

基于模块化的轨道交通装备智能感知架构研究

Xiaoyu Shen

CRRC Academy, Beijing

【摘要】本文重点探讨了智能技术的快速发展与工业现场多样化智能需求之间的矛盾。由于智能技术的快速发展，开发难度高，在工业环境中实施智能技术需要相当长的时间。同时，轨道交通设备故障预测与健康管理（PHM）系统种类繁多，以满足不同的需求。这些系统功能独立，接口复杂，容易导致“孤岛”现象。PHM 系统的开发成本高，且难以在不同场景下进行修改或复用。在轨道交通智能感知领域，迫切需要一种统一的状态监测技术架构。该架构应能够构建一个结构标准化、接口开放的平台。为了解决这些现有问题，本文提出了一种基于模块化的轨道交通设备智能感知架构。在此架构下，实现了设备智能感知流程编排与测试系统。该系统可用于 PHM 系统的预处理，从而高效地建立故障感知流程并进行在线测试。这有助于解决将故障诊断技术融入数据处理管理和特定场景根本原因的挑战。

【关键词】 PHM；模块化；智能感知

【收稿日期】 2025 年 5 月 15 日 **【出刊日期】** 2025 年 6 月 25 日 **【DOI】** 10.12208/j.telm.20250002

Research on intelligent perception architecture of rail transit equipment based on modularization

Xiaoyu Shen

CRRC Academy, Beijing

【Abstract】 This paper focuses on the contradiction between the rapid evolution of intelligent technology and the diverse intelligence requirements of industrial sites. Due to the rapid evolution of intelligent technology, which is challenging to develop, it will take a considerable amount of time to implement in the industrial setting. Meanwhile, there are various types of fault prediction and health management (PHM) systems for rail transit equipment to meet different requirements. These systems have complex interfaces within independent functional systems, which can result in the Islanding phenomenon. The cost of developing the PHM system is high, and it is difficult to modify or reuse it from one scenario to another. In the field of intelligent perception in rail transit, there is an urgent need for a unified architecture of condition monitoring technology. This architecture should be able to create a platform with standardized structure and open interfaces. In order to address these existing issues, an Intelligent Perception Architecture for Rail Transit Equipment based on modularization is proposed. Within this framework, the Device Intelligent Sensing Process Arrangement and Testing System has been implemented. The system can be used for pre-processing in PHM systems to efficiently establish the fault sensing process and conduct online testing. This helps address the challenge of integrating fault diagnosis technology into data processing management and scene-specific root causes.

【Keywords】 PHM; Modularization; Intelligent perception

1 背景

随着中国轨道交通的发展，列车内部结构列车变得越来越复杂，其运营安全、故障诊断、高效快速

维护以及车站基础设施的安全运行变得越来越重要。

人工智能、物联网、5G 等技术的应用，增加了

客流、设备、环境等数据的采集量，促进了数据挖掘、分析和预测，提升了实时数据传输和监控的效率以及行业服务能力，从而能够及时发现安全风险。轨道交通系统在运营过程中，需要持续采集数据，用于车辆状态分析。通过智能感知技术^[1]，可以高效地汇集数据资源，提高网络资源调度效率。智能交通系统是提升交通系统效率、服务质量、安全水平以及环境保护和节能减排的关键。然而，由于智能技术迭代速度快，开发难度大，在工业场景中的落地需要较长时间。智能技术的快速迭代与工业现场多样化的智能化需求之间的矛盾不断凸显，阻碍了轨道交通智能化进程。

1.1 研究现状

近年来，国内外开展了预测与健康（PHM）技术架构研究^[2,3]，是开发一套系统用于从复杂机械系统的输出信号中提取特征故障信号，分析零部件的故障特征，并根据此特征诊断机械系统的运行状态，最终预测未来故障的发展趋势。PHM 已成为飞机、舰船或车辆系统领域不可或缺的一部分。

PHM 技术在轨道交通行业的应用，可以实现对轨道交通设备及整个系统状态的识别和分类，并整合获取的预测信息、运营需求以及可用的维护资源，为设备运维提供决策支持，从而实现设备维护成本、供应或人力资源管理系统的优化。然而，现有的故障诊断系统大多是基于场景定制的系统，缺乏可重构性和通用性^[4]，系统架构与场景耦合度较高，导致企业在智能系统建设中需要投入大量资源针对不同的软件进行学习和培训，阻碍了智能产品的集成应用。

为满足功能模块化^[5]和技术融合的需求，智能感知、大数据分析等技术与轨道交通领域的融合方式日趋全面，覆盖范围也越来越广泛，致力于实现全面、实时、精准、高效的运营管控与管理，有力推动综合交通运输系统向网络化、协同化、智能化方向发展，引领轨道交通科技进步。为了提高 PHM 系统在项目应用中的可扩展性和可维护性，各种层次化架构^[6-8]和分布式架构^[9,10]在各个领域涌现。然而，由于实际语言环境的复杂性和多样性，以及系统架构的复杂性和冗余性，导致研究体系分散，缺乏统一高效的协调机制^[11]。轨道交通检测系统难以灵活多变，针对不同场景重复建设系统造成成本消耗过

大。

参考文献^[12]介绍了航空航天装备领域的软件——可测试性工程设计与分析系统。该系统能够实现可视化设备模型构建和可测试性分析，协助 PHM 系统开发者改进系统设计，旨在应对航空航天系统技术快速发展、结构复杂度高以及部件测试成本不断上升的问题。近年来，上海^[13]、北京^[14]等城市开始研究城市智慧轨道交通的总体架构，探索轨道交通信息化顶层架构设计，并从核心业务、IT 战略、网络安全等方面进行全面设计。实现 PHM 技术灵活、快速、高效的业务部署。然而，上述研究虽然依靠可扩展的架构实现了功能范围的高覆盖率，但却未能解决其数据处理流程管理封闭、场景化等问题的根本原因。

1.2 待解决的问题

在轨道交通智能感知领域，亟需建立统一的状态监测技术框架与体系，规范智能检测技术发展，形成一套架构标准化、接口开放的协同设计工具和集成验证平台，作为 PHM 系统的输入，为工程师提供可视化、快速构建故障感知流程的平台，使 PHM 系统的构建更加便捷、快速，进一步推动轨道交通领域人工智能服务生态系统的构建。

2 架构

本文基于模块化的思想，对轨道交通设备智能感知的数据接入、数据处理、智能诊断、应用交互四个流程步骤进行模块化封装，对接统一的数据采集硬件接口和感知算法的模块接口，设计并实现了设备智能感知流程的可视化编排，并提供在线部署与测试。整体架构设计如图 1 所示。

整体架构分为三层：输入层、服务层（即设备智能感知流程编排与检测系统）、输出层。

输入层对接硬件设备（如数据采集设备、计算服务器等）、通用 API（如 MQTT、HTTP 等）、模型商店（提供成熟的数据处理方法和智能算法模型），为数据感知流程提供依赖的数据源、处理方法和计算环境。

服务层将输入层访问的资源进行模块转换，通过计算中心与流程中心的交互配合，实现智能感知流程的构建和运行，并为开发者提供算法模块的开发和管理平台。

当流程在服务层运行时，可将输出的算法模型

和数据处理结果通过标准化接口输出，供输出层的 PHM 系统进行设备故障诊断、数据可视化等应用，

完成从数据采集、可视化智能分析流程构建到分析结果应用和决策支持的全过程。

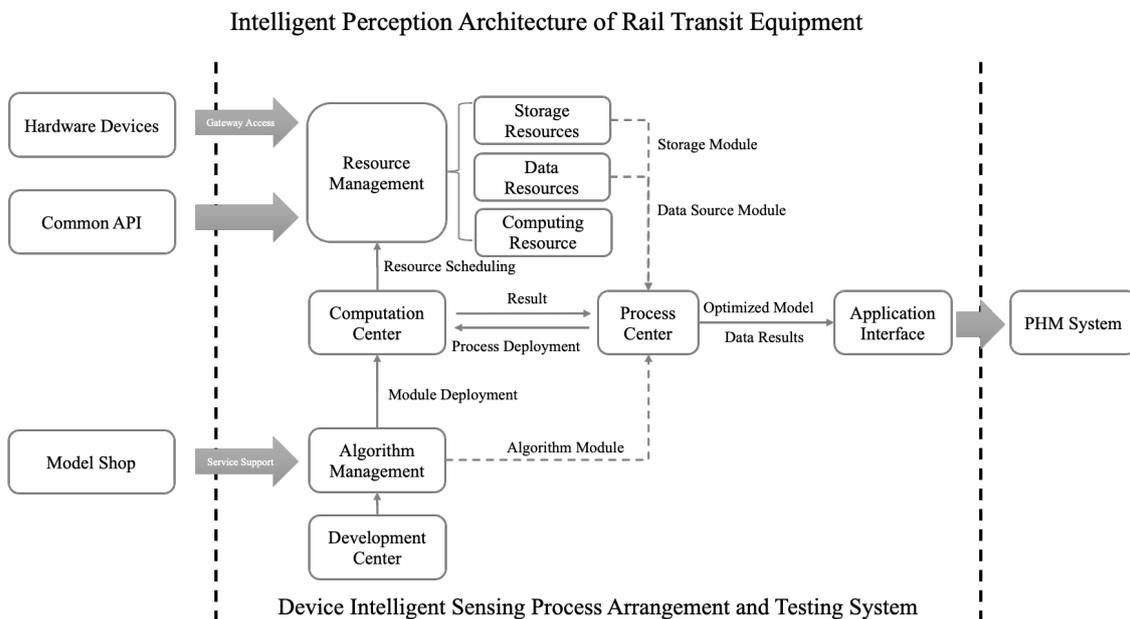


图 1 轨道交通设备智能感知架构

总体架构以人工智能技术为核心，深入挖掘智能感知算法在轨道交通领域各场景的应用重点与优势，并对系统、接口、算法进行模块化归类和规范化，通过标准化接口实现各类智能检测算法的模块化封装，进而实现设备智能感知流程编排与测试系统，以满足不同应用场景、不同数据分析方式的应用需求。

该架构的应用将形成一个可视化、组件灵活、低编码的轨道交通智能检测平台。系统提供的服务层旨在简化应用于 PHM 系统的设备状态智能感知流程的创建。系统通过可视化界面和拖拽式的操作方式，为工程师快速构建智能数据处理流程提供了平台，并为 PHM 系统的构建提供了可视化流程编辑的预录入。这将增加智能检测产品的部署和运行灵活性，有效降低用户运维成本，提高轨道交通设备状态监测的效率。

3 功能

设备智能感知流程编排与测试系统基于 B/S 架构，采用前后端分离的开发模式，实现了数据访问、模块配置、流程管理、流程部署、模型管理和数据管理六大功能模块。本系统的用户主要为工业设备研发、运行和维护工程师。应用该系统可以实现设备

感知流程的透明编辑。系统支持感知方法的模块化，用户可以通过系统操作界面将模块连接形成数据处理流，实现智能算法的训练和输出模型的测试。数据源支持数据包的离线上传和数据采集设备的实时数据录入。

流程建立后，用户可直接运行查看数据处理结果。整体功能架构如图 2 所示。

用户交互层提供流程管理、模块配置、模型管理、数据管理相关的功能操作，与逻辑处理层建立数据交互，实时可视化展示流程运行状态和模块运行结果。逻辑处理层处理数据接入、模块配置、模型管理、数据管理、流程管理、流程部署等相关逻辑，除了处理前端界面的数据传输外，还提供智能感知过程中实时设备接入相关的模块转换逻辑。逻辑处理层调用数据中心的数据采集接口，与算法服务器建立消息通道，实现算法模块的传输和数据，并连接数据库进行数据存储。

系统将前后端解耦，前端系统只需完成业务逻辑、提升用户体验，后端服务器只需专注于服务提供和数据管理。这样的分层架构使得系统整体结构更加清晰，进而结合模块化技术，实现算法的模块化管理，更利于后期功能扩展和系统维护。

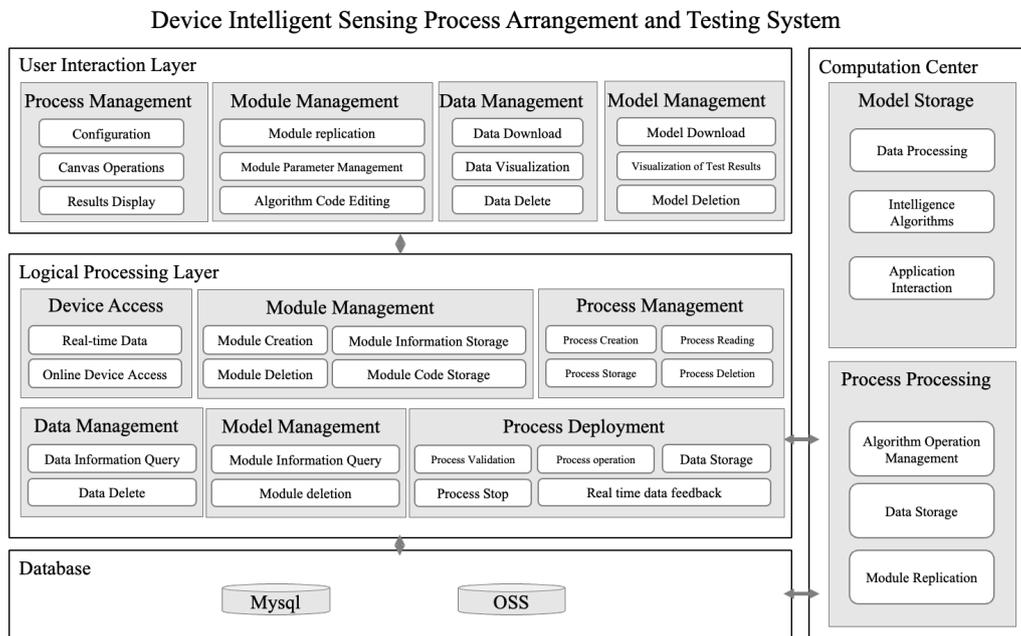


图2 功能架构设备智能感知工艺安排与测试系统

4 结论

本文介绍了基于轨道交通装备模块化智能感知架构的设备智能感知工艺编排与测试系统。该系统构建低代码算法应用体系，消除了系统使用者与算法开发者之间的隔阂，在确保安全的前提下打破了现有传统工业体系的封闭性。系统通过提供灵活的自主组合开发模式，最大程度地将开放程度的决定权交给用户，并以零代码、拖放式、积木式结构的方式降低人工智能的总体拥有成本。

在此基础上，通过构建模块化边缘计算系统，进一步构建云边端协同的设备故障预测与健康管理系统，增强设备的自适应、自学习、自优化能力，以及设备运维过程中的信息交互、数据分析和决策能力，从而提升系统的安全性和效率。逐步开发针对行业应用定制的人工智能技术平台，该系统能够贴合现场环境需求和用户习惯，通过人工智能与物联网的无缝融合，全面监测现场应用状态，降低传统企业采用高科技解决方案的门槛，构建完整的生态系统，提供从研发到服务的端到端解决方案，加速传统行业的智能化转型。

参考文献

[1] Lu T, Chen X, Bai W. Research on environmental monitoring and control technology based on intelligent

Internet of Things perception [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23).

- [2] IEEE Standard Framework for Prognostics and Health Management of Electronic Systems [J]. IEEE Std 1856-2017, 2017: 1-31.
- [3] Zio Enrico. Prognostics and Health Management (PHM): Where are we and where do we (need to) go in theory and practice [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2022, 218(PA).
- [4] Xu Ke, Zhang Chen-bin, Chen Zong-hai. A Review on Fault Diagnosis for Rail Transit [C]. 18th CCSSTA 2017, 2017:297-302.
- [5] Zhang Wei, Shi Yongjiang, Tang Renzhong, et al. Research on manufacturing and service integration technology based on industrial internet [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2022, 52(01):104-122.
- [6] Jia W, Haimin L, Xiao W. Application and Design of PHM in Aircraft's Integrated Modular Mission System [C]. 2019, pp. 1-6.
- [7] Zhang Y, Yan C, Li Y, et al. Design of Fault Diagnosis System for Steam Turbine Based on UML [C]. 2020, pp. 254-260.

- [8] Li C, Song H, Lei Y, et al. Research on PHM Technology for Special Vehicle Weapon Control System [C]. 2019, pp. 1-6.
- [9] Terrissa L S, Meraghni S, Bouzidi Z, et al. A new approach of PHM as a service in cloud computing [C]. 2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt), 2016: 610-614.
- [10] Wang P, Long Z, Dai C. A PHM architecture of maglev train based on the distributed hierarchical structure [C]. 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2019: 1623-1626.
- [11] Li Liang, Li Yuan, Huang Jia-Bin. Development of Intelligent Fault Diagnosis and Health Prediction Technology for Electrical System [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022, 35(01):96-98.
- [12] Wang G, Zhang H. A Software Based on Multi-Signal Flow Graph Model for PHM-Oriented Design for Testability [C]. 2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2018: 370-373.
- [13] Sun Yu. Thoughts on Top Level Information Architecture Design Based on Smart Rail Transit [J]. Tunnels and Rail Transit, 2020(04):1-5.
- [14] HE Li'na, GUO Zekuo. Research on Intelligent Operation and Maintenance Ecosystem of Urban Rail Transit Based on AI Intelligence and Big Data [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9):79-84, 89.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS