

# A Simulation Analysis of Airport Security-Check Queues Based on Passengers' Risk Classification

Chia-Hung Wang<sup>1,2</sup>, Rongqing Chen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou Fujian

<sup>2</sup>Fujian Provincial Key Laboratory of Big Data Mining and Applications, Fuzhou Fujian

Email: [jhwang728@hotmail.com](mailto:jhwang728@hotmail.com)

Received: May 23<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Jun. 12<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 19<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

This paper studies the optimization design of airport security-check queuing lines based on the passengers' risk classification. We develop a simulation model of security-check queuing system with two types of inspection channels, where the risk threshold is used to differentiate the incoming passengers into two risk classes. In addition, we perform a sensitivity analysis to study the influence of the decision variables on the average waiting time and the safety level for the proposed security-check system. In this paper, the interested decision variables include the risk threshold used for assigning passengers to different inspection channels and the number of devices in each inspection channel. This study presents an optimization strategy for balancing the customs clearance efficiency and the safety level. In the numerical experiments, we conduct a series of data analysis on the alternatives, which reveal the relationship between the decision variables and the overall performance of the proposed security-check queuing system. Finally, based on the presented sensitivity analysis, we put forward an operating mechanism to optimize the proposed security-check queuing lines, which could provide useful suggestions for airport security management in China.

## Keywords

Simulation Model, Security Check, Queuing System, Airport Security, Risk Classification

---

# 基于旅客风险分类的机场安检排队仿真分析

王嘉宏<sup>1,2</sup>, 陈荣庆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>福建工程学院, 信息科学与工程学院, 福建 福州

<sup>2</sup>福建省大数据挖掘与应用技术重点实验室, 福建 福州

Email: [jhwang728@hotmail.com](mailto:jhwang728@hotmail.com)

收稿日期: 2018年5月23日; 录用日期: 2018年6月12日; 发布日期: 2018年6月19日

## 摘要

本文研究基于旅客风险分类的机场安检排队线优化设计。我们开发了一个具有两种安检通道的安检排队系统仿真模型, 在安检系统中风险门阀值被用来将到达旅客分为两种风险等级。此外, 我们采用敏感性分析研究决策变量对所提出安检系统的平均等待时间和安全水平之影响。在本文中, 感兴趣的决策变量包括用于指派旅客前往不同安检通道的风险门阀值和各安检通道的设备数量。本研究提出权衡通关效率和安全水平的优化策略。在数值实验中, 我们对备选方案进行一系列的数据分析, 揭示了安检排队系统的决策变量与整体性能之间的关系。最后, 在敏感性分析的基础上, 我们提出了优化安检排队线的运行机制, 可为中国机场安检管理提供建议。

## 关键词

仿真模型, 安全检查, 排队系统, 机场安检, 风险分类

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

机场安检管理是通过一系列通关安全检查流程来识别、评估与监控各类风险, 并采取有效合适的分析工具和管理措施来保障机场的安全水平。近两年来欧洲已接连发生数起大规模恐怖攻击案, 机场安全检查工作的考验也越来越大。为防范部分旅客违法行为对民航飞行安全的不利影响, 国家发改委、民航局等 8 部门联合发布《关于在一定期限内适当限制特定严重失信人乘坐民用航空器推动社会信用体系建设的意见》, 相关部门将协调建立信息推送机制, 将需要纳入限制乘坐民航的名单信息归集至全国信用信息共享平台, 自 2018 年 5 月 1 日起在一定期限内适当限制特定严重失信人乘坐民用航空器。

然而, 严格且繁琐的安检流程可能导致机场人流与物流存在严重滞留问题, 譬如旅客排队等待安检时间过长导致机场服务质量及满意度下降、货物卡关时间延长影响物流运输经济损失等情况。以美国为例, 美国运输安全管理局(Transportation Security Administration, 简称 TSA)在 2016 年受到了机场旅客对超长安检排队的尖锐批评, 特别是在芝加哥奥黑尔国际机场(Chicago O'Hare International Airport), 随着公众关注度的提高, TSA 投入了大量的资金改进机场的安检设备及安检过程, 并在拥挤的机场增派了安检员工。而在中国改进通关效率方面, 国务院在第十三届全国人民代表大会第一次会议对 2018 年政府工作提出建议, 指出为推进“一带一路”沿线大通关合作, 提出整体通关时间再压缩三分之一的目标。由此可知, 如何优化机场安检风险管理与通关效率已成为重要的研究课题。

本文主要依据《国务院关于印发落实“三互”推进大通关建设改革方案的通知》(国发[2014]68 号)和《国务院关于改进口岸工作支持外贸发展的若干意见》(国发[2015]16 号)精神, 在兼顾机场安检的风险安全水平与通关效率考虑下, 探索通关安检排队系统的优化策略。本研究将旅客风险值作为指派待检旅客至合适等级安检站之依据, 利用计算机仿真模型来分析通关安检排队系统的随机行为, 并评估系统之绩效表现, 藉以决定具有风险安全水平控制的优化方案。在海关安检总成本的限制下, 适当地指派待检

旅客至合适的安检站, 找出最优化的风险门阈值和安检设备配置数, 不仅能维持安全性, 还能兼顾改进通关效率。

## 2. 国内外相关文献

### 2.1. 风险等级分类研究

自 1998 年后, 美国机场的海关使用计算机预先查核系统(Computer-Assisted Passenger Prescreening System, 简称 CAPPS), 海关人员根据 CAPPS 查核系统数据库中的通关旅客身分背景、有无犯案前科、护照历史数据等属性, 估计每个通关旅客的风险值。旅客被指派风险值后, 海关人员会将各个旅客分配至其中一个安检站, 作为后续进行安全检查程序之参考, 而不同等级的安检站依据其安检设备(与安检人员)的能力差异, 导致不同的判别准确性和安检效率。

McLay 等[1]提出利用查核系统预先指派的风险值, 可将通关旅客区分为不同的危险等级, 风险值愈高, 通关安全检查程序就愈严格。Virta 等[2]将通关旅客划分为两类: 征召人选(Selectee)和非征召人选(Non-Selectee), 并根据其风险值分派至相应的安检站。Nie 等[3]也将安全检查站分为两种等级: 常规安检通道(Normal Lane)和严格安检通道(Selectee Lane), 其中常规安检通道的检查过程较为宽松, 而严格安检通道的检查过程较为严谨繁琐。Wang [4]构建了两等级通关旅客安检站的计算机仿真模型, 研究严格安检通道和非严格安检通道的优化设计。McLay 等[5]考虑不同等级、检查过程和检查设备的成本, 在满足总预算与指派限制式下, 最大化检查站成功抓到旅客携带危险物品的机率。

为了应对欧美近年来的恐怖攻击威胁, Shafieezadeh 等[6]提出一套风险管理架构, 以避免机场口岸的潜在恐怖袭击。通过筛选和分析搭机旅客的风险, Bagchi 和 Paul [7]研究机场安全资源的最佳配置。Wang [8]将通关安检问题建构成一数学模型, 探讨基于风险管理的决策分析方法。Lee 和 Jacobson [9]提出了两种通关旅客的安检分配策略: 一种为静态的策略, 即在稳定状态下以优化模型决定待检旅客分配至各个安全检查站的机率值; 另一种为动态的策略, 经由瞬时分析(Transient Analysis)决定旅客指派策略, 以平衡正确警报的机率和旅客停留在安全检查系统之期望时间。Wang 等[10]建构货物通关安检的管理决策模型, 研究集装箱的通关风险和延误时间损失。Kierzkowski 和 Kisiel [11]提出一种基于模糊逻辑(Fuzzy Logic)的机场安检系统多目标评价模型, 该模型探讨安检系统的服务水平、容量和违禁物品的检测效率。

