

市域快速轨道交通车辆选型分析

庄 哲 张晓江 寇玮琛

(中国铁路设计集团有限公司机械动力与环境工程设计研究院,300308,天津 //工程师)

摘 要 鉴于车辆选型对市域快速轨道交通工程的建设成本、施工难度、线网拓展的可操作性产生的影响,介绍了典型市域快轨线路的车辆制式;针对市域快速轨道交通的典型特征,对地铁和城际铁路进行了车辆适用性分析。结合现有标准,从车辆选型、车辆编组、最高运行速度、供电制式、受流方式、车辆定员及车辆成本等方面,综合分析了市域快速轨道交通车辆选型涉及的技术要求。分析表明,需结合线路实际情况,经多种因素比选后才能确定市域快速轨道交通的车辆选型。

关键词 市域快速轨道交通;车辆选型;技术要求

中图分类号 U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.010

Vehicle Type Selection of Urban Rapid Rail Transit System

ZHUANG Zhe, ZHANG Xiaojiang, KOU Weichen

Abstract Vehicle type selection directly affects investment of project, difficulty of construction and sustainability of subsequent network development. Vehicle formats of typical urban rapid rail transit line are introduced. Targeting the characteristics of urban rapid rail transit, vehicle applicability on metros and intercity railways is analyzed. Considering the existing standards, technical requirements involved in the selection of urban rapid rail transit vehicles are comprehensively analyzed from the perspectives of vehicle type, marshalling, maximum operating speed, power supply system, current collection mode, vehicle staffing and vehicle cost. Analysis shows that the selection of urban rapid rail transit vehicles needs to be de-

termined after comparing and selecting through many factors according to the actual situation.

Key words urban rapid rail transit; vehicle selection; technical requirements

Author's address Mechanical Power and Environmental Engineering Design Department, China Railway Design Corporation, 300308, Tianjin, China

在轨道交通线网规划阶段,车辆选型将对线路工程的建设成本、施工难度、线网拓展的可操作性等产生深远影响。本文将从车辆选型、车辆编组、最高运行速度、供电制式、受流方式、车辆定员及车辆成本等方面,结合市域快速轨道交通(简为市域快轨)的特点,对其车辆选型展开分析。

1 典型市域快轨线路的车辆制式及其适用性分析

1.1 车辆制式

典型市域快轨线路的车辆制式^[1-6],如表 1 所示。

1.2 车辆适用性分析

1.2.1 市域快轨与其他轨道交通方式的典型特征对比

市域快轨主要建设在与中心城经济、人口交流紧密的地区,以及与组团城市联系密切的各城镇地区,并不完全受行政区划的限制。市域快轨主要以上述地区间 1 h 交通为基本目标。

表 1 典型市域快轨线路的车辆制式表

线路名称	车型	编组/节	制造商	最高运行速度/(km/h)	受流方式	供电制式
日本成田机场线	AE 型车	3、6、12	日本车辆制造株式会社	130	接触网	DC 1 500 V
法兰西岛区域快线	MS61、MI84、MI09	4、5、8	阿尔斯通	140	接触网	DC 1 500 V AC 25 kV
旧金山湾区快速交通系统	A、B、C、C2	3~10		130		
香港机场线	Adtranz-CAF	7+1	德国 ADtranz、西班牙 CAF	135	接触网	DC 1 500 V
广州机场快线	B 型车	6	中车株洲电力机车有限公司	120	接触网	DC 1 500 V
青岛地铁 13 号线	B 型车	4	中车青岛四方机车车辆股份有限公司	120	接触轨	DC 1 500 V
上海轨道交通 16 号线	A 型车	3、6	中车株洲电力机车有限公司	120	接触轨	DC 1 500 V
成都地铁 18 号线	A 型车	8	中车青岛四方机车车辆股份有限公司	160	接触网	AC 25 kV
重庆轨道交通 1 号线、璧铜线	B 型车	6	重庆中车长客轨道车辆有限公司	160	接触轨 接触网	DC 1 500 V AC 25 kV
北京地铁新机场线	D 型车	7+1	中车青岛四方机车车辆股份有限公司	160	接触网	AC 25 kV

