**文章编号**：1003-1421(2026)07-0039-08
**引用格式**：刘永强，姜维，蔡伯根，等. 面向列控系统的全息感知与互操作验证平台设计与实现[J]. 铁道运输与经济，2026，48(7)：39-46，57.
LIU Yongqiang，JIANG Wei，CAI Baigen，et al. Design and Implementation of a Holographic Perception and Interoperability Verification Platform for Train Operation Control Systems[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(7)：39-46，57.

# 面向列控系统的全息感知与互操作验证平台设计与实现

刘永强[1]，姜　维[1,2]，蔡伯根[1,2]，王　剑[1,2]，刘　江[1,2]，陆德彪[1,2]，孙玉龙[3]

(1.北京交通大学 自动化与智能学院，北京　100044；2.北京交通大学 先进轨道交通自主运行全国重点实验室，北京　100044；3.中国铁道科学研究院集团有限公司 国家铁道试验中心，北京　100015)

**摘　要**：随着铁路运输需求持续增长，列车运行控制系统正向智能化与多制式协同方向演进，全息感知能力评估与互操作性验证成为系统工程化落地的关键环节。研究设计并实现了一套面向列车运行控制系统的全息感知与互操作验证平台，以线路实测数据为基础，支持摄像头、激光雷达、惯导与卫星导航等多源传感器数据的注入，在GPS统一授时下实现多源数据的时空对齐，并构建覆盖列车运行状态、线路状况与设备状态等要素的场景库，以支持典型场景嵌入与故障注入测试。平台以Jetson Orin为核心计算单元，结合高带宽存储分发与多通道数据接入机制，提供算法在线运行、回归对比与性能评估能力。应用案例表明，该平台能够稳定支撑多源感知算法的集成与运行，并为列控系统互操作验证与安全评估提供可复现的实验环境与技术支撑。

**关键词**：列控系统；全息感知；互操作性；数据回放；验证平台
**中图分类号**：U284　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20260203007

# Design and Implementation of a Holographic Perception and Interoperability Verification Platform for Train Operation Control Systems

LIU Yongqiang[1]，JIANG Wei[1,2]，CAI Baigen[1,2]，WANG Jian[1,2]，LIU Jiang[1,2]，LU Debiao[1,2]，SUN Yulong[3]

(1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. National Railway Test Center, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100015, China)

**Abstract**: With the continuous growth of railway transport demand, train operation control systems are evolving toward intelligence and multi-standard synergy, and the evaluation of holographic perception capability and verification of interoperability become key links for the engineering implementation of the systems. In this paper, a holographic perception and interoperability verification platform for train operation control systems was designed and implemented. Based on measured line data, the platform supported the injection of multi-source sensor data such as cameras, LiDAR, inertial navigation,

**收稿日期**：2026-02-03　　**修订日期**：2026-06-10
**通信作者**：姜维(1988—)，女，陕西西安人，北京交通大学自动化与智能学院教授。
**基金项目**：国家重点研发计划项目(2022YFB4300501)；国家自然科学基金项目(T2422002，U2468202，U2268206，U2568222)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2024YJ391)

and satellite navigation. Under unified GPS timing, the spatiotemporal alignment of multi-source data was achieved, and a scenario library covering elements such as train operation states, line conditions, and equipment states was constructed to support typical scenario embedding and fault injection tests. Taking Jetson Orin as the core computing unit, combined with high-bandwidth storage and distribution and multi-channel data access mechanisms, the platform provided capabilities for online algorithm execution, regression comparison, and performance evaluation. Application cases show that the platform can stably support the integration and operation of multi-source perception algorithms and provides a reproducible experimental environment and technical support for the interoperability verification and safety assessment of train operation control systems.

**Keywords:** Train Operation Control System; Holographic Perception; Interoperability; Data Replay; Verification Platform

## 0　引言

随着我国高速铁路和轨道交通的快速发展，铁路已成为国民经济的大动脉，承担着日益繁重的客货运输任务。列车运行控制系统(以下简称“列控系统”)作为铁路核心基础设施，是保障列车安全高效运行的重要支撑[1]。面向现代交通运输发展需求，构建具备高精度环境感知能力与跨系统协同的智能列控技术体系，已成为轨道交通发展的重要方向[2]。

