

高速动车组服役性能跟踪研究

白彦超¹, 安超¹, 李明高¹, 林建辉², 李强³

- (1. 中车唐山机车车辆有限公司 技术研究中心, 河北 唐山 063035;
2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;
3. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 随着多条客运专线的开通, 国内高速动车组服役环境变得日益复杂, 对动车组运行安全性和可靠性带来了新的挑战。为研究高速动车组在复杂服役环境下的服役性能, 选取 CRH3 系列动车组在武广、京广和京沪客运专线进行长期服役性能跟踪, 获取了动车组运营条件下服役环境、服役状态和服役性能的大量数据并进行了关联分析, 得到了高速动车组服役性能随运用环境和服役状态的变化规律, 为高速动车组的研发设计和运用维护提供依据和参考。

关键词: CRH3 动车组; 服役性能; 服役环境; 跟踪测试; 高速列车

中图分类号: U292.91⁺4; U266.2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.05.003

Service Performance Tracking Research on High-speed EMUs

BAI Yanchao¹, AN Chao¹, LI Minggao¹, LIN Jianhui², LI Qiang³

(1. Technology Center, CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China;

2. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Along with the operation of more passenger dedicated lines, the service environment of domestic high-speed trains becomes more complex, which brings new challenge to the safe and reliable operation of China high-speed trains. For researching the service performance of high-speed trains under the complex service environment, long service performance tracking of CRH3 series EMUs was carried in Wuhan-Guangzhou, Beijing-Guangzhou and Beijing-Shanghai passenger dedicated lines. A great lot of test data about service environment, service condition and service performance was obtained under operating condition of CRH3 series EMUs, and coupling analysis of test data was carried, by which, service performance variation rules of high-speed trains with service environment and service condition were obtained. This study made academic basis and guidance to the R&D and maintenance of high-speed trains.

Keywords: CRH3 EMUs; service performance; service environment; tracking test; high-speed trains

0 引言

国内高速铁路具有速度快、运距长、列车开行密度大、客流量大、运行工况复杂等特点。随着运营速度的提升, 高速动车组的轮-轨耦合关系、流-固耦合关系、弓-网耦合关系、机-电耦合关系进一步加强, 多场耦合作用对高速动车组运行品质的影响进一步加深^[1], 使高速动车组持续运行的安全可靠性问题显得非常突出。同时, 高速动车组由上万个零部件组成, 自身系统组成

及接口关系复杂, 在服役期间存在着不同程度的磨耗、老化等服役状态变化, 会导致运行品质退化。

随着多条客运专线的开通, 高速动车组服役环境变得更加复杂。京广客运专线全长 2 068.8 km, 其中, 武广客运专线共有桥梁 661 座, 长度占线路长度的 41.4%, 隧道 237 座, 长度占线路长度的 18.5%, 在世界铁路史上尚无先例。沿途经过北京、河北、河南、湖北、湖南、广东等 6 个南北省市, 纬度跨度大, 冬季 1 月平均气温广州比北京高 15° 以上, 夏季 7 月平均气温相差 5°C 以上; 同时, 广州地处亚热带湿润地区, 空气

湿度大；沿途有风沙、柳絮等复杂环境。复杂多变的服役环境对高速动车组的服役性能提出了空前挑战。为了探索高速动车组的服役性能演变规律，为动车组的研发设计和运用维护提供依据，拟对CRH3系列动车组进行服役性能跟踪研究。

1 服役性能跟踪研究思路

高速动车组服役性能表征了在复杂的服役环境下，随着自身服役状态不断变化，动车组运行品质的持续保持能力。服役性能主要包括列车在载客运营条件下的能力、安全性、可靠性和舒适性等运行性能。高速动车组服役性能与服役环境和服役状态紧密相关，服役环境和服役状态的变化会直接或间接影响到高速动车组的服役性能。服役环境是指高速动车组在运营过程中所处的自然环境条件以及外部接口设施，服役状态是指高速动车组的系统和结构在运行过程中的状态。

