

基于排队理论的地铁安检集中判图模式研究

陈 帅¹ 蔺天震¹ 范光涛¹ 卢存桥¹

CHEN Shuai LIN Tianzhen FAN Guangtao LU Cunqiao

摘 要

随着城市地铁客流的持续增长,传统地铁安检模式效率低下、资源分配不均的问题日益凸显。文章基于排队理论模型,探讨地铁多个车站采用安检集中判图模式的使用效果。通过分析传统地铁安检点安检员分散作业的瓶颈,构建基于排队网络模型的集中判图系统,并通过动态性能仿真实验,证明集中判图系统对比于传统分散模式,能够提升安检效率、优化人力资源配置、减少乘客等待时间。实验结果表明,集中判图模式通过网络在多个车站间动态分配判图任务分析,乘客平均等待时间降低 72.1%,判图人员数量减少 26.7%,为城市地铁安检系统的优化提供理论依据。

关键词

排队理论; 地铁安检; 集中判图; 系统优化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.034

0 引言

城市地铁作为城市公共交通的骨干,其安全运营至关重要。安检系统是保障地铁安全的第一道防线,然而,随着客流量持续攀升,传统安检模式效率低下的问题日益凸显。在传统分散判图模式下,每个安检点均配备独立的图形工作站和判图员,各安检点独立进行判图。这种模式容易导致判图员工作量不均衡、人力资源浪费的情况发生^[1]。

为解决这一问题,结合人工智能识别^[2-3]的集中判图^[4]技术应运而生。该技术基于禁带品智能识别和网络实时传输,

将判图任务集中分配,实现了判图工作的削峰平谷。通过安检智能集中判图系统可以有效减少人力成本,实现城市地铁安检判图工作的减员增效^[5]。

排队理论^[6]作为研究服务系统中排队现象和优化资源配置的数学工具,为分析集中判图模式提供了理论框架。基于排队论原理,可以构建安检进站排队模型,对安检设备布置方案和配置数量进行优化改进^[7-8]。史跃亚等^[9]提出了一种排队理论仿真模型,结果表明安检串联排队系统的总时间更少,且在以高峰小时人数为上限的前提下,人数越多优势越明显。付保明等^[10]采用基于排队理论的安检集中判图人员配置模型减员效果显著。赵天可等^[11]提出了一种铁路客运安检的排队系统模型,结果表明,集中判图作业模式在提高安检

1. 青岛博宁福田智能交通科技发展有限公司 山东青岛 266111

- [4] 钱文鑫,李强,卢鹤,等.典型飞机蒙皮零件工艺特征识别与智能检索方法[J].锻压技术,2024,49(12):250-256.
- [5] 张鹏豪.基于可编程数据面加速分布式检索系统[J].北京大学学报(自然科学版),2026,62(1):57-68.
- [6] 周依杰,林圣原,巩树凤,等.GoVector:I/O- 高效的高维向量近邻查询缓存策略[J].软件学报,2026(3):1021-1036.
- [7] 江宇轩,姚俊杰,侯宇轩.权重残差向量量化:向量压缩与分层索引结构[J].软件学报,2026(3):1104-1120.
- [8] 张士栋,叶芄,张沁川,等.基于大语言模型的示波器智能控制系统研究[J].仪器仪表学报,2025,46(10):42-51.
- [9] 周景,唐振洋,董晖,等.融合特征增强和对比学习的电力客服工单多标签文本分类方法[J].计算机应用,2025,45(12):3847-3854.

- [10] 贾昀峰,王俊峰,吴鹏.TPLADD:高鲁棒性与高精度的C/C++ 第三方库检测方法[J].计算机科学与探索,2025,19(7):1969-1980.
- [11] 伍凌川,史慧芳,邱枫,等.基于近似存在性查询的高效图像异常检测方法[J].电子科技大学学报,2024,53(3):424-430.
- [12] 钱来,赵卫伟.基于对比学习和注意力机制的文本分类方法[J].计算机工程,2024,50(7):104-111.

