

液压挖掘机履带链轨节疲劳分析

王国强¹, 马超洋¹, 郭志远², 王 帅³, 左国棚², 刘世博¹

(1. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022; 2. 三一集团有限公司 传动事业部, 常熟 215500; 3. 吉林
大学 生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘 要:以液压挖掘机履带链轨节为研究对象,提出了完整的基于动力学-有限元-疲劳准则的链轨节疲劳寿命预测技术路线。首先,构建了液压挖掘机履带行走装置动力学模型,通过对比试验数据和动力学仿真结果,验证了动力学模型的正确;其次,将动力学模型提取的链轨节张紧力与动态接触载荷导入有限元分析软件,对链轨节网格各节点进行应力和应变数值求解;最后,针对链轨节多模式交变非对称载荷特征,基于多轴疲劳准则实现了结构寿命预测。结果表明:建立的仿真动力学模型关键参数数据与试验数据的均值误差在 10% 以内,预测了液压挖掘机直行和转向两种工况下的链轨节疲劳寿命,直行工况寿命超过 10^7 次循环,转向工况寿命为 3.59×10^6 次循环。

关键词:液压挖掘机;链轨节;疲劳寿命;动力学建模;有限元

中图分类号:TH114 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)09-2292-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250253

Fatigue analysis methods for hydraulic excavator track links

WANG Guo-qiang¹, MA Chao-yang¹, GUO Zhi-yuan², WANG Shuai³, ZUO Guo-peng², LIU Shi-bo¹

(1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Transmission Business Department, Sany Group Co., Ltd., Changshu 215500, China; 3. School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The hydraulic excavator track link was selected as the research object. A comprehensive methodology for predicting track link fatigue life, based on integrated dynamics-FEA-fatigue criterion analysis, was proposed. Initially, a dynamic model of the hydraulic excavator track link was constructed and validated by contrasting key parameter data obtained from experiments and simulations. Subsequently, the extracted dynamic loads, including track tension and contact forces derived from the dynamic model, were imported into finite element analysis software. Stress and strain solutions were numerically computed at all nodal points within the track link mesh. Finally, addressing the characteristic multi-mode, alternating, asymmetric loading of the track link, structural life prediction was implemented based on a multiaxial fatigue criterion. The results demonstrate that the mean error between critical parameter data from the established simulation model and experimental data was maintained within 10%. Fatigue life predictions were obtained for the track link under both straight-line travel and steering conditions of the

收稿日期:2025-03-26.

基金项目:国家自然科学基金项目(52302516);国家重点研发计划项目(2023YFD1500603-05);工科集群青年人才专项支持计划项目(419021423G68);2024年博士后留吉(来吉)人员资助项目(820241042418).

作者简介:王国强(1965-),男,教授,博士.研究方向:工程装备智能化.E-mail: wgq@jlu.edu.cn

hydraulic excavator. The predicted life exceeded 10^7 cycles under straight-line travel, while a life of 3.59×10^6 cycles was predicted for the steering condition.

Key words: hydraulic excavator; track link; fatigue life; dynamic modeling; finite element

0 引言

随着液压挖掘机在工程建设、矿山开采等领域的广泛应用,其工作环境日益严苛,履带链轨节^[1,2]作为关键的传动部件,其疲劳寿命直接影响到整机的使用可靠性和维修成本。并且履带链轨节的受力复杂,预测其疲劳安全性困难。因此,研究履带链轨节的疲劳性能、提升其耐久性具有重要的工程实践意义。针对高周疲劳的 10^7 次循环实验需要长达数月的测试周期,难以满足工程设计的迭代效率需求;而实验环境中接触界面损伤的复现性不足与多物理场耦合测试的高成本,进一步凸显了对数值模拟方法的技术依赖。动力学以及有限元软件是分析机械结构疲劳寿命的重要手段。叶华文等^[3]采用有限元软件 ANSYS 和 FRANC3D 的交互技术模拟钢圆管裂纹扩展行为,并基于有限元模型对剪—拉应力比、径厚比和初始损伤尺寸等因素进行了参数分析;孙树磊等^[4]基于多体动力学的方法,构建了挖掘机动力学仿真模型及不同凸块间距的虚拟强化路面。

但上述的疲劳预测方法,在复杂的动态工况下,载荷的多轴特性和非线性行为常常被忽略,导致分析结果不准确或保守。传统的疲劳分析方法^[5-8]通常依赖于静态载荷和简单的材料假设,也会导致分析结果与实际偏差较大。

对于多轴疲劳问题,临界平面法是预测疲劳寿命最有前景的方法。文献[9-11]研究了不同临界平面参数对疲劳寿命的影响;文献[12]研究了不同相位角和平均应力对疲劳寿命预测的影响。近年来,基于 Dang Van 准则^[13,14]的疲劳安全性分析方法逐渐受到关注。文献[15]基于 Dang Van 准则研究了零件表面的疲劳失效问题,使用该准则确定裂纹萌生的位置;文献[16]考虑到多轴应力状态,将 Dang Van 准则应用于疲劳研究;文献[17]受到了 Dang Van 的启发,提出了一种预测滑动轴承疲劳损伤的三维非线性方法。Dang Van 准则能有效处理多轴应力状态下的疲劳破坏问题,尤其在复杂动力学载荷下表现出较高的准确性。因此,本文采用 Dang Van 准则对液压挖掘机履带链轨节疲劳进行深入研究,旨在为其优化设

计和疲劳寿命预测提供科学依据。

针对上述问题,本文提出基于数值模拟的液压挖掘机履带链轨节疲劳安全性分析方法,其总体包括动力模型建模、有限元分析以及疲劳寿命预测三部分。该方法有效突破传统试验方法周期长、成本高的局限性,并解决现有测试手段难以有效表征多轴疲劳损伤机制的难题。

