

不仅要发生一定的弹性变形,而且所有铰接点的单边间隙也基本上都消除了。这样,铲斗齿尖D点的座标位置,势必要发生相应的变化。在这种情况下,要想测得预期的挖掘力数值,当然是办不到的。这一点本文一开始就已经谈到了。

5. 结论与建议

(1) 根据我们的国情,对于测试手段不完备的挖掘机厂来讲,为了考核新产品的整机性能是否达到了设计要求,采用本试验的测试系统,进行单斗液压挖掘机挖掘力的测定,还是比较简单可靠的。至于测试精度较低的问题,通过总结经验,不断改进,是完全可以逐步提高直至满足要求的。

(2) 采用上述测试方法测定挖掘力的时候,特别值得注意的是,要想尽一切办法防止预先确定的铲斗齿尖D的座标位置(x,y)在测试过程中发生变化。不过,由于构件弹性变形及铰接点间隙的客观存在,要做到这

一点,确实是不容易的。然而,在整个测试过程中,从加载开始到加载终了,铲斗齿尖D的座标位置(x,y)究竟发生了多大变化,通过实际测量总是可以得到的。有了 Δx 和 Δy 之后,再通过机器的进退及动臂的升降,使铲斗齿尖D在加载的开始,处于 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 座标位置上,然后再进行测试,待加载终了,铲斗齿尖D就可望刚好处在(x,y)点座标位置上了。或者是首先测出某种工况下加载终了时铲斗齿尖D的座标位置(x,y)以及相应的挖掘力,然后再通过计算的办法找出该位置上实际挖掘力的大小与之对照,效果可能会更令人满意一些。

(3) 对于有条件的单位,最好能够建立一个适应多种机型与多种作业装置测定挖掘力和稳定性而用的木桩。花钱不见得多,但是给发展新品种、进行整机性能测试,却会带来很大的方便。

用雨流计数法编制装载机动臂的疲劳试验载荷谱

中国科学院力学研究所 伍义生
机械部天津工程机械研究所 高月华

一、编谱方法的发展简况

构件疲劳试验和寿命估算是检验构件设计是否满足设计要求的重要环节,而构件疲劳寿命试验和疲劳寿命估算的准确性在很大程度上取决于载荷谱的真实性。由于构件所受的载荷通常为随时间变化的载荷,又随工况的不同而变化,为了确定构件载荷谱需要对构件所受的载荷在不同工况下进行大量的随机测量,以得到载荷一时间历程的记录,此外还要采用一定的计数方法编制载荷谱,计数方法的选取直接影响到疲劳试验的准确

性[1]。早期的计数方法是单参数法,如峰值计算法、穿级计数法、变程对计数法、均峰值计数法、疲劳计数法等[2]。这些方法仅取一个参量进行统计,统计的结果完全不考虑平均载荷的影响。然而试验证明平均载荷的不同对疲劳试验的结果有显著的影响,因而近年来出现了双参数计数法、雨流计数法[5]、变程对均值计算法[6]、四峰值计数法[7]等计数法,计数的结果,都能根据载荷的时间历程正确地给出载荷的幅值平均值和幅值的变化值。文献[8]介绍了双参数计

数的编谱方法。由于我们采集的样本较长，以装载机构件应力时间历程样本为例，如以20毫米/秒的走带速度，复现在示波纸上，一个通道的纸带长度就要在400米以上，这样长的样本，如用人工读取峰谷值工作量将是相当繁重的，因此，本文全部采用计算机技术对某装载机动臂在大石块工况、碎石工况、土方工况下分别作业100斗的随机载荷模拟信息进行了峰谷值采样和雨流计数，并根据雨流计数的统计结果编制了试验载荷谱。

二、雨流计数的基本原理

疲劳破坏往往在构件的应力集中处最先出现，这些部位常常产生局部的塑性变形，在这种情况下，应力和应变的关系不再是线性的，而是按照应力应变迟滞回线的关系变化。构件的疲劳寿命是由加载和卸载过程中形成的迟滞回线的大小和个数决定的，雨流计数是根据迟滞回线的形成来判别循环的，因此具有可靠的力学根据。所谓雨流是因为可以把这种方法看作雨滴流过一系列由峰谷连线组成的塔顶，其计数的规则如下：

