

线夹和磨损深度对高速铁路接触线应力分布与疲劳寿命的影响

黄杰¹ 张家玮² 关金发² 张继旺¹ 苏凯新¹ 徐可佳²

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 成都 610031)

(2. 西南交通大学 电气工程学院, 成都 611756)

摘要:【目的】高速铁路接触线在服役过程中存在疲劳失效风险,由于线夹位置受流质量的恶化,该处的接触线磨损严重,成为疲劳失效的高发区域。探究线夹和磨损深度对接触线应力分布和疲劳寿命的影响具有重要的工程意义。【方法】首先,以线夹位置处接触线为研究对象,建立受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型和含实体单元的线夹与接触线的接触网混合模型;然后,对不含线夹的接触线、具有不同磨损率(0%、14%、19%)的含线夹的接触线进行应力分析;最后,开展 10^7 循环次数内接触线材料的高周疲劳试验,并基于应力分析结果进行疲劳寿命预测。【结果】研究结果表明,所提的接触网混合模型能够准确、直观地呈现接触线在线夹位置处的应力分布,相比于梁单元接触网模型,该模型能够捕捉到更加详细的应力时程。线夹两端的接触线出现了明显的应力集中,且随着磨损深度的增加,应力集中会更加显著。线夹的存在会显著缩短接触线的疲劳寿命,而忽视线夹的影响将导致预测的接触线疲劳寿命偏长。接触线的疲劳寿命随着磨损深度的增大而缩短,且磨损深度越大,接触线的疲劳寿命缩短越快。

关键词: 高速铁路; 接触线; 线夹; 磨损; 应力分布; 疲劳寿命**中图分类号:** U225 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.002

0 引言

高速铁路接触线是电气化铁路接触网系统中的核心部件,承担着输送电能的作用^[1]。然而,由于在服役过程中不可避免地受到张力、受电弓冲击抬升、环境风载等多重作用,接触线存在疲劳失效的风险,这严重威胁到列车运行的安全^[2-3]。

为了预防接触线的疲劳失效,提高其服役可靠性,学者针对接触线的疲劳寿命开展了大量研究。数值模拟方法因其高效、低成本的显著优势,成为研究接触线疲劳寿命的主流方法^[4]。陈花丽等^[5]、^[25-29]、^[6]、^[34-39]通过建立受电弓-接触网耦合动力学仿真模型,获取了接触线的服役载荷,然后,基于Minner线性损伤理论进行了接触线的寿命预测。刘方林等^[7]、^[1618-1623]在其基础上开展了接触线的疲劳可靠性研究。宋洋等^[8]、^[20-26]考虑接触线服役过程中环境横风的影响,建立了基于受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型的随机风场,并预测了不同风速、风攻角下接触线的疲劳寿命。上述文献在建立受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型时,均将接触线采用欧拉梁等效。但是,由于梁单元

无法反映接触线截面上的应力分布,导致无法提取到接触线截面上最薄弱点的应力时程。因此,Xu等^[9]建立了一段1 m长的实体单元接触线模型,通过将弓网耦合模型动力学分析获得的节点位移作为该实体模型的输入激励,从而获得了接触线在服役过程中的应力响应,并完成了对速度为350、400 km/h的接触线的寿命预测。然而,该研究在接触线实体模型的边界条件设置上仅考虑在两端施加恒定张力,并未将接触线与接触网其他部件连接,忽视了接触线与接触网其他部件之间的相互作用及载荷传递。另外,以上研究在进行接触线的疲劳寿命预测时,均将线夹等效为质量点,忽略了线夹对接触线疲劳寿命的影响。

同时,受电弓通过在接触线上高速滑动来完成受流,这将使得接触线在服役过程中不可避免地发生磨损。磨损使得接触线截面面积减小,抗弯截面系数减小,平均应力增大,因而在相同的弓网抬升力作用下将发生更显著的弯曲,这将加速接触线的疲劳失效。对此,Massat等^[10]报道了由磨损导致的线夹位置接触线发生严重疲劳失效的事故。然而,目前关于磨损对接触线疲劳寿命影响的研究还尚未开展。

收稿日期: 2024-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52472421)

作者简介: 黄杰,男,2000年生,江西抚州人,硕士研究生; 主要研究方向为弓网动力学、接触线疲劳与断裂; E-mail:2833252614@qq.com。

张继旺(通信作者),男,1983年生,河南洛阳人,博士研究生,研究员; 主要研究方向为高速列车材料和结构的疲劳与断裂、摩擦和磨损及材料和结构的表面强化处理工艺; E-mail:zhangjiwang@swjtu.cn。

引用格式: 黄杰,张家玮,关金发,等. 线夹和磨损深度对高速铁路接触线应力分布与疲劳寿命的影响[J]. 机械强度,2026,48(7): 12-22.

Huang Jie, Zhang Jiawei, Guan Jinfa, et al. Influence of clamp and wear depth on stress distribution and fatigue life of high-speed railway contact wires[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 12-22.



免费获取

因此,本文以线夹位置接触线为研究对象,基于受电弓-接触线耦合系统动力学仿真模型和含实体单元线夹与接触线的接触网混合模型,开展不含线夹、含线夹无磨损、含线夹有磨损这3种工况下接触线的应力分析和疲劳寿命预测,以探究线夹与磨损深度对接触线应力分布和疲劳寿命的影响。

1 受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型与弓-网受流质量分析

1.1 受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型建模

我国速度为250 km/h及以上的高速铁路的接触网大多采用弹链构形,其模型如图1(a)所示,主要由接触线、承力索、弹性吊索、吊弦、腕臂及各连接装置组成。本研究采用有限元法进行接触网建模,其中,

接触线、承力索、弹性吊索均采用具有一定抗弯刚度、张力、线密度的欧拉梁来模拟。采用非线性弹簧模拟吊弦仅能受拉的特性,将各连接线夹简化为质量点^[11-13]。接触网系统的运动方程^[14]可表示为

$$M_c \ddot{U}_c + C_c \dot{U}_c + K_c U_c = F_c \quad (1)$$

式中, $\ddot{U}_c$ 、 $\dot{U}_c$ 、 U_c 分别为接触网的全局加速度、速度和位移; M_c 、 C_c 、 K_c 分别为接触网的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; F_c 为接触网所受的总外力。考虑比例阻尼假设, C_c 可表示为

$$C_c = \alpha M_c + \beta K_c \quad (2)$$

式中, α 和 β 为与接触网相关的比例系数,可由现场测量获得。依据Duan等^[15]对中国高速铁路接触网的实测结果可知, $\alpha = 0.018\ 915$ 、 $\beta = 0.004\ 757$ 。