在铁路环境下，高精度定位与全息感知技术的融合已成为研究热点。现有研究通过融合卫星定位系统(Global Navigation Satellite System，GNSS)、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit，IMU)、激光雷达(Light Detection and Ranging，LiDAR)及高分辨率摄像头等多源异构传感器数据，构建列车周边环境的动态多维表征，实现对列车自身状态及运行环境的综合感知[3]。该类方法能够在空间维度增强对环境几何与目标特征的表达，提升对危险源、轨道状态变化与障碍物等异常事件的检测与识别性能，为列控系统在复杂工况下提供实时、精确的感知与定位支撑[4-6]。近年来，面向铁路巡检和轨旁目标感知的相关平台与工程应用，也为多源感知数据获取和部署验证提供了技术基础[7-9]。然而，现有研究更多聚焦于感知算法优化，对于面向列控应用的全流程闭环验证仍显不足。

列控系统在多系统、多设备协同运行条件下面临接口兼容、时序一致和链路稳定等工程需求。相关研究已围绕适应多网融合的列控系统互联互通设计，以及不同制式信号系统之间的兼容性与协同运行开展探讨[10-11]。相关工程项目与行业实践亦表明，复杂路网条件下列控系统的互操作与可靠运用需要在系统集成、接口一致性与运行验证方面形成体系化的方法与平台支撑[12]。在国际上，列控系统互操作性验证已通过ETCS/ERTMS等标准框架形成了系统的技术与测试方法，明确了车载与地面系统的接口要求，并强调通过场景驱动的测试验证一致性与功能兼容[13-14]。但总体来看，现有研究主要关注协议层或设备层兼容性，缺乏系统性的验证平台与评估方法。

全息感知技术通过统一授时与坐标基准对传感器数据进行时空对齐，并通过标准化接口向列控系统输出高精度位置、速度、目标距离及其置信度标志等状态信息，以满足工程应用中对一致性与可验证性的要求[15]。然而，从算法验证走向工程化部署仍面临多源数据时序一致性、实验验证流程及场景覆盖等挑战[16-17]。针对上述问题，设计并实现了一套面向列控系统的全息感知与互操作验证闭环测试平台。平台以线路实测数据为基础，通过回放与注入机制复现摄像头、激光雷达、IMU与GNSS等多源传感数据流，并在统一授时基准下实现时空对齐，为列控系统提供可解释、可验证的感知源输入。研究实现以下目标：①构建涵盖数据回放与注入、统一授时与时序对齐、融合处理、结果输出及性能评估等环节的系统级验证流程，实现全息感知输入链路的可复现闭环测试与量化评估；②设计多接口多源数据回灌与注入链路，结合GPS/PTP统一授时与调度缓冲机制，保证多源数据在回灌条件下的相对时序一致性；③基于真实线路数据构建测试场景库与参数化回放配置，支持跨场景、跨版本的回归对比与可复现评测。

## 1　平台框架设计

面向干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路与城

市轨道交通等复合路网条件，控制系统对环境感知的需求正从单一传感测量转向多源信息协同下的全息感知。全息感知旨在形成覆盖列车自身运行状态与列车周边环境状态的动态、多维数字表征，典型要素包括列车定位与运动状态，对人/车/障碍物的主动检测，轨道、道岔与信号等基础设施状态感知，以及风雨雪与线路灾害等外部环境信息获取，并通过标准化接口向列控系统输出可解释、可验证的状态量。为满足列控系统对高可靠与可验证的工程要求，全息感知不仅需要实现多源信息融合，还需具备性能监测评估、故障容错与可信性量化能力，形成面向典型运营场景与关键事件的风险识别与决策支撑机制。

研究构建闭环测试平台，面向列控系统的全息感知输入链路与互操作验证需求，列车运行控制系统与全息感知互操作验证的架构如图1所示，可划分为系统层、核心感知层与平台层3部分。系统层包含地面调度/控制中心(Centralized Traffic Control/Temporary Speed Restriction Server，CTC/TSRS)、无线闭塞中心(Radio Block Center，RBC)、车载列控单元(Automatic Train Protection，ATP)及执行与监控单元，用于实现典型列控闭环运行逻辑。核心感知层以GNSS/北斗、惯性导航、激光雷达与双目相机为主要信息源，在GPS/PTP统一授时基准下完成多源数据的时空对齐与融合处理，输出包含列车高精度定位(位置/速度/航向)与环境感知信息(障碍物、轨旁设施、线路状态等)及其置信度/可用性标志，并作为车载列控单元的感知/定位输入以驱动列控闭环。平台层提供数据与场景库(NAS存储与场景/故障管理)、回灌与注入模块(工作站接口)以及边缘计算与中间件(Jetson Orin + ROS)等能力，用于复现线路实测数据的输入特性与系统负载，并支持跨场景回归与故障注入测试。

