

文章编号: 1003-1421(2026)10-0001-09

引用格式: 王浩宇, 陆德彪, 蔡伯根, 等. 列车运行全息感知控制实验平台功能测试方法[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(10): 1-9.
WANG Haoyu, LU Debiao, CAI Baigen, et al. Function Testing Methods of Holographic Perception Control Experimental Platform for Train Operation[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(10): 1-9.

列车运行全息感知控制实验平台功能测试方法

王浩宇¹, 陆德彪^{1, 2, 3}, 蔡伯根^{1, 2, 3}, 王 剑^{1, 2, 3}, 刘 江^{1, 2, 3}, 姜 维^{1, 2, 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. 北京交通大学 北京市电磁兼容与卫星导航工程技术研究中心, 北京 100044)

摘 要: 随着列车运行控制实验平台由传统控制与防护功能向感知、计算、决策协同方向发展, 实验平台对复杂线路场景下多源感知信息的连续接入、时空一致性和关键目标稳定感知能力提出了更高要求。针对现场试验组织成本高、典型场景覆盖不足以及多源数据难以重复验证等问题, 研究面向列车运行控制实验平台全息感知功能的测试验证需求, 构建可复现、可量化的测试环境与测试方法。并基于平台输出真实线路数据闭环回放, 设计线路环境适应性、多感知源一致性和环境目标识别精度3类测试方法。多条线路数据集回放测试实验表明, 设计的平台未出现明显数据异常状况; 时间同步稳定, 时间偏差控制在20 μ s以内; 信号灯(信号机)、电线杆、公里标、百米标与桥梁5类环境目标检测准确率均达到94%以上, 整体误检率 $\leq 5\%$ 、漏检率 $\leq 3\%$ 。结果表明, 该平台及测试方法可支撑全息感知能力的系统化验证, 为多源感知链路稳定性、时空一致性和环境目标识别能力评价提供依据。

关键词: 列车运行控制; 全息感知; 闭环回放; 多感知源; 目标识别

中图分类号: U284 文献标识码: A DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20260402001

Function Testing Methods of Holographic Perception Control Experimental Platform for Train Operation

WANG Haoyu¹, LU Debiao^{1, 2, 3}, CAI Baigen^{1, 2, 3}, WANG Jian^{1, 2, 3}, LIU Jiang^{1, 2, 3}, JIANG Wei^{1, 2, 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. Beijing Engineering Research Center of EMC and GNSS Technology for Rail Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the evolution of train operation control experimental platforms from conventional control and protection functions toward integrated perception, computation, and decision-making, higher requirements have been placed on continuous multi-source perception data access, spatiotemporal consistency, and stable recognition of key targets in complex railway line scenarios. In response to the high cost of field testing, insufficient coverage of typical scenarios, and limited repeatability of multi-source data validation, based on the testing and validation requirements of the holographic perception function in a train operation control experimental platform, a reproducible and quantifiable testing environment and method were developed. Based on the closed-loop replay of real line data

收稿日期: 2026-04-02

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(U2568222, U2468202, U2268206, T2422002); 先进轨道交通自主运行全国重点实验室(北京交通大学)自主课题(RA02025ZD001)

from the holographic perception experimental platform (HPEP), three test methods were designed for line-environment adaptability, multi-sensor consistency, and environmental target recognition accuracy. Replay experiments of multiple line dataset show that the proposed HPEP exhibits no obvious data anomalies, maintains stable time synchronization with the deviation controlled within 20 μ s, and achieves detection accuracy above 94% for five categories of environmental targets including signal light, wire pole, kilometer post, hundred-metre sign, and bridge, with an overall fallout ratio no greater than 5% and a miss ratio no greater than 3%. The results indicate that the HPEP and the proposed testing method can support systematic validation of holographic perception capability, providing evidence for evaluating multi-sensor perception link stability, spatiotemporal consistency, and environmental target recognition performance.

Keywords: Train Operation Control; Holographic Perception; Closed-Loop Replay; Multi-Source Perception; Target Recognition

0 引言

随着列车运行密度提升、线路条件复杂化以及运营场景多样化,列车运行控制实验平台已不仅仅局限于传统意义上的控制与防护功能,而是逐步向全息感知、计算、决策和协同一体化方向发展^[1-2]。其中,本研究所提出的全息感知指在统一时间基准下对惯性导航、卫星导航、相机与激光雷达等多源感知信息进行连续接入、时空对齐、统一组织和联合表达,形成对列车运行前方线路环境与铁路沿线关键目标的综合感知能力。列车运行全息感知实验平台是开展列控系统功能验证、性能评估和场景复现的重要工具^[3-4]。铁路运行环境线路复杂多样,实验平台需要连续接入列车状态、线路基础设施状态及外部运行环境等多源信息,并保证不同来源数据在统一时间基准下的同步组织与稳定输出^[5]。列车全息感知对多种类型传感器与车辆运行数据的统一接入、时空对齐、语义理解与融合表达,其本质是构建面向列车运行场景的综合感知能力,而非单一传感器或单一算法的局部增强^[6]。因此,全息感知能力的验证对象为端到端闭环链路的整体功能验证,不仅需要评估局部模块的功能性能,还能够验证平台在跨模块数据流与统一时间基准下保持稳定、连续运行的能力^[7]。

