

装载机工作装置载荷数据模型与载荷谱编制*

万一品¹, 宋绪丁¹, 员征文², 田维波¹

(1.长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室 西安,710061)

(2.徐工集团江苏徐州工程机械研究院 徐州,221004)

摘要 为了研究装载机工作装置载荷数据模型和载荷谱特性,以动臂板上截面弯矩为中间变量,确定工作装置当量外载荷。以LW900K装载机实测铰点载荷为依据,建立了核密度估计和参数分布估计两种当量外载荷数据模型,编制了疲劳试验载荷谱并进行了损伤验证。核密度估计模型和参数分布模型都能够获取工作装置载荷谱,参数分布模型载荷谱损伤结果明显偏小,核密度估计模型载荷谱损伤结果计算得到的焊接位置处疲劳寿命更接近疲劳设计寿命 3×10^4 h。结果表明:核密度估计模型获得的载荷谱损伤结果更接近实际,其以雨流矩阵为基础,能够弥补参数分布模型中分布拟合对低频数大载荷影响弱化的不足,更能反映被估计总体数据的真实特征。建立的载荷数据模型和编制的载荷谱结果为装载机工作装置疲劳寿命预测提供依据。

关键词 装载机;工作装置;载荷数据模型;载荷谱;疲劳损伤

中图分类号 TH243.1

引言

装载机工作装置抗疲劳设计和疲劳试验时须确定与实际作业工况相符的载荷谱,常利用程序载荷谱在试验台上再现机械结构所承受的随机载荷^[1-2]。

Yan等^[3]借助当量寿命概率分布,在保持载荷时间历程与状态参数一致的前提下编制了飞机结构的疲劳载荷谱。文献[4-5]运用轮心位移反求汽车车身的当量外载荷,结合多体动力学编制了汽车车身载荷谱。于佳伟等^[6]在汽车室内模拟实验中,将汽车实测载荷时间历程编制成试验用载荷谱,应用于耐久性试验中。文献[7-8]研究了铁路货车车钩与车体的载荷谱编制与疲劳寿命预测方法,编制的加速试验谱减少了车钩疲劳试验次数。高云凯等^[9]则利用外载荷编制的程序载荷谱实现了汽车车身的疲劳台架试验和寿命预测。装载机载荷谱的研究多集中在传动系,张英爽等^[10]测试了装载机传动系载荷,编制了疲劳试验载荷谱。装载机结构件的研究多集中在静强度分析、动力学仿真以及基于仿真的结构优化分析^[11],对载荷谱的相关研究很少。

文献[12]给出了装载机斗尖载荷水平、竖直等不同分量的载荷谱,然而在疲劳台架试验加载时很难保持不同分量载荷谱之间的相位关系。笔者确定

了装载机工作装置固定姿态下的外载荷与动臂铰点载荷当量关系,建立了核密度估计和参数分布估计两种外载荷数据模型,编制载荷谱并通过损伤试验分析了两种载荷数据模型编谱结果的差异。

1 装载机工作装置外载荷当量

装载机工作装置由铲斗、连杆、动臂、摇臂、动臂油缸和摇臂油缸铰接组成,在油缸作用下实现物料铲装和卸载。工作装置在一个作业循环内测得的载荷对应不同作业姿态,获得固定姿态下的当量载荷是编制疲劳试验载荷谱的基础。实测大载荷出现在铲掘时刻,选择铲掘作业姿态为外载荷当量姿态,保证对结构损伤影响大的载荷与实际一致^[13]。将装载机所受外载荷简化为作用在铲斗的集中载荷,固定姿态下的装载机当量外力如图1所示。图中:A、B、C、D、E、H、J、K、L分别为各结构铰接点;O点为当量外力作用点; F_O 装载机当量外力; θ_1 为力 F_O 与水平方向的夹角; l 和 h 分别为O点到点A水平和竖直方向的距离; F_E 和 F_L 分别为摇臂油缸和动臂油缸支反力。