在中国学者的相关研究工作进展上, 詹天宇[12]的研究表明对机场安检的旅客进行多层次安全等级分类, 可以有助于改进机场安检程序, 因为旅客可以节省更多的时间, 增强观察名单上的安全性。麻建军[13]从旅客角度出发, 对中国现有机场安检系统性能进行分析, 提出以旅客风险等级为依据的分组安检方式, 将旅客按照不同风险等级分为高风险旅客、中风险旅客和低风险旅客, 不同风险等级的旅客采取不同的安检方式。周欣及张弛海[14]采用数据挖掘的方法建立海关风险分类预测模型, 对历史报关单进行分类, 探索报关单的风险评估预测规律。赵振武等[15]根据国内外学者对机场安检的旅客风险分类研究, 指出旅客分类将成为降低机场安检系统排队压力、提高旅客满意度、保障航空安全的重要发展趋势。

### 2.2. 安检系统仿真研究

国内外学者广泛应用计算机仿真技术来探索通关安检机制, 优化安检管理模式, 提升通关安检管理水平, 安检系统仿真研究已成为各国通关安检管理的关键技术之一。在国内的相关研究, 倪桂明与杨东援[16]指出计算机仿真分析是提高机场系统运营管理水平的重要途径。蒋欣欣等[17]运用广义随机 Petri 网和马尔科夫链, 对深圳宝安国际机场航站楼内旅客安检流程进行建模与计算机仿真分析。肖耀铨等[18]为降低机场行李安全检测的压力和成本, 利用矩阵分析来规划高峰期航班的起飞时间, 平稳高峰期旅客到达的流量。陆迅[19]通过 Petri 网为建模工具, 建立了浦东国际机场旅客和行李流程的仿真系统。赵振

武与麻建军[20]引入虚拟排队的概念,应用计算机仿真技术进行我国民航机场安检系统模型的研究与实验。王嘉宏[21]整理了国内外通关安检系统运作模式与仿真研究的相关文献,藉以创新探索中国特色的通关安检管理运作模式。Wang 和 Lan [22]将机场旅客分成三种风险等级,使用 Arena 仿真软件对通关安检系统流程进行仿真建模,评估不同决策变数下机场旅客通关安检系统的性能表现。

欧美各国学者应用计算机仿真技术于通关安检作业的各个方面,透过构建安检系统的计算机仿真模型,以研究通关安检管理优化策略。例如,de Lange 等[23]利用计算机仿真实验,分析与评估机场安检通道的虚拟排队线运行效率。Boekhold 等[24]使用微观计算机仿真模型,评估国内航班的安全检查系统。Dorton [25]采用离散事件模拟(Discrete Event Simulation)和排队网络,利用计算机仿真软件 Arena 研究了小机场行李量和安全检查站的报警率之间的关系。Kierzkowski 和 Kisiel [26]利用 Flexsim 仿真软件研究波兰一机场航站楼的安检站,提出一种模拟安全控制系统的运行模式,计算旅客等待安检的平均时间、平均停留时间和安检站的运营工作时数。Alodhaibi 等[27]开发离散事件模拟架构,用以评估机场航站楼内旅客出境流程的效率。Perboli 等[28]对机场的运营过程进行离散事件仿真建模和分析,用来调校机场新设安检系统的参数,以优化系统整体性能。

### 2.3. 排队理论的应用研究

透过应用排队理论,我们可分析通关安检系统的动态过程和运行规律,从而根据安检流程特性改善安检效率,解决安检拥堵问题。例如,Zhang 等[29]利用排队论方法分析美国与加拿大之间的通关安检系统,建构两阶段式安全检查的排队模型,以推导通关车辆在安检站的平均等待时间,并评估后续进行第二阶段检查之最佳筛选比率。Wang 等[30]藉由构建通关安检的排队模型,探讨供应链管理运作过程中的安全性与效率性问题。Luh 等[31]利用排队论建构矩阵计算方法,计算具有有限缓冲的两阶段式安检模型的平均通关时间。Lin 等[32]利用多服务器的排队模型,预测过境通关的延迟时间。Huang 等[33]以马可夫决策过程探讨指派通关旅客至何种安检通道的问题,其所考虑的安全检查站可分成 3 种安检通道,并以模拟退火法求解通关旅客的安检信道分配方式。Wang [34]分析一种具有两类安检通道(正常检查通道和绿色通道)的排队系统,提出基于特征根的稳态机率计算算法,用以求解此安检排队模型的矩阵几何解。

顾扬等[35]基于排队论针对机场不同时段的航班数动态分配安检资源,计算旅客的等待时间与相应合适的安检通道开放数量。张楠等[36]运用 M/M/1 和 M/M/c 排队模型建立机场安检系统效率模型,计算安检各个环节的服务强度以确定瓶颈,并分析影响瓶颈区效率的因素。包邻淋[37]建立基于自适应参数的航站楼安检区旅客到达分布预测模型,选择 GI/M/C 排队模型计算安检区旅客排队队长和旅客等待时间等指标,并在实验部分采用 Service Model 软件进行仿真模拟。赵振武和麻建军[38]引入灰色马尔科夫模型来预测未来几个月机场安检的危险品数量,以便为相关部门改进安检设备或调整人员提供依据。赵元棣和蒋晓蕾[39]应用排队理论对机场航站楼的安检排队系统进行优化分析,建立两种安检排队模型以计算主要运行指标,并对比两种排队模型的运行效率。曹永昌等[40]基于个体仿真和排队论建立机场安检流程的网络流模型,以分析安检过程中的瓶颈所在,寻找相应的优化方案。

谢晶[41]通过对我国主要口岸通关效率水平进行了测度评价,指出目前我国大多数口岸通关效率仍存在资源配置不合理、投入比例及规模不合适的问题。程晋云与徐杨[42]的研究表明,从管理方法和实际效率上来看,中国内地的民航机场安检工作在运行过程中暴露出了一些问题,不仅制约了中国民航安检业的发展,对于民航的安全生产也埋下了不少的安全隐患。因此,寻求一个适应中国当前国情的安检管理模式,以促进民航安检工作的发展是具有一定现实意义的。

以往研究通关安检问题的学者,较少考虑旅客的通关时间限制,少部分考虑通关时间限制的文献则常直接套用传统的排队模型公式,且常忽略不同安全检查站的通关旅客来源具有相异性。与以往研究工

作不同之处是, 本文将在兼顾风险安全水平与通关效率的考虑下, 建构基于旅客风险分类的机场安检排队系统仿真模型, 分析与评估在不同参数设定下的系统运作表现, 找出具风险安全水平保证的优化方案。在全国海关通关一体化改革的新背景下, 本文借助于国内外的排队论方法与仿真建模技术, 来创新探索中国机场安检管理模式, 应是具有相当的研究价值。

### 3. 机场通关安检排队系统的优化问题

机场安检的目的在于预防具有不良企图之旅客(携带危险物品)登机, 危险旅客(或物品)的出现频率对机场和民用航空器的安全水平息息相关。在安全检查系统有两种可能发生的错误情形, 分别为错误警报(False Alarm)和错误放行(False Clear), 都会造成相当的损失。尤其是当错误放行时, 让危险分子通过安检站, 后果不堪设想。若在安检时针对每个通关旅客做仔细检查, 会相应增加旅客的通关时间, 后面等待检查的旅客排队线也会愈长, 使得安检成本也随之大幅上升。过往安检系统降低危险的方法是增加检查设备和安检人员, 然而此方法必然会增加不少的检查成本和检查时间, 相对应的通关效率就会随之下降。所以, 机场安全水平和通关效率往往是取舍的目标。

本研究拟找出更合适的机场通关安检排队线设计, 探讨在旅客风险分类的基础上, 优化分配待检旅客至各等级安检站的决策变量, 权衡机场通关安全水平和通关效率。机场安检系统预先根据航空器乘客的身分特性赋予风险值, 再将其分配至不同安检能力的检查站, 让安检人员聚焦高风险性的待检旅客接受严密的检查, 以达成安检系统的风险管理。每种等级的安检站是根据其筛选能力与设备精确度而设置, 待检旅客的风险值愈高, 则检查的严格程度愈高。改善安检系统应聚焦在待检旅客的风险管理, 即分类不同风险的待检旅客至适当的安检通道, 而非增加安检复杂性和增加设备(及人力)来降低风险。风险评估能给予安检决策参考, 当系统能准确的判别出待检旅客的风险性, 此时低风险性的待检旅客能节省不少等待时间, 检查效率和降低风险两个具冲突性的目标都能顾及。

