

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615143

受电弓与刚性接触网动态接触力频谱特性研究*

李焦典, 占 栋

(西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

摘 要:刚性接触网弹性小、应力大,弓网系统长期运行过程中易出现零部件松脱、疲劳及断裂等问题,严重影响地铁受流质量与运营安全。针对刚性弓网系统接触行为复杂、动态作用过程难以准确表征的实际问题,提出一种结合功率谱密度与载荷谱的联合分析方法,基于弓网动态接触力实测数据,对列车静止、起动、惰行及制动工况下的弓网接触行为开展研究。通过傅里叶变换将时域接触力信号转换至频域,计算功率谱密度,提取特征频率及能量分布指标,揭示不同运行工况下接触力的幅频分布特征及能量变化规律。采用雨流计数法对接触力时间历程进行循环计数,编制各工况下载荷谱,统计分析载荷幅均值分布,提取导致弓网疲劳失效的主要振动特征参数。研究结果表明,刚性弓网动态接触力主要集中于 0~6 Hz 低频区间,0~1 Hz 范围内能量占比较高;载荷幅值主要集中在 120 N 附近,0.1~1 N 范围内存在低幅值、高频次周期载荷成分。不同运行工况下弓网接触力波动特征存在明显差异,起动与制动阶段接触力变化更为剧烈。通过接触力幅值及频谱特性综合分析,揭示了刚性弓网系统振动机理,为优化地铁刚性弓网系统结构,开展疲劳寿命评估,及弓网系统状态监测与运维管理提供理论依据。

关键词: 受电弓;刚性接触网;弓网接触力;功率谱密度;载荷谱

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

Research on the spectral characteristics of the dynamic contact force between pantograph and rigid catenary

Li Jiaodian, Zhan Dong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The rigid overhead contact system is characterized by low elasticity and high stress. During long-term operation, the pantograph-catenary system is prone to issues such as component loosening, fatigue, and fracture, which severely affect the current collection quality and operational safety of subways. To address the complex contact behavior of the rigid pantograph-catenary system and the difficulty of accurately characterizing its dynamic interaction process, a combined analysis method integrating power spectral density and load spectrum is proposed. Based on measured dynamic contact force data of the pantograph-catenary system, the contact behavior under train stationary, starting, coasting, and braking conditions is investigated. By applying Fourier transform to convert the time-domain contact force signal into the frequency domain, the power spectral density is calculated, and characteristic frequency and energy distribution indicators are extracted to reveal the amplitude-frequency distribution characteristics and energy variation patterns of the contact force under different operating conditions. The rainflow counting method is employed to perform cycle counting on the contact force time history, compile load spectra under each operating condition, statistically analyze the distributions of load amplitudes and mean values, and extract the main vibration characteristic parameters that lead to pantograph-catenary fatigue failure. The results show that the dynamic contact force of the rigid pantograph-catenary system is primarily concentrated in the low-frequency range of 0~6 Hz, with a high energy proportion in the 0~1 Hz range. The load amplitude is mainly concentrated around 120 N, with low-amplitude, high-frequency periodic load components existing in the range of 0.1~1 N. Significant differences in contact force fluctuation characteristics are observed under different operating conditions, with more intense variations occurring during the starting and braking phases. Through a comprehensive analysis of the contact force

收稿日期: 2026-04-14 Received Date: 2026-04-14

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

amplitude and spectral characteristics, the vibration mechanism of the rigid pantograph-catenary system is revealed, providing a theoretical basis for optimizing the structural design of subway rigid pantograph-catenary systems, conducting fatigue life assessments, and enabling condition monitoring and operational maintenance management of pantograph-catenary systems.

Keywords: pantograph; rigid catenary; pantograph-catenary contact force; power spectral density; load spectrum

0 引言

弓网系统是电气化铁路的重要组成部分,担负着持续为列车输送电能的重任,其性能直接关系到牵引供电系统的安全与稳定^[1-2]。研究表明,弓网系统作为电能传输的接口,其接触状态对列车正常运行具有决定性影响。相比干线铁路柔性接触网,刚性接触网具有结构简单、无张力、载流能力强、维护工作量小以及节省隧道净空等显著优势,因此在地铁中得到广泛应用,并成为提高供电可靠性和降低建设运维成本的重要技术手段^[3-5]。地铁车站间距短,列车频繁经历起停状态转换,牵引系统产生短时、高幅值的冲击负载,直接作用于弓网受流界面,受电弓与接触线会产生复杂的耦合振动^[6],集中体现为弓网接触力的波动。弓网接触力的动态变化是反映弓网受流质量与系统安全的核心指标^[7]。接触力过大会加速磨损,过小则易导致离线与电弧^[8],二者均直接影响供电连续性、设备寿命及运行安全。深入研究地铁刚性弓网系统振动特性,特别是弓网接触力的动态响应规律与影响因素,对于完善弓网动力学理论,优化系统匹配设计,提升地铁运行可靠性与经济性具有重要的理论价值与工程意义^[9]。

国内外学者围绕弓网接触力检测方法开展了大量研究。传统方法主要通过安装在弓头滑板和托架间的力传感器和加速度传感器实现弓网接触力检测^[10]。张晓林等^[11-13]以弓头力矩平衡方程为基础,通过力传感器换算所得弓网作用力,结合加速度传感器测得的弓头惯性力,得到修正后的弓网接触力。近年来也有许多学者在传统传感器的基础上提出光纤测试的方法,谭梦颖等^[14-15]通过在弓头滑板安装光纤应变片,基于弓头载荷与应变响应间的映射关系测量弓网接触力。上述方法主要针对弓网接触力的精确采集进行研究,对接触力的振动特性缺少进一步的深入分析。为此,汪宏睿等^[16]提出将AR谱应用到弓网接触力动态估计中,提取了不同运行条件下的弓网接触力谱特征,分别用拟合下包络线和峰值点参数的方法,表征弓网接触力频谱趋势和波动特征,实现了弓网接触力谱特征的量化。李三喜等^[17]采用小波变换,分析弓网接触力周期特征和奇异特征。上述研究主要针对弓网接触力仿真数据,且集中在干线铁路柔性接触网,对地铁刚性弓网接触力较少述及。对于载荷谱的编制,现有研究主要聚焦于雨流计数法与标准载荷谱编制过程

