

厦门市市域快速轨道交通关键技术指标研究

李 悄

(中国铁路设计集团有限公司,300142,天津//高级工程师)

摘 要 在总结国内外市域快速轨道交通技术特征及快慢车运营组织影响因素的基础上,以厦门轨道交通 4 号线为例,结合线路及客流特点,对其最高速度目标值、车辆选型及编组、车站分布、运营组织模式等关键技术指标进行研究,确定了适合本线特点的技术方案。

关键词 市域快速轨道交通;快慢车运营;速度目标值;技术指标

中图分类号 U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.04.007

Key Technical Index on Urban Rail Rapid Transit in Xiamen City

LI Qiao

Abstract The technical characteristics of urban rail rapid transit at home and abroad, the influencing factors of express and slow train operation modes are summarized. On this basis and combined with the characteristics of line and passenger flow on rail transit Line 4 in Xiamen City, the key technical index, such as the maximum targeted speed, vehicle selection and formation, station layout and operational organization are studied, a technical scheme appropriate to the characteristics of this line is determined.

Key words urban rail rapid transit; express and slow train operation; targeted speed; technical index

Author's address China Railway Design Corporation, 300142, Tianjin, China

随着我国城市化进程的加快,城市轨道交通线网不断向远郊延伸,市域快速轨道交通,这种介于市内传统地铁与普通铁路之间的交通方式,已被提上重要议事日程。目前,有关市域快速轨道交通的研究成果有:文献[1]分析了纽约、巴黎和东京的市域轨道交通发展特征,并提出我国应发展市域快速轨道交通的建议;文献[2]分析了市域快速轨道交通的主要技术特征以及功能定位,并研究了其主要技术标准;文献[3-5]分别研究了北京、上海、天津等地市域快速轨道交通的建设模式、建设标准;

等等。

国内外的市域快速轨道交通基本都是连接市中心与郊区新城,呈放射状。而厦门轨道交通 4 号线(以下简称“4 号线”)的特点是:其规划为厦门岛外环湾快线,既是快线、又是环线,串联未来第二市中心与岛外其它新城,连接高铁车站与新机场两大对外交通枢纽,并与其它联系岛内外的放射状地铁线进行衔接换乘。本文以 4 号线为例,对其最高速度目标值、车辆选型及编组、车站分布、运营组织模式等关键技术标准进行研究。图 1 为 4 号线在厦门轨道交通规划线网中的位置。



图 1 4 号线在厦门轨道交通规划线网中的位置

1 市域快速轨道交通现状

目前,在地铁发达的国家,市域快速轨道交通系统的发展也较完善,可利用其引导城市的发展,引导居民向郊区迁移,为工业产业重新布局,减少环境污染创造交通条件。我国的市域快速轨道交通发展虽起步较晚,但发展势头加快。国内外主要城市的市域快速轨道交通关键指标汇总见表 1。

1.1 快线技术特征

由对国内外主要城市市域快速轨道交通统计及调研可知,因城市不断发展,逐渐由单中心向多中心、多组团演变,需要用市域轨道交通快速连接市中心与周围卫星城或组团,以满足住职分离人群

早晚通勤、通学的需求。因此,市域轨道交通有其鲜明的特点:①线路长度长。除少数机场线相对较短外,一般都在 40 km 以上。②全程时间目标 1 h。如超过 1 h,则快线的优势将不明显。③速度目标值高,旅行速度快。最高运行速度一般为 100 ~ 140 km/h,旅行速度达 50 ~ 80 km/h。④平均站间距大。若线路位于市区,站间距一般为 2 ~ 3 km;若线路位于郊区,站间距一般为 4 km 以上。⑤采用灵活的快慢车组合运行组织模式^[6]。

表 1 国内外主要城市的市域快速轨道交通关键指标统计表

项目名称	线路长度/ km	平均站 间距/km	最高速度/ (km/h)	运行组 织方案
东京筑波快线	58.3	3.1	130	快慢车组合
东京京王线	37.9	1.2	110	快慢车组合
巴黎 RER 线	587.0	2.3	120 ~ 140	快慢车组合
香港机场快线	35.3	8.8	135	快慢车组合
北京机场快线	28.1	7.0	110	站站停组合
上海城市轨道交通 16 号线	59.0	4.9	120	快慢车组合
广州地铁 3 号线	67.2	2.5	120	站站停组合
广州地铁 14 号线	54.4	4.6	120	快慢车组合
深圳地铁 11 号线	51.5	3.2	120	站站停组合
天津津滨轻轨	52.3	3.0	100	站站停组合