#### 3.1. 具两种安检能力的通关安检优化问题

我们探讨基于风险分类的机场通关安检流程, 通过建构通关安检排队线的仿真模型, 研究决策变量分别对安检系统的安全水平和通关时间之影响, 达成通关安检系统的优化运作。如图 1 的机场安检流程图所示, 本文所考虑基于风险分类的机场安检系统具有两种安检通道: 严格安检通道(Selectee Lane)对通关旅客的检查较为严格, 而常规安检通道(Normal Lane)对通关旅客的检查则相对宽松。机场安检人员利用风险查核系统数据库提供的信息标注通关待检旅客的风险值, 先根据旅客个人身分、有无犯案前科、历史信用数据等属性可以赋予每个通关旅客相对应的风险值。利用预先设定的风险门限值(赋值介于 0% 与 100%之间), 我们可将待检旅客区分为不同的风险等级(Selectee 或 Non-Selectee), 再根据待检旅客的风险值指派前往两种安检能力的安检站。旅客的风险值(Risk Value)是经由查核系统得知, 大部分文献假设旅客的风险值服从截断指数分布(Truncated Exponential Distribution), 例如 McLay [1]、Wang [4]、Lee 与 Jacobson [9]等。风险值较高的旅客指派至安全检查较严密的严格安检通道, 待检旅客有概率  $p$  被指派至严格安检通道; 而风险值较低的旅客指派至检查较宽松的常规安检通道, 待检旅客有概率  $(1-p)$  被指派至常规安检通道。本研究将风险门限值  $\theta$  当作决策变量进行系统仿真数据分析, 通过设定适当的门限值  $\theta$ , 使安检系统的安全水平和通关效率达到优化。

我们将机场通关安检排队线建构成一计算机仿真模型, 求解通关安全检查的优化问题。在机场安检优化模型中, 决策变量之一是待检旅客被指派至不同安检站的风险门限值  $\theta$ , 属于连续型变量; 而另一种决策变量是安检设备的配置数, 即常规安检通道和严格安检通道的安检设备数  $s_1$  及  $s_2$ , 属于离散型变数。此优化问题为: 在满足可容许的通关时间和总预算限制下, 如何决定指派旅客前往不同检查站的风

险门阈值及各安检站的设备数, 使得机场安检系统的安全水平 SL 和通关时间 W 达到优化。

### 3.2. 安检排队系统的 Arena 仿真模型

本研究采用仿真软件 Arena 作为建构模拟机场通关安检系统模型的工具。Arena 是美国 Rockwell Software 公司开发的通用仿真软件, 具有对象连接与嵌入(Object Linking and Embedding, 简称 OLE)功能、可视化界面、模拟处理器、数据输入分析、数据输出分析、统计分析模块以及动画演示等功能。Arena 软件具有使用方便、界面美观、动画显示等优点, 可轻易地建立通关安检排队模型, 而且能依据用户需求设置系统模块参数进行动态模拟运行, 并进行实时分析和优化。

如图 2 的 Arena 模型流程图所示, 它囊括了所有用来定义模拟图 1 的机场安检流程图对象和数据对象。在 Arena 软件可视化环境中用来构建模型的基本单元称为模块, 构建仿真模型的过程就是选取、放置和连接模块, 并进行模型相关的参数设置。模块分为两类: 流程图模块(Flowchart Module)和数据模块(Data Module), 流程图模块包括 Create、Dispose、Process、Decide、Batch、Separate、Assign 和 Record 等, 数据模块包括 Entity、Queue、Resource、Variable、Schedule 和 Set 等。我们利用 Create 模块功能来

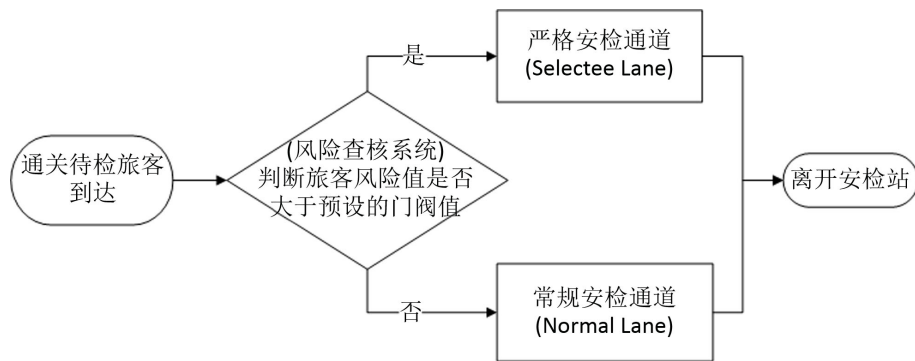


Figure 1. A flowchart of airport security-check process based on the risk classification  
图 1. 基于风险分类的机场安检流程图

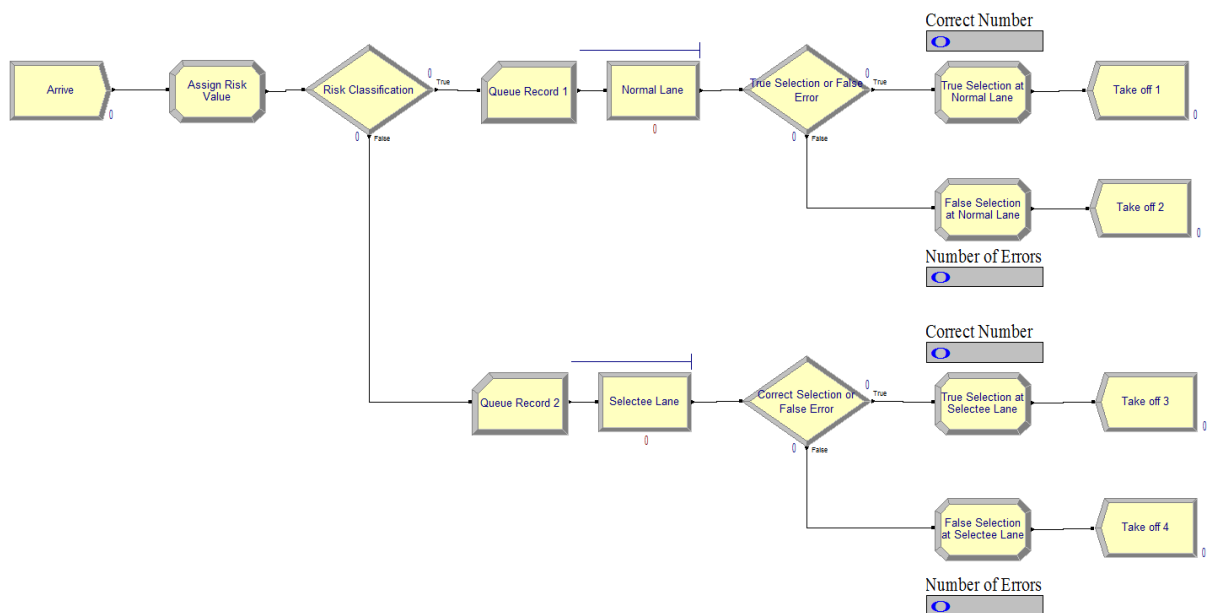


Figure 2. The flowchart of Arena model for the proposed security-check system  
图 2. 本文提出的安检系统 Arena 模型流程图

生成通关旅客实体, 安检系统中的每个待检旅客都在命名为 Arrive 的 Create 模块中产生; Process 模块是安检系统的旅客检查队列, 待检旅客在命名为 Selectee Lane 和 Normal Lane 的 Process 模块中进行安全检查; Dispose 模块是 Arena 仿真软件中每个实体离开的模块。必须注意的是, Arena 仿真模型要按照逻辑顺序连接 Create、Process 和 Dispose 等模块, 我们可以透过单击“Connect”按钮或是选择菜单命令进行模块间的连接。