## 2　硬件与软件功能

### 2.1　硬件组成

为保障全息感知与互操作验证平台的稳定运行，系统采用了面向多源数据回灌与实时处理的一体化硬件架构，各模块协同完成传感器数据注入、计算处理、存储管理与时间同步等关键任务。测试平台硬件设备配置及功能描述如表1所示，依托高带宽数据链路与统一授时机制，平台可在回放真实运行数据的同时保持稳定的数据吞吐与时空一致性对齐，从而为列控系统的功能验证、性能评估与回

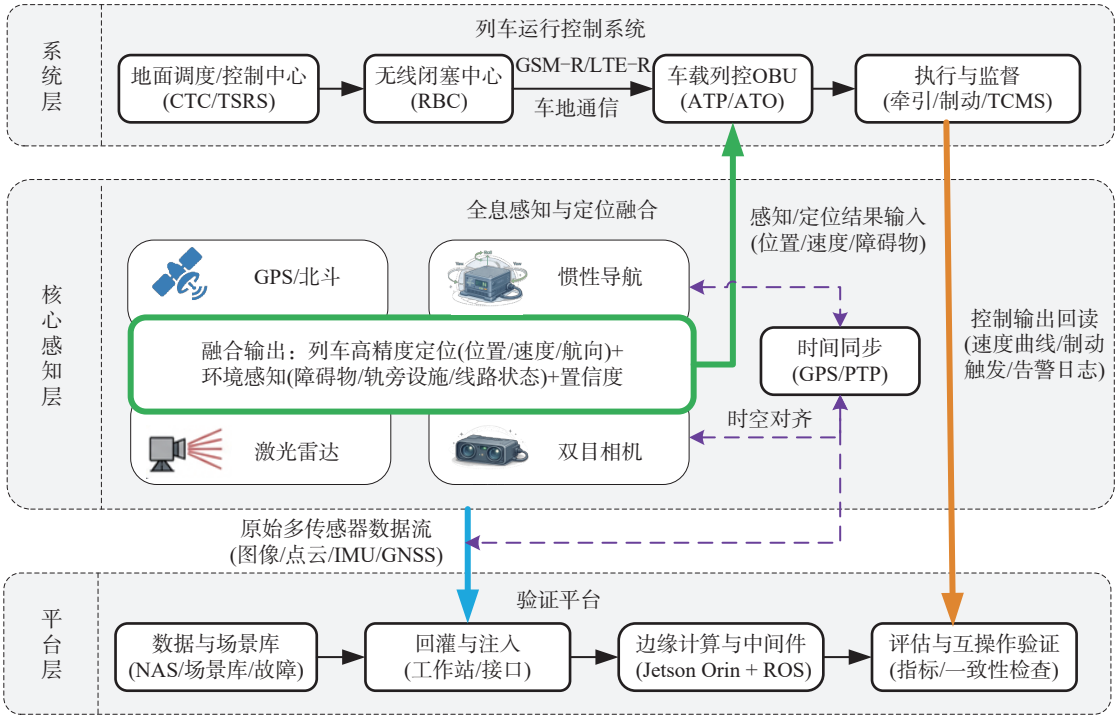


**图1　列车运行控制系统与全息感知互操作验证的架构**

Fig.1　Architecture for train operation control system and holographic perception and interoperability verification

**表1　测试平台硬件设备配置及功能描述**

Tab.1　Hardware configuration and functional description of test platform

| 设备名称 | 功能描述 |
|---|---|
| 数据回灌工作站 | 负责数据解析与回灌操作，配备高性能计算单元 |
| 存储服务器 | 提供大容量存储，支持高速数据传输 |
| Orin计算单元 | 为后端感知定位与互操作验证算法提供算力支撑 |
| GPS授时同步盒 | 提供高精度时间同步，支持PTP/GPTP授时 |
| GMSL-MIPI转接套件 | 支持GMSL到MIPI数据转换，传输多种传感器数据 |
| 以太网交换机 | 5端口交换机，支持高带宽数据传输 |
| 光纤跳线 | 用于设备间的光纤连接 |
| fakra线 | 用于传输视频与数据，提供高带宽连接 |
| 电源适配器 | 提供稳定电源支持 |
| GPS天线 | 为GPS同步模块提供天线支持 |

归测试提供支撑。平台主要硬件组成如下。

（1）回灌工作站。回灌工作站作为平台的数据接入与管理中心，承担数据解析、格式转换与回灌调度等功能。其配置包括高性能CPU和GPU，可满足大规模数据处理与实时回放的计算需求。工作站通过千兆以太网与视频注入卡与其他模块进行数据交互，并结合GMSL-MIPI转换链路实现摄像头等传感器数据的注入与转发。

（2）存储服务器。存储服务器用于平台数据的集中存储与管理，为海量回放数据提供可靠的读写支撑。服务器通过光纤网络接口与回灌工作站连接，实现ROSBAG等数据的高速传输与安全存储，确保长时序场景回放与多轮实验的可复现性。