在国内外轨道交通列控实验平台验证与确认方面,一般围绕实验平台功能安全、可靠性、可用性和可维护性等要求,采用分层验证、场景化测试和证据化评估等技术路线开展实验平台验证工作^[8]。随着智能感知与多传感融合技术在轨道交通中的应用逐步深入,列车全息感知功能测试逐渐从单一设备或接口验证,扩展到感知算法识别精度、定位误

差和鲁棒性等方面的综合评估。相关研究通常采用仿真测试、半实物试验或硬件在环等方法,以提高测试覆盖率、降低现场试验成本,并增强测试过程的可重复性^[9]。这些研究为全息感知实验平台测试提供了基础,但在实验平台级测试方法方面存在不足,特别是在真实线路数据驱动、多源时空一致性验证、跨模块互操作能力评估以及测试结果可追溯组织等方面,尚缺乏兼顾工程可实施性与评估完整性的统一方法^[10-11]。

全息感知能力在轨道交通场景中的验证仍面临多方面挑战。首先,现场试验组织成本高、实施周期长,且受天窗时间、线路运营安排和安全管理要求约束明显,导致测试样本获取难度大,边界工况与低频异常场景覆盖不足^[11]。其次,多源感知数据融合对时间同步精度、数据完整性和接口一致性高度敏感,任何输入侧的小尺度偏差都可能在融合与输出环节被放大,进而影响实验平台整体功能判定的可靠性。再次,轨道交通场景具有较强的线路依赖性与环境差异性,不同地理条件、自然环境和基础设施分布特征会对感知输入质量、数据处理稳定性和检测输出一致性产生显著影响,仅依赖单一线路或单一测试环境难以全面反映实验平台的适应能力。此外,随着实验平台协同程度提升,测试不再仅是对单点性能指标的测量,还需要验证跨模块、跨接口的数据兼容、同步关联与一致性输出能力,测试对象最终体现为端到端闭环能力的实验平台级评估^[12]。

基于上述背景与问题,面向列车运行控制实验平台全息感知过程构建可重复、可追溯、可量化的测试方法具有重要意义。相较于完全依赖现场试验条件或完全仿真条件,基于真实线路数据的闭环回

放能够在受控条件下复现实车运行过程中的传感器数据流与车辆运行数据,保留真实场景数据的统计特征与环境差异信息,通过持续采集、场景库扩充和异常样本补充进一步提高边界场景覆盖度^[13],兼顾真实性与可复验性。在此基础上,若进一步结合实验平台组成层面的性能验证与功能链路层面的专项测试,可形成从输入侧一致性到输出侧有效性的完整测试闭环,为全息感知能力的工程化验证提供更加稳定的技术路径^[14]。

本研究围绕列车运行控制实验平台全息感知过程的测试验证展开,结合系统性能测试与功能测试构建面向实验平台闭环链路的测试方法。研究以真实线路数据闭环回放为基础能力,复现传感器与车辆数据流并构建可复用的测试场景支持;在此基础上,从实验平台组成与运行保障角度对关键性能约束进行验证,并围绕线路适应性、多感知源一致性及环境目标识别能力开展功能测试设计,以形成覆盖输入、处理与输出环节的实验平台级测试框架。

1 列车运行控制全息感知功能实验平台

面向全息感知功能实验平台的测试验证方法开展研究,实验平台在受控条件下复现真实列车运行过程中的传感器与列车数据流,形成与现场一致的处理负载与数据时序关系,从而为功能验证提供可重复的测试环境。实验平台具备现场数据注入、闭环回放能力,可复现列车运行过程,并基于实测线路数据构建多维度场景数据支撑。

1.1 全息感知实验平台功能与逻辑组成

基于上述测试要求,设计并构建列车全息感知

功能实验平台,为列车运行控制场景下的全息感知能力提供统一、可重复的实验平台级验证环境。实验平台主要具备3类功能:①面向多线路与多场景的数据管理能力,将实测运行数据按线路条件与典型场景切换片段进行整理与存储,形成可复用的线路场景数据库;②面向多源异构信号的规范化接入与受控回放能力,对来自多传感器通道的数据进行统一封装与时序组织,在统一时基约束下实现按原始顺序的连续回放注入;③面向测试评价的输出记录与证据链组织能力,在回放条件下保持跨源时间戳一致与序列对应关系稳定,支持对实验平台运行状态、链路连续性与感知输出的可追溯分析。实验平台逻辑结构由3个功能模块构成,全息感知实验平台逻辑组成如图1所示。

