

doi :10.3969/j.issn.1005-3026.2016.06.018

一种非平稳随机循环工况下的参数化载荷模型

姜涛,付志翼,王安麟
(同济大学机械与能源工程学院,上海 201804)

摘 要:为解决土方工程机械非平稳随机循环工况下,其零部件设计与试验中载荷表达的难题,提出一种参数化载荷模型.以液压挖掘机多路阀回转联为研究对象,将其阀口压力载荷数据通过小波变换分解为载荷随机项和载荷趋势项,其中具有平稳随机特征的载荷随机项利用功率谱估计等处理实现其“随机项函数”表达,具有非平稳特征的载荷趋势项利用随机变量表征工况的函数拟合实现其“趋势项函数”表达,再将两者组合重构为“循环工况载荷函数”.仿真与试验数据对比证明,该函数较好地复现了非平稳随机循环工况下多路阀载荷的随机特征.研究表明构建载荷模型的方法,对于实现面向循环工况特征的非平稳随机载荷的参数化表达,具有工程化应用的重要参考价值.

关 键 词:循环工况载荷;液压挖掘机;多路阀;整机试验;参数化模型

中图分类号: TU 621 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)06-0845-06

Parameterized Load Model Under Non-stationary Random Cyclic Conditions

JIANG Tao, FU Zhi-yi, WANG An-lin
(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China. Corresponding author: JIANG Tao, E-mail: jiangtao@tongji.edu.cn)

Abstract: Aiming at characterizing the load of earthmoving machinery under non-stationary random cyclic conditions for design and tests of its components, a parameterized model was proposed. In order to study the multi-way valve in the hydraulic excavator, the outlet pressure at valve port was decomposed into random term and trend term by wavelet transform. The stationary random term was described by “random term function” using the estimation of power spectral density, and the non-stationary trend term was expressed by “trend term function” using the function to fit with condition-variables. Then the two functions were combined to generate “cyclic condition load function”. Comparisons between simulated and test data prove that this function can accurately reconstruct random character in multi-way valve under non-stationary random cyclic conditions. The results also indicate that the modeling method will be an applicative reference for realizing the parametric expression of non-stationary random load with cyclic features in engineering application.

Key words: cyclic condition load; hydraulic excavator; multi-way valve; overall test; parameterized model

以挖掘机为代表的土方工程机械一般在循环工况下作业,由于结构参数、工作模式、工作介质及操纵习惯等多方面因素的影响^[1],各零部件载荷为具有循环工况特征的非平稳随机载荷.随着试验与仿真技术的发展,为了降低研发成本、提高试验可重复性,对土方工程机械零部件的动态性能测试研究多在室内台架或计算机仿真环境中开展.在台架试验加载或仿真设置边界条件时,采用何种载荷信号对研究结果有很大影响^[2].如果仅采用恒定载荷、阶跃载荷、斜坡载荷等简单信号,由于和实际作业负载差别较大,势必造成研究结论的偏差,如果直接采用有限的整机测试数据加

载,则因该载荷不能涵盖实际作业的多工况特征而造成研究的片面.因此,复现零部件在整机系统中的真实载荷特征,编制符合实际工况的载荷谱,对其试验和仿真的有效性及准确性至关重要.

采用传统计数法编制的载荷谱只能用于零部件的疲劳寿命试验^[3-5],由于丢失了时间历程信息,无法反映土方工程机械在循环工况下的非平稳随机载荷特征,故不适用于动态性能试验仿真.

针对这一问题,本文提出一种非平稳随机循环工况下的参数化载荷模型,以挖掘机多路阀压力载荷为研究对象,基于整机现场试验数据,建立了由随机项函数和趋势项函数构成的循环工况载荷函数.通过该函数随机生成的仿真载荷数据与试验测试数据的对比,验证了利用该模型表达循环工况下非平稳随机载荷的合理性和有效性,从而为阀芯结构设计及其动态性能分析提供依据.

1 挖掘机多路阀工况特征与载荷谱

多路阀在挖掘机循环作业过程中的典型压力载荷时间历程如图 1 所示.

