

地铁列车动力配置问题分析

黄隆飞¹ 梁广深²

(1. 林同棣国际工程咨询(中国)有限公司, 401121, 重庆; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘要 近年来,有观点认为“地铁列车中动拖占比 66% 的列车,优于动拖占比 50% 的列车”。这一观点导致各地盲目加大列车动力,有的城市甚至在运营线路上投入了 5M1T 和 6M2T 编组列车,由此加大了列车牵引能耗,增加运营成本。以重庆地铁 5 号线为例,通过模拟牵引计算,对 4M2T 及 3M3T 列车(B 型车)的牵引特性进行专题研究,揭示出列车的牵引能耗、制动力、再生制动力、牵引能力及爬坡能力,与列车的动车数量并无直接关系。建议各个城市应结合自身特点,合理选择列车的车辆编组方式及动力配置,以降低地铁建设工程投资和运营成本。

关键词 地铁; 列车编组方式; 动力配置

中图分类号 F530.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.005

Analysis of Metro Train Power Allocation

HUANG Longfei, LIANG Guangshen

Abstract In recent years, there is a view that "the train with dynamic towing proportion of 66% is better than the train with dynamic towing proportion of 50%", which leads to the blind increase of train power in various regions. Some cities even invested 5M1T and 6M2T in the train lines, which caused the energy consumption of train traction and the operating cost to increase. Taking Chongqing metro line 5 as an example, the traction characteristics of 4M2T and 3M3T trains (type B) were studied by means of simulated traction calculation, and it is revealed that the traction energy consumption, braking force, regenerative braking force, traction capacity and climbing capacity of the train are not directly related to the number of bullet trains. It is suggested that each city should choose the vehicle grouping method and power allocation of trains reasonably according to its own characteristics, so as to reduce the investment and operation cost of subway construction projects.

Key words metro; train formation method; power allocation

First-author's address T. Y. Lin International Engineering Consulting(China) Co., Ltd., 401121, Chongqing, China

0 引言

目前,国内地铁列车常规有 4M2T(动拖比 66%)和 3M3T(动拖比 50%)两种编组方式。有观点认为,动拖比 66% 列车(以下简称“4M2T 列车”)在牵引耗能、环保、全寿命期运营成本等方面优于动拖比 50% 列车(以下简称“3M3T 列车”),并建议新线采购列车和旧线增购列车时,尽量选用 4M2T 列车。受此观点影响,大部分在建地铁新线一刀切选用 4M2T 列车,经济适用的 3M3T 列车被挤出市场。

2017 年,全国城市轨道交通运营成本为 28.1 元/(车·km)和 0.95 元/(人·km),运营收入为 13.2 元/(车·km)和 0.33 元/(人·km),平均单位票款收入为 0.14 元,仅北京、广州、深圳、武汉 4 城市地铁的运营收支比超过 100%。经验表明,4M2T 列车只能 6 辆编组运行,而许多二、三线城市由于地铁运营初期客流量小,采用 6 辆编组列车运营,造成空耗浪费现象严重,是亏损的主要原因之一。今后随着更多城市 4M2T 列车投入运营,亏损还会进一步加剧。

本文以重庆地铁 5 号线(悦港大道站—跳蹬站,全长 46.796 km)为例,通过模拟牵引计算,对 B 型车 4M2T 及 3M3T 列车的牵引特性进行专题研究,分析了 480 张牵引计算图,整理汇总了 36 张表,表 1 是其中之一。据此针对相关观点发表几点不同意见。

1 对地铁列车动力配置相关观点的质疑

1.1 关于列车故障情况下运行能力问题

观点 1 认为“3M3T 列车在一个动力单元发生故障后,只剩下 33% 的动力,须在下一站清客退出运营,对运营组织有较大影响”。众所周知,3M3T 列车采用架控方式,以一个转向架作为一个

表 1 重庆地铁 5 号线列车(B 型车)AW2 工况、95 km/h 速度运行时牵引数据表

运行线路	4M2T			3M3T		
	区间运行 时间/s	牵引电能 消耗/(kWh)	再生电能 量/(kWh)	区间运行 时间/s	牵引电能 消耗/(kWh)	再生电能 量/(kWh)
重庆地铁 5 号线悦港 大道站—跳蹬站下行区间	2 936	897.04	439.9	3 133	856.89	416.96

