DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.002　　文章编号：1000-128X(2023)02-0014-22

中国高速动车组转向架技术发展及展望

李秋泽[1]，单　巍[2]，张英春[1]，杨广雪[3]，梁树林[4]
（1.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春　130062；
2.中国铁路总公司，北京　100844；
3.北京交通大学 机械与电子控制工程学院，北京　100044；
4.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，四川 成都　610031）

摘　要：转向架是支承、牵引和制动车体并能相对车体回转的走行装置，具有缓冲振动和导向功能，决定列车运行安全可靠性和运行品质。中国高速动车组转向架经过技术引进、吸收创新和自主创新3个阶段的发展，通过不断的技术创新与实践，在结构轻量化、安全可靠性、动力学性能及智能化等关键技术上取得了成果，针对转向架结构强度和动力学性能开展的试验台、环形道、试验专线科学研究试验及线路长期服役跟踪测试，为自主创新阶段的中国高速动车组转向架的自主开发奠定了坚实的理论研究和工程实践基础。文章系统地回顾了中国高速动车组转向架在3个发展阶段的结构参数和技术瓶颈，指出了下一代高铁及CR450动车组转向架技术研究方向；从转向架基本结构角度系统论述了转向架总体集成、构架、轮对轴箱及定位装置、悬挂装置、驱动系统、基础制动和辅助装置的技术发展历程及趋势，提出技术自主创新及工程应用创新研究方向；论述了转向架轻量化设计、强度可靠性、车辆系统动力学、智能化设计和试验测试这5种关键技术的研究现状及发展方向。

关键词：高速动车组；转向架；结构设计；强度可靠性；车辆系统动力学；智能化；高速列车
中图分类号：U292.91+4；U270.331　　**文献标识码：**A

Technological development and prospect of China's high speed EMU bogies

LI Qiuze[1], SHAN Wei[2], ZHANG Yingchun[1], YANG Guangxue[3], LIANG Shulin[4]

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China; 2. China Railway Corporation, Beijing 100844, China; 3. School of Mechanical Electronics and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Bogie is the running device that supports, pulls and realizes the brake of vehicle body, buffers vibration and rotates relative to the vehicle body, which determines the safety, reliability and quality of train operation. The bogie of China's high-speed EMU has undergone three stages of development: technology introduction, innovation based on absorption, and independent innovation. Through continuous technological innovation and practice, achievements have been made in key technologies such as structural lightweight, safety and reliability, dynamic performance, and intelligence. The scientific research and testing conducted on test benches, circular tracks, and dedicated testing lines for the structural strength and dynamic performance of bogies, as well as the long-term service tracking testing of the lines, have laid a solid foundation for theoretical research and engineering practice and the independent development of China's high-speed EMU bogies in the stage of independent innovation. This paper systematically reviews the structural parameters and technical bottlenecks of China's high-speed EMU bogies in three development stages, and points out the technical research direction of the next-generation high-speed EMU and CR450 bogies. From the perspective of the basic structure of bogie, this paper systematically dis-

基金项目：国家自然科学基金项目（12072020）
通信作者：梁树林（1967—），工学博士，正高级工程师，研究方向为车辆工程结构可靠性及动力学；E-mail: liangshulin@swjtu.edu.cn
引用格式：李秋泽, 单巍, 张英春, 等. 中国高速动车组转向架技术发展及展望[J]. 机车电传动, 2023(2): 14-35.
Citation: LI Qiuze, SHAN Wei, ZHANG Yingchun, et al. Technological development and prospect of China's high speed EMU bogies[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(2): 14-35.

cusses the development process and trend of bogie's overall integration, frame, wheel-set axle box and positioning device, suspension device, driving system, foundation braking and auxiliary device, and puts forward the research direction of technological independent innovation and engineering application innovation. This paper also discusses the research status and development direction of five key technologies: lightweight design of bogies, strength reliability, vehicle system dynamics, intelligent design, and experimental testing.

Keywords: high-speed EMU; bogie; structural design; strength reliability; vehicle system dynamics; intelligence; high-speed train

0　引言

铁路是国民经济的大动脉、国家重要基础设施和大众化交通工具，在民生、国家战略安全和经济发展中具有重要作用，党中央、国务院对铁路发展高度重视，规划和引导铁路技术的发展方向。2004 年 1 月，国务院通过了我国历史上第一个《中长期铁路网规划》，之后结合发展新形势和新要求，在 2008 年进行了修编；2021 年 2 月，中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》，规划期为 2021 年至 2035 年，远景展望到本世纪中叶[1]。经过 17 年的发展，我国铁路网由“四纵四横”发展到“八纵八横”，结合“十四五”目标，我国将建成“综合立体交通网”。

跟随铁路网的建设，我国的铁路机车车辆装备技术也得到了迅速提升，中国的高速列车表现尤其突出。截至 2021 年 3 月，中国铁路共配属动车组 3 918 个标准组（以 8 节编组为 1 个标准组）[2]，列车的运营速度覆盖 160~350 km/h 范围内的各速度等级，而且正在研制下一代高铁及 CR450 动车组。其中，转向架作为高速列车“九大关键技术”之一[3]，既得到了系统长足的发展，又面临着新的挑战。

本文回顾我国高速动车组转向架的发展历程，从转向架基本结构角度系统论述了转向架总体集成、构架组成、轮对轴箱及定位装置、悬挂装置、驱动系统、基础制动和辅助装置在结构和技术上的发展历程、发展趋势及研究方向；从转向架轻量化设计、强度可靠性、车辆系统动力学、智能化设计技术和试验测试技术 5 个方面论述了转向架关键技术研究现状和方向，以期为技术发展提供参考。

1　转向架的发展历程

转向架是支撑车体并相对车体回转的走行装置，通常包括构架、轮对轴箱、弹簧减振装置、基础制动装置和驱动装置等，起到承载、牵引、缓冲、转向和制动等功能[4]。

1997 年至 2004 年，我国共计进行过 5 次大提速，我国在铁路机车、客车和国产化内燃动车组、电力动车组研制过程中针对转向架系统进行过研制、试制和批量生产，干线列车的持续运营速度由 80 km/h 提升到 160 km/h，动力集中 DJJ2 型“中华之星”电动车组最高试验速度达到 321.5 km/h，动力分散“先锋”号动车组最高试验速度达到 292.2 km/h[5]，该阶段通常被称为国内探索阶段。

2004 年至今，我国的高速动车组经历了技术引进、吸收创新和自主创新共 3 个阶段的发展，动车组的型号也由“和谐号”发展成“复兴号”。在技术引进阶段和吸收创新阶段，动车组的种类有很多变化，但是相应的转向架型号并没有太多变化，各平台车型及对应转向架型号如表 1 所示。本文讨论的转向架产品、转向架技术发展都是针对 2004 年以后的动车组产品。

1.1　技术引进阶段

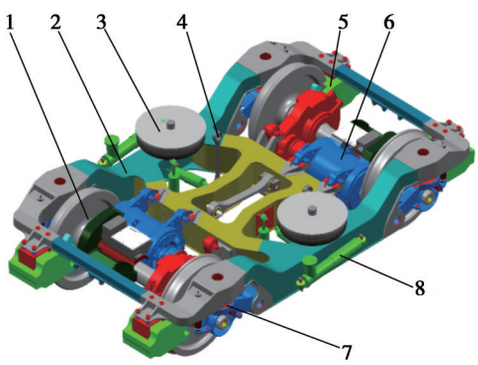
2004 年，原铁道部确定了“引进先进技术，联合设计生产，打造中国品牌”的技术路线和实施计划。2004 年 6 月，通过《时速 200 公里铁路动车组项目技术转让协议》和《时速 200 公里铁路动车组项目国内制造合同》完成了 3 种型号时速 200 km 动车组的技术引进。动车组于 2007 年 4 月上线运营，成为第 6 次大提速的主力车型[6-10]。CRH1 型动车组动力转向架见图 1；CRH2 型动车组动力转向架型号为 SKMB-200，见图 2；CRH5 型动车组动力转向架型号为 CW250D，见图 3。2005 年 11 月，原铁道部与西门子公司签订时速 300 km 动车组采购合同和技术转让协议，引进 CRH3 型动车组。CRH3 型动车组于 2008 年上线运营，其动力转向架型号为 CW300D，见图 4。这 4 种技术引进的动车组转向架的主要技术参数如表 2 所示。

技术引进的 4 种动车组的整体技术水平超过国内探索阶段研制的各型动车组，但对国内运用环境存在一定不适应性，具体如下：①动车组运用中故障较多，其主要原因之一是部分线路的超速运营。动车组持续运营速度取决于动车组各系统（车体、转向架、牵引、制动、网络等）的综合性能，单独的转向架系统具有较高的运行速度，并不能代表整车的持续运营能力。②设计标准体系和检修运维体系不适应中国国情。SKM(T)B-200 型转向架采用了日本 JIS 标准，其余 3 种转向架均采用了欧洲 EN 标准体系。基于这些标准而进行的频繁检修给用户带来很大压力。③CRH1A、CRH2A 和 CRH5A 动车组的技术成熟但不先进，速度提升潜力不大，CRH3C 动车组是几种车型中设计理念和设计技术最先进的。

表1　中国主型动车组车型与转向架型号对应表

Table 1　Table of China's main EMU modals and corresponding bogie modals

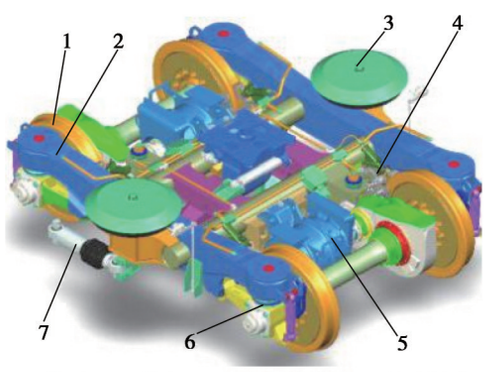
主机厂	技术引进			吸收创新			自主创新		
	转向架型号	应用车型	持续运营速度/(km·h^{-1})	转向架型号	应用车型	持续运营速度/(km·h^{-1})	转向架型号	应用车型	持续运营速度/(km·h^{-1})
中车长春轨道客车股份有限公司（简称“长客股份”）	CW250(D)	CRH5A	200	CW250(D)	CRH5G	250	CW350(D)	CRH400BF	350
	CW300(D)	CRH3C	300	CW400(D)	CRH380B/BL/CL	350	CW351(D)	CRH300BF	250
中车青岛四方机车车辆股份有限公司（简称“四方股份”）	SKMB-200 SKTB-200	CRH2A/B/E	200	SKMB-300 SKTB-300	CRH2C（一阶段）	250	SWM-400E1 SWT-400E1	CRH400AF	350
				SWMB-350 SWTB-350	CRH2C（二阶段）	300	SWM-400E2 SWT-400E2	CRH300AF	250
				SWMB-400 SWTB-400	CRH380A/AL	350			
青岛四方庞巴迪铁路运输设备有限公司（简称“BST公司”）	CRH1	CRH1A/B/E	200						
	CRH380D	CRH380D	300						



1—轮对；2—构架；3—空气弹簧；4—抗侧滚扭杆；5—基础制动；6—牵引电机；7—一系弹簧；8—抗蛇行减振器。

图1　CRH1型动力转向架

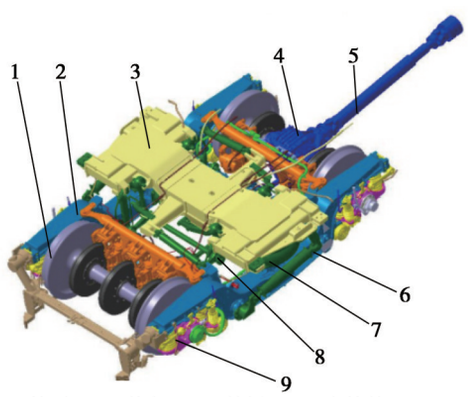
Fig. 1　CRH1 power bogie



1—轮对；2—构架；3—空气弹簧；4—基础制动；5—牵引引机；6—一系弹簧；7—抗蛇行减振器。

图2　SKMB-200型动力转向架

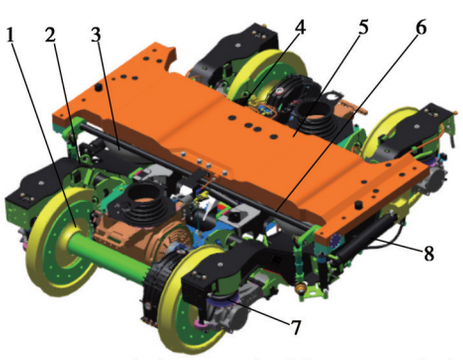
Fig. 2　SKMB-200 power bogie



1—轮对；2—构架；3—枕梁；4—齿轮箱；5—万向轴；6—抗蛇行减振器；7—空气弹簧；8—抗侧滚扭杆；9—一系弹簧。

图3　CW250D型动力转向架

Fig. 3　CW250D power bogie



1—轮对；2—构架；3—空气弹簧；4—基础制动；5—枕梁；6—抗侧滚扭杆；7—一系弹簧；8—抗蛇行减振器。

图4　CW300D型动力转向架

Fig. 4　CW300D power bogie

1.2　吸收创新阶段

在吸收创新阶段，转向架的技术提升是围绕用户需求开展的，一方面需解决原型动车组转向架的运营故障，满足用户对持续运营速度的要求，提升动车组对运用环境的适应性，另一方面需研制持续运营速度

