

Engineering Achievements

京张智能高速铁路

王同军

China State Railway Group Corporation Limited, Beijing 100844, China

1. 引言

京张高速铁路（简称京张高铁）是2022年北京冬奥会重要交通保障设施，正线全长174 km，最高设计速度为350 km·h⁻¹，是世界上第一条按照智能化理念进行设计的高铁。京张高铁于2016年4月29日开工建设，2019年12月30日开通运营，将张家口至北京的最快运行时间由3小时7分钟压缩至47分钟，为冬奥会期间两地三赛区的赛事提供了重要保障，并促进了京-津-冀一体化互联互通和经济融合。本文从总体架构设计和智能建造、装备、运营等方面，重点介绍京张智能高铁的建设和运营实践。

2. 工程概况

京张高铁正线设北京北、清河、沙河、昌平、八达岭长城、东花园北、怀来、下花园北、宣化北、张家口等

10座车站，延庆支线设延庆站，崇礼铁路设太子城站，预留赵川南站。其中，北京北为始发终到站，清河和张家口为始发终到兼通过站，如图1所示。线路穿越北京核心区、八达岭长城景区、官厅水库等地区，具有地质条件复杂、施工难度大、环境保护要求高等难点，面临着冬奥会期间旅客群体多样、客流量时段集中、出行服务要求高、国际关注度高等挑战。迫切需要集成运用建筑信息模型（building information modeling, BIM）、大数据、人工智能、北斗卫星导航、5G等新一代信息技术，对京张高铁建造、装备和运营技术进行智能化创新，以数据驱动为核心，实现全面感知、泛在互联、融合处理、主动学习、优化决策，满足冬奥会对京张高铁建设和运营的要求。

京张高铁涵盖建造、装备、运营多个业务领域，是由多个子系统和多项新技术构成的复杂巨系统，为应对其全生命周期技术复杂、接口众多、协调难度大等挑战，提出了“顶层设计、平台先行；模数驱动、轴面协同”的建设



图1. 京张高铁线路平面示意图。

理念，取得了多项重大技术突破[1]。

在京张智能高铁体系和管理方面：①基于分层分类原则，构建了“平台+应用”的技术体系架构；②提出了“以全生命周期管理为主轴线、以全业务要素为基本、模数驱动、轴面协同”的建设管理方法。

在智能建造技术方面：①构造基于BIM的全专业、全线统一环境的协同设计平台，实现了多专业协同设计和数据无损传递；②建成双块式轨枕场，实现了轨枕制造全工序自动化、全过程数据集成化，为数字化制造提供了支撑；③突破路基、桥梁、隧道、客站等智能化施工成套技术；④研发了基于BIM+GIS的高铁工程管理平台。

在智能装备技术方面：①研制了智能动车组系统，实现智能行车、智能运维、智能服务和安全监测；②首次实现 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 高速动车组自动驾驶；③建成智能牵引供电系统，实现了智能运维；④构建了智能安全监测与应急处置系统。

在智能运营技术方面：①构建了覆盖全程的智能票务服务和智能客站系统；②研制出基于BIM+GIS融合的基础设施综合运维系统；③建成高铁智能调度集中系统。

下面从四个方面阐述京张智能高铁的重大创新。

3. 京张智能高铁的技术体系设计和管理思想

3.1. 京张智能高铁技术体系

技术体系是从系统层面对京张智能高铁核心要素组成及其相互关系等进行的整体设计[2]。基于“顶层设计、平台先行”的设计理念，技术体系自顶向下划分为板块、领域、方向、创新、基础平台五个层面，如图2所示。

其中**三大板块**指智能建造、智能装备、智能运营。**十大领域**指三大板块下的勘察设计、工程施工、建设管理、移动装备、通信信号、牵引供电、检测监测、客运服务、运输组织、养护维修等领域。**十八个方向**指十大领域分解后形成的空天地一体化工程勘察，基于BIM工程设计，桥隧路轨工程、客运站工程和四电工程等智能化施工，基于BIM+GIS工程建设管理，智能动车组、智能综合检测车、信号、通信、智能牵引供电、智能检测监测等，智能客运、智能票务、智能综合调度、智能行车调度、工电供一体化运维、动车组智能运维等。**N项创新**指在十八个方向框架下进一步细分形成的空天地一体化智能测绘、BIM建模、智能梁场、客站智能施工、基于BIM虚拟建造、动车组智能监控、智能检测设备、列车自动驾驶(ATO)、智能牵引变电所、自然灾害监测与预警、站车智能服务、客票电子化、列车运行计划自动调整、运维智能决策等。

