

城际动车组牵引系统研制

焦京海¹，曹 江¹，刘江涛¹，孙 宁¹，荣智林²

(1. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;
2. 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 焦京海(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事动车组电气系统设计工作。

摘 要: 对城际动车组的线路及牵引系统的特点进行分析, 提出城际动车组应具备的能力, 具体阐述了 CRH6 系列城际动车组牵引系统平台方案, 通过对部件和系统进行仿真和试验, 表明城际动车组牵引系统优良。

关键词: 城际动车组; CRH6A; CRH6F; 140 km/h 城际动车组; 牵引系统
中图分类号: U266.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-128X(2015)03-0005-05
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.03.002

Traction System Development for Intercity EMUs

JIAO Jinghai, CAO Jiang, LIU Jiangtao, SUN Ning, RONG Zhilin

(1.CSR Qingdao Sifang Locomotive Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China;
2. Zhuzhou CSR Times Electric Co.,Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Railway and traction system features of intercity EMUs were analyzed, and the ability requirement of the EMU was pointed out. Traction platform scheme of CRH6 series intercity EMUs was expounded in detail, and the simulation and test of system and parts validated the good performance of the traction system.

Keywords: intercity EMUs; CRH6A; CRH6F; 140 km/h EMUs; traction system

0 引言

城际动车组牵引系统是车辆时效性和经济性的具体体现, 其特性决定车辆的运行性能。本文主要就城际动车组牵引系统的现状、面临的问题及难点、最终方案、方案的验证进行深入分析及讨论。

1 城际动车组线路特点

国内 3 条典型的城际动车组线路情况如表 1 所示。

表 1 国内典型 3 条城际线路情况

项目	珠三角莞惠	上海金山线	温州市域 S1 线(一期)
供电电压	单相 AC 25 kV/50 Hz	单相 AC 25 kV/50 Hz	单相 AC 25 kV/50 Hz
线路长度 / km	106.130	54.800	53.507
运营速度 /(km·h ⁻¹)	200	160	120
最大站间距 /km	12.580	12.000	7.096
平均站间距 / km	3.342	3.900	3.130
区间最大坡度	30‰	11.7‰	30‰

从以上 3 条线路数据可以看出, 城际动车组线路平均站间距小, 正线最大运行坡道达 30‰, 因此在设

计中必须充分考虑并满足快启(牵引)快停(电制动), 以及在最大坡道上的故障及救援能力^[1]。

城际动车组与高速动车组、城市轨道交通之间既有联系又有区别。它既需要有高速动车组持续高速运行的能力, 又要具有地铁列车的启停能力。表 2 列出了城际动车组与地铁及高铁在线路的总长度、站间距的设置、运行速度、加速性能等方面的对比情况。

2 牵引能力及要素分析

根据城际线路的特点, 城际动车组应具备如下几方面能力: ①长线路持续高速运行的能力; ②短站间距快启快停、频繁启停的能力; ③大坡道启动的能力; ④大载客量的能力。

2.1 长线路持续高速运行的能力

城际动车组在城与城之间运行需经历“站站停”和“大站停”2 种运行模式, 即市区内需要“站站停”, 市区间需要“大站停”。其中“大站停”要求车辆以最高运行速度长时间持续运行。

长线路持续高速运行, 要缩短市区间“大站停”所需的必要时间, 需对牵引系统平均旅行速度和最高

收稿日期: 2014-10-14; 收修改稿日期: 2014-12-31
基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2012J003-A)

