

双套冗余异构列车运行控制系统的可靠性及运营延误分析*

汪小勇^{1,2,3,4} 欧冬秀^{1,2,3} 刘宇^{1,2,3} 纪玉清^{1,2,3} 唐晨凯^{1,2,3}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;

3. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海; 4. 卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海 // 第一作者, 正高级工程师)

摘要 在对比分析某市轨道交通列车 5 min 以上延误原因及特征的基础上, 对不同列车运行控制制式的故障模式和可靠性进行了分析和建模计算。基于赋时 Petri 网建模方法, 对 CBTC(基于通信的列车控制)+BM(基于固定闭塞的点式列车自动防护模式)和 CBTC+TBTC(基于数字轨道电路的列车控制)系统在降级模式切换时对列车运营延误的影响进行仿真分析。结果表明, 当 BM 设计运行间隔较小时, 列车延误可控制在 5 min 内; 当 TBTC 设计运行间隔在 100 s 左右时, 列车延误不超过 2 min。对不同列车运行控制制式可靠性以及通信故障对运营延误影响的分析可为城市轨道交通线路信号设计、信号制式选取及实际运营提供参考。

关键词 城市轨道交通; 双套冗余列车运行控制; 可靠性分析; 列车延误

中图分类号 U231.6

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.04.001

Reliability and Operation Availability Analysis of Heterogeneous Redundancy Train Control System

WANG Xiaoyong, OU Dongxiu, LIU Yu, JI Yuqing, TANG Chenkai

Abstract By comparatively analyzing causes and characteristics of a city metro train operation delays over 5 minutes, the fault mode and reliability of different train control system modes are analyzed and calculated with model. Based on Colored Petri Network (CPN) modeling method, the influence of CBTC+BM and CBTC+TBTC system downgrading mode on train operation delay is simulated for analysis. Results show that when the BM design headway is relatively short, operation delay can be controlled under 5 minutes; when the TBTC design headway is around 100 s, operation delays will not exceed

2 minutes. The analysis of the impact of different train control system modes reliability and communication fault on operation delay can be a reference for rail transit signaling system design, signaling format selection and practical operation.

Key words urban rail transit; heterogeneous redundancy train control; reliability analysis; operation delay

First-Author's address Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education in Tongji University, 201804, Shanghai, China

1 现有运行线故障分析及其对运营的影响

目前轨道交通信号系统采用固定闭塞、TBTC(基于数字轨道电路的列车控制)、BM(基于固定闭塞的点式列车自动防护模式)、单 CBTC(基于通信的列车控制)、CBTC+BM 及 CBTC+TBTC 冗余备份等列车运行控制(以下简为“列控”)制式。其中, 固定闭塞系统、TBTC 系统、BM 的点式 ATP(列车自动保护)系统及单 CBTC 系统为单套列控系统, CBTC+BM 系统及 CBTC+TBTC 系统为双套冗余异构列控系统。

基于互联网数据, 统计分析了某市轨道交通各类突发事件(含设备发生故障)造成的列车 5 min 以上延误总体情况, 如表 1 所示。分析结果显示, 故障次数占据前三的线路为运营服役时间最长的 3 条线, 其信号制式分别为固定闭塞、TBTC(准移动闭塞)、单 CBTC(移动闭塞)。在故障次数占比最高的 TBTC 制式线路中, 由信号设备故障引起的运营延误次数占比超 1/4(见表 2), 仅次于由车辆故障引起的延误次数, 显然无法满足高质量客运服务的需求。

* 国家重点研发计划基金项目(2018YFB1201403)

表 1 某市轨道交通列车延误 5 min 以上故障次数统计
(2012—2019 年)

线路	故障次数 占比/%	线路	故障次数 占比/%
固定闭塞线路	12.69	CBTC+BM 线路 4	9.34
TBTC 线路	16.86	CBTC+BM 线路 5	3.05
CBTC 线路 1	12.59	CBTC+BM 线路 6	11.47
CBTC 线路 2	5.89	CBTC+BM 线路 7	0.71
CBTC(原 BM)线路	3.15	CBTC+BM 线路 8	1.12
CBTC+BM 线路 1	5.58	CBTC+BM 线路 9	1.62
CBTC+BM 线路 2	4.87	CBTC+BM 线路 10	0.20
CBTC+BM 线路 3	8.12	CBTC+BM 线路 11	2.74

