

试
验
检
测

高速试验动车组牵引系统设计研究

徐广伟

(南车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 山东 青岛 266111)



作者简介：徐广伟（1968-），女，高级工程师，现从事轨道交通车辆电气系统的研发设计工作。

摘 要：试验动车组牵引系统采用满足欧标要求基于异步交流电机的牵引系统进行性能测试和高速试验，从牵引系统的系统结构组成及关键部件技术参数的设计进行分析、验证。试验动车组牵引系统部件系统性能良好，满足顶层指标的要求。

关键词：试验动车组；牵引系统；动力配置；试验验证

中图分类号：U266；U292.91+4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2012)03-0037-05

Traction System Design of High Speed Test EMUs

XU Guang-wei

(Technology Center, CSR Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: The traction system of test EMUs used for performance and high speed test was based on asynchronous AC motor and satisfied with EN standard. Technical parameter design on system structure and critical components of the traction system were analyzed and verified, which validated had good performance and satisfied the highest level requirements.

Key words: test EMUs; traction system; power configuration; test verification

0 引言

试验动车组牵引系统采用满足欧标要求基于异步交流电机的牵引系统进行性能测试和高速试验。牵引传动系统是确保试验动车组高速、安全、可靠运行的最关键系统之一，为试验动车组提供充裕的动力牵引能力和再生制动能力。下面从试验动车组的牵引传动系统方案设计和试验验证两个方面进行分析。系统的方案设计是按照试验动车组顶层指标对于动力性能的要求，进行系统的牵引特性计算及部件的容量计算。

1 牵引系统主要技术要求

牵引系统主要技术要求如下：

最高线路试验速度	550 km/h
最高运营速度	450 km/h
持续运营速度	400 km/h
平直道上0~300 km/h的平均启动加速度	$> 0.50 \text{ m/s}^2$
平直道上的剩余加速度，在500 km/h时	$> 0.05 \text{ m/s}^2$
传动比	1.944

动车组质量	348 t
轮径	920 mm
编组	6M0T

2 牵引系统技术方案

依据现有的CRH₂型动车组平台基础，根据顶层指标和总体技术要求结合新车体的阻力公式、轴重以及传动效率计算出列车需要的总牵引功率，再通过对国外高速车的分析，最终确定试验动车组的牵引功率。

依据确定的总牵引功率，结合现有的技术平台合理匹配出试验动车组的牵引系统配置。

根据牵引系统的配置，对关键部件（牵引变压器、主变流器、牵引电机）的能力提升进行分析，制定可行的部件实施方案。

依据部件的技术特点和国内外成功的经验，匹配出合理的牵引系统，校核牵引系统的性能，对牵引系统进行试验验证，保证牵引系统的可靠性。

2.1 牵引功率的确定

2.1.1 牵引计算

根据顶层输入指标，通过牵引特性计算进行牵引

能力的计算,所需牵引力按照下列公式计算:

$$F = G(1+\gamma) \cdot \alpha + G \cdot w \quad (\text{N})$$

式中: α ——剩余加速度, m/s^2 ; G ——编组整体质量, t ; w ——运行阻力, N/t ; γ ——列车惯性系数。

在确定以上参数后进行相关计算,确定牵引力大小。根据 $P = F \cdot V$,传动效率为 0.95,确定牵引功率为 14 400 kW (正常)/21 120 kW (短时),根据编组形式,单电机的功率为 600 kW (正常)/880 kW (短时)。

2.1.1.1 牵引特性曲线

根据整车的牵引特性的需求,阻力计算公式为 $w = 5.39 + 0.0441V + 0.00115V^2 (\text{N/t})$ 的前提下,进行牵引特性的设定并进行牵引计算,根据计算的牵引系统容量设定高速试验和正常运行的牵引特性如图 1 所示。