的结合,通过统计接触力幅值与均值分布,构建二维载荷谱矩阵。例如,李俊杰等^[18]利用雨流计数法研究了运行线路、工况、速度和铰轮等因素对车辆等效载荷和载荷谱分布的影响规律,基于疲劳极限理论的区域协同扩展方法,建立了扩展载荷谱;袁征等^[19]针对高速列车转向架实测结构载荷与应力大数据,探讨了列车运行时间、线路、速度和轨道对应力谱特征和疲劳损伤的影响,揭示了载荷谱与应力谱的分段特征,并提出了一种新的分段威布尔(S-Weibull)方法,但上述研究主要集中在车辆领域,对弓网载荷特征关注较少。

综上所述,刚性弓网振动的既有研究,目前主要侧重于弓网仿真建模和时域特征分析,对刚性弓网实测数据和频域特征分析较少述及。弓网接触力数据分析的现有方法主要集中于时域^[20-21],分析结果仅能反映弓网接触力的瞬态变化特征,但在复杂振动工况下存在一定局限性,难以揭示复杂振动信号中的频率组成及能量分布规律。频域分析通过功率谱密度及谱估计,可有效提取系统主频,识别共振区域,量化不同频段能量贡献^[22],对弓网接触力的深入研究具有较大优势。本文为开展地铁刚性弓网振动特性研究,提出利用刚性弓网接触力实测数据,对不同工况条件下弓网振动行为进行深入研究。通过傅里叶变换和谐分析,观察弓网接触力功率谱密度;利用雨流计数法,对载荷分布特征进行分析,以期得到不同工况下弓网接触力功率谱密度和载荷特征,进而揭示刚性弓网振动特性。

1 弓网接触力检测原理

接触力是评估弓网关系的核心指标。接触力的精准测量对弓网系统运行安全具有重大意义^[23],检测原理如图1所示。

4组力传感器分别安装在受电弓前后滑板的左右支撑上。列车运行前,外部动力单元向受电弓施加抬升力,确保受电弓滑板与接触线可靠接触。列车运行时,受电弓滑板与接触线摩擦,受接触线不平顺、滑板磨损型面不规则、车辆振动等因素影响,弓网接触力随外部激励动态变化^[24]。动态检测过程中,力传感器产生的电信号通过屏蔽电缆传输至高压侧数据处理单元。为隔离接触网高电压对车内主机影响,减小弓网电磁干扰,采用光纤进行高低压隔离与信号传输。电信号经电光转换单元处理后,成为可通过光纤传输的光信号,再经高低压隔离模

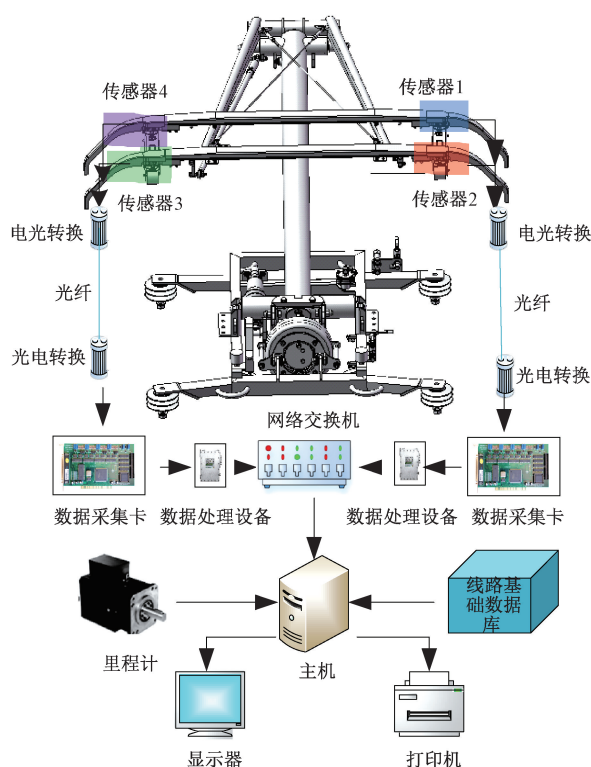


图1 弓网接触力检测原理

Fig. 1 The detection principle of the contact force between the pantograph and catenary system

块,进入低压侧光电转换单元,还原为处理主机可接收的电信号,最后通过主机进行时空同步、信号滤波和标定换算,得到弓网接触力的数字信号。

受电弓力传感器现场安装实物如图2所示。

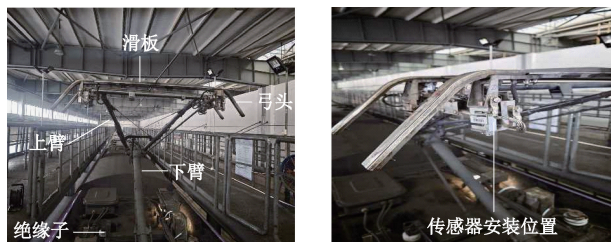


图2 传感器安装位置及受电弓实物图

Fig. 2 Sensor installation positions and physical diagram of the pantograph

滑板是受电弓与接触线直接接触的部件,通常由碳或铜碳复合材料制成,具有良好的导电性和耐磨性^[25]。力传感器安装在滑板下方的支撑结构处。受电弓上臂连接滑板与下臂,负责支撑滑板并保持其平稳。下臂是受电弓底部的支撑杆,通过驱动装置带动受电弓升降。受电弓底部绝缘子是支撑受电弓整体荷载和隔离接触网高压电压的部件。

检测过程中,传感器以固定频率进行采样,通过现场实测数据分析,可以为刚性弓网接触力频谱特性研究提供依据。

2 谱估计分析和载荷谱编制方法

功率谱密度分析,可揭示接触力的幅频特性,定位主要能量集中频段。载荷谱分析,可揭示循环载荷幅值及其分布,评估疲劳风险^[26]。单独使用任何一种方法无法同时反映频域能量特征与循环载荷影响。为此,提出采用弓网接触力功率谱与载荷谱关联分析,识别弓网接触力振动频率,评估弓网系统长期运行的疲劳风险。通过量化弓网接触力频域和时域关键特征指标,表征弓网系统服役状态。处理步骤为:1)对实测弓网接触力数据进行功率谱密度分析,提取振动频率及能量分布特征;2)利用雨流计数法对弓网接触力时程数据进行循环载荷分析,生成弓网接触力载荷谱;3)将功率谱密度与载荷谱关联,识别弓网接触力振动频率及疲劳特征。