注:AW2 为额定载荷

动力单元,因此,在一台牵引逆变器发生故障情况下,列车只损失 1/6 的动力,尚有 83.3% 的动力,而不是只剩下 33% 的动力。本文通过牵引计算,表明

3M3T 列车(B 型车)在 AW3(超载)工况下动力损失 1/3 时,仍能在 43‰坡道上停车再起动车运行(见图 1),应对故障运行的能力很强。

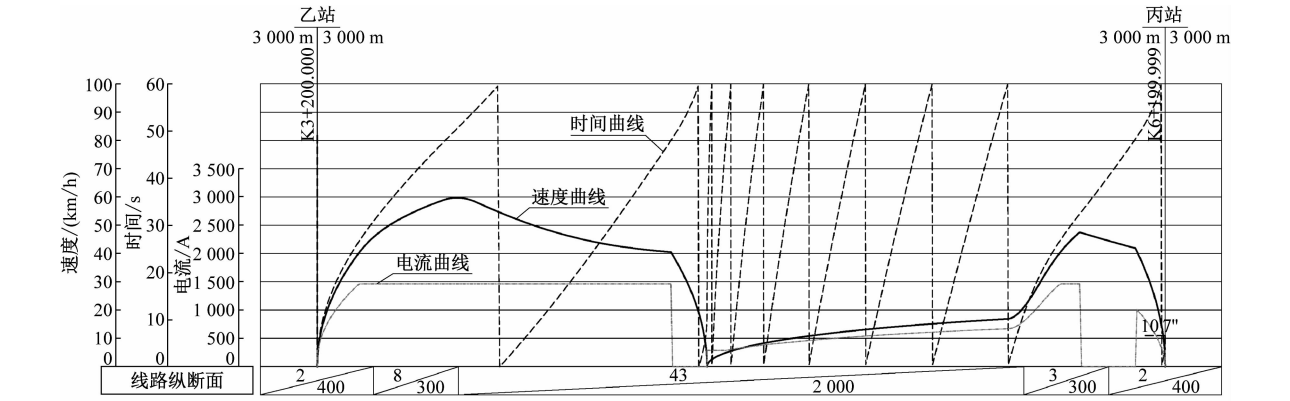


图 1 3M3T 列车 AW3 工况下运行速度曲线

1.2 关于列车旅行速度问题

观点 2 认为“4M2T 列车的加速度大,可明显提高旅行速度”。由表 1 可见:(线路长 46.796 km,设 31 座车站),在重庆地铁 5 号线下行区间 4M2T 列车全程运行时间为 2 936 s,3M3T 列车全程运行时间为 3 133 s,二者相差 197 s。以列车停站 30 s 计算,4M2T 列车旅行速度为 44.23 km/h,3M3T 列车旅行速度为 42.06 km/h。由此可见:4M2T 列车的提速效果甚微,只在列车起动、制动阶段能节省几秒时间;在区间内,4M2T 列车与 3M3T 列车的运行速度基本相同,可节省时间有限。

1.3 关于列车牵引能耗问题

观点 3 认为“3M3T 列车的牵引能耗远高于 4M2T 列车”。从物理学角度分析,这两种列车的质量相同、运行速度相同、运行距离相同,因此所做的机械功应相等。更何况 4M2T 列车多一辆动车和一套牵引电器设备,其质量比 3M3T 列车重约 4~5 t,按理 4M2T 列车的牵引耗电量应高于 3M3T 列车。由表 1 可知,4M2T 列车单程牵引耗电为 897.04 kWh,3M3T 列车单程牵引耗电为 856.89 kWh,前

者比后者多耗电 40.15 kWh,高出约 4.7%。

1.4 关于环境污染问题

观点 4 认为“4M2T 列车,可较充分地利用电气制动,减少摩擦制动闸瓦消耗,保护隧道环境;3M3T 列车频繁地施加空气摩擦制动,闸瓦消耗量是 4M2T 列车的几倍,甚至数十倍”。由表 1 可知,4M2T 列车全程再生制动电能量为 439.94 kWh,3M3T 列车全程再生制动电能量为 416.96 kWh。这两种列车的再生制动电能量相近,意味着这两种列车的再生制动力相近,与动车数量多少关系不大。因此,所谓 3M3T 列车频繁进行摩擦制动、闸瓦消耗量是 4M2T 列车的几倍甚至几十倍的说法不成立。

