

文章编号: 1671-7449(2022)03-0194-05

基于振动时域信号并行雨流处理的 振动疲劳寿命预估

顾秀聪, 王 轲, 李奕霖

(南京航空航天大学(机械结构力学及控制国家重点实验室振动工程研究所), 江苏 南京 210016)

摘要: 对振动时域信号进行雨流计数处理构建疲劳载荷谱是进行时域振动疲劳研究的关键。工程实际中的振动信号载荷历程普遍较长, 时域样本规模较大, 对此类时域信号进行传统雨流计数处理精度差、计算时间长, 因此在传统雨流计数的基础上引入了并行雨流计数处理, 适用于处理长时间历程的振动信号, 特别是含低频信号的振动信号。构建信号的疲劳谱后再结合 $S-N$ 曲线和损伤累积理论实现了时域振动疲劳寿命的计算。初始程序在 Matlab 平台上完成, 通过执行文件转成 Labview 程序并编制操作页面, 简化操作, 实现结果可视化。以航空典型结构加筋板为例, 对比疲劳试验结果, 验证了所编程序计算的精确性。

关键词: 振动疲劳; Labview 平台; 并行计算; 雨流计数法

中图分类号: TN98; O329 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2022.03.003

Predicting the Vibration Fatigue Life Based on Parallel Rainflow Counting of Vibration Time Domain Signals

GU Xiucong, WANG Ke, LI Yilin

(Institute of Vibration Engineering Research, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The key to time-domain vibration fatigue research is rain flow counting for time-domain vibration signals and constructing fatigue load spectrum. The vibration signal load history in engineering practice is generally long and the sample size is usually very large. Perform traditional rain flow counting processing on such time domain signals will lead to poor accuracy and long processing time. Therefore, parallel rainflow counting processing is introduced on the basis of traditional rainflow counting. This technique is suitable for dealing with long-term vibration signals, especially when low frequency signal is contained in the vibration signal. After the construction of fatigue spectrum of the signal, the calculation of vibration fatigue life in time domain will be realized with the help of $S-N$ curve and the damage accumulation theory. The initial program is completed on the Matlab platform and converted into Labview program by executing the file. The operation page is programmed to simplify operations and visualization results are achieved. The example of stiffened board is taken in this paper and the result is compared with the result of fatigue life test to verify the accuracy of the programmed calculations.

Key words: vibration fatigue; Labview platform; parallel computing; rain flow counting method

0 引 言

随着现代工业技术的飞速发展, 飞行器所处

的工作环境趋向高速、高温和高压, 因此, 其所处的振动环境也日趋复杂, 由此造成的结构失效也越来越多, 因此振动疲劳寿命研究受到众多学者

收稿日期: 2021-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775270); 民机专项资助项目(MJ-2017-F-21); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 顾秀聪(1997-), 男, 硕士生, 主要从事振动疲劳研究. E-mail:751431725@qq.com.

和工程界的广泛关注^[1], 工程实际中, 结构与构件失效很多都是由疲劳载荷引起的^[2]. 据统计, 在机械零件失效中大约有 70% 属于疲劳破坏, 尤其是在航空航天领域^[3]. 目前, 进行疲劳寿命预估计算主要借助一些市面流行的疲劳寿命预估软件, 例如 MSC 软件中搭载的 MSC. fatigue 模块, Ansys 中的 Ncode 模块等^[4].

目前, 振动疲劳寿命预估主要分时域寿命预估方法和频域寿命预估方法. 时域方法一般采用的方法是在结构危险位置的应力时域信号基础上^[5-7], 采用循环计数方法将信号转化为由许多个不同正弦波载荷所组成的加载序列, 对载荷进行雨流计数后, 对每一个循环的损伤进行计算, 并通过损伤累计准则计算对应的总损伤及寿命^[8], 使用较多的为 miner 线性损伤累积准则. 在整个计算流程中, 通过雨流计数法构建疲劳载荷谱是最为重要的环节. 但是在处理长时间历程、大时域样本数据的时域信号时, 常规雨流计数法处理速度缓慢, 处理时间长, 因此, 需要提高雨流计数处理的效率. 本文利用 Matlab 平台, 以雨流并行处理技术为基础, 编写了时域振动疲劳寿命计算程序, 并通过航空典型结构九宫格加筋板验证了程序计算的精确性.