- 1、雨流从每一个峰和谷开始。
- 2、从峰开始的雨流停在下一个数值上等于或高于它的峰的对面。
- 3、从谷开始的雨流停在下一个在数值上等于或低于它的谷的对面。
- 4、假如雨流遇到从上面塔顶来的雨流就停止。

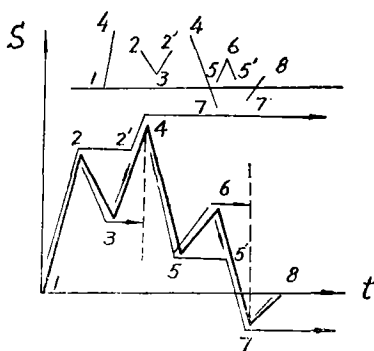


图1 雨流计数法规则

现以图1为例说明

1、雨滴从点1(谷)开始流过点2和点4，停在7的对面(规则3)，从1到4确定半个循环。

2、雨滴从点2(峰)开始流过3，停在4的对面(规则2)，从2到3确定半个循环。

3、雨滴从点3(谷)开始流向4，遇到从2来的雨滴停止(规则4)，确定一个与2到3大小相等方向相反的半个循环，这两个半循环组成一个全循环2-3-2'。

4、雨滴从点4(峰)开始流过5和7，直到谱的末端停止，从4到7确定半个循环。

5、雨滴从点5(谷)开始流过6，停在7的对面(规则3)，从5到6确定半个循环。

6、雨滴从点6(峰)开始流向7，停在与从5来的雨流相遇处(规则4)，构成6到5'的半循环，它与从5到6的半循环大小相等，方向相反，这两个半循环构成全循环5-6-5'。

7、雨滴从点7(谷)开始流过8，直到谱的末端停止，给出从7到8的半循环。

雨流计数结果确定了2-3-2'，5-6-5'两个全循环和1-4，4-7，7-8三个半循环。

本文采用文献[9]的方法，将载荷历程作规整化处理。使载荷历程从最大开始到最

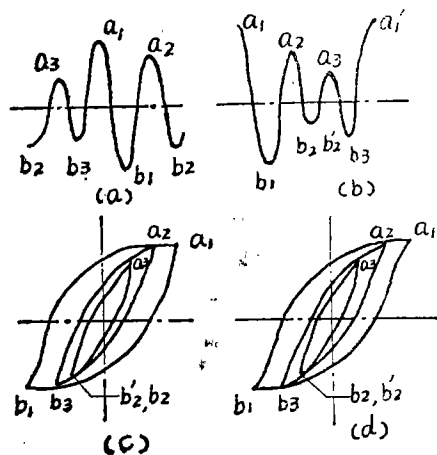


图2 发散收敛谱及其等效的收敛发散谱

大结束，即把发散收敛谱转换为等效的收敛发散谱（见图2），从而得到全循环雨流计数。由雨流计数可以得出与每一循环相应的峰值和谷值，因此可以算出该循环的幅值和均值，从而得到双参数计数结果。

三、数据处理过程

由于雨流计数必须根据峰谷的顺序按照一定的规则逐次取出循环，如用人工处理，工作量十分繁重，本文全部采用了计算机技术。过程如下。

1、将随机载荷模拟信息转换为数字信息。由于装载机载荷的测量是通过磁带机记录在磁带上的，为了在数字计算机上进行运算，首先要将模拟信息转换为数字信息，这一步是通过模数转换器实现的，模数转换结果将连续变化的模拟信息转换为等时间间隔的数字信息。本文采用的采样间隔时间为50毫秒。

2、删除无效幅值和伪读数。在磁带记录的模拟信息中包含噪音干扰信号及微小变化的载荷，这种信号及微小变化的载荷对构件的疲劳没有影响。此外，在处理过程中还可能产生由于偶尔感应产生的过大信号，这些信号不代表外载荷，故在模数转换之后将通过计算程序将这些信号删除。本文无效幅值（变程）选为0.2伏，相当于略去2.24公斤/毫米²的应力波动，因为此应力波动远低于疲劳极限。

3、峰谷采样。雨流计数依据的是按峰谷值顺序变化的载荷——时间历程，因此必须从模数转换得出的数字信息中将峰谷值取出来。由于峰值比邻近的数值大，谷值比邻近的数值小，根据这一特点很容易通过计算程序取出峰谷值。

