

# 上海轨道交通既有有线运能提升研究

施董燕<sup>1</sup> 周 明<sup>2</sup>

(1. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海; 2. 上海申通地铁集团有限公司运营管理部, 201103, 上海)

**摘 要** [目的] 通过总结上海城市轨道交通既有有线运能提升改造项目的实施经验, 为其提出有效的运能提升方法及具体案例。[方法] 深入分析上海轨道交通既有有线运能不足的主要原因及其影响因素; 基于这些分析, 提出运能提升的技术路线及 5 大核心策略; 详细介绍了上海轨道交通 9 号线实现 1 min 50 s 最小行车间隔、3 号线与 4 号线增能改造、5 号线从 4 节编组扩编至 6 节编组、6 号线增能改造及增设复线等成功案例。[结果及结论] 影响线路运能的主要因素包括车辆基地规模、区间通过能力、出入场能力, 以及供电能力等。针对这些因素, 确定了运能提升的技术路线, 即从客流预测及客流特征分析入手, 进行设施设备能力评估, 设计行车交路方案, 最终形成科学的改造方案。同时, 提出了 5 大策略: 运营管理优化、既有系统能力挖潜及改造、信号系统升级或土建局部改造、系统规模性改造及线网整体优化。

**关键词** 城市轨道交通; 运能提升; 线路通过能力评估; 既有有线改造

**中图分类号** U293.5

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.10.022

## Transport Capacity Enhancement for Shanghai Urban Rail Transit Existing Lines

SHI Dongyan<sup>1</sup>, ZHOU Ming<sup>2</sup>

(1. Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China; 2. Operation Management Department of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Aiming to propose effective methods and specific cases for capacity enhancement, the implementation experiences of capacity improvement renovation projects on existing Shanghai urban rail transit lines are systematically summarized. [Method] An in-depth analysis of the main reasons and influencing factors behind the insufficient capacity of existing Shanghai urban rail transit lines is conducted. Based on these analyses, the technical approach and five core strategies for capacity enhancement is outlined. Successful cases are introduced, including the achievement of 1-minute 50-second minimum departure interval on Line 9, the capacity enhancement renovation of Line 3 and Line 4, the expansion reconstruction of Line 5 from 4-car to 6-car trains, and the capacity

enhancement renovation and double-track addition on Line 6. [Result & Conclusion] The key factors influencing line capacity include vehicle depot size, interval throughput, depot entry/exit capacity, and power supply capacity. Addressing these factors, a technical approach for capacity enhancement is established, which starts with passenger flow prediction and characteristics analysis, followed by facility and equipment capacity assessment, and train routing scheme design, ultimately leading to the development of scientifically sound renovation plans. Additionally, five major strategies are proposed: optimization of operational management, digging into and upgrading existing system capacity, signaling system upgrades or localized modifications of civil works, large-scale system overhauls, and line network overall optimization.

**Key words** urban rail transit; transport capacity enhancement; line throughput capacity evaluation; existing line reconstruction

截至 2021 年年底, 上海轨道交通网络已扩展至 20 条线路 (含磁浮线与浦江线), 总运营长度达 830.8 km, 拥有 508 座运营车站。全网年日均客流量已跃升至 978.07 万人次, 显示出网络化运营后客流的快速增长趋势。2010 年至 2019 年期间, 线网年日均客流量平均增长率高达 11.9%, 凸显了运能与客流需求之间的显著不匹配, 运能提升成为迫切需求。因此, 近年来上海轨道交通积极实施了多项既有有线运能提升改造项目。

本文旨在总结上海轨道交通在这一领域的成功经验, 提出一套行之有效的运能提升技术路线及策略, 旨在为那些正逐步步入城市轨道交通网络化运营阶段的城市, 或是未来可能面临中心城骨干线路运能提升挑战的城市, 提供宝贵的思路和参考。

