

研
究
开
发新一代 CRH380CL 型高速动车组
牵引系统参数设计

王华伟, 常振臣, 王金田

(长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)



作者简介：王华伟(1981-), 男, 硕士, 工程师, 目前主要从事高速列车牵引系统设计。

摘 要：介绍了 CRH380CL 型高速动车组牵引系统的性能指标及基本组成, 阐述了牵引系统各部件主要参数的设计方法, 最后通过线路仿真、地面联调试验和线路试验对牵引系统进行了验证。

关键词：CRH380CL 型高速动车组; 牵引系统; 参数设计; 仿真; 试验

中图分类号：U292.91⁺4; U266.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2012)04-0006-04

Traction System Parameter Design of New-generation
CRH380CL High-speed EMUs

WANG Hua-wei, CHANG Zhen-chen, WANG Jin-tian

(CNR Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: Traction system performance and main structure of CRH380CL high-speed EMUs were introduced. Design method of main parameters of traction components was expounded. Traction system was proved to meeting the technique requires by running line simulation, system tests on ground and running line test.

Key words: CRH380CL high-speed EMUs; traction syetem; parameter design; simulation; test

0 引言

随着我国高速铁路干线的陆续建成, 需要设计满足大客运量和新建线路条件的高速动车组。本文根据新一代 CRH380CL 型高速动车组的技术指标, 介绍了牵引传动系统的参数设计方法, 并对系统进行了试验验证。

1 整车性能指标

新一代 CRH380CL 型高速动车组是为速度 300 km/h 以上的高速铁路设计的车型, 根据技术合同要求, 整车性能指标如表 1 所示。

表 1 CRH380CL 型高速动车组性能指标

性能	数据
空车质量	约 900 t
满员质量	约 1 000 t
持续运营速度	350 km/h
最高运营速度	380 km/h
最高试验速度	420 km/h
平直道, 0~200 km/h 平均加速度	$\geq 0.4\text{m/s}^2$
速度为 350 km/h 时剩余加速度	$\geq 0.05\text{m/s}^2$
阻力公式	$R=0.000755mg+192.55v+11.6v^2$

收稿日期: 2012-02-26; 收修改稿日期: 2012-04-19

2 牵引系统参数设计

高速动车组牵引传动系统设计的基本思路是: 首先对列车牵引功率进行设计; 其次根据列车阻力、牵引功率、牵引力、启动加速度、列车启动平均加速度及列车最高速度等进行列车牵引特性设计; 最后确定牵引电机参数、主变流器参数及牵引变压器的参数。

2.1 牵引系统组成

新一代 CRH380CL 型动车组为 16 辆编组, 其中 1 车、3 车、6 车、8 车、9 车、11 车、14 车和 16 车为安装有牵引变

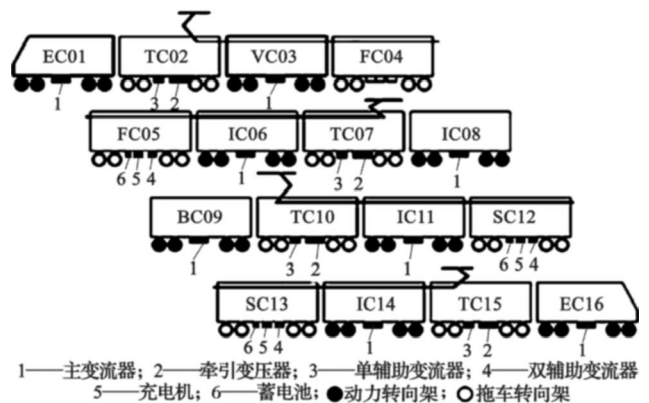


图 1 CRH380CL 型动车组编组示意图

流器及牵引电动机的动车。动车组分为4个牵引单元, 每个牵引单元包括1个带牵引变压器的拖车和2个相邻的动车。列车编组示意图如图1所示。

一个牵引传动系统主要由受电弓、牵引变压器、主变流器、牵引电机和齿轮传动系统等组成。牵引系统主电路结构图如图2所示。

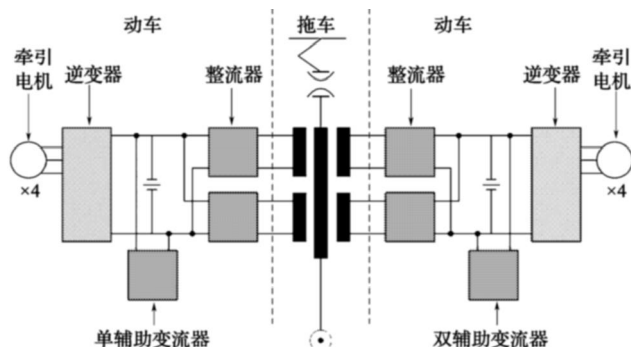


图2 牵引系统主电路结构图

2.2 牵引功率确定

列车牵引功率主要与列车运行速度、列车质量、最高速度时的列车运行阻力和剩余加速度相关, 如下式所示:

$$P = \frac{[R + (1 + \gamma) \times m \times 10^6 \times \Delta a] \times (v + \Delta v) \times 10^{-3}}{3.6}$$