2.1 谱估计方法分析

目前,常用的谱估计方法分为经典谱估计法和现代谱估计法。经典谱估计法有周期图法、布莱克曼-图基(Blackman-Tukey, BT)法、韦尔奇(Welch)法与巴特利特(Bartlett)法等^[27],适用于处理数据量大的平稳信号;现代谱估计法有参数化方法、非参数化方法和子空间方法,在处理数据量较小的非平稳信号时具有更高的准确度与稳定性,但是计算效率相对较低,对信噪比更为敏感,并存在受初始相位影响的“谱峰分裂”和受计算阶次影响的“虚假谱峰”现象^[28]。Welch法作为一种改进周期图法,计算简单快速,功率谱估计结果方差较小,频谱泄漏较少,可保留真实幅值信息^[29],被广泛应用于油井液面测量、小信号分析等领域^[30]。

周期图法通过对空间域平稳信号傅里叶变换和幅值归一化处理,得到信号的功率谱估计^[31],计算公式如式(1)、(2)所示。

$$X_N(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \quad (1)$$

$$p(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} |X_N(e^{j\omega})|^2 = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (2)$$

式中: N 为信号离散点数; $X_N(e^{j\omega})$ 为信号 $x(n)$ 的傅里叶变换; $p(e^{j\omega})$ 为信号序列功率谱估计。

在平均周期图法的基础上,采用信号分段重叠、加窗处理,结合傅里叶变换,可估计信号的功率谱密度,即功率谱估计的 Welch 法,如式(3)、(4)所示。

$$p(e^{j\omega}) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{1}{MU} |x^i(n)\omega(n)e^{-j\omega n}|^2 \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \omega^2(n) \quad (4)$$

式中: M 为单个分段数据长度; U 为归一化因子; K 为分段数; $\omega(n)$ 为窗函数。

为研究弓网接触力的频谱特性,基于现场实测数据,采用功率谱估计的 Welch 法,对弓网接触力进行频谱分析。

2.2 载荷谱编制方法

机械振动分析中,不同周期与幅值的机械载荷对结构的疲劳损伤具有累积效应。雨流计数法将任何复杂的机械振动视为若干循环载荷的叠加,并根据载荷分布特征,确定复杂机械振动中的疲劳分量,是机械振动领域常用的分析方法,计算规则为^[32]:

1) 雨流计算的起始点依次从载荷变化时间历程的每个峰(谷)值开始,雨滴沿着斜边内侧向下流动;

2) 雨滴在流到峰(谷)值处,若存在比当前点更大的峰(谷)值,则竖直落下,直到流至有 1 个比雨滴起始点值更大(更小)峰(谷)值处停止;

3) 雨滴下落途中,若遇到之前雨滴流动的路径即结束流动,当前流动路径构成闭合轨迹,即 1 个循环过程;

4) 依据雨滴流动路径端点,可提取出所有的载荷循环,从而统计各循环过程相应的幅值和均值;

5) 经过步骤 1)~4) 计数后,剩下的载荷变化时间历程经过改造后继续按照步骤 1)~4) 再次提取剩余的循环,直至所有数据处理完毕。

雨流计数法的核心功能在于对实测载荷时序进行离散化处理,通过循环事件提取算法重构典型载荷历程^[33]。因此,雨流计数法可较好地适应地铁列车频繁启动、制动导致的弓网接触力周期性冲击动态变化特征。雨流计数法的应用示意如图 3 所示, σ 为应力, t 为时间,数字 1~5 表示雨滴流动路径。

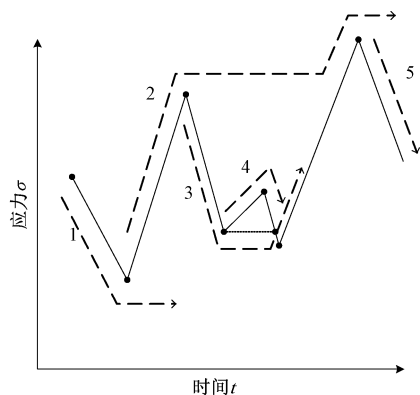


图 3 雨流计数结果示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rainflow counting results

雨流计数的统计结果即循环计数的总数等于各计数

阶段的计数循环总和,其中每一载荷循环用其始值和终值表示,反映了载荷循环的变化范围^[34],按式(5)可求得载荷循环均幅值。

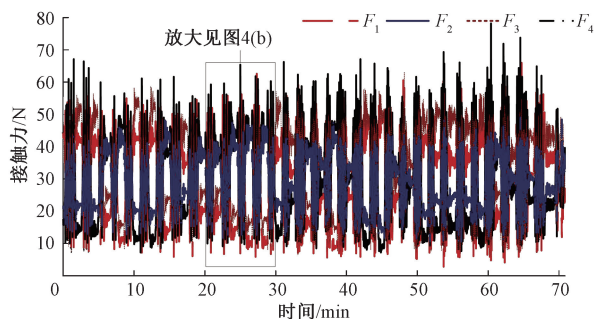
$$\begin{cases} F_m = \frac{F_a + F_b}{2} \\ F_r = \left| \frac{F_a - F_b}{2} \right| \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_a 和 F_b 分别为载荷循环的始值、终值; F_m 和 F_r 分别为对应载荷循环的均值、幅值。

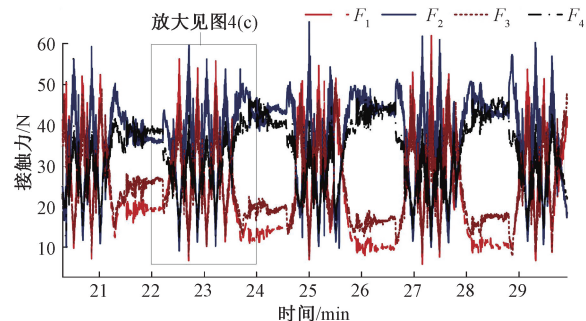
谱估计方法和雨流计数法为传统研究方法,但鲜有研究使用二者联合分析方法。本文提出功率谱密度与载荷谱联合分析的方法,功率谱密度用于分析振动信号的频率分布及能量特性^[35-36];载荷谱用于描述弓网接触力随时间的变化规律^[37-38]。联合分析可在频域和时域同时揭示振动特征与受力状态的关系,获取弓网接触力的幅频特性及循环载荷分布,实现振动特征与疲劳载荷量化,为地铁刚性弓网设计优化和安全评估提供科学依据。

