

上海城市轨道交通既有数据通信子系统优化研究^{*}

王历珩

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘 要 DCS(数据通信子系统)为 CBTC(基于通信的列车控制)信号系统内其他子系统提供安全、可靠的数据交换服务,是 CBTC 的通信基础。对上海城市轨道交通 CBTC 信号系统线路进行了研究,首先介绍了既有 DCS 的功能和基本网络架构,阐述了 DCS 在 CBTC 系统中的重要性;然后结合实际城市轨道交通信号项目的现状,分析了既有 DCS 在上海城市轨道交通系统中的应用及存在的问题,提出了 DCS 在冗余性、网络性能和可扩展性的优化方案,建立优化后的 DCS 网络架构;最后,结合研究成果,指出了未来 DCS 的发展方向。

关键词 城市轨道交通; 基于通信的列车控制; 数据通信子系统; 可靠性; 系统优化

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.010

Optimization Research of Shanghai Urban Rail Transit Existing Data Communication Subsystem

WANG Lizhou

Abstract DCS (data communication subsystem) provides safe and reliable data exchange services for the other subsystems in the CBTC (communication-based train control) signaling system, which is the communication basis of the entire CBTC system. Research is carried out on Shanghai urban rail transit CBTC signaling system. Firstly, functionality and basic network architecture of the existing DCS are introduced, and the importance of DCS to the CBTC system is expounded. Then, considering the current situation of actual urban rail transit signaling projects, the application and existing problems of current DCS in Shanghai urban rail transit signaling system are analyzed, and optimization plan for DCS in redundancy, network performance and scalability is put forward, and optimized DCS network architecture is established. Finally, combined with the previous analysis results, future development direction of DCS is explained.

Key words urban rail transit; CBTC; DCS; reliability; system optimization

Author's address Telecom & Signaling Branch, Shanghai

Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China

CBTC(基于通信的列车控制)系统是一种基于车地无线通信的列车控制系统。移动中的列车通过车载无线 MR(移动电台)接入轨旁 DCS(数据通信子系统)无线网络,建立车地无线通信通道。列车 VOBC(车载控制器)和轨旁 ZC(区域控制器)、ATS(列车自动监控)服务器通过车地无线通道进行双向、实时的数据交互,VOBC 将列车位置、车速、车次号等信息实时上报给 ZC、ATS;ZC、ATS 开始追踪列车,并发送移动授权、最高限速等命令给 VOBC,控制列车在轨道上的移动。与传统的列车控制系统相比,CBTC 系统的列车发车间隔更小,列车的开行密度更大,所以运输效率也更高。

1 DCS 的组成及性能

1.1 既有 DCS 网络的组成

既有 DCS 网络可分解为 3 部分:①轨旁有线网络,负责车站、运营控制中心(OCC)、车辆段、试车线等轨旁区域信号设备的接入和数据交互;②车地无线网,负责轨旁信号设备和车载信号设备的数据交互;③车载有线网络,负责车载信号设备的接入和数据交互。

1.2 DCS 的性能要求

对于 CBTC 系统而言,DCS 是一个透明的传输子系统,其任务是传输行车控制数据。如果某列车在行驶过程中 DCS 发生故障,列车车载信号子系统与轨旁信号子系统会丢失通信,后续列车运行将会受到影响。因此,DCS 的稳定性直接决定了整条线的运行效率。DCS 运行的稳定性通常通过以下方面来保证:

1) 冗余的网络架构设计。即在设计网络架构时充分考虑冗余性,包括冗余的接入层、冗余的分布层和冗余的核心层,以确保网络发生单点故障或

^{*} 上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1205802)

