

1-8-2019

## Modeling and Simulation of Airport Flight Flow Based on Cellular Automaton

Hongying Zhang

*1.College of Electronic Information and Automation ,Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;*

Xuwei Yang

*1.College of Electronic Information and Automation ,Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;*

Luo qian

*2.The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, 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.

---

## Modeling and Simulation of Airport Flight Flow Based on Cellular Automaton

### Abstract

**Abstract:** To increase the reliability of the airport scene traffic simulation model, the complex characteristics of scene traffic are researched. *An improved model based on NS model is proposed. The influence of the stochastic factors on the taxiing process and the traffic characteristics at the intersection are considered, and the new cells are added to connect the two sections with different evolution rules. The state of the connected cells represents the occupancy of the next section.* A large number of simulation experiments were processed, and the results show the goodness of fit between the simulation values and true ones increased by 13%. The reliability and accuracy of the model were verified by the relationship between flight flow and arriving rate, the relationship among flight flow density, average velocity and average flow, and the space-time map. The model can be used to calculate, deduce and predict the operation situation of airport traffic.

### Keywords

airport scene traffic, NaSch (NS) model, connected cell, evolution rule, cellular automaton

### Recommended Citation

Zhang Hongying, Yang Xuwei, Luo qian. Modeling and Simulation of Airport Flight Flow Based on Cellular Automaton[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2864-2874.

# 基于元胞自动机的机场航班流建模与仿真

张红颖<sup>1</sup>, 杨旭伟<sup>1</sup>, 罗谦<sup>2</sup>

(1.中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2.中国民用航空总局第二研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 深入研究场面交通的复杂特性可以提高机场场面交通仿真模型的可靠性。在NS(NaSch)模型基础上, 提出一种改进模型。新模型考虑了滑行时的随机因素和交叉口处的交通特性, 并在交叉口处增加连接元胞来连接两个演化规则不同的路段, 连接元胞的状态代表下一路段的飞机占用信息。大量仿真实验表明, 仿真值与真实值的吻合度提高了13%, 从流量与到达率的关系、密度与平均速度和平均流量的关系以及时空图等方面验证了新模型的可靠性和准确性, 该模型可用于计算、推演和预测机场场面交通的运行态势。

**关键词:** 机场场面交通; NS模型; 连接元胞; 演化规则; 元胞自动机

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)08-2864-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808007

## Modeling and Simulation of Airport Flight Flow Based on Cellular Automaton

Zhang Hongying<sup>1</sup>, Yang Xuwei<sup>1</sup>, Luo qian<sup>2</sup>

(1.College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2.The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** To increase the reliability of the airport scene traffic simulation model, the complex characteristics of scene traffic are researched. An improved model based on NS model is proposed. The influence of the stochastic factors on the taxiing process and the traffic characteristics at the intersection are considered, and the new cells are added to connect the two sections with different evolution rules. The state of the connected cells represents the occupancy of the next section. A large number of simulation experiments were processed, and the results show the goodness of fit between the simulation values and true ones increased by 13%. The reliability and accuracy of the model were verified by the relationship between flight flow and arriving rate, the relationship among flight flow density, average velocity and average flow, and the space-time map. The model can be used to calculate, deduce and predict the operation situation of airport traffic.

**Keywords:** airport scene traffic; NaSch (NS) model; connected cell; evolution rule; cellular automaton

## 引言

机场是航空运输体系的重要枢纽。近年来,



收稿日期: 2017-01-05 修回日期: 2017-02-21;  
基金项目: 国家自然科学基金民航联合研究基金(U1533203); 国家自然科学基金民航联合研究基金(U1333122); 四川省科技支撑计划(2016GZ0068); 成都市战略性新兴产业研发补贴项目(2015-CP01-00158-GX);  
作者简介: 张红颖(1978-), 女, 天津, 博士, 副教授, 研究方向为机场智能与自动化技术。

随着航空业务的不断发展, 民航枢纽机场的延误拥堵现象越来越严重。2015 年全年航班正点率仅约 65.17%, 因此对机场场面交通流拥堵的内在机理展开深入研究是十分必要的<sup>[1]</sup>。国内外学者早就对能提高机场场面运行效率的场面交通优化问题展开了大量研究<sup>[2-3]</sup>, 虽然机场场面拥堵现象有所缓解, 但并没有对飞机运行的动态演化机理进行内在的分析, 而这恰恰是全面改善空中交通管理的一个关键

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

• 2864 •

因素。建立机场场面交通仿真模型, 详细分析航班运行过程的内在机理, 可以为机场控制人员及时做出有效的控制决策提供理论依据, 从而实现对机场场面交通流量的合理管控<sup>[4]</sup>。因此, 对机场场面交通的仿真建模已经得到了研究人员的广泛关注<sup>[5-6]</sup>。

国外对机场系统的建模及仿真方法的研究已经取得了一些成果。Total Airspace and Airport Modeler<sup>[7]</sup>可以对停机位、滑行道和跑道进行高保真仿真, 但对人力和时间成本要求较高。Surface Management Systems<sup>[8]</sup>可以为机场场面调度和管理工作提供支持, 在一定程度上提高了机场运行效率。但是, 该工具把飞机的滑行速度设定为常数, 这与机场运行的实际情况不符。针对这一问题, Yusuke Kariya 等<sup>[9]</sup>对大型机场飞机滑行拥堵现象进行分析, 对飞机滑行过程建模, 提出两种策略有效地缩短了滑行时间, 模型限制了飞机在滑行道的最大滑行速度, 但并没有对飞机滑行时速度的变化规则进行详细讨论。飞机在机场场面中的动态运行过程可以看成一种特殊的交通流。在汽车交通流的研究中, 基于元胞自动机理论的建模仿真技术已经相对成熟<sup>[10-12]</sup>。其中, 经典的 NS 模型(NaSch Model, NS)<sup>[13]</sup>在交通流模拟中得到了广泛的应用。NS 模型在机场场面交通仿真中显现出巨大的潜力, 一些研究者将汽车交通流中的元胞自动机模型运用到机场场面交通流的模拟中。如周天琦等在 NS 模型基础上提出 CA-GEP 模型<sup>[14]</sup>, 该模型能够合理表现出飞机起降的运行过程, 但是只考虑了平行双跑道机场, 而实际情况下, 机场跑道的运行方式复杂多样。康瑞等<sup>[15]</sup>构造了航空器滑行元胞自动机模型, 定义了航空器元胞尺寸和速度位置演化规则, 该模型只考虑了一条滑行道的跑滑结构, 不能实现对整个机场场面复杂路网的准确模拟。Ryota Mori<sup>[16]</sup>提出了一种基于 NS 模型的仿真模型, 模型中考虑了速度更新规则和位置更新规则。但是飞机滑行过程有很多不确定性因素, 该模型的适用性不高。以上模型虽然对飞机滑行的速度变化

