机车电传动 2019 年第 4 期 (2019-07-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №4, 2019(July 10, 2019)

文章编号：1000-128X(2019)04-0112-04

# 城市轨道交通全自动运行系统设计及场景分析

谭文举[1]，杨卫峰[2]，廖　云[2]，周开成[2]

（1. 南宁轨道交通集团有限责任公司，广西 南宁　530000；
2. 中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲　412001）

**摘　要：**对城市轨道交通全自动运行系统的组成和功能进行了介绍，着重阐述了运营场景的设计方法及分类依据，选取了部分典型场景进行详细分析。城市轨道交通全自动运行系统是未来智能化、智慧化发展的方向，我国多个城市已在开通、建设或规划中。

**关键词：**城市轨道交通；全自动运行；场景分析

**中图分类号：**U284.48；U231+.92；U268.4　　**文献标识码：**A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.04.024

# Overview of Urban Rail Transport Full Automatic Operation System and Typical Scenario

**TAN Wenju[1], YANG Weifeng[2], LIAO Yun[2], ZHOU Kaicheng[2]**

( 1. Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China;
2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China )

**Abstract:** The composition and function for full automatic operation system of urban rail transport were introduced, and the design method and classification basis of operation scenario were emphatically expounded. Finally, some typical scenarios were selected for detailed analysis. Full automatic operation system of urban rail transport is the direction of intelligent and wisdom development in the future and had been opened, constructed or planned in many chinese cities.

**Keywords:** urban rail transport; full automatic operation; scenario

## 0　引言

根据国际公共交通协会 UITP 统计，自 1962 年世界上第 1 条全自动载客地铁系统在美国开通运行以来，至 2018 年 4 月全球已有 42 个城市开通运营[1-4]。鉴于国内全自动运行系统处于快速发展的态势，本文通过对全自动运行 FAO(fully automatic operation) 系统的国内外标准、架构和运营场景的分析介绍[5-8]，使读者对 FAO 系统的组成与功能以及系统与人之间的交互过程有所了解，希望能对 FAO 系统的设计人员、系统的使用者及其他相关领域的从业者有所帮助。

## 1　全自动运行系统设计

全自动运行系统相对于传统系统有着许多的优势，但这些优势的实现不仅涉及到运营管理，而且涉及到基建和机电等各专业[9-11]。为此，全自动运行系统应结合具体项目的运营管理模式，应用系统工程的理念和方法，自上向下，建立起系统设计类规范文件。作为顶层设计文件之一的运营场景文件是全自动运行系统的纲领性文件，其地位在一系列技术文件中尤为重要。

收稿日期：2019-01-09；修回日期：2019-07-04



(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

### 1.1　系统标准

全自动驾驶技术的国际标准主要有 IEC 62267:2009 “Railway applications-Automated urban guided transport (AUGT)-Safety requirements” 和 IEC 62290-1:2014 “Railway applications-Urban guided transport management and command/control systems” 标准系列。

在国际标准的基础上，我国进行了标准转化工作，形成了 GB/T 32588.1—2016《轨道交通自动化的城市轨道交通（AUGT）安全要求 第 1 部分：总则》和 GB/T 32590.1—2016《城市轨道交通运输管理和指令 / 控制系统 第 1 部分：系统原理和基本概念》等标准。

中国城市轨道交通协会在此基础上，结合国内城市轨道交通列车全自动运行工程建设和运营经验，编制了《城市轨道交通全自动运行系统技术规范》第 1 部分至第 7 部分（征求意见稿），涵盖了需求规范、接口规范、测试及验证技术规范、运营规范、核心设备产品规范、工程安全评估规范和试运营基本条件。

依据国际标准，按照运营人员和系统所承担的列车运行基本功能的责任划分，列车运行的自动化等级（GOA）可划分为 5 级，如表 1 所示。

表 1　列车运行的自动化等级

| 自动化等级 | 列车运行方式 |
|---|---|
| GOA0 | 目视下列车运行（TOS） |
| GOA1 | 非自动列车运行（NTO） |
| GOA2 | 半自动列车运行（STO） |
| GOA3 | 有人值守下列车自动运行（DTO） |
| GOA4 | 无人值守下的列车自动运行（UTO） |

