

文章编号:1671-1637(2021)05-0006-24

中国高速铁路的崛起和今后的发展

熊嘉阳¹, 沈志云²

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:中国高速铁路是世界高速铁路发展中重要的一部分,从历史观点(人类社会发展的必然)和全球视野(世界高速铁路发展的延续)两方面重点回顾了中国高速铁路的崛起和发展历程,从宏观角度分析了世界高速铁路发展的时间轴,阐述了4次世界工业革命不断催生交通运输技术的重大进步,指出了世界高速铁路的发展都要经历4个阶段:酝酿、探索、成熟、发展。美国最早提出建设高速铁路,但至今还在酝酿期。日本、法国、德国等仍然处于探索期。只有中国高速铁路已进入快速发展期。围绕中国高速铁路取得的巨大历史成就,阐述了中国高速铁路引进、消化、吸收再创新到自主创新的过程,阐明了中国高速铁路之所以取得世界瞩目的重大成就,从政策层面看,主要是因为中国在吸收各国探索经验的基础上,在政府统筹下集中力量办大事,充分整合和利用企业、高校、科研院所等的资源优势,创建了轨道交通国家技术创新体系;从技术层面看,主要原因是取得了技术突破、理论突破和试验突破三大重要突破。探讨了高速铁路发展面临的技术挑战,论述了高速铁路关键技术的研究进展,展望了后高铁时代轮轨高铁和磁悬浮高铁的发展方向,提出了智能高铁、智慧高铁、数字高铁等未来发展思路,以期为中国高速铁路的未来走向和发展提供参考,助力中国交通强国伟大梦想的实现。

关键词:轨道交通;轮轨高铁;重大突破;技术革命;数字化;超导磁悬浮;未来发展

中图分类号:U238 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.05.002

Rise and future development of Chinese high-speed railway

XIONG Jia-yang¹, SHEN Zhi-yun²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The high-speed railway of China is an important part of the development of the world high-speed railway. The development and rise of Chinese high-speed railway were reviewed from the historical perspective (the inevitability of human society development) and the global perspective (the continuation of the world high-speed railway development). The timeline of the world high-speed railway development was analyzed from a macro point of view and the encouragement of the four worldwide industrial revolutions to the major advances of transportation technology was expounded. It is pointed out that the development of the high-speed railway goes through four stages: ferment, exploration, mature and development. The United States first suggested building high-speed railway, but it is still in the ferment stage. The

收稿日期:2021-04-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1201701);国家自然科学基金项目(U19A20102)

作者简介:熊嘉阳(1969-),男,四川峨眉人,西南交通大学副教授,工学博士,从事车辆轨道系统动力学与磁悬浮车辆系统动力学研究。

通讯作者:沈志云(1929-),男,湖南长沙人,西南交通大学教授,中国科学院院士,中国工程院院士,前苏联副博士。

引用格式:熊嘉阳,沈志云.中国高速铁路的崛起和今后的发展[J].交通运输工程学报,2021,21(5):6-29.

Citation:XIONG Jia-yang, SHEN Zhi-yun. Rise and future development of Chinese high-speed railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 6-29.

high-speed railways of Japan, France and Germany are in the exploration stage. Only the Chinese high-speed railway has entered a rapid development stage. Based on the great achievements of Chinese high-speed railway, this paper expounded the path of introduction, digestion, absorption, innovation, and independent innovation in the process of Chinese high-speed railway development. The significant achievements have been made, on one hand, on the policy level, mainly due to Chinese efforts of taking the high-speed railway exploration experience of other countries and Chinese governmental ability of concentrating resources to accomplish large projects, integrating the advantages of enterprises, universities, and research institutes, and creating a national rail transit technology innovation system. On the other hand, from a technical perspective, the main reason of Chinese great achievements in high-speed railway lies in three important breakthroughs, which are technical breakthrough, theoretical breakthrough, and experimental breakthrough. The technical challenges faced by the development of high-speed railway and the research progress of key technologies of high-speed railway were discussed. The directions of the development of wheel-rail based high-speed transit and high-speed maglev in the post high-speed railway era were prospected, and the future development concepts of digital, intelligent, and smart high-speed railways were proposed so as to provide a reference for the future development of Chinese high-speed railway and to help to realize the great dream of building a great nation with modern transportation. 2 tabs, 25 figs, 40 refs.

Key words: rail transit; wheel/rail high-speed railway; major breakthrough; technology revolution; digitalization; superconducting maglev; future development

Author resumes: XIONG Jia-yang(1969-), male, associate professor, PhD, jyxiong@swjtu.edu.cn; SHEN Zhi-yun(1929-), male, professor, academician of Chinese Academy of Sciences and Chinese Academy of Engineering, zyshen@swjtu.edu.cn.

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2018YFB1201701); National Natural Science Foundation of China (U19A20102)

0 引 言

中国高速铁路,简称中国高铁,是指中国境内建成使用的高速铁路,为当代中国重要的一类交通基础设施^[1]。高速铁路(以下简称高铁)是铁路现代化的重要标志,具有安全、快速、正点、舒适、环保等诸多优点,是集多种高新技术于一体的复杂巨系统,已在世界各国得到广泛重视。中国铁路通过大力推进原始创新、集成创新、引进消化吸收再创新,用短短十多年的时间走出了一条具有中国特色的高铁发展之路,中国成为世界上高铁发展速度最快、系统技术最全、集成能力最强、运营里程最长、在建规模最大的国家,已建成世界上高铁运营里程规模最大、运营速度最高、年发送旅客最多、舒适度最好、具有完全知识产权的高铁网络,取得了迅猛的发展及举世瞩目的成就。中国铁路2020年统计公报显示,截至2020年底,中国高铁运营里程达到3.79万公里,比“十二五”末的1.98万公里翻了近一番,比2016年

提出的目标超出近8000公里,在线高速动车组3918标准组,高铁运营里程及高速动车组保有量均占世界2/3以上,稳居世界第一。中国高铁“四纵四横”干线网已提前建成,并向“八纵八横”大网推进,路网规模化发展迅速,覆盖除西藏外的所有省份,建成了世界上最现代化和最发达的高铁网。预计到2030年,高铁运营里程将达到4.5万公里,在线高速动车组将超过7000标准组^[2]。2021年2月8日党中央、国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》中提出,到2035年,中国铁路网总规模将达到20万公里,其中高铁包含部分城际铁路,将达到7万公里左右,建设“八纵八横”高铁主通道,以及区域性高铁,形成高效的现代化高铁网。

中国高铁的技术先进主要体现在运营速度高、建设环境复杂、运营场景多样、能与世界先进铁路技术相兼容、性价比高等方面^[3]。中国高铁技术站在了全球高铁市场的最前沿,并逐步引领全球高铁市场的发展。习近平总书记多次向世界推荐中国高

铁,他指出,高铁是中国装备制造的一张亮丽的名片,党的十八大以来,成为中国对外经济技术合作的“抢手货”,要抓住机遇,乘势而上^[4]。

党的十九届五中全会提出,要坚持创新在中国现代化建设全局中的核心地位,把科技自立自强作为国家发展的战略支撑。2021年1月11日在省部级主要领导干部学习贯彻党的十九届五中全会精神专题研讨班开班式上,习近平总书记强调,构建新发展格局最本质的特征是实现高水平的自立自强,必须更强调自主创新。

2021年1月19日,习近平总书记乘坐京张高铁,到达太子城站,参观后指出,中国自主创新的一个成功范例就是高铁,从无到有,从引进、消化、吸收再创新到自主创新,现在已经领跑世界。要总结经验,继续努力,争取在“十四五”期间有更大发展。

在高铁研发过程中,中国开展了大量的基础研究、设计探索、仿真优化、台架试验及长期线路跟踪试验,积累了大量宝贵数据与经验,自主攻克了大量核心技术难题,解决了一系列重大技术问题,形成了自主研发能力。根据习近平总书记对高铁发展“总结经验”的要求,本文主要谈中国高铁崛起的2个观点、取得的三大突破^[5]和未来的发展方向。

1 中国高铁的崛起和迎接数字时代

世界高铁的发展经历了酝酿、探索、成熟和快速发展四个阶段。其中,美国虽然最早酝酿,但一直未能真正起步。日本和欧洲的高铁虽然各自取得了可

观的成就,但严格说来,仍处于探索如何建成理想中的高铁网阶段。只有中国高铁,虽然起步较晚,但快速经历酝酿、探索期后,广泛吸收各国探索的经验,再自主创新,达到了建成成熟高铁网的程度,现在正处于快速发展时期。一般而言,新事物的产生是因为其符合事物发展的客观规律和发展趋势,新事物比旧事物具有更强劲的生命力和更远大的发展前途。高铁的兴起意味着人类交通运输方式的巨大变革。与日本、法国和德国相比,中国高铁的崛起与发展,虽然相对较晚,但因受到强劲的国内需求驱动和国际竞争压力等外在因素以及其自身迫切需要发展壮大的内在动力因素的影响,所以发展速度惊人,令世界震撼。

1.1 交通运输技术随人类社会重大技术进步而不断发展(历史观点)

如何建立现代化的综合交通运输体系和建立什么样的体系呢?是走美国的老路,即客运只发展高速公路和民航,铁路仅限于货运,还是要根据中国国情和绿色交通的原则,把轨道交通放在骨干的地位^[6]?这是值得深思的问题。

1.1.1 世界工业革命对交通运输技术进步的促进作用

每一次世界工业革命都标志着人类社会文明发展达到了一个新的里程碑,极大地解放了生产力,推动人类社会的巨大变革,促使人类社会向更高层次迈进,从纪年的角度清晰描述了世界科技进步与陆地交通速度提升相辅相成的关系。交通运输在4次世界工业革命中的发展情况见表1。

表1 交通运输在4次世界工业革命中的发展

Table 1 Development of transportation in four worldwide industrial revolutions

时期	特点	重大技术进步	交通运输的发展
18世纪	第1次工业革命 60年代起开始进入机器时代	1782年瓦特发明蒸汽机	畜力为主
19世纪	第2次工业革命 50年代开始进入电气化时代	1825年诞生第一条铁路 1886年诞生第一辆汽车	铁路为主
20世纪	第3次工业革命 60年代开始进入计算机时代	1931年德国建成第一条高速公路 1903年莱特兄弟发明第一架飞机 1914年美国建第一条民航运输线 1964年日本诞生第一条高速铁路	高速公路+民航为主,拥堵和晚点呼吁新铁路
21世纪	第4次工业革命 逐步进入人工智能、数字化时代	铁路必须完成2个颠覆性技术革命	重回铁路(历史必然),高速铁路+管道磁浮

交通运输的发展与重大技术进步息息相关,从人类社会历史来看,交通运输方式的变革,直接引导着世界格局的变化。

蒸汽机的出现是划时代的,引起了第1次世界工业革命,正是蒸汽动力机械的发明和应用,促使了现代轨道交通的诞生,之后轨道交通进入了快速发

展时期,牵引能力的提升已能满足大运量集中客货运输需求。以电气化为代表的第2次工业革命,把轨道交通直接推向了高速化。1964年日本东海道新干线开通,地面大运量旅行速度突破了 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,1983和1991年法国和德国相继开行高速列车,速度分别达到 270 和 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,与第1次工业

革命时代相比,速度大约翻了一番。第 3 次工业革命主要以计算机及信息化为表征,一方面传统轨道交通牵引能力显著提高,使得中国普遍开行 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速列车成为现实,而且已经将运行速度进一步提升至 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;另一方面,以高速磁悬浮列车为标志,基于材料、电子、物理、信息、控制技术最新发展的新型大运量轨道交通,运行速度已可达到 $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,相比于第 2 次工业革命时代的地面大运量交通运行速度大约再翻一番。进入 21 世纪,人类迎来了以新能源、大数据、云计算、物联网、人工智能、5G、量子通讯等为特征的第 4 次世界工业革命的曙光。毋庸置疑,人类持续推升轨道交通速度的梦想和诉求不会改变,地面轨道交通速度是否能够再翻一番,达到 $1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上值得期待,而磁悬浮轨道交通方式最有可能去实现这一目标。尽管航空方式已实现 $1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的旅行速度,但地面高速及超高速轨道交通的生命力依然旺盛,仍有必要,它对铁路沿线经济的带动作用以及转移航空客流减少高空温室气体排放的影响极为明显^[7-8]。

1.1.2 交通运输重回铁路是历史的必然选择

第 2、3 次世界工业革命以后,在交通运输领域,19 世纪是铁路的天下,在铁路时代美国共建成 40 多万公里铁路线,为世界之最,之后高速公路和民航运输占据主导,铁路客运则急速衰退,美国拆掉了 10 多万公里铁路线,而且铁路的客运量仅占社会总客运量的 0.24%。但是好景不长,问题慢慢显现,首先是公路拥堵,然后是航空晚点,航线是固定的,航线多了之后,航班经常排队起飞,出行效率降低。随后美国最先意识到,光靠高速公路和民航还是难以维持长久,交通运输问题的症结依然存在,还必须重回铁路,才能解决交通运输的根本问题,所以重回铁路是历史发展的必然选择。

图 1 为世界最宽的美国华盛顿至纽约高速公路,双向 20 车道,但是经常发生拥堵,上图表示数千辆汽车排着队慢慢爬行,可谓“场面宏大、蔚为壮观”。所以从 20 世纪 50 年代开始,美国铁路协会(the Association of American Railroad, AAR)便酝酿建设高铁,首先考虑在卡罗拉多州建立 Pueblo 列车试验场,用于高铁试验研究。当时美国就看到客运的出路只能是重回铁路。但是,已有的铁路不能适应新的运输需求,因此,列车需要重造,线路也得重建。美国当时提出的高铁发展理念,可以概括为以下 4 点。

(1)速度要提高,当时提出速度要达到 $280 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。

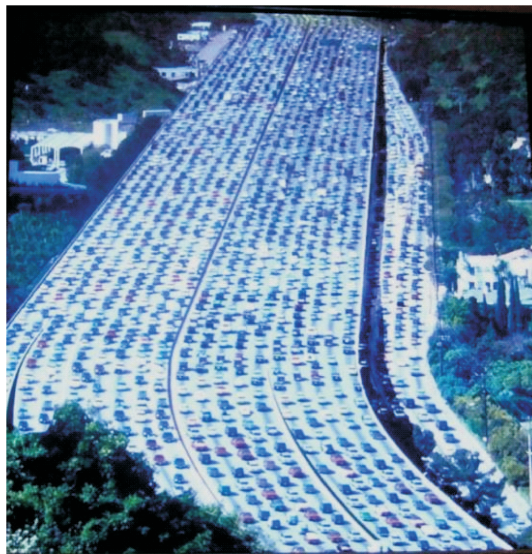


图 1 美国华盛顿至纽约高速公路

Fig. 1 Washington-New York Highway in America

(2)动力要分散,不能集中在机车上。牵引力要足够大,整个列车都要能提供牵引力,不能集中在一辆机车上,整个列车质量都要有可能用作粘着质量,因此,动力必须分散,传统机车和车辆分家的格局要彻底打破。

