



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

决策模拟期末论文研读

课题名称: 通过模拟方式解决飞机登机问题

小组成员: 羊山 王子路 马畅

指导老师: 胡照林

学院: 经济与管理学院

1. 研究领域概述	3
1.1 研究背景	3
1.2 研究方法	3
2. 仿真方式解决登机问题	4
2.1 研究发展概述	4
2.2 乘客行为模拟	5
2.2.1 如何进行行为模拟	5
2.2.2 简单行为模拟	5
2.2.3 经验统计	6
2.3 宏观环境	6
2.4 登机策略介绍	7
2.4.1 启发式登机策略	7
2.4.2 通过优化算法获得登机策略	7
2.5 实验过程	8
2.5.1 实验简介	8
2.5.2 如何检验模型效果	8
2.5.3 如何进行对照实验	8
2.5.4 如何进行稳健性检验	8
2.6 实验结果（节选）	9
2.6.1 登机时间统计分析	9
2.6.1 不同上座率时的登机时间	9
3. 分析与评价	10
3.1 论文优点	10
3.1.1 开发了多种行为模拟模型	10
3.1.2 通过扰动因素检验稳定性	10
3.1.3 考虑了各种实际情况	10
3.1.4 实验过程严谨	10
3.2 论文不足	10
3.2.1 早期研究缺乏对人行行为的研究	10
3.2.2 宏观条件设置有限	11
3.2.3 缺乏执行条件	11
3.2.4 考虑随机因素有限	11
3.3 小结	11
4. 未来展望与思考	11
4.1 未来展望	11
4.1.1 指定非满座情况分组规划	11
4.1.2 综合实时规划模型	11
4.3 思考	12
参考文献	12

1. 研究领域概述

1.1 研究背景

近年来，随着人民生活水平的提高，中国民航业迎来了飞速的增长，2019 年民航总营业额高达万亿。在民航业的增长大环境下，如何在有限的飞机资源、机场资源下，增加飞机周转率成为了一个非常重要的问题，应运而生了几个航空业的运筹问题，比如飞机排程问题（Aircraft Scheduling）、登机问题（Boarding Problem）等，妥善处理这些问题能够直接降低飞机的延误率，提高飞机的飞行时间。

我们所研究的问题便是登机问题（Boarding Problem）。根据顶级期刊 EJOR 的一份研究显示^[1]，乘客登机时间可高达 30 分钟，在飞机清理完之后，需要乘客排队检票、直接或通过摆渡车登机、排队逐一登机并放置行李，如果不是头等舱，整个行李放置的过程也是非常恼人的，而且最终登机需要的时间无法确定，这就导致需要为乘客登机留有充足的时间。

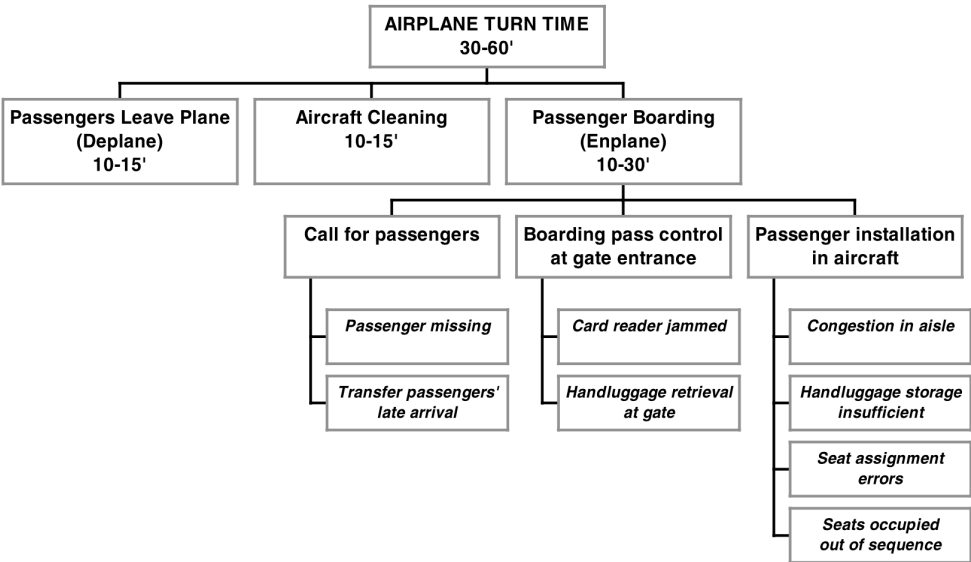


Fig. 1. Elements and disturbances of airplane turnaround time (“Turn Time”).

