

高速铁路动车组在线路上适应性设计方法及应用

王开云,袁玄成,翟婉明

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室,成都 610031)

[摘要] 我国高速铁路轨道结构类型较多,动车组在线路上的适应性问题越来越突出,其相关研究越显重要。本文基于车辆-轨道耦合动力学理论,对高速铁路动车组在线路上适应性设计方法进行了初步探讨,提出了以高速动车组为设计主体的线路适应性设计方法,介绍了该方法在中国标准动车组动力学性能设计工程中的应用情况,以期为我国高速铁路动车组设计提供一种新的思路和参考。

[关键词] 高速铁路;线路适应性;动车组;车辆-轨道耦合动力学

[中图分类号] U211;U270 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)04-0090-08

1 前言

高速铁路的最大特点是可以在地面上快速、稳定地实现大批量的旅客运输,在世界上发展很快,日本、法国、德国等铁路发达国家自1964年后相继开行时速200 km以上的高速列车。近年来,我国高速铁路发展突飞猛进,取得了举世瞩目的成就,为国民经济发展做出了不可磨灭的贡献。自2008年开通第一条时速250 km的合宁客运专线、第一条时速350 km的京津城际高速铁路以来,我国已经开通运营京沪、京广、郑西、沪杭、哈大等一大批高速铁路新线,绝大部分线路的开通运营速度最高达到了300 km/h。目前,我国高速铁路运营里程已经超过世界其他国家高速铁路里程总和,我国已成为世界上高速铁路运营里程最长、在建规模最大的国家。

与其他国家的高速铁路相比,中国高速铁路采用的轨道结构种类众多,包括有砟轨道、板式无砟轨道和双块式无砟轨道,每种轨道结构的铺设里程长,地域跨度大,轨道结构服役环境复杂。因此,不同的轨道结构设计参数不同、服役性能与状态变化

不同。中国高速铁路线路的特殊性将影响高速动车组的运行品质,同种类型动车组在不同类型轨道上运行时的轮轨相互作用也将有所区别。

安全与舒适运输是现代铁路的核心要素,如何确保高速铁路更加安全舒适运输,是现代铁路领域面临的重大课题,尤其是对于多种轨道结构类型、多种动车组的中国高速铁路,动车组在线路上适应性更是一个值得关注的问题。一方面,高速动车组对不同轨道结构线路的动力作用不同;另一方面,不同轨道结构线路状态对动车组运行平稳性和安全性的影响也不完全相同。因此,有必要加强开展高速铁路动车组在线路上适应性研究。

关于高速铁路动车组在线路上适应性研究,国内外相关研究工作鲜有报道,自西南交通大学翟婉明院士提出车辆-轨道耦合动力学理论^[1,2]以后,高速铁路动车组在线路上适应性越来越引起重视,该理论为解决这种复杂的轮轨系统性能匹配难题提供了理论基础和技术支撑。因此,本文基于车辆-轨道耦合动力学理论,对高速铁路动车组在线路上适应性设计方法进行了初步的探讨,以期为我国高

[收稿日期] 2015-01-30

[基金项目] 国家重点基础研究973课题(2013CB036206);中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2014G010-H)

[作者简介] 王开云,1974年出生,男,江西萍乡市人,研究员,博士生导师,从事机车车辆-轨道耦合动力学研究;E-mail: ywang@swjtu.edu.cn

速铁路动车组设计提供一种新的思路和参考。

2 高速铁路动车组在线路上的适应性问题的

到目前为止,高速铁路动车组在线路上的适应性问题越来越突出,主要涉及高速动车组运行安全性、旅客乘坐舒适性、车辆运动稳定性及车轮磨耗等,下面将简要介绍我国高速铁路中已存在的此类

问题。

2.1 安全性问题

在早期,我国某型动车组在北方某条客运专线上高速试运行,在部分直线轨道区段和曲线轨道上,高速机车车辆的轮重减载率(安全性指标)普遍达到或超出0.8(合格限值),如图1所示。

