

上海轨道交通市域线机场联络线的车辆选型*

刘高坤 杨 辉

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//第一作者, 工程师)

摘 要 从上海轨道交通市域线机场联络线长度、站间距、旅行时间、工程投资等角度分析,提出该线速度目标值应为 160 km/h,且该线应采用 AC 25 kV 供电制式。结合本线速度目标值、客流水平、线路条件、运营组织、应急救援及有利于实现与国家铁路互联互通等因素,分析了该线车辆选型需求及主要原则,并对车体尺寸、车辆编组及定员、动拖比选择与列车救援、列车疏散方式等主要技术特征进行探讨。

关键词 上海市域铁路;机场联络线;车辆选型

中图分类号 U270.9;U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.12.042

Vehicle Selection for Airport Link Line of Shanghai Rail Transit Suburban Line

LIU Gaokun, YANG Hui

Abstract From the perspective of line length, the distance between stations, travel time and engineering investment of Airport Link Line of Shanghai Rail Transit Suburban Line, it is proposed that the line target speed should be 160 km/h, and the power supply format should adopt AC 25 kV. Considering the line target speed, passenger flow level, line conditions, operating organization, emergency rescue and other factors that are conducive to interoperability with the national railway, the requirements and main principles of vehicle selection for the line are put forward. Main technical features including vehicle size, formation and capacity, selection of moving and towing ratios

and train rescue, and train evacuation methods are discussed.

Key words Shanghai suburban railway; airport link line; vehicle selection

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

根据《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》^[1],上海规划了 22 条市域线,总长约 1 157 km。上海轨道交通市域线机场联络线(以下简为“机场联络线”)是上海轨道交通市域线的重要组成部分,全长 68.6 km,其中桥梁长 4.4 km,地下线长 60.5 km,路基长 3.7 km,桥隧比为 94.7%。全线设 9 座车站(见图 1),其中地下站 6 座,地面站 3 座(虹桥站、七宝站、上海东站),平均站间距离为 8.6 km。

机场联络线不仅是城市轨道交通网的重要组成部分和上海市东西主轴内的市域快速通道,而且是虹桥和浦东两大综合交通枢纽的快速通道,还通过与国家铁路网络的互联互通,实现了浦东综合交通枢纽对长三角区域的服务。机场联络线是我国第一条与普通铁路实现互联互通的市域铁路,其将同近沪地区的沪宁(上海—南京)城际铁路、沪杭客专(上海—杭州客运专线),以及上海的嘉闵线及金山线等市域铁路实现互联互通。

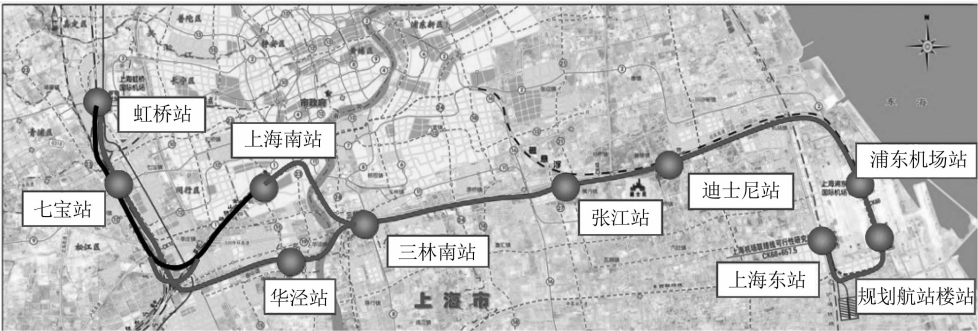


图 1 机场联络线线路平面示意图

Fig. 1 Plane diagram of airport link line route

* 上海市科学技术委员会科研计划项目(19DZ1201002)

1 速度目标值及供电制式选择

1.1 速度目标值选择

上海市域铁路机场联络线平均站间距约 8.6 km,大于地铁线路的一般站间距,小于城际铁路站间距。因此,其速度目标值也应高于地铁速度目标值,并低于城际铁路速度目标值。本文重点研究了速度目标值分别为 120 km/h、160 km/h 及 200 km/h 的 3 个方案。

机场联络线采用大站直达列车和站站停列车组合运行的方案^[2]。结合车站分布、线路走向及列车停站方式,通过牵引计算仿真模拟,得到上海虹桥站—浦东机场站在不同速度目标值方案下的旅行时间如表 1 所示。其中,上海虹桥站—浦东机场站的旅行时间要求为 40 min。

表 1 不同速度目标值下的旅行时间对照
Tab.1 Comparison of travel time with different target speed values

列车停站方式	旅行时间/min		
	120 km/h 方案	160 km/h 方案	200 km/h 方案
大站直达	38	32	30
站站停	44	40	39

从表 1 可知:各方案的大站直达列车均可满足旅行时间要求;120 km/h 方案中的站站停列车无法满足旅行时间要求;只有速度目标值达 160 km/h 及以上时,才能使站站停列车满足旅行时间要求,并将大站直达列车从上海虹桥站至浦东机场站的运行时间控制在 30 min 左右;与 160 km/h 方案相比,200 km/h 方案大站直达列车与站站停列车的旅行时间分别仅节省 2 min 和 1 min,节时效果不明显。

速度目标值不同,则线路建设标准不同,工程投资规模也不同。经研究,与 160 km/h 方案相比,120 km/h 方案投资仅节省约 2%,200 km/h 方案投资增幅约为 8%。可见,200 km/h 方案的工程投资明显更高。

从线路条件及站间距适应性来看,160 km/h 方案列车运行效率相对较高,200 km/h 速度目标值方案无法充分发挥高速效能。

综上分析,机场联络线速度目标值推荐采用 160 km/h。

1.2 供电制式选择

我国高铁(最高运行速度为 250~350 km/h)和城际动车组(最高运行速度为 120 km/h、160 km/h、

200 km/h)主要采用 AC 25 kV 供电制式,市域铁路(最高运行速度为 100~160 km/h)主要采用 AC 25 kV 供电制式和 DC 1500 V 供电制式,城市轨道交通(最高运行速度为 80~120 km/h)以 DC 1500 V 和 DC 750 V 供电制式为主,如表 2 所示。

表 2 国内外典型市域/城际轨道交通线路供电制式选择
Tab.2 Selection of power supply system for typicalsuburban/intercity rail transit lines at home and abroad

线路名称	线路长度/km	速度目标值/(km/h)	供电制式
曼谷机场快线 ARL	28.80	160	AC 25 kV
吉隆坡机场快线 KLIA	57.00	160	AC 25 kV
港铁机场快线 AEL	35.00	130	DC 1 500 V
北京地铁大兴机场线	41.36	160	AC 25 kV
北京地铁首都机场线	28.00	110	DC 750 V
上海地铁 11 号线	59.40	120	DC 1 500 V
广州白云机场快线	64.41	120	DC 1 500 V
深圳地铁 11 号线	51.94	120	DC 1 500 V
杭海(杭州—海宁)城际铁路	47.30	120	DC 1 500 V
温州轨道交通 S1 线	77.00	120	AC 25 kV
温州轨道交通 S2 线	88.90	140	AC 25 kV
台州市域铁路 S1 线	52.60	140	AC 25 kV
长株潭(长沙—株洲—湘潭)城际铁路	105.00	160	AC 25 kV
穗深(广州—深圳)城际铁路	76.00	140	AC 25 kV

直流供电制式相比交流供电制式,具有牵引加速性能较强、速度控制精确、隧道断面较小及车辆成本较低等优势^[3]。在世界范围内,速度目标值在 120 km/h 及以下的城市轨道交通线路得到了非常广泛的应用。但直流供电制式存在供电范围较短、较高速度下电能损耗较大、牵引功率的局限,因此,在目前投入运营的轨道交通线路中,除港铁机场快线(MTR Airport Express)的速度目标值达 130 km/h 外,其他线路的速度目标值均不超过 120 km/h。当线路设计速度超过 130 km/h 时,基本采用交流供电制式。

机场联络线定位为市域铁路,其速度目标值推荐 160 km/h。从牵引功率、技术成熟性、可靠性角度出发,推荐机场联络线采用 AC 25 kV 供电制式。

机场联络线不仅要同城际铁路互联互通,还要同市域铁路金山线(已建成,采用 AC 25 kV 接触网供电制式)及嘉闵线(建设规划已批复,采用 AC 25 kV 接触网供电制式)等线路贯通运营。从便于实现互联互通、较少运营维护工作量、实现资源共享的角度出发,机场联络线推荐选用 AC 25 kV 供电制式、速度目标值为 160 km/h 的市域动车组。

2 车体尺寸选择

机场联络线将与近沪地区范围内的国家干线铁路及城际铁路实现互联互通,其主要车型有 CRH1B/E、CRH2A、CRH380B/D、CR400 和 CRH6A 等。为了合理利用空间,节省工程投资,机场联络线车辆的外形尺寸,如长度、宽度、高度、地板面高度、车辆定距、轴重等参数,宜同国家铁路、城际铁路的动车组保持一致,以保证机场联络线市域列车与国有铁路城际列车、市域铁路跨线列车对土建设施的需求一致。

机场联络线列车初、近期为 4 辆编组,远期为 8 辆编组。为减少远期列车采购成本,推荐远期的 8 辆编组列车优先采用 2 列 4 辆编组列车重联。为了统一站台门结构尺寸、简化站台门方案、便于运营组织、减少后期维护工作,在满足列车运能的前提下,将头车两端车钩中心距与中间车的车钩中心距统一为 25 000 mm。列车重连位置车门与站台门设置方案如图 2 所示。

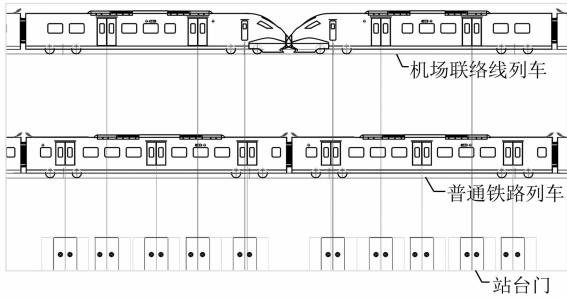


图 2 列车车门与站台门设置方案

Fig. 2 Setting scheme of train door and platform door

机场联络线列车基本参数如表 3 所示。

表 3 车辆基本参数表

Tab. 3 Basic parameters of vehicle

参数	取值
头车车钩中心距/mm	25 000
头车车体长度/mm	24 500
中间车车钩中心距/mm	25 000
中间车车体长度/mm	24 500
4 辆编组列车长度/mm	100 500
8 辆编组列车长度/mm	200 500
车体宽度/mm	3 300
车体高度/mm	3 880
转向架中心距/mm	17 500
固定轴距/mm	2 500
客室地板距走行轨轨面高度/mm	1 280(新轮)
车轮直径/mm	860(新轮)
轴重/t	≤17

3 列车载客量与编组

3.1 列车载客量

机场联络线平均乘客乘车距离较大(初期与近期为 24.0 km,远期为 20.0 km),而且该线连通了虹桥火车站、虹桥机场、浦东机场、上海东站等对外综合交通枢纽。由此可预见,其乘客大多携带行李,特别是大件行李。针对这一客流特点,机场联络线选用 1.5 m 宽大开度车门,采用横纵结合的座椅布置方式,并增大座椅间距,设置行李存放区和行李架。为提高乘客乘车舒适度,机场联络线列车额定载客量按站立密度为 4 人/m² 考虑,超载载客量按站立密度为 6 人/m² 考虑,得到列车载客量如表 4 所示。

表 4 机场联络线列车载客量

Tab. 4 Passenger capacity of airport link line train

工况	车厢载客量/人		列车载客量/人	
	头车	中间车	4 辆编组	8 辆编组
AW1(满座)	36	54	180	396
AW2(额定载客)	144	202	692	1 500
AW3(超载)	196	274	940	2 036

3.2 列车编组

根据客流预测成果^[2],机场联络线初、近、远期全日最大单向断面客流量分别为 2.68 万人次/d、3.48 万人次/d、5.06 万人次/d,初、近、远期的高峰时段最大单向断面客流量分别为 0.41 万人次/h、0.52 万人次/h、0.89 万人次/h。合理的列车编组应不仅能满足各设计年度的高峰时段断面客流量,还应具有一定的运能储备余量。

目前,市域动车组列车主要有 4 辆编组、6 辆编组、8 辆编组。机场联络线的编组方案主要有:

方案一,初、近、远期均采用 8 辆编组;

方案二,初、近期采用 6 辆编组,远期采用 8 辆编组;

方案三,初、近期采用 4 辆编组,远期逐渐过渡到 8 辆编组。

机场联络线各编组方案在不同设计年度的运能余量见表 5。由表 5 分析可知:方案一与方案二的初、近期运能富余较大,较浪费;方案三在初、近期采用小编组列车,既提高了开行频率,又实现了运营组织灵活,还节省了初、近期的工程投资,其远期可视客流变化情况调整编组,能更好地适应客流。故方案三为推荐方案。

表 5 机场联络线各编组方案在不同设计年度的运能余量

Tab.5 Extra capacity of each formation scheme of airport link line in different design year

方案	设计年度	列车编组辆数/辆	运能余量/%	
			虹桥站—七宝站—三林南站	三林南站—上海东站
方案一	初期	8	49.80	54.80
	近期	8	48.40	50.00
	远期	8	19.70	25.50
方案二	初期	6	31.30	47.00
	近期	6	29.40	40.20
	远期	8	19.70	14.80
方案三	初期	4	13.00	26.50
	近期	4	6.80	24.20
	远期	4	18.50	13.90
		8	18.50	13.90

4 列车救援与动拖比选择

4.1 列车救援

如机场联络线的列车编组采用方案三,则运营期内会出现 4 辆编组和 8 辆编组列车混跑的情况。根据市域铁路车辆救援要求^[4-5],同编组列车救援(4 编组救援 4 编组、8 编组救援 8 编组或两列 4 编组重联救援 8 编组),无论动拖比采用 1:1(2M(动车)2T(拖车))还是 3:1(3M1T),均能在线路最大坡度上完成救援。对于三林南站—上海东区间,可能会有 16 辆编组的大铁路跨线列车进入机场联络线运营。由于 4 编组列车救援 16 编组列车没有先例,故需对 4 编组列车采用不同动拖比(1:1 和 3:1)的列车救援能力进行线路仿真分析(启动时计算黏着系数取 0.20)。

- 当动拖比为 1:1 时:
- 1) 当使用 4 辆编组 AW0 工况列车来救援 8 辆编组 AW3 工况无动力列车时,能在 $\leq 12\%$ 的坡道上启动。
- 2) 当使用 4 辆编组 AW0 工况列车来救援 16 辆编组 AW3 工况无动力列车,能在 $\leq 2\%$ 的坡道上启动。
- 当动拖比为 3:1 时:
- 1) 当使用 4 辆编组 AW0 工况列车来救援 8 辆编组 AW3 工况无动力列车时,能在 $\leq 25\%$ 的坡道上启动。
- 2) 当使用 4 辆编组 AW0 工况列车来救援 16 辆编组 AW3 工况无动力列车时,能在 $\leq 10\%$ 的坡道上启动。
- 由此可见:

- 1) 即使采用动拖比为 3:1 的 4 辆编组 AW0 工况列车,也仅能在 10‰ 的坡度上救援 16 辆编组 AW3 工况无动力列车。按规范,正线最大坡度为 30‰。故该救援措施无法满足 16 辆编组列车的救援要求。
- 2) 当采用 2 列 4 辆编组 AW0 工况列车重联救援 16 辆编组 AW3 工况列车时,其救援情况与使用 4 辆编组 AW0 工况列车救援 8 辆编组 AW3 工况无动力列车的救援情况相同,仅能在 $\leq 25\%$ 的坡道上启动。根据线路特征,当考虑双向救援时,该救援措施能够满足救援需求。
- 因此,在列车能实施正向救援和反向救援的前提下,3:1 的动拖比能满足机场联络线(8 辆编组列车)及国家铁路(16 辆编组列车)跨线运营的救援需求,但车辆购置成本和运营检修成本会相应增加。
- 4.2 列车动力性能
- 4.2.1 动力配置与动拖比选择
- 在初、近期,列车编组为 4 辆编组,动拖比主要为 3:1 及 1:1,则牵引性能参数见表 6。
- 表 6 不同动拖比时的列车牵引性能参数
- Tab.6 Train traction performance parameters at different moving and towing ratios
- | 动拖比 | 牵引电机的数量/台 | 牵引功率/kW | 起动加速度/(m/s ²) | 平均加速度/(m/s ²) |
|-----|-----------|---------|---------------------------|---------------------------|
| 1:1 | 8 | 2 680 | 0.8 | 0.38 |
| 3:1 | 12 | 3 120 | 1.0 | 0.44 |
- 注:起动加速度指列车从 0 加速至 40 km/h 时的平均加速度;平均加速度指列车从 0 加速至 160 km/h 时的平均加速度。
- 由表 6 可以看出,相对于 2M2T,3M1T 列车的电机数量增加了 4 台,明显提高了牵引功率。故 3M1T 列车在旅行时间、旅行速度、救援能力及达速比等方面具有一定的优势。
- 3M1T 列车主要存在以下缺点:①市域铁路动车组可靠性高,故障率低,在日常运营时动力冗余较多,有一定的资源浪费;②动力配置增强,故列车购置费用相应增加,列车全寿命周期运用检修维护工作量也将增加,故运营成本增加。
- 从机场联络线线路情况、救援性能、运营灵活性、全寿命周期成本等因素综合考虑,机场联络线列车动拖比暂推荐采用 3:1。
- 4.2.2 列车牵引性能
- 列车起动牵引力是在额定载客量、车轮半磨耗的条件下计算确定的。动拖比为 3:1 时,列车牵引性能需满足:最高运行速度为 160 km/h,平均起动

