

1-2-2019

## Airport Surface Traffic Simulation Based on Agent-Cellular Automaton

Zhiwei Xing

*1.R&D Base of Special Ground Equipment, CAUC, Tianjin 300300, China; ;*

Shijiao Li

*1.R&D Base of Special Ground Equipment, CAUC, Tianjin 300300, China; ;*

Yunxiao Tang

*1.R&D Base of Special Ground Equipment, CAUC, Tianjin 300300, China; ;*

Luo Qian

*2.Information Technology Filiale, The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Airport Surface Traffic Simulation Based on Agent-Cellular Automaton

### Abstract

**Abstract:** *In order to analyze the traffic situation of airport surface, an airport surface traffic simulation method is proposed based on the theory of agent and cellular automaton model. The traffic characteristics of airport surface are analyzed. The combination of agent theory and the cellular automaton model is discussed. Different parts of the airport surface traffic are defined respectively as one-dimensional cellular automaton, and aircraft agent is designed, which means that a traffic simulation model is constructed based on agent-cellular automaton. The airport surface traffic is simulated. Simulation results show that the simulation method has the characteristics of simple, high efficiency and high accuracy, which can reflect the autonomy and individual differences of aircraft taxi in airport traffic system. And the analysis and assessment of the traffic situation has high application value in airport surface.*

### Keywords

airport surface traffic, agent, cellular automata, traffic simulation, traffic operation situation

### Recommended Citation

Xing Zhiwei, Li Shijiao, Tang Yunxiao, Luo Qian. Airport Surface Traffic Simulation Based on Agent-Cellular Automaton[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 857-865.

# 基于 Agent-元胞自动机的机场场面交通仿真

邢志伟<sup>1</sup>, 李世皎<sup>1</sup>, 唐云霄<sup>1</sup>, 罗谦<sup>2</sup>

(1.中国民航大学航空地面特种设备民航研究基地, 天津 300300; 2.中国民航局第二研究所信息技术分公司, 成都 610041)

**摘要:** 为分析机场场面交通态势, 提出了 Agent 智能体理论与元胞自动机模型理论相结合的机场场面交通仿真方法。对机场场面的交通特点进行了分析; 探讨了 Agent 智能体理论与元胞自动机模型理论的结合点和结合方法, 将机场交通的不同部分分别定义成一维元胞自动机, 定义了飞机 Agent 结构, 构建了一个基于 Agent-元胞自动机的机场场面交通仿真模型; 对机场场面交通进行仿真分析。结果表明, 该仿真方法具备了简单、高效、高精度的特点, 反映出了机场交通系统中飞机滑行的自主性和个体差异性; 对机场场面交通运行态势的分析及评估具有较高的应用价值。

**关键词:** 机场场面交通; Agent 智能体; 元胞自动机; 交通仿真; 交通运行态势

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 03-0857-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803011

## Airport Surface Traffic Simulation Based on Agent-Cellular Automaton

Xing Zhiwei<sup>1</sup>, Li Shijiao<sup>1</sup>, Tang Yunxiao<sup>1</sup>, Luo Qian<sup>2</sup>

(1.R&D Base of Special Ground Equipment, CAUC, Tianjin 300300, China;

2. Information Technology Filiale, The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to analyze the traffic situation of airport surface, an airport surface traffic simulation method is proposed based on the theory of agent and cellular automaton model. The traffic characteristics of airport surface are analyzed. The combination of agent theory and the cellular automaton model is discussed. Different parts of the airport surface traffic are defined respectively as one-dimensional cellular automaton, and aircraft agent is designed, which means that a traffic simulation model is constructed based on agent-cellular automaton. The airport surface traffic is simulated. Simulation results show that the simulation method has the characteristics of simple, high efficiency and high accuracy, which can reflect the autonomy and individual differences of aircraft taxi in airport traffic system. And the analysis and assessment of the traffic situation has high application value in airport surface.

**Keywords:** airport surface traffic; agent; cellular automata; traffic simulation; traffic operation situation

## 引言

机场是航空运输体系的重要枢纽, 随着航空运输业务量激增, 世界范围内的主要机场都出现了不

同程度的容量饱和问题, 也由此导致了机场航班延误、拥堵等现象。如何通过机场场面交通仿真对机场的场面交通运行态势进行推演、计算和评价, 并采取有效措施提高机场的运行效率、减少航班延误成为研究热点。

目前已有机场运行仿真模型广泛应用于民用以及军用机场, 如 SIMMOD, Airfield Capacity Model (FAA), TAAM<sup>[1]</sup>等, Airfield Capacity Model



收稿日期: 2016-03-07 修回日期: 2016-06-28;  
基金项目: 国家自然科学基金委员会——中国民用航空局联合研究基金(U1533203), 中央高校基本科研业务费基金(3122014P003);  
作者简介: 邢志伟(1970-), 男, 辽宁沈阳, 博士, 教授, 研究方向为民航装备与系统、机场交通信息与控制。

