

城市轨道交通系统安全韧性思考与实践

毕湘利

(上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海)

摘要 [目的]城市轨道交通作为城市的重要交通基础设施,对保障城市安全有序运行至关重要。为应对城市轨道交通系统所面临的安全挑战,需探讨提升城市轨道交通系统安全韧性的策略。[方法]介绍了“安全”的相关定义和“韧性”的相关表述,提出了城市轨道交通系统安全韧性概念的内涵。基于上海轨道交通的建设和运营实践,结合具体案例,围绕隧道结构安全性、设施设备可靠性和系统协同性三个方面提出了提升城市轨道交通系统安全韧性的策略。[结果及结论]提出以强化本质安全、系统安全为核心,通过夯实隧道结构安全基石、强化关键设施设备可靠性、增强系统间匹配与协同等关键性举措不断提升城市轨道交通系统的安全韧性。

关键词 城市轨道交通;安全韧性;结构安全性;设备可靠性;系统协同性

中图分类号 U298

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.001

Thinking and Practice of Urban Rail Transit Safety Resilience

BI Xiangli

(Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

Abstract [Objective] As an important transportation infrastructure, urban rail transit is crucial to ensure safe and orderly operation of the city. In order to cope with the safety challenge faced by urban rail transit system, it is necessary to discuss the strategy of improving the safety resilience of the system.

[Method] The relevant safety definition and resilience expression are introduced, and the connotation of the concept of safety resilience in urban rail transit system is put forward. Based on the construction and operation practice of Shanghai rail transit as well as specific cases, the strategy of improving the safety resilience of urban rail transit system is proposed from three aspects, i. e. tunnel structure safety, facility reliability and system collaboration. [Result & Conclusion] It is proposed that strengthening the intrinsic and system safety is the core task, and consolidating the safety cornerstone of tunnel structure, intensifying the reliability of key facilities and equipment, and enhancing the matching and coordination between systems are

the key measures to continuously improve the safety resilience of urban rail transit system.

Key words urban rail transit; safety resilience; structure safety; equipment reliability; system coordination

近年来,城市轨道交通行业得到快速发展,在服务乘客出行、缓解大城市交通拥堵、推动国土空间结构优化、促进绿色低碳战略实施和轨道交通装备产业发展等方面取得了显著成效^[1]。与此同时,高密度的行车、巨量的设施设备、高峰时段大客流以及复杂的外部环境等,都有可能对城市轨道交通运营产生严重影响。即便如车门卡滞、道岔失表等小故障,在高峰时段也会对运营造成较大影响,产生诸如大客流聚集等较大社会影响;而骨干线路高峰期间 15 min 以上运营延误,会直接造成城市局部区域的交通瘫痪,随着故障处置时间的延长其影响甚至会波及全网络。相对密闭、狭小的地下空间也对应急处置、大客流疏散带来极大困难。因此,客观上对提升城市轨道交通系统安全韧性有更加迫切需求。为全面贯彻落实人民城市的治理理念,全面提升城市轨道交通系统安全韧性是当前安全韧性城市建设和城市轨道交通行业推动高质量发展的迫切需求和关键所在^[2]。本文即从上海轨道交通的建设和运营实践出发,探讨如何提升城市轨道交通系统的安全韧性。

1 安全韧性概念

国际标准 ISO/IEC Guide 51:2014《安全问题》对“安全”的定义为“免除不可接受的风险”。国际民航组织对“安全”的定义为“安全是一种状态,即通过持续的危险识别和风险管理过程,将人员伤害或财产损失的风险降低至并保持在可接受的水平或其以下”。国家标准如 GB/T 28001—2021《职业健康安全管理体系》对“安全”的定义为“免除了不可接受的损害风险的状态”,GB/T 50438—2007《地铁运营安全评价标准》对“安全”的定义为“没有

不可接受的有害风险”。

韧性(resilience)来自拉丁语 resilio、resilire 和 resalire,被描述为“受挫折后恢复原状的能力”。20 世纪 50 年代,物理学中的韧性定义为“在负载下韧性偏转而不会断裂或变形,在压力作用下反弹复原的能力”。20 世纪 60 年代初,生态学家通过研究生态种群系统稳定性理论,提出韧性观点。1973 年,加拿大生态学家霍林(Holling)将韧性概念引入生态学领域,韧性内涵表现为生态系统自身重组能力和适应恢复到稳定状态的速度和能力。2010 年,马丁(Martin)借鉴复杂适应系统理论,提出了演化韧性,也称为适应韧性,是指系统为减少干扰的影响程度或利用冲击来实现系统更新和结构重组的能力,强调实体吸收、适应、预测、恢复、抵御和应对冲击的能力。

结合“安全”和“韧性”的相关表述,可以将城市轨道交通系统安全韧性理解为:面对内外部环境或人为扰动时,城市轨道交通系统自身所具备的抵御、承受,或恢复至可接受水平的运行能力。为此,一是从设施设备角度,需要强化关键核心系统的本质安全;二是从运行角度,需要从全局高度、系统思维来统筹兼顾,即树立大安全理念;三是从经济角度,需要权衡好安全、效率与效益的关系,评估确定可接受的水平。

2 夯实隧道结构安全基石

2.1 区间联络通道优化设置

GB 51298—2018《地铁设计防火标准》规定,相邻联络通道(水平)距离不大于 600 m(强制性条文)。住房和城乡建设部颁布实施的 GB 55037—2022《建筑防火通用规范》中,调整了有关区间联络通道设置的具体内容,即不再明确相邻联络通道间 600 m 间距的要求,但目前的设计实践中仍按照 GB 51298—2018 中的要求执行。

区间联络通道施工作为重大安全风险点,尤其在隧道叠交、越江区段等复杂地质与环境下,可能引发涌水涌砂、路面塌陷、冻结管破裂等事故^[3]。上海轨道交通在既有线路建设中,为控制联络通道建设风险,投入巨大。“十四五”期间建设所面临的环境更为复杂,类似情况更趋普遍。如 12 号线西延伸场七风井—七莘路站区间工程的 7#联络通道位于承压含水层并近距离下穿既有运营线路(竖向最小净距仅 4.03 m),施工风险极大。此外,若对联络

通道与区间连接的排水管以及集水井内注浆孔处置不当,在运营期间列车持续振动影响下会产生诸多安全隐患。据统计,软土地区运营超过 10 年的地铁隧道中,联络通道旁线路出现不均匀沉降的占比高达约 80%,沉降槽深度可达 40 mm,影响范围超过 50 m^[4]。联络通道与主隧道连接部位的差异沉降会导致连接区域应力集中,甚至会出现混凝土受拉或受剪破坏,进而引发渗漏水病害。

因此,从科学、合理制定技术标准、优化工程风险控制的角度而言,应重新审视联络通道设计中相邻联络通道间 600 m 间距要求的合理性,甚至要研究如此设置的必要性,探索取消部分风险地层内联络通道的可行性,并研究相应的替代方案。如采用更先进的监控和预警系统、提高应急响应能力等,以达到同样的安全防护和应急响应效果。

2.2 提升结构本质安全的技术措施

以区间盾构隧道结构安全为例,上海轨道交通地下区间隧道几乎全部采用盾构法修建完成,目前服役盾构管片总量超过 73 万环。由于受施工初始质量缺陷、周边载荷以及外部环境变化等因素的综合影响,所引发的隧道结构安全问题日益凸显,盾构隧道收敛变形超过 6 cm 的病害尤其突出。

自 2017 年起,在广泛调研国内外盾构隧道接头形式发展进程、新型连接件形式及新型连接件管片工程应用的基础上,上海轨道交通研究开发了基于新型接头的预埋承插式管片盾构隧道技术体系。该新型接头管片摒弃了传统的螺栓连接方式,采用在管片浇筑前预埋雌雄连接件、施工时将相邻管片机械插入式固定的拼装方式。根据足尺试验和工程验证,新型接头管片的初始刚度较传统螺栓连接管片结构的更高,极限承载能力也更高,同时环缝接头也表现出更强的延性,整体呈现“环刚纵柔”的特性,在提升横断面承载性能以抵御外界环境变化的同时,能够很好地适应软土地层隧道的纵向长期沉降变形^[4]。基于新型接头的预埋承插式管片、接头及成型隧道如图 1 所示。

基于新型接头的预埋承插式管片盾构隧道技术体系是对传统隧道施工技术的一次重大创新,可有效减少隧道结构初始缺陷,提升隧道成型质量,增强隧道的整体稳定性和耐久性,可从源头上保障隧道结构本质安全^[5]。上海轨道交通在“十四五”建设期间大力推广新型管片的应用,也为后续长期运营的结构安全奠定坚实基础。



图1 基于新型接头的预埋承插式管片、接头及成型隧道

Fig. 1 Embedded socket segment, joint and formed tunnel based on new joints

2.3 研发推拼同步智能盾构建造技术

采用基于新型接头的预埋承插式管片,对盾构机姿态和管片拼装的控制精度要求大幅提高,对现有盾构施工水平提出了极大挑战,同时也为盾构智能推拼提供了更高技术要求和新的应用场景^[6]。

上海轨道交通在“十四五”建设期间将积极研发应用盾构隧道推拼同步智能建造技术。该技术的核心理念是将人工操作经验数字化,通过机器自动控制取代人工操作。具体而言,“智能化推进”是推进系统根据当前姿态自主调整推力进行纠偏,确保盾构机沿设计轴线精准推进;而“智能化拼装”是拼装系统自动抓取、拼装管片。在此基础上转变施工模式,将盾构掘进和管片拼装的工序并联,实现了从“推拼交替”到“推拼同步”的跨越。通过两大盾构机系统的智能化改造,可减少人工操作引发的不确定性,实现隧道施工过程的精细化控制,进而提高施工质量和效率。盾构推力自动分配、掘进自主纠偏示意图如图2所示。管片位姿识别、拼装运动路径规划示意图如图3所示。

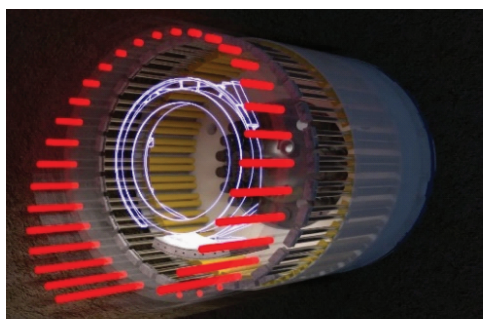


图2 盾构推力自动分配、掘进自主纠偏

Fig. 2 Automatic allocation of shield thrust and self-correcting of tunneling

3 提升关键设施设备可靠性

根据中国城市轨道交通协会的统计数据,2023

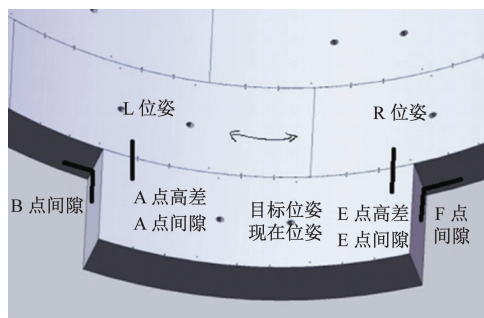


图3 管片位姿识别、拼装运动路径规划

Fig. 3 Segment pose recognition, assembly motion path planning

年度我国内地城市轨道交通5 min以上运营延误事件中,设施设备故障占比达到74.4%,其中车辆系统、通信信号系统和供电系统的设施设备故障是影响运营安全的关键。上海轨道交通近年来的统计数据显示,在导致5 min及以上运营延误的事件中,通信信号系统、车辆系统、供电系统的设施设备故障占比分别为52%、28%和3%。上海轨道交通结合多年运营经验,通过增强关键设施设备的冗余设计、减少单点故障对整体运营的影响,不断提升系统安全韧性和稳定性。

3.1 车辆系统增强冗余设计

车辆的电气设备故障发生率远高于机械故障,且许多电气故障是监测设备产生的误报,并非真正意义上的故障。针对这一问题,上海轨道交通提出通过硬件冗余(继电器、蓄电池、辅助逆变器等)、回路冗余和网络冗余(MVB(多功能车辆总线)网络双通道)设计,配合单点继电器故障不救援策略、外置式旁路设置,确保即使在单点故障发生时,列车仍能安全运行,实现“零救援”目标。

针对车辆设计、制造、维护优化,上海轨道交通研究采用模块化车辆设计,提高部件的可诊断性及可维护性;通过加强关键设备状态监测与诊断,依托车辆故障与健康管理系统,优化车辆全寿命周期维修频次,实现“故障不过夜”目标。

3.2 通信信号系统冗余设计

通信与信号系统是地铁安全运营的神经中枢。在网络侧,上海轨道交通建立了服务行车指挥的专用无线集群网络,通过异地冗余设计提升了系统的冗余性和可靠性。在线路级的有线侧,通信信号骨干网的物理独立,信号LTE(长期演进)核心的异地部署,确保了系统的强冗余性;在线路级的无线侧,上海轨道交通开创性地对信号系统采用双制式车

地通信网络设计,避免了单频段易受干扰的风险。目前信号系统双制式车地通信网络技术已在上海轨道交通新线建设和既有线改造中得到应用。从运营实际效果看,采用冗余设计后均未发生过因车地通信中断导致影响运营的事件。该技术与传统单制式车地通信网络技术相比,可靠性表现更优异。

3.3 供电系统的可靠性加强

城市轨道交通供电系统设计采用了冗余设计理念,从 110 kV 到 400 V 设备系统均实现了单设备故障不影响运营的韧性设计,是城市轨道交通关键设备系统中在设计上韧性最强的系统。在此基础上,通过完善供电专业 SCADA(电力监控系统),实现了自动化控制、一键停送电等功能,从应用效果看生产效率总体可提升 70%。通过 UPS(不间断电源)设备的模块化、智能化升级,可基本杜绝 UPS 设备引起的关键系统供电故障。此外,对既有线供电牵引框架绝缘的维护改造,绝缘标准从 0.5 MΩ 提升至 3.0 MΩ,同步推进动态监测和风险防范,实现了框架绝缘的零故障运行。这些技术改进和标准提升的可靠性加强措施,从源头上增强了供电系统设备的安全韧性,确保了供电系统的高可靠性。

4 增强系统间的匹配与协同

城市轨道交通系统的健康运行需要各专业系统的协同联动来保障。就发生的故障甚至事故而

言,已凸显出由早期的“散点式、单专业、小范围”特征逐步转变为“耦合式、多专业、扩散式”特征。因此,增强专业系统间的功能性能匹配与高效协同,是当前运营安全面临的新挑战,也是未来行业发展需要不断改进和突破的技术问题。

4.1 提升轮轨关系匹配性设计

图 4 为轮轨匹配关系示意图。轮轨关系直接影响列车运行安全、车辆部件的疲劳性能、轨道结构服役寿命、乘客舒适度及环境振动噪声等问题,严重时甚至影响行车安全^[7]。以北京地铁昌平线为例,受降雪影响,轮轨黏着系数降低,列车制动距离增加,最终导致追尾事故的发生。这一事件凸显出,在恶劣环境条件下,城市轨道交通钢轮钢轨制式的安全性面临极大挑战。上海轨道交通个别线路也曾遭遇湿轨模式下的列车打滑事件。在处理过程中发现,在打滑状态下,空气制动可能并非最佳选择,在低黏着条件下甚至不利于轮轨之间黏着的建立。相关研究和试验已表明,在防滑性能方面,单节车纯电制动与纯气制动之间的差异并不显著,说明在低黏着条件下电制动的效率更高,更有利于轮轨间快速建立黏着。目前,关于低黏着条件下如何快速建立黏着、制动系统防滑控制底层逻辑以及防滑应对策略,甚至在低黏着下电气制动与空气制动、快速制动与紧急制动之间的制动效率差异问题,都需更为深入地研究和探讨。

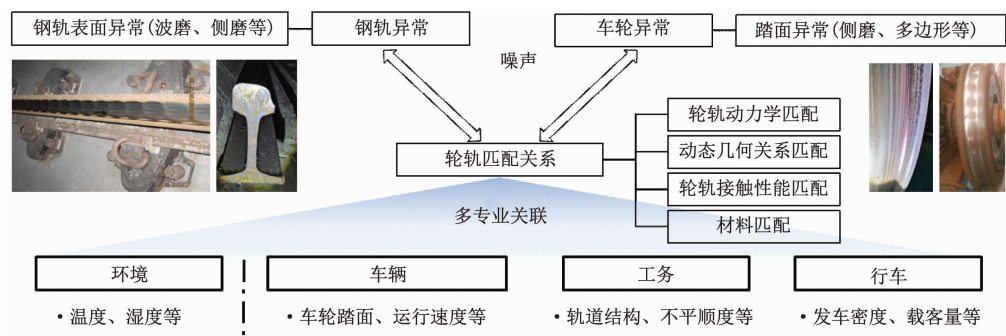


图 4 轮轨匹配关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wheel-rail matching relationship

4.2 提升弓网关系匹配性设计

图 5 为弓网关系匹配性示意图。弓网关系匹配性设计是确保城市轨道交通系统安全高效运行的关键,涉及到受电弓与接触网之间的动力学性能、系统稳定性和磨耗控制,直接影响行车安全、取流效率和弓网设备寿命。弓网关系不匹配可能导致列车受流不稳定、接触线和受电弓磨耗加剧、供电

中断、安全隐患增加,进而引发故障甚至事故。2021 年,上海轨道交通某线发生了受电弓碳滑板 V 型异常磨耗事件,即为弓网系统匹配失衡的典型表现。碳滑板磨耗过快,由正常值的 0.3 mm/万 km 激增到 46.0 mm/万 km,磨耗速度增加 150 多倍,导致碳棒和接触线更换频率急剧上升,碳棒和接触线的使用寿命大大缩短,维护成本急剧升高。研究发现,