以东京京王线为例。京王线全长 37.9 km,设站 33 座,平均站间距只有 1.2 km,看似为普通地铁,但其列车运行却分为站站停、快速、急行、准特急和特急 5 种等级。其中,特急列车只停靠 7 个站,平均停车间距为 6.3 km,旅行速度达到 67 km/h,达到了快线的效果^[7]。

1.2 快慢车运营组织方案现状

根据表 1 的统计,很多快线都采用快慢车组合的运行组织方案。这最主要是为了满足住职分离人群早晚通勤、通学的需求。这种客流具有明显的潮汐特点,平均运距长,直达需求高,最适合采用快慢车组合运营。

但快慢车开行比例是关键。如快车开行比例过高,则虽能提高整体旅行速度,但慢车避让次数过多,增加了慢车旅行时间,降低了慢车的服务水平,也使线路通过能力下降。此外,越行站设置越多,车站投资越大。经测算,高架双岛 4 线越行站土建投资约为 0.9 亿元,较标准侧式站投资增加 2 500 万元;地下双岛 4 线越行站土建投资高达约 4.8 亿元,是标准岛式站的 3.2 倍,土建投资增加 3.3 亿元;单岛 4 线站土建投资约 2.5 亿元,相对双岛方案投资较省,但也达到标准站的 1.7 倍,土建投资增加

约 1.0 亿元。因此,为控制投资,越行站应设置于周边环境简单、客流量较小的地面或高架段落,并应尽量避免地下段。

如快车开行比例过低,则快车等待时间长,组织快慢车将失去意义。因此,需在以上各种因素之间找到平衡点,发挥快慢车的优势。

以东京筑波快线为例。筑波快线开行 3 种车:快车、大站车、慢车。快车停靠 7 站,旅行时间为 45 min,平均车速为 77.7 km/h;大站车停靠 14 站,旅行时间为 52 min,平均车速为 67.3 km/h;慢车站站停,旅行时间为 57 min,平均车速为 61.4 km/h。早高峰小时开行列车 16 对,其中快车 2 对,大站车 4 对,慢车 10 对,快车、大站车、慢车的开行比例为 1:2:5,全线共设 3 座越行站^[8]。

综上所述,采用快慢车组合运行应综合考虑客流特征、快慢车开行比例及越行站的设置等因素。另外,快车一般开行对数有限,平均等待时间较长,因此,快车仅起到锦上添花的作用,最主要还是通过提高速度目标值,加大站间距,提高旅行速度来实现快线功能(筑波快线慢车旅行速度都达到 61.4 km/h)。

2 厦门 4 号线项目概况

2.1 线路概况

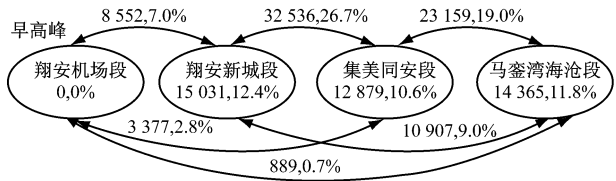
4 号线从嵩屿码头站至翔安机场站,线路全长 71.3 km(其中地下段长 49 km,高架及过渡段长 22.3 m),共设站 18 座,平均站间距为 4.1 km,最大站间距为 10.1 km(蔡厝站至翔安机场站区间)^[9]。

2.2 客流特征

(1)客流强度:根据客流预测^[10],4 号线远期全日客运量为 76.34 万人次;单向高峰小时最大断面客流为 2.41 万人/h。远期高峰小时客流断面表现出较明显的中间大两头小的特点。

(2)区段客流 OD(起讫)分析:跨组团长距离出行的客流量很少,仅占客流总量的 12.5%;相邻组团间联系的客流较大,其中翔安新城段、集美同安段、马銮湾海沧段组团之间客流量占客流总量的 45.7%;组团内部短距离客流量比例为 34.8%。可见,本线客流以中、短距离组团内部及组团间出行为主。图 2 为远期早高峰客流分布示意图。

(3)平均运距:4 号线远期全日平均运距为 17.3 km,与 OD 分析吻合。这进一步证明客流出行以相邻组团间出行为主。



注:图中数字为客流量(人次)及其占比

图 2 4 号线远期早高峰分段客流分布示意图

3 关键技术指标分析

3.1 速度目标值

为充分发挥 4 号线的快线功能,实现对岛外各片区中心及交通枢纽的快速衔接,本线全程旅行时间按 1 h 控制,厦门北站与翔安机场两大交通枢纽间的旅行时间按 30 min 控制。

