

# 一种基于车载标准化的列车互通方案研究\*

乔志远

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司,200235,上海//工程师)

**摘要** 上海既有城市轨道交通线路列车上线数及配属数分布不均匀,且不同线路间列车集中下线开展架修、大修的情况经常发生,存在线路间需互通运营以集约列车资源的需求。“十四五”期间,上海多条轨道交通线路将陆续启动信号系统的大修更新改造工作,在设计方案时可统筹考虑不同线路间互通运营的方案,以实现列车资源的集约化管理。设计了一套基于车载标准化的列车互通方案,该方案从定位测速标准化、车地通信标准化、信号-车辆接口标准化等方面进行了具体的分析研究。

**关键词** 城市轨道交通;通信;车载标准化;大修改造;互联互通

**中图分类号** U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.028

## Train Interoperation Scheme Based on On-board Standardization

QIAO Zhiyuan

**Abstract** Volume of on-line trains and allocated trains are unbalanced on Shanghai metro existing lines, and trains on different lines are often gathered offline for overhaul and maintenance. It's necessary to plan interoperation among different lines for intensive utilization of train resources. During the 14th Five-Year Plan, many lines of Shanghai rail transit will start the overhaul and transformation work of signaling system. By comprehensively considering possibilities of interoperation among different lines at design stage, intensive management of train resources can be realized. A train interoperation scheme based on on-board standardization is developed. The scheme carries out specific analysis and research on standardization of location and speed measurement, train-wayside communication, ATC signal-vehicle interface.

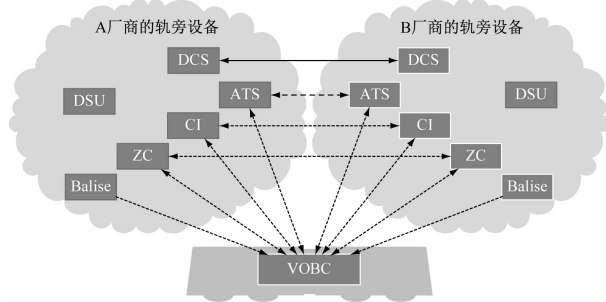
**Key words** urban rail transit; communication; on-board standardization; overhaul and reconstruction; interoperation

**Author's address** Telecom & Signaling Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China

在上海的城市轨道交通线网中,既有线路的列车上线数和配属数分布不均匀,不同线路间列车集中下线开展车辆架修和大修的情况经常发生,存在着需通过列车的互通运营来调节不同线路间列车资源配属的需求。“十四五”期间,上海有多条城市轨道交通线路将陆续启动信号的大修更新改造工作。本轮改造需结合功能优化和运能提升,以及与既有系统兼容、改造期间尽量避免影响正常运营等方面因素,统筹考虑列车在不同线路间互通的可行性,以实现线网内列车资源的集约化管理。

## 1 列车互通方案现状分析

目前行业主流的互通方案为“基于通信列车运行控制系统互联互通”。该方案基于统一的规范、协议,使装备了不同信号厂家车载设备的列车可以在装备了不同信号厂家轨旁设备的1条轨道交通线路或多条轨道交通线路上实现无缝互通、安全可靠运营。信号统一协议架构如图1所示。



注:ATS——列车自动监控;Balise——应答器;CI——计算机联锁;DCS——数据通信子系统;DSU——数据存储单元;VOBC——车载控制器;ZC——区域控制器。

图1 信号互联互通统一协议架构示意图

Fig.1 Diagram of unified protocol architecture for ATC interoperation

互联互通的实现,一方面需完善顶层规划,确保轨道、供电、车辆、信号、导乘、无线调度、综合监

\*上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1205802)

控等与行车相关的专业支持列车具备在不同线路间跨线运营的基础条件;另一方面,不同信号系统间需统一系统功能划分、子系统接口、安全分析、工程设计(如轨旁设备和信标天线安装位置、数据库设备编码规则等)、测试验证、软件升级管理和安全验证原则,以保证列车在不同线路间跨线运营的安全、高效。

《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》明确 2025 年列车智能运行的目标:与其他信号制式轨道交通的区域互联互通取得突破性进展。重庆轨道交通 4 号线、5 号线、10 号线、环线等 4 条线路的 CBTC(基于通信的列车控制)互联互通的国家示范工程已完成结题,并成功开通了 4 号线至环线在平峰时段的大站车运行班次。中国城市轨道交通协会在“CBTC 互联互通的国家示范工程”实施的基础上制定了 17 个 CBTC 互联互通团体规范,并且将互联互通 CBTC 纳入了第 1 批的《城轨产品认证目录》。基于此,国内多个城市新建的城市轨道交通工程也以实现互联互通作为建设的目标之一。

