

上海轨道交通网络的运能瓶颈评估及改进对策

朱 莉

(上海轨道交通维护保障有限公司,201103,上海//高级工程师)

摘 要 对于运能运量矛盾突出的超大规模城市轨道交通系统,全网络多条线路的进一步增能需求十分迫切,而运能瓶颈集中体现为设备能力的制约。着眼于系统性增能,综合考虑和评估了各项设备能力对增能的影响。以上海轨道交通网络的增能需求为基础,阐述了7类影响增能的设备能力及其相互之间关系和其与运能之间的制约关系,分析了各项设备能力的评估方法;评估总结了上海轨道交通网络当前的设备能力问题,并分别给出了改进对策,最后从工作实施、技术改进和规划设计方面提出了建议。

关键词 城市轨道交通;超大规模线网;运能瓶颈;增能对策;设备能力评估

中图分类号 F530.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.01.001

Evaluation and Improvement Countermeasures of Shanghai Rail Transit Network Transportation Capacity Bottleneck

ZHU Li

Abstract For the super-large scale rail transit system that has conflicts between transportation capacity and passenger volume, it is urgent to further increase transportation capacity of multiple lines in the whole network, while the transportation capacity bottleneck is mainly reflected in the restriction of equipment capacity. In order to systematically increase transportation capacity, the influences of various equipment capabilities are comprehensively considered and evaluated. Based on the demand of Shanghai rail transit network capacity increase, seven influencing equipment capability factors, their inter-correlations, and their restrictions on transportation capacity are expounded, and the evaluation methods of each equipment capability are analyzed respectively. The evaluation results summarize current Shanghai rail transit network equipment capability problems, and the improvement countermeasures are given. Finally, suggestions on the work implementation, technology improvement and the planning and design are put forward.

Key words urban rail transit; super large-scale line network; transportation capacity bottleneck; capacity improvement countermeasures; equipment capability assessment

Author's address Shanghai Rail Transit Maintenance Support Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

随着城市轨道交通线网规模增长及通达性的提高,客流量不断增长,客流分布呈现出时空不均衡性。对此,运营管理部门需要针对性地提高城市轨道交通的运输能力。运输能力的大小主要取决于固定设备和活动设备的能力,以及技术设备的运用、行车组织方法和行车作业人员的数量及技能水平^[1]。对于常态化高密度、高负荷运营的上海、北京等城市的轨道交通网络,在经历若干轮千方百计的增能之后,运能进一步提升的瓶颈主要表现为设备能力的限制,可归纳为列车载客能力、线路能力和客运设施能力等3类^[2]。

对城市轨道交通运能瓶颈的研究,多见于车站内部集散能力瓶颈研究^[3]、线路区间通过能力技术瓶颈和基于乘客服务水平的服务瓶颈研究^[4],主要通过车站客流仿真^[3]、分析计算^[4]、软件系统仿真^[5]和网络客流预测及分配^[6]等方法评估能力供给及其与客流需求的匹配程度。而对于制约运能提高的关键设备能力,则分别针对车辆购置策略^[7]、折返能力改进^[8]、基地出入段扩能^[9]、供电系统改造^[10]、配线能力提升^[11]等问题进行研究。然而,城市轨道交通系统是由各专业子系统构成的复杂大系统,各子系统之间存在相互影响和制约的关系,因此,在考虑增能提效时,不仅要解决突出问题,还要改进相关的配套条件。对于已经发展到较为成熟阶段的城市轨道交通网络,进一步的增能提效工作必然牵涉范围更广、影响因素更多,其运能瓶颈问题的识别及解决方案则需要从系统工程的角度进行整体布局和协同推进。基于此,本文以上海轨道交通网络的增能需求为基础,系统性地分析和评估超大规模城市轨道交通系统的设备能力瓶颈,讨论当前及将来发展的工作对策,以期实际的增能工作和技术发展提供借鉴。