规则进行了研究, 但是缺乏对机场场面网络交叉口处交通特性的研究。为了真实的模拟整个复杂机场场面交通, 应该对飞机滑行过程中速度的随机性和交叉口处的交通特性进行深入研究。

针对以上模型对机场场面交通仿真存在的不足, 本文在 NS 模型基础上进行改进, 考虑滑行过程中速度变化的随机性, 并定义了路段间包含前方路况占用信息的连接元胞。机场场面复杂路网可以分成不同的路段和连接元胞, 飞机在不同的路段上分别按照改进的演化规则进行速度和位置更新。模型中不仅考虑了机场场面交叉口处交通流的复杂性, 而且加入了滑行过程中影响速度变化的随机因素, 能有效提高对机场场面复杂路网交通模拟的准确度。

## 1 机场场面航班流仿真模型的建立

### 1.1 NS 模型

NS 模型是交通流中经典的一维元胞自动机模型, 可以用来描述汽车交通中复杂的拥堵现象, 其基本原理如图 1 所示。该模型将一条单行道划分为等长的元胞, 图 1 是从右向左编号为 1、2、3、4 的四辆汽车在三个连续时刻位置和速度的更新状态。在任意时刻, 每个元胞有两种状态: 空闲状态或被车辆占据状态。每辆车的速度可以根据实际情况取值 0, 1, ...,  $v_{\max}$ 。每辆车根据每一时刻的速度向前移动相应的元胞数, 所有的车辆向右移动, 定义初始值后, 车辆的位置和速度就会按照演化规则动态更新。

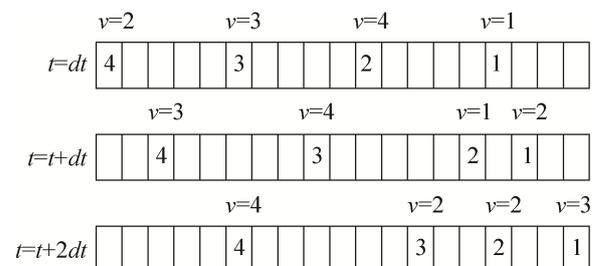


图 1 NS 模型  
Fig. 1 NS model

该模型包括以下 4 步更新准则:

(1) 加速规则:

若  $v_n(t) \leq v_{max}$

则  $v_n(t+1) \rightarrow \min\{v_n(t)+1, v_{max}\}$ .

(2) 减速规则:

若  $v_n(t+1) \geq x_n(t+1) - x_{n+1}(t+1)$

则  $v_n(t+1) \rightarrow x_n(t+1) - x_{n+1}(t+1) - l$ .

(3) 随机慢化规则: 以随机概率  $p$  更新速度

$v_n(t+1) \rightarrow \max\{0, v_n(t+1) - 1\}$ .

(4) 位置更新规则:

$x_n(t+1) \rightarrow x_n(t) + v_n(t)$ .

规则中参数含义为  $x_n(t)$ : 第  $n$  辆车  $t$  时刻的位置;  $v_n(t)$ : 第  $n$  辆车  $t$  时刻的速度;  $v_{max}$ : 此处最大滑行速度为 5 元胞/秒;  $l$ : 车辆长度, 即一个元胞长度;  $p$ : 车辆的随机慢化概率。NS 模型是模拟单车道交通中的经典模型, 强调了单车道同方向上车辆间的相互作用, 对模拟单一路段高速公路或环形路段上的交通流具有很大的优势。NS 模型不能用来描述机场场面交通, 为了突出机场交通的特性, 需要综合考虑多种因素。

### 1.2 机场系统的组成

机场主要用于航空器的起降, 并负责乘客和货物的中转服务。根据功能机场可分为不同的区域, 如图 2 所示, 机场系统主要由跑道系统、滑行道系统、停机坪和航站楼四部分组成<sup>[17]</sup>。

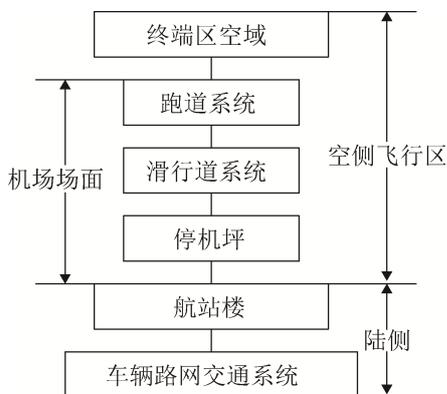


图 2 机场系统组成示意图  
Fig. 2 Composition of the airport system

其中跑道系统、滑行道系统和停机坪属于空侧, 主要负责飞机的运行。航站楼、连接机场区域的公路、铁路交通和各种对应的服务设备属于陆侧, 主要负责对乘客和货物提供中转任务。

本文所研究的对象是机场场面飞行区部分的交通, 即飞机经过跑道着陆后滑行至指定停机位, 或者飞机由停机位被推出, 通过分配的滑行道到达跑道起飞的过程。

### 1.3 机场场面交通与道路的差异

城市道路交通中各路段汽车的行驶规则基本一致, 单车道上车辆的行驶方向是确定的, 而机场场面的道路结构组成相对复杂。飞机在不同的路段实际运行规则差异很大, 在一些路段上的滑行方向由实际情况决定, 同一路段可以双向滑行。考虑到机场场面交通的复杂性, 在模拟时应该避免发生滑行对头冲突<sup>[18]</sup>。图 3 是飞机进、离港交通示意图, 复杂的机场场面路网结构决定了交通流的复杂性。