而在民航业内的共识是，“飞机只有飞在天上才能够创造利润”，一个 1500 架次飞机每天的航空公司，能够为每班飞机节约一分钟，每年能够潜在增加收入数千万美元。所以，通过模式方式，降低乘客登机的期望时间、降低登机时间的期望方差，不仅能够提高乘客的登机体验，而且可以为航空公司获得大量的利润。

飞机登机过程本质上是人的行为交互过程，其核心的研究方法便是仿真实验，所以我们将对近年来通过仿真方法对飞机登机问题进行研究的部分论文进行综合的介绍，大致勾勒出登机问题的整个研究脉络和方法。

1.2 研究方法

为了能够模拟乘客登机的过程，需要分别对飞机的宏观环境进行设置，并对乘客的微观行为进行仿真，以获得在特定的登机队列模型、特定的上座率情况下，登机的具体情况。

乘客的微观行为模拟问题上,由于飞机上乘客的行为被飞机座位的环境所约束,且有一定的规律性,即进入后先放置行李,再入座,可能需要已经落座的乘客让座,可能需要重新拿行李,其他的行为基本上不会影响登机的时间,所以登机过程的微观的乘客行为模拟比较简单。宏观场景主要关于飞机本身的环境,宏观参数则与实验相关,具体情况如下表。

	主要内容
微观行为模拟	乘客速度模型、放置行李时间模型、座位交互时间模型、携带行李数目模型、偶发事件概率模型等
宏观场景模拟	飞机座位数目、舱门开放情况、过道数目等
宏观参数设定	上座率、登机队列模型(如 Back-to-Front, Random)

在设定好上述参数后,由于模型存在随机性,需要进行重复实验,统计最终的登机时间分布情况,同时,可以调整上座率、登机队列进行对照实验,通过调整其他微观行为的模型来检测某登机队列模型的稳健性(Robustness)

2. 仿真方式解决登机问题

本节中,我们将现对通过仿真解决登机问题的研究发展进行概述,再对从乘客微观模拟、宏观环境模拟、登机策略获取、实验与统计分析各角度,对如何通过仿真解决登机问题进行完整的说明。虽然不同研究采用的方法并不一致,但是所有研究核心脉络是统一的,即乘客行为模拟、宏观环境调整、登机策略模拟、实验及扰动因素设置几个方面,这也是我们在本节采用统一讲述的原因。

2.1 研究发展概述

1998 年 Boeing 发表了通过模拟方案解决登机问题的开山之作,提出了 PEDS 对乘客行为进行模拟,并对开放不同的舱门、简单的几个登机模型进行比较^[2],是采用仿真方式解决登机问题的开山之作;2002 年,Landeghem 通过模拟方式分析,建立了完整的启发式登机策略模型,并通过模拟方式对其进行了完整的测试^[1];2005 年, Ferrari 对 Landeghem 的实验进行了补充,建立了与实际情况相关的用户行为模型,并通过调整部分参数对登机策略的稳健性进行测试^[3]。以上研究奠定了登机策略研究的基础。

登机策略优化方面,2005 年,Steffen 开启了通过优化算法获得登机策略的先河^[4],美国西方航空于 2008 年采用混合算法获得可行策略,并通过实地和模拟两种方式进行比较^[8],后续还有研究对 Steffen 进行了修正,如 2014 年 Milne 所做的研究^[5],或者通过 LP 等策略获得登机模拟^[9]等。

行为模型方面,除了 Boeing 和 Ferrari 最初提出的方案外, Schultz 于 2010 年提出了基于客体运动的行为模型^[11];2012 年 Tang 提出乘客属性对行为模型,并提出了新的登机策略^[14];2017 年 Kierzkowski 第一次通过统计方式对乘客的行为进行分析^[6]。

实验统计方面,每个实验都会提出基于其实验目标的统计方法, Bachmat 也于 2009 年提出了分析仿真结果的统计模型^[13], Steffen 于 2012 年也通过实地试验检验方案可行性^[10]。