表 2 城际动车组与高铁、地铁性能对比

项目	CRH6A	CRH6F	140 km/h 城际动车组	CRH2A	北京 14 号线列车
编组形式	4M4T	4M4T	2M2T	4M4T	4M2T
供电电压	AC 25 kV	AC 25 kV	AC 25 kV 或 DC 1 500 V	AC 25 kV	DC 1 500 V
加速性能	0~40 km/h 时 ≥ 0.65 m/s ²	0~40 km/h 时 ≥ 0.80 m/s ²	0~40 km/h 时 ≥ 0.80 m/s ²	0~40 km/h 时 0.36 m/s ²	0~37 km/h 时 ≥ 1.0 m/s ²
	0~200 km/h 时 ≥ 0.30 m/s ²	0~160 km/h 时 ≥ 0.38 m/s ²	0~140 km/h 时 ≥ 0.40 m/s ²	0~120 km/h 时 0.33 m/s ² 200 km/h 时剩余加速度 ≥ 0.05 m/s ²	0~80 km/h 时 ≥ 0.6 m/s ²
最高运行速度 /(km·h ⁻¹)	200	160	140	200	80
试验速度 /(km·h ⁻¹)	220	176	160	275	90
适宜站间距 /km	≥ 10	约 5~10	约 2~5	约 20	约 5
线路长度 /km	约 150	约 50~100	约 50~80	约 300	46

运行速度有较高的要求。在市区间距离一定的前提下，平均旅行速度与运行时间成反比，平均旅行速度的大小直接影响到城市群经济圈内列车的调度安排和运营的效率，如果平均旅行速度太小，必然无法实现此目标；如果平均旅行速度太大，虽然可能在时间指标上占优，但会使线路建设配套成本加大，车辆配置的价格也更高，显然不符合经济性的设计原则。因此，平均旅行速度的选取既要满足顶层技术目标，又要经济合理。

最高运行速度是影响平均旅行速度较为关键的因素之一。在“大站停”运行模式下，车辆需以最高运行速度长时间持续运行，以期获得较高的平均旅行速度，提高运营效率。车辆的最高运行速度需要根据运输组织及线路的实际情况，如站间距、曲线半径、坡度等因素来决定，其中站间距为主导因素。通常设计最高速度运行距离占站间距 1/2 以上比较合适，速度－站间距适宜关系如表 3 所示。目前我国规划内的城际铁路项目，站间距多在 5~10 km 之间。综合考虑“站站停”和“大站停”2 种运行模式以及城轨交通 80~120 km/h、高铁 200~350 km/h 的速度等级范围，城际动车组采用 140 km/h、160 km/h 和 200 km/h 速度等级可完全覆盖当前市域轨道交通中速度等级的空白，满足用户不同的需求。

表 3 最高速度—站间距适宜关系

最高运行速度 / (km·h ⁻¹)	120	140	160	200
适宜的站间距 /km	3.5	4.5	7.5	13.8

2.2 短站间距快启快停及频繁启停的能力

城际动车组在市区内行驶时需要经历“站站停”运行模式，这就要求车辆具备在较小的站间距内快启快停、频繁启停的能力，在较小的站间距实现快启快停是提高平均旅行速度的保证，能有效提高运营效率。

快启快停对牵引系统的另一个关键指标——加速度提出了较高的要求。“快启”要求车辆有较大的启动加速度，“快停”要求车辆有较大的电制动减速度，这就需要牵引系统在短时间内有强大的启动、制动扭矩输出，而启动、电制动工况均是电机发热较为严重阶段，所以“频繁启停”需要牵引系统具备较好的通风冷却能力。

另一方面，从电机设计原理来看，在电机输出功

率等级不变的前提下，要获得较大的启动转矩，则电机额定转速就会比较低；反之，若要获得较高的额定转速，则电机的启动转矩就不会很大；若要同时提高电机的额定转速和启动转矩，则需要提升电机的功率等级，相应会带来重量、安装尺寸、通风散热等方面的问题^[2-3]。所以，城际动车组需要根据实际线路特点及运营情况合理设计系统的牵引能力，以期获得最优设计方案，比如：CRH6A-200 型城际动车组，最高运行速度 200 km/h，0~40 km/h 平均加速度为 0.65 m/s²，而 CRH6F-160 型城际动车组，最高运行速度 160 km/h，0~40 km/h 平均加速度达 0.8 m/s²，所以 CRH6A-200 型车较适宜运营于相距 100 km 以上的区域城际主轴系统，而 CRH6F-160 型车则较适宜运营于相距 100 km 以下的都市圈城际通勤系统。