4、载荷历程规整化处理。通过计算机将载荷历程中的最大峰值或最低谷值检出，在此处将载荷历程切为两段，将前段移至后段，后段移至前段，并在首尾连接时去掉不是谷值的点，从而得到规整化的历程。

5、雨流计数。按照前面介绍的规则逐次取出循环，直到全部取完为止。

图3和图4分别表示程序框图和计算机工作时的外部设备。

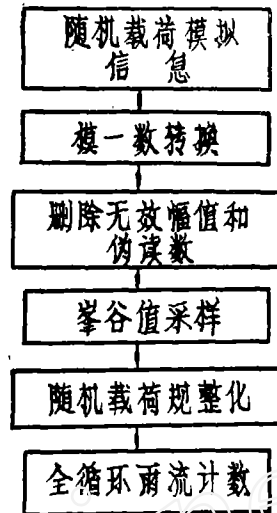


图3 随机载荷模拟信息的峰谷采样和全循环雨流计数框图

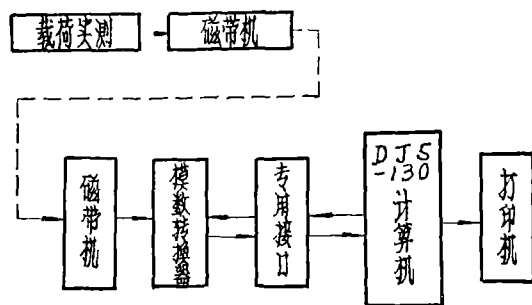


图4 计算机及有关的外部设备

表1给出通过峰谷采样得出的装载机动臂在三种不同工况下装载5斗的峰谷载荷历程，图5表示该峰谷历程的示意图。

A.大石块工况

表 1

1.79	9.07	6.05	21.62	19.04	21.39	15.01	17.36	11.31	17.14
14.78	17.92	12.43	15.90	15.46	18.93	4.14	6.38	1.68	4.03
0.45	2.69	0.00	3.36	1.12	22.96	0.11	22.96	0.11	22.96
1.46	22.96	4.48	11.09	8.18	11.98	0.11	18.14	0.11	9.30
5.38	9.52	4.37	7.17	3.14	6.61	3.70	6.16	3.14	6.16
3.58	8.06	3.25	6.61	3.14	9.74	3.25	11.20	3.81	8.29
2.69	8.85	2.35	12.21	3.14	8.06	1.79	5.82	2.80	6.27
0.00	3.14	0.56	3.14	0.56	8.85	5.82	11.65	5.94	11.65
1.90	10.75	6.94	13.33	1.12					

B. 碎石工况

0.15	10.28	8.02	11.74	9.32	13.21	8.33	20.93	15.94	18.22
15.50	17.79	1.31	6.66	0.64	10.46	7.45	11.26	7.60	11.10
8.76	11.09	7.29	11.00	7.74	14.98	5.02	21.51	19.10	21.53
18.51	21.13	1.57	4.06	1.62	7.64	4.85	10.68	5.10	19.76
17.45	20.69	3.09	6.25	0.96	3.48	0.78	10.10	7.36	10.57
8.17	14.59	7.83	21.42	6.94	9.56	7.21	14.04	6.47	20.92
18.47	21.25	18.54	20.94	1.42	4.39	1.98	22.94	1.19	22.94
0.53	10.64	6.89	12.80	10.34	15.65	8.34	22.69	0.73	11.59
4.92	10.02	6.17	8.54	6.10	8.73	3.80	9.58	6.68	10.02
6.48	8.79	3.91	6.82	1.32	3.71	0.82			

