文章编号：1003-1421(2026)06-0111-10
引用格式：栾承宇，景云，孙国锋，等. 基于广义Benders分解的铁路车站安检通道配置方案优化[J]. 铁道运输与经济，2026，48(6)：111-120.
LUAN Chengyu，JING Yun，SUN Guofeng，et al. Optimization of Configuration Scheme for Security Inspection Channels at Railway Stations Based on Generalized Benders Decomposition[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：111-120.

基于广义Benders分解的铁路车站安检通道配置方案优化

栾承宇[1]，景　云[1,2]，孙国锋[1]，吴明泽[1]

(1.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044；2.北京交通大学 智慧高速铁路系统前沿科学中心，北京　100044)

摘　要：为提高乘客服务质量、降低铁路车站管理成本，针对进站安检通道数量配置问题进行优化。首先，综合考虑不同时段乘客到达需求，以最小化安检通道运营管理成本和乘客安检排队时间为目标，提出安检通道配置形式化整数规划模型。其次，采用广义Benders分解方法，将模型分解为安检通道配置主问题和安检作业处理过程子问题。最后，利用离散事件仿真算法进行求解。实例以北京西站为研究对象，求解得到不同进站口在不同时段安检通道最优配置数量方案。与北京西站常态化情景下的配置方案相比，运用广义Benders分解方法后，所有进站口安检系统高峰期平均队长降低了88.1%，安检通道运营管理成本与乘客排队等待时间成本之和降低了24.5%。研究为我国铁路车站实现安检通道资源配置与实时客流需求精准匹配提供了理论依据，对提升设备利用效率、优化乘客进站时长具有一定的参考价值。

关键词：广义Benders分解方法；铁路车站；安检通道数量配置；整数规划模型；离散事件仿真算法

中图分类号：U293.1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250331002

Optimization of Configuration Scheme for Security Inspection Channels at Railway Stations Based on Generalized Benders Decomposition

LUAN Chengyu[1]，JING Yun[1,2]，SUN Guofeng[1]，WU Mingze[1]

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Frontiers Science Center for Smart High-Speed Railway System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To improve passenger service quality and reduce management costs of railway stations, the quantity configuration of security inspection channels for station entry was optimized in this paper. First, by comprehensively considering passenger arrival demands at different times, a formalized integer programming model for security inspection channel configuration was proposed with the objective of minimizing the operation and management cost of security inspection channels and passenger security queuing time. Next, the generalized Benders decomposition method was adopted

收稿日期：2025-03-31　　**修订日期**：2026-01-29
基金项目：国家自然科学基金项目(52372300)

to decompose the model into a main problem of security inspection channel configuration and a subproblem of security operation processing. Finally, a discrete event simulation algorithm was utilized for the solution. By taking Beijingxi Railway Station as a case study, the optimal configuration scheme for the number of security inspection channels at different entrances in different periods was obtained. Compared with the configuration scheme under the normalized scenario of Beijingxi Railway Station, after applying the generalized Benders decomposition method, the average queue length of the security inspection system at all entrances during peak periods decreased by 88.1%, and the sum of the operation and management cost of security inspection channels and the cost of passenger queuing and waiting time decreased by 24.5%. This provides a theoretical basis for the precise matching between security inspection channel resource allocation and real-time passenger flow demand at railway stations in China and has certain reference value for improving equipment utilization efficiency and optimizing passenger entry time.
Keywords: Generalized Benders Decomposition Method; Railway Station; Quantity Configuration of Security Inspection Channel; Integer Programming Model; Discrete Event Simulation Algorithm

0　引言

为适应铁路运输高质量发展的需要，提升铁路车站的运行效率和服务质量势在必行。安检是铁路车站的一项重要工作，其目的是保障乘客运输安全。在确保安全的前提下，适当增加安检通道开放数量可提升安检效率，显著缓解客流积压问题，但过多开放安检通道易造成资源浪费与成本上升。因此，合理配置、科学优化铁路车站安检通道开放数量，对于提升安检效率具有重要意义。

当前针对铁路车站安检设备运用优化的系统性研究仍较为有限，现有成果主要集中于排队论模型与仿真技术的应用层面。姚加林等[1]基于排队论，构建了车站安检设备配置优化模型，并基于边际分析法，运用Matlab编程，求出了不同客流条件下对应的安检设备最优开放数量。窦敏[2]针对安检服务过程构建了M/M/c排队模型，然后利用Anylogic对车站换乘层安检通道的使用情况进行了仿真优化研究，最后基于不同的客流进站率情况，制定了安检通道优化配置和运营管理设计方案。吴桐[3]利用排队论模型求解得到了综合性铁路客运站安检口数量的最优配置方案，充分考虑了旅客到达率、安检效率等因素，为提升客运站安检效率和服务质量提供了科学依据。

铁路安检通道优化配置问题与机场安检通道、机场值机柜台优化配置问题类似，有许多成熟的方法可以借鉴。Mujica Mota[4]提出了一种融合进化算法与仿真技术的优化方法，用于求解航站楼值机柜台资源配置问题。汪春华[5]建立了机场安检通道分时段开放数量优化配置模型并基于排队论对其进行了改进，然后利用逐段平稳化方法进行问题分割，最终采用枚举法近似求解模型。Lalita等[6]构建了考虑先进先出排队规则和控制乘客等待时间的整数线性规划模型，对机场值机柜台资源分配问题进行了优化。也有学者[7-8]使用0-1规划来建立整数规划模型，对机场安检柜台分配问题进行深入分析。