2.3 大坡道启动的能力

在城际线路设计时多考虑与地铁互联互通。城际线路坡道较多、坡度比较大，部分线路坡度可达到 30‰，这就对牵引系统的启动能力提出了严苛的要求。系统应能在 25% 动力损失且满载的条件下，满足可能出现的坡道启动情况，同时也应满足空车可救援满载车辆的坡道启动工况。

2.4 大载客量的能力

城际轨道交通介于干线网与城市轨道交通网之间，主要承担区域内城际间或大城市周边城际间的中短途客运，旅客人数多。为提高载客量，方便换乘，动车组应尽量减少部件数量，增大系统集成度，最大程度实现轻量化。大的载客能力意味着系统应具有大的功率水平，以搭载更多的旅客，应对早晚的客流高峰。

2.5 其他能力

城际动车组的牵引系统与高速动车组和地铁相比具有较强的适应性，它可根据不同的线路、运营工况，采取不同的设计方案，如受流系统可采用双流制，编组方式可以有 4 动 4 拖、4 动 2 拖、2 动 2 拖等，必要时还可以多组重联，满足不同牵引运输能力需求。

3 CRH6 系列城际动车组牵引系统平台方案

通过对城际线路的国内外发展现状及其牵引特点分析可以看出，运行速度等级为 140 km/h、160 km/h、

200 km/h 的城际动车组已完全可以覆盖当前城际轨道交通用户的需求。城际动车组牵引系统应具有大启动扭矩、大牵引功率的特点, 各部件需高度集成化、轻量化设计。

3.1 CRH6A-200 型城际动车组牵引系统方案

CRH6A-200 型动车组采用 8 编组, 4 动 4 拖型式, 为动力分散型交流传动系统, 牵引系统采用车控方式,

主要由牵引变压器、主变流器、牵引电机、齿轮传动机构等组成, 如图 1 所示。以 2 台动车为 1 个基本动力单元, 每个动力单元由 1 台牵引变压器、2 台主变流器和 8 台牵引电机构成, 其中每台主变流器驱动 4 台牵引电机。

CRH6A-200 型动车组制动为电空复合模式, 以电制动为主, 不足部分由空气制动补足, 常用制动过程中电制动参与的比例较高, 再生电制动能力利用较为充分。

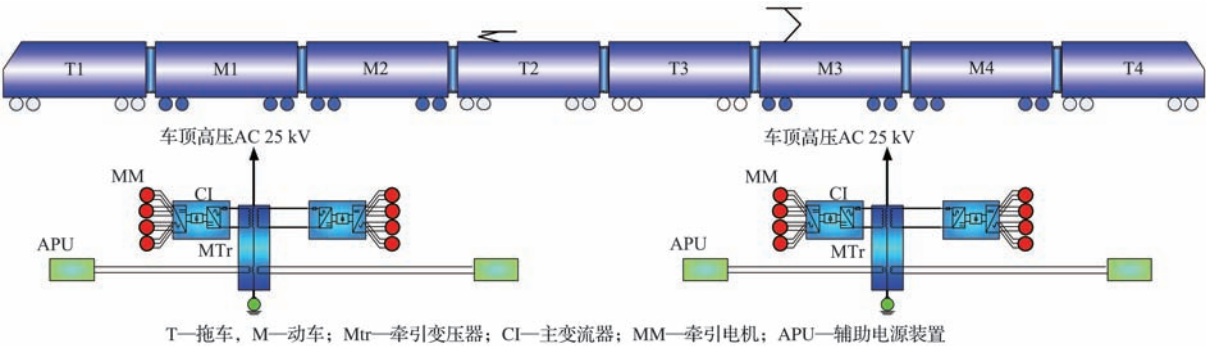


图 1 CRH6A-200 型城际动车组牵引系统结构图

3.1.1 牵引特性

根据牵引性能需求, 在确保可用粘着的基础上, 设置传动比为 4.316 和牵引电机启动扭矩 1 850 N·m, 单电机最大输出功率 345 kW, 整车最大输出功率 5 520 kW, 从而保证牵引性能达到设计需求。牵引特性曲线如图 2 所示。