3 实测数据分析

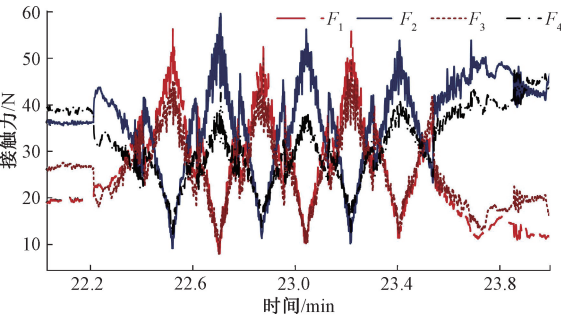
通过地铁接触网检测车,开展现场实测试验。传感器采样频率设为 2 000 Hz,列车由线路起点运行至终点,总时长 70 min,检测系统共采集 850 万组数据。4 个力传感器采集的原始数据记为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ,时域波形见图 4(a),局部放大见图 4(b)和(c)。



(a) 传感器原始数据
(a) Sensor original data



(b) 传感器原始数据放大图
(b) Enlarged view of sensor raw data



(c) 传感器原始数据放大图
(c) Enlarged view of sensor raw data

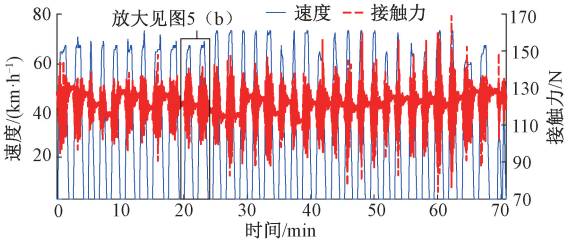
图 4 传感器原始数据

Fig. 4 Sensor original data

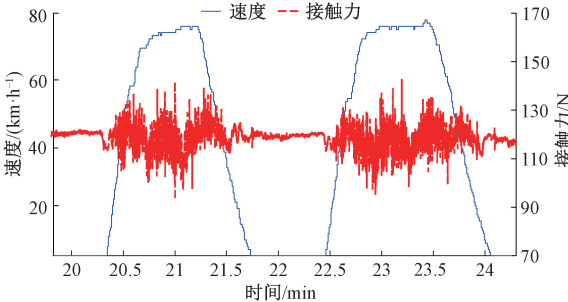
将 4 个力传感器原始数据叠加,即可得到弓网接触力 F :

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (6)$$

图 5 为列车运行速度和弓网接触力同步叠加后的波形,可知弓网接触力的波动与列车运行状态密切相关。在启动和制动工况,由于列车存在明显的加速或减速过程,弓网系统需承受附加动力激励,接触力波动显著增强。惰行工况下,列车速度平稳,但速度较高,任何微小的外部扰动,都可引发剧烈的弓网振动。分析表明,弓网接触力的动态特性不仅与运行速度有关,同时受速度变化影响。



(a) Waveforms of pantograph-catenary contact force and speed



(b) Enlarged view of pantograph-catenary contact force and velocity waveforms

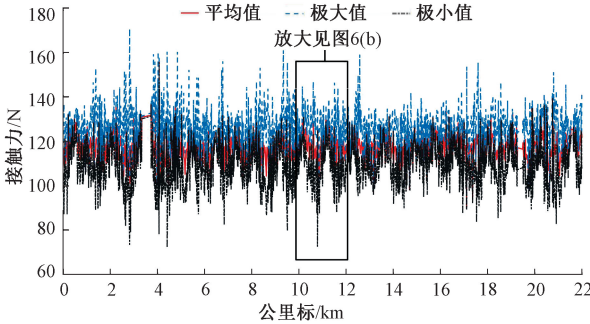
图 5 弓网接触力、速度波形

Fig. 5 Waveforms of pantograph-catenary contact force and speed

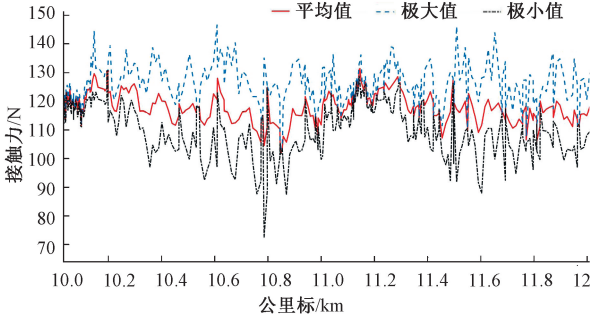
3.1 接触力时域分析

弓网接触力传统分析方法主要在时域开展。接触网跨距通常设为 8 m,以 8 m 为单位统计跨距内接触力极大

值、平均值、极小值及标准差,据此分析弓网接触力时域特性,结果如图 6 和 7 所示。



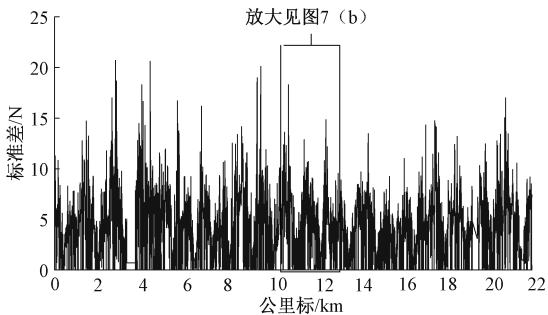
(a) 接触力极值、均值统计
(a) Statistical results of maximum, minimum, and mean contact forces



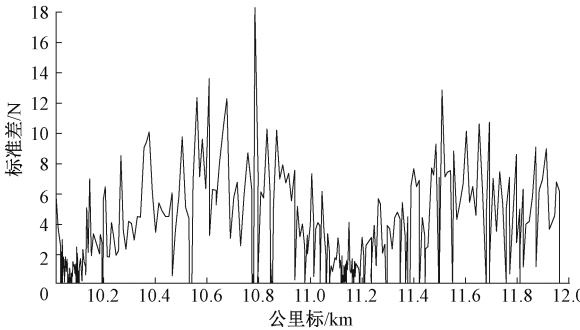
(b) 接触力极值、均值统计放大图
(b) Enlarged view of statistics of extreme and mean values of contact force

图 6 接触力极值、均值统计

Fig. 6 Statistical results of maximum, minimum, and mean contact forces



(a) 接触力标准差统计
(a) Statistical results of variance contact force



(b) 接触力标准差统计放大图
(b) Enlarged view of contact force variance statistics

图 7 接触力标准差统计

Fig. 7 Statistical results of variance contact force

图 6 和 7 结果表明,接触力均值整体较为稳定,弓网系统总体受流性能良好;但局部区段存在较大接触力极值及标准差峰值,表明弓网系统在运行过程中存在明显瞬时动态冲击。接触力波动呈随机离散分布特征,体现出弓网耦合振动的非平稳性。标准差峰值区域与接触力极值区域具有较强一致性,可用于识别弓网动态异常区段及评价系统运行稳定性。