多点故障时,关键数据的传输不会中断。

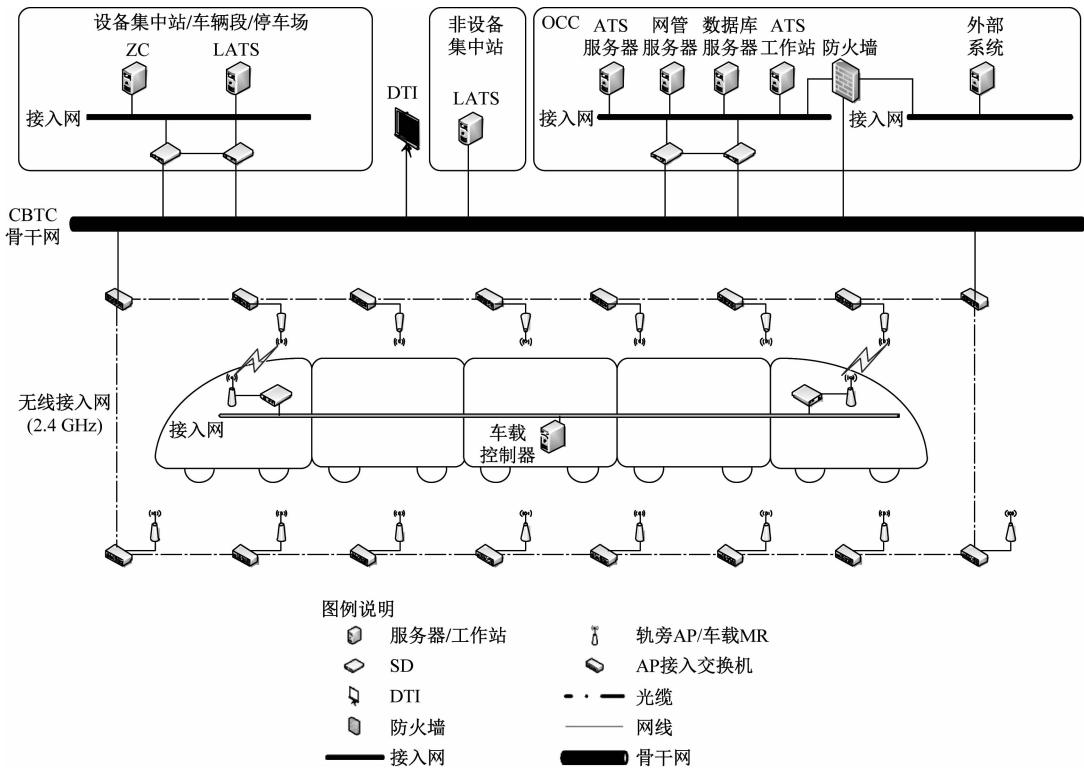
2) 稳定的数据传输性能。包括 DCS 有线和 DCS 无线的吞吐率、时延、丢包率等性能参数,以充分满足信号系统的运行需求。

3) 可靠的网络安全机制。即需要确保列车行车控制数据在传输过程中不会被篡改,非法的网络入侵会被隔绝在 DCS 网络之外,接入 DCS 网络的终端/用户都是经过 DCS 认证的合法终端/用户。

2 上海城市轨道交通既有 DCS 介绍

上海轨道交通 8 号线是上海第 1 条部署 CBTC

系统的线路。目前,上海城市轨道交通线网中,除了 1 号线、3 号线、4 号线外,其余线路的信号系统均采用 CBTC 系统。在后续的线路信号系统改造项目以及新线建设项目中,在保持各家信号供应商的架构特性基础上,上海城市轨道交通将对 DCS 的高冗余性、高可靠性及高吞吐量提出新的要求。本文以上海轨道交通 6 号线、7 号线、8 号线、9 号线等线路为例,对既有的 DCS 架构进行分析,如图 1 所示。在此基础上研究下一代 DCS 架构的搭建,以满足上海城市轨道交通高密度、零故障的运营需求。



注:LATS——集中站的监控系统;DTI——发车指示器;SD——安全设备;AP——接入点;MR——移动广播。

图 1 上海城市轨道交通线路既有 DCS 的网络架构示意图

Fig. 1 Illustration of current DCS network architecture of Shanghai rail transit lines

2.1 既有 DCS 网络架构的特点

2.1.1 接入层网络

接入层网络包括轨旁有线接入网、轨旁无线接入网和车载有线接入网 3 部分。

1) 轨旁有线接入网。轨旁有线接入网需要接入网络的终端,使用冗余的物理网口连接至 2 台冗余的接入交换机。在网络终端使用链路捆绑技术将 2 个物理接口捆绑成 1 个虚拟接口后对外通信。在正常情况下,主用链路激活,备用链路后备;当主用链路故障情况时,备用链路会接替主用链路继续收发数据,以确保通信业务不被中断。

