

上海轨道交通 3、4 号线改造后的数据通信子系统可靠性优化方案

王 欣

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

摘 要 [目的] 在上海轨道交通 3、4 号线信号系统大改造项目现有 DCS(数据通信子系统)向双制式四网络演进的过程中,存在轨旁 DCS 单点故障引起单个车-地通信网络失效的隐患,有必要通过调整通信网络结构来优化 DCS 的可靠性。[方法] 基于列车自主运行系统的结构及业务,分析 DCS 网络结构,并确定影响 DCS 可靠性的关键节点与链路。从设备层和协议层分别对 DCS 可靠性优化方案进行阐述。在样板段对优化后的方案进行现场动车测试,以评估 DCS 的可靠性。[结果及结论] 优化后的 DCS 可靠性高,优化方案能显著增强信号系统的整体性能。

关键词 城市轨道交通;数据通信子系统;可靠性;通信网络

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.026

Data Communication Subsystem Reliability Optimization Scheme of Upgraded Shanghai Rail Transit Line 3 and Line 4

WANG Xin

(Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] During the evolution of existing DCS (data communication subsystem) towards a dual-mode four-network system in the major signaling system renovation project of Shanghai Rail Transit Line 3 and Line 4, there is a hidden risk that the trackside DCS single-point fault may cause the failure of individual vehicle-wayside communication network. It is needed to optimize DCS reliability through adjusting the communication network structure. [Method] Based on TACS (train autonomous circumambulate system) structure and operation context, the DCS network structure is analyzed to identify key nodes and links affecting DCS reliability. The optimization scheme for DCS reliability is elaborated from both device and protocol layers. Field tests of operating trains on a sample section in the optimized scheme are conducted to evaluate the reliability of DCS. [Result & Conclusion] The optimized DCS demonstrates high reliability, it significantly enhances the over-

all performance of signaling system.

Key words urban rail transit; DCS; reliability; communication network

上海轨道交通 3、4 号线信号系统大规模升级改造为 TACS(列车自主运行系统)。遵循国务院对城市轨道交通运营设备数字化、智能化转型的方针指导,需要建立双套双制式无线通信网络和实施关键子系统的冗余配置来显著增强信号系统的可靠性与可用性。城市轨道交通 DCS(数据通信子系统)为信号系统的核心子系统,其可靠性直接关联到整个城市轨道交通网络的稳定性和安全性。现有 DCS 可靠性无法满足新的要求。对此,有必要研究 DCS 可靠性优化方案。

1 DCS 的通信网络结构及可靠性分析

1.1 DCS 的通信网络结构

TACS 减少了地面设备,简化了轨旁设备功能,采用以具备车-车通信能力列车为主体的核心控制方式,由 CC(车载控制器)依据 ATS(列车自动监控系统)发送的运行任务,自主规划列车的运行路径,并通过无线网络向 WRC(轨旁资源管理器)申请运行所需的线路资源;WRC 根据申请信息通过有线网络动作轨旁设备,并将线路资源分配状态反馈给对应列车 CC;CC 通过无线网络与相邻前车通信,综合线路资源状态、前车位置等信息计算移动授权,完成运行间隔防护。TACS 结构示意图如图 1 所示。

根据 TACS 结构和业务需求,制定上海轨道交通 3、4 号线信号系统改造现用的 DCS 的通信网络方案,DCS 的通信网络分为有线通信网络和无线通信网络,其结构示意图如图 2 所示。

为了提升通信的可靠性与可用性,DCS 的无线通信网络为 LTE(长期演进)+Wi-Fi 双制式无线通

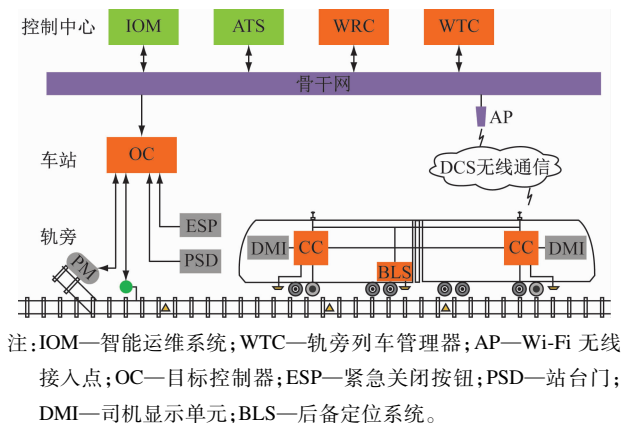
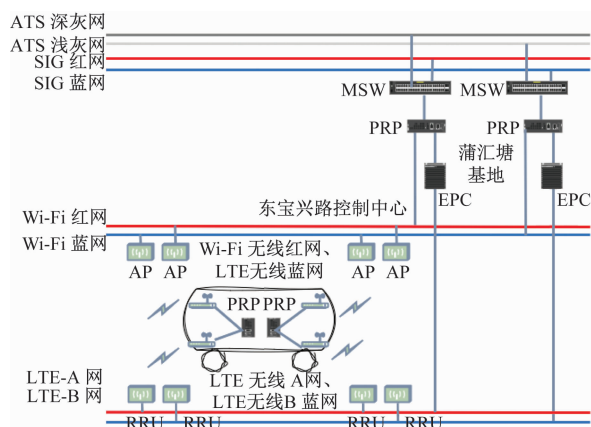