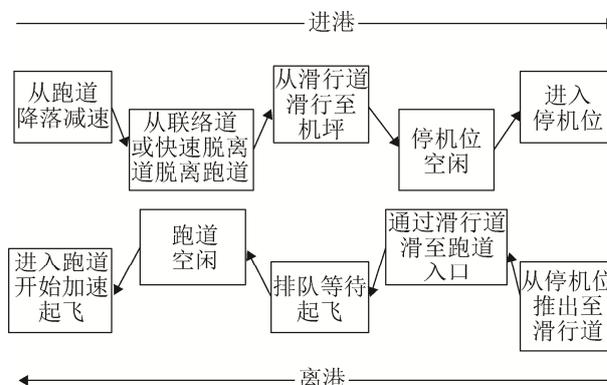


图 3 飞机进、离港机场场面交通示意图  
Fig. 3 Airport scene traffics of flight arrival and departure

(1) 飞机在跑道上的复杂性。飞机的起飞和降落是机场交通中最重要的一环。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。通常, 一条跑道仅供一架飞机使用, 其余飞机在滑行道等待起飞。等待降落的飞机可以优先使用跑道, 但这会延长飞机的起飞等待时间。

(2) 飞机在滑行道上的复杂性。塔台管制给每

架飞机指定滑行路径, 为了避免发生滑行追尾冲突与交叉冲突, 飞机滑行时要满足一定的速度限制和安全间隔要求。飞机由飞行员操作控制, 滑行具有自主性和个体差异性。为了缩短滑行时间, 塔台管制员对飞机路径的规划往往遵从最短路径的原则, 并按照经验对滑行的飞机进行管制与调度。不同型号飞机的滑行速度和尾流间隔要求不同, 对这种按照固定路径滑行的飞机进行合理的管制可以有效避免滑行冲突。

(3) 飞机在快速脱离道和联络道上的复杂性。飞机最大的转弯速度由跑道与联络道的夹角决定。夹角越大允许的出口速度越小, 夹角越小允许的出口速度越大。飞机从哪个出口滑出跑道主要依据飞机机型和减速性能。

(4) 飞机在停机位的复杂性。飞机从停机位推出一般有三种方向, 图 4 中 a、b、c 是 3 号停机位的飞机推出路线: 粗线条 a 指飞机向 3 号停机位前方滑行道方向推出; b 指飞机向左侧滑行道方向推出; c 指飞机向右侧滑行道方向推出。在不影响其他飞机正常运行的前提下, 选择合理的方向推出。如果超过一个方向满足推出条件, 就从最容易到达指定跑道的方向推出; 如果不满足推出条件, 则需要在停机位处等待。

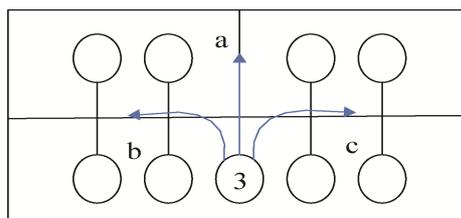


图 4 停机位推出方向

Fig. 4 Pushback directions of the spot

(5) 飞机通过交叉路口的复杂性。在道路路网结构建立的元胞自动机模型中, 多数是利用交通灯为约束因素对交通进行模拟。因为机场场面交通的路口管制只能由塔台完成, 所以增加了模拟的难度。飞机的尾流会对后面的飞机造成影响, 后机需要在路口前等待塔台指挥才能转弯。飞机转弯

时, 根据路口的最大速度限制进行减速。

由于机场场面交通的复杂性, 将 NS 模型直接应用到机场场面交通的模拟中是不准确的。本文考虑机场场面航班流的实际运行特性, 在 NS 模型基础上, 建立一种更加符合实际情况的改进模型。模型中把机场场面复杂的交通路网结构划分成单独路段和连接元胞, 并加入机型和减速性能等影响因素来限制飞机通过快速脱离道的速度。连接元胞的状态信息包含了下一路段内飞机的行驶方向, 及时获取元胞状态信息可以防止发生滑行对头冲突。在仿真过程中, 通过观察连接元胞状态了解下一路段飞机占用信息, 不同路段上元胞的状态更新反映出交通流的演化过程。

#### 1.4 模型基本参数设置

元胞长度是模型中一个十分重要的参数。为了方便模拟, 车辆模拟中一般选车辆长度为元胞长度, 这样可以通过元胞方便的表达出汽车的速度。各类飞机长度差别较大, 利用飞机的长度定义元胞的尺寸并不可行。飞机的长度大于飞机滑行的速度, 可以利用飞机的滑行速度来定义元胞大小, 再把飞机的长度转化为元胞个数, 这样可以便于模拟。《民航航空空中交通管理规则》规定飞机在停机坪和障碍物附近滑行道上的滑行速度不得超过 15 km/h, 滑行通过路口 g 处需要减速至 10 km/h 之内, 飞机滑行速度不可超过 50 km/h, 在主滑行道速度限制为 30~45 km/h, 滑行至路口 j 处要减速至 20 km/h。为了避免尾流的影响, 后面的飞机跟进滑行时, 飞机之间的间隔不得小于 50 m。

图 5 是某机场场面示意图。机场场面中滑行道、跑道、联络道、停机坪等每个路段分别转化为一个独立的 NS 模型, 将交叉口转化成连接元胞。连接元胞包含前方道路占用信息, 对两个规则不同的路段起到安全过渡的作用, 通过连接元胞后飞机的运行规则发生变化。每个 NS 模型中的演化规则由实际运行规定决定。