（3）Orin计算单元。作为平台的核心计算单元，集成高性能GPU计算能力，并提供多通道输入输出接口，用于接收来自多传感器链路的数据流并执行在线计算任务。该单元与回灌工作站协同工作，可支持实时感知、定位与验证算法的部署与运行。

（4）GMSL-MIPI转换套件。GMSL-MIPI转接套件用于实现车载摄像头等GMSL链路数据到MIPI接口的协议/物理层转换，以适配计算单元的MIPI输入。该套件支持多路GMSL输入与多路MIPI输出，满足高带宽图像数据的稳定传输需求，为多摄像头回放与在线处理提供硬件基础。

（5）GPS授时同步盒。为实现全平台多源数据的时间一致性，系统配置GPS授时同步盒，支持PTP精确时间协议，可向平台提供统一的高精度授时基准。通过GPS天线获取外部时间源后，授时同步盒向各计算/注入节点分发时间同步信息，从而保证多传感器数据时间戳对齐与跨模块数据融合的准确性。当GPS信号短时不稳定或缺失时，CS300进入保持模式依赖内部振荡器维持PTP输出，可在一定时间窗口内保持网络内相对同步，但绝对时间精度会随失锁时长产生漂移并在GPS恢复后重新收敛。

## 2.2　软件功能

本平台的软件系统基于ROS1(ROS Noetic)作为中间件框架(运行于ubuntu 20.04)，采用模块化设计，能够实现对多种传感器数据的接收、处理和融合。通过ROS Bridge，平台能够实时接收来自不同传感器的数据，并通过多通道数据流实现数据的实时分析与存储。平台采用基于节点通信的结构，确保了各个硬件模块之间的协同工作，同时提供强大的数据处理能力。

（1）传感器。本平台不直接依赖传感器在线采集，而是依据传感器前端的接口规范、数据格式及时序特性进行设计，以保证回放数据能够真实反映采集条件。通过不同接口接入传感器数据，双目摄像头数据通过GMSL-MIPI转接套件接入Orin平台，双目图像数据实时传输至ROS系统进行处理；激光雷达数据通过以太网接口传输到回灌工作站，再推送到Orin平台进行处理，生成点云数据；IMU通过串口传输至Orin平台，用于获取姿态、加速度等信息；GPS数据通过PTP同步模块进行时间同步，并通过ROS框架接入平台进行定位和时间戳对齐。所有传感器数据将通过ROS Bridge解析后发布至ROS消息队列，供后台算法处理与融合，传感器硬件及参数配置如表2所示。

（2）平台功能。平台提供多个功能模块来支持列控系统感知能力的测试与验证，功能测试与验证模块提供功能测试和验证的环境，确保导航定位系

**表2　传感器硬件及参数配置**

Tab.2　Sensor hardware and parameter configuration

| 序号 | 内容 | 规格 | 帧率 | 数量 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 双目摄像头 | 3 MP 车载摄像头 (1 920×1 536，HFOV 60°) | 20 fps | 2 |
| 2 | 激光雷达 | Livox Mid-70 | 10 Hz | 1 |
| 3 | 惯导 | TM362 | 200 Hz | 1 |
| 4 | 卫星导航 | u-blox接收机 | 10 Hz | 1 |

统的各项功能按预期工作，包括对不同软件版本的回归测试和功能比较；同时，平台支持传感器数据回放，通过回灌工作站将ROSBAG数据导入系统，复现真实车辆运行时的传感器数据和车辆总线数据。通过数据回放，用户可以测试定位精度、感知系统的响应速度及其他关键指标。负载与压力测试模块能够模拟不同场景下的负载与压力测试，评估系统在长时间运行中的稳定性和性能，特别是在高频率、多数据源环境下的处理能力。平台功能项列表及描述如表3所示。

## 3　平台通信链路

本平台的数据链路设计确保了各硬件模块之间的数据高效传输与时间同步。整个数据流从传感器数据采集到处理，再到存储与后续分析，均通过多个硬件接口与协议实现无缝衔接，系统以Orin为核心处理单元，负责多传感器数据的在线接收、解析与融合计算；存储服务器提供大容量数据存储能力，并通过40 G光纤链路向回灌工作站高速传输ROS日志文件，以保障大规模数据回放场景下的吞吐与可复现性。平台接口与数据链路示意图如图2所示。

### 3.1　数据传输与存储

平台采用“集中存储–高速分发–终端计算”的数据回放链路。存储服务器用于管理与存储原始实验数据，并通过40 G光纤网络向回灌工作站进行高速数据分发，以满足长时序、大规模场景回放的吞吐需求。回灌工作站在接收数据后完成必要的解析与组织，并通过千兆以太网向Orin侧输出点云、视频流等在线计算所需的数据流，为后续融合与验证提供输入。

