

城市轨道交通全自动运行列车的需求分析

陈春辉

(深圳地铁建设集团有限公司, 518035, 深圳 // 高级工程师)

摘要 从功能需求、RAMS(可靠性、可用性、可维护性和安全性)需求及列车设计需求等方面,对全自动无人驾驶列车的需求进行分析。着重讨论了全自动无人驾驶列车在运行模式、控制方式、列车状态监控、安全需求等方面的功能特点及优势。

关键词 城市轨道交通;全自动运行列车;需求分析

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.04.003

Requirement Analysis of Urban Rail Transit Fully Automatic Operation Train

CHEN Chunhui

Abstract From perspectives including function requirements, RAMS (Reliability, Adaptability, Maintainability, Safety) requirements and vehicle design requirements, vehicle requirement analysis of fully automatic operation system is conducted. The function features and advantages of fully automatic operation system vehicle in operation mode, control mode, vehicle status monitoring, and safety requirements are discussed with emphasis.

Key words urban rail transit; fully automatic operation train; requirement analysis

Author's address Shenzhen Metro Group Co., Ltd., 518035, Shenzhen, China

列车作为乘客运输和安全运营的主体,在地铁运营过程中起着至关重要的作用。城市轨道交通全自动运行列车在完全没有司机和乘务人员参与的情况下,由控制中心统一控制,可实现全自动运营。其自动完成休眠、唤醒、自检、运行、精确停车、开关车门及洗车等操作,在故障情况下还能实现自动恢复等。本文以 CBTC(基于通信的列车控制)制式的传统列车作为比较对象,对全自动运行列车从功能需求、RAMS(可靠性、可用性、可维护性和安全性)需求以及列车设计需求等方面进行分析。

1 列车功能需求分析

与传统列车相比,全自动运行列车增加了自动

唤醒、休眠、故障报警、障碍物检测、脱轨检测及低压系统恢复供电等功能。此外,全自动运行列车还需在传统列车的基础上增强车门系统控制功能和火灾报警功能,增强电磁兼容性,各子系统也需冗余配置。全自动运行列车功能与传统列车的功能差异主要体现在运行模式、远程控制、列车联动、列车状态监控等方面。

1.1 运行模式的功能需求

全自动运行列车在传统列车的驾驶模式基础上,新增了 FAM(全自动驾驶模式)和 CAM(蠕动模式)。

在 FAM 下,ATP(列车自动防护)子系统负责保证列车的运行安全,ATO(列车自动运行)子系统负责完成列车在区间的自动运行、调整及对位停车控制等。在列车到站自动对位停车时,如出现停车对标不准的情况,ATO 子系统应能自动进行对位调整,实现车门与站台门的对标。在实现对标不准自动对位调整时,需要列车响应信号系统的精细化调整策略,实现精确对标。

CAM 为 FAM 的应急模式。当列车通信网络出现故障,或列车通信与信号车载设备通信发生故障时,列车先向控制中心申请切换为蠕动模式;在列车停车后,经控制中心确认,列车运行模式由 FAM 切换为 CAM。因列车通信网络存在问题,部分列车状态不可实时监控,故列车需限速运行。在 CAM 下,ATP 子系统监控列车以不超过 25 km/h 的速度自动运行至下一座车站对标停车,并在自动打开车门完成清客后,在站台等待工作人员上车对故障进行处理。

1.2 控制功能需求

传统列车的电气设备由司机来操控。为实现行车控制,全自动运行列车的电气设备增加了远程控制功能。全自动运行列车的远程控制功能需求主要有:

1) 替代司机进行列车激活及断电功能。具体

有远程唤醒功能及休眠功能等。

2) 替代司机进行常规调节操作的功能。此类功能包括远程控制空调、照明、刮雨器及电热玻璃等。在 FAM 下,列车智能控制系统依据工况来自动控制空调与照明的启闭:在上线工况下自动开启空调、照明;在待命工况下自动关闭中间车的空调系统,并降低照明亮度或关闭照明。通过远程控制功能,也可对空调及照明进行人工控制。在列车唤醒与休眠过程中,TCMS(列车监控管理系统)按照设定的流程条件控制受电弓实现自动升降;在特殊工况下,工作人员也可远程手动控制受电弓的升降。

