

高速铁路联调联试关键技术和试验研究主要成果

康 熊,姚建伟

(中国铁道科学研究院高速铁路系统试验国家工程实验室,北京 100081)

[摘要] 阐释了高速铁路联调联试的内涵和必要性,结合我国高速铁路联调联试的工程实践,从轮轨关系、弓网关系、列车空气动力学、车-线-桥耦合等角度,对高速铁路联调联试关键技术进行了分析,对高速铁路联调联试和试验研究取得的主要成果进行了系统性提炼和归纳,给出可供高速铁路建设和运用参考的相关思考和建议。

[关键词] 高速铁路;系统试验;联调联试;轮轨关系;弓网关系;车-线-桥;列车空气动力学

[中图分类号] U238;N945 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)04-0021-09

1 前言

联调联试是高速铁路建设和运营准备的重要组成部分和必要环节,截至目前,我国已完成30多条高速铁路联调联试,累计里程已超过 1×10^4 km,实现了我国高速铁路系统集成整体目标。通过联调联试和科学研究,一方面积累了大量宝贵的基础性试验数据,另一方面解决了与高速铁路运行安全性和舒适性相关的一系列科学问题,实现了理论与技术创新。

目前的联调联试技术和数据处理技术的研究成果可直接应用于后续新建高速铁路联调联试,从而进一步提高联调联试测试效率,提高准确、及时、有效地获取和处理试验数据的能力,因此有必要对我国现有的联调联试技术和试验研究的主要成果进行分析和总结,而鲜有文献进行这方面的系统分析和研究,鉴于此,本文主要围绕高速铁路联调联试的关键技术和试验研究的主要成果进行提炼和归纳,以期 of 高速铁路开通和安全运营提供科学的

方法和手段,提升我国高速铁路联调联试技术和试验研究水平。

2 联调联试的内涵及必要性

高速铁路是一项庞大的系统工程,建设标准高,综合性强,技术复杂,涉及工务工程、动车组、牵引供电、通信信号、运营调度、客运服务等众多子系统,各子系统间接口复杂又相对独立,其设备配置必须满足整体系统的功能要求^[1],所有这一切决定了在高速铁路建设中应进行综合性的大系统调试,即开展联调联试。

联调联试即高速铁路各系统间的综合联调,既含“调”,又含“试”,即调试所有的子系统,通过联调联试经由大系统、子系统间的多次反馈与调整,使各子系统功能结构完整与合理,使整体系统的功能达到最优,满足运输要求^[1]。开展联调联试的原因可以从以下四个方面进行阐释。

1)实现高速铁路系统集成整体目标。从轮轨关系、弓网关系、机电耦合、列车控制等方面,检测、

[收稿日期] 2015-01-10

[基金项目] 中国铁路总公司科技研究开发计划重大项目(2013B001-A-1,2013B001-A-2)

[作者简介] 康 熊,1955年出生,男,甘肃兰州市人,研究员,博士生导师,主要从事高速铁路科学研究和系统试验等工作;E-mail:kx@rails.cn

调试、优化各系统间的接口功能,使整体系统的功能达到最优,满足运输要求。通过系统联调联试,经由大系统到子系统的多次检测和调整方可认定系统功能的完整性与合理性。

2)实现移动设备与固定设施的最佳匹配。通过联调联试,使移动设备与固定设备间得到相互磨合,综合调试并评估高速铁路各系统接口匹配功能、整体系统运行性能、安全性及环境保护等,在系统总体目标的协调下实现移动设备与固定设施间的最佳匹配。

3)实现对系统的安全性分析和指导缺陷整改。高速铁路运行速度快,因而对整体系统的安全性要求高,因而要通过联调联试判别可能出现的故障类别和波及范围,确定发现系统缺陷和故障,指导相关部门进行调整和克服缺陷,并经过复测,确认系统已完成缺陷整改,保证高速铁路整体系统的安全性。

4)为运营提供有效的技术支持。联调联试结果是高速铁路工程验收的依据之一。通过系统调试和运行试验,全面综合检验高速铁路线路、通信、信号、供电、动车组、调度指挥、客运服务等设施和设备以及行车组织方式等,能否满足列车高速、高效、高密、安全、平稳的运行要求,为开通运营和进一步优化设备配置、提高设备性能、制定科学的运输组织方案提供技术支持。

3 高速铁路联调联试关键技术

联调联试过程中有许多关键技术问题需要解决,主要包括高速轮轨关系、高速弓网关系及供变电系统性能、高速铁路空气动力学、车-线-桥耦合、高速移动无线传输与列车运行控制、高速铁路基础结构系统动力学性能、高速铁路环境影响等,见图1。下面将从四个方面分析高速铁路联调联试关键技术。

