

文章编号: 1000-128X(2018)01-0006-07

# 城市轨道交通全自动驾驶技术发展综述

路向阳<sup>1</sup>, 李雷<sup>1</sup>, 雷成健<sup>1</sup>, 马伟杰<sup>2</sup>, 周开成<sup>1,3</sup>

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 上海地铁第一运营有限公司, 上海 201103; 3. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 回顾了城市轨道交通全自动驾驶技术近 100 年来的发展历程, 简要介绍了与此相关的 2 个国际标准的制修订过程和主要内容, 描述了全自动驾驶的优越性和发展前景。

**关键词:** 城市轨道交通; 全自动驾驶; 国际标准

**中图分类号:** U284.48; U231<sup>+</sup>.94; U268.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.01.002

## A Review of the Development of Urban Railway Transport Full Automatic Operation Technology

LU Xiangyang<sup>1</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, LEI Chengjian<sup>1</sup>, MA Weijie<sup>2</sup>, ZHOU Kaicheng<sup>1,3</sup>

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Shanghai Metro First Operation Company, Shanghai 201103, China; 3. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** The development and progress of the urban railway transport full automatic operation technology for the past 100 years was reviewed, and briefly introduced the relevant standards and the standardization progress, as well as the advantage and prospect of the full automatic operation technology.

**Keywords:** urban railway transport; full automatic operation; international standard

## 0 引言

列车全自动驾驶技术是当前轨道交通自动化领域的研究热点之一。本文力图就城市轨道交通无人驾驶(业内一般称为全自动驾驶)的发展历程情况作一些介绍, 希望能从城市轨道交通全自动驾驶技术的起源、发展变迁、世界各国的系统供应商与运营商的业绩, 以及国际标准的侧面收集一些信息并进行分析, 为该领域的读者提供一点参考。

## 1 城市轨道交通全自动驾驶技术发展回顾

### 1.1 早期的研究与试验

轨道交通全自动驾驶技术可以追溯到 1926 年英国伦敦进行的无人驾驶邮件地铁列车的试验, 该系统于

1927 年开通运行, 线路全长 10.5 km。该邮件专用窄轨铁路线为东西走向, 从位于伦敦西侧的帕丁顿邮局分拣中心至伦敦东侧的怀特查佩尔邮局分拣中心, 途经芒特普莱森等 7 个站, 主要服务于邮局间邮件传送。该系统从 1927 年正式开通, 运营到 2003 年, 由于沿路各邮局搬迁而被废弃<sup>[1]</sup>。

此后英国开展了一系列全自动驾驶旅客运输交通的项目。1963 年, 在伦敦进行了一系列自动驾驶列车在 2 个站之间的自动驾驶试验, 在成功进行了安全测试之后, 于 1964 年开始进行全方位的自动驾驶试验, 试验运行采取了自动驾驶列车与有人驾驶列车在同一线路混跑的方式, 自动驾驶系统也是利用既有的固定闭塞信号系统。在所有自动驾驶的列车都被证明能安全运行之后, 1968 年 11 月伦敦的第一条全自动驾驶地铁线

收稿日期: 2017-12-08

维多利亚线开始运营<sup>[2-4]</sup>。

伦敦虽然在全自动驾驶技术的发展与应用开了先河, 但世界上第一条全自动载客地铁系统被认为是诞生在美国。纽约时代广场至中央火车站摆渡线被认为是首条载客的自动化地铁线。该项目于1959年启动, 1960年初开始在一段隔离的线路进行相关试验; 1961年开始进行站台等设施的改造以支持自动化运行, 并于1961年的后期进行无乘客的调试及试运行; 1962年1月正式开始载客运营。线路采用环形设计, 具备了包括站台自动发车、区间自动调速、站台自动停车和自动开关车门, 实现了列车正线作业过程自动化。该系统由纽约市公共交通局组织包括通用电气、西屋、通用铁路信号公司、美国联合道岔与信号国际公司以及威斯汀豪斯空气制动公司共同完成<sup>[5]</sup>。单从技术角度来看, 该线路已经完全具备不需要乘务员上车, 不过由于工会的介入以及安抚乘客, 列车上仍安排有乘务员。1964年一场发生在第42大街车站的意外火灾, 导致部分车辆和站台损坏, 由此包括车站及车站周边区域被关闭, 在修复完毕后, 没有再采用自动驾驶。

这一时期自动驾驶技术采用的主要手段是通过向钢轨发送不同频率的脉冲来指示列车的速度限制, 如每分钟270个脉冲表示列车可以以40 km/h的速度运行。除此之外, 还在特殊的地点布置“点式命令”发生器, 例如, 在2个站之间的最佳地点布置一个“点式命令”发生器, 该发生器发出15 kc/s的音频信号指示经过的列车当前应当是卸载还是惰行。而在列车驶入站台过程中, 将经过一系列上述的点式命令发生器, 实现列车在站台的平稳停车。

