

武汉轨道交通19号线车辆选型研究

左玉东

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//高级工程师)

摘要 武汉轨道交通19号线工程近期与20号线贯通运营。该线是联系天河机场、武汉高铁站和东湖高新区的市域快线,同时也是一条机场线。19号线是武汉轨道交通线网中第一条市域快线,车辆选型对后续市域线具有示范作用。根据线路特征、功能定位,对列车最高运行速度、车型选择、列车编组、站席标准、车门、城市值机(行李托运)条件等进行了研究,确定了19号线的车辆选型方案为:最高运行速度120 km/h(线路预留140 km/h条件),6节编组A型车,DC 1 500 V架空接触网供电,具备较高乘坐舒适度且能满足值机的需求。

关键词 武汉;城市轨道交通;市域快线;车辆选型

中图分类号 U270.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.019

Vehicle Selection for Rail Transit Line 19 in Wuhan City

ZUO Yudong

Abstract Wuhan rail transit Line 19 will connect with Line 20 in the near term, it is an urban rapid rail transit line connecting Tianhe Airport, Wuhan High-speed Railway Station and Wuhan East Lake Hi-tech Zone, and at the same time the airport line. Since Line 19 is the first urban rapid rail in Wuhan rail transit network, the vehicle selection for this line has a demonstration effect on the follow-up urban rapid rail lines. According to the line characteristics and functional location, the maximum speed, vehicle type selection, train formation, station table standard, vehicle door, and the inner city check-in functions of Line 19 are studied. On this basis, the final vehicle selection scheme is determined as follows: the maximum running speed of the train is 120 km/h (reserved 140 km/h conditions), with 6 unit marshalling of model A vehicle and DC 1 500 V overhead contact line power supply. If so, the train will have higher ride comfort and meet the demands of inner city check-in at the same time.

Key words Wuhan City; urban rail transit; urban express line; vehicle selection

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

武汉轨道交通19号线近期与20号线贯通至天河机场,串联了光谷、武汉站及天河机场,既是一条市域线,也是一条机场线,提供来往机场的快速、舒适、直达的高品质服务。因此,19号线除开行普通站站停列车外,还开行大站快车,以缩短旅行时间,提升竞争力。

19号线工程初期线路全长24.45 km,全部为地下线,设车站9座。19号线近期与20号线贯通运营后(以下称其为19号贯通线),线路全长63 km,设站16座,最大站间距约7 km,最小站间距约1 km,平均站间距约4.2 km^[1]。

作为武汉轨道交通首条集市域快线与机场线于一体的复合型线路,其车辆选型除了将决定该线的建设标准、建设规模和工程投资,以及影响轨道交通网络资源的共享之外,同时还对后续市域线路车辆选型具有示范作用。因此,根据19号线和20号线线路特征、功能定位,对列车最高运行速度、车型选择、列车编组、站席标准、车门、值机条件等进行研究很有必要。

1 最高运行速度

从线路条件来看,该线适宜采用较高的运行速度,因此,对100 km/h、120 km/h、140 km/h、160 km/h速度目标值进行了综合比选。

1.1 时间目标适应性

根据武汉最新轨道交通线网提出的“45 min 枢纽圈”要求,城市集中建设区所有对外枢纽之间以及主城和新副城中心到主要枢纽之间的出行时间,不超过45 min^[1]。

目前,天河机场至武汉站客运大客车的运行时间在50~60 min,小汽车运行时间在45 min左右。为实现光谷地区至中心城区及机场的交通发展目标,提高轨道交通的竞争力,更好地吸引客流,时间目标值确定为:武汉站至天河机场出行时间应不超过30 min,光谷中心城区至天河机场出行时间应不

超过 45 min^[1]。

针对不同运行速度,对天河机场—武汉火车站和天河机场—光谷五路两个区段进行运行时间目标检算,结果如表 1 所示。

表 1 不同运行速度下的时间目标检算

区段	距离/km	时间目标值/ min	站站停列车运行时间/min				机场专列运行时间/min			
			100 km/h	120 km/h	140 km/h	160 km/h	100 km/h	120 km/h	140 km/h	160 km/h
天河机场—武汉火车站	28.7	30	27.3	25.2	23.7	23.1	23.5	21.9	21.2	20.6
天河机场—光谷五路站	47.7	45	46.5	41.5	39.5	38.6	41.9	35.2	34.5	33.7