1 动力学模型

1.1 运动学模型

分析履带车辆平面运动时建立两个坐标系,分别为全局坐标系 XOY 和车辆局部坐标系 $X_cO_cY_c$ 。全局坐标系的原点 O 固定于大地上某一点,在履带移动过程中该坐标系的位置和方向不发生变化。车辆局部坐标系 $X_cO_cY_c$ 的原点 O_c 与履带车辆的形心位置重合, O_cX_c 正方向为履带前进方向, O_cY_c 正方向与 O_cX_c 轴垂直且指向履带前进方向左侧,该坐标系的位置和方向随履带车辆移动而变化^[18],如图1所示。

初始时刻,履带车辆几何中心 O_c 与全局坐标系 O 点重合, t 时刻履带到达如图1所示位置,由图1可列出表示履带车辆平面运动状态的方程:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (V_R + V_L) \cos \varphi dt \\ y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (V_R + V_L) \sin \varphi dt \\ \varphi(t) = \frac{1}{B+b} \int_0^t (V_R - V_L) dt \end{cases} \quad (1)$$

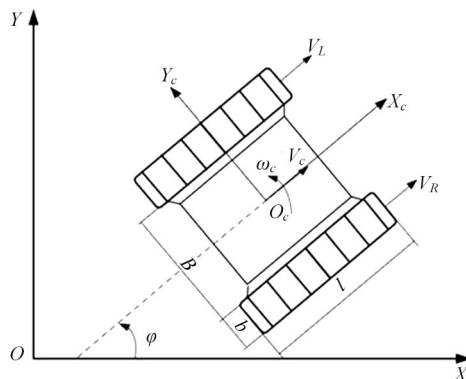


图1 履带车辆平面运动模型

Fig. 1 Plane motion model of tracked vehicle

履带车辆中心的速度与角速度为:

$$\begin{cases} V_C = \frac{1}{2}(V_R + V_L) \\ \omega_C = \frac{V_R - V_L}{B + b} \end{cases} \quad (2)$$

当两侧履带速度相同 $V_L = V_R$ 时,履带转向半径 $R \rightarrow \infty$,此时车辆直线行驶,转向角变化率 $\dot{\varphi} = 0$ 。令 φ_0 为车辆初始时刻旋转角,则履带的直线行驶的运动学方程为:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (V_R + V_L) \cos \varphi dt = V_R t \cos \varphi \\ y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (V_R + V_L) \sin \varphi dt = V_R t \sin \varphi \\ \varphi(t) = \frac{1}{B + b} \int_0^t (V_R - V_L) dt = \varphi_0 \end{cases} \quad (3)$$

车辆在转向过程中两侧履带速度不发生变化,即 $V_L - V_R = \Delta V$ 为常量,则此时运动学方程为:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (V_R + V_L) \cos \varphi dt = \\ \quad \frac{(2V_R + \Delta V)(B + b)}{2\Delta V} \times \sin\left(\frac{\Delta V}{B + b}t\right) \\ y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (V_R + V_L) \sin \varphi dt = \\ \quad \frac{(2V_R + \Delta V)(B + b)}{2\Delta V} \times \left[1 - \cos\left(\frac{\Delta V}{B + b}t\right)\right] \\ \varphi(t) = \frac{1}{B + b} \int_0^t (V_R - V_L) dt = \frac{\Delta V}{B + b}t \end{cases} \quad (4)$$

1.2 动力学模型的建立

在多体动力学软件 Recurdyn 的低速履带模块中,首先,建立包含驱动轮、引导轮、支重轮、托带轮以及履带的底盘系统;其次,添加各零部件直接的接触以及约束;最后,将通过试验获得参数,输入动力学模型,并对部分可变参数进行调整,使挖掘机的物理参数与试验基本一致,完整的动力学模型建立流程如图 2 所示。挖掘机的虚拟样机模型如图 3 所示。挖掘机的主要参数如表 1 所示。

1.3 主要参数设置

在履带式虚拟样机模型中,链轨节的链轮和销衬套均采用钢材制造,且两者之间的摩擦类型为无润滑的滑动摩擦,因此,摩擦系数被设定为 0.15。拖带轮、引导轮及支重轮的旋转依赖于与履带链轨节之间的滚动摩擦力,这些组件同样由钢材制成,摩擦系数为 0.01。轴和轴承分别为钢

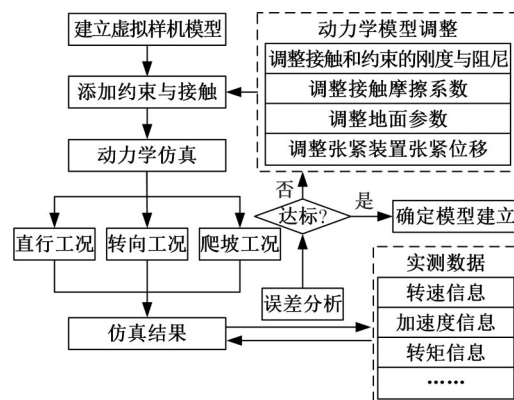


图 2 动力学模型建立流程图

Fig. 2 Process diagram for establishing dynamic model

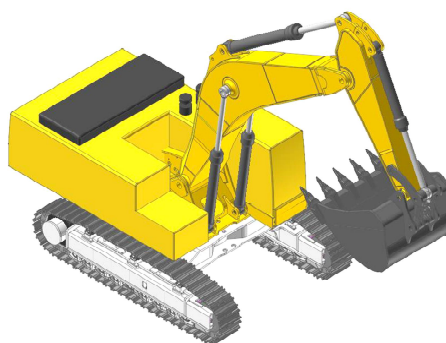


图 3 虚拟样机模型

Fig. 3 Virtual prototype model

表 1 挖掘机主要参数

Table 1 Main parameters of excavator

参数名称	数值
重量/kg	71 000
排量/L	15.681
履带板宽度/m	0.6
链轨节节距/m	0.228
接地长度/m	4.6
轨距/m	3.08
驱动轮齿数	23
驱动轮分度圆半径/m	0.392
支重轮每侧个数	9
拖带轮每侧个数	3
履带板数	52
地面摩擦系数	0.7

