

# 移动通信网络架构演进规律对列车运行控制系统发展的启示

韩涛<sup>1,2</sup> 李翀<sup>1,2</sup> 王冬海<sup>1,2</sup>

(1. 上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心, 200071, 上海; 2. 卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海 // 第一作者, 高级工程师)

**摘要** 根据城镇化发展需要以及电子信息系统发展规律, 列车控制系统一直在探索实践中发展。作为列车控制系统基础的移动通信网络, 其内在发展规律和已有实践成果, 对列车控制系统有较高借鉴参考价值。通过研究从 2G 到 5G 的移动通信网络架构演进以及关键接入设备结构功能变化, 归纳总结移动通信网络演进规律, 即结构扁平化、功能前置化以及平台虚拟化。运用该规律对以列控联锁一体化为代表的实践进行解释, 并提出可能的发展趋势, 包括感知决策执行端直通以及业务功能向车载转移。

**关键词** 列车运行控制系统; 移动通信网络; 网络架构演进  
**中图分类号** U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.04.016

## Enlightenment of Mobile Communication Network Evolution on Train Control System Development

HAN Tao, LI Chong, WANG Donghai

**Abstract** According to the needs of urbanization and the development of electronic information systems, train control system develops through exploration and practice. As the basis of train control system, mobile communication network has a high reference value for train control system in aspect of its inherent development pattern and practical achievements. By studying the evolution of mobile communication network architecture from 2G to 5G, and the structure and function changes of radio access network, the evolution pattern of mobile communication network is summarized: structural flattening, function prefabrication and hardware virtualization. This pattern is used to explain the practice represented by the integration of interlocking

and train control, and possible development trend is proposed, including the perception of direct connection at the execution end of decision-making and transferring business functions on-board.

**Key words** train operation control system; mobile communication network; network architecture evolution

**First-author's address** Shanghai Engineering Research Center of Driverless Train Control of Urban Guided Transport, 200071, Shanghai, China

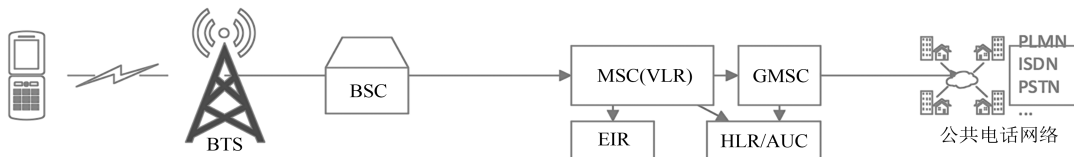
现代移动通信网络系统, 尤其数字移动通信系统是近 30 年来发展最好、规模最大的商用信息化系统。截至 2019 年, 全球范围内的独立移动用户数约为 52 亿, 其中我国的独立移动用户数约为 12 亿。本文回溯了第 2 代移动通信(2G)网络到第 5 代移动通信(5G)网络的演进发展, 从技术视角比对其代际发展中网络架构的差异, 分析归纳移动通信网络演进规律, 以期对列车运行控制系统(以下简称“列控系统”)的发展提供有益启示。

