

Modeling and Application of Airport Security System Efficiency

Nan Zhang¹, Ziyi Li¹, Tiantian Zhou², Quandong Feng^{1*}

¹College of Sciences, Beijing Forestry University, Beijing

²College of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing

Email: 771568416@qq.com, *fqd@lsec.cc.ac.cn

Received: Jul. 30th, 2017; accepted: Aug. 12th, 2017; published: Aug. 16th, 2017

Abstract

This paper establishes the airport security system efficiency model to explore the way to improve passenger throughput and the stability of the service system in the premise of ensuring safety. Firstly, the queuing system model is used to find the bottleneck according to the service intensity, and the efficiency of the bottleneck area is verified by the transmission system efficiency model. Secondly, analyze the factors that affect the efficiency of the bottleneck area, and develop the concrete plans of decompression, then apply the linear programming model to obtain the optimal plan of balance efficiency and cost, and verify the effectiveness of the measures through the transmission system efficiency model. Finally, the data were screened to simulate the movement of passengers in all age groups, using the proportions of the age groups as their weight to calculate the average transit time. Linearly interpolate the population of each age group in 2020, and use the hypothesis test to verify the sensitivity of the system in order to analyze the adaptability of the airport security system to specific passenger groups and propose ways to improve the stability of the service system.

Keywords

Airport Security System, Queuing Theory, Transmission System Efficiency, Linear Programming, Linear Interpolation, Hypothesis Test

机场安检系统效率的建模及应用

张楠¹, 李子怡¹, 周甜甜², 丰全东^{1*}

¹北京林业大学理学院, 北京

²北京林业大学经济管理学院, 北京

Email: 771568416@qq.com, *fqd@lsec.cc.ac.cn

*通讯作者。

收稿日期：2017年7月30日；录用日期：2017年8月12日；发布日期：2017年8月16日

摘要

本文通过建立机场安检系统效率模型，探讨了在确保安全的前提下，提高旅客吞吐量和服务系统稳定性的方法。首先，运用排队系统模型，找出服务强度最大的瓶颈，并借鉴传送系统效率模型分析旅客通过瓶颈区的效率。其次，分析影响瓶颈区效率的因素，制定减压的具体计划，应用线性规划模型，获得平衡效率和成本的最优计划，并通过传送系统效率模型来验证措施的有效性。最后，筛选数据来模拟各年龄组旅客的运动，使用各年龄组的比例作为其权重来计算旅客平均通过时间。用线性插值预测2020年各年龄组的人口比例，并模拟人口老龄化的情况，使用假设检验来验证系统的敏感度，用来分析机场安检系统对特定乘客群体的适应性，提出提高服务体系的稳定性的办法。

关键词

机场安检系统，排队理论，传输系统效率，线性规划，线性插值，假设检验

Copyright © 2017 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

机场用安全检查站来屏蔽危险物品，但有时会造成对乘客的不便。因此机场需要一个解决方案，既提高检查站吞吐量，又保持相同的安全标准。关于这个问题的研究有很多不同的角度，文献[1]以机场的旅客和行李流程为研究对象进行车道边的容量评估，文献[2]建立虚拟排队模型以减少乘客等待时间，本文则是兼顾了[1]和[2]的关注点，从机场各个环节的旅客通过效率出发，找出影响旅客有效率地通过安检站的关键环节，即系统的“瓶颈”，并通过减少该环节的等待时间，提高机场安检效率。此外，不同的旅行者风格也会影响乘客过程通过特定检查点的效率，只有适应这些差异才能保证安检系统的稳定性。

本文首先根据安检各环节的运作方式，建立排队模型，分析和计算各个环节的服务强度以确定瓶颈。其次，通过分析影响瓶颈区效率的因素，用 MATLAB 模拟增加安检仪器后瓶颈环节的多种情况，应用线性规划模型，获得平衡效率和成本的最优计划。最后，检验安检系统对不同旅客群体的敏感性，探讨提升系统稳定性的办法。本文根据常理推断出不同年龄层旅客较普遍的特点，在这个基础上从实际旅客信息中筛选数据来模拟各年龄组旅客的安检时间，利用各年龄组的比例作为其权重来计算各个年龄段旅客的平均通过时间。用 Spss 拟合 1980 至 2010 年间各年龄组的人口比例，预测出 2020 年的人口比例分布，据此求出 2020 旅客平均安检时间。使用单样本 T 检验，检验人口老年化达到某种程度时的旅客安检时间与以往安检时间是否有显著差异，以此验证安检系统的敏感度，并提出提高服务体系稳定性的办法。