现场采集线路数据库模块,数据库内容来源于现场铁路线路条件下采集并汇聚多模态数据,包括全球卫星导航实验平台(Global Navigation Satellite System, GNSS)、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、相机图像(Camera)与激光雷达点云(LiDAR)数据集,并完成数据封装与管理,为后续回放注入提供统一的数据源。在平台设计过程中,从全息感知功能测试需求出发,将列车运行控制系统中的数据采集、信号转换等功能纳入闭环回放测试链路,为真实线路数据场景复现、多源数据接入、时序对齐和测试结果评价提供可控输入条件。

数据信号转换模块,承担异构接口适配与信号规范化功能,通过接口转换将多源数据映射为规范化接收端数据,其中GNSS与IMU原始输出通过串口直接发送至多源信号处理模块,图像视频与激光

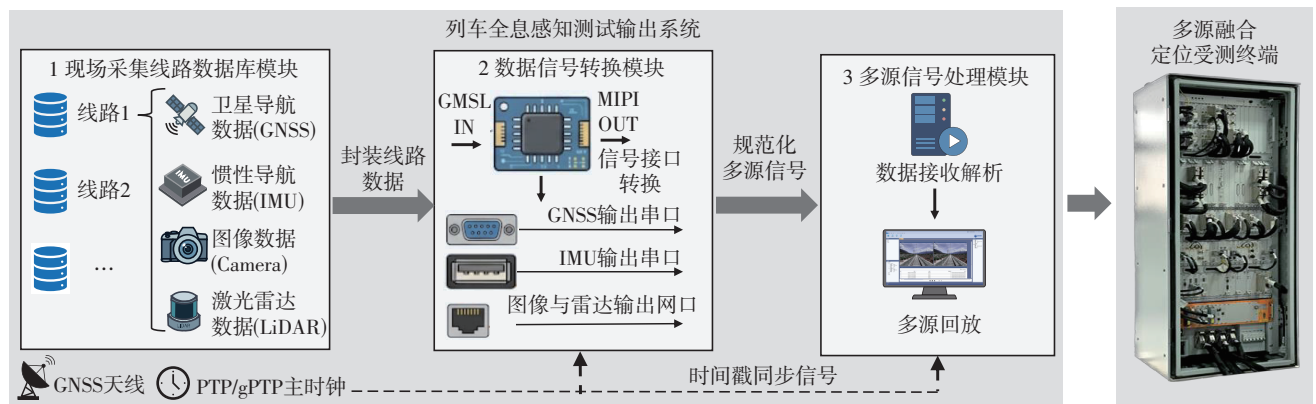


图1 全息感知实验平台逻辑组成

Fig.1 Logic composition of holographic perception experimental platform

雷达数据由于带宽需求较高,需要通过 GMSL-MIPI 转换链路完成接口适配。千兆多媒体串行链路(Gigabit Multimedia Serial Link, GMSL)是一种面向车载视觉传感器的高速串行传输技术,移动产业处理器接口(Mobile Industry Processor Interface, MIPI)是嵌入式计算平台常用的相机输入接口标准,保证多源数据能够并行进入同一处理链路并保持结构一致。

多源信号处理模块,在接收端对规范化后的多源数据进行接收、解析与组织,完成多源回放与数据分发,并为后续多源融合定位与环境感知算法提供一致的数据接口与连续的数据供给,保证在长时间回放与场景切换条件下处理链路稳定运行。

全局时间同步装置,由 GNSS 天线和 PTP/gPTP 主时钟组成,用于为实验平台提供统一时间基准。装置通过 GNSS 授时获取全局时间参考,并利用网络同步机制,将统一时基传递至数据输出、信号转换、接收与解析等环节,使多源数据在闭环回放过程中保持时间戳一致。经接收端解析与多源处理后,相关运行状态信息发送至融合定位测试终端,为后续定位与感知功能测试提供输入条件。

1.2 实验平台硬件性能测试项

实验平台硬件性能测试项包括端到端一致性与完整性验证、传输时延与吞吐稳定性评估,以及时间同步精度验证 3 项。

(1) 端到端一致性与完整性验证。比较源端与接收端的数据记录数量、帧序连续性、时间戳对应关系和关键字段有效性,确认数据回放、缓存与解析过程中未出现记录未完整复现、帧序错位、时间戳异常或字段解析错误等问题。

(2) 传输时延与吞吐稳定性评估。在长时间回放过程中统计处理速率及波动特性,并结合实验平台日志分析是否存在处理阻塞、异常恢复或持续性性能退化,以判定链路在典型负载下的可持续运行能力。

(3) 时间同步精度验证。采用硬件时间戳比对

量化不同节点间时间偏差,并结合同步协议状态核查评估时基建立与长期稳定性,重点关注偏差是否满足微秒级约束以及长时间运行中是否出现漂移或跳变,从而确保多源数据具备可对齐、可关联的时序基础。

依据测试工程经验,10 次连续运行可有效覆盖回放链路初始化波动及短期异常恢复周期,当上述 3 项指标在实验平台工作过程中连续回放 10 次保持稳定输出,未出现崩溃、卡死或长时间阻塞等失效现象,可认为系统性能满足功能测试的基本要求。全息感知实验平台性能测试如表 1 所示。