(3)轨道要精准,宜采用整体道床。好车配好路才有高速度,有必要采用整体道床,这样就可以充分保持轨道刚度的一致性,同时可以提高轨道的平直度,减少线路对高速列车的扰动。美国在 Pueblo 列车试验场建立了 40 多公里的试验线,其中有一条试验线是专门试验高速的。

(4)高铁要成网,线路上不能高速客车和重载货车混合跑。铁路货运讲究的是重载,重载列车的牵引质量上万吨,车辆的轴重超过 30 t,这样的重载列车如果上高铁运行,显然会破坏高铁线路的平顺性和轨道结构。

当时美国根据这些想法,准备在 Pueblo 建设一个高速列车试验研究中心,要建 2 个试验台,分别为试验高速列车稳定性的滚台和测定高速车辆平稳性的振动台。但是高铁计划一到议会就不能通过,所以直到现在美国都还没有一条真正意义上的高铁,高铁在美国至今仍然处于酝酿期。美国首先抛弃铁路客运,也最先意识到需要重回铁路,从历史发展来看美国迟早是要建设高铁网的。

1964 年 10 月 1 日,世界第一条高铁东海道新干线在日本诞生,最高运营速度为 $210 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,全球开始发展商业运营高铁^[9]。日本虽然是按照美国的铁路发展理念来做,基本方向是对的,但是日本定

的速度标准太低。当时日本在工业软件方面运用还有欠缺,计算的临界失稳速度只有 $270 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,因此,日本定的运营速度仅为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,所以日本高铁一直赔本,直到 20 世纪 80 年代提高运营速度到 $230 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,才开始盈利。这时法国看到日本赚钱了,也开始建设高铁,但为了降低成本,法国仍然搞动力集中、碎石道床,两车共用一个转向架,最高轴重达 17 t,不能再降低,非常受限制,发展方向显然不对。但法国还是很努力,运营速度起点高,达到 $270 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,后来提高到 $300、320 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。尽管如此,还是达不到成熟的更高速度。德国一开始也跟着法国的路子走,ICE1 和 ICE2 都是动力集中的,直到 ICE3 才纠正了方向,改成动力分散,开始建整体道床。但是德国由于管理体制的原因,高铁的建设和运营是分开的,高铁线路也是一段一段且离散的,不仅不成网,而且成线也不够,只能客货混跑,速度很难再提高。所以,至今德国也处在全德以至全欧洲如何建成现代化高铁网的探索之中。

在中国,铁路是国家最重要的大众化交通基础设施之一,在强力构建的综合交通运输体系中处于骨干地位。对地域辽阔、人口众多,而资源分布相对不均衡的一个大国而言,经济、快捷、高效的铁路自然是优先发展且被广泛使用的交通运输方式。

1978 年,邓小平同志访问日本乘坐新干线列车,说:就感觉到快,有催人跑的意思,现在正合适坐

这样的车。高铁因此进入中国大众的视野^[10]。20 世纪 80 年代,中国从世界银行拿到一批美元贷款,计划增设 50 个国家重点实验室。西南交通大学开始酝酿,跟美国一样,首先要建立高铁试验基地。西南交通大学提出要建 $450 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速试验台,得到国家批准,命名为牵引动力国家重点实验室(以下简称 TPL 国重),成为整个铁路系统唯一的国家重点实验室。当时提出的建设总目标之一是:进行基础性研究和高新技术开发,为研制高速列车服务。事实证明,这个实验室的建立在中国高铁的崛起过程中,起到了不可替代的作用,大大促进了 20 世纪 90 年代中国高铁探索的高潮,各主机厂自主研发的 25 种高速列车,都在 TPL 国重的高速试验台上进行过试验研究。

中国高铁的真正成熟是 2003 年以后的事。为了吸收全球探索的经验,采取引进消化吸收再创新的方针,这就需要有全球视野的目光。

1.2 世界高铁颠覆性技术革命进程(全球视野)

所谓颠覆性技术就是对已有传统或主流技术途径产生整体或根本性替代的技术,可能是全新技术,也可能是现有技术的跨学科、跨领域的应用。从世界上第一条高铁在日本诞生到中国高铁的快速崛起,开辟了一个全球性的铁路颠覆性技术革命的新时代。

1.2.1 中国高铁在全球快速崛起的根本原因

从全球视野出发,世界高铁发展进程如表 2 所示。

表 2 世界高铁颠覆性技术革命进程

Table 2 Disruptive technology revolution process of world high-speed railway

高铁时代	国外	酝酿期	20 世纪 50 年代	美国筹建 Pueblo 高速列车试验基地,高铁至今未起步
		探索期	20 世纪 60 年代	日本建新干线,理念新,但起点低,速度提不高
			20 世纪 80 年代	法国起点高,后来达到 $320 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,但方向不对 德国虽然纠正了方向,但高铁不成网
		中国崛起 40 年	酝酿期	20 世纪 80 年代
	探索期		20 世纪 90 年代	既有线提速,自主研发 25 种高速列车,并在高速列车试验台进行试验
	成熟期		21 世纪初	引进(全球探索的经验)消化吸收再创新(在已有基础上自主创新)
	发展期		2013~2020 年	成功开发 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的“复兴号”高速列车,建成 3.79 万公里现代化高标准高铁网
	后高铁时代	前期	2021~2035 年	1、开发智能“复兴号”CR450,达到 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运营速度; 2、选择高速磁悬浮技术——高温超导
中期		2035~2049 年	1、研发智慧“复兴号”CR500、CR600; 2、发展 $800 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 真空管道磁悬浮列车	
后期		2050~2100 年	1、修建 $1\ 000\sim 1\ 500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 超高速真空管道磁悬浮列车线路; 2、试探太空通道	

恢复铁路在客运中的地位要求铁路进行脱胎换骨的改造,或者说需要进行一次颠覆性技术创新。

这是一场世界范围的高铁颠覆性技术革命,不以人们意愿为转移。

高铁在不同国家、不同时代以及不同的科研学术领域有不同规定,但是作为能够与航空、高速公路相匹敌的高铁,至今无一脱离上面美国提出的 4 个发展理念。

国际铁路联盟(International Union of Railways, UIC)高铁定义:高铁的定义相当广泛,包含高铁领域下的众多系统。高铁是这一“系统”的所有元素的组合,包括基础设施(新线设计速度 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,提速线路速度 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 甚至 $220 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、高速动车组和运营条件。中国高铁定义:新设计开行 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (含预留)及以上动车组列车,初期运营速度不小于 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的客运专线铁路,都可称为高铁。

中国高铁异军突起,成为自主创新的范例,能率先快速建成现代化高标准高铁网,根本原因是中国特色社会主义体制优越性发挥到极致的结果。虽然需求与投资能力是条件,但正确决策才是关键。

经过 20 年酝酿和探索,到本世纪初,经过引进消化吸收再创新,在吸收日本、法国、德国等成功探索经验基础上,充分发挥中国自己的探索成果,进行自主创新,才达到成熟,并且发展了能按 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度运营的“复兴号”高速列车,走向更高水平的高铁辉煌。

中国在吸收各国经验基础上,发挥集中力量办大事和资源丰富的优势,才建成了真正意义上的现代高铁网。在中国高铁行业的迅速崛起过程中,需要解决的问题日益呈现出多样性。高铁建设过程中,遇到了很多前所未有的技术难题,特别是高铁线

路设计规范、无砟轨道设计理论和建造技术等诸多重大的关键科学技术问题亟待深入研究,迫切需要工程建设单位、高校和科研院所密切合作,协同攻关,因此,在高铁建造技术领域,有必要整合社会资源,充分利用企业、高校、科研院所等单位的优势,在政府指导和中介机构服务下,优化资源配置,建立以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系。

为什么中国高铁建设会率先取得如此突出的成就?究其原因,就是通过建立轨道交通国家技术创新体系(图 2),该体系在政府统筹下产学研相结合,以企业为主体,实现了有关主体企业的现代化,成立各级研究机构,凝聚全国科技力量为主体服务,实现了科学与技术的最佳结合,提出并实践“高速列车耦合大系统动力学”理论,建立高速列车创新试验体系,大大促进了高铁技术的自主发展。凝聚全国的科技力量来支持这个创新主体,技术创新的主体是现代制造业、建设业和运输部门,包括唐山、长春、四方 3 个主机厂、30 个配套厂、500 个企业组成的产业链等,以及原铁道部(现国铁集团)、教育部、各省市重点实验室和科研院所 120 多个研究单位。继 TPL 国重之后,轨道交通领域逐步有了 13 个国家级的重点实验室等研究机构。2004 年,西南交通大学申报轨道交通国家实验室,经过 16 年的努力,现在转为申报功能更加全面的轨道交通技术国家研究中心,这在国内实属罕见。这个中心的主要功能是搞基础理论研究和最先进的技术研究,将研究成果不断提供给创新主体,这样中国高铁才有继续领跑

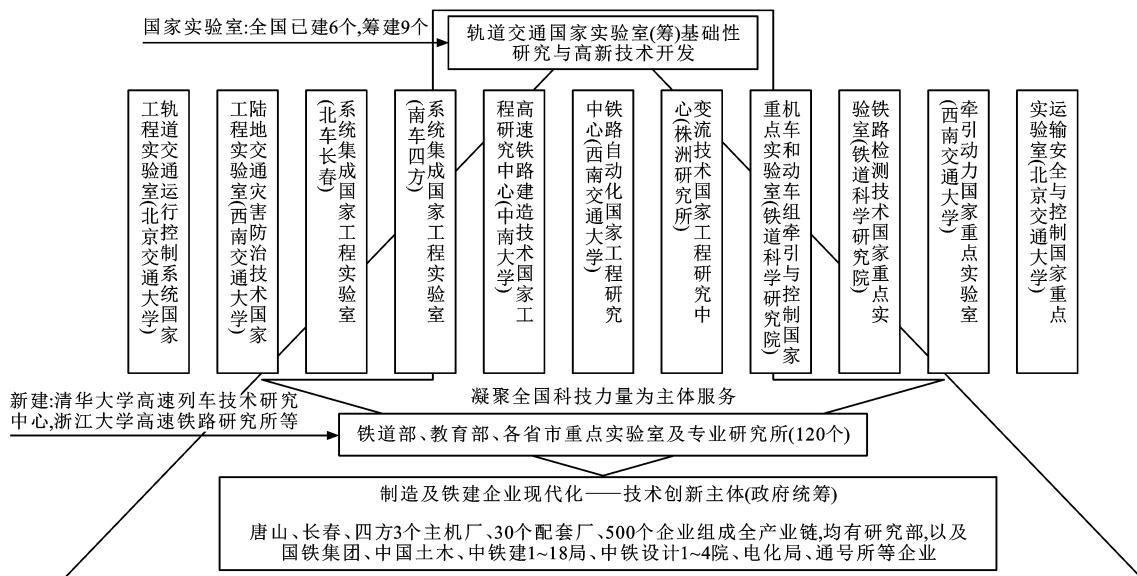


图 2 轨道交通国家技术创新体系

Fig. 2 Rail transit national technical innovation system

世界的可能。

1.2.2 数字化是高铁颠覆性发展的趋势

时代总是在前进的,第 1 次世界工业革命的标志是机械化,第 2 次世界工业革命的标志是电气化,第 3 次世界工业革命的标志是信息化,前 3 个时代可以统称为工业时代,第 4 次世界工业革命,由工业时代进入数字时代,数字生产力成为主要的生产力,即互联网、物联网、大数据、云计算、人工智能、区块链等成为主要的社会生产力,这是颠覆性的历史转变。在数字时代,高铁发展可以预见有如下一些趋势。

- (1) 高速列车耦合大系统动力学采用云计算。
- (2) 高速轮轨列车智慧化,研制智慧“复兴号”CR450、CR500、CR600。
- (3) 超高速真空管道磁悬浮技术数字化。
- (4) 高速列车跟踪测试采用大数据技术。

(5) 创建高速列车云。尽管现在已有高铁云,但是这还不够,应扩展到高速列车的 9 大关键技术和 10 项配套技术,大家都来建高铁云,都用高铁云。产品不只是高速列车,还应包括高速列车的安全性指标、稳定性指标、平稳性指标、数字指标等,其中数字指标是更关键的指标,中国要充分利用好数千列高速列车的数字指标,随时可查询、可调用。

要构建基础设施、移动装备、运营指挥、检修维护、旅客服务五位一体的高铁统一大数据中心,研究海量高铁数据高效处理、多源异构数据融合技术,制定数据标准及接入规范,深度融合各种先进检测系统,纳入故障预测与健康管理系统(Prognostic and Health Management, PHM)体系平台,实现各子系统数据共享、同步及协同驱动,统筹数据分析管理,高效监测管理与服务^[2]。PHM 的主要功能如图 3 所示。通过建立 PHM 模型,不断优化高速列车部件修程修制与智能化管理,从而实现高速列车健康状态评估、故障趋势预测、运维决策优化等,提高运维效率,降低运维成本。

2 中国高铁发展的演进——中国高铁技术的三大突破

中国高铁的迅猛发展并非一朝一夕之功,高铁技术是多学科的交叉,要想自主开发现代化的高速列车,必须加强基础性研究^[11]。从 20 世纪 80 年代起,中国高铁研究人员就开展了车辆系统动力学、列车空气动力学、轮轨关系、弓网关系以及流固耦合关系等基础性研究,建设了一批试验研究平台,形成了中国高铁的基础理论和试验体系,支撑了中国高铁的自主

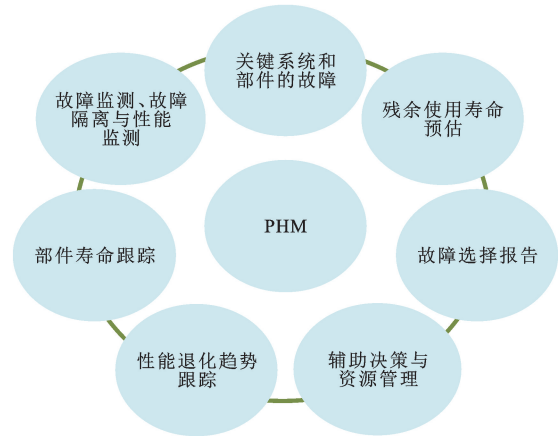


图 3 PHM 功能谱

Fig. 3 Function spectrum of PHM

创新发展。中国高铁发展取得举世瞩目的成就,在创新型国家建设中做出了重大贡献。高铁已被国家定位为实现了与载人航天等同样的“重大突破”。能被提到是国家的重大突破,一定是世界水平的重大技术突破,因此,从技术层面上看,中国高铁技术的发展,主要是取得了技术、理论和试验三大重要突破。