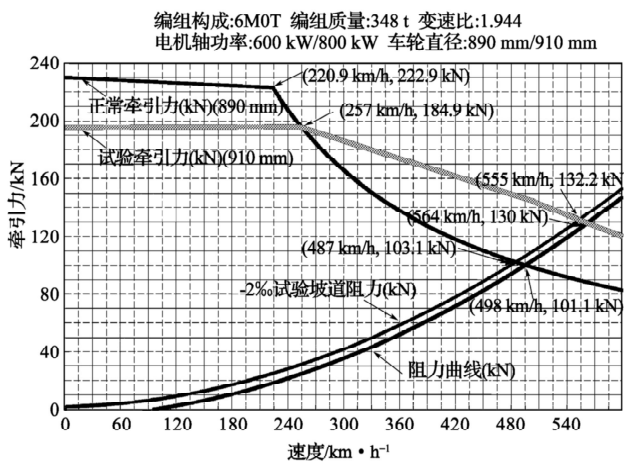


图 1 牵引特性曲线

表 2 国内外高速试验动车组部分数据

动车组	动力方式	试验时间	最高速度 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	总功率 / kW (额定 / 短时)	单位功率 / $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$	短时轴功率 / kW (4 轴 / 车)	说明
法国 AGV	集中 + 分散	2007-04	575	13 000/19 600	73.0	980	5 辆编组
法国 TGV	集中	1990-05	515	8 800/12 800	49.5	640	5 辆编组
本试验动车组	分散	2011	500	14 400/21 120	60.7	880	6 辆编组

2.2.1 牵引动力单元配置

通过牵引计算及结合国外高速列车的经验确定的试验动车组电机额定轴总功率 14 400 kW/21 120 kW (短时),继承可靠的 CRH₂ 型车单元组成结构,根据 6 辆编组方式,列车动力单元配置如图 2 [电机额定轴总功率 14 400 kW/21 120 kW (短时)]。



图 2 单元配置

2.2.2 牵引设备容量计算

2.2.2.1 计算方法

按照车辆的最大牵引性能求得必要的车轮踏面的输出功率,利用各设备的效率、功率因数及图 1 中所示的关系式,按牵引电机→主变流器→牵引变压器的顺

2.1.1.2 计算结果

按照牵引功率的配置额定和短时工况的计算结果如下表 1。

表 1 牵引功率及牵引力参数计算

速度 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	牵引力 / kN	剩余加速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	牵引功率 / kW
400	123.120	0.139	14 400
450	109.440	0.053	14 400
500	180.127	0.082	21 120

2.1.2 国内外高速试验动车组对比分析

根据不同类型、动力分配方式,对几种高速试验动车组试验数据归纳如表 2 所示。

通过表 2 高速试验车的数据分析可知,列车若要满足试验速度到达 500 km/h 以上,动车组单位牵引能力应在 50 kW/t 左右。将国外高速试验的铰接转向架列车的牵引功率按照 4 轴/车进行折算,速度达到 500 km/h 的单轴功率约在 640 kW 以上。

根据试验车牵引计算确定的列车总功率及车重计算,单位牵引能力为 60.7 kW/t 左右,超过了有实际业绩的法国 515 km/h 的 49.5 kW/t 单位牵引能力的列车。

2.2 牵引系统配置

试验动车组的牵引动力单元设置,采用每个动力单元 (2 辆动车) 由 1 台牵引变压器、2 台主变流器、8 台牵引电机的组合,具有轻量化、体积小、功能设置集中、易扩展的特点。

序求得各设备的最大功率。进行此计算时,将功率因数与效率假定为定值,计算结果为估算值。主电路系统容量推算图见图 3。

部件效率及功率因数估算值如下:

牵引变压器功率因数	$P_{\text{TR}} \approx 1$
脉冲整流器效率	$\eta_{\text{conv}} \approx 0.99$
逆变器效率	$\eta_{\text{inv}} \approx 0.99$
齿轮箱效率	$\eta_{\text{Gear}} \approx 0.95$
牵引电机功率因数	$P_{\text{MM}} \approx 0.87$
牵引电机效率	$\eta_{\text{MM}} \approx 0.94$