2 全息感知实验平台功能测试方法

全息感知实验平台功能测试遵循数据驱动的闭环方式,以真实线路采集的多源数据作为输入,通过回放复现列车运行过程中的数据流与实验平台负载,使受测终端在受控条件下具备可重复性。测试流程可标准化为 4 个环节:①对原始数据进行预处理,包括清洗、同步性检查与真值标注;②完成工程配置,加载与测试线路相匹配的必要参数配置;③按原始时序进行闭环注入,复现多源数据并发输入与场景切换过程;④开展自动化评估,将实验平台输出与真值或一致性约束进行比对统计,形成可量化的功能判定依据。全息感知实验平台功能测试内容如表 2 所示。

2.1 线路环境适应性测试

线路测试用于评估全息感知实验平台在不同铁路运行环境中的跨场景适应能力与连续运行稳定性,评估环境变化对数据获取、数据传输、时序组织、处理链路及感知输出一一致性的综合影响。相较于单一场景下的静态功能验证,全息感知实验平台的线路测试要求环境扰动条件下实验平台状态的持续稳定性,重点关注地理与气候差异、光照突变、遮挡增强、轨道拓扑变化等因素引发的输入分布变化及

表 1 全息感知实验平台性能测试
Tab.1 Performance tests for holographic perception experimental platform

测试名称	测试内容	测试方法	评价指标
一致性与完整性	源端记录与接收端解析结果一致性,数据缺失/异常识别	对数据库与接收端对照核查,统计回放数据量与关键字段	运行稳定性,数据传输稳定性,失效事件
数据吞吐稳定性	长时间回放下链路处理稳定性,阻塞/退化识别	连续回放并统计处理速率波动,通过日志记录数据运行状态	吞吐波动范围,异常/恢复事件
时间同步精度	多源采集数据时间同步一致性与长期稳定性	长时间监测硬件时间戳比对	时间偏差,漂移/跳变情况

表2 全息感知实验平台功能测试内容

Tab.2 Function test items for holographic perception experimental platform

测试名称	测试内容	测试方法	评价指标
线路环境适应测试	多种场景结构的差异化线路数据	对长距离连续回放并覆盖多次场景切换；对切换时段进行观测	运行稳定性，数据传输稳定性，失效事件
感知源测试	IMU, GNSS, Camera, LiDAR 4类传感器数据	单传感器完整性监测、采样间隔稳定性判断；多传感器跨源对齐，包括时间匹配稳定性，运动学/空间一致性约束	丢失比例，最大连续缺失，采样间隔；时间偏移比例，列车运动趋势、空间一致性偏差
环境目标测试	信号灯(信号机)、电线杆、公里标、百米标与桥梁5类典型目标	基于相机图像数据连续回放，目标检测模型在线推理，与人工标注真值进行空间匹配计算准确度	分类别检测准确度、整体误检率、漏检率

其在处理链路中的传播效应，并据此判断实验平台是否具备面向实际线路运行的适用性。全息感知实验平台功能线路环境适应性测试方法如图2所示。

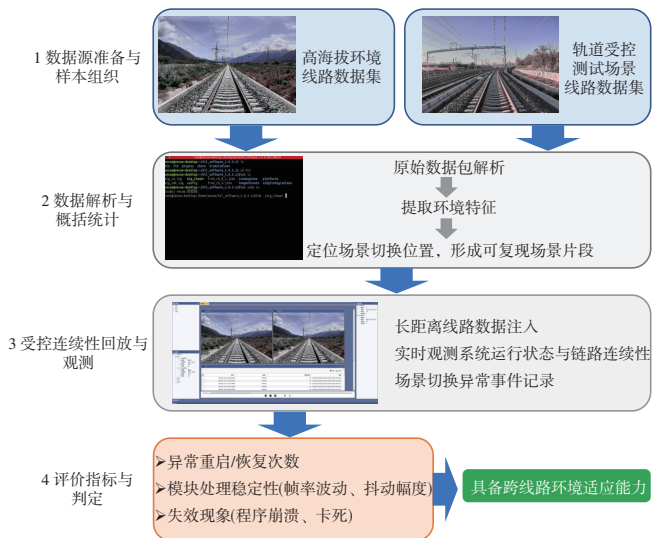


图2 全息感知实验平台功能线路环境适应性测试方法

Fig.2 Line-environment adaptability test method for holographic perception experimental platform function

(1) 数据源准备：采集的数据应在场景属性、环境扰动来源及基础设施分布形态上具有明显差异，可用于检验实验平台在不同线路条件下的数据链路稳定性与功能输出一致性。为避免样本选择偏差，样本组织阶段需保证验证测试选择的初始数据均包含若干典型场景切换事件，并在时间轴上保留完整过程，在统一测试框架下对实验平台鲁棒性进行对比分析。

(2) 数据解析：需要完成数据完整性核查与场景片段标记。通过对多源数据的时间范围、记录数量、采样连续性等基础信息进行统计，并结合图像序列、定位轨迹与线路结构信息，对光照变化区段、天气特征区段及轨道拓扑变化区段进行定位与标记。

