

铁路轨道工程长寿命安全保障战略探讨

王平^{1,2}, 陈嵘^{1,2}, 安博洋^{1,2}

(1. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 我国轨道交通基础设施建设实现了跨越式发展, 但针对轨道工程运营的安全管理与高效维护, 仍存在许多复杂的难题亟待解决, 突出表现为轨道结构实际服役周期难以达到设计寿命。因此, 组织实施铁路轨道工程长寿命安全保障计划尤为迫切。本文首先回顾了我国铁路轨道工程领域取得的成绩, 进一步介绍了国外一些发达国家在该领域的发展动态。相比发达国家, 目前我国在轨道工程长寿命安全领域的研究还存在比较大的提升空间, 具体表现在缺乏顶层设计, 研究工作的系统性不足, 深度与广度不够。最后就该计划的实施从理论研究、人才培养、智能化信息管理、性能提升与恢复等方面提出了若干建议。

关键词: 铁路轨道工程; 长寿命; 安全保障; Shift2Rail

中图分类号: U2 **文献标识码:** A

Discussion on Long-Life Security Strategies for Railway Track Engineering

Wang Ping^{1,2}, Chen Rong^{1,2}, An Boyang^{1,2}

(1. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Although significant progress in the development of rail transportation infrastructure has been achieved in China, operational safety management and efficient maintenance still has numerous complicated problems to be solved, especially relating to insufficient service life. Therefore, it is particularly urgent to organize and implement a long-life security plan for railway track engineering. This paper first reviews recent achievements in the field of railway track engineering in China, and then introduces advancements in this field in developed countries. Compared to developed countries, current research into long-life safety in the field of railway track engineering in China has much room for improvement; there is the absence of a top-level design, a lack of systematic research work, and insufficient depth and breadth of research. This paper concludes by providing suggestions in terms of theoretical research, talent cultivation, intelligent information management, and performance improvement and recovery.

Keywords: railway track engineering; long life; safety guarantee; Shift2Rail

铁路是现代交通运输的重要组成部分, 在我国不仅承担了近三分之一的旅客运输量, 还担负了一半以上的货物运输量。轨道工程结构作为铁路系统

的主要部件, 确保其安全服役并尽可能延长其使用寿命, 对于支撑经济建设持续发展、保障人民生活安稳有序、助力国家和社会稳定, 都具有十分

收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2017-11-29

通讯作者: 王平, 西南交通大学, 教授, 主要研究方向为高速、重载铁路轨道结构与轨道动力学; E-mail: wping@home.swjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“交通基础设施重大结构安全保障战略研究”(2015-XZ-28)

本刊网址: www.enginsci.cn

重大的战略意义。为此，2015 年中国工程院重点咨询项目“交通基础设施重大结构安全保障战略研究”中设专题开展铁路轨道结构安全保障战略这一事关国家安全、国防安全和国计民生的重大研究项目，为本领域的学科发展、技术发展、法规建设提供战略咨询。

一、我国轨道工程规模庞大，长寿命安全保障面临严峻挑战

经过多年的发展，我国轨道交通的基础网络布局已初步完成。中西部地区铁路跨区域快速通道基本形成，高速铁路逐步成网，城际铁路与城市轨道交通不断发展，保障能力明显增强。目前，全国铁路运营里程已接近 1.25×10^5 km，其中高速铁路超过了 2.2×10^4 km。依托重载技术的自主创新，我国不仅成为世界上仅有的几个掌握铁路 3 万吨重载技术的国家之一，而且运输效率居世界首位。我国已有 27 个城市开通了快速轨道交通线路，运营线路总长度超过了 3 000 km。随着《中长期铁路网规划》(2016—2030 年)的颁布，铁路网将构建以“八纵八横”主通道为骨架、区域连接线衔接、城际铁路为补充的高速铁路网，实现省会城市高速铁路通达、区际之间高效便捷相连。总的来讲，我国铁路发展突飞猛进，取得了令人瞩目的成就，但针对轨道工程运营的安全管理与高效维护，仍缺乏相关的基础理论与技术研究 [1]。通过科学的维护使铁路轨道能够在长期运营中安全与稳定地服役，是一个日益突出的关键问题。

