

超大规模城市轨道交通线网全寿命 周期健康管理系统的研究

刘纯洁 王大庆

(上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海//第一作者, 教授级高级工程师)

摘要 分析了当前我国超大规模城市轨道交通线网设施设备维护保障面临的突出问题。分析了故障预测与健康管理系统在高速铁路、航空航天、核电等领域的应用现状,以及新一代信息科学技术的适用性。在此基础上,提出了超大规模城市轨道交通线网全寿命周期健康管理系统的体系架构,介绍了该系统的关键功能及实现这些功能的技术路线,描述了该系统的应用发展前景。

关键词 城市轨道交通; 超大规模线网; 全寿命周期; 健康管理

中图分类号 U231.94

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.002

Life Cycle Health Management System of Super-large Scale Urban Rail Transit Network

LIU Chunjie, WANG Daqing

Abstract The prominent issues of facilities and equipment maintenance in the super-large scale urban rail transit networks of Chinese cities are analyzed. The application status of related fault prediction and health management systems in high-speed railway, aerospace, nuclear power and other fields, as well as the applicability of new information science and technology, are studied. On this basis, the architecture of life cycle health management system for super-large scale urban rail transit network is put forward, by introducing key functions of the system and the technical routes to realize these functions, and the prospect of the system application is described.

Key words urban rail transit; super-large scale network; life cycle; health management

Author's address Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

1 超大规模城市轨道交通路网运营现状

随着社会经济的发展,城市规模不断扩大,城市轨道交通获得了迅猛发展,已逐渐成为城市公共交通的主力。以上海为例,截至2018年底,轨道交

通日均客流量超过1 000万人次,轨道交通已经成为市民出行的主要形式,是城市公共交通的主力军,呈现典型的网络化运营特征。根据规划,到2020年,上海将形成18条线路、850 km、506座车站的超大规模轨道交通线网。北京、广州、深圳等大城市的情况也非常类似,按照规划,在不远的将来都将形成超大规模轨道交通线网。如何高效运营、高效维护是城市轨道交通企业普遍面临的关键课题^[1]。

城市轨道交通主要专业的维保现状分析如下:

(1) 工务专业:承担轨道交通线路、基础及相关各种附属设施的检查、维修工作,保证线路的安全畅通。目前,城市轨道线路检测主要为静态检测。静态检测是指在无车轮荷载作用的情况下,用人工或轻型测量小车对线路进行的检查,作业过程通常采用手工方式,效率低、劳动强度高,人工读取的数据还会不可避免地引起误差。也有部分专用轨道检查车辆,用于定期巡检收集数据。工务专业的各种数据基本采用离线分析形式,以人工分析为主,自动化程度较低。

(2) 车辆专业:维护保养工作量较大,自动化、智能化尚处于初级阶段;建有多多个零散的子系统,目前正在逐步整合,向体系化方向发展。以上海轨道交通为例,车辆专业规划建设的鹰眼、平轮检测、车地数据传输等多个子系统已初步实现车辆关键数据的采集和分析。

(3) 通信信号专业:在CBTC(基于通信的列车控制)系统广泛应用、全自动运行线路日益增多的背景下,列车行车间隔越来越小,保障行车安全的核心——信号系统日益受到高度重视。信号系统的安全性有一系列相关的国际标准进行规范,可靠性和可用性方面则主要由RAMS(可靠性、可用性、可维修性、安全性)进行规范,在高效智慧的运行维

护方面则缺乏有明确约束力的标准和规范。城市轨道交通企业迫切需要配置相应的技术装备,实现有效的检修、维护和管理,及时发现和处理运行中的故障,保证系统稳定运行。另一方面,城市轨道交通运营线路不断扩张,逐渐演化为大规模乃至超大规模复杂线网拓扑,容易形成蝴蝶效应,即单点的偶发故障可能产生无法预料的连锁反应,进而诱发全线网大面积拥堵甚至瘫痪。从目前国内各个城市的轨道交通的运营情况看,通信信号的维保仅能够满足基本的设备维修需求,还存在较多问题。当前不同线路的维护支持系统存在较大的差异性,且可用性较差。随着运营线路的不断增加,维保工作量也在不断增加,受到人员编制限制,维护人员的数量增长也总是滞后。这也是无法满足日益增加的维护需求的原因之一。另外,还存在以下问题:缺乏通信信号维护行业标准,维护系统所要采集的监测信息不统一,监测信息采集不全面;维护系统的集成化、综合化、智能化水平不足,不能有效支撑设备维修模式向状态修转变;数据分析功能有待进一步加强;信号故障处理支持较弱。

(4) 供电专业:在城市轨道交通供电领域,设备维护保障系统中的电力数据采集与监视控制(PSCADA)系统,能够实现对主变电所、牵引变电所等的遥控、遥信、遥测、遥调和遥视,改善变电站运行安全可靠水平、改善运行速率、减少运行成本投入以及保证供电品质,但仍然存在信息单一、缺乏集成等缺点。

面对超大规模城市轨道交通线网,需要从顶层设计开始,强化网络层面的统一指挥协调功能。建设网络化运营指挥中心,建立全网统一的各项业务管理平台,并不断优化运营生产指挥体系,提升网络统一指挥与协调联动能力。设施设备上,不断提升装备系统的智能化水平。为提高超大规模网络设施设备的运行可靠性,提高列车运行效率,以及提升运营服务质量,需将新技术、新装备、物联网、大数据、云计算、互联网、人工智能等现代科学技术应用到运营管理和运营服务过程中,以设备来代替人,用技术来保障运营,打造智慧高效的城市轨道交通网络。

为此,需要做到:充分依靠技术装备和技术方法,尽可能替代人工的重复性检修工作,实现智慧化的故障诊断与预测预警;消除各专业的条块分隔,智能调配人、财、物等;实现全线网级别的资源

共享,形成适应超大规模城市轨道交通线网的维护解决方案,即全寿命周期健康管理系统,实现线网管理的综合化、标准化、智能化和高效化。

从国内外的现状来看,超大规模城市轨道交通线网全寿命周期健康管理系统尚处于概念阶段,没有普遍适用的成熟经验,因此有必要广泛调研国内外城市轨道交通线网的运维现状,参考和借鉴高速铁路、航空航天、核电等关键安全行业的运维系统,同时关注能够推动高效运营维护的先进理论和新兴技术,为超大规模城市轨道交通线网的全寿命周期健康管理提供技术支持。

2 全寿命周期健康管理的参照系统和支撑技术

目前,在城市轨道交通行业已经开始研究智能运维系统。该系统是建立在设备使用现场的以预测性微信模式为主的一体化平台,可以在大数据中心支持下,实现关键设备在线实时故障诊断,自动生成维修工单等功能^[2]。现对相关关键安全行业的运维系统应用情况进行分析。

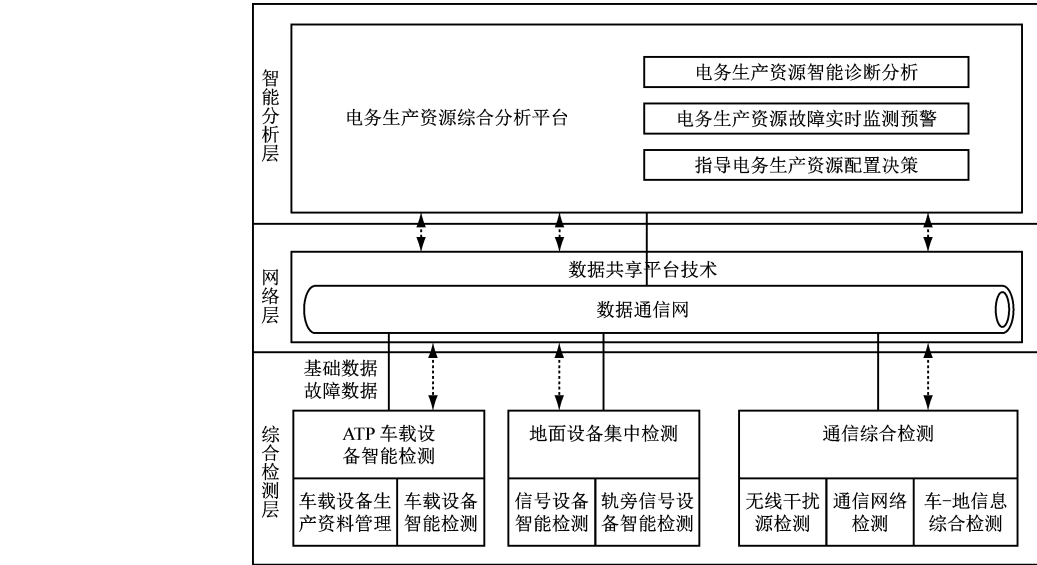
2.1 铁路行业现状

在我国铁路行业,中国铁路集团有限公司的高速铁路全寿命周期健康管理系统尚处于概念阶段,尚未出现跨专业的综合化集成系统。以铁路电务系统为例,存在数据采集手段落后、检测数据分散、共享率低,以及网络管理效率低下、电务系统生产资源数据综合分析智能化低等缺陷。先后有研究人员提出基于故障预测与健康管理的(PHM)的设备维修新模式的管理模型,并在高铁信号设备维护管理^[3]和智能一体化电务检测维护方案^[4]等方面进行了一些尝试和探索,但是尚未得到实际部署。智能一体化电务检测维护系统,通过统一数据平台,能够实现分布在不同地点的ATP(列车自动保护)车载设备检测信息、地面设备集中检测信息和通信综合检测信息,实时地与电务生产决策部门的管理系统有效同步,解决检测数据分散、共享率低,以及网络管理效率低的问题;电务生产资源综合分析平台,能够实现电务生产资源的智能诊断分析、故障实时监测预警及对电务生产资源配置决策形成指导建议等功能,解决电务生产资源数据综合分析智能化低的问题,实现快速、准确和智能化的决策过程。

高速铁路智能化电务检测系统架构如图1所

示:综合检测层主要完成对 ATP 车载设备、地面设备和通信设备的智能综合检测;网络层主要完成所有检测数据的传输和共享;智能分析层实现电务生

产资源综合分析,通过对各类检测数据的智能化关联、统计和分析,实现对电务生产资源优化配置的指导。



注:ATP——列车自动保护

图 1 高速铁路智能化电务检测系统

2.2 航空航天领域现状

在航空航天领域,形成了 PHM 的概念,PHM 一般技术框架如图 2 所示。PHM 是指利用尽可能少的传感器系统,借助各种智能推理算法,对系统的健康状态进行评估;在系统故障发生之前对故障进行预测,并根据预测结果采取一系列维修措施以实现装备的视情维修^[5]。PHM 概念是在美国的 JSF 联合攻击战斗机计划中被正式提出的,是 JSF 联合攻击战斗机实现经济承受性、保障性和生存性目标的关键系统之一,并由此引发全球性的 PHM 研究热潮。PHM 技术优势在美国 F-35 战斗机上得到了充分的展现:PHM 的应用改变了维修原理,使得故障检测覆盖飞机的各大重要系统,可以实现故障的精确诊断和定位;能够预测关键部件的剩余寿命,

减少了中继级测试设备和验证设备,取消了 O 级测试设备;减少了保障延误时间,提高了保障效率,降低了维修成本,并简化了使用和维修训练程序。根据美国军方的统计,JSF 联合攻击战斗机与 F-16 战斗机相比,人力成本降低了约 30%,保障设备减少了 50%,维护人员减少了 20%~40%,架次生成率增加了 25%。PHM 技术在民航领域也得到了广泛应用,波音公司运用 PHM 技术开发出飞机状态管理(AHM)系统,已在全球 53 家航空公司近 2 000 架飞机上安装了该系统,包括 B777、B747-400、A320、A330 和 A340 等主流机型。全球最大的航空发动机制造商罗-罗公司开发的发动机健康管理(EHM)系统,能够实时监控上万台发动机,在马航 MH370 失联事件中提供了重要信息。我国 C919 大型宽体

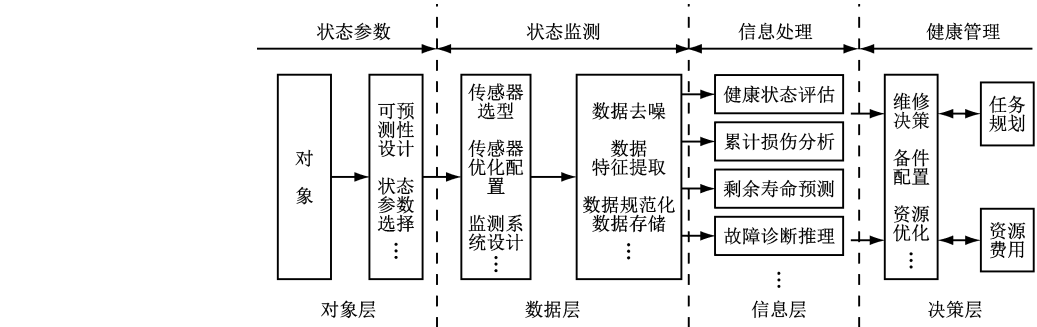


图 2 PHM 一般技术框架

客机采用的 PHM 系统,能够对 3 万多项飞机数据中涉及飞行安全的 4 000 个关键数据进行实时监控,实现了故障诊断、维修控制决策、飞机运行管理、发动机监控、健康状态评估及维修品质分析等功能。我国以此建立了国产大型客机的数据中心,为大型客机扩展应用服务奠定了坚实的基础。

2.3 核电领域现状

在核电领域,核电站设计寿命大多在 40 年以上,其设备和组件会随运行时间增加而产生老化和损伤,如何有效检查和探测结构损伤以确定合适的维护管理策略值得深入探讨。核电厂的运营和维护成本占整个核电厂成本的 60% ~ 70%,燃料成本只占 15% ~ 30%。核电厂的 PHM 系统可以预测可能发生的故障,从而能够进行预防性维护,降低经济损失^[6]。

另一方面,5G、人工智能、大数据、云计算、物联网等新一代信息技术的蓬勃发展,为超大规模城市轨道交通线网的全寿命周期健康管理系统提供了强有力的技术支撑。物联网可以支持各个末梢节点数据采集和短距离传输;5G 能够为关键数据的大

容量快速传输提供通道,并提供相应的精确定位^[7];云计算实现了计算资源的按需灵活部署、弹性均衡和高容灾,使得企业可以聚焦于核心业务集成,直接使用云计算供应商提供的计算资源,而无需耗费大量人力、物力建设机房;大数据技术支撑了超大规模城市轨道交通路网的海量运行数据,实现了数据信息的价值化;以深度学习为代表的人工智能具有特征提取和快速分类能力^[8],可以用于各类设施设备故障的自动识别、自动分类,极大地减少了人工重复检查工作,并确保了检查质量。

3 超大规模城市轨道交通线网全寿命周期健康管理系统

3.1 体系架构

超大规模城市轨道交通线网全寿命周期健康管理系统体系架构如图 3 所示。体系架构自底向上依次分为三层:多维可信数据感知平台、大数据驱动型维修支持平台和综合智慧运维管理平台。通过三层平台的相互配合实现跨专业、跨线网互操作的统一化综合运维业务。

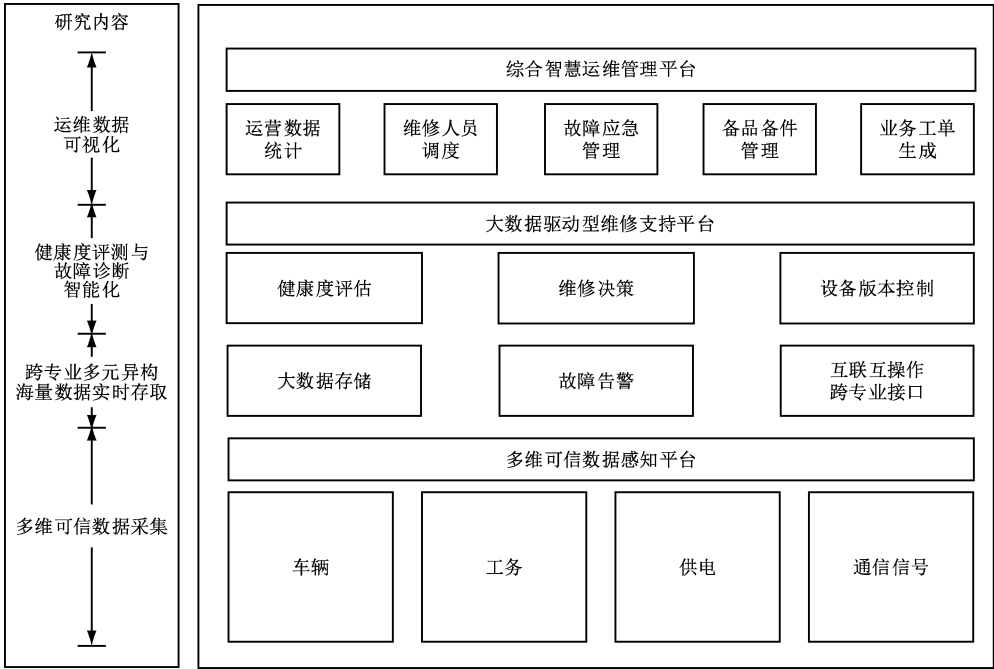


图 3 超大规模城市轨道交通线网全寿命周期健康管理系统体系结构图

(1) 多维可信数据感知平台直接面向在途运营设备,通过可信数据采集、多源数据融合等关键技术,实现设备运行数据的采集和预处理,为上层应用提供可信的、海量的设备工况信息。实现关键设备数据有效无损的采集和融合,为挖掘数据蕴含的

设备健康度和故障信息提供全面、可靠的数据来源。

(2) 大数据驱动型维修支持平台通过分布式存储、跨专业多元异构海量数据存取等关键技术实现数据的快速访问;健康度评测和故障诊断的智能化技术实现设备故障预测与诊断,为维修决策提供

参考。

(3) 综合智慧运维管理平台以故障应急管理为中心,实现维修人员调度、备品管理、业务工单生成等功能,而且能够为运营提供相关业务统计数据。

3.2 智能化运维研究

本系统的创新部分是基于人工智能对关键设备进行异常检测,因此,需要研究的是:如何有效利用多传感器采集的大量数据,综合分析出能准确反应设备健康程度的量化评估值;如何通过设备健康度曲线分析设备不同阶段的临界点及变化趋势,准确预测和诊断设备的故障;如何通过大数据、云计算等技术,智能化分析出设备的故障机理。之后,对于分析的结果,通过可视化来表达,让所有的人理解一致、执行一致、结果一致。

3.2.1 多维可信数据采集研究

城市轨道交通涵盖车辆、线路、供电、通信信号等众多专业,是一个大联动机,只有众多人员的协同配合和诸多设备的有序运行,才能实现整个城市轨道交通系统的正常运行。目前各专业的设备运行数据采集往往是专业内部的、孤立的,没有充分考虑关联专业的输入条件。例如,轨道电路的偶发红光带,有可能由轨道电路故障引起,也可能由工务维修人员检修线路导致,此类故障数据需要人工甄别,耗费大量人力,效率低下。另外,现有设备监测系统对长时间尺度预测效果不佳,数据可信度将大大降低。因此需要研究城市轨道交通设备运行数据的多维可信采集,为挖掘数据蕴含的设备健康度和故障信息提供全面、可靠的信息来源。

3.2.2 跨专业多元异构海量数据实时存取研究

基于物联网的数据采集系统能够有效采集到实时的设备运维数据,但数据采集系统为每个运维子部门(专业)提供的数据格式和表述方式不完全一致,即数据存在异构性。而且,设备设施产生的数据量庞大,如何实时存取各个专业的异构海量数据至数据中心,是整个城市轨道交通线网全生命周期健康管理系统的保障。基于 Hadoop 分布式架构的云存储系统^[9]是实现多元异构海量数据实时存取的关键系统。相比于传统的数据库存储系统,Hadoop 分布式架构的优势在于数据存储的分布式处理方式,能够将来各个专业数据库中的数据分布式存储于各个机柜中。分布式架构采用并行处理方式,因此能够加快数据的存储速度。同时,需要研究基于 Hadoop 分布式架构的高效数据备份

策略,当数据库遭受异常事件,数据部分或全部丢失时,使用备份策略能够将丢失的数据及时恢复。

3.2.3 关键设备健康度评测与故障诊断的智能化研究

准确地对设备进行健康量化评估,并预测诊断设备的故障,得到设备的健康状态信息,需要用传感器或者其他监测工具对设备进行实时信息采集。通常,不同的传感器采集得到的信息反应了设备不同层面的健康状态。因此,通过部署多个传感器采集设备运行时产生的实时大数据,然后利用物联网、大数据、云计算等前沿技术,从不同层面整体考虑设备的健康情况,计算得到一个设备的整体综合量化健康度评估值,即可用具体的健康度指数反应设备的健康程度。通常情况下,在没有发生突发异常或交通事故的条件下,设备的健康度函数是随着时间单调递减的^[11]。长期对设备进行监测,能描绘出设备整个生命周期的健康度变化曲线,清晰地看出设备不同时间段的健康程度。综合分析各个型号设备的健康度曲线,计算不同时段临界点与特殊点,在线预测正在运行的设备的健康度变化,及时预测或诊断出设备的故障。

3.2.4 信息可视化研究

通过人机交互、数据挖掘、图像技术和图形学等学科的理论和方法的结合,将抽象信息和数据进行模拟和类比,使之转化成为形象、具体的可视信息。将抽象信息以直观的视觉方式表现出来,也使得人们能够充分利用视觉和感知能力去观察、处理信息,从而发现信息之间的关系和隐藏的模式^[12]。对于全寿命周期健康管理系统来说,提供一种高效、一致性、透明化、面向用户的服务是运维的价值所在,这样就要求屏蔽其提供的服务背后的所有实现细节。利用信息可视化技术,对复杂的维护保障工作流程进行可视化表达,可以让所有的人理解一致、执行一致、结果一致。

4 结语

超大规模城市轨道交通线网全生命周期健康管理,采用跨专业顶层设计,具有预警智能化、维修可视化、管理综合化三大典型特征,将车辆、工务、通信信号和供电等专业集成到统一的健康管理平台,实现跨专业平台化运行,消除信息孤岛,显著提高检修维护效率。

(下转第 38 页)

时,在离心力及自导向力合力作用下转向架的运动几何关系,并推导出了车辆横向偏移量数值与曲线半径、转向架主要几何尺寸之间的几何关系,以及转向架偏转角大小与曲线半径和杜瓦梁长度的关系。可根据设计要求规定的线路半径以及偏移量和偏转角要求,参照本文所推导的关系式对转向架主要几何尺寸进行优化。本文主要考虑磁浮车辆过曲线时离心力和超导体自导向力对转向架曲线通过能力的影响,但在计算时未考虑悬挂力、超高等因素,因而计算值与实际结果存在一定的误差。该结论可作为转向架初步设计及优化的参照依据。

参考文献

- [1] 白雪,赵立峰,蒋靖,等. 超导磁悬浮转向架设计[J]. 液气驱动与密封,2011(8):13.
- [2] 曾佑文,王少华. 三转向架磁悬浮车几何曲线通过分析[J]. 西南交通大学学报,2003(3):2825.
- [3] 李云锋,陈革,李杰. 中低速磁悬浮列车五单元转向架曲线通过研究[J]. 机车电传动,2007(4):26.
- [4] 杨阳,李芾,夏迎旭,等. 70% 低地板车辆几何曲线通过及其动力学性能研究[J]. 铁道机车车辆,2015(5):91.

- [5] 李庆华. 材料力学[M]. 成都:西南交通大学出版社,1994.
- [6] 宋顺宝. 客车车辆构造与检修[M]. 北京:中国铁道出版社,2003.
- [7] 张卫华,刘刚. 动车组总体与转向架[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [8] 刘华清. 德国磁悬浮列车[M]. 成都:电子科技大学出版社,1995.
- [9] 陈秀宁. 机械设计课程设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.
- [10] 江河. 高温超导磁悬浮模型车设计[C]// 第五届全国超导薄膜和超导电子器件学术会议论文集. 成都:西南交通大学超导技术研究所,2000.
- [11] 卜继玲,傅茂海,严隽毫,等. 常导吸引式低速磁悬浮车辆动态曲线通过性能研究[J]. 铁道学报,2001(1):29.
- [12] WANG X R, WANG J S, WANG S Y. The relationship of guidance force between single and multiple cylindrical YBaCuO superconductors[J]. PHYSICAC,2003(2):113.
- [13] 仇毅,周虹. 采用 HALBACH 磁阵列的磁悬浮平台的磁场分析[J]. 机床与液压,2010(1):41.
- [14] 宋宏海,王家素,王素玉,等. 高温超导磁悬浮系统中横向运动对悬浮力和导向力影响的研究[J]. 低温物理学报,2005(增刊1):963.

(收稿日期:2017-06-16)

(上接第 11 页)

全生命周期健康管理系统以系统安全为底层基础,以系统可用性为指标,通过故障事件驱动,实现人、财、物的自动化智能配置,打破了工务、车辆、供电和通信信号等各个运维业务的条块分隔,消除了采购、仓储、维修、结算等业务流程的纵向延迟,实现了人员调度、备品备件、维修工单、统计数据的自动触发融合,最大程度地实现资源统筹和共享,是解决超大规模城市轨道交通线网集约发展的必由之路。

参考文献

- [1] 毕湘利. 当前轨道交通发展中几个技术问题的思考[J]. 城市轨道交通研究,2018(5):29.
- [2] 刘述芳. 城市轨道交通关键设备智能运维系统初步建构[J]. 设备管理与维修,2018(增刊1):22.
- [3] 陈建译. 基于故障预测与健康管理的铁路信号设备维护技术研究[J]. 中国铁路,2015(3):16.
- [4] 赵显琼,程剑锋,汪洋,等. 智能一体化电务检测维护方案研

- 究[J]. 中国铁路,2015(1):46.
- [5] 邱立军,吴明辉. PHM 技术框架及其关键技术综述[J]. 国外电子测量技术,2018(2):10.
- [6] 解光耀,刘井泉,曾聿赞. PHM 技术在核电厂的应用与展望[J]. 核动力工程,2018(2):189.
- [7] 陆平,李建华,赵维铎. 5G 在垂直行业中的应用[J]. 中兴通讯技术,2019(1):67.
- [8] 伊恩·古德费洛. 深度学习[M]. 北京:人民邮电出版社,2017.
- [9] 杨鹏,林俊晖. 一种基于 MongoDB 和 Hadoop 的海量非结构化物联网数据处理方案[J]. 微电子学与计算机,2018(4):68.
- [10] 刘博元,王焕钢,范文慧,等. 基于大数据的复杂生产线系统健康度实时评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2014(10):1377.
- [11] 刘学增,郭乔登,桑运龙,等. 基于承载力分析的公路隧道结构健康度评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2018(增刊2):4161.
- [12] 李擎,刘仍奎,白磊,等. 基于网格的铁路轨道状态大数据可视化模型[J]. 铁道科学与工程学报,2018(7):1879.

(收稿日期:2019-01-20)