(3) 受控连续性回放：采用受控条件下的连续性回放方式，按原始时间顺序注入长距离线路数

据，保持数据流的时序关系与场景切换顺序不变，以尽可能复现线路运行过程中的输入动态变化。同时关注感知与处理模块在场景切换时段是否出现异常中断、处理阻塞、状态重置或恢复延迟，在数据处理链路层面，对输入接收、解析组织与输出生成过程在环境快速变化条件下能否保持连续运行状态。

(4) 评价指标与判定：以实验平台日志与运行统计结果为主，结合场景切换片段进行分析。评价指标分为稳定性指标与失效事件。稳定性指标指的是处理链路在环境变化条件下的运行平稳程度，如帧率波动范围、抖动幅度及波动持续时间；失效事件指的是实验平台在复杂场景下的异常响应，包括实验平台异常重启次数、异常恢复次数，以及是否发生程序崩溃、卡死、长时间阻塞等影响功能可用性的事件。

实验平台应在不同线路条件下均能够完成长时连续回放，且在典型场景切换期间未出现程序崩溃、平台卡死等失效现象，感知输出在场景切换前后保持基本连续与稳定。若在特定类型场景切换中反复出现异常事件或显著波动，则应进一步结合日志记录与片段回放结果定位问题来源，并作为后续感知源测试与环境特征测试的重点关注对象。

2.2 多感知源一致性测试

感知源测试是对实验平台多源输入在回放条件下的一致性检验，从传感器输入侧验证各传感器数据流是否能够被稳定、完整地复现，并在统一时间基准约束下保持可对齐、可关联的跨源一致性关系。全息感知实验平台功能多感知源一致性测试方法如图3所示。

(1) 多感知源数据回放：多感知源传感器的测试至少包含惯导、卫星导航、相机与激光雷达通道数据，分别对应惯性测量来源、卫星定位测量来源与运行周边环境感知信息来源。

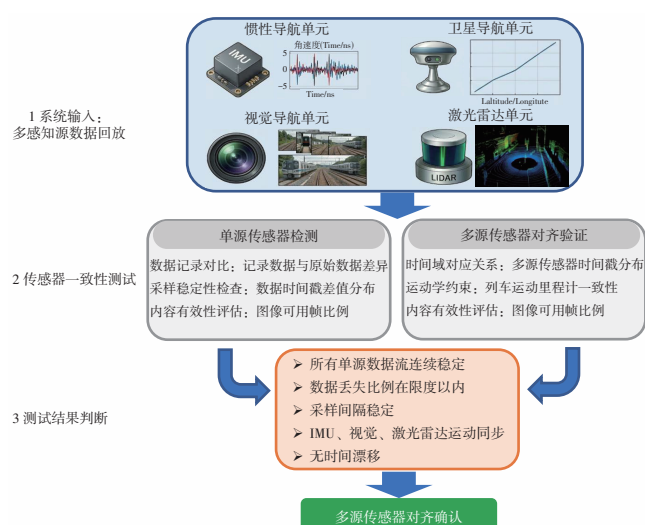


图3 全息感知实验平台功能多感知源一致性测试方法

Fig.3 Multi-sensor consistency test method for holographic perception experimental platform function

(2) 传感器一致性测试：主要包括单源完整性监测与跨源对齐2部分。

单源完整性监测用于确认每一通道在回放链路中具备可用性与稳定性。在数据复现过程中，对各传感器通道的接收记录数与原始记录数进行同步统计，并计算丢失比例，统计最大连续缺失段长度，区分短时随机丢失与长时段断流两类风险。同时，利用相邻时间戳差的分布特性对采样间隔稳定性进行核查，通过其均值与离散程度识别帧率不均、突发延迟或异常抖动等时序问题，当各通道数据流在整个回放区间内保持连续到达、丢失事件处于可控水平且采样间隔无显著异常波动时，证明单源输入具备连续性与可用性。

跨源对齐验证面向多通道数据在统一时间基准下的匹配稳定性与合理性检验。在时间维度上，对不同通道的时间戳序列建立对应关系，形成跨源匹配，统计匹配过程中的时间偏移与失配比例。在列车运行的不同场景中，如连续弯道、出入隧道或过桥等片段中，对比视觉里程计估计的角速度变化趋势与IMU角速度输出的同步性，分析是否存在明显相位滞后、趋势背离或突变不一致等现象。同时选取特征明显且位置稳定的路标或固定设施作为参照目标，在标定关系约束条件下验证LiDAR点云中的空间位置与图像中的像素观测是否存在跨源错配、标定参数不一致或时间同步误差引起的系统性偏差。

(3) 测试结果判断：根据测试结果判断感知源

的一致性，各个单通道数据流应连续稳定，丢失比例与连续缺失段长度处于预设范围内，采样间隔统计特性保持稳定，同时在跨源层面通道间匹配关系应保持一致，时间偏移无明显趋势，IMU与视觉/雷达观测在运动趋势上应具有同步性，避免出现图像或点云观测发生显著变化而其余传感器长期无响应等滞后现象。若出现持续性失配或累计漂移，将其判定为输入侧一致性风险，并在进入输出侧功能评估前完成定位与修正。