2.2.2.2 容量计算结果

根据需要,牵引特性分为正常运营特性和冲击高速 (短时) 特性。考虑牵引变压器、主变流器、牵引电机的效率及功率因数,分别计算结果如表 3 所示。

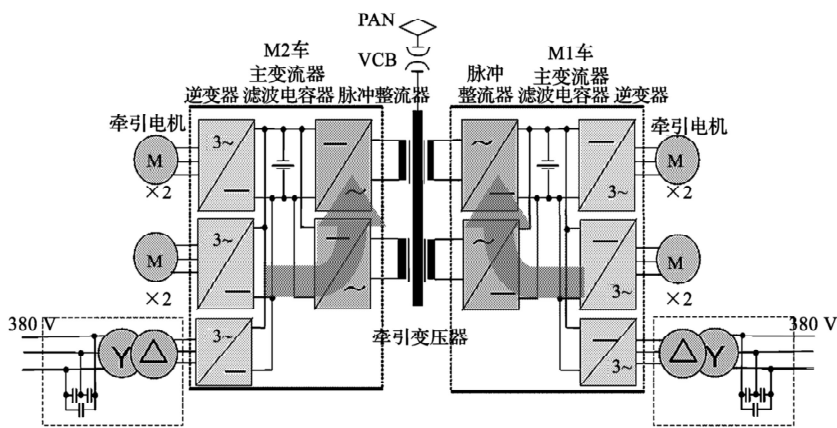


图 3 主电路系统容量推算图

表 3 牵引设备容量

额定工况（网压 25 kV）		高速试验工况（网压 27.5 kV）	
参数	数值	参数	数值
电机功率/kW	600	电机功率/kW	880
电机输入电压/V	2 730	电机输入电压/V	2 845
电机输入电流/A	155	电机输入电流/A	218
主变流器输入电压/V	2 121	主变流器输入电压/V	2 333
主变流器输入电流/A	2 × 698	主变流器输入电流/A	2 × 900
牵引变压器容量/kVA	6 000	牵引变压器容量/kVA	8 430

2.2.3 牵引系统的特点

牵引系统具有以下特点：

- ①主辅一体化设计；
- ②逆变器控制电机采用架控方式；
- ③同一单元内的 2 台主变流器之间采用载波移相控制策略，实现整车所有整流器构成多重化运行；
- ④电机控制采用直接力矩控制；
- ⑤过无电区辅助系统不间断供电控制(速度在 50 km/h 以上)。

2.3 牵引系统部件的分析

2.3.1 牵引电机

2.3.1.1 强度仿真计算

为核算牵引电机的机座悬挂的机械强度，牵引电机机座采用有限元分析计算，牵引电机机座强度分析结果见图 4。

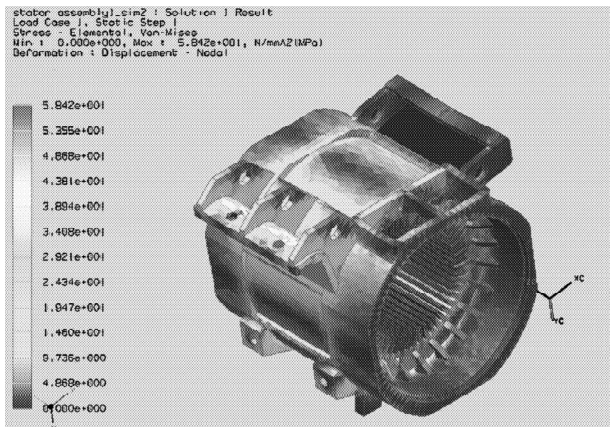
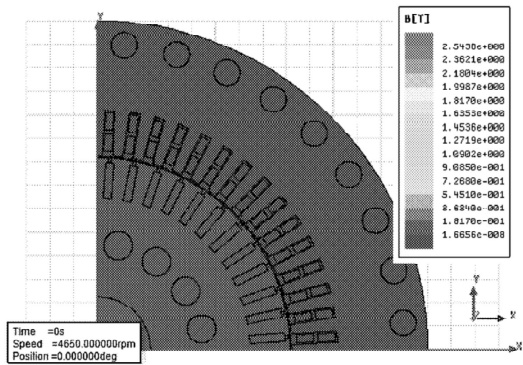