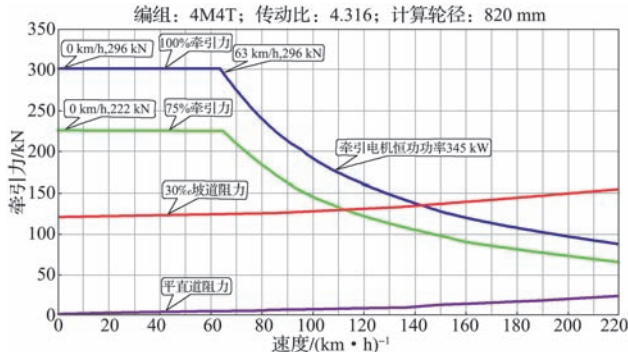


图 2 CRH6A-200 型城际动车组牵引特性曲线

加速性能: 0~40 km/h 平均加速度为 0.652 m/s², 0~200 km/h 平均加速度为 0.357 m/s²。

3.1.2 再生制动特性

在 CRH2A 型动车组电机制动特性基础上, 提高了电制动能力。将牵引电机的最大制动轮轴功率设置为 565 kW, 高于电机的最大牵引功率 345 kW。再生制动

特性曲线如图 3 所示。

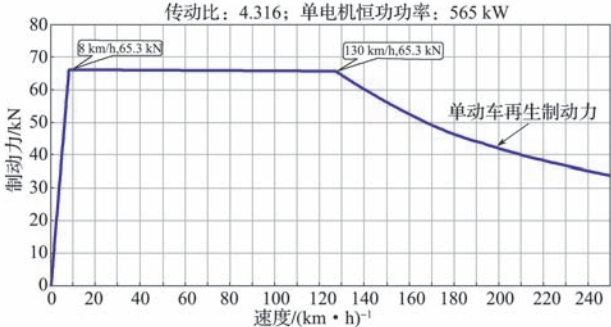


图 3 CRH6A-200 型城际动车组再生制动特性曲线

3.2 CRH6F-160 型城际动车组牵引系统方案

CRH6F-160 型城际动车组采用 4M4T 编组型式, 架控模式, 为动力分散型交流传动系统, 如图 4 所示。考虑灵活编组, 以 1 台动车为 1 个基本动力单元, 每个动力单元由 1 台牵引变压器、1 台主变流器和 4 台牵引电机构成, 其中每台主变流器逆变器分别驱动 2 台牵引电机, 可满足 4 编组、6 编组等要求。

3.2.1 牵引特性

根据牵引性能需求, 在确保可用粘着基础上, 设置传动比为 4.44 和牵引电机启动扭矩 2 540 Nm, 单电机最大输出功率 322 kW, 整车最大输出功率 5 152 kW, 从而保证牵引性能达到设计需求。牵引特性曲线如图 5 所示。

