

用于风机疲劳寿命实时追踪的高阶峰谷识别方法

桂家彬, 李良星, 郭译文

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了满足风电场中实时追踪风力发电机疲劳寿命以减少运维成本的需求, 针对传统应力循环识别算法的实时性不足的缺点, 提出一种新的高阶峰谷识别方法, 通过对风机载荷的峰谷序列数据进行识别, 引入半循环和高阶区间循环的概念, 实现快速准确的疲劳寿命评估。研究表明: 高阶峰谷识别方法的计算精度优于变程均值法, 与雨流计数法相近; 计算响应速度远远高于雨流计数法, 与未采用该方法的计算性能相比, 各风机的计算加速比超过 5 倍。利用高阶峰谷识别法对风机塔架推力与主轴力矩数据进行分析, 计算了风机的等效疲劳载荷和累计疲劳损伤, 结果表明, 随着时间增加, 损伤在初期增长较快, 然后增速逐渐减缓, 各风机累计疲劳损伤增长速度差异较大。高阶峰谷识别法可有效减少疲劳寿命评估的计算时间, 对提高风电机场的安全性和经济性具有一定的意义。

关键词: 风力发电机; 疲劳寿命; 应力循环; 高阶峰谷识别方法; 雨流计数法

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202507010 **文章编号:** 0253-987X(2025)07-0099-09

High-Order Peak-Valley Identification Method for Real-Time Tracking of Wind Turbine Fatigue Life

GUI Jiabin, LI Liangxing, GUO Yiwu

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to meet the demand for real-time fatigue life tracking in wind farms and to reduce operation and maintenance costs, a novel high-order peak-valley identification method is proposed to address the insufficiency of real-time performance in traditional stress cycle identification algorithms. This method identifies peak-valley sequence data of wind turbine loads, introducing the concepts of half-cycles and high-order interval cycles to achieve fast and accurate fatigue life assessment. The research results indicate that the high-order peak-valley identification method achieves better computational accuracy than the variable range mean method and is comparable to the rain flow counting method. Furthermore, its computational response speed far exceeds that of the rain flow counting method, with a computational acceleration ratio of over 5 times compared to performance without this method for each wind turbine. The high-order peak-valley identification method is applied to analyze the tower thrust and main shaft torque data of wind turbines and to calculate the equivalent fatigue load and accumulative fatigue damage. As time increases, damage grows rapidly in the early stages and then gradually slows down, with significant differences in the growth rates of cumulative fatigue damage among different wind

turbines. The high-order peak-valley identification method can effectively reduce the computation time for fatigue life assessment, which is significant for improving the safety and economic efficiency of wind farms.

Keywords: wind turbines; fatigue life; stress cycles; high-order peak-valley identification method; rainflow counting method

风能是重要的可再生能源,风能的高效利用和风电的快速发展对实现“双碳”目标具有重要意义^[1]。基于中国能源转型需求,风电技术正向着大规模、集群化和智能化方向发展,对风电机组的安全性和经济性提出了更高要求。大型风力机组工作环境恶劣,复杂多变的高强应力载荷会给风机带来疲劳损伤^[2]。研究表明,风机疲劳是导致风电机组故障的主要原因^[3],会提高风电场运维成本,减少风机工作寿命,降低风电场可靠性^[4]。因此,分析风机疲劳载荷和追踪风机的疲劳寿命一直是风力发电技术的热点,对减少风电场运维成本,提高风电场经济收益具有重要意义。

疲劳寿命评估的核心在于识别应力载荷中的应力循环^[5]。主流计数法有雨流计数法、峰值计数法、量程计数法等。其中,应用最广的是雨流计数法,该方法的技术过程与材料真实应力-应变特性相符,在材料疲劳寿命评估中有着大量的应用^[6]。雨流计数法的具体过程可参照文献^[7-8]。雨流计数法通过多次遍历峰谷序列,识别出全部的应力循环,其缺点在于计算速度较慢,实时性差。随着风电场实时功率调节优化技术的发展,业界对风电场中监测机组疲劳寿命的实时性也提出了更高的要求^[9-11]。国内外学者对雨流计数法进行了大量改进,例如使用四点雨流计数法和残留点连接法以提高精度^[12]。针对雨流计数法实时性差的问题,一部分学者提出通过载荷加窗减小运行所需空间的方案,Antonopoulos等提出了基于链表的动态分配内存方法进行损伤计算,但这种方法会导致信息缺失,增大测量误差^[13],Chen等考虑了非线性损伤的累积结果,并对窗口长度所导致的预测结果误差进行了研究^[14];另一部分学者提出建立雨流矩阵,存储在持久内存,持久内存是一种结合了快速访问特性和持久存储特性的存储设备^[15]。改进的雨流计数法也已经在电池健康寿命、车用模块热疲劳应力等过程中得到广泛应用^[16-18],机器学习等技术也被应用于风电机场的疲劳寿命计算。He等使用了机器学习的方法对风机载荷的数据进行了学习,从而做到疲劳寿命计算的快速响应^[19];Zhu等基于隐马尔科夫模型和神经网络