C. 土方工况

0.85	3.81	1.55	5.27	2.13	4.55	0.01	5.71	2.76	5.86
2.09	11.54	0.14	2.56	-0.34	1.97	0.53	4.69	2.23	4.86
0.80	8.57	3.82	7.22	4.83	9.53	1.00	6.39	2.53	8.54
0.81	4.07	1.60	4.17	1.67	4.31	2.06	4.98	2.18	4.54
1.85	4.30	-0.31	5.05	2.80	7.42	1.01	3.72	0.92	6.58
0.82	4.59	2.13	4.94	1.70	5.12	0.90	5.61	1.88	11.06
0.72	3.08	0.58	6.41	4.15	6.83	0.38	6.63	3.89	6.37
0.15	3.18	0.77	4.02	1.66	10.73	2.68	5.02	2.32	6.26
2.35	6.17	3.07	5.47	0.59	9.92	2.74	7.73	0.42	6.14
0.71	3.04	0.63	2.97	0.31	5.15	0.13	6.13	0.25	5.67
0.42	6.12	2.59	8.85	0.15	3.74	0.55	3.69	1.30	4.51
-0.73	8.94	0.57	6.05	3.64	6.17	2.08	6.22	3.26	6.00
0.40	5.33	2.74	5.72	2.18	5.76	1.04	5.85	1.20	5.46
2.73	5.43	1.09	7.24	0.19	6.71	-0.25	2.12	-0.15	2.21
-0.07	8.91	2.20	4.74	-0.02					

· 由于双参数计数法采用两个参数对载荷历程进行计数，所以得到的雨流计数结果以矩阵的形式给出。本例将雨流计数得到的循环按幅值和均值分类。幅值按最大变程分为10组，均值也分为10组。表2给出装载机动臂装载100斗的雨流计数结果。图6以直方图形式给出只考虑幅值的雨流计数结果。

四、程序载荷谱的编制

由于平均应力的的高低对疲劳损伤有影响，所以双参数雨流计数给出了每一循环的幅值和均值，但在构件进行模拟疲劳试验时，必须对双参数的计数结果作一定的简化。简化的方法通常有以下几种（10）（11）。

1. 常均值谱原则：以各次循环的总的平均值代替每一循环的均值，而每一循环的幅值保持不变。此总的平均值称为波动中心。各次循环围绕波动中心变化。

2. 等损伤谱原则：以各次循环总的平

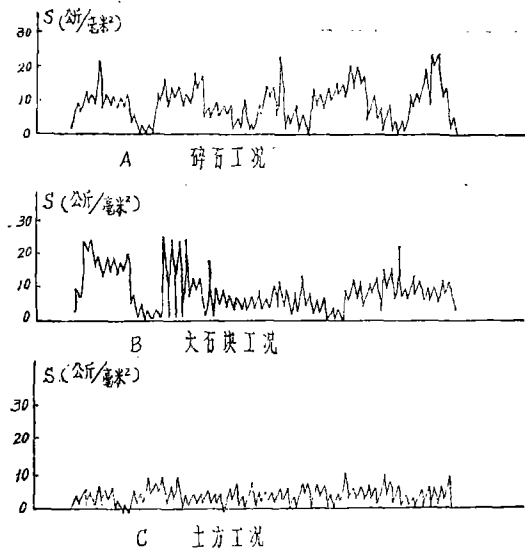


图5 装载机动臂峰谷载荷历程

均值代替每一循环的均值，而每一循环的幅值按等损伤原则进行折算。

3. 变均值谱原则：求出每一级幅值的平均均值，以此均值代表这一级幅值的均

表2 装载机动臂载荷时间历程全循环雨流计数结果
(单位 公斤/毫米²)

大石块工况

平均值 幅值	-0.022	2.40	4.82	7.24	9.65	12.07	14.91	16.91	19.33	21.75	合计	累积频次
1.21	15	153	121	114	74	28	13	32	7	0	557	937
2.42	0	11	63	58	35	15	4	0	0	0	186	380
3.63	0	0	9	28	19	3	1	0	0	0	60	194
4.84	0	0	1	5	7	4	0	0	0	0	17	134
6.05	0	0	0	8	4	0	0	0	0	0	12	117
7.26	0	0	0	4	5	1	0	0	0	0	10	105
8.47	0	0	0	4	26	0	0	0	0	0	30	95
9.68	0	0	0	0	33	2	0	0	0	0	25	65
10.89	0	0	0	0	20	3	0	0	0	0	23	30
12.10	1	0	0	0	1	5	0	0	0	0	7	7

碎石工 况

平均值 幅 值	-1.19	1.35	3.89	6.43	8.97	11.51	14.05	16.59	19.13	21.67	合计	累积频次
1.27	1	77	131	166	121	59	40	22	14	3	634	990
2.54	0	4	42	48	43	14	6	1	2	0	160	356
3.81	0	0	13	27	16	7	1	1	0	0	65	196
5.08	0	0	1	6	11	3	0	0	0	0	21	131
6.35	0	0	0	5	3	1	1	0	0	0	10	110
7.62	0	0	0	2	25	0	1	0	0	0	28	100
8.89	0	0	0	0	23	2	0	0	0	0	25	78
10.16	0	0	0	0	6	21	0	0	0	0	28	53
11.43	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	21	25
12.70	1	0	0	0	1	2	0	0	0	0	4	4

土 方 工 况

平均值 幅 值	-2.37	0.29	2.96	5.62	8.29	10.95	13.61	16.38	18.94	21.61	合计	累积频次
1.33	0	77	359	246	171	84	45	25	17	1	1025	1472
2.66	0	1	61	69	68	26	17	6	2	0	253	447
4.00	0	0	3	33	22	11	6	5	0	0	80	194
5.33	0	0	1	26	3	4	0	0	0	0	34	114
6.66	0	0	0	18	7	1	0	0	0	0	26	80
7.99	0	0	0	2	13	0	0	0	0	0	15	54
9.32	0	0	0	0	11	5	0	0	0	0	16	39
10.66	0	0	0	0	2	12	0	0	0	0	14	23
11.99	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	5	9
13.32	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	4	4

值。

的等损伤幅值 \bar{S}_a 。

4. 双波法谱原则：将载荷分为主波和二级波，分别统计再合在一起。

$$\bar{S}_a = S_a \frac{1 - \bar{S}_m/S_b}{1 - S_m/S_b}$$

变均值谱和双波法谱试验技术较复杂，根据文献(10)(11)的试验结果，常均值谱偏于危险，而等损伤谱偏于保守。本文采用等损伤原则，先求出各工况的总平均值 \bar{S}_m ，用以代替每一循环的平均值 S_m ，然后根据Goodman公式(12)计算与该均值对应