## 2 上海城市轨道交通线网互联互通的可行性分析

### 2.1 基于通信的互联互通方案

2016 年 6 月,上海市科学技术委员会将《轨道交通互联互通 CBTC 系统关键技术及核心装备研制》立项,在张江试验线的 3 站 2 区间内完成了卡斯柯公司生产的轨旁设备与电气泰雷兹生产的车载设备的共线测试工作,该项目于 2019 年 7 月完成验收。同时,基于该项目进度,同步制定了编制 32 个上海市地方标准的工作计划,目前已有 24 个标准的编制工作已完成,且具备了在城市轨道交通新线路中实施开展基于通信的互联互通的前提条件。

### 2.2 基于“车载标准化”的互通方案

上海的城市轨道交通线路建设起步较早,其中的 1 号线南段于 1993 年开通试运营,至今运营已达 28 年。既有线路早期设计时未充分考虑、匹配“基于通信的互联互通方案”的线路设计、规划。既有线路间设立联络线的目的是为了实现在列车/工程车的转线。只有部分线路之间设有联络线,且这些联络线多为单线设计,在不进行土建专业大规模改造的情况下无法支持线路间的互联互通运营。上海城市轨道交通线网联络线情况如表 1 所示。

城市轨道交通的既有线路改造采用 DTO(有人

表 1 上海城市轨道交通线网联络线一览表

Tab.1 Link lines of Shanghai urban rail transit network		
可采用联络线联通的线路	联络线设置形式	具体位置
1 号线、2 号线	车站内联络线	人民广场站
1 号线、5 号线	车站内联络线	莘庄站
1 号线、8 号线	车站内联络线	人民广场站
2 号线、7 号线	停车场内联络线	龙阳路停车场
2 号线、10 号线	车站内联络线	虹桥机场站
2 号线、13 号线	停车场内联络线	北翟路停车场
3 号线、4 号线	共线区段	宝山路站—虹桥路站
6 号线、8 号线	车站内联络线	东方体育中心站
7 号线、12 号线	车站内联络线	龙华中路站
7 号线、13 号线	车站内联络线	长清路站
7 号线、15 号线	停车场内联络线	陈太停车场
9 号线、12 号线、14 号线	停车场内联络线	金桥停车场
11 号线、14 号线	车站内联络线	真如站
11 号线、13 号线、16 号线	停车场内联络线	川杨河停车场

值守的列车自动运行)运营模式更具经济性。DTO 不但具备了与 UTO(无人值守的列车自动运行)相当的高效运行能力,同时其应急能力更高,是当前城市轨道交通项目建设不错的选择。尤其对于旧线改造,DTO 在原有 ATO(列车自动运行)线路基础上增加的功能较少,现场调试时间较短,功能变化较小,改造方案的优势更为明显。

基于上海城市轨道交通既有线路的现状,可基于车载设备的标准化,即在允许不同信号供应商采用不同的“车载大脑”的情况下,对车载相关的信号-车辆接口、定位系统、测速系统、车地通信等进行标准化的设计和定义,最终实现通过简单更换部分信号车载核心设备即可达到列车换线互通运营的目标。车载的标准化方案如图 2 所示。

## 3 基于车载标准化的列车互通技术方案设计

### 3.1 列车定位系统标准化

列车的定位功能是保证安全的关键功能,列车定位的准度和精度直接关系到 ATP(列车自动防护)系统的安全性。目前上海采用 CBTC 的城市轨道交通线路均采用基于 RFID(射频识别)技术的查询机-信标系统。该系统由地面应答器和车载查询器组成,如图 3 所示。

地面应答器通常位于轨道的中心位置,车载查

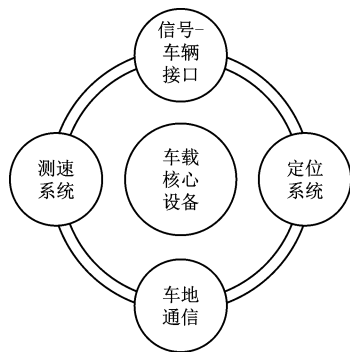
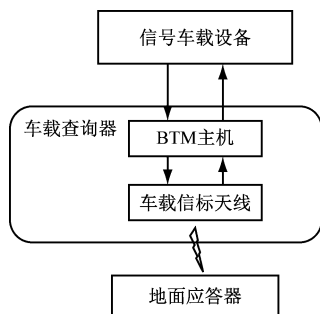