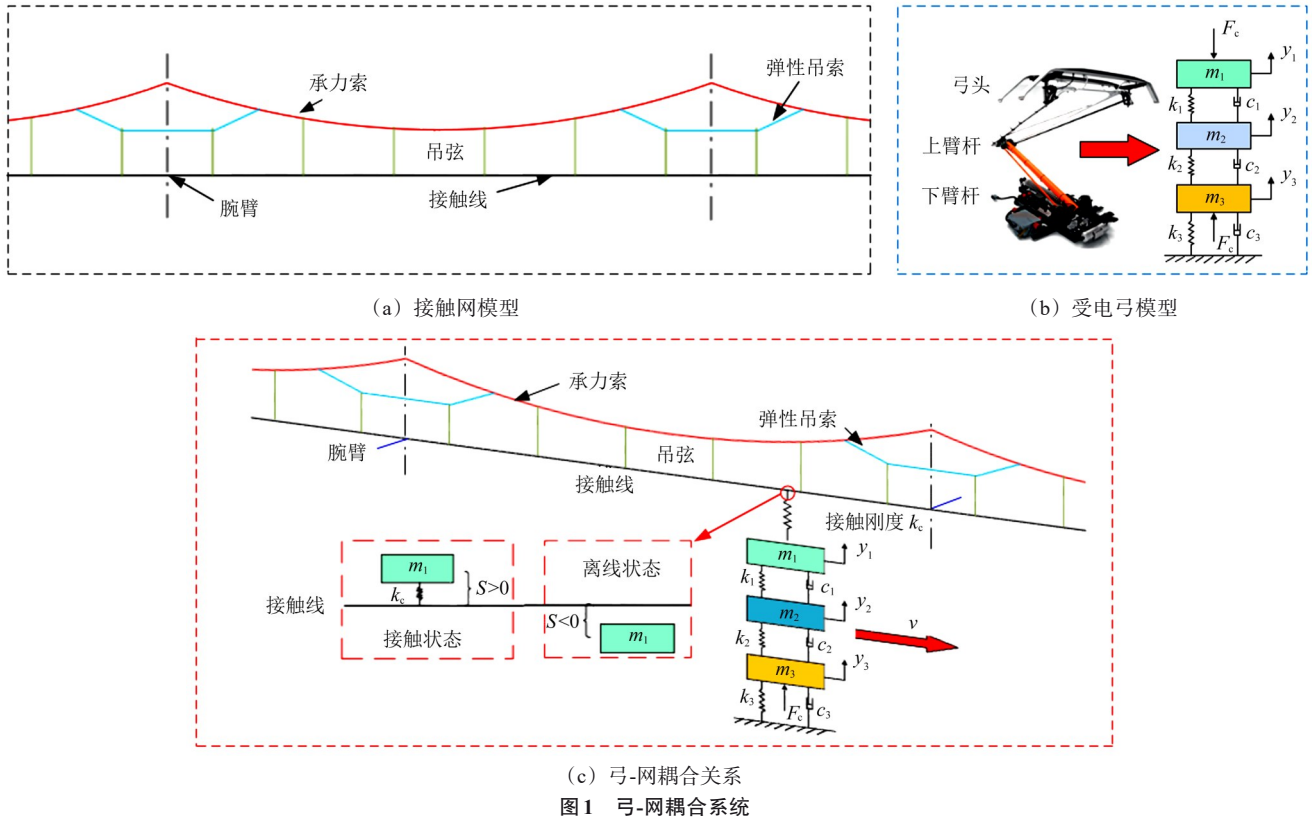


图1 弓-网耦合系统

受电弓采用质量-刚度-阻尼模型进行等效^[16],弓头(质量为 m_1 、垂直位移为 y_1)、上臂杆(质量为 m_2 、垂直位移为 y_2)和下臂杆(质量为 m_3 、垂直位移为 y_3)及它们之间相互连接的弹簧阻尼元件如图1(b)所示。忽略受电弓与接触线切向之间的摩擦,采用罚函数建立弓、网的接触关系[图1(c)],其相互作用表达式为

$$F_c = \begin{cases} k_c S, & S \geq 0 \\ 0, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, S 为接触线与受电弓在空间高度上位移的差值; k_c 为接触刚度,参考文献[17],取50 000 N/m。

在建立受电弓-接触网耦合动力学仿真标准模型

之后,参照文献[18],对仿真模型进行有效性验证。验证结果如图2所示。图2中,横坐标表示标准规定的参数指标,其含义详见标准EN 50318:2018,纵坐标为对应的参数值,黑色横线为标准给定的界限值,带有颜色的特殊符号为本文的仿真结果。由图2可知,仿真结果均在标准规定范围内,表明本研究中所采用的建模方法合理。

然后,建立10跨京沪高铁受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型。其中,接触网采用跨距为50 m、高度为1.6 m的弹链接触网;受电弓选用DSA380,单弓运行,速度为350 km/h。接触网的接触线、承力索、弹性

吊索参数如表 1^{[19]2444-2451}所示,吊弦密度为 0. 089 kg/m, 拉伸刚度、压缩刚度分别为 100 000、0 N/m,间距分别为 5、8、8、8、5 m;接触线、承力索的吊弦线夹质量均为 90 g。受电弓模型的具体参数如表 2^{[19]2444-2451}所示。

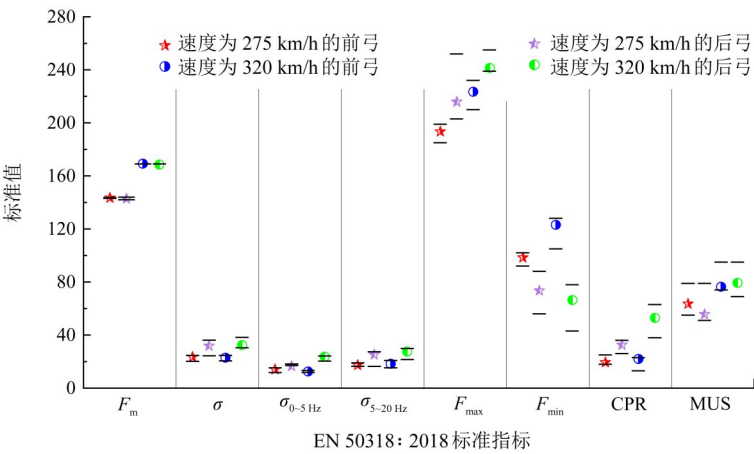


图2 EN 50318:2018标准模型的仿真结果与标准值的对比

Fig. 2 Comparison of the simulation results of the EN 50318:2018 standard model with the standard values

表 1 京沪高铁接触网的接触线、承力索、弹性吊索参数

Tab. 1 Parameters of contact wire, messenger wire and elastic dropper for Beijing-Shanghai high-speed railway catenary						
项目	线密度/(kg/m)	等效横截面积/mm ²	弹性模量/GPa	泊松比	张力/N	长度/m
接触线	1.350	150	120	0.33	31 500	—
承力索	1.065	120	120	0.33	20 000	—
弹性吊索	0.311	35	120	0.33	3 500	18

表 2 DSA380 受电弓参数

Tab. 2 Parameters of the DSA380 pantograph	
参数	值
弓头质量 m_1 /kg	7.12
上臂杆质量 m_2 /kg	6
下臂杆质量 m_3 /kg	5.8
弓头刚度 k_1 /(N/m)	9 430
上臂杆刚度 k_2 /(N/m)	14 100
下臂杆刚度 k_3 /(N/m)	0.1
弓头阻尼 c_1 /(N·s/m)	0
上臂杆阻尼 c_2 /(N·s/m)	0
下臂杆阻尼 c_3 /(N·s/m)	70

为进一步验证仿真模型的有效性和准确性,对建立受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型进行实际线路验证。本课题组前期研究中^{[20]260-285},对京沪高铁开展了接触网定位点抬升量试验,并获得了京沪高铁接触线服役的真实抬升量数据。具体试验过程为:首先,选择京沪高铁接触网某一锚段的第 12、13 跨之间的中间支柱对应的定位点,作为抬升量试验的研究对象;然后,采用高速相机捕提高清图像,采用图像处理方法识别定位点的特征,如图 3^{[20]260-285}所示;最后,对定位点的静态位置进行校准,高速相机的采集频率为 2 000 Hz,当受电弓以 350 km/h 的速度高速滑过时,记录该定位点的垂向抬升量,如图 4 所示。由图 4 可知,仿真获得的定位点抬升量与实际线路的测试曲线较接近,实测和仿真的最大定位点抬升量分别为 72. 7、75. 6 mm,两者的相对误差仅为 4. 7%。



图3 京沪高铁接触网定位点抬升试验

Fig. 3 Uplift test at registration points of the Beijing-Shanghai high-speed railway catenary