图 4 牵引电机强度仿真

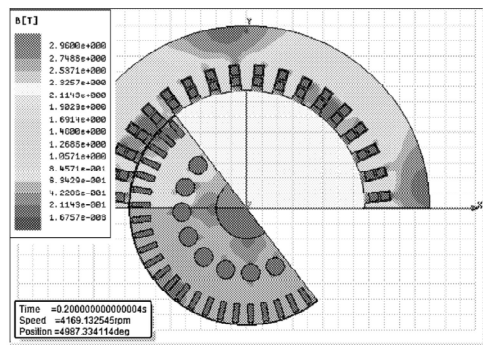
通过图 4 的机座强度分析可知，吊挂在给定运行载荷(垂直加速度 10g，横向加速度 3g，纵向加速度 2g) 工况下，最大应力值为 58.4 MPa，低于机座悬挂材料(GS20Mn5)的屈服强度 300 MPa，满足强度要求。

2.3.1.2 磁密计算—电磁有限元分析

在额定点对试验动车组电机和新—代电机的电磁场分布均匀程度进行电磁场对比分析，磁密大小基本一致，如图 5 所示。



试验动车组



CRH380A

图 5 牵引电机电磁有限元分析

额定点电磁参数对比如表 4 所示。

表 4 牵引电机磁通量密度对比

磁密	CRH380A 电机	试验动车组电机
气隙磁通量密度	0.783	0.737
定子齿部磁通量密度	1.357	1.117
定子轭部磁通量密度	1.291	1.144
转子齿部磁通量密度	1.546	1.444
转子轭部磁通量密度	1.035	0.910

从以上的对比数据可得结论：试验动车组牵引电机的各部分磁通量密度设计与 CRH380A 相当，满足高速试验动车组要求。

2.3.1.3 温升试验

电机设计时，根据定子发热因素来控制电机温升。环境温度为 30 ℃，温升仿真计算(模拟计算电机功率工作时间, 0~880 kW 约 109 s, 880 kW 恒功约 968 s, 等效计算后相当于 670 kW 电机持续运行约 30 min)。牵引电

机的温升仿真如图6所示。

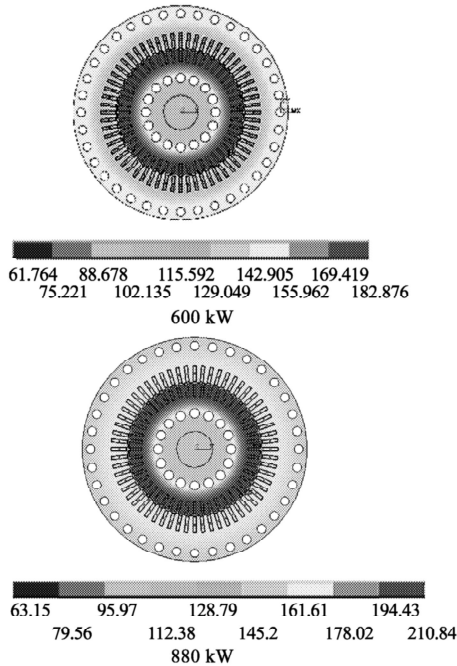


图6 牵引电机温升仿真

试验结果如表5所示。

表5 牵引电机温升仿真结果

运行状态	定子绕组温度/℃		定子绝缘温度/℃	
	最高温度	最低温度	最高温度	最低温度
600 kW, 4 636 r/min	171.8	165.2	171.8	107.4
670 kW, 4 907 r/min	180.1	173.4	180.1	111.7