建立了疲劳损伤的概率模型,显著降低了长期运行中所需要的计算压力^[20]。然而,机器学习和神经网络模型的机理影响尚不明确,计算结果的泛化能力较弱。因此,改进的雨流计数法和使用机器学习的方法均存在各自的缺憾,难以满足风电机场的实时疲劳计算需求,需要新的改进方法来满足风电机场的监测需求。

本文提出了一种高阶峰谷识别法,该方法通过对峰谷序列数据进行识别,引入半循环的概念进行载荷计算,并扩充区间循环定义,建立完整的疲劳计算方法。该方法在保证计算精度的基础上具有良好的响应速度,可为风电机场的疲劳寿命评估提供有效支持。

1 风机载荷模型与疲劳寿命计算方法

1.1 风机疲劳载荷建模

风电机组运行过程中,风机的疲劳载荷是部件长期受到交变循环应力的结果。已有研究结果^[21-24]表明,传动轴(主轴)和塔架是风力涡轮机中最容易发生结构损坏的部件。因此,对风机的疲劳载荷评估可通过分别评估风机的主轴和塔架的等效疲劳载荷来进行,忽略发电机、叶片、变桨等部件的疲劳载荷。本文选取了某风电机组中100个风机时长为100 s的塔架推力和主轴扭矩数据进行分析。

为简化模型,做出以下假设:①塔架和主轴均使用相同材料;②风机设计寿命所对应的最大循环次数由风机寿命和每年的平均循环次数估算得出。

1.2 风机疲劳寿命计算方法

风机所受疲劳载荷主要为高周疲劳,即材料在低于其屈服强度的循环应力下经历 10^4 以上循环次数产生的疲劳现象。高周疲劳的特点在于其最大循环次数遵循 $S-N$ 曲线,与单轴应力幅值相关。 $S-N$ 曲线可以展示不同应力水平下材料能够承受的循环次数^[25],表达式如下

$$SN^b = C \quad (1)$$

式中: S 为载荷; N 为对应载荷的最大循环载荷次数; b 为疲劳强度指数; C 为材料常数。

$S-N$ 曲线一般是基于平均载荷为0的条件下进

行的,然而由于风电场的风力环境较为复杂且恶劣^[26],应力载荷随机,通常利用计数法识别出应力循环,并使用 Goodman 曲线进行修正^[27],修正公式为

$$1 = \frac{S_{Ai}}{S_i} + \frac{S_{Mi}}{\sigma_B} \quad (2)$$

式中: S_{Ai} 为第一步中计算的第 i 个循环的幅值; S_i 为等效均值为 0 时的载荷幅值; S_{Mi} 为第一步中计算的第 i 个循环的均值; σ_B 为材料在拉伸断裂时的最大载荷。

通过 Goodman 曲线修正,可使用等效疲劳载荷^[28]来表示能造成与实际疲劳载荷相同损伤的假想重复载荷,整个时段内的等效疲劳载荷表达式如下

$$L_N = \left(\sum_{i=1}^{k-1} \frac{S_i^{1/b} n_i}{N_d} \right)^b \quad (3)$$

式中: L_N 为等效疲劳载荷; n_i 为该级载荷的循环次数; N_d 为风电风机设计寿命所对应的循环次数。

对于风电机组的基于损伤优化的实时功率分配策略,会使用另一个衡量指标。根据 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论^[29],各循环所造成的累计疲劳损伤 D 为各循环所造成的损失之和

$$D = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{N_i} \quad (4)$$

式中: D 为所有过往时间内的应力循环对材料造成的损失之和,当其等于 1 时材料会发生断裂; N_i 为经过 Goodman 修正的各级幅值在 $S-N$ 曲线上找到的对应最大循环载荷次数。

本文中 $b = 0.10$, $C = 1.26 \times 10^7 \text{ Pa}$, $\sigma_B = 5 \times 10^7 \text{ Pa}$, $N_d = 4.26 \times 10^7$ 。

2 高阶峰谷识别法

2.1 变程均值计数法

变程均值计数法是计数法中较为简单的一种^[30]。在将载荷数据处理为峰谷值序列后,将序列视作若干半循环处理,定义对应时间序列为 $\{t_i\}_{i=1}^k$, $k \in N$, t_i 表示第 i 个峰谷值所对应的时刻。

另外,将一个半循环视作一个区间循环,可表示为 $[t_i, t_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, k-1$, 即共有 $k-1$ 个区间循环。