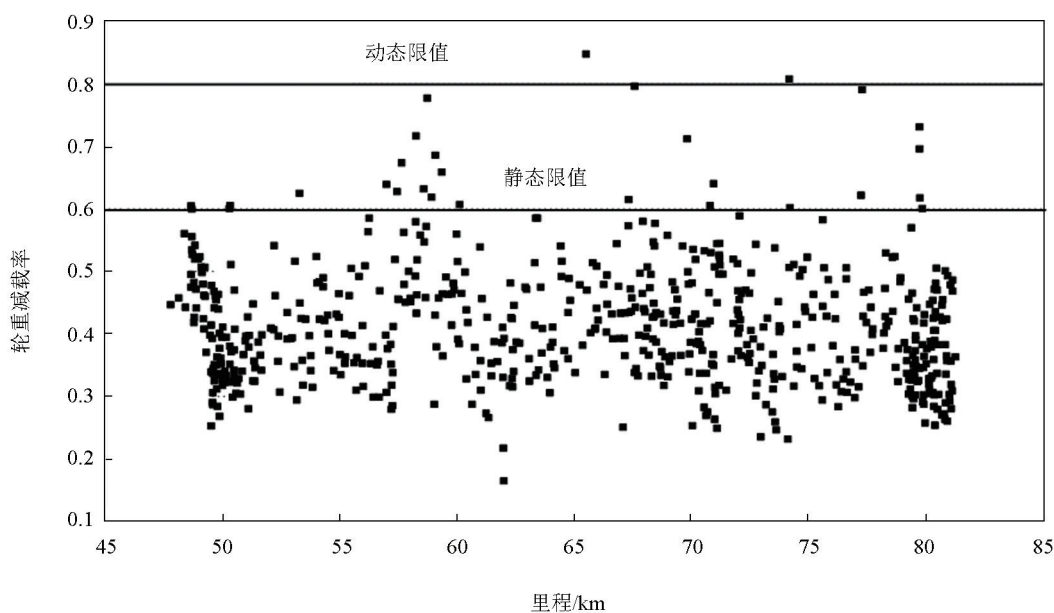


图1 轮重减载率的实测值

Fig. 1 Measured results of the rate of wheel-load reduction

该型动车组为引进车辆,在国外以相同速度等级运行时,未出现轮重明显减载的问题。理论与现场测试表明,该现象与线路状态和轨面几何状态密切相关。图2给出了波长范围1~45 m不平顺激励

下减载率的动态响应^[3,4],结果表明,在该不平顺激励下,轮重减载率普遍超出静态限值(0.6),最大值接近了1.0,超出了动态限值(0.8)。

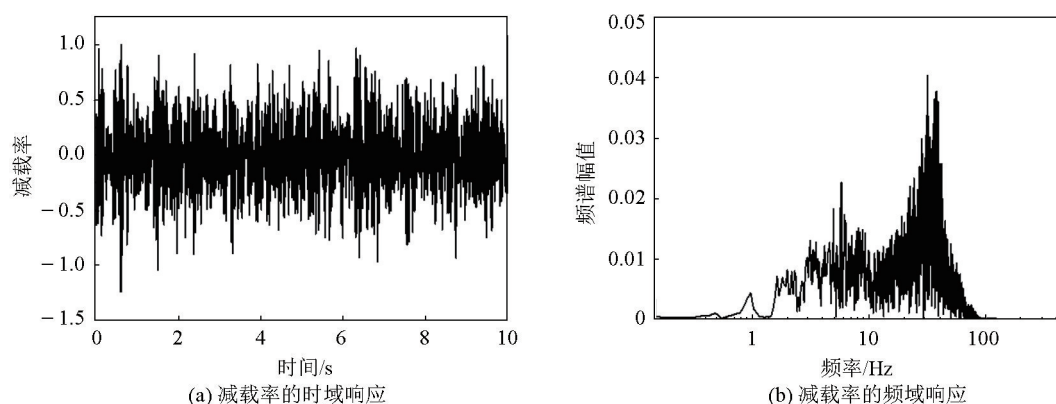


图2 轮重减载率的计算结果

Fig. 2 Calculated results of the rate of wheel-load reduction

2.2 舒适性问題

高速铁路平纵断面线形复杂,图3给出了一个典型的高速铁路平纵断面线形,动车组高速通过平纵断面线形时,平纵断面的线形与参数对高速行车时的舒适性有较大影响。图4给出了动车组以350 km/h的速度高速通过某高速铁路平纵断面(原始设计方案)时车体横向加速度的计算结果^[5],从图4可以看出,在该平纵断面条件下,车体横向加速度超过 $0.2g$ ($g=9.8\text{ m/s}^2$),不满足舒适度要求。