高速动车组服役性能研究通过网络监控、跟踪测试、人工检查等方法对服役环境、服役状态和服役性能信息进行全天候记录，服役性能研究跟踪内容如表1所示。通过网络时间与GPS信号对时，实现测试信号的定位，从而实现服役过程信息时空同步采样。基于时空同步，对上述服役数据进行关联分析，研究高速动车组服役性能随服役环境及服役状态的变化规律。服役性能研究思路如图1所示。

表1 服役性能研究跟踪内容

研究内容	跟踪对象	包含要素	实现手段	
服役环境	季节	春、夏、秋、冬	人工记录	
		天气	PIS系统数据	
	线路	风、霜、雨、雪	人工记录	
		几何参数	轨检数据	
服役状态	运行状态	速度、载重	网络监控	
		牵引制动工况	网络监控	
		磨损、磨损	人工记录	
	时变参数	旋转件温度	网络监控	
		悬挂参数	M/A3级检查	
	运行故障	材料参数	M/A3级检查	
		功能失效、结构失效	人工记录/网络监控	
		服役性能	能力	牵引热容量
	安全性	动力学性能	跟踪测试	
	可靠性	结构疲劳	跟踪测试	
舒适性	乘坐舒适度	跟踪测试		

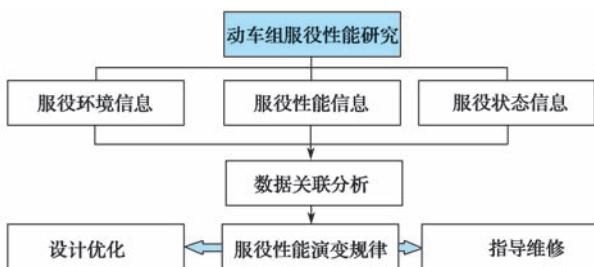


图1 高速动车组服役性能研究思路

2 CRH3系列动车组服役跟踪研究方案

选取2列CRH3C动车组和4列CRH380BL动车组同时在京津、武广、京广和京沪客运专线进行长期服役性能跟踪。为体现动车组的寿命周期特点，选取的动车组包含新造、三级修后和四级修后3种状态。其中1列CRH380BL动车组加装测试设备在京广客运专线重点进行安全可靠性的跟踪测试。为充分获取动车组服役期间的性能数据，同时考虑到传感器在复杂运用条件下的寿命，跟踪测试周期定为1个三级修程。

2.1 动车组服役研究跟踪内容

高速动车组的安全可靠性主要体现在车辆动力学性能、结构振动、疲劳性能和功能部件的使用状态等几方面。

影响动车组动力学性能、结构振动和疲劳性能的主要因素，一是线路不平顺引起的轮轨耦合作用，二是空气流场与动车组的流固耦合作用。因此，CRH3系列动车组服役性能研究重点开展以轨道-车轮-构架-车体-车下部件为系统的车轮磨耗、振动加速度、气动压力和动应力的时空同步测试，结合车轮磨耗变化规律，进行转向架-车体-车下设备振动和疲劳可靠性分析；研究动车组动力学性能、结构振动、疲劳性能在持续运行条件下随时间和运营里程的演变规律。

功能部件的使用状态主要和持续运行时间以及温度、湿度等环境因素有关。服役跟踪的重点是结合各级修程对动车组功能部件的使用状态进行预防性检查和定期检查记录，重点包括接触运动部件如车轮、闸片、碳滑板等的磨耗状态以及轴箱、齿轮箱、牵引电机等旋转部件的轴承温度等。同时，对温度、湿度等环境信息进行跟踪记录。

2.2 动车组运行状态监测

采用铁科院开发的高速动车组远程数据传输系统在地面对动车组运行状态进行实时监控，并通过高速动车组远程MVB数据下载轴箱、齿轮箱、电机等轴承温度传感器的温度参数，研究动车组旋转部件状态随运行速度、运营里程、运行时间、环境温度的变化规律。高速动车组远程数据传输系统原理如图2所示。