对于过程中作用于元件上的载荷变化,每个区间循环都经历从波峰到波谷或波谷到波峰。对所有的区间循环,为提高算法响应速度,认为区间循环中

的峰谷应力变化呈线性,计算区间平均载荷为

$$S_{Mi} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} S(t) dt \approx \frac{S(t_i) + S(t_{i+1})}{2} \quad (5)$$

区间载荷幅值为波峰与波谷的插值,即

$$S_{Ai} = |S(t_i) - S(t_{i+1})| \quad (6)$$

将幅值和均值代入式(2)中进行计算,可获得该应力循环对风机造成的等效疲劳载荷。

变程均值计数法的时间复杂度低,算法响应速度快,适用于风电机组的实时功率调配应用。但是变程均值计数法中仅考虑了相邻峰谷之间的应力循环,容易受到传感器信号噪声或载荷小波动的影响,无法识别完整的应力循环。因此,变程均值法的计算结果往往明显低于雨流计数法,计算精度较低。

2.2 高阶峰谷识别法

为了降低信号噪声以及载荷小波动的影响,本文提出高阶峰谷识别法,用于提高应力循环识别的精度。

按 2.1 节所述,变程均值法中的区间循环仅为相邻两点组成的半循环。本文进一步扩展区间循环的定义,认为上述峰谷区间构成一个一阶区间循环,而形如“峰-谷-峰-谷”的峰谷点序列首尾之间构成一个二阶区间循环。高阶区间循环示意图如图 1 所示,选取了一段应力载荷峰谷值数据作为展示,其中,黑色实线可视为一个半循环,即一阶区间循环。1-4-7 即为二阶区间循环。更进一步,相隔更多采样点可构建三阶及以上的高阶区间循环。

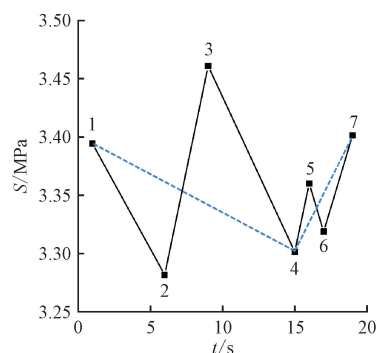


图 1 高阶区间循环示意图

Fig. 1 High-order interval cycle diagram

因此,除了变程均值法中已经得到的一阶区间循环之外,还需对时间序列 $\{t_i\}_{i=1}^k$, $k \in N$ 划分各个高阶区间循环。 r 阶区间循环的切分方式如下。

(1) 正划分。从时间序列中 $t_i = t_1$ 开始,每隔 $2(r-1)$ 个采样点取出下一个采样点(例如,二阶区

间循环由采样点 $t_1, t_4, t_7, \dots, t_{1+3j}$ 分隔)。由于 $2(r-1)$ 为偶数且序列峰谷相间, 因此形成正划分序列 $\{t_{p(j)}\}_{j=1}^{G_r}$, 其中

$$p(j) = 1 + (2r-1)j, \quad j = 1, \dots, G_r \quad (7)$$

$$G_r = \lfloor \frac{k}{2r-1} \rfloor \quad (8)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整函数; G_r 是 j 的最大值。相邻两个元素必然也会形成类似一阶区间循环中峰谷对, 从而作为 r 阶区间循环。

(2) 逆划分。为了更完整地提取低频应力循环的成分, 考虑正划分后未被分入高阶区间循环的末

尾值, 从 $t_i = t_k$ 开始, 每隔 $2(r-1)$ 个采样点取出上一个采样点, 形成逆划分序列 $\{t_{n(j)}\}_{j=1}^{G_r}$ 其中

$$n(j) = k - (2r-1)j, \quad j = 1, \dots, G_r \quad (9)$$

(3) 去重。为了防止对同一区间循环重复进行计算, 若正逆划分的两序列中有元素相同, 则在此划分意义下意味着这两个序列完全相同, 此时仅保留其中的一个序列即可。

该算法用超参数 R 表示所考虑的区间循环的最大阶数, 则对于 R 阶以内的所有区间循环, 按照 1.2 节的疲劳寿命计算方法即可得出任意时间的疲劳损伤情况。高阶峰谷识别法流程图如图 2 所示。

