文章编号：1003-1421(2026)02-0164-09
引用格式：郭喆，任洪权，李超，等. 基于数字孪生和BPMN的铁路智能客站数字化研究与应用[J]. 铁道运输与经济，2026，48(2)：164-172.
GUO Zhe，REN Hongquan，LI Chao，et al. Research and Application of Intelligent Railway Passenger Stations Based on Digital Twin and BPMN[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：164-172.

基于数字孪生和BPMN的铁路智能客站数字化研究与应用

郭　喆[1]，任洪权[2]，李　超[1]，黄建秋[2]，梁　博[1]

(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；2.京沪高速铁路股份有限公司 运输管理部，北京　100038)

摘　要：针对传统铁路客站运营管理中存在的动态响应滞后、多系统协同不足、服务效率受限等问题，本研究聚焦智能客站数字化转型，提出一种基于数字孪生技术和业务流程建模与标注(BPMN)相结合的智能客站数字化研究与应用框架。通过构建客站三维可视化数字孪生体，全面映射其物理设施、业务流程和实时状态，实现物理客站全要素的数字化映射与实时动态模拟；同时采用BPMN建模方法对客站关键业务流程进行优化重构。结合上海虹桥三维模型，研制了集孪生监控、全景仿真、运营推演、决策应对以及模型管理等功能于一体的智能客站全景平台。结果表明：提出的基于数字孪生和BPMN的智能客站三维平台实现了系统架构设计与功能试验验证，展示了该系统在铁路客站全景运营中的可行性，为铁路客站数字化转型提供了重要的架构指导与试验范例。

关键词：数字孪生；BPMN；智能客站；智能铁路；数字化转型；系统架构
中图分类号：U291.6　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250507005

Research and Application of Intelligent Railway Passenger Stations Based on Digital Twin and BPMN

GUO Zhe[1]，REN Hongquan[2]，LI Chao[1]，HUANG Jianqiu[2]，LIANG Bo[1]

(1. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Department of Transportation Management, Beijing-Shanghai High Speed Railway Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: Regarding the issues in traditional railway passenger station operations, such as delayed dynamic response, insufficient multi-system coordination, and limited service efficiency, this study focused on the digital transformation of intelligent railway passenger stations. It proposed a research and application framework based on digital twin technology and business process model and notation (BPMN). By building a 3D visual digital twin of the station, the framework fully mapped its physical infrastructure, business processes, and real-time operational status, enabling comprehensive digitization and real-time simulation of all elements of the station. BPMN was employed to optimize and reconstruct key operational workflows. By leveraging a 3D model of Shanghai Hongqiao Railway

收稿日期：2025-05-07
通信作者：李超(1983—)，男，湖南岳阳人，中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所研究员。
基金项目：京沪高速铁路股份有限公司科技研究项目(京沪科研-2024-7)

Station, a panoramic intelligent station platform was developed, integrating functions such as twin-based monitoring, panoramic simulation, operational deduction, decision-making support, and model management. The results demonstrate that the proposed intelligent 3D platform for railway stations based on digital twin and BPMN has achieved the system architecture design and function test verification, demonstrating the feasibility of this system in the panoramic operation of railway stations. It provides important architectural guidance and test examples for the digital transformation of railway stations.
Keywords: Digital Twin; BPMN; Intelligent Passenger Station; Intelligent Railway; Digital Transformation; System Architecture

0　引言

随着智能高铁1.0的逐步建设和完善，同时伴随着人工智能、大数据、云计算、物联网、BIM、GIS等技术的不断发展和应用，铁路智能客站也逐步向着智能化、数字化方向完善。中共中央、国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》中要求构建便捷顺畅、经济高效、绿色集约、智能先进、安全可靠的现代化高质量国家综合立体交通网，基本实现交通网基础设施全要素全周期数字化，基本实现交通基础设施建设全过程全周期绿色化，至2035年完成数字化90%，绿色化95%[1]。中国国家铁路集团有限公司(以下简称“国铁集团”)在“精品工程、智能京张”建设中首次提出了智能客站的概念，并逐步加以完善。智能客站是基于新兴信息技术驱动下，以旅客便捷出行、车站温馨服务、生产高效组织、安全有力保障、绿色节能环保为目标，实现铁路客运车站智能出行服务、智能生产组织、智能安全应急、智能绿色节能有机统一的新型生产服务系统[2]。目前客运站依托旅客服务与生产管控平台(以下简称“管控平台”)实现了智能高铁1.0的目标，解决了不同系统数据独立存在，缺乏统一的数据管理平台，难以跨系统数据共享及分析的数据孤岛现象，完成了铁路系统资源共用、数据共享、效率提升等目标。然而智能客站仍然存在一些问题亟待解决，目前智能客站的集成化展示仍然采用2D或2.5D的方式，无法实现列车运行数据与停靠站等业务关联的实时孪生展示。本研究将基于数字孪生技术及业务流程建模与标注(Business Process Model and Notation, BPMN)建立智能客站数字化模型，通过三维与实时视频融合的方式，全面展示智能客站运营情况，实现多方协同以及客流组织作业优化的目标。