结合前文对市域快速轨道交通的现状分析及本线线路特点,本次研究选择列车运行的速度目标值 v 取 100 km/h、120 km/h、140 km/h 等 3 个方案,从时间目标适应性、站间距离适应性、经济性等方面进行比较,选择经济合理的速度目标值。

3.1.1 时间目标适应性分析

对 3 个方案进行关键技术指标计算。计算结果如表 2 所示。

表 2 不同速度目标值关键技术指标结果表			
运行区段	$v/(km/h)$	旅行速度/ (km/h)	旅行时间/ min
全线	100	63	65.8
	120	71	58.4
	140	75	55.3
厦门北站站— 翔安机场站	100	66	34.7
	120	77	29.8
	140	82	27.9

由表 2 可知, $v = 100$ km/h 方案的列车全程旅行时间不满足 1 h 的要求, $v = 120$ km/h、 $v = 140$ km/h 两方案全程旅行时间在 1 h 以内,其中 $v = 120$ km/h 方案列车全程旅行时间较 $v = 140$ km/h 方案仅多 3.1 min;从厦门北站站—翔安机场站区段, $v = 100$ km/h 方案的列车旅行时间不满足 30 min 的要求, $v = 120$ km/h、 $v = 140$ km/h 两方案旅行时间均在 30 min 以内,其中 $v = 120$ km/h 方案列车旅行时间较 $v = 140$ km/h 方案仅多 1.9 min。

3.1.2 站间距适应性分析

通过运行模拟计算,3 个方案中列车以目标速度运行的距离分别占区间总长的 73%、58%、31%。一般情况下,列车在区间运行中,如以目标速度运

行的距离占区间总长的 50% 及以上时,则可认为其车辆效率得到有效利用,即列车速度目标值与站间距是相适应的。

列车以 140 km/h 目标速度运行的距离达不到区间总长度的 50%,其车辆效率不能得到充分利用;列车以 120 km/h 目标速度运行的距离占区间总长度的 50% 以上,其车辆的使用效率能得到较好的发挥。

3.1.3 经济性分析

3.1.3.1 土建投资

v 对土建工程造价的影响,主要体现在区间隧道的造价上。 $v = 100$ km/h 方案的盾构内径为 5.4 m,造价为 12.5 万元/双延米。如 v 超过 100 km/h,考虑隧道内空气动力学效应,内径将有不同程度提高。 $v = 120$ km/h 方案的盾构内径为 6.0 m,造价为 13.5 万元/双延米; $v = 140$ km/h 方案的盾构内径为 7.7 m,造价为 17.0 万元/双延米。4 号线全线区间隧道总长约 49 km,初步估算,3 个方案的隧道工程土建投资分别为 61.3 亿元、66.2 亿元、83.3 亿元。其中 $v = 120$ km/h、 $v = 140$ km/h 方案分别较 $v = 100$ km/h 方案增加投资 4.9 亿元和 22.0 亿元。

3.1.3.2 车辆基地规模

采用不同速度目标值车辆段规模差异主要体现在停车列检库的规模。 $v = 100$ km/h、 $v = 120$ km/h、 $v = 140$ km/h 方案分别需要 62 个、54 个、49 个停车列位。 $v = 120$ km/h 方案的车辆基地投资相对 $v = 100$ km/h 方案约少 0.40 亿元, $v = 140$ km/h 方案相对 $v = 100$ km/h 方案约少 0.65 亿元。

3.1.3.3 车辆购置费

3 个方案远期车辆购置费估算如表 3 所示。

表 3 远期车辆购置费估算表				
$v/(km/h)$	车辆单价 (万元/辆)	配属列车/ 列	配属车辆/ 辆	购车 费用/亿元
100	650	68	408	26.52
120	700	59	354	24.78
140	950	54	324	30.78

由表 3 可知, $v = 120$ km/h 方案的远期车辆购置费比 $v = 100$ km/h 方案的少 1.74 亿元, $v = 140$ km/h 方案的车辆由于单价大幅提高,其远期车辆购置费比 $v = 100$ km/h 方案多 4.26 亿元。

3.1.3.4 运营费用

运营费用的差别主要表现为运营能耗的差别。随着速度目标值的提高,运营能耗依次增加。经测

算,30 年运营期累计增加运营能耗, $v = 120\text{ km/h}$ 方案与 $v = 140\text{ km/h}$ 方案分别较 100 km/h 方案多支出 1.02 亿元及 2.87 亿元。

