

文章编号:1671-6833(2018)03-0067-05

装载机工作装置载荷测试样本长度确定方法

万一品, 宋绪丁, 陈乐乐

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 构建了装载机工作装置载荷测试系统, 以预处理后销轴载荷为数据样本, 提出一种基于中心极限定理的样本长度确定方法, 并探讨了样本长度变化对载荷均幅值分布模型预估参数的影响. 结果表明: 提出的载荷样本长度确定方法避免了谱密度法的数据饱和以及趋势线拟合法对拟合模型的依赖性. 在置信度 0.95 和统计误差为 0.05 时, 得到了测试物料工况下载荷均幅值分布估计参数达到稳定时的临界样本数为 48 斗, 低于临界样本数时估计参数变化波动明显, 高于临界值开始趋于稳定. 本方法具有可信度高、试验成本低和工作量小的优点, 为装载机工作装置载荷测试样本长度的确定提供了重要参考依据.

关键词: 装载机; 载荷测试; 中心极限定理; 样本长度

中图分类号: TH243.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.019

0 引言

装载机作业工况复杂多变, 疲劳失效成为零部件主要的失效形式^[1-2]. 统计分析是结构件载荷谱编制及疲劳寿命预测的依据, 样本长度决定分析结果精度和试验成本^[3], 确定合理的样本长度成为载荷测试与疲劳试验谱编制的关键基础.

数据的均值特性是样本长度确定最常用的评价准则, 文献[4]研究了参数模型建模样本长度, 给出了样本长度区间选取的基本原则, 明确了样本数对模型参数估计的重要性; 文献[5]基于频域分析给出了功率谱密度方法确定样本长度的理论计算公式; 文献[6]利用指数模型和变差系数法计算了随机数据中样本长度确定方法; 文献[7]利用近似均值精度估计的方法给出了样本长度近似估计的计算公式; 文献[8-9]利用拟合趋势线的方法获得了所需的载荷测试样本长度. 然而, 谱密度法以信号频带宽度为依据, 未考虑载荷的统计特性; 近似均值估计法用样本直接代替总体, 考虑因素过少, 结果可信度低; 而趋势线拟合法过度依赖拟合模型的选取, 包含人为因素, 得

到的结果波动较大.

由于缺少实测试验数据, 对装载机工作装置载荷测试样本长度确定方法的公开研究很少. 构建 ZL50 型装载机工作装置载荷测试系统, 得到黏土物料工况下销轴载荷时间历程. 提出一种基于中心极限定理的样本长度确定方法, 考虑实测载荷数据均值特性和统计误差, 分析不同方法得到的样本长度结果对载荷统计模型的影响, 给出了满足误差精度要求的样本长度结果.

1 载荷测试与数据处理

1.1 载荷测试

装载机工作装置由铲斗、动臂、摇臂、连杆等通过销轴铰接组成, 各铰接点处的销轴载荷是工作装置各部件力学分析的基础, 油缸位移则是工作装置姿态分析的基础, 结构敏感点应力和油缸压力信号等则是辅助性验证参数^[10]. 得到装载机工作装置载荷测试测点布置如图 1 所示. 各测点传感器和信号采集装置如图 2 所示.

选择黏土物料工况, 采用 L 型铲装路线和一次铲装作业法进行试验, 如图 3 所示.

收稿日期: 2017-05-25; **修订日期:** 2017-08-10

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF07B02); 长安大学优秀博士研究生项目(310825175009)

作者简介: 万一品(1988—), 男, 河南邓州人, 长安大学博士研究生, 主要从事动态载荷测试与疲劳研究.

通信作者: 宋绪丁(1963—), 男, 陕西合阳人, 长安大学教授, 博士生导师, 主要从事结构抗疲劳研究, E-mail: songxd@chd.edu.cn.