装载机在铲装物料时,动臂油缸为支点,视动臂结构为悬臂梁,选取动臂板上弯矩作为外力当量的

* 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF07B02);中央高校基本科研业务专项资金资助项目(300102259304);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JQ-283)

收稿日期:2019-05-22;修回日期:2019-09-23

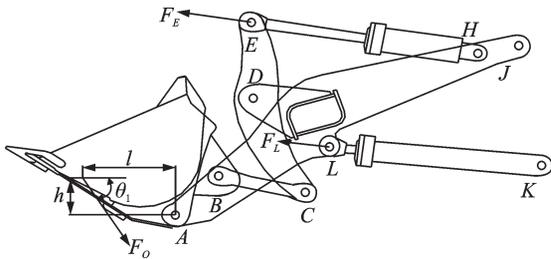


图 1 固定姿态装载机外力当量

Fig.1 External force equivalent indication of fixed attitude

中间变量,保证动臂结构在实际作业过程中,不同作业姿态下的截面弯矩与疲劳台架试验时保持一致,从而确保疲劳台架上动臂的整体受力状态与实际铲装作业状态一致。

装载机当量外力 F_o 及其作用于铲斗的位置参数 l, h 和 θ_1 是未知量,以动臂铰点 AJ 连线为 x' 方向建立动臂局部坐标系 $x'Jy'$,已知动臂局部坐标系下各铰点受力,便可求得动臂截面弯矩。动臂局部坐标系下动臂截面弯矩如图 2 所示。

图中: $F_{Ax'}$, $F_{Ay'}$, $F_{Dx'}$, $F_{Dy'}$, $F_{Lx'}$ 和 $F_{Ly'}$ 分别为动臂铰点 A, D, L 上受力在动臂局部坐标系 x' 和 y' 方向的分力; O_1, O_2, O_3 和 O_4 为动臂不同截面处的弯矩计算点; O_5 为动臂最大弯矩截面弯矩点。

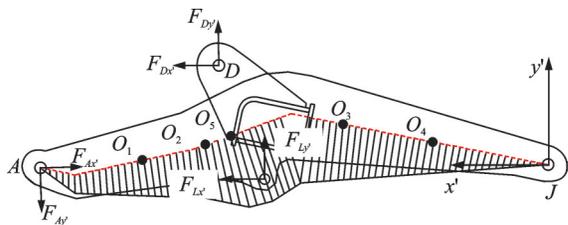


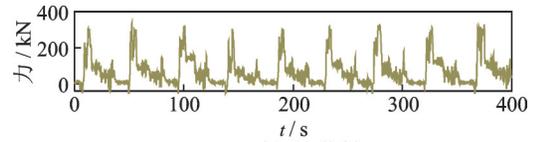
图 2 装载机动臂截面弯矩示意图

Fig.2 Sketch diagram of cross-section bending moment of loader boom

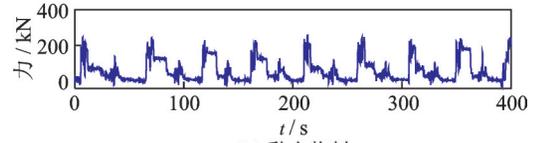
利用文献[14]中载荷测试系统,实测 LW900K 装载机在大石方、黏土、铁矿粉和小石方物料下铲斗铰点力和动臂、摇臂油缸位移数据,求得固定姿态时当量外力 F_o 作用位置和方向参数 h 为 176 mm, l 为 818 mm, θ_1 为 65° 。由文献[15]中弯矩当量计算公式得到 4 种物料下当量外力时间历程如图 3 所示。

2 参数分布估计载荷模型与载荷谱

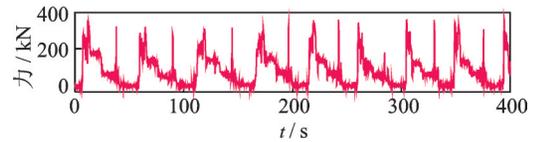
参数分布估计外载荷数据模型是利用联合概率密度函数的相关分布参数,计算对应载荷均幅值不同分级下的频次数,编制载荷谱。由正态分布和三参数威布尔分布得到确定载荷谱各级频次的均幅值



