



铁路大系统动力学: 理论体系、工程实践及未来前景

翟婉明^{*}

西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 成都 610031

^{*} E-mail: wmzhai@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-04-01; 接受日期: 2026-06-08; 网络版发表日期: 2026-07-20

国家自然科学基金卓越研究群体项目(编号: 52388102)、教育部学科突破先导项目(编号: JYB2025XDXM211)和国家自然科学基金杰出青年科学基金项目(批准号: 59525511)资助

摘要 本文回顾了作者于二十世纪九十年代率先提出的铁路大系统动力学学术思想及其形成背景与发展脉络。在全面梳理铁路动力学领域所涉及的各种动力学问题基础上, 创建了铁路大系统动力学理论体系, 包括四个核心层级和十余个分支方向。提出了铁路大系统动力学建模的两项基本原则, 即“问题导向的简约化建模原则”与“大系统分区建模分步求解原则”。针对铁路大系统动力学理论体系所确立的总体模型框架, 全面论述了各个层级和各个分支方向的动力学建模方法及发展现状, 并给出了一系列代表性的铁路大系统动力学基础模型。概要介绍了铁路大系统动力学理论及模型的工程应用, 并举例展示了其在解决国家重大铁路工程科学技术难题中的显著实践成效。最后展望了铁路大系统动力学在未来更高速度铁路、更大载重铁路、更绿色铁路及更复杂艰险铁路发展中的广阔应用前景。本研究清晰架构了现代铁路动力学知识体系, 形成了铁路大系统动力学研究新范式, 为铁路现代化高质量发展提供了先进理论支撑。

关键词 铁路, 大系统, 动力学, 理论体系, 模型, 工程实践

1 引言

铁路是交通运输的大动脉, 对社会经济发展的作用与意义十分重大。现代铁路交通运输的飞速发展, 特别是列车运行速度持续提升、运载重量不断增大, 导致列车与铁路基础结构之间的动态相互作用不断加剧, 动力学问题更加突出; 另一方面, 服役条件也愈趋严苛, 如艰险山区铁路小半径曲线、长大坡道以及高

原、大风、极端温度等恶劣服役环境, 给铁路行车安全带来严重威胁, 也使铁路系统动力学问题更趋复杂。所有这些都给铁路系统安全设计与运营维护带来严峻挑战, 这就对铁路动力学研究提出更高要求, 呼唤更加准确、更加先进的动力学理论方法。只有弄清铁路系统内在的动力相互作用机理, 科学刻画外在的复杂行车环境及其动态影响关系, 才能正确把握与科学评估铁路系统动力学性能, 才有可能设计出高安全、高平

引用格式: 翟婉明. 铁路大系统动力学: 理论体系、工程实践及未来前景. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1924–1948

Zhai W M. Railway large-scale system dynamics: theory system, engineering practice and future prospect (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1924–1948, doi: [10.1360/SST-2026-0102](https://doi.org/10.1360/SST-2026-0102)

稳、高可靠的现代化铁路运输系统,也才能为实现复杂服役条件下的安全运营提供科学理论保障。

铁路大系统动力学理论就是在此背景下开展的大胆尝试,至今已历经三十余年的探索与实践,取得系统性成果。本文将全面总结与回顾其学术思想、理论体系、模型发展及工程应用实践,并指出其未来发展与应用前景。

2 铁路大系统动力学的学术思想及其形成背景

铁路是一个庞大而复杂的工程系统。从动力学角度看,它主要包含两大组成部分:移动的运载系统——列车和固定的基础结构——轨道、路基、桥梁、隧道及接触网等,由此形成复杂的动态相互作用大系统;此外,该系统还受到周边的环境介质——气流、水流等的动力作用,更增加了动力学问题的复杂性;与此同时,该系统产生的振动也向铁路沿线周边的环境结构传播,造成环境振动问题。

由此可见,列车在铁路轨道上运行,与基础结构及环境介质构成一个极为复杂的动力学大系统,各子系统之间相互作用、相互影响。如图1所示,这些相互作用关系错综复杂,既有子系统之间的耦合作用关系,如车辆与轨道之间的轮轨耦合关系、受电弓与接触网之间的弓网耦合作用关系、列车与空气介质之间的流固耦合关系等;又有子系统内部结构部件之间的动态作用关系,如列车系统内部车与车之间的相互作用、线路系统内部轨道与路基/桥梁/隧道之间的动态相互作用等;还有一个子系统对另一个子系统的振动传播影响,如列车系统(车顶)振动对弓网系统的影响、线路系统(路基/桥梁/隧道)振动向周边环境结构的传播影响等。

因此,应该采用系统工程思想,从铁路大系统的角度综合研究与认识列车在线路上运行所引起的各种动力学问题及其相互作用关系;即使是针对其中的某个子系统动力学问题,也不能孤立对待,应充分考虑与其密切相关(强相关)的子系统之间的动态相互作用;与此同时,还应充分认识到并非所考虑的系统越大越好,要抓住问题的主要矛盾,尽可能忽略与其弱相关的子系统之影响,不使问题过于复杂化。这便是铁路大系统动力学的基本学术思想。

最早提出铁路大系统动力学的思想可追溯到二十

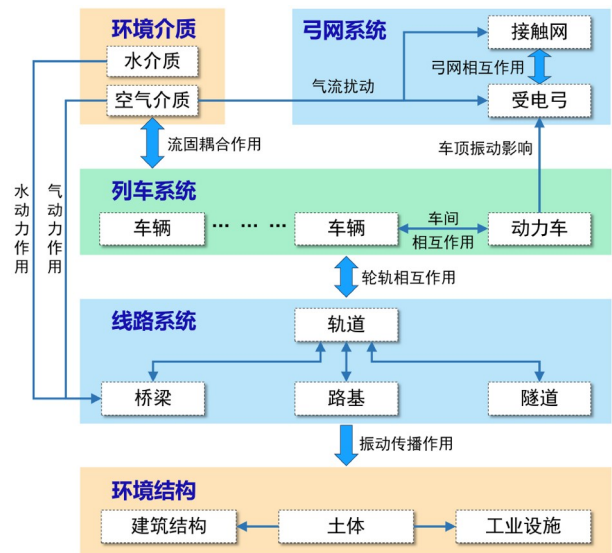


图1 铁路动力学大系统组成及其相互作用关系

Figure 1 Composition and interaction relationships of railway large-scale system dynamics.

世纪九十年代初,作者率先开展车辆-轨道耦合动力学的研究^[1],首次提出从车辆和轨道耦合大系统综合研究车辆动力学性能、轨道动力学性能以及轮轨动态相互作用特性^[2,3]。而在当时,研究铁路工程中的动力学与振动问题,往往受限于系统的复杂性以及大规模数值计算的困难性等因素,习惯上将所要研究的对象(子系统)从大系统中分离出来单独考虑,而将相邻子系统作为其外界激励源。例如,经典的车辆动力学,以车辆系统为研究对象,将轨道结构视为刚性固定边界,不考虑轨道结构振动对车辆系统的动态影响,而将轨道几何不平顺视为车辆系统的外部激励;又如,经典的轨道动力学,常常将车辆简化为轨道系统的外部激励荷载。事实上,车辆系统与轨道系统是相互耦合、相互影响的。轨道的几何变形会激起车辆系统振动,而车辆振动经由轮轨接触界面作用力的传递,又会引起轨道结构振动的加剧,反过来助长了轨道的几何变形。可见,传统的子系统研究方法具有本质上的局限性。因此,在铁路各子系统的研究已日趋成熟及计算技术日益进步的背景下,不失时机地开展铁路大系统动力学研究,不仅十分必要,而且也是学科发展的必然趋势,具有重要的科学理论意义和工程应用价值。

正式提出铁路大系统动力学的学术思想是在1995年,作者在国家杰出青年科学基金项目申请书中,首次

完整地提出了“铁路大系统动力学理论的研究与应用”之研究计划, 当年得到评审专家委员会的充分肯定并顺利获得批准, 随即正式开始了铁路大系统动力学的理论研究工作, 并于1996年在中国科协第九次青年科学家论坛上首次公开发表“铁路大系统动力学理论体系的研究”学术报告^[4].

铁路大系统动力学学术思想真正受到学界广泛重视始于二十一世纪之初, 国内外学者从列车、轨道、路基、桥梁、隧道等各个子系统组合角度, 纷纷开展程度不一的大系统动力学研究与实践, 取得显著成效. 如今, 采用铁路大系统动力学理念开展现代轨道交通工程动力学问题研究与系统优化设计, 已成共识.

3 铁路大系统动力学理论体系总体架构

遵循上述学术思想, 我们在开展铁路工程动力学研究时, 最重要的是要树立系统工程观念, 不孤立地看待问题, 而绝非研究任何问题都要考虑整个铁路大系统, 也并非所考虑的系统越大才越好, 关键是要看所研究问题及对象在整个铁路工程系统中主要与哪些子系统强耦合、与哪些子系统弱相关, 从而科学界定该研究所涉及的“大系统”范围. 也就是说, 针对不同的研究对象与研究目的, 相应地有不同程度的“大系统”.

为此, 作者根据图1所示的铁路动力学大系统组成及其相互作用关系, 构建出了如图2所示的铁路大系统动力学理论体系. 图中清晰展现了铁路动力学领域各

个分支方向所涉及的各种动力学问题及其研究内容, 包含四个逻辑层级, 其核心是车辆-轨道耦合动力学, 进一步考虑基础结构后形成列车-轨道-基础结构耦合动力学. 在此基础上, 考虑铁路周围环境介质后形成列车-基础结构-环境介质动力相互作用研究方向; 考虑铁路周边环境结构后衍生出列车-承载结构-环境结构动力相互作用研究方向. 由此可见, 铁路大系统动力学充分考虑了各复杂系统动力相互作用, 具有广阔的应用范畴, 完全适应于日趋复杂的现代铁路高质量发展应用需求, 实际上这也清晰诠释了现代铁路动力学学科领域的内涵及知识体系(图2), 形成了铁路大系统动力学研究全新范式. 下面分别予以论述.

第一个层级当属车辆-轨道耦合动力学, 系核心层. 众所周知, 铁路运输系统的终极目标是实现列车高效、可靠地运送人或物, 从动力学角度来看, 就是要实现列车在轨道上安全平稳运行. 因此, 通过轮轨紧密耦合在一起的车辆-轨道系统是整个铁路大系统的功能中心. 毫无疑问, 铁路大系统动力学的核心就是车辆-轨道耦合动力学, 它是研究车辆在轨道上运行安全平稳性及轮轨动态相互作用的核心理论.

第二个层级是对车辆-轨道耦合动力学核心层进一步考虑铁路基础结构后形成的. 列车行驶于轨道, 而轨道铺设在路基、桥梁或隧道等承载基础结构上, 它们相互作用、相互依存. 移动列车的循环动荷载通过轨道结构向下传递至承载基础结构, 会引起结构损伤劣化与累积变形, 而基础结构损伤变形反过来又会影

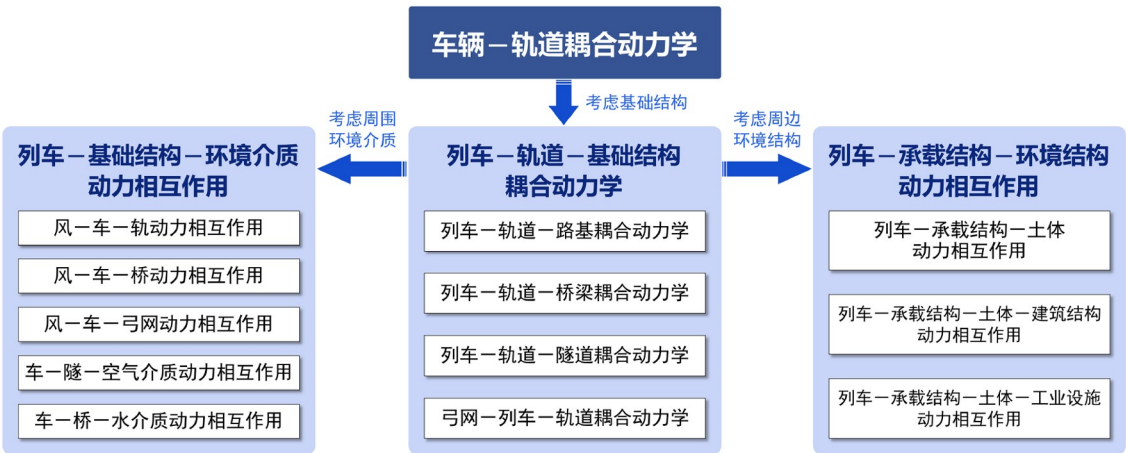


图2 铁路大系统动力学理论体系
Figure 2 Theory system of railway large-scale system dynamics.

道-基础结构系统处于特定的耦合振动形态之中, 由此自然而然地形成了列车-轨道-基础结构耦合动力学研究方向. 这是铁路大系统动力学理论体系的第二个层级, 也是除了核心层级之外最紧密的组成部分, 主要包含: 列车-轨道-路基耦合动力学、列车-轨道-桥梁耦合动力学和列车-轨道-隧道耦合动力学. 除此之外, 接触网作为非承受列车荷载的铁路基础结构, 其与安装于车顶的受电弓之间的相互作用又会受到列车振动的直接干扰影响, 由此拓展出一个分支: 弓网-列车-轨道耦合动力学. 探明列车与不同基础结构之间的动力相互作用机制及影响关系, 是实现列车-轨道-基础结构动力性能最佳匹配设计之基础, 对保障列车安全平稳运营至关重要, 尤其是针对现代高速、重载铁路及复杂运营情形更显重要.

第三个层级是在第二个层级基础上再考虑铁路周围环境介质后的产物. 空气流(风)便是主要考虑的环境介质. 一方面, 横风对运行列车的动力影响不可忽视, 列车被大风吹翻的现象时有发生, 高速行车情形下空气动力效应十分显著, 随车速呈幂次方增长, 而高速列车通过隧道时的空气动力效应更为剧烈, 严重影响乘车舒适性; 另一方面, 强风对桥梁及接触网等铁路基础结构也会产生不利影响, 加剧桥梁与接触网系统振动, 危及桥上行车安全, 恶化弓网动态作用关系, 影响列车受流取电. 因此, 必须予以充分重视, 这就需要深入开展列车-基础结构-环境介质动力相互作用研究, 主要包括: 风-车-轨动力相互作用、风-车-桥动力相互作用、风-车-弓网动力相互作用和车-隧-空气介质动力相互作用. 此外, 铁路基础结构跨越江、河、海时还涉及一类环境介质——水(冰). 当铁路桥梁桥墩受到洪水、流冰及海浪冲击时, 会影响桥上列车走行性, 严重时甚至威胁行车安全, 因此需要考虑水浪、流冰与桥墩的流固耦合效应, 将洪水、流冰及海浪对桥墩的水动力作用反映到列车-桥梁耦合系统中, 形成一个较为特别的小分支: 车-桥-水介质动力相互作用. 更有甚者, 在遇到强风与大浪同时作用(如跨海大桥)情形, 还需同时考虑风-车-桥动力相互作用和车-桥-水介质动力相互作用, 针对更大、更复杂系统的风-车-桥-浪动力相互作用开展特别研究.

