

基于排队论的安检集中判图调度控制系统

唐雯¹, 杨栋¹, 段杰鹏², 王建超¹, 王椿钧²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所, 北京 100081;

2. 北京经纬信息技术有限公司, 北京 100081)

摘要: 安全检查是保障铁路客运站场安全的重要措施; 为解决安检判图作业中资源浪费的问题, 深入剖析安检集中判图的全套作业流程, 设计并搭建了安检集中判图调度控制系统; 依托排队论模型、包一图对应、目标检测技术, 针对集中判图调度控制策略、包裹快速定位方法及智能辅助判图分析服务展开了深入研究; 系统遵循“先到先判图”准则, 以保障安检作业效率为基础, 通过分析旅客到达人数来合理确定判图员配置数量, 力求成本最小化; 经仿真实验与现场实测双重验证, 结果显示: 在切实满足安检判图及处置作业实时性需求的同时, 该系统可有效减少旅客安检等待时间, 并削减了80%的总体成本; 该研究可为促进安检作业模式和管理方式升级提供理论基础, 从而实现客运安检的提质增效。

关键词: 安全检查; 集中判图; 排队论; 调度控制系统; 包一图对应

Centralized Image Recognition Schedule Control System of Security Inspection Based on Queuing Theory

TANG Wen¹, YANG Dong¹, DUAN Jiepeng², WANG Jianchao¹, WANG Chunjun²

(1. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd.,

Beijing 100081, China;

2. Beijing Jingwei Information Technologies Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Safety inspection is an important measure to ensure the safety of railway stations. In order to solve resource waste in security inspection image recognition operation, and deeply analyze the entire operation process of centralized security inspection image recognition, a centralized security inspection image recognition schedule control system was designed and constructed. Based on the queuing theory model, package-image association, and object detection, in-depth research was carried out on the centralized image recognition scheduling control strategy, the rapid package positioning method, and the intelligent assisted image analysis service. The system follows the principle of “first come, first judge” to ensure the efficiency of security inspection operations. By analyzing the number of arriving passengers, the appropriate number of image judges was reasonably determined to minimize costs. Through dual verification by simulation experiments and on-site measurements, the results show that meeting the real-time requirements for security inspection and disposal operations, the system can effectively reduce the waiting time for passenger security checks, and the overall cost is reduced by 80%. This research can provide a theoretical basis for promoting the upgrading of security inspection operation modes and management methods, thus improving quality and efficiency in passenger security inspection.

Keywords: passenger security inspection; centralized image recognition; queuing theory; schedule control system; package-image correspondence

0 引言

在旅客进站时对旅客进行安全检查是保障铁路客运

站场安全的重要措施, 它主要依托安检仪检测旅客行李并成像, 安检判图人员根据生成的安检 X 光图像判断并查堵禁限物品, 可以使旅客在公共区域免于安全威

收稿日期:2024-11-15; 修回日期:2024-12-26。

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划合同(N2024X025)。

作者简介:唐雯(1993-),女,硕士,助理研究员。

引用格式:唐雯,杨栋,段杰鹏,等. 基于排队论的安检集中判图调度控制系统[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8):152-159, 178.

胁^[1-2]。对于传统的安检模式, 无论该车站特定时段开行列车的数量多寡, 亦或是当下是否有旅客集中进站, 都至少需要启动一个安检通道并配备相应的安检作业人员。在客流低谷时段, 大量人力、设备资源处于闲置状态, 造成了严重的资源浪费现象。相较之下, 安检集中判图作为一种新兴的安检作业模式应运而生, 判图人员可以在集中判图室对不同安检通道安检仪产生的 X 光图像进行网络判图, 远程识别图像中的禁限物品。借助系统对安检判图任务予以调度控制并分配至判图终端, 通过判图任务的均衡分配, 达到铁路客运安检作业提质增效的目的^[3]。

目前, 铁路安检领域已经开始了集中判图作业模式的探讨与研究。文献 [4] 在铁路客运安检系统设计中提出了原始 X 光数据标准化接入协议, 使得不同品牌、不同型号安检仪可以统一接入系统并进行数据交互, 为安检集中判图调度控制系统的实现提供了技术基础。文献 [5] 提出的基于智能调度技术的安检集中判图调度控制系统, 对集中判图作业模式下值机员排班计划进行了讨论。此外, 国内地铁安检^[6]和民航安检也开展了集中判图的研究与应用工作。在重庆单轨 3 号线 [7] 应用的智慧安检方案中包含了集中判图功能, 实现网络可达范围内判图站之间判图任务的灵活调度与平衡分配。文献 [8] 提出的基于安全和任务等级模型的异构机场货运安检集中判图系统, 实现了更加快速、精准地货物图像判图。在智能辅助判图技术方面, 随着近年来深度学习的崛起, 图像分析广泛用于安检禁限物品识别领域, 借助目标检测算法辅助识别各类禁限物品。文献 [9] 在 YoloV5 模型基础上, 研究了一种可以降低计算量、防止过拟合的多尺度融合模块, 提升了对安检 X 光图像中危险物品全局信息和边缘特征的表达, 提高了安检辅助判图精度。文献 [10] 探究了 RetinaNet 与 Faster-RCNN 方法之间的差异性, 提出了单阶段密集图像检测网络, 该网络在保证检测速度的前提下, 可以提高安检 X 光中禁限物品的检测精度。