2. 机场安检系统基本信息

本文根据网站[3]给出的机场安全检查站客流信息，可知机场安检系统各环节运作方式，如表 1。

Table 1. Operation of all aspects of the security system
表 1. 安检系统各环节运作方式

| 区域 | 运作方式 |
|----|---|
| A | 乘客随机到达检查站，并等待队列，直到安全人员可以检查他们的身份证明和登机文件。大约 45% 的乘客报名参加一个称为预检查信任旅行者的计划。这些乘客支付 85 美元，以加快筛选。 |
| B | 开放了一个检查乘客的毫米扫描仪、两个检查包裹的 X 射线扫描仪。 乘客必须将包裹放在单独的 X 射线扫描仪中；笔记本电脑和一些医疗设备需要从袋中取出并放置在单独的容器中；可疑物品被标记，供安全人员(D 区)进行额外检查。同时，乘客被毫米扫描仪检查。 |
| C | 乘客前进到 X 射线扫描仪另一侧的传送带，拿起物品并离开检查站。 |
| D | 检查 B 区筛选出的可疑物品。 |

3. 瓶颈判别与效率提升

3.1. 建立排队模型

瓶颈一般是指整体的关键限制因素。不同领域的瓶颈有不同的含义。在交通领域，当交通站处于客流高峰时，设施容量不足，布局不合理的地区被称为瓶颈[4]。可以使用排队模型分析出整个系统的瓶颈是哪个环节。文中涉及了两种排队模型 $M/M/1/\infty$ 模型和 $M/M/c/\infty$ 模型，具体原理参考[5]和[6]。服务强度作为服务管理的标识之一，能够为移动节点的服务缓存提供有效的参考标准[7]。服务强度越大的环节就繁忙。如果某一环节比上一环节繁忙，乘客该环节中耽搁，这个环节就成为整个服务系统的瓶颈。

3.2. 根据服务强度判别系统瓶颈

本节所用到的符号说明如表 2，安检系统客流信息的表示方法如表 3。

3.2.1. A 区服务强度

A 区域有两个端口。每个端口为一个 $M/M/1/\infty$ 系统，平均每 S_1 秒到一个预检查旅客，每 S_2 秒到一个普通旅客，大约 45% 的乘客为预检查旅客，所以平均每两个乘客的到达时间间隔为两种旅客到达时间间隔的加权平均，记为 S_a ， $S_a = S_1 \times 45\% + S_2 \times 55\%$ 。平均每秒到达旅客数 $\lambda_A = \frac{1}{S_a}$ 。

每个端口检查效率不同，用两个端口的时间间隔求平均，得一个端口检查一个乘客平均需要时间记为 S'_a ， $S'_a = \frac{S_3 + S_4}{2}$ ，所以一个端口平均一秒检查乘客数 $\mu_A = \frac{1}{S'_a}$ 。

整个 A 区为一个 $M/M/c_1/\infty$ 系统，其中 c_1 是服务端口个数。A 区服务强度 $\rho_{A,c_1} = \frac{\lambda_A}{c_1 \mu_A}$ 。

3.2.2. B 区服务强度

B 区域每秒到达人数 $\lambda_B = c_1 \mu_A$ 。

B 区有一个检查乘客的毫米扫描仪、两个检查包裹的 X 射线扫描仪，每一个毫米扫描仪为一个 $M/M/1/\infty$ 系统。一个毫米扫描仪平均一秒扫描旅客数 $\mu_{B,passenger} = \frac{1}{S_5}$ 。

根据简化问题的需要，作如下合理假设：

- 1) 假设每一个包裹通过扫描时间间隔差异只和乘客准备待扫描物品的速度有关，与不同工作人员的工作效率无关(忽略工作人员标记可疑物品的时间)。
- 2) 假设一个旅客将物品放上任一 X 射线扫描仪的几率一致。

Table 2. Symbol description
表 2. 符号说明

| 符号 | 描述 |
|-----------|--------------------|
| λ | 每单位时间的旅客平均数目 |
| μ | 乘客每单位时间完成安全检查的平均数目 |
| ρ | 服务强度 |
| L_q | 平均等待时间 |
| L | 平均候车乘客 |
| W_q | 平均轮候时间 |
| W | 平均停留时间 |

Table 3. Passenger information of security system
表 3. 安检系统客流信息

| 区域 | 客流数据(单位: 秒) | |
|-----|--------------------------------------|-------|
| A | 预检查旅客到达的平均间隔 | S_1 |
| | 普通旅客到达的平均间隔 | S_2 |
| | 一号端口检查一个乘客平均用时 | S_3 |
| | 二号端口检查一个乘客平均用时 | S_4 |
| B&C | 毫米扫描仪扫描旅客的平均间隔 | S_5 |
| | X 射线扫描仪扫描包裹的平均间隔 | S_6 |
| | 旅客到达 B 区域放置要扫描的物品直到到达传送带末端上拿起物品的平均时间 | S_7 |

3) 假设每一个旅客都带着行李。

每一个 X 射线扫描仪看作一个 $M/M/1/\infty$ 系统。根据假设(1)和(2)，一个 X 射线扫描仪平均一秒扫描行李数 $\mu_{B, \text{package}} = \frac{1}{S_6}$ 。扫描包裹可以看作一个 $M/M/c_2/\infty$ 系统，其中 c_2 是端口数。根据假设(3)，一个旅客和其所携带的行李都通过扫描才算通过 B 区域，所以平均每秒 B 区域通过旅客 $\mu_B = \min\{\mu_{B, \text{passenger}}, c_2 \mu_{B, \text{package}}\}$ 。整个 B 区域看作一个 $M/M/1/\infty$ 系统， $\rho_B = \frac{\lambda_B}{\mu_B}$ 。

3.2.3. C 区服务强度

每秒进入 C 区域的旅客 $\lambda_C = \mu_B$ 。

人们到达 B 区域放置物品直到他们到达传送带末端上拿起物品的平均时间是 S_7 秒，减去旅客通过 B 区域的平均时间 S_5 秒，得到旅客通过 C 区域的平均时间为 S_C 秒，每秒 C 区域通过旅客 $\mu_C = \frac{1}{S_C}$ 。

整个 C 区域看作一个 $M/M/1/\infty$ 系统， $\rho_C = \frac{\lambda_C}{\mu_C}$ 。

3.2.4. 案例分析及瓶颈判别

根据网站[3]给出的机场安全检查站客流信息，一段时间内客流数据经过整理如表 4。

将数据代入 3.3.1~3.3.3 中服务强度的计算公式，可得 A、B、C 区服务强度分别为 $\rho_A = \rho_{A, c_1} = 0.523$ ， $\rho_B = 2.023$ ， $\rho_C = 1.458$ 。因为 $\rho_B > \rho_C > \rho_A$ ，所以 B 区域为瓶颈。

Table 4. Passenger data of security system
表 4. 安检系统客流数据

| 区域 | 客流数据(单位: 秒) | |
|-----|--------------------------------------|--------|
| A | 预检查旅客到达的平均间隔 | 9.034 |
| | 普通旅客到达的平均间隔 | 12.681 |
| | 一号端口检查一个乘客平均用时 | 10.222 |
| | 二号端口检查一个乘客平均用时 | 12.714 |
| | 毫米扫描仪扫描旅客的平均间隔 | 11.575 |
| B&C | X 射线扫描仪扫描包裹的平均间隔 | 10.400 |
| | 旅客到达 B 区域放置要扫描的物品直到到达传送带末端上拿起物品的平均时间 | 28.621 |

3.3. 应用传送系统模型验证判定结果

借鉴传送系统效率模型[8]对从 B 区域旅客通过效率进行分析。

选取一段特定长的时间,记这段时间内从 A 区域进入 B 区域的旅客数为 n ,而这段时间内 B 区域能够通过的人数为 m 。可以认为一个旅客有 m 个机会可以在这段时间之内顺利通过 B 区域。那么,一个通过 B 区的机会被任一个旅客碰到的概率为 $\frac{1}{n}$ 。任一个旅客没有碰到某一个通过 B 区的机会的概率为

$1 - \frac{1}{n}$ 。由遇到每一次机会的独立性,一名旅客错过所有通过 B 区的机会的概率是 $\left(1 - \frac{1}{n}\right)^m$ 。任一个旅客

有机会通过 B 区域的概率是 $p = 1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^m$ 。

若任意抽取 100 秒时间段。每 100 秒内平均有 17.4 人从 A 区域进入 B 区域, B 区域每 100 秒内平均能通过 8.6 人,即 $m = 17.4, n = 8.6$,那么 $p = 0.3989$ 。可见,这 100 秒内进入 B 区域的每一名旅客能够在这段时间内顺利通过 B 区域的概率只有 39.89%,证明旅客在 B 区的通过效率低。