## 1 移动通信网络

现代移动通信网络, 通常指服务公共的商用移动通信网络。其结构主要分为终端、接入网(RAN)及核心网等 3 个部分。

### 1.1 网络总体架构的演进

2G 网络系统通常指 GSM(全球移动通信系统)系统及 CDMA(码分多址)系统。其中 GSM 的网络架构如图 1 所示。

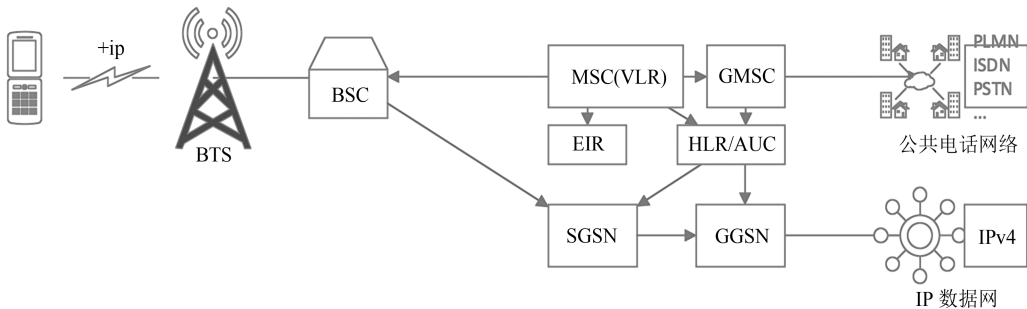


注: BTS——基站收发台, 简称基站; BSC——基站控制器; MSC——移动交换中心; VLR——访问归属寄存器; EIR——设备标识寄存器; HLR——归属位置寄存器; AUC——鉴权中心; GMSC——网关移动交换中心; PLMN——公共陆地移动网; ISDN——综合业务数字网; PSTN——公共交换电话网。

图1 GSM 的网络架构

在 2G 发展过程中衍生出的 2.5G(第 2.5 代移动通信)网络,提供了基于 IP(网际互连协议)的数

据通信能力。2.5G 网络架构如图 2 所示。

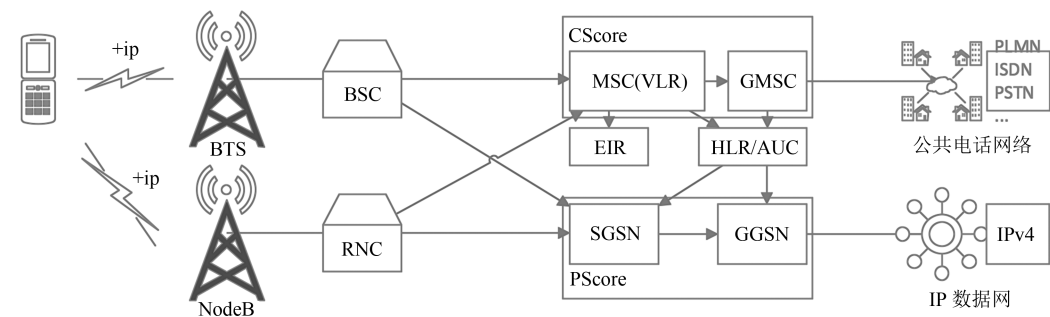


注: SGSN——服务 GPRS (通用无线分组业务) 支持节点; GGSN——网关 GPRS 支持节点; IPv——网际协议版本。其余同图 1。

图 2 2.5G 网络架构

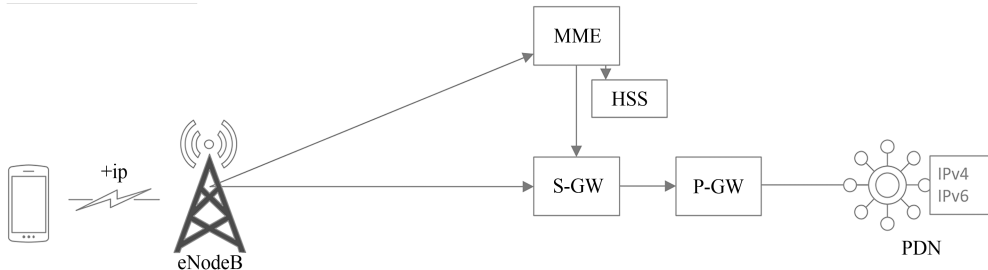
3G(第 3 代移动通信)网络系统一般指基于 WCDMA(宽带码分多址)技术的 UMTS(通用移动通信系统)、CDMA2000 系统及 TD-SCDMA(时分同步码分多址)系统。WCDMA 系统的网络架构(含 2G 部分)如图 3 所示。

4G(第 4 代移动通信)网络系统通常指 LTE(长期演进)系统(主要指 TD-LTE 系统,分时长期演进系统),以及 WiMAX(全球微波接入互操作性)系统。2009 年建成运行的第 1 张商用 LTE 网络架构如图 4 所示。



注: NodeB——3G 移动基站,通常直接采用英文称呼; CS Core——电路域核心网; PS Core——分组域核心网; 其余同图 1、图 2。

图 3 3G 网络架构(含 2G 部分)



注: eNodeB——演进 NodeB; MME——移动管理实体; HSS——归属签约用户服务器; S-GW——服务网关; P-GW——PDN 网关; PDN——公共数据网。