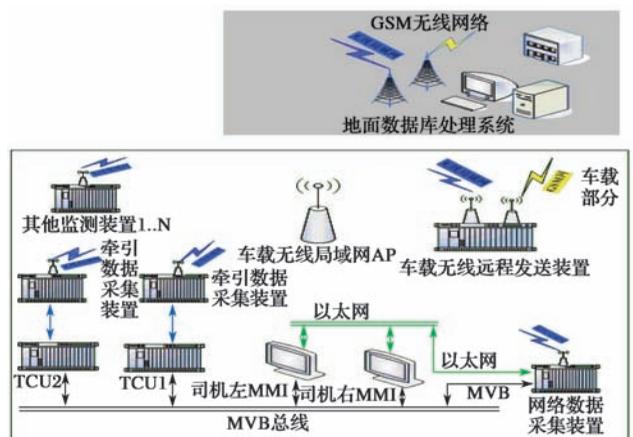


图2 高速动车组远程数据传输系统原理图

动车组远程数据传输系统由车载数据采集设备、无线传输设备、地面接收设备和数据库组成^[2]。车载数据采集设备通过动车组 MVB 网络实时记录列车的运行数据, 通过以太网与司机 MMI 同步记录列车的故障信息。无线传输设备通过 GPRS 无线传输系统将运行数据传输至地面, 以实现地面对列车运行状态的实时监控。动车组到站后, 无线远程发送装置通过无线局域网 WLAN 将运行数据和故障信息整体下载至地面, 传输至地面监视及维修数据库, 进行记录、存储、查询和分析。

2.3 关键功能部件状态跟踪

采用车轮磨耗测量仪, 每 3 万 ~5 万 km 对动车组车轮轮缘、踏面进行人工定期测量, 分析踏面形状和轮轨等效锥度随运用里程的变化规律。

结合动车组修程, 针对齿轮箱每 10 万 km 定期取油观察, 统计耗油量并分析齿轮磨耗情况; 针对制动闸片盘片每 1 万 km 进行厚度测量, 分析闸片磨耗规律; 针对受电弓滑板, 每 5 万 km 进行厚度检查, 分析磨耗规律。

2.4 服役性能跟踪测试

2.4.1 动力学性能测试

在轴箱、构架、齿轮箱、电机、车体及车下设备等关键部位布置加速度测点, 获取其振动加速度在一个完整三级修程各镟轮周期内的测试数据, 结合车轮磨耗分析动车组动力学性能、关键部位振动特性及传递关系随运用里程的变化规律。构架振动加速度测点布置如图 3 所示。

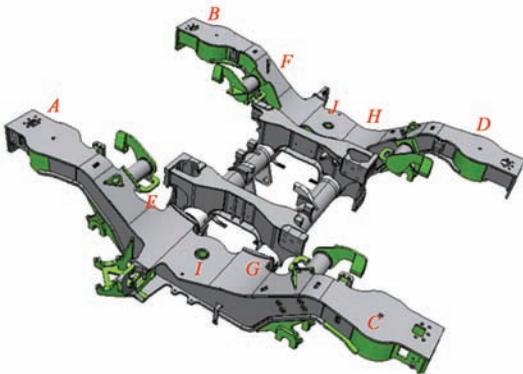


图3 构架振动加速度测点布置图

2.4.2 疲劳可靠性跟踪测试

针对重点关注的转向架及车下设备舱等部位进行应变片布置, 进行典型工况下全程往返动应力测试。典型工况包括新车状态、镟轮前和镟轮后的状态。构架动应力测点布置如图 4 所示。

