

基于广义随机 Petri 网的航站楼旅客离港流程优化

李双龙, 冯佳宾, 冯晓磊

(中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 广汉 618307)

摘要:为解决航站楼内旅客离港拥挤,排队等待时间过长问题,提出将值机服务与安检服务进行整体考虑,建立一个值机与安检服务的广义随机 Petri 网(GSPN)模型,寻找流程瓶颈。然后针对所得瓶颈提出优化方法,利用 AnyLogic 仿真软件进行优化前后对比仿真。仿真实验结果表明,优化后单位小时内通过的旅客数提升 9.88%,航站楼内值机安检平均逗留时间降低 6.96%。提出的优化方法有效解决了航站楼旅客离港瓶颈问题,有助于提升航站楼吞吐量。

关键词: 航站楼; 流程优化; 广义随机 Petri 网; 马尔可夫链; AnyLogic

中图分类号: V351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)22-0309-09

日益增长的航空出行需求与有限的航空运输资源之间的矛盾也日益加重,特别是机场航站楼内部设施资源和人工资源不足以及空间资源有限等原因,导致出现高峰小时离港旅客逗留时间过长、管理成本增加、旅客满意度降低等问题,严重影响着民航运输业的安全与效率^[1-2]。

目前,针对航站楼离港旅客的相关研究主要集中在离港旅客资源配置以及旅客离港流程仿真等方面。针对离港旅客值机拥堵、逗留时间过长等现象,张天炫等^[3]基于排队论,结合自助值机柜台的实际使用情况,构建了一个双排对系统模型,并且以值机旅客的排队时间为目标函数,通过验证表明,该模型可每天节约旅客时间成本 379.151 h。王加冕等^[4]基于蒙特卡洛仿真原理结合对某机场实际现场数据的分析,发现旅客平均到达率符合泊松分布,旅客平均服务率符合负指数分布,通过实验表明,通过开放最佳的服务柜台数量,可以降低 68% 的旅客值机排队等待时间。随着对静态配置模型的不断深入研究,越来越多的学者发现所采取的配置方案往往要大于实际所需,导致资源利用率降低,并且难以应对延误等突发状况,为解决这一问题,越来越多的学者对动态配置模型展开了研究。Hsu 等^[5]根据规定的旅客最长排队时间和最低资源利用率,建立相应的动态分配模型,使得值机平均等待时间从 1.3 min 降低为 0.17 min,柜台利用

率从 18.9% 提升到 45%。刘英等^[6]在考虑值机设备和行李托运设备之间关系的前提下建立了一个静态资源整数规划模型和动态调整策略,通过与传统值机系统的对比表明,该模型使得设备利用率提高 132%,旅客排队时间缩短 62.5%,同时动态调整策略在其基础上将设备利用率再次提高 8%~15%。对于安检来说,因其拥有较值机更加复杂的流程和更长的服务时间,因此更容易产生拥堵。为此,史跃亚等^[7]基于资源优化配置的思想,建立安检排队系统双目标优化模型,通过对模型最优解集进行排序,可以有效提升安检排队系统的资源利用效率。Wang 等^[8]将机场客流抽象为网络流,建立一个网络流结构用于分析安检系统吞吐量的瓶颈,并且通过模拟客流波动情况确定安检通道数量,减少旅客平均等待时间。汪春华等^[9]利用现有排队论理论建立安检排队数学模型获得全天各时段最佳通道开放数量,随后利用仿真进行方案优化,为瓶颈时段增加通道数量,从而提升资源利用率,减少旅客安检排队时间。

综上所述,目前大多数研究都是将值机服务与安检服务割裂开进行单独研究,忽略了两者的连续性。事实上,值机服务的输出作为安检服务的出入,两者是连续且密不可分的,应将两者同时考虑进行研究,避免局部最优的情况。本文将值机服务与安检服务进行整体考虑,建立一个广义随机 Petri

收稿日期: 2024-06-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(ZHMH2022-002)

作者简介: 李双龙(2000—),男,山东滨州人,硕士研究生,研究方向为机场运行;通信作者冯佳宾(1990—),男,四川成都人,博士,副教授,研究方向为动力工程;冯晓磊(1988—),男,山东潍坊人,硕士,讲师,研究方向为机场运行。

网模型,将广义随机 Petri 网中的托肯、变迁和库所映射为航站楼内的旅客和行李、值机和安检的步骤以及旅客和行李所处的状态,通过构建广义随机 Petri 网模型的同构马尔可夫链寻找流程瓶颈,提出瓶颈优化方法,利用 Anylogic 仿真软件对优化方法进行仿真验证。

1 广义随机 Petri 网

定义: $GSPN=(P, T, F, W, M_0, \lambda)$ 为一个拥有 6 个元素的广义随机 Petri 网^[10]。其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为存放托肯的库所合集; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为系统中变迁的合集,分为瞬时变迁(一种逻辑选择,变迁发生时不需要时间就可以完成的变迁)和时间变迁(变迁发生时需要一定的时间才能完成的变迁); $F \subseteq [(P \times T) \cup (T \times P)]$ 为库所到变迁以及变迁到库所的有向弧的集合; W 为权函数,即变迁发生所需的前置条件; M_0 为系统的初始标识; M_i 为系统的可达标识; $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ 为系统中时间变迁的平均点火频率合集(即每单位时间内变迁可发生的次数), $\lambda_i = 60/b_i$, 其中 b_i 为变迁所需要的时间; 系统中变迁 T 与库所 P 满足 $T \cup P \neq \emptyset, T \cap P = \emptyset$; $\text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = P \cup T$, 即系统中无孤立元素,其中, $\text{dom}(F) = \{x \mid \exists y: (x, y) \in F\}$, $\text{cod}(F) = \{y \mid \exists x: (x, y) \in F\}$ 。

