

利用雨流法统计进行疲劳分析和寿命估计

沈松 应怀樵 刘进明

(东方振动和噪声技术研究所, 北京, 100085)

摘要: 对于长期承受交变载荷的机器设备, 除了振动和强度外, 疲劳也是导致其损坏的常见原因之一。因此进行有效的疲劳分析和寿命估计, 是保障设备安全运转的重要手段之一。本文介绍了基于 DASP 软件的疲劳分析方法, 利用符合材料应力循环特性的雨流法对结构承受的交变载荷进行统计分析, 然后进行损伤度的计算和寿命估计。

关键词: 雨流法; 疲劳分析; 寿命估计

Abstract: For the machine worked with lasting alternate loads, the fatigue is the familiar reason of damage, besides the vibration and strength. So the effective fatigue analysis and life estimate is the important method to ensure that the machine can work safely. The fatigue analysis method base on the software named DASP is introduced in this paper. First the alternate loads statistics is done by rain flow method that is accord with the stress cycle characteristic of material, and then the damage degree is calculated.

Key Words: rain flow method; fatigue analysis; life estimate

1 引言

实际生产中许多设备在正常工作状态下需要承受循环交变载荷, 这种循环载荷在性质上既不同于静态载荷, 也不同于振动载荷, 但同时也具有两种载荷的某些特征。它常常具有低速重载的特点, 一方面是循环受力, 另一方面又具有很低的循环频率和较大的载荷。承担装卸任务的港口机械、需要左右倾倒的热轧设备等结构都长期处于循环交变载荷的作用下。

对于这种情形, 即使设备具有足够的静态强度, 并且不会产生共振, 但却会在长期的循环受力过程中出现疲劳损伤, 导致设备的损坏。为防止结构发生疲劳损坏, 了解设备疲劳状态, 则需要对其进行疲劳测试分析, 并进行寿命估计, 保证设备的正常安全运行, 并对设备的维修和故障诊断提供依据。

如何对这些设备进行疲劳分析, 以及如何保证分析的准确性是本文主要讨论问题。基于 DASP 系统的有关模块软件, 结合此类问题各个环节的主要特征, 文中总结了从疲劳测试、应力统计、损伤度计算到寿命估计的完整方案。

2 疲劳测试

疲劳测试是直接通过测量获取设备承受载荷的数据。测量的物理量选择动态应变和应力, 符合低速重载的特征。

测点的选择需要结合实际结构特点和受力情况, 在结构的关键部位和应力集中部位布置测点, 然后让设备处于工作状态或者模拟实际工况作业, 记录各测点的动应变数据, 并转换为应力数据。

测量设备可包括电阻应变片、动态应变仪和 INV303/306 型信号采集分析仪, 对结构所受应变和应力进行测试和数据记录, 然后进入 DASP 软件进行分析。

3 雨流法进行应力统计

应力幅的大小直接关系到结构的损伤度计算, 因此需要对测量的数据进行统计, 以便得到不同

大小应力幅的出现概率。然后结合各应力幅对应的损伤度和各应力幅的出现概率，得到结构的总损伤度。

波形计数通常有几十种方法，常用的方法包括峰值计数法、变程计数法和雨流计数法，各方法具有各自的特点，也有不同的适用范围。DASP 软件中包含上述三种常用计数方法，现分别进行比较和讨论。

峰值计数法对载荷波形中落在各载荷等级中的所有峰值（波峰和波谷）的数目进行统计计数。这种方法记录了载荷波动的信息，但夸大了实际载荷时间历程中小载荷波动的幅值，即夸大了载荷对机件的损伤程度，因此偏于保守。

变程计数法（振幅计数法），则只计及载荷时间历程中波峰和波谷之间的距离，而不考虑该振程距零载荷的距离，它考虑了影响机件寿命的主要因素—振幅，但是忽略了载荷的静态分量。