一个基础平台指集成前沿信息新技术为京张智能高铁各系统、子系统提供公共的计算、存储、数据、算法等服务的基础平台。

该技术体系已成为指导我国智能高速铁路建设的总体架构，处于国际铁路技术前沿。

3.2. “模数驱动、轴面协同”的京张智能高铁管理思想

京张智能高铁是一个覆盖全生命周期、涵盖众多业务、集成各类专业技术的复杂巨系统，建设运营管理难度极大，为此提出了面向全生命周期综合效能最优的“以全生命周期管理为主轴线、以全业务要素为基本、模数驱动、轴面协同”的“**模数驱动、轴面协同**”建设管理思想，如图3所示。全生命周期涵盖了京张智能高铁的设计、施工、运营等阶段，全业务要素协同指不同生命周期的多个业务要素整体协同、综合最优。例如，设计阶段需要统筹路基、桥梁、轨道、隧道、工经、地质、通信、信号等要素，施工阶段需要统筹投资、安全、质量、进度、环保等要素，运营阶段需要统筹工务、电务、客流、运输、车辆和安全保障等要素。模数驱动为轴面协同目标实现提供支撑，通过线路、桥梁、车站、通信、信号、供电等多专业、多粒度BIM模型和规划设计、工程建设、调度指挥、运营服务、安全监控等海量大数据的融合应用，实现全生命周期、全业务要素协同，达到京张智能高铁系统的整体运营效能最优。

4. 智能建造技术

京张高铁建设过程中创造性发展了基于BIM的协同化设计、数字化制造和智能化施工等技术，建成了基于BIM+GIS的工程管理平台，实现了建设数据的自动采集和信息互联，支撑参建各方协同管理和决策优化。

4.1. 基于BIM的多专业协同设计平台

京张智能高铁设计是一项庞大复杂的系统性工程，参与专业多，协调难度大，需要设计团队内部多专业间密切配合。目前铁路各专业设计过程及最终设计成果均采用二维图纸，存在设计意图表达与理解不明确、专业间沟通不顺畅等问题。

BIM技术具有数字化、可视化、多维化、协同性、模拟性等特点，可贯穿设计、施工、运营维护整个铁路生命周期，为此面向京张高铁构建了基于BIM的多专业协同设计平台，开展了京张高铁全线BIM设计和三站三隧的精细化设计，自主开发了测绘、线路、桥梁、隧道、路