然而, 现有研究仍存在以下问题: 1) 在对值机员进行排班作业时, 仅仅考虑当前客流量的需求, 没有从宏观角度考虑整体的系统成本, 造成资源浪费; 2) 在远程判图情况下, 判图人员发现禁限物品后, 与开包处置人员沟通耗费时间过长, 会严重分散其值机判图识别禁限物品的注意力, 导致误判或漏判, 影响安检作业速度与质量^[11]; 3) 相比于传统的作业模式, 集中判图模式中判图人员的数量大概率会减少, 但由于铁路旅客对于客运安检工作速度的要求普遍较高, 工作模式的转变无疑给判图员增加了工作强度与压力。因此, 研发一个在不影响安检作业工作效率的前提下考虑系统成本的安检集中判图调度控制系统十分必要。

综上, 本文的安检集中判图调度控制系统: 1) 综合考虑旅客排队时间成本、判图人员成本等因素, 对安检判图作业任务进行合理分配, 提高铁路客运安检作业的整体经济性; 2) 当判图员发现含有禁限物品的包裹时, 可及时将“问题包裹”实物图片与 X 光图像一同实时反馈给处置人员进行开包, 减少判图员与处置员的远程沟通时间; 3) 借助智能辅助判图技术对 X 光图像进行禁限物品辅助识别, 从而减轻判图员的工作压力。

1 系统设计

1.1 总体架构设计

集中判图调度控制系统可对系统内各安检通道的判图任务与判图人员的匹配关系进行调度分配。系统涉及安检通道、控制中心及判图终端 3 个物理位置, 其总体架构如图 1 所示。安检通道中的安检仪产生 X 光图像后将图像推送至控制中心的判图任务分配服务, 通过任务分配服务将判图任务分配至位于集中判图室空闲的判图终端。1) 若开启智能辅助分析功能, 判图任务分配服务在推送给判图终端之前会将图像传送给分析服务进行智能辅助分析, 分析服务返回智能分析结果后, 判图任务分配服务将安检 X 光图像与智能分析结果一同推送给判图终端; 2) 若不开启辅助分析功能, 任务分配服务将判图任务直接分配至空闲的判图终端。之后, 判图人员对安检 X 光图像进行集中判图, 得出的判图结果通过判图任务分配服务反馈至位于安检通道的处置台处, 处置员可结合系统返回的判图结果与安检仪推送的包裹图像进行开包与禁限物品的处置。

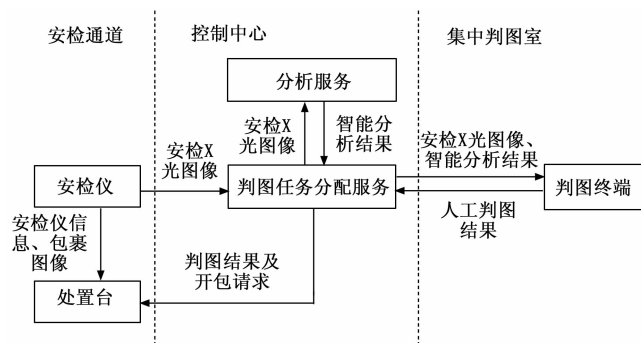


图 1 安检集中判图调度控制系统总体架构图

1.2 核心模块

1) 安检仪: 可实时向控制中心推送安检 X 光图像, 可向处置台推送安检仪相关信息, 用于包图对应计算。

2) 判图任务分配服务: 可接收安检仪发送的安检 X 光图像, 并将数据发送给空闲的判图终端。可向分析服务器发送安检 X 光图像, 可接收分析服务发送的智能分析结果、判图终端发送的人工判图结果, 可向对应的处置台发送开包请求。

3) 判图终端：可进行安检 X 光图像、智能分析结果展示，用于判图员的判图操作。支持判图交互操作，可向控制中心对人工判图结果进行反馈。

4) 分析服务：可接收安检原始 X 光图像，通过目标检测技术进行禁限物品识别，从而辅助判图人员进行判图作业。

5) 处置台：可接收开包请求，展示需要开包的包裹图像与安检 X 光图像及禁限物品的位置、类别，方便处置人员开包。

2 系统实现

安检集中判图调度控制系统由判图任务分配服务、判图终端、分析服务、处置台软件等多部分协同构成。系统各部分均采用 Java 语言开发，运行于 JDK 环境，系统技术架构如图 2 所示。

