

智慧城市智能交通建设新视野丛书

# 城市轨道交通

## 全自动运行系统研究

---

### ——以西安地铁三期为例

公吉鹏 王建  
广州地铁设计研究院股份有限公司

文 © 著

西安市轨道交通集团有限公司 李 奎

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·





## 前言

## FOREWORD

截至 2021 年年底,西安地铁已经开通 8 条线路,包括 1 号线(一期、二期)、2 号线一期、3 号线一期、4 号线、5 号线(一期、二期)、6 号线一期、9 号线(临潼线)、14 号线(机场线)。西安地铁单日最高客流已多次突破 400 万人次大关,客流强度长期处于国内前茅。远景年更将达到 20 余条线、总里程 1 000 余千米的地铁线网。为了满足西安地铁线网网络化运营需求,适应西安城市轨道交通发展的需要,助力西安经济加速追赶超越的步伐,西安地铁公司启动了“西安轨道交通系统化关键技术研究”工作,委托我院(广州地铁设计研究院股份有限公司)开展了“全自动运行系统专题研究”,目的是进一步提升西安地铁系统自动化水平,提升城市轨道交通系统的安全与运行效率。

这次全自动运行专题研究项目结合西安市地铁第三轮建设规划(2018—2024 年),以三期新线 8、10、15 号线为研究基础,通过实地考察、调研、技术交流、探讨座谈、专家咨询等方式,对全自动运行模式下的运营管理模式、运营场景需求、系统设计、土建设计、建设模式进行全过程研究。本研究专题根据西安地铁特点,提出适应西安地铁的运营管理、系统设计、建设模式等方面的解决方案,对西安未来拟采用全自动运行的线路提供指导及建议,使得西安新一轮线路能够保持足够的先进性,提升轨道交通服务品质,提升企业综合竞争实力,发挥企业行业引领作用,带动经济效益和区域发展,提高城市区域形象。

本书共有 11 章。第 1 章和第 2 章分别为研究综述和全自动运行系统概述,第 3 章对国内外全自动运行系统应用现状开展调研,第 4 章整理和总结了全自动运行系统的必要性和可行性,这些由公吉鹏著写。

第 5 章全面分析和研究了全自动运行下不同于常规线路的运营管理模式、组织架构以及岗位职能。第 6 章分析和梳理出全自动运行下的 3 大类共 33 项运营场景。这两章深度分析运营需求，奠定了本次研究的基础前提，它们由西安地铁运营公司李奎牵头著写。

根据需求分析，第 7 章~第 9 章分别就满足全自动运营需求的系统方案、土建方案和建设模式进行分析研究，提出了全自动线路在设计、建设、联调、评估阶段的可实施方案。它们由王建文著写。

第 10 章分析全自动运行线路的投资、工筹及效益分析，由公吉鹏著写。最后第 11 章为本书的结论和建议。

本次研究专题在编写过程中得到了中铁第五勘察设计院集团有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、北京城建设计发展集团股份有限公司等兄弟单位的大力支持和帮助，在此一并表示感谢！

**王建文**

2022 年 05 月



目 录  
CONTEST

<b>第 1 章</b>	<b>研究综述</b> .....	1
	1.1 研究背景 .....	1
	1.2 研究目的 .....	3
	1.3 研究范围及内容 .....	3
	1.4 研究基本原则 .....	4
	1.5 主要研究方法路线 .....	5
<b>第 2 章</b>	<b>全自动运行系统概述</b> .....	6
	2.1 轨道交通自动化等级简介 .....	6
	2.2 全自动运行等级的功能对比 .....	8
	2.3 轨道交通全自动运行的定义 .....	9
<b>第 3 章</b>	<b>全自动运行系统应用情况介绍</b> .....	11
	3.1 全自动运行系统的发展阶段及趋势 .....	11
	3.2 国外及中国港台地区全自动线路建设情况 .....	12
	3.3 中国内地全自动运行线路建设情况 .....	15
<b>第 4 章</b>	<b>全自动运行系统的必要性和可行性</b> .....	24
	4.1 全自动运行系统的必要性 .....	24
	4.2 全自动运行在新线建设的可行性分析 .....	31