3.1.3.5 综合经济比较

不同速度目标值时,土建工程、车辆基地规模、车辆购置费及运营能耗等费用的比较如表 4 所示(表中以 $v = 100\text{ km/h}$ 方案的费用为基数进行比较)。

表 4 综合经济比较表			
项目	增减的费用/亿元		
	$v = 100\text{ km/h}$	$v = 120\text{ km/h}$	$v = 140\text{ km/h}$
土建工程	0	4.90	22.00
车辆基地规模	0	-0.40	-0.65
车辆购置费	0	-1.74	4.26
运营能耗	0	1.02	2.87
合 计	0	3.78	28.48

综上所述, $v = 120\text{ km/h}$ 方案符合 4 号线的快线功能定位,满足时间目标值要求,对站间距适应性较好,综合经济性分析较 $v = 100\text{ km/h}$ 方案增加投资不大。因此,本线的列车运行速度目标值推荐采用 120 km/h 。

3.2 车辆选型及列车编组

根据线路特征及客流规模,结合我国已建成地铁项目的运营经验,同时考虑本线衔接的厦门城市轨道交通线网以 B 型车为主,故本次研究推荐 4 号线采用城市轨道交通 B 型车。列车采用 6 辆编组,并适当降低车内站立密度,按 5 人/m^2 计算。根据运能计算,客流适应性较好。

3.3 车站分布

4 号线既是快线,又是环线,并且沿线多为待开发规划用地,因此本线设站原则主要为:①站间距应尽量大;②应在连接岛内外的其它轨道交通线换乘点设站;③应在大型交通枢纽处设站;④站点应结合用地规划,引导城市土地开发,发挥 TOD(交通引导发展)效应。

结合以上设站原则,本线在建规方案基础上对车站分布做了如下调整:

(1)东坑湾站附近规划为湿地公园,客流量小,用地开发强度低,因此取消东坑湾站,以加大站间距、提高旅行速度。

(2)双过村站南移至规划的东部中心核心位置,以支持规划土地的开发。

(3)大嶝站北移至蔡厝车辆基地内,并支持车辆基地上盖物业开发。

通过以上车站分布调整,站间距更加符合快线

特征。未来中心城区的站间距较小,最小站间距为 2.1 km ;远离中心城区的站间距加大,最大站间距达到 10.1 km ;站位与规划结合紧密,可最大程度地推进规划的落实和沿线的发展。

3.4 运营组织方案

根据远期客流强度及分布,本线组织大小交路套跑,大小交路按 2:1 开行,大交路开行 14 对,小交路开行 7 对。大交路可采用快慢车组合运行方案,也可采用站站停方案。

结合本线客流 OD 分析,长距离直达出行客流的需求低,中短距离组团之间出行的客流需求高,因此拟组织大站车(快车)与慢车两种列车开行。大站车停靠 5 站,慢车站站停。根据前文分析及现状调研,快慢车开行比例按 1.0:2.5 考虑,大站车开行 4 对,慢车开行 10 对。同时,沿线需增设 4 座越行站(2 座高架站,2 座地下站),土建投资增加约 2.5 亿元(地下站按单岛 4 线设置)。不同运行方案的关键技术指标计算结果如表 5 所示。

由表 5 可知,大站车由于停站少,其旅行时间明显缩短,全程可节省 14.0 min ,但由于大站车开行对数少,考虑旅客平均等候时间,全程仅节省 6.5 min 。结合本线客流特征,平均运距为 17.3 km ,通过旅行速度计算出两方案平均运距下的旅行时间仅相差 3 min 。因此,大站车优势不明显,反而增加运营组织难度及土建投资。而站站停列车旅行速度也高达 73.3 km/h ,全程旅行时间也控制在 1 h 以内,达到了快线的标准。因此,推荐 4 号线采用站站停运营组织模式。

表 5 不同运行方案的关键技术指标计算结果							
运行方案	工况	平均候车时间/ min	列车运行时间/ min	乘客旅行时间/ min	大站车节省旅行 时间/min	旅行速度/ (km/h)	平均运距旅行 时间/min
快慢车组合	最少等待	0	44.4	44.4	14	96.3	10.8
	平均等待	7.5	44.4	51.9	6.5	82.4	12.6
	最长等待	15.0	44.4	59.4	-1.0	72.0	14.4
站站停			58.4	58.4		73.3	14.2