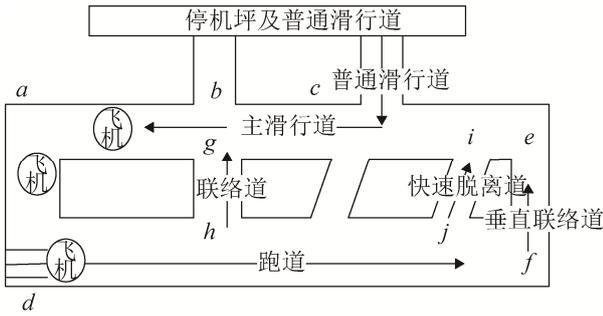


图5 机场场面示意图  
Fig.5 Diagram of airport scene

为了避免滑行冲突, 每条路段包含飞机的占用状态信息。用  $S_{gi}$  表示任意一条滑行路段  $i$  与交叉口节点  $g$  之间的占用状态信息。通过  $S_{gi}$  的取值可以在  $g$  处判定滑行路段  $i$  是否空闲。图5中联络道  $gh$  和两条快速脱离道  $ji$  只供降落的飞机脱离跑道时使用, 因此占用信息只有 0(路段空闲)和 1(飞机正向滑行)两种状态。停机位也是只有空闲和占用两种状态。对于其他路段, 可以分别取 1(飞机正向滑行)、-1(飞机逆向滑行)、0(路段空闲)三种状态。

利用两种元胞自动机模型相结合的思想, 将机场场面连接元胞之间的每个路段转化为一个独立的一维元胞自动机模型, 如图6所示, 路段上有两架飞机先后向右滑行, 图中参数含义为  $l_i$ : 第  $i$  条路段长度;  $s_{ij}(t)$ : 第  $j$  架飞机的机头沿滑行方向距离道路  $i$  尽头的距离;  $s_{ij+1}(t)$ : 第  $j+1$  架飞机沿滑行方向距离道路  $i$  尽头的距离;  $x_{ij}(t)$ : 飞机  $j$  尾端沿滑行方向到道路  $i$  尽头的距离。  $d_{ij}(t) = s_{ij}(t) - s_{ij+1}(t) - l_{a,j+1}$  为前后两架飞机之间的间距;  $l_{a,j+1}$ : 第  $j$  架飞机的长度。当满足  $x_{ij}(t) < l_{a,j}$  时, 飞机  $j$  正滑出这条路段, 当满足  $l_i - s_{ij}(t) < l_{a,j}$  时, 飞机  $j$  正滑入这条路段。

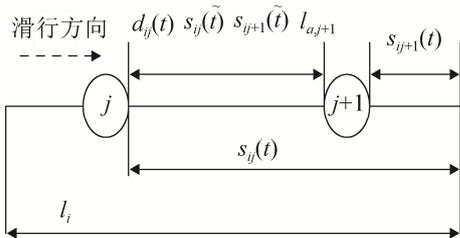


图6 机场场面路段参数设定示意图  
Fig.6 Parameter setting for airport scene road

### 1.5 模型中元胞的演化规则

飞机滑出路段前或者飞机进入路段后, 即满足  $s_{ij+1}(t) \neq 0$  或  $l_i - s_{ij+1}(t) \geq l_{a,j}$  时, 在该路段的行为满足以下五条规则:

#### 1. 加速规则

$$\text{if } d_n > L_t \text{ or } d_{nc} > \frac{v_n(v_n + 1)}{2} - \frac{v_{curve}(v_{curve} + 1)}{2}$$

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

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

式中: 参数含义为  $v_n(t)$ : 飞机  $n$  在  $t$  时刻的滑行速度;  $d_n$ : 飞机  $n$  与前面飞机的间距;  $L_t$ : 飞机  $n$  与前面飞机的安全尾流间隔;  $d_{nc}$ : 飞机  $n$  与前方路口的距离;  $v_{curve}$ : 路口处最大滑行速度。

#### 2. 减速规则

(1) 当满足(2)式的距离要求时, 飞机开始以  $1 \text{ cell/s}^2$  的加速度平稳减速。

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

式中: 参数含义为  $d_{stop}$ : 飞机  $n$  与前面飞机的距离或到跑道头的距离;  $v$ : 飞机当前的滑行速度。式(2)表示当前面出现飞机或者在路口处等待其他飞机通过时, 飞机不得不减速的最小距离条件。因此得出防撞减速公式如(3)所示:

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

$$v_n(t+1) = v_n(t) - 1 \tag{3}$$

(2) 当满足公式(4)描述的条件时, 飞机开始减速。

$$d_{curve} \leq \sum_{s=v_{curve}+1}^v S = \frac{v(v+1)}{2} - \frac{v_{curve}(v_{curve}+1)}{2} \tag{4}$$

式中: 参数含义为  $d_{curve}$ : 从当前位置到前方弯道路口的距离;  $v_{curve}$ : 到达交叉口的最大转弯速度。因此弯道减速公式如式(5)所示:

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

$$v_n(t+1) = v_n(t) - 1 \tag{5}$$

通过交叉路口的顺序对于仿真也是非常重要的, 可根据真实的交通数据预先设定通过的顺序。

(3) 等待放行规则: 如果不满足起飞间隔, 则需要等待放行, 即  $v_n(t) = 0$ 。

(4) 由于国际标准机场跑道与快速脱离道的夹角是不同的, 并且夹角大小与滑行速度成反比。飞机从快速脱离道脱离跑道只需要降到  $v_{fast}$ , 而从垂直联络道脱离跑道必须将速度降到直角弯道限制的速度  $v_{turn}$ 。飞机能否从快速脱离道脱离跑道受机型和飞机的减速性能影响。

$$d_r = \begin{cases} \frac{v_n(v_n + 1)}{2} - \frac{v_{turn}(v_{turn} + 1)}{2} & A_t = 0 \text{ or } F_i = 0 \\ \frac{v_n(v_n + 1)}{2} - \frac{v_{fast}(v_{fast} + 1)}{2} & A_t = 1 \text{ or } F_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: 参数含义为  $A_t = 1$ : 中小机型;  $A_t = 0$ : 大机型;  $d_r$ : 飞机脱离跑道前在跑道上的滑行距离;  $F_i = 1$ : 飞机减速性能良好;  $F_i = 0$ : 飞机减速性能不好;  $v_n$ : 飞机  $n$  当前的滑行速度;  $v_{turn}$ : 飞机通过垂直联络道的速度;  $v_{fast}$ : 飞机通过快速脱离道的速度。