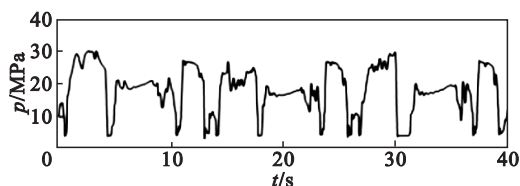


图 1 循环作业过程多路阀压力载荷测试数据
Fig. 1 Pressure data of multi-way valve in cycle circulation

从中可以看出,载荷历程具有明显的分段特征,不同阶段的载荷对应作业的不同工况.在对各工况下的载荷数据处理之前,应先明确多路阀载荷的主要特征^[6]:

1) 试验样本长度很短,样本总体只能靠多次重复试验获得;

2) 各工况随机性大,即使严格控制试验条件也不可能具有平稳数据的性质;

3) 这类非平稳随机载荷包含着某种循环出现的具有相似趋势的分量,且可从原数据中分离出来.

因此,多路阀的压力载荷是一个典型的非平稳随机信号,这一信号可表示为

$$f_i(t) = E(f_i^1(t)) + f_i^2(t) \quad i=1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

式中: $E(f_i^1(t))$ 为压力载荷的期望,即趋势项; $f_i^2(t)$ 为压力载荷的平稳随机项; m 为作业工况数.

对于多路阀来说,其载荷谱^[7]为能代表各工况特征的压力载荷时间历程.如能将式(1)中各工况下的载荷信号用函数表达,则多路阀的载荷谱就能实现参数化.因此,若要建立多路阀的载荷谱,需先建立符合真实作业情况的循环工况载荷函数.

2 多路阀载荷模型构建方法与流程

2.1 挖掘机整机现场试验

为构建载荷函数,应先准确获取各工况条件下的压力载荷实测信号,因此需进行整机现场试验.作为典型的循环作业机械,多路阀的压力载荷具有窄带低通的频域特征,能量分布一般在 10 Hz 内^[8].

本文以回转联为实例,构建多路阀的循环工况载荷函数.整机测试条件:20 吨级某型号挖掘机调至 H 档(额定转速 2 155 r/min),铲斗满载,转台起动、稳定回转 360 度、制动,通过数据采集仪将回转联阀口压力载荷历程录入计算机.保持相同测试条件进行多次试验,获得若干测试样本.

2.2 循环工况载荷函数建立流程

试验测得的真实载荷数据是不规则、不能重复、随机变化的非平稳信号,无法直接用于试验台加载和软件仿真,必须对其进行数据处理以得到其特征,据此构建出相应的载荷函数.基于试验数据建立循环工况载荷函数的流程如图 2 所示.

2.3 载荷处理关键方法

2.3.1 小波变换分解

实测载荷为非平稳随机信号,无法直接进行功率谱分析得到其频域特征,故需先采用有效的分解方法将平稳随机项提取出来.小波变换是一种时间窗和频率窗均可改变的时频局部化分析方法,特别适合于非平稳信号的处理.

一种重要的小波变换方法为多分辨率分析^[9],其基本思想为:对能量有限的信号 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ (L^2 为可积实数空间) 将其在尺度 2^j 下的近似 $A_j f$ 进行分解,得出 $f(t)$ 在该尺度下通过低通滤波器得到的近似 $A_{j-1} f$ 及高通滤波器得到的细节 $D_{j-1} f$,如式(2)所示.

$$\left. \begin{aligned} A_j f &= A_{j-1} f + D_{j-1} f. \\ A_{j-1} f &= \sum_k a_k^{j-1} \varphi(2^{j-1}x - k) \\ D_{j-1} f &= \sum_k d_k^{j-1} \psi(2^{j-1}x - k). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: a_k^{j-1} 与 d_k^{j-1} 分别为近似系数和细节系数; φ 为特定小波的尺度函数,对应于低通滤波器; ψ 为

相应的小波函数 ,对应于高通滤波器.