自动化等级中的 UTO 与 DTO 均属于全自动运行系统。

值得一提的是，中国城市轨道交通协会根据国内运营实际，在 GB/T 32590.1—2016 的基础上提出了 GOA3$^{+}$ 的概念，即由设备自动完成各项操作但保留车上的乘务人员，其核心是将系统目标由节省人员拓展为全面提升安全与效率。

### 1.2　系统组成及功能

全自动运行系统是基于整个行车运营组织管理为引导，以无人驾驶功能为基础，以提升全系统安全为导向，能够在生产运营效率和乘客服务水平等方面带来巨大提升，是城市轨道交通走向智能化、智慧化的发展方向。全自动运行系统涉及的关键核心机电系统有信号系统、车辆、站台门系统、综合监控系统和通信系统（见图 1）等。信号系统涉及行车组织及运营管理，其设备在运营控制中心、车站、轨旁和车辆上均有布置，在整个全自动运行系统中处于主导地位；车辆作为移动平台和乘客旅行运输载体，直接关系到全自动运行能否顺利执行，另外还需要保证乘客安全乘坐及提供舒适的乘坐体验；综合监控系统提供整个线路和车站机电设施的环境监控，为整个全自动运行提供运营环境保障；站台门与车门共同为乘客提供在站台与列车之间移动的安全保障；通信系统确保全自动运行各机电系统内部或各子系统之间可靠通信，保障数据安全、可靠地进行交互。随着越来越多的全自动运行系统投入大客流公共交通运输骨干网中，对系统可用性的要求也越来越高。为保证系统持续处于良好的工作状态，有必要对全自动运行系统提供全面的监视和维护信息化，所以拥有状态修、专家分析、健康管理等特点的智能运维系统在全自动运行系统中的重要性也在不断提升。

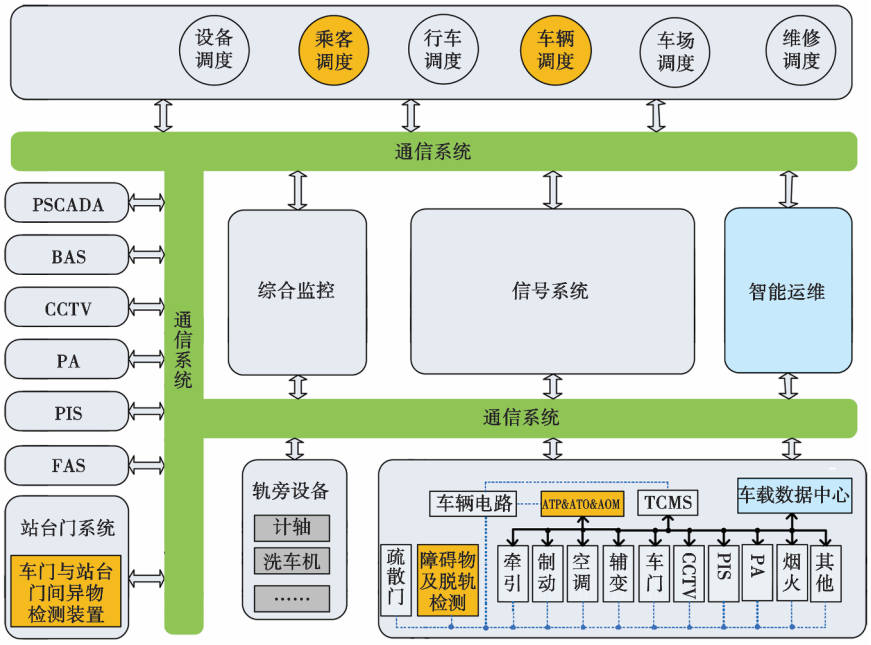


图 1　全自动运行核心机电系统

通过全自动运行系统的几大核心机电的控制与联动（见图 1），全自动运行系统实现的功能主要包括：①列车自动唤醒、综合自检、自动投入正线进行服务、站台精准停车、自动开关车门、自动发车离站、自动折返；②完成运营后自动清客退出正线服务、自动回库、自动休眠、自动洗车；③车载设备故障、车辆火灾等异常情况下的应急响应。

## 2　场景定义及分类

全自动运行系统的场景文件针对城市轨道交通全自动运行系统运营的全过程进行了全面、准确、详细的描述。场景文件既需要体现运营的理念与需求，又需要反应出系统中的各设备功能和岗位设置的依据以及系统之间联动的逻辑。