4 结论

本文在总结国内外市域快速轨道交通技术特征的基础上,以厦门轨道交通 4 号线为例,结合线路及客流特点,对列车运行最高速度目标值、车辆选

(下转第 34 页)

4 结语

基于大数据技术的运营故障影响分析系统,能够对城市轨道交通运营故障时的客流影响情况进行可视化分析。本文从数据采集、数据存储与处理、数据分析、数据呈现等 4 个方面进行了论述。运营故障影响分析系统以 LDA 模型作为故障影响分析模型,能有效预测运营故障及天气条件所造成的对客流的持续影响情况,可避免人为主观因素造成的“感觉误差”。根据 LDA 模型的故障持续时间预测,运营故障影响分析系统可计算该故障持续时间内整个网络受影响的客流分布情况,并通过友好的界面将故障车站、故障持续时间、影响人数、受影响的线路分布等直观呈现出来,为相关工作提供参考。

参考文献

- [1] BROWN D E. Text mining the contributors to rail accidents [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 346.
- [2] 李巍. 半结构化数据挖掘若干问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [3] CEAPA I, SMITH C, CAPRA L. Avoiding the crowds: under-

standing tube station congestion patterns from trip data [C]// Proceedings of the ACM SIGKDD international workshop on urban computing. ACM, 2012: 134.

- [4] 陈争航. 分布式数据库系统研究与应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [5] NI M, HE Q, GAO J. Forecasting the subway passenger flow under event occurrences with social media [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(6): 1623.
- [6] YOKOYAMA D, ITOH M, TOYODA M, et al. A framework for large-scale train trip record analysis and its application to passengers' flow prediction after train accidents [C]// Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Berlin: Springer, Cham, 2014: 533-544.
- [7] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I. Latent dirichlet allocation [J]. Journal of Machine Learning Research, 2003, 3: 993.
- [8] BLEI D M. Probabilistic topic models [J]. Communications of the ACM, 2012, 55(4): 77.
- [9] 曾悠. 大数据时代背景下的数据可视化概念研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [10] 张鲁鲁. 多维数据可视化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

(收稿日期: 2018-07-09)

(上接第 30 页)

型及编组、车站分布、运行组织模式等关键技术指标进行研究,得出以下结论:

(1) 结合功能定位及客流特征, 4 号线推荐采用 120 km/h 作为列车运行速度目标值, B 型车 6 辆编组, 车厢内站立密度为 5 人/m²。

(2) 车站分布应根据本线在线网中的功能定位, 考虑与其它线路换乘需求及大型枢纽集散客流需求, 合理选择站间距, 并充分结合用地规划, 引导城市土地开发, 发挥 TOD 效应。

(3) 应结合客流特征、快慢车开行比例及越行站的设置等因素, 综合考虑时间与经济效益, 确定合理的运行组织方案。4 号线经过综合分析, 推荐采用站站停运行组织模式, 并组织大小交路运行。

参考文献

- [1] 王灏. 关于城市轨道交通快线发展的研究 [J]. 都市快轨交通, 2006, 19(3): 4.
- [2] 万学红, 李忍相, 冯爱军. 市域快速轨道交通的技术特征与标准研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2016(6): 10.

- [3] 丁树奎, 姜传治. 北京市域快轨新机场线关键技术及建设标准研究 [J]. 都市快轨交通, 2016, 29(4): 12.
- [4] 胡志晖, 饶雪平. 关于市域轨道交通快速功能设计的探讨—以上海市轨道交通 11 号线南段为例 [J]. 交通与运输 (学术版), 2009(1): 22.
- [5] 李鸿战. 天津市域快速轨道交通建设模式的探讨 [J]. 铁道标准设计, 2015, 59(1): 47.
- [6] 荆敏. 市域轨道交通规划设计关键指标和主要运输组织模式研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [7] 周庆源, 陈春娇. 东京京王线及京王电铁株式会社简介 [J]. 城市轨道交通研究, 2008(2): 15.
- [8] 潘寒川, 杨涛. 市域轨道交通快慢车组合运营的通行能力研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2009(10): 48.
- [9] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 厦门市轨道交通 4 号线工程 (后溪至翔安机场段) 可行性研究报告 [R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2016.
- [10] 中国城市规划设计研究院. 厦门市轨道交通 4 号线工程可行性研究阶段客流预测 [R]. 北京: 中国城市规划设计研究院, 2016.

(收稿日期: 2017-07-12)