

# 下一代高速列车关键技术的发展趋势与展望

张卫华, 缪炳荣

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 迅速发展的轨道车辆装备制造业已经成为未来世界经济发展的重要引擎。针对全球高速铁路发展及高速列车的技术特征进行技术分析和调研, 分析了世界高速铁路发展状况及高速列车发展计划, 尤其是欧洲及日本的下一代高速列车技术研制特征。同时, 介绍我国下一代高速列车的技术特征和技术目标, 包括设计理念, 车体、转向架、牵引传动和制动、智能化特征、安全性等关键技术。重点提出我国下一代高速列车的技术指标建议值, 论述了下一代高速列车转向架、车体、牵引传动等关键系统的技术发展方向和智能化的设计目标。结论表明: 国内外下一代高速铁路的技术发展和竞争依然比较激烈, 下一代高速铁路先进技术成为当前的主要热点和重要研究方向, 具有迫切性和必要性。

**关键词:** 高速铁路; 转向架; 下一代高速列车; 牵引传动; 智能化

**中图分类号:** U292.91<sup>+</sup>4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.01.001

## Development Trend and Prospect of Key Technologies for Next Generation High Speed Trains

ZHANG Weihua, MIAO Bingrong

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

**Abstract:** The rapid development of rail vehicle equipment manufacturing industry has become an important engine for the development of the world economy in the future. According to global high speed railway development and high speed trains technical characteristics, analysis and research were carried out, including of development status and plan of world high speed railways and trains, especially the development characteristics of next generation high speed trains in Europe and Japan. At the same time, the technical characteristics and technical objectives of China's next generation high speed trains were introduced, including the design idea, and key technology of car body, bogie, traction drive and brake, intelligent features and safety, and suggestive technical indicators of China's next generation high speed trains were put forward, as well as the key technology development direction and intelligent target of bogie, car body, and traction drive system. The conclusion showed that the technology development and competition of the next generation high speed railways are still fierce at home and abroad, the advanced technologies of the next generation high speed railways have become the major hot spots and important research direction at present, which is urgent and necessary.

**Keywords:** high speed railway; bogie; next generation high speed train; traction drive; intelligent

## 0 引言

面对目前世界轨道车辆交通领域剧烈竞争的国际市场, 很多国内外著名的轨道车辆产品制造商, 诸如德国的西门子、法国的阿尔斯通和日本的川崎等均已

经开始大力投入到下一代高速列车关键技术的研发过程中。他们积极开展下一代高速列车的研制计划项目, 并提出了相关的新概念高速列车的设计方案。本文在充分研究国际高速铁路下一代先进技术最新发展趋势, 以及国内 CRH380 系列高速列车和中国标准高速动车组的设计技术基础上, 探讨研制下一代中国高速列车关键核心技术的发展趋势。在下一代高速列车关键技术设计中, 以更高速度 (400<sup>+</sup> km/h)、更环保、更经济、

收稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51375405, 51775456); 国家重点实验室自主基金项目 (2016TPL\_T10); 中国铁路总公司科研计划项目 (2015J011-B)

更安全和更具技术竞争力为根本目标,重点突破关键技术和拥有中国高铁的自主核心技术,比如走行部的广域适应性技术,车体的综合舒适性技术,牵引传动的高效、节能技术;围绕安全、舒适、节能和维修的智能化技术,研制成具有环境友好、线路友好、技术友好、乘坐友好、运行维护友好和经济友好的 400 km/h “友好型”高速列车<sup>[1-3]</sup>。

下一代高速列车的关键技术,主要包括牵引制动、转向架、车体、车载网络和安全性等相关的技术内容。最近几年来,欧盟加大投资欧洲高速铁路部门的研制计划,以推动技术性革命并提高铁路部门对其他运输方式的竞争力,正式推出了建设未来铁路系统的“Shift<sup>2</sup>Rail”的欧洲铁路项目发展计划(2017~2022),期望以此来降低制造高速列车的成本和提高列车可靠性、改善交通管理和控制系统、引入轨道服务 IT 方案来改善服务、发展可持续技术和吸引欧洲货运。他们从如何降低逐步增加的能源成本(与轨道车辆的投资成本相比)、如何考虑全寿命周期成本(对下一代高速列车车辆的研制技术提出更加严格的安全要求,包括碰撞设计等)、如何在未来的几十年内提高对其他交通方式的竞争力以及进一步提高乘客的舒适度等方面进行了综合考虑。日本针对新高速列车概念的车型也不断涌现<sup>[4-6]</sup>。

