

基于 MATLAB 的液压挖掘机载荷 信号预处理研究

任雪娇¹, 吕彭民², 向清怡²

(1. 陕西工业职业技术学院 机械工程学院, 陕西 咸阳 712000;

2. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了使采集到的载荷信号更加真实有效,应用 MATLAB 软件编制相应的程序对液压挖掘机工作装置载荷信号进行去除零点漂移及去除奇异值等预处理操作,依据油缸位移、油缸推力和回转角度 3 个参数在挖掘机工作过程中的变化情况,将挖掘机作业过程分为挖掘、提升、卸载及返回 4 个阶段,并对试验中的某段载荷信号进行了验证,发现其顺利通过了平稳性和各态历经性检验,说明预处理程序科学有效,为后续科学编制挖掘机载荷谱、预测疲劳寿命奠定了基础。

关键词:液压挖掘机;载荷信号;预处理;MATLAB

中图分类号: TU621

文章编号: 1000-0682(2024)05-0102-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.019

Research on load signal preprocessing of hydraulic excavator based on MATLAB

REN Xuejiao¹, LYU Pengmin², XIANG Qingyi²

(1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Shaanxi Xianyang 712000, China;

2. School of Construction Machinery, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to make the collected load signals more realistic and effective, used MATLAB software to develop corresponding programs for pre-processing operations such as removing zero drift and singular values on the load signal of the hydraulic excavator working device. Based on the changes in the displacement, thrust, and rotation angle of the hydraulic cylinder during the operation of the excavator, the excavator operation process was divided into four stages: excavation, lifting, unloading, and return, and verified a certain load signal in the experiment, it successfully passed the tests of stationarity and ergodicity of various states, this indicates that the preprocessing program is scientifically effective and lays the foundation for the subsequent scientific compilation of load spectra and prediction of fatigue life.

Keywords: hydraulic excavator; load signal; preprocessing; MATLAB

0 引言

液压挖掘机是工程机械中从事土方工程施工的主要机械装备,广泛应用于建筑工程、道路工程、矿山建设等领域^[1]。液压挖掘机在工作的过程中,其工作装置各构件所受的载荷为随机载荷,并且在载荷信号采集的过程中也存在较大的随机性。通过数

据采集系统直接测得的一系列载荷信号,并非理想化的。信号在实际采集的过程中,会受到各种因素的干扰,这些因素会对最终的分析结果产生很大影响,因此在压缩编辑之前需要进行一系列的预处理工作,包括去除零点漂移、去除奇异值等。通过以上步骤,可将反应液压挖掘机关键零部件载荷变化规律的真实信号提取出来,为后续科学编制载荷谱、预测疲劳寿命奠定基础。

1 载荷信号预处理

1.1 去除零点漂移

半导体元件的导电性对温度非常敏感,在信号

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 陕西工业职业技术学院 2023 校级科研项目 (2023YKYB-014)

第一作者: 任雪娇(1991—),女,山东烟台人,硕士研究生,讲师,研究方向为机械制造及职业教育。E-mail: 1328282990@qq.com

采集的过程中,外界温度的影响、机器本身的发热、仪器不稳定等原因都会造成测试仪器中元件参数的变化,使得输出的信号具有一定的零点漂移。零漂信号又被称为趋势项,该趋势项的存在会引起信号的失真^[2-3],因此必须对其进行处理。

针对零均值的随机过程,可通过建立计算模型去除随机信号中的零漂信号,具体做法如下:

(1)将整个采样信号分成 n 段,利用时间加权法分别求取各段信号的平均值,得到一个台阶状的曲线;

(2)利用分段线性化方法^[4]来拟合该曲线(如图 1 所示),以保证信号的连续性和真实性。

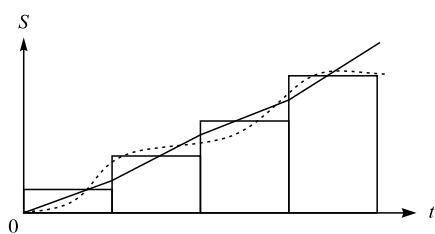


图 1 零漂信号的线性化

分段线性化方法如下:

(1)当 $i=1$ 时,由于零漂信号的起始点为零,故将零作为第 1 段的起点零漂信号值,终点信号值取 $[S_0(1) + S_0(2)]/2$,故第 1 段零漂信号的方程为:

$$S_0(t) = \frac{S_0(1) + S_0(2)}{2} \cdot \frac{t}{\Delta T} \quad (1)$$

(2)当 $1 < i < n$ 时,首先将第 $i-1$ 段和第 i 段均值的平均值,即 $[S_0(i-1) + S_0(i)]/2$ 作为第 i 段的起点零漂信号值,然后将第 i 段和第 $i+1$ 段均值的平均值,即 $[S_0(i+1) + S_0(i)]/2$ 作为第 i 段的终点零漂信号值,故第 i 段零漂信号的方程为:

$$S_0(t) = \frac{S_0(i-1) + S_0(i)}{2} + \frac{S_0(i+1) - S_0(i-1)}{2} \cdot \frac{t - (i-1)\Delta T}{\Delta T} \quad (2)$$

(3)当 $i=n$ 时,将 $[S_0(n-1) + S_0(n)]/2$ 作为第 n 段的起点零漂信号值,将第 n 段中点处对应的零漂信号 $S_0(n)$ 作为时间加权零漂信号的平均值,故第 n 段零漂信号的方程为:

$$S_0(t) = \frac{S_0(n-1) + S_0(n)}{2} + [S_0(n) - S_0(n-1)] \cdot \frac{t - \Delta T(n-1)}{\Delta T} \quad (3)$$

式中: t 为采样时间; i 为采样信号的某一段; ΔT 为每段信号的长度。

(4)计算有效的应力信号公式如下:

$$\sigma(t) = S(t) - S_0(t) \quad (4)$$

式中: $S(t)$ 为原始记录信号。

但是,上述方法仅对零均值的随机过程有效,如果有效信号的均值不为零,则需要先减去有效信号的均值,将有效信号变为零均值的信号,再采用该方法去除零漂,最后再将之前减掉的均值加上。

有效信号均值的确定方法:零漂信号是随时间推移缓慢增长的非周期信号,当 $t=0$ 时,零漂信号为零,并且在采样初期,机器发热并不严重,零漂信号就很小,可粗略不计。那么在该段时期内采集到的信号就认为没有零漂信号,故信号的均值就是有效信号的均值。

基于 MATLAB 软件编制零漂处理程序,部分代码如下:

```
xydata = input('请输入需要进行零漂处理的信号');
a = input('请输入分段数 a');
time = xydata(:,1); str = xydata(:,2);
.....
str11 = sum(str(1:n_T * c1))/(n_T * c1); C
= str - str11;
.....
if a == 1
Q = 2 * S(1)/(time(1) - time(1)) * time;
else
for i = 1:a
if i == 1
K(:,i) = S(1) * (time(1:b) - time(1))/(b *
(time(2) - time(1)));
else if i == a
K(:,i) = (S(a-1) + S(a))/2 + (S(a) - S(a-1)) *
(time((a-1) * b + 1:a * b) - time((a-1) * b + 1))/
(b * (time(2) - time(1)));
REMAIN = (S(a-1) + S(a))/2 + (S(a) - S(a-1)) *
(time(a * b + 1:l) - (a-1) *
(b * (time(2) - time(1))))/(b * (time(2) -
time(1)));
else
K(:,i) = (S(i-1) + S(i))/2 + (S(i) - S(i-1)) *
(time((i-1) * b + 1:i * b) - time((i-1) *
b + 1))/
(b * (time(2) - time(1)));
```

```

end
end
M = [ ];
for j = 1 : a
N = K( :, j ); M = [ M; N ];
end
Q = [ M; REMAIN ];
end
W = C - Q; str1 = W + str11;
xydata1 = [ time str1 ];
save( '零漂处理结果.txt', 'xydata1', '-ascii' );

```

1.2 去除奇异值

载荷谱在采集的过程中,一些较大的外部干扰或是人为错误都会导致载荷数据的突变,这些突变的载荷数据通常被称为奇异值。奇异值的存在会严重干扰信号的处理,对后期疲劳寿命的预测产生较大的影响^[5-6],因此必须提前加以识别并将其去除。常用的去除奇异值的方法有以下几种:

(1) 幅值门限法

该方法需要预先设置一个幅值的阈值,然后对信号中的数据逐个进行检测,若某点的幅值大于阈值,则认为该点属于奇异值。此种方法适用于去除和正常数据差别较大的奇异值,对差别较小的奇异值的去除效果并不好。