2) 轨旁无线接入网。轨旁无线接入网使用 2.4 GHz 频段,通过基于 FHSS (跳频扩频) 技术的 AP 实现轨旁无线覆盖。轨旁 AP 采用冗余部署方案,即第 n 个 AP 的信号可以覆盖到第 $n+2$ 个 AP 点,在列车运行轨道的任意一处,列车任意一端都有至少 2 个信号强度满足要求的 AP 信号,从而确保了单点的 AP 故障不会导致信号盲区的出现,如图 2 所示。

3) 车载有线接入网。VOBC 为 2oo3 (2 out of 3, 即 3 取 2) 架构,车载信号设备主设备安装列车带司机室拖车的 TC1 端 (又称 A 端)。2 套 DCS 设

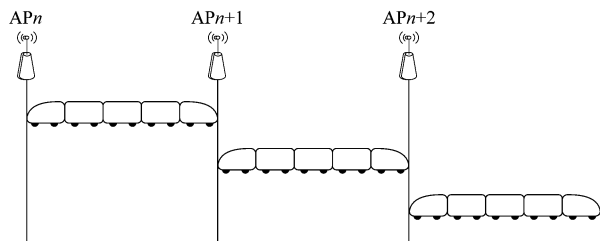


图 2 轨旁 AP 的冗余覆盖示意图

Fig. 2 Illustration of redundancy coverage of wayside AP

备分别安装在列车的 TC1 端和 TC2 端(又称 B 端)。VOBC 通过冗余的 2 条 FHSS 车地无线链路(含车载电台 + 车载 SD)分别部署,与轨旁 ZC、ATS 交换数据。这 2 条链路上传输的数据完全相同,单条链路故障不影响另 1 条链路的数据传输。

2.1.2 分布层网络

分布层网络使用 SD 作为安全网关,其中:“安全”的意思是 SD 运行了 IPSec(IP 安全)功能,即在 IP(互联网协议)层面对进出 SD 所属区域的业务流量进行加密、解密、鉴权及完整性校验,同时对不合法的流量进行过滤;“网关”的意思是 SD 属于 3 层设备,具备路由功能,可以对终端提供网关服务。

SD 主要部署于轨旁集中站、OCC 和车载等区域,不同区域的 SD 间需使用 CA(认证授权)证书进行相互认证。使用认证的证书来自同一台 CA 服务器,只有经过认证的 SD 之间才能相互信任,建立 IPSec 链接。

SD 按照物理位置可以分为轨旁 SD 和车载 SD。其中:轨旁 SD 工作于集群主备模式,主机故障时备机会接替主机继续工作;车载 SD 工作于单机模式,在车载 A 端和 B 端各部署 1 台,2 台车载 SD 并行工作,单机故障不影响另一台的正常运作。

2.1.3 核心层网络

CBTC 骨干网由 100 Mbit/s 的 2 层交换机组成,这些交换机以环形方式互连,以实现冗余。交换机运行环形解析协议。根据此协议,环网中的 1 台交换机被配置为 RM(冗余管理器)。配置为 RM 的交换机将自身的 1 个环网端口设为禁用,从而使环网中的 1 条链路处于备用状态,这样在骨干网中不会产生任何环路。在单点故障时,如链路或交换机故障的情况下,RM 将激活禁用的端口,从而在 500 ms 内启用备用链路。这意味着在发生交换机或链路故障的情况下,DCS 仍然可以保持骨干网内的通信。

2.2 既有 DCS 网络架构待优化问题

1) 冗余性问题。主要包括:①采用单套无线网;②轨旁 SD 为分散式部署;③采用单骨干网。

2) 网络性能问题。主要包括:①骨干网吞吐率(100 Mbit/s)和无线网吞吐率(1 Mbit/s)均偏低,无法承载更多的应用;②列车运行的轨道沿线的电磁环境日趋恶化,充斥着大量的 2.4 GHz 同频干扰信号,这些密集部署且工作在不同 2.4 GHz 信道的同频干扰设备对基于 2.4 GHz 的 DCS 产生一定的干扰。

