

重庆地铁6号线车辆牵引与电制动
特性设计及性能计算仿真

李 伟, 陈文光, 陈超录, 解培金

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介：李 伟（1979-），男，硕士，工程师，现从事城市轨道交通车辆电气牵引系统的研发工作。

摘 要：简述重庆地铁6号线地铁列车电传动系统的基本参数和性能要求，阐述了列车牵引与电制动特性的设计以及性能计算和线路仿真。计算和仿真结果表明，该电传动系统特性和性能满足设计要求。重庆地铁6号线地铁列车及其牵引电传动系统已通过线路型式试验和运行考核，目前已载客运营，运行情况良好。

关键词：牵引；再生制动；特性设计；性能计算；线路仿真；重庆地铁6号线

中图分类号：U231；U260.13 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2012)03-0052-03

Design and Simulation of Traction and Regenerative Braking
Performance of Chongqing Metro Line 6 Vehicles

LI Wei, CHEN Wen-guang, CHEN Chao-lu, XIE Pei-jin

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Basic parameters and performance requirements were briefed for the electric drive system of Chongqing metro line 6 vehicles, and the design, calculation and line simulation of traction and regenerative braking performance of the system were expounded. The calculation and simulation results showed that the performance of electric drive system met the design requirements. The Chongqing metro line 6 vehicles and their electric drive systems had passed the field type test and running inspection, and passenger-carried operation worked well.

Key words: traction; regenerative braking; design of performance; calculation of performance; line simulation; Chongqing metro line 6

0 引言

重庆地铁6号线一期工程（上新街至礼嘉段）地铁车辆为国内首个DC 1 500 V供电、最高速度100 km/h的B型国产地铁列车，其牵引系统采用VVVF牵引逆变器-异步牵引电动机构成的交流传动系统，优先使用电制动（不设电阻制动），具有反应迅速、可靠的空转/滑行保护功能。

1 列车基本参数和动力性能要求

1.1 列车基本参数

重庆地铁6号线一期工程地铁车辆为B型车体，架控接触网受电，供电电压为DC 1 500 V（DC 1 000~1 800 V），轮径为840/805/770 mm（新/半磨耗/全磨耗），动车轴式B₀-B₀，列车编组为=Tc*Mp*M=M*Mp*Tc=（4

动2拖，如图1所示），车辆自重：动车35 t，拖车34 t；列车载客人数：额定载荷AW2时，动车254人，拖车226人；超员载荷AW3时，动车325人，拖车290人。

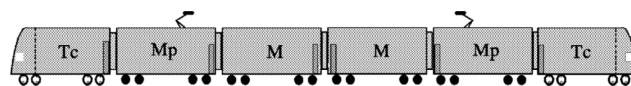


图1 列车编组示意图

1.2 列车动力性能要求

在超员AW3情况下，在平直干燥轨道上，车轮为半磨耗状态，额定电压DC1 500 V时：

平均加速度为：

列车从0加速到40 km/h $\geq 1.0 \text{ m/s}^2$

列车从0加速到100 km/h $\geq 0.5 \text{ m/s}^2$

平均减速度为：

常用制动（空-电混合制动） $\geq 1.0 \text{ m/s}^2$

快速制动（空-电混合制动） $\geq 1.2 \text{ m/s}^2$

紧急制动平均减速度 $\geq 1.2 \text{ m/s}^2$

收稿日期：2011-07-08；收修稿日期：2012-03-19

列车纵向冲击极限 $\leq 0.75 \text{ m/s}^3$
 最高运行速度 100 km/h
 平均旅行速度 $\geq 43 \text{ km/h}$ (上行方向为42.9 km/h,
 下行方向为43.1 km/h)

2 牵引/电制动特性设计

列车牵引/电制动特性是列车传动系统的基本特性,是牵引系统设计的前提条件和重要环节。牵引/电制动特性设计主要是基于列车的动力性能要求,考虑参数匹配以及轮轨粘着的允许,通过对典型区间、目标线路进行牵引计算和仿真。

根据列车基本参数,计算得到列车的换算质量: $M_g = 17.4 \text{ t}$,其中,动车的惯性系数取10%,拖车的惯性系数取5%。列车启动阻力取49 N/t。

基本阻力公式(参照日本类似电动车组阻力公式进行计算):

$$W_v = [(1.65 + 0.0247v) \times M_m + (0.78 + 0.0028v) \times M_t + (0.028 + 0.0078 \times (N-1))v^2] \times 9.80665 \times 10^{-3} \text{ kN}$$