这便是通过仿真方式解决登机策略问题核心研究的大致脉络。

2.2 乘客行为模拟

2.2.1 如何进行行为模拟

乘客行为主要包括乘客速度、登机入口干扰（Entrance Interference）、座位干扰（Seat Interference）、放置行李（Bin Occupancy），以及诸如在前面乘客登机时后面乘客有多大的概率会直接通过、乘客行李携带数目、多大概率有乘客会迟到或早到等等，这些行为影响着模型的建立。

对乘客行为的模拟研究主要分为两个阶段，第一阶段以波音公司在 1998 年论文中提到的 PEDS（Passenger Enplane/Deplane Simulation）为代表^[2]，通过常用分布和周期性事件触发对乘客行为进行简单模拟，同时常用分布的参数设置也可以作为对照实验的扰动因素；第二阶段以 Kierzkowski 在 2017 年提出的模型为代表的经验分布模型^[6]，该模型通过对登机过程中人的各类行为进行的综合统计获得。

由于登机模型相对简单，所以一般采用网格（Grid）来模拟乘客本身，再通过增加乘客行为，即可完整模拟^[12]。

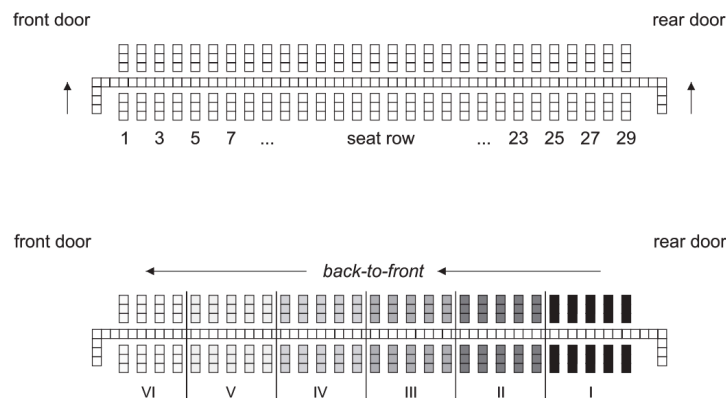


Fig. 4. Grid-based simulation environment – reference Airbus A320 layout (above) and example for block (here back-to-front) boarding strategy modelled in the simulation environment (darker seats are boarded first) (below).

2.2.2 简单行为模拟

波音公司 1994 年第一次通过离散离散模型（Discrete Event Model）到乘客行为研究中，开发了 PEDS。该模型将乘客的行为拆解为开始、移动、停止、等待、重新开始、结束几个基础的行为，由不同的事件触发。

对于乘客的行为具体模拟，分为偶发性事件和乘客行为属性。

PEDS 通过周期性触发模拟偶发性事件，比如乘客等待站在走廊等待、帮助自己的家人、等待前面乘客放置行李等等，这些行为都是波音通过观察乘客行为获得；属性性质事件，比如走路速度、携带的行李数目、乘客放置行李时间、乘客之间位置交换时间等，PEDS 通过将其分别分配到不同的分布上实现模拟，具体的分布有正态分布、三角分布、指数分布等。

后续的所有研究基本上基于此模型，即通过拆分乘客行为、周期触发事件、使用分布进行模拟等，或者对此模型进行了优化，比如 Ferrari 于 2005 年建立了行李数与放置时间的关系模型、交换位置与已落座乘客数目的关系模型，也建立了乘客迟到/早到的扰动因素^[3]；Schultz 于 2010 年提出的 ASEP（Asymmetric simple exclusion process）模型^[11]等。

	<i>Some representative behavior models</i>
1998 Boeing	Passenger Enplane/Deplane Simulation model
2005 Ferrari	Bin Occupancy Model and Seating Model
2010 Schultz	Discrete agent motion based on asymmetric simple exclusion process.
2012 Tang	Model based on passengers' individual properties

部分有代表性的行为模型

2.2.3 经验统计

Kierzkowski 于 2017 年首次通过经验统计方式，获得了乘客行为的分布情况，包括乘客在飞机上走路速度的准确分布、乘客进入飞机时的时间、乘客交换位置时的时间、乘客等待前方放置行李后再路过的概率、乘客放置行李的时间分布等。该分布结果通过对数千名乘客的录像观察获得，比单纯通过分布进行模拟更符合实际情况，在 2017 年后较多论文即开始基于此模型进行研究^[12]。