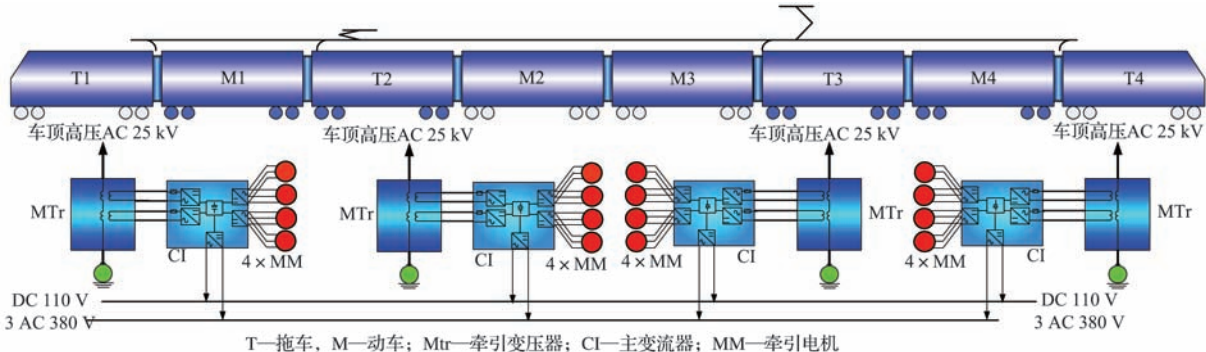


图 4 CRH6F-160 型城际动车组牵引系统结构图

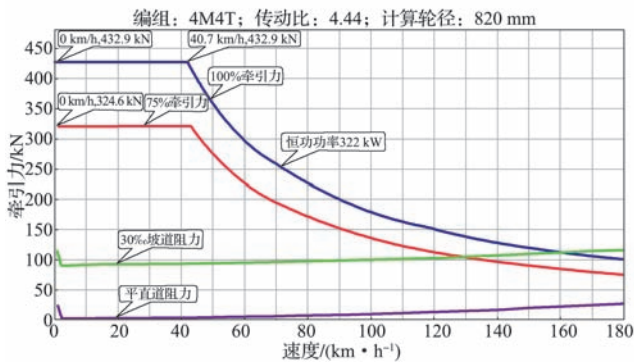


图5 CRH6A-160型城际动车组牵引特性曲线

加速性能：0~40 km/h 平均加速度为 0.8 m/s^2 ，0~160 km/h 平均加速度为 0.38 m/s^2 。

3.2.2 再生制动特性

将牵引电机的最大制动轮轴功率设置为 400 kW，高于电机的最大牵引功率 322 kW，约为牵引功率的 1.24 倍。根据单电机制动特性及变流器制动能力绘制的 1 台动车电制动曲线如图 6 所示。

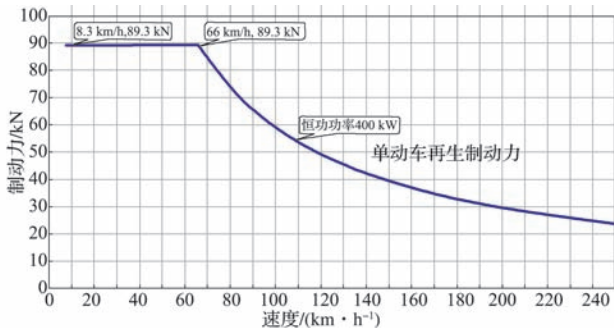


图6 CRH6A-160型城际动车组再生制动特性曲线

3.3 140 km/h 城际动车组牵引系统方案

140 km/h 城际动车组采用 2M2T 编组型式，架控模式，为动力分散型交流传动系统，如图 7 所示。考虑灵活编组，以 1 台动车为 1 个基本动力单元，每个动力单元由 1 台牵引变压器、1 台主变流器和 4 台牵引电机构成，其中每台主变流器逆变器分别驱动 2 台牵引电机，可满足 4 编组、6 编组等要求。

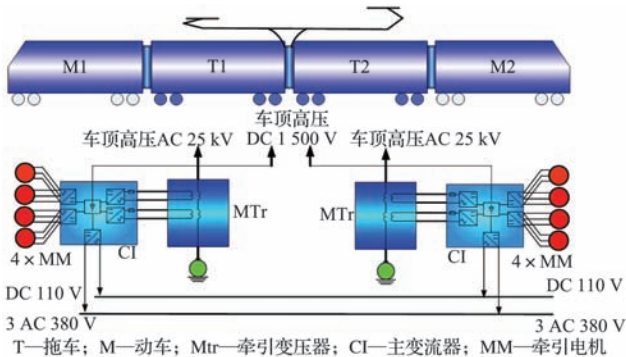


图7 140 km/h 城际动车组交流传动系统

3.3.1 牵引特性

根据牵引性能需求，在确保可用粘着基础上，设置传动比为 4.94 和牵引电机启动扭矩 $2\,540 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，单电机最大输出功率 300 kW，整车最大输出功率 2 400 kW，从而保证牵引性能达到设计需求。牵引特性曲线如图 8

所示。

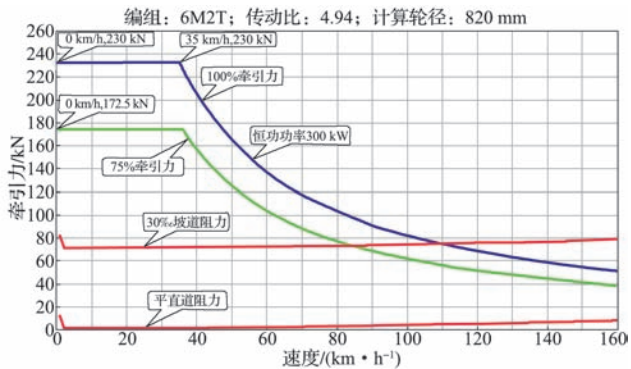


图8 CRH6-140型城际动车组牵引特性曲线

加速性能：0~40 km/h 平均加速度 0.82 m/s^2 ，0~140 km/h 平均加速度 0.40 m/s^2 。

3.3.2 再生制动特性

将牵引电机的最大制动轮轴功率设置为 400 kW(AC)/360 kW(DC)，高于电机的最大牵引功率 300 kW。根据单电机制动特性及变流器制动能力绘制的 1 台动车电制动曲线如图 9 所示。

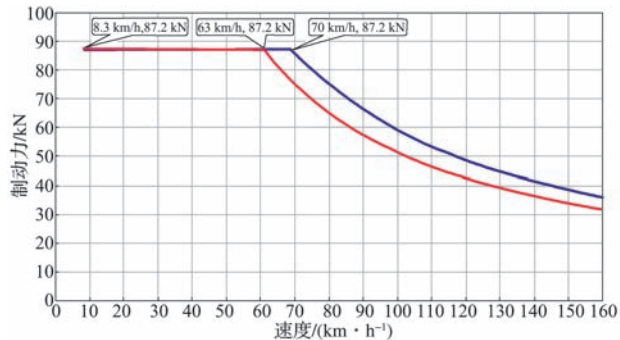


图9 140 km/h 型城际动车组再生制动特性曲线

4 设计验证及运用考核

为验证牵引系统特性方案及部件方案的正确性及适应性，在设计过程中对单个部件及系统进行了大量的仿真及试验工作，包括部件的仿真、部件试验、系统仿真及系统组合试验等。各项试验依照 IEC 国际标准进行，试验均顺利通过。设计验证过程见图 10。

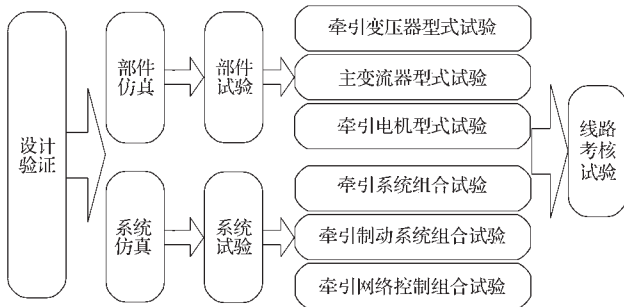


图10 设计验证工作树

4.1 设计验证

4.1.1 部件设计仿真

在城际动车组的设计过程中，对牵引变压器、主变流器、牵引电机进行了仿真分析，包括牵引变压器的箱体强度仿真分析、温升分析；主变流器的箱体强

度仿真分析; 牵引电机的温升分析、吊挂强度分析、冷却风量分析等。

4.1.2 系统设计仿真

以珠三角莞惠线路条件, 对 CRH6A-200、CRH6F-160 城际动车组进行了典型线路牵引系统线路仿真, 校验了系统性能, 确认其可满足线路运行需求。计算条件及结果如图 11、图 12 所示。