式中: P 为列车牵引功率, kW; m 为列车质量, kg; R 为列车单位阻力, N; γ 为质量系数, 一般取 0.06~0.07; Δa 为剩余加速度, m/s^2 ; Δv 为逆风速度, m/s ; v 为列车速度, m/s 。

由表1可知, 列车最高运营速度为 380 km/h。为保留一定裕量, 设定列车满员时的平衡速度为 400 km/h, 根据上式即可求出最大牵引功率:

$$P_0 = 19\,111 \text{ kW}$$

最终选择最大牵引功率即最大轮缘输出功率 $P_{\max}$ 为 19 200 kW。

根据列车最大牵引功率、齿轮传动效率和牵引电机的效率, 可以按照下式计算出牵引电机的总输出功率:

$$P_M = \frac{P_{\max}}{\eta_{\text{Gear}}}$$

式中: P_M 为整车牵引电机的总功率, kW; η_{Gear} 为齿轮箱传动效率, 取 0.975;

根据上式求得牵引电机的总额定输出功率 P_M 为 19 692 kW。

2.3 牵引特性确定

为保证列车速度在 0~200 km/h 区间最大平均加速度不小于 0.4 m/s^2 , 并考虑乘客舒适度, 整车启动轮缘牵引力设置为 520 kN。计算得出整车计算性能指标如表 2 所示。

表2 CRH380CL 整车计算性能指标

性能	指标
启动加速度	0.48 m/s^2
0~200 km/h 区间最大平均加速度	约 0.42 m/s^2
速度为 350 km/h 时的剩余加速度	0.058 m/s^2
平直道的平衡速度	400 km/h

表2中的各项性能指标满足整车性能要求, 由此绘出的牵引特性曲线如图3所示。

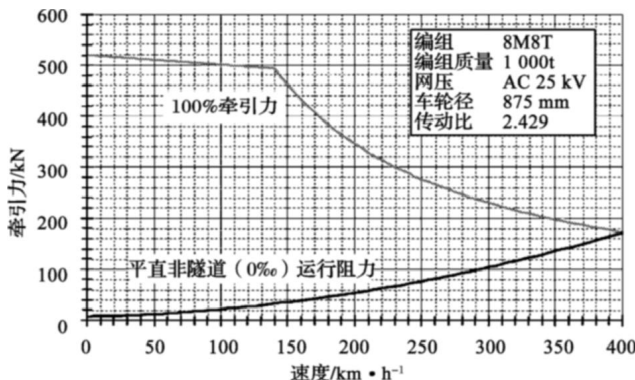


图3 CRH380CL 型动车组牵引特性曲线

2.4 牵引传动系统主要部件参数确定

2.4.1 牵引电机主要参数确定

1) 最大扭矩确定

由图1可知, 全列车具有8个动车, 每个动车装有4台牵引电机, 整车共装有32台牵引电机。由整车启动时的最大轮缘牵引力 520 kN 可以得出, 每个牵引电机的轮缘输出牵引力为

$$F_{MM} = \frac{520}{32} = 16.25 \text{ kN}$$

则牵引电机的最大启动力矩为

$$T_{MM} = \frac{F_{MM} \times D}{2 \times \alpha \times \eta_{\text{Gear}}} = 3\,002 \text{ Nm}$$

式中: T_{MM} 为牵引电机最大启动力矩, Nm; D 为轮对的直径, 取 0.875 m; α 为传动比, 取 2.429。

2) 额定功率确定

每台电机的额定输出功率为

$$P_{MM} = \frac{P_M}{32} = 615 \text{ kW}$$

3) 最高工作电压确定

主变流器的逆变器输出最大电压, 即牵引电机的最高线电压与主变流器中间直流环节电压的关系如下:

$$U = \frac{U_{dc} \times \sqrt{6}}{\pi}$$

式中: U 为牵引电机最高线电压, V; U_{dc} 为主变流器中间直流环节最高电压, V。

由 2.4.2 可知, U_{dc} 为 2 650 V, 求得 U 为 2 066 V。

4) 最高工作电流确定

电机的额定功率与电压及电流的关系如下:

$$P_{MM} = \sqrt{3} \times U \times I \times \eta_{\text{Gear}} \times \cos \varphi$$