1 振动疲劳寿命时域计算理论

1.1 雨流计数法

雨流计数法如图 1 所示, 是以双参数法为基础的一种计数法, 考虑了动强度(幅值)和静强度(均值)2 个变量, 符合疲劳载荷固有特性, 其主要功能是把实测载荷历程简化为若干个载荷循环, 供疲劳寿命估算和编制疲劳试验载荷谱使用. 1982 年, 阎楚良院士在论文中通过用雨流计数法对随机载荷时间历程统计处理程序的研究, 系统地讨论了随机疲劳载荷的统计处理及其物理模型, 其中包括对随机载荷时间历程的压缩处理、峰谷值的检测、雨流计数法的图解模型等, 成为雨流计数的基本理论. 现代对雨流计数的应用也多基于此理论^[9].

对于振动疲劳问题, 工程实际中的振动信号载荷历程普遍较长, 时域样本规模较大, 特别是对于含有低频分量的信号更是如此. 对于这类信号进行传统的雨流计数处理, 计算效率低下, 计算时间过长. 因此, 亟需研究开发一种能够处理长时间历程振动信号的有效算法和处理方法.

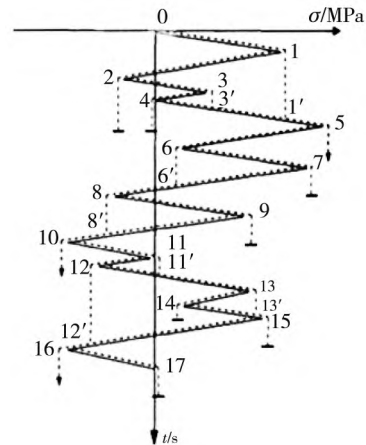


图 1 雨流计数法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rain flow counting method

1.2 累积损伤准则

疲劳累积损伤理论研究的是变幅疲劳载荷作用下疲劳损伤的累计规律和疲劳破坏准则. 累积损伤模型都认为, 在超出疲劳极限的应力水平下, 每一循环载荷都会给承载结构造成一定的损伤增量.

目前, 常用的疲劳累积理论主要有: 线性损伤累积理论、修正的线性损伤累积理论、非线性损伤累积理论以及概率累积损伤理论等.

线性疲劳损伤累积理论是指在循环载荷下, 疲劳损伤是可以线性累加的, 各个应力之间相互独立和互不相关, 当累加的损伤到达某一临界值时, 就认为试件发生疲劳破坏. 线性累积损伤理论中典型的是 Miner 理论. 该理论认为: 当第 i 级载荷循环了 n_i 次时, 该级载荷对结构或试件造成的损伤

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

则所有各级载荷累计造成的损伤

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

那么疲劳寿命

$$T = \frac{D_{CR}}{D} \times T_m \quad (3)$$

式中: T_m 为 m 级载荷所经历的总时间或循环数; D_{CR} 为损伤临界值, 一般为 1^[10-11].

2 振动疲劳寿命时域预估流程

利用软件进行时域疲劳寿命预估, 需要获得模型的功率谱密度曲线并通过时域模拟获得时域信号, 因此需要建立模型的有限元模型, 通过计算有限元的频响, 结合随机分析方法确定模型危

险点并获得危险点的 PSD 曲线. 利用三角级数法对 PSD 曲线进行时域模拟, 获得时域信号. 对时域信号进行雨流计数处理, 获得疲劳载荷谱, 再结合材料的 S-N 曲线和 Miner 线性损伤累积理论获得结构的疲劳寿命. 计算流程如图 2 所示.