由表 1 可知,最高运行速度采用 100 km/h 时站站停列车不能满足天河机场—光谷五路站 45 min 的时间目标,考虑到远期高峰小时开行大站快车 4 对,开行站站停列车 8 对,站站停列车比例更高,为确保乘客的乘坐时效性,故排除 100 km/h 速度目标值方案。

120 km/h 及以上速度目标值方案均可满足运行时间目标值要求,随着运行速度的提高,节省的时间越来越有限;从光谷五路站至天河机场站,140 km/h 较 120 km/h 方案节省约 2.1 min,160 km/h 较 140 km/h 方案节省 0.9 min。

1.2 站间距适应性

根据线路走向和车站分布,19 号贯通线平均站间距约 4.2 km,光谷五路以北最小站间距为 1.6 km (花山新城站—花山车辆段站),最大站间距为 7.0 km (新荣站—和平公园站)。19 号贯通线全线站间距统计见表 2。

表 2 19 号贯通线站间距统计

区间长度/km	区间数/个	区间数占比/%	同类区间长度和/km	同类区间长度占比/%
≥8	0	0	0	0
5≤·<8	6	46.2	36.8	70.4
3≤·<5	2	15.4	9.3	17.8
<3	5	38.5	6.2	11.8
合计	13	100.0	52.3	100.0

根据车辆加减速性能,车辆运行速度为 120 km/h、140 km/h、160 km/h 的起动距离加制动距离分别为 1.5 km、2.5 km、4.0 km^[2]。当发挥列车高速性能的运行距离不低于区间长度的 50% 时,认为列车在该区间能充分发挥高速性能,因此,120 km/h、140 km/h、160 km/h 速度等级列车的站间距分别应不小于 3 km、5 km、8 km。

由表 2 可知:该线无大于 8 km 的区间,大于 5

km 的区间有 7 个,大于 3 km 的区间有 8 个;大于 3 km 的区间线路长占全线总长的 88.1%。因此,从车辆性能与站间距的匹配性来看,可选择 120 km/h 或 140 km/h 速度目标值。

1.3 线路条件适应性

线路中曲线半径及大坡度对列车运行速度影响较大。经牵引计算,实际能按照最高速度运行的地段长度分别为 20.8 km、18.7 km 和 5.1 km,占比分别为 43.7%、39.3% 和 10.8%;从运行效率来看,120 km/h 方案最高,140 km/h 与 120 km/h 方案较为接近,而 160 km/h 方案偏低。具体结果见表 3。

表 3 最高运行速度与线路条件匹配性统计

项 目	天河机场—光谷五路			天河机场—牛山湖		
最高运行速度/(km/h)	120	140	160	120	140	160
运营线路长度/km	47.7	47.7	47.7	58.7	58.7	58.7
区间数/个	9	9	9	15	15	15
能达到最高速度区间数/个	6	6	4	8	8	4
能达到最高速度区间占比/%	66.7	66.7	44.4	53.5	53.5	26.7
以最高速度持续运行总距离/km	20.8	18.7	5.1	23.8	20.2	5.1
以最高速度持续运行总距离占运营总长比例/%	43.7	39.3	10.8	40.6	34.4	8.7

1.4 车辆配置数量

根据远期交路计算,最高运行速度 120 km/h 方案远期需运用车 43 列,配属车 52 列;140 km/h 和 160 km/h 方案,远期运用车及配属车相同,为 41 列,配属车为 50 列。虽然最高运行速度 120 km/h 方案远期较 140 km/h 和 160 km/h 方案多出 2 列配车数,但 120 km/h 的车辆单价较低,车辆购置费整体还是较 140 km/h 和 160 km/h 方案节省。