场景的设计应遵循国内外的相关标准，基于充分的安全分析，符合全自动运行系统的特点，充分发挥出系统的优势，并考虑国内运营需求的特点和系统的兼容性等因素。



(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以国内首条自主 FAO 线路北京燕房线为例，其场景分为正常场景和异常场景 2 类，41 个大项点，包括早间上电、唤醒、出库、轧道车运行、进入正线服务、折返换端、再关车门控制等 [9-10]。具体到工程实现上，场景的分类及数量是存在一些差异的，可根据项目需求和实际应用情况对场景内容和数量进行修改。如按照各场景下的参与方和安全防护主体的差别，场景又可细分为正常场景、非紧急降级场景、紧急降级场景 3 个层次。图 2 为某种场景设计思路。

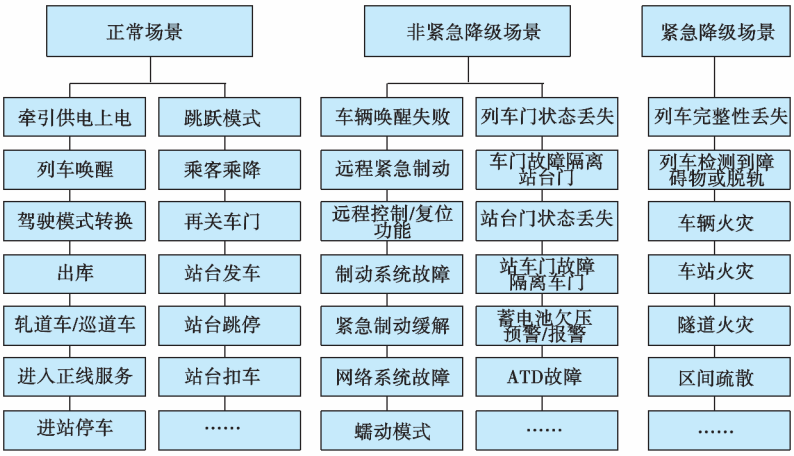


图 2　一种全自动运行运营场景设计构成图

### 2.1　正常场景

正常场景是指系统在无故障、无意外情况下按照计划正常运行的情形，涵盖了列车一天正常的运营活动，从早间上电唤醒到完成当天运营回库后休眠的全过程，一般包括运营前准备、列车唤醒、出库、正线运行、折返、清客、退出正线服务、洗车、日检和维护、休眠以及控制中心远程监控功能等。

除了日检和维护等个别场景必须要工作人员参与外，通常情况下，正常场景下的运营活动不需要人工干预，可由系统自动完成，但根据运营的实际情形的需求，系统支持由控制中心调度人员进行一定程度的干预。

### 2.2　非紧急降级场景

非紧急降级场景一般认为是指因与行车相关的各机电系统内部发生故障或因外部条件的变化导致系统运行偏离运营计划但不直接危及安全的情况。此类场景可包括车辆唤醒失败、站台门故障、车门故障、牵引故障、制动故障、车载网络控制系统故障( 蠕动模式 )、黏着因数降低（雨雪模式）、列车定位故障、ATO 故障及其他需要控制中心对列车进行远程干预的场景（如关车门、施加紧急制动、故障复位）等。

### 2.3　紧急降级场景

紧急降级场景是指因系统中发生故障或因外部发生突发事件而危及安全并要求立即处置的情况。紧急的异常场景可包括车辆火灾、车站火灾、隧道火灾、救援、乘客触发列车紧急手柄、区间疏散、紧急疏散门打开、列车检测到障碍物或脱轨报警等。

总的来说，异常场景是对可能发生的系统内部故障或外部事件的预案。从这个意义上来讲，不可能事先穷尽所有的异常场景，一般以出现的概率较高、危害较为严重的、典型的、共性的或相关标准中已有涉及的一些场景作为基础。异常场景的描述需要有安全分析作为支撑。

## 3　典型场景分析

为使读者能够对 FAO 系统功能及其运营场景有更清晰的了解，下文参考北京燕房线对列车自动唤醒、车门与站台门的对位隔离和车辆火灾 3 个典型运营场景进行分析和介绍。