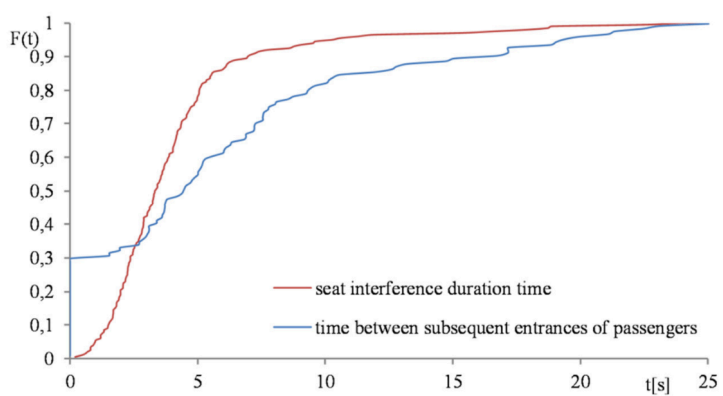


Fig. 2. An empirical cumulative distribution functions of the time between subsequent entrances of passengers and seat interference duration time.

上述的研究基本上基于乘客的动态模拟，Tang 对基于乘客个体属性的登机模拟也做了详细的研究^[14]。

2.3 宏观环境

宏观环境主要包括飞机舱门个数、飞机座位数目、飞机座位布局、飞机过道数目等，而我们所参考的研究中，除了波音公司对舱门开放个数进行了研究^[2]，其他全部采用的是下图所视单过道、三列座位的基本布局，只对座位个数进行了调整。

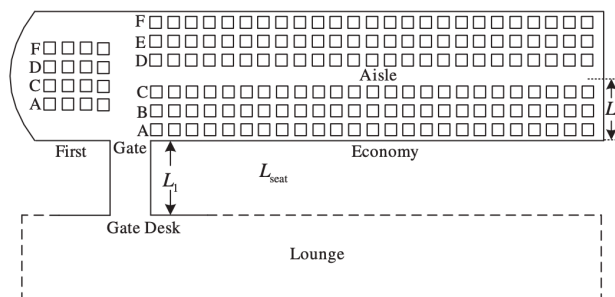


Fig. 1. The scheme of an aircraft during the boarding process.

一般采用的飞机内部结构

2.4 登机策略介绍

2.4.1 启发式登机策略

启发式登机策略可以参考下图的主要包括随机序列、从后往前、按照 Block 分组、从窗户往走廊、倒金字塔型、指定位置等，下图^[12]中对部分模型进行了说明，Landeghem 在文章中按照各种原则也提出了非常多的启发式模型并进行了试验^[1]。