1 超大规模城市轨道交通线网的增能需求

近年来,各大城市的轨道交通网络规模不断扩大、客流量不断增长。北京地铁5号线和10号线开通不到一年,高峰高断面客流已接近远期的预测值;上海轨道交通有7条线路高峰高断面客流均超过原设计^[13]。2019年上海城市轨道交通网络年日均客流量突破了1 060万人次,早晚高峰时段客流量尤其大,其中有5条线路的高峰小时断面客流超过了5万人次^[12]。全网目前有13条线路的最小行车间隔在3 min以内,其中6条线路的最小行车间隔更是达到了2 min以内(含3号线和4号线共线段),但其中10条线路的客流量仍然接近或超过了运能上限。如图1所示,在统计上海轨道交通各线路2019年高峰小时最大满载率的同时,提出了2020年和2025年的规划满载率。2019年,较早开通的6号线和8号线的满载率最高,达到120%;新开通的线路中,16号线的满载率超过100%;13号线的满载率虽然最低,但已经多次增能,行车间隔由10 min缩短为最短的2 min 30 s。在既有线路客流量不断攀升、新开通线路客流量快速增长的态势下,为了提升运营服务水平,达到2020年的目标满载率、2025年的规划满载率,全网络多条线路的进一步增能需求十分迫切,特别是图1中2019年现状运能与2025年规划运能差异较大的线路,其增能需求更加迫切。

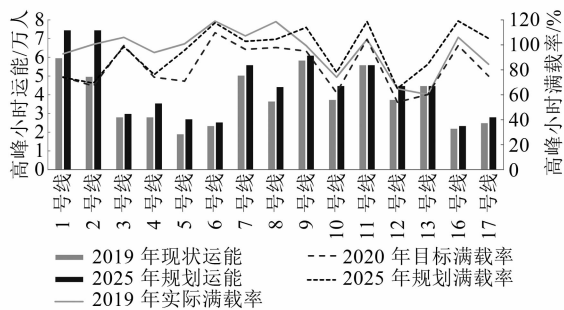


图1 上海轨道交通各线路的运能现状及规划运能和满载率
Fig. 1 Current transportation capacity, planned capacity and full-load ratio of each line of Shanghai Rail Transit

对此,上海申通地铁集团有限公司制定了上海轨道交通增能提效的实施方案,已开展了两轮补短板工作,对与增能相关的设备的能力进行提升,包括:①网络车辆增购及车辆基地扩建;②供电系统改造;③车场出库能力改造;④零星的车站改造、基地扩容。对于一个庞大复杂的轨道交通系统而言,

各专业设备的能力现状及其对系统整体运行效率的影响程度有所差异,为了更加有效地开展补短板工作,需要对既有设备的能力进行评估,对照增能要求,发现和总结运能瓶颈问题,提出工作对策和改进建议。

2 既有设备的能力评估与判定

2.1 影响增能的设备能力分类

综合考虑影响增能的多种设备能力因素,并对典型线路进行实测研究发现,现阶段上海轨道交通的运能瓶颈因素主要为列车载客能力和线路能力两大类。列车载客能力指的是列车配属数这项活动设备能力,线路能力因素则包括折返能力、基地停车能力、基地出库能力、汇车能力、正线供电能力和基地供电能力等6项固定设备能力。设备能力因素对运能的影响及其相互关系如图2所示。

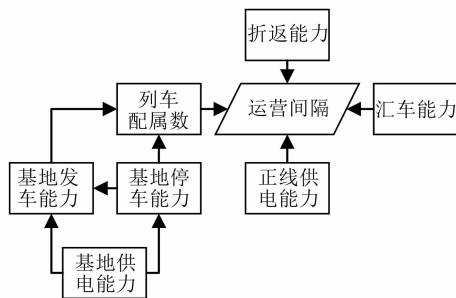


图2 设备能力因素对运能的影响及其相互关系
Fig. 2 Impact of equipment capability factors on transportation capacity and their inter-relationship

如图2所示,上述7项瓶颈因素之间存在着相互影响和制约的关系。通过增加列车配属数可以直接增加高峰时段上线列车数量,从而缩短行车运营间隔,增加单位时间内提供的载客运行空间,也就是运能。但增加运能并不是单纯地通过增加列车配属数就可实现。一方面,列车配属数受车辆基地能力的制约,具体包括基地停车能力、基地发车能力和基地供电能力。基地停车能力也就是容纳停放列车的列检库线数量,由车辆基地的土建设计确定,因此其是限制列车配属数量的硬约束。同时基地停车能力又受基地供电能力和发车能力制约,基地发车能力决定了高峰时段从车辆基地快速投放正线增加的效能。而基地供电能力限制了场内同时运行列车数量,均需与列车配置数量相匹配。另一方面,缩短正线行车间隔也直接受制于正线的线路运营能力,具体包括折返能力、正线供电能力

和汇车能力等因素。其中折返能力和汇车能力直接由线路土建条件和信号系统能力决定,直接制约了行车间隔的极限能力,在进行线路增能时是必须首先评估和考虑的。同时正线供电能力也直接影响行车间隔,当正线增加运能时,供电设施必须同步改造增能以实现匹配。