加速度 $\geq 1.0 \text{ m/s}^2$,平均加速度 $\geq 0.4 \text{ m/s}^2$ 。

5 列车疏散方式

5.1 国家铁路动车组列车的疏散方式

国家铁路动车组列车配置了应急救援梯,如图3所示。当列车发生火灾等紧急情况时,由列车员操作应急救援梯,并组织乘客疏散至道床面。



图3 应急疏散梯

Fig. 3 Emergency evacuation ladder

5.2 城市轨道交通列车疏散方式

城市轨道交通列车运行速度一般较低,且列车头部一般采用非流线型设计,故可在列车头部和尾部设置端门。当在高架或未设置疏散平台的区域发生紧急情况时,可利用端门疏散,如图4所示。在地下区间一般设置高度为900 mm疏散平台。疏散平台与设备限界的距离一般控制为50~100 mm。



图4 端门疏散梯

Fig. 4 End door evacuation ladder

5.3 机场联络线列车疏散方式

机场联络线列车设计速度为160 km/h,桥隧比为94.7%。为减少列车运行阻力及司机室噪声,车头需采用流线型,无法设置端门。

由于国家铁路动车组与机场联络线互联互通运营,故机场联络线列车的技术标准需满足国家铁路动车组限界标准:建(构)筑物距离线路中心距离不得小于2 200 mm。而机场联络线动车组列车车体半宽为1 650 mm。如设置疏散平台,则疏散平台距离车辆侧部最小距离为550 mm。在紧张氛围或

光线昏暗条件下,极易在人员疏散时发生掉落事件,危害乘客安全。因此,机场联络线无法按照常规模式贴临列车设置架空疏散平台。

因此,当列车由于动力故障或火灾等需要在区间疏散乘客时,机场联络线在地下及高架区间主要以道床面和电缆沟盖板面作为纵向疏散通道进行乘客紧急疏散,其列车也需相应配置能够满足市域铁路动车组疏散需求的疏散设施。

为节省运营成本,机场联络线列车不配备乘务员。为便于乘客从列车疏散至地面,机场联络线动车组疏散设施设计有多种结构形式。参考国家铁路适应低站台的车门结构形式(见图5)^[5],推荐在头尾车中间车门附近设置下沉式踏步结构形式的应急疏散设施。通过仿真分析验证^[6],该设施疏散效率较高。

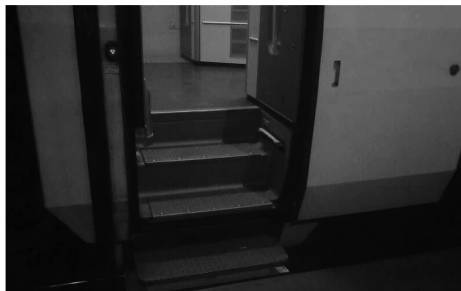


图5 国家铁路适应低站台车门结构形式

Fig. 5 Vehicle door structure form of national railway adapting to low platform

6 结语

机场联络线是我国第一条与国家铁路实现互联互通的市域铁路线路。本文从线路条件、站间距、时间目标值、工程投资、技术成熟度、便于实现互联互通、实现资源共享等角度出发,通过综合分析提出,机场联络线车辆应选用AC 25 kV供电制式、目标速度为160 km/h的市域铁路动车组列车,并对该车型的车辆基本参数、定员、编组、动拖比、疏散和救援性能展开分析和讨论。

本文提出的车辆主要技术指标及解决方案,可为类似条件线路的车辆选型提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 上海市人民政府. 上海市城市总体规划(2017—2035年)[R]. 上海:上海市人民政府,2018.
Shanghai Municipal People's Government. Shanghai urban master plan (2017—2035)[R]. Shanghai: Shanghai Municipal People's Government, 2018. (下转第209页)