<b>第 5 章</b>	<b>全自动运行的运营管理模式</b> .....	41
5.1	全自动运行的主要运营模式 .....	41
5.2	全自动运行与常规线路运营管理方面的区别 .....	44
5.3	全自动运行系统的运营组织架构研究 .....	48
5.4	运营岗位设置建议 .....	58
<b>第 6 章</b>	<b>全自动运行系统的运营场景</b> .....	61
6.1	正常模式场景 .....	62
6.2	故障场景 .....	72
6.3	应急模式场景 .....	86
<b>第 7 章</b>	<b>全自动运行下各系统方案研究</b> .....	96
7.1	全自动运行系统总体性研究 .....	96
7.2	多专业协同关键方案研究 .....	103
7.3	车辆专业研究 .....	116
7.4	信号系统研究 .....	123
7.5	综合监控系统研究 .....	130
7.6	通信系统研究 .....	140
7.7	站台门系统研究 .....	149
7.8	控制中心工艺研究 .....	153
7.9	培训系统研究 .....	155
<b>第 8 章</b>	<b>全自动运行下土建专业方案研究</b> .....	157
8.1	全自动车辆基地方案研究 .....	157
8.2	车站建筑 .....	166
8.3	区间应急疏散平台 .....	168
8.4	配线设置与特点 .....	168
8.5	主/备中心规模 .....	170

<b>第 9 章</b>	<b>全自动运行建设模式研究</b> .....	171
	9.1 系统集成方案研究及建议 .....	171
	9.2 系统设备招标模式研究及建议 .....	171
	9.3 全自动运行系统联调要求 .....	176
	9.4 全自动运行的安全评估 .....	178
<b>第 10 章</b>	<b>投资、工筹及效益分析</b> .....	181
	10.1 各系统投资变化 .....	181
	10.2 土建投资变化 .....	183
	10.3 工程投资变化 .....	184
	10.4 工筹影响分析 .....	184
	10.5 社会及经济效益分析 .....	185
<b>第 11 章</b>	<b>结论与建议</b> .....	187
	11.1 结 论 .....	187
	11.2 建 议 .....	189
	参考文献 .....	191







## 研究综述

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 西安城市及轨道交通发展与规划

西安市定位为亚欧合作交流型国际化大都市，随着《关中平原城市群发展规划》和《西安都市圈发展规划》的批复，其作为“一带一路”倡议上的核心城市，正发挥着经济核心和引领作用。城市轨道交通有利于带动城市经济，又是城市的名片和观光车，一直以来，“建地铁就是建城市”的说法得到广泛认可。截至 2021 年年底，西安地铁基本完成前两轮建设规划，已经开通 8 条线路，分别是 1 号线（一期、二期）2 号线一期、3 号线一期、4 号线、5 号线（一期、二期）、6 号线一期、9 号线（临潼线）、14 号线（机场线），单日最高客流已突破 400 万人次大关，客流强度长期处于国内前茅。至 2024 年年底，西安市将再开通第三轮建设规划中的 4 条线路，远景年线网规划将达到 20 余条线，总里程 1 000 余千米。全自动运行系统的研究与实施，是西安轨道交通系统化、智慧化建设中重要的一部分。为了满足西安地铁线网网络化运营需求，适应西安城市轨道交通发展的需要，助力西安经济加速追赶超越的步伐，本书基于第三轮建设规划新建线路，开展轨道交通全自动运行系统研究，希望研究工作能进一步提升系统自动化水平，提升城市轨道交通系统的安全与运行效率。