式中: W_v ——列车基本阻力, kN;

M_m ——动车质量, t; M_t ——拖车质量, t; N ——车辆数;

v ——列车速度, km/h。

列车AW3下的基本阻力曲线如图2所示。

2.1 牵引特性

在半磨耗轮径、接触网压DC 1 500 V条件下,列车最大启动轮缘牵引力:AW3时, $F_{st3} \approx 384 \text{ kN}$; AW2时, $F_{st2} \approx 356 \text{ kN}$; AW0时, $F_{st0} \approx 256 \text{ kN}$ 。恒牵引力速度范围为0~40 km/h,恒功速度范围为40~65 km/h,自然特性速度范围为65~100 km/h。

其中,AW3时,恒功起始点列车牵引力为384 kN,自然特性起始点列车牵引力约为236.3 kN。

考虑低网压时的功率限制,在网压 $U_s \geq 1 500 \text{ V}$ 时,特性不变;在网压 $U_s < 1 500 \text{ V}$ 时,列车牵引特性根据网压的下降,其恒功起始点及终止点与网压成一次方比例下降。列车牵引特性曲线见图2所示。

2.2 电制动特性

在半磨耗轮径、接触网压DC 1 650 V条件下,列车最大电制动轮缘制动力为:AW3时, $F_{b3} \approx 352 \text{ kN}$; AW2时, $F_{b2} \approx 325 \text{ kN}$; AW0时, $F_{b0} \approx 227 \text{ kN}$ 。自然特性速度范围为100~80 km/h,恒电制动力速度范围为80~5 km/h,电制动力减小的起始速度点为5 km/h(可调)。列车的最大计算粘着系数约为0.165。

在网压 $U_s \geq 1 650 \text{ V}$ 时,特性不变;在网压 $U_s < 1 650 \text{ V}$ 时,列车制动特性根据网压的下降,其恒制动力起始点与网压成一次方比例下降。列车制动特性曲线见图

2所示。

列车制动原则:制动时优先使用电气制动(再生制动),电气制动不足部分自动由空气制动补充。紧急制动仅使用空气制动。

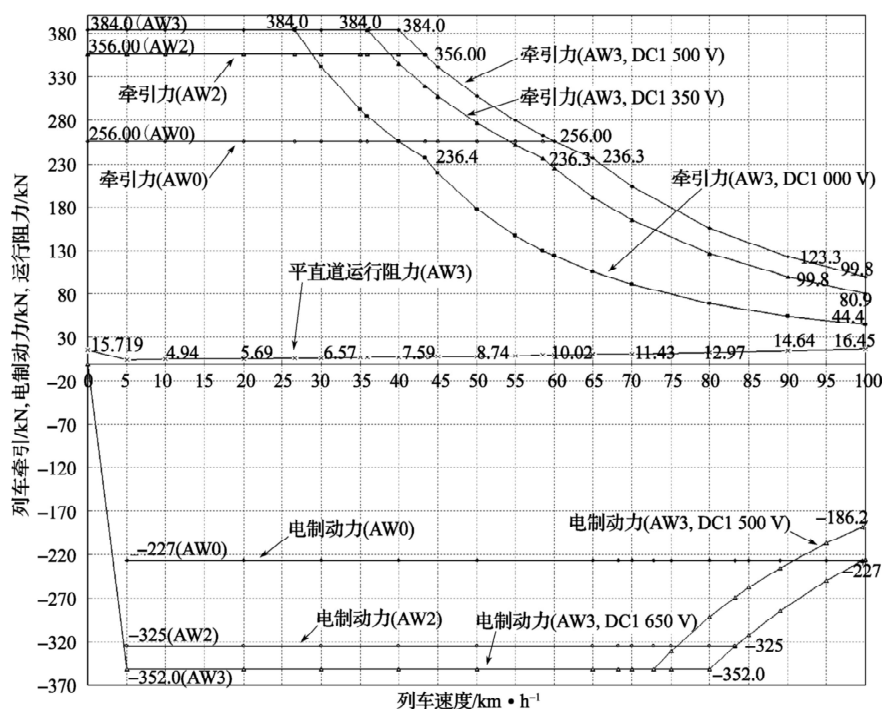


图2 列车牵引/电制动特性曲线图

列车充分利用轮轨粘着条件,并按列车载重量从空车到超员范围内自动调整牵引力/电制动力的大小及补充空气制动,使列车在空车至超员范围内保持加速度/制动减速度基本不变,并具有反应迅速、有效可靠的防滑行控制。