图2 车载标准化方案框架图

Fig. 2 Diagram of on-board standardization scheme frame



注:BTM——应答器传输单元。

图3 基于地面应答器的列车定位系统架构示意图

Fig. 3 Diagram of train positioning system architecture based on balise

询器位于列车的车头和车尾的底部。地理位置信息会事先存储在在地面应答器内部。当车载查询器通过时,可以通过读取存储在在地面应答器中的存储数据来获得列车在轨道上的确切位置。

列车定位功能由车载查询器与地面应答器成对实现,地面应答器根据线路条件固定位置铺设且基本不变,而列车会根据运营需求转换至不同的线路中运营。基于上述场景,车载标准化方案需要对车载信标天线的安装接口及安装位置、列车定位系统的制式、车地传输协议报文等进行研究。

### 3.1.1 车载信标天线安装接口

为避免列车换线运营时对车载信标天线进行拆装作业,减少不必要的维护工作量,车载标准化方案需要对车载信标天线的安装接口进行统一规定。车载信标天线设备简单,条件允许时应考虑采用同一型号。

### 3.1.2 列车定位系统制式

车载标准化方案的实施需对列车定位系统的制式进行统一。上海的城市轨道交通线路中,其信号系统的定位制式有欧标系统和美标系统2种,其

中:3号线、4号线、10号线、12号线、13号线、15号线、16号线、17号线、18号线使用了欧标定位系统;5号线、6号线、7号线、8号线、9号线、11号线以及在建的14号线采用了美标定位系统。这2种系统具有不同的技术特点:

1) 欧标定位系统的车载查询器采用中高频段RFID技术,车载定位天线的发射功率较大,作用距离较远;轨旁无源应答器采取电感耦合方式,识别距离小于1 m,以此来保证列车读取应答器的准确性。

2) 美标定位系统的车载查询机采用超高频段RFID技术,车载定位天线的发射功率很小,作用距离较近;无源信标采取电磁反向散射耦合方式,识别距离大于1 m,在实际应用中需要严格控制相邻信标之间的距离,否则在道岔区域容易发生列车同时读取到正线和侧线信标的情况。

相较于美标定位系统,欧标定位系统的定位精度更高,可为信号系统提供更高的灵活性。而且,欧标定位系统的发射功率更大,受外界环境干扰影响较小,更适合在既有线路信号改造工程中应用。

### 3.1.3 车地传输协议报文

为支持列车在线路间跨线运行,在地面应答器不更换的情况下,不同列车的信号系统通过车载查询器正确获得地面应答器的有效报文信息,实现统一的定位方案,需对全线网欧式定位系统的车地通信结构及接口连接方式、应答器报文结构及应答器发包等报文编码规则等进行规范定义。CBTC系统应通过车载查询器和地面应答器传输报文实现建立列车定位、校正列车位置、传输点式移动授权、监控应答器通信状态等功能。具体要求可参照T/CAMET 04011.1—2018《城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通接口规范 第1部分:应答器报文》,本文不再赘述。

### 3.1.4 车载查询器安装位置

车载查询器安装位置(中心点至车钩端面的距离)作为信号最为重要的ATP参数之一,参与信号的ATP/ATO核心运算。在线路地面应答器位置固定的情况下,需统一车载查询器的安装位置,以实现列车的安全包络计算、精确停车等功能。

## 3.2 测速系统标准化

测速系统作为信号系统的关键安全设备,通过连续测量并整合列车的瞬时行驶速度获得列车的行驶距离。上海城市轨道交通线网中,应用的测速

设备有 2 种:泰雷兹信号系统的霍尔式速度传感器和卡斯柯信号系统的光电式编码里程计。这 2 种测速设备都安装在车轴上,其功能的实现与轨旁设备无关联。为减少维护工作量,实现列车换线时不更换测速设备的目标,测速设备需统一型号。不同信号供应商需要在同一硬件的基础上开发与之相匹配的软件,以实现列车速度测试的相关功能。

霍尔式速度传感器和光电式编码里程计都是安装于车轴,测速信息准确与否主要依赖车轮转动的准确性。当轨道湿滑时,黏着系数下降,轮对会出现打滑现象,此时安装于车轴的测速设备采集到的速度波动较大,若超过一定阈值则会导致模式丢失。近年来,测速设备融合技术发展较快,通过对多种测速设备(如速度传感器、加速度计、多普勒雷达、组合导航等)进行数据及算法融合,可提高测速精度。车载标准化方案可考虑测速设备后续的技术升级方向,降低对车轴的依赖,并进一步简化、统一测速系统与信号 ATP/ATO 系统的接口。