1.5 关于车辆全寿命期成本问题

观点 5 认为“4M2T 列车比 3M3T 列车在全寿命期成本上拥有较大优势”。地铁的运营成本主要包括车辆购置费、车辆维修费、牵引耗电费等。根据表 1 的数据对两种列车车辆的全寿命期主要运营成本做一个大致分析。

1) 车辆购置费分析。以重庆地铁 5 号线为例,

4M2T 列车旅行速度按 44.23 km/h 计算,采用 4M2T 列车全线需运用列车 35 列;3M3T 列车旅行速度按 42.06 km/h 计算,采用 3M3T 列车全线需运用列车 37 列。4M2T 列车的价格比 3M3T 列车高 2%~5%,故二者的车辆购置费差别不大。

2) 车辆维修费分析。首先从日常维修工作量进行分析。重庆地铁 5 号线采用 4M2T 列车运营,运用车数为 35 列,其中动车 140 辆,拖车 70 辆;采用 3M3T 列车运营,运用车数为 37 列,其中动车 111 辆,拖车 111 辆。动车的维修量大,维修费用高;拖车的维修量小(甚至不要维修),维修费用低。这是客观事实。由此判断 4M2T 列车的日常维修费用高于 3M3T 列车。其次从定期检修量进行分析。按《地铁设计规范》规定的“车辆检修周期表 27.3.14”计算,每个列车在全寿命期内,需要做 2 次大修、3 次架修和 18 次定修。地铁车辆的使用寿命按 30 年计算,按检修工作量推理,4M2T 列车动车数量多,拖车少,其全寿命期维修费用肯定高于 3M3T 列车的。

3) 列车牵引耗电量分析。按地铁列车运行时刻表,一般线路近远期每日约开行 450 列列车。以表 1 列车的牵引耗电量(每度电 0.81 元),计算全寿命期列车的牵引电费支出:4M2T 列车年牵引电费为 35.8 亿元,3M3T 列车年牵引电费为 34.2 亿元。在全寿命期内,4M2T 列车比 3M3T 列车多支出牵引电费约 1.6 亿元,平均每年多支出牵引电费约 533 万元。

综上分析可知,在车辆全寿命期成本上,4M2T 列车比 3M3T 列车上没有任何优势。

2 对地铁车辆动力配置的几点想法

2.1 国内外地铁交流车的动力配置概况

地铁交流车是在直流车的转向架上,将直流牵引电动机更换为交流电动机形成。由于同体积交流电动机的牵引力是直流电动机的 2 倍以上,因此在保持列车总功率不变的前提下,只需一部分车辆配置动力即可。

日本地铁在上世纪末实现了交流车转型,其技术标准规定动车拖车比例采用 1:1,即 6 辆编组采用 3M3T,8 辆编制采用 4M4T,12 辆编制采用 6M6T。我国第一代交流车也采用 1:1 的动拖比配置。这种配置的优点是,以一辆动车和一辆拖车作为一个动力单元,两个单元连挂为 4 辆编组的

2M2T 列车,三个单元连挂为 6 辆编组的 3M3T 列车,列车编组运用灵活。

目前,北京地铁 11 条线、天津地铁 1 号线、武汉地铁 1 号线、苏州 1 号线、上海轨道交通 6 号线和 16 号线、广佛线等均采用 2M2T 列车或 3M3T 列车,香港地铁马鞍山线为 2M2T 列车、东铁线为 6M6T 列车,运营情况均良好。国内 A 型车和 B2 型车为 2:1 动力配置,采用 4M2T 编组方式的缺点为列车编组不灵活。

2.2 加大列车动力之风不可取

当前,有盲目加大地铁列车动力之风,凡遇提高运行速度或线路坡度变大等问题,就通过增加动车数量应对。要解决这一问题,应了解地铁车辆的牵引特性:地铁车辆的加速度达到规定的指标,其牵引力就够用了,且牵引电动机具有牛马特性,对大小坡道基本都能适应。3M3T 列车(B 型车)在不同坡道上的牵引计算图如图 2 所示。图 2 a)为列车在 4‰坡道上起动运行,车速达到目标速度 70 km/h 后断电惰行,列车的牵引力有富裕;图 2 b)为列车在 50‰坡道上起动运行,因坡度大、加速度小,牵引电机全程满负荷运转,在牵引力与坡道阻力平衡时,列车以 68 km/h 速度运行。3M3T 列车的功率为 2 160 kW,相当于 4M2T 列车的 71%,也能在 50‰的大坡道上运行。

