

· 资助成果 ·

## 高速铁路轨道结构安全服役的研究

王平\* 何庆 杨荣山 陈嵘 徐井芒\*

西南交通大学, 成都 611756

**[摘要]** 高速铁路基础研究联合基金于2011年4月由国家自然科学基金委员会和中国铁路总公司共同协商设立,本文针对高铁联合基金(轨道)资助下的重要项目成果进行了回顾简述,通过概述在高铁联合基金资助下各专家学者在轨道结构检测关键理论、钢轨伤损演变机理及数据驱动智能运维、极端气候条件下无砟轨道伤损及服役状态、高速道岔轮轨接触行为及损伤机理等方面取得的研究突破,阐述了高铁联合基金对于高速铁路核心技术发展的重要性。

**[关键词]** 高速铁路基础研究联合基金;轨道检测;钢轨伤损;无砟轨道伤损;高速道岔

近些年来,我国的高速铁路建设已经进入了全面发展阶段,在许多方面不断刷新世界纪录,但与德国、法国等老牌高铁强国相比,我国高速铁路核心技术的竞争力仍存在不足。而随着我国高速铁路“走出去”战略的实施,高速铁路核心技术的发展更是未来研究的重点。因此加大高速铁路基础理论研究力度、大力提升高铁核心技术竞争力成为我国高铁行业未来的发展方向<sup>[1]</sup>。

高速铁路基础研究联合基金(以下简称“高铁联合基金”)于2011年4月由国家自然科学基金委员会和中国铁路总公司共同协商设立,旨在发挥国家自然科学基金的导向和协调作用,促进产学研结合,吸引调动社会科技资源开展以我国高速铁路发展为背景的相关领域基础研究工作,推动我国铁路行业自主创新能力提升。高铁联合基金对实现基础研究与国家目标相结合,发挥科技生产力在企业中的作用,加速企业开发具有自主知识产权的新技术和新产品,行成市场竞争力,促进研究成果转化的各个环节有效衔接和资源的合理调整、优化配置等方面具有重要推动作用<sup>[2-4]</sup>。

高铁联合基金自成立以来吸引调动了众多社会优势科技资源,在高速铁路基础研究、重大科学技术难题攻关等方面取得了一系列阶段性成果,在轨道结构检测、大数据在钢轨伤损预测及养护维修的应用、轨道板在极端环境下的服役性能以及高速道岔长寿命服役性能等诸多方面都取得了突破。



**王平** 西南交通大学教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金项目获得者,西南交通大学科学技术发展研究院院长,高速铁路线路工程教育部重点实验室主任,曾获享受国务院政府特殊津贴专家、教育部新世纪人才、四川省“天府杰出科学家”、四川省学术及技术带头人等称号。现为科技部国家重点研发计划“先进轨道交通”重点专项总体专家组成员、中国国家铁路局技术标准委员会委员、中国铁道学会轨道交通工程分会副主任。曾主持获得国家技术发明奖二等奖,四川省科技进步奖(自然科学类)一等奖、教育部科学技术进步奖一等奖及中国铁道学会科技进步奖一等奖等奖励。



**徐井芒** 西南交通大学特聘研究员,博士生导师,国家优秀青年科学基金获得者。入选了中国科协“青年人才托举工程”、四川省学术与技术带头人后备人选等。主持研究了国家自然科学基金青年、面上及优秀青项目,四川省重点研发项目等。曾获得詹天佑铁道科技青年奖、中国铁道学会科学技术奖特等奖及一等奖、四川省科学技术奖(自然科学类)一等奖等奖励,授权发明专利10余项,其中1项获得中国专利奖优秀奖。