图3 某高速铁路典型平纵断面组合曲线
Fig. 3 Typical plan and profile section in high-speed railway

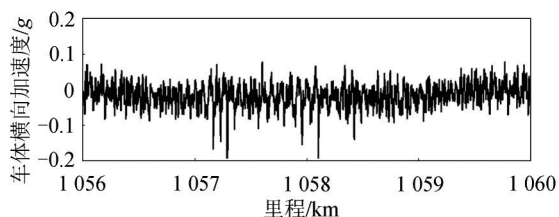


图4 动车组通过平纵断面时车体加速度响应
Fig. 4 Response of car body lateral acceleration on the plan and profile section

图5为某型动车组以240 km/h的速度通过某站附近道岔时车体振动加速度测试结果。由图5可知,当动车组通过道岔区域时,车体横向振动异常,最大振动加速度超过了 $0.3g$,远高于其舒适性限值,严重恶化旅客乘坐舒适性。

2.3 运动稳定性问题

对于临界速度非常高的高速动车组,线路状态差或者轨道结构参数与车辆参数性能不匹配将可能导致车辆失稳。图6给出了某高速车辆临界速度与轨下支承刚度的关系^[6],从图6中可以看出,扣件横向刚度对车辆的临界速度有较明显的影响。

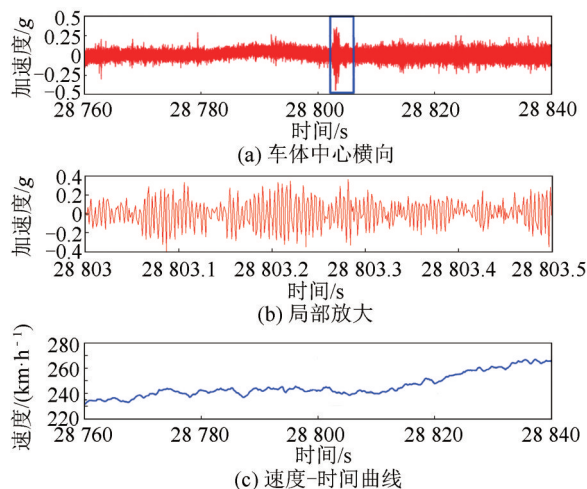


图5 动车组通过道岔时车体加速度测试结果
Fig. 5 Measured results of car body acceleration on the railroad switch

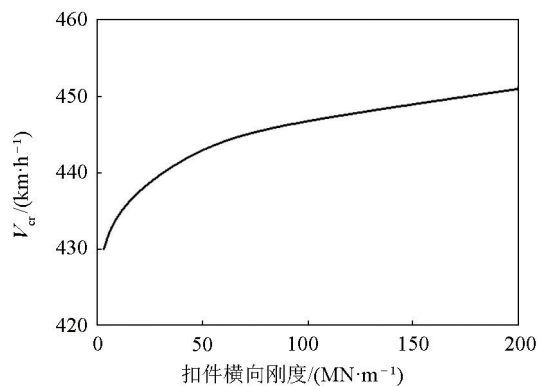


图6 扣件横向刚度对临界速度的影响规律
Fig. 6 Lateral stiffness of rail pad versus critical speed

2.4 车轮磨耗问题

动车组车轮磨耗非常严重(见图7),运营 $2\times 10^5\text{ km}$ 左右就需要镟轮,远低于设计目标值,大大提高了运营成本。

在进行车辆型面优化设计时,不仅要考虑车辆结构参数及动力学参数,还要考虑轨道结构参数对轮轨接触几何关系的影响,甚至需要考虑轨道结构类型(如有砟轨道、板式无砟轨道和双块式无砟轨道等)对轮轨关系的影响。图8给出了不同轨距条件下车轮踏面等效锥度 λ_e 随轮对横向位移 Y_w 的变化情况^[7],从图8中结果可以看出,轨距对轮轨接触几何关系影响较明显。

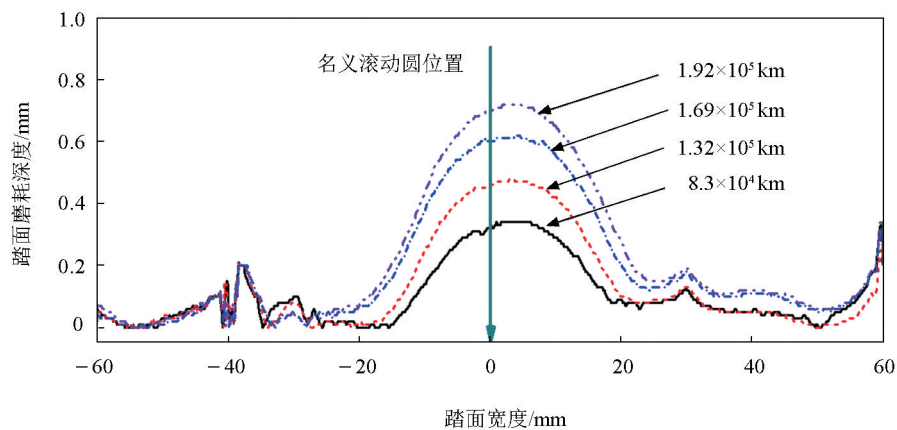


图7 不同运行里程下的踏面磨损深度

Fig. 7 Wear of wheel tread with different running distances

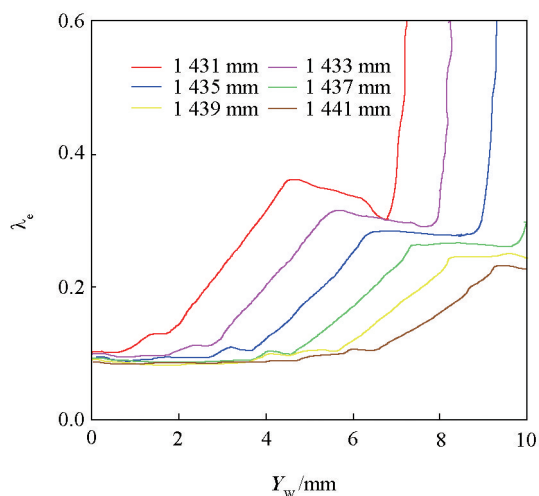


图8 不同轨距条件下车轮踏面等效锥度随轮对横向位移的变化

Fig. 8 Lateral displacement of wheel set versus equivalent conicity with different track gauges

综上所述,列车高速运行导致轮轨关系及轮轨动态相互作用变得十分复杂,动车组在线路上的适应性问题十分突出,对高速铁路轮轨关系及动态相互作用的线路适应性研究的需要也越来越迫切。

3 适应性设计方法

所谓高速铁路动车组在线路上的适应性设计,是指动车组系统和线路系统在动态性能设计上要相互适应、相互匹配,以期实现铁路机车车辆和线路系统动态性能的最优设计^[1,6,8]。

随着铁路列车速度不断提高,列车与轨道动态

相互作用日益增强,主要表现为:一方面,机车车辆对线路的动力破坏作用加剧;另一方面,轨道结构振动及线路几何状态对机车车辆运行品质的影响也越来越强。针对动车组在线路上的适应性问题,仅从车辆动力学角度进行研究是很难解释动车组与不同轨道结构类型及轨道结构状态的轮轨系统动态相互作用现象,必须从铁路大系统角度进行理论与试验研究,只有深刻认识轨道结构参振与高速铁路轮轨系统动态相互作用影响的规律,才有可能最大限度地实现高速动车组在线路上运行时的动力学性能最佳匹配设计,确保高速列车安全、平稳、高效运营。

因此,高速动车组在线路上适应性设计的核心技术是机车车辆与线路系统动态性能匹配。文献[1,6]指出:为了实现机车车辆与线路系统动态性能的最佳匹配,必须采用系统设计思想,将机车车辆系统和线路系统作为一个相互作用、相互耦合的整体系统,以整体系统动态性能指标作为优化目标,进行综合优化设计。

进行机车车辆与线路系统动态性能匹配时^[1,6,8],根据设计主体对象,可分别从机车车辆和线路工程的角度进行优化分析。但无论设计主体对象是机车车辆还是线路,都将对方视为主体对象的动态环境,通过机车车辆-轨道耦合动力学理论方法考虑对方的动态影响因素。因此,对于高速铁路动车组在线路上的适应性设计,笔者从机车车辆工程的角度,以高速动车组为研究对象,提出了一套设计方法和技术,其原理如图9所示。

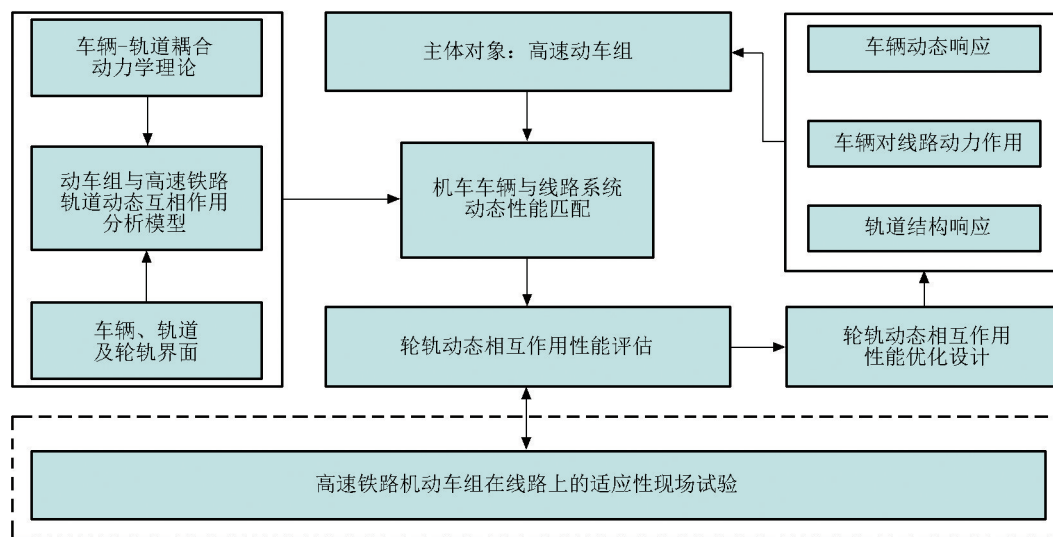


图9 高速动车组在线路上的适应性设计方法

Fig. 9 Method of adaptability design for high-speed electric multiple unit (EMU) running on the tracks

高速铁路动车组在线路上的适应性设计技术具体为:首先,基于车辆-轨道耦合动力学理论,考虑高速铁路动车组车辆结构及轨道结构,建立轮轨动态相互作用分析模型,并编制相应的计算机仿真分析软件,然后以高速动车组为研究主体,分析动车组在轨道上运行时的安全性与舒适性,并重点考核动车组对线路的动力作用,分析轨道结构振动响应;其次,对轮轨动态相互作用性能进行综合评估分析,并从车辆工程的角度进行优化设计,若轮轨动力学性能和低动力性能不满足要求,则针对主体研究对象的结构与动力学参数进行设计,重复进行计算与评估分析,直到性能指标满足要求为止。

需要说明的是,对于理论分析结果,若能通过现场试验,进行验证研究,则更具有实际指导意义。当然,在现场实施轮轨动力学性能测试是一个系统而又复杂的工程,往往要付出昂贵的人力、物力与财力,并且还要确保试验安全,因此并不是所有的理论分析都能够有条件进行试验验证。通常的处理方法是,对理论分析模型及仿真分析软件进行必要的试验验证,据此开展大量的仿真计算与理论分析,其结果亦具有重要参考价值与指导意义。

4 应用举例

针对我国高速铁路规模巨大、高速动车组技术平台众多的实际情况,以及高速动车组技术出口对

自主知识产权的具体要求,我国于2014年启动了中国标准动车组项目。中国标准动车组项目一方面旨在通过自主创新,打造适合中国国情、路情的高速动车组设计制造平台,实现全面自主化;另一方面是要建立统一的技术标准体系,实现动车组在服务功能、运用维护上的统一,提高效率,降低成本,以自主化、系列化和简统化为目标,打造中国标准动车组品牌,助力中国高铁技术“走出去”。

笔者及课题组积极参与了中国标准动车组项目的相关科研工作,应用课题组提出的线路适应性设计方法,对中国标准动车组在线路上的适应性进行了研究,重点研究了动车组在不同轨道结构上运行的动力学性能,并进行了对比分析,研究结果为中国标准动车组的动力学性能评估与性能改进设计提供了理论支撑。下面简要介绍一下研究进展。

根据我国高速铁路典型轨道结构类型,选用了有砟轨道、CRTS I 板式、CRTS II 板式、CRTS III 板式无砟轨道和双块式无砟轨道作为动车组线路适应性分析的动态环境和条件。由于 CRTS I 板式、CRTS II 板式、CRTS III 板式无砟轨道的动力学模型相同,仅动力学参数与结构参数不同,因此,这3种轨道结构模型统称为板式无砟轨道模型。图10~图12分别给出了车辆与有砟轨道、板式无砟轨道和双块式无砟轨道动态相互作用分析模型,图中符号说明参见文献[6]。

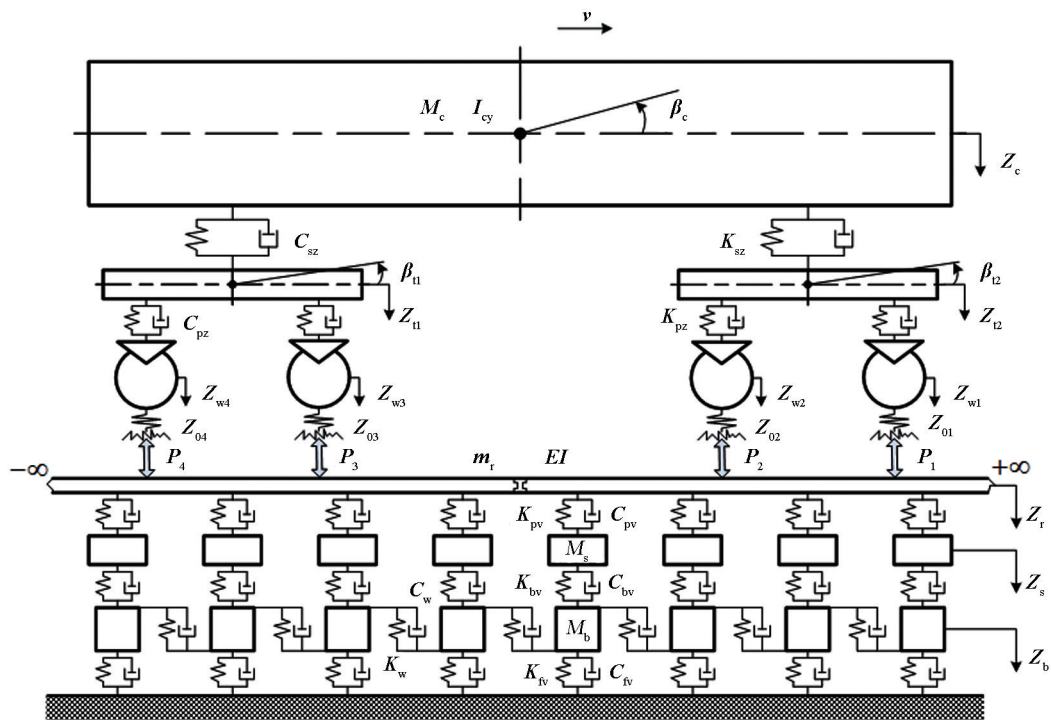


图 10 车辆-有砟轨道耦合模型

Fig. 10 Dynamic model coupling with vehicle and ballast track

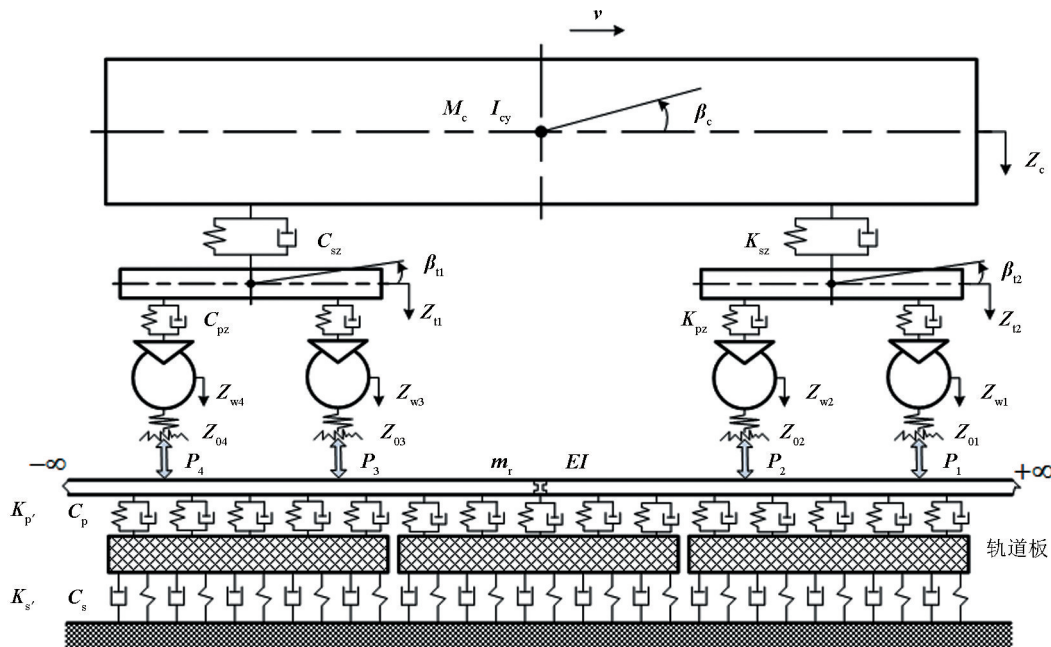


图 11 车辆-板式无砟轨道耦合模型

Fig. 11 Dynamic model coupling with vehicle and slab track

当动车组以 350 km/h 的速度通过半径为 7 000 m 的曲线时,CRTS I 板式、CRTS II 板式、

CRTS III 板式、双块式无砟和有砟 5 种轨道结构线路上的轮轨动态安全性指标计算结果如图 13 所示。

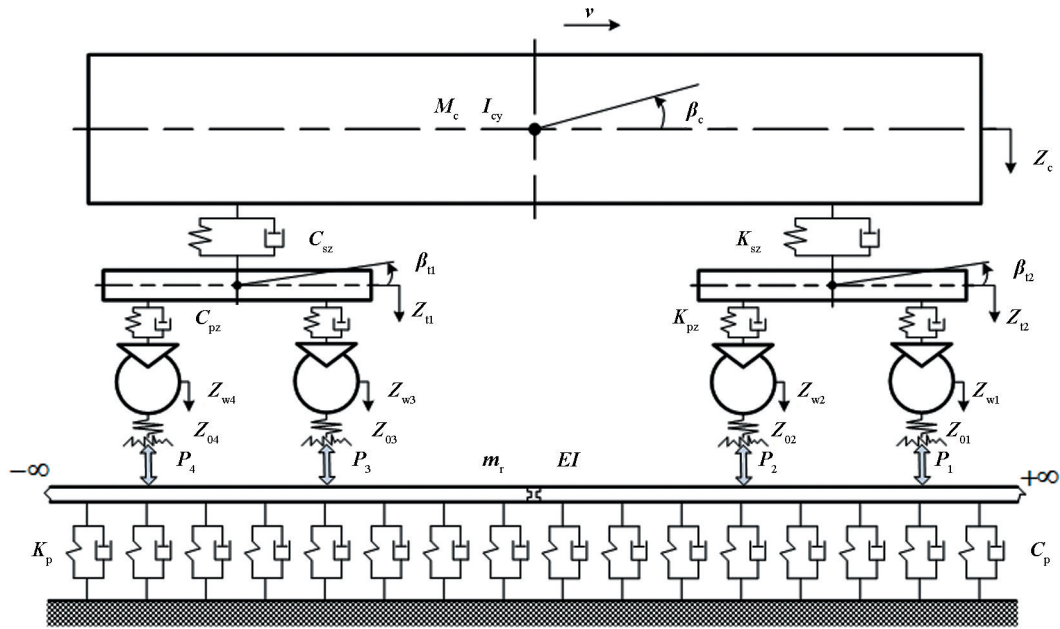
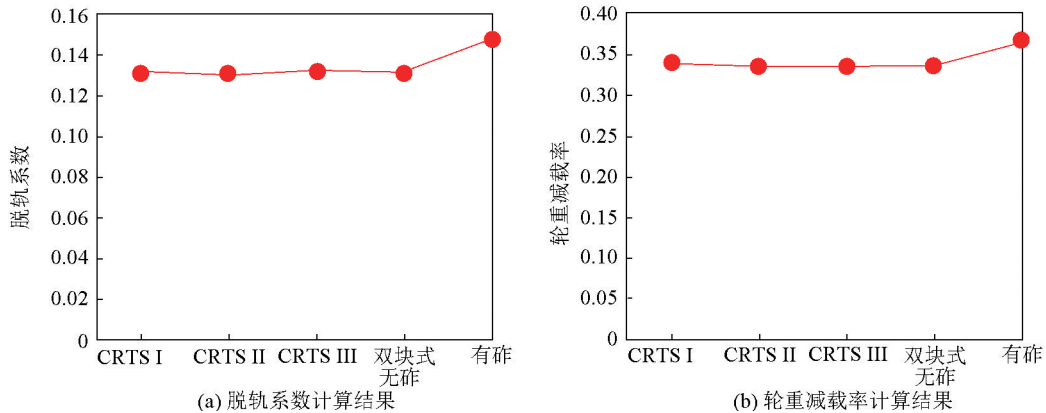


图 12 车辆-双块式无砟轨道耦合模型

Fig. 12 Dynamic model coupling with vehicle and double-block track



(a) 脱轨系数计算结果

(b) 轮重减载率计算结果

图 13 中国标准动车组与不同轨道结构相互作用的动力学性能

Fig. 13 Dynamic performance of Chinese high-speed EMU on different tracks

从图 13 中可以看出,所有的动力学性能指标均在安全限值范围之内,但轨道结构类型对中国标准动车组的动力学性能有一定的影响。总体上看,4 种无砟轨道结构上的安全性指标值较接近,有砟轨道结构上的安全性指标值均略高于 4 种无砟轨道结构上的值。例如,当动车组在有砟轨道上运行时脱轨系数最大值约为 0.15,在 4 种无砟轨道上运行时脱轨系数最大值约为 0.13;再如,对于轮重减载率,动车组在有砟轨道结构上运行时的指标值为 0.37,在 4 种无砟轨道上运行的指标值约为 0.34。上述分析表明,轨道结构类型不同,高速动车组的轮轨动力学性能指标略有差异,尤其是有砟轨道和无

砟轨道之间的差异更加明显。

5 结语

我国高速铁路轨道结构类型较多,动车组在不同轨道结构上运行时的轮轨动态相互作用特性存在一定的差异,动车组在线路上的适应性问题十分突出,进而将影响高速行车安全性与舒适性,因此,开展动车组在线路上的适应性研究具有重要的理论意义和工程应用价值。

本文从铁路大系统角度,对高速铁路动车组在线路上适应性设计方法进行了初步的探讨,提出了以高速动车组为设计主体的线路适应性设计方法,

并结合中国标准动车组动力学性能设计研究项目,介绍了该方法在工程中的具体应用情况,以期为我国高速铁路动车组设计提供一种新的思路和参考。

参考文献

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] Zhai Wanming, Wang Kaiyun, Cai Chengbiao. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics [J]. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2009, 47(11): 1349-1376.
- [3] 王开云, 司道林, 陈忠华. 高速列车轮轨动态相互作用特征[J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(5): 15-18.
- [4] 张卫华. 高速列车耦合大系统动力学理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] 蔡成标, 王开云. 京沪高速铁路线路平纵断面行车动力学检算报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [6] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(上册)[M]. 第四版. 北京: 科学出版社, 2015.
- [7] 王开云. 轨距变化对车辆运行品质影响的理论分析[J]. *结构工程师*, 2004(增刊): 554-558.
- [8] 翟婉明. 机车车辆与线路最佳匹配设计原理、方法及工程实践[J]. *中国铁道科学*, 2006, 27(2): 60-65.

The adaptability design method and its application for high-speed electric multiple unit on the track

Wang Kaiyun, Yuan Xuancheng, Zhai Wanming

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[Abstract] Nowadays, various track structures have been applied in Chinese high-speed railway, which obviously causes the adaptability problems for electric multiple unit (EMU) running on the tracks. It is significant to carry out the investigation of track adaptability. Therefore, based on the theory of vehicle-track coupled dynamics, the method of adaptability design for high-speed EMU running on the tracks is preliminarily discussed in this paper. By regarding the high-speed EMU as the design object, a method of track adaptability design is presented, which can supply a new idea and reference for Chinese high-speed EMU. Lastly, the application of this method is introduced in the dynamic performance design of Chinese standard EMU.

[Key words] high-speed railway; track adaptability; EMU; vehicle-track coupled dynamics