

适用于轨道交通机电智慧运维的智能设备的研发与应用

安俊峰¹, 郑雷², 张继伟, 胡信超, 周伟

(1.济南轨道交通集团有限公司, 济南 250000; 2.积成电子股份有限公司, 济南 250100; 3.北京竞业达数码科技股份有限公司, 北京 100089)

摘要: 研发了多功能一体化传感器和边缘智能网关, 应用于设备健康管理及智慧运维。所研发的智慧运维平台, 可基于传感器的采样数据, 结合 PHM 算法, 集成全状态域健康管理技术, 通过故障数据与检修数据的大数据积累, 实现设备的全生命周期的健康管理。

关键词: 智慧运维 健康管理 智能传感器

中图分类号: TP2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

1 设计背景和应用价值

1.1 设计背景

目前, 地铁机电设备设施呈现多样化、集成化和复杂化的发展趋势, 设备设施运行存在多种潜在故障隐患因素, 存在轨道交通设备故障预警的原理、机理未被研究透彻, 或者没有采取技术手段解决现存机理问题; 需研究故障预测与健康管理 (PHM) 模型搭建方法。设备在轨道交通领域, 故障预警较为重要, 关键设备系统一旦发生故障, 对运营的影响较大, 并且会带来较大的负面影响, 因此解决故障预警问题尤其重要。截止目前, 机电专业的核心设备故障机理、原理没有被发现, 或者发现部分原理、机理但是没有采取技术手段进行解决。深入研究设备的故障预警机理原理, 找到解决方案是轨道交通面临和急需解决的关键问题[1]。智慧运维的研究热度比较高, 业内也在探索智慧运维的场景应用, 例如在北京新机场线的车辆段应用部分传感技术, 做了一定程度的分析研究, 但业内缺少针对性的物联网全生命周期的专业技术应用, 在地铁线路信息化建设中, 主要靠地铁综合监控系统 (ISCS) 监视机电设备状态, 监控点位大多是设备故障和正常状态, 但对于设备的健康状态缺少分析和监控, 对故障的诊断还存在较大进步空间, 缺少智能终端采集设备, 缺少数据分析、算法设计、故障预警、健康度诊断的相关研发和技术投入, 同时对边缘计算的应用存在空缺, 数据分析处理依靠后台软件, 也大大增加了后台的负荷能力[2]。因此, 目前的运维工作量相对较大, 运维

¹第一作者: 安俊峰、男、高级工程师、轨道交通智慧运维及视频识别技术、97098541@qq.com

²通讯作者: 郑雷、男、正高级工程师、轨道交通智能节能技术、89282067@qq.com

人员数量庞大，运维投入的资金相对较多。面对轨道交通设备，需要采集众多的感知数据，需研制具备数据处理能力的传感器。轨道交通领域，实现智慧运维，需要增加传感器采集信号，但是冗余的信号传递到上位需要占据大量的资源，在传感器加装数据感知能力的处理器可有效解决问题，且面临复杂的多样的设备，研制多种类型传感器集成于一体的装置意义深远。而智能化传感器是设备 PHM 管理的重要组成部分，是急需解决的重大研究课题。目前，新一代信息技术日新月异，但在轨道交通车站基础设施设备运行综合监测领域，相关应用研究仍存在多风险致灾耦合及演变机理不清、感知层技术可靠性差、灾害控制理论针对性不强等问题。因此，基于智能探测技术、物联网技术、边缘计算技术及大数据分析技术，构建高灵敏、快响应、长寿命、智能可靠、自主可控的设备状态监测及故障管理平台，对设备进行 PHM 预警管控，确保设备稳定可靠运行，提供安全环境。对城市轨道交通“安全、绿色、智慧、高效”发展至关重要[3]。

基于以上需求，主要研发了多功能一体化传感器和边缘智能网关。其中自主研发了具有自主知识产权的一体化复合传感器系列产品，如 IDS 系列三轴振动传感器，用于测量三轴振动加速度，采用 MEMS 芯片，通过前端算法滤波进行起始误差和轴向偏差补偿，经过串口输出数据测量数据，具有高性能、低价位、高可靠性、高封装坚固性。可用于车辆测控、惯性导航、地震监控、倾斜和速度等。所研发的一体化传感器和智能网关已应用于济南轨道交通 3 号线车站机电智慧运维项目中。

1.2 应用价值

随着新一代物联网、边缘计算和大数据技术的发展，为设备状态智能监测、设备健康智能边缘计算分析、检测信息高效传输与设备 PHM 管理等提供了全面的技术支撑。通过新一代物联网技术，在车站设备系统增加智能检测设备感知车站设备各种运行状态，打造车站设备多角度、全过程、多专业的数字孪生系统，实现设备运行的全方位实时监测，并为智能分析提供数据基础，实现各类设备状态监测、智能分析与运维管理功能，从而提升监测自动化程度，实现故障准确定位、设备隐患预警分析，实现有轨电车车站设备状态检修[4]。

通过本课题的研发与应用，可在成本优化、运营效率提升、运营安全性及运营品质提升等方面获得卓越成效，将为城市轨道交通带来显著的经济效益和社会效益。

2 创新点与优势

2.1 基于智能传感器实现了物联网智慧交通端侧设备态势感知技术

智能感知终端基于传感器、物联网传输技术，采用一体化全数字传感器感知车站端侧主

要设备关键部件的全息特征，对其进行在线监测，将物理特征转化成数字信号，且进行过滤及运算（如傅里叶变换、拉普拉斯变换等），并将数据实时传给平台，从而能够提供早期判断趋势，并提供设备故障预警。基于 FMEA 的理论建模，形成故障库，通过故障库模型分析比对故障原因，可以使维修部门有效的安排维修时间和周期。

所研发的系统在主要的机电设备上加装传感器来监视机电设备的运行情况，在车站重要位置安装激光雷达、摄像机监测人流、设备的异常状态，边缘网关采集这些传感器的数据进行初步处理。采用振动传感器、机房环境传感器、机柜微环境传感器、激光雷达、风阀摄像机、行为网关、行为分析摄像机等智能设备，用于设备状态的态势感知，动态监测设别状态，提前感知异常，发生故障前及时预警，发生故障后第一时间告警。