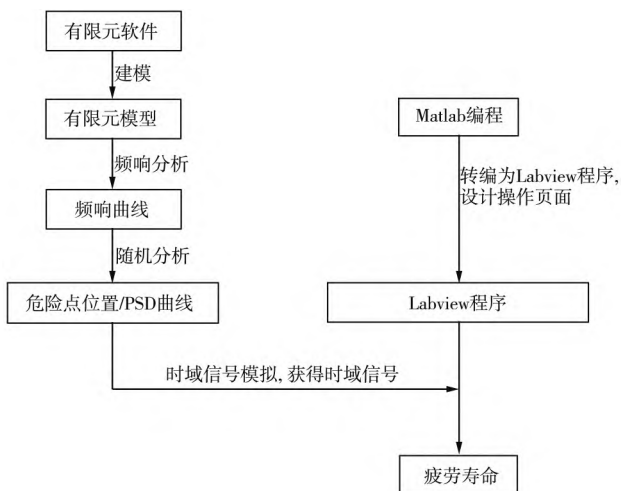


图 2 时域疲劳寿命预估流程图

Fig. 2 Flow chart of time domain fatigue life prediction

2.1 传统雨流计数法的程序编制

传统雨流计数法对首轮循环提取后剩余的发散收敛波是以半循环配对形式给出, 带来的计数误差较大. 本文采用波型封闭式计数模型^[12], 将载荷历程从最高峰值处截开, 使左段的起点与右段的末点首尾相接, 构成收敛发散波, 再对重构后的收敛发散波进行雨流计数处理.

对相邻的峰谷点 $X_I, X_{I+1}, X_{I+2}, X_{I+3}$, 若 $X_I < X_{I+1}, X_I \leq X_{I+2}$ 且 $X_{I+1} \leq X_{I+3}$, 则

$$SA = |X_{I+2} - X_{I+1}|, SM = (X_{I+2} + X_{I+1})/2, N = 1. \quad (4)$$

若 $X_I > X_{I+1}, X_I \geq X_{I+2}$ 且 $X_{I+1} \geq X_{I+3}$, 则

$$SA = |X_{I+2} - X_{I+1}|, SM = (X_{I+2} + X_{I+1})/2, N = 1, \quad (5)$$

式中: SA 为变程循环; SM 为相对变程循环的平均值; N 为变程循环次数.

计完一次循环后, 从计算机内存中抹去 X_{I+1} 和 X_{I+2} 两点, 继续判断 $X_I, X_{I+3}, X_{I+4}, X_{I+5}$.

若不符合上述循环提取条件, 则后移判断 $X_{I+1}, X_{I+2}, X_{I+3}, X_{I+4}$, 并 X_I 将存放于 $X_s(t)$ 数组中.

对剩余的峰谷值数列 $X_s(t)$ 再进行循环提取, 直到所有循环提取结束. 若循环提取结束时剩余的峰谷值点为 X_{s1}, X_{s2}, X_{s3} , 根据波形封闭处理, X_{s1} 与 X_{s3} 一定相等, 则直接提取此循环, 即 $SA_{s1} = |X_{s1} - X_{s2}|$.

综上所述, 便得到了循环次数 N 、循环幅值 SA 、循环均值 SM .

2.2 雨流计数法并行计算的程序编制

并行计算的编程实现可通过可进行并行编程预计算的软件平台实现, 在本文中初始编程采用的是 matlab 平台, matlab 平台的并行语句为“parfor”语句. “parfor”语句为并行计算的“for”语句, 但在循环中处理的数据不会出现数据的依赖, 例如循环内部不能出现数据的传递等.

在进行雨流并行前, 需要先对原时域信号进行分段. 根据上文所述, “parfor”语句循环之间不能出现数据的依赖, 所以在分段点处会出现载荷循环的丢失, 当时域信号较长时, 丢失载荷循环的影响可以忽略不计. 同时, 为控制丢失载荷循环造成的影响, 需要对分段点进行选择. 本文采用的准则是各分段点需要在等分点左右 5% 的范围内, 且应力绝对值最小.

