



论我国高速铁路技术创新发展的优势

沈志云

西南交通大学牵引力国家重点实验室, 成都 611756

E-mail: zyshen@home.swjtu.edu.cn

2011-11-17 收稿, 2012-02-02 接受

摘要 论述我国 2004~2010 年高速列车技术快速发展的成就、科学基础和重大意义. 着重讨论高速列车国家技术创新体系的形成和所发挥的作用. 作为这一创新体系理论指导的是一门新学科: 高速列车大系统动力学. 对这一新学科近几年取得的突破性进展和在建立高速铁路技术标准体系方面所起的作用, 做了简要的介绍. 并在此基础上, 从技术层面, 论述了我国创新发展高速铁路技术的特有优势.

关键词

高速列车大系统动力学
高速列车国家技术
创新体系
和谐号高速列车
高速列车运行安全技术
保障体系
高速列车服役安全可靠度

近 30 多年来, 我国国民生产总值 GDP 增长很快, 尤其进入 21 世纪以后, 直线上升, 2010 年达到 5.5 万亿美元, 超过日本, 成为世界第二大经济体, 与此同时, 城市化率急增至 49.8%. GDP 和城市人口猛增标志我国已进入现代化先进国家行列. 要面对的第一个问题就是在交通运输需求急剧上升情况下, 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? 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, 还是要根据我国国情和绿色交通的原则, 把轨道交通放在骨干的地位? 2004 年国务院提出并及时修订的铁路网规划, 正是适应我国当前经济及社会迅猛发展的形势, 考虑我国特点及长远方向, 发展绿色交通, 以轨道交通为骨干的战略决策.

在 2004~2010 执行规划的 7 年中, 中国高速铁路的发展向前迈了一大步. 建成时速 200 km 及以上高速铁路 8358 km, 其中新建时速 300~350 km 高标准高速铁路 2197 km, 时速 250~300 km 高速铁路 2477 km, 其他 3679 km 主要是既有线提速到时速 200 km 以上. 引进和研制和谐号高速列车 1000 多列, 最初的 CRH 系列主要是通过联合设计生产从国外引进的.

随即通过消化吸收再创新自主研发成功 CRH300 系列的高速列车, 最高时速达到 350 km. 经过京津、武广、郑西线上实际运用和大量试验之后, 又创新开发了新一代 CRH380 系列的高速列车, 在沪杭、沪宁及京沪线上实现了长距离时速 350~380 km 列车. 中国在这 4 年中商业运营 3 亿多公里, 运送 6 亿多次, 最高时速达到 350 km, 除一次路外撞人事故外, 没有发生过人身事故.

应当说我国高速铁路能向前跨出这一步是很不容易的. 多年来中国铁路苦于融资渠道不畅, 国家投入很少, 而票价几十年不变, 1994 年, 铁道部全行业亏损. 铁路靠自身很难发展, 故严重滞后, 成为我国经济和社会发展的瓶颈. 在国家大力支持下, 到 2010 年底, 时速 200 km 以上的高速铁路, 只有 8358 km, 相对于高速公路实在太少. 我相信国家对高速铁路的建设会支持下去.

近年来, 根据国务院的决定: “引进先进技术, 联合设计制造, 打造中国品牌”. 在政府统筹下, 一致对外, 实现了全新的引进, 强调技术转让, 引进资金中含研发经费(不是指给外商的技术转让费), 这在以前引进项目中是没有的. 通过国内制造, 提升了企业

现代化水平,创建了现代化的高速列车制造基地.创造中国品牌,享有自主知识产权.短短几年,高速列车引进和发展,走出了一条中国自己的新路,效果显著.

能够快速发展最本质的原因是建成了高速列车国家技术创新体系,实现了政府统筹下的产学研相结合.技术创新的主体是企业,以四方、长春、唐山3个主机厂的现代化为龙头,30个配套厂为骨干,500多家相关企业组成的高速列车生产链是创新的强大基础.为这个主体服务的有全国国家级、省部级和企业内部相关实验室、研究所和研发部.在政府统筹下,按国家规定,建立课题,展开研究,并组织实施(图1).