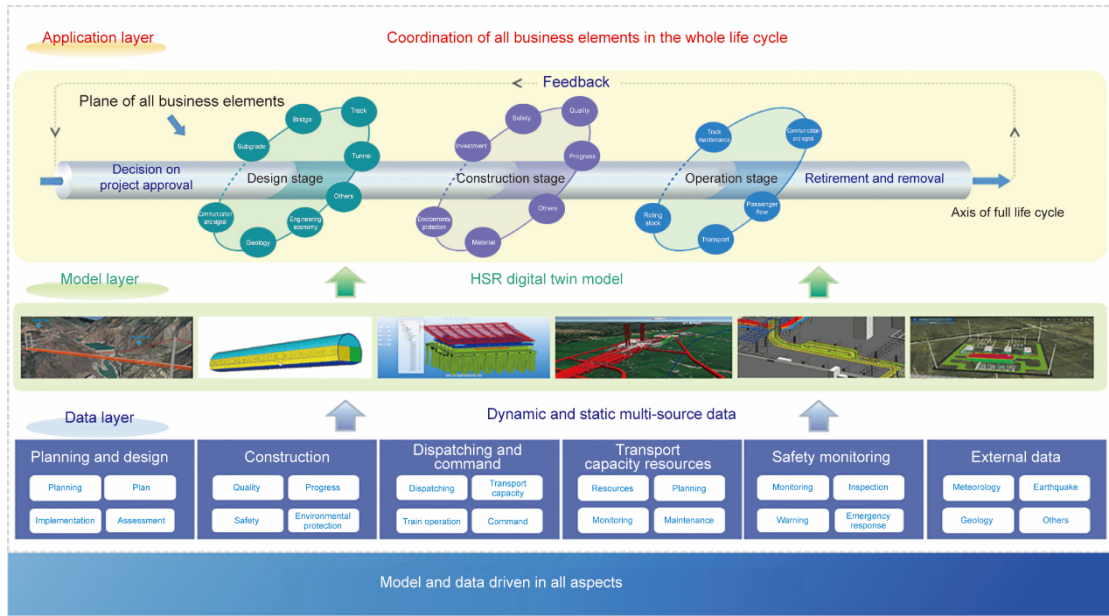


图3. “模数驱动、轴面协同”管理思想。

基、接触网、信号等多个专业BIM协同设计软件，提高了设计效率，优化了设计模式。利用BIM模型对设计方案进行有效优化、在复杂节点设计中进行多专业可视化协同，突破了传统平面图纸表达的局限性。攻克了地图投影变换、数据格式融合转换、数据源组织管理、显示策略定制等多项技术难题，实现了铁路各专业BIM模型的快速参数化设计、工程量计算、专业间装配、设计成果集成管理和信息无损传递等，如图4（a）所示。

采用基于BIM的协同设计平台，可节省约8%的协调

联络时间和3%的材料费用。

4.2. 面向数字化制造的智能双块式轨枕场

利用物联网、自动化、图像智能识别等技术实现了全工序自动化、智能化。集成制造全过程的生产数据，建成了基于工业机器人和大数据的智能双块式轨枕生产线，车间作业人员减少50%。采用了面向工业互联网的生产管理信息系统，支撑轨枕场全要素的在线集中管理，数据统计效率提高20%。研发了基于激光测量、机器视觉深度学习等的双块式轨枕智能检测技术，检测精度提高5倍，检测

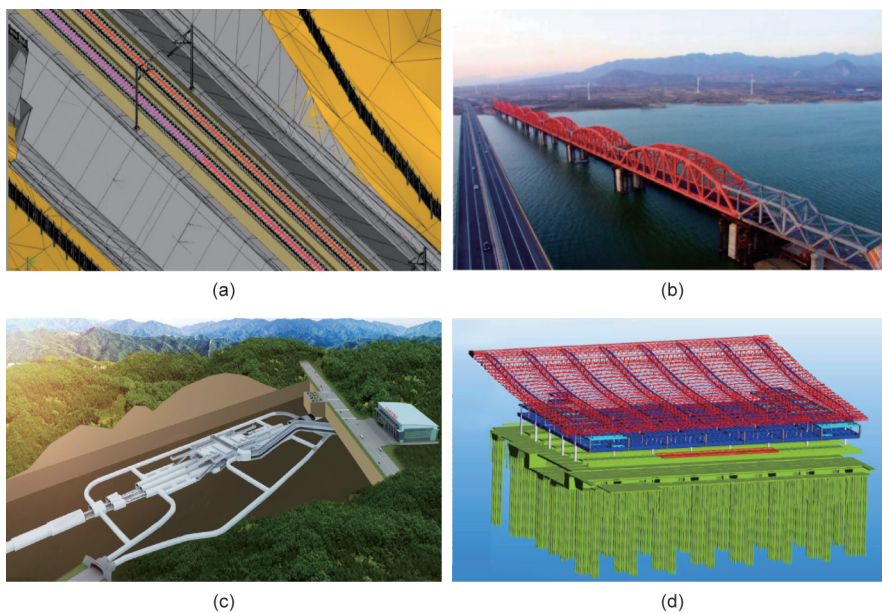


图4. 京张高铁智能建造。(a) 基于BIM的协同设计平台；(b) 官厅水库特大桥同步顶推；(c) 基于BIM的新八达岭隧道智能施工；(d) 清河站智能施工。

效率提升15倍。实现了双块式轨枕的数字化制造。

4.3. 路基、桥梁、隧道、客站等基础设施的智能化施工

4.3.1. 路基智能填筑新技术

针对常规路基压实质量检测中存在的事后抽样检测时效性和完整性不足，创造性发展了基于北斗定位的无人驾驶碾压、路径自动规划、薄弱区域自动补压等技术，实现了填料运输自动管控、填料质量自动识别、路基压实质量实时检测。实施了推土机、摊铺机、挖掘机等自动引导、协同作业和机群协同，形成全覆盖式振动压实连续检测。与传统路基建造工艺相比，路基填筑质量、压实程度和均匀性得到提升，检测效率和路基质量显著提高。