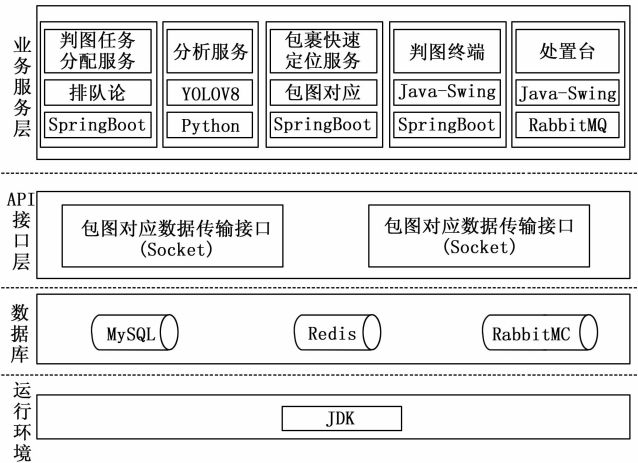


图 2 系统技术架构图

技术架构的具体实现方法如下：1) 基于排队论模型的判图任务分配服务采用 SpringBoot 整合 Redis 和 RabbitMQ 的方式实现，Redis 负责存储各安检通道信息、各集中判图终端信息，RabbitMQ 负责存储各通道实时安检 X 光图像；2) 基于 YOLOV8 禁限物品智能识别算法的分析服务通过 Python 语言实现；3) 处置台中的包图对应服务采用 SpringBoot 架构实现，前端采用 H5+jQuery+CSS 实现，数据存储采用 MySQL 数据库；4) 判图终端前端采用 SpringBoot 整合 Java-Swing，后端通过 SpringBoot 整合 RabbitMQ 实现异步消息处理。之后将各部分进行系统集成与整合：不同型号安检仪的 X 光图像与系统交互的方法基于 TCP/IP 协议设计，采用长连接的方式；分析服务、处置台、判图终端等系统其他部分的数据传输接口协议通过 Socket 通信实现，保证数据传输性能。系统界面如图 3 所示。

安检集中判图调度控制系统实现的关键技术包括基于排队论的集中判图策略、基于“包一图对应”的包裹



图 3 系统界面

快速定位方法和基于 YoloV8 的智能辅助判图分析服务。

2.1 基于排队论的集中判图策略

排队论作为一门成熟的运筹学分支，在众多领域有着广泛应用与深入研究。在交通领域，可被用于优化机场值机^[12]、车站安检通道^[13]的排队流程，以减少旅客等待时间。

安检集中判图调度控制系统的任务分配服务采用基于排队理论模型的集中判图策略，部署于控制中心，可以将各安检通道产生的判图任务分配至空闲的判图终端，其过程如图 4 所示。

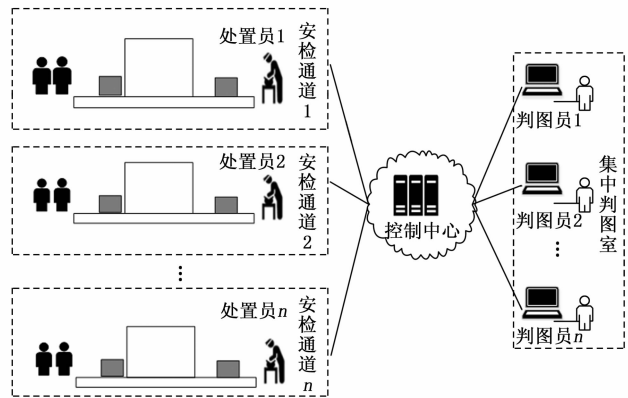


图 4 集中判图流程示意图

在集中判图作业模式中，旅客安检的等待时间为网络传输图像时间、判图任务排队时间、判图时间与包裹处置时间之和。若判图员岗位设置的数量少于安检通道的数量，判图任务排队时长会发生变化。对于每个判图任务，网络传输图像时间、判图时间、包裹中出现禁限物品需要开包处置的概率与时间可理解为相对固定的，因此，判图任务排队时间的变化是导致旅客安检等待时间变化的主要因素，同时也会影响整个系统的成本。为达到优化成本、减员增效的目的，需对判图岗位开放数量、任务排队时间、系统成本等参数建立模型。

2.1.1 判图任务的排队分析

判图任务的产生和集中判图作业过程可组成一个 $M/M/s/\infty$ 的多服务台等待制排队系统, 如图 5 所示。

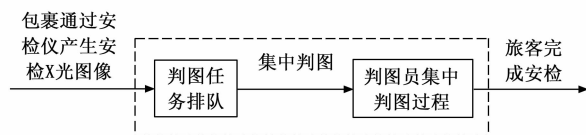


图 5 判图任务排队模型

排队过程的要素包括产生待判断 X 光图像的过程、判图排队规则、判图员集中判图过程。

1) 产生待判断 X 光图像的过程。旅客到达安检通道将行李放置于安检仪传送带后, 传送带将行李传送到 X 光扫描位置后即可生成 X 光图像。在各个不相交的时间区间内, 旅客到达各安检通道是相互独立的事件, 可理解成为一个服从泊松分布的随机动态过程^[14]。

