

高速磁浮交通与城市轨道交通运营场景差异性分析*

刘涛¹ 陈光¹ 楚彭子^{2,3} 林辉² 虞翊²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 以高速磁浮交通 OCS(运行控制系统)和城市轨道交通 FAO(全自动运行)系统为着眼点,分析了两类系统的系统构成及运营场景,剖析了两类系统的差异性。两类系统运营场景的差异性主要体现在固有性、功能性和过程性等3方面,且不同交通系统之间存在可借鉴之处。

关键词 高速磁浮交通;城市轨道交通;运营场景;差异性;运控系统;全自动运行系统

中图分类号 U29-39;U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.023

Analysis on Differences between High-speed Maglev and Urban Rail Transit Operating Scenarios

LIU Tao, CHEN Guang, CHU Pengzi, LIN Hui, YU Yi

Abstract Taking the OCS (operation control system) of high-speed maglev and the FAO (fully automatic operation) system of urban rail transit as the starting point, the differences of system compositions and operating scenarios between OCS and FAO are analyzed. The research shows that the differences between the two systems in terms of operating scenario are mainly reflected in inherent, functional and process aspects, but different transportation systems can also be used for reference.

Key words high-speed maglev; urban rail transit; operating scenario; difference; operation control system; fully automatic operation

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

国内以轮轨交通为典型制式的城市轨道交通 OCS(运行控制系统),已由传统的基于轨道电路的列车运行控制系统向 CBTC(基于通信的列车控制)

系统及 FAO(全自动运行)系统迈进。香港地铁迪斯尼线、广州地铁 APM(旅客自动输送系统)线、上海轨道交通 10 号线和北京地铁燕房线等多条线路,均已达到 UITP(国际公共交通协会)定义的自动化最高等级——GOA4 级(无人干预的列车运行),实现了包括紧急处理场景在内的列车运营自动化,即 UTO(无人值守的全自动运行)。

场景文本是对城市轨道交通运行系统运营全过程全面、准确、细致的描述,反映了该系统及其内部的联动逻辑。场景文本是设备功能配置与岗位设置的依据^[1],能够指导城市轨道交通运行系统的设计与开发^[2-3]。当前,针对城市轨道交通的运营场景,尤其是 FAO 系统运营场景的研究较多^[1,4-5]。文献[6]对 FAO 系统与传统 CBTC 系统的运营场景进行了对比分析。文献[7-8]对高速磁浮交通 OCS 及其子系统的运行场景进行了研究。磁浮交通利用磁力作用使驱动车辆悬浮于轨道之上,而轮轨交通则是利用车轮与轨道的相互作用来支撑驱动车辆。两者在系统架构、特性、运维模式等方面存在一定差异。不同交通系统及其运营场景的对比有相互借鉴作用。

基于此,以典型运营场景为着眼点,将城市轨道交通 FAO 系统以及高速磁浮交通 OCS 作为研究对象,就两类交通系统的基本构成及其所涉及的运营场景进行阐述,并分析其差异特征。

1 高速磁浮交通系统及其运营场景

1.1 高速磁浮交通 OCS

高速磁浮交通系统主要由车辆、线路、牵引供电与运行控制等 4 大专业组成,包括 OCS、牵引供电系统、车辆系统、ISCS(综合监控系统)等关键系

* 国家重点研发计划项目(2016YFB1200602-02);中铁第四勘察设计院集团有限公司科研项目(2019K131-1);上海市科学技术委员会科研项目(18DZ1205803);上海市磁浮与轨道交通协同创新中心基金项目(20132223)

统。其中,OCS 通过与磁浮交通系统的车辆、牵引供电及道岔等设备或系统之间的相互联动,实现列车运行的过程控制、安全防护、自动运行及调度管理等功能。以上海磁浮列车示范运营线为例,该线路采用 DTO(有人值守的全自动运行),自动化等级