中国高速铁路的发展也进入了一个新的发展活跃期。中国标准动车组“复兴号”是目前世界高速列车最高水平的代表列车之一。技术人员大量采用正向设计,创造了具有中国标准的高速列车自主品牌。该车无论在乘坐的平稳性、舒适性,还是在减阻、降噪水平以及技术水平等方面都得到大幅提高。

世界高速列车的技术发展与竞争随着市场竞争的加剧越来越激烈,我国高速铁路关键技术的迅速成长进一步促进了这场伟大的变革。德、法、日等传统高速铁路技术强国纷纷制定并付诸实施的下一代高速列车发展计划,也加速了我国对下一代高速列车技术研制的进程。

## 1 国外下一代高速列车技术的发展

### 1.1 德国下一代高速列车发展计划

最近几年,欧盟提出的第一个高速列车创新发展项目为 Shift<sup>2</sup>Rail 计划,对新一代机车车辆提出了创新的设计理念 and 思想。该计划项目旨在开发核心技术和消除铁路车辆领域中已存在的阻碍原始创新的因素,革新机车车辆技术。实际上,德国航天航空中心早在十年前就启动了下一代高速列车(NGT, Next Generation Train)的思考与研发,并提出了能源成本,降低生命周期成本及投资成本,满足严格的安全要求,提高与其他运输模式的竞争能力,满足乘客对舒适性期望等总体发展目标。同时,德国在 400 km/h AeroLiner 3000

高速列车样机研发中,更是提出在既有基础设施不作改变的情况下,运输能力提高至少 30% 的具体要求<sup>[7-8]</sup>。

在这一正向设计的要求下,高速列车的物理样机采用了双层车体结构,以大幅增加列车的载客能力。双层车体结构的样机设计大胆地采用了类似 100% 低地板有轨列车的贯通式低地板结构,通过特殊的轮毂驱动独立旋转车轮走行部,而且为了节省空间,进一步提高列车的载客能力,样机设计采用了单轴结构,如图 1 所示。当然为了避免独立旋转车轮有轨电车的轮轨作用力过大,特别是在曲线上轮轨摩擦磨损和摩擦噪声严重的问题,样机设计上还采用了先进的轮对径向位置控制技术,实现良好的轮轨作用关系<sup>[7]</sup>。

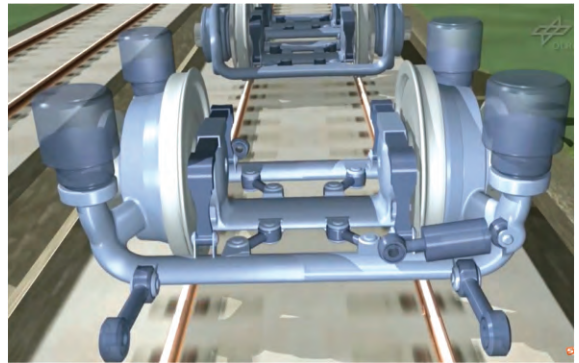


图 1 德国下一代高速列车转向架概念图<sup>[7]</sup>

德国下一代高速列车安全性设计有一个值得我国高速列车开发人员学习的理念,就是在主体结构设计上,采用板式结构与桁架结构结合;在旅客乘坐区,采用了结构强度高的板式结构。车体两端采用结构弹性性能好,可以实现碰撞吸能的桁架结构。这样的创新设计,最大程度提高了旅客乘坐安全性。在车体设计上,采用多材料设计概念和新型筋板结构,运用玻璃纤维增强板材(GFK)三明治填充结构和轻金属结构,以实现比金属结构质量减小 30% 的目标。与此同时,最大限度地增加窗口面积,并采用新型的暖通空调(HVAC),以提高旅客乘坐的舒适性。图 2 和图 3 分别表示德国下一代高速列车车体概念图和效果图。



图 2 德国下一代高速列车车体概念图<sup>[7]</sup>



图 3 德国下一代高速列车效果图<sup>[7]</sup>

### 1.2 英国的下一代高速列车发展计划

近年来, 英国也计划在未来 15 年内建造新型高速铁路干线, 并推广速度最高可达 225 英里 / 小时 (约 362 km/h) 的列车。这款概念车叫“水星号”, 其在结构设计方面同样采用很多新的设计理念, 一些设计概念颇有创新性, 外观具有英国本土特色。作为低碳、可持续的重要交通运输工具, 这一新型的高速列车设计对于英国轨道交通规划的未来至关重要。全长 400 m 的“水星号”整体概念设计具有未来感, 流线型的车身设计完美符合空气动力学, 能保证流线型的整车以 362 km/h 的速度安全行驶<sup>[9]</sup>。



图 4 英国下一代高速列车<sup>[9]</sup>

除了高速之外, 内部的人机工程也是“水星号”的设计重点。从车舱概念图来看, “水星号”完全没有了传统火车杂乱拥挤闷热的现象, 它采用广角视野车窗车厢, 座位间间隙大, 座椅安装了具有电影、音乐和游戏功能的娱乐系统, 还有 2 层高的观景台方便旅客欣赏窗外风光。细心的设计者还设计了专门存放折叠式自行车的空间、可举行家庭聚会和商业会议的玻璃舱包间以及供儿童玩耍的游乐区。

### 1.3 法国下一代高速列车发展计划

2016 年 9 月, 法国国铁 (SNCF) 与阿尔斯通就研制下一代 TGV 列车建立“创新伙伴”关系, 研制新一代的高速列车, 包括传统的 TGV 和动力分散的 AGV。在本次法国国铁与阿尔斯通“创新伙伴”合作中, 法国国铁将充分发挥高速列车运行的经验优势, 而阿尔斯通则发挥创新设计优势, 共同开发下一代高速列车, 并计划 2022 年投入商业化的运行。图 5 所示为下一代 TGV Avelia 系列高速列车。法国对下一代高速列车的研制提出了量化的目标任务<sup>[10]</sup>:

- ①降低建设与运行成本至少 20%;
- ②材料循环利用率提升超过 90%;



图 5 阿尔斯通下一代 TGV Avelia 系列高速列车<sup>[10]</sup>

- ③能源消耗降低至少 25%;
- ④载客能力提升 20%;
- ⑤列车内饰采用模块化的设计, 同时改善车辆服务设施, 提升旅客的乘车舒适性与便利性。

### 1.4 日本下一代高速列车发展计划

日本为了实现高速列车的国际化, 按照国际标准研制了新一代高速列车 AT400, 突破了 360 km/h 的最高运行速度。车辆配备大量传感器, 可远程监控车辆零部件的结构健康状态, 未来还将通过人工智能进行数据分析和管理, 以提升结构故障预测的精度。同时希望与竞争对手相比, 借助包括维护费用等在内, 在建设 & 运行成本上取得优势。与此同时, 日本正在研制的第六代高速列车 N700S, 计划于 2020 年在东海道新干线上投入运行。新干线的下一代高速列车 ALFA-X (试验列车) 也在研制过程中。对于日本下一代高速列车的发展, 日本政府表示将结合日本的需要来进行技术革新, 创新的内容包括:

- ①根据地震频发的特点, 内部和外部设施更加先进, 配备响应速度更快的车载地震预警及紧急停车系统、防脱轨系统;
- ②针对北方的寒冷气候, 使车体具有高耐寒、高耐雪特性;
- ③由于日本新干线隧道面积小, 气流扰动明显, 车上搭载晃车阻尼器, 有效遏制列车晃动;
- ④未来进一步提高乘坐舒适性, 研发新技术抑制车底和受电弓噪声, 更好实现节能减排效果;
- ⑤利用物联网、大数据、人工智能等新技术, 优化列车网络控制系统和信息管理系统, 提高维修性。

