

新一代中国高速铁路动车组面临的技术挑战与策略研究

缪炳荣,张卫华,邓永权,李旭娟,梅桂明

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室,成都 610031)

[摘要] 基于新一代中国高速列车(动车组)关键技术的研究发展趋势和策略问题进行详细讨论和技术展望。主要内容包括:首先,介绍国际先进轨道车辆制造商在其新一代车辆开发过程中采用的先进设计技术和理念,分层次研究其各自的核心技术特点和未来其可能的技术发展趋势。其次,在国内外文献研究的基础上,结合中国高速铁路车辆发展的自身特点和实际情况,针对具体的牵引传动技术、转向架技术、车体设计技术等可能面临的核心技术难题,提出一些分析建议。最后,在综合考虑轨道车辆造型发展趋势及设计原则的基础上,根据集成设计的理论与多学科优化设计方法,针对新一代中国高速铁路动车组可能面临的重大技术挑战与策略和改进措施的研究提出一些明确的建议。总之,通过本文的初步研究,希望可以对我国高速列车未来的发展方向和趋势提出一些有益的建议。

[关键词] 高速铁路;高速列车;新一代;关键技术;集成设计;多学科优化

[中图分类号] U270 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)04-0098-15

1 前言

高速铁路运输不仅已经成为世界经济的重要引擎,而且高速铁路技术发展也带动了不同的相关技术研究领域的发展。也就是说如何拥有更多、更先进的集成设计技术的高速铁路已经成为目前各个国家铁路的核心竞争技术的要求所在。世界铁路旅客运输的形式和范围在不断扩大,传统的轨道车辆运输形式也正在不断地改变。除了那些高速铁路发达国家之外,一些发展中国家,其中包括东南亚国家和其他亚非拉地区,对新一代的高速铁路技术都呈现了异样的热情。这是因为先进的高速铁路技术不仅能够加快世界经济运输服务领域的沟通,解决许多世界经济面临的实际课题,而且为了促进世界经济的发展和融合也提供了极大

的助力。考虑到未来20年内世界高速线路网长度的明显增加、各国对新高速铁路线路的建设计划和热情,高速列车车辆产品换代和性能提高将会更加频繁且得到不断改善^[1-5]。

在过去,轨道车辆结构主要追求的是车辆结构轻量化、服役长寿命、免(少)维修性、降低成本等,而近十年来,各个国家在看到高速铁路带动国家和地区经济发展的强大动力后,对高速铁路的重视和热情空前高涨,也使得高速铁路技术的功能性或经济性呈现多样化和高度化的发展。这必然导致高速铁路车辆的新产品的更新换代日益频繁,而且将给世界主要高速铁路制造厂家带来巨大的压力和挑战,也给很多高速铁路的研发部门的技术人员对于未来高速铁路车辆的发展趋势带来很多困惑。但是,经济市场中出现的任何新鲜事物或者说新一

[收稿日期] 2015-02-11

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(51375405)

[作者简介] 缪炳荣,1970年出生,男,江苏泰县人,副研究员,硕士生导师,主要从事轨道车辆动力学、结构疲劳强度和载荷谱等工作;
E-mail:brmiao@163.com

代产品的研发,都必须遵循一个基本的原则,即必须要遵循其可持续性的科学发展规律。作为主要的公共交通工具,高速铁路车辆和其他主要交通工具(汽车、航空和船舶等)同样必须要面对社会多样化的技术需求,比如为乘客提供安全、舒适和经济的乘坐环境服务;必须要考虑经济效益的同时,还需要考虑社会效益,比如必须要重视LCA(寿命周期评价)的生态设计,降低CO₂的排放等^[6-8]。

尽管中国高速铁路的快速发展是近十年的事情,在吸纳和融合国外先进高速铁路技术的基础上,结合自身铁路系统的特点进行多元创新,也已经迅速发展成为世界高速铁路车辆的主要制造国家和未来技术发展的风向标。但是应该客观地看到,中国高速铁路和那些已经发展和积累了几十年的高速铁路先进技术的发达国家,比如德国、法国和日本依然存在着很多技术上的差距,各种关键技术的积累和技术难题依然客观存在。这不仅是某一个技术领域的问题,而是和高速铁路车辆相互关联的多个基础学科(力学、材料和制造与装配工程等)均面临着各种严峻的技术课题的挑战。本文将结合世界几个主要高速铁路先进技术国家的特点,在对国内外高速铁路车辆最新文献研究的基础上对研制新一代中国高速铁路的最新技术发展趋势提出个人的一些浅薄建议。

这里的高速铁路技术主要是指运营最高速度高于200 km/h、两站间不停车运行速度不低于150 km/h的现有商业运营的高速电气化干线,以及最近可能将运行的高速干线。目前符合这些线路的国家有中国、日本、法国、德国、西班牙、英国、意大利、瑞典、芬兰、美国、韩国和俄罗斯等,以及巴黎—布鲁塞尔—科隆/阿姆斯特丹高速线(法国、比利时、德国和荷兰区域)和“欧洲之星”线(英国、法国和比利时区域)。高速干线铁路可区分为以下几种类型^[9]: a.新建专线,仅用于运行最高速度为250 km/h及以上的列车;b.改建线路Ⅰ,全长或个别区段可运行速度为200~220 km/h的列车;c.改建线路Ⅱ,全长或个别区段可运行速度为200~230 km/h的由摆式车辆组成的列车。

未来中国高速铁路车辆新技术的发展趋势在哪里?如何在研究世界高速铁路发展强国的技术基础上,进行技术的不断创新,继续站在世界高速铁路发展的前列?如何在追求经济价值的同时努

力适应未来技术多样化、高度功能化的社会效益需求。本文将从技术层面的角度,多层次研究国外发展新一代高速铁路动车组的设计和开发理念技术基础,针对未来中国高速铁路车辆发展可能面临的一些技术难题,比如“绿色(生态)设计的概念”,“降低寿命周期成本”、“安全、降噪、环保的概念”等主要课题逐层次地分析和讨论。在实施新一代产品设计理念的构筑或关键技术基础研讨的同时,也希望中国高速铁路技术在未来经过新一代车辆的研制或可靠性试验的基础上,建立一套完整的新一代中国高速铁路车辆架构系统和技术标准,且为中国高速铁路的未来技术发展提出一些浅薄的技术性建议。下面,将回顾国外著名轨道车辆制造商最近研制的一些代表性车辆最新发展趋势,逐步分解和介绍其主要的设计理念与技术构成,在其基础上逐步归纳出中国高速铁路车辆未来可能面临的一些技术挑战和难题。

2 概述

在高速轮轨技术上,德国西门子公司(SIEMENS,简称西门子)和法国阿尔斯通轨道制造公司(ALSTOM,简称阿尔斯通)、日本川崎公司(KAWASAKI)、加拿大庞巴迪公司(BOMBARDIER,简称庞巴迪)的铁路公司技术世界领先,这些国家在高速铁路车辆产品的技术上各有优势和劣势,也各有自己的核心设计理念和独特的技术特点。在世界轨道车辆的发展历史上,轨道车辆结构主要的设计理念在于结构轻量化、服役长寿命、免(少)维修性、降低成本等^[9]。而近十年来,车辆结构已经逐步实现轻量化、模块化的设计原则,在很多车辆上也采用合适的最佳材料(不锈钢、铝合金、复合材料、玻璃钢、碳纤维等)。但是在最近的社会环境急剧变化或技术革新中,也对新一代高速铁路车辆结构提出了很多的技术要求,比如车辆功能或特性的多样化,环境的生态化和绿色化发展趋势。为了应对这种生态设计的发展趋势,一些传统的车辆制造技术和方法难以延续下去,必须要进行大量的技术革新和改革。比如一些著名铁路公司已经将设计理念定义为:为客户提供高效、快捷、完善的高速铁路新技术(新研究)、提供技术咨询、技术测试、系统工程的检查和技术培训,并以高度安全的方式和标准提供相关技术支持,确保诚信的最高水平,同时为公司本身营造一个具有挑战性的和可持续发展的工

作环境。这就要求各个国家在开发新一代高速铁路车辆产品的时候,必须要有一个创新的设计理念,对未来高速铁路车辆的发展有一些前瞻性的研究,并提出具体的基础技术构成。

日本是世界上第一个实现高速铁路运营的国家,1964年开始东海道(东京—大阪)高速铁路运输。它的成功运营促进了世界其他高速铁路干线的建设。可以说日本是第一个研发高速列车的国家,并不断吸纳新技术发展自己的高速铁路交通网和不同系列的高速列车(新一代日本高速铁路主要代表是新干线E7系、N700系、efSET系)。欧洲凭借着浓厚的技术底蕴,在近三十年来已经迅速建立了全欧洲范围的高速铁路网,也在根据不同的需求进行产品的更新换代(主要代表为阿尔斯通的TGV/AGV、西门子的ICE系列、VELARO-X系列)。加拿大庞巴迪是轨道交通领域的一个世界铁路技术巨头,ZEFIRO系列动车组是庞巴迪运输(Bombardier transportation)2005年公布的超高速铁路旅行最新概念的高速电动车组设计平台,由庞巴迪公司工业设计组与意大利工业设计公司Zagato共同设计,但一直没有得到实用,最近几年重新启动研发计划。庞巴迪开发了三种不同型号:ZEFIRO 380(主要瞄准中国市场,设计最高时速380 km/h);ZEFIRO-V300(主要瞄准欧洲市场,设计最高时速300 km/h);ZEFIRO-250(主要瞄准普通市场,设计最高时速250 km/h)。采用ECO4的理念进行高速铁路车辆设计,也称为ECO4计划项目。

中国新一代的高速列车代表(CRH-380A、CRH380B等)也已经成为高速铁路车辆新技术的典型代表。实际上,除日本在积极准备新一代新干线列车,拓展海外市场。其他的国家和地区,包括中

国、欧洲等主要厂家都将面临着可以预见的世界高速铁路巨大的市场需求和残酷的技术竞争,实际上德国的VELARO-D、AGV-11均是其第4代高速列车。由于中国高速铁路技术的迅猛发展,其性价比的优势逐渐成为世界和亚洲许多国家渴望的产品,而邻国日本、韩国高速铁路车辆的保有量也在不断增加,亚洲的高速铁路市场和线路综合总量已经处于世界领先水平。在亚洲高速铁路市场出现异乎寻常的高速增长的同时,欧洲高速铁路网规划2020年也开始加大投入,预计其新增高速铁路线路约10 000 km。

3 国外动车先进设计理念和关键技术构成

3.1 日本车辆设计理念的差异性

近年来,日本铁道部门为了面对世界高速铁路市场竞争激烈的形势,针对新产品的研发重新投入了极大的热情,比如提高高速铁路运输能力,保证车辆运输效率提高,提高产品的环境友好性。并且,其在巴西、美国、越南、印度等世界各地,正在计划开展高速客运专线的建设和中国高速铁路展开激烈的竞争。特别是为了满足国外高速铁路不同的运营情况,比如不同的线路条件、应用规格、标准等,作为准备出口国外的高速车辆川崎重工公司考虑为适应国外的运行条件及标准,着手开发新型高速车辆,提出一些新的设计理念。下面结合一些代表性的文献,简单地说明一下日本新一代高速列车的设计理念 and 基础技术构成^[6-11]。

图1为日本新干线高速铁路的主要发展构成模式,每一代新干线高速列车产品都是针对不同的技术问题而进行解决。



图1 日本高速列车的主要研制路线的发展简图^[9]

Fig. 1 The diagram of Japan Shinkansen high-speed train development process^[9]

简单地来说,0系车辆是最早研制的主力车型(1964);200系车辆耐寒、抗风雪(1982);100系车辆是0系车辆的后继车型,追求高舒适度(1985);300系车辆是新干线(东海道、山阳线)主力车型(1992),主要运营于山区道路,首款使用交流牵引电动机的列车,有着很好的静音技术;400系是实现新干线和既有线直通的车辆(1992);E1系车辆为双层编组(1994);E2系车辆为双频、环境保护(1997);E3系车辆则采用新机轴应用于秋田干线(1997);500系车辆真正实现300 km/h等(1997)。E5系车辆(2011年投入商业运营)的车身采用了铝合金空心桁架断面和双皮层构造。为了减少通过隧道时的微压力波,车辆的高度和试验车E954型车

辆(FASTECH360 S)的3 650 mm相同,车辆宽度同为3 350 mm。考虑到车体倾斜,车侧结构主体内侧设计为倾斜式样,E6系车辆(2013年投入运营)主要运营于北日本海^[6-8]。

日本川崎最新研制的E7系新干线列车(2014年投入运营,见图2),是融入日本传统樱花风格的豪华列车,也是面向美国加州地区推销的主导高速铁路车辆产品,藉此面对美国加州高速铁路线路的竞争。该型车辆于2013年亮相于日本车辆展,并作为日本新干线高速列车50周年庆贺的纪念品(运营于日本东京—长野)。预计2015年运营于日本沿海地区,2025年运营于大阪地区。最高速度160 mph(约256 km/h,1 mph = 1.609 344 km/h)。



图2 新干线E7系^[10]

Fig. 2 The diagram of Japan Shinkansen high-speed train E7 series^[10]

图3表示日本采用了“A-train”的高速列车设计概念,是日本首次获得的欧洲订单的高铁产品,也

是为英国伦敦奥运会制造的高速列车^[10]。



图3 日本新干线N700系和为英国研制的高速列车(A-train设计概念)^[10]

Fig. 3 The diagram of Japan Shinkansen high-speed train E7 series and high-speed train for England (A-train design concept)^[10]

3.2 德国高速铁路发展的循序渐进性

德国高速铁路是从20世纪80年代初期开始发展,其中VELARO系列平台是由德国铁路运营的

ICE-3列车发展而来的第4代产品。实际上,ICE列车的各款型号主要是在20世纪90年代出现,由西门子为首的多家公司组成的制造商联盟进行开

发。VELARO系列是一款纯粹的西门子产品,主要面向国际铁路市场。为此针对不同的设计标准西门子公司对动车组进行了很多一般适用性的修改。特别是针对欧盟出台的互操作性技术规范 and 进一步的标准,当中对包括新的消防标准及各项复杂的要求进行了技术修改^[12,13]。

整体结构采用铝质构造的VELARO-D列车目前已经被设计为新一代高速列车设计平台概念,它可以针对不同国家客户的具体需求进行技术修改。可根据当地要求进行调整的范围包括传动功

率、配电系统、空调、座位数量、车身宽度及轨距。车厢连接处与ICE-3列车相比也有明显的改变。乘降门为电动塞拉门,其净宽及净高分别为900 mm及2 050 mm。不同于ICE-3列车,VELARO的辅助牵引设备,例如,整流器冷却水泵、逆变器冷却风机、电动机风机以及制动器风机均可以独立于接触网供电运行。它解决了ICE-3列车在法国高速铁路东线上通过分相区时反复出现的冷却中断问题^[14]。

德国高速列车的发展历程可以参见图4所示^[15]。

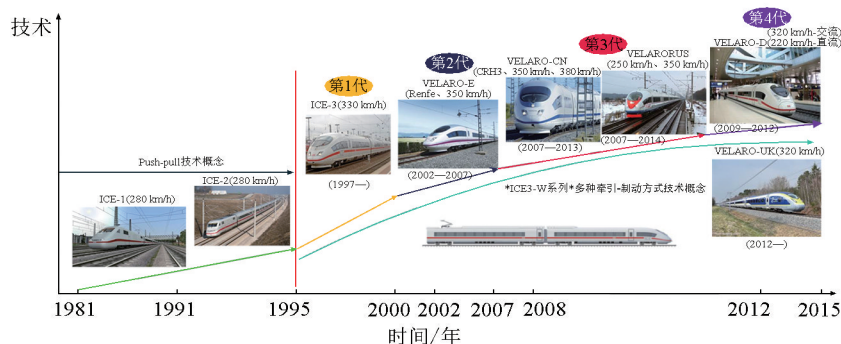


图4 德国高速铁路的主要研制路线的发展简图^[15]