图 4 4G 网络架构

与 3G 网络架构不同,4G 网络在接入网一侧有显著变化,其取消了 BSC 及 RNC(无线网络控制器),将基站直接接入核心网。

复用的全新空口 5G 标准)网络系统。其网络架构如图 5 所示。由图 5 可见,核心网一侧划分的功能更为细致,主要得益于硬件虚拟化技术。

5G 网络系统一般是指 5G-NR(基于正交频分

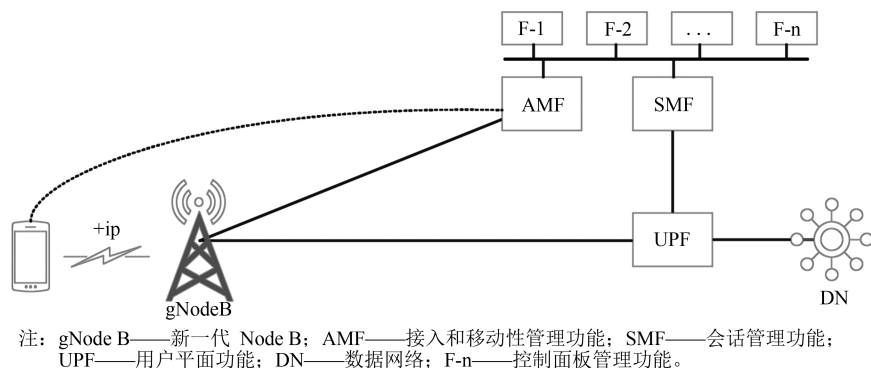


图 5 5G 移动通信网络架构

### 1.2 接入网结构的演进

接入网(RAN)是手机等终端用户接入网络的部分。通信系统代际也多按 RAN 的代际来划分。RAN 的演进更能反映移动通信网络演进变化的内在规律。

3G 网络的 RAN 发展可划分为 3 个阶段:初期为 RAN、中期为 D-RAN(分布式 RAN),后期为 C-

RAN(集中式 RAN)。不同时期的 3G 网络 RAN 架构如图 6 所示。在初期 RAN 的基础上, D-RAN 通过分离 BBU(基带处理单元)和 RRU(射频拉远单元)部分,实现了 RRU 的光纤拉远。C-RAN 在 D-RAN 的基础上,实现了 BBU 部分的资源池化,从物理层面集中了 BBU。

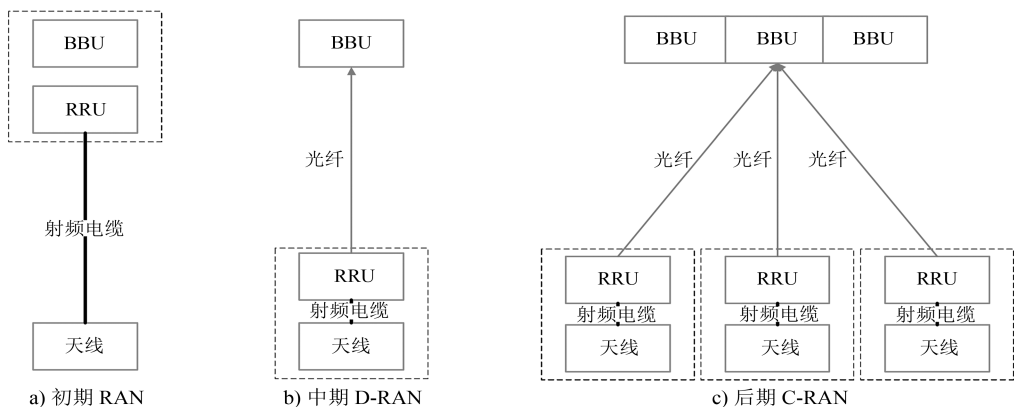


图 6 3G 网络的 RAN 架构

相比于 3G 网络的 RAN,4G 网络 RAN 的 BBU 虚拟化,实现了从硬件资源池到软件定义的演变,有利于资源的高效利用以及新功能的协同引入。

5G 网络的 RAN 将 BBU 和 RRU 的功能融合后重新拆分给 AAU(有源天线单元)及 CU+DU(集中单元和分布单元),此外,满足低延时需求及 D2D(端到端业务)需求,部分原属于核心网的功能也转至 RAN。例如,图 7 中的 MEC(移动网络边缘计算平台),以更短的信息路径来保证更低的延时,使业务服务能力更接近用户。