【作者简介】

安泽晖(1992—),女,山西垣曲人,硕士研究生,中级职称,研究方向:智能算法优化。

(收稿日期:2026-06-16 修回日期:2026-07-15)

效率、优化人力资源配置等方面表现出显著优势，具有较高实用价值和推广前景。然而，现有研究多集中于技术实现，缺乏对系统整体运行效率的理论分析。

本文将基于排队理论，深入分析地铁安检集中判图模式的运行机制，构建数学模型，并通过实际案例验证，探讨该模式在地铁安检系统中的优化路径与实施效果，以期为城市地铁安检系统的智能化升级提供理论支持和实践参考。

1 地铁安检系统现状与排队理论基础

1.1 传统地铁安检模式及其瓶颈

传统地铁安检系统采用分散的判图模式，每个安检点都配备判图工作站和判图人员，各安检点独立完成判图工作。高峰期部分安检点判图员超负荷工作，而低峰期部分安检点则处于闲置状态，各安检点因客流不均，导致判图员的工作量无法达到均衡，判图员整体效率低下，导致地铁运营的人力成本高。

1.2 集中判图模式的特点与优势

集中判图模式通过网络将X光安检机分析后的图像实时传输至集中判图室，由集中判图室的判图员进行远程判图。这种模式打破各个车站物理空间隔离，对安检判图业务的限制性。与传统分散模式相比，集中判图模式按照实际情况，采用合适的任务分配策略，将安检点的判图任务分给判图员，实现各安检点判图任务的削峰填谷。通过集中调度各个车站的判图任务，实现人力资源共享。

集中判图室有至少1位判图员及多个关键设备，如图1所示。每个判图室配置有多个工作站，判图员使用判图工作站进行判图作业。监控工作站用于管理和监控整个判图系统。系统服务器也存放在判图室中，服务器采用双机热备方式部署确保系统稳定。



图1 集中判图室关键组件

1.3 排队理论基本概念

一个完整的排队系统通常包含三个基本要素：到达过程、服务过程和服务设施。到达过程描述的是顾客到达的规

律性，其可以是确定性的，也可以是随机性的。服务过程涉及顾客接受服务所花费的时间，不同乘客的安检时长可能因人工开包检查而有所差异。服务设施则指服务点的数量、布局及其服务能力，在地铁安检中，安检设备和安检人员共同构成服务设施的一部分。本文基于排队理论原理，构建安检进站排队模型，对安检设备布置方案和配置数量进行优化改进。

2 集中判图模式的排队理论模型构建

2.1 集中判图系统的排队网络模型

集中判图模式本质上是一个多服务台排队系统，其结构可以抽象为一个排队网络模型，如图2所示。

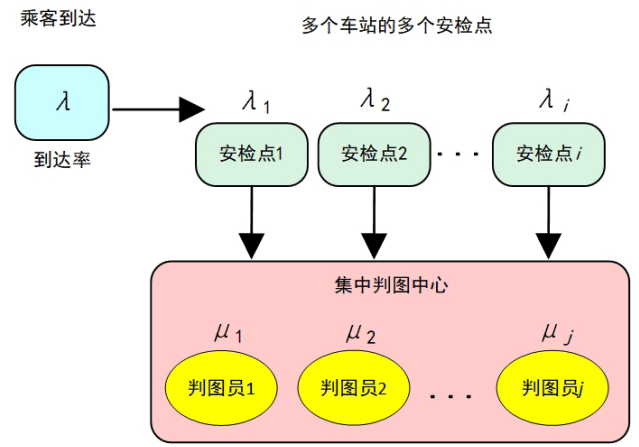


图2 集中判图系统排队网络模型

根据排队理论，本文用到的系统关键参数，按照参数类型分为输入参数、系统参数、性能指标。详细的参数符号及参数描述如表1所示。

乘客到达率 λ_i 一般服从泊松分布，表示第 i 个安检点的乘客到达率；服务率 μ_j 表示第 j 个判图员的服务率； m 表示所有安检点的总数量； c 表示集中判图室的判图员数量； W_q 表示平均排队时间； L_q 表示平均队列长度； ρ 表示系统的利用率。该系统模型可视为一个多队列多服务台排队系统。

表1 集中判图排队模型详细参数

参数类型	参数符号	参数描述
输入参数	λ_i	第 i 个安检点的乘客到达率
	μ_j	第 j 个判图员的服务率
系统参数	m	所有安检点总数量
	c	集中判图中心的判图员数量
性能指标系统利用	W_q	平均排队时间
	L_q	平均队列长度
	ρ	系统整体利用率

2.2 排队网络模型优化目标

基于排队理论的集中判图模型优化，主要围绕以下 3 个目标展开。

- (1) 最小化平均等待时长，包括乘客在安检点的等待时间和图像经过判图员判断的排队时间。
- (2) 在固定的资源条件下，尽可能提高系统单位时间内处理判图任务的数量。
- (3) 平衡判图员工作量，避免某些判图员特别繁忙而其他判图员闲置，实现多个车站间的负载均衡。集中判图系统通过动态任务分配，平衡多名判图员的判图工作，达到工作量的削峰填谷目的。