Fig. 4 The diagram of German high-speed train development process^[15]

与ICE-3列车相比,大多数的Velar列车的变体都没有配备涡流制动,仅VELARO-D列车具有这样的制动系统。VELARO列车采用动力分散式技术。除了牵引电动机及制动器始终安装在底板下方外,一些原本设于动力车头内的电气设备及机械设备,例如,变压器、牵引逆变器、辅助变流器、空压

机、风缸、制动架、电池箱和蓄电池充电器等都被分布在每节车厢的底板下方。一列八节编组的动车组有50%的转向架为动力转向架(十节编组的Velaro RUS则为40%),德国高速铁路VELARO设计平台如图5所示^[16]。



图5 德国高速列车VELARO设计平台^[16]

Fig. 5 German high-speed train VELARO design platform^[16]

在相同长度的列车中,VELARO列车提供的座位数提高了15%。被称为“VELARO-HD”的设计草图可在200 m长的列车中提供536个座位(UIC标准的2+2布局)。这个概念还允许乘客在列车两端获得清晰的线路视野。驾驶室与客舱仅以一扇玻

璃幕墙相隔,坐在休息室内的乘客可以越过火车司机眺望列车的前方或后方景观。VELARO-D系列的列车是集成了德国高速铁路最新、最全面的先进技术的高速铁路车辆新一代研制和开发的技术平台。它已经完成了400 000 km测试里程,是得到德

国联邦铁路和交通运输部授权的标志性新一代高速列车产品。很多出口的高速铁路车辆均是在此基础上进行修改。图6是VELARO-Eurostar列车,主要是在比利时进行线路测试,号称具有完整高速铁路装配技术的第6代高速铁路产品(主要运营于法国、英国和比利时,2015年投入运营),也属于VELARO系列,其产品中引入了智能移动通信技术。



图6 VELARO-Eurostar 列车^[16]

Fig. 6 German high-speed train VELARO-Eurostar^[16]

3.3 法国阿尔斯通(ALSTOM)的TGV/AGV系列的独特性

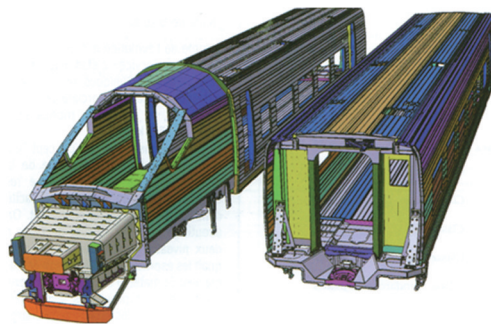
法国阿尔斯通是世界著名的高速列车轨道车辆制造商,也是西门子公司在欧洲最大的竞争对手。AGV即“高速动车组”,由阿尔斯通独立研发,是法国最新研制的高速铁路车辆,AGV车辆主要包括三项关键技术:铰链结构、发动机分置和能量反馈技术。AGV计划代替TGV作为法国高速铁路的下一代车型。采用动力分散驱动是AGV与动力集中式的TGV最大的不同处,此设计上的优势让



(a)

AGV得以在相同的路线上达到较TGV更高的运营速度,其目标运营速度为360 km/h。阿尔斯通为AGV提供7节到14节的不同编组。列车由3节小单元组成,每个单元都具有位于车底的1组变压器和2组牵引电气组件;两个上述单元加上1节拖车构成整列7节编组。7节编组有2个3节单元,1节拖车居中分隔,提供约245个座位;11节编组则有以2节拖车分隔的3个3节单元,座位数约为446个^[17]。

AGV的优点在于:与相同长度单层TGV列车相比提供更多座位;铰接式转向架的采用可以降低列车转向架数目,从而降低维护费用;高的功率重量比与高效永磁同步电动机的使用,以及其他设计改进,令列车拥有更高的能源效率,更低的噪音水平和车厢两端贯通部位的更多空间。采用结构轻量化设计和模块化设计,在保证车体结构满足EN 12633-1500 kN标准的同时也极大地降低了重量,铰接支撑部位的枕梁采用钢材和复合材料。同时其在舒适度,平稳度,可靠性和可用性方面都做了极大地改观,在能源消耗,环境影响,运营成本上也进行了重点设计,比如:采用了98%的易回收的材料(铝合金、钢、铜和玻璃、复合材料等);采用了再生电力,最高可以达到8 MW能量反馈技术。采用了优化的气动外形设计,可以保证225 mph和187 mph时的噪声水平相当。和同类型车相比,降低了15%的能源消耗。较早进行了抗碰撞和吸能设计^[18]。图7表示AGV-II系列列车和车体结构三维模型,图8表示其抗碰撞性能设计的特点,图9表示其采用的气动性能设计。



(b)

图7 法国AGV-II系列和车体结构三维模型^[18]

Fig. 7 The French AGV-II series train and the structure of 3D model of car body^[18]

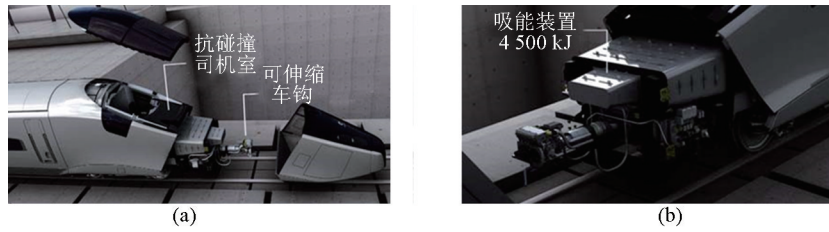


图8 AGV列车在抗碰撞性能设计的特点^[18]

Fig. 8 AGV trains on the design characteristics of collision resistance performance^[18]

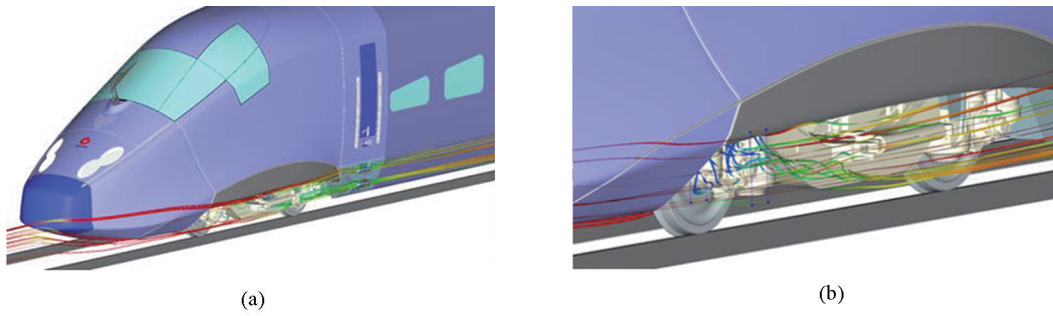


图9 AGV列车的气动性能设计^[18]

Fig. 9 Aerodynamic performance design of AGV train^[18]

2008年,阿尔斯通开发“AGV Duplex”,作为在TGV 2N2之后提供给法国国家铁路的后续车型。2011年6月阿尔斯通开始开发最高速度达400 km/h的新型高速列车,并同时有单层和双层版本。新设计采用动力集中于机车的设计,此设计称为“AGV-II”。在AGV的产品研发过程中,阿尔斯通投入了大量的精力进行相关的技术创新。比如采用最新