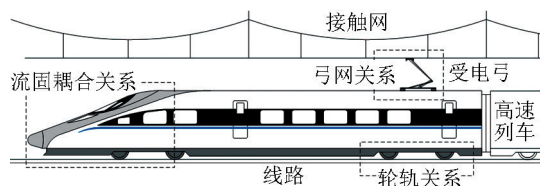


图1 高速铁路关键技术

Fig. 1 Key technology of high-speed railway

3.1 轮轨关系关键技术

轮轨关系问题与高速列车的运行安全性和旅客乘坐舒适性密切相关,动车组高速运行时,与低速的情况相比,轮轨之间的动态作用变得更加复杂,高速铁路轮轨关系关键技术涉及以下几个方面。

1)动车组动力学性能。由于车辆实际运行工况多种多样,因此在进行动车组动力学测试时需考虑不同线路区段(路基、桥梁、隧道、道岔等)、不同轮轨接触状态和交会等工况下的车辆动力学响应特征。在测点布置方面,需科学合理地选择有代表性的车辆的不同位置安装加速度计,换装测力轮对等。

2)“车辆-轨道”系统安全性评判方法。轮轨之间的相互作用将车辆和轨道耦合成为一个系统,怎样选取合理的评价指标对这个系统的安全性进行准确评价是高速铁路联调联试过程中需要解决的关键技术问题。提出并验证高速区段“车辆-轨道”系统安全性评判的新方法至关重要。

3)高速铁路轨道不平顺管理标准。高速铁路对轨道平顺性提出更高要求,国外没有专门针对350 km/h运营速度的轨道不平顺管理相关标准。我国应用于京津城际铁路的300~350 km/h轨道不平顺管理暂行标准的适用性还需进一步验证^[2]。为完善我国高速铁路轨道不平顺管理技术体系,指导300~350 km/h高速铁路轨道的养护和维修,需开展最高试验速度350 km/h预设轨道不平顺区域实车试验。

4)高速铁路轨道不平顺谱。国外轨道不平顺谱和我国原有的轨道不平顺谱难以描述高速铁路轨道状态,在联调联试过程中需利用轨道精调小车和综合列车检测得到的数据,提出高速铁路轨道不平顺谱计算方法,这对设计和建设我国高速铁路具有重要意义。

3.2 列车空气动力学关键技术

随着列车运行速度的提高,列车与周围空气的动力作用明显加剧,一方面气动力对列车本身和列车运行产生作用,另一方面列车高速运行引起的气动现象对周围环境产生影响。

实车空气动力学试验需要解决的具体问题包括:测试列车高速运行及交会时的空气动力效应对动车组运行安全性和车辆振动的影响;通过测试动车组高速通过隧道或隧道内交会时的瞬变压力和

微气压波,评价气压变化环境下人体舒适性、列车气密性、微气压波对周边环境的影响程度;分析列车速度的提高以及隧道长度的增加引起的微气压波激化现象,同时,验证隧道断面参数和缓冲结构设置的合理性,研究不同型式缓冲结构对瞬变压力和微气压波的影响等,对高速铁路隧道设计、运营提出相关措施和建议。

3.3 弓网关系关键技术

动车组高速运行情况下,采用何种型式的弓、网才能满足高速列车正常取流非常重要,因此需要深入研究弓网关系。高速列车弓网关系涉及的关键技术主要包括以下几个方面。

1)新型弓网系统受流性能。对弓网动态接触力、燃弧、硬点、接触线动态高度进行测试,并通过图像监视弓网受流验证不同接触网张力组合的接触网与不同受电弓的弓网适应性和运行安全性,从而评价不同型号受电弓和双弓运行工况的受流性能、不同运行方向或不同距离的双受电弓受流性能。

2)新型受电弓空气动力学性能。对不同动车组车顶形状受电弓在双向运行时受电弓导流装置的位置和不同角度,分别测试受电弓的空气动力学性能,探索高速运行情况下动车组受电弓导流装置的位置和角度设置与受电弓空气动力学性能的关系。

3.4 “车-线-桥”耦合关键技术

车辆-线路-桥梁是一个相互影响、相互作用的耦合系统,为保证列车在桥上的运行安全性及旅客的乘坐舒适性,系统评价桥梁、轨道和车辆动力响应的相关性,需选择有代表性的桥梁,基于桥上轨道结构状态、列车运行状态和桥梁受力状态三个方面进行试验研究。