2.3 列车牵引能力与动车数量关系不大

以德黑兰地铁为例,1 号线上有连续 6 个 50‰大坡道区间,长度为 5.7 km。本文针对该线路的纵断面,对 AW3 工况下,4M2T 和 3M3T 列车(B 型车)的牵引计算图(见图 3 和图 4)进行比较。其中:4M2T 列车质量为 316.8 t,牵引电机功率为 190 kW,列车功率为 3 040 kW;3M3T 列车质量为 313.2 t,电机功率为 180 kW,列车功率为 2 160 kW。由图 3、图 4 可知,4M2T 列车和 3M3T 列车质量相近,虽功率大小和动车数量不同,但都能通过连续 6 个 50‰大坡道区段。

综上分析可知:地铁列车的牵引能力,取决于列车功率和粘着力,与动车数量多少关系不大。

2.4 创新造车技术水平

国家制定的现代有轨电车交通工程技术标准规定,有轨电车可采用 3 模块、5 模块、7 模块和 8 模块编组,为用户提供了较大的选择空间。相比之下,地铁车辆的品种单调,编组方式选择余地较小。面对不断发展的城市轨道交通市场,车辆规格也需

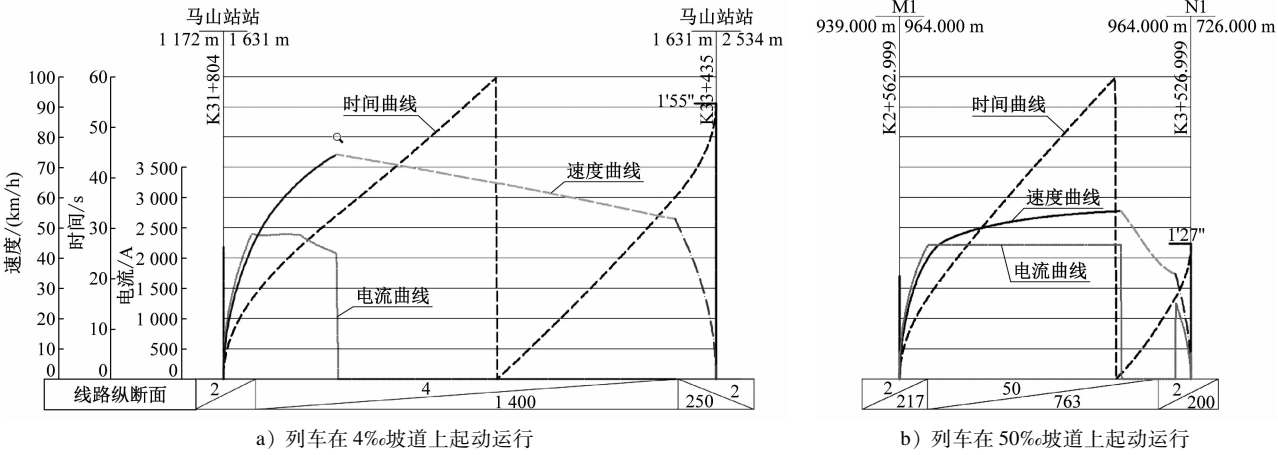


图 2 3M3T 列车(B 型车)在不同坡道上牵引计算图

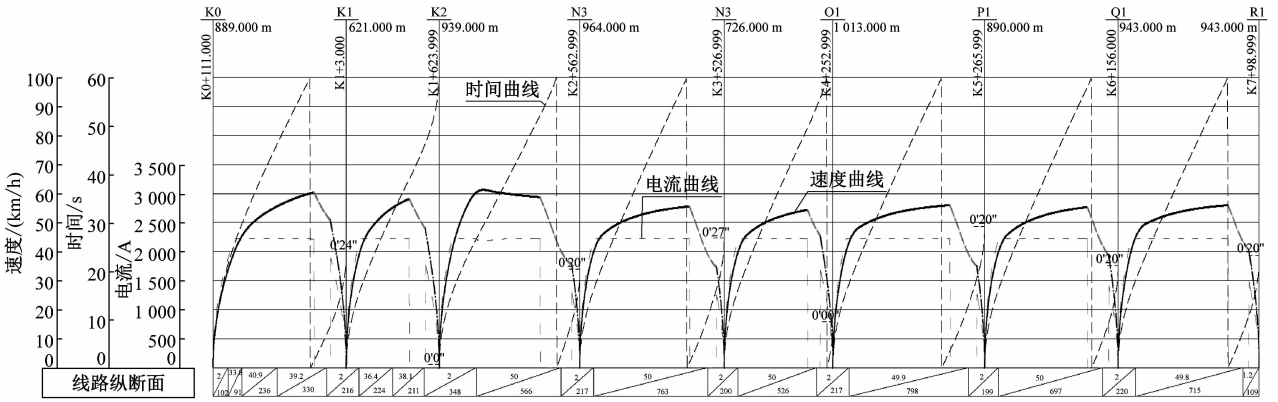
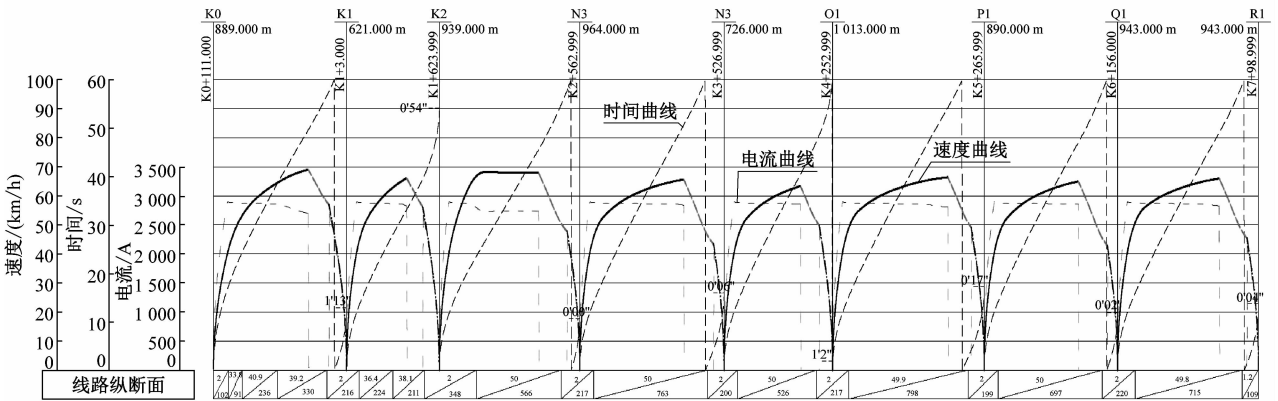