的变压器技术,每两个电机有一个独立的变流器,采用新一代的IGBT6.5 kV-600A技术;辅助变流器集成在牵引装置中,同时采用同步永磁电机技术、动力分置技术。采用的永磁电机比传统发动机体积和质量更小(约小40%~50%),并配有样机和试验平台等。图10为AGV采用的永磁电机技术示意图^[18]。

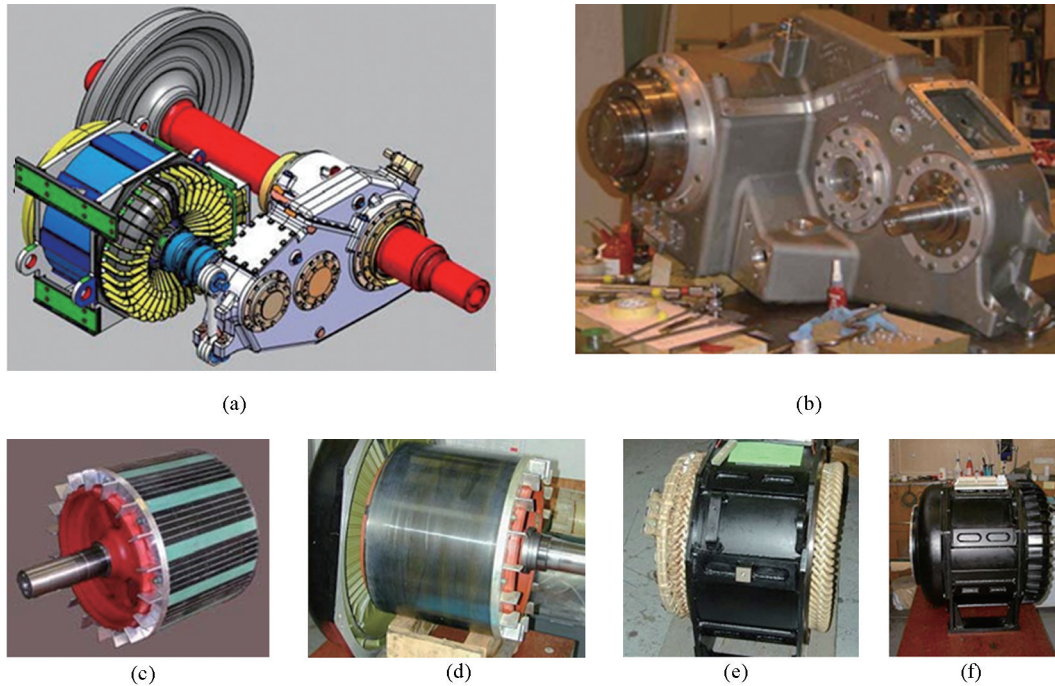


图10 法国AGV采用的永磁电机技术(功率-质量比>1 kW/kg)^[18]

Fig. 10 Permanent magnet motor technology used in the French AGV (power-weight ratio>1 kW/kg)^[18]

3.4 庞巴迪(BOMBARDIER)的ECO4设计理念

加拿大庞巴迪也是一家世界领先的创新交通运输解决方案供应商,公司的结构以飞机和列车这两个规模几乎相当的业务领域为核心。目前,庞巴迪是中国地铁车厢及支线与公务飞机的主要供应商。ZEFIRO系列动车组是庞巴迪运输(Bombardier transportation)2005年公布的超高速铁路旅行最新概念的高速电动车组设计平台,由庞巴迪公司工业设计组与意大利工业设计公司Zagato共同设计,但一直没有得到实用,最近几年迫于世界高速铁路市场的激烈竞争,重新启动研发计划。其中庞巴迪开发了三种不同的型号:ZEFIRO-380(主要瞄准中国市场,设计最高时速380 km/h);ZEFIRO-V300(主要瞄准欧洲市场,设计最高时速300 km/h);ZEFIRO-250(主要瞄准普通市场,设计最高时速250 km/h)。庞巴迪几年前就提出建立包括能源(energy)、效益(efficiency)、经济(economy)和生态(ecology)的研发理念,并将其全面覆盖至自产品设计到产品运营的整个生命周期。庞巴迪在中国的庞巴迪合资公司BST正在制造的CRH380D高速列车正是融入了“ECO4”的研发设计理念。庞巴迪的产品生产流程采用更严格的国际标准,在实现优化能效、降低噪音、使用无害可回收材料的同时,许多车辆都具备超过95%的可回收性。CRH380D电力动车组是由青岛四方庞巴迪铁路运输设备有限公司基于庞巴迪ZEFIRO平台研发的CRH系列高速动车组。设计标称运行时速为380 km。在2010年9月庞巴迪首度公开展示了最新ZEFIRO 380动车组头车的1:1全尺寸实体模型,并用互动式三维显示技术展示了车厢内部的设计。2013年4月,在宁杭甬高速铁路的试验中,跑出最高时速420 km^[19,20]。

列车外形设计以“独特性、空气动力学和优化的运营成本”为主,在速度方面,良好的空气动力性能提高了最大速度,同时降低了能源的消耗,因而减少了运作成本;而在安全方面,优良的空气动力性能减少了侧风影响,从而大大地改善了稳定性;而在降低噪音方面,高级别的空气动力性能在环保设计中是关键的因素,因为它大大地降低了噪音污染,同时提高了旅客舒适度;而列车在整体性能上都达到了更好的空气动力的功效。列车内部以“布置灵活、照明充足和座位舒适”为主,座位方面安排灵活,即使是二等车厢需要更多的座位都会与民航客机的经济舱相若,并可根据需求增加或减少行李

容量和座位数目。至于一等车厢的座位将如客机的商务舱或公务舱。而每个座位底部垫子翻转后可作为靠墙桌、衣架、附加存物位、推拉桌或无靠背椅使用。而车厢照明可让乘务员控制灯光,通过增加或降低照明强度或改变灯光颜色为旅客创造完美的气氛。列车内部所用的物料有良好的耐火性、有毒烟雾释放量低的特点,坚固耐用,提高旅客的安全性^[18]。图11表示BOMBARDIER的ZEFIRO系列(ECO4计划)。

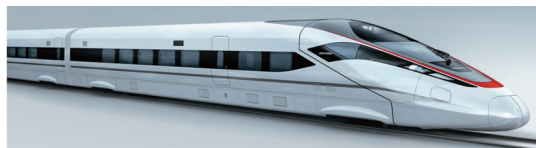


图11 BOMBARDIER的ZEFIRO系列(ECO4计划)^[20]

Fig. 11 BOMBARDIER ZEFIRO series (ECO4 program)^[20]

主要具备如下特点:独特的气动外形设计;最低能量消耗;符合欧盟标准的宽车体设计;最多可以提供4种不同的电压功率模式;可满足跨国界的设计模式;可以设计到664个座位/(8车编组);1336个座位/(16车编组);具有高速卧铺车等。

其他的国家,比如西班牙、瑞典和韩国等也结合各自国家的高速铁路技术特点,分别进行了高速列车的研制。限于论文研究的篇幅具体情况可以参见相关研究文献,在这里不再分别赘叙。

4 未来高速列车的设计思想

德国西门子、日本联合财团(川崎、三菱为代表)、法国阿尔斯通、加拿大庞巴迪,这些国际轨道交通的制造业的跨国巨头高速铁路车辆技术世界领先,目前已经处于第4代高速列车技术,关键在于其产品的设计理念领先^[1-8,21,22]。这些国家在高速铁路的技术上各有优势和劣势,也各有自己鲜明的技术特点。简单地总结这些国家的设计理念基本上都异曲同工,围绕的还是能源、效益、经济和生态的“环境友好性”研发理念,这些理念贯穿于各个产品的设计环节。实际上,中国2005年最早签订合同引进的CRH2-200属于E2系(日本新干线1997年技术产品);2007年引进的CRH3-300技术属于德国VELARO-CN技术(德国西门子2007年制造的第三代技术产品),后者引进的技术明显要较前者先进。据此构想,未来中国的高速列车的新一代产品应该

