

基于元胞自动机的乘客登机策略

尚华艳¹, 陆化普¹, 彭愚²

(1. 清华大学 土木工程系, 交通研究所, 北京 100084; 2. 北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 登机策略的研究以最小化乘客登机时间为目标。该文对登机策略选择问题进行仿真建模和评价分析。分析乘客登机过程和特点, 利用双曲线模型描述乘客放置行李时的过道冲突, 提出了过道冲突模型和座位冲突模型。根据元胞自动机仿真原理, 建立了乘客登机模拟流程。对 7 类 21 种登机策略的模拟结果表明: 有序的策略并不一定比无序策略更能提高登机效率; 相反, 乘客自由登机可能是一种最简单且行之有效的办法。

关键词: 登机策略; 元胞自动机; 过道冲突模型

中图分类号: V 355

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2010)09-1330-04

Aircraft boarding strategy based on cellular automata

SHANG Huayan¹, LU Huapu¹, PENG Yu²

(1. Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aircraft boarding strategies seek to minimize the boarding time. This paper provided simulations and analyses of aircraft boarding strategies using a hyperbolic model to describe conflicts in the aisle when passengers are placing baggage in the overhead bins. An aisle conflict model and a seat conflict model are used to describe passenger motion based on a cellular automata model. Simulations for seven strategies and twenty-one policies show that some strategies do not improve the boarding efficiency and an orderly strategy is not necessarily better than a disordered one. On the contrary, random boarding may be the simplest but most effective method.

Key words: aircraft boarding strategy; cellular automata model; aisle conflict model

乘客登机时间是决定飞机周转时间的关键环节, 在短途航线中占到了总旅行时间的 40% ~ 60%。缩短登机时间有助于安排更多的飞行班次, 获得更高的经济效益, 并提高服务质量和市场竞

争力^[1-3]。

登机策略研究以最小化登机时间为目标, 大量学者首先采用了仿真模拟的方法。Marelli 等人针对不同内部结构的波音 757 飞机, 模拟了多种登机策略^[4]。Van Landeghem 和 Beuselinck 系统地提出了登机策略的仿真模型和方法, 结果表明随机 (random) 登机优于大部分航空公司当时使用的从后向前 (back to front, BF) 策略^[5]。在此基础上, Pieric 和 Kai 提出了线性的过道冲突模型和基于网格的模拟方法^[6]。Kirchner 等人则糅合了不均衡理论、元胞自动机和动力学等理论, 讨论了登机门临界宽度的影响^[7]。

一些学者则利用数学方法研究乘客登机问题。Menkes 等人将登机问题视为非线性指派和 0—1 整数规划问题进行研究, 率先提出倒金字塔 (reverse pyramid, RP) 策略^[8]。Bazargan 建立线性规划模型来求解最优的登机策略, 由从外向里 (outside in, OI) 策略演化为 RP 策略, 最终演化为 BF 策略^[9]。

本文采用基于元胞自动机 (cellular automata, CA) 的仿真方法来研究登机策略, 对当前使用的登机策略和基于数学方法的各种策略进行比较分析。

1 登机仿真模型

1.1 机舱的描述

登机问题研究的主要对象是短途航线。本文以中小型飞机空客 A320 为样本, 如图 1 所示。对机

收稿日期: 2009-11-16

基金项目: 国家“八六三”高技术项目 (2007AA11Z233);

国家自然科学基金青年科学基金项目 (70901046);

“十一五”国家科技支撑计划项目 (2009BAG13A06);

中国博士后科学基金项目 (20090450395)

作者简介: 尚华艳 (1978—), 女 (汉), 湖北, 博士后。

通讯作者: 陆化普, 教授, E-mail: luhp@tsinghua.edu.cn

舱假设如下: 1) 所有座位视为大小相同的紧密排列的元胞; 2) 过道与一个座位等宽, 仅允许乘客单列通过; 3) 唯一的入口在头等舱和经济舱之间; 4) 头等舱乘客较少且优先登机, 故只需分析登机策略对经济舱乘客的影响。基于上述假设, 用飞机网格矩阵 AGM (aircraft grid matrix) 表示机舱抽象成的网格, m 和 n 分别表示机舱内座位排数和座位列数(过道计为一列), 即 $AGM = [a_{i,j}]_{m \times n}$, 其中

$$a_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{空闲;} \\ 1, & \text{占用.} \end{cases} \tag{1}$$

