s,AME 小于 6%。进场航空器滑行时间的 AME 均维持在 14 s 以内,对比 4 个典型日真实进场航空器平均滑行时间 4 min 30 s,AME 同样小于 6%。进离场航空器滑行时间最大

误差值均在 100 s 以上,这是因为实际运行过程中影响滑行时间的因素众多^[6],仿真模型不能完全模拟,因此会出现个别航空器滑行时间的仿真误差较大的现象。

在 4 个典型日下,对 3 种类型保障车辆仿真结果进行分析。针对不同类型保障车辆,分别统计每类车在运行过程中因航空器与车辆冲突(“机-车”冲突)导致的总停车次数以及因车辆间冲突(“车-车”冲突)导致的总停车次数,如表 7 所示。

表 7 ASOM 仿真车辆运行结果

Table 7 ASOM simulation results of vehicles					
车辆类型	冲突类型	日期 1	日期 2	日期 3	日期 4
离场摆渡车	机-车	173	207	198	232
	车-车	89	104	86	159
进场摆渡车	机-车	128	154	192	130
	车-车	76	65	88	92
拖车	机-车	157	120	196	179
	车-车	206	289	240	237

由表 7 可知,针对离场摆渡车以及进场摆渡车两种车型,在各仿真场景中因发生“机-车”冲突导致的总停车次数远大于因发生“车-车”冲突导致的总停车次数。这是由于 ASOM 中存在航空器-车辆协同机制,深圳宝安国际机场场面摆渡车行车道与航空器滑行道交叉部分较多,摆渡车在运行过程中遇到行车道与滑行道交叉路口需要停车观察,因此发生“机-车”冲突导致的总停车次数较多。反观拖车运行情况,在各仿真场景中因发生“车-车”冲突导致的总停车次数远大于因发生“机-车”冲突导致的总停车次数,这是由于拖车在各仿真场景只执行航班推出任务,拖车行车道与航空器滑行道交叉部分较少,拖车运行集中于机坪附近,因此发生“车-车”冲突导致的总停车次数较多。

在 4 个典型日下,分别统计 3 种类型保障车辆在运行过程中因发生“机-车”冲突导致的平均停车时间以及因“车-车”冲突导致的平均停车时间,柱状图如图 7 所示。

由图 7 可知,针对离场摆渡车以及进场摆渡车两种车型,在各仿真场景中,因发生“机-车”冲突导致的平均停车时间远大于因发生“车-车”冲突导致的平均停车时间,这是因为发生“机-车”冲突导致的总停车次数远大于因发生“车-车”冲突导致的总停车次数,与表 7 结论相符。拖车的运行结论与表 7 所得结论同样相符,不再赘述。

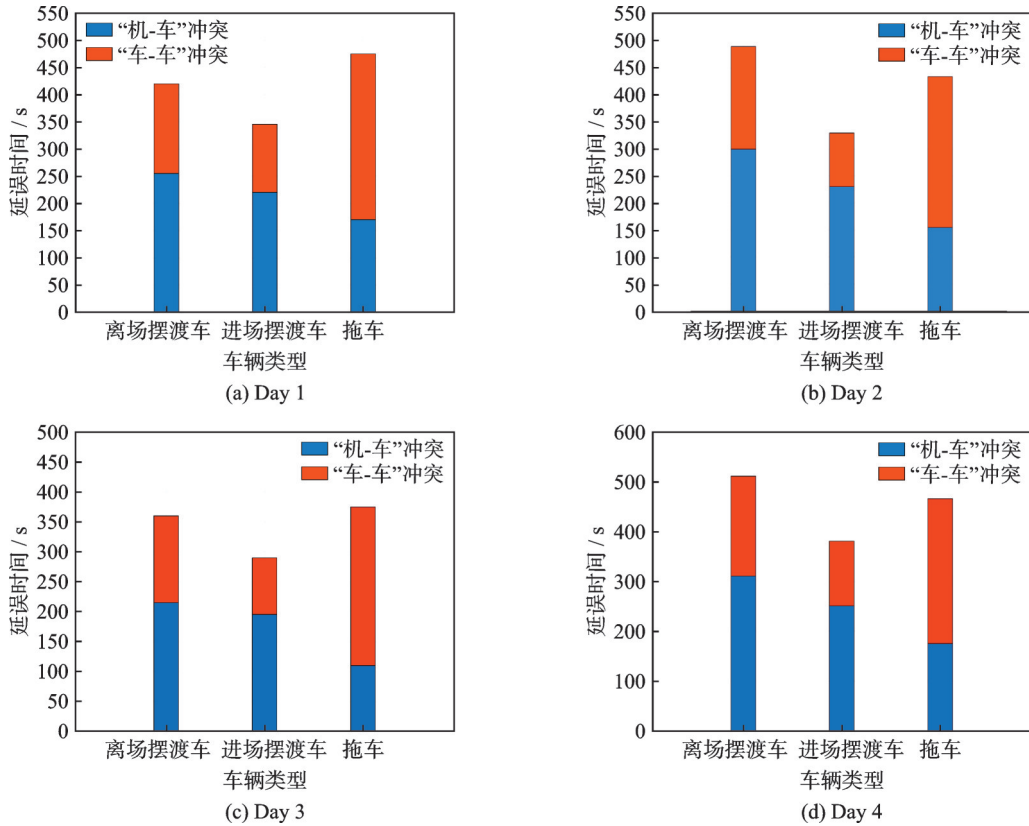


图7 ASOM对4个典型日的车辆仿真结果

Fig.7 ASOM simulation results of vehicles for four typical days

5 结 论

本文提出了一种基于NS元胞自动机的机场场面运行模型(ASOM),并采用深圳宝安国际机场的真实运行数据进行验证,得到了以下结论:

(1)ASOM充分考虑了航空器与车辆之间的相互作用、速度的动态演化以及道路交叉口的影响,能够准确地刻画机场活动区内航空器滑行道和车道的结构,并且能够快速、高精度地对多类型航空器和车辆在机场场景中的运行过程进行仿真,仿真结果与真实运行数据之间的误差小于6%。

(2)ASOM能够模拟并评估不同类型航空器和车辆在机场场景中的运行行为,并为设计和优化机场的“机-车-场道”协同控制策略提供了有力的工具。通过对机场场面的仿真,ASOM可以评估不同的运行策略,例如调整航空器和车辆的流量分配、停机位的分配以及改进滑行道和车道的设计。这些措施将有助于提高机场的运行效率、减少拥堵和延误,并最终提升整个机场系统的安全性和可靠性。

(3)在今后的研究中,可以将实验的验证区域扩展到整个机场场面区域,加入多类型地面保障车辆,针对不同的天气场景,设置差异化的航空器运行参数以及车辆运行参数进行仿真,逐步提升

ASOM的普适性。

参考文献:

- [1] EVERTSE C, VISSER H G. Real-time airport surface movement planning: Minimizing aircraft emissions [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 79: 224-241.
- [2] MORI R. Aircraft ground-taxiing model for congested airport using cellular automata[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(1): 180-188.
- [3] 邢志伟,李世皎,唐云霄,等.基于Agent-元胞自动机的机场场面交通仿真[J].*系统仿真学报*, 2018, 30(3): 857-865.
XING Zhiwei, LI Shijiao, TANG Yunxiao, et al. Airport surface traffic simulation based on Agent-cellular automaton[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(3): 857-865.
- [4] MORRIS R, PĂȘĂREANU C, LUCKOW K S, et al. Planning, scheduling and monitoring for airport surface operations[C]//*Proceedings of AIAA Workshop: Planning for Hybrid Systems*. [S.l.]:AIAA, 2016.
- [5] 朱承元,张澈,管建华.基于改进支持向量机的空域交通态势识别方法[J].*交通信息与安全*, 2023, 41(2): 76-85.
ZHU Chengyuan, ZHANG Che, GUAN Jianhua. A

- method for monitoring traffic state in the airspace based on an improved support vector machine[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023, 41(2): 76-85.
- [6] ZELINSKI S, WINDHORST R. Modelling and simulating airport surface operations with gate conflicts[J]. The Aeronautical Journal, 2019, 123(1259): 1-19.
- [7] COULURIS G J, FONG R K, DOWNS M B, et al. A new modeling capability for airport surface traffic analysis[C]//Proceedings of 2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference. St. Paul, USA: IEEE, 2008: 1-11.
- [8] SU J M, HU M H, YIN J N, et al. Integrated optimization of aircraft surface operation and de-icing resources at multi de-icing zones airport[J]. IEEE Access, 2023, 11: 56008-56026.
- [9] LV L L, DENG Z Y, SHAO C Y, et al. A variable neighborhood search algorithm for airport ferry vehicle scheduling problem[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 154: 104262.
- [10] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de Physique I, 1992, 2(12): 2221-2229.
- [11] JIANG Y, HU Z T, LIU Z Y, et al. A bilevel programming approach for optimization of airport ground movement[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(5): 829-839.
- [12] WU P P Y, MENGERSEN K. A review of models and model usage scenarios for an airport complex system [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013, 47: 124-140.
- [13] 刘颖俐, 胡明华, 苏佳明, 等. 基于多目标优化的机场机坪管制区域划分方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(8): 150-156.
- LIU Yingli, HU Minghua, SU Jiaming, et al. Division method of airport apron control areas based on multi-objective optimization[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(8): 150-156.
- [14] 刘金安, 汤新民, 胡钰明, 等. 基于聚类分析的航空器滑行过点时间预测[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 903-911.
- LIU Jin'an, TANG Xinmin, HU Yuming, et al. Prediction of aircraft taxiing estimated time of arrival based on cluster analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 903-911.
- [15] JIANG H, LIU J X, ZHOU W S. Bi-level programming model for joint scheduling of arrival and departure flights based on traffic scenario[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(4): 671-684.
- [16] YANG L, YIN S W, HAN K, et al. Fundamental diagrams of airport surface traffic: Models and applications [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 106: 29-51.
- [17] JIANG Y, LIAO Z H, ZHANG H H. A collaborative optimization model for ground taxi based on aircraft priority[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013. DOI: 10.1155/2013854364.

(编辑:张蓓)