#### 1.1.2 国家科技创新相关规划

《“十三五”国家科技创新规划》强调，坚持创新是引领发展的第一动力，以深入实施创新驱动发展战略、支撑供给侧结构性改革为主线，全面深化科技体制改革，大力推进以科技创新为核心的全面创新，塑造更多依靠创新驱动、更多发挥先发优势的引领型发

展，确保如期进入创新型国家行列，为建成世界科技强国奠定坚实基础。

《“十三五”交通领域科技创新专项规划》强调轨道交通领域发展重点为（1）轨道交通系统综合安全评估与协同安全保障技术。（2）轨道交通系统全息感知与泛在融合智能化技术。（3）轨道交通运营与管理信息大数据深度应用。（4）“互联网+”轨道交通精准服务模式。（5）智能运维与应急处置。

《“十四五”交通领域科技创新规划》再次提出要大力发展智慧交通，推动云计算、大数据、物联网、移动互联网、区块链、人工智能等新一代信息技术与交通运输融合，加快北斗导航技术应用，开展智能交通先导应用试点；将新一代信息技术与交通运输深度融合；针对轨道交通行业，研发新一代移动闭塞/车车通信及专用移动通信系统、智慧行车、智慧车站调度等技术。

### 1.1.3 我国人口结构与经济发展趋势

目前我国正处于人口结构变化、经济发展加速的特殊时期，出生率低将导致人口年龄结构改变，人口红利消退，老龄化加速，并影响经济的长期发展。

一方面，中国劳动力人口总数在逐年减少。据国家统计局数据显示，2021年我国16~59岁的劳动年龄人口为88222万人，占全国人口的比重为62.5%；60岁及以上人口为26736万人，占全国人口的18.9%，其中65岁及以上人口为20056万人，占全国人口的14.2%。这是中国65岁及以上人口占比首次超过14%。此前有人口学者预测，65岁及以上人口占比突破14%，将成为人口形势变化的标志性事件。相比2018年，16~59岁劳动年龄人口减少约1500万人，比重下降1.8%。整体看来，我国劳动力人数持续减少，且近几年下降速度加快。

另一方面，用人成本逐年提高。根据国家统计局针对制造企业的调查发现，企业劳动力成本逐年上涨，招工难、用工荒等问题日益凸显，阻碍了制造企业的发展。以城市轨道交通行业为例，电客车司机的员工数每条线路为100~200人，且电客车司机的薪金等级为生产类人员中较高的层级，这一部分的运营成本，已成为轨道交通企业发展中较为重要的一部分。如何解决国家人口结构、劳力成本与经济发展之间的矛盾，是各大企业亟待研究的关键课题。

### 1.1.4 新技术的发展趋势

2008 年以前,全自动运行技术推广比较慢,且多用于小运量或机场线等特殊需求的线路。2008 年后,随着 CBTC (基于通信的列车自动控制系统) 技术的迅猛发展,各地对地铁能力和运营需求的急剧增加,全自动运行技术开始在中、高运量地铁广泛地运用。目前,轨道交通建设在全国开展得如火如荼,就西安市而言,新一轮的地铁建设时期也已经到来。在新技术快速发展的今天,新技术已成为业务发展的重要基石。轨道交通行业实施业务驱动和创新驱动策略,推进新技术与轨道交通业务深度融合,为乘客便捷出行,运营效率提高,服务质量优质,安全稳定可控,企业运营高效,实现轨道交通现代化、智能化提供强有力的信息技术支撑。城市轨道交通运行控制经历“人工时代”“机械时代”“继电时代”,进入了现在的“信息化时代”,并最终会进入“AI (人工智能) 时代”,全自动运行作为提高城市轨道交通自动化水平的一个阶段,对人工智能时代有着承上启下的作用。

## 1.2 研究目的

(1) 利用现有国内外已开通全自动运行线路的既有成果为基础,根据西安地铁特点,提出适应西安地铁的运营管理、系统设计、建设模式等方面的解决方案建议。

(2) 根据涉及全自动运行的各个专业研究,进行分类、归纳、整理并对不同的情况分别制订适当的原则,对西安未来拟采用全自动运行的线路提供指导及建议。

(3) 进一步整合企业优势资源,使得新一轮线路在未来保持足够的先进性,提升轨道交通服务品质,提升企业综合竞争实力,发挥企业行业引领作用,带动经济效益和区域发展,提高城市区域形象。

## 1.3 研究范围及内容

### 1.3.1 研究范围

本次城轨全自动运行研究的研究范围为结合西安地铁第三轮建设规划,以西安 8、10、15 号线为对象基础,对全自动运行模式下运营管理模式、运营场景需求、系统设计、土建设计、建设模式的全过程研究。



### 1.3.2 研究内容

- (1) 全自动运行系统的必要性、可行性研究。
- (2) 全自动运行系统定义及自动化等级选择的研究。
- (3) 全自动运行系统的运营管理模式、运行场景、运营组织架构研究。
- (4) 全自动运行下运营需求下的全自动系统架构研究。
- (5) 全自动运行下各系统专业优化设计方案及原则研究。
- (6) 全自动运行下土建专业优化设计方案及原则研究。
- (7) 全自动运行系统对投资和工筹、经济性的影响分析。
- (8) 全自动运行系统建设模式研究。

### 1.4 研究基本原则

(1) 结合研究背景，确定科学、合理的研究技术路线和研究方向，明确研究的目的、必要性、可行性。

(2) 运营管理匹配原则：全自动系统研究基于利于运营管理更加精细化和高效化，能够提升运营工作效率，降低运营建设和管理成本，确保企业长期可持续发展的原则。

(3) 以人为本原则：坚持“以人为本”核心科学发展观，完善和丰富乘客乘车体验，提供增值增质的精准化服务，提升乘客满意度。

(4) 指导性原则：结合西安第三轮建设规划线路的特征，讨论并推荐全自动运行系统的自动化等级、运营管理模式及组织架构、相关系统、土建专业的方案建议及原则性技术要求，作为后续线路设计、建设的指导及建议。

(5) 经济性原则：估算全自动运行所带来的相关系统、土建较常规线路的投资变化，并对全寿命周期进行经济性评估。

(6) 量力而行原则：全自动运行的方案须考虑西安地铁企业的承受能力。研究应遵循《关于进一步加强城市轨道交通规划建设管理的意见》中关于地铁行业发展的基本原则，即“量力而行，有序推进；因地制宜，经济适用；衔接协调，集约高效；严控风险，持续发展”。确保西安市轨道交通发展规模与实际需求相匹配、建设节奏与支撑能力相适

应，实现规范有序、持续健康的发展。

## 1.5 主要研究方法及路线

### 1.5.1 采取的研究路线

(1) 利用调研、走访和比较国内外城市轨道交通的特征、存在的问题以及针对全自动、智能化、智慧化方面取得的研究成果，总结出可借鉴的经验，同时优化和完善的不足。

(2) 分析乘客、地铁内部建设公司、运营公司各层级、各部门的需求，与具备先进技术的厂家开展技术交流。

(3) 结合西安市地铁建设现状，合理分析，找出全自动、智能化、智慧化研究成果（如业务功能、系统、设备）的落地途径和具体实施方案。

(4) 整个研究将分别从建设、运营、乘客的视角出发，全过程、全方位地介绍“全自动运行”体系各个方面的应用。

### 1.5.2 研究的主要活动

(1) 针对全自动运行技术和项目广泛收集、整理资料，开展研究。

(2) 邀请业内主流的信号、综合监控、车辆等系统的集成商，开展技术交流，对涉及全自动运行的关键技术问题、建设管理问题、运营筹备、运营管理等方面的问题进行深入探讨。

(3) 多次赴北京、上海就全自动运行系统建设、运营管理经验以及相关技术问题进行现场学习交流，汲取成功的建设、运营经验，并关注建设过程中需要注意的问题。

(4) 就研究报告组织多次开会讨论，征求运营部门、建设部门及相关设计单位的意见，此外，组织多次专家研讨会，及时解决研究过程中的问题和偏差。

## 全自动运行系统概述

## 2.1 轨道交通自动化等级简介

根据国际公共交通协会 (UITP) 和国际标准 IEC 62290-1 *Railway applications—Urban guided transport management and command/control systems-Part 1: System principles and fundamental concepts* 的定义, 轨道交通自动化等级共分为 5 个等级, 分别是 GOA0、GOA1、GOA2、GOA3、GOA4。不同的自动化等级的定义源于轨道交通列车运行中完成规定功能, 对运营人员和系统的责任分配。

轨道交通单条线路或线网对不同自动化等级在列车运行过程中必须实现的功能如表 2-1 所示。不同自动化等级下的列车运行过程中非必需的功能, 也可由系统来实现。

轨道交通自动化等级决定运营需求、运营设施、车辆、运营人员等。运营需求必须考虑到乘客的行为习惯。

表 2-1 轨道交通不同自动化等级功能实现表

列车运行的基本功能		非自动列车运行 (NTO)	半自动列车运行 (STO)	有人值守下列车自动运行 (DTO)	无人值守下的列车自动运行 (UTO)
		GOA1	GOA2	GOA3	GOA4
确保列车运行安全	安全进路	系统	系统	系统	系统
	列车安全间隔	系统	系统	系统	系统
	速度监督	人工	系统	系统	系统
列车驾驶	加速制动	人工	系统	系统	系统
监视轨道	障碍物监视	人工	人工	系统	系统
	防止碰撞人员	人工	人工	系统	系统
监视乘客上下车	车门控制	人工	人工	系统	系统
	乘客跌落站台	人工	人工	人工或系统	系统



续表

列车运行的基本功能		非自动列车运行 (NTO)	半自动列车运行 (STO)	有人值守下列车自动运行 (DTO)	无人值守下的列车自动运行 (UTO)
		GOA1	GOA2	GOA3	GOA4
监控列车	投入/退出运营	半人工或系统	人工	半人工或系统	系统
	监督列车运行	人工	人工	系统	系统
紧急状况的检测与处理	列车诊断	人工	人工	系统	设备检测+人工处置
	烟火检测	人工	人工	人工或系统	
	脱轨检测	人工	人工	人工或系统	
	紧急情况处理	人工	人工	人工或系统	

#### 1. GOA0: 目视下列车运行

在 GOA0 的自动化等级下, 列车运行由司机全部负责, 系统无法实现自动监控和保护。线路上的道岔和轨道区段由系统控制。

#### 2. GOA1: 非自动列车运行 (NTO)

在 GOA1 的自动化等级下, 司机在 ATP (列车自动保护系统) 保护下驾驶列车, 观察线路轨道情况并在紧急情况下停车。司机遵循轨旁信号或车载信号来控制列车的牵引和制动。信号系统监督司机的操作, 这种非连续或连续的监督只能在特定位置实现, 特别是信号显示和速度控制。列车关闭车门, 安全从站台出发, 均由司机操作。

#### 3. GOA2: 半自动列车运行 (STO)

在 GOA2 的自动化等级下, 司机在列车驾驶室里, 观察线路轨道情况并在紧急情况下停车。系统将自动监控列车的牵引和制动, 提供连续的速度距离曲线。列车安全从站台出发, 由司机操作, 列车车门可自动关闭。目前, 我国城市轨道交通运营最常用的运营模式, 即 ATO (列车自动运行) 驾驶模式。

