

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 85 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2019 年 3 月 28 日

“轨道交通工程”科学与技术前沿论坛综述

一、国内外研究现状

1. 高速铁路发展现状

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。日本也是第一个研发高速列车的国家，多年来它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。欧洲凭借着深厚的技术底蕴，近 30 年来已经迅速建立了覆盖欧洲大陆全境的高速铁路网，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）。加拿大庞巴迪公司是世界轨道交通领域的技术巨头，ZEFIRO 系列动车组是庞巴迪于 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，但一直没有得到应用，最近几年重新启动研发计划。庞巴迪开发了 3 种不同型号的动车组：ZEFIRO380（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）和 ZEFIRO-250（主要瞄准普通市场，设计最高时速 250 km/h）。

中国新一代的高速列车（CRH-380A、CRH380B 等，后改名为“复兴号”）也已经成为高速铁路车辆新技术的典型代表。由于中国高速铁路技术的迅猛发展，凭借高性价比的优势，中国高速铁路车辆逐渐成为亚洲乃至世界上许多国家渴望的产品，而日本、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地高速增长的同时，欧洲高速铁路网规划 2020 年也将加大投入，预计其新增高速铁路线路约 10000 km。

高速列车在发展过程中面临的主要问题有：高速列车系统动力学问题、复杂环境下的安全性问题、全服役周期经济性问题、绿色环保问题、高速列车空气动力学问题、高速列车谱系化问题。

2. 城市轨道交通发展现状

1863 年，伦敦修建了世界上第一条地下铁道，峰时列车运行间隔为 100~120 s，列车到站停车时间为 20~25 s。车辆一般采用第三轨供电，在轨道中心铺有 1 条接触轨，供回流用。受流和回流的接触轨安装绝缘瓷瓶，可在很大程度上阻止产生能腐蚀金属、降低信号和通信装置工作可靠性的迷流。

纽约是世界上最大的城市之一，是美国的商业和交通运输业中心，城市集中了相当部分的加工、机械制造和电力工程企业。地铁公司 МЕТРО 现有地铁线路 27 条，线路总长 369.8 km，共 461 个车站。МЕТРО 公司修建了 22.4 km 的地铁线路，共 13 个车站。纽约地铁覆盖总面积为 770 km²，路网密度为 0.5 km/km²，第一座区间隧道建于 1904 年，大部分线路为双线，但三线和四线区段也不少。

多伦多居民超过 210 万人，是加拿大最大的工业城市。加拿大第

一条地铁线于 1954 年在多伦多建成投入运营。现在地铁为双线，线路长 56.9 km，共 61 个车站。地铁大部分建在露天或封闭的路堑里，少部分建在隧道里。地铁的最大通过能力为 30 对/小时列车，列车采用 4~8 节编组。

墨西哥城是墨西哥的首都，居民超过 1000 万人，人口还在不断增长，人口密度达到 1.8 万人/km²。地铁是该城市的主要交通形式，线路长约 112 km，共 105 个车站，其中 10 个为换乘站。

东京居民大约有 3000 万人，地铁是东京主要的公共交通方式。东京地铁年运量居世界首位，大约 21 亿人次。由于地价昂贵，东京 85% 的地铁线路建在隧道里，只有 15% 的线路建在高架桥和地面上。多数地铁都安装有三显示信号装置自动闭塞和自动停车装置，车辆装有限速系统。

中国城市地铁建设正处于起步阶段，将地铁交通建设成可持续发展的网络，促进社会和谐发展，进而促进我国整体的社会和经济的可持续发展，将是我们面临的重要课题。政府在解决人民群众基本需求，特别是交通需求方面的任务异常艰巨和繁重。

围绕城市轨道交通的发展，国内学者已在地铁车辆动力学参数优化、地铁车辆轮轨踏面匹配、地铁钢轨磨耗、地铁车辆车体轻量化、地铁限界、城市轻轨车辆等方面开展了大量的研究工作。根据国内外城市地铁的研究现状，城市地铁还存在轮轨磨耗严重、噪声、车体轻量化、地铁车辆低动力、弹性车体、构架及轮对等几方面的问题。

3. 磁悬浮交通发展现状

磁悬浮交通最早发源于德国，工程化研究始于 20 世纪 60 年代，至今已有 50 多年的开发历史。在磁悬浮交通工程应用方面，目前高速、中低速磁悬浮交通均取得了一定的进展。在高速领域，采用常导 EMS 方式的德国 TR08 高速磁浮列车已在上海 30 km 线路上实现了商业示范运行 12 年。2015 年 4 月，采用低温超导 EDS 方式的日本 L0 系磁浮