立足于国外第4代高速列车的产品技术基础之上,结合中国自身的技术特点和原始创新技术,产品的核心思想预测简单地用下图12所示表述。

近10年来,由于中国高速铁路技术的迅猛发展,国内外铁路专家面对庞大的中国高速铁路市场

进行了很多层面的技术博弈,尤其在动车组研究技术方面也在寻求很多重要的技术突破。拥有原创性技术和自主知识产权的中国高速铁路车辆产品逐渐增加,固有的设计思维和传统经验的束缚被逐渐打破。

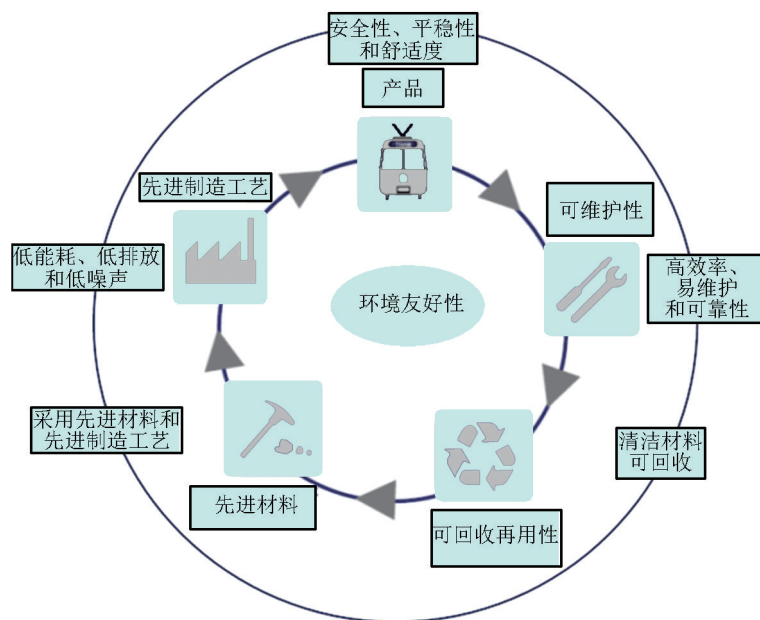


图12 新一代中国高速列车设计的核心思想

Fig. 12 The core design thought of Chinese new generation high-speed train

尤其,针对高速铁路车辆产品的重要技术发展方向和需要解决的关键技术难题,各个国家都设立了不同层面的大型国家计划项目予以支撑。比如中国第一个轨道交通领域的国家级计划项目(973计划项目,项目号2007CB714700)“高速列车安全服役关键基础问题研究”(西南交通大学张卫华教授为首席科学家,2007—2012年)正好覆盖整个中国高速铁路发展的飞跃时期,进行了大量的科学试验和关键基础的技术问题研究(涵盖6个主要课题,几十个关键技术课题研究方向),从不同的技术层面上,指导了中国高速铁路的技术的正确发展方向。国家后续还资助了针对不同高速列车关键技术问题的国家级973计划项目、863计划项目、两部行动计划等。比如结合具体的高速检测列车产品(也称为CIT400计划项目,28个子课题)863计划项目(2012年结题);比如中国中科院力学所主持的500 km/h高速列车关键技术的973计划项目等等。

面对未来的国际、国内高速铁路激烈的竞争市场,各个国家在近5年来,从不同的角度和技术层面

积极吸收和运用当代先进科技成果,进行技术创新,其深度和广度可以称得上一次跨时代的高速铁路技术革命。比如中国提出的绿色生态设计列车;德国逐渐完善的VELARO-D高速列车设计平台;日本面向国际高速铁路市场的环境友好性概念列车(efSET、E7系列车);法国融入最新技术的AGV列车(铰接式、发动机分置和能源反馈技术),庞巴迪的ECO4概念列车ZEFIRO,韩国KTX-400计划项目中采用的碳纤维车体技术等等。在这些最新研制的列车中,牵引供电方式经历交流、直流,交直流混合以及未来燃料电池为动力方式的不断转变。采用宽体的车体技术和独立轮对的技术实现低地板和无台阶的动车设计,能量反馈和再生制动等技术等等。未来的高速列车已经面临既要保证车辆应有的安全性、平稳性和舒适度,又必须要保证高效节能和环境友好性(低能耗、低排放和低噪声);材料的多样性和可回收性(要求采用低污染的水性涂料)等复杂技术的要求。

5 高速铁路车辆关键的基础技术

国际铁路车辆设计和制造理念已经由传统的企业生产为导向,向系统集成设计方向转变;由组装式设计向模块化设计转变等。这就需要建立完善的总体系统集成设计体系。从各个系统的概念设计、项目管理到售后服务要进行全程的跟踪和管理。以产品功能设计为中心,拓展到RAMS(可靠性—reliability、可用性—availability,可维修性—maintainability、安全性—safety)及LCC(全寿命周期成本—life cycle cost)工程设计。满足高速列车检测任务需求,致力整体设计功能最优。高速列车的关键基础技术可以简单地概述为如下几点。

5.1 牵引供电技术^[1-8,23,24]

对于日益提高的高速铁路车辆运营速度而言,要满足高效和低能源、低排放、低噪声和低污染等众多复杂技术的要求,交流-直流的电力传动技术,以及未来的燃料电池技术的发展成为了必然的选择。牵引供电设备是电力传动技术的关键组成,其中还包括各种电力、电子和电器设备及其辅助系统,体积要降低,结构要求轻量化,而且还需要保证提供高功率(功率质量比是重要设计参数),可以说,牵引供电技术的研究成为首当其冲的一项关键技术课题。以牵引逆变器为例,已经由传统的晶闸管(SCR)、门级可关断晶闸管(GTO)逐步向绝缘栅双极晶体管(IGBT)、集成门级换向晶闸管(IGCT)和智能功率模块(IPM)发展。日本新干线采用的三菱电机,采用交-直-交的单项交流电力传动技术,主要应用于目前的日本300系、500系、700系以及E1/E2/E3/E4系等。逆变器的功率可以达到1 200 kW。西班牙TALGO350型高速列车中采用轴功率大于1 000 kW的智能功率模块IPM技术,降低了功率损失。韩国在引进法国TGV的技术基础上,研制了韩国高速列车KHST,大量采用集成门级换向晶闸管(IGCT)技术;法国在新一代高速列车技术中,大量采用ONIX交流牵引驱动系统,极大提高了电机的牵引功率的同时也使得电机质量轻量化和体积减小。这些牵引动力新技术的采用,不仅减少元器件的数量,也提高了电器设备的质量和可靠性与可用性,降低了维护费用。

5.2 转向架技术^[25-30]

转向架技术,这是整个高速列车设计过程中最核心的关键技术之一。随着动车组功率的增加,在

高速运营的条件下,由于各种振动导致的问题已经成为工程界最受关注的技术难题。比如速度的提高,轮轨作用力急剧增大,轮轨磨耗和噪声加重;轮轨的粘着性能则快速下降,牵引效率下降;制动功率和距离要求增加,这些变化要求转向架必须要具备足够的牵引功率,要求提高运行安全性(防止脱轨)、平稳性和舒适度;要求提高制动能力,降低制动距离,实现结构的疲劳可靠性、可用性和低维护性等。转向架的技术具体可以包括以下几点^[20-22]。