- (1) 技术突破:成功研发 350 km · h⁻¹ 运营速度的“复兴号”高速列车。
- (2) 理论突破:高速列车耦合大系统动力学的建立和应用。
- (3) 试验突破:建成并运用高速列车再现实景的试验设备。

如图 4 所示,中国高铁技术的三大突破贯穿于产品研发的全过程。一个新产品(高速列车)的研发,要经过系统设计、样机制造、试验验证,才能变成产品,产品投入运营以后,还要进行跟踪试验,找出其性能规律,进行再优化、再设计、再制造、再运营、

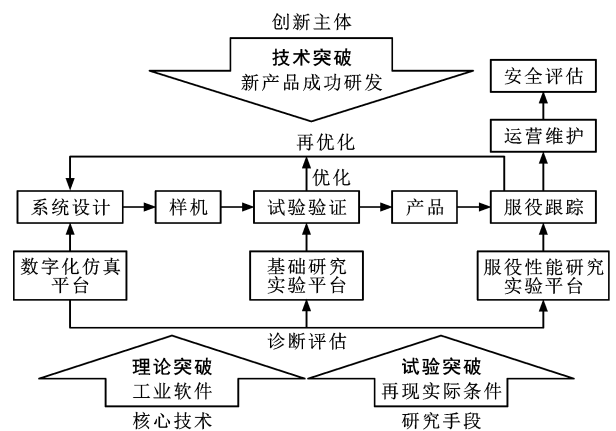


图 4 科学与技术相结合的高速列车全寿命周期研发体系

Fig. 4 Research and development system of whole life cycle of high-speed train combined with science and technology

再跟踪,形成这样一个循环,产品才能够不断完善,不断创新,不断发展,从而形成高速列车全寿命周期研发体系。新产品成功开发的技术突破当然是属于创新主体——制造企业(主机厂)大量技术突破的积累。但是,技术突破的成功,需要有理论突破和试验突破的强力支持。

2.1 技术突破(创新主体)

在科学指引下的技术发明才能成就技术上的重大突破,中国高铁技术就是这样的重大技术突破。中国高铁在发展过程中,突破了一系列关键核心技术,从无砟轨道、无缝钢轨到高速道岔的线路结构技术,从大跨桥梁到长大隧道的工务工程技术,从高强高导接触网、节能变压器到智能运维供电系统,从无线通信、车地通讯到自动驾驶的通信信号技术,从“和谐号”到运营速度 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ “复兴号”高速列车,以及 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 自动驾驶的高速列车,这些都代表着技术突破。

中国高铁核心技术的突破过程并非一蹴而就,一开始是建立在普通列车技术基础上的^[12],而核心技术的突破实质是技术质的演化及根本性创新^[13-14]。高铁技术的不断突破将成为支撑高铁发展的重点,掌握先进高铁技术的国家就能在未来的竞争中占据主导地位^[15]。

2.1.1 最高运营速度是高铁技术水平的综合指标

首先,必须明确衡量高速列车技术水平的第一指标是什么? 本文认为应当是运营速度,具体来说就是在满足安全、平稳、舒适、环保等基本条件下的最高商业运营速度,这一综合指标代表高速列车的技术水平。如图 5 所示,中国高铁实际运营速度全球最高,中国“复兴号”高速列车继“和谐号”高速列车之后创造了 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 最高商业运营速度,代表取得了世界性的技术突破。这是一系列高铁技术创新的结果,是需要技术来保障和支撑的。

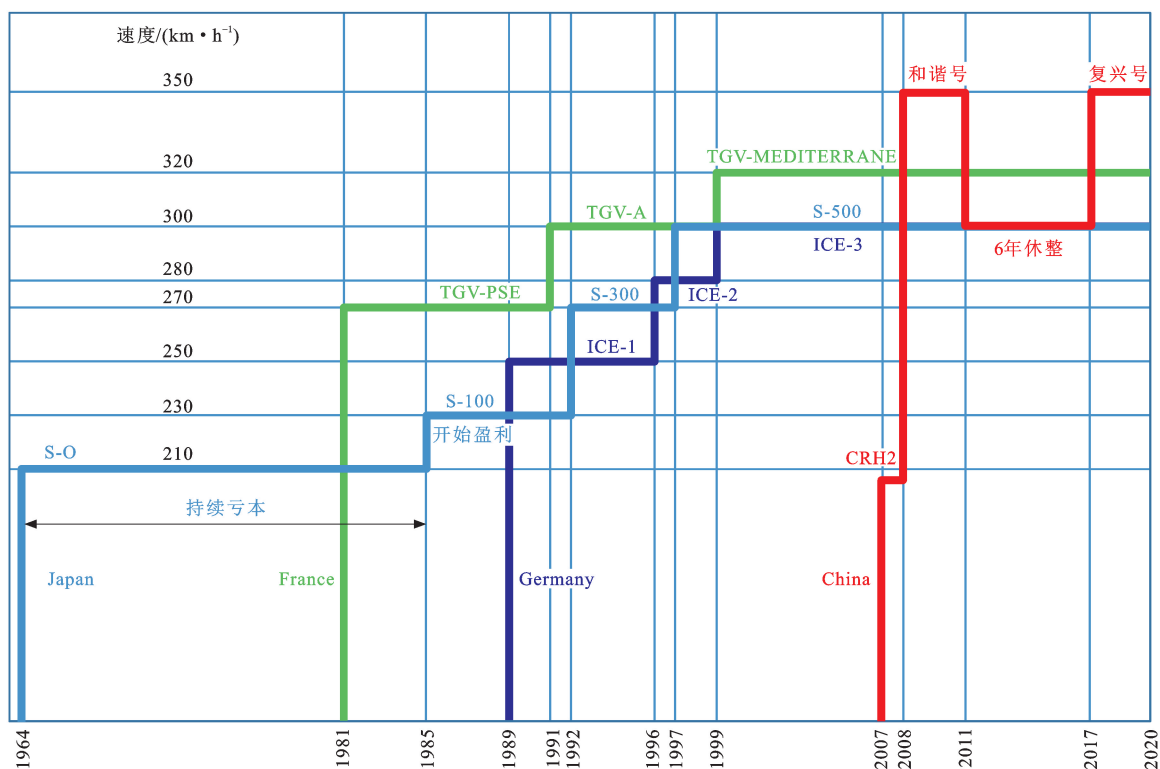


图 5 世界各国高速列车的运营速度谱

Fig. 5 Running velocity spectrum of high-speed trains from all over the world

那么,高铁速度是不是越高越好呢? 这个问题的提出显然没有讲清前提。高铁速度是指技术速度,还是指经济速度? 必须搞清技术速度和经济速度的内涵。

作为技术速度,当然是运营速度越高,技术水平越高。因为在任何运营速度下,都必须用技术确保

安全、平稳、节能和环保,速度越高越难做到。

但是,经济速度就不一样,必须针对具体线路来谈。建设任何线路首先要做经济可行性研究。前提是运量预测,包括建成后可能的诱发运量。速度越高,成本越大,从效益出发来选定适当的技术速度,达到最好经济效益,这样选定的经济速度并非越高

越好。

轮轨高铁最高的技术速度是多少?目前仍是个世界性难题。“复兴号”列车运营速度已达到 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,世界第一,但是否就是轮轨高铁的最高运营速度了?回答是否定的,俄罗斯莫喀线就要求 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 运营,中国第一条预留提速 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件的高铁也要来了,那就是成渝中线高铁。

本文认为开发智慧“复兴号”CR500,达到 $450\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 运营速度,很有前途,将是一种颠覆性创新。2019年9月19日党中央、国务院印发的《交通强国建设纲要》要求:由依靠传统要素驱动向更加注重创新驱动转变。《交通强国建设纲要》提出“全国123出行交通圈”,全国主要城市3小时覆盖。京沪线全长1300 km,如果用智慧“复兴号”CR500就能满足要求。基于此,本文建议京沪二线的建设应将运营速度标准提高到 $450\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

轮轨高铁的研发之路还不能就此停止,还应当考虑研发智慧“复兴号”CR600,运营速度能提高到 $500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,这可能是轮轨高铁的最高运营速度了。

运营速度在 $200\sim 500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间是轮轨高铁的天下,任何其他类型的高铁都无法与之相比较量。比如,京沪高铁,从1998年开始就有轮轨与磁悬浮2种制式的激烈争论,直到2006年中央才下文批准上轮轨制式,但在同一文件中也批准了沪杭上磁悬浮制式,不过最终建成的沪杭高铁还是轮轨制式。

2.1.2 中国高铁技术突破的历程

中国高铁技术的突破经历了酝酿探索、引进消化吸收再创新和自主创新3个时期。

(1) 酝酿探索期

中国高铁的自主探索阶段开始于20世纪末。1997年开始推进既有线提速,由最高运营速度 $90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 提高至 $120、160\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,甚至 $200、250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。还从国外引进了摆式列车,修建了广深提速线和秦沈 $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度客运专线,并开始了高速列车的研发。

众所周知,转向架是决定高速列车运行安全特性及乘坐舒适度的关键子系统。以新材料、新结构、新工艺、机电一体化为支撑的高强、轻质、智能高速转向架是转向架技术的发展趋势^[2],因此,高速转向架的开发成为高速列车技术研发的重中之重。

这一时期中国首创高速转向架型号: CW型(长客)、SW型(四方)和PW型(浦镇)3种高速转向架。1992年西南交通大学TPL国重研究团队出访长春客车厂,与工厂关明全总工程师等的技术团队

讨论高速转向架问题,尽管当时长春客车厂从英国引进了3辆车,但是这3辆车并不是高速列车,所以他们自己研制了BT10转向架,不过BT10也不是高速转向架。高速转向架要有颠覆性的技术和结构转变,也就是TPL国重提出必须走“三无结构和转臂式定位”的道路,即二系无摇动台、无摇枕、无旁承,一系采用转动臂定位。TPL国重认为要从根本上改变转向架的结构,这才是高速转向架的方向,长春客车厂十分同意TPL国重的观点,随即从设计处抽出5位工程师,组成研发小组,在张鑫鑫领导下,脱产5年,自主正向设计制造 $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 高速转向架,获得试验成功,取名CW型转向架。之后,四方车辆厂、浦镇车辆厂依此思路研制成功SW、PW型高速转向架。1998年由铁道部发起联合研制 $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的“大白鲨”高速动车组,采用的就是这3种转向架。1999年9月27日,在广深铁路载客试运营,成为中国自主研发的速度 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的第一列商业运营列车,定型为DDJ1型“大白鲨”高速动车组。这段历史后来很少有人提及,但这段自主探索的历史事实上是存在的。

大家比较清楚的是20世纪90年代——全国掀起了高速列车探索的高潮。1995年西南交通大学TPL国重的高速滚动振动试验台通过国家验收。正如时任戚墅堰机车车辆厂葛来薰总工程师所言:“制造工厂就希望新产品路试前有法知道行不行,否则一出问题就前功尽弃”。在TPL国重的高速滚动振动试验台试验通过了,他们就放心了。此后各主机厂研制新型高速列车的积极性空前高涨。到2003年以前就有25种速度 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的高速转向架到TPL国重做过试验。高速滚动振动试验台今天被称为“复兴号”列车的“跑步机”。

值得一提的是,1998年傅志寰担任铁道部(现国铁集团)部长以后,磁悬浮之说占上风,到2002年上海高速磁悬浮示范线正式通车。但在这样一种形势之下,傅志寰部长仍然带领大家埋头坚持发展轮轨高铁技术,修建设计速度 $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的秦沈客运专线,组织研发“中华之星”、“神州号”、“先锋号”、“蓝箭号”等高速列车,为下一步加快发展打下了技术和人才方面的基础。有了这个基础,再加上实践的探索,加快了我国高铁前进的步伐。

(2) 引进消化吸收再创新期

引进消化吸收再创新阶段开始于2003年,2004年中国政府发布了《中长期铁路网规划》,提出规划建设“四纵四横”高铁网。这个阶段中国从

庞巴迪、川崎重工、西门子和阿尔斯通分别引进了4种原型动车组并相应打造了CRH1、CRH2、CRH3和CRH5共4个“和谐号”动车组平台。引进技术的学习过程是创新的基础,创新不是空想,而应建立在学习的基础之上。中国高铁的迅速发展不仅有其内外动力因素的刺激,而且还有一系列的运行机制保证自主创新的实现,引导企业及合作单位协同行动,通过人力、财力和物力的合理调配保证决策目标及任务的真正实现,这种协调、灵活、高效的运行机制是高铁创新发展必不可少的基本保障,打破了长期以来中国制造业“引进-落后-再引进”的“怪圈”。

一是独特的引进模式——引进国际(德国、日本和法国)探索高铁技术的经验。当时中国提出了4个必须:必须与国内指定企业联合投标,必须包含指定核心技术如动力分散等,必须与国内企业联合设计制造,必须采用国内指定的品牌名称“和谐号”,而且引进资金中可包括科研项目经费,由主机厂用于整车技术平台的消化吸收再创新,这在以前是没有的。如唐山车辆厂引进德国西门子公司ICE3型高速列车,速度为 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,唐山车辆厂派去德国包括工班长、车间主任等科技人员1000多人,德国也派来相应技术人员300多人,在技术消化吸收过程中,使得整个工厂从管理理念到技术水平很快实现了现代化。

二是快速结合国内实际再创新。如四方车辆厂引进日本 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 高速列车,依靠TPL国重研究团队的探索和依托TPL国重的高速滚动振动试验台,很快研制出 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的CRH2型列车,在京沪线上跑到 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度。

三是两部联合贯彻执行党中央、国务院战略决策。2008年2月26日,科技部与铁道部联合签署《中国高速列车自主创新联合行动计划》,科技部主动提出与铁道部联合研制CRH380高速列车。该型列车2010年下线,CRH380A样车被送到世博会展览,惊艳了世界。图6为CRH380高速列车“三无结构”转向架,轴功率增加到400 kW,采用抗侧滚扭杆、抗蛇行减振器等先进装置。

(3) 自主创新期

2013年开始,中国高铁进入自主创新阶段,由中国铁路总公司(原铁道部)牵头组织研制具有自主知识产权的“复兴号”中国标准动车组。引进国外先进技术不可能解决中国高铁面临的所有问题,中国的高铁系统也不可能把国外的高铁系统全部复制与