<http://www.china-simulation.com>

用于在给定连续需求情况下计算跑道系统的极限容量; SIMMOD 和 TAAM 都属于快速仿真软件,采用离散事件仿真方法,在解决复杂系统和微观评估方面具有一定优势,但由于评估过程不仅需要建立复杂的仿真环境和逻辑规则,还要求进行多次反复仿真和参数调节,所以需要耗费大量的人力,导致软件的使用成本较高。近年来,我国学者对机场仿真的相关工作开展也陆续展开,张玉州等<sup>[2]</sup>引入局部搜索机制的多种群遗传算法,建立了一种进离港地面等待问题(ADGHP)多目标优化模型,以实现延误损失和续航航班延误时间的多目标优化;钟育鸣等<sup>[3]</sup>基于组件式 Supermap GIS 技术开发的机场地面运行仿真评估系统,提出了飞机流的仿真思路,对机场终端容量进行了评估;针对航班进离港流程,尹嘉男等基于随机着色 Petri 网理论对机场进行了建模仿真<sup>[4]</sup>;尤杰等<sup>[5]</sup>基于多 Agent 的滑行路径优化算法融合了 Dijkstra 算法的最优路径选择和合同网协议的思想,对机场场面滑行路径进行了建模仿真;但也都存在着结构复杂、灵活性不足、运行效率低的问题,我国对机场仿真的研究仍然处于起步阶段。

元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型<sup>[6-11]</sup>的并行性、规则简单和计算能力快速等特点使其在道路交通流的仿真中展现出重要作用,但其难以体现交通可移动实体的个体差异;Agent 智能体<sup>[12-14]</sup>能准确地描述各种复杂的交通元素的特性和自主行为,但其实现复杂,运行效率较低;以上两种理论在道路交通仿真中的应用相对独立,无法同时体现交通仿真的简单高效以及交通元素个体差异与自主行为的特性。

本文结合了 Agent 智能体和元胞自动机模型理论在交通仿真研究和应用中的优点,将其应用于机场场面的交通仿真,将机场的停机位、联络道、滑行道等交通的不同部分分别定义成一维元胞自动机,并定义了飞机 Agent 智能体结构,构建了一个基于 Agent-元胞自动机的机场场面交通仿真模型,该仿真方法既具备了简单、高效、高精度的特

点,又能反应机场交通系统中飞机滑行的自主性和个体差异性,较为真实地仿真出了机场场面的交通运行态势。

## 1 机场场面交通特点分析

机场场面交通相对于城市道路交通更为复杂,以下即是机场场面交通与城市道路交通的差异之处,也是本文研究的难点和要点:

1) 机场场面交通的复杂性。城市道路交通组成比较简单,各种路段的运行规则基本一致,而机场场面的交通是由跑道、联络道、滑行道、停机位等部分组成,各个部分的飞机运行规则不同,这就充分体现出机场场面交通的复杂性。若不能将不同部分的演化规则分别定义,很难较为真实的模拟机场场面交通的实际情况。

2) 飞机运行规则特殊性:飞机的进离港、滑行、等待等动作需要按照塔台管制的指令进行;在滑行过程中还要满足一定的速度要求和间距要求;又由于飞机由飞行员操作控制,使得飞机的滑行具有自主性和个体差异性,其滑行状态的改变还会受外界其它环境的影响。

## 2 机场场面交通仿真模型构建

### 2.1 仿真模型整体设计

对于上述复杂的机场场面交通系统,本文提出了将机场场面交通的不同组成部分分别定义成一维元胞自动机,即机场的不同部分分别为不同的元胞空间,根据不同的组成部分设置不同的属性值,使得复杂的机场场面交通系统得到了较大的简化,因此可比较简单的实现,系统的仿真效率也较高。

然而,常规的元胞自动机理论在交通仿真应用中进行简化处理的同时也存在一定的局限性,由于常规应用中元胞空间的每个元胞分布形式以及演化规则形同,这种情况和机场场面交通实际状况大不相同;因为在机场场面交通系统中,任何一个飞机的行为方式都不尽相同,而且具有智能体的特性。飞机和飞行员作为一个整体可以根据外界信

息、外界交通状况以及整体自身特点进行决策, 自行决定自身的运行状态, 而不能简单地按照固定规则进行常规演化。为体现飞机滑行的自主性与个体差异性, 本文进一步提出将 Agent 理论加入到系统的仿真中, 定义了飞机 Agent 智能体结构, 并将其引入到元胞空间中来, 实现了元胞中演化规则的动态性。

图 1 为元胞自动机与飞机 Agent 结合进行机场场面交通仿真的模型图, 仿真系统由多个一维元胞自动机空间组成, 每个元胞空间中都有一个协调器用于记录该元胞空间上所有的飞机 Agent 的状态信息, 统计出元胞空间中相关的交通状态数据, 例如飞机位置、滑行速度、加减速状态、滑行间距等信息, 同时, 将各种状态信息发送给该元胞空间上的所有飞机 Agent, 以协调元胞空间上的飞机 Agent 的运行行为; 各个元胞空间的组合能力通过它们之间的通讯来实现, 元胞空间设有标准的输入和输出接口, 所有的元胞空间使用相同的数据结构和输入输出方式, 与其它元胞空间交换信息。