首先,这个体系提供了一个全新的理论,即:高速列车大系统动力学^[1-5],把高速列车同轨道线路、接触网和周围稠密大气环境耦合在一起,进行模拟仿真,用来确定高速列车和所有相关系统的动态特性和相关关系.这是一个包含多刚体、连续体、流体的高维、强非线性、参数时变、随机输入、不定常流场的复杂巨系统,这个系统的仿真计算、系统控制和系统全局优化的理论和试验研究构成一门崭新的工程学科:高速列车大系统动力学.这门学科近年来在研究上取得了突破性进展.在列车系统建模时,首

次提出了基于循环变量法的高速列车系统动力学建模和积分方法,打破了商业软件对列车建模自由度的限制,使列车系统动力学仿真计算成为可能;在受电弓-接触网耦合系统建模时,不仅发展了基于奇延拓展的接触网建模方法(Zhang's model),同时发展了考虑接触形貌的弓网接触模型,使弓网仿真更加精确;在传统空气动力学基础上,首次考虑列车动力学与空气动力学行为耦合,从而可以研究在列车姿态变化时,气动力作用对列车运行安全的影响.基于创新的建模方法,研制了世界上第一套考虑轮轨耦合、弓网耦合、流固耦合和机电耦合高速列车耦合大系统动力学大型仿真软件.软件计算的结果经过了大量试验验证.

这些非常重要的突破性进展为我国高速列车技术的研究开发树立了科学理念,奠定了科学基础,提供了科学的分析工具.成为制定某一速度目标下,勘测设计、基础工程、装备制造、通信信号、系统集成、运营管理6大系统技术标准的科学根据^[3].我国高速铁路多属新建,新车新路,有利于实现理论要求的技术标准,这是日、法、德等国不具备的条件,也是我国高速铁路快速发展的根本原因.