表2　技术引进转向架主要技术参数

Table 2　Main technical parameters of the introduced bogie

参数	CRH1型转向架	SKM(T)B-200型转向架	CW250(D)型转向架	CW300(D)型转向架
运行速度/(km·h^{-1})	200	200	200	300
最高运行速度/(km·h^{-1})	250	250	250	330
轨距/mm	1 435	1 435	1 435	1 435
轴重/t	16.5	14.0	17.0	17.0
固定轴距/mm	2 700	2 500	2 700	2 500
车轮直径（新轮/磨耗轮）/mm	915/835	860/790	890/820	920/830（动车） 920/860（拖车）
转向架质量（动车/拖车）/t	8.20/6.30	7.40/6.80	8.06/7.60	9.65/7.50
应用车型	CRH1A/B/E	CRH2A/B/E	CRH5A	CRH3C
整车寿命/年	30	20	30	30
原型车	庞巴迪 Regina	川崎重工 E2-1000	阿尔斯通 SM3	西门子 Velaro-E

350 km/h 的新型动车组，满足京津线、武广线和京沪线先导段350 km/h线路[11-12]的用车需求。

技术引进的各型转向架在中国运行时都发生过故障，因此国内企业进行了相应的技术优化升级。针对CRH1型动车组转向架与车体模态不匹配，在速度大于200 km/h时局部线路易出现失稳的问题，设计了新型LMD车轮踏面，优化了悬挂参数；针对SKM(T)B-200型转向架检修运维体系与用户需求不匹配，液压基础制动故障较多的问题，结合250 km/h运营速度的用户需求，在技术引进的基础上与日本KYB公司合作开展提升设计，形成了动力转向架SKMB-300和拖车转向架SKTB-300的新型号产品；针对CW250(D)型转向架传动系统故障较多，在运行速度大于200 km/h时部分旋转部件临界转速安全余量不足的问题，更改了传动比[13-15]、提升了制动梁强度[16]、优化了抗蛇行减振器参数[17]等，使该转向架具备了250 km/h的持续运营能力。

除了对技术引进转向架的优化升级之外，还创新设计了新型转向架，具体如表3所示。其中，四方股份针对300 km/h运营速度的需求，设计了动力转向架SWMB-350和拖车转向架SWTB-350；针对350 km/h运营速度的需求，设计了动力转向架SWMB-400和拖车转向架SWTB-400，该转向架与SKM(T)B-200相比，增加了抗侧滚扭杆，增加了抗蛇行减振器数量，基础制动由液压制动改为空气制动，轮轴系统的设计和生产采用欧洲标准[18-21]。同时，长客股份针对350 km/h运营速度的需求，在技术引进的CW300(D)基础上，设计了动力转向架CW400D和拖车转向架CW400，该转向架与CW300(D)转向架相比，结构上增加了二系垂向减振器，优化了电机吊架结构，设计了新型LMB-10车轮踏面，改变了抗蛇行减振器参数，提出动态刚度和动态阻尼要求，优化了动力学参数。长客股份的这些升级同时也解决了CRH3C动车组转向架失稳报警、车辆抖动和晃动等线路适应性问题[22-25]。

该阶段的动车组，其车轮多边形化问题使得车辆结构和轨道结构之间产生了强烈的振动及噪声，导致了部分车辆零部件断裂，分析车轮多边形形成机理，探寻抑制措施成为该阶段技术研究的重点。国内学者进行了大量研究[26-28]，其中文献[29]从车轮多边形特征、形成机理、影响范围等方面系统总结和分析了高速列车车轮圆度磨耗情况，并提出应对措施，为后续自主创新转向架设计和运维管理提供理论支撑。

表3　吸收创新转向架主要技术参数

Table 3　Main parameters of innovated bogies after technology absorption

参数	SWM(T)B-400型转向架	CW400(D)型转向架
运行速度/(km·h^{-1})	350	350
最高运行速度/(km·h^{-1})	380	380
轨距/mm	1 435	1 435
轴重/t	15	17
固定轴距/mm	2 500	2 500
车轮直径（新轮/磨耗轮）/mm	860/790	920/830 (动车) 920/860 (拖车)
车轮踏面型式	LMA	S1002CN/LMB-10
牵引电机吊挂方式	刚性螺栓连接	电机托架板弹簧弹性悬挂
转向架质量（动车/拖车）/t	7.40/6.80	9.65/7.50
应用车型	CRH380A/AL	CRH380B/BL/CL
整车寿命/年	20	30

1.3　自主创新阶段

中国高速动车组在技术引进和吸收创新这2个阶段取得了快速发展，截至2013年年末，基于4个技术平台共开发了15种车型，但仍然存在不足：首先，4个平台的技术标准体系差异大，牵引、制动和网络接口均不同，动车组之间不能实现互联互通，不利于动车组的运用；其次，动车组修程修制不同，转向架分解检修的运营里程不同，备品备件不能互换，不利于用

户的检修；而且，吸收创新阶段的动车组，其部分关键系统仍然受限于技术引进，因此实现“走出去”目标存在知识产权风险。

2012 年末，为践行“一带一路”倡议和动车组“走出去”目标，中国铁路总公司规划并启动了中国标准动车组研制工作[30]，提出 3 项顶层要求：①开展正向创新设计，实现全面自主化；②实现动车组的互联互通和零部件统型；③构建动车组的中国标准体系。其中对转向架系统的顶层要求主要包括：采用模块化设计的 H 形构架无摇枕转向架，强化结构及性能的安全冗余设计；采用 920 mm 的大轮径车轮和磨耗型踏面，改善轮轨匹配关系；优化转向架两系悬挂参数，降低簧下质量，减轻轮轨动力作用，提高运行稳定性、舒适性和结构安全性；实现主要部件的统型和互换。转向架主要技术参数见表 4[31]。

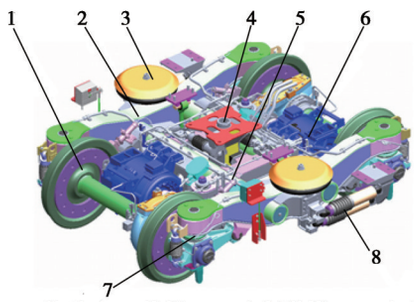
表 4　自主创新时速 350 km 转向架主要技术参数

Table 4　Main parameters of 350 km/h bogie with independent innovation

参数名称	参数值或说明
最高运营速度/(km·h^{-1})	350
最高试验速度/(km·h^{-1})	385
固定轴距/mm	2 500
轨距/mm	1 435
轮对内侧距/mm	1 353(0, +2)
车轮直径（新轮/磨耗轮）/mm	920/850
轴颈中心距 /mm	2 000
轴颈直径/mm	130
车轴内孔直径/mm	30
最大设计轴重/t	17
转向架自重	动车不大于 10 t，拖车不大于 8 t
车轮踏面型式	LMA 或 LMB-10
动力学性能指标	符合《高速电动车组整车试验规范》要求
强度要求	满足 UIC 615-4、UIC 515-4、EN 13749、《200 km/h 及以上速度级铁道车辆强度设计及试验鉴定暂行规定》（科教装〔2001〕21 号）的要求

四方股份和长客股份根据顶层指标和技术条件的要求分别完成了标准动车组研制。2015 年 6 月，2 列标准动车组样车竣工下线，之后在大西高铁完成了型式试验，在郑徐高铁完成了 60 万 km 运营考核；2017 年 1 月，标准动车组取得了型号合格证和制造许可证；2017 年 6 月 25 日，标准动车组正式命名为 CR400AF 和 CR400BF“复兴号”动车组。动车组的转向架型号分别为 SWM(T)-400E1（见图 5 和图 6）和 CW350(D)（见图 7 和图 8）。

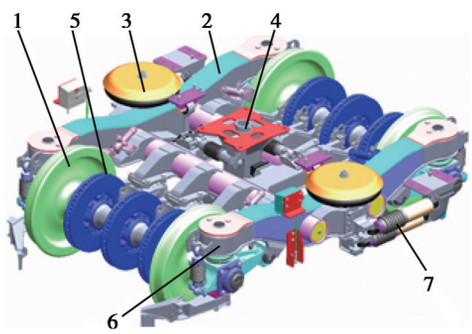
基于自主创新的 2 种转向架实现了统一的修程修



1—轮对；2—构架；3—空气弹簧；4—中心销；5—抗侧滚扭杆；6—牵引电机；7— 一系弹簧；8—抗蛇行减振器。

图 5　SWM-400E1 型动力转向架

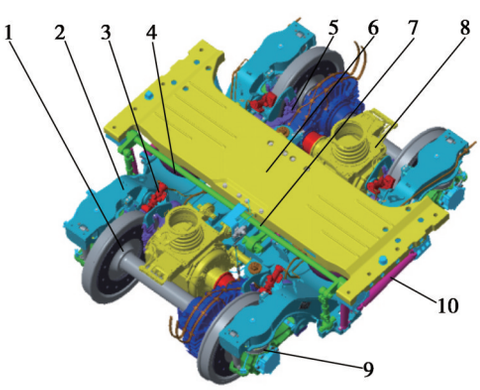
Fig. 5　SWM-400E1 power bogie



1—轮对；2—构架；3—空气弹簧；4—中心销；5—制动装置；6— 一系弹簧；7—抗蛇行减振器。

图 6　SWT-400E1 型拖车转向架

Fig. 6　SWT-400E1 trailor bogie



1—轮对；2—构架；3—踏面清扫器；4—空气弹簧；5—基础制动；6—枕梁；7—抗侧滚扭杆；8—牵引电机；9— 一系弹簧；10—抗蛇行减振器。

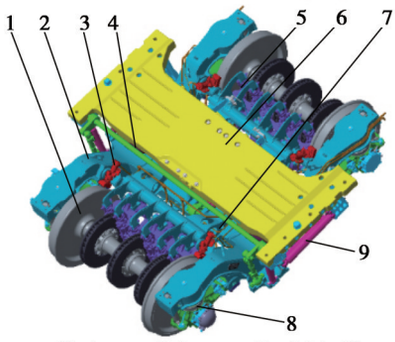
图 7　CW350D 型动力转向架

Fig. 7　CW350D power bogie

制，新的转向架统一了车轮、轴承和制动盘等重要零部件及易损易耗件的技术条件和图纸，实现了 23 项零部件的统型互换，减少了备品备件种类和数量，降低了运维成本；CW350(D)转向架加装了车轮修形装置，解决了车轮多边形化问题，通过采用以 LMB-10 车轮踏面为特征的全新动力学参数，解决了横向失稳报警问题。

2018 年，主机厂在此基础上进一步统型，研制了时速 250 km 的“复兴号”动车组 CR300AF 和 CR300BF，转向架型号分别为 SWM(T) -400E2 和 CW351(D)。后续将基于此平台研制时速 200 km 的“复

兴号”城际动车组和市域动车组转向架。



1—轮对；2—构架；3—踏面清扫器；
4—空气弹簧；5—基础制动；6—枕梁；
7—抗侧滚扭杆；8— 一系弹簧；
9—抗蛇行减振器。

图 8　CW350 型拖车转向架

Fig. 8　CW350 trailor bogie

1.4　下一代高铁和 CR450 动车组转向架

以商业运营速度 400 km/h 为目标的下一代高铁和 CR450 动车组的设计总体要求为：安全、舒适、绿色、智能。围绕该要求，转向架的研究重点和创新方向为转向架结构、强度可靠性、动力学性能和智能化，具体包括：

① 转向架结构：以降低整车轴重，降低转向架总成质量和簧下质量为目标，开展构架悬挂一体化、驱动轮对一体化研究和机电一体化设计；研究弹性构架或轴箱内置结构；开展碳纤维构架、钛合金构架、碳陶制动盘相关的新材料和新技术应用研究，实现转向架结构的轻量化设计。

② 强度可靠性：以目标轴重和边界载荷为输入，开展转向架新结构零部件的强度和寿命评估研究。在传统结构可靠性、载荷谱、轨道谱和风载环境研究基础上，开展旋转部件高周疲劳、转向架结构模态应力、新材料强度评估方法及标准研究。

③ 动力学性能：以保证车辆运行安全性和改善乘坐舒适性为目标，开展转向架主动控制技术、轮对导向控制技术研究，减少轮轨噪声和轮缘磨耗。开展基于线路曲线欠超高 150 mm、客室内横向加速度小于 1.0 m/s^2 限定条件下的列车曲线通过速度研究，ALSTOM 公司不同年代生产的 TGV 动车组[32-33]在上述限定条件下的曲线通过速度见表 5，研究时可与该表中速度进行对照。

表 5　TGV 列车曲线通过速度

Table 5　Speed of TGV passing through curve

年份	列车型号	列车速度/(km·h^{-1})
1988	TGV88	354
1990	TGV117	440
2007	TGV-V150	470

④ 智能化：以车辆安全性为导向，研究自监控、自诊断、自决策的智能行车安全管控技术；以车辆舒适性为导向，研究动力学性能跟踪评估和参数调整系统，研究转向架悬挂参数自适应调整技术；以智能运维为导向，基于 5G、人工智能、大数据等技术的融合，研究动车组全生命周期数据贯通应用技术。

2　转向架结构演化与统一

2.1　转向架总体集成

转向架的分类依据有很多，包括速度、轴数、轨距、轴箱定位方式、动力来源和用途等[34]。通过动力来源和用途相结合的方式对车辆和相应转向架进行分类更通俗易懂，既符合铁路行业内车辆制造企业分工，又符合车辆运营管理单位分工，同时在行业标准中也有相应的技术条件和要求。基于此，转向架可以分为货车转向架、客车转向架、内燃机车转向架、电力机车转向架和动车组转向架。这些转向架尽管在用途、速度、运营线路环境、特殊性能要求和运用检修体系等诸多方面存在差异，但在结构组成上大致相同，通常包括构架、轮对轴箱及定位装置、悬挂装置（包括一系悬挂、二系悬挂和牵引装置）、基础制动装置和辅助装置，内燃机车转向架、电力机车转向架和动车组动力转向架还包括驱动装置。