第四个层级是在第二个层级基础上延伸考虑铁路周边环境结构后的衍生研究领域, 主要针对日益受到关注的轨道交通诱发环境振动问题, 开展列车运行引

起的车-轨耦合振动向铁路周边环境结构传播规律及其振动抑制研究. 作为轨道交通激振源的车-轨耦合振动, 首先通过路基、桥梁、隧道等承载基础结构传播至周边土体, 然后通过土体传播至周边居民房屋、古建筑、文物博物馆等建筑结构及地面通讯设施、精密仪器、敏感装备等工业设施, 给居民生活及精密设施带来不利影响. 只有深入仔细地研究高速铁路、城市地铁等不同类型轨道交通的振源特征及振动波通过土体向周边建筑结构及工业设施传播规律, 才能进一步提出针对各种不同程度减振需求的环境振动控制策略. 相应地, 衍生出列车-承载结构-环境结构动力相互作用研究领域, 包含如下几个具体研究方向: 列车-承载结构-土体动力相互作用、列车-承载结构-土体-建筑结构动力相互作用、列车-承载结构-土体-工业设施动力相互作用. 之所以在这个层级没有提“耦合动力学”, 是因为这些研究方向的众多子系统之间虽有耦合互馈但更主要的是关注振动波的单向传播机制, 即车-轨耦合振动向周边土体及环境结构单向传播、衰减效应, 而反过来, 远场土体及环境结构对车-轨耦合振动影响甚微. 而在振动传播路径中, 土与结构(包括铁路承载结构和周边环境结构)之间的相互作用十分重要, 因此采用“动力相互作用”术语.

4 铁路大系统动力学模型及其发展

针对铁路工程领域各式各样的动力学问题, 第3节已经厘清了铁路大系统动力学所涉及的四大理论层级与十余个研究方向, 它们均属于复杂大系统动力学研究范畴, 毫无例外地都需要建立相应的理论模型, 方能进行求解分析. 而图2自然而然地也成为铁路大系统动力学理论建模的总体框架.

然而, 如何科学合理地建立如此纷纭繁杂的大系统动力学模型, 是我们必须面临的一大挑战. 对此, 作者遵循最初业已确立的铁路大系统动力学学术思想, 并结合铁路大系统动力学理论体系中的具体研究方向及研究内容, 提出两个建模基本原则: 一是基于问题导向的简约化建模原则, 在抓住主要矛盾的同时, 尽可能简化问题的复杂性, 具体而言, 针对所研究问题及对象, 在厘清与其强耦合、强相关的子系统之基础上, 确定出建模范围尽可能小的“大系统”边界, 例如, 在进行常规的车辆动力学性能分析设计时, 一般只需要

考虑车辆-轨道耦合动力学建模, 而无需考虑下部基础结构建模, 更不必考虑弓网系统(虽然与车毗邻但完全可以忽略其动力影响)的建模; 二是针对超大系统的分区建模、分步求解原则, 对必须要涉及很多子系统、涵盖很大范围的铁路动力学问题, 特别是针对那些主要关注单向振动传播影响的问题, 例如, 列车运行引起的环境振动问题、列车振动对弓网系统动力学影响问题等, 可以采取分区域建模及分步求解的方式。

下面基于这两个建模原则, 分别论述铁路大系统动力学理论体系中各个层级的理论建模。

4.1 核心模型: 车辆-轨道耦合动力学模型

车辆-轨道耦合动力学, 作为铁路大系统动力学研究之先导, 发展至今已形成完整、成熟理论。相应地, 其理论模型也日趋成熟, 从最初的车辆-轨道垂向耦合动力学模型^[2,3]发展到考虑垂向、横向相互作用的车辆-轨道空间耦合动力学模型^[5], 再到着眼于长大重载列车动力学研究而必须要考虑车与车之间纵向冲动效应的列车-轨道三维耦合动力学模型^[6], 涵盖了各种主要类型的机车车辆与轨道结构, 其动力学建模原则、模型与方程具体可参考《车辆-轨道耦合动力学》中、英文专著^[6,7]。作为示例, 这里仅给出当前我国高速铁路广为采用的客车-无砟轨道空间耦合动力学模

型^[8], 如图3所示。车辆-轨道耦合动力学模型被国内外同行学者称为“翟模型”^[9-15]而得到广泛采用, 特别是, 其计算结果常常被作为考核同类研究结果正确性的基准^[9,12-20], 得到公认。

4.2 列车-轨道-基础结构耦合动力学模型

4.2.1 列车-轨道-路基耦合动力学模型

路基作为轨道结构的承载基础, 是由路基表层、路基本层、路堤等多层土工材料堆叠形成的复合结构。受材料空间质异性、土体介质离散性及复杂环境因素的影响, 路基易产生不均匀沉降、翻浆冒泥和冻胀变形等病害, 导致其上轨道几何形位劣化与结构累积损伤, 直接影响线路动态服役性能和列车运营安全。因此, 综合考虑路基与车轨系统之间的动态相互作用, 是铁路大系统动力学研究的必然考虑。将路基系统纳入列车-轨道耦合动力学模型, 便可构建出图4所示的列车-轨道-路基耦合动力学的基本模型(v 为行车速度), 其中列车、轨道动力学建模原则和求解方法与车辆-轨道耦合动力学模型完全一致; 路基结构则模拟为分层异质的三维弹性介质, 通常采用积分变换法、格林函数法、有限单元法来求解空间动态响应。图中考虑了双线铁路轨道结构建模, 以便研究列车交会时的动态耦合效应, 如仅考虑单线行车, 则可简化处理(下文同此)。

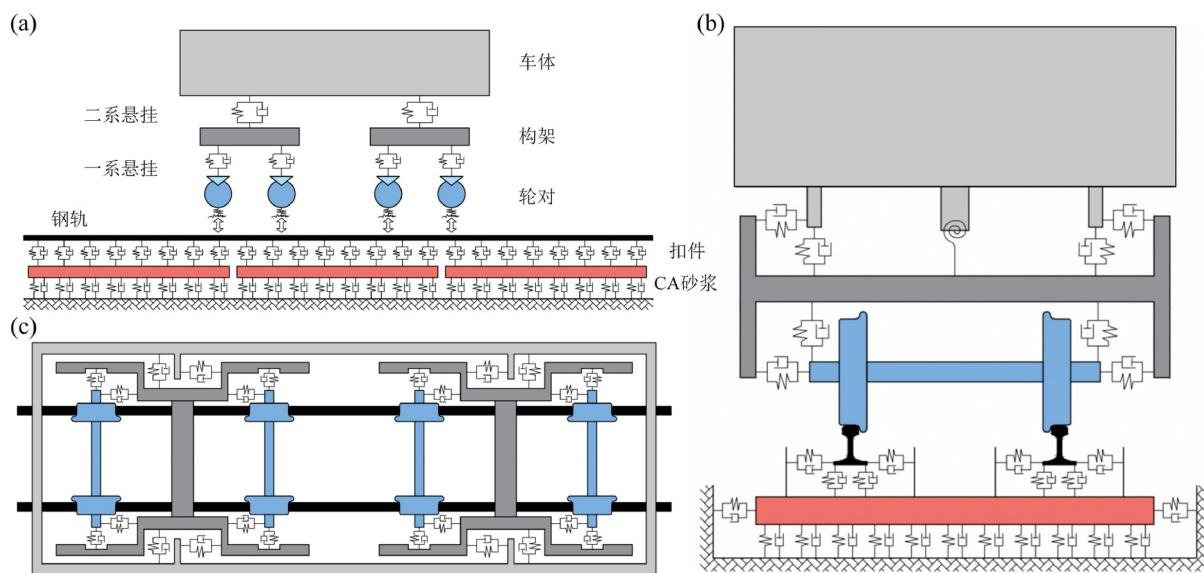


图3 车辆-轨道耦合动力学模型示例。(a)侧视图; (b)端视图; (c)俯视图

Figure 3 Illustration of vehicle-track coupled dynamics model. (a) Side view; (b) end view; (c) plan view.

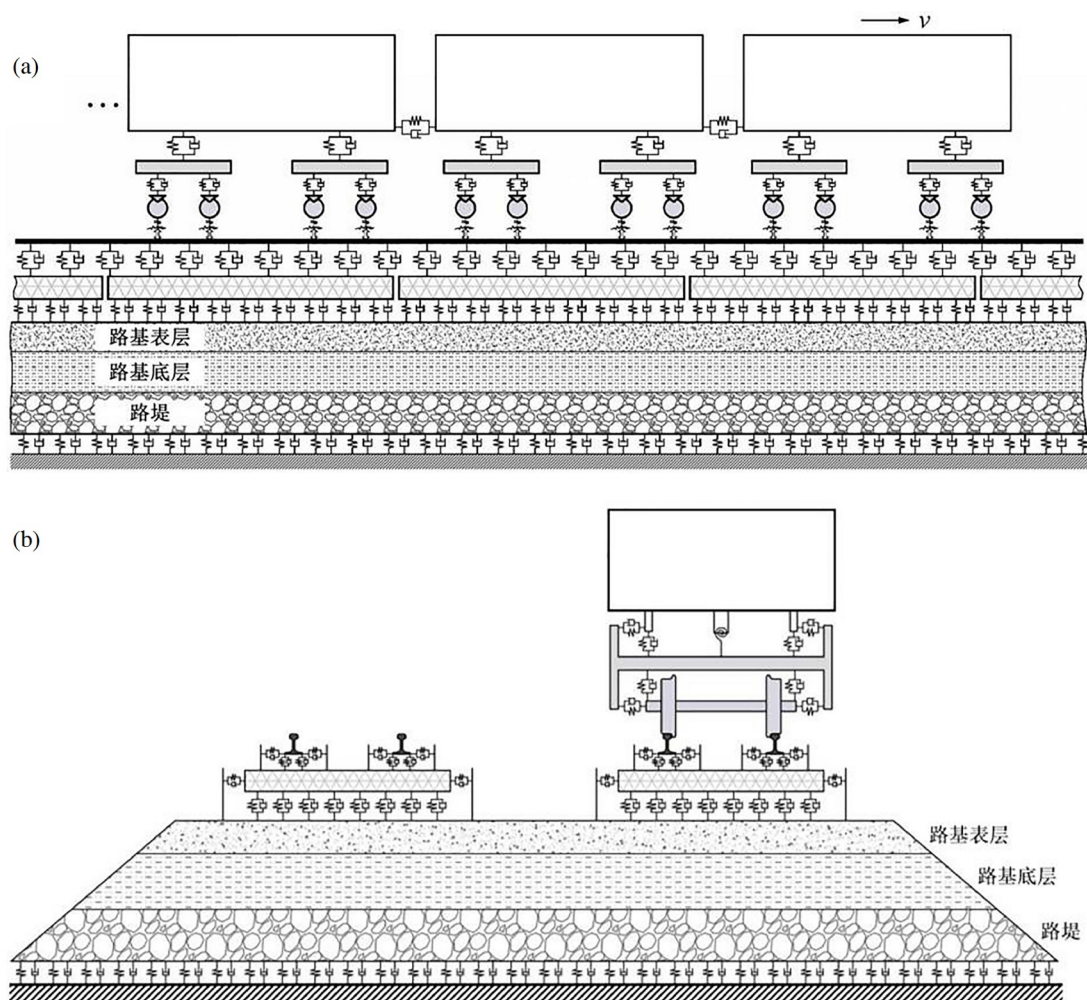


图 4 列车-轨道-路基耦合动力学模型示意图. (a) 侧视图; (b) 端视图

Figure 4 Schematic diagram of train-track-subgrade coupled dynamics model. (a) Side view; (b) end view.

在早期研究中,路基尺寸效应及分层特性未予以充分考虑,轨下基础被视为弹性半空间或Winkler弹性基础,车辆则被简化为移动简谐荷载;而后为满足车致结构振动分析和行车性能评估需求,移动荷载逐步被多刚体系统动力学模型所取代.为进一步考虑路基系统参振的影响,相关学者将钢轨离散为梁单元,轨枕及以下介质(路基和地基)离散为四边形单元,建立了较为简化的车辆-轨道-路基垂向耦合动力学模型^[21].而针对全截面尺寸路基乃至地基参振的列车-轨道-路基空间耦合动力学模型,如何实现精确建模及高效求解一直是备受关注的热点问题.一般而言,其建模或求解方法可分为解析法和数值法.基于弹性介质运动方程和积分变换的解析法^[22-24],具有高效准确的特点,

但通常局限于线弹性分析及频域分析;而对于高维时变非线性系统(列车-轨道-路基耦合系统常是如此),数值法则展现出更强的适应性.特别是伴随着车辆-轨道耦合动力学模型和数值模拟方法的发展,众多学者在构建并高效求解更为精细复杂的列车-轨道-路基耦合动力学模型方面做出了诸多有益尝试.例如,以几何边界连续性和周期性为基本假设,引入格林函数法^[25]求解轨道-路基系统动态响应;结合有限元模拟和单元多尺度耦合技术,解决轨道结构与下部路基系统的动力学时变方程的矩阵耦合及表征问题^[26];为满足非线性轮轨系统动力有限元分析的数值稳定性需求,将经典的轮轨动态耦合模型等效为非线性单元耦合矩阵形式,建立车辆-有砟轨道-路基耦合动力学模型^[27]和车

辆-无砟轨道-路基耦合动力学模型^[28,29]。以此类模型为基础, 相关学者相继开展了路面上拱与轨枕空吊临界阈值判定^[27,30]、路基变形下车辆走行性能评估^[29]、轨下基础结构动力特性分析^[31]等研究; 此外, 通过引入模拟列车长距离运行的循环计算方法^[26], 还能实现千米级路基沉降变形下行车安全平稳性分析。

纵观列车-轨道-路基耦合动力学模型的发展历程, 系统性建模方法已然形成并日臻成熟, 模型的计算规模不断扩大, 从最初的路基基床、路堤扩展至地基甚至更远的地下区域; 研究内容也在不断延伸, 涉及列车-轨道-路基系统动力学特性、路基变形控制、轨道结构损伤劣化、大系统高效求解等方面。我国幅员辽阔, 铁路线路穿越各种复杂服役环境和特殊地质条件, 而目前路基子系统动力学模型基本遵循各向同性线弹性假设, 针对特殊地质条件下(如软土、冻土)路基宏观动力学行为与细观结构的跨尺度建模、路基土体力学属性的空间变异性表征及其对列车-轨道-路基耦合系统动力学性能影响机制等方面还面临诸多挑战。

4.2.2 列车-轨道-桥梁耦合动力学模型

桥梁是铁路线路跨越江河时的常用基础结构。自铁路诞生以来, 列车通过桥梁时引起的车桥振动, 一直是备受关注的问题, 因为它直接影响行车安全性和乘车平稳性。传统的车桥振动分析模型^[32-34]大多以桥梁为研究主体, 对车辆建模及轮轨相互作用关系进行了极大简化, 更不考虑桥上轨道结构建模。然而, 现代铁路发展(特别是我国高铁发展)对桥上列车走行性能提出越来越高的要求, 如何准确评估列车过桥动态安全性与平稳性, 成为现代铁路设计中亟待解决的重大关键问题。为此必须要采用铁路大系统动力学思想, 精细化构建如图5所示的列车-轨道-桥梁耦合动力学模型, 图中桥梁结构为铁路中最常见的简支箱梁桥, 通常采用欧拉梁或铁木辛柯梁模拟, 若要捕捉桥梁局部振动效应, 或仿真更为复杂的桥梁结构形式, 则可引入板壳理论或采用有限元实体单元进行细致建模。