## 1 上海轨道交通既有有线运能提升概况

2015 年, 上海中心城市轨道交通线路最小行车间隔缩短至 5 min 以内, 其中 14 条线路中有 11 条线路的最大断面满载率超过了 100%。面对这一挑

战,上海轨道交通启动了第一轮与增能相关的“补短板”项目。到了2018年,中心城线路的最小行车间隔进一步缩短至4 min以内,运能相比2015年提升了31.96%,但仍有10条线路的最大断面满载率保持在高位。为此,上海轨道交通又启动了第二轮增能“补短板”项目,并在此期间实施了一系列线路增能的综合性改造工程。

运能提升项目涵盖8大类:一是9条线路的车辆增购;二是5座场段的扩建;三是9条线路的供电系统改造;四是7座场段出入场能力的提升改造;五是14座车站集散能力的提升改造;六是2号线信号系统的升级;七是3号线、4号线及6号线提质增效综合改造项目;八是2号线东延伸列车4节改8节

编组及5号线列车4节改6节编组的系统规模扩容改造项目。

目前,部分改造项目已顺利完成。截至2021年12月底,全网中心城的15条线路中,有10条线路的最小行车间隔已缩短至2.5 min以内,其中7号线达到了1 min 55 s,9号线更是达到了1 min 50 s。与2015年和2018年相比,2021年的运能分别提升了57.45%和26.62%。这一显著提升有效缓解了网络的拥挤状况。受2021年运能大幅提升及新型冠状病毒肺炎的共同影响,全网仅有4条线路(6、8、11、16号线)的最大断面满载率超过了100%,如图1所示。

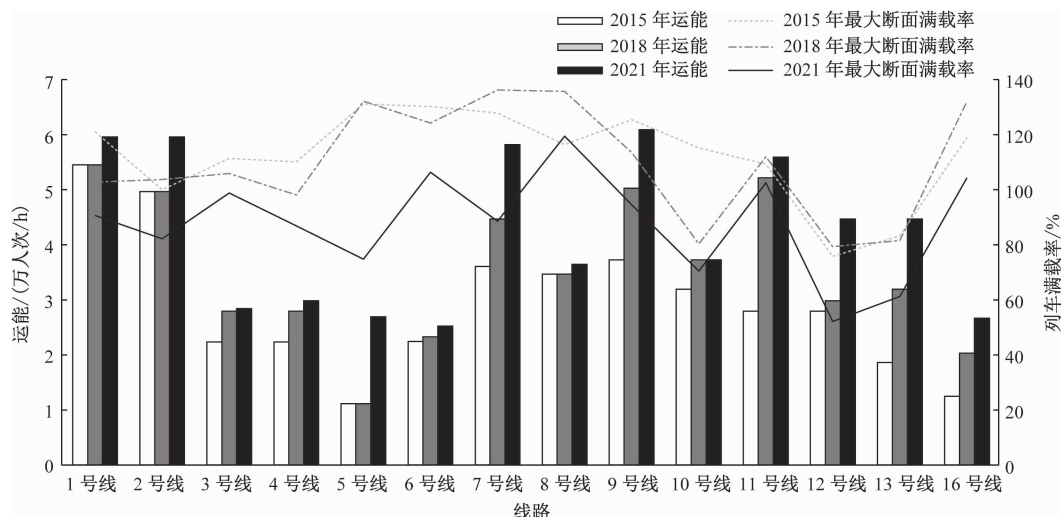


图1 上海轨道交通运营超过3年的线路的运能和最大断面满载率对比图

Fig. 1 Comparison diagram of Shanghai rail transit capacity of lines operating over 3 years and maximum sectional load factor

## 2 运能不足的原因分析及影响因素

### 2.1 既有线运能不足的原因分析

经分析,上海城市轨道交通既有线运能不足的主要原因有:①客流增长超过预期,轨道交通沿线大开发、线路不断延伸、城市往外拓展,使得客流预测与实际产生偏差;既有的系统设计能力无法满足客流增长需求。②实际能力没有达到系统设计能力,如折返能力设计时各专业匹配性设计不足,造成实际折返能力达不到30对/h;又如实际旅行速度达不到设计的35 km/h,导致同样的行车间隔下,实际用车需求增多,造成车辆基地设计规模不足。③系统规模本身就偏小,运能预留不足,不能适应客流的快速发展,如上海轨道交通3、4号线受共线段

限制运能无法提升,6、8号线是中心城骨干线路,但采用了C型列车。

### 2.2 运能影响因素

线路运能包括线路通过能力和车站集散能力,其影响因素如图2所示。线路通过能力主要受车辆基地规模、区间通过能力、出入场能力<sup>[1]</sup>、供电能力等子系统能力的制约。具体而言,车辆基地规模涵盖了停车能力和检修能力;区间通过能力则包括区间追踪能力、终点站折返能力、分叉与汇合能力等,其中车站作业时间是影响区间通过能力的重要因素之一。此外,供电能力也至关重要,它直接关联到主变电所容量等关键因素。在构建超大规模的轨道交通网络时,还需要特别关注大客流车站的集散能力,以确保整个网络的顺畅运行。

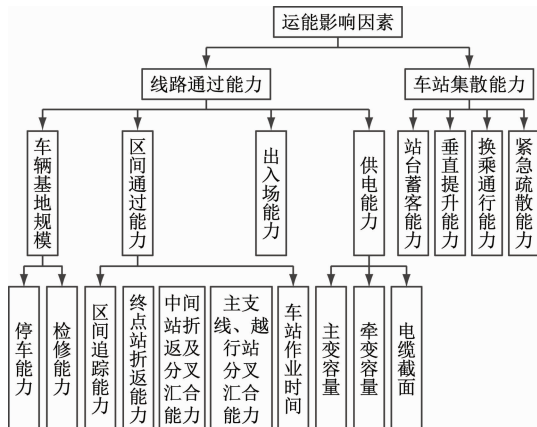


图 2 线路运能影响因素

Fig. 2 Factors affecting of lines transport capacity

### 3 运能提升的技术路线及策略

#### 3.1 运能提升的技术路线

总结既有线运能提升的技术路线,有如下 7 个步骤,如图 3 所示。

步骤 1:开展既有线关键年限客流预测。不仅要考虑现状客流特征,也需要统筹近、远期客流需求,以避免将来的反复改造。关键年限是指网络建设的关键节点,如各轮建设规划项目实施完成的节点,远期网络规划的节点等。

步骤 2:评估线路通过能力。包括既有配属车底数、车辆基地规模、区间通过能力、出入场能力、供电能力等。

步骤 3:判定线路通过能力能否满足客流需求,若满足,则通过采购车辆即可完成增能;若不满足,则实施步骤 4。

步骤 4:研究比选形成关键年限的运能提升行车交路方案。以减少土建或者设施设备改造量为原则,结合客流需求、线路各子系统通过能力、既有配线条件,研究比选形成行车交路方案,应采用大小交路、不对称交路、高峰局部超车、多点折返等灵活、经济的方案。

步骤 5:开展针对行车交路方案的相关系统能力评估及提升措施研究。对比分析既有线相关子系统能力与行车交路方案要求的差异,应优先选用不改造成改造量小的提升措施。

步骤 6:形成分类施策的综合运能提升方案,可多个策略同时使用。

步骤 7:对于增能后仍不能满足客流需求的线路,应开展系统规模改造或线网优化研究。

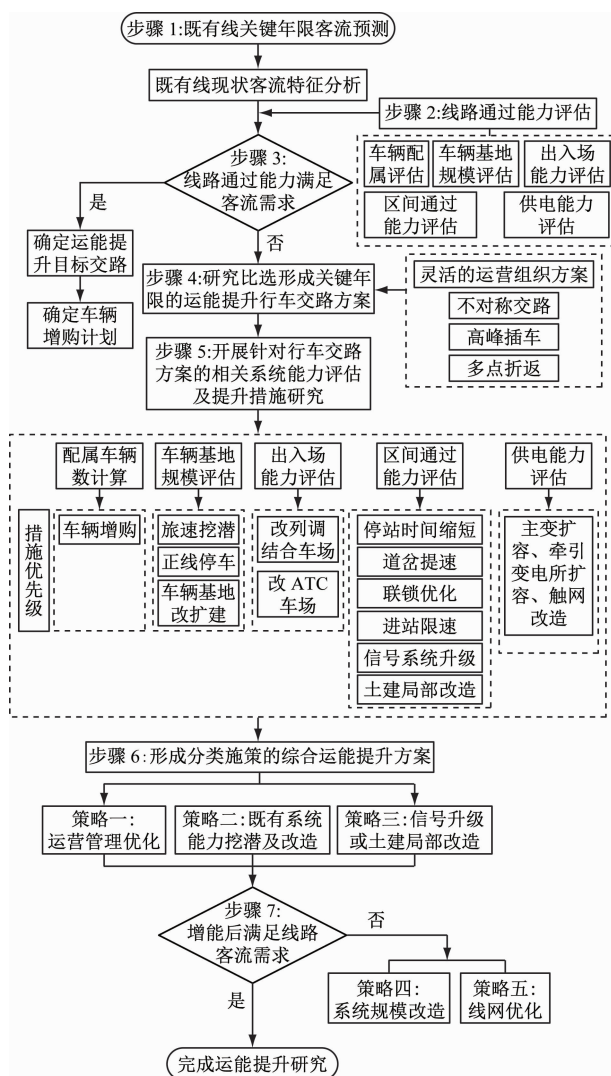


图 3 运能提升的技术路线流程图

Fig. 3 Flow chart of capacity enhancement technical approach

#### 3.2 运能提升改造五大策略

按照运能提升实现的难度和改造量大小,提出以下五大类策略:

策略一:运营管理优化。这包括采用灵活的运营组织方式,如开行不对称列车交路、在高峰时段插入加车等。例如,上海轨道交通 7 号线通过实施高峰时段的不对称交路并插入加车,成功实现了 1 min 55 s 的最短行车间隔。此外,还可以缩短信号瓶颈车站的停站时间<sup>[1]</sup>,以提升折返能力和区间追踪能力;提升列车旅行速度,以减少所需车底数量;必要时采取正线停车措施,以应对车辆基地规模不足的问题。

策略二:既有系统能力挖潜及改造。这主要涉及对既有系统进行优化和改造,以提升其能力。例



如,通过优化信号连锁设计、提高道岔运行速度<sup>[2]</sup>、调整进站限速等改造措施,可以提升信号系统的能力。另外,进行供电扩容改造也是有效提升运能的一种方式。例如,上海轨道交通 9 号线通过供电改造和运营组织优化,成功实现了 1 min 50 s 的最小行车间隔。

策略三:信号升级或土建局部改造。这包括折返站配线改造、新增主变电所、车辆基地扩建、出入场模式改造以及信号系统的更新升级。例如,上海轨道交通 2 号线将 TBTC(准移动闭塞信号系统)升级改造为 CBTC(基于通信的列车自动控制系统)后,成功实现了 30 对/h<sup>[3]</sup>的列车追踪能力;而 3、4 号线通过 CBTC 升级为 TACS(列车自主运行系统)<sup>[4]</sup>,其线路运能更是达到了 36 对/h<sup>[5]</sup>。

策略四:系统规模改造。这一策略主要针对列车编组进行改造,如小车改大车或增加编组,虽然改造难度较大,但效果显著。上海轨道交通已经成功实施了多个项目,如上海轨道交通 2 号线东延伸段列车从 4 节编组改为 8 节编组,5 号线列车从 4 节编组改为 6 节编组。值得注意的是,2 号线东延伸段车站站台在改造前已经预留了 8 节编组的条件,而 5 号线作为高架线路,相比地下线路,其实现扩容改造的可行性更大。