雨流计数法也叫塔顶计数法，其主要特点是根据研究材料的应力—应变过程进行计数，统计载荷波形中的循环和半循环。

雨流法计数方法如图 1：

（1）雨流的起点依次从每个峰值的内侧边开始，波形左半部为内侧边；

（2）雨点在下一个峰值落下，直到对面有一个比开始时的峰值更大的峰值为止，也就是说比开始时的最大值更大的值或者比最小值更小的值为止；

（3）当雨流遇到来自上面屋顶流下的雨时，也就停止；

（4）按以上过程取出所有全循环，并记下各自的变程；

（5）再按正负斜率去除所有半循环，并记下各自的变程；

（6）把取出的半循环按修正的“变程对”计数法配成全循环。

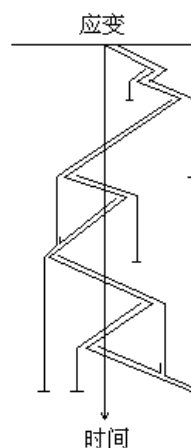


图 1 雨流计数方法示意

应注意的是，应变—时间记录的每一部分只计而且仅计数一次。一个基本假设是一个大的幅值所引起的损伤并不受夹在大循环中的小幅值循环所引起应力应变回线而截断的影响。

根据以上比较可见，对于交变载荷下的应力波形，最合理的统计方法为雨流计数法。图 2 为使用 DASP 软件对某港机设备的疲劳应力波形进行雨流法统计的结果，图中上面的波形为实测应力波形，下面的直方图为雨流统计结果，横坐标为应力循环幅度，纵轴为对数方式，该直方图完整地给出了不同大小的应力循环的发生次数和概率。

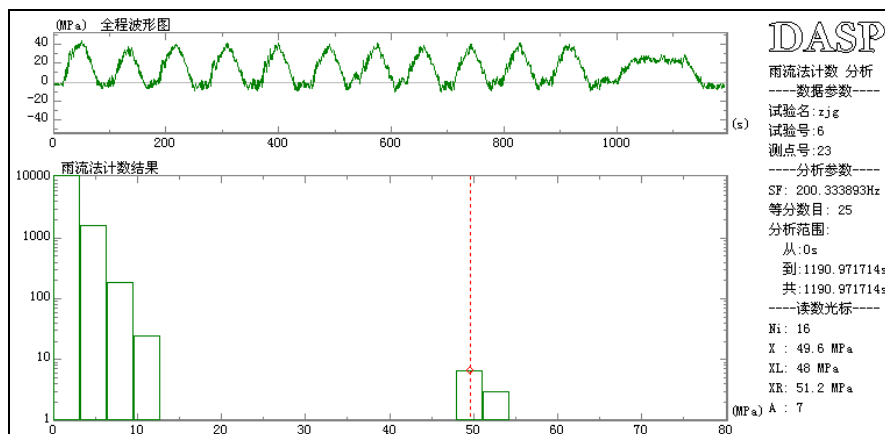


图 2 实测应力波形和雨流统计结果

4 损伤度计算和寿命估计

得到了结构所受应力的结果后，就可以对其疲劳寿命和损伤度进行计算。疲劳寿命一般可以通过 S-N 曲线进行计算，S 为应力幅大小，N 为对应的疲劳寿命，即承受 N 次大小为 S 的循环应力作用后将会导致结构损伤。

S-N 曲线与结构的焊接或螺栓连接形式有关，不同的连接形式会有不同的计算结果。此外 S-N 曲线是基于统计分析的，因此计算中还需要指定可信度因子，通常可选取可靠度因子为 2，对应 97.7% 的可信度。

S-N 曲线的计算公式如下：

$$\log N = \log C_0 - d / \sigma - m \log S_r \quad (1)$$

其中：\$S_r\$ 为应变幅，\$C_0\$ 是与材料及连接形式有关的常量，\$\sigma\$ 为 \$\log N\$ 的标准差，\$d\$ 为可靠度因子，\$m\$ 为 \$\log S_r\$ 对 \$\log N\$ 的反斜率。