### 1.3 网络架构的演进规律

由总体架构的演进及 RAN 结构的变化,归纳总结出移动通信网络架构的演进规律:

1) 结构扁平化。包括功能的融合合并。3G 网

络发展到 4G 网络后,取消了基站控制器设备(BTS 及 RNC),将基站直接接入核心网,实现了结构上的扁平化演进。4G 网络的 RAN 将 RRU 与 BBU 功能融合,将 BBU 部分从资源池演进到 Cloud(云)-BBU,将 RRU 融合天线一体化成为 AAU。

2) 功能前置化。为了实现更低通信延时以及 D2D 直通功能,基于场景需要,4G 网络将原核心网部分功能下沉,并使之在 RAN 一侧实现,从而使功能更靠近终端用户,实现了功能前置化。

3) 平台虚拟化。在 4G 网络的核心网部分,通过设备集中及网络功能细化,使用 NFV(网络功能虚拟化)技术在通用的集中化平台实现了更为细致的通信网络系统功能,即基于同一个硬件平台实现了不同软件的功能。

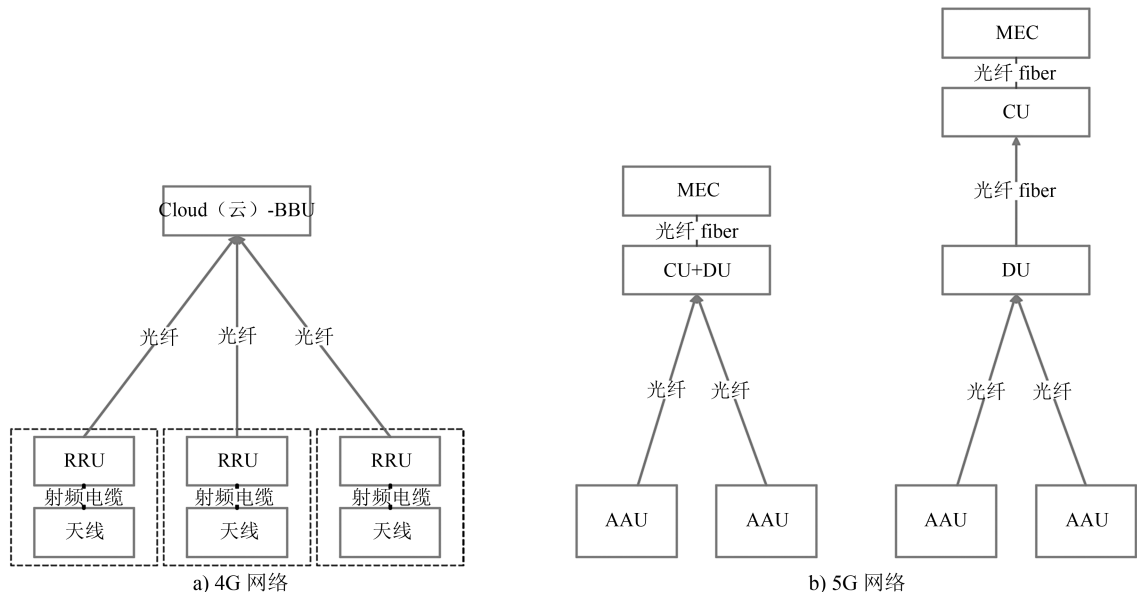


图 7 4G/5G 接入网 C-RAN 架构

不同代际移动通信网络的架构演进带来显著的性能提升,体现在终端的网络吞吐量的增大以及切换性能的提高,尤其是大幅降低了通信延迟。以 3G 网络到 4G 网络为例,取消 RNC 后,网络延时从 3G 网络后期的 100~200 ms 降低至 4G-LTE 网络的 40~50 ms,降幅超过 50%<sup>[1]</sup>。