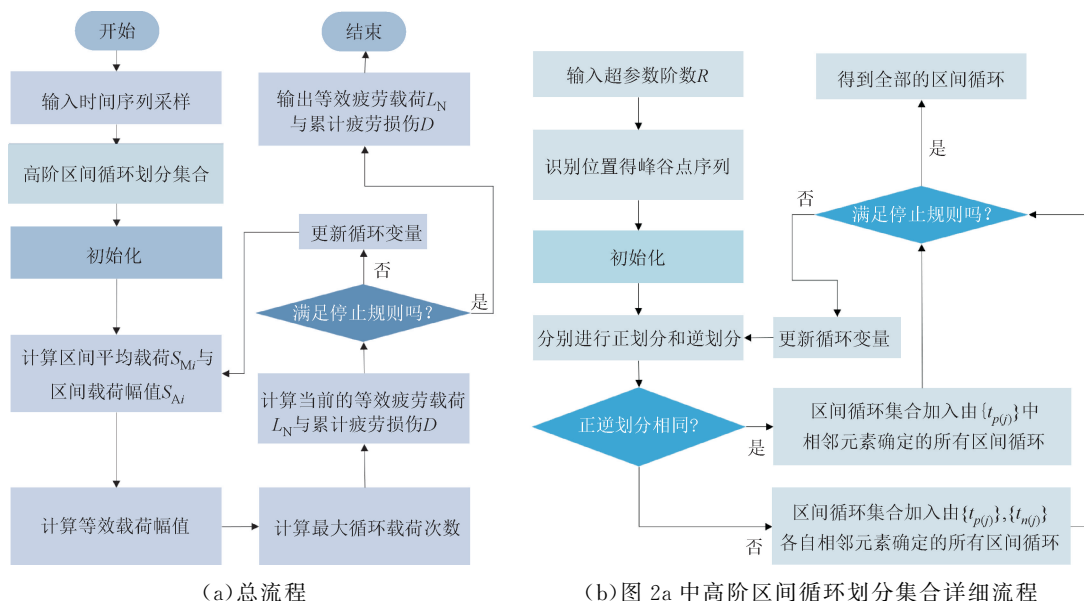


图 2 高阶峰谷识别法详细流程

Fig. 2 High-order peak-valley identification method

值得注意的是, 尽管该序列和正划分后序列确定的高阶区间循环存在相同的覆盖范围, 但其首尾值对应的是不同的应力循环过程, 因此仍可以在求解过程中考虑。对于阶数越高的情况, 其区间循环的时间范围越广, 重叠效应也越显著。因为高阶区间循环的数量较少, 所以并不会引入过大的数值误差。另外, 这种误差只会使计算结果略微大于实际情况, 在实际的监测过程中, 略微偏大的计算结果为风机的安全预警提供相应的容错, 有利于减小事故的发生概率。

3 算法验证与比较

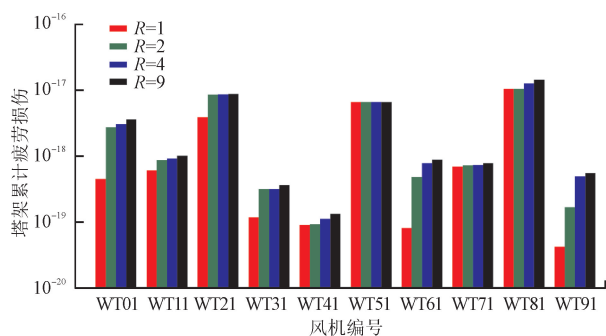
3.1 高阶峰谷识别法的超参数 R 敏感性分析

在本文提出的高阶峰谷识别法中, 所选择的高阶区间循环的最大阶数用超参数 R 来表征。显然, R

越大, 该算法越能够提取到更为全面的应力特征, 在计算结果中获得更高精度。然而, 盲目提高 R 会造成计算资源的过度消耗, 不利于实现高速计算。因此, 明确 R 的取值对于模型性能具有重要影响。

以 1~100 s 内塔架推力累计疲劳损伤值的计算任务为例, 对风机编号 (WT) 为 1, 11, 21, $\dots$, 91 的 10 台风机进行计算, 超参数 R 分别取 1, 2, 4, 9, 结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着 R 增大, 计算出的塔架推力等效疲劳载荷整体逐渐增大, 增速呈先快后慢的趋势, 计算所得的曲线逐渐收敛。这表明, 模型提取的交变应力载荷成分越来越接近实际情况。图 3 中 $R = 4$ 和 $R = 9$ 对应的两条曲线已经几乎完全重合, 因此进一步增大 R 对结果的改进效果有限, 故以下均取 $R = 4$, 以保持求解精度与效率之间的平衡。

图3 R 的无关性验证结果Fig. 3 Results of R -value independence verification

3.2 算法计算精度验证与分析

为验证所提出的高阶峰谷识别法的计算准确性,本文通过自编程的方式,分别使用雨流计数法、变程均值计数法和高阶峰谷识别法对风机的主轴扭矩和塔架推力数据进行疲劳寿命的计算,对比结果如图4所示。

