

城市轨道交通运行安全与运营效率的矛盾和统一

吴 越

(温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司,325002,温州//高级工程师)

摘 要 运行安全、高效运营是城市轨道交通行业关注的焦点,二者各有侧重又互为补充,统一在为乘客提供高质量的出行服务宗旨下;但同时二者在领域划分的边界上也存在着一些矛盾和盲点。在分析城市轨道交通运行安全和运营效率的定义以及事故发生诱因的基础上,给出安全与效率之间的矛盾和统一关系,并提出了解决矛盾的方法和案例。

关键词 城市轨道交通;运行安全;运营效率

中图分类号 U298.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.11.004

The Contradiction and Unification Between Urban Rail Transit Operation Safety and Revenue Efficiency

WU Yue

Abstract Operation safety and revenue efficiency are the keen focuses of urban rail transit industry, the two of which develop in different aspects while complementing each other, unifying under the overall purpose of providing high quality service for passengers. However, several contradictions and blind spots exist on the boundary of their definition. On the basis of analyzing the definition and causes of accidents, the contradictory yet unified relationship between safety and efficiency is delivered, and the methods and exemplary cases for solution are proposed.

Key words urban rail transit; operation safety; revenue efficiency

Author's address Wenzhou Mass Transit Railway Investment Group Co., Ltd., 325002, Wenzhou, China

1 运行安全与运行效率

在城市轨道交通领域,安全是列控和信号系统的灵魂,故障导向安全是城市轨道交通运行不可逾越的底线^[1]。这里的“安全”是指在人类生产过程中,将系统的运行状态对人类的生命、财产、环境可能产生的损害控制在人类能够接受的水平以下的状态^[2]。同时,城市轨道交通作为一个高效的

大运量交通方式,满足故障-安全这个底线是远远不够的,毕竟其宗旨是服务于乘客,如何在保证安全的前提下,持续高质量的运营是其服务理念。经过长期研究和经验积累,无论在城市轨道交通的各类标准里,还是在日常工作中,安全运行控制系统专业的研究人员已对信号系统的各个子系统的运行安全行为做了极为详尽的研究,运营组织和维护保障专家也尽一切可能确保系统以最高效的方式为乘客提供服务^[1];然而,各个领域在如何引导、辅助和提高运营效率、持续运营特别是故障下的持续运营以及对整体运营服务质量的全局把控等方面,还有很大的提升空间,与之相关的研究有待开展。

结合运行安全及运行效率的侧重点,将运行安全与运营效率做一个比对,其基本特征如表 1 所示。

表 1 运行安全和运营效率的基本特征

对比项		运行安全	运营效率
研究主体	系统		规程调度人员
研究对象	设备级安全;子系统级安全;板卡级安全;软件安全;通信安全		列车运营组织;交通与土地利用;线网运营规划与服务;交通出行成本;交通衔接换乘;系统操作与故障恢复
原则	系统故障-安全;系统可靠、可用、可维护		人员资质培训及考核;人员作业行为的全过程控制;人员规程的制定和执行;系统可靠、可用、可维护
体现形式	状态安全;系统的运行状态		行为安全;人员操作

1.1 运行安全及其表现形式

系统运行是指系统应执行的工作以及执行该工作所需的条件。在城市轨道交通中,运行安全集中体现在行车安全上。信号系统的安全设计遵循“故障-安全”原则^[4]。系统对运行状态进行实时计算,一旦计算结果与预期的安全状态不吻合,或者 2 套/多套并行处理器的仲裁结果不一致时,系统将立即作出反应,将系统导向安全一侧,最大限度确保安全停车,例如紧急制动(EB)、模式不可用、区域封锁/轨道关闭、停车点/进路移动授权回撤等。

1.2 运营效率及其表现形式

系统运营是指在营运环境中旅客、货物、工作人员和运行系统的共存^[1]。效率则是在给定投入和技术条件下有效地使用资源以满足设定需求的评判方法。城市轨道交通运营效率集中体现在在确保安全的前提下优化列车运营组织、管理规定和操作规程的制定和执行上^[3],特别是在列车自动防护失效或者信号设备故障的情形下,中央和集中站行车指挥、列车驾驶员、车站值班人员、维护保障人员和安防人员等相关运营人员必须严格依照相应的管理规定作业,这是保证运营效率和运营安全的基石。由此可见,影响运营效率的最主要因素是系统和人之间的协同,特别是在突发情况和故障情况下。系统制式和控制模式,以及车辆、供电安全性、可靠性、可用性和可维护性直接影响运营效率,同时运营条件和维护条件对运营效率也产生直接的影响。例如,当某种原因导致车辆晚点或突发设备故障时,调度员应能够按照操作规程及时向有关部门报告,迅速采取相应的措施,最大限度减小故障和意外对运营造成的影响,及时恢复列车正常运行。而这一切,离不开控制系统、综合监控系统、维护保障系统的支持。