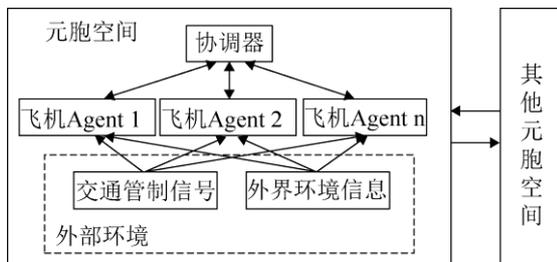


图 1 机场场面交通仿真模型  
Fig. 1 Airport surface traffic simulation model

## 2.2 元胞空间构建

如图 2 为某机场场面交通的结构示意图, 该机场由 1 条跑道; 编号为 L1-L8 的 8 段滑行道; 编号为 R1-R3 的 3 条联络道; 编号为 A-I 的 9 个节点; 编号为 S1-S12 的 12 个停机位组成。

将该机场场面交通的不同组成部分分别定义成一维元胞自动机模型, 每个一维元胞空间由  $N+$  个大小相同的元胞和一个协调器构成, 节点定义为

单元胞自动机。元胞的属性设计如下:

- 1) 位置信息(1-N);
- 2) 状态信息(“0”表示空元胞; “1”表示该元胞被飞机占据);
- 3) 方向信息(表示飞机向哪个方向行进, 共两个方向: 正向和反向; 对于编号 L1-L4 的 4 段横向滑行道取向右为正方向, 向左为反方向; 对于编号 L5-L8 的 4 段滑行道取向下为正方向, 向上为反方向)。

在系统的每个元胞空间中, 最主要的移动实体是飞机, 飞机 Agent 从元胞空间的协调器获取它的邻居飞机状态信息以及其它信息, 根据邻居的滑行状态以及自己的决策模块修正自己的滑行状态, 并产生下一个速度和位置等状态, 元胞空间的协调器根据所有飞机 Agent 的状态提取出其新的元胞状态并进行全面的更新。

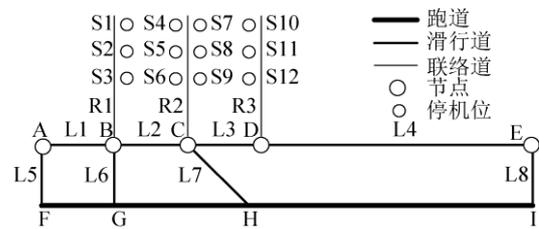


图 2 机场场面交通结构示意图  
Fig. 2 Airport surface traffic structure diagram

## 2.3 飞机 Agent 设计

如图 3 所示, 飞机 Agent 结构主要由感知器、规则库、决策生成模块和效应器四部分组成。感知器用于接收元胞空间提供的各种状态信息以及感知外界其他环境信息; 规则库定义了飞机滑行动作的各种规则; 决策生成模块根据规则库的规则以及所接收的各种信息进行自身滑行状态改变的决策生成; 效应器根据所生成的运行决策进行运行状态的改变, 并将改变后的状态信息传递给所在元胞空间的协调器。

飞机 Agent 运行规则的设定如下:

- 1) 随机慢化:

飞机在图 2 机场场面交通结构示意图中滑行

道、联络道等单一路段无需换道直道滑行情况下的随机慢化概率  $p$  的确定如下:

$$p = p[\alpha, b_{n+1}(t), d_n, l_{T(n+1)}] = \begin{cases} \frac{\mu l_{T(n+1)} b_{n+1}(t)}{d_n}, & d_n > l_{T(n+1)} + 1 \\ 1, & d_n \leq l_{T(n+1)} + 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为概率修正参数;  $b_n$  表示的是飞机  $n$  的加减速状态;  $b_n=0$  表示飞机进行匀速或加速滑行;  $b_n=1$  表示飞机进行减速滑行;  $d_n=x_{n+1}-x_n-l_{n+1}$  是指飞机  $n$  与飞机  $n+1$  之间的距离;  $x_n$  表示飞机  $n$  在元胞空间中的位置;  $l_n$  表示飞机  $n$  的长度;  $l_{T(n)}$  表示飞机  $n$  的安全尾流间距; 如式(1)所示, 飞机 Agent 是根据前面相邻飞机的加减速状态以及与前面相邻飞机的距离来确定随机慢化概率。

飞机以概率  $p$  进行随机慢化, 随机慢化的速度确定如下:

$$v_n(t+1) = v_n(t) - 1 \quad (2)$$

$$b_n(t+1) = 1 \quad (3)$$

式(2)和式(3)表示飞机随机慢化时进行平滑减速并同时改变自身的加减速状态, 为保证飞机在滑行过程中能够进行平滑地加减速以及便于参数设置, 取飞机加速度为 1 元胞/s<sup>2</sup>; 式(2)中  $v_n(t)$  表示飞机  $n$  的滑行速度。