市域快轨通常与城际铁路以及以地铁为代表的城市轨道交通共同构成城市轨道交通骨架,其客流强度一般介于城际铁路与城市轨道交通之间;城际铁路主要负责大型城市群内中心城市与周边城市的便捷交通功能;城市轨道交通系统主要负责城

区内部骨干客流交通功能。三者功能相互补充,其典型特征对比见表 2^[8]。目前,适用于国内大运量城市轨道交通系统的车型为 A 型车、B 型车及城际动车组,其技术参数如表 3 所示^[9-10]。

表 2 市域快轨与其他轨道交通方式的典型特征对比表

轨道交通类型	服务区域	设计速度/(km/h)	站间距/km	线路长度/km	铺设方式	乘坐方式	供电制式	工程造价/(亿元/km)	管理主体
地铁	城市中心区内	80~100	<1.5	<30	以地下线为主	以站位为主	以直流为主	4.0~8.0	城市政府
市域快轨	主城区与组团间	100~160	1.5~<3.0 (城区); 3.0~<8.0 (城区外围)	30~100	以地面线或高架线为主	以座位为主	以交流为主	0.8~2.0	城市政府
城际铁路	主要大城市间	120~200	5~20	>100	以地面线或高架线为主	座位	交流	1.0~2.0	国家铁路部门

注:工程造价与项目所处地区的地质条件、征地拆迁成本、桥隧比例及车站密集度等相关,表中数值仅供参考。

表 3 A 型车、B 型车及城际动车组的技术参数表

技术参数	车型		
	A 型车	B 型车	城际动车组
车辆基本长度/mm	22 800	19 500	24 500
车辆基本宽度/mm	3 000	2 800	3 300
车辆高度/mm	3 800	3 800	3 860
车辆地板高/mm	1 130	1 100	1 260
固定轴距/mm	2 200~2 500	2 100~2 200	2 500
车辆定距/mm	15 700	12 600	17 500
轮径/mm	840	840	860
最大轴重/t	16	14	17
车门数量/(对/侧)	5	4	2 或 3
额定载员/人	310	230 或 250	147 或 200 或 202
受流方式	接触轨、接触网	接触轨、接触网	接触网
受电弓落弓高度/mm	3 810	3 810	4 650
受电弓工作高度/mm	3 900~5 600	3 900~5 600	5 150~6 800
最高运行速度/(km/h)	80~100	80~100	160~200
起动平均加速度/(m/s ²)	0.83~1.00	0.83~1.00	0.80
常用制动减速度/(m/s ²)	1.0	1.0	1.0
紧急制动减速度/(m/s ²)	1.2	1.2	1.2

注:计算额定载员时,A 型车按 6 人/m² 计,B 型车按 6 人/m² 计,城际动车组按 4 人/m² 计;A 型车单价为 900 万元/辆,B 型车单价为 680 万元/辆,城际动车组单价为 1 500 万元/辆。

1.2.2 地铁车辆的适用性

地铁 A 型、B 型车虽运输能力可满足市域快轨的要求,但最高运行速度均在 120 km/h 以下,仅适用于站间距为 3 km 以内的线路,并不满足市域快轨线路的站间距要求。

1.2.3 城际铁路车辆的适用性

CRH6 型动车组是我国城际铁路车辆的代表车型。虽 CRH6 型动车组运量及最高运行速度满足市域快轨的要求,但其牵引、制动性能较市域快轨车辆要求存在差距,CRH6 型动车组车体尺寸较大,