式中: I 为电机的线电流, A; $\cos \varphi$ 为电机的功率因数, 取 0.88。根据上式求得, 电机的额定电流为 208 A。

5) 最高转速确定

电机转速与列车速度的关系如下:

$$v = \frac{60 \times \pi \times D \times n}{\alpha \times 10^3}$$

式中: v 为列车速度, km/h; n 为电机转速, r/min。

列车需满足在最大轮径为 0.92 m 时, 最大试验速度为 420 km/h, 根据上式求得电机转速为 5 886 r/min。最终选择电机最高转速为 5 900 r/min。

2.4.2 主变流器主要参数确定

1) 容量确定

牵引逆变器的负载为每个动车的 4 个牵引电机, 故逆变器的容量:

$$P_1 = 4 \times \sqrt{3} \times U \times I = 2\,977 \text{ kVA}$$

式中: P_1 为逆变器的容量。

由图 2 可知, 主变流器除了给牵引电机提供能量外, 中间直流环节还给辅助变流器供电, 正常情况下 1 台主变流器最多给 2 台辅助变流器供电。当牵引单元的一台主变流器故障, 为保证各车的中压供电正常, 另一台主变流器同时给 3 台辅助变流器供电, 此时牵引变流器的容量最大, 则有:

$$P_c = \frac{P_1 \times \cos \varphi}{\eta_{\text{INV}}} + 3 \times P_{\text{APS}}$$

式中: P_c 为主变流器的整流器的最大输出容量, kW; η_{INV} 为逆变器的效率, 取 0.985; P_{APS} 为一台辅助变流器的最大容量, 取 136 kW。

根据上式, 求得 P_c 为 3 112 kW。

2) 中间直流环节电压的确定

主变流器采用电压等级为 4 500 V 的 IGBT, 施加到 IGBT 上的最大电压需满足下式:

$$U_{\text{dc}} + \Delta V < 4\,500 \times 0.9 \text{ (保留 10\% 的裕量)}$$

式中: ΔV 由 IGBT 的特性决定, 此处取 700 V, 则可以求得 $U_{\text{dc}} < 3\,350$ V。为保护元件, 主变流器的中间直流环节设置两级保护, 当直流电压高于 2 950 V 时, 逆变器停止工作; 当直流电压高于 3 200 V 时, 整流器停止工作, 直流环节电压上限设置为 2 785 V, 考虑直流环节电压 5% 的波动, 最终确定直流环节电压为 2 650 V。

3) 滤波电容的选择

主变流器通过中间直流环节的滤波电容吸收频率为 100 Hz 的 2 次谐波成分。考虑直流环节电压 5% 的波动范围, 在主变流器最大容量时, 为保证控制的稳定性, 按下式选择滤波电容:

$$\Delta V_{\text{dc}} = \frac{P_c}{\omega_{100 \text{ Hz}} \times C \times V_{\text{dc}}}$$

式中: ΔV_{dc} 为直流环节的电压波动, 取 $2\,650 \times 5\% = 133$ V;

$\omega_{100 \text{ Hz}}$ 为 2 次谐波的角频率, 取 $2 \times \pi \times 100$; C 为滤波电容的最小值; V_{dc} 为中间环节额定电压, 取 2 650 V。

则根据上式可求得 C 为 14 060 μF 。为保留一定裕量, 最终选定的滤波电容值为 15 758 μF ($1\,072 \mu\text{F} \times 14 + 750 \mu\text{F} \times 1$)。

2.4.3 牵引变压器参数确定

1) 容量确定

如图 2 所示, 牵引变压器的负载为 1 个牵引单元, 包括 2 台牵引逆变器和 3 台辅助变流器, 牵引变压器的容量按下式计算:

$$P_{\text{TR}} = \frac{2 \times P_1 \times \cos \varphi / \eta_{\text{INV}} + 3 \times P_{\text{APS}} / \eta_{\text{APS}}}{\eta_{\text{conv}} \times \eta_{\text{TR}}}$$

式中: P_{APS} 为辅助变流器的效率, 取 0.9; η_{conv} 为主变流器的整流器的效率, 取 0.975; η_{TR} 为牵引变压器的效率, 取 0.965。

根据上式计算出牵引变压器的容量为 6 136 kVA。

2) 二次绕组电压确定

在 CRH380CL 型动车的技术合同中规定的接触网额定电压为交流 25 kV, 波动范围为交流 17.5~31 kV, 考虑接触网电压为 31 kV 时变压器也能正常工作, 直流环节电压与变压器二次电压满足如下关系:

$$V_{\text{dc}} > \frac{\sqrt{2} \times U_2 \times 31}{25}$$

式中: U_2 为接触网电压 25 kV 时的变压器二次电压。

根据上式求得 $U_2 < 1\,511$ V, 再考虑到由变压器电感和电阻引起的压降, 最终确定在接触网电压为 25 kV 时, 变压器的二次电压为 1 350 V。

