

基于云平台的城市轨道交通智能运维系统设计与应用

李 杰 徐启禄

(青岛地铁集团有限公司, 266101, 青岛//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 随着城市轨道交通的快速发展,运维面临越来越大压力。介绍了基于云平台的城市轨道交通智能运维系统的平台架构和主要功能;结合青岛地铁的应用实际,总结了该智能运维系统的应用成效。该智能运维系统能够处理海量的设备监测数据,运维管理人员可根据现有和将来的运维需求灵活扩展其计算能力和存储能力。

**关键词** 城市轨道交通;智能运维;云平台

**中图分类号** U231.94

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.045

Design and Practice of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance System Based on Cloud Platform

LI Jie, XU Qilu

**Abstract** With the rapid development of urban rail transit, operation and maintenance is faced with growing pressure. The platform architecture and main functionality of urban rail transit intelligent operation and maintenance system based on cloud platform are introduced. Taking the actual practice in Qingdao Metro for reference, the efficacy of the intelligent operation and maintenance system is summarized. The system can deal with massive equipment monitoring data, and the operation and maintenance staff can flexibly expand its computing and storage capacity according to current and future needs.

**Key words** urban rail transit; intelligent operation and maintenance; cloud platform

**Author's address** Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266101, Qingdao, China

城市轨道交通智能运维通常是指充分利用智能化、信息化和大数据等技术,在获取大量设备运行状态数据基础上,通过数据计算和智能分析,对设备运用与维护进行有效的指导,从而达到提高运维效率、减少运营延误、降低人员要求、延长设备寿命、降低运维成本等目的。近几年,笔者在轨道交通智能运维领域进行了深入研究,结合云计算、物联网、大数据、DevOps(过程、方法与系统)等

新技术,探索了一条适合城市轨道交通智能运维平台建设的路线,并在实践中予以实施。本文介绍了城市轨道交通智能运维平台的架构、功能和实际应用情况。

1 城市轨道交通智能运维系统的平台架构设计

随着城市轨道交通运维系统所要处理的业务逻辑越来越复杂,需要监控和处理的数据越来越多,而且随着城市级线网规模的不断扩大,智能运维系统也需要动态地进行扩展。而基于传统架构的运维系统在系统扩展、海量存储、计算力方面都存在局限性,无法做到无缝扩展,越来越难以适应城市轨道交通运维的需求。因此,在设计和开发全新的智能运维平台时,宜采用基于原生云平台的系统架构(如图 1 所示)。

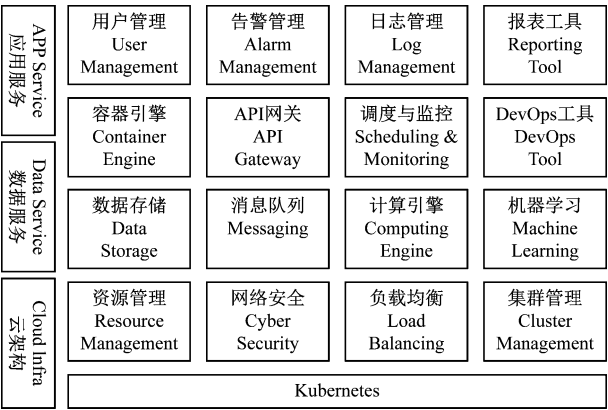


图 1 基于原生云平台的城市轨道交通智能运维系统平台架构图

Kubernetes 具有伸缩性、自愈性、可预测性,以及自动调度、负载平衡等优点,作为对底层硬件资源进行管理的轻量级解决方案,可完全满足智能运维平台的可扩展、高冗余性和可用性要求。跟传统的 OpenStack 相比,可大幅降低部署和维护的复杂度,以及对运维团队的技能要求。

通过容器和微服务技术,分别开发部署智能运维系统平台的各种后台服务和业务,可提升开发效率和灵活性,满足复杂业务快速迭代变更的需求。具体体现为:微服务之间是相互独立的,不同的微服务可以分配给不同的开发人员来进行开发与部署;不同的微服务可以采用不同的技术栈,开发人员可以选用自己熟悉的、相对成熟的技术栈来构建自己的微服务;易于局部变更,单个微服务下线并不会使整个系统停止服务,因此微服务架构使得局部升级变为可能。

随着监测技术的发展和进步,城市轨道交通智能运维系统采集的监测数据快速增长,需要存储和处理的数据会达到 TB 甚至 PB 级别。而对于传统 SQL 数据库,当存储的数据达到数十 GB 以上量级时,查询、过滤的性能已大大下降,因此,对于智能运维系统平台,必须采取大数据和分布式存储和计