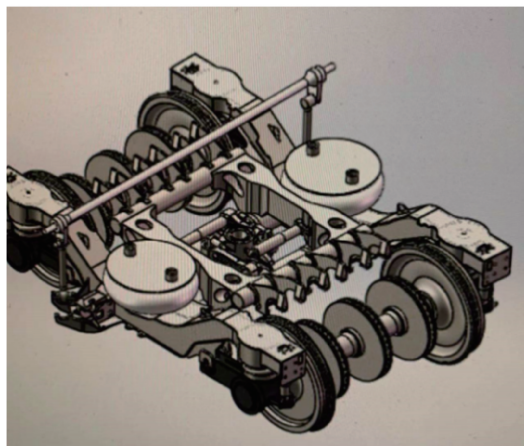


图6 CRH380高速列车转向架

Fig. 6 CRH380 high-speed train bogie

完全照搬,中国必须立足于自身的技术储备和技术创新^[15]。从1998~2003年,中国经历了国产动车组的研发高峰期,自主研发了“中华之星”、“先锋”、“蓝箭”、“大白鲨”等为代表的一大批优秀国产动车组。数据显示,中国早期自主研发的动车组高达25个品种之多,总产量达到67列,其中大部分都是在这个阶段完成的,为高速动车组的自主创新奠定了坚实的人才基础和技术基础。到2004年,经过5次大面积提速,中国铁路客运机车车辆基本上处于 $160\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度级,仍然难以满足人们便利、快捷、舒适出行的需求。2004年以来,根据国务院“引进先进技术,联合设计生产,打造中国品牌”的指导方针,大力推进原始创新、集成创新、引进消化吸收再创新。攻克了动车组总成、高速转向架、牵引变压器、牵引变流器、牵引电机、牵引控制、高速制动、列车网络、车体制造等九大核心技术难题,以及受电弓、塞拉门、高速钩缓装置、辅助供电系统、风挡、车窗、座椅、车内装饰、空调系统、集便装置等十大配套技术,成功研制了 $350、250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 2种速度等级的高速动车组。2010年12月3日,新一代“和谐号”动车组CRH380AL在京沪高铁枣庄至蚌埠间的试验段创造了 $486.1\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 运营列车试验速度新纪录^[3]。

2013年在中国铁路总公司领导下,成立标准动车组研发团队,统型国产自主研发的动车组。以四方车辆厂、长春客车厂为主,凝聚全国相关科技力量参加。TPL国重也十分荣幸地成为其中一支重要的创新力量。其中,最关键的转向架技术研发组的组长则由西南交通大学张卫华教授担任,在研发实践中形成了集设计、制造、运维于一体的完备的高速转向架研发体系,如图7所示。另一个重要的核心

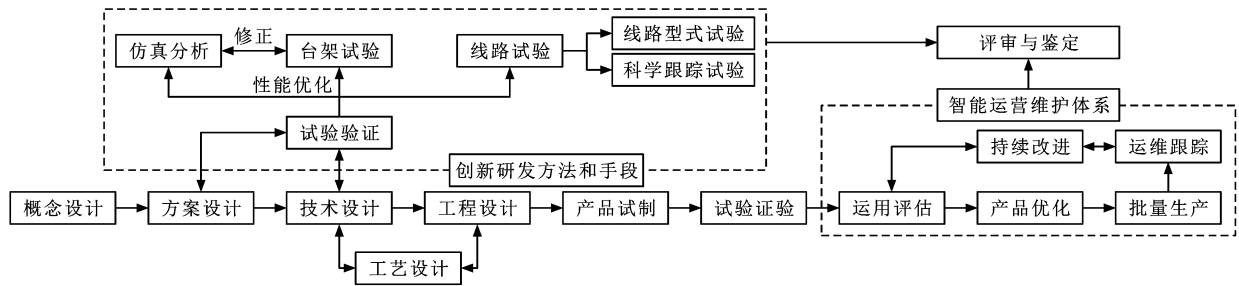


图7 高速转向架研发体系

Fig. 7 Research and development system of high-speed bogie

技术是牵引动力及其控制。中国中车株洲所的变流技术国家工程研究中心攻克了最核心的 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)技术,取得了牵引电气方面核心技术的突破。

2016年,标准动车组进行了创造世界纪录的 $420 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的会车试验,2017年更名为“复兴号”动车组 CR400,成为自主研发的中国品牌,拥有完全自主知识产权的“复兴号”动车组,可谓“纯正的中国血统”,运营速度 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,世界领先。中国利用积累起来的技术能力,正在逐步摆脱对国外关键核心技术依赖,特别是中国标准体系的建立和标准动车组的开行,标志着中国开始迈入高铁自主创新阶段^[16]。

“复兴号”系列动车组有 CR400AF 和 CR400BF 两个平台,均为 4M4T 形式和 8 辆编组,设计速度为 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,当前实际运营速度为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。2018年,为适应京沪等长大干线的运输需求,分别推出 CR400AF-A、CR400BF-A 和 CR400AF-B、CR400BF-B 动车组,其中 A 和 B 分别表示 8M8T 和 8M9T 形式。

“复兴号”动车组是在“和谐号”动车组的基础上研发的,在京沪线以 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度运行时,“复兴号”性能优于“和谐号”:一是气动阻力较 CRH380 系列动车组减少 10%;二是车内噪声较 CRH380 系列降低 3~5 dB;三是转向架有 16 挡速度 161 种工况。全车装有 2500 个安全监测点,随时监测、收集、判断列车运行状态,并可全时通知地面机构。旅客在全程都可免费享用 WiFi 通讯。 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下的行车阻力比和谐号下降 7.5%~12.3%。百万公里人均能耗下降 17%。列车寿命延长到 30 年,或 1 500 万公里,比和谐号动车组提高 30%。图 8 为“复兴号”动力转向架。

高速转向架的悬挂参数决定了高速列车的动力学性能,其运动稳定性不只是仅考虑蛇行运动的线性性质,而是考虑所有外部激励的非线性稳定性。

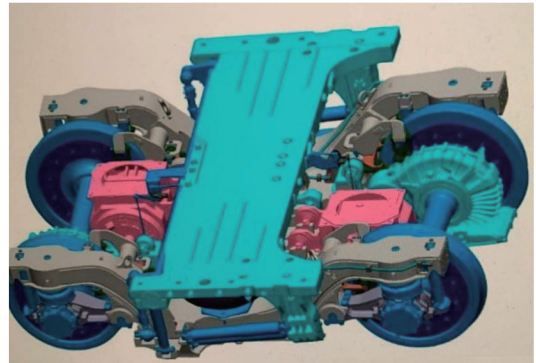


图8 “复兴号”动力转向架

Fig. 8 Fuxing power bogie

西南交通大学 TPL 国重主持完成了中国所有高速列车转向架悬挂参数创新设计与参数优化,TPL 国重研究团队提出了临界速度定义新方法,具体如下。

一是通过车体-构架-轮对-踏面参数有序匹配的转向架动力学参数设计策略的工业软件,有效提升蛇行失稳临界速度。中国制造之所以不能成为制造强国而只是制造大国,就是因为缺乏自己的工业软件,核心技术在工业软件上。不只是怎么做,而是为什么要这么做。

二是发明新型车轮踏面,优化轮轨关系,有效提升了转向架运动稳定性。

三是针对来自轨道不平顺与轮对蛇行运动等时变频率激励,提出可靠的系统隔振控制策略,实现了高速列车的平稳运行。

四是设计发明了动力吸振的弹性电机悬挂结构。

TPL 国重参与了中国所有高速转向架的设计和试验,高速转向架装备了 5 000 余列高速列车,最高运营速度 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,累计安全运行近百亿公里。

高铁技术创新的动力来自国内市场的刚性需求、国内外的技术推力、国家的发展规划和政策扶持、企业自我发展的追求等方面,高铁技术水平的进步提升了中国高铁装备的现代化水平,中国高铁自身的技术积累也促使其取得了一个又一个具有自主

知识产权的专利,造就了一大批高铁科研人才梯队,这些都是保证中国高铁能取得突破性技术创新的基础和前提。

2.2 理论突破(核心技术)

半个多世纪以来,世界高铁技术的发展,得益于科学理论的发展。技术突破源于理论突破,中国之所以能够后来居上,在较短的时间内获得世界瞩目的高铁技术的突破,在于中国创建和应用了高速列车耦合大系统动力学理论,使得设计理念、设计方法和计算工具都迈上新台阶,才有了中国高铁技术的快速发展。所以,第 2 项重大突破就是以高速列车耦合大系统动力学为代表的理论突破^[5]。

2.2.1 科学理论指导对高铁技术创新发展的重要性

世界高铁的设计没有一个统一的理论,以往的理论计算都是各算各的,也就是线路算线路的,车辆算车辆的。中国打破了铁路原有各专业的隔离,把高速列车以及与之相关并影响其动力学性能的线路、气流、接触网和机电等耦合系统作为一个统一的大系统,从系统与全局层面进行了全局仿真、全局优化和全局控制。正是高速列车耦合大系统动力学理论的提出,以及数字化仿真平台的构建,才有了中国高速列车在复杂的地理环境和气候条件下,以速度 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 持续高速运行所呈现的高稳定性、高平稳性和高安全性,才有了中国高铁技术的快速发展。比如,转向架设计除结构布局外,最重要的就是动力参数的优化,如踏面锥度、弹簧刚度、阻尼系数等,是大家都知道的。还有许多耦合因素少为人知,如上面谈到的第一台自主研发的 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 转向架,上 TPL 国重高速滚动振动试验台试验时, $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 就失稳了,设计师张鑫鑫和 TPL 国重研究人员一起利用试验台研究了 4 个月,才发现原因是转向架与车体的耦合刚度太大,纠正后临界速度一下就提高到 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。又如转向架与周围空气的流固耦合,一般认为对藏于车下的转向架影响不大。但是,高速转向架的气流使尾车向上抬起,引起轴重减小,甚至会造成脱轨,引发头尾车的转向架是否应该有不同结构的大问题,这个问题还需要深入研究。

2.2.2 高速列车耦合大系统动力学的建立

1978 年邓小平同志在日本发出“我们现在正合适坐这样的车”的呼声之后,中国进入高铁酝酿和准备时期。西南交通大学 TPL 国重开始积极探讨高速列车耦合大系统动力学理论,这是高铁技术方面首次提出的核心理论。

首先是轮轨耦合的力学特性及计算,1983 年沈志云发表的“沈-赫-叶氏理论”解决了轮轨蠕滑力的计算问题,孙翔、翟婉明提出的“翟孙模型”则解决了车辆与线路的耦合作用问题。高铁是一个十分复杂的巨系统,作为移动装备的高速列车,车与车之间存在耦合关系,而且高速列车与固定的基础设施包括接触网、轨道(线桥隧)、机电设备以及周边的空气都形成了耦合关系,这些耦合关系相互关联、相互影响。进入高铁迅速发展以后,西南交通大学 TPL 国重研究团队逐步解决了轮轨耦合、车轨(线桥隧)耦合、弓网耦合、流固耦合、机电耦合等问题,并将所有这些耦合集中建模,用于全局仿真、全局优化和全局控制。新产品在系统设计、制造和以后的优化、再优化,都要运用数字化仿真平台,使用作为核心技术的工业软件。TPL 国重从 20 世纪 80 年代就走出校门,深入工厂,共同致力于酝酿和探索高速列车全局仿真、全局优化和全局控制的计算方法,结合实际逐步形成高速列车耦合大系统动力学新理论,在实际运用中,逐步完善工业软件。虽然目前还没有达到商业软件的程度,但已成为与各个主机厂共同享有的核心技术。

如图 9 所示,通过全局仿真,形成工业软件,作为核心技术,应用于中国所有型号动车组的研制,实现了高速列车的高速、平稳、安全运行。

系统全局优化目标包括:安全性、舒适性、环保性和经济性等 4 个重要指标。全局优化方法流程为:各子系统在一个积分步长内独立求解;向耦合器发送与其他子系统相关的计算结果;耦合器对各个有关数据进行耦合处理;将处理结果发送各子系统更新其计算边界;新数据发给耦合器判断耦合系统终止条件,若符合耦合计算系统退出,不符合则返回第 1 步流程重新计算。

中国所有动车组设计过程中重要动力学参数都要经过上述过程反复核算循环,以达到最优。

全局控制即全寿命服役监控体系,其控制流程

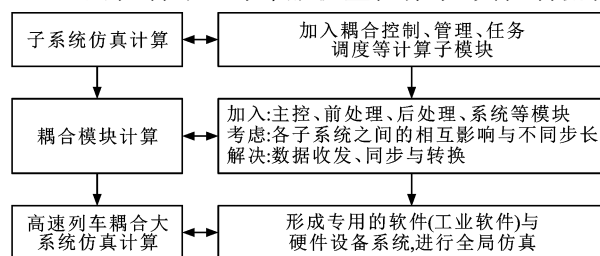


图 9 高速列车耦合大系统动力学全局仿真

Fig. 9 Global dynamics simulation of coupling large system of high-speed train

为:全程监测各耦合系统的参数,计算有关安全与运行品质指标;进行运行状态实时监控、诊断与评估;提供在线辅助决策与预警信息,如安全运行、减速运行、停车检查、线路检查、入库检修等;保证列车每一次运行都在耦合大系统动力学安全作用域之内。

张卫华的由科学出版社 2013 年出版的专著《高速列车耦合大系统动力学理论与实践》(图 10)宣告了一个新学科的成立,并且通过国际会议和出版英文版,得到国际公认,评价很高。

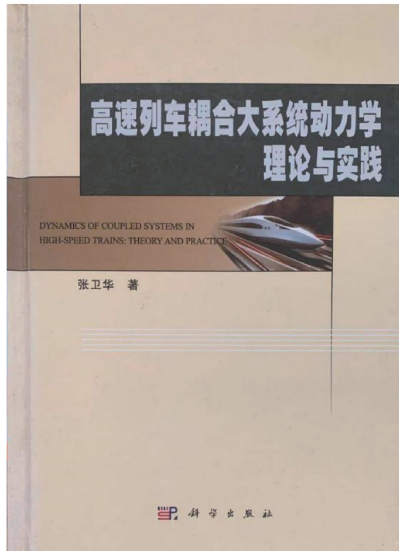


图 10 高速列车耦合大系统动力学理论与实践
Fig. 10 Theory and practice of coupled large system dynamics of high-speed train

高速列车耦合大系统动力学理论研究的突破,提出了高速列车动力学计算方面的核心算法^[17]。提出基于循环变量的列车动力学递推积分方法,突破商业软件的计算自由度限制,实现任意长编组列车的仿真;由于列车运行速度越高,车线耦合越强,必须考虑车线耦合的影响^[18-25],因此,提出车线耦合的滑移窗口建模与计算方法,突破以往车辆和轨道无法相对移动的计算瓶颈,实现任意长线路的车线