铁路安检通道优化配置问题也与车站售票窗口优化配置问题类似，可借鉴此研究领域诸多成熟的理论、模型与算法。武中凯[9]基于排队论和仿真理论，建立了售票窗口分配仿真模型，并以哈尔滨站为研究对象进行仿真实验，最终根据仿真结果提出了售票窗口合理设置的建议。何运彬等[10]通过计算机行人动态行为仿真模型，分析了售票窗口平均排队人数与购票需求客流量之间的关系，进而得到了不同排队人数控制下推荐开启的售票窗口数量。宫宇姝[11]运用Anylogic仿真平台建立了进站流线动态仿真模型，模拟了旅客在高架层进站区的进站过程，优化了人工售票服务窗口等客运设备配置方案。李得伟等[12]运用旅客行为微观仿真方法，针对大型铁路客运站旅客对售票设备的使用行为进行建模，提出了基于旅客行为微观仿真的售票设备评估指标体系，并建立了仿真系统，解决了车站售票设备现状评估、极限能力计算及远景数量配置等问题。张伯敏[13]以沪杭高速铁路嘉兴南站为例，应用排队理论和建模方法，探讨了车站售票窗口和自动售票机设置优化问题。

分析上述成果发现，目前针对机场、车站设备资源分配问题的研究多依赖传统的排队论模型、仿

真建模方法等，这些方法在面对场景的复杂性时，灵活性欠佳。在高峰期与低谷期客流差异显著的情况下，传统方法难以快速自适应调整以提供精准配置方案。此外，部分研究对实例数据的获取不够全面、精准，多基于理想假设构建模型，忽略了实际运营中乘客行为的多样性与不确定性，导致优化结果与现实场景存在偏差。

基于此，构建铁路车站安检通道优化配置模型，设计求解模型的广义Benders分解方法，旨在提高车站安检运营效率，为车站安检通道最优配置数量的确定提供理论依据和决策支持。相比于现有研究主要有以下创新点。①首次将广义Benders分解方法应用于车站安检通道配置方案优化上，该方法将离散事件仿真算法嵌入模型，通过模拟不同场景下的安检作业处理过程来动态优化模型，实现精确求解。②通过实地调研获取乘客到达数据，并通过对数据拟合检验得到乘客提前到达过程服从对数正态分布的规律，而不是直接假设其符合某种分布。基于拟合出的对数正态分布特征，构建与其对应的仿真场景，使优化结果更精准地契合真实运营需求。

1　问题描述

在车站安检通道分配问题中，规定所有时间段集合为T，每个时间段长度设定为L，乘客依据先到先服务(First Come First Serve，FCFS)原则于开放的安检通道接受服务。在此过程中，需要决策每个时间段内开放的安检通道数量，其数量范围为$x_t \in [1, n]$。

该问题的目标是通过优化不同时间段安检通道配置数量来最小化安检环节运营成本。同时，考虑到实际运营情况，允许加班服务，即虽然开放的安检通道数量有所减少，但必须完成对所有乘客的安检服务。

对于每列车f，均设定有安检截止时间d_f，此为确保乘客能够顺利赶上列车的最晚服务完成时间。为保证在各种可能场景下乘客的安检截止时间要求均能得以满足，引入2类约束条件。对于每个时间段t，B_t表示在时间段t及之前出发的所有乘客的最大总服务时间，对应的服务水平约束为$\sum_{t'=1}^{t} L \cdot x_{t'} \geqslant B_t$；$A_t$表示在时间段$t$之后到达的所有乘客的最大总服务时间，对应的服务水平约束为$\sum_{t'=t}^{|T|} L \cdot x_{t'} \geqslant A_t$。只要$x_t$取值足够高，上述2类约束便能确保在各个场景下均有充足的安检通道数量来服务所有乘客。

2　模型构建

安检通道配置形式化整数规划模型的决策变量、目标函数和约束条件如下所示。

（1）决策变量。x_t为t时段车站安检通道配置数量。

（2）目标函数。目标函数由2部分组成，分别为安检通道运营管理成本和乘客安检排队时间，则目标函数可表示为

$$\min Z = \sum_{t \in T} C \cdot x_t + f(x_t) \tag{1}$$

式中：t为研究时段索引，$t \in T$；C为单个安检通道开通的运营管理固定成本，元/(时段·个)；$f(x_t)$为由决策变量x_t数量变化引起的乘客排队等待时间函数。

（3）约束条件。约束条件约束了决策变量的可能取值，如公式(2)所示。

$$x_t \in X \tag{2}$$

式中：X为安检通道所有可能配置方案的配置数量的集合。

3　广义Benders分解方法

在上述目标函数中，$\sum_{t \in T} C \cdot x_t$为简单求解的部分；由于乘客到达和服务的随机性，$f(x_t)$无法显式表达，为求解困难的部分。将上述构建的模型分解为安检通道配置主问题和安检作业处理过程子问题。主问题是对原模型的松弛，通过使用求解器求解主问题，能够保证快速收敛到可行解，而后通过子问题评估可行解的优劣，评估结果用于更新主问题的约束条件，从而使得可行解逐渐逼近原模型的最优解。

3.1　安检通道配置主问题

3.1.1　参数及变量定义

主问题的模型参数及变量说明如表1所示。

3.1.2　目标函数

通过引入连续变量θ_{st}，得到了原问题的松弛问

表1　主问题的模型参数及变量说明

Tab.1　Description of model parameters and variables for main problem

符号	说明	符号	说明
S	场景集合	i	安检通道配置方案索引，$i=\{1, 2, \ldots, n\}$
s	场景索引，$s \in S$	θ_{st}	当场景为s，研究时段为t时的乘客排队等待时间，min
F	列车集合	r_{sj}	场景s中乘客j的到达时间，min
f	列车索引，$f \in F$	ρ_{sj}	场景s中乘客j接受安检服务的时间，min
J_f	每列列车的乘客集合	Q	排队等待时间成本，元/(时段·人)
j	每列列车的乘客索引，$j \in J_f$	y_t^i	在时段t是否选择第i种安检通道配置方案

题。松弛后的目标函数主要考虑了安检通道的运营管理固定成本和乘客排队等待的时间成本，如公式(3)所示。

$$\min Z = \sum_{t \in T} C \cdot x_t + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} (Q/L)\theta_{st}/|S| \tag{3}$$

式中：Z表示安检环节运营成本，元；$\sum_{t \in T} C \cdot x_t$表示所有时段开放的安检通道的运营管理固定成本总和，元；$\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} (Q/L)\theta_{st}/|S|$表示所有场景乘客排队等待时间成本总和的平均值，元。

3.1.3　约束条件

（1）安检通道配置方案唯一性约束。在每个时段t，必须且只能选择一种安检通道配置方案。

$$\sum_{i=1}^{n} y_t^i = 1 \qquad \forall t \in T \tag{4}$$

（2）变量关系约束。在时段t选择的安检通道配置方案所对应的通道数量之和应等于该时段实际配置的安检通道数量x_t，故建立了y_t^i与x_t之间的关系。

$$\sum_{i=1}^{n} i \cdot y_t^i = x_t \qquad \forall t \in T \tag{5}$$

（3）乘客安检服务需求约束。为明确乘客安检服务需求，定义了在时间段t之后、时间段t及之前到达的所有乘客的最长总服务时间。

$$A_t = \max_{s \in S} \sum_{j \in J_f:\ L_t < r_{sj}} \rho_{sj} \tag{6}$$

$$B_t = \max_{s \in S} \sum_{f \in F:\ d_f < L_t, j \in J_f} \rho_{sj} \tag{7}$$

其中，A_t和B_t的确定依托于求解器对场景数据的预处理机制，为获取全场景范围内最具不利性的乘客安检服务需求阈值，然后将其加入主问题模型约束中，从而保证所构建的约束条件能够覆盖所有潜在场景情况。

（4）安检通道总处理能力约束。为保证在各种可能场景下乘客的安检需求均能得到满足，必须使时间段t之后、时间段t及之前的所有时段的安检通道总处理能力满足该时段内所有乘客的服务需求。

$$\sum_{t' \in \{t, \ldots, |t|\}} L \cdot x_{t'} \geqslant A_t \qquad \forall t \in T \tag{8}$$

$$\sum_{t' \in \{1, \ldots, t\}} L \cdot x_{t'} \geqslant B_t \qquad \forall t \in T \tag{9}$$

（5）变量取值约束。每个时段t安检通道配置数量x_t的取值范围，必须是从1到n的整数；为了准确表示在时段t对第i种安检通道配置方案的选择与否，强调了y_t^i作为0–1变量的性质；乘客排队等待时间函数θ_{st}的值在任何场景和时段的组合下都必须是非负的。

$$x_t \in \{1, 2, \ldots, n\} \qquad \forall t \in T \tag{10}$$

$$y_t^i \in \{0, 1\} \qquad \forall i \in \{1, 2, \ldots, n\},\ t \in T \tag{11}$$

$$\theta_{st} \geqslant 0 \qquad \forall s \in S,\ t \in T \tag{12}$$

3.2　子问题的离散事件仿真算法

求解器在求解主问题模型过程中会给乘客排队等待时间连续变量θ_{st}赋予一个较低的值，以最小化目标函数，这会导致低估θ_{st}，因此，需借助子问题的离散事件仿真算法对θ_{st}进行修正。

离散事件仿真算法主要用于模拟车站安检通道分配场景下的安检作业处理过程，以评估不同安检通道分配策略对系统性能的影响。算法首先接受利用求解器求解到的主问题的可行解，然后通过仿真过程量化可行解的实际排队性能指标并生成割平面约束反馈至主问题。算法步骤伪代码如图1所示。该算法主要包括算法输入、初始化、乘客安检服务处理循环、性能计算、返回指标值等多个步骤，为方便描述，构建一个向量$\boldsymbol{Q}$用于记录每个安检通道下一次可用的时间点，f_t用于表示每个研究时段t的性能度量指标。主要步骤介绍如下。

步骤1：算法输入。算法接受3个输入参数：场景索引s，研究时段集合$\mathcal{L}$以及利用求解器求解到的研究时段集合$\mathcal{L}$中每个研究时段t对应的安检通道分配数量x_t'(即主问题的初始可行解)，这些输入为算法提供了初始的仿真模拟条件。

步骤2：初始化。对于不在研究时段集合$\mathcal{L}$中

算法　离散事件仿真

1: **input** $s, \mathcal{L} \subseteq \{1,...,n\}, \{(t, x_t'): t \in \mathcal{L}\}$
2: $x_t' \leftarrow x_{\max} \quad \forall t \in T \setminus \mathcal{L}$
3: $f_t \leftarrow 0 \quad \forall t \in T$
4: $\boldsymbol{Q} \leftarrow (0,...,0)$
5: $t' \leftarrow 0$
6: **for** $j \in J$ **do**
7:　**while** $len(\boldsymbol{Q}) = 0$ **or** $\max\{r_{sj}, \mathcal{Q}_0\} \geqslant (t'+1)L$ **do**
8:　　**if** $x_{t'+1}' > x_{t'}'$ **then** Add $(t'+1)L$ to $\boldsymbol{Q}$
9:　　**if** $x_{t'+1}' < x_{t'}'$ **then** Remove $\mathcal{Q}_0$ from $\boldsymbol{Q}$
10:　　$t' \leftarrow t'+1$
11:　$\sigma \leftarrow \mathcal{Q}_0$
12:　Remove $\mathcal{Q}_0$ from $\boldsymbol{Q}$
13:　$f_{\lfloor r_{sj}/L \rfloor} \leftarrow f_{\lfloor r_{sj}/L \rfloor} + \max\{0, \sigma - r_{sj}\}$
14:　Add $\max\{\sigma, r_{sj}\} + \rho_{sj}$ to $\boldsymbol{Q}$
15: **return** $f_1,..., f_H$