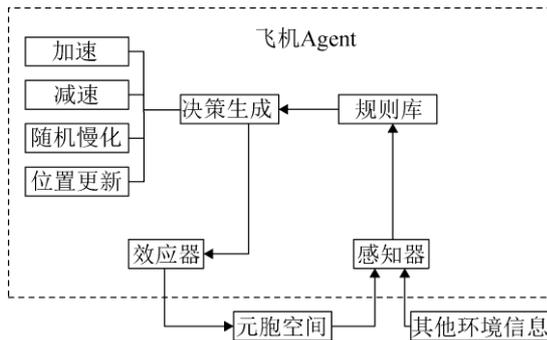


图3 飞机 Agent 结构  
Fig. 3 Aircraft agent structure

## 2) 减速:

飞机在图 2 机场场面交通结构示意图中滑行道、联络道、节点、跑道终端等待区等部分滑行时需进行防撞减速。

防撞减速: 飞机为避免与前面飞机相撞需进行

减速, 或滑行到交叉口需停车等待, 或在跑道端需停车等待起飞时需进行减速动作, 假设飞机的当前速度为  $v$ , 当满足(4)式所示的距离要求时该飞机开始以 1 元胞/s<sup>2</sup> 的加速度进行减速:

$$d_{stop} \leq \sum_{S=1}^v S = \frac{v(v+1)}{2} \quad (4)$$

防撞减速公式如(5)所示:

$$\text{if } d_{stop} \leq \frac{v_n(t)[v_n(t)+1]}{2}$$

$$v_n(t+1) = \min(v_n(t) - 1, d_{stop} - 1) \quad (5)$$

$d_{stop}$  表示当前飞机  $n$  与前面飞机的距离或到交叉口的距离。

飞机在图 2 机场场面交通结构示意图中编号为 A-I 的 9 个节点处需要转弯时需进行减速滑行。

交叉口转弯减速: 设弯道滑行的最大速度为  $v_{curve}$ , 为满足平滑减速且安全转弯滑行, 当满足式(6)描述的条件时飞机开始减速:

$$d_{curve} \leq \sum_{S=v_{curve}+1}^v S = \frac{v(v+1)}{2} - \frac{v_{curve}(v_{curve}+1)}{2} \quad (6)$$

$d_{curve}$  表示从当前位置到弯道的距离;

弯道减速公式如(7)所示:

$$\text{if } d_{curve} \leq [v_n(v_n+1)]/2 - [v_{curve}(v_{curve}+1)]/2$$

$$v_n(t+1) = v_n(t) - 1 \quad (7)$$

## 3) 加速:

飞机在图 2 机场场面交通结构示意图中滑行道、联络道等直道滑行时可进行加速滑行。

这个步骤描述的是飞行员驾驶飞机总是期望以最大速度行驶的特点:

$$\text{If } \{[b_{n+1}(t) = 0] \text{ and } [b_n(t) = 0] \text{ and } (d_n > l_{T(n+1)})\}$$

$$v_n(t+1) = \min(v_n(t) + 1, v_{max}) \quad (8)$$

$$\text{else } v_n(t+1) = v_n(t) \quad (9)$$

式(8)和式(9)表示飞机 Agent 的加速效果需要根据前面飞机的滑行状态以及安全间距来确定;  $v_{max}$  表示在特定路段允许滑行的最大速度, 飞机按照调整后的速度向前滑行;

## 4) 位置更新:

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t) \quad (10)$$

式中:  $v_n$  分别表示飞机  $n$  的位置和速度; 飞机 Agent

按照式(10)进行位置更新;

#### 5) 滑行路由及冲突解脱:

根据对该机场的实际调研及查阅相关标准规范文件, 滑行路由设定及冲突解脱方法如下:

滑行路由: 飞机在机场的滑行按照固定路径规则进行进离港, 例如在图 2 机场场面交通结构示意图中停机位 S1, S2, S3 的离港航班的路由为 MD={R1, B, L2, C, L3, D, L4, E, L8}, 进港路由按照不同类型的机型设定为 MA={L7, C, L2, B, R1} 或 MA={L6, B, R1} 或 MA={L5, A, L1, B, R1}。

冲突解脱: 飞机滑行过程中的对头冲突通过定义元胞自动机在同时段内只允许飞机 Agent 同向滑行来避免; 追尾冲突通过上述减速机制来避免; 交叉口冲突按照进港航班及直行航班优先占用并通过路口, 其他滑行飞机在路口外停止等待的原则进行冲突解脱;

#### 6) 边界条件:

在图 2 机场场面交通结构示意图中, 飞机从机场场面交通的不同组成部分的一个部分滑行到另一个部分时, 需满足边界条件, 例如在 L3 经过节点 D 滑行到 L4 的过程。

这里采用开口边界条件, 假设一维元胞自动机模型始端的元胞对应的位置为  $x=1$ , 在  $t \rightarrow t+1$  时刻, 当路段上飞机位置更新完毕后, 搜寻路段上头飞机和尾飞机的位置  $x_{\text{first}}$  与  $x_{\text{last}}$ , 如果  $x_{\text{last}} - l_1 - l_{T(1)} - 1 > v$ , 则一架速度为  $v$  的飞机将以概率  $\alpha$  进入元胞空间; 在路段的出口处, 如果  $x_{\text{first}} > L_{\text{road}}$  ( $L_{\text{road}}$  表示路段长度), 那么此路段上的头飞机以概率  $\beta$  滑行出此路段。

上述模型充分考虑并协调了加速、减速行为与邻居飞机距离的关系, 使得飞机 Agent 的驾驶行为更加符合真实情况。

## 2.4 仿真精度描述

飞机进离港时长定义如(11)式所示:

$$t = \sum_{i=1}^m t_i^{\text{taxi}} + \sum_{j=1}^k t_j^{\text{wait}} \quad (11)$$

式中:  $t_i^{\text{taxi}}$  表示飞机第  $i$  次滑行所用时长;  $t_j^{\text{wait}}$  表

示飞机第  $j$  次等待所用时长;

为描述仿真系统的仿真精度, 定义了仿真误差函数, 如式(12)所示:

$$J = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{dep}} + n_{\text{arr}}} \left[ \sum_{i=1}^{n_{\text{dep}}} (t_i^{\text{act}} - t_i^{\text{sim}})^2 + \sum_{j=1}^{n_{\text{arr}}} (t_j^{\text{act}} - t_j^{\text{sim}})^2 \right]} \quad (12)$$

式中:  $t_i^{\text{act}}$  和  $t_i^{\text{sim}}$  分别表示第  $i$  架飞机的实际和仿真的离港时长;  $t_j^{\text{act}}$  和  $t_j^{\text{sim}}$  分别表示第  $j$  架飞机的实际和仿真的进港时长;  $n_{\text{dep}}$  和  $n_{\text{arr}}$  分别表示离港航班量和进港航班量。  $J$  称作误差时间指数, 用来描述系统仿真的精确度,  $J$  的值越小表示模型仿真的精度越高,  $J$  的值越大表示模型仿真的精度越低。

## 3 机场场面交通模型仿真

### 3.1 仿真参数设置

元胞空间参数设置: 根据图 2 所示的某机场场面交通网络示意图, 每部分的一维元胞自动机模型的长度用字母  $N$  表示, 各部分允许飞机滑行的最大速度用  $v_{\text{max}}$  表示; 按照机场运行标准要求, 飞机在直道滑行速度最大为 15 m/s, 弯道及联络道的最大滑行速度为 5 m/s; 为简化参数设置, 取元胞大小边长为 5 m, 元胞更新步长为 1 s, 则上文参数取值为: 直道滑行最大速度  $v_{\text{max}}=3$  元胞/s, 弯道及联络道的滑行最大速度为  $v_{\text{max}}=1$  元胞/s; 各部分的具体参数取值见表 1。

表 1 元胞自动机模型参数表  
Tab. 1 Cellular automaton model parameter table

编号	实际长度/m	模型长度 N(元胞)	实际允许滑行 最大速度/(m/s)	模型允许 最大滑行速度 $v_{\text{max}}$ (元胞/s)
L1	380	76	15	3
L2	360	72	15	3
L3	370	74	15	3
L4	2110	422	15	3
L5	210	42	5	1
L6	210	42	5	1
L7	240	48	5	1
L8	210	42	5	1
R1	410	82	5	1
R2	420	84	5	1
R3	410	82	5	1

飞机滑行过程中的随机慢化概率修正参数为 $\mu=0.95$ ；飞机进入一维元胞自动机模型的概率 $\alpha=0.5$ ；飞机滑出一维元胞自动机模型的概率 $\beta=0.5$ ；飞机长度及尾流间距参数见表2。

表2 飞机机型参数表  
Tab. 2 Aircraft model parameters table

机型	实际长度/m	模型长度/ $l_n$ (元胞)	安全尾流间距/ $l_{T(n)}$ (元胞)
大型	70	14	18
中型	50	10	14
小型	30	6	10

### 3.2 仿真模型验证

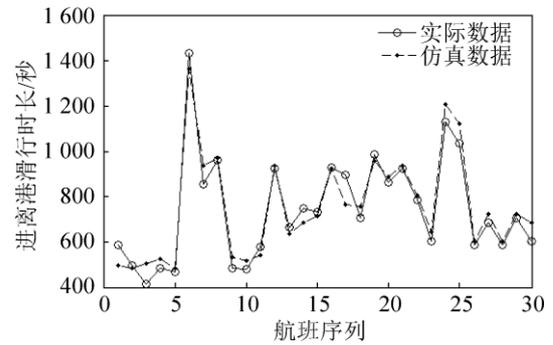
按照上述参数构建仿真模型后对该机场某天的共30个航班的实际数据进行了仿真。部分实际航班数据见表3。

表3 部分实际航班数据表  
Tab. 3 Part of the actual flight data sheet

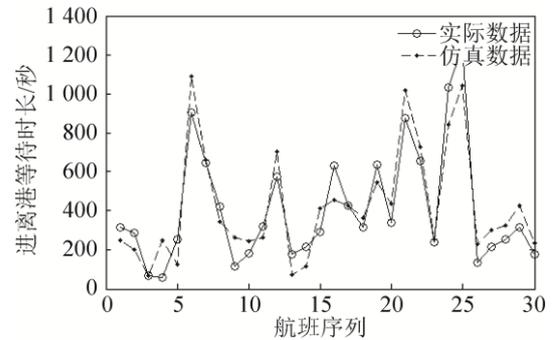
航班序号	航班类型	进离港总时长/s	滑行时长/s	等待时长/s
1	离港	900	585	315
2	离港	780	496	284
3	离港	480	415	65
4	离港	540	485	55
5	进港	720	468	252
6	离港	2 340	1 435	905
7	离港	1 500	854	646
8	进港	1 380	960	420
9	离港	600	485	115
10	进港	660	480	180