模型可靠性判断^[11]如下:

(1)系统中的某个可达标识 M_i 需要由初始标识 M_0 经过一系列变迁才可到达,并且该可达标识再经过一系列变迁最终到达最终标识。

(2)系统中最终标识必须是初始标识 M_0 通过一系列变迁得到的,同时系统流程结束后,输出库所中的托肯数要大于或等于一个。

(3)系统中没有死变迁,即系统中每一个变迁都有发生的可能。

2 航站楼旅客离港流程瓶颈分析

2.1 航站楼旅客离港流程建立

机场航站楼旅客值机流程,如图 1 所示。

机场航站楼旅客安检流程,如图 2 所示。

基于现实中的航站楼旅客值机与安过程,做出下列假设。

H1: 旅客的流量与值机和安检的服务过程是相互独立的,即旅客的流量大小不会影响值机与安检所规定的过程;

H2: 无设备的故障,所有设备均可平稳运行;

H3: 旅客的到达间隔相互独立且服从一定参数的负指数分布;

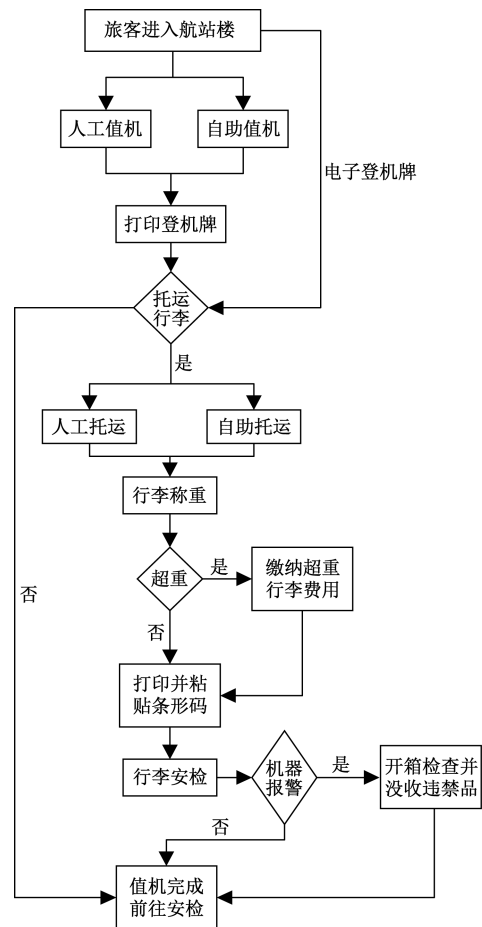


图1 机场航站楼旅客值机流程

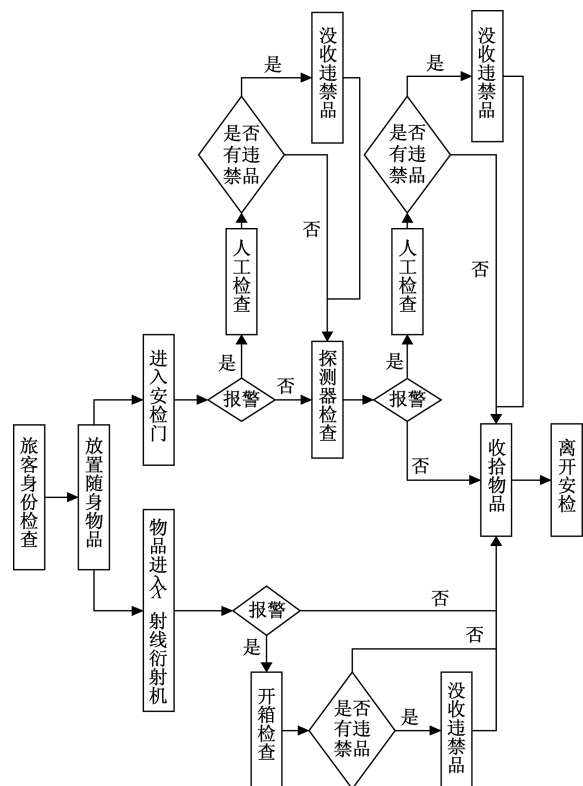


图2 机场航站楼旅客安检流程

H4:在相同的时间段内,所有员工的服务能力是相同的,即在相同的一段时间内,所有员工所能服务的人数具有相同的期望。

2.2 Petri 网模型建立

将实际的机场航站楼旅客离港流程与广义随

机 Petri 网结合,同时因为瞬时变迁是一种逻辑上的判断或选择,发生时无需时间,所以将瞬时变迁与其接下来的变迁结合,建立机场航站楼旅客离港流程的 GSPN 模型,如图 3 所示。