算等技术(例如 Apache Hadoop、Hive、Spark、HBase 等技术)来满足业务的需求。

## 2 城市轨道交通智能运维系统功能设计

基于云平台的城市轨道交通智能运维系统平台通常需要包括如下功能:①满足虚拟化、弹性计算和高可靠性等要求,承载智能运维中的各种业务;②各种设备实时监测数据的接入和采集;③数据的处理和存储,即利用大数据、物联网技术对数据进行高速处理和存储;④算法分析,即运用云计算和大数据挖掘技术,对海量数据进行深入挖掘和智能分析,包括知识库和模型库的建立以及预测评估等;⑤智能应用,即借助移动互联的大数据和可视化软件,实现多维可视化监控报警、智能管理以及移动应用。城市轨道交通智能运维系统平台的主要功能如图 2 所示。

状态监测	数据分析	设备管理	故障管理	维修管理	专家系统
<ul style="list-style-type: none"><li>• 线网设备运行全景图</li><li>• 设备监测数据</li><li>• 实时历史告警预警</li><li>• 状态查询</li><li>• 触发工单</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• ATC分析</li><li>• MDS分析</li><li>• DCS分析</li><li>• 端到端分析</li><li>• RAMS分析</li><li>• 故障异常规律分析</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 设备动态履历</li><li>• 巡检校核</li><li>• 作业管理</li><li>• 健康度评估</li><li>• 剩余寿命预测</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 故障响应</li><li>• 过程回放</li><li>• 应急处理</li><li>• 备件管理</li><li>• 故障闭环</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 维修计划</li><li>• 维修统计</li><li>• 设备轮换提示</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 案例库</li><li>• 维修建议</li><li>• AR远程协作</li><li>• VR培训</li></ul>

注:ATC——列车自动控制;MDS——微机监测系统;DCS——数据通信系统;RAMS——可靠性、可用性、可维护性和安全性;AR——增强现实;VR——虚拟现实。

图 2 城市轨道交通智能运维系统平台功能图

目前业界讨论很多的是如何从故障修和计划修全面走向状态修,即利用对设备的状态监测和诊断,对设备故障进行预测,从而实现预防性的维护。但 RCM(以可靠性为中心的维护)的大量实践数据显示:70%~90% 设备的故障概率分布呈现随机性的特点;只有 10%~30% 的设备故障才跟设备本身的老化,即与使用次数与使用时间相关。也就是说,只有少部分设备,可以通过监测其关键指标参数,对其健康度进行评估,跟踪其性能下降的劣化趋势,从而在其故障概率达到某个临界点之前,提前进行处理。这种设备通常都是带机械部件的设备,比较典型的就是道岔转辙机,可通过监测道岔转辙机动作时间、动作电压和电流等参数变化,来判断道岔转辙机可能出现的故障隐患,并及时进行检修和更换;另一种典型设备就是继电器,可通过其动作次数来评估其剩余寿命。对于大部分设备而言,比如电子部件设备,其故障跟时间没有相关性,呈现随机性特点,对这些设备是无法做到状态

修的。因此,智能运维系统必须为传统故障修和计划修提供有效辅助,以提高故障定位和维修效率、缩短维修时间、降低对人员技能的要求;另外,通过优化计划修的设备种类和维修周期,减少定期维修的工作量。

除了传统的状态监测和数据分析的功能之外,智能运维系统基于 BIM(建筑信息模型)的配置管理系统(CMS)实现了设备全生命周期管理,跟踪和采集的设备履历涵盖了设备的生产、采购、运输、仓储、安装、位置、环境、使用、维护、更换、维修、报废、备件等全方位信息。正是基于这些设备数据信息支撑,智能运维系统可以利用 RCM 的分析方法,根据设备数据信息,对设备的历史故障率、故障规律等进行自动统计计算和追踪,然后结合每种设备的故障维修时间、维修成本,综合评估设备故障对运营的影响程度,给出每种设备的维护策略、维护计划以及备件增补建议。

### 3 城市轨道交通智能运维系统的实践

1) 提升了资源利用率和系统可靠性。由于云平台已经将计算资源、存储资源与网络资源统一管理并动态分配,因此,可以更好共享硬件资源,并且可按需进行扩容,在不修改任何系统架构的情况下,添加更多的硬件资源,即完成智能运维系统的动态扩容。另外,由于智能运维系统运行于容器内,因此,在服务器硬件故障发生时,只需将容器迁移至云平台的其他资源上,系统就依然可以正常运行;对于服务层面可靠性的提升,可以通过负载均衡、服务网关来实现,每个服务都会有多个实例,单个服务实例的下线不会影响整个系统的正常运行。由于容器可以使用主机的操作系统,因此容器内的应用程序只需部署与该应用相关的插件即可,这样就大大节省了资源;同时,当应用程序启动时,由于无需启动操作系统,因此大大缩短了启动时间。另一方面,在采用了应用程序多副本技术后,当需要升级应用程序时,只需逐一更新副本即可,尚未更新的副本仍可以维持原有的服务功能,这样就使得用户无需终止原有服务即可完成升级。通过在项目中的实际运行和测试发现,硬件资源利用率从原先的平均 30% 提升到了 70% 以上,业务连续服务水平上升到了 90% 以上。

2) 数据分析工具助力故障分析。智能运维系统集成成了 ATC、MDS 和 DCS 等信号子系统,并且提供了丰富的分析工具,可以帮助运维人员从系统存储的海量设备状态监测数据、历史告警信息以及日志文件中,进行个性化的自动分析,并以可视化的图表方式展现分析结果。同时,可以针对故障报警信息的多个参数进行专项组合分析,如信标丢失故障报警信息,可以按照信标丢失次数进行排序,锁定问题可能性最大的信标;也可针对信标与不同列车 ID 的相关性进行关联分析,以确定信标丢失故障报警的原因是来自信标还是来自列车。

3) 支持基于实际应用需求的二次开发。比如 MDS 子系统的二次开发。根据 MDS 数据协议解析 MDS 子系统推送的数据报文,获取 MDS 子系统监控范围内的轨旁设备实时状态,比如智能电源屏、UPS(不间断电源)、外电网、道岔转辙机等一系列设备状态信息,进而根据这些设备实时状态信息进行多方面的二次开发。例如可根据道岔动作曲线获取转辙机在道岔整个定位、反位动作过程中的电

流、电压、功率等模拟量的变化数据,提取其特征值,并与此类转辙机出厂校准的参数进行对比分析,由此可以实现道岔转辙机的故障预测和预警,为日常的道岔维保工作提供数据支撑。

4) 实现了海量数据的快速读写与实时流处理。智能运维系统采集和保存各个子系统的多种数据源(包括实时和历史告警信息)、各种监测设备的开关量和模拟量的监测值、各种日志信息等,而且历史数据存储和查询的时间至少达到 3 年。因此相关的数据记录已超过亿条。建立海量数据的快速写入与实时的秒级查询数据访问机制是智能运维系统的关键技术点。HBase 是典型的 NoSQL,是一种构建在 HDFS 之上的分布式、面向列的存储系统,是目前写入速度最快的数据库之一,单机写入速度可达每秒 100 万条记录。Elasticsearch 是目前查询速度最快的全组合搜索引擎,亿级的数据精准查询可在秒内完成。智能运维系统将 HBase 与 Elasticsearch 相结合,利用 HBase 实现大数据快速入库;用 Elasticsearch 建立索引,与 HBase 相结合,实现海量数据的快速查询。本文介绍的城市轨道交通智能运维系统在实际测试中的数据库读写速度见表 1。

表 1 城市轨道交通智能运维系统实测数据库读写速度		
数据库类型	数据写入/(万条/s)	亿级数据查询
关系型数据库	1	10~30 s 完成
HBase	100	主键查询 1 s 内完成
Elasticsearch	1	任意查询 1 s 内完成
Elasticsearch + HBase	100	任意查询 1 s 内完成

另外,智能运维系统不仅需要能快速处理离线数据,也需要能实时处理实时数据。该智能运维系统的数据处理应用模块提供实时数据统一化封装,将来自 Kafka/RabbitMQ 的实时流数据统一转化为相同的数据结构;利用 Flink/Storm 技术将接受到的数据进行快速处理,然后输出到 Kafka/RabbitMQ 中,为其他模块提供实时数据;利用 Spark/Presto 技术将来自数据库或者文件的数据统一转化为相同的数据结构并做离线处理,然后统一输出到不同媒介中,为其他模块提供实时数据。通过实际运行和测试显示,该智能运维系统实时流处理模块可以每秒处理百万条流数据。

5) 实现了现场应急和排故处理电子化流程。智能运维系统为故障修提供了一套完整的现场应急与排故处理的电子化操作流程,包括现场和管理

人员的手持端和后台电脑端的操作界面,把现场应急和排故处理的业务数据串联了起来,实现了调度、班组,以及车辆运维、备件管理等环节的联动和同步操作,解决了既有应急系统中存在的信息不同步、维修建议不统一、指挥管控度不足、故障分析维度低的痛点。

(1) 所有抢修员工接到警告的一刻,智能运维系统开始显示其状态信息,在每一个环节都可以点击操作按键,状态信息可直接同步到看板,全程操作仅以点击形式完成,无需录入信息。

(2) 应用 GIS(地理信息系统)地图,人、车、物等信息可显示在 GIS 地图上,可在地图上点击人员图标指派任务。

(3) 可互动群发送或接收文档、图纸、照片等信息,实时分享信息。

(4) 同步信息至进程状态看板,指挥人员和管理人员可通过看板实时得知施工进度。

(5) 专家库智能化操作。专家库可根据故障现象,自动推送维修建议;根据维修结果,自动统计建议;对专家库自动迭代更新。

(6) 自动记录和计算标准维修时间,并且对主要环节进行超时提醒;同时,进行预测式风险管控,推算正常时间内的应用时间,对于在临近使用时间但仍有大量未完成的工作,进行提前预警。

在实际应用中,现场维护人员可根据排故流程提醒,按既定步骤进行故障原因排查和故障恢复的操作,真正达到了把经验和知识转换为标准流程。一方面降低了对人员技能的要求,另一方面也显著提高了现场问题解决的效率。

在传统运维模式中,从故障发生到抢修指令逐级通知到现场抢修人员,需要经历行调、调度、班组、组员等几个环节,且多为双方依次沟通,缺乏多方信息共享,使得抢修人员在故障发生后 10 min 左右才可以得到全部信息,采取实际行动。同时,在抢修过程中,信息传递方式为打字或电话,无法实时保持节点信息的持续性和共享度,导致指挥层缺失现场最新信息,延误指挥抢修时机。电子化应急管理模块使告警、接警、派单、接单(含人员接到故障信息)可在 2 min 内完成,信息准确度可以达到现场维护需求标准。城市轨道交通传统运维模式与智能运维模式排故处理情况对比如表 2 所示。

6) 实现了设备健康度与精准维护管理。关键继电器是现场维修量比较大的部件之一,其寿命主

表 2 城市轨道交通传统运维模式与智能运维模式排故处理情况对比

项目	传统运维模式	智能运维模式
抢修人员接单时间(从告警算起)	约 10 ~ 15 min	2 min 内
任务完成时间(从到场算起)(测试案例:UPS 电源故障)	约 15 ~ 20 min (中、低级维修人员)	10 min 内(节省沟通时间和现场找方案时间)
参与协调人数	>3 人	1 人
全程内容、时间盯控	无	有
人、车、备件分布	无	有
移动端应用	无	有
文档、履历、案例推送	无	有
维修建议推送	无	有
人员调配功能	无	有
人员状态显示	无	有

要跟继电器的动作次数相关。但同一个继电器柜里的不同继电器,即使是相同时间安装的,每个继电器的使用情况和动作次数不尽相同。如果采用原先的一刀切的方式,统一按照规定时间更换,必然会造成部分继电器的浪费。通过 MDS 采集的道岔转辙机、信号机、屏蔽门的动作次数,可推算出其对应的关键继电器的动作次数;再结合该继电器的履历信息,比如继电器的品牌型号、平均设计寿命、同批次产品历史故障率等情况,可计算出每一个关键继电器的健康度和剩余寿命情况;然后自动导出精确的维护计划,即哪个机柜的哪个继电器需要进行更换,并通过平台的工单功能,指派给维护人员进行处理,实现精准的维护。

在传统运维模式中,大量继电器在投用后,通过人工使用电子表格进行继电器动作次数的计算,同时,需要人为定期维护计算表。电子化应用可以通过设备的健康状态进行维护计划的自动部署,减少人为维护计划的操作。城市轨道交通传统运维模式与智能运维模式设备健康度与精准维护管理情况对比如表 3 所示。

4 结语

随着我国城市轨道交通的快速发展,各地的轨道交通运维团队纷纷开展了专业化、智能化、集约化的维保工作和前瞻性研究。本文根据青岛地铁业务积累,提出了基于云平台的城市轨道交通智能运维系统的平台架构与技术方案,并分享了相关的

表 3 城市轨道交通传统运维模式与智能运维模式设备健康度与精准维护管理情况对比

项目	传统运维模式	智能运维模式
人工维护	人工维护计算表	零人工维护, 系统自动计算
更换方式	固定计划, 按计划批量更换	自动提醒, 延长更换周期
替换数量	约 300 个/站	约 250 个/站
节省成本	无	平均节约 15% 以上