本研究将依托京沪高速铁路(北京南—上海虹桥)智能化提升项目，分析既有京沪智能客站现状，采用基于数字孪生的展示框架以及基于BPMN的可视化建模语言，选取上海虹桥站，设计铁路智能客站数字化作业模型，并基于该架构模型实现智能客站旅客服务和生产作业流程，最后通过试点应用验证该架构设计的可行性。

1　既有铁路智能客站数字化及相关技术现状

1.1　既有铁路智能客站数字化现状

“十三五”时期，依托京张高速铁路(北京北—张家口)以及京雄高速铁路(北京西—雄安)等重大工程，国铁集团开展了智能高铁1.0的建设，实现智能建造、智能装备、智能运营的应用实践。智能客站作为智能运营的重要内容之一，构建了旅客服务与生产管控平台，围绕旅客智能出行服务、车站高效生产目标，整合了客票、旅服、客管、调度、动车、视频、机电设备控制等七大数据，完成了车站旅客服务、生产组织、安全卡控、应急处置等业务的全面信息化覆盖。随着国家战略和数字经济发展的持续深化，以及铁路运力服务的持续增长[3]，“十四五”时期国铁集团持续深化智能高铁1.0关键技术创新及顶层体系设计，提出了智能高铁2.0的总体设计，通过模型和数据的驱动，实现铁路内部以及外部相关行业的综合应用，并推动数据分析以研判报警为主到预测分析为主的应用[4]。

目前智能客站完成了业务的信息化覆盖，并基于智能高铁1.0试点验证清河站孪生模型，然而由于清河站数字孪生BIM模型数据量过大、加载过慢、建模成本高等问题，智能客站信息集成展示的方式普遍仍采取2维或2.5维的方式，智能客站集成化展示如图1所示。因此，无法实现基于列车到发联动的业务深度融合以及实时推演的三维动态数

字孪生展示。依托京沪高速铁路智能化项目，基于BIM+GIS数据轻量化技术的数字孪生三维智能底座模型，研究将进一步推进客站业务的三维动态可视化展示的应用落地。

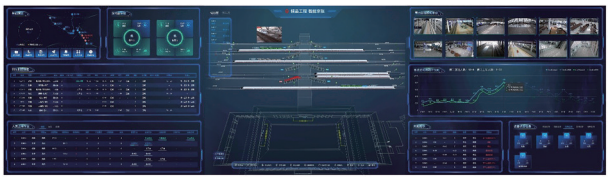


图1　智能客站集成化展示

Fig.1　Integrated display for intelligent passenger station

1.2　数字孪生技术现状

数字孪生的概念最早由Michael Grieves在讨论产品生命周期管理时提出，指的是物理实体的数字化表示。其核心思想是通过实时数据和模拟技术，将物理对象的状态、行为和特征在数字环境中进行映射和分析，从而实现更高效的监控、预测和决策[5]。数字孪生的概念模型，包括3个主要部分：物理实体、虚拟实体，以及物理与虚拟实体之间的数据和信息连接[6-7]。

随着物联网、人工智能和大数据等技术的发展与进步，数字孪生与新兴技术融合，其应用也从早期的军工及航空航天领域逐渐扩展到多个领域，包括制造业、建筑、城市管理、医疗、铁路等[8-10]。国内外在铁路领域的数字孪生研究得到进一步发展[11-12]。

Aheleroff等[13]提出了工业4.0数字孪生即服务的理念，Iliuţă等[14]在其基础上提出了一个可应用于工业4.0的数字孪生通用框架。刘亿等[15]通过数字孪生技术在智能车站领域进行了应用展望，王小书等[16-17]采用了陶飞等提出的数字孪生五维模型，并应用于智能客站模型建设[18]。

在前期研究的基础上，结合数字孪生五维模型以及通用框架应用进一步阐述智能客站数字孪生架构，以期为基于数字孪生的智能客站数字化研究进一步应用落地提供参考。

1.3　BPMN模型概况

BPMN是业务行为和工作流建模语言的事实上的标准，目前被工业界和学术界广泛接受，可用于业务的描述、模拟和执行[19-20]。在工业数字化转型的背景下，BPMN作为一种高度综合的业务建模语言被广泛应用在复杂业务的重构与执行[21-22]。相比于其他的流程图如统一建模语言(UML)、事件驱动流程链(EPC)以及传统流程图等，BPMN具备可视化的业务展示、多参与者协同、实时动态响应、跨领域通用等优势，此外BPMN的XML格式可直接对接流程引擎，实现业务的解析执行。因此研究采用BPMN作为智能客站数字孪生三维业务场景的业务建模方法。