### 1 助力高速铁路轨道结构检测关键理论与方法取得突破

由于轨道结构承受多场耦合的外荷载作用,结构呈长条形,具有散体性和组合性,工作环境及边界

收稿日期:2021-06-24;修回日期:2021-08-01

\* 通信作者,Email:wping@home.swjtu.edu.cn, mang080887@163.com

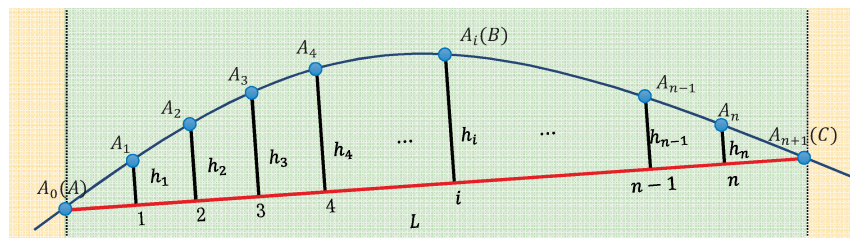
条件异常复杂,因而轨道结构的状态具有时变性。由于轨道状态直接影响着轮轨关系,具有高敏感性,时变的轨道结构状态不能实现有效管控与评估将严重威胁轮轨运输安全。在高速铁路高安全、高速度、高平稳、高密度行车及有限的“天窗”时间条件下,依靠大量的人力、物力和财力保障轨道结构安全服役并不科学,研究更高效、更可靠、更合理的检测理论与技术成为确保高速铁路轨道结构应用安全的当务之急。在高铁联合基金的支持下,西南交通大学王平团队针对高速铁路轨道结构安全长效服役急需的三项关键检测内容,应用理论研究、仿真分析、现场试验相结合的方法,开展了轨道几何不平顺高效检测、无缝线路状态监测、轨道刚度移动检测的理论与方法研究,探索构建了面向工务维护及实时反馈的检测评估体系。

在高速铁路轨道静态几何长波不平顺的高效检测与评估理论研究方面,该项目通过高速铁路轮轨动力学分析,确定了不同速度级时影响高速行车品质的敏感波长区段和幅值,完善了轨道几何不平顺管理指标等检测标准;然后在 GPS/惯导航检仪、动静组合轨检仪等检测技术的基础上,优化系统设计,提出了将轨道几何关键点(测量区段始、终点,沿线控制点)的高精度绝对测量(静)与空间曲线的快速相对测量(动)有机结合的长波不平顺高效检测理论

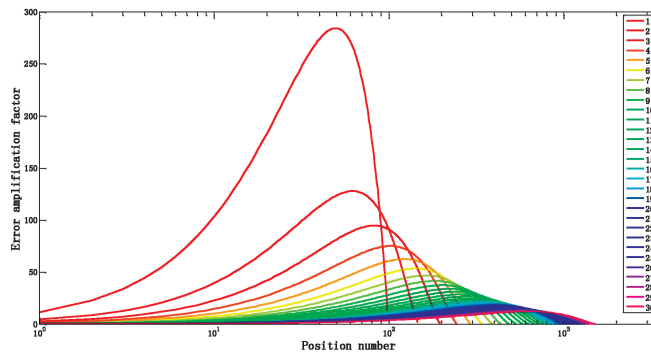
一类改进 N 点弦测法,从根本上解决了弦测法基准不稳定的缺陷,并提出通过多测点来实现测量误差的控制,形成一系列的衍生轨道不平顺测量方法,如图 1 所示;通过新型轨检仪获取区段轨道几何空间曲线,并采用虚拟弦线在获得的三维空间曲线上“量取”任意波长的方向和高低不平顺,实现了与高速行车舒适性密切相关的长波长不平顺检测,如图 2 所示。提出了基于 TQI 轨道质量指数及概率密度函数的轨道不平顺评价方法和轨道不平顺维修调整的控制方法,满足了高速列车运行的安全性和平稳性要求。

在高速铁路无缝线路状态检测理论与技术研究方面,该项目提出了无缝线路状态以监代检的检测原则,建立了考虑不同轨道结构以及不同下部结构的无缝线路静、动力学分析模型,确定了重点区段无缝线路状态评估方法,研究了关键监测项及合理布点的选择,构建了成套的无缝线路状态监测理论与方法。

在高速铁路轨道刚度的移动检测方面,该项目研究了人工激振情况下钢轨振动的移动测量技术、采用轮轨系统动力学分析钢轨的结构模态参数、基于模态参数的轨道整体刚度及扣件系统刚度反演求解理论与方法、室内及现场试验验证,为研发新型的移动式轨道刚度检测车提供了理论支撑。



(a) N 点弦测法反演模型



(b) N=1~30 时的一弦 N 点弦测法误差分布

图 1 一弦 N 点弦测法

该项目建立了高架站—无砟轨道—道岔长期监测系统,实现了高架站轨道系统服役状态的实时在线监控与预测预警;开展了无缝线路检测与监测的室内外试验,试验结果良好;构建了高速道岔功能状态的监测系统,如图3所示。

该项目基于轮轨动力相互作用理论,深入研究了轨道不平顺敏感特征谱集;建立了高速铁路轨道结构几何不平顺的长波长高效检测理论与方法,提出了考虑波长的轨道不平顺评价体系和控制技术,指导了新型静态轨检仪的研发,使静态轨检技术与动态轨检技术相匹配、相配合,指导了轨道几何状态现场维护与管理。研究了关键区段高速铁路无缝线路状态的纵向行为,遴选了高敏性参数,建立了多参数、多源的无缝线路状态监测系统,提出了无缝线路状态监测的综合评估方法,指导了高敏感区段的无缝线路状态监测。研究了基于模态检测的轨道刚度检测理论,提出了移动式轨道刚度检测车的实现方法及评估体系。基于点、线、面立体交叉的多源、海量信息,探索构建了轨道结构安全服役综合评价体系,对于面向工务维护及实时反馈的检测应用平台的研发具有指导意义。

## 2 助力高速铁路钢轨伤损演变机理与数据驱动智能运维研究取得突破

我国高速铁路正由大规模建造向长期运营安全管理转变,然而在钢轨安全运维方面还存在很多挑战,如钢轨探伤检测的准确率和效率普遍较低,对复杂服役环境下的钢轨伤损演变行为认知不明以及高速铁路钢轨的修规亟待完善等问题,针对这些问题,在高铁联合基金的资助下,西南交通大学何庆团队从演变机理上探究了线路线型、轨道几何参数、复杂服役环境(例如低粘着、长大坡道地段等)对钢轨伤损的影响。

在钢轨伤损演变机理方面,该项目建立了钢轨伤损萌生及扩展的三维瞬态仿真模型,如图4所示,开展了复杂环境下钢轨伤损特性试验,建立了仿真条件下钢轨伤损演变规律与实际钢轨疲劳特性间的映射关系;基于相关实验和检测资料,确定了描述钢轨伤损状态的数学模型;研究了线路多因素交叉耦合作用对钢轨伤损的影响机制,构建了钢轨伤损全生命周期预测的物理模型,并进一步探明钢轨伤损的失效机理,为高速铁路钢轨伤损风险控制与数据驱动维护提供了理论基础。

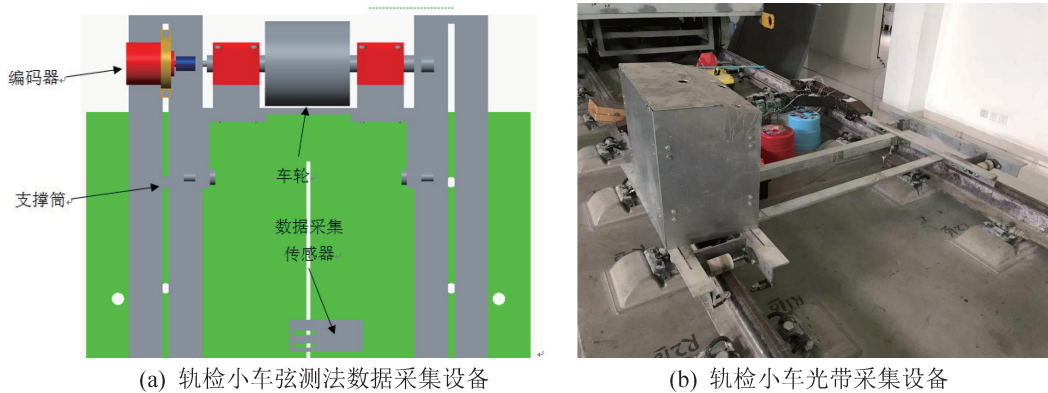


图2 轨道多功能检测小车

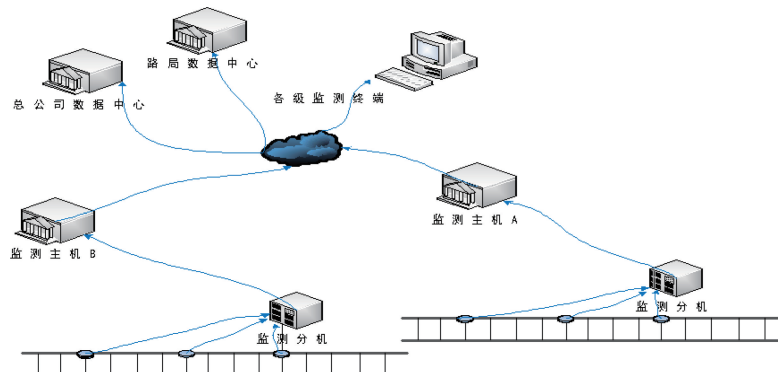


图3 高速道岔监测系统

在钢轨损伤多数据智能识别及硬度信息采集研究方面,该项目基于钢轨探伤回波图像、钢轨表面损伤光学图像,开展了钢轨伤损识别及定位精细化研究,结合钢轨光带、磨耗及硬度历史数据,利用数据融合增强了钢轨缺陷辨识检测精度,构建了钢轨伤损状态特征化模型;针对当前探伤设备缺陷,考虑不同探头数量、位置及角度对伤损识别精度的影响,提出了探伤设备合理配置的优化方案;研究了考虑钢轨复杂服役环境下的表面硬度连续测量与优化方案(图5),实现了区段线路钢轨的智能识别、预警及个性化打磨。

在钢轨损伤相关多源数据管理、融合与预测研究方面,该项目建立了面向海量多源钢轨监测数据的钢轨探伤信息管理系统,如图6所示;针对多源异构数据的精度、结构、时空尺度特性差异,开展了基于耦合张量分解的多源钢轨运维相关数据融合研究;挖掘多因素耦合作用下钢轨伤损相关变量的关联关系,实现了复杂环境中钢轨伤损异常辨识与预警;同时构建了多因素耦合作用下的钢轨损伤物理与数据演化模型,预测了区段钢轨伤损风险。

在基于列车运行品质与安全风险控制的数据驱动最优维护策略方面,该项目以高速线路钢轨伤损状态为研究对象,研究了基于伤损劣化机理的风险控制与数据驱动最优维护策略。基于深度强化学习

理论,结合大数据技术,探索了以钢轨状态最佳为目标的最优大修周期;构建了复杂环境或不同钢轨伤损情况下钢轨个性化打磨方案;对既有钢轨养护维修行业标准进一步优化;以此为基础,完成了高速铁路路网多种维修任务协调研究,为高速铁路的智能运营提供了理论支持。

该项目揭示了高速铁路钢轨伤损机理,初步构建了伤损演变与监控的理论体系,探明了钢轨检测数据间的相互关系,提取了多源数据关联特征,初步建立了高速铁路养护维修的理论框架,为复杂环境下的高铁钢轨维修决策提供支撑,这些成果对确保高速铁路的安全服役、实现钢轨的科学养护维修具有十分重要的理论和实践价值。

### 3 助力极端气候条件下高速铁路无砟轨道伤损机理、服役状态评估与控制研究取得突破

无砟轨道结构作为长大线性结构,常年暴露于大气环境中,经受风吹、日晒及雨淋等环境因素作用,具有环境的复杂性,无砟轨道结构由于自身的材料特性及结构特性,在重复荷载及环境的影响下,部件及各部件之间长期处于劣化工作状态,在使用过程中不可避免地会出现不同形式伤损(如图7所示),而当极端气候出现时,则有可能使无砟轨道结构

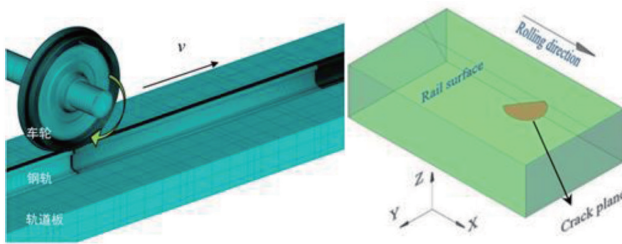


图4 钢轨伤损萌生及扩展的三维瞬态仿真模型

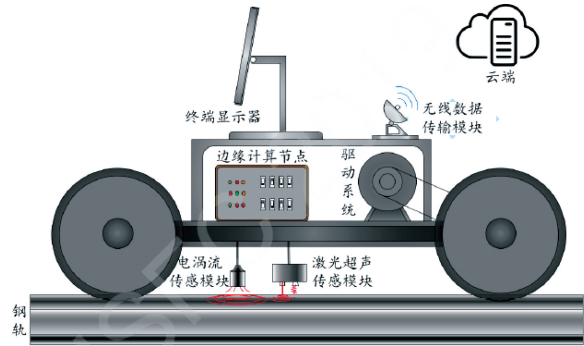


图5 钢轨表明硬度连续式测量仪器

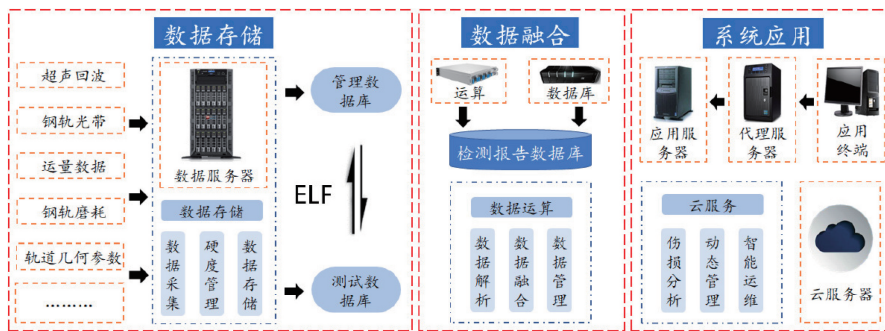


图6 高速铁路钢轨状态云监测系统



图7 无砟轨道伤损情况

产生严重伤损,影响高速行驶的安全性、舒适性,针对极端气候条件下无砟轨道结构由于自身的材料特性及结构特性出现的不同形式伤损问题,在高铁联合基金的资助下,西南交通大学刘学毅团队开展了极端气候条件下的高速铁路无砟轨道伤损机理、服役状态评估与控制研究。

根据计算气候的特征和无砟轨道的特点,该项目主要研究了极端温度、温度骤变、超强降雨、极端干旱和超强风沙条件下的无砟轨道伤损机理、服役性能与控制。针对极端温度对无砟轨道伤损的影响,基于无砟轨道结构设计理论、混凝土热传导性能、结构稳定性理论、断裂力学理论、损伤力学理论等,分别建立了适用于不同极端温度下无砟轨道伤损机理及服役状态的分析模型,分析了不同极端温度条件下无砟轨道的伤损机理,评估其服役状态,并分别开展了极端温度条件下的试验研究,如图8所示。

针对极端降水条件对无砟轨道伤损的影响,该项目开展了超强降雨条件、冻雨条件、干湿循环条件下的无砟轨道伤损机理、服役状态与控制研究,并开展了相应试验进行研究,如9所示。此外针对超强风沙条件对无砟轨道伤损的影响,该项目还开展了

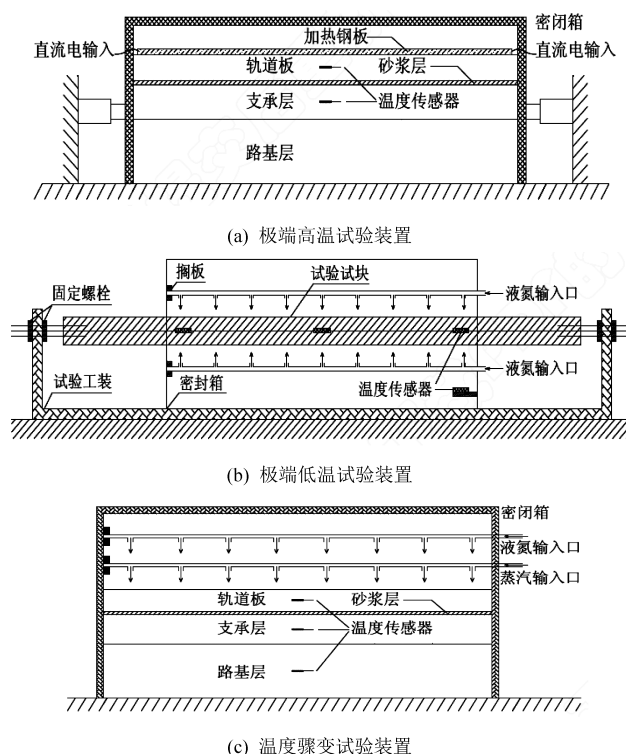


图8 极端温度条件下无砟轨道性能试验

超强风沙条件、强对流天气下的无砟轨道伤损机理、服役状态与控制研究,并开展了超强风沙条件下无

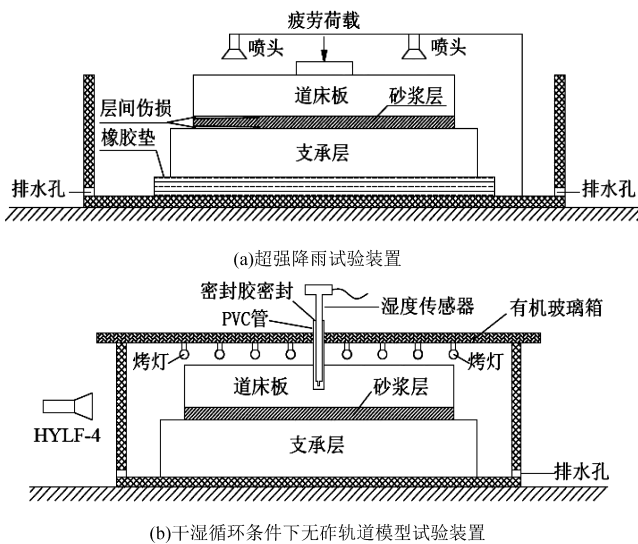


图9 极端降水条件下无砟轨道性能试验

砟轨道扣件系统性能测试试验、超强风沙条件下带裂纹无砟轨道模型升温试验和强对流引起的大颗粒冲击无砟轨道承轨台模型试验。

该项目明确了极端气候条件下无砟轨道的伤损机理,建立了极端气候条件下无砟轨道状态评估体系,针对不同极端气候条件提出了合理的无砟轨道状态控制措施;针对极端温度条件、极端降水条件、强颗粒流条件下的混凝土复合结构伤损机理的关键科学问题进行了深入全面的研究。其成果对于提高高速铁路无砟轨道的安全服役性能具有十分重要的理论和实践价值。

#### 4 助力高速铁路道岔轮轨接触行为、性能演化与损伤机理研究取得突破

高速道岔由于承受多因素场耦合重复作用,且结构具有系统复杂性、技术集成性和失效多样性,服役过程中高速道岔系统构成材料的微结构会发生变化,关键部件可能出现伤损甚至失效,而且关键材料与部件已有缺陷的动力演化,关键部件与结构的长时劣化及特殊条件下局部状态的瞬时突变等,必然引起高速道岔轮轨关系与动态性能的持续改变,同时恶化高速列车过岔运行品质,甚至形成安全隐患,危及高速列车过岔安全。针对高速道岔长寿命安全服役亟待解决的三类典型损伤问题,在高铁联合基金的支持下,西南交通大学王平团队应用理论研究、仿真分析、室内及现场试验相结合的方法,开展了道岔轮轨关系演变及影响机制、岔区瞬态接触与高频振动疲劳、道岔钢轨磨耗机理与减缓措施研究,探索构建了高速道岔长期服役性能与运营安全保障

体系。

在高速道岔轮轨瞬态滚动接触行为及钢轨波导特性研究方面,该项目结合高速道岔区典型轮载过渡区的结构特点,基于显式有限单元法建立了三维轮轨瞬态滚动接触数值模型,探明了高速道岔区轮轨瞬态滚动接触行为作用机理。此外由于岔区瞬态接触所激发的高频振动以导波的形式传递至螺栓孔处,道岔钢轨高频振动沿纵向的传递特性可由其波导特性来表征,因此该项目还开展了高速道岔钢轨的波导特性研究,揭示了高频振动传递至螺栓孔的机理。揭示了岔区瞬态接触行为及高频振动传递特性,为道岔高频振动疲劳实时监测提供了技术支撑。

在高速列车一道岔刚柔耦合三维动力学模型和数值方法研究方面,该项目建立了考虑多钢轨柔性变形的道岔结构动力学模型,构建了考虑道岔组合廓形动态重构的轮轨耦合模型,基于车辆动力学构建了高速列车模型,建立了高速列车一道岔刚柔耦合系统动力学模型;并探明了变速运行条件下列车一道岔系统动力特性,提出了适用于动力学模型精确高效运算的算法,为揭示道岔轮轨关系演变规律及影响机理提供了理论支撑。

