ⓒ 应用数学和力学编委会, ISSN 1000-0887

http://www.applmathmech.cn

高速铁路接触网定位线夹的动力学分析*

张海波[1]，　赵颖昕[1]，　赵　蒙[2]，
赵清媛[1]，　余　颢[3]，　刘　磊[4]

（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 标准计量研究所，北京 100000；
2. 南京工业大学 土木工程学院，南京 211816；
3. 中国铁路西安局集团有限公司，西安 710000；
4. 中国铁路兰州局集团有限公司，兰州 730000）

摘要： 针对高速铁路接触网定位线夹在动态载荷下的力学行为，基于非线性有限元方法构建了包含定位器销钉、主夹板、副夹板及 U 型销钉的三维多体动力学模型.采用混合网格划分技术，结合分阶段加载策略，模拟了周期性振动、实际振动以及冲击抬升三种典型工况.研究结果表明：水平拉力与动态载荷的耦合作用显著影响定位线夹的应力分布与变形模式.低拉力工况下，U 型销钉因剪切作用产生明显变形，接触界面滑移与碰撞导致局部应力集中；高拉力工况下，夹板间摩擦约束增强抑制相对滑动，但主夹板侧面及销钉根部呈现持续应力集中.动态载荷通过接触界面能量传递主导应力场时空演化，传统静态设计准则难以适应高速动态环境.基于仿真结果，提出优化夹持面的几何参数以降低应力梯度，并建议开发弹性约束结构以改善动态响应特性.研究为定位线夹结构设计与可靠性评估提供了理论依据，对提升接触网系统服役性能具有工程指导意义.

关　键　词： 接触网；　定位线夹；　动力学分析；　应力分布

中图分类号： U225.4　　**文献标志码：** A　　DOI：10.21656/1000-0887.460056

Dynamics Analysis of Catenary Positioning Wire Clips for High-Speed Railway

Zhang Haibo[1]，　Zhao Yingxin[1]，　Zhao Meng[2]，
Zhao Qingyuan[1]，　Yu Hao[3]，　Liu Lei[4]

（1. *Standards & Metrology Research Institute*，
China Academy of Railway Sciences Corporation Limited，*Beijing* 100000，*P.R. China*；
2. *School of Civil Engineering*，*Nanjing Tech University*，*Nanjing* 211816，*P.R. China*；
3. *China Railway Xi'an Bureau Group Co.*，*Ltd.*，*Xi'an* 710000，*P.R. China*；
4. *China Railway Lanzhou Bureau Group Co.*，*Ltd.*，*Lanzhou* 730000，*P.R. China*）

Abstract: The dynamic mechanical behavior of high-speed railway catenary positioning wire clips was investigated by the nonlinear finite element analysis, and a 3D multi-body dynamic model comprising positioning dowels, main clips, auxiliary clips, and U-bolts was established. The hybrid meshing technique with the step load-

* **收稿日期：** 2025-03-24；**修订日期：** 2025-07-31
基金项目： 中国铁道科学研究院基金项目(2024YJ288)；中国国家铁路集团有限公司青年科研专项(Q2024G019)
作者简介： 张海波(1980—)，男，正高级工程师，硕士(E-mail：zhbjcw@126.com)；
赵颖昕(1989—)，男，高级工程师，博士(通信作者. E-mail：yxzhao15801042226@163.com).
引用格式： 张海波，赵颖昕，赵蒙，赵清媛，余颢，刘磊. 高速铁路接触网定位线夹的动力学分析[J]. 应用数学和力学，2026，**47**(10)：1254-1265.

ing strategy was used to effectively simulate the cyclic vibration, the actual vibration, and the impact lift conditions. The results demonstrate that, the horizontal tension-dynamic load coupling markedly affects stress distributions and deformation characteristics, where low tension conditions induce significant U-bolt shear deformation accompanied by stress concentration from interface sliding and impact, while high tension conditions enhance frictional constraints between clips to suppress relative displacement yet cause sustained stress concentration at the main clip side surface and the bolt root. Dynamic loads govern spatiotemporal stress evolution through interfacial energy transfer, revealing limitations of conventional static design criteria. The geometric optimization of clamping surfaces was proposed to mitigate stress gradients, with elastic constraint mechanisms recommended to improve dynamic response performance. This research establishes a theoretical foundation for structural design and reliability evaluation of catenary positioning wire clips, providing practical solutions for improving catenary system durability under high-speed operations.

Key words: catenary; positioning wire clip; dynamics analysis; stress distribution

0　引　　言

高速铁路作为现代轨道交通体系的核心载体[1-2],其安全性、可靠性与运营效率直接影响区域经济发展与社会运行秩序[3-6].截至 2023 年底,中国高速铁路运营里程已突破 4.5 万 km,最高运营速度达 350 km/h,对接触网系统的动态稳定性提出了前所未有的挑战.接触网作为高速铁路牵引供电系统的核心组成部分,其功能是通过受电弓与接触线的持续滑动接触实现电能传输[7-10].定位线夹作为接触网悬挂装置中的关键承力部件[11-13],承担着固定接触线空间位置、调控拉出值及平衡动态载荷的重要任务.其力学性能的优劣直接决定了接触线几何参数的稳定性,进而影响弓网受流质量与列车运行安全.

早期的定位线夹[11-15]设计多基于静态载荷假设,材料以普通碳钢或铸铁为主,结构形式较为单一.随着列车速度从 200 km/h 提升至 350 km/h,接触网系统面临的载荷、机械振动及弓网冲击载荷呈现非线性增长特征.研究表明,当列车速度超过 300 km/h 时,接触线动态抬升量可达 120 mm 以上,定位线夹承受的垂直振动加速度峰值超过 50 m/s^2.在此工况下,传统定位线夹暴露出应力集中[16-18]显著、疲劳寿命[19-22]不足等问题,导致螺栓松动、销钉剪切失效等故障频发,严重威胁接触网服役可靠性.为此,国内外学者从材料优化、结构创新及仿真方法三个维度开展了系统性研究.

在材料领域,高强度铝合金与铜基复合材料的应用显著提升了定位线夹的比强度与耐腐蚀性.例如:Al-$Si_7Mg_{0.6}$合金通过时效强化处理可将屈服强度提高至 320 MPa,同时保持优异的塑性(延伸率≥10%);Cu-Ni_2Si 铜合金则通过固溶强化与冷加工工艺,实现抗拉强度 650 MPa 与导电率 80% IACS 的协同优化.在结构设计方面,多体动力学理论推动了定位线夹从刚性连接向弹性约束的转变,例如采用非对称夹持面设计以降低接触应力梯度,或引入阻尼元件抑制高频振动传递.在分析方法层面,有限元仿真与多物理场耦合技术的进步,使得定位线夹在复杂载荷下的应力-应变响应预测精度大幅提升.刘金增等[23]通过建立接触网棘轮装置的精细化有限元模型,揭示了腕臂结构在风振载荷下的应力集中规律;李韬团队[24]采用预紧力单元与螺纹接触算法,首次量化了螺栓预紧力矩对定位线夹组合体强度的影响机制.殷荣幸等[25]对失效铜合金定位线夹的断口分析表明,80%的断裂事故源于销钉剪切区的微动磨损与疲劳裂纹扩展;孙增田团队[26]进一步指出,加工残余应力与外部动态应力的叠加可能使局部应力强度因子超过材料的应力腐蚀阈值.这些现象凸显了传统准静态分析方法的局限性,亟须从动力学角度揭示定位线夹的失效机理.