**表3　平台功能项列表及描述**

Tab.3　List and description of platform functional items

| 序号 | 功能项 | 描述 |
|---|---|---|
| 1 | 功能测试和验证 | 提供功能测试和验证的环境，确保导航定位系统的各项功能按预期工作，包括对不同软件版本的回归测试和功能比较 |
| 2 | 数据回放 | 可复现真实列车运行时的传感器数据和列车总线数据，用于分析软件问题、评测KPI指标以及定位感知、定位、功能激活等问题 |
| 3 | 负载和压力测试 | 产生真实进程负载，实现负载和压力测试，包括大型/长场景测试和耐力测试，以评估系统的稳定性和性能 |
| 4 | 不同软件版本的回归测试 | 可对比不同版本的软件释放，进行回归测试，确保新版本的软件在性能和功能上的改进 |
| 5 | 基础软件和中间件测试 | 可用于测试硬件上的基础软件和中间件，评估其在实际运行环境中的性能和稳定性 |
| 6 | 总线数据和内部数据分析 | 提供对总线数据和内部数据的分析功能，用于故障分析、软件版本对比等用途 |

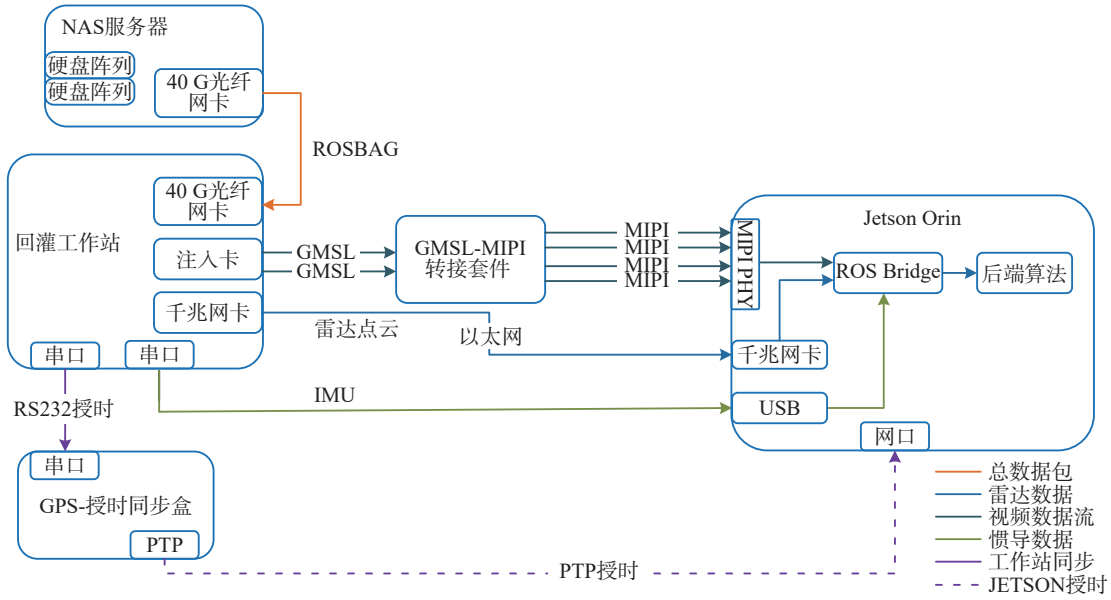


**图2　平台接口与数据链路示意图**

Fig.2　Schematic diagram of platform interface and data link

### 3.2　传感器数据注入

平台面向多源传感器数据构建了多通道注入路径，以实现对真实运行场景的复现。

（1）视频图像：双目图像通过视频注入卡进入GMSL链路，经GMSL-MIPI转接套件完成接口适配后，以MIPI格式接入Orin平台，用于图像处理与视觉感知。

（2）雷达点云：点云等高带宽数据通过以太网接口传输至Orin，为环境感知与定位计算提供输入。

（3）惯导数据：IMU数据通过串口传入，用于姿态与加速度等运动信息获取。

（4）时间同步链路：回灌工作站通过RS232对GPS授时同步盒进行授时，同步盒再通过PTP向Orin分发高精度时间基准，用于多源数据时间戳对齐。其中，采集阶段该链路用于为各传感器与记录系统提供统一授时基准以生成一致的采样时间戳；回放阶段则用于将注入与计算端锁定到同一时间基准，抑制接口传输抖动带来的时序偏差。

### 3.3　Orin端接入与消息封装

Orin平台负责多源数据的统一接入与在线处理。系统在Orin端部署ROS通信框架，通过ROS Bridge将来自MIPI、以太网、串口等不同接口的数据封装为统一的ROS消息并发布，形成标准化数据接口，便于后端定位、感知与互操作验证模块调用。

### 3.4　数据记录与同步

平台在Orin端可采用本地存储或外接存储硬盘对关键数据流进行缓存与记录，用于离线复核、故障追溯与指标统计。时空一致性方面，系统以PTP提供的统一时间基准对多源数据进行时间对齐，从而降低跨传感器时间偏差对融合计算与系统验证结果的影响，保证数据融合与性能评估的可靠性。

## 4　应用实例

为验证平台对全息感知链路的支撑能力，选取“轨旁关键目标检测与三维测距”作为代表性子任务开展应用验证。该子任务覆盖全息感知中的视觉几何建模与目标识别环节，输出目标类别、空间位置与距离信息，并在统一授时条件下与定位信息进行时空对齐，可直接服务于列控系统对运行态势的感知输入与安全评估需求。

### 4.1　铁路场景感知算法部署

本实验所用数据集分别于2024年11月在国家铁道试验中心(环铁线)和2020年12月在朔黄铁路(神池南—黄骅港)朔州—神池段实地采集完成。数据覆盖多时段、不同工况下的真实铁路运行场景，面向轨旁关键目标感知任务，包含信号机、电线杆、百米标、公里标、桥梁等典型目标的多源传感器数据。为开展平台化验证，采集数据以ROSBAG形式存储于NAS服务器，并通过高速光纤链路回放至工作站；随后数据以在线流的方式输入至Orin计算单元，从而在计算端复现原始数据的时序特征与吞吐负载，模拟列车在线运行条件下的数据输入环境。在Orin端部署面向铁路场景的双目感知处理链路：采用Raft-Stereo光流立体匹配算法用于视差估计，并结合YOLOv8目标检测算法实现沿线关键目标的识别与定位，检测算法处理流程如图3所示。

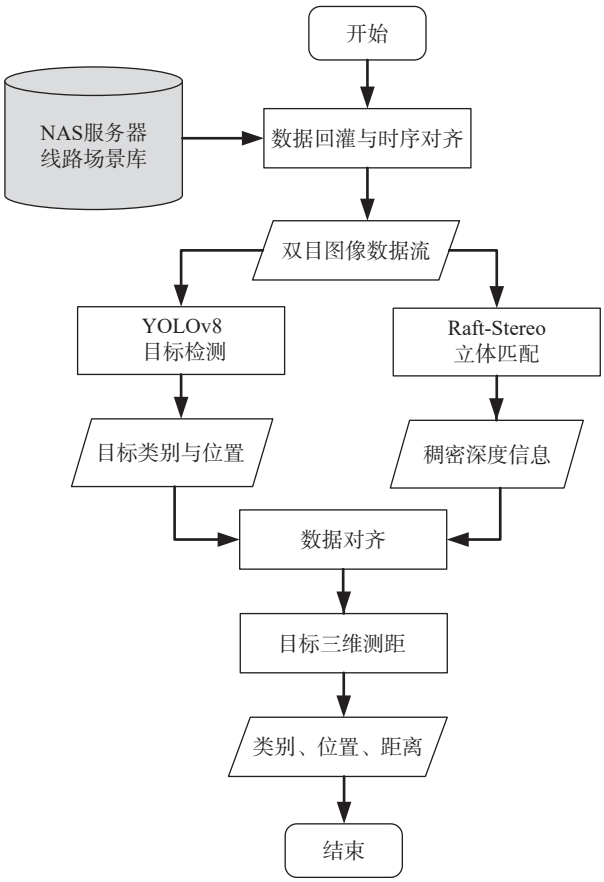


**图3　检测算法处理流程**

Fig.3　Processing flowchart of detection algorithm

在数据注入阶段，回灌工作站的注入软件与Orin端接收模块协同工作，实现多源数据的稳定回放与在线传输。存储服务器基于分布式文件系统对ROSBAG数据进行管理与分发，并通过高速链路将回放数据推送至回灌工作站。为保证多传感器数据的时空一致性，回灌工作站在ROS环境下对回放消息进行时间重映射，统一各数据流的时间基准并修正潜在的时间漂移。随后，系统采用ZeroMQ中间件的发布和订阅通信模式将数据流发布至计算端，由Orin以异步订阅方式接收多通道消息，从而在保障吞吐的同时降低端到端传输延迟，为后续实时处理提供稳定的数据输入基础。