2.2 基于边缘网关实现了边端协同的区域信息自治分析处理技术

基于边侧智能终端和端侧智能感知设备的相互通信融合，实现边端协同的区域信息采集和自治分析处理。设备数据上传至云端进行处理、存储和分析，但这些数据中包含大量无效数据，需要云平台配备更高的服务器配置和更大的带宽，给企业带来高昂成本。“边云协同”可以有效的解决上述问题，边缘计算网关采用边缘计算技术，在智能监测设备上采集信息，边缘计算网关从不同设备收集的数据可以在生成位置附近（边缘侧）处理，无需发送至云端，通过故障初步诊断，只将可疑数据通过物联网上送到服务器。边缘网关监测实时数据，对数据进行预处理，如果振动数据异常，超过设定的阈值，即判定为异常数据，并将此异常数据立即上送到服务器。本系统所述边端协同的技术包括：摄像头行为分析技术、摄像头风阀分析技术、传感器及传感器网关分析技术。

基于边侧智能终端和端侧智能感知设备的相互通信融合，实现边端协同的区域信息采集和自治分析处理。边侧智能终端采用边缘计算技术，为降低整体网络负载，采取分布式前端计算，实现本区域内的信息就地化处理，并对存在的问题进行快速预警处理，同时将有效数据或结果数据上传至主站数据分析平台，将高负载与低负载数据进行平衡。从系统设计上降低系统布路的复杂性，缩减服务器等硬件设备的参数要求及投入，减少因系统设备多而增加的故障和维修成本，使后期的运维管理轻量、简便。

2.3 基于传感器信号分析的设备健康状态评价技术

综合利用边侧智能终端采集的多源信息和大数据云主站平台，基于大数据挖掘技术，建立边云系统的智慧运维系统，实现设备健康状态评价。依托设备状态数据建立自动化采集的评价指标计算模型，从设备故障率、关键部件检测状态数据，寿命预测、运行预估年限、隐患预测等多维度构成健康评价模型，采用以上算法及设备状态数据关联分析等为设备故障监

测、故障维修和设备检修计算提供依据。

2.4 基于边缘网关实现了基于云边协同的智慧交通设备健康状态评价技术

综合利用边侧智能终端采集的多源信息和大数据云主站平台，基于大数据挖掘技术，建立边云系统的智慧运维系统，实现设备健康状态评价。依托设备状态数据建立自动化采集的评价指标计算模型，从设备故障率、关键部件检测状态数据，寿命预测、运行预估年限、隐患预测等多维度构成健康评价模型、采用逻辑回归，多维度评价、熵权法等算法 建立动态权重自适应的评价模型，应用大数据分析技术进行深度挖掘与分析，采用以上算法及设备状态数据关联分析等为设备故障监测、故障维修和设备检修计算提供依据。在本技术中，“云端”是指云计算 “边端”是指边缘计算。“云边协同”的含义是“云计算”和“边缘计算”互补工作。如果说云计算是集中式数据处理，边缘计算可以说是分布式数据处理。“云计算”和“边缘计算”互为补充，边缘计算距离端设备较近，适合实时的数据分析和智能化处理，更加高效和安全。“云端”是指本系统的云计算。“云计算”部分，设备主要包括服务器、网关设备等，用于和“边缘计算”协同工作，边端的“边缘计算”功能，“边缘计算”的设备包括竞业达边缘网关、环境网关，用于处理传感器传来的设备振动数据、环境数据等，“边缘计算”通过 5G 网络传输来的数据，在这里加工存储，这部分距离传感器较近，称为“边缘计算”。边缘网关包括实时监测模块、统计分析模块、预警处置模块。

2.5 适用于轨道交通的专用物联网通讯技术

研究适用于轨道交通的专用物联网通讯技术，实时获取机电设备及其他重要设备的信息，为轨道交通大数据积累和分析、优化轨道交通设备运维策略、发展智能应用打下基础。轨道交通专用物联网系统应适应轨道交通线路的电磁环境特性、适应轨道交通业务特点、选择合适的布网方式，满足高可靠、高可用的要求。本系统中所应用的适用于轨道交通的专用物联网通讯技术移动 5G 技术和竞业达物联网技术。

随着物联网技术的普及，以太网供电（PoE）作为一种向多种设备提供电力和数据传输的通信技术，其在智能运维领域应用拥有显著的优势。可以减少电力线的物料成本和人工布线成本，布置点位相对比较自由。

使用的水泵电机、风机安装到的振动传感器因其数据量大，采用 POE 连接方式与振动监测边缘网关进行连接，安装简单，只需要布置一根双绞线，不需要敷设电源线，可以省去昂贵的电源线，省去敷设电源线的工作量。同时为节省布线减少后期的维护和维修成本。

当今工业物联网 CAN 总线运用较多，随着总线通讯的数据量越来越大，这就使得传统的 CAN 总线在传输速率和带宽方面越来越力不从心。因此 CAN-FD 孕育而生。CAN-FD 比

CAN 总线的带宽更高，提高了 CAN 总线的网络通信带宽，改善了错误帧漏检率。也可以参与原来的 CAN 通信网络中，提高了网络系统的兼容性。

机房机柜环境监测各传感器采用 CAN-FD 高速总线的通讯方式，与环境监测边缘网关相连，一个总线回路即可串联环控电控柜室 24 台机柜内的环境监测传感器，同时保障各传感器与边缘网关之间数据通信的通信速度。

振动监测边缘网关、环境监测边缘网关形成各区域小脑，数据存储与计算的重心不依赖后台，作为运维云平台的补充，解决的正是数据传输、处理、存储的效率问题。边缘网关与运维云平台之间采用工业物联网（IIoT）环境中最流行的 MQTT 协议对接，MQTT（消息队列遥测传输）是为从多个设备收集数据，然后将数据传输到 IT 基础设备而专门设计的协议。由于是轻量级协议，MQTT 适用于远程监视，尤其是需要代码占用空间较小或网络带宽受限的机器与机器（M2M）通信。具有以下优势：数据传输功耗低；提供一对多的信息发布方式，解除应用程序耦合；客户端并发数量为百万级；开放消息模式，便于实现；包容不稳定的网络；数据流量小。