图1　算法步骤伪代码

Fig.1　Pseudocode of algorithm steps

的所有时段t，将其安检通道分配数量x_t'初始化为最大值$x_{\max}$，为后续仿真模拟提供了一种初始化的资源配置状态；初始化f_t为0；初始化$\boldsymbol{Q}$为0，表示所有安检通道在初始时刻均处于可用状态；将当前研究时间段t'初始化为0，表示仿真模拟从时间0开始。

步骤3：乘客安检服务处理循环[14]。①外层循环(遍历乘客)：算法通过遍历所有乘客j来仿真模拟整个安检作业处理流程。在每次迭代中，处理每个乘客的到达、排队和服务过程。②内层循环(推进时间)：对于每个乘客j，进入内层循环以推进时间，直至有可用安检通道服务当前乘客。循环条件为当前没有可用的安检通道、下一个乘客尚未到达或者下一个乘客已经到达，但所有安检通道仍然处于忙碌状态。在循环中，若下一个研究时段$t'+1$的安检通道需求数量大于当前时段t'的安检通道配置数量，表示系统需要增加资源；反之，表示系统不再需要这么多资源，需要减少资源。每次循环结束后，将仿真时间向前推进。

步骤4：性能计算。当内层循环结束，即有可用的安检通道时，从向量$\boldsymbol{Q}$中取出最早可用的资源$\mathcal{Q}_0$并移除，然后计算乘客j完成安检服务的时间$f_{\lfloor r_{sj}/L \rfloor}$，并将此时间添加到向量$\boldsymbol{Q}$中，以更新安检通道下一次可用的时间。

步骤5：返回指标值。算法最终返回可行解x_t'对应的真实乘客排队等待时间性能指标值$f(x_t')$。

步骤6：添加Benders切割。比较$f(x_t')$和利用求解器求解到的乘客排队等待时间连续变量θ_{st}，根据比较结果生成不同类型的Benders切割添加到主问题中以修正θ_{st}，使其逐渐逼近真实乘客排队等待时间$f(x_t')$。

当$\theta_{st} < f(x_t') < \infty$，生成最优性Benders切割：$\theta_{st} \geqslant B(x_t')$，其中，$B(x_t')$是基于子问题计算结果生成的下界；当$f(x_t') = \infty$，生成可行性Benders切割：$F(x_t') \leqslant 0$，其中，$F(x_t')$是确保当前解$(x_t')$满足所有可行性约束的一个函数。这些切割作为约束被添加到主问题后，会有效缩小主问题的解空间，从而确保在迭代过程中主问题的解逐渐逼近全局最优解。

4　应用实例

以北京西站不同进站口安检区域为应用实例进行测算。乘客到达北京西站后有4种进站方式：北一层进站口安检进站、北二层进站口安检进站、南进站口安检进站、地铁到达免检进站。北一层进站口安检区域设有10个安检通道，北二层进站口安检区域设有7个安检通道，南进站口安检区域设有8个安检通道。实例采用Python编程求解，在环境为13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13620H 2.40 GHz，显卡为NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU且内存为8 GB的计算机上执行。

4.1　实例参数确定

(1) 列车信息。选取北京西站某日上午08:30—12:00所有开行列车的乘车人数及每列车乘客安检开始时段，对所有开行列车的乘客进行实地抽样调查，每列车乘客选择不同进站口安检进站的比例如表2所示。利用表2中的每列车乘车人数和每列车乘客选择不同进站口安检进站比例，即可计算得到每列车选择不同进站口安检进站的乘客人数。

(2) 每个安检通道的平均服务率。已有研究指出乘客离开安检区域过程服从泊松分布。为验证该分布与本实例场景的适配性，以北一层进站口开放的安检通道为调查对象，调查了2 h内的安检服务人数。在数据采集过程中，每隔1 min记录1次离开每个安检通道的乘客人数，共得到320份有效数据，对这些数据进行统计分析，得到各安检通道前单位时间离开的乘客人数如图2所示。

基于K-S检验方法，对单位时间接受安检后离开安检通道的乘客人数是否服从泊松分布进行检

表2　每列车乘客选择不同进站口安检进站的比例

Tab.2　The proportion of passengers choosing different entrances for security inspection per train

车次	乘车人数/人	安检开始时段	选择南进站口安检进站乘客百分比/%	选择北二层进站口安检进站乘客百分比/%	选择北一层进站口安检进站乘客百分比/%
G1579	1 084	06:30—07:00	35	22	25
G935	422	06:30—07:00	40	20	23
G501	557	06:30—07:00	37	20	18
C19	697	06:30—07:00	34	22	20
G93	1 147	07:00—07:30	30	21	30
G67	762	07:00—07:30	40	27	25
G307	885	07:00—07:30	28	22	30
G401	900	07:00—07:30	31	29	20
D35	891	07:00—07:30	31	23	25
G689	610	07:00—07:30	43	22	24
C2705	143	07:30—08:00	45	15	20
G7813	249	07:30—08:00	40	18	24
G655	448	07:30—08:00	41	25	29
G333	891	07:30—08:00	30	20	31
G55	1 231	07:30—08:00	25	28	34
G79	1 235	08:00—08:30	29	24	30
G95	1 050	08:00—08:30	28	25	27
K1177	216	08:00—08:30	15	36	42
G421	537	08:00—08:30	37	24	26
Z69	1 086	08:00—08:30	11	35	40
G337	1 094	08:00—08:30	33	19	20
G481	471	08:00—08:30	37	25	26
C2707	77	08:30—09:00	42	19	28
G561	692	08:30—09:00	36	24	25
G1577	497	08:30—09:00	39	22	24
G73	1 123	09:00—09:30	30	25	30
G6709	275	09:00—09:30	43	24	23
D49	839	09:00—09:30	31	27	30
G351	1 033	09:00—09:30	28	25	32
G7818	72	09:00—09:30	40	19	27
Z295	990	09:00—09:30	15	41	36
C2725	86	09:00—09:30	45	20	15
Z161	1 279	09:00—09:30	12	35	40
G605	828	09:00—09:30	35	20	21
G657	938	09:30—10:00	37	20	25
K7701	433	09:30—10:00	18	37	39
K117	1 114	09:30—10:00	20	33	42
G805	669	09:30—10:00	35	21	23
C2709	71	09:30—10:00	45	20	21
G893	770	10:00—10:30	40	25	27

