

市域快速轨道交通系统制式比选分析

张 鸿

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 市域快速轨道交通系统制式比选是项目前期研究的基础内容, 直接决定项目的设计标准和投资。在综合整理中国市域快速轨道交通设计案例的基础上, 明确系统制式的选择标准: 速度目标值、车辆选型、供电系统、工程经济性。分析比较不同制式在各个标准下的性能特性及优劣, 从工程造价角度分别说明不同制式在土建工程费用、车辆购置费、车辆基地投资、运营成本等方面的区别。研究表明, 120 km·h⁻¹速度目标值的直流1 500 V市域B型车, 投资规模适中, 车辆技术成熟, 运营维护成本较低, 性价比较高。

关键词: 市域快速轨道交通; 系统制式; 速度目标值; 车辆选型; 供电系统; 工程经济性

Selection of Metropolitan Rapid Rail Transit Systems

Zhang Hong

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: Comparing different metropolitan rapid rail transit systems is the basic step in a project initial preliminary research, which directly dictates the design standards and project investment. By reviewing the design cases of metropolitan rapid rail transit in China, this paper clarifies the system selection criteria in the targeted travel speed, vehicle type selection, power supply systems, and project economic analysis. Through comparing the performance and characteristics of different systems under various criteria, the paper analyzes the differences among systems in several aspects: construction costs, vehicle purchase costs, vehicle facility investment, system operating costs, and etc. The results show that the 1,500 VDC metropolitan vehicle B with 120 kilometers per hour targeted speed has a moderate investment scale, reliable vehicle technologies, low operating and maintenance costs, and a high ratio of quality to cost.

Keywords: metropolitan rapid rail transit; different types of system; travel speed; vehicle selection; power supply system; engineering economy

收稿日期: 2019-08-06

作者简介: 张鸿(1985—), 湖南醴陵人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 城市轨道交通线路与站场。E-mail: 393137330@qq.com

市域快速轨道交通(以下简称“市域快轨”)是在市域行政管辖区域内或规划区(都市圈)范围内, 连接市区与外围组团或卫星城, 串联沿线主要城镇、枢纽点或新城开发区, 采用大站距、全封闭、最高运行速度为100~160 km·h⁻¹, 融入城市轨道交通系统网络, 基于城市轨道交通运营管理模式, 为城市客运服务为主, 舒适度较高的快速城市轨道交通系统。当前, 市域(郊)铁路发展滞后, 有效供给能力不足, 成为城市公共交通短板。为此, 国家发展改革委颁布了《关于促进市域(郊)铁路发展的指导意见》(发改基础〔2017〕1173号), 有序推进市域(郊)铁路发展。因轨道交通系统制式繁多, 各地域经

济社会环境不尽相同, 需集合各地的地域特色对市域快轨制式进行比选分析。

1 市域快轨系统制式应用情况

轨道交通系统制式包括车辆制式、供电制式、轨道制式三方面的内容, 以及系统对线路速度目标值的适用性。供电制式主要有25 kV交流供电、1 500 V直流供电、750 V直流供电以及双流制式, 车型主要有A型车、B型车、D型车、直线电机车辆、磁悬浮车辆等, 轨道制式主要有钢轮钢轨和适用于中低速磁悬浮的F轨。目前国内外运营或在建的多条市域快轨项目系统制式如表1所示。

2 系统制式选择标准

各地的市域快轨均需与当地的城市规划、经济社会环境相适应，研究恰当的市域快轨系统制式可从速度目标值选择、车辆选型、供电系统比选、工程经济性比较等方面综合分析。

2.1 速度目标值选择

速度目标值是轨道交通项目最重要的技术标准之一，是确定全线工程规模、系统制式、设备配置以及工程投资的重要基础。市域快轨的运营速度目标应结合线路长度、线路走向与曲直形态、站间距分布、乘客出行时间目标等因素综合确定(见表2)。

1)确定时间目标：制式比选中应按线路长度确定不同地段的时间和速度目标，全程运行时间不宜大于1 h，以与乘客的出行时间相适应。2)确定合理站距：适当拉大站间距是提高全线旅行速度的有效途径。3)确定速度效率：制式比选时应确定旅行速度占最高运行速度的比例。一般速度效率以50%~60%

为宜。4)确定最高运行速度：市域快轨一般有100 km·h⁻¹，120 km·h⁻¹，140 km·h⁻¹三个最高运行速度等级，在特殊线路上也可选用160 km·h⁻¹。但能耗、工程造价均与速度关系密切，具体工程应用上应结合经济性综合比较分析。

2.2 车辆选型

根据市域快轨的性质以及最高运行速度等级(100~160 km·h⁻¹)，其可供选择的车型主要有市域A型车、B型车、D型车、CRH6F、双流制式车辆、中低速磁悬浮等。每个车型都有其独特的技术参数和运行特性，应根据项目的具体经济社会环境选择合适的车型(见表3)。

市域A、B型车直流制式在中国应用非常成熟，建设和运营成本较低。市域D型车主要在温州市域快轨S1线运用，开行速度高，建设成本高于A、B型车。CRH6F型动车组在长株潭城际铁路、宁波至余姚城际铁路中投入运营，运行稳定，应用成熟。双流制式车辆在中国尚没有运用，厂家已开展自

表1 部分已运营和在建的市域快轨系统制式

Tab.1 Metropolitan rapid rail transit systems in operation and under construction

线路名称	供电制式	车辆制式	轨道制式	速度/(km·h ⁻¹)	线路长度/km
温州S1线	25 kV 交流供电	动车组6辆编组	钢轮钢轨	120	51.9
香港机场 LAR 快线	1 500 V 直流供电	车辆采购自西班牙和韩国	钢轮钢轨	130	35
广州地铁3号线	1 500 V 直流供电	B型车6辆编组	钢轮钢轨	120	67.25
天津滨海轻轨	1 500 V 直流供电	B型车4辆编组	钢轮钢轨	100	45.43
南京宁高城际二期	1 500 V 直流供电	B型车4辆编组	钢轮钢轨	120	54.4

资料来源：各线路工程可行性研究报告。

表2 市域快轨旅行速度与站间距匹配表

Tab.2 Relationship between metropolitan rapid rail transit stations spacing and corresponding travel speed

指标	准快速		1级快速		2级快速		3级快速			
	旅行速度/(km·h ⁻¹)	站间距/km								
线路运营长度/km	≤45		≤50		≤60		≤70~80			
最高运行速度(V _{max})/(km·h ⁻¹)	80		100		120		140		160	
V _{max} × 50%	40	1.4	50	2.0	60	2.8	70	4.0	80	5
V _{max} × 60%	48	2.2	60	3.0	72	4.3	84	6.0	96	7.8
V _{max} × 70%	56	3.6	70	4.9	84	7.0	98	10.0	112	12.9
V _{max} × 80%	64	7.1	80	9.4	96	13.0	112	20.3	128	25.6

注：按DC1 500 v受电，A/B型车辆参数计算。

主研究。中低速磁悬浮已先后在长沙、北京建成通车，但运营效益、稳定性有待进一步验证。

市域快轨的车型选择应有利于线路与整个轨道交通线网的资源共享，能与线路的客流需求相适应。

1) 与线网资源共享的统一性。

市域快轨作为城市轨道交通线网的一部分，应将其纳入线网的资源共享方案中统筹考虑。市域快轨的车型选择应尽量与线网中其他线路车型一致，以便于共享利用线网中的车辆厂、架修资源；车辆供电制式也应尽可能与线网中的其他线路供电制式一致，以利于实现主变电站等设备设施的资源共享。

2) 与客流需求的适应性。

车辆型号的选择和编组需满足线路的客流需求。不同车型、编组的列车定员必然不同，对客流需求的满足和适应程度也不一致。《市域铁路设计规范》(T/CRS C0101—2017)规定车厢内有效空余地板面积上站立乘客标准宜按4人·m²计算。在这一标准下不同车型和编组的列车定员如表4所示。

列车车型和编组方式与客流需求的适应性可通过计算线路运能余量的方式判断，计

算公式为

$$R = \frac{DS - G}{G}, \quad (1)$$

式中： R 为运能余量/%； D 为列车定员/(人次·列⁻¹)； S 为设计高峰小时最大列车开行对数/(对·h⁻¹)； G 为高峰小时单向最大断面客流量/人次·h⁻¹。一般情况下，线路的运能余量为单向最大断面客流量的10%~20%。

2.3 供电系统选择

线路的速度目标值会直接影响牵引供电系统选择及供电能力设计。从车辆最佳功率配置、弓网受流质量和实际工程应用情况分析，在速度目标值低于120 km·h⁻¹、线路长度较短(50 km以下)时，交、直流供电制式均可选用，此时速度目标值并非决定因素，系统制式选择更多取决于线网衔接关系等其他因素。速度目标值为120~140 km·h⁻¹时，交、直流供电制式均可选用，若采用直流供电制式，车辆功率配备及性价比、研制成本相比交流供电而言，技术经济已无优势^[2]。速度目标值达到140~160 km·h⁻¹时，直流制式车辆研制成本增加，国内外已无运营业绩，配套的直流牵引供电系统也很不经济。

表3 市域快轨可供选择车辆型号的主要技术参数

Tab.3 Technical parameters of available vehicle models for metropolitan rapid rail transit

制式	钢轮钢轨制式				磁悬浮制式		
	车型	市域A型	市域B型	市域D型	CRH6F	双流制式车辆	中低速磁悬浮 ^[1]
供电制式		AC25 kV 或 DC1 500 V	AC25 kV 或 DC1 500 V	AC25 kV	AC25 kV	AC25 kV, DC1 500 V	DC1 500 V
车体基本长度/mm	无司机室车辆	22 000	19 000	22 000	24 500	22 000	15 600
	单司机室车辆	22 000+Δ	19 000+Δ	22 000+Δ	25 700	22 000+Δ	15 600+Δ
车体基本宽度/mm		3 000	2 800	3 300	3 300	3 000	2 800
车辆落弓高度/mm		交流≤4 400 直流3 810~3 850	交流≤4 400 直流3 810~3 850	4 640	3 860	≤4 050	≤37 000
车内净高/mm			≥2 100			≥2 100	≥2 100
地板面高/mm		1 130	1 100	1 260~1 280	1 250	1 130	880
固定轴距/mm		2 500	2 200, 2 300	2 500	2 500	2 500	
车辆定距/mm		15 700	12 600	15 700	17 500	15 700	悬浮架模块长度≤2 800
每侧车门数/对		2~5	2~4	2~4	2~3	3~5	2~3
车门宽度/mm			≥1 300		1 600		≥1 300
车轮直径/mm		840 或 860	840	860 或 840	860	860	
轴重/t		≤17	≤15	≤17	17	< 17	车辆悬浮能力≥33
最高运行速度/(km·h ⁻¹)		120~160 120~140	120~140	120~160	160	120	≥100
造价/(万元·辆 ⁻¹)		1 000	750	900	1 100		1 000

注：相关项目车辆初步设计文件。

速度目标值大于 $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 线路一般较长(大于 100 km), 从弓网受流质量和牵引供电系统配套来看, 交流供电性价比更优, 应采用交流牵引供电制式。

2.4 工程经济性比选

市域快轨系统制式比选时, 工程经济性也是需要考虑的重点因素, 系统选型需要考虑的经济成本主要包括土建工程费用、车辆购置费、车辆基地投资、运营成本等。

1) 土建工程费用。

市域快轨不同系统制式由于速度等级、车型、供电制式的不同, 其隧道断面、桥梁规模均不一致, 导致土建工程费用有较大区别。不同速度等级的隧道断面造价^[3]如表 5 所示。

决定桥梁结构尺寸的主要因素为恒载。在相同的梁跨度和线间距的情况下, A 型车桥面宽度比 B 型车宽 0.4 m ; 市域线 D 型车桥面宽度比 B 型车宽 0.99 m 、比 A 型车宽 0.59 m 。每标准跨桥梁(30 m), 采用市域 D 型车, 混凝土数量比 A 型车多 98.6 m^3 。对比全桥(包含墩、梁、基础), 一孔桥的预算: 市域线 D 型车比地铁 A 型车的费用多 45 万元 左右。

系统制式对土建工程费用的影响还与线路的桥隧占比有关, 例如采用磁悬浮制式, 由于噪声、震动小, 采用高架敷设方式较

多, 线路桥梁占比相对较高, 虽然磁悬浮单洞造价较轮轨高, 但线路整体土建工程费用可能相对较少。因此, 比较系统制式对土建工程费用的影响应全线综合考虑。

2) 车辆购置费。

不同型号列车的车辆购置费用如表 6 所示。因不同型号列车定员不一致, 同一条线路采用不同型号列车时, 会导致配属车辆数不一致。因此, 具体车辆购置费应结合项目实际情况综合考虑。

3) 车辆基地投资。

不同列车型号、配属车辆数会直接影响轨道交通项目的场段规模。综合分析中国案例, 一般情况下, A, B 型车厂架修基地造价为 $7\sim 8 \text{ 亿元}$, 定临修车辆段造价为 $5\sim 6 \text{ 亿元}$, 停车场造价为 3 亿元 。参考温州市域车辆检修基地的投资, D 型车厂架修基地造价为 $10\sim 12 \text{ 亿元}$, 定临修车辆段造价为 6 亿元 , 停车场造价为 2 亿元 。

双流制式车辆的场段在中国尚无实际应用项目, 但因车辆结构更为复杂, 场段造价较市域 A, B, D 型车的场段投资更高。

因交流制式车辆可以在露天停放, 而直流制式车辆须在库房内停放, 因此交流制式车辆场段较直流制式场段的建筑规模更小, 但检修设备更复杂、造价高。因此, 在场段建筑及检修设备总体费用上, 交流、直流制式车辆相差较小。

表 4 不同车型列车编组与定员

Tab.4 Marshalling and staffing of different train car models

项目	市域 A 车		市域 B 车		市域 D 车		CRH6F	中低速磁悬浮
站席/(人·m ²)	4	4	4	4	4	4	4	4
编组辆数/辆	4	6	4	6	4	6	8	6
列车定员/人	692	1 460	692	1 053	760	1 152	960	936

资料来源: 相关项目车辆初步设计文件。

表 5 不同隧道断面单位造价

Tab.5 Unit cost for tunnels with different cross sections

项目	速度目标值/(km·h ⁻¹)				
	≤100	≤120	120	140	160
供电制式	直流 1 500 V	直流 1 500 V 接触轨	直流 1 500 V	25 kV 交流	25 kV 交流
车型	A/B 车型	中低速磁悬浮	A/B 车型	市域动车组	市域动车组
隧道断面外径/m	6.0~6.2	7.0~7.2	6.7	8.5	8.8~9.0
隧道造价(双线)/ (万元·m ⁻¹)	10	16	12.5	18	20
应用案例	中国多数地铁线路	长沙磁悬浮线	东莞 R1 线	台州市域铁路 S1 线	长株潭城际铁路

4) 运营成本。

运营费用主要包括运营牵引能耗成本、维修和人工成本等。经分析统计，不同系统制式在运营成本方面的差别主要体现在运营能耗上^[4]。随着速度目标值的提高，运营能耗依次增加。按4辆编组列车、全日开行100对列车考虑，不同速度目标值的能耗与牵引能耗费用差别如表7所示。

与120 km·h⁻¹速度目标值相比，100 km·h⁻¹方案的年牵引能耗费用略有节省，140 km·h⁻¹和160 km·h⁻¹方案的年牵引能耗费用较120 km·h⁻¹方案高出较多。因此，从运营成本方面看，120 km·h⁻¹速度目标值的直流1500 V市域B型车性价比最高。

3 结语

通过实际工程案例的分析研究，本文解决了市域快轨规划、立项时对其系统制式选择的关键问题。进行市域快轨系统制式选择时，首先应根据项目的功能定位、线路条件、车站分布、乘客出行时间目标等因素综合确定线路的最高运行速度目标值，一般市域快轨有100 km·h⁻¹，120 km·h⁻¹，140 km·h⁻¹，160 km·h⁻¹等几个速度目标等级，在平均旅行速度为最高运行速度60%的线路条件下，站间距达3 km可采用100 km·h⁻¹最高速度目标等级，平均站间距达4.3 km以上时可采用120 km·h⁻¹最高运行速度目标等级。确定线路最高运行速度目标等级后，应选择与之适应的车辆型号，车型选择时应考虑满足客流需求并与线网资源共享条件相适应。系统供电制式应考虑与线路长度、速度目标及车型的匹配性。从土建工程费用、车辆购置费、车辆基地投资、运营成本等四个方面进行综合经济性比较，一般来说，120 km·h⁻¹速度目标值的直流1500 V市域B型车，投资规模适中，车辆技术成熟，运营维护成本较低，性价比最高。

本文仅从中国已建或在建市域快轨项目进行分析，随着轨道交通技术的进步以及相关技术、产业的成熟和规模化应用，某些应用较少的市域快轨系统制式有可能在解决技术短板后，在某些特定场合可以焕发强大的潜在竞争力。后续进行相关规划立项、可行性研究时需紧跟当前的技术发展潮流，仔细调研，结合当地的具体社会背景，选择满足需求、技术先进、经济合理的制式标准。

表6 不同车型购置费用

Tab.6 Purchase costs of different train models

车型	供电制式	最高运行速度/(km·h ⁻¹)	造价/(万元·辆 ⁻¹)
市域A型	AC25 kV	120~160	约1 000
	DC1 500 V	120~140	
市域B型	AC25 kV	120~140	约750
	DC1 500 V		
市域D型	AC25 kV	120~160	约900
CRH6F	AC25 kV	160	约1 100
双流制式车辆	AC25 kV, DC1 500 V	120	无实际应用
中低速磁悬浮	DC1 500 V接触轨	120	约1 000

资料来源：相关已建项目初步设计概算文件。

表7 列车牵引能耗与费用对比

Tab.7 Comparison of trains' energy consumption and cost

项目	速度目标值/(km·h ⁻¹)			
	100	120	140	160
制式	直流	直流	交流	交流
车型	B型	B型	市域动车组	市域动车组
单位能耗/(kWh·辆 ⁻¹ ·km ⁻¹)	2.3	2.5	4.1	4.7
4辆编组 列车开行 100对·d ⁻¹	能耗/(万kWh·d ⁻¹)	9.6	10.5	17.2
	能耗差值/(万kWh·d ⁻¹)	-0.9	0	6.7
	牵引能耗费用差值/(万元·a ⁻¹)	-215	0	1 714

参考文献：

References:

- [1] 肖飞. 中低速磁浮交通的技术经济性分析[J]. 铁道工程学报, 2017(3): 99-105.
- [2] 王会丰, 江志忠. 城市轨道交通牵引供电制式的比较与选择[J]. 铁道经济研究, 2014(2): 43-46.
Wang Huifeng, Jiang Zhizhong. The Comparison and Selection of Urban Railway Transport Traction Power Supply System[J]. Railway Economics Research, 2014(2): 43-46.
- [3] 穆礼彬. 市域快速铁路综合效益评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(9): 1-5.
- [4] 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, 32(3): 1-3.
Xu Zongxiang. Research on Type Selection for Urban High-Speed Line Vehicle of Mass Transit in China[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2009, 32(3): 1-3.