

# 峰值法载荷谱编制与计算机程序

程建钢 黄振声

(西北农业大学农机系)

## 摘 要

本文详细讨论了峰值法载荷谱编制步骤,提出了不同工况合成时,均值的等效原则,以及最大载荷的计算方法,并编制了编谱全过程的计算机程序。

**关键词:** 载荷谱; 峰值计数法; 计算机程序

疲劳载荷谱类型很多,比较典型且应用较为广泛的是采用雨流法计数的等损伤谱和峰值法载荷谱。前者越来越受到人们的重视,与此同时,仍然有许多国家还在继续研究和完善峰值法载荷谱,并且在实际应用中也十分广泛。

本文详细讨论了峰值法载荷谱编制的步骤,提出了不同工况合成时,均值的等效原则,以及最大载荷的计算方法,并编制了编谱全过程的计算机程序。

## 1 数据处理

### 1.1 数据平稳性与各态历经性检验

载荷一时间历程若满足平稳性和各态历经性,就能以任意样本代替总体,分析的起始时间也可以任取,且不必取无限长的样本,因此载荷的平稳性和各态历经是编制载荷谱的必要条件。

各态历经性难以直接检验,实践证明,表示平稳物理现象的随机过程一般都是各态历经的,因此只要检验单个样本记录是平稳的,即可有效地认为样本总体满足平稳性和各态历经性。

平稳性检验一般用轮次法。检验的具体步骤见参考文献〔1〕。

### 1.2 峰、谷值检测

峰、谷值检测的方法取决于信号的记录方式。

1.2.1 磁带机记录: 首先把模拟信号进行 A/D 转换,由计算机等间隔采样。在采样频率较高时,可直接由三点法取得峰谷值,在采样频率不够高时,应采用多项式插值法并由极值条件求出峰谷值。

本文于1986年4月22日收到。

本文于1986年9月在“全国拖拉机试验技术与振动噪声控制学术讨论会”上宣读。

1.2.2 光线示波器记录：由人工对曲线的峰谷点直接采样，得出峰谷值数据。

1.3 数据的统计与分析<sup>[2,3]</sup>

1.3.1 无效幅值的省略：无效幅值的大小可按下式计算：

$$\Delta P = (P_{m..x} - P_{m..n}) \Delta \% \quad (1)$$

式中： $P_{m..x}$ 、 $P_{m..n}$ 分别表示载荷一时间历程中的最大值和最小值； $\Delta$ 为任意给定数值，一般取10或5。

1.3.2 峰值（或谷值）均值与标准差计算（以峰值计算为例）

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中： $\mu$ ——均值； $\sigma$ ——标准差； $n$ ——峰值总数。

1.3.3 波动中心 $m$ 计算

$$m = \frac{1}{2} (\mu_{\text{峰}} + \mu_{\text{谷}}) \quad (4)$$

1.3.4 峰值（谷值）分布频次统计（以峰为例）

(1) 分组：组数的大小视样本的多少确定，其组间距  $C$  用下式计算：

$$C = \frac{1}{L} (X_{m..x} - X_{m..n}) \quad (5)$$

式中： $L$ ——分级数； $X_{m..x}$ 、 $X_{m..n}$ ——峰值的最大值和最小值。

(2) 组中值 $X_j$ 的计算

$$X_j = \frac{1}{2} (X_{j..} + X_{j..}) \quad (6)$$

式中： $X_{j..}$ 、 $X_{j..}$ 分别表示第  $j$  组上、下限值。

(3) 频次分布统计：统计计算各级峰值发生次数 $N_j$ ，相对频率 $F_j$ ，累计频率 $CF_j$ ，超值累积频率 $ECF_j$ 。

$$F_j = N_j / n \quad (7)$$

$$CF_j = \sum_{i=1}^j F_i \quad (8)$$

$$ECF_j = 1 - CF_{j-1} \quad (9)$$

1.3.5 分布函数推断与检验：峰值法计及的峰、谷值一般服从正态分布，其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