在德国, 柏林的第一次自动驾驶试验是在1928年, 在Krumm Lanke站附近, 自动驾驶系统叠加在既有的信号闭塞系统之上, 目标是在列车的整个运行进路上干预列车运行而不是仅仅在信号机处。更进一步的试验在1958至1959年, 试图采用LZB技术控制列车速度, 但没有取得足够进展。更大的成功于20世纪60年代取得, 1965年开始在U9线的Spichernstrass和Zoological Gardens站之间进行夜间试验, 1967年系统运行良好。1969年列车开始载客。1976年5月, 整个U9线全部升级为自动驾驶运营, 不过开始只是在低谷时间段。全时间段的自动驾驶运营服务开始于1977年, 直到15年后的1993年, 因系统老化而整改, 1998年废弃。

20世纪70年代, 来自另一个有竞争关系的公司的技术Seltrac在一段因柏林城市的分裂而关闭的高架U-Bahn上得到试验, 该线路在Buelowstrasse和Potsdamer Platz站之间。试验后续转到U4线, 从1981年持续到1985年, 直到当技术被认为足够成熟可载客。U4线自动驾驶系统载客运营从1985年直到1993年。

在1996~2000年期间, 在U5线的Friedrichsfelde和Biesdorf-Sued站间进行了自动驾驶的试验, 称为STAR项目。该项目采用了无线电技术与列车进行通信, 但由于U5线西向延伸的计划延迟, 该项目最终停止, 以后再无进展。

20世纪60年代~20世纪70年代, 在联邦政府计划下进行了汉堡地铁(U-Bahn)的试验, 1982年10月~1985年1月间在10 km的线路上进行了自动载客运行服务。

法国巴黎在1952~1956年期间也进行过载客地铁列车的自动驾驶试验, 经过20世纪60年代多列车的试验之后于1972~1979年间把传统地铁升级到自动驾驶地铁系统, 但这个时期的列车上仍然有人负责列车的车门控制和站台发车<sup>[6]</sup>。

## 1.2 轻轨列车自动驾驶技术的兴起

20世纪80年代, 轻轨列车的全自动驾驶技术开始蓬勃兴起。

1981年2月, 日本的第一条市区自动导向运输AGT即Automatic Guided Transit线神户港岛线开通, 该线采用橡胶轮、侧轨导向, 实现了正线运营全过程的自动化。神户港岛线也被认为是全球首条真正意义上的GOA4线路。

1983年4月25日, 法国的第一条全自动轻轨地铁系统里尔Lille1号线开通, 采用了VAL系统。VAL原本是第一条采用这种技术的轻轨线路的地名的首字母, 但现在被认为是自动化轻轨车辆即automated light(weight) vehicle的代名词。VAL车辆长26 m(2节车辆联挂), 宽2 m, 每2单元列车载客152人, 采用胶轮。VAL的优点是建设成本低, 站台短, 发车间隔可达60 s。在该线路中, 首次采用站台门将轨行区与乘客进行隔离, 以保证乘客安全, 减少站台被入侵概率, 大幅提高了安全性和系统运行的可靠性。该自动驾驶系统的体系相对完善, 对后续轨道交通自动驾驶技术的发展具有深刻的影响。

VAL技术在法国、意大利、美国、韩国等多个国家或城市得到了应用, 如韩国首尔首都区的Uijeongbu, 该线路长11.2 km, 依地名的首字母被称为U线。VAL技术后来演变、升级为不同的、具有竞争关系的自动驾驶系统, 在一些城市得到应用, 如中国台湾地区台北地铁的文湖线。

里昂是法国另一个具有无人驾驶地铁线路的城市, 列车采用全景窗以便乘客欣赏风景。列车车门具有传感器检测是否夹住了衣服、包或其他东西, 红外线系统检测站台边缘或轨道上是否有障碍物。虽然车站的建设允许列车可由4节车厢组成, 但实际上列车仅由2节车厢组成, 发车间隔约2 min。

加拿大也开展了自动驾驶技术研究, 其中有些项目采用了本土培育的技术。该技术最初称之为ICTS

(Intermediate Capacity Transit System), 其车辆被称为 ALRT(Canadian Automated Light Rail Transit Vehicles), 采用传统的钢轮、钢轨和创新的自导向转向架, 以及直线电机驱动, 除了再生制动和轮盘制动外, 还具有磁轨制动以确保紧急情况时的快速停车。如今该系统被称之为 ART (Advanced Rapid Transit), 最初的车辆 (UTDC 的 Mark I) 长度为 12 m, 第二代 (庞巴迪) 的 Mark II 车辆长度为 18 m。该技术首先应用于温哥华 1985 年开通的全自动的 Expo 线。除了市中心的一小段隧道外, Expo 线大部分为高架线路, 因此该 ART 系统也被称为天空列车 Skytrain。该线路采用 Mark II 型车辆, 可支持灵活编组 (2、4、6 辆进行编组), 采用加拿大 ITT SEL 公司 (后被泰雷兹收购) 提供的 SelTrac 信号系统。信号系统车载设备和地面子系统间通过环线进行双向数据传输, 整体自动化等级达到 GOA4 级, 并支持车辆段的自动化。该项目不仅是移动闭塞技术在城市轨道交通的首次应用, 而且是基于通信的列车控制系统 (CBTC) 在城市轨道交通的首次应用<sup>[7]</sup>。