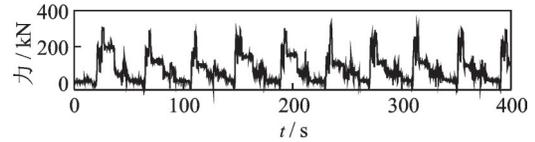
(a) 大石方物料
(a) Large stone material



(b) 黏土物料
(b) Clay material



(c) 铁矿粉物料
(c) Iron ore material



(d) 小石方物料
(d) Small stone material

图 3 不同物料下外载荷当量结果

Fig.3 External load equivalent results for different materials

联合概率密度函数^[10]如式(1)所示

$$f(x, y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{y - \epsilon}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{y - \epsilon}{\beta} \right)^\alpha - \left(\frac{x - u}{\sigma\sqrt{2}} \right)^2} \quad (1)$$

其中: x 和 y 分别为载荷均值和幅值; u 和 σ 分别为正态分布的均值和标准差; α, β 和 ϵ 分别为威布尔分布的形状、尺度和位置参数。

第 a 级均值和第 b 级幅值的载荷循环数 N_{kab} 由均幅值联合概率密度函数的积分求得,外载荷数据的数学模型为

$$N_{kab} = N_k \int_{\tau_a}^{\tau_{a+1}} \int_{\phi_{\tau_b}}^{\phi_{\tau_{b+1}}} f(x, y) dx dy \quad (2)$$

其中: N_k 为工况 k 的扩展频次, k 取 1, 2, 3, 4; τ_a 和 τ_{a+1} 分别为第 a 级均值的下限和上限; ϕ_b 和 ϕ_{b+1} 分别为第 b 级幅值的下限和上限。

将一个载荷循环总频次为 10^6 次的完整谱块的载荷总频次按照式(3)分配给 4 种作业物料工况

$$N_k = 10^6 \left(\frac{m_k \lambda_k}{s_k} \right) / \sum_{k=1}^4 \left(\frac{m_k \lambda_k}{s_k} \right) \quad (3)$$

其中: m_k, λ_k 和 s_k 分别为工况 k 对应物料雨流计数所得循环数、所占时间比例与实测作业斗数。

多物料工况合成后的二维载荷谱第 a 级均值和

第 b 级幅值的循环数 N_{ab} 由式(4)求得

$$N_{ab} = \sum_{k=1}^4 N_{kab} \quad (4)$$

用正态分布和三参数威布尔分布得到 4 种物料参数分布估计外载荷数据模型中均幅值联合概率密度函数的未知参数拟合结果如表 1 所示。

表 1 参数分布估计载荷数据模型参数

物料	均值分布参数		幅值分布参数		
	均值	标准差	形状参数	尺度参数	位置参数
大石方	56.78	39.57	1.45	29.71	41.63
黏土	60.55	44.06	1.77	24.12	37.49
铁矿粉	46.89	57.13	1.47	25.34	40.83
小石方	56.93	30.66	1.41	23.91	41.77

试验样机 4 种物料调研所得的各工况时间比例和按照式(3)所得载荷扩展频次如表 2 所示。

表 2 载荷扩展频次数据

物料	工况比例	实测斗数	雨流循环	扩展频次	扩展倍数
大石方	0.20	115	2 495	169 470	67.92
黏土	0.20	200	3 869	302 218	78.11
铁矿粉	0.20	141	5 296	293 380	55.39
小石方	0.40	145	4 361	234 932	53.87

联立式(1)~式(4)并代入表 1 和表 2 中数据,均值采用等区间划分,幅值采用 Cover 系数非等区间划分,所得 8 级二维载荷谱如表 3 所示。

表 3 参数分布估计模型所得二维载荷谱

载荷均值	载荷幅值							
	45.9	101	156	211	266	312	349	367
-58.6	10 181	835	113	19	4	1	0	0
-10.7	76 998	6 293	842	141	26	5	1	0
37.5	267 344	21 328	2 777	451	80	17	6	1
85.7	356 951	27 962	3 578	571	100	21	8	3
134	166 017	12 926	1 652	264	46	10	2	0
182	31 257	2 375	301	48	8	2	0	0
230	2 845	203	25	4	1	0	0	0
279	123	8	1	0	0	0	0	0

3 核密度估计载荷模型与载荷谱

核密度估计外载荷数据模型是利用雨流矩阵和核函数,获得对应均幅值不同分级下的载荷频次,建立外载荷数据的数学模型并编制载荷谱。工作装置当量外力如式(5)所示

$$x_i = f(t_i) + \epsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

其中: x_i 为时刻 t_i 时的载荷测量值; ϵ_i 为随机测量误差; $f(t_i)$ 为非参数模型。

对 $f(t)$ 进行非参数估计, x_i 对 $f(t)$ 的影响大小与 t_i 和 t 的距离成正比, $f(t)$ 的估计应取 t 点的邻域内的均值加权修正值,如式(6)所示

$$\hat{f}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i(t) x_i \quad (6)$$

其中: $k_i(t)$ 为不同时刻权重值,权重值总和为 1。

用核函数 $g(t)$ 代替权重函数 $k_i(t)$ 的方法^[16]实现了非参数估计中概率密度的光滑性,避免了非连续

权函数信息丢失。高斯核函数 $g_1(t)$ 和 Epanechnikov 核函数 $g_2(t)$ 分别如式(7)和式(8)所示

$$g_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (7)$$

$$g_2(t) = 0.75(1 - t^2) \quad (|t| \leq 1) \quad (8)$$

载荷数据保存为 From-to 形式的雨流矩阵,雨流计数得到的载荷循环与应力应变迟滞回环一一对应,所得结果不会破坏与损伤对应的应力应变迟滞回环完整结构。采用 Epanechnikov 核函数进行载荷数据模型建立,二维核密度估计如式(9)所示

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{nh'} \sum_{i=1}^n g\left(\frac{x-x_i}{h'}, \frac{y-y_i}{h'}\right) \quad (9)$$

其中: n 为数据个数; h' 为带宽。

核函数光滑程度由其带宽决定,Epanechnikov 核函数的最优带宽 h' 如式(10)所示

$$h' = 2.4\sigma_{\min} n^{-1/6} \quad (10)$$

其中: σ_{\min} 为二维样本标准差较小值。

装载机外载荷不同均幅值的载荷频次是动态变化的,需要确定动态最优带宽。根据随机数据点 (x_i, y_i) 引入自适应修正系数 ψ_i 如式(11)所示

$$\psi_i^2 = f(x_i, y_i) / \left[\prod_{i=1}^n f(x_i, y_i) \right]^{-n} \quad (11)$$

将式(10),(11)代入式(9)中,得到具有自适应带宽的核密度估计数学模型如式(12)所示

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{\psi_i^2 h'^2} \cdot g\left(\frac{x-x_i}{\psi_i h'}, \frac{y-y_i}{\psi_i h'}\right) \right] \quad (12)$$

采用雨流编辑技术将图 3 所示 4 种物料的当量外载荷转化为 From-to 矩阵,按照表 2 中物料样本实测斗数和雨流频次合成为 1 000 斗目标样本,如图 4 所示。

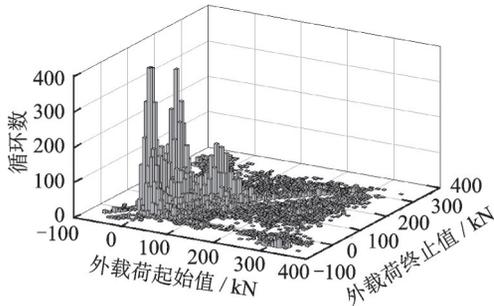


图 4 不同物料合成 1 000 斗样本的 From-to 雨流矩阵
Fig.4 From-to rainfall flow matrix of 1 000 bucket samples synthesized from different materials

合成目标样本数据中载荷总频次为 27 570,外推至总频次 10^6 的外推倍数为 36.27。根据式(12)建立核密度估计数学模型,并将外推后的 From-to 矩阵重构转换为 Rang-mean 雨流矩阵如图 5 所示。

得到 LW900K 装载机外载荷采用核密度估计模型所得 8 级二维载荷谱如表 4 所示,均值仍采用等区间划分,幅值仍采用 Cover 系数非等区间划分。

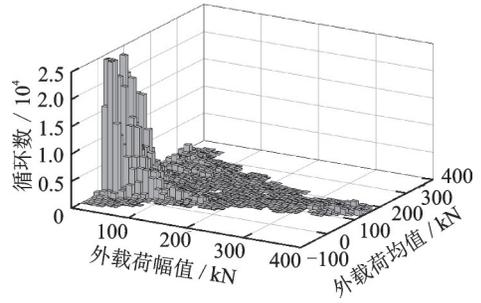


图 5 核密度估计总频次 10^6 的 Rang-mean 雨流矩阵
Fig.5 Rang-mean rainfall flow matrix with total frequency 10^6 estimated by kernel density

4 疲劳损伤验证试验与分析

为了验证两种载荷数据模型编制的载荷谱的合理性,按照图 1 所示的当量姿态载荷加载方式,搭建工作装置疲劳试验台。选择作动器施加外载荷,根据铲斗和作动器结构尺寸,确定龙门架的宽度和高度,并安装在刚性地面上。用圆形钢柱代替油缸,用刚性墙代替车架。刚性墙上安装有与动臂和钢柱连接的连接座,刚性墙固定在刚性地面上。搭建的工作装置疲劳台架实物如图 6 所示。

LW900K 装载机动臂焊接位置主要是动臂板与横梁、铰孔衬套与动臂板处。在上述焊接大应力区



图 6 LW900K 装载机工作装置应力标定试验台
Fig.6 Stress calibration test bench of LW900K loader

表 4 核密度估计模型所得二维载荷谱
Tab.4 2-D load spectrum based on kernel density method

载荷均值	载荷幅值							
	45.9	101	156	211	266	312	349	367
-58.6	12 182	172	0	0	0	0	0	0
-10.7	337 068	13 380	2 317	13	0	0	0	0
37.5	252 768	31 371	12 111	1 511	483	0	0	0
85.7	144 206	7 260	5 226	8 554	8 056	12 489	4 989	0
134	24 521	7 697	7 793	6 971	3 147	5 450	5 051	1 906
182	28 177	10 253	6 365	1 569	8	0	0	0
230	29 602	4 098	950	0	0	0	0	0
279	2 060	0	0	0	0	0	0	0

域选择L-1, L-2和L-3共3个点进行载荷谱的疲劳损伤验证,如图7所示。

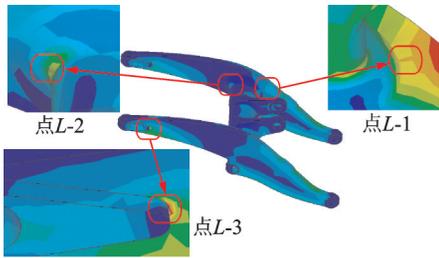


图7 疲劳损伤验证点

Fig.7 Fatigue damage verification points

采用名义应力法进行疲劳损伤计算,焊接结构处在避开应力非线性增大区域后,选择焊缝应力方向上板厚2.2倍处与焊缝垂直方向的表面粘贴应变片,测得的应力作为名义应力^[17],如图8所示。

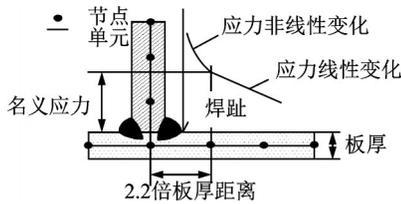


图8 焊接结构名义应力确定

Fig.8 Nominal stress determination of welded structures

利用作动器多次施加200 kN的外载荷,测得结构名义应力和计算得到的传递系数如表5所示。

表5 疲劳损伤验证点的传递系数

Tab.5 Transfer coefficients of fatigue damage verification points

验证点	外载荷/kN	名义应力/ MPa	传递系数/ (MPa/kN)
L-1	200	38.43	0.148 7
L-2	200	26.24	0.131 2
L-3	200	39.71	0.198 6

焊接结构S-N曲线在应力范围为 ΔS_i 时疲劳破坏的循环次数 N_i 如式(13)所示

$$N_i = \begin{cases} C_1 / (\Delta S_i)^m & (\Delta S_i \geq \Delta S_1) \\ C_2 / (\Delta S_i)^{m+2} & (\Delta S_1 > \Delta S_i \geq \Delta S_2) \end{cases} \quad (13)$$

其中: ΔS_1 和 ΔS_2 为焊接接头S-N曲线两个拐点对应的疲劳强度值; m 取常数3; C_1 和 C_2 为常数。

应力范围 ΔS_i 的作用频次为 n_i 时,对应的疲劳损伤 D_i 如式(14)所示

$$D_i = n_i / N_i \quad (14)$$

根据验证点处焊接细部特征,选择BS7608:2014标准提供的F2等级作为疲劳损伤评估的依据,对应的疲劳损伤计算参数如表6所示。

表6 BS标准计算疲劳损伤的参数值

Tab.6 Parameter values for calculating fatigue damage in BS standard

等级	C_1	$\Delta S_1 /$ MPa	C_2	$\Delta S_2 /$ MPa
F2	1.23×10^{12}	49.80	5.25×10^{14}	31.40

由参数分布估计模型中的表2和核密度估计模型中的外推倍数可知,表3和表4所示载荷谱当量装载机连续作业斗数分别为39 054斗和36 270斗。LW900K装载机完成1斗作业的平均时间为40 s,即表3和表4所示载荷谱当量装载机连续作业时间分别为434和403 h。根据表5中的传递系数将表3和表4的载荷谱转换为幅值应力频次谱,得到参数分布模型和核密度估计模型载荷谱损伤和疲劳寿命结果如表7所示。

表7 载荷谱损伤计算结果

Tab.7 Damage calculation results load spectrum and fatigue life results of load spectrum

载荷谱	验证点	损伤值	破坏所需 谱块数	疲劳寿命/h
参数分布	L-1	0.000 412 8	2 422	1 051 349
	L-2	0.000 227 9	4 388	1 904 175
	L-3	0.001 485 3	673	292 208
核密度估计	L-1	0.012 612 1	79	31 954
	L-2	0.010 797 6	93	37 323
	L-3	0.015 284 3	65	26 367

由表7可知,参数分布模型获得的载荷谱损伤计算结果明显小于核密度估计模型获得的载荷谱。参数分布模型载荷谱计算的焊接结构疲劳寿命最小为 29×10^4 h,按照装载机每天24 h连续作业,至少需要33年时间才发生疲劳破坏,近似于无限寿命。核密度估计模型载荷谱计算的焊接疲劳寿命最小为 2.6×10^4 h,更接近恒幅极值载荷下的疲劳设计寿命 3.0×10^4 h。两种数据模型编制的载荷谱存在明显差异,参数分布模型所得损伤结果偏小,核密度估计模型所得损伤结果更接近实际。

通过影响疲劳损伤结果的幅值频次关系变化来分析两种数据模型编制载荷谱产生差异的原因,各

物料工况实测载荷的幅值-累积频次与载荷谱编制完成后的幅值-累积频次关系变化如图9所示。

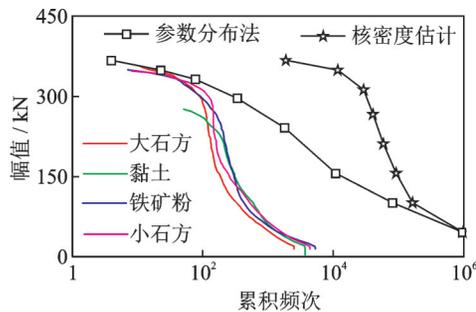


图9 幅值-累积频次关系

Fig.9 Relation between amplitude range and cumulative frequency

两种数据模型编制的载荷谱都实现了载荷幅值和频次的双向外推扩展,参数分布估计数据模型编制的载荷谱中幅值-累积频次在大载荷区域内的载荷频次数没有得到扩展反而降低了,这是由于样本中的小载荷循环频次多,对均幅值载荷分布拟合参数的结果影响大。虽然载荷分布拟合满足检验要求,但是参数分布规律对小载荷的拟合度要明显高于大载荷,幅值较小的载荷频数大,对载荷统计分布影响权重高,使得满足一定可靠度的分布并不能完全反应载荷雨流计数中均幅值频次谱形,在幅值载荷分布拟合中体现的尤为明显。

核密度估计模型以雨流矩阵为基础,具有自适应带宽特性的二维核密度函数与工作装置当量外载荷均幅值同步对应。疲劳损伤验证试验结果表明,在进行装载机疲劳试验载荷谱编制时核密度估计数据模型无需假定载荷均值和幅值的分布类型,所得载荷谱的幅值-累积频次关系曲线实现了对大载荷和小载荷的同步频次扩展,核密度估计模型获得的载荷谱结果能够弥补参数分布模型中分布拟合对低频数大载荷影响弱化的不足。

5 结束语

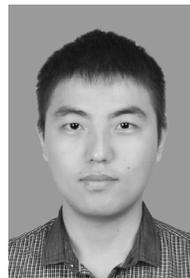
核密度估计模型和参数分布模型都能够获取工作装置载荷谱,疲劳损伤验证试验结果表明,参数分布模型载荷谱损伤结果明显偏小,核密度估计模型载荷谱损伤结果计算得到的焊接位置处的疲劳寿命更接近疲劳设计寿命 3×10^4 h;核密度估计模型以雨流矩阵为基础,具有自适应带宽特性的二维核密度函数与工作装置当量外载荷均幅值同步对应,所得载荷谱结果能够弥补参数分布模型中分布拟合对低频数大载荷影响弱化的不足,且无需对样本做

分布假设;建立的参数分布估计和核密度估计数据模型以及编制的载荷谱为装载机结构件的疲劳可靠性分析提供关键依据。下一步将开展装载机结构件疲劳寿命预测和试验研究。

参 考 文 献

- [1] WANG J X, WANG N X, YU X J, et al. A method for compiling load spectrum of transmission system of wheel loader[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 108-111: 1314-1319.
- [2] FARINAZ S, CASSIE C. Material nonlinearity in asphalt binder fatigue testing and analysis[J]. *Materials and Design*, 2017, 133(5): 376-389.
- [3] YAN C L, LIU K G. Fatigue scatter factor of whole life and reliability of aircraft structure service life [J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 44-46: 739-744.
- [4] 高云凯,李翠,崔玲,等. 燃料电池大客车车身疲劳寿命仿真分析[J]. *汽车工程*, 2010, 32(1): 7-9. GAO Yunkai, LI Cui, CUI Ling, et al. A simulation analysis on the fatigue life of fuel cell bus body[J]. *Automotive Engineering*, 2010, 32(1): 7-9. (in Chinese)
- [5] 方剑光,高云凯,徐成民. 车身疲劳载荷谱的位移反求法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(6): 895-899. FANG Jianguang, GAO Yunkai, XU Chengmin. Displacement back-calculation of body fatigue loading spectrum [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(6): 895-899. (in Chinese)
- [6] 于佳伟,郑松林,赵礼辉,等. 整车室内道路模拟试验用载荷谱的编制方法研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(14): 93-99. YU Jiawei, ZHENG Songlin, ZHAO Lihui, et al. Research on spectrum development methodology for vehicle indoor road simulation test [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(14): 93-99. (in Chinese)
- [7] 薛海,李强,胡伟钢,等. 重载货车车钩疲劳试验载荷谱的编制方法[J]. *中国铁道科学*, 2017, 38(2): 105-110. XUE Hai, LI Qiang, HU Weigang, et al. Compilation method for fatigue test load spectrum of coupler on heavy haul freight car [J]. *China Railway Science*, 2017, 38(2): 105-110. (in Chinese)
- [8] ZOUGAB N, ADJABI S, KOKONEDJI C C. Bayesian estimation of adaptive bandwidth matrices in multivariate kernel density estimation [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2014, 75(6): 28-38.
- [9] 高云凯,徐成民,方剑光. 车身台架疲劳试验程序载荷谱研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(4): 92-98. GAO Yunkai, XU Chengmin, FANG Jianguang.

- Study on the programmed load spectrum of the body fatigue bench test[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 92-98. (in Chinese)
- [10] 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[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(6): 1646-1651.
ZHANG Yingshuang, WANG Guoqiang, WANG Jixin, et al. Load spectrum compiling and fatigue life prediction of wheel loader axle shaft [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(6): 1646-1651. (in Chinese)
- [11] 万一品, 贾洁, 梁佳, 等. 装载机工作装置结构强度分析与试验研究[J]. 机械强度, 2016, 38(4): 772-776.
WAN Yipin, JIA Jie, LIANG Jia, et al. Structural strength analysis and experimental research for working device of loader [J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(4): 772-776. (in Chinese)
- [12] 万一品, 宋绪丁, 员征文, 等. 装载机工作装置疲劳试验载荷谱编制方法[J]. 中国机械工程, 2017, 28(15): 1806-1811.
WAN Yipin, SONG Xuding, YUAN Zhengwen, et al. Compilation method of fatigue experimental load spectrum of loader working devices [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(15): 1806-1811. (in Chinese)
- [13] 万一品, 宋绪丁, 郁录平, 等. 装载机工作装置销轴载荷测试方法与试验研究[J]. 机械强度, 2017, 39(1): 26-32.
WAN Yipin, SONG Xuding, YU Luping, et al. Study on load measuring method and test of the pin-shaft in loader working device [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(1): 26-32. (in Chinese)
- [14] 万一品, 宋绪丁, 郁录平, 等. 装载机工作装置载荷识别模型与载荷测取方法[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(3): 582-589.
WAN Yipin, SONG Xuding, YU Luping, et al. Load identification model and measurement method of loader working device [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2019, 39(3): 582-589. (in Chinese)
- [15] 万一品, 宋绪丁, 吕彭民, 等. 基于弯矩等效的装载机外载荷当量与载荷谱编制[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 117-126.
WAN Yipin, SONG Xuding, LÜ Pengmin, et al. External load equivalent and load spectrum compilation of loader based on moment equivalent [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(2): 117-126. (in Chinese)
- [16] 刘海鸥, 张文胜, 徐宜, 等. 基于核密度估计的履带车辆传动轴载荷谱编制[J]. 兵工学报, 2017, 38(9): 1830-1838.
LIU Haiou, ZHANG Wensheng, XU Yi, et al. Load spectrum compiling for transmission shaft of tracked vehicle based on kernel density estimation [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(9): 1830-1838. (in Chinese)
- [17] 赵方伟. 基于瞬态动力学的铁路货车车体疲劳强度评价研究[J]. 铁道车辆, 2017, 55(2): 1-4.
ZHAO Fangwei. Research on the fatigue strength evaluation of railway carbody based upon transient dynamics [J]. Rolling Stock, 2017, 55(2): 1-4. (in Chinese)



第一作者简介:万一品,男,1988年12月生,博士、讲师。主要研究方向为结构载荷测试与抗疲劳设计。曾发表《装载机工作装置载荷识别模型与载荷测取方法》(《振动、测试与诊断》2019年第39卷第3期)等论文。
E-mail: wyipin@chd.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332

邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn