

城市轨道交通运能提升策略研究

王潇骁

(上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海 // 工程师)

摘要 随着近年来城市轨道交通的快速发展, 越来越多城市进入了网络化运营时代。与此同时, 部分早期建设的城市轨道交通主干线路面临巨大客流压力。因受制于较高的改造成本等因素, 线路增能方案较为复杂。结合仿真计算结果提出了若干提升列车追踪及线路折返能力的策略和手段, 可为相关工程提供参考。

关键词 城市轨道交通; 增能; 列车运行能力; 正线追踪能力; 折返能力

中图分类号 U292.5+5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.016

Study on Urban Rail Transit Capacity Enhancement Strategy

WANG Xiaoxiao

Abstract With the rapid development of urban rail transit in recent years, more and more cities have formally entered the era of network operation. At the same time, part of the urban trunk lines built in the early stage are faced with huge pressure of passenger flow and are subject to high reconstruction cost and other factors, so the line capacity enhancement strategy is more complicated. Based on the simulation results, several strategies and means to improve the train tracking and line turn-back capacity are proposed, providing theoretical basis for related engineering cases.

Key words urban rail transit; capacity enhancement; train running capacity; main line tracking ability; turn-back capacity

Author's address Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

至2020年底, 上海轨道交通已建成并运营19条线路(含磁浮示范运营线), 线路总长度为772 km, 车站总数为459座, 已形成超大网络, 规模居世界第一; 在结构方面, 已形成“环线+射线+割线”的复杂网络; 在功能方面, 城市轨道交通与市内道路公交、机场、铁路枢纽等其他交通的衔接和融合不断深入, 交通一体化功能显现^[1]。随着上海轨道交通全面进入网络化运营阶段, 大量市区核心线路面

临满载率过高、高峰时段运能缺口明显的挑战, 如何在尽可能减少对既有线路日常运营影响的前提下, 通过优化运营组织、调整部分系统参数等手段实现精细化、精准化的线路增能成为亟待解决的问题。

1 城市轨道交通运能制约因素分析

1.1 系统自动化及智能化水平制约

在传统CBTC(基于通信的列车控制)系统GoA2(半自动化列车运行)模式中, 司机、控制中心调度员、车站值班员共同参与运营控制, 自动化程度较低且运营易受人为因素干扰^[2]。全自动运行系统包括DTO(有人值守的全自动运行, 即GoA3)以及UTO(无人值守的全自动运行, 即GoA4), 在正常运营状态下, 系统自动实现列车的自动发车、自动出入库、区间自动运行、自动停站、自动开关门、自动折返等功能。全自动运行模式能够确保列车在正常情况下的高效运行^[3]。目前上海轨道交通除10号线、14号线、15号线、18号线、浦江线(胶轮捷运)具备GoA4级, 5号线、17号线具备GoA3级运行能力外, 其余线路均仅具备GoA2运行能力。此外1号线、2号线、3号线、4号线等线路甚至不具备自动折返功能。由此可见, 大部分既有线路综合自动化及智能化水平较低, 但又承担着上海轨道交通主干运输线路的职责, 客运压力极大, 增能需求迫切。

1.2 跨专业匹配性设计能力制约

根据过去多个专项运能提升研究中所总结的经验, 线路、运营、信号、车辆等专业存在一定的专业间隙, 例如, 受线路限界影响, 车辆、信号系统均有限速要求, 并且车辆、信号系统在设计时, 相互之间的匹配性考虑不够充分, 虽然可实现安全控制列车, 但是否因预留安全余量过大而导致行车效率降低, 仍存在疑问。另一方面, 对于线路运行能力计算, 缺乏统一的综合评估方法; 特别是针对特定能力瓶颈点的专项能力提升策略研究, 较为匮乏。

2 城市轨道交通运能评估因素分析

2.1 线路运行能力

线路运行能力是评价城市轨道交通综合设计、运营能力的直接指标。一条城市轨道交通线路的运行能力,是指系统中的各项固定设备在单位时间内(通常是高峰小时)所能通过的列车数。线路每小时通过列车对数直接反应整条线路的乘客运载能力。对运行能力的精准评估将有利于进一步优化设计、提升运营服务水平。

2.2 运能评估因素构成

线路运行能力评估可遵循先独立分析核心区域的列车开行能力,再综合分析各相关区域能力匹配性的原则,进而实现对线路总体运能的综合评估。

线路运行能力评估可分为区域能力及区域能力匹配性两个方面。区域能力包括正线运行能力及出入段/场能力两个关键部分。正线运行能力主要包括端站折返能力、大小交路分叉汇合能力和正线追踪能力。出入段/场能力评估主要是指列车晨间的出库能力。

区域能力匹配则是指线路不同关键区域间的运能设计应相互匹配,尽可能避免特别突出的能力短板点。例如:出库能力与正线开行间隔的要求应相互匹配,终端站的连续折返能力应与单一交路正线追踪能力相相匹,大小交路分叉汇合点的开行间隔应与不同交路的列车开行比例相匹配。

3 正线追踪能力提升策略

缩短列车的正线追踪间隔,实现更紧密的列车追踪,这是直接提升线路运能的重要方向。根据国际标准 IEEE 1474.1-2004《Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements》中关于安全制动模型^[5]的定义,制约列车安全间隔的主要因素是由前后两车所需要保持的安全制动距离所形成的。另一方面,由于测速、定位等技术局限所带来各种位置不确定性及安全余量等参数,决定了列车在动态运行时头尾包络的长度,故以上参数取值的合理性也是导致前后车间距变大的重要原因。列车在正线运行主要分为出站加速、区间巡航、进站制动三部分。最为制约追踪间隔的往往是进站制动阶段,这是由于在紧密追踪场景下,前方列车往往还未出清站台,后车就已经准备进入进站制动阶段。因此后车的

制动曲线必须考虑前车停车时间及出站运行时间。

3.1 改善进站限制点

列车在区间运行过程中,车载计算机在每个计算周期中都假设列车在若干个周期内触发安全制动,并计算当前列车需与前车保持的安全制动距离。确保当前列车在最不利情况下不会越过前车尾部(包络),这是前后两车形成安全间隔的基础。最大正线追踪间隔($T_{\text{Headway,max}}$)是指在整个区间追踪过程中,前后车在形成最大安全距离间隔时,两车的运行时间间隔。

图 1 为正线追踪区间间隔(T_{Headway})变化趋势示意图。图中“追踪间隔区间(Headway)”为线路任一点前后两车的 T_{Headway} 。列车在区间追踪时, T_{Headway} 通常发生在进站区段。对于后车而言, $T_{\text{Headway,max}}$ 可理解为由以下三部分时间组成:①列车由进站干扰点至车站停车走行时间($T_{\text{EnterStation}}$);②列车在站台的停站时间(T_{DellTime});③列车出清站台安全防护区段时间($T_{\text{LeaveSafeDis}}$)。即:

$$T_{\text{Headway,max}} = T_{\text{EnterStation}} + T_{\text{DellTime}} + T_{\text{LeaveSafeDis}} \quad (1)$$

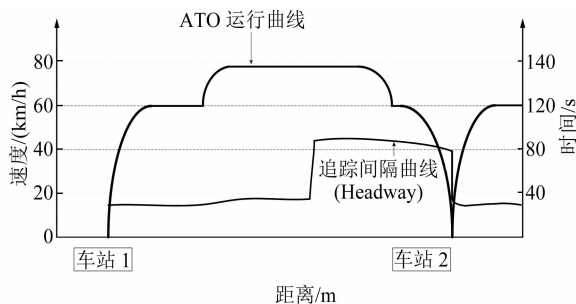


图 1 正线追踪区间间隔 T_{Headway} 变化趋势示意图

3.2 提升列车制动性能

接车干扰点是指前、后列车无扰运行条件下,在前车逐步出清站台安全防护距离、后车准备进站作业过程中,后车可以接近站台的极限位置。前后两车的安全制动距离,通常受制于列车制动性能。列车制动特性包括两个重要参数,分别是保障紧急制动率和常用制动率。通过提高保障紧急制动率可有效缩短后车追踪至前车尾部包络时的安全制动距离。表 1 是上海轨道交通部分线路的列车保障紧急制动率。

保障紧急制动率由车辆厂商在考虑根据特定前提及参数下核定,例如:干轨、湿轨不同的黏着系数,列车的最高运行速度^[6]。若运营方接受部分运营限制,则可在经过详细核定后予以适当调整。常用制动率通常设定为全场用制动率的 80% 性能,适

当提升常用制动率可有效减小 $T_{EnterStation}$ 。而提升保障紧急制动率,其一是有助于缩小与前车尾部安全制动距离,即干扰点距离目标停车点的距离;其二还有助于缩小进站安全防护区段长度,从而缩短 $T_{LeaveSafeDis}$ 。

表 1 上海轨道交通部分线路的列车保障紧急制动率

线路	列车编组/节	不同轨道工况的保障紧急制动率/(m/s^2)	
		干轨	湿轨
16 号线	3	0.79	0.79
5 号线、6 号线	4	0.77	0.63
5 号线	6	0.85	0.77
8 号线	7	0.89	0.72
2 号线	8	0.83	0.83

3.3 缩短停站作业时间

列车在车站的停站时间由系统或设备的反应时间、乘客实际乘降时间、人工作业时间三部分构成。系统或设备的反应时间包括列车停稳判断延时(典型值为 0.5 s)、列车牵引起动延时(典型值为 1.2 s);乘客实际乘降时间则根据站台客流及车站在整个线路中所处的位置核定,取值范围差异较大(典型值为 20~60 s);人工作业时间主要是指对于非 UTO 线路,存在人工确认车门状态、列车按下 ATO 发车按钮等人工作业时间(典型值为 3 s)。

根据公式(1)可知,缩短列车在站台的停车时间可直接有效缩小追踪间隔。其中,系统或设备反应延时及乘客实际乘降时间缩小余地及难度均较

大。当信号系统升级至全自动运行系统后则可有效缩短人工作业时间,这是 UTO 线路能直接提高列车正线追踪性能的主要体现。

3.4 优化线路限速因素

列车进站前通常需要由高限速区段制动至站台进站入口限速,线路限速特别是列车进站制动段的限速对 $T_{Headway}$ 具有显著影响。进站降速点的起始速度越高,所需的提前制动距离越大,前后两车所需保持的安全间隔距离相应增大,但与之对应的列车进站走行时间较短。由此可知进站入口速度与 $T_{Headway}$ 非单纯线性关系。表 2 列举了经仿真计算后,列车进站降速点初始速度与 $T_{Headway}$ 之间关系(假定站台土建限速为 70 km/h,ATO 命令速度为 60 km/h,所有车站停站时间为 30 s)。图 2 为 $T_{Headway}$ 的仿真计算结果。

表 2 进站限速与区间 $T_{Headway}$ 间关系

限速/(km/h)	运行距离/ m	走行时间/ s	$T_{Headway}/s$
87	2 000	124.30	84.641
80	2 000	121.08	81.727
75	2 000	122.27	79.818
70	2 000	124.16	78.211
65	2 000	126.68	76.886
60	2 000	130.88	75.914
55	2 000	135.99	75.190
50	2 000	143.13	75.006
45	2 000	153.00	75.376
40	2 000	165.18	76.539
35	2 000	182.61	79.013

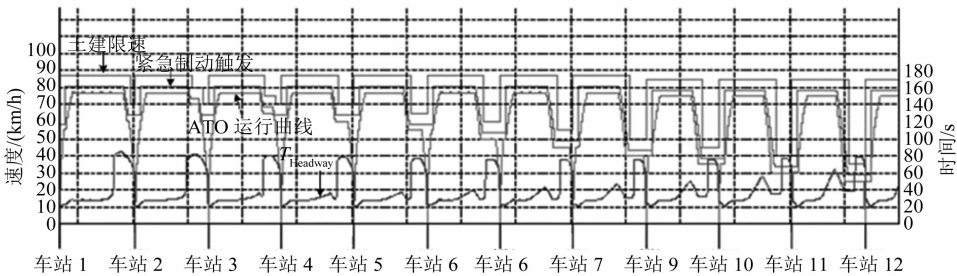


图 2 $T_{Headway}$ 计算结果图

由图 2 可见,进站限速与 $T_{Headway}$ 的数学关系是一个近似于开口向上的抛物线。适当对站台进站区段进行限速有助于提高区间 $T_{Headway}$,但过多限速不仅无法减小追踪间隔,反而会减慢区间旅行速度。

4 端站折返能力提升策略

4.1 提升过岔限速

在现有的城市轨道交通线路设计中,正线多采

用 9 号道岔,少数正线采用 12 号道岔,车库多使用 7 号道岔。部分信号系统厂商内部定义的 9 号道岔临界限速默认为 35 km/h(具体应按照设计院提供资料设置)。事实上,9 号道岔根据尖轨类型及导曲线差异,侧向通过限速各不相同。根据 T/CAMET 040015—2019《城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术规范》给出的道岔直线及侧向限速,当满足曲线半径 200 m,且道岔采用弹性可弯尖轨的情

况下,对现有 9 号道岔进行提速,则可缩短列车的过岔时间,进而提升折返能力。经仿真计算,在满足相应规范条件下,如果将站后折返的道岔临界速度由 35 km/h 提升到 40 km/h,则可在不增加任何工程改造的情况下,将图 3 所示站型的站后折返能力提高 7.1% 以上,即每小时增加 2 对列车。对于上海轨道交通 9 号线三期工程,经专家核定后,将其道岔临界限速由 35 km/h 提升到 40 km/h。