分段后, 对各分段信号同时进行雨流计数处理, 得到各分段信号的载荷循环幅值 $SA_1, SA_2, SA_3, \dots, SA_n$, 载荷循环均值 $SM_1, SM_2, SM_3, \dots, SM_n$, 循环次数 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n, n$ 为分段数. 再将上述分段信号的疲劳谱整合至一个疲劳谱. 利用 Goodman 修正法修正循环幅值 SA , 再确定雨流分级数, 根据修正后疲劳谱中幅值 SA 的最大值和最小值进行分级, 得到分级疲劳谱.

并行雨流计数处理流程图如图 3 所示, 软件操作页面如图 4 所示.

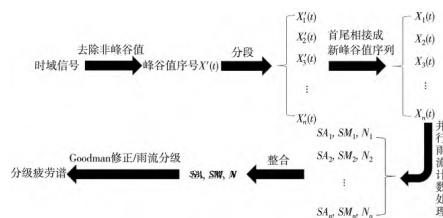


图 3 并行雨流处理计算流程图

Fig. 3 Flowchart of parallel rainflow processing calculation

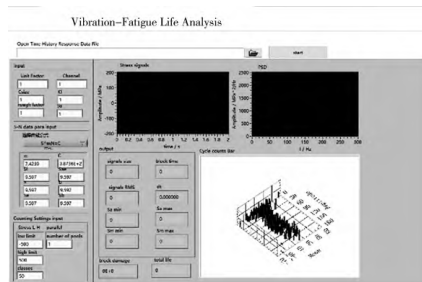


图 4 软件操作页面

Fig. 4 Software operation page

3 疲劳寿命预估程序的验证

本文采用的模型为九宫格加筋板模型。该模型长 1 000 mm, 宽 800 mm, 整体采用壳单元进行离散, 共 10 020 个有限元单元。在有限元模型中, 板和加强筋均采用壳单元, 二者之间的连接方式采用 RBE2 的方式进行模拟。为模拟试验的约束和加载方式, 将模型四周与试验中夹具接触部分的所有节点通过 RBE2 的方式连接到同一节点上, 该节点除 Z 轴方向之外的其他自由度全部约束。九宫格加筋板有限元模型见图 5。

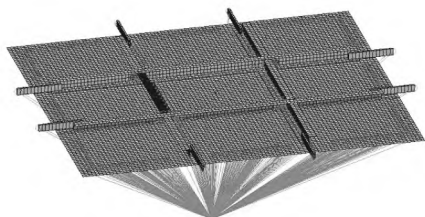


图 5 九宫格加筋板有限元模型

Fig. 5 Finite element model of nine-lattice stiffened plate

该模型所采用的材料为 2024-O 铝合金, 其材料属性见表 1。

表 1 2024-O 铝合金材料属性表

Tab. 1 2024-O aluminum alloy material properties

弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	抗拉强度/ MPa	密度/ kg · m ⁻³
69	0.33	85.9	166	2 789

本文采用的 S-N 曲线经验公式为幂函数形式

$$S^m N = C, \tag{6}$$

式中: $m=7.423\ 9$, $C=3.873\ 6 \times 10^{21}$ 。

根据疲劳试验结果, 先通过 MSC. Patran 对该模型进行频率范围 65 Hz~350 Hz 下的频率响应分析, 再输入频率范围为 65 Hz~350 Hz, 幅值大小为 0.990 3 g²/Hz, RMS 值为 16.8 g 的加速度平直谱, 对模型进行随机响应分析, 由结果得出, 危险位置为九宫格板中心节点处, 危险位置的局部应力云图如图 6 所示。

由高应力点的应力 RMS 值的各分量可以看出, 该点 x 方向和 y 方向上的应力水平均较高, 因此采用 Lemaitre 多轴应力等效方法。导出该点的 x 方向自功率谱密度曲线 $G_{\sigma_{xx}\sigma_{xx}}(f)$ 、y 方向自功率谱密度曲线 $G_{\sigma_{yy}\sigma_{yy}}(f)$ 、xy 方向自功率谱密度曲线 $G_{\tau_{xy}\tau_{xy}}(f)$ 、x 方向和 y 方向互功率谱密度曲线 $G_{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}(f)$ 。

