

城市轨道交通列车运行控制系统智能运维系统研究<sup>\*</sup>赖治平<sup>1</sup> 高 宁<sup>2\*\*</sup> 鲁怀科<sup>2</sup>

(1. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 530029, 南宁;

2. 广西交控智维科技发展有限公司, 530201, 南宁//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 城市轨道交通列车运行控制系统一旦发生故障将会影响行车效率。目前的检修管理模式, 已经不再适用于行车效率的高效发展需求, 为此需利用健康管理和故障预警来建立高效的智能运维系统。通过智能运维算法, 对列车运行控制系统中的多元信息进行监测, 将该系统的运行信息与早期细微的故障特征进行关联, 实现对系统健康的判断及早期预警。结合检修计划, 辅助制定科学的运维策略, 以提高智能运维系统的可靠性, 降低故障发生的概率和运营成本。

**关键词** 城市轨道交通; 列车运行控制系统; 智能运维系统

**中图分类号** U231.94

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.02.010

## Intelligent Operation and Maintenance System of Urban Rail Transit Train Operation Control System

LAI Zhiping, GAO Ning, LU Huaike

**Abstract** Urban rail transit train operation control system failure affects train efficiency once occur. Current maintenance management mode is no longer meeting the developing operation requirements. Therefore, it is necessary to use health management and failure early warning to establish an intelligent operation and maintenance system of higher efficiency. The multi-unit information of train operation control system is monitored using intelligent operation and maintenance algorithm, and the system operation information is correlated with the early stage subtle fault characteristics, realizing the judgment and early warning of the system health. Scientific operation and maintenance strategies are formulated based on maintenance plan, improving the intelligent operation and maintenance system reliability and reducing the probability of failure occurrence and operation cost.

**Key words** urban rail transit; train operation control system; intelligent operation and maintenance system

**First-author's address** Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., 530029, Nanning, China

目前,我国城市轨道交通的设备运行维护管理一般采用各条线路单独设置 MSS(维护支持系统),尚存在监测信息分散、维护信息不能共享等问题,在维护实践中日益突显出“维修不足”和“维修过剩”两个严重的弊端。“维修不足”是因为常见故障大多依靠人员经验进行判断和处理,无法通过细小的参数量及时发现设备的隐患,导致设备带病运行。“维修过剩”是在装备仍然正常的情况下采取维修措施,容易增加系统的停机时间,影响设备的正常使用,导致维修投入增加。智能运维理念的缺失,导致以上问题严重制约了城市轨道交通运行的安全性和可靠性。

文献[1]介绍了城市轨道交通 IDSS(智能决策支持系统)的运营案例,该系统采用 AI(人工智能)及 ES(专家系统)将人工智能与各学科相融合,使得 DSS(决策及支持系统)具备了智能化。日本新干线综合运输管理系统将人工智能与铁路系统相融合,其运营调度与系统维修实现了统一指挥,初步实现了信息互通功能<sup>[2]</sup>。德国的 COBRA(车载辅助中心)诊断系统在 ICE(城际特快)列车上进行了应用,该系统可将列车乘务人员发现的其他故障一同输入至其中<sup>[3]</sup>。近年来,为了保证行车安全、加强信号设备的维护管理,信号微机监测系统在国内得到了广泛的推广和应用<sup>[3]</sup>。中国城市轨道交通协会发布的《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》提出要建立智能运维和安全保障体系。文献[4]在分析国内外一体化集成系统现状的基础上,阐述了智能运维一体化的优势。文献[5]阐述了城

<sup>\*</sup> 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035008)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

市轨道交通进入网络化运营阶段设备运维体系转型的必要性。文献[6]构建了城市轨道交通智能运维系统框架。文献[7]针对目前城市轨道交通智能运维系统存在的问题,提出了城市轨道交通智能运维系统的新框架。文献[8-9]介绍了当前上海轨道交通车辆智能运维系统的建设。

综上,国内外学者在智能维护决策领域开展了卓有成效的探索,在一定程度上为智能运维提供了一定的引导方向。但城市轨道交通数据融合和智能化决策的适用性仍存在亟待解决的问题,对于数据信号数据信息统计中多源异构、不确定性和不详细数据信息的突出问题,并未明确提出统一的异构数据融合和设备健康的统一算法,无法对设备状态进行预测。因此,在设备出现故障前应对其进行处理,尽量规避故障发生。