1)结构轻量化与抗疲劳性能的选择。结构的轻量化必然导致结构强度和刚度的下降,也导致转向架动力学性能和抗疲劳性能的恶化。这是因为转向架的结构参数(质量、转动惯量和质心位置)的选择极大地影响着转向架的动力学性能。转向架的质量主要分为簧下质量和簧上质量。为了降低车辆,尤其是车轮对轨道的冲击作用力,需要尽可能降低簧下质量,目前世界高速列车的簧下质量有着明显降低的趋势(轴重小于17 t)。降低簧下质量,就需要考虑采用一些关键的轻量化技术措施,比如采用整体碾压的钢制小半径车轮;采用空心车轴;采用整体铸造的轻型轴箱;电机采用架悬和体悬等悬挂方式。另外,研制轻量化的焊接构架和铝合金的齿轮箱技术也是关键技术。甚至研制其他的复合材料(比如采用碳纤维材料、钛合金等)的构架也成为未来转向架轻量化设计技术的一个重要方面。但是也应该看到,过分追求轻量的同时,必然会导致结构的强度和刚度下降,也导致焊接制造加工工艺的复杂性,结构的抗疲劳性能降低和局部颤振问题也会剧烈增加,导致结构疲劳失效问题的频繁产生,这些需要进行多学科问题的技术优化。

2)动力学悬挂参数的优化。高速列车的稳定性、平稳性和曲线通过性能是衡量其动力学性能的几个主要方面。结构参数的选择和动力学悬挂参数的选择需要进行精心的优化与控制。如何平衡动力学悬挂参数和结构优化设计参数之间的矛盾是关键。比如车辆直线运行稳定性与曲线通过性能之间的在轴箱一系悬挂参数定位刚度的选取上的矛盾问题;二系悬挂参数(空气弹簧刚度和垂向减振器阻尼系数)的选择需要考虑转向架平稳性和相对位移选择的矛盾问题。而悬挂参数选择的确定,在面对不同轨道不平顺线路的激励下,如何继续保持良好的动力学特性也面临着技术挑战,这就要求进行主动和半主动悬挂控制技术的选择

与优化,解决实际线路运营过程中的高速运行和平稳度、舒适度及曲线通过性能(防止脱轨)。在未来主动控制悬挂技术和半主动控制悬挂技术依然是提高车辆运动性能和改善转向架振动特性的关键技术之一。

3)适应多标准的兼容性设计问题。目前,为了争夺国际高速铁路市场,西门子、阿尔斯通、庞巴迪,日本川崎等公司均要求高速铁路产品满足不同的国际和区域的设计标准。比如日本最新研制的高速列车E7系就需要同时满足JIS标准、EN标准和美国设计标准进行设计,并重点进行350 km/h速度下稳定运行的技术参数研究;构架焊接要求满足AWS标准(美国焊接协会标准);为了提高舒适度和抑制车辆曲线通过时车体横向摇晃的严重问题,装备上可以防止车体摇晃的横向稳定主动控制装置;另外为了安全运行,每台转向架安装4个抗蛇形减振器的冗余设计模式。基础制动装置采用中心部紧固式的制动盘,以及列车启动时的卡钳制动装置,实现轻量化设计的同时,提高零部件的耐久性。采用全主动悬挂控制装置,主要目标是降低高速运行产生的空气激振力的影响,同时安装有更好减振性能的全主动控制系统。该系统通过装备作动器(Actuator)直接控制作用载荷抑制车体的横向振动。日本川崎公司在新一代高速列车中采用了独特设计和开发的小型电磁式作动器。在高速运行区域,有时由于抗蛇形减振器的故障及零件性能的下降,可能会导致转向架的运动不稳定,产生蛇行运行的危险状态,就必须安装异常的检测装置(失稳检测装置),主要检测转向架、车体振动、轴箱轴承、齿轮箱润滑系的温度监控等。由于转向架技术涉及的层面比较宽,相关的关键技术可以参见一些技术文献。

5.3 车体设计技术^[32-45]

1)气动外形和气动性能的设计与优化。由于空气阻力与车辆运行速度的2次方成正比且逐步增大,在高速运行时,能耗巨大,且空气阻力远大于轮轨滚动阻力,必须要进行气动性能的设计和优化。降低空气阻力和噪声影响,不仅可以实现节能和高效,而且以降低阻力的设计为目标,还可以影响到其他结构设计方面的要求,比如车体、转向架等主要部件的结构轻量化设计以便于降低机械运行阻力;降低主电路容量以节约能耗等。隧道微气压(隧道出口处的气爆声,引起周围环境振动和噪声

现象,微气压强度与列车进入隧道速度的三次方成正比关系),隧道内气压扰动(对车辆运行稳定性影响较大,且隧道内气动激振力加大车体的晃动),隧道内压力变化(内外压差的动影响)等问题也需要展开专题研究(车体项目中的核心研究内容之一)。头车外形的设计一直是各个国家关注的热点,也是代表一个国家的文化精髓所在。在前面已经对各个高速列车代表性国家的高速列车进行了介绍(可以看出日本的头车外型处于多变,但是整体上可以看出其主要还是仿真于海洋生物的外形;法国的AGV和德国的VELARO-D系列车辆的外形变化不大,头型基本上都是经过大量风洞试验和气动性能优化设计技术分析的结果,限于篇幅本文不在此赘述)。

2)高速列车的气密性技术。高速列车的车体密封技术是车体的关键技术,整车的密封性尤其是气密性问题是车体的关键性技术之一。高速列车的密封性,实际上指的是车辆的空气压力密封性,一般称之为气密性。整车气密性是指在列车完成整备状态,即在安装厕所、供水系统、车窗和车门等之后和关闭列车与外界相通的所有开孔(包括通过门和空调设备的开孔),车内压力相对车外压力变化的密封性能。高速列车运行速度的提高,使得对高速列车的车体要求也越来越高,高速列车运行中的密封性问题越来越引起人们的重视。影响气密性的因素很多,除了端门、侧门、车窗等与外界相通的结构外,在车体的四周还有许多与外界相联系的各种接口。高速列车的密封技术主要包括4个部分:固定部分,主要指车体、车窗和通线口等,包括采用挤压型材料的焊接问题;玻璃安装部位的密封性问题,通线口的密封问题等;活动部分,主要指车门,如何采用密封胶条保证气密性,以及采用塞拉门和密封锁紧机构;排水部分,设置空调排水孔,厕所排污孔的密封;排气部分,主要指空调换气装置。简单地说车体密封问题包括:通线口(各种电缆、信号线等)、通水口(空调排水孔、厕所排污口等)、通气口(空调换气装置等)以及其他各种需要与外界联系的封口类型。因此,每个列车车厢的不同部位存在着许多不同尺寸和不同类型的封口。研究不同类型封口的气密性是评估整车气密性的基础,进而建立一种统一的气密性评价标准,形成一个对高速列车评价的技术体系也是车体设计的一项重要技术内容和课题。

3)车体结构的设计与开发。对于车体结构等主要部件,首先要求满足适应不同的结构设计标准,比如国际标准和欧美等区域性标准的强度要求。其次从节能的观点出发,要求实现车体结构轻量化设计,并且提高材料的可再生利用和应用水性涂料等。具体的一些技术要求可以简单地阐述如下。

a.提高车体振动性能,保证其良好的动态特性。采用宽车体和轻量化的动车组设计技术是目前国际高速列车新一代产品的主流方向。也可以说,提高车辆的安全性、舒适度和平稳度,一直是车辆动力学的研究核心所在,而如何保证轻量化的车体具有良好的振动特性也是其关键的技术课题。如何在车体轻量化设计与提高强度、刚度设计标准之间的矛盾问题的平衡和优化,保证设定适当的目标刚度,在满足强度(动强度和疲劳强度)的基础上,设计出满足轻量化且具有最佳刚度的车体也是核心可以研究的内容(在结构设计、载荷时间历程和新型材料之间的选择与优化)。避免车体与转向架系统、车体与车下悬挂设备的共振破坏问题是关键技术课题,车体座椅的优化设计(侧重动力学性能)与人体舒适度之间的平衡问题等也需解决。另外,内外压差的波动对车体疲劳性能的影响也是重点。内外压差的波动不仅会使得车体产生明显鼓胀变形,而且频繁进出隧道可能会导致车体疲劳破坏,日本专家认为车体内外压差频繁波动是导致车体结构发生疲劳破坏问题的主要原因之一(可能源于日本隧道的小截面设计和隧道多发线路比较多)。如何开发出适应小截面隧道的严格技术要求,既要满足轻量化设计又要保证一定的疲劳强度的车体也是核心研究内容。