为 GOA3 级(无人驾驶列车运行);若根据 FAO 系统的定义,也可将其系统制式划分为 FAO 系统。上海磁浮列车示范运营线 OCS 的基本结构^[8-11]如图 1 所示。其层次结构可划分为 3 层,即中央控制层、分区控制层及车载运行控制层。

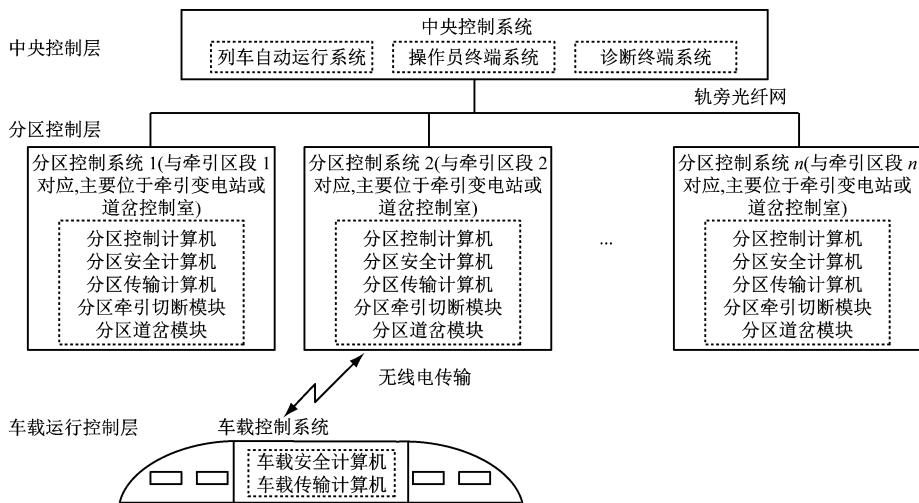


图 1 上海磁浮列车示范运营线 OCS 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of OCS of Shanghai Maglev Demonstration Line

1.2 高速磁浮交通 OCS 的运营场景

高速磁浮交通 OCS 运营场景的相关规范或标准较为缺乏。对高速磁浮交通 OCS 的运营场景进行梳理,将其分为 3 大类,即正常模式运营场景、故障模式运营场景和应急模式运营场景。

正常模式运营场景是指高速磁浮交通运营过程中一系列活动的基本逻辑或过程,包括运营准备、列车出库、列车正线运营、运行临时调整、列车回库、段内工作及运营结束等。同时,这些正常模式运营场景还可以进一步细分。例如,运营准备包括运营前检查、列车唤醒、列车综合自检、列车静止悬浮、出库计划和运行计划下发等。

故障模式运营场景包括正线列车故障、运控系统故障、牵引供电系统故障、站台门系统故障、综合监控系统故障、线路故障和控制中心故障等。故障模式运营场景的诸多大类场景也可以进一步细分。例如,牵引供电系统故障的相关场景可分为牵引变电所故障、长定子故障、车站整体失电、定子开关站故障和轨旁变电所故障(含区间动力轨)等。

应急模式运营场景包括列车火警、车站火警、列车事故、列车迫停区间、紧急疏散、地震场景、大客流场景、风雨雪天气应急场景和区间应急登车场景等。类似地,应急模式运营场景的诸多大类场景