## 1 智能运维系统框架研究

为减小城市轨道交通列车运行控制系统故障对运营造成的影响,运营单位会根据系统和设备的故障影响,制定检修标准和检修周期。通常以主要的列车运行控制系统,如车载系统、联锁系统、ATS(列车自动监控系统)、电源系统、计轴系统、DCS(数据通信系统)、转辙机设备、信号机设备、轨道电路等作为检修对象,并对其进行常规的运营维护。其中:对设备的正常维护工作包括清扫、外观检查、状态检查、润滑、调整及损耗件更换等;对系统的维护工作主要是对系统进行功能检查、系统优化、数据备份等常规性维修操作。检修周期通常分为周检、半月检、月检、季检、半年检及年检等6种修程,以及定期的设备巡视。通过巡视发现信号设备的告警信息、电气超限等情况,触发启动设备系统的故障修等工作。

将上述对于智能运维的研究成果,归纳为一般的智能运维系统框架,如图1所示。

1) 监测对象。监测对象是智能运维系统对于维护对象宏观的定义。将该系统的子系统按照可以融合传感技术和无法融合传感技术进行区分,即:将通过传感技术进行数据采集的子系统划归为设备;将需要依靠自身进行数据收集的子系统划归为系统,并对系统进行切片。

2) 状态监测。通过传感技术和数据采集,建立多维度高效融合的数据标准和完备的验证机制,用于测定与实物相关的更多数据,并利用传感技术获

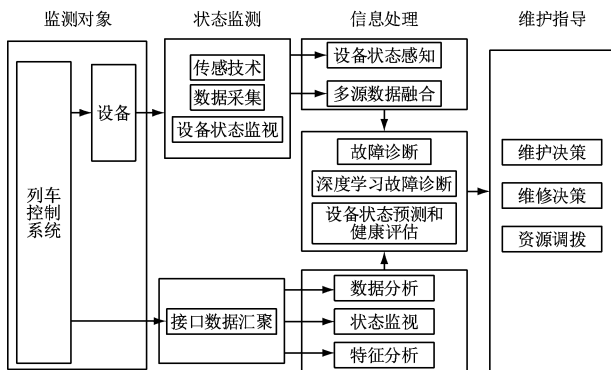


图1 智能运维系统框架

Fig.1 Framework of intelligent operation and maintenance system

取设备的故障特征。针对无法进行采集的接口数据,通过子系统自身的监测将其进行汇聚,使分散的数据形成统一的数据。对数据进行自由维度融合,从而可以动态产生多样化的数据结果,为数据呈现和故障分析提供数据支持。

3) 信息处理。利用状态感知技术对多数据状态进行融合,结合设备状态、数据分析、特征分析全面获取子系统的监测信息,达到故障诊断的自动定位功能;同时通过研究故障数据特征值变化规律完成对设备参数异常波动、突变等故障隐患情况的捕捉,实现设备故障状态的诊断。

4) 维护指导。融合信号设备感知技术、数据处理和分析技术及状态特征融合技术,对城市轨道交通列车控制所有子系统的状态进行评估和诊断,实现维护决策、维修决策的可视化以及资源调拨,有效地提高了城市轨道交通列车控制系统的管控能力。

## 2 智能运维系统的关键技术

### 2.1 监测对象切片及数据综述

完全由传感技术实现的监测设备如道岔,其采集数据域是故障域的特征。通过对采集数据分析可以进一步确定设备当前的故障及故障发生的征兆。道岔的采集数据域和故障域见表1和表2。

完全由接口数据汇集的系统如DCS,由子系统分析自身判断故障特征,并将自身监测的数据通过接口传给智能运维系统。智能运维系统经切片后进一步判断故障定位和故障发生的征兆。DCS的接口数据域和故障数据域见表3和表4。

### 2.2 智能运维算法的适用范围

瞬间失效率是指产品在时刻 $t$ 尚未失效的器件

表 1 道岔的采集数据域

数据信息	含义
$X_{rs,1}$	关键继电器开关量
$X_{rs,2}$	动作电流
$X_{rs,3}$	动作电压
$X_{rs,4}$	表示电压
$X_{rs,5}$	动作时间
$X_{rs,6}$	动作阻力
$X_{rs,7}$	缺口图像
$X_{rs,8}$	机箱温、湿度