实践经验,对不断创新和发展中的城市轨道交通智能运维平台的建设具有一定的参考意义。

(Continued from Commentary)

surpassed along the track, which is devised from the perspective of ensuring transportation safety. Railway basic clearances include structure gauge, equipment gauge and railway vehicle clearances. The former two refers to the inviolable outline dimension of structure or equipment along the track (other than equipment interacting with railway vehicles such as vehicle retarder, power supply contact wire system), and the last one is the inviolable outline of vehicle itself. Certain space should be kept between them, defined as reserved space or safe space. Reserved space shall consider vibration deviation and track deviation during train operation, and actual clearance should be appropriately enlarged on top of the basic clearances, defined as ‘clearance widening’. If clearance is decided, the train won’t collide with structures or equipment along the track during operation.

To keep reserved space or safe space between moving object and structure (or equipment)—this technical regulation is enlightening for human behavior regulation.

In the mutual relationship described above, between operating train and structure (or equipment), both parties possess single property; however, the mutual relationship among passengers in a metro compartment has dual properties: passenger in movement as ‘operating train’ while passenger in seat as ‘structure’ or ‘equipment’. The duality of passengers demonstrates us that switching perspectives is necessary, and ‘Avoid imposition of what you yourself don’t desire.’

The conflict is generally ignored due to the moderate speed of human walking or even running, and small mass causes less serious consequences on collision. As is aware of, only in specific scenarios such as 100-metre dash, specialized racing track with ‘clearance’ that keeps other people away shall be set up.

On hot summer days, because of the relatively cool environment in compartment and the arrival of tourism season, metro renews single day passenger flow record often, rising with which are the complains about crossing legs. Now, should crossing legs be allowed in metro compartments?

On the night of 14<sup>th</sup> July, the notice from Shanghai Metro about avoiding crossing legs became a hot topic on internet, triggering online discussion of ‘indecent behaviors’ on metro. Shanghai Metro operation unit stated that crossing legs is a common behavior on metro, but it will interfere with other passenger passing or even cause stumbling in crowded compartments (obviously violating ‘clearance’), thus the conclusion of being inappropriate.

Reasonably speaking, sitting gesture is a private matter that shouldn’t be judged; however, it shall be differently reviewed when metro compartments are overwhelmed by passengers. Firstly, the dirt on soles will potentially stain other passengers’ outfit. Secondly, the standing space of other passengers is inevitably taken away to certain extent. There are comments that to carefully avoid all the crossing legs while passing through metro compartments, they have to walk along ‘S’ curve.

Freedom is one of the core socialist values, and is a desire delightful to everyone, only that freedom has the premises of not affecting other people’s freedom. Engels pointed out, ‘Freedom consists in the control over ourselves and over external nature, a control founded on knowledge of natural necessity.’ Confucius said, ‘Live as your heart desires without transgressing what is right.’ In open air parks, people have the conditions to stretch and work out, ‘Eagle soars through sky while fish wanders in river. All creatures are enjoying their freedom in this deep autumn.’ Nevertheless, how to behave in crowded metro compartment must be discussed separately, where it is necessary to ‘think twice’ and to coordinate between human and environment.

Culture, in one phrase, is collective habit, that consists public order and social custom. Law is external discipline while morality is internal. When the conditions are ready, internal discipline can externalize. Prohibiting smoking in regulated space is an example. Since prohibiting music playing out loud in Shanghai Metro, the rising of passenger experience of enjoyment is another evidence.

Smart metro is the hardware, and metro culture is the software. Cultivating prominent transport culture and promoting civilized riding behavior are necessary context for improving the soft power of Shanghai as metropolis.

(Translated by ZHANG Liman)

参考文献

[1] 朱志伟,范永华,罗运真. 轨道交通信号系统智慧运维体系的应用研究[J]. 铁道通信信号,2019(4):77.  
[2] 杨文轩. 基于大数据的城轨信号系统健康维护平台研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.  
[3] 周洪利. 一种基于 OpenStack 和 Kubernetes 的实验云[J]. 信息技术与信息化, 2021(1):156.  
[4] 吴杰. 基于大数据分析的城市轨道交通信号系统无线接入点状态修可行性分析[J]. 城市轨道交通研究,2020(2):67.  
[5] 邢贞明,李登辉,潘博. 微服务架构与容器技术探析[J]. 金融科技时代,2021(2):66.

(收稿日期:2021-05-10)