图 4 AW3 工况下 3M3T 列车(B 型车)运行速度曲线图

要多元化发展,新车制造应以增加运营灵活性、降低运营成本为核心进行技术创新,使 A、B、C 型车辆,形成 3 辆、4 辆、6 辆灵活编组的系列产品。

香港地铁公司经营的深圳地铁 4 号线,根据牵引电动机的技术标准“起动时电机电流不大于额定电流的 2 倍,制动时电机电流和电压均不超过额定值 2 倍”,在保持 A 型车功率 3 000 kW 不变的前提下,将 185 kW 电机改为 200 kW(牵引电机启动时

瞬时功率为 256 kW,制动时瞬时功率为 418 kW),列车额定功率为 2 400 kW(列车牵引功率为 3 072 kW,制动功率为 5 016 kW)。通过此方法,将 A 型车改成了 3M3T 编组,初、近期列车采用 4 辆编组,远期列车采用 6 辆编组,降低了运营成本,取得较好的经济效益,这一经验值得借鉴和推广。

3M3T 列车由于加速度(0.83 m/s^2)偏小,逐渐
(下转第 27 页)

度均在不断下降,其中决策树 CART 算法的变化程度最大,SVR 的变化影响最小。

3 结语

本文分别采用了误差反向传播神经网络(BPNN)、决策树 CART、支持向量回归机(SVR)三种不同的算法,建立了基于数据挖掘算法的时间序列预测模型,对地铁站内的能耗走向进行了预测。利用实际测量某地铁站的总能耗结果,验证了三种预测模型所得到的预测值精度,并通过五个不同的模型性能指标对这三个模型进行了对比及测评,得出结论如下:

1) 普通的输入-输出模型中,SVR 模型对能耗的预测最精确;

2) 对基于时间序列的能耗预测模型进行改进后,BPNN 模型的提升最大;

3) 滞后时长为 5 min 时,三种模型的预测值与实际值的拟合效果最好;

4) 基于决策树 CART 算法的时序能耗预测模型对滞后时长的敏感度最高。

参考文献

[1] 朱培根,王春旺,全晓娜,等. 地铁站乘客动态热舒适评价研

(上接第 22 页)

被边缘化,若按照上述方法以 B2 型车 190 kW 牵引电机或其他电机替换既有的 180 kW 电机,其加速度亦可适当提高。

3 结语

本文认为 4M2T 与 3M3T 列车都是地铁运营不可或缺的列车。4M2T 列车的粘着力大,爬坡能力较强,适合在线路坡度较大的山城地铁、市域线、城际线,或行车密度大于 30 对/h 的系统运营;3M3T 列车适合在平原城市地铁线路、郊区线路和平均站间距 1km 左右的线路上运营。各个城市应结合自身特点、具体线路条件,合理选择车辆编组及动力配置,降低地铁建设工程投资和运营成本,构建资源节约型社会。

参考文献

[1] 施仲衡. 抓住机遇再创十三五城市轨道交通新辉煌[J]. 都市快轨交通,2016,29(1):卷首语。

[2] 中国城市轨道交通协会. 2017 年统计报告[R/OL]. (2018-

究[J]. 暖通空调,2016(2):101.

[2] 张华廷,田雪刚,向灵均. 地铁站空调系统节能潜力分析[J]. 暖通空调,2016(4):7.

[3] 王春,李楠,刘志军,等. 重庆地铁站通风空调系统节能改造[J]. 暖通空调,2017(1):91.

[4] LEUNG P C M, LEE E W M. Estimation of Electrical Power Consumption in Estimation of Electrical Power Consumption in Subway Station Design by Intelligent Approach[J]. Applied Energy, 2013,101(1):634.

[5] WANG Y, FENG H, SONG L, et al. On Energy Saving of Subway HVAC System: Investigation and Autonomous Control[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.

[6] 黄文,王正林. 数据挖掘:R 语言实践[M]. 北京:电子工业出版社,2014:242.

[7] 陈茹雯,黄仁. 非线性自回归时序模型研究及其预测应用[J]. 系统工程理论与实践,2015(9):2370.

[8] WANG Y, WANG J, ZHAO G, et al. Application of Residual Modification Approach in Seasonal ARIMA for Electricity Demand Forecasting[J]. A Case Study of China,2012,48(9):284.

[9] PAPPAS S S, EKONOMOU L, KARAMELAS P, et al. Electricity Demand Load Forecasting of The Hellenic Power System Using an ARMA Model[J]. Electric Power Systems Research, 2010,80(3):256.

[10] WANG Y, FENG H, XIAO Q. SEED Public Energy and Environment Dataset for Optimizing HVAC Operation in Subway Stations[D]. Beijing: Tsinghua University,2013.

(收稿日期:2018-05-28)

01-16)[2018-04-19]. <http://www.camet.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=18&id=13532>

[3] 刘书斌. 二线城市轨道交通发展浅思[J]. 都市快轨交通,2016,29(2):100.

[4] 侯秀芳,左超,李楠. 城市轨道交通 2016 年统计和分析[J]. 都市快轨交通,2017,30(3):1.

[5] 陆缙华. 关于 6 辆地铁列车编组的动车与拖车配置[J]. 都市快轨交通,2006,3(19):15.

[6] 杨颖,陈中杰. 国内地铁车辆动力配置研究[J]. 城市轨道交通研究,2009(11):26.

[7] 李春成. 关于地铁列车的动力配置[J]. 城市轨道交通研究,2011(2):5.

[8] 冯伯欣. 地铁车辆配置中的新技术应用[J]. 都市快轨交通,2012,25(4):99.

[9] 梁广深,黄隆飞. 地铁 B 型车牵引能耗与再生制动节能效果初探[J]. 城市轨道交通研究,2016(2):27.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程项目建设标准:JB 104—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2008:9.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国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,2013:249.

(收稿日期:2018-09-05)