

上海轨道交通网络运营现状分析及对线路总体设计的建议*

沈 坚

(上海申通地铁集团有限公司技术中心,201103,上海//第一作者,高级工程师)

摘 要 实际客流与预测客流的偏差,造成城市轨道交通实际运营需求与设计目标不相符。分析上海轨道交通网络运营现状存在的问题,表现为高峰时段线路运能配置不足、大客流情况下车站客流集散能力不足、系统设计能力不匹配以及配线灵活性不足等。针对运营现状问题,从系统规模配置、车站建筑标准、系统能力匹配性以及配线灵活性等方面提出线路总体设计的对策与建议。

关键词 上海轨道交通;运营;线路总体设计

中图分类号 U293.1;U212.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.07.005

Operational Status Analysis of Shanghai Rail Transit and Suggestions for Overall Line Design

SHEN Jian

Abstract Due to the deviation between the actual passenger flow and the predicted one, the actual operational demand of urban rail transit is inconsistent with the designed goal. Problems existing in the operation of Shanghai rail transit network are analyzed, including the shortage of line capacity during peak hours, the insufficient passenger flow distribution capacity in case of large passenger flow, the mismatch of system design capacity and insufficient flexibility of auxiliary lines. According to the operational problems of Shanghai operation rail transit network, countermeasures and suggestions for overall line design are proposed from the aspects of system scale, station standards, system capacity matching and auxiliary lines flexibility.

Key words Shanghai rail transit; operation; overall line design

Author's address Technology Center Of Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

20多年的建设历程,到2016年底,上海建成了拥有14条线路、588.4 km运营里程、365座车站的轨道交通网络,全网最高日客流量已达到1 186.67万人次,大客流成为网络运营的新常态。目前,上海轨道交通各条线路高峰时段普遍拥挤,运能与客流矛盾突出,客流不均衡性明显,部分车站客流集散能力不足。鉴于如此大的运营规模和不可忽视的运营管理压力,有必要重新审视城市轨道交通设计中需要注意的一些问题,在后续规划和建设中吸取教训,避免新的短板产生。

1 上海轨道交通运营现状及存在的问题

1.1 高峰运能配置不足

截至2017年4月,14条运营线路中,除4、10、12、13号线外,其他10条线路满载率均接近或超过100%,高峰时段运能配置不足。14条线路中有8条线路行车间隔已达到3 min以内,有6条线路现状客流已接近或超出远期的客流预测,详见表1。根据历史客流增长情况和系统设计能力富余率对比分析,运能与客流需求矛盾突出的有6条线路:①受3、4号线共线段能力24对/h限制,3号线无富余运能。②6号线是4节编组(小型车),目前高峰高段面满载率高达134%,行车间隔为2 min 15 s,运能提升空间有限,而且近5年年均客流增长率仍维持在10.2%。③8号线土建预留能够满足7节编组(小型车)需求。但目前8号线的最小行车间隔为2 min 22 s,系统设计能力富余率仅为6.7%,而且近5年年均客流增长率仍维持在9.4%。6、8号线系统规模偏小,与客流需求不匹配。④9号线是长大市域线路,目前高峰高段面满载率高达134%,系统设计能力富余率仅为10.7%,而且5年年均客流增长率

从1995年上海轨道交通1号线建成以来,经过

* 上海申通地铁集团有限公司科研项目(JS-KY18R001-WT-18038)

仍维持在 10.3%。9 号线三期开通后,客流量还将进一步增加。⑤ 花桥段和迪士尼段开通后,11 号线客流增长很快,增长高达 35.6%,而系统设计能力富余率仅为 14.1%。苏州 S1 线接入后,预计客流量还将增加。

表 1 上海轨道交通既有网络运能配置及客流发展情况表(截至 2017 年 4 月)