图4(a)描述的是进离港滑行时长的仿真数据与真实数据的对比，图4(b)描述的是进离港等待时长的仿真数据与实际数据的对比，图4(c)为仿真所得的进离港所用总时长与实际进离港所用总时长的对比；可以看出仿真数据折线图与实际数据折线图基本保持一致；图4(d)为仿真误差时长折线图，最低误差值为56 s，最高误差值为235 s，误差值在呈现正负波动状态，没有出现发散趋势，说明该仿真模型具有较好的稳定性；由公式(12)可得误差时间指数值为 $J=73$  s，该值小于平均进离港时长的

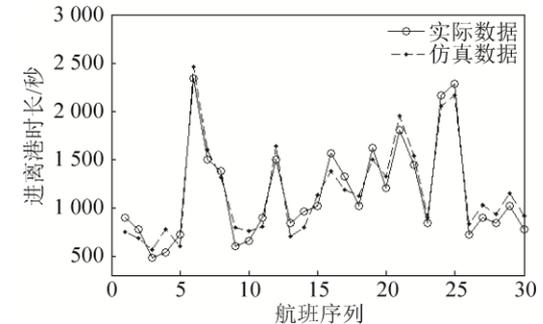
10%，说明该仿真模型具有较高的仿真精度，可以较为准确地仿真机场场面交通状况。



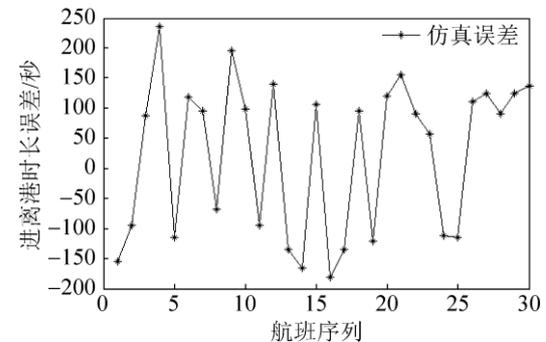
(a) 进离港滑行时长对比



(b) 进离港等待时长对比



(c) 进离港总时长对比



(d) 仿真总时长误差图

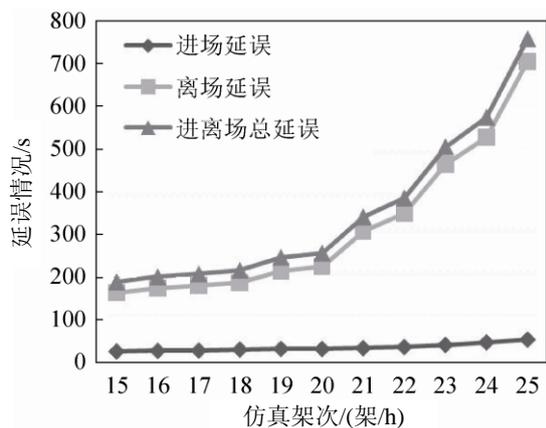
图4 模型精度仿真验证

Fig. 4 Model accuracy simulation verification

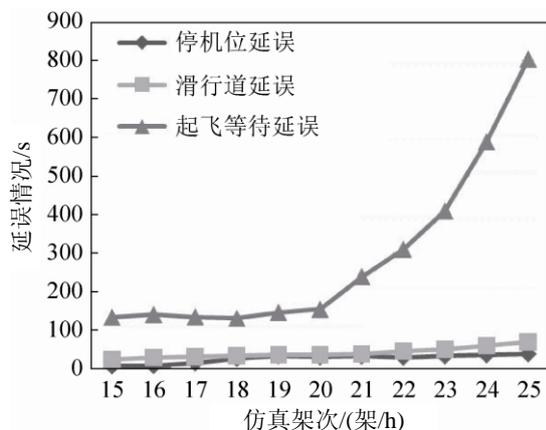
### 3.3 仿真结果分析

该仿真取跑道 IF 方向为飞机的起飞与降落方向, 对于各个元胞空间, 飞机仿真模型中运行时, 以进港航班为例, 当飞机滑行到 L5 或 L6 时, L5、L6 元胞自动机上的方向信息为反向, 相应的元胞的状态信息会变成 1, 飞机滑行到不同的位置时由该元胞空间上的协调器记录下位置信息并实时更新所有的状态信息。

对该机场场面交通运行态势进行预测评估, 利用仿真模型将仿真架次由 15 架/h 至 25 架/h, 进离港架次比例为 1:1 并符合泊松分布, 依次进行仿真, 各架次情况仿真 20 次, 针对飞机滑行时间和飞机等待时间性能指标经统计分析得到如下统计图 5 所示。