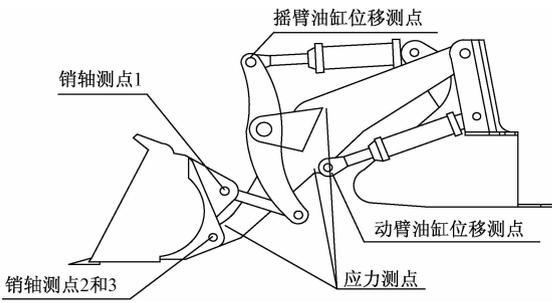


图1 装载机工作装置载荷测点布置图

Fig.1 Load measuring points of the working device

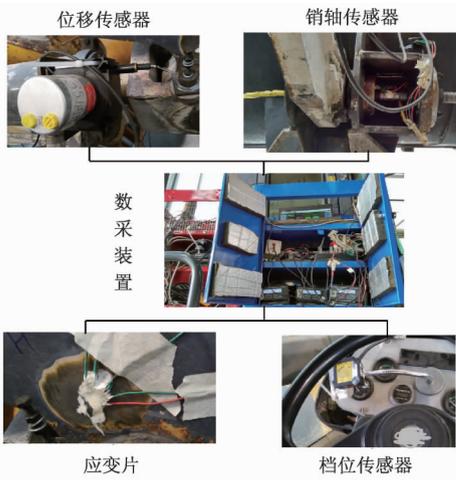


图2 工作装置载荷测试设备

Fig.2 Load measuring equipments



图3 散状物料铲装试验图

Fig.3 Bulk material loading test

1.2 数据处理

实测数据包含干扰信号及异常峰值点,在载荷数据统计处理前进行预处理,包括滤波、消除趋势项以及异常峰值点剔除^[11].以铲斗与动臂左侧铰点销轴为例,编制预处理程序,处理前后销轴载荷时间历程段对比如图4所示.

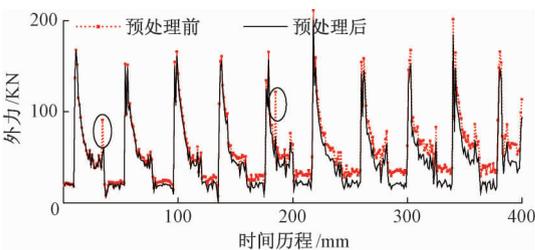


图4 动臂与铲斗铰点销轴载荷预处理

Fig.4 Comparison diagram of load pretreatment

由图4可知,动臂与铲斗销轴载荷具有周期性,预处理剔除了载荷奇异值并且消除了线性趋势项,所得载荷时间历程保留了销轴的真实受力特性.将1个作业循环数据视为1个子样,24个子样均值如表1所示,依时间序列由不同子样个数组成的样本均值如表2所示.

表1 各子样数据均值变化表

Tab.1 The mean change of sample data

| 子样序号 | 均值/kN | 子样序号 | 均值/kN | 子样序号 | 均值/kN |
|------|-------|------|-------|------|-------|
| 1 | 51.89 | 9 | 51.37 | 17 | 45.17 |
| 2 | 49.07 | 10 | 44.78 | 18 | 46.48 |
| 3 | 51.85 | 11 | 45.48 | 19 | 46.51 |
| 4 | 48.14 | 12 | 47.73 | 20 | 54.52 |
| 5 | 44.61 | 13 | 54.65 | 21 | 55.13 |
| 6 | 50.94 | 14 | 51.53 | 22 | 49.07 |
| 7 | 45.76 | 15 | 46.36 | 23 | 48.33 |
| 8 | 46.82 | 16 | 48.21 | 24 | 50.56 |

表2 含不同子样个数的样本数据均值变化表

Tab.2 The mean change of data with a different number of sample

| 子样个数 | 均值/kN | 子样个数 | 均值/kN | 子样个数 | 均值/kN |
|------|-------|------|-------|------|-------|
| 1 | 51.89 | 9 | 48.93 | 17 | 48.49 |
| 2 | 50.48 | 10 | 48.52 | 18 | 48.38 |
| 3 | 50.94 | 11 | 48.25 | 19 | 48.28 |
| 4 | 50.24 | 12 | 48.20 | 20 | 48.59 |
| 5 | 49.11 | 13 | 48.69 | 21 | 48.91 |
| 6 | 49.41 | 14 | 48.90 | 22 | 48.92 |
| 7 | 48.89 | 15 | 48.73 | 23 | 48.72 |
| 8 | 48.64 | 16 | 48.70 | 24 | 48.83 |

2 载荷样本长度确定方法

装载机工作装置实测载荷数据是一个具有周期性的物理随机过程,在其系统参数和试验条件基本保持不变时,将装载机工作装置载荷数据视为一般平稳物理现象的随机数据,从而认为其是各态历经的^[12].记装载机销轴全生命周期载荷数据为总体 X ,则总体均值 $E(X) = u$ 和方差 $D(X) = \sigma^2$,在总体中选择容量为 n 的样本 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,样本的均值记为 \bar{x} ,根据中心极限定理可得式(1):

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_n - nu}{\sqrt{no\sigma^2}} = \frac{\bar{x} - u}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (1)$$

总体方差不为0且样本数 n 充分大时, $f(x)$ 近似服从标准正态分布;对于载荷总体标准差 σ

未知时,可用样本标准差 S 代替总体标准差,此时 $\bar{x} - u / (S / \sqrt{n})$ 服从 t 分布,显著水平 α 与总体中样本个数 n 之间的概率关系如式(2)所示:

$$P\left\{|\bar{x} - u| \leq \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1)\right\} = 1 - \alpha. \quad (2)$$

此时总体均值置信区间如式(3)所示:

$$\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \leq u \leq \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1). \quad (3)$$

记变异系数为 $V = S/u$, 总体均值和样本均值的相对误差为 $\varepsilon = (u - \bar{x})/u$, 变异系数 V 与相对误差 ε 以及相对误差 ε 与样本长度 n 之间的关系分别如式(4)和式(5)所示:

$$V = (1 - \varepsilon) \cdot (S/\bar{x}), \quad (4)$$

$$\varepsilon \geq \left| \frac{S}{u \sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right| = \left| \frac{V}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right|. \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得式(6),如下所示:

$$n \geq \left[\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{S}{\bar{x}} \cdot t_{\alpha/2}(n-1) \right]^2. \quad (6)$$

给定置信水平 $1 - \alpha$ 后,根据样本均值和标准差以及式(6)可计算得到给定统计误差 ε 下所需最小样本长度.然而,在实际求解过程中样本长度 n 是未知的,此时 $t_{\alpha/2}(n-1)$ 也是未知的,因此需要根据经验选定 n 的初始值 n_1 .由中心极限定理推导样本长度计算公式及过程,可得样本长度迭代计算流程如图5所示.

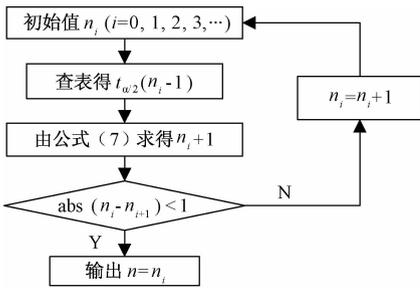


图5 样本长度迭代计算流程图

Fig.5 Flow diagram of sample length calculation

3 结果分析

3.1 载荷样本长度计算结果

置信水平为 95%, 统计误差取 0.05, 初始子样选择 3, 根据式(6)和图5可得子样数 n 的输出值与迭代次数之间的变化关系如图6所示.

以相邻两个输出值的差值作为迭代的终止条件,第15和16次的迭代输出分别为47.02和47.73,取整后的48斗样本长度即为通过提出的基于中心极限定理法获得的最小样本长度.选用多项式、S曲线和指数模型对表2中样本均值变

化趋势进行拟合,所得结果如图7所示.

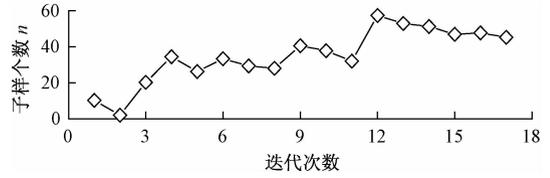


图6 样本个数输出值与迭代次数关系

Fig.6 Relationship between sample and iteration

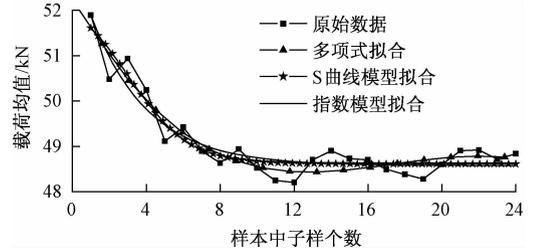


图7 趋势线拟合法结果示意图

Fig.7 The results of trend line method

对非线性拟合方程,拟合度指标 R^2 的计算公式如式(7)所示:

$$R^2 = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}}, \quad (7)$$

式中, x_i 为实测数据均值; x'_i 为拟合方程预测值.

由式(7)得多项式、S曲线和指数模型的拟合优度分别为 0.89、0.92 和 0.94,趋势线趋于稳定时最小子样个数分别为 17 斗、14 斗和 19 斗.由图7和样本长度计算结果可知趋势线拟合方法对拟合模型有一定依赖性,所得结果不稳定.采用谱密度法^[5]得到样本长度约为 400 斗,近似均值估计法^[7]得子样个数约为 16 斗.

3.2 载荷统计灵敏度分析

不同样本长度的载荷影响着均值频次和幅值频次概率密度函数各待估参数的取值,样本长度的影响最终反映在载荷谱的编制结果中.利用 nCode 软件对预处理后的销轴载荷进行均幅值频次统计,样本长度从 5 斗开始每次增加 5 斗直至 80 斗,其中 80 斗的雨流计数结果如图8所示.