列车在 42 km 试验线上创造了 603 km/h 的世界纪录，验证了其工程实用性，并且已开工建设 286 km 东京东品川至名古屋商业示范线。在中低速磁浮交通领域，采用常导 EMS 方式的日本 HSST 中低速磁浮列车，在名古屋 8.9 km TKL 线路上实现了商业示范运行 10 年。2012 年底韩国建成 6.1 km 仁川机场联络线并开始试运行，但目前仍未正式投入运营。2013 年底和 2014 年初，中国相继开工建设北京 S1 线、长沙机场线 2 条中低速磁浮商业运营示范线，现已开通运营。

总体上，磁浮交通技术在德国、日本、中国、韩国得到了大力发展，而美国、加拿大、巴西、俄罗斯、意大利、瑞士、伊朗等国家也对磁浮交通的未来应用抱有极大期待。例如，美国、加拿大等国很早就提出了磁浮交通概念设计方案和各自的技术实现途径；巴西研制了超导 EMS 磁浮试验样车；在时速超过 1000 km 的超高速轨道交通领域，美国、瑞士、中国的研究人员分别提出了各自的概念设计方案。

半个多世纪的发展历程表明，无论在高速还是中低速领域，磁浮交通方式仍未实现规模化应用。究其原因，一方面是由于磁浮列车机电一体化程度很高，电力电子技术的发展水平较大程度地影响了磁浮列车的发展；另一方面是磁浮交通系统本身具有相当大的难度，除了电力电子技术，在决定总体性能的车辆技术和系统集成方面也需要相应地发展。现阶段，可以认为阻碍常导高速及中低速磁浮交通发展的主要因素是系统的经济性；影响低温超导磁浮发展的主要因素是，作为一个已达到工程化应用程度的新交通系统，尚未得到实际应用的验证；其他形式的磁浮交通，如巴西的超导中低速磁浮、美国和加拿大的中速磁浮等，则还处于方案研究阶段，系统技术还远未成熟，而属于超级列车的真空管道高温超导磁浮和美国的 Hyperloop 真空管道气垫列车则还在初步的方案设计阶段，要达到工程实际化水平还有很长的路要走。

二、论坛概况

2018年10月19日，以“轨道交通工程”为主题的第85次中国科学院学部科学与技术前沿论坛在成都望江宾馆马六甲会议厅召开。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院技术科学部、学部学术与出版工作委员会承办，西南交通大学和《中国科学》杂志社协办。

大连理工大学程耿东院士、国防科技大学于起峰院士、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所赖远明院士、清华大学雒建斌院士、浙江大学陈云敏院士、深圳地铁公司陈湘生院士、西南交通大学翟婉明院士等7名院士出席了本次论坛。论坛汇聚了全国31家高等院校、科研院所、设计与应用单位百余位轨道交通领域的知名专家学者，另有100多名从事轨道交通研究的博士、硕士研究生参会。

三、论坛的目的、重要性和重点关注问题

铁路是国家的重要基础设施和国民经济的大动脉，长期以来我国高度重视铁路交通发展，取得了令世人瞩目的成就。中国已成为世界上高速铁路运营里程最长、运营速度最高、在建规模最大的国家，中国高铁无疑已成为一张响亮的国家名片，对我国的社会进步和城市化进程发挥了重要的促进和推动作用。然而，由于建设和运营经验不足，加上基础研究薄弱，跟不上快速发展的需求，在建设、运营过程中不断出现安全隐患，甚至恶性事故也时有发生，给现代轨道交通的健康发展带来极大负面影响。研究建立和完善现代轨道交通工程安全保障体系的必要性和紧迫性日益显现。

此次论坛围绕高速铁路、城市轨道交通和磁悬浮交通三大重点领域，重点关注了以下几方面的问题：（1）高速铁路方面，关注了高速铁路路基动力学研究进展，时速400 km高速列车研发与技术创新，莫斯科-喀山高速铁路设计关键技术，高速铁路弓网系统运营安全保障成套技术与装备；（2）城市轨道交通方面，重点关注了城市轨道交通模式的可持续化，以及地下工程不限速穿越高速铁路技术方面的问题

与挑战；（3）磁悬浮交通方面，主要关注了其发展现状、发展磁悬浮交通的可行性以及发展建议。

在中国科学院学部学科发展战略研究项目“轨道交通工程”和2015年召开的首次“轨道交通工程”科学与技术前沿论坛已有的研究工作基础上，再次举办“轨道交通工程”科学与技术前沿论坛，进一步梳理了现代轨道交通工程发展的重要基础研究方向和核心科学与技术问题，结合国家轨道交通运营安全、行业和产业重大需求，分析了现代轨道交通工程安全保障体系的新问题，并重点结合我国高速铁路工程安全保障体系的不足，理清我国现代轨道交通工程的前沿科技问题和亟待解决的关键问题，提出了重点研究方向。同时，论坛的举办，实现了轨道交通领域的科学技术前沿探索、系统评述和前瞻预测；为相关领域的专家搭建高层次的交流平台，鼓励学术争鸣，启迪创新思维，从而推动轨道交通领域的前沿科学理论和技术探索，促进相关学科发展战略研究系统深入开展；探寻学科发展新的增长点，发现和培养优秀人才，为我国轨道交通工程健康稳定发展出谋划策。