耦合服役模拟,这是一种快捷高效的计算方法,已被众多相关学者应用^[20,23-24];发明可任意耦合配置的多领域协同仿真耦合控制方法,实现了车车、车线、弓网、流固和机电耦合的协同仿真技术;通过加装时变参数项,全面实现高速列车耦合大系统动力学的服役仿真。最终形成了高速列车耦合大系统动力学研究体系,如图 11 所示。

2.3 试验突破(研究手段)

理论的基础是试验。试验不仅验证理论,还是发展理论的源泉,更是联系理论与实践的桥梁。中国在创建高速列车耦合大系统动力学理论时,从未放松开展试验研究^[5]。

2.3.1 建成机车车辆整车滚动振动试验台

1988 年科技部批准成立铁路系统唯一的国家级牵引动力国家重点实验室。由张卫华负责总体和最关键的激振装置的设计,他提出的加强基础(4 000 t,可以应对速度 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 甚至 $700 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、水平布置(车可以直接开上试验台)、三维仿真等想法,都对提高试验台的质量起了很大的作用。TPL 国重在两轮五年一次的评估中获得优秀,两次获得金牛奖,评语分别是:“在中国高速铁路发展中,发挥了不可替代的作用”和“有力地支撑了我国铁路提速和高速的发展,在学科的发展和赶超世界先进水平方面发挥了重要的引领和示范作用”。2013 年后,TPL 国重研究团队仍潜心研究试验台的改进,取得试验技术的重大突破。30 多年的历史证明,高瞻远瞩、顺应历史发展的必然方向,符合全球视野的科学精神是非常重要的。

达到世界领先水平的机车车辆整车滚动振动试验台获得西南交通大学第一个国家科技进步一等奖。其技术特点如下。

- (1)模拟速度最高,达到 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,目前还在设法要提高到 $700 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。
- (2)能反映轨道状态的全参数。

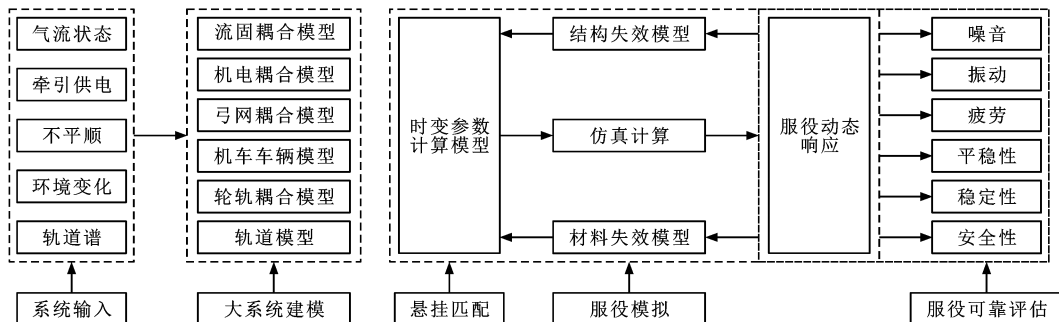


图 11 高速列车耦合大系统动力学研究体系
Fig. 11 Research system of coupling large system dynamics of high-speed train

(3)变轨距、变轴距和定距,能模拟曲线通过。

(4)能实现车辆动力学性能和牵引制动性能的验证和优化。

(5)6 轴车辆和 3 车连挂都可以进行试验。

(6)前面放置被试车辆动力参数测量台,实测参数进入仿真计算,实车送试验台试验,两种结果相互比对。不仅提出试验结果,同时给出被试车存在的问题及解决方案。

(7)跟踪被试车在实际线路上运行的表现,实测结果与台架试验结果高度符合。

TPL 国重的机车车辆整车滚动振动试验台承

担了中国所有高速列车型号的试验和优化,建立起 600~400 km·h⁻¹ 高速列车试验体系:台架试验 600 km·h⁻¹,保证线路试验达到 500 km·h⁻¹,后者保证运营中检测试验达到 400 km·h⁻¹。这是列车 350 km·h⁻¹ 运营速度最可靠的保证。

2.3.2 虚实结合的弓网动力学试验

弓网关系是高铁重要的耦合关系,它决定了高速列车在高速运行条件下的受流质量,弓网耦合动力学性能也是高速列车耦合大系统动力学研究的一个重点。图 12 为虚实结合的弓网动力学试验方案。

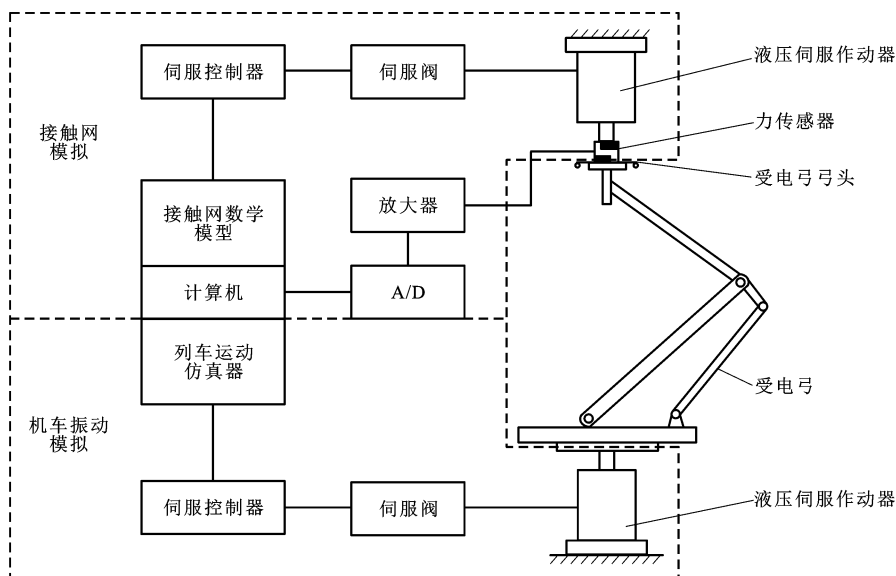


图 12 虚实结合的弓网动力学试验方案

Fig. 12 Virtual-real testing scheme of bow-net dynamics

(1)实物受电弓加接触网模拟和机车振动模拟。

(2)考虑了受电弓空间运动的模拟运行试验。

(3)可研究弓网耦合系统动力学性能和检测受电弓运动轨迹和受电弓结构可靠性等功能。

(4)完成了中国所有在役受电弓型号的动力学性能测试与优化,解决了原来受电弓依靠进口的问题,节约了成本。

2.3.3 实现实际动态服役条件下的结构强度和疲劳试验

研制出多激振输入转向架结构强度与疲劳试验台(图 13):有 46 个随机输入通道,全球最多。目的是再现构架的动应力,可进行各种转向架及其零部件的多通道周期加载和随机加载试验。可再现构架等部件的动态服役条件。截止 2019 年底累计完成试验近 100 项。

2.3.4 高速列车运营中的跟踪测试试验

高速列车服役运行中测试是最好的再现服役环

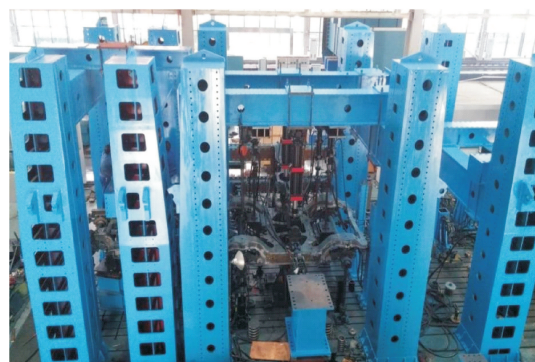


图 13 多输入转向架结构强度与疲劳试验台

Fig. 13 Multi-input test bench of strength and fatigue of bogie structure

境的试验。最突出的是高速列车运行中的跟踪测试试验,目的是了解列车长期运行中的动力状况,掌握高速列车及其耦合系统动力学性能和传递关系,研究高速列车长期运行下服役性能的变化规律,作为再优化的根据。比如,2008 年,京津高铁开通,西南

交通大学 TPL 国重首创跟踪试验,组织 30 多人赴京津沿线待了 3 个多月,对高速列车运行情况跟踪测试,包括高速列车及其耦合系统动力学性能、振动状态和传递关系、高速列车在长期服役条件下的性能变化情况,以及在不同服役周期内性能的演变规律。通过对海量测试数据的分析,揭示了在服役条件下车轮踏面磨耗、悬挂参数时变对高速列车动力学性能的影响,为高速列车的动力学性能优化和安全评估提供了科学依据。

无痕检测和无人值守的检测管理是跟踪试验技术的核心。在武广、郑西、沪宁、沪杭等线路开通运营后,TPL 国重都坚持派研究小组跟车进行无痕检测,将结果分析后同高速列车制造主机厂及运营单位交流,研究改进和处理方法。

从 2008 年开始,截至 2020 年底,TPL 国重完成了 70 余项跟踪合同,累计完成的跟踪试验里程达 8 500 万公里,获得大量高速列车运行动力情况的第一手资料,在协助企业进行高速列车运用维修改进和设计再优化以外,还获得了蕴含高速列车运行规律的特大数据库,为机器识别、数据挖掘和人工智能等打下基础,有利于找到全寿命安全保障和高质量运行的规律。

综上,中国高铁技术的 3 个重大突破,支撑了中国高速列车的自主创新,实现了高速列车的高速、平稳、安全运行。试验突破保证了理论突破,理论突破引领着技术突破。反过来,高铁的技术突破,验证了理论突破的正确性,正确的理论指导着新的试验体系不断改进和取得新的数据。如此良性循环,周而复始,只要坚持不懈,中国高铁必将始终冲锋在世界高铁发展的最前沿,持续领跑。

3 中国高铁的未来发展

3.1 高铁核心技术创新发展

中国高铁的成功发展是中国现代化和强国化的标志之一,经过十余年的蓬勃发展,中国已经成为了令世界瞩目的高铁大国。中国高铁建设虽然在很多方面处于国际领先地位,但是距离真正的高铁强国还有一定的距离。高速列车包括机械、电气、计算机在内的三大领域、九大核心技术,其中最为核心的是软件技术,包括逆变器控制软件、通讯信号软件,国外大公司是绝对不会转让的。国外寻求掌握未来高铁核心技术的脚步从未停止^[26]。很明显,在高铁技术发展过程中,将面临诸多新的技术难题和挑战^[27-28],中国如果不掌握核心技术,那么在高铁建设

中必遭外国企业掣肘,因此,出于国家战略安全和经济成本的考虑,中国高铁想要真正做强,必须要掌握核心技术^[29]。也就是要把“卡脖子”的高铁核心技术牢牢掌握在自己手中。

2015 年西南交通大学参加的国家重点研究项目“国内外高铁最新发展技术研究”,其中有一项分课题为“下一代高速列车发展战略研究”,由 TPL 国重张卫华教授主持。2017 年该项目结题报告提出的主要结论为:要使高速列车对线路有更好的适应性,特别是对线路的平纵断面和线路不平顺,如,采用主动控制悬挂技术将使得转向架悬挂参数按需可变,适应线路状态的变化,即开发自适应转向架,成为智能动车组。

高铁的核心技术众多,其中,转向架技术是高速列车的关键核心技术之一,转向架是决定高速列车运行安全性与乘坐舒适性的关键子系统。必须在新材料、新结构、新工艺、机电一体化等方面不断取得突破,研制高强、轻质、智能的高速转向架,支撑高速列车高质量发展。下面列举几项在下一代高速转向架中可应用的技术方案。

3.1.1 一系自适应被动悬挂技术

(1)用频变刚度橡胶节点代替传统轴箱转臂定位节点

频变刚度橡胶节点称为液压式橡胶衬套,该橡胶衬套内设有阻尼通道,利用其阻尼特性可实现其低频低刚度和高频高刚度的动态特性,液压式橡胶衬套可改善运动稳定性和曲线通过性的矛盾。图 14 为液压式橡胶衬套动刚度频变特性。

(2)用频变阻尼减振器代替抗蛇行阻尼器

低频范围内输出较低的阻尼力,提高车辆曲线

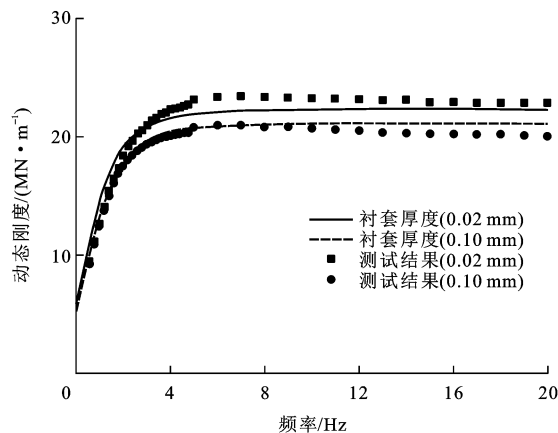


图 14 液压式橡胶衬套动态刚度频变特性

Fig. 14 Dynamic stiffness characteristics of hydraulic rubber bushing with frequency

通过性能,而在高频振动下输出较大的阻尼力,以提供足够的阻尼保证车辆的稳定性。图 15 为正常一系和频变一系悬挂横向振动加速度对比。

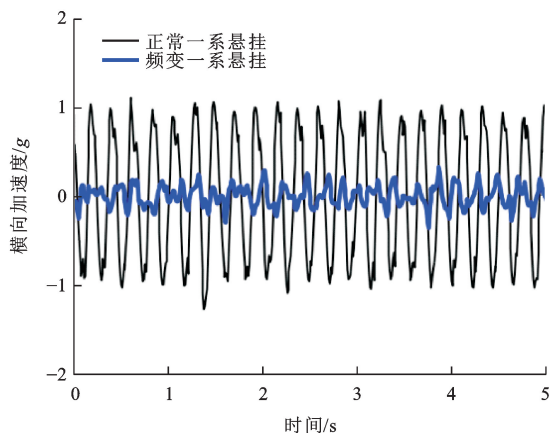


图 15 正常和频变一系悬挂横向振动加速度对比

Fig. 15 Comparison of lateral vibration accelerations between normal and frequency-varying primary suspensions

3.1.2 二系半主动控制悬挂技术

(1)用磁流变减振器代替抗蛇行阻尼

磁流变减振器是利用电磁反应,通过对外加磁场强弱的控制,可在毫秒级的时间内改变液体的流变力学特性。磁流变液体是一种磁性软粒悬浮液,当液体被注入减振器活塞内的电磁线圈后,线圈的磁场将改变其流变特性(或产生流体阻力),产生反应迅速、可控性强的阻尼力。图 16 为磁流变减振器。