(2) 梯度门限法

该方法需要对原始数据以等间隔求梯度,再由梯度的概率分布确定阈值的选取,当梯度大于设定的阈值时,则认为该点属于奇异值。此种方法可去除小概率、梯度较大的信号,但是当正常信号变化剧烈时,也有可能被去除掉。

(3) 标准方差法。

该方法需先求出原始信号中幅值序列的均值和方差,然后求取原始数据与均值的差值,当该差值大于方差的设定倍数时,则认为该点属于奇异值。此种方法对奇异值比较敏感,但是原始信号中那些出现频率较低的大载荷很有可能被去除掉。

对比以上 3 种方法可知,因甄别奇异值的原理不同,所以每种方法的适用范围也有所差异。载荷数据在采集过程中,不同的传感器、不同的测试点产生的奇异值都会有所不同。去除奇异值时,必须对症下药,针对每种奇异值选择合理有效的方法进行处理,方可取得良好的效果。

识别、去除奇异值的部分程序代码如下:

```
switchsth
```

```

case 1
a = inputdlg('请输入幅值阈值:', '参数设置',
1, {''});
a = str2double(a);
L = (data < a);
xydata = data(L);
case 2
n = length(data);
for i = 2:n
dd(i-1) = data(i) - data(i-1);
end
b = inputdlg('请输入梯度阈值:', '参数设置',
1, {''});
b = str2double(b);
L1 = (dd < b);
xydata = data(L1);
case 3
mu = mean(data); sigma = std(data);
c = inputdlg('请输入标准差倍数阈值:', '参数设置', 1, {'3'});
c = str2double(c);
xydata = data(abs(data - mu) <= c * sigma);
end

```

代码的含义为:待处理的载荷数据为 data,去除奇异值后的载荷数据为 xydata。sth 是标签,每个标签下,根据每种去除奇异值的原理编制了相应的程序。在实际使用的过程中,可根据奇异值出现的原因,通过选择某个标签来确定去除奇异值的方法。

2 测试数据的检验

2.1 作业分段

挖掘机的载荷特征主要是由其作业环境和作业方式决定的。汽车、拖拉机等尽管同样存在各种不同的作业工况,但是在每种工况内的载荷一时间历程都可以接受平稳性假设。而对于挖掘机而言,不仅各工况组成的总体不符合平稳性假设,就某一特定的工况而言,一个作业循环中的载荷一时间历程也可能不平稳。这主要是由挖掘机工作环境恶劣、载荷强度大引起的。高强度的作业载荷使挖掘机的载荷波动特征非常明显,就挖掘机的斗尖而言,通常在挖掘阶段所承受的载荷最大,而其它阶段所承受的载荷相对较小。因此,参照飞机载荷谱“飞—续—飞”的编谱方式,试验同样以作业段为基本单位进行载荷信号的平稳性检验。

挖掘机在工作过程中,各油缸位移在各个作业段具有较明显的特征,如图2所示。通过图示特征,再辅以转台角度变化以及各油缸推力的大小,

即可将挖掘机实际工作过程分为挖掘、提升回转、卸载和空斗返回4个阶段。具体的划分依据如表1所示。

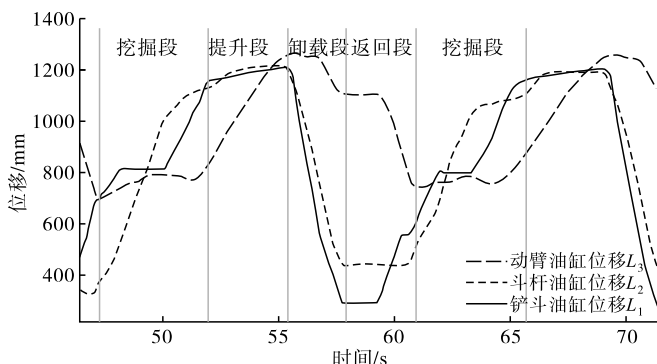


图2 某实测挖掘机作业段划分

表1 挖掘机工作阶段划分依据

工作阶段	细分	划分依据
提升回转	仅提升	θ 不变, L_1 单调增加, L_3 达到最大值附近且变动小
	仅回转	θ 单调增加或减小, L_1 不动, 铲斗油缸推力大于平均值
	提升同时回转	θ 单调增加或减小, L_1 单调增加
卸载		L_2 单调减小, 且 L_3 单调减小
	仅下放	θ 不变, L_1 单调减小
空斗返回	仅回转	θ 单调增加或减小, L_1 不动, 铲斗油缸推力小于平均值
	下放同时回转	θ 单调增加或减小, L_1 单调减小
	间歇	L_1, L_2, L_3 和 θ 均不变(常出现在卸载结束后)
挖掘		以上3个阶段以外的阶段

注:表中, L_1, L_2 和 L_3 分别为动臂、斗杆和铲斗油缸的长度; θ 为转台回转角度。

挖掘机在工作时,工作装置所承受的载荷理论上属于连续的随机过程。应取无限多的样本方可获得描述随机信号性质的统计特性参数,但是,该方法在实际测量中是不可行的。由随机过程理论可知,若随机载荷信号具备平稳性和各态历经性,则可采用一个合适的子样来代替载荷母本。因此,在测得载荷信号后,必须首先检验其平稳性和各态历经性。

2.2 平稳性检验

假设随机信号在某一时刻 t_1 上的均值用下式表示:

$$E_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) \quad (5)$$

在 t_1 和 $t_1 + \tau$ 这2个不同时刻之间的相关函数用下式表示:

$$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau) \quad (6)$$

若均值 $E_x(t_1)$ 不随时间 t_1 的变化而变化,自相关函数 $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau)$ 与信号时间的起始点无关,仅

与时间间隔 τ 有关,则认为该随机信号是平稳的,反之,则认为是非平稳的。

平稳性检验^[7-8]原则上应按照其定义来进行,但是在实际采集信号的过程中,要获得信号的集合体作无限多个样本函数的测量是不现实的。因此,工程上常采用轮次法^[9]检验载荷信号的平稳性,其具体步骤如下:

(1) 将总体样本长度均分为 M 组,若存在余数,则将其自动存放于最后一组中,认为 M 个子样数据相互独立;

(2) 分别计算 M 个子样的均方值与总体样本的均方值;

(3) 将每组子样的均方值与总体样本均方值作比较。若子样的均方值大于总体的均方值,则标记“+”;若子样的均方值小于总体的均方值,则标记“-”;

(4) 顺序观察同类符号为一轮次,确定出轮次数目 r ;

(5) 假设随机信号是平稳的,根据分组数 M 和

显著性水平 α , 可由表 2 查得相对于总体均值的轮次区间 $[r_{\min}, r_{\max}]$;

(6) 若 $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$, 则接受平稳性假设, 否则, 则拒绝平稳性假设。

表 2 轮次分布表

$n = M/2$	$1 - \alpha$			α		
	0.99	0.975	0.95	0.05	0.025	0.01
	期望数区间下限			期望数区间上限		
5	2	2	3	8	9	9
10	5	6	6	15	15	16
15	9	10	11	20	21	21
20	13	14	15	26	27	28
30	21	22	24	37	39	40
40	30	31	33	48	50	51
50	38	40	42	59	61	63
60	47	49	51	70	72	74
80	65	68	70	91	93	96
90	74	77	79	102	104	107
100	84	86	88	113	115	117

平稳性检验的部分程序代码如下:

```
data = load(待检验数据.txt');
xydata = data.^2; N = 10;
meanTotal = mean(xydata);
l = length(xydata);
b = fix(l/N); r = rem(l, N);
S = [];
for i = 1:N
    if i == N
        meanS(i) = sum(xydata((i-1)*b+1:l))/(b+r);
    else
        meanS(i) = sum(xydata((i-1)*b+1:i*b))/(b);
    end
end
tag = zeros(N,1);
for i = 1:N
    if (meanS(i) - meanTotal) >= 0
        tag(i) = 1;
    end
end
```

```
count = 0;
for i = 2:N
    if tag(i) ~= tag(i-1)
        count = count + 1;
    end
end
[countmin, countmax] = referTimes(N, 0.05);
if count >= countmin && count <= countmax
    tagSteady = 1; % 接受平稳性假设
else
    tagSteady = 0; % 拒绝平稳性假设
end
```

采用所编制的程序, 对试验中某段载荷信号进行平稳性检验。该段信号包含 20 个数据, 将其平均分成 10 个子样, 认为各子样相互独立。通过计算, 得到总体样本的均方值为 50 718, 计算的各子样均方值及轮次数, 如表 3 所示。由表 3 可知, 最终确定出的轮次数 $r=5$ 。取 $M=10$, $\alpha=0.05$, 通过查表可得, 最小轮次数应为 3, 最大轮次数应为 8。而最终确定的轮次数 5 恰好落在此区间内, 说明该段信号是平稳的。

表 3 某段信号的轮次数统计

子样序列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
均方值	52 664	57 898	45 644	51 875	61 419	48 319	42 424	45 502	52 855	53 758
标记轮次数	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+
	1		2		3		4			5

2.3 各态历经性检验

对于平稳的随机过程,若它的任意一个子样函数 $x(t)$ 求得的统计信息与母体 $X(t)$ 求得的统计信息相同,则称该随机过程具有各态历经性。

各态历过程与平稳随机过程的关系为:各态历过程一定是平稳随机过程,但是平稳随机过程却不一定是各态历过程。

若想证明随机过程各态历经性需要长期观察及大量的数据分析,这是非常困难的。目前工程应用中主要采取物理判断这种近似的假设检验对各态历经性进行判定,即若该随机过程的各个样本本身是平稳的,且获得各个样本的基本物理因素大致相同,则认为该过程为各态历经随机过程。所以在试验中,若各个作业段均通过平稳性检验,则认为它也通过了各态历经性检验。

3 结论

载荷信号预处理是数据采集完成后必须进行的试验数据准备与校验工作,也是进行后续数据分析处理工作的前提^[10]。该文以某型液压挖掘机为研究对象,应用 MATLAB 软件编制相应的程序对液压挖掘机工作装置载荷信号进行去除零点漂移、去除奇异值等预处理操作。依据油缸位移、油缸推力及回转角度 3 个参数在挖掘机工作过程中的变化情况,将挖掘机作业过程分为挖掘、提升、卸载及返回四个阶段。对分段后的载荷数据进行平稳性检验和各态历经性检验,为确保用子样替代母体以获取载

荷信号后续处理中的各种统计信息,提供了科学的理论依据。

参考文献:

- [1] 王斌华,向清怡,陈一馨,等. 挖掘机结构疲劳可靠性研究现状及展望[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022,42(01):115-126.
- [2] 田永卫,张书明,杨方飞. 联合收获机底盘载荷谱实测趋势干扰信号处理[J]. 农机化研究,2014,36(11):24-28.
- [3] 赵宇嘉. 构架载荷特征分析与预测及数据库建立方法[D]. 北京:北京交通大学,2023.
- [4] 吕彭民. 大型复杂结构抗疲劳设计[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1999.
- [5] 赵晓鹏,冯树兴,张强,等. 越野汽车试验场载荷信号的采集及预处理技术[J]. 汽车技术,2010(09):38-42.
- [6] 秦立峰. 轮式装载机驱动桥前后输出轴载荷谱编制及疲劳寿命预测[D]. 西安:长安大学,2022.
- [7] RIDER R L, LANDGRAF R W. Reliability analysis of an automobile wheel assembly[J]. SAE International journal, 1993,7(3):46-112.
- [8] 张树京,齐立心. 时间序列分析简明教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [9] 石来德,佟德纯. 信号处理技术在载荷谱研究中的应用[J]. 建筑机械化,1983(3):32-38.
- [10] 金红杰,臧利国,李瑶薇. 车辆底盘试验载荷谱编制技术研究与应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2022,36(12):58-70.

(上接第 82 页)

- [7] 贺嘉琪. 基于深度学习的指针式仪表示数自动识别的研究与应用[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
- [8] HOWARD A, SANDLER M, CHEN B, et al. Searching for MobileNetV3 [C]. 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2019.
- [9] HOU Q, ZHOU D, FENG J. Coordinate attention for efficient mobile network design [C]. 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021.
- [10] 张文政,吴长悦,赵文,等. 融合对抗网络和维纳滤波

的无人机图像去模糊方法研究[J]. 无线电工程, 2024,54(03):607-614.

- [11] PAN J, HU Z, SU Z, et al. Deblurring text images via L0-regularized intensity and gradient prior [C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Columbus, 2014:2901-2908. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.371>.
- [12] 佟雨兵,张其善,祁云平. 基于 PSNR 与 SSIM 联合的图像质量评价模型[J]. 中国图象图形学报,2006(12):1758-1763.