3 试验验证

3.1 列车行驶仿真

牵引特性曲线确定之后, 还必须根据实际线路图, 按照实际运行工况, 对牵引系统进行仿真分析, 验证是否能够满足实际线路的运营需求。为验证上述所确定的牵引特性曲线, 选取设计最高运营时速为 380 km/h 的京沪高铁线路做行驶仿真模拟。图 4 所示为北京—上海的行驶模拟示意图, 行驶仿真结果表明特性曲线及牵引系统的各主要部件能够满足实际运营的要求。

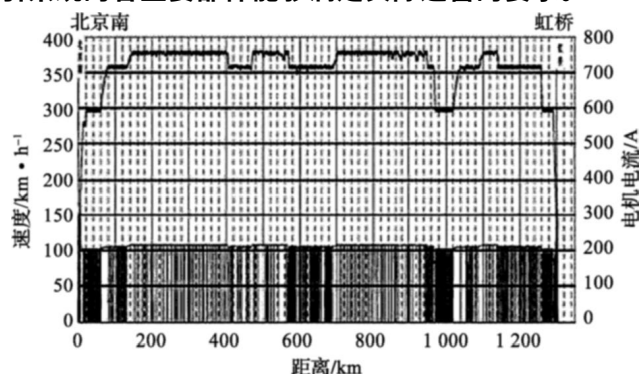


图 4 CRH380CL 型动车组京沪高速铁路路线行驶仿真

3.2 系统地面联调试验

在牵引传动系统的各主要部件设计完成后, 需要进行地面联调试验, 以进行实际的系统验证。2010年9月, 将1台主断路器、1台牵引变压器、1台主变流器、4台牵引电机及飞轮系统组合为一个动车的牵引系统后, 进行了地面联调试验。试验结果如图5所示。从图5中可以看出, 换算到整车的牵引力实测值和设定值一致, 说明牵引传动系统满足设计要求。

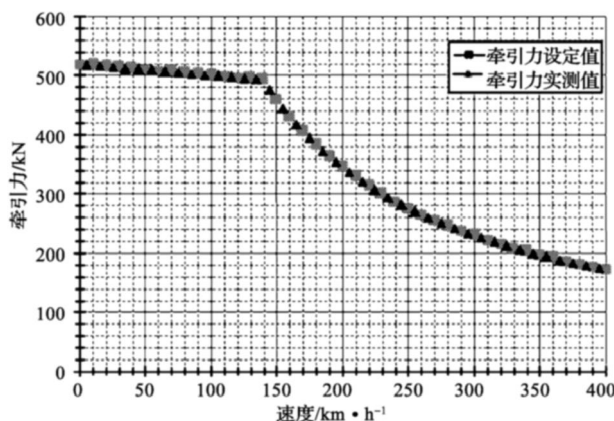


图5 牵引特性曲线实测值与设定值比较

3.3 整车线路试验

在地面联调试验验证满足设计要求后, 牵引系统还必须进行实际线路试验, 以检验牵引系统的整车性能和在实际工况下牵引系统与其他系统的匹配性。牵引系统装车后于2011年5月份到2011年12月份在中国

铁道科学研究院进行了半年多的整车试验。在此期间牵引系统完成了200 km/h以下速度等级的试验, 包括启动牵引力测试、整车牵引功率测试、网压波动时的功率曲线测试、手动过分相试验、牵引传动系统的电气保护试验、恒速控制功能试验及防滑防空转试验, 以上试验经铁道科学研究院认定, 全部达到设计要求。

4 结语

新一代CRH380CL型动车组牵引系统充分考虑了动车组的运用条件和各系统的性能参数, 对可靠性和安全性进行了论证。牵引系统的设计采用了仿真设计、系统地面联调及装车试验的方式, 充分验证了牵引系统的各项技术指标。CRH380CL型动车组长达半年多的线路试验表明, 牵引系统在200 km/h速度等级下性能优良, 各部件工作可靠。该牵引系统即将进行350 km/h速度等级的高速试验, 届时将对牵引系统作进一步优化。

参考文献:

- [1] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 连级三. 电力牵引控制技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [3] 江 靖. 新一代高速动车组牵引系统参数匹配设计与研究 [J]. 机车电传动, 2011(3):9-12.
- [4] 郭世明, 黄念慈. 电力电子技术 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002.

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