智能客站数字化业务模型如下。

$$RPS_{\mathrm{BPMN}}=\{EV,\ AC,\ GW,\ SF,\ MF,\ LA\} \tag{1}$$

$$EV=\{SEV,\ IEV,\ EEV\} \tag{2}$$

$$AC=\{TK,\ SPR\} \tag{3}$$

$$GW=\{PGW,\ EGW,\ IGW\} \tag{4}$$

式中：RPS_{BPMN}为智能客站业务模型；EV为该模型的Event事件流程，为业务模型中被动触发的状态变化，如突发的应急事件、工作人员接收/反馈的作业信息等；SEV为开始事件；IEV为中间事件；EEV为结束事件；AC为该模型的Activity活动流程，是业务模型中主动执行的工作单元，如旅客进站检票、工作人员执行站内作业等具体业务活动；TK为任务；SPR为子流程；GW为模型的网关流程，控制EV，AC流程的分支逻辑；PGW为流程的并行分支；EGW为条件分支；IGW为条件并行分支；SF为模型的顺序流，表示活动之间的执行顺序；MF为模型的消息流，表示不同参与者的消息交互；LA为模型的参与者，支持对参与者的逻辑分组，如将智能客站数字化业务模型分别划分为旅客、指挥中心、工作人员等不同的角色。

2　铁路智能客站数字化系统架构设计

2.1　需求分析

铁路智能客站的参与主体为旅客、现场作业人员以及指挥中心作业人员，下面将对这3类人员进行需求分析。

2.1.1　旅客需求分析

旅客是车站服务的主体，经过车站多年的信息化发展，车站在围绕旅客出行，从站前、进站、候车、检票、登乘、换乘、出站全流程、各环节为旅客提供了初步的信息化服务。旅客的基本出行需求已经得到了满足，然而在精细化旅客需求方面仍存在需要改进的方面，如在进站通道客流突然增大的

情况下，旅客能得到有效引导，减少拥堵提高进站效率；在候车时，需要适宜的候车环境；有换乘计划的旅客在前列列车晚点时，需要现场工作人员及时的精准引导等。

2.1.2　现场作业人员需求分析

车站现场作业人员是服务旅客顺利出行的服务主体，在指挥中心统一调度管理下，现场作业人员在车站作业关键岗位区域进行相应的日常生产作业，如进站安检通道、实名制核验区域、候车区域、检票区域、站台区域以及出站口区域。目前日常生产作业信息化已经完全覆盖车站关键作业区域，然而车站传统的管控方式在面对大客流、大面积晚点、设备异常等突发情况下，仍然存在现场处置效率低下的问题。因此现场工作人员需要及时接受指挥中心处置指令，实现高效作业，提升旅客服务质量。

2.1.3　指挥中心人员需求分析

为保障旅客全流程出行的顺利完成以及车站生产作业高效安全的运行，智能客站需要建设生产指挥中心的三维可视化全景指挥平台，穿透现场作业细节，了解车站列车、人员、设备、环境等生产作业实时信息，保障安全生产，提高旅客服务质量。此外还需整合历史数据、售票信息、图像视频等多源数据，精准诊断现场作业问题并及时预警。通过智能运营分析为车站生产作业优化提供策略支持，帮助指挥中心人员迅速决策并联动现场作业人员，实现指挥中心与现场的紧密联动，优化车站生产作业，保障旅客顺利出行。

基于旅客、现场作业人员、指挥中心人员需求以及列车到发的智能客站BPMN模型如图2所示。

2.2　智能车站数字孪生总体架构

基于数字孪生的智能客站旨在建立基于车站物理实体的数字实体模型，以三维与视频融合的方式，全面展示车站实际运营情况，以此实现车站高效生产管理以及为旅客提供精准服务的目标。智能客站数字化模型的建立依托智能车站管控平台，总体架构主要分为物理层、数据层、分析层和应用层，数字孪生总体架构如图3所示。

（1）孪生感知层，负责采集智能客站物理实体的各种信息。智能客站物理实体主要包括列车、站房、闸机、广播设备、传感器、引导屏、摄像头、RFID、蓝牙、端部报警设备、上水设备、吸污设备、电梯等。

