机车电传动 2017 年第 6 期 (2017-11-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №6, 2017(Nov. 10, 2017)

文章编号：1000–128X(2017)06–0001–05

高速列车本构安全保障技术

丁叁叁

（中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111）

摘 要：从贯穿“设计研发—产品制造—运维保障”全寿命周期的高速列车本构安全技术体系架构出发，详细介绍了设计研发过程中的本构安全典型技术项点，尤其是国家先进轨道交通重点专项关注的防火、碰撞及防冰雪技术；结合高速列车产品技术及运维需求前景，展望了高速列车本构安全保障技术的未来发展方向。

关键词：高速列车；本构安全；技术体系；全寿命周期；防火；碰撞；防冰雪

中图分类号：U292.91^{+}4；U298　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.001

Constitutive Safety Support Technology of High-speed Train

DING Sansan

(CRRC Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao,Shandong 266111, China)

Abstract: Based on the constitutive safety technology architecture of high-speed train through "Research and design - Manufacturing - Maintenance guarantee" the whole life cycle, constitutive safety typical techniques of the design and development process were introduced in detail, especially fire prevention, collision and anti-icing technology which concerned by key projects of national advanced rail transit. Combining high-speed train product technology and operation demand outlook, the future development direction of the constitutive safety technology of high-speed train was prospected.

Keywords: high-speed train; constitutive safety; technology architecture; whole life cycle; fire prevention; collision; anti-icing

0 引言

作为最具可持续性的交通运输模式，轨道交通是国民经济大动脉、大众化交通工具和现代城市运行的骨架，是国家关键基础设施和重要基础产业。轨道交通科技的持续自主创新，不仅对我国经济社会发展、民生改善和国家安全起着不可替代的全局性支撑作用，也对建设创新型国家、构建现代综合交通运输体系、在经济社会发展新常态下实现全面建成小康社会目标具有重大意义[1–2]。

安全是轨道交通运营的前提和核心竞争力。尤其随着我国建成世界上最大规模的高速铁路网后，高密度、强耦合、恶劣环境等因素对其运营安全保障带来了巨大挑战，系统研究和发展安全领域技术，加强高速列车全局安全保障，逐步成为推动我国轨道交通发展的大趋势[3–5]。

收稿日期：2017–10–12
基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFB1200403）

在此背景下，我国于 2016 年启动了先进轨道交通重点专项“轨道交通系统安全保障技术”[6]。本专项旨在形成我国自主的、科学的、客观的轨道交通安全评测方法与列车本构安全分析设计体系，搭建行业领先的全息化、智能化、普适化综合安全保障平台：一方面，提升我国轨道交通安全保障能力和经济效益，提高列车运营安全预警完备率，降低交通安全事故率；另一方面，带动以安全保障和高效运维为导向的智能传感、大数据、智能计算等一大批新兴高技术及产业的发展，支撑国家“十三五”发展战略全面实现。高速列车本构安全保障作为专项核心研究内容之一，在系统研究相关行为机理以及分析评估方法的基础上，重点提升防火、碰撞、防冰雪等 3 个具体方面的本构安全设计技术水平。

1 高速列车本构安全技术体系

相较于世界其他国家，我国高速铁路具有高速度、大客流量、高密度和大跨度运营等特点，沿线地理气

候多变、运用环境复杂，对工务工程、牵引供电、高速列车、运营调度和运行控制等高速铁路子系统安全提出了更为严苛的要求。其中，高速列车作为最为活跃的关键子系统，其本构安全保障体系对于整个高速铁路系统安全而言有着至关重要的影响。迄今为止，我国高速列车制造企业已逐步搭建起以 RAMS、IRIS 等为安全支撑，以八防设计、故障导向安全、冗余设计等为安全理念，并且贯穿高速列车“设计研发—产品制造—运维保障”全寿命周期的本构安全技术体系，如图 1 所示。

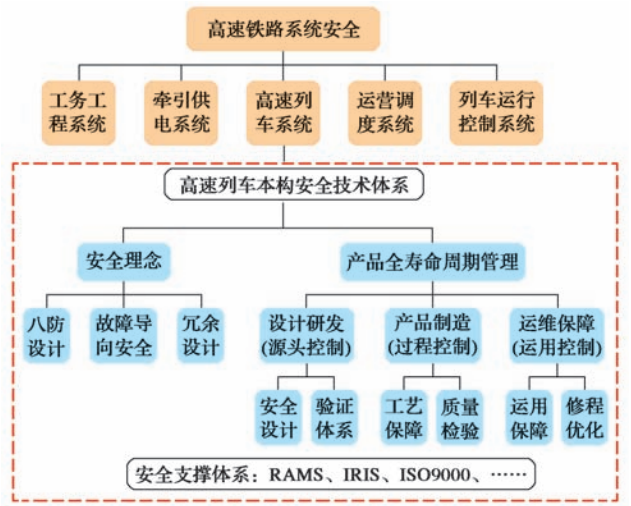

图 1　高速列车本构安全技术体系架构

1.1　设计研发

高速列车通常由总成、车体、转向架、高压、牵引、制动、网络、辅助、旅客界面等九大核心系统组成，这些系统的设计研发涉及车辆动力学、空气动力学、结构强度、噪声控制等不同专业领域。本构安全设计理论、方法和技术的应用在上述各专业领域中都得到充分关注。目前，基于主动和被动安全设计理念，企业在产品设计研发阶段已搭建包含走行安全、气动安全、制动安全等技术项点的综合安全设计平台，是本构安全技术体系的起源，如图 2 所示。本文将在第 2 部分介绍各项点的详细内容。

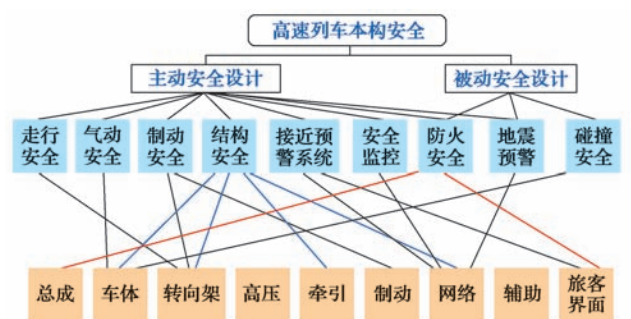

图 2　设计研发环节的高速列车本构安全

1.2　产品制造

在高速列车的产品制造环节，建立以精益理念为核心的生产制造质量管控体系，通过完整的制度体系、严格的工艺控制、智能的检测手段以及关键工序的质量策划等多方位过程管控措施，保证本构安全体系与产品质量全方位融合：

①健全生产制造质量制度体系，促进质量、成本、交货期的改善；强化工艺控制，确保工艺准备情况满足生产要求。②识别、提取、控制产品质量关键节点，确保工序质量受控。③建立重要工序完工质量评审机制和变更跟踪关闭机制。④通过系统导入智能化在线监测 / 检验手段，提高质量保证能力。⑤规范质量问题处理流程，实施“三不原则”和“技术管理双归零”，提高质量纠正和预防的能力。

1.3　运维保障

在高速列车的运维保障过程中，已经搭建起制造企业与用户共同支持、一体化的运维服务体系，建立起先进的健康诊断及专家支持平台，并基于以可靠性为中心的维修理念，以最少修时和最小维修成本为目标建立了 5 个等级的检修体系，满足高速列车全寿命周期内安全性、可靠性和经济性的要求，确保高速列车运营网络可靠安全及其性能的持续优化，如图 3 所示。

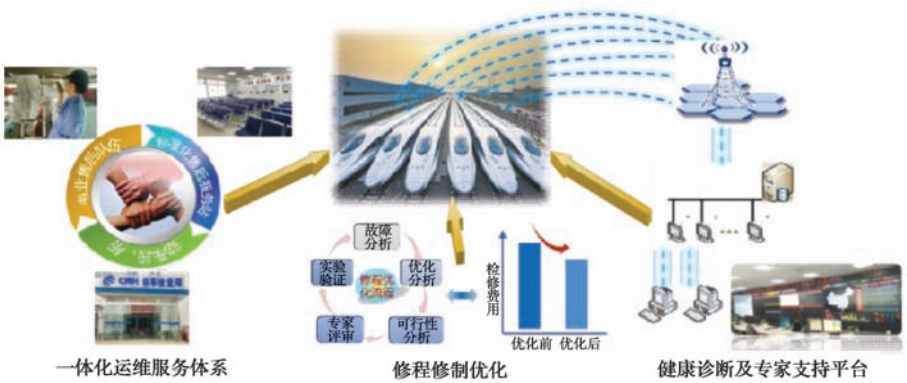

图 3　运维保障环节的高速列车本构安全

2　高速列车本构安全技术项点

设计研发阶段是高速列车本构安全体系的源头。本文将介绍相关技术项点内容，尤其是国家先进轨道交通重点专项关注的防火、碰撞及防冰雪技术的研究内容及研究现状。

2.1　走行安全

走行部是高速列车在牵引动力作用下沿轨道运行的部分，主要作用是保证列车灵活、安全平顺地沿轨道运行和通过曲线，缓和列车与轨道之间的冲击，保证列车具有足够的运行平稳性和良好的运行品质。由于轨道激励呈现一定规律的非稳态随机不平顺特征，为了实现高速列车良好的线路适应性以及高速运行时各工况下充足

的安全裕度等要求，在开展走行安全设计时，将根据需求选取 GB 5599、UIC 513、EN 12299 等标准，开展车辆动力学安全性、稳定性和平稳性的结构参数设计、仿真计算及台架和线路试验验证，详见表 1 所示。

表 1　列车走行本构安全技术

结构参数设计	动力学仿真	台架试验（滚振）	线路试验
①轮轨匹配关系；②抗蛇行减振器冗余设置；③空气弹簧设置应急橡胶堆和内置横向挡	正常工况：①轮轨接触；②频率特征；③车辆安全性指标；④稳定性临界速度；⑤车辆平稳性；⑥抗大风倾覆安全性	正常工况：①临界速度；②不同类型轨道谱激励	正常工况：①小曲线通过；②正线型式试验
	故障工况：①抗蛇行减振器故障；②空簧失气故障；③横向减振器故障	故障工况：①抗蛇行减振器故障；②空簧失气故障；③横向减振器故障	故障工况：①抗蛇行减振器故障；②空簧失气故障；③横向减振器故障

2.2　气动安全

气动安全主要考虑气动升力、侧向力、交会压力波和大风等气动载荷对轮重减载率、横风稳定性、结构可靠性、道旁设备及人员安全的影响，如图 4 所示。以大风环境安全为例，为了提高列车在大风环境下的运行安全，避免风致倾覆危险，设计人员基于大量的实车试验、模型试验以及数值仿真等工作，探索大风对列车空气动力学性能的影响机理，据此提出了一系列安全保障措施，包括修建防风屏障、优化车体外形和建立大风预警系统。

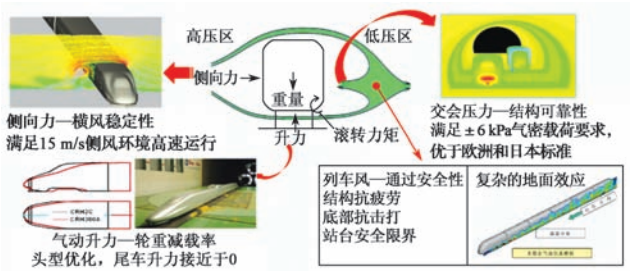

图 4　气动安全的考虑因素

2.3　制动安全

制动是能量转换的过程，高速列车制动主要采用 2 种方式：将动能转变为热能的“热逸散”制动和将动能转变为可用能的再生制动，即空气制动和动力制动。目前，我国高速列车制动系统采用微机控制的空电复合制动模式，关键系统和部件继续沿用成熟技术，通过系统优化减速度曲线，满足 UIC、TSI 技术规范及相关欧洲标准，确保列车定点、定位、安全准确制动，如图 5 所示。

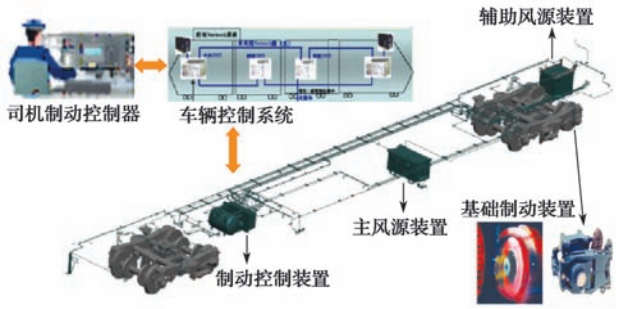

图 5　高速列车的制动系统

2.4　结构安全

高速列车车体、转向架及其承载关键部件的强度、刚度、模态和疲劳寿命是高速列车结构安全关注的重点。以车体强度设计为例，基于在国际上被广泛接受和认可的 EN 12663 标准，在概念设计、方案设计和技术设计阶段进行充分的仿真分析，实现结构优化及工程化，并开展仿真分析与实车试验的相互校核验证，如图 6 所示。在样车生产完毕后，需要进行车体结构强度的型式试验，作为车体结构性能的最终验收依据。

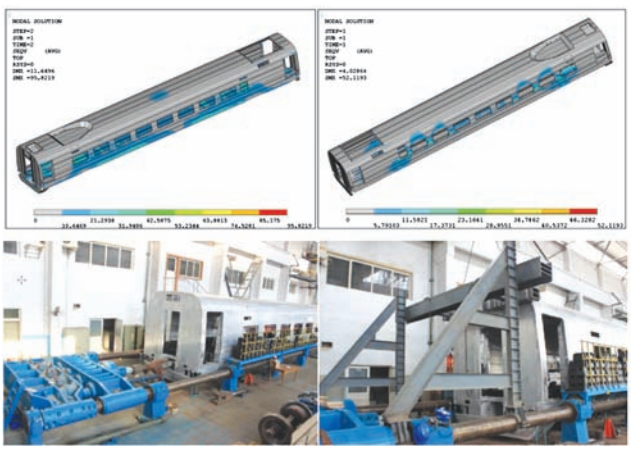

图 6　中国“复兴号”车体强度仿真（上）及试验（下）

2.5　安全监控

应用先进的传感技术，高速列车上布设有上千个传感器，包括速度、加速度、压力、电压、电流和温度等传感器，实现故障在线诊断、预警和处置，保障高速列车的运用安全，如图 7 所示。以温度监控为例，车载系统会自动采集和存储来自轴箱、齿轮箱和电机的温度数据，分析并判断温度的预警或报警状态，从而实现温度的预警或报警故障提示，同时根据预警或

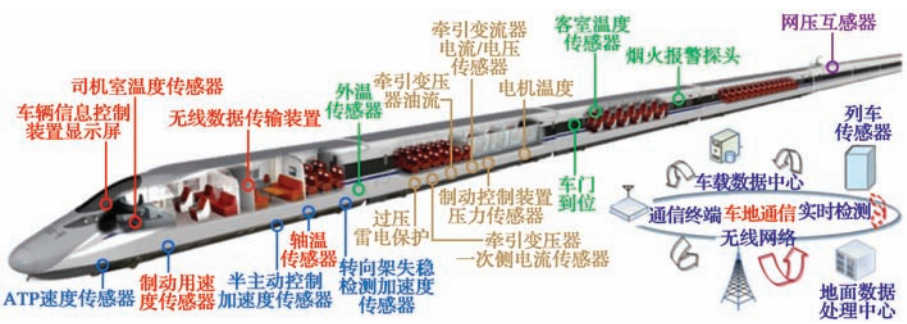

图 7　高速列车的安全监控系统

报警状态以及系统内置的控制逻辑，自动控制列车限速运行或停车，保证行车安全。

2.6 地震预警

为减轻地震次生灾害，高速列车还设有地震预警系统，如图 8 所示。在铁路沿线的变电所内间隔设置地震仪，联合远地地震监测网共同判断，当加速度值超过阈值时，系统将发出预警信号或自动断电，列车接收信号后会实施紧急制动，最大程度确保行车安全。

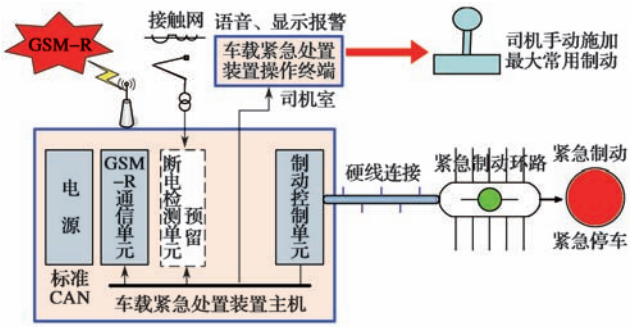

图 8 高速列车的地震预警系统

2.7 防火安全

高速列车防火安全是以发生火灾时保护乘客和员工的安全为目标，通过危害识别和风险评估分析，并根据潜在火焰和火焰扩展传播途径，从防止火焰扩展、切断 / 阻隔传播途径方面提出车辆防火解决措施，将风险降低到许可范围内[7]。除了非金属材料防火、结构耐火、消防设施、烟火报警、紧急报警、应急要求和疏散措施等要符合相关标准外，火载荷的计算方法技术、基于材料防火性能的结构安全性匹配技术以及应急疏散技术等都是防火安全保障的重要技术。

1）火载荷的计算方法技术

火载荷是指火灾热释放速率，其大小是衡量火灾对乘客危害程度的重要参数，需要根据其设计站台及隧道的烟气控制系统，以提供安全的人员疏散环境。通常计算手段包括 Duggan 方法、Duggan+CSIRO 方法、迭代理论以及计算流体力学（CFD，Computational Fluid Dynamics）。目前，应用 CFD 已能在考虑材料热释放速率、应用面积、临界辐射通量等因素基础上，模拟火灾情况下材料的燃烧及蔓延，使计算结果更加接近实际火灾。

2）基于材料防火性能的结构安全性匹配技术

在发生火灾的情况下，为了阻隔烟 / 火向邻车蔓延，为乘客提供充足的转移和疏散时间，对存在火灾隐患的外端墙（含门）结构、地板结构开展材料防火与结构防火的匹配技术研究。目前，已经形成了不同耐火能力的典型地板结构、外端墙（含门）结构。如图 9 所示，按 EN 1363-1、EN 1364-1 和 EN 1364-2 进行的结构耐火试验结果表明，地板结构完整性及隔热性已达到 16 min，外端墙（含门）结构完整性及隔热性达到 25 min。



图 9 地板结构（上）及外端墙（含门）结构（下）耐火试验

3）应急疏散技术

为减少烟毒气体和火灾高温对乘客造成的伤害，提出了列车应急疏散能力需求，以实现快速疏散乘客至安全区域。目前，从影响应急疏散的敏感性参数（包括定员、疏散方式、出口有效性等）出发，考虑火灾发生位置和疏散方式等因素，根据乘客的性别及年龄构成比例确定乘客行走速度分布曲线，并考虑行走方向、行走速度及随机因素等行为特性，建立了高速列车疏散仿真模型，以验证疏散敏感性参数设计的合理性和疏散安全性。

2.8 碰撞安全

被动安全是列车运营安全的重要组成部分，作为一切主动防护失效后的最终保护，在发生意外碰撞事故时能够有效保护乘员不受伤害或少受伤害。目前，世界各国针对高速列车的被动安全防护技术研究均未全面深入展开，尚未形成一套可以借鉴的成熟完备的设计、仿真、试验及评估标准体系[8]。我国依托专项载体，研究搭建基于系统能量管理、刚度匹配、逐级吸能、吸能承载一体化、包覆工况、吸能部件模块化等理念的碰撞系统设计平台，初步形成中国高速列车碰撞安全标准（送审稿），已取得的阶段性成果如下：

1）复杂碰撞仿真模型

如将钩缓装置模型和吸能装置模型连接车辆模型，建立“列车 + 轨道”耦合碰撞动力学模型，研究碰撞爬车、爬车临界速度和影响爬车的车辆参数，分析高速列车的头车钩缓装置和中间钩缓装置的碰撞行为。

2）碰撞材料力学性能数据库

开展铝合金材料动态性能研究，建立了适合于高速列车碰撞研究的铝合金材料力学性能数据库，极大提高仿真分析精度。

3）全包覆工况下主吸能结构设计

形成了以材料选型、元件设计、部件设计、整车设计为主要设计步骤的设计平台，系统开展仿真分析、试验验证及多目标优化工作，保证主吸能结构变形及

能量耗散有序、可控，如图 10 所示。

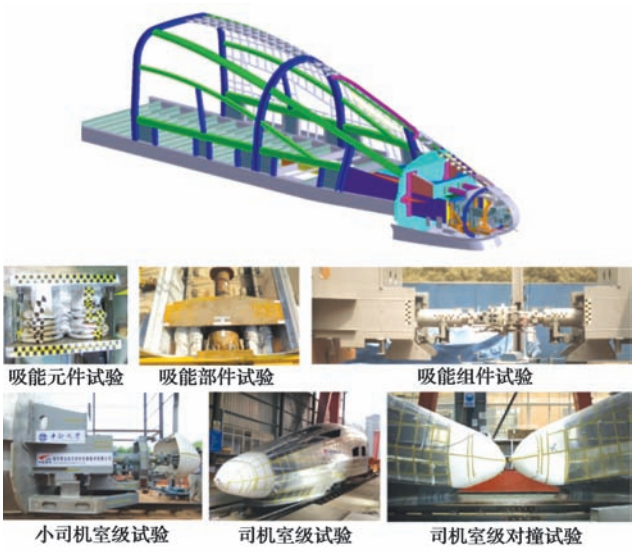

图 10　主吸能结构工程化方案（上）及试验验证平台（下）

2.9　防冰雪安全

在覆雪路段运行时，高速列车转向架区域是冰雪堆积的主要区域之一，对高速列车的安全运行和运用维护等都带来了新的困难和挑战[9]。列车运行时在车底产生负压，使得转向架区域容易吸附积雪；同时，伴随着传动系统（电机、齿轮箱等）以及制动钳夹的工作发热，在对应结构表面附着的积雪会融化成水，部分融化的水可能流淌到周边温度较低的区域凝结成冰，也可能被气流甩带到转向架其他区域或设备舱端板上凝结成冰。

为此，需要开展高速列车转向架冰雪灾害分析与防治技术研究，建立冰雪灾害分析边界条件。主要采用数值模拟、试验相结合的方法，建立走行部流场模型，研究流场特点对冰雪堆积规律的影响，形成走行部防冰雪设计与试验评估方法。目前，已搭建起单节列车转向架区域风夹带雪花的两相流计算模型，如图 11 所示，初步探索了雪粒子流动特性、逐步堆积、形成结冰的机理。

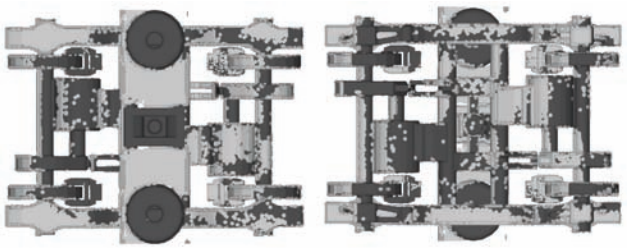

图 11　单车一位端转向架上表面（左）及下表面（右）积雪（浅色区域）情况仿真

3　展望

根据国家《中长期铁路网规划》，预计到 2020 年，我国高速铁路运营里程将达 3 万 km[1]，列车运营分布区域更广，沿线的地理气候条件及运用环境更加复杂多变；高速列车的运行速度和开行密度将进一步增加，在线不间断运行时间将进一步延长。因此，这对高速列车的安全运行和高效维保提出了更高要求，推动高速列车本构安全保障模式从状态监测预警到故障预测、从装备安全到生态安全的系统转变。

①基于大数据分析的故障预测与健康管理（PHM，Prognostic and Health Management）系统。将来，在目前已有信息采集及处理系统基础上，通过集成先进的感知、诊断、预测、决策、通信等技术，构建智能高速列车 PHM 系统，综合形成车辆状态感知、实时分析、实时通信、智能决策、精准执行等能力，提高车辆运行安全性、运维经济性和智能设计与制造水平。未来，以智能高速列车 PHM 系统为基础，集成运用大数据、云计算、机器学习等先进信息技术，构建以高速列车为核心，以全息化列车状态感知和动态数字化运行环境为基础，以大数据技术智能处理与可视化交互为支撑的平台体系，实现对列车状态的综合监测、安全感知和预警。

②生态安全。高速铁路具有运能大、安全舒适和环境友好等优势，已经成为能源和环境约束下解决交通运输能力供给不足的必然选择。未来，在保证运营安全的前提下，将致力于低碳环保、节能减排新技术的广泛应用，为维护生态安全尽责，如图 12 所示。



图 12　高速列车生态安全发展方向

4　结语

通过对高速列车本构安全体系的规划，有助于形成高速列车本构安全成套技术标准规范以及本构安全一体化技术体系，提高高速列车本构安全水平，研制具有国际先进水平的具有国际适应性的高速客运装备及关键核心部件，促进我国具有国际适应性的高速客运装备乃至整个轨道交通装备相关产业技术升级和发展，为高铁“走出去”战略的顺利实施夯实技术基础。

参考文献：

［1］中华人民共和国国务院 . 中长期铁路网规划［S］. 北京：中华人民共和国国务院，2016.
［2］中华人民共和国国务院 . 国家中长期科学和技术发展规划纲要［S］. 北京：中华人民共和国国务院，2006.
［3］秦勇，马慧，贾利民 . 先进轨道交通系统发展趋势与主动安全保障技术［J］. 中国铁路，2015(12)：77–81.
［4］贾利民，秦勇，李平 . 新一代轨道智能运输系统总体框架与关键技术［J］. 中国铁路，2015(4)：14–19.
［5］贾利民，秦勇，王莉 . 轨道交通科技发展的方向与任务［J］.

（下转第 16 页）