#### 4. GOA3: 有人值守下列车自动运行 (DTO)

在 GOA3 的自动化等级下, 由于没有司机在列车驾驶室观察线路轨道情况和在紧急情况下停车, 因此相较于 GOA2 级, 系统必须增加辅助的检测装置。

在 GOA3 的自动化等级下，需要一名运营人员在列车上。列车关闭车门，安全从站台出发，可自动控制，也可人工控制。该等级也是全自动运行的一种模式。

#### 5. GOA4：无人值守下的列车自动运行（UTO）

在 GOA4 的自动化等级下，由于没有运营人员在列车上，因此相较于 GOA3 级，系统必须增加辅助的检测装置。

列车关闭车门，安全从站台出发，均为自动控制。更具体地说，系统支持危险情况和紧急情况的检测和处理，例如乘客疏散等。其他的危险情况和紧急情况，例如列车脱轨或检测到烟雾或者火灾，则需要运营人员介入处理。

## 2.2 全自动运行等级的功能对比

DTO、UTO 均属于全自动运行方式，两种运行方式的主要区别如表 2-2 所示：

表 2-2 UTO 与 DTO 等级下主要功能对比表

编号	功能	DTO	UTO
1	唤醒列车	M	M
2	休眠列车	M	M
3	列车进入/退出运营	M	M
4	管理策略确定	M	M
5	计算时刻表或发车间隔偏离	M	M
6	建议或指挥时刻表校正管理行为	M	M
7	紧急制动性能测试（OCCHMI 上显示）	O	M
8	静止状态下确定初始列车位置	O	M
9	GOA3&4 中列车驾驶模式的管理	M	M
10	阻止列车进站	M	M
11	跳停	M	M
12	扣车	M	M
13	车辆段和停车场车辆移动管理（入、出运营）	O	M
14	站内门开启的监督	O	M
15	门开启的控制（远程控制车门开启）	O	M

续表

编号	功能	DTO	UTO
16	门关闭的监督（门故障车载设备阻止列车离站）	O	M
17	门关闭的控制（远程控制屏蔽门关闭）	O	M
18	疏散监督（OCC直接指挥人员疏散）	O	M
19	轨道上工作人员的防护	M	M
20	监督站台上的乘客（站台加语音、视频接口）	O	M
21	监督车上的乘客（提供车载视频监控）	O	M
22	非MODURBAN车载设备故障的响应	M	M
23	提供维护支持（为维护行为提供建议）	O	M

注：O—可选项；M—必选项。

### 2.3 轨道交通全自动运行的定义

前阶段在国内各地专题报告、会议论文中，FAO系统最早翻译成“无人驾驶”，或者“全自动运行系统”，通过国内率先实施线路的工程实施经验，体会到“全自动运行”系统更能准确地描述FAO系统对于运营模式变革的内涵。

由中国城市轨道交通协会在2019年颁布和实施的团体标准，《城市轨道交通全自动运行系统规范》（T/CAMET 04017）在IEC 62290-1的基础上，对全自动运行系统进行了再次定义：全自动运行系统是基于现代计算机、通信、控制和系统集成等技术，由信号、车辆、综合监控、通信、站台门等与列车运行相关的设备组成，实现列车运行全过程自动化的系统。

根据轨道交通自动化等级的划分原则，运行在有人值守的全自动运行（DTO）或无人值守的全自动运行（UTO）下的城市轨道交通系统均可称为全自动运行系统（Fully Automatic Operation System, FAO）。

运行在非自动化列车运行（NTO）或半自动化列车运行（STO）下的城市轨道交通系统称为非全自动运行系统（None Fully Automatic Operation System）。

有人值守的全自动运行（Driverless Train Operation）定义：列车在配置车上值守人员的条件（正常运行所有功能均由系统负责实现）下的运行。车上值守人员仅在故障和应急情况下介入列车运行。（注：此定义为城轨协会团体标准改写自GB/T 32588.1—2016，



定义 3.1.4)

无人值守的全自动运行 (Unattended Train Operation) 定义: 列车在不配置车上值守人员的条件 (所有功能均由系统负责实现) 下的运行。(注: 此定义为城轨协会团体标准改写自 GB/T 32588.1—2016, 定义 3.1.20)



城市轨道交通全自动运行系统研究

——以西安地铁三期为例