转向架的主要技术参数有：持续运营速度、最高试验速度、限界、轨距、轴重、车轮直径、车轮踏面型式、固定轴距、轴径中心距、转向架质量、符合的强度标准和符合的动力学标准等。转向架总体集成涉及强度和动力学知识，总体结构设计时应考虑运用环境条件、线路条件、生产制造体系、维护及检修体系等外部因素，考虑转向架各部件结构空间布置和性能参数匹配，还应综合考虑各部件故障导向安全的结构设计，以及与车体间机械、电气、网络的接口和参数。

动车组转向架分为动力转向架和非动力转向架（也称拖车转向架），为方便实现 2 种转向架的制造、维护和检修，基本采用了模块化设计，实现动车、拖车转向架主体结构一致和各主要零部件通用互换，最大化减少备品、备件数量，统一检修周期和使用寿命。

2.2　构架组成

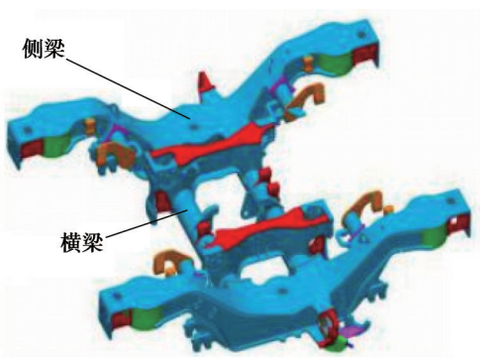
构架是转向架的基础，可将转向架各零部件组成一个整体，用于承受、传递各种作用力及载荷，其结构、形状和尺寸大小都应满足各零部件的定位和组装要求。动车组构架组成为“H”形结构，一般由 2 个侧梁和 2 个横梁组成，横梁有型材钢管和钢板焊接 2 种结构，如图 9 所示。

构架组成作为转向架的重要承载部件，经历了铸钢、铸钢+钢板焊接和锻件+钢板焊接 3 个阶段的发展。动车组转向架的构架组成均为锻件+钢板焊接结构，其中支吊座多采用锻件。长客股份生产的转向架其钢板

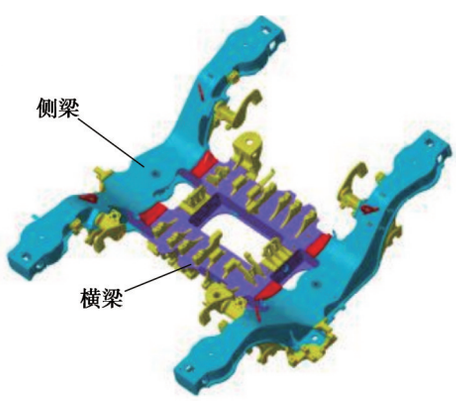
材质为S355J2W+N，焊接锻件材质为Q345E，焊接标准符合EN 15085，构架强度满足本文表4所述要求。

技术引进后，各主机厂焊接技术水平和焊接装备性能迅速提升，依据EN 15085焊接认证体系要求，从“人、机、料、法、环、测”6个方面提高焊接质量管理水平；从机械焊接设备、焊接组对工装、焊接无损检验设备和焊接环境等多方面保证焊接质量[35]。基于此，构架组成主体结构强度按30年寿命设计，目前，各型动车组构架主体结构均未发生故障，但局部支吊座开裂故障时有发生。

构架结构设计应考虑材料、焊接、加工、热处理、防腐等专业知识，构架组成是转向架的根基，其研究方向有：①轻量化设计，拓扑优化技术、新材料应用及强度评估；②强度分析及寿命评估基础理论；③构架主体结构及支吊座模态，关注高频模态应力，避免与轮对、牵引电机振动频率区域重叠导致的共振；④各部件结构失效时的故障导向安全设计。



(a) 横梁为钢管的构架



(b) 横梁为钢板焊接的构架

图9 转向架构架组成

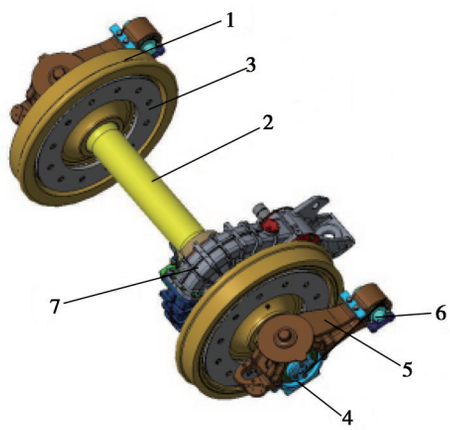
Fig. 9 Bogie frame assembly

2.3 轮对轴箱及定位装置

轮对轴箱及定位装置包括轮对组成和轴箱定位2个部分。

1）轮对组成

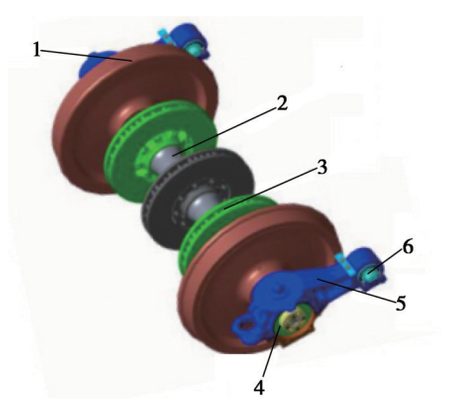
轮对组成包括车轮、车轴、制动盘、轴承、轴箱（动力轮对还包括齿轮箱组成）等部件，这些部件均为高速旋转部件，是转向架上受力最复杂的重要部件，它们直接影响行车安全。为减小簧下质量，满足车轴探伤需求，高速动车组的车轴采用空心车轴，其统型后使用的材质为EA4T和DZ2；统型车轮为整体碾钢直幅板车轮，材质为ER8、ER8C和DZ2，车轮踏面型式可为LMA、S1002CN和LMB-10；统型轴承为整体自密封圆锥或圆柱轴承，轴承内径为130 mm，外径为240 mm。动车、拖车轮对组成分别见图10和图11。



1—车轮；2—车轴；3—制动盘；4—轴承；5—轴箱转臂；6—定位节点；7—齿轮箱组成。

图10 动车轮对及转臂组成

Fig. 10 Power wheel-set and swing arm assembly



1—车轮；2—车轴；3—制动盘；4—轴承；5—轴箱转臂；6—定位节点。

图11 拖车轮对及转臂组成

Fig. 11 Trailor wheel-set and swing arm assembly

2）轴箱定位装置

轴箱定位装置是将轮对组成和构架组成连接在一起的一种结构装置，可将轮轨的横向力和纵向力传递到构架上，承受、衰减轮轨之间的冲击，并提供导向功能，同时使轮对的滚动转化为车辆沿轨道的平动。它对转向架的横向动力性能、曲线通过性能和抑制轮对蛇行运动具有决定性作用。轮对轴箱装置中轮对与构架的定位方式有导框式、导柱式、拉杆（板）式和转臂式等多种形式。

由于橡胶节点硫化制造技术的发展，节点的刚度可通过设计选择且节点结构更加简洁；又由于采用了整体自密封轴箱轴承，通过转臂和箍取代了轴箱体，

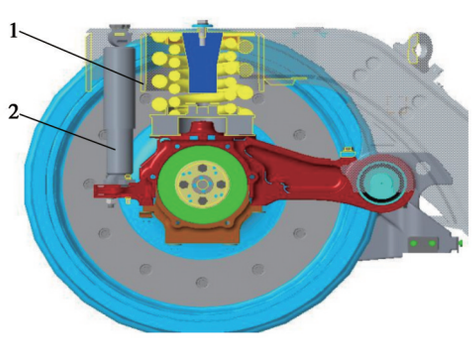
简化了结构设计，减小了簧下质量，因此促进了转臂式定位方式的发展。这种轮对定位方式的优点在于其纵向、横向定位刚度可通过橡胶关节的设计进行选择，能较好地满足高速动车组转向架的运用要求[36]，动车组转向架基本上采用轮对轴箱转臂式定位方式，通过转臂橡胶节点实现轮对与构架连接。

轮对轴箱及定位装置研究内容和方向包括：①车轮、车轴材质性能、结构设计及强度可靠性、探伤与维修；②车轮踏面外形的动态变化与车辆动力学性能响应之间的关系，车轮直径与轮轨接触应力、踏面垂直磨耗量的对应关系，满足高速运行的车轮踏面外形及其运用限度值优化；③以无磨耗、低累积疲劳、具备抗失稳性、参数可独立调整优化为目标的定位结构及设计方法；④新型制动盘、轴箱轴承和齿轮箱组成的可靠性安装方法。

2.4　悬挂装置

1）一系悬挂

一系悬挂装置主要由轴箱弹簧（多用螺旋钢弹簧或橡胶弹簧）、油压减振器组成，用于传递和缓冲轮对组成与构架组成间的垂向力，减小由轨道不平顺带来的动态影响。弹簧的主要作用是缓冲冲击，一系垂向减振器的作用除了吸收冲击所产生的振动能量外还具有整体起吊功能。通过主动故障导向安全设计原则，在钢弹簧组成内设置非线性垂向止挡，如图 12 所示，避免弹簧断裂时垂向落差较大而影响车辆安全。



1—轴向弹簧；2—油压减振器。

图 12　一系悬挂装置组成

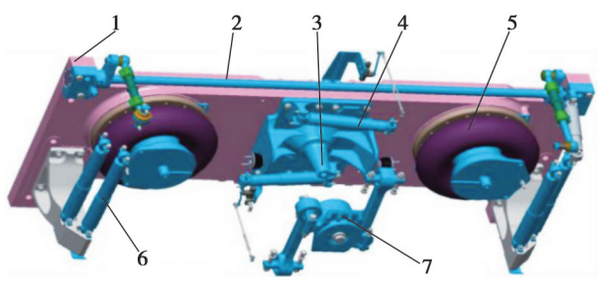
Fig. 12　Primary suspension assembly

一系悬挂的研究方向包括：①主动减振技术，钢弹簧和橡胶垫刚度匹配研究；②一系刚度对转向架动力学性能的影响，和对钢弹簧强度的影响；③钢弹簧强度设计及抗疲劳制造技术研究。

2）二系悬挂

二系悬挂装置设置在转向架与车体之间，用于缓冲衰减构架与车体之间的振动，传递车体与转向架之间的垂向力、纵向力（牵引力和制动力）和横向力，通常包括弹簧组成、减振器、横向缓冲装置、抗侧滚扭杆组成和牵引装置等。二系悬挂弹簧经历了叠板弹簧、钢弹簧和空气弹簧的发展过程，而采用空气弹簧是当前的发展趋势；减振器包括横向、垂向和抗蛇行 3 种类型，应设置的种类和数量、刚度和阻尼等参数需通过动力学仿真分析确定；是否设置抗侧滚扭杆以及扭杆刚度值的确定，与转向架结构和车辆倾覆系数相关，需通过动力学仿真分析确定；横向缓冲装置的间隙设定、刚度和阻尼等参数确定也需通过动力学仿真进行分析；转向架牵引装置主要有 Z 型双拉杆和单拉杆 2 种结构型式，牵引装置通过与转向架及车体的连接，实现牵引力和制动力的正常传递，约束车体与转向架相对位置的同时容许转向架相对于车体的回转运动。

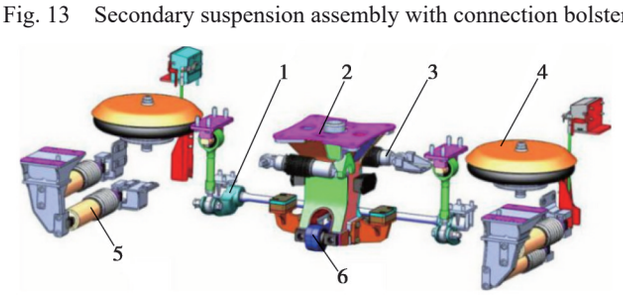
二系悬挂在车体和转向架之间有的设置了联系枕梁，有的没有设置联系枕梁[37]，如图 13 和图 14 所示。设置联系枕梁的优点有 3 个：①便于转向架和车体间的快速分离；②可将空气弹簧附加气室设置在枕梁内，减少外置风缸；③转向架相对独立，在静压测量时可进行无风和有风 2 种检测调整，减少落车调整工作量。设置联系枕梁的缺点是会增加整车质量和成本。



1—联系枕梁；2—扭杆装置；3—中心销；4—横向悬挂；5—空气弹簧；6—抗蛇行减振器；7—中央牵引装置。

图 13　设置联系枕梁的二系悬挂

Fig. 13　Secondary suspension assembly with connection bolster



1—扭杆装置；2—中心销；3—横向悬挂；4—空气弹簧；5—抗蛇行减振器；6—中央牵引装置。

图 14　不设置联系枕梁的二系悬挂

Fig. 14　Secondary suspension assembly without connection bolster

空气弹簧的支承方式分为二点支承、三点支承和四点支承[38]。欧洲国家一般采用二点支承或三点支承的模式，但必须设置抗侧滚扭杆；日本采用四点支承的模式，在空气弹簧跨距足够大且运行速度不太高的条件下，允许不设置抗侧滚扭杆。空气弹簧采用二点支承时，通过 1 个高度阀控制同一转向架上的 2 个空气弹簧，具有结构简单、制造维护成本低的优势，在出现破损故障时可避免车体倾斜，使得车辆曲线通过时不发生充排气，可一定程度上抑制轨道高频激扰，但