接触网安装高度较高,从而带来的土建投资亦较高,而且铁路系统制式与既有城市轨道交通的互联互通性较差,不利于开展运营维护一体化协同工作。

因此,直接选用地铁 A 型、B 型车或 CRH6 型动车组均不能完全满足现有条件下的市域快轨线路要求。

2 市域快轨车辆选型分析

2.1 车型选择

目前,我国市域快轨车辆分为市域 B 型、市域 A 型、市域 D 型等 3 种型式。典型市域快轨车辆的主要技术参数如表 4 所示^[1]。

市域快轨车辆车型选择通常受远期高峰小时最大断面客流影响。当高峰小时最大断面客流超过 3 万人次时,必须选择 A 型车。按照 6A 编组 and 最小发车间隔 2 min 测算,线路高峰小时最大断面客流可达 3.6 万人次。当高峰小时最大断面客流低于 3 万人次时,可选择 B 型车。按照 6B 编组 and 最小发车间隔 2 min 测算,线路高峰小时最大断面客流可达 2.8 万人次。

2.2 车辆编组选择

根据客流情况,市域快轨车辆可灵活选择相应编组。如上海轨道交通 16 号线最少时采用 3 辆编组 A 型车,青岛地铁 13 号线采用 4 辆编组 B 型车,北京地铁新机场线采用 7 辆客车外加 1 辆行李车的 8 辆编组 D 型车。需注意,车辆编组及车型选择需满足车辆牵引制动需求,特别是如果采用 AC 25 kV 供电制式,车辆需增设变压及整流设备,若车辆编组

表 4 典型市域快轨车辆的主要技术参数表

技术指标		市域 D 型车	市域 A 型车		市域 B 型车	
		AC 25 kV	AC 25 kV	DC 1 500 V	AC 25 kV	DC 1 500 V
车体基本长度/mm	无司机室	22 000	22 000	22 000	19 000	19 000
	单司机室	22 000+Δ	22 000+Δ	22 000+Δ	19 000+Δ	19 000+Δ
车钩连接中心点间距/mm	无司机室	22 800	22 800	22 800	19 520	19 520
	单司机室	22 800+Δ	22 800+Δ	22 800+Δ	19 520+Δ	19 520+Δ
车体基本宽度/mm		3 300	3 000	3 000	2 800	2 800
车体落弓高度/mm		4 640	≤4 400	3 810~3 850	≤4 400	3 810~3 850
车内净高/mm		≥2 100	≥2 100	≥2 100	≥2 100	≥2 100
地板面高/mm		1 260~1 280	1 130	1 130	1 100	1 100
固定轴距/mm		2 500	2 500	2 500	2 200、2 300	2 200、2 300
车辆定距/mm		15 700	15 700	15 700	12 600	12 600
每侧车门数/对		2~4	2~5	2~5	2~4	2~4
车门宽度/mm		≥1 300	≥1 300	≥1 300	≥1 300	≥1 300
车轮直径/mm		860 或 840	840	840	840	840
轴重/t		≤17	≤17	≤17	≤15	≤15
最高运行速度/(km/h)		120~160	120~160	120~140	120~160	120~140

注：“Δ”表示司机室加长量。

较短,设备舱空间紧张,这会给车辆设备布置及轴重控制带来极大挑战。

2.3 最高运行速度选择

市域快轨的功能定位使得其运营速度要求较地铁车辆高,然而较高的运营速度也将带来车辆设计的困难、车辆成本的上升、运营能耗的增加及环境噪声的升高。因此,在制定最高运行速度时,应将其与旅行时间及站间距等要求进行综合考量。其中,最高运行速度与站间距的关系目前并未有相关标准明确定义,通常需考虑在标准规定的车辆加减速特性下,即平均加速度取 $0.5\sim0.6\text{ m/s}^2$,最大常用制动减速度取 $1.0\sim1.2\text{ m/s}^2$,使列车在一半站间距范围内保持最高运行速度即可。市域快轨最高运行速度与平均站间距间的关系,如表 5 所示。需注意,国内外部分线路的平均站间距小于 3 km,这就需要结合实际情况进行具体分析。

表 5 市域快轨最高运行速度与站间距关系参考表

最高运行速度/(km/h)	120	140	160
平均站间距/km	>3.0	>4.6	>6.6

2.4 供电制式选择

市域快轨通常采用 DC 1 500 V、AC 25 kV 以及 DC 1 500 V/AC 25 kV 混合供电等 3 种供电制式。从车辆角度出发,这 3 种供电制式均可满足最高运行速度 160 km/h 的要求,但 DC 1 500 V 和 AC 25 kV 供电制式各有优劣,两者对比如表 6 所示^[4]。

表 6 DC 1 500 V 与 AC 25 kV 供电制式优劣对比表

供电制式	优点	缺点
DC 1 500 V	整流设备在变电所内,电能质量高;车辆牵引系统简单,轴重及成本低;变电所采用双边供电,再生制动效率高;土建工程造价低	牵引供电设备复杂;供电臂短,变电所数量多;车辆牵引功率受限,速度等级低
AC 25 kV	牵引供电设备简单;供电臂长,变电所数量少;电压等级高,功率损耗小;有利于车辆牵引总功率的提升	土建工程造价高;车辆牵引系统复杂,绝缘耐压要求高,轴重及成本高;再生制动效率低

当车辆供电制式采用 AC 25 kV 或者 DC 1 500 V/AC 25 kV 后,车辆牵引传动系统需增设主变压器及整流器,因此,这将带来车辆自重的增加,从而运营能耗亦会相应增加。市域快轨供电制式与运营能耗间的关系,如表 7 所示。

表 7 市域快轨供电制式与运营能耗间的关系表

供电制式	运营能耗
DC 1 500 V	E_{DC}
AC 25 kV	$1.122 E_{\text{DC}}$
DC 1 500 V/AC 25 kV	$1.122 E_{\text{DC}}$

注： E_{DC} 为 DC 1 500 V 供电制式的运营能耗。

根据国内外供电制式的选择经验,当最高运行速度为 120 km/h 时,国内相关线路已有成熟的应用经验,加之从运营维护角度出发,全线采用统一的供电制式有利于降低运行维护工作量,应优先选择 DC 1 500 V 供电;当最高运行速度为 140 km/h 时,可选选择 DC 1 500 V/AC 25 kV 供电制式;当最高运行速度为 160 km/h 时,直流制式车辆研发制造及

直流牵引供电系统成本均大幅增加,加之国内尚无应用经验,采用 AC 25 kV 供电制式更佳。

2.5 受流方式选择

受流方式包括受流靴—接触轨和受电弓—接触网两种方式,后者又可分为受电弓—刚性悬挂接触网和受电弓—柔性悬挂接触网。从车辆动力学角度出发,受流靴—接触轨的靴轨跟随性最差,不利于受流质量的提升;受电弓—刚性悬挂接触网的弓网跟随性适中,受流质量优于受流靴—接触轨;受电弓—柔性悬挂接触网的弓网跟随性最好,受流质量最佳。不同受流方式对比如表 8 所示。由表 8 可知,3 种受流方式下的车辆最高运行速度有所不同,仅受电弓—刚性接触网的受流方式可以满足最高运行速度 160 km/h 的要求。

表 8 不同受流方式对比表

受流方式	优点	缺点	供电制式	最高运行速度/(km/h)
受流靴—接触轨	土建工程造价低;磨损小,寿命可达 60 年,维护简单	运行速度较低;存在安全隐患;与其他专业影响大	DC 1 500 V	120
受电弓—刚性悬挂接触网	运行速度较高,安全性高,对其他专业影响小	土建工程造价高;磨损较小,寿命较短,维护较复杂	DC 1 500 V/ AC 25 kV	160
受电弓—柔性悬挂接触网	运行速度最高,安全性高,对其他专业影响小	土建工程造价高;磨损大,寿命最短,维护最复杂	DC 1 500 V/ AC 25 kV	160,380

注:最高运行速度为 160 km/h 时,采用 DC 供电;最高运行速度为 380 km/h 时,采用 AC 供电。

2.6 车辆定员

车辆定员由座席定员及站席定员两部分组成。由于市域快轨线路较长,乘客对车厢舒适度要求较高,因此,车厢内部座椅通常采用横排或横纵混合布置的方式,以提高车厢座席数量。同时,市域快轨站席标准较地铁车辆有所提高,站席定员按照 4 人/m² 考虑。市域快轨车厢座席及定员如表 9 所示。

2.7 车辆造价分析

受车辆型式、最高运行速度及供电制式的影响,市域快轨车辆参考造价如表 10 所示。

3 建议

1) 车型选择与高峰小时最大断面客流相关。

表 9 不同座椅布置方式下的车厢座席及定员数量表

座椅布置方式	车辆类型	座席/个	定员/人
纵排	A 型	不带司机室	56
		带司机室	310
	B 型	不带司机室	46
		带司机室	230
横排	A 型	不带司机室	70
		带司机室	210
	B 型	不带司机室	54
		带司机室	141

注:座椅纵排布置方式下 A 型车按 5 对车门,B 型车按 4 对车门,定员按 6 人/m² 计算;座椅横排布置方式下 A、B 型车均按 3 对车门,定员按 4 人/m² 计算;座椅横纵混合布置方式由于横纵座椅布置比例不固定,其座席及定员数量一般介于纵排及横排布置数量之间。

表 10 不同技术参数的市域快轨车辆参考造价表

最高运行速度/(km/h)	不同供电制式的车辆造价/万元		
	DC 1 500 V	AC 25 kV	DC 1 500 V/AC 25 kV
120	800	1 000	1 100
140	1 000	1 200	1 300
160	1 200	1 400	1 500

2) 车辆最高运行速度应与站间距、旅行时间等要求相适应。

3) 当车辆最高运行速度为 120 km/h 时,建议采用 DC 供电;当车辆最高运行速度为 160 km/h 时,建议采用 AC 供电。

4) 车辆最高运行速度为 120 km/h 时,建议采用受流靴—接触轨受流方式;车辆最高运行速度为 160 km/h 时,建议采用受电弓—接触网受流方式。

5) 车厢站席定员按 4 人/m² 考虑,座椅采用横纵混合布置方式。

6) 车辆造价应结合车型、最高运行速度、供电制式等多方面综合考虑。

参考文献

[1] 李得伟,李若怡,兰贞. 巴黎 RER 线现状分析及对我国市域轨道交通发展的启示[J]. 都市轨道交通,2017(5): 134.

[2] 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.

[3] 程万慧,魏庆朝,白雁,等. 美国旧金山湾区捷运系统[J]. 都市轨道交通,2013(1): 116.

[4] 冯爱军,李忍相. 市域快轨发展研究及技术分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015.

[5] 王高琛,傅茂海,姚鹏辉,等. 成都市轨道交通 18 号线车辆模式选型探讨[J]. 电力机车与城轨车辆,2015(3): 76.

[6] 徐成永,李猛. 北京市域快轨新机场线车辆选型研究[J]. 都市轨道交通,2016(4): 20.

图 12~16 采用不同形状的图例标识出了训练样本与测试结果。当仅有 5 个 SVM 分类器的识别结果均为 1 时,判定钢轨扣件的弹条处于扣紧状态。程序最终测试结果与单一特征程序测试结果如表 1 所示。

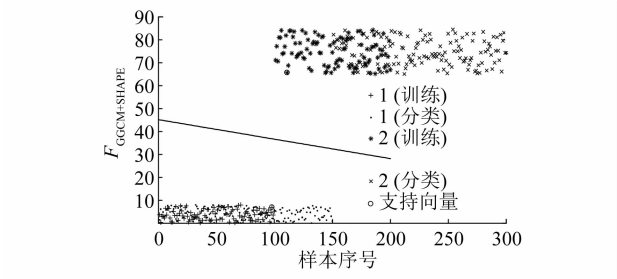


图 16 5 号 SVM 分类器分类结果图

表 1 各种算法测试结果对比表

算法	误检率/%	正确率/%	漏检率/%
本文算法	2.9	92.9	7.1
GGCM 算法	17.9	83.7	16.3
几何参数算法	21.5	85.3	14.7

由表 1 可知,本文算法取得了较低的误检率、相对较高的正确率以及相对较好的漏检率;相较于单独使用 GGCM 算法,本文算法的误检率减少了 15%,正确率提高了 9.2%,漏检率减少了 9.2%;相较于单独使用几何参数算法,本文算法的误检率减少了 18.6%,正确率提高了 7.6%,漏检率增加了 7.6%。综上所述,本文算法有效地提高了钢轨扣件弹条状态识别的准确率。

参考文献

[1] 王凌,张冰,陈锡爱. 基于计算机视觉的钢轨扣件螺母缺失检测系统[J]. 计算机工程与设计,2011(12): 4147.

[2] 刘馨,穆颖,张斌. 基于计算机视觉的钢轨扣件检测算法研究[J]. 华东交通大学学报,2017(2): 72.

[3] YANG J,TAO W,LIU M,et al. An efficient direction field-based method for the detection of fasteners on high-speed railways[J]. Sensors,2011,11(8): 1364.

[4] XIA Y,XIE F,JIANG Z. Broken railway fastener detection based on adaboost algorithm [C] // IEEE. 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing (ICOIP). Haiko: IEEE,2010.

[5] 吴益红,许钢,江娟娟,等. 基于 LBP 和 SVM 的工件图像特征识别研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2016(1): 77.

[6] 王凯. 基于图像纹理特征提取算法的研究及应用[D]. 成都: 西南交通大学,2013.

[7] DOU Y,HUANG Y,LI Q,et al. A fast template matching-based algorithm for railway bolts detection [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics,2014,5(6): 835.

[8] MARINO F, DISTANCE A, MAZZEO P L, et al. A real-time visual inspection system for railway maintenance: automatic hexagonal-headed bolts detection [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews),2007,37(3): 418.

[9] 梁俊,谭勇,汪斌,等. 小波变换在遥感图像纹理高频增强显示中应用[J]. 测绘信息与工程,2008(5): 39.

[10] 李灵杰,唐宁. 一种面向交通场景的快速图像增强算法[J]. 计算机与现代化,2015(6): 55.

[11] 陈兴,丁亚军,钱盛友,等. 基于超声图像的生物组织损伤判定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019(1): 171.

[12] 盛磊,周著黄,吴水才,等. 热消融组织 B 超图像纹理特征参数温度相关性[J]. 北京工业大学学报,2013(8): 1275.

[13] 刁彦华,孟子钰,王晓君. 基于 Hu 不变矩的图像形状特征提取研究[J]. 网络安全技术与应用,2017(10): 46.

[14] 陈坤,黎煊,刘品,等. 基于 FPGA 的图像形状边缘匹配算法的实现[J]. 科技创新与应用,2016(11): 32.

[15] 杜恩宇,张宁,李艳荻. 基于 Gabor 滤波器的车道线快速检测方法[J]. 红外与激光工程,2018(8): 314.

[16] 贡玉南,华建兴,黄秀宝. 基于匹配 Gabor 滤波器的规则纹理缺陷检测方法[J]. 中国图象图形学报,2001(7): 14.

[17] 吴阳,刘振华,周晓锋,等. 基于纹理特征和 SVM 分类器的铝铸件类型识别[J]. 计算机系统应用,2018(8): 281.

(收稿日期:2019-06-01)

(上接第 45 页)

[7] 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.

[8] 赵国堂,周诗广. 我国市域铁路发展现状及未来展望 [J]. 中国铁路,2018(8): 1.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质

量监督检验检疫总局. 地铁设计规范: GB 50157—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2013.

[10] 丁叁叁,张忠敏,何丹炉,等. 城际动车组总体技术设计 [J]. 机车电传动,2014(6): 10.

(收稿日期:2019-06-06)