3 实现方案简介

开展关键传感器技术研发，并在此基础上完成基于物联网的智慧城轨运维系统关键技术研究，采用最新的传感检测技术、互联网通讯集成技术、边缘计算、设备 PHM 管理及大数据分析等技术，采用分布式处理方式，不单纯依赖于中心平台，降低系统应用的复杂度，提高系统可靠性。提供边缘协同架构，根据用户场景，灵活定制边缘智能计算能力，快速准确部署智能算法，实现快速高效、安全可靠的前端快速处理。进行边缘侧数据预分析，结合大数据智能分析服务，在不需要人工查询大量数据的情况下精准定位可疑场景、事件，提高运维效率。结合设备修程修制和设备管控要求进行设备故障处理过程管控，实现设备 PHM 管理，实现全生命周期管理，降低运维成本，提升设备 RAMS 指标。采用智能监测传感器对设备状态如声音、振动、空气、温湿度、电流、电压、设备本身的状态量数据等进行采集，实现设备全方位检测；对采集到的各类状态数据进行建模，采用大数据模型进行分析，实现设备数据深度挖掘，以提供先进的故障预警和故障诊断方法，进而实现设备全方位的健康状态管理；采用边缘计算技术，在智能监测设备上采集信息，研究进行故障初步诊断和预测的技术，并将可疑数据通过窄带物联网上送到大数据平台，作为基础数据进行分析；对车站人员、备品备件、工器具等资源进行建模，结合设备运行状态预测结果和运行要求，实现维修工单流程化管控，实现设备维修智能决策和设备运维过程智能管控，实现设备的全生命周期

管理，实现设备 PHM（故障预测与健康管理）管理，降低运维成本。基于大数据技术建设的管控平台接入济南轨道交通线网云平台，实现线网在线监测集成、全网设备健康质量评价与设备生命周期管理。

3.1 机电智慧运维平台设计

为了将所研发的传感器得到应用，研发了跨操作系统平台的系统。即机电智慧运维平台，应用于机电智慧运维系统，该系统融合了传感器终端感知，边缘网关通信上传，服务器智慧大脑运算分析，实现了机电设备的智慧运维。

平台技术选型如下：

- 采用 Redis 存储实时数据和实时事项
- 采用关系型数据库存储模型数据，开发模型拼接工具，实现模型拼接
- 所有历史数据、事项采用大数据平台存储,并兼容支持关系数据库。在数据库表设计时要考虑其兼容性。
- 采用 Kafka 消息系统实现各模块间的业务通讯
- 建议其它系统与平台的交互采用 Kafka 消息直接通讯
- 后台服务可直接提供 Restful 接口，供前端界面调用
- 图形、图像、视频等数据存储于 MongoDB 文件数据库中。
- 工作流采用 WEB-CBB 组提供的 Activiti 工作流组件

平台人机交互界面采用 B/S 架构实现，采用前后端分离实现的策略。采用 springboot2 框架，前端采用 vue，后台采用微服务方式。

采用移动 app 实现检修工单的全闭环。

所有第三方服务组件采用集群方式部署。



系统整体分为六层：硬件资源、基础资源、数据资源处理、基础平台服务、业务应用服务和业务应用层。

历史数据存储支持关系数据库和大数据库（HBase）的兼容应用，采用标准接口实现对两者的支持。历史数据存储表在设计时需要考虑兼容关系数据库和 HBase 数据库。

其中界面应用主要包括两部分：浏览器访问的界面 UI 及用于作业工单及故障维修的移动 app。

基础资源管理层主要由 Redis 数据中心、关系数据库、大数据平台、MongoDB、Kafka 消息总线、BI 组成。

该层用于提供全面、高效和可靠的数据管理能力，实现包括图形文件、模型数据、实时数据和运行数据在内的多种数据的海量、高效存储能力和高并发、高可用访问能力。主要功能包括：

1. 支持各种类型数据，包括模型数据、实时数据、历史数据、告警信息、配置信息等数据。
2. 支持多种存储方式，包括关系型数据库、列式数据库、键值数据库、文件存储数据库；
3. 支持分布式应用数据的并发访问和高效汇总，支撑大规模数据分析带来的海量数据查询和中间数据高速存取。

a) Redis 数据中心：存储实数数据、告警事项。

- b) 关系型数据库：存储模型信息、用户配置信息，权限模型， workflow 模型等，也可用来存储历史量测数据、历史事项。
- c) 大数据平台（HBase）：存储历史量测、历史事项。本课题系统设计支持采用 HBase 和关系型数据库存储历史数据，研发及测试均采用关系数据库。以下的描述中，凡是涉及采用 HBase 描述历史数据存储的，均表示支持 HBase 和关系型数据库。
- d) MongoDB：存储图形、视频文件。
- e) Kafka 消息总线：提供通信中间件安全消息传递支持，提供可靠发布与可靠订阅支持。
- f) BI：报表分析工具，提供报表的统计分析展示。

数据资源处理层由数据流接口服务、文件接口服务、数据库接口服务、实时数据整合服务、图形数据整合服务、模型数据整合服务组成。

该层主要负责通过数据流接入的方式采集依赖系统的实时数据、告警事项、模型数据，通过文件接入的方式采集依赖系统的图形文件、模型数据文件、实时数据和告警事项文件，通过数据库接入的方式采集依赖系统的告警事项、模型数据。

完成数据的采集后，不同来源的图形数据、模型数据、实时数据分别由图形数据整合服务、模型数据整合服务、实时数据整合服务进行数据抽取、转换、净化、加载等处理，实现不同数据源的图形数据、模型数据、实时数据的数据整合。图形整合完毕后直接存入 MongoDB 文件数据库，实时数据和实时事项通过 Kafka 消息总线发出去，由实时代理服务 and 实时事项服务收取后做响应后续处理，模型整合之后，直接写入本系统关系数据库。

业务应用服务层由移动应用访问服务、智能分析服务、智能巡检服务、备品分析服务、设备检测服务、智慧作业服务组成，为智能运维管控平台提供业务相关的服务。

1. 移动应用访问服务：负责调用后台服务处理移动应用发送过来的请求。
2. 智能分析服务：负责对大数据的统计分析、制作报表。
3. 智能巡检服务：分析各类设备数据，提供可靠的检维修策略。
4. 备品分析服务：提供备品备件的查询和分类统计等功能。
5. 设备检测服务：提供设备的实时检测、故障预判和告警。
6. 智慧作业服务：分析设备运行状态，判断设备劣化趋势，自动生成检修工单。
7. 业务应用层由含桌面应用和移动应用组成。

桌面应用包含：智慧检测、智慧巡检、智慧报表、事项告警、智慧决策、智慧作业、备品备件。

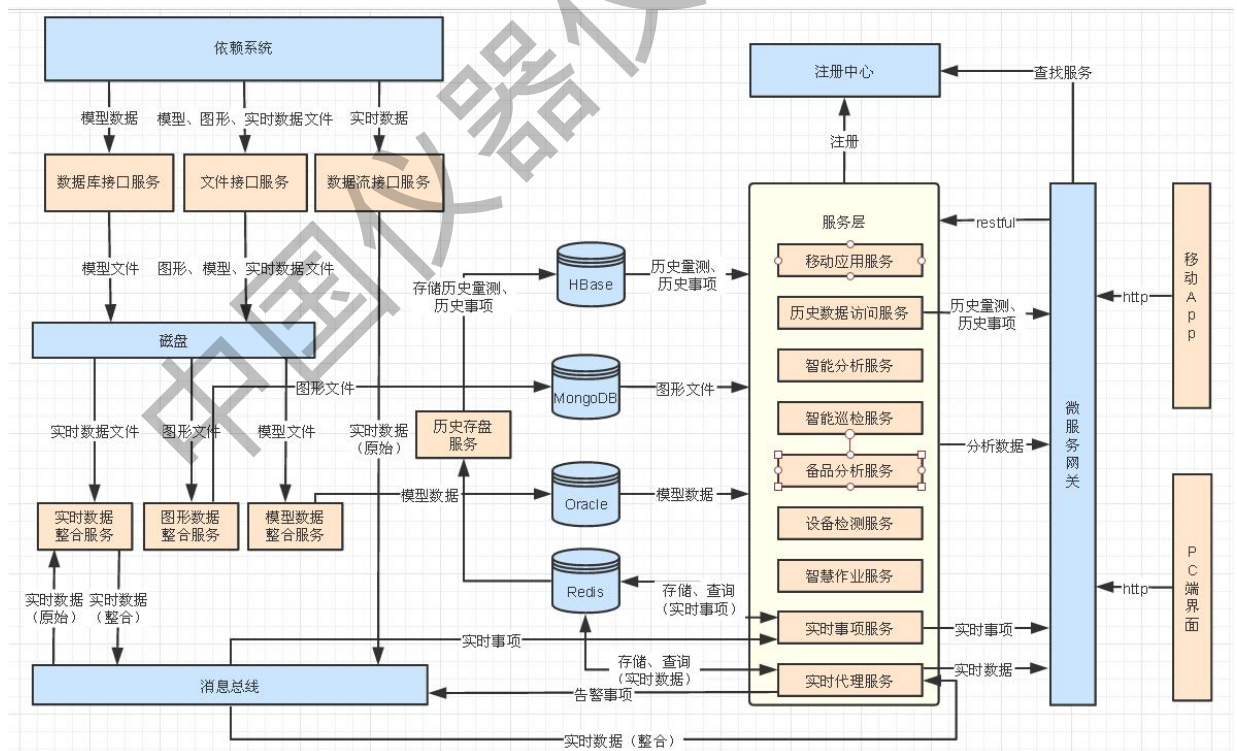
移动应用包含：智慧作业、故障上报、智慧报表、事项告警。

1. 智慧检测：支持对设备进行在线状态检测及预警，实时诊断设备故障，主动运维管理设备。
2. 智慧巡检：支持获取系统智能分析维修价值和故障后果，推荐检维修策略。
3. 智慧报表：支持查看系统通过大数据分析产生的报表。
4. 事项告警：支持告警事项的推送及提醒。
5. 智慧决策：支持查看规范化的故障处理方案与故障快速排除辅助决策。
6. 智慧作业：支持查看系统智能生成的检修工单和巡检工单。
7. 备品备件：支持查看备品备件的库存数量与分类统计。
8. 故障上报：支持主动上报发现的设备故障。

智能运维管控平台的系统数据流如下图所示，可以根据数据流分为两部分，一部分为数据访问数据流，另一部分为数据接入数据流。

数据访问数据流：UI 以及移动 App 发送请求访问后台服务的数据流。

数据接入数据流：从依赖系统中采集数据，将数据输入到智能运维管控平台。智能运维管控平台的数据来源于依赖系统，具体的数据接入数据流如图所示。



数据集成服务模块通过数据流、文件、数据库三种方式采集依赖系统的实时数据、图形数据、模型数据。

3.2 基于智能传感器和智能网关的运维系统设计

传感器是一种检测装置，能感受到被测的信息，并能将检测感受到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求，它是实现自动检测和自动控制的首要环节。通过研发智能传感器进而开发的设备设施监测及故障预警系统可有效地对机电设备潜在故障的发生、发展和转移发出预警，智能地诊断出设备故障原因与严重程度，为设备的维修保养提供可靠依据。搭建了直观的监测平台，对机电设备进行实时监测，并在平台直观显示，当某台设备发生故障平台可及时发出报警信息提示相关人员进行处理，提高故障处理效率。应用于济南轨道交通3号线八涧堡车站搭建基于物联网的城轨智慧运维系统，实现了预期研究目标。系统在主要的机电设备上加装传感器来监视机电设备的运行情况，边缘网关采集这些传感器的数据进行粗加工后，采用5G通信技术推送到智慧运维平台，由平台进行数据处理、分析和展示，最终实现设备故障预警和健康状况分析。

序号	设备名称	传感器类型	检测内容	数据传输	供电	态势感知内容
1	送风机、排风机	一体化温度、湿度、TVOC，姿态、振动传感器	监测设备的振动、温度、湿度等变化，对异常情况报警。	CAN	DC9-36V	监测并确定正常工作温湿度计振动频谱区间，温度过高提示设备异常、温度过低可能未开机或设备故障；湿度过高提示可能漏水；振动异常提示部件松动或脱落等、根据振动频谱进行PHM健康状态、故障隐患等分析。
	组合式空调电机	一体化温度、湿度、TVOC，姿态、振动传感器，水温	监测设备的振动、温度、湿度等变化，对异常情况报警。	CAN	DC9-36V	监测并确定正常工作温湿度计振动频谱区间，温度过高提示设备异常、温度过低可能未开机或设备故障；湿度过高提示可能漏水；振动异常提示部件松动或脱落等、根据振动频谱进行PHM健康状态、故障隐患等分析。

2	泵类	雨水泵、污水泵、冷却水、冷冻水泵	一体化温度、湿度、TVOC, 姿态、振动传感器	监测设备的振动、温度、湿度等变化, 对异常情况报警。	CAN	DC9-36V	监测并确定正常工作温湿度计振动频谱区间, 温度过高提示设备异常、温度过低可能未开机或设备故障; 湿度过高提示可能漏水; 振动异常提示部件松动或脱落等、根据振动频谱进行 PHM 健康状态、故障隐患等分析。
		机房环境	温湿度、TVOC、气压、照度、PM0.5	对机房环境进行综合监测	CAN	DC9-36V	监测机房环境颗粒物含量, 温湿度, TVOC 等状态, 对光照、线缆爆燃隐患给与分析, 及时预警
4	机柜	机柜、配电箱	温湿度、气压、TVOC、加速度/红外阵列	对机柜环境进行综合监测	CAN	DC5-30V	监测机柜振动, 温湿度, TVOC 等状态, 对线缆爆燃隐患给与分析, 提前给出趋势判断。

态势感知内容

系统由以下设备组成:

序号	名称	型号	单位	数量	作用
1	边缘网关	JYD-MIST-V	台	4	汇聚传感器数据
2	机房微环境传感器	JYD-MES-0601B	个	1	机房环境监测
3	机柜微环境传感器	JYD-MES-1701A	个	21	机柜环境监测
4	振动传感器	JYD-IDS5001EB	个	16	风机、水泵振动状态监测
5	激光雷达	JYD-SIGMA	个	1	人流监测
6	风阀摄像机	DH-SD-29D204UE-GN-PD	台	1	风阀异常状态
7	AIU 行为分析终端	AIU Server 智能视频管理系	台	1	异常行为分析

统 1.0

工作站

定制

5G 网关

IGW-1002A

8	行为分析摄像机	DH-SD-29D204UE-GN-PD	台	1	人员异常行为监测
---	---------	----------------------	---	---	----------

工业交换机

IES6312-8GP4GS-2P24-120w

台

5

机电智慧运维平台

积成电子定制

套

1

系统

设备组成

系统整体架构为：



1) 边端协同

边侧是指传感器网关，端侧是指传感器设备。边侧智能传感器网关设备采用边缘计算技术，为降低整体网络负载，采取分布式前端计算，实现本区域内的信息就地化处理，并对存在的问题进行快速预警处理，同时将有效数据或结果数据上传至主站数据分析平台，将高负载与低负载数据进行平衡。从系统设计上降低系统布路的复杂性，缩减服务器等硬件设备的参数要求及投入，减少因系统设备多而增加的故障和维修成本，使后期的运维管理轻量、简

便。传感器监测网关可进行边缘计算。主要技术包括卡尔曼滤波、快速傅里叶转化、模糊算法。以振动信号分析为例，采用傅里叶变换（FFT），滤掉正常的振动信号，保留冲击脉冲的信息，将生产状态参数与故障数据相关联。

①本系统设置了4个边缘网关，1个边缘网关安装在环控电控室墙壁上，1个安装在环控机房智慧运维系统机箱内，1个安装在天井智慧运维系统机箱内，1个安装在污水泵房智慧运维系统机箱内。

边缘网关用于采集传感器的数据，进行处理后推送到智慧运维平台，识别设备异常向智慧运维平台发送告警。边缘网关用于采集传感器的数据，进行处理后推送到智慧运维平台，识别设备异常向智慧运维平台发送告警。边缘网关具备接入多种、多个传感器的能力，并对接入的数据进行加工处理和保存，保证发送到智能运维平台都是可靠的数据。



边缘网关设备

② 机房微环境传感器

本系统设置1个机房微环境传感器设置于环控电控室内，用于监测机房内的微环境数据。

ICS 复合环境传感器具备边缘计算、数据耦合、Open Data 等核心特性，针对不同应用场景要求，监测温湿度、TVOC、粉尘、PM2.5、照度等参数，实时边缘报警，实现资源整合优化、数据轻量化等功能。

微环境网关根据《电子计算机机房设计规范》GB50174—2008 为要求，对温度、湿度、洁净度、电磁场强度、噪音干扰、防漏、电源质量、振动等机房/机柜环境各参数进行综合分析，进行综合判断。



机房微环境传感器

采集的数据有：

序号	采集值	单位	备注
1	温度	°C	
2	湿度	%RH	
3	气压	KPa	
4	TVOC	ppb	
5	噪音	dB	
6	PM0.5	/cm ³	
7	照度	lux	

③ 机柜微环境传感器

机柜微环境传感器设置于环控电控室机柜内，用于监测机柜内的微环境数据。

采集的数据有：

序号	采集值	单位	备注
1	温度	°C	
2	湿度	%RH	
3	气压	KPa	
4	TVOC	ppb	
5	噪音	dB	
6	振动	m/s ²	



机柜微环境传感器

轨道交通智能运维管控平台

首页 智慧检测 巡检管理 事项管理 设备管理 工单管理 计划管理 报警管理 终端管理 商品备件 任务管理 公告管理

实时监测

子系统 JYD 设备类型 机房/机柜传感器 设备名称 机柜环境传感器1 重置 删除

系统名称	设备名称	设备类别	设备类型	设备参数码	参数名称	参数单位	监测值
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	temperatureValue	温度		24
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	pressureValue	气压		100
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	humidityValue	湿度		68
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	lvocValue	lvoc数值		1
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	airQuality1	空气质量1		
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	volumeValue	音量		0
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	acceleration	加速度		
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	illumianceValue	光照		0
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	pmValue	pm		0
JYD	机柜微环境传感器1	ENVIRON	机房/机柜传感器	deviceTime	时间戳		

共 13 条 10条/页

查询界面



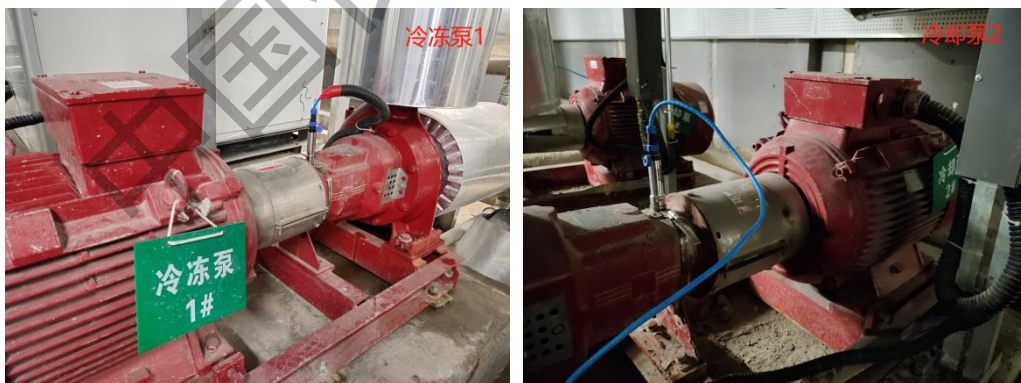
历史曲线

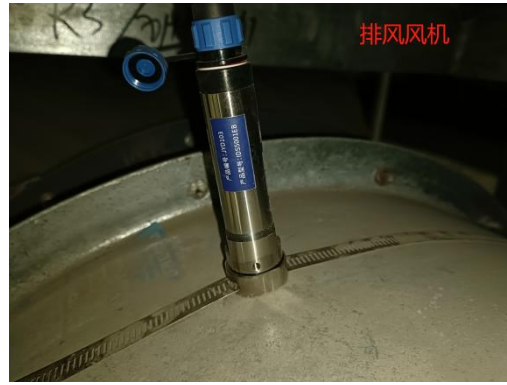
④ 振动传感器

本系统共设置 16 个振动传感器，分别用于监测 3 个冷冻泵、3 个冷却泵、3 个排热风机、3 个空调机组电机、2 个雨水泵、2 个污水泵。其中冷冻泵、冷却泵、排热风机和空调机组电机在环控机房，雨水泵在天井，污水泵在污水泵房。

IDS 加速度传感器，用于测量三轴振动加速度，采用 MEMS 芯片，通过前端算法滤波进行起始误差和轴向偏差补偿，经过串口输出数字测量数据。具有高性能，低价位，高可靠性，高封装坚固性。可用于车轴测控，惯性导航，地震监控，倾斜和速度测量，振动和冲地中试验台加速度测量等系统中。

传感器安装图如下所示：





传感器安装位置图

采集的数据有:

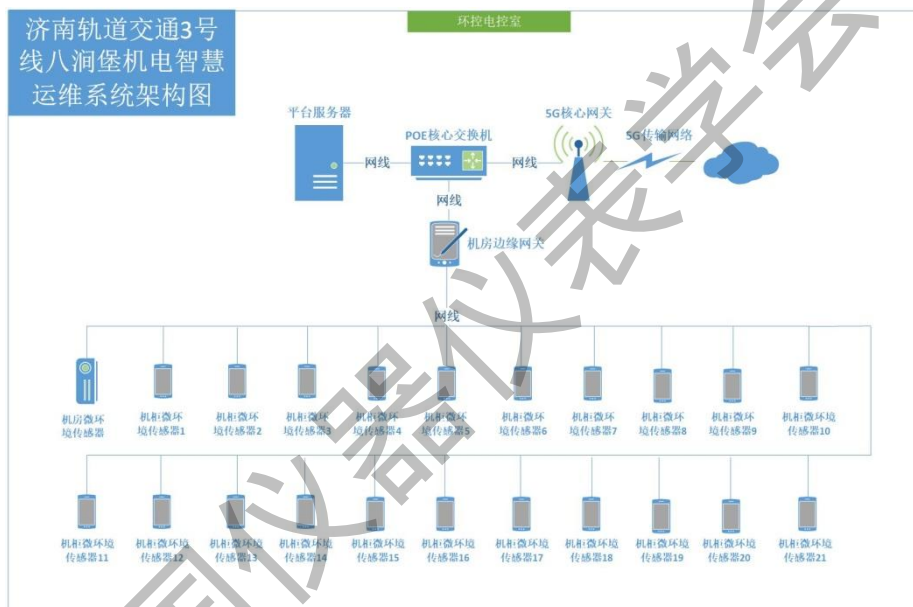
序号	采集值	单位	备注
1	X 轴加速度有效值	m/s ²	主要数据
2	X 轴速度	m/s	
3	X 轴位移	mm	
4	Y 轴加速度有效值	m/s ²	主要数据
5	Y 轴速度	m/s	
6	Y 轴位移	mm	
7	Z 轴加速度有效值	m/s ²	主要数据
8	Z 轴速度	m/s	
9	Z 轴位移	mm	



查询界面



传感器历史曲线图



架构图



现场设备图

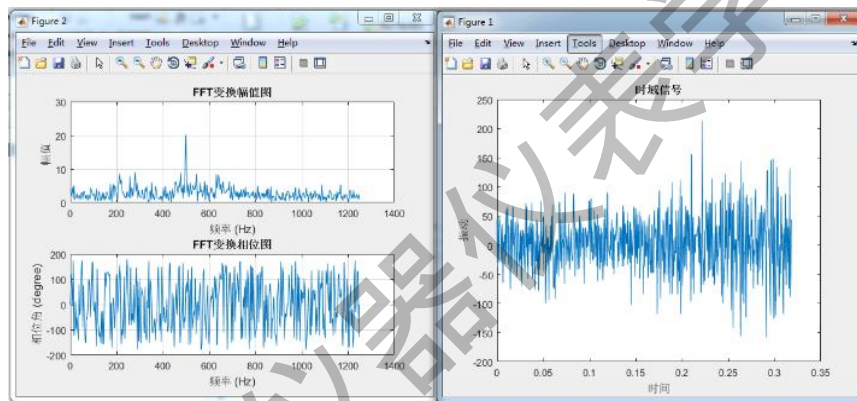
对传感器所采集数据分别进行时域数据分析和频域数据分析。时域分析是描述物理量随时间的变化，因为自变量是信号的最基本和最直观的表达。求取信号波形在不同时刻的相似

性和关联性，获得反映机械设备运行状态的特征参数，为机械系统动态分析和故障诊断提供有效信息。

对信号进行频域分析可以获得更多有用信息，求出各个频率成分的幅值分布和能量分布，从而得到主要幅度和能量分布的频率值。

信号频域分析将信号源发出的信号强度按频率顺序展开，使其成为频率的函数，并考察变化规律。频谱分析主要分析信号是由什么频率的正弦信号叠加得到的，以及这些正弦信号的振幅。

信号的频域分析是采用傅立叶变换将时域信号 $x(t)$ 变换为频域信号 $X(f)$ ，从而帮助人们从另一个角度来了解信号的特征。信号频谱 $X(f)$ 代表了信号在不同频率分量成分的大小，能够提供比时域信号波形更直观，丰富的信息，如下图为信号进行 FFT 后的频谱图。



信号分析

依据失效模式与影响分析及不同机电设备结构特点对待监测设备的重点部位进行特征提取、处理。通过综合分析信号的时域、频域特征，考察振动信号在不同时间、不同频率下的振动特性并结合设备运行工况建立设备预警阈值。从而建立设备故障预警，辅助维修决策及维修策略优化。

系统采用基于现场实时状态数据建立智能化的维修管控技术算法，确定设备维修策略、设备维修周期和设备维修内容。包含：维修策略决策、维修时机决策、设备维修项目决策三个部分。针对故障异常的现象和报警采用动态的故障决策树，定位可能的故障原因和部位；按照零部件寿命预警提出需要更换检查的零部件清单，结合设备状态检测结果等，提出计划维修的检查项目和维修更换内容。采用故障工单自动流转功能，结合备品备件、工器具等实现维修过程智能管控，提升故障处理维修效率，并实现设备的状态分析统计，形成多维度的报表信息，实现设备健康管理。

系统采用设备故障诊断方法，对机电设备数据进行采集，构造深度学习算法模型，根据实时采集的数据进行故障诊断，区分健康和故障类型，并针对故障给出设备自愈或者相关的维修手段。技术路线为采集到有关数据，然后指定标准化的接口，研究网络传输方案，最后在平台层实现算法模型的搭建。采取的实验手段为模拟产生故障，搭建数据采集系统，并进行深度学习算法模型的仿真和验证。关键技术为深度学习算法模型的搭建。

采取剩余寿命预测来达到健康管理的功能。采用一种融合嵌套式长短期记忆神经网络算法和高斯平滑滤波的方法来实现剩余寿命预测，为了实现更加科学合理的寿命值的预测分析，通过深度学习算法模型对历史海量数据建模分析，得到相关的模型，并且根据实时采集的状态数据得出设备的健康程度，剩余寿命时间等，为合理科学的掌握设备状态提供智能辅助。模拟关键核心设备从开始使用到报废过程的数据采集，按照时间序列，将输入数据和剩余寿命数值一一对应，然后建立循环神经网络模型，构造输入数据和剩余寿命之间的模型，进而当输入数据获得后可以调用模型，得到剩余寿命数值。实验手段为模拟产生系统数据，搭建一套最小化仿真测试平台，对关键设备进行仿真分析，模拟各个阶段的数据，获取数据存储。

2) 分析结果举例

以振动监测为例，对监测设备进行振动监测，通过快速傅立叶变换分析幅值谱、相位谱定位故障，判断故障类型为不对中故障。

序号	故障类型	故障原因	监测参数	故障特征	备注
1	不对中	联轴器安装偏心或轴承座两侧位置与标高不同。轴承不对中原因是转子轴心线与轴承中心线偏移或倾斜。	振动	在振动方向上易发生轴向振动，其激振频率以联轴频率为主，振动形态与转速无关且不趋于零	

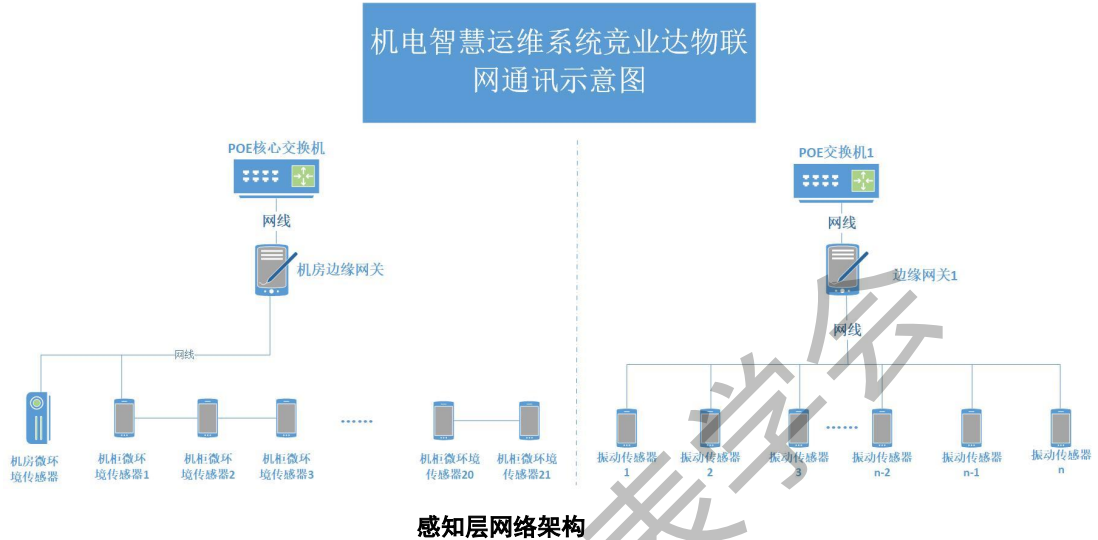
不对中故障分析结果，2 倍频分量，振动随负荷变化情况及轴向振动值等。2 倍频与 1 倍频的比值超过 50%，2 倍频的幅值超过通频报警值的 25%且轴向振动幅值较大，或轴向振动与径向振动最高幅值的比值超过 50%，则可认为不对中。

3.3 网络架构设计

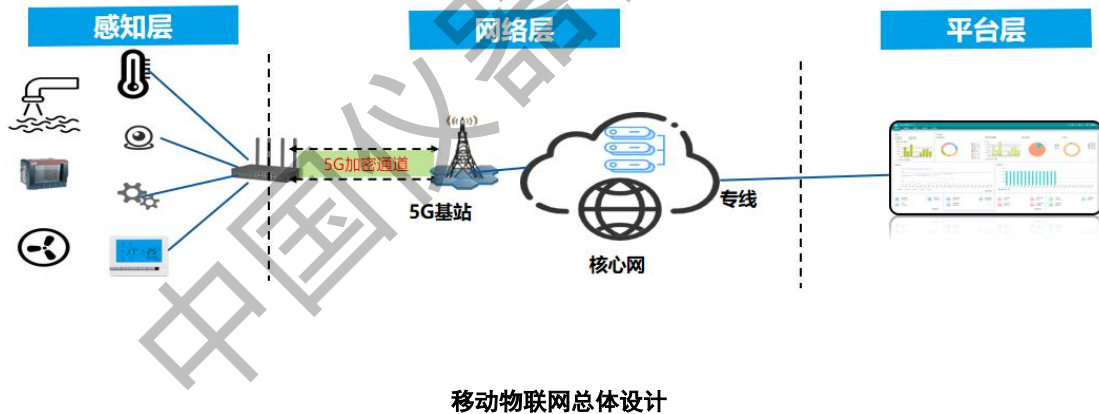
采用适用于轨道交通的专用物联网通讯技术，实时获取机电设备及其他重要设备的信息

，为轨道交通大数据积累和分析、优化轨道交通设备运维策略、发展智能应用打下基础。轨道交通专用物联网系统应适应轨道交通线路的电磁环境特性、适应轨道交通业务特点、选择合适的布网方式，满足高可靠、高可用的要求。