图 3 中变迁含义如表 1 所示。

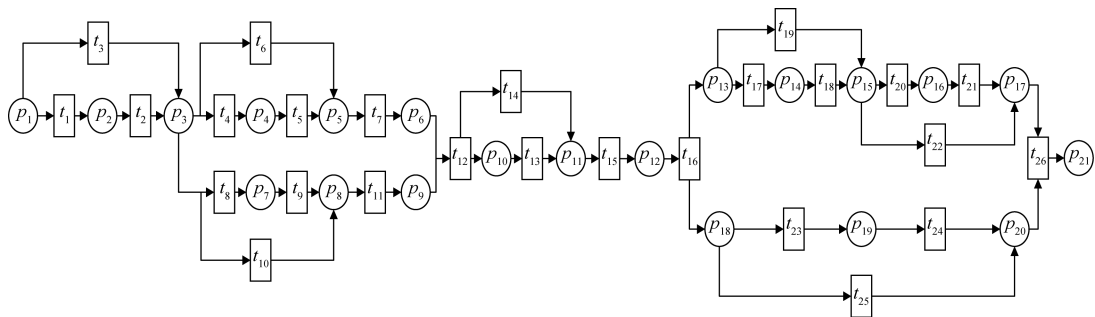


图 3 机场航站楼旅客离港流程 GSPN 模型

表 1 机场航站楼旅客离港流程 GSPN 模型变迁含义

变迁	含义
t_1	人工值机并进行身份核查
t_2	人工值机并打印登机牌
t_3	自助值机并打印登机牌
t_4	自助行李托运并进行行李称重且未通过
t_5	缴纳超重行李费用
t_6	自助行李托运并进行行李称重且通过
t_7	自助打印并粘贴行李条形码
t_8	人工行李托运并进行行李称重且未通过
t_9	缴纳超重行李费用
t_{10}	人工行李托运并进行行李称重且通过
t_{11}	人工打印并粘贴行李条形码
t_{12}	托运行李进行安检且未通过
t_{13}	进行开包检查并没收违禁品
t_{14}	托运行李进行安检且通过
t_{15}	登机牌与证件检查
t_{16}	移除随身物品
t_{17}	进入安全门且未通过
t_{18}	进行人工检查并没收违禁品
t_{19}	进入安全门且通过
t_{20}	进行探测器检查且未通过
t_{21}	进行人工检查并没收违禁品
t_{22}	进行探测器检查且通过
t_{23}	随身物品过 X 射线衍射机且报警
t_{24}	未通过 X 射线衍射机的随身物品进行开包检查
t_{25}	随身物品过 X 射线衍射机且通过
t_{26}	收拾随身物品并离开

通过可达标识集,对机场航站楼旅客流程 GSPN 模型的可靠性进行判断如下:

(1)在机场航站楼旅客离港流程 GSPN 模型中的任意可达标识 M_i 而言都需要由输入库所 p_1 经过一系列变迁到达,并且再经过一系列变迁最终会到达输出库所 p_{21} 。H1 满足。

(2)在机场航站楼旅客离港流程 GSPN 模型中输出库所 p_{21} 中的标识均是由输入库所 p_1 经过一系列变迁才可到达的,同时当流程结束时,输出库所 p_{21} 中至少会有一个托肯。H2 满足。

(3)在机场航站楼旅客离港流程 GSPN 模型中没有死变迁。H3 满足。

通过现场调查我国南方某大型国际机场夏季 08:00—11:00 航站楼内旅客流程数据得出各项变迁所表示的服务时间以及其参数和概率,如表 2 所示。

2.3 同构马尔可夫链建立

通过机场航站楼旅客离港流程 GSPN 模型构建同构马尔可夫链^[12],如图 4 所示。

根据马尔可夫链中关于平稳分布的相关理论以及对切普曼-柯尔莫哥洛夫方程进行求解可以得出稳定状态下每个可达状态的概率^[13],公式为

表 2 机场航站楼旅客离港流程 GSPN 模型参数和概率

变迁	时间/s	参数	参数值	概率	概率值/%	变迁	时间/s	参数	参数值	概率	概率值/%
t_1	39.2	λ_1	1.53	α_1	35.4	t_{14}	33.4	λ_{14}	1.80	α_{14}	90.0
t_2	6.9	λ_2	8.70	α_2	—	t_{15}	13.5	λ_{15}	4.44	α_{15}	—
t_3	28.6	λ_3	2.10	α_3	64.6	t_{16}	34.4	λ_{16}	1.80	α_{16}	—
t_4	10.9	λ_4	5.50	α_4	8.4	t_{17}	2.0	λ_{17}	30.00	α_{17}	5.0
t_5	73.2	λ_5	0.82	α_5	—	t_{18}	90.0	λ_{18}	0.67	α_{18}	—
t_6	10.9	λ_6	5.50	α_6	33.6	t_{19}	2.0	λ_{19}	30.00	α_{19}	95.0

续表

变迁	时间/s	参数	参数值	概率	概率值/%	变迁	时间/s	参数	参数值	概率	概率值/%
t_7	35.2	λ_7	1.70	α_7	—	t_{20}	22.0	λ_{20}	2.73	α_{20}	1.0
t_8	10.9	λ_8	5.50	α_8	11.6	t_{21}	90.0	λ_{21}	0.67	α_{21}	—
t_9	73.2	λ_9	0.82	α_9	—	t_{22}	22.0	λ_{22}	2.73	α_{22}	99.0
t_{10}	10.9	λ_{10}	5.50	α_{10}	46.4	t_{23}	19.6	λ_{23}	3.06	α_{23}	15.0
t_{11}	22.4	λ_{11}	2.68	α_{11}	—	t_{24}	120	λ_{24}	0.50	α_{24}	—
t_{12}	33.4	λ_{12}	1.80	α_{12}	10.0	t_{25}	19.6	λ_{25}	3.06	α_{25}	85.0
t_{13}	180.0	λ_{13}	0.33	α_{13}	—	t_{26}	35.1	λ_{26}	1.71	α_{26}	—

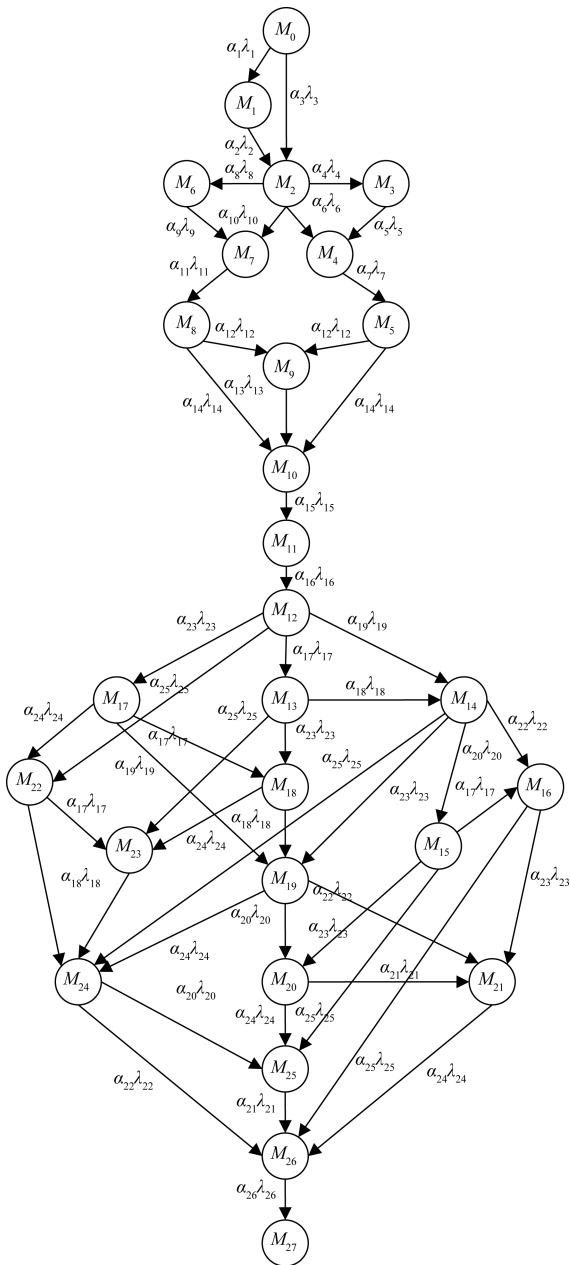


图4 机场航站楼旅客离港流程 GSPN 模型同构马尔可夫链

$$\begin{cases} \mathbf{XQ} = 0 \\ \sum_{i=0}^n x_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{X} = \{x_0, x_1, \dots, x_{26}\}$ 为系统不同状态的概率

矩阵； $\mathbf{Q}$ 为系统的状态转移速率矩阵； $n=27$ 。

当系统达到稳定状态时，系统中任意一个可达状态经过一次变迁转移到其他所有可达状态的概率之和等于该系统中其他所有可达状态经过一次变迁转移到该可达状态的概率之和，由此可得出系统的状态转移速率矩阵 $\mathbf{Q}$ 。因为该系统必定会处于某种可达状态，所以该系统中所有可达状态的概率之和应当等于 1。通过求解式(1)得到系统不同状态得概率，如表 2 所示。

根据表 2 中的概率值可计算出库所平均托肯数以及变迁利用率^[14]。

库所平均托肯数表示为库所 p_i 中存在托肯的概率数学期望，库所平均托肯数等于系统达到稳定状态时，库所 p_i 拥有托肯的所有可达状态概率之和。该值可以反应系统中库所 p_i 的繁忙程度，该值越大表明旅客在此处停留时间越长，越容易出现排队，成为系统的瓶颈。

库所平均托肯计算公式为

$$\bar{p}_i = \sum_{j=0}^{27} x_j E_{p_i(M_j)} \quad (2)$$

式中： $E_{p_i(M_j)} = \begin{cases} 1, & M_j \text{ 状态下库所 } p_i \text{ 中存在托肯} \\ 0, & M_j \text{ 状态下库所 } p_i \text{ 中没有托肯} \end{cases}$

变迁利用率等于系统达到稳定状态时，所有通过变迁 t_i 所达到可达状态概率之和，该指标可以反映变迁 t_i 的时间消耗情况，以及变迁 t_i 在整个系统中的时间占比，即变迁 t_i 的利用率越大时，表明可触发该变迁的所达到可达状态概率越大，后续等待该变迁的旅客流量越来越多，从而引起旅客排队，产生瓶颈。

变迁使用率计算公式为

$$\bar{t}_i = \sum_{j=0}^{27} x_j U_{t_i(M_j)} \quad (3)$$

式中： $U_{t_i(M_j)} = \begin{cases} 1, & M_j \text{ 状态下变迁 } t_i \text{ 可以发生} \\ 0, & M_j \text{ 状态下变迁 } t_i \text{ 不可发生} \end{cases}$

根据表 3 数据以及式(2)和式(3)计算得到库所平均托肯数如表 4 所示，变迁利用率如表 5 所示。

表 3 系统中不同状态概率

x_i	概率值	x_i	概率值	x_i	概率值	x_i	概率值	x_i	概率值
x_0	0.079 0	x_6	0.021 2	x_{12}	0.004 5	x_{18}	0.000 8	x_{24}	0.092 8
x_1	0.004 9	x_7	0.032 2	x_{13}	0.001 8	x_{19}	0.003 9	x_{25}	0.004 4
x_2	0.027 3	x_8	0.047 9	x_{14}	0.022 4	x_{20}	0.000 1	x_{26}	0.190 2
x_3	0.015 4	x_9	0.045 3	x_{15}	0.000 1	x_{21}	0.039 8	x_{27}	0.149 4
x_4	0.037 1	x_{10}	0.033 6	x_{16}	0.019 9	x_{22}	0.000 1		
x_5	0.035 0	x_{11}	0.083 0	x_{17}	0.000 1	x_{23}	0.007 7		