b.进行抗碰撞车体结构的设计。高速列车车体结构的抗碰撞性能设计的要求,不仅包括同类编组车辆,车辆与站台和护栏,还包括与其他类型的小型车辆以及小变形体、小型障碍物,如鸟、石子等一系列抗碰撞性能的设计。

c.防火、阻燃性能及温差适应性能。车辆在不同地区的极端气温和气候条件下的车体技术要求,比如严寒地区的冰雪对结构性能的影响;沿海地区潮湿空气对车体结构材料的腐蚀问题研究等等。

d.提高车体材料可再生和利用性。比如日本新干线7000系列车选择的主要材料屈服强度高,可以应用在强度要求高的车体部位,但是由于其含有

锌,不利于再生利用,有待解决。其6000系和5000系车辆研制过程中,水性涂料的应用也是有待解决的研究课题。传统的车辆涂装材料中,一般使用有机溶剂系的涂料,但是由于采用了挥发性的有机化合物容易导致周围环境破坏问题,新一代产品中已经计划采用水性涂料,利于环境。

e.降低噪声研究。高速列车的噪声问题主要包括气动噪声和轮轨滚动噪声,以及其他机械振动导致的噪声。弓网系统导致的气动噪声需要加强其气动外形优化设计和耐磨材料的选择;空调进出风口导致的噪声;动力设备制造的噪声等。由于目前动力分散式是高速列车设计的主流方向,而动力设备分散,导致的噪声源增多,如何进行有效的噪声控制研究,也是环境友好性的研究内容。有时需要高速铁路大系统进行配套设计(比如声屏障等)。另外车体室内噪声(含设备噪声、电磁噪声等)也需要加强车体内部的密封性研究及成本、质量适合的降噪静音设计策略,达到国际和区域设计标准的隔声要求。

4)其他关键技术^[46-50]。高速列车是一个非常繁杂的技术系统,比如国家863计划CIT400项目中就涵盖了28个关键技术研究方向,这里限于篇幅只是简单列出了部分关键技术,其他技术一样重要,比如列车牵引制动技术与电气设备控制技术、智能通信与故障实时诊断技术、海量数据传输技术等等。各个国家在高速列车的制动技术上采用了不同的制动方式,比如新型制动装置的研发,主要设定为再生制动,并采用指令方式的空气制动方式,装备常规制动、非常规制动、紧急制动和停车制动。针对极端气候环境下(刮风、下雨、下雪等)车轮与钢轨之间的粘着力不稳定性问题的解决。如何调整编组车优化运行方式,达到整体调节制动的编组控制方式运行等运输规划技术。350 km/h的受电弓的设计和优化技术,需要设计开发出耐磨性、跟随性好、低噪声的最佳气动外形结构的受电弓。采用减轻接触导线磨损量的碳系换班和自降弓装置的设计应用(一旦滑板破损时使用)。车辆信息控制的设计和实时健康监控技术(如加速、制动指令的准确传输、空调服务设备的控制、各设备状态的监控,车上试验等检修支持等,信息传输网络的研制)。研究电动空气压缩机采用无油往复式压缩机或者螺旋式压缩机等等,限于篇幅无法一一介绍。

6 结语

高速列车关键技术较多,本文只能以点带面,根据相关最新文献的研究基础,针对代表性高速铁路发达国家在高速列车设计上采用的部分先进技术,对我国未来高速列车的发展方向提出一些浅薄的建议和展望。客观地说,高速列车关键技术只是高速铁路技术中的核心部分之一。而国外先进高速列车技术,也可以说动车组设计技术涵盖的范围要远远多于本文阐述的内容,比如列车网络通信技术、制动设计技术、电磁兼容技术、故障实时诊断技术、空调设计技术,外形、内饰设计及人机工程技术、列车供电技术等等。根据前面章节的概述,中国高速列车技术的发展方向,就是建立新一代中国高速列车的先进集成技术设计平台。该平台水平应该类似于欧洲高铁的第4代高速列车先进设计平台,比如德国的VELARO-D设计平台。在此集成设计平台基础上,面向国际高速铁路市场研制出具有环境友好性特点的高速列车等。且在产品设计过程中,逐渐融入自身民族的传统文化和特色,真正实现高速列车产品的“环境友好性”。环境友好性设计不仅仅是在低能耗、低噪音、低污染以及可持续发展方面。它也意味着与城市背景下充分的视觉和谐,针对不同国家的文化设计出一些独特的解决方案。

对于未来中国高速铁路技术发展要形成具有中国风格和标准的中国高速列车,特别保持足够先进和安全可靠的动车组的设计技术,科研人员还有一条极为艰巨的道路需要走。这不仅要求国家继续加大技术投入,针对高速列车相关的基础科学和应用科学问题提出良好的解决方案,而且要求新产品研制人员,不断进行技术原始创新,融入新的科学成果,在多学科优化的基础上,研制出具有完全自主知识产权的高速列车技术。只有这样才可以保证中国高速列车核心技术的创新性和前瞻性,才可能面对未来国际市场的激烈竞争,满足未来国际市场对高速列车的更加严格要求和巨大竞争压力。未来高速列车的技术可以简单地归结为如下几点。

1)设计理念具有足够的先进性和前瞻性。即要求整车的总体设计水平具备足够的先进性和前瞻性。不仅需要保证高速列车设计技术的环境友

好性(也可以说生态设计、绿色设计),而且要求高效率、低能耗、低排放、低污染;保证车辆在高速运行时实现能源再生和能源反馈技术。对车内车外环境的电磁干扰和振动噪声、气动噪声的影响降低到合理水平。高速列车必须要从多学科优化设计的角度真正实现高速列车总体技术条件及集成技术总体设计的优化和先进性,在此基础上确定新一代高速列车各项关键的技术设计参数。

2)中国新一代高速列车必须要拥有自己具有标志性的新一代的产品设计平台。平台设计理念主要基于模块化、标准化和定制化设计。模块化可以满足客户不断变化的需要(例如,通过增加列车长度,采用宽车体技术等);标准化允许降低采购成本与减少交货时间,并提高产品品质;定制化提供给客户定制产品,提供选项设计系统,允许不同的设计方案,可以为客户定制不同的产品特征,例如头型设计,车体外饰和内饰(适应对方特定的民族文化),座椅布置,旅客设施和司机室以及控制台等设计。

3)保证高速列车运行足够的安全性、稳定性、舒适性和可靠性。采用先进的材料(比如铝合金、镁钛合金、复合材料和碳纤维等)和先进的焊接制造加工工艺;满足高速列车安全服役前提下的关键技术问题的解决。必须要考虑高速列车在复杂载荷环境下的振动破坏问题(车-线-桥-风的耦合振动问题,如地震条件下的列车安全运行问题,危险线路段的防脱轨装置的设计);比如关键结构部件的疲劳失效问题,振动噪声问题,曲线通过的稳定性(防止脱轨);高速列车的碰撞安全和吸能装置的设计问题,比如高速列车运行时与小型物体的碰撞安全问题(飞鸟,小石块,小型异物等);保证高速列车在极端气候条件下(严寒、暴雪、大风沙等)安全运行机制。

4)高速列车应该具备的良好空气动力学特性和气动性能。保持高速列车具有良好的气动性能的同时(良好的横风稳定性),降低气动噪声,保证进出隧道内外压差波动对车体结构安全问题的影响,列车高速会车的安全问题等。