四、报告内容及讨论情况

10位轨道交通领域的顶级专家围绕高速铁路、城市轨道交通、磁悬浮交通三大重点领域的工程科学与技术前沿问题，分别作了精彩的特邀报告，充分展示了当前轨道交通科技领域的最新发展和取得的重大成果，剖析了与现代轨道交通工程密切相关的前沿科技问题和亟待解决的关键技术问题。

1. 陈湘生院士：轨道交通-土地资源-城市空间-居民需求之协同——兼论轨道交通可持续发展之路

1863年伦敦第一条轨道交通运营至今，境外城市轨道交通业主能盈利的寥寥无几。我国从1969年10月1日城市轨道建成运营至今，截至2017年年底已经有34个城市运营轨道交通总里程达4712公里（不计市域快轨），全部业主在全成本上都是亏本的，这已经成为当地

政府一个沉重的经济负担。此外全国已经批复城市轨道交通建设规划的城市接近 70 个。每年城市轨道交通建设投资超过 4000 亿人民币，2017 年投资 4762 亿人民币，这又成为地方政府一项巨大的资金需求。目前我国城市轨道交通的发展模式是不可持续的。另一方面，由于城镇化快速发展，土地资源更加紧缺，已经成为国民经济发展的巨大瓶颈。而城市轨道交通车辆基地和运营区间结构安全保护又占用大量土地资源，使得社会经济发展和环境难以持续。

借助科技和人文手段，在进行城市轨道交通线站位规划时，需要使用不同制式交通工具、轨道交通、城市环境、城市空间、城市土地资源集约利用和居民需求六者之间协调发展；优化城市空间结构，提高整个城市交通服务水平，满足市民各类需求，提高市民的幸福感和获得感；轨道交通的发展和带动了全产业链的发展和大量就业，籍此来支撑社会的可持续性。规划基于车站或枢纽建设城市综合体、串接原来孤立的地下空间、协同旧城改造和重塑协调的城市空间形态等。将城市土地资源与生态环境协同实现高效能利用、按城市居民需求塑造城市空间以及业态分布，特别是极大地集约利用了土地资源并减少土地资源占用，实现城市环境的可持续性。通过科学规划实现城市土地立体空间高效利用，可给城市轨道交通业主带来大量的客流票务收益、持有物业及商业的额外收益；通过关键装备国产化带动中国制造；建设和运营环节自身降造节能减排，使运维管理安全高效，降低全寿命周期的成本；从而全面促进并激活经济与社会可持续健康发展，实现整体经济效益的可持续性。

深圳市委、市政府勇于担当，深圳市地铁集团有限公司在上述三个方面经过 18 年的不断探索，初步形成了一种“建效能最大化的城市轨道交通”理念，并取得初步成功。本报告全面介绍了这方面的探索。

2. 梁建英总工程师：时速 600 km 高速磁浮系统研制

国家“十三五”重点研发计划先进轨道交通重点专项立项开展“高

速磁浮交通系统关键技术研究”，以前三个五年计划研究为基础，聚集高速磁浮、高铁优势资源，旨在攻克高速磁浮系统核心技术，全面掌握自主设计、制造、调试和试验评估方法，研制时速 600 km 工程化常导高速磁浮交通系统，建立完善的高速磁浮系统研发、制造、试验平台，形成自主研发创新能力。建立具有国际适应性的中国高速磁浮系统核心技术和标准规范体系。

中车四方牵头 25 家单位组成产、学、研、用联合研发团队，在综合分析国内外各磁浮技术的成熟度和发展现状的基础上，确定常导磁浮的技术路线。通过梳理分析系统集成和线路轨道、牵引供电、车辆、运控通信四大系统的技术现状与缺口，结合顶层技术指标带来的技术挑战，开展系统创新，研发新型梁上梁、梁上板轨道结构，解决施工工艺、救援逃生难的系统问题；自主研发大功率牵引变流系统，可实现最高运行速度 600 km/h 以上；研发新型车辆，气动阻力、噪声大幅降低，舒适度、旅客界面大幅提升，采用轻量化、高气密铝合金激光复合焊和碳纤维复材车体，气密承载能力提升 1 倍；自主研发基于 SIL4 安全计算机平台的 ATO 自动驾驶运控系统，基于 38 GHz 和 LTE 的低时延高可靠车地无线通信系统，形成了系统集成及四大系统技术方案，并通过了专家评审。

目前正在开展试验平台、试制平台搭建工作，关键系统样机正在试制或试验，计划 2018 年完成一辆原理样车研制，2019 年完成一列工程样车研制，2020 年完成系统调试。后续将全力推进试验线集成试验及示范线运用考核工作，力争率先实现时速 600 km 商业运营。

3. 陈云敏院士：高速铁路路基动力学进展

高速铁路是各个国家竞相发展的关键交通基础设施，对经济发展和社会进步都具有重要意义。高速铁路有别于传统铁路的最大特点是列车运行速度高，从而对铁路路基的振动和沉降等提出严苛的控制要求，同时列车高速运行引起路基动应力的放大，导致进一步加速路基

的循环累积变形和性能退化；高速铁路的发展已突破传统岩土工程理论和技术范畴，高速铁路路基动力学已经成为铁道工程、岩土工程、结构动力学等多学科交叉的国际前沿和研究热点。报告总结了国内外对高速铁路路基动力学的研究进展，重点阐述了列车荷载作用下路基动力响应的理论分析模型、路基内部动应力分布特征和随着列车运行速度提高的放大效应、列车运行引起路基循环累积沉降分析方法及控制和修复技术等三方面内容，并提出高速铁路路基动力学发展的展望。

4. 刘长青总工程师：时速 400 km 高速动车组研制

近年来，中国高铁迅猛发展，现已建成“四纵四横”高铁网络，营业里程突破 2.5 万公里，动车组保有量达 3000 余列，最高运营速度 350 km/h，稳居世界第一。作为最具可持续性的交通运输模式，高铁已成为国民经济大动脉，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支撑作用。

为了持续推进轨道科技自主创新，国家科学技术部和中国中车股份有限公司以国家战略需求为目标，以国内外市场为导向，在既有高铁科技发展成果的基础上，以产、学、研、用协同创新为主要模式，研制时速 400 km 高速动车组，形成具备“超越遏制”和“战略高地”特征的新一代高速动车组。

针对 400 km/h 运营速度和跨国互联互通运用需求，以安全、高速、舒适、智能、节能、环保、互联互通为顶层目标，重点开展变轨距走行系统列车关键技术、跨国互联互通高速动车组装备与运维系统研制、列车多效应耦合及智能控制技术、基于噪声主动控制的综合舒适度控制技术、基于“重量-阻力-动力”多目标均衡的综合节能技术、面向高安全性的走行、结构、安全、电磁兼容技术研究，系统开展基础前沿研究、共性关键技术研发、集成与应用示范的全链条设计，依托时速 400 km 高速动车组样车研制，全面提升我国高速客运装备的安全、效能、绿色、体系化和国际化水平。

时速 400 km 高速动车组 8 辆编组(4 动 4 拖),运营速度 400 km/h,试验速度 440 km/h;具备跨国互联互通能力,适应轨距 1435/1520 mm,采用多制式牵引供电系统 AC25kV/DC3kV 或 AC25kV/AC15kV;能耗更低,应用轻量化、低阻力和动力系统优化技术,节能 10%以上;智能化水平更高,具备智能行车、智能运维和智能服务功能;更安全,主动安全和被动安全技术更加全面、先进、可靠;舒适度更高,350 km/h 时车内噪声值降低 2 dB(A)以上。同时,应用主动降噪技术,标准测点噪声值降低 1 dB(A)以上。

按照项目总体执行计划,2018 年 7 月完成了时速 400 km 高速动车组施工设计,正在开展样车试制,计划 2019 年 7 月完成整车试制,并开展整车试验验证。

5. 周顺华教授:地下工程穿越高速铁路的关键技术

随着我国基础设施建设的快速发展,大量地铁、道路、管廊等地下工程需要穿越运营高铁,且下穿工程数量每年以 20%的速度在增长。为满足高铁的高平顺性,须严格控制下穿工程的施工变形,但由于受浅层土质松散、列车振动等影响,下穿施工变形控制极为困难,需要解决以下三方面的关键科学技术问题:(1)行车与下穿施工之间的耦合影响,并寻找毫米级变形的技术方案;(2)下穿施工的多工序会导致变形累积,需要全过程、精细化的施工控制技术;(3)施工机械需要全过程感知施工状态,以保障精细化施工控制的实现。为此,从理论上揭示土体微变形产生的条件,提出主动减小应力释放并优化系统动力响应的微变形设计方法;建立了盾构掘进三元同步控制、管棚微扰动施工和辅助工法五步成桩的精细化施工、高精度监测、实时预警的下穿高铁闭环施工控制技术;研发了盾构机土仓渣土性状自动感知和实时改良、管棚自动纠偏、循环置换水平成桩加固等装置。通过上述成套技术实现下穿高铁施工变形小于 2 mm,成果应用于杭州地铁 1 号线下穿 300 km/h 运行的沪杭高铁,随后推广应用于南京宁高城际铁