表 4 库所平均托肯数

库所 p_i	平均托肯数 $\bar{p}_i$	库所 p_i	平均托肯数 $\bar{p}_i$	库所 p_i	平均托肯数 $\bar{p}_i$	库所 p_i	平均托肯数 $\bar{p}_i$
p_1	0.079 0	p_7	0.021 2	p_{13}	0.004 7	p_{19}	0.044 7
p_2	0.004 9	p_8	0.032 2	p_{14}	0.010 3	p_{20}	0.295 2
p_3	0.027 3	p_9	0.047 9	p_{15}	0.119 1	p_{21}	0.149 4
p_4	0.015 4	p_{10}	0.045 3	p_{16}	0.004 6		
p_5	0.037 1	p_{11}	0.033 6	p_{17}	0.249 9		
p_6	0.035 0	p_{12}	0.083 0	p_{18}	0.048 7		

表 5 变迁利用率

变迁 t_i	变迁利用率 $\bar{t}_i$	变迁 t_i	变迁利用率 $\bar{t}_i$	变迁 t_i	变迁利用率 $\bar{t}_i$	变迁 t_i	变迁利用率 $\bar{t}_i$
t_1	0.079 0	t_8	0.027 3	t_{15}	0.033 6	t_{22}	0.1191
t_2	0.004 9	t_9	0.021 2	t_{16}	0.083 0	t_{23}	0.048 7
t_3	0.079 0	t_{10}	0.027 3	t_{17}	0.004 7	t_{24}	0.044 7
t_4	0.027 3	t_{11}	0.032 2	t_{18}	0.010 3	t_{25}	0.048 7
t_5	0.015 4	t_{12}	0.082 9	t_{19}	0.004 7	t_{26}	0.190 2
t_6	0.027 3	t_{13}	0.045 3	t_{20}	0.119 1		
t_7	0.037 1	t_{14}	0.082 9	t_{21}	0.004 6		

由表 4 可知,库所平均托肯数前 5 名分别为 p_{20} (0.295 2)、 p_{17} (0.249 9)、 p_{21} (0.149 4)、 p_{15} (0.119 1)、 p_{12} (0.083 0)。由表 5 可知,变迁利用率前 5 名分别为 t_{26} (0.190 2)、 t_{22} (0.119 1)、 t_{20} (0.119 1)、 t_{16} (0.083 0)、 t_{12} (0.082 9)。将两者结合考虑可知,该系统的瓶颈为旅客收拾随身物品、旅客进行探测器检查、旅客移除随身物品。

3 航站楼旅客进程优化仿真

航站楼作为一个客流量大,行人路线众多,旅客行为特性相对复杂的区域,通过众多行人微观仿真模型的优缺点以及适应性的对比发现,只有社会力模型能够较好地描述这种行人量大、行为特性复杂的自组织现象,能够最真实描述实际情况^[15]。而 Anylogic 仿真软件中的行人库仿真模块便是基于社会力模型所创建的。因此利用 Anylogic 仿真软件对航站楼旅客离港流程进行仿真^[16]。社会力模型是一组基于牛顿第二定律的动力学微分方程,该方式说明行人的行走方向并不是完全由外力所决定的,而是由行人自身的驱动力、行人之间的相互作用力、边界对人的作用力,这三种力的合力所决定的^[17]。

社会力模型可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}_a}{dt} = \mathbf{v}_a(t) \\ \mathbf{F}_a(t) = \frac{d\mathbf{v}_a}{dt} + \mathbf{f}_a(t) \\ \mathbf{F}_a(t) = \mathbf{F}_a^0(t) + \sum_{a \neq b} \mathbf{F}_{ab}(t) + \mathbf{F}_{aN}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}_a$ 为行人 a 的空间位置向量; $\mathbf{v}_a(t)$ 为行人 a 在时刻 t 的速度; $\mathbf{F}_a(t)$ 为行人 a 的社会力; $\mathbf{f}_a(t)$ 为行人 a t 时刻社会力与现实的偏差; $\mathbf{F}_a^0(t)$ 为行人 a 的驱动力; $\sum_{a \neq b} \mathbf{F}_{ab}(t)$ 为行人 a 与行人 b 的相互作用力; $\mathbf{F}_{aN}(t)$ 为边界 N 对行人 a 的作用力。

3.1 仿真系统建立

利用 Anylogic 仿真模块中的 pedSource、pedSelectOutput、pedService、pedWait 及 pedSink 模块进行旅客在航站楼内的服务流程仿真,利用流程建模库模块中的 split、queue、conveyor、match 及 sink 模块进行旅客随身物品仿真,结合现实服务时间数据进行编程修改,并限制安检通道内最多容纳 15 名旅客使仿真更加符合现实情况。各个模块及其参数如表 6 所示,其中旅客属性使用软件自带初始属性。流程仿真模型如图 5 所示。

