

# 轨道车辆动力学与控制研究进展\*

杨绍普<sup>†</sup> 刘永强

(石家庄铁道大学, 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 050043)

**摘要** 作为动力学与控制学科的一个分支, 车辆动力学与控制方向的研究近年来一直很受重视。轮轨式轨道车辆在基础研究、技术攻关和产品研发等领域不断取得重要进展, 这得益于近 20 年来我国轨道交通领域的快速发展和国家科技部门的大力支持。本文从我国轮轨式轨道车辆的发展趋势、特点和运营过程中遇到的主要问题等研究角度出发, 重点介绍了轨道车辆的载荷分析与减振降噪方法, 轨道车辆动力学建模、计算方法和新型结构的动态设计, 以及轨道车辆关键旋转部件的状态识别等三个方面的研究成果。这些成果在一定程度上反映了作者们目前所关注的问题和拟解决途径, 希望能给轨道车辆动力学与控制领域的其他研究者们提供一些借鉴和参考。

**关键词** 轨道车辆动力学, 高速列车, 减振降噪, 动力学建模与仿真, 状态识别

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-069

## 引言

车辆动力学作为动力学与控制的一个学科分支, 其研究对象主要为公路车辆和轨道车辆, 而轨道车辆又包含传统的轮轨列车、单轨列车和近年来兴起的磁悬浮列车、真空管道列车等, 这些不同类型的列车在车辆构造、运行方式和轨道结构等方面均存在着明显的差异。本文着重探讨传统轮轨式列车在载荷识别、动力学响应分析、结构设计、悬挂控制和状态识别等动力学问题的研究进展。

近年来, 我国轮轨列车主要在高速客运、重载货运和城市轨道交通三个方向上得以快速发展, 在基础研究、技术攻关、产品研发等领域不断取得重要进展, 为推动全国交通体系的进一步完善、国民经济的发展和人们出行的便捷等方面做出了突出的贡献。尤其是我国高速轨道交通更是取得了日新月异的进步, 目前已实现高速铁路运营里程达 3.5 万公里、在役高速列车编组超过 3600 列、最高运营速度超过 380 km/h、拥有完全自主知识产权的新一代标准动车组等重大成就<sup>[1]</sup>, 在受到全世界瞩目的同时, 部分技术和产品也走出国门, 为世界轨道交通的发展做出了贡献。

从 21 世纪初投入运营的第一代时速 200 公里

级别动车组开始, 大规模的长、短编组列车相继投入运营, 在我国高速铁路运营里程长、运行速度快、列车运行密集、启停频繁等特点的影响下, 列车在服役过程中遇到了一些动力学方面的问题, 例如: 齿轮传动系统和轴箱轴承等关键部件的疲劳破坏、车体异常晃动、轮轨异常磨耗、噪声污染、动力学性能恶化等<sup>[2-6]</sup>, 这些问题的解决一方面需要一线工程师们的调研、测试和记录工作, 另一方面也需要科学家们从基础研究入手探索其背后的机理和规律, 为彻底解决这些问题奠定基础。在这个过程中, 国内的科技工作者们进行了大量的研究, 也取得了丰硕的学术成果<sup>[1,7-12]</sup>。

在《动力学与控制学报》上出版轨道车辆动力学专刊尚属首次, 这一工作一方面得益于近年来我国轨道车辆领域蓬勃发展, 吸引了一大批的专家和学者开展研究工作, 另一方面在国家自然科学基金等基础研究项目的大力支持下, 轨道车辆动力学方面的许多基础理论问题取得重要进展, 比如翟婉明院士系统地提出的车辆—轨道耦合动力学理论, 这一新的理论能够更加全面准确地解决高速和重载铁路的列车与轨道的动力相互作用问题, 目前围绕这一理论的众多研究成果已广泛应用于铁路工程领域<sup>[13]</sup>。

2020-06-10 收到第 1 稿, 2020-06-12 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目 (11790282, 11802184, 11902205)

<sup>†</sup> 通讯作者 Email: yangsp@stdu.edu.cn

本次轨道车辆动力学与控制专刊从国内多个科研院所征集了14篇优秀的学术论文,其中载荷分析与减振控制、噪声抑制方面6篇,新型结构的设计、建模与仿真分析方法方面5篇,关键旋转部件的安全状态识别方面3篇。接下来,本文就从轨道车辆的载荷分析与减振降噪方法,轨道车辆动力学建模、计算方法和新型结构的动态设计,以及轨道车辆关键旋转部件的状态识别等三个方面介绍目前的主要进展情况。

## 1 轨道车辆的载荷分析与减振降噪方法研究

随着列车速度的不断提高,车辆与线路之间的作用力加剧,列车在复杂轮轨激励的作用下容易出现振动和噪声水平的升高,车辆运行的稳定性、安全性和运行品质都会受到很大影响。因此,有必要研究车辆所受的载荷特征和在载荷作用下车辆动力学性能的变化规律,以及走行部和悬挂系统在抑制振动和噪声方面所起到的作用等。

针对轨道车辆所受的复杂载荷特征分析方面,北京交通大学的任尊松教授以国内某型动车组轮轨载荷为研究对象,利用测力轮对在大同一西安的高速铁路线上测量了实际的轮轨力时间历程曲线,并按不同速度等级、线路区段、每一趟往返等不同工况进行抽样和统计,编制了64级时域载荷值谱和峰值值谱,分析其变化趋势及原因,研究结果为后续轮轨疲劳及动力学研究提供试验和理论基础。

在悬挂系统参数对车辆动力学性能的影响方面,西南交通大学牵引动力国家重点实验室的陈再刚博士与中车唐山机车车辆有限公司合作,对公司研发的新型高速货运动车组开展了动力学建模和仿真研究,研究了一系定位刚度对车辆运动稳定性、运行安全性和平稳性的影响,揭示了车辆主要动力学指标随一系定位刚度的变化规律,为后续动车组的安全运营提供了理论支撑。另外,石家庄铁道大学的戚壮博士以某型采用纵向耦合边驱电机转向架的100%低地板轻轨车为对象,通过SIMPACT-MATLAB联合仿真的方式,研究了空气弹簧在100%低地板轻轨车运行时车辆动力学性能的变化情况,从车辆运动稳定性、运行平稳性和曲线通过性等方面证明了空气弹簧在100%低地板轻轨车上的应用可行性。

在主动/半主动悬挂系统的设计和优化方面,西南交通大学的姚远教授提出了基于构架横向振

动的高速列车稳定性主动控制方法,讨论了采用惯性作动器控制构架横向振动,以及对动力转向架驱动系统采用主动弹性悬挂这两种实施方式。以车辆蛇行稳定性指标和控制力作为两个目标函数,利用遗传算法(NSGA-II)优化了该主动悬挂系统的控制参数和驱动系统悬挂参数,并解决了控制系统中的时滞问题。石家庄铁道大学的赵义伟和刘永强等基于传统的开关型和连续型天棚阻尼控制,提出了一种连续型混合控制,该控制策略可以兼顾上述两种传统控制策略的优点,频域控制范围更大,振动控制效果更好。研究结果通过UM-Matlab联合仿真进行了验证。

在轮轨噪声的预测和抑制方面,同济大学的杨新文教授采用模态叠加法求得阻尼车轮导纳特性,并利用已建立的轮轨滚动噪声预测模型,以轮轨表面粗糙度为激励,分析了辐板阻尼层与其厚度对阻尼车轮振动与声辐射特性的影响规律。计算结果表明:车轮辐板敷设阻尼层对1600 Hz以上的高频振动和噪声具有良好的抑制作用,双侧敷设阻尼的降噪效果优于单侧阻尼,车轮辐板敷设阻尼层厚度越厚,振动抑制效果越明显。

## 2 轨道车辆动力学建模、计算方法和新型结构的动态设计

为了改善非线性车辆系统的计算效率,北京交通大学的杨超博士引入广义多步显式积分算法,并根据非线性系统的特性将该算法改造为增量格式,采用增量格式的广义多步显式积分算法分别研究了列车连挂冲击和列车中低速碰撞问题,结果表明该算法计算效率更高,稳定性更好。针对轨道车辆系统临界速度的不确定性问题,成都理工大学的高学军教授推导了高维多阶基于正态分布场的Hermite正交多项式,建立临界速度与随机参量之间的函数关系,分析了不同变异系数下转向架悬挂系统部件左/右、前/后均服从独立正态分布时临界速度的变化规律,并对各参量灵敏度指标进行了计算和排序。

为了研究车轮不同耦合方式对其车辆导向性能的影响,石家庄铁道大学的戚壮博士分别建立了传统轮对、独立旋转车轮、纵向耦合车轮和弹性阻尼耦合轮对转向架动力学模型,分析其导向机理及纵向蠕滑力,通过仿真确定不同耦合方式车轮车辆的曲线通过规律。为了研究闸瓦制动力不均衡状态下的轮轨接触行为,刘鹏飞博士利用仿真软件

UM建立重载货车动力学模型,以紧急制动工况为例,分别对一、二位轮对只施加左、右轮不一致的闸瓦压力,得到了车辆直线运行时不平衡闸瓦压力对轮对运行姿态和轮轨动态接触行为的影响规律和主要影响因素。

针对变轨距车辆在变轨距过程中的动力学性能变化情况,西南交通大学的石怀龙博士建立了考虑轮轴间隙的三大件式变轨距货车转向架动力学模型,分析了车辆在准轨和宽轨线路上的动力学性能,并分析LM车轮踏面在不同轨距线路上的轮轨接触关系。研究发现:变轨距车辆运行过程中,轮轨横向力和纵向蠕滑力会导致轮轴横向间隙和旋转间隙动态变化,变化量为间隙值。对轮轴间隙与轮轨载荷进行正态分布统计后,发现其轮轴间隙载荷与轮轨载荷相当。

### 3 轨道车辆关键旋转部件的状态识别研究

作为轨道车辆的关键旋转部件,齿轮和轴承的工作环境恶劣,承重量大,受摩擦与振动冲击的影响显著等,导致轴承和齿轮部件极易发生故障,从而影响列车的运行安全。因此,研究这些部件的安全监测和故障诊断方法也非常重要。

针对轮对轴承的安全域建模和分析方法,电子科技大学的刘志亮博士将增量支持向量数据描述方法引入轮对轴承的故障诊断领域,提出了一种基于样本增量学习的高速列车轮对轴承安全域的建模方法。实验结果表明,相比于传统批量学习算法,该方法在轮对轴承安全域的建模中更加高效,并且分类准确率基本不受影响。

针对传统最优小波解调方法在轴承故障诊断过程中存在的参数选择问题,石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室的顾晓辉博士从故障振动信号的冲击性和循环平稳性出发,提出了一种基于负熵和多目标优化的复Morlet小波解调方法,利用遗传算法的泛优化能力,以窄带信号包络和包络谱的负熵作为两个独立且相悖的目标函数,通过非支配排序和拥挤距离排序,结合选择、交叉和变异遗传操作对复Morlet小波参数进行优化,自适应地确定富含故障信息的最优共振频带进行包络解调。试验表明,该方法通过多目标优化可以统一表征轴承故障的冲击性和循环平稳性,可以准确识别轮对轴承的局部故障。

针对强背景噪声下齿轮微弱故障特征难以准确提取的问题,石家庄铁道大学的邓飞跃博士提出了一种基于自适应经验小波塔式分解的齿轮故障诊断方法。该方法在齿轮故障信号傅立叶变换基础上,通过设定分解层数对信号频谱进行分割,在此基础上进行经验小波变换。然后进一步提出时-频峭度指标,绘制信号不同分解层数下各分量信号的时-频峭度图,进而确定所感兴趣的最优共振频段范围。最终得到最优单分量信号,利用包络解调分析提取齿轮微弱故障特征。数据分析结果表明,相比于传统经验小波方法,该方法可以有效提取齿轮微弱故障特征。

### 4 结语

以上研究成果中一部分是针对轨道车辆在实际运营过程中出现的各种问题,提出相应的解决办法和应对措施,一部分是针对新型结构和改进型设计而开展的动力学性能预测,还有一部分是对轨道车辆在动力学分析中存在的问题而提出的新型建模和计算方法。相信这些研究成果会对相关理论方法的完善和实际工程问题的解决起到推动作用。

车辆动力学与控制的研究内容一般是从实际工程问题中提炼的基础科学问题,采用动力学与控制的相关理论与方法加以解决。因此,车辆动力学与控制的研究问题与方法中涉及了非线性动力学、随机动力学、转子动力学和多体动力学等多个学科分支的研究方向。受篇幅所限,本专题所收录的论文还不够全面和细致,只能在有限的几个方面予以展示,其它重要方向如轮轨接触理论、轮轨磨耗预测、噪声溯源与机理分析、悬挂系统参数优化、车—线—桥耦合动力学等本专题还没有涉及,待今后继续完善。

### 参 考 文 献

- 1 杨国伟,魏宇杰,赵桂林,等. 高速列车关键力学问题研究. 力学进展, 2015, 45: 217~457 (Yang G W, Wei Y J, Zhao G L, et al. Research progress on the mechanics of high speed rails. *Advances In Mechanics*, 2015, 45: 217~457(in Chinese))
- 2 何旭升,吴会超,高峰. 高速动车组晃车机理试验研究. 大连交通大学学报, 2017, 38(1): 21~25 (He X S, Wu H C, Gao F. Experimental study on shaking mechanism of high speed EMU. *Journal of Dalian Jiaotong Uni-*

- versity, 2017, 38 (1): 21~25(in Chinese))
- 3 郭涛, 高峰, 赵晓军, 等. 我国高速铁路轮轨关系相关技术探讨. 中国铁路, 2018, 1: 20~29(Guo T, Gao F, Zhao X J, et al. Discussion on China's HSR technologies for wheel-rail relations. *China Railway*, 2018, 1: 20~29 (in Chinese))
  - 4 李响, 任尊松, 徐宁. 基于转向架悬挂参数与踏面锥度优化的高速车辆动力学性能分析. 铁道学报, 2018, 40 (3): 39~44(Li X, Ren Z S, Xu N. Dynamic performance analysis of high-speed vehicle based on optimization of bogie suspension parameters and tread conicity. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40 (3): 39~44(in Chinese))
  - 5 李忠继, 戴焕云, 曾京. 半主动悬挂高速列车稳定性研究. 机械工程学报, 2015, 51(4): 116~125(Li Z J, Dai H Y, Zeng J. Study on the stability of semi-active suspension high-speed train. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51 (4): 116~125(in Chinese))
  - 6 刘永强, 王宝森, 杨绍普. 含外圈故障的高速列车轴承转子系统非线性动力学行为分析. 机械工程学报, 2018 54(8): 17~25(Liu Y Q, Wang B S, Yang S P. Non-linear dynamic behavior analysis of high speed train bearing rotor system with outer ring fault. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54 (8): 17~25(in Chinese))
  - 7 秦震, 周素霞, 孙晨龙, 等. 减振器特性参数对高速动车组临界速度的影响研究. 机械工程学报, 2017, 53 (06): 138~144(Qin Z, Zhou S X, Sun C L, et al. Study on the influence of damper characteristic parameters on the critical speed of high-speed EMUs. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53 (06): 138~144 (in Chinese))
  - 8 杨柳, 杨绍普, 王久健, 等. 机车转子系统的非线性动力学分析. 机械工程学报, 2018, 54(18): 97~104(Yang L, Yang S P, Wang J J, et al. Nonlinear dynamic analysis of locomotive rotor system. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54 (18): 97~104(in Chinese))
  - 9 Gong D, Zhou J, Sun W. Influence of under-chassis-suspended equipment on high-speed EMU trains and the design of suspension parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(8): 1790~1802
  - 10 Jin T, Liu Z, Sun S, et al. Development and evaluation of a versatile semi-active suspension system for high-speed railway vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 135: 106338
  - 11 Cai G, Yang C, Pan Y, et al. EMD and GNN-adaboost fault diagnosis for urban rail train rolling bearings. *Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series S*, 2019, 12(4-5): 1471~1487
  - 12 Yang S P, Gu X H, Liu Y Q, et al. A general multi-objective optimized wavelet filter and its applications in fault diagnosis of wheelset bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 145: 106914
  - 13 Zhai W M. *Vehicle-Track Coupled Dynamics: Theory and Applications*. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020

## DEVELOPMENT OF RAILWAY VEHICLE DYNAMICS AND CONTROL \*

Yang Shaopu<sup>†</sup> Liu Yongqiang

(State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract** As one of part of dynamics and control research field, the development of vehicle system dynamics and control has attracted more and more attentions in recent twenty years. Getting benefits from railway traffic quickly development and huge found from government of China, railway vehicle filed has achieved many important progresses continuously in fundamental research, technology research, product development and so on. Starting from development trend, characteristics and the main problems in operating of railway vehicle in China, this paper focus on the research achievements in load analysis, vibration and noise reducing, modeling and simulation, new structure designing, health state identification of the key rotating parts and so on. These research content represents the key problems and study methods of authors in some degree, and may be useful to other researchers in railway vehicle system dynamics and control filed.

**Key words** railway vehicle dynamics, high-speed train, vibration and noise reducing, dynamic modelling and simulation, health state identification

Received 10 June 2020, revised 12 June 2020.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(11790282, 11802184, 11902205)

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: yangsp@stdu.edu.cn