在 DASP 软件的雨流计数模块中，有两种计算损伤度的入口：拟合统计的损伤度计算和实际统计的损伤度计算，分别适合以下两种情形：

a) 拟合统计的损伤度计算。对于许多情况下，不同大小应力幅的出现概率符合正态分布，若实际疲劳测试次数较少，统计结果可能不能完全反映真实情形，则可以对雨流统计结果进行拟合计算，得到较为接近真实的统计概率分布，再进行损伤度计算。

b) 实际统计的损伤度计算。有些设备由于长期承受一个或几个幅度较为固定的载荷，使得实际应力幅并不符合正态分布或其它分布的规律，此时就需要使用实际的统计结果进行损伤度计算，而不能对统计结果进行拟合计算，否则会影响这些固定载荷对应损伤度在总损伤度中的主导地位。

最后结合各应力幅的大小和出现概率，就可以计算得到对应的损伤度，采用线性累理论，求其总和便得到结构的总损伤度，以估算其寿命。

图 2 中的波形明显具有大小约为 50MPa 的重要应力幅存在，从其雨流统计直方图中也直观反映了这个特征，因此需要使用实际统计的疲劳计算结果。图 3 为实际统计计算结果，可见其中大小为 50MPa 的应力幅出现 10 次，出现概率为 0.025%，对应损伤度 5.8528E-8，在总损伤度中占主导地位。若使用拟合统计计算，如图 4，则拟合后的概率仅为 0.001%，对应损伤度仅为 1.4583E-9，未对总损伤度起主要作用，显然不能符合实际情况。

DASP 数据列表						
测点 23 雨流法计数分析-疲劳寿命分析(实际统计)						
序号	平均应力幅	频次	实际概率(%)	S-N对应寿命	实际统计损伤度	
1	3.333	37911	99.509	8.2032e+012	4.6215e-009	
2	10.000	175	0.459	1.0127e+011	1.7280e-009	
3	18.667	0	0.000	1.3125e+010	0.0000e+000	
4	23.333	0	0.000	3.4166e+009	0.0000e+000	
5	30.000	0	0.000	1.2503e+009	0.0000e+000	
6	36.667	1	0.003	5.6029e+008	1.7848e-009	
7	43.333	1	0.003	2.8722e+008	3.4817e-009	
8	50.000	10	0.025	1.6204e+008	5.8528e-008	
9	56.667	1	0.001	9.8218e+007	5.0907e-009	
10	63.333	0	0.000	6.2946e+007	0.0000e+000	
11	70.000	0	0.000	4.2180e+007	0.0000e+000	
12	76.667	0	0.000	2.9314e+007	0.0000e+000	

图 3 实际统计的疲劳统计表

DASP 数据列表						
测点 23 雨流法计数分析-疲劳寿命分析(拟合统计)						
序号	平均应力幅	频次	统计概率(%)	S-N对应寿命	拟合统计损伤度	
1	3.333	37911	99.458	8.2032e+012	4.6192e-009	
2	10.000	175	0.4369	1.0127e+011	1.6435e-008	
3	18.667	0	0.040	1.3125e+010	1.8587e-008	
4	23.333	0	0.125	3.4166e+009	1.3978e-008	
5	30.000	0	0.029	1.2503e+009	8.8052e-009	
6	36.667	1	0.007	5.6029e+008	5.0597e-009	
7	43.333	1	0.002	2.8722e+008	2.7593e-009	
8	50.000	10	0.001	1.6204e+008	1.4583e-009	
9	56.667	1	0.000	9.8218e+007	7.5615e-010	
10	63.333	0	0.000	6.2946e+007	3.8752e-010	
11	70.000	0	0.000	4.2180e+007	1.9726e-010	
12	76.667	0	0.000	2.9314e+007	1.0005e-010	

图 4 拟合统计的疲劳统计表

5 结束语

对于长期承受交变重载的设备，除了静强度和振动的考虑外，疲劳测试和分析也是准确掌握设备运行健康状态的重要手段。DASP 中提供的雨流计数分析模块和疲劳统计分析功能，则正好可以作为此类疲劳测试分析的工具，为设备的使用和维修提供有价值的重要决策依据。

参考文献

- [1] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理. 北京:中国铁道出版社, 1985, 89~105.
- [2] 北京东方振动和噪声技术研究所. DASP 操作使用说明书. 北京, 2005, VOL.1-1 : 39~43.