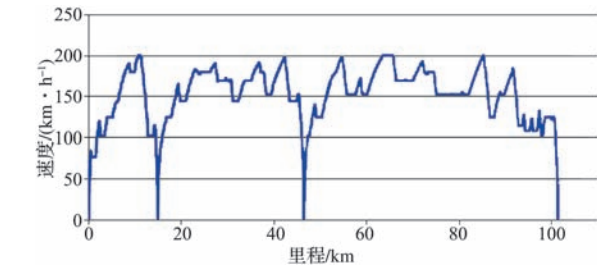


图 11 CRH6A-200 莞惠线路仿真运行曲线

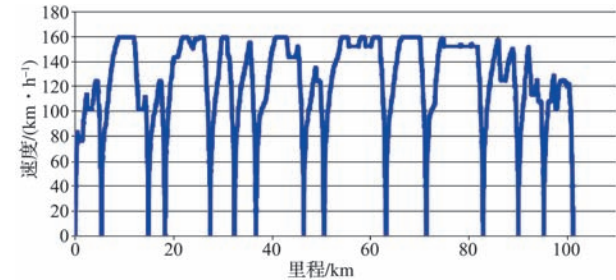


图 12 CRH6F-160 莞惠线路仿真运行曲线

莞惠线路条件大致如下: 莞惠线总长 101.2 km, 共 15 站, 大站停运行模式, 中间停 2 站, 以 CRH6A-200 型城际动车组进行线路仿真计算。

线路仿真结果: 旅行时间为 45 min, 平均旅行速度为 135 km/h。

莞惠线总长 101.2 km, 共 15 站, 站站停, 平均站距 7.23 km, 最小站距为 3.342 km, 以 CRH6F-160 型城际动车组进行线路仿真计算。

线路仿真结果: 旅行时间为 66 min; 平均旅行速度为 93 km/h。

4.1.3 部件试验

对牵引变压器、主变流器、牵引电机进行了 IEC 国际标准型式试验, 并顺利通过。试验相关标准及主要试验项目点见图 13。



图 13 部件试验相关标准及项目

4.1.4 系统组合试验

组织实施了牵引系统各部件的组合试验、牵引制动组合试验、牵引系统与网络通信协议匹配试验, 在地面验证牵引部件的匹配性、实际输出与设计牵引特性曲线的复合性及牵引系统各部件与其他系统的匹配性。试验结果显示, 城际动车组牵引系统牵引及制动工况实测特性与设计特性要求差异小于 10%, 满足特性曲线要求。

4.2 运用考核

为确保城际动车组正式运营后的可靠性, 对 CRH6A 型城际动车组及 CRH6F 型城际动车组在既有线路上已经进行了约 1 年的线路考核试验。

截止到 2014 年 8 月 21 日, CRH6A 实际考核里程 33.56 万 km, 其中空载 9.77 万 km、重载 7.8 万 km、载客运 15.99 万 km。截止到 2014 年 9 月 19 日, CRH6F 运用考核已完成 88 112 km, 其中空载 50 692 km、重载 37 420 km, 考核过程中城际动车组整体运行性能良好、安全可靠。

5 结语

根据各地区城际轨道交通线路条件、客流量以及站站停和大站停等运营模式的不同, CRH6 型城际动车组系列产品可以同时覆盖不同的速度等级、不同的供电制式、不同的编组形式, 牵引系统平台技术成熟稳定可靠、性能优异、性价比高, 可以满足各种城际线路的运行要求。

CRH6 系列城际动车组其牵引系统基于国际标准进行设计并验证, 系统具备完善的保护功能, 可确保设备稳定运行; 系统加减速速度大, 可满足快启快停、频繁启停等使用工况的要求; 牵引系统动力单元的划分使设备轻量化、体积小、功能设置集中、易扩展、成本低; 再生制动功率大, 闸瓦损耗低, 维修成本低。

CRH6 型城际动车组具有优良的牵引性能, 是城际、市域交通解决方案的绝佳选择。

参考文献:

[1] 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): 10–15.

[2] 任晋旗, 葛琼璇, 李耀华. CRH2 型动车组牵引系统电机控制策略研究 [J]. 铁道机车车辆, 2008(28): 109–113.

[3] Cheok A, Kawamoto S, Matsumoto T, et al. AC Drive with Particular reference to traction drives [J]. Fourth International Conference on APSCOM, 1997(1): 348–353.

[4] TB/T 1407—1998, 列车牵引计算规程 [S].

[5] 黄国盈. 铁道轮轨黏着系数 [J]. 铁道机车车辆, 2010(30): 17–25.