分布检验的方法有概率纸法和 $X^2$ 检验法,由于 $X^2$ 检验比较严密,且易实现计算机处理,故应优先应用。

$X^2$ 检验的数学表达式为

$$X^2 = \sum_{j=1}^L \frac{(N_j - K_j)^2}{K_j} \quad (11)$$

$$K_j = n \cdot P_j \quad (12)$$

式中:  $K_j$ —— $j$ 区间理论频数;  $P_j$ ——正态分布在 $j$ 区间的概率。

按(11)式计算出 $X^2$ 后,与由自由度数( $L-3$ )和显著性水平 $\alpha$ 查得的 $X^2_{L-3, \alpha}$ 比较,当 $X^2 \leq X^2_{L-3, \alpha}$ 时,则接受正态分布假设,否则拒绝。

## 2 载荷谱编制

在结构零件实际使用载荷—时间历程的采集中,是按不同使用工况分别进行的,而且采得的样本长度十分有限,所以,在通过上述数据处理获得了不同工况下各个子样的载荷—累积频次关系后,还需对它们进行扩展与合成,进而完成程序载荷谱的编制。在载荷—累积频次关系的扩展与合成中,存在着先合成后扩展和先扩展后合成两种方法,经证明,这两种方法是等效的。因此为了便于实现计算机编谱,下面按先扩展后合成的方法分析编谱的步骤。

### 2.1 载荷—累积频次的扩展

#### 2.1.1 各工况载荷循环次数比的确定

$$\psi_i = \frac{\lambda_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^R \lambda_i \cdot n_i} \quad (13)$$

式中:  $\lambda_i$ —— $i$ 工况工作时间比;  $n_i$ —— $i$ 工况单位时间载荷循环次数;  $R$ ——工况数。

#### 2.1.2 扩展载频—累积频次关系 $m_i(X)$

$$m_i(X) = \psi_i \cdot N \cdot \frac{1}{\sigma_i \cdot \sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{(X-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} dx \quad (14)$$

式中:  $N$ ——各工况载荷循环总次数,常取 $N=10^6$ ;

$\mu_i$ —— $i$ 工况峰值载荷均值;

$\sigma_i$ —— $i$ 工况峰值载荷标准差。

### 2.2 载荷—累积频次的合成

#### 2.2.1 文献回顾

各工况载荷—累积频次的合成一般有以下三种处理方法。

**方法一**<sup>[3]</sup> 根据各工况载荷—累积频次关系 $M_i(X)$ , 求出各工况大于 $X$ 的累积频次 $m_i$ , 然后按下式求得合成累积频次 $m(X)$ :

$$m(X) = \sum_{i=1}^R m_i \quad (15)$$

这种方法使得那些峰谷值波动中心较大的工况, 在合成中占有明显的优势, 特别当存在某一工况的波动中心远远大于其它工况时, 其合成结果将与实际情况偏差较大。

**方法二**<sup>[4]</sup> 合成时对波动中心接近的工况按方法一进行合成, 对波动中心与合成波动中心偏离较大的工况, 编制子程序谱, 这种编制结果由于有子程序谱的存在既不利于室内试验加载, 又不易于实现编谱的计算机程序化。

**方法三**<sup>[5]</sup> 在对波动中心接近的工况进行合成时, 采用了以各波动中心的均值作为总波动中心, 并在保持载荷变化部分特征不变的条件下按方法二合成。这种方法一则没有克服产生子程序谱的情况, 二则对合成的各工况采取的简化原则无力学依据。

### 2.2.2 等损伤理论的应用

由等损伤原理知, 任意平均应力下的应力循环可以按照疲劳损伤当量的原则, 折算到某一给定的平均应力上, 折算一般采用Goodman公式, 即

$$\sigma_q = \sigma' \cdot \frac{\sigma_b - \sigma_m}{\sigma_b - \sigma'_m} \quad (16)$$

式中:  $\sigma_q$ ——折算后的应力幅值;

$\sigma'$ ——折算前的应力幅值;

$\sigma_b$ ——材料的真实强度极限;

$\sigma_m$ ——给定的应力均值;