1.5 隧道断面影响分析

19 号贯通线以地下敷设为主。地下区间施工

以盾构法为主。隧道断面的尺寸直接影响土建投资。隧道断面的影响因素主要包括阻塞比 λ (列车横断面积与隧道轨面以上净空面积之比^[3])及设备安装要求两个方面。

1.5.1 阻塞比

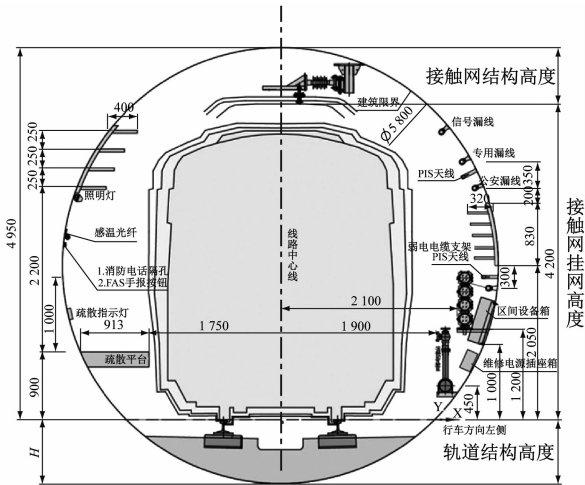
表 4 不同速度目标值及阻塞比对应的隧道建筑参数

项目	隧道建筑参数			
	120 km/h 时	140 km/h 时		160 km/h 时
	$\lambda < 0.40$ (非密闭性车体)	$\lambda < 0.27$ (非密闭性车体)	$\lambda < 0.35$ (密闭性车体)	$\lambda < 0.29$ (密闭性车体)
轨面以上隧道净空面积/m ²	26	36	28	35
盾构隧道建筑限界直径/mm	5 800	7 100	6 100	7 000

1.5.2 设备安装

由于接触轨适应的最高速度一般不超过 120 km/h^[4],故仅研究对比架空接触网方式。

影响隧道断面的设备安装因素主要包括轨道结构高度、接触网挂网高度、接触网结构高度,如图 1 所示。



注:尺寸单位为 mm;FAS 为火灾报警系统;PIS 为乘客信息系统

图 1 圆形隧道典型建筑限界

轨道结构高度取 850 mm,设备安装主要受接触网挂网高度及接触网结构高度 2 个因素影响。不同的供电制式,接触网结构高度、挂网高度均不同,具体见表 5。

1.5.3 综合分析

综合考虑阻塞比、设备安装的影响,不同速度目标值对应的隧道建筑限界如表 6 所示。

λ 和供电制式是确定速度为 120 ~ 160 km/h 的

车辆高速运行工况下,限界断面制定时,需在满足车辆运行动态限界的基础上,考虑乘客的舒适性。根据 T/CCES 2—2017《市域快速轨道交通设计规范》,单线圆形隧道在满足 λ 要求时所需最小轨面以上隧道断面面积及建筑限界内径见表 4。

盾构隧道限界尺寸的主要因素^[5]。从表 6 可以看出,选择 120 ~ 140 km/h 的最高运行速度时,直流刚性接触网所需的隧道断面最小。

表 5 供电制式及接触网对应的隧道建筑限界内径

供电制式	接触网类型	挂网高度/接触网结构高度/mm	轨道结构高度/mm	隧道建筑限界内径/mm
DC 1 500 V	刚性	4 200 / 550	850	5 600
	柔性	4 200 / 1350	850	6 400
AC 25 kV	刚性	5 000 / 1 000	850	6 900
	柔性	5 000 / 1 500	850	7 400

表 6 不同速度目标值、阻塞比、供电制式对应的隧道建筑限界

供电制式	隧道建筑限界/mm			
	120 km/h 时	140 km/h 时	160 km/h 时	
	$\lambda < 0.4$	$\lambda < 0.27$	$\lambda < 0.35$	$\lambda < 0.289$
DC 1 500 V(刚性接触网)	5 800	7 100	6 100	
DC 1 500 V(柔性接触网)	6 400	7 100	6 400	
AC 25 kV(刚性接触网)	6 900	7 100	6 900	7 000
AC 25 kV(柔性接触网)	7 400	7 400	7 400	7 400

1.6 武汉线网后续市域线路的特征分析及供电制式选择

《武汉市轨道线网规划(2014—2049)》于 2015 年编制完成并获批复,远景线网由 25 条线路构成,总长度 1 100 km,590 座车站^[6]。对其中 11 条约 660 km 市域线路进行了统计分析,市域线路长度均

在 30 ~ 70 km 范围,站间距 3 ~ 5 km 左右。

根据线路长度及站间距适应性分析,市域线路适宜的最高运行速度应是 120 ~ 140 km/h。

按照 T/CCES 2—2017《市域快速轨道交通设计规范》,市域快轨牵引供电系统制式选择结合自身特点及负荷需求,可采用单相工频 25 kV 交流制,直流制牵引网优选 DC 1 500 V。