在设计通风量 $46 \text{ m}^3/\text{min}$ 条件下, 计算表明电机温升符合设计要求(电机的温升限值为 200 K)。

2.3.2 主变流器

2.3.2.1 强度计算

为了验证主变流器的强度是否满足试验动车组的要求, 对其进行强度仿真计算, 计算结果如图7所示。

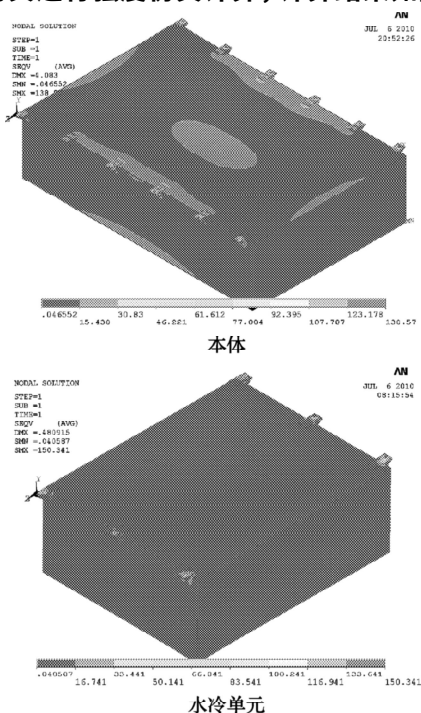


图7 主变流器强度仿真

从图7中可以看出, 主变流器本体最大应力为 139 MPa , 水冷装置最大应力为 150 MPa , 低于材料Q345的屈服强度 345 MPa , 满足设计要求(GB/T 21563—2008)。

2.3.2.2 高速试验功率提高分析

试验动车组主变流器中, 逆变器部分采用架控方式(1个逆变器模块带1个转向架的2台电机), 即主变流器输出的最大电流约 436 A 。按照其额定输入电压、中间电压、输出电压计算, 其输出功率不能满足高速试验时, 牵引电机功率由 600 kW 提升至短时 880 kW , 过载幅度 46% 。为此, 拟采取如下措施来满足牵引功率的需求(表6)。

表6 主变流器高速试验计算值

列车工况	整流器输入电流/A	逆变器输出电流/A	整流器输入电压/V	中间直流环节电压/V	逆变器输出电压/V
额定(网压25 kV)计算值	2×698	2×310	2 121	3 500	2 730
高速试验(网压27.5 kV)计算值	2×900	2×436	2 333	3 650	2 840

2.3.3 牵引变压器

2.3.3.1 强度仿真计算

试验动车组牵引变压器本体、吊座和冷却装置的安装架的材料为Q345A, 屈服强度 345 MPa 。为了校核牵引变压器各部件的强度, 牵引变压器油箱及安装架强度采用了有限元计算分析, 其计算结果如图8所示。

