

论文编号: 1001-3954(2006)03-0095-97

# 雨流计数法及其在疲劳寿命估算中的应用

王宏伟<sup>1</sup> 邢波<sup>1</sup> 骆红云<sup>2</sup><sup>1</sup> 长春工业大学机电工程学院 吉林长春 130012<sup>2</sup> 北京航空航天大学

**在**机械结构的破坏形式中,疲劳破坏是一种主要形式。据不完全统计,机械零件破坏 50% ~ 90% 为疲劳破坏<sup>[1]</sup>。而近年来的研究也表明,机械零部件的疲劳是由于其内部局部应力集中区域内产生循环塑性应变所造成的,而载荷时间历程是复杂的,是随机变化的,因此要合理地预测零部件的疲劳寿命,必须对载荷时间历程或局部应力、应变历程进行统计处理——循环计数,从而进行损伤计算,完成寿命估算<sup>[2]</sup>。目前计数方法有很多种,例如峰值计数、量程计数、穿级计数和雨流计数等,其中雨流计数法虽然其计数过程与材料真实应力-应变特性相符,但其技术条件偏于复杂,影响计算速度,因此必须加以改进,使其计数过程简化,更好地运用于机械零部件的疲劳寿命估计中。

## 1 雨流计数法的简述

雨流计数的基本流程如下。

(1) 根据采样定理作数据采集,得到时间历程记录,若截止频率为  $f_c$ ,则采样间隔

$$t = 1/2f_c$$

(2) 根据连续的 3 个采样数据,删除既不是峰值也不是谷值的数据点,将时间历程记录转化为峰谷值序列。

(3) 针对峰谷值序列采用 4 点法雨流计数原则进行雨流计数,计数条件如下。

如果  $A > B; B > D; C$

A, 记录一个循环(全波)BCB',如图1所示。得到

范围值  $S_{range} = |B - C|$

幅值  $S_a = |B - C|/2$

平均值  $S_m = (B + C)/2$

如果  $A < B; B > D; C$

A, 记录一个循环(全波)BCB',如图2所示。得到范围值  $S_{range} = |B - C|$

幅值  $S_a = |B - C|/2$

平均值  $S_m = (B + C)/2$

(4) 重复上述方法计数后,剩下的是所谓的发散—收敛序列,如图3所示:

这个峰谷值序列已不再满足 和 计数条件。

作者简介:王宏伟,女,1978年生,山西长子人,长春工业大学机电工程学院机械电子工程专业硕士研究生,研究方向为汽车零件常规疲劳试验方法研究及其应用软件开发。

此时可采用变程均值计数法,分别得到范围和均值计数结果为: $|x_1 - x_2, x_2 - x_3, \dots$  和  $(x_1 + x_2)/2, (x_2 + x_3)/2, \dots$  的一系列半个循环(半波)。再将具有相同的均值和范围的两个半波合成

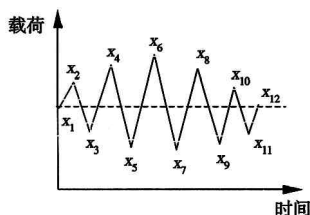


图3 发散-收敛序列

一个完整的循环(一个全波)。将(3)、(4)两步的结果综合到一起完成对时间历程的雨流计数。

## 2 雨流计数在疲劳寿命估算中的应用

雨流计数的最后结果可用一张均幅矩阵表来表示(如表1)。

这张表就是载荷谱<sup>[3]</sup>。如果这个载荷谱是在用户使用条件下测量得到的,那么它就是用户使用条件下的载荷谱,如果是在试车场条件下得到的,它就是该构件在试车场条件下的载荷谱。假定它是通过 L 公里的测试得到的。

如果已知构件在不同均值和不同幅值载荷下的 P-S-N 曲线和疲劳极限(或表2)。

根据载荷谱

表1和完整的疲劳特性表2,采用Miner线性累积疲劳损伤理论<sup>[4]</sup>,可以估计出构件的使用寿命。方法如下:

表1中的  $n_{ij}$  表示构件在第 i 级幅值和第 j 级均值载荷下构件的工作循环次数;

表2中的  $N_{ij}$  表示存活率为 p 时,构件在第 i 级

表1 不同均幅值载荷下的工作频次(均幅矩阵表)

| 工作频次 | 载荷均值     |   |     |   |     |
|------|----------|---|-----|---|-----|
|      | 1        | 2 | ... | j | ... |
| 1    | $S_{a1}$ |   |     |   |     |
| 2    | $S_{a2}$ |   |     |   |     |
| i    | $S_{ai}$ |   |     |   |     |
| m    | $S_{am}$ |   |     |   |     |

