

# 上海轨道交通超大网络运能精细化管理研究

殷 峻

(上海申通地铁集团有限公司运营管理中心,200070,上海//高级工程师)

**摘 要** 面对城市轨道交通网络化运营中运能与运量矛盾突出的问题,研究运能精细化管理尤为必要。通过分析上海轨道交通的网络运营特征,针对网络结构、客流需求和运能配置等方面存在的问题,提出网络运能规划方法。总结了近年来上海轨道交通在提升线路系统能力、优化开行方案及提供个性化服务等方面的举措和实施效果。

**关键词** 城市轨道交通;网络化运营;运能提升;精细化管理  
**中图分类号** F530.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.06.002

## Refined Management of Transport Capacity Upgrading in Shanghai Urban Rail Transit Network

YIN Jun

**Abstract** With the rapid development of urban rail transit network operation, the contradiction between transport capacity and traffic volume becomes prominent in network operation, which requires refined management more urgent than ever. Through analyzing the characteristics of Shanghai urban rail transit network operation, and according to the problems existing in network structure, passenger flow demands and capacity allocation, a method of network capacity planning is proposed, and measurements taken in transport capacity upgrading, optimization of operation scheme and personalized service provision, the recent years implementation effects in Shanghai urban rail transit are summarized.

**Key words** urban rail transit; network operation; transport capacity upgrading; refined management

**Author's address** Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., Operation Management Center, 200070, Shanghai, China

随着我国城市轨道交通的快速发展,越来越多的城市步入网络化运营阶段,随之带来了许多运营方面的问题和挑战。其中,矛盾最突出、对乘客影响最大的是运能不能满足运量的需求,从而导致列车拥挤度高、出行舒适性差等问题。

目前,国内学者及专家针对城市轨道交通运能配置优化所做的大量研究,主要是基于客流需求,从

缩短运行间隔、优化行车交路、优化停站方案等方面提出列车开行方案优化建议<sup>[1-3]</sup>。而国外的研究除了考虑满足客流需求,更关注列车衔接及出行舒适度等提升系统服务水平的措施优化。例如:东京地铁通过采用灵活的行车组织模式,提高列车旅行速度<sup>[4]</sup>;柏林地铁重视线间的换乘衔接,缩短乘客换乘等待时间<sup>[5]</sup>;纽约地铁则采取全天运营,提升客运服务水平。

本文结合上海轨道交通网络化运营的特征,阐述轨道交通在超大规模网络运能精细化管理方面的探索和实践。

## 1 上海轨道交通网络化运营特征与挑战

### 1.1 网络化运营的特征

#### 1.1.1 网络结构特征

目前,上海轨道交通已形成共17条运营线路、总长度673 km、拥有395座车站的超大网络,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。由于换乘站增多,多点换乘的多路径通达功能增强,线路间的联络功能、互补功能进一步凸显。

#### 1.1.2 网络客流特征

(1) 客流压力大,且呈持续增长态势。一是新线开通后诱增大量潜在客流;二是随着可达性提升,吸引更多客流;三是运能提升带来客流的进一步增长,往往增能后不久,满载率达到甚至超出之前水平(见表1)。

(2) 时空分布不均衡。由于线路功能定位和形态不同,市域线路及呈射线状的超长线路的断面客流空间分布不均衡问题突出,部分区段最大满载率在100%以上,而全线平均满载率仅约25%;部分线路区段高峰时段客流是平峰时段客流的3倍左右。

(3) 乘客对运营服务需求更高。例如节假日期

表1 上海轨道交通部分线路增能前后最大满载率对比

线路号	增能情况/ (列/h)	最大满载率/%		
		增能前	增能后一周	增能后三个月
3,4	2	105	85	110
11	4	100	87	105
16	3	110	95	118