2.3 环境目标识别精度测试

环境目标识别测试用于对全息感知实验平台输出侧的关键能力验证，并评估实验平台对铁路沿线典型基础设施与潜在风险要素的感知有效性。测试对象覆盖5类代表性目标，包括信号机/信号灯、电线杆、公里标、百米标、桥梁。对这些铁路沿线目标的检测结果能够反映实验平台在复杂背景、光照变化与遮挡干扰条件下对关键目标的稳定检测能力。通过对上述目标的识别性能评估，可为实验平台在复杂铁路环境中的可用性与可靠性提供量化依据，避免仅以局部场景或单一目标的表现推断实验平台整体能力。全息感知实验平台功能环境精度测试方法如图4所示。

(1) 数据准备与回放：数据准备与回放在多种复杂线路条件下采集列车运行的多模态感知数据，并完成数据完整性核查与预处理，确认记录覆盖所

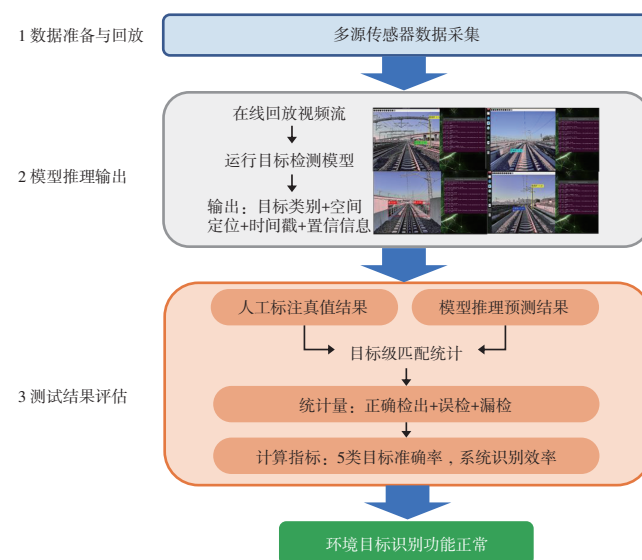


图4 全息感知实验平台功能环境精度测试方法

Fig.4 Environmental accuracy test method for holographic perception experimental platform function

需的时间范围与帧序连续性,同时确保包含IMU、GNSS、相机、激光雷达等关键通道数据,并通过解析工具将数据整理为可回放格式,形成统一的数据集输入。

(2) 模型推理输出:在验证环境中完成回放配置并启动数据库,以原始时序注入长时序数据流,观察回放过程中是否存在滞后或不同步等影响推理稳定性的异常情况,保证输入侧满足连续推理条件。随后,在接收端加载训练好的目标检测模型,对回放视频流进行在线推理,输出目标类别与定位结果,并记录输出的时间戳与置信信息以支持后续追溯。

(3) 测试结果评估:基于人工标注真值对输出结果进行目标级匹配与统计,按类别分别计算5类目标的识别精度,同时给出实验平台层面的误检与漏检统计,从可靠性角度综合评价模型在不同线路条件下的识别表现。

3 全息感知实验平台功能仿真测试结果

测试平台的搭建逻辑按照上文提到的全息感知

实验平台功能逻辑组成,实车运行数据采集,在2条不同的线路分别运行列车,采集多模态感知数据(惯性导航、卫星导航、相机与激光雷达)。通过解析工具分别解析列车运实际运行过程中采集的原始数据,并拷贝至验证平台指定目录;验证平台配置与现场采集线路数据库,在验证平台端进行工程配置,启动数据回放进程;在接收平台启动数据接收进程,解析数据并检查各传感器同步情况,供后续检测及算法验证使用。全息感知实验平台功能测试步骤如图5所示。

本研究测试采用环境特征差异显著的两类典型线路数据集。其中,一类数据集用于测试高海拔等特殊自然条件下的运行环境,其典型特点包括气候条件复杂、光照变化剧烈、环境背景差异明显等;另一类数据集用于测试受控测试轨道中的复杂结构场景,覆盖密集弯道、隧道、桥梁等典型区段。