线路	系统规模	最小行车间隔	①最大断面客流/(人次/h)	现状断面运能/(人次/h)	②系统设计能力/(人次/h)	满载率/%	实际客流与设计对比	5 年年均客流增长率/%	系统设计能力富余率/%
1 号线	8A	2 min 44 s	54 076	54 439	74 400	99.3	接近近期	2.7	27.3
2 号线	8A	3 min	52 804	49 600	74 400	106.5	超过近期	4.6	29.0
3 号线	6A	4 min	29 716	27 900	22 320	106.5	超过远期	1.8	-33.1
4 号线	6A	3 min 45 s	25 070	29 760	22 320	84.2	低于近期	2.5	-12.3
5 号线	4C	4 min	14 872	12 540	38 160	118.6	未达近期	3.6	61.0
6 号线	4C	2 min 15 s	29 917	22 293	25 080	134.2	超过远期	10.2	-19.3
7 号线	6A	2 min 51 s	46 177	39 158	55 800	117.9	超过远期	7.5	17.2
8 号线	7C	2 min 22 s	41 704	35 011	44 700	119.1	接近远期	9.4	6.7
9 号线	6A	3 min	49 826	37 200	55 800	133.9	超过远期	10.3	10.7
10 号线	6A	3 min	27 440	37 200	66 960	73.8	未达初期	10.1	59.0
11 号线	6A	2 min 30 s	51 118	44 640	59 520	114.5	接近远期	35.6	14.1
12 号线	6A	3 min 30 s	24 721	31 886	55 800	77.5	未达初期	117.1	55.7
13 号线	6A	4 min 17 s	23 281	26 054	55 800	89.4	未达初期	94.7	58.3
16 号线	6A	3 min 30 s	19 348	15 631	31 104	123.8	超过近期	52.1	37.8

注: 8A 表示列车编组为 8 辆 A 型车;4C 表示列车编组为 4 辆 C 型车;系统设计能力富余率= $((②-①)/②) \times 100\%$

1.2 运能提升存在瓶颈

在既有网络运能提升的实施过程中,存在部分车辆基地规模、折返能力、出入场能力、供电能力等设施设备能力不足的情况,需进行升级改造。如:1 号线(莘庄站—富锦路站)原设计按大小交路设计,随着城市外围地区的快速发展,1 号线目前需开行单一交路 30 对/h,而莘庄站折返能力为 164 s(22 对/h),北延伸上海火车站—富锦路段供电系统为按远期交路 20 对/h 设计,因此需对折返能力、供电能力进行提升改造;6、8 号线小交路位置也需要在原设计位置外延,加上实际旅行速度低于设计的原因,运营用车数大于设计用车数,需对部分车辆基地进行扩建。老线列车出入场一般为调车进路模式,单线出库能力仅为 250~300 s;而随着上海轨道交通开行密度逐步增加以及延时运营,为确保夜间一定的维护天窗时间,需提高出入场效率。因此,现在正逐步根据需求将老线列车出入场模式改为与列调结合的出库模式,或将车场改造 ATC(列车自动控制)车场。

1.3 高峰车站集散能力不足

既有网络中一些车站的设施设备能力在高峰

时段无法与客流量相匹配,站厅/站台蓄客能力、站台到站厅的垂直提升能力、换乘通行能力等存在不足。目前上海轨道交通已改造人民广场站、莘庄站、上海火车站站、沈杜公路站等 9 座车站,并计划对莲花路站、佘山站、世纪大道站等 6 座车站进行改造,通过增加站台至站厅的楼扶梯、拓宽站台宽度、增加出入口、增加进出站闸机、优化站厅布局等提高进出站客流疏散能力。一些大型枢纽车站疏散空间不足,如:世纪大道站是 2、4、6、8 号线的 4 线换乘站,是全网换乘量最大的枢纽站,该站的高峰小时客流已经达到 96 898 人次,其中换乘客流 74 915 人次;该站客流流线复杂,换乘大厅分为 A\B 两个厅,疏散空间不足;由于 6 号线的换乘客流很大,因此世纪大道站的疏散能力将影响 6 号线的运能提升。

1.4 运营调整灵活性不足

上海轨道交通网络客流不均衡性现象突出。时间上的不均衡体现在早晚高峰与平峰的客流量差异大;空间上的不均衡体现在线路上下行的客流量差异大,如 7 号线早高峰下行最大断面客流量仅为上行的 57%,16 号线早高峰上行最大断面客流量

仅为下行的 20%。应对客流不均衡需要开行单边交路,但因配线设置不够灵活,运营调整难度较大,如 6 号线,在大客流断面云山路站—世纪大道站前可供备车停放以便高峰插车的停车线仅有巨峰路站一处。

上海轨道交通客流发展特征是小交路区段外延,因此需对运行交路进行调整。如 1 号线,目前的小交路折返点在上海火车站站,上海火车站站以北区段客流量大,但由于北段停车线无折返条件,因此无法调整小交路折返点。