4.3.2. 官厅水库特大桥同步顶推技术

官厅水库特大桥全长9.08 km，主桥采用8孔110 m跨筒支曲弦钢桁梁，是京张高铁重点控制性工程之一。大桥处于官厅水库水源保护区，为最大限度保护水体，提出了钢梁岸上拼装、顶推就位的施工方法。研制基于焊接机器人的龙门式自动焊接系统，实现了多条加劲肋同步焊接，并采用智能控制多点同步顶推及自动监测技术，突破了多孔大跨钢桁梁的顶推施工，确保钢梁顶推精确安全到位。采用该技术后提升了施工效率，提高了焊接和施工质量，如图4（c）所示。

4.3.3. 基于BIM的新八达岭隧道(八达岭长城站)智能施工

京张高铁八达岭隧道全长12 km，内设八达岭长城站，是目前世界上规模最大、埋深最深、洞群结构最复杂的地下叠层暗挖洞群高铁车站。通过构建基于BIM的模型，实现叠层进出站通道、环形救援廊道和并行双洞立体多分支斜井等设计优化和施工工艺可视化交底，缩短了各工序的衔接时间，现场施工效率提升20%以上。基于BIM模型，融合物联网、大数据技术开展对临近建（构）筑物危险性的实时预测预报，支撑盾构施工全过程智能化、可视化动态监控与管理，有效降低了施工的影响。研发了基于高速激光扫描的隧道断面质量管理系统，完成隧道超欠挖、净空及空洞方量的自动高精度检测。

4.3.4. 客站智能施工和精细化管理

针对大型客站建设，利用BIM发展了对客站装饰装修、钢结构、机电管线和客服机房等建筑结构进行三维深化设计和绿色设计的技术。建立起基于BIM+IoT的客站施工管理系统，实现施工原材料追溯、深基坑监测、高支模监测、检验批、塔吊防碰撞、钢结构焊缝等三维可视化管控。研制了基于BIM的施组优化仿真系统，支撑现场

施工精细化管理和安全质量管控，如图4（d）所示。采用智能化施工技术，非传统水源利用率达到22.14%，可再循环建筑材料用量比达到15.30%。

4.4. 基于BIM+GIS的高铁工程管理平台

京张高铁建设具有投资大、周期长、技术复杂、接口多、管理分散、协调关系复杂等特点，传统管理手段难以适应京张高铁建设高质量、高效率、高速度的需求。为了顺利完成建设目标，采用信息化、智能化手段将传统的线下管理模式转变为线上管理，以标准化管理为抓手、BIM+GIS技术为核心、工程建设项目为载体，研发了高速铁路工程管理平台。平台分为三大板块（综合管理、过程控制、现场管理）、四个维度（空间维度、数据维度、管理维度、应用维度）、六大应用（综合管理、进度管理、材料管理、质量管理、安全管理、投资控制）。攻克了BIM+GIS多源数据融合技术和模型轻量化技术，实现了构件级三维形象进度、质量、安全综合管控，提高了工程建设数据多角度、多维度、多尺度综合分析与管理能力。

平台应用以来，铁路工程建设质量与安全事件、事故显著减少，示范效应突出，社会经济效益显著。

5. 智能装备技术

5.1. 智能动车组系统

智能动车组系统集成了智能复合传感器、车地信息实时传输、大数据挖掘与分析、自动化控制、信息智能处理、故障预测与健康管理等技术，实现了智能化感知、诊断与决策[图5（a）]。京张智能动车组作为复兴号中国标准动车组成员之一，分为标准配置、奥运配置两款车型。标准配置是在“复兴号”动车组基础上增加了智能模块和适应京张线路特点的相关功能，奥运配置是在标准配置上再增加奥运模块。

- 智能模块：实现智能行车（C3+ATO）、智能运维（监控点多达2718个）、智能服务、安全监测（新增走行部振动监测点168个）。

- 奥运模块：奥运涂装、奥运专用平面布置、运动器材存放、奥运赛事直播。

- 适应京张线路特点功能：-40℃高寒适应能力、30‰坡道运行能力（含牵引、制动两方面）、应急自走行能力。

京张智能动车组首次实现了30‰长大坡道运行能力提升；全面提高动车组绿色环保性能，节水10%，噪声降低1~2 dB，内装材料可回收率达75%，可降解材料占比

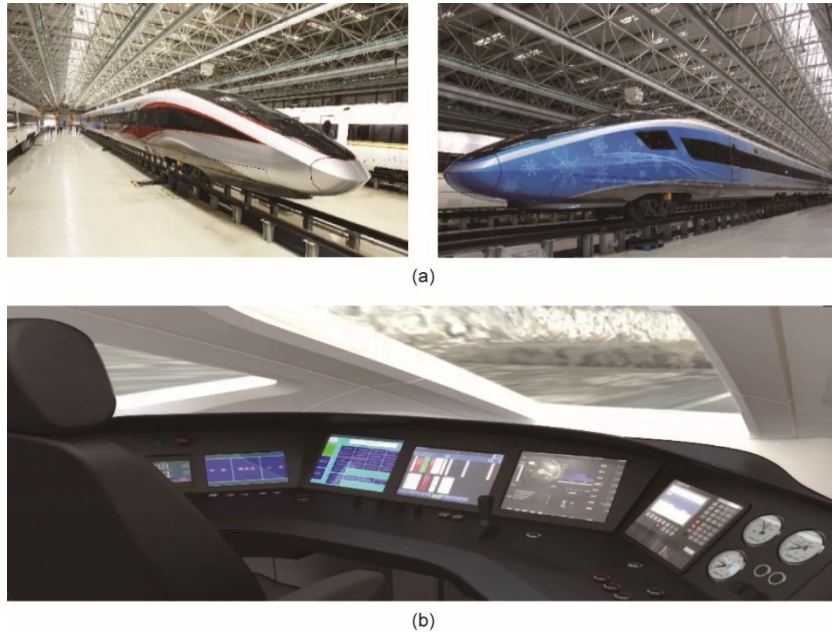


图5. 京张高铁智能装备。(a) 智能动车组；(b) 时速350 km自动驾驶。

50%；采用气动优化设计及减阻技术、“重量-阻力-动力”多目标节能匹配技术、轻量化技术（全列综合减重约7 t）等，实现综合节能7%；利用智能环境感知调节技术，提升了旅客乘坐舒适性。

5.2. 时速350 km高速动车组自动驾驶

动车组自动驾驶技术是京张智能高铁关键核心技术之一[图5(b)]。通过在CTCS-3级列控系统基础上增加ATO相关设备实现列车自动驾驶，在车站股道增加地面精确定位应答器实现列车自动精确对标停车，实现了车站自动发车、区间自动运行、自动停车、自动开门、车门与站台门联动。

京张高铁创造了世界上首次 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 动车组自动驾驶纪录，实现了列车高速条件下的运动建模及速度控制优化、长大区间运行策略运算及控制精度提升等。通过将智能化控制算法与控车策略进行结合，优化了ATO控车算法，全面提升了控车舒适度、停车精度、节能降耗等性能指标。运营实践表明，高速动车组自动驾驶能够确保列车运行安全、降低牵引能耗、减轻司机劳动强度、改善旅客乘车体验。

5.3. 智能牵引供电系统

目前高铁牵引供电系统之间相互独立，各牵引变电所亭间缺少实时通信和信息交换，难以满足京张高速动车组全天候全场景的可靠电力供应。京张高铁智能牵引供电系统是以智能化牵引变电所、分区所、自耦变压器所（auto-transformer，简称AT所）等智能供电设施为基础，运

用信息化和网络化技术改变牵引变电所亭间的信息孤岛，进行系统整合、多信源数据共享，建立广域测控保护、故障自愈重构、故障报警预警机制和系统健康评估体系，提高牵引供电系统可靠性和运行维护水平。此外还建立了具有全息感知、多维融合、重构自愈、智能运维特征的智能牵引变电所，实现了全所无人值守，广域保护延时由100 ms缩短至20 ms，一、二次设备达到100%光纤隔离。

5.4. 智能安全监测与应急处置系统

针对京张高铁沿线风、雨、雪、地震等灾害监测设备多、预警分析时效性强、应急联动分布广等特点，构建了覆盖安全数据全时汇聚、风险事前预测、危情实时预警，应急处置及时联动的全链条智能安全监测与应急处置系统，实现了基于大数据的灾害时空分布规律分析、安全风险智能预警与综合研判、安全监测信息车地实时传输、灾害监测与调度系统，综合视频系统的互联互通、铁路与地方相关部门的应急处置协同等，提高了安全预警和应急处置的及时性和协同性。

6. 智能运营服务技术

6.1. 智能出行服务

构建了全过程出行票务服务体系，实现了基于PSR（旅客服务记录）的电子客票、高并发条件下的电子客票检票、线上-线下一体化的人脸识别比对、基于站车无线交互系统的车上查验等关键服务[图6(a)]，突破了综合

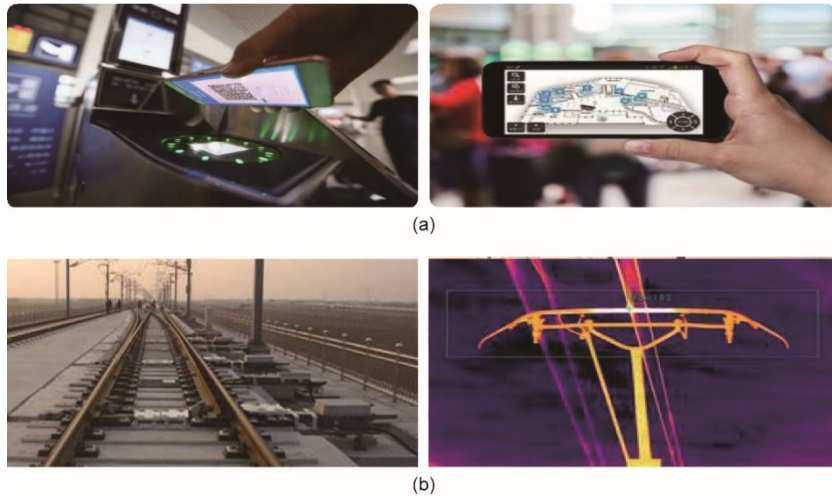


图6. 京张高铁智能运营。(a) 智能出行服务；(b) 智能综合运维系统。

交通出行“一张票”技术，支撑了面向冬奥的票务服务国际化，为旅客提供无纸化、自助化、一体化的出行服务体验。

建成了智能客站系统，完成全业务、全岗位生产要素管理，以及一体化生产组织、高效应急处置、全生命周期设备管理和精准安全管控；同时为旅客提供行程提醒、刷脸进站、验检合一、广播引导、电子导航、智能问询、自助退票、自助制证、远程售票等自助化、智能化服务，为综合交通枢纽车站提供客流信息共享、换乘方案推荐、旅游资讯发布等技术支撑。

6.2. 基础设施智能综合运维系统

基于BIM和GIS融合技术，完成了工务、电务和供电等基础设施数据由建设期向运营期无损交付和全生命周期管理；规范工务、电务和供电专业数据采集与处理方式，提高移动检测、固定监测、静态检查数据接入与处理能力；建立了工务、电务和供电多专业融合的检测检查-状态分析-生产计划系统，支撑了一体化综合运维。应用该系统后提高了高铁维修天窗的利用效率，有效降低了基础设施运维成本[图6(b)]。

6.3. 智能调度集中系统

调度集中系统作为高铁运输指挥的神经中枢，担负着组织指挥高铁列车安全、正点、高效运行的重要任务。高铁调度集中系统的智能化已成为国内外发展的趋势。

高铁智能调度集中系统是基于人工智能和大数据等新兴技术，以CTC3.0软硬件平台为基础，拓展了列车运行

计划自动调整、列车进路和命令安全卡控、列车自动驾驶(ATO)等关键功能，全面提升了列车调度指挥、运行安全保障能力和智能化水平。

7. 结语

京张高铁开通运营两年来，在智能建造、智能装备、智能运营服务方面开展的技术创新全面通过了实车实线运营考验，得到广大旅客和社会各界的普遍赞誉。京张智能高铁建设中始终坚持先试验验证、再工程实施的工作方法。在京张高铁开通前选取京沈高铁辽宁段作为试验段(含七站六区间，全长256 km)，系统开展了高速动车组自动驾驶系统、智能高铁调度集中系统、自主化C3级列控、铁路下一代移动通信等28项智能关键技术综合试验，全面验证了智能高铁创新技术的功能和性能指标。

随着川藏铁路建设、中国铁路CR450工程、“走出去”工程的不断推进，以及数字孪生、出行即服务、可解释AI、无屏显示等前沿技术的快速发展，智能高铁建设还将面临新一轮的技术升级和优化，中国将进入引领世界智能铁路建设的新时代。

References

- [1] Wang T, He H, Tian H. System architecture and standard system of intelligent high speed railway, volume 1. Beijing: China Railway Publishing House; 2020. Chinese.
- [2] Wang T. Research and applications of China intelligent high-speed railway architecture. J China Railw Soc 2019;41(11):1-9. Chinese.