1)桥梁动力性能测试。测试桥梁自振特性和试验列车以各种速度通过典型桥梁时梁体的动力响应,判断桥梁结构在动载作用下的工作状态(包括长大桥梁等跨布置引起的竖向周期性不平顺效应),验证桥梁是否具有合理的竖向和横向刚度,分析、评价试验列车通过桥梁时的安全性和桥梁的动力性能。

2)车辆与桥梁耦合振动性能测试。动车组高速通过桥梁区段时的车体振动会受到列车自身结构系统、线路条件、桥梁结构等因素的影响,同时,

车辆重力荷载也会通过规则排列的轮轴对桥梁产生周期性加载。研究动车组高速通过桥梁时车辆与桥梁的动力相互作用机制,从而获得车辆与桥梁振动耦合响应规律至关重要。

3)简支梁动力设计参数。对高速铁路简支箱梁的实测动力参数及动力响应、设计参数和车桥动力响应结果进行综合分析,研究简支梁设计参数对桥梁动力性能的影响规律及设计优化,为我国高速铁路桥梁优化设计提供依据。

4 联调联试和试验研究取得的主要成果

4.1 轮轨关系方面取得的成果

4.1.1 提出了“车辆-轨道”系统安全性评判方法

通过联调联试和试验研究,提出并验证了“车辆-轨道”系统安全性评判方法。

1)基于轴箱加速度的“车辆-轨道”系统安全性评判方法。利用谱方法和相干函数分析方法,通过挖掘轴箱垂向加速度与轮轨间垂向力波形数据的内在关系,提出了基于轴箱垂向加速度的轮轨垂向力软测量模型^[3],并验证了其测量精度。

图2给出了SY998799综合检测车在京沪高铁上行线实测轮轨垂向力与软测量模型预测得到的轮轨垂向力波形的对比结果。可见,由中高频轮轨垂向力软测量模型预测得到的轮轨垂向力与实测的轮轨垂向力的波形变化趋势高度一致,幅值相当,特别是在钢轨接头处吻合很好。

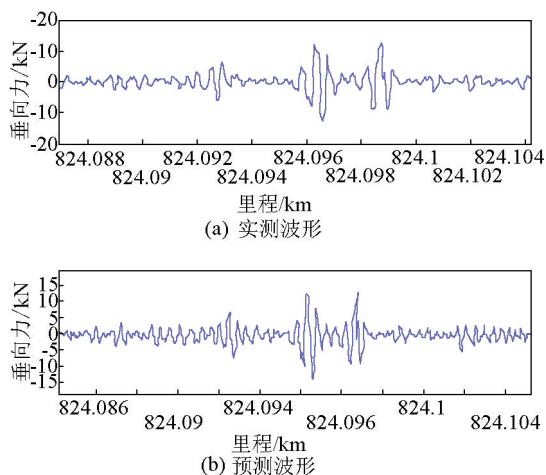


图2 京沪高铁预测轮轨垂向力与实测轮轨垂向力波形局部放大图

Fig. 2 The comparison graph of predictive and testing wheel-rail vertical force

2) 基于广义能量法的“车辆-轨道”系统动态特性评判方法。从能量的角度,证明了广义能量指标(GEI)、轨道不平顺标准差与车辆动力学响应标准差的线性相关性,提出了利用广义能量法评判高低不平顺及其敏感波长对“车辆-轨道”系统动力学的影响,为丰富和完善轨道状态评判体系提供了理论依据^[4,5]。

图3给出了CRH2-061C车以350 km/h速度运行在京沪先导段时,车体垂向加速度标准差、轨道等效高低不平顺单项GEI、等效高低不平顺标准差的对比结果。由图可知:高低不平顺标准差与车体垂向加速度标准差不满足一一对应关系,而单项高低不平顺GEI与车体垂向加速度标准差相关性较强,因此GEI比等效高低不平顺标准差能更好地反映轨道不平顺状态。

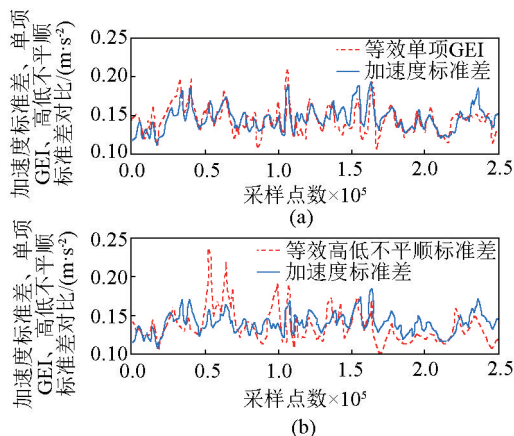


图3 车体垂向加速度标准差、等效单项GEI、等效高低不平顺标准差的比较结果

Fig. 3 The comparison results of standard deviation of car-body vertical acceleration, equivalent single item GEI and standard deviation of equivalent vertical irregularity