2 上海轨道交通运营问题分析

2.1 系统能力对客流变化的适应性不足

既有运营线路的系统能力设计以客流预测为依据,对实际客流与预测客流的偏差考虑不足,这一情况在 3、4、6、8 号线上尤其突出。3、4 号线受共线段能力的限制,其运能无法提升;6、8 号线是城市化密集区的市区线路,采用的是小型车小编组,系统规模先天不足。另外,与系统能力相关的折返能力、供电能力、车辆基地规模预留不足,如:莘庄站的实际折返能力不能达到设计的 30 对/h;7 号线,如配合小交路外延,则需要进行供电改造和车辆基地扩建。1、2 号线在系统能力做了充分预留,系统规模为 8A,其设计可供借鉴;1 号线在车辆基地规模预留上更是典范,按照单一交路 8A 预留,因此不存在后期车辆基地规模不足的问题;2 号线为长大线路,布置了 3 座车场,运营更为灵活。

2.2 车站规模标准低和布局不合理

造成既有网络车站规模普遍偏小的原因有:①车站的站台宽度、楼扶梯数量、出入口数量等设计以客流预测值为依据,没有考虑到实际客流与预测客流的偏差,因而没有做好规模预留;② 1~5 号线建设时,上海市的轨道交通网络规划方案还没形成,因而未考虑到规划线路的接入,因此先期开通的线路无法适应规划线路开通的换乘客流需求;③换乘理念追求锚固和方便的原则,没有考虑到大客流情况下需要缓冲疏散空间来确保运营的安全。

2.3 系统能力与相关专业匹配性不足

1) 折返能力设计与各专业的匹配性不足。信号折返能力已成为限制运能提升的大瓶颈。安全距离长度、道岔限速、车辆设备响应、停站时间等都和折返能力密切相关。目前各专业的匹配性设计较弱,这造成了线路的实际折返能力达不到设计时

的 30 对/h。

2) 旅行速度设计各影响因素匹配性考虑不足。目前运营中的实际旅行速度不能达到设计的 35 km/h,部分线路需通过扩建车辆基地提升运能。影响旅行速度的主要因素有站间距、停站时间、最高运行速度。设计和实际停站时间不匹配,停站时间与设备响应时间、客流量、司机作业时间有关,一些车站设计停站时间取 25 s、30 s,与实际情况不符。最高运行速度是在车辆、线路、轨道、限界、信号、结构各专业的匹配设计后,最终才能实现设计目标值 80 km/h。目前与最高运行速度相关的各专业的匹配性设计不足,因而影响线路的最高运行速度,如 6、7、8 号线最高运行速度直线段仅为 75 km/h,曲线段最高运行速度仅为 70 km/h。

2.4 配线设置标准低

以往的配线设计对运营灵活的作用考虑不足,弱化了配线设计的重要性。如:受工程建设条件限制时,配线按规范的最低标准设置;当实施难度大时,不惜降低停车线的功能,甚至取消配线的设置。一些车站停车线上下行没有完全与正线贯通,如 2 号线威宁路站和 8 号线曲阳路站(见图 1)。从上海城市发展的情况来看,随着人口向外围迁移,原设计小交路点也需要外移,早期开通的线路因配线设计没有适当考虑客流的这种特性,因此在小交路折返点和终点站之间没有设置可供将来运营调整的折返线或停车线。

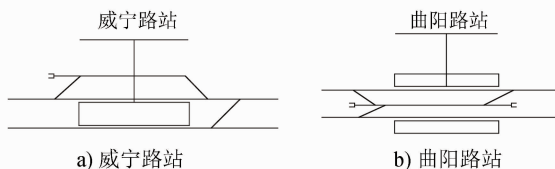


图 1 功能不完备的停车线设置

3 对线路总体设计的建议

根据以上对上海轨道交通运营现状存在的问题及其原因分析,就城市轨道交通总体设计中关于系统设计规模、车站建筑设计标准、系统能力的匹配性设计、配线设计等方面提出如下一些对策及建议。

3.1 系统设计规模

1) 车辆选型与编组。在规划设计阶段,系统规模不应以客流预测为单一基准,而应同时考虑城市的规模及线路在城市中的功能定位。我国特大型城市以及大型城市其主要客流走廊上的线路,列车

应采用 8A 编组,在国产化率高、技术成熟、网络化效益强的情况下,甚至可以采用更宽的车体。服务于城市化程度高的中心城区的线路,列车至少应采用 6A 编组。服务于城市化程度相对较高的中心城区及周边地区城市化程度较低的客运走廊的线路,车辆可采用 C 型车,但列车至少应采用 6 节编组。长大市域线路应采用 A 型车,并适当提高编组数量。市域线中连接新城和中心城区的线路,列车至少应采用 6A 编组。