表2 不同均幅值载荷下的疲劳寿命

| 工作频次 | 载荷均值     |   |     |   |     |
|------|----------|---|-----|---|-----|
|      | 1        | 2 | ... | j | ... |
| 1    | $S_{a1}$ |   |     |   |     |
| 2    | $S_{a2}$ |   |     |   |     |
| i    | $S_{ai}$ |   |     |   |     |
| m    | $S_{am}$ |   |     |   |     |

通用

幅值和第  $j$  级均  
值 载 荷 下 构 件  
(破坏) 的疲劳寿  
命 (数据来源于  
完整的  $P-S-N$   
曲线);  
应用 Miner  
理论, 可得到  
构件的损伤度  
值 (如表 3)。

表 3 不同均幅值载荷下的构件损伤度

| 工作频次 | 载荷均值     |          |     |          |     | $n$      |
|------|----------|----------|-----|----------|-----|----------|
|      | 1        | 2        | ... | $j$      | ... |          |
|      | $S_{m1}$ | $S_{m2}$ | ... | $S_{mj}$ | ... | $S_{mn}$ |
| 1    | $S_{a1}$ |          |     |          |     |          |
| 2    | $S_{a2}$ |          |     |          |     |          |
| $i$  | $S_{ai}$ |          |     | $D_{ij}$ |     |          |
| $m$  | $S_{am}$ |          |     |          |     |          |

$$D_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_{ij}}$$

即雨流矩阵 (表 1) 中第  $i$  行、第  $j$  列载荷块所造成的损伤度 (见表 3)。

进而可得到与雨流矩阵所对应的总损伤度

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{ij}$$

根据 Miner 线性累积疲劳损伤理论, 构件的疲劳寿命为

$$T = 1/D$$

式中  $T$  —— 表示上述载荷谱执行  $T$  次, 构件将发生破坏

对应的寿命里程  $L_{总}$  为

$$L_{总} = TL \quad (\text{km})$$

### 3 应用实例

实测载荷谱中应力比  $r = (S_{均值} - S_{幅值}) / (S_{均值} + S_{幅值})$  取各种不同的值, 在材料机械性能手册中通常只有少数几个应力比下的疲劳寿命数据。为了进行寿命估计, 必须根据已有的材料和零件在个别应力比  $r$  下疲劳寿命导出不同存活率  $p$  和各种应力比  $r$  下的疲劳寿命的资料。一般说来有 2 种方法: 一种方法是将载荷谱中各个应力级 (均值和幅值载荷) 向疲劳试验参数上转换; 另一种方法是将疲劳试验中得出的  $P-S-N$  曲线向载荷谱 (均值和幅值载荷) 上转换。由于我们在进行疲劳试验时和以往疲劳试验中都是在某一固定的循环特征  $r$  下进行的。且二维载荷谱中的均值, 幅值的级数较多转换不方便, 为方便起见, 我们将累积频次分布中的各个应力向某一固定的  $r$  进行转换。由于平均应力对累积损伤也有较大的影响, 须按等损伤的原则将非对称循环等效转换成为零平均应力的对称应力循环。本文选择将累积频次分布中的各个应力向  $r = -1$  下进行转换。从而求得不同应循环特征下的疲劳寿命。具体步骤如下。

(1) 求  $P-S-N$  曲面方程 在 MTS 部件疲劳试验台上对汽车前轴进行疲劳试验, 结果统计如表 4。

疲劳寿命  $N$ 、疲劳强度  $S$  和存活率  $p$  三者之间的一个普遍关系式为

$$p = 1 - \int_{N_{min}}^N f(N/S) dN \quad (1)$$

式中  $f(N/S)$  为在应力水平  $S$  下疲劳寿命  $N$  的概率密度函数<sup>[5]</sup>。

在恒定应力水平下, 疲劳寿命分布一般服从对数正态分布, 并且由恒定应力下的寿命样本, 可以计算寿命分布均值和方差<sup>[7]</sup>。

 表 4 不同应力水平下的疲劳寿命 (频率为 2 Hz 应力比  $r = 0.1$ )

| 序号 | 应力 (MPa) | 寿命次数 ( $\times 10^3$ ) |          |          |         |         |  |
|----|----------|------------------------|----------|----------|---------|---------|--|
| 1  | 728      | 30.184                 | 31.262   | 34.104   | 38.024  | 40.670  |  |
| 2  | 520      | 106.971                | 115.639  | 120.466  | 148.440 | 154.547 |  |
| 3  | 416      | 224.445                | 237.900  | 251.453  | 354.608 |         |  |
|    |          | 413.045                | 463.453  | 505.953  |         |         |  |
| 4  | 312      | 575.040                | 639.168  | 718.144  | 972.192 |         |  |
|    |          | 1031.168               | 1091.168 | 1144.288 |         |         |  |