3.4. 基于排队模型提升瓶颈环节的效率

根据 3.3~3.4 的结果,客流会在安检站的 B 区域遇到瓶颈,因此,为了在提高旅客吞吐量的同时减少乘客在各个区域等待时间的方差,可以通过在 B 区域采取以下措施来减少旅客在 B 区域的等待时间:

- a. 增加检查旅客的毫米波扫描仪数目。
- b. 增加检查货物的 X 射线扫描仪及其传送带数目。
- c. 增加传送带长度。

从上一题求解过程可知,在现有条件下,旅客接受扫描的速度比货物接受扫描的速度慢得多,所以仅仅增加检查货物的 X 光机与传送带数目或传送带长度不能使乘客更快地通过 B 区域,所以有效方案为:

- ① 单独采取措施 a。
- ② 同时采取措施 a、b。
- ③ 同时采取措施 a、c。
- ④ 同时采取措施 a、b、c。

在 3.3 中,只有 A 区域服务强度小于 1,所以 A 区域服务系统是稳定的。B 区域仅有 1 个厘米扫描仪并且只有 2 个 X 射线扫描仪,导致 B 区域和 C 区域的服务强度都大于 1,排队会无限长,服务系统不稳定。因此,只需对 B 区域进行改进。

首先考虑方案①和②。

由 3.3.2 已知一台厘米扫描仪平均 1 秒扫描 0.086 个旅客，一台 X 射线扫描仪平均一秒扫描 0.096 个行李。如果有 i 台厘米扫描仪和 j 台 X 射线扫描仪，则 B 区域平均 1 秒扫描 $0.086i$ 个旅客和 $0.096j$ 个行李，根据假设，B 区域平均 1 秒通过旅客 $\rho(i, j) = \min\{0.086i, 0.096j\}$ 。设起始状态为 $i_0 = 1, j_0 = 2, \rho(1, 2) = 0.086$ 。

如果采取方案①，仅增加一台扫描旅客的厘米扫描仪(i 从 1 增加到 2)，就能使 B 区域平均 1 秒通过旅客数从 0.086 增加到 0.192，继续增加厘米扫描仪不再有效。想要继续提高吞吐量，就要采取方案②。

用 MATLAB 计算得 $(i, j), i = 1, 2, \dots, 10, j = 1, 2, \dots, 10$ 的 100 种情况下，B 区域平均服务人数、服务强度、平均逗留人数、平均逗留时间、平均等待队长、平均等待时间，从初始条件 $(i, j) = (1, 2)$ 开始，选取有效提高吞吐量的情况(即平均服务人数增多的情况)，作为效率提升方案，如表 5。

可以看出，随着方案②的实施力度加大，B 区域的每秒服务人数增加，服务强度减小，平均逗留人数、平均逗留时间、平均等待队长、平均等待时间都减小，说明 B 区域的瓶颈现象得到缓解。B 区域开通的车道越多，扫描仪和工作人员越多，越能满足旅客需求，但同时机场的运营成本也会增加。因此，权衡成本费用、旅客的可接受等待时间和排队长度等因素，可以确定开通多少条车道最合理。平均等待时间 T 和成本 C 都是越小越好。采用线性规划模型[9]，如果时间效率的权重为 a ，经济成本的权重为 b ，则使 $a \times T + b \times C$ 最小的方案就是最优方案。

C 区域平均到达人数就是 B 区域平均服务人数，这个数随着 B 区域吞吐量的增大而增大，但是 C 区域的平均服务人数也会随着传送带数量增加而增大。因此 C 区域的服务强度、等待时间会有波动，但不会出现很明显的变化。

方案③和④中，增加传送带长度，就可以同时放许多包裹在传送带上，当一个旅客进入 B 区域时，可以立刻整理物品使物品快速通过 B 区域，而不必等前一个人的物品先通过。因此从效果上看，增加传送带长度等同增加传送带数目。所以方案③和④的效果不再单独讨论。

3.5. 基于传送系统效率模型验证效率提升方案的合理性

从 B 区域旅客通过效率的变化进行分析，可以建立传送系统效率模型[8]估计在一段时间内进入 B 区域的旅客能在这段时间内顺利通过的概率。

根据 3.4 的结论，选取一段特定长的时间，若这段时间内有 n 个旅客进入 B 区域。一个旅客有 m 个机会可以在这段时间之内顺利通过 B 区域，则任一个旅客在这段时间内有机会通过 B 区域的概率是 $p = 1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^m$ 。四个方案的效果都是增大 m ，若 m 可以无限大，则这个概率可以无限接近 1。

4. 安检系统敏感性检验与稳定性提升

按年龄分析不同年龄旅客的特点，如表 6。从网站[3]所提供的机场安检站客流信息中分别选取各区域通过时间的最大值、中位数、最小值，作为这三类人的通过时间，如表 7。进入 D 区域并不影响整个系统的排队和运行效率，因此不予考虑。从网站[10]提供的人口数据整理得 1860~2010 年旅客年龄构成，如表 8。

对 1860~2010 年的老年人、小孩、青年比例做时序图可知这三个年龄组比例的变化基本上呈线性，用线性插值法[11]预测出 2020 年的三个年龄组百分比分别为 24.84%，61.50%，13.65%。

根据 1980, 1990, 2000, 2005, 2010 年的人口比例以及三种人群的平均安检时间，分别计算出平均通过时间，如 1980 年人口比例：32%，56.7%，11.3%与其对应的时间：5 秒，27 秒，68 秒，加权后得出平均通过时间为 24.59 秒。同理，得出 1990, 2000, 2005, 2010 年的平均通过时间，如表 9。

Table 5. B area efficiency improvement program
表 5. B 区效率提升方案

| i | j | 平均服务人数 | 服务强度 | 平均逗留人数 | 平均等待队长 | 平均逗留时间 | 平均等待时间 |
|----|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 2 | 0.0860 | 2.0233 | 2.0233 | 0.0039 | 0.0034 | 0.0022 |
| 2 | 2 | 0.1720 | 1.0116 | 7.5700 | 7.5690 | 4.3506 | 4.3500 |
| 3 | 2 | 0.1920 | 0.9062 | 0.0944 | 0.0934 | 0.0542 | 0.0537 |
| 3 | 3 | 0.2580 | 0.6744 | 0.0050 | 0.0043 | 0.0029 | 0.0025 |
| 4 | 3 | 0.2880 | 0.6042 | 0.0029 | 0.0023 | 0.0017 | 0.0013 |
| 4 | 4 | 0.3440 | 0.5058 | 0.0016 | 0.0010 | 0.0009 | 0.0006 |
| 5 | 4 | 0.3840 | 0.4531 | 0.0011 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0004 |
| 5 | 5 | 0.4300 | 0.4047 | 0.0009 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0003 |
| 6 | 5 | 0.4800 | 0.3625 | 0.0007 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0002 |
| 6 | 6 | 0.5160 | 0.3372 | 0.0006 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0001 |
| 7 | 6 | 0.5760 | 0.3021 | 0.0005 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0001 |
| 7 | 7 | 0.6020 | 0.2890 | 0.0005 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0001 |
| 8 | 7 | 0.6720 | 0.2589 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0001 |
| 8 | 8 | 0.6720 | 0.2529 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0001 |
| 9 | 8 | 0.7680 | 0.2529 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0000 |
| 9 | 9 | 0.7740 | 0.2248 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0000 |
| 10 | 9 | 0.8600 | 0.2023 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0000 |

Table 6. Analysis of passenger style by age
表 6. 按年龄分类的旅客风格分析

| | 儿童及青少年 | 青年和中年 | 老人 |
|----|-----------------|------------|------|
| 特征 | 动作快, 不带行李或带少量行李 | 动作快但往往行李较多 | 行动不便 |
| 耗时 | 短 | 中 | 长 |

Table 7. Passengers' passing time by age (in seconds)
表 7. 按年龄分类的旅客通过时间(单位: 秒)

| 区域 | 儿童及青少年 | 青年和中年 | 老年人 |
|-----|--------|-------|-----|
| A | 5 | 11 | 20 |
| B&C | 5 | 27 | 68 |
| 总计 | 10 | 38 | 88 |

以此作为基准数据, 对系统是否敏感作单样本 T 检验[12], 来验证两组数据是否存在显著差异, 当显著差异存在时, 系统较为敏感。例如, 当人口老龄化到达 40%时, 计算出平均通过时间分别为 28.15 秒, 验证当检验值为 28.15 时的差异性, 得到 p 值 < 0.05, 表明存在显著差异。因此, 该机场安检系统对不同人群敏感度较高, 系统稳定性较差。