### 3.1　列车自动唤醒

列车在投入运营前，依据派班计划，控制中心可远程（包含自动和人工授权 2 种方式）对停放在驻车位的已处于休眠状态的列车进行低压上电；唤醒过程主要由信号系统与车辆系统进行配合，完成相关自检和有关车辆机电子系统的工作状态测试。正常唤醒后的列车进入运营服务前的待命状态。

列车被唤醒前，车上的唤醒模块会对唤醒条件进行检查，如是否有司机室钥匙开关动作，检修开关是否激活，列车蓄电池电压是否正常。当列车唤醒模块 AOM 接收到远程唤醒命令并且判断车辆满足上电条件后，向车辆控制电路输出全列车上电脉冲信号，完成全列车设备低压上电的动作。得电后的车载控制设备会对自身状态进行自检，自检内容包括牵引系统、辅变系统、PIS 等车载设备的自检和车载 ATC 的自检。上电自检完成后，车载网络系统 TCMS 会采集和整理相关数据，并将上电自检结果通过车载 ATC 经由车 – 地无线系统传输至控制中心（OCC），列车低压上电自检完成后进行高压上电，启动辅助电源和制动系统空气压缩机。

在静态测试阶段，车载 ATC 将主导列车静态测试环节。占有端的车载 ATC 通过 IO 或通信总线，以一定的顺序发送各项测试指令，车辆根据车载 ATC 的指令依次执行各项测试，并反馈各项测试结果。一端测试完成后，由车载 ATC 更换列车的主控端并进行换端测试。两端测试均完成才认为本次静态测试全部完成。静态测试的内容包括牵引 / 制动测试、照明测试、广播测试、车门开关测试、蠕动模式（CAM）和 PWM 通道测试等。

动态测试在静态测试成功后进行，在动态测试过程中，系统将会参照人工动车步骤，由 ATC 按照预定顺序输出鸣笛、方向、牵引 / 制动指令及级位等信息，控制列车移动一小段距离。动态测试需要根据项目的具体需要进行，其会对土建提出更高的要求，同时需要进行更多的前置人工防护。动态测试并非必须的测试环节，在国内外很多 FAO 线路上没有这一测试环节，



(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

如上海地铁 10 号线、香港南岛线、成都 9 号线、上海 14 号线、上海 15 号线和上海 18 号线等。

设备自检、静态 / 动态测试均成功后，列车唤醒成功，此时可认为该列车已具备投入正线服务的条件。

列车设备自检和静态 / 动态测试中任一环节出现故障时，均需要人工远程 / 本地干预，原则上不允许列车带“病”出库。

列车唤醒的过程中，列车的设备自检、静态 / 动态测试结果以及在此过程中的关键状态信息和故障信息，都将经由车 – 地无线系统传输至控制中心 OCC, 控制中心 OCC 的调度工作站界面可获取各列车的自检结果，使中心的工作人员能够实时掌握列车的状态，并在异常情况下及时处理。图 3 为列车唤醒过程示意图。

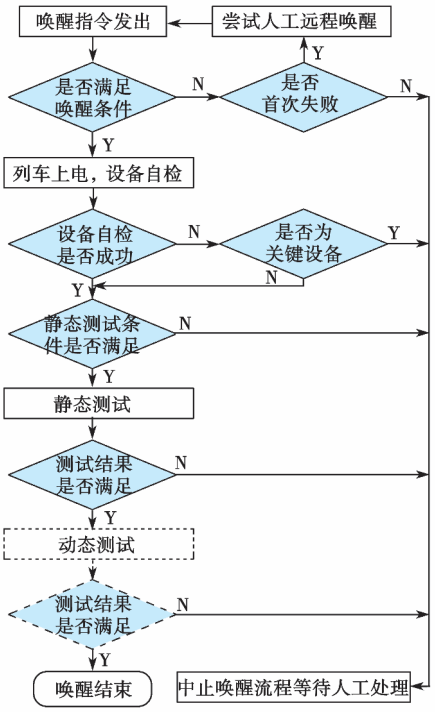


图 3　列车自动唤醒过程示意图

### 3.2　车门与站台门间的对位隔离

对比常规有人驾驶系统情况，全自动运行系统可实现“车门 / 站台门”故障时隔离对应的“站台门 / 车门”，在乘客换乘的过程中保持关闭，确保乘客换乘安全。门对位隔离功能主要由车辆系统、站台门系统、信号系统共同参与完成，同时当“车门 / 站台门”发生故障和隔离时还需要车辆 TCMS/ 综合监控联动对应区域的 CCTV 系统，供控制中心调度及时掌握现场情况。