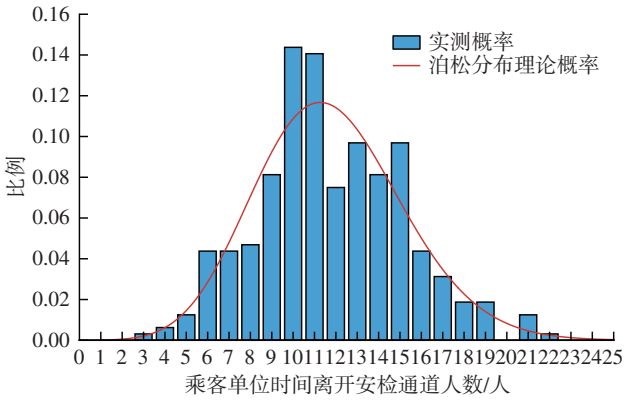


图2　各安检通道前单位时间离开的乘客人数

Fig.2　Number of passengers leaving per unit time before each security inspection channel

验，乘客离开安检区域过程检验结果如表3所示。

表3　乘客离开安检区域过程检验结果

Tab.3　Inspection results of passenger departure process from security inspection area

样本量N		320
泊松参数	平均值	11.74
最极端差值	绝对	0.030
	正	0.030
	负	−0.028
K-S统计量		0.541
渐近显著性(双尾)		0.932

分析表3可知，渐近性检验显著性水平为0.932，大于显著性阈值0.05，因此本实例乘客离开安检通道过程服从泊松分布，即相邻乘客安检服务间隔时间服从指数分布，得到每个安检通道平均服务率为11.74人/min，取整数为12人/min。

（3）乘客提前到达分布。对北京西站乘车乘客进行实地调查，共得到607份有效数据，主要来自于G67，G79，C2707，G657等8个车次的乘客提前到达时间信息，通过对乘客提前到达时间数据进行频数统计和归一化处理后，进行拟合分析，拟合效果图像如图3所示。分析图3可知，对数正态分布拟合单峰的聚集趋势最好[15]，因此选取对数正态分布研究乘客提前到达分布规律。

通过分析图3乘客提前到达分布规律可知，对于每列车的乘客，都有一个“到达期”，由4个连续的时间段组成，每个时间段长L=30 min，4个时间段对应的乘客到达百分比分别为3.36%，16.32%，56.23%，24.09%。每个到达时段的第一时间段在

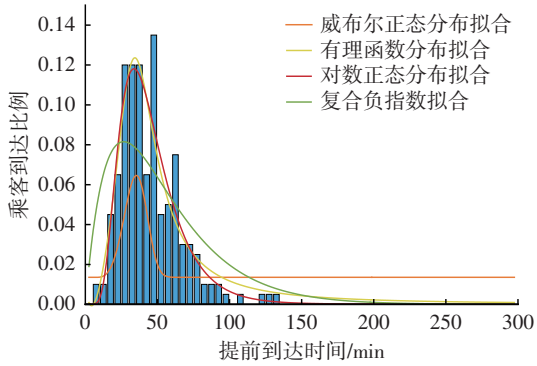


图3　拟合效果图像

Fig.3　Fitting effect image

表2中给出。所有乘客都在相应的时间段到达。

（4）相关费用。对北京西站乘客进行现场问卷调研，运用收入法统计分析乘客工资收入，进而估算出乘客的平均时间价值，近似为每位乘客在安检系统逗留单位时间的费用为36元/h。此外，通过咨询北京西站工作人员，推算出每个安检通道运营管理费用为56元/h。

4.2　计算结果

在本研究中，为全面优化北京西站的安检通道配置，分别对北京西站北一层进站口、北二层进站口以及南进站口的安检通道开放数量展开求解。由于该问题的实例规模较大、较难解决，因此为节省求解时间，每个进站口均只生成100个场景下的安检通道配置问题的解决方案信息。不同进站口实例求解过程类似，在此仅选取南进站口为代表分析其求解过程。

求解器求解过程中每个节点(子问题)的求解信息如表4所示。在求解每个节点过程中，广义Benders分解方法通过拓展搜索空间、动态调整目标函数值、不断分支探索复杂子问题，逐步优化当前最优目标值，使其与最优目标下界的差距不断缩小，从而逐渐接近最优解。

表4　每个节点(子问题)的求解信息

Tab.4　Solution information for each node (subproblem)

当前节点	当前最优目标值/元	当前最优目标下界/元	*GAP*/%	运行时间/s
1	2 877.591 8	2 323.593 6	19.30	22
2	2 877.591 8	2 323.593 7	19.30	24
3	2 323.599 9	2 323.599 9	0.00	24

通过分析上述求解信息可以看出：广义Benders分解方法能够在24 s内将所有实例求解到最优性，在求解到第3个节点(子问题)时，*GAP*=0.00%，并且不再继续迭代，表示求解器认为已经找到最优解。