2) 判图排队规则。采用先到先判图的规则, 安检仪产生 X 光图像传送至控制中心时, 若有空闲的判图终端, 则可以直接进行判图; 反之则需排队等待, 在判图服务完成后才可完成安检。

3) 判图员集中判图。对于每一位判图员, 其工作时间由判图岗位的开放数量决定。

2.1.2 判图岗位开放数量模型

1) 模型构建:

在系统中, 判图岗位设置的数量不会多于正在工作的安检仪数量。判图员排班模型的目标函数为待安检旅客等待的时间成本与判图工作总成本之和, 判图员设置的数量 s 可根据目标函数取最小而求出。另外, 总成本的支出也应包括处置人员成本、安检设备损耗成本等, 但无论是集中判图还是传统判图模式, 上述部分成本是相同的, 因此构建该模型时暂不考虑。

安检旅客等待的时间成本为旅客的平均排队时长乘以单位时间内的旅客等待成本, 判图工作总成本为判图员数量乘以判图员单位时间内的的工作成本。判图员排班模型为:

$$\min f(s) = b_1 s + b_2 L_s \quad (1)$$

式中, b_1 为判图员单位时间内的的工作成本, b_2 为单位时间内的旅客等待成本, L_s 为旅客的平均排队时间。

2) 参数确定:

(1) 排队系统参数: 根据上节分析, 判图任务的排队过程可建立为 $M/M/s$ 的多判图终端排队模型。假设判图任务的产生率为 λ , 每个判图终端的服务率为 μ , 正在判图的安检判图终端个数为 s , 则系统的服务强度为:

$$\rho_s = \frac{\lambda}{s\mu} \quad (2)$$

判图终端空闲的概率为:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!(1-\rho_s)} \right]^{-1} \quad (3)$$

旅客到达安检通道需要等待的概率为:

$$C(s, \rho) = \frac{\rho^s}{s!(1-\rho_s)} P_0 \quad (4)$$

旅客的平均排队长度为:

$$Lq = C(s, \rho) \frac{\rho s}{1-\rho_s} \quad (5)$$

旅客的平均排队时间为:

$$Wq = \frac{Lq}{\lambda} \quad (6)$$

(2) 判图工作成本: 通过判图员工资进行计算:

$$b_1 = \frac{SL_w}{T_w} \quad (7)$$

式中, SL_w 为判图员人均年收入, T_w 为判图员年工作小时数。

(3) 旅客等待成本: 通过旅客的平均收入进行计算:

$$b_2 = \frac{SL}{T} \quad (8)$$

式中, SL 为旅客人均年收入, T 为年小时数。3) 模型求解:

为求 $f(s)$ 的最小值, 由于判图岗位开放的数量 s 为整数, 则有:

$$\begin{cases} f(s) \leq f(s+1) \\ f(s) \leq f(s-1) \end{cases} \quad (9)$$

即:

$$\begin{cases} b_1 s + b_2 L_s \leq b_1 (s+1) + b_2 L_{s+1} \\ b_1 s + b_2 L_s \leq b_1 (s-1) + b_2 L_{s-1} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 基于“包一图对应”的包裹快速定位方法

“包一图对应”技术旨在精准关联旅客包裹与其安检 X 光图像, 基于简单特征匹配, 利用包裹经安检仪扫描生成 X 光图像的时间与摄像机拍摄包裹的实物图片时间进行关联, 实现禁限物品的快速定位。

当安检 X 光图像进行集中判图后, 对于含有禁限物品的包裹, 需向该包裹安检通道的处置台返回处置结果。通过计算, 结合安检仪向处置台推送的实物包裹信息, 使每一个过机包裹与安检仪生成的 X 光图像逐一进行“包一图对应”。对于含有禁限物品的包裹, 系统向处置台推送的实物包裹图片, 可使开包员快速定位包裹在传送带上的具体位置, 从而实现精准开包; 系统向处置台推送的判图结果, 包括与安检 X 光图像及禁限物品的位置、类别信息, 可方便开包人员对禁限物品进行处置、登记工作。