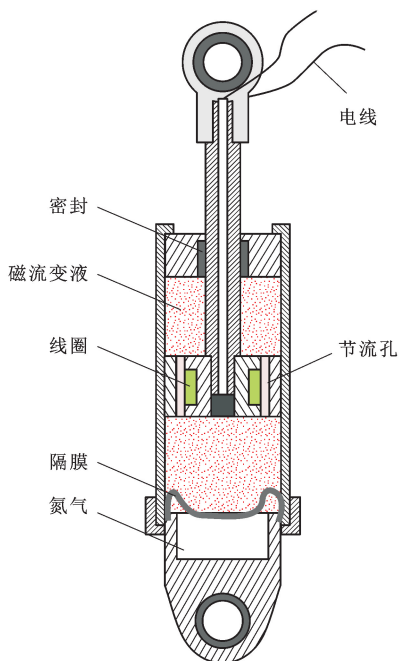


图 16 磁流变减振器

Fig. 16 Magnetorheological damper

(2)二系稳定性半主动控制器

如图 17 所示,二系稳定性半主动控制器根据输入电信号,可以改变元件的阻尼特性。

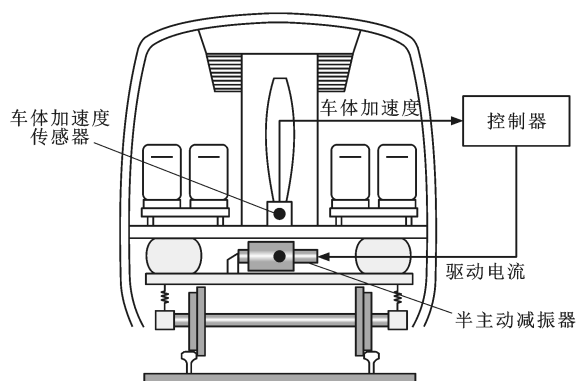


图 17 二系稳定性半主动控制器

Fig. 17 Secondary stability semi-active controller

控制器的设计采用天棚阻尼器,其原理如图 18 所示,假想在被隔振物体和固定的天棚之间安装了一个无源可控的阻尼器。

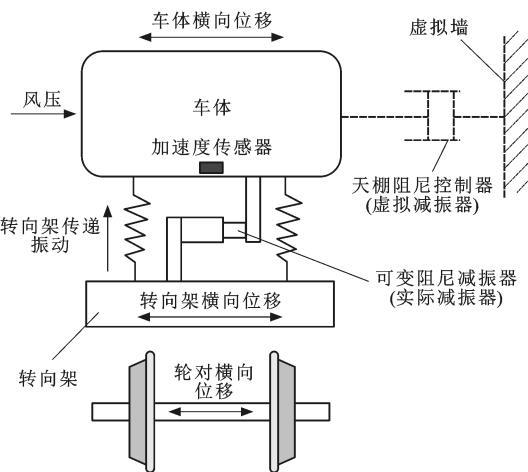


图 18 天棚阻尼器原理

Fig. 18 Skyhook damper principle

3.1.3 弹性侧架

目前的转向架构架,普遍都是箱式 H 型结构,质量大,只靠一系悬挂减振,在运行时这一部分通过车轮对于轨道会形成巨大的冲击力,使得铁路需要进行频繁的养路作业,急需改进。使用碳纤维复合材料这种高性能材料,将其一次成型,做成弓形的板状复合材料弹簧,将转向架 H 形主构架侧梁的功能和一系悬挂的功能整合到一起,这样不仅改善了转向架一系悬挂的性能,还能达到极致减小质量的目的。同时,板簧自身也承担了一部分均衡梁的功能,将 2 个车轴从相对独立的悬挂重新联系到一起,进一步改变了转向架的垂向

安定性。日本川崎重工的 efWING 新型转向架结构采用侧架式,比传统结构转向架每个减小质量约 450 kg^[30],轴重减载约 50%,舒适性也有很大提升,如图 19 所示。

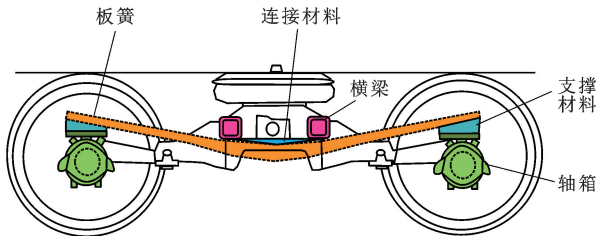


图 19 日本 efWING 新型转向架结构

Fig. 19 efWING new bogie structure in Japan

如果将侧架做成多层翼板状复合结构,板层之间填充减振材料,比如橡胶等,或者采用复合高阻尼合金,就可以增加侧架的弹性和阻尼,可以直接装于轴箱上获得更简单的结构。图 20 为进一步的转向架侧架设想。

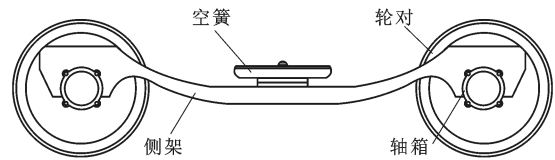
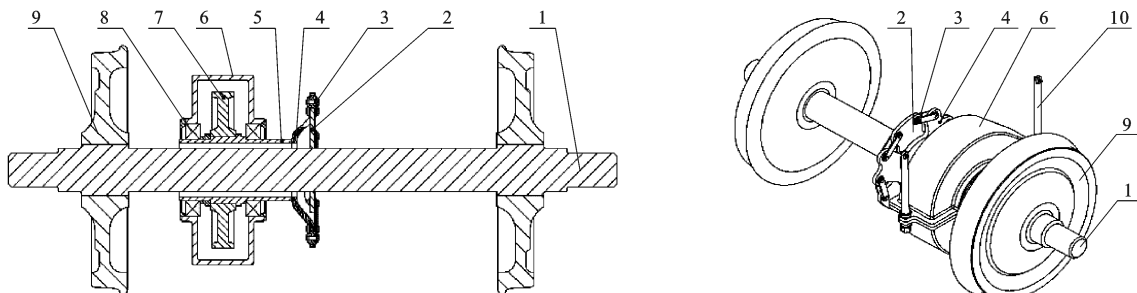


图 20 进一步的转向架侧架设想

Fig. 20 Further envisaged bogie side frame

3.1.4 架悬式齿轮箱

图 21 为架悬式齿轮箱结构。车轴与齿轮箱之间用六连杆机构相连,将原固定在车轴上的齿轮箱悬挂在构架或车体底架上,可以减轻簧下质量,有利于高速运行,提高平稳性^[31]。牵引电机和转向架构架一起振动,与电枢轴上的小齿轮相啮合的大齿轮也必须随构架振动,使大小齿轮的中心距保持不变。把从动大齿轮上的力矩传到轮对的驱动装置上是架悬齿轮箱的关键技术。驱动装置必须是弹性的,以适应转向架构架相对于轮对各方向的振动位移。



(a) 剖视结构

(b) 外观结构

1-车轴;2-轮对;3-六连杆机构;4-输入盘;5-空心输出轴;6-齿轮体;7-从动齿轮;8-轴承;9-车轮;10-安装架

图 21 架悬式齿轮箱结构

Fig. 21 Suspension gear box structure

3.1.5 轴箱内置转向架

未来高速转向架整体结构方案中可考虑轴箱内置^[32],其优点如下。

(1)将轴箱置于车轮内侧,使得转向架体积变小,质量比传统转向架可减小约 30%。

(2)适用于运行速度不高、线路曲线半径小、坡度和顺坡率较大的轨道车辆。

(3)通过曲线时与传统转向架相比,最大轮对冲角减小约 25%,最大轮轨横向力减小约 30%,最大脱轨系数减小约 20%。

(4)轴箱内置可有效降低轮轨作用力,减轻轮轨磨损,降低轮轨噪声,改善车辆动力学性能,降低运营维护成本。

3.1.6 流线型转向架

图 22 为流线型转向架的概念设计方案。采用流线型转向架是为了保证更高速度的高速列车转向

架区的良好气动特性,包括气动阻力、流场与气动噪声等,不可忽略。

3.1.7 降噪车轮

根据西南交通大学 TPL 国重对高速列车车外噪声实测结果,走行部位的噪声最高(图 23),这个结果与一般见解不同,故采用降噪车轮对于高速转向架仍很重要。

如图 24 所示,车轮降噪方法一般有:腹板阻尼层、减振阻尼环、隔音板、腹板上加振子的吸振器等,简单的是腹板涂抹阻尼浆。后者虽最安全,但降噪效果并不理想。此问题还有待研究。

3.2 绿色节能环保

铁路绿色发展和高质量发展是时代主题。绿色节能环保是高速列车的重要发展方向之一,这是全球环境可持续发展的要求,在中国也是生态文明建设的需要。随着运营速度的不断提高,机车车辆制

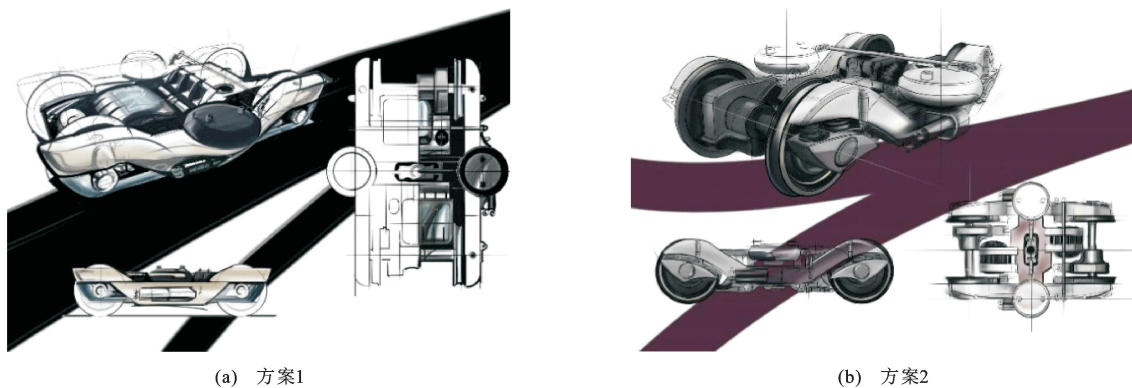


图 22 流线型转向架的概念设计

Fig. 22 Conceptual design of streamlined bogie

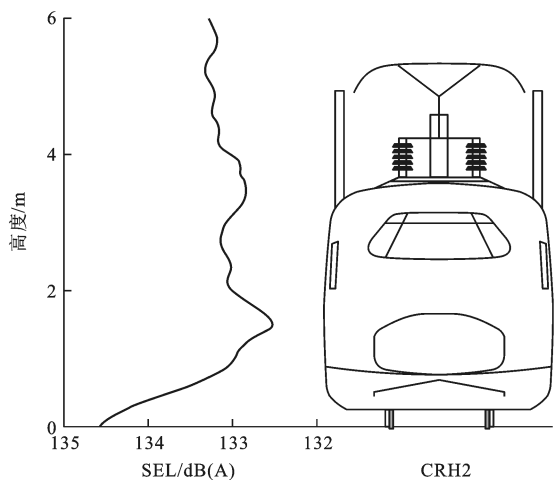


图 23 车辆高度方向的噪声测试

Fig. 23 Noise test of vehicle in height direction

造企业应当注重从以下几方面采取措施^[33-36]。

3.2.1 提高牵引制动效率

牵引制动技术是高速列车核心技术之一,要提高牵引系统和制动系统的效率,包括采用新型电力变换装置和牵引电机、全电制动与再生制动以及最

优控制策略等。

3.2.2 减轻列车质量

从优化单个部件的设计、轻量化材料选取等方面入手来实现列车整体轻量化的目标。

3.2.3 减小列车运行阻力

从高速列车空气动力学方面提高高速列车流线型外形结构设计水平,达到减阻节能目的。

3.2.4 智能运行控制

采用自动/辅助驾驶技术,达到最佳运行控制,提高能效利用率,降低能耗,这是未来高速列车设计需要重点关注的内容。

3.2.5 降低设备能耗

采用低能耗设备技术,如发光二极管(LED)照明技术,采用高效智能化空调实现余热利用等。

3.2.6 减振降噪

速度越高,高速列车车内噪声越难控制,车内噪声控制技术是一项系统工程,与车体轻量化设计、气密性设计、车下设备布局、减振结构优化及吸振隔声材料的选型等相关。要搞清噪声传递途径、探索声学

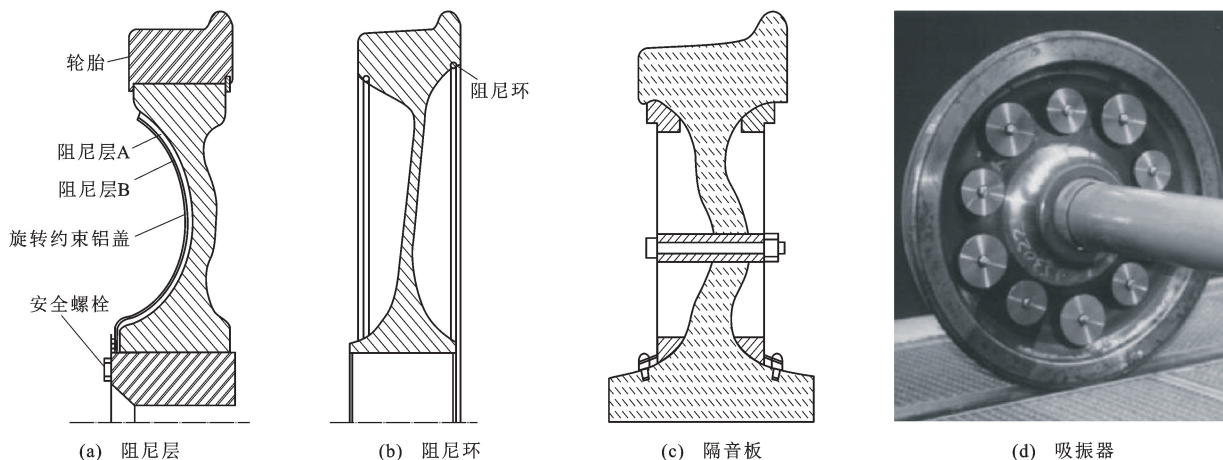


图 24 车轮降噪方法

Fig. 24 Noise reduction methods of wheels

超结构和超材料的运用、优化头车表面流线型设计、优化车体局部结构、优化车体局部刚度和阻尼,形成低噪声设计方案,制订适应更高速度的高速列车声学设计规范,从而解决车体局部颤振和噪声问题。