表 6 各个模块环节及其参数

模块	环节	参数	模块	环节	参数
pedSource	旅客到达航站楼/(人·h ⁻¹)	200	pedService	人工值机并打印登机牌/s	triangular(36, 42, 55)
	舒适速度/(m·s ⁻¹)	Uniform (0.5, 1)		自助值机并打印登机牌/s	triangular(16, 29, 43)
	初始速度/(m·s ⁻¹)	Uniform (0.3, 0.7)		托运行李称重/s	triangular(5, 9, 17)
	行人直径/m	Uniform (0.4, 0.5)		缴纳超重行李费用/s	triangular(46, 76, 98)
pedSelectOutput	旅客值机方式(自助:人工:电子登机牌)	64:6:35.4:5		人工打印并粘贴行李条形码/s	triangular(16, 23, 35)
	旅客托运行李方式(自助:人工:无托运行李)	58:42:6.667		自助打印并粘贴行李条形码/s	triangular(24, 36, 49)
	托运行李超重概率/%	20		托运行李进行开箱检查/s	triangular(160,180, 200)
	托运行李安全检查未通过概率/%	10		登机牌和证件检查/s	triangular(11, 14, 17)
	安全门报警概率/%	5		旅客移除随身物品/s	triangular(16, 34, 49)
	性别比例(男:女)	1:1		旅客通过安全门/s	uniform(1.0, 3.0)
	探测器报警概率/%	1		旅客进行探测器检查/s	triangular(16, 21, 28)
queue	随身物品未通过安全检查概率/%	15		旅客进行人工检查/s	triangular(70, 90, 120)
	随身物品排队队列最大容量/个	3		旅客整理随身物品/s	triangular(16, 39, 53)
conveyor	传送带长度/m	3	pedWait	旅客等待托运行李安全检查/s	triangular(17, 31, 37)
	传送带速度/(m·s ⁻¹)	0.25			

注:uniform(a,b)表示a与b之间取任意值;triangular(a,b,c)表示服从三角形分布,下限为a,上限为b,众数为c。

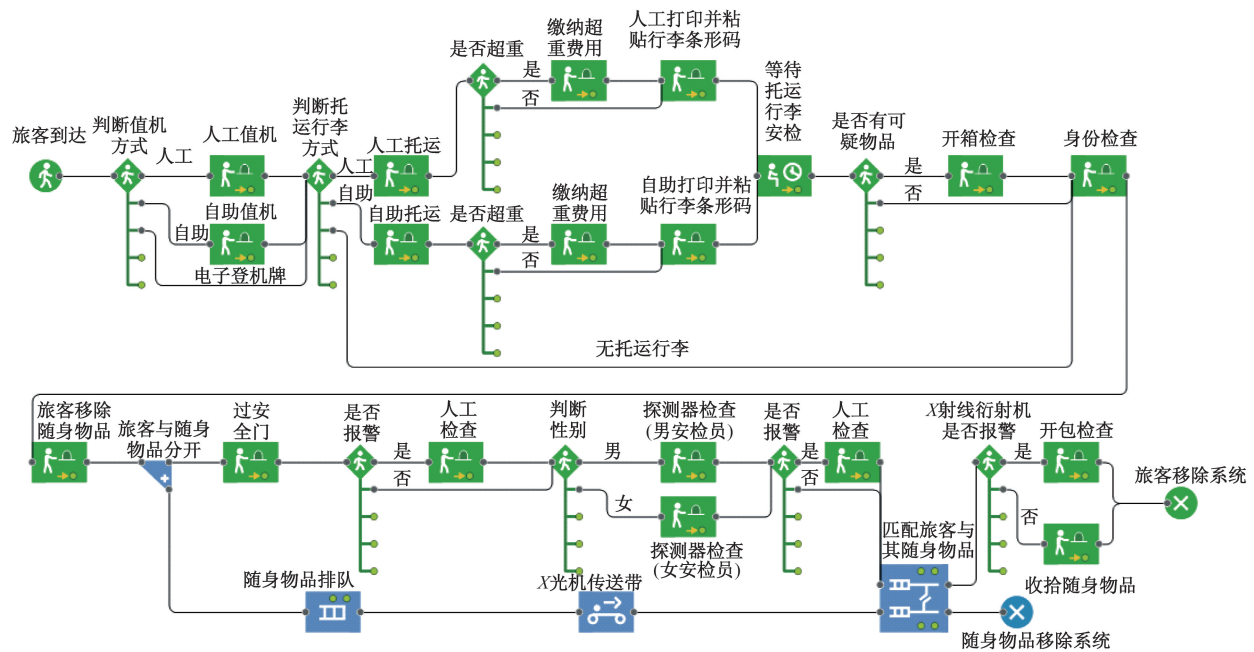


图 5 航站楼旅客离港流程模型

每个仿真模块的作用如下所述：

- (1)pedSource 模块:模拟旅客进入航站楼。
- (2)pedSelectOutput 模块:用于区分旅客是否进行自助值机、进行行李托运，安全检查是否报警等。
- (3)pedService 模块:模拟旅客在航站楼的服务和排队情况。
- (4)pedWait 模块:模拟旅客等待托运行李安检情况。
- (5)pedSink 模块:将旅客移除系统。
- (6)split 模块:将旅客与其对应的随身物品相互分离。
- (7)queue 模块:表示随身物品在 X 射线衍射机前排队。

(8)conveyor 模块:传送带,用于传送旅客随身行李过 X 射线衍射机。

(9)match 模型:用于匹配旅客与其随身物品,使旅客提取自己的物品。

(10) sink 模块:将旅客提取后的物品移除系统。

3.2 仿真分析

为减小仿真开始时仿真软件中人数较少而带来的误差,将仿真软件运行 1 h,待仿真软件运行稳定后再将仿真软件运行 1 h,收集该 1 h 内的数据,并将仿真软件运行 30 次后,取所得数据的平均值,得到优化前的仿真结果。在利用广义随机 Petri 网对旅客离港流程分析的得到该流程中的瓶颈为旅客收拾随身物品、旅客进行探测器检查、旅客移除随身物品,针对所得瓶颈进行优化。在原有安检通道基础上增加旅客移除和收拾随身物品的物理空间,即增加传送带长度,在同一时间可以有 2 名旅客进行移除和收拾随身物的基础上增加一个位置,此时应增加适量的传送带长度。增加探测器检查员工数量,由原先 2 名员工增加至 3 名。按照优化方案建立新的模型,同样将仿真软件运行 1 h,待仿真软件运行稳定后再将仿真软件运行 1 h,收集该 1 h 内的数据,并将仿真软件运行 30 次后,取所得数据的平均值,得到优化后的仿真结果。对于数据的获取可以利用 Anylogic 中自带的 timeMeasureStart 与 timeMeasureEnd 模块记录旅客在该两个模块内的逗留时间,从而获取旅客航站楼内值机安检逗留时间与旅客安检通道逗留时间。对于旅客身份检查排队等待时间可以对 pedService 模块进行内部编程,并将其获得的数据导入 data 模块中进行可视化。