2) 车辆基地规模。车辆基地按照用地规模一次预留、分期建设可以规避后续规划征地流程上和实际操作性方面的风险。城市化带来了城市人口逐步往外扩张,小交路有往外拓展的需求,因此:对于非长大线路的车辆基地,应按照单一交路 30 对/h 预留用地规模;对于长大市域线路,可合理选择小交路点(宜在城市中心区外围附近),其车辆基地应按大小交路 30 对/h 预留用地规模,为未来运能的提升提供车辆基地改扩建的条件。

3) 变电所容量。主变电所及牵引变电所的改造难度较大,供电设计时应预留一定余量,为未来的增能提供一定条件。对于非长大线路,其正线牵引负荷应按远期高峰小时列车最大行车对数且全线单一交路进行设计,并应预留一定的裕量;对于长大线路,应考虑其远景年的行车交路,做好预留。

3.2 车站建筑设计标准

车站土建规模是百年大计,一旦实施,改造的可能性较小。考虑到车站周边土地功能和开发强度有调整的可能性,车站土建规模设计标准应在现有的国家标准和地方标准上有所提高。

1) 站台宽度。应根据所属线路在网络中的功能、车站和城市中的区位、车站在网络中的重要程度、客流增加的不确定等因素来综合考虑,并结合计算结果,确定合理的站台宽度。上海在新线建设中提高了建设标准:中心城区地下岛式车站站台宽度不宜小于 12 m,换乘站站台宽度不宜小于 14 m;岛式站台侧站台净宽不应小于 2.5 m,侧式车站侧站台净宽不宜小于 3.5 m。对于大型换乘枢纽,更应充分预留足够的大客流疏散空间。

2) 楼梯扶梯通行能力。根据 GB 50157—2013《地铁设计规范》,1 m 宽、运行速度 0.65 m/s 的自动扶梯,其通过能力不大于 8 190 人/h。在车站现场实测发现,上海轨道交通车站自动扶梯的通过能力仅为 5 850 人/h。在新线建设中,相应地提高了

车站自动扶梯的建设标准,DG/TJ 08-2232—2017《城市轨道交通工程技术规范》规定,1 m 宽、运行速度 0.65 m/s 的自动扶梯通过能力为 5 850~8 190 人/h^[2],设计取低值。

3) 换乘通道宽度。上海轨道交通 2 条线路换乘中,同时有 2 列列车到达情况高达 90%以上,高峰时极端情况下会有 4 列列车同时到达的情况。因此,对于 2 min 行车间隔的线路,可按一个行车间隔内最大计算换乘客流断面通过时间不大于 1 min,有条件的车站可按不大于 0.5 min 设计,这样即可分别满足 2 列或 4 列列车同时到达情况下的乘客换乘通行。

3.3 系统能力的匹配性设计

从目前的运营存在的问题来看,运能提升受旅行速度和折返能力的限制,因此需做好各专业匹配性设计,以达到设计目标。

1) 折返能力匹配性设计。提高折返能力需要对信号、线路、轨道、供电、行车各专业进行充分的匹配性设计^[6],具体要求如下:① 选取信号系统等等级较高的移动闭塞系统,有效控制折返作业过程中的车载设备换端作业时间。② 站后折返,线路专业应保证折返站和道岔区域的距离满足安全防护距离需求;站前折返,应尽量缩短道岔区域与折返站的距离间隔。③ 增加轨旁信号设备,以缩短正线闭塞设计间隔,提高接车作业能力。④ 线路专业,应尽量缩短线间距;轨道专业,应尽量采取侧向通过设计速度较高的道岔。

2) 最高运行速度匹配设计。最高运行速度达不到 80 km/h 是旅行速度偏低的重要原因。如果要使最高运行速度达到 80 km/h 的目标值,就需要挖掘车辆、限界、线路、结构和信号各专业间的重复防护潜力,并进行匹配性设计,以提高 ATP(列车自动保护)顶篷速度。根据上海轨道交通企业标准《城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术标准》^[5],对于线路等级速度为 80 km/h 得线路,各专业有如下取值:车辆构造速度 ≥ 90 km/h,车辆紧急制动触发速度为 88 km/h,最大动态包络线计算速度为 90 km/h,线路曲线临界速度取未被平衡的离心加速度为 0.5 m/s² 时的曲线通过速度,结构设计速度 ≥ 90 km/h,ATP 顶篷速度为 87 km/h,ATO(列车自动运行)目标速度 ≥ 78 km/h。

3.4 加强配线设计

应对客流的不均衡性,停车线应与上下行正线

(下转第 26 页)