3.2 接触力谱分析

将弓网接触力检测数据通过快速傅里叶变换 (fast fourier transform, FFT) 进行频域分析,频谱分布如图 8 所示。

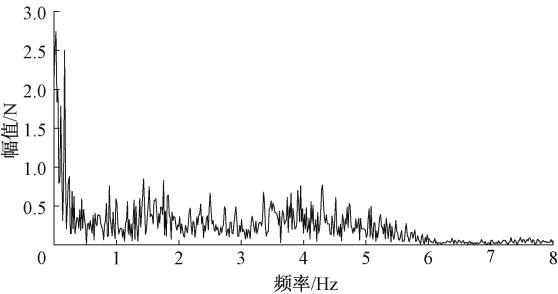
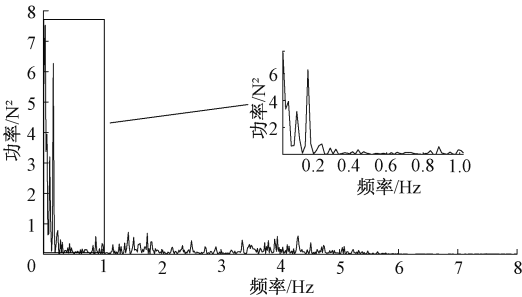
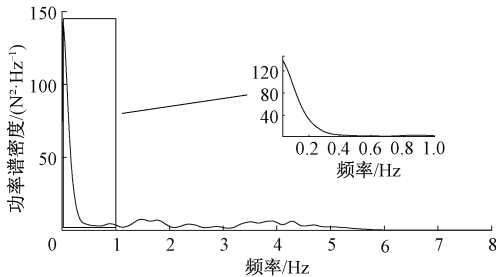


图 8 接触力频谱图
Fig. 8 Contact force spectrum

从图 8 可以看出,弓网接触力主要由 6 Hz 以下的低频信号构成。采用式 (3) 和 (4) 对弓网接触力数据进行处理,可得到其功率谱,如图 9 所示。



(a) 接触力功率谱
(a) Contact force power spectrum



(b) 接触力功率谱密度
(b) Contact force power spectral density

图 9 接触力谱估计结果

Fig. 9 Estimation results of the contact force spectrum

由图 9(a) 的谱估计结果,可以看出弓网接触力的能量绝大部分集中在 0~1 Hz 的低频范围内。图 9(b) 中, 0.2 Hz 以下的能量密度极高,而一旦超过 1 Hz,能量迅速衰减并趋于平稳。这说明接触力的波动主要受列车运行产生的低频成分(如线路长波不平顺、接触网跨距波动等)影响。

3.3 载荷谱编制

采用雨流计数法对接触力载荷时程循环分析,结果如图 10 所示。

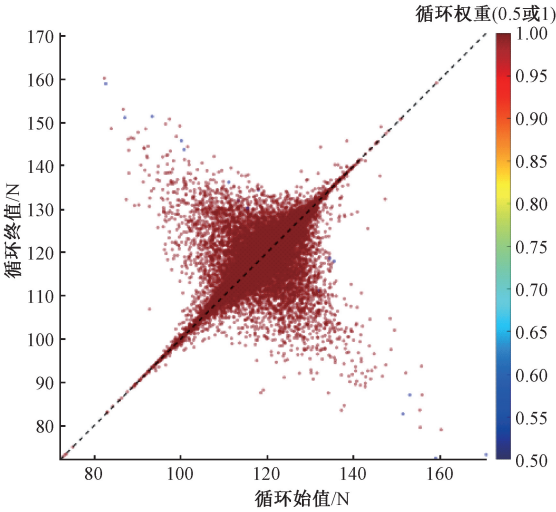
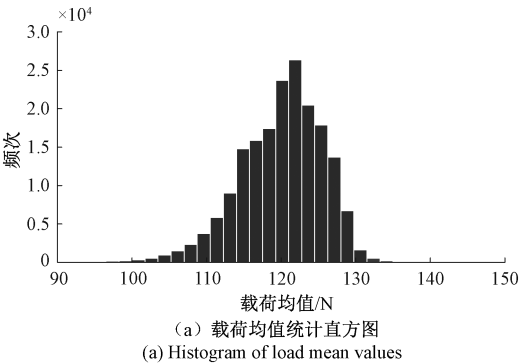


图 10 雨流计数结果
Fig. 10 Rain flow counting results

雨流计数后的载荷分布呈现明显的对称性,大量数据集中在对角线附近。这说明大多数接触力的波动幅值较小,循环起始值和终止值越接近,接触力波动越小。

将弓网接触力载荷数据的雨流计数结果转化为载荷均值统计直方图和载荷幅值统计直方图,如图 11(a) 和 (b) 所示,其中图 11(b) 横轴为对数坐标。

在图 11(a) 中,载荷均值高度集中在 120 N 附近,呈现近似正态分布,弓网接触力中心基值稳定,未出现中心偏移,符合弓网振动特征,符合地铁弓网接触力的运行标准。图 11(b) 中,0.1~1 N 之间存在高频次的循环载荷,属



(a) 载荷均值统计直方图

(a) Histogram of load mean values

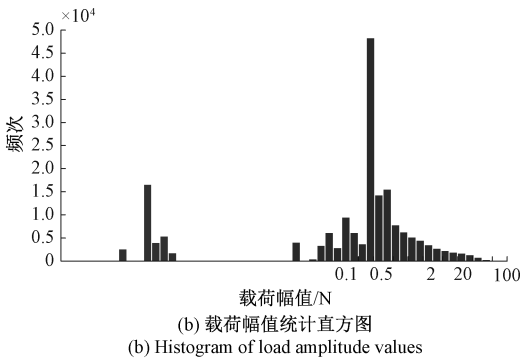


图 11 载荷均值、幅值统计

Fig. 11 Load histograms of means and amplitudes

低幅、高频振动,通常源于传感器噪声、接触线非均匀磨损或受电弓框架的微小颤振,长期作用对结构损伤较大。

3.4 不同工况振动特性分析

地铁列车运行过程中,需频繁经历起停切换,为便于分析,将列车在相邻车站的完整运行过程视为一个周期。根据列车牵引特性,一个周期可进一步划分为静止、启动、惰行和制动四种运行工况。列车在整条线路的运行过程可视为四种工况的周期循环叠加。单个周期内弓网接触力与速度的波形曲线如图 12 所示。

