

# 基于虚拟排队系统的机场分类安检最优通道数量研究

陈燕婷, 李梦琪\*

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年8月17日; 录用日期: 2023年9月18日; 发布日期: 2023年9月25日

## 摘要

由于出行方式的多样化、出行成本的降低和人民生活水平的提高,人们选择乘飞机出行的概率不断增大,机场旅客吞吐量快速增长,安检工作人员的压力不断攀升,旅客的等待时间也逐渐增加,传统安检模式已显现出其局限性。为了应对这一挑战,本文提出了一种新的解决方案,即采用基于虚拟排队系统的分类安检模式。该模式通过引入虚拟排队系统和分类安检,为旅客提供了更便捷的安检体验,能够有效缓解传统安检模式下的排队压力。为了评估两种安检模式之间的差异,本文通过建立两种安检模式下的成本函数,得到使得成本最低的各类安检通道数量,同时综合考虑旅客等待时间的需求。通过数值模拟,研究结果充分表明了虚拟排队分类安检模式在成本方面的优势。尽管其实施需要一定的投资成本,但从长远来看,这种新模式将为机场带来显著的成本节约和效率提升,进而提高旅客的满意度,增强机场的竞争力。

## 关键词

分类安检, 旅客风险等级, 虚拟排队系统, 最优安检通道数量

# Research on the Optimal Number of Lanes for Airport Classification Security Check Based on Virtual Queueing System

Yanting Chen, Mengqi Li\*

Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai

Received: Aug. 17<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Sep. 25<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

## Abstract

Due to the diversification of travel options, reduced travel costs, and increased living standards, the likelihood of people choosing air travel has been consistently rising. As a result, airport passenger throughput has been rapidly increasing, placing escalating pressure on security screening personnel and leading to progressively longer passenger waiting times. The limitations of traditional security screening methods have become evident. To tackle this challenge, this paper introduces a novel solution: a classification security screening mode based on a virtual queueing system. This mode incorporates virtual queueing and classification-based security screening to offer passengers a more convenient screening experience, effectively alleviating the queueing pressures associated with traditional methods. To assess the differences between the two screening modes, this paper formulates cost functions for both methods and determines the optimal number of security lanes for each, considering the passengers' waiting time requirements. Numerical simulations conclusively demonstrate the cost advantages of the virtual queueing classification security screening mode. While its implementation may require initial investment, this new mode is poised to yield substantial cost savings and efficiency improvements for airports in the long run, ultimately enhancing passenger satisfaction and bolstering airport competitiveness.

## Keywords

Categorized Screening, Passenger Risk Level, Virtual Queueing System, Optimal Number of Screening Lanes

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在当今全球化和快节奏的生活方式下,越来越多的人选择乘坐飞机出行。中国民用航空局《2022年全国民用运输机场生产统计公报》[1]数据表明,2013年至2019年,机场旅客吞吐量逐年增长,从75430.9万人次增加至135162.9万人次。2020年至2022年,由于受到新冠肺炎疫情的影响,机场旅客吞吐量有较大程度上的减少,但乘坐飞机出行仍然是一个不可替代的选择。并且随着生产、生活的逐步恢复,机场的旅客吞吐量迅速恢复到之前的增长趋势。然而,随着恐怖袭击和其他安全问题的频发,机场安检变得越来越重要。机场安检是保障国家安全、旅客生命财产安全和维护社会稳定的必要手段之一。《“十四五”民用航空发展规划》坚持安全发展底线和智慧民航建设主线,加快构建更为安全、更高质量、更有效率、更加公平、更可持续的现代民航体系[2]。

在机场,旅客需要排队值机、安检和登机等程序,这不仅会耗费大量的时间和精力,还可能对旅客及机场的工作人员的身体和心理造成压力[3]。同时,由于安检程序的复杂性和旅客流量的不稳定性,安检排队拥堵问题也时常发生。安检排队时间长不仅会降低旅客的满意度,还会对机场的效率和经济效益造成负面影响。因此,机场旅客安检排队问题一直是困扰旅客和机场管理方的一个重要问题。为了改善这种情况,本文提出一种解决方案——基于虚拟排队系统的机场分类安检,并进行数值模拟以验证其效果。

本文的工作主要与两类文献相关。第一类是关于机场分类安检问题的文献:上世纪末,美国机场海关使用一种带有选择性的预先检查系统,当旅客出示证件时,旅客的信息被上传到该系统,安检工作人

员根据旅客的身份背景、历史乘机数据等信息给每个旅客分配风险值, 作为后续安检系统的决策参考值[4]; 王嘉宏和陈荣庆[5]通过进行敏感度分析, 研究了安检设备数量配置和正确报警率对分类安检系统的安全水平和旅客的平均等待时间的影响; 陈晓红等[6]提出了分类安检模式, 建立了分类安检模型; 赵振武, 唐玉丽, 麻建军[7]针对机场旅客数量增加、排队等待时间长等问题, 在国内外研究的基础上, 建立了具有中国特色的分类安检系统; Nie 等[8]研究如何通过对旅客分类来提高安检效率。综合考虑旅客等待时间和正确报警率这两个因素, 做出最佳的分配决策; Wang [9]将安检通道分为两种不同等级, 在该模型中, 风险值较高的旅客接受更严格的安检流程; Nie 和 Parab [10]通过结合历史数据中的正确报警率和所需安检人员数量, 并采用旅客分组策略, 提高旅客安检系统的效率; McLay 等[11]在差异化安检系统中, 将安检系统分为两类。在总成本和安检人员数量的限制下, 研究了最大化识别危险乘客的概率问题; Papa [12]梳理了美国和欧洲海关的检查策略, 主要包括均等检查和选择性检查两种方法。结果表明采用基于风险值的分类安检系统比对所有旅客和物品都进行严格检查更为高效; Virta 等[13]考虑了一个安检能力不同的动态分类安检系统, 旅客在通过安检设备后, 系统会实时更新其风险值。分类安检在传统安检模式的基础上进行了改良, 它能够合理的分配安检资源, 减少旅客的等待时间, 提高安检效率, 分类安检为民航业的发展带来了巨大的收益。

第二类是关于虚拟排队系统的文献: 赵振武和麻建军[14]在单阶段多层次服务系统的基础上引入虚拟排队的概念, 对无虚拟排队、部分虚拟排队和完全虚拟排队三种情形进行了数值研究, 结果表明采用虚拟排队系统有助于降低旅客的等待时间; 杨媛元等[15]提出利用虚拟排队系统缩短旅客安检的排队等待时间。杨媛元等[16]开发了一款基于 Android 平台的机场安检虚拟排队系统, 该系统有效减少了旅客的时间成本, 提高了旅客的满意度; 麻建军[17]在机场安检流程的基础上, 根据机场安检的特点, 设计出符合机场安检的虚拟排队系统; 并且虚拟排队系统在游乐园也得到了广泛应用, Cope 等[18]和 Lutz 等[19]介绍了在迪士尼部分顾客可以获得所谓的 FASTPASS, 他们可以在指定的时间段内使用 FASTPASS 到某些娱乐设施游玩, 而不必排长队等待。游乐园通过充分利用人们时间安排灵活性的特点, 成功缩减了顾客排队时间。同样地, 机场的虚拟排队系统通过将高峰期的一部分安检需求转移到非高峰期, 使整体安检需求趋于平缓。这可以有效避免旅客在短时间内集中到达而导致的排队拥堵, 从而减少高峰期旅客的平均等待时间。

基于虚拟排队系统的机场分类安检问题是指通过对机场安检流程进行优化和改进, 实现更加高效和精确的安检服务。在传统的机场安检中, 旅客按照先到先服务的顺序进行安检。而在虚拟排队分类安检系统中, 旅客可以使用手机等移动设备在线上进行值机并依据历史乘机数据、身份信息、犯罪记录等[4] [7]被分类, 收到对应等级的安检通道及安检时间, 并在指定的时间段内到达机场进行安检, 否则取消此次排队资格。这样, 旅客就可以在安检前处理其他事情, 避免了长时间的排队等待。针对机场安检排队时间长这一瓶颈问题, 以最小化成本前提下的最优安检通道数量为目标, 分析基于虚拟排队系统的机场分类安检模式的特点并得出最优安检通道数量。与现存的研究相比本文的主要创新之处在于将分类安检与虚拟排队系统结合起来, 以期在更大程度上减少旅客安检的等待时间。本研究的结果可为机场安检排队问题的解决提供一种新的思路和方法, 对于提高机场的安检效率和减少旅客等待时间具有重要的实际意义。

## 2. 模型建立及分析

### 2.1. 传统安检排队模型的构建

**定义:** 若顾客的到达间隔服从参数为  $\lambda_i$  的指数分布(从而到达的人数服从泊松分布), 每位顾客的服务时间服从参数为  $\mu_i$  的指数分布, 且顾客的到达与服务时间独立, 系统有  $s_i$  个服务台, 称这样的模型为 M/M/  $s_i$  排队模型[20]。

安检作为机场服务的重要一环, 旅客的到达过程是泊松过程, 服务时间服从独立同分布的指数随机变量, 是典型的多服务台排队系统。因此, 可以用  $M/M/s_i$  模型来对本文所研究的问题进行建模。

图 1 为传统登机流程示意图。



Figure 1. Traditional boarding process

图 1. 传统登机流程

本文采用的符号如表 1 所示。

Table 1. Description of notations

表 1. 符号说明

符号	含义
$s_i$	安检通道的数量, $i = H, N, T$
$n_i$	旅客数, $i = H, N, T$
$\mu_i$	安检通道服务率, $i = H, N, T$
$\lambda_i$	旅客到达安检通道的到达率, $i = H, N, T$
$\rho_i$	占用率, 即系统中机场旅客的到达率与服务率之比, $i = H, N, T$
$\alpha$	每个旅客在系统中逗留单位时间的费用
$\beta_i$	每个服务台单位时间内的费用, $i = H, N, T$
$x$	每条安检通道安检设备每小时的使用成本
$y$	每位安检工作人员每小时工资
$\gamma$	加入虚拟排队系统的旅客比例, $0 \leq \gamma \leq 1$
$P_0$	$i$ 类系统中存在 0 个旅客的均衡概率, $n_i = 0$
$P_{n_i}$	$i$ 类系统中存在 $n_i$ 个旅客的均衡概率, $n_i \leq s_i$
$P_{s_i+n_i}$	$i$ 类系统中存在 $n_i$ 个旅客的均衡概率, $n_i > s_i$
$\Pi_w$	延迟概率
$L_q$	系统中排队的平均旅客数
$W$	系统中旅客的平均等待时间
$i = H, N, T$	分别表示分类安检模式高风险安检通道、普通安检通道和传统模式下的安检通道

由经典排队论[21]可得  $M/M/s_i$  系统如下几个数量指标:

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{s_i \mu_i} \quad (1)$$

$$P_0 = \left( \sum_{n_i=0}^{s_i-1} \frac{(s_i \rho_i)^{n_i}}{n_i!} + \frac{(s_i \rho_i)^{s_i}}{s_i!} \frac{1}{1-\rho_i} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$P_{n_i} = \frac{(s_i \rho_i)^{n_i}}{n_i!} P_0, n_i = 0, 1, 2, \dots, s_i \quad (3)$$

$$P_{s_i+n_i} = \rho_i^{n_i} P_{s_i} = \rho_i^{n_i} \frac{(s_i \rho_i)^{s_i}}{s_i!} P_0, n_i = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

$$\Pi_W = \frac{(s_i \rho)^{s_i}}{s_i!} \left( (1 - \rho_i) \sum_{n_i=0}^{s_i-1} \frac{(s_i \rho_i)^{n_i}}{n_i!} + \frac{(s_i \rho_i)^{s_i}}{s_i!} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$L_q = \Pi_W \frac{\rho_i}{1 - \rho_i} \quad (6)$$

$$W = (\Pi_W + L_q) \frac{1}{s_i \mu_i} \quad (7)$$

传统安检模式中, 各个安检通道相同, 服务率、单位安检成本均相等。在平稳状态下单位时间内总费用(旅客等待时间成本与安检服务成本)为

$$Z(s_i) = \alpha L_q + \beta_i s_i \quad (8)$$

其中  $\alpha$  为每位旅客在系统中逗留单位时间的费用, 在本文中取为 265.33 (元/小时), 为 2021 年 8 月北京首都民航时间成本 TOP15 市场[22]的均值,  $L_q$  是平均队长,  $\beta_i$  是每个安检通道单位时间的费用,  $s_i$  是安检通道的数量。由于  $\alpha, \beta_i$  是给定的, 故安检通道数  $s_i$  是唯一的变量, 求出使  $Z(s_i)$  最小的  $s_i^*$ 。

因为  $s_i$  取整数,  $Z(s_i)$  不是连续函数, 不能用经典的微分法, 故采用边际分析法。根据  $Z(s_i^*)$  应为最小的特点, 有

$$\begin{cases} Z(s_i) \leq Z(s_i + 1) \\ Z(s_i - 1) \geq Z(s_i) \end{cases} \quad (9)$$

依次求当  $s_i = 1, 2, 3, \dots$  时  $Z(s_i)$  的值, 即可定出最优的  $s_i^*$ 。

## 2.2. 基于虚拟排队系统的分类安检排队模型的构建

在基于虚拟排队系统的分类安检模式中, 旅客可以在线上(虚拟排队系统)或线下值机时依据历史记录被分配到高风险安检通道或普通安检通道, 这两类通道在服务能力、单位安检成本、旅客等待时间上具有差异性。

基于虚拟排队系统的分类安检模式流程图如图 2 所示(加入虚拟排队系统的旅客可以在指定时间到达机场安检, 而不必过早到达机场; 类似于文献[4], 高风险旅客依据旅客的历史乘机数据、身份信息、犯罪记录等判定):

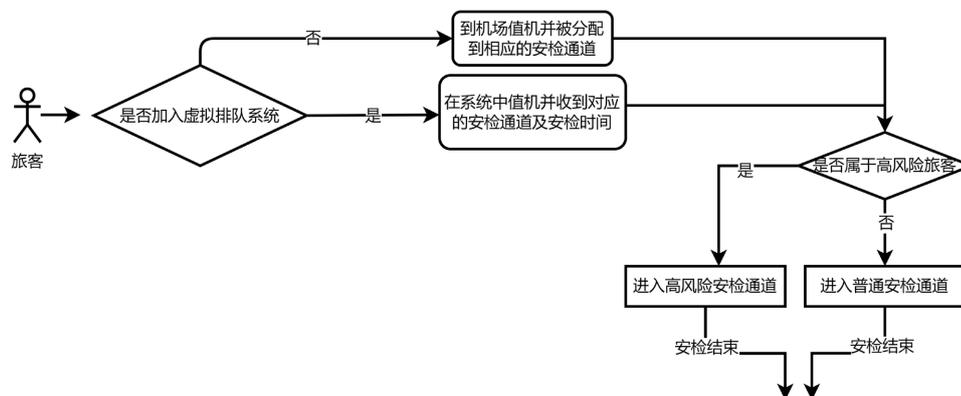


Figure 2. Flow diagram of the virtual queuing and sorting security system  
图 2. 虚拟排队分类安检系统的流程示意图

故基于虚拟排队系统的分类安检模式最优化问题建立如下所示:

$$Z(s_i) = (\alpha\gamma(1-38.7\%)L_q + \alpha(1-\gamma)L_q) + \beta_i s_i \quad (10)$$

上式中  $\alpha\gamma(1-38.7\%)L_q$  是加入虚拟排队系统旅客的时间成本,  $\alpha(1-\gamma)L_q$  是未加入虚拟排队系统旅客的时间成本, 其中  $\alpha$  为每位旅客在系统中逗留单位时间的成本,  $\gamma$  为加入虚拟排队系统的旅客比例, 2022 年, 全行业完成旅客运输量 25171.32 万人次, 全年通过“易安检”实际过检 40.3 万人次, 故将虚拟排队系统的旅客比例取为 0.0016 [22], 加入虚拟排队系统的等待时间比不加入虚拟排队系统的等待时间缩短 38.7% [22]。  $L_q$  是平均队长,  $\beta_i$  是每个安检通道单位时间的费用,  $s_i$  是安检通道的数量。由于  $\alpha, \beta_i, \gamma$  是给定的, 故唯一可变的是安检通道数  $s_i$ , 求出使  $Z(s_i)$  最小的  $s_i^*$ 。

### 3. 数值模拟

选取深圳宝安国际机场 7 月 5 日的出发航班数据进行统计分析(如图 3), 当天计划出发航班 521 个班次, 实际出发航班 509 个班次, 其中有 10 个班次在次日出发, 2 个班次取消飞行, 当天到达机场的待检旅客为 76350 人, 即平均每小时到达 3181.25 人。已知该机场国内航班一般在离港航班起飞前 2 小时开始安检, 航班起飞前 40 分钟时停止安检, 所有乘客需要在这段时间内到达机场进行安检。

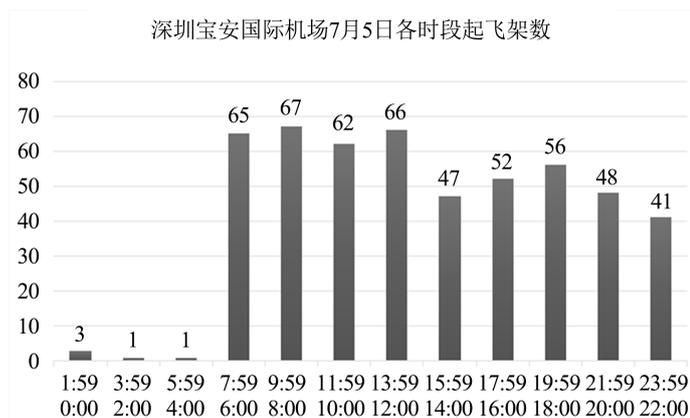


Figure 3. Number of flights at Shenzhen Baoan International Airport on July 5 by time slot

图 3. 深圳宝安国际机场 7 月 5 日各时段起飞架数

在本文中做如下假设:

假设 1: 同种类型安检通道的设备和工作人员的服务效率都相同;

假设 2: 所有旅客服务时间分布相同, 不考虑特殊人群(包括残疾旅客、孕妇、无人陪伴儿童等)的异质性对服务时间的影响;

假设 3: 根据经验及航空公司的统计可以假设平均每班飞机客座率为 80%, 实际乘客数量为 150 人;

假设 4: 假设每条安检通道的安检设备连续使用寿命为 10 年;

假设 5: 假设所有旅客的单位等待时间成本均相同, 所有安检通道的设备成本相同;