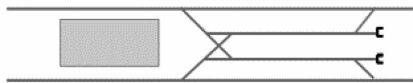


图 3 常见站后折返站型配线

4.2 优化折返轨换端时间

当列车折返能力的主要瓶颈点为折返轨作业时,优化折返轨换端可直接缩小列车的折返间隔。可考虑采取的方法如下:

1) 升级信号系统为全自动运行系统,实现自动换端、自动折返。

2) 对于不具备自动折返功能的线路,可采用双司机换端,在驾驶室另一端再登乘一名司机,待系统换端成功后立即驶出折返轨。

3) 采用退行方式驶出折返轨,该功能需得到信号系统厂商支持,列车以特定速度反向运行。上海轨道交通 14 号线支持以退行方式驶出折返轨。

对于方法 2,实施难度较低,但需要极大增加人力成本;对于方法 3,在现场亦有应用,但不是所有信号系统厂商产品均支持列车以此模式运行;对于方法 1,信号系统改造成本较大,但是实际实施后能力改善最为明显,由列车进入折返轨停稳至起动,实际换端时间小于 12 s。

5 结语

本文分析了制约城市轨道交通运能提升的若干因素,介绍了提升正线列车追踪能力及列车在终端站的连续折返能力的部分策略,并给出了相应的仿真数据。城市轨道交通场景多、情况复杂,很难使用统一的方法或手段对所有线路实现运能优化。所以应该秉持一线一方案、一站一方案,甚至一站多方案的研究策略。理论上有许多线路优化技术手段,且理论计算结果较好,但实际操作难度大、工程投资较高。故应结合工程投资等研究能力优化综合模型,结合优化效果、可实施性、费用概算等综合评估优化手段的优缺点。

参考文献

- [1] 殷峻. 上海轨道交通超大网络运能精细化管理研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019(6): 7.
- [2] 李世琦. 轨道交通全自动无人运行探讨[J]. 中国设备工程, 2019(16): 206.
- [3] 马能艺. 城市轨道交通全自动运行的模式选择[J]. 城市轨道交通研究, 2020(增刊 2): 20.
- [4] 吴智利. 城市轨道交通线路通过能力影响因素分析及平台应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [5] IEEE. Standard for Communications Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements: IEEE 1474.4-2011[S]. New York City: IEEE, 2011.
- [6] 刘婧婧, 曲睿. 湿轨可保证紧急制动率值对信号系统安全制动距离的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2016(7): 151.
- [7] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术规范: T/CAMET 040015—2019[S]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2019.
- [8] 王潇骁, 虞翔, 刘循. 道岔限速对站后折返站型折返能力影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(8): 132.

(收稿日期: 2021-03-26)

(上接第 68 页)

- [2] 左亮, 肖绯雄. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型材料系数对轴向刚度影响分析[J]. 弹性体, 2008(3): 54.
- [3] 柳禄决, 荣继刚, 冯万盛. 锥形弹簧的特点及在城市轻轨车辆中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2011(12): 101.
- [4] 陈灿辉, 陈文海, 陈平, 等. 半沙漏橡胶弹簧低温性能研究[J]. 橡胶工业, 2011(11): 687.
- [5] AT-BACHIR M, MARS W V, VERRON E. Energy release rate of small cracks in hyperplastic materials[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012, 47: 22.
- [6] 荣继刚, 黄友剑, 周炜. 环式叠层型橡胶弹簧稳定性及优化设计技术研究[J]. 铁道机车车辆, 2013(增刊 1): 19.
- [7] 黄雪涛, 李战芬, 王海霞, 等. 橡胶弹簧隔振特性及其影响因

素研究[J]. 中北大学学报, 2018(2): 150.

- [8] 谭富星, 石怀龙, 王玮, 等. 转向架橡胶件动态参数的高低温特性[J]. 交通运输工程学报, 2019(4): 104.
- [9] 李水利, 周建民. 非线性橡胶弹簧减振系统的数值分析与设计方法[J]. 现代制造工程, 2019(12): 123.
- [10] 潘锋, 彭立群, 林达文, 等. 低温和频率对橡胶弹性元件刚度性能的影响[J]. 橡胶工业, 2019(5): 323.
- [11] 刘文光, 三山刚史, 冯德民, 等. 橡胶隔震支座竖向刚度简化计算法[J]. 地震工程与工程振动, 2001(4): 111.
- [12] 中华人民共和国铁道部. 铁道车辆空气弹簧 TB/T 2841—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

(收稿日期: 2020-07-11)