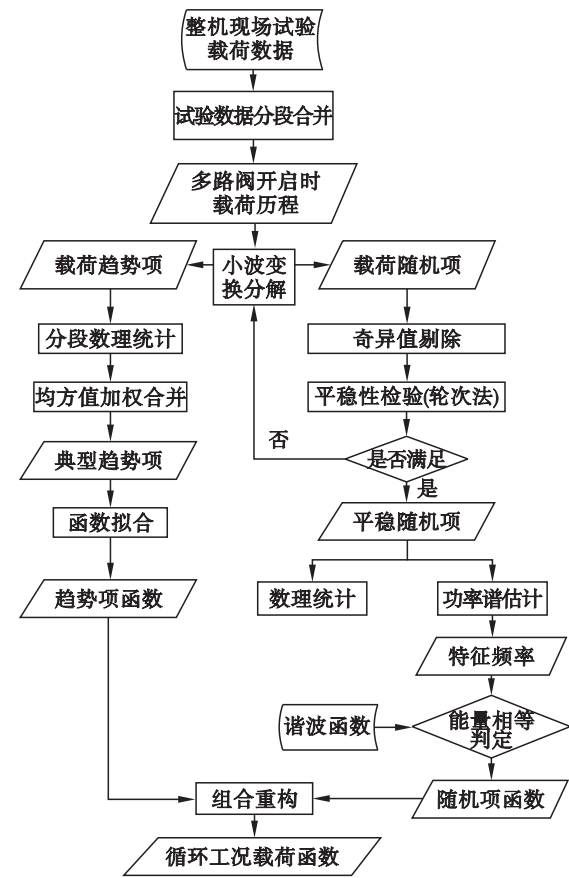


图 2 循环工况载荷函数构建流程

Fig. 2 Building process of cyclic condition load function

由此 ,即可通过选择合适的小波及分解尺度进行迭代运算 ,实现原载荷信号的多尺度一维小波分解. 以一个 4 尺度分解为例 ,其结构如图 3 所示.

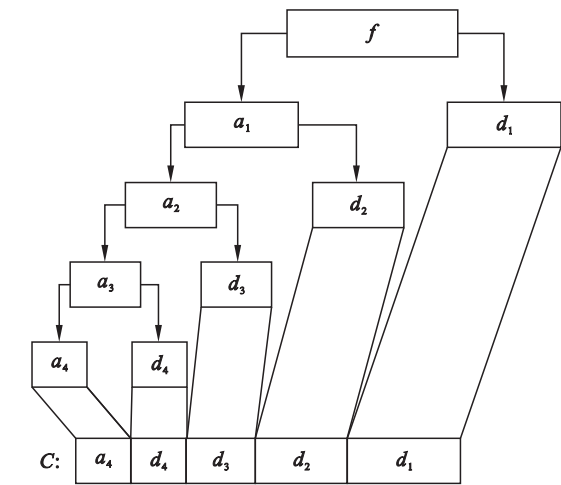


图 3 多尺度一维小波分解的结构

Fig. 3 Structure of the multiscale wavelet decomposition

图 3 中 f 为原始载荷 , a_k 为分解得到的近似系数 , d_k 为分解得到的细节系数 , C 为系数集合.

由各层细节系数 $[d_j \ d_{j-1} \ \dots \ d_1]$ 通过重构滤波器可得到载荷的各层细节信号 ,全部相加即得随机项 ;由最后一层近似系数 a_j 可重构原载荷的低频逼近 ,即趋势项. 分解得到的随机项要符合平稳随机性 ,趋势项要尽量平滑 ,若不满足要求 ,则需调整小波类型及分解尺度重新分解 ,直至获得合理结果.

2. 3. 2 功率谱估计

分解出的载荷随机项是功率信号 ,不满足傅里叶变换的绝对可积条件 ,应采用功率谱密度函数对其进行频域分析. 由于试验测得的数据长度有限 ,属于小样本 ,需采用合适方法进行功率谱估计.

本文采用 Welch 法改进 ,计算公式如下 :

$$\bar{P}(\omega) = \frac{1}{MU} \sum_{i=1}^L \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_N^i w(n) e^{-jn\omega} \right|^2. \quad (3)$$

式中 : U 为归一化因子 , $w(n)$ 为窗函数 , L 为分段数 , M 为每段数据长度.

Welch 法对经典估计法进行了两方面修正 :一是选择合适的窗函数 $w(n)$ 使谱估计非负 ,且减少谱泄漏、改善分辨率 ;二是将序列 x_N^i 分段估计再平均 ,且各段间有重叠 ,改善了方差特性.

3 多路阀载荷模型构建实例

3. 1 载荷的分解

依据流量判别出阀口开启时间段 ,从原测试数据中分割出若干载荷片段 ,将这些片段按顺序合并为多路阀开启时载荷历程 ,然后利用小波变换分解得到载荷趋势项和随机项 ,如图 4 所示.

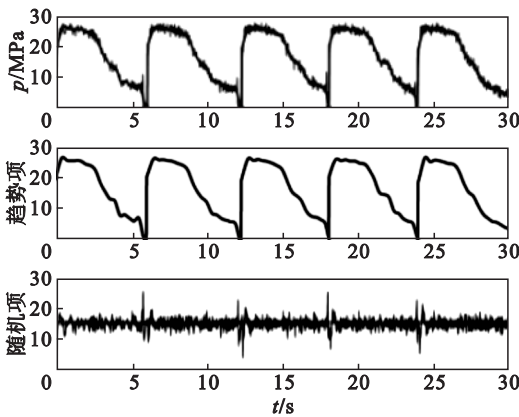


图 4 回转联载荷小波变换分解

Fig. 4 Decomposition of load in swing way by wavelet transform

3. 2 载荷随机项的处理

小波变换对非平稳信号有较好的分解效果 ,

但对信号采集中出现的偶然较大外部干扰去除效果不佳,所以对载荷随机项分析前需去奇异值. 本文采用标准差检测法,将随机项中超过标准差 3 倍的奇异值剔除,处理前后的正态概率分布图对比如图 5 所示. 从中看出,剔除奇异值后的载荷随机项,其正态概率函数更接近一条过(0,0.5)点的直线,即一个均值为零的正态分布.

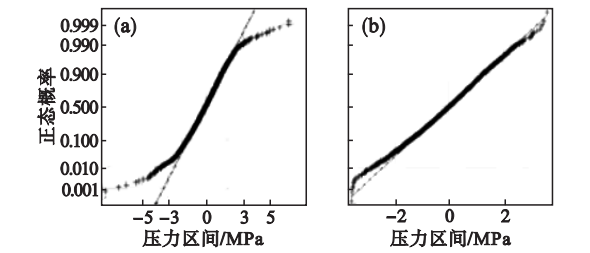


图 5 去奇异前后正态概率分布比较

Fig. 5 Comparison of normal probability distribution before and after removing singular value
(a)—去奇异前;(b)—去奇异后.

载荷随机项只有是平稳的各态历过程,其统计特征才具有代表性. 工程上常用的检验方法为轮次法^[10]. 将随机项信号按时间顺序分割为若干段等长度子样序列,统计出每段序列的均方值并与总均方值比较,得出轮次数,如表 1 所示.

表 1 载荷随机项轮次统计表

Table 1 Round statistical table for load random terms

子样序列	随机项均方值	轮次统计
1	1.051 7	-
2	1.368 0	+
3	1.282 1	+
4	1.282 8	+
5	0.796 2	-
6	1.177 4	+
7	1.192 7	+
8	1.206 3	+
9	1.124 1	-
10	1.273 4	+
总均方值	1.176 4	轮次数=5

在子样数 $N=10$,显著水平 $\alpha=0.05$ 条件下,查轮次分布表可知轮次数应在(3,8)区间内. 统计得载荷随机项的轮次数为 5,故可接受平稳性假设. 工程上,若一个随机过程的各样本是平稳的且获得各样本的试验条件基本相同,则平稳随机过程可当作各态历过程来处理.

利用 Welch 法对载荷随机项进行功率谱估计,所得的功率谱密度函数曲线如图 6 所示.

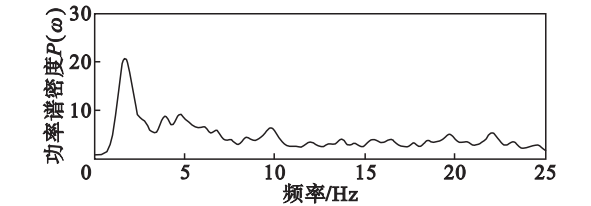


图 6 载荷随机项功率谱

Fig. 6 Power spectral density of load random term

可以看出,载荷随机项的功率谱宽有限,能量基本分布于 0~10 Hz 内,且峰值频率位于 2 Hz 左右. 这种低频的振动特性主要是由挖掘机巨大的附着质量及其循环作业的工作方式所决定.

为了参数化表达此类载荷,可用一系列频率、幅值和初相位不同的谐波函数构建,即将频域轴分割成若干区间,每个区间的中间频率为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$,用这些离散频率上的谐波函数近似代替谱值连续的原随机项. 若要有效地复现原载荷,需使每个谐波分量满足式(4)的能量等价条件^[11].

$$\frac{a_n^2}{2} = 2 \int_{\omega_{n-1}}^{\omega_n} P(\omega) d\omega \quad (4)$$

式中 a_n 为第 n 个谐波的振幅; $P(\omega)$ 为随机项的功率谱密度.

由此,可以将式(1)中的随机项 $f_i^{(2)}(t)$ 参数化表达为式(5):

$$\begin{aligned} f_i^{(2)}(t) = & 2 \sqrt{\int_{\omega_0}^{\omega_1} P(\omega) d\omega} \cos\left(\frac{\omega_1}{2}t + \varphi_1\right) + \\ & 2 \sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} P(\omega) d\omega} \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \varphi_2\right) + \dots + \\ & 2 \sqrt{\int_{\omega_{n-1}}^{\omega_n} P(\omega) d\omega} \cos\left(\frac{\omega_{n-1} + \omega_n}{2}t + \varphi_n\right). \end{aligned} \quad (5)$$

本文将频率范围选为 0~15 Hz,间隔频率 1 Hz,按上述能量等价原则得到各分量振幅. 取各分量的幅值和对应频率,初始相位随机选择,可用 Matlab 程序模拟出参数化表达的载荷随机项函数. 函数生成的随机项与测试数据得到的随机项的各项统计参数比较如表 2 所示.

表 2 构建随机项与原随机项主要统计量比较

Table 2 Comparison of key statistics for random terms between reconstructed and original

	随机项	最小值	最大值	平均值	标准差
构建随机项		-3.429 3	3.513 4	-0.013 5	1.084 8
原随机项		-3.454 5	3.410 3	0.001 8	1.056 0

可以看出,由随机项函数构建出的载荷随机项数据,其平均值、标准差等统计量与原试验数据基本一致,即用谐波函数将随机项参数化表达,较真实地复现出载荷平稳随机项的特征.

3.3 载荷趋势项的处理

3.3.1 典型趋势项合成

分解出的载荷趋势项受驾驶员操纵及整机运行性能等因素的影响,即使在试验中对操作方法与流程作严格规定,不同作业循环内的载荷变化趋势仍存在一定区别,所以需将不同循环内的趋势项子样本合成能代表实际工况的典型趋势项。由于均方根综合考虑了数据的均值与标准差这两项最重要的统计量^[10],故本文采用均方根作为加权依据进行各子样本的合成:

$$E(f_i^{(1)}(t)) = \sum_{j=1}^k \left(\frac{R_j}{\sum_{j=1}^n R_j} f_j \right). \quad (6)$$

式中: R_j 为第 j 段子样本的均方值; f_j 为第 j 段子样本的载荷时间序列。

合成的回转工况下的典型载荷趋势项如图 7 所示。可以看出在该工况,多路阀的载荷变化趋势为先快速上升至回转马达溢流阀调定的压力峰值并保持一段时间,此时挖掘机处于回转启动过程;然后载荷逐渐降低至趋于平缓,这一过程对应于挖掘机上车进行匀速回转,最后在回转制动阶段,由于阀门关闭,压力载荷产生一定突变。

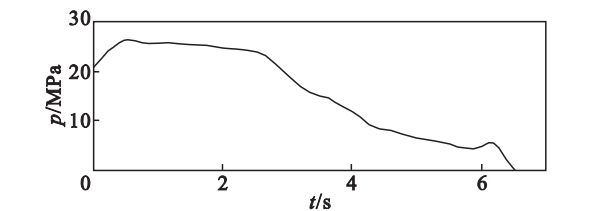


图 7 回转工况典型载荷趋势项

Fig. 7 Typical load trend terms in swing working condition

3.3.2 趋势项函数拟合

采用合适的函数拟合,可以实现典型载荷趋势项的参数化表达。通过改变该函数的系数反映元件类型、工作介质及操作方式等对载荷变化的影响,从而可以随机生成一系列表达工况特征的载荷序列。针对回转工况的载荷特点,本文采用式(7)所示的分段函数来表达载荷趋势项。

$$E(f_i^{(1)}(t)) = \begin{cases} \frac{p_y - p_0}{t_1} t + p_0 & (0 \leq t \leq t_1), \\ p_y & (t_1 \leq t < t_2), \\ p_y \left(\frac{t_2}{t} \right)^\gamma & (t_2 \leq t < t_3), \\ p_s & (t_3 \leq t < t_4), \\ \frac{p_p - p_s}{t_5 - t_4} t + p_s & (t_4 \leq t < t_5), \\ 0 & (t \geq t_5). \end{cases} \quad (7)$$

式中: p_0 为阀口开启压力; p_y 为溢流压力; p_s 为匀速回转时压力; p_p 为回转制动时峰值压力; γ 为压力衰减指数; $t_1 \sim t_5$ 为时间分段点,相邻两分段点之差定义为时间间隔 $T_1 \sim T_5$ 。

以上参量可分为压力参量和时间参量。压力参量 p_y 由回转马达溢流阀调定压力确定,压力参量 p_0 、 p_s 、 p_p 及 γ 与负载转矩相关。根据典型趋势项拟合结果,可得到压力参量的取值,见表 3。

表 3 压力参量取值
Table 3 Valuation of pressure parameters

p_y/MPa	p_0/MPa	p_s/MPa	p_p/MPa	γ
25.5	15	7	10	2

时间参量 $T_1 \sim T_5$ 采用拟合所得的确定值无法表征主观操纵及其他不稳定因素带来的随机干扰,故需对原测试数据进行统计,以获得各时间参量的概率密度函数。

统计结果表明,时间参量均服从对数正态分布。对各时间参量的分布参数估计如表 4 所示。

表 4 时间参量分布参数估计
Table 4 Estimation of time parameters

分布参数	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
μ	-2.00	0.82	0.85	0.03	-2.71
σ	0.23	0.04	0.10	0.24	0.42

获取不同回转角度、铲斗中不同土量等工作条件下的试验测试数据,可以用以上方法进一步找到各参量对应于不同工作条件的变化规律。由此即可通过改变趋势项函数中的各参量来表征回转工况不同工作条件的转变。

3.4 载荷模型的有效性验证

将确定了各参量取值的趋势项函数与 3.3.1 节中建立的随机项函数组合得到多路阀回转联的循环工况载荷函数,通过该函数能够复现出反映回转工况特征的载荷时间历程。由 Matlab 仿真模拟出的多个循环的随机载荷历程如图 8 所示。

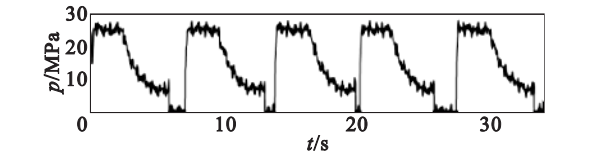


图 8 按循环工况载荷函数仿真所得载荷历程

Fig. 8 Simulated load time histories by cyclic condition load function

为验证该方法的有效性,在前述试验环境下重新进行整机试验,获得回转联阀口载荷的二次

试验数据. 由循环工况载荷函数随机生成的仿真数据与试验数据的直方分布对比如图 9 所示.

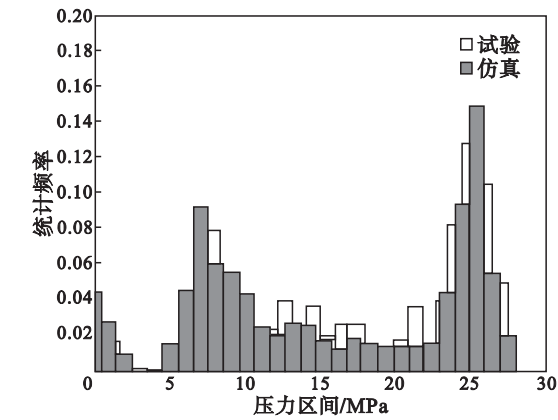


图 9 仿真载荷数据与试验载荷数据对比
Fig. 9 Comparison between simulated and test loads

通过对比可知,循环工况载荷函数构建出的仿真数据与试验测试载荷数据的压力分布基本一致,均有 7 MPa 左右和 25 MPa 左右两个分布中心,且仿真数据分布更加平滑. 因此建立的循环工况载荷函数可以较准确地表达多路阀回转联的真实载荷特征,验证了该模型建立方法的有效性.

4 结 论

1) 挖掘机用多路阀中的压力波动为具有循环特征的非平稳随机过程,可以分解成一个确定的趋势变化过程和一个平稳的随机过程. 其中,载荷随机项服从正态分布,频域上为低通窄带信号,用一系列的谐波函数可以较好地复现其特征,载荷趋势项可以采用数据加权处理得到反映挖掘机作业方式的典型载荷历程,该历程可利用函数分段拟合来参数化表达.

2) 趋势项函数与随机项函数组合重构的循环工况载荷函数,能快速生成反映以挖掘机多路阀为代表的土方工程机械零部件在非平稳随机循环工况下载荷特征的仿真数据,可方便应用于台架试验及软件解析过程,为零部件的性能研究及再设计提供真实依据.

参考文献:

[1] 王安麟,石世宁,李晓田. 挖掘机动态性能试验及其数据的小波处理方法[J]. 同济大学学报(自然科学版) 2014 ,42(1):115 - 123.
(Wang An-lin , Shi Shi-ning , Li Xiao-tian. Dynamic performance test and wavelet processing method for non-stationary random data of hydraulic excavator[J]. Journal of

Tongji University(Natural Science) ,2014 ,42(1):115 - 123.)
[2] Wang J ,Wang Z ,Yu X ,et al. Establishment method of a mixture model and its practical application for transmission gears in an engineering vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering 2012 25(5):1001 - 1010.
[3] Xiong J ,Shenoi R A ,Gao Z. A reliability-based data treatment system for actual load history[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures ,2005 ,28(10) 875 - 889.
[4] Heuler P ,Klättschke H. Generation and use of standardised load spectra and load-time histories[J]. International Journal of Fatigue 2005 27(8) 974 - 990.
[5] Wang Y ,Jia Y ,Shen G. Multidimensional force spectra of CNC machine tools and their applications ,part one :force spectra[J]. International Journal of Fatigue 2002 24(10) :1037 - 1046.
[6] 孙祖望,张义甫,郭德虎. 推土机动态性能试验的非平稳随机数据模型和处理方法[J]. 工程机械 ,1988 ,19(10) :22 - 28.
(Sun Zu-wang ,Zhang Yi-fu ,Guo De-hu. Non-stable random data model of dynamic performance testing for bulldozers and data processing procedure[J]. Construction Machinery and Equipment ,1988 ,19(10) 22 - 28.)
[7] Carboni M ,Cerrini A ,Johannesson P ,et al. Load spectra analysis and reconstruction for hydraulic pump components [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 2008 ,31(3/4) 251 - 261.
[8] 姚怀新. 工程车辆液动力学关键问题的理论与试验台建设[D]. 西安 :长安大学 2006.
(Yao Huai-xin. Theoretical research on construction vehicle hydraulic dynamic key problems and the test platform construction[D]. Xi 'an Chang 'an University 2006.)
[9] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. Siam :Society for Industrial and Applied Mathematics Press ,1992.
[10] 徐礼超,葛如海,常绿. 典型工况下载机液压系统载荷时间历程的制取方法[J]. 农业工程学报 ,2012 ,28(6) :57 - 62.
(Xu Li-chao ,Ge Ru-hai ,Chang Lü. Acquisition method of load time course of loader hydraulic system under typical operating condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2012 28(6) 57 - 62.)
[11] 马登成,杨士敏,马登慧,等. 工程机械波动载荷分析与模拟方法研究[J]. 甘肃农业大学学报 ,2013 ,48(3) :136 - 143.
(Ma Deng-cheng ,Yang Shi-min ,Ma Deng-hui ,et al. An analysis of fluctuations load and simulation method on construction machinery[J]. Journal of Gansu Agricultural University 2013 48(3) 136 - 143.)