同样可以进一步细分。例如,紧急疏散的相关场景可分为到站疏散场景和区间疏散场景。

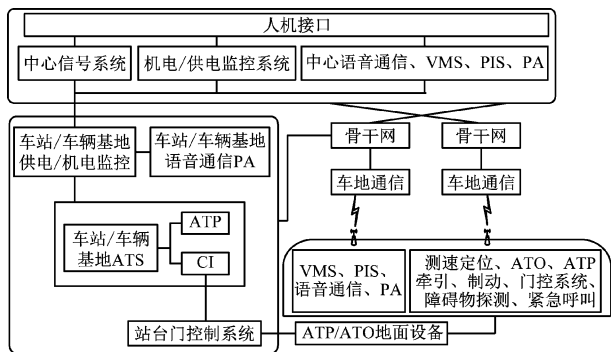
2 城市轨道交通系统及其运营场景

2.1 城市轨道交通 FAO 系统

城市轨道交通 FAO 系统是在 CBTC 技术的基础上,进一步考虑了不同专业的联动形成的以系统安全与乘客服务提升为导向的高集成度系统^[1]。FAO 系统是一个广义的概念,其中,GOA4 对应的 UTO 和 GOA3 对应的 DTO 统称为 FAO^[4,11]。城市轨道交通 FAO 系统的参考架构如图 2 所示。该系统涉及的关键机电系统包括信号系统、车辆系统、牵引供电系统、站台门系统、ISCS 和通信系统等^[1]。根据图 2,FAO 系统设备可划分为 3 层,即中心层、车站与车场层(含轨旁)及车载层。

2.2 城市轨道交通 FAO 系统的运营场景

文献[1,4-5]较详细地描述了城市轨道交通 FAO 系统的运营场景。以北京地铁燕房线 FAO 系统为例,该系统涉及 41 个大场景以及诸多小场景和细小类场景。这 41 个大场景(见表 1)包括 18 个正常场景和 23 个异常场景^[3-4],绝大多数运营场景对应的功能由系统按照预设逻辑自动完成,仅有少量异常场景需要人工介入。其中:正常场景是指 FAO



注:VMS 为视频监控系统;PIS 为乘客信息系统;PA 为公共广播;
ATS 为列车自动监控;ATP 为列车自动防护;CI 为计算机联锁;
ATO 为列车自动运行。

图2 城市轨道交通FAO系统的参考架构

Fig. 2 Reference architecture of urban rail transit FAO system

系统在无故障与无意外情况下按照计划正常运营的一系列场景;异常场景是受到与行车相关的故障与意外情况导致运营计划偏离,甚至危及安全的一系列场景。按照降级场景的紧急程度,异常场景可分为非紧急降级场景和紧急降级场景^[1]。按照诱发因素,异常场景又可分为设备故障场景和紧急事件场景^[4]。

表1 北京地铁燕房线的典型运营场景分类

Tab.1 Typical operation scenarios of Beijing Metro Yanfang Line

项目	运营场景内容
正常场景	早间上电,唤醒,出库,进入正线服务,进站停车,站台发车,折返换段,跳停,扣车,清客,停止正线服务,回库,清扫,洗车,休眠,日检与维修,自动调车,轨道车运营
异常场景	故障复位控制,再开车门控制,紧急制动缓解,区间疏散,紧急手柄触发,紧急呼叫,远程紧急制动,车辆火灾,CAM(蠕虫模式),车门故障隔离站台门,站台门故障隔离车门,车门状态丢失,雨雪模式,车辆制动系统故障,设备故障后的处理,车站火灾,站台门状态丢失,障碍物/脱轨检测,列车远程广播,FAM(全自动驾驶模式)/CAM 相关模式转换,车上设备状态远程检测,救援,其他远程控制功能

需注意,城市轨道交通 FAO 系统运营场景的分类与数量目前尚无明确的通用规范规定,需结合 FAO 系统的特征及其应用程度来确定。

3 高速磁浮交通系统与城市轨道交通交通系统差异性分析

3.1 系统构成差异

尽管高速磁浮交通系统与城市轨道交通系统均由车辆、线路、牵引供电与运行控制等4大主要专

业组成,但不同于城市轨道交通的驱动方式,高速磁浮交通采用抱轨运行,且牵引设备完全配置于地面上,进而造成了两种系统在具体组成和架构等方面存在广泛差异,如车辆结构、轨道结构与道岔组成、牵引供电、车地通信和 OCS 的设备配置等^[9-10]。