5)保证牵引供电等电器和通信信号等高速铁路配套设备的安全可靠性;要求高速列车具备良好的制动性能;具有足够的故障实时诊断能力,实现结构损伤和裂纹的动态监测等。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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):7-12.
- [3] БЕЛОВ Л Ф.世界高速铁路干线的现状与发展[J].国外铁道车辆,2010,47(2):1-5.
- [4] 李春阳.高速电动车组的发展动态及我国应用探讨[C]//推进铁路新跨越加快经济大发展—中国科协2004年学术年会铁道分会论文集.2004.
- [5] 仲川·滋.欧洲与日本高速铁路的发展动向[J].变流技术与电力牵引,2000(3):1-6.
- [6] 石津一正.欧洲高速车辆发展动向[J].国外铁道车辆,2000,(3):1-6.
- [7] 董锡明.近代高速列车技术进展[J].铁道机车车辆,2006,26(5):1-11.
- [8] 佐藤·芳彦.欧洲高速列车最新技术发展动向[J].国外机车车辆工艺,2010(2):1-6.
- [9] Masashi Ishizuka Kawasaki's. Approach to US high speed rail [C]// Japan :Rail Conference Kobe,2013.
- [10] Takeshi Kawasaki, Takashi Yamaguchi, Toshihiko Mochida. Railway-vehicle technologies for european railways[J].Hitachi Review,2008,57(1):61-65.
- [11] Yasushi Yokosuka, Takenori Wajima, Sumiyuki Okazaki. Versatile, environmentally-friendly, and comfortable railway systems [J]. Hitachi Review ,2008,57(1):9-17.
- [12] Katsutoshi Horihata, Hirofumi Sakamoto, Hideo Kitabayashi, et al.Environmentally friendly railway-car technology[J]. Hitachi Review, 2008, 57(1):18-22.
- [13] 栗山敬.日本为国外开发的新型高速铁道车辆“efSET”[J].国外铁道车辆,2011,4.
- [14] 李瑞淳,王 駿.德国高速列车综述[J].国外铁道车辆,2005,42(6):1-6.
- [15] Dipl.-Ing. Martin Steuger. Velaro-customer oriented further development of a high-speed train[J].Erlangen ZEVrail, 2009, 133(10):1-16.
- [16] Jochen Eickholt.On track to target achievement[D]. London : Capital Market Day,2013.
- [17] 戴维·布里金肖.法国新一代高速列车AGV[J].国外铁道车辆2001(4):25-27.
- [18] Alstom Transport. The AGV, a cutting-edge technology integrator[J]. Inno-trans Berlin.September,2008.
- [19] Salwa Fouda.ECO⁴-bombardier's new formula for total train performance[C]//Canada :Bombardier Calgary, 2009.
- [20] Bombardier Inc. Annual information form for the year ended December 31, 2013 [D]. 2014.
- [21] 海因茨·库尔兹.德国新一代ICE高速列车ICE3[J].国外铁道车辆,1998(3):21-23.
- [22] 海因茨·库尔兹.ICE3的新设计思想[J].国外铁道车辆,2004(1):13-18.
- [23] Moshe Givoni. Development and impact of the modern high-speed train: A review [J]. Transport Reviews,2006,26(5):593-611.
- [24] Masyuki Miyamoto. Recent research and development on advanced technologies of high speed trains in Japan[J].Vehicle System Dynamics,2003(3):55-99.
- [25] Maksym Spiraygin, Colin Cole, Sun Yanquan, et al. Design and Simulation of Rail Vehicles[M].USA:CRC Press,2014.
- [26] Paolo Belforte. Numerical simulation for improving the design of running gear: Improvement of vehicle dynamic behavior[C]//Bogie 07 conference, sept 3rd-6th, Budapest, Hungary,2007.
- [27] Morimura T, Seki M. The course of achieving 270 km/h operation for tokaido shinkansen - part 1: Technology and operations overview[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2005, 219: 21-26.
- [28] 李 强,金新灿.动车组设计[M].北京:中国铁道出版社,2008.
- [29] 任尊松.车辆系统动力学[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [30] 陈泽深,王成国.完整的车辆-轨道系统动力学研究是铁路发展的迫切需要(1)[J].铁道机车车辆,2004,24(2):1-8.
- [31] Michael Pepple.Simulation of articulated trains with consideration of elastic car bodies[D].France:Alstom corporation,2003.
- [32] David Wennberg. Multi-functional composite design concepts for rail vehicle car bodies[D]. Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 2013.
- [33] Martin Kozek, Christian Benatzky Alexander .Vibration damping of a flexible car body structure using piezo-stack actuators [C]//17th IFAC World Congress (IFAC.08).Korea, 2008, (6-11):8286-8292.
- [34] Dories Mohr.Efficient modelling and post processing of spot welded railway vehicle car bodies[D].Canada: Bombardier Corporation,2008.
- [35] 公江·茂树.新干线车辆车体的强度和安全性评价[J].国外铁道车辆,2003,40(6):12-16.
- [36] 伊藤顺一.改善空气动力学性能实现新干线的高速[J].国外铁道车辆,2002,39(3):9-12.
- [37] Tado Takigami, Takanhiro Tomioka, Joel Hansson.Vibration suppression of railway vehicle carbody with piezoelectric elements[J].Journal of Advanced Mechanical Design System and Manufacture,2007(5):649-660.
- [38] Takahiro Tomioka, Tadao Takigami, Ken-Ichiro Aida. Modal analysis of railway vehicle car bodies using a linear prediction model [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2009, 3(6): 918-931.
- [39] Stribersky, Moser F, Rulka W. Structural dynamics and ride comfort of a rail vehicle system[J].Advanced Engineering Software, 2002(33):541-552.
- [40] Jung-Seok Kim, Sang-Jin Lee, Kwang-Bok Shin. Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody [J]. Composite Structures,2007,78:468-476.
- [41] Tsuyoshi YAGI,何晓蕾.用于铝合金车体外壳焊缝的疲劳设计图[J].国外铁道车辆,2008,45(3):23-28.
- [42] David Wennberg. A light weight car body for high-speed trains [D]. KTH University,2009.
- [43] 田红旗.列车空气动力学[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [44] 王 玮,王 喆.韩国高速铁路列车外观设计分析[J].包装工程,2014,35(14):28-31.
- [45] 徐伯初,李 洋,管聪颖.高速列车造型的美学特征分析[J].包装工程,2012,33(2):23-26.
- [46] 具·嶋,和·也.静电测定法传感器在铁道车辆上的应用[J].国外铁道车辆,2013,50(1):26-31.
- [47] 徐伯初,李 洋,管聪颖.高速列车造型的美学特征分析[J].包装工程,2012,33(2):23-26.
- [48] 具·嶋,和·也.静电测定法传感器在铁道车辆上的应用[J].国外铁道车辆,2013,50(1):26-31.
- [49] Michael Steenberg. Extending the lifetime of rail infrastructure by proper energy management[J].European Railway Review,2010,1,61-63.
- [50] Michael Renner, Gary Gardner. Global competitiveness in the rail and transit industry[D].US:Northeastern University,2010:1-36.

Technology challenges and strategies of the new generation Chinese high-speed railway EMU

Miao Bingrong, Zhang Weihua, Deng Yongquan,
Li Xujuan, Mei Guiming

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

[Abstract] Based on the study on key technical problems and prospect of a new generation of China high-speed trains (electric multiple unit, EMU), the development trend and strategies are discussed in detail. The main contents include: firstly, the advanced design technology and concept of international advanced rail vehicle manufacturers used in the new generation vehicles developing process were introduced. And their respective characteristics of the core technology and its possible future technology development trend were hierarchically studied. Secondly, based on the study of domestic and foreign literatures, combined with the Chinese high-speed rail vehicle development of its own characteristics and the actual situation, some suggestions and specific analysis, which included the traction drive technology, bogie, carbody design technology and other key technical problems were put forward here. Finally, based on the development of a comprehensive consideration of rail vehicle styling trends and design principles, according to the design method of integrated design theory and multidisciplinary optimization, some specific suggestions and strategy of development for major technical challenges in the new generation of Chinese high-speed rail EMU were put forward. In conclusion, through the study of the paper, some useful suggestions were put forward for the future development of high-speed train in China.

[Key words] high-speed railway; high-speed train; new generation; key technology; integrated design; multi-disciplinary design optimization