是这种方式对抗侧滚扭杆的要求较高，整车落成时调整相对困难。空气弹簧采用四点支承时，每个高度阀控制 1 个空气弹簧，在每个转向架的 2 个空气弹簧间设置压差阀，结构相对复杂，但这种方式可提供车辆的抗侧滚刚度，便于落车调整。二系悬挂的研究方向包括：①基于横向减振器的主动横向控制技术；②抗蛇行减振器的动态刚度和动态阻尼对车辆性能的影响，抗侧滚扭杆刚度对侧风倾覆的影响；③不同外载激励下空气弹簧刚度和阻尼特性研究；④二系悬挂参数匹配对整车平稳性和舒适性的影响。

2.5 驱动系统

动车组驱动系统包括牵引电机、联轴节和轮对齿轮箱，根据牵引电机的悬挂位置可分为轴悬式、体悬式和架悬式驱动系统[39]。

轴悬式驱动系统牵引电机的大半质量为簧下质量，一般使用在低速动车上；体悬式驱动系统牵引电机悬挂在车体上，通过万向轴传递牵引电机与轮对齿轮箱之间的牵引力和制动力，但受限于万向轴的质量和尺寸，万向轴的临界转速较低，因而列车的最高运营速度受限，目前 CRH5 型动车组采用的即为体悬式驱动系统，系统组成如图 15 所示；架悬式驱动系统的牵引电机安装在构架上，通过联轴节传递牵引电机与轮对齿轮箱之间的牵引力和制动力，根据牵引电机与构架的安装结构，架悬式驱动系统又分为吊架式、弹性架悬式和刚性架悬式，具体为：

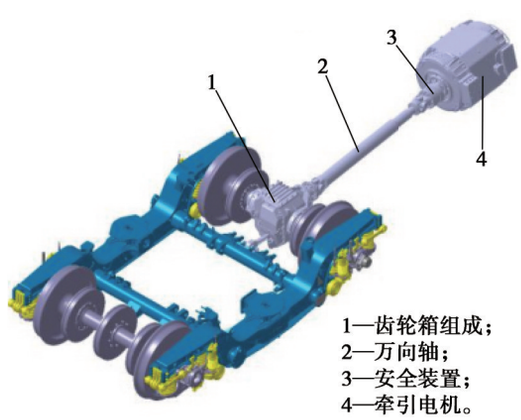


图 15 牵引电机体悬式驱动系统组成

Fig. 15 Driving system with motor mounted on the vehicle body

①吊架式：将牵引电机与吊架刚性连接，再采用板弹簧将电机吊架与构架连接，实现 2 台牵引电机整体与构架的解耦，该方式为 CW300D 和 CW400D 转向架牵引电机的吊挂方式，系统如图 16 所示。

②弹性架悬式：牵引电机通过橡胶节点分别与构架连接，通过优化橡胶节点刚度来分别实现 2 个电机与构架的解耦，CW350D 和 CW351D 转向架即采用这种方式，如图 17 所示。庞巴迪公司的 CRH1 和 CRH380D 型动车组转向架也采用这种连接方式。

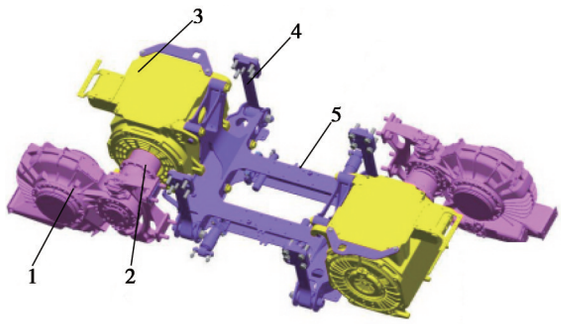


图 16 吊架式驱动系统

Fig. 16 Driving system with motor mounted on the hanging bracket

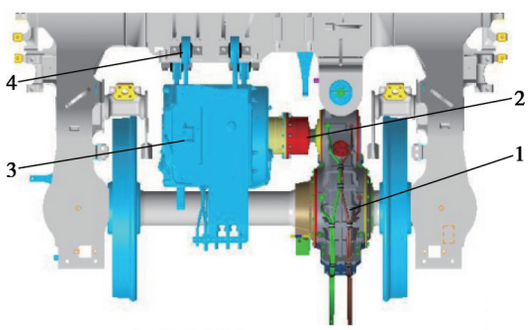


图 17 弹性架悬式驱动系统

Fig. 17 Driving system with motor mounted on the bogie via rubber joint

③刚性架悬式：将牵引电机用螺栓直接安装在构架上，如图 18 所示。其优点是联轴节变位需求小，驱动系统结构紧凑，电机尺寸、功率可加大，但对构架强度的要求较高。

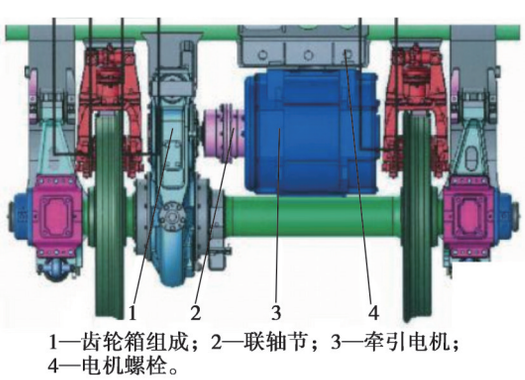


图 18 刚性架悬式驱动系统

Fig. 18 Driving system with motor rigidly mounted on the bogie

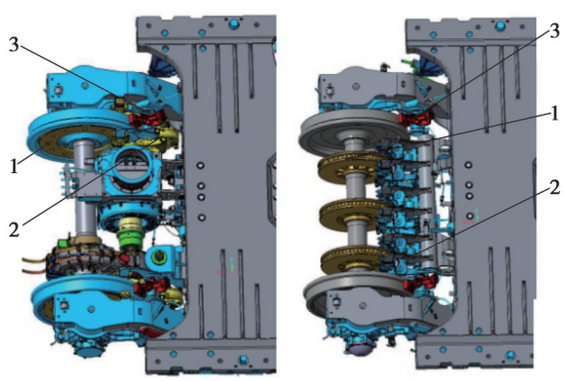
驱动系统的研究方向包括：①研究驱动系统结构布置及运动学姿态，分析各组件间力和力矩的传递关系、各工况下运动空间姿态，提高各部件传动的平稳性和可靠性；②提高牵引动力性能，优化电机控制及黏着控制策略，研究交流传动控制技术，实现电机功率平稳输出，提高牵引电机功率质量比，研制功率大、

重量轻、体积小的新型牵引电机；③提升联轴节和万向轴的承载能力、变位能力和临界转速，减小尺寸和质量；④研制高性能、高可靠性、小质量、小尺寸的齿轮箱组成；⑤研究驱动系统动力学性能与车辆系统动力学耦合关系；⑥研究驱动系统各部件的车载和地面安全检测监控装置。

2.6　基础制动

基础制动装置提供制动力，使运行中的车辆能减速运行或停车。基础制动装置有踏面制动、磁轨制动、轮盘制动和轴盘制动等多种形式。根据需求设停放制动装置，并配置手动缓解功能。

动车组基础制动有轮盘和轴盘2种形式，部分车辆还加装了踏面清扫装置，如图19所示。气动制动夹钳单元目前主要有3点吊挂接口的传统制动缸结构和4点吊挂的紧凑式结构2种。



(a) 轮盘制动　　(b) 轴盘制动

1—制动盘；2—制动夹钳；3—踏面清扫装置。

图19　基础制动装置

Fig.19　Foundation brake rigging

目前，基础制动的集成化、小型化、轻量化和模块化仍然是技术发展方向[40]。其研究方向包括：以降低转向架簧下质量为目标，研究高热熔、轻量化、更耐磨的新型摩擦材料，研制面向工程应用的大功率集成式基础制动装置、碳陶制动盘以及铝基制动盘等；以可靠性、可用性、可维修性和较低的全寿命周期成本为目标，研究新型基础制动装置，如磁轨制动和涡流制动。

2.7　辅助装置

为提高整车性能、接收线路信号，提升整车智能化水平，在转向架上布置了许多附属设备。

安装在转向架端部的有轮缘润滑装置、撒砂装置、扫石器、信号检测装置和障碍物检测装置等；安装在轴端的有防脱线装置、接地回流装置、防滑器速度传感器、列车自动控制系统用ATP和LKJ速度传感器；安装在构架上的有横向失稳检测传感器、过分相检测传感器；转向架上还有齿轮箱接地回流装置，轴箱和齿轮箱轴承温度传感器、振动传感器等。

动车组运用以来，辅助装置在运营中发生的机械、电气故障较多，影响动车组运营秩序。因此研究方向包括：统筹确定辅助装置与转向架的接口关系和紧固方式，在保证功能和强度的前提下减小质量；研究辅助装置本身以及安装吊座的振动模态，避免系统间共振区域重叠；研究各类传感器统型和电磁兼容问题。

3　转向架关键技术发展及展望

3.1　轻量化结构设计技术

车辆轻量化设计是降低车辆总能耗、实现绿色环保最重要的手段[19,41]。降低转向架轴重、簧间质量及簧下质量等转向架结构轻量化设计方法可有效减小轮轨相互作用力[42]，提高车辆安全性、平稳性和舒适性。

1）传统转向架轻量化研究

转向架质量是影响转向架动力学性能的重要参数，质量分为簧下质量、簧间质量和簧上质量。车辆的运营速度、自重和转向架轴重是非常重要的技术指标，直接影响到转向架的质量。

以CR300BF动车组的其中1辆动车为例，车辆运营速度为250 km/h，整备自重为54 000 kg，轴重为17 t，动力转向架各部件质量统计如表6所示。传统轴箱外置动力转向架质量相对整车质量占比与表6基本相同，动力转向架质量占整车质量的35%左右，每转向架簧下质量为4.0 t左右，簧间质量为4.4 t左右。拖车转向架质量占整车质量的28%左右，每转向架簧下质量为3.6 t左右，簧间质量为3.0 t左右。

表6所示的各部位质量占比为研究转向架的轻量化确定了减重方向：①降低转向架簧下质量，开展整体辗钢小轮径车轮、空心车轴、轻金属轴箱体、轻量化轴箱轴承、紧凑型一级减速齿轮箱以及轻量化轴端设备[43-44]研究。②降低簧间质量和转动惯量，研制轻量化的焊接钢结构构架，研究钛合金结构构架，研制非金属结构的构架；研究牵引电机的吊挂方式，将牵引电机全部或部分质量悬挂在车体上，提高牵引电机功率质量比；研究集成式、大功率基础制动装置；尽量将设备集中在转向架的中心附近以降低簧间转动惯量。③二系簧上质量应归属于车体减重范畴，需要在车体设计时统一考虑。

2）基于新结构和新材料的转向架轻量化研究

采用轴箱内置转向架替代传统轴箱外置转向架可实现轻量化。目前，运营速度最高的轴箱内置拖车转向架为ICE4，轴箱内置动力转向架还主要应用在速度低、自重轻、轴重较小的地铁和城轨车辆上。假设车辆运营速度为250 km/h，轴重为17 t，车辆整备质量为54 000 kg，基于此长客股份设计的可工程实现的轴箱内置动力转向架各部位质量占比见表6。由表6可知，

与轴箱外置转向架相比，其减重效果较明显。但要在速度较高的动车组上采用轴箱内置动力转向架还需进一步研制功率质量比（目标值为1.2 kW/kg）较大的牵引电机和集成化的齿轮箱及联轴节，而这些技术目前还仅处于研究阶段，还需进一步完善才能实现工程应用。

表6　轴箱外置与内置动力转向架各部位质量对比

Table 6　Weight comparison of each parts between outboard and inboard power bogie

系统	包含部件	轴箱外置转向架		轴箱内置转向架	
		质量/kg	占整车质量比%	质量/kg	占整车质量比/%
簧下质量	轮对轴箱、2/3齿轮箱、1/2钢弹簧、制动盘、轴端设备等	4 070	15.07	3 300	12.20
簧间质量	构架组成、1/3齿轮箱、1/2钢弹簧、二系悬挂、牵引电机、基础制动装置、踏面清扫装置等	4 388	16.25	3 350	12.40
簧上质量	联系枕梁、中心销、抗蛇行减振器座、抗侧滚扭杆座、高度阀等	928	3.44	350	1.29
转向架总质量		9 386	34.76	7 000	25.89

西门子[45]提出了“工字梁”构架侧梁设计概念，以期实现结构减重，具体如图20所示。

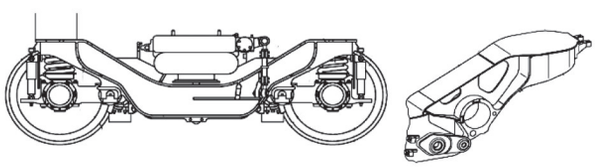


图20　西门子“工字梁”转向架

Fig. 20　Siemens bogie with "I" beam

通过新的转向架结构实现减重的研究方向有：增大构架柔度，取消一系悬挂或二系悬挂；驱动系统轻量化、集成化设计；基础制动系统集成化设计等。转向架零部件减重设计还需依靠仿真和制造技术的提升，研究零部件拓扑优化，通过3D打印制造技术[46]并采用拓扑优化设计方法进行零部件优化，提升强度仿真水平和强度试验水平。

轻量化设计的另一个途径是依托新材料进行转向架减重，长客股份依托CR450动车组项目进行了钛合金构架研制，构架减重约700 kg，文献[47]介绍了日本川崎重工公司碳纤维增强塑料材质的efWING弹性转向架，其结构形式见图21。



图21　efWING弹性转向架

Fig. 21　efWING elastic bogie

研究铝合金、镁合金、钛合金、碳纤维等高强度轻质新材料应用，研究新材料的焊接、加工制造工艺以及材料的强度评估标准和评估体系，这些将是新材料减重面临的新课题[48-49]。