求解器在求解过程中通过添加多种类型的切割以及约束达到限制主问题解空间的目的，从而加速收敛过程并逐步逼近最优解。在求解过程中，添加Gomory割平面、MIR割平面以及惰性约束的次数分别为1次、10次、206次。

北一层进站口、北二层进站口实例求解过程与南进站口类似。最终求得各个时段不同进站口的安检通道最优配置数量如图4所示。

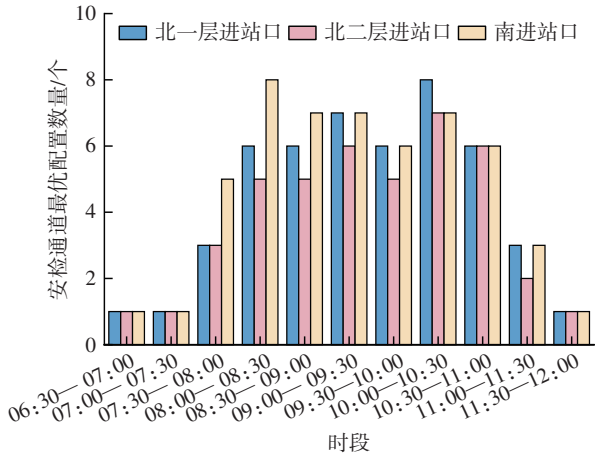


图4　各个时段不同进站口的安检通道最优配置数量

Fig.4　Optimal configuration number of security inspection channels at different entrances in each period

通过分析图4结果可以看出：使用广义Benders分解方法，能够在合理时间内解决不同时段安检通道最优配置数量问题，能够在场景的层次上精确地整合排队结构，并得到稳定、准确的随机问题解。

4.3　结果对比

北京西站北一层、北二层和南进站口常态化下各只开放4个安检通道。北京西站安检排队系统符合多通道排队模型的特征。模型的指标计算公式如下所示。

假设乘客不同时段实际到达率为λ_t，每个安检通道的服务率为μ，安检通道开放数量为k，则安检系统在每个时段的服务强度为

$$\rho_t = \lambda_t / k\mu \tag{13}$$

每个时段安检系统内无乘客的概率为

$$P_{0t} = \left[\sum_{m=0}^{k-1}\frac{(\lambda_t/\mu)^m}{m!} + \frac{(\lambda_t/\mu)^k}{k!}\left(\frac{k\mu}{k\mu-\lambda_t}\right)\right]^{-1} \tag{14}$$

式中：m为求和索引，表示遍历系统内乘客数的计数变量。

每个时段安检系统内排队等待的乘客数为

$$L_{qt}=\frac{(\lambda_t/\mu)^k\lambda_t\mu}{(k-1)!(k\mu-\lambda_t)^2}P_{0t} \tag{15}$$

每个时段安检系统平均队长为

$$L_{st}=L_{qt}+\lambda_t/\mu \tag{16}$$

每个时段安检系统内乘客在队列中等待时间的平均值为

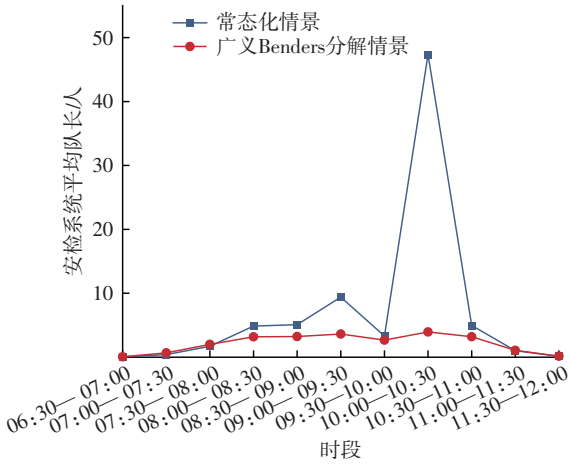
$$W_{st}=L_{st}/\lambda_t \tag{17}$$

运用多通道排队模型，分析常态化情景下以及运用广义Benders分解情景下各时段安检系统平均队长，各时段安检系统平均队长如图5所示；同时求得常态化情景下和运用广义Benders分解情景下安检通道运营管理成本与乘客排队等待时间成本之和，安检通道运营成本与乘客排队时间成本之和如表5所示。

分析图5和表5结果可以看出：在常态化情景下，各进站口安检系统的平均队长普遍较高且波动较大，安检通道运营管理成本与乘客排队等待时间成本之和较高。原因在于常态化情景下各进站口仅固定开放4个安检通道，无法灵活适应不同时段客流量的变化。在客流量大的时段，安检通道处理能力不足，导致平均队长迅速上升。在客流量小的时段，又造成安检资源浪费；而运用广义Benders分解方法后，各进站口安检系统的平均队长和安检通道运营管理成本与乘客排队等待时间成本之和得到了显著优化。在多数时段，其平均队长明显低于常态化情景下的平均队长，且整体波动幅度减小，安检环节运营成本降低。经计算，所有进站口安检系统高峰期平均队长降低了88.1%，安检通道运营管理成本与乘客排队等待时间成本之和降低了24.5%。这充分表明广义Benders分解方法能够依据不同时段的乘客到达率和安检通道服务率，动态、合理地调整安检通道开放数量，不仅有效减少了乘客排队等待人数，缓解了安检通道的拥堵状况，提高了安检效率，还降低了安检环节运营成本，在优化安检通道配置方面相较于常态化模式具有明显优势。