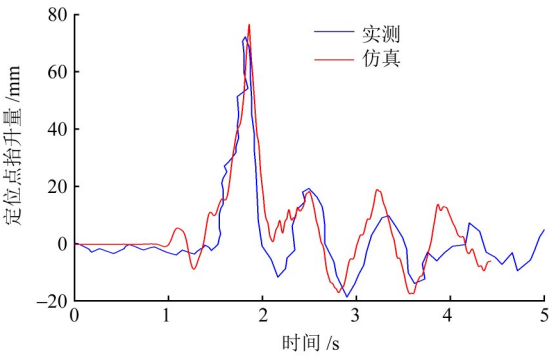


图4 定位点抬升量仿真与实测数据对比

Fig. 4 Comparison between simulation and measured data of registration point uplift

综上所述,本文基于EN 50318:2018标准验证了仿真模型建模方法的有效性,基于京沪高铁的定位点抬升试验,验证了仿真模型结果的准确性,为后续的应力分析提供了准确的位移响应输入条件。

1.2 弓-网受流质量分析

为进一步明确1跨接触线上服役环境最恶劣的线夹的位置,以便确定本文研究对象,以弓-网受流质量优劣为判据,引入移动平均值对弓-网接触力的时序数据进行处理^[21],从而获得移动弓-网接触力与移动接触力标准差,以描述接触线上不同位置受流质量的优劣。弓-网接触力移动平均值和移动弓-网接触力标准差的数学表达式分别为

$$\bar{F}_n = \frac{1}{2m+1} \sum_{n-m}^{n+m} F_k \quad (4)$$

$$F_{n, \text{std}} = \sqrt{\frac{1}{2m+1} \sum_{n-m}^{n+m} (F_k - \bar{F}_k)^2} \quad (5)$$

式中, $\bar{F}_n$ 为第 n 个采样点的弓-网接触力移动平均值; F_k 为第 k 个点的弓-网接触力; $\bar{F}_k$ 为 F_k 的平均值; m 为采样数据点数量的一半; $F_{n, \text{std}}$ 为第 n 个采样点的移动弓-网接触力标准差。

为避免端部固定对提取的结果产生影响,提取接触网中间4跨的弓-网接触力,如图5所示。图5中,数字1~6代表1跨接触网中吊弦的编号。由图5可知,弓-网接触力以跨距为周期,呈周期性分布,在各线夹位置出现了陡增、陡降现象,其中,第1号和第5号吊弦位置波动较为剧烈。图6所示为中间4跨的移动弓-网接触力标准差分布。由图6可知,在各线夹所在位置,移动弓-网接触力标准差显著增大,第1号和第5号吊弦的移动接触力标准差较大。弓-网受流质量分析结果表明,线夹会使弓-网受流质量恶化,其中,第1号吊弦线夹处受流质量最为恶劣。恶劣的弓-网受流质量将加剧接触线的磨损和疲劳失效。因此,选定第6跨第1号吊弦线夹位置的接触线为研究对象,并开展后续研究。

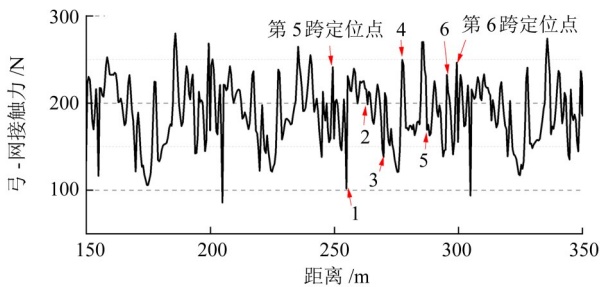


图5 中间4跨弓-网接触力分布

Fig. 5 Contact force distribution of pantograph-catenary in the middle four spans

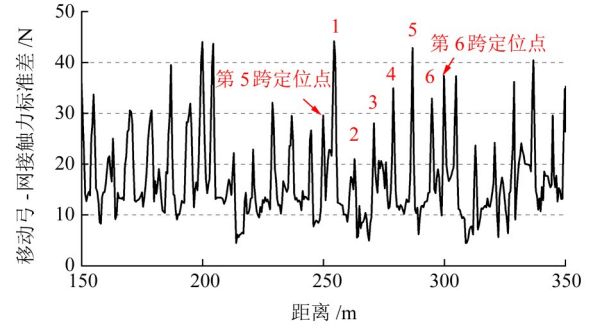


图6 中间4跨移动弓-网接触力标准差分布

Fig. 6 Standard deviation distribution of moving pantograph-catenary contact force in middle four spans

2 线夹位置接触线应力分析方法

尽管梁单元能反映接触线在服役过程中的力-位移响应,但无法准确且直观地展现接触线截面的应力分布及线夹与接触线之间的相互作用^[22]。相比之下,实体单元能反映更多细节。然而,对整个接触网采用实体单元进行建模,仿真将占用大量计算机内存,且计算时间过长。为提高计算效率,本研究重点关注线夹局部接触线,并建立实体单元模型,其余区域依然采用梁单元模型。以第6跨第1号吊弦线夹位置接触线为研究对象,使用1.2 m长的实体单元接触线模型替代接触网模型中原有的梁单元接触线。为便于有限元分析,对接触线截面进行简化,去除圆倒角和识别槽,并对截面的关键位置点进行定义,如图7所示。使用实体单元线夹模型替代质量点,线夹关键尺寸与实际线夹完全一致;对局部进行简化,但质量与实际线夹质量一致。忽略线夹与接触线之间的摩擦,两者之间采用绑定约束;实体单元与梁单元接触线之间及线夹与吊弦之间采用Kinematic耦合约束。建立的含局部实体单元的接触网混合模型,如图8所示。

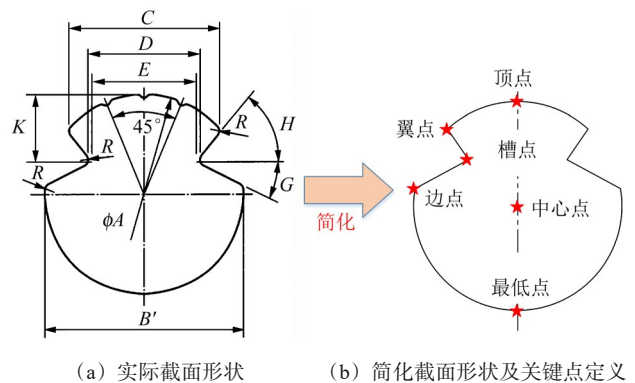


图7 接触线截面形状

Fig. 7 Cross-sectional shape of the contact wire

实体单元与梁单元接触线连接处的几何非线性导致接触网混合模型进行弓-网耦合动力学仿真时不收敛。为顺利获得接触线在服役过程中的应力响应,将从受电弓-接触网耦合模型动力学分析中获得的节

点在6个自由度上的位移响应导入接触网混合模型中,并进行静力学分析,图9所示为载荷转移示意图。将从受电弓-接触网耦合动力学仿真模型中获得的吊弦线夹位置 a 、 b 、 c 这3个点的位移响应,施加在接触网混合模型内对应位置的实体单元接触线上。 a 、 b 、 c 这3点两两之间的间隔为500 mm, b 点位于吊弦线夹中央。