2.2 既有设备能力评估规则

2.2.1 列车配属数评估规则

列车配属数是运用车数、备用车数和检修车数的总和。列车配属情况评估是根据各线路列车的到车、调试和上线的计划,综合评估 3 类车数在相应的增能节点时是否符合要求。

1) 运用车数:根据运营增能目标,各线路按运营要求投入运营使用的列车数。

2) 备用车数:按照近期规划运用车数的 10% 计算,远期根据线路及运营条件按规划运用车数的 5%~6% 计算,四舍五入取整。

3) 检修车数:在运用车数和备用车数的总数基础上,根据车辆检修率的乘积计算确定,四舍五入取整。车辆检修率应按车辆检修制度确定,为简化计算,一般按运用车数的 15% 计算确定,四舍五入取整。

2.2.2 折返能力评估规则

运营中,通常用 2 列列车先后接入或发出折返站的最小间隔表示折返能力,其受限于接车间隔、折返作业间隔和发车间隔中的最大者。因此,折返能力评估是对接车能力、发车能力和折返线能力的综合评估,不仅要考虑车站的配线条件和信号制式,也要考虑折返方式、折返模式、停站时间、技术作业时间、富余时间分配和到发均衡性等因素的影响。

以站后固定折返线折返为例,接车间隔包含列车进站走行时间、停站清客时间、列车进折返线时间和道岔转换时间;同一折返线的折返作业间隔包含列车进出折返线走行时间、司机换端作业时间和道岔转换时间;发车间隔包含列车出折返线时间、停站上客时间和列车出清站台时间。更多条件下的折返能力详细计算方法参考图解法^[1]。在实际的评估工作中,根据各线路固定设备和技术设备条件,再考虑一定冗余量,通过仿真测算折返能力是否满足缩短行车间隔的要求。

2.2.3 基地停车能力评估规则

停车能力是对设计停车列位、实际停放能力和

具备发车能力列位数的综合评估。根据各线路增能目标中的列车配属数,评估线路所属基地的实际停放能力是否大于总的列车配属数,以及具备发车能力的列位数是否大于目标运用车数。运营实践中,为了应对突发情况,车场能力还要考虑留有一定数量的空余列位。

1) 基地满额停车能力:是指基地理论的停车列位数,即基地车库的所有列位,包含停车列位、检修列位、静调线和吹扫线等。

2) 实际停放能力:按照以下车辆基地生产任务的压力情况,计算该车库的实际停车列位数:一场单线的车辆基地预留 2 股道空闲;一场多线和具有“大型工艺装备”资源的车辆基地预留 3 股道空闲。

3) 具备发车能力的列位数:计算车库具备发车能力的列位数,即信号设备配置和列位的部署位置满足列车一次性调车至总出发信号机。

2.2.4 基地发车能力评估规则

发车能力,也称为出库能力。发车能力评估主要针对基地具备发车条件的股道,分析车辆基地满额列车在基于保障夜间维护天窗时间的前提下,是否能在早高峰来临前全部投入正线运营。满额配属列车全部发完的总时间取决于列车单线出库能力。单线出库能力一般按车辆基地最远发车股道上的单列车完成出库的时间确定。在此基础上,进行基地发车能力评估,通过比较当前和增能时刻表的早高峰最后一列列车的出场时间确定基地发车能力。该时间的计算方法为:

$$t_{\text{次日早高峰最后一列列车出场}} = t_{\text{当日最后一列列车入场}} + t_{\text{维修}} + t_{\text{满额配属发车}}$$

2.2.5 正线供电能力评估规则

根据增能规划的行车间隔仿真计算供电能力,并对比分析目前线路的系统能力现状。综合牵引系统整流机组的容量、负荷等级和直流开关整定值等信息,选取直流开关对双边供电区域的取流特性进行监测,验证系统的极限能力。

2.2.6 基地供电能力评估规则

基地供电能力是对出库能力(同时动车数量)、列车动态的用电负荷、列车静态双开的用电负荷和自身系统设备能力的综合评估。判断原则为:ATC(列车自动控制)系统 2 min 间隔的出库能力,停车库 14 列列车双开辅助负荷,检修库 100% 列车双开辅助负荷,同时 1 列列车启动出库,持续时间 30 min。通过比较该原则下的用电总负荷和各基地的自身系统设备能力,得到基地供电能力评估结果。

2.2.7 汇车能力评估规则

汇车能力是对出场列车与正线列车汇合能力和小交路折返列车与通过列车分叉汇合能力的综合评估。该项评估同样需要进行列车运行仿真,以测算达到各种场景下列车之间互不干扰的行车间隔时间是否满足缩短行车间隔的要求。