采用 Miner 线性疲劳累计损伤法则和 NASA 针对变幅加载条件所推荐的 S-N 曲线形式计算等效应力幅, 采用这一方法可使各级应力水平产生的损伤均得到合理的考虑。计算时按照式 (1) 进行^[3]。动车组设计寿命为 20 年, 平均每年运行 60 万 km, 则整个寿命期大约运行 1 200 万 km, 分别代入式 (1), 就可计算出整

个寿命期相应的等效应力幅, 对关键结构疲劳寿命进行评估, 并分析动应力随运用里程的变化规律。

$$\sigma_{\text{aeq}} = \left[\frac{L}{L_1 N} \sum n_i (\sigma_{-1ai})^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

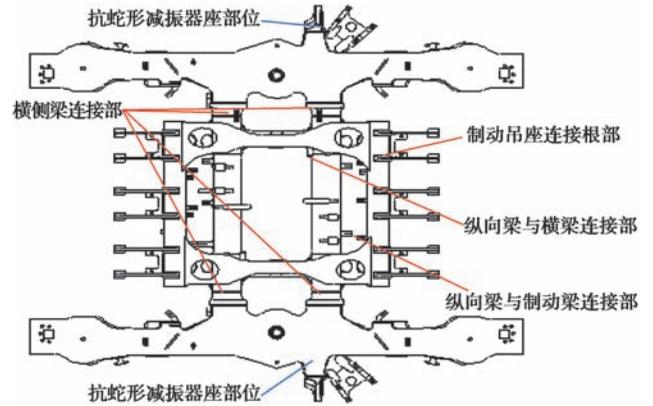


图4 构架动应力测点布置图

3 CRH3 动车组服役性能分析

CRH3 系列动车组服役跟踪历时 2 年半 (2013 年 1 月 ~2015 年 6 月), 动车组跟踪里程累计超过 720 万 km。通过 CRH3 系列动车组服役性能跟踪和数据分析得到了高速动车组服役性能随服役环境和服役状态的变化规律。

3.1 服役状态变化规律分析

通过跟踪数据分析可知, 动车组关键系统或部件的服役状态会随着动车组的运用而出现变化, 而且与服役环境有相关性。

3.1.1 车轮磨耗

动车组在运行过程中由于轮轨相互作用, 车轮磨耗在所难免。车轮磨耗会导致踏面形状发生改变, 进而可能导致等效锥度和轮径差发生变化, 影响到动车组动力学性能。

对动车组在京广客运专线三级修程内的车轮磨耗数据分析表明, 前 2 个镟修周期内车轮磨耗较快, 之后趋于稳定; 一个镟修周期内车轮踏面和轮缘磨耗都呈慢速增长趋势。车轮踏面磨耗随里程变化趋势如图 5 所示。

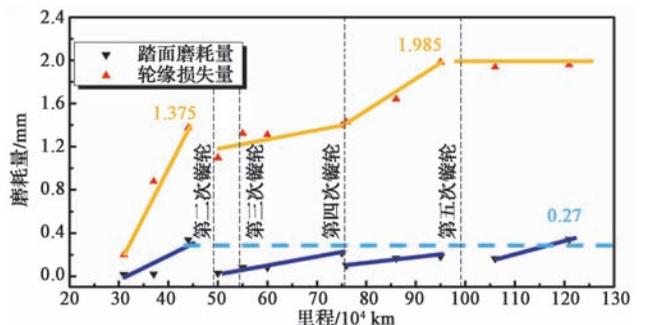


图5 车轮踏面磨耗随里程变化趋势

3.1.2 碳滑板磨耗

在 2013 年 1 月 ~2014 年 3 月间, 对京广客运专线

CRH380BL 动车组 TC02 车碳滑板进行了全寿命跟踪, 并进行了碳滑板磨耗趋势分析, 受电弓碳滑板磨耗趋势如图 6 所示。通过趋势图可以看出, 碳滑板使用初期的磨耗速率要高于碳滑板使用末期的磨耗速率, 随着碳滑板厚度的降低, 磨耗速率呈下降趋势。

