

力学

# 基于作业段识别的装载机半轴载荷谱编制及其在疲劳预测的应用

方奕凯 侯亮\* 王少杰 陈鼎 郭腾鹏

(厦门大学航空航天学院机电工程系 厦门 361005)

**摘要** 为改进轮式装载机可靠性及耐久性设计中数据清洗和分析的方法,以装载机半轴为对象,优化载荷信号去噪和作业段识别的方法。利用小波自适应阈值法去除实测载荷的噪声尖峰和突变信号,并通过迭代平滑滤波法搜寻单个作业周期内同步载荷信号的极值点,识别、划分作业段为“行走段-铲掘段”。结合雨流计数和频次外推法编制载荷谱,有限元静力分析,以及 Miner 准则对装载机半轴进行疲劳寿命分析。结果表明:雨流计数的均幅值结果符合正态分布和三参数威布尔分布的假设性检验,疲劳分析损伤最大节点出现在万向节叉连接处,其寿命为  $7.22 \times 10^8$  次循环。结果证实了作业段智能识别法的便利性和准确性,为传动系统疲劳分析的数据处理提供了借鉴。

**关键词** 轮式装载机 半轴载荷谱 小波阈值去噪 作业段识别 疲劳寿命预测

中图分类号 O346.2; 文献标志码 A

轮式装载机常用于建筑、矿山、交通施工的铲掘和运输作业,其传动系统受复杂交变应力影响常造成半轴断裂失效、半轴花键破损等故障<sup>[1]</sup>。运用应力寿命法、应变寿命法或应力场强法<sup>[2-3]</sup>的结构件疲劳分析是提高车辆可靠性必要的技术手段:①多体动力学仿真数据与疲劳分析相结合的方法常用于如轴承、连杆等简单外形部件的寿命计算,缺乏真实载荷作用影响;②工程应用中常采用基于载荷谱的疲劳分析方法,能更加真实地反映实际工况。针对载荷谱编制及结构件疲劳分析,国内外学者做了大量研究:文献[4,5]从变幅值载荷(VAL)测试、数据预处理和试验台加载谱的编制进行了研究;文献[6,7]通过挡位电平信号分别把作业段划分为四段和六段,利用雨流计数和频次外推的方法合成载荷谱;文献[8,9]基于实测载荷谱和有限元分析结果,结合 Miner 累计损伤理论,分别对变速箱输出法兰

和控制臂进行疲劳寿命分析;文献[10]利用马尔科夫链蒙特卡罗方法重构整体时域载荷历程并对液压缸进行疲劳寿命分析。

在恶劣工况下装载机半轴扭矩常出现大幅值突变,非平稳随机载荷的去噪方法<sup>[6,7,9,10]</sup>容易造成间歇性噪声尖峰残留,反之滤波波形过于平滑,信号失真影响均幅值分布的假设性检验。作业过程中装载机做重复的“铲掘-负载-卸料”动作,其半轴扭矩具有各态历经型,但根据挡位电平信号对作业段进行人工划分<sup>[7]</sup>,没有考虑由于装载距离、停靠位置变化出现多个短暂后退再前进等因素,浪费人力时间,影响分段统计结果,作业段划分方法亟待改进。基于此,现测取四种工况下的传动结构和工作装置的载荷信号,采用统计方差法和小波阈值去噪相结合的方法对载荷信号进行数据清洗。针对转斗大腔压力、动臂大腔压力和半轴扭矩信号的波形特性,寻找典型作业段的极值点,智能划分单个工作循环为“铲掘段-行走段”。结合 Abaqus 有限元分析和 nSoft 疲劳分析对装载机半轴进行寿命预测,为传动系可靠性研究的数据分析方法提供可行的指导。

## 1 整体方案及数据预处理

### 1.1 整体方案

基于载荷谱和有限元分析结果的疲劳分析流程如图1所示,选用某型号轮式装载机为研究对象,首先对车辆载荷信号进行数据测取。由于不同物料间粒度大小、料堆高度和地面平整度的不同,影响了车辆铲掘和运载作业时所受载荷的大小。为全面、真

2017年4月28日收到 福建省财政厅企业技术创新项目资助  
第一作者简介:方奕凯(1993—) 硕士研究生。研究方向:车联网技术。E-mail: yikaifang@qq.com。

\* 通信作者简介:侯亮(1974—) 教授,博士研究生导师。研究方向:复杂机电装备产品的大批量定制与创新设计、振动与噪声控制、预测与健康管。E-mail: hliang@xmu.edu.cn。

引用格式:方奕凯,侯亮,王少杰,等. 基于作业段识别的装载机半轴载荷谱编制及其在疲劳预测的应用[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(34): 1—7

Fang Yikai, Hou Liang, Wang Shaojie, et al. Load spectrum compiling based on operation section recognition and fatigue life prediction of wheel loader axle shaft [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 1—7

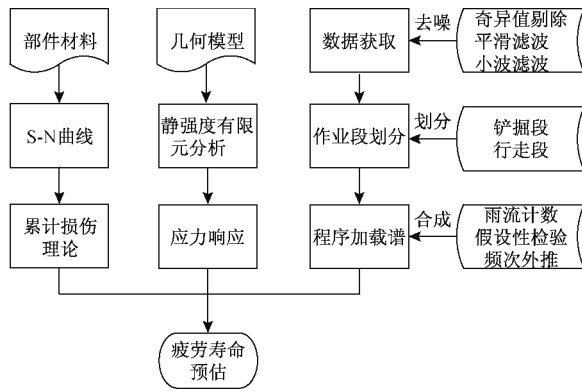


图1 半轴疲劳分析流程图

Fig. 1 Flow diagram of fatigue analysis of axle shaft

实地反映测试样机的受载情况,选取原生土、煤炭、砂石和铁矿石作为典型作业对象。根据车辆传动系统与工作装置的结构特征,选取动臂大腔压力和转斗大腔压力作为作业段识别和划分的依据,半轴扭矩作为疲劳分析的载荷条件。测试方法上,动臂大腔压力和转斗大腔压力利用有线测试获取,半轴扭矩利用近程遥测获取<sup>[11]</sup>。

## 1.2 数据清洗

由于信号噪声、数据传输异常等外界干扰,实际采集载荷信号的随机性强,部分时段信号的周期性不明确,并且存在大幅值间歇噪声尖峰。根据巴特沃斯低通滤波器在通频带内的平坦特性,首先利用10阶、截止频率2 Hz的巴特沃斯滤波器滤除大多数高频噪声,并利用统计方差法剔除显著的奇异值<sup>[12]</sup>。

传统去噪方法使得变换后的信号畸变升高,难以刻画信号的非平稳特性。小波阈值分析具有多分辨率、去相关性和小波基多样性的优点<sup>[13-15]</sup>,用于载荷信号的细节处理:①选择合适小波基及分解层数对原始信号 $x(n)$ 进行正交小波变换得到各层尺度系数 $w_{j,k}$ ;②对各层尺度系数阈值处理得到小波系数的估计值 $\hat{w}_{j,k}$ ;③对阈值处理后的小波系数重构,得到去噪后的信号 $\hat{x}(n)$ 。阈值函数选取上,硬阈值法在小波域内存在间断点,无法对阈值函数全局求导;若小波系数较大,利用软阈值法重构的信号与原信号偏差较大。因此采用一种改进后的阈值函数<sup>[11]</sup>进行处理:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}(1-u) + u \operatorname{sign}(w_{j,k}) f(|w_{j,k}|), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ w_{j,k}(1-u), & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

$$f(|w_{j,k}|) = |w_{j,k}| - \frac{\lambda}{1 + e^{-(|w_{j,k}|^p - 1)}} \quad (2)$$

式中, $u$ 为范围 $[0, 1]$ 的自然数; $n$ 为非零自然数。不同小波阈值去噪的处理效果对比表明(表1),采

用改进阈值方法的信噪比<sup>[14]</sup>较高,均方根误差小,滤波效果良好。又由于Daubechies小波基局部化能力较好<sup>[8, 11]</sup>,考虑对称性和正交性影响选用db9小波基。扭矩信号滤波波形见图2。

表1 小波阈值去噪处理效果对比

Table 1 Comparison of different wavelet threshold denoising methods

小波阈值去噪方法			SNR	RMSE
小波基	层数	阈值		
db9	10	硬阈值	65.588 8	0.398 4
db9	10	软阈值	57.249 8	1.040 6
db9	10	新阈值	79.410 5	0.081 1
sym8	10	硬阈值	65.345 2	0.409 7
sym8	10	软阈值	57.076 6	1.061 5
sym8	10	新阈值	79.122 0	0.083 9