在登机过程中，也需要考虑实际的限制，比如头等舱、一致性概率（比如：旅行团）、上座率、分组情况（比如：家庭）。

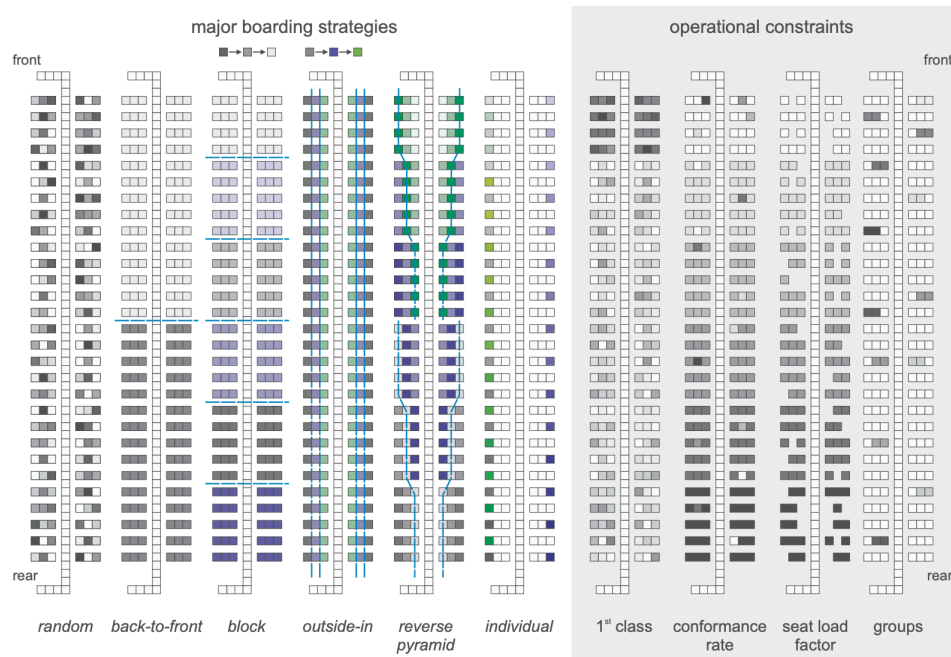


Fig. 2. Overview of different boarding strategies (darker seats are boarded first, black then blue then green) and implementation of operational constraints. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

2.4.2 通过优化算法获得登机策略

除了上述方案外，也可以通过 MCMC（Markov chain Monte Carlo）等优化算法获得可行的登机策略，比如 Steffen^[4]就采用了 MCMC 算法获得最佳的座位差异个数，从而获得最优队列（下图），Nyquist^[5]则对 Steffen 获得的方案进行了优化。

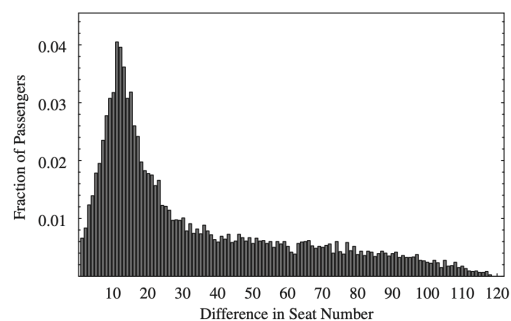


Fig. 1. . Example of the seating distribution obtained from 100 realizations of the luggage loading time distribution.

其他还有 Bazargan 通过线性规划获得登机模型^[9]、美国西部航空通过混合算法进行分组获得可行策略^[8]。

2.5 实验过程

2.5.1 实验简介

在确定了宏观环境即飞机的条件后，选择通过经验分布或其他分布模拟乘客的行为，设置包括迟到、早到、协助放行李等偶然性事件导致的扰动或延时，最后设置采用何种登机策略，即可进行登机模拟（如下图^[12]）。

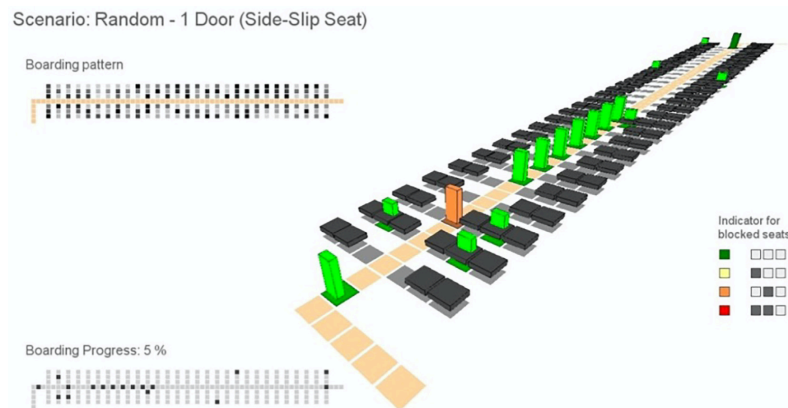


Fig. 22. Model extension to cover the operational behavior when implementing the Side-Slip Seat.

由于模拟过程存在随机性，所以需要进行重复实验以检验模型的可靠性，同时也需要进行对照实验和稳定性实验。为了能够对仿真结果进行检验，部分研究人员也将模型其直接应用到机场进行实地试验，如 Steffen 于 2012 年做的实验验证^[10]。

2.5.2 如何检验模型效果

由于模拟实验存在随机性，在确定了实验模型后（行为分布/宏观条件/登机策略），一般通过重复实验以检验一个模型的效果，获得的结果一般会呈现出正态分布。通过分析正态分布的方差、期望值、最值、置信区间以对模型进行综合评价，而不单单是看登机时间的期望值。具体的分析方式将在下一节进行说明。

2.5.3 如何进行对照实验

我们如果需要比较两种登机策略的效果，就需要对模型在各种情况下的表现进行全面的分析。而实际情况中，我们无法对全部的实验情况进行比较，所以一般过离散事件仿真的方式以实现目的。比如下图^[5]即离散事件仿真的一个案例，通过设置不同的行为模型参数，枚举所有情况即可。

Table 1
Model parameters.

Parameter	Value
Plane characteristics {rows; seats per row; aisles}	{20; 6; 1}
Plane occupancy	100%
Time from one row to the next {min; mode; max} in seconds	{1.8; 2.4; 3}
Time to sit without interference {min; mode; max} in seconds	{6; 8; 10}

2.5.4 如何进行稳健性检验

稳健型检验的目的主要是检测一种登机策略，能否获得较为稳定、方差较小的实验结果。由于飞机登机过程中，可能会出现各类随机事件，同时乘客登机的行为模拟完全可能也不符

合模拟分布，而飞机的登机时间需要按照最差情况进行安排的，否则乘客还未入座飞机已经起飞，所以需要保证登机时间的稳健性。

检验稳健性的主要途径有两个，首先，通过调整偶然事件的出现概率，比如调高迟到、协助放行李等的概率，其次，通过调整模拟行为的分布，比如降低乘客期望登机速度、降低乘客期望座位交换速度。检验这些参数的调整对最终登机时间分布的影响。

2.6 实验结果（节选）

2.6.1 登机时间统计分析

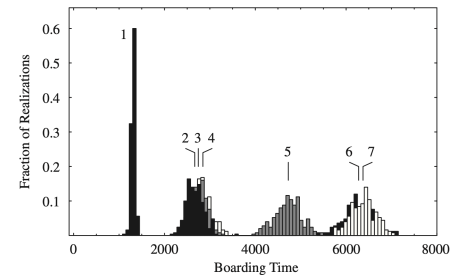


Fig. 5. The loading times for 100 realizations of seven different boarding schemes. Note: The luggage loading time for each realization is drawn from a uniform distribution with a mean of 50 counts. The alternatives are: (1) optimal boarding (mean boarding time: 1312 counts), (2) modified optimal approach (2670), (3) the window-middle-aisle method (2750), (4) random boarding (2846), (5) ordered blocks from back to front (4727), (6) back to front with all passengers in order (6276), and (7) worst case, front to back with all passengers in order (6373).

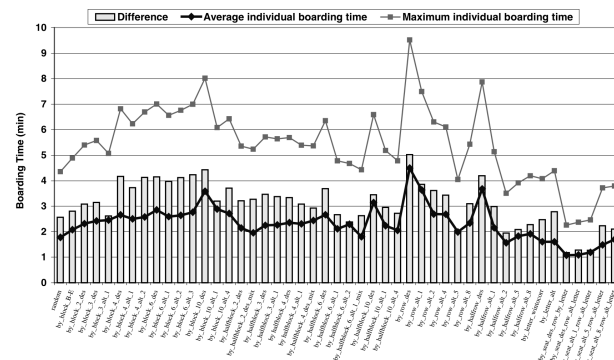


Fig. 4. Individual boarding time under different call-off methods (100% occupation).

图一: Steffen 对登机时间的重复实验结果 图二: Ferrari 对重复实验结果的统计分析 (均值/最值/方差)

在 Steffen 的研究中^[4]，为了比较几种方式的优劣性，其采用了统一的乘客微观行为分布模型，在同样的宏观环境中进行重复实验，获得最终的统计时间分布。我们可以看到，方案一即 Steffen 登机策略效果最好，时间最短且方差最小；方案 2 即修正后的 Steffen 登机策略次优，方差比其他登机方案更小，且登机时间的期望值也更低。