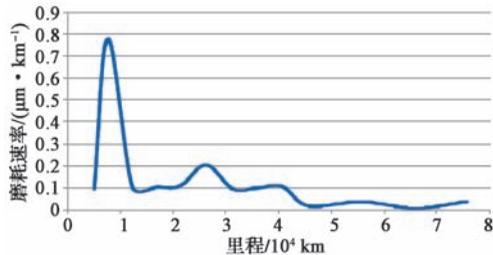


图 6 受电弓碳滑板磨耗趋势

对京广、京沪客运专线 CRH380BL 型动车组受电弓碳滑板的使用情况进行了差异对比, 京广客运专线和京沪客运专线单块碳滑板平均磨耗里程数据对比如表 2 所示。从表 2 可以看出, 京沪客运专线单块碳滑板平均磨耗里程比京广客运专线要高 1 倍多。经分析认为, 京沪线和京广线的接触网均为弹性链型悬挂, 造成此现象的原因主要是京广线隧道较多, 气动载荷造成受电弓动态接触力变化剧烈, 从而磨耗相对较大。

表 2 京广和京沪客运专线单块碳滑板平均磨耗数据对比

线路	列车运营总里程 / 10 ⁴ km	磨耗到限更换数量 / 个	单块碳滑板磨耗里程 / 10 ⁴ km
京广客运专线	817.3	367	4.45
京沪客运专线	776.7	157	9.89

3.1.3 旋转部件升温

通过高速动车组远程数据传输系统对 2013 年 7 月~2014 年 3 月间运行于京广客运专线和京沪客运专线的 CRH380BL 动车组转向架轴箱轴承温度数据进行采集, 绘制变化趋势图。轴箱轴承温度与速度关系如图 7 所示, 轴箱轴承温度变化趋势如图 8 所示。从图 7 和图 8 可以看出, 轴箱轴承温度随列车运行速度变化而发生变化, 运行速度越高, 温度越高。当列车速度趋于稳定时, 轴箱轴承温度变化趋势基本与列车环境温度变化趋势一致。

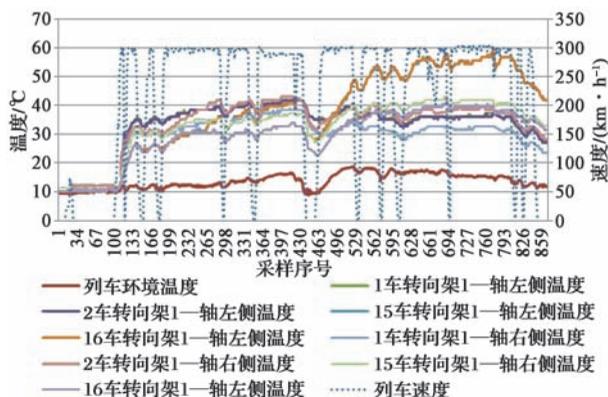


图 7 轴箱轴承温度与速度关系

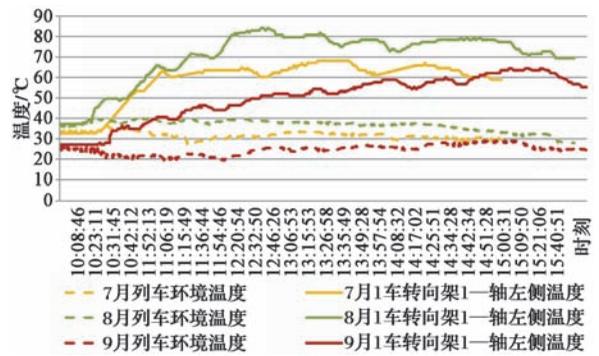


图 8 轴箱轴承温度变化趋势图

3.2 服役性能变化规律分析

高速动车组服役性能跟踪测试数据分析表明, 动车组服役性能与服役环境相关, 而且会随着动车组服役状态变化而变化。

3.2.1 与服役环境相关性

1) 与线路相关性

以 CRH380BL 动车组京广客运专线振动加速度跟踪测试为例, 每月选择 2~3 天的数据, 截取 300 km/h 速度下, 京石、石武、武广区间各一直线段数据, 求取垂向和横向平稳性指标。京广客运专线不同区间动车组横向平稳性随里程变化规律如图 9 所示。武广区间平稳性指标明显大于石武区间和京石区间。