所以式 (1) 可具体写成

$$u_p = \frac{\lg N - m(s)}{s(s)} \quad (2)$$

式中  $u_p$  —— 标准正态偏量, 可以通过存活率  $p$  查表得到

$m(s)$ ,  $s(s)$  —— 分别为应力水平  $S$  下对数疲劳寿命遵循正态分布时的均值和标准差

利用所给数据分别求得各个应力  $S_i (i = 1, 2, 3, 4)$  下对数疲劳寿命的均值  $m(s_i)$  和标准差  $s(s_i)$ , 然后通过最小二乘法拟合得  $m(s)$  和  $s(s)$  的函数表达式, 将  $m(s)$  和  $s(s)$  代入 (2) 式就得到了在指定存活率  $p$  下的  $P-S-N$  曲面方程

$$u_p = \frac{\lg N + 0.003 331 S - 6.921 155}{0.196 401 - 0.000 198 S} \quad (3)$$

(2) 进行等寿命转换 按等损伤的原则将非零平均应力的应力循环等效转换成零平均应力的应力循环。

由试验得到  $L = 10\ 000$  km 普通组合路面的均、幅值雨流计数处理结果 (表 5)。

本文采用 Goodman 疲劳经验公式进行转换

$$S_{ij} = \frac{s_b S_{ai}}{s_b - |S_{mj}|} \quad (4)$$

式中  $S_{ij}$  —— 等效零均值应力

$S_{ai}$  —— 第  $i$  个应力幅值

$S_{mj}$  —— 第  $j$  个应力均值

$s_b$  —— 材料的强度极限

该前轴材料为 42CrMo, 可查得  $s_b = 1\ 133.9$  MPa,  $S_{ai}$ 、 $S_{mj}$  可依据虎克定律计算, 即

$$S = Ee \quad (5)$$

式中,  $E$  为杨氏模量, 可查得  $E = 0.21 \times 10^6$  MPa

由式 (4) 和 (5) 得

$$S_i = \frac{1134 \times 0.21 \times e_{ai}}{1134 - 0.21 \times |e_{mj}|} \quad (6)$$

式中  $e_{ai}$  —— 应变幅值,  $\mu e$

$e_{mj}$  —— 应变均值<sup>[6]</sup>,  $\mu e$

 表 5 载荷时间历程雨流计数法处理结果 ( $L = 10\ 000$  km)

| 幅值       | 410.25 | 957.25 | 1 504.25 | 2 051.25 | 2 598.25 | 3 145.25 | 3 692.25 | 4 239.25 |
|----------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 均值       |        |        |          |          |          |          |          |          |
| -322.625 | 2      | 0      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| -213.125 | 114    | 43     | 4        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| -103.625 | 1679   | 1120   | 456      | 148      | 11       | 1        | 0        | 0        |
| 5.875    | 2675   | 891    | 400      | 194      | 69       | 25       | 4        | 2        |
| 115.375  | 1016   | 91     | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 224.875  | 131    | 8      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 334.375  | 15     | 0      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 443.875  | 2      | 0      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |



将表 5 中的应变均值和幅值代入式 (6) 中, 即可得到零平均应力的等效应力  $S_i$  值。如由表 5 的  $n_{11} = 2$ ,  $e_{a1} = 410.25 \mu e$ ,  $e_{m1} = -322.625 \mu e$ , 得  $S_1 = 92.15 \text{ MPa}$ 。

(3) 生成不同均幅值载荷下的疲劳寿命表  $N_{ij}$  把得到的  $S_{ij}$  代入式 (3) 中, 并根据给定的  $P$  值查得的  $u_p$ , 从而得到均幅值载荷表中的  $N_{ij}$ 。如  $p = 0.5$ ,  $u_p = 0$ , 由  $S_1 = 92.15 \text{ MPa}$ , 可得

$$0 = \frac{\lg N + 0.003331 \times 92.15 - 6.921155}{0.196401 - 0.000198 \times 92.15}$$

即  $N_{11} = 4111497$  次。

(4) 生成构件损伤度表 由表 5 中  $n_{ij}$  的与上步获得的  $N_{ij}$  可得

$$D_{ij} = n_{ij} / N_{ij}$$

如  $n_{11} = 2$ ,  $N_{11} = 4111497$  次, 可得

$$D_{11} = 0.000005$$

从而可得到总损伤度为

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{ij}$$

构件的疲劳寿命为

$$T = 1/D$$

对应的寿命里程  $L_{\text{总}}$  为

$$L_{\text{总}} = T \times L = L/D \quad (\text{km})$$

本例中, 如选  $p = 0.5$ , 得总损伤度为 0.006447, 疲劳寿命为 155.1 万 km, 寿命里程为 155.1 万 km; 选  $p = 0.99$ , 得总损伤度为 0.012898, 疲劳寿命为 77.5 万 km, 寿命里程为 77.5 万 km; 选  $p = 0.9999$ , 得到总损伤度为 0.020109, 疲劳寿命为 49.7 万 km, 寿命里程为 49.7 万 km。