以 OCS^[7,9-11] 为例,高速磁浮交通 OCS 系统包括车载控制系统、通信系统、分区控制系统和中央控制系统。文献[11]所述的城市轨道交通 FAO 系统控制中心是依托于集成了 ATS、电力调度系统以及 ISCS 的 TIAS(行车综合自动化系统)。车站控制以车站级综合监控设备为主,以车站 TIAS 为核心。线路轨旁部分还包括轨旁 ATP、ZC(区域控制器)和 CI(计算机联锁)等系统。车载控制系统则以信号系统 ATP/ATO 为核心,并与障碍物检测、测速定位等系统互联。

高速磁浮交通系统与城市轨道交通交通系统的整体分布较为接近,但结合文献[9-11]可知,两者存在以下差异:

1) 在中央层方面,高速磁浮 OCS 的中央控制系统由 ATO 系统、操作员终端系统和诊断终端系统等构成,并未集成综合监控系统。而基于 FAO 的 TIAS 则集成了综合监控系统及其他子系统。

2) 在轨旁(含车站)层方面,分区控制系统是高速磁浮交通的轨旁信号系统,对道岔、车速、进路和列车等进行管理。站级操作人员终端系统是中央操作人员终端系统故障时期发挥行车综合自动控制的后备系统。高速磁浮交通牵引变电站在其供电范围内只能引导 1 列列车运行,其将 1 个牵引供电区间作为 1 个分区(区间),并设置闭塞(固定闭塞)与联锁机制。分区控制系统和车载控制系统均涉及速度曲线计算与监控,且牵引切断由分区控制器负责。FAO 系统的轨旁信号系统则为 ZC 和 CI。车站 TIAS 则是在中央 TIAS 故障时期发挥行车综合自动控制的关键系统。此外,轮轨交通的道岔与高速磁浮交通的道岔亦存在差异,高速磁浮交通的道岔是 1 根连续可弹性弯曲的钢梁,转辙时需要整个轨道梁一起移动,具体移动由磁浮线路的 SC(道岔控制设备)负责,而道岔的安全防护由分区控制系统中的分区道岔模块负责。轮轨交通的道岔则由 CI 的道岔控制模块负责。

3) 在车载层方面,高速磁浮交通车载系统无ATO功能,列车牵引由分区控制系统给分区牵引系统发送上位控制命令(移动授权等),具体执行由分

区牵引控制系统负责,即部分ATO功能位于分区牵引系统。列车的连续运行以停车点(辅助停车区或车站)为防护点实现步进运行^[9,12]。而FAO系统的牵引位于车载,ATO功能以车载部分实现为主。列车的连续运行通过移动授权的延伸来实现。速度计算、监控与牵引切断等主要由车载ATP负责。

4) 在列车的制动方式上,两者同样存在差异。轮轨制式的城市轨道交通列车主要采用闸瓦制动、盘形制动、磁轨制动、再生制动和电阻制动。正常情况下,采用以再生制动和电阻制动为主的电制动方式;紧急制动时,采用以闸瓦制动、盘形制动及磁轨制动为代表的摩擦制动方式。对于高速磁浮交通系统,在正常情况下,车辆的制动由常定子同步电机通过电阻制动或再生制动的方式实现。在牵引系统失效或其他紧急情况下,当列车运行速度高于一定速度时,采用安装在车上的特殊涡流制动器制动;当列车运行速度低于该速度时,关闭涡流制动,车辆降落并通过滑橇与滑道摩擦的方式制动,并停靠到指定的辅助停车区。

5) 在通信层方面,高速磁浮交通系统的车地通信除了满足与轮轨交通信号相似的运行控制系统中的车地信息传输需求外,还必须满足同步直线电机驱动所需的列车定位信息与地面牵引控制系统的实时传送需求。上海磁浮列车示范运营线的通信系统采用了具备冗余设计、高实时性和抗干扰能力强的38 GHz毫米波通信。由于服务的多元化,FAO系统同样需要传输大量信息,LTE(长期演进)相关通信系统是当前的主流选择。