### 3. 随机规则

$$v_n(t+1) = \begin{cases} v_n(t) + 1 & v_n(t) = 0 \\ v_n(t) - 1 & v_n(t) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

当  $v_n(t) = 0$  时, 以概率  $p_a$  随机加速; 当  $v_n(t) > 0$  时, 以概率  $p_b$  随机减速。

### 4. 位置更新规则

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t) \quad (8)$$

式中: 参数含义为  $x_n(t)$ :  $t$  时刻飞机  $n$  的位置;  $v_n(t)$ :  $t$  时刻飞机  $n$  的速度。

### 5. 时间的累计性

$$T = \sum_{i=1}^n (t_{out}^i - t_{in}^i) + \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (9)$$

式中: 参数含义为  $T$ : 所有飞机滑行的总时长;  $t_{in}^i$ : 第  $i$  架飞机滑进模型的时刻;  $t_{out}^i$ : 第  $i$  架飞机滑出模型的时刻;  $\Delta t_i$ : 飞机  $i$  的延误等待时间。

## 2 模型的仿真实验与分析

图 7 是某机场场面交通简化模型, 将整个机场场面转化成多条独立的路段和连接元胞。为了方便

模拟, 设定元胞长度为 2.5 m, 更新时步为 1 s, 直道最大滑行速度为  $v_{rmax} = 5$  元胞/s, 转弯最大秒速  $v_{curve} = 2$  元胞/s, 滑行安全间距为 20 元胞。飞机的长度根据机型的不同可以近似取值, 如 37.52 m 的 A320-200 机型, 可以近似取  $l_a = 15$  元胞。根据机场路网结构, 把跑道、滑行道、停机位的实际长度转化成元胞个数。

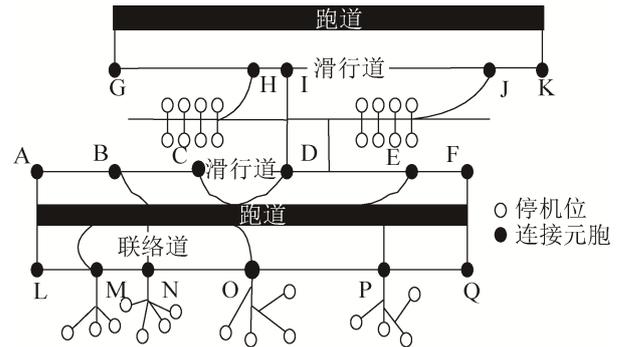


图 7 机场场面简化模型

Fig. 7 Simplified model of airport scene

在上述理论基础上, 模型中加入时钟推进机制, 模拟仿真系统动态演化。按照上述参数初始化仿真模型, 对某机场 30 天内实际起降数据进行筛选和处理。表 1 是机场某天 08:00-10:00 时间段内部分真实的航班数据。为了验证改进后的模型比 NS 模型更加适用于机场场面复杂交通的模拟, 在单一路段和整个机场场面复杂路网两种情况下, 分别对两个模型进行 MATLAB 仿真实验。

在滑行道路段上分别对两个模型进行多次仿真实验, 图 8 是 NS 模型及其改进模型对进入滑行道的 840 架飞机的仿真对比图。

通过实际数据我们算得平均滑行时间约 570 s, 最大滑行时间约为 1 080 s。利用绝对误差公式(10)计算出仿真值  $x_i$  与真实值  $x$  之间的最大误差, 并利用真实时间  $t_i^a$  与仿真时间  $t_i^s$  的差值来估算仿真精确度。

$$|x_i - x| \quad (10)$$

$$J = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i^a - t_i^s)^2} \quad (11)$$

表 1 部分航班运行数据  
Tab. 1 Partial operational data of flights

FLTNO	Type	Start time	Terminal time	Passenger
CA1622	738	08:00	08:09	165
CA1234	738	08:02	08:12	120
CA1364	321	08:06	08:14	100
CA9502	320	08:11	08:18	154
CA9542	738	08:14	08:20	162
HU7702	346	08:21	08:27	213
HU7812	332	08:24	08:39	272
JD5562	319	08:27	08:36	136
JD5624	320	08:31	08:42	132
CZ3962	332	08:36	08:47	198
CZ6160	321	08:40	08:53	161
CZ6599	320	08:46	08:57	147
CZ6993	332	08:49	08:58	137
CA4194	320	08:52	08:55	154
CA1239	738	08:57	09:00	109
MU5298	738	09:06	09:15	156
MU5136	320	09:13	09:20	143
CA9503	321	09:15	09:24	146
MU7007	321	09:19	09:29	156
CA9541	738	09:22	09:38	103
ZH9921	738	09:27	09:43	155
CA9549	319	09:33	09:40	104
MF8176	738	09:41	09:51	87
MU5112	333	09:43	09:49	260
CA1509	321	09:51	09:59	152
CZ6110	321	09:56	10:13	171
CZ6220	320	10:00	10:15	145

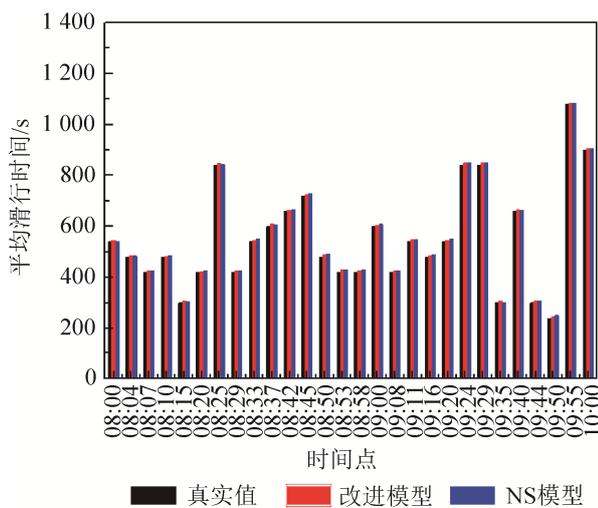


图 8 滑行道滑行时间对比图

Fig. 8 Comparison of taxiing time of taxiway

NS 模型得到的平均滑行时间约 544 s, 最大误差约 23 s。改进的模型得到的平均滑行时间约 553 s, 最大误差约 19 s。在滑行道两个模型的仿真值与真实值相近, 改进模型的仿真准确度优于 NS 模型 12 s。