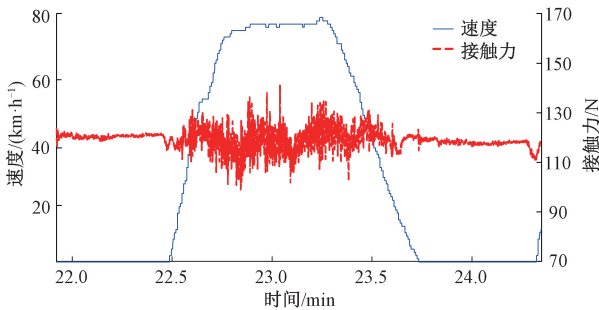


图 12 接触力与速度时域波形图

Fig. 12 Time-domain waveforms of contact force and speed

图 5 为接触网检测车在地铁 30 个区间内连续采集的弓网接触力动态波形,其载荷可视为 30 个周期循环叠加。分别按静止、启动、惰行和制动 4 种工况,分析 30 个周期内弓网接触力振动特性。

由式(3)和(4),可得静止、启动、惰行和制动 4 种工况条件下弓网接触力的功率谱密度,结果如图 13 所示。

图 13 表明,不同工况下弓网接触力高频能量较小,功率谱密度均集中在低频区,说明弓网接触力主要受低频振动影响。静止工况下谱能量最低,仅包含弓网初始接触状态及背景扰动;启动和制动工况下低频谱峰明显增强,表明速度变化和纵向动力效应会加剧弓网接触力波动;惰行工况下功率谱密度分布稳定,周期之间一致

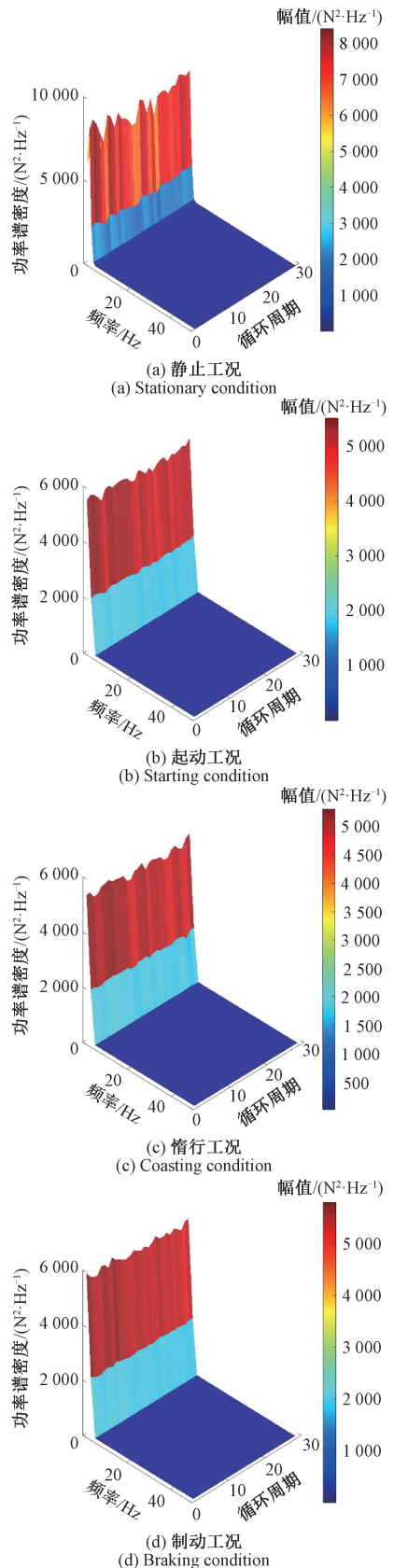


图 13 不同工况条件弓网接触力功率谱密度

Fig. 13 Power spectral density of contact force under different operating conditions

性较好,与弓网系统稳态运行时的动力学特征吻合。

综合比较4种运行工况,可知列车运行速度对弓网接触力动态响应具有显著影响,起动与制动工况下更加突出,惰行工况下弓网接触力表现出更好的稳定性和重复性。

利用雨流计数法可得不同工况下的载荷谱均幅值分布,如图14所示。

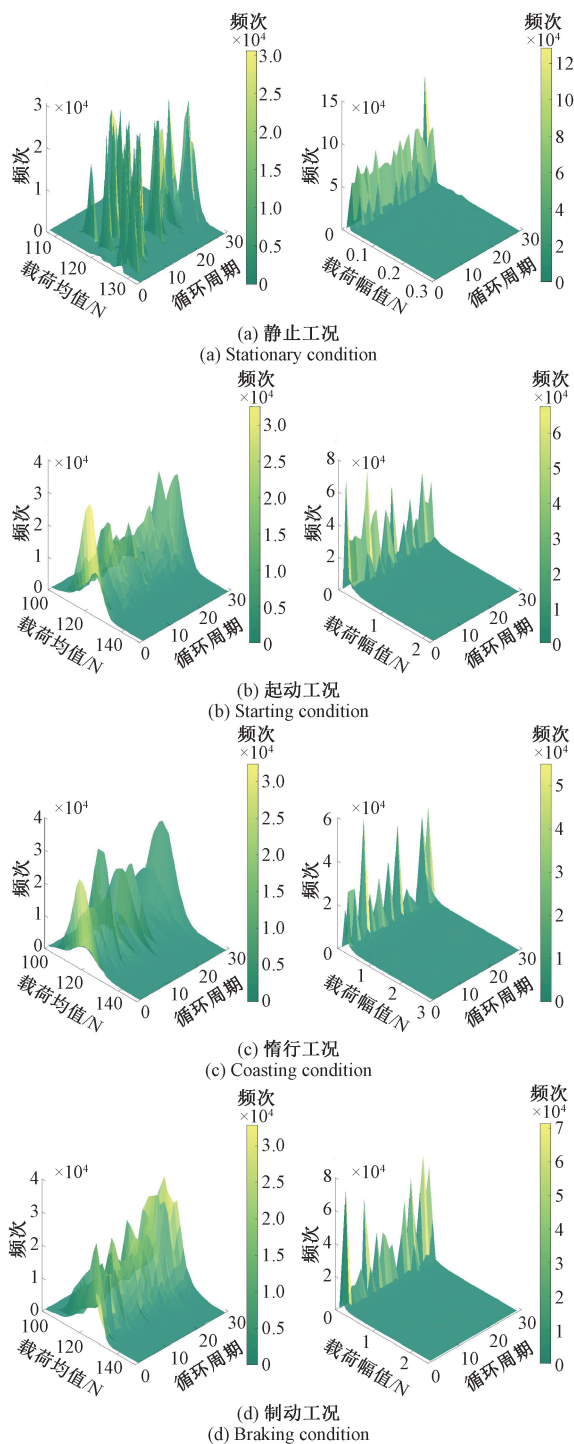


图14 不同工况条件下载荷均幅值分布

Fig. 14 Load mean and amplitude values under different operating conditions

图14表明,不同工况下接触力循环载荷均具有集中分布特征,载荷均值主要集中在特定区间内,载荷幅值则主要集中在小幅值区域,说明弓网接触力总体上围绕某一稳定受力水平作小幅波动。

进一步比较发现,静止工况下均值谱和幅值谱分布最集中,表明系统主要处于静止平衡状态,外部扰动较小;起动工况下均值谱和幅值谱均有所展宽,反映出列车起动过程中牵引作用使接触力波动增强;惰行工况下谱分布相对平稳,说明在较稳定运行状态下弓网系统具有较好的受流性能;制动工况下均值谱分布更分散,幅值谱中的大幅值循环增多,表明制动过程中的纵向惯性和速度变化会加剧接触力波动。

综上所述,4种工况中静止工况的疲劳载荷水平最低,惰行工况表现出较好的稳定性,起动工况和制动工况下载荷波动增强,对弓网系统疲劳损伤的影响更为显著。

4 结 论

针对受电弓与刚性接触网动态接触力分析评估难题,基于地铁实测数据,研究了弓网动态接触力频谱分析方法,主要结论如下:

1) 提出采用功率谱估计法,对弓网接触力进行频谱分析,实测结果表明,弓网接触力主要由6 Hz以下的低频信号构成,弓网接触力能量主要集中在0~1 Hz的低频范围内,研究结论揭示了接触力振动频率分布规律,为地铁刚性弓网受流质量评估提供依据;

2) 运用雨流计数法,对接触力载荷进行不同循环周期均幅值分析,结果表明载荷均值集中分布在120 N,0.1~1 N范围内存在低幅高频振动分量,低幅高频振动长期作用,可能导致受电弓及接触网局部疲劳;

3) 按列车静止、起动、惰行和制动4种工况,对弓网接触力功率谱密度和载荷谱均幅值分布进行分析,揭示不同工况条件下受电弓与刚性接触网动态接触力振动特性。

4) 不同城市地铁系统在接触网刚度、悬挂间距、车辆轴重及运行速度等方面存在差异,接触力频谱分布可能表现出一定差异性,但弓网耦合振动能量主要集中于低频范围这一规律,与弓网动力学已有研究结果一致,表明低频振动是影响刚性弓网受流质量的重要因素。

参考文献

- [1] 李向东,韦友春,代林峰. 基于实测弓网接触力的高速铁路接触线疲劳寿命研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(4): 168-179.
- LI X D, WEI Y CH, DAI L F. Research on fatigue life of high-speed railway contact wires based on measured pantograph-catenary contact force [J]. China Railway

- Science, 2024, 45(4): 168-179.
- [2] 吴文江, 李响. 高速铁路接触网吊弦断裂电气因素研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 164-172.
WU W J, LI X. Research on electrical factors of dropper fracture in high-speed railway catenary [J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 164-172.
- [3] TAN M Y, LI H SH Y, NIE L. Defect diagnosis of rigid catenary system based on pantograph vibration performance[J]. Actuators, 2024, 13(5): 162.
- [4] BAUTISTA A, MONTESINOS J, PINTADO P. Dynamic interaction between pantograph and rigid overhead lines using a coupled FEM—Multibody procedure [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 97: 100-111.
- [5] 占栋, 高仕斌, 于龙. 刚性接触网磨损动态检测系统视觉标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 99-109.
ZHAN D, GAO SH B, YU L. Research on visual calibration method for dynamic wear detection system of rigid catenary[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 99-109.
- [6] 时光, 陈忠华, 郭凤仪, 等. 基于模糊反演法的参数不确定弓网接触载荷控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 471-479.
SHI G, CHEN ZH H, GUO F Y, et al. Control of pantograph-catenary contact load with parameter uncertainty based on a fuzzy inversion method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 471-479.
- [7] POMBO J, AMBRÓSIO J. Influence of the pantograph-catenary interaction on the quality of current collection in high-speed trains [J]. Computers & Structures, 2012, 110: 32-42.
- [8] 李斌, 舒嘉辉. 基于端口阻抗法的弓网电弧识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2026, 40(3): 155-163.
LI B, SHU J H. Pantograph-catenary arc detection method based on port impedance [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2026, 40(3): 155-163.
- [9] 陈仁祥, 王帅, 杨黎霞, 等. 弓网接触力长短时记忆网络预测的受电弓主动控制与仿真[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 192-198.
CHEN R X, WANG SH, YANG L X, et al. Active control and simulation of pantograph based on long short-term memory network prediction of pantograph-catenary contact force [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 192-198.
- [10] 周宁, 蔚超, 谭梦颖, 等. 弓网系统动态及受流性能测试技术研究及应用[J]. 铁道学报, 2020, 42(3): 47-54.
ZHOU N, WEI CH, TAN M Y, et al. Research and application of testing technology for pantograph-catenary system dynamics and current collection performance [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(3): 47-54.
- [11] 张晓林, 高晓蓉, 王黎, 等. 弓网接触力检测方法介绍[J]. 铁道技术监督, 2010, 38(8): 11-13, 16.
ZHANG X L, GAO X R, WANG L, et al. Introduction to pantograph-catenary contact force detection methods [J]. Railway Quality Control, 2010, 38(8): 11-13, 16.
- [12] 王子恒. 地铁弓网关系检测技术及常见问题整改分析[J]. 人民公交, 2024(8): 73-75.
WANG Z H. Detection technology for metro pantograph-catenary relationship and analysis of common problem rectification [J]. People's Public Transportation, 2024(8): 73-75.
- [13] 王亚春, 徐超, 杨才智. 弓网动态接触压力测量方法研究[J]. 铁道技术监督, 2014, 42(12): 41-43.
WANG Y CH, XU CH, YANG C ZH. Research on measurement method of pantograph-catenary dynamic contact pressure [J]. Railway Quality Control, 2014, 42(12): 41-43.
- [14] 谭梦颖, 邹栋, 李瑞平, 等. 基于应变响应测量弓网接触力的新方法[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1208-1215.
TAN M Y, ZOU D, LI R P, et al. A new method for measuring pantograph-catenary contact force based on strain response [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1208-1215.
- [15] SCHRÖDER K, ECKE W, KAUTZ M, et al. An approach to continuous on-site monitoring of contact forces in current collectors by a fiber optic sensing system [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(2): 172-179.
- [16] 汪宏睿, 刘志刚, 韩志伟, 等. 电气化铁路弓网接触压力功率谱的特征提取[J]. 铁道学报, 2014, 36(11): 23-28.
WANG H R, LIU ZH G, HAN ZH W, et al. Feature extraction of contact pressure power spectrum for pantograph-catenary in electrified railways [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(11): 23-28.