3.3 高铁数字化

高铁是一项巨大的系统工程,高铁产业是改革开放以来中国技术赶超世界最为成功的产业之一,甚至已成为了国家自豪感的重要来源。未来中国高铁要实现高效、高速、高质量运行,数字化是一个重要方向。

当前新一轮科技革命和产业变革孕育兴起,人工智能、大数据、云计算、物联网、建筑信息模型、北斗卫星导航等新技术加速突破应用,人类社会快速进入智能时代。智能时代的到来对铁路的创新发展提出了新的更高要求,引起世界各国政府、铁路运输企业和相关研究机构的高度关注。近年来,德国、法国、英国、美国、日本等多个国家都制定了铁路数字化发展战略,旨在通过推进新兴技术和铁路业务的高效融合,达到优化运输服务质量,增强运输安全水平,提高运输组织效率,降低运输成本,提高经营效益等目的^[37]。很显然,未来世界范围内高铁领域的竞争将在很大程度上取决于数字化、智能化、智慧化水平^[38]。

今后,中国高铁必须基于数字化技术,研制运行水平更高、安全性和舒适性更好的高速列车;研制基于 LTE 通信的列车智能控制系统;研究基于 Wi-Fi 及移动互联的旅客服务技术;研制不设分相、远程控制的牵引供电系统;研制与全国地震监测台网适时接入的地震监控预警系统;研究基于大数据的固定设备和移动设备智能监测与安全预警技术等,以实现中国高铁技术更先进、更可靠、更安全、更经济、更绿色,持续确立在世界高铁的领先地位^[3]。

3.3.1 智能高铁

“智能、绿色、创新、融合”已成为当前世界高铁发展的重要方向,各国都在加速推进高铁智能化相关技术及发展策略的研究^[39]。京张高铁作为“八纵八横”京兰通道的重要组成部分及北京冬奥会重要配套基础设施工程,已于 2019 年 12 月 30 日开通运营,开启了中国智能高铁建设的新篇章。当前欧洲、日本都在开展更高速度的高速列车研发,为研发新一代更速度更加智能的“复兴号”高速列车,国铁集团勇闯“无人区”,启动了“CR450 科技创新工程”,研发新一代更速度、更加安全、更加环保、更加节能、更加智能的“复兴号”列车新产品,实现中国

高铁更高商业运营速度,持续巩固中国高铁领跑优势。国铁集团提出的基于智能高铁云平台为核心的“2035 智能高铁”,主要包括以下三方面^[38-39]。

(1) 智能建造

以 BIM(Building Information Modeling)+GIS (Geographic Information System) 技术为核心,综合应用物联网、云计算、移动互联网、大数据等新一代信息技术,与先进的工程建造技术相融合,通过自动感知、智能诊断、协同互动、主动学习和智能决策等手段,进行工程设计及仿真、数字工厂、精密测控、自动化安装、动态监测等工程化应用,构建勘察、设计、施工、验收、监督全寿命可追溯的闭环控制体系,实现建设过程中进度、质量、安全、投资的精细化和智能化管理,推动高铁建设从工业化、信息化走向智能化。比如,勘测设计采用 BIM 标准,装配式建筑设计和模块式制造,数字孪生铁路技术,全线、全专业、全过程精细化管理平台,桥隧路轨工程智能化施工,四电工程智能化施工,客站智能化建造等。

到 2035 年,BIM 与工程机械深度融合,智能建造技术广泛应用,实现无人自主智能机械施工,打造智慧工地,全面突破更高速高铁的智能建造技术。

(2) 智能装备

基于全方位态势感知、自动驾驶、运行控制、故障诊断、故障预测与健康管理等技术与先进装备技术相融合,实现高铁移动装备及基础设施的自感知、自诊断、自决策、自适应、自修复,实现高速列车的自动与协同运行。比如,研制速度 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 智能“复兴号”高速列车,标准简化接触网、智能牵引供电装置、智能无线通信系统、智能列车运行控制系统、智能安全保障系统等。

到 2035 年,探索基于智能设计与制造的自修复动车组技术,实现全自动的列车无人驾驶技术,研究可储能源的绿色无线供电技术,实现动态近距离列车移动适时追踪,探索基于量子等技术的智能安全保障体系。

(3) 智能运维

采用泛在感知、智能监测、增强现实、智能视频、事故预测及物联网等技术与高铁运营维护技术相结合,实现智能化出行服务、预测性运维、主动性绿色环保安全防控和智能化经营管理。比如,建设智能高铁车站,为旅客提供购票、进站、候车、乘车、出站等全环节的自助化、精准化、个性化、智能化全过程出行服务,实现智能检测监测,智能安全保障,智能调度,智能票务,智能维护等。

到2035年,为旅客提供基于位置服务(Location Based Services, LBS)的全方位、全行程的定制化门到门服务,实现无人站车智能服务,实现装备自主智能检修,探索极端复杂条件下高铁智能容错理论与技术。

中国高铁的快速发展离不开铁路信息化、智能化建设的持续推进。未来基于智能技术、专家系统故障诊断模型、大数据分析、数据挖掘等功能,将进一步实现动车组故障预测与健康评估,提前实施“预见性”维修,保障高速列车运营安全和可靠,进一步降低高速列车全寿命周期成本。

3.3.2 智慧高铁

智慧高铁是全球铁路的最前沿发展方向,抓住新一轮科技产业革命带来的难得机遇,加快制定中国智慧高铁发展战略对持续保持中国高铁的全球领跑地位具有重要意义。基于高铁数字化的未来发展,本文的期望目标是在建国100年时实现“2049智慧高铁”,想法如下。

(1)发展方向:数字转型,智能升级,协同创新,打造智慧。

(2)集中调度中心的智慧化:构建大规模高密度运行的全时、全过程、全环境信息中心(高铁云)支持下的调度系统。

(3)高铁站的智慧化:将铁路12306大数据系统提升到充分利用高铁云的水平。

(4)建议研发智慧“复兴号”:在CR450(运营速度 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)的基础上,继续研发CR500,运营速度为 $450\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;研发CR600,运营速度为 $500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

(5)建设更加全面的高铁云:扩大现有高铁云,使其包括高速列车所有的九大关键核心技术,如建成的高速列车云等。高铁的设计、制造、运维都要智慧化,统一加入高铁云,要站在高铁云端,庆祝“2个100年”。

顺应全球科技发展趋势,加快智慧高铁科技攻关,将大数据、云计算、物联网、移动互联网、北斗导航、BIM、5G、人工智能等新技术全方位应用在高铁各专业领域,打造更加安全可靠、经济高效、温馨舒适、方便快捷、节能环保的智慧高铁系统将成为中国高铁乃至世界高铁发展的趋势^[40]。

3.4 关于后高铁时代

2021年2月24日,中共中央、国务院最新印发的《国家综合立体交通网规划纲要》中提出:“研究推进超大城市间高速磁悬浮通道布局和试验线路建

设”。规划还提出“123”小时要求:大城市之间要求3h到达。沈志云2004年提出真空管道磁悬浮的建议在国家规划中已有所提及,高速磁悬浮的春天就要到来。但是,高速磁悬浮争议较大,不像低速磁悬浮,采用短定子常导磁悬浮,已成共识。

自有铁路以来一直存在2个世界难题:一是轮轨列车的最高技术速度是多少?二是更高速度下,用什么磁悬浮技术来代替轮轨技术?上百年的争论和实践,现在应当有大致可信的结论了。

关于轮轨最高速度,根据“复兴号”CR400的成功运营,最高失稳临界速度在 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,理论上速度可超过 $700\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,线路试验速度可达近 $500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,设计速度为 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,商业运营速度为 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。现正研制CR450,速度可望再提高 $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。如果智慧“复兴号”CR500和CR600研制成功,而且能够自适应线路情况,在既有 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 线路的直线段提速到 $450\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 运营速度,应当有可能。但是速度再高恐怕很难突破了。

于是就出来一个似是而非、广为流传的“填补空白”论,用 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 磁悬浮代替轮轨。本文认为,运营速度在 $200\sim 500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,还应属于轮轨天下,任何磁悬浮都不足以和轮轨相比^[40]。例如智慧“复兴号”CR500如果研制成功,它的智慧自动驾驶能够记忆全线路的状态参数,可以比人工司机更准确地随时根据线路情况精准调整运行速度。像汽车一样,设计速度一般可达 $180\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,但实际运行中司机要根据限速只能跑 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下。同样,智慧“复兴号”CR500也可以到低标准高铁网上去运行,只需要随时调整运行速度而已。这一与高铁网兼容的优势,是任何磁悬浮列车所不可能具备的。

至于 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以下的运行速度就必须采用高速及超高速磁悬浮技术了(图25)。

在 $400\sim 600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,也可以采用开敞式的磁悬浮列车,像日本和德国所研究的那样,但他们的磁悬浮列车都不能超过 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。只有中国原创的高温超导磁悬浮列车,速度起点就是 $620\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,加上真空管道,可到 $800\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,直至几千公里时速。如开敞运行,就能覆盖 $400\sim 600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,不但可以填补速度空白,而且兼容超高速全程。所以目前来看,未来的磁悬浮高速或超高速列车最好采用高温超导磁悬浮技术,本文称之为“超导未来”(图25)。

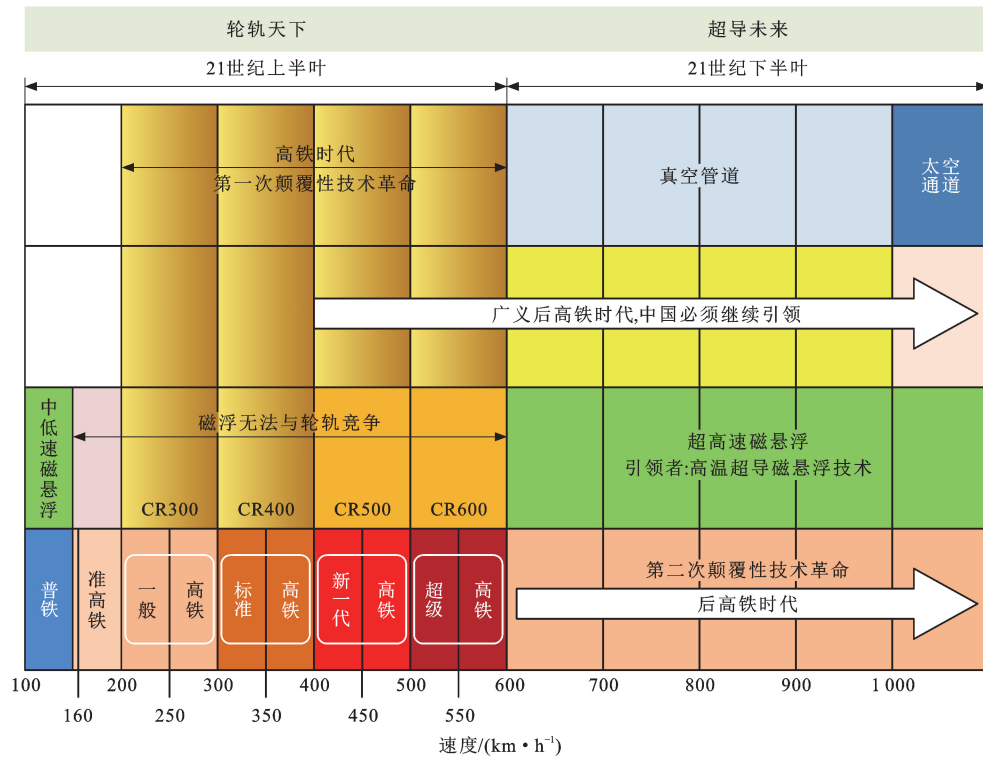


图 25 高速铁路发展演进设想

Fig. 25 Ideas of high-speed railway development evolution

大家都知道现有高速列车的环保噪声水平是超标的,速度越高气动噪声越大。环保要求在距离轨道中心 20 m,高 1 m 处,噪声不能超过 70 dB,实际上都在 80 dB 以上,所以高铁与高速公路不同,即使在农村,凡有房屋的地方,都要设声屏障。图 25 中以 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度轴为界,加真空管道就是后高铁时代的特征。

至于德国的常导高速磁悬浮列车,从原理上就是一个不稳定系统,依靠高精度控制技术保持悬浮。西门子公司采用高精度控制技术将运行速度提高到 $430 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,已经很不简单了。即使如此,德国还是停止了这一技术的继续研发,35 km 长的试验线也已拆除。如果想将运行速度提高到 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,即使万幸成功,也到了运行速度的天花板,还够不上高温超导磁悬浮速度的起点,所以本文所说的“超导未来”,是有根据的。

从图 25 可以看到,本文对于磁悬浮技术的观点是:磁悬浮技术只在速度轴的两头有价值。在低速域,可用常导磁悬浮技术表现无轮轨接触的优点,低噪声、低机械阻力。但在高速域,轮轨等机械阻力和噪声只占整个阻力和噪声的几个百分点,主要部分都是气动阻力和噪声,与是否有轮轨接触关系不大,故磁悬浮的这一优点就不突出了。所以在 $200 \sim$

$500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,还是轮轨的天下,任何磁悬浮都不足以与轮轨比高下。只有在 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,轮轨技术无法应用的条件下,才只能采用磁悬浮技术,而且要加低气压管道^[40]。至于运营速度在 $500 \sim 600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间时,采用不加低真空管道的高温超导磁悬浮列车应该是顺理成章的。

2021 年 1 月 13 日西南交通大学高温超导磁悬浮列车工程化样车和试验线正式启用,标志着中国相关研究具备了工程化试验示范条件,震撼了国内外。高温超导磁悬浮列车技术拥有无源自悬浮自稳定自导向、结构简单、节能、无化学和噪声污染、安全舒适、运行成本低等优点,该技术拟首先在大气环境下实现工程化,预期运行速度目标值大于 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,可望创造在大气环境下陆地交通运行速度新纪录。下一步计划结合未来真空管道技术,开发更高速度的磁悬浮列车系统,为远期向 $1000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上速度值的突破奠定基础,从而构建陆地交通运输的全新模式,引发轨道交通发展的前瞻性、颠覆性变革。人民日报、新华社、中央电视台、光明日报、经济日报、中国新闻网、中国交通报、中国科学报、中国青年报、中国教育报、科技日报、四川日报、四川卫视、东方卫视、成都日报、成都商报、华西都市报、成都电视台等 20 余家中央、地方主流媒体前来采访报道。这是中

