**文章编号**：1003-1421(2026)11-0160-12
**引用格式**：李慧，蔡伯根，傅卫国，等. 铁路基础设施智能运维检测平台设计及应用[J]. 铁道运输与经济，2026，48(11)：160-171.
LI Hui，CAI Baigen，FU Weiguo，et al. Design and Application of Intelligent Operation and Maintenance Detection Platform for Railway Infrastructure[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：160-171.

# 铁路基础设施智能运维检测平台设计及应用

李　慧[1,2,3]，蔡伯根[1,3]，傅卫国[2]，吴大勇[2]，任志恒[2]，王　娟[2]

(1.北京交通大学 自动化与智能学院，北京　100044；2.北京鼎兴达信息科技股份有限公司，北京　100070；3.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)

**摘　要**：随着铁路网规模的持续扩张，铁路基础设施运维面临着诸多严峻挑战。传统的巡检方法存在效率低和成本高的局限性，迫切需要技术创新来提升基础设施安全保障水平和降低运营维护成本。本研究基于国内外铁路基础设施发展态势的现状，以实现基础设施状态智能感知、泛在互联和智能运维为目标，借助物联网(IoT)、大数据(BD)、云计算(CC)、人工智能(AI)等现代化信息技术，创新性地构建了智能运维检测平台。该平台实现了对铁路轨道、桥梁等关键设施的实时感知、超前预警、故障诊断、数据分析、预测性维护和智能化管理，有效提升了检测信息的全面性与效率。同时，助力基础设施优化运行、降低成本，为铁路维护的精准决策和安全运行提供坚实的技术保障。

**关键词**：铁路基础设施；智能感知；泛在互联；智能运维
**中图分类号**：U239.4　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250723001

# Design and Application of Intelligent Operation and Maintenance Detection Platform for Railway Infrastructure

LI Hui[1,2,3]，CAI Baigen[1,3]，FU Weiguo[2]，WU Dayong[2]，REN Zhiheng[2]，WANG Juan[2]

(1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Top Xingda Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract**: With the continuous expansion of the railway network scale, the operation and maintenance of railway infrastructure are facing many severe challenges. Since traditional inspection methods are limited by low efficiency and high cost, there is an urgent need for technological innovation to improve the safety guarantee level of infrastructure and reduce operation and maintenance costs. Based on the current development trends of railway infrastructure at home and abroad, modern information technologies such as Internet of Things (IoT), big data (BD), cloud computing (CC), and artificial intelligence (AI) were applied to innovatively construct an intelligent operation and maintenance detection platform, with the aim to achieve intelligent perception of infrastructure status, ubiquitous interconnection, and intelligent operation and maintenance. This platform enables real-time perception, advanced early warning, fault diagnosis, data analysis, predictive maintenance, and intelligent management of key facilities including railway tracks and bridges, and effectively

**收稿日期**：2025-07-23　　**修订日期**：2026-07-20
**通信作者**：傅卫国(1972—)，男，江西南昌人，北京鼎兴达信息科技股份有限公司高级工程师。
**基金项目**：国家重点研发计划项目(2022YFB4300501)

improves the comprehensiveness and efficiency of information detection. At the same time, it helps infrastructure optimize operation and reduce costs, providing solid technical support for accurate decision-making in railway maintenance and the safe operation of railways.
**Keywords:** Railway Infrastructure; Intelligent Perception; Ubiquitous Interconnection; Intelligent Operation and Maintenance

## 0　引言

在数字经济、数字中国、数字交通背景下，国家陆续发布《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》，分别提出围绕数字化、智能化、网络化，大力应用新技术革命成果并与轨道交通深度融合，构建泛在互联、柔性协同的数字化感知监测体系，推进服务全程数字化、数据开放共享、平台整合优化。

铁路作为国家综合交通网络的核心骨架，其安全稳定运行直接关系社会经济发展和人民生命财产安全。在“交通强国”战略引领下，截至2025年底，全国铁路运营里程已达16.5万km，其中高铁里程突破5万km，形成全球最大的高速铁路客运服务网络[1]。国家铁路局发布的《“十四五”铁路科技创新发展规划》明确了智能铁路2.0发展目标，要求充分发挥智能技术在安全生产保障、效率效益提升和服务质量优化等方面的支撑作用[2]，重点突破具备全面感知与泛在互联能力的智能关键技术，加大5G、大数据、物联网、人工智能等现代技术与铁路的融合赋能攻关，推进铁路物联网平台研发与应用，深化基础设施检测监测技术研究。至2025年底，我国铁路已基本建成“六大现代化体系”，并计划到2035年建成“智能高铁”体系，基础设施运维须实现“状态自感知、故障自诊断、风险自预警、维修自决策”，全面建成国际领先的现代化铁路强国[3]。然而，伴随路网规模持续扩张，以及行车速度与载重量的不断提升，铁路基础设施运维正面临前所未有的挑战。

传统铁路基础设施运维长期依赖人工巡检和定期检修。当前人工巡检模式存在主观性强、效率低下、夜间作业条件受限等突出瓶颈，且受限于综合维修天窗，巡检范围有限，自动化分析能力不足。尤其在西部高寒地区，铁路线路大量穿越无人区，环境恶劣，巡检人员的人身安全亦受到严重威胁[4]。同时，定期检修周期长、覆盖面窄，一旦故障发生，由于缺乏实时监测与精准定位手段，难以满足现代铁路“故障零容忍”的安全要求[5]。近年来，大数据、BIM、5G通信等技术在国内外铁路智能化领域已取得显著进展[6]：瑞士铁路推行的Smart Rail 4.0战略利用大数据整合多源检测数据，提升系统安全性与运营能力[7]；荷兰铁路采用面向故障风险评估的大数据分析方法，构建了基础设施检测监测体系并提供检修建议[8]；德国铁路建立了集成经营分析与设备故障诊断的综合数据平台[9]；美国货运铁路实施资产健康战略计划(AHSI)，通过大数据分析降低运维成本28%，推进资产全生命周期管理[10]。国内学者李若琼等[11]针对智能列控系统故障特征，开发了基于模糊神经网络的诊断模型；王志华等[12]和武晓春等[13]提出了基于BIM的铁路基础设施运维管理平台总体方案及关键技术；李俊波等[14]构建了铁路基础设施综合维修生产管理信息系统，有效支撑了高铁维修作业的资源集约管理与统筹组织。上述研究为本领域奠定了重要的理论与实践基础。

综合分析国内外现状可见，单一技术应用或局部系统优化已难以适应铁路网规模化扩张的运维需求，智能运维技术的集成创新成为破局关键，亟需融合大数据、云计算、物联网、人工智能等现代信息技术，构建覆盖多专业、全场景的智能运维体系。为此，研究立足铁路运营规模快速增长与运营管理日趋复杂的现实，针对运营期“数据量庞大、专业类型繁多、信息共享难”的困境，以铁路基础设施运营监测为核心，以智能感知采集、数据高度融合、云计算应用技术为支撑，集成多专业物联感知、自动化传感与监测、通信等关键技术，构建铁路基础设施智能运维检测平台。通过强化安全监测与异常自动识别，实现数据采集、实时感知、数据分析和智能决策的贯通，精准、及时地研判和科学评估基础设施服役状态，形成“状态感知—风险预警—维修决策”闭环，助力高速铁路运维从“计划修”向“预测修”转型，有效降低故障发生率，提升巡

检效率与质量，实现降本增效，为运维决策提供理论依据，确保高速铁路安全高效运营，推进智能高铁率先建成，加快智慧铁路实现[15-16]。

## 1　铁路基础设施智能运维需求分析

为增强铁路基础设施安全性并提升管理效率，亟需整合与分析来自各专业监测设备的海量数据。构建面向工务、电务、供电(以下简称“工电供”)的大数据应用策略，是提升基础设施健康管控水平的关键途径，也可为各级人员提供实用化的应用服务，总体需求涵盖以下方面[17-18]。

（1）多专业数据共享，消除信息孤岛。铁路局集团公司既有系统多为面向信息管理的本专业系统，侧重于业务数据记录与基础生产管理，缺乏跨专业数据融合能力。工电供等专业间数据共享渠道不畅，信息孤岛问题突出，亟需统一的技术平台支撑数据共享服务。

（2）实时监测与全面感知。利用先进的传感技术和新一代无线通信技术，提升工电供等专业基础设施的状态感知能力。在基础设施关键部位布设传感器，实时采集位移、角度、应力等数据，依托低功耗广域网实现远程传输，实现全专业、全断面、全天候的实时监测和多维度数据采集。同时建立工电供基础设施状态数据库，汇集历史与实时数据，为后续分析提供支撑。

（3）精准诊断与预测性维护。融合大数据与机器学习技术，开展设备健康评估、故障预测与维护优化，减少停机时间，延长设备寿命，实现智能化监测与管理。针对工电供基础设施分布广、数量大、运行环境复杂的特点，系统需具备高频数据采集与异常变化快速识别能力，确保故障信息的即时响应与处置，最终构建基于实时健康状态的预测性维护体系。

（4）数据融合与智能决策。为实现各专业系统间的顺畅数据交互，平台须制定统一的接口标准与协议，并对工电供基础设施及相关设备进行统一编码，推动跨专业数据互通。运用大数据分析和数据融合工具，开发智能评估模型，全面研判基础设施的当前状态与发展趋势，自动生成维护建议。在此基础上，建立集监测、分析、预警、调度、执行、反馈于一体的智能化故障处理与维护决策支持系统，优化设备维护流程，为管理层提供科学、直观的决策依据。

（5）工电供一体化管理。通过大数据技术，平台集成处理来自监测设备、维修记录等多源异构数据，以维修天窗共用、设备综合利用为目标，结合工电供等专业基础设施状态评估、运维决策建议与设备病害信息库，自动生成维修作业计划建议与维修方案。通过对作业人员和履职项目的精准匹配，实时监控作业过程并自动评价作业质量，实现作业流程的可视化闭环管理，确保数据管理与信息共享的统一高效，从而提升整体管理运作效率。

## 2　平台总体架构

铁路基础设施智能运维平台采用“铁路局集团公司–站段–工区”三级架构：在铁路局集团公司层面实现与数据采集与监视控制系统(SCADA)、列车调度管理系统(TDMS)等系统的多源数据融合[19]；站段层级实施基础数据标准化管理；工区层面通过智能终端实现调度指令闭环管理，实现调度指挥与现场维修作业的上下紧密协同。

平台总体架构如图 1 所示，按照“层级化+模块化”的思路，将平台分为数据来源层、数据通信层、平台服务层和终端用户层，体现了“集中部署、分级应用”的设计理念。数据来源层通过物联网传感器采集边坡、桥梁、轨道、限高架等多类数据，实现水位、边坡、桥梁位移等多类监测数据的全域采集；数据通信层通过 GSM–R 与有线网络结合的方式，保障高频与低频数据的稳定传输，同时设置防火墙、网闸等安全设备，满足等保要求，既保障了实时性，又兼顾了成本与安全性；平台服务层集成了数据计算、存储、挖掘等核心能力，实现数据融合、AI分析、健康预测等功能；终端用户层则面向工电供等多专业用户，通过大屏实时展示设备状态、预警信息、健康排名等，提供精准服务。

平台定位为“铁路工电供一体化智能运维大脑”，不替代既有专业系统，而是通过数据接口整合多专业数据，解决“信息孤岛”问题，提升跨专业故障溯源、预测性维修能力。面向铁路局集团公司调度所、工务/电务/供电段技术员、现场维修工

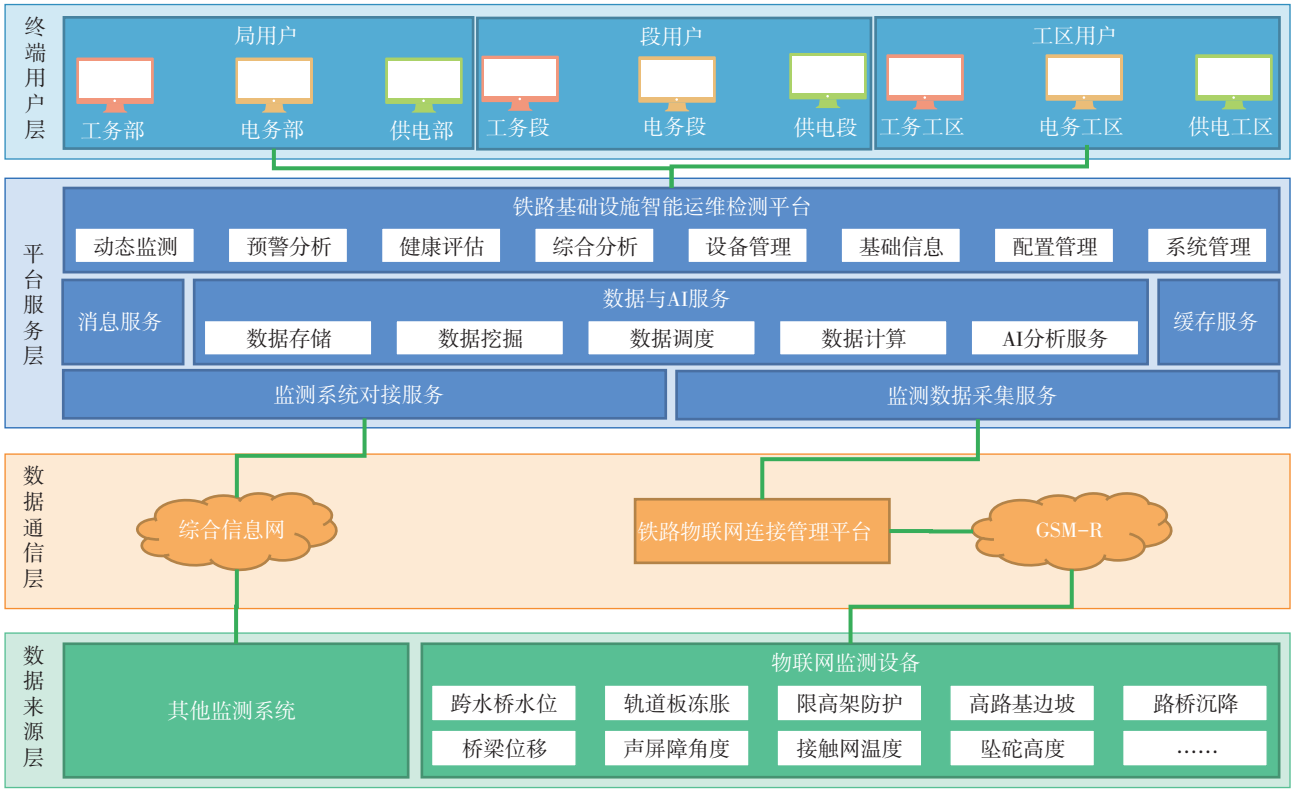



**图1　平台总体架构**

Fig.1　Overall architecture of platform

区三级用户，提供状态感知、故障诊断、预测维修、资源优化等能力，满足不同层级运维需求，支持从战略决策到现场执行的全层级应用。

GSM-R网络是铁路物联网实现万物互联所依赖的关键传输通道之一。为了保障监测设备接入GSM-R网络的通信质量和数据安全，系统还设计了铁路物联网连接管理平台如图2所示，对传输数据网络提供安全服务、鉴权服务，并能够对边缘计算控制模组进行模组管控、行为分析及业务侧的相关服务，保障铁路物联网的网络稳定性，实现监测数据在可靠、完整的条件下传回数据中心。其他监测系统数据通过铁路内部的综合信息网与同样部署在综合信息网中的监测系统对接服务进行对接，达到数据互通的目的。同时，在未来铁路专用5G网络实现应用后，可以将数据传输无感转移至铁路专用5G网络，打造安全、可靠、稳定的铁路物联网传输通道。

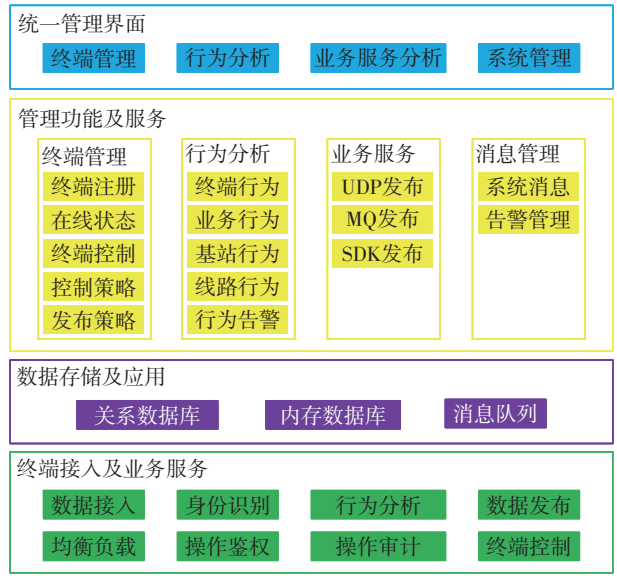



**图2　铁路物联网连接管理平台**

Fig.2　Railway Internet of Things connection management platform

## 2.1　技术架构

铁路基础设施智能运维检测平台构建分层分布式技术架构如图3所示，按照数据获取、存储、处理、分析及应用的逻辑顺序进行设计，采用加密存储传输确保核心数据安全，建立完整性验证机制。数据实时计算是先将原始数据存入消息队列中，使用流式计算引擎实时读取消息队列进行数据计算与

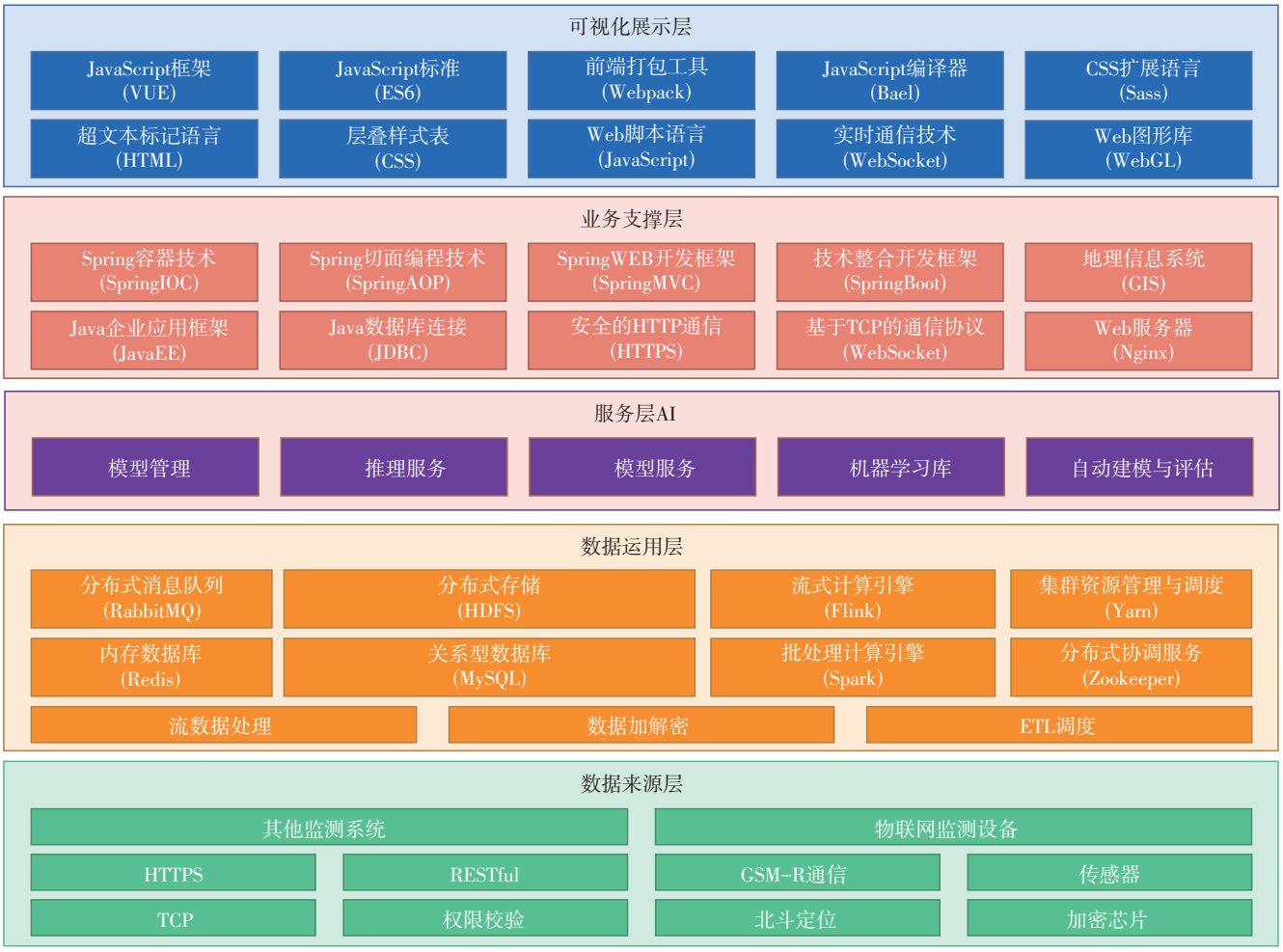



**图3　技术架构**

Fig.3　Technical architecture

业务处理的过程。批量计算是将数据存入分布式数据库中，通过分布式计算引擎定期执行业务程序，对数据进行计算与业务处理的过程。数据存储使用分布式存储结构，保障数据存储的高性能，同时也保障数据容灾备份和弹性扩容。数据挖掘包括回归分析、聚类分析、关联分析等，并融入专家经验，对数据进行学习建模，为运维决策提供智能辅助[20]。通过多源数据融合与智能算法(包括机器学习、神经网络、灰色预测等[21])，平台具备展现可视化的接口和服务、设备动态监测、故障预警、健康评估等功能[22-25]。当监测数据超出阈值时，自动触发多级报警机制。

## 2.2　网络架构

铁路基础设施智能运维检测平台基于B/S结构设计，相关软件部署在铁路局集团公司机房实体服务器，或者云平台提供的虚拟机上。平台网络架构按照云、管、端三层进行建设：中心层(云)、传输层(管)、感知层(端)，网络架构如图4所示，通过监测设备(智能传感+通信模组)采集沿线的重点基础设施数据，经覆盖铁路沿线的GSM-R网络、自建NB网络、运营商网络、其他检测系统等外部专业系统接口的互联互通，将工电供等相关信息纳入平台进行综合管理和追踪。感知层→传输层：传感器数据经边缘计算预处理后，通过GSM-R/NB网络加密传输，触发传输层的动态带宽分配。传输层→中心层：数据经网闸安全校验后，进入分布式存储，由中心层调用机器学习模型处理，结果反馈至应用层，传输层需满足铁路安全标准，中心层算力分配优先保障实时预警，实现工电供一体化作业全流程的智能管理。

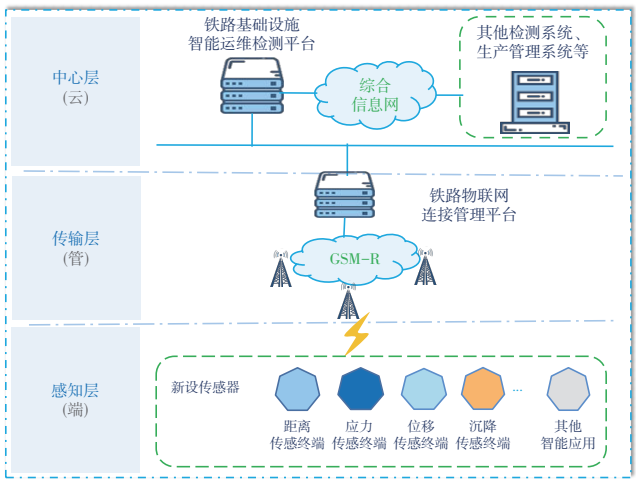



图4　网络架构

Fig.4　Network architecture

### 2.2.1　感知层

数据感知层即系统中的“端”——终端感知设备主要由基础设施监测传感器(包括但不限于应力传感器、位移传感器、振动传感器、温度传感器、湿度传感器等)、边缘控制器及铁路物联网通信终端组成，通过对基础设施设备运行数据进行采集，结合边缘计算控制器，对数据进行初步处理，处理后的数据通过通信终端传输到铁路物联网。同时，通信终端结合边缘控制器能够对数据的发送进行管控，以保证铁路物联网的网络稳定性。

铁路基础设施智能运维检测平台与既有其他检测系统、生产管理系统等对接，获取已有业务数据作为平台数据分析的数据源，获取运维数据并完成报警和综合评估预警设施处理的流程闭环。既有业务系统种类多、数据量大、数据类型多样，难以实现数据接口的标准化治理，因此平台设计采用TCP，HTTP，RESTfulAPI等多种数据接入协议，实现与各类既有业务系统对接。

### 2.2.2　传输层

数据传输层即系统中的“管”，传输层如图5所示，沿线部署监测设备，通过GSM-R基站进行数据传输，数据经过基站、GSM-R网络、GGSN路由器、CE交换机、两道防火墙、连接管理平台、网闸、监测数据接口服务、交换机、防火墙、综合信息网到达检测平台中。位于综合信息网中的既有监测系统，可直接通过综合信息网与检测平台进行通信和数据对接。不同区域位置间通过防火墙进行边界安全防护，跨网络时通过网闸进行边界安全防护，保障网络边界通信安全，实现将监测数据在