根据现实的机场安检流程,安检通道的空间资源有限,所以当安检通道内的旅客数量达到最大时,进行身份检查的旅客只能在队列中等待,因此旅客移除随身物品排队队列在系统繁忙时变化不大,该处的排队时间以及队长无法当作优化前后的对比指标。所以选取旅客登机牌和证件检查平均排队等待时间、单位小时内通过旅客人数、旅客航站楼平均逗留时间以及安检通道平均逗留时间作为优化前后对比指标。为体现优化前后指标的对比,选取某一次仿真数据进行指标对比。图 6 为优化前后旅客身份检查排队等待时间对比,图 7 为优化前后旅客航站楼内值机安检逗留时间对比,图 8 为旅客安检通道逗留时间对比。整体仿真结果如表 7 所示。

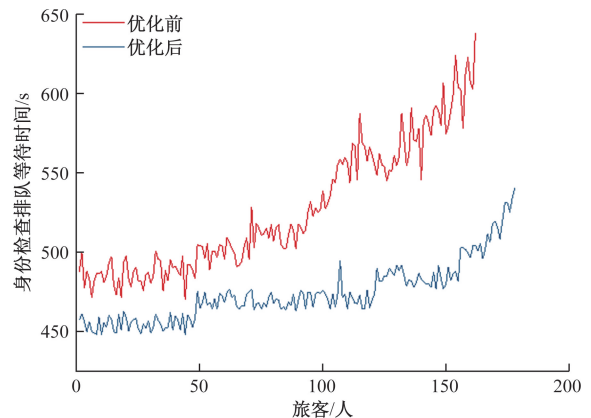


图 6 优化前后旅客身份检查排队等待时间对比

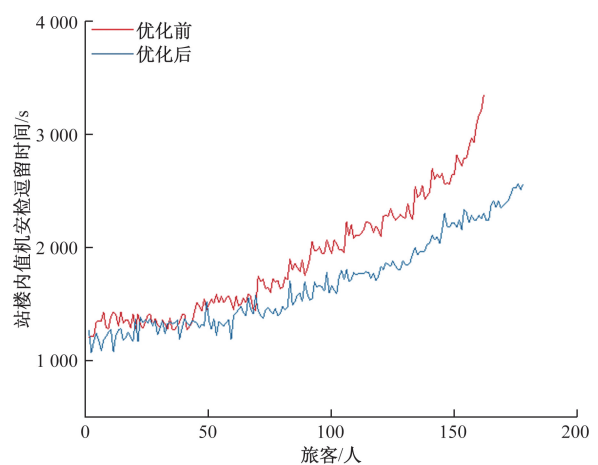


图 7 优化前后旅客航站楼内值机安检逗留时间对比

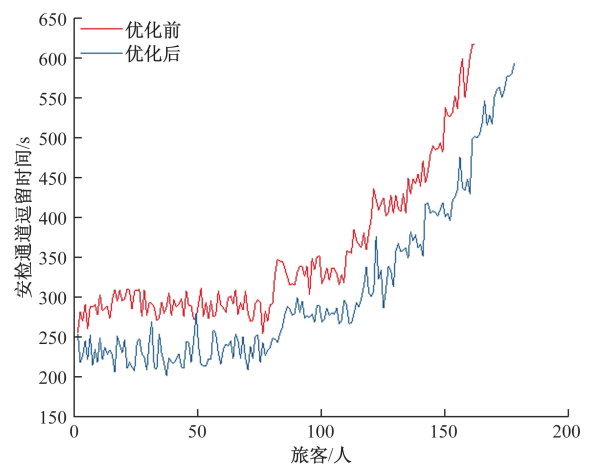


图 8 旅客安检通道逗留时间对比

表 7 旅客航站楼离港仿真对比

项目	优化前	优化后
旅客身份检查平均排队等待时间/min	8.81	7.61
单位小时内通过旅客人数/人	162	178
旅客航站楼内值机安检平均逗留时间/min	31.02	28.86
旅客安检通道平均逗留时间/min	5.81	5.03

优化前随着旅客人数的增加,导致进行身份检查的队列人数增加,到第100名旅客时由于排队队列过长导致排队等待时间以及旅客航站楼内值机安检逗留时间开始激增,而优化后由于安检单位时间内服务增加使旅客可以更快的离开队列,因此直至第150名旅客时排队等待时间以及旅客航站楼内值机安检逗留时间开始激增,同时由于优化后旅客可以更快的完成安检,因此旅客身份检查排队等待时间以及旅客航站楼内值机安检逗留时间在整体上都有所减小。因为安检通道内的空间限制即使优化后单位时间内安检服务人数增加但不会出现排队人数激增的情况,因此优化前后安检通道内旅客逗留时间整体趋势基本相同,但由于人数的增加,会导致旅客随身物品在传送带上排队等待时间增加,导致旅客移除随身物品以及收拾随身物品时间增加。因此在第100名旅客过后,优化前后旅客逗留时间开始激增。由表7可知优化前整个旅客航站楼离港流程单位小时内通过的旅客数为162人,身份检查平均排队时间为8.81 min,航站楼内值机安检平均逗留时间为31.02 min,安检通道平均逗留时间为5.81 min。优化后增加安检通道的空间资源,增加探测器检查员工数量,减小安检通道内的拥挤程度,采取该措施后比优化前单位小时内通过的旅客数提升9.88%,身份检查平均排队时间降低13.62%,安检通道平均逗留时间降低13.43%,航站楼平均逗留时间降低6.96%。结果表明,采用该优化方案能够有效的减少旅客排队等待以及逗留时间,提升单位时间内旅客通行量。