以上过程为了计算简便, 已利用 VB6.0 编制了程序, 可进行损伤度计算和安全里程的可靠计算。

## 4 将材料的疲劳特性转换成零件的疲劳特性

在实际工程中, 我们往往只知道材料的疲劳特性, 而不知道零件的疲劳特性<sup>[3]</sup>, 这就要求我们在没有零件的  $P-S-N$  曲线的情况下, 能通过将材料的  $P-S-N$  曲线转化成零件的  $P-S-N$  曲线。

影响零件疲劳寿命的主要因素有:

- (1) 工作条件 载荷特性、加载频率、服役温度、环境介质;
- (2) 零件状态 缺口效应、尺寸效应、零件热处理、表面粗糙度、表面热处理、残余应力应变;
- (3) 材料本质 化学成分、金相组织、纤维方向、内部缺陷分布。

材料成分、晶粒尺寸大小和晶粒方向、热处理状态、焊接等都会影响疲劳强度, 在上述条件基本相同时, 材料与零件主要差异在于材料外形的差异、尺寸大小差异和表面质量的差异<sup>[7]</sup>。分别表述为:

### 4.1 应力集中的影响<sup>[3]</sup>

理论应力集中系数

$$K_r = s_{\text{max}} / s_n = (\text{最大局部弹性应力} \div \text{名义应力}) \quad (1)$$

疲劳缺口系数

$K_r = s_e / s_N = (\text{光滑试件的疲劳强度} \div \text{缺口试件的疲劳强度}) \quad (1)$

缺口敏感系数  $K_{QWq}$

$$q = K_r / K_r \quad (0 \leq q \leq 1)$$

对塑性材料:  $q = 0$ ; 对脆性材料:  $q = 1$ 。

### 4.2 尺寸的影响

疲劳尺寸系数:  $e = s_L / s_S = (\text{大试件的疲劳强度} \div \text{小试件的疲劳强度}) \quad (0 \leq e \leq 1)$

### 4.3 表面状态的影响

表面敏感系数:  $b = \text{零件的疲劳强度} / \text{标准光滑试件的疲劳强度} \quad (0 \leq b \leq 1)$

表面状态主要包括: 表面加工粗糙度 (微观的应力集中), 表层组织结构 (表面处理工艺: 表面渗碳、渗氮、氰化、淬火、表面激光处理等) 和表层应力状态 (滚压、挤压、喷丸等), 从而

$$b = b_1 b_2 b_3$$

综合考虑上述 3 种因素, 零件在对称循环下的疲劳强度

$$s_{-1} = \frac{K_r}{eb} s_{-1}^0$$

式中  $s_{-1}$  —— 零件的疲劳极限

$s_{-1}^0$  —— 材料的疲劳极限

对于每个零件个体  $K_r, e, b$  是确定的, 对于零件总体  $K_r, e, b$  则均为随机变量<sup>[8]</sup>。根据  $K_r, e, b$  的分布抽取  $K_{ri}, e_i, b_i$  修正后的疲劳应力, 以及材料的  $P-S-N$  曲线, 可得零件的  $P-S-N$  曲线。

以上过程为了计算简便, 已利用 VB6.0 编制了程序, 可进行损伤度计算和安全里程的可靠计算。

## 5 结束语

本文介绍的雨流计数法简单的概括为: 连续 3 点定峰谷 (序列), 连续 4 点记全波 (一个循环), 剩下半波 (半个循环) 配全波, 从而简化计数条件和计数过程。并可根据不同均幅值载荷下的工作频次和不同均幅值载荷下的疲劳寿命, 按 Miner 线性累积疲劳损伤理论对构件在相应使用条件下的疲劳寿命进行估算。

### 参 考 文 献

- 1 赵少沅. 抗疲劳设计. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- 2 金德新. 改进的雨流计数法应用于随机载荷下的寿命预测. 鞍钢技术, 2000(5)
- 3 刘惟信. 机械可靠性设计. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- 4 凌树森. 可靠性在机械强度设计和寿命估算中的应用. 北京: 宇航出版社, 1998.
- 5 傅惠民. 疲劳强度概率分布. 北京航空学院研究生院, 1986(9)
- 6 郭虎等. 车辆随机载荷谱的统计分析. 汽车科技, 2003(6)
- 7 钟群鹏等. 断裂失效的概率分析和评估基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000(6)
- 8 徐灏, 胡俏. 随机载荷下零件的可靠性设计新方法. 农业学报, 1995(2)

(收稿日期: 2005-07-06)

(修改稿日期: 2005-10-12)