3.2　强度可靠性技术

高速列车各部件长期暴露在随机载荷的环境中，其结构可靠性是高速列车安全运行的重要保障[3]。由于轮轨的冲击，列车速度越高，振动就越强烈，其失效就越快。转向架零部件结构可靠性不仅影响行车安全，而且也成为列车提速的制约因素。

1）强度研究对象范围扩大

强度可靠性要求转向架构架主体结构及零部件在各自的全寿命周期内安全可靠，不发生断裂、开焊、脱落、磨耗、腐蚀等影响结构安全的故障。强度可靠性研究的对象是转向架主体结构及其零部件，早期的转向架由于理论仿真分析手段落后、试验设备受限，研究的对象仅限于构架、车轮、车轴等主要部件；随着动车组的批量运用和速度的不断提升，转向架强度可靠性研究的部件范围也逐渐扩大，包括枕梁、轴箱体、轴箱轴承、齿轮箱组成、转臂、钢弹簧、空气弹簧、抗侧滚扭杆、中心销及牵引拉杆、减振器、橡胶件以及各种吊座等。研究时应从有限元仿真分析、试验台试验和线路动应力测试这3个维度对零部件进行强度分析和疲劳寿命评估。

2）仿真–台架–线路闭环研究体系建设

转向架零部件强度分析和疲劳寿命评估通常从仿真分析、台架试验和线路运行试验（测定运行中零部件应力）3个层次进行评定。通过循环迭代，不断修正仿真分析模型、试验台加载方式及边界载荷、线路测试方法及数据处理方法，使仿真分析–台架试验–线路测试形成闭环，提高强度分析和疲劳寿命评估的可信度，从强度的维度对转向架主体结构和零部件结构进行正向设计。

用于指导构架设计及试验的TB/T 1335、UIC 615-4、UIC 515-4和JIS 4207标准体系逐渐被EN 13749标准替代，各主机厂和试验单位编制的仿真分析大纲、试验台试验大纲和线路测试大纲对载荷的施加、边界约束和试验数据的采集及处理提出更详细的要求；针对焊缝强度评估已不限于传统Goodman曲线和S-N曲线的评估方法，逐步扩展到采用DVS 1612、BS 7608、BS 7910、JIS 4207等标准进行评估。

3）载荷谱测试与建立

仿真分析、台架试验的核心工作是确认基本载荷力系的构成[50]。现有用于指导构架设计及试验的国际通用载荷规范 UIC 615-4、UIC 515-4、JIS 4207 和 EN 13749 对载荷作用模式的规定并不明确，构架结构强度评价是通过载荷工况组合的方式进行的[51]，现行的国际规范并不能保证其按照现有载荷组合工况完成疲劳试验后在运营条件下有足够的可靠性，也并不能真正反映国内高速动车组线路运行过程中的损伤[52-54]。同时在焊接和加工过程中，零部件存在制造质量差异，因此在实际运用过程中，某些零部件可能存在过早失效的问题。为准确确定载荷，提高转向架结构强度和疲劳寿命评估的可靠度，行业相关团队开展了线路载荷测试及载荷谱编制研究工作[55-58]，提出了载荷谱建立必须遵循的损伤一致性准则[59]，给出了适用于复杂结构的载荷谱建立方法。构架载荷谱研究的技术路线如图 22 所示[60]。

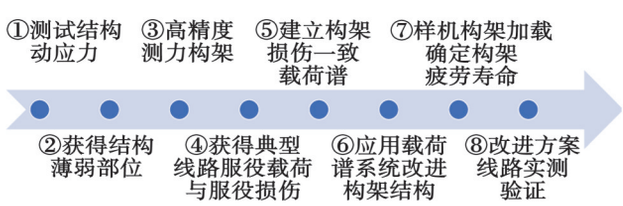


图 22　构架载荷谱研究路线

Fig. 22　Research route of frame load spectrum

该研究以高精度测力构架为传感器，测试不同线路载荷，进行构架力系分析和载荷识别，编制线路载荷谱，用于有限元仿真分析、试验台试验、构架结构改进、构架寿命评估、构架故障再现等。利用该研究思路和方法解决了许多工程应用故障，如 209P 构架开裂[61]、CRH3 型动车组牵引电机吊架强度不足问题。线路载荷谱测试研究推动了我国转向架结构可靠性正向设计，确立了我国在该方向的国际行业地位。

参考构架载荷谱的研究方法和思路，可对转向架其余重要部件进行强度分析和疲劳寿命评估，文献[62]以车轴为传感器，测试地铁车辆车轴线路载荷，并利用波动中心法编制典型工况下载荷谱，评估车轴结构强度和剩余疲劳寿命；文献[63-65]研究了钢弹簧、转臂和抗侧滚扭杆的线路载荷谱，这些尝试和初探可被应用在高速动车组其他零部件强度分析和疲劳寿命评估上。

4）强度研究新方向

列车速度不断提高，行业对转向架强度的认知超出传统范畴。在旋转部件高周疲劳和转向架悬吊件模态应力[66-67]方面需要建立新的基础理论研究体系和试验验证体系。转向架零部件振动模态应力和结构应力间内在联系及规律将成为新兴学科或研究方向。

随着列车速度的提升，轮轨动作用力加剧，激振频率带宽增大，高频成分增多，转向架动力学性能恶化，导致其主体结构和零部件模态应力加大。相应的载荷谱需要拓展，即应在宽频域中考虑动刚度和动阻尼的影响，这使强度可靠性和车辆系统动力学有了交融，形成学科交叉。长客股份从强度和动力学性能 2 个方面入手分析并解决了 CRH380CL 动车组电机吊架裂纹故障；许多学者也进行了探索和尝试，文献[68]建立了 CRH3 型动车组拖车动力学模型，模拟分析各工况时构架的载荷谱特点，建立了不同工况运行的构架载荷谱；文献[69]采用标准载荷谱、基于多刚体系统动力学仿真获取的载荷谱及实际线路测试的应力谱，分析了某拖车转向架强度，对比了 3 种载荷谱的差异。

3.3　车辆系统动力学技术

1）车辆系统动力学体系拓展

车辆系统动力学是以振动力学和多体系统动力学为基础，针对轮轨车辆发展起来的一门科学[70]。随着列车速度的提高，研究内容除了基于轮轨接触动力学的车辆系统动力学外，范围进一步拓展：文献[71]研究了车辆–轨道耦合系统动力学；文献[72]研究了列车空气动力学；文献[73]将传统车辆系统动力学进行了外延，构建了高速列车大系统动力学，形成具有高速特征的车辆–轨道轮轨耦合、车辆–空气流固耦合、车辆受电弓–接触网弓网耦合、机电耦合的高速列车大系统耦合动力学体系，如图 23 所示。在高速列车耦合大系统动力学理论框架基础上，构建了仿真分析技术平台，细化了弓网模型、列车模型和线路模型，创新了核心算法，实现了中国高铁技术发展的基础理论突破[74]。

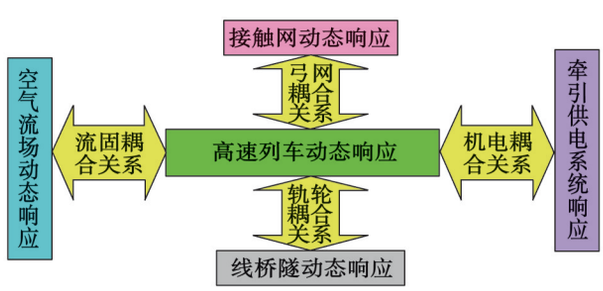


图 23　高速列车大系统耦合动力学框架

Fig. 23　System-coupled dynamics research framework of HST

2）动力学性能评定和试验规范更新

车辆系统动力学的研究对象为高速列车的车辆，研究内容为车辆在直线、曲线和道岔工况下的运行稳定性、平稳性和安全性。

国外关于车辆动力学试验的标准较多，包括 UIC 518、UIC 513、EN 14363、EN 12299、JIS E4023、49 CFR 213 等，各标准的侧重点不同，具体参见表 7。

1985 年，我国首次编订了 GB/T 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》；2004 年，由于评价指标和限值等落后于同期的欧洲标准，动车组技术引进时，针对动力学性能的评定指标与限值，另行

编制了招标技术文件；2008 年，针对 300 km/h 动车组，原铁道部下发铁运〔2008〕28 号文件《高速动车组整车试验规范》；2019 年，根据实际运营情况和试验经验对 GB/T 5599—1985 进行了修订，形成了 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》[75]，并于 2020 年 7 月实施。

新修订的标准其适用范围涵盖标准轨距的机车车辆，考核指标和限值更加全面和清晰，数据的采集和处理方法更加明确。与 GB/T 5599—1985 相比，新标准主要内容的变化包括：①删除了倾覆系数指标，采用动应力来评价结构疲劳方面的内容；②修改了数据采样和处理方法、脱轨系数评定限值、轮重减载率评定限值、轮轴横向力评定限值等项目；③增加了机车动力学评定的内容；增加了横向稳定性评定和舒适度指标的评定。

表 7　机车车辆动力学试验标准汇总

Table 7　Summary of dynamic test standards for locomotive and rolling stock

国家或组织	标准号	标准名称	主要内容
国际铁路联盟	UIC 518: 2009	铁道车辆动力学性能的试验和鉴定–面向安全、运行质量和线路疲劳	稳定性
	UIC 513: 1994	铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则	舒适性
欧洲	EN 14363: 2016	铁路应用–铁路车辆运行特性验收试验–运行性能试验和静止试验	稳定性
	EN 12299: 2009	铁路应用–旅客乘坐舒适性 – 测量和评估	舒适性
日本	JIS E4023	铁道车辆振动特性的测定方法	舒适性
美国	49 CFR 213	轨道安全标准	稳定性
中国	GB/T 5599—2019	机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范	稳定性/舒适性
	TB/T 2360—1993	铁道机车动力学性能试验鉴定方法和评定标准	稳定性/舒适性
	铁运〔2008〕28 号	高速动车组整车试验规范	稳定性/舒适性

3）基于动力学的车辆正向设计

目前车辆系统动力学所研究的轮轨关系、弓网关系、流固耦合和机电耦合等，主要侧重于对车辆系统外部影响因素的分析。在对车辆内部各系统的动力学研究方面，还存在理论研究较多、对工程应用的指导较少的问题。相关研究给出了某些悬挂构件的性能参数（刚度和阻尼），但参数在实际生产中并不能实现；在结构位置参数（连接点位置坐标、结构中心、重心、力矩及转动惯量等）方面，这些研究给出的建议较少，实际研发中多为先开展结构设计，再优化悬挂参数。目前，车辆系统动力学仿真分析的作用主要是预测车辆动力学性能、优化动力学悬挂参数、再现及分析车辆动力学故障，尚未实现对车辆各系统设计的正向指导。因此，车辆动力学设计应与车辆结构设计相结合，围绕车辆系统的内部和外部 2 方面影响因素对车辆各系统结构和参数进行正向设计，重点包括：

① 车辆总体设计：编组方式、动拖车布置及动拖比、车体断面设计、质量分布及转动惯量设计、车端联结设计（车钩及缓冲装置、风挡及车间减振器）等；

② 车体设计：车体和车头尺寸、断面形状、承载方式、质量、模态及振型等；

③ 牵引制动设计：牵引功率性能特性曲线、牵引制动加速度和减速度控制曲线等；

④ 转向架设计：构架结构、悬挂结构及参数、轮对结构及踏面型式、牵引装置及参数、驱动系统结构及参数等。

车辆系统动力学研究包括仿真分析、台架试验、线路试验和线路长期服役性能跟踪测试 4 个方面。由于轮轨系统复杂、边界载荷条件不准确，实际车辆参数非线性较强，模型的简化等原因，车辆在仿真分析、台架试验和线路型式试验阶段暴露的问题不多，多数车辆动力学性能恶化的故障是在载客运营过程中，特别是在车轮磨耗后期发生的，如车辆的抖动与晃动、构架横向失稳报警、车体震颤、车内噪声超标等。

动力学仿真分析及试验研究解决了许多动车组运用故障，如 CRH380B 型动车组出现横向失稳报警故障，通过内因分析，提出了以 LMB-10 车轮踏面为特征的一套新的动力学参数；通过外因分析，提出了线路钢轨打磨的新廓形 60N。目前，CRH380B 型动车组采用以 2 种踏面型式为特征的 2 套动力学参数，横向失稳报警故障得到了解决。随着车辆系统动力学研究的深入，初步确定了车辆晃动、抖动、抗蛇行减振器失效故障的频率范围、预警和报警的具体阈值，并制定了相应的解决措施。

3.4　智能化设计技术

物联网、大数据以及人工智能技术的发展推动了智能高铁的建设和发展，打造更加安全可靠、经济高效、温馨舒适、方便快捷、节能环保的智能高铁系统将成为中国高铁乃至世界高铁发展的未来趋势[76]。智能高铁系统是一项复杂而庞大的信息物理系统工程，行业相关学者在分析国内外智能系统体系框架的设计方法和研究思路基础上，结合我国智能高铁的内涵及特征，规划了我国智能高铁体系架构，描绘了总体蓝图，明确了系统组成，确定了功能模块以及模块间通信协同的协议与接口，为智能高铁 15 个应用系统的研

发提供指导[77-79]，并在京张高铁和京雄高铁上进行了工程实践[80]。未来中国高铁应在智能建造、智能装备、智能运营、智能养护维修、智能服务等方面推进技术和管理创新，全面提升中国高铁智能化水平[81]。

智能化动车组是铁路智能装备的现场子系统之一[77]，转向架的智能化主要用来提升列车的安全性，并为智能化铁路提供信息支撑。转向架智能化技术包括：①研究高速转向架安全相关仿真模型、变量检测方法及运行状态在线评估技术，用于实现理论层面的基础支撑；②研制高速转向架运行状态实时监测、调整和控制装置，实现工程应用层面的软件开发和硬件制造。