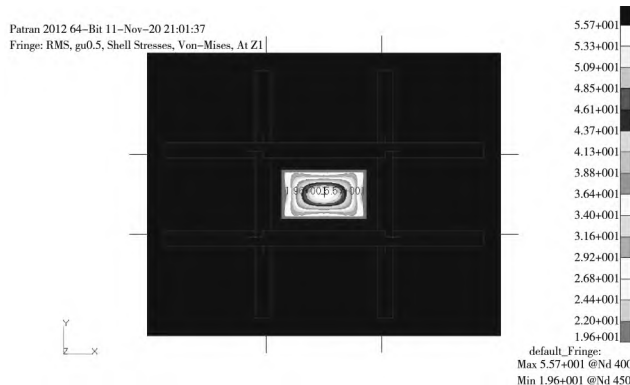


图 6 危险位置的局部应力云图

Fig. 6 Local stress nephogram of the hazard location

根据频域上的 Lemaitre 等效公式^[8]

$$G_{\sigma_{eq}^*}(f) = G_{\sigma_{xx}\sigma_{xx}}(f) + G_{\sigma_{yy}\sigma_{yy}}(f) - 2\tau G_{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}(f) + 2(1+\nu)G_{\tau_{xy}\tau_{xy}}(f). \tag{7}$$

计算得到响应的 PSD 曲线, 曲线如图 7

所示。

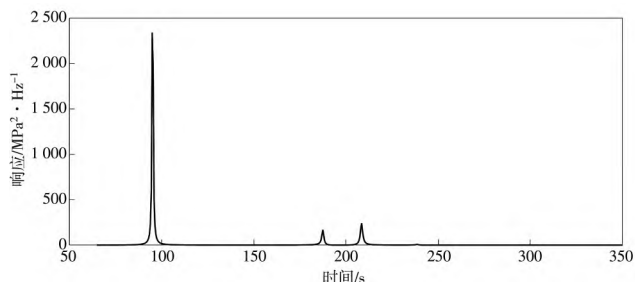


图 7 Lemaitre 多轴等效 PSD 曲线图

Fig. 7 Lemaitre multi-axis equivalent PSD curve

利用程序的时域模拟功能, 对该 PSD 曲线进行时域信号模拟, 模拟得到的时域信号时长为 2 s, 时间步长为 0.001 s, 时域信号如图 8 所示。

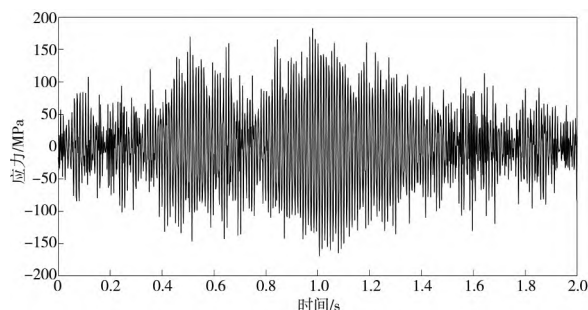


图 8 模拟后的时域信号图

Fig. 8 Simulated time domain signal diagram

根据该时域信号进行疲劳寿命预估, 雨流分级数设置为 100, 并行线程数设置为 8。经过计算, 所得雨流计数结果如图 9 所示。

结合 S-N 曲线和 miner 线性损伤累计理论, 该结构的疲劳寿命为 5 484.9 s。

将程序计算结果与试验结果对比, 对比结构如表 2 所示。

表2 疲劳寿命试验与编制程序的时域寿命计算结果对比

Tab.2 Comparison of fatigue life test results with time domain life calculation by programming