(a) 仿真架次与进离港延误分析图



(b) 仿真架次与各阶段延误分析图

图 5 仿真结果飞机延误分析

Fig. 5 Simulation results of aircraft delay analysis

图 5(a)为仿真航班频率与进离场延误之间的关系图, 可以看出当进离港总架次小于 20 架/h, 进场航班的延误随着进离场航班总频率的增加并没有明显的变化, 此时机场场面交通处于自由流相, 各飞机之间的滑行没有发生互相影响的现象; 进离港总架次在 20~21 架/h 时, 机场场面交通处于同步流相, 接近机场的饱和运行流量; 当进离港总架次达到 21 架/h 以上后, 离场延误明显成增大趋势, 进离场总延误也呈现出同样的增长趋势, 此时机场场面的交通处于拥堵状态, 即处于宽运动堵塞流状态, 飞机滑行中的存在自主性和个体差异性, 各架飞机之间互相影响严重, 造成此现象的原因是由于进场航班对滑行道的使用拥有较高的优先级, 进场过程中在机场变得拥堵的情况下也几乎不会出现停车等待, 因而其不会出现明显的延误时长变大现象, 而进离场航班频率增大时离场航班须停止等待避让, 因而当机场航班频率增大到一定程度机场发生拥堵后的离场航班延误会明显增大。由此可知离港延误是航班延误的主要原因。

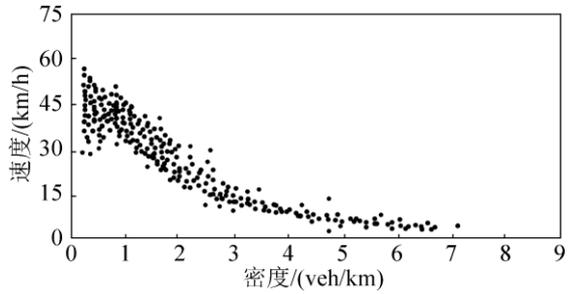
图 5(b)描述的为仿真架次与机场场面交通不同部分发生延误之间的关系图, 由图可知随着航班频率的增加, 只有起飞等待延误会发生变化, 并且当进离港总架次达到 21 架/h 以上会出现明显增加趋势, 而停机位延误和滑行道延误并没有出现明显变化。由此可知该机场场面交通运行的瓶颈在跑道的运行能力上, 可通过提高跑道的运行能力来改善整个机场的场面滑行性能。

图 5 表明, 当进离港总架次达到 21 架/h 以上后, 延误程度迅速增大, 说明 21 架/h 的运行流量超过了该机场的服务能力, 造成延误程度迅速变大, 即当航班架次频率增加到 21 架/h 的时候, 机场场面的交通达到饱和状态。

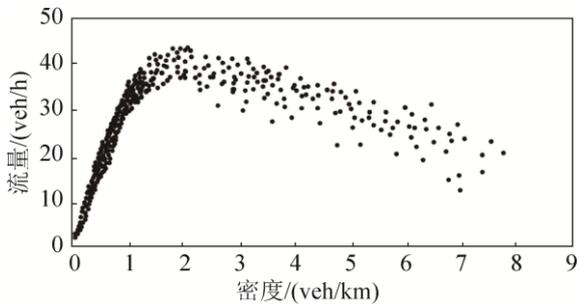
针对飞机滑行速度、道面负载密度、机场交通流量等性能指标, 统计图如图 6 所示。

由图 6(a)可知在机场场面交通中的飞机滑行速度随着滑行道负载密度的增加而减小, 出现此现象的原因是由于随着机场场面滑行的飞机的增多,

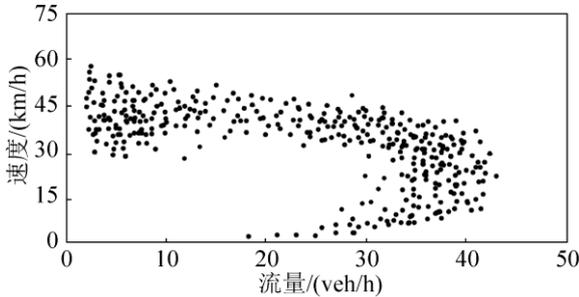
加之飞机滑行的自主性和个体性差异,飞机之间的互相影响越来越大,为保证安全滑行,各架飞机需减慢速度滑行。



(a) 交通流速度-密度关系



(b) 交通流流量-密度关系



(c) 交通流速度-流量关系

图6 交通流关系图

Fig. 6 Traffic flow diagram

图 6(b)所述的是机场交通流量和密度的关系图,从图中可以看出当交通流密度 $<2 \text{ veh/km}$ 时,机场的流量随着滑行道负载密度的增加而增加,此时机场交通处于自由流相,各架飞机的滑行不受影响,机场场面的交通运行流畅;当密度达到 $2 \text{ veh/km}$ 以后,机场的交通流量随着密度的增加而减少,此时机场场面的交通处于自由流到同步流的相变过程;在当密度处于 $2\sim 3 \text{ veh/km}$ 之间时,机场场面交通处于同步流相,机场场面交通处于饱和状态,

达到机场运行的最大容量;当道面的密度大于 $3 \text{ veh/km}$ 时,机场场面交通处于宽运动堵塞相,机场场面的交通发生严重堵塞,机场的交通流量随密度的增加呈现明显下降趋势,机场场面滑行性能急剧下降,飞机在滑行过程中需要更多的停车等待,飞机的平均滑行速度急速下降。