转向架智能化现状及发展方向包括：

① 针对运营安全性和舒适性的车载监控与诊断技术。

以车辆安全性为导向，研发故障检测、诊断及报警系统[82]，针对转向架的重要部件和易发故障部件进行故障特征分析，确定故障特征量，并选择合适的传感器，实现故障的检测、诊断和报警功能。故障检测设备包括3个部分：传感器、数据采集处理系统和终端设备。数据采集处理系统是整个检测系统的核心[83-84]，内部包含高性能处理器、数据采集模块、电源转换模块、总线模块、存储模块等。传感器类型包括：应力（应变）、力矩、位移、加速度、温度、频率、油样和图像等。目前，已批量应用的有构架横向失稳监测、针对轴箱轴承和齿轮箱轴承的温度检测装置，振动监测和应力（应变）监测正处于研究阶段。

以车辆舒适性为导向，研制动力学性能跟踪评估和参数调整系统，使转向架具有自动识别线路工况功能和主动调整转向架参数功能（如定位节点刚度、空气弹簧刚度、减振器刚度和阻尼等），实现根据线路激励实时调整悬挂特性，以获得更好的整车动力学性能。在车载平稳性、舒适性监测方面，其阈值的确定尚不具普适性，因此也处于研究阶段。

② 针对运用安全的地面监测与诊断技术。

为确保动车组的安全，针对走行部位的监测与诊断，将既有5T检测设备（THDS , TFDS , TADS , TPDS , TCDS）进行功能优化与拓展升级后加装在高铁沿线；同时开发新设备（如TEDS[85]和LY[86]设备）用于高铁沿线监测或库内诊断检修。动车组的地面安全监测设备如表8所示。

目前，TEDS自动识别系统还存在误报率较高、准确率较低、故障模型不准确等问题，需要建立故障图像数据库，统一数据采集标准，制定标准的数据格式及规则，进一步提升时效性和准确性。TADS轴承故障检测装置实现了线路联网检测和分级报警管理，准确率可达95%以上。LY设备还需提高精度，增加对轮对等效锥度和车轮多边形化的判定，加装基于相控阵超声及常规超声多探头组合阵列探伤技术的探伤模块以实现对车轮的探伤。

表8　地面安全监测设备汇总表

Table 8　Summary of ground safety monitoring equipment

名称	功能简介
TEDS	安装在列车途经线路上，采用光学成像和成像对比技术，检测走行部位零部件变形、松动、异物侵入、缺失等故障
TADS	安装在列车途经线路上，采用轨边声学诊断技术，自动检测轴箱轴承外圈、内圈及滚动体等部件故障
TPDS	安装在列车途经线路上，测试车轮与钢轨间冲击，实现对车轮多边形化和车轮径跳的动态监控
THDS	安装在列车途经线路上，利用红外热成像和红外探测技术，自动检测走行部位关键部件温度
LY	安装在列车途经线路上或检修库内，利用光截图像测量技术，自动检测轮对外形尺寸、车轮擦伤和剥离情况；此外，通过加装探伤模块可实现对车轮的探伤

③ 针对转向架维修的故障预测及健康管理（PHM）技术。

20世纪80年代，美国首先提出了预测与健康管理（Prediction and Health Management,PHM ）的概念，并于1982年将其运用于大黄蜂战机F404的发动机监测[87]。之后铁路车辆应用是通过先进的传感技术拾取系统状态信息，利用智能算法分析系统状态并进行故障诊断及预测，提出维修维护建议以实现对使用者决策的支持[88-89]。

目前，动车组的检修和管理执行的是定期预防性维修[90]，而采用PHM系统的最终目的是在保证动车组安全的前提下，掌握零部件性能变化趋势、安全可靠性趋势，确定零部件可靠性和寿命周期，研究数字化维修技术，实现预防性检修向状态检修转变，降低全寿命周期维修成本，形成基于“多维状态评估与经济效益约束下预测预防”的状态维修体系。2016年原中国铁路总公司设立“动车组健康管理及运维决策系统研究”项目进行尝试和研究。然而，众多研究和工程实施仍停留在理论探讨、框架和管理平台构建方面，针对修程修制改革、实现真正意义的状态修，有效节约维修成本的研究还不多[91]。同时，该体系也涉及到管理理念和工作职能的转变。

转向架的PHM系统与安全监测系统存在技术交叉，两者研究的变量相同，包括振动加速度、噪声、应力（应变）、温度；研究路径相同，均为通过仿真、实测研究，剖析其中的映射关系。如何实现故障模型、算法统一，实现数据融合与共享，减少传感器的数量和种类是未来研究的重点。

总之，动车组转向架的智能化是围绕零部件强度安全可靠性，动力学稳定性、安全性和平稳性展开的。车辆强度可靠性理论和车辆系统动力学是动车组智能化的基础，只有基础理论、传感技术、测试及数据处

理技术共同发展和创新，才能加快动车组智能化向智慧化转变。另外，转向架智能化只是铁路智能化的一部分，铁路智慧化、列车智能化研究应进行顶层架构设计，统筹规划各系统、各部件之间的功能与接口、传输与存储、模型与算法、硬件安装、数据格式、人机界面、维护操作等。

3.5 试验测试技术

从20世纪80年代开始，中国高铁科研人员就开展了车辆系统动力学、列车空气动力学、轮轨关系、弓网关系和流固关系等方面的基础研究，并逐步建立了试验研究平台，形成了中国高铁的基础理论体系和试验体系，支撑了中国高铁的自主创新，取得了技术、理论和试验3个方面的重要突破[74]。基础理论研究和试验测试研究是动车组技术创新的根基，而动车组的技术发展也推动了基础理论和试验测试技术的进步。试验测试技术不仅是正向设计的必备步骤，而且是分析故障、确认解决方案的重要手段。

1）试验台试验

① 试验台型式试验。

试验台试验按种类可分为例行试验、型式试验和研究性试验，按内容可分为强度试验和动力学试验。在技术引进阶段和吸收创新阶段CRH1、CRH3和CRH5型动车组依据UIC和EN标准开展型式试验，具体如表9所示，CRH2型动车组依据日本JIS系列工业标准开展试验。试验主要针对构架、车轮、车轴、轴承和钢弹簧等影响安全的部件开展。

表9 试验台型式试验

Table 9 Type test on bench

分类	试验名称	依据标准
动力学	整车滚振试验	研究性试验*，参考TB/T 3115—2005
强度	构架静强度和疲劳强度试验	UIC 615-4/UIC 515-4/EN 13749
	车轮静强度和疲劳强度试验	EN 13262
	车轴静强度和疲劳强度试验	EN 13261
	轴箱轴承台架试验	EN 12082
	钢弹簧疲劳试验	EN 13906

注：* 在技术引进阶段，滚振试验为研究性试验，不作为型式试验和验收标准。

在自主创新阶段，基于基础理论的创新，借鉴国内外标准并结合中国实际运用经验，制定了国家标准、铁路行业标准、企业标准及标准性文件，构建了中国高速动车组技术标准体系[92]。国铁集团制定的TJ/CL系列动车组零部件暂行技术条件明确了零部件的技术要求、检验方法、检验规则、标识、包装、运输及储存要求等，清晰界定了例行试验和型式试验，用于指导零部件的设计、制造、检验、试验和认证。与转向架相关的暂行技术条件如表10所示。

表10 转向架零部件技术条件

Table 10 Technical specifications of bogie parts

标准编号	技术条件名称
TJ/CL 275	动车组车轮暂行技术条件
TJ/CL 276	动车组车轴暂行技术条件
TJ/CL 277	动车组齿轮箱组成暂行技术条件
TJ/CL 278	动车组抗侧滚扭杆暂行技术条件
TJ/CL 279	动车组空气弹簧暂行技术条件
TJ/CL 280	动车组联轴节（鼓形齿）暂行技术条件
TJ/CL 281	动车组轮对组成暂行技术条件
TJ/CL 282	动车组牵引拉杆组成暂行技术条件
TJ/CL 283	动车组万向轴暂行技术条件
TJ/CL 284	动车组油压减振器暂行技术条件
TJ/CL 285	动车组轴箱弹簧暂行技术条件
TJ/CL 286	动车组轴箱体及端盖暂行技术条件
TJ/CL 287	动车组轴箱轴承暂行技术条件
TJ/CL 288	动车组转向架暂行技术条件
TJ/CL 289	动车组转向架构架组成暂行技术条件
TJ/CL 290	动车组轴箱定位节点暂行技术条件

② 试验台研究性试验。

试验是研究车辆零部件强度和车辆系统动力学最好的手段，试验台研究性试验主要包括2个方面：一是针对运营故障开展的研究性试验的主要目的是在试验台上实现故障再现，寻找故障根源，确定解决方案；二是对新理论、新产品、新技术进行工程验证，通过科学探索掌握规律，提升技术能力。研究性试验没有现成的试验标准和判定依据，制定试验大纲需要考虑实际线路载荷和边界条件，考虑故障特征参数的选择、测试和数据处理，以及通过强化试验缩短试验周期等。目前，相关试验如表11所示。

研究性试验的开展解决了许多运营故障，如车轮多边形化、电机吊架及制动系统吊座强度不足等。图24为转向架参数试验台，该试验台对分析、预测和再现线路故障，验证基础理论，提升仿真分析准确性都起到了很大作用。

2）线路试验

① 线路型式试验。

线路测试试验的组织比较困难，所以线路试验更多的是以整列车为研究对象的线路型式试验，试验内容包括牵引性能、制动性能、动力学性能、弓网受流性能、空气动力学、高压绝缘、网侧谐波、称重限界等。与转向架直接相关的试验为动力学性能试验，分为环形道试验和正线型式试验，根据铁运〔2008〕28号《高速动车组整车试验规范》、IEC 61133: 2006《铁路设施–铁路车辆–车辆组装和运行前的整车试验》、GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》等相关标准，编制试验大纲，进行环

表 11　试验台研究性试验

Table 11　Investigation test on bench

分类	试验台及主要研究内容
动力学	①整车滚振试验台：研究蛇行运动稳定性、失稳临界速度、车辆平稳性和舒适性，研究悬挂系统振动特性、振动传递规律固有频率，开展扫频激振试验、模拟线路激扰轨道谱激振试验
	②轮轨试验台：研究轮轨关系和轮对疲劳可靠性，开展轮轨摩擦磨损试验
	③车线耦合关系试验台[72]：针对轨道部件（扣件、轨枕、轨道板）强度、寿命及动力学特性，研究线路位移、刚度、阻尼等综合性能
	④轮对高频激励振动试验台[72]：研究高频激扰下轮对振动、疲劳可靠性，结构应力响应；研究车轮多边形化、轮对剥离、擦伤等扁疤，和轴端安装紧固件、制动盘螺栓等
	⑤悬挂元件试验：研究静态及动态刚度和阻尼特性，空气弹簧、减振器、橡胶节点类，以及钢弹簧刚度等
	⑥转向架参数试验台：研究悬挂系统刚度、阻尼比、阻尼系数，以及回转力矩、摩擦力矩、回转刚度和车辆柔度系数；开展轮重减载试验，干涉检查，振动模态等研究
强度	①开展扭杆组成和万向轴的强度、刚度测定及疲劳试验
	②开展轮轴线路载荷谱测试标定试验
	③开展接地回流磨耗及性能测试
	④开展轮对组成试验台试验
	⑤开展模态测试试验
	⑥开展轴承关键力学参数测试
	⑦开展驱动系统试验



图 24　转向架参数试验台

Fig. 24　Bogie parameter test bench

形道试验和正线试验。其中搭载的科学研究试验还包括：转向架载荷特性试验、重要零部件应力测试、悬挂方案性能对比试验、转向架部件故障模拟试验等。

线路型式试验以及其搭载的研究性试验，推动了中国动车组的技术进步、速度提升和新车型的迭代研发。特别是自主创新的 CR400AF/BF 型动车组，在“大同—西安”高速试验专线开展了 7 个月左右的高速综合试验。中国近年开展的针对动车组的主要线路型式试验如表 12 所示。

动车组线路型式试验中与转向架相关的试验项点、评价指标及限值如表 13 所示。

表 12　中国动车组主要线路型式试验

Table 12　Main on-line type tests of China's EMU

年份	试验线路	车型	速度级/($km\cdot h^{-1}$)
2006	胶济线	CRH1A/CRH2A/CRH5A	200~250
2008	京津线	CRH2C（一阶段）/CRH3C	300~350
2009	武广线	CRH3C /CRH380BL	300~350
2009	郑西线	CRH2C（二阶段）	300~350
2010	京沪线先导段	CRH380A/AL, CRH380B/BL	300~350
2012	哈大线	CRH380BG	300~350
2014	兰新线	CRH5G	200~250
2015	大西线	CR400AF/CR400BF	300~350
2016	郑徐线	CR400AF/CR400BF	300~350
2019	成贵线	CR300AF/CR300BF	250

表 13　转向架线路型式试验项点

Table 13　Items bogie on-line type test list

试验项点	评价指标	限值
运行稳定性	轮轴横向力	49.54~53.55 kN
	脱轨系数 Q/P	0.8
	轮重减载率 $\Delta P/P$	不得出现连续减载峰值超过 0.80
横向稳定性	构架横向加速度	以 0.5~10 Hz 滤波，不得出现连续 6 次峰值达到或超过 8 m/s^2
运行品质	车体横向加速度	以 0.5~40 Hz 滤波，≤2.5 m/s^2
	车体垂向加速度	以 0.5~40 Hz 滤波，≤2.5 m/s^2
运行平稳性	横向平稳性指标	客室：≤2.5，司机室：≤2.75
	垂向平稳性指标	客室：≤2.5，司机室：≤2.75
	舒适度指标	客室：≤2.0 司机室：≤3

② 线路长期服役性能跟踪研究。

为深入研究动车组在运营条件下其动力学性能及重要零部件强度可靠性随运营时间（里程）增长的变化规律，确保动车组安全可靠运营，对新上线的新型动车组或新开通的线路开展长期服役跟踪测试研究。该试验属于研究性试验，没有现成的试验规范和判定标准，测试跟踪里程为 60 万 km、120 万 km 和 240 万 km。

长期线路服役性能跟踪试验以动车组运用时间（或运营里程）为横坐标，研究环境温度、线路状态、轮轨踏面磨耗状态与车辆性能变化的关系，掌握整车动力学性能的变化规律和演变过程；跟踪轮对、构架、齿轮箱、牵引电机和车体振动加速度的变化，研究车辆悬挂系统振动传递规律，研究减振部件的减振效果；跟踪重要零部件的动应力变化情况，研究转向架零部件强度，开展疲劳寿命评估。与转向架相关的长期线路服役性能跟踪测试内容如表 14 所示。

线路长期服役性能跟踪研究为既有动车组运营故障的分析解决、新型动车组转向架结构和参数的设计提供数据支撑；为仿真分析和台架试验研究提供数据

支撑；为动车组运用维修、科学合理维护周期的制定、运维成本和全寿命周期成本的降低提供数据支撑。同时，这种通过试验研究高铁线路长期服役性能的策略也为中国动车组技术发展和核心技术创新提供了数据支撑。

表 14　长期线路服役性能跟踪测试内容

Table 14　Test content of long-term on-line service performance tracking

序号	测试与研究内容
1	车轮外形：踏面和轮缘磨耗形状、磨耗量和磨耗速率，车轮圆度，车轮多边形化，车轮硬度变化
2	轮对组成：等效锥度变化，钢轨廓形
3	基础制动：制动盘、闸片磨耗速率，研磨子磨耗量，制动缸、空簧压力
4	振动加速度：轴箱、构架、电机、齿轮箱、车体振动加速度，横向稳定性、运行平稳性演变规律，关键部件振动演变，振动传递规律
5	位移：钢弹簧、空气弹簧、减振器、横向缓冲器位移
6	温度：牵引电机定子、轴承温度，齿轮箱轴承、轴箱轴承温度
7	噪声：车内噪声，车外噪声
8	应力：构架、扭杆、制动梁、支吊座等应力

该研究促进了轨道车辆数据采集、数据传输和数据存储等硬件技术的进步。这些海量的测试数据需要专业人员对数据分析处理方法进行研究，并围绕数据按车型、线路进行纵向对比分析，按技术平台进行横向对比分析，深度挖掘并利用好数据，以形成对我国铁路具有普遍指导意义的基础理论。

4　结语

本文首先回顾总结了中国高速动车组技术引进、吸收创新和自主创新 3 个阶段主型转向架的基本结构和主要技术参数，简述各阶段转向架在运用中的主要问题，展望下一代高铁及 CR450 动车组转向架技术创新方向；其次，根据中国高速动车组 3 个阶段主型转向架基本结构演化历程，结合其他转向架主体结构发展及同期制造技术，从转向架总体集成、构架组成、轮对轴箱及定位装置、悬挂装置、驱动系统、基础制动和辅助装置“七大结构”角度，简述其功能及组成，从结构角度提出自主创新研究内容和研究方向；最后，阐述动车组转向架关键技术，随着动车组运行速度的不断提升，新产品和新技术的不断迭代，转向架关键技术也由传统的“结构”“强度”和“动力学”三大技术拓展为“五大关键技术”：转向架轻量化设计技术、强度可靠性技术、车辆系统动力学技术、智能化设计技术和试验测试技术，本文对转向架关键技术的研究现状和发展方向进行了阐述。

中国高速动车组运营数量、运营里程和运用环境的不同为动车组转向架的检修和运维技术提供了大量的运用数据及实际案例，下一步将围绕动车组转向架检修运维开展基础理论创新和工程应用技术创新，建立中国高速动车组运维检修技术体系，在确保安全可靠、平稳舒适的前提下降低动车组全寿命周期维修成本，提高动车组综合经济效益，提升动车组转向架产品技术水平，推动中国高铁装备技术和运维技术的创新发展。

参考文献：

[1] 新华社 . 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(8): 25-37.
The Xinhua News Agency. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council print and issue *the outline development plan for national comprehensive three-dimensional transport network*[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(8): 25-37.

[2] 国家铁路局 . 2020 年铁道统计公报 [R]. (2021-04-19) [2023-02-21]. http://www. gov. cn/xinwen/2021-04/19/content_5600508.htm.
NATIONAL Railway Administration of the People's Republic of China. Railway statistical bulletin for 2020[R]. (2021-04-19) [2023-02-21]. http://www. gov. cn/xinwen/2021-04/19/content_5600508.htm.

[3] 张卫华, 王伯铭 . 中国高速列车的创新发展[J]. 机车电传动, 2010(1): 8-12.
ZHANG Weihua, WANG Boming. Innovation and development of high-speed railway in China[J]. Electric Drive for Locomotives, 2010(1): 8-12.

[4] 中国中车 . 动车组转向架暂行技术条件: TJ/CL 288—2016[Z]. [出版地不详]: [出版者不详], 2016.
CRRC. Temporary technical conditions for the bogie of the EMU: TJ/CL 288—2016[Z]. [S.l.]: [s.n.], 2016.

[5] 李芾, 安琪 . 国内外高速动车组的发展[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(5): 1-5.
LI Fu, AN Qi. Development of high-speed EMU[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2007, 30(5): 1-5.

[6] 何华武 . 创新的中国高速铁路技术(上)[J]. 中国工程科学, 2007, 9(9): 4- 18.
HE Huawu. The innovative Chinese high-speed railway technology (first part)[J]. Engineering Sciences, 2007, 9(9): 4-18.

[7] 何华武 . 创新的中国高速铁路技术(下)[J]. 中国工程科学, 2007, 9(10): 4-18.
HE Huawu. The innovative Chinese high-speed railway technology (next part)[J]. Engineering Sciences, 2007, 9(10): 4-18.

[8] 张曙光 . CRH1 型动车组 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.

ZHANG Shuguang. CRH1 electric multiple units[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.

[9] 张曙光 . CRH2 型动车组[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
ZHANG Shuguang. CRH2 electric multiple units[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.

[10] 张曙光 . CRH5 型动车组[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
ZHANG Shuguang. CRH5 electric multiple units[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.

[11] 何华武 . 京津城际铁路科技创新[J]. 铁道建筑技术, 2009 (2): 1-12.
HE Huawu. Science and technology innovations on Beijing-Tianjin inter-city railway[J]. Railway Construction Technology, 2009(2): 1-12.

[12] 何华武 . 中国高速铁路创新与发展[J]. 中国铁路, 2010 (12): 5-8.
HE Huawu. Innovation and development of China high speed railways[J]. China Railway, 2010(12): 5-8.

[13] 冷扬立, 李秋泽, 李庆国, 等 . CRH5 型动车组万向轴结构及临界转速分析[J]. 铁道车辆, 2010, 48(12): 6-11.
LENG Yangli, LI Qiuze, LI Qingguo, et al. Analysis of the structure and critical rotating speed of the cardan shafts for CRH5 multiple units[J]. Rolling Stock, 2010, 48(12): 6-11.

[14] 张红军, 姚远, 罗赟, 等 . CRH5 型动车万向轴传动系统技术特征分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 115-119.
ZHANG Hongjun, YAO Yuan, LUO Yun, et al. Analysis on technical characteristics of CRH5 cardan drive system[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(2): 115-119.

[15] 李秋泽, 王文静, 谌亮, 等 . 高速动车组弧齿锥齿轮齿面疲劳点蚀失效分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(6): 1206-1213.
LI Qiuze, WANG Wenjing, CHEN Liang, et al. Fatigue pitting failure analysis of tooth surface of spiral bevel gear for EMU train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(6): 1206-1213.

[16] 谌亮, 杨广雪, 李秋泽, 等 . 高速动车组制动横梁裂纹故障分析及改进措施[J]. 铁道学报, 2020, 42(6): 44-49.
CHEN Liang, YANG Guangxue, LI Qiuze, et al. Crack failure analysis and improvement measures for brake beam of high-speed EMU[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(6): 44-49.

[17] 李众, 崔利通, 曲文辉, 等 . 高速动车组传动系统异常振动问题研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(1): 66-72.
LI Zhong, CUI Litong, QU Wenhui, et al. Study on abnormal vibration problems of traction drive system in the high-speed EMU trains[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40 (1): 66-72.

[18] 王文静 . 动车组转向架[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2012.
WANG Wenjing. Bogie of China's EMUs[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2012.

[19] 赵红卫, 梁建英, 刘长青 . 高速动车组技术发展特点及趋势[J]. 工程, 2020, 6(3): 234-244.
ZHAO Hongwei , LIANG Jianying ,LIU Changqing . High-speed EMUs: characteristics of technological development and trends[J]. Engineering, 2020, 6(3): 234-244.

[20] 虞大联 . 日本新干线动车组转向架研发历史回顾(待续)[J]. 国外铁道车辆, 2012, 49(5): 1-7.
YU Dalian. Review of the development history of bogies for multiple units on Shinkansen in Japan (to be continued)[J]. Foreign Rolling Stock, 2012, 49(5): 1-7.

[21] 张曙光 . 高速列车设计方法研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
ZHANG Shuguang. Study on the design method of high-speed EMUs[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.

[22] 池茂儒, 蔡吴斌, 梁树林, 等 . 高速铁路钢轨打磨偏差对车辆动力学性能的影响[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 261-265.
CHI Maoru, CAI Wubin, LIANG Shulin, et al. Influences of rail grinding deviations on vehicle dynamics performances of high speed railways[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 261-265.

[23] 黄照伟, 崔大宾, 杜星, 等 . 车轮偏磨对高速列车直线运行性能的影响[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 14-20.
HUANG Zhaowei, CUI Dabin, DU Xing, et al. Influence of deviated wear of wheel on performance of high-speed train running on straight tracks[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 14-20.

[24] 金学松, 赵国堂, 梁树林, 等 . 高速铁路轮轨磨损特征、机理、影响和对策——车轮踏面横向磨耗[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 3-13.
JIN Xuesong, ZHAO Guotang, LIANG Shulin, et al. Characteristics, mechanisms, influences and counter measures of high speed wheel/rail wear: transverse wear of wheel tread [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 3-13.

[25] 黄照伟 . 车轮磨耗及其对车辆动力学性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
HUANG Zhaowei. Wheel tread wear and its influence on dynamic performance of vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[26] 金学松, 吴越, 梁树林, 等 . 车轮非圆化磨耗问题研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 1-14.
JIN Xuesong, WU Yue, LIANG Shulin, et al. Mechanisms and countermeasures of out-of-roundness wear on railway vehicle wheels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1): 1-14.

[27] 吴越, 韩健, 刘佳, 等 . 高速列车车轮多边形磨耗对轮轨力和转向架振动行为的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 37-46.
WU Yue, HAN Jian, LIU Jia, et al. Effect of high-speed

train polygonal wheels on wheel/rail contact force and bogie vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 37-46.

[28] 吴华丽, 宋冬利, 张卫华, 等. 高速动车组车轮多边形磨耗规律研究及其对车辆系统动力学的影响[J]. 科技创新与应用, 2017(31): 1-3.
WU Huali, SONG Dongli, ZHANG Weihua, et al. Effect of polygon of high speed EMUs on wheel rail force and vibration behavior of bogie[J]. Technology Innovation and Application, 2017(31): 1-3.

[29] 金学松, 吴越, 梁树林, 等. 高速列车车轮多边形磨耗、机理、影响和对策分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(16): 118-136.
JIN Xuesong, WU Yue, LIANG Shulin, et al. Characteristics, mechanism, influences and countermeasures of polygonal wear of high-speed train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(16): 118-136.

[30] 胡亚东. 坚持自主创新道路积极推进中国标准动车组研制[J]. 中国铁路, 2014(8): 1-5.
HU Yadong. Insist on the road of independent innovation and promote the development of the Chinese standard EMUs[J]. China Railway, 2014(8): 1-5.

[31] 中国铁路总公司. 时速350公里中国标准动车组暂行技术条件: TJ/CL 342—2014[S]. 北京: 中国铁路总公司, 2014.
China Railway Corporation. Provisional Technical Conditions for China Standard Multiple Unit with a Speed of 350 km/h: TJ/CL342—2014[S]. Beijing: China Railway Corporation, 2014.

[32] Alstom. Alstom transport high speed signaling[Z]. Paris: Alstom, 2009.

[33] Alstom. TGV 150 test campaign: key results and implications[Z]. Paris: Alstom, 2009.

[34] 张卫华. 动车组总体与转向架[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011: 138-141.
ZHANG Weihua. EMU overall and bogie[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011: 138-141.

[35] 胡文浩, 卢峰华, 张晓军. 高速动车组转向架构架焊接残余应力研究(一)[J]. 焊接技术, 2018, 47(1): 71-74.
HU Wenhao, LU Fenghua, ZHANG Xiaojun. Study on the residual stress of bogie frame of high speed EMUs (1)[J]. Welding Technology, 2018, 47(1): 71-74.

[36] 李芾, 安琪, 付茂海, 等. 高速动车组转向架的发展及其动力学特性综述[J]. 铁道车辆, 2008, 46(4): 5-9.
LI Fu, AN Qi, FU Maohai, et al. Survey on development of bogies for high speed multiple units and the dynamics features[J]. Rolling Stock, 2008, 46(4): 5-9.

[37] 冯永华, 崔志国, 周平宇, 等. 高速动车组转向架联系枕梁研究[J]. 机车车辆工艺, 2017(2): 5-7.
FENG Yonghua, CUI Zhiguo, ZHOU Pingyu, et al. Study on connection bolster of high speed EMUs[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2017(2): 5-7.