3) 车载网络的扩展性问题。在以太网已经成为主流的当下,车载 CAN(控制器局域网)需要整体向以太网方向改造。

3 优化的 DCS 网络架构

针对既有 DCS 存在的问题,本文在冗余性、网络性能等方面对 DCS 的架构进行了优化。如图 3 所示,优化后的 DCS 网络架构是一个高度冗余的架构。

3.1 冗余性

1) 骨干网。使用多重骨干网代替既有单骨干网,以解决既有网络骨干网缺乏冗余的问题。多重骨干网包括 4 部分:①ATP 骨干网,用以承载行车控制相关的 ATP 流量;②ATS 骨干网,用以承载列车监控相关的 ATS 流量;③FHSS 骨干网,用以承载流经 FHSS 无线系统的车地通信流量;④LTE(长期演进)骨干网,用以承载流经 LTE 无线系统的车地通信流量。不同类型的业务流量在不同的骨干网上传输,相互之间不会相互影响。同时,针对 ATP 骨干网、ATS 骨干网发生骨干网故障后可能会导致 ATP 业务流、ATS 业务流中断的情况,优化后的 DCS 引入了“双网切换机制”,即如果 ATP 骨干网故障了,ATP 业务流会顺畅切换到 ATS 骨干网;如果 ATS 骨干网故障了,ATS 业务流会顺畅切换到 ATP 骨干网。

2) 无线网。使用“LTE-M 和 Wi-Fi”双制式网络代替既有 DCS 的单 FHSS 无线网架构,解决了既有 DCS 无线网缺乏后备的问题。同时,LTE 无线系统采用“A/B 网”架构设计,以进一步提升无线网的冗余性,车地无线链路数量由既有 DCS 的 2 条 FHSS 链路增加到了 4 条(新增了 2 条 LTE 链路)。优化后 DCS 的 VOBC 可以同时通过这 4 条无线链路与轨旁 ZC、ATS 做数据交互,任意 1 条或者多条链

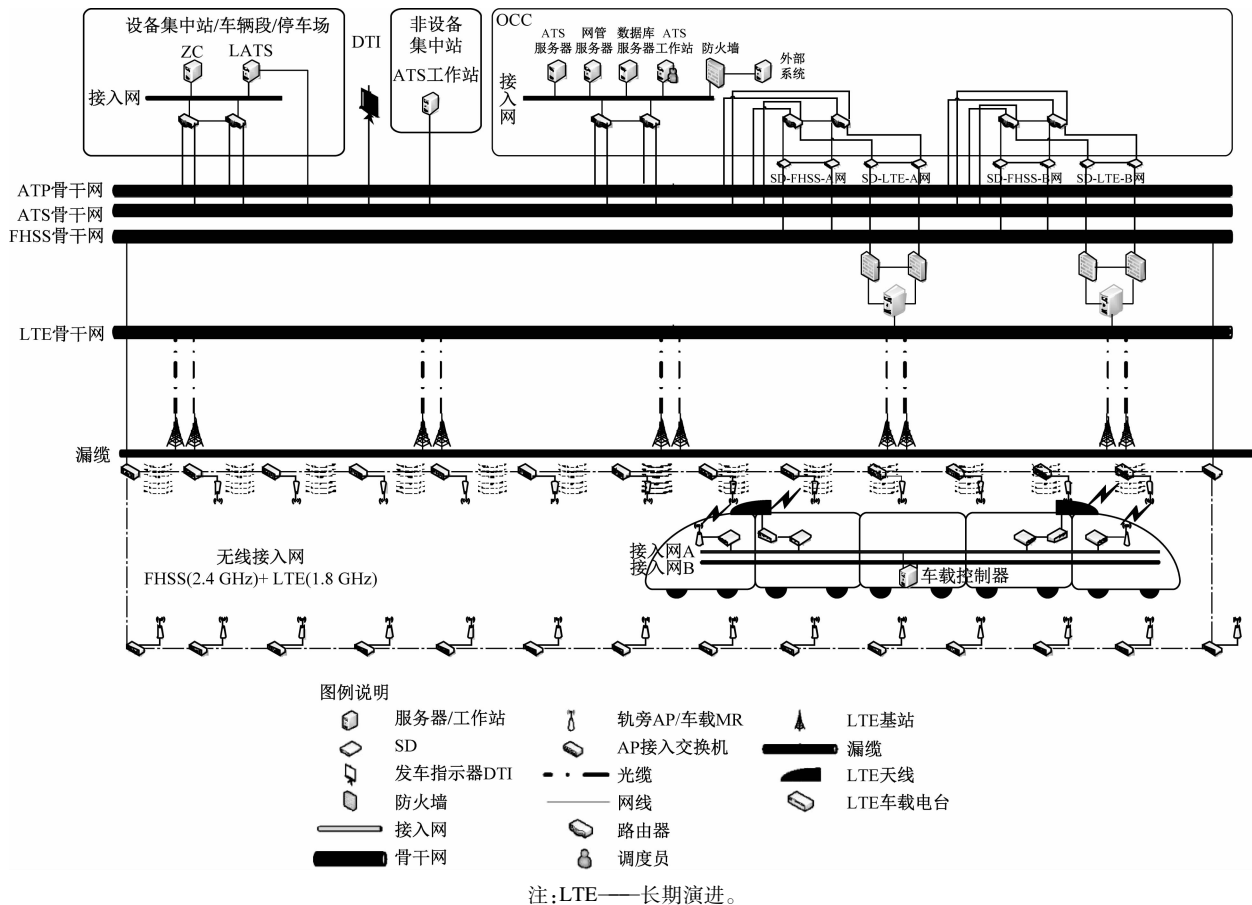


图3 优化后的DCS系统架构示意图

Fig. 3 Illustration of optimized DCS system architecture

路故障不影响数据传输,只要有1条链路正常,列车就不会和轨旁丢失通信。

3) SD。轨旁SD使用“集中化A/B网部署”方式代替既有DCS网络“分散式部署”,其中:“集中化”是指将所有的轨旁SD集中到OCC进行集中维护,以降低了维护难度;“A/B网”是指针对车载SD分A端和B端的架构,轨旁SD分为A组和B组,轨旁A组的SD只负责和A端的车载SD通信,轨旁B组的SD只负责和B端的车载SD通信。A组和B组的SD物理隔离,单组SD故障不会导致车地通信的丢失。

3.2 网络性能

1) 有线部分。优化后的DCS网络的骨干网吞吐率由100 Mbit/s升级为1 Gbit/s,车载网络使用100 M的车载以太网交换机代替CAN总线,车载信号设备内部网络通信的带宽得到很大提升。

2) 无线抗干扰。优化后的DCS新引入LTE无线系统。与2.4 GHz频段相比,该系统使用1.8 GHz专有频段,专网专用,干扰问题较少,理论上可

大幅提高DCS的无线抗干扰能力。

4 DCS未来的发展方向

优化后的DCS网络架构是基于既有DCS网络架构演化而来,主要针对既有网络的冗余性、网络性能和可扩展性三方面进行了优化。在未来,优化后的DCS架构还可以进一步在以下方面进行优化:

1) 将DCS整体过渡到A/B网架构。如图4所示,A/B网架构的优势是A网和B网并行工作,并行传输数据,不存在双网切换,因而不存在切换时延;双网物理隔离,单网故障不会传导到另外一张网上。鉴于A/B网架构上述的优点,目前A/B网架构已经成为信号DCS的主流网络架构。优化后的DCS架构在车地通信网层面是A/B网架构,列车A端和B端与轨旁系统的通信走相互独立的通道,在轨旁有线网层面则采用“ATP+ATS双网切换”架构。未来DCS的车地无线网和轨旁有线网在架构方面将趋于一致,可整体过渡到A/B网架构。

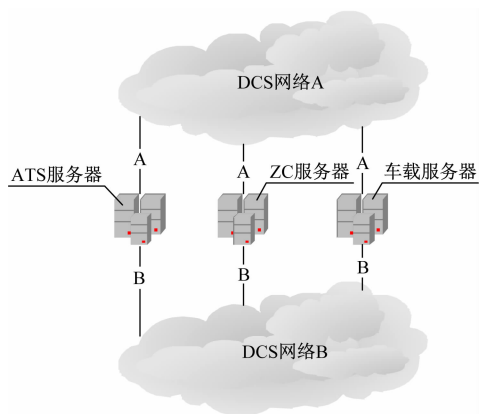


图 4 优化后 DCS 的 A/B 网网络架构示意图

Fig. 4 Illustration of A/B network architecture in optimized DCS

2) 将部分 DCS 设备异地部署。既有 DCS 中,与车地通信相关的轨旁 SD、LTE 设备全部部署在 OCC。优化后的 DCS 车地通信网部分为 A/B 网架构,A 端和 B 端完全独立,与列车 B 端通信相关的轨旁交换机、SD、LTE 等设备可以考虑拆分出来异地部署,如 A 端设备部署在 OCC、B 端设备部署在车辆段。这样部署后,任意一处设备发生故障,轨旁 ZC 和 VOBC 都不会丢失通信。

3) 应对目前 LTE 频谱资源有限问题。LTE 所使用的 1.8 G 频段,可用于城市轨道交通的频率范围为 1 785 ~ 1 805 MHz,带宽 20 MHz,频谱资源有限,获取频段难度很大。以上海轨道交通 5 号线为例,该线的信号业务只申请到 5 MHz 带宽,虽然可以满足信号业务需求,但是有限的频谱带宽限制了后续新增业务的扩展。DCS 会考虑在后续的项目中采用新技术来解决频谱资源受限的问题,如引入 5G(第 5 代移动通信技术)等。不同于 4G(第 4 代移动通信技术),5G 在通信带宽、传输时延、信息传递可靠性和安全性等方面都有显著的优势,使用 5G 网络承载城市轨道交通信号业务将会是未来发展的大趋势。因此,可以在当前阶段,积极对基于 5G 的 DCS 演进进行探索和技术储备。

上述几点是从网络架构、系统性能 2 个方面对优化后 DCS 网络提出的优化方案。未来 DCS 的基本任务依然是行车控制数据的可靠传输,优化 DCS 的网络架构、提升 DCS 的网络性能都需要围绕这个基本任务来开展。在网络架构趋于稳定、网络性能充分满足信号系统需求之后,DCS 还需要在运营稳

定性方面下功夫,既有 DCS 的故障解决流程如图 5 所示。尝试将目前的运维工作由被动运维转为主动运维,在故障发生之前就能发现存在的故障隐患并及时处理,在故障发生后可自动定位故障并出具故障分析报告,这样可以大大提升运维效率,将 DCS 故障对运营的影响降到最低。

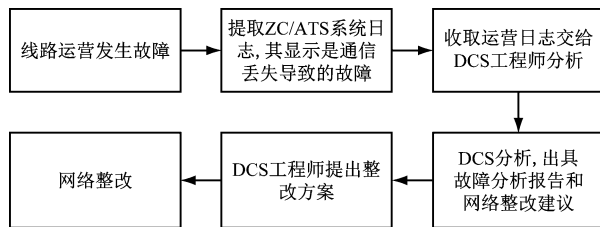


图 5 既有 DCS 的故障处理流程

Fig. 5 Fault handling procedure of current DCS

5 结语

信号系统承担着城市轨道交通高效运营的重任。由于信号的数据传输故障会对运营造成重大影响,因此信号系统演进的核心目标之一是涉及运营的关键功能“零失效”。为提高设备的稳定性与可靠性,需通过多模冗余的架构设计来实现关键设备单系故障不导致整体失效、故障设备和冗余设备间实现无缝切换,以达到对运营不造成显性影响的目的。

参考文献

- [1] 刘会明,陶伟. 基于跳频扩频技术的无线 CBTC 系统的抗干扰能力测试[J]. 城市轨道交通研究,2014(增刊 2):10.
LIU Huiming, TAO Wei. Anti-interference ability test of wireless CBTC system based on FHSS technology[J]. Urban Mass Transit, 2014(S2):10.
- [2] 卢晓宇. 基于 802.11 + FHSS 标准的无线 CBTC 系统高速漫游研究及测试[J]. 城市轨道交通研究,2014(增刊 2):34.
LU Xiaoyu. Test on the high-speed roaming of CBTC Based on 802.11 + FHSS radio system[J]. Urban Mass Transit, 2014(S2):34.
- [3] 刘建. 上海轨道交通 5 号线 LTE 系统方案设计与部署[J]. 城市轨道交通研究,2019(11):160.
LIU Jian. Design and deployment of LTE system on Shanghai rail transit line 5[J]. Urban Mass Transit, 2019(11):160.
- [4] 陶小婧. CBTC 无线通信传输技术的改进与使用 LTE 技术的可行性分析[J]. 城市轨道交通研究,2014(增刊 1):8.
TAO Xiaojing. Improvement of CBTC wireless communication technology and analysis of LTE technical feasibility[J]. Urban Mass Transit, 2014(S1):8.

(收稿日期:2021-04-27)