表 2 某市轨道交通 TBTC 制式线路列车延误 5 min 以上的原因统计(2012—2019 年)

延误原因	延误次数 占比/%	延误原因	延误次数 占比/%
车辆故障	41.21	线路设备故障	4.24
信号设备故障	25.45	异常天气	1.21
车门故障	15.15	屏蔽门故障	1.23
供电系统故障	4.85	其他	2.42
有人员、异物进入线路	4.24		

2012 年至 2019 年间,各线由信号设备故障导致的 5 min 以上延误次数差别较大。究其原因,各线建设年代不同,其信号系统制式和所用技术也不同。经细化分析发现,占比最高的 TBTC 制式线路信号设备故障对列车运营的影响时长大多为 10~20 min 及 30 min 以上(见图 1)。对于繁忙的城市轨道交通干线,30 min 以上的延误会影响数以

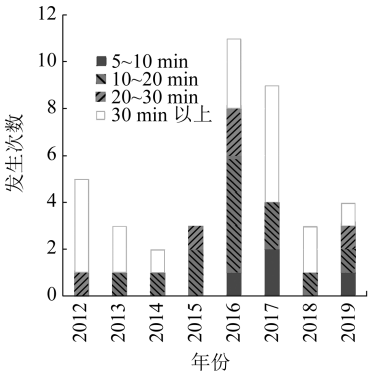


图 1 TBTC 制式信号设备故障影响时间分档统计

万计的乘客出行,必须予以避免。

2 不同列车运行控制制式的工作模式

某市轨道交通早期建设的线路,其信号系统采用单套列控系统,且未设置 BM;后期建设的线路都采用 CBTC+BM 系统,其实质是以 CBTC 为主用列控系统,以点式 ATP 作为降级备用列控系统。列控系统主要由 ATS(列车自动监控)、ATP、ATO(列车自动驾驶)、CI(计算机联锁)、TWC(车地通信设备)等多个子系统,以及基础信号设备组成。不同列控制式的列车控制模式、信息传输方式、列车追踪间隔、主要设备系统等各有差异,具体见表 3。

表 3 不同列控制式的工作模式

项目	点式 ATP 制式	TBTC 制式	CBTC 制式	CBTC+BM 制式	CBTC+TBTC 制式
列车控制模式	按目标-距离速度曲线控制	按目标-距离码模式曲线控制	按实时目标-距离速度连续曲线控制;并由 ATO 子系统控制列车	主用模式采用 CBTC 制式,备用模式采用点式 ATP 制式	主用模式采用 CBTC 制式,备用模式采用 TBTC 制式
设计追踪间隔	160 s	100 s	≤90 s	≤90 s(主用模式);160 s(备用模式)	≤90 s(主用模式);100 s(备用模式)
信息传输方式	应答器	轨道电路 TWC、应答器	无线通信等方式实现大信息量车地双向传输	车地双向大容量无线通信;后备模式下应答器	WLAN、LTE 等大容量无线通信,后备模式 TWC 通信
主要设备及子系统	CI、应答器、LEU、车载 ATP、ATO	CI、数字轨道电路、TWC、车载 ATP、车载 ATO、ATS	CI、ZC、DCS、车载 ATP、ATO、ATS	CI、ZC、DCS、应答器、LEU、车载 ATP、ATO、ATS	CI、ZC、DCS、数字轨道电路、TWC、车载 ATP、车载 ATO、ATS
构成及可靠性	结构简单,冗余性欠佳,可靠性较高	冗余性欠佳,可靠性低	系统较复杂,可靠性较高	系统复杂,高冗余,可靠性更高	构成复杂,具备高冗余,可靠性更高