图1 TACS结构示意图

Fig. 1 Diagram of TACS structure



注:LTE 无线 A 网、LTE 无线 B 网、Wi-Fi 无线红网、Wi-Fi 无线蓝网为无线通信的 4 张子网;SIG (信号) 红网、SIG 蓝网、ATS 深灰网、ATS 浅灰网、LTE-A 网、LTE-B 网、Wi-Fi 红网、Wi-Fi 蓝网为 DCS 有线通信网络骨干网的 8 张环状网络;MSW—主交换机;PRP—并行冗余交换机;EPC—演进分组核心网;RRU—LTE 射频拉远单元。

图2 优化前的上海轨道交通 3、4 号线信号系统 DCS 结构示意图

Fig. 2 Diagram of the signaling system DCS structure for Shanghai Rail Transit Line 3 and Line 4 before optimization

信网络(以下简称“LTE + Wi-Fi 无线网”)。

LTE 制式的无线通信网络(以下简称“LTE 无线网”)支持多种带宽选择,能借助 X2 接口实现网络切换优化,安全性能出色,工作主频为 1.8 GHz,其扁平化架构能满足地铁沿线的线性覆盖需求,LTE 无线网的子网(LTE 无线 A 网与 LTE 无线 B 网)采用冗余独立网络方式,每张网内各有 1 套核心网和基站系统,完全覆盖行车区域。

Wi-Fi 制式的无线通信网络(以下简称“Wi-Fi 无线网”)采用红、蓝双网冗余设计,工作主频为 2.4

GHz。Wi-Fi 无线网的 2 张子网(Wi-Fi 无线红网与 Wi-Fi 无线蓝网)完全独立,并行工作,互不影响。

DCS 的有线通信网络由骨干网和接入网组成。

骨干网由 2 张相互独立的环状子网络组成,分别为 SIG 红网、SIG 蓝网、ATS 深灰网、ATS 浅灰网、LTE-A 网、LTE-B 网和 Wi-Fi 红网、Wi-Fi 蓝网。每张环网都是由集中站的骨干网交换机与相邻车站通过骨干网光纤组成的环形网络。其中 SIG 红网及 SIG 蓝网用来传输控制轨旁设备的信息;ATS 深灰网及 ATS 浅灰网用来传输运行任务,LTE-A 网、LTE-B 网、Wi-Fi 红网及 Wi-Fi 蓝网用来传输无线承载信息。所有环状子网络均完全独立、并行工作、互不影响。

接入网分为轨旁接入网和车接入网。

轨旁接入网负责接入轨旁无线网络与有线网络。其中:LTE 无线 A 网与 LTE 无线 B 网的轨旁基站设备,通过轨旁接入网同骨干网中 LTE-A 网及 LTE-B 网的骨干网交换机通信;Wi-Fi 无线红网与 Wi-Fi 无线蓝网的轨旁设备,通过轨旁接入网同骨干网中 Wi-Fi 红网及 Wi-Fi 蓝网的骨干网交换机通信。轨旁接入网由此实现了轨旁设备之间的无线通信传输。

车接入网负责接入车载无线通信网络与有线通信网络。车载 LTE 制式天线通过车接入网与 LTE 制式的车接入单元通信网络相连,Wi-Fi 制式天线通过车接入网与 Wi-Fi 制式的车接入单元通信网络相连,从而实现车载 CC 与轨旁设备之间的冗余通信。

1.2 DCS 的可靠性分析

可靠性是指能够持续不间断地提供服务的能力,即使设备或链路出现单点或者多点故障也能保持功能不间断的能力。

对于 TACS 而言,如果在列车行驶过程中 DCS 发生故障,则列车与列车之间、列车与轨旁设备之间会丢失通信数据,后续列车的运行将会受到影响。可见,DCS 的可靠性直接影响整条线路的运行效率。通过分析网络结构,可确定线路关键节点和链路,进而判断网络中是否会因单点或多点故障或者外部干扰出现通信中断的情况。