（2）数据资源层，主要包括客站建模的虚拟实体数据以及从感知层采集到的数据。数据层的信息

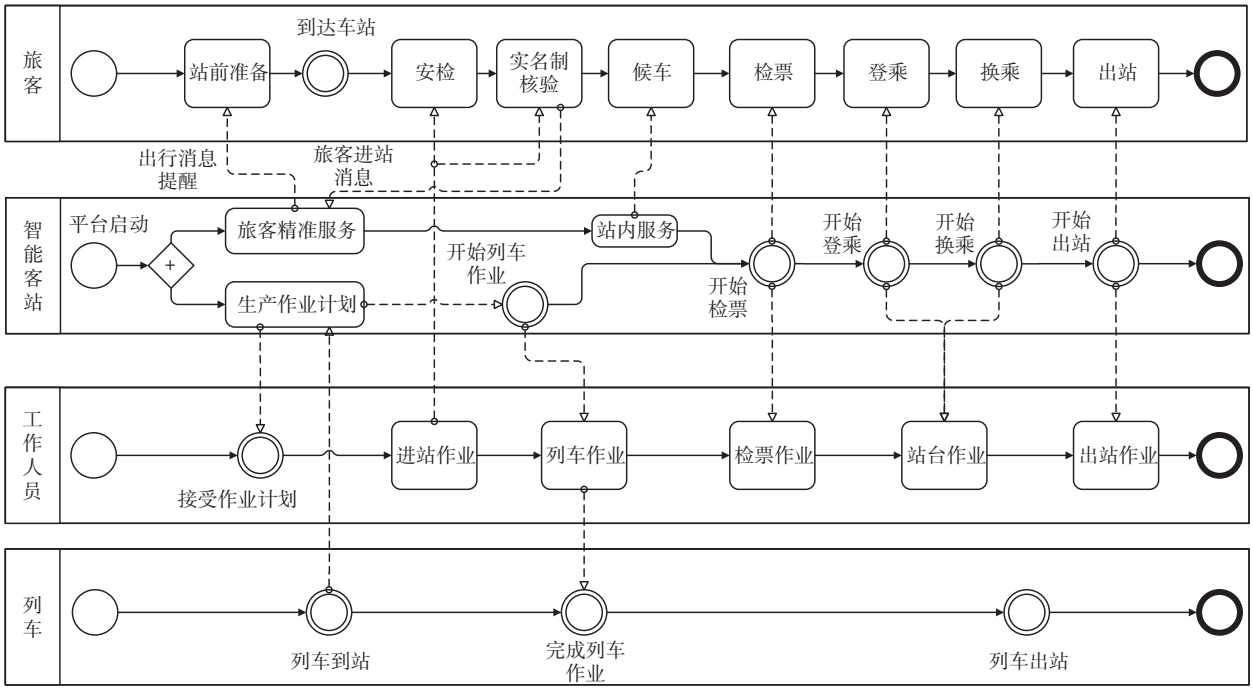


图2　智能客站BPMN模型

Fig.2　BPMN model for intelligent passenger station

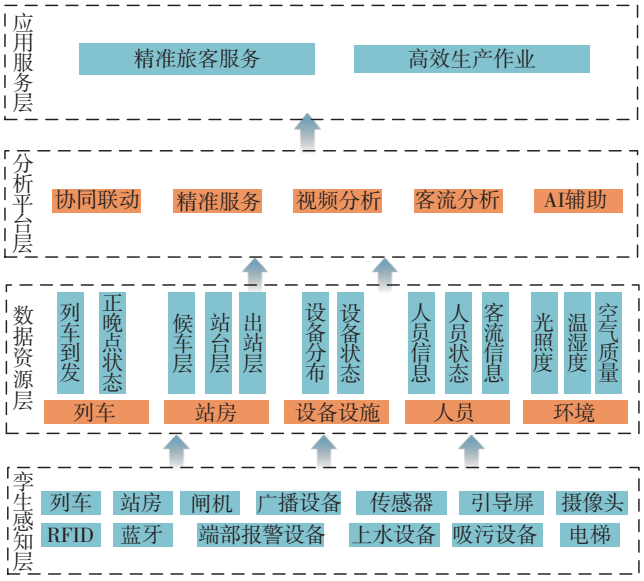


图3　数字孪生总体架构

Fig.3　Overall architecture of digital twin

主要分为列车、站房、设备设施、人员以及环境，包括虚拟实体数据以及业务数据等。

（3）分析平台层，运用各种数据分析算法和模型，对数据进行统计分析、趋势预测，并依据数据挖掘和分析的结果，为智能客站管理层提供决策建议。分析平台层为应用服务层提供基于数字孪生的业务协同联动、旅客精准服务、数据分析与共享，并借助AI服务等技术，完成对应用服务层的支撑。

（4）应用服务层，根据分析平台层提供的决策支持信息，开发满足智能客站业务的应用服务，对车站实时场景进行仿真模拟，对车站运营态势进行推演，实现智能客站三维全景化指挥，以及客站安全运营的虚实互控。其中，通过对客站进站口等关键区域进行分时段人流量分析，及时增减进站口安检通道等实现精准旅客服务。