为了体现飞机在整个机场场面复杂路网的仿真效果, 以某机场 30 天内 07:00-24:00 时间段的所有进、离港航班运行数据为例, 用改进后的模型和 NS 模型分别进行多次仿真。得出每个仿真时间段所有航班的平均值, 根据实际数据求出平均滑行时间真实值的分布情况, 进而得到两个模型的仿真值与真实值对比图如图 9 所示。

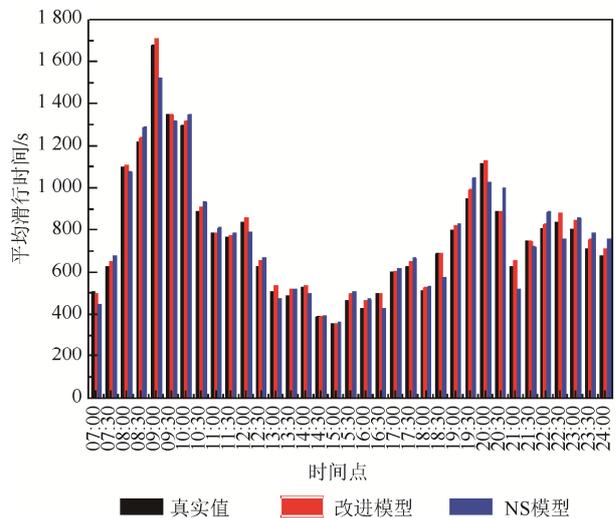


图 9 机场场面复杂路网滑行时间对比图

Fig. 9 Comparison of taxiing time of complex road network

图 9 表明, 改进后模型的仿真结果比传统 NS 模型的仿真结果更符合真实情况。通过真实数据  $x$  和仿真数据  $x_i$  代入公式(12)计算出相对误差平均值作为参考。

$$\delta = \frac{|x_i - x|}{x} \times 100\% \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (13)$$

式(13)计算得到标准误差来判定该组数据的可靠性。通过计算, 改进后的模型与真实值的吻合度提高了 13%。因为传统的 NS 模型中没有考虑路

口处交通对整个复杂系统的影响,与实际交通情况不符。所以,在整个机场场面复杂路网模拟中,改进的模型可以得到更加可靠的结果。改进模型的仿真结果显示,在机场当天早上 08:00-10:00 和晚上 19:00-21:00 期间航班的平均滑行时间比较长。根据当天航班时刻表分析,早上是该机场飞机起降的高峰期,飞机密度较大。为了安全滑行,飞机速度受限,飞机滑行时间较长。机场早上更容易引发航班延误。晚间滑行时长总体降低,但仍然比中午时段的滑行时间长很多。虽然晚上起降航班密度变化不大,但是晚上能见度降低,飞机滑行速度相对减小,滑行时长相对增加。

为了分析航班流密度以及不同机型飞机在交叉口处的到达率对机场场面交通总体变化趋势的影响,选取机场某天航班数据对改进模型进行多次仿真验证。选取仿真平均值作为参考,仿真得到航班流密度-平均速度关系图、不同航班流密度和随机慢化概率下的时空演化图、航班流密度-平均流量关系图和滑行道交叉口处不同机型飞机的到达率对飞机流量的关系图。

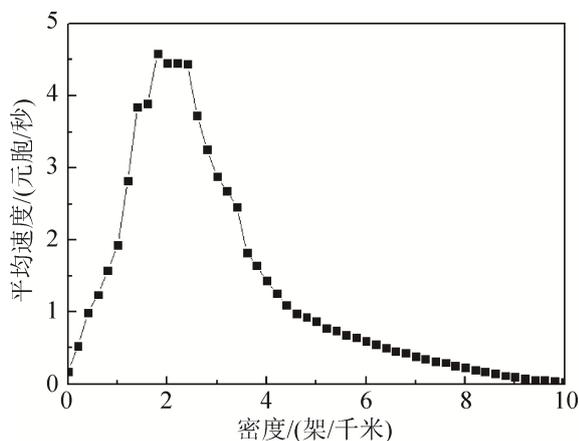


图 10 航班流密度-平均速度关系图

Fig. 10 Diagram of relationship between flight flow density and average velocity

当飞机密度很小时,飞机可以在最大速度限制下加速行驶,平均速度会不断增加。随着飞机密度的增加,飞机受前方飞机的影响会出现减速行为,

飞机的平均速度变小,但平均滑行速度基本稳定在 4.5 元胞/s。当飞机数量超过容量临界值时,飞机之间的相互影响加大,飞机平均速度下降,滑行道整体通行能力也会下降。如果密度过大,飞机之间不满足安全间距要求时,飞机只能暂时停下等待。

飞机在滑行过程中,机场场面上的航班流密度与随机减速概率成反比。图 11 是改进模型在不同航班流密度和随机减速概率下的时空演化图,图中给出的是 1 000~2 000 时步的演化过程,时空图中黑色部分表示元胞没有被飞机占据,白色部分表示元胞被飞机占据。

图 11(a)~(b)是在航班流密度 1.5 架航班/km,不同的减速概率下得到的航班流时空分布图,图 11(a)中随机减速概率  $p_b = 0.2$ ,图 11(b)中  $p_b = 0.8$ 。可以看出图 11(a)没有发生飞机滑行拥堵现象,航班位置的移动是均匀的,航班流运行基本通畅。图 11(b)明显出现了飞机停止滑行进入等待状态、航班流局部拥堵状态。这表明,航班流密度相同时,随着慢化概率加大,航班流会向拥堵的趋势演化。

图 11(c)是在航班流密度为 6 架航班/km,  $p_b = 0.5$  情况下的时空演化图,图中航班流处于严重拥堵状态。密度过大增加了飞机之间的相互影响,为了避免滑行冲突,飞机之间需要保持一定的安全间隔,这会延长滑行等待时间和起飞等待时间。