1.2.1 无线通信网络

LTE + Wi-Fi 无线网在异地灾备中心配置了独立的灾备核心网,即使单个核心网发生故障也不会影响相关业务。

LTE + Wi-Fi 无线网的 4 个子网能同时传输信息,既避免了既有单制式车-地无线通信网络在外部干扰下的中断风险,又避免了 1~3 条无线通信链路中断导致的车-地通信数据丢失风险。

轨旁 RRU 和 AP 采用冗余部署方案,2 套 BBU (基带处理单元)分别接入 2 个 LTE 骨干网交换机,两套 AP 分别接入 2 个 Wi-Fi 骨干网交换机,以保证单个交换机故障时不影响车-地通信。

1.2.2 骨干网

SIG 红/蓝网、ATS 深灰/浅灰网、LTE-A/B 网和 Wi-Fi 红/蓝网共构成 4 组冗余骨干网,传输不同类型的业务数据,相互之间不会影响。

每组冗余骨干网中有 2 张子网,即使其中 1 张子网的任何器件出现故障,通信数据也能够由另一张子网实时传送到目的地。且由于 2 张子网同时传输通信数据,故在故障发生时不需要切换通信网络,也就不存在故障切换时间。

当只剩下 1 张子网可用时,为了在单个交换机发生故障或 1 根纤芯断掉时能够确保不影响通信,单个环网采用了 MRP(快速重置)协议,其重置时间低于 50 ms。

1.2.3 接入网

在控制中心和基地设置轨旁 PRP、在列车上设置车载 PRP,利用 PRP 方案叠加 Wi-Fi 和 LTE 两种无线通信链路。轨旁设备发送的数据经轨旁 PRP 设备处理后,通过两条无线通信链路同时向车载 PRP 传输。PRP 将先到达的数据包进行转发,并丢弃后到达的数据包,从而实现轨旁与车载设备的无线冗余车-地通信。

1.2.4 DCS 的轨旁关键节点

SIG 红/蓝网中只有单张网络工作时的车-地通信网络结构示意图如图 3 所示。当只有单张网络工作时,若轨旁 PRP 或者 MSW 发生故障,车载设备无法与轨旁终端通信,则车-地通信功能丧失。可见,轨旁 PRP 及 MSW 为 DCS 的轨旁关键节点,数据通

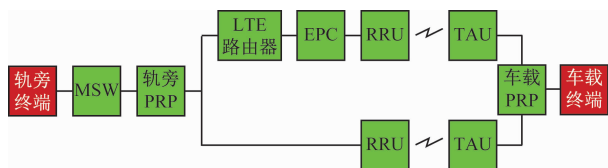
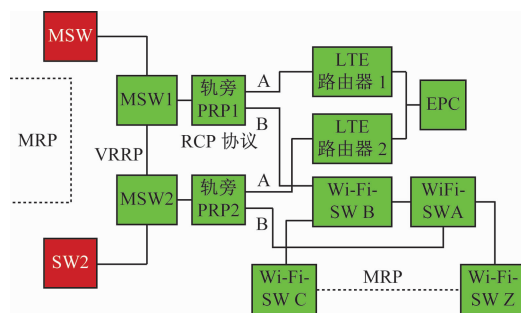


图 3 优化前单张子网工作时的车-地通信网络结构示意图
Fig. 3 Diagram of vehicle-wayside communication network structure during single sub-network operation before optimization

信子系统的可靠性优化方案须对 DCS 的轨旁关键节点及相关链路进行方案设计与研究。

2 DCS 可靠性优化方案

每张子网的 MSW、PRP、LTE 路由器及 Wi-Fi 交换机均为 2 台,按主备设置,并通过链路冗余协议的匹配组合来实现网络冗余功能。当任意 1 台主用设备或链路发生故障而导致数据传输中断时,自动切换至备用设备或备用链路,以提高 DCS 的可靠性,本文针对单张子网工作时的车-地通信网络的 DCS 轨旁关键节点进行可靠性优化。优化后的车-地通信网络结构示意图如图 4 所示。



注:Wi-Fi-SW 为 Wi-Fi 骨干网交换机;VRRP 为虚拟路由冗余协议;PCR 协议为环网保护协议。

图 4 可靠性优化后单个子网工作时的车-地通信网络结构示意图

Fig. 4 Diagram of vehicle-wayside communication network structure during single sub-network operation after reliability optimization

2.1 设备层的优化

设备层的主要优化内容为:

1) 增设 1 台 MSW 冗余设备并接入骨干网,形成环形网络结构,旨在提高网络的冗余性和可靠性。

2) 基于稳定可靠的网络结构,增设 1 台与 MSW 主备联动的轨旁 PRP 冗余设备,并在 PRP 端口上设置端口联动功能。当一侧端口检测到 down 指令时,联动关闭另一侧端口,进而实现 MSW1、LTE 路由器 1 及 Wi-Fi-SW B 的联动切换或 MSW2、LTE 路由器 2 及 Wi-Fi-SW A 的联动切换,从而进一步增强通信网络的可靠性。

3) 为提升无线通信关键节点的可靠性,需增加 1 台与 EPC 相连的 LTE 路由器,和 1 台 Wi-Fi 骨干网交换机,接入 Wi-Fi 红/蓝网。

2.2 协议层优化

1) 在 2 台 MSW 主交换机上配置 VRRP,形成

1 个虚拟路由设备与外界通信的通道。其中, MSW1 为主节点, MSW2 为备节点。正常情况下, MSW1 作为网关设备与外界通信, 当 MSW1 发生故障时, MSW2 承担起数据流量转发的任务, 实现主备 MSW 自动切换。

2) 为保证 Wi-Fi 网的冗余性, 2 台 Wi-Fi 主交换机和 PRP 间的 2 条链路须同时工作, 再叠加 PRP 与 MSW 的联动, 进而形成二层环路。在 2 台 MSW 主交换机和 2 台 PRP 间使用 RCP 协议进行拆环, 并在环路中的备用链路 MSW2-PRP2 侧设置虚拟断点。当主用链路 MSW1-PRP1 发生故障中断通信时, 虚拟断点消失, 自动切换至备用链路 MSW2-PRP2。

3) VRRP 和 RCP 协议的搭配可实现 MSW-PRP 间的主备联动切换。

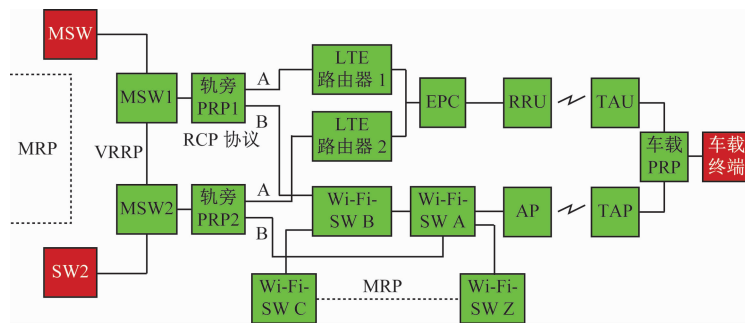


图5 DCS 可靠性优化方案效果测试的单张车-地通信网络结构示意图

Fig. 5 Diagram of single vehicle-wayside communication network structure in DCS reliability optimization scheme performance testing

表1 不同测试场景的通信网络状况及主要测试记录数据

Tab. 1 Communication network conditions and main test record data for different testing scenarios

测试场景	通信网络状况
场景一	同时存在 2 条无线通信链路和 SIG 双网
场景二	任意断掉 LTE 无线网或 Wi-Fi 无线网
场景三	任意断掉 SIG 红网或 SIG 蓝网
场景四	任意断掉 SIG 红网或 SIG 蓝网并任意断掉 LTE 无线网或 Wi-Fi 无线网
场景五	任意断掉 SIG 红网或 SIG 蓝网, 并任意断掉 1 个轨旁 DCS 关键节点

3.2 测试结果分析

不同测试场景的测试结果如表 2 所示。由表 2 可知, 在 5 种测试场景下, 列车均正常运行, 无线双网和 SIG 双网可以正常切换, 双机热备故障可以正常转移, 链路故障可以正常切换且丢包率等数据均在正常范围。由此可见, 优化后的 DCS 可靠性完全

3 方案优化效果的验证测试

3.1 验证测试方案

在改造项目样板段车站采用 DCS 可靠性优化方案后, 进行动车验证测试。DCS 可靠性优化方案效果测试的单张车-地通信网络结构示意图如图 5 所示。在 1 台车载电脑 (PC1) 和 1 台轨旁电脑 (PC2) 之间运行 Iperf 网络性能测试工具, 测试所用吞吐量为 25 Kibit/s, 发送数据包大小为 200 B。设置不同的测试场景, 观察列车是否正常运行, 测试 PC1 和 PC2 间的通信是否正常稳定, 测试并记录丢包率、平均测试时间和平均修复时间。每个测试场景均测试 10 万次。不同测试场景的通信网络状况如表 1 所示。

满足要求。

表2 不同测试场景的测试结果

Tab. 2 Test results for different testing scenarios

测试场景	列车是否正常运行	PC 是否正常通信	丢包率/%	平均测试时间/h	平均单次修复时间/s
场景一	正常	正常	0.1	1	0.02
场景二	正常	正常	0.1	1	0.02
场景三	正常	正常	0.3	1	0.02
场景四	正常	正常	0.3	1	0.03
场景五	正常	正常	0.3	1	0.03

4 结语

DCS 系统向双制式四网络演进的过程中存在的轨旁 DCS 单点故障引起单个车-地通信网络失效的隐患。对此, 本文基于上海轨道交通 3、4 号线信 (下转第 125 页)

交通 12 号线推广应用。

在某次日间巡检中,检修作业人员使用了快速诊断法进行预操位置电路隐患诊断检查发现,12 号线七莘路站 8# 道岔处于定位表示状态。测得的 $U_{112-123}$ 电压值为 AC 0 V,再测得 U_{2-3} 为 AC 0 V,说明 X3 处于室外开路状态。此时若反位操动道岔,则道岔会失表。作业人员第一时间向行车值班员报备了设备异常,并申请定位预留。这次作业人员利用快速诊断法及时发现了设备异常,避免了故障的发生。当日夜间,申请临修点并检查电压异常的区间。测量发现,HZ-24 电缆盒的 U_{2-3} 为 AC 0 V,说明室内分线盘 X3 端子至室外电缆盒 HZ-24 内 3 端子无故障点;之后,经测量,转辙机内万科端子排 2、3 端子间电压为 AC 60 V,说明电缆盒 HZ-24 内 3 端子至转辙机内万科端子排 3 端子存在开路点。检修人员拆除电缆保护管后发现,电缆盒 HZ-24 内 3 端子至转辙机内万科端子排 3 端子间的电缆线破皮氧化断裂,更换电缆线后设备恢复正常。

由实际应用情况来看,快速诊断法能大幅提升 ZDJ9 型转辙机的电路故障诊断效率,有效降低了设备隐患对运营造成的影响。

5 结语

ZDJ9 型转辙机电路故障的快速诊断法具有准确、高效等特点,能大幅提升电路故障的排查速度,

(上接第 120 页)

号系统大修改造项目,提出了 DCS 的可靠性优化方案,消除了安全隐患,提高了 DCS 的可靠性,进而提升了信号系统的整体可靠性,为其他新建线路及改造线路提供了优化思路。

参考文献

- [1] 杨震, 邝荣华, 蔡景俏, 等. 基于 PRP 提升 CBTC 车地无线通信可靠性方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(9): 83.
YANG Zhen, KUANG Ronghua, CAI Jingqiao, et al. Research on improving reliability of CBTC train-ground wireless communication based on PRP[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 83.
- [2] 王皓. 基于 LTE-M 的下一列控数据通信系统设计与可用性评估[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 156.
WANG Hao. Design and availability evaluation of next generation train control data communications system based on LTE-M[J].

并能避免下一次操动道岔引发的故障。

未来,快速诊断法可以加入转辙机微机监测中,自动盯控电路中的关键电压值,从而进一步提高故障自动诊断效率,并加强监测中的预警功能。

参考文献

- [1] 崔明松. 交流转辙机八线制道岔控制电路故障诊断分析方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 191.
CUI Mingsong. AC switch machine eight-wire turnout control circuit fault diagnosis and analysis method[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 191.
- [2] 张希宁. ZDJ9 型转辙机道岔启动电路技术改进方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(8): 40.
ZHANG Xining. Improvement plan of starting circuit of ZDJ9 type switch machine[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(8): 40.
- [3] 刘俊杰. ZDJ-9 型交流道岔转辙机故障智能识别方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(4): 262.
LIU Junjie. Intelligent identification method for ZDJ-9 AC turnout switch machine faults [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(4): 262.

· 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-05-31 出版日期:2024-11-10
Received:2024-03-18 Revised:2024-05-31 Published:2024-11-10
· 通信作者: 颜韵飞, 高级技师, 307117288@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 156.

- [3] 张郁. 上海城市轨道交通超大规模网络化下通信及信号设备的管理与转型[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 1.
ZHANG Yu. Management and transformation of signaling communication equipment under super-large-scale network of Shanghai urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 1.
- [4] 王历珩. 上海城市轨道交通既有数据通信子系统优化研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 41.
WANG Lizhou. Optimization research of Shanghai urban rail transit existing data communication subsystem[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 41.

· 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-05-20 出版日期:2024-11-10
Received:2024-03-18 Revised:2024-05-20 Published:2024-11-10
· 通信作者: 王欣, 助理工程师, 419694520@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license