早在二十一世纪之初, 作者带领学生率先建立了考虑桥上轨道结构参振影响的列车-轨道-桥梁耦合动力学基本模型^[35-37], 随后, 在原铁道部科技司组织下, 作者有幸带领一支由西南交通大学、北京交通大学、铁道科学研究所和中南大学组成的车-轨-桥跨学科联

合攻关课题组, 针对高速铁路桥梁动力性能设计重大需求, 联合研发了列车-轨道-桥梁耦合动力学仿真通用软件及安全评估技术^[38,39], 其核心是精细化的列车-轨道-桥梁耦合动力学模型^[38-41], 更加细致地考虑了机车车辆非线性动态特性和桥上轨道结构参振的影响, 并将精确的轮轨动态耦合模型引入车桥系统动力分析, 从而能够更加准确反映桥上列车走行性能。

此后, 国内外学者相继开展了纷繁多样的跟踪研究, 涵盖各种各样的桥梁结构形式, 包括简支梁桥^[42-46]、连续梁桥^[47]、曲线梁桥^[48]、斜拉桥^[49-51]等; 考虑各种环境荷载和结构变形的影响, 例如: 横风、地震作用下列车过桥安全舒适性评估^[43,44,49], 温致桥梁变形^[50]、桥墩不均匀沉降^[42]对高速列车走行性能的影响, 甚至一些偶发撞击事件^[52], 研究所涉及的问题也越来越丰富, 如列车-轨道-桥梁整体系统的减振降噪设计^[53]、能量传递与耗散机制^[54]、结构参数优化^[55]等。近年来, 列车-轨道-桥梁系统随机动力学分析成为领域内的研究热点, 众多学者引入概率密度演化理论^[45]、随机场理论^[46]等, 考虑实际工程中结构参数的不确定性以及系统激励的随机性, 以期准确评估随机参数组合下系统动力学指标超限概率。这种从“确定性”转向“概率性”的分析方法, 可为列车-轨道-桥梁复杂系统的可靠性设计、潜在风险评估和全寿命管理提供科学工具。针对大型、复杂、非线性列车-轨道-桥梁耦合动力学系统, 作者曾根据轮轨系统和桥梁结构的振动特性, 率先提出一种显-隐式混合数值积分模式^[39], 即对列车-轨道子系统采用较小积分步长的快速显式积分方法(翟方法)^[56], 而对桥梁子系统则采用较大积分步长的隐式积分方法(Newmark- β 法), 这样既保证了桥梁结构动力分析稳定性, 又提高了轮轨非线性动力系统计算效率。受该方法的启发, 研究者们相继提出了不同形式的列车-轨道-桥梁耦合系统异步长积分算法^[49,57]。

总之, 国内外学者围绕列车-轨道-桥梁耦合动力学模型开展了大量卓有成效的研究工作, 推动了理论建模方法与数值求解技术的持续完善, 并在随机振动分析、动力性能优化设计以及多物理场耦合作用下系统动力学性能评估等方面取得了丰硕成果。然而, 面向车-轨-梁系统全寿命周期的动态性能预测模型、融合结构损伤识别的智能运维模型等, 尚处于研究起步阶段。与此同时, 随着跨江越海铁路通道与艰险山区铁

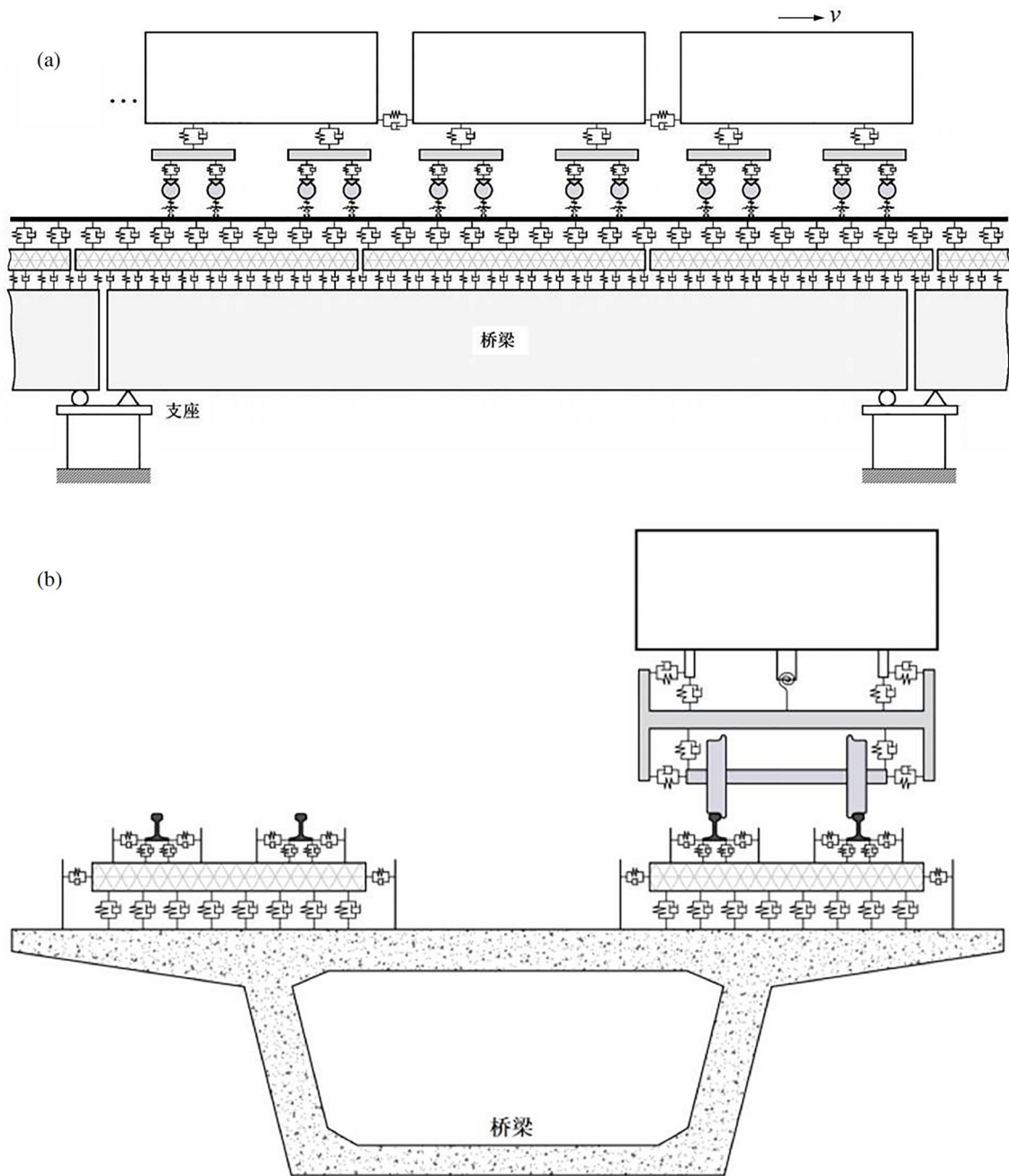


图 5 列车-轨道-桥梁耦合动力学模型示意图. (a) 侧视图; (b) 端视图

Figure 5 Schematic diagram of train-track-bridge coupled dynamics model. (a) Side view; (b) end view.

路的加速建设,千米级大跨度桥梁相继涌现.此类桥梁结构自由度庞大,梁体变形受温度、风等环境荷载影响显著,对耦合动力学模型提出了更高的要求.因此,以列车-轨道-桥梁耦合动力学模型为基础,从系统科学角度看,持续拓展模型的适用范围,并综合考虑各

类复杂因素之影响,是应对上述挑战的有效路径.

4.2.3 列车-轨道-隧道耦合动力学模型

当铁路线路穿越山岭和城市地下空间时,隧道成为铁路基础结构的必然选择.作为一种高风险的地下

工程, 隧道结构在复杂地质条件下受列车动荷载长期作用, 将不可避免地产生不均匀沉降变形及结构伤损, 高效准确地评估隧道内列车走行性能以及轨道-隧道系统的动态服役性能至关重要, 而建立列车-轨道-隧道耦合动力学模型(如图6所示)则是实现这一目标的基本前提。图中着重展示了以矿山法挖掘的“马蹄形”山岭隧道与轨道及列车之间的动态相互作用关系。在列车-轨道-隧道耦合动力学模型中, 通常采用黏弹性人工边界来模拟隧道与周围土体的相互作用, 或者仅考虑隧道周围有限空间范围内的环形柱状土体参振; 隧道和周围土层则模拟为空心柱壳模型或考虑盾构隧道管片及环间接头作用的实体模型。

隧道作为一种较为特殊的埋入式环形基础结构, 在服役环境和振动特性等方面与其他形式基础结构存在较大差别。众多学者将庞大自由度的隧道及周围土体视为连续均匀和周期性弹性支承结构, 而列车被简化为移动荷载, 在频域内实现了系统动态响应的高效求解^[58]。由于此类模型未考虑轮轨动态耦合作用, 故而无法评估隧道内列车走行性能, 亦难以揭示系统的时变非线性振动特性。伴随着车辆-轨道耦合动力学的发展, 众多学者通过引入列车动力学模型和轮轨动态耦合模型, 相继建立了繁简不一的列车-轨道-隧道耦合动力学模型。例如, 采用半解析方法, 将隧道和周围土层模拟为空心圆柱单元^[59,60], 通过引入位移相容条件和各子系统相互作用关系, 实现列车、轨道和隧道三者间的耦合振动分析; 又如, 基于有限单元法, 引入空间等参单元和弹簧-阻尼单元, 建立考虑盾构隧道管片及环间接头作用的隧道实体模型, 并结合子结构单元多尺度耦合方法构建列车-轨道-隧道耦合动力学模型^[61,62]。以此类模型为基础, 国内外学者相继开展了列车作用下隧道动力响应及沉降变形分析^[63]、曲线地段隧道振动源强及其在土体中传播特性分析^[60]、小半径曲线隧道差异沉降对行车安全平稳性的影响研究^[62]等。

随着我国铁路向复杂艰险山区不断延伸, 高地温、强震、软岩和活动断裂带区域的隧道结构累积变形、动力稳定性及隧道内行车安全平稳性评估将是模型发展需要重点关注的问题。

4.2.4 弓网-列车-轨道耦合动力学模型

受电弓与接触网之间的相互作用关系(也称弓网关系)是铁路动力学大系统中除轮轨相互作用关系之

外的又一基本耦合关系, 它直接影响到列车受流质量。列车通过受电弓从接触网获取电能, 受电弓与接触网的可靠接触是保证正常受流的基本前提。在列车行驶过程中, 受电弓沿接触网导线向前滑移, 其作用过程背后实质上对应于一个典型的移动荷载作用于连续离散柔性结构的动力学问题, 弓与网构成了一个典型的刚-柔耦合动力学系统。

由于受电弓直接安装于机车(或动力车)车顶, 机车的振动对弓网系统的动力学性能将会带来一定影响。早期的研究将受电弓底部视为固定不动边界, 显然不符合实际情况。事实上, 列车车顶的振动响应构成了弓网系统的激励输入, 作者早在1997年就在国际车辆系统动力学协会(International Symposium on Dynamics of Vehicle on Roads and Tracks, IAVSD)第15届学术大会上首次宣读发表了机车振动对弓网系统动力学影响的初步研究结果: 机车在几何状态欠佳的轨道上行驶时所产生的振动对弓网系统动力学性能具有明显影响, 而且这种影响随着行车速度的提高而增大^[64], 后来逐渐受到重视, 近年来有越来越多的跟踪研究^[65-69]。反过来, 受电弓-接触网系统的振动响应, 虽然也可视为对车辆-轨道系统的一种输入, 但由于弓网系统和车-轨系统在质量上相差悬殊, 而弓网接触力较之轮轨作用力(千倍之差)完全可以忽略不计。因此毫无必要考虑弓网系统振动对车-轨系统动力学的影响。也就是说, 这里的动力作用关系可以看成单向的, 即车-轨系统对弓网系统的单向动力作用。据此可以采取前述的分区建模原则, 进行分区域、模块式建模。具体来说, 只需分别建立受电弓-接触网耦合动力学模型(如图7所示)和车辆-轨道耦合动力学模型(如图3所示); 然后采用分步求解方法, 先实施车-轨耦合动力学分析, 以获取车顶振动响应, 再将其从受电弓底部输入至弓网系统, 进行弓网耦合动力学分析。值得强调的是, 我们无需机械地将虽然也相互耦合的接触网-受电弓-机车-轨道作为一个超大系统进行一体化建模、一体化求解, 否则将面临数值求解上的巨大困难, 也极不科学。

4.3 列车-基础结构-环境介质动力相互作用模型

如前所述, 环境介质最主要指列车与铁路基础结构周围无所不在的空气介质(风), 也包括铁路基础结构跨越江河海时的水介质。空气动力效应及水浪(流冰)动力作用也是铁路大系统动力学研究中不可忽

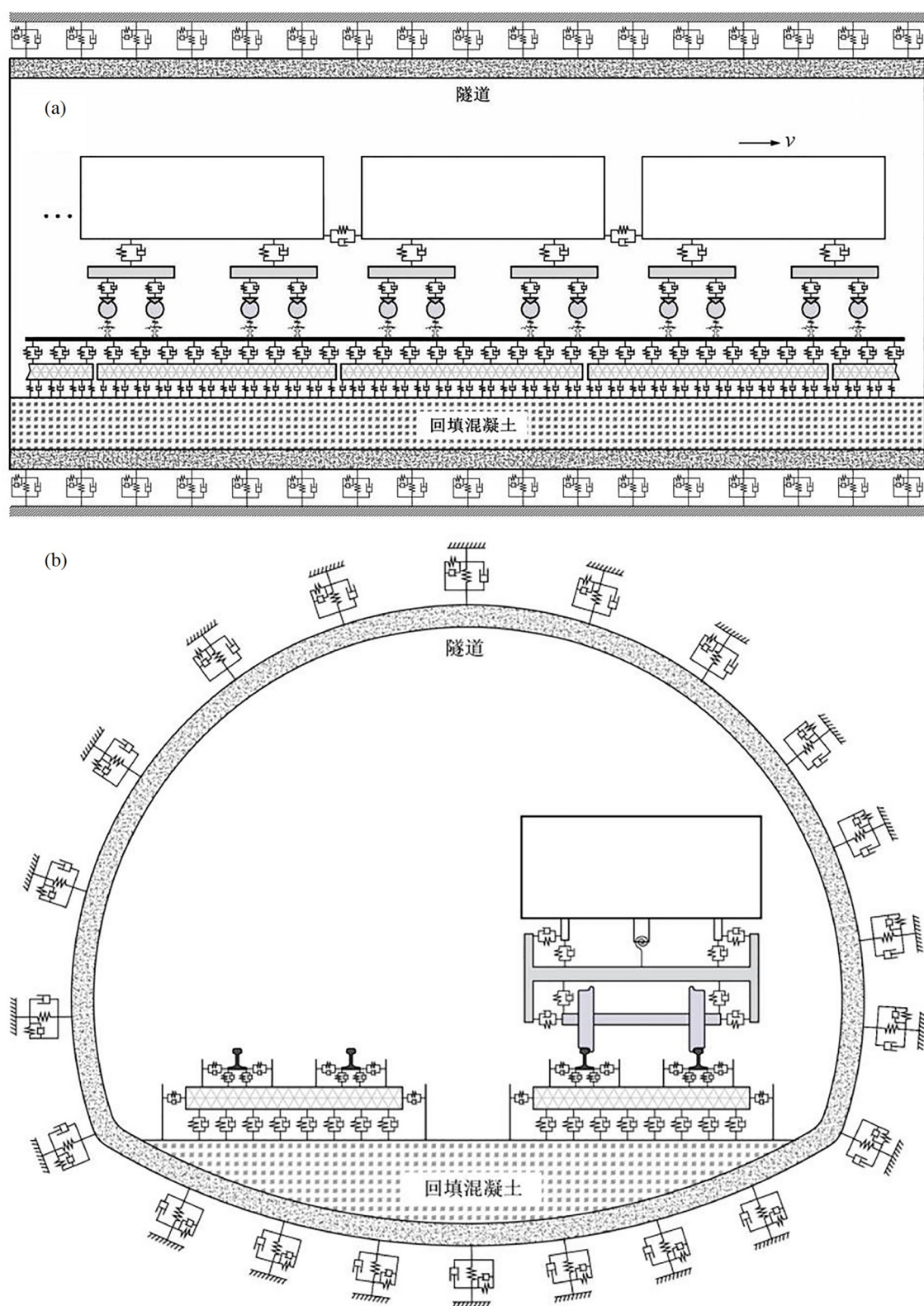


图 6 列车-轨道-隧道耦合动力学模型示意图. (a) 侧视图; (b) 端视图

Figure 6 Schematic diagram of train-track-tunnel coupled dynamics model. (a) Side view; (b) end view.

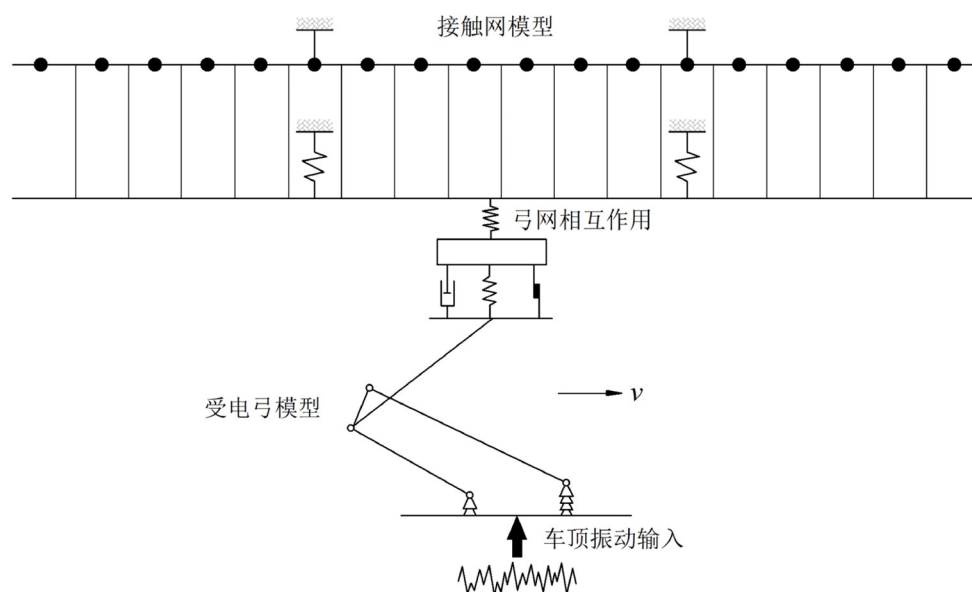


图 7 考虑车顶振动影响的受电弓-接触网耦合动力学模型示意图

Figure 7 Schematic diagram of pantograph-catenary coupled dynamics model considering vehicle roof vibrations.

视的因素, 对铁路服役性能乃至运营安全具有重要影响.

4.3.1 风-车-轨动力相互作用模型

列车在风环境下行驶时, 必然会受到空气动力作用影响, 这种动力效应随着列车速度的提高而急剧增大, 特别是在强横风环境下, 高速列车在轨道上的走行性能将会受到更大影响, 不仅直接影响乘车舒适性, 而且对行车安全构成威胁. 其作用机制源于运行列车与空气介质之间的流固耦合关系, 这也是铁路动力学大系统中的一类基本耦合关系, 由此决定作用于列车的风载荷.

目前, 有关结构物风载荷的计算主要有两种途径: 一种是应用空气动力学的研究成果和理论分析方法, 建立各类风载荷的数学模型; 另一种途径是采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法, 通过数值计算得到气流经过结构物时周围流场的基本物理量(如速度、压力等)的分布及随时间的变化, 进而获得作用在结构物上的气动力和力矩.

横风环境下, 列车运行的方向与环境风向相垂直, 如图8所示, 由横风及与列车运行相反方向的气流合成而得的风以侧偏角 β 作用于车辆上. 为简化起见, 横风对列车的气动力作用一般可等效为三个气动力(阻

力、升力、侧力)和三个气动力矩(点头力矩、摇头力矩、侧滚力矩). 将各种气动力与力矩施加于车辆-轨道耦合动力学模型之相应车体上, 便可开展横风对车辆动态运行行为及行车性能的影响研究^[70~72].

4.3.2 风-车-桥动力相互作用模型

相比于陆地行车, 在桥梁上行车受风的影响会更大. 侧向风不仅对桥上列车直接产生空气动力作用, 而且同时对桥梁施加气动力作用, 特别是大跨度桥梁结构柔, 风致振动更为显著, 振动的桥梁与运行列车间的动态相互作用进一步加剧, 对桥上列车走行性能带来不利影响. 侧向风与列车和桥梁之间均存在流固耦合作用关系, 并将影响轮轨耦合关系, 风、车、桥三者构成一个相互作用的系统, 是铁路动力学大系统的重要组成部分.

当列车以一定速度通过桥梁时, 在轨道不平顺、轮轨缺陷等激励因素作用下, 列车和桥梁系统会产生耦合振动. 而受到侧向风作用时, 桥梁又会产生风致变形和风致振动(抖振、涡激振), 加剧车桥耦合振动, 进一步影响桥上行车安全平稳性. 此外, 列车在桥上运行会改变桥面风场分布, 桥梁风荷载随列车的到达和离去而改变. 桥梁断面外形的变化也会影响列车的气动荷载, 列车沿变截面桥梁运行时, 列车在不同位

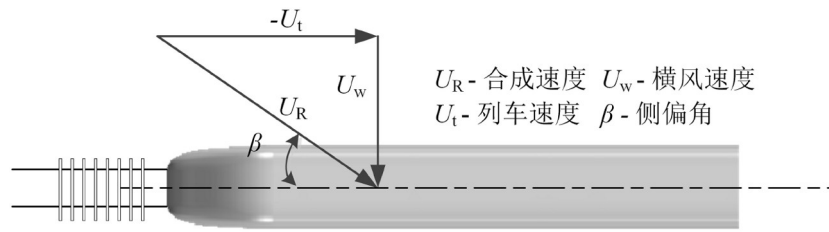


图 8 列车在横风环境下运行时合成风速示意图

Figure 8 Schematic diagram of resultant wind speed for train running under crosswind environment.

置处受到的气动荷载也是变化的。由此可见, 风-车-桥动力相互作用关系十分复杂, 是大跨度桥梁动力设计的控制性因素之一^[73]。

早期的研究通常是在车-桥耦合振动的基础上考虑平均风荷载的作用, 即给车辆和桥梁施加侧向静力荷载, 不能充分考虑车桥相互气动干扰以及桥梁风致振动的影响, 具有较大的局限性。Li等人^[74]于2003年提出“风-车-桥系统”概念, 将侧风作用下列车通过桥梁视为一个时变过程, 考虑车桥相互气动干扰、双重随机激励(脉动风和轨道不平顺)以及双重耦合(流固耦合和车桥耦合)的共同作用, 建立了较为完善的风-车-桥系统耦合振动模型^[74,75], 亦即本文所称的风-车-桥动力相互作用模型(图9)。在建模分析时, 通常可采用自编软件或商业软件, 前者较为灵活, 便于深入考虑一些特殊因素, 但编程繁琐, 难以得到充分验证; 后者使用方便, 可以考虑更为复杂的列车动力学模型, 且可通过联合仿真的方法易于实施大系统动力学分析, 但受到计算条件单一、分析功能固定等诸多限制。总体而言, 风-车-桥动力相互作用研究朝着两个方向发展。一是考虑更多的影响因素或特殊的风荷载影响, 例如, 考虑下击暴流等非平稳风影响^[76]及稳态均匀大风影响(诱发桥梁涡振)^[77]; 又如开展风-车-轨-桥^[78]等方面的相互作用研究。二是获取更精细化的风荷载参数, 一方面通过研制风洞试验装置, 以准确获取车-桥系统气动参数^[79]; 另一方面采用高效的脉动风场模拟方法, 考虑列车气动导纳、风向角修正等的影响^[80], 以获得更准确的列车非定常风荷载等。

基于风-车-桥系统动力相互作用模型, 依据行车安全平稳性和桥梁动力性能方面的相关控制标准, 便可进行桥梁设计和行车性能评估, 提出桥上行车的风速和车速阈值, 评价桥梁防风措施的性能, 以保障大

风环境下桥上行车的安全性和舒适性。

4.3.3 风-车-弓网动力相互作用模型

建立风-车-弓网动力相互作用模型是为了研究风环境下弓网动态相互作用关系, 特别是高速列车行驶在强横风环境下, 弓网关系会受到空气动力作用的极大影响, 需要予以高度关注。一方面, 强风直接影响列车在轨道上的走行性能, 加剧车体振动(特别是横向振动), 增强了车顶上受电弓的振动激励, 从而影响弓网系统动力学特性; 另一方面, 强风对接触网和受电弓本身也会产生复杂的气动效应, 引起接触导线动态横移运动, 从而影响弓网动态相互作用关系。显然, 前者可以直接采用4.3.1节风-车-轨动力相互作用模型或者4.3.2节风-车-桥动力相互作用模型加以研究; 而后者则需要十分细致的CFD建模计算或通过风洞实验确定接触网风荷载。总之, 这是一个极为复杂的大系统动力学问题, 迄今为止开展这方面的分析研究工作少之又少。

4.3.4 车-隧-空气介质动力相互作用模型

车-隧-空气动力相互作用, 即列车与隧道内非定常空气流场之间的动态相互作用, 也是铁路大系统动力学中一个重要组成部分。当列车通过隧道时, 列车排挤周围空气并将其挤压, 而空气又以瞬态交变气动力的形式作用于列车, 从而构成了一个复杂大尺度的列车-隧道-空气流固耦合动力学系统。

列车在隧道内因活塞效应、压力波传递及尾涡交替脱落产生的瞬变非定常气动力(侧力、升力以及摇头力矩等)对车辆-轨道耦合动力学性能带来重要影响, 而且这种影响随着列车运行速度提高或者隧道净空面积缩小呈非线性增加。因此, 高速行车条件下列车通过

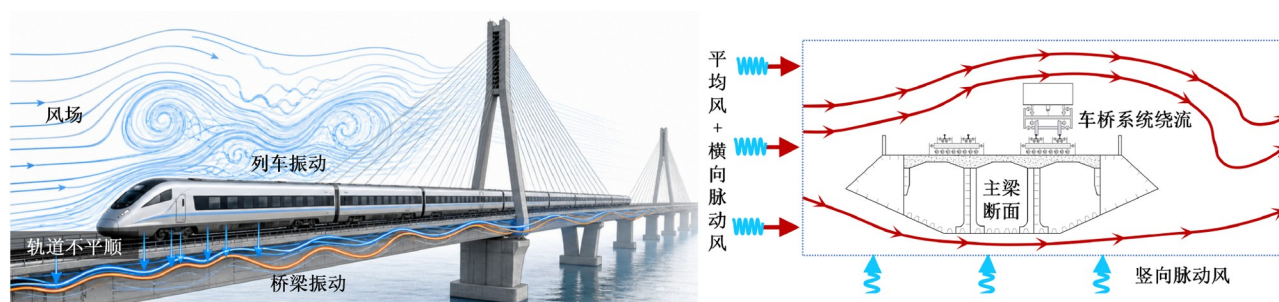


图9 风-车-桥动力相互作用模型示意图

Figure 9 Schematic diagram of wind-train-bridge dynamic interaction model.

隧道时的空气动力效应极为显著, 必须予以高度重视。虽然车-隧-空气动力相互作用颇为剧烈, 但由于受到车辆结构特别是悬挂系统的可靠约束, 车体振动位移相对较小, 通常仅为毫米至厘米级别, 故而车身姿态的微小变化对运行于隧道内的列车气动力幅值、压力波传播特性和出口微气压波幅值等影响很小。因此, 在开展列车-隧道-空气动力相互作用研究时, 我们无需对此复杂大系统进行一体化建模和求解(将导致耦合计算效率极低且数值计算困难), 而可简化采用分区建模、分步求解方式: 首先, 分别建立列车-隧道空气动力学模型^[81,82]和车辆-轨道耦合动力学模型^[6,7]; 其次, 利用计算流体力学或者动模型试验方法得到不同工况下车体交变气动载荷; 然后, 将车体气动力和气动力矩作为外部激励施加到车辆-轨道耦合动力学模型中对应的质心或几何结构点上; 再考虑轮轨几何不平顺激励, 采用快速数值积分方法^[56]求解车辆-轨道耦合动力学方程获得动态响应, 并评估其动力学性能。一般情况下, 这种简化处理能够满足工程应用要求。

4.3.5 车-桥-水介质动力相互作用模型

铁路桥梁越江跨海, 难免会受到洪水、流冰及大浪冲击, 这种水动力作用会通过桥墩直接影响桥上列车走行性, 严重时甚至威胁行车安全^[83]。针对此类问题, 我们可以通过分析水浪、流冰与桥墩的流固耦合作用机制, 确定出不同程度的洪水、流冰及海浪对桥墩的冲击作用力, 将其作为激励输入至4.2.2节列车-轨道-桥梁耦合动力学模型之中, 进而研究其对桥上列车运行安全性和平稳性的影响。

当遇到强风与大浪同时作用时, 只需同时采用4.3.2节风-车-桥动力相互作用模型和车-桥-水介质动

力相互作用分析方法, 即可开展更加庞大、更为复杂的风-车-桥-浪动力相互作用研究。

4.4 列车-承载结构-环境结构动力相互作用模型

列车在弹性轨道结构上行驶而产生的车-轨耦合振动, 通过轨下承载基础结构(路基、桥梁、隧道)向周边土体、建筑物、工业设施等环境结构传播, 进而引发铁路沿线不同程度的环境振动问题。城市轨道交通线路往往紧邻(甚至穿越)居民生活区, 特别是近年来轨道交通上盖物业、城轨综合体和交通导向开发(transit-oriented development, TOD)模式的兴起, 进一步缩短了铁路线路与振动敏感区(住宅区、精密设施、古建筑等)的距离, 由此带来的环境振动问题尤为突出。车致环境振动问题已成为制约我国城市轨道交通健康发展的瓶颈因素。因此, 准确预测、评估继而有效抑制城市轨道交通环境振动是摆在我们面前的重大课题, 其首要任务是, 科学构建不同运营条件下的列车-承载结构-环境结构动力相互作用模型。图10给出了一个综合展示车-轨耦合振动通过分层土体向地面及建筑结构与精密设施传播模型的示意图, 而具体针对地面振动、建筑结构振动、工业设施振动研究时, 则可相应地建立列车-承载结构-土体动力相互作用模型、列车-承载结构-土体-建筑结构动力相互作用模型、列车-承载结构-土体-工业设施动力相互作用模型。

在传统的车致环境振动研究中^[84,85], 车辆一般被简化为移动质量、移动质量-弹簧-阻尼系统或仅具有垂向振动自由度的多刚体系统, 轨道多采用单层或多层梁模型, 轮轨相互作用仅考虑垂向线性动态特性。在此基础上, 通过引入轨下基础结构沿纵向连续一致性或周期性假设, 可将三维问题映射至频域-波数域求

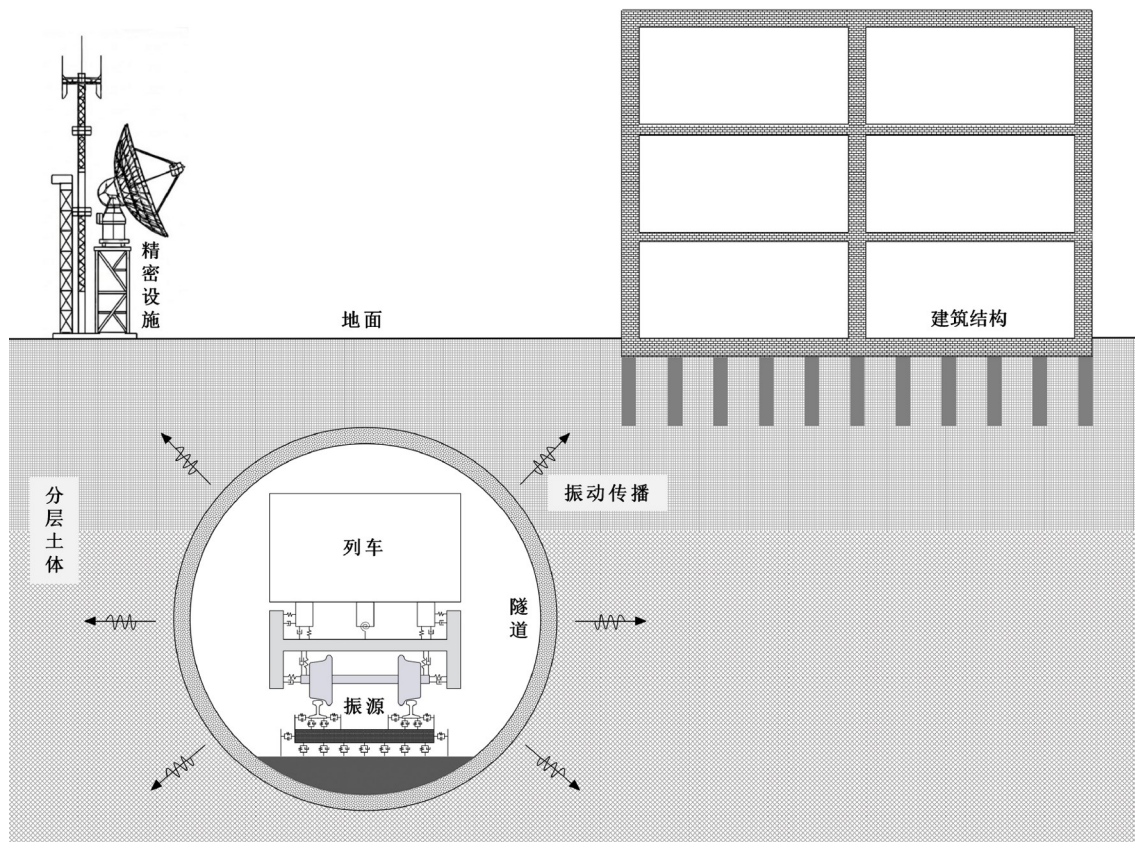


图 10 列车-轨道-环境结构动力相互作用模型示意图

Figure 10 Schematic diagram of train-track-environment structure dynamic interaction model.

解,从而有效降低系统自由度并显著提升求解效率.土体一般采用薄层法^[86]、有限元法^[87]、边界元法^[88]等方法建模,以兼顾计算精度和效率.此外,结合Biot波动理论和三相多孔介质波动理论,还可进一步考虑土体的饱和与非饱和特性^[89]对车致环境振动传播行为的影响.建筑物则根据结构特征和研究需求,建立繁简不一的一维质量-梁杆模型^[90]、平面框架模型^[91]或三维梁杆-板壳模型^[92].传统简化模型因具有分析效率高之优势,已广泛应用于参数敏感性分析和环境振动的初步评估,但这类方法未考虑车轨动态相互作用的非线性和时变性,特别是在涉及曲线段、道岔区与大型复杂建筑物等场景时,难以准确揭示环境结构振动的振源特性及传播规律.

为解决上述问题,以车辆-轨道耦合动力学为理论框架基础,形成了两类典型的研究技术路线,对应两类列车-轨道-环境结构动力相互作用模型.其一是列车-轨道-环境结构系统时域耦合模型^[93-95],该模型可准确

描述轮轨非线性接触特性以及轨下基础结构动力特性对振源强度的影响.然而,列车-轨道子系统和环境结构子系统分别属于高、低频振动系统,尽管采用显-隐式异步长混合积分方法和动态子结构技术可提升两者时域动态耦合求解的计算效率,但在处理城市上盖建筑、远场土体等大尺度复杂环境结构振动问题时,仍然存在计算规模庞大、分析效率极低的应用局限性.其二为列车-轨道-环境结构系统时频域混合弱耦合模型^[96-98],即着重关注车-轨耦合振动向周边土体及环境结构单向传播效应,据此可以采取前述的分区建模原则,首先采用列车-轨道耦合动力学模型计算系统的时域激励荷载(一般为扣件力或轨下基础结构支承力),然后通过Fourier或Floquet变换输入至环境结构频域-波数域动力学模型求解环境振动响应.该方法不仅能够较好地反映列车与轨道动态相互作用的基本特性,还能够保持环境结构振动分析的高效性,已广泛应用于地面建筑、上盖物业及远场敏感工业设施的车致振

动评价与控制研究中. 需要指出的是, 当环境结构的整体刚度较低时, 采用列车-轨道耦合动力学模型计算激励荷载时需要考虑环境结构变形的影响, 否则将导致计算结果出现较大偏差.

回顾列车-承载结构-环境结构动力相互作用模型的发展历程, 大尺度模型计算精度和效率不断改进完善, 环境结构建模方法也日趋成熟, 土体由理想线弹性模型拓展至饱和、非饱和及多孔介质的综合表征体系, 建筑结构从单体扩展至更为精细复杂的城市综合体及轨道上盖开发空间. 未来, 在环境振动预测方面, 可以融合高效数值算法与数据驱动的降阶建模技术, 构建实时预测的数字孪生平台, 为环境结构振动评估与科学维护提供技术支撑; 在环境振动控制方面, 着力发展主动与半主动协同控制策略, 建立涵盖列车、轨道与环境结构的多目标、多路径减振优化模型, 为城市轨道交通的高质量建设及可持续发展提供理论支撑与科学决策依据.

5 铁路大系统动力学理论的工程应用与实践

自铁路大系统动力学学术思想提出至今已有三十多年历史, 在此过程中, 理论研究最初主要是作者团队独自开展, 后来逐渐受到学界广泛重视和应用部门采纳, 再后来甚至是随着现代铁路工程实际应用需求而倒逼其发展, 因此可以说, 铁路大系统动力学理论研究的过程也是应用实践的过程. 如今看来, 车辆-轨道耦合动力学及其发展衍生而来的列车-轨道-基础结构耦合动力学模型、列车-基础结构-环境介质动力相互作用模型、列车-承载结构-环境结构动力相互作用模型, 已被国内外众多学者/团队成功应用于解决铁路工程领域各式各样的动力学问题, 包括列车与线路动力性能最佳匹配设计^[6,7,50,51,99,100]、机车车辆动力学性能优化设计^[6,7]、高速列车气动外形优化设计^[81,101]、高速铁路隧道洞口缓冲结构设计^[81,102]、桥梁结构抗风设计与行车安全保障^[103]、弓网系统结构优化设计^[104]、车致环境振动预测评估与控制^[97,98,105]等; 应用范围涵盖铁路工程众多领域, 涉及高速铁路工程、重载铁路工程、提速铁路工程、城市轨道交通工程等, 经过了系统的现场试验验证和大量的工程实践考核, 取得可喜成效, 有力推动了铁路大系统动力学研究与发展. 下面着重介绍作者所在团队在铁路大系统动力

学工程应用与实践方面的三个代表性案例.

5.1 我国第一条建造标准最高的(京沪)高速铁路

京沪(北京-上海)高速铁路全长1318 km, 设计速度350 km/h, 是世界上一次建成里程最长、建造标准最高的高速铁路, 代表了当前中国运营高铁之最高技术水平.

然而, 长期以来我国传统铁路选线设计主要依赖牵引计算与常规参数检算, 无法评估高速行车条件下线路平纵断面设计参数对车辆运行安全性与旅客乘坐舒适性的影响, 而且这种影响随行车速度提高而迅速增大, 有时甚至成为主要控制因素. 这一问题在当时还无法依靠常规的设计方法或经验来解决, 成为京沪高铁线路高性能设计中亟待突破的重大技术难题.

2008年初, 作者受京沪高速铁路股份有限公司的委托全面开展初步设计方案的列车走行性评估与优化. 团队将京沪高速铁路全线194条平面曲线按照里程划分为112段, 运用铁路大系统动力学理论核心模型, 即车辆-轨道耦合动力学模型, 全面计算了动车组以350 km/h通过全线时的行车安全性和运行平稳性指标, 并逐段进行分析评估, 发现了多个问题区段. 特别是针对第154号和161号曲线存在行车安全性、舒适性指标超出国家标准的严重问题, 提出了平纵断面改进设计方案(如图11所示). 针对第154号曲线(半径5500 m)存在的车体横向加速度超限问题, 提出了三种行之有效的曲线超高和缓和曲线长度的改进设计方案, 以及动车组限速至330 km/h的降速方案(此为最终采纳方案); 针对第161号曲线(半径9000 m)存在的轮轴横向力和脱轨系数超限问题, 提出了平面曲线缓圆点与竖曲线变坡点间距优化设计准则: 原则上增加量 ΔL 应大于20 m, 困难条件下应不小于17 m(此为最终采纳方案). 上述研究建议既能满足高速行车安全平稳性的要求, 又可减少因变更线路设计而造成的废弃工程, 最终被京沪高速铁路公司采纳, 节省了数亿元工程投资, 有力地支撑了我国设计标准最高的高速铁路工程建设. 2011年开通至今的十多年运营实践证明京沪高铁行车安全平稳, 被公认为乘坐舒适性最高的高铁线路之一.

5.2 我国第一条大跨桥上铺设无砟轨道的(昌赣)高速铁路

无砟轨道稳定性、平顺性好, 运营维护工作量少,

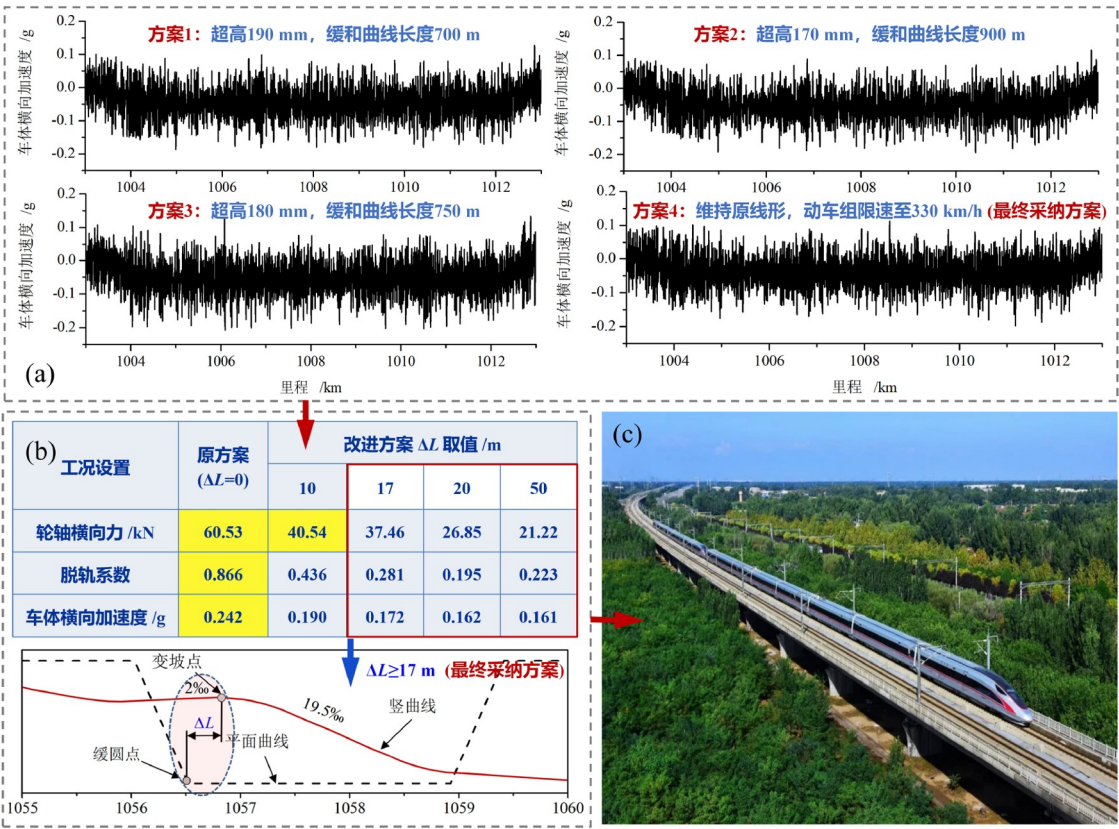


图 11 京沪高速铁路平纵断面设计参数之动力学分析. (a) 第154号曲线不同优化设计方案下车体横向加速度; (b) 第161号曲线平面曲线缓圆点与竖曲线变坡点间距优化设计方案; (c) 建成通车后的京沪高速铁路

Figure 11 Dynamic analysis of horizontal and vertical alignment design parameters for the Beijing-Shanghai high-speed railway. (a) Lateral car-body acceleration under different optimized alignment designs for Curve No. 154; (b) optimized design scheme for the spacing between the spiral-to-circular transition point of the horizontal curve and the grade-change point of the vertical curve for Curve No. 161; (c) the Beijing-Shanghai high-speed railway after completion and opening to traffic.

是我国时速350 km高速铁路的首选。然而，受温度变化、横向风荷载、混凝土徐变等多重因素作用，高铁大跨度桥梁变形量大且复杂，“刚性”无砟轨道与“柔性”桥梁结构变形跟随性差，因此长期以来跨度200 m以上的高铁桥梁只允许铺设砟轨道，且列车必须限速至时速250 km运行。这就导致了列车运营速度受限、养护维修成本增加等突出问题。由此，大跨度桥上铺设无砟轨道一度成为我国高速铁路发展亟须突破的技术瓶颈。

作者所在团队依托中铁四院承担的昌赣(南昌-赣州)高铁赣江特大桥重点工程，在其设计与建设过程中，基于铁路大系统动力学思想，运用列车-轨道-桥梁耦合动力学理论，针对无砟轨道与大跨桥梁变形协调匹配方法、桥上轨道长波不平顺控制准则等进行了系

统研究(如图12所示)^[51]。首创了无砟轨道多层复合结构静态“变形协调”“隔而不离”的设计理念，构建了大跨度桥梁与无砟轨道之间设置弹性隔离缓冲垫层、轨道单元不跨索布置的新型轨道结构体系；探明了缓冲垫层力学参数对车-轨-桥系统动力学性能的影响规律，并确定了垫层材料、最优设计厚度和刚度，解决了无砟轨道与大跨度桥梁之间静、动态受力协调和变形跟随的技术难题；提出了针对大跨桥上长波不平顺的“60 m中点弦测”偏差控制标准，现已成为新建高铁大跨桥梁工程质量验收的基本准则，并纳入我国多部铁路行业设计规范。2019年12月，该研究成果在主跨300 m的赣江特大桥首次成功应用，实现了高速列车350 km/h过桥不限速运行，直接支撑突破了高铁大跨桥铺设无砟轨道的“工程禁区”，标志着中国高铁大跨度桥梁迈

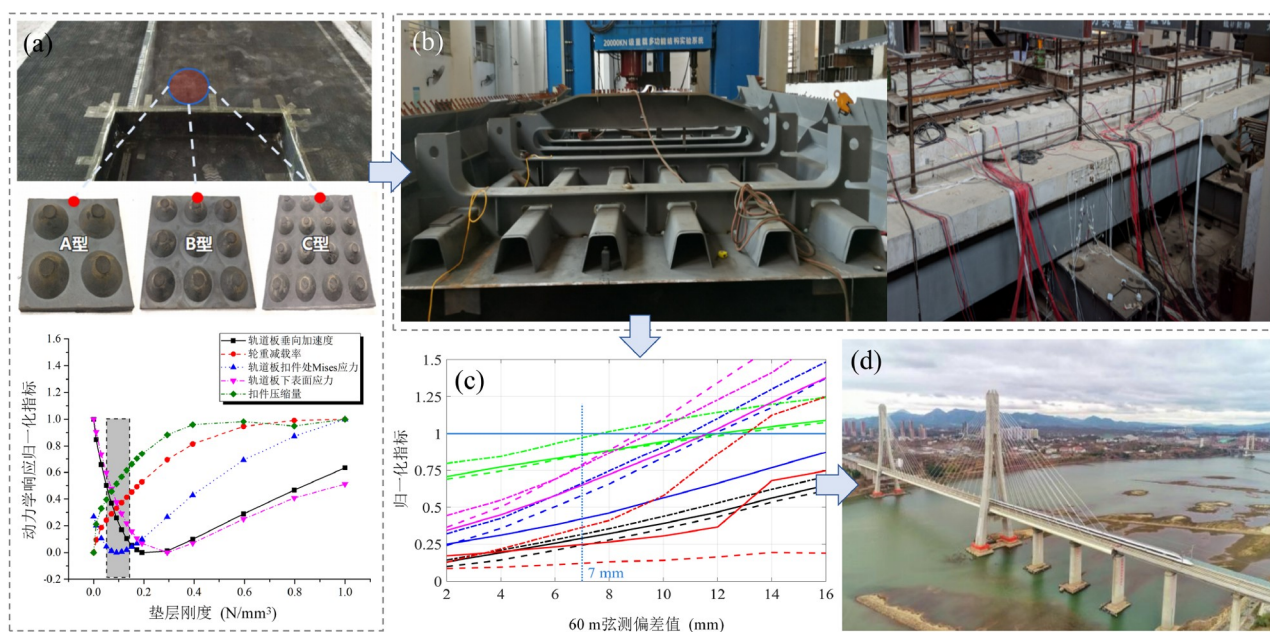


图 12 昌赣高铁赣江特大桥铺设无砟轨道关键技术. (a) 大跨度桥梁弹性隔离缓冲垫层关键力学参数确定; (b) 无砟轨道与大跨度桥梁变形跟随性试验; (c) 60 m 中点弦测偏差控制标准; (d) 建成通车后的昌赣高铁赣江特大桥

Figure 12 Key Technologies for laying ballastless tracks on the Ganjiang Grand Bridge of the Nanchang–Ganzhou high-speed railway. (a) Determination of critical mechanical parameters for the elastic isolation buffer mat on the long-span bridge; (b) testing of deformation compatibility between the ballastless track and the long-span bridge; (c) control standards for the mid-chord offset measured with a 60-m chord; (d) the Ganjiang River Grand Bridge of the Nanchang–Ganzhou high-speed railway after completion and opening to traffic.

入“时速350时代”。此后，该技术相继指导建设了安海湾特大桥、泉州湾特大桥等十余座具有世界领先水平的高铁大跨度无砟轨道桥梁的设计与建造，产生了显著的社会经济效益。

5.3 我国第一条时速350公里下穿国际航空枢纽机场的(蓉昆)高速铁路

成都天府国际机场是我国“十三五”期间规划建设的最大民用运输机场。蓉昆(成都–昆明)高铁以350 km/h的速度斜穿机场核心区域，地铁13号线、18号线列车以90 km/h的速度贯穿机场中轴线，使其成为我国首个高铁与地铁同步下穿的航空枢纽。受机场空间布局、旅客换乘效率及设施功能整合等因素制约，对振动敏感的航空导航设备不得不邻近高铁线路布设，而航站楼及旅客过夜用房则直接作为下穿高铁与地铁的上盖建筑。列车在弹性轨道结构上行驶而产生的系统振动，经由隧道向周边土体、构筑物等环境结构传播，进而显著影响精密设备的正常运行及建筑物使用舒适性。面对如此复杂的铁路大系统，如何准确预测评估继而

有效抑制车致环境振动，在当时尚无先例可循，成为制约机场工程顺利推进的技术瓶颈。

2018~2020年间，作者团队针对蓉昆高铁和地铁线路下穿天府机场诱发的车致环境振动问题，从振源、传播路径、受振体整体大系统的角度开展了建模仿真、预测评估和振动控制研究(如图13所示)^[97]。建立了完整的列车-承载结构-环境结构动力相互作用分析预测模型，探明了轮轨界面振动沿轨道、隧道、土体、建筑物的链式传递路径，揭示了机场航空导航设备、上盖建筑物的振动响应特征、敏感频率与空间分布规律；根据相关标准对环境振动进行了系统评估，发现了建筑结构楼层振级超限问题，并提出了基础隔振支座参数与布置的优化设计方案。优化后的隔振方案不仅实现了最大15 dB以上的减振效果，同时大幅减少了隔振支座数量，降低了项目建设成本和结构安全风险。相关技术方案被设计单位直接采纳，并在后续现场测试中验证了其有效性，有力支撑了天府国际机场安全稳定运营与高品质环境需求，取得了显著的成效。

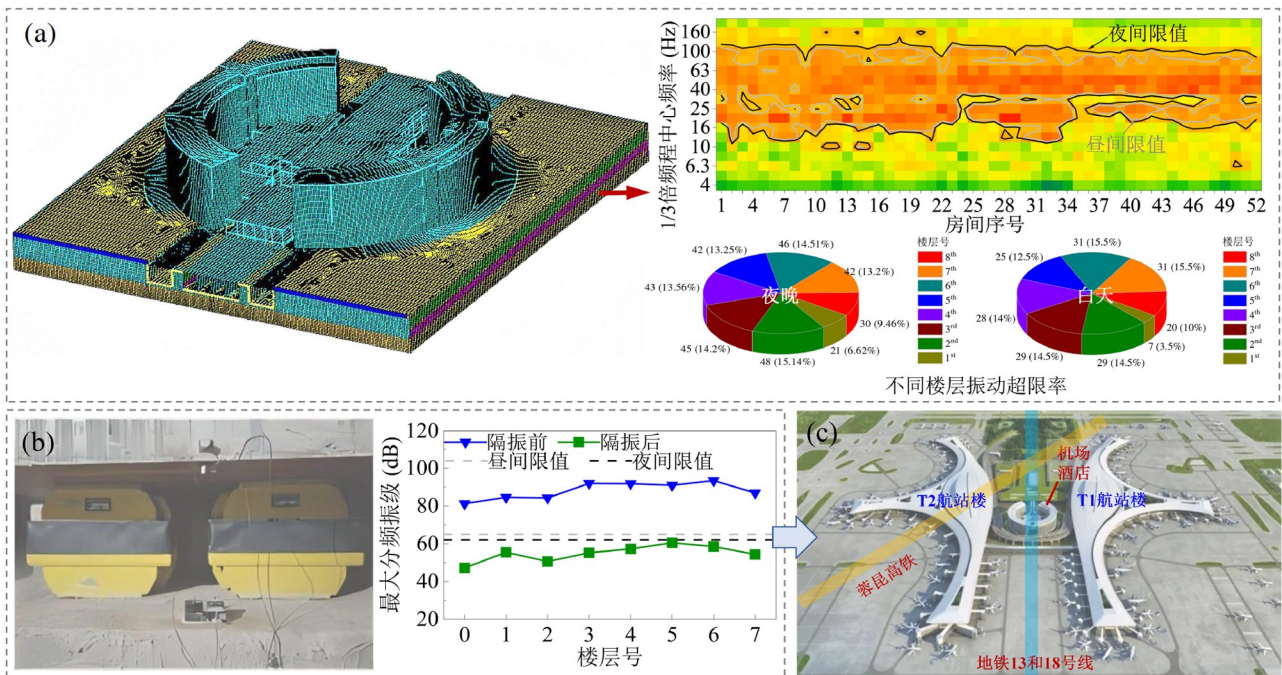


图 13 蓉昆高速铁路下穿天府国际机场的环境振动评估与控制. (a) 环境振动预测模型与评估结果; (b) 建筑物基础隔振支座安装与减振效果; (c) 建成后的天府机场一期工程

Figure 13 Environmental vibration assessment and mitigation for the Chengdu-Kunming high-speed railway passing beneath Tianfu International Airport. (a) Environmental vibration prediction model and assessment results; (b) installation of vibration-isolation bearings at building foundations and their vibration-reduction effectiveness; (c) the completed Phase I project of Tianfu International Airport.

6 未来前景展望

未来铁路运输不断朝着更高速度、更大载重、更大运能方向发展,加之我国庞大的铁路网覆盖辽阔国土,穿越东西南北各种各样的地质与气候环境,强风、地震、极端温度等恶劣服役条件屡见不鲜,新需求、新问题和新的挑战不断涌现,尤其是动力学问题将异常突出,对行车安全平稳性构成严重威胁,对铁路工程建设与安全运营提出更高、更严要求,而这恰恰给铁路大系统动力学研究与应用提供了广阔的舞台.基于迄今为止所取得的大量成功应用案例,我们完全可以期待,通过广大铁路科技工作者的不懈努力,必将获得更加丰富多彩的应用成果,为铁路现代化发展及交通强国建设做出积极贡献.

6.1 更高速铁路

当前,世界高速铁路源发国都在竞相发展新一代更高速度轨道交通技术,如日本的ALFA-X、法国的TGV-Avelia Horizon、德国的AeroLiner3000.我国高

速铁路起步晚,但发展快,在短短二十年间,从无到有,已经开始领跑世界.为了持续引领世界高铁技术发展,我国已布局运营时速400 km高速铁路技术研发.目前,设计时速400 km的“复兴号”高速动车组CR450已经下线,正在进行线路运行考核试验;而预留最高时速400 km的成渝中线高速铁路也已开工建设,预计2027年建成.此外,作者通过主持中国科学院学部重大咨询项目“我国轨道交通发展战略研究”,向国家正式提出了“中国高铁实现引领发展的提速建议”:除了建议“全面恢复高铁主干线时速350 km运营”之外,还首次提出“积极研究我国既有高铁进一步提速可能性”建议,探索在有条件的高铁线路区段将高速列车最高运营速度提至380甚至400 km/h的可行性,从而进一步挖掘我国高铁网潜能,逐渐得到有关部门的关注与积极响应.

毫无疑问,高速铁路朝着更高速度不断跃升是必然趋势,而运营时速达到350~400 km甚至更高时可能会面临一些新的更为突出的动力学问题,如:更高速运行条件下车辆在基础结构上运动稳定性问题、更高速行驶条件下气动荷载和线路激扰共同作用下风-车-轨

及风-车-桥动态相互作用问题及安全控制、既有高铁线路进一步提速适应性问题和提速改造技术对策等。这些更高速铁路动力学问题的产生、发展与演变机制目前尚未完全弄清楚,而如何有效控制这些突出的动力学问题以确保更高速行车安全、平稳,是摆在我们面前的重要课题,需要从铁路大系统动力学角度予以综合研究、探索与试验。

6.2 更大载重铁路

我国重载铁路虽然创造了列车运营速度、开行密度、单线年运量等多个世界纪录,但在长编组、大轴重铁路运输技术领域与世界先进水平(列车牵引质量3万吨以上、货车轴重30~40吨)仍有较大差距。更长编组、更大轴重的铁路货物运输技术一直是我国重载铁路的发展方向。然而,随着重载列车编组长度不断增加,机车车辆之间的纵向冲动将更加剧烈,导致车钩力的增大,过大的车钩力传递至线桥结构,会恶化车-轨、车-桥动态相互作用关系,带来一系列安全问题,甚至可能会引发断钩、脱钩、钢轨倾覆及列车脱轨等重大安全事故;另一方面,列车轴重不断增大将导致轮轨动力作用显著增强,列车对轨道、路基、桥梁、隧道结构的动力作用增大,从而加速轨下基础结构损伤劣化,直接影响运营安全与服役性能^[106]。所有这些都属于车辆、轨道、路基、桥梁、隧道等子系统组合而成的大系统动力学问题,可以采用铁路大系统动力学建模方法,建立各种重载铁路运营条件下的列车-轨道-路基耦合动力学模型、列车-轨道-桥梁耦合动力学模型和列车-轨道-隧道耦合动力学模型,在深入细致研究各种重载运输条件下各子系统之间动态相互作用变化规律的基础上,寻找减轻动态相互作用、确保重载行车安全的途径与策略,如提升更大载重铁路基础结构耐久性技术以及更大轴重重载车辆的低动力作用技术等。

6.3 更绿色铁路

随着人们生活水平的提高及环保意识的增强,发展更加绿色环保铁路成为必然,而更高速度、更大载重铁路运输不可避免地导致能耗增加、振动噪声增大,产生矛盾冲突。例如,列车运行气动阻力与能耗及空气动力噪声随着车速提高均呈幂次方增加,在高速及超高速行车条件下,其矛盾极为突出。解决这一矛

盾的基本途径唯有从铁路大系统动力学视角全面细致地梳理各个可能的减阻、减振、降噪环节,在此基础上最大限度优化提升整体系统动力学性能。例如,采用列车空气动力学方法优化设计出适合于更高速运行的列车气动外形,以期进一步降低列车气动阻力、噪声和运行能耗;又如,借助列车-轨道-基础结构耦合动力学模型寻求更高速列车与线桥隧结构动力相互作用性能合理匹配,进而实现整体系统最优减振设计;等。

6.4 更复杂艰险铁路

我国幅员辽阔,铁路路网规模庞大,穿越东西南北多种多样的复杂地质与气候环境,如东北冬季高严寒、海南常年湿热、东部沿海软土地质、西部高原风沙等等。当前及今后,我国铁路建设会不断触及各种更复杂艰险环境,必将面临更严峻挑战,世界罕见。特别是,随着2006年青藏铁路全线通车运营,以及由四川、新疆、云南等进藏铁路重大战略工程的稳步推进,复杂艰险的高原山区铁路建设如火如荼。高原山区铁路具有“地形高差显著、气候条件恶劣、地质灾害频发”等特征,给选线设计、工程建设、运营维护带来诸多世界级挑战,存在大量科学技术难题需要攻克。仅从动力学视角来看,就有诸多涉及复杂艰险铁路行车安全性、乘车舒适性及服役可靠性等方面难题,除了长大坡道、小半径曲线和地质灾害等情况下引发的列车-轨道-基础结构系统动力学问题,还需面对强风、地震、极端温度等极端运营条件考验,而这些正是铁路大系统动力学理论的应用研究范畴,需要重点关注的研究至少包括(但不限于):

(1) 复杂艰险山区铁路线形最优动力性能设计与调控。基于车辆-轨道耦合动力学理论,研究针对复杂艰险山区线路状况的平纵断面线形设计准则,提出满足行车安全平稳性要求的最困难坡道设置策略,研究长大坡道叠加小半径曲线区段车-轨耦合动力学响应特征及其线形优化方案,评估受灾线路几何状态进而提出其最优修复线形。

(2) 强风环境下列车在线桥结构上的运行安全评估与风险防控。发展更为精细且高效的强风-列车-轨道-基础结构动力相互作用模型,全面考虑系统参数和激励随机性,深入剖析极端特异风、山区峡谷风、线周突变风等复杂强时变非平稳风场对系统动态服役安

全的影响机制, 从而为提升强风环境下行车安全保障能力提供理论和技术支撑。

(3) 地震作用下铁路基础结构动力灾变表征及行车安全评估与防控。强震作用下铁路工程结构易发生塑性损伤甚至破坏, 表现出材料性能和几何变形强非线性行为, 这给列车-轨道-基础结构耦合动力学建模及其高效数值求解带来显著挑战。此外, 更加科学精准地评估地震作用下列车在基础结构上的走行性能, 特别是评判脱轨风险, 也是值得深入细致研究的课题, 这对发展地震灾害条件下行车安全预警技术体系具有重要意义。而基于铁路大系统动力学开展震后线路几何状态下列车走行性能综合评估, 对科学制定轨下基础结构修复策略, 同样具有十分重要的意义。

(4) 极端温度作用下铁路大系统动力学性能演变及其对行车安全平稳性的影响。在严寒与酷暑等极端温度下, 列车与铁路基础结构服役性能会发生意想不到的变化, 如材料性能退化、结构服役状态劣化、线下基础变形等, 进而引发异常的动力学问题, 给行车安全带来威胁。对此, 首先需要研究铁路工程材料性能随温度变化的微观机制及变化规律; 其次需要研究材料性能退化与结构部件服役状态劣化之间的映射关系及其宏观表征; 然后再从大系统层面研究其对列车-轨道-基础结构动力相互作用性能的影响; 最后完成行车性能评估。可见, 铁路大系统动力学研究可望在制定极端温度作用下铁路建设与运营维护相关安全控制标准方面发挥积极作用。

7 结语

三十多年前, 作者提出了开展铁路大系统动力学

理论研究的设想与研究计划, 并于1995年获得国家杰出青年科学基金资助。经过三十年的研究探索与实践, 现已系统形成了铁路大系统动力学学术思想与理论体系, 构建了铁路大系统动力学模型总体框架, 并针对不同问题与应用需求, 建立了各种各类的铁路大系统动力学基础模型。如今可以说, 业已成功开拓出了铁路大系统动力学这一新的学科领域, 构建了完整的现代铁路动力学知识体系, 并形成了全新的研究范式。

铁路是一个庞大而复杂的工程系统, 因此, 在开展铁路工程动力学研究时, 最重要的是要树立系统工程思想, 采用铁路大系统动力学理念分析研究问题, 弄清所研究问题及对象在整个铁路工程系统中主要与哪些子系统强耦合(不能忽略)、与哪些子系统弱相关(尽可能简化), 从而科学界定出该研究所涉及的“大系统”范围, 而绝非研究任何问题都要考虑整个铁路大系统, 也并非所考虑的系统越大越好。

三十多年来, 特别是近十年来, 国内外学者不同程度地开展了铁路大系统动力学相关理论与应用研究, 尤其是我国铁路科研人员紧密围绕中国铁路大发展中涉及的一系列复杂大系统动力学问题, 广泛开展了卓有成效的应用研究与现场试验, 解决了大量工程实际难题, 有力地支撑了我国铁路现代化飞速发展, 也极大地推动了铁路大系统动力学研究与发展。

展望未来, 现代铁路运输正朝着更高速度、更大载重及更大运能方向发展, 而服役环境也愈趋严苛, 对铁路工程建设与运营提出更高、更严要求, 尤其是行车安全性与平稳性方面, 必将面临更大挑战, 可以期待, 铁路大系统动力学理论, 对破解未来铁路发展中面临的诸多关键科技难题定能发挥更大、更好作用, 应用前景十分广阔。

致谢 感谢西南交通大学李永乐教授、李田副研究员和作者研究团队成员罗俊副研究员、凌亮研究员、朱胜阳研究员, 以及作者的博士生杨建近、曲帅、李若愚、张恒等为协助撰写本文付出的努力。

参考文献

- 1 Zhai W M. Vertical vehicle-track coupled dynamics (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1991 [翟婉明. 车辆-轨道垂向耦合动力学. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 1991]
- 2 Zhai W M. The vertical model of vehicle-track system and its coupling dynamics (in Chinese). J China Railw Soc, 1992, 14: 10–21 [翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理. 铁道学报, 1992, 14: 10–21]

- 3 Zhai W M, Sun X. A detailed model for investigating vertical interaction between railway vehicle and track. *Vehicle Syst Dyn*, 1994, 23: 603–615
- 4 Zhai W M. Research on the theoretical system of railway large-scale system dynamics. In: Towards the 21st Century Chinese Mechanics—Proceedings of the 9th Youth Scientists Forum of the China Association for Science and Technology (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 1996. 286–292 [翟婉明. 铁路大系统动力学理论体系的研究. 《走向二十一世纪的中国力学——中国科协第九次青年科学家论坛报告文集》. 北京: 清华大学出版社, 1996. 286–292]
- 5 Zhai W M, Wang K Y, Cai C B. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics. *Vehicle Syst Dyn*, 2009, 47: 1349–1376
- 6 Zhai W M. *Vehicle-Track Coupled Dynamics: Theory and Application*. Singapore: Springer, 2020
- 7 Zhai W M. *Vehicle-Track Coupled Dynamics* (in Chinese). 4th ed. Beijing: Science Press, 2015 [翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学. 第4版. 北京: 科学出版社, 2015]
- 8 Zhai W M. Development of vehicle-track coupled dynamics theory and engineering practice (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 3793–3807 [翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学理论的发展与工程实践. 科学通报, 2022, 67: 3793–3807]
- 9 Chen Y C, Zhang B J, Zhang N, et al. A condensation method for the dynamic analysis of vertical vehicle-track interaction considering vehicle flexibility. *J Vib Acoustics*, 2015, 137: 041010
- 10 Olivier B, Connolly D P, Alves Costa P, et al. The effect of embankment on high speed rail ground vibrations. *Int J Rail Transp*, 2016, 4: 229–246
- 11 Sadeghi J, Rabiee S, Khajehdezfoly A. Effect of rail irregularities on ride comfort of train moving over ballast-less tracks. *Int J Str Stab Dyn*, 2019, 19: 1950060
- 12 Ling L, Dhanasekar M, Thambiratnam D P, et al. Minimising lateral impact derailment potential at level crossings through guard rails. *Int J Mech Sci*, 2016, 113: 49–60
- 13 Chen X M, Deng X Y, Xu L. A three-dimensional dynamic model for railway vehicle-track interactions. *J Comput Nonlinear Dyn*, 2018, 13: 071006
- 14 Guo Y S, Yu Z J, Shi H M. Effects of rail thermal stress on the dynamic response of vehicle and track. *Vehicle Syst Dyn*, 2015, 53: 30–50
- 15 Pan L, Xu L, Chen X M, et al. Curved ballasted track-vehicle dynamic interaction: Effects of curve radius and track structural nonlinearity. *J Comput Nonlinear Dyn*, 2021, 16: 071004
- 16 Uzzal R U A, Ahmed A K W, Rakheja S. Analysis of pitch plane railway vehicle-track interactions due to single and multiple wheel flats. *Proc Institution Mech Engineers Part F-J Rail Rapid Transit*, 2009, 223: 375–390
- 17 Grossoni I, Iwnicki S, Bezir Y, et al. Dynamics of a vehicle-track coupling system at a rail joint. *P I Mech Eng F-J Rai*, 2015, 229: 364–374
- 18 Arvidsson T, Andersson A, Karoumi R. Train running safety on non-ballasted bridges. *Int J Rail Transp*, 2019, 7: 1–22
- 19 Zhang J, Gao Q, Tan S J, et al. A precise integration method for solving coupled vehicle-track dynamics with nonlinear wheel-rail contact. *J Sound Vib*, 2012, 331: 4763–4773
- 20 Sun Y Q, Dhanasekar M. A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system. *Int J Solids Struct*, 2002, 39: 1337–1359
- 21 Ma X N, Liang B. A time-varying coupling model for dynamic analysis of high speed railway subgrade (in Chinese). *J China Railw Soc*, 2006, 28: 65–70 [马学宁, 梁波. 高速铁路路基结构时变系统耦合动力学分析. 铁道学报, 2006, 28: 65–70]
- 22 Sheng X Z, Jones C J C, Petyt M. Ground vibration generated by a harmonic load acting on a railway track. *J Sound Vib*, 1999, 225: 3–28
- 23 Metrikine A V, Popp K. Vibration of a periodically supported beam on an elastic half-space. *Eur J Mech-A Solids*, 1999, 18: 679–701
- 24 Galvín P, Romero A, Domínguez J. Fully three-dimensional analysis of high-speed train-track-soil-structure dynamic interaction. *J Sound Vib*, 2010, 329: 5147–5163
- 25 Chen M, Sun Y, Zhai W M. High efficient dynamic analysis of vehicle-track-subgrade vertical interaction based on Green function method. *Vehicle Syst Dyn*, 2020, 58: 1076–1100
- 26 Xu L. *Train-Track-Substructure Dynamic Interaction: Theoretical Models and Numerical Algorithms* (in Chinese). Beijing: China Railway Publishing House, 2021 [徐磊. 列车-轨道-基础结构动力相互作用: 理论模型与数值算法. 北京: 中国铁道出版社, 2021]
- 27 Xu L, Zhao Y S, Li Z, et al. Three-dimensional vehicle-ballasted track-subgrade interaction: Model construction and numerical analysis. *Appl Math Model*, 2020, 86: 424–445
- 28 Xu L, Yu Z W, Shi C. A matrix coupled model for vehicle-slab track-subgrade interactions at 3-D space. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2020, 128:

105894

- 29 Li Z, Xu L, Wang W D. A method for vehicle-track-soil interaction analysis considering soil deformation. *Archiv Civ Mech Eng*, 2022, 22: 210
- 30 Cai X P, Zhang Q, Wang Q Y, et al. Effects of the subgrade differential arch on damage characteristics of CRTS III slab track and vehicle dynamic response. *Construction Building Mater*, 2022, 327: 126982
- 31 Chen M, Sun Y, Zhu S Y, et al. Dynamic performance comparison of different types of ballastless tracks using vehicle-track-subgrade coupled dynamics model. *Eng Struct*, 2021, 249: 113390
- 32 Chu K H, Garg V K, Wiriyachai A. Dynamic interaction of railway train and bridges. *Vehicle Syst Dyn*, 1980, 9: 207–236
- 33 Yang Y B, Yau J D. Vehicle-bridge interaction element for dynamic analysis. *J Struct Eng*, 1997, 123: 1512–1518
- 34 Xia H, Xu Y L, Chan T H T. Dynamic interaction of long suspension bridges with running trains. *J Sound Vib*, 2000, 237: 263–280
- 35 Zhai W M, Cai C B. Train/track/bridge dynamic interactions: Simulation and applications. *Vehicle Syst Dyn*, 2002, 37: 653–665
- 36 Zhai W M, Cai C B, Wang K Y. Numerical simulation and field experiment of high-speed train-track-bridge system dynamics. *Veh Syst Dyn*, 2004, 41(Suppl): 677–686
- 37 Cai C B. Theoretical and applied research on coupled vibration of high-speed railway vehicle-track-bridge systems (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004 [蔡成标. 高速铁路列车-线路-桥梁耦合振动理论及应用研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2004]
- 38 Zhai W M, Xia H. Theory and Engineering Application of Train-Track-Bridge Dynamic Interaction (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011 [翟婉明, 夏禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用. 北京: 科学出版社, 2011]
- 39 Zhai W M, Xia H, Cai C B, et al. High-speed train-track-bridge dynamic interactions—Part I: theoretical model and numerical simulation. *Int J Rail Transp*, 2013, 1: 3–24
- 40 Zhai W M, Wang S L, Zhang N, et al. High-speed train-track-bridge dynamic interactions—Part II: experimental validation and engineering application. *Int J Rail Transp*, 2013, 1: 25–41
- 41 Zhai W M, Han Z L, Chen Z W, et al. Train-track-bridge dynamic interaction: A state-of-the-art review. *Vehicle Syst Dyn*, 2019, 57: 984–1027
- 42 Chen Z W, Zhai W M. Theoretical method of determining pier settlement limit value for China's high-speed railway bridges considering complete factors. *Eng Struct*, 2020, 209: 109998
- 43 Montenegro P A, Carvalho H, Ortega M, et al. Impact of the train-track-bridge system characteristics in the runnability of high-speed trains against crosswinds—Part I: Running safety. *J Wind Eng Industrial AeroDyn*, 2022, 224: 104974
- 44 Montenegro P A, Ribeiro D, Ortega M, et al. Impact of the train-track-bridge system characteristics in the runnability of high-speed trains against crosswinds—Part II: Riding comfort. *J Wind Eng Industrial AeroDyn*, 2022, 224: 104987
- 45 Yu Z W, Mao J F. A stochastic dynamic model of train-track-bridge coupled system based on probability density evolution method. *Appl Math Model*, 2018, 59: 205–232
- 46 Xu L, Zhai W M, Li Z L. A coupled model for train-track-bridge stochastic analysis with consideration of spatial variation and temporal evolution. *Appl Math Model*, 2018, 63: 709–731
- 47 He Q L, Li S H, Yang Y, et al. A novel modelling method for heavy-haul train-track-long-span bridge interaction considering an improved track-bridge relationship. *Mech Syst Signal Processing*, 2024, 220: 111691
- 48 Zhai Z H, Cai C B, Zhu S Y. Implementation of Timoshenko curved beam into train-track-bridge dynamics modelling. *Int J Mech Sci*, 2023, 247: 108158
- 49 Gong W, Zhu Z H, Liu Y, et al. Running safety assessment of a train traversing a three-tower cable-stayed bridge under spatially varying ground motion. *Rail Eng Sci*, 2020, 28: 184–198
- 50 Li R Y, He Q L, Zhu S Y, et al. A new methodology for pre-camber design of a long-span bridge considering dynamic train load and complex environmental effects. *Eng Struct*, 2024, 302: 117349
- 51 Li R Y, He Q L, Wang X T, et al. An improved chord measurement method for determining track irregularity thresholds on long-span high-speed railway bridges. *Mech Syst Signal Processing*, 2025, 229: 112510
- 52 Ling L, Dhanasekar M, Wang K Y, et al. Collision derailments on bridges containing ballastless slab tracks. *Eng Fail Anal*, 2019, 105: 869–882
- 53 Zhang X A, Zhang X Y, Yang J J, et al. Noise reduction mechanism of high-speed railway box-girder bridges installed with MTMDs on top plate. *Railw Eng Sci*, 2024, 32: 518–532
- 54 Gou H Y, Gao H, Ban X L, et al. Vibration energy transmission in high-speed train-track-bridge coupled systems. *Eng Struct*, 2023, 297: 117019

- 55 Gao L, Jiang H W. Study on model updating of vehicle-track-bridge spatial coupling system in high-speed railway based on multi-objective optimization (in Chinese). *China Railw Sci*, 2022, 43: 50–57 [高亮, 姜涵文. 基于多目标优化的高速铁路车辆-轨道-桥梁空间耦合系统模型修正研究. *中国铁道科学*, 2022, 43: 50–57]
- 56 Zhai W M. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering. *Int J Numer Meth Engng*, 1996, 39: 4199–4214
- 57 Xu L, Zhai W M, Zhu S Y, et al. An efficient method for train-track-substructure dynamic interaction analysis by implicit-explicit integration and multi-time-step solution. *Rail Eng Sci*, 2023, 31: 20–36
- 58 He C, Zhou S H, Guo P J, et al. A three-dimensional semi-analytical method for calculating vibrations from a moving load on a periodic jointed tunnel. *Comput Geotechnics*, 2019, 114: 103150
- 59 Zhou S H, Zhang X H, Di H G, et al. Metro train-track-tunnel-soil vertical dynamic interactions—Semi-analytical approach. *Vehicle Syst Dyn*, 2018, 56: 1945–1968
- 60 Yang J J, Zhu S Y, Li Q Y, et al. A spatial train-track-tunnel coupled dynamics model for assessing influences of curved railway line on circular tunnel vibrations. *Appl Math Model*, 2025, 140: 115892
- 61 Xu L, Zhai W M. Vehicle-track-tunnel dynamic interaction: A finite/infinite element modelling method. *Rail Eng Sci*, 2021, 29: 109–126
- 62 Zhang J F, Zhu Z X, Zhu X Y, et al. Study on the influence of uneven settlement and small curve radius on metro train running safety and riding comfort. *Structures*, 2023, 51: 1806–1820
- 63 Xiao P, Peng L M, Li R, et al. Research on vehicle-rail-tunnel coupling model and influence factors of dynamic response of bottom structure of heavy-haul railway tunnel (in Chinese). *J Railw Sci Eng*, 2022, 19: 3737–3745 [肖鹏, 彭立敏, 李锐, 等. 重载铁路隧道车-轨-隧耦合模型及底部结构动力响应影响因素研究. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19: 3737–3745]
- 64 Zhai W M, Cai C B. Effect of locomotive vibrations on pantograph-catenary system dynamics. *Vehicle Syst Dyn*, 1998, 29: 47–58
- 65 Seo J H, Sugiyama H, Shabana A A. Three-dimensional large deformation analysis of the multibody pantograph/catenary systems. *Nonlinear Dyn*, 2005, 42: 199–215
- 66 Pombo J, Ambrósio J. Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains. *Comput Struct*, 2013, 124: 88–101
- 67 Yao Y M, Zou D, Zhou N, et al. A study on the mechanism of vehicle body vibration affecting the dynamic interaction in the pantograph-catenary system. *Vehicle Syst Dyn*, 2021, 59: 1335–1354
- 68 Song Y, Wang Z W, Liu Z G, et al. A spatial coupling model to study dynamic performance of pantograph-catenary with vehicle-track excitation. *Mech Syst Signal Processing*, 2021, 151: 107336
- 69 Xu Y, Liu Z D, Stichel S, et al. A comparative study on the influence of typical track failures on high-speed pantograph-catenary interaction dynamics. *Vehicle Syst Dyn*, 2024, 62: 2883–2911
- 70 Yang J Z, Bi H Q, Zhai W M. Dynamic analysis of train in cross-winds with the arbitrary Lagrangian-Eulerian method (in Chinese). *China Railw Soc*, 2009, 31: 120–124 [杨吉忠, 毕海权, 翟婉明. 基于ALE方法的列车横风绕流动力学分析. *铁道学报*, 2009, 31: 120–124]
- 71 Zhai W M, Yang J Z, Li Z, et al. Dynamics of high-speed train in crosswinds based on an air-train-track interaction model. *Wind Struct*, 2015, 20: 143–168
- 72 Zhang L, Zhang J Y, Li T, et al. Unsteady aerodynamic characteristics and safety of high-speed trains under crosswinds (in Chinese). *J Mech Eng*, 2016, 52: 124–135 [张亮, 张继业, 李田, 等. 横风下高速列车的非定常气动特性及安全性. *机械工程学报*, 2016, 52: 124–135]
- 73 Li Y L, Xiang H Y, Qiang S Z. Review on coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems (in Chinese). *China J Highw Transp*, 2018, 31 :24–37 [李永乐, 向活跃, 强士中. 风-列车-桥系统耦合振动研究综述. *中国公路学报*, 2018, 31 :24–37]
- 74 Li Y L, Qiang S Z, Liao H L. Dynamic interaction of wind-vehicle-bridge system. In: *Proceedings of the Eleventh International Conference on Wind Engineering*. Lubbock: Texas Tech University, Wind Engineering Research Center, 2003
- 75 Li Y L, Qiang S Z, Liao H L. 3-D coupled vibration of wind-vehicle-bridge system (in Chinese). *China Civ Eng J*, 2005: 61–64, 70 [李永乐, 强士中, 廖海黎. 风-车-桥系统空间耦合振动研究. *土木工程学报*, 2005: 61–64, 70]
- 76 He X H, Shi K, Wu T. An efficient analysis framework for high-speed train-bridge coupled vibration under non-stationary winds. *Structure Infrastructure Eng*, 2020, 16: 1326–1346
- 77 Liu D J, Li X Z, Mei F L, et al. Effect of vertical vortex-induced vibration of bridge on railway vehicle's running performance. *Vehicle Syst Dyn*, 2023, 61: 1432–1447

- 78 Liu G, Chen S Y, Wang K P. Study on coupling vibration of vehicle-bridge-wind-wave-current system of rail-cum-road sea bridge (in Chinese). *China Civ Eng J*, 2019, 52: 72–87 [刘高, 陈上有, 王昆鹏, 等. 跨海公铁两用桥梁车-桥-风浪流耦合振动研究. *土木工程学报*, 2019, 52: 72–87]
- 79 Li Y L, Hu P, Xu Y L, et al. Wind loads on a moving vehicle-bridge deck system by wind-tunnel model test. *Wind Struct*, 2014, 19: 145–167
- 80 Yan N J, Chen X Z, Li Y L. Assessment of overturning risk of high-speed trains in strong crosswinds using spectral analysis approach. *J Wind Eng Industrial AeroDyn*, 2018, 174: 103–118
- 81 Tian H Q. Train Aerodynamics (in Chinese). Beijing: China Railway Publishing House, 2007 [田红旗. 列车空气动力学. 北京: 中国铁道出版社, 2007]
- 82 Li N X, Li T, Zhang J Y. Study on the influence of tunnel opening partition walls on the pressure wave characteristics and mitigation effects during train passage. *Tunnelling Underground Space Tech*, 2026, 172: 107577
- 83 Li P H, Li Z L, Han Z L, et al. Running safety evaluation of high-speed train subject to the impact of floating ice collision on bridge piers. *Proc Institution Mech Engineers Part F-J Rail Rapid Transit*, 2022, 236: 220–233
- 84 Sheng X Z. A review on modelling ground vibrations generated by underground trains. *Int J Rail Transp*, 2019, 7: 241–261
- 85 Kouroussis G, Connolly D P, Verlinden O. Railway-induced ground vibrations—A review of vehicle effects. *Int J Rail Transp*, 2014, 2: 69–110
- 86 Bian X C, Jiang H G, Chang C, et al. Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2015, 76: 29–43
- 87 Sheng X, Jones C J C, Thompson D J. Modelling ground vibration from railways using wavenumber finite- and boundary-element methods. *Proc R Soc A*, 2005, 461: 2043–2070
- 88 Degrande G, Clouteau D, Othman R, et al. A numerical model for ground-borne vibrations from underground railway traffic based on a periodic finite element-boundary element formulation. *J Sound Vib*, 2006, 293: 645–666
- 89 Nelson J T. Prediction of ground vibration from trains using seismic reflectivity methods for a porous soil. *J Sound Vib*, 2000, 231: 727–737
- 90 Sanayei M, Kayiparambil P A, Moore J A, et al. Measurement and prediction of train-induced vibrations in a full-scale building. *Eng Struct*, 2014, 77: 119–128
- 91 Feng Q S, Wang Z Y, Zhang Y X. Application for dynamic sub-structuring method in the analysis of building vibration caused by metro train (in Chinese). *Noise Vib Control*, 2017, 37: 136–141 [冯青松, 王子玉, 张翊翔. 基于动态子结构法探讨地铁列车运行引起建筑物的振动. *噪声与振动控制*, 2017, 37: 136–141]
- 92 Zou C, Li X M, He C, et al. An efficient method for estimating building dynamic response due to train operations in tunnel considering transmission path from source to receiver. *Comput Struct*, 2024, 305: 107555
- 93 Yang J J, Zhu S Y, Xu L, et al. A 3D train-track-tunnel-soil coupled dynamics model based on semi-analytical cylindrical layer element. *Comput Geotechnics*, 2025, 179: 106966
- 94 El Kacimi A, Woodward P K, Laghrouche O, et al. Time domain 3D finite element modelling of train-induced vibration at high speed. *Comput Struct*, 2013, 118: 66–73
- 95 Olivier B, Verlinden O, Kouroussis G. A vehicle/track/soil model using co-simulation between multibody dynamics and finite element analysis. *Int J Rail Transp*, 2020, 8: 135–158
- 96 Kouroussis G, Verlinden O, Conti C. Ground propagation of vibrations from railway vehicles using a finite/infinite-element model of the soil. *Proc Institution Mech Engineers Part F-J Rail Rapid Transit*, 2009, 223: 405–413
- 97 Yang J J, Zhu S Y, Zhai W M, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel. *Sci Total Environ*, 2019, 668: 485–499
- 98 Qu S, Yang J J, Zhu S Y, et al. A hybrid methodology for predicting train-induced vibration on sensitive equipment in far-field buildings. *Transp Geotechnics*, 2021, 31: 100682
- 99 Zhai W M. Optimum matching design between railway vehicles and tracks: Principle, method and engineering practice (in Chinese). *China Railway Sci*, 2006, 27: 60–65 [翟婉明. 机车车辆与线路最佳匹配设计原理、方法及工程实践. *中国铁道科学*, 2006, 27: 60–65]
- 100 Zhai W M, Gao J M, Liu P F, et al. Reducing rail side wear on heavy-haul railway curves based on wheel–rail dynamic interaction. *Vehicle Syst Dyn*, 2014, 52: 440–454
- 101 Wang T T, Yang L, Wang Y, et al. Research on aerodynamic drag reduction for 400 km/h high-speed trains. *Adv Wind Eng*, 2025, 2: 100056
- 102 Zhao Y M, Ma W B, Cheng A J, et al. High-Speed Railway Tunnel Aerodynamic Effects (in Chinese). Beijing: China Railway Publishing

- House, 2012 [赵有明, 马伟斌, 程爱君, 等. 高速铁路隧道气动效应. 北京: 中国铁道出版社, 2012]
- 103 Li Y L, Yu J S, Zhang M J, et al. Wind characteristics of a bridge site and wind-resistance key technology in complex mountains (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 530–542 [李永乐, 喻济昇, 张明金, 等. 山区桥梁桥址区风特性及抗风关键技术. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 530–542]
- 104 Zhang J, Tian Y B, Liu S Y, et al. A novel multidisciplinary hierarchical collaborative optimization of the high-speed pantograph considering the uncertainty of joint clearances. *Eng Optimization*, 2025, 57: 3007–3036
- 105 Zhu S Y, Wang J W, Cai C B, et al. Development of a vibration attenuation track at low frequencies for urban rail transit. *Comput-Aided Civil Infrastructure Eng*, 2017, 32: 713–726
- 106 Zhai W M, Stichel S, Ling L. Train-track coupled dynamics problems in heavy-haul rail transportation. *Vehicle Syst Dyn*, 2025, 63: 1187–1240

Railway large-scale system dynamics: theory system, engineering practice and future prospect

ZHAI WanMing

State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

This article reviews the academic rationale of the railway large-scale system dynamics firstly proposed by the author in the 1990s, as well as its formation background and development sequence. On the basis of a comprehensive review of various dynamic problems involved in the field of railway dynamics, a theoretical system of railway large-scale system dynamics was established, including four core levels and over ten branch directions. Two fundamental principles for the dynamics modeling of a large-scale railway system were proposed: the problem-oriented principle of parsimonious modeling and the principle of zonal modeling and stepwise solution for the large-scale system. Based on the modeling principles, this paper comprehensively discusses the dynamics modeling methods and their development status at all levels and in all branch directions established in the theory system of railway large-scale system dynamics, and presents a series of representative basic models of railway large-scale system dynamics. Application of the theory and model of the railway large-scale system dynamics in engineering is briefly introduced, with illustrative examples demonstrating their remarkable practical effectiveness in addressing major scientific and technological challenges in national key railway projects. Finally, the broad applications of railway large-scale system dynamics in the future development of railways with higher-speed, with greater load capacity, and with more complex operating environment are prospected. This research clearly structures the knowledge system of modern railway dynamics, establishes a new research paradigm for railway large-scale system dynamics, and provides advanced theoretical support for the high-quality development of railway modernization.

railway, large-scale system, dynamics, theory system, model, engineering practice

doi: [10.1360/SST-2026-0102](https://doi.org/10.1360/SST-2026-0102)