策略五:线网优化。当既有线路的运能提升达到极限时,可以考虑从线网层面进行优化。这包括增加平行线、加密线路、建设联络线以及优化线路换乘衔接等策略。这些优化措施可以结合网络规划的契机得以实现。例如,在《上海城市快速轨道交通网络规划(2017—2035 年)》中,就充分考虑了对既有网络的完善和优化。

## 4 既有线运能提升改造实践

下面针对五大策略,介绍上海轨道交通部分线路增能的案例。

### 4.1 上海轨道交通 9 号线压缩行车间隔

9 号线作为连接松江新城与市中心的重要市域线,高峰时段的最大断面客流量位居全网之首,达到 5.7 万人次/h。原系统设计能力为 30 对/h。2020 年,通过实施增能措施,9 号线成功实现了最小行车间隔 1 min 50 s,有效满足了通勤大客流的出行需求。9 号线增能突破系统设计能力的关键在于 3 点:一是灵活的运营组织,采用嵌套交路、不对称交路、车场连续发车及高峰插车等方式,形成高峰时

段 90 min 内余山站至金吉路站区段的高密度发车模式;二是充分利用信号系统能力,满足折返和高密度插车需求;三是实施了供电系统改造。这一案例充分展示了策略一和策略二的联合应用能以较小的改造量实现线路运能的显著提升。

### 4.2 上海轨道交通 3、4 号线增能改造研究

3、4 号线在宝山路站—虹桥路站区段共轨运营,由于共线段最大运能仅为 26 对/h,严重限制了两线的运能发挥。历经 15 年的研究,形成了“大、中、小”三大改造技术方案,分别对应不同的土建改造量。大方案提出彻底分线,使 4 号线独立成环,以完全释放运能;中方案为局部土建改造,包括宝山路站折返改造等,旨在提高运营组织的灵活性;小方案则聚焦于信号系统升级为 TACS 及站前接轨改站后接轨,以维持既有运营模式并提升共线段运能至 36 对/h。综合考虑多方面因素,推荐分步实施方案,初期实施小方案,远期视客流发展情况实施中方案。目前,小方案已开始实施。这一案例表明,随着通信技术的快速发展,策略三成为提升超负荷线路运能的有效途径。

### 4.3 上海轨道交通 5 号线实施 4 改 6 扩编工程

5 号线一期工程原采用 4 节编组 C 型车,因系统规模先天不足,运能提升潜力有限。在 2014 年实施南延伸工程时,同步进行了 5 号线 4 节改 6 节的扩编工程<sup>[6]</sup>,包括莘庄站—东川路站的 5 座车站的土建改造、机电设备的更新以及折返改造等。改造完成后,5 号线采用主线和支线 4 或 6 节编组混跑运营模式,系统能力提升了 50%。这一案例证明了在条件允许的情况下,通过策略四(系统规模改造)能实现系统能力的大幅提升。

### 4.4 上海轨道交通 6 号线增能改造及复线设想

6 号线目前采用 4 节编组的 C 型车,系统设计能力为每小时 30 对列车,即原设计运能约为 2.5 万人次/h。然而,随着城市发展和人口增长,该线路的高峰小时客流量已攀升至 2.8 万人次/h,远超设计之初的预期。据客流预测,到 2025 年和 2035 年,6 号线上行方向的最大小时断面客流将分别达到 3.5 万人次/h 和 3.7 万人次/h,这意味着需要开行至少 44 对/h 的列车才能满足需求。

鉴于 6 号线大部分为地下线路,且地下车站并未预留扩编条件,直接进行车辆编组增加的难度极大。因此,增能改造的主要方向聚焦于优化行车交路和升级信号设备。改造目标交路具体策略包括

两个方向:一是维持现有信号系统基础上,通过DTO(有人值守的全自动运行)系统改造、优化折返换端时间、联锁系统、停站时间和进站速度等措施,力求将线路通过能力提升至40对/h以上,并同步进行车辆、供电等配套设施的改造;二是结合信号系统的大修更新,将信号整体升级为高性能的CBTC系统,预计同样能达到或超过40对/h的通过能力。目前,6号线改造的初步设计已上报。

值得注意的是,即便实现40对/h的高密度行车,6号线作为一条客流受运能压制的线路,其拥挤问题仍难以得到根本解决。为此,建议结合上海轨道交通网络规划的修编或中运量系统的规划建设,在博兴路站至世纪大道站区间为6号线增设复线<sup>[7]</sup>。复线设计应避免直接接入世纪大道站,而是考虑与6号线北段主要换乘线路如2号线、9号线的车站进行衔接,以有效疏解世纪大道站的客流压力。当然,这一方案的实施将面临车场选址、换乘衔接方案等工程难点,同时在系统制式的选择上也需要进行充分的科学论证。综上所述,对于超负荷运行的轨道交通线路,往往需要多策略联合应用,才能较好地解决客流走廊的拥挤问题。

## 5 结语

本文提出了运能提升研究的技术路线及五大策略,并介绍了上海轨道交通运能提升改造的实践案例。在城市轨道交通建设中,土建工程应具有前瞻性,系统规模应预留一定空间;中心城骨干线路应尽量采用大容量制式,有条件区段考虑采用地面及高架敷设方式,为未来可能的扩建预留条件;地下线工程建设时应充分研究配线设置以预留灵活的运营组织条件;对于运能极度紧张的线路,可结合信号大修更新改造的契机研究信号系统升级的技术方向。

## 参考文献

[1] 王潇骁.城市轨道交通运能提升策略研究[J].城市轨道交通

研究,2021,24(9):69.

WANG Xiaoxiao. Study on urban rail transit capacity enhancement strategy[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 69.

[2] 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,2019,22(8):132.

WANG Xiaoxiao, YU Yi, LIU Xun. Influence of turnout speed limit on the turn-back capacity of the station-back return station [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(8): 132.

[3] 张郁.上海轨道交通2号线信号系统的更新改造[J].城市轨道交通研究,2020,23(6):126.

ZHANG Yu. Signal system renewal and transformation of Shanghai Urban Transit Line 2 [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23 (6): 126.

[4] 汪小勇.城市轨道交通基于车车通信的列车自主运行系统探讨[J].中国铁路,2020(9):77.

WANG Xiaoyong. Discussion on train autonomous circumambulate system based on vehicle-to-vehicle communication in urban rail transit[J]. China Railway, 2020(9): 77.

[5] 陈思维.上海轨道交通3、4号线信号系统改造方案研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(7):148.

CHEN Siwei. Research on the signal system renovation plan for Shanghai Rail Transit Lines 3 and 4 [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 148.

[6] 朱捷,陈文艳.上海既有轨道交通5号线“不停运”改扩建升级关键技术[J].都市快轨交通,2020,33(5):51.

ZHU Jie, CHEN Wenyan. Key technologies for renovation and expansion of Shanghai rail transit line 5 without stopping operation [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(5): 51.

[7] 王镇波,沈坚,李昱澄,等.高峰客流方向严重不均衡的城市轨道交通线路扩能方法[J].城市轨道交通研究,2020,23(11):109.

WANG Zhenbo, SHEN Jian, LI Yucheng, et al. Transport capacity expansion method of urban rail transit lines with seriously unbalanced directional passenger flow in peak hour[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 109.

· 收稿日期:2022-06-21 修回日期:2022-11-01 出版日期:2024-10-10

Received:2022-06-21 Revised:2022-11-01 Published:2024-10-10

· 通信作者:施董燕,高级工程师,47538440@qq.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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com