影响弓网系统磨耗性能的主要因素为电流、接触压力及列车运行速度等,特别是列车出站牵引、进站制动阶段的电流极值与异常磨耗具有较高的关联性。因此在设计阶段,就需要研究接触线能承载的最大电流值,要充分研究碳滑板和接触线之间的性

能匹配设计,从运营中出现的各种问题看,城市轨道交通各系统间的匹配性设计和研究还远远不够。在运营维护阶段,还需要加强对弓网关系的监测,及时发现并处理潜在的故障隐患。

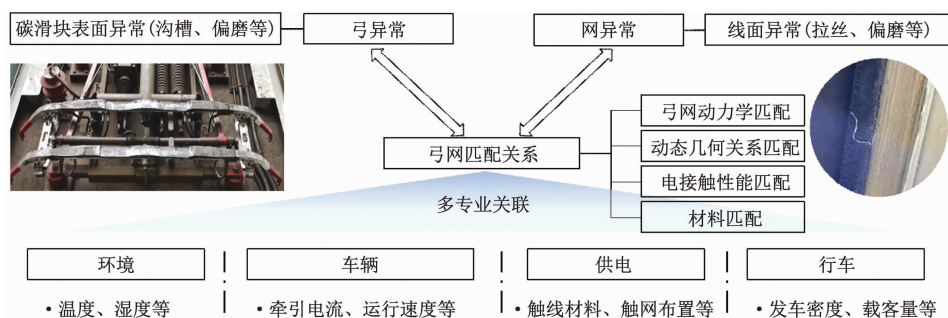


图5 弓网关系匹配性示意图

Fig.5 Schematic diagram of pantograph-catenary relationship

5 结语

在我国交通强国战略中,明确将安全置于首位。与此同时,应认识到城市轨道交通系统中存在的安全问题仍然不少。因此,守牢安全底线、加强系统安全和强调本质安全是城市轨道交通行业共同的努力方向。本文基于上海轨道交通的建设和运营实践,围绕提升系统安全韧性这个关键点,提出以强化本质安全、系统安全为核心的夯实结构安全基石、强化关键设施设备可靠性、增强各系统间匹配与协同等关键性举措。相关经验可供同行借鉴参考,共同打造更安全、更便捷、更高效的城市轨道交通网络。

参考文献

- [1] 周晓勤. 中国城市轨道交通发展战略与“十四五”发展思路[J]. 城市轨道交通, 2020(11): 16.
ZHOU Xiaolin. The development strategy of China urban rail transit and the thinking of the tenth five-year plan[J]. China Metros, 2020(11): 16.
- [2] 夏泽郁, 汤育春, 李启明. 基于韧性理论的中国城市轨道交通事故统计[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(3): 148.
XIA Zeyu, TANG Yuchun, LI Qiming. Statistical analysis of urban rail transit accidents in China based on resilience theory[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(3): 148.
- [3] 崔玖江. 盾构隧道施工风险与规避对策[J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 377.

- CUI Jiujiang. Risks and countermeasures for construction of shield-bored tunnels[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(4): 377.
- [4] 狄宏规, 周顺华, 宫全美, 等. 软土地区地铁隧道不均匀沉降特征及分区控制[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊2): 74.
DI Honggui, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Characteristics and zoning control of differential settlement of subway tunnel in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 74.
- [5] 毕湘利, 柳献, 李文勇, 等. 盾构法地铁隧道管片新型连接件技术应用研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 1.
BI Xiangli, LIU Xian, LI Wenyong, et al. Research on the application of new connecting segment technology in metro shield tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 1.
- [6] 毕湘利. 上海轨道交通提升盾构隧道结构本质安全的创新实践[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 1.
BI Xiangli. Innovative practices in enhancing the inherent safety of shield tunnel structures in Shanghai rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(1): 1.
- [7] 刘加华. 轨道交通隧道系统动力设计计算新进展[J]. 隧道与轨道交通, 2023(1): 5.
LIU Jiahua. New advances in dynamic calculation of rail transit tunnel systems[J]. Tunnel and Rail Transit, 2023(1): 5.

· 收稿日期:2024-06-20 修回日期:2024-07-15 出版日期:2024-09-10
Received:2024-06-20 Revised:2024-07-15 Published:2024-09-10
· 通信作者:毕湘利,正高级工程师, Bixiangli1@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license