基于“包一图对应”的包裹快速定位方法部署于安检通道的处置台处, 从安检集中判图调度控制系统获取最新的软件包和配置参数, 设计如图 6 所示。

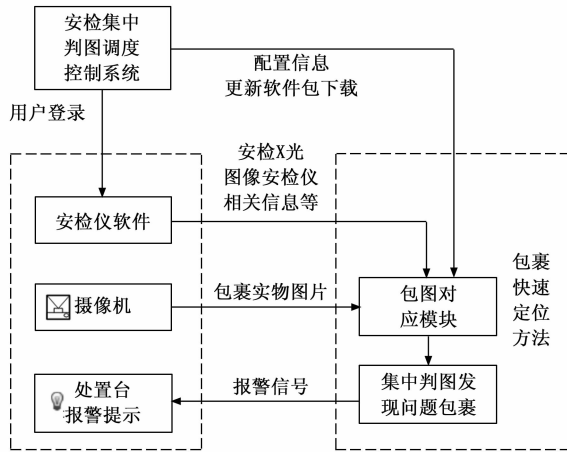


图 6 包裹快速定位方法

安检仪软件向包图对应模块推送安检 X 光图像、生成 X 光图像的时间点 t_1 、包裹出铅门帘时间 t_2 、传送带速度 v 等信息, 摄像机向模块推送包裹实物图片, 之后进行“包—图对应”计算。

假设安检仪结束扫描包裹到卷帘门的距离为 L_1 , 则:

$$L_1 = (t_2 - t_1) \times v \quad (11)$$

扫描生成 X 光图像的时间 t_1 与摄像机拍摄包裹的实物图片时间 t_2 的关系为:

$$t_2 = t_1 + \frac{L_1}{v} \quad (12)$$

2.3 基于 YOLOV8 的智能辅助判图分析服务

在使用集中判图调度控制系统时, 可开启智能判图辅助功能。当安检 X 光图像传输至判图员时, 系统可以同步提示判图员图像中是否含有禁限物品及禁限物品的位置与类别, 从而减轻判图员的工作强度和压力。

2.3.1 YoloV8 基础网络

随着深度学习技术的蓬勃发展以及安检 x 射线图像数据集的不断扩大, 禁限品识别技术逐步从传统的识别模式转变为深度学习^[15-16]。单阶段目标检测算法 YOLO (YOLO, you only look once) 从问世开始就受到了各界学者的广泛关注, 并一直不断优化^[17-19]。Ultralytics 团队在 2023 年提出的 YoloV8, 是在之前 YOLO 算法的基础上对骨干网络、检测头和损失函数上进行改进, 使算法可以在各种硬件平台上运行, 更加适用于工程实践^[20], 是目前效果较好、模型轻量化的目标检测算法。YoloV8 基础网络可分为 input、backbone、neck、head 共 4 部分, 网络结构如图 7 所示。

其中, input 输入端采用了马赛克数据增强、自适应锚框计算、自适应图片缩放技术; backbone 骨干网络采用跨阶段局部网络结构, 使用了 YoloV5 中的空间金字塔池化结构模块, 并使用了轻量化的 C2f 网络;

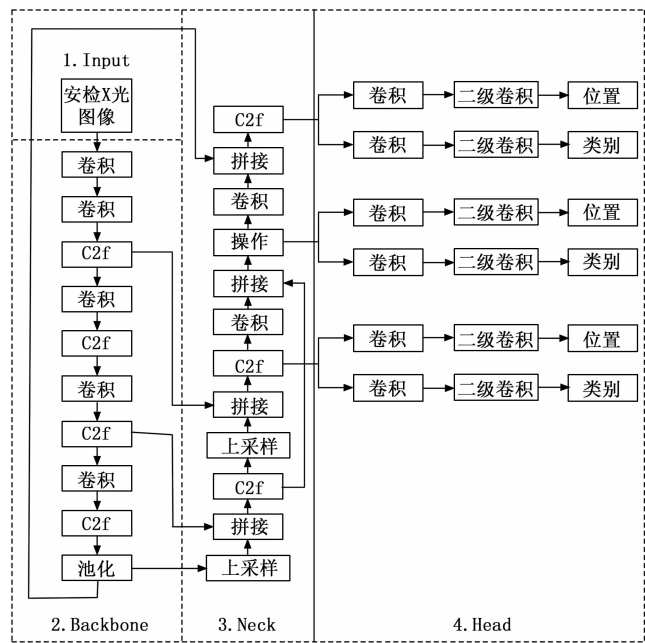


图 7 YoloV8 网络结构图

neck 部分采用了路径聚合网络和特征金字塔网络的思想, 以增强网络对于不同缩放尺度对象特征融合的能力; head 部分采用了无锚点解耦检测头, 进行损失计算和目标检测框筛选, 通过双解耦头分别输出。

2.3.2 算法实现

基于 YoloV8 的智能辅助判图分析服务的训练过程如下:

1) 数据采集: 根据需求, 于各客运车站收集了含有禁限物品的图片及标注 24 204 张。

2) 违禁品类别: 选择了现场最常见的 28 类禁限品, 包括 bottle (水瓶)、scissor (剪刀)、powerbank (充电宝)、pressure (压力罐)、lighter (打火机)、knife (小刀) 等。

3) 数据集特点: 图像包含单种、多种违禁物品, 背景涵盖行李箱、背包等不同的包裹类型, 干扰物也相对复杂。

4) 模型及参数设置: 系统采用了 YoloV8 公开模型中的 YoloV8n.pt, Batch 大小: 8, Epoch 训练次数: 300, 其中训练集 19 384 张, 测试集 4 820 张。