当列车故障车门被隔离后，车载网络系统（TCMS）会周期性地向车载 ATC 发送车门故障（隔离）信息，ATC 通过车 – 地无线通信系统向轨旁信号系统发送车门故障信息和需对位隔离的站台门位置，再由轨旁信号系统将相关信息转发至站台门系统。列车进站停稳后，ATC 控制列车打开车门，故障或被隔离的车门保持关闭。同时 ATC 通过轨旁信号系统向站台门系统发送站台门打开指令控制打开站台门，故障车门对应的站台门由站台门系统控制保持关闭状态。停站时间结束后列车出站，ATC 不再向轨旁信号系统发送隔离信息。

当车站站台门故障或被隔离后，轨旁信号系统将采集到的站台门故障或隔离信息，通过车 – 地无线通信系统发送至待进站列车的车载 ATC。ATC 接收到站台门隔离信息后，根据信息中的故障或被隔离站台门的位置号确定需被隔离的车门位置号，并通过车辆总线向 TCMS 发送对应车门的切除信息，再由 TCMS 发送至车载门控器（EDCU）。列车进站后，ATC 执行开门作业时，需被隔离的车门由 EDCU 控制不打开，实现站台门故障或被隔离时，隔离对应列车车门的功能。列车驶离站台规定距离后，此列车的车载 ATC 不再使用已经驶离站台的门隔离信息。

### 3.3　车辆火灾

按照 UTO 运行的列车上可能没有值乘人员，因此诸如车辆火灾等紧急情况下的应急处理需在场景文件上体现，即需对列车触发火灾报警时系统的联动功能和所采取的应急策略进行描述。

按照火灾报警触发时列车所处的状态，系统将采取不同的应对措施：

①区间运行过程中触发车辆火灾报警，列车继续运行至下一站对标停车，自动打开车门并保持车门打开状态，疏散乘客。

②列车停靠在站台时触发车辆火灾报警，则控制中心或站台工作人员可发送开门指令至 ATC，从而打开车门并保持车门打开状态，疏散乘客。

车辆需装载火灾报警系统（FAS），对客室和电气设备柜进行火灾探测。车载火灾报警系统检测到车辆火灾时，报警信息和火灾位置信息会通过车辆总线及时发送至车载 TCMS 和车载 ATC。TCMS 将根据被激活的火灾探测器位置，联动车载 PIS 将车载摄像头对准火灾区域，并将火灾区域的画面主动推送至控制中心。另一方面，车载 ATC 通过车 – 地无线通信系统将火灾报警上传至 OCC 调度的工作站进行报警，同时等待 OCC 调度对“火灾情况”进行确认。控制中心调度人员可通过视频画面确认火灾情况，也可在列车运行至下一站后由站务人员上车对火灾情况进行确认并上报 OCC。

若控制中心调度确认发生火灾，则可由中心调度远程向发生火灾的列车发送“火灾确认”信息，此时 ATC 将通过 TCMS 联动车载 PA 和 PIS，向乘客进行火灾广播和图文提示，并在火灾处理结束后由人工进行本地的火警复位。

若站务人员上车确认火灾报警为误报，则可通过列车显示屏上的复位按键或通知控制中心调度进行远程火灾报警的复位，随后列车在中心调度确认后将仍以 FAM 模式 ( 全自动驾驶模式 ) 自动发车。

通过对上述 3 个场景的分解，可以看出运营场景需对参与的相关系统及工作人员职能（下转第 135 页）



(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

## 4　结论

通过对某地铁运行过程中牵引电机实测的振动数据进行数值分析，得到以下主要结论：

①地铁牵引电机实际运行中的振动分布特性属于超高斯分布，而标准 IEC 61373 中规定的分布特性为高斯分布，标准不能满足我国地铁牵引电机对振动测试的要求。

②地铁牵引电机实际运行中的振动方均根值在标准频率范围内明显低于 IEC 61373 标准的规定值；冲击加速度峰值在横向略高于标准规定值，而在其他 2 个方向远低于标准值。

③从 ASD 频谱图可知，标准 ASD 谱大于实测谱，但实测谱存在一些标准中未包含的中高频振动。因此，在电机设计中需考虑高频振动的影响。

本文在实测振动数据的基础上，与标准 IEC 61373 进行了对比分析，分析结果可为地铁车辆用牵引电机的结构耐久性设计提供载荷谱输入。下一步将积累更多的实测数据，归纳整理分析，同时基于现有的实测数据进行深化分析，提出适用于牵引电机的超高斯振动的疲劳可靠性设计方法。

**参考文献：**

[1] International Electrotechnical Commission Technical Committee 9. Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests: IEC 61373:2010 [S]. Geneva: Standards Press of International Electrotechnical Commission, 2010.
[2] 丁杰 , 张平 , 王鹏 . 机车车辆设备振动试验标准与实测数据的分析 [J]. 机械工程学报 , 2016, 52(22): 129-137.
[3] 张春玉 , 程亚军 . 基于实测载荷谱的 ATP 天线梁随机振动疲劳分析 [J]. 大连交通大学学报 , 2015, 36(6): 44-47.
[4] 黄洪斌 . 随机振动下受流器 / 第三轨接触振动及噪声研究 [D]. 北京 : 北京交通大学 , 2015.
[5] 徐杰 , 肖守讷 , 阳光武 . 动车组天线梁随机振动疲劳寿命评估 [J]. 城市轨道交通研究 , 2017, 20(6): 57-61.
[6] 李帅 . 牵引电机传动系统噪声与振动特性分析 [D]. 大连 : 大连交通大学 , 2012.
[7] 于庆斌 . 牵引电机引起动车组车体振动的分析 [J]. 铁道车辆 , 2017, 55(1): 42-44.
[8] 安琪 , 李芾 , 傅茂海 . 牵引电机振动对构架疲劳强度的影响 [J]. 西南交通大学学报 , 2010, 45(2): 209-212.

作者简介：郭　枫（1985—），女，工程师，主要从事地铁车辆运用维保工作。

（上接第 115 页）　提出具体要求，并将所需实现的功能分配至各参与系统。

## 4　结语

全自动运行系统的设计涉及信号系统、车辆、通信、综合监控、站台门等多个系统，是一个先进、复杂、庞大的系统性工程，代表了未来轨道交通的发展方向。FAO 系统凭借其高效、安全、可靠等优点在国内受到青睐。目前国内各主要城市如北京、上海、广州、武汉、南京、南宁等都已开通、建设或规划了全自动运行线路。

在 FAO 系统的具体设计过程中场景分析起着指导性的作用。FAO 的优化与完善应建立在对运营场景做更全面、深入的分析基础上，通过加强对异常情景的剖析，并结合智能传感、大数据分析云平台等技术手段，围绕提高运营管理效率，提升乘客服务质量，完善突发事件响应机制，进一步提高系统可靠性和安全性。

**参考文献：**

[1] STANWAY L C. Mails Under London: The story of the carriage of the mails on London's underground railways[M]. London: Association of Essex Philatelic Societies, 2000.
[2] Thales. The Evolution of CBTC[R]. Toulouse: Thales, 2016.
[3] Simens. Driverless metro in Nuremberg[R]. Belin: Simens, 2014.
[4] HORNE M. Driverless Underground trains for London[J]. Modern Railways, 2012(9): 62-65.
[5] IEC TC9. Railway applications – Automated urban guided transport(AUGT) – Safety requirements: IEC 62267: 2009[S].
[6] 路向阳 , 李雷 , 雷成健 , 等 . 城市轨道交通全自动驾驶技术发展综述 [J]. 机车电传动 , 2018(1): 6-12.
[7] 路向阳 , 吕浩炯 , 廖云 , 等 . 城市轨道交通全自动驾驶系统关键装备技术综述 [J]. 机车电传动 , 2018(2): 1-6.
[8] 李晶 . 城轨全自动驾驶信号系统方案设计及运营场景分析 [J]. 铁道通信信号 , 2016, 52(2): 48-52.
[9] 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, 186(6): 85-86.
[10] 包峰 , 侯忠伟 . 城市轨道交通全自动运行系统运营场景分析 [J]. 信息技术与信息化 , 2018, 218(5): 189-191.
[11] 宁滨 , 郜春海 , 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, 43(1): 1-6.

作者简介：谭文举（1972—），男，教授级高级工程师，从事城市轨道交通运营管理和机电设备系统研究工作。



(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net