$\sigma'_m$ ——折算前的应力均值。

因此, 在合成时利用等损伤原理, 就会使合成过程合理化。

### 2.2.3 合成步骤

(1) 计算载荷总波动中心 $SU$ , 建议按各工况载荷循环次数比取各工均值的加权平均值。

$$SU = \sum_{i=1}^R SU(i) \cdot \psi_i \quad (17)$$

式中:  $SU(i)$  表示 $i$ 工况峰谷值波动中心。

(2) 计算各工况均值折算系数 $\eta_i$ ,

$$\eta_i = \frac{\sigma_b - \sigma_m}{\sigma_b - \sigma_{m_i}} \quad (18)$$

式中:  $\sigma_{m_i}$  由 $i$ 工况波动中心求得的应力;  $\sigma_m$  由总波动中心 $SU$ 求得的应力。

(3) 各工况载荷—累积频次关系 $m_i(x)$

$m_i(x)$  与式(14)形式相同, 式中的  $\mu_i, \sigma_i$  分别用  $\mu_i', \sigma_i'$  代替即可。  $\mu_i', \sigma_i'$  用下式计算(推导过程从略)。

$$\text{则 } \mu_i' = \eta_i (\mu_i - SU_{(i)}) + SU; \quad (19)$$

$$\sigma_i' = \eta_i \cdot \sigma_i \quad (20)$$

$$m_i(x) = \Psi_i \cdot N \cdot \frac{1}{\sigma_i' \cdot \sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{(x - \mu_i')^2}{2\sigma_i'^2}} dx \quad (21)$$

(4) 合成一载荷累积频次关系  $M(x)$

$$\begin{aligned} M(x) &= \sum_{i=1}^R m_i(x) \\ &= \frac{N}{\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^R \frac{\Psi_i}{\sigma_i'} \int_x^{\infty} e^{-\frac{(x - \mu_i')^2}{2\sigma_i'^2}} dx \end{aligned} \quad (22)$$

## 2.3 合成后的最大载荷 $X_e$ 的确定

### 2.3.1 $X_e$ 的确定原则<sup>[3,4]</sup>

一般取累积频次为  $10^6$  中发生一次的最大载荷作为疲劳试验程序块的最大载荷, 即最大载荷出现的概率为  $10^{-6}$ 。

### 2.2.3 文献回顾

确定  $X_e$  是编制载荷谱特别重要的一步,  $X_e$  的真实性直接影响试验结果的真实性, 关于  $X_e$  的确定方法, 目前已有许多研究, 归纳起来有以下三种:

**方法一**<sup>[4]</sup> 按扩展后各工况的载荷循环次数  $N_i = \Psi_i \times 10^6$ , 求出各工况最大载荷, 然后找出它们中的最大者作为合成后的最大载荷。该方法对于取得的  $i$  工况最大载荷  $X_{ei}$  若远远大于其它工况的最大值  $X_{ej}$  时,  $X_{ei}$  很接近合成后真正的最大载荷。反之, 若各工况最大载荷都很接近时, 该方法求得的  $X_{ei}$  远远小于合成后真正的最大载荷。

**方法二**<sup>[2]</sup> 把各工况累计循环次数都扩展到  $10^6$ , 分别求出各工况的最大载荷, 然后找出它们中的最大者作为合成后的最大载荷  $X_e$  (设  $X_e$  为第  $i$  种工况的最大载荷), 该方法只有在各工况载荷分布十分接近或第  $i$  种工况循环次数具有明显加权优势时, 才有足够的精度, 反之误差很大。

**方法三**<sup>[2]</sup> 在先合成后扩展的编谱中, 最大载荷是以合成曲线为基础, 借助于曲线板外推确定, 其结果带有很大的为人性。

### 2.3.3 用解超越方程的方法确定 $X_e$

根据  $X_e$  的确定原则和式(22), 可得方程

$$\frac{10^6}{\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^R \frac{\Psi_i}{\sigma_i'} \int_{x_e}^{\infty} e^{-\frac{(x - \mu_i')^2}{2\sigma_i'^2}} dx = 1 \quad (23)$$

由  $X_e$  的物理含义知,它是介于 0 与  $\infty$  之间的一个实数,这样大的范围求解  $X_e$  往往无从下手,所以,推导出  $X_e$  的上、下限值将显得十分必要。

(1)  $X_e$  上下限值的导出

$$\text{令 } n_i = \Psi_i \times 10^6, \quad (24)$$

$$p_i(X_e) = \frac{1}{\sigma_i' \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} e^{-\frac{(x - \mu_i')^2}{2\sigma_i'^2}} dx \quad (25)$$