日本下一代高速列车的相关设计图如图 6~ 图 8 所示。



图 6 日本下一代高速列车 AT400<sup>[11]</sup>



图 7 东海道新干线新车型“N700S”的车头<sup>[11]</sup>

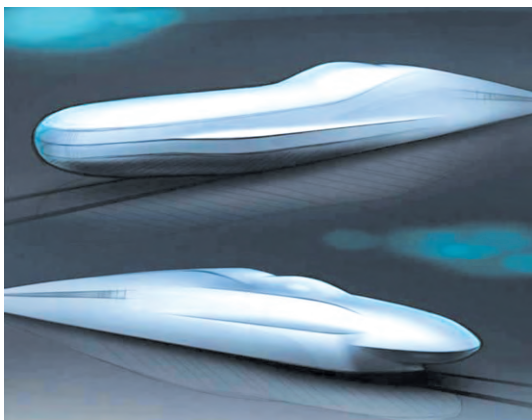


图 8 新干线试验车“ALFA-X”概念图<sup>[11]</sup>

## 2 我国下一代高速列车的发展目标

在我国高速铁路发展的需要和世界高速列车的发展趋势下,我国下一代高速列车的研制计划已经迫在眉睫。中国下一代高速列车关键技术的发展需求和设计目标应该体现在更高速、更安全、更环保、更经济、更舒适、更友好这 6 个方面<sup>[12-14]</sup>。

### 1) 更高速

目前欧系和日系的高速列车没有在速度上要求太高,只是更多关注其经济性、安全性与环保性,但是面对世界高铁的发展趋势,特别是中国高铁的崛起,他们发展下一代高速列车的眼光实际上也瞄准了更高的运营速度。由于速度是高速列车先进技术的具体体现,也是旅客不断追求的指标。因此,我国的下一代高速列车,应该在速度上做到“400<sup>+</sup>”,这一方面要引领世界高速列车的发展,同时也和目前的“复兴号”形成速度上的级差,成为谱系化产品。为此,相比中国标准动车组,要实现更高速,下一代高速列车的速度指标应为:设计速度为 400<sup>+</sup> km/h,线路试验速度 440<sup>+</sup> km/h。

### 2) 更安全

欧系与日系车运用更先进的技术对下一代高速列车的安全性给予了极大的关注。比如,日本的下一代高速列车配备了更加先进、响应速度更快的车载地震预警及紧急停车系统。我国的下一代高速列车的安全性,将通过主动安全结构设计和智能化的安全状态管理来实现进一步的提升。为此,与既有高速列车相比,下一代高速列车的脱轨系数、轮重减载率等安全性指标应降低 10%,安全预警能力与指标应提升 50%,通过结构实现脱轨不脱线的安全性能力提升 50%,地震响应时间与列车制动距离缩短约 5%,列车的百万公里故障率下降 10%。

### 3) 更环保

纵观世界高铁发展趋势,生态、环保的概念已经成为共识。比如法国在下一代 TGV 高速列车的设计中就明确要求“材料的再循环率必须要高于 90%、能量消耗至少降低 25%”。下一代高速列车,会通过材

料、结构与控制的技术进步,来进一步提升环保性指标。为此,以中国标准动车组为基础研究对象,下一代高速列车的研制应该争取更先进的环保性指标:运行阻力降低 5%~10%,运行能耗减少 10%~15%;车外噪声降低 2~3 dB,车内噪声降低 3~5 dB;可再生材料的应用率提高 10%,通过材料轻量化实现轴重减少 5%~10%;车内外电磁辐射减小 10%。

### 4) 更经济

考虑到下一代高速列车将尝试与采用新技术,在研制初期,其制造成本可暂时不作要求,但由于智能化技术的采用,状态修、经济修技术日趋成熟,下一代高速列车一定会具有更好的经济性。下一代高速列车相比现有中国标准动车组的全生命周期成本应降低 10%~15%,其中,维修成本下降 20%,车辆可用性提升 5%~10%。

### 5) 更舒适

作为载客运输工具,提升旅客舒适性也是努力的方向。尽管为了实现运输效益的经济性,很难在乘坐空间上进一步提高旅客的舒适性,但是通过改善乘坐环境、人机工程及列车运行平稳性等方面,旅客乘坐舒适性依然有进一步提高的空间。