路下穿京沪、沪汉蓉、宁安城际等高铁线路群，宁波地铁下穿甬台温高铁道岔咽喉区等工程，创造了下穿高铁速度最高、线路最密、距离最长和风险最高四项国际工程纪录。以上述成果为基础主编了国际上首部下穿高铁技术标准《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程（TB10182-2017）》，现已全面推广应用于国内下穿高铁工程。

6. 翟婉明院士：新能源空铁——一种有前景的轨道交通制式

随着我国经济和城镇化的快速发展，公众出行难、乘车难、交通拥堵已成为社会一大难题。地铁、轻轨由于建设投资大、周期长、运维成本高，难以在中小城市和旅游景区大规模修建。构建“分层次、多制式、功能互补、无缝对接、一体化运营”的轨道交通客运系统，已成为迫切需要解决的问题。新能源空铁（以锂电池驱动的悬挂式单轨交通）具有安全性高、适应性强、占地少、投资小、工期短、噪音低、景观性好等突出优势，有望成为我国大城市实现地下、地面、空中立体化交通，缓解城市和旅游景区交通拥堵问题的一种创新解决方案。

我国自 2011 年开始对空铁技术开展理论研究和可行性论证。2016 年初，中唐空铁集团、西南交通大学、中铁第六勘察设计院集团有限公司、中车南京浦镇车辆有限公司、中铁宝桥集团有限公司、上海富欣智能交通控制有限公司、四川大唐能源投资有限公司、中车资阳机车有限公司等单位组建产、学、研协作平台，联合研制新能源空铁。由中国科学院院士、西南交通大学首席教授翟婉明担任总设计师，中唐空铁集团投资建设的世界首条新能源空铁试验线全长 1.41 km，2016 年 11 月全线投入试运行。截至目前，已累计运行 30000 余公里，积累了大量的试验数据及运营经验，各项关键技术指标均达到了设计要求，标志着我国成为继德国和日本之后第三个掌握空铁技术的国家。2017 年 3 月，以刘友梅院士为组长的技术专家组评审认为，新能源空铁属国内外首创，整体技术达到国际先进水平，其中大容量

锂电池动力牵引应用技术和空铁列车-轨道梁桥耦合动力分析技术居国际领先水平。

新能源空铁的研发成功在国内外产生了广泛影响，2018 中国西部国际博览会发布了继“熊猫空铁”之后的第二代空铁产品——全景空铁，车体采用 270°透明窗设计，车身可以智能变色、变光，车内场景可随车外风景而变化。新能源空铁在我国正处于标准研究、示范线建设阶段。2018 年 8 月四川省正式发布了工程建设地方标准《悬挂式单轨交通设计标准》(DBJ51/T099-2018)。四川省大邑县晋原至安仁旅游基础设施——空铁试验线项目于 2018 年 7 月开工建设；贵州雷山空铁旅游示范线工程（西江千户苗寨—乌东村）“一期工程”黄里坳至乌东段已完成初步设计；深圳的新能源空铁项目也在积极推进之中。通过建设新能源空铁产业基地、打造产业集群、开拓国际市场，新能源空铁的应用前景值得期待。

7. 朱颖设计大师：莫斯科-喀山高速铁路设计关键技术

莫斯科至喀山高铁西起莫斯科，东至喀山，线路全长 770 km。设计速度 400 km/h，轨距 1520 mm，除承担旅客运输外，还承担轻型货物运输。地处高纬度严寒地区，极端最高温度 40°C，极端最低温度 -48°C。沿线季节性冻土、软土广泛分布，部分地区岩溶发育，地质和气候极其复杂。在全世界尚无商业运营经验可以参考借鉴。

要在严寒地区挑战 400 km/h 高铁设计标准，需要对高铁技术进行创新和发展。根据项目特点、地理环境条件、高铁技术发展需要，开展了时速 400 km 高速铁路平面和纵断面线路设计参数研究、时速 400 km 简支梁结构竖向挠跨比和基频限值研究、高速列车作用下无砟轨道的动力特性及其影响因素研究、地基处理加固桩抗冻拔技术研究、冻胀融沉对路基基底部的影响采用室内试验和数值模拟分析等工作。研究成果为莫喀高铁勘察、设计和建设提供了理论依据，为攻克特殊严寒地区修建时速 400 km 高铁关键技术提供了保证，有力推进了项