3) 特殊工况的远程操作功能。除正常系统自动控制之外,特殊工况还需要工作人员进行受电弓升降远程控制或列车对标停车后的远程开关车门等操作。

4) 应用于列车排除故障的远程控制功能。当牵引或辅助系统因发生故障而被隔离时,可尝试通过远程复位功能,使隔离的牵引逆变器或辅助逆变器重新投入运行。远程复位断路器,是影响行车的

关键断路器。当其异常跳开且自复位一次失败时,在列车静止且没有火灾告警情况下,可通过远程复位断路器来恢复。对于 PIS(乘客信息系统)主机等较常需要断电重启的重要设备,可对其供电回路设置远程跳开及复位断路器,以便在其实现远程断电重启,进而使设备从故障状态恢复正常。

5) 远程复位单个转向架空气制动单元的功能。如出现单个转向架空气制动缓解不良的情况,影响了列车起动,可通过该功能来尝试复位发生了故障的转向架,进而排除故障,使列车具备运行条件。

1.3 列车状态监控功能需求

传统列车由司机监控运行。当列车出现故障时,由司机处置并报告行车调度员;行车调度员依据司机报告的列车状态进行运营组织决策。

为了远程监视列车运行状态,全自动运行系统需在地面设置列车调度工作站来替代行车监控功能。列车调度工作站通过车地无线通信传输通道来接收全线列车实时的状态信息(如图 1 所示),对全线列车的运行状态进行实时监控,根据列车发生的故障情况进行及时处理。

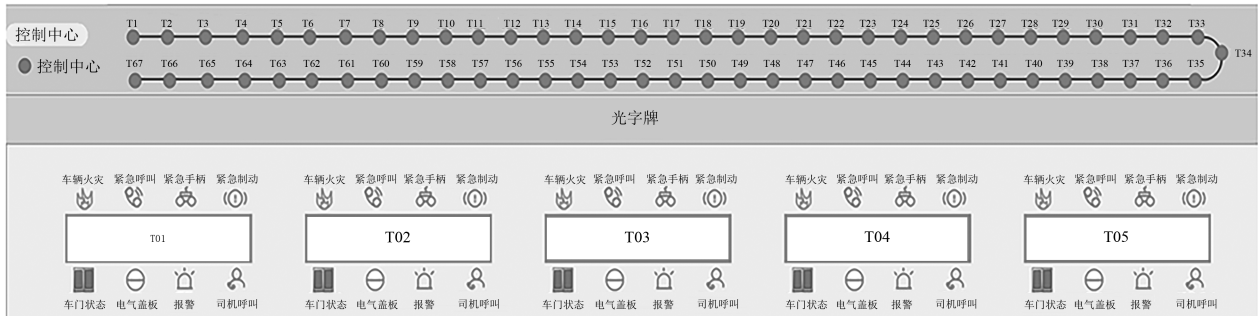


图 1 列车调度工作站状态监控界面

1.4 列车联动功能需求

列车运行中的应急事件有乘客紧急对讲请求、车门紧急解锁、车门状态丢失、车门检测到障碍物、逃生门盖板被打开、司机操作台盖板被打开、电气柜门被打开、灭火器被移动、感烟或温烟组合探测器检测到火灾等。在传统列车上,司机负责对应急事件进行处理。而全自动运行列车应具有在应急事件场景中快速反应的联动功能:

1) 当车上发生应急事件时,车载 CCTV(闭路电视)及车载 PIS 立即启动联动功能,将触发源对应区域的摄像头,通过车地无线通信传输通道传送至 OCC(运营控制中心)调度台,以供调度人员第一时间掌握现场情况。同时,TCMS 将对应的告警信息

同步发送至控制中心的各调度台。

2) 车门紧急解锁、逃生门盖板、司机台盖板打开等突发事件,可触发对应的乘客紧急对讲功能,以方便 OCC 调度人员第一时间与现场乘客沟通。

3) 在列车火灾或区间火灾等场景下,需联动空调系统进行运转调整,以免给乘客带来进一步危害。如发生区间火灾,则在区间运行的列车收到区间火灾信号后,应立即关闭新风及废排,以避免区间火灾产生的浓烟被吸入列车,直至列车通过火灾区域后,再取消区间火灾信号,使空调系统恢复正常运行。

4) 全自动运行列车应配置障碍物及脱轨检测系统,来检测轨道是否有影响列车运行的障碍物或

列车是否脱轨。如检测到障碍物或脱轨信息,则立即触发列车的紧急制动。列车通过紧急制动来降低车速,可减少因列车碰撞障碍物或脱轨而造成的人员损伤。同时,该检测系统将障碍物及脱轨检测信息作为紧急信号报送给 OCC 行车调度员,并将行车摄像头视频推送至 OCC 调度员。行车调度员组织工作人员现场处置,只有等到所有障碍物引起的风险解决后才能恢复正常运行。

2 全自动运行列车的 RAMS 需求分析

与传统列车相比,全自动运行列车需面对更高的安全风险挑战,其 RAMS 要求更高。

2.1 安全完整性等级要求

依据 EN 50128 与 EN 50129 标准要求,基于全自动运行列车的安全风险分析,针对风险分配、边界危害的控制,参照相关经验,列车子系统及设备的 SIL(安全完整性等级)应满足表 1 要求。

表 1 全自动运行列车 SIL 需求

列车子系统及设备	传统列车的 SIL	全自动运行列车的 SIL
紧急制动系统	4 级	4 级
制动系统 常用制动系统	2 级	2 级
车轮防滑系统	2 级	2 级
车门系统(硬线)		4 级
DCU(驱动控制装置)		2 级
端部疏散门		4 级
牵引系统		2 级
TCMS	2 级	2 级
紧急对讲装置		2 级
火灾和烟雾监测		2 级
障碍物及脱轨检测装置		1 级

针对安全性风险,对列车开展 PHA(初步危害分析)、安全评估、IHA(接口危害分析)、SSHA(子系统危害分析)、O&SHA(运营和支持危害分析)、FTA(故障树分析)及 FMECA(故障模式影响和危害性分析)等安全性分析。通过安全分析对存在的危害风险进行识别,进而采取积极的应对措施,降低危害风险对全自动运行列车运行的影响。

2.2 可靠性要求

列车发生故障的频率反映了列车的可靠性。按故障导致的后果,列车故障可分为两类:①导致列车发生 ≥ 2 min 初始延误的故障;②导致不适合继续服务或未能出车的故障。具体的故障频率控

制目标如表 2 所示。

表 2 全自动运行列车的故障频率控制目标

故障类别	故障频率控制目标/(次/(车·km))
导致列车发生 ≥ 2 min 初始延误的故障	$\leq 1.44 \times 10^{-6}$
导致不适合继续服务或未能出车的故障	$\leq 0.41 \times 10^{-6}$

全自动运行列车的可靠性指标还需参照既有项目的故障数据等,来分配列车各子系统的可靠性指标权重,以使整车的可靠性指标可控。

2.3 可维修性要求

根据全自动运行列车可维修性用时要求,列车在线维修可更换单元不超过 0.5 h,无需架车作业的维修工作不超过 4.0 h,需架车维修的作业不超过 6.0 h。

3 全自动运行列车的设计需求分析

基于更高的 RAMS 要求,全自动全自动运行列车整体的设计要求更高。

3.1 列车网络系统的冗余性

全自动运行列车 ATC(列车自动控制)子系统、TCMS、PIS、BCU(制动系统)、EDCU(车门系统)等均要求网络通道冗余,主从热备冗余。此外,TCMS 的 I/O(输入/输出)模块也要进行冗余采集及控制。

3.2 硬件电路设计需求

在列车激活电路上:传统列车一般从列车一端发出指令,激活列车;全自动运行列车从列车两端同时发出激活指令,使列车激活上电,可提高列车唤醒的成功率。

为尽可能地提高列车可靠性,全自动运行列车的牵引授权、方向选择、紧急制动等关键控制电路均为冗余设计,降低了电路单点故障对列车运行的影响。

传统列车的乘客紧急对讲装置不关联列车牵引授权。全自动运行列车的乘客紧急对讲装置关联了列车牵引授权:当乘客按压紧急对讲按钮后,未发车的列车将扣留在站台,已发车的列车将在下一站扣车,以处理乘客紧急对讲请求。

车门控制电路采取控制电路冗余设计,当一路控制电路发生故障时,另一路控制电路能打开一半车门。

3.3 底架设备悬挂的二次防护需求

为减少底架设备掉落的风险,应对在车辆底架

(下转第 17 页)

有后方引力>前方引力,进而使列车运行控制系统自动延长了列车停站时间。由于列车之间存在群体效应,前方列车间的引力向前传递,使得前方多列列车依次受“向后的”引力作用而自动扣停,由此分摊晚点,确保前方车站的列车服务间隔均匀。

2) 后方列车运行的自组织调整过程:故障车迫停压缩了与后方列车的运行间隔,使得后方列车与前后列车之间的运行间隔进入排斥间隔区间,且前方间隔小于后方间隔,故有前方斥力>后方斥力,使列车自动扣停后方车站。同样,由于列车间的群体效应,后方列车间的斥力向后传递,使得后方多列列车依次受“向后的”斥力作用自动扣停,由此确保列车运行安全且列车服务有序。

需要说明的是,为确保列车上旅客服务的安全性,在列车运行控制系统实施列车运行自组织调整过程中,主要采取延长列车停站时间(即扣停)的自动调整策略。

4 结语

在日益复杂而严峻的地铁运营组织形势下,因突发事件导致的运营延误或运营安全事件时有发生。为确保能够快速、系统、有效应对偶发的列车运行晚点影响,在系统梳理和分析列车运营调整策略和规则的基础上,引入智能体概念和自组织理论,借鉴“沙丁鱼群”运动现象描述基于3个间隔阈值的邻近列车间的作用关系。将列车与前后邻近列车间的运行间隔关系转化为个体之间的吸引与排斥关系,实现对列车间运动交互关系的描述,从而建立线路运行系统中各列车的自组织协同模型。

(上接第12页)

安装的设备采取二次防护措施,以防止因设备紧固不足导致其脱落至轨道而影响行车安全。

4 结语

全自动运行系统实现了监控轨道、监控乘客上下车、监控列车和应急处理等的自动化。列车是全自动运行系统关键的子系统。相对传统列车,全自动运行列车的可靠性、可用性、可维护性及智能化等方面要求更高。本文探讨了全自动运行列车的功能需求、RAMS需求及列车设计需求,以期为全自动运行列车的设计及全自动无人驾驶系统的发展提供参考。

地铁列车运行条件复杂、系统不确定因素众多,本文基于所建立的上海轨道交通8号线列车运行仿真平台,建立假定的列车故障场景模型,并实现了前、后方向列车运行自组织调整的过程模拟与运行结果自动化输出,由此论证了基于群体协同的列车运行调整自组织机制与规则模型的有效性和应用性。由于线路未发生长时间运行中断,行车调整过程中不改变在线列车运动顺序及关系,因此,所建立的列车运动交互、协同的自组织机制还需进一步优化。

参考文献

- [1] 刘莉.城市轨道交通列车运行调整的粒子群算法实现[D].成都:西南交通大学,2013.
- [2] 胡亚峰.列车运行自动调整研究回顾与展望[J].铁路通信信号工程技术,2011(6):54.
- [3] 魏道江,康承业,李慧民.自组织与他组织的关系及其对管理学的启示[J].系统科学学报,2014(2):45.
- [4] 杨肇夏,董中英.列车晚点传播模拟系统[J].铁道学报,1995(2):17.
- [5] 吴洋.晚点情况下地铁列车实时运行调整及速度控制模式研究[D].成都:西南交通大学,2004.
- [6] 曹继茹.城市轨道交通列车运行调整算法研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [7] 张星臣.城市轨道交通运营管理[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [8] 上海申通地铁集团有限公司轨道交通培训中心.城市轨道交通运营调度[M].北京:中国铁道出版社,2017.
- [9] 高佳丰,赵之,陈浩.基于三维空间关于海豚围捕沙丁鱼群的运动规律[J].计算机科学与应用,2019(2):299.
- [10] 朱琳,吴强,刘志钢,等.城市轨道交通运营列车故障影响仿真分析系统[J].都市快轨交通,2017(2):113.

(收稿日期:2020-09-28)

参考文献

- [1] 张海涛,梁汝军.地铁列车全自动无人驾驶系统方案[J].城市轨道交通,2015(2):33.
- [2] 公吉鹏.全自动运行系统中信号系统新增配置和功能[J].铁路通信信号,2019(3):76.
- [3] 李猛,张艳兵,徐成永,等.全自动运行系统地铁车辆关键技术[J].都市快轨交通,2018(1):123.
- [4] 郭涛.全自动驾驶地铁车辆安全性需求分析[J].交通安全与环保,2016(11):118.
- [5] 翟国锐,刘宏伟,师秀霞.下一代地铁车辆全自动无人驾驶信号系统关键技术[J].都市快轨交通,2017(3):78.

(收稿日期:2020-08-31)