综合以上分析,武汉市轨道交通线网中市域线运营速度不大于 140 km/h,且与武汉地铁网线路具备互联互通条件,推荐采用 DC 1 500 V 供电

制式。

隧道内采用架空刚性接触网,以减少土建规模;隧道外采用架空柔性接触网。刚性悬挂推荐采用带有旋转底座的刚性接触网安装方式^[9],汇流排线夹及绝缘子等建议采用弹性元件。净空受限且行车速度低于 120 km/h 区段,可采用竖直悬吊方案。

1.7 推荐的最高运行速度

综上,对各种速度目标值的对比整理如表 7 所示。

表 7 不同速度目标值时各指标综合对比表

项目	120 km/h 时	120(预留 140) km/h 时	140 km/h 时	160 km/h 时
供电制式	DC 1 500 V	DC 1 500 V	AC 25 kV	AC 25 kV
光谷五路—天河机场运行时间/min	41.5	初期 41.5 远期 39.5	39.5	38.6
武汉站—天河机场运行时间/min	25.2	初期 25.2 远期 23.7	23.7	23.1
适应的站间距占比/%	87.0(3 km 以上)	78.8(5 km 以上)	78.8(5 km 以上)	不适应
达速比/%	43.7	39.3	39.3	10.8(效率低)
远期购车数/列	52	50	50	50
资源共享	可纳入线网	可纳入线网大架修资源共享或市域线车辆基地统筹考虑	可纳入线网大架修资源共享或市域线车辆基地统筹考虑	建立一套市域动车检修体系或利用武汉铁路局动车检修资源
土建方案	隧道为内径 6.0 m,外径 6.7 m;车站轨面埋深约 15 ~ 16 m	隧道建筑限界 6.1 m,内径 6.3 m,外径 7.1 m;车站轨面埋深约 15.5 ~ 16.5 m	隧道建筑限界 7.1 m,内径 7.4 m,外径 8.2 m;车站轨面埋深约 16.5 ~ 17.5 m	隧道建筑限界 7.4 m,内径 7.7 m,外径 8.6 m;车站轨面埋深约 16.5 ~ 17.5 m
工程投资/亿元	0(作基准)	+ 3.86	+ 13.8	+ 20.4
年运营成本/万元	0(作基准)	+3 240	+3 240	+6 584
年平均出行时间成本/万元	0(平均乘距 15 km 作基准)	-1 217	-1 217	-1 758

注:年运营成本仅考虑车辆运行能耗,数据来自牵引计算;年平均出行时间成本按 2017 年武汉市人均可支配收入 38 642 元/年计算

从满足时间目标要求、站间距及线路条件适应性等分析,120 km/h、140 km/h 速度目标值均较为适合。预留 140 km/h 条件,较 120 km/h 方案增加工程投资 3.86 亿元,占 19 号线工程费用的 3.4%,单程节省时间 4.8%。综合考虑工程投资、乘客出行时间成本、运营成本、车辆技术发展以及区域线网技术标准的统一,推荐采用 120 km/h 速度目标值,预留远期提速到 140 km/h 的条件。

2 车型选择

武汉市已运营的城市轨道交通线路以 A 型车和 B 型车为主,即将开通的新线路均采用 A 型车,

根据武汉市轨道交通近期建设规划,后续新建线路车辆选型以 A 型车为主。

从 19 号线客流、最高运行速度、供电制式、车辆采购、与城市轨道交通线网互联互通等因素考虑,亦推荐采用技术成熟的 A 型车。

考虑到 DC 1 500 V 的 140 km/h 的 A 型车目前国内还没有应用,与成熟的 120 km/h 的 A 型车相比,140 km/h 的车辆在牵引、制动、车体密封性(包括车体、空调、贯通道、车门、车窗、管线孔)方面均存在差异^[10],结合目前国内车辆制造厂商的技术水平、车辆造价等综合因素,推荐采用 120 km/h 的 A 型车,后续待 140 km/h 直流供电车辆技术成熟

后,再行配置。

3 站席标准

2016 年 1 月,中国城市轨道交通协会发布了《地铁列车定员、车站规模动态计算方法及其标准研究》。其中,对城市轨道交通车站的服务水平进行综合评价的等级由舒适至拥挤依次分为 A、B、C、D、E、F。

《地铁列车定员、车站规模动态计算方法及其标准研究》提出:城市轨道交通的服务水平应按城市的整体发展规划、经济发展水平、地域文化环境综合考虑,一般以交通功能为主的线路宜选用 D 级或 C 级;车厢服务水平等级首先考虑选择 D 级,如果属于城市主干线,服务水平可以考虑适当提升半级或一级;如果属于机场线,携带行李的乘客比重较高,可以直接选择 B 级。