ART 系统在美国的底特律和纽约也得到了应用, 底特律采用了单节或双节的 Mark I 型 ART, 而在纽约该 13 km 长的系统用于连接约翰 F. 肯尼迪国际机场各航站楼、机场停车场与市区地铁以及通勤列车。

马来西亚的 Kelana Jaya 线采用了 ART 的 Mark II 型车辆, 该系统以 2 辆和 4 辆编组混跑的形式运行。

在中国北京, ART 系统采用了专门为机场服务而建设的机场快轨线, 该线全长 27 km, 连接北京首都机场与东直门, 总共 4 个站, 其中 2 个站在机场的 3 号航站楼和 2 号航站楼, 其他 2 个站与地铁的换乘站驳接。机场快轨采用了 Bombardier 的 Mk II 型车辆, 4 辆编组运行, 于 2008 年 8 月北京奥运会之前开通。

韩国的一些城市也使用了轻轨自动驾驶系统, 如釜山地铁的 4 号线采用了胶轮的 AGT 系统。该线路全长 12.7 km, 14 个站, 其中 8 个站在地下, 1 个站在平地, 5 个站为高架。而全长 24 km 21 个站的釜山—金海全自动驾驶轻轨采用了传统的标准轨距钢轮技术, 该线路连接釜山和金海, 途经金海国际机场。

### 1.3 全自动驾驶技术进入加速应用

1998 年, 法国巴黎开通了第一条全自动无人驾驶地铁线 14 号线, 称为流星, 该线具有站台门, 列车两

端采用大型全景玻璃以便乘客观景。14 号线车采用了阿尔斯通提供的 MP89 型车和西门子提供的 Trainguard 信号系统。正是由于 14 号线的巨大成功, 2005 年巴黎地铁决定把极其繁忙的 1 号线也升级为无人驾驶, 升级工程包括信号系统 (西门子负责)、车辆 (阿尔斯通负责) 以及把所有站台安装 / 更新屏蔽门或 1.8 m 高的站台门。在 2011 年 11 月至 2012 年 12 月间, 引入了无人值守的列车并与有人值守的列车混跑, 2012 年 12 月 15 日后, 所有列车均为无人值守, 实现了 100% 的自动化。

2003 年 6 月, 新加坡东北线开通, 这是全世界首条全自动驾驶的全地下大运量地铁 MRT 线路, 也是全世界第一条实现正线、车辆段全自动运行的大运量地铁。新加坡除了表 1 中所列出的 6 条全自动驾驶线路外, 还有 1987 年开通的东西线 (49 km) 和 1989 年开通的南北线 (44 km) 人工驾驶线路。由于全自动驾驶系统的优越性, 新加坡陆路交通管理局 LTA 已经启动了将其改造为全自动驾驶的工程, 也就是说, 新加坡的所有地铁线路将全部采用全自动驾驶技术。

在德国, 纽伦堡的 RUBIN (Realising an automated U-Bahn In Nuernberg) 项目是德国第一条全自动 / 无人驾驶 U-Bahn 的成功实现, 也是全世界载客无人驾驶与有人驾驶混跑的第一个实例。其 U3 线包含 2 个郊区分支线, 于 2008 年 6 月开通, 之后 U2 线采取逐列车自动驾驶的方式升级, 最终于 2010 年 1 月实现全自动驾驶<sup>[8-9]</sup>。

值得一提的是, 德国在全自动驾驶方面在国家、行业层面有比较完备的法规、行业标准体系。例如, 德国有法规规定, 在紧急警报被激活或如果检测到任何诸如火灾的其他危害, 列车不应停在隧道中, 而应行进到下一站, 因为这将便于救援。为了尽可能提高安全性和减少乘客的危险, 以无人驾驶方式运行的列车的设计应在以下方面考虑安全性的提高: ①乘客与控制中心的通话能力; ② CCTV 摄像头应连接到控制中心, 以便控制中心人员能够实时不间断监视列车上的状况; ③车辆应采用防火材料, 包括防火的电缆; ④在旅客区域和地板下每一个机器间都应布置多重温度和烟雾探测器, 以便尽早发现可能火灾。

截至目前已开通全自动驾驶 (GOA4) 线路见表 1<sup>[10-11]</sup>。

表 1 已运营的无人驾驶系统线路

| 序号 | 国家 | 城市名称 | 线路名称    | 首次开通时间 | 制式         | 车辆供应商                | 信号系统供应商    | 线路长度 / km |
|----|----|------|---------|--------|------------|----------------------|------------|-----------|
| 1  |    | 神户   | 神户港岛线   | 1981   | LRT        | 川崎重工                 |            | 10.8      |
| 2  |    | 大阪   | 南港线     | 1981   | LRT/AGT    | 石川岛播磨重工 IHI          |            | 7.9       |
| 3  | 日本 | 横滨   | 金泽海岸线   | 1989   | LRT        | 三菱重工                 |            | 10.6      |
| 4  |    |      | 百合海鸥线   | 1995   | LRT/AGT    | 三菱重工                 |            | 14.7      |
| 5  |    | 东京   | 日暮里—舍人线 | 2008   | LRT/AGT    | 石川岛播磨重工 IHI/<br>三菱重工 | 日信         | 9.7       |
| 6  |    | 名古屋  | 东部丘陵线   | 2005   | LRT/Maglev | Chubu HSST           | Chubu HSST | 8.9       |

表 1(续)

| 序号 | 国家   | 城市名称  | 线路名称        | 首次开通时间  | 制式            | 车辆供应商             | 信号系统供应商    | 线路长度 /km   |
|----|------|-------|-------------|---------|---------------|-------------------|------------|------------|
| 7  | 中国   | 台北    | 文湖线         | 1996    | LRT           | 庞巴迪               |            | 25.1       |
| 8  |      | 香港    | 南港岛线(东段)    | 2016    | MRT           | 阿尔斯通/长客           | 阿尔斯通       | 7.4        |
| 9  |      | 上海    | Line 10     | 2016    | MRT           | 阿尔斯通/浦镇           | 阿尔斯通/卡斯柯   | 36.95      |
| 10 | 马来西亚 | 吉隆坡   | 格拉那再也线      | 1998    | LRT           |                   | 泰雷兹        | 29         |
| 11 | 新加坡  | 新加坡   | 武吉班让轻轨      | 1999    | LRT           | 庞巴迪               |            | 8          |
| 12 |      |       | 盛港轻轨        | 2003    | LRT           | 三菱重工              |            | 10         |
| 13 |      |       | 榜鹅轻轨        | 2005    | LRT           |                   |            | 10         |
| 14 |      |       | 东北线         | 2003    | MRT           | 阿尔斯通              | 阿尔斯通       | 20         |
| 15 |      |       | 环线          | 2009    | MRT           |                   |            | 33         |
| 16 |      |       | 滨海市区线       | 2013    | MRT           | 庞巴迪/长客            | 西门子        | 42         |
| 17 | 阿联酋  | 迪拜    | Red line    | 2009    | MRT           | 三菱重工/近畿车辆<br>株式会社 | 泰雷兹        | 52.1       |
| 18 |      |       | Green line  | 2011    | MRT           | 三菱重工/近畿车辆<br>株式会社 | 泰雷兹        | 22.5       |
| 19 | 韩国   | 釜山    | 釜山至金海轻轨     | 2011    | LRT           |                   | 泰雷兹        | 23.9       |
| 20 |      |       | Line 4      | 2011    | LRT           |                   |            | 10.8       |
| 21 |      | 首尔    | 新盆唐线        | 2011    | MRT           |                   | 泰雷兹        | 30.1       |
| 22 |      | 议政府   | U Line      | 2012    | LRT           |                   |            | 11.2       |
| 23 |      | 龙仁    | 龙仁轻轨        | 2013    | LRT/ART       | 庞巴迪               |            | 18.1       |
| 24 |      | 大邱    | Line 3      | 2015    | LRT/Mono rail |                   | 日立         | 23.95      |
| 25 |      | 仁川    | 仁川机场磁浮线     | 2016    | LRT/Maglev    | 现代                |            | 6.1        |
| 26 |      |       | Line 2      | 2016    | LRT           | 现代                | 泰雷兹        | 29.2       |
| 27 | 法国   | 里尔    | 里尔地铁        | 1983    | LRT/VAL       | Matra             | VAL system | 45         |
| 28 |      |       | 奥利机场快轨      | 1991    | LRT/VAL       | 西门子               | VAL system | 7.3        |
| 29 |      | 巴黎    | Line 14     | 1998    | MRT           | 阿尔斯通              | 西门子        | 8.6        |
| 30 |      |       | 戴高乐机场捷运系统   | 2007    | LRT/VAL       | 西门子               | VAL system | 3.5        |
| 31 |      |       | Line 1      | 2011    | MRT           | 阿尔斯通              | 西门子        | 16.6       |
| 32 |      | 里昂    | Line D      | 1992    | LRT/VAL       | 阿尔斯通              | 西门子        | 12.5       |
| 33 |      | 图卢兹   | Line A      | 1993    | LRT/VAL       | Matra             | VAL system | 12.5       |
| 34 |      |       | Line B      | 2007    | LRT/VAL       | 西门子               | VAL system | 15.7       |
| 35 |      |       | 雷恩          | Line A  | 2002          | LRT/VAL           | 西门子        | VAL system |
| 36 | 丹麦   | 哥本哈根  | M1          | 2002    | MRT           | 安萨尔多              | 安萨尔多       | 14.3       |
| 37 |      |       | M2          | 2002    | MRT           |                   |            | 14.2       |
| 38 | 意大利  | 都灵    | Line 1      | 2006    | LRT/VAL       | 西门子               | VAL system | 13.2       |
| 39 |      | 布雷西亚  | 布雷西亚地铁      | 2013    | LRT           |                   |            | 13.7       |
| 40 |      | 米兰    | Line 5      | 2013    | LRT           | 安萨尔多              | 安萨尔多       | 12.8       |
| 41 |      | 罗马    | Line C      | 2015    | MRT           |                   |            | 18.1       |
| 42 | 德国   | 纽伦堡   | U2&U3       | 2008    | LRT           |                   | 西门子        | 21.3       |
| 43 | 瑞士   | 洛桑    | M2          | 2008    | MRT           | 阿尔斯通              | 阿尔斯通       | 5.9        |
| 44 | 西班牙  | 巴塞罗那  | Line 9      | 2009    | MRT           | 阿尔斯通              | 西门子        | 12         |
| 45 | 匈牙利  | 布达佩斯  | Line 4      | 2014    | MRT           | 阿尔斯通              |            | 7.4        |
| 46 | 加拿大  | 温哥华   | 博览线         | 1985    | LRT           | 庞巴迪               | 泰雷兹        | 28.9       |
| 47 |      |       | 千禧线         | 2002    | LRT           | 庞巴迪               | 泰雷兹        | 31.2       |
| 48 |      |       | 加拿大线        | 2009    | LRT           | 现代                | 泰雷兹        | 19.2       |
| 49 |      |       | 底特律         | 底特律捷运系统 | 1987          | LRT               | 庞巴迪        | 泰雷兹        |
| 50 |      | 杰克逊维尔 | 杰克逊维尔捷运系统   | 1989    | LRT           | 庞巴迪               | 泰雷兹        | 4          |
| 51 | 美国   | 拉斯维加斯 | 拉斯维加斯单轨系统   | 1995    | LRT           | 庞巴迪               | 泰雷兹        | 6.3        |
| 52 |      | 纽约    | 约翰肯尼迪机场捷运系统 | 2003    | LRT           | 庞巴迪               | 泰雷兹        | 12         |
| 53 |      | 迈阿密   | 迈阿密捷运系统     | 2008    | LRT           | 庞巴迪               | 泰雷兹        | 7.1        |
| 54 | 巴西   | 圣保罗   | Line 4      | 2010    | MRT           | 现代                | 西门子        | 12.8       |

## 2 有关地铁全自动驾驶的主要国际国内标准

有关地铁全自动驾驶技术的国际标准主要有

IEC 62267 和 IEC 62290 系列。

IEC 62267 Railway applications –Automated urban guided transport (AUGT) Safety requirements (轨道

交通自动化的城市轨道交通 (AUGT) 安全要求) 第 1 版发布于 2009 年<sup>[12]</sup>, 该标准主要来源于 IEC/PAS 62267: 2005。

IEC 62267 提出了自动化等级即 GoA 的概念, 根据运营人员和系统所承担的列车运行基本功能的责任划分确定列车运行的自动化等级, 可分为以下 5 级:

① TOS- 目视列车运行。列车运行由司机全权负责, 不受任何系统监控, 但道岔和轨道可部分由自动设备系统监控。

② NTO- 非自动化列车运行。司机在列车司机室观察路况, 根据轨旁信号和车载信号控制列车加速和制动, 并在发生紧急情况时及时停车。信号系统可断续、半连续或全程监管司机驾驶。列车上或站台上工作人员共同负责列车的安全离站, 包括车门关闭。

③ STO- 半自动列车运行。运营工作人员在列车驾驶室观察路况, 并在发生紧急情况时及时停车。列车的加速和制动由设备自动完成。全程由自动设备系统监管。列车上或站台上工作人员负责列车的安全离站。

④ DTO- 无人驾驶列车运行。列车工作人员不控制列车加速和减速, 也不负责在司机室监视路况和紧急制动操作; 而列车的安全离站 (包括车门关闭) 由列车工作人员负责, 或由设备自动完成。