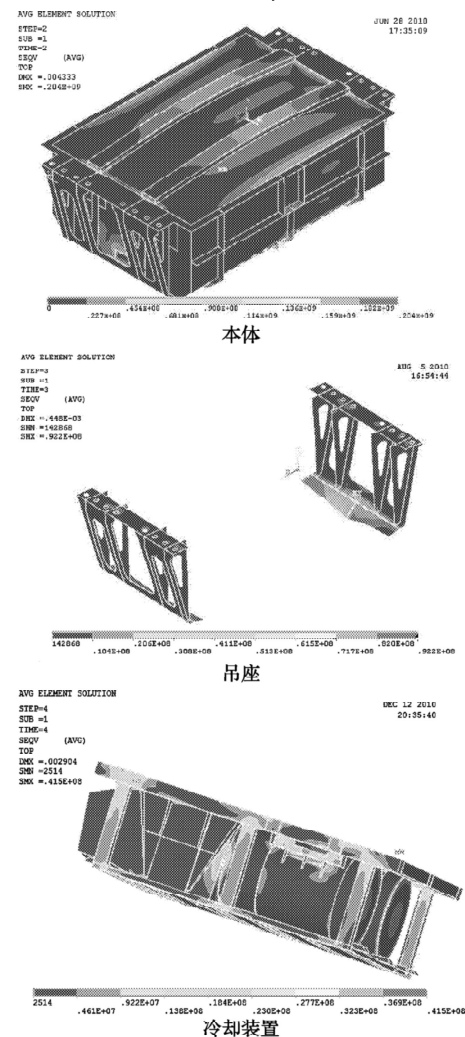


图8 牵引变压器强度仿真

在垂向3g、横向3g、纵向5g冲击条件下：

牵引变压器本体最大应力为192 MPa；

吊座最大应力为92.2 MPa；

冷却装置最大应力为41.5 MPa。

上述各设备最大应力均低于其材料Q345屈服强度345 MPa,满足设计要求(GB/T 21563—2008)。

2.3.3.2 温升仿真计算

牵引变压器温升仿真计算如图9所示。

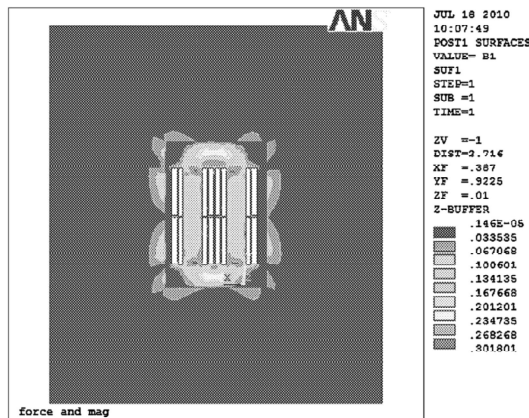


图9 牵引变压器温升仿真

计算结果(额定工况为6 000 kVA)如表8所示。

表8 牵引变压器温升仿真结果 K

项目	温升值	温升标准
一次绕组	64.9	95
二次绕组	80.1	95
油温升	45.7	65

经仿真计算表明,牵引变压器的冷却系统满足设计要求。

2.3.3.3 短时功率提升分析说明

定性分析:CRH₂型300 km/h动车组京津线高速试验时,网压27.5 kV,牵引变压器过载33%,试验后牵引变压器性能正常。试验动车组冲击高速试验时的容量同样是在额定的基础上提高33%,电磁参数及设计余量与CRH₂型动车组变压器相当。因此,网压27.5 kV的条件下,能够承受冲击高速试验过载33%(对应牵引电机功率880 kW)的工况。

通过上述对牵引系统的计算、仿真分析,表明关键部件设计符合系统设计要求,系统匹配符合指标要

求。

2.4 试验验证

为验证试验动车组的主变流器、牵引变压器和牵引电机组成的牵引系统正常发挥牵引、再生制动功率,达到规定的牵引性能,各项指标均符合要求,进行了牵引系统的地面组合试验。

地面组合试验内容主要包括:满档牵引/再生特性试验,输出限制功能动作试验,网压短时中断试验,网压突变试验,斩波动作试验,接地保护动作试验,功率因数的测试,网线停电试验,载波相位确认试验,牵引系统损耗试验。

通过对牵引系统部件的性能分析及牵引系统组合试验验证,试验动车组牵引系统部件系统性能良好,满足试验动车组的要求。

3 结语

试验动车组牵引系统是在既有CRH₂动车组牵引系统技术平台基础上进行的自主创新设计。该设计方案继承了既有CRH₂动车组牵引系统成熟的技术平台,是在充分考虑系统和部件可靠性、安全性基础上进行的牵引性能提升创新设计。

为保证试验动车组牵引系统的可靠性、安全性,试验动车组牵引系统以仿真计算、地面试验等形式进行了装车前性能验证。装车前进行的试验验证结果显示,试验动车组牵引系统满足设计试验考核要求,系统性能良好。后期还将进行进一步的整车线路型式试验,对牵引系统部件进行长期运行跟踪考核。

参考文献:

- [1] 纳霍德金. 牵引电机设计 [M]. 北京:中国铁道出版社,1983.
- [2] Sudhoff S D, Kuhn BT, Corzine k A, et al. Magnetic equivalent circuit modeling of induction motors [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2):259-270.
- [3] 钱照明, 盛 况. 大功率半导体器件的发展与展望 [J]. 大功率变流技术, 2010(1):1-9.
- [4] 荣智林, 忻 力, 陈燕平, 李 华. TGA型主辅一体化IGBT变流器 [J]. 机车电传动, 2010(5):25-28.
- [5] 杨建华, 高 军. 考虑磁饱和影响的同步发电机励磁电流计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009(4):104-108.