注:SNR为信噪比;RMSE为均方根误差。

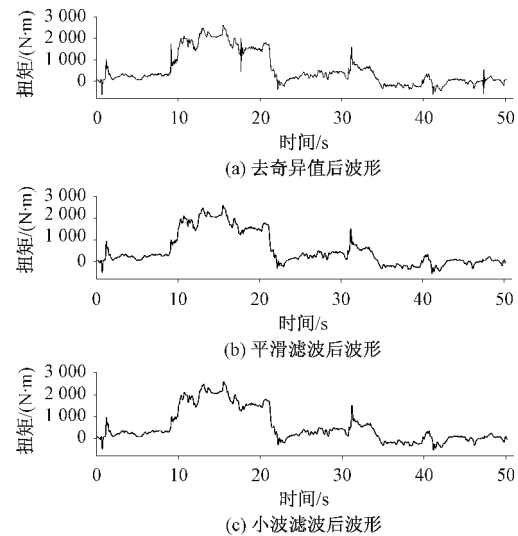


图2 扭矩信号滤波波形

Fig. 2 Waveform of torque signal after filtering

## 1.3 作业段识别

载荷谱作业周期划分是指对于重复的作业过程,区分每个作业循环的载荷谱数据,计算重复作业次数。根据FCM聚类算法划分载荷谱作业周期<sup>[11]</sup>,观察单个作业周期内载荷谱数据(图3)发现:①半轴扭矩信号呈小幅值、相对稳定的波动,但其均值在AB段呈阶跃式增加;②转斗大腔压力和动臂大腔压力在A处达到相对较低点,并在AB段呈上升趋势,转斗大腔压力在B处达到最高点;③实际工况下AB段为装载机铲掘作业段,三通道信号在时域内的变化具有同步性。因为AB段扭矩信号在数值上显著增加并与其他段有明显的区别,定义AB作业段为“铲掘段”,其余作业段为“行走段”。

为划分作业段,应确定动臂大腔压力信号点A和转斗大腔压力信号点B的位置。对转斗大腔压

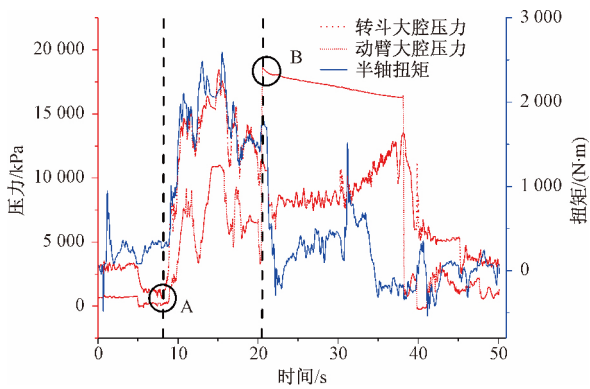


图3 单个作业周期内载荷信号波形

Fig.3 Waveform of load signals in one operation cycle

力进行 100 次平滑迭代滤波, 确定极大值点 Point\_A [图 4(a)] ,再通过 Point\_A 点寻找相对稳定变化段的起始点 Point\_B [图 4(b)] ,Point\_B 即为点 B。如图 4(c) 所示,寻找动臂大腔压力信号的相对极小值点,以及相对稳定变化段的极小值点 Point\_C,在 Point\_C 点时域波形前的第一个值小于 Point\_C 的相对极小值点 Point\_D 即为点 A。在此作业循环内,AB 为铲掘段,其余信号段为行走段。将同一测点、相同作业段的所有工作循环的信号进行连接,实现载荷信号的分段处理。连接后各作业段的扭矩信号符合平稳性检验和各态历经检验<sup>[6,8]</sup>,可任取一个长度足够的信号子样进行统计计数。单个作业周期内作业段划分后载荷信号波形如图 5 所示。

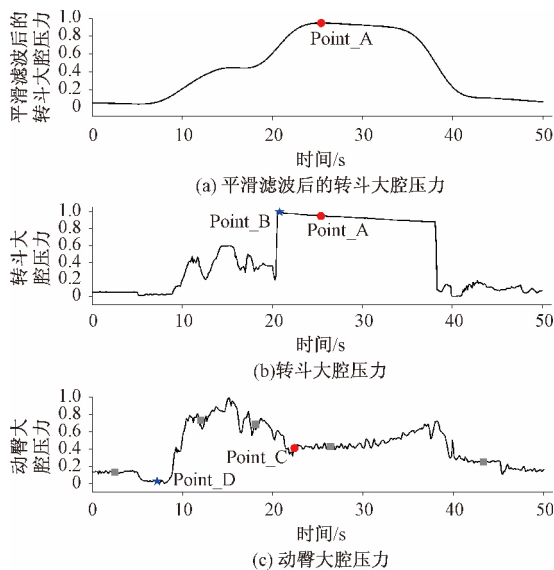


图4 作业段划分原理图

Fig.4 Schematic diagram of division operations

## 2 载荷谱编谱

### 2.1 雨流计数及假设性检验

双参数雨流计数法考虑了动强度(幅值)和静

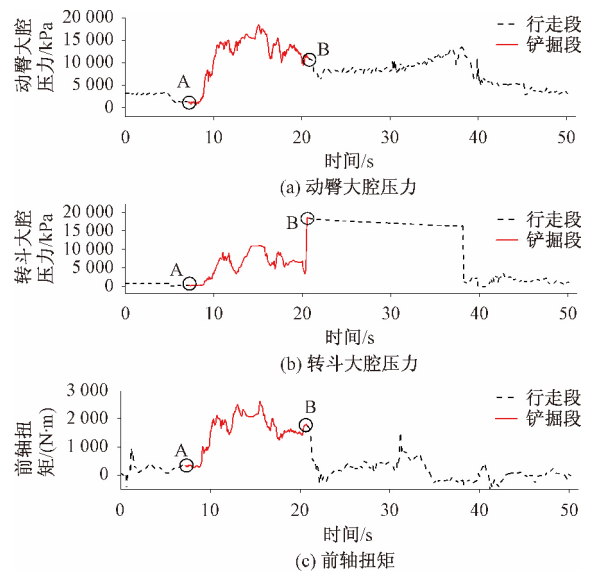


图5 单个作业周期内作业段划分后载荷信号波形

Fig.5 Waveform of load signals after division in one operation cycle

强度(均值)两个变量,是对基本疲劳损伤单元的计数统计,其结果包含不同均值、幅值载荷循环的频次<sup>[8,16,17]</sup>。利用雨流计数法对实测的时间-载荷历程统计计数,图 6 和图 7 分别为其生成的均值-频次分布直方图和幅值-频次分布直方图。假设均值-频次和幅值-频次分别服从正态分布和三参数威布尔

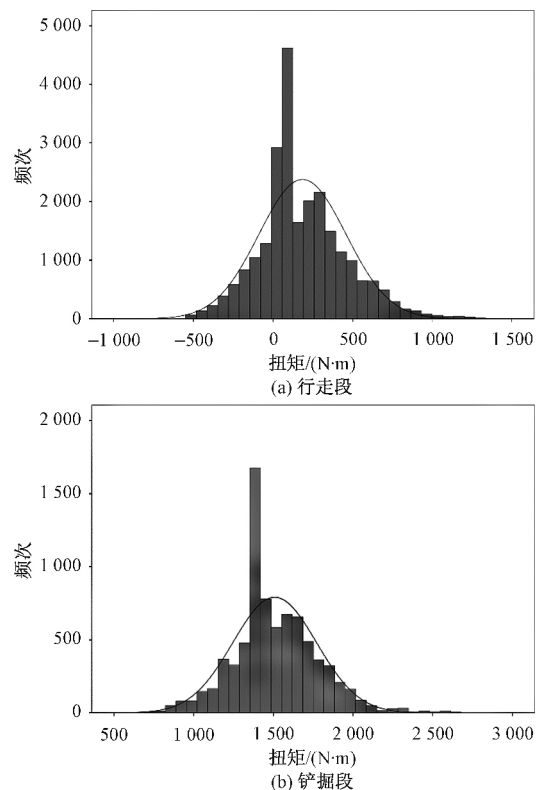


图6 半轴均值-频次分布直方图

Fig.6 Distribution histogram of mean-frequency of axle shaft

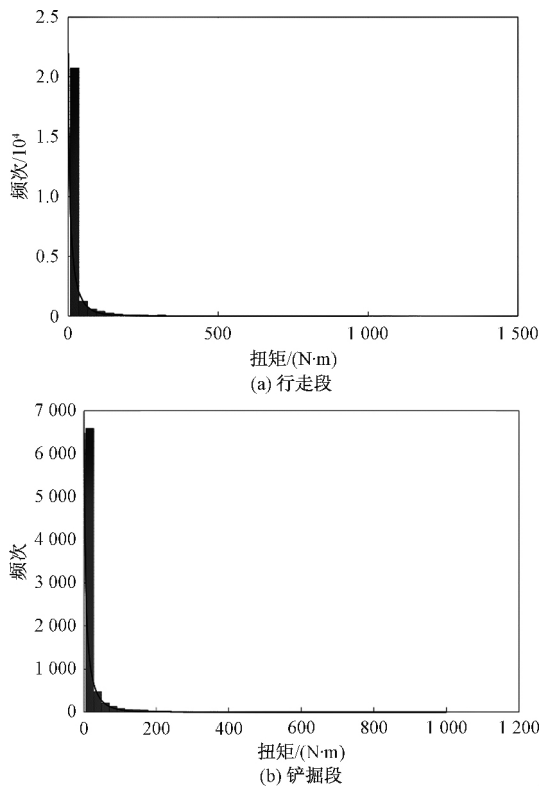


图7 半轴幅值-频次分布直方图

Fig. 7 Distribution histogram of amplitude-frequency of axle shaft

分布,其联合分布概率密度函数为

$$f(x, y) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{x - \varepsilon}{\beta} \right)^{\alpha - 1} e^{-\left( \frac{x - \varepsilon}{\beta} \right)^\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{(y - \mu)^2}{2\delta^2}} \quad (3)$$

式(3)中,  $x$  为载荷均值;  $\mu$  为正态分布均值;  $\delta$  为正态分布标准差;  $y$  为载荷幅值;  $\alpha$  为威布尔分布的形状参数;  $\beta$  为威布尔分布的尺度参数;  $\varepsilon$  为威布尔的分布位置参数。在 95% 的置信区间内利用极大似然法进行参数估计,分别得到铲掘段和行走段均幅值概率分布的参数估计量(表 2),其中行走段载荷均值为 185.02 N·m,铲掘段均值为 1 507.78 N·m。

表3 半轴铲掘段二维载荷谱

Table 3 Two-dimensional load spectrum of axle shaft in shoveling section

	载荷幅值变程/(N·m)							
	738	701	627	535	424	314	203	92
1 006	0	0	0	0	0	3	37	774
956	0	0	0	0	2	15	160	3 400
855	0	0	0	1	7	52	547	11 601
载荷均值变程 / (N·m)	729	1	1	4	22	166	1 756	37 236
578	0	1	1	8	49	360	3 805	80 667
427	0	1	2	13	78	580	6 127	129 904
277	0	1	3	15	94	694	7 335	155 517
126	0	0	2	12	71	528	5 573	118 161

表2 均幅值概率分布的参数估计量

Table 2 Estimator of parameters of probability distribution of mean and amplitude

参数	行走段	铲掘段
幅值-频次	$\alpha$ 0.724 4	0.690 7
	$\beta$ 20.235 7	16.410 9
	$\varepsilon$ 0	0
均值-频次	$\mu$ 185.02	1 507.78
	$\delta$ 273.61	263.17

## 2.2 频次外推及载荷谱编制

实际测量的载荷信号子样的时间历程有限,难以确保信号母样中有少数极值载荷的出现。为了表征整个生命周期的载荷历程,利用式(4)将作业频次扩展到  $10^6$  次循环<sup>[8]</sup>:

$$N'_i = \frac{10^6}{\sum_{i=1}^2 N_i} N_i, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式(4)中,  $i = 1, 2$  分别代表行走段和铲掘段,  $N'_i$  为某作业段载荷扩展后累积频次数,  $N_i$  为某作业段实测斗数合成累积频次。

由于连续的累积频次曲线难以在实验室重现,必须将其转化为阶梯型试验台加载谱。根据正态分布极值计算公式式(5)和三参数威布尔极值计算公式式(6)计算均幅值极值,采用系数为 1、0.95、0.85、0.725、0.575、0.425、0.275 和 0.125 的非等间隔的比值系数法将均幅值分为八级<sup>[6]</sup>,根据式(7)生成二维谱,表 3 为半轴铲掘段二维载荷谱。

$$M_{\max_i} = \mu_i + \sigma_i^3 \quad (5)$$

$$A_{\max_i} = \varepsilon_i + \beta_i \alpha_i \sqrt{-\ln N_i} \quad (6)$$

$$n_i = N'_i \int_{S_{m1_i}}^{S_{m2_i}} \int_{S_{a1_i}}^{S_{a2_i}} f_i(x, y) dx dy \quad (7)$$

式中,  $M_{\max_i}$ 、 $A_{\max_i}$  分别为均值、幅值的极值;  $f_i(x, y)$  为某作业段的联合分布概率密度函数;  $S_{m1_i}$ 、 $S_{m2_i}$  分别为均值积分下限、上限;  $S_{a1_i}$ 、 $S_{a2_i}$  分别为幅值积分

下限、上限。采用波动中心法将各级循环均值与其对应的频次乘积之和除以总频次,求得波动中心。采用二维谱中的幅值分级,其频次为二维谱中幅值所对应的各级均值频次之和,化简二维载荷谱为方便加载的一维程序加载谱。表 4 为半轴铲掘段一维程序加载谱。

表 4 半轴铲掘段一维程序加载谱

Table 4 One-dimensional program loading spectrum of axle shaft in shoveling section

载荷幅值变程/(N·m)	载荷均值/(N·m)	载荷幅值变程/(N·m)	载荷均值/(N·m)
-	1 665	362	202
629	1	267	1 260
598	2	173	11 295
535	8	79	232 206
456	40		

### 3 实例分析

#### 3.1 有限元静力分析

传动轴管与万向节叉焊接为一体组成装载机半轴结构,工作时作为承载部件受纯扭矩作用产生扭转变形。通过有限元软件 Abaqus 进行静力学分析<sup>[18,19]</sup>,确定半轴受载最薄弱的部位及最大扭转应力。采用实体单元建模,为保证网格质量,采用二次节点的四面体单元 C3D26 进行网格划分,模型共有单元 135 529 个,节点 181 646 个。半轴材料为 30CrMnTi,其弹性模量为 205 GPa,泊松比为 0.250,质量密度为 785 kg/m<sup>3</sup>。在半轴一端的万向节叉约束六个自由度,另一端面的中心点施加与端面法向量平行、均值 2 294 N·m、默认 Ramp 幅值的扭矩。由图 8 可知,部件最大应力出现在万向节叉连接处,其值 232.4 MPa 远小于材料屈服极限为 1 470 MPa,寿命循环次数较高,属于高周疲劳范围。

#### 3.2 疲劳寿命分析

Miner 线性累积损伤理论假定,各应力水平下材料的总损伤线性累加,且累积损伤度为 1 时样件发生破坏<sup>[20]</sup>。对塑性材料,Gerber 准则更贴切地反

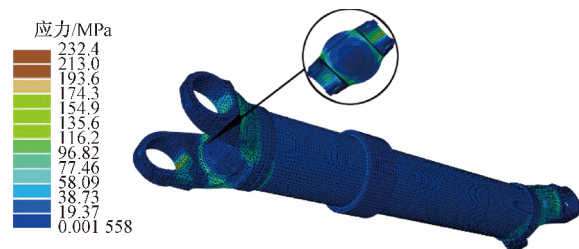


图 8 半轴应力分布云图

Fig. 8 Contours of stress distribution of axle shaft

映真实应力应变:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式(8)中, $\sigma_a$ 为应力幅; $\sigma_{-1}$ 对应对称循环作用下的疲劳极限; $\sigma_m$ 为平均应力; $\sigma_b$ 为抗扭强度极限。

将有限元模型导入 nSoft 软件的 FE-fatigue 接口模块,把半轴静力分析结果文件转化为对应的应力时间历程文件,结合 Geber 准则进行置信度为 50% 的疲劳分析<sup>[20,21]</sup>。前五个疲劳损伤最大的节点及循环寿命如表 5 所示,损伤最大的节点是 81 772 号节点,出现在万向节叉连接处,其疲劳寿命为  $7.22 \times 10^8$  次循环。半轴寿命分布云图如图 9 所示,在万向节叉的连接处损伤较大,与有限元分析结果和真实工况相吻合。

表 5 疲劳损伤最大节点处疲劳寿命及损伤大小

Table 5 Fatigue life and damage value of maximum damage nodes

节点	疲劳寿命/ $10^9$	损伤/ $10^{-10}$
81 772	0.722	13.850 5
81 781	1.722 1	5.806 95
81 782	9.060 4	1.103 70
82 798	9.503 4	1.052 25
125 393	10.102	0.989 89

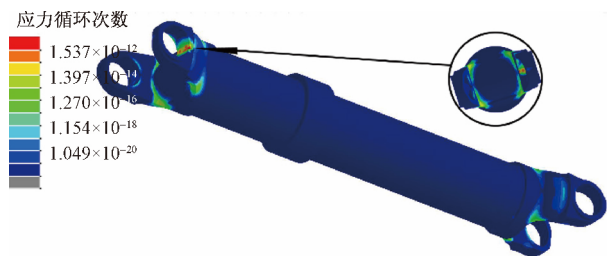


图 9 半轴寿命分布云图

Fig. 9 Contours of fatigue life distribution of axle shaft

### 4 结论

(1) 以轮式装载机的实测载荷信号为基础,优化数据预处理中信号去噪的方法,采用改进阈值函数的小波分析方法提升信噪比,同时保证原波形信息。

(2) 提出针对装载机作业特点的半轴扭矩作业段划分方法,通过迭代平滑滤波搜索时域波形的极值点,识别并划分单个作业循环为“行走段-铲掘段”,为载荷谱编制提供依据。

(3) 通过建立装载机半轴载荷谱,根据有限元静力分析结果和线性累积损伤理论,预测半轴损伤最大节点位置及其疲劳循环寿命。该方法有较好的实用性,可用于复杂工况下载荷数据的清洗与分析,

为车辆传动系统的可靠性设计提供方法指导。

### 参 考 文 献

- 张英爽, 王国强, 王继新, 等. 轮式装载机半轴载荷谱编制及疲劳寿命预测. 吉林大学学报(工学版) 2011; 41(6): 646—651  
Zhang Y S, Wang G Q, Wang J X, et al. Load spectrum compiling and fatigue life prediction of wheel loader axle shaft. Journal of Jilin University, 2011; 41(6): 1646—1651
- 杨剑秋, 陆山. 中长寿命轮盘应力寿命及可靠性分析方法. 航空动力学报 2007; 22(6): 991—995  
Yang J Q, Lu Shan. Methods for stress based life and its reliability analyses of discs with medium-long and long life. Journal of Aerospace Power, 2007; 22(6): 991—995
- 李玉春, 姚卫星, 温卫东. 应力场强法在多轴疲劳寿命估算中的应用. 机械强度 2002; 24(2): 258—261  
Li Y C, Yao W X, Wen W D. Application of stress field intensity for the prediction of multiaxial fatigue. Journal of Mechanical Strength, 2002; 24(2): 258—261
- Svensson T, Johannesson P, Maré J D. Fatigue life prediction based on variable amplitude tests—Methodology. International Journal of Fatigue, 2005; 27(8): 954—965
- Sonsino C M. Fatigue testing under variable amplitude loading. International Journal of Fatigue, 2007; 29(6): 1080—1089
- 刘永臣, 常绿, 孙丽. 轮式装载机传动系载荷谱编制方法研究. 中国机械工程 2012; 23(12): 1412—1416  
Liu Y C, Chang L, Sun L. A Method of compiling load spectrum on wheel loader transmission. China Mechanical Engineering, 2012; 23(12): 1412—1416
- 张英爽, 王国强, 王继新, 等. 工程车辆传动系载荷谱编制方法. 农业工程学报 2011; 27(4): 179—183  
Zhang Y S, Wang G Q, Wang J X, et al. Compilation method of power train load spectrum of engineering vehicle. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011; 27(4): 179—183
- 张英爽. 装载机传动系载荷谱的测取与应用研究. 长春: 吉林大学 2014  
Zhang Y S. Research on the load spectra acquisition and application of loader powertrain. Changchun: Jilin University 2014
- 刘永臣, 王国林, 孙丽. 车辆控制臂疲劳损伤分析与寿命预测. 农业工程学报 2013; 29(16): 83—91  
Liu Y C, Wang G L, Sun L. Fatigue damage analysis and life prediction for vehicle control arm. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013; 29(16): 83—91
- 梁云龙. 轮式装载机液压缸载荷谱编制方法与时域信号重构. 长春: 吉林大学 2011  
Liang Y L. Compiling method of load spectra and signal reconstruction in time-domain for hydraulic cylinders of wheel loader. Changchun: Jilin University 2011
- 王少杰. 基于作业谱分析与模式识别的工程车辆智能换挡技术研究与应用. 厦门: 厦门大学 2016  
Wang S J. Research and application of intelligent shift technology for engineering vehicle based on working spectrum analysis and pattern recognition. Xiamen: Xiamen University 2016
- 贾海波. 轮式装载机传动系载荷谱测试与编制方法研究. 长春: 吉林大学 2009  
Jia H B. Study on the test and generation methods about load spectrum of wheel loader driveline. Changchun: Jilin University 2009
- 高建波, 杨恒, 胡鑫尧, 等. 基于最大熵原理的小波去噪方法. 光谱学与光谱分析 2001; 21(5): 620—622  
Gao J B, Yang H, Hu X Y, et al. Maximal entropy principle wavelet denoising. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2001; 21(5): 620—622
- 吴光文, 王昌明, 包建东, 等. 基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法. 电子与信息学报 2014; 36(6): 1340—1347  
Wu G W, Wang C M, Bao J D, et al. A wavelet threshold denoising algorithm based on adaptive threshold function. Journal of Electronics & Information Technology, 2014; 36(6): 1340—1347
- 唐进元, 陈维涛, 陈思雨, 等. 一种新的小波阈值函数及其在振动信号去噪分析中的应用. 振动与冲击 2009; 28(7): 118—121  
Tang J Y, Chen W T, Chen S Y, et al. Wavelet-based vibration signal denoising with a new adaptive thresholding function. Journal of Vibration & Shock, 2009; 28(7): 118—121
- 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. 铁道学报 2012; 34(6): 34—39  
Bi J H, Chen H L, Ren H P. Analysis on fatigue life of contact wire based on rain-flow counting method. Journal of the China Railway Society, 2012; 34(6): 34—39
- 阎楚良, 王公权. 雨流计数法及其统计处理程序研究. 农业机械学报 1982; (4): 88—101  
Yan C L, Wang G Q. Investigation of rain-flow counting method and its program of statistical treatment. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1982; (4): 88—101
- 吴光强, 李运超, 盛云. 后悬架多轴疲劳寿命预测. 同济大学学报(自然科学版) 2010; 38(6): 880—884  
Wu G Q, Li Y C, Sheng Y. Multiaxial fatigue life prediction of rear suspension. Journal of Tongji University (Nature Science Edition), 2010; 38(6): 880—884
- 孙国芹, 尚德广, 陈建华, 等. 缺口件两轴循环弹塑性有限元分析及寿命预测. 机械工程学报 2008; (2): 134—138  
Sun G Q, Shang D G, Chen J H, et al. Elastoplastic finite element analysis and fatigue life prediction for notched specimens under biaxial cyclic loading. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008; (2): 134—138
- 邓锐. 机车转向架构架疲劳寿命预测. 成都: 西南交通大学 2008  
Deng R. Fatigue life prediction of a railway locomotive bogie frame. Chengdu: Southwest Jiaotong University 2008
- 赵丽娟, 马强, 刘鹏. 大采高采煤机新型摇臂壳体可靠性分析. 系统仿真学报 2014; 26(7): 1621—1626  
Zhao L J, Ma Q, Liu P. Reliability analysis on new ranging arm of large mining height shearer. Journal of System Simulation, 2014; 26(7): 1621—1626

## Load Spectrum Compiling Based on Operation Section Recognition and Fatigue Life Prediction of Wheel Loader Axle Shaft

FANG Yi-kai , HOU Liang\* , WANG Shao-jie , CHEN Ding , GUO Teng-peng

( Department of Mechanical and Electrical Engineering , School of Aerospace Engineering , Xiamen University , Xiamen 361005 , P. R. China)

**[Abstract]** In order to improve the method of data cleaning and data analysis in fatigue durability and modify reliability design of wheel loader , research on load signal denoising and operation section recognition of wheel loader axle shaft was conducted. In view of the shortcoming of residual noise and waveform distortion caused by traditional wavelet threshold analysis , an adaptive threshold denoising method was used. Operation sections were divided as “driving section-shoveling section” through searching the extreme points of synchronous load signal in one single work cycle after iterative smoothing filter. Based on one-dimensional program loading spectrum and the finite element analysis , the fatigue life of axle shaft was predicted using the Miner criterion. The result shows that rain flow counting results were consistent with Normal distribution and Weibull distribution hypothesis testing. And the maximum damage node appeared in the universal joint folk which fatigue life is  $7.22 \times 10^8$  times cycle. The result confirmed that the intelligent recognition method is convenient and accurate , which provides a reference method for data processing of fatigue analysis of wheel loader transmission system.

**[Key words]** wheel loader half axle load spectrum wavelet threshold denoising operation section recognition fatigue life prediction