表 2 道岔的故障域表

故障类型	含义
$Y_{rs,1}$	启动电路短路
$Y_{rs,2}$	继电器故障
$Y_{rs,3}$	DBQ(断相保护器)故障
$Y_{rs,4}$	道岔卡阻
$Y_{rs,5}$	道岔二极管短路
$Y_{rs,6}$	电阻短路
$Y_{rs,7}$	二极管断路

表 3 DCS 的接口数据域

数据信息	含义
$X_{DCS,1}$	端口状态
$X_{DCS,2}$	整机状态
$X_{DCS,3}$	交换机温度
$X_{DCS,4}$	交换机内存占用情况
$X_{DCS,5}$	CPU 利用率占用情况
$X_{DCS,6}$	交换机光口的光功率
$X_{DCS,7}$	端口流入、流出量
$X_{DCS,8}$	板卡状态
$X_{DCS,9}$	信道利用率
$X_{DCS,10}$	设备状态
$X_{DCS,11}$	无线设备场强
$X_{DCS,12}$	无线设备信噪比

注:CPU 为中央处理器。

在单位时间内失效的概率,记作  $\lambda(t)$ 。电子设备的瞬间失效率与时间关系符合浴盆曲线,见图 2。

城市轨道交通列车控制系统由其子系统自身监控的部分依然遵循设备的瞬间失效率原则。

可靠度是指产品在规定的条件下、在规定的时

表 4 DCS 的故障数据域

故障类型	含义
$Y_{DCS,1}$	通信故障
$Y_{DCS,2}$	通信受扰
$Y_{DCS,3}$	模块故障

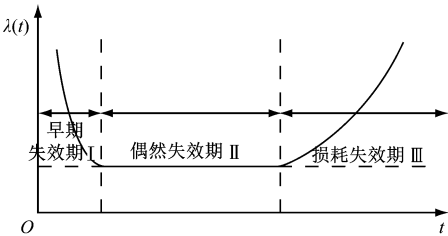


图 2 瞬间失效率与时间关系曲线

Fig. 2 Curve of instantaneous failure rate and time relation  
间内完成规定功能的概率,常记作  $R(t)$ ,亦称可靠度(函数):

$$R(t) = P(\xi > t) \tag{1}$$

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{N(t)}{N} \tag{2}$$

式中:

$\xi$ ——产品的寿命;

$P$ ——产品在规定条件下、在规定时间内完成规定功能的概率;

$N$ ——试验的产品总数;

$n(t)$ ——试验到  $t$  时刻产品失效的总数;

$N(t)$ ——工作到  $t$  时刻仍正常工作的产品数;

$R(t)$ ——产品在  $(0, t]$  内完好的概率。

将某个子系统的设备根据其内部构造和实现功能,切片成不同的分系统,维护系统的监视即可视作对不同分系统进行观测的过程。信号系统在其正常寿命周期内,为保证系统无间断运行而进行的维护,使得信号系统直到报废时一直保持在偶然失效期,期间发生的故障失效是由多种类且又不太严重的偶然因素引起的,因此满足可靠度和失效概率的特征。对整个系统按照可维护最小单元进行拆分,其颗粒度正好等同于其报警的颗粒度。

因此,根据式(1)可以计算系统中分系统的可靠度  $R_0(t)$ :

$$R_0(t) = \frac{n_0(t)}{N_0} \tag{3}$$

式中:

$R_0(t)$ ——分系统的可靠度,即在  $(0, t]$  内完好的概率;

$n_0(t)$ —— $t$ 时刻报警的数量;  
 $N_0$ ——系统涵盖所有报警的总数。  
 某分系统的失效概率  $F_0(t)$  为:

$$F_0(t) = \frac{N_0(t)}{N_0} \quad (4)$$

式中:

$N_0(t)$ ——分系统当前尚未报警的数量。  
 某分系统的失效概率密度  $f_0(t)$  为:

$$f_0(t) = \frac{n_u}{N_u} \quad (5)$$

式中:

$n_u$ ——单位时间内的报警数量;  
 $N_u$ ——单位时间内可能报警的总数。  
 某分系统的瞬间失效率  $\lambda_0(t)$  为:

$$\lambda_0(t) = \frac{f_0(t)}{R_0(t)} = \frac{f_0(t)}{1 - F_0(t)} \quad (6)$$

一般通过产品的瞬间失效率判断当前产品的所属区间。当分系统发生故障时,子系统亦发生故障,分系统与当前系统的报警成正相关。在城市轨道交通项目中,列车运行控制系统在产品正式交付运营前,通过大量测试排查规律性故障以规避系统早期失效,使得该系统在正式交付运营使用时已过渡到偶然失效阶段。由式(6)可看出,分系统的评分方式可以通过瞬间失效率来体现。

## 2.3 智能运维算法

### 2.3.1 故障诊断模型

设备感知技术、数据处理和分析技术、状态特征融合、推理和诊断建模等技术,涵盖转辙机、计轴、轨道电路、信号机及电源设备的状态评估和诊断。根据采集数据结合专家经验对设备故障与设备运行状态间的相关性进行研究。例如,道岔状态与故障的诊断模型中,由温度突变造成的密贴力变化导致的故障可以由道岔的状态进行诊断。当转辙机转动道岔发生故障时,通过转辙机的三相电源和 DBQ 的输出功率可以判断转辙机的故障情况。提取转辙机在各类故障时的功率曲线,将其作为故障诊断的特征变量,并与正常情况进行对比分析。采用智能运维算法对故障诊断进行训练,将故障进行归类,再将功率的实时数据录入并进行实时拟合对比,以输出诊断和预测结果。

### 2.3.2 健康管理算法

智能运维的健康管理最常用的有专家系统、层次分析法、模糊评判法等,虽需大量的经验作为基

础,且存在一定的主观性,但立足于运营维护的可操作性仍是一种适合于当下的健康管理方式。

城市轨道交通列车控制系统中子系统健康度评价可根据运行环境、意外事件、运行状况三部分进行分析。以地面 ATP(列车自动防护)为例,其子系统的最小可维护单元有 8 类:逻辑板、输入输出板、通信板、电源板、维护机、通信单元、运算单元、电源插箱。各最小可维护单元的权重分别为  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 、 $\cdots$ 、 $M_8$ ,权重总和为 100%。

其中,逻辑板运行环境评分可按照相应规范得到评分为  $a_1$ 。逻辑板意外事件评分可分为如下两种情况进行设备健康度的计算:

1) 第一种是当前设备处于故障状态,其子系统正在报警未恢复。逻辑板意外事件评分  $b_1$  为:

$$b_1 = 0 \quad (7)$$

2) 第二种是当前无报警。假设当设备运行时间为  $t$  时,设备健康评分为 100 分,则:

$$b_1 = 100(1 - \lambda_b) \quad (8)$$

式中:

$\lambda_b$ ——逻辑板的瞬间失效率。

逻辑板的运行状况可依据板卡的特性进行分类。例如,逻辑板的运行状况可分为板卡微周期状态和板卡寿命耗损,其权重分别设为  $N_1$ 、 $N_2$ ,权重总和为 100%。假设在时间  $t$  内板卡的损耗评分为  $s$ ,微周期超标的次数可类比报警次数,当时间为  $t$  时设备健康评分为 100 分,则:

$$c_1 = 100(1 - \lambda_c)N_1 + sN_2 \quad (9)$$

式中:

$c_1$ ——逻辑板的运行状况评分;

$\lambda_c$ ——逻辑板的微周期超标率。

逻辑板运行环境、意外事件、运行状况等 3 部分的权重分别为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ,权重总和为 100%。逻辑板的健康评分  $z_1$  为:

$$z_1 = Aa_1 + Bb_1 + Cc_1 \quad (10)$$

同理,可根据上述方法计算其余设备的健康评分。因此地面 ATP 在时间  $t$  时刻的健康评分  $z$  为:

$$z = M_1z_1 + M_2z_2 + \cdots + M_8z_8 \quad (11)$$

式中:

$z_1, z_2, \cdots, z_8$ ——分别代表地面 ATP 的 8 类最小可维护单元的健康分值。

列车运行控制系统的健康度评分可根据最小可维护单元的健康度评分加权获得。对每个车站子系统下的单体设备权重进行设置,根据具体设备

的重要程度给予其权重。当车站子系统有影响设备正常运行的意外事件发生时,意外事件的评分为车站子系统下单体设备意外事件的最低分。

### 3 结语

1) 城市轨道交通列车控制系统的维护数据通常可以达到海量的规模,因此在研究智能运维算法的同时,必须研究如何使用大数据技术来处理海量数据。基于智能运维系统的大数据技术分为数据存储和数据分析两个层面,未来需跟据不同场景、不同专业在不同类型的数据基础上对该技术进行研究。