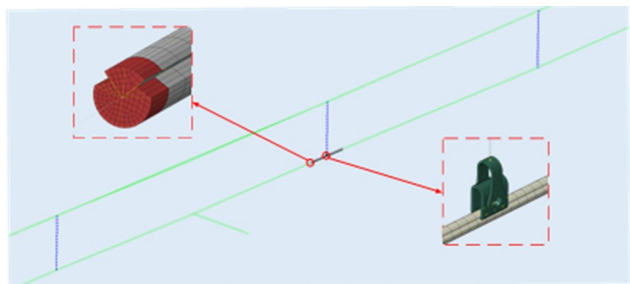


图8 接触线与线夹的局部实体模型

Fig. 8 Local solid model of the contact wire and clamp

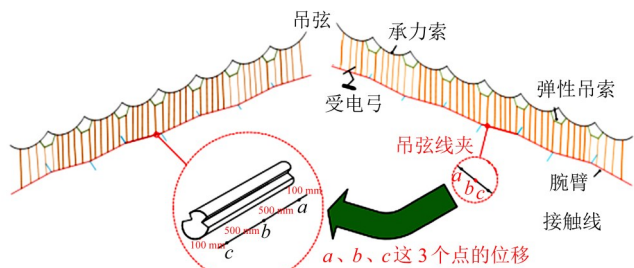


图9 载荷转移示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the load transfer

图10所示为本研究中获取接触线应力分布的分析流程。由图10可知,接触线应力分析的准确性不仅取决于受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型的位移响应精度,还取决于接触网混合模型的应力响应的精度。

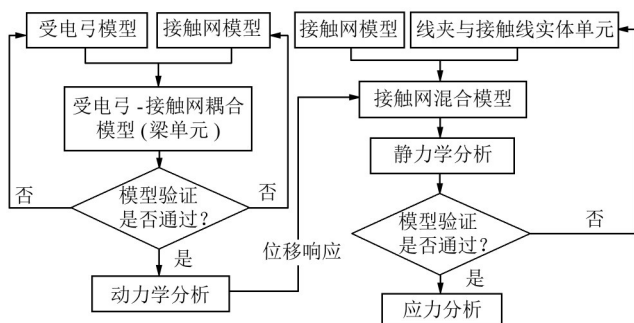


图10 应力分析流程

Fig. 10 Stress analysis procedure

将接触网混合模型的应力响应精度与由传统(梁单元)弓-网耦合模型中心点得到的应力时程进行对比验证。尽管传统弓-网耦合动力学仿真模型无法直接反映接触线截面的应力分布,但通过将接触线等效为具有刚度的梁单元,并结合其弯曲变化,仍可依据理论知识计算接触线的 von Mises 应力。尽管该应力值

存在一定误差,但其在接触线疲劳寿命预测中的有效性和可接受性已被广泛验证^{[5]25-36[6]34-39[7]1618-1623[8]20-26}。因此,当由所建的接触网混合模型得到的应力响应与传统弓-网耦合模型基于理论知识计算得到的应力结果的误差较小时,可认定接触网混合模型对实体接触线应力分布的计算具有有效性和准确性。图11对比了速度为350 km/h时,弓-网耦合模型与接触网混合模型在接触线中心部分的应力时程。由图11可知,2种模型的应力时程高度一致,应力峰值分别为215.3、215.9 MPa,差异极小,仅在弓过后出现应力波动差别,其主要原因为梁单元与实体单元接触线的截面形状不同。这证实了本研究中基于接触网混合模型获取的接触线应力分布这一方法的有效性与准确性。

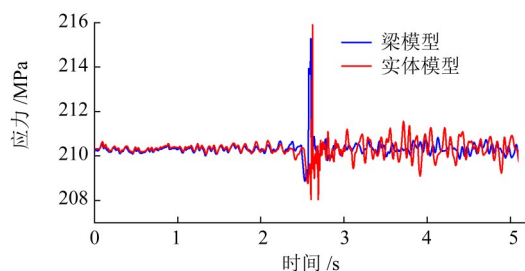


图11 2种模型的应力时程对比

Fig. 11 Comparison of stress time histories between two models

综上所述,本文利用由京沪高铁定位点抬升试验获取的抬升曲线,验证了所建立的弓-网耦合系统动力学仿真模型位移响应的准确性。同时,通过接触网混合模型与弓-网耦合模型的对比,验证了接触网混合模型的有效性。由此确保了在精准的位移输入条件和可靠的应力分析方法下,所获得的接触线的应力状态是准确的、有效的。

3 疲劳寿命预测方法

在获得接触线的应力分布后,采用以下程序估算接触线疲劳寿命:首先,通过雨流计数法将仿真获得的应力响应处理成离散循环,并计数;然后,使用 Goodman 方程将随机离散载荷谱修正为对称循环载荷,接触线的 S-N 曲线通过标准试样的高周疲劳试验获得;最后,根据 Minner 线性损伤累积理论进行疲劳寿命预测。

3.1 雨流计数法及 Goodman 方程

雨流计数法^[23]是一种将随机载荷谱离散并计数的双参数计数法。Sugahara 等^[24]的研究结果表明,雨流计数法在铜合金接触线的疲劳寿命预测中有较好的适用性。因此,本文同样采用雨流计数法对接触线载荷谱进行处理。

由于应力载荷谱通常不是对称循环,为了避免应力均值对疲劳寿命产生影响,采用 Goodman 方程^{[25]3-40}

将随机载荷修正为均值为 0 的对称循环载荷, 计算式为

$$S_i = \frac{S_{ai}}{(1 - S_{mi}/S_u)} \quad (6)$$

式中, S_i 为第 i 级应力循环的等效应力; S_{ai} 和 S_{mi} 分别为由雨流计数法统计的应力幅值与均值; S_u 为材料的抗拉强度。本研究中所用 CTMH150 接触线的抗拉强度为 560 MPa。

3.2 接触线高周疲劳试验

根据标准 GB/T 3075—2021^[26], 设计疲劳标准试样, 试样取自京沪铁路所用的 CTMH150 接触线, 形状及尺寸如图 12 所示, 化学成分如表 3 所示。使用 RUMUL TYPE 250 HFP 高频疲劳试验机进行高周疲劳试验, 应力比为 -1, 加载频率为 73 Hz, 环境温度为 25 °C, 当试样失效或加载循环数达到 10^7 时, 终止试验。

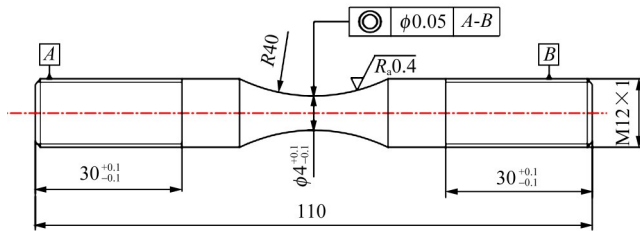


图 12 接触线标准试样的形状及尺寸

Fig. 12 Shape and dimensions of the contact wire standard sample

表 3 CTMH150 接触线化学成分

Tab. 3 Chemical composition of the CTMH150 contact wire

元素	Cu	Mg	P	其他
质量分数/%	余量	0.4~0.7	≤0.01	≤0.01

3.3 Minner 线性损伤累积理论

Minner 线性损伤累积理论^[27]可以定量评价不同载荷水平对疲劳寿命的贡献, 其表达式为

$$D = 1 / \left(\sum_{i=1}^{k'} \frac{n_i}{N_i} \right) \quad (7)$$

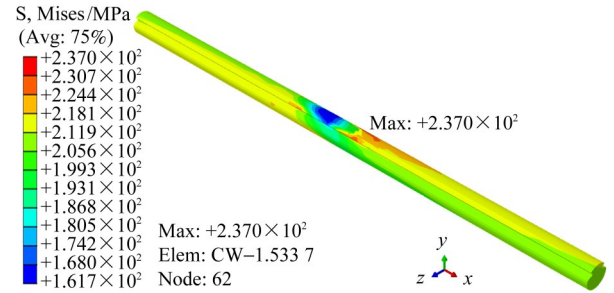
式中, D 为接触线在应力载荷谱作用下达到疲劳失效所需要的载荷谱块数, 即接触线的疲劳寿命; k' 为接触线单元应力水平级数; n_i 为接触线在应力载荷作用下的工作循环次数; N_i 为在接触线的 $S-N$ 曲线上对应的破坏循环次数。