载荷统计分布中幅值常采用威布尔分布,而均值则采用正态分布或对数正态分布.这里采用概率图法分析雨流计数均值结果,均值频次的正态分布和对数正态分布概率图如图9所示.

由图9可知,销轴载荷均值频次采用对数正态分布.40斗和80斗的样本均幅值频次直方图分别如图10和图11所示.

记均值变量为 x , 幅值变量为 y , 则均值对数正态分布和幅值威布尔分布的概率密度函数 $f(x)$

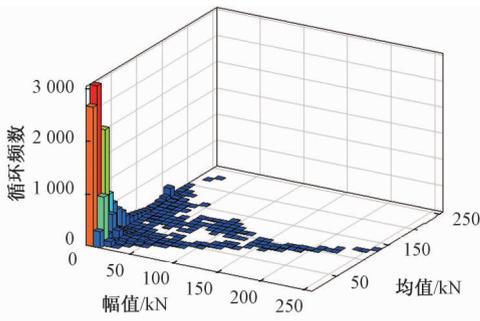


图8 雨流计数结果示意图

Fig. 8 The result of rain flow counting method

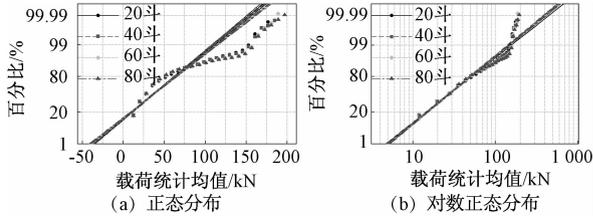


图9 均值分布概率图

Fig. 9 Probability graph of mean distribution

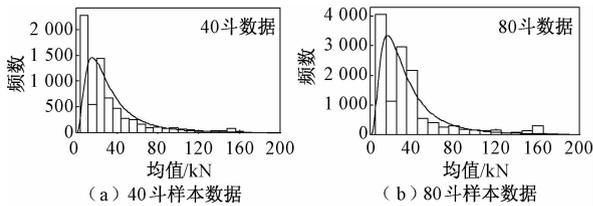


图10 均值频次直方图与分布拟合图

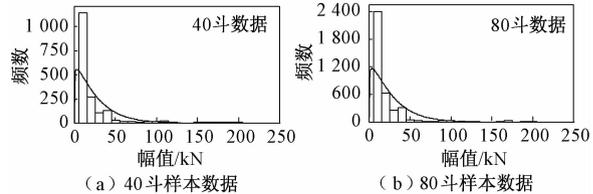


图11 幅值频次直方图与分布拟合图

Fig. 11 Amplitude frequency histogram and distribution fitting

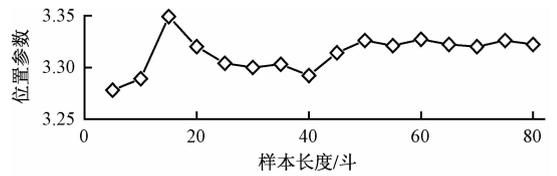
和 $f(y)$ 分别如式(9)和式(10)所示^[13]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x - u)^2}{2\sigma^2}\right]; \quad (9)$$

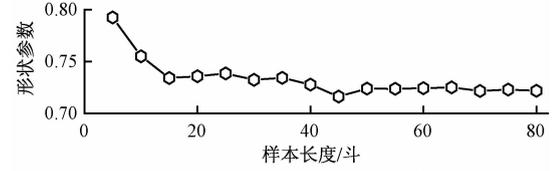
$$f(y) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{y}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{y}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad (10)$$

式中, u 和 σ 为对数正态分布位置参数和形状参数; α 和 β 为威布尔分布形状参数和尺度参数。

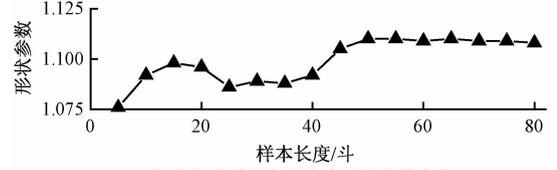
以5斗数据为间隔,样本从5斗~80斗的均幅值频次统计分布参数变化如图12所示。由图12可知,随着样本长度 n 的增加,载荷均幅值的统计分布参数趋于稳定。当 $n < 20$ 时,4个待估统计参数与样本长度近似呈线性变化关系;当 $20 \leq n < 50$ 时,待估参数呈现波动变化;待估统计参数自样本长度 n 趋近于50时开始趋于稳定,即销轴



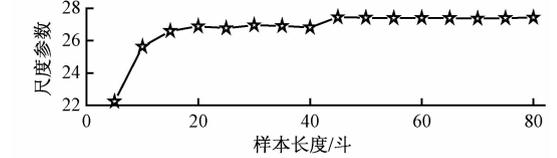
(a) 均值频次对数正态分布中位置参数变化



(b) 均值频次对数正态分布中形状参数变化



(c) 幅值频次威布尔分布中形状参数变化



(d) 幅值频次威布尔分布中尺度参数变化

图12 均幅值分布待估参数与样本长度关系

Fig. 12 The relationship between the distribution parameters and the sample length

载荷谱编制结果对样本长度的灵敏性以50斗样本长度数据为明显分界。在 $n < 50$ 时,载荷样本长度的增加或减小会对载荷谱编制结果产生较大影响;在 $n \geq 50$ 时,载荷样本长度的改变对载荷谱编制结果的影响则可以忽略。

在误差取0.05、置信水平为0.95时,谱密度法所得400斗的样本结果趋于保守,使模型参数估计出现数据饱和,增加了试验测试成本以及数据处理的难度;而近似均值法和趋势线拟合法所得20斗左右的样本数据下,均幅值统计参数估计量并没有达到稳定;基于文中方法所得48斗可以认为是销轴载荷测试最小样本,此时总体参数的估计值 u 、 σ 、 α 和 β 已基本开始趋于稳定。通过载荷统计参数估计量的验证,基于中心极限定理确定载荷样本长度方法,与谱密度法相比减小了工作量;与近似均值法和趋势线拟合法相比,具有较高的精确性和可信度。

4 结论

(1)提出的载荷样本长度确定方法避免了谱密度法的数据饱和和趋势线拟合法对拟合模型的依赖,谱密度法所得400斗样本长度结果偏于保守,而趋势线拟合法结果随拟合模型的变化而改

变,低于20斗的样本长度可靠性不高.

(2)基于雨流计数和统计分析得到载荷均幅值分别服从对数正态分布和威布尔分布,置信度0.95和统计误差为0.05,得到了48斗样本长度是载荷均幅值分布模型估计参数达到稳定时的临界样本数,在低于临界样本数时估计参数变化波动明显,高于临界值开始趋于稳定.

(3)基于中心极限定理的样本长度确定方法具有可信度高、试验成本低和工作量小的优点,为装载机工作装置载荷测试提供参考依据.

参考文献:

- [1] MURER S, LEGUILLON D. Static and fatigue failure of quasi-brittle materials at a V-notch using a dugdale model[J]. *European journal of mechanics A/solids*, 2010, 29(8): 109-118.
- [2] 万一品,来盼盼,宋绪丁,等. 装载机工作装置有限元分析与疲劳强度评估[J]. *起重运输机械*, 2016(9): 30-34.
- [3] 阎楚良,高镇同. 最少空测采样飞行起落次数设计准则[J]. *航空学报*, 1999, 11(20): 514-517.
- [4] 高品贤. 参数模型建模样本长度的选择[J]. *振动、*

测试与诊断, 1991, 11(4): 5-10.

- [5] 石来德. 机械的有限寿命设计和试验 第七讲载荷谱的研制过程[J]. *建筑机械*, 1986(10): 35-45.
- [6] 石来德,张巨光,黄珊秋. 随机数据处理中确定样本长度的问题的探讨[J]. *建筑机械*, 1993(4): 16-21.
- [7] 张云龙,褚文农,许纯新. 装载机传动系载荷样本长度的确定[J]. *工程机械*, 1994(6): 16-20.
- [8] 何春华,周铤,项娇. 汽车道路行驶试验载荷谱样本长度确定方法的研究[J]. *汽车技术*, 2003, (11): 14-17.
- [9] 李叶妮,林少芬,刘少辉,等. 回归分析法在样本长度误差分析中的应用[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2010, 15(1): 72-75.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

Study on Method for Determining Load Sample Length of the Loader Working Device

WAN Yipin, SONG Xuding, CHEN Lele

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The load measuring system of the loader working device was constructed and the pin-shaft pretreatment load was used as the sample data. The sample length determination method based on central limit theorem was proposed, and the influence of sample length variation on the parameters of load mean amplitude distribution model was discussed. The results showed that the proposed method could avoid the data saturation of the spectral density method and the dependence of the trend line fitting method on the model. When the confidence level was 0.95 and the statistical error was 0.05, the critical sample number was 48. The estimated parameters of the distribution model had obvious fluctuation when the number of samples was lower than the critical value. It tends to be stable when the sample number was higher than the critical value. This method had the advantages of high reliability, low test cost and small workload, which could provide an important reference for load measuring of the loader working device.

Key words: loader; load measuring; central limit theorem; sample length