感知层网络架构如下：



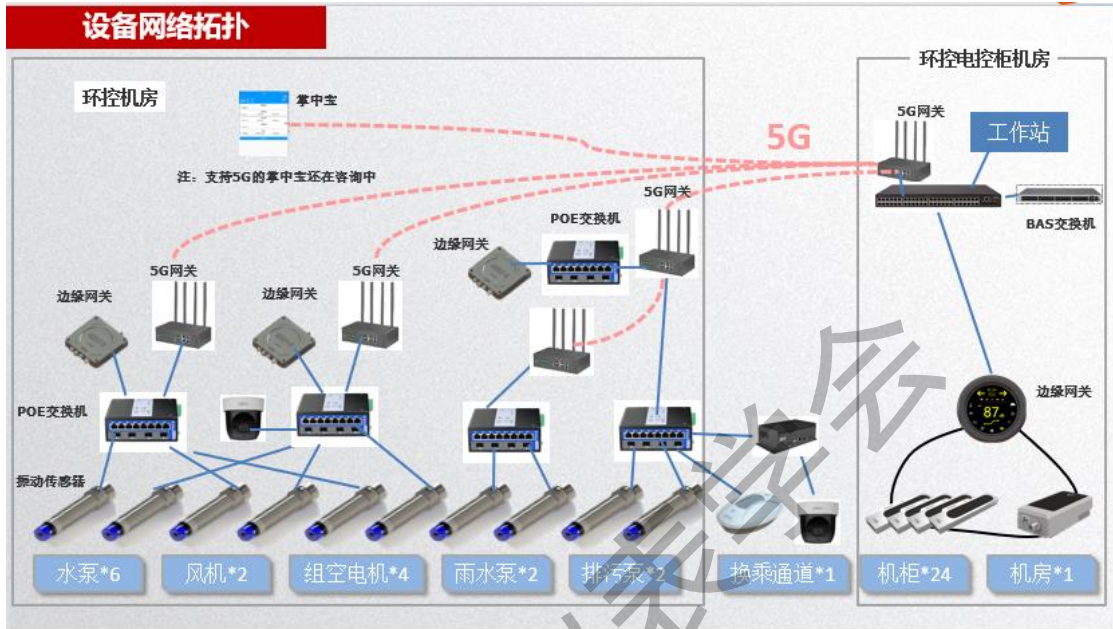
移动物联网网关总体设计如下图所示：



网络架构分感知层、网络层和平台层。

底层是用来感知数据的感知层，第二层是数据传输的网络层，最上面则是内容平台层。其中感知层由各种具有感知能力的设备组成，主要用于感知和采集工业生产中发生的物理事件和数据。感知层至关重要，是物物相连的基础，是实现物联网的最底层技术。物联网感知层是物联网建立的基础，深入的了解物联网感知层的双层部分为建立低成本、高效、灵敏的物联网提供一定的一局。感知层的作用相当于人的眼耳鼻喉和皮肤等神经末梢，它是物联网获识别物体，采集信息的来源，其主要功能是识别物体，采集信息。

移动物联网网关是感知层的最核心器件，也是物联层的汇聚设备。底层物联设备通过接口对接、协议适配、IP 地址规划，进行数据采集的 5G 网关汇聚。最终在 5G 网关上实现了 5G 网络回传。



网络拓扑结构

4 有益效果

1) 基于边端协同技术，提升了智慧交通设备感知水平

终端侧使用了多种智能传感器，边缘侧使用边缘网关收集数据处理后上传，即边端协同技术，提升设备感知水平。而且本系统可以进行故障分析。传统的指标分析需要作业人员将历史数据找出，通过人工对比计算得出需要的指标；智慧运维系统提供常用的统计指标分析，例如设备故障趋势、不同系统设备故障比重、故障等级分类统计等，故障次数在月、季、年周期上的变化，为维修人员、管理者等不同角色人员提供辅助决策。同时通过不断地数据积累和故障类型的结合，将故障数据记录与数据模型配对归档到本设备的自学习故障库中，为本设备后期运维提供数据支撑。

2) 故障预警水平提升

长时间单一设备和同类型设备数据的积累，对被监测设备故障类型和运行状态具有高度针对性，故障预警将逐步精确到设备内部的零部件，故障预警、报警更加准确，为故障排除和检修提供有力数据支撑。

3) 维修的智能化水平提升

设备在发生故障时，检修作业人员会根据相应的检修建议步骤排查故障。传统的维修建

议只能一步一步的排除故障发生的原因，设备健康管理及运维技术方面，基于传感器的采样数据，结合 PHM 算法，而使用的全状态域健康管理技术，通过故障数据与检修数据的大数据积累，实现了设备的全生命周期的健康管理。

参考文献：（如有可补充）

- [1]杨家荣.故障预测与健康管理工作在智能运维中的应用[J].装备机械,2021(03):7-12.
- [2]周健.城市轨道交通车辆故障预测与健康管理工作研究[D].南京师范大学,2021.DOI:10.27245/d.cnki.gnjsu.2021.000356.
- [3]张波.轨道交通装备故障预测与健康管理工作系统分析[J].城市轨道交通研究,2019,22(05):175-177.DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.038.
- [4]刘乐乐.基于新一代信息技术的智慧城市轨道交通运维管理工作研究[J].智能建筑与智慧城市,2020(09):70-71+78.DOI:10.13655/j.cnki.ibci.2020.09.025.

中国仪器仪表学报