和黄铜材质轮轴和轴承分别为钢和黄铜材质,且它们之间的摩擦类型为带润滑的滑动摩擦,摩擦系数为 0.01。接触面和旋转接头的摩擦系数与材料属性及摩擦类型紧密相关,这些因素在仿真分析中起着至关重要的作用,并会显著影响仿真结果的准确性^[19]。

1.4 仿真和试验关键数据对比

试验中挖掘机行驶的地面为松软的泥土地面,在动力学仿真中选择与之对应的泥土地面模

型。挖掘机的行驶速度有11个档位,选择P1档位,其他中速档位和高速档位的链轨节疲劳分析方法与P1档位相同。为测得行驶信息,在挖掘机的液压马达上安装压力传感器间接测量驱动转矩;在履带左右边缘处的支重轮支座上安装加速度传感器;在张紧装置处安装拉线式位移传感器测量张紧位移;在驱动轮处安装转速传感器测量行驶速度。传感器安装示意图如图4所示。

对仿真虚拟样机进行关键数据提取,包括液压挖掘机的实时行驶速度、驱动轮转矩以及加速度数据。在实测过程中,提取两种工况下的相同的实测数据。仿真数据和实测数据对比如图5和图6所示。为了量化实测数据和仿真数据的偏差,采用均值的相对误差,其表达式为:

$$\delta = \left| \frac{P_{\text{仿真}} - P_{\text{实测}}}{P_{\text{实测}}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

通过分析两者的数据,发现速度和转矩的变

化趋势类似且均值相对误差 δ 小于10%,其具体数值如表2所示。

频域分析能提取履带链轨节的关键振动频率,识别疲劳损伤来源,避免共振失效,并通过功率谱计算疲劳贡献,提高分析精度,同时还能去除噪声、检测故障,确保结构安全可靠。采用离散傅里叶公式处理信号:



图4 传感器安装示意图

Fig. 4 Sensor installation diagram

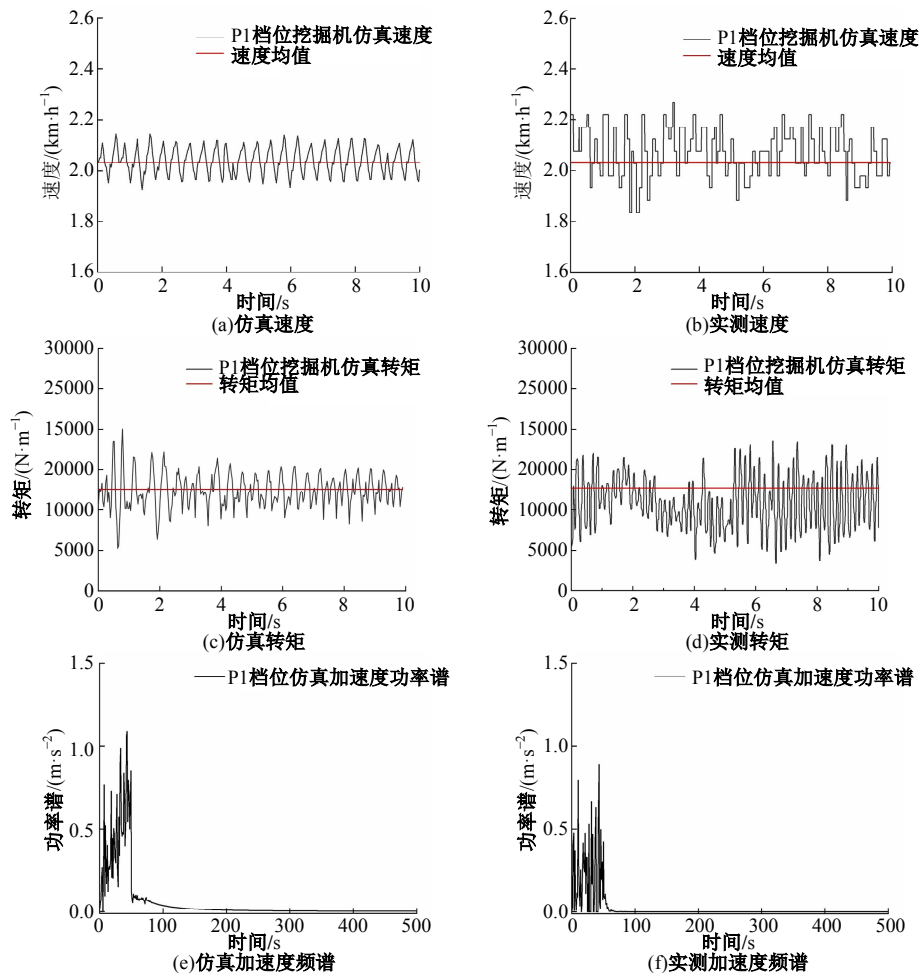


图5 直行工况仿真数据与实测数据对比

Fig. 5 Comparison between simulation data and measured data of straight driving conditions

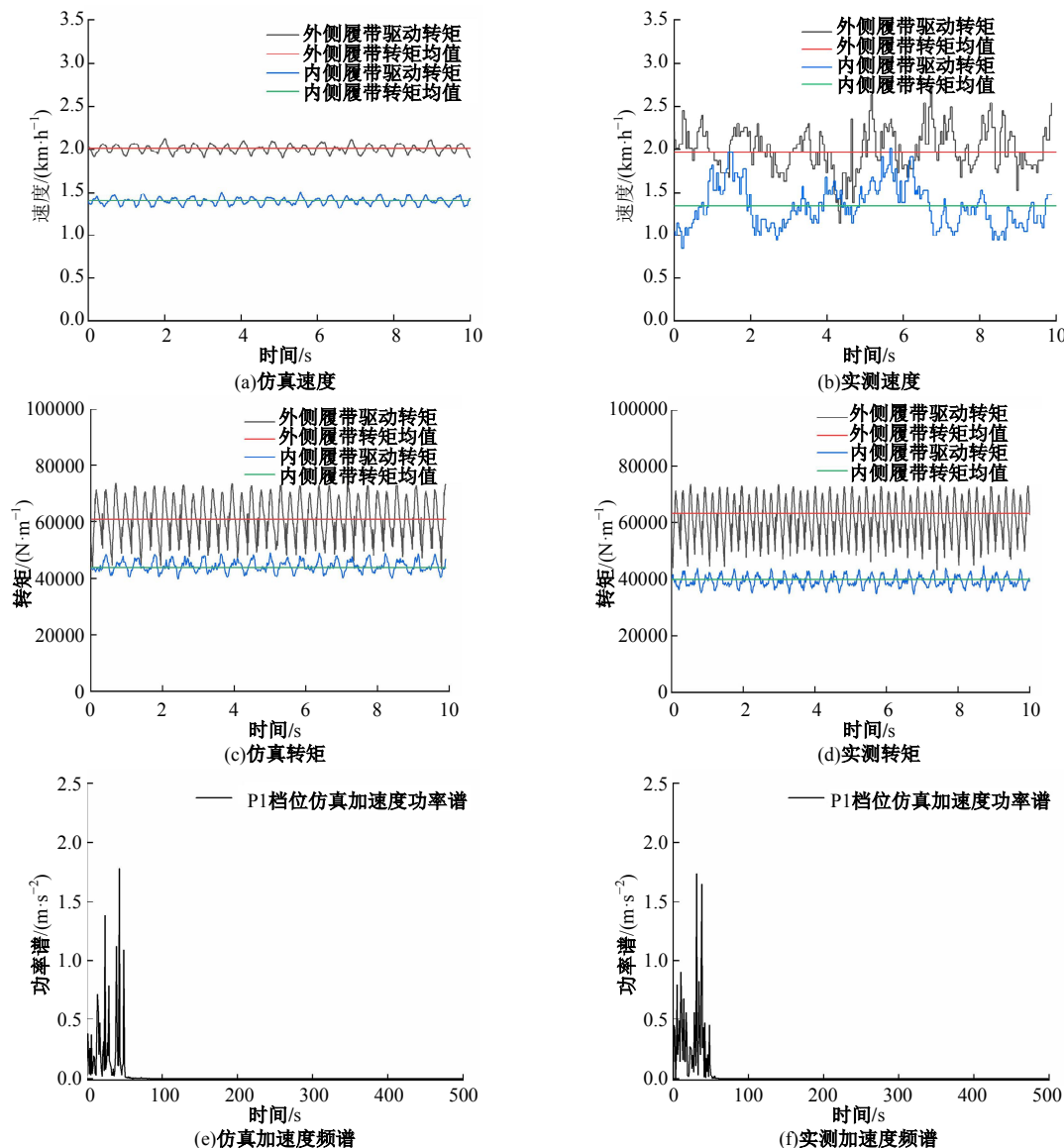


图 6 转向工况仿真数据与实测数据对比

Fig. 6 Comparison between simulated and measured data of steering conditions

表 2 仿真与实测的相对误差

Table 2 Relative error between simulation and actual measurement

工况	参数	仿真均值	实测均值	误差
直行	速度(km/h)	2.038 1	2.028 6	0.46%
	转矩(N·m)	12 500	12 784	2.22%
转向	外侧履带速度(km/h)	2.016 3	1.959 2	2.91%
	内侧履带速度(km/h)	1.417 1	1.350 5	4.93%
	外侧履带转矩(N·m)	63 636	61 079	4.19%
	内侧履带转矩(N·m)	40 057	44 318	9.61%

$$A[k]=\sum_{n=0}^{N-1}a[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn},k=0,1,\cdots,N-1\quad (6)$$

式中: $A[k]$ 为第 k 个频率分量,频率的对应公式为:

$$f_k=\frac{kf_s}{N},k=0,1,\cdots,N-1\quad (7)$$

式中: f_s 为采样频率,其功率谱的公式为:

$$S_a(f)=\frac{|A[k]|^2}{N}\quad (8)$$

对比试验数据和仿真结果,加速度频谱的谱线形状、谱峰高度以及频带宽度的实测结果与仿真结果基本一致,履带转速与转矩相对误差均小于 10%,从而验证了动力学模型的正确。

1.5 载荷提取

在直行工况下,提取单个链轨节在与支重轮、驱动轮、拖带轮、引导轮以及张紧装置相互作用下的受力情况,具体受力见图 7(a)。根据图中数据的波动规律,可以看出履带运行一周经过了 9 个

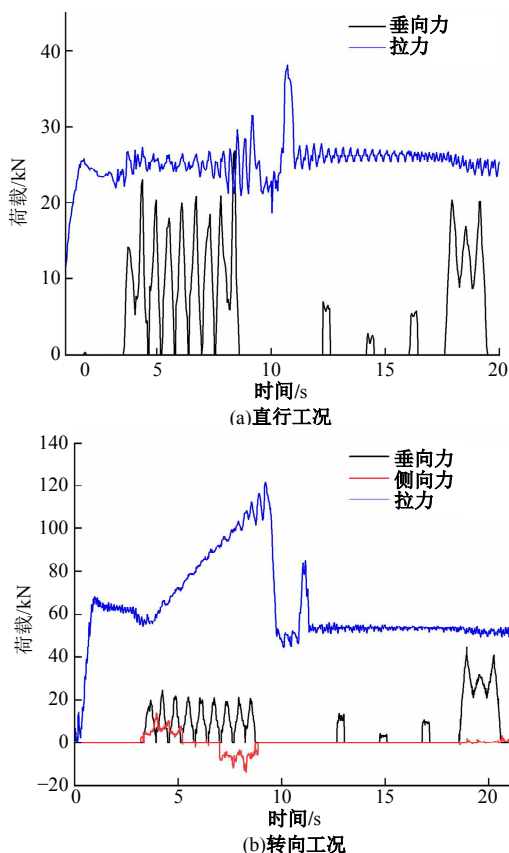


图 7 链轨节相关的作用力

Fig. 7 Force related to track link

支重轮,3个托链轮以及驱动轮和引导轮各1个。在转向工况下,数据如图7(b)所示。

2 多轴疲劳安全性分析

2.1 有限元分析

在ANSYS中建立了链轨节的有限元模型,并施加与实际受力方向相同的单位力。图8为链轨节在直行工况下受到单位张紧力和垂向力后的有限元结果;图9为链轨节在转向工况下受到单位张紧力、垂向力以及侧向力后的有限元结果。链轨节材料性能见表3。

2.2 Dang Van 准则

Dang Van 准则主要用于评估材料在复杂载

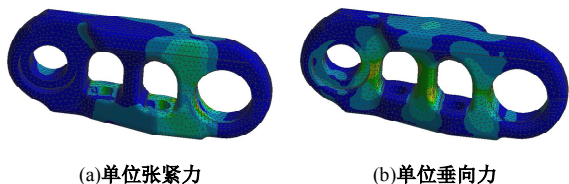


图 8 直行工况链轨节应力云图

Fig. 8 Stress cloud map of the straight ahead working condition

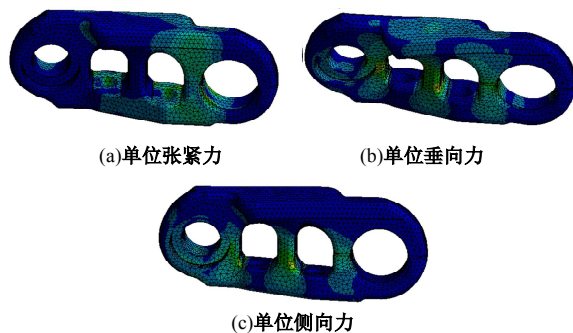


图 9 转向工况链轨节应力云图

Fig. 9 Stress cloud map under steering condition

表 3 链轨节材料参数

Table 3 Material parameters of track link

参数	描述	数值
E	弹性模量/MPa	210 000
μ	泊松比	0.3
HSS	静水应力敏感性	0.35
LHF	极限硬化因子	5
SHF	应变硬化因子	1
$TAFE$	A 型疲劳极限/MPa	274.4
UTS	极限抗拉强度/MPa	980

荷和高应力条件下的疲劳行为。该准则特别适用于考虑均值应力对疲劳寿命的影响,尤其是针对金属材料,在接近屈服条件下,它比传统的 Manson-Coffin 准则和 Goodman 准则更加有效。

根据 Desimone^[20] 的总结,Dang Van 准则可以用如下公式表示:

$$\tau_{\max}(t) + a_{DV}\sigma_H(t) = \tau_w \quad (9)$$

式中: $\tau_{\max}(t)$ 为随时间变化的剪切应力,其计算公式为式(12); a_{DV} 为与材料相关的常数; $\sigma_H(t)$ 为静水应力; τ_w 为反向扭转的疲劳极限。

$$\tau_{\max}(t) = \frac{\hat{s}_I(t) - \hat{s}_{III}(t)}{2} \quad (10)$$

在对称应力偏差上评估,该偏差是通过从应力偏差中减去来获得的:

$$S_{ij}(t) = \sigma_{ij}(t) - \delta_{ij}\sigma_H(t) \quad (11)$$

$S_{ij,m}$ 是一个常数张量,其表达式为:

$$\hat{s}_{ij}(t) = s_{ij}(t) - s_{ij,m} \quad (12)$$

常数张量 $S_{ij,m}$, 又是通过如下的表达式定义的:

$$\max_t [(s_{ij}(t) - s_{ij,m})(s_{ij}(t) - s_{ij,m})] = \min_{s_{ij}'} \max_t [(s_{ij}(t) - s_{ij}')(s_{ij}(t) - s_{ij}')] \quad (13)$$

常数张量 $S_{ij,m}$ 可以看作是应力偏差的一部分它对疲劳裂纹成核没有影响,因此通过式(15)的最小化过程被消除。这种方法的结果之一是正确预

测了平均剪切应力对扭转疲劳极限没有任何影响。

关于疲劳准则中的 a_{DV} , 可以在应力比为 $R = -1$ 的情况下, 通过两种不同的载荷条件, 即单轴拉压, 弯曲或者纯剪切, 获得疲劳应力极限, 就可以得到参数 a_{DV} , 如图 10 所示。假设疲劳轨迹为与这两条线相切的直线, 其斜率由以下表达式给出:

$$a_{DV} = 3 \left(\frac{\tau_w}{\sigma_w} - \frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

如果材料的应力状态满足 $\tau_{\max}(t) + a_{DV} \sigma_H(t) \leq \tau_w$, 则认为应力状态位于材料的安全域内, 材料不会发生疲劳破坏。反之, 则可能出现疲劳失效。

对于链轨节的疲劳分析, 计算 Dang Van 安全因子, 判断链轨节是否在工作载荷状态下发生高周疲劳失效。其计算的表达式为:

$$SF = \frac{\tau_w}{\text{Max}(\tau(t) + a_{DV} \times \sigma_H(t))} \quad (15)$$

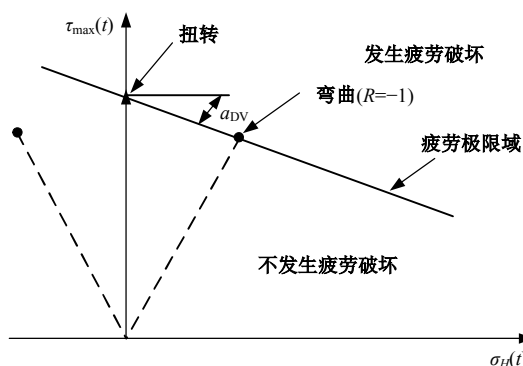


图 10 带有弯曲和扭转疲劳测试的典型校准方案

Fig. 10 Typical calibration scheme with bending and torsional fatigue testing

2.3 疲劳安全性分析

在液压挖掘机的工作过程中, 履带链轨节承受复杂的多轴载荷, 包括张紧力、支重轮作用力、驱动轮作用力、拖带轮作用力以及引导轮作用力。这些载荷在链轨节表面及其内部产生循环应力, 可能导致疲劳裂纹的萌生和扩展。

基于 Ansys Ncode 软件, 设置材料参数以及载荷谱映射, 基于 Dang Van 准则对履带链轨节进行了疲劳安全性分析, 并借助疲劳软件计算得到了直行和转向两种工况多轴应力状态下的安全因子 (FS), 如图 11(a) 和图 11(b) 所示。根据云图结果, 可以直观地看出来链轨节零件可能发生疲劳破坏的位置, 即图中颜色为红色的区域。安全因子 $FS=1$ 是临界值, 低于此值的节点有失效风险。

为了识别高风险区域 (FS 低) 和安全裕度过

大的区域 (FS 过高), 绘制了疲劳安全因子分布直方图, 见图 11(c) 和图 11(d)。

在直线工况下, FS 主要集中在 $1 \sim 40$ 之间, 说明结构的部分区域疲劳安全性较低, 接近临界值。直方图左侧没有 $FS < 1$ 的数据点, 表明所有节点理论上都满足疲劳安全要求。

在转向工况下, 部分区域的疲劳安全因子小于 1, 可能会发生疲劳破坏, 属于有限寿命。 FS 主要集中在 $2 \sim 15$ 之间, 链轨节大部分区域的疲劳安全性较高。部分区域 FS 低于 3, 最小值为 0.5014, 这些区域存在疲劳失效的风险。

基于 Dang Van 准则的输出曲线用于评估材料在多轴应力状态下的疲劳安全性。该曲线表示剪切应力幅与静水应力的关系, 通过比较材料的实际应力状态与 Dang Van 准则所定义的安全域, 判断材料是否可能发生疲劳失效。具体而言, 曲线下方的区域被视为安全区域, 表示材料在该应力组合下不易发生疲劳破坏; 而曲线上方的区域则被视为危险区域, 表示材料可能在该应力状态下发生疲劳失效。通过分析该曲线, 可以直观地评估材料在复杂载荷条件下的疲劳性能, 从而为工程设计和安全评估提供重要参考。

链轨节疲劳分析的曲线如图 11(e) 和图 11(f) 所示。在直线行驶工况下, 链轨节的应力状态位于疲劳极限临界曲线的下方。最大的切向应力小于临界疲劳切向应力, 表明动态载荷幅值未激活微观滑移带演化。材料内部剪切应力与静水压力组合未突破本征阈值, 疲劳裂纹形核概率趋近于零。在转向工况下, 链轨节的部分应力状态位于疲劳极限临界曲线的上方。危险区域材料承受的剪切应力与静水压力的组合显著激活了微观塑性应变累计机制, 裂纹萌生驱动力进入非稳态区间。

这一研究从疲劳角度验证了履带链轨节设计的可靠性, 为链轨节在复杂载荷条件下的疲劳寿命预测提供了科学依据, 有助于进一步提升液压挖掘机的耐用性与安全性。

2.4 S-N 曲线与寿命预测

尽管 Dang Van 准则主要用于评估链轨节的无限寿命安全性, 但若需进行疲劳寿命预测, 可结合 S-N 曲线, 针对危险区域估算其实际寿命, 以确保设计的可靠性和耐久性。

S-N 曲线首先由 Wöhler 在 19 世纪提出, 根据 Basquin^[21] 方程, S-N 曲线的表达式为:

$$\sigma_a^m N_f = n \quad (16)$$

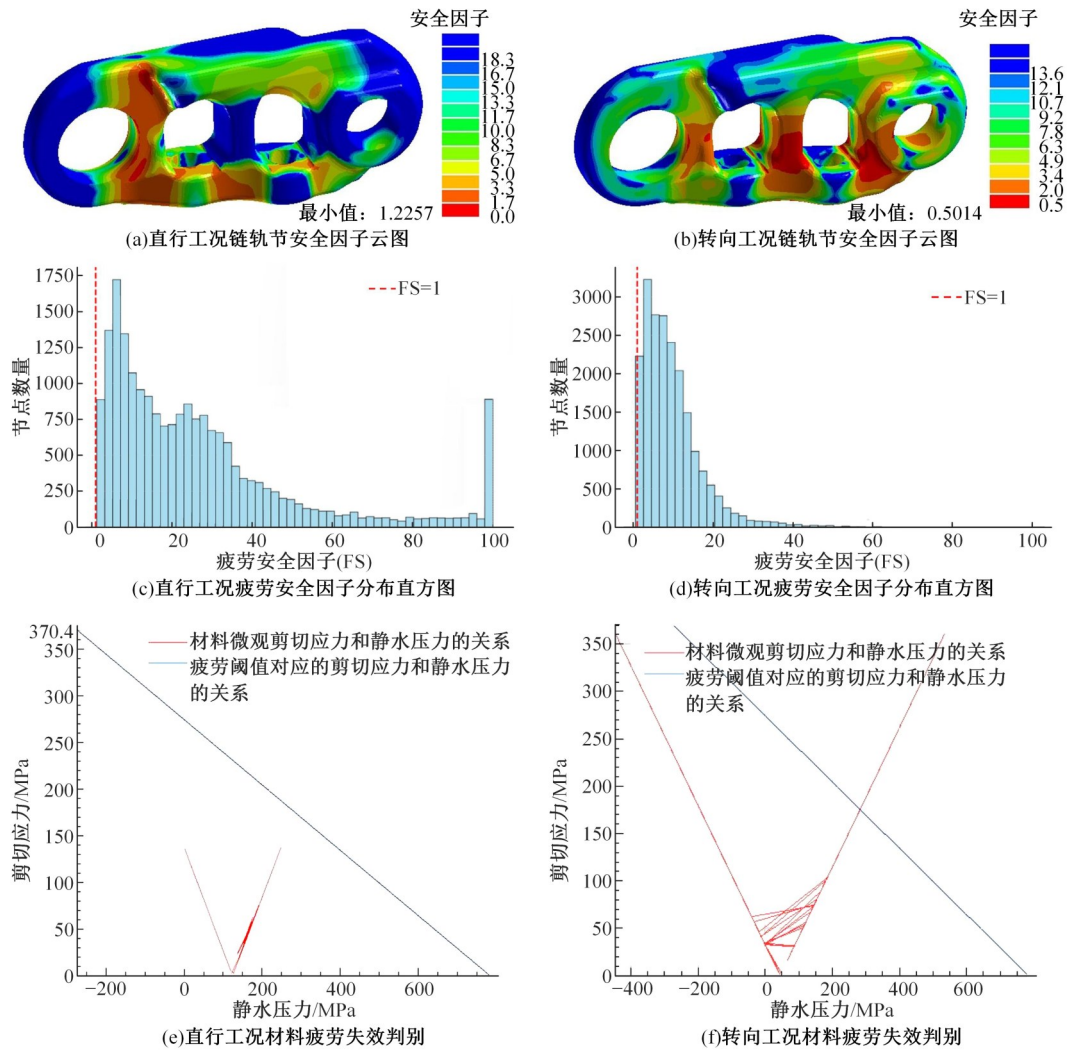


图11 疲劳安全分析结果

Fig. 11 Fatigue safety analysis results

式中: σ_a 是应力幅值; N_f 是疲劳寿命; m 和 n 是材料参数, 可通过试验获得, 其对数形式如下:

$$\lg \sigma_a = a + b \lg N_f \quad (17)$$

式中: a 、 b 为材料常数, 可由式子(18)推导得出。

当疲劳寿命 $N_f = 10^3$ 时, 疲劳应力通常接近材料的极限强度 σ_b 。采用经验公式:

$$\sigma_{10^3} = 0.9\sigma_b \quad (18)$$

此假设基于高周疲劳起始阶段应力接近材料强度极限的工程实践。

疲劳极限 σ_{-1} 通常对应 $N_f = 10^7$ 循环次数, 对于金属材料, 一般的经验公式为:

$$\sigma_{-1} \approx 0.5\sigma_b \quad (19)$$

考虑到估计误差, 可以引入安全系数进行保守修正:

$$\sigma_{-1} = 0.5\sigma_b \times 0.8 = 0.4\sigma_b \quad (20)$$

链轨节材料 $\sigma_b = 930$ MPa, 因此链轨节材料

的 S-N 曲线如图 12 所示。

Dang Van 准则计算得到的最大等效应力:

$$S_{eq} = \max(\tau(t) + a_{DV} \cdot \sigma_H(t)) = \frac{\tau_w}{SF} \quad (21)$$

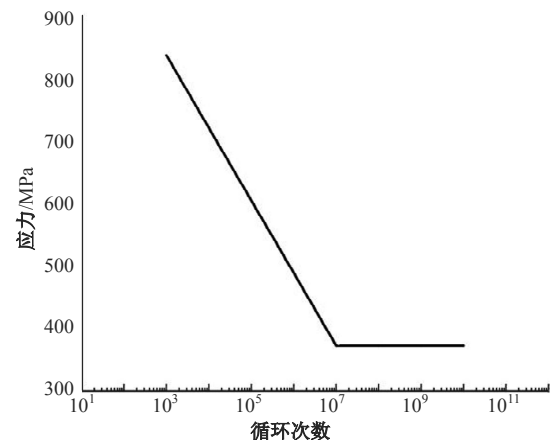


图12 链轨节材料SN曲线

Fig. 12 SN curve of track link material

将等效应力带入 S-N 曲线,即可得到疲劳寿命预测。

由式(23)可以得出结论,寿命 N_f 与 SF 呈现负幂次关系,当 SF 越小,疲劳寿命越低;当 $SF > 1$ 时,寿命趋于无限。

直线行驶工况下的最小的安全因子大于 1,寿命趋于无限,当结构发生改变与材料更换时,安全因子是可能小于 1 的。

转向行驶工况下的最小安全因子为 0.501 4,是小于 1 的属于有限寿命。两种工况下的疲劳寿命如表 4 所示。

链轨节常见的疲劳断裂如图 13 所示,实际疲劳断裂发生的位置与疲劳安全因子值较小区域基本吻合。

表 4 不同工况下的疲劳寿命预测

Table 4 Fatigue life prediction under different working conditions

工况	最小安全因子	寿命
直线行驶	1.225 7	大于 10^7
转向行驶	0.501 4	3.59×10^6

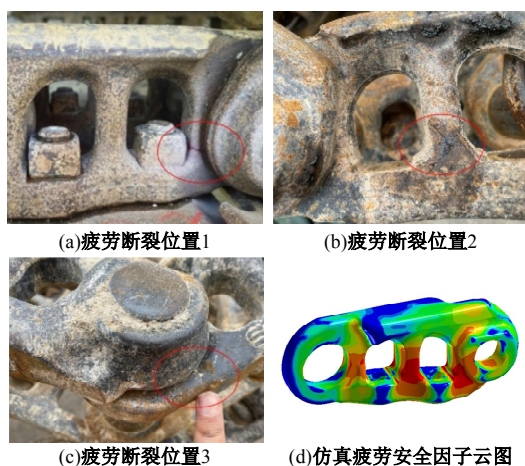


图 13 疲劳断裂位置对比图

Fig. 13 Comparison diagram of fatigue fracture locations

3 结 论

(1)通过直行和转向工况下试验测量数据与动力学仿真数据对比(关键参数误差 $\leq 10\%$),构建液压挖掘机履带链轨节的双工况高精度动力学模型,为后续的有限元分析奠定了基础。

(2)将提取的载荷谱导入有限元分析软件中,基于多轴疲劳准则,对链轨节进行多轴应力状态下的疲劳强度评估,求得各区域疲劳安全系数,进而结合材料 S-N 曲线定量预测链轨节疲劳

寿命。

(3)所提方法通过动力学-有限元-疲劳准则的跨尺度耦合,建立了液压挖掘机链轨节疲劳寿命的快速预测体系,为工程机械关键运动部件设计、结构优化与材料选择提供依据。

参考文献:

- [1] Rubinstein D, Coppock J L. A detailed single-link track model for multi-body dynamic simulation of crawlers[J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(5): 355-364.
- [2] Wang L, Chen X G, Li Z G, et al. Investigation of tracked mining vehicles' driving performance at varying travel speeds by experimental and numerical simulation[J]. Applied Ocean Research, 2024, 152: 104142.
- [3] 叶华文, 邓加林, 冯志皓, 等. 拉-扭复合疲劳加载作用下薄壁钢管管裂纹扩展机理[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 55(10): 3253-3261.
Ye Hua-wen, Deng Jia-lin, Feng Zhi-hao, etc. Mechanism of crack propagation in thin-walled steel circular tubes under tensile torsional fatigue loading [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 55(10): 3253-3261.
- [4] 孙树磊, 雷丽妃, 黄海波, 等. 基于用户作业工况的履带式挖掘机加速疲劳强化路面构建方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 319-328.
Sun Shu-lei, Lei Li-fei, Huang Hai-bo, et al. Construction method of accelerated fatigue strengthened road surface for crawler excavators based on user operation conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 319-328.
- [5] Niesłony A, Dsoki C E, Kaufmann H, et al. New method for evaluation of the manson-coffin-basquin and ramberg-osgood equations with respect to compatibility[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(10): 1967-1977.
- [6] Sun Q, Dui H N, Fan X L. A statistically consistent fatigue damage model based on Miner's rule[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 69: 16-21.
- [7] Susmel L, Tovo R, Lazzarin P. The mean stress effect on the high-cycle fatigue strength from a multiaxial fatigue point of view[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(8): 928-943.
- [8] Zhang Z, He Z W, Yang B, et al. An improved Goodman-Smith fatigue limit diagram for railway vehicle base metals and welded structures[J]. Interna-

- tional Journal of Fatigue, 2024, 182: 108160.
- [9] Chiocca A, Frendo F, Marulo G. An efficient algorithm for critical plane factors evaluation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 242: 107974.
- [10] Messele A G, Mekonnen T H, Mekonone S T. Investigation on fatigue parameters in railway wheels using a critical plane model[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 166: 108874.
- [11] Wang T H, Wang Y R, Wei D S, et al. An engineering applicable method for multiaxial fatigue under proportional and non-proportional loads based on the octahedral plane projection[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 187: 108475.
- [12] Zhang Q, Hu X, Zhang Z, et al. The mean stress and phase angle effect on multiaxial fatigue behavior of a TiAl alloy: Failure analysis and life modeling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 193: 106123.
- [13] Dantas R, Correia J, Lesiuk G, et al. Evaluation of multiaxial high-cycle fatigue criteria under proportional loading for s355 steel[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 105037.
- [14] Lepagneul J, Tadrist L, Sprauel J M, et al. Fatigue lifespan of a planetary roller-screw mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 172: 104769.
- [15] Bossy E, Noyel J P, Kleber X, et al. Competition between surface and subsurface rolling contact fatigue failures of nitrided parts: A Dang Van approach[J]. Tribology International, 2019, 140: 105888.
- [16] Causse B, Bernot R, Poyet N, et al. Multiaxial fatigue on cableway installations components: use of the Dang Van criterion based on detail categories of EN 1993-1-9 standard[J]. Procedia Structural Integrity, 2024, 57: 540-549.
- [17] El-daher C C, Kebir H, Bouvier S, et al. Prediction of fatigue damage and spalling in a multilayered journal bearing shell[J]. Tribology International, 2022, 175: 107850.
- [18] 周琳. 履带车辆路径规划与轨迹跟踪控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学机械与航空航天工程学院, 2020.
- Zhou Lin. Research on path planning and trajectory tracking control methods for tracked vehicles[D]. Changchun: College of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, 2020.
- [19] Zhao H Y, Wang G Q, Wang H T, et al. Fatigue life analysis of crawler chain link of excavator[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 737-748.
- [20] Desimone H, Bernasconi A, Beretta S. On the application of Dang Van criterion to rolling contact fatigue[J]. Wear, 2006, 260(4): 567-572.
- [21] Kohout J, Veřchet S. A new function for fatigue curves characterization and its multiple merits[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(2): 175-183.