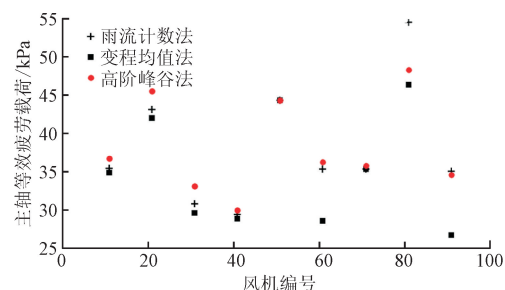
选取风机编号为11,21,...,91的9台风机进行计算,图4(a)~4(d)分别对应1~100 s内每台风机主轴等效疲劳载荷、主轴累计疲劳损伤、塔架等效疲劳载荷、塔架累计损伤的计算结果。

如图4(a)所示,采用3种算法对主轴的等效疲劳载荷的计算结果呈现相似的趋势,说明算法能够有效计算对应疲劳指标,追踪主轴的疲劳寿命。以雨流计数法的等效疲劳载荷计算结果为参照,变程均值法的计算结果明显小于雨流计数法,平均相对误差达到了7.4%。这是因为变程均值法只计算了相邻半循环,导致小波动的信号误差对计算结果造成较大的影响,无法有效识别完整的应力循环。本文提出的高阶峰谷识别法的计算结果平均相对误差为3.9%,更接近雨流计数法的数据结果,在计算精度上可以满足主轴疲劳寿命评估的需求。

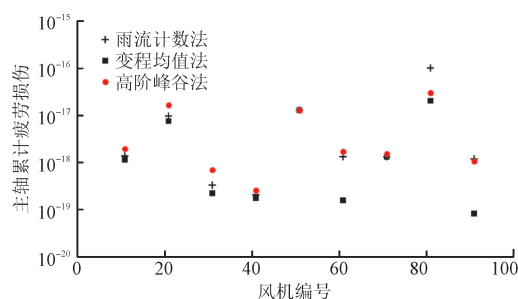
图4(b)显示了塔架的等效疲劳载荷计算结果,变程均值法计算结果明显偏小,高阶峰谷识别法计算结果更接近雨流计数法,变程均值法与高阶峰谷识别法相对于雨流计数法分别增加了21.7%和10.8%。有少部分风机塔架的计算结果中,高阶峰谷识别法的结果明显小于雨流计数法。可能的原因是塔架的应力过程中存在更多频率低的应力循环。

图4(c)、图4(d)分别给出了主轴和塔架的累计疲劳损伤的计算结果,相对于变程均值法,高阶

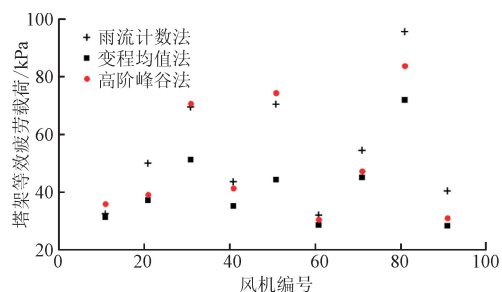
峰谷识别法的计算结果精度更接近雨流计数法。以雨流计数法计算结果为参照,累计疲劳损失的平均绝对误差见表1。高阶峰谷法对累计疲劳损伤的计算精度也优于变程均值法,接近雨流计数法的结果。



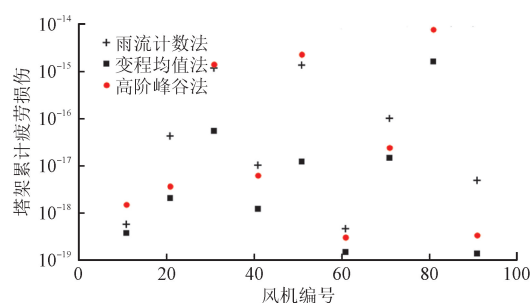
(a) 主轴等效疲劳载荷



(b) 主轴累计疲劳损伤



(c) 塔架等效疲劳载荷



(d) 塔架累计疲劳损伤

图4 100 s内3种方法的等效疲劳载荷与累计疲劳损伤计算结果的对比

Fig. 4 Calculation results of equivalent fatigue loads and cumulative fatigue damage values for three methods within 100 s

表1 相对于雨流计数法的累计疲劳损伤平均绝对误差的对比

Table 1 Comparison of cumulative fatigue damage average absolute error relative to RCM

部件	雨流计数法累计 疲劳损伤/ 10^{-19}	累计疲劳损伤 平均绝对误差/ 10^{-19}	
		变程均值法	高阶峰谷法
风机1主轴	28.83	2.02	1.45
风机51主轴	229.17	14.70	9.14
风机1塔架	82.81	1.52	1.36
风机51塔架	653.32	1.49	1.21

另外,为显示风机疲劳寿命随时间的变化情况,使用3种方法对累计疲劳损伤在0~100 s内的增长过程进行计算,如图5所示。

图5(a)、图5(b)中分别为主轴和塔架的累计疲劳损伤增长过程,对应的风机编号为25、50、75、100。认为初始状态($t=1$ s)下的疲劳损伤为0,从第2 s开始计算风机主轴和塔架疲劳损伤的增长过程。

由图5可知,随运行时间的增加,风机整体上损伤程度逐渐增加。但是针对不同风机,其累计疲劳损伤增长速度存在较大的差异,主要是因为在大风电场中,大气中的湍流、局部地形影响和上游风机的尾流会使风机所受载荷各不相同^[31]。因此,监测不同风机的疲劳状态对风电场的安全运行具有重要意义,且高阶峰谷识别法可有效追踪风机疲劳寿命的增长过程。

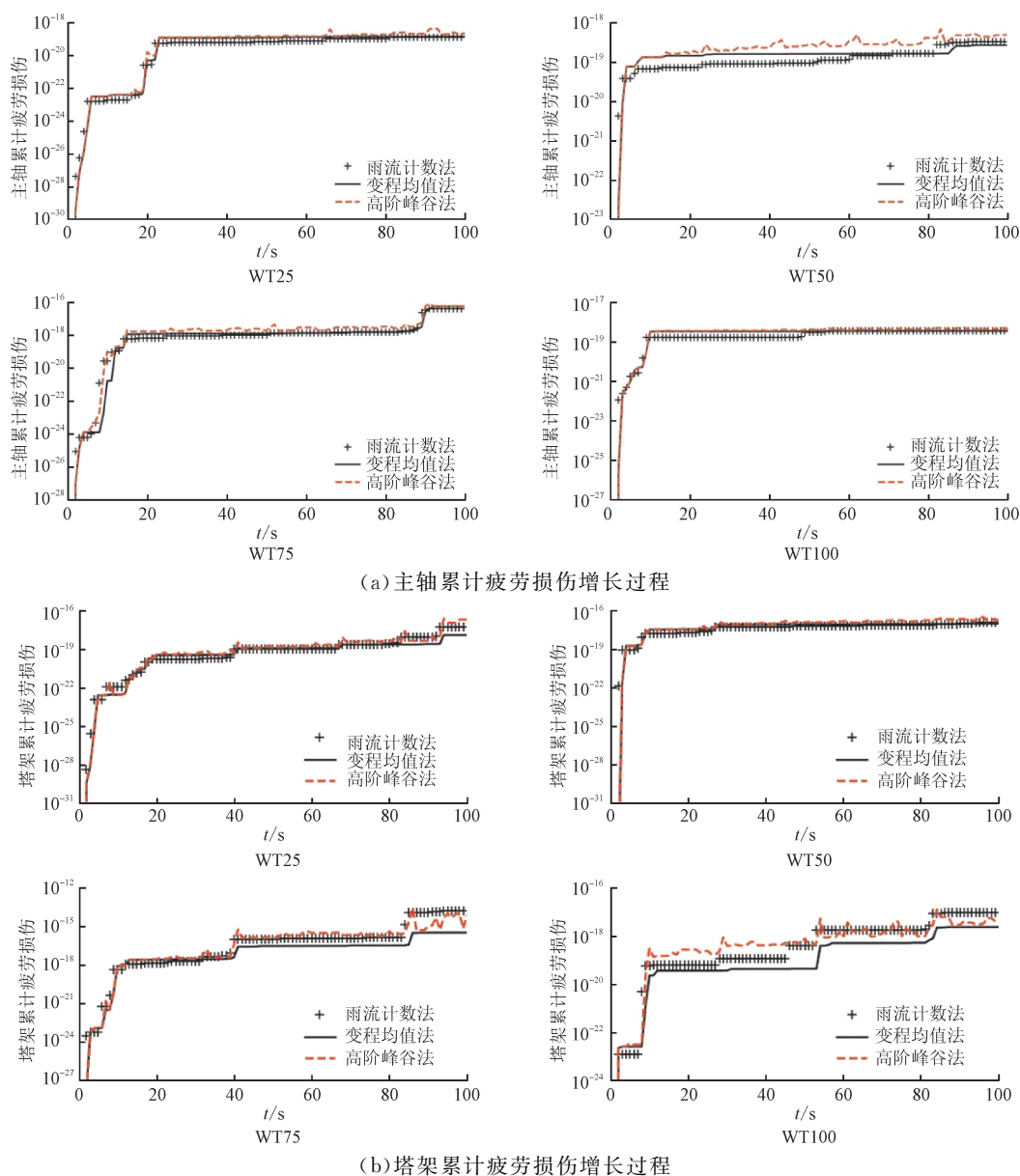


图5 0~100 s时3种方法下的累计疲劳损伤的增长过程

Fig. 5 Cumulative fatigue damage growth process of three methods from 0 to 100 s

3.3 算法响应速度比较

在验证高阶峰谷识别法具有足够的计算精度后,对高阶峰谷识别法与雨流识别法的响应速度进行比较,对100 s内风机编号为1~8的8台风机的累计疲劳损伤进行计算,并记录计算所需时间,如图6所示。加速比为雨流计数法的响应时间与高阶峰谷识别法的响应时间之比。

由图6可以看出,高阶峰谷识别法的计算速度明显快于雨流计数法,加速比均在5倍以上,因此可以认为本文提出的高阶峰谷识别法的实时性远优于雨流计数法,可以应用于实时追踪风机的实时状态,从而为风机实时功率优化和提高经济收益提供数据支撑。

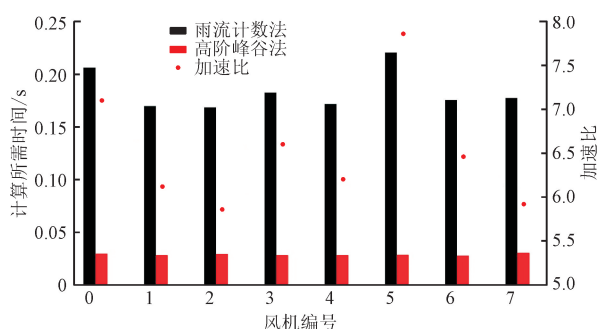


图6 高阶峰谷识别法与雨流计数法的响应时间对比

Fig. 6 Comparison of response times between high-order peak-valley identification method and RCM

4 结 论

为实时追踪风机疲劳寿命,降低风电场运维成本,本文提出一种新的高阶峰谷识别法,识别风机载荷的峰谷序列数据,引入半循环和高阶区间循环的概念进行载荷计算,实现快速准确的风机疲劳寿命评估,主要结论如下。

(1)通过引入高阶区间循环和超参数 R ,高阶峰谷识别法可快速有效识别完整的应力循环。以主轴等效疲劳载荷为例,高阶峰谷识别法的相对误差仅为3.9%,远低于变程均值法的7.4%;其计算速度比传统雨流计数法快5倍以上。

(2)利用高阶峰谷识别方法对风机塔架推力与主轴力矩数据进行分析,结果表明,随运行时间增加,初期损伤增长较快,然后增速逐渐减缓。

参考文献:

[1] ROGA S, BARDHAN S, KUMAR Y, et al. Recent technology and challenges of wind energy generation: a

review [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52(Part C): 102239.

[2] WANG Ni, LI Jian, YU Xiang, et al. Optimal active and reactive power cooperative dispatch strategy of wind farm considering levelised production cost minimisation [J]. Renewable Energy, 2020, 148: 113-123.

[3] 李特, 王荣喜, 高建民. 风电机组数据采集与监控系统异常数据识别方法 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(3): 106-116.

LI Te, WANG Rongxi, GAO Jianmin. A method for abnormal data recognition of wind turbine supervisory control and data acquisition systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(3): 106-116.

[4] 葛畅, 阎洁, 刘永前, 等. 海上风电场运行控制维护关键技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4278-4291.

GE Chang, YAN Jie, LIU Yongqian, et al. Review of key technologies for operation control and maintenance of offshore wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4278-4291.

[5] MUNIZ-CALVENTE M, ÁLVAREZ-VÁZQUEZ A, PELAYO F, et al. A comparative review of time-and frequency-domain methods for fatigue damage assessment [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 163: 107069.

[6] PARAFOROS D S, GRIEPENTROG H W, VOUGIOUKAS S G, et al. Fatigue life assessment of a four-rotor swather based on rainflow cycle counting [J]. Biosystems Engineering, 2014, 127: 1-10.

[7] AMZALLAG C, GEREY J P, ROBERT J L, et al. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis [J]. International Journal of Fatigue, 1994, 16(4): 287-293.

[8] MCINNES C H, MEEHAN P A. Equivalence of four-point and three-point rainflow cycle counting algorithms [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(3): 547-559.

[9] TAO Tao, YANG Yi, YANG Taolue, et al. Time-domain fatigue damage assessment for wind turbine tower bolts under yaw optimization control at offshore wind farm [J]. Ocean Engineering, 2024, 303: 117706.

[10] 金鑫, 王亚明, 李浪, 等. 基于LQG的独立变桨控制技术对风电机组气动载荷影响研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6164-6170.

JIN Xin, WANG Yaming, LI Lang, et al. Dynamics loads optimization analysis of wind turbine based on LQG independent pitch control [J]. Proceedings of the

- CSEE, 2016, 36(22): 6164-6170.
- [11] 刘颖明, 赵哲, 王晓东, 等. 考虑机组疲劳载荷的风电集群有功功率分配方法 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 430-436.
- LIU Yingming, ZHAO Zhe, WANG Xiaodong, et al. Active power distribution method for wind farm cluster based on cluster analysis [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2021, 42(5): 430-436.
- [12] MARSH G, WIGNALL C, THIES P R, et al. Review and application of Rainflow residue processing techniques for accurate fatigue damage estimation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 82(Part 3): 757-765.
- [13] ANTONOPOULOS A, D'ARCO S, HERNES M, et al. Challenges and strategies for a real-time implementation of a rainflow-counting algorithm for fatigue assessment of power modules [C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 2708-2713.
- [14] CHEN Jie, IMANIAN A, WEI Haoyang, et al. Piecewise stochastic rainflow counting for probabilistic linear and nonlinear damage accumulation considering loading and material uncertainties [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 140: 105842.
- [15] OBERMAYR M, RIESS C, WILDE J. A novel online 4-point rainflow counting algorithm for power electronics [J]. *Microelectronics Reliability*, 2021, 120: 114112.
- [16] 宾洋, 于静美, 朱英凯, 等. 实时雨流计数法及其在钴酸锂电池健康状态建模中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3627-3635.
- BIN Yang, YU Jingmei, ZHU Yingkai, et al. A real-time rain flow algorithm and its application to state of health modeling for LiCoO₂ lithium-ion batteries [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12): 3627-3635.
- [17] FIORITI D, SCARPELLI C, PELLEGRINO L, et al. Battery lifetime of electric vehicles by novel rainflow-counting algorithm with temperature and C-rate dynamics: effects of fast charging, user habits, vehicle-to-grid and climate zones [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 59: 106458.
- [18] 项恩耀, 卢倚平, 罗皓泽, 等. 车用功率模块热疲劳应力的高精度在线提取方法与实证 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8991-9002.
- XIANG Enyao, LU Yiping, LUO Haoze, et al. High-precision online extraction method and demonstration of thermal fatigue stress of automotive power modules [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(22): 8991-9002.
- [19] HE Ruiyang, YANG Hongxing, SUN Shilin, et al. A machine learning-based fatigue loads and power prediction method for wind turbines under yaw control [J]. *Applied Energy*, 2022, 326: 120013.
- [20] ZHU Dongping, DING Zhixia, HUANG Xiaogang. Probabilistic model for fatigue damage estimation of wind turbines with hidden Markov model and neural network [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 310(Part 1): 118663.
- [21] MANWELL J F, MCGOWAN J G, ROGERS A L. Wind energy explained: theory, design and application [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2009: 95-96.
- [22] ZHAO Jie, FANG Yudi, HE Yuqin, et al. Active power control strategy of wind farm considering fatigue load of wind turbines [J]. *Energy Reports*, 2021, 7(S7): 1466-1476.
- [23] 杨伟峰, 文云峰, 李立, 等. 考虑疲劳载荷的风电场分散式频率响应策略 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 55-62.
- YANG Weifeng, WEN Yunfeng, LI Li, et al. Decentralized frequency response strategy for wind farm considering fatigue load [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(4): 55-62.
- [24] 宋子秋, 冯翰宇, 余照国, 等. 基于模型预测控制的半潜漂浮式风机协调控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4330-4338.
- SONG Ziqiu, FENG Hanyu, YU Zhaoguo, et al. Coordinated control of semi-submersible floating turbine with model predictive control strategy [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(12): 4330-4338.
- [25] MURAKAMI Y, TAKAGI T, WADA K, et al. Essential structure of S-N curve: prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter [J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 146: 106138.
- [26] 姚钢, 杨浩猛, 周荔丹, 等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 33-47.
- YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(21): 33-47.
- [27] ZHANG Y, LU T. Study of the quantitative assessment method for high-cycle thermal fatigue of a T-pipe under turbulent fluid mixing based on the coupled CFD-FEM method and the rainflow counting method [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 309: 175-196.

- [28] FENG Zheng, LI Chuanxi, HE Jun, et al. Static and fatigue test on lightweight UHPC-OSD composite bridge deck system subjected to hogging moment [J]. *Engineering Structures*, 2021, 241: 112459.
- [29] CHEN Nianzhong, WANG Ge, GUEDES SOARES C. Palmgren-miner's rule and fracture mechanics-based inspection planning [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(18): 3166-3182.
- [30] 邢广鹏. 循环计数法在航空发动机载荷谱统计中的适用性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [31] MEYERS J, BOTTASSO C, DYKES K, et al. Wind farm flow control: prospects and challenges [J]. *Wind Energy Science*, 2022, 7(6): 2271-2306.
- (编辑 武红江)