3 列车性能计算

3.1 牵引性能计算

经计算,在网压为DC1 500 V,AW3负载条件下,列车以384 kN的恒牵引力启动加速,其启动加速度为 1.089 m/s^2 ,列车的最大计算粘着系数 $\mu_{jt} = 0.18$ 。

此种工况下,列车在0~40 km/h和0~100 km/h速度范围内其平均加速度分别可以达到 1.03 m/s^2 和 0.6 m/s^2 ,其结果满足牵引动力性能要求。

综合考虑牵引电动机的输出转矩、转速以及机械传动装置的结构和可靠性,选定齿轮驱动装置齿轮传动比为6.312 5(101/16)。

此时,牵引电机启动转矩约为 $1 561 \text{ N} \cdot \text{m}$ (齿轮箱传动效率为0.98),牵引电机最大转速约为4 160 r/min (半磨耗轮径,车速100 km/h时),牵引电机最大牵引功率约为272 kW。

3.2 电制动性能计算

经过计算,在网压为DC1 650 V以及AW3负载条件下,列车在100~0 km/h速度范围内其平均减速度达到 1.0 m/s^2 ,列车仅依靠电制动可实现80~5 km/h的平

均减速度达 1.027 m/s^2 , 最大计算粘着系数约为 0.165 , 其结果满足列车制动性能要求。

此种工况下, 牵引电机最大制动转矩为约 $1\,374 \text{ N} \cdot \text{m}$ (取传动效率为 0.98), 牵引电机最大电制动功率约为 480 kW 。

4 线路运行仿真

4.1 典型区间(平直线路)运行仿真

根据列车基本参数, 平直线路上(距离为 $1\,620 \text{ m}$), 在超员载荷 AW3, 牵引网压为 DC1 500 V, 制动网压为 DC1 650 V 工况下, 仿真计算结果和曲线如表 2 和图 3、图 4 所示。从仿真结果可知, 该牵引系统的性能符合设计要求。

表 2 典型区间(平直线路)运行仿真计算结果

运行时间/s	旅行时间/s	运行速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
87.84	122.84	66.43
旅行速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	直流侧等效电流/A	电机等效电流/A
47.5	490.68	119.65

图 3 为 DC 1 500 V 网压、AW3 载荷下列车牵引力、运行阻力、线路电流、电机电流、时间、距离对列车速度的曲线图。图 4 为 DC 1 650 V 网压、AW3 载荷下列车电制动力、线路电流、电机电流、时间、距离对列车速度的曲线图。

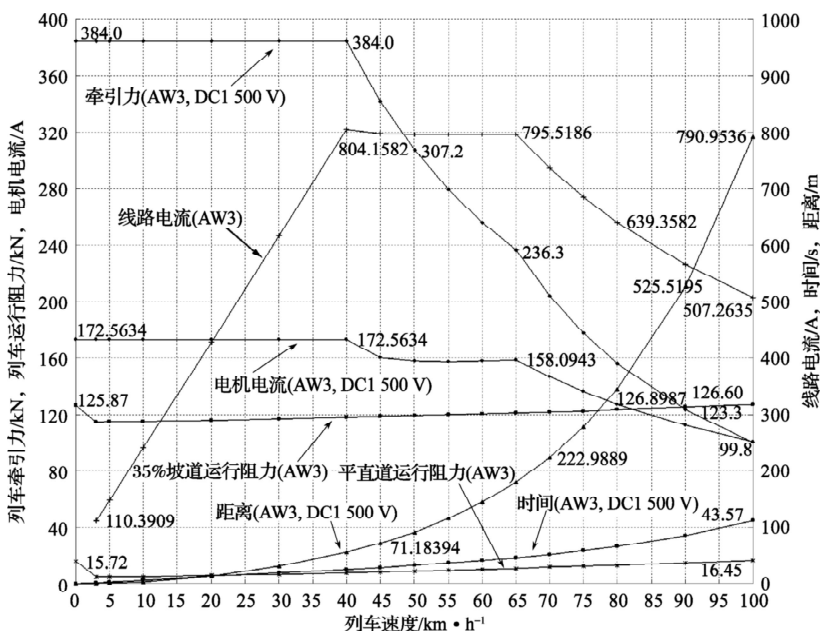


图 3 典型区间(平直线路)运行仿真计算曲线图(牵引)

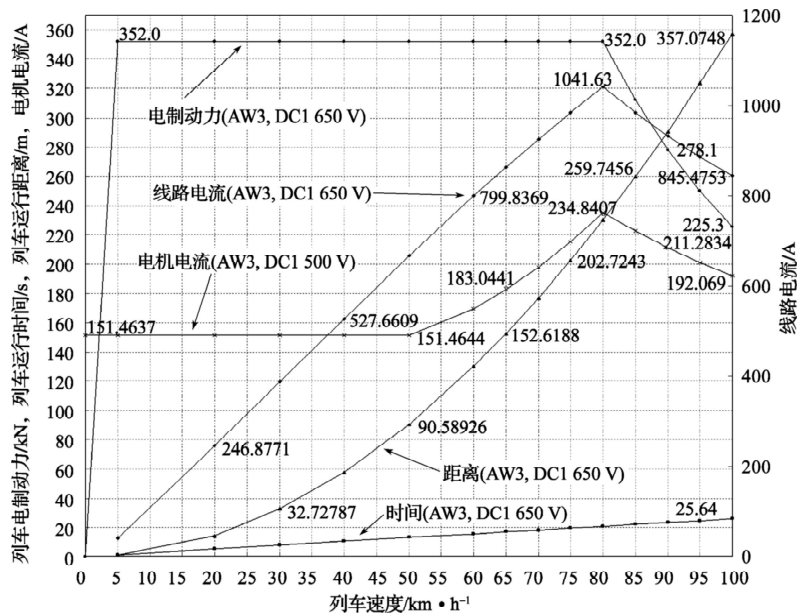


图 4 典型区间(平直线路)运行仿真计算曲线图(制动)

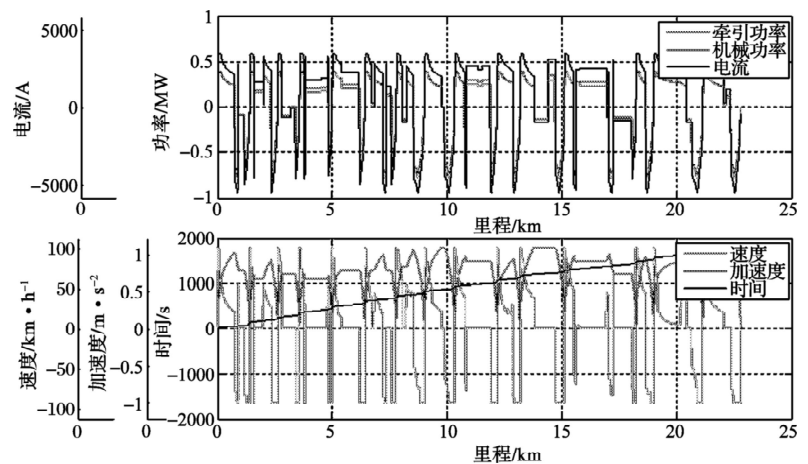


图 5 上行线(上新街站至礼嘉站)的模拟运行曲线

4.2 全线路模拟运行仿真

重庆地铁 6 号线一期工程上行线(上新街至礼嘉, 距离为 $22\,783.0 \text{ m}$) 和下行线(礼嘉至上新街, 距离为 $22\,753.8 \text{ m}$), 列车旅行速度计算公式为 $V_1 = S/T_1$, 式中 V_1 为旅行速度, S 为上行或下行总距离, T_1 为旅行时间(等于运行时间加停站时间)。仿真计算结果为: 在超员载荷 AW3, 牵引时网压取 $1\,350 \text{ V}$, 制动时网压取 $1\,650 \text{ V}$ 的条件下, 上行线的总旅行时间为 $1\,821.3 \text{ s}$, 平均旅行速度可达 45.03 km/h , 完全满足不小于 42.9 km/h 的旅行速度要求, 主电路等效电流约为 454 A ; 下行线总旅行时间为 $1\,789.16 \text{ s}$, 平均旅行速度可达 45.78 km/h , 满足不小于 43.1 km/h 的旅行速度要求, 主电路等效电流约为 438 A 。

(下转第 61 页)

时,全部车门开度0.07 m、车速30 km/h能够快速、有效地排出烟雾。数值分析与实车现场试验结果的一致性表明,利用气体动力学与混合分数燃烧学理论建立地铁列车在发生火灾的数值分析模型,采用FLUENT软件进行数值分析是正确的,利用该方法确定列车应急排烟模式具有较高精度。

参考文献：

- [1] 赵 轶. 地铁火灾烟气数值模拟及通风控制 [D]. 大连：大连交通大学, 2009.
- [2] 刘万福, 申海波, 王静萱, 等. 地铁模型实验测量与火灾模拟 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29 (6): 1074-1076.
- [3] Dong-Ho Rie. A study of optimal vent mode for the smoke control of subway station fire [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21:3-4.
- [4] 杨立中, 邹 兰. 地铁火灾研究综述 [J]. 工程建设与设计, 2005, 11: 8-12.
- [5] Won-Hee Park, Dong Hyeon Kim, Hee-Chul. Numerical Pre-

- diction of Smoke Movement in a Subway Station Under Ventilation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21:304-309.
- [6] 钟茂华, 史聪灵, 涂旭炜, 等. 深埋地铁岛式站点火灾模型实验研究—实验设计 [J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(1):3-9.
- [7] 王洪德, 林 琳, 赵 轶. 地铁隧道火灾事故通风方式数值模拟 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29 (2): 177-181.
- [8] 冯 炼, 刘应清. 地铁火灾烟气控制的数值模拟 [J]. 地下空间, 2002, 22(1):61-64.
- [9] 赵相相. 地铁隧道火灾烟气流动与控制规律研究 [D]. 广州：广州大学, 2006.
- [10] E John Finnemore, Joseph B Franzini. Fluid Mechanics with Engineering Applications [M]. 北京：清华大学出版社, 2003: 114-121.
- [11] 钟茂华, 史聪灵, 涂旭炜, 等. 深埋地铁车站火灾实验与数值分析 [M]. 北京：科学出版社, 2009:71-72.
- [12] 陈开元. 宝宝成长必读 [M]. 石家庄：河北科学技术出版社, 2006.

(上接第54页)

仿真运行曲线(电网线电流、列车牵引功率、机械功率、列车速度、加速度、运行时间对运行里程的曲线)如图5(上行线)和图6(下行线)所示。

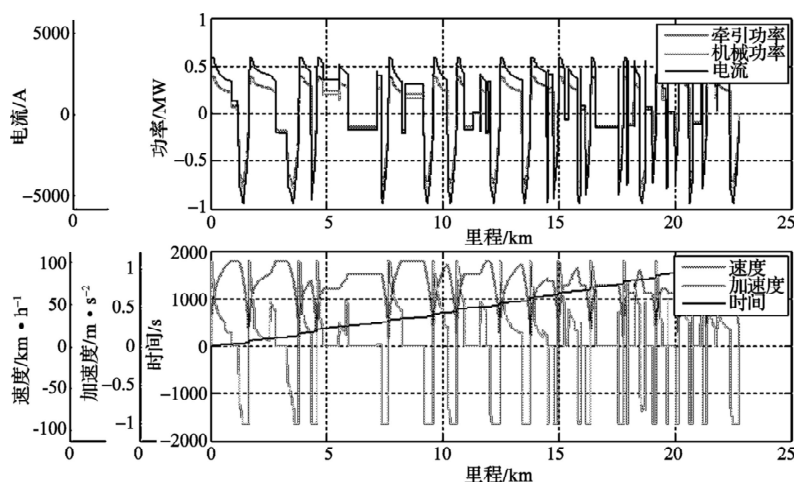


图6 下行线(礼嘉站至上新街站)的模拟运行曲线

5 结语

本文为国内首个DC1 500 V供电、最高速度达100 km/h的B型地铁列车重庆地铁6号线的牵引/电制动特性设计和性能计算仿真。该地铁列车已完成现场试验验证和运行考核,目前正在进行载客运营,运行情况良好,电传动系统性能稳定,列车动力性能及各项技术指标符合设计要求。

参考文献：

- [1] 丁荣军, 陈文光. 地铁车辆用交流传动系统的设计 [J]. 机车电传动, 2001(5).
- [2] 陈文光, 丁荣军. 国产化北京地铁列车牵引电传动系统设计 [J]. 机车电传动, 2006(4).

动态消息

《机车电传动》编辑部声明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求,推进期刊网络出版传播,凡向本刊投稿并被本刊录用,在著作权法的框架内,该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊及本刊授权的相关数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网、手机等进行网络出版或提供信息服务,根据本刊编辑部稿酬标准一次性支付作者著作权使用报酬(即稿费,包含印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)。

《机车电传动》编辑部