为此,与中国标准动车组相比,下一代高速列车乘坐舒适性指标,除车内噪声降低 3~5 dB 外,车辆运行平稳性(舒适性)指标应提升 10%,车厢内温度均匀性应提升 10%,车厢窗户面积应增加 10%~20%,车内反映空气质量的二氧化碳与有害气体含量应降低 10%。

### 6) 更友好

下一代高速列车将采用更加先进的走行部技术,通过降低轴重、簧间和簧下质量来减小轮轨相互作用,同时运用悬挂控制技术来提高列车对线路的适应性;通过车体外形、材料与结构(包括表面微结构)设计,来降低气动作用。因此,运用高速列车耦合大系统动力学理论,进行系统优化,适当降低线间距、隧道面积与线路不平顺要求,实现高速铁路系统更好的经济性。与既有 350 km/h 高速铁路标准要求相比,可按不同线路的设计速度进行取值:

① 250 km/h: 线间距取 4.5 m,隧道面积 70 m<sup>2</sup>,线路不平顺要求降低 20%。

② 350 km/h: 线间距取 4.8 m,隧道面积 85 m<sup>2</sup>,线路不平顺要求降低 10%。

③ 400<sup>+</sup> km/h: 线间距取 5.0 m,隧道面积 100 m<sup>2</sup>,线路不平顺要求降低 5%。

根据更高速、更安全、更环保、更经济、更舒适、更优化(简称“六更”)的目标要求,下一代高速列车的创新与变革,除了材料、形状与结构,更体现在智能化上,包括悬挂控制技术、主动安全控制技术、预测健康管理(PHM)、状态修与智能维修等,以实现“六更”下的技术指标。

### 3 我国下一代高速列车的设计创新

下一代高速列车从总体设计、转向架、车体、牵引制动等关键系统上均要全面创新, 以实现“六更”的技术指标, 同时呈现出明显的技术进步与“代记”特征。

#### 1) 结构设计创新

轮轨关系的基本作用机理并没有发生根本性的改变, 但走行部(又称转向架系统)、车体、牵引系统、制动系统都一直在不断变化。随着电气化、电子化、信息化与网络化的发展, 新技术的不断涌现, 有力地支撑着轨道车辆(机车、客车与货车、地铁与城轨车辆等), 特别是高速列车的发展。下一代的高速列车应该在总体设计的理念, 在总体结构上有一定创新, 使得下一代高速列车在结构可靠性、系统安全性、维修经济性和性能指标等方面得到明显提升。结构的创新更多反映在走行部和车体结构上, 如通过结构创新, 有效减小轮轨力, 有效提高乘坐舒适性等。

#### 2) 材料技术革新

下一代高速列车的车辆创新的元素多反映在材料革新上, 这包括机械材料、隔振材料、碳纤维材料、高分子材料、复合材料等, 也包括电气元器件等智能材料。材料的革新不断催生着新技术、新结构和新工艺在轨道车辆上的应用。随着下一代高速列车运行速度的不断提高( $400^+ \text{ km/h}$ ), 减振降噪成为研究的主题, 通过材料革新的零部件轻量化设计更是未来高速列车的材料发展的重要方向。镁合金、碳纤维等材料的逐渐成熟, 为走行部及车体的轻量化提供了良好的基础条件; 而碳化硅的成功应用, 更是给牵引系统的大功率和小型化、轻量化带来可能; 碳-碳、碳-陶瓷复合材料的应用, 也为制动系统轻量化及高可靠性带来希望; 无磨损、长寿命与鲁棒性的高分子材料的发展, 也使得车辆结构的悬挂元件有了多样化的选择。

#### 3) 主动控制技术创新

下一代高速列车的一个核心思想就是要使车辆对线路有更好适应性, 特别是对线路的平纵断面和线路不平顺有很好的适应性, 这样就可以大大提高列车与线路友好性, 降低线路的建造与维护等级, 提高系统的经济性。因此, 悬挂的主动控制技术(包括半自动与自适应)有望得到应用, 通过先进的控制技术的应用, 来极大提升车辆性能和车辆对线路的适应性。