世界铁路自诞生 190 余年来，“速度”始终是不断发展的目标，而“安全”则是铁路运输永恒的

主题，是铁路设计、建造、运营与维护的核心要求和最终落脚点。铁路一旦出现安全事故，将导致重大的人员伤亡与财产损失，甚至有可能影响到国家的稳定。规模庞大的轨道工程在复杂的服役环境下不可避免地存在性能退化，同时可能受到自然灾害（如地震、滑坡、泥石流、风灾、冰雪凝冻等，见图 1）和人为破坏（如可能的局部战争、恐怖袭击、纵火等）的影响，导致其在正常状态下的性能表现不佳、服役寿命缩短，在自然灾害和突发事件的影响下损伤严重。然而，我国在轨道结构长寿命及其安全保障领域的系统性研究工作尚处于起步阶段。

我国仍处于交通快速发展时期，一大批结构新颖、技术复杂、设计和施工难度大、科技含量高的重大工程结构相继建成，而且随着既有基础设施服役时间的不断延长，损伤和病害加速涌现，灾难破坏形式和致灾行为与后果更为多变，交通基础设施的长寿命安全保障呈现出新内容、新形式和新特征 [3]。一方面，因结构的自然劣化、严峻的服役条件以及不足的养护维修等因素的影响，部分结构过早地出现了安全性不足、耐久性降低、适用性不强的状况，这导致结构的实际使用寿命远远短于预期使用年限；另一方面，随着时间的推移，我国大批工程结构物的老化现象日益突出，特别是一部分重大结构将陆续达到设计使用寿命，如何科学决策它们的存续或合理使用将是我国面临的一个重要问题；同时，以往高速度和高强度建设的弊端必然会在某一时段内集中反映到结构的维修和加固上，届时将会给养护维修、交通运输和社会生活等带来巨大压力。

自世界第一条高速铁路开通运营以来，一代代科研技术人员虽然对高速铁路进行了不断探索，但



图 1 地震（左）和暴风雪（右）引起新干线高速列车脱轨 [2]

危及高速行车条件的安全问题仍没有得到全面的认识与解决，影响高速铁路行车安全的故障甚至事故仍然时有发生。究其原因，除了对新材料的失效机理、列车运行于极端条件下的脱轨原理等问题认识不够深刻之外，对于轨道基础结构动态性能演变机理认识不清也是重要原因，如高速铁路基础结构初始缺陷演化、动态性能劣化、特殊条件下突变状态对列车运行安全的影响。由钢轨、扣件系统、轨道板、路基或桥梁等组成的高速铁路基础结构，因其组成材料的多样性、运营环境的复杂性以及结构分布的空间效应、服役过程的时间效应、多场多因素交变耦合效应等，其动态性能的时空演变机制与规律十分复杂，是完善高速铁路运营安全技术体系的主要障碍之一。在今后5~10年内，我国在对高速铁路持续建设的同时，高速铁路高安全、高可靠、高品质运营保障体系的建设迫在眉睫，持续着力开展与之相关的基础理论与关键技术开发（图2以高速道岔设计为例示意该过程），是我国高速铁路运营安全保障体系建设的迫切需求，也是我国从追踪、保持到引领国际高速铁路技术发展的必由之路。

高速铁路是许多高新技术最大的应用平台之一，高速铁路发展对科学技术的促进作用、对社会经济文化产业的辐射作用、对国家安全及地缘政治的保障作用是其他产业难以比拟的。我国高速铁路的发展已培植出了一个庞大的产业链，并带动信息、材料、能源、制造等高新技术的进步和产业化进程，对促进农业、制造业、建筑业、能源工业、旅游业

和物流业等行业的发展起着强大的推动作用。目前，我国的高速铁路系统技术已跻身世界前列，掌握了拥有自主知识产权、具有国际先进水平的成套技术，我国高速铁路技术的下一次提升基本上不再受制于人，完全可以通过持续强化自主创新，逐步占领高速铁路技术的制高点，引领世界高速铁路技术[5]。因此，充分利用我国高速铁路已具有的相对优势，深入持久地强化高速铁路技术的基础理论与关键技术开发，形成高速铁路技术国际竞争优势，不仅能推进我国科学技术的快速发展，而且对增强国家竞争优势、构建国际政治经济新秩序影响深远。

我国的自然条件和地质情况复杂多样，要满足高速铁路的安全运营，仍存在众多复杂的难题亟待解决[6,7]。目前，我国针对轨道工程结构长寿命安全的系统研究尚处于起步阶段，有效地维护铁路轨道的价值、功能以及在有限的财政基础上达到最优的使用性能已成为管理部门亟需解决的问题。目前已有的设计缺乏对结构长寿命的系统考虑，包括相关的设计理论与建造方法均不成熟；施工与设计质量的缺陷威胁着大量正在使用的既有结构的安全；对既有结构养护维修的缺失或系统性不足可能严重缩短结构的实际使用寿命；遭受不同类型灾害作用后的结构会存在不同程度的损伤，并对结构的长期性能造成影响；对既有结构的剩余寿命评估还缺乏必要的理论基础；对服役期已达到设计年限的轨道结构，评估其继续安全服役的可行性理论与方法还有待研究；现有的检测与监控的技术与手段还不足以保证结构在长寿命期的安全运行；对长寿命安全

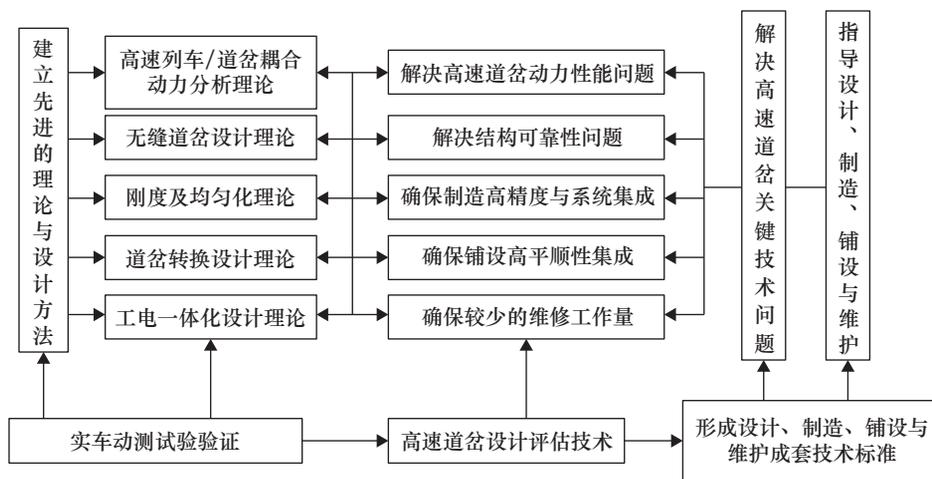


图2 高速道岔设计总体技术路线 [4]

领域开展的系统研究工作不足, 既不利于既有结构的管理与维护, 也对新结构的设计提出挑战。

二、发达国家高度关注铁路轨道工程长寿命安全领域的科学技术与产业发展

鉴于交通基础设施日益严峻的安全形势及其在国计民生中的重要地位, 世界上许多国家和组织均先后发起了针对轨道工程维护管理与安全保障的战略性研究计划, 如国际铁路联盟 (UIC) 的 EcoTrack 系统开发 [8]、欧盟委员会的 Shift2Rail 战略 [9~11] 等。

铁路工程的建设及维护费用高昂, 占基础设施总开支相当大的部分。任何此类费用的减少都将对基础设施管理的整体效益产生显著影响。因此, 对于负责铁路线路状况管理的人员来说, 最重要的是以尽可能低的成本在所需时间内使铁路保持在既定的质量水平。20 世纪 90 年代, 24 个欧洲国家的铁路部门共同参与了 UIC 发起的 EcoTrack 系统开发。EcoTrack 系统可帮助铁路运营决策者有效地进行维护规划、财务安排及制定相应的维修策略。EcoTrack 系统开发的总体思路是解决轨道管理操作序列中最复杂的环节, 做出有关轨道维护或更换的决策。为此, 应弄清轨道现场状况 (如年通过总重、轴重、速度)、轨道几何形位、轨道材料的状态与各种轨道维护或更换工作介入效果之间的复杂关系, 并做出相应的规划。这些相互关系被称为“规则”。在这些“规则”中, 一部分代表劣化过程, 一部分代表因轨道维护或更换作业介入而产生的修复效果, 而其余部分则代表基于欧洲各大铁路公司几十年来轨道维护和更换实践的经验规则。这些“规则”代表 EcoTrack 系统推理工具的核心, 或者说是知识库。在 EcoTrack 系统开发期间, 从上述 24 个欧洲国家铁路部门的维护实践中收集到约 173 条“规则”。经过广泛而深入的筛选过程后, 54 条“规则”得到采纳并被纳入 EcoTrack 系统知识库中作为标准“规则”。这些“规则”均可被弃用、起用、修改或补充, 使 EcoTrack 系统能够适用于任何特定国家铁路部门的政策。

进入 21 世纪, 欧盟意识到欧洲铁路部门面临一系列重要的挑战, 这些挑战严重阻碍了铁路运输模式的发展, 威胁欧洲铁路制造业在全球市场的领

先地位。为增强铁路在环保、土地利用、能源消耗和安全性方面的内在优势, 2014 年欧盟委员会发起 Shift2Rail 战略, 由欧盟以及铁路行业的 8 个代表 (包括铁路设备制造商阿尔斯通公司、安萨尔多、庞巴迪公司、西班牙铁道车辆制造商 CAF 公司、西门子股份公司、泰雷兹公司以及两家基础设施运营商 Network Rail 和 Trafikverket) 组成企业联盟负责组织实施, 计划在 2020 年前投入 770 亿欧元, 通过全面协调的方法来进行铁路研究和创新, 同时注重铁路系统供应商和用户的需求, 帮助解决铁路领域面临的各种挑战。维护和提高系统的安全性过去一直被认为是铁路研究和创新项目的必要部分, 提供最佳的安全水平是 Shift2Rail 应该维持的一个关键目标。Shift2Rail 的实施应该能够通过技术触发安全改进。当创新可以解锁安全壁垒、安全规则成为过去式需要重新审视时, Shift2Rail 将能识别一种方法来应对安全和风险。除了通过科技发展进行安全改进, Shift2Rail 也应该研究和审查如弹性、人类和组织、风险接受标准等因素。

相比发达国家, 目前我国在轨道工程长寿命安全领域的研究还存在比较大的提升空间, 具体表现在缺乏顶层设计, 研究工作的系统性不足, 深度与广度不够。由于我国铁路轨道运营里程最长, 速度目标最高, 气候和地质条件最为复杂, 运行平稳性要求最严, 致使轨道工程长寿命安全保障的实现与保持的技术难度是其他任何国家都无法比拟的, 因此, 组织实施铁路轨道工程长寿命安全保障计划尤为迫切。

三、铁路轨道工程长寿命安全保障计划的实施建议

(一) 总体目标

通过政府引导、整合资源, 实施交通基础设施长期保持、性能提升、损伤恢复等三项重大工程, 实现长期制约交通基础设施发展的关键共性技术突破, 提升我国交通行业的整体竞争力。到 2025 年, 全面掌握我国交通基础设施重大结构的状态, 构建起统一的可视化、信息化、智能化的交通基础设施重大结构信息管理平台。对重大工程结构实现可测、可控、可修、可换、可应急处置, 从真正意义上实现重大结构在常态、自然灾害和应急条件下的

长寿命安全保障；促进大型工程结构现代传感技术与智能养修机器人等装备的研发及其产业化，实现核心基础零部件和关键基础材料的完全自主研发。在重大结构的长寿命安全保障领域推广新材料、新结构和新工艺，应用范围达到重大工程结构总量的30%，并推动产业的升级换代，形成一批具有较强国际竞争力的跨国公司和产业集群。到2035年，形成现代交通基础设施养护维修策略及技术体系，实现交通基础设施重大结构长寿命安全保障的常态化，现代传感技术、智能机器人、无损检测技术基本普及。同时，结合现代信息技术，高水平、高效地进行重大结构的检测、监测、评估、修复或加固处置。推动交通基础设施发展成为我国科技创新的又一新的主战场，在世界上应具有创新引领能力和明显的竞争优势，从而实现交通强国的战略目标。

（二）战略任务

（1）针对长寿命安全保障领域的基础理论和方法尚不成熟等问题，实施轨道工程行业创新能力提高工程。通过国家科技计划（专项、基金等）支持关键核心技术的研发并加快成果转化。在高速铁路、重载铁路和城市轨道交通等重点领域开展示范工程，推广以绿色、智能、协同为特征的先进设计技术。

（2）以轨道工程结构长寿命安全保障领域高层次、紧缺专业技术人才和创新型人才为重点，实施专业技术人才知识更新工程和卓越工程师培养计划，建设一批工程结构性能与安全保障训练中心，打造高素质的技术人才队伍。采取多种形式，选拔各类优秀技术人才到国外学习，探索和建立国际培训基地。建立人才激励机制，加大对优秀人才的表彰和奖励力度。加强人才需求预测，完善各类人才信息库，构建人才水平评价制度和信息发布平台。

（3）针对正常工作状态下的各类交通基础设施和重大结构，构建统一的可视化、信息化、智能化的服役状态信息管理平台，运用互联网+、物联网、大数据和云计算的现代信息技术，完成从设计、建造、运营到损伤和老化的全寿命信息档案的创建，为结构安全、设计校核、养护维修和检测技术发展提供服务。实施重大结构服役性能长期保持工程，有效掌握重大结构在服役期间的局部或整体的长期性状和发展趋势，确保交通基础设施重大结构的性能表现优良。

（4）针对即将达到设计寿命或服役期提前到限的重大工程结构，实施基于新材料、新结构和新工艺的性能提升工程，强化结构承载能力，延长大型结构的使用寿命。以特种金属功能材料、功能性高分子和先进复合材料等为发展重点，加快研发新材料制备关键技术和装备；引导企业采用先进适用技术，优化产品结构，全面提升设计、制造、工艺和管理水平，促进基础设施的升级换代。

（5）针对交通基础设施重大结构因自然灾害或突发事件所造成的局部损（毁）伤，构建大型结构应急抢修、抢建与装备研发和应急救援组织管理体系，实施交通基础设施重大结构损伤恢复或性能再造工程。基于现代运营组织管理、全寿命预防养护维修模式及智能化、自动化养护机械设备的研发，培育重大交通基础设施养护、维修和加固新型产业。

四、结语

我国既有轨道工程规模庞大且发展迅猛，结构的长寿命安全保障面临严峻挑战。相比发达国家，目前我国在轨道工程长寿命安全领域的研究还存在比较大的提升空间，缺少针对轨道工程维护管理与安全保障的战略性研究计划。由于我国铁路轨道运营里程最长，速度目标最高，气候和地质条件最为复杂，运行平稳性要求最严，致使轨道工程长寿命安全保障的实现与保持的技术难度是其他任何国家都无法比拟的。为确保铁路轨道运营安全并尽量延长其使用寿命，可通过提高创新能力、加强专业人才培养、培育轨道工程“建、养、护”领域的新型产业体系，促使我国在铁路轨道工程长寿命安全保障领域（设计、施工、管理等）的综合能力达到世界先进水平。因此，建议尽快实施“铁路轨道工程长寿命安全保障计划”。

参考文献

- [1] 许佑顶, 高柏松, 杨吉忠, 等. 中国铁路工程建设技术标准“走出去”战略研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(5): 116-122.
Xu Y D, Gao B S, Yang J Z, et al. Analysis of the “going global” strategy of China railway engineering construction technical standards [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(5): 116-122.
- [2] 金学松, 郭俊, 肖新标, 等. 高速列车安全运行研究的关键科学问题[J]. 工程力学, 2009(26): 8-22.
Jin X S, Guo J, Xiao X B, et al. Key scientific problems in the

- study on running safety of high speed trains [J]. *Engineering Mechanics*, 2009 (26): 8–22.
- [3] 翟婉明, 赵春发, 夏禾, 等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(7): 645–660.
Zhai W M, Zhao C F, Xia H, et al. Basic scientific issues on dynamic performance evolution of the high-speed railway infrastructure and its service safety [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, 44(7): 645–660.
- [4] 王平, 陈嵘, 徐井芒, 等. 高速铁路道岔系统理论与工程实践研究综述 [J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(2): 357–372.
Wang P, Chen R, Xu J M, et al. Theories and engineering practices of high-speed railway turnout system: Survey and review [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(2): 357–372.
- [5] 卢春房. 中国高速铁路的技术特点 [J]. *科技导报*, 2015, 33(18): 13–19.
Lu C F. Highlights of China high-speed railway [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(18): 13–19.
- [6] 赵国堂. 严寒地区高速铁路无砟轨道路基冻胀管理标准的研究 [J]. *铁道学报*, 2016, 38(3): 1–8.
Zhao G T. Study on management standard of frost heaving of ballastless track subgrade on high-speed railway in service cold regions [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(3): 1–8.
- [7] 杜彦良, 张玉芝, 赵维刚. 高速铁路线路工程安全监测系统构建 [J]. *土木工程学报*, 2012(45): 59–63.
Du Y L, Zhang Y Z, Zhao W G. Construction of the high-speed railway line engineering safety monitoring system [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012(45): 59–63.
- [8] Rivier R E. EcoTrack: A tool for track maintenance and renewal managers [J]. *WIT Transactions on The Built Environment*, 1998(37): 733–742.
- [9] Haltuf M. Shift2Rail JU from member state's point of view [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016 (14): 1819–1828.
- [10] Gogos S, Letellier X. IT2Rail: Information technologies for shift to rail [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016 (14): 3218–3227.
- [11] Peris E, Goikoetxea J. Roll2Rail: New dependable rolling stock for a more sustainable, intelligent and comfortable rail transport in Europe [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016 (14): 567–574.