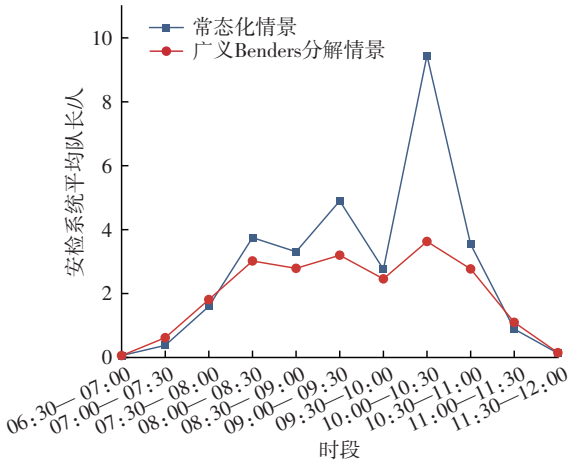
4.4　研究方法对比

不同进站口的求解过程相似，因此以北一层进站口为例，在广义Benders分解方法求得的北一层进站口安检通道最优配置方案的基础上，运用软件模拟了乘客排队接受安检服务以及被服务完离开队列的过程，构建北京西站北一层排队流程模型如



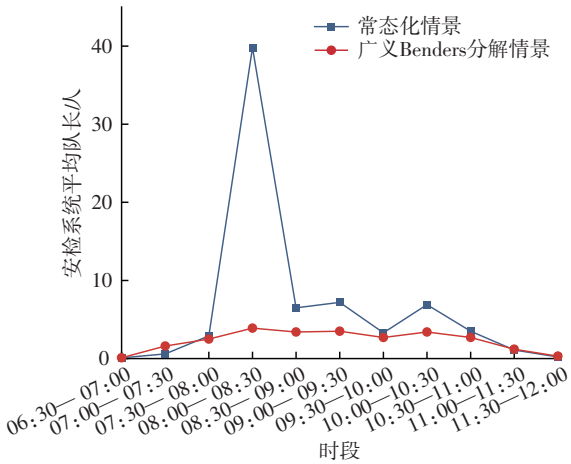
a　北一层进站口安检系统平均队长

a　Average queue length of security inspection system at north first floor entrance



b　北二层进站口安检系统平均队长

b　Average queue length of security inspection system at north second floor entrance



c　南进站口安检系统平均队长

c　Average queue length of security inspection system at south entrance

图5　各时段安检系统平均队长

Fig.5　Average queue length of security inspection system in each period

图6所示。设置仿真模拟基本时间单位为1 min，仿真时段为应用实例中的06:30—12:00。

表5　安检通道运营成本与乘客排队时间成本之和　元

Tab.5　Sum of operation cost of security inspection channels and cost of passenger queuing time

不同进站口 / 2类成本之和	北一层进站口安检系统	北二层进站口安检系统	南进站口安检系统
常态化情景	2 642.43	1 785.89	2 529.57
广义Benders分解情景	1 773.66	1 565.00	1 911.41

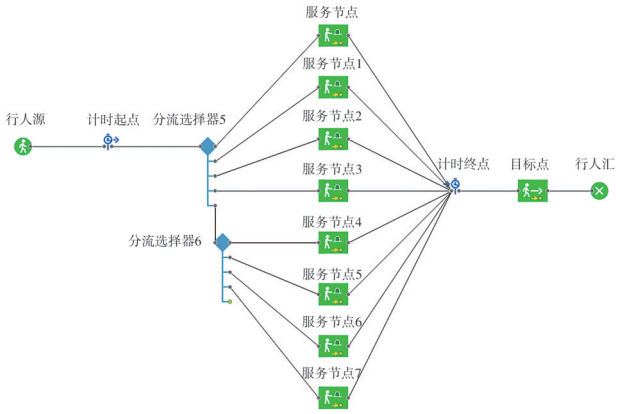


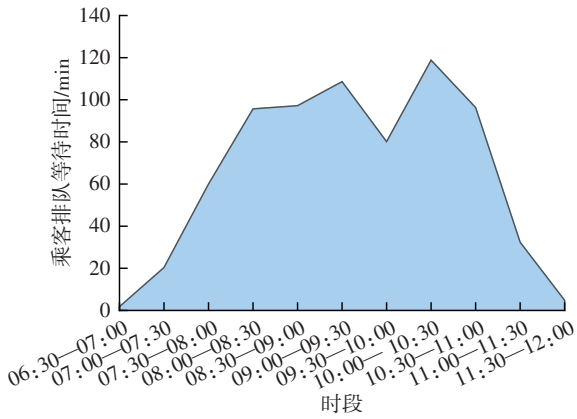
图6　北京西站北一层排队流程模型

Fig.6　Queuing process model for north first floor of Beijingxi Railway Station

将建立好的模型进行仿真，在仿真过程中收集每个时段北一层安检系统内乘客在队列中排队等待时间。运行330个单位后，可得到北一层安检系统仿真结果，将此结果与基于广义Benders分解方法输出的排队指标结果进行对比，基于广义Benders分解与基于Anylogic仿真的排队指标对比如图7所示。

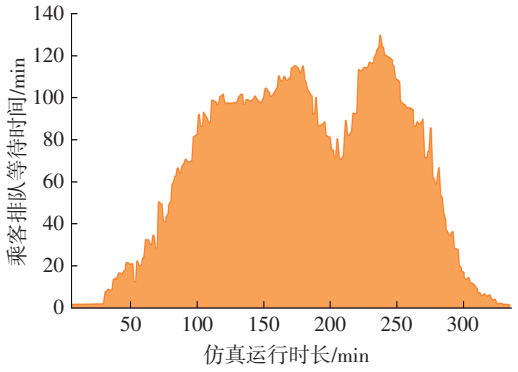
分析图7可以看出：2种方法得到的北一层安检系统排队指标变化趋势基本一致，峰值时段的分布也高度吻合，这一结果证明了广义Benders分解方法在模型化以及模拟安检系统排队动态行为方面具有有效性。