3 实验设计

为量化基于排队理论的集中判图模式的系统整体利用率，设计了一个对比仿真实验，通过数学模型和随机仿真，验证地铁安检场景的集中判图模式在减少乘客等待时间、提高系统吞吐量等方面的优势。

3.1 实验目标

本仿真实验通过模拟地铁多个车站的安检任务，采用集中判图模式，评估集中判图模式在不同客流量和不同运行条件下的性能，验证基于排队理论构建模型的有效性，通过离散事件仿真，对比传统分散判图模式与集中判图模式在相同客流条件下的 3 个关键性能指标，包括平均排队时间、平均队列长度、系统整体利用率。

3.2 仿真模型构建

基于排队理论，为传统分散判图和集中判图模型分别构建了仿真模型。

(1) 传统分散判图模型 (M/M/1)

该模型被视为多个独立的 M/M/1 队列。每个安检点被视为一个单独的服务台。乘客到达地铁站过安检服从参数为 λ_i 的泊松过程。每个判图员的服务时间服从参数为 μ 的负指数分布，乘客队列容量无限。

(2) 集中判图模型 (M/M/N)

该模型是一个集中的 M/M/N 队列。所有 m 个安检点的判图任务汇聚到一个中央队列，由 c 名判图员组成的资源池共同处理。总到达率为各安检点到达率之和，仍服从泊松分布。每位判图员的服务时间仍服从参数为 μ 的负指数分布。判图任务分配采用先到先服务 (FCFS) 的排队规则和负载均衡策略。

3.3 参数设置

实验模拟了一个判图室拥有 6 个车站、共计 15 个安检点 ($m=15$)。仿真实验参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真实验参数设置

参数	符号	取值	说明
安检点总数	m	15	6 个车站 共计 15 个安检点
总到达率	λ	235 人/min	模拟高峰客流
服务率	μ	12 人/min	基于实际判图速度
传统模式判图员数	$c_{\text{traditional}}$	15	固定分配
集中模式判图员数	c_{central}	11	资源共享

客流在每个安检点的到达率不均匀，以模拟站点客流不均衡性。总到达率 $\lambda=235$ 人/min。基于实际数据，设定每位判图员的平均服务率 $\mu=12$ 人/min。传统模式：每个安检点配置 1 名判图员，共 $c=15$ 名。集中模式通过资源共享和负载均衡，判图员总数设置根据 M/M/N 模型，计算 95% 的判图任务在队列中的等待时间 W_q 不超过 3 min 得到 $c=11$ 名（优化率约 26.7%），组成共享资源池。每次仿真运行 480 min（8 h），包含早高峰的客流变化，预热期为 30 min，以消除初始状态影响。重复运行 100 次取平均值，以保证结果的统计显著性。

4 实验分析

4.1 动态性能仿真

为了更直观地展示两种模式在应对客流高峰时的差异，选取客流量最大的车站 A，绘制了在仿真周期内的排队长度变化，如图 3 所示。X 轴的仿真时间从 6:00—14:00，共计 8 h 工作周期。Y 轴排队长度（人），范围从 0~50 人，刻度间隔为 5 人。图 3 中，传统模式曲线在客流早高峰期间（7:00—9:00）排队人数持续处于高位（超过 40 人），并且排队长度曲线升高迅速，表明排队人数急剧增加，并且波动剧烈。即使在早高峰过后（9:00—11:00）排队人数，维持在 20~30 人，回落缓慢。午高峰期间（11:00—13:00）再次出现排队长度增加情况，排队长度超过 40 人。在早午高峰期，表现出明显的排队数量波动和长时间排队。

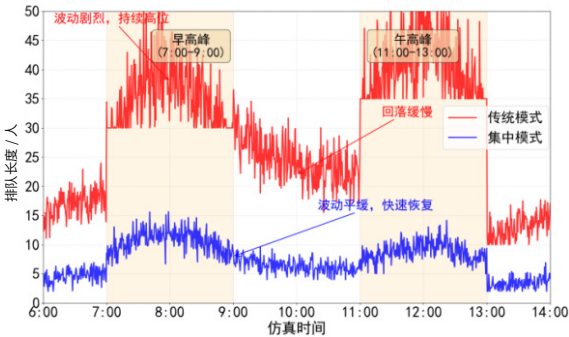


图 3 车站 A 两种模式的排队长度动态变化对比

图 3 中，集中模式曲线在早高峰期间（7:00—9:00）人

数维持在 5~10 人,排队长度有小幅上升,早高峰过后(9:00—11:00)排队人数回落到正常水平(4~6 人)。午高峰期间(11:00—13:00)虽然出现排队人数的小高峰,但排队人数仍在合理范围内(5~8 人),整体表现为波动平缓,高峰排队人数快速降低。

从图 3 中曲线的波动程度以及曲线的数值表明,集中判图模式有更强的系统稳定性和抗拥堵能力。集中判图模式通过多车站间的资源分配,能应对局部高峰,防止队列的剧烈波动和长时间持续。在传统模式下,排队数量高的车站一旦形成,由于判图人员数量及资源固定,很难快速减少排队人数。

4.2 关键性能指标对比分析

通过仿真运行后,我们得到了两种模式下的关键性能指标,如表 3 所示。

表 3 两种判图模式关键性能指标对比

判图模式	系统平均等待时间 W_q/min	系统平均排队长度 $L_q/\text{人数}$	判图人员平均利用率 ρ	判图人员利用率标准差	系统整体吞吐量 $/(\text{人} \cdot \text{min}^{-1})$
传统分散模式	8.42	132.5	78.60%	0.31	228.7
集中判图模式	2.35	36.8	89.20%	0.04	233.1
提升幅度	降低 72.1%	降低 72.2%	提升 13.5%	降低 87.1%	提升 1.9%

从表 3 的关键性能指标看出,在动态性能仿真实验使用的 15 个安检点中,集中判图模式下系统平均等待时间和系统平均排队长度都比传统模式降低约 72%。这表明集中判图模式在多车站间,通过资源集中调度,协同判图人员,能更有效地解决客流量不均导致的局部排队等待。

在集中判图的模式下判图员利用率的标准差降幅明显,达到了 87.1%,判图人员平均利用率提升了 13.5%。集中判图模式能消除判图人员工作量不均衡问题,能实现车站间判图任务的削峰填谷。

集中判图模式下判图人员数量从 15 人减至 11 人,在保证服务质量提升的同时,体现集中判图模式能有效地降低人员数量,进一步降低人力成本。

5 总结与展望

本文在集中判图模式下构建了 M/M/N 排队网络,实现跨车站的判图资源共享和负载均衡,实验使用了 6 个车站 15 个安检点的大规模仿真。最后的结果表明在平均等待时间、排队长度、系统稳定性和人力资源效率等关键指标上显著优于传统模式。实验结果为地铁的运营采用集中判图模式提供实验依据和理论支持。

参考文献:

[1] 秦柳.集中判图技术在城市轨道交通安检系统中的应用[J].

铁路通信信号工程技术,2023,20(9):66-70.
[2] 刘卫华,王蓉,胡配雨,等.基于深度学习的 X 光安检违禁物品检测[J].中国人民公安大学学报(自然科学版),2025,31(2): 59-67.
[3] 董佳鑫,罗婷,李根,等.基于改进 YOLOv8s 的 X 射线安检图像违禁品检测方法[J].激光与光电子学进展,2024,61(22): 268-279.
[4] 张丽新,刘筠,邵雅琪.基于安全和任务等级模型的异构集中判图系统[J].民航学报,2023,7(5):63-67.
[5] 熊晓锋,金兆远,张峥嵘.城市轨道交通安检系统智能判图模式研究与设计[J].都市快轨交通,2024,37(3):64-68.
[6] 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.
[7] 黄慧,李剑剑,甘建文.安检智能集中判图系统在南宁市城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J].城市轨道交通研究,2023,26(2): 146-148.
[8] 韩骁,王多龙,庄金翠.基于排队论模型的天津地铁刘园站安检系统优化研究[J].交通世界,2020(10):127-129.
[9] 史跃亚,张美蕙,孙唯,等.机场安检排队系统仿真优化研究[J].计算机仿真,2025,42(5):27-31.
[10] 付保明,张宁,石琦玉.城市轨道交通安检集中判图人员配置研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(6):251-255.
[11] 赵天可,杨栋,王椿钧,等.基于排队系统模型的铁路旅客车站安检集中判图作业模式研究[J].中国铁路,2024(11): 152-158.

【作者简介】

陈帅(1990—),男,山东青岛人,硕士,工程师,研究方向:软件工程。
蒯天震(1992—),男,山东德州人,硕士,高级工程师、研发经理,研究方向:软件工程、人工智能。
范光涛(1982—),男,山东青岛人,硕士,研发经理,研究方向:软件架构设计。
卢存桥(1996—),男,山东日照人,本科,研发工程师,研究方向:软件工程。

(收稿日期:2025-11-13 修回日期:2026-07-09)