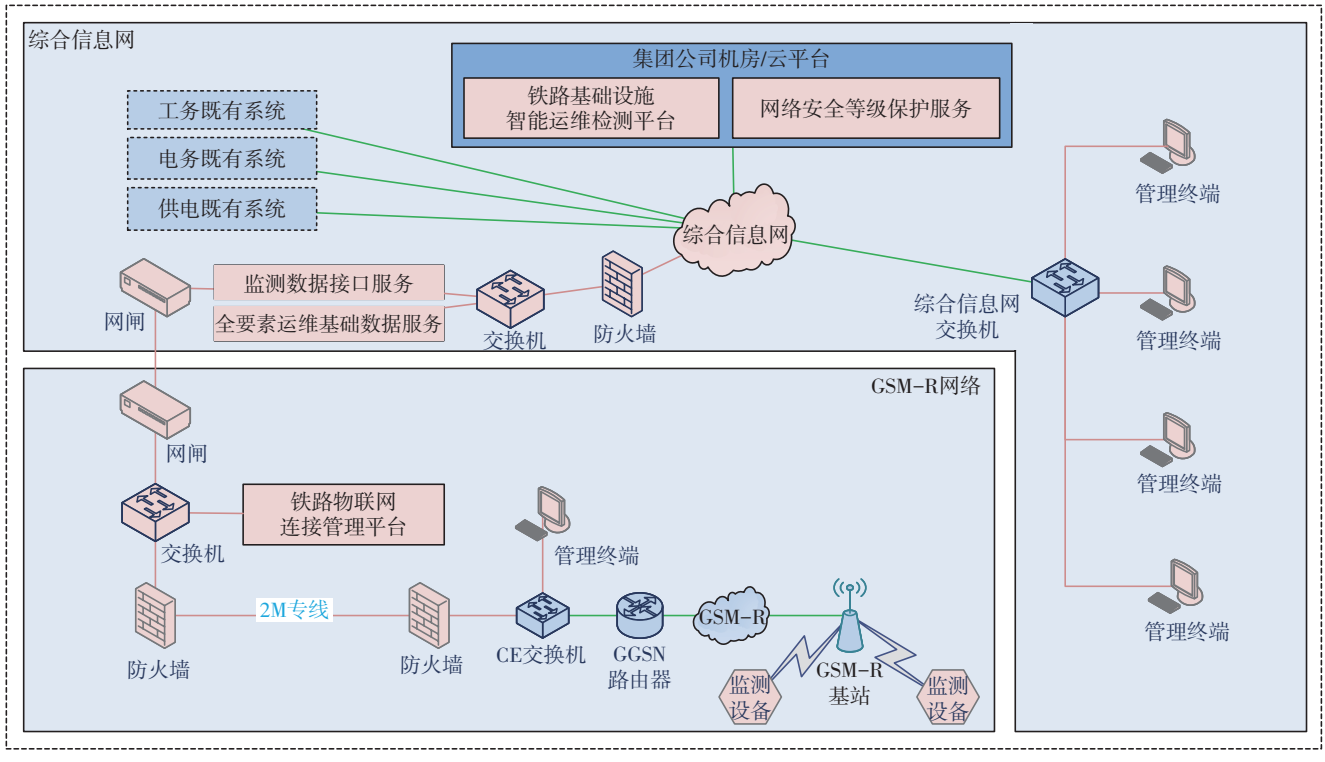



图5　传输层

Fig.5　Transport layer

安全、可靠、完整的条件下传回数据中心，同时，连接管理平台能够对监测终端下达数据监测及回传模式指令，保障铁路物联网的网络稳定性。同时，在未来铁路专用5G网络实现应用后，可以将数据传输无感转移至铁路专用5G网络。

### 2.2.3　中心层

数据中心层即系统中的“云”——智能运维检测平台，利用大数据技术，对海量的监测数据进行清洗、解析、存储，通过设备健康模型算法，对设施设备健康状态进行评估，在设施设备健康度退化过程中及时进行预警。同时，对工电供等不同专业不同设施设备的健康退化关联性进行数据挖掘分析，有助于增加多专业运维工作联动性，进而通过信息化手段及数字化技术对故障预警、健康评估进行呈现及应用，实现面向铁路多领域的一体化智能运维。

## 3　平台功能

铁路基础设施智能运维平台由平台大屏、平台主页、动态监测、预警分析、故障诊断、健康评估、故障预测、维修决策、综合分析、设备管理、基础信息、配置管理、系统管理模块组成，每个模块中又包含若干子模块。平台功能如图6所示。

（1）平台大屏。平台大屏为使用者提供系统平台重要数据的直观展示，并提供数据快速查看和跳转功能。用户可以查看设备的实时状态、历史数据曲线、故障报警位置等，实现对铁路基础设施的全局可视化监控，为维修人员提供更加直观、便捷的现场作业指导。

（2）动态监测。动态监测用于实时采集铁路基础设施各关键部位的运行参数，如轨道板的几何尺寸、桥梁位移等，并对这些数据进行实时分析和处理。动态监测功能模块包括监测总览、设备总览、终端分析、监测列表、监测详情、监测历史等子模块。

（3）预警分析。预警分析针对系统中监测设备预警数据信息进行展示和统计，并利用可视化展示手段模拟展示预警发生的位置，查询预警历史。预警分析功能模块包括预警盯控、预警列表、预警详情、预警历史等子模块。

（4）故障诊断。针对工电供多专业数据混杂问题，采用人工智能技术实现异常数据自动识别与修复，完成包括数据清洗、校验、补全等预处理流程。依托深度学习算法对设备运行数据进行深度挖掘，可自动识别故障类型、定位及成因。采用改进的模糊神经网络模型，输入故障特征，通过历史故障案例训练，实现90%的故障类型识别率。

（5）健康评估。通过对监测设备的监测数据、预警数据，利用多个维度、多种算法进行分析，对监测点位进行健康评估并打分，统计分析设备的健康状态和健康发展趋势。健康评估功能模块包括健康总览、评估列表、健康详情、健康历史等子模块。