按此要求,考虑到 19 号线为机场线,乘客的平均乘距为 15 km,机场及武汉站客流会随身携带行李,因此设计普通车选择 B 级服务水平,即站立密度采用 4 人/m² 标准。

机场专列服务于武汉站及天河机场客流,其旅行速度高、舒适度要求高,车内全部采用(2+2)横排座椅布置,并设置行李架。站站停列车采用全纵排座椅布置。

4 列车编组

列车编组应在满足各设计年度高峰断面客流量的基础上,具有一定的运能储备和服务水平提高的余地。

国内目前采用 A 型车的城市,主流编组是 6 节编组。考虑到市域快线的客流基本不可能达到市内地铁的拥挤程度,因此一般情况下市域快线的编组不宜超过 6 节编组。此外,从车辆编组设计角度考虑,4 节(2M+2T)编组动力性能偏弱,5 节(3M+2T)编组动力性能稍显不足和主电路的非对称性,不推荐选用 4 节、5 节编组方式^[7]。

19 号线远期最大高峰断面客流为 2.38 万人次/h,根据本线设计的运行交路核算,采用 6 节编组设计运能余量为 6.5%,采用 8 节编组的设计运能余量为 30.1%。

通过上述对比分析,6 节编组方案满足客流需求,运能富余量适中,推荐采用。根据线路条件、故障运行及救援能力等要求,推荐采用 4M2T 动力配

置方案。

5 车门选型

根据 19 号线确定的最高运行速度,对车辆密封性、车内噪声要求较高,推荐采用塞拉门。对于该线存在站站停及大站快车开行方案,对应的站站停、大站快车车辆座椅布置方式不同,对车门的设置数量要求也不相同。按照文献[11]“车门净开度计算”中的公式,确定站站停车辆每辆车单侧设 5 个双开门,大站快车车辆每侧设 3 个双开门,两种车型车门宽均为 1 300 mm。为与车站站台门对位,两种车型开门位置为对应关系,具体见图 2。

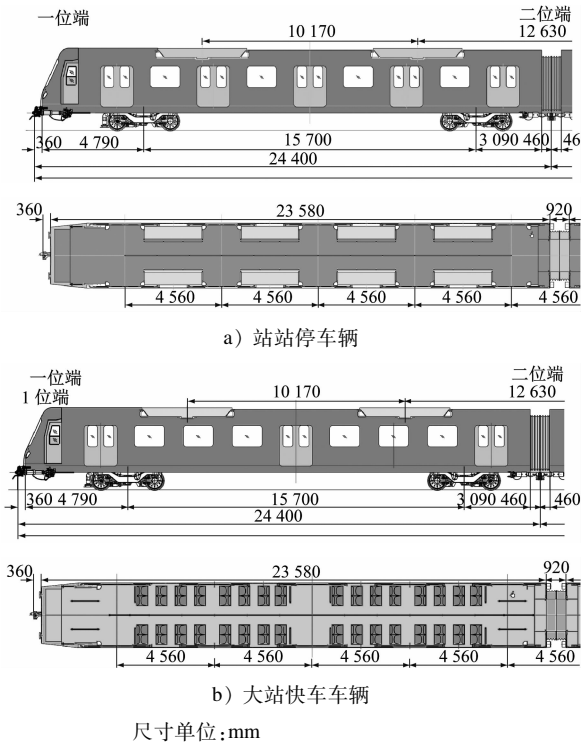


图2 车门设置方案

6 值机条件

本线作为市域线中的机场快线,根据有关部门意见,需预留城市值机功能条件。

根据值机客流预测,远期高峰小时需办理的值机行李为 353 件/h,由于行李数量较少,推荐采用“行李输送装箱系统结合货梯、万向轮行李集装箱”方案。

行李集装箱采用人工推行转运,行李集装箱主要技术参数如下:

(1) 外形尺寸(长×宽×高):800 mm×800

mm × 1 500 mm。

(2) 满载质量为 800 kg,最大载重约 600 kg。

按照行李集装箱的规格,其容积为 10 件/箱。根据行车交路,高峰小时开行值机列车 4 对(大站快车不值机),故每车次列车至少需要能够装运 8 个行李集装箱。利用普通车头车一半空间改造为行李车,既可以满足客流需求,又能满足值机行李集运的要求。头车改造为行李车的平面布置示意图如图 3 所示。