在系统性能测试中,测试平台在满负载多模态数据注入条件下,全息感知实验平台功能回灌端与接收端均表现出良好的长时间运行稳定性,实验平

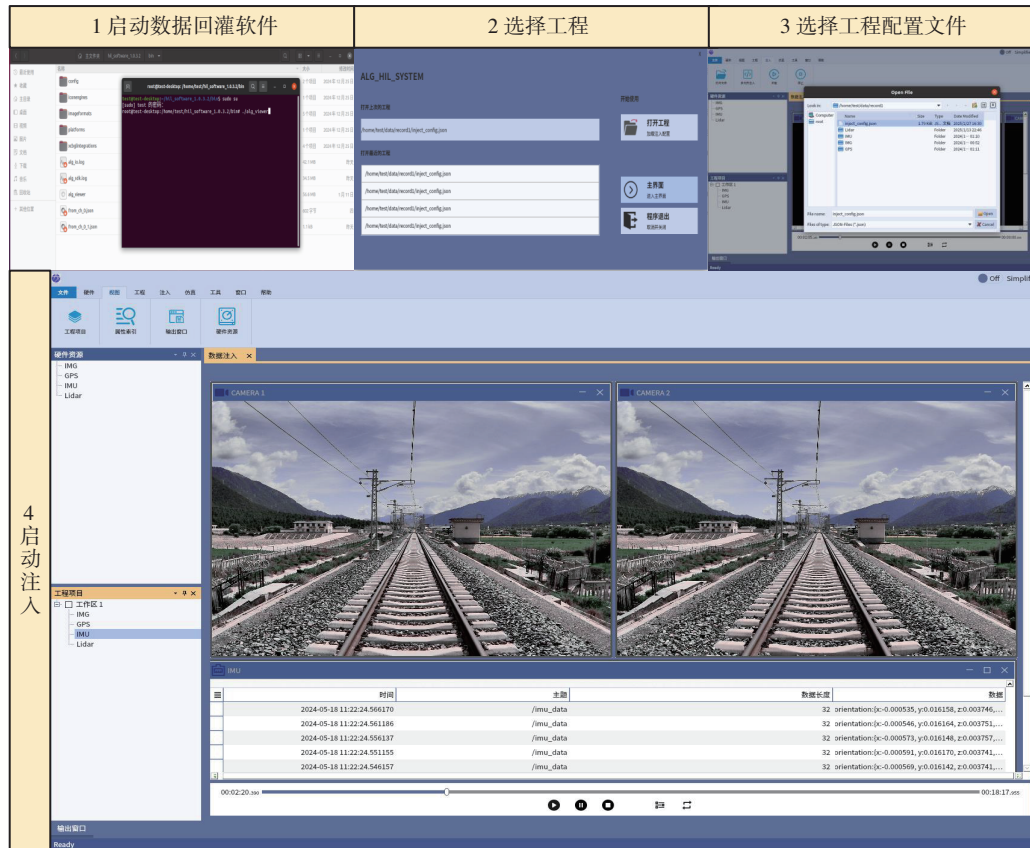


图5 全息感知实验平台功能测试步骤

Fig.5 Test procedure for holographic perception experimental platform function

台运行过程中未出现异常进程阻塞、异常退出或热重启等现象，网络链路保持稳定。时间同步测试显示，两端成功实现PTP时钟同步锁定；在长时间连续监测中，以5 s间隔进行采样，实验平台时间偏差能够控制在20 μ s以内，未观察到明显漂移或误差累积，说明时基稳定性满足微秒级对齐需求。

在功能测试中，对提取的2类代表性线路数据集进行长距离受控回放。回放过程中数据注入稳定，未出现明显数据丢失或时序错乱；IMU，GNSS与Camera/LiDAR等多源数据解析与存储完整，跨源时序匹配保持一致，未见显著丢帧、畸变或画面滞后。关键环境特征识别测试覆盖信号机/信号灯、电线杆、公里标、百米标与桥梁5类目标，采用人工逐帧标注真值进行关键特征匹配与统计。铁路沿线目标检测故障现象统计结果如表3所示，5类环境目标识别结果如表4所示。

表3 铁路沿线目标检测故障现象统计结果 %

目标类型	典型场景	故障现象	故障比例
信号机	背光、遮挡	漏检	7.5
电线杆	背景结构相似、密集	误检	6.4
公里标	阴影遮挡、小目标	漏检	6.1
百米标	远距离小目标	漏检	8.7
桥梁	桥梁结构变化	误检	5.8

测试结果表明，在闭环回放条件下，平台能够稳定输出可用于环境目标识别测试的图像数据流，并支持检测结果与人工标注真值之间的匹配统计。2类线路条件下，5类目标识别准确率均达到94%以上，综合误检率 $\leq$ 5%、综合漏检率 $\leq$ 3%，说明在统一输入和受控回放条件下，实验平台能够完成环境目标识别功能的连续测试、结果记录和量化评价。

表4 5类环境目标识别结果 %

Tab.4 Recognition results of five categories of environmental targets									
序号	线路数据集	信号机	电线杆	公里标	百米标	桥梁	均值	误检率	漏检率
1	高海拔场景	94.6	94.1	95.0	94.2	94.8	94.5	4.6	2.7
2	高海拔场景	95.2	94.4	95.1	94.3	95.0	94.8	4.4	2.6
3	受控测试场景	94.3	94.0	94.7	94.2	94.6	94.4	4.8	2.9
4	受控测试场景	94.9	94.5	95.3	94.6	95.2	94.9	4.2	2.4
5	受控测试场景	94.5	94.2	94.9	94.1	94.7	94.5	4.5	2.7
均值		94.7	94.2	95.0	94.3	94.9	94.6	4.5	2.7

