

# 高速列车服役性能研究

林建辉, 易彩, 张卫华, 丁建明, 刘璐, 张兵

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

**[摘要]** 高速列车运行时空上的跨越所面临的振动、环境变化,使其服役状态与安全状态始终处于时变状态,给高速列车安全保障与健康维护带来极大的挑战。随着高速列车运营里程的增长,高速列车服役性能的研究成为保障我国高速列车技术持续发展的重要课题。在分析高速列车服役性能基本内容的基础上,提出了高速列车服役性能检测体系,阐明了其建设内容与方案,并发展了高速列车走行部跟踪试验技术,跟踪试验对高速列车服役性能的研究具有显著成效与提升。最后,指出了本领域今后的发展趋势及需重点关注与加强的研究工作。

**[关键词]** 高速列车;服役性能;列车检测;跟踪试验;性能演变

**[中图分类号]** U270.1<sup>4</sup> **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)04-0083-07

## 1 前言

截至2013年年底,我国新建高速铁路运营里程已达到11 000余千米,初步形成了“四纵四横”高速铁路骨干网。据我国高速铁路发展规划网,到2020年将建成 $1.8 \times 10^4$  km的高速线路,形成“长三角”、“珠三角”和“环渤海”三个区域轨道交通网和对应的辐射网<sup>[1]</sup>。这标志着我国铁路已经进入了运行速度快、运行里程长、运行规模大的高铁时代,并将以更加迅猛态势继续向前推进。

随着我国高速铁路的蓬勃发展,路网规模的迅速扩大,高速列车关键技术与性能研究也趋见丰富与深入。然而,高速列车运行安全始终是高铁研究、建设与运行最关注的重点。高速列车运行时空上的跨越所面临的振动、环境变化,使其服役状态与安全状态始终处于时变状态,对高速列车安全预警与健康维护带来极大的挑战。再者随着高速列车服役时间的增加,与轮轨关系联系最为紧密的走

行部与轨道出现自身缺陷(如轮轨磨耗、部件失效、局部瑕疵、悬挂失效等)将导致高速列车系统动力学性能退化,存在脱轨、失稳等重大安全隐患,最终危及到高速列车的安全运营。另一方面,随着我国高速列车运营里程的不断增长,掌握高速列车全生命周期内各个关键部件及系统的服役性能演变规律,是进一步优化高速列车技术与主动控制高速列车运行安全的必要手段。因此开展高速列车服役性能研究,已成为高速列车可持续健康发展的当务之急。

随着列车提速,列车与固定设备及空气的相对运行速度提高,列车和线路、接触网与空气间的相互作用加剧。速度给高速列车带来的不仅是列车自身动力学性能的挑战,也带来了列车高速运行时的平稳性和稳定性问题,以及振动加剧所带来的结构可靠性问题;速度还导致列车与其相关的耦合振动加剧,这不仅加剧了线路和弓网振动,同时轮轨的高速滚动、弓网的高速滑动还将带来摩擦磨损和

**[收稿日期]** 2015-01-07

**[基金项目]** 轨道交通协同创新中心发展规划(2013—2016年)中国铁路总公司重大课题(2013J008-A)

**[作者简介]** 林建辉,1964年出生,男,四川成都市人,教授,博士生导师,研究方向为机车车辆、高速列车检测技术、信号分析与故障诊断;  
E-mail: lin13008104673@126.com

接触疲劳等失效问题;高速列车运行下的空气作用,不再是空气阻力和列车表面的压强问题,更重要的是气流作用所诱发的安全性问题。安全问题的升级,加上高速列车的服役生命周期异于普通车辆,因此高速列车在各个运用阶段的服役性能如何掌握与控制,与高速列车持续运用安全息息相关。我国高速列车技术虽然发展迅速,但起步时间较晚,运营经验不是很丰富,因此对于高速列车运用周期内的服役性能研究及运行安全问题应该引起高度重视。

本文在分析高速列车服役性能及其复杂服役环境特点的基础上,建立了高速列车服役性能检测体系,描述与探讨了高速列车服役性能跟踪试验的几点关键技术,并指出了该研究方向今后的发展趋势以及需要加强与深入的研究工作。

## 2 高速列车服役性能概述

高速列车服役性能一般采用动力学性能参数、安全性指标、振动特性等来描述与表征。文献[2~6]分别从轮对踏面锥度、车轮不圆、悬挂参数、轨道结构参数、轨道不平顺等列车参数或故障模式下研究了列车服役过程中服役性能的变化及对列车运行安全的影响。高速列车服役性能下降主要是由于参数的不稳定性和参数时变性引起的,或者是由材料变化和结构失效导致的。根据刚性结构的不可逆性,某一性能的下降,意味着该性能将会持续下降,直至恶化,抑或引起其他系统或部件的服役性能也同时下降。高速列车运行速度高,运动形式具有特殊性和多样性,从而导致这一问题更为严重,速度越高,更容易加速加剧服役性能的演变与下降。探索高速列车服役性能演变规律,先从单一部件或系统入手,基于耦合动力学分析,找到部件与系统间的相互作用关系,才能准确地了解与掌握整车的服役性能及其发展趋势。

高速列车动力学研究的理论和方法都比较成熟,不管是在单车还是列车上都有众多的研究成果,研究工作大多聚焦于构架、车轴、轮对等几个关键部件,研究的理论大多基于多刚体动力学理论,在低频范围内关注列车运动稳定性、平稳性及安全性<sup>[7~11]</sup>。可以说高速列车的正向力学行为研究得到了充分的发展,能够分析高速列车在特定线路条件下的各种力学行为及其性能指标,这对高速列车的设计、制造与系统集成优化具有重大的理论与现实

意义。但随着高速列车在役时间的增加,高速列车自身的结构参数会发生缓慢变化,如一系弹簧的刚度、车轮踏面磨耗等,在特殊情况下可能出现瞬态突变,如二系空气弹簧的失气、车轮磨损擦伤、钢轨断裂等,甚至引起结构部件的形位误差。列车的结构参数、装配误差或者尺寸误差一旦发生变化,其服役力学性能将偏差或恶化于设计或出厂状态。由于发生性能偏离,基于正向力学分析的方法不能满足高速列车服役安全保障技术的需要;而且随着车辆高速化发展,线路不平顺引起的随机激励的频域加宽,车辆部件间的耦合振动更加复杂,基于仿真计算的理论研究需要考虑的参数和因素需更加全面与极端。因此,高速列车服役性能的研究更需要依赖高速列车服役性能的实时跟踪检测,利用现代信号处理理论、智能信息处理方法与动力学理论进行交叉融合,基于检测与监测到的物理特性,反演车辆部件、系统及整车的服役性能,才能更贴合实际需求地指导列车安全运用、科学检修、优化设计。

## 3 高速列车服役性能检测体系

试验检测是科学研究最基本、最直接、最有效的方法。高速列车是高速铁路的主体,与环境、轨道、受电弓和空气相互作用,各部分出现的问题都始于高速列车的运行,最终又集中反应到高速列车的响应上。因此,建立高速列车动态响应的检测体系是掌握与研究高速列车服役性能的基础。不仅可以通过高速的运行响应直接确定高速列车动态行为,同时也通过高速列车的运行响应和运动界面(轮轨和弓网)的振动状态,推断线路和接触网状态,从而实现车对车和车对地的状态检测。

我国从第一条高速铁路——京津城际客运专线开始,就在常规的联调联试之外增加了科研性试验。采用无线检测、卫星定位等技术,从全程监控角度,测试、纪录高速列车在运行中的动态响应。随着列车速度的提高,列车轮轨作用、弓网耦合作用、流固耦合作用加剧,高速列车服役性能研究不仅仅局限于列车在高速运行时的运行状态和动态行为,还需要综合研究高速列车在运行时与线路、接触网及周围环境的相互作用。基于高速列车运行时力学行为研究,高速列车服役性能检测体系基本内容包括以下几个方面<sup>[12~15]</sup>。a.弓网接触状态检测:受电弓气动升力、弓的气动阻力与迎面风速、弓

网接触压力、接触网应力和接触热等。b.列车状态检测:轴箱、构架、电机、齿轮箱垂、横、纵向振动,车体振动及动应力,轴承、电机等关键部件温升,一、二系减振系统横、垂向位移及振动。c.轮轨接触状态检测:轮轨横向力与垂向力的大小及作用点位置检测。d.轨道状态检测:轮轨的磨损状态检测、线路

不平顺检测、轨道耦合振动的传递规律检测等。e.气流状态检测:列车阻力、压力、气流及侧风特征检测,特别是列车会车及进入隧道时列车表面的压力变化等。f.线路周边环境状态检测:线路状态、建筑限界。

高速列车服役性能检测体系与高速列车各方面力学行为及服役性能的映射关系如图1所示。

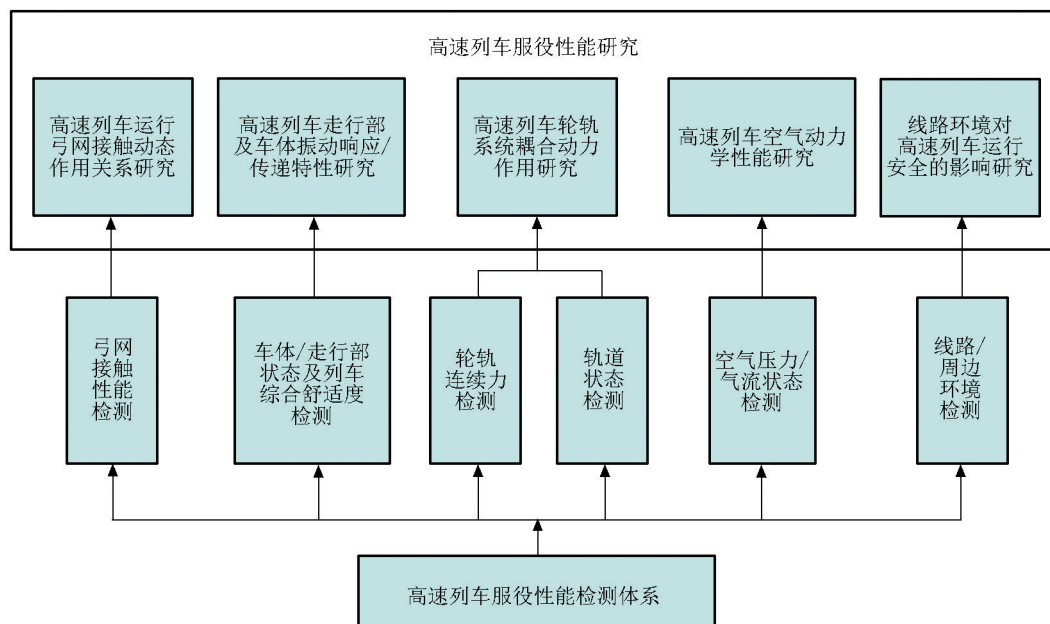


图1 高速列车服役性能检测体系

Fig. 1 High-speed train service performance testing system

接触网是与高速电气化铁路安全运营直接相关的架空设备,是整个牵引供电系统最为薄弱的环节,接触网的不平顺直接作用于受电弓,对动车组产生激励。因此对其不平顺的检测与控制直接决定高速列车受电弓的受流质量,影响列车的运行速度和安全。弓网接触性能演变规律的研究,更有助于探索最佳弓网匹配方案,优化受电弓结构及受流方式。

走行部是影响高速列车运行安全最为关键的部件之一。走行部动态响应的检测是高速列车服役性能研究的重点。走行部异常振动检测主要针对轴箱、构架、齿轮箱、电机、车体等关键部位。由于高速列车存在明显的尺度特性,走行部结构复杂,力耦合和众多随机因素影响作用显著,异常振动源难以判断,可能是系统故障引发也可能是轨道不平顺所产生的激励,因此采用统一的参数阈值来评判走行部服役性能是不科学的。基于各个关键部件的服役性能演变规律,总结走行部安全性态发展趋势,才能更全面地掌握走行部服役性能。

轮轨磨损及轨道几何不平顺会对车辆产生激励,导致车辆沉浮振动、横向滚摆、左右摇摆、侧滚等耦合振动,从而进一步引起轮轨磨损加剧的同时,还将影响车辆运行的平稳性和安全性;轮轨关系是车辆和轨道系统中基本而复杂的问题之一。轮轨相互作用力的检测是研究轮轨关系的基础,也是评价转向架性能、车辆运行品质必不可少的参数。

高速铁路是十分复杂的系统工程,需要多学科技术的支持,许多列车在低速时可以忽略的现象,高速时却变得非常重要。列车与空气间的相互作用就是一个突出的例子:列车高速运动引起的具有强烈湍流特性的列车风对站台及铁路沿线人员及建筑安全具有极其严重的影响;反之,具有强烈脉动特性的空气作用在高速运行的列车上,特别在恶劣的自然风条件下,不仅使列车受到的气动阻力增加,而且使列车受到的侧向力和侧滚力矩增大,严重影响列车安全运行,甚至引起列车脱轨等重大安全事故。由于地理条件的限制,铁路沿线通常需要

设置隧道。当高速列车进入、通过、在隧道内交会和驶出隧道时,列车与隧道内空气之间的相互作用也要引起一系列的空气动力学效应,不仅严重影响列车运行安全性、运动平稳性和乘坐舒适性,而且对高速铁路及高速铁路隧道建设费用均具有极其重要的影响。可见,高速列车运行过程中对空气压力及气流状态进行检测,也是开展高速列车列车服役性能研究的重要内容。

高速列车的运行品质和运行安全性不仅仅取决于高速列车自身的性能,同时依赖于线路、供电、信号甚至天气等运行环境的状态。为评价列车实时的服役性能,如平顺性、平稳性等,需充分结合路基、桥梁、隧道结构等实时线路环境信息,排除环境干扰与影响,同时应考虑环境因素对列车服役性能的作用关系。

#### 4 走行部跟踪试验技术

高速列车跟踪试验,顾名思义是指对高速列车实行全过程全生命周期的跟踪检测、监测、评估、优化改进等。我国高速列车的发展历程中利用线路科学研究试验,联调联试,运行考核试验等验证新技术和新产品的性能。我国高速列车技术历经200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h、380 km/h的台阶,走上快速发展的道路,单项、短时的科学性实验逐步发展为实行跟踪试验,在京津、武广、京沪等干线上,固定几列车组,持续跟踪,为我国高速列车安全监控和今后的技术改进提供了重大支撑,是高速列车全过程工程管理上迈出的重要一步。

##### 4.1 试验内容

对高速列车走行部实施跟踪试验,可对线路轮轨磨耗的形成过程进行跟踪监测,以进一步研究轮轨磨耗及波磨的形成机理;通过轨道状态、轮对振动、构架和车体的振动的实时检测,进一步研究高速动车组在线路作用下的振动传递关系。另外通过线路跟踪试验,完善应用日益广泛的数字化仿真模型,还可以为数字化仿真和实验室的基础试验及研究提供轨道参数、载荷谱等边界条件和应用条件。跟踪试验是高速列车服役性能检测体系建设的必要手段。基于高速列车服役性能检测体系建设内容及高速列车动力学基础研究成果,高速列车走行部服役性能跟踪试验的主要内容应包括以下几个方面。

1)动力学性能检测。旨在探索高速列车在持续高速运行一定里程后的运行平稳性、舒适性变化

规律,性能演变规律,以及掌握轴箱-构架-车体的振动传递关系。基于轴箱振动的检测,分析车轮擦伤与列车运行服役时间的关系;基于构架振动的检测,监控列车运行中的失稳状态;基于车体振动的检测,评判列车运行的平稳性指标;基于轴箱、构架、车体运行姿态的检测,分析车体、构架、轴箱的动态行为,判断抗侧滚减震器的工作状态;基于转臂节点的振动检测,掌握列车垂向动力学特性;基于抗蛇形减震器加速度和温升检测,判断其是否性能失效。

2)结构可靠性研究。基于对高速列车轮对踏面形状的跟踪检测,掌握在镟轮周期内车轮踏面的磨耗状态对车辆动力学性能、关键部位(转向架构架、电机、车体、车下悬吊及设备舱)的载荷谱、振动特性及其各零部件的振动传递关系的影响。基于转向架动应力的监测,建立运用载荷工况下应力-速度关系曲线和载荷应力谱,结合踏面磨耗形状测试分析动应力的变化规律,评估各承载部件的结构可靠性。基于车下悬吊设备本体、吊座、车体吊挂横梁及设备舱典型部位动应力与振动加速度的检测,获得设备实际载荷谱,掌握其振动特性及其传递关系测试。

3)牵引传动系统温度检测。通过对牵引传动系统(牵引变压器及牵引变流器、牵引电机温度、齿轮箱、轴箱等)温度的跟踪检测,研究运行速度、线路条件、温度、运用维护状态等外界条件对牵引传动部件冷却系统的影响及牵引传动关键部件的各参数时间历程特征。通过对不同速度级、线路条件、检修维护状态持续温升的跟踪测试,研究牵引及冷却系统各部件的温升与功率、速度、时间的关系,与运行环境(温度、湿度、灰尘)、线路条件及检修维护状态的关系,研究其长距离高速持续运行能力。

4)舒适度测试。通过跟踪监测车内压力,研究在不同季节、滤网不同状态下车内压力变化趋势。通过对车内振动、噪声和温度进行测试,掌握地板的振动特性、传递关系和变化规律以及客室内噪声水平和温度,研究旅客乘坐舒适度。

##### 4.2 关键技术

由于高速列车的特殊性,走行部跟踪试验系统的设计有必要关注与研究以下几个问题。a.如何实现检测设备与高速列车的有机融合,确保不影响高速列车设计品质的前提下对高速列车进行全寿命检测与监测。b.针对高速列车关键设备与系统所处的恶劣电磁环境、复杂温湿气候环境等极端服役条

件,如何保障传感器件的可靠性,提升抗干扰能力及误差补偿技术。c.车内和车(车体)外数据传输问题。由于车体密闭,无法设置信号线,车外信号如何向车内传输。d.不同检测装置的数据同步问题。由于需要研究列车耦合系统问题,所有检测信号必须同步才能科学进行耦合作用研究,如何同步。e.车载信号到地面的数据传输问题。车载检测系统的测试状态和检测结构必须实时传输到地面,数据采取什么方式才能精确、实时地实现远程传输。f.海量数据传输问题。车载检测信号是海量数据,无线网络难以实现。g.高速列车运行对无线传输的影响以及无线传输的多普勒效应等问题。

### 4.3 试验结果

走行部跟踪试验为掌握高速列车关键部件的服役性能提供了最为原始与珍贵的研究基础。图2为某一高速列车车下水箱与换气装置振动加速度检测图,图3为该换气装置垂向和横向振动加速度

随里程增加的变化规律,在列车运行到 $1.2 \times 10^5$  km到 $2.1 \times 10^5$  km间,该换气装置上中下位置的振动都有所增长,但变化较为缓慢,通过该装置全过程周期的跟踪检测,可以进一步掌握其性能演变规律,同时还能了解不同速度、服役环境下该装置不同的振动响应,研究该装置振动与走行部其他部件的作用关系。图4和图5分别是某一高速列车垂向平稳性与舒适度随里程增长的演变趋势。由于数据量太大,图中只计算了四个里程数下的结果,分别是 $1.4 \times 10^4$  km、 $1.12 \times 10^5$  km、 $1.52 \times 10^5$  km、 $2.7 \times 10^5$  km,图中横坐标表示的是不同的运行路段。由图可知,随服役里程增长,列车的平稳性与舒适度都有所下降,且不同线路条件下,列车性能也是不同的。列车服役性能的跟踪检测及演变规律分析,可以更有效地指导高速列车的维护检修工作,科学地制定检修周期,降低列车维护成本。



图2 某一高速列车车下水箱与换气装置振动加速度检测图

Fig. 2 High-speed train water tank and ventilation device vibration acceleration monitoring

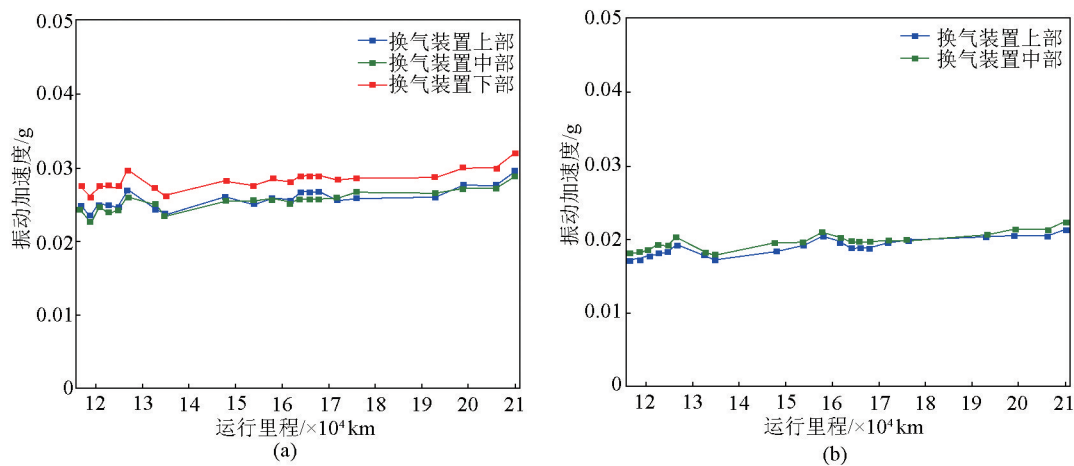


图3 某一高速列车换气装置垂向与横向振动加速度随里程变化演变规律

Fig. 3 The evolution law of vertical and horizontal vibration of high-speed train ventilation device

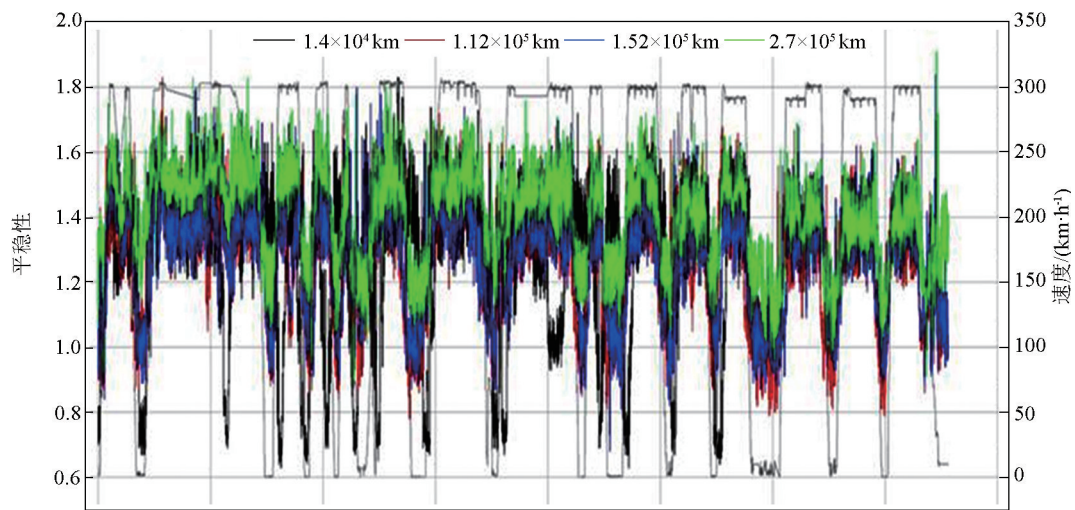


图4 某一高速列车平稳性演变规律

Fig. 4 The evolution law of stationarity of high-speed train

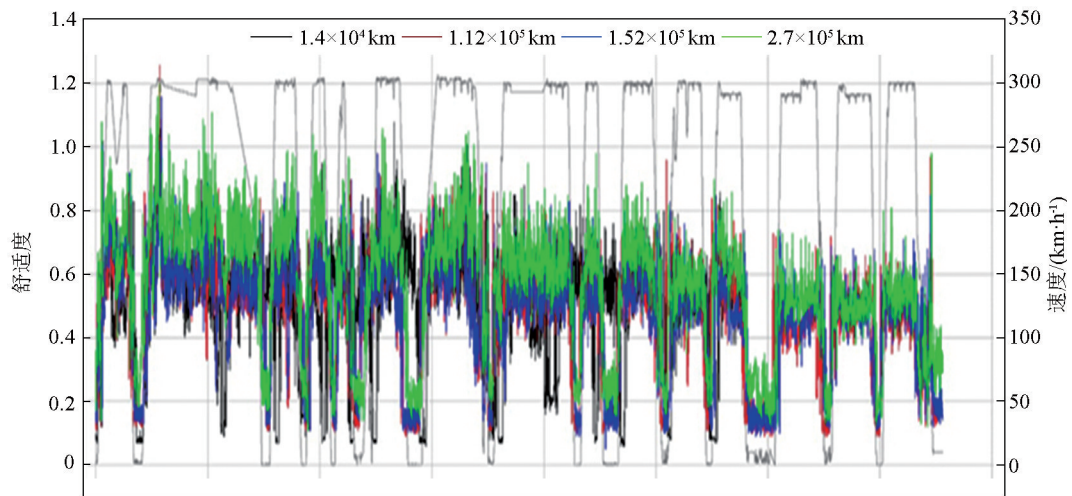


图5 某一高速列车舒适度演变规律

Fig. 5 The evolution law of comfort performance of high-speed train

## 5 发展趋势及今后的研究方向

根据高速列车服役性演变与服役安全的发展现状与最新进展,展望本研究方向发展趋势,今后关于高速列车服役性能安全,应重点关注并加强以下几方面研究工作。

1)在高速列车智能化检测技术方面,需要进一步结合先进的检测技术,如光纤、红外等,提高安全状态信息的检测精度及可靠性;研究系统架构与各类子系统的统一状态监测信息架构、接入协议、车地无线传输、数据接收与存储等技术。

2)在研究高速列车运行安全状态识别方面,需开展多重神经网络、数据挖掘、故障树、马尔可夫模型、Hilbert-huang等数学或信号处理方法在高速列

车状态识别领域的应用研究,形成各个部件或部位安全性能或状态自适应辨识技术。

3)在发展高速列车服役性能状态信息共享平台方面,需实现行车、线路、环境、防灾、车辆等综合监控信息集成,综合评判车辆当前运行安全性,提出车辆安全防护分级原则,完善预警机制<sup>[16]</sup>。

4)在研究高速列车关键零部件性能阈值方面,需进一步研究零部件振动对零部件性能的破坏程度,研究零部件失效限度,根据高速列车在线路不平顺和气流扰动下的振动规律,研究零部件服役性能量化评价方法与模型。

5)在高速列车服役性能量化评估方面,研究列车状态与动力学指标的数值映射关系,确定车轮不同几何形貌、悬挂元件不同性能参数、不同轨道状

态、不同运行速度条件下的高速列车稳定性指标、平稳性指标及脱轨系数等的安全作用域,最终形成综合直观的评价列车运行安全程度的量化指标。

#### 参考文献

- [1] 张卫华,王伯铭.中国高速列车的创新发展[J].机车电传动,2010,50(1):8-13.
- [2] 曾京,邬平波.高速列车的稳定性[J].交通运输工程学报,2005,5(2):1-4.
- [3] 池茂儒,张卫华,曾京.轮径差对行车安全性的影响[J].交通运输工程学报,2008,8(5):19-22.
- [4] 池茂儒,张卫华,曾京.高速客车转向架悬挂参数分析[J].大连交通大学学报,2007,28(3):13-19.
- [5] 王开云,翟婉明,蔡成标.轮轨结构参数对列车运动稳定性的影响[J].中国铁道科学,2003,24(1):43-48.
- [6] Karim H, Ali Abood, Rasheed Ahmad Khan. Investigation to improve hunting stability of railway carriage using semi-active longitudinal primary stiffness suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering Research, 2010, 2(5): 97-105.
- [7] Hans True. On the theory of nonlinear dynamics and its application in vehicle systems dynamic[J]. Vehicle System Dynamics, 1999(31): 393-421.
- [8] Oldrich Polach. Characteristic parameters of nonlinear wheel/rail contact geometry[J]. Vehicle System Dynamics, Supplement, 2010(48): 19-36.
- [9] 陈泽深,王国成.铁道车辆动力学与控制[M].北京:中国铁道出版社,2004.
- [10] Jerry Evans, Mats Bergb. Challenges in simulation of rail vehicle dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(8): 1023-1048.
- [11] 张卫华.机车车辆动态模拟[M].北京:中国铁道出版社,2006.
- [12] 张兵.列车关键部件安全监测理论与分析研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [13] 王靖.列车轮对故障振动特性及诊断关键技术研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [14] Carrarini A. Reliability based analysis of the crosswind stability of railway vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007 (95): 493-509.
- [15] Wang Chunsheng, Chen Airong, Chen Weizhen, et al. Safety assessment of existing riveted railway bridges [J]. Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Steel Structures, 2005: 1651-1656.
- [16] Braband J. A proposal for common safety methods and risk assessment in European railways [J]. Signal Draht, 2007, (4): 34-37.

## Study on high-speed train service performance

Lin Jianhui, Yi Cai, Zhang Weihua, Ding Jianming, Liu Lu, Zhang Bing

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

**[Abstract]** Due to the space-time span, there always is variation on the vibration and climate, which makes the service status and safety state of high-speed trains remain the time-varying, and at the same time it brings huge challenges to high-speed train security assurance and health maintenance. As the growth of the high-speed train operation mileage, studying on the service performance of high-speed train become an important topic as a guarantee for sustainable development of China's high-speed train technology. Based on the content analysis of the high-speed train service performance, the high-speed train service performance testing system is presented, and its construction content and scheme is expounded. On this basis, the high-speed train tracking test technology is developed, which has significant efficiency and promotion for the studying on service performance of high-speed train. Finally, the development trend and strengthen research work of this study field in the future is indicated.

**[Key words]** high-speed train; service performance; train detection; tracking test; performance evolution