图2表示列车同轨道线路、接触网和周围大气耦合的3大关系和共同初变量 V ,即列车运行速度. V 将

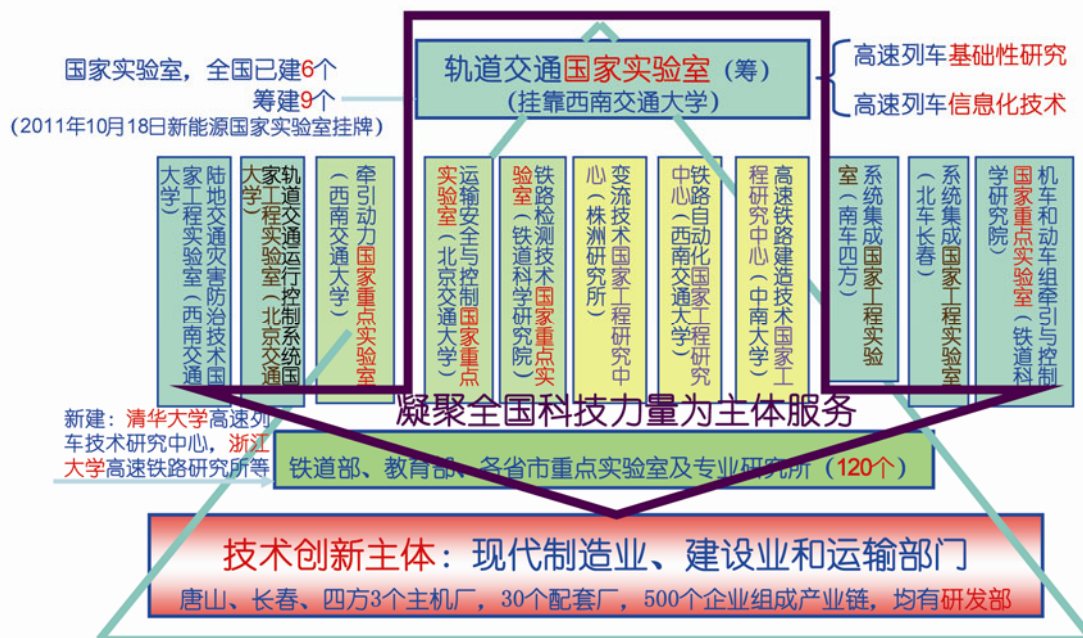
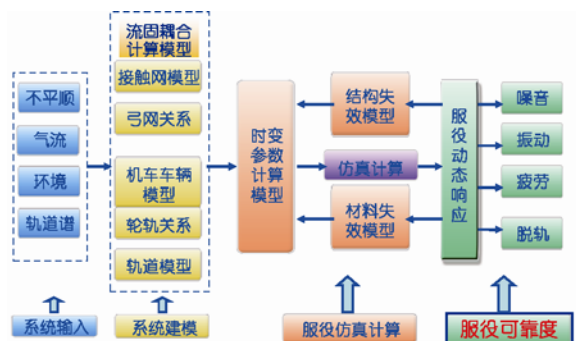
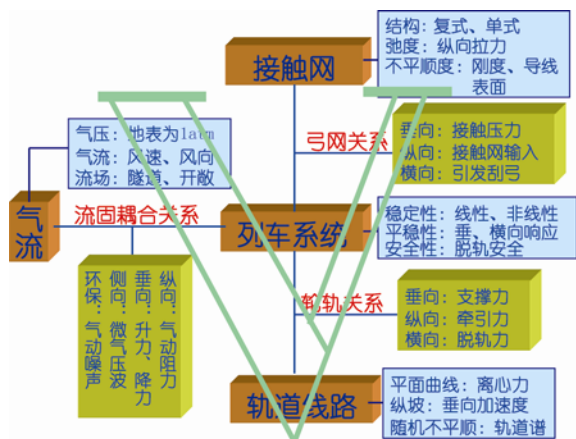
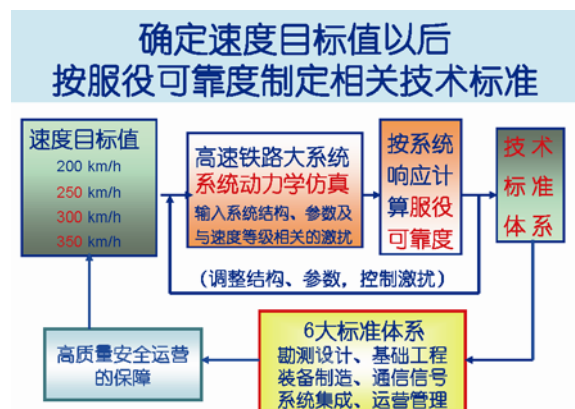


图1 高速列车国家技术创新体系



轮轨关系^[1,5,6]、弓网关系^[4]和流固耦合^[7]关系又进一步耦合起来。图3为这个系统的计算框图。因为系统参数有时变性，必须反复计算，才能得到系统的动态响应。按动态响应计算出服役可靠度后，即可得到该列车在该速度下的安全评估的数量化指标。所有这些计算都经过大量试验加以验证^[2]。如CRH380开发过程中，在工程设计阶段，进行了260余项试验研究，零部件研究开发中，进行了650余项试验研究，新头型研究、试验了20几个方案，在武广、郑西高速线上，做了20类279项试验研究，沪杭线上，最高试验速度达到416.6 km/h，京沪先导段最高试验速度达到486.1 km/h。

通过系统仿真计算可以确定与高速列车运行相关的6大系统的技术标准(见图4)。在铁道部统筹下，搭建了6大技术平台。以确保所定目标速度下安全行车为宗旨，分别落实这些技术标准，并组织统一的检查验收。这就是高速铁路的安全技术保障体系。任何部分出现异常，都可能发生情况不同的故障。正常情