5) 试验结果评价指标: 平均准确率 mAP (mean average precision)。平均准确率 mAP 的值越高, 代表模型识别目标的能力越好, 其计算公式为:

$$mAP = \frac{1}{classes} \sum_{i=1}^{classes} \int_0^1 P(R) d(R) \quad (13)$$

式中, $classes$ 为违禁品的类别数。

3 实验结果分析

采用仿真实验和现场实验相结合的方式进行测试

分析:

- 1) 仿真实验以济郑高速铁路(济南西站—郑州东站)郑州段中 4 个车站的实际客流为例,对判图任务的调度分配进行建模分析,综合分析该系统对于旅客等待时长及整体经济性方面的效果;
- 2) 现场实验是在原型系统搭建完成后,测试其在数据传输、禁限物品识别等方面的现场应用效果。

3.1 仿真模拟

统计济郑高速铁路郑州段中滑浚站、南乐站、内黄站、卫辉南站 4 个车站的实际客流量,根据各站相关客流数据进行拟合。这 4 个车站的进站口都只有 1 个安检通道,将集中判图系统接入各站安检仪,并基于排队论模型的集中判图策略进行仿真计算。

1) 判图任务的产生率 λ 。旅客到达安检区域的过程、旅客离开安检区域的过程均服从泊松分布,两个安检旅客的间隔时间服从指数分布^[14]。判图任务的产生率等同于系统接入安检通道的旅客平均到达率。

分别选取南乐站、内黄站、卫辉南站、滑浚站连续几日的上车人数数据,按小时为单位计算不同时段判图任务的产生率。在集中判图系统中,不同时段判图任务

的产生数量等同于该时段中 4 个车站旅客到达数量之和。表 1 为各时段 4 个车站旅客到达数量总数,可计算集中判图系统判图任务的产生率。

2) 判图员的平均判图效率 μ 。对车站某时段若干判图员 4 h 内的判图工作进行记录,统计出判图员的判图时间通常为 3~7 s。由于相邻 2 个旅客的服务间隔时间服从指数分布,此次仿真将判图人员平均判图效率取整得到 $\mu=9$ 张/min、 $\mu=11$ 张/min。

3) 费用成本为判图工作成本和旅客等待成本之和。对 4 个车站判图员的收入情况及排班时长进行问询,推算出判图工作成本 $b_1=23.68$ 元/h。根据 2023 年中国人均收入情况,估算旅客等待成本 $b_2=19.6$ 元/h。

4) 仿真结果。分别选取 4 个车站 9 天的数据进行实验,对既有安检模式与集中判图模式分别进行仿真,数据如表 2 所示。

(1) 既有安检模式。既有安检模式中每个安检通道均配备一个判图员,判图人员的工作时长按照车站单位小时内是否有上车人员计算,取整数。仿真结果如下,判图任务的排队时间如表 3 所示,系统的成本如表 4 所示。表 3 中的 2~5 行分别为滑浚站、南乐站、内黄站、

表 1 各时段 4 个车站旅客到达总数量

日期 时段	2024-01-09	2024-01-10	2024-01-11	2024-01-12	2024-01-13	2024-01-14	2024-01-15	2024-01-16	2024-01-17
7 时	2	2	36	44	59	61	55	51	33
8 时	229	196	179	209	285	239	267	220	87
9 时	263	238	350	368	506	384	377	406	190
10 时	157	205	155	170	208	158	197	212	62
11 时	151	202	216	238	236	210	223	60	95
12 时	101	96	119	146	111	101	152	176	39
13 时	184	64	128	145	117	134	121	111	65
14 时	121	0	78	100	124	138	117	108	35
15 时	114	58	78	106	84	46	36	79	10
16 时	300	497	437	601	495	879	442	515	96
17 时	94	84	118	125	73	83	54	80	23
18 时	180	4	5	8	10	4	2	2	0
19 时	20	141	137	193	102	279	97	122	12
20 时	82	7	22	27	17	28	17	9	6
21 时	5	13	42	52	52	113	50	33	6
22 时	0	6	13	19	4	26	6	13	5
总计/人	2 003	1 813	2 113	2 551	2 483	2 883	2 213	2 197	764

表 2 各车站到达旅客总数量

日期 站名	2024-01-09	2024-01-10	2024-01-11	2024-01-12	2024-01-13	2024-01-14	2024-01-15	2024-01-16	2024-01-17	总计/人
滑浚	1 335	1 274	1 343	1 630	1 602	1 900	1 489	1 341	437	12 351
南乐	157	148	232	309	275	368	243	301	134	2 167
内黄	331	231	297	311	329	397	307	316	136	2 655
卫辉南	180	160	241	301	277	218	174	239	57	1 847