本文构建基于风险分类的机场安检 Arena 仿真模型流程(如图 2 所示), 具体使用的模块说明如下: 我们以 Arrive 模块生成实体, 表示待检旅客到达机场通关安检系统。Assign Risk Value 模块用来赋予每个实体的风险值, 例如可以截断指数分布随机赋予一个介于 0 与 1 之间的数值。Risk Classification 判断模块将每个实体的风险值与风险门阈值进行大小比较, 用来区分高风险旅客和低风险旅客, 使之分别进入相应的安检通道。Normal Lane 模块表示常规检查站, 而 Selectee Lane 模块表示严格检查站。Queue Record 1 模块记录常规安检通道当前的排队人数, 而 Queue Record 2 模块记录严格安检通道当前的排队人数。我们使用 True Selection or False Error 模块来计算错误放行(False Clear)的概率, 分别纪录通过常规检查站的真实危险旅客人数和安全旅客人数; 而 Correct Selection or False Error 模块则用来计算错误警报(False Alarm)的概率, 判别通过严格检查站的真实危险旅客人数和安全旅客人数。我们利用 Correct Number 标签纪录正确进行分类安检的实体个数, 并用 Correct Number 标签纪录发生错误分类安检的实体个数。Take off 模块表示旅客离开安检站。

在 Arena 模型中, Create 模块可设置的参数包括: 名称(Name)、实体类型(Entity Type)、到达间隔时间分布类型(Time between Arrivals Type)、每次到达的实体个数(Entities per Arrival)、实体最大数量(Max Arrival)等参数。Process 模块可以设置的参数包括: 名称(Name)、类型(Type)、活动(Action)等, 其中活动可以选取延迟类型(Delay Type)、占用 - 延迟 - 释放(Seize Delay Release)、单位(Units)和分配(Allocation)等。在仿真实验运行中, 每个模块都有其产生或处理的实体个数说明, 队列上方的圆点代表待处理。

我们可以透过 Run Setup 设置重复仿真运行参数(Replication Parameters), 例如重复仿真次数(Number of Replications)、仿真暖机时间(Warm-Up Period)、仿真运行长度(Replication Length)、基本时间单位(Base Time Units)、开始日期与时间(Star Date and Time)等运行参数。

在 Arena 仿真实验运行结束后, 如果要查看 Arena 仿真实验的数值结果, 可以在 Reports 中查看总报告、重复实验报告以及资源报告等仿真实验数据, 其中 Category Overview 报告提供了仿真实验的主要统计信息, 而分类汇总报告(Category by Replications)则汇总了仿真模型队列的等待时间和等待人数的平均值、最大值和最小值等统计结果。

## 4. 仿真实验数据分析

### 4.1. 计算机仿真环境设置

本文中所有数值实验是基于 Arena 仿真平台(软件版本号为 14.00.00000), 电脑运行环境为 Windows 10 操作系统, CPU 为 Intel Core i5-2520M (2.5 GHz), 内存为 8GB。实验中的决策变数是风险门阈值  $\theta$ , 是在模型中用以区分高、低风险旅客并进行待检旅客分流的依据, 其赋值范围为  $0 \leq \theta \leq 1$ 。在我们的仿真实验中, 旅客的风险值服从截断指数分布(参数设置为 0.0625), 且假设每一个待检旅客的风险值相互独立。旅客到达间隔时间服从指数分配, 常规安检通道及严格安检通道的查验时间服从指数分配, 查验时间均值与安检通道的类型有关。对于每个方案的仿真实验, 将运行足够长的仿真运行周期(Replication Length)和设置合适的预备时间(Warm-Up Period), 以及取 8 次的仿真重复次数(Number of Replications)计算各实验数据之均值, 具体参数设置将在各小节中介绍。

## 4.2. 安检设备数对通关效率的影响

在本小节实验中, 我们研究安检设备数量对通关等待时间的影响。在此节实验中, 我们将风险门阈值  $\theta$  设定为 0.05, 待检旅客平均到达率设为 3 (人/单位时间), 严格安检通道每台设备的平均服务率为 1.5 (人/单位时间), 常规安检通道每台设备的平均服务率为 2 (人/单位时间)。此实验将透过变动两种安检通道的安检设备数量, 分析安检设备的使用数量对通关等待时间的影响。在实务应用上, 相关管理部门或研究单位可以利用本文提出的 Arena 仿真模型, 将采集到的统计数据输入设置所需的模型参数, 来进行计算机仿真实验与数据分析。

在给定两种安检设备数量的组合方案下, 本实验得到的数据结果可以整理如表 1、图 3 和图 4 所示。观察表 1 的实验结果, 当我们增加常规安检通道或严格安检通道的设备数量时, 都可以降低各自通道内旅客的等待时间。同时, 图 3 和图 4 的数据显示安检设备的增加量对旅客等待时间的影响变化, 且其边际效益将随着设备数量足够多后而递减。也就是说, 当待检旅客平均到达率不变的情况下, 每增加一台设备数能相应减少旅客平均等待时间的下降幅度会越来越小。另外, 同时增加两种安检通道的设备数量, 不仅可以降低各自安检通道的旅客等待时间, 而且能大幅度降低总体安检系统的平均通关时间。

## 4.3. 风险门阈值对通关效率和安全水平的影响

在本小节的敏感性分析中, 我们将关注用来区分待检旅客为不同风险等级的风险门阈值, 观察风险门阈值的变动对通关等待效率和系统安全水平的影响。在此仿真实验中, 我们提出两种方案剧本, 方案一将两种安检通道分别视为单一服务台排队系统(Single-Server Queueing System), 而方案二则将两种安检通道视为多服务台排队系统(Multi-Server Queueing System)。利用本文提出的 Arena 仿真模型, 安检管理部门可以透过输入规划设计或实务运行所需的模型参数, 进行相应方案剧本的敏感性分析(Sensitivity Analysis)。

**Table 1.** Average waiting time for various combinations of two types of inspection equipments

**表 1.** 两种安检设备不同组合数的平均等待时间

两种安检设备的数量组合		常规安检通道的 平均等待时间 $W_1$	严格安检通道的 平均等待时间 $W_2$	安检系统总体的 平均等待时间 $W$
常规安检通道	严格安检通道			
1	2	320.22	18.69	178.73
1	3	269.16	9.20	149.30
1	4	265.96	6.18	142.23
1	5	260.23	4.55	133.02
1	6	259.42	3.60	139.38
2	1	23.28	548.57	266.51
3	1	11.00	453.93	218.41
4	1	6.83	450.94	212.47
5	1	5.01	452.51	212.23
6	1	3.94	473.83	221.52
2	2	24.83	30.18	27.34
3	3	11.33	13.93	12.55
4	4	7.10	8.38	7.69
5	5	5.09	6.01	5.52
6	6	3.87	4.66	4.24



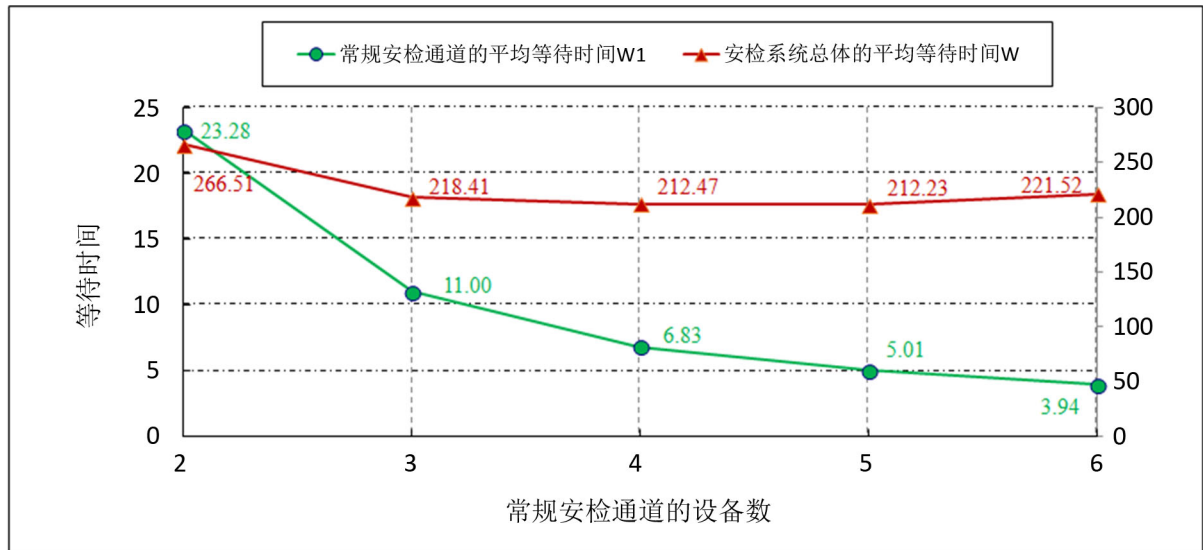


Figure 3. The effect on the average waiting time via varying the number of inspection equipments at normal lanes  
 图 3. 常规安检通道的设备数量变化对平均等待时间的影响