则方程(23)可化为

$$\sum_{i=1}^R p_i(X_e) \cdot n_i = 1 \quad (26)$$

实际上,  $n_i$  就是  $i$  工况扩展后的载荷循环次数,  $p_i$  是  $i$  工况载荷概率分布函数。

①  $X_e$  下限值  $a$  的确定:由  $n_i$  和  $p_i(X_e)$  的物理含义知,它们都是非负值,所以可由方程(26)得出

$$p_i(X_e) \cdot n_i \leq 1 \quad (27)$$

设  $a$  为方程  $p_i(x) \cdot n_i = 1$  的根。

$$\because p_i(x + \Delta) < p_i(x), \quad (\Delta > 0)$$

$$\text{则 } X_e \geq a_i, \quad (28)$$

$$\therefore X_e \text{ 的下限 } a = \max\{a_i\}.$$

②  $X_e$  上限值  $b$  的确定:方程(26)可表示为:

$$p_i(X_e) \sum_{j=1}^R n_j + \sum_{j=1}^R [p_i(X_e) - p_j] n_j = 1 \quad (29)$$

$$\text{如果 } p_i(X_e) \geq p_j(X_e), \quad (30)$$

$$\text{则 } p_i(X_e) \sum_{j=1}^R n_j \geq 1$$

$$\because \sum_{j=1}^R n_j = 10^6$$

$$\therefore p_i(X_e) \cdot 10^6 \geq 1 \quad (31)$$

设  $b$  为方程  $p_i(x) \cdot 10^6 = 1$  的根,

$$\text{则 } X_e \leq b. \quad (32)$$

所以  $X_e$  的上限为  $b$ , 还应指出,这一结论是在式(30)成立的条件下得出的,所以,下面分两种情况对式(30)进行分析;

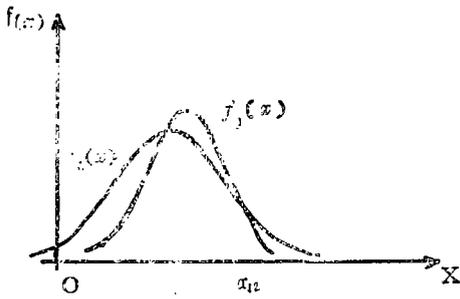


图 1

设  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  两个正态分布 (如图1所示), 它们的特征参数分别为  $\mu_1, \sigma_1$  和  $\mu_2, \sigma_2$ , 且有  $\mu_1 > \mu_2, \sigma_1 < \sigma_2$ 。由图1容易看出, 很难判断  $p_1(Xe)$  与  $p_2(Xe)$  哪一个较大。

设  $X_{12}$  为两条曲线两个交点中的较大者, 则  $X_{12}$  可由下面方程求得

$$f_1(x) = f_2(x)$$

$$\text{即 } \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}}$$

在求出  $x_{12}$  后, 把  $x_{12}$  代入方程 (26), 如果  $\sum_{i=1}^R p_i(x_{12}) \cdot n_i < 1$ , 则

$x_{12} > x_e$ , 反之  $x_{12} < x_e$ 。从图中还可以看出, 在  $x_{12} < x_e$  时,  $p_1(Xe) > p_2(Xe)$  则用  $p_1(x) \times 10^6 = 1$  求出  $b$ ; 在  $x_{12} > x_e$  时, 很难断定  $p_1(Xe)$  与  $p_2(Xe)$  哪个较大, 但是由于  $Xe < x_{12}$ , 不妨取上限  $b = x_{12}$ 。

(2)  $Xe$  的确定: 知道了  $Xe$  的区间  $[a, b]$ , 即可对超越方程式 (23) 利用对分法等方法求解, 得出  $Xe$ 。

## 2.4 程序载荷谱编制<sup>[6]</sup>

采用比值系数法编制八级程序载荷谱是国内外公认的比较切合实际的方法, 其各级载荷可由下式求得

$$X = \xi_i \cdot (Xe - SU) + SU$$

式中,  $\xi_i$  为比值系数, 在  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  时, 分别取  $1, 0.950, 0.850, 0.725, 0.575, 0.425, 0.275, 0.125$ 。

各级载荷的循环次数  $\Delta n_i$  可由下式确定:

$$\Delta n_i = n_{i+1} - n_i \quad (i = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)$$

式中,  $n_{i+1}, n_i$  分别为  $\frac{1}{2}(X_{i+1} + X_i)$  和  $\frac{1}{2}(X_i + X_{i-1})$  对应的累积频次数, 可由 (22) 式求得。