表 3 既有安检模式下判图任务的排队时间

日期 站名	2024-01-09	2024-01-10	2024-01-11	2024-01-12	2024-01-13	2024-01-14	2024-01-15	2024-01-16	2024-01-17	平均排队 时间/s
滑浚	2.126	3.997	3.163	5.128	6.291	377.278	3.741	3.889	0.869	45.165
南乐	0.389	0.452	0.341	0.519	0.481	0.743	0.39	0.524	0.242	0.454
内黄	0.558	0.748	0.665	0.858	0.829	1.332	0.751	0.776	0.248	0.752
卫辉南	6.362	6.363	6.436	6.615	6.511	6.35	6.297	6.411	6.109	6.384

卫辉南站，有安检模式下的判图任务的排队时间，其各站 9 天数据的平均排队时间分别为 45.165，0.454，0.752，6.384 s。4 个车站的平均排队时间为 13.26 s，判图员人数为 4 人，4 个车站的目标函数平均总成本为 4 490.92 元。

表 4 既有安检模式下系统平均成本

成本 车站名	等待成本/元	判图人员成本/元	总成本/元
滑浚	3 037.07	378.88	3 415.95
南乐	5.35	378.88	384.23
内黄	10.87	331.52	342.39
卫辉南	64.19	284.16	348.35
总计			4 490.92

(2) 集中判图模式。

此仿真中取平均判图效率 $\mu=9$ 张/min、 $\mu=11$ 张/min，基于目标函数的最小值，得到相应的判图员最优排班数量。在不同到达率下的安检最佳判图员数量和判图任务的排队时间如图 8、图 9 所示。

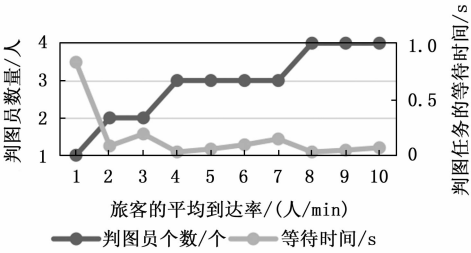


图 8 $\mu=9$ 人/min 时，不同到达率下的最佳判图员数量和判图任务的排队时间

从图中可以看出，随着旅客到达率的增加，当设置的判图员数量不变时，判图任务的排队等待时间呈增长趋势，符合实际情况。

对集中判图模式进行计算，在集中判图模式下，分别对判图员人数 s 为 2 和 3 进行计算，判图任务的排队

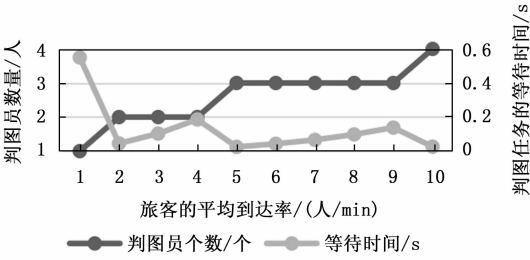


图 9 $\mu=11$ 人/min 时，不同到达率下的最佳判图员数量和判图任务的排队时间

时间 Wq 和成本 $f(s)$ 如表 5、表 6 所示。当判图员为两人时，判图任务的排队时间为 0.974 s，总成本为 858.62 元。判图人数为 3 人时，判图任务的排队时间为 0.098 s，总成本为 1 146.78 元。

综上，在集中判图模式下，判图任务的平均排队时间均小于 1 s，与既有作业模式下平均排队时间 13.26 s 相比，旅客体验感会得到大幅提升。在经济效益层面，在判图人数为 2 时，平均成本为 858.62 元，仅为既有作业模式下 4 490.92 元的 20%。诚然，判图员人数的减少意味着人均工作量的增加，在实际应用中应考虑作业人员班组设定、设备使用成本等多方面因素。

3.2 现场实验

现场实验选用的安检仪型号是 100100D，对其进行相应的升级改造，使其具备接入系统的条件。在新乡南站建立集中判图室，启用两个判图工作站，完成对新乡南站、卫辉南站、内黄站共计 3 个安检通道的实时判图任务。

通过现场数据统计可知，集中判图模式下单个包裹的判图总时长约为 7.5 s，可计算得 $\mu=8$ 张/min，系统平均判图任务的产生率 $\lambda=4$ 张/min，带入排队论模型求解得到最优判图人数 $s=2$ 。若需开包处置，旅客的安检总时长约为 30 s。

表 5 集中判图模式下判图任务的排队时间

日期 判图人数	2024-01-09	2024-01-10	2024-01-11	2024-01-12	2024-01-13	2024-01-14	2024-01-15	2024-01-16	2024-01-17	平均排队 时间/s
2	0.248	0.631	0.479	0.936	0.863	4.236	0.55	0.747	0.075	0.974
3	0.02	0.075	0.053	0.02	0.108	0.446	0.061	0.092	0.004	0.098

表 6 集中判图模式下系统平均成本

成本 判图人数	等待成本/元	判图人员成本/元	总成本/元
2	100.86	757.76	858.62
3	10.15	1 136.64	1 146.78

基于排队论的安检集中判图调度控制系统的现场应用部署如图 10 所示,判图终端和调度服务器均通过接入交换机和防火墙接入安全生产网;安检通道的摄像头、安检仪、处置台也通过接入交换机和防火墙接入铁路安全生产网,以保证铁路客运安检工作的数据安全。

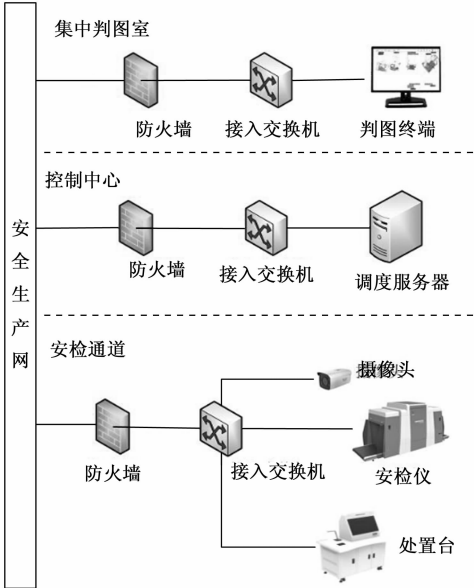


图 10 系统应用部署图

现场集中判图室里,在判图员左手边屏幕显示包裹实物图及其包图对应结果,右手边屏幕为两个视角的安检 X 光图像以及智能辅助的判图结果展示。在安检仪上方设有摄像机。当判图员发现禁限物品时,处置台处有报警提示,并显示包图对应结果,方便处置人员开包。

对系统关键指标进行实验,结果如下:1) 在集中判图室配置两名判图员可满足对于 3 个小型客运车站中 3 个安检通道的日常安检判图需求,同时需在每个通道配备 1 名处置人员。相比于传统作业模式中 3 个安检通道需要 3 名判图人员与 3 名处置人员,人员成本减少了 16.7%;2) 对于含有禁限物品的包裹,通过“包一图对应”计算,可实时向安检通道的处置台返回禁限物品及实物包裹信息,信息延迟约为 1 s,相对于开包处置 30 s 的时间,信息延迟基本不会影响旅客的安检体验;3) 对于 X 光图像的禁限物品识别,智能辅助的判图结果准确率均可达到 90% 以上,可大幅减轻判图人员的工作压力。

现场实验的结果表明,安检集中判图调度控制系统可满足现场安检判图作业对禁限物品的精准识别,同时满足了判图员与现场处置作业的无缝实时交互需求,实现了安检值机人员判图工作量的“削峰填谷”。

4 结束语

本文主要基于排队论设计并实现了安检集中判图调度控制系统,该系统打破了传统安检作业模式,为后续调整优化客运安检作业组织结构提供了技术基础。仿真实验表明,相比于既有安检模式,在判图员人数减少的前提下,旅客的安检等待时间也大幅减少,平均成本仅为既有作业模式下的 20%。系统在济郑高铁进行现场应用的结果表明,该集中判图系统在不影响旅客安检体验的情况下,解决了各安检点判图作业分配任务不均衡的问题,借助智能辅助分析判图可大幅减轻判图人员的工作强度。下一步将结合实际应用,考虑作业人员班组设定、设备使用成本等多方面因素,继续优化判图任务分配策略与人员排班策略,实现铁路客运安检作业的降本增效。

参考文献:

[1] 唐 雯, 吴兴华, 杨 栋, 等. 铁路客运安检查危系统在旅客服务与生产管控平台中的应用研究 [J]. 铁路计算机应用, 2021, 30 (6): 41-45.

[2] 戴贤春, 焦志恒, 李子华, 等. 铁路旅客安检系统现状及发展研究 [J]. 铁道技术监督, 2016, 44 (1): 1-5.

[3] YANG D, ZHU J, LI C, et al. How to reduce the number of inspectors: operation mode and modeling simulation of centralized image recognition in railway passenger security inspection [J]. Transportation Research Record, 2024, 2678 (12): 834-847.

[4] 张志科. 铁路旅客运输安全检查系统设计研究 [J]. 铁道运输与经济, 2023, 45 (8): 121-128.

[5] 杨 栋, 朱建生, 唐 雯. 基于智能调度技术的安检集中判图调度控制系统研究 [J]. 铁道运输与经济, 2023, 45 (10): 133-141.

[6] 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]. 都市轨道交通, 2024, 37 (3): 64-68.

[7] 陈宝军, 汤旻安. 智慧安检在重庆单轨 3 号线上的应用 [J]. 现代信息科技, 2021, 5 (22): 109-113.

[8] 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.

[9] 侯惠超. 基于 YOLO 算法的安检图像危险品检测方法研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.

[10] 杨子固. 基于深度学习的 X 光安检图像危险品识别方法研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.

(下转第 178 页)