4.1.2 验证并完善了高速铁路轨道不平顺管理标准

通过轨道不平顺管理标准试验,验证并完善了高速铁路300~350 km/h轨道不平顺管理标准,提出了高速铁路现行300~350 km/h轨道动态不平顺标准修改建议,具体见文献[6]。对高速铁路无砟轨道现行300~350 km/h轨道静态不平顺标准进行了修改,建议管理项目增加轨距变化率;三角坑计算基长由6.25 m修改为3.0 m;管理等级增加了经常保养管理值;限速管理由200 km/h修改为250 km/h。

4.1.3 获得了高速铁路轨道不平顺谱分布特征

通过对轨道不平顺实测数据进行分析,获得了不同无砟轨道结构的轨道不平顺谱特征,提出了高速铁路轨道不平顺谱拟合公式,为我国高速铁路机车车辆和线桥隧设计、计算及评估提供了重要依据。

高速铁路轨道不平顺谱分段按幂函数进行拟合,该幂函数公式为^[7]:

$$S(f) = Af^{-k} \quad (1)$$

式(1)中, A 、 k 为待定系数, f 为空间频率。

4.2 空气动力学方面取得的成果

4.2.1 获得了动车组隧道通过及隧道交会相关规律

获得了动车组以380 km/h速度通过隧道和以350 km/h速度在隧道内及洞口交会时列车内外压力、车内压力的3 s变化量随隧道长度、隧道内位置和速度的变化规律。通过对京沪高铁实测数据进行分析,获得的车外最大负压临界隧道长度与速度关系见图4。

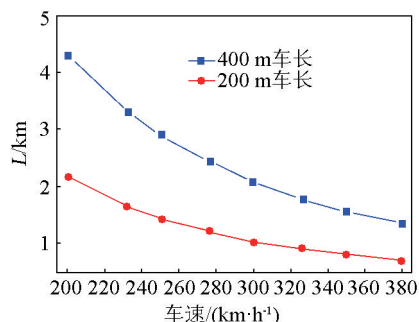


图4 车外最大负压临界隧道长度与速度的关系

Fig. 4 The critical tunnel length according to vehicle exterior maximum negative pressure for different speed

通过对现场实测得到的海量数据统计分析可知:CRH2C动车组隧道内和车内瞬变压力3 s变化极值成比例关系,比例因子(k)与隧道长度(L)的关系式为: $k=0.039 \ln(L) - 0.0623$ 。

4.2.2 获得气动效应对动车组车体底部的影响规律

获得了380 km/h速度下通过隧道或隧道内交会和400 km/h速度下明线交会时车体底部设备舱内外、裙板内外及转向架附近空气压力的分布和变化规律。

图5为CRH380AL动车组在不同速度下明线交会时头尾车压力变化对比情况,由图5可知:400/400 km/h明线交会时,CRH380AL动车组尾车的车外压力变化比头车增大了22%,车内外压差比头车增大了8%。

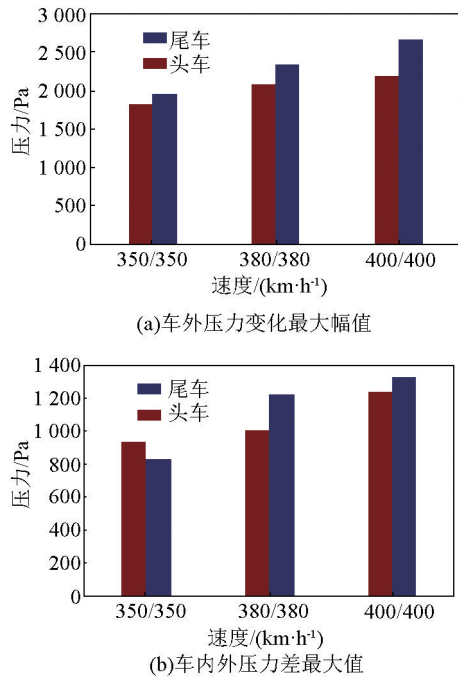


图5 CRH380AL明线交会时头尾车压力变化对比柱状图
Fig. 5 The comparison results of pressure for the head and the tail vehicle when the CRH380AL train passing by in open air at different speed

图6为CRH380BL以400/400 km/h明线交会时同一断面不同测点压力对比结果,可见:CRH380BL头车车体中部裙板和侧窗测点受交会影响较大,二者压力变化幅值基本相当,而车体中部底板测点受交会影响较小;尾车车体中部裙板受交会影响最大,底板受交会影响次之,侧窗最小。

4.3 高速弓网关系试验成果

4.3.1 获得了不同张力组合下弓网受流性能的差异

接触网张力组合不同,弓网受流性能有所差异。图7为京沪高铁四种张力区段弓网燃弧率对比分析结果,可见,弓网燃弧率随接触网张力增加呈减小趋势,弓网受流性能有所改善,33 kN及以上张力区段燃弧率变化不明显,31.5 kN区段燃弧率较其他张力区段大。

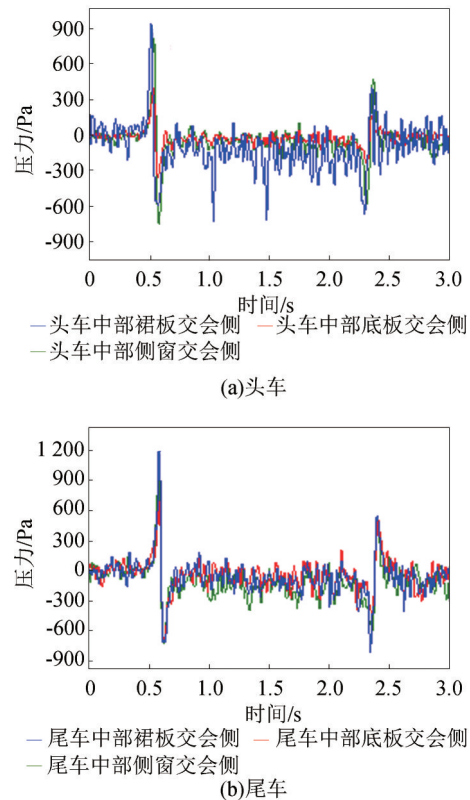


图6 CRH380BL以400/400 km/h明线交会时同一断面不同测点压力对比图

Fig. 6 The comparison results of pressure for different measuring points at the same cross section when the CRH380BL train passing by in open air at speed of 400 km/h

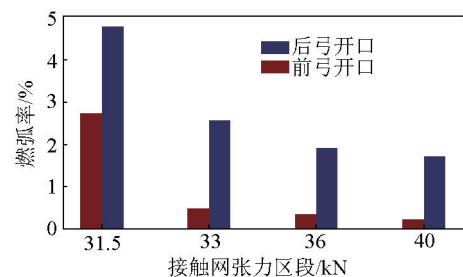


图7 四种张力区段弓网燃弧率对比分析(速度380 km/h)
Fig. 7 The comparison results of success rate for four kinds of ocs tension force

4.3.2 获得了弓网接触力和空气动力随速度的变化规律

在16辆编组高速动车组上试验了双弓受流性能,获得了弓网动态接触力和受电弓不同方向运行时空气动力随速度的变化规律。京沪高铁获得的DSA380型受电弓不同方向运行时空气动力随

速度的变化规律如图8所示。

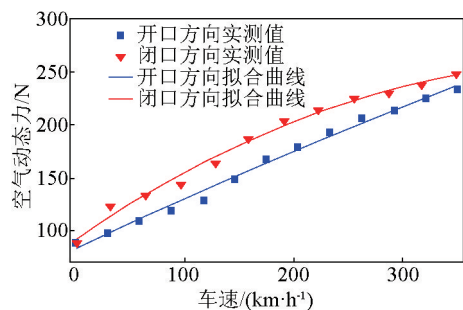


图8 空气动态力与速度关系

Fig. 8 The relationship between air dynamic force and running speed

受电弓开口方向空气动态力与速度关系的回归公式为： $F = -0.092 4v^2 + 13.128v + 70.502$
受电弓闭口方向空气动态力与速度关系的回归公式为： $F = -0.735 3v^2 + 23.63v + 70.675$ ，其中， v 为速度，单位为km/h； F 为空气动态力，单位为N。

4.4 “车-线-桥耦合”方面取得的成果

4.4.1 获得了动车组-轨道-桥梁(路基)耦合振动规律

首次从车-线-桥耦合系统动力学的角度，通过对高速动力学试验数据进行分析，更深入地揭示了动车组的动力学响应与线、桥激励之间的关系。应用速度-频率分析方法^[8]，获得了车辆振动特征与外部激励的耦合关系，识别了轴箱、构架和车体振动中随速度变化的频率和不随速度变化的频率峰值。

表1为对CRH380B-6202L动车组在京沪先导段下行方向15车(此时该车位于前进方向的第2车位)的轴箱、构架、车体振动特征进行分析，识别的车辆固有振动频率、外部激励波长和对应的线路几何特征。

图9、图10为CRH380B-6202L动车组车体固有振动与外部激励的耦合关系。图中识别出影响车辆振动的激励主要来自轨道板、32 m简支箱梁、百米轨、轮对滚动，这些激励在一定速度范围内会与车辆的固有特性相耦合。

表1 车辆振动特征频率与外部激励波长

Table1 The relationship between the main frequency of vehicle vibration and the of wavelength of external excitation

位置	固定频率/Hz	激励波长/m	
轴箱	横向	3.91	25(1/4单轨长)、6.45、3.66、3.24
	垂向	—	6.47(轨道板长)、3.26(轨道板半长)、2.88(车轮周长)
构架	横向	3.91	25、6.47、3.66、3.26、2.87
	垂向	—	6.472、16、10.80、3.66、3.24、2.88
车体	横向	0.49、1.59、10.62、17.80、22.30、31.49、36.50	32.26(32 m简支箱梁)、2.886
	垂向	0.73、8.79、18.82、22.71、31.37、36.38	32.78、6.47、2.88

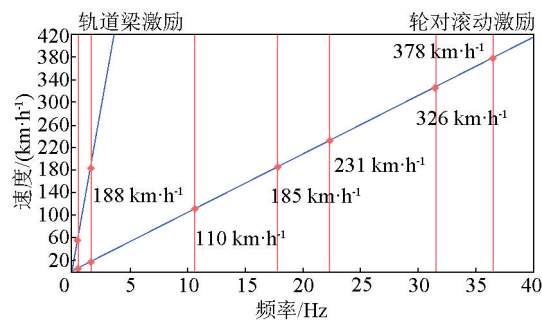


图9 车体横向振动与外部激励耦合点

Fig. 9 The coupling points of car-body lateral vibration and the external excitation

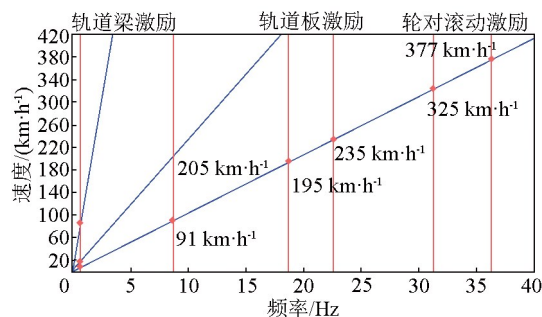


图10 车体垂向振动与外部激励耦合点

Fig. 10 The coupling points of car-body vertical vibration and the external excitation

4.4.2 获得了车辆与桥梁振动耦合响应规律

实测 CRH380AL 和 CRH380BL 动车组以 300 km/h 通过淮河特大桥连续等跨布置 32 m 简支梁时车体垂向、横向加速度幅值谱图分别见图 11、图 12。可见,动车组通过淮河特大桥连续等跨布置 32 m 简支梁时,实测桥梁竖向自振频率在 6.68~7.03 Hz,横向墩梁一体自振频率在 2.83 Hz 附近,车体垂向和横向振动加速度幅值谱相应频率附近均无明显对应峰值,说明梁体自振对车体振动影响不大。

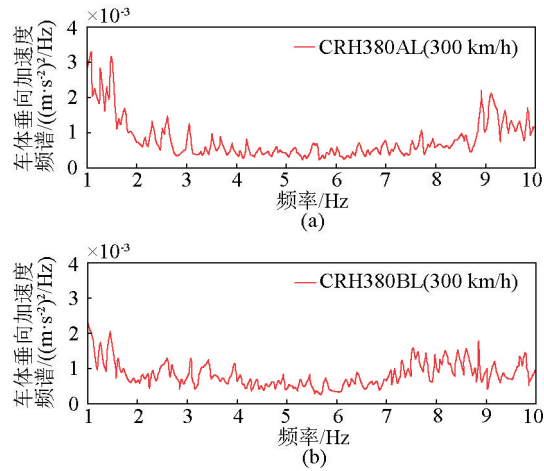


图 11 不同动车组通过淮河特大桥 32 m 简支梁时车体垂向加速度幅值谱

Fig. 11 Frequency spectrum of car-body vertical acceleration when different train passing 32 m simply supported beam of Huaihe bridge

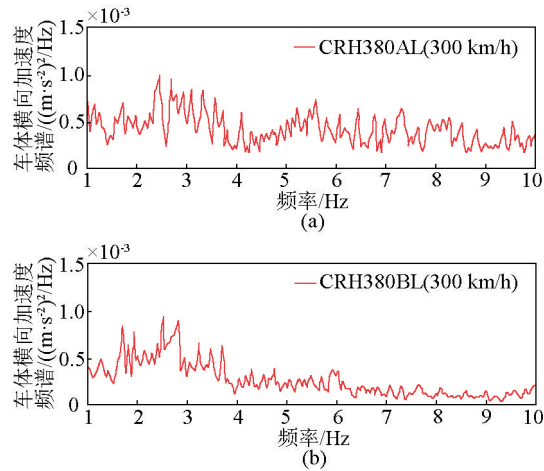


图 12 不同动车组通过淮河特大桥 32 m 简支梁时车体横向加速度幅值谱

Fig. 12 Frequency spectrum of car-body lateral acceleration when different train passing 32 m simply supported beam of Huaihe bridge

4.4.3 获得了梁体动力响应随速度的变化规律

图 13 为京沪高速铁路 32 m 简支箱梁跨中竖向加速度与行车速度关系,32 m 简支箱梁竖向加速度(20 Hz 滤波后)与速度的关系为:

$$a_{v_{\max}} = 1 \times 10^{-6} v^2 - 8 \times 10^{-5} v + 0.0125 \quad (2)$$

式(2)中, $v \leq 420$ km/h, 为行车速度, km/h; $a_{v_{\max}}$ 为竖向加速度, m/s^2 。

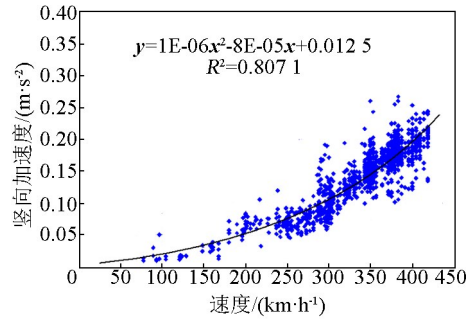


图 13 32 m 简支箱梁跨中竖向加速度与行车速度关系图
Fig. 13 The relationship between the vertical acceleration of middle-span of 32 m box girder and the running speed

4.5 优化了高速铁路整体系统的功能

根据轨道状态检测和车辆动力学响应、轨道结构动力性能、道岔动力性能测试结果,联调联试期间对轨道进行了多次调整与精调,使得轨道几何状态质量不断提升。

图 14、图 15 分别为京沪高铁枣庄西—蚌埠南(先导段)上行线和下行线检测的轨道几何偏差每千米个数、平均 TQI 的总体变化趋势图。上、下行线轨道几何偏差个数总体呈减少趋势,轨道质量指数平均值保持稳定并呈下降趋势。

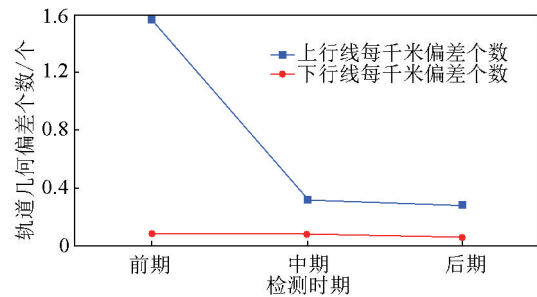


图 14 轨道几何偏差个数变化趋势图

Fig. 14 The changing trend diagram of track geometry deviation

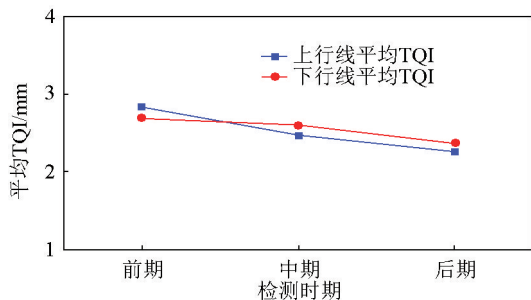


图 15 平均 TQI 变化趋势图

Fig. 15 The changing trend diagram of average TQI

5 可供高速铁路建设和运用参考的相关思考和建议

联调联试和试验研究取得的成果,可为后续在建和新建高速铁路项目提供具有参考价值的理论和工程指导意见,结合前述的内容进行简要分析。

1)“车辆-轨道”系统动态特性评判方法方面的建议。通过对大量试验数据进行挖掘和理论分析,提出了能够评判车辆运行安全性并能够诊断轨道不平顺状态的“车辆-轨道”系统动态特性评判指标(轴箱加速度、广义能量指标 GEI)及评判方法。

建议采用基于轴箱垂向加速度的中高频轮轨垂向力软测量模型来诊断和控制轮轨垂向力大值。建议将广义能量指标 GEI 作为对轨道病害等评判的依据之一,并依据其值判断轨道状态对“车辆-轨道”系统不同动力学特性影响的敏感波长,从而为高速铁路养护维修提供充分的理论和数据支撑。