4 结果与讨论

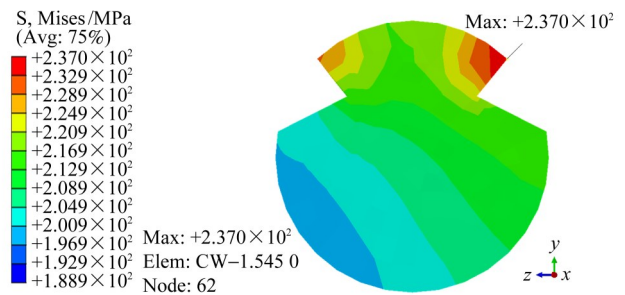
4.1 线夹位置处接触线应力分布

图 13 所示为静止状态下线夹位置处接触线的应力分布。由图 13(a)可知, 接触线在静止状态下, 线夹两端边缘出现了应力集中, 应力最大值为 237 MPa, 线夹中部位置应力最小, 为 161.7 MPa, 远离线夹位置的接触线应力分布较为均匀, 数值上接近张力作用下产生的预应力 (210 MPa)。由接触线截面的应力分布可

知, 应力集中的位置位于接触线的翼点, 即线夹夹持部位, 如图 13(b)所示。由图 14(a)可知, 线夹位置接触线在弓过瞬间的应力集中发生在线夹前部边缘。在抬升力的作用下, 接触线向上弯曲, 并在顶部产生应力集中, 如图 14(b)所示。应力最大值为 319.2 MPa, 相比于静止状态, 最大应力值增大了 34.7%。



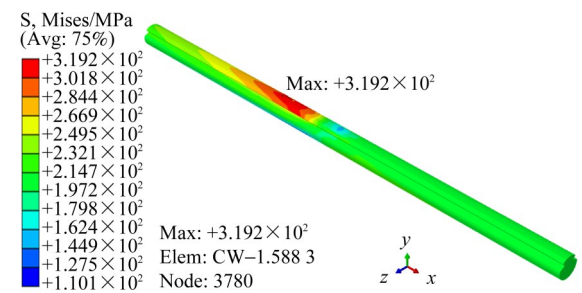
(a) 线夹附近应力分布



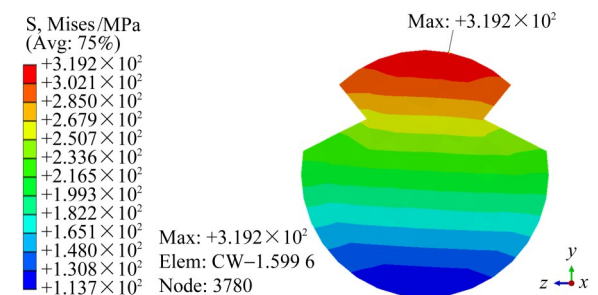
(b) 应力最大值点截面应力分布

图 13 静止状态下线夹位置接触线的应力分布

Fig. 13 Stress distribution of the contact wire at the clamp position in the stationary state



(a) 线夹附近应力分布



(b) 应力最大值点截面应力分布

图 14 弓过状态下线夹位置接触线应力分布

Fig. 14 Stress distribution of the contact wire at the clamp position under the pantograph passing state

同时,为了对比有、无线夹对接触线应力响应的影响,提取了受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型中吊弦点的应力时程,与接触网混合模型中实体接触线在弓过瞬间应力最大值点的应力时程进行比较,结果如图15所示。由图15可知,含线夹的接触线在弓过瞬间的应力时程相比于不含线夹的接触线,无论是应力最大值,还是应力幅值,都显著增大。综上所述,线夹会显著改变接触线上的应力分布,并产生应力集中,当受电弓经过,应力集中现象会更加显著。

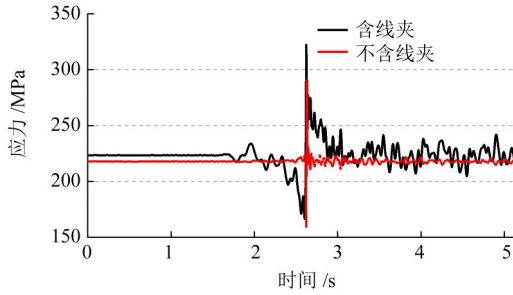


图15 有、无线夹的接触线上最大应力点的应力时程对比

Fig. 15 Comparison of stress time history at the maximum stress point of contact wire with and without wire clamps

4.2 不同磨损深度下线夹位置处接触线的应力分布

参照TB/T 2809—2017^[28]中的接触线形状及尺寸,建立磨损深度与磨损率之间的换算关系。图16(a)为接触线磨损前、后的截面形状。存在以下关系:

$$h = r'(1 - \cos \theta) \quad (8)$$

$$\theta = \arcsin(w/r') \quad (9)$$

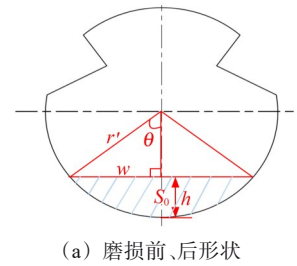
$$S_0 = (r')^2 \theta - wr \cos \theta \quad (10)$$

$$\varphi = S_0/S \quad (11)$$

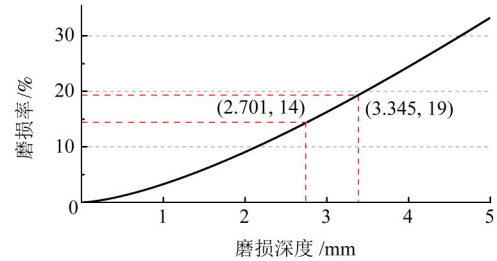
式中, h 为接触线的磨损深度; r' 为接触线截面下部圆弧的半径; θ 为 r' 与竖直方向的夹角; w 为磨损后底部宽度的一半; S_0 为接触线的磨损面积; S 为标称横截面积; φ 为接触线截面的磨损率。京沪高铁所用接触线的型号为CTMH150,故将 S 取为 151 mm^2 。

联立式(8)~式(11),可建立 φ 与 h 之间的函数关

系,如图16(b)所示。随着磨损深度的增加,磨损率增大,两者为非线性正相关的关系。TG/GD 124—2015^[29]中规定,速度为 350 km/h 工况下,CTMH150接触线的最大允许磨损率的警示值与界限值分别为14%与19%,对应的磨损深度分别为 2.701 mm 与 3.345 mm 。据此,建立磨损率为14%及磨损率为19%的接触线实体单元模型,如图17所示。图18、图19所示分别为磨损率14%、19%的接触线在线夹位置处的应力分布。由图18、图19可知,受电弓经过时,线夹前段接触线存在应力集中,截面应力从接触线顶部到底部逐渐递减,同无磨损接触线上的应力分布一致。以上结果表明,磨损深度的增大并不会改变接触线的应力分布规律。表4所示为不同磨损率下线夹位置处接触线在弓过瞬间的应力最大值。由表4可知,线夹位置处接触线在弓过瞬间的最大应力值随着磨损率的增大而增大;且磨损深度越大,应力最大值的增幅越明显。当磨损率达到19%时,线夹位置处接触线的最大应力值为 456.6 MPa 。