在高速道岔轮轨关系演化规律及其动态组合廓形优化研究方面,该项目基于现场观测试验和相关检测资料,建立了描述高速道岔轮轨关系演变的数学模型,揭示了轮轨关系演化规律;基于高速列车一道岔刚柔耦合三维动力学模型,开展了轮轨关系演变对行车品质和钢轨滚动接触疲劳的影响机理研究;考虑列车与道岔动态性能的最佳匹配,建立了基于多目标最优的道岔动态组合廓形的优化数学模型,提出了科学的道岔钢轨打磨廓形。

在高速道岔钢轨高频振动疲劳损伤机理及监控关键技术研究方面,该项目以高速道岔钢轨轨腰螺栓孔疲劳裂纹作为研究对象,研究了高速道岔钢轨轨腰螺栓孔附近材料的高频振动特性;开展了高速道岔钢轨材料的动态力学性能实验和高频高周疲劳实验,建立了应变率相关的动态循环塑性本构模型及高周疲劳失效寿命预测模型;以此为基础,分析了轨腰螺栓孔裂纹的影响因素并提出相应的养护维修策略和实时监测技术。

在高速道岔曲尖轨非一致性磨耗机理及减缓措施研究方面,该项目结合高速列车一道岔刚柔耦合三维动力学模型及轮轨材料磨耗模型,建立了高速道岔曲尖轨非一致性磨耗仿真分析模型,研究了列车牵引/制动运行对高速道岔曲尖轨磨耗的影响,开

展了高速道岔曲尖轨磨耗的跟踪测试,基于统计学规律对比分析了试验数据及仿真磨耗结果,建立了高速道岔曲尖轨磨耗特征评价方法,开展了高速铁路道岔曲尖轨磨耗特征评价及演变机理研究,为减缓高速铁路道岔曲尖轨磨耗提供了理论支撑。

该项目探明了岔区轮轨关系演化规律及影响机制,提出了多目标最优的道岔钢轨打磨廓形,揭示了高速道岔高频振动疲劳损伤机理,初步构建了高速道岔结构高频疲劳损伤与监控的理论体系,探明了高速道岔曲尖轨非一致性磨耗特征及演变机理,提出了牵引/制动行车方式下的道岔钢轨磨耗减缓措施。该项目成果对确保高速道岔的安全服役、实现高速道岔的科学养护维修具有十分重要的理论意义和实践推广价值。

## 5 总 结

自高铁联合基金成立以来,在高速铁路基础研究、

重大科学技术难题攻关等方面取得了诸多阶段性成果。本文通过对高铁联合基金资助的重要项目成果进行简要回顾,阐述了高铁联合基金对于推动我国高速铁路基础研究、重大科学技术难题攻关、铁路行业自主创新能力提升以及高铁核心技术竞争力提升的重要性。

## 参 考 文 献

- [1] 王冬梅. 联合基金为高铁基础研究插上了腾飞的翅膀. 科研管理, 2017, 38(S1): 765—769.
- [2] 高铁基础研究联合基金助力我国高铁技术继续保持世界先进水平. 铁道学报, 2016, 38(11): 87.
- [3] 王之中, 丁玉琴, 车成卫, 等. 高速铁路基础研究联合基金管理工作回顾与展望. 中国科学基金, 2017, 31(2): 150—152.
- [4] 王之中, 谭立刚, 高钰涵, 等. 服务“一带一路”引领高铁科技未来——高速铁路基础研究联合基金实施5周年回顾与展望. 中国科学基金, 2017, 31(3): 239—243.

## Research on the Safe Service of High-speed Railway Track Structures

Wang Ping\*    He Qing    Yang Rongshan    Chen Rong    Xu Jingmang\*  
*Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756*

**Abstract** The Joint Fund for High-speed Railway Basic Research was established in April 2011 by the National Natural Science Foundation of China and the China Railway Corporation. The fund focuses on the key theories of track structure inspection, rail damage evolution mechanism and data-driven intelligent operation and maintenance, ballastless track damage and service status under extreme weather conditions, high-speed turnout wheel-rail contact behavior and damage mechanism, etc. The research breakthroughs illustrate the importance of the High-speed Rail Joint Fund for the development of core technologies for high-speed railways.

**Keywords** high-speed railway basic research Joint Fund; track inspection; rail damage; ballastless track damage; high-speed turnout

(责任编辑 吴征天)

\* Corresponding Author, Email: wping@home.swjtu.edu.cn, mang080887@163.com