### 3.3 车地通信标准化

上海城市轨道交通线网中,除 1 号线、2 号线、3 号线、4 号线外,其余的线路在建设时均采用了 CBTC 技术;此后,2 号线、3 号线、4 号线经信号大修改造后目前也使用了 CBTC 信号系统。CBTC 依托于先进的列车定位和无线通信技术,将基于轨道电路的信息传输向基于无线的信息传输转化,将普遍使用的单向信息传输转变为双向、不间断的信息传输,支持列车更安全、更高效的运行。为实现车载标准化方案,车地通信也需要进行标准化设计。

#### 3.3.1 统一网络制式

目前,上海轨道交通 6 号线、7 号线、8 号线、9 号线、11 号线、12 号线、13 号线、16 号线、17 号线都使用了以 Wi-Fi(无线保真)技术为主的车地通信系统。Wi-Fi 技术在经济性、高速率等方面具有一定的优势,但其网络开放性容易发生外部设备干扰城市轨道交通车地无线通信系统的情况。

近年来,LTE(长期演进)技术凭着传输速率高、抗干扰性强等优点发展迅速,LTE-M(城市轨道交通用长期演进)是基于长期演进技术的城市轨道交通车地综合通信系统,《上海轨道交通 LTE-M 系统建设指导意见》明确规定:既有线路改造时应遵照此指导意见实施。同时,在《城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通接口规范》第 2 部分——CBTC 系统车地连续通信协议中,

也要求各信号子系统间的通信基于 LTE-M 制式。上海轨道交通 2 号线、5 号线的 CBTC 改造项目,以及 14 号线、15 号线、18 号线 3 条全自动运行线路建设项目均已使用 LTE 技术来承载车地通信业务。

为提高 DCS(数据通信子系统)的可靠性和可用性,同时预留后期 DCS 向新技术(如 5G(第 5 代移动通信技术)/6G(第 6 代移动通信技术))演进的可能,车载标准化方案在保留 2.4 GHz Wi-Fi 制式的基础上,增加了 LTE-M 制式,采用双模冗余的架构,最大程度降低外界单频干扰对城市轨道交通信号系统的影响。

#### 3.3.2 共用 DCS 车载设备

除 TAU(车载接入单元)、加密设备等需配置数据的部分 DCS 设备由供应商根据自身架构进行定制设计外,其他 DCS 相关附属设备(如天线、合路器、滤波器等)均统一参数,支持不同信号系统间共用。图 4 为 DCS 车载设备的标准化方案。其中:

1) 核心设备包括 ATC(列车自动控制)机柜、主动定位机柜和网络调制设备,集软件、参数配置功能,在列车换线运行时需更换。

2) 附属设备包括车内 2.4 GHz 天线、车顶 LTE 天线、车底 LTE 天线、合路器、滤波器、中继器等,采用统一的技术规格参数,支持不同信号系统使用。

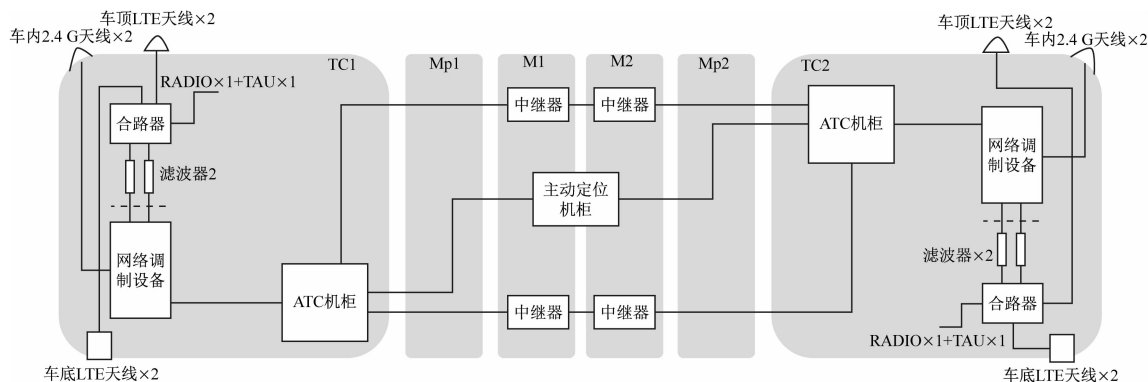
3) 车载 DCS 设备考虑预留 RADIO(无线电)、综合承载系统。

4) 所有线缆均需预埋预留充分,支持不同的信号系统。

### 3.4 信号-车辆接口

为提高城市轨道交通线路运营的安全性、高效性,全自动运行模式是新线建设及既有线路信号系统改造的首选。根据自动化等级不同,全自动运行模式由 2 种差异较大的运营模式组成:DTO 和 UTO。既有线路改造项目中,综合线路客观情况(如土建、供电、车辆等)、运营模式需求和成本差异等因素,更推荐采用 DTO 模式。上海轨道交通 5 号线和 2 号线信号系统 CBTC 改造后,运营模式均采用 DTO 模式。本文研究基于 DTO 运营模式改造方案相关功能的信号-车辆接口标准化。

信号与车辆的接口包括模拟量接口、ATC-TCMS(列车控制与管理系统)通信接口、输入输出接口。车载标准化需对上述接口进行详细考虑,设计确认唯一的信号-车辆接口界面,以支持所有列车都能匹配不同的信号系统。



注:TC1——拖车1;Mp1——带受电弓的动车1;M1——动车1;M2——动车2;Mp2——带受电弓的动车2;TC2——拖车2。

图4 DCS车载设备的标准化方案

Fig. 4 Standardization scheme of DCS on-board equipment

1) 模拟量接口是车辆执行信号控车请求接口,可影响列车在自动驾驶情况下的控车稳定性和停站精度,其接口形式和数据定义都需要唯一明确。上海城市轨道交通线网中,模拟量接口的主要形式为电流环,通过恒定电流源发送  $4 \sim 20 \text{ mA}$  的电流(依据不同的项目电流范围略有差异)来表示信号极位请求,稳定性较强;部分线路(如16号线、15号线、18号线)尝试采用了MVB(多功能车辆总线)网络接口形式。这2种接口形式都是成熟技术,考虑到既有线路改造项目中车辆专业各子系统的既有架构限制,建议车载标准化方案2种接口形式共存,明确接口定义。在项目执行时,车辆可根据信号的约定输出选择相应的接口形式。

2) ATC-TCMS 通信接口是信号与车辆的数据交互接口,上海城市轨道交通线网中,有RS485串口形式和MVB网络2种接口形式。目前MVB网络形式凭借其通信的可靠性、实时性成为了城市轨道交通车辆TCMS的主流总线形式,也是上海城市轨道交通既有线路车辆专业TCMS更新改造的方向。如果ATC-TCMS接口采用RS485接口,车辆专业需增加MVB转RS485的功能模块,进而增加信息传输延时。同时,考虑到信号模拟量控车信号通过ATC-TCMS接口传输,车载标准化方案建议ATC-TCMS接口形式匹配车辆总线形式,因而推荐采用MVB接口。

3) 输入输出接口是信号-车辆最重要的接口,通过列车线信号输出各种控制命令,并采集车辆设备、状态的反馈信息。不同信号系统的输入输出接

口差异较大。车载标准化方案需根据信号侧的功能需求求同存异,最终形成统一的、车辆侧可执行的、能匹配不同信号系统的输入输出接口定义。

综上所述,车载标准化方案需结合所有的信号设备安装需求,以及模拟量、ATC-TCMS与输入输出等接口需求,形成统一的信号-车辆接口定义。

## 4 结语

基于车载标准化的列车互通方案通过统一约束信号与车辆的接口、车载与轨旁(定位系统、车地通信)的接口,期望通过采用简易更换信号车载设备的方式实现列车在不同线路间的互通运行。该方案在边界条件限制较多的既有线路信号系统改造中具有很强的可操作性。此外,车载标准化方案也基本实现了信号外围设备(如信标天线、DCS天线线缆等)的型号统一,为上海城市轨道交通后续实施基于通信的互联互通开展了设备统一型号的尝试,具有一定的参考意义。

## 参考文献

- [1] 赵晓峰. 城市轨道交通列车绝对定位系统比较[J]. 城市轨道交通研究, 2015(10): 57.  
ZHAO Xiaofeng. Comparative study on absolute localization system of urban railway train[J]. Urban Mass Transit, 2015(10): 57.
- [2] 马能艺. 城市轨道交通全自动运行的模式选择[J]. 城市轨道交通研究, 2020(增刊2): 20.  
MA Nengyi. Selection of full automatic operation mode for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020(S2): 20.

(收稿日期:2021-03-25)