## 4.2　平台运行效能与实时性验证

面向平台在高算力需求算法负载下的运行能力开展验证，重点评估其在多源数据回放条件下的计算吞吐与实时性表现。针对铁路场景对在线处理时延与稳定性的要求，平台基于Orin的GPU异构计算架构，对深度学习推理链路进行了部署与优化，通过CUDA流并行技术建立了线程池，并对算法的计算逻辑进行了适配与优化，提升端到端处理效率。

多源感知数据回放与同步可视化界面如图4所示，支持图像、点云、惯导、卫导多源数据的回放与状态显示。实验过程中，平台Orin端能够稳定加载并运行双目立体匹配与目标检测等深度学习模型。在连续回放30 min的稳态运行条件下，平台的平均推理帧率约为10 fps；输入图像分辨率为1 920×1 536像素。运行过程中，Orin端GPU资源占用稳定在40%左右，表明平台在长时序负载下具备稳定的计算吞吐与实时处理能力。上述结果说明，平台在长时序连续负载下具有较稳定的计算吞吐与实时处理能力，可满足所构建感知链路的在线运行需求。

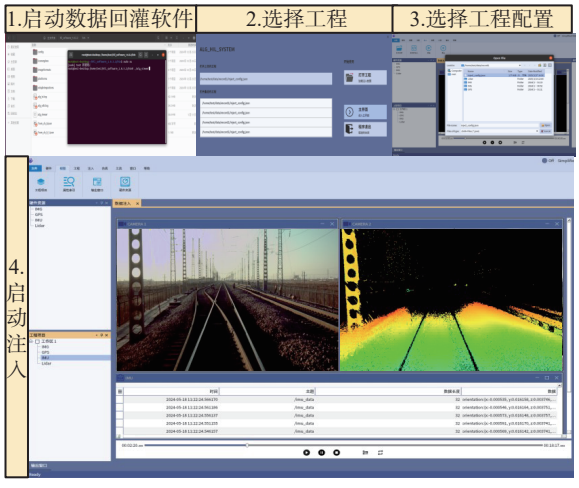


**图4　多源感知数据回放与同步可视化界面**

Fig.4　Interface for multi-source perception data replay and synchronized visualization

## 4.3　感知结果输出与系统功能验证

平台能够实时输出包含目标类别、位置信息及距离估计等结构化数据，并将深度估计与目标检测信息进行关联展示。轨旁目标检测与三维测距结果如图5所示，其中，深度图能够反映场景几何结构与空间层次，目标检测结果则能够识别铁路沿线典型目标，并同步输出对应的距离信息或三维测距结果。综上，平台已经形成从数据回灌、授时对齐、在线推理到结果输出的完整处理链路，可有效支撑全息感知算法的集成验证与系统级功能测试。跨线路互操作验证指标如表4所示，表4进一步给出了环铁线与朔黄铁路2条线路场景下的互操作量化结果。在统一接口规范下，2条线路的感知数据字段校验均可通过；同时，回放注入链路在不同线路条件下均保持了较好的时间对齐精度和帧率稳定性，端到端丢帧率也维持在较低水平。上述结果说明，平台在跨线路场景下具备良好的接口兼容性、时序一致性和链路稳定性，能够为多场景、跨线路条件下的互操作验证提供有效支撑。

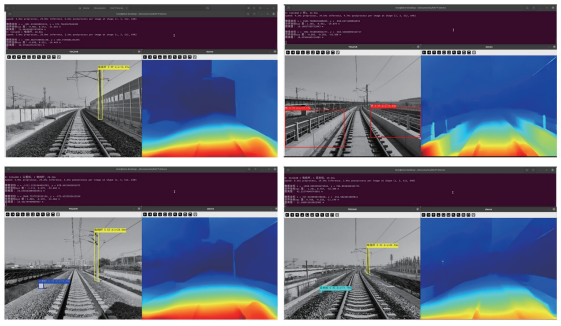

**图5　轨旁目标检测与三维测距结果**

Fig.5　Trackside object detection and three-dimensional ranging results

**表4　跨线路互操作验证指标**

Tab.4　Cross-line interoperability verification metrics

| 类别 | 指标 | 环铁线 | 朔黄铁路 | 目标 |
|---|---|---|---|---|
| 接口兼容性 | 接口校验通过率/% | 100 | 100 | 100 |
| 时序一致性 | 相机-GNSS时间对齐误差P95/us | 50 | 52 | ≤100 |
| | 图像回放帧率稳定性/fps | 10 ± 0.3 | 10 ± 0.2 | ≥10 |
| 链路稳定性 | 数据流端到端丢帧率/% | 2 | 3 | ≤5 |

## 5　结束语

本研究设计并实现了一套面向列车全息感知与互操作验证的测试平台，通过回放真实线路采集的多源传感器数据与总线数据，构建可复现的闭环验证环境。平台集成场景库管理、故障注入与性能评估能力，支持在高铁/城际等典型工况下开展功能验证与负载耐力测试。系统以Orin为核心计算单元，结合多接口数据注入、ROS消息发布与PTP高精度授时同步，实现多源数据的稳定接入与时空对齐，为后续多制式列控系统的系统级验证与工程应用提供了可靠支撑。

**参考文献：**


[1] 中国国家铁路集团有限公司．中国国家铁路集团有限公司发布《新时代交通强国铁路先行规划纲要》[EB/OL]．(2020-08-13) [2026-02-05]．http://www.chinarailway.com.cn/xwzx/rdzt/ghgy/gyqw/202008/t20200812_107636.html.

[2] 龙　腾，王彧弋，林　军，等．轨道交通车载智能化应用技术发展展望[J]．机车电传动，2024(1)：11-21.
LONG Teng，WANG Yuyi，LIN Jun，et al. Development Review and Prospects of Intelligent Technology in Rail Transit Vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives，2024(1)：11-21.

[3] 余祖俊，王洪伟，王　悉，等．轨道交通自主运行控制技术综述[J]．北京交通大学学报，2025，49(5)：6-33.
YU Zujun，WANG Hongwei，WANG Xi，et al. Review of Autonomous Operation Control Technology for Railway Transportation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(5)：6-33.

[4] GAO H，HUANG Y，LI H，et al. Multi-Sensor Fusion Perception System in Train[C]//2021 IEEE 10th Data Driven Control and Learning Systems Conference(DDCLS). Suzhou：IEEE，2021：1171-1176.

[5] DENG Z，SONG H，HUANG H，LI Y，DONG H. Multi-Sensor Based Train Localization and Data Fusion in Autonomous Train Control System[C]// 2020 Chinese Automation Congress (CAC). Shanghai：IEEE，2020：5702-5707.

[6] 李　慧，蔡伯根，吴大勇，等．低空无人机技术在铁路行业的应用与展望[J]．铁道运输与经济，2026，48(1)：46-58.
LI Hui，CAI Bogen，WU Dayong，et al. Application and Prospect of Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle Technology in Railway Industry[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：46-58.

[7] 蔡伯根，李智宇，王　剑，等．面向铁路巡检的低空无人机智能感知与精密定位研究[J]．铁路通信信号工程技术，2025，22(1)：1-12.
CAI Bogen，LI Zhiyu，WANG Jian，et al. Research on Intelligent Sensing and Precise Positioning of Low-Altitude UAV for Railway Inspection[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(1)：1-12.

[8] AELA P，CHI H L，FARES A，et al. UAV-Based Studies in Railway Infrastructure Monitoring[J]. Automation in Construction，2024，167：105714.

[9] BUTT M Z，NASIR N，A. RASHID R B. A Review of Perception Sensors，Techniques，and Hardware Architectures for Autonomous Low-Altitude UAVs in Non-Cooperative Local Obstacle Avoidance[J]. Robotics and Autonomous Systems，2024，173：104629.

[10] 王　力，王冬海，李雪飞，等．适应四网融合的市域(郊)铁路列控系统互联互通设计方案研究[J]．铁道标准设计，2024，68(7)：1-10.
WANG Li，WANG Donghai，LI Xuefei，et al. Research on Design Scheme of Interconnection and Interoperability of Regional (Suburban) Railway Train Control System in Response to the Integration of the Four Networks[J]. Railway Standard Design，2024，68(7)：1-10.

[11] 张国慧．轨道交通不同制式信号系统的兼容性及其互联互通[J]．城市轨道交通研究，2021，24(4)：39-44.
ZHANG Guohui. Compatibility and Interoperation between Different Formats of Rail Transit Signaling System[J]. Urban Mass Transit，2021，24(4)：39-44.

[12] 国家铁路局．复杂路网条件下高速铁路列控系统互操作和可靠运用关键技术及应用[EB/OL]．(2018-11-02)[2026-02-05]．https://www.nra.gov.cn/ztzl/hd/cxdh/cxcg/kjj/edj/201811/t20181102_146889.shtml

[13] European Union Agency for Railways. Subset-076：Scope of the Test Specifications[EB/OL]．(2012-02-25) [2026-02-27]．https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/index009_-_subset-076-0_v233.pdf.

[14] European Union Agency for Railways. Report on Railway Safety and Interoperability in the EU-2022[EB/OL]．(2022-05-01) [2026-02-27]．https://www.era.europa.eu/system/files/2022-10/


（下转第57页）