本文中 m 取 23, n 取 7。以 $a_{i,j}$ 表示某时刻乘客在机舱中的位置, 以 $a_{x,y}$ 表示乘客票上分配的座位。 $a_{1,4}$ 即入口的位置。

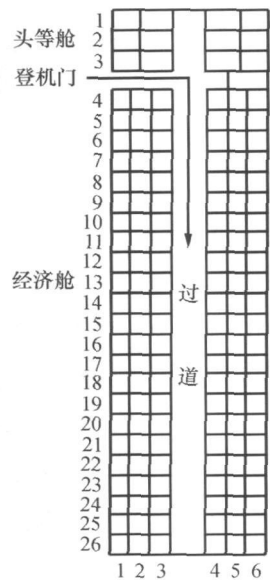


图 1 小型飞机抽象网格图

1.2 乘客行为描述

对乘客行为作如下假设: 1) 乘客从机舱前部舱门进入, 到达指定座位以后, 在原地放置随身行李, 然后坐下; 2) 乘客只能单列通过, 无法越行; 3) 所有乘客在无堵塞时具有相同的移动速度; 4) 飞机满载且没有乘客迟到或插队。

乘客的运动状态有 3 种: 匀速前进、等待、停滞。停滞是指到达指定座位尚未坐下的状态, 如正在放行李等。若乘客没有到达指定座位, 则其在过道中运动过程类似于 Wolfram 的 184 号 CA 规则, 即:

$$a_{i,j}^t = 1 \xrightarrow{t+1} a_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} 0, & \text{当 } a_{i+1,j}^t = 0; \\ 1, & \text{当 } a_{i+1,j}^t = 1; \end{cases} \tag{2}$$

$$a_{i,j}^t = 0 \xrightarrow{t+1} a_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} 0, & \text{当 } a_{i-1,j}^t = 0; \\ 1, & \text{当 } a_{i-1,j}^t = 1. \end{cases} \tag{3}$$

其中 t 表示当前时刻。如果乘客到达指定座位, 将会停下放置行李并可能出现冲突, 此时进入停滞状态。系统首先计算停滞时间, 即过道冲突总时间 T_{aisle} 与座位冲突总时间 T_{seat} 之和 Γ 。当模拟时钟推进时, 处于停滞状态的乘客不做任何行动, 只判断停滞时间是否达到。如果停滞时间没有结束, 则继续停滞; 如果停滞时间结束, 则将该乘客视为已经坐下, 从队列中清除, 令其原来所在坐标 (i, j) 对应的 AGM 矩阵元素 $a_{i,j} = 0$ 。停滞过程如下:

$$\begin{cases} a_{i,j}^t = 1 \xrightarrow{t+\Gamma} a_{i,j}^{t+\Gamma} = 0, \\ a_{x,y}^t = 0 \xrightarrow{t+\Gamma} a_{x,y}^{t+\Gamma} = 1, \end{cases} \quad \text{当 } i = x. \tag{4}$$

1.3 冲突模型

舱内乘客的主要冲突为过道冲突和座位冲突。过道冲突是由乘客放置行李而使紧随其后的部分乘客产生延误。例如登机队列中相邻 2 个乘客的座号是 $a_{8,1}$ 和 $a_{12,2}$, 当前一个乘客到达第 8 排时, 他会找到自己的座位, 并且将行李放到行李架上; 这段时间内 $a_{12,2}$ 的乘客将无法继续前进只能原地等待。座位冲突是当一个乘客就座以后, 他有可能挡住同一排的其他乘客就座。例如 $a_{5,3}$ (靠过道) 的乘客已经就座, $a_{5,1}$ (靠窗) 的乘客要入座, 则 $a_{5,3}$ 的乘客必需起身让 $a_{5,1}$ 的乘客进入, 由此会产生所谓的座位冲突, 同时堵塞过道。如果 $a_{5,3}$ 和 $a_{5,2}$ 的乘客都已就座, 那么 $a_{5,1}$ 的乘客入座将更加困难, 冲突时间更长。

1.3.1 过道冲突模型(行李架模型)

Van Landeghem 和 Beuselinck 采用三角分布来描述乘客的行为, 将过道冲突时间视为一个概率事件, 没有考虑行李架上行李数量增加、剩余空间减少导致后来乘客放置行李的时间变化^[5]。

Ferrari 和 Nagel^[6] 行李放置时间的模型虽有改进, 但依然存在 2 点问题: 1) 时间系数随着行李数量呈线性的增长; 2) 模型没有考虑行李架的容量上限。有鉴于此, 本文提出如下双曲线模型:

$$T_{aisle} = \theta + \frac{\lambda}{(c+1) - (n_{bin} + n_{lug})} n_{lug}, \tag{5}$$

s. t. $0 \leq (n_{bin} + n_{lug}) \leq c$.

式中: T_{aisle} 表示乘客入座消耗的总时间; θ 表示乘客入座基本时间, 取 2 模拟时长 (1 模拟时长对应 2.4 s); n_{bin} 表示行李架上现有行李的数量; n_{lug} 表示乘客将要放置的行李的数量; c 表示一排座位上方行李架的最大容量; λ 为修正系数, 由实测值确定。参照 VBL^[5], 令 $\theta = 1.5$, $c = 9$, $\lambda = 10$, 则

$$T_{\text{aisle}} = 1.5 + \frac{10n_{\text{luggage}}}{10 - (n_{\text{bin}} + n_{\text{luggage}})}, \quad (6)$$
$$\text{s. t. } 0 \leq (n_{\text{bin}} + n_{\text{luggage}}) \leq 9.$$

双曲线模型中, 令 ΔT 表示放置一件行李所需要的单位时间, n_{total} 表示行李总数, 则 $\Delta T = f(n_{\text{total}})$ 是一条双曲线在 $0 \leq n_{\text{total}} \leq c$ 的部分 (见图 2)。当行李箱空余较大时, 双曲线在区间 $[0, 6]$ 变化较缓慢; ΔT 在区间 $[6, 9]$ 迅速上升, 表示行李箱变得非常拥挤; $n_{\text{total}} \rightarrow 10$ 时, $\Delta T \rightarrow \infty$, 超过了行李箱容量限制。

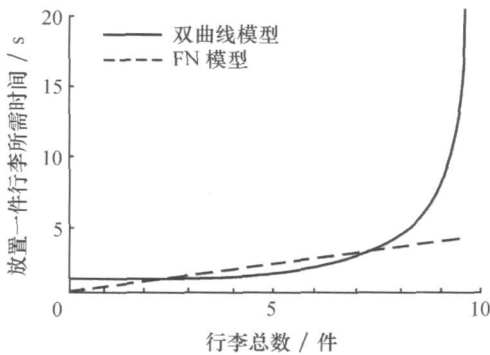


图 2 ΔT 随 n_{total} 变化的变化趋势

1.3.2 座位冲突模型

从微观角度看, 座位冲突包含 3 个过程: 1) 已经坐下的乘客起身到过道; 2) 新来的乘客入座; 3) 步骤 1 中起身避让的乘客重新入座。则:

$$T_{\text{seat}} = T_{\text{out}} n_{\text{seat}} + T_{\text{in}} + T_{\text{in}} n_{\text{seat}}, \quad (7)$$

其中: T_{seat} 表示座位冲突总时间; n_{seat} 表示引起阻碍的乘客数量, $n_{\text{seat}} \in (0, 1, 2)$; T_{out} 表示乘客起身到过道的的时间; T_{in} 表示乘客从过道坐入座位的时间。设 $T_{\text{out}} = T_{\text{in}} = \mu$ (本文取 1.5 个模拟时长), 可得:

$$T_{\text{seat}} = \mu(1 + 2n_{\text{seat}}). \quad (8)$$

2 基于元胞自动机的乘客登机模拟流程

模拟流程如图 3 所示, 对关键步骤解释如下:

1) 按策略生成排序: 根据既定的策略, 将乘客排成若干子队列, 再将各子队列首尾相连, 构成一个完整的登机序列。按一定规则分成的子队列中, 顺序任意, 但子队列之间相连接的顺序是根据策略确定的。故每次仿真时登机序列都会有局部的不同。

2) 循环 3 次允许 1 人进入: 假设检票系统每隔 7.2 s 放行 1 名乘客, 系统时间取 2.4 s 为一个步长, 即整体循环 3 次, 机舱内乘客队列中增加 1 人。

3) 进入停滞状态(计算坐下所需时间): 当乘客到达指定座位时, 将会放置行李并可能出现座位冲突, 仿真时笼统地视为停滞状态。

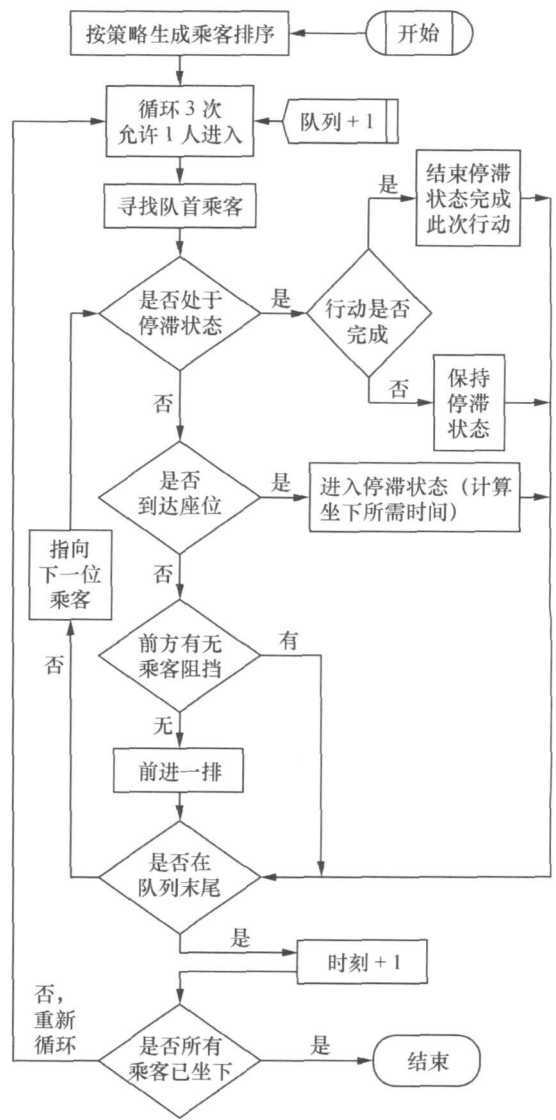


图 3 基于元胞自动机的登机策略模拟流程

3 仿真与结果

筛选 7 大类具有代表性的策略, 命名规则如下: **Random** 随机登机, 即不采取任何组织策略, 乘客完全自由、随机地排成一列通过检票口入舱。

BF_n(back to front) 按座位排号将乘客分为 n 组, 组内顺序任意, 从机舱尾部向头部依组次登机。

FB_n(front to back) 顺序与 BF 法相反。

RZ_n(rotating zone) 按座位排号将乘客分为 n 组, 组内顺序任意, 按机舱首尾向中部的顺序登机。

OI(outside in) 按座位列号将第 A、F 列乘客分为第 1 组, 第 B、E 列分为第 2 组, 第 C、D 列分为第 3 组, 组内顺序任意, 各组按升序登机。