### 3 计算机程序

程序是在TJAP模拟数据处理系统硬件的基础上,利用 BASIC 语言和 6502 汇编语言〔7,8〕编写(程序框图如图2所示)。

源程序是由一个起控制作用和进行简单运算的主程序和七个主要的子程序组成,即采样子程序、峰谷值检测子程序、无效幅值略去子程序、峰谷值统计处理子程序、计算最大载荷子程序以及程序载荷谱编制子程序。应该指出,在这些子程序中又含有若干个子程,如在峰谷值统计处理子程序中,就含有 $\chi^2$ 检验子程序和绘制分布图子程序等。

程序的主要功能有:

- (1) 适用于 1~4 信号的采集与处理。
- (2) 采样频率在 4~5000HZ 任选。
- (3) 单通道采样最多点数 32768 个。
- (4) 对一个连续的磁带记录模拟信号可以分段进行处理。

### 4 结论

4.1 采用解析法分析了峰值法载荷谱编制全过程。

4.2 提出了利用等损伤原理,对各工况的波动中心进行等效处理的原则。

4.3 提出了通过解超越方程确定最大载荷的计算方法。

4.4 编写了利用 TJAP 数据处理系统硬件,编制峰值法载荷谱的计算机程序。

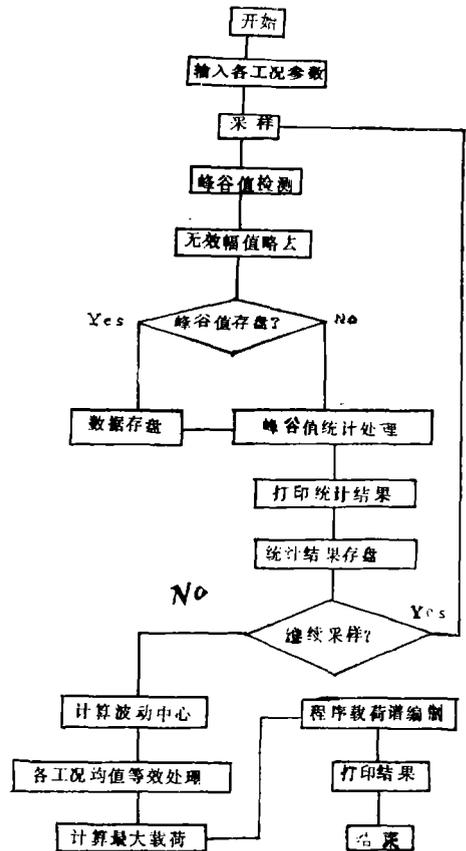


图2 编谱计算程序框图

### 参考文献

- 1 丁汉哲. 试验技术. 机械工业出版社, 1982: 359-374
- 2 阎楚良、王公权. 峰值计数法疲劳载荷谱的编制与统计处理程序. 农业机械学报. 1984(1): 51-57
- 3 苏清祖、王锦雯. 轮式拖拉机前桥载荷谱测取方法的初步研究. 农业机械学报. 1982(2): 30-42
- 4 丁川等. 东风-50L履带拖拉机支重轮轴田间载荷谱的编制. 洛阳工学院学报. 1982(2): 59-71
- 5 沈先例、周驷骥. 南方-12型机耕船驱动轴扭矩工作载荷谱. 农业机械结构强度学术会议论文选集, 1980: 192-209
- 6 高镇同. 疲劳载荷谱编制. 航空学报, 1982(2): 36-47
- 7 张巨洪等. BASIC语言程序库. 清华大学出版社, 1983
- 8 荣树熙、张开敬. 6502微处理机及其应用. 北京师范大学出版社, 1984

# PEAK-VALLEY LOAD SPECTRUM COMPILING AND COMPUTER PROGRAM

Cheng Jiangan    Huang Zhengsheng

( *Department of Farm Machinery, Northwestern Agricultural University* )

## Abstract

In this paper, the precedures of compiling peak-valley Load Spectrum is discussed in detail, based on which the principle of equal effects of average values and the calculating method of maximum load are proposed. Also, the computer program for compiling the whole process of compiling load spectrum is contributed.

**Key words:** load spectrum, peak-valley counting method, computer program