注: WLAN 为无线局域网;LTE 为长期演进;LEU 为轨旁电子单元;ZC 为区域控制器;DCS 为数据通信子系统。

3 不同制式列控系统的可靠性分析

3.1 单套系统可靠性分析

文献[1-4]基于城市轨道交通信号系统列车自动控制技术提出了 RAMS(可靠性、可用性、可维护性和安全性)指标要求(见表 4)。

根据点式 ATP 列控系统、TBTC 系统和单

CBTC 系统的设备组成,参考表 4 的基础指标,测算整个信号系统的可靠性指标。本研究使用商用安全可靠分析软件 PTC Windchill Quality Solutions 11.0,对点式 ATP 列控系统、TBTC 系统和单 CBTC 系统建立 RBD(Reliability Block Diagrams,可靠性方块图)(见图 2),并进行可靠性指标计算。

表 4 城市轨道交通信号系统各子系统及设备的可靠性指标

子系统及设备	MTBF 最小值/h
DCS 子系统	5.0×10^4
ZC 子系统	2.5×10^5
CI 子系统	1.0×10^5
车载 ATP 子系统	1.0×10^5
车载 ATO 子系统	1.0×10^5
ATS 子系统	5.0×10^4
计算机外围设备	5.0×10^4
地面有线网络设备	5.0×10^5
ATP 轨旁设备	1.0×10^5

注：MTBF 为平均故障间隔时间。

列车运行 1 000 h 的列控系统可靠性指标计算结果如表 5 所示。单 CBTC 系统可靠度最高，TBTC 次之，BM 最低。可见由于新技术的引入，CBTC 系统具有更高的可靠性。列控系统可靠性与其本身结构及控制方式密切相关。虽然现在的列控系统的可靠性有所提高，但只要单套列控系统发生故障，列车仍会直接进入人工驾驶模式，由人工调度，并由司机目视行车，致使运营效率受到严重影响。

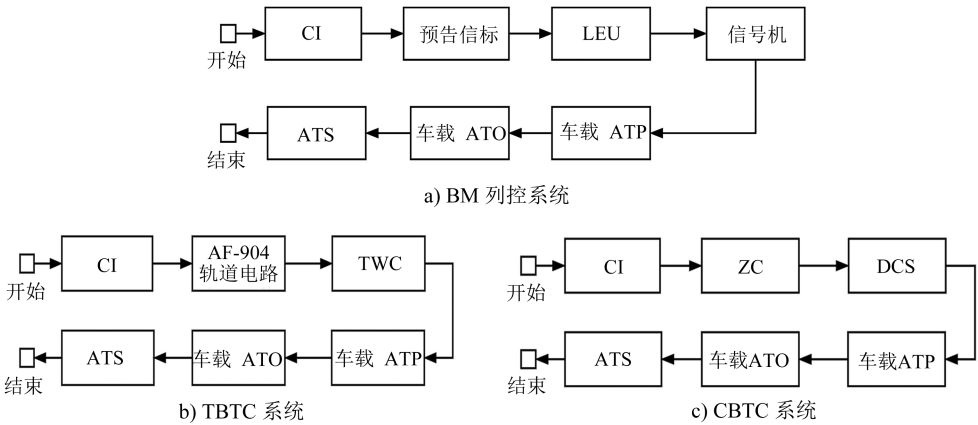


图 2 列控系统的 RBD^[5-6]

表 5 列车运行 1000 h 的列控系统可靠性指标计算结果

指标	BM 系统	TBTC 系统	单 CBTC 系统
可靠度	0.908 724	0.913 931	0.914 192
λ/fit	95.714 286	90.000 000	89.714 286
MTBF/h	10 447	11 111	11 146

注： λ 为失效率。

3.2 双套冗余异构系统可靠性分析

某市轨道交通新建线路较多采用 CBTC+BM 双信号冗余系统方案，当主用 CBTC 系统中的区域控制器等发生故障，或车地无线通信功能受限时，列车可切换至 BM 模式，以保证列车的安全运行^[7]。有些设备为 CBTC 模式与 BM 模式复用。当联锁、道岔及电源等复用设备发生故障时，列车不可避免地切换为人工驾驶模式，由人工调度并由司机目视行车。