- [17] 李三喜, 张坚, 李鑫, 等. 基于小波变换的弓网接触压力特征研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(12): 30-36.
LI S X, ZHANG J, LI X, et al. Characteristic study of pantograph-catenary contact pressure based on wavelet transform[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(12): 30-36.
- [18] 李俊杰. 高速列车转向架构架载荷谱研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
LI J J. Research on load spectrum of bogie frame for high-speed trains[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [19] 袁征. 基于数据驱动的高速列车转向架载荷谱特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
YUAN ZH. Research on data-driven load spectrum characteristics of high-speed train bogie frames[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [20] 王强. 刚性架空接触网弓网动态检测探讨[J]. 科学技术创新, 2024(12): 30-33.
WANG Q. Discussion on dynamic detection of rigid overhead catenary system for pantograph-catenary interaction[J]. Scientific and Technological Innovation, 2024(12): 30-33.
- [21] 王志良, 杨卢强. 弓网接触力和硬点数据的分析与评价方法[J]. 电气化铁道, 2023, 34(S2): 53-55, 60.
WANG ZH L, YANG L Q. Analysis and evaluation method of pantograph-catenary contact force and hard spot data[J]. Electric Railway, 2023, 34(S2): 53-55, 60.
- [22] 田野, 陈姚节, 张莉, 等. 频域特征提取联合双流CNN的轴承故障诊断方法[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(4): 167-173, 295.
TIAN Y, CHEN Y J, ZHANG L, et al. Bearing fault diagnosis method using frequency domain feature extraction combined with dual-stream CNN[J]. Noise and Vibration Control, 2024, 44(4): 167-173, 295.
- [23] WANG H R, LIU ZH G, SONG Y, et al. Detection of contact wire irregularities using a quadratic time-frequency representation of the pantograph-catenary contact force[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(6): 1385-1397.
- [24] LIN T C, SUN C W, LIN Y CH, et al. Intelligent contact force regulation of pantograph-catenary based on novel type-reduction technology[J]. Electronics, 2022, 11(1): 132.
- [25] LIAO Q H, WEI W F, ZUO H Z, et al. Interfacial bonding enhancement and properties improvement of carbon/copper composites based on nickel doping[J]. Composite Interfaces, 2021, 28(6): 637-649.
- [26] 丁西涛, 方聪聪, 周伟, 等. 考虑高速列车复杂工况的轴箱轴承载荷谱分析[J]. 机械设计与制造, 2026(3): 373-378.
DING X T, FANG C C, ZHOU W, et al. Load spectrum analysis of axle box bearings considering complex operating conditions of high-speed trains[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2026(3): 373-378.
- [27] 陈宪麦. 轨道不平顺时频域分析及预测方法的研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2006.
CHEN X M. Research on time-frequency domain analysis and prediction methods for track irregularities[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2006.
- [28] 杨太. 现代谱估计理论在信号去噪中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
YANG T. Research on the application of modern spectral estimation theory in signal denoising[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [29] 程凡永. 高分辨谱估计及其在雷达信号处理中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
CHENG F Y. Research on high-resolution spectral estimation and its application in radar signal processing[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [30] 罗久飞, 郑明轩, 冉超, 等. 噪声激励下的油井动液面测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 258-266.
LUO J F, ZHENG M X, RAN CH, et al. Research on dynamic fluid level measurement method for oil wells under noise excitation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 258-266.
- [31] 邓泽怀, 刘波波, 李彦良. 常见的功率谱估计方法及其Matlab仿真[J]. 电子科技, 2014, 27(2): 50-52.
DENG Z H, LIU B B, LI Y L. Common power spectrum estimation methods and Matlab simulation[J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(2): 50-52.
- [32] 张明锐, 段宏伟, 李启峰. 基于改进雨流计数法的城轨列车牵引负荷特征提取策略[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(2): 203-212.
ZHANG M R, DUAN H W, LI Q F. Feature extraction strategy for traction load of urban rail transit trains based on improved rainflow counting method[J]. China Railway Science, 2025, 46(2): 203-212.
- [33] 刘英财. 基于雨流计数法的多级行星传动随机误差均载系数研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2025.

LIU Y C. Research on random error load sharing coefficient of multi-stage planetary transmission based on rainflow counting method [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2025.

[34] 郑昕, 高仕斌, 于龙, 等. 基于自适应核密度估计的接触网吊弦疲劳程序载荷谱编制方法[J]. 铁道标准设计, 2026: 70(4): 188-195.

ZHENG X, GAO SH B, YU L, et al. Compilation method of fatigue program load spectrum for catenary dropper based on adaptive kernel density estimation[J]. Railway Standard Design, 2026: 70(4): 188-195.

[35] WEN CH K, XIE B, LI ZH, et al. Power density-based fatigue load spectrum editing for accelerated durability testing for tractor front axles [J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 73-88.

[36] 刘柏廷, 李立民, 王泓翔, 等. 飞行训练操纵稳定性的功率谱密度特征识别与评价模型分析[J]. 电子技术, 2026, 55(1): 127-129.

LIU B T, LI L M, WANG H X, et al. Power spectral density feature identification and evaluation model analysis for flight training handling stability [J]. Electronic Technology, 2026, 55(1): 127-129.

[37] ZHENG G F, DUAN Y L, SU H, et al. Novel method for accelerated multi-axial load spectrum editing with phase preservation based on the fusion of damage and energy domain features [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 316: 110880.

[38] WANG Y, WANG L, WANG SH M, et al. Loading method for tractor rotary tillage load spectrum based on extreme load retention resampling [J]. International Journal Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(4): 128-138.

作者简介



李焦典, 2024 年于华北电力大学获得学士学位, 现于西南交通大学攻读硕士研究生, 主要研究方向为接触网智能检测监测。

E-mail: 3149396629@qq.com。

Li Jiaodian received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2024. He is currently pursuing his M. Sc. degree at Southwest Jiaotong University. His main research interest includes intelligent detection and monitoring of catenary systems.



占栋(通信作者), 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 (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southwest Jiaotong University in 2016. He is currently a teacher at Southwest Jiaotong University. His main research interests include railway overhead catenary intelligent dynamic detection, monitoring and infrastructure service performance estimation.