(a) 磨损前、后形状



(b) 磨损深度与磨损率之间的关系

图16 接触线磨损

Fig. 16 Contact wire wear

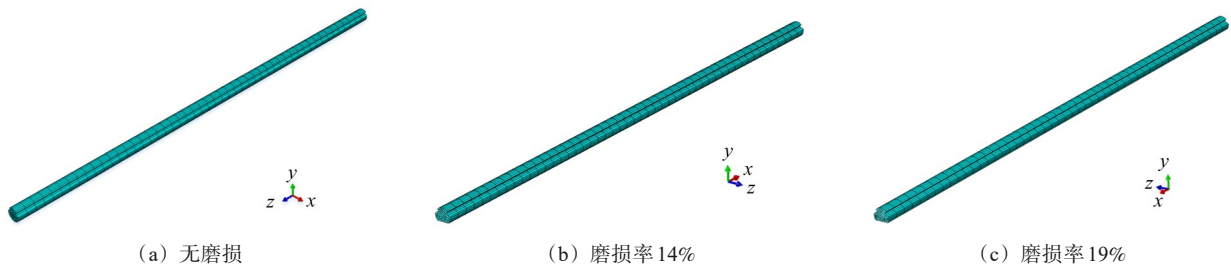


图17 接触线实体模型及网格划分

Fig. 17 Solid model and meshing of the contact wire

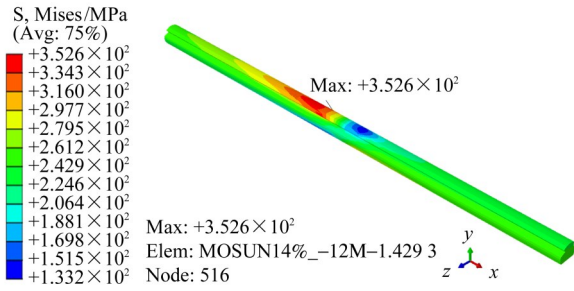
4.3 疲劳寿命预测

CTMH150接触线标准试样的疲劳试验结果如图20所示,基于最小二乘法,采用Basquin公式^[25]¹⁸对试验数据进行拟合,表达式为

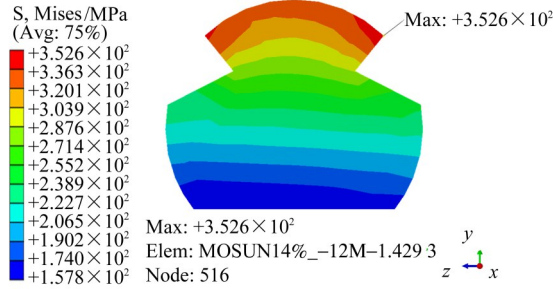
$$\sigma^{m'} N = c' \quad (12)$$

式中, σ 、 N 分别为加载应力和疲劳寿命; m' 、 c' 为与材料参数相关的常量。

考虑疲劳寿命的分散性,为确保疲劳预测结果满

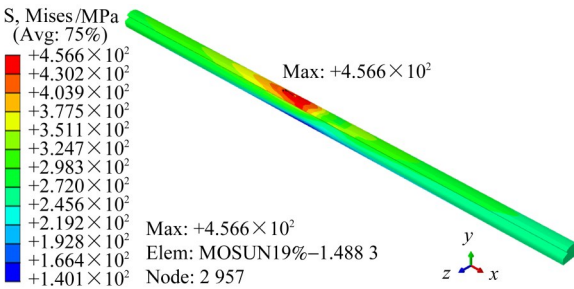


(a) 线夹附近应力分布

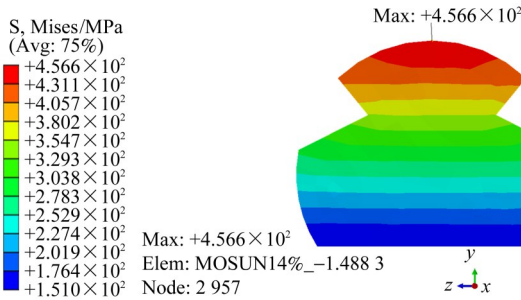


(b) 应力最大值点所在截面的应力分布

图 18 磨损率为 14% 时, 线夹位置处接触线在弓过瞬间的应力分布
Fig. 18 Stress distribution of contact wire at the clamp position at the moment of pantograph passage when the wear rate is 14%



(a) 线夹附近应力分布



(b) 应力最大值点所在截面的应力分布

图 19 磨损率为 19% 时, 线夹位置处接触线在弓过瞬间的应力分布
Fig. 19 Stress distribution of contact wire at the clamp position at the moment of pantograph passage when the wear rate is 19%

表 4 不同磨损率下线夹位置处接触线在弓过瞬间的应力最大值
Tab. 4 Maximum stress of contact wire at clamp position under pantograph passage moment with different wear rates

磨损率/%	0	14	19
最大应力/MPa	319.2	352.6	456.6

足工程需要,采用数理统计的方法对疲劳试验数据进行处理。标准 GB/T 24176—2009^[30]规定,总样本在置信度为 $1 - \alpha$ 、自由度为 ν 、失效概率为 P_f 的情况下, $S-N$ 曲线的下极限的估计式为

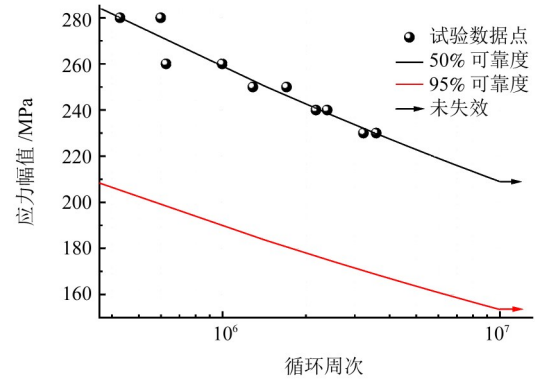


图 20 CTMH150 接触线的试验数据及拟合曲线

Fig. 20 Test data and fitting curve of the CTMH150 contact wire

$$y_r(P_f, 1 - \alpha, \nu) = A + Bx_r -$$

$$k(P_f, 1 - \alpha, \nu) \rho \sqrt{1 + \frac{1}{l} + \frac{(x_r - \bar{x})^2}{\sum_{r=1}^l (x_r - \bar{x})^2}} \quad (13)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^l [y_r - (A + Bx_r)]^2}{l - 2}} \quad (14)$$

式中, x_r, y_r 分别为第 r 个试件的对数疲劳寿命和对数加载应力; $\bar{x}$ 为 x_r 的平均值; A, B 为最小二乘法拟合参数; $k(P_f, 1 - \alpha, \nu)$ 为正态分布的单边误差限, 可以从 GB/T 24176—2009 中查表获得; l 为试件总个数; ρ 为对数疲劳寿命的标准偏差。

同时, 基于疲劳试验结果评估实际接触线的疲劳寿命, 需要对 $P-S-N$ 曲线引入尺寸修正系数和表面质量修正系数, 即

$$S_N = S_a C_D C_S \quad (15)$$

式中, S_N 和 S_a 分别为修正后的应力幅值和初始应力幅值; C_D 为尺寸修正系数; C_S 为表面质量修正系数, C_D, C_S 的值分别为 0.966 和 0.81^[31]。至此, 在综合考虑尺寸因素和表面质量的影响下, 获得置信度和存活概率为 95% 的接触线的 $S-N$ 曲线的表达式为

$$S' = 10^{2.829 23 - 0.091 87 \log_{10} N} \quad (16)$$

式中, S' 为疲劳应力; N 为疲劳破坏循环次数。

提取不含线夹的受电弓-接触线耦合系统动力学仿真模型中第 6 跨第 1 号吊弦点的应力时程, 以及含实体线夹的接触网混合模型中对应位置无磨损、磨损率 14% 与磨损率 19% 的接触线上应力最大值点的应力时程, 采用雨流计数法将其处理为离散载荷循环, 并进行计数, 如图 21 所示。采用 Goodman 方程将离散载荷循环修正为均值为 0 的应力循环, 再根据 $S-N$ 曲线和 Miner 线性损伤累积理论求得接触线的疲劳寿命, 预测结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 在不考虑线夹影响的情况下, 在第 6 跨第 1 号吊弦处预测的接触线的疲劳寿命为