CBTC+TBTC 系统是一种信号系统利旧的升级改造方案。CBTC 系统中的 ZC 和车地无线通信子系统等一旦发生故障，会导致列控系统降级为 TBTC 模式。如果联锁系统、道岔和电源等复用设备发生严重故障，或者轨道电路等 TBTC 系统的关键设备发生故障，则会直接导致 TBTC 系统失效，列车只能依靠人工调度、站间闭塞技术及司机目视行车^[8]。

本文采用马尔科夫过程选取关键的车地通信故障，并将之作为触发条件来构建信号系统状态转换过程，进而分析 CBTC+BM、CBTC+TBTC 等双套冗余异构列控系统的状态转换过程（如图 2 及图 3 所示）。使用商用安全可靠性分析软件 PTC Windchill Quality Solutions 11.0 的 Markov 模块功能（参照表 4），计算列车运行 1 000 h 后的相关 RAM 指标，如表 6 所示。计算结果表明，CBTC+TBTC 系统具有更高的可用性。

表 6 不同制式的双信号系统可靠性指标计算结果

指标	CBTC+BM	CBTC+TBTC
可靠度	0.999 960	0.999 995
λ/fit	10.1	10.0
MTBF/h	99 010	100 004

4 双套冗余异构列控系统模式切换对列车延误的影响

4.1 CBTC+BM 系统

CBTC+BM 系统依靠主用 CBTC 系统来实现移动闭塞。当 CBTC 系统的 ZC 或 DCS 发生故障，且

CBTC 系统本身的冗余失效时,列车切入 BM 后备模式运行,其防护曲线发生变化(见图 3)。

本文使用赋时 Petri 网建立列控系统由 CBTC 模式切换到 BM 模式的过程,如图 4 所示。当 CBTC 制式发生 DCS 故障,列车丢失移动授权时,一方面,列车先紧急制动直至列车完全停稳;另一

方面,司机与调度请求确认模式切换。当中心调度人员授权司机切换控制模式时,列车先切换模式至 RM(限制人工驾驶模式),待列车运行通过有源信标并完成车载 BM 初始化后,则进入 BM。如 CBTC 通信恢复正常,则列车只要接收到有效的移动授权,就可自动切换回 CBTC 模式。