然而,既有研究多聚焦于定位线夹的静强度校核和疲劳寿命研究,对其在动态载荷下的瞬态力学行为缺乏系统性分析.在实际运营中,定位线夹需同时承受水平拉力和垂向振动的复合作用,导致 U 型销钉与夹板间产生复杂的摩擦-碰撞耦合效应.基于非线性有限元方法,本文建立了高速铁路接触网定位线夹的多体动力学模型,重点研究了水平拉力与垂向动态荷载耦合作用下,定位线夹的应力演化规律与结构响应特性.通过对比周期性振动、实际线路振动及冲击抬升三种典型工况的仿真结果,揭示了 U 型销钉剪切变形、夹板相对滑移与应力集中区的动态关联机制.研究成果可为优化定位线夹拉力参数和开发新型抗振结构提供理论支撑,对提升高速铁路接触网系统的服役可靠性与经济性具有重要意义.

1 定位线夹有限元模型

1.1 几何模型和材料属性

在高速铁路接触网系统中,定位线夹是确保接触线空间定位精度的关键组件,其结构设计直接影响弓网动态受流性能.该装置由三个核心部件构成,主夹板作为主要承力部件采用高强度合金铸造,通过双耳结构与定位器销钉铰接,承受接触线水平张力(80~3 000 N).其外侧设计为流线型曲面,以降低风阻并分散应力分布.副夹板通过高强度螺栓和垫片与主夹板刚性连接,两者形成闭合夹持腔以固定接触线.副夹板内侧设有防滑纹理,防止动态载荷下的相对滑移,几何模型简化去除螺栓和垫片使用相互作用等效模拟.U 型销钉采用 U 型柱状结构贯穿主、副夹板的定位孔,通过剪切力限制夹板横向位移.为精确模拟定位线夹的力学行为,基于实际工程尺寸与装配关系,建立了三维几何模型(图 1).其中,主副夹板沿接触线方向的长度 L_1 = 75 mm,两夹板外侧间距 L_2 = 18.8 mm,定位销钉上端直径 D_1 = 30 mm,U 型销钉的弯曲直径 D_2 = 11.6 mm .主夹板位于 U 型销钉开口端外侧,副夹板则嵌入内侧,完全复现了现场安装的几何约束条件.建模过程中,依据材料力学特性赋予组件弹性模量、Poisson 比等参数,确保仿真结果与物理实验的一致性.

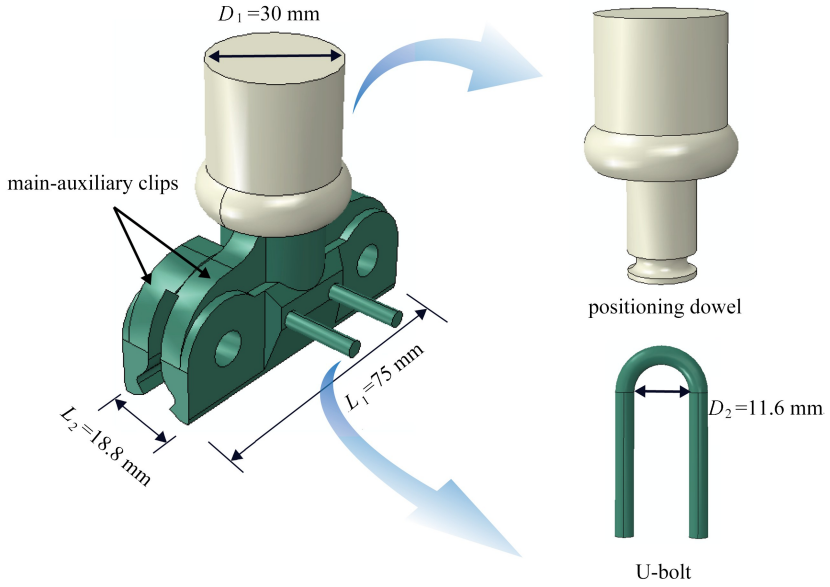


图 1 定位线夹几何模型

Fig. 1 The geometric modeling of contact wire clips

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同.

在材料选择方面,严格遵循《铝和铝合金:铸件、化学成分和机械特性》(DIN EN 1706:2010)标准的技术规范,该标准系统规定了铝合金材料的化学成分、机械性能指标及质量验收准则.基于接触网定位线夹的服役环境与功能需求,采用差异化材料选型策略:主副夹板和 U 型销钉选用 $CuNi_2Si$ 铜镍硅合金铸造(图 1 绿色部位),其镍含量(1.8wt%~2.5wt%)与硅含量(0.5wt%~1.2wt%)的精准配比,通过固溶强化与时效处理形成 Ni_2Si 强化相,使材料兼具 650 MPa 级抗拉强度与 80% IACS 导电率的优异性能;定位器销钉则采用 $AlSi_7Mg_{0.6}$铝硅镁合金精密铸造(图 1 灰色部位),该材料通过 T6 热处理使 Mg_2Si 强化相均匀弥散分布,在保持低密度 ρ = 2 600 kg/m^3 的同时,实现屈服强度≥220 MPa、延伸率≥8%的力学性能组合.如表 1 所示,$CuNi_2Si$ 合金 120 GPa 的弹性模量 E 可有效抑制夹持结构的弹性变形,而 $AlSi_7Mg_{0.6}$合金 0.33 的 Poisson 比 ν 特性则赋予销钉良好的抗剪切变形能力.这种铜-铝异质材料组合方案,既满足了定位线夹对导电性能、结构强度与抗振性能的复合需求,又通过材料比强度优化实现了接触网悬挂装置的轻量化设计.

1.2 模型网格划分和边界条件

在构建高速铁路接触网定位线夹三维模型过程中,针对原始 SolidWorks 模型存在的几何特征冗余(如倒角密集、曲面过渡复杂等)导致的有限元分析效率低下问题,实施结构优化策略,首先通过建模剔除非承

载性细节特征，继而使用商业有限元软件 ABAQUS 2020/Standard 进行模拟，选择动态隐式积分主要考虑到加载时间较长且隐式求解器能够处理复杂非线性问题（包括材料非线性、几何大变形、接触非线性等）.该算法通过迭代求解能可靠处理主副夹板和 U 型销钉之间的摩擦和压紧行为.综合考量非线性处理能力和计算效率，动态隐式算法对此类问题较为适用.我们针对不规则部件采用四面体非结构化网格与六面体结构化网格的混合剖分技术，其中 U 型销钉接触区域设置 1 mm 精细化网格以确保应力集中区求解精度（单元长宽比控制在 3∶1 以内），我们将主副夹板网格尺寸从 6 mm 逐步细化至 2 mm，共构建了 6 组不同网格密度的计算模型.对比图 2 各模型的应变能发现：当网格较大时应变能结果差异较大，随着网格精度的提高，应变能逐渐降低并趋于收敛，尤其是 2 mm 和 2.5 mm 的曲线几乎重合，表明在该范围内，进一步细化网格已无法显著改善计算精度.综合考虑计算精度与计算效率，最终选择 3 mm 作为最终网格尺寸.尽管更细的网格可以提供更高的计算精度，但其计算成本显著增加，而 3 mm 的网格精度已能较好地反映整体应变能变化过程，并且误差控制在合理范围内.综合考虑计算精度与效率需求，本研究最终确定采用 3 mm 网格进行后续分析.经网格划分后，我们得到了一个更加简化且适合分析的定位装置模型，如图 3 所示.

