

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2413007

高速接触网静/动态几何参数及误差特性*

占 栋, 高仕斌, 游诚曦, 于 龙
(西南交通大学电气工程学院 成都 611756)

摘 要: 接触网几何状态是决定高铁供电安全与弓网受流质量的关键因素。根据接触网静/动态属性, 明确接触网静/动态几何参数与静/动态检测涵义。针对接触网动态检测时车辆姿态变化、轨面弹性变形、接触线动态抬升与环境扰动问题, 开展动力激励下接触网几何动态检测复合误差形成机理与补偿方法研究。通过轨道、车辆、接触网系统动力耦合及环境扰动作用下复合误差分解、溯源与辨识, 分析车辆姿态误差特性及其表征模型, 结合轨面弹性变形、接触线动态抬升、风载动态响应, 阐述轮轨、弓网、风场多重耦合下接触网几何动态检测误差补偿方法。旨在揭示动力激励作用下接触网几何动态检测误差产生、传播、复合与演变过程, 形成面向高速接触网几何动态检测的复合误差控制基础理论方法, 为提高我国接触网检测水平和保障接触网高品质维修起到科学有效的促进作用。

关键词: 高速铁路; 接触网; 几何参数; 动态响应; 动态误差

中图分类号: TH873. 7 U226. 5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520. 2040

Static/dynamic geometric parameters and error characteristics of high-speed overhead catenary

Zhan Dong, Gao Shibin, You Chengxi, Yu Long

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The geometric state of the catenary is a crucial factor in ensuring the safety of traction power supply and the quality of current collection in high-speed railway systems. Understanding the fundamental characteristics of static and dynamic geometric parameters within the catenary system is vital for accurately interpreting them in both static and dynamic detection contexts. However, dynamic detection poses challenges due to factors such as vehicle posture changes, elastic deformation of the track surface, dynamic lifting of the contact wire, and environmental disturbances. Research efforts are concentrated on understanding the mechanisms behind hybrid error formation and developing compensation methods for detecting catenary geometry under dynamic conditions. This involves breaking down, tracking, and identifying hybrid errors within the complex interactions between the track, vehicle, and catenary, as well as environmental influences. The study examines the characteristics of vehicle posture errors and their representation models, taking into account the elastic deformation of the track surface, the dynamic lifting of the contact wire, and wind-induced responses. It further elaborates on compensation techniques for dynamic geometric errors in the catenary system, considering the combined effects of wheel-rail interaction, pantograph dynamics, and wind field forces. The goal is to uncover the processes of error generation, propagation, compound formation, and evolution during dynamic geometric detection of the catenary system under dynamic conditions. This research provides a theoretical foundation for controlling composite errors in dynamic geometric detection of high-speed catenary systems, aiming to scientifically and effectively improve China's catenary system detection capabilities and ensure the high-quality maintenance of the system.

Keywords: high speed railway; catenary; geometric parameters; dynamic responses; dynamic errors

收稿日期: 2024-07-01 Received Date: 2024-07-01

* 基金项目: 国家重点研发计划专项 (2023YFB4302002)、国家自然科学基金 (52372401)、四川省自然科学基金 (2023NSFSC0487) 项目资助

0 引言

我国高铁接触网延展里程已突破 12 万公里,成为世界上高速接触网发展速度最快、运营里程最长、运行速度最高的国家。接触网作为高铁的重要基础设施,通过零部件实现有序的连接和接续,把接触线、承力索、支持装置、绝缘元件、电气设备以及支柱等连接成具有支持功能,同时保证相应强度的机械、电气系统^[1]。接触网几何状态是决定高铁供电安全与弓网受流质量的关键因素。任何几何微小缺陷在高速弓网动力激励下,都极可能诱发剧烈的弓网冲击,造成弓网关系恶化甚至危及运行安全^[2]。高速动态检测是掌握沿线接触网几何服役状态的重要方法,也是实现我国高铁接触网规模化品质维修和安全运营的主要途径^[3]。

为保障高速铁路供电安全,世界各国铁路部门围绕接触网参数检测技术进行了广泛研究和装备应用。日本、意大利、法国、英国等高速铁路发达国家普遍采用装配先进检测设备的高速综合检测列车对沿线基础设施进行动态检测^[4]。日本“Yellow Doctor”、“East-i”综合检测列车,意大利“ARCHIMEDE”、“Dia. Man. Te”综合检测列车,法国“IRIS320”综合检测列车,英国“New Measurement Train”综合检测列车为保障上述国家电气化铁路接触网运营安全发挥了重要作用^[5]。德国和美国铁路网存在不同速度等级列车共线运营、客货混跑情况,因此主要采用旅客列车加挂试验车的方式对沿线接触网进行动态检测^[6]。

国内方面,中国铁道科学研究院^[7]和西南交通大学^[8]最早开始接触网检测技术研究和装备研制,于 1962 年在国内第 1 条电气化铁路宝鸡至凤州段下线我国第 1 辆接触网检测车^[9],随后陆续开发了 JJC-1 型、JJC-2 型、JJC-3 型接触网检测车。随着高速铁路建设与发展,接触网检测技术得到进一步提升,最高检测速度 250 km/h 的 0 号综合检测列车、400 km/h 综合检测列车,先后于 2008 年、2011 年在京津、京沪高铁成功试验并投用^[10]。接触网检测技术伴随电气化铁路建设一路发展^[11],由初期接触式向如今接触式和非接触式相结合转变,检测项目由单一类别向综合类别延伸,速度逐步由低速向高速过渡,检测载体正由专用检测车向专用检测车与综合检测列车相结合的运用方式转换^[12]。

精度是检测永恒的主题,尤其是高速动态检测,误差辨识与精度控制是研究工作中的基础问题。车载接触网动态检测过程中,动力激励诱发车辆姿态变化与基础结构动载变形^[13],轨道、车辆、接触网通过轮轨与弓网动力耦合构成庞大复杂的动态系统。现行接触网几何动态检测,轨道、车辆、接触网视作 3 个独立个体,轨道视为刚性

支承,精度控制主要沿用传统静态或准静态误差理论方法。轮载向下施加引发的轨面弹性变形^[14],弓网接触力向上传递致使接触线动态抬升^[15],车辆姿态多自由度变化^[16],未得到系统考虑。基础结构动载响应与动态检测误差高度耦合,导致接触网动态检测面临复杂的复合误差影响,并成为制约接触网精细化维修的关键性因素。究其根因在于轮轨与弓网动力激励作用下,不同类型与尺度的误差复合过程与形成机理不明,车辆姿态变化与基础结构动载变形对检测的误差影响规律不清,科学有效的误差补偿方法缺失。如何揭示动力激励作用下复合误差形成机理,构建反映误差时变特性的表征模型,并提出误差抑制、减小甚至消除的动态补偿方法,是实现我国高速铁路高精度动态检测所必须解决的关键技术难题,也是保障接触网高品质维修的现实需要。

针对接触网几何动态检测误差问题,提出将轨道、车辆、接触网作为一个相互作用、相互依存的整体加以考察,充分考虑接触网静/动态特性,检测误差复杂多样性、动态不确定性和时空多变性,综合运用轮轨耦合动力学^[17]、弓网耦合动力学^[18]和动态误差理论^[19],开展动力激励下接触网几何动态检测复合误差形成机理研究,旨在揭示动力激励作用下接触网几何动态检测误差产生、传播、复合与演变过程,为提高我国接触网检测水平和保障接触网高品质维修起到科学有效的促进作用。

1 接触网静/动态几何参数及检测

接触网几何参数依据静/动态属性,包含静态几何参数^[20]与动态几何参数^[21](以下简称静态参数、动态参数),是表征接触网静/动态性能的关键指标。现行标准和文献对于接触网静/动态参数尚未形成统一定义,加之接触网检测包括静态检测与动态检测,导致实际工程设计、施工与运维中,常出现接触网静/动态参数混淆,静/动态检测等效的情况。正确认识和理解接触网静/动态参数与静/动态检测,是进行接触网几何动态检测误差辨识的基础,也是揭示接触网几何动态检测误差形成机理的前提。

1.1 接触网静/动态参数

接触网结构示意图和实物如图 1(a)、(b)所示。接触网几何参数包括拉出值、接触线高度(简称导高)^[22],反映接触线与轨道平面、受电弓滑板平面的空间位置关系^[23],表征接触线平顺状态^[24],是决定车辆限界安全与弓网受流质量的关键因素^[25]。

接触网静态几何参数中的静态拉出值与静态导高,指在线路空载和接触网无扰动(风、冰、温载可近似忽略)条件下,接触线在定位点处与轨道中心的横向偏移,接触线底面与轨面的垂向距离。接触网动态几何参数中

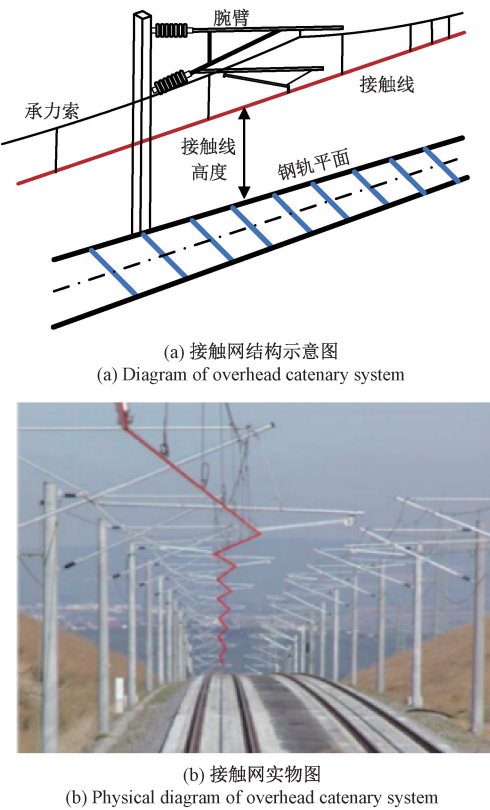


图 1 高速接触网空间布置

Fig. 1 Spatial distribution of high-speed overhead catenary

的动态拉出值与动态导高,指受电弓与接触网高速动态耦合条件下,接触线在定位点处与受电弓滑板中心的横向偏移,接触线底面与轨面的垂向距离^[26]。

接触网静态几何参数可在较短时间内进行连续多次测量,具有检测过程可重复、精度可验证的特点。动态参数在静态参数的基础上,叠加了车辆轮载作用下轨面弹性变形、弓网接触力作用下接触线动态抬升及环境扰动,检测结果受检测速度 and 环境影响^[27],误差溯源和精度验证极为困难。受电弓滑板与接触线动态匹配原理,如图 2(a)、(b)所示^[28]。动态参数表征轨道、车辆、接触网动态耦合作用下接触网几何状态^[29],反映运行条件下弓网几何匹配与受流质量^[30],可弥补静态参数在接触网动态性能表征中的不足^[31],在新建高铁联调联试^[32]与既有高铁接触网运维^[33]中发挥至关重要的作用。

1.2 接触网静/动态检测

接触网几何参数静态检测,主要采用便携式测量仪,利用步巡、梯巡(如图 3(a)、(b)所示),基于非接触式激光位移传感器^[34]和角位移传感器^[35],借助时间飞行法或激光三角法^[36]进行测量。静态检测可避免动态检测中大型检测车对接触网和轨面扰动,表征接触网静态条件下偏离设计的程度,但检测过程需人工参与,效率低下,一般用于局部超限数据复核,无法对接触网进行全线分

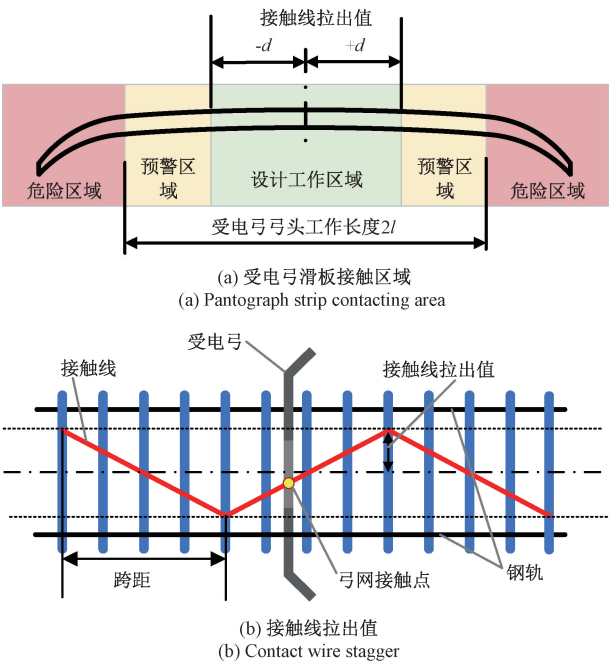


图 2 接触网与受电弓参数匹配

Fig. 2 Pantograph and catenary geometric matching

析与质量评价。

动态检测以车辆为载体,车顶设置高速采集设备^[37],车轴转动带动光电式里程计输出等距脉冲,触发图像采集,实现弓网动态参数检测(如图 3(c)、(d)所示)。我国铁路维修部门依据管内线网规模,配备相应数量接触网检测车^[38],基于非接触式视觉测量技术^[39],对接触网施行周期检测与状态维修^[40]。



图 3 接触网静/动态检测

Fig. 3 Catenary static detections and dynamic inspections

既有接触网静/动态检测研究,主要聚焦于计算机视

觉技术中的图像识别与视觉建模^[41]。相关学者提出采用图像阈值分割与动态模板匹配^[42]、Canny 边缘算子与 Hough 直线变换^[43]、KCF (kernel correlation filters) 目标跟踪^[44]、深度卷积神经网络^[45]等算法,对复杂背景下弓网图像特征进行实时动态提取(如图4所示)。发明了接触网几何参数单目、双目主动视觉检测技术^[46],建立了离线标定与在线识别相融合的检测模型^[47],形成了内外参数分离的视觉检测方法。



图4 接触网动态检测复杂环境干扰

Fig. 4 Dynamic images of overhead catenary under complex environmental interference

需指出,动态检测除与检测设备自身性能相关外,还受车辆检测载体、轨面动态基准和接触线动态抬升、环境扰动影响,关键是动力激励作用下的误差辨识、建模、补偿问题。上述误差得不到有效控制,动态检测数据无法真实反映接触网运行状态,带来维修的盲目性和不确定性。

2 误差特性与辨识

动态检测过程中,轨道、车辆、接触网动力耦合过程如图5所示。轮轨动力向上传递引起车辆振动,并进一步通过受电弓向上作用引起接触线动态抬升;轮轨动力向下施加致使轨面弹性变形。车辆系统中的轮对和受电弓振动,导致轮轨和弓网几何状态发生变化,进一步加剧轮轨和弓网动力激励。接触点处作用力的动态变化反过来又会影响车辆、轨道、接触网系统振动。如此循环反馈,耦合叠加,致使轨道、车辆、接触网处于特定的耦合振动形态之中。可见,车载接触网几何动态检测本质上是与轨道、车辆和接触网密不可分的复杂动态过程,轨道、车辆、接触网系统动力耦合效应导致检测面临复杂的轮轨与弓网动力激励及其复合误差影响。

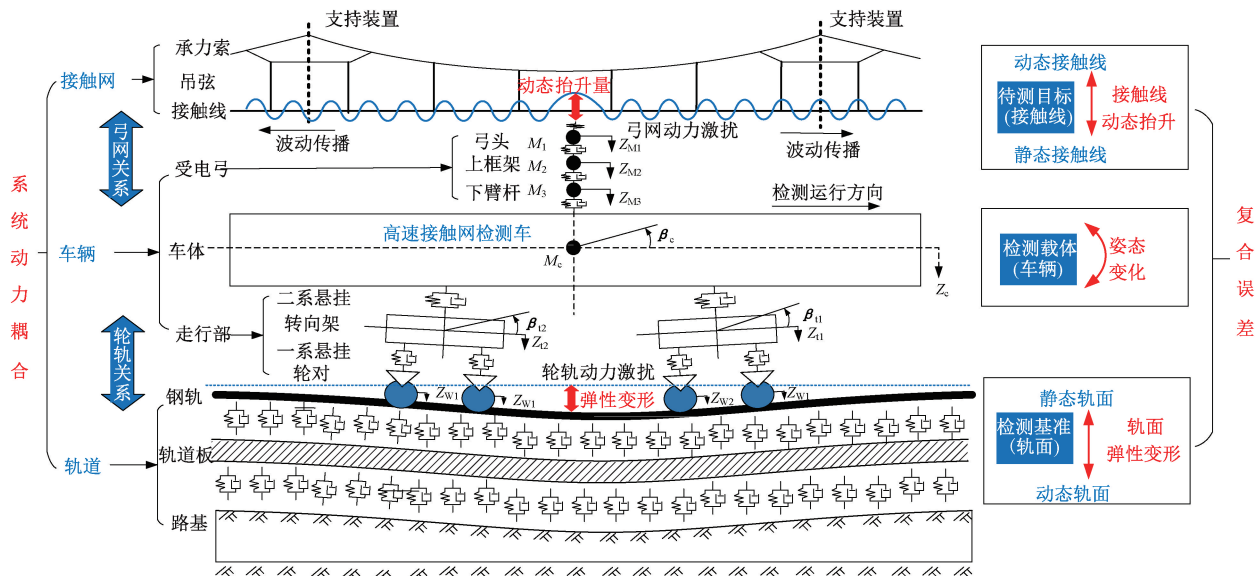


图5 轨道-车辆-接触网系统动力耦合作用下接触网几何动态检测原理

Fig. 5 Dynamic inspection principle of catenary geometric parameters under track-vehicle-catenary coupling conditions

2.1 误差特性

1) 误差复杂多样性。接触网几何动态检测过程中,各种误差诱因通过轮轨和弓网动力作用相互渗透、相互影响。例如,轨道不平顺、钢轨波浪形磨耗,车轮不圆度、踏面磨耗,接触线硬弯、弓网硬点等缺陷,在轨道、车辆、接触网动力耦合作用下,诱发复杂多样的车辆姿态变化与基础结构动载变形。同时,检测车运行速度动态变化,

接触网和轨道固有结构特征和离散缺陷沿线路周期和随机动态分布,轮轨和弓网动力激励引发不同类型和尺度的系统误差和随机误差。上述误差来源广泛,通过运动传递,传播链路长,误差分解、溯源与辨识困难,从而增加误差表征与建模难度。

2) 误差时空多变性。接触网几何动态检测具有时间和空间双重属性,空间位置变化伴随时间推移,动态检测

数据表现为与时间和空间相关的函数,即误差具有时空变化特性。加之车辆循环荷载短时和长期累积效应,轨道、车辆、接触网服役性态及检测系统性能演变,决定了复合误差的多时空尺度特性。解决上述复杂耦合系统动态相互作用下接触网几何动态检测复合误差控制难题,单从轨道、车辆、接触网的某一方面研究,已难以胜任。

3) 误差动态不确定性。接触网动态检测速度随线路条件动态变化,连续特征和离散缺陷沿接触网和轨道表面随机分布,轮轨和弓网耦合引发车辆姿态和结构荷载随机动态变化,进而产生不同类型和尺度的系统误差和随机误差。需特别注意,不同诱因引发的系统误差和随机误差在一定条件下(内部结构或外部环境变化)可相互转化,导致轨道、车辆、接触网系统动态耦合下接触网几何动态检测误差具有较大的不确定性,进而增加动态误差表征及建模难度。

2.2 误差分解

轮轨和弓网动力激励以及环境荷载综合作用下,多源异构的系统误差和随机误差隐含于动态检测数据中。国内外研究表明,误差分解与溯源是误差辨识与建模的基础。小波分析^[48]、经验模态分解^[49]、神经网络^[50]等方法被广泛应用于误差分解。相关学者运用复杂网络^[51]、误差逆向回溯^[52]、多层误差溯源分析^[53]等方法,对误差动态传播过程进行追溯研究,旨在从误差产生的源头掌握误差。最近,门松辰等^[54]又提出基于数字孪生的误差溯源分析方法,将装配工艺信息与数字孪生模型相结合,为误差溯源与辨识研究提供了新思路。

研究表明,误差分解与溯源的关键是探明系统内部各结构单元耦合关系与传播路径,并根据单元间耦合关系建立误差传递函数。针对接触网柔性索网结构特点,相关学者对山区峡谷地形风场下接触网风致振动^[55]、沿线横风对弓网接触力及接触线抬升量^[56]的影响,隧道内列车风引发的接触网系统振动响应^[57]进行研究,但从接触网动态检测与误差辨识视角切入的较少。针对接触网几何动态检测误差问题,陈唐龙等^[58]关注较早,对车辆多自由度振动空间耦合关系进行了研究,通过误差溯源分析与动态拟合得到车辆姿态误差局部分量控制参数。占栋等^[59-60]在此基础上,对车辆侧滚、横摆与浮沉振动导致的接触网几何动态检测误差辨识与分离方法进行探究。然而,轮轨与弓网动力激励下接触网几何动态检测误差复合过程与形成机理,仍待进一步研究。

接触网静/动态检测根本目的在于对接触网静/动态条件下真实状态的精确量化。受检测装置与方法限制,静/动态误差不可避免。静态误差主要源于传感器,例如传感器标定、目标识别等。静态误差理论与处理方法较为成熟。动态检测在静态误差的基础上,还包含车辆姿态误差与基础结构动载响应(如图6所示)。动态响应

反映接触网在动态激励下的输出,动态误差是检测系统测量结果与接触网动态响应的偏差。因此,误差补偿是确保接触网几何动态检测精度的关键。

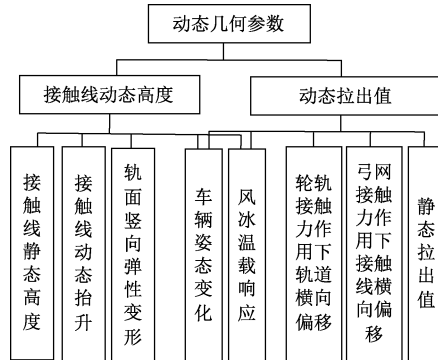


图6 接触网动态几何参数误差分解

Fig. 6 Dynamic error decomposition of catenary geometric parameters

设 H_s 、 H_d 为接触线静、动态高度, L_s 、 L_d 为接触线静、动态拉出值。静/动态参数反映接触线静/动态客观条件下接触线几何形态特征。接触线动态高度在静态高度 H_s 的基础上,叠加接触线受弓网接触力作用产生的动态抬升量 H_u ,轨道平面受轮轨接触力作用产生的竖向弹性变形 H_T ,外部环境扰动作用下竖向变形 H_E 。动态拉出值在静态拉出值 L_s 的基础上,叠加了轮轨接触力作用下轨道横向偏移 L_T ,弓网接触力作用下接触线横向偏移 L_U ,受电弓滑板中心与轨道中心的横向偏移 L_P ,外部环境作用下接触线横向偏移 L_E 。风载、冰载、温载作用下接触网几何参数动态响应记为 (H_{wind}, L_{wind}) 、 (H_{ice}, L_{ice}) 、 (H_{temp}, L_{temp}) 。接触网静/动态几何参数及误差分解如式(1)、(2)所示。

$$\begin{cases} H_d = H_s + H_u + H_T + H_E \\ L_d = L_s + L_U + L_T + L_P + L_E \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} H_E = H_{ice} + H_{wind} + H_{temp} \\ L_E = L_{ice} + L_{wind} + L_{temp} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 误差辨识

接触网几何动态检测误差辨识研究进展如图7所示。针对轮轨与弓网动力激励对接触网几何动态检测的误差影响,运用大系统分解、子系统优化、子系统间协调为核心的大系统分解协调方法,对误差耦合致因进行分析。利用因素分析法探明不同误差耦合关系,采用广义灰色耦合模型进行误差关联分析,提取不同误差关联度与隶属度。通过混合时间序列与层次分析法,辨识轨道、车辆、接触网子系统误差时变控制参数。

综合运用车辆-轨道耦合动力学、受电弓-接触网耦合动力学、全系统动态精度理论,通过轮轨和弓网几何约束进行接触网动态检测误差溯源与分解。提取轨道、车

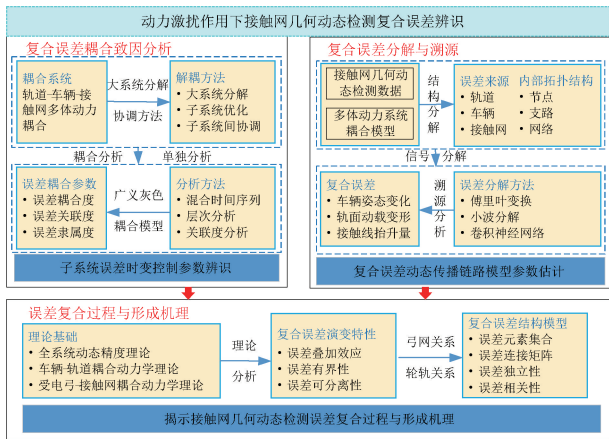


图7 误差辨识

Fig. 7 Error identification

辆、接触网动态响应控制参数,基于多层误差溯源分析法研究不同误差元素节点、支路、网络结构表征方法,对复合误差网络模型参数进行估计。

利用接触网几何动态检测误差传播路径及空间拓扑结构,建立表征误差耦合关系的连接矩阵。采用误差独立性辨识准则和多变量相关性判别条件,求解误差连接矩阵独立分量与冗余分量。利用误差的可分离性与有界性,对复合误差进行动态分解,构建误差元素线性无关最小集合。定义车辆姿态变化、轨面动载变形、接触线动态抬升误差强度函数,基于误差传播路径与误差动态叠加效应,揭示动力扰动下误差复合过程与形成机理。

3 车辆姿态误差

接触网检测车是具有多级悬挂的弹性阻尼系统,高速行驶不可避免产生多自由度随机振动,车载检测设备随车辆振动发生姿态变化,导致复杂的姿态误差。高速运行条件下,车辆多自由度姿态建模及表征是进行接触网几何精确检测的基础。

3.1 车辆姿态变化特性

车辆姿态变化牵涉因素众多且成因复杂,车辆关键部件性能演变^[61]、轮轨磨耗^[62]及外界激励^[63]等均可能诱发周期、随机及其复合的车辆姿态动态响应。总结国内外研究现状,车辆运行姿态建模与表征包括内因和外因两方面。内因主要从车辆构造出发,对不同结构参数下的车辆姿态特性进行研究。例如:干锋等^[64]对车轮高阶不圆度导致的轮对蛇行运动进行分析;徐宁等^[65]探究了悬挂参数和惯性参数对车辆姿态的影响规律;任尊松等^[66]对典型运行工况下车辆弹簧荷载导致的姿态变化特征进行分析;Sun等^[67]通过求解车辆轴箱弹簧的模式特征,分析了考虑弹簧动态特性的系统主体部件

动态响应;杜森等^[68]采用 Sperling 指标研究了不同空气弹簧参数、车体质量对车辆平稳性的影响;杨岳等^[69]通过灵敏度分析揭示悬挂设计参数对车辆运行姿态的影响规律。上述研究主要围绕车辆运行过程中局部参数或单一部件内因作用下的动态响应,聚焦于车辆动力学性能及其关键力学问题^[70],对不同悬挂部件及结构单元整体耦合下的车辆运行姿态较少涉及。

外因主要从线路、轨道结构、运行速度出发,对不同外部条件下车辆姿态响应进行研究。例如:董少笛等^[71]提出一种基于数字孪生技术的列车曲线通过性能实时预测方法,解决传统动力学仿真在列车曲线通过性能分析时面临的多自由度耦合模型构建复杂、不确定性因素分析困难等问题;牛留斌等^[72]基于状态空间法构建了轨道不平顺与车体横向加速度关联模型,通过实测数据验证状态空间模型的结构参数,辨识输入输出传递函数;徐井芒等^[73]针对道岔尖轨降低值、钢轨廓形、轨距和轨底坡等参数对车辆通过时的轮轨接触行为进行研究。

既有基于外因的车辆姿态响应研究,主要侧重于通过加速度、轮轨接触力、轮重减载率、脱轨系数等关键指标对车辆运行安全性、平稳性和舒适性进行评估,而外因引发的车辆姿态时变特性和空间几何特性未得到应有的重视。姿态误差广泛存在于数控加工^[74]、机器人控制^[75-76]、精密装配^[77]等领域。例如,围绕机床空间运动误差建模与表征^[78],相关学者进行了深入研究,根据误差的有界性,通过齐次坐标变换对机床进给轴、旋转轴运动姿态及几何误差进行建模,提出了由输入到输出区域传递的机构误差映射模型,建立了基于运动几何包络理论的多轴运动误差多自由度递推求解方法^[79]。上述研究可为车辆姿态表征提供参考。

3.2 车辆姿态误差补偿

车辆姿态误差补偿示意图8所示。受电弓是具有多级质量单元的弹性阻尼系统,垂向具有一定弹性,以满足弓头滑板对于接触线高度变化的适应性与跟随性;横向设置足够刚度,以约束弓头滑板在拉出值变化条件下与接触线可靠接触。车载传感器以车体作为测量基准,动态检测过程中,车体测量基准与轨面参考基准必然发生偏离,因此须将车体测量基准转换至轨面参考基准。

车体振动有6个自由度,分别为车体绕横、竖、纵向转动产生的侧滚、点头、摇头振动,车体沿横、竖、纵向移动产生的横摆、浮沉、伸缩振动。上述多自由度振动随机动态耦合,对检测影响各不相同。基于受电弓滑板中心基准的动态拉出值图像检测精度主要取决于弓网接触点图像识别。车辆振动致使车体相对于轨面动态变化,主要影响基于轨面基准的接触线动态高度检测精度。目前车体姿态误差补偿,采用车底安装非接触式二维激光位移传感器,对左、右股钢轨待测目标进行动态跟踪。通

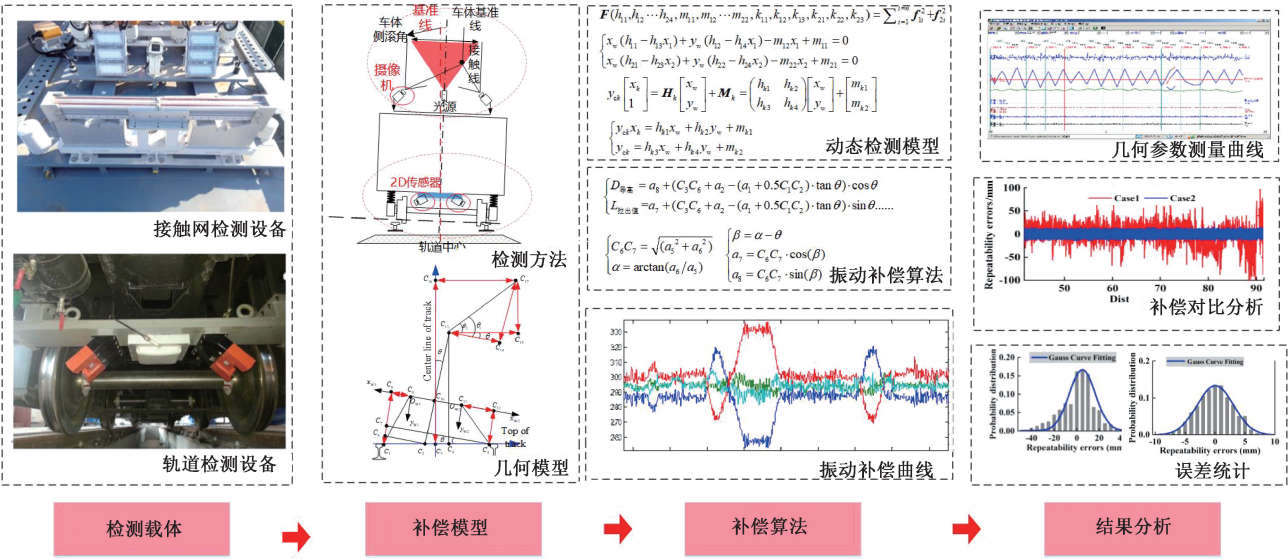


图 8 接触线几何动态检测误差补偿

Fig. 8 Compensation for geometric dynamic detection errors of overhead catenary

过车体与轨面相对位置变化,解析车辆姿态误差补偿所需参数信息。接触网动态检测过程中,车体伸缩运动方向与车辆运行方向重合,伸缩振动对接触线高度与拉出值均不构成误差影响;车辆摇头为车体绕竖向的回转运动,回转轴与接触线高度方向重合,因此摇头振动对接触线高度测量无影响;车辆点头为车体绕横向的回转运动,回转轴与接触线拉出值方向重合,因此点头振动对接触线拉出值测量无影响。综上分析,仅需考虑剩余侧滚振动、横摆振动、浮沉振动影响。车辆姿态误差补偿符号定义如表 1 所示,补偿原理如图 9 所示。

表 1 符号定义
Table 1 Symbol definition

符号	描述
C_1	左侧钢轨基准点
C_5	左侧钢轨基准点
C_3	轨道中心(C_1 C_5 中点)
C_9	左侧传感器测量基准点
C_{11}	右侧传感器测量基准点
C_{10}	检测梁中心(C_9 C_{11} 中点)
C_{13}	车顶传感器测量基准
C_{17}	接触线特征点
C_3 C_{16}	轨道中心线
C_{10} C_{13}	车体中心线
θ	车体侧滚角

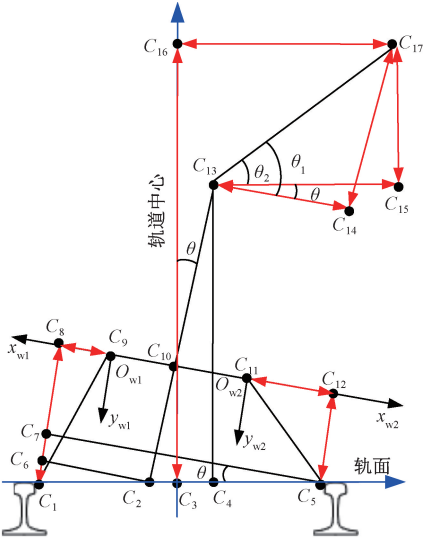


图 9 车辆姿态误差补偿原理

Fig. 9 Principle of vehicle error compensation

式(3)~(6)。

第 1 步:计算侧滚角度 θ 和参考角度 θ_1, θ_2 。

$$\begin{cases} \theta = \text{atan}((C_1 C_8 - C_5 C_{12}) / (C_8 C_9 + C_9 C_{11} + C_{11} C_{12})) \\ \theta_1 = \text{atan}(C_{14} C_{17} / C_{13} C_{14}) \\ \theta_2 = \theta_1 - \theta \end{cases} \quad (3)$$

第 2 步:将以车体为坐标系的接触线几何测量值换算至轨道中心坐标系。

$$\begin{cases} C_{15} C_{17} = \sqrt{(C_{14} C_{17})^2 + (C_{13} C_{14})^2} \cdot \sin \theta_2 \\ C_{13} C_{15} = \sqrt{(C_{14} C_{17})^2 + (C_{13} C_{14})^2} \cdot \cos \theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

车辆姿态误差补偿过程主要包括以下 4 步,具体如

第3步:计算中间换算变量。

$$\begin{cases} C_4 C_{13} = [C_{10} C_{13} + C_1 C_8 - (C_8 C_9 + \\ 0.5 C_9 C_{11}) \cdot \tan \theta] \cdot \cos \theta \\ C_3 C_4 = [C_{10} C_{13} + C_1 C_8 - (C_8 C_9 + 0.5 \cdot \\ C_9 C_{11}) \cdot \tan \theta] \cdot \sin \theta + \\ \frac{(C_8 C_9 + 0.5 \cdot C_9 C_{11})}{\cos \theta} - \frac{C_1 C_5}{2} \end{cases} \quad (5)$$

第4步:计算接触线动态高度与动态拉出值。

$$\begin{cases} C_3 C_{16} = C_{15} C_{17} + C_4 C_{13} \\ C_{16} C_{17} = C_{13} C_{15} + C_3 C_4 \end{cases} \quad (6)$$

4 轨道与接触网基础结构动载变形

受车辆移动荷载向下施加和弓头向上抬升作用,轨道和接触网在动力激励下发生不同程度弹性变形,导致接触网几何动态检测误差。

4.1 接触线动态抬升

对于受电弓作用下接触网抬升量建模及表征,相关研究人员以受电弓、接触网或弓网耦合模型为基础开展相关研究。例如:Kim等^[80-85]将受电弓对接触网的作用简化为均匀移动的集中荷载,通过弓网接触力为纽带建立接触网运动微分方程,结合既有标准,基于仿真^[86]、试验^[87]或二者相结合^[88]的方法对受电弓抬升作用下接触网动态特性进行研究。

弓网动态耦合原理如图10所示。受电弓是具有多级铰接的非线性弹性-阻尼系统,在役型号众多且结构复杂,性能随役龄增加而退化,加之动车组重联时双弓受流^[89],弓网关系更为复杂,基于弓网动态耦合的仿真模型显然无法真实反映受电弓时变特性。为此,陈立明等^[90-92]以现场实测整体吊弦动态抬升量作为仿真初始条件,对弹性链形悬挂吊弦动态特性进行分析,研究受电弓高速通过时吊弦拉伸、压缩动态特性,以此推断接触线动态抬升量。

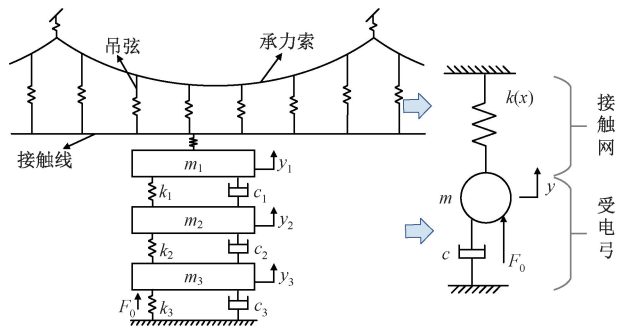


图10 弓网动态耦合与受力示意图

Fig. 10 Schematic of dynamic coupling and force

此外,接触线抬升变化是弓网关系多因素耦合作用下的复杂动态过程,不仅与接触网结构类型相关,还受线路条件影响(例如,隧道^[93]、曲线^[94]、线岔^[95]、锚段区域^[96]接触线动态抬升量差异较大),通过简化模型仿真和离线试验研究,无法真实反映复杂条件下弓网动态过程。基于此,Jiang等^[97-98]相关学者采用车载动态检测和地面原位监测的方法,对接触线动态抬升量进行检测监测^[99-101]。双弓受流条件下接触线抬升量波动曲线如图11所示。

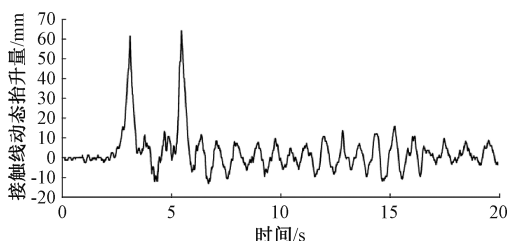


图11 双弓受流下接触线动态抬升量

Fig. 11 Contact wire uplift created by double pantographs

需指出,车载动态检测过程中车辆随机振动与受电弓对接触网的动态抬升作用高度耦合,接触线动态抬升量分离的空间独立性条件无法保证,导致测算结果具有较大的不确定性。地面式监测方法精度较高,但仅能对局部固定位置抬升量进行原位监测,无法覆盖沿线接触网,该方法具有较大的局限性。

4.2 轨面弹性变形

接触网动态检测,轨道为检测车提供结构支承,轨面作为测量基准。传统人工或轻型测量小车低速检测,轮载对轨道的扰动忽略不计,轨面视为静态。实际轨道由钢轨、扣件、轨枕、道床等组成,是竖向多层、纵向异性的弹性系统^[13]。高速接触网几何动态检测,受车辆移动荷载向下施加作用,轨面必然发生弹性变形^[102]。传统“静态轨面法”无法消除接触网动态检测面临的轨面动态误差。轨面误差表征及建模是消除接触网动态检测基准误差的关键。

动载条件下轨面弹性变形如图12所示。目前围绕轨面动载变形的研究,主要包括两个方面。一是基于车辆与轨道耦合动力学理论^[17],对轨道横、竖、纵向位移进行仿真分析,揭示车辆动载下轨道动态响应。赵国堂等^[103-107]分别运用车辆与轨道耦合模型,对轨道刚度设计的合理性、基床表面变形与应力动态关系、轨道刚度频率时变特性、轨道荷载层间分布特性进行了研究,并在我国高铁建设和运营中得到应用。上述研究主要对轨道动力学响应进行仿真分析,结合地面固定布点进行监测和验证,但针对实际运营线路的轨道结构动载变形高速动态巡检,缺少科学有效的测评手段。

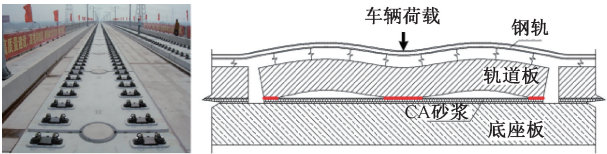


图 12 轨面弹性变形

Fig. 12 Rail surface elastic deformation

另一方面,相关学者提出采用主动式轨道加载试验,对轨道刚度进行动态检测,通过不同速度下轨道动力响应,评估轨面动变形。潘振等^[108-109]对轨道刚度检测技术进行了研究,通过移动式线路动态加载试验车,向轨道施加恒定荷载,基于二次弦测法,对桥梁、地面、隧道、直线、曲线等不同区段轨道刚度进行综合检测。然而,由于轨道结构的复杂性,轨道刚度受众多因素影响,除扣件、轨枕、道床等因素外,钢轨接头、道岔、轨面缺陷等引发的轮轨冲击性荷载,给轨道刚度检测及表征带来极大干扰。最近,杨飞等^[110]又提出了基于动静态检测数据融合的轨道弹性状态评估方法,为轨道动载作用下轨面弹性变形研究提供了新的思路。

可见,上述研究主要聚焦于轨道与车辆耦合下的轨面变形分析,而对于轨道、车辆、接触网整体耦合下轨面动载变形与接触网几何状态映射关系及其误差影响机制尚不明确,造成精细化的轨面动载变形建模及表征困难,相关问题还有待进一步研究。

4.3 动载变形表征

轨道与接触网动载变形及误差响应研究进展如图 13 所示。

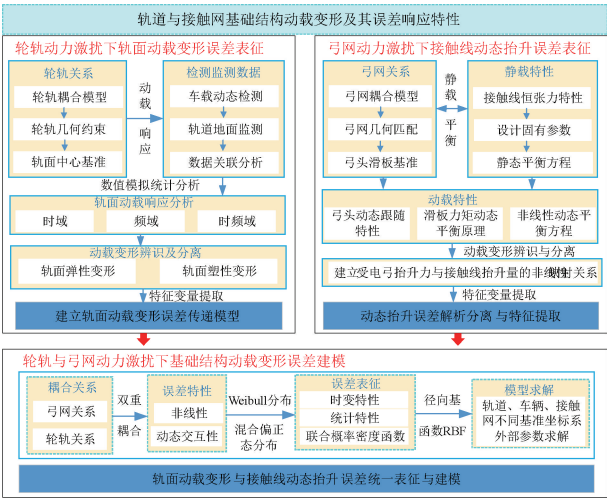


图 13 轨道与接触网动载变形及误差响应

Fig. 13 Dynamic load deformation and error response of catenary and track

轮轨动力激励下轨面动载变形表征。根据轮轨动力耦合模型及其几何约束,建立轨面中心基准坐标系;结合车载动态检测数据、轨道动载响应地面监测数据,利用数值模拟和统计分析,开展轮轨动力激励作用下车辆动态检测数据与地面监测数据的同步关联分析;基于轮轨振动响应时域、频域、时频域特征及其变化规律,提取不同构造轨道刚度控制参数,建立轨面动载变形误差传递函数。

弓网动力激励下接触线动态抬升表征。根据弓网动力耦合模型及其几何匹配,利用接触线、承力索恒张力特性建立接触线静载平衡方程;结合接触线弹性、跨距等固有参数与弓网接触力动态检测数据,利用弓网动态耦合过程中弓头动态跟随特性及滑板力矩平衡原理,建立受电弓抬升力与接触线抬升量的非线性动态平衡方程,通过静载、动载试验求解表征受电弓抬升力与接触线抬升量二者映射关系的模型控制参数,进而实现接触线动态抬升误差解析分离与特征提取。

轮轨与弓网动力激励下基础结构动载变形与表征。考虑轮轨与弓网双重耦合及动态叠加效应,以轮轨关系和弓网关系为基础,对不同误差非线性动态交互特性进行研究;利用轮轨与弓网动力激励作用下的误差传递函数,同步考察轨面动载变形与接触线动态抬升时变统计特性;采用 Weibull 分布和混合偏正态分布,建立轨面动载变形、接触线动态抬升误差联合概率密度函数;基于径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络进行复合误差关联分析,求解轨道、车辆、接触网不同基准坐标系外部参数,实现轨面动载变形与接触线动态抬升统一表征。

5 环境荷载下接触网动态响应

接触网几何动态检测面临风、冰、温等一切自然环境的影响。覆冰带来接触网负载增加,冰壳厚度和包裹区域与风向密切相关。覆冰接触网常常伴随偏心负载,导致接触线几何形态畸变。接触网冰载动态响应包含接触网覆冰作用下接触线几何参数静态变化,以及接触线覆冰舞动。接触网覆冰研究涉及流体力学,空气动力学和热力学等多学科交叉融合,系统深入的研究目前仍然较少。温变带来热胀冷缩,引发接触线几何形态变化。为解决温度变化和覆冰导致的接触线弛度增加,接触网以锚段为单位,两端设置张力补偿装置,通过补偿坠砣提供的固定张力,最大程度减小冰载和温载作用下接触网几何形态动态变化。接触网覆冰、接触网防风、接触网温度补偿分别如图 14(a)~(c) 所示。

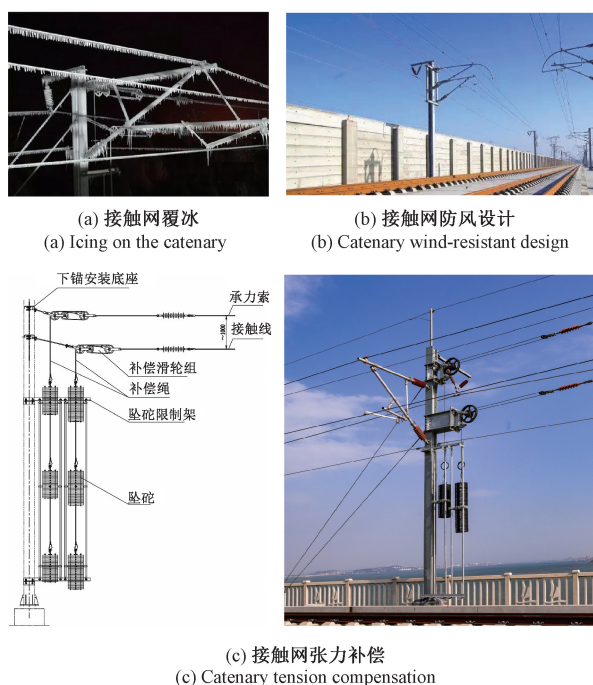


图14 接触网环境荷载及张力补偿

Fig. 14 Catenary environmental loads and tension compensation

5.1 接触网风载特性

大跨度、高柔性、非线性的接触网结构决定其对风场变化极为敏感^[111]。运营条件下铁路沿线环境风^[112]、列车风^[113]以及隧道活塞风^[114]叠加耦合,沿线风场具有多时空、跨尺度、非稳态的复杂动态特征^[115],不同强度、流向风场作用于接触线及其支持装置,接触网几何动态响应具有周期与随机动态耦合的变化特征^[116]。

研究表明,不同类型风负载形成机理与影响因素各不相同^[117]。环境风主要由当地气候条件与地形地貌决定^[118],列车风与运行速度相关^[119-120],活塞风主要受隧道断面净空与列车运行速度影响^[121]。铁路沿线风负载分为静风负载和脉动风负载^[122],静风引起接触线风偏,脉动风引发接触线风振^[123]。锚段关节和线岔过渡区域,风载极易造成刮弓、钻弓、打弓事故。静风与脉动风极端条件下,还会诱发接触网线索发生大幅度的自激舞动现象,一旦发生对接触网危害极大,导致铁路停运与接触网结构损伤^[124]。

5.2 接触线风偏解析

基于经验公式的接触线风偏解析法,将定位点作为基准进行固定,对直线、曲线区段跨距内接触线风致偏移进行解析计算^[125]。解析法以定位点为约束,无法表征接触网零部件集中质量与接触线均布质量的非线性结构特征,导致传统解析法无法对连续锚段单元内的接触线风致偏移进行精确分析计算,具有较大的局限性。此外,高

铁链形悬挂中接触线、承力索、吊弦交织布置,解析法采用了大量等效和当量替换。例如,将风载简化为水平负载,接触线高度变化未得到系统考虑,基于跨内横向偏移的计算方法无法进行连续多跨协同分析。解析法由于未考虑接触网的非结构特征,计算结果与实际偏差较大,且结果往往过于保守,造成不必要的设计富余。接触线风载解析法计算原理如图15所示。

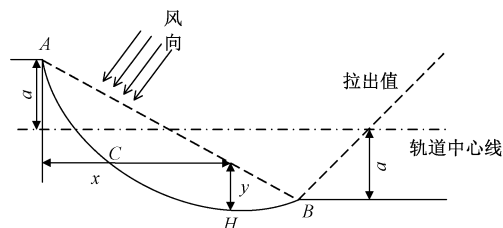


图15 接触线风偏解析原理

Fig. 15 Computational principle of contact wire wind deflection

计算公式如式(7):

$$P = 0.615sKdlv^2 \sin \theta \quad (7)$$

式中: P 为接触线单位长度风载(kN); s 为风速不均匀系数; K 为风载体型系数(链形悬挂选为1.25); d 为接触线直径(mm); l 为接触网跨距(m); v 为当地观测到的风速(m/s); θ 为风向与线路方向夹角。接触线在跨中更易受到风载影响,在跨距参数一定的条件下,最大风偏主要由接触线风载决定。

5.3 接触线风偏仿真

仿真计算是接触线风偏评估的重要方法。李瑞平等^[126]基于AR模型对接触网脉动风场与风振响应进行研究,通过三维有限元模型,揭示单元锚段内接触线风偏、模态和风振响应,并对位移响应进行频谱分析。刘志刚等^[127]分别使用谐波合成法、小波重构法和随机傅里叶谱法进行脉动风的时程模拟,通过高速弓网耦合模型与生成风速时程数据,分析接触线水平和垂直偏移。Song等^[123,128-130]利用绝对节点坐标方程,通过风洞试验与非线性有限元分析法,对接触线风偏进行模拟仿真。通过风洞试验测得接触网体型系数,通过生成三维风场模拟风载作用下接触网动态响应,仿真计算接触线风偏幅值、频率与极值。通过接触网静态初始找形^[131-132],从不同来流方向构建三维风场空间分布,建立接触网风载受力方程,基于虚拟激励法,揭示风场随机作用下接触线抖振规律。通过仿真计算,在40 m/s静风场与脉动风场综合作用下,接触线存在脱离受电弓安全工作范围的风险,通过提高接触网阻尼系数和加大接触网张力可显著提高强风作用下接触网几何形态保持能力^[115]。不同风速下接触线风偏仿真计算结果如图16所示。

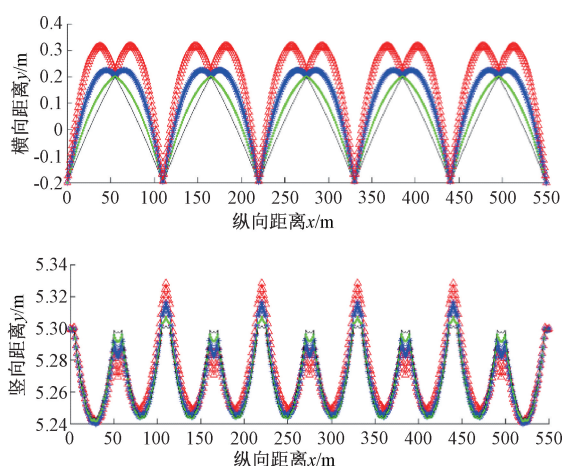


图 16 不同风速下接触线风偏

Fig. 16 Contact wire deviation at different wind speeds

6 结 论

车辆姿态变化与基础结构动载响应,动态误差辨识、建模与补偿,均具有较好的基础理论支撑,并在诸多领域成功应用。高速接触网几何动态检测是轨道、车辆、接触网系统整体耦合作用下的复杂动态过程,牵涉因素众多、误差来源广泛、成因极为复杂。传统静态或准静态误差处理方法和单独的轮轨、弓网动力耦合模型,无法解决轨道、车辆、接触网整体耦合作用下接触网几何动态检测复合误差问题。本文围绕高速接触网静/动态几何参数及误差特性开展研究,主要结论如下。

1) 通过分析比较国内外研究现状与现行主要技术标准,明确接触网静/动态几何参数与静/动态检测涵义,指出静/动态几何参数、静/动态检测的关联与差异。基于误差分解与溯源理论方法对接触网几何动态检测复合误差进行辨识,系统阐明接触网几何动态检测误差的复杂多样性、时空多变性与动态不确定性,探明接触网几何动态检测误差来源与传递路径,有效解决接触网静/动态参数混淆、静/动态检测等效问题。

2) 突破传统子系统研究方法束缚,提出将动态检测过程中的轨道、车辆、接触网作为一个相互作用、相互依存的整体加以考察。通过综合运用轮轨耦合动力学、弓网耦合动力学、动态误差理论,揭示了弓网与轮轨动力耦合作用下接触网几何动态检测误差复合过程与形成机理。

3) 重点针对轮轨和弓网动力激扰作用下车辆姿态变化、轨面弹性变形、接触线动态抬升误差表征与建模方法

进行研究。立足全系统动态精度理论,从内因和外因两方面对车辆姿态多自由度变化规律进行分析,建立基于机器视觉的车辆姿态误差补偿模型。总结轨面弹性变形、接触线动态抬升国内外研究现状,构建了基于轮轨与弓网动力响应的接触网几何动态检测复合误差补偿方法。

4) 针对环境扰动下接触网几何动态响应进行研究,重点分析静态风载与脉动风载作用下接触线动态响应及其差异,总结经验解析法与仿真算法在接触线风载偏移评估中的最新研究进展,对不同风速与风向条件下接触线风偏幅值、频率进行分析,探明接触线风偏动态响应及变化规律。

高速接触网静/动态几何参数及误差特性研究虽然已取得显著进展,但以下工作仍有待进一步深入研究。

1) 接触网静/动态几何参数本构关系。动态几何参数是接触网在弓网、轮轨动力激扰以及环境扰动作用下的外在表现,本质上反映的是轮轨接触力、弓网接触力、环境荷载瞬时和长期累计作用下接触网应力与应变的演化过程,因此接触网静/动态几何参数具有动态、渐变、稳态多重属性。探明多重荷载及其耦合作用下接触网力-形本构关系,是进一步揭示接触网静/动态几何特性的重要理论方法,目前该方面研究较少,相关工作有待进一步开展。

2) 接触网动态响应与动态误差解耦分离。接触网动态响应与动态误差均具有来源广泛、复杂多变、动态不确定的特征,二者高度耦合,伴随动态检测过程传播与演变。目前通过车载动态检测方式,已成功完成车辆姿态响应的实时分离及动态误差在线补偿,但对于轨面弹性变形、接触线动态抬升依然缺乏经济有效的高精度车载动态检测方法,高精高效的接触网几何动态检测仍然有待未来持续研究。

3) 高速接触网全生命周期内静/动态性能保持。接触网是高铁的重要基础设施,一旦发生故障,维修过程极为复杂,对高铁运输造成极大干扰,因此高速接触网必须满足全生命周期高可靠性要求。随着高速铁路大规模投入运营及服役时间推移,接触网静/动态性能必然随之下降。采用最低维修成本保障高速接触网全生命周期内良好的静/动态性能,是我国大规模高速接触网运维当前面临的重要技术难题,因此围绕静/动态检测数据,开展接触网服役性态评估与预测性维修,在我国具有广阔的应用前景,相关工作也有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] KIESSLING F, PUSCHMANN R, SCHMIEDER A, et al. Management and maintenance in contact lines for electric railways: Planning, design, implementation, maintenance, 3rd edition [M]. Erlangen, Germany, 2018: 1019-1078.
- [2] GAO S B. Automatic detection and monitoring system of pantograph-catenary in China's high speed railways[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-12.
- [3] BRUNI S, BUCCA G, CARNEVALE M, et al. Pantograph-catenary interaction: Recent achievements and future research challenges[J]. International Journal of Rail Transportation, 2018, 6(2): 57-82.
- [4] MORETTI M, TRIGLIA M, MAFFEI G. ARCHIMEDE-the first European diagnostic train for global monitoring of railway infrastructure [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Parma, Italy, 2004: 522-526.
- [5] 侯卫星. 0 号高速综合检测列车[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
HOU W X. No. 0 high-speed comprehensive inspection train[M]. Beijing, China Railway Press, 2010.
- [6] 王卫东. 高速铁路基础设施动态检测技术[M]. 北京,科学出版社,2017.
WANG W D. Dynamic detection technology of high-speed railway infrastructure [M]. Beijing, Science Press, 2017.
- [7] 韩博怀. 接触网检测技术[J]. 中国铁道科学,1994, 15(3):27-40.
HAN B H. Inspection technology for overhead contact system[J]. China Railway Science, 1994, 15(3): 27-40.
- [8] 于万聚. 接触网检测数据处理系统[J]. 铁道学报, 1989,11(3):29-35.
YU W J. Data-processing system of detection of contact network of electric railways[J]. Journal of the China Railway Society, 1989, 11(3): 29-35.
- [9] 韩博怀. 接触网检测车的研究和开发[J]. 中国铁路, 1994(8):18-19.
HAN B H. Research and development of catenary inspection trolley[J]. China Railway, 1994(8): 18-19.
- [10] 韩通新. 高速铁路接触网检测技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2022.
- HAN T X. Detection technology of high-speed railway overhead contact line [M]. Beijing: China Railway Press, 2022.
- [11] 刘志刚,韩志伟. 基于 AR 模型的电气化铁路接触网线谱研究[J]. 铁道学报,2013,35(12):24-29.
LIU ZH G, HAN ZH W. Study on electrical railway catenary line spectrum based on AR model[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(12): 24-29.
- [12] 王保国. 智能牵引供电系统工程实践与发展思考[J]. 铁道学报,2024,46(6):1-10.
WANG B G. Engineering practice and development thinking of intelligent traction power supply system[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(6): 1-10.
- [13] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学理论的发展与工程实践[J]. 科学通报, 2022, 67(32): 3793-3807.
ZHAI W M. Development of vehicle-track coupled dynamics theory and engineering practice [J]. Science China Press, 2022, 67(32): 3793-3807.
- [14] XU L, ZHAI W M, ZHU SH Y, et al. An efficient method for train-track-substructure dynamic interaction analysis by implicit-explicit integration and multi-time-step solution [J]. Rail Engineering Science, 2023, 31(1): 20-36.
- [15] LIU ZH G, SONG Y, HAN Y, et al. Advances of research on high-speed railway catenary[J]. Journal of Modern Transportation, 2018, 26(1): 1-23.
- [16] JING L, WANG K Y, ZHAI W M. Impact vibration behavior of railway vehicles: A state-of-the-art overview[J]. Acta Mechanica Sinica, 2021, 37(8): 1193-1221.
- [17] 翟婉明. 车辆轨道耦合动力学[M]. 北京:科学出版社, 2015.
ZHAI W M. Vehicle-track coupled dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [18] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2002.
YU W J. Catenary systems of high-speed electrified railway [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2002.
- [19] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
FEI Y T. Error theory and data processing[M]. Beijing:

- Mechanical Industry Press, 2015.
- [20] 中国国家铁路集团有限公司. Q/CR842—2021. 接触网静态检测评价方法[S]. 北京:中国铁道出版社, 2021.
- China National Railway Group Limited. Q/CR842—2021. Evaluation method of catenary static inspection data[S]. Beijing: China Railway Press, 2021.
- [21] 中国国家铁路集团有限公司. Q/CR841—2021. 接触网动态检测评价方法[S]. 北京:中国铁道出版社, 2021.
- China National Railway Group Limited. Q/CR841—2021. Evaluation method of catenary dynamic inspection data[S]. Beijing: China Railway Press, 2021.
- [22] 国家铁路局. TB10621—2014. 高速铁路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2022.
- China National Railway Administration. TB10621—2014. Code for design of high speed railway [S]. Beijing: China Railway Press, 2022.
- [23] 国家铁路局. TB10009—2016. 铁路电力牵引供电设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2016.
- China National Railway Administration. TB10009—2016. Code for design of railway traction power supply[S]. Beijing: China Railway Press, 2016.
- [24] 国家铁路局. TB10758—2018. 高速铁路电力牵引供电工程施工质量验收标准[S]. 北京:中国铁道出版社, 2022.
- China National Railway Administration. TB10758—2018. Standard for acceptance of traction power supply works in high-speed railway[S]. Beijing: China Railway Press, 2022.
- [25] 国家铁路局. TG/GD 124—2015. 高速铁路接触网运行维修规则[S]. 北京:中国铁道出版社, 2015.
- China National Railway Administration. TG/GD 124—2015. High-speed railway catenary operational maintenance rules[S]. Beijing: China Railway Press, 2015.
- [26] 周靖松, 韩志伟, 杨长江. 基于三维点云的接触网几何参数检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 239-246.
- ZHOU J S, HAN ZH W, YANG CH J. Catenary geometric parameters detection method based on 3D point cloud [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 239-246.
- [27] SONG Y, WANG ZH W, LIU ZH G, et al. A spatial coupling model to study dynamic performance of pantograph-catenary with vehicle-track excitation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 151: 107336.
- [28] 张冬凯. 高速铁路弓网动态几何参数与零部件缺陷检测方法[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- ZHANG D K. The dynamic geometric parameters of pantograph-catenary and the component defect detection method for high speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [29] SONG Y, ANTUNES P, POMBO J, et al. A methodology to study high-speed pantograph-catenary interaction with realistic contact wire irregularities [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 152: 103940.
- [30] SONG Y, WANG H R, LIU ZH G. An investigation on the current collection quality of railway pantograph-catenary systems with contact wire wear degradations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9003311,1-11.
- [31] 刘志刚, 宋洋, 韩烨, 等. 高速铁路接触网研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3): 495-518.
- LIU ZH G, SONG Y, HAN Y, et al. Advances of research on high-speed railway catenary [J]. Southwest Jiaotong University, 2016, 51(3): 495-518.
- [32] 王澜. 高速铁路联调联试方法论[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 104-109.
- WANG L. The methodology of high speed railway testing and commissioning [J]. China Railway Science, 2011, 32(2): 104-109.
- [33] SONG Y, DUAN F CH, WU F P, et al. Assessment of the current collection quality of pantograph-catenary with contact line height variability in electric railways [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 8(1): 788-798.
- [34] 陈忠斌, 周燕芳, 韦宝泉. 便携式接触网几何参数激光测量仪的研制 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32(4): 103-105.
- CHEN ZH B, ZHOU Y F, WEI B Q. Research and fabrication of portable laser measuring instrument for catenaries geometry parameters [J]. Transducer and Microsystem Technology, 2013, 32(4): 103-105.
- [35] 张欣, 韩志, 陈春雷, 等. 基于多传感器融合的轨检

- 车构架位姿测量方法[J]. 计量学报, 2024, 45(1): 18-23.
- ZHANG X, HAN ZH, CHEN CH L, et al. Position and attitude measurement method of track inspection vehicle bogie based on multi-sensors [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2024, 45(1): 18-23.
- [36] MAKYNEN A J, KOSTAMOVARA J T, MYLLYLÄ R A. Tracking laser radar for 3-D shape measurements of large industrial objects based on time-of-flight laser range finding and position-sensitive detection techniques [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1994, 43(1): 40-49.
- [37] ZHAN D, JING D Y, WU M L, et al. An accurate and efficient vision measurement approach for railway catenary geometry parameters [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67 (12): 2841-2853.
- [38] 王同军. 高速铁路弓网检测监测体系研究[J]. 中国铁路, 2021(3): 1-7.
- WANG T J. Research on HSR pantograph-OCS inspection and monitoring system [J]. *China Railway*, 2021(3): 1-7.
- [39] 杨飞, 涂文靖, 魏子龙, 等. 铁路工务、电务、供电检测监测装备发展现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 47-69.
- YANG F, TU W J, WEI Z L, et al. Review on development status of inspection equipment for track maintenance, communication and signaling, and power supply of railway [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(1): 47-69.
- [40] 王文聪, 赵国栋, 张彩霞, 等. 青藏铁路高铁接触网检测车[J]. 机车电传动, 2019(2): 133-138.
- WANG W C, ZHAO G D, ZHANG C X, et al. Inspection vehicle for high-speed railway catenary system (OCS) in Qinghai-Tibet railway [J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2019(2): 133-138.
- [41] YU L, GAO SH B, ZHANG D K, et al. A survey on automatic inspection of overhead contact lines by computer vision [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 10104-10125.
- [42] CHO C J, KO H. Video-based dynamic stagger measurement of railway overhead power lines using rotation-invariant feature matching [J]. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16 (3): 1294-1304.
- [43] KARAKOSE E, GENCOGLU M T, KARAKOSE M, et al. A new experimental approach using image processing-based tracking for an efficient fault diagnosis in pantograph-catenary systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(2): 635-643.
- [44] SHEN Y, LIU ZH, ZHANG G J. PAC interaction inspection using real-time contact point tracking [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(10): 4051-4064.
- [45] ZHANG D K, GAO SH B, YU L, et al. A robust pantograph-catenary interaction condition monitoring method based on deep convolutional network [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(5): 1920-1929.
- [46] LIU ZH G, LIU W Q, HAN ZH W. A high-precision detection approach for catenary geometry parameters of electrical railway [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(7): 1798-1808.
- [47] 占栋, 景德炎, 吴命利, 等. 电气化铁路接触网定位器坡度动态视觉测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 50-58.
- ZHAN D, JING D Y, WU M L, et al. Study on dynamic vision measurement for locator slope gradient of electrified railway overhead catenary [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32 (8): 50-58.
- [48] 任志英, 高诚辉, 罗德海, 等. 二维经验模态分解在工程表面形貌误差评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 425-432.
- REN ZH Y, GAO CH H, LUO D H, et al. Application of bidimensional empirical mode decomposition in error evaluation for engineering surface texture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 425-432.
- [49] 毕果, 郭隐彪, 杨峰. 基于经验模态分解的精密光学表面中频误差识别方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 164-170.
- BI G, GUO Y B, YANG F. Mid-spatial frequency error identification of precision optical surface based on empirical mode decomposition [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(1): 164-170.

- [50] 鄢肖敏,李世平,程双江. 基于小波神经网络和 PSO 的动态误差溯源方法研究[J]. 中国测试, 2014, 40(6): 27-30.
WU X M, LI S H P, CHENG S H J. Research of dynamic error tracing method based on wavelet neural network and PSO[J]. China Measurement & Test, 2014, 40(6): 27-30.
- [51] 祝鹏,余建波,郑小云,等. 机械装配过程的偏差传递网络建模与误差溯源[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(8): 1582-1593.
ZHU P, YU J B, ZHENG X Y, et al. Variation propagation network-based modeling and error tracing in mechanical assembling process[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(8): 1582-1593.
- [52] 祝鹏,余建波,郑小云,等. 混合机械加工过程的偏差网络建模与误差溯源[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 664-675.
ZHU P, YU J B, ZHENG X Y, et al. Variation complex network-based modeling and error source diagnosis of hybrid machining processes[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 664-675.
- [53] ZHONG X M, LIU H Q, MAO X Y, et al. Volumetric error modeling, identification and compensation based on screw theory for a large multi-axis propeller-measuring machine[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 055011, 1-16.
- [54] 门松辰,周光辉,张超,等. 基于数字孪生的装配误差建模与溯源分析方法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 175-184.
MEN S CH, ZHOU G H, ZHANG CH, et al. Assembly error modeling and traceability analysis method based on digital twin[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 175-184.
- [55] 吴凡平,徐钊,刘志刚,等. 山区峡谷地形风场下柔性接触网风振特性研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(5): 47-61.
WU F P, XU ZH, LIU ZH G, et al. Research on wind-induced vibration of flexible catenary under canyon terrain wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(5): 47-61.
- [56] SONG Y, ZHANG M J, WANG H R. A response spectrum analysis of wind deflection in railway overhead contact lines using pseudo-excitation method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1169-1178.
- [57] 杨伟超,何川,彭立敏,等. 隧道结构内列车风荷载下接触网系统的风致振动响应[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 276-284.
YANG W CH, HE CH, PENG L M, et al. Vibrating response of overhead contact system(OCS) under loading of slipstreams induced of high speed train (HST) traveling through tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 276-284.
- [58] 陈唐龙,于涤,陈耀坤. 接触网检测车振动补偿研究[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(4): 461-465.
CHEN T L, YU D, CHEN Y K. Study on vibration compensation of measuring cars for overhead contact line equipment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(4): 461-465.
- [59] 占栋,于龙,肖建,等. 基于计算机视觉的接触轨检测车振动补偿方法及应用[J]. 铁道学报, 2013, 35(1): 25-30.
ZHAN D, YU L, XIAO J, et al. Computer vision approach to conductor rail detecting vehicle vibration compensation method and its application[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(1): 25-30.
- [60] 张冬凯,高仕斌,于龙,等. 车体振动对接触网检测的影响分析及补偿方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 43-50.
ZHAN D K, GAO S H B, YU L, et al. Research on influence of vehicle vibration on catenary detection and compensation method[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(9): 43-50.
- [61] YANG Y F, LING L, WANG CH, et al. Wheel/rail dynamic interaction induced by polygonal wear of locomotive wheels[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(1): 211-235.
- [62] ZHU Y, WANG W J, LEWIS R, et al. A review on wear between railway wheels and rails under environmental conditions [J]. Journal of Tribology, 2019, 141(12): 120801.
- [63] JING L, WANG K Y, ZHAI W M. Impact vibration behavior of railway vehicles: A state-of-the-art[J]. Acta Mechanica Sinica, 2021, 37(8): 1193-1221.
- [64] 干锋,戴焕云,宋春元,等. 车轮高阶不圆对轮对蛇行运动和等效锥度的影响[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 57-64.

- GAN F, DAI H Y, SONG CH Y, et al. Effect of out-of-round wheel on hunting movement and equivalent conicity of wheelset[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 57-64.
- [65] 徐宁, 李强, 任尊松, 等. 考虑一系悬挂局部细化的车辆垂向系统振动传递特性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 106-117.
- XU N, LI Q, REN Z S, et al. Study on the vibration transfer characteristics of vertical vehicle system considering local refinement of primary suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 106-117.
- [66] 任尊松, 孙守光, 李强. 高速动车组轴箱弹簧载荷动态特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 109-115.
- REN Z S, SUN SH G, LI Q. Axle spring load test and dynamic characteristics analysis of high speed EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 109-115.
- [67] SUN W, THOMPSON D J, ZHOU J, et al. Analysis of dynamic stiffness effect of primary suspension helical springs on railway vehicle vibration[J]. Journal of Physics Conference Series, 2016, 744(1): 012149.
- [68] 杜森, 石广田, 李彪. 空气弹簧对车辆运行平稳性的影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(3): 233-239.
- DU M, SHI G T, LI B. Analysis of the effect of air spring on vehicle ride comfort[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(3): 233-239.
- [69] 杨岳, 张晓峰, 张兆丰, 等. 面向运行平稳性的铁道车辆悬挂参数灵敏度分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(2): 116-120.
- YANG Y, ZHANG X F, ZHANG ZH F, et al. Sensitivity analysis of railway vehicle suspension parameters on riding stability[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(2): 116-120.
- [70] 杨国伟, 魏宇杰, 赵桂林, 等. 高速列车的关键力学问题[J]. 力学进展, 2015, 45(1): 201507.
- YANG G W, WEI Y J, ZHAO G L, et al. Research progress on the mechanics of high speed rails[J]. Advances in Mechanics, 2015, 45(1): 201507.
- [71] 董少笛, 唐兆, 王开云, 等. 数字孪生在列车曲线通过性能预测中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 240-250.
- DONG SH D, TANG ZH, WANG K Y, et al. Application of digital twin to curve negotiation performance prediction of train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 240-250.
- [72] 牛留斌, 刘金朝, 曲建军, 等. 基于状态空间法的轨道不平顺与车体横向加速度关联模型[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 123-129.
- NIU L B, LIU J ZH, QU J J, et al. Study of relation between track irregularity and lateral acceleration of vehicle based on state-space model[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(8): 123-129.
- [73] 徐井芒, 郑兆光, 赖军, 等. 轨道参数对高速道岔轮轨接触行为的影响[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(5): 990-999.
- XU J M, ZHENG ZH G, LAI J, et al. Influence of track parameters on wheel/rail contact behavior of high-speed turnout[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(5): 990-999.
- [74] FU G Q, FU J ZH, XU Y T, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: Geometric error modeling, identification and compensation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 89: 170-181.
- [75] LI W L, XIE H, ZHANG G, et al. Hand-eye calibration in visually-guided robot grinding[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(11): 2634-2642.
- [76] XIONG G, DING Y, ZHU L M. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 19-28.
- [77] DELIRY S I, AVDAN U. Accuracy of unmanned aerial systems photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping: A review[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2021, 49(8): 1997-2017.
- [78] 陈根良. 操作机构尺寸与变形误差传递的统一建模方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- CHEN G L. A unified error transmission model of robot manipulators considering both kinematic and deformation errors[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [79] 赵强强, 洪军, 刘志刚, 等. 任意拓扑结构机床运动轴误差传递链建模方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 130-137.
- ZHAO Q Q, HONG J, LIU ZH G, et al. Modeling

- method on motive axes error transfer chain for machine tool of arbitrary topological structure [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(21): 130-137.
- [80] KIM J W, CHAE H C, PARK B S, et al. State sensitivity analysis of the pantograph system for a high-speed rail vehicle considering span length and static uplift force[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 303(3/5): 405-427.
- [81] POMBO J, AMBROSIO J. Influence of pantograph suspension characteristics on the contact quality with the catenary for high speed trains [J]. *Computers and Structures*, 2012(110/111): 32-42.
- [82] GREGORI S, TUR M, PEDROSA A, et al. A modal coordinate catenary model for the real-time simulation of the pantograph-catenary dynamic interaction[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2019, 162: 1-12.
- [83] KOYAMA T, NAGAO K, IKEDA M. Three-dimensional simulation of catenary pantograph dynamic interaction[J]. *QR of RTRI*, 2021, 62(2): 104-109.
- [84] DAI ZH Y, LI T, ZHOU N, et al. Numerical simulation and optimization of aerodynamic uplift force of a high-speed pantograph [J]. *Railway Engineering Science*, 2022, 30(1): 117-128.
- [85] VESALI F, REZVANI M A, MOLATEFI H. Simulation of the dynamic interaction of rail vehicle pantograph and catenary through a modal approach [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2020, 90(7): 1475-1496.
- [86] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN50318. Rail applications-current collection systems-technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line [S]. *European Standards (EN)*, Brussels, 2016.
- [87] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN50317. Railway applications—Current collection systems—Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line [S]. *European Standards (EN)*, Brussels, 2012.
- [88] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN50367. Railway applications—Fixed installations and rolling stock—Criteria to achieve technical compatibility between pantographs and overhead contact line [S]. *European Standards (EN)*, Brussels, 2020.
- [89] XU ZH, SONG Y, LIU ZH G. Effective measures to improve current collection quality for double pantographs and catenary based on wave propagation analysis [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(6): 6299-6309.
- [90] 陈立明. 高速受电弓作用下接触网整体吊弦动态力研究[J]. *中国铁道科学*, 2018, 39(3): 86-92.
- CHEN L M. Study on dynamic force of integral dropper of catenary under action of high-speed pantograph [J]. *China Railway Science*, 2018, 39(3): 86-92.
- [91] GIL J, TUR M, GREGORI S, et al. Finite element periodic catenary model to perform HIL pantograph tests considering non-linear dropper behavior [J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2022, 210: 103816.
- [92] 关金发, 田志军, 张学武. 接触网弹性吊索参数对弓网动态性能影响 [J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(3): 659-665.
- GUAN J F, TIAN ZH J, ZHANG X W. Influence of catenary stitch wire parameters on dynamic performance between pantograph and catenary [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(3): 659-665.
- [93] JI ZH L, GUO Y, GUO D L, et al. Coupling effects between pantograph of high-speed train and tunnel[J]. *Vehicle Systems Dynamics*, 2022, 60(10/12): 3830-3847.
- [94] JI ZH L, GUO Y, GUO D L, et al. Prediction of coupling effect between pantograph and tunnel resulting from car body vibration using an aerodynamic and multi-body dynamic coupling approach [J]. *Vehicle Systems Dynamics*, 2023, 62(1): 114-128.
- [95] 刘再民, 张宝奇. 高速铁路接触网无交叉线岔优化设计探讨[J]. *铁道学报*, 2021, 43(9): 32-37.
- LIU Z M, ZHANG B Q. Discussion on design optimization of non-crossing crossover of catenary in high-speed railways[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(9): 32-37.
- [96] YAO Y M, YANG ZH P, WANG J, et al. Analysis of contact force and uplift of pantograph catenary system in overlap section based on numerical simulations and experimental tests[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2023, 61(10/12): 2492-2515.
- [97] JIANG T J, RONNQUIST A, SONG Y, et al. A detailed investigation of uplift and damping of a railway catenary span in traffic using a vision-based line-tracking system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 527:

- 116875.
- [98] 阮杰, 龙鹏, 许一统, 等. 基于机器视觉的吊弦动态抬升量测量方法[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(2): 143-151.
- RUAN J, LONG P, XU Y T, et al. Measurement method for dynamic lifting of dropper based on machine vision[J]. China Railway Science, 2022, 43(2): 143-151.
- [99] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 32591—2016. 轨道交通-受流系统-受电弓与接触网动态相互作用仿真的验证[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People. GB/T 32591—2016. Railway applications—Current collection systems—Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [100] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 32592—2016. 轨道交通—受流系统—受电弓与接触网动态相互作用测量的要求和验证[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People. GB/T 32592—2016. Railway applications—Current collection systems—Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [101] BRUNI S, BUCCA G, COLLINA A, et al. Numerical and hardware-in-the-loop tools for the design of very high speed pantograph-catenary systems[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2012, 7(4): 041013, 1-8.
- [102] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道—路基变形计算模型的研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 1-8.
- ZHAO G T. Calculation model of ballastless track and subgrade deformation on high speed railway[J]. China Railway Science, 2016, 37(4): 1-8.
- [103] 赵国堂. 铁路轨道刚度的确定方法[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(1): 1-6.
- ZHAO G T. Method for determining the rigidity of railway track [J]. China Railway Science, 2005, 26(1): 1-6.
- [104] 徐鹏, 蔡成标. 列车-无砟轨道-路基空间耦合动力学模型[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 191-197.
- XU P, CAI CH B. Spatial dynamic model of train-ballast track-subgrade coupled system[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 191-197.
- [105] 王平, 徐金辉, 汪力, 等. 轨道刚度对车辆-轨道系统频率响应的影响[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(9): 46-52.
- WANG P, XU J H, WANG L, et al. Effect of track stiffness on frequency response of vehicle-track coupling system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(9): 46-52.
- [106] 张鲁顺, 赵国堂. 高速铁路双块式无砟轨道车辆荷载动态传递特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(9): 8-16.
- ZHANG L SH, ZHAO G T. Dynamic transfer characteristics of vehicle load on double-block ballast less track of high-speed railway [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 8-16.
- [107] GAO L, AN B, XIN T, et al. Measurement, analysis, and model updating based on the modal parameters of high-speed railway ballast less track[J]. Measurement, 2020, 161: 107891.
- [108] 潘振, 金花, 柴雪松, 等. 移动式线路动态加载试验车轨道刚度检测技术[J]. 铁道建筑, 2015(6): 143-146.
- PAN ZH, JIN H, CHAI X S, et al. Dynamic loading test vehicle track rigidity detection technology for mobile line[J]. Railway Engineering, 2015(6): 143-146.
- [109] 金花. 移动式线路动态加载车轨道刚度检测系统研究与应用[J]. 铁道建筑, 2016(12): 94-97.
- JIN H. Research and application of track stiffness detection system on track loading vehicle[J]. Railway Engineering, 2016(12): 94-97.
- [110] 杨飞, 孙宪夫, 魏子龙, 等. 基于动静态检测数据的轨道弹性状态评估级平顺性调整方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(5): 82-90.
- YANG F, SUN X F, WEI Z L, et al. Method for track elastic state evaluation and smoothness adjustment based on dynamic and static detection data[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(5): 82-90.
- [111] SONG Y, DUAN F CH, GAO SH B, et al. Crosswind effects on current collection quality of railway pantograph catenary: A case study in Chengdu-Chongqing passenger special line[J]. IEEE Transactions on Instrumentation

- and Measurement, 2022, 71: 9000713.
- [112] 田红旗. 中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 30-41.
- TIAN H Q. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(4): 30-41.
- [113] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1-9.
- TIAN H Q. Study evolvement of train aerodynamics in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 1-9.
- [114] 杨伟超, 何川, 彭立敏, 等. 隧道结构内列车风荷载下接触网系统的风致振动响应[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 276-284.
- YANG W CH, HE CH, PENG L M, et al. Vibrating response of overhead contact system (OCS) under loading of slipstreams induced of high speed train(HST) traveling through tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 276-284.
- [115] SONG Y, ZHANG M J, ØISETH O, et al. Wind deflection analysis of railway catenary under crosswind based on nonlinear finite element model and wind tunnel test[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 168: 104608.
- [116] SONG Y, LIU ZH G, DUAN F CH, et al. Study on wind-induced vibration behavior of railway catenary in spatial stochastic wind field based on nonlinear finite element procedure [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2018, 140(1): 011010.
- [117] 郭凤平. 不同防风设施过渡段接触网风场特性分析[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(2): 80-85.
- GUO F P. Analysis of wind field characteristics of catenary in transition section of different windproof facilities[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(2): 80-85.
- [118] 穆鑫. 兰新铁路隧道与路堤相连处防风过渡段接触网风场特性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 70-77.
- MU X. Study on wind field characteristics of catenary along wind-break transition section at tunnel and embankment connection of Lanzhou-Urumqi railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 70-77.
- [119] 严乃杰, 苏永华, 郭辉, 等. 移动车辆非定常气动力时域模拟及分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 119-127.
- YAN N J, SU Y H, GUO H, et al. Simulation and analysis of unsteady aerodynamic forces relative to moving vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 119-127.
- [120] POMBO J, AMBROSIO J, PEREIRA M, et al. Influence of the aerodynamic forces on the pantograph-catenary system for high-speed trains [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(11): 1327-1347.
- [121] 严晓楠, 曾艳华, 杨佳畅, 等. 双竖井铁路隧道活塞风非定常流动理论计算研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(4): 121-132.
- YAN X N, ZENG Y H, YANG J CH, et al. Theoretical calculation study on unsteady flow of piston wind in double-shaft railway tunnel[J]. China Railway Science, 2023, 44(4): 121-132.
- [122] 宋洋, 刘志刚, 汪宏睿, 等. 接触网三维模型的建立与风偏的非线性求解[J]. 铁道学报, 2015, 37(4): 30-38.
- SONG Y, LIU ZH G, WANG H R, et al. Establishment of 3D model for catenary and nonlinear solution for its wind deflection[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(4): 30-38.
- [123] SONG Y, ZHANG M J, WANG H R. A response spectrum analysis of wind deflection in railway overhead contact lines using pseudo-excitation method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1169-1178.
- [124] SONG Y, LIU ZH G, WANG H R, et al. Nonlinear analysis of wind-induced vibration of high-speed railway catenary and its influence on pantograph catenary interaction [J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(5/6): 723-747.
- [125] 敖晓峰. 平潭海峡公铁两用大桥接触网风偏分析[J]. 中国铁路, 2021(12): 87-91.
- AO X F. Wind deflection analysis of OCS of Pingtan straits rail-cum-road bridge [J]. China Railway, 2021(12): 87-91.
- [126] 李瑞平, 周宁, 张卫华, 等. 基于 AR 模型的接触网脉动风场与风振响应[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 56-62.
- LI R P, ZHOU N, ZHANG W H, et al. Fluctuating wind field and wind-induced vibration response of

catenary based on AR model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 56-62.

- [127] 刘志刚, 侯运昌, 韩志伟, 等. 基于风场模拟的高铁接触网动态性能分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 21-28.

LIU ZH G, HOU Y CH, HAN ZH W, et al. Analysis on dynamic characteristics of high-speed railway catenary based on wind field simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 21-28.

- [128] POMBO J, AMBROSIO J. Influence of pantograph suspension characteristics on the contact quality with the catenary for high speed trains[J]. Computers and Structures, 2012, 110/111: 32-42.

- [129] POMBO J, AMBROSIO J. Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains[J]. Computer and Structures, 2013, 124: 88-101.

- [130] POMBO J, AMBROSIO J. Multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains[J]. ASME Journal of Computer Nonlinear Dynamics, 2012, 7(4): 041008,1-7.

- [131] 梅桂明, 罗群, 邱江洋, 等. 基于 ANCF 的链型悬挂接触网找形及分析[J]. 铁道学报, 2023, 45(7): 44-54.

MEI G M, LUO Q, QUE J Y, et al. Analysis on form-finding of longitudinal suspension catenary based on ANCF[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(7): 44-54.

- [132] 罗群, 梅桂明, 赵晨, 等. 基于非线性理论的接触网找形方法研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(7): 27-35.
- LUO Q, MEI G M, ZHAO CH, et al. Research on form-finding of railway overhead based on nonlinear theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(7): 27-35.

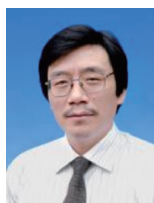
作者简介



占栋, 2016 年于西南交通大学获得博士学位, 现为西南交通大学电气工程学院教师, 主要研究方向为接触网智能检测监测及基础设施服役性能。

E-mail: 15198281626@163.com

Zhan Dong received his Ph. D. degree in 2016 from Southwest Jiaotong University. Now he is a teacher in Southwest Jiaotong University. His main research interests include railway overhead catenary intelligent dynamic detection, monitoring and infrastructure service performance estimation.



高仕斌 (通信作者), 西南交通大学教授、博士生导师, 国家轨道交通电气化与自动化工程技术研究中心主任, 主要从事智能牵引供电理论与工程应用研究。

E-mail: gao_shi_bin@126.com

Gao Shibin (Corresponding author) is a professor and Ph. D. supervisor in Southwest Jiaotong University. He is also the Director of National Rail Transit Electrification and Automation Engineering Technology Research Center. His main research interests include railway intelligent traction power supply theory and engineering applications.



游诚曦, 2002 年于西南交通大学获得学士学位、2019 年于西南交通大学获得硕士学位, 2002 年起任职于中国铁路广州局集团有限公司 (教授级高工), 现为西南交通大学电气工程学院博士研究生, 主要研究方向为电气化铁路牵引供电智能运维。

E-mail: youcx2005@126.com

You Chengxi received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Southwest Jiaotong University in 2002 and 2019, respectively. Currently, he is a Ph. D. candidate in Southwest Jiaotong University. He works in China Railway Guangzhou Group Co., Ltd from 2002. Now he is a professor of engineering and his main research interest is intelligent operation and maintenance of traction power supply system of electrified railway.