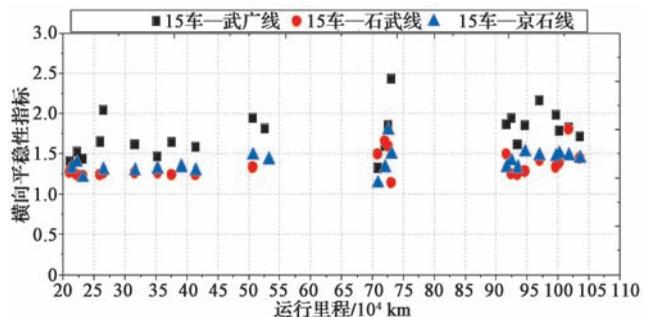


图 9 京广客运专线不同区间动车组横向平稳性随里程变化规律

图 10 为以 CRH380BL 动车组 G621 交路 (北京西—太原—广州南) 的测试数据为例的京广客运专线不同区间动应力水平。从图 10 可以看出, 从齿轮箱、构架

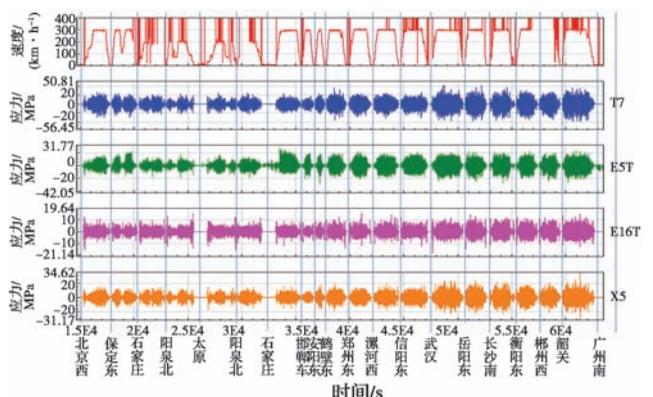


图 10 京广客运专线不同区间动应力水平

T7—16 车构架天线梁吊座处测点; E5T—16 车变流器支撑槽吊座处测点; E16T—16 车废排单元吊架下横梁处测点; X5—16 车齿轮箱下部筋板处测点

和车体等关键部位动应力在京广长交路的时域测试结果可以看出, 武广区间动应力数据水平总体上也高于其他区间。

以上分析结果表明, 武广线路恶劣的线路条件(多隧道、坡度大)对动车组动力学性能和疲劳可靠性影响显著。

2) 与自然环境相关性

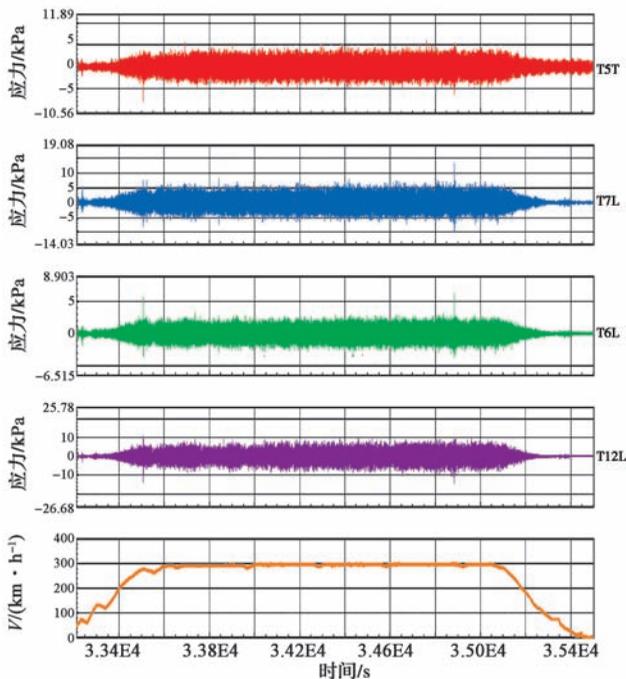
对京广客运专线 CRH380BL 动车组不同季节设备舱压差跟踪测试数据分析表明, 设备舱底板在夏秋季节的压差小于春冬季节的压差, 其他部位大致相当。设备舱压差不同季节对比如图 11 所示。