3.2 运营场景差异性

基于对两类系统构成的分析可知,两者的部分差异是固有的,与系统本身的特殊性有关。两类系统运营场景的差异性具体表现为:

1) 固有性差异:是指两类系统各自的特色场景,且相互之间不需要借鉴。例如,高速磁浮交通列车运行的停车点步进场景,以及长定子故障场景。以停车点步进场景为例,高速磁浮轨道采用高架模式,抱轨运行且车头未设置应急门;考虑到应急疏散需要,在轨道上设置了辅助停车区,并要求列车的运行采用双曲线防护和停车点步进的运行方式,以保证车辆在辅助停车区停车^[12]。而对于城市轨道交通,乘客在应急情景下可在路肩停留,列车的运行未采用最小速度曲线防护。类似地,由于轮轨交通未采用同步直线电机驱动,长定子故障场

景只能在高速磁浮交通中出现。

2) 功能性差异:代表两者未同时具有的场景,但后续可以相互借鉴。例如,上海磁浮列车示范运营线当前未配备站台门系统,而国内地铁常设置有与信号系统互联的站台门系统。结合具体情况,高速磁浮交通也可配备站台门系统。因此,与站台门相关的运营场景是可以相互参考的。

3) 过程性差异:体现在两者均具有的场景中实现过程存在的差异。例如,对于清客场景,当前高速磁浮交通和城市轨道交通FAO系统均实现了高度自动化,两种系统的信号系统都能够根据运行计划自动触发清客,并提醒乘客下车。目前,上海磁浮列车示范运营线的清客完成情况需要由站务确认,FAO系统则可通过车载图像设备确认。

4 结语

磁浮交通和轮轨交通各具特色,且运营场景存在差异。通过对高速磁浮交通和城市轨道交通的系统构成与自动化等级介绍,讨论了两者之间存在的差异性,为相关功能的完善以及相关场景文本的撰写提供研究思路。场景文本的规范化不仅有助于不同类别交通系统运营场景的对比分析,还有助于系统的开发与完善。

参考文献

- [1] 谭文举,杨卫峰,廖云,等.城市轨道交通全自动运行系统设计及场景分析[J]. 机电传动,2019(4):112.
TAN Wenju, YANG Weifeng, LIAO Yun, et al. Overview of urban rail transport fully automatic operation system and typical scenario[J]. Electric Locomotive Drive, 2019(4):112.
- [2] 张利宽,吴苏婷,杨远舟.基于场景的城轨交通试运营基本条件评估中设备测试检验方案研究[J].现代城市轨道交通,2015(3):65.
ZHANG Likuan, WU Suting, YANG Yuanzhou. Research on equipment test and inspection scheme in evaluation of basic conditions for trial operation of urban rail transit based on scenario[J]. Modern Urban Transit, 2015(3):65.
- [3] 宁滨,郇春海,李开成,等.中国城市轨道交通全自动运行系统技术及应用[J].北京交通大学学报,2019(1):1.
NING Bin, GAO Chunhai, LI Kaicheng, et al. Technology and application of fully automatic operation system for urban rail transit in China[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019(1):1.
- [4] 刘鹏翔.城市轨道交通全自动驾驶运营安全分析与列车运行模拟仿真[D].北京:北京交通大学,2017.

(下转第126页)

出现误动作。但在 DSP 写使能趋于稳定的过程中, DSP 的数据总线也会逐渐稳定,即在下一个 CAN 轮询时刻, FPGA 读到正确的数据并发送给 DO 板卡, DSP 的写数据误操作在理论上只存在 1 个 CAN 轮询周期(20 ms)。

2.2.2.2 DO 异常输出故障解决对策

经分析,可从以下两方面对 IO 板卡底层软件进行优化:

1) 使用 FPGA 软件对 DSP 的外部总线进行处理,防止 DSP 在外部总线的边界时刻访问 FPGA 内部 RAM(随机存取存储器)。DSP 通过配置内部寄存器,增加 DSP 外部总线写控制信号的脉宽;FPGA 对 DSP 外部总线写使能信号进行寄存处理,在该信号充分稳定时,允许 DSP 写访问 FPGA 内部 RAM 1 次。

2) 升级 DO 程序,使 IO 模块底层软件内部对 TCMS 控制指令实施 20 ms 滤波处理。该方案可滤除 1 个 CAN 通信周期内的数据异常,增加 DO 板卡数据输出的可靠性和稳定性。

通过对 DO 板卡底层软件实施优化,经验证,现场未再发生 DO 板卡异常输出故障。

(上接第 122 页)

- LIU Peng'ao. Operation safety analysis and train operation simulation of fully automatic operation of urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [5] 包峰,侯忠伟.城市轨道交通全自动运行系统异常运营场景分析[J].信息通信,2018(6):85.
- BAO Feng, HOU Zhongwei. Analysis of abnormal operation scenarios of urban rail transit fully automatic operation system[J]. Information and Communication, 2018(6):85.
- [6] 王向阳, 宋建华, 高晓菲.城市轨道交通全自动无人驾驶系统与传统 CBTC 系统差异分析与探讨[J].铁路技术创新,2019(5):22.
- WANG Xiangyang, DUO Jianhua, GAO Xiaofei. Analysis and discussion on the difference between fully automatic driverless system and traditional CBTC system of urban rail transit[J]. Railway Technology Innovation, 2019(5):22.
- [7] 屈胤达.高速磁浮列控系统运行场景构建与形式化验证[D].北京:北京交通大学,2019.
- QU Yinda. The design and verification of high-speed maglev train control system operation scenarios[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [8] 吴建伟.高速磁浮车载设备测试方法研究与实践[D].北京:北京交通大学,2012.
- WU Jianwei. Research and practice on test method of high-speed

3 结语

IO 模块的工作稳定性和可靠性直接关系到 TCMS 对列车非智能设备监视、控制和诊断的有效性。本文列举的 IO 板卡典型故障问题,涵盖了工艺处理、硬件设计及底层软件设计等方面的内容,为业界研发设计和检修技术人员处理该类问题提供了故障处理思路。

参考文献

- [1] IEC. 铁路电子模块-列车通信网络(TCN)-第3-1部分:多功能车辆总线(MVB):IEC 61375-3-1[S]. Geneva: IEC, 2012:51.
- IEC. Electronic railway equipment-train communication network (TCN)-Part 3-1: Multifunction Vehicle Bus (MVB): IEC 61375-3-1[S]. Geneva: IEC, 2012:51.
- [2] 杨鹏.列车通信网络远程输入输出模块研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- YANG Peng. Research on remote input and output module (RI-OM) in train communication network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- (收稿日期:2019-09-26)
- maglev vehicle equipment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [9] 吴祥明.磁浮列车[M].上海:上海科学技术出版社,2003.
- WU Xiangming. Maglev train[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.
- [10] 吴卫平,胡剑,高原.高速磁浮运行控制系统与城轨信号系统 CBTC 的对比分析[J].控制与信息技术,2018(3):56.
- WU Weiping, HU Jian, GAO Yuan. Comparative analysis of high-speed maglev operation control system and urban rail transit signal system CBTC [J]. Control and Information Technology, 2018(3):56.
- [11] 闫宏伟,燕飞.城市轨道交通全自动运行系统及安全需求[J].都市快轨交通,2017(3):50.
- YAN Hongwei, YAN Fei. Fully automatic operation system and its safety requirement of urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017(3):50.
- [12] 虞翊,姜西,林辉,等.基于防护速度的高速磁浮辅助停车区设置[J].同济大学学报(自然科学版),2019(9):1310.
- YU Yi, JIANG Xi, LIN Hui, et al. Setting method of auxiliary stopping area for high-speed maglev based on protection speed [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019(9):1310.

(收稿日期:2020-02-27)