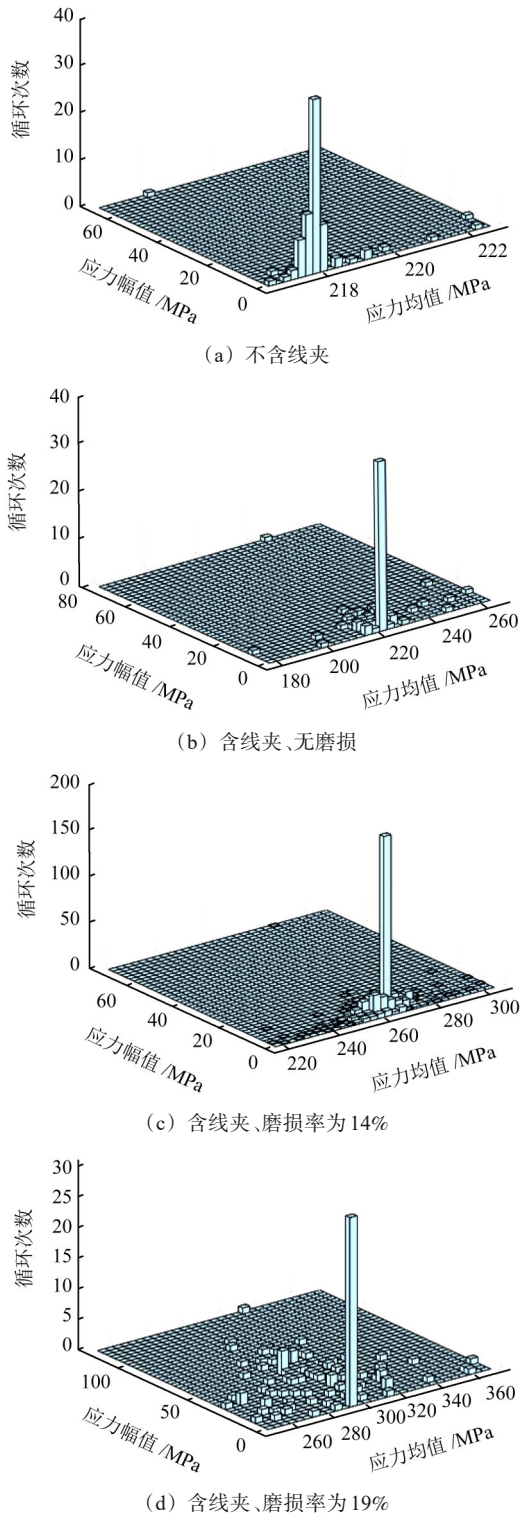


图 21 第 6 跨第 1 号吊弦处接触线应力时程雨流计数

Fig. 21 Rainflow counting of the contact wire stress time history at the first dropper of the sixth span

表 5 不同工况下第 6 跨第 1 号吊弦处接触线的疲劳寿命预测结果

Tab. 5 Prediction results of the contact wire fatigue life at the first dropper of the sixth span under different working conditions

工况	不含线夹	含线夹、 无磨损	含线夹、磨损 率为 14%	含线夹、磨损 率为 19%
疲劳寿命 (弓架次)	3.448×10^8	3.094×10^7	1.660×10^7	6.605×10^3

3.448×10^8 弓架次, 相比于考虑线夹影响情况下预测的疲劳寿命 (3.094×10^7), 弓架次数增大了近 10 倍。这表明线夹会显著缩短接触线的疲劳寿命, 忽略线夹的影响将导致接触线疲劳寿命的预测结果偏大。同时, 对比无磨损、磨损率为 14% 与磨损率为 19% 的接触线的疲劳寿命可知, 随着磨损率的增大, 接触线的疲劳寿命显著缩短。当磨损率为 19% 时, 接触线的疲劳寿命仅为 6.605×10^3 弓架次。因此, 当接触线磨损到一定限度时, 必须及时更换接触线, 否则可能造成严重的事故。值得一提的是, 当接触线磨损率在 0~14% 时, 磨耗深度为 2.701 mm 的接触线, 疲劳寿命缩短 1.434×10^7 弓架次; 当磨损率在 14%~19% 时, 仅磨耗掉深度为 0.644 mm 的接触线, 疲劳寿命就缩短了 1.6593×10^7 弓架次。以上结果表明, 随着磨损深度的增大, 接触线疲劳失效加速。通过对京沪高铁 CTMH150 接触线磨耗性能进行实测与试验可知, 随着弓架次的增多, 接触线的磨耗速度趋于稳定^[32]。这表明, 在接触线服役后期, 当疲劳失效速率超过磨损失效速率时, 疲劳失效可能代替磨损失效, 成为接触线失效的主要形式, 如图 22 所示。因此, 笔者将在后续的研究中通过试验验证疲劳寿命预测的准确性, 并进一步构建准确的描述接触线疲劳寿命与磨损深度之间的关系的数学模型, 明确磨损寿命与疲劳寿命的拐点, 以便未来现场指导接触线的检修、更换。

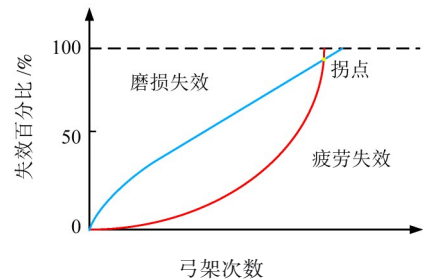


图 22 接触线磨损失效与疲劳失效竞争关系示意图

Fig. 22 Schematic diagram of the competitive relation between the wear failure and fatigue failure of the contact wire

5 结论

基于受电弓-接触网耦合系统动力学仿真模型和接触网混合模型, 开展线夹和磨损深度对接触线应力分布和疲劳寿命的影响的研究, 得到的主要结论如下:

1) 接触网混合模型能够准确且直观地呈现接触线在线夹位置的应力分布, 相比于梁单元接触网模型, 该模型能够捕捉到更加详细的应力时程。

2) 由于线夹的作用, 接触线截面上燕尾槽上部顶点位置存在应力集中, 顺线路方向呈现出线夹两侧应力高、中间应力低的应力分布。磨损深度的增大并不

会改变线夹位置处接触线的应力分布规律,但应力最大值会随着磨损深度的增大而增大。

3)线夹会显著缩短接触线的疲劳寿命,忽视线夹的存在将导致预测的接触线的疲劳寿命偏大。

4)接触线的疲劳寿命会随着磨损深度的增大而缩短,且磨损深度越大,疲劳寿命缩短越快。

参考文献(References)