式中

S_m, S_a ——每一循环的均值和幅值

\bar{S}_m ——总平均值

S_b ——材料的强度极限

在进行平均应力修正以后，要进行应力

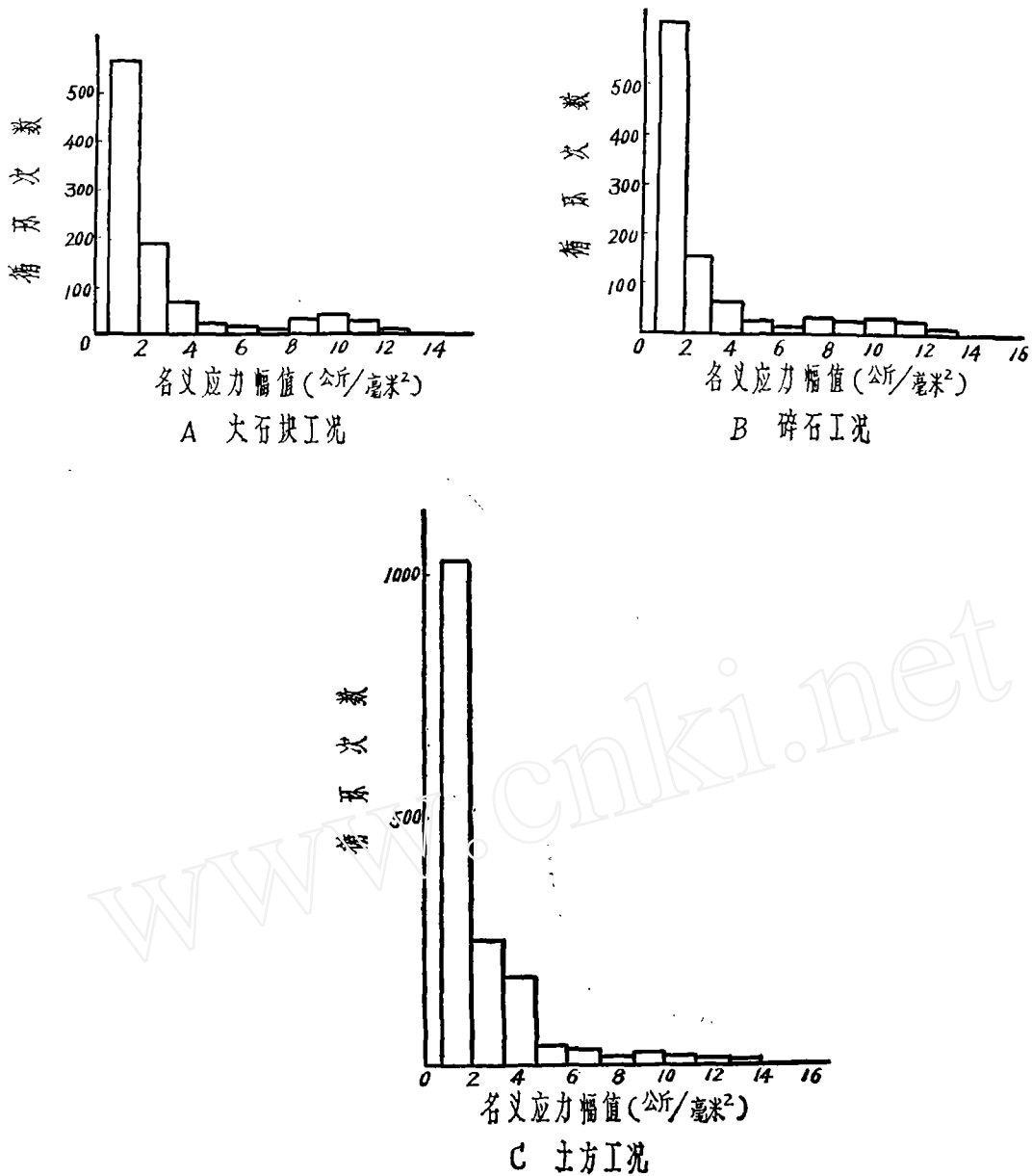


图6 装载机动臂在三种不同工况下装载100斗的雨流计数结果

谱的合成,按以上工况比例,计算各工况总的平均值。见表3。

然后根据各工况的每一等损伤幅值及其出现的频次来求出合成的加数平均幅值,表4列出了每个工况及合成工况的平均值及其对应的各组幅值,并以合成工况的总平均值及其对应的幅值来绘制累积频次曲线(见图7)。

表3

装载工况	工况比例
大石块	40%
碎石	30%
土方	30%

由于装载机外载荷的最大值受液压系统安全阀压力、整机稳定性、地面附着条件的限制，在载荷谱的实测过程中，由于场地和物料条件能够保证以上极限情况的出现，因此在编谱过程中，不再作幅值扩展，而只作频次扩展。

表 4 三种工况及合成工况的工作载荷谱
(载荷单位 公斤/厘米²)

大石块工况 $\bar{S}_m = 7.23$	等效幅值	1.21	2.42	3.63	4.84	6.05	7.26	8.47	9.68	10.89	12.10	13.31
	循环次数	548	181	71	16	13	11	20	28	27	12	7
碎石工况 $\bar{S}_m = 7.72$	等效幅值	1.27	2.54	3.81	5.08	6.35	7.62	8.89	10.16	11.43	12.70	13.47
	循环次数	629	162	62	25	11	24	23	16	25	17	1
土方工况 $S_m = 6.43$	等效幅值	1.33	2.66	4.00	5.33	6.66	7.99	9.32	10.66	11.99	13.32	14.65
	循环次数	1006	261	84	40	26	12	11	15	10	3	2
合成工况 $\bar{S}_m = 7.13$	等效幅值	1.28	2.54	3.81	5.14	6.40	7.60	8.78	10.01	11.24	12.49	13.58
	循环次数	710	199	72	26	16	15	18	21	21	11	4
	累积频次	1113	403	204	132	106	90	75	57	36	15	4

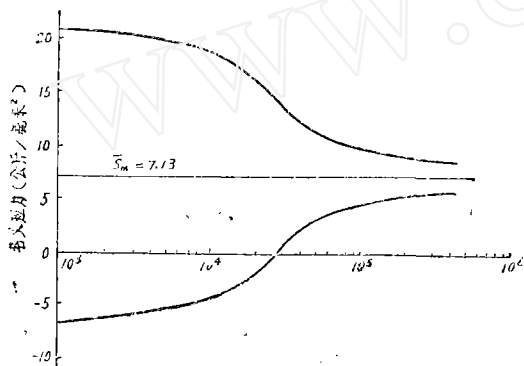


图 7 装载机动臂装载 3 万斗的累积频次曲线

根据我国目前的设计制造水平，参照国外同类产品的有关寿命资料，暂规定装载机构件的寿命为 5000 小时，如以 V 型作业的平均生产率 60 斗/时（现场初步统计结果）计算，预计可安全作业 30 万斗，在进行疲劳试验时分十个子程序，因此须将 100 斗的合成谱扩展为 3 万斗的统计结果，图 7 给出动臂装载 3 万斗的累积频次曲线。

根据表 4 给出的合成应力谱，把应力幅值平分分为 8 级得出的程序载荷谱如表 5。

此外，由于在装载过程中，装载机的铲斗较宽（ZL-30 铲斗宽度为 2350 毫米），常

表 5 动臂 8 级程序载荷谱平均应力为 7.13 公斤/毫米²

幅值(公斤/毫米 ²)	2.05	3.59	5.13	6.66	8.20	9.74	11.28	12.81
加载次数	243000	42000	14000	6000	6500	5500	8000	8000

遇到偏心载荷，这种载荷往往导致动臂发生永久变形，横梁断裂，直接影响工作装置的寿命，因此，必须考虑一定的偏载比例，本文在编谱时，偏载的频次比例取 1/3，分 4 级加载，最后得出的试验程序如图 8 所示，在实际进行疲劳试验时，尚需根据试验机的性能作适当的

调整, 例如应用单向脉动疲劳试验机时, 可按等伤原则进行必要的平均应力修正。

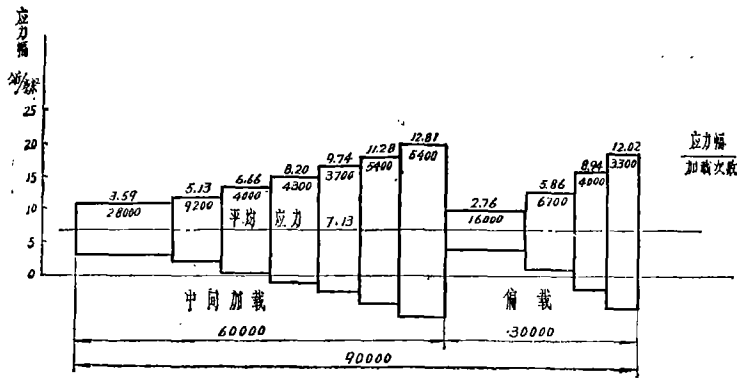


图 8 装载机动臂疲劳试验子程序

结束语

本文对计数方法的发展, 雨流计数原理及根据双参数计数结果进行编谱的方法作了介绍, 并利用先进的计数法完成了某装载机动臂的载荷统计和疲劳试验载荷谱的编制, 从峰谷值采样到雨流计数全部采用了计算机技术, 所用的方法, 也可用于其他部件载荷谱的编制。

参考文献

[1] Otto Buxbaum "Random Load Analysis as a link Between Operational Stress Measurement and Fatigue Life Assessment" ASTM STP 671 p 5~20 1977

[2] Schijve. J. "The Analysis of Random load. time Histories With Relation; to Fatigue Tests and Life Calculation" NLR Report Mp. 201. National Aircraft and Space Laboratory, Amsterdam, 1960

[3] 吴富民、张保法“随机载荷时间历程的统计处理”西北工业大学《科技资料》总字第 655 期, 1978.7.

[4] 焦宝仁、阎楚良“随机载荷的数据处理”农业机械结构强度文集 1980

[5] Dowling. N. E. "Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-Strain Histories" Journal of Materials, Vol17, No1, March 1972 p71~87

[6] Van. Dijk. G. M. "In Advanced Approaches to Fatigue Evaluation", NASA Special publication 309. 1972. p 565~598

[7] 简政、黄舜琪“雨流计数法处理随机载荷的计算程序”三机部 603 所 1979.4.

[8] 高镇“疲劳载荷谱的编制”航空学报 1980. 第二期

[9] 杨永吉“雨流法的第二阶段计数”农业机械结构强度文集 1980

[10] “计数法及简化原则的对比试验”三机部 621 所 79014 题目组, 1980

[11] 蒋祖国等“双参数循环计数法及其简化原则”航空学报 1981 第二卷第一期

[12] P. G. Forrst "Fatigue of Matal" p94 1962 pergamon press