利用车辆一端控制室客室空间(长度 9 m)改造为行李车,单侧 2 个客室门供行李集装箱装卸。考虑到行李集装箱的装卸需求,在车门位置处不设固定货位,可以满足至少 10 个集装箱的货位需求。

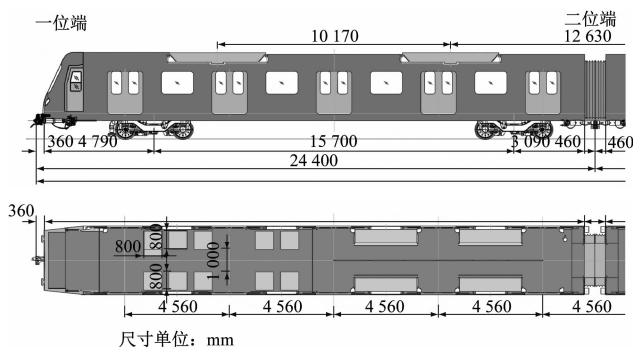


图 3 头车改造为行李车示意图

7 结论

(1) 通过时间目标、站间距、线路条件适应性分析,结合车辆配置数量、隧道断面及对武汉后续市域线路特征分析,确定车辆最高运行速度 120 km/h,并预留 140 km/h 的条件。

(2) 考虑到武汉市域线路的特征及与武汉既有线网的互联互通条件,推荐采用 DC 1 500 V 架空接触网供电,隧道内采用架空刚性接触网,隧道外采

用架空柔性接触网。

(3) 采用成熟的 A 型车平台,6 节(4M + 2T)编组方案。

(4) 大站快车机场专列采用(2 + 2)横排座椅布置方式,每辆车设 3 对车门;站站停普通车采用纵排座椅布置方式,每辆车设 5 对车门;两种车均采用 4 人/m² 站席标准。

(5) 值机列车利用站站停列车的一端头车半节车厢设置封闭行李车。

参考文献

- [1] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 武汉市轨道交通 19 号线工程(武汉火车站—光谷保税区站)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,2018.
- [2] 李建斌. 我国市郊铁路速度目标值选择范围探讨[J]. 铁道运输与经济,2011(8):81.
- [3] 中国土木工程学会. 市域快速轨道交通设计规范:T/CCES 2—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017:42.
- [4] 桂兵. 市郊列车牵引供电接触网设置类型比较[J]. 城市轨道交通研究,2010(2):49.
- [5] 唐云. 适用于 120 ~ 160 km/h 的地铁工程盾构隧道限界分析[J]. 都市快轨交通,2017(5):56.
- [6] 武汉市交通发展战略研究院. 武汉市轨道交通线网规划修编(2014—2049 年)[G]. 武汉:武汉市国土资源规划和规划局,2015.
- [7] 徐宗祥. 我国城市轨道交通市域快线车辆选型研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2009(3):1.
- [8] 雷磊,高飞. 轨道交通市域线车辆[J]. 铁道车辆,2009(2):16.
- [9] 刘长利. 地铁隧道内 120 km/h 刚性接触网技术研究[J]. 城市轨道交通研究,2012(6):45.
- [10] 张方涛,李文彪,李兵. 动车组气密性技术探讨[J]. 铁道机车车辆,2015(6):44.
- [11] 刘玉文,尤维秀. 城市轨道交通车辆选型相关技术因素分析[J]. 城市轨道交通研究,2017(3):136.

(收稿日期:2018-08-08)

“五一”小长假首日长三角铁路客流出现井喷

“五一”小长假首日,上海及周边地区天气晴好,人们纷纷走出家门,踏上旅途。记者从中国铁路上海局集团有限公司获悉,5 月 1 日长三角铁路发送旅客 326 万人次。由于旅客出行意愿高涨,京沪、沪宁、沪杭等高铁干线客流出现井喷,旅客发送量创下历年同期之最。其中,上海三大铁路客运站发送旅客 58 万人次,分别为:上海站 18.9 万人次、上海南站 8.1 万人次、上海虹桥站 31.0 万人次。5 月 1 日上海三大火车站增开旅客列车 47 趟,主要发往安徽、沪宁、沪杭、甬台温、浙赣、福建、湖北等方向。

(摘自 2019 年 5 月 2 日《文汇报》,记者 张晓鸣、李静报道)