4 结论

(1) 本文通过将现实中机场航站楼旅客离港流程与GSPN模型相结合,将GSPN模型中的托肯、变迁和库所映射为航站楼内的旅客和行李、值机和安检的步骤以及旅客和行李所处的状态,建立机场航站楼旅客离港流程GSPN模型。

(2) 基于机场航站楼旅客离港流程GSPN模型构建同构马尔可夫链,根据马尔可夫链中关于平稳分布的相关理论以及对切普曼-柯尔莫哥洛夫方程进行求解得出稳定状态下每个可达状态的概率,并通过对可达状态稳定概率的计算得到库所平均托肯数和变迁利用率,通过对库所平均托肯数和变迁利用率的分析得出瓶颈为旅客收拾随身物品、旅客进行探测器检查、旅客移除随身物品。

(3) 针对所得瓶颈提出优化方案,即增加传送带长度、增加探测器检查员工数量,并利用 anylogic

仿真软件进行仿真对比,结果表明,采用该优化方案能够有效的减少旅客排队等待以及逗留时间,航站楼平均逗留时间降低6.96%,提升单位时间内旅客通行量。

参考文献

- [1] 刘继新, 杨宋瑞雪, 江灏, 等. 航站楼离港资源配置优化方法研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1812-1822.
- [2] 李明捷, 王涛, 黄欣宁, 等. 考虑延误特征的航站楼离港聚集客流预测方法[J/OL]. 交通运输系统工程与信息: 1-18 [2024-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4520.U.20240420.1757.004.html>.
- [3] 张天炫, 包丹文, 朱婷, 等. 双排队系统下航站楼值机柜台优化配置研究[J]. 航空计算技术, 2020, 50(5): 48-52.
- [4] 王加冕, 陶翼飞, 罗俊斌, 等. 基于蒙特卡洛仿真的机场值机系统优化研究[J]. 软件导刊, 2021, 20(8): 82-86.
- [5] HSU C I, CHAO C C, SHIH K Y. Dynamic allocation of check-in facilities and dynamic assignment of passengers at air terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(2): 410-417.
- [6] 刘英, 向勇, 杨秀清, 等. 机场共享自助值机托运服务资源配置研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58(5): 63-70.
- [7] 史跃亚, 张美蕙, 孙唯. 机场安检排队系统资源优化配置[J]. 科技和产业, 2024, 24(8): 229-234.
- [8] WANG Y R, ZANG J H, WANG G P, et al. A network flow approach for optimizing the passenger throughput at an airport security checkpoint[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019(4): 166-190.
- [9] 汪春华, 李泳懿, 林家星, 等. 某机场安检通道的动态优化配置方法研究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(9): 41-44.
- [10] 孙霞, 邢金库. 基于Petri网的运输流程系统建模优化[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2023, 41(5): 5-9.
- [11] 胡艳敏, 井儒东, 王凡, 等. 航站楼安检吞吐量瓶颈分析及时空优化[J]. 控制工程, 2020, 27(2): 316-322.
- [12] 韦潇, 石丽娜. 疫情下基于Petri网的值机流程仿真建模与分析[J]. 上海工程技术大学学报, 2022, 36(4): 418-427.
- [13] 张清, 张雷, 刘学川, 等. 基于广义随机Petri网的机场安检流程建模及优化[J]. 科技创新与应用, 2017(11): 60-61.
- [14] 刘彦青, 赵岭忠, 钱俊彦. 基于Petri网CSP并发系统验证技术研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(10): 244-250.
- [15] 张龙财, 徐健平, 刘明辉, 等. 航站楼出发厅小团体旅客应急疏散仿真研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(20): 207-212.

[16] 许雅玺, 梁迅, 刘一. 基于社会力模型的航站楼卫星厅安检布局仿真[J]. 航空计算技术, 2023, 53(6): 11-15.

[17] 许雅玺, 梁迅, 刘一. 基于 Anylogic 的机场安检流程研究[J]. 科技和产业, 2022, 22(10): 326-333.

Optimization of Terminal Passenger Departure Process Based on Generalized Stochastic Petri Nets

LI Shuanglong, FENG Jiabin, FENG Xiaolei

(Airport College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: To solve the problem of crowded departure and long waiting times for passengers in terminal buildings, a generalized stochastic Petri net (GSPN) model was proposed under the consideration of check-in and security check services as a whole to find the process bottleneck. Then, an optimization method was proposed to address the identified bottleneck. Meanwhile, a comparative simulation was conducted by using AnyLogic simulation software before and after optimization. The experimental results show that after optimization, the number of passengers passing per unit hour has increased by 9.88%, the average stay time for check-in and security checks in the terminal has decreased by 6.96%. This method can effectively solves the bottleneck problem of passenger departure in the terminal and improve the throughput of the terminal.

Keywords: terminal building; process optimization; generalized stochastic Petri net; Markov chain; AnyLogic