Ferrari 的实验的登机策略要多得多，所以该论文的实验中则直接采用比较方差、最值、期望值的方式，来比较方案的优劣。

后续的研究如果需要比较不同登机方案的优劣性，基本沿用了该策略，即比较分布、方差、期望、最值等。

2.6.2 不同上座率时的登机时间

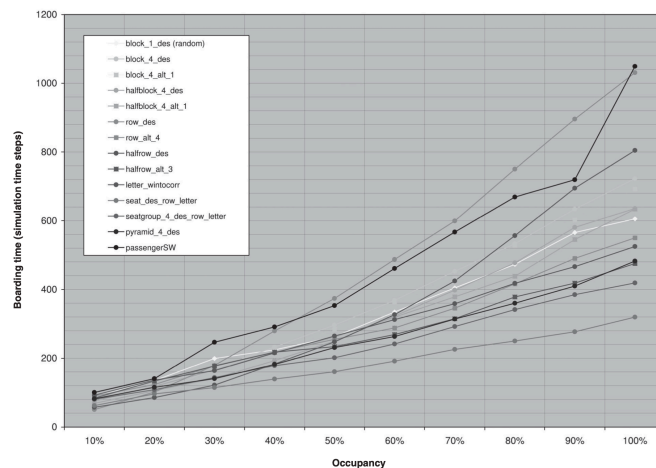


FIGURE 6 Average worst case of chosen strategies under different occupancies.

Ferrari 通过调整上座率，重复进行不同方案下的实验结果，计算其期望值并进行比较。其他试验如果需要计算在不同方案受某试验参数的影响，也基本会沿用该方式，进行离散的统计计算。

这便是进行仿真结果分析的两种手段，当然实际需要如何统计是按照实验目的来安排的，也不尽相同。不过 Bachmat 在其文章中对如何分析登机时间详细的介绍^[13]，改文章发表在 Operations Research。

3. 分析与评价

3.1 论文优点

3.1.1 开发了多种行为模拟模型

对人行为的模拟模型，从最初波音的 PEDS 模型到后来的 ASEP 模型，以及经验统计的乘客行为模拟，研究人员通过对个人行为的拆解，寻找合适的分布模型或直接统计时间分布以模拟飞机上人的行为。

虽然说飞机上人的行为相对简单，但是登机过程中，对登机时间影响最大的除了一些宏观条件，就是人的行为了，所以多样的模型随着发展能够更好的模拟人。

3.1.2 通过扰动因素检验稳定性

由于飞机登机过程涉及了人，人的行为的复杂性和不确定性导致了飞机登机过程中其实存在非常大的不确定性，这也对模型的稳健性提出了比较高的要求。所以，实验通过设置了各种类型的扰动因素，来检验各种方案在不同扰动因素下结果的方差和期望值的变化，比如增加了迟到的比率、调整步行速度的分布等。

3.1.3 考虑了各种实际情况

飞机登机实务中，偶尔可能开两舱门，有人会迟到，也有旅行团登机，或者家庭登机互相帮助，这就导致了登机过程的复杂性。虽然就单个的研究来说，大家对实际情况的考虑都比较局限，但是总的来说，现阶段对较多的实际情况的考虑还是不少的。

3.1.4 实验过程严谨

举例来说，在综合比较两种方案的优劣时，实验会通过离散事件模拟和重复实验，以比较两种方案在不同的宏观或微观设置下的表现；在从多种方案中选择出最优方案时，试验会对同一微观行为模型下不同的宏观设置导致结果的不一致进行了全面的比较，以观察其不同情况下的表现等。

3.2 论文不足

3.2.1 早期研究缺乏对人行行为的研究

先前我们说到人的行为在飞机登机仿真中的重要性，早期的研究虽然有对人行行为模拟的模型，但是其局限性非常高，更准确的说那不是人的行为模型，而是假定的/可能的行为模型。这些研究在 2010 年后开始逐渐补充，包括人的行为与个人属性的关系、人的行为时间的经验统计等。

3.2.2 宏观条件设置有限

相对而言,单过道登机与双过道登机会更加麻烦,而国内航线飞行时间短、机舱小,所以基本采用的都是单过道登机,相关研究也就理所当然几乎全部采用了单过道。不仅如此,大部分研究也都采用了单舱门、三过道,部分研究甚至全部考虑的是 100%的上座率等等,这种宏观条件的考虑明显偏少,不过对应用的影响不算大。

3.2.3 缺乏执行条件

2005 年 Steffen 提出的登机模型的模拟效果是最好的,但是由于需要指定整个的登机序列,该模型基本不具备执行条件。

同时,部分模型比如分组登机模型,能否在国内机场执行、有摆渡车的情况下又能否使用,实际上是未知的,毕竟国内的许多机场还没有达到饱和状态,边际效应的成本并不明显,所以大部分情况下采用随机登机。