国原创震惊世界的成果,引起了轰动。本文称之为第二次颠覆性技术革命,这就是广义的后高铁时代。

40年前,西南交通大学王家素、王素玉2位教授原创的高温超导磁悬浮技术,经过20年的工程化研究,终于得到认可。沈志云2004年提出的所谓“空想”,经过40年磨一剑,20年造一辆车,现在也证明的确包含了超前的科学思想和精神,这是对后高铁时代的重大贡献。

4 结 语

(1)中国高铁是自主创新的一个成功范例。从历史观点和全球视野两个维度,探讨并阐述了中国高铁崛起的历程,分析了其根本原因和技术原因。几十年来,中国高铁经过酝酿、探索,经过引进消化吸收再创新,达到了世界性的成熟,又在此基础上自主创新,成功研制了多型号、全产权、全标准的先进产品“复兴号”高速列车,成为自主创新的范例,成为了中华民族伟大复兴的“加速器”,中国新的“外交名片”和“形象代表”。

(2)中国高铁取得了举世瞩目的重大成就。从政策层面看,主要是因为中国在吸收各国探索经验的基础上,在政府统筹下集中力量办大事,充分整合和利用企业、高校、科研院所等的资源优势,创建了轨道交通国家技术创新体系,是新型举国体制在铁路系统的成功实践;从技术层面看,主要原因是取得了技术突破、理论突破和试验突破三大重要突破。中国高铁的三个重大突破,支撑了中国高速列车的自主创新,实现了高速列车的高速、平稳、安全运行。试验突破保证了理论突破,理论突破引领着技术突破。反过来,高铁技术的突破,验证了理论突破的正确性,正确的理论指导着新的试验体系不断改进和取得新的数据。保持这一良性循环,周而复始,持续坚持,中国高铁必将始终站在世界高铁发展之巅。

(3)数字化是高铁未来发展的一个重要方向。随着智能高铁核心关键技术得到应用验证,将成为推动中国高铁技术新一轮创新的标志性工程。未来随着物联网、云计算、大数据、人工智能、5G等新一代信息技术的飞速发展,智能高铁将持续深化新技术与高铁的集成融合和应用创新,不断完善智能高铁关键技术体系。到2025年,智能高铁理论与技术实现重大突破,中国将深入掌握智能高铁设计、建造、运营全产业链技术。到2035年,通过持续深化智能建造、智能装备、智能运营的研究与应用,将推

动智能高铁应用由辅助协同向自主操控升级,实现铁路运营全面自主操控、无人化。在关键支撑技术和关键专用技术研究的推动下,中国高铁智能化技术将不断优化和迭代升级,持续为实现全面感知、泛在互联、融合处理、主动学习和科学决策进行赋能。在实现“2035智能高铁”的基础上,“2049智慧高铁”离我们也并不遥远。

(4)高温超导磁悬浮技术可以称为世界第二次颠覆性技术革命。在 $200\sim 500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度区间,磁悬浮列车与轮轨列车相比不具备竞争优势,此乃“轮轨天下”;在 $500\sim 600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度区间,可采用不加低真空管道的高温超导磁悬浮列车; $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上速度则采用低气压真空管道高温超导磁悬浮列车技术,提速空间极大,这是“超导未来”。高温超导磁悬浮技术属于中国原创,通过掌握具有自主知识产权的磁悬浮原创、实用技术,有望形成与高速轮轨系统并存的城际高速客运网,构建城市、城际综合交通体系,促进中国轨道交通技术跨越式发展。安全可靠、经济高效、温馨舒适、方便快捷、绿色节能的智能磁悬浮高铁系统将成为中国乃至世界后高铁时代的发展趋势。

(5)历史已经并将继续证明,世界铁路史上的“中国世纪”必将到来并走向世界。根据更高速、更安全、更环保、更经济、更舒适的目标,除了形状、结构、材料与技术的变革与创新,更应该在智能化、智慧化上下功夫,加强数字化平台等新基建建设。让我们大家都来建设和应用高铁的设计云、制造云、运管云、维修云,站在越来越好的高铁云端,迎接和庆祝最可贵的建党和建国2个100周年纪念日。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 中国国家铁路集团有限公司. 中国交通70年大幅跃升 高速铁路里程世界第一[EB/OL]. (2019-08-16)[2021-03-15]. https://baike.baidu.com/reference/5923925/976a0EX3Oiy-Wh9xad-D2RUhmU7AFaZpzftVkeYUhl1ogvvgN-Wa3cM5gA_1yJDz4-tn1d503Vr1adEvb9HCKQY4llvLwFxDYQbeMOcVh77et9-VBqefQZQ29JXMfqMWH5HClYZA. China State Railway Group Co., Ltd. Chinese transportation has jumped sharply in 70 years, and high-speed railway mileage ranks first in the world [EB/OL]. (2019-08-16)[2021-03-15]. https://baike.baidu.com/reference/5923925/976a0EX3Oiy-Wh9xadD2RUhmU7AFaZpzftVkeYUhl1ogvvgN-Wa3cM5gA_1yJDz4tn1d503Vr1adEvb9HCKQY4llvLwFxDYQbeMOcVh77et9VBqefQZQ29JXMfqMWH5HClYZA. (in Chinese)
- [2] 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 San-san, CHEN Da-wei, LIU Jia-li. Research, development and prospect of China high-speed train[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 35-50. (in Chinese)
- [3] 卢春房. 中国高速铁路的技术特点[J]. 科技导报, 2015, 33(18): 13-19.
LU Chun-fang. Highlights of China high speed railway[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(18): 13-19. (in Chinese)
- [4] 曲 星. 中国高铁: 风驰电掣领跑全球[J]. 党史文汇, 2019(11): 19-25.
QU Xing. China high-speed railway: the speed leads the world[J]. Corpus of Party History, 2019(11): 19-25. (in Chinese)
- [5] 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 Zhi-yun, ZHANG Wei-hua. Breakthrough in theory development and in experiment methodology of high-speed rail technology in China[J]. China Invention and Patent, 2020, 17(10): 6-16. (in Chinese)
- [6] 沈志云. 论我国高速铁路技术创新发展的优势[J]. 科学通报, 2012, 57(8): 594-599.
SHEN Zhi-yun. The superiorities in innovatively developing high-speed train technology in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(8): 594-599. (in Chinese)
- [7] 徐 飞, 罗世辉, 邓自刚. 磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 40-49.
XU Fei, LUO Shi-hui, DENG Zi-gang. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 40-49. (in Chinese)
- [8] 徐 飞. 中国高铁的全球战略价值[J]. 学术前沿, 2016(2): 6-20.
XU Fei. The global strategic value of China's high-speed railway[J]. Frontiers, 2016(2): 6-20. (in Chinese)
- [9] 国家铁路局. 高速铁路探索初创阶段[EB/OL]. (2014-03-11) [2021-03-15]. https://baike.baidu.com/reference/5923925/77b10-8-RNObHPaazcFT1a5-nAMzcr3ujKLMNnjZ8ICVbq-ADVUP5zNIDIKhnhstxhmP_-hs-23HZLtbCCGffhDDt7k4t-OEWz-PZZBHRJhWlc0LdTGYYVqV3Jnba6LDei8WdjVsEw4-TQ-uRug.
National Railway Administration of People's Republic of China. High-speed railway to explore start-up stage [EB/OL]. (2014-03-11)[2021-03-15]. https://baike.baidu.com/reference/5923925/77b10-8-RNObHPaazcFT1a5-nAMzcr3ujKLMNnjZ8ICVbq-ADVUP5zNIDIKhnhstxhmP_-hs-23HZLtbCCGffhDDt7k4t-OEWz-PZZBHRJhWlc0LdTGYYVqV3Jnba6LDei8WdjVsEw4-TQ-uRug. (in Chinese)
- [10] 国务院国有资产监督管理委员会. “复兴号”高速列车研制的主持者孙永才[EB/OL]. (2018-12-26) [2021-03-15]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2641611/n4518442/c10086300/content.html>.
State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. SUN Yong-cai, the protagonist of “Renaissance” high-speed train development [EB/OL]. (2018-12-26) [2021-03-15]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2641611/n4518442/c10086300/content.html>. (in Chinese)
- [11] 沈志云. 关于高速铁路及高速列车的研究[J]. 振动、测试与诊断, 1998, 18(1): 1-7.
SHEN Zhi-yun. On the study of high-speed railways and trains[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 1998, 18(1): 1-7. (in Chinese)
- [12] 李显君, 熊 昱, 冯 堃. 中国高铁产业核心技术突破路径与机制[J]. 科研管理, 2020, 41(10): 1-10.
LI Xian-jun, XIONG Yu, FENG Kun. Core technology breakthrough path and mechanism of China's high-speed rail industry[J]. Science Research Management, 2020, 41(10): 1-10. (in Chinese)
- [13] BELL M, PAVITT K. Technological accumulation and industrial growth: contrasts between developed and developing countries[J]. Industrial and Corporate Change, 1993, 2(2): 157-210.
- [14] LEE K, LIM C. Technological regimes, catching-up and leapfrogging: findings from the Korean industries[J]. Research Policy, 2001, 30(3): 459-483.
- [15] 赵建军, 郝 栋, 吴保来, 等. 中国高速铁路的创新机制及启示[J]. 工程研究, 2012, 4(1): 57-69.
ZHAO Jian-jun, HAO Dong, WU Bao-lai, et al. The innovation system and inspiration of Chinese high-speed railway [J]. Journal of Engineering Studies, 2012, 4(1): 57-69. (in Chinese)
- [16] 满 勇, 刘颖琦. 高铁列车技术创新演进研究: 中日两国的对比[J]. 中国科技论坛, 2020(1): 176-188.
MAN Yong, LIU Ying-qi. The evolution research of bullet train technologic innovation; comparative view of China and Japan[J]. Forum on Science and Technology in China, 2020(1): 176-188. (in Chinese)
- [17] ZHANG Wei-hua, SHEN Zhi-yun, ZENG Jing. Study on dynamics of coupled systems in high-speed trains[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(7): 966-1016.
- [18] KNOTHE K L, GRASSIE S L. Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies[J]. Vehicle System Dynamics, 1993, 22(3/4): 209-262.
- [19] ZHAI Wan-ming, SUN Xiang. A detailed model for investigating vertical interaction between railway vehicle and track [J]. Vehicle System Dynamics, 1994, 23(S1): 603-615.
- [20] DIANA G, CHELI F, BRUNI S, et al. Interaction between railroad superstructure and railway vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 1994, 23(S1): 75-86.
- [21] DONG R G, SANKER S, DUKKIPATI R V. A finite element model of railway track and its application to the wheel flat problem[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, 1994, 208: 61-72.
- [22] 李德建, 曾庆元. 列车-直线轨道空间耦合时变系统振动分析[J]. 铁道学报, 1997, 19(1): 101-107.

- LI De-jian, ZENG Qing-yuan. Dynamic analysis of train—tangent-track space-coupling time-varying system[J]. Journal of the China Railway Society, 1997, 19(1): 101-107. (in Chinese)
- [23] NIELSEN J C O, IGELAND A. Vertical dynamic interaction between train and track—influence of wheel and track imperfections[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 187(5): 825-839.
- [24] ZHAI Wan-ming, XIA He, CAI Cheng-biao, et al. High-speed train-track-bridge dynamic interactions—Part I: theoretical model and numerical simulation[J]. International Journal of Rail Transportation, 2013, 1(1/2): 3-24.
- [25] ZHAI Wan-ming, WANG Shao-lin, ZHANG Nan, et al. High-speed train-track-bridge dynamic interactions—Part II: experimental validation and engineering application[J]. International Journal of Rail Transportation, 2013, 1(1/2): 25-41.
- [26] VICKERMAN R. High-speed rail in Europe: experience and issues for future development[J]. The Annals of Regional Science, 1997, 31(1): 21-38.
- [27] GIVONI M. Development and impact of the modern high-speed train: a review[J]. Transport Reviews, 2006, 26(5): 593-611.
- [28] PERIS E, GOIKOETXEA J. Roll2Rail: new dependable rolling stock for a more sustainable, intelligent and comfortable rail transport in Europe[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 567-574.
- [29] 李永东. 我国高铁未来的发展方向——兼谈顶层设计和底层技术革命相辅相成[J]. 变频器世界, 2017(12): 1-2.
- LI Yong-dong. The future direction of China's high-speed rail—the top design and the underlying technology revolution complement each other[J]. The World of Inverters, 2017(12): 1-2. (in Chinese)
- [30] 稻村文秀, 李伟平. 新一代铁道车辆用转向架[J]. 国外铁道车辆, 2017, 54(3): 24-27.
- INAMURA F, LI Wei-ping. The new generation bogies for rolling stock[J]. Foreign Rolling Stock, 2017, 54(3): 24-27. (in Chinese)
- [31] KOSEKI T. Technical trends of railway traction in the world[C]//IEEE. The 2010 International Power Electronics Conference. New York: IEEE, 2010: 2836-2831.
- [32] MARZ A, LASKA B, KRAFFT E, et al. Latest Developments in increasing the power density of traction drives[C]//IEEE. The 2014 International Power Electronics Conference. New York: IEEE, 2014: 2113-2119.
- [33] ZHAO Hong-wei, LIANG Jian-ying, LIU Chang-qing. High-speed EMUs: characteristics of technological development and trends[J]. Engineering, 2020, 6(3): 234-244.
- [34] LI Liang, DONG Wei, JI Yin-dong, et al. Minimal-energy driving strategy for high-speed electric train with hybrid system model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(4): 1642-1653.
- [35] 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 Bing-rong, ZHANG Wei-hua, CHI Mao-ru, et al. Analysis and prospects of key technical features of next generation high speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 58-70. (in Chinese)
- [36] 李田, 戴志远, 刘加利, 等. 中国高速列车气动减阻优化综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 59-80.
- LI Tian, DAI Zhi-yuan, LIU Jia-li, et al. Review on aerodynamic drag reduction optimization of high-speed trains in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 59-80. (in Chinese)
- [37] 聂宁, 官科, 钟章队. 德国铁路4.0战略[J]. 中国铁路, 2017(5): 86-90.
- NIE Ning, GUAN Ke, ZHONG Zhang-dui. German railway 4.0 strategy[J]. China Railway, 2017(5): 86-90. (in Chinese)
- [38] 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 Tong-jun. Study on the development strategy of China intelligent high speed railway[J]. China Railway, 2019(1): 9-14. (in Chinese)
- [39] 马建军, 李平, 邵赛, 等. 智能高速铁路关键技术研究及发展路线图探讨[J]. 中国铁路, 2020(7): 1-8.
- MA Jian-jun, LI Ping, SHAO Sai, et al. Key technologies and development roadmap of intelligent high speed railways[J]. China Railway, 2020(7): 1-8. (in Chinese)
- [40] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 177-198.
- XIONG Jia-yang, DENG Zi-gang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198. (in Chinese)