2.3　系统业务逻辑架构

采用BPMN模型构建基于数字孪生的铁路客站数字孪生系统业务逻辑架构图，系统业务逻辑架构如图4所示。

（1）孪生监控模块，对车站全要数据监控以及处理，通过监测终端展示车站实时环境，包括列车到发、客流分布、工作人员到岗、设备运行状态、告警信息等实时信息。

（2）全景仿真模块，基于客站三维模型，将车站实时运营状态包括列车到发、客流分布、人员到岗、设备状态与客站三维模型结合，实现车站的实时态势、虚实交互的全景仿真。

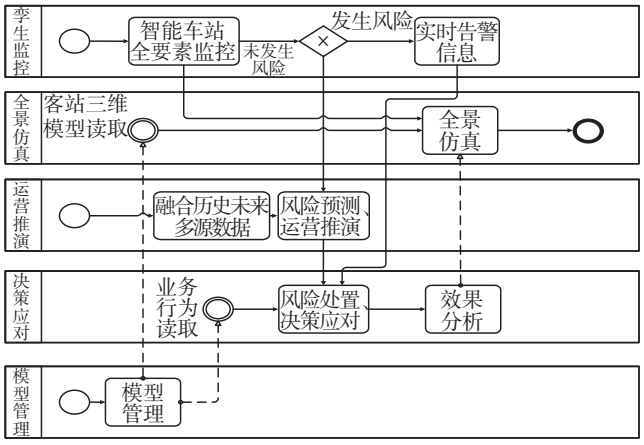


图4　系统业务逻辑架构

Fig.4　System business logic architecture

（3）运营推演模块，将融合历史/未来数据、售票信息和视频等，结合大数据分析、人工智能模型，对车站的运营态势进行推演预测，辅助车站优化运营管理、提升服务效率、预防潜在风险。

（4）决策应对模块，基于业务行为模型，对潜在的问题提供相应的措施，实现精准决策应对，同时分析措施运用效果并展示在客站三维模型场景中。

（5）模型管理模块，对客站数字孪生三维模型、监测数据以及业务行为模型等进行统一管理。

3　铁路智能客站数字化模型实现

3.1　功能设计

基于数字孪生铁路客站全景仿真业务模型，设计满足旅客需求、作业需求、管理需求的系统功能，同时也要对智能客站数字孪生模型可提供的服务进行分析。系统功能架构如图5所示。

（1）孪生监控，对车站全区域全要素进行监控。全区域包括车站候车层、站台层、出站层，候车层重点区域包括进站口、候车室以及检票口，站台层重点区域包括股道、站台，出站层重点区域主要是出站口。全要素包括列车、人员、设备、环境、作业信息，列车方面主要监控列车的到发；人员包括作业人员和旅客，监控作业人员的作业流程以及旅客从进入到离开车站的整个过程；设备状态包括与列车到发的作业联动状态以及设备

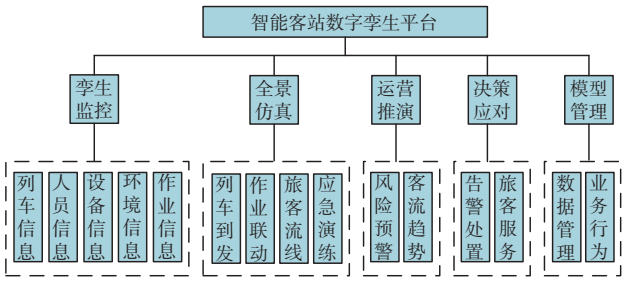


图5　系统功能架构

Fig.5　Functional architecture of system

正常故障状态；环境信息主要是车站的温湿度以及空气质量；作业方面是基于列车到发对车站业务流程的监控。

（2）全景仿真，将模拟仿真基于数字孪生车站实时运营状态，包括列车到发、作业联动、旅客流线、应急演练等场景。实时运营状态包含列车、人员、设备、环境的状态以及围绕列车到发状态所联动协同的作业、人员、设备等信息。

① 列车到发模拟列车进站、出站、在股道停靠的列车，以及列车实时运营状态，包括列车相关信息如列车车次、列车长信息、停靠股道站台、始发终到站、编组顺序等；运行信息包括实际到站和预计发车时间、停留时间、正晚点时间等；乘客服务信息包括站台停靠方向、站台地标等。

② 作业联动模拟与列车到发联动的作业信息包括乘降作业、上水作业、吸污作业、重点旅客、工单交接、行包作业、送餐作业、中铁快运、垃圾清运等。与作业关联的人员，将展示其名称、作业时间以及到岗状态，完成对作业全流程的盯控。

③ 旅客流线模拟旅客站前、进站、候车、检票、登乘、换乘、出站整个过程的行动轨迹。

④ 应急演练针对车站应急仿真，如大面积晚点、大客流拥堵等车站状态、外界自然灾害、站内设备故障等应急场景。

（3）运营推演，根据车站实时运行数据、历史运营数据、未来车站运行数据以及外部环境数据等多维度综合数据的深度分析，实现车站运行态势和未来运营的基于数字孪生的可视化展示。此功能包括进站、换乘、出站客流趋势推演，以及车站的风险预警。

