

一个与载荷模拟同步进行的 三峰谷计数法则*

谢 敏 张安哥

(工程力学研究室)

摘 要

应用蒙特卡罗方法产生伪随机数来进行疲劳载荷的计算机模拟,并基于雨流法的基本原理,对“三峰谷计数法则”作了改进,提出了一种能与载荷信号的发生同步进行的统计计数的计算机算法,这使得结构疲劳寿命的估算与疲劳载荷谱的产生的同步实现成为可能。

关键词:疲劳载荷;雨流计数法;计算机模拟;疲劳寿命

0 引 言

疲劳载荷谱的确定是随机疲劳寿命估算中的一个非常重要的问题。通过对结构在其使用条件下的各危险点危险截面的应力应变测试,并用载荷的极值统计法对实测应力历程进行统计分析,可得出应力的分布类型、分布参数和相应的载荷谱。这种方法较为可靠,但实测工作量非常大,且得到的数据只适用于特定类型、结构参数和使用条件下的结构构件。而计算机仿真方法是在已获取一定的统计资料的基础上,应用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟法^[1]模拟出结构件的应力历程,该方法免去了大量复杂的实验和人工统计分析工作,因而具有良好的应用前景。

载荷的模拟使得我们能够在产生若干个载荷峰谷值后即可进行疲劳损伤的计算,从而也就使得损伤的累积计算和结构疲劳寿命的估算有可能与载荷峰谷值的产生同步进行。但是,在用蒙特卡罗方法产生的随机载荷序列中载荷峰谷值的排列是杂乱无章的,为了能用于疲劳寿命的估算,还必须对其进行统计计数,将载荷应力历程简化为一系列的全循环或半循环。

现有的计数方法多达十几种,其中雨流计数法^[2]由于其计数过程与材料的应力—应变特性相符,有较可靠的力学基础而被认为是较先进的计数方法。但是,一般所采用的雨流法是按照“四峰谷计数法则”^[3]进行计数的,每次需要作出多种判断,并且总要分成两个阶段进行,

本文于1994年3月23日收到

* 铁路高校青年教师基金资助项目

使得其在计算机上的实施偏于复杂. 文献〔4〕中的改进雨流计数法和 Glinka 与 Kam^{〔5〕}提出的算法均以“三峰谷计数法则”为基础, 前者需要在开始计数前先找出整个历程中的最大峰值(或谷值), 并对载荷历程进行重排列, 因而与一般的算法一样, 需要预先得到完整的载荷历程, 并将其全部读入计算机内存, 这样处理对于载荷历程很长的情况是不合适的. 后者将贮存于磁盘上的完整载荷历程分块地读入内存进行统计计数, 使这一问题得以解决. 然而通过上述分析也可看到, 这些算法均不能或不便于用来进行载荷模拟与损伤累积的同步计算. Dowling 和 Socie^{〔6〕}给出的算法是从磁盘中逐点地读入载荷峰谷值并立即进行统计分析, Cacko 将其改造后用于载荷的模拟分析^{〔7〕}, 但其计数结果有可能与一般雨流法的计数结果不符, 从而与雨流法的原理相矛盾, 因此, 需要寻求一种既能与载荷的模拟相同步又能符合雨流法计数原则的统计计数法.

本文采用随机变量来描述疲劳载荷, 讨论了如何应用蒙特卡罗方法来产生给定分布的伪随机数序列以进行疲劳载荷的计算机模拟. 基于雨流法的基本原理, 本文对“三峰谷计数法则”作了改进, 提出了一种能与载荷信号的发生同步进行的统计计数的计算机算法, 这使得结构疲劳寿命的估算与疲劳载荷谱的产生的同步实现成为可能.

1 随机疲劳载荷的计算机模拟

以起重机的疲劳应力谱的模拟为例进行分析^{〔8〕}, 其结构件应力的随机性主要决定于起重量的大小、作用位置和起重机自重的随机性等. 自重和起重量的分布规律已有一些统计结果可供参考, 位置随机变量则可以根据使用条件决定, 如对铁路货场使用的门吊, 可认为其运动的起始位置平均值是火车的纵向中心线. 有了这些量的分布规律, 便可建立相应的弹性动力学模型, 用计算机仿真得到构件任意计算截面的应力时间历程, 必要时也可得到应力幅值的分布规律. 每一工作循环的起重量和力作用位置可通过取伪随机数的方法得到.

随机数的产生是实现计算机模拟的一个基本问题, 而其中最基本的是产生〔0, 1〕上均匀分布的随机数. 产生均匀分布伪随机数的方法有迭代取中法、移位法、线性同余法等, 考虑到结构的疲劳寿命一般较长, 要经历很长的载荷历程才会破坏, 为此可采用具有最长周期特点的混合同余法来产生伪随机数. 对于微型计算机而言, 文献〔9〕给出的产生均匀随机数的 FORTRAN 程序中所采用的递推公式为:

$$x_{i+1} = 2053x_i + 13849(\text{mod } 2^{16}), \quad (1)$$

然而经检验, 当随机数序列的长度较长时(如为 1000 个), 该程序产生的伪随机数不能认为是均匀分布的随机数. 笔者将程序中的计算式改用双精度运算后, 便能通过有关的检验.

对于随机疲劳分析来说, 经常遇到的是正态分布、对数正态分布和 Weibull 分布, 这三种分布的随机数可通过随机抽样方法得到^{〔1,10,11〕}. 为了检验产生的伪随机数序列是否服从某一给定的分布, 可将其看作是对某一总体观测得到的一个随机样本, 对其进行分布类型的检验, 常用的检验方法有 χ^2 检验法和柯尔莫哥洛夫检验法^{〔12〕}.

笔者已按上述方法编制了伪随机数的发生程序和假设检验的计算机程序, 程序产生的伪随机数序列均能通过有关的检验.

2 疲劳载荷的统计计数方法

2.1 雨流计数法的基本原理^[2]

假定一个大的变程所引起的损伤不受为完成一个小的迟滞回线所截断的影响, 则可将构成较小迟滞回线的较小循环从整个载荷时间历程中提取出来, 重新组合, 而认为两者对材料

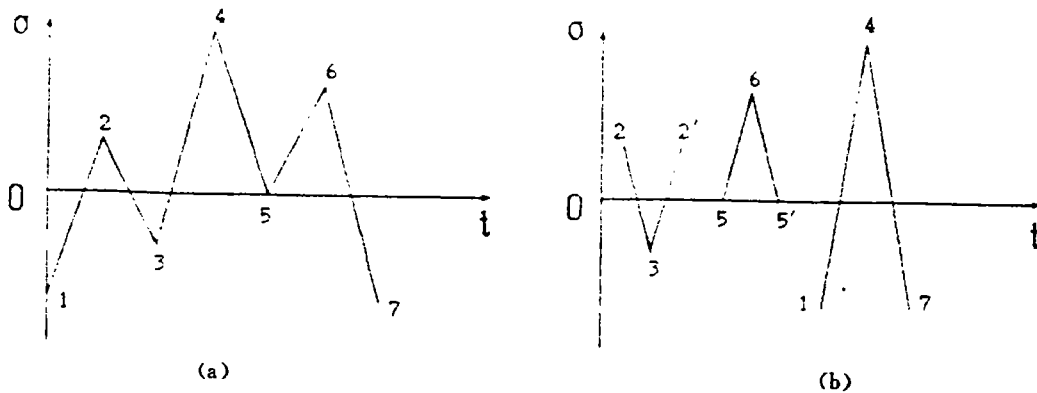


图 1

引起的疲劳损伤是等效的. 如图 1 中, 图 1 (a) 的载荷时间历程将简化为图 1 (b) 的形式.

在实现计算机处理时, 一般是按照“四峰谷计数法则”^[3]进行计数的, 如图 2 所示, 在谱处理过程中考虑当前的四个峰谷值 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$, 其计数条件如下:

(1) 如果 $\sigma_2 > \sigma_1$, 且 $\sigma_1 \leq \sigma_3, \sigma_2 \leq \sigma_4$ (图 2(a)), 则可取出 σ_2, σ_3 两点构成一个全循环;

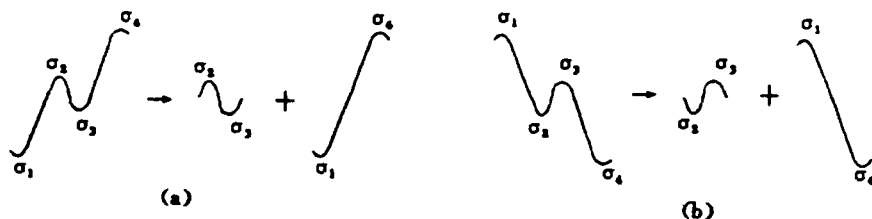


图 2

(2) 如果 $\sigma_2 < \sigma_1$, 且 $\sigma_1 \geq \sigma_3, \sigma_2 \geq \sigma_4$ (图 2(b)), 则可取出同样的全循环.

如果当前四点满足上述两个条件之一, 则在取出 σ_2, σ_3 后, 向后扩展两点 σ_5, σ_6 构成新的四个点 $\sigma_1, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$, 再作如上判断. 如果当前四点不满足上述条件, 则将 σ_1 暂时放入残波中, 并向后扩展一点 σ_5 , 再判断 $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$ 是否满足上述条件. 如此循环至最后一个载荷峰谷值. 对于不满足上述两条件的最终残波, 先找出最大值和最小值, 两者组成一个完整波, 然后依次向两个方向取完整波, 若最后在某一侧剩余一个峰谷值, 则将其忽略.

2.2 改进的三峰谷计数法则

为了使雨流计数法在计算机上的实现得以简化,提高计数速度,国内外学者提出用“三峰谷计数法则”来代替一般的“四峰谷计数法则”。三峰谷计数法则可用数学式子表达成:

$$|\sigma_n - \sigma_{n-1}| \geq |\sigma_{n-1} - \sigma_{n-2}|, \quad (2)$$

即从应力时间历程的起始点开始反复寻找如图 3 中所示的三峰谷波形,当出现图 3 (a) 或图 3 (b) 中任一种情况时,则取出一个全循环 $\sigma_{n-2}, \sigma_{n-1}$ 。然而,如果简单地采用该法则对应力历程进行计数,其结果有可能与雨流法的原理相背。

首先,分析计数的中间过程,即假设已用三峰谷计数法则从应力历程的起始点开始并处理完应力历程的一段,当前的三个峰谷值为 $\sigma_{n-2}, \sigma_{n-1}, \sigma_n$,且符合计数条件 (14) 式,则可证明它们一定能满足四峰谷计数条件。因为,如果不能满足的话,便有 $\sigma_{n-3} < \sigma_{n-1}$ (图 3 (a)) 或 $\sigma_{n-3} > \sigma_{n-1}$ (图 3 (b)),这又使得 $\sigma_{n-3}, \sigma_{n-2}, \sigma_{n-1}$ 三点满足三峰谷计数条件,也就意味着在前面的计数过程中漏掉了一个全循环。然而,既然是按照法则 (14) 从头开始反复寻找的,这种遗漏是不可能的。因此,一定有 $\sigma_{n-3} \geq \sigma_{n-1}$ (图 3 (a)) 或 $\sigma_{n-3} \leq \sigma_{n-1}$ (图 3 (b)),即 $\sigma_{n-3}, \sigma_{n-2}, \sigma_{n-1}, \sigma_n$ 符合四峰谷计数法则,可取出 $\sigma_{n-2}, \sigma_{n-1}$ 构成一个全循环。

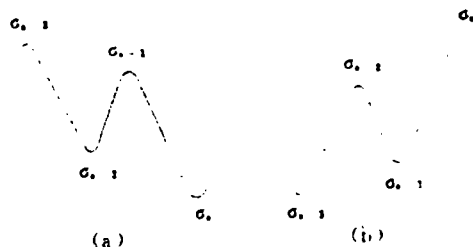


图 3

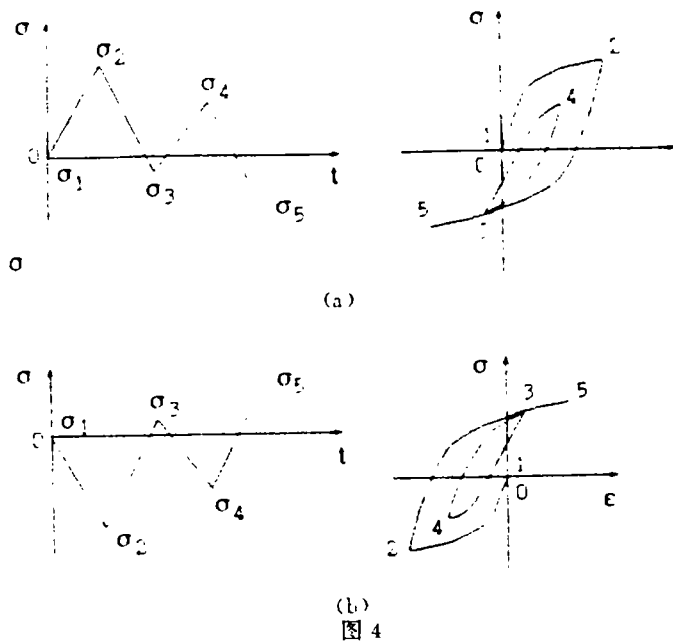


图 4

上述分析说明,只要在历程的起始点处三峰谷法则能与四峰谷法则的计数结果相符,则后续的计数也一定能符合四峰谷法则。下面就应力历程的起始点处的三峰谷计数法则的应用进行分析和讨论。

鉴于载荷一般都是从零开始施加的,不失一般性,可假设应力历程的峰谷值从零开始。对于图 4 所示的两种情况,若采用“四峰谷计数法则”进行计数,得到的全循环为 σ_3, σ_4 ; 而若采用“三峰谷计数法则”进行计数,得到的全循环为 σ_1, σ_2 ,这种差异还势必影响后续的计数过程,使得两者的计数结果完全不同。从图中的 $\sigma-\epsilon$ 迟滞回线可以看出,符合雨流法基本原理的全循环应是 σ_3, σ_4 。为此,需要对“三峰谷计数法则”作某种改进,使得其在起始点处的计数结果也能与雨流法的原理相符。一种简便的方法就是将 $\sigma_1=0$ 直

看出,符合雨流法基本原理的全循环应是 σ_3, σ_4 。为此,需要对“三峰谷计数法则”作某种改进,使得其在起始点处的计数结果也能与雨流法的原理相符。一种简便的方法就是将 $\sigma_1=0$ 直

接放入计数后的峰谷值序列中，而从 $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 三点开始，对后面的历程应用三峰谷法则进行计数。经分析研究，这样的处理方式所得到的结果能符合雨流法的原理，并且能够得到一般雨流法不能计取而又实际存在的全循环。

以图 5 所示的应力历程为例，应用“四峰谷计数法则”进行计数时，便不能得出全循环 σ_2, σ_3 ，而其迟滞回线表明这一循环是实际存在的，采用上面提出的改进的三峰谷计数法就可

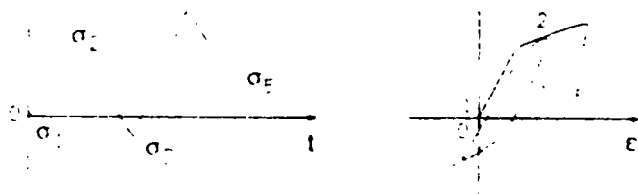


图 5

将该循环从历程中计取出来。正因为如此，用该改进算法计数后，将不会产生发散的残波。

前面讨论的是应力历程的峰谷值从零开始的情况，然而利用随机数发生程序所产生的第一个随机数往往不为零。为此，可根据程序产生的前两个随机应力值 σ_1, σ_2 ，按如下法则对起始点进行修改：

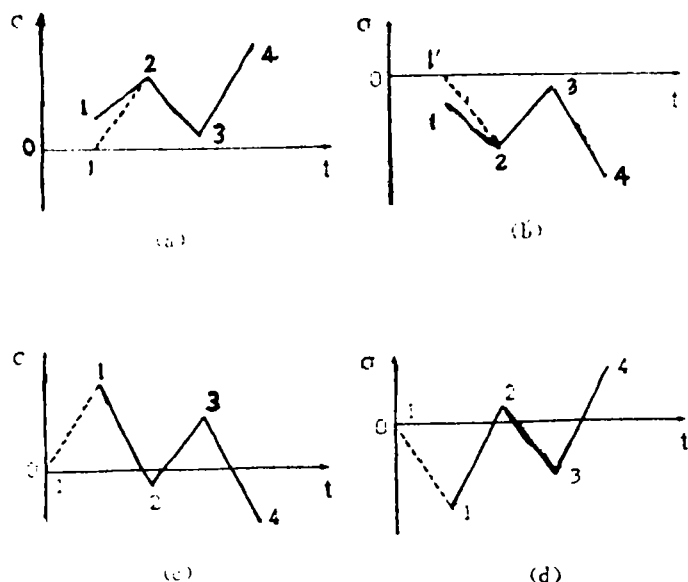


图 6

- (1) 若 $\sigma_1/(\sigma_2 - \sigma_1) \geq 0$ (图 6(a), 6(b)), 则令 $\sigma_1 = 0$;
- (2) 若 $\sigma_1/(\sigma_2 - \sigma_1) < 0$ (图 6(c), 6(d)), 则将 σ_1, σ_2 两点后移, 即分别看成是 σ_2 和 σ_3 , 而

补充一个峰谷值 $\sigma_1 = 0$.

用上述计数法对应力历程进行处理后所产生的最终残波一般为一收敛波. 但是, 由于程序所产生的载荷峰谷值是随机排列的, 使得该残波往往只包含少数几个绝对值最大的峰谷值, 同时峰谷值的产生可通过模拟程序不断地进行下去, 因此, 对疲劳载荷的模拟问题来说, 可以将此残波忽略, 而不会改变载荷的分布规律.

应用上述改进的三峰谷计数法可实现载荷历程的模拟与统计计数的同步进行, 其程序框图见图 7, 其中给定分布的随机数通过一外部函数产生.

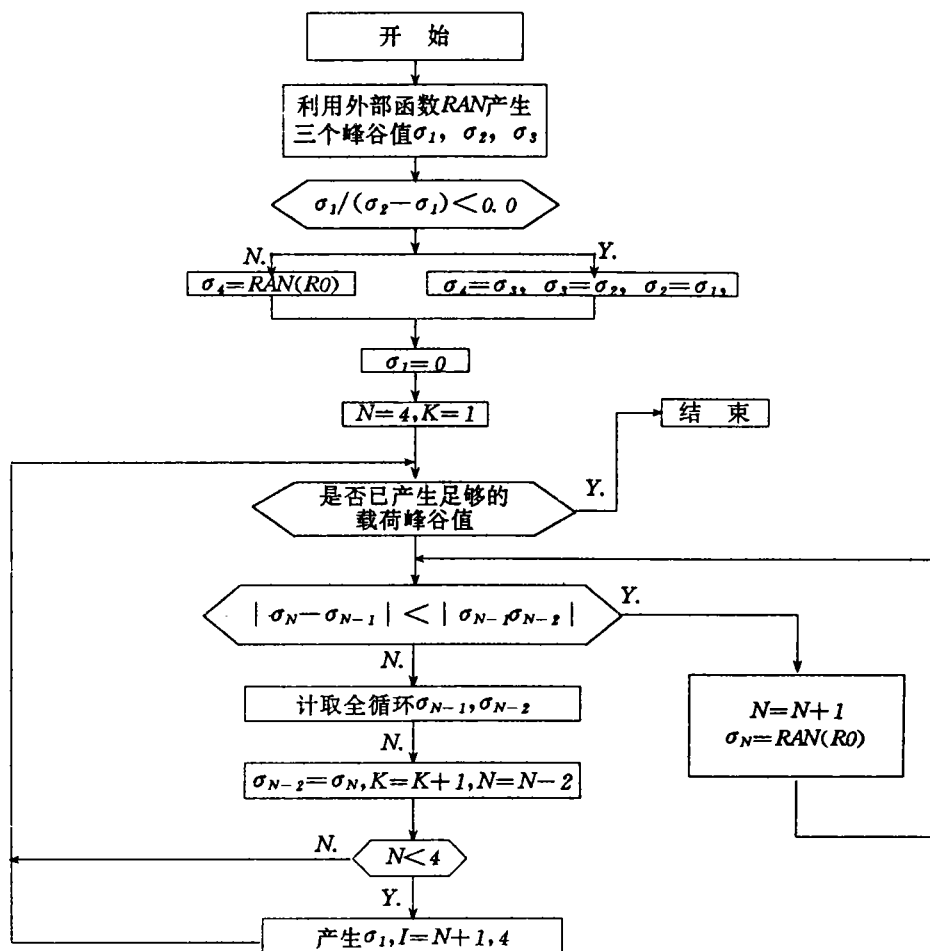


图7 改进三峰谷计数法程序框图

3 结 论

(1) 应用蒙特卡罗方法, 笔者编制了伪随机数的发生与假设检验的计算机程序, 程序所产生的伪随机数序列均能通过有关的检验.

(2) 本文提出的改进三峰谷计数法能如实地反映材料的应力应变响应, 符合雨流法的基

本原理，并能计取出一般雨流法不能取出而又实际存在的全循环。

(3) 改进的三峰谷计数法是一种能与载荷信号的发生同步进行的统计计数方法，它使得结构疲劳寿命的估算与载荷谱的产生的同步实现成为可能。

参 考 文 献

- [1] 徐钟济. 蒙特卡罗方法. 上海: 上海科学技术出版社, 1985
- [2] 高镇同. 疲劳应用统计学. 北京: 国防工业出版社, 1986
- [3] J. B. Chang, M. Szamosi and K. W. Liu. Random Spectrum Fatigue Crack Life. Predictions with or without Considering Load Interactions. ASTM STP 748, 1981
- [4] 过玉卿, 龙靖宇. 改进雨流计数法及其统计处理程序. 武汉钢铁学院资料
- [5] G. Glinka and J. C. P. Kam. Rainflow Counting Algorithm for Very Long Stress Histories. Int. J. Fatigue, 1987, 9: 223~228
- [6] S. Downing and D. F. Socie. Simple Rainflow Counting Algorithms. Int. J. Fatigue, 1982, 4: 31~40
- [7] J. Cacko. Simultaneous Computer Simulation of Operational Random Processes and Continual Rainflow Counting. Int. J. Fatigue, 1992, 14: 183~188
- [8] 谢敏, 张安哥. 起重机焊接箱形梁的疲劳分析与寿命估算. 华东交通大学学报, 1993, 10 (1)
- [9] 吴新瞻等. 随机模型与计算机模拟. 北京: 电子工业出版社, 1990
- [10] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集. 北京: 清华大学出版社, 1992
- [11] P. 布雷特利等. 模拟导论. 北京: 机械工业出版社, 1991
- [12] 复旦大学数学系. 概率论与数理统计. 上海: 上海科学技术出版社, 1961

A Three—Extreme Counting Rule Parallel to the Simulation of Random Fatigue Load

Xie Min Zhang Ange

ABSTRACT

This paper discusses the generating and testing techniques of some pseudo—random numbers which are used to simulate the fatigue loads with the application of Monte Carlo method. On the basis of rainflow counting, a computer algorithm is derived from “three—extreme counting rule”. The new algorithm will enable the prediction of fatigue life of engineering structures to be performed parallel to the simulation of random fatigue load.

Key words: Fatigue load; Rainflow counting; Monte Carlo method; Computer simulation; Fatigue life