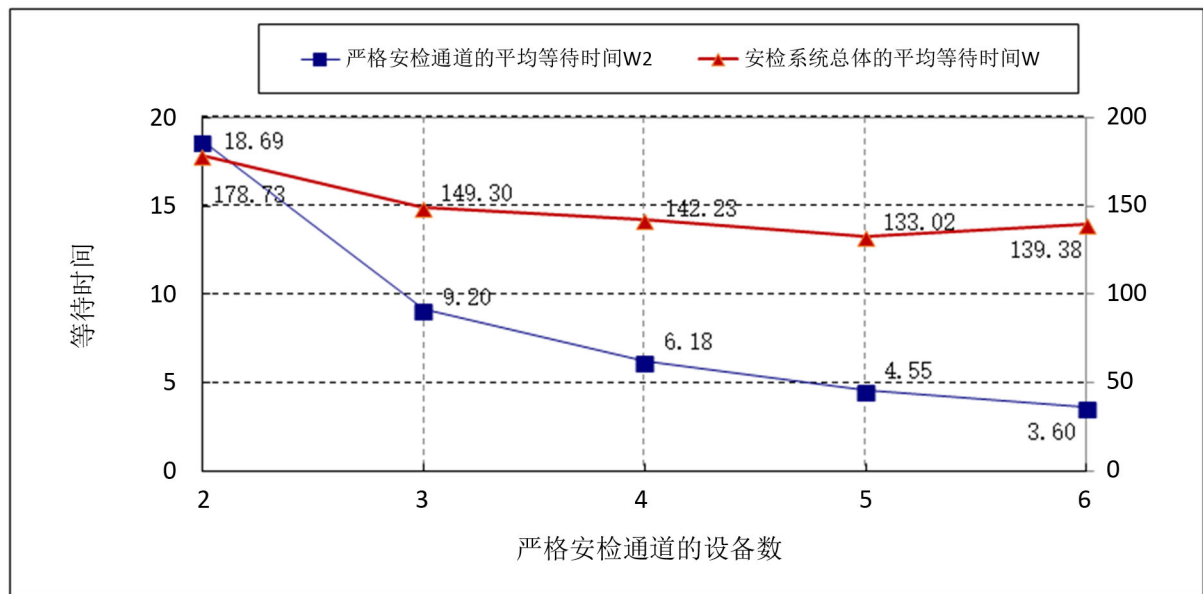


Figure 4. The effect on the average waiting time via varying the number of inspection equipments at selectee lanes  
 图 4. 严格安检通道的设备数量变化对平均等待时间的影响

### 4.3.1. 方案一的敏感性分析

在此方案一的仿真实验中, 我们设定待检旅客平均到达率为 1 (人/单位时间), 严格安检信道的平均服务率为 1.5 (人/单位时间), 常规安检信道的平均服务率为 2 (人/单位时间), 以及两种安检通道的设备数量都是 1 台。为了量化计算安检系统的安全水平 SL, 旅客风险值的截断指数分配参数赋值为 0.0625, 设定常规安检通道的安检能力  $d_1 = 0.7$ , 严格安检通道的安检能力  $d_2 = 0.98$ , 而安检系统的安全水平 SL 定义为被指派至两种安检站的风险比例与相应设备安检能力的加权平均值。在实务上, 安检通道的安检能力  $d_1$  和  $d_2$  之赋值可由安检设备的出厂信息估算得知。

利用以上的参数设置进行 Arena 仿真实验, 可以得到图 5 与图 6 的实验结果数据。由图 5 的数据线

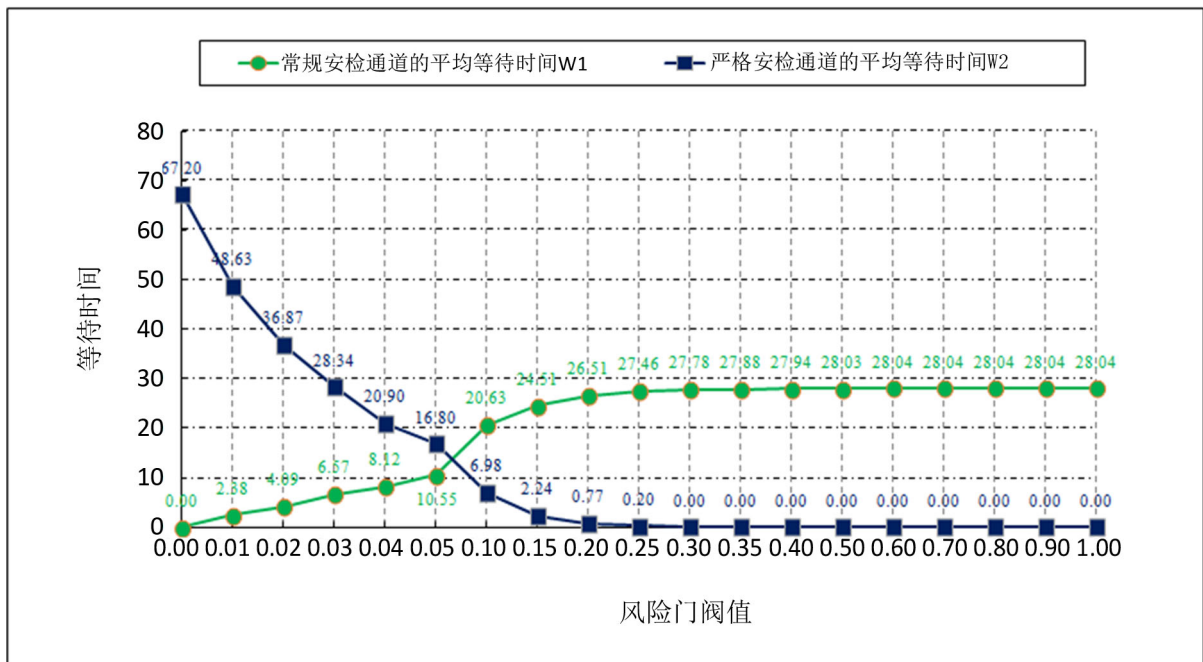


Figure 5. The impact of risk threshold on the average waiting time ( $W_1$  and  $W_2$ ) for two types of inspection channels under Scheme I

图 5. 方案一的风险门阈值对两种安检通道平均等待时间( $W_1$  和  $W_2$ )的影响

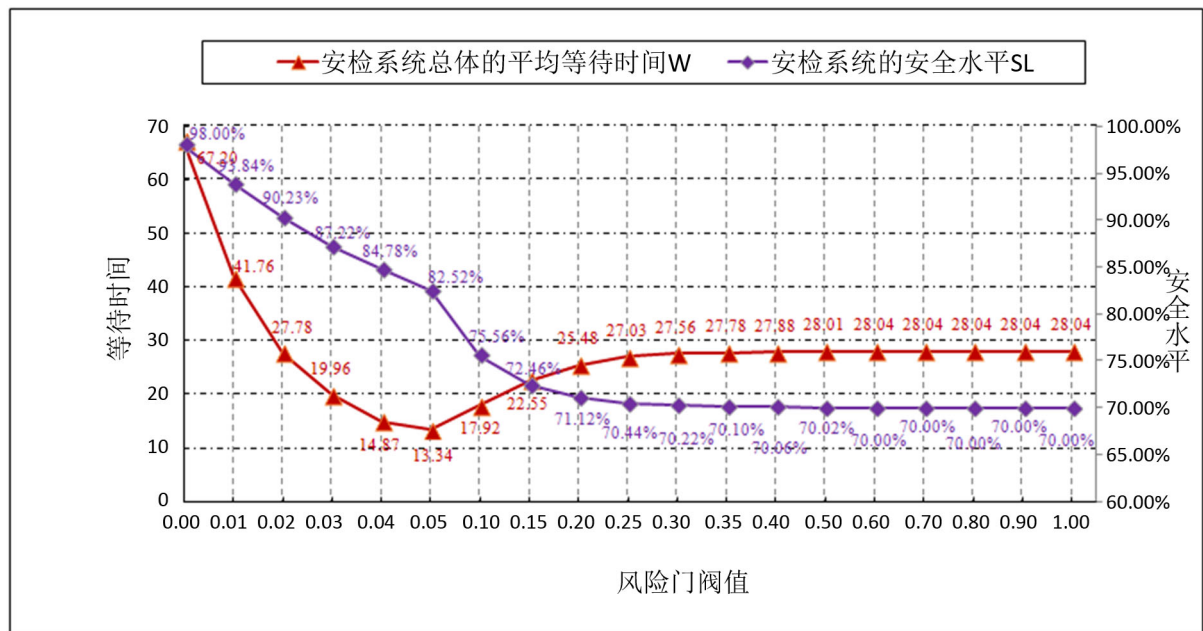


Figure 6. The impact of risk threshold on the average waiting time  $W$  and safety level  $SL$  for the security-check system under Scheme I

图 6. 方案一的风险门阈值对安检系统平均等待时间  $W$  和安全水平  $SL$  的影响

趋势, 我们可观察到常规安检通道队列的平均等待时间  $W_1$  随风险门阈值  $\theta$  的增加而增长(直到最大值), 而严格安检通道队列的平均等待时间  $W_2$  则是随着风险门阈值  $\theta$  的增加逐渐下降。需要注意的是, 风险门阈值  $\theta$  的赋值会显著影响分配至两种安检通道的旅客比例, 增加风险门阈值  $\theta$  会使得被分配至严格安检通

道的旅客数量下降。也就是说, 待检旅客被派往常规安检通道的风险比例会随风险门阈值  $\theta$  的增加从 0% 增长到 100%, 而待检旅客被分派至严格安检通道的风险比例则随风险门阈值  $\theta$  的增加从 100% 下降到 0%。

在图 6 的数据中, 可以发现当增加风险门阈值  $\theta$  时, 旅客的平均等待时间  $W$  将先减小, 在风险门阈值赋值 0.05 时达到最小值, 过了此拐点之后平均等待时间  $W$  将随风险门阈值  $\theta$  的增加而增大。另外, 由图 6 可知安检系统的安全水平  $SL$  会随风险门阈值  $\theta$  的增加而下降。然而, 增加风险门阈值  $\theta$  影响安全水平  $SL$  的边际效应是递减的, 当风险门阈值  $\theta$  较小时对安全水平  $SL$  的影响幅度较大, 在本例中  $\theta$  赋值小于 0.1 时影响幅度较大; 而随着风险门阈值  $\theta$  的增加, 安全水平  $SL$  的下降幅度是逐渐减小的。在此方案一的实验参数设置下, 各运行指标在风险门阈值  $\theta$  达到 0.4 后都趋于稳定状态。

### 4.3.2. 方案二的敏感性分析

在方案二的仿真实验中, 我们将两种安检通道视为多服务台排队系统, 设定两种安检通道的设备数都是 2 台, 严格安检通道的平均服务率为 1.5 (人/单位时间), 常规安检通道的平均服务率为 2 (人/单位时间)。同时, 待检旅客的平均到达率赋值为 1 (人/单位时间), 旅客风险值的截断指数分配参数赋值为 0.0625, 常规安检通道的安检能力  $d_1 = 0.7$ , 严格安检通道的安检能力  $d_2 = 0.98$ 。

在方案二的参数设置下, 运行 Arena 仿真模型可以得到实验数据, 整理如图 7 和图 8 所示。在图 7 中, 我们可以观察发现常规安检通道队列的平均等待时间  $W_1$  会随风险门阈值  $\theta$  的增加而增大(直到最大值 2.00), 但是严格安检通道队列的平均等待时间  $W_2$  则随着风险门阈值  $\theta$  的增加而从最大值 4.77 下降到零。如同方案一的实验现象, 待检旅客被派往常规安检通道的风险比例会随风险门阈值  $\theta$  的增加从 0% 增长到 100%, 而分配至严格安检通道的风险比例会随风险门阈值  $\theta$  的增加从 100% 下降到 0%。

观察图 8 的系统平均等待时间  $W$  和安全水平  $SL$  的数据变化, 可以发现旅客的平均等待时间  $W$  先随门阈值  $\theta$  的增加从最大值 4.77 慢慢减小, 在门阈值  $\theta$  等于 0.05 时达到最小值 0.82, 之后平均等待时间  $W$  再随门阈值  $\theta$  的增加而增加。同时, 安检系统的安全水平  $SL$  会随风险门阈值  $\theta$  的增加而下降, 且风险门

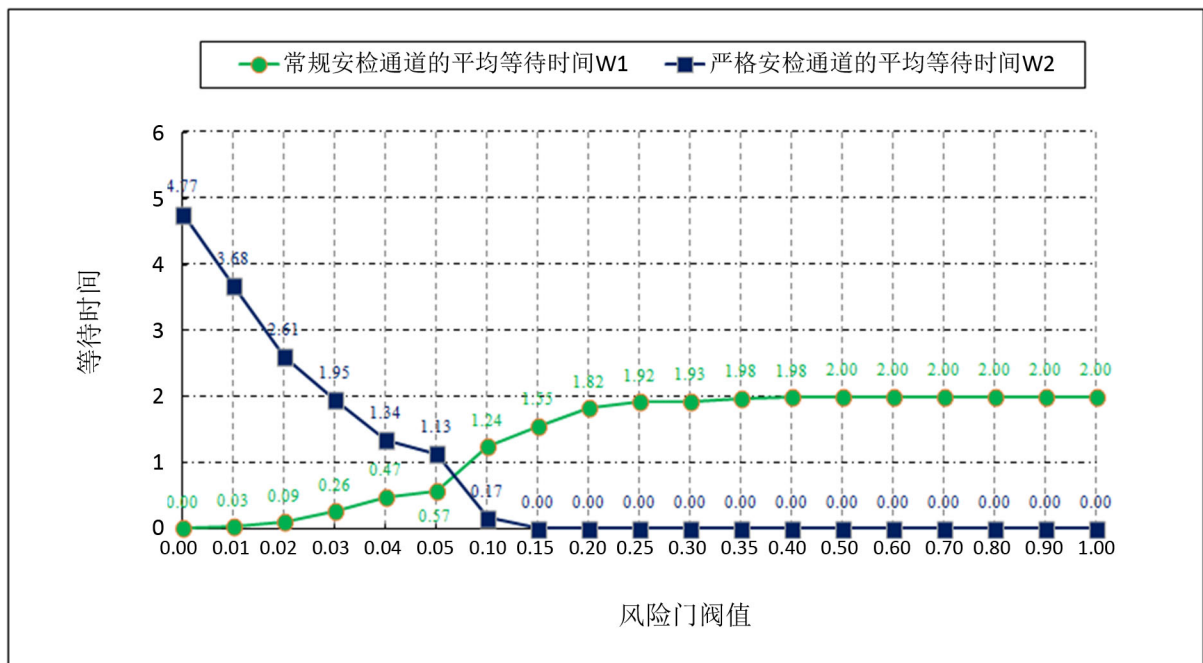
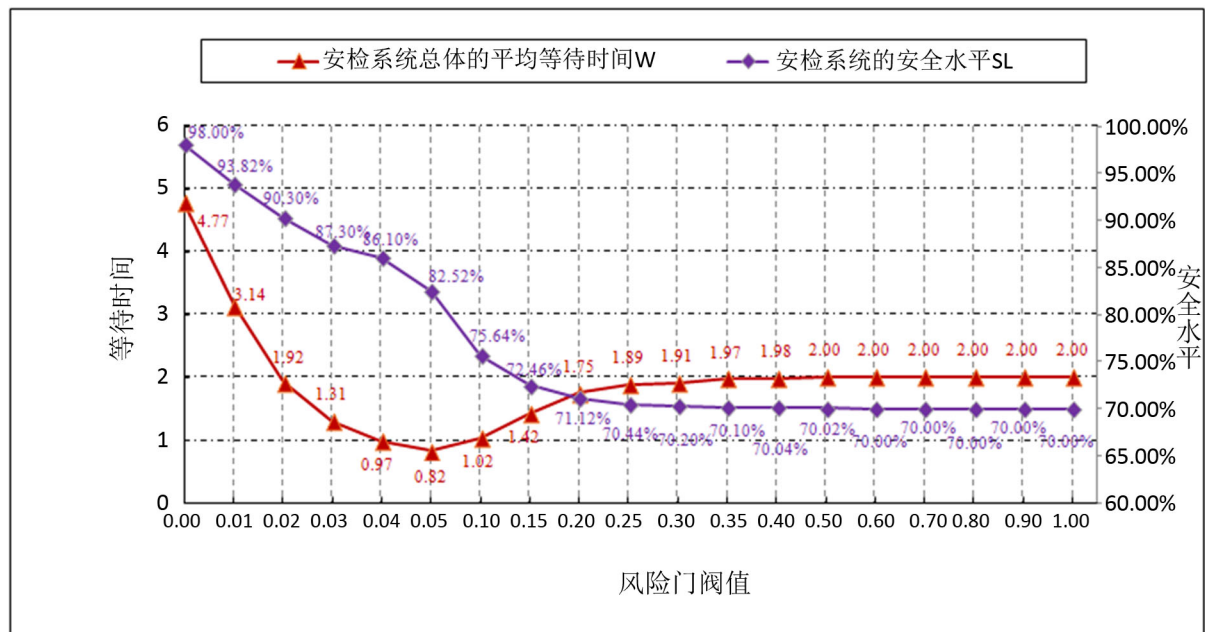


