

一、问题翻译(2017ICM_Problem_D)

问题 D:最优化在机场安检检查点处的乘客流量

自 2001 年 9 月 11 日恐怖分子袭击美国以来，机场安保在全世界范围内都进行了极大幅度的加强。机场内设置了能检查乘客和他们的包裹内的爆炸物及其他危险品的安检检查点。这些安保措施的目的在于预防乘客劫机或破坏飞行器同时确保所有乘客旅行中的安全。然而，航空公司有一项既定的任务——他们要通过最小化乘客在安检处排队和等候飞机的时间来维持乘客们积极的乘机体验。因此，在尽可能的提高安全性和尽可能的减少乘客们的不便之间就产生了矛盾。

在 2016 年，美国交通运输安全局 (TSA) 因为超长的排队现象面临了极其尖锐的批评，尤其是在芝加哥 O' Hare 国际机场。在舆论关注的压力下，TSA 在对他们的安检设备和安检过程的几项改善中进行了投资，同时在最拥堵的几个机场增加了工作人员。尽管这些改进在减少等待时间上多少取得了成功，但是人们仍不清楚 TSA 为了实施这些新措施和增加人手花费了多少钱。除了 O' Hare 机场的问题以外，其他机场也仍然有不可解释且不可预知的排长队事件发生，甚至包括一些通常情况下等候时间很短的机场。对乘客来说，这种安检队伍的高不确定性会使他们付出极高代价，因为他们必须在没必要的早到和也许会错过预定航班之间做出抉择。大量的新闻文章，包括文献[1, 2, 3, 4, 5]，描述了一些和机场安检检查点有关的问题。

你们的国际控制管理团队与 TSA 签订了合同来检验机场安检检查点和员工，从而找出潜在的破坏乘客流动的瓶颈。TSA 尤其对在维持同等安全性标准下能同时增加检查点流量并降低等候时间变化量的创新性解决方案感兴趣。

现在美国机场安检的流程如图一所示。

A 区域:

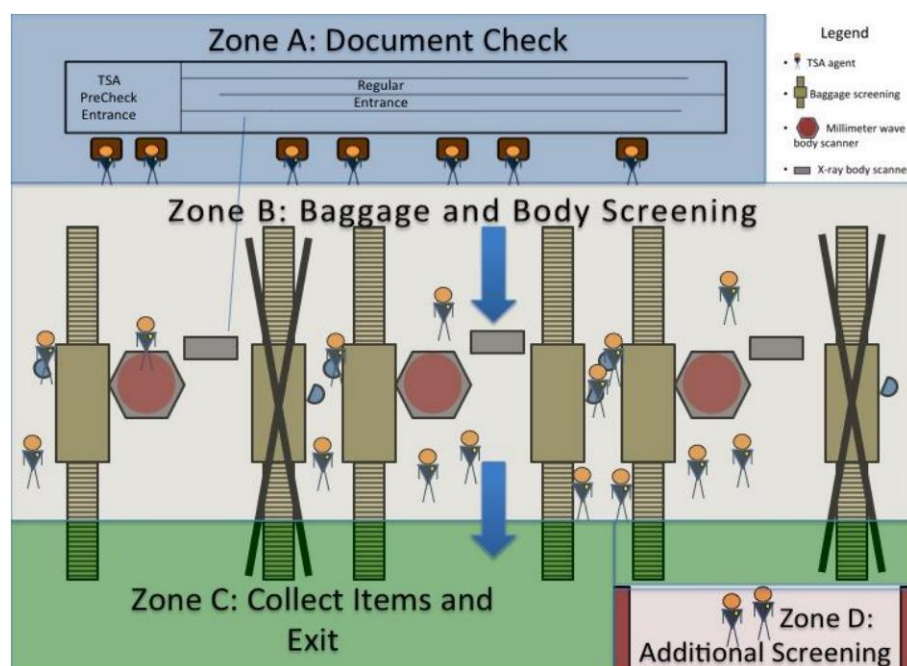
乘客随机到达安检点并排队等待，直到安检员能检查他们的身份证明和登机证件。

B 区域:

- 1、乘客们接下来排下一个队伍以通过开放式扫描线。取决于机场预期吞吐量的不同，机场会开放不同数量的扫描线。
- 2、一旦乘客到达队列前端，他们会开始准备将他们所有的东西进行 X 光扫描。乘客必须脱掉鞋子、腰带、夹克，拿下金属物品、电器和装有液体的容器，并把它们放进一个盒子来进行单独的 X 光扫描。笔记本电脑和医疗设备也需要从他们的包里取出并放在单独的盒子里。
- 3、他们所有的物品，包括装有前述物品的盒子，都会在传送带上通过一台 X 光机。X 光机会把一些需要进一步被安检员检查或扫描的物品标出。（D 区域）
- 4、与此同时，乘客们要通过一个毫米波扫描仪或金属探测器。
- 5、未能成功通过此步（4）的乘客需要接受安检员的搜身检查。（D 区域）

C 区域:

乘客们接着走到 X 光机另一面的传送带处来取走他们的物品并离开检查区域。



大约 45%的乘客会参加针对可信任旅客的预检项目。这些乘客会花 85 美元接受背景调查，然后享受五年单独筛查。虽然事实上用预检方法的人更多，但一般每三个常规通道，一个预检通道。预检的乘客和他们的行李都会通过更快的筛查。他们还是必须除去金属、电子产品，以及液体接受扫描检查，但可以不用脱鞋、皮带和薄夹克，也不用将电脑从包里取出。

Excel 表里的数据，是关于乘客如何通过每一步安检。

任务：

A、建立一个或以上大量乘客通过安检的模型，寻找瓶颈障碍，准确找出现行方案存在的问题。

B、进行两处及以上可能的修改，提高乘客通过率，减少等待时间差异，并建模说明修改处的作用。

C、很显然，世界各地独有的文化规范造就了一些社会互动的地方规则。考虑这些文化规范对模型可能的影响。比如，美国人一般非常尊重、优先保证他人的个人空间，所以对插队行为会有社会耻辱感。与此同时，瑞士人一般更侧重于整体效率，而中国人一般优先考虑个人效率。考虑这些文化差异可能如何影响乘客通过安检的方式，做灵敏度分析。用作灵敏度分析的文化差异，可以是真实的，也可以不联系任何一种特定的文化，模拟各种行为方式的旅客（如，一个较慢的旅客）。安检系统应该如何应对这些行为方式的不同，以提高乘客通过率，减少等待时间差异？

D、基于模型，向安检经理提出政策和程序上的建议。这些政策可能全球适用，或者适用于特定文化、某类行为方式的旅客。

除了建立、实施模型，还应该检验模型，评估优缺点，并提出改进想法（将来的工作）。

内含 1 页摘要，不超过 21 页（不含附录和参考文献）

参考：

- [1] <http://www.wsj.com/articles/why-tsa-security-lines-arent-as-bad-as-you-d-feared-1469032116>
- [2] <http://www.chicagotribune.com/news/ct-tsa-airport-security-lines-met-20160823-story.html>
- [3] <http://www.cnn.com/2016/06/09/travel/tsa-security-line-wait-times-how-long/>
- [4] <http://wgntv.com/2016/07/13/extremely-long-lines-reported-at-chicago-midway-airports-tsa-checkpoint/>
- [5] <http://www.cnbc.com/2016/04/14/long-lines-and-missed-flights-fuel-criticism-of-tsa-screening.html>

二、问题重述

机场安检排队问题是长期以来影响美国航空业乘客体验的严重问题。自 9-11 事件以来，安检措施的步骤不断增多，安检所需要的时间也不断增长。在美国各地的大小机场，都发生过数次非常严重的拥堵问题，也就是安检点处排的队伍太长以至于乘客在安检点处耽搁了很长时间。TSA 采取了很多措施来解决安检拥堵问题。

问题提出了以下几点要求：

- 1、对机场的安检过程和排队队列的行为进行建模。
- 2、通过对建立的模型进行分析，找出安检过程中的瓶颈——也就是排队现象发生最频繁、排队队列最长的安检步骤——并据此找出现行方案的问题。
- 3、通过调整模型参数并对模型进行分析，提出新的可以缩短乘客平均等待时间并提高单位时间内乘客通过量的方案——例如合理的人员数量调整或者队列数目调整。
- 4、通过改变队列模型或乘客模型的行为方式，观察模型可能出现的变化，基于这些变化提出合理的改进安检的建议。