#### 4) 智能运维(智能运营维护)技术创新

在网络化、数字化和信息化的今天, 智能铁路、智能列车已经不是遥不可及的期望, 一定是下一代高速列车基本特征。下一代高速列车智能化的方向有2个: 一是通过智能化实现对车辆状态的感知与评估, 也就是列车运行健康评估与安全保障; 二是基于健康管理的智能运维, 通过先进的状态修体制, 实现车辆状态与能力的保持, 有效减少维修作业, 降低维修成本。

### 4 展望

我国在下一代高速列车项目的研制过程中, 需要紧密跟踪国内外最新的设计前沿新技术, 综合考虑与高速列车的空气动力学、结构动力学、车辆运动动力学、牵引制动技术、能量管理、材料科学等领域相关的核心科学问题。在不断完善下一代高速列车集成设计平台的基础上, 瞄准最新设计目标, 开发更新技术的高速列车, 极大降低比能要求以及改善乘客舒适度和噪声特性。具体的技术指标特征应该能够体现在如何降低逐步增加的能源成本、如何考虑车辆全寿命周期成本, 以及对下一代高速列车提出更加严格的安全技术要求, 以确保我国在未来的几十年内高速列车技术具备足够的技术竞争力。与其他交通运输方式相比, 下一代高速列车的基础技术和应用技术涵盖的范围更加广泛, 高速列车的技术发展永无止境。

面对世界高速列车未来的挑战, 更应发挥我国高速列车自主创新的高速列车集成设计技术平台和人才优势, 利用我国高速列车保有量多、高速铁路线路长、高速列车运行里程多而环境复杂等特点, 充分总结好“复兴号”等高速列车运用经验, 积极开展下一代高速列车的研究, 以应对未来世界高速列车的技术挑战。下一代高速列车既是我国标准动车组发展的继续, 又是新一轮高速列车研究的起点。下一代高速列车研发应该考虑到如下几方面:

①考虑高速列车的动力学大系统<sup>[15]</sup>, 即需要充分研究车线、轮轨、弓网、流固和机电的耦合关系, 达到技术与经济指标的科学匹配, 实现全局优化。

②贯彻全寿命设计周期的概念, 即从高速列车设计、制造、运用、维护的全寿命过程, 开展RAMS研究, 有效控制全生命周期成本。

③运用高仿真技术, 充分利用高速列车耦合大系统动力学理论和仿真平台, 实现高速列车运行过程全程模拟, 并通过虚拟制造、虚拟装配和虚拟维修, 实现在设计过程中的全面优化。研究在互联网+、大数据下的高速列车全数字协同设计技术及以人为中心的自适应用户体验, 真正实现高速列车新产品的全寿命周期友好设计和基于大数据技术实现高速列车运行安全评估。

#### 参考文献:

- [1] 缪炳荣, 张卫华, 邓永权, 等. 新一代中国高速铁路动车组面临的挑战与策略研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 98-112.
- [2] Goodall R M, Ward C P. Rolling stock technology for the future[C]. Birmingham: International Conference on High Speed Rail, University of Birmingham, 2014.
- [3] Lee H, Moon D. Next generation of Korea Train Express (KTX): prospect and strategies[C]// Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2005: 255-262.

(下转第12页)