图 6(c)所述的是机场交通飞机滑行速度和机场交通流量之间的关系图,随着交通流量的增加,各架飞机之间的互相影响更加明显,飞机的平均滑行速度逐渐减小。

## 4 结论

针对机场场面交通的复杂性、飞机运行规则特殊性等机场场面交通的特点,本文结合了元胞自动机模型理论和 Agent 智能体理论在交通仿真应用中的优点,搭建出了机场场面交通的仿真模型,以元胞自动机模型为基础框架,将飞机 Agent 引入到元胞自动机空间中,使其按照智能体的行为规则去改变元胞空间中相关元胞的状态。Agent 与元胞自动机的结合使得仿真系统相对于引言中提到的其它的仿真方法即具备了结构简单、快速并行运算的特点,又能通过飞机 Agent 反映出机场场面交通中可移动实体的自主性和个体差异性。通过对实际航班数据的仿真分析可知,该系统达到了较好的仿真效果,可以较为真实的仿真出机场场面的交通状况,实现了机场场面交通的运行态势推演、计算和评价,具有较高的应用价值。

## 参考文献:

- [1] Long D, Kostiuk P. Integrating LMINET with TAAM and SIM-MOD [R]. CR-210875, Virginia: NASA, 2001: 25-36.
- [2] 张玉州, 陈文莉, 李锐, 等. 基于局部搜索机制 MOGA 的多目标 ADGHP 建模及优化[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 962-968.  
Zhang Yuzhou, Chen Wenli, Li Rui, et al. Modeling and Optimization for Multi-objective ADGHP Based on Local Search MOGA[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(5): 962-968.
- [3] 钟育鸣, 韩松臣, 张旭婧. 机场容量评估中仿真飞机

- 流的设计与实现[J]. 交通与计算机, 2008, 26(6): 120-123.
- ZHONG Yu-ming, HAN Song-chen, ZHANG Xu-jing. Design and Implementation of Simulation Aircraft Flow in Airport Capacity Assessment [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2008, 26 (6): 120-123.
- [4] 尹嘉男, 胡明华, 赵征. 多跑道机场停机位分配仿真模型及算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 71-76.
- YIN Jia-nan, HU Ming-hua, ZHAO Zheng. A Simulation Model and Algorithm of Airport Runway Allocation at Multi-runway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 71-76.
- [5] 尤杰, 韩松臣. 基于多 Agent 的机场场面最优滑行路径算法[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(1): 109-112.
- YOU Jie, HAN Song-Chen. An Optimal Glide Path Algorithm for Airport Scene Based on Multi-Agent [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(1): 109-112.
- [6] Meng Qiang, Weng Jinxian. An Improved Cellular Automata Model for Heterogeneous Work Zone Traffic [J]. Transportation Research Part C(S0968-090X), 2011, 19(6): 1263-1275.
- [7] 魏丽英, 吴荣华, 王志龙. 考虑公交影响的进口道元胞自动机换道模型[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1327-1330.
- Wei Liying, Wu Ronghua, Wang Zhilong. Cellular Automata Lane-changing Model on Approach Considering Affects of Transit Vehicles[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(6): 1327-1330.
- [8] 庞明宝, 陈静, 杨敏. 基于 CA 模型的中小学放学门口道路交通仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(5): 927-934.
- Pang Mingbao, Chen Jing, Yang Min. traffic Simulation of Elementary and Middle School's Gate Road During Student Departing School Based on CA Model[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 927-934.
- [9] Wang Yang, Chen Yan-Yan. A new cellular automaton for signal controlled traffic flow based on driving behaviors[J]. Chinese Physics B (S1674-1056), 2015, 24(3): 463-473.
- [10] Tian J F, Jia N, Zhu N, et al. Brake light cellular automaton model with advanced randomization for traffic breakdown[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies (S0968-090X), 2014, 44(4): 282-298.
- [11] Han Yo-sub, Ko Sang-ki. Analysis of a Cellular Automaton Model for Car Traffic with a Junction [J]. Theoretical Computer Science (S0304-3975), 2012, 450(13): 54-67.
- [12] 白宪阵, 曹军海, 王绪智. 面向复杂系统可靠性仿真的 Agent 设计与验证[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(10): 2193-2196.
- Bai Xianzhen, Cao Junhai, Wang Xuzhi. Design and Validation of Agents Orientated to Complex System Reliability Simulation [J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(10): 2193-2196.
- [13] 毛新军, 胡翠云, 孙跃坤, 等. 面向 Agent 程序设计的研究[J]. 软件学报, 2012, 23(11): 2885-2904.
- Mao Xinjun, Hu Cuiyun, Sun Yuekun, et al. Research on Agent Oriented Programming [J]. Journal of Software, 2012, 23(11): 2885-2904.
- [14] 罗键, 武鹤, 曹浪财. 多智能体对手建模及其真实模型的确定[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 48-52.
- Luo Jian, Wu He, Cao Langcai. Modeling of multi-agent opponent and its real model determination [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2015, 43 (10): 48-52.