2.3 既有设备能力评估结果

2.3.1 典型问题评估总结

根据上海轨道交通各线路的增能目标,对上述 7 类设备能力进行统计、计算或仿真测算之后发现:列车配属数通常能满足增能要求;运能瓶颈多见于折返能力,其次依次是供电能力、停发车能力和汇车能力,具体影响程度则因线路条件各异。表 1 为上海轨道交通网络既有设备能力典型问题的评估总结。

表 1 上海轨道交通既有设备能力典型问题评估总结
Tab.1 Evaluation summary of typical capability problems of Shanghai Rail Transit existing equipment

存在问题	问题表现
折返能力不足	受限土建条件,信号系统折返能力无法达到 2 min;折返能力仿真结果采用的停站时间等参数与实际情况存在差异,实际运行折返能力达不到理论值
基地停车、发车能力不足	个别线路的基地设计不够合理,造成停车能力不足或单方向发车压力过大;个别早期线路检修库股道不具备发车条件,造成发车列车数不够;个别早期线路采用调车进路出库,出库效率低
正线、基地供电能力不足	个别线路基地和正线供电能力与信号系统能力不匹配;个别基地供电分区设置不合理
汇车能力不足	个别线路(如 3 号线宝山路站和虹桥路站)汇车能力不足。

2.3.2 典型线路评估结果

以上海轨道交通开通最早的 1 号线为例,该线路长 36.889 km,非 CBTC(基于通信的列车控制)信号系统,有梅陇和富锦路两个停车场,停车列位和发车列位分别为 87 个和 80 个,目前配属 84 列列车。在最小行车间隔为 2 min 的增能目标下,通过设备能力评估发现,列车配属、停车能力和汇车能力满足需求,而其他能力存在不足,问题与对策如表 2 所示。

3 解决运能瓶颈的对策和建议

3.1 对策

针对评估工作中发现的固定设备能力不足问题,综合同一问题和相关问题在各条线路的表现特征,分析给出解决各类问题的对策。

表 2 上海轨道交通 1 号线 2 min 行车间隔增能目标下设备能力评估结果

Tab.2 Equipment capability evaluation results under the capacity increase target of 2-minute headway of Shanghai Rail Transit Line 1

分类	目前存在的问题	对策
折返能力	莘庄站理论折返能力为 134.74 s	考虑线路改造,站后延长 50 m
正线供电能力	正线供电能力为 24 对/h	供电增能改造
基地供电能力	无法匹配发车能力,天气炎热时,如果多列车同时启动,可能导致直流开关跳闸或单向导通击穿等情况	供电增能改造或实施管理手段,列车逐列启动、发车
基地发车能力	富锦路基地单线出库能力较弱,目前为 321 s,满额 49 列车单线发完需 4 h 20 min	基地信号系统改造,列车进路、调车进路配合,提升出入库能力

3.1.1 解决折返能力不足的对策

1) 提升侧向过岔速度:通过提升侧向过岔顶篷限速,提升 ATO(列车自动运行)模式下的侧向过岔速度。如采用 12 号道岔,可减少折返时间 8~10 s。

2) 增加部分区段限速:在折返站进站前的 400 m 左右,降低列车运行速度,延缓后续追踪列车行驶至受前车干扰的位置,从而能按要求插入更多列车。

3) 结合实际情况,对折返线进行延伸改造。

3.1.2 基地停车和发车能力不足的对策

1) 结合实际情况,对部分基地实施扩库改造。

2) 采取正线存车,解决因生产任务造成的停车列位不足问题。

3) 对部分基地信号系统进行改造,如将传统出库方式提升为 ATC 模式下的出库方式。在周检库和月检库配置信号系统设备,使其具备发车条件,从而提升发车效率。

3.1.3 正线和基地供电能力不足的对策

1) 对供电能力与信号系统能力不匹配的部分线路,开展供电能力改造。

2) 对部分基地供电分区设置不合理的线路,开展分区设置改造。

3) 可采取管理手段,控制基地同时发车的数量,从而控制发车时的负荷。

3.1.4 汇车能力不足的对策

1) 优化信号系统进路触发和互锁防护机制,缩短单车通过时对汇合区线路资源的独占时间,减少冲突和停车等待,从而缩短汇合区通过间隔。

2) 加快车车通信等新技术的研究、试点,优化道岔等轨旁资源动态精细化控制,提高汇车能力。

3.2 总体工作建议

在线网规模发展进入成熟期,但客流需求不断接近运能上限的现阶段,全面、系统性的增能提效迫在眉睫,但由于所面临问题涉及专业范围广、系统复杂度高和设备施工难度大,实际的系统增能工作还处于探索阶段,这个过程中存在的主要问题是:①对系统实际能力认识不足,包括实际折返能力、汇车能力和供电能力掌握不充分,停留于仿真计算结果;②多专业匹配规划不充分,典型问题是停车能力、正线供电能力、折返能力、车辆吊装运输、发车能力、基地供电能力和仓储等其他能力,以及车站通信设备,如 PIS(乘客信息系统)和 PA(广播)系统等专业协同不足;③项目规划协调不足,表现为逐步发现和逐步报项,缺乏与增能迫切性的关联。对此,分别从工作实施、技术改进和规划设计方面提出建议。

3.2.1 工作实施建议

对需要增能的线路,采用实际的线路数据、设备数据和停站数据等进行折返能力、汇车能力、基地能力和供电能力等方面的综合仿真测算,结合设备状态及配套项目对能力短板进行统筹改造。

3.2.2 技术改进建议

1) 加大力度推进具有自动开关门功能列车的投入使用。研究发现,折返能力、汇车能力以及旅行速度等都受停站时间影响较大,而 CBTC 系统的线路可通过列车全自动开关门的方式缩短一定的停站时间。因此,对于部分非 CBTC 线路进行改造升级,以使全网线路具备 ATO 开关门功能,从而进一步增大实际能力,趋近仿真能力。

2) 研究自动折返和无人驾驶系统的简配改造。评估自动折返功能在部分线路的使用情况时发现,自动折返技术已经较为成熟,可消除因司机换端慢、发车按钮响应时间长等人为因素造成的时间耽误。由于折返时间为大部分线路最主要的制约因素,而折返设备设施改造周期长、难度大,因此自动折返技术的运用十分必要。在此基础上,建议可综合考虑车辆专业和信号专业的大修项目,实现简配的 DTO(有人值守的全自动运行)系统改造。

3.2.3 规划设计阶段的建议

从可持续发展角度出发,一方面,特大城市应尽量选择宽体、大编组的列车,以及配套相应的系统规模和预留一定的发展弹性,避免线路系统规模成为运能瓶颈;另一方面,对于关键设备设施的能

力,如机电设备系统和土建设备等的能力,应预留可扩展的余地,以备缩短行车间隔时的需要,以降低后期进行系统改造升级时的高昂成本。

4 结语

在各大城市的轨道交通网络规模趋近成熟、运能运量矛盾日益突出的现阶段,多数线路需要分时段、分区段针对性地增加运能,而运能瓶颈集中体现在设备能力的制约,因此增能工作对设备能力的改造升级提出了全面要求。本文从系统性增能的角度出发,综合考虑和评估影响增能的各项设备能力。基于上海轨道交通的增能要求,阐述了7类影响增能的设备能力因素及其与运能的制约关系;分析了各项设备能力的评估方法;以典型线路为例评估总结了当前的设备能力不足问题,并分别给出了改进对策;最后结合实际工作中的问题总结,从增能工作实施、技术改进和前期规划设计方面提出了建议,可为解决运营实践中的运能瓶颈问题提供参考。

参考文献

- [1] 江志彬. 城市轨道交通网络列车运行组织与管理[M]. 上海:同济大学出版社,2018.
JIANG Zhibin. Organization and management of train operation in urban rail transit network[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [2] 汪波,韩宝明,战明辉,等. 城市轨道交通运输能力计算及加强研究[J]. 城市轨道交通研究,2013(4):48.
WANG Bo, HAN Baoming, ZHAN Minghui, et al. Calculation and improvement of urban rail transport capacity[J]. Urban Mass Transit, 2013(4):48.
- [3] 单征,术瑞,李婷婷,等. 城市轨道交通车站集散能力瓶颈识别方法研究[J]. 交通信息与安全,2014(1):117.
SHAN Zheng, SHU Rui, LI Tingting, et al. Bottleneck identification for the gathering and distributing capacity of urban rail transit station[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014(1):117.
- [4] 李得伟,韩宝明,鲁放. 城市轨道交通网络瓶颈分析[J]. 城市轨道交通研究,2011(5):49.
LI Dewei, HAN Baoming, LU Fang. Analysis of urban rail transit network bottlenecks[J]. Urban Mass Transit, 2011(5):49.
- [5] 刘荣峰,钱江. 高仿真系统运输能力评估和方案验证的研究[J]. 铁道通信信号,2016(10):36.
LIU Rongfeng, QIAN Jiang. Study of carrying capability assessment and program verification method of urban rail transit line[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2016(10):36.