间休闲、旅游乘客夜间出行增多,或各交通枢纽返沪客流集中,致使普通末班车时间和行车间隔不能满足乘客需求。

### 1.1.3 运输能力配置特征

受制于线路和车站的设计,在高峰时段各线路的通过能力、相邻线路的换乘能力和车站的集散能力等的配置存在较大差异。

### 1.1.4 乘客出行特征

随着上海轨道交通网络规模的扩增,乘客的出行距离进一步加大,对于快速、直达、舒适性的需求也进一步增加。

## 1.2 运能提升面临的挑战

### 1.2.1 设计能力不足,运能运量矛盾突出

网络的结构功能定位、线路条件、设施设备系统的设计能力等,直接决定了线路的运输能力。由于某些线路先天设计能力不足,致使运能不能满足运量需求的问题突现。

### 1.2.2 增补和改造周期长,运能提升时效性不佳

在线路运能受制于规划建设中的先天不足时,为了提升运能,必须进行线路改造、车辆增购、车辆基地改扩建、设施设备功能改造以及增配驾驶员等工作。有些改造工作周期较长,等其增能改造完成时,客流需求又发生了新的变化。因此,涉及系统改造的增能工作时效性不佳,能力的提升跟不上需求的增长。

### 1.2.3 乘客需求多样,运能需多维度提升

乘客对于出行的需求,除了通达性之外,对于舒适性、人性化服务的需求也越来越高。这也是网络运能提升精细化管理中不可忽视的部分。

## 2 上海轨道交通运能精细化管理措施及实施效果

### 2.1 提出运能规划方法,系统管理增能工作

上海轨道交通运营管理中心提出了“五年运能规划”、“年度增能计划”、“动态运能调整”相结合的运能规划方法(见图1)。这种由远及近、自上而下的灵活互补的运能管控模式,对于网络资源协调管理具有重要意义。

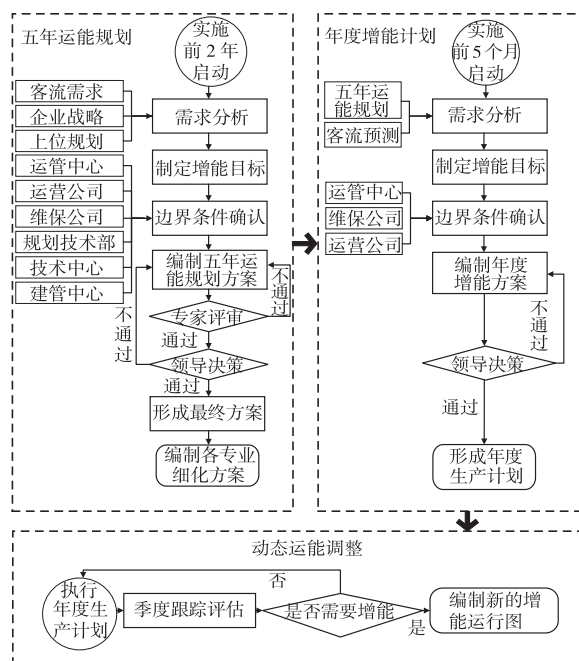


图1 上海轨道交通运能规划流程图

### 2.1.1 五年运能规划

五年运能规划应在实施前2年启动,对其规划期内的客流增长和上位规划目标为依据,确定规划期内的最高时段最小行车间隔,协同各专业从设备改造、列车增购和人员配置等方面制定阶段性配套方案。五年运能规划是未来每年增能计划制定的依据和基础。

### 2.1.2 年度增能计划

根据五年运能规划的总体目标,结合下一年的客流需求和设备边界条件,提前5个月开展年度增能方案编制,制定各线增能目标,并分解到月。各单位根据此目标落实年度生产任务。

### 2.1.3 动态运能调整

为动态跟踪客流变化和满载率情况,上海轨道交通每季度对各线运能运量匹配性进行分析,重点对高峰满载率超过100%的线路提出运能调整建议,对具备增能条件的线路实施增能措施。

### 2.1.4 运能规划实施效果

自运能规划实施以来,2015年1月至2018年6月,上海轨道交通网络累计增能56次,更换运行图149套;路网高峰运能从2014年底62.94万人次/h增至2018年6月底的80.46万人次/h,增幅为28%,每年增能比例均超过计划值。可见,该运能规划方法有效促进了网络运能的提升。

## 2.2 提升新线系统能力,使用全自动驾驶系统

根据五年运能规划目标,将运营需求反馈至新

线的规划设计中,以避免新建的轨道交通也产生能力不足的状况。据此,新建的上海轨道交通 14 号、15 号、18 号线将采用全自动驾驶系统,以提升系统能力。全自动驾驶系统(UTO)可实现列车在运行期间完全依靠系统进行全自动控制(包括自动运行、实时监控、状态报警等)。相比于其他系统,全自动驾驶系统没有驾驶员操作,系统可靠性更高,运行效率也更高。例如,上海轨道交通 10 号线为 UTO 线路,相比于列车自动运行(ATO)线路,在开关屏蔽门、驾驶员确认发车条件等作业环节共节省时间约 16 s/站,主线单程旅行时间可缩短 7 min 28 s,支线单程旅行时间可缩短 7 min 12 s,运行效率大幅提升。

### 2.3 通过“补短板”改造提升既有有线系统能力

系统运输能力主要受线路能力、列车能力以及车站集散能力等因素的影响<sup>[6]</sup>。根据五年运能规划目标,对系统能力不足的既有有线实施“补短板”改造。

#### 2.3.1 提升线路能力

线路能力包括线路通过能力和折返能力,两者的最小值决定线路的最大通过能力。线路通过能力受信号系统设计能力限制,故对于设计发车能力、追踪能力不足的线路应进行信号系统改造;折返能力则受终端折返站和中间折返站的折返条件限制。在开行大小交路时,应分别满足大、小交路列车的行车密度要求,因此,对于不满足远期运能需求的折返站应进行改造,以提升折返能力。

随着列车开行密度的增加,可能出现供电能力不足的情况。因此,在考虑线路能力提升时应同步考虑供电能力的匹配性,对供电能力不足线路的牵引变电所、电缆等设施进行扩能改造。

#### 2.3.2 增加配属车辆

对于客流的持续增长,最直接有效的方法是通过增加配属车辆、缩短行车间隔来提升运能。但增购车辆的周期较长,从报审到投入运营,至少需要两年半时间,因此车辆增购需提前启动。应同步考虑车辆基地的扩建、新建,以及出入库能力改造,以满足远期增购列车的停放以及对发车效率的需求,保证增购列车能够及时上线运营。

#### 2.3.3 提升车站集散能力

由于车站集散能力不足造成的乘客在车站内积压和对冲等状况,不仅增加安全风险,也制约了列车发车频率和运能的提升。因此,迫切需要对站台太小、站台至站厅垂直运输能力不足、站厅蓄客能力不足、换乘通道能力不足的车站进行改造,增加服务设

施,为增能奠定基础。

#### 2.3.4 “补短板”实例分析

以上海轨道交通 2 号线为例,由于分期建设运营和设计能力不均衡,目前全线采用分段运营模式(见图 2):2 号线西段(徐泾东站—广兰路站)为 8 节编组列车运行,2 号线东段(广兰路站—浦东国际机场站)为 4 节编组列车运行。两个区段间出行的乘客必须在广兰路站换乘。不平衡的运能配置使得换乘客流在广兰路站形成对冲、积压,安全风险极大,且广兰路站两端的折返能力紧张,成为全线运能提升的技术瓶颈。

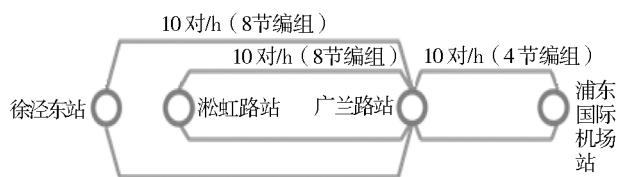


图 2 2015 年上海轨道交通 2 号线运营交路示意图

为达到远期(2041 年)小交路开行列车间隔 2 min 的目标(见图 3),2 号线目前正在进行系统能力的改造。一是提升线路能力,将徐泾东站、浦东国际机场站的信号系统按 30 对/h 能力进行改造;对远东大道站、海天三路站和川沙停车场的低压配电进行扩能改造;对牵引用电进行扩能改造,更换川沙主所—川沙站的环网电缆等。二是增加配属车辆,增购 31 列 8 节编组列车和 16 列 4 节编组列车,将既有停车列检库进行扩建。三是对 2 号线东段的车站实施扩容,对已预留 8 节编组站台的车站进行装修,对未预留 8 节编组站台的高架车站实施扩建,以满足 4 节编组列车扩编至 8 节编组后的运行需求。预计到 2041 年,全线最大满载率将低于 90%,较 2015 年的 115%有较大改善。

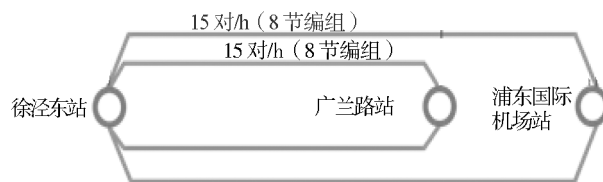


图 3 远期上海轨道交通 2 号线运营交路示意图

### 2.4 通过精细化开行方案设计挖潜增效

为完成年度增能计划,上海轨道交通在旅行速度、不对称列车开行、复杂交路等方面进行精细化管理,实现了在现有车辆和信号系统不变条件下的挖潜增效,一定程度上缓解了高峰时段客流的拥挤程度。

#### 2.4.1 提升旅行速度

通过提升列车旅行速度,提高车底周转效率,从而在不增加列车配属的情况下增加线路运能。

2016年起,对上海轨道交通12号线开展旅行速度提升试点研究。该研究针对影响旅行速度的各项作业时分进行分解,然后通过正交试验法确定如下优化方案(见图4):提高区间运行等级,减少区间运行时间;制定驾驶员停站作业时间标准,减少驾驶员“关门动车”时间;对各车站不同时段的患者乘降时间进行精细化设置等。通过优化,12号线旅行速度从原来的30.99 km/h提高到32.94 km/h,增长率为6.29%,运能提升了13%,最大满载率下降了13%。目前,该方法已在上海轨道交通6号、7号、10号、13号、16号线予以推广,可增能4%~10%。

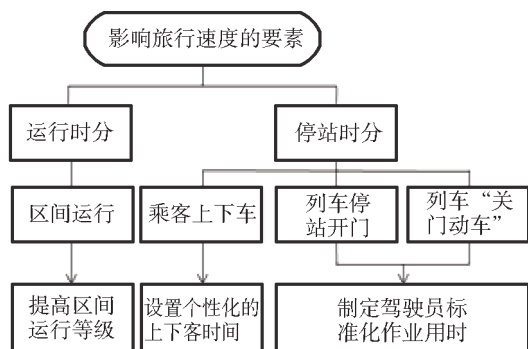
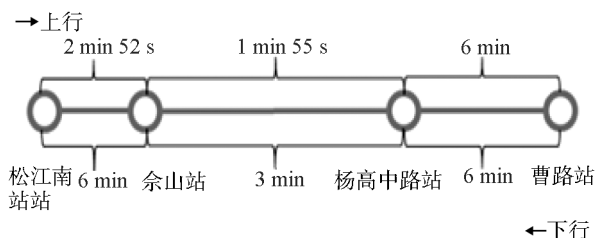