问题的目的：

- 1、找出安检过程中人流密度的最大处。

2、找出令乘客平均等待时间最短、单位时间内乘客通过数量最大的安检人员数量和扫描线数量等的组合。

3、找出当队列参数变化时不同的最优组合。

与问题有关的因素：

1、进入安检点的乘客数量和乘客进入的方式。

显然，随着乘客数量的增加，在安检人员数量和扫描线数量不变的情况下，乘客的平均等待时间更有可能增长。另外，即便在一段时间内进入安检点乘客的总数不变，不同的进入方式也有可能引起不同的结果。例如，同样是在 1 小时内进入 10 个乘客，如果他们是均匀时间间隔进入（也就是每个 6 分钟进入一位），那么安检点不会产生拥堵现象；如果他们在同一时刻来到安检点，那就会产生一个 10 人长度的排队现象。显然，后者的平均等待时间要长于前者。实际上，在机场这两种现象都有可能产生（例如：前者对应早早来候机的乘客，后者对应旅行团队），还有更多的时候是两者结合。

2、使用预检方法乘客的比例和预检队列的设置数量

据问题所说，有 45% 的乘客选择使用预检方法，但当前配置中仅有 25% 的安检通道被设置为预检通道。可以想见，如果增加预检通道，乘客的平均等待时间将降低。另一方面，如果更多的乘客使用预检方法，队列的流量可能升高、平均等待时间可能降低，但也需要更多的预检通道配合。在预检乘客的比例和预检队列的设置数量间可能存在某种最优组合。

3、安检过程的时间消耗

如果一个乘客携带更多需要单独扫描的行李，他就需要更多时间将它们取出，相应地，他将影响整个队列的行进速度。另一方面，如果一名乘客携带了较多行李，它们通过 X 光机的时间也就更长。同时，因为乘客要在行李接受检查时接受金属检测等，也许乘客不能在行李扫描完成后及时取走行李。当然，也有可能乘客需要在完成人身扫描后等待行李完成扫描。理想情况是乘客与行李同时完成扫描，这样乘客的等待时间是最短的。

4、乘客行为

一名行为异常的乘客（例如，行进速度较慢）可能会对整个队列产生影响。同

样地，插队行为等产生的影响也不可忽视。

三、文献综述

为了辅助我们的建模，本组一共查阅并阅读了 6 篇有关机场安检过程的外文文献，这些文献既提供了一些可供参考的模型，也给我们的建模很大启发。

6 篇文献中，有的是对机场安检的人员因素进行考虑，有的是对机场安检的总体过程及优化办法进行考虑，还有一些是对队列模型的研究。总体而言，涉及了机场安检的多个方面。

在“A fuzzy model for evaluating airport security screeners' work”中，作者提出了一种基于模糊模型的机场安检人员评价算法。尽管在本问题中并不涉及对机场工作人员的评价问题，但工作人员的工作经验、工作态度等引起的工作效率的不同确实是一个值得考虑的因素。

另外，还有一些文章是对队列进行分析：

在“A diffusion approximation to a single airport queue”中，作者建立了一个基于扩散估计的针对机场飞机到达队列的单服务者队列模型，将队列用偏微分方程描述并用蒙特卡洛方法进行了模拟。尽管这篇文章讨论的问题是机场到达飞机的队列，但乘客到达安检点面对只有一个安检员的队列与此有很大的相似之处，该模型可能在后续的建模中发挥很大作用。

在“Approximation of the non-stationary $M(t)/M(t)/c(t)$ -queue using stationary queuing models: The stationary backlog-carryover approach”中，作者提出了一种针对“时有超载”的服务队列的估计方法，也就是他所说的 SBC(stationary backlog-carryover)方法。在该作者的后续研究中，他又在“Analysis of passenger queues at airport terminals”将 SBC 方法运用在了机场检票过程的模拟中，估计了乘客等待时间。SBC 方法——一种针对随时间变化且时而发生服务能力不足的队列的估计方法——对我们的建模很有启发。在其第二篇文章中，还引用了一个乘客到达率与距飞机出发时间的统计数据，也是很有帮助的。

最后，有一些文章是对整体过程进行分析或模拟：

在“Improving airport security screening checkpoint operations in the U.S. Via paced system design”中，作者对机场安检过程和安检人流进行了详细的分析，