图 12 中交通流密度小于 2 架/(km/h),随着密度的增加,平均流量增大。达到通行容量之前,密度的增加几乎不会对飞机之间的滑行产生影响,机场场面交通运行通畅。当机场场面交通流密度从 2 架/(km/h)增至 3 架/(km/h),容量逐渐达到饱和,流量达到整个机场交通运行过程的最大值。密度超过 3 架/(km/h),机场场面交通流量随着密度的增加而呈现出减小趋势,机场的通行能力明显下降,飞机滑行需要等待的时间相应延长。

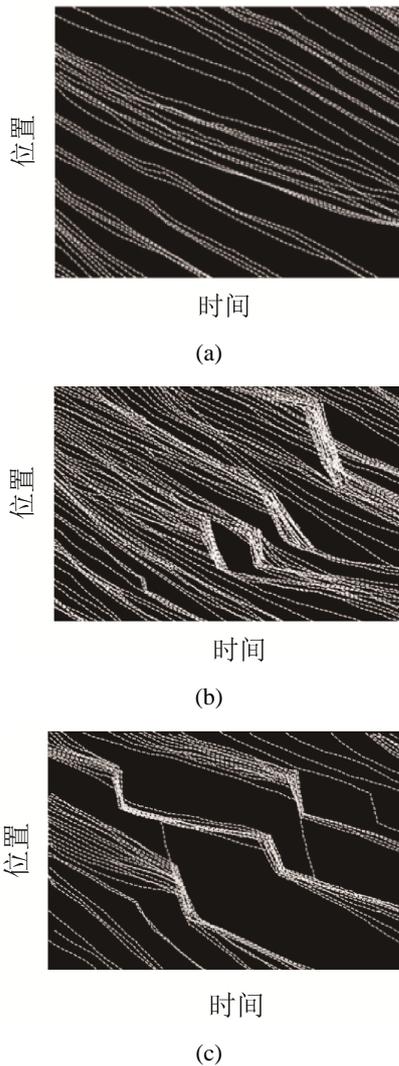


图 11 不同航班流密度和随机慢化概率下的时空演化图  
Fig. 11 Space-time map with different flight flow density and random deceleration probability

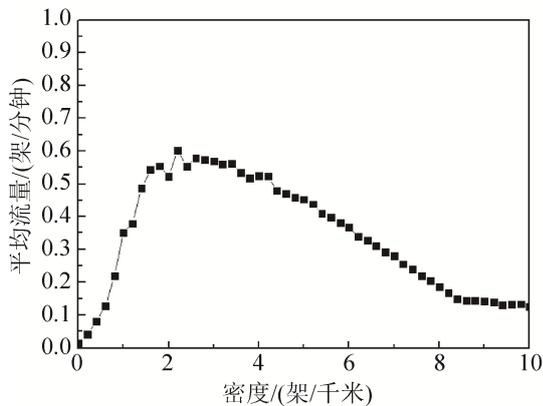


图 12 航班流密度-平均流量关系图  
Fig. 12 Diagram of relationship between flight flow density and average flow

本文以滑行道交叉口为例研究复杂机场场面网络交叉口处不同机型飞机到达率对流量的影响, 仿真元胞如图 13 所示。滑行道 1 长为 355 个元胞; 滑行道 2 长为 200 个元胞。元胞 C 是滑行道交叉口的冲突区, 设置在两条滑行道上的交叉处; 元胞 X 和元胞 Y 分别表示紧邻冲突元胞 C 的小型飞机元胞和大型飞机元胞。不同机型的元胞在交叉口处有三种情况: 直行、等待或转弯。为获取研究所需的流量数据, 在滑行道内设置虚拟探测器, 测 1 000 个时步内通过探测器的不同机型飞机数量。大型飞机流量  $q_m$ (架/时步) 为通过滑行道 1 上第 100 个元胞的飞机数量; 小型飞机流量  $q_n$ (架/分钟) 为通过滑行道 2 上第 100 个元胞的飞机数量。 $p_m$  和  $p_n$ (架/分钟) 分别为交叉口处大型飞机和小型飞机的到达率。



图 13 改进模型滑行道交叉口处元胞空间划分  
Fig. 13 Cell space division at taxiway intersection of the advanced model

图 14(a) 为大型飞机流量  $q_m$  与大型飞机到达率  $p_m$  和小型飞机到达率  $p_n$  的关系。如图所示,  $q_m$  随着  $p_m$  的增大而线性增长, 当  $p_m > p_m^c$  时, 流量变为临界值  $q_m^c$ , 达到大型飞机饱和流量。随着  $p_n$  的不断增加,  $q_m^c$  越来越小, 当  $p_n > 0.5$  时, 大型飞机的饱和流量  $q_m^c$  趋于稳定。

图 14(b) 为小型飞机流量  $q_n$  与  $p_m$  和  $p_n$  的关系。 $q_n$  随着  $p_n$  的增加线性增长, 但是当  $p_n > p_n^c$  时, 流量  $q_n$  达到小型飞机饱和流量值  $q_n^c$ , 流量趋于稳定。当  $p_m$  继续增加, 饱和流量也越来越小。当  $p_m > 0.2$  时, 饱和流量  $q_n^c$  趋于稳定。当

$p_m > p_m^c$  ( $p_n > p_n^c$ )时, 由图 14 可知, 两个机型飞机之间的滑行有明显的相互干扰现象。

本文从多方面分析了机场航班流的运行状态演化过程, 进而研究了交叉口处飞机到达率对交通流量的影响。该模型在模拟机场场面交通流中具有巨大的潜力, 能更加真实地体现航班流的运行行为, 为缓解机场运行容量不足、提高运行效率提供重要的理论参考。