况下，这些故障都应当导向安全。其次，这个体系(见图1)凝聚着全国有关科技力量为高速铁路技术服务。除挂在西南交通大学的国家实验室、国家重点实验室和工程研究中心以外，还有遍布全国的国家级、省部级和企业的研究单位。还有同济大学、清华大学、浙江大学、中国科学院力学研究所、中国科学院金属研究所等120几个省部级重点实验室及研究单位在科技部、教育部、铁道部、国家发展和改革委员会等的统筹下，联合成为一个整体，共同为高速铁路企业服务。这样的政府统筹下产学研结合的国家技术创新体系，是我国独有的模式。

国家技术创新体系的能力在开发CRH380技术上充分地显露出来。这是科技部、铁道部联合行动计划支撑的目标产品，吸收了全国千千万万科技人员及职工参加，在极短时间内，研制成功世界一流产品。最高运营速度：380 km/h，最高运营试验速度：486.1 km/h，脱轨系数等一系列参数都达到了规定指标。许多人不敢相信这是我们自己开发的产品。事实是最好的说明，前述业绩中有CRH380参加的约有1亿多公里和运送2亿多人次，最高时速350 km，没有发生人身安全事故。迄今为止，没有哪个国家有这样的商业运营业绩。表1按实际运营速度将国际上的高速列车分为三代(见表1)。可以看得出来，21世纪以来各国都在研究350 km时速的第三代高速列车^[7]，但无一投入商业运营。我们引进第一代、发展第二代、创新第三代，而且第三代有了相当规模的商业运营业绩。

这几年的最大进展与其说是成功研发了CRH380这样出色的高速列车，不如说是建立了能研究开发这些车的国家技术创新体系。后者具有更加

表1 世界高速列车技术发展比较表^[2]

分代	日本	法国	德国	中国
第一代 250 km/h	S-0, 210 km/h, 1964 S-100 270 km/h, 1975 E2, 275 km/h, 1997	TGV-PSE 280 km/h, 1981 TGV-A, 300 km/h, 1996	ICE-1, 250 km/h, 1991 ICE-2, 280 km/h, 1996	CRH1, 200 km/h CRH2, 200 km/h CRH5, 200 km/h 2007 引进第一代
第二代 300 km/h	S-500, 300 km/h, 1998	TGV-地中海线 320 km/h, 2001 TGV-东部线 320 km/h, 2007	ICE-3, 300 km/h, 2002	CRH2~300 CRH3-300 300~250 km/h, 2008 发展第二代
第三代 350 km/h	Fastech360 1998~2009 未实现 360 E5, 300 km/h 2011, 2012, 320 km/h	AGV360 350 km/h, 2008 未运营 2013 年前 300 km/h	ICE350E 350 km/h, 2006 未运营	CRH380-A CRH380-B 350-380 km/h, 2010 创新第三代 已投入商业运营

深远的意义。有了能凝聚全国科技力量，又能落实研究成果的创新机制，即使目前陷入低谷，也会在不远的将来走向高速铁路技术的顶峰。

列宁曾经在实施新经济政策时说过：“退一步，进两步”。这句话用于现在中国的高速铁路正合适。今天退一步是为了明天进两步，把速度退下了，彻底清理整顿，大力改进，巩固和加强安全技术保障体系，就能更好、更健康地发展高速铁路，实现更安全的高速度。

有人说不是速度越高越好，时速 270~310 km/h 是最佳经济速度。非也，提高速度是交通运输永恒的主题。表1表明，进入21世纪以来，世界高速铁路强国都在研究时速 360 km 的高速列车，受既有高速铁路线路条件的限制，才不得不把商业运营速度降下来。法国修了新线，时速才提为 320 km，但老线仍为 300 km。日本和英国都在计划修 402 km(250 英里)时速的高速铁路。北京交通大学的赵坚教授在京沪高速铁路工程专家评审会议上介绍说：“国外审查一个高速铁路项目主要看节省多少旅行时间，如果节省的时间其社会价值超过高速铁路的建设成本，项目就可以通过。”在稠密大气层中，只要不超过时速 400 km，都可能在系统优化中找到适当的经济速度。京沪高速铁路计划年运量双向 1.6 亿人，由时速 350 km 降为 300 km，票价可减 5%，但旅行时间由 4 h 增加到 5 h。每人多花 1 h，1.6 亿人一小时的社会价值，即使用我国目前的最低工资标准计算，也是十分惊人的。

速度是高速铁路大系统的自变量，按目标速度优化的铁路系统，目标速度就是经济速度。日本当年认为经济时速是 210 km，极限速度是 270 km，很快他们就修订了自己的看法。另外，高速铁路安全是靠技术来保障的，并不是说速度越低越安全。“723”事

故后不久，印度也发生了追尾事故，车速只有每小时 30 km。只要经过严格检查，彻底整改，把安全技术体系及监控机制落实了，就能保证安全运行。在此前提下，回到设计时速 350 km/h 甚至更高，达到 380 km，应当是顺理成章的事。

从技术层面上说，中国高速铁路具有明显的发展优势：

(1) 高速铁路成网络，有最大客流。按照中长期铁路网规划，我们要建设的是一个高速铁路网络，能覆盖 90%以上人口，连通所有 50 万以上人口的城市。高速铁路成网具有最大运量诱发能力，必将成为绿色交通的骨干。我国人口很快会超过 14 亿，城镇化率即将超过 50%，将来还要达到 60%或更高。高速铁路网诱发的客运市场是世界最大的，在如此强大的市场支持下，即使全球高速铁路亏损，中国高速铁路也会盈利。

(2) 线路标准高，有提速空间。就建成以后很难改变的最小曲线半径、线间距及双线隧道截面积 3 项主要指标而言，我国的标准在世界上是最高的(见表 2)^[7]。日本高速铁路建设最早，标准最低。当前世界潮流是要发展时速 350 km 及以上的高速列车，日本就遇到线路标准低的限制。其实，高速铁路成本同高速公路差不多，以后会低于高速公路，因为后者占地多，征地成本会越来越高。京沪高速铁路建设预算最初是 1300 亿，后升到 1700 亿，最后落实时一下飚升到 2200 亿，主要是征地和拆迁费上涨的缘故。

(3) 基础研究强，有发展后劲。已建成的“高速列车国家技术创新体系”将得到充实提高。轨道交通国家实验室目前虽然还未得到正式批准，但是资金已经到位，业已初步建成，正式启用。基础研究平台，

表 2 高速铁路线路主要标准比较表^[8]

项目	中国 (km/h)		日本 (km/h)			法国 (km/h)			德国 (km/h)		
	300~350	200~250	东海道线 270	山阳干线 300	东北干线 300	东南线 280	北方线 300	地中海线 280	汉维线 250	柏汉线 280	可莱线 300
最小曲线 半径(m)	9000~7000	5500~4500	2500	4000	4000	4000	6000	7700~2000	7000	4400	3500
线间距(m)	5.0	4.6	4.2	4.3	4.3	4.2~4.3	4.5	4.8	4.7	4.7	4.5
隧道截面积 (m ²)	100	92~80	64	64	64	71	100	100	82	82	92

在原有 600 km/h 六轴滚动振动试验台基础上又新建一间基础试验大厅, 新研制的 20 多台试验设备都是世界一流或独一无二的, 能进行开创性研究. 在京沪、武广、京津等线路上正在进行为期 3 年的跟踪试验, 长期积累第一手实测数据, 以便进行高速列车全寿命、全过程的分析和研究. 国家实验室是国家公开的研究平台, 在国家技术创新体系中起引领作用, 相信在全国共同参与和支持下会发挥更大作用.

(4) 信息化进行时, 促进现代化. 运输调度系统在吸取温州 723 事故的教训后, 彻底检查和改进 CTCS2 和 CTCS3 系统, 会使系统进一步完善, 确保列车运行安全.

现在正在进行一项更大胆的尝试, 就是准备建立个性化、全寿命、实时安全监控中心. 其基本思路是: 对投入运营的每一列车的每一次运行, 都实时给出数量化的“服役安全可靠度”指标, 配合调度中心, 进行实时安全评估和监控. 为此, 首先必须把列车变成一个自感知终端. 能感知运行外部环境, 如暴雪、大

风、滑坡、路基沉降等; 能感知实时运动状态, 如位置、速度、加速度响应等; 能感知关键部件的信息, 如疲劳、发热、脱落等. 第二, 要建立可靠的无线传输系统. 克服高速移动、频繁切换、带状覆盖、电磁干扰等困难, 将终端信息实时准确地传到监控中心. 第三, 最重要的是与调度中心平行建立运行安全实时监控中心. 采用超大容量数据库储存和发送海量数据; 采用云计算, 对该次列车和该次运行的动态数据, 进行模拟仿真; 实时计算该列车的服役可靠度^[2]. 对结果分类处理, 实时显示状态, 提供给调度中心, 发出在途预警和指导行车, 保证行驶安全. 还为维修基地提供信息, 为高速列车制造全过程工程科学提供原始数据.

中国高速铁路能有今天不容易, 我们要珍惜得来不易的成果, 要树立信心. 我们需要中国的高速铁路, 世界需要中国的高速铁路. 让我们纠正偏差, 发挥优势, 跌倒了, 爬起来, 再前进, 从低谷走向顶峰, 满怀信心去迎接中国高速铁路的复兴.

参考文献

1 Shen Z Y, Hedrick J K, Elkins A A. A comparison of alternative creep force models for rail vehicle dynamic analysis. In: Proc. 8th IAVSD Symposium, Cambridge, Ma., USA, 1984[C], Lisse, Netherlands, Sweets & Zeitlinger, 1984, 591–605

2 Li Z, Shen Z Y. Progress in high-speed train technology around the world. J Modern Trans, 2011, 19: 1–6

3 张卫华. 机车车辆动态模拟. 北京: 中国铁道出版社, 2006

4 张卫华, 沈志云. 接触网动态研究, 铁道学报, 1991, 13: 26–33

5 翟婉明. 车辆-轨道耦合系统动力学. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2007

6 金学松. 轮轨蠕滑理论及试验研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 1999

7 田红旗. 列车空气动力学. 北京: 中国铁道出版社, 2007

8 钱立新. 世界高速铁路技术. 北京: 中国铁道出版社, 2005

9 李浩鸣, 成舸, 廖洋. 追寻中国南车高速铁路技术自主创新轨迹. 科学时报, 2011 年 10 月 24, 26 日

10 翟婉明, 夏禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用. 北京: 科学出版社, 2011

The superiorities in innovatively developing high-speed train technology in China

SHEN ZhiYun

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

In this paper the importance, scientific foundation and achievements of fast development in high-speed train technology in China in the period of 2004 to 2010 are looked through carefully. The national system of innovation in developing high-speed train technology set up in this period is discussed especially about its important role in application. Theoretically, this system is based upon a quite new science discipline: the high-speed train vast system dynamics, which has got breakthrough advances in this period and provided strong argumentation to the technical standards for high-speed train. The basic aspects of this discipline and the related superiorities in developing high-speed railways in China are reported in this paper.

the high-speed train vast system dynamics, the national system of innovation in developing high-speed train technology, the technical guarantee system for safety of the high-speed train operation, the high-speed train typed “harmonious”, service reliability of the high-speed train

doi: 10.1360/972011-2340