城市轨道交通运营服务管理是运营高效率的另一个重要保障。所有相关运营人员必须熟知相关法律法规及知识,具备熟练操作技能,具备良好的服务意识;更为重要的是,必须具备应变能力,能及时应变保护乘客安全。除了线路本身的运营与维护外,运营还与乘客息息相关,大客流下的换乘、导客、限流、疏散、与其他交通系统(如公路交通等)的联动等都与乘客的公共意识和公共素养直接相关,进而对运营安全产生直接影响。如何正确引导客流,减少乘客原因所导致的运营事故也是运营效率的表现形式之一。而这一切都离不开高质量规章制度和管理水平的支持。

1.3 影响运行安全和运营效率的因素

运行安全方面,回顾城市轨道交通的实际运营历程,重大事故的发生往往同时伴随着设备的故障、人员的不安全行为、相关环境的负反馈。在研究了近 30 年全球的轨道交通安全事故及原因分析^[7]后,发现人为过失、管理不善和设备故障所导致的故事占事故总量的 80% 以上。这一惊人的高比例反映出—个事实:城市轨道交通列控系统的安全性仍存在较大的局限性,虽然“故障-安全”保证

了信号系统的运行安全,但运行安全更多地体现在没有将“点”(设备故障、人员误操作等)联结成“面”(设备-人-环境-管理)^[16]。

运营效率方面,除了运行安全是运营效率的重要影响因素外,人员素质(如工作人员的专业服务素养、维保人员的专业能力、乘客的高素质等)、车辆运输能力(车辆旅行速度等)、车站集散能力(岛式/侧式站台设计、停站时间、乘客通道、安检等)、故障和灾害恢复能力(信号、电力、通信、车辆等)都直接体现了城市轨道交通运营现状。

从表 1 可以看到,虽然运行安全和运营效率的研究主体、研究对象和体现形式各不相同,但二者互相影响、互相牵制、互相促进。控制系统的可靠性、可用性和可维护性是两者研究的交叉点。系统的安全设计策略及其实现直接影响系统的可靠性、可用性和可维护性(例如系统设计中通信链路的节点数、系统冗余程度和维护保障系统的界面友好等),而运行控制系统的高可靠性、可用性和可维护性又是高质量运营的根本,二者存在必然的关联。

2 运行安全和运营效率的矛盾根源

城市轨道交通既不能牺牲运行安全以达到运营高效,也要尽量避免为了达到运行安全而牺牲运营效率。为保证这一点,首先需要理清整个运营过程中所有参与系统活动的人、设备、环境等因素是如何影响运营组织的,从而总结出运行和运营的矛盾现象及其根源。

2.1 安全和效率研究的重要问题

安全领域的国内外学者和专家从 1930 年开始,在几十年的时间里相继提出了众多各种场景和行业的安全事故模型,如:Adams 模型^[3,8]、Vird 模型^[8]、奶酪模型^[3]、多线性时间序列模型(MES)^[8]、基于系统论的 STAMP^[9,11]、Heinrich 事故致因模型^[10,12]。这些安全模型被广泛应用于航空航天、采矿、冶金、医疗急救、消防等行业。对事故模型研究的意义在于:在对这些事故模型的研究和总结的基础上,将整个导致危险的过程进行分析,可以找出导致危险的矛盾、原因和风险,从而为更具针对性的安全系统设计、制定合理的措施与应急预案提供支撑^[16]。

以影响运营效率的事故为例,事故是由事故诱发因子导致的,综合各类安全模型可以看到,事故的诱发因子是离散量而非线性数据;事故的发生是

其诱发因子共同作用的结果,其中诱发因子间不乏相互关系^[16]。据此,不妨把事故以有限非空集合的形式表述如下,简称为 4E 集合,即:

Accident = 4E

{ Human_E, Sys_E, Unexpected_E, Mgt_E } (1)

其中:Human_E (Human Error) 为人员操作失误; Sys_E (System Error) 为设备故障/系统失效;Unexpected_E (Unexpected Environment) 为必备环境的缺失/周边环境的刺激;Mgt_E (Management Error) 为安全管理流程的漏洞/处置预案的缺失。

公式(1)涵盖了影响运行安全和运营效率的主要因素,由此引出以下两个问题:

- 1) 诱发因子是否存在先后/因果/诱导、互斥/抵触/限制等关系;
- 2) 采取怎样的手段能够最大限度地抑制事故诱发因子从而同时提高安全性和效率。

2.2 运行安全和运营效率的矛盾及示例

公式(1)体现的是同时影响安全和效率的矛

盾,即当故障因子出现时,安全和运营同时收到负反馈。公式(1)引出的另外一个问题就是:控制系统导向安全侧是否可能对运营的安全带来风险,进而影响运营效率。这个问题的答案是肯定的。从相关领域的技术论文、科学报告特别是事故分析报告中可以看到存在这样一种现象:参与系统运营安全的某个专业领域在处理安全风险时可能会直接或间接地将安全风险责任输出给其他相关专业^[16]。

例如,因故障迫停区间场景下,一些典型的运营场景需要考虑两者间的风险转嫁问题:①列车救援;②乘客逃生;③后续运营恢复;④与其他交通系统信息交互和联动等。

表 2 列举了两种在运营场景中出现较多的故障示例。在对故障中引入的安全风险、系统或操作人员采取的安全手段、现场的实际操作和处置进行分析后可知,运营和系统之间的安全风险存在转移的可能。

表 2 运行-运营风险转移示例

示例	安全风险	安全手段	现场实操及处置	矛盾-风险转移
运行安全风险→运营安全风险→运营效率降低	车辆定位在道岔区域故障,信号系统在道岔区域失去对列车的定位	1. 紧急制动停车; 2. 道岔和轨道封锁	司机采取切除车载 ATP (列车自动保护) 方式手动动车; 电话闭塞, 强扳道岔, 红灯冒进动车; 电话闭塞, 可能红灯冒进动车	信号系统符合故障-安全原则; 但运行管理人员和维护人员可能采取人工切除信号防护的方式维持运营, 系统的整体安全系数可能降至 SIL4 以下, 同时固定闭塞行车方式降低运营效率
	人为失误 (例如由于人为操作失误、维护不当等导致信号系统宕机)	人工防护	降级运行、电话闭塞、人工驾驶、手摇道岔等	误操作或人员疏忽导致系统的整体安全系数可能降至 SIL4 以下, 同时必然降低运营效率

表 2 中安全风险的转移凸显了安全和效率矛盾的现象:安全设计和运营管理的安全行为,可能会对对方或后续/周边的学科、专业、引入新的安全风险。显然,无论是安全性 (这里指的是安全完善度等级 4-SIL4) 还是运营效率,都无法达到预期的要求。

3 运行安全、运营安全、信息安全的统一

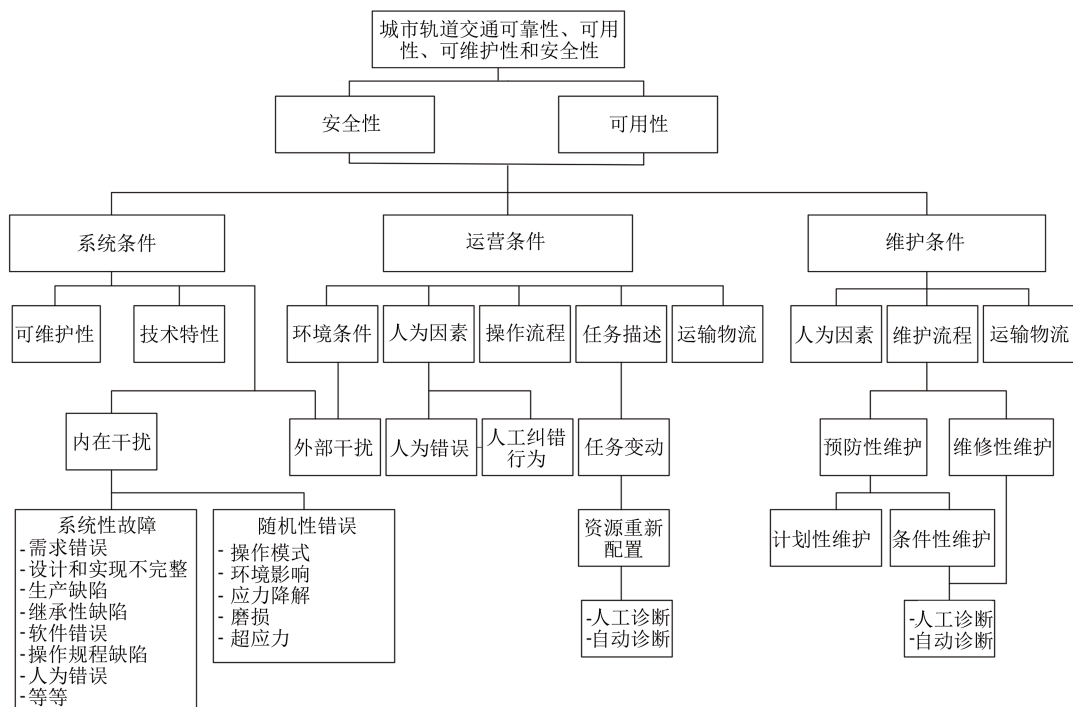
通过上述分析可以看到,提升运行安全和提升运营效率符合人-机-环境-管理的本质安全的定义^[16],同时也符合城市轨道交通服务的宗旨^[15]。所以,将运行、运营最终统一在系统整体安全和服务质量的终极目标上,实现土建、信号、运营管理、车辆、供电等各个部门的联合联动,是降低城市轨道交通整体安全风险、给出优化运营效率的理想途径。举例而言,安全、节能、高度自动化的无人驾驶系统是目前城市轨道交通发展的趋势之一,原因是

由以安全设备为基础的系统取代人工操作;而人-机-环境-管理的整体安全^[16]是实现全自动无人驾驶的基石。

3.1 系统整体安全性的影响因素

既然通过分析发现了矛盾的存在,在事故诱发公式中提到的第二个问题——综合运行安全性和运营效率两个维度上的技术和机理,对城市轨道交通提出整体运营需求,让系统给出一个优化的安全高效输出,更加“智慧”地决策安全-效率平衡,成为一个亟待解决的问题。系统的整体安全性影响因素,以及安全性和可用性、可靠性、可维护性之间的关系^[1]如图 1 所示。

安全性的影响除了受制于系统条件外,还与运营条件、维护条件相关,各个分支的子节点均同时对最终的安全性和可用性产生影响。分析图 1 不难看出:



1) 安全性同时受到系统条件、运营条件和维护条件的制约,不存在独立的安全性。

2) 效率体现在可用性上,而人为错误、运输物流、故障诊断等穿插在各个可用性的应用条件中,而这些因素背后反映的是运营管理的水平^[13]。从而,效率-系统可用性-安全性-人员-管理在图中自然融合。

3) 外部干扰是系统条件和运营条件之间的横向联系,所以孤立地研究安全性和运营必然存在盲区,而这个盲区就是“外部干扰”。

综上分析,安全是人—机—环境—管理的整体安全^[16];运营效率和质量虽穿插在运行、运营和信息等不同范畴之中,但最终都会统一到整个系统的安全和可用性上来。

3.2 安全和运营效率优化

综上分析,从系统设计伊始就应考虑整体安全与运营一致性的问题,具体而言,系统安全-效率的优化解可以从以下几个方面开展:

1) 信号系统的全自动化。“故障-安全-持续运营”系统的升级改造(比如 FAO(全自动运行)),通过冗余、设备精简提升系统的可用性、可靠性,从而尽量减少人为操作和维护可能引入的故障,特别是故障状态下的人为操作。

2) 新技术、新手段。为信号系统注入新技术、

新理念,借鉴、复用、提炼其他领域先进的系统运行方案来减少或取代传统人工操作、运营维护等,降低安全风险。例如借鉴云平台的安全实时控制特性、分布式计算和数据存储、集群替代冗余、实时故障容错和安全数据回滚等技术^[16]。

3) 运营联动。信号、运营管理、车辆、供电、调度等各个专业在设计阶段便可制定详尽的运营场景和演练计划等,而不是在系统交付阶段;运营人员可以参与到系统实验室测试,从而在更早的阶段便了解系统,并制定更契合系统运行安全的管理规程。

4) 紧急预案的可操作性。运营方应参与系统失效评估,了解系统失效对运营的影响,从而制定出更有针对性和可操作性的故障恢复预案,确保人工控制前提下的运营安全和效率。

4 结语

本文从安全和效率的概念出发,对运行安全和运营效率的表现形式及其之间存在的矛盾进行了分析,提出了解决方法的设想,为进一步优化和提高系统的整体安全性研究提供参考。目前,全自动化、智能处理、高度集中控制是城市轨道交通运营的趋势之一,对安全控制中的设备、人员、运行环境更加紧密有机地结合提出了更高的要求。所以,如

何在自动化要求进一步提升的条件下将运行、运营的重要功能协同工作,以运营场景为纲,实现专业接口协同、人机接口协同,为城市轨道交通提供更为灵活的操作模式,同时避免人为误操作所引入的风险,更加“智慧”地给出安全-效率输出,使列车运行更安全,服务更高效,是需要不断深入研究的课题。

参考文献

- [1] CEN-CENELEC. Railway Applications—The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS); EN 50126-1[S]. Brussels: CCMC, 2001: 29.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 轨道交通可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例: GB 21562—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 6-7.
- [3] 孙肖,周新蕾,林佳,等. 事故模型理论发展与应用研究[J]. 质量与可靠性, 2014(2): 19.
- [4] CEN-CENELEC. Railway Application-Communication, Signaling and Processing Systems—Software for railway control and protection systems; EN 50128—2011[S]. Brussels: CCMC, 2011: 7.
- [5] CEN-CENELEC. Railway Application-Communication, Signaling and Processing Systems. EN 50159—2010[S]. Brussels: CCMC, 2010: 33.
- [6] JASON Andress. The Basics of Information Security: Understanding the Fundamentals of InfoSec in Theory and Practice [M]. Syngress. USA: soc_arm7, 2013: 240.
- [7] 毕湘利,邓奇. ATP失效模式下的城市轨道交通列车运行安全保障措施研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014(10): 3.
- [8] BENNER L. Accident investigation Multi-linear events sequencing methods[J]. Journal of Safety Research, 1975, 7(2): 67.
- [9] SONG T, ZHONG D, ZHONG H. A STAMP Analysis on the China-Yongwen Railway Accident [J]. SAFECOMP 2012, LNCS 7612: 376.
- [10] 赵文祥,刘婷婷. 海因里希事故因果连锁理论模型及其应用[J]. 经济论坛, 2009(9): 94.
- [11] 王昊,刘中田,徐越. 基于多层 STAMP 模型的 CTCS-I 级列控系统功能安全分析方法[J]. 铁路信息技术, 2017(5): 27.
- [12] NANCY L. A New Accident Model for Engineering Safer Systems[J]. Safety Science, 2004, 42(4): 237.
- [13] 康茹,傅贵,高平,等. 消防员伤亡案例的事故致因“2-4”模型解读[J]. 消防科学与技术, 2016(35): 1756.
- [14] 汪明艳,汪泓,刘志钢. 城市轨道交通枢纽运营效率管理研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
- [15] 孙来平,洪海珠,施聪,等. 城市轨道交通运行安全、运营安全和信息化安全的矛盾与统一[J]. 城市轨道交通研究, 2019(6): 15.

(收稿日期:2020-08-18)

京沪高铁将推“静音车厢”等服务新举措

记者从京沪高速铁路股份有限公司(以下简称“京沪高铁公司”)获悉,今年年底前,京沪高铁将推出“静音车厢”及计次季票等新型票制产品系列服务新举措,同步实施灵活折扣、有升有降的市场化票价机制,为旅客出行提供更多选择,更好适应人民群众对美好旅行生活的需求。京沪高铁公司相关负责人介绍,自2011年开通运营以来,京沪高铁客流需求旺盛,人员往来密集。为进一步提高服务质量,公司将以上市为动力,深化高铁标准示范线建设,开行智能型升级版复兴号,推出多个服务新举措,全面提升服务质量。一是试点“静音车厢”服务。这种车厢可为旅客提供更加安静舒适的旅行环境,愿意遵守相应行为规范的旅客,通过12306网站和手机客户端等购票时可自行选择“静音车厢”。二是推出新型票制产品。针对固定区间密集出行的通勤客流、频繁出行的商务客流,探索推出票价折扣、灵活适应市场需求的计次季票等产品。三是为重点旅客实行“一站式”服务。依托铁路12306客服中心,在京沪高铁沿线主要车站开展全渠道特殊重点旅客预约服务,对行动不便需要照顾的重点旅客提供从到站、上车、乘车、下车、出站全流程重点服务。四是进一步为商务座旅客服务提质。在京沪高铁沿途主要客站,为商务座旅客提供专用安检通道、专属候车区、专人引导进出站等服务。该负责人介绍,在提高服务质量的同时,自2020年12月23日起,京沪高铁公司将对京沪高铁运行时速300~350 km的高铁动车组列车公布票价进行优化调整,改变目前固定票价的做法,根据客流情况,区分季节、时段、席别、区段等,建立灵活定价机制,实行优质优价,有升有降。各站间执行票价将以公布票价为上限,实行多档次、灵活升降的票价体系,为旅客出行提供更多选择。京沪间二等座初期最低票价498元、降幅10%,最高票价598元、涨幅8%,具体以售票时12306网站公布结果为准。该负责人表示,京沪高铁公司将持续改进乘车条件,不断提高服务质量,积极回应人民群众新需求,更好地服务经济社会发展。

(摘自2020年10月23日人民网,记者 鄂智超报道)