通过模拟不同配置方案，对比不同方案的仿真结果，为客运设备配置调整提供依据，得到最优客运设备配置方案。但求解时间会随着仿真次数的增加而增加，使得求解过程相对复杂。以上述北一层进站口仿真过程为例，以25倍速进行仿真，仿真1次所需的模拟运行时间为330/25=13.2 min，但由于客运设备配置优化问题可能涉及多个应用场景以及多种配置方案，会使得整体求解时间成倍增加，求解时间过长。但广义Benders分解方法在面对复杂应用场景时，灵活性较高，能够根据客流变化情况自适应调整配置方案，1~2 min即可完成不同场景安检通道最优配置方案的求解，显著地节省了求解时间，降低了求解复杂程度。



a　基于广义Benders分解的排队指标

a　Queuing indicator based on generalized Benders



b　基于Anylogic仿真的排队指标

b　Queuing indicator based on Anylogic simulation

图7　基于广义Benders分解与基于Anylogic仿真的排队指标对比

Fig.7　Comparison of queuing indicator based on generalized Benders decomposition and based on Anylogic simulation

5　结论

（1）基于广义Benders分解方法，可以有效求解含3个进站口、25个安检通道、40列列车的铁路车站安检通道分配实际案例，其所得到的最终配置方案能够在时空维度很好地满足到达乘客的安检需求，使得所有进站口安检系统高峰期平均队长降低了88.1%，铁路车站安检通道运营管理成本与乘客排队等待时间成本之和降低了24.5%，解决了乘客安检排队等待时间长或安检资源浪费的问题。

（2）在广义Benders分解的子问题中使用了离

散事件仿真算法来评估安检通道配置方案性能，此算法将仿真融入优化，通过模拟乘客行为和状态，精确处理了复杂排队结构；同时，结合逻辑推理生成有效Benders割平面，缩小了搜索空间。最终的求解结果表明该方法能够在短时间内完成求解，得到最优解，且不同场景下解稳定。

虽然研究提出的方法可在短时间内得到精确解，但随着问题规模和复杂性进一步增加，计算耗时可能会呈非线性增长，限制了算法在超大规模车站或极端复杂运营场景下的应用。为此，寻找更高效的求解方法是下一阶段研究的主要内容。

参考文献：

[1] 姚加林，潘学成. 基于排队论的高铁车站安检设备运用优化研究[J]. 铁道科学与工程学报，2020，17(8)：1919-1925.
YAO Jialin，PAN Xuecheng. Research on Application by Optimization of Security Inspection Equipment in High Speed Railway Station Based on Queuing Theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2020，17(8)：1919-1925.

[2] 窦　敏. 北京南站出京人员实证分析与安检服务仿真优化研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017.

[3] 吴　桐. 综合性铁路客运站大客流组织方法研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2020.

[4] MUJICA MOTA M. Check-in Allocation Improvements through the Use of a Simulation-Optimization Approach[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2015，77：320-335.

[5] 汪春华. 某机场安检通道分时段开放数量优化配置方法研究[D]. 广州：广东工业大学，2021.

[6] LALITA T R，MANNA D K，MURTHY G S R. Mathematical Formulations for Large Scale Check-in Counter Allocation Problem[J]. Journal of Air Transport Management，2020，85：101796.

[7] CARDINALI R，ANNIBALLI E. Track Fusion in a New Security System for Airports[EB/OL]. (2012-10-11)[2025-01-29]. https：//ieeexplore. ieee. org/document/6328092.

[8] TAKAKUWA S，OYAMA T. Simulation Analysis of International-Departure Passenger Flows in an Airport Terminal[EB/OL]. (2004-01-30) [2025-01-29]. https：//ieeexplore. ieee. org/document/1261612.

[9] 武中凯. 哈尔滨站售票窗口分配仿真研究[J]. 铁道运输与经济，2012，34(5)：50-53.

[10] 何运彬，姬　海. 客运枢纽售票窗口精益化规划方法研究[J]. 交通与运输，2012，28(H07)：63-65.
HE Yunbin，JI Hai. Study on Plan Method of Fine Profit Ticket Window in Passenger Transport Hub[J]. Traffic & Transportation，2012，28(H07)：63-65.

[11] 宫宇姝. 基于Anylogic的兰州西站客运设备配置优化仿真研究[J]. 铁道运输与经济，2018，40(12)：44-48.
GONG Yushu. A Study on the Optimization of Lanzhou West Station Equipment Disposition Based on Anylogic Simulation[J]. Railway Transport and Economy，2018，40(12)：44-48.

[12] 李得伟，禹丹丹，张　彦，等. 基于旅客行为微观仿真的大型铁路客运站售票设备配置方案评估研究[J]. 铁道学报，2013，35(2)：1-7.
LI Dewei，YU Dandan，ZHANG Yan，et al. Assessment of Fare Collection System of Large-Scale Railway Passenger Station Based on Microscopic Simulation of Passenger Behavior[J]. Journal of the China Railway Society，2013，35(2)：1-7.

[13] 张伯敏. 排队论在铁路客站售票组织中的应用[J]. 铁道经济研究，2015(3)：31-35.
ZHANG Bomin. The Application of Queuing Theory in Railway Ticket Sales Organization[J]. Railway Economics Research，2015(3)：31-35.

[14] FORBES M A，HARRIS M G，JANSEN H M，et al. Combining Optimisation and Simulation Using Logic-Based Benders Decomposition[J]. European Journal of Operational Research，2024，312(3)：840-854.

[15] 米荣伟，帅　斌，许旻昊，等. 大型高铁车站最高聚集人数计算模型研究[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18(12)：3102-3109.
MI Rongwei，SHUAI Bin，XU Minhao，et al. Research on the Calculation Model of Maximum Assembled People in Large High Speed Railway Station[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2021，18(12)：3102-3109.

(责任编辑　魏　然)