图 11 设备舱压差不同季节对比图

3.2.2 随速度的变化规律

通过对 CRH380BL 动车组出站加速、平稳运行和进站减速的动应力进行分析可知, 运行速度增加, 动应力值增大; 速度减小, 动应力值减小, 动应力与速度呈明显的线性关系。列车匀速运行时, 动应力值相对稳定。动应力与速度关系如图 12 所示。



T5T—15 车变压器冷却单元裙板吊架处测点; T7T—15 车废排单元上横梁焊缝处测点; T6L—15 车风缸吊座焊缝处测点; T12L—15 车废排安装位置处测点

图 12 动应力与速度关系图

3.2.3 随服役状态变化规律

以 CRH380BL 高速动车组的横向稳定性跟踪测试为例, 动车组构架横向稳定性随里程变化规律如图 13 所示。在一个镟修周期内, 动车组构架横向加速度测试数据总体上呈慢速增长态势, 在镟修前有增大趋势, 镟修后有所减小。横向稳定性变化与车轮磨耗状态存在正相关性。

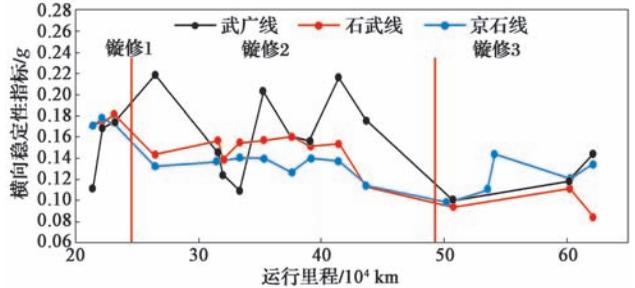


图 13 动车组构架横向稳定性随里程变化规律

4 结语

高速列车技术设计的核心任务是结构设计、参数设计、边界设计和服役设计^[4]。在国内大力发展高速铁路之前, 轨道车辆的设计基本都是基于相对确定的边界条件和服役环境, 更多关注的是结构设计和参数设计。而高速铁路给高速动车组设计带来了一系列未知的边界条件和更加复杂的服役环境。因此, 为保证高速动车组在寿命周期内的服役性能, 应重点加强动车组的边界设计和服役设计。

通过 CRH3 系列动车组服役性能跟踪研究, 获取了高速动车组在运营条件下服役环境、服役状态和服役性能的大量测试数据, 得到了高速动车组服役性能随服役环境、服役状态的变化规律, 为高速动车组的研发设计和优化改进提供了指导, 同时也为高速动车组修程制定和优化提供了科学依据。

参考文献:

[1] 张卫华, 张曙光. 高速动车组耦合大系统动力学及服役模拟[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(2): 147-152.
 [2] 黄志平, 赵红卫, 朱广超, 等. 高速动车组远程数据传输系统的研究与实现[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(1): 33-36.
 [3] 杨子森. 209 系列转向架结构补强及结构疲劳评估研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
 [4] 张曙光. 高速动车组设计方法研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009: 67.

作者简介: 白彦超(1972-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事轨道车辆仿真试验技术研究工作。