表 1　定位线夹零部件的材料系数

Table 1　Material coefficients for contact wire clip components

material	ρ /(kg/m^3)	ν	E /GPa
$CuNi_2Si$	8 900	0.34	120
$AlSi_7Mg_{0.6}$	2 600	0.33	70

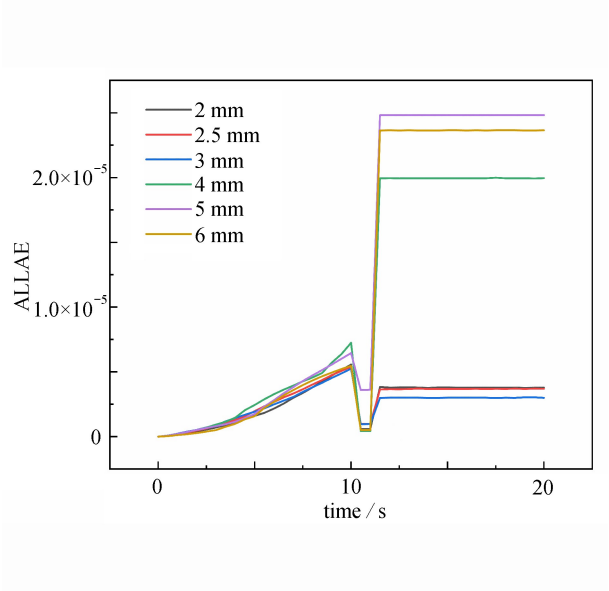


图 2　网格收敛性分析

Fig. 2　The mesh convergence analysis

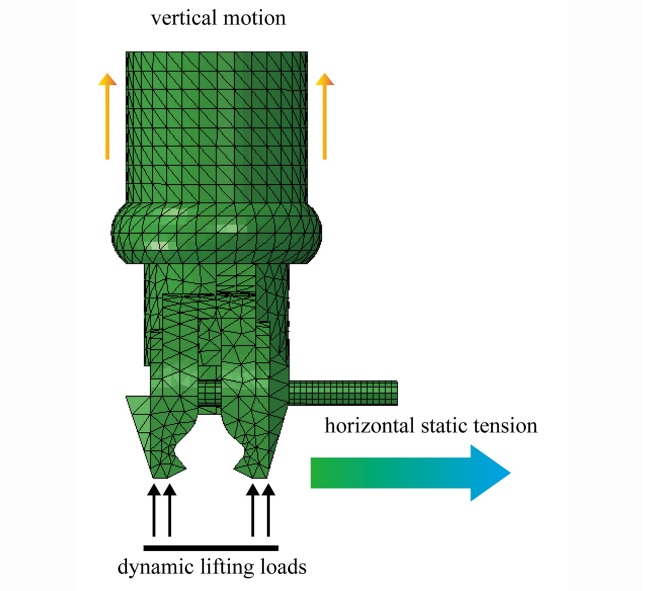


图 3　定位线夹模型的网格划分和边界条件

Fig. 3　Meshing and boundary conditions for contact wire clip models

在接触网定位线夹动态响应研究中，数值模型的构建需要精确反映装置在复杂工况下的力学行为特征.主夹板作为张力承载主体，其外侧承受接触线水平拉伸作用，与副夹板通过螺栓预紧系统形成夹持力场，两者的协同作用导致 U 型销钉产生空间复合应力状态.基于非线性动力学理论，采用 ABAQUS 2020/Standard 平台构建多物理场耦合模型：通过 MPC 绑定约束算法等效螺栓预紧效应，控制夹板间距固定不变；在接触定义中启用有限滑移选项，采用罚函数接触算法处理高速铁路接触网定位线夹动力学中的复杂接触行为.具体参数配置如下：切向接触采用罚函数法处理摩擦行为，而法向接触选用硬接触（hard contact）以严格限制穿透量，针对高速铁路接触网定位线夹动力学问题中存在的强非线性接触、滑移及频繁接触状态变化等特点，罚函数方法具有实现简单、计算效率高、数值稳定性好的优势，能够有效处理接触界面间的复杂相互作用，避免因接触状态剧烈变化导致的收敛困难.切向接触采用罚函数法处理摩擦行为，而法向接触选用硬接触约束，这种组合方式特别适用于接触网定位线夹动力学中的强非线性接触与滑移问题.罚函数法通过引入切向

罚刚度模拟摩擦滑移,能够有效捕捉接触面间的黏着-滑移过渡行为,其无需严格满足接触约束的特点提高了计算收敛性;同时硬接触约束严格禁止法向穿透,确保接触力的物理准确性,两者结合可高效模拟定位线夹各部件之间的复杂摩擦、间歇分离及大滑移等非线性行为.罚函数方法能够有效处理接触界面间的复杂相互作用,避免因接触状态剧烈变化导致的收敛困难,与 ABAQUS 动力隐式算法结合具有显著的适用性和优势.

仿真流程采用分阶段加载策略:step 1 初始平衡阶段通过全约束边界条件($U_1 = U_2 = U_3 = 0$)固定定位器销钉,在主夹板内侧沿接触线轴向施加水平张力,水平张力的范围是 80~3 000 N(本文取此范围边界值分析),该载荷范围基本覆盖典型工况,同时施加重力考虑自重影响;step 2 动态响应阶段解除销钉竖向自由度约束,在夹板底部耦合施加三类垂向动态载荷——包含幅值可控的周期振动、基于线路实测数据的实际振动以及 120 mm 冲击抬升载荷.加载路径有效重构了受电弓滑板通过时的动态抬升过程与接触网弹性形变的交互作用.这种多维度载荷协同加载模式,为评估定位装置在极端工况下的结构完整性提供了高保真仿真环境.周期振动载荷和实际振动载荷如图 4 和图 5 所示.

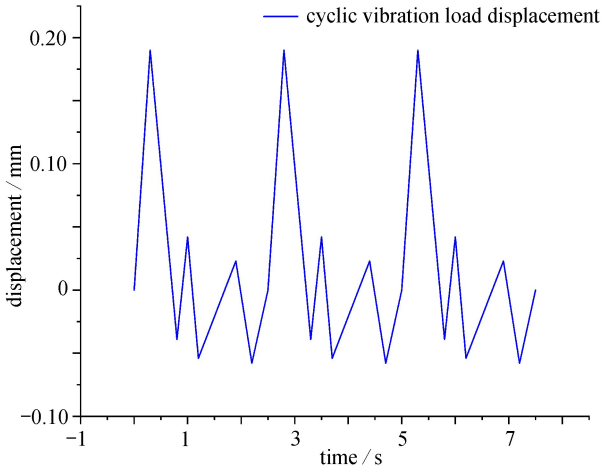


图 4 周期振动载荷

Fig. 4 The cyclic vibration load

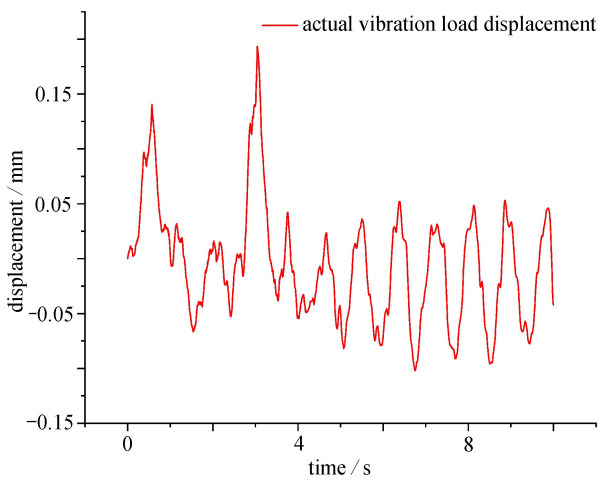


图 5 实际振动载荷

Fig. 5 The actual vibration load

在分析步参数配置中,静态(step 1)和动态加载(step 2)的最大迭代次数分别设置为 20 000 和 30 000,旨在为接触非线性迭代提供充分的求解空间.ABAQUS 动态隐式积分的时间步长通过综合考虑结构动态响应特性、接触非线性程度以及数值收敛性进行合理确定,我们将最小增量步长分别设定为 1E−10 s 和 1E−15 s,以确保在接触状态剧烈变化时仍能精确捕捉结构的瞬态响应.将增量步连续缩减的最大次数(I_A)统一设定为 10,在接触状态突变或接触力波动时,细分增量步长可以提高收敛性.采用 ABAQUS 自动时间步长控制策略,系统根据每一增量步的收敛情况自动调整步长大小,实际计算过程中步长远小于加载总时间.这种设置既保证了计算精度,又有效提高了计算效率,能够稳定地处理定位线夹在列车通过时产生的复杂动态接触与滑移行为.图 6 展示了实际振动过程中两个分析步的总迭代次数随计算过程的变化曲线.可以看出,迭代次数的较大波动主要出现在静态和动态加载的起始阶段,这主要是由于接触关系建立初期存在较强的非线性特性.一旦接触状态趋于稳定,迭代次数的波动明显减弱,说明所采用的收敛控制方法在后续计算中有效保障了求解过程的稳定性.

在定位线夹的动力学分析中,由于涉及接触、碰撞等非线性行为,时间步长的选取对计算精度和收敛性具有重要影响.较小的时间步长有助于准确捕捉接触力的瞬态变化和结构的高频响应,避免因时间离散引起的数值误差.以实际振动工况为例,我们在分析中设置了最小时间步长为 1E−15 s, step 1 和 step 2 最大时间步长分别为 0.5 s 和 0.1 s,并采用 ABAQUS 自动时间步长控制策略,系统根据每一增量步的收敛情况自动调整步长大小,实际计算的步长远小于加载的总时间.如图 7 所示,在分析步初始时间增量步较小,随后增大至最大时间步长,保证结果精度的同时提高效率.

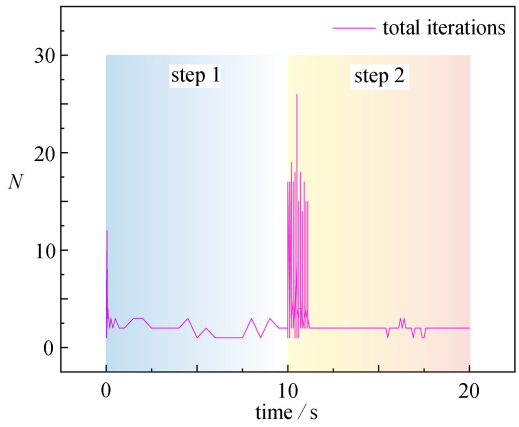


图 6　总迭代次数演化曲线

Fig. 6　The evolution curve of the total iteration number

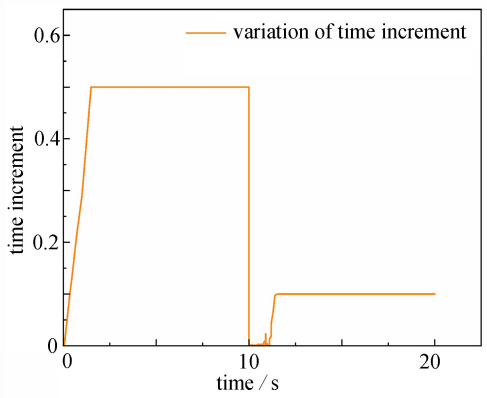


图 7　时间增量变化曲线

Fig. 7　The time increment variation curve

2　应 力 分 析

2.1　周期振动过程中拉力对定位线夹应力的影响

针对第一个周期，在 80 N 水平拉力与周期性振动荷载作用下，定位器销钉和定位线夹的应力分布随时间呈现规律性变化.如图 8 所示，t = 0 s 时刻的初始应力状态通过准静态分析获得，具体来说，在 step 1 中，首先对定位线夹施加水平方向的拉力，通过静态分析使结构在水平拉力作用下达到稳定平衡状态，此时结构内部的应力分布即为 t = 0 s 时刻的初始应力状态.该状态作为 step 2 动态振动分析的初始条件，确保了后续动态响应分析的准确性和连续性.

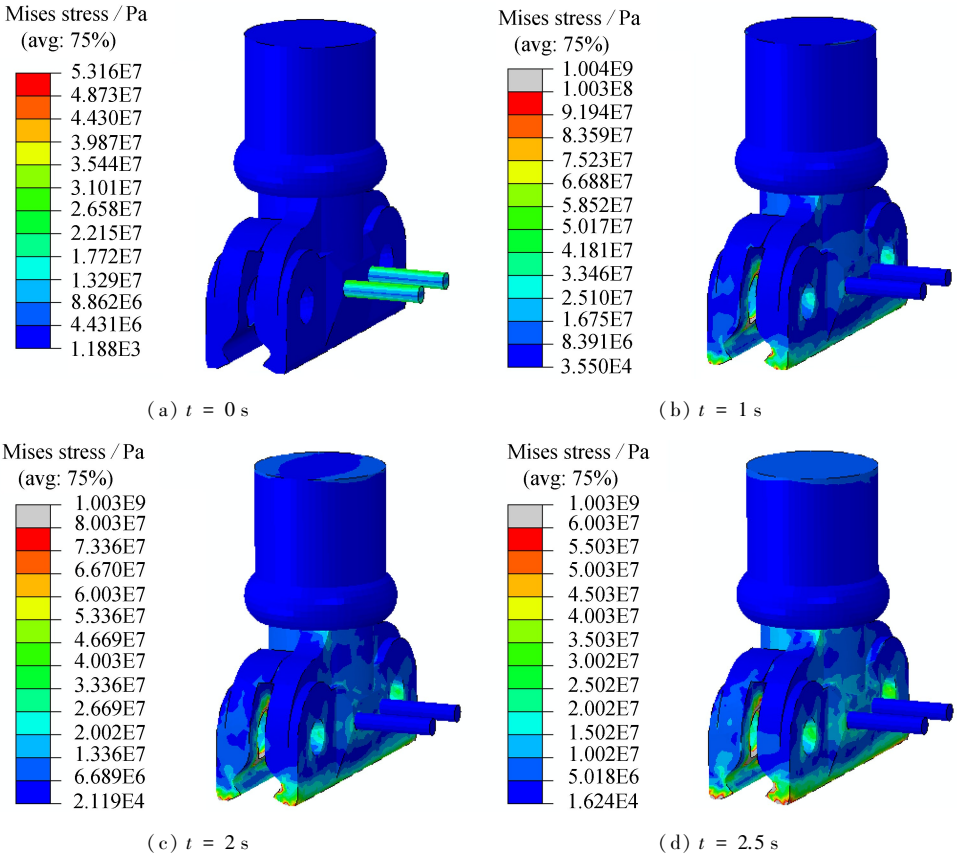
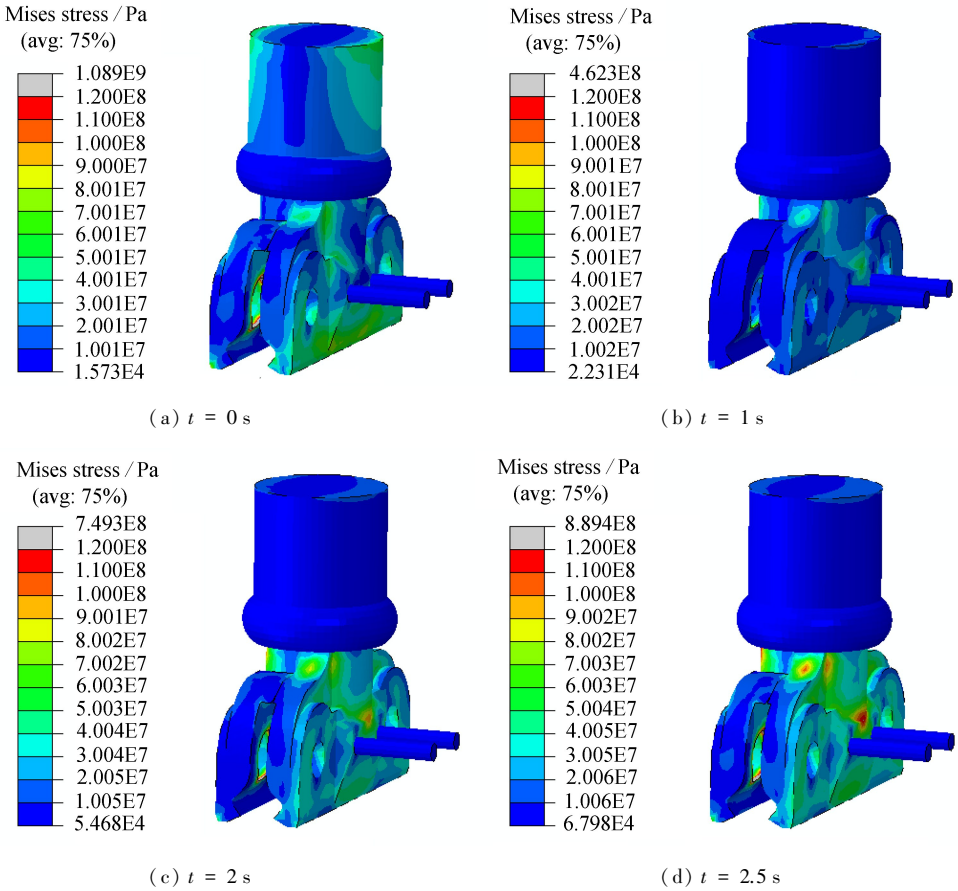


图 8　周期振动过程中在 80 N 拉力下定位线夹的应力分布

Fig. 8　Stress distributions of contact wire clips under 80 N tension during cyclic vibration

$t=0$ s 时,接触线自重产生的垂向静力使 U 型销钉承受主副夹板的联合剪切作用,其弯曲过渡段因几何突变形成应力集中,最大 Mises 应力达 53 MPa; $t=1$ s 时,周期性振动荷载引发夹板与定位器销钉间的相对滑动及碰撞,导致 U 型销钉应力值较初始阶段有所下降,同时螺栓孔周边及夹板接触区域因动态冲击出现局部应力升高,形成约 20~30 MPa 的离散应力斑点;随着振动持续,主副夹板底端及螺栓孔处应力水平明显上升,且定位器销钉与线夹的碰撞事件主要集中于振动上升阶段,此阶段接触压力瞬态增强导致应力分布重构;至周期性振动荷载结束时,应力集中区从销钉弯曲段向夹板接触边缘迁移,局部区域维持中等应力水平.整个过程表明,动态载荷通过接触界面滑移与碰撞机制,主导了结构应力场的时空演化规律.

如图 9 所示,在 3 000 N 水平拉力与周期性振动荷载作用下,定位器销钉和线夹系统的力学响应呈现以下特征:相较于 80 N 工况, $t=0$ s 时刻主夹板、副夹板及定位器销钉的应力水平显著升高;随着振动周期推进,定位器销钉应力逐渐降低,至 $t=2.5$ s 时主夹板侧面中间位置出现应力集中,最大 Mises 应力达 889 MPa .在水平拉力为 80 N 时,定位线夹各零部件之间的接触压力明显低于 3 000 N 拉力工况,导致零部件之间的约束性较弱,结构整体刚性不足.当受到垂直方向的动态载荷作用时,零部件之间容易发生相对滑移甚至瞬时分离,随后产生明显的碰撞与冲击现象.这种强烈的撞击效应会引起局部应力集中,导致应力幅值显著增大.而在 3 000 N 拉力工况下,较大的预紧力使零部件之间保持紧密接触,结构整体刚性增强,零部件之间的相对运动受到有效抑制,动态载荷引起的冲击效应明显减弱,因此应力幅值反而低于 80 N 拉力的情况.动态过程中,主夹板与定位器销钉间发生相对滑动,U 型销钉产生倾斜与偏转.由于 3 000 N 水平拉力产生的静摩擦力远超接触线自重垂直力,U 型销钉未受显著剪切作用,其应力分布整体保持稳定,但主夹板与定位器销钉间约束增强,导致接触界面压力及局部应力持续累积.该工况下,系统从动态滑移模式转向摩擦锁定状态,接触面高约束条件成为主导力学响应的核心因素.



(a) $t=0$ s (b) $t=1$ s

(c) $t=2$ s (d) $t=2.5$ s

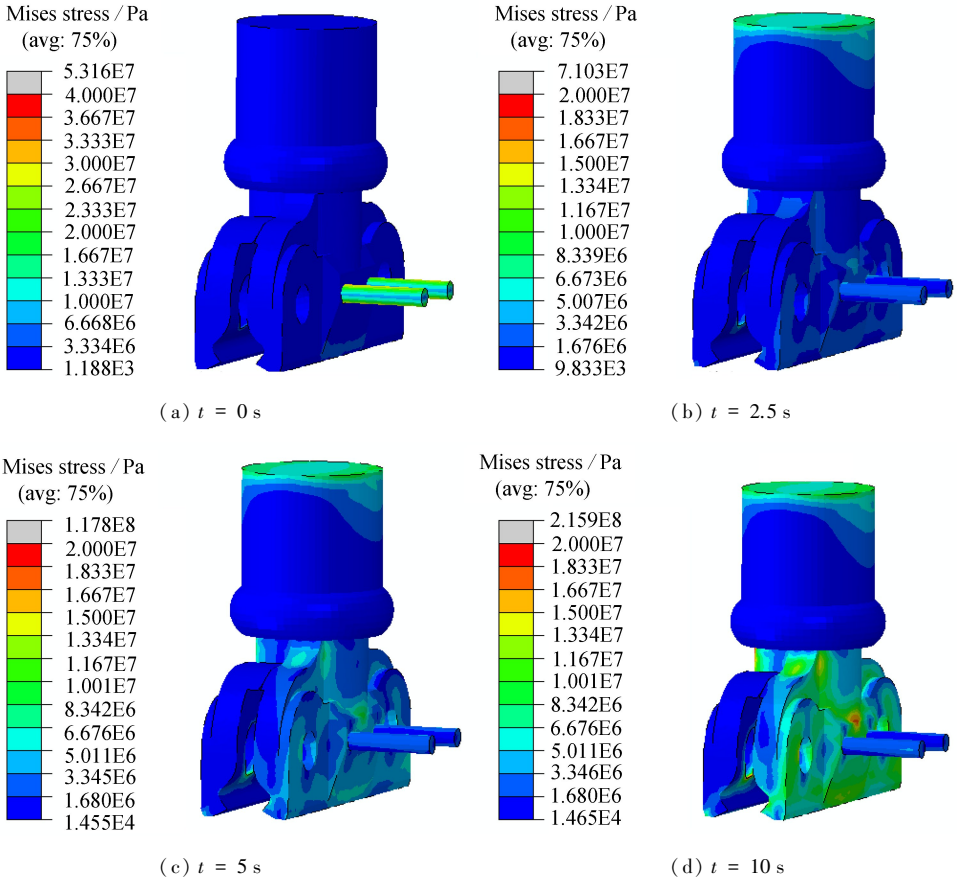
图 9 周期振动过程中在 3 000 N 拉力下定位线夹的应力分布

Fig. 9 Stress distributions of contact wire clips under 3 000 N tension during cyclic vibration

2.2　实际振动过程中拉力对定位线夹应力的影响

图 10 与图 11 直观呈现了定位器销钉及定位线夹在不同拉力水平与实际振动载荷耦合作用下的变形模式与应力场分布特征.通过对比两组图示数据,可清晰辨识载荷强度对接触界面力学响应的调控规律:随外力条件变化,夹板接触区应力梯度等关键参数呈现显著关联性差异.如图 10 所示,在水平拉力 80 N 实际振动荷载下,U 型销钉的应力水平显著大于其他部位, U 型销钉在剪切力的作用下产生了明显的变形.这种变形是由于接触线自重产生的垂直力导致的剪切作用,这使得 U 型销钉的应力分布显著增加.t = 1 s 时刻及之后,定位线夹与定位器销钉之间出现了相对滑动和碰撞现象,导致定位器销钉顶端应力增大.在振动载荷持续作用过程中,周期性振动能量通过接触界面传递,引发销钉与线夹的间歇性碰撞,此类冲击作用随载荷周期循环往复,直至振动完全终止.在碰撞过程中,接触面瞬时压力波动与惯性力交互作用.

图 11 展示了在 3 000 N 水平拉力与实际振动载荷协同作用下,定位线夹主夹板与定位器销钉间产生的相对滑移现象,伴随销钉轴线的倾斜与空间偏转行为.在此工况下,其分布规律与周期性振动条件具有相似性.由于夹持界面的静摩擦力显著超过接触线自重垂向分力,U 型销钉的剪切应力传递路径被有效抑制,使其应力场维持相对稳定状态.动态观测显示,振动载荷持续引发销钉与线夹间的间歇性冲击作用,直至振动能量完全消散.



(a) t = 0 s　　(b) t = 2.5 s

(c) t = 5 s　　(d) t = 10 s

图 10　实际振动过程中在 80 N 拉力下定位线夹的应力分布

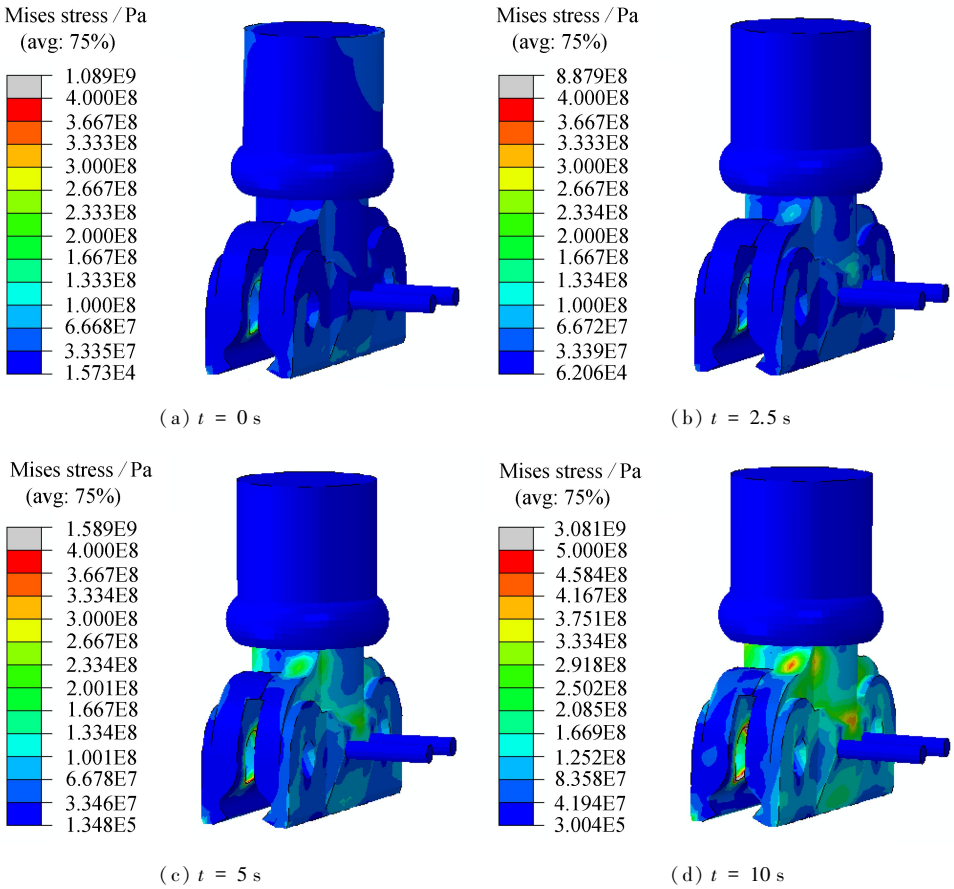
Fig. 10　Stress distributions of contact wire clips under 80 N tension during actual vibration

2.3　冲击过程中拉力对定位线夹应力的影响

图 12 展示了 80 N 水平拉力与 120 mm 抬升位移共同作用下,定位器销钉与线夹系统的变形特征及应力分布规律.

在 80 N 水平拉力与 120 mm 抬升位移共同作用下,定位线夹与定位器销钉发生相对滑动及碰撞.U 型销钉受剪切作用发生明显变形. t = 0 s 时刻,接触线自重产生的垂直力使 U 型销钉受主夹板与定位器销钉剪切作用,U 型销钉的上下端的应力显著增加.抬升荷载触发定位器销钉受定位线夹冲击,引发二者碰撞. t =

0.012 s 振动结束时,定位器销钉和定位线夹的接触面应力略大于周边区域.应力最大值在螺栓孔边缘处,可达 330.2 MPa .定位器销钉自重与抬升荷载协同作用,二者再次接触直至荷载结束.

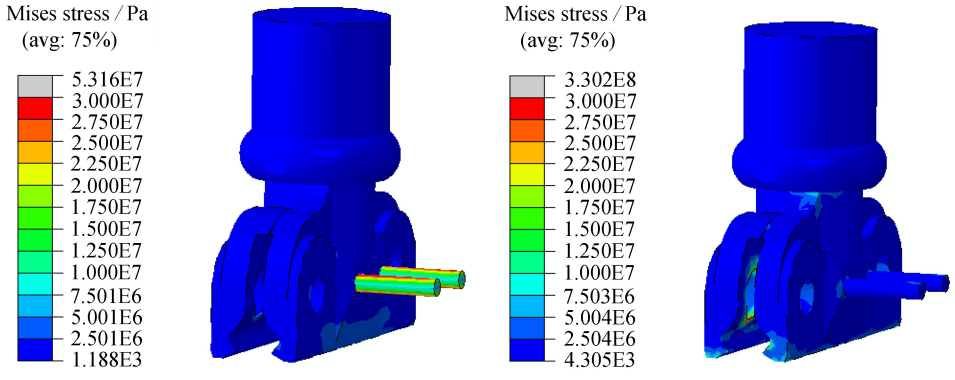


(a) t = 0 s (b) t = 2.5 s

(c) t = 5 s (d) t = 10 s

图 11 实际振动过程中在 3 000 N 拉力下定位线夹的应力分布

Fig. 11 Stress distributions of contact wire clips under 3 000 N tension during actual vibration

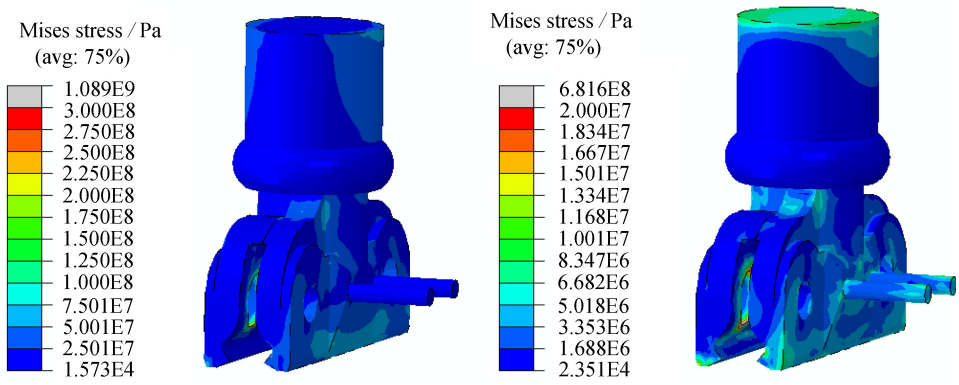


(a) t = 0 s (b) t = 0.012 s

图 12 冲击抬升过程中在 80 N 拉力下定位线夹的应力分布

Fig. 12 Stress distributions of contact wire clips under 80 N tension during impact lifting

图 13 展示了 3 000 N 水平拉力与 120 mm 抬升荷载共同作用下,定位线夹的力学行为发生了显著变化:较大的水平拉力增强了副夹板与定位器销钉之间的静摩擦力,使其超过垂直分离力,抑制了二者间的相对滑动.此时主夹板、副夹板与定位器销钉的接触区域应力略有升高,振动结束时部分区域应力值处于规定范围内.定位器销钉因受力状态改变发生明显倾斜,其根部与夹板连接处呈现持续应力集中.相较于低拉力工况,该状态下系统未发生滑移碰撞,但销钉倾斜可能导致接触线空间位形改变,进而影响定位线夹的长期服役性能.



(a) t = 0 s　　(b) t = 0.012 s

图 13　冲击抬升过程中在 3 000 N 拉力下定位线夹的应力分布

Fig. 13　Stress distributions of contact wire clips under 3 000 N tension during impact lifting

针对冲击抬升工况下螺栓孔边缘应力集中的问题，我们进一步探讨了不同材料特性对应力分布的影响。以 $CuNi_2Si$ 合金为例，其材料密度为 8 900 kg/m^3，Poisson 比为 0.34，弹性模量为 120 GPa。通过对比分析发现，在冲击工况结束时刻，如图 14 所示定位线夹的最大应力依然集中在螺栓孔附近，但采用 $CuNi_2Si$ 合金时的最大应力水平明显高于其他材料。这表明材料的弹性模量和强度特性对应力集中具有显著影响。为进一步优化设计、降低应力集中，后续研究可从考虑以下几个方面展开：一是优化螺栓孔的几何形状，以缓解应力集中；二是探讨不同螺栓预紧力和连接方式（如采用弹性垫圈或浮动连接）对结构应力分布的影响。通过多参数协同优化，开展进一步工作有望显著提高定位线夹的可靠性和服役寿命。

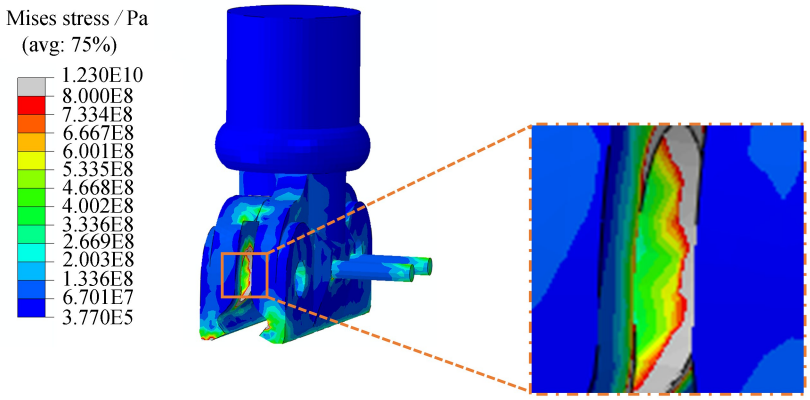


图 14　螺栓孔应力集中放大图

Fig. 14　The magnified view of stress concentration around the bolt hole

3　总　　结

通过建立高速铁路接触网定位线夹的非线性有限元模型，系统揭示了不同动态载荷与水平拉力耦合作用下的力学响应规律。研究表明，定位线夹的应力分布与变形模式具有显著的载荷敏感性：在周期性振动工况下，3 000 N 水平拉力导致主夹板侧面出现 889 MPa 应力集中，相较 80 N 工况应力集中区向夹板接触边缘迁移；实际振动中，低拉力工况下 U 型销钉受剪切作用产生显著变形，而高拉力通过增强摩擦约束抑制滑移，但引发销钉轴线倾斜；冲击抬升工况下，80 N 水平拉力使螺栓孔边缘应力达 330.2 MPa，而 3 000 N 拉力虽抑制相对滑动却导致销钉根部持续应力集中。基于上述发现，建议在结构优化中重点考虑夹持面几何参数调整以降低应力梯度，开发具有弹性约束特性的新型定位装置，同时建议在动态载荷设计标准中引入销钉倾斜角度的阈值控制，并加强高应力区域的无损检测频次以预防疲劳失效。

参考文献(References):

[1] 张锋, 郭鹏飞, 毛保红, 等. 高速铁路临时限速列控设置时机确定及相关安全措施[J]. 铁路技术创新, 2024(6): 79-85.(Zhang Feng, Guo Pengfei, Mao Baohong, et al. Determination of timing for temporary speed restriction for train control on high speed railways and relevant safety measures[J]. *Railway Technical Innovation*, 2024(6): 79-85. (in Chinese))

[2] 高永红, 段亚鹏, 郭彦朋, 等. 关于国家高速铁路网战争安全的思考[J]. 防护工程, 2024, **46**(6): 74-78.(Gao Yonghong, Duan Yapeng, Guo Yanpeng, et al. Reflections on wartime security of the national high-speed railway network[J]. *Protective Engineering*, 2024, **46**(6): 74-78. (in Chinese))

[3] 程伟, 杨新华. 铁路运营安全评估体系构架研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2024, **6**(9): 30-35.(Cheng Wei, Yang Xinhua. Research on the architecture of railway operation safety assessment system[J]. *Railway Technical Standard (Chinese & English)*, 2024, **6**(9): 30-35. (in Chinese))

[4] 王明年, 郭晓晗, 于丽, 等. 高速铁路隧道紧急救援站人员安全疏散可靠性研究[J]. 铁道标准设计, 2026, **70**(2): 114-121.(Wang Mingnian, Guo Xiaohan, Yu Li, et al. Reliability study of safe evacuation of personnel at emergency rescue stations in high-speed railway tunnels[J]. *Railway Standard Design*, 2026, **70**(2): 114-121. (in Chinese))

[5] 魏好. 高速铁路气动效应对轨旁监测设备安全的影响研究[J]. 铁道勘察, 2024, **50**(5): 131-136.(Wei Hao. Research on aerodynamic effect on trackside monitoring equipment safety for high-speed railway[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2024, **50**(5): 131-136. (in Chinese))

[6] 邹俊, 林维, 聂军. 高速铁路联调联试运输组织日计划编制要点及建议[J]. 铁路技术创新, 2024(5): 29-35.(Zou Jun, Lin Wei, Nie Jun. Key points and suggestions for preparation of daily transport organization plan of high speed railway integrated commissioning & test[J]. *Railway Technical Innovation*, 2024(5): 29-35. (in Chinese))

[7] 赵娜, 韦晓广, 高仕斌. 基于可靠性和维修成本的高铁接触网维修策略优化[J]. 电气化铁道, 2024, **35**(6): 1-6.(Zhao Na, Wei Xiaoguang, Gao Shibin. Optimization of maintenance strategy of OCS of high-speed railway based on reliability and maintenance costs[J]. *Electric Railway*, 2024, **35**(6): 1-6. (in Chinese))

[8] 王明涛. 山区大坡道对高铁接触网动静态特性的影响及优化研究[J]. 电气化铁道, 2024, **35**(3): 41-47.(Wang Mingtao. Impacts to dynamic and static characteristics of OCS of high-speed railway caused by steep grade in mountain area[J]. *Electric Railway*, 2024, **35**(3): 41-47. (in Chinese))

[9] Wu X, Yuan P, Peng Q, et al. Detection of bird nests in overhead catenary system images for high-speed rail[J]. *Pattern Recognition*, 2016, **51**: 242-254.

[10] 樊少杰, 何龙. 雅万高铁简统化接触网系统应用实践[J]. 中国铁路, 2023(12): 91-97.(Fan Shaojie, He Long. Practices in the application of simplified and unified OCS in jakarta-bandung HSR[J]. *China Railway*, 2023(12): 91-97. (in Chinese))

[11] 郑磊. 接触网定位器出现脱落的原因分析及解决措施研究[J]. 机械管理开发, 2023, **38**(10): 220-222.(Zheng Lei. Analysis of the causes of contact network positioner falling off and solution measures[J]. *Mechanical Management and Development*, 2023, **38**(10): 220-222. (in Chinese))

[12] Yang Z, Yan C, Wang J, et al. Investigation of failure analysis and failure delay strategy for H13 steel contact wire clip die[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, **169**: 109138.

[13] 王艺丹. 定位线夹结构与优缺点分析及选型[J]. 电气化铁道, 2023, **34**(3): 64-66.(Wang Yidan. Analysis of structures and advantages & disadvantages of contact wirer clip and type selection[J]. *Electric Railway*, 2023, **34**(3): 64-66. (in Chinese))

[14] 屈志坚, 张博语, 杨行, 等. 基于MFDC-SSD网络的接触网定位线夹缺陷识别[J]. 铁道学报, 2024, **46**(5): 48-57.(Qu Zhijian, Zhang Boyu, Yang Hang, et al. Fault identification of overhead contact system steady ears based on MFDC-SSD network[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2024, **46**(5): 48-57. (in Chinese))

[15] 王腾, 吴胜强, 杜清全, 等. 高速铁路接触网定位器脱落原因分析及解决措施[J]. 电气化铁道, 2022, **33**(2):

30-32.(Wang Teng, Wu Shengqiang, Du Qingquan, et al. Analysis of causes of falling off of steady arm of OCS of high-speed railway and its counter-measures[J]. *Electric Railway*, 2022, **33**(2): 30-32. (in Chinese))

[16] 张春春, 王嵩, 张冬凯, 等. 基于图像处理的接触网定位线夹目标检测[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, **12**(6): 1478-1484.(Zhang Chunchun, Wang Song, Zhang Dongkai, et al. Detection of catenary steady clamp based on image processing[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, **12**(6): 1478-1484. (in Chinese))

[17] Toubal L, Karama M, Lorrain B. Stress concentration in a circular hole in composite plate[J]. *Composite Structures*, 2005, **68**(1): 31-36.

[18] Potvin A B, Kuang J G, Leick R D, et al. Stress concentration in tubular joints[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1977, **17**(4): 287-299.

[19] Kamal M, Rahman M M. Advances in fatigue life modeling: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **82**: 940-949.

[20] Talreja R. Fatigue of composite materials: damage mechanisms and fatigue-life diagrams[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences*, 1981, **378**(1775): 461-475.

[21] Lei L, Li B, Wang H, et al. High-temperature high-cycle fatigue performance and machine learning-based fatigue life prediction of additively manufactured Hastelloy X[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, **178**: 108012.

[22] Jiang L, Hu Y, Liu Y, et al. Physics-informed machine learning for low-cycle fatigue life prediction of 316 stainless steels[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, **182**: 108187.

[23] 刘金增, 张静, 储文平, 等. 高速铁路接触网关键零部件力学特性分析[J]. 电气化铁道, 2019, **30**(3): 38-42.(Liu Jinzeng, Zhang Jing, Chu Wenping, et al. Analysis of mechanical property of key OCS fittings for high speed railway[J]. *Electric Railway*, 2019, **30**(3): 38-42. (in Chinese))

[24] 李韬, 赵军涛, 杨甲申. 接触网定位线夹强度模拟分析[J]. 电气化铁道, 2019, **30**(3): 61-63.(Li Tao, Zhao Juntao, Yang Jiashen. Strength simulation and analysis for OCS steady clamps[J]. *Electric Railway*, 2019, **30**(3): 61-63. (in Chinese))

[25] 殷荣幸, 王旭, 李东升. 铁路电气化用铜合金定位线夹失效分析[J]. 热加工工艺, 2015, **44**(5): 245-246.(Yin Rongxing, Wang Xu, Li Dongsheng. Failure analysis on copper alloy positioning clamp for railway electrification[J]. *Hot Working Technology*, 2015, **44**(5): 245-246. (in Chinese))

[26] 孙增田, 陈永瑞, 赵金凤, 等. 浅谈铜合金定位线夹断裂原因及改进措施[J]. 电气化铁道, 2020, **31**(3): 52-54.(Sun Zengtian, Chen Yongrui, Zhao Jinfeng, et al. Discussion on causes of fracture of copper alloy steady clamps and related improving measures[J]. *Electric Railway*, 2020, **31**(3): 52-54. (in Chinese))