- [1] 周宁. 350 km/h及以上弓网动态行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2013:1-4.
Zhou Ning. Investigation on dynamic behavior of pantograph and catenary system for the running speed of 350 km/h or above[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013: 1-4. (In Chinese)
- [2] Yamashita C, Sugahara A. Influence of mean stress on contact wire fatigue[J]. Quarterly Report of RTRI, 2006, 47(1): 46-51.
- [3] Sugahara A. Preventing fatigue breakage of contact wires[J]. Railway Technology Avalanche, 2008, 24: 140.
- [4] Song Y, Rønquist A, Nævik P. Assessment of the high-frequency response in railway pantograph-catenary interaction based on numerical simulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10596-10605.
- [5] 陈花丽. 高速铁路接触网的疲劳寿命分析[D]. 天津:天津大学, 2012:25-36.
Chen Huali. The fatigue life analysis of high-speed railway contact system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 25-36. (In Chinese)
- [6] 毕继红, 陈花丽, 任洪鹏. 基于雨流计数法的接触线疲劳寿命分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 34-39.
Bi Jihong, Chen Huali, Ren Hongpeng. Analysis on fatigue life of contact wire based on rain-flow counting method[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 34-39. (In Chinese)
- [7] 刘方林, 张静, 杨红梅, 等. 高速接触线动态疲劳可靠性研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(10): 1618-1623.
Liu Fanglin, Zhang Jing, Yang Hongmei, et al. Investigation on dynamic fatigue reliability of high-speed contact wires [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(10): 1618-1623. (In Chinese)
- [8] 宋洋, 刘志刚, 汪宏睿, 等. 随机风场下高速铁路接触线风振疲劳分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 20-26.
Song Yang, Liu Zhigang, Wang Hongrui, et al. Analysis on influence of stochastic wind field on wind vibration fatigue of high-speed railway catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 20-26. (In Chinese)
- [9] Xu Z, Song Y, Liu Z G. Stress analysis and fatigue life prediction of contact wire located at steady arms in high-speed railway catenary system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3144747.
- [10] Massat J P, Tajan T M L N, Maitournam H, et al. Fatigue analysis of catenary contact wires for high speed trains[C]//Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research. Lille: Société Nationale des Chemins de fer Français, 2011: 1-11.
- [11] 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 Yang, Liu Zhigang, Wang Hongrui, 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. (In Chinese)
- [12] 阮杰, 颜伏伍, 李红梅. 电气化高速铁路接触网静态模型的建立[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 20-25.
Ruan Jie, Yan Fuwu, Li Hongmei. Static modeling of overhead contact system of high-speed electrified railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(8): 20-25. (In Chinese)
- [13] 吴天行. 接触网的有限元计算与分析[J]. 铁道学报, 1996, 18(3): 44-49.
Wu Tianxing. Analysis and calculation of catenary by FEM[J]. Journal of the China Railway Society, 1996, 18(3): 44-49. (In Chinese)
- [14] 梅桂明, 张卫华, 刘红娇. 不同结构类型接触网动态特性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 27-31.
Mei Guiming, Zhang Weihua, Liu Hongjiao. Dynamic performances of different structural catenary[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 27-31. (In Chinese)
- [15] Duan F C, Liu Z G, Zhai D H, et al. A Siamese network-based non-contact measurement method for railway catenary uplift trained in a free vibration test[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(14): 3984.
- [16] 卢琪. 受电弓参数对弓网受流质量的影响分析[J]. 电工技术, 2022(15): 101-105.
Lu Qi. Influence of pantograph parameters on pantograph-catenary current collection quality[J]. Electric Engineering, 2022(15): 101-105. (In Chinese)
- [17] BS EN 50318: 2002 Railway applications-current collection system—validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line[S].
- [18] BS EN 50318: 2018 Railway applications-current collection system—validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line[S].
- [19] 关金发, 吴积钦. 受电弓与接触网动态仿真模型建立及其确认[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2444-2451.
Guan Jinfa, Wu Jiqin. Building and confirmation for dynamic simulation model of pantograph and catenary[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2444-2451. (In Chinese)
- [20] Su K X, Zhang J W, Zhang J W, et al. Optimisation of current collection quality of high-speed pantograph-catenary system using the combination of artificial neural network and genetic algorithm[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(1): 260-285.
- [21] 张宗芳. 城市轨道交通弓网受流特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 29-30.
Zhang Zongfang. Analysis of pantograph-catenary system current collection of urban railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 29-30. (In Chinese)
- [22] Bianchi J P, Balmès E, Nguyen-Tajan M L. Dynamic stress prediction in catenary wires for fatigue analysis[J]. International Association for Vehicle System Dynamics, 2015, 2015: 1-10.
- [23] Khosrovaneh A K, Dowling N E. Fatigue loading history reconstruction based on the rainflow technique[J]. International Journal of Fatigue, 1990, 12(2): 99-106.
- [24] Sugahara A, Yamashita C, Usuki T. Applicability of rain flow

- method to fatigue life span estimation of overhead contact wire[J]. Quarterly Report of RTRI, 2010, 51(4): 176-181.
- [25] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 3-40.
- Chen Chuanyao. Fatigue and fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 3-40. (In Chinese)
- [26] GB/T 3075—2021 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法[S].
- GB/T 3075—2021 Metallic materials—fatigue testing—axial force-controlled method[S]. (In Chinese)
- [27] Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [28] TB/T 2809—2017 电气化铁路用铜及铜合金接触线[S].
- TB/T 2809—2017 Copper and copper alloy contact wires for electric railway[S]. (In Chinese)
- [29] TG/GD 124—2015 高速铁路接触网运行维修规则[S].
- TG/GD 124—2015 Rules for operation and maintenance of overhead contact system of high-speed railway[S]. (In Chinese)
- [30] GB/T 24176—2009 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法[S].
- GB/T 24176—2009 Metallic materials—fatigue testing—statistical planning and analysis of data[S]. (In Chinese)
- [31] Guo Z, Kim Y S, Hong S W, et al. Fatigue life estimation of cold drawn contact wire[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(11): 2291-2299.
- [32] 杨广英, 徐超, 张海波, 等. 京沪高铁CTMH150接触线磨损性能试验和分析[J]. 铁道技术监督, 2015, 43(5): 17-19.
- Yang Guangying, Xu Chao, Zhang Haibo, et al. Test and analysis of wear performance of CTMH150 contact wire on Beijing-Shanghai high-speed railway[J]. Railway Quality Control, 2015, 43(5): 17-19. (In Chinese)

Influence of clamp and wear depth on stress distribution and fatigue life of high-speed railway contact wires

HUANG Jie¹ ZHANG Jiawei² GUAN Jinfa² ZHANG Jiwang¹ SU Kaixin¹ XU Kejia²

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

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

Abstract: [Objective] High-speed railway contact wires are exposed to the risk of fatigue failure during service. Deterioration of current quality at the clamp position causes severe wear of the contact wire, making this area a high-incidence region for fatigue failure. It is of important engineering significance to investigate the effects of clamps and wear depth on the stress distribution and fatigue life of contact wires. [Methods] Firstly, taking the contact wire at the clamp position as the research object, a dynamic simulation model of the pantograph-catenary coupling system and a hybrid catenary model with solid elements for clamps and contact wires were established. Secondly, stress analysis was carried out on the contact wire without clamps and the clamped contact wires with different wear rates (0%, 14%, 19%). Finally, high-cycle fatigue tests of contact wire materials within 10^7 cycles were conducted, and fatigue life prediction was performed based on the stress analysis results. [Results] The results show that the proposed hybrid catenary model can accurately and intuitively present the stress distribution of the contact wire at the clamp position. Compared with the beam-element catenary model, this model can capture more detailed stress time history. Obvious stress concentration occurs on the contact wire at both ends of the clamp, and the stress concentration becomes more significant with the increase of wear depth. The existence of clamps remarkably shortens the fatigue life of the contact wires, and ignoring the influence of clamps will lead to an overestimated fatigue life. The fatigue life of the contact wire shortens with the increase of wear depth, and the greater the wear depth, the faster the life shortening of the contact wire.

Key words: High-speed railway; Contact wire; Clamp; Wear; Stress distribution; Fatigue life

Corresponding author: ZHANG Jiwang, E-mail: zhangjiwang@swjtu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (52472421)

Received: 2024-10-31

(编辑: 刘星泽)