## 2 基于通信的列控系统结构

列控系统的服务目的是满足运输需求。依据服务对象的不同,列控系统可分为铁路列控系统及城市轨道交通(以下简为“城轨”)列控系统。CTCS(中国列车运行控制系统)-3 级列控系统为典型基于通信的铁路列控系统,而 CBTC(基于通信的列车控制)系统为常用的城轨列控系统。

### 2.1 铁路 CTCS-3 级列控系统结构

CTCS-3 级列控系统是以 GSM-R 为通信网络的列控系统,向下兼容 CTCS-2 级列控系统。其主要设备及架构如图 8 所示。

### 2.2 CBTC 系统

CBTC 系统在早期主要以 WiFi(无线网络)系统作为车地通信网络,后来逐步用 LTE-R(LTE-Railway)技术来实现车地通信。不同设备供应商的 CBTC 系统架构类似。典型 CBTC 系统架构如图 9 所示。随着城市轨道交通建设规模的发展,运营需求逐步提高,不同线路的 CBTC 系统间有互联互通的需求。

CBTC 列控系统主要包括车载子系统、轨旁设备及联锁设备等,并在控制中心设置中心 ATS(列

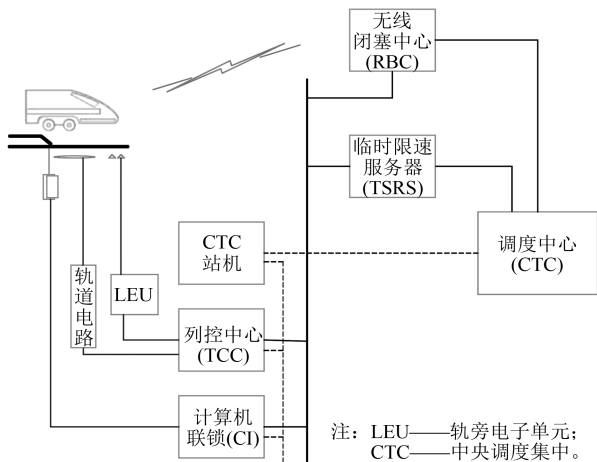


图 8 CTCS-3 级列控系统架构示意图

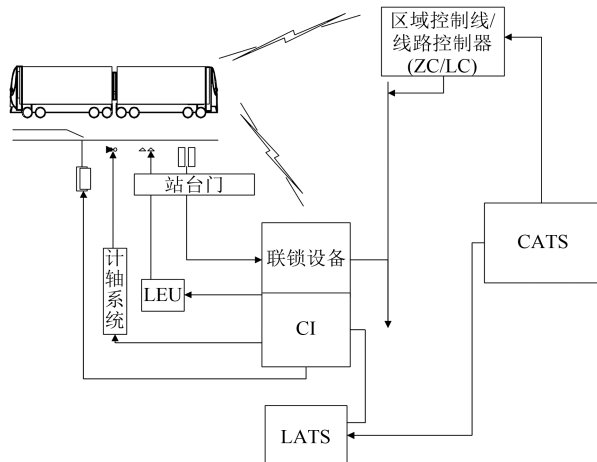


图 9 城轨 CBTC 系统架构示意图

车自动监控)设备。

### 3 列控系统的发展趋势

列控系统的演进方向必须与运输系统的目标一致:首先,要保证整个运输过程中的安全可靠,是列控系统的最根本要求;其次,更快更灵活地完成运输过程,是整个运输系统对效率的核心诉求。列控系统的发展过程可借鉴移动通信网络的演进实践经验。

#### 3.1 列控系统与通信系统的关系

在铁路系统诞生的初期,列车运行控制主要通过旗语及火把等视觉信号,以及和“响墩儿”等声学信号来向司机传递信息,其实质就是原始通信。

后来,列控系统开始采用专用的通信方式来传递信号。电报技术<sup>[2]</sup>、数字轨道电路技术及有源应答器技术先后服务于列控系统专用通信。

可见,列控系统和通信系统的本质相同。二者都是要高效地实现信息快速传输和处理。因此,移动通信网络的发展规律天然适用于列控系统。

1999 年发布的 IEEE.1474 标准将商用通信系统独立出来,并提出了 CBTC 系统的概念,淡化了列控系统和通信系统的实质区别。

#### 3.2 列控系统的功能

在列控系统中,联锁是最早实现的功能,主要解决铁路系统中的碰撞等安全问题,其引入“闭塞”概念,采用相应的技术手段来改善运输效率。回溯列控系统发展,无论是 CI(计算机联锁)系统、CTC(铁路列控)系统、TCC(城市轨道交通指挥中心)系统等特定功能子系统引入的先后顺序,还是从“固定闭塞”到“移动闭塞”的概念发展,都是在安全的前提下,围绕提高运输效率这一核心目标的技术演进过程。如果列控系统控制的列车有更高的旅行速度和更多的在线运行列车数,就更容易实现提高效率这一目标。