并主要对进入 D 区域接受再检的过程进行了描述和建模,最后提出了一种“分步的”系统安检优化方案。

在“Security checkpoint optimizer(SCO): an application for simulating the operations of airport security checkpoints”中,作者设计实现了一种软件,也就是 SCO,可以对机场安检过程进行可视化的离散模拟,其模拟得到的数据可以在我们的模型建立完成后验证我们模型的正确性。

综上所述,在我们查阅的 6 篇文献中,有些是基于队列模型的建模,有些是直接对这一过程进行全面的离散的模拟,这两种思路对我们后续的建模工作都提供了一些启发。另外,在这些文章中,“泊松分布”、“泊松过程”多次在文献综述部分出现,我们想到,可以使用泊松分布来对乘客进入队列的概率进行建模。最后,这些文献中还提供了一些必要的数据和数据的来源,为我们建立模型和验证模型的正确性提供了方便。

附录:

参考文献

- [1]Skorupski J, Uchroński P. A fuzzy model for evaluating airport security screeners' work[J]. Journal of Air Transport Management, 2015, 48:42-51.
- [2]Lovell D J, Vlachou K, Rabbani T, et al. A diffusion approximation to a single airport queue[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2013, 33(33):227-237.
- [3]Stolletz R. Approximation of the non-stationary $M(t)/M(t)/c(t)$ -queue using stationary queueing models: The stationary backlog-carryover approach ☆[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 190(2):478-493.
- [4]Stolletz R. Analysis of passenger queues at airport terminals[J]. Research in Transportation Business & Management, 2011, 1(1):144-149.
- [5]Leone K, Liu R. Improving airport security screening checkpoint operations in the US via paced system design[J]. Journal of Air Transport Management, 2011, 17(2):62-67.
- [6]Wilson D, Roe E K, So S A. Security Checkpoint Optimizer (SCO): An Application for Simulating the Operations of Airport Security Checkpoints[C]//

四、假设及可能采用的数学模型

(1) 假设

当然，对于不同的建模方式还有不同的附加假设，这里只列出一些公用的假设。

- 1、 在建模过程中不考虑诸如 X 光机损坏、员工换班、乘客突发疾病等会严重影响队伍行进速度的意外状况。
- 2、对同一个工作人员，认为其处理同一件事的时间不变。举例来说，若队列 1 的安检人员检查一个乘客的证件需要 2 秒，那么他检查每一位乘客的证件所花费的时间都是 2 秒不变。
- 3、不考虑安检的每个过程之间乘客走过的路程所花费的时间(因为这段路程相对而言很短而且拥堵状况发生的主要原因是安检的每一步所花费的时间)，也就是说，乘客从一个队列出队以后立刻进入下一个队列。
- 4、假设队列不会受到有限的空间的限制，也就是说，假定每个队列可以无限长，不会出现因排队队列过长暂时停止安检的情况。
- 5、假设每个乘客的体型相同，移动能力也相似。

(2) 可能采用的数学模型

1、基于交通流和排队论的模型：

参考查阅的文献，我们可以建立一个基于 SBC 方法的模型，在这个方法中可能需要的参数是乘客进入队列的速度，队列本身的速度等，变量是队伍数目，队

伍密度等。

2、基于元胞自动机和蒙特卡洛方法的模型：

参考查阅的文献，我们想到可以基于离散的建模来对各种方案进行模拟。在这个模型中可能需要的参数是每个时刻不同队列出现乘客的概率(基于泊松分布)，每个旅客携带的行李数(基于正态分布)，工作人员的处理能力等，变量仍然是不同环节队列的数目。在这种模型中，我们需要指出每个乘客的行为模式，也就是元胞的行为模式。

3、评价模型：

我们使用一个参数 Φ 来评价一个组合的优劣。 $\Phi = \beta \bar{t} + (1 - \beta)n_o$ ，其中 β 是一个衡量不同因素权重的数值。举例而言，对于乘客吞吐压力较大的大机场， β 选取较小值；对更注重乘客体验的小机场， β 选择较大值。

这里， $t = \sum t_i, \bar{t} = \frac{t}{N_i}, n_o = \frac{N_o}{T}$

参量	数学记号
经过的总时间	T
进入队列的总乘客数	N_i
第 <i>i</i> 个乘客在安检中花费的时间	t_i
已进入队列的乘客等待的总时间	t
已结束安检的总乘客数	N_o
平均每位乘客等待的时间	\bar{t}
单位时间内通过安检的乘客数	n_o