（6）故障预测。根据设施健康指标、指标劣化

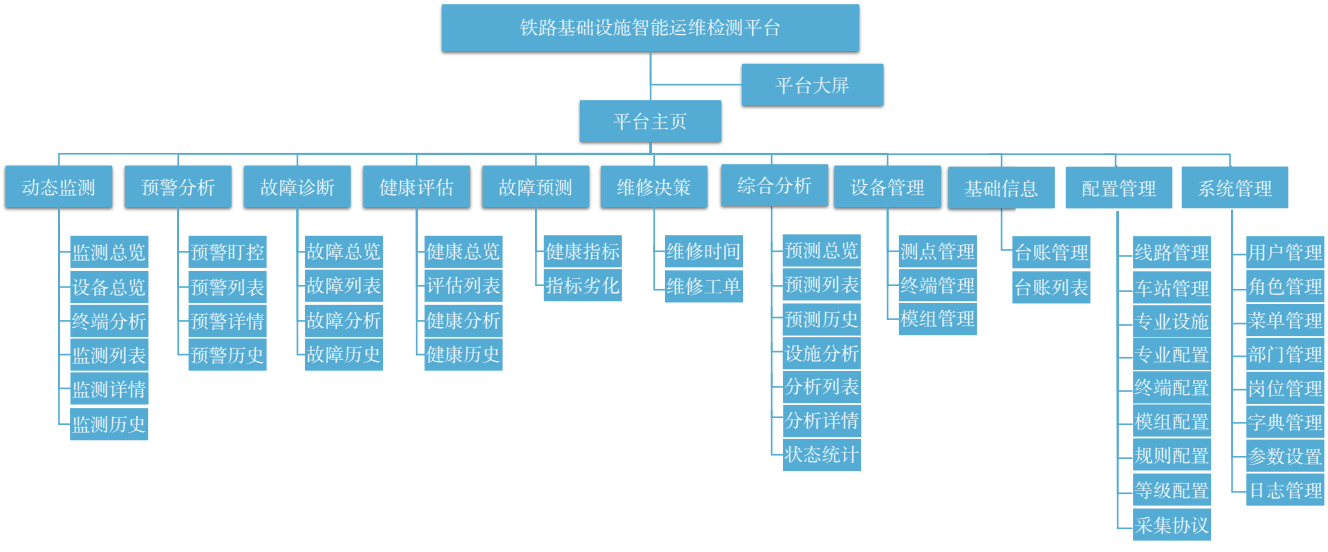



图6　平台功能

Fig.6　Platform functions

速度等信息对设施进行故障预测。分析劣化设备指标，并预测设备可能发生故障的时间和概率，提前为运维人员提供故障预警信息，以便采取相应的预防措施，减少故障发生的概率和对铁路运输的影响。基于LSTM网络构建设备劣化模型，输入设备运行数据与环境参数，提前预警时间窗口≥72 h。

（7）维修决策。在充分掌握轨道板、桥梁、接触网等设备的结构属性信息后，借助大数据深度自主学习、神经网络、灰色预测等先进技术，构建设备状态智能评估与运维决策模型。精准预测设备的最佳维修时间，并自动生成维修工单，实现维修任务从生成、分配、执行到跟踪管理的全流程管控。

（8）综合分析。综合分析通过对系统中不同数据进行融合，展示分析结果，包括通过设备健康数据的分析，对健康趋势进行预测；综合分析同一设施中不同的测点数据，利用“大模型”对设备健康度进行评估；根据监测设备的实际运行情况，继续统计分析，输出运行报告。生成各类报表和图表，如设备运行日报、周报、月报、故障统计报表、维修费用报表等。为铁路运维管理部门提供决策支持，帮助其了解设备的运行状况、故障规律和维修工作的成效，以便制定合理的运维策略和计划，优化资源配置，提高运维管理水平。

（9）设备管理。设备管理对系统中的终端监测设备、监测点、边缘控制器进行管理和维护，设备管理维护的结果会直接表现在动态监测、预警分析、健康评估、综合分析等模块中。

（10）基础信息。基础信息主要用于展示所有设施设备的台账数据信息，系统通过统一入库，以及和其他系统同步的形式对数据进行更新，同时台账数据可以被测点信息绑定，通过台账数据完善测点信息内容。

（11）配置管理。配置管理通过配置信息的相互关联，提供系统运行的整体框架结构。配置管理功能模块包括线路管理、车站管理、专业设施、专业配置、终端配置、模组配置、规则配置、等级配置、采集协议等子模块。

（12）系统管理。系统管理主要是提供系统用户、角色、菜单、部门、岗位、日志、参数设置等管理功能。

## 4　关键技术

### 4.1　智能感知技术

智能感知技术是基础设施一体化运维在铁路领域实现高效、精准作业的有力支撑[26-27]。选择高精度、高可靠性、低功耗的物联网传感器是实现铁路基础设施智能监测的关键。传感器应具备良好的环境适应性和长期稳定性，能够在复杂的铁路运行环境下准确采集数据。如在京张高速铁路(北京北—张家口)桥梁部署的高精度传感器，传感器采用宽温设计(−40~70 ℃)，电池续航达5年，实现±0.1 mm位移监测精度，成功预警3次梁体微变形。高频振动传感器部署于轨道扣件、桥梁墩台，采集100~1 000 Hz振动数据，识别轨道不平顺、墩台沉降初期特征。

### 4.2　大数据技术

大数据技术为铁路基础设施运维提供核心数据支撑能力。随着传感网络扩展与监测粒度细化，铁路数据呈现爆发式增长与高度异构特征，涵盖毫秒级采样的实时监测数据、结构化台账记录、非结构化图像视频等多模态信息。基于分布式存储构建统一数据湖，实现对多源异构数据的集中存储与统一管理。通过构建数据共享交换总线，打通工电供等专业系统数据接口，建立跨专业数据融合机制。采用分布式存储与多副本冗余技术，确保海量数据的安全存储与高可用性。针对钢轨断裂、接触网断线等需秒级响应的故障场景，采用流式计算框架构建实时处理链路，实现监测数据的即时分析与故障识别，端到端处理延迟控制在500 ms以内。建立基于机器学习的数据治理体系，运用神经网络算法自动检测多专业数据中的异常模式、离群值与缺失记录，并生成相应的数据修复方案。实践表明，平台实现了多专业数据的标准化管理与一致性控制，数据质量问题识别准确率达到92%以上，关键故障的实时识别响应时间稳定在500 ms以内，为后续的智能分析与决策应用奠定了高质量数据基础。

### 4.3　边缘计算与云计算协同技术

边缘计算凭借低时延、本地化数据处理、带宽优化的核心优势，满足轨道、信号、接触网等核心设备“故障秒级响应”的需求，能有效解决铁路基础设施运维中“海量数据实时分析难、故障响应要

求高、沿线部署环境复杂”的痛点。在桥梁墩台、隧道内壁部署边缘节点，连接振动传感器、位移传感器、裂缝监测相机；边缘设备本地处理振动波形数据、位移数据，并对裂缝图像进行本地比对，仅当数据超出阈值时触发预警并回传云端，减少80%以上的无效数据上传，降低云端存储与计算成本；支持铁路沿线“偏远、带宽弱、环境恶劣”区域的稳定运行，在终端侧部署轻量化AI模型，降低云计算压力，弥补云端集中式处理的短板。

通过云计算平台，利用聚合算法、模糊神经网络算法等对积累的海量传感器数据进行整合和分析，智能解析作业计划内容并自动建立各作业计划关联，通过安全实时加密传输，挖掘数据背后的潜在信息，分析铁路基础设施的运行趋势，预测设备故障的发生概率，提升预警准确率；降低了巡检人员工作强度，从而确保作业安全。还可以优化铁路的运营管理和设备维护策略等，提高铁路的运营效率和效益。

### 4.4　机器学习与深度学习技术

机器学习和深度学习技术在故障诊断、预测分析等方面具有重要应用价值。通过对大量的设备运行数据和故障案例进行学习和训练，融合随机森林、聚类分析、主成分分析等，基于特征工程后的特征，构建相关机器学习和深度学习(卷积神经网络、长短期记忆网络)的故障诊断模型和预测模型，能够实现对设备故障的自动识别和精准预测。基于长短期记忆网络(LSTM)的桥梁沉降预测模型，输入桥梁3个月的日均沉降数据及同期气象数据，可预测未来1个月内的沉降趋势，实现设备劣化趋势分析，预测精度达88%，为维修天窗规划提供依据。

## 5　典型应用

京张铁路作为中国首条自主设计建造的干线铁路，其线路穿越燕山山脉，地形复杂、坡度陡峭，对基础设施的稳定性要求极高。京张高速铁路正线全长174 km，最高设计速度为350 km/h，是世界上第一条按照智能化理念进行设计的高速铁路。传统运维方式难以满足高精度、实时性需求。为此，引入智能运维检测平台，采用智能传感设备和定制化通信模组，覆盖铁路沿线的GSM-R网络，旨在通过物联网、AI、大数据等技术实现全线路设备状态实时监测、故障预测和自动化运维，保障运营安全并提升效率。

基于物联网的铁路基础设施智能运维检测平台在投入运用后，对干线的轨道、桥梁、声屏障等关键设施部署了数千个传感器，实时采集振动、温度、位移等数据，可根据传输的实时状态数据还原设备参数信息和大屏界面，帮助运营和维护人员多维度分析基础设施设备的运行情况，为智能运维提供技术支持。成功发现了轨道几何尺寸偏差、桥梁位移异常等安全隐患，并及时进行了维修处理，桥梁位移监测界面如图7所示，维修决策界面如图8所示。




图7　桥梁位移监测界面

Fig.7　Bridge displacement monitoring interface




**图8　维修决策界面**

Fig.8　Maintenance decision-making interface

平台对维修过程的全程跟踪和管理，为铁路运营指挥、检修维护提供应急处置和精准检修指导，确保了维修工作的质量和规范性，避免了潜在的安全事故发生。例如，通过平台发现“轨道几何偏差导致接触网磨耗加剧”，联动调整维修计划，减少重复作业1次/月，利用关联规则挖掘优化维修策略，实现工电供数据互联互通。同时，平台的故障预测功能提前预测到了部分设备的故障风险，为维修人员提供了充足的准备时间，减少了设备故障对铁路运输的影响。故障预测功能通过提前72 h预警潜在故障，使维修部门可精准规划天窗时段，每月减少2次临时天窗，使计划天窗利用率提升15%以上，功能基本达到设计要求和用户期望，使用效果良好，为后续跨专业智能分析奠定坚实基础。

## 6　结束语

基于物联网、大数据、AI、云计算等信息技术设计研发的铁路基础设施智能运维检测平台是铁路领域的重要创新和发展方向。该平台实现“物联网+GSM-R+AI”在铁路工电供一体化运维中的深度融合，突破传统单一专业系统的数据壁垒，其推广应用不仅缓解了传统人工作业模式与现代化需求之间的矛盾，还通过提高运维效率和质量、降低作业风险、提升调度效率、保障运输安全等途径，推动了铁路行业的数字化转型与智能化升级。当前平台在高寒地区传感器稳定性问题，需通过冗余设计和自校准算法解决。未来研究和实践中，需要进一步加强技术创新和应用拓展，探索更高效、绿色、智能的运维管理模式，构建“采集-传输-存储-治理-共享”全流程数据管理体系，将智能技术转化为实际生产力，助推铁路智能运维转型升级，有效提升安全保障能力和运营效率，赋能铁路行业降本增效，对培育新质生产力具有重要示范意义。

**参考文献：**

[1] 李　慧，蔡伯根，傅卫国，等. 高速铁路高陡边坡监测技术现状与解决策略[J]. 铁路通信信号工程技术，2026，23(2)：17-29.
LI Hui，CAI Baigen，FU Weiguo，et al. Current Status and Solution Strategies for Monitoring Technologies of High and Steep Slopes in High Speed Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2026，23(2)：17-29.

[2] 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.

[3] 蔡　军. 重载铁路公专网车-地通信监测技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2024，21(2)：48-53.

CAI Jun. Research on Vehicle-Ground Communication Monitoring Technology for Heavy Haul Railway Public and Private Networks[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2024，21(2)：48-53.

[4] WITLOX F，ZWANIKKEN T，JEHEE L，et al. Changing Tracks：Identifying and Tackling Bottlenecks in European Rail Passenger Transport[J]. European Transport Research Review，2022，14(1)：7.

[5] 秦　勇，张紫城，杨怀志，等. 轨道交通基础设施自主无人机智能巡检技术现状与发展趋势[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(2)：1-10.
QIN Yong，ZHANG Zicheng，YANG Huaizhi，et al. Current Status and Development Trends of Autonomous UAV Intelligent Inspection Technology for Railway Infrastructure[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(2)：1-10.

[6] 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 Baigen，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.

[7] THADURI A，GALAR D，KUMAR U. Railway Assets：A Potential Domain for Big Data Analytics[J]. Procedia Computer Science，2015，53：457-467.

[8] JAMSHIDI A，FAGHIH-ROOHI S，HAJIZADEH S，et al. A Big Data Analysis Approach for Rail Failure Risk Assessment[J]. Risk Analysis，2017，37(8)：1495-1507.

[9] 朱　雨，石利刚，王健慧. 面向智慧化的重载铁路发展研究[J]. 交通科技与经济，2021，23(4)：59-64.
ZHU Yu，SHI Ligang，WANG Jianhui. Research on the Development of Intelligent Heavy-Haul Railway[J]. Technology & Economy in Areas of Communications，2021，23(4)：59-64.

[10] 丁茂廷，赵有明，柯在田. 基于新一代信息技术的重载铁路工务设备智能运维系统总体架构研究[J]. 铁道建筑，2022，62(8)：12-18.
DING Maoting，ZHAO Youming，KE Zaitian. Research on Overall Architecture of Intelligent Operation and Maintenance System for Track Infrastructure of Heavy Haul Railway Based on New Generation Information Technologies[J]. Railway Engineering，2022，62(8)：12-18.

[11] 李若琼，李　欣，张友鹏. 基于模糊神经网络和证据理论的列车智能控制系统多信息融合故障诊断研究[J]. 自动化与仪器仪表，2008(6)：6-9，26.
LI Ruoqiong，LI Xin，ZHANG Youpeng. Study on the Fault Diagnosis of Multi-Information Fusion in Train Intelligent Control System Based on Fuzzy Neural Network and Evidential Theory[J]. Automation & Instrumentation，2008(6)：6-9，26.

[12] 王志华，卢文龙，郭鹏飞，等. 基于BIM的铁路基础设施运维管理平台总体方案及关键技术研究[J]. 铁路计算机应用，2019，28(4)：45-48，52.
WANG Zhihua，LU Wenlong，GUO Pengfei，et al. Overall Scheme and Key Technology of Railway Infrastructure Operation and Maintenance Management Platform Based on BIM[J]. Railway Computer Application，2019，28(4)：45-48，52.

[13] 武晓春，臧文浩，张　琰. 基于BIM的铁路电务智能运维平台关键技术研究[J]. 铁道技术标准(中英文)，2022，4(12)：1-7.
WU Xiaochun，ZANG Wenhao，ZHANG Yan. Research on Key Technologies of BIM-Based Intelligent Operation and Maintenance Platform for Railway Electrical Service[J]. Railway Technical Standard (Chinese & English)，2022，4(12)：1-7.

[14] 李俊波，沈　鹢，王东妍，等. 基于BIM的综合维修生产管理信息系统设计与实现[J]. 铁路计算机应用，2021，30(12)：24-28.
LI Junbo，SHEN Kun，WANG Dongyan，et al. Comprehensive Maintenance and Production Management Information System Based on BIM[J]. Railway Computer Application，2021，30(12)：24-28.

[15] 朱发林. 基于云边协同计算的城市轨道交通信号智能运维系统研究[J]. 铁道通信信号，2023，59(9)：12-18.
ZHU Falin. Research on the Intelligent Operation and Maintenance System of Urban Rail Transit Signaling Based on Cloud-edge Collaborative Computing [J]. Railway Signalling & Communication，2023，59(9)：12-18.

[16] 蒋　伟，余　浩，焦开福. 基于物联网云平台技术的地铁

智能运维系统研究[J]. 数字通信世界，2023(7)：55-57.
JIANG Wei，YU Hao，JIAO Kaifu. Research on Metro Intelligent Operation and Maintenance System Based on IoT Cloud Platform Technology[J]. Digital Communication World，2023(7)：55-57.

[17] 马珺杰，闫　凡，张　强，等. 重载铁路电务设施设备智能运维平台关键技术研究[J]. 铁路物流，2025，43(8)：47-53.
MA Junjie，YAN Fan，ZHANG Qiang，et al. Key Technologies of Intelligent Operation and Maintenance Platform for Electrical Facilities and Equipment in Heavy-Haul Railway[J]. Railway Logistics，2025，43(8)：47-53.

[18] 武　威，马小宁，殷新贝，等. 面向重载铁路基础设施智能运维的朔黄铁路智能大脑平台总体设计及关键技术研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(11)：11-21，57.
WU Wei，MA Xiaoning，YIN Xinbei，et al. Research on Overall Design and Key Technologies of Shuohuang Railway Intelligent Brain Platform for Intelligent Operation and Maintenance of Heavy-Haul Railway Infrastructure[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(11)：11-21，57.

[19] 张　宁. 电气化铁道供电调度管理信息化系统现状及优化建议[J]. 铁道技术监督，2023，51(10)：38-43.
ZHANG Ning. Current Status and Optimization Suggestions of Management Information System for Power Supply Dispatching of Electrified Railway[J]. Railway Quality Control，2023，51(10)：38-43.

[20] 袁振江. 基于5G-R的铁路基础设施运维检测系统研究[J]. 科技与创新，2023(22)：119-121，130.

[21] 王瑞锋. 基于智能检测监测与大数据技术的城市轨道交通智能运维管理[J]. 现代城市轨道交通，2021(11)：85-89.
WANG Ruifeng. Intelligent Operation and Maintenance Management of Urban Rail Transit Based on Intelligent Detection and Monitoring and Big Data Technology[J]. Modern Urban Transit，2021(11)：85-89.

[22] 赵有明，张格明，凌烈鹏，等. 朔黄铁路基础设施智能运维系统研发与应用[J]. 铁道运输与经济，2023，45(11)：1-10.
ZHAO Youming，ZHANG Geming，LING Liepeng，et al. Development and Application of Infrastructure Intelligent Operation and Maintenance System for Shuohuang Railway[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(11)：1-10.

[23] 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 Baigen，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.

[24] 李　慧，蔡伯根，傅卫国，等. 铁路基础设施低空无人机巡检现状与应对策略[J]. 铁道通信信号，2025，61(6)：1-10.
LI Hui，CAI Baigen，FU Weiguo，et al. Current Situation and Countermeasures of Low-Altitude UAV Inspection of Railway Infrastructure[J]. Railway Signalling & Communication，2025，61(6)：1-10.

[25] 李　慧，秦　勇，胡　越，等. 基于数字孪生的高速铁路高陡边坡智能监测系统设计与研究[J]. 铁路采购与物流，2026(1)：76-79.

[26] 马珺杰，王春雷，赵　阳，等. 数据治理在重载铁路基础设施运维管理中的应用与实践[J]. 铁路物流，2025，43(7)：34-39，64.
MA Junjie，WANG Chunlei，ZHAO Yang，et al. Application and Practice of Data Governance in Operation and Maintenance Management of Heavy-Duty Railway Infrastructure[J]. Railway Logistics，2025，43(7)：34-39，64.

[27] 李志鹏，张志国，张雅琴. 朔黄铁路基础设施运维智能决策技术研发及应用[J]. 铁道运输与经济，2023，45(11)：22-29，47.
LI Zhipeng，ZHANG Zhiguo，ZHANG Yaqin. Research and Application of Intelligent Decision-Making Technology for Operation and Maintenance of Shuohuang Railway Infrastructure[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(11)：22-29，47.

(责任编辑　吴文娟)