列控系统模型可简化为列车对线路的运用。相应的,列控系统的设备和子系统主要功能有:①对线路的操作,如状态采集、联锁子系统对道岔转辙机的直接操作等;②对线路的使用决策,如调度子系统对整体资源规划决策、联锁子系统对前方占用区段通过禁止信号来防护、无线闭塞中心给车载子系统的移动授权、车载系统在安全授权范围内决策资源应用等。

表 1 为列控系统设备及子系统的主要功能分

配。CTC 系统或者 ATS 系统是典型的决策执行系统,在此不作统计。

表 1 列控系统设备及子系统的主要功能分配

铁路列控	城轨 CBTC	操作	决策	备注
车载系统	车载设备		√	
RBC	ZC/LC		√	
TSRS	LC		√	
TCC	无	√	√	*
CI	CI	√	√	**

注: \* ——TCC 中心向 RBC 转发 CI 发送的信息部分,可看作 CI 功能延伸; \*\* ——作为备用模式时,偏操作属性。

由表 1 可见,多个轨旁(地面)子系统参与了线路的使用决策。进一步跟踪可以发现,有一些决策功能是重复的。比如,在 CTCS-3 系统中,列控中心和无线闭塞中心同时对线路使用进行决策,并通过不同的信息通道传递上车。可见,从系统服务可用性角度来说,减少硬件设备可更好地保障系统服务可靠。

#### 3.3 列控系统发展趋势可能性

本文基于移动通信网络架构的演进规律,探讨列控系统发展趋势的可能性。

##### 3.3.1 基于结构扁平化的发展可能性

结构扁平化是减少信息交互过程跨越节点的方法。铁路列控系统联锁一体化(TIS)项目的实质就是结构扁平化。在城轨列控系统中,车载设备之间直接交互信息,也是结构扁平化的体现。借鉴相关经验,将控制中心→轨旁(地面)设备→车载设备的 3 层通信结构进一步扁平化,是可以探索研究的。进一步融合调度系统功能到列控系统之中,实现从现在 3 层结构到 2 层结构转换。移动通信网络和列控系统发展可以互相借鉴,列控系统的业务需要也是网络的用户需求。列控系统自身对移动通信系统也有新的要求,比如在结构扁平化的演进中,通信网络是否可以在结构上实现列控系统设备端到端的直连,这些也需要在移动通信系统演进过程中予以考虑。

##### 3.3.2 基于功能前置化的发展可能性

功能前置化的目的是通过调整功能来改善信息节点交互,使功能的直接使用者直接使用该功能。例如,在列控系统中,列车进路办理的既有做法是:轨旁子系统申请进路操作成功后,将相关信息发送给列车;列车再按照指令进路。在科技部的研究课题“基于动态间隔的运能可配置列车运行控

制系统”中一项“联锁上车”(原联锁子系统部分功能移至车载子系统)就是功能前置,结合表 1,可将部分功能向车载子系统进一步前置。

3.3.3 基于平台虚拟化的发展可能性

移动通信网络设备规模庞大,促进了从专用设备转换为通用设备的需求,催生了虚拟化功能,将原来跨平台的硬件交互,转变为同平台内的软件交互,消除了外部通信周期(秒级),实现了运算周期内交互(毫秒级)。

受设备规模限制,列控系统自身的平台虚拟化存在一定压力,但可以从技术的角度进行探索。从云化应用非安全系统,到基于容器或虚拟主机进行的安全结构探索(虚拟 MooN),都是平台虚拟化的尝试。在平台虚拟化的基础上,列控系统扩容及新功能部署会更有利于全自动无人驾驶列控系统的发展。