2) 本文针对智能运维系统的研究是建立在故障模型和对监测对象切片后进行加权计算的研究,需专家提前对该系统的运行环境、意外事件、运行状况、故障类型、最小可维护单元所占权重进行定义,其理论数据较为依赖于专家经验,分析方法及加权重等方面存在一定的主观性,故该系统在机器自适应的算法上还有待进一步研究。

### 参考文献

[1] 村山一雄, 邹振民. JR 东日本公司的新干线综合运输管理系统(COSMOS)[J]. 中国铁路, 2000(11):42.  
MURAYAMA Kazuo, ZOU Zhenmin. Shinkansen integrated transportation management system of JR East Japan Railway Company (COSMOS)[J]. Chinese Railways, 2000(11):42.

[2] 冯双洲. 德国 ICE 高速动车组及其检修技术[J]. 机车电传动, 2002(4): 1.  
FENG Shuangzhou. ICE high-speed EMU in Germany and its maintenance technology [J]. Electric Drive for Locomotive, 2002 (4): 1.

[3] 杨洪权, 应志鹏, 张德明. 城市轨道交通 CBTC 列车自动监控子系统设计与创新[J]. 现代城市轨道交通, 2012(5): 1.  
YANG Hongquan, YING Zhipeng, ZHANG Deming. Design and innovation of subsystem of CBTC automatic train control for urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2012(5): 1.

[4] 朱莉, 胡恩华. 全自动无人驾驶一体化智能运控系统研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(10): 69.  
ZHU Li, HU Enhua. Study of integrated intelligent completely

automated and driverless train operation control system[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(10): 69.

[5] 钟文文. 地铁设备智能化运维管理探索与实践[J]. 中国建设信息化, 2020(14): 70.  
ZHONG Wenwen. Exploration and practice of intelligent operation and maintenance management of metro equipment[J]. Informatization of China Construction, 2020(14): 70.

[6] 刘丙林, 朱佳, 李翔宇. 城市轨道交通车辆智能运维系统探索与研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(6): 16.  
LIU Binglin, ZHU Jia, LI Xiangyu. Exploration and research on intelligent operation and maintenance system of urban rail transit vehicles[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(6): 16.

[7] 詹炜, 徐永能, 王依兰. 城市轨道交通车辆智能运维系统应用研究[J]. 城市公共交通, 2018(12): 28.  
ZHAN Wei, XU Yongneng, WANG Yilan. Application research on intelligent operation and maintenance system of urban rail transit vehicle[J]. Urban Public Transport, 2018(12): 28.

[8] 傅嘉俊. 上海轨道交通车辆智能运维系统[J]. 城市轨道交通, 2020(7): 23.  
FU Jiajun. Intelligent operation and maintenance system of Shanghai rail transit vehicles[J]. China Metros, 2020(7): 23.

[9] 胡佳琦. 上海市轨道交通车辆智能运维系统研究与应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 5.  
HU Jiaqi. Research and application of intelligent operation and maintenance system for Shanghai rail transit vehicles[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(7): 5.

[10] 国家统计局. “十一五”经济社会发展成就系列报告之七: 交通运输业成就卓著[R/OL]. 北京: 国家统计局, 2011. [http://www.stats.gov.cn/ztcj/ztx/sywcj/201103/t20110304\\_71319.html](http://www.stats.gov.cn/ztcj/ztx/sywcj/201103/t20110304_71319.html).  
National Bureau of Statistics. Seventh report of 'the Eleventh Five-year Plan' achievements in economic and social development series: outstanding achievements in transportation industry [R/OL]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2011. [http://www.stats.gov.cn/ztcj/ztx/sywcj/201103/t20110304\\_71319.html](http://www.stats.gov.cn/ztcj/ztx/sywcj/201103/t20110304_71319.html).

[11] 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, 37(2): 10.  
QIU Lijun, WU Minghui. Review on the framework and key technology of PHM[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(2): 10.

(收稿日期: 2022-09-21)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: [tougao. umt1998. com](http://tougao. umt1998. com)