4 结论

围绕列车运行控制实验平台的全息感知验证需求，构建基于真实线路数据闭环回放的测试体系，实现线路环境适应、多感知源一致性、环境目标识别精度3类功能用例，以端到端一致性、吞吐稳定性与时间同步精度作为性能支撑。多次测试仿真回放结果表明：平台在满负载条件下可长期稳定运行，时间同步可靠，满足闭环功能验证的可靠性要求，为实验平台全息感知的可重复评估提供了统一输入与可量化判据，可降低现场试验成本并提升场景覆盖率。受限于线路与场景库规模、光照变化对视觉检测的敏感性评价维度仍偏重检测指标，后续将扩充多天气、多时段数据，提升面向更复杂应用场景的验证能力。未来，还将基于本次测试的结果持续优化平台性能，并加强测试体系，以支持更复杂的应用场景，同时为后续多源融合定位受测终端的输入要求进行对应配置。

参考文献：

[1] 李学峰, 潘明亮, 王卫东, 等. 都市圈智能城际铁路发展理念与总体架构设计[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(7): 1-7.
LI Xuefeng, PAN Mingliang, WANG Weidong, et al. Development Concept and Overall Architecture Design of Intelligent Intercity Railway in Metropolitan Area[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(7): 1-7.

[2] 朱琴跃, 李泓羿, 李纪元, 等. 基于多智能体的地铁列车节能运行优化方法[J]. 铁道学报, 2025, 47(12): 56-66.
ZHU Qinyue, LI Hongyi, LI Jiyuan, et al. Optimization Method for Energy-Efficient Operation of Metro Trains Based on Multi-Agent Systems[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(12): 56-66.

- [3] 刘江, 蔡伯根, 王剑, 等. 基于卫星导航的铁路列车控制系统自主定位技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(4): 1–23.
- LIU Jiang, CAI Baigen, WANG Jian, et al. Research Progress on Autonomous Positioning of Satellite Navigation-Based Railway Train Control System[J]. Navigation Positioning and Timing, 2023, 10(4): 1–23.
- [4] 万勇兵, 王大庆. 城市轨道交通CBTC系统互联互通测试平台的设计与实现[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(1): 149–153.
- WAN Yongbing, WANG Daqing. Design and Realization of Test Platform for Interoperable CBTC System of Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(1): 149–153.
- [5] 陈汇远. 基于微服务架构的高铁列控仿真测试系统的研究与设计[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(7): 336–341.
- CHEN Huiyuan. Study and Design of a Simulation Test System for High Speed Railway Train Control Based on Microservice Architecture[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(7): 336–341.
- [6] IÑIGUEZ DE GORDOA J A, GARCIA S, URBIETA I, et al. Scenario-Based Validation of Automated Train Systems Using a 3D Virtual Railway Environment[C]//2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2023, Bilbao, Spain, September 24–28, 2023. Piscataway: IEEE, 2023: 5072–5077.
- [7] 苏璇, 廖代富, 宋宗莹, 等. 重载铁路列车群组开行模式设计研究[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(8): 98–107, 123.
- SU Xuan, LIAO Daifu, SONG Zongying, et al. Design of Train Group Operation Mode for Heavy-Haul Railways[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 98–107, 123.
- [8] 贺德强, 柳国强, 陈彦君, 等. 基于正态云模型和模糊层次分析法的列车通信网络性能评估方法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(2): 310–320.
- HE Deqiang, LIU Guoqiang, CHEN Yanjun, et al. Evaluation Method of Train Communication Network Performance Based on Normal Cloud Model and Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(2): 310–320.
- [9] PELESKA J, HAXTHAUSEN A E, LECOMTE T. Standardisation Considerations for Autonomous Train Control[C]//MARGARIA T, STEFFEN B. Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation: Practice, 11th International Symposium, ISoLA 2022, Rhodes, Greece, October 22–30, 2022, Proceedings, Part IV. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 286–307.
- [10] FERRARI A, TERBEEK M H. Formal Methods in Railways: A Systematic Mapping Study[J]. ACM Computing Surveys, 2022, 55(4): 1–37.
- [11] D’AMICO G, MARINONI M, NESTI F, et al. TrainSim: A Railway Simulation Framework for LiDAR and Camera Dataset Generation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(12): 15006–15017.
- [12] TAGIEW R, KÖPPEL M, SCHWALBE K, et al. OSDaR23: Open Sensor Data for Rail 2023[C]//2023 8th International Conference on Robotics and Automation Engineering, ICRAE 2023, Singapore, Singapore, November 17–19, 2023. Piscataway: IEEE, 2023: 270–276.
- [13] BRUCKER M, CRAMARIUC A, VON EINEM C, et al. Local and Global Information in Obstacle Detection on Railway Tracks[C]//2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2023, Detroit, USA, October 1–5, 2023. Piscataway: IEEE, 2023: 9049–9056.
- [14] ETXEBERRIA-GARCIA M, ZAMALLOA M, ARANA-AREXOLALEIBA N, et al. Visual Odometry in Challenging Environments: An Urban Underground Railway Scenario Case[J]. IEEE Access, 2022, 10: 69200–69215.

(责任编辑 金晶)