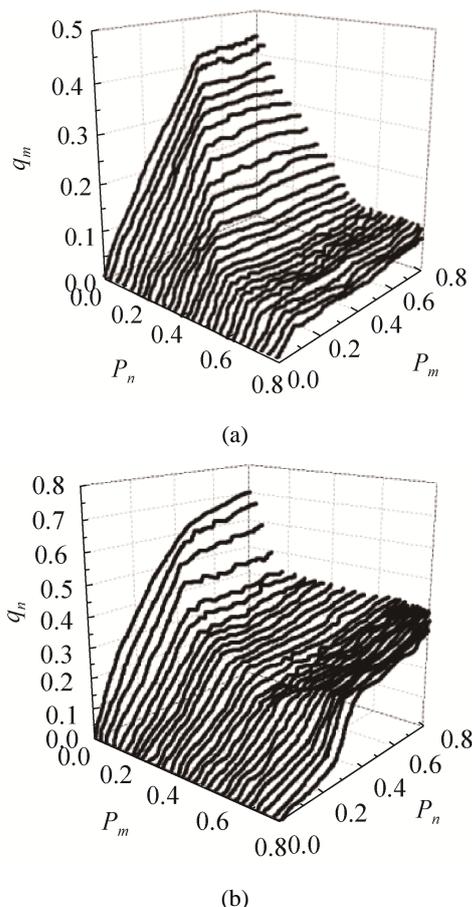


图 14 大型飞机流量与大(小)型飞机到达率的关系  
Fig. 14 Relationship between large flight flow and arrival rate of large (small) flight

### 3 结论

(1) 建立的机场场面交通仿真模型考虑了滑行时的随机因素和交叉口处的交通特性, 在贴近客观实际情况的前提下, 能较好地提高模型的可靠性。结合机场实际运行数据进行仿真, 并对机场流量、密度和速度之间的关联关系进行推演, 研究了

机场航班流拥堵状态的转化过程。结果表明, 改进的模型能更准确的反映机场场面航班流的行为状态, 在机场场面交通流模拟中有明显的优势, 能提高机场决策者的动态实时调配能力和应急保障能力。

(2) 该模型可以提高机场的精准管理能力, 从而提高机场容量, 缓解航班运行给机场带来的运行压力。该模型为实现机场运行状态定量预测提供了可能, 对机场场面流量的合理控制, 以及快速缓解堵塞和延误波及现象具有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 杨磊, 胡明华, 尹苏皖, 等. 大型繁忙机场场面离场交通流拥堵特征分析[J]. 航空学报, 2016, 37(6): 1921-1930.  
Yang Lei, Hu Minghua, Yin Suwan, et al. Characteristics analysis of departure traffic flow congestion in mega airport surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(6): 1921-1930.
- [2] 冯兴杰, 岳鹏涛. 基于动态优先级的机场滑行道调度优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(4): 999-1003.  
Feng Xingjie, Yue Pengtao. Optimization algorithm based on dynamic priority for airport taxiway scheduling[J]. Computer engineering and design, 2016, 37(4): 999-1003.
- [3] 尹嘉男, 胡明华, 张洪海, 等. 独立离场模式下多跑道时空资源优化调度方法[J]. 航空学报, 2015, 36(5): 1574-1584.  
Yin Jianan, Hu Minghua, Zhang Honghai, et al. Optimized method for multi-runway spatiotemporal resource scheduling in the mode of independent departures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(5): 1574-1584.
- [4] Frank Saunders, Jason Rife, Sai Vaddi, et al. Information flow diagram analysis of a model cyber-physical system: Conflict detection and resolution for airport surface traffic[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine (S0885-8985), 2013, 28(12): 26-35.
- [5] Kenji Uehara, Kunihiko Hiraishi, Koichi Kobayashi, et al. Mesoscopic modeling of airport surface by object Petri nets[C]// IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (S2161-8070), NJ: IEEE Press, 2015: 298-303.

- [6] Ryota Mori. Aircraft taxiing model at congested airports[C]//The 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Brisbane: Australia, 2012: 4353-4361.
- [7] Long D, Kostiuk P. Integrating LMINET with TAAM and SIMMOD[R]. Virginia: NASA, 2001: 25-36.
- [8] S Atkins, Y Jung, C Brinton, et al. Surface management system field trial results [C]//The 4th Aviation Technology, Integration and Operations(ATIO)Forum, Chicago: AIAA, 2004: 20-22.
- [9] Yusuke Kariya, Takamichi Mase, Shigeki Yoshihara, et al. Analysis of congestion of taxiing aircraft at a large airport[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, NJ: IEEE Press, 2011: 180-185.
- [10] Yaohan He, Danya Yao, Yi Zhang, et al. Cellular Automaton Model for Bidirectional Traffic under Condition of Intelligent Vehicle Infrastructure Cooperative Systems[C]//IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, NJ: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [11] Chong yuan Tao, Jian Zhang. A Cellular Automata Simulation on Multi-lane Traffic Flow for Designing Effective Rules[C]//IEEE International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration, NJ: IEEE Press, 2015: 209-212.
- [12] Juan Bao, Wei Chen. Prediction of Traffic Flow Based on Cellular Automaton[C]//IEEE International Conference on Industrial Informatics Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration, NJ: IEEE Press, 2015: 88-92.
- [13] 曲仕茹, 贾光帅. 考虑驾驶疲劳的一维元胞自动机交通流模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(5): 46-51.
- [14] 周天琦, 康瑞. 多跑道机场起降排序实时优化元胞自动机模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 87-92.
- Zhou Tianqi, Kang Rui. Real time optimization model for flight take-off and landing on multi-runways using cellular automaton[J]. Journal of Sichuan University: Engineering (Science Edition), 2014, 46(2): 87-92.
- [15] 杨凯, 康瑞. 基于元胞自动机的航空器起降间隔研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(2): 127-134.
- Yang Kang, Kang Rui. Research on Taking Off and Landing Space of Aircrafts Based on Cellular Automaton[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2016, 48(2): 127-134.
- [16] Ryota Mori. Aircraft ground-taxiing model for congested airport using cellular automata[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2013, 14(1): 180-188.
- [17] 倪桂明, 杨东援. 机场系统计算机仿真研究的应用与发展[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(1): 112-115.
- NI G M, YANG D Y. Application and Development of Computer Simulation Research on Airport System[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(1): 112-115.
- [18] 王艳军, 胡明华, 苏炜. 基于冲突回避的动态滑行路径算法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 933-939.
- Wang Yanjun, Hu Minghua, Su Wei. Dynamic taxiway routing algorithm based on conflict avoidance[J]. Journal of South-west JiaoTong University, 2009, 44(6): 933-939.