假设 6: 假设高风险安检通道的人工成本高于普通安检通道。

根据该机场的招聘信息可知每位安检工作人员月收入为 6000~8000 元, 假设每月工作 30 天, 做一休一, 每天工作 12 小时。对安检工作人员月工资取平均, 则机场每位安检人员平均每小时的工作费用为:

$$y = \frac{7000}{15 \times 12} = 38.89(\text{元})$$

机场所用的安检设备, 智能安检机每台 30.88 万元, 智能安检门每台 17.9 万元, 液态分析仪每台 5.9 万元, 手持金属探测仪每台 0.045 万元, 则平均每条安检通道的安检设备每小时折损费用:

$$x = \frac{547250}{10 \times 365 \times 24} = 6.25(\text{元})$$

### 3.1. 传统安检模式下使得成本最低的安检通道数量 $s_T$

在传统安检模式下, 旅客根据所看到的队伍长度随机进入这  $s_T$  个安检通道, 在这些同质安检通道中, 旅客进行相同的安全检查流程, 并且所需要的安检时间和单位安全检查成本也相同。在传统安检模式中, 由于事先无法对旅客进行风险等级的预估, 即高风险旅客和普通旅客都会接受相同复杂程度的安全检查流程。为了确保安全水平, 机场安检人员往往更倾向于对旅客实施较为严格的安检流程, 这导致了平均等待时间的增加。

假设传统安检模式下每条安检通道配备 3 名工作人员, 则每小时每条安检通道安检成本为:

$$\beta_T = 6.25 + 38.89 \times 3 = 122.92(\text{元})$$

取  $\lambda_T$  为 60,  $\mu_T$  为 3, 计算不同  $s_T$  下的平均等待时间、平均队长和单位时间总费用。

对这个安检排队系统的最优化问题建立如下所示:

$$Z(s_T) = \alpha L_q + \beta_T s_T \tag{11}$$

在该模式下将  $n_T$  取值为 3182, 从图 4 可以看出此时使得  $Z$  值最小的  $s_T$  数量为 25。

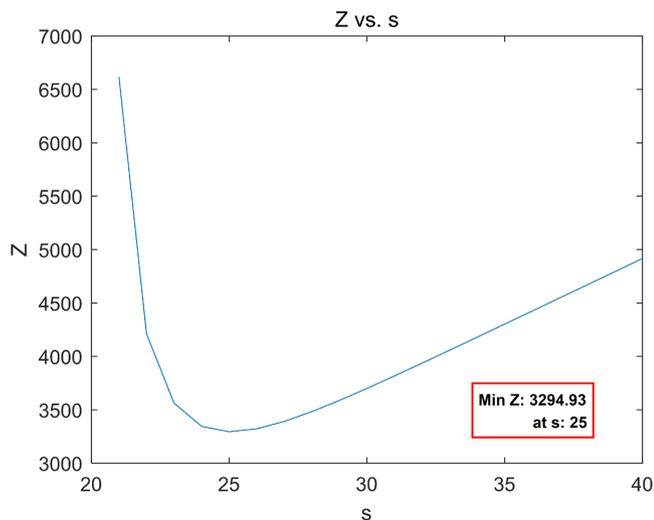


Figure 4. The number of screening lanes that make the traditional screening model the least costly  $s_T$

图 4. 传统安检模式下使得成本最低的安检通道数量  $s_T$

### 3.2. 基于虚拟排队系统的分类安检模式

在基于虚拟排队系统的分类安检模式中, 旅客可以在抵达机场之前选择是否要使用虚拟排队系统进行排队, 从而决定他们抵达机场的时间。抵达机场后, 根据个人的风险评估等级或安全检查水平要求(可以在线上或线下确定), 到相应的安检通道进行安检。在安检流程中, 被归为高风险类别的旅客需要经受严格的安全检查, 等同于传统的安检模式, 因此所需的时间较长。而被归为普通风险类别的旅客只需要

进行基本的安全检查, 所需时间较短。在从传统的安检模式过渡到分类安检模式时, 分配给高风险安检通道的旅客比例存在一个最佳值。以陈晓红等[6]文中所得到的高风险旅客比例为例, 本文将分配到高风险类别旅客的比例取为 25%, 不同的机场该比例可能会有所不同, 针对不同比例值均可使用本文研究模型确定最佳安检通道数量。

### 3.2.1. 使得成本最低的普通安检通道数量 $s_N$

假设基于虚拟排队系统的分类安检模式下每条普通安检通道配备 2 名工作人员时, 则每小时每条安检通道安检成本为:

$$\beta_N = 6.25 + 38.89 \times 2 = 84.03(\text{元})$$

取  $\lambda_N$  为 45,  $\mu_N$  为 4, 计算不同  $s_N$  下的平均等待时间、平均队长和单位时间总费用。

对这个安检排队系统的最优化问题建立如下所示:

$$Z(s_N) = (\alpha\gamma(1-38.7\%)L_q + \alpha(1-\gamma)L_q) + \beta_N s_N \quad (12)$$

在该模式下将  $n_N$  取值为 2386, 从图 5 可以看出此时使得  $Z$  值最小的  $s_N$  数量为 16。

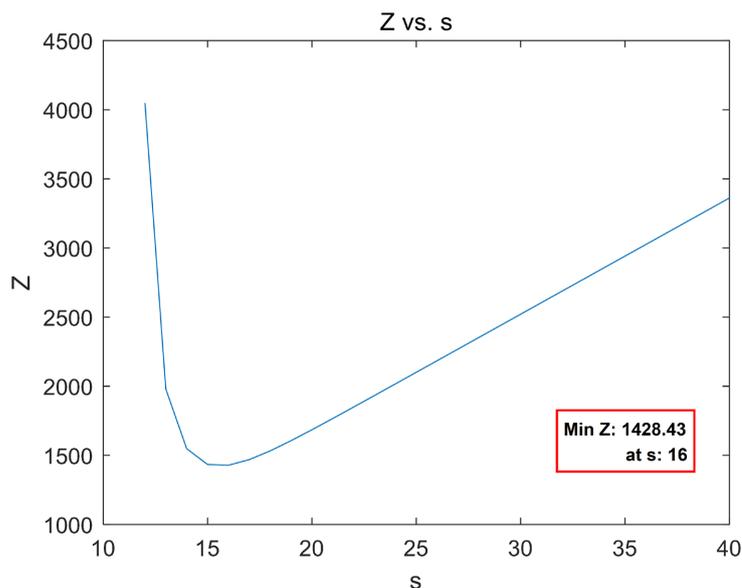


Figure 5. The number of general security lanes that make the virtual categorized security screening model the least costly  $s_N$

图 5. 虚拟分类安检模式下使得成本最低的普通安检通道数量  $s_N$

### 3.2.2. 使得成本最低的高风险安检通道数量 $s_H$

假设基于虚拟排队系统的分类安检模式下每条高风险安检通道配备 3 名工作人员时, 则每小时每条安检通道安检成本为:

$$\beta_H = 6.25 + 38.89 \times 3 = 122.92(\text{元})$$

取  $\lambda_H$  为 15,  $\mu_H$  为 3, 计算不同  $s_H$  下的平均等待时间、平均队长和单位时间总费用。

对这个安检排队系统的最优化问题建立如下所示:

$$Z(s_H) = (\alpha\gamma(1-38.7\%)L_q + \alpha(1-\gamma)L_q) + \beta_H s_H \quad (13)$$

在该模式下将  $n_H$  取值为 796, 从图 6 可以看出此时使得  $Z$  值最小的  $s_H$  数量为 8。

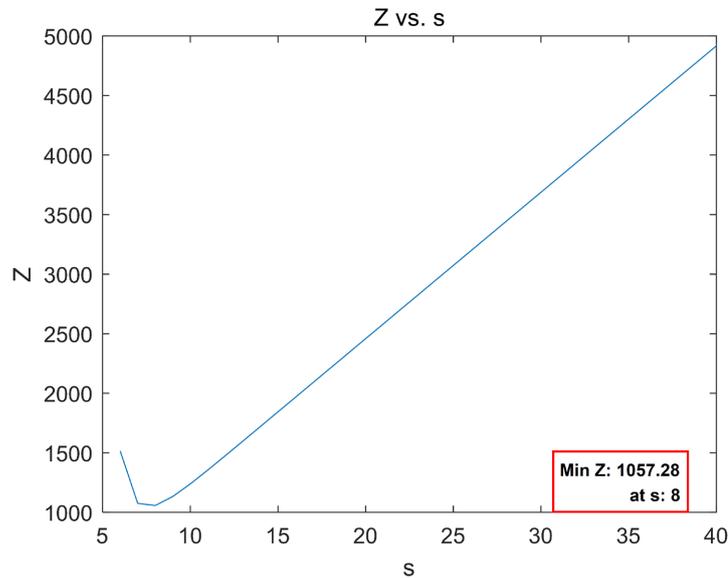


Figure 6. Number of high-risk screening lanes in the virtual categorized screening model that minimizes costs  $s_H$

图 6. 虚拟分类安检模式下使得成本最低的高风险安检通道数量  $s_H$

### 3.3. 结果分析

Table 2. The required number of security lanes and costs for the two types of security screening modes

表 2. 两类安检模式下所需的安检通道数和成本

	$\alpha$	$\beta_i$	$\gamma$	$\mu_i$	$\lambda_i$	$n_i$	$Z(s_i)$	$s_i$
$i = T$	265.33	122.92	0.0016	3	60	3182	3294.93	25
$i = N$	265.33	84.03	0.0016	4	45	2386	1428.43	16
$i = H$	265.33	122.92	0.0016	3	15	796	1057.28	8

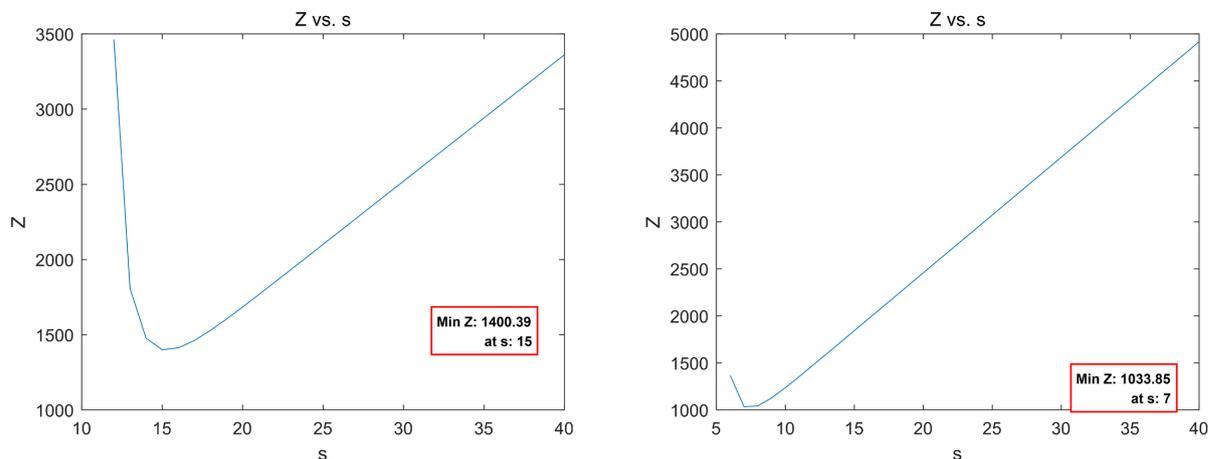
两类安检模式下所需的安检通道数和成本如表 2 所示, 传统安检模式需要开放的安检通道数量为 25 个, 总的成本为 3294.93 元, 而基于虚拟排队系统的分类安检模式需要开放普通安检通道 16 个, 高风险安检通道 8 个, 总成本为 2485.71 元。开放的安检通道数量减少了一个, 总成本也减少了 809.22 元。该结果表明基于虚拟排队系统的分类安检模式对于减少成本有较大帮助。

## 4. 模型拓展

由于上述模型选取的加入虚拟排队系统的比例  $\gamma$  为 0.0016, 与预期虚拟比例相差较大, 未来随着进一步的应用, 加入虚拟排队的旅客比例会不断提高。故在本节将计算虚拟比例  $\gamma = 0.5$  (部分旅客加入虚拟排队系统) 时的各项数量指标, 其他参数不变。

### 4.1. 使得成本最低的普通安检通道数量 $s_N$ 和高风险安检通道数量 $s_H$ , 基于预期虚拟比例 $\gamma = 0.5$

在该模式下将  $n_N$  取值为 2386,  $n_H$  取值为 796, 从图 7 可以看出此时使得  $Z$  值最小的  $s_N$  数量为 15, 使得  $Z$  值最小的  $s_H$  数量为 7。



**Figure 7.** The minimum number of regular security screening lanes ( $s_N$ ) and high-risk security screening lanes ( $s_H$ ) that minimize costs in the virtual classification security screening model

**图 7.** 虚拟分类安检模式下使得成本最低的普通安检通道数量  $s_N$  和高风险安检通道数量  $s_H$

## 4.2. 结果分析

**Table 3.** The number of security lanes required and the total cost for some passengers to join the virtual queuing system

**表 3.** 部分旅客加入虚拟排队系统所需的安检通道数量及总成本

	$\alpha$	$\beta_i$	$\gamma$	$\mu_i$	$\lambda_i$	$n_i$	$Z(s_i)$	$s_i$
$i = N$	265.33	84.03	0.5	4	45	2386	1400.39	15
$i = H$	265.33	122.92	0.5	3	15	796	1033.85	7

部分旅客加入虚拟排队系统所需的安检通道数量及总成本如表 3 所示, 在该模式下, 当  $\gamma = 0.5$  时, 基于虚拟排队系统的分类安检模式需要开放普通安检通道 15 个, 高风险安检通道 7 个, 总的成本为 2434.24 元。

对比  $\gamma = 0.0016$  时的结果可知, 虚拟排队系统的应用对于降低总成本有较大的优势。

## 5. 结束语

本文旨在缓解机场安检排队时间过长的问题, 探讨基于虚拟排队系统的分类安检模式的运营策略。在考虑安全水平和旅客等待时间的限制条件下, 分别为传统安检模式和基于虚拟排队系统的分类安检模式建立模型, 研究不同安检模式下的最优安检通道数量。选用深圳宝安国际机场 2023 年 7 月 5 日的客流量数据进行数值模拟, 从成本的角度对两种安检模式做了比较研究, 并选取不同的加入虚拟排队系统的旅客比例来验证虚拟排队系统对减少旅客排队时间和总成本的积极影响。研究表明, 虚拟排队分类安检模式相较传统安检模式成本更低, 且得到最优安检通道数量。该结果表明基于虚拟排队系统的机场分类安检模式能有效地优化最优通道数量和降低机场的运营成本。

## 基金项目

本研究由上海理工大学管理学院 2021 年度科研启动项目(KYQD202101)资助。

## 参考文献

- [1] 中国民航局. 2022 年全国民用运输机场生产统计公报[EB/OL].

- [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202303/t20230317\\_217609.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202303/t20230317_217609.html), 2023-03-16.
- [2] 中国民航局. 《“十四五”民用航空发展规划》印发[EB/OL]. [http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202201/t20220107\\_210799.html](http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202201/t20220107_210799.html), 2022-01-07.
- [3] 程明, 梁文娟. 机场安检人员工作压力源及影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011(1): 63-67.
- [4] 王嘉宏. 通关安全检查系统的运作模式与仿真研究综述[J]. 计算机科学与应用, 2017, 7(11): 1067-1078.
- [5] 王嘉宏, 陈荣庆. 基于旅客风险分类的机场安检排队仿真分析[J]. 管理科学与工程, 2018, 7(2): 110-124.
- [6] 陈晓红, 徐敏婕, 陈武华. 考虑成本、等待时间和安全水平的分类安检模式研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(7): 35-43.
- [7] 赵振武, 唐玉丽, 麻建军. 基于旅客分类的机场安检系统研究[J]. 综合运输, 2017, 39(3): 37-41.
- [8] Nie, X., Parab, G., Batta, R., et al. (2012) Simulation-Based Selectee Lane Queuing Design for Passenger Check Point Screening. *European Journal of Operational Research*, **219**, 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.012>
- [9] Wang, C. (2017) Arena Simulation for Aviation Passenger Security-Check Systems. *Genetic and Evolutionary Computing*, **536**, 95-102. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48490-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48490-7_12)
- [10] Nie, X., Parab, G., et al. (2009) Passenger Grouping with Risk Levels in an Airport Security System. *European Journal of Operational Research*, **194**, 574-584. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.027>
- [11] McLay, L., Jacobson, S. and Kobza, J. (2007) Integer Programming Models and Analysis for a Multilevel Passenger Screening Problem. *IIE Transactions*, **39**, 73-81. <https://doi.org/10.1080/07408170600729200>
- [12] Papa, P. (2013) US and EU Strategies for Maritime Transport Security: A Comparative Perspective. *Transport Policy*, **28**, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.08.008>
- [13] Virta, J., Jacobson, S. and Kobza, J. (2003) Analyzing the Cost of Screening Selectee and Non-Selectee Baggage. *Risk Analysis: An International Journal*, **23**, 897-908. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00367>
- [14] 赵振武, 麻建军. 民航机场安检排队系统的发展趋势与研究[J]. 综合运输, 2016, 38(10): 64-69.
- [15] 杨媛元, 吴一飞, 蓝子睿, 王嘉文, 涂念之. 虚拟排队系统在机场安检中的应用[J]. 科技创新与应用, 2018(24): 162-163.
- [16] 杨媛元, 吴一飞, 蓝子睿, 王嘉文, 涂念之. 机场旅客安检虚拟排队系统的设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2018(14): 32.
- [17] 麻建军. 虚拟排队在民航安检系统中的应用[J]. 科技与创新, 2016(19): 34-35.
- [18] Cope III, R.F., Cope, R.F. and Davis, H.E. (2008) Disneys Virtual Queues: A Strategic Opportunity to Co-Brand Services? *Journal of Business & Economics Research (JBER)*, **6**, 13-20. <https://doi.org/10.19030/jber.v6i10.2475>
- [19] Lutz, H. (2008) The Impact of Virtual Queues for Amusement Parks. Annual Meeting Proceedings. Decision Sciences Institute, Houston. [https://www.researchgate.net/publication/253662168\\_THE\\_IMPACT\\_OF\\_VIRTUAL\\_QUEUES\\_FOR\\_AMUSEMENT\\_PARKS](https://www.researchgate.net/publication/253662168_THE_IMPACT_OF_VIRTUAL_QUEUES_FOR_AMUSEMENT_PARKS)
- [20] 陆船赞. 排队论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1993.
- [21] Ivo, A. and Jacques, R. (2015) Queueing Systems. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- [22] 林怀银. CADAS: 如何评估民航出行的竞争力[EB/OL]. <http://news.carnoc.com/list/591/591723html>, 2022-09-14.