目实施，确保了莫喀高铁的技术水平和质量。

应用中国高铁的经验，采用基于中国 CRTS III 板式无砟轨道系统并满足俄罗斯技术环境条件的 CRTS IIIRUS 板式无砟轨道系统；正线道岔设计直向通过速度 400 km/h，侧向通过速度 120 km/h 的 25 号道岔；全线以统一的跨度 33.1 m 混凝土标准箱梁为主，特殊情况采用混凝土框架桥、连续梁、简支系杆拱；路基由沥青混凝土封闭层、第一保护层、第二保护层、保护层以下路堤、边坡防护、排水系统构成，设置全断面沥青混凝土封闭层，地基处理采用 CFG 桩、挤密螺纹桩、岩溶注浆、桩板结构；提出满足本项目的高速列车主要技术参数，客运动车组选型，货运动车组方案；提出动车所需工艺方案、关键设备建议；完成 5 个新建站的建筑、给排水、消防、供暖等专业设计。通过优化设计、创新俄罗斯铁路工程模式，提升了莫喀高铁的技术水平，也为中国技术、中国装备“走出去”创造了条件。

积极参与俄罗斯高铁《特殊技术条款》的修编和完善，为建立健全俄罗斯高铁技术标准体系提供中国经验，确保勘察设计质量，实现了中国标准“走出去”。

8. 徐恭义设计大师：我国两座在建超级悬索桥工程技术特点

杨泗港长江大桥是位于武汉中心城区的过江长江大桥，因桥位区桥梁密集等建设条件制约而采用主跨 1700 m 悬索桥跨越长江，悬索桥加劲梁采用全焊钢结构，上下双层公路布置 12 条车道，4 条人行道，2 条非机动车道。在同类悬索桥中刷新多项世界第一。

五峰山长江大桥位于江苏镇江大港区，是连接淮扬镇客运专线铁路的越江工程，采用跨度 1092 m 钢桁架梁悬索桥，下层为 4 线铁路，上层为 8 车道高速公路。是目前国际上载重车道最多、运营速度最高的千米级特大跨度悬索桥，创造多项世界纪录。

报告从设计角度介绍了两座超级悬索桥的技术特点和工程技术对策。

9. 高仕斌教授：高速铁路弓网系统运营安全保障成套技术与装备

高速铁路受电弓-接触网系统是动车组获取电能的唯一途径。弓网系统服役性态直接关乎我国 2.5 万公里高速铁路的运营安全。围绕高速铁路弓网系统在高速滑动、持续振动、频繁拉弧、恶劣气候等复杂环境下服役性态的检测监测、诊断评估与养护维修护等技术问题，开展系统的理论研究、技术创新与工程应用，对于保障高铁安全运营与效能提升具有重大意义。

(1) 建立了弓网机-电-热耦合模型，揭示了弓网受流性能的演变规律，提出了弓网多维特征的服役状态表征方法，构建了弓网服役状态表征的指标体系。

(2) 突破了高铁弓网系统检测监测与诊断评估系列关键技术，提出了目标摆动跟随与随车振动补偿方法，解决了几何参数精确检测难题；提出了复杂视景下弓网零部件松脱断裂的智能识别方法，解决了微细裂纹和微小零部件松脱的准确诊断问题；提出了弓网机-电-热检测参数的受流性能关联评估方法，实现了多参数综合评估弓网受流性能；提出了以安全指数为核心的弓网安全状态评估方法，实现了服役性能变化致因复杂的弓网安全状态综合评估。

(3) 研制了高铁弓网系统运营安全保障成套技术装备，开发了全天候、全方位的高铁弓网系统检测监测系列装置；建立了基于大数据技术的供电段、铁路局和铁路总公司三级架构的数据处理与诊断评估中心；研制了“检测-维护-抢修”一体化和高空、跨线、多工位作业的贯通式接触网检修列等检修维护重大技术装备。

已应用于全国所有的 18 个铁路局集团有限公司，为保障我国高铁安全运营发挥了重要作用，并推广到重载、普速电气化铁路和城市轨道交通。同时，对青藏、川藏特殊复杂环境的弓网运营安全保障技术提出了发展方向。