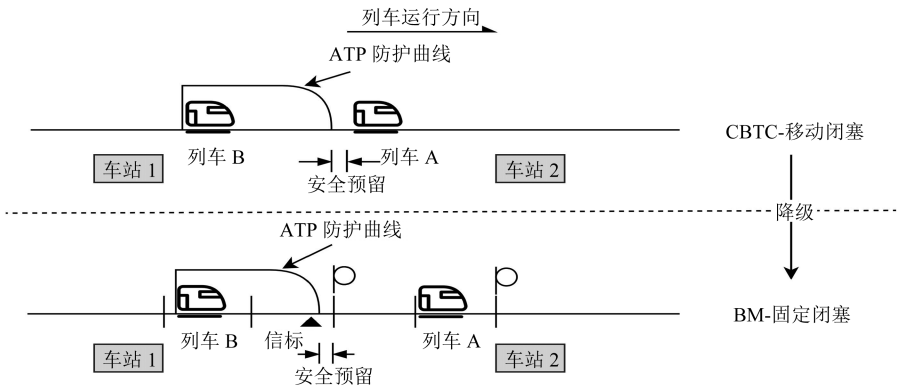


图 3 CBTC+BM 系统的列控模式转换

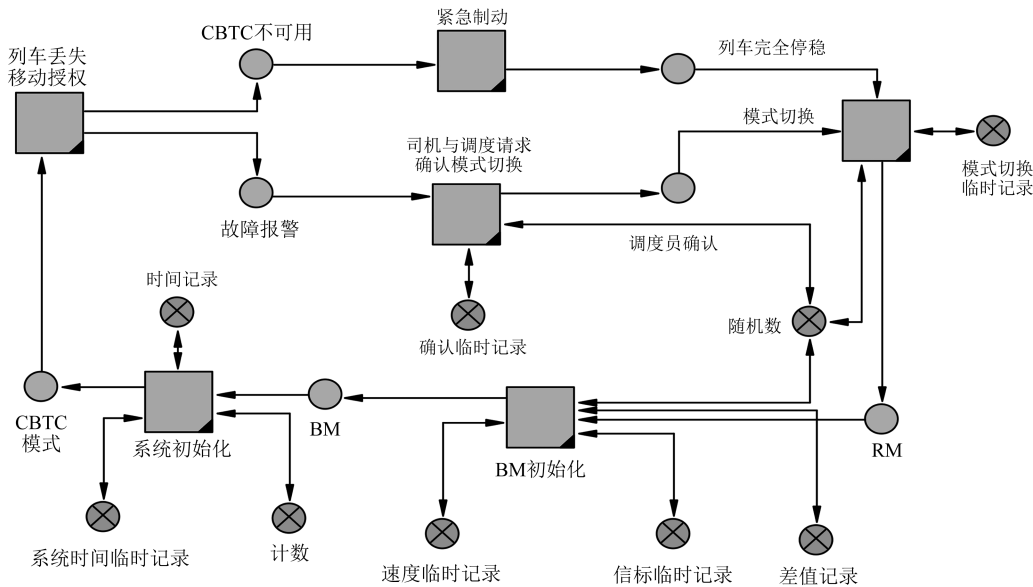


图 4 CBTC+BM 系统模式切换的 Petri 网模型

利用 Petri 网模型,仿真计算不同 $t_{\text{信标}}$ (相邻信标运行间隔) 下的 $t_{\text{误}}$ (列车延误时间), 如图 5 所示。当 $t_{\text{信标}}=2\text{ min}$ 时, $t_{\text{误}}$ 平均值约为 5 min, 50% 以

上的 $t_{\text{误}}$ 超过 5 min; 当 $t_{\text{信标}}=4\text{ min}$ 时, $t_{\text{误}}$ 平均值约为 10 min, 超过 5 min 占比达 90% 以上; 当 $t_{\text{信标}}=6\text{ min}$ 时, $t_{\text{误}}$ 平均值已超过 15 min, $t_{\text{误}}$ 最大值约为 25 min。

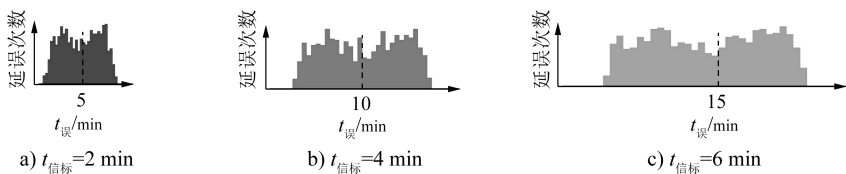


图 5 不同 $t_{\text{信标}}$ 下的 $t_{\text{误}}$ 分布仿真计算结果

由此可知,CBTC+BM 降级时的切换时间受信标设置间距的影响较大。

4.2 CBTC+TBTC 系统

当 CBTC+TBTC 系统的主用 CBTC 系统发生故障且其本身冗余失效时,列控系统切入 TBTC 制式,可实现准移动闭塞,虽增大了最小追踪间隔,却仍能保障较为充足的运力。CBTC+TBTC 系统的列车控制模式转换如图 6 所示。

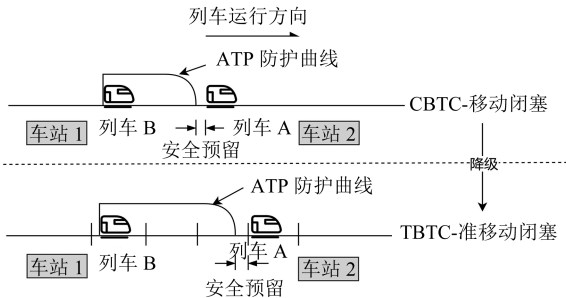


图 6 CBTC+TBTC 系统的列控模式转换

采用赋时 Petri 网建立列控系统由 CBTC 模式切换到 TBTC 模式的过程如图 7 所示。当 CBTC 系统的 DCS 发生故障时,列车随即接入 TBTC 系统下的数字轨道电路 TWC 子系统,从而实现连续通信。准移动闭塞下列车降速 10% 运行,必须保证前方闭塞分区出清后方可驶入,转入 TBTC 制式下基于目

标-距离追踪运行。列车延误主要由于列车运行间隔的增大和列车行驶速度的降低造成,根据构建的赋时 Petri 网模型对列控系统降级导致的列车晚点时间进行计算。

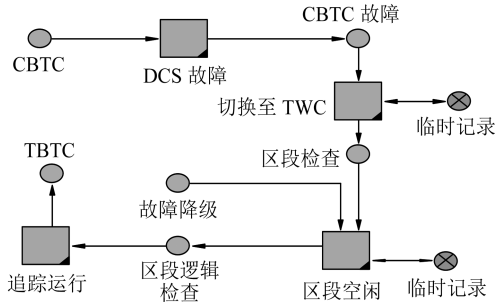


图 7 CBTC+TBTC 制式下由于通信故障导致系统降级至 TBTC 运行模型

基于 Petri 网模型,仿真计算当 $t_{\text{运行}}$ (运行设计间隔)分别为 100 s、120 s 和 180 s 时的 $t_{\text{误}}$,结果如图 8 所示。当 $t_{\text{运行}} = 100 \text{ s}$ 时, $t_{\text{误}}$ 均不超过 2 min。这与当前某线路“CBTC+TBTC”信号系统改造工程中的 TBTC 制式设计行车间隔一致。当 $t_{\text{运行}} = 120 \text{ s}$ 和 $t_{\text{运行}} = 180 \text{ s}$ 时, $t_{\text{误}}$ 均未超过 5 min。CBTC+TBTC 系统为 1 套连续通信的闭塞系统,其降级时的信号切换用时仅由本身行车间隔和速度降级造成,远低于 CBTC+BM 系统的信号切换用时。

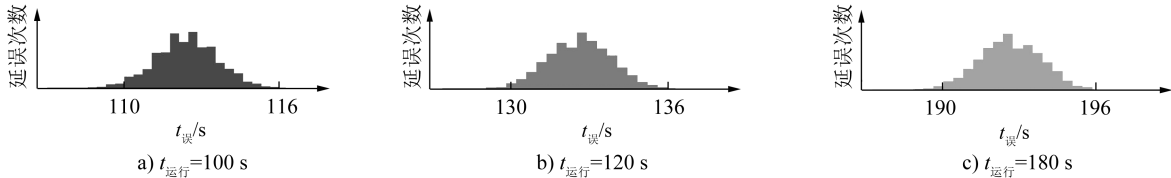


图 8 TBTC 不同 $t_{\text{运行}}$ 下的 $t_{\text{误}}$ 分布仿真计算结果

5 结语

本文基于现场数据和理论建模,计算列控系统的 RAM 指标。计算结果表明,双套冗余异构列控系统的可用性高。针对 CBTC+BM 系统及 CBTC+TBTC 系统,建立 Petri 网模型并分析了列控模式切换对列车延误的影响。CBTC+TBTC 系统的模式切换用时短,基本不会发生 5 min 的列车延误。CBTC+BM 系统的模式切换用时与 $t_{\text{信标}}$ 有直接关系: $t_{\text{信标}}$ 越小,对列车延误的影响越小,当 $t_{\text{信标}} = 2 \text{ min}$ 时,列车的平均延误时间约为 5 min;当 $t_{\text{信标}}$ 增大时,列车延误时间将成倍增长。

在工程实践中,应结合实际选择信号制式,选择

合适的双套冗余列控系统,既能提升列控系统的可用性,也能降低列控模式切换对列车延误的影响,从而满足线路大客流运输的需求,提升服务水平。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 轨道交通可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例: GB/T 21562—2008[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2008.

[2] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会. 城市轨道交通 CBTC 信号系统-ATP 子系统规范: CZJS/T 0028—2015[S]. 北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会,2015.

[3] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会. 城市轨道交通 CBTC 信号系统-ATO 子系统规范: CZJS/T 0029—2015[S]. 北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会,2015.

(下转第 9 页)

才能做出响应。这种处理耗时长、效率低。在 CIOS 系统中,维护人员使用的 NMS(网络管理系统)增设了专门界面,以追踪调度员日常使用过程中控制命令的运行途径。通过该方式,维护单位可在第一时间判断故障的类型及原因,从而组织有效的修复工作。将全路网的信息集中,实现各线路维护界面的统一化和标准化,只需 1 个维护部门即可肩负整个路网控制中心的维护工作,真正做到了维护成本的降低和维护效率的提升。

3.4 实际应用案例

上海轨道交通 8 号线的设备设施维保工作应用了 CIOS 系统。在路网控制中心,设置了 6 个 CIOS 系统监控员席位及 8 台服务器。CIOS 系统在网络管理工作站的 NMS 网络状态监视图能直观反映所有设备的健康运行状态。维护人员可通过日常对该图的检查,了解当前的设备运行状态。

CIOS 系统网络管理工作站的界面还展现了全线各子系统的网络通道状态,以便维护人员直观地对各站各子系统的通断情况作出判断,做好相应的维修和防护工作。

4 结语

CIOS 系统在软件平台上实现多专业、多系统的数据采集、信息集成和信息共享,为城市轨道交通科学和高效的运营组织和管理提供了先进的技术手段。新运维管理模式基于 CIOS 系统集成平台,能实现对多个专业的设备设施的统一监视和集中控制,实现了不同专业的信息共享和联动控制,提高了运营和维护效率,突破了行业数据处理瓶颈,能充分满足线路及线网运营精细化管理及扩展需求。

参考文献

- [1] 上海申通地铁集团有限公司技术中心.上海市轨道交通网络运营指挥调度大楼 OCC 设置及接入建设指导意见[R].上海:上海申通地铁集团有限公司,2017.
- [2] 上海申通地铁集团有限公司技术中心.轨道交通线路控制中心集成操作平台(CIOP)建设指导意见[R].上海:上海申通地铁集团有限公司,2018.
- [3] 安红艳,蔡正国.提高设备诊断水平的途径和方法研究[J].石油化工设备技术,1996(4):60.

(收稿日期:2020-08-31)

(上接第 5 页)

- [4] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会.城市轨道交通 CBTC 信号系统-ATS 子系统规范:CZJS/T 0030—2015[S].北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会,2015.
- [5] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会.城市轨道交通 CBTC 信号系统-CI 子系统规范:CZJS/T 0031—2015[S].北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会,2015.
- [6] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会.城市轨道交通 CBTC 信号系统-DCS 子系统规范:CZJS/T 0032—2015[S].北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会,2015.
- [7] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通系统规范 第 1 部分:系统总体要求:T/CAMET 04010.1—2018[S].北京:中国城市轨道交通协会,2019.

- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通基于通信的列车自动控制系统技术要求:CJ/T 407—2012[S].北京:中国质检出版社,2012.
- [9] KIM M C, SEONG P H. Reliability graph with general gates: an intuitive and practical method for system reliability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety. 2002, 78(3): 239.
- [10] 汪小勇.城市轨道交通信号系统可靠性分析[J].铁道通信信号,2016(11):68.
- [11] 丛亚闻,李飞.浅谈基于通信的列车控制增强型后备模式方案[J].铁道通信信号,2017(2):59.
- [12] 张郁.上海轨道交通 2 号线信号系统的更新改造[J].城市轨道交通研究,2020(6):126.

(收稿日期:2020-08-31)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umat1998.com