3.3.4 考虑随机因素有限

我们参考的文献中,考虑的随机影响因素比如迟到、早到、协助放行李等等的内容,其实是非常有限的,人的行为往往比这些要更加的复杂,会有层出不穷的随机事件。如果能够完整的封装一个 API,包括登机过程中可能出现的随机事件以及随机事件所产生的人与人之间的影响,或许能够推动该领域发展。

3.3 小结

我们发现,我们选取的和阅读的十几篇文献中的非常多的不足之处,在近年的一些引入或者没有引入的论文中行了补充研究,科研的连贯性是非常强的,由于篇幅有限,这里不做展开的阐述。但是,该领域内仍然有空缺的研究方向,比如非满座情况分组规划等,我们将在下一节进行简单的介绍。

4. 未来展望与思考

4.1 未来展望

4.1.1 指定非满座情况分组规划

据我们研究,现阶段的登机策略均只研究了登机过程中不同满座率的情况,而对于同一种满座率,乘客的座位都是随机生成的,这就导致登机策略不一定适合该上座情况。比如极端情况当飞机靠窗只坐了一个人时,仍然采用 Windows-Middle-Aisle 模型分三批上飞机就是多次一举。

但是国内很多飞机没法坐满,假设都是 $\frac{2}{3}$ 的上座率,如何通过方针或规划算法,直接给出分组结果,按组登机从而实现时间的解决呢?

4.1.2 综合实时规划模型

机场登机开始时,对于经济舱而言,不一定全部乘客已经到了并准备好登机,同时航空公司根据后台的数据分析,也可以知道飞机上的旅行团、乘客年龄、是否有家庭/男女朋友,以此为基础,能否实时基于仿真或规划建立一个登机序列呢?理论上,该模型可以基于指定

的非满座情况下的分组规划，调整后实现。

4.3 思考

在研究的过程中，我们发现对登机策略这一个非常小的问题的研究比我们想象的要多的多，我们除了阅读了文章中引用的十几篇文章外，其实还通过简介或者快速阅读筛选了更多的论文，但是理论上存在的该领域论文比我们了解的还要多的多，这次的论文研读也是对科研的初步探索。

同时，仿真对与人相关的模型优化、不确定性优化有着至关重要的作用，通过仿真可以获得一个更优的模型、可以检验一个模型的可靠性和效果，我们都还需要对仿真领域进一步了解和学习。

参考文献

- [1] Van Landeghem, H., Beuselinck, A., Reducing passenger boarding time in airplanes: a simulation based approach. *European Journal of Operational Research* 2000, 142, 294–308.
- [2] Marelli, S., G. Mattocks, and R. Merry. Racing the Clock: The Role of Computer Simulation in Reducing Airplane Turn Time. *Aero Magazine*, No. 1, 1998, p. 10. www.boeing.com/commercial/aeromagazine.
- [3] Ferrari P, Nagel K. Robustness of efficient passenger boarding strategies for airplanes[J]. *Transportation Research Record*, 2005, 1915(1): 44-54.
- [4] Steffen J H. Optimal boarding method for airline passengers[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2008, 14(3): 146-150.
- [5] Milne R J, Kelly A R. A new method for boarding passengers onto an airplane[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2014, 34: 93-100.
- [6] Kierzkowski A, Kisiel T. The human factor in the passenger boarding process at the airport[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 187: 348-355.
- [7] Nyquist D C, McFadden K L. A study of the airline boarding problem[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2008, 14(4): 197-204.
- [8] Van Den Briel M H L, Villalobos J R, Hogg G L, et al. America west airlines develops efficient boarding strategies[J]. *Interfaces*, 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.
- [10] Steffen J H, Hotchkiss J. Experimental test of airplane boarding methods[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2012, 18(1): 64-67.
- [11] Schultz M, Kretz T, Fricke H. Solving the direction field for discrete agent motion[C]//*International Conference on Cellular Automata*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010: 489-495.
- [12] Schultz M. A metric for the real-time evaluation of the aircraft boarding progress[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 86: 467-487.
- [13] Bachmat E, Berend D, Sapir L, et al. Analysis of airplane boarding times[J]. *Operations Research*, 2009, 57(2): 499-513.
- [14] Tang T Q, Wu Y H, Huang H J, et al. An aircraft boarding model accounting for passengers' individual properties[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 22: 1-16.