10. 余志武教授：混凝土随机损伤本构模型及其在铁路工程结构

中的应用

“客运需高速，货运要重载”，客运高速化与货运重载化是我国解决铁路运输能力紧张的两大重要举措。截至 2016 年底，我国高速铁路总里程数已经超过 2 万公里，而重载铁路已列入国家发展纲要优先主题和自主创新领域。开展铁路工程结构经时性能研究，即疲劳性能、变形性能、耐久性能研究，对于保障列车行车安全极为重要。因为高速与重载铁路轨道、桥梁结构经时性能的动态演化进程会影响轨道结构的平顺性，进而严重影响列车-轨道-桥梁系统的运营安全。由于混凝土材料的复杂性、铁路工程结构施工过程中人为或者环境等因素的影响，导致结构初始状态具有随机性；而且由于荷载的长期作用，引起材料和结构性能具有时变性和随机性。于是，铁路工程结构经时性能理论研究的突破口，是如何有效地揭示其性能的随机性与时变性规律。由于开展混凝土随机损伤本构关系研究，是揭示结构性能随机性与时变性的基础，因此，开展了混凝土随机损伤本构模型方面的研究。在微观损伤机理分析的基础上，基于统计力学方法，提出了一种混凝土及其与钢筋之间界面的随机损伤本构模型。该模型揭示了混凝土(界面)力学行为随机性与非线性耦合的物理本质，同时能方便快捷地表征随机性与非线性力学行为。开发了混凝土疲劳随机损伤本构模型有限元数值计算方法，进行了重载铁路桥梁与高速铁路无砟轨道结构疲劳性能劣化全过程数值分析。分析结果表明，该分析方法不仅可在均值意义上反映铁路工程结构性能的疲劳劣化，也可在概率意义上预测其离散范围，从而，更全面地反映铁路工程结构疲劳力学行为的非线性与随机性，进而验证了所提出的混凝土疲劳随机损伤本构模型应用于铁路工程结构疲劳劣化数值分析的可行性。

五、共识和建议

围绕高速铁路、城市轨道交通和磁悬浮交通等现代轨道交通重点领域，论坛报告人及专家提出了一系列的前沿科学与技术问题、见解

和建议，形成了轨道交通领域新颖的学术思想和观点，总结如下。

1. 高速铁路领域

前沿与挑战一：有砟铁路可靠运行 300 km/h 以上高速列车的路基设计和维护技术。现有软土地基上无砟铁路沉降发展规律及有效沉降修复技术。在极端环境（降雨、洪水、冻融循环和地震等）和车辆运行荷载共同作用下路基服役性能的保障。如何提升高速铁路临界速度以适应未来超级高铁超高速运行的要求。

前沿与挑战二：考虑高速列车的动力学大系统来实现高速列车技术与经济指标的科学匹配，实现全局优化。贯彻全寿命设计周期的概念，有效地控制高速列车全寿命周期成本。

前沿与挑战三：基于弓网机-电-热耦合模型揭示弓网受流性能的演变规律并确定弓网服役性能状态表征的指标体系。高速运行、持续振动下接触网动态几何参数的实时精确检测，复杂视景下弓网细微裂纹和微小零部件松脱的快速准确诊断，弓网机-电-热检测参数的受流性能评估，服役性能变化致因复杂的弓网安全状态综合评估。全方位检测监测、多维度诊断评估、状态式养护维修的装备体系的构建，全方位的高铁弓网系统监测装置的开发，诊断评估中心的建立，一体化养护维修重大技术装备的研制。

2. 城市轨道交通领域

前沿与挑战一：城市轨道交通所需的土地资源与城市空间和居民需求之间的协同。其中的关键科学问题是城市轨道交通模式的可持续化，即如何实现社会、城市环境以及经济效益的可持续性；主要技术难点在于使城市轨道交通建设达到效能最大化。

前沿与挑战二：地下工程不限速穿越高速铁路。涉及的科学问题与技术难点包含设计、控制和装备三个方面，即考虑高速行车与下穿开挖施工耦合的毫米级变形技术方案、全过程精细化的施工控制技术、全过程感知施工状态。

前沿与挑战三：新制式城市轨道交通（如新能源空铁）的技术创新和发展。

3. 磁悬浮交通领域

前沿与挑战一：常导磁浮车辆的稳定悬浮。主要存在的工程问题有：车辆与钢结构梁强烈共振，悬浮失稳，以及车辆参数微调，悬浮稳定性变差等。其中涉及的科学问题和技术挑战有：车辆-控制系统-轨道梁耦合振动机理，寻求一套自适应悬浮控制方案，确保不同线路结构上车辆都能够稳定悬浮。

前沿与挑战二：低振动长寿命磁浮道岔结构设计。目前，仍然面临车岔耦合振动剧烈，转辙时应力应变大，威胁道岔疲劳耐久性等突出问题。因此，亟需开展磁浮道岔荷载谱和转辙工况下的应力-应变特征的研究工作。

前沿与挑战三：长大桥上磁浮交通风-车-轨-桥耦合作用。主要存在的工程问题：长大桥上磁浮轨道结构设计缺乏理论与技术支撑。科学问题：磁浮风-车-轨-桥耦合作用机制与相应特征。

前沿与挑战四：超高速真空管道磁浮交通的基础科学问题：（1）超高速运动场中超导体物理与力学特性，涉及的科学难点有运动速度对超导体感应电流和捕获磁通的影响机理、超导体电磁-热-力多物理场耦合作用机理、高速运动场中悬浮导向力与超导材料物性的关系等。