柱 12 两侧应力逐渐递减。施作上盖物业后车站中柱轴力最大为 6 280 kN, 中柱极限承载力按不利的偏心受压构件计算, 其承载力为 15 246 kN, 故施作上盖建筑物对车站结构影响不大。

4 结论

1) 构建了鹅掌坦站数值分析简化模型, 通过与现场多项实测数据对比分析, 对计算模型、方法和参数的合理性进行了验证, 可为上盖物业效应预测和类似工程提供技术支持。

2) 地表沉降最大值为 20.5 mm, 且在基坑两侧沉降呈槽型, 沉降槽出现位置在基坑两侧 $0.5H$ (H 为开挖深度) 处附近。受支撑作用的影响, 基坑顶部位移小, 底部位移大, 整体呈现“勺型”; 最大位移为 11 mm, 位于 $2/3H$ 处, 沉降与水平侧移均小于允许值。

3) 在基坑深度方向上, 下层混凝土支撑轴力大于上层支撑; 在基坑长边方向上, 支撑轴力则呈现中间大、两边小的态势。

4) 上盖物业在车站横断面方向上呈现明显的不均匀沉降特性, 建筑物倾斜值为 0.001。实际施工时可对远离车站侧的土体进行加固处理; 车站中柱所受荷载小于柱承载力, 表明上盖物业的附加荷载影响不大, 车站主体结构处于安全状态。

参考文献

- [1] 陈阳, 赵文, 贾鹏蛟, 等. 砂土地区深基坑稳定性评价及力学效应分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018(9): 1353.
- [2] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007(1): 30.
- [3] 李佳宇, 陈晨. 坑角效应对基坑周围建筑物沉降变形影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2238.
- [4] 于廷新. 软土地区某临近高铁基坑支护设计及监测分析[J]. 铁道工程学报, 2015(11): 23.
- [5] 汪俊杰, 刘少伟. 软土地层深基坑地下连续墙支护参数敏感分析与优化[J]. 地下空间与工程学报, 2015(增刊2): 666.
- [6] 糕一, 张军, 宋顺忱. 软土地区基坑开挖对临近高铁影响数值仿真分析[J]. 铁道工程学报, 2014(2): 41.
- [7] 唐仁, 林本海. 基坑工程施工对邻近地铁盾构隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014(增刊1): 1629.
- [8] 沈辉, 罗先启, 李野, 等. 深基坑施工对地铁车站影响的数值仿真分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011(5): 1018.
- [9] 杨贵生, 李雨润, 李雨辰. 超深基坑支护开挖对土体变形影响数值模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2008(6): 32.
- [10] 龚迪快, 成怡冲, 汤继新, 等. 城市轨道交通深基坑周边建筑物安全评判方法[J]. 城市轨道交通研究, 2017(10): 48.
- [11] 李靖, 徐中华, 王卫东. 基础托换对基坑周边建筑物变形控制作用的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2017(增刊2): 163.
- [12] 孙克国, 李术才, 李树忱, 等. 明挖法地铁车站围护结构变形模拟与预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(增刊1): 3210.

(收稿日期: 2019-01-30)

(上接第 20 页)

分别双向连通, 以便于双向列车进出, 高峰时还可以用于停放备车, 有利于上下行不对称交路的运营组织。

随着城市范围的扩张, 中心城区范围不断外移, 存在小交路外移的可能性, 此时终点站与小交路折返站之间需新设小交路折返站。建议在小交路折返站与终点站区段设计停车线, 并应具有自动折返功能, 且站台布置应具有完善的乘降功能。

4 结语

随着我国经济社会发展, 城市化进程不断加快, 对城市人口增长预测比较难把控, 建议在城市轨道交通线路总体设计时适当提高设计标准, 加大设计余量, 加强专业的匹配性设计, 提高总体设计能力。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 城市轨道交通工程技术规范: DG/TJ 08—2232—2017[S]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
- [3] 毕湘利. 从可持续发展角度谈轨道交通的规划和设计[J]. 城市轨道交通研究, 2008(12): 1.
- [4] 毕湘利. 城市轨道交通的规划建设理念应适度超前[J]. 城市轨道交通研究, 2015(9): 1.
- [5] 上海申通地铁集团有限公司. 城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术标准: STB-CL-010002—2015[S]. 上海: 上海申通地铁集团有限公司, 2015.
- [6] 刘循. 城市轨道交通折返能力的匹配性设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2012(5): 64.

(收稿日期: 2018-10-25)