⑤ UTO- 无人干预列车运行。列车在不配置车上工作人员的条件 (所有功能均由系统负责实现) 下的运行。

在各种自动化等级下运营人员和系统所承担的列车运行基本功能更进一步细化的责任划分如表 2 所示。

表 2 IEC 62267 自动化等级划分

| 列车运行基本功能                        | 自动化等级  |  |  |  |  |
|---------------------------------|--|--|--|--|--|
|                                 | GoA0<br><br>TOS | GoA1<br><br>NTO | GoA2<br><br>STO | GoA3<br><br>DTO | GoA4<br><br>UTO |
| 确保进路安全                          | x  | √  | √  | √  | √  |
| 确保列车运行安全                        |  |  |  |  |  |
| 确保列车运行间隔安全                      | x  | √  | √  | √  | √  |
| 确保列车速度安全                        | x  | √  | √  | √  | √  |
| 列车驾驶                            |  |  |  |  |  |
| 控制加速和制动                         | x  | x  | √  | √  | √  |
| 轨道的监督                           |  |  |  |  |  |
| 避免与障碍物碰撞                        | x  | x  | x  | √  | √  |
| 避免与人碰撞                          | x  | x  | x  | √  | √  |
| 乘降作业的监督                         |  |  |  |  |  |
| 控制车门                            | x  | x  | x  | x/√  | √  |
| 避免列车和列车间隙对人造成伤害;                |  |  |  |  |  |
| 避免列车和站台间隙对人造成伤害                 | x  | x  | x  | x/√  | √  |
| 确保列车启动运行的安全                     | x  | x  | x  | x/√  | √  |
| 列车的运营                           |  |  |  |  |  |
| 列车投入或退出运营                       | x  | x  | x  | x  | √  |
| 监督列车状态                          | x  | x  | x  | x  | √  |
| 紧急情况的检测和处理                      |  |  |  |  |  |
| 执行列车诊断, 检测火灾 / 烟雾, 检测脱轨, 处理紧急情况 | x  | x  | x  | x  | √/OCC  |

2011 年, IEC 发布 了 IEC/TR 62267 Railway applications –Automated urban guided transport (AUGT)

Safety requirements – Part2:Hazard analysis at top system level (轨道交通自动化的城市轨道交通 (AUGT) 安全要求 第 2 部分: 系统顶层危害分析<sup>[13]</sup>)。该文件主要在系统顶层分配可能的安全措施以弥补由于前端司机室或列车上没有乘务人员的空白。

我国于 2016 年发布修改采用 IEC 62267: 2009 的国家标准轨道交通自动化的城市轨道交通 (AUGT) 安全要求 第 1 部分: 总则即 GB/T 32588.1—2016<sup>[14]</sup>。

国际上另一个与全自动驾驶密切相关的标准是 IEC 62290 系列。

IEC 62290 Railway applications –Urban guided transport management and command/control systems – Part1:System principles and fundamental concepts (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, 以下简称 IEC 62290-1) 首次发布于 2006 年, 2014 年发布第 2 版 (在前版基础上做了微小修订, 主要是删除了 GOL 即线路等级的相关内容)<sup>[15]</sup>。

在策划之初, IEC 62290 标准编制工作组 IEC/TC9/WG40 计划编制 4 个部分, 形成对 UGTMS 即城市轨道交通管理与命令 / 控制系统 (涵盖 GoA0- GoA4 各等级) 从需求、功能、系统构成、功能分配到接口的递进关系的系列规范。该标准对于通用的全自动驾驶系统的设计有指导性的意义, 以下做一些简要的介绍。

IEC 62290-1 主要负责 UGTMS 的定义、原理和主要的功能要求。覆盖了包括从目视驾驶到全自动驾驶的运行等级, 其 GoA0 到 GoA4 的定义与 IEC 62267-1 一致。IEC 62290-1 规定了 UGTMS 的范围和外围, 即把运控子系统、轨旁子系统、车载子系统和数据通信子系统划归 UGTMS 内部系统, 而把控制中心人机界面、车站、信息发布、列车、基础设施、牵引供电、维护等划归外围设备。IEC 62290-1 提出了互联互通、互换性、兼容性和适应性的要求, 但是鉴于本系列标准要达到该目标所需的巨大工作, 以及在 IEC 62290-3 的编制、讨论过程中发现大量有关 IEC 62290-1 和 IEC 62290-2 的问题, WG40 倾向于启动对 IEC 62290-1 和 IEC 62290-2 的修改工作并同步修改这一要求。

IEC 62290-1 的 6.2.2 节“列车运行的基本功能”和 6.2.3 节“运营管理和监视的基本功能”是 IEC 62290-1 的主体, 也是整个 IEC 62290 标准系列将逐步递进展开和深入进行规范的主要内容。列车运行

的基本功能包括确保列车的安全移动(确保安全进路、确保列车的安全距离、确保安全速度和授权列车移动)、驾驶列车(列车的起、停和速度控制)、监视轨道(防止与障碍物碰撞、防止与轨道上的人碰撞)、监视乘客乘降(门的控制、防止车辆之间或车辆与站台之间的人员伤亡、确保列车离站发车条件)、运行列车(列车投入或退出运营、牵引模式转换、列车站间移动、改变旅行方向、编组或解编、列车状态监视)、确保紧急场景的检测与管理(烟火检测、脱轨检测、列车完整性检测、旅客呼叫/疏散处置)等;运营管理和监视的基本功能包括管理日常时刻表(导入时刻表、选择时刻表、修改时刻表)、管理列车服务(管理列车车次、自动设置进路、调度列车、确保换乘服务、处置运营的干扰、列车派遣)、监视列车运营(监视列车轨迹、监视列车和轨旁设备、监视乘客)、控制牵引供电、操作接口(控制中心HMI、列车HMI、乘客与工作人员的通信、乘客信息系统、乘客视频监控、维修支持、车辆和工作人员资源管理等)。

IEC 62290-2 即 IEC 62290 Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems–Part2:Function requirements specification (城市轨道交通运输管理和指令/控制系统 第2部分:功能需求)规范首次发布于2011年,2014年发布了第2版<sup>[16]</sup>。

IEC 62290-2 的主体是第5章“列车运营功能”和第6章“运营管理和监视功能”。这2章分别对应 IEC 62290-1 的6.2.2节“列车运行的基本功能”和6.2.3节“运营管理和监视的基本功能”,把前者的每一项要求分别分解为若干分子功能,并进一步把分子功能分解为原子功能,对每一原子功能编号,甄别其适用于何种GoA等级,以便在后续系列标准中进一步使用。例如,对于“确保安全进路”这个要求,在IEC 62290-1中仅用一句话提出了应具有防止其他列车冲突使用进路的要求。在IEC 62290-2中,将该要求分解成包括设置进路、监管进路、锁闭进路和释放进路4个分子功能,并对每个分子功能进一步细化,如设置进路又细分出了设置进路(自动或手动)、确定所需进路元素、检查进路元素的可用性、移动进路元素到所要求位置等10个原子功能。最终“列车运营功能”和“运营管理和监视功能”共分解为约400个原子功能。

IEC 62290-3 即 IEC 62290 Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems UGTMS (城市轨道交通运输管理和指令/控制系统 第3部分:系统需求规范)目前正在制订之中。IEC 62290-3 在 IEC 62290-1 的基础上进一步明确和细化了UGTMS的系统构成和涉及的外部系统或设备。UGTMS内部系统由运营控制子系统OCS、轨旁子系统WS、车载子系统OBS、数据通信子系统DCS和点式传输子系统SPTS共计5个子系统构成,其中点式传

输子系统仅用于列车定位。外部环境由位于控制中心、正线与站场、列车上的各种设备共计19种构成。IEC 62290-3 将把 IEC 62290-2 中规范的约400个原子功能逐一分配到这些内部子系统或外部设备。对每一个原子功能,规定由哪个或哪几个内部子系统处理,以及为实现这一原子功能该子系统与涉及到的其他子系统或外部设备的关联关系。

按照最初的计划,IEC 62290-4 应在 IEC 62290-3 的基础上进一步规范UGTMS系统的组成元素之间的接口和数据交换。由于工作量大以及IEC 62290-1 和 IEC 62290-2 需要修改,暂不会安排IEC 62290-4 的编写计划。

我国于2016年发布修改采用IEC 62290-1:2006的国家标准GB/T 32590.1—2016(修改内容主要是部分引用标准由IEC标准改为中国国家标准)<sup>[18]</sup>。

### 3 结论

城市轨道交通全自动驾驶的研究与实践在国际上已有近100年的历史,历经了早期的探索试验、轻轨列车上的应用阶段,进入了在繁忙线路上推广应用阶段。经过长期的运营考验,全自动驾驶的安全性已经得到了充分验证。在国际标准方面,IEC/TC9发布了一系列涉及全自动驾驶的标准,规定了自动化等级的划分、相关的安全措施以及系统的原理、需求、架构、功能等;有关功能分配的标准化工作正在制订过程之中。

全自动驾驶的优越性开始得到运营部门的认可。自动化程度的提高带来的优越性可体现在:

①对于单列列车而言,在自动驾驶模式下,列车可以按照事先计算好的曲线运行,而不随司机的不同驾驶风格偏离,因此自动驾驶能够使列车运行在最佳状态,更节能和减少磨损,提高运营效率,降低运营成本。

②对于整条线路大系统,由于消除了人员操作的偏差,因此可以对整个大系统进行优化。例如可以通过优化ATS的时刻表,而使得某些列车的制动能量能够被另一些列车充分吸收用于牵引。

③控制中心直接对列车的灵活控制消除了司机中间环节,自动驾驶列车比人工驾驶列车反应更快,从而可以减少备用列车的数量。通过自动驾驶技术可以缩短列车出库、折返时间,消除司机的反应时间,可以实现更短的发车间隔和更高的平均旅行速度。