（2）超高速条件下车-磁-轨-管-气动力学行为，涉及的科学难点有超高速运行时车-磁-轨-管-气振动形态以及悬浮导向间隙变化规律、轨道结构静态不平顺和变形变位对超高速运行车辆动力性能的影响机制、轻量化车体的高频弹性振动机理与响应规律。

会上，报告人、与会专家学者和领导纷纷发表个人对轨道交通领域相关问题的看法和观点，围绕重点关注的科技问题和热点工程问题展开热烈的讨论和交流，达成了一系列的共识，充分展示了我国轨道交通领域专家学者的新颖学术观点以及对我国轨道交通事业发展的积

极思考，呈现出繁荣的学术争鸣景象。此次论坛水平高、纪律好、学术氛围浓郁，为相关专家学者搭建了高层次的学术交流平台，有效地推动了轨道交通领域的前沿科学理论和技术探索，达到了倡导科学民主，鼓励学术争鸣的目的。同时，进一步增强了国家和社会各界对轨道交通领域存在的问题及发展情况的了解和关注，提升了我国轨道交通的影响力。

六、与国外同领域研究相比较的优势和不足

长期以来，我国高度重视铁路交通发展，特别是近 10 多年来轨道发展突飞猛进，取得了令世人瞩目的成就，主要体现在：运营里程最长（已建成“四纵四横”高铁网络，营业里程突破 2.5 万公里，占世界营业里程的 65% 以上）、建设速度最快、建成世界等级最高高铁（全长 1318 公里京沪高铁是世界上一次建成线路最长、标准最高的高速铁路）、新建世界首条高寒高铁、建成世界单条运营里程最长运营时速最高高铁（全长 2298 公里的京广高铁，全线设计最高运营时速 350 公里，初期运营时速 300 公里）、高速动车组谱系最全、整车滚振台试验速度最高（CRH380AM 高速动车组在西南交通大学牵引动力国家重点试验室，创造了 605 km/h 整车滚动振动试验的世界纪录）、运营动车组试验时速最高（CRH380A 高速动车组创造了 486.1 km/h 世界铁路运营列车试验第一速）、持续高速运行时间最长、高速动车组运用环境最复杂等。

同时，我国城市轨道交通起步晚、发展快，后来居上，已成为目前世界上最大的建设市场之一；磁浮交通作为一种战略性新兴产业，也具有一定的发展前景。总之，轨道交通领域的迅猛发展对促进和推动我国的社会进步、城市化进程，助力“一带一路”的发展不断发挥着重要作用，这为我国轨道交通的发展以及相关领域的研究工作带来了重大机遇。

然而，与国外相比，我国轨道交通领域还存在许多劣势和问题。

我国高铁和城市轨道交通的发展起步较晚，建设和运营经验不足，加上基础研究薄弱，跟不上快速建设和发展的需求，造成基础理论与工程建设应用不匹配，同时缺乏符合我国国情的建设和养护维修标准体系，仍存在许多科学技术以及工程问题有待研究解决。大规模快速化发展以及养护维修带来了一系列的新问题与新挑战。例如，我国尚未形成自己的高速铁路运营维护标准体系，亟待开展高速铁路基础结构运营维护控制限值研究；钢轨波浪形磨耗成因对于我国乃至世界都还是一个难题；基础结构累积变形与轨面几何形态的空间映射关系及规律尚未揭示清楚。我国城市轨道交通运营维护仍然面临着重大挑战，城市轨道交通线路的变形与控制问题、城市轨道交通引起的环境振动与噪声问题以及城市轨道交通通信信号可靠性问题形势依然十分严峻。磁悬浮交通领域，常导磁浮车辆的稳定悬浮问题、低振动长寿命磁浮道岔结构设计理论与方法、超高速真空管道磁浮交通的基础科学问题都迫切需要开展实质性的基础科学研究工作。

七、其他特色和创新之处

此次论坛促进了轨道交通领域产、学、研的有力结合，推动了科研、教育、生产不同单位和部门在功能与资源优势上的协同与集成化，加强了技术创新链条中的上、中、下游的对接。从研讨的议题和报告内容来看，论坛覆盖了高速铁路、城市轨道交通、磁悬浮交通等现代轨道交通的重点领域，对整个轨道交通领域的科技前沿问题、工程难题等进行了全面的梳理和讨论。另外，论坛研讨内容不仅有基础科学问题和理论体系的剖析、技术难点和突破点的探寻，而且还有工程问题及解决方案等应用成果的展示，具有鲜明的“顶天立地”特色。

（作者：翟婉明，中国科学院院士，西南交通大学牵引动力国家重点实验室列车与线路研究所所长、教授；赵春发，西南交大牵引动力国家重点实验室列车与线路研究所副所长，研究员；陈再刚，西南交大牵引动力国家重点实验室，副研究员）