Figure 7. The impact of risk threshold on the average waiting time ( $W_1$  and  $W_2$ ) for two types of inspection channels under Scheme II

图 7. 方案二的风险门阈值对两种安检通道平均等待时间( $W_1$  和  $W_2$ )的影响



**Figure 8.** The impact of risk threshold on the average waiting time W and safety level SL for the security-check system under Scheme II

**图 8.** 方案二的风险门阈值对安检系统平均等待时间 W 和安全水平 SL 的影响

阈值  $\theta$  影响安全水平 SL 的边际效应是递减的。在此方案二的实验参数设置下, 各运行指标在风险门阈值  $\theta$  足够大之后也都趋于定值。

#### 4.3.3. 两备选方案的比较分析

在 4.3.1 节和 4.3.2 节中, 我们已对两种备选方案进行决策变量对系统运行指标的敏感性分析。根据图 5~图 8 的数据结果, 我们在此小节中比较方案一和方案二的系统运行表现, 分析具两种安检能力的通关安检排队系统的优化策略。

由图 5 与图 7 的数据中, 我们比较两备选方案的平均等待时间  $W_1$  和  $W_2$  数值。方案二的两种安检通道平均等待时间  $W_1$  和  $W_2$  都相较于方案一的平均等待时间为小。同时, 在图 6 和图 8 的数据比较中, 方案二的系统总体平均等待时间 W 也相对于方案一大幅减少, 因此, 我们可知增加两种安检通道的设备数量可以降低旅客的平均等待时间。

由图 5 与图 7 的数据比较中, 两备选方案的常规安检通道的平均等待时间  $W_1$  都随风险门阈值  $\theta$  的增加从零开始增长到最大值, 且严格安检通道的平均等待时间  $W_2$  也都随风险门阈值  $\theta$  的增加从最大值下降到零。另外, 图 6 和图 8 显示两备选方案的系统总体平均等待时间 W 都会随着风险门阈值  $\theta$  的增加而具有先减后增的现象。此现象的解释说明如下: 这是因为风险门阈值  $\theta$  的赋值越接近 0 时, 将会有越大比例的到达旅客被分配至严格安检通道, 例如当门阈值  $\theta$  取值为 0 的极端情况就是将全部的旅客进行严格安检; 而当风险门阈值  $\theta$  的赋值越接近 1 时, 则会有越高比例的旅客将被分配至常规安检通道, 当门阈值  $\theta$  取值为 1 的极端情况就是将全部的旅客进行常规安检。因此, 我们可以透过适当选取风险门阈值  $\theta$ , 在安全水平 SL 满足要求的条件下, 使得安检系统的平均等待时间 W 达到最小值。在安检实务操作上, 本文建议可以透过仿真实验进行穷举法, 或是求解一数值优化模型, 用来确定所面临安检系统环境的适当风险门阈值。

在图 6 和图 8 中, 两备选方案的安全水平 SL 都随风险门阈值  $\theta$  的增加而下降, 而且相应得到的数值差异很小, 说明增加安检设备数量对安检系统的安全水平 SL 影响不大。因此, 在安检技术与设备精确度

尚未明显改进的情况下, 我们可以透过降低风险门阈值  $\theta$  的赋值而增加安检系统的安全水平 SL。

值得一提的是, 在图 5~图 8 中 x 轴自变量(风险门阈值  $\theta$ )的变动间隔不全为 0.1, 我们特别列出风险门阈值  $\theta = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$  等数据点。其原因是, 在 4.3.1 节和 4.3.2 节给定的实验参数设置下, 当风险门阈值较小时, 系统运行指标有比较明显的数值结果变动。虽然设置不同的实验参数不会改变本文提出的 Arena 仿真模型的正确性与敏感性分析结果, 但需注意计算机仿真实验的各运行指标会与模型设置参数息息相关, 当参数赋值超出模型适用范围时, 决策变量的变动对系统运行指标的影响可能会不明显, 或是产出实验数据可能出现偏差。所以, 在实务操作上考虑备选方案时, 进行计算机仿真实验前需优先做好相关输入参数的数据统计(预测)工作。

## 5. 结束语

本文探讨基于旅客风险分类的机场安检排队线优化设计。我们通过构建机场通关安检排队线的仿真模型, 利用计算机仿真实验对备选方案进行敏感性分析, 评估决策变量对安检系统的安全水平和通关时间之影响, 分析权衡安全水平和通关效率的优化策略。我们提出具有两种安检通道的安检排队系统, 利用风险门阈值将机场通关旅客分成两种风险等级, 并指派待检旅客至合适等级的安检通道。本研究采用 Arena 仿真软件对机场安检流程进行计算机仿真建模, 以风险门阈值和安检设备数量作为决策变量, 研究决策变量对安检系统平均等待时间和安全水平的影响。在本文中, 我们已进行一系列的敏感性分析, 在给定的模型参数设定下进行数值实验, 比较分析系统的绩效表现。最后, 我们以敏感性分析为基础, 提出通关安检排队系统的优化策略。

本研究的主要贡献总结在以下三个方面: 首先, 我们基于旅客风险分类的信用体系, 提出具有两种安检通道的排队系统仿真模型。其次, 一系列的数据分析和敏感性分析揭示了安检排队系统的决策变量与整体性能之间的关系。最后, 本文建议安检排队线的优化运行机制, 可以合理权衡安检系统的通关效率和安全水平。

未来研究工作可以在本文的仿真模型基础上, 加入安检设备建置成本、维运成本和安检人员工资等成本分析, 为探索全国通关一体化新背景下的通关效率和风险管理提供评估工具。近年来全球各地频繁出现恐怖攻击案, 各国通关安检管理与流程也越来越复杂, 将持续增加研究安检运作模式关键技术的挑战性。本文提出的安检系统仿真建模与数据分析, 可以作为相关部门探索我国机场多通道安检系统的研究参考。

## 基金项目

本课题得到福建省科技厅自然科学基金面上项目(2016J01330)、福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT160337)资助。

## 参考文献

- [1] McLay, L.A., Lee, A.J. and Jacobson, S.H. (2010) Risk-Based Policies for Airport Security Checkpoint Screening. *Transportation Science*, **44**, 333-349. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0308>
- [2] Virta, J.E., Jacobson, S.H. and Kobza, J.E. (2003) Analyzing the Cost of Screening Selectee and Non-Selectee Baggage. *Risk Analysis*, **23**, 897-908. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00367>
- [3] Nie, X., Parab, G., Batta, R. and Lin, L. (2012) Simulation-Based Selectee Lane Queuing Design for Passenger Checkpoint Screening. *European Journal of Operational Research*, **219**, 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.012>
- [4] Wang, C.-H. (2016) Arena Simulation for Aviation Passenger Security-Check Systems. *Advances in Intelligent Systems and 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)
- [5] McLay, L.A., Jacobson, S.H. and Kobza, J.E. (2007) Integer Programming Models and Analysis for a Multilevel Pas-

- senger Screening Problem. *IIE Transactions*, **39**, 73-81. <https://doi.org/10.1080/07408170600729200>
- [6] Shafieezadeh, A., Cha, E.J. and Ellingwood, B.R. (2015) A Decision Framework for Managing Risk to Airports from Terrorist Attack. *Risk Analysis*, **35**, 292-306. <https://doi.org/10.1111/risa.12266>
- [7] Bagchi, A. and Paul, J.A. (2014) Optimal Allocation of Resources in Airport Security: Profiling vs. Screening. *Operations Research*, **62**, 219-233. <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1241>
- [8] Wang, C.-H. (2015) A Modelling Framework for Managing Risk-Based Checkpoint Screening Systems with Two-Type Inspection Queues. *Proceedings of the Third International Conference on Robot, Vision and Signal Processing (RVSP 2015)*, Taiwan, 18-20 November 2015, 220-223. <https://doi.org/10.1109/RVSP.2015.59>
- [9] Lee, A.J. and Jacobson, S.H. (2011) Evaluating the Effectiveness of Sequential Aviation Security Screening Policies. *IIE Transactions*, **43**, 547-565. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2010.550909>
- [10] Wang, C.-H., Wu, M.-E. and Chen, C.-M. (2015) Inspection Risk and Delay for Screening Cargo Containers at Security Checkpoints. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP-2015)*, Adelaide, 23-25 September 2015, 211-214. <https://doi.org/10.1109/IIH-MSP.2015.29>
- [11] Kierzkowski, A. and Kisiel, T. (2017) Evaluation of a Security Control Lane with the Application of Fuzzy Logic. *Procedia Engineering*, **187**, 656-663. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.427>
- [12] 詹天宇. 基于成本效益视角的机场多层次动态安检系统模型[J]. 当代经济, 2017(20): 88-89.
- [13] 麻建军. 基于乘客风险等级的分组安检对机场安检系统性能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- [14] 周欣, 张弛海. 基于数据挖掘的海关风险分类预测模型研究[J]. 海关与经贸研究, 2017, 38(2): 22-31.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 蒋欣欣, 周航, 蔡冰青. 航站楼安检布局及流程优化研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(3): 25-29 + 34.
- [18] 肖耀铨, 邓波, 霍浩超, 叶世绮, 胡代强. 机场安全检测的优化策略[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2003, 24(5): 35-42.
- [19] 陆迅. 机场旅客与行李流程的规划和仿真研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [20] 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.
- [21] 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. <https://doi.org/10.12677/CSA.2017.711121>
- [22] Wang, C.-H. and Lan, J. (2017) Performance Evaluation of a Risk-Based Three-Tier Inspection System. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, 464-468. <https://doi.org/10.12783/dtce/cmsam2017/16417>
- [23] De Lange, R., Samoilovich, I. and van der Rhee, B. (2013) Virtual Queuing at Airport Security Lanes. *European Journal of Operational Research*, **225**, 153-165. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.025>
- [24] Boekhold, J.V., Faghri, A. and Li, M. (2014) Evaluating Security Screening Checkpoints for Domestic Flights Using a General Microscopic Simulation Model. *Journal of Transportation Security*, **7**, 45-67. <https://doi.org/10.1007/s12198-013-0129-8>
- [25] Dorton, S.L. (2011) Analysis of Airport Security Screening Checkpoints Using Queuing Networks and Discrete Event Simulation: A Theoretical and Empirical Approach. Dissertations and Theses, Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, 47.
- [26] Kierzkowski, A. and Kisiel, T. (2017) Simulation Model of Security Control System Functioning: A Case Study of the Wrocław Airport Terminal. *Journal of Air Transport Management*, **64**, 173-185. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.09.008>
- [27] Alodhaibi, S., Burdett, R.L. and Yarlalagadda, P.KDV. (2017) Framework for Airport Outbound Passenger Flow Modelling. *Procedia Engineering*, **174**, 1100-1109. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.263>
- [28] Perboli, G., Musso, S., Perfetti, F. and Trapani, P. (2014) Simulation of New Policies for the Baggage Check in the Security Gates of the Airports: The Logiscan Case Study. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, **111**, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.038>
- [29] Zhang, Z.G., Luh, H.P. and Wang, C.-H. (2011) Modeling Security-Check Queue. *Management Science*, **57**, 1979-1995. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1110.1399>
- [30] Wang, C.-H., Luh, H.P. and Zhang, Z.G. (2012) Secure and Efficient Global Supply Chain Management: A Queueing Analysis. *Lecture Notes in Operations Research and Decision Science*, 28-36.

- [31] Luh, H., Zhang, Z.G. and Wang, C.-H. (2013) A Computing Approach to Two Competing Services with a Finite Buffer Effect. *Proceedings of the 8th International Conference on Queueing Theory and Network Applications*, Taichung, 30 July-2 August 2013, 15-21.
- [32] Lin, L., Wang, Q. and Sadek, A.W. (2014) Border Crossing Delay Prediction Using Transient Multi-Server Queueing Models. *Transportation Research Part A*, **64**, 65-91. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.03.013>
- [33] Huang, P., Luh, H. and Zhang, Z.G. (2016) A Queueing Model for Tiered Inspection Lines in Airports. *International Journal of Information and Management Sciences*, **27**, 147-177.
- [34] Wang, C.-H. (2018) A Queueing Analysis of a Security-Check System with Two Types of Inspection Channels. *Advances in Intelligent Systems Research*, **159**, 102-106. <https://doi.org/10.2991/mmsa-18.2018.23>
- [35] 顾扬, 郑敏, 周航, 李玥. 机场安检资源动态分配方法研究[J]. 航空计算技术, 2016, 46(5): 67-72.
- [36] 张楠, 李子怡, 周甜甜, 丰全东. 机场安检系统效率的建模及应用[J]. 建模与仿真, 2017, 6(3): 170-178.
- [37] 包邻淋. 航站楼安检系统研究与优化[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- [38] 赵振武, 麻建军. 基于灰色马尔科夫模型的机场安检危险品数量预测[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 51-53.
- [39] 赵元棣, 蒋晓蕾. 机场航站楼安检通道数量配置优化方法研究[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(20): 293-301.
- [40] 曹永昌, 陈丕炜, 吕可波, 高翔, 曹圣山. 基于个体仿真的机场安检系统优化研究[J]. 数学建模及其应用, 2017, 6(2): 76-87.
- [41] 谢晶. 我国进口贸易口岸通关效率水平测度研究——基于 Co-plot-DEA 组合评价模型的实证分析[J]. 海关与经贸研究, 2016, 37(5): 65-78.
- [42] 程晋云, 徐杨. 对国内民航机场安检管理模式的思考[J]. 中国公共安全(学术版), 2016, 2: 41-44.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-664X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [mse@hanspub.org](mailto:mse@hanspub.org)