3.4 列控系统发展趋势

基于移动通信网络架构的演进规律来分析列控发展趋势过程,可以为从技术角度抽象梳理列控系统功能及进行功能重配置提供清晰的思路。不仅能作为正在进行的研发实践及科学研究提供例证,也能为正在进行的功能研究提供上述演进规律的实践运用。可见,列控系统向结构扁平化、功能前置化及平台虚拟化趋势的发展是可能的。

4 结语

当前,在列控系统的发展中,研发实践及科研探索的方向均可适用移动通信网络架构演进规律来解释。这证明了移动通信网络架构演进规律对

列控系统发展趋势判断的可借鉴性。列控系统的技术演进方向也指向结构扁平化、功能前置化及平台虚拟化。其最终目的是使列控系统更好地发展,使其能更加安全灵活高效地支撑运输服务。

参考文献

[ 1 ] ILYA G. High performance browser networking: What every web developer should know about networking and web performance[ M]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2013.

[ 2 ] VINCZE B, TARNAI G. Evolution of train control systems [ C]//European Rail Research Network of Excellence. 14th International Symposium EURNEX-ZEL. Zilina: EURNEX, 2006.

[ 3 ] GSM Association. GSMA Mobile Economy 2020 Global [ R/OL]. ( 2019-03-15 ) [ 2020-09-24 ]. [https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA\\_MobileEconomy2020\\_Global.pdf](https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf).

[ 4 ] GSM Association. GSMA Mobile Economy 2020 China Chinese [ R/OL]. ( 2019-03-18 ) [ 2020-09-24 ]. [https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA\\_MobileEconomy2020\\_China\\_Chinese.pdf](https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_China_Chinese.pdf).

[ 5 ] 朱湘琳. 移动通信网络体系架构[ J]. 移动通信, 2013 ( 13 ): 47.

[ 6 ] 江明. CTCS-3 级列控系统发展历程及技术创新[ J]. 铁路通信信号工程技术, 2020 ( 1 ): 1.

[ 7 ] 张曙光. CTCS-3 级列控系统总体技术方案[ M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.

[ 8 ] 汪小勇. 城市轨道交通全自动运行系统的现状及展望[ J]. 城市轨道交通, 2019 ( 2 ): 20.

[ 9 ] 夏庭楷, 崔科. 城市轨道交通下一代 CBTC 系统发展展望[ J]. 城市轨道交通研究, 2018 ( 5 ): 43.

( 收稿日期: 2020-09-29 )

( 上接第 64 页 )

表 5 接轨改造后的宝山路站汇合间隔时间

系统制式	汇合间隔时间(含 35 s 停站时间)/s	
	前 4 后 3	前 3 后 4
U200 系统	123	116
CBTC 系统	116	109
TACS 系统	101	72

3 结语

3/4 号线客流量与日俱增,具有信号系统更新改造和运能提升的迫切需求。本文基于不同信号系统制式,通过仿真计算,深入分析宝山路站汇合能力提升方案。计算结果表明,选择合适的信号系统制式、采取土建配线改造措施、调整列车开行比例,能有效提升宝山路站的汇合能力。研究结果可

为其他线路信号系统制式选择和运营能力提升提供一定的参考。

参考文献

[ 1 ] 徐启禄. 基于车车通信的 CBTC 系统关键技术研究[ J]. 城市轨道交通研究, 2020 ( 5 ): 110.

[ 2 ] 柴明东, 祝陶美, 王涛. 基于车-车通信的 CBTC 系统方案研究[ J]. 城市轨道交通研究, 2019 ( 5 ): 80.

[ 3 ] 罗情平, 吴昊, 陈丽君. 基于车-车通信的列车自主运行系统研究[ J]. 城市轨道交通研究, 2018 ( 7 ): 46.

[ 4 ] 杜建新. 城市轨道交通车车通信信号系统的控制思想[ J]. 城市轨道交通研究, 2016 ( 增刊 2 ): 21.

[ 5 ] 刘会明. 城市轨道交通既有有线更新改造将成为常态[ J]. 城市轨道交通研究, 2019 ( 6 ): 彩 12.

( 收稿日期: 2020-09-29 )