即使调整了人口政策, 人口老龄化的趋势依旧难以避免[13], 并且随着经济的发展, 老年人出游会更多。因此, 机场安检站应增设老年人专用通道, 提高安检系统效率。

Table 8. 1860-2010 passenger age composition
表 8. 1860~2010 年旅客年龄构成

| | 儿童和青少年(%) | 青年和中年(%) | 老年(%) |
|------|-----------|----------|-------|
| 1860 | 51.2 | 46.1 | 2.7 |
| 1870 | 49.7 | 47.3 | 3 |
| 1880 | 48.1 | 48.5 | 3.4 |
| 1890 | 46.1 | 50 | 3.9 |
| 1900 | 44.4 | 51.4 | 4.1 |
| 1910 | 42 | 53.6 | 4.3 |
| 1920 | 40.7 | 54.5 | 4.7 |
| 1930 | 38.8 | 55.7 | 5.4 |
| 1940 | 34.4 | 58.7 | 6.8 |
| 1950 | 33.9 | 57.9 | 8.1 |
| 1960 | 38.4 | 52.3 | 9.2 |
| 1970 | 37.9 | 52.3 | 9.8 |
| 1980 | 32 | 56.7 | 11.3 |
| 1990 | 28.9 | 58.7 | 12.5 |
| 2000 | 28.6 | 59 | 12.4 |
| 2005 | 27.5 | 60 | 12.4 |
| 2010 | 24 | 53 | 13 |

注：19 岁以下为儿童和青少年、20~64 岁为年轻和中年、65 岁以上为老年。

Table 9. Average time through security system
表 9. 平均通过安检时间

| 年份 | 1980 | 1990 | 2000 | 2005 | 2010 |
|------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 通过时间 | 24.59 | 25.796 | 25.792 | 26.007 | 24.35 |

5. 模型评价与推广

本文所使用的模型可以逐个分析安全检查站不同环节的繁忙程度，从而找到影响整个系统效率的瓶颈；可以比较计算机场安全检查站在使用不同设备和人员配置方案时的服务效率，通过时间效率和经济成本两方面的权衡，规划出缓解矛盾的最优方案。然而，本文所使用的数据比较片面，而且没有考虑不同风格的旅客在瓶颈区域的通过效率的差异。

根据不同旅行者的特点，可以在已有的基础上作出调整，使机场安检系统能够更好地适应各种不同人群的需要，增强系统稳定性，维持安检秩序。然而，在对不同旅行者风格进行分析时，可以加入文化因素做更加深入的分析，比如考虑不同国籍人群的安检习惯，作出更具体的调整，使系统稳定性更强。

基金项目

北京高等学校“青年英才计划”(YETP0769)，国家自然科学基金(61571002, 61370193)。

参考文献 (References)

- [1] 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.

- [2] 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(10): 64-69.
- [3] COMAP[EB/OL]. <http://www.comap.com/undergraduate/contests/mcm/contests/2017/problems/>, 2017-3-3.
- [4] “中国公路学报”编辑部. 中国交通工程学术研究综述 2016[J]. 中国公路学报, 2016(6): 1-161.
- [5] 刁在筠, 刘桂真, 宿洁, 马建华. 运筹学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [6] 王强强, 周伟. 递进式输入率和服务率设定下的 M/M/c 模型优化及应用[J]. 运筹与管理, 2017, 26(4): 96-104.
- [7] 佟乐. 基于服务强度的 VANET 服务发现策略与协议研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2012.
- [8] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 301-302.
- [9] 刘奇飞, 邓华. 线性规划模型的教学研究及探讨[J]. 山西青年, 2017(11).
- [10] InfoPlease[EB/OL]. <https://www.infoplease.com/us/population/population-distribution-age-race-and-nativity-1860-2010>, 2017-7-9.
- [11] 刘彩云, 郭尊光, 曲良辉. 一类具有可调参数的分段线性插值函数及性质研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2016(4): 13-16.
- [12] 张祥云. 在 Excel 中利用单样本 t 检验对麦汁理化指标进行评价[J]. 啤酒科技, 2010(8): 15-16.
- [13] 周小平. 我国人口结构转变与城镇人口老龄化趋势预测[J]. 科学发展, 2015(4): 104-112.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

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

期刊邮箱: mos@hanspub.org