2)高速铁路轨道不平顺谱建议。我国之前在研制高速列车时,多采用德国高速轨道谱,建议以后在进行线路设计速度 350 km/h 高速铁路无砟轨道用高速列车研制、理论计算和实物激振试验时,采用公式(1)所示的高速铁路轨道不平顺拟合函数。

3)不同速度等级下承力索和接触线张力建议值。通过对京沪高速铁路不同接触网参数的弓网受流试验的综合分析表明:300 km/h 及以上线路宜采用全补偿弹性链型悬挂,承力索张力建议值为 20 kN。

相同速度下,随着接触网张力增大,弓网受流性能有所改善,但接触线张力增大到一定值后弓网受流性能变化不明显,因此对不同速度等级的接触性张力建议如下:300 km/h 速度等级的线路,接触线

张力为 28.5 kN;350 km/h 速度等级的线路,接触线张力为 31.5 kN;380 km/h 速度等级的线路,接触线张力为 33 kN。

4)空气动力学方面的建议。通过测试动车组高速通过隧道或隧道内交会时的瞬变压力、微气压波等变化规律,验证了数值模拟计算结果,完善了空气动力学数值计算模型和参数,为系统开展高速铁路车隧耦合空气动力效应研究奠定基础。

通过对大量试验数据进行分析表明:动车组明线交会时,头车车体中部裙板和侧窗测点受交会影响较大,尾车车体中部裙板受交会影响最大,因此为了提高长期服役过程中动车组车体的抗疲劳性能和可靠性,建议对这几个部位进行细化设计。

通过高速铁路联调联试技术创新和工程应用实践^[9],全面掌握了高速铁路工务工程、牵引供电、通信信号、高速动车组等系统的综合试验技术,探索了高速铁路轮轨关系、空气动力学、弓网关系和车-线-桥耦合作用的相关规律,形成高速铁路工程动态验收技术规范,完善了我国时速 350 km/h 高速铁路技术标准体系^[10],有力推动了我国高速铁路技术跨入世界高速铁路先进国家的行列。

本文是对中国铁道科学研究院科研团队取得的部分科研成果的梳理、归纳和提炼,所提出的一些探索性的规律和结论,有待于在我国高速铁路联调联试和试验研究实践中进一步验证和完善。

参考文献

- [1] 康 熊.铁路试验检测评估技术[M].北京:中国铁道出版社,2012.
- [2] 田新宇,黎国清,陈东生.高速铁路轨道不平顺管理标准试验研究[J].中国铁路,2012(9):37-40.
- [3] 王卫东,牛留斌,刘金朝.基于轴箱垂向加速度中高频轮轨垂向力软测量模型[J].中国铁道科学,2013(2):100-105.
- [4] 康 熊,王卫东,刘金朝.基于 RAMS 的高速铁路轨道平顺状态综合评价体系研究[J].中国铁道科学,2013(2):13-17.
- [5] 王卫东,刘金朝,梁志明.综合评价车辆/轨道系统动态特性的广义能量法[J].中国铁道科学,2009(5):22-27.
- [6] 田新宇,黎国清,陈东生.高速铁路轨道不平顺管理标准试验研究[J].中国铁路,2012(9):37-40.
- [7] 康 熊,刘秀波,李红艳,等.高速铁路无砟轨道不平顺谱[J].中国科学:技术科学,2014,44(7):687-696.
- [8] 康 熊,曾宇清.车辆振动加速度响应分析的速度——频域方法[J].中国铁道科学,2012(1):60-70.
- [9] 王 峰,姚建伟,张 骏,等.高速铁路联调联试管理与技术[M].北京:中国铁道出版社,2013.
- [10] 高速铁路工程动态验收技术规范[S]//中华人民共和国行业标准.北京:中国铁道出版社,2013.

The key technology of testing and commissioning of high-speed railway and the main testing achievements

Kang Xiong, Yao Jianwei

(National Engineering Laboratory for System Test of High-speed Railway of China Academy of Railway Science, Beijing 100081, China)

[Abstract] The connotation and necessity of testing and commissioning of high-speed railway is explained and discussed, combined with the engineering practice of testing and commissioning in China, the key technology of testing and commissioning of high-speed railway are analyzed from the perspective of wheel/rail interaction, pantograph and ocs relation, aerodynamics of high-speed railway and train-track-bridge coupling. Then the main achievements of testing and commissioning of high-speed railway in China are concluded, and some useful suggestions are given about high-speed railway construction and operation.

[Key words] high-speed railway; system test; testing and commissioning; wheel/rail interaction; pantograph and ocs relation; train-track-bridge; aerodynamics of high-speed railway