图4 上海轨道交通旅行速度提升方案示意图

#### 2.4.2 实施不对称运行图

针对大部分线路客流的时空分布不均衡特征,为使运能运量匹配性最高,在客流强度最高的方向和区段开行更高频次的列车。目前,上海轨道交通3号、4号、6号、7号、9号、10号、11号、12号、16号线在高峰时段均采用不对称运行方式。以9号线为例(见图5),早高峰上行方向最小行车间隔为1 min 55 s,同一时段下行方向的最小行车间隔为3 min,若采用对称的开行方式,则仅能做到上下行最小行车间隔为2 min 20 s,单向最大运能相差22%。



注:图中时间为所属区段的最小行车间隔

图5 上海轨道交通9号线不对称运行图示意图

#### 2.4.3 开行复杂交路

通过调整交路范围以节约运用车数。在经济合

理使用车底的基础上,使运营计划符合实际客流特征。经过多年摸索,上海轨道交通已形成了大小交路、搭接交路、Y型交路、环形交路等多种复杂交路形式(见图6)。通过开行不同交路,可有效提升共线段的运能约20%~50%。

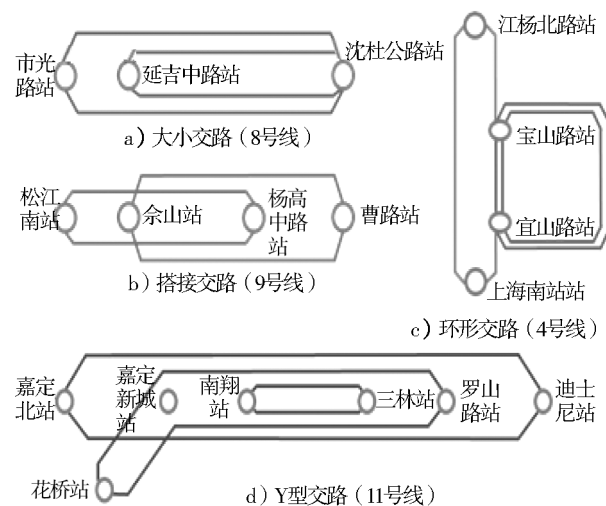


图6 上海轨道交通复杂交路示意图

#### 2.5 基于乘客需求研究个性化服务措施

在满足高峰时段最大运能供给的同时,上海轨道交通从乘客体验出发,通过列车开行方式创新、实施非高峰增能和延时运营等措施,为各类乘客提供高质量的运营服务。

##### 2.5.1 实施大站车运行创新模式

大站车运行模式是指列车在上下客流量较少的车站进行跳站运行,从而提高列车的周转效率。例如,上海轨道交通16号线是全国首条采用大站车开行方式的线路(见图7),大站车全程旅行时间44 min 43 s,比普通列车缩减13 min左右,节约旅行时间近1/4,可帮助郊区乘客快速进入市区。

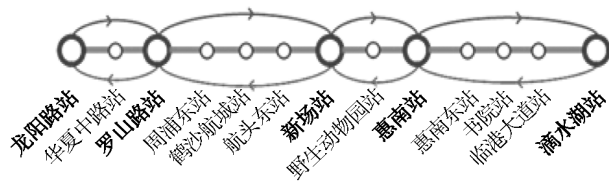


图7 上海轨道交通16号线大站车运行交路示意图

##### 2.5.2 实施多点首班车创新模式

针对客流的空间不均衡性,结合停车场地理位置,在轨道交通1号、2号、7号、9号、11号、12号、13号、16号线上建立了多点首班车模式,既分散了乘坐全程首班车的客流压力,又增加了部分车站的

(下转第14页)

切,需要开行跨线动车组。

从国内高铁运营现状看,目前合资铁路公司基本上由国家铁路控股,均采用委托铁路集团公司代管模式。考虑到高铁线路的通道属性,自管自营模式基本不具备可操作性。通道类项目建议广东省与铁路总公司合资建设,各线宜单独成立合资铁路公司,运营管理推荐委托广铁集团。

## 4 结论

(1) 广珠城际铁路建议继续委托广铁集团运营。

(2) 粤港澳大湾区内其它城际线路可独立成网运营,建议由珠三角城际铁路公司自管自营。对于利用国家铁路线路进入广州枢纽的城际线路,由城际铁路公司与广铁集团进行清算。

(3) 粤港澳大湾区内港深西部快轨由香港与内

地联合运输,建议珠三角城际铁路公司与港铁公司签订联合运输协议。

(4) 粤港澳大湾区通道类线路,推荐采用委托代管模式,单独成立合资铁路公司。

## 参考文献

- [1] 陈柯冰,聂磊.我国城际铁路运营管理模式探讨[J].综合运输,2016(9):34.
- [2] 刘庆.城际铁路建设与运营模式研究[D].西南交通大学,2018.
- [3] 赵海宽,王涛,宋锴,等.基于路网效能最大化的合资铁路运营管理模式探讨[J].铁道运输与经济,2014(10):11.
- [4] 黄成.城际铁路网建设时序研究——以珠三角地区为例[D].成都:西南交通大学,2015.
- [5] 陈军团.关中城市群城际铁路运营管理模式研究[J].铁道运输与经济,2019(1):48.

(收稿日期:2018-08-30)

(上接第10页)

运营时间。

### 2.5.3 实施非高峰时段增能

针对客流的时间不均衡性,在工作日非高峰时段和双休日实施增能,以最大满载率不超过50%为控制目标优化开行方案,以提升乘客出行舒适性,同时吸引部分对出行时间不敏感的乘客错峰出行。

### 2.5.4 制定重大交通枢纽站配套运行图

针对枢纽站乘客的夜间出行需求,在末班车后加开定点加班车。目前,为虹桥综合交通枢纽服务的5座轨道交通车站,在常态运营结束后加开2班定点载客列车(仅停靠沿线部分固定站点),运送由航空港和高铁站转入轨道交通的乘客进入市区。

为保障枢纽站节假日返程期间的大客流运输,根据客流特征,制定了虹桥枢纽相关车站的节假日返程运输配套运行图:从13:00至运营结束,行车间隔缩短至3 min 40 s,使这些车站的运能较平日和双休日增加一倍。这一举措自2018年清明节假期实施以来,取得了良好效果。

### 2.5.5 实施常态周末延时运营

为满足节假日休闲、旅游乘客的夜间出行需求,从2010年起,在元旦、国庆期间对轨道交通1号、2号线进行了延长运营时间的试点。其间,系统研究了延时运营情况下的施工组织、客运组织、行车组织的应对措施。此后,通过不断论证,于2017年4月28日起,轨道交通1号、2号、7号、8号、9号、10号线每逢周五、周六延时运营70~80 min,中心城区车

站运营到午夜零点,延时线路全天运营时间平均为18 h 29 min。该举措推出后,截至2018年6月底,延时运营期间共运送乘客169.9万人次,社会反响良好。

## 3 结语

城市轨道交通运能提升是一项系统性工作,需要规划、建设、运营各方协同努力。因此,需要高度重视网络化运能的精细化管理,树立运营需求反馈规划建设理念,从源头上确保运能供给。针对既有线的运能提升工作,运营管理部门应结合自身特点,深入研究挖潜增效的技术手段,推出更多人性化服务举措。

## 参考文献

- [1] 徐瑞华,陈菁菁,杜世敏.城轨交通多种列车交路模式下的通过能力和车底运用研究[J].铁道学报,2005,27(4):6.
- [2] 徐新玉.城市轨道交通行车组织交路形式分析[J].铁道运输与经济,2010,32(9):55.
- [3] 蔡涵哲.网络化条件下城市轨道交通行车组织优化问题研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [4] 刘丽波,叶霞飞,顾保南.东京私铁快慢车组合运营模式对上海市域轨道交通线的启示[J].城市轨道交通研究,2006(11):38.
- [5] LIEBCHEN C, MOHRING R. A case study in periodic timetabling[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2002, 66(6):1.
- [6] 马骥,饶咏.城市轨道交通运营管理[M].北京:科学出版社,2014:49.

(收稿日期:2018-08-30)