④自动化程度的提高可以减少司机和站务人员,特别是在不太繁忙的线路或时间段人员的减少带来的经济效益更为显著。

⑤消除人为的不确定与不稳定因素,为今后更进一步的、更大系统联动的更高级别自动化、智能化创造了条件。

无论是从 UITP 等权威第三方统计数据来看, 还是来自于已开通项目业主的反馈, 全自动驾驶技术发展方向十分明朗。预计全自动驾驶技术很快将会迎来蓬勃发展和广泛应用。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Stanway LC, BEng CEng FIMechE. Mails Under London [ M ] . UK: Assoc' of Essex Philatelic Societies, 2000.
- [ 2 ] John Robert Day, John Reed. The Story Of The Victoria Line [ M ] . UK: Capital Transport Publishing, 1971.
- [ 3 ] Richard E Barone. Accelerating the Transition to Communications-Based Train Control for New York City's Subways [ R ] . USA: RPA, 2014.
- [ 4 ] Dell R, Manser AW. Automatic driving of passenger trains on London Transport [ J ] . Institution of Locomotive Engineers, 1964(3).
- [ 5 ] Katz, Ralph. First Automated Subway Train Starts Run; Shuttle Riders Find Trip Without Crew About the Same STRIKE ENDED ONE-YEAR PACT All 3 Will Benefit [ N ] . The New York Times, 1962-01-05.
- [ 6 ] Edgar Sée. Automation in urban public transportation [ R ] . France: RATP Group, 2016.
- [ 7 ] Thales. The Evolution of CBTC [ R ] . Canada: Thales, 2016.
- [ 8 ] Siemens. Driverless metro in Nuremberg [ R ] . Germany: Siemens, 2014.
- [ 9 ] Horne M. Driverless Underground trains for London [ J ] . UK: Modern Railways, 2012.
- [ 10 ] UITP. Statistic Brief\_World Metro Automation 2016 [ R ] . Belgium: UITP, 2016.
- [ 11 ] Jonathan Peter Powell, Anna Fraszczyk, Chun Nok Cheong, et al. Potential Benefits and Obstacles of Implementing Driverless Train Operation on the Tyne and Wear Metro: A Simulation Exercise [ J ] . Urban Rail Transit, 2016(6).
- [ 12 ] IEC. Railway applications—Automated urban guided transport (AUGT) Safety requirements: IEC 62267 [ S ] . IEC, 2009.
- [ 13 ] IEC. Railway applications—Automated urban guided transport (AUGT) Safety requirements—Part2: Hazard analysis at top system level: IEC/TR 62267-2 [ S ] . IEC, 2011.
- [ 14 ] 国家质量监督总局. 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: GB/T 32588.1 [ S ] . 北京: 国家质量监督总局, 2016.
- [ 15 ] IEC. Railway applications—Urban guided transport management and command/control systems—Part1: System principles and fundamental concepts: IEC 62290-1 [ S ] . IEC, 2014.
- [ 16 ] IEC. Railway applications—Urban guided transport management and command/control systems—Part2: Function requirements specification: IEC 62290-2 [ S ] . IEC, 2014.
- 作者简介: 路向阳 (1961-), 男, 教授级高级工程师, 长期从事车载网络控制、机务信息化、轨道交通自动化方面的研究工作。

(上接第 5 页)

- [ 4 ] Peris E, Goikoetxea J. Roll<sup>2</sup>Rail: New Dependable Rolling Stock for a More Sustainable, Intelligent and Comfortable Rail Transport in Europe [ J ] . Transportation Research Procedia, 2016, 14: 567-574.
- [ 5 ] Haltuf M. Shift<sup>2</sup>Rail JU from Member State's Point of View [ J ] . Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1819-1828.
- [ 6 ] Gogos S, Letellier X. Shift 2 Rail: Information Technologies for Shift to Rail [ J ] . Transportation Research Procedia, 2016, 14: 3218-3227.
- [ 7 ] German Aerospace Center (DLR). Researching the train of the future [ EB/OL ]. (2013-09-10) [ 2017-10-01 ]. [http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10467/740\\_read-916/#/gallery/2043](http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10467/740_read-916/#/gallery/2043).
- [ 8 ] Winter J. Aeroliner 3000-increasing productivity of the GB rail network [ J ] . European Railway Review, 2016, 22(3): 32-35.
- [ 9 ] Namrata Dixit . Mercury: Concept high-speed luxury train envisioned for UK [ EB/OL ]. (2010-07-15) [ 2017-12-01 ]. [http://luxurylaunches.com/transport/mercury\\_concept\\_highspeed\\_luxury\\_train\\_envisioned\\_for\\_uk.php](http://luxurylaunches.com/transport/mercury_concept_highspeed_luxury_train_envisioned_for_uk.php).
- [ 10 ] JM. Climate change, an opportunity for high-speed train manufacturers [ EB/OL ]. (2016-11-04) [ 2017-12-01 ]. <https://rctom.hbs.org/submission/climate-change-an-opportunity-for-high-speed-train-manufacturers/>.
- [ 11 ] Hitachi corporation. Ready for high speed travel throughout the UK and Europe [ EB/OL ]. (2015-08-02) [ 2017-12-01 ]. <http://www.hitachirail-eu.com/products/our-trains/at400-very-high-speed>.
- [ 12 ] Vickerman R. High-speed rail in Europe: experience and issues for future development [ J ] . The annals of regional science, 1997, 31(1): 21-38.
- [ 13 ] Ai B, Cheng X, Kürner T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway [ J ] . IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2014, 15(5): 2143-2158.
- [ 14 ] Uzuka T. Faster than a speeding Bullet: An overview of Japanese high-speed rail technology and electrification [ J ] . IEEE Electrification Magazine, 2013, 1(1): 11-20.
- [ 15 ] 张卫华. 高速列车耦合大系统动力学理论与实践 [ M ] . 北京: 科学出版社, 2013.
- 作者简介: 张卫华 (1961-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轨道车辆动力学。