无论是从 UITP 等权威第三方统计数据来看,还是来自于已开通项目业主的反馈,全自动驾驶技术发展方向十分明朗。预计全自动驾驶技术很快将会迎来蓬勃发展和广泛应用。

#### 参考文献:

- [1] Stanway LC, BEng CEng FIMechE. Mails Under London [M]. UK: Assoc' of Essex Philatelic Societies, 2000.
- [2] John Robert Day, John Reed. The Story Of The Victoria Line [M]. UK: Capital Transport Publishing, 1971.
- [3] Richard E Barone. Accelerating the Transition to Communications-Based Train Control for New York City's Subways [R]. USA: RPA, 2014.
- [4] Dell R, Manser AW. Automatic driving of passenger trains on London Transport [J]. Institution of Locomotive Engineers, 1964(3).
- [5] Katz, Ralph. First Automated Subway Train Starts Run; Shuttle Riders Find Trip Without Crew About the Same STRIKE ENDED ONE-YEAR PACT All 3 Will Benefit [N]. The New York Times, 1962-01-05.
- [6] Edgar Sée. Automation in urban public transportation [R]. France: RATP Group, 2016.
- [7] Thales. The Evolution of CBTC [R]. Canada: Thales, 2016.
- [8] Siemens. Driverless metro in Nuremberg [R]. Germany: Siemens, 2014.
- [9] Horne M. Driverless Underground trains for London [J]. UK: Modern Railways, 2012.
- [10] UITP. Statistic Brief\_World Metro Automation 2016 [R]. Belgium: UITP, 2016.
- [11] Jonathan Peter Powell, Anna Fraszczyk, Chun Nok Cheong, et al. Potential Benefits and Obstacles of Implementing Driverless Train Operation on the Tyne and Wear Metro: A Simulation Exercise [J]. Urban Rail Transit, 2016(6).
- [12] IEC. Railway applications—Automated urban guided transport (AUGT) Safety requirements: IEC 62267 [S]. IEC, 2009.
- [13] IEC. Railway applications—Automated urban guided transport (AUGT) Safety requirements—Part 2: Hazard analysis at top system level: IEC/TR 62267-2 [S]. IEC, 2011.
- [14] 国家质量监督总局. 轨道交通自动化的城市轨道交通 (AUGT) 安全要求 第 1 部分: 总则: GB/T 32588.1 [S]. 北京: 国家质量监督总局, 2016.
- [15] IEC. Railway applications—Urban guided transport management and command/control systems—Part 1: System principles and fundamental concepts: IEC 62290-1 [S]. IEC, 2014.
- [16] IEC. Railway applications—Urban guided transport management and command/control systems—Part 2: Function requirements specification: IEC 62290-2 [S]. IEC, 2014.
- 作者简介: 路向阳 (1961—), 男, 教授级高级工程师, 长期从事车载网络控制、机务信息化、轨道交通自动化方面的研究工作。
- (上接第 5 页)
- [4] Peris E, Goikotxea J. Roll<sup>2</sup>Rail: New Dependable Rolling Stock for a More Sustainable, Intelligent and Comfortable Rail Transport in Europe [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 567–574.
- [5] Haltuf M. Shift<sup>2</sup>Rail JU from Member State's Point of View [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1819–1828.
- [6] Gogos S, Letellier X. Shift 2 Rail: Information Technologies for Shift to Rail [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 3218–3227.
- [7] German Aerospace Center (DLR). Researching the train of the future [EB/OL]. (2013-09-10)[2017-10-01]. [http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10467/740\\_read-916/#/gallery/2043](http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10467/740_read-916/#/gallery/2043).
- [8] Winter J. Aeroliner 3000-increasing productivity of the GB rail network [J]. European Railway Review, 2016, 22(3): 32–35.
- [9] Namrata Dixit. Mercury: Concept high-speed luxury train envisioned for UK [EB/OL]. (2010-07-15)[2017-12-01]. [http://luxurylaunches.com/transport/mercury\\_concept\\_highspeed\\_luxury\\_train\\_envisioned\\_for\\_uk.php](http://luxurylaunches.com/transport/mercury_concept_highspeed_luxury_train_envisioned_for_uk.php).
- [10] JM. Climate change, an opportunity for high-speed train manufacturers [EB/OL]. (2016-11-04)[2017-12-01]. <https://rctom.hbs.org/submission/climate-change-an-opportunity-for-high-speed-train-manufacturers/>.
- [11] Hitachi corporation. Ready for high speed travel throughout the UK and Europe [EB/OL]. (2015-08-02)[2017-12-01]. <http://www.hitachirail-eu.com/products/our-trains/at400-very-high-speed>.
- [12] Vickerman R. High-speed rail in Europe: experience and issues for future development [J]. The annals of regional science, 1997, 31(1): 21–38.
- [13] Ai B, Cheng X, Kürner T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2014, 15(5): 2143–2158.
- [14] Uzuka T. Faster than a speeding Bullet: An overview of Japanese high-speed rail technology and electrification [J]. IEEE Electrification Magazine, 2013, 1(1): 11–20.
- [15] 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.
- 作者简介: 张卫华 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轨道车辆动力学。