[38] 李芾. 傅茂海. 高速客车转向架发展及运用研究[J]. 铁道车辆, 2004, 42(10): 1-7.
LI Fu, FU Maohai. Research on development and operation of high speed passenger car bogies[J]. Rolling Stock, 2004, 42(10): 1-7.

[39] 李秋泽. CRH5型动车驱动系统万向轴失效机理及对策研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
LI Qiuze. Study on failure mechanism and countermeasure of CRH5 drive system universal shaft[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[40] 李培署, 王风洲. 我国高速动车组制动技术现状及未来技术发展探讨[J]. 铁道车辆, 2018, 56(9): 1-5.
LI Peishu, WANG Fengzhou. Present conditions of braking technology for high speed multiple units in China and discussion of technical development in future[J]. Rolling Stock, 2018, 56(9): 1-5.

[41] 史俊玲. 国外高速列车技术特点及发展趋势研究[J]. 中国铁路, 2016(1): 95-98.
SHI Junling. Study on technology and future development of foreign high speed trains[J]. China Railway, 2016(1): 95-98.

[42] 丁叁叁, 陈大伟, 刘加利. 中国高速列车研发与展望[J]. 力学学报, 2021, 53(1): 35-50.
DING Sansan, CHEN Dawei, LIU Jiali. Research, development and prospect of China high-speed train[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 35-50.

[43] 乔英忍. 世界铁路动车组的技术进步、水平和展望(待续)[J]. 国外铁道车辆, 2007, 44(2): 1-7.
QIAO Yingren. Technology progress, level and prospects of railway multiple units in the world (to be continued)[J]. Foreign Rolling Stock, 2007, 44(2): 1-7.

[44] 乔英忍. 世界铁路动车组的技术进步、水平和展望(续完)[J]. 国外铁道车辆, 2007, 44(3): 7-13.
QIAO Yingren. Technology progress, level and prospects of railway multiple units in the world (the last part continued)[J]. Foreign Rolling Stock, 2007, 44(3): 7-13.

[45] 胡布曼恩,塞夫里伊德. 转向架构架: CN201580014897.6[P]. 2015-02-25.
HUBERMANN, SEVRIID. Bogie frame: CN201580014897.6[P]. 2015-02-25.

[46] 韩文娟, 董晓鹏. 国外高速动车组的发展趋势分析[J]. 机车车辆工艺, 2017(4): 8-10.
HAN Wenjuan, DONG Xiaopeng. Development trend of foreign high speed EMU[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2017(4): 8-10.

[47] 缪炳荣, 张卫华, 池茂儒, 等. 下一代高速列车关键技术特征分析及展望[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 58-70.
MIAO Bingrong, ZHANG Weihua, CHI Maoru, et al. Analysis and prospects of key technical features of next gen-

eration high speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 58-70.

[48] 李梁京, 王继荣, 李军. 新型轻材料在转向架部件中的应用[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 42-46.
LI Liangjing, WANG Jirong, LI Jun. The application of new-type lightweight materials in bogie parts[J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2017, 30(4): 42-46.

[49] 李洪强, 徐芳, 王瑞卓. 转向架轻量化探讨及展望[J]. 铁道技术监督, 2020, 48(9): 48-51.
LI Hongqiang, XU Fang, WANG Ruizhuo. Discussion and prospect of bogie lightening[J]. Railway Quality Control, 2020, 48(9): 48-51.

[50] 张亚禹, 孙守光, 王斌杰, 等. 高速动车组构架载荷分类验证研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 156-163.
ZHANG Yayu, SUN Shouguang, WANG Binjie, et al. Study on the classification and verification of bogie frame loads of the high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 156-163.

[51] 刘德刚, 刘宏友, 李庆升. 转向架构架强度试验标准对比[J]. 铁道车辆, 2011, 49(9): 12-17.
LIU Degang, LIU Hongyou, LI Qingsheng. Comparison of strength test standards for bogie frames[J]. Rolling Stock, 2011, 49(9): 12-17.

[52] 李凡松, 邬平波, 曾京. 车下设备承载结构疲劳试验载荷谱编制方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 99-106.
LI Fansong, WU Pingbo, ZENG Jing. Compilation method of fatigue test load spectrum for underfloor equipment bearing structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 99-106.

[53] 邹骅. 城际动车组转向架构架载荷谱研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
ZOU Hua. Load spectrum study on intercity EMU bogie frame[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[54] 王斌杰, 孙守光, 李强, 等. 基于载荷谱提升转向架构架疲劳可靠性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 23-30.
WANG Binjie, SUN Shouguang, LI Qiang, et al. Research on the improvement of speed increased passenger car bogie frame reliability based on load spectrum[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 23-30.

[55] 邹骅, 吴奇峰, 孙守光. 基于损伤一致性的动车组转向架载荷实验谱研究[J]. 力学学报, 2021, 53(1): 115-125.
ZOU Hua, WU Qifeng, SUN Shouguang. Research on load test spectrum of EMU car bogies based on damage consistency[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 115-125.

[56] 陈道云, 孙守光, 李强. 高速列车载荷谱推断及扩展方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 151-155.
CHEN Daoyun, SUN Shouguang, LI Qiang. Study on deduction and extend of high-speed train load spectrum[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 151-155.

[57] 张春玉, 程亚军, 邵俊捷. 基于线路实测载荷谱的转向架部件振动疲劳分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(2): 46-47.
ZHANG Chunyu, CHENG Yajun, SHAO Junjie. Vibration fatigue analysis of bogie components based on routine test load spectrum[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(2): 46-47.

[58] 郭奇宗. CRH6 型动车组转向架载荷谱试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
GUO Qizong. Study on testing for load spectrum of CRH6 bogie[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[59] 张曙光. 高速列车转向架载荷谱测试与建立方法的研究[J]. 中国科学(E辑: 技术科学), 2008, 38(11): 1805-1814.
ZHANG Shuguang. Study on establishment of load spectrum test method of high speed train bogie frame[J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2008, 38 (11): 1805-1814.

[60] 轨道车辆结构可靠性团队. 转向架结构载荷谱研究[Z]. 北京: 北京交通大学, 2021.
Rail Vehicle Structural Reliability Team. Study on structure load spectrum of bogie[R]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[61] 孙晶晶, 孙守光, 李强, 等. 转向架构架试验载荷谱编制方法[J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 29-36.
SUN Jingjing, SUN Shouguang, LI Qiang, et al. Compilation method of test load spectrum for bogie frame[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(6): 29-36.

[62] 廖就. 地铁车轴载荷谱统计分析及台架试验谱研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LIAO Jiu. Statistic analysis of load spectrum of metro axle and study on spectrum of experiment bench[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[63] 杨广雪, 张亚禹, 李广全. 高速列车轴箱弹簧载荷特性与疲劳损伤[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 81-93.
YANG Guangxue, ZHANG Yayu, LI Guangquan. Axle box spring load characteristics and fatigue damage of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 81-93.

[64] 王文静, 王燕, 孙守光, 等. 高速列车转向架载荷谱长期跟踪试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 84-89.
WANG Wenjing, WANG Yan, SUN Shouguang, et al. Long-term load spectrum test of high-speed train bogie[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 84-89.

[65] 王文静, 张志鹏, 李广全, 等. 动车组抗侧滚扭杆载荷特性[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(6): 1277-1282.
WANG Wenjing, ZHANG Zhipeng, LI Guangquan, et al. Load characteristics of anti-rolling torsion bar of high-speed train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54 (6): 1277-1282.

[66] 杨广雪, 李爽, 张子璠, 等. 高速动车组转向架端部悬挂件对构架应力的影响[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 300-310.

YANG Guangxue, LI Shuang, ZHANG Zifan, et al. Effects of suspension parts at end of high-speed EMUs bogies on frame stress[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 300-310.

[67] 李国栋, 王建斌, 曾京. 转向架构架模态频率与疲劳损伤参数敏感性研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 264-269.
LI Guodong, WANG Jianbin, ZENG Jing. Parametric sensitivity study on modal frequency respect to fatigue damage of bogie frame[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 264-269.

[68] 张大福. 高速转向架构架作用载荷谱研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
ZHANG Dafu. The load spectrum study on high-speed bogie frame[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[69] 李凡松, 邬平波, 曾京, 等. 构架三种常用疲劳强度校核方法对比研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 170-176.
LI Fansong, WU Pingbo, ZENG Jing, et al. Study on the differences between the three common fatigue strength analysis methods for bogie frame[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 170-176.

[70] 罗仁, 石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018.
LUO Ren, SHI Huailong. Dynamics of railway vehicle systems and application[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2018.

[71] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015: 97-116.
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015: 97-116.

[72] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
TIAN Hongqi. Train aerodynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.

[73] 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.
ZHANG Weihua. Dynamics of coupled systems in high-speed trains: theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2013.

[74] 沈志云, 张卫华. 中国高铁技术发展中的理论突破和试验突破[J]. 中国发明与专利, 2020, 17(10): 6-16.
SHEN Zhiyun, ZHANG Weihua. Breakthrough in theory development and in experiment methodology of high-speed rail technology in China[J]. China Invention & Patent, 2020, 17(10): 6-16.

[75] 国家铁路局. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Railway Administration of People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[76] 梁建英. 开启智能化轨道交通装备新时代[J]. 科学, 2020, 72(2): 17-22.
LIANG Jianying. A new era of intelligent railway equipment [J]. Science, 2020, 72(2): 17-22.

[77] 何华武, 朱亮, 李平, 等. 智能高铁体系框架研究[J]. 中国铁路, 2019(3): 1-8.
HE Huawu, ZHU Liang, LI Ping, et al. Study on the system framework of intelligent high speed railway[J]. China Railway, 2019(3): 1-8.

[78] 王同军. 智能铁路总体架构与发展展望[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(7): 1-8.
WANG Tongjun. Overall framework and development prospect of intelligent railway[J]. Railway Computer Application, 2018, 27(7): 1-8.

[79] 王同军. 中国智能高铁发展战略研究[J]. 中国铁路, 2019 (1): 9-14.
WANG Tongjun. Study on the development strategy of China intelligent high speed railway[J]. China Railway, 2019(1): 9-14.

[80] 刘长青. 京张高铁智能动车组关键技术研究与应用[J]. 中国铁路, 2019(9): 9-13.
LIU Changqing. Research and application of key technologies of intelligent EMU trains of Beijing-Zhangjiakou HSR [J]. China Railway, 2019(9): 9-13.

[81] 科学大院. 翟婉明院士: 中国高铁发展面临的科技挑战与对策[R/OL]. (2021-07-28) [2023-01-16]. https://www.shkp.org.cn/articles/2021/07/wx338999.html.
Science Academy. Academician Zhai Wanming: Technological challenges and countermeasures for the development of China's high-speed railways[R/OL]. (2021-07-28) [2023-01-16]. https://www. shkp. org. cn/articles/2021/07/wx338999.html.

[82] 何华武. 高速铁路运行安全检测监测与监控技术[J]. 中国铁路, 2013(3): 1-7.
HE Huawu. Technology for safety testing, monitoring, and control of high-speed railway operation[J]. China Railway, 2013(3): 1-7.

[83] 任斌. 大数据环境下高速动车组转向架状态监测及其故障诊断研究[J]. 装备维修技术, 2020(2): 284.
REN Bin. Study on high-speed EMU bogie status monitoring and failure diagnosis in big data environment[J]. Equipment Technology, 2020(2): 284.

[84] 梁建英, 刘韶庆, 范龙庆, 等. 大数据在我国高速动车组运维中的应用[J]. 控制与信息技术, 2019(1): 7-11.
LIANG Jianying, LIU Shaoqing, FAN Longqing, et al. Application of big data technology in the operation and maintenance for high speed EMUs[J]. Control and Information Technology, 2019(1): 7-11.

[85] 杨凯. TEDS 动车组故障图像数据库建立技术研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(6): 38-42.
YANG Kai. TEDS EMU fault image database[J]. Railway

Locomotive & Car, 2020, 40(6): 38-42.

[86] 汪春晓. 相控阵超声波车轮缺陷探伤技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
WANG Chunxiao. Phased array ultrasonic technology research for wheel flaw inspection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

[87] 曾声奎, PECHT M G, 吴际. 故障预测与健康管理(PHM)技术的现状与发展[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626-632.
ZENG Shengkui, PECHT M G, WU Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626-632.

[88] 周斌, 谢名源, 吴克明. 动车组维修体制现状分析及展望[J]. 机车电传动, 2017(1): 17-21.
ZHOU Bin, XIE Mingyuan, WU Keming. Analysis and prediction on the current situation of the repair class and repair system of electric multiple units (EMU)[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(1): 17-21.

[89] 牛齐明. 基于PHM技术的高铁装备健康状态智能分析模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
NIU Qiming. Research on intelligent analysis model of high-speed railway equipment health condition based on PHM technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[90] 钱铭. 我国铁路机车车辆修程修制改革初探[J]. 中国铁路, 2019(10): 1-5.
QIAN Ming. Study on the reform of maintenance system and cycle for China's railway locomotive & car[J]. China Railway, 2019(10): 1-5.

[91] 张卫华, 李权福, 宋冬利. 关于铁路机车车辆健康管理与状态修的思考[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 379-389.
ZHANG Weihua, LI Quanfu, SONG Dongli. Thoughts on health management and condition-based maintenance of rolling stocks[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(4): 379-389.

[92]《面向世界的复兴号》编委会. 面向世界的复兴号[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020: 153-156.
Editorial Board of *Facing the World with Fuxing*. Facing the world with Fuxing[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2020: 153-156.

收稿日期：2021-09-03
修回日期：2023-02-26