OI_LR 不同座位列号的乘客分为一组, 组内顺序任意, 各组按 A、F、B、E、C、D 的顺序登机。

RP_n(reverse pyramid) 该方法是 OI 法的变种, 以倒金字塔的顺序由外向内组织乘客登机。

SBS(seat_by_seat) 按照座位号逐一确定每个乘客在队列中的最优顺序。

用软件 C# .net2005 编程开发出登机模拟系统。因篇幅限制, 仅分析登机时间和冲突次数(见图 4)。

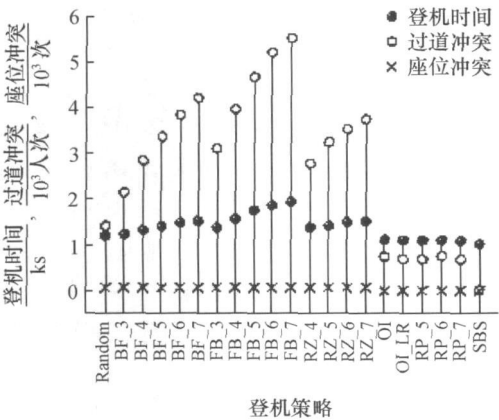


图 4 21 种登机策略的模拟结果对比图

1) BF、FB、RZ 策略所花费的登机时间随着分组数目的增加而增加, 即分组越少效率越高; 而 OI、RP 类策略所花费的时间与分组数目的关系不大。

2) 有序的策略并不一定比无序(Random)状态更优。显然, 基于乘客座位排数分组的策略(如 BF、FB、RZ), 所花费的时间大于 Random。故 BF、FB、RZ 策略不但不能提高登机效率, 反而使效率降低; BF 等策略随着分组数的增加, 组内乘客的位置越接近时, 过道冲突明显增加, 而座位冲突保持不变。

3) 单纯从登机时间上看, OI、RP 策略优于 Random, 劣于 SBS 策略。原因是 OI、RP 策略完全避免了座位冲突, 相应减少了过道冲突。

4) 仿真结果表明 OI_LR 策略稍优于 RP 策略。

5) SBS 策略虽从理论上得到最短登机时间, 但由于排队组织成本太高, 很少被使用。其他登机策略效果从优到劣的排序为: OI、RP、Random、BF、RZ、FB。

4 结 论

通过模拟 7 类 21 种登机策略, 给出了 7 类登机策略的排序。仿真模拟结果表明其中一些方法并不能提高登机效率。相反, 乘客自由登机可能是一种较为有效且最简单的办法。若对每名乘客严格的排序, 尽管登机时间最短, 但排队组织成本很高, 因而很少被使用。

值得指出的是, 登机问题实际是机内和机外排队、由无序到有序所花时间的权衡。登机策略复杂性所决定的机外排队成本, 目前还没有严谨的定量研究方法, 机舱内外时间的平衡问题有待进一步研究。

参考文献 (References)

[1] David C N, Kathleen L M. A study of the airline boarding problem [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2008, 14(4): 197–204.

[2] Steffen J H. Optimal boarding method for airline passengers [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2008, 14(3): 146–150.

[3] Bachmat E, Elkin M. Bounds on the performance of back to front airplane boarding policies [J]. *Operations Research Letters*, 2008, 36(5): 597–601.

[4] Marelli S, Mattocks G, Merry R. The role of computer simulation in reducing airplane turn time [Z/OL]. *Aero Magazine*, Quarter 1, 1998, <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine>.

[5] Van Landeghem H, Beuselinck A. Reducing passenger boarding time in airplanes: A simulation based approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 142: 294–308.

[6] Ferrari P, Nagel K. Robustness of efficient passenger boarding strategies for airplanes [J]. *Transportation Research Board*, 2005, 1915: 44–54.

[7] Kirchner A, Klüpfel H, Nishinari K, et al. Simulation of competitive egress behavior: Comparison with aircraft evacuation data [J]. *Physica A*, 2003, 324: 689–697.

[8] Menkes H L, Briel V D, Villalobos J R, et al. America West Airlines develops efficient boarding strategies [J]. *Interface*, 2005, 35(3): 191–201.

[9] Bazargan M. A linear programming approach for aircraft boarding strategy [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 183(1): 394–411.