（4）决策应对，主要是提供预案决策，即车站协同告警处置以及为旅客提供精准服务。通过智能分析算法构建的应急仿真模型与安全态势推演，实现应急情景应对，联控不同工作岗位人员完成实时应急处理闭环。

（5）模型管理，包括对数字孪生车站的数据管理以及业务行为模型管理。数据管理包括客站数字虚拟孪生体的模型数据，包括站房、列车、人员、设备等模型的三维几何参数。业务行为模型管理是对站房、列车、人员、设备等以列车或旅客业务为核心，将所有与其相关的模型按业务进行联动的行为规则进行统一管理。

3.2　试验验证

通过京沪高速铁路智能客站数字孪生三维典型场景进行验证。

3.2.1　孪生监控

智能客站三维平台首页如图6所示，首页包括候车厅、股道站台的实时监控，接入端部入侵、上水、直梯、扶梯、站台屏、检票屏、检票闸机等设备设施数据并监控运行状态。车站环境监控包括温湿度、PM2.5、车站实时人数以及预测人数等。



图6　智能客站三维平台首页

Fig.6　Home page of intelligent passenger station's 3D platform

智能客站三维平台候车厅页面如图7所示，监控候车厅设备设施包括检票闸机、检票屏状态、检票作业状态等信息。闸机为绿色表明开始检票作业，红色表明检票作业结束，并在上方展示检票口、检票车次信息。

智能客站三维平台股道站台页面如图8所示，接入列车到发数据，监控列车实时到发状态，左侧

列表展示即将进站列车，右侧列车展示即将出站列车，中间监控股道站台列车，并监测站台客运工作人员是否到岗，绿色表示工作人员到岗，红色闪烁提示工作人员未到岗。

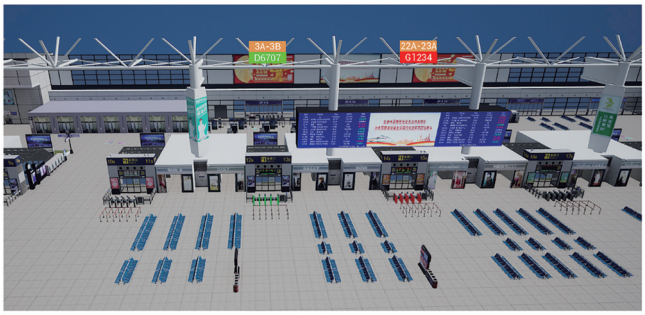


图7　智能客站三维平台候车厅页面
Fig.7　Waiting hall page of intelligent passenger station's 3D platform



图8　智能客站三维平台股道站台页面
Fig.8　Track and platform page of intelligent passenger station's 3D platform

3.2.2　全景仿真

智能客站全景仿真列车到站如图9所示，展示了列车到发、停靠等信息驱动的三维动态业务模型，并通过可视化界面展示了股道实时占用情况及列车车次、车型、进站时间、出站时间、上下车人数、中转人数等列车详情信息，以及是否有上水、吸污、行包等作业，并与客运工作人员、设备进行作业联动。

智能客站全景视频融合如图10所示，展示了候车室进站、检票等业务全景视频融合。通过视频分析技术对铁路客站进站口、安检通道等区域进行客流拥堵情况的深入分析，联动旅客服务作业辅助制定有效的作业通道开行策略。

3.2.3　运营推演

依托售票数据、视频分析、历史客流等多元数



图9　智能客站全景仿真列车到站
Fig.9　Train arrival in panoramic simulation of intelligent passenger station

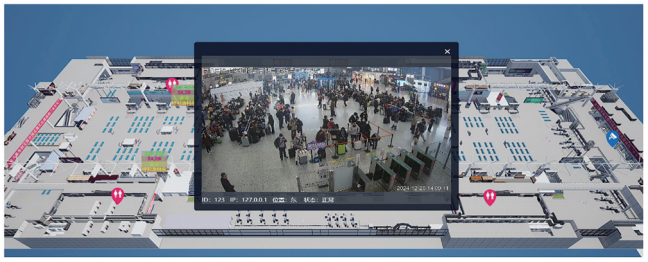


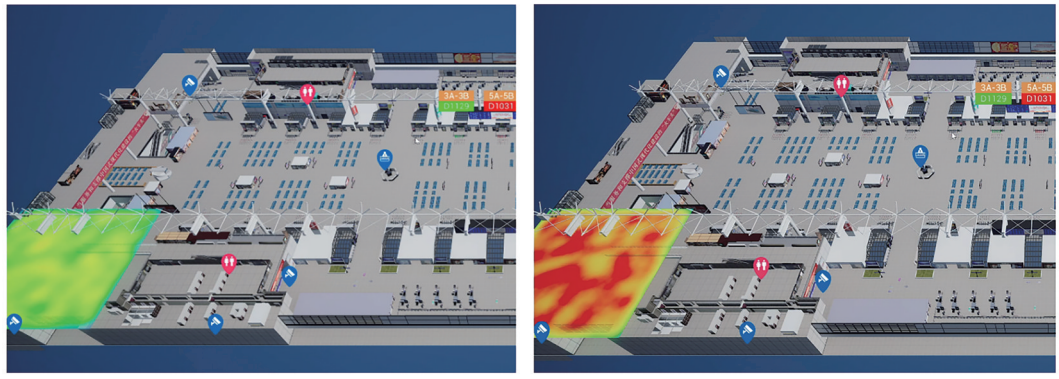
图10　智能客站全景视频融合
Fig.10　Panoramic video integration of intelligent passenger station

据，搭建客站关键区域客流模型以及算法，分析进站通行效率与分时段人流量，并通过三维模型动态展示分析结果，及时诊断现场客流拥堵问题。智能客站客流趋势如图11所示，图11a表示进站口通畅，图11b表示进站口拥堵，以热力图的形式展示客流趋势，实现三维态势推演。

3.2.4　决策应对

（1）客流拥堵。当客站进站通道发生拥堵，平台即可弹出告警信息，并根据智能分析提供决策。指挥人员依据决策，迅速下达处置指令，联控现场工作人员增加进站口通道减少旅客进站拥堵，并实时反馈到平台。智能客站进站口拥堵告警如图12所示。

（2）设备故障。智能客站检票作业相关设备设施状态联动列车到发，正常状态下显示设备原色，开始检票作业后，关联设备显示绿色表示检票作业开始，红色表示检票作业结束。红色闪烁表示故障，智能客站三维平台设备告警如图13所示，对出现故障的电梯设备及时显示告警信息，指挥人员通过定位联控现场工作人员协同处置。



a　进站通道通畅
a　No congestion at station entrances

b　进站通道拥堵
b　Congestion at station entrances

图11　智能客站客流趋势
Fig.11　Passenger flow trends of intelligent passenger station



图12　智能客站进站口拥堵告警
Fig.12　Entrance congestion alert of intelligent passenger station

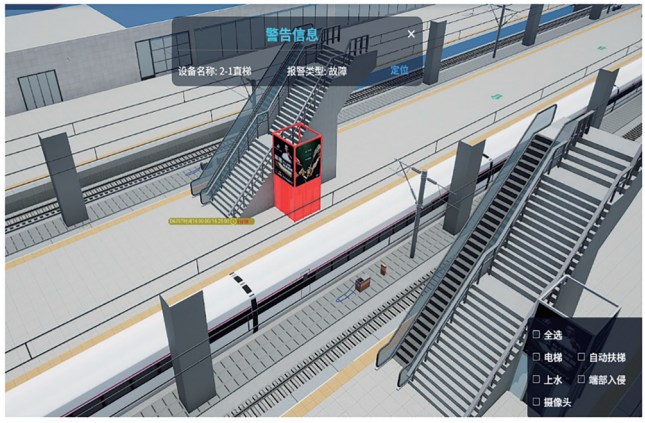


图13　智能客站三维平台设备告警
Fig.13　Device alert of intelligent passenger station's 3D platform

4　结束语

本研究分析了既有铁路智能客站的数字化现状以及旅客、作业人员、管理人员的需求，提出了基于数字孪生和BPMN的智能客站数字化总体框架及系统框架，通过构建智能客站数字孪生核心框架，明确了框架内涵。在实际应用中，重新构建智能客站业务行为模型并通过数字孪生模型实现了一系列关键功能。从可视化全景指挥的角度，借助客站数字孪生体接入实际运营数据，达成了基于数字孪生的客站运营虚实互控以及全场景监控与日常运维，使工作人员能够直观、全面地掌握车站实时状态，极大提升了管理效率与决策的准确性。后续将继续深化新兴技术与智能客站数字孪生体的融合，优化提高业务模型效果。

参考文献：

[1] 中共中央，国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[Z]. 北京：中共中央，国务院，2021.

[2] 史天运，张春家. 铁路智能客运车站系统总体设计及评价[J]. 铁路计算机应用，2018，27(7)：9-16.
SHI Tianyun，ZHANG Chunjia. Overall Design and Evaluation of Intelligent Railway Passenger Station System[J]. Railway Computer Application，2018，27(7)：9-16.

[3] 中国国家铁路集团有限公司. 中国国家铁路集团有限公司工作会议在京召开[EB/OL]. (2025-01-02)[2025-02-28]. https：//mp. weixin. qq. com/s/AhXh5ipCMDdw6btCssHqfw.

[4] 王同军. 中国智能高速铁路2.0的内涵特征、体系架构与实施路径[J]. 铁路计算机应用，2022，31(7)：1-9.
WANG Tongjun. Connotation，Architecture and Implementation Path of China Intelligent High Speed Railway 2.0[J]. Railway Computer Application，2022，31(7)：1-9.

[5] HANANTO A L，TIRTA A，HERAWAN S G，et al. Digital Twin and 3D Digital Twin：Concepts，Applications，and Challenges in Industry 4.0 for Digital Twin[J]. Computers，2024，13(4)：100.

[6] GRIEVES M. Digital twin：manufacturing excellence through virtual factory replication. 2014 http：//www. apriso. com/library/Whitepaper_Dr_Grieves_DigitalTwin_ManufacturingExcellence. php.

[7] LIU M N，FANG S L，DONG H Y，et al. Review of Digital Twin about Concepts，Technologies，and Industrial Applications[J]. Journal of Manufacturing Systems，2021，58：346-361.

[8] JAVAID M，HALEEM A，SUMAN R. Digital Twin Applications Toward Industry 4. 0：A Review[J]. Cognitive Robotics，2023，3：71-92.

[9] 陈华鹏，鹿守山，雷晓燕，等. 数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用[J]. 华东交通大学学报，2021，38(4)：27-44.
CHEN Huapeng，LU Shoushan，LEI Xiaoyan，et al. Advance in Research on Applications of Digital Twin in Intelligent Railway Operation Management[J]. Journal of East China Jiaotong University，2021，38(4)：27-44.

[10] 马小平，王　旭，贾利民，等. 基于数字孪生和MBSE的铁路防灾监测仿真推演系统设计[J]. 中国铁道科学，2024，45(3)：168-181.
MA Xiaoping，WANG Xu，JIA Limin，et al. Design of Railway Disaster Prevention Monitoring Simulation System Based on Digital Twin and MBSE[J]. China Railway Science，2024，45(3)：168-181.

[11] ERRAC. RAIL Strategic Research and Innovation Agenda[EB/OL]. (2020-12-04)[2025-02-28]. https：//errac. org/wp-content/uploads/2020/12/RAIL-Strategic-Research-and-Innovation-Agenda-2020-_FINAL_dec2020. pdf.

[12] ERRAC. Railway Research and Innovation Agenda[EB/OL]. (2024-10-10) [2025-02-28]. https：//errac. org/wp-content/uploads/2024/10/Railway-Research-and-Innovation-Agenda_V3. pdf.

[13] AHELEROFF S，XU X，ZHONG R Y，et al. Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4. 0：An Architecture Reference Model[J]. Advanced Engineering Informatics，2021，47：101225.

[14] ILIUŢĂ M E，MOISESCU M A，POP E，et al. Digital Twin：A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields[J]. Applied Sciences，2024，14(13)：5454.

[15] 刘　亿，栾　中，李　平，等. 数字孪生技术在智能车站领域应用展望[J]. 铁道运输与经济，2024，46(10)：157-165，177.
LIU Yi，LUAN Zhong，LI Ping，et al. Prospect for the Application of Digital Twin Technology in the Field of Intelligent Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(10)：157-165，177.

[16] 陶　飞，刘蔚然，张　萌，等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统，2019，25(1)：1-18.
TAO Fei，LIU Weiran，ZHANG Meng，et al. Five-Dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2019，25(1)：1-18.

[17] 陶　飞，马　昕，戚庆林，等. 数字孪生连接交互理论与关键技术[J]. 计算机集成制造系统，2023，29(1)：1-10.
TAO Fei，MA Xin，QI Qinglin，et al. Theory and Key Technologies of Digital Twin Connection and Interaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2023，29(1)：1-10.

[18] 王小书，史天运，吕晓军，等. 铁路智能客站数字孪生模型研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(5)：78-88.
WANG Xiaoshu，SHI Tianyun，LYU Xiaojun，et al. Digital Twin Model of Intelligent Railway Passenger Stations[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(5)：78-88.

[19] CHINOSI M，TROMBETTA A. BPMN：An Introduction to the Standard[J]. Computer Standards & Interfaces，2012，34(1)：124-134.

[20] COMPAGNUCCI I，CORRADINI F，FORNARI F，et al. A Study on the Usage of the BPMN Notation for Designing Process Collaboration，Choreography，and Conversation Models[J]. Business & Information Systems Engineering，2024，66(1)：43-66.

[21] FARSHIDI S，KWANTES I B，JANSEN S. Business Process Modeling Language Selection for Research Modelers[J]. Software and Systems Modeling，2024，23(1)：137-162.

[22] LARA MACHADO P，VAN DE VEN M，AYSOLMAZ B，et al. Methods that Bridge Business Models and Business Processes：A Synthesis of the Literature[J]. Business Process Management Journal，2023，29(8)：48-74.

(责任编辑　吴文娟)