	试验	自编软件(并行数 8)	自编软件(不并行)
寿命/s	4 080	5 484.9	5 506.0
误差/%	/	34.43	34.95

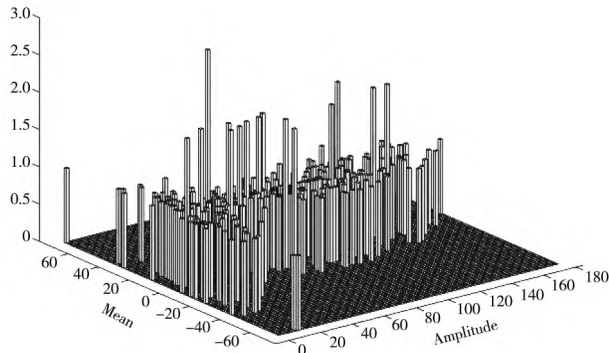


图9 雨流计数结果图

Fig.9 Rain flow count results

4 结论

本文研究了加入并行计算的振动疲劳寿命时域预估方法及其程序编制。该程序通过导入时域振动信号,利用雨流计数法编制了疲劳载荷谱,再借助 S-N 曲线和损伤累积理论实现了时域疲劳寿命的计算。同时针对工程实际中时域信号振动时间历程较长、数据量较大的问题,程序中雨流计数过程加入了并行计算的功能,通过选择分段数和分段点控制误差,提高了计算效率。程序先通过 Matlab 平台进行初始编程,然后利用执行文件转换 Labview 编程,并编制操作页面,简化操作,并实现结果的可视化。本文通过九宫格加筋板构件的实例,分别计算了分段并行和未并行情况下的时域寿命,证明了所编程序的精确性,该疲劳寿命计算软件可以运用到工程实际中。

参考文献:

[1] 何泽夏. 振动与疲劳[J]. 火箭推进, 1994(3): 14-20.
HE Zexia. Vibration and fatigue [J]. Journal of Rocket Propulsion, 1994(3): 14-20. (in Chinese)

[2] 王强, 陈明. 随机振动仿真分析[J]. 光电技术应用, 2009(5): 77-80.
WANG Qiang, CHEN Ming. Emulation and analysis of random vibration [J]. Electro-Optic Technology Application, 2009(5): 77-80. (in Chinese)

[3] 赵丽茹. 基于应变映射技术的振动疲劳寿命分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

[4] 李成林, 宋莎莎, 韩振南. 基于 nCode Design-Life 的某车架疲劳可靠性分析[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 42-44.
LI Chenglin, SONG Shasha, HAN Zhennan. Fatigue reliability analysis of a frame based on nCode Design-Life [J]. Journal of Graphics, 2014, 35(1): 42-44. (in Chinese)

[5] 张永林. 用谐波叠加法重构随机道路不平顺高程的时域模型[J]. 农业工程学报, 19(6): 32-35.
ZHANG Yonglin. Time domain model of road irregularities simulated using the harmony superposition method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 19(6): 32-35. (in Chinese)

[6] 姜丽丽. 基于傅里叶反变换的路面随机激励时域建模与仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

[7] 王虎. 基于细观力学的振动疲劳研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

[8] 毕鑫. 基于多轴应力等效的振动疲劳寿命预估[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

[9] 董乐义, 罗俊, 程礼. 雨流计数法及其在程序中的具体实现[J]. 航空计测技术, 2004, 24(3): 38-40.
DONG Leiyi, LUO Jun, CHENG Li. Rain flow count method and its realization in the programming [J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 2004, 24(3): 38-40. (in Chinese)

[10] PALMGREN A. Die Lebensdauer Von Kugellagern [J]. Z V er Deut Ing, 1924, 68: 339-341.

[11] MINER M A. Cumulative damage in fatigue [J]. Applied Mechanics, Trans ASME, 1945, 12(3): 159-164.

[12] 李永新. 航空发动机飞行载荷实时雨流计数模型及程序设计[J]. 航空发动机, 1992(1): 14-25.
LI Yongxin. A real-time rain-flow method of cycle counting and its program design for aeroengine service loads [J]. Journal of Aerospace Power, 1992(1): 14-25. (in Chinese)