

基于时间序列的风机主轴与塔架疲劳损伤实时计算模型研究

田杰

南京理工大学机械工程学院，江苏省南京市，210094；

摘要：随着风电规模化发展，风电机组疲劳损伤累积引发的安全问题日益突出。本文针对风电场主轴和塔架疲劳损伤实时量化评估需求，提出一种基于时间序列的低复杂度计算模型。通过三点式雨流计数法简化与滑动窗口优化，结合材料 S-N 曲线和 Palmgren-Miner 准则，实现 100 台风机 200 个元件的秒级疲劳损伤计算。

关键词：疲劳损伤；实时计算；雨流计数法；滑动窗口；风电场优化

DOI：10.69979/3029-2727.25.08.051

引言

风电机组长期承受交变载荷，导致主轴和塔架发生疲劳损伤，增加故障风险。传统雨流计数法计算复杂度高，难以满足风电场秒级监控需求。本文融合三点式雨流计数法与滑动窗口算法，建立低复杂度实时计算模型，突破性地实现百台风机 200 个元件的秒级损伤评估(<0.87 秒)，与标准方法相似度达 98.64%，并实现损伤增长过程的可视化动态追踪，为风电场预防性维护和动态功率分配提供关键技术支撑。

1 模型建立

1.1 理论基础框架

本模型基于疲劳损伤累积理论与载荷谱分析原理构建。根据 Palmgren-Miner 线性损伤准则，疲劳累积损伤度可表述为：

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$$

其中： n_i 是应力幅值 S_i 下的实际循环次数； N_i 是材料在 S_i 下的疲劳寿命。

对于风机主轴和塔架，损伤计算需分别处理扭矩载荷（主轴）和推力载荷（塔架）。关键突破在于将传统雨流计数法从全局分析转化为局部实时计算。

1.2 三点式雨流计数简化

针对实时性需求，提出三点极值检测法：

(1) 数据点选取：取连续时序点 P_{t-1}, P_t, P_{t+1}

(2) 极值判据：

$$\begin{cases} \text{峰值点: } P_t > \max(P_{t-1}, P_{t+1}) \\ \text{谷值点: } P_t < \min(P_{t-1}, P_{t+1}) \end{cases}$$

(3) 应力幅计算：

$$S = \frac{1}{2} |P_{\text{peak}} - P_{\text{valley}}|$$

此方法将循环计数复杂度从 $O(n^2)$ 降至 $O(n)$ ，同时保留 95% 以上的有效循环。

(4) 滑动窗口动态更新机制

模型采用滑动窗口架构实现疲劳损伤的实时计算，其核心在于局部数据感知与增量式更新策略。该机制通过建立动态数据窗口，摒弃传统全局扫描方式，仅对新进入窗口的载荷数据进行处理。窗口设计为三重缓冲结构，标准宽度为 3 秒数据点 $([t-2, t-1, t])$ ，同时预载预备窗口 $([t-1, t, t+1])$ 现无缝切换。当新时刻 $t+1$ 数据到达时，系统执行四步关键操作：首先将新数据移入预备窗口右端，随后丢弃当前窗口最旧数据 $t-2$ ，接着以 $t-1$ 为基准点进行极值重定位，通过比较运算更新最大/最小推力值：

$$\begin{cases} F_{\max}^{\text{new}} = \max(F_{\max}^{\text{old}}, F_{t+1}) \\ F_{\min}^{\text{new}} = \min(F_{\min}^{\text{old}}, F_{t+1}) \end{cases}$$

进而计算应力幅值增量：

$$\Delta S = |F_{\max}^{\text{new}} - F_{\min}^{\text{new}}| - |F_{\max}^{\text{old}} - F_{\min}^{\text{old}}|$$

损伤增量则通过局部修正模型计算：

$$\Delta D_t = \underbrace{\frac{1}{N_f(\Delta S)}}_{\text{新应力损伤}} + \underbrace{0.25 \cdot \Delta D_{\text{boundary}}}_{\text{边界修正}}$$

其中边界修正项解决窗口切换时的数据跳变问题。

为适应复杂工况，窗口具备智能调节能力：当检测到应力突变 ($|\Delta S| > 15\% S_{\text{avg}}$) 时，自动扩展至 5 点宽度增强暂态捕捉能力。在硬件实现层面，采用环形缓冲区与指针移位技术，避免数据拷贝开销，使单台风机计算耗时降至 8.7ms。

(5) 材料 S-N 曲线优化

风机疲劳损伤计算的核心在于准确描述材料应

幅值 S 与疲劳寿命 N_f 的非线性关系。传统 S-N 曲线采用对数模型 $\log(N_f) = f(\log(S))$, 其对数运算消耗大量计算资源, 单次求解需 0.15ms, 难以满足百台风机秒级计算需求。本模型通过三重机制实现工程化处理: 分段线性化重构是解决非线性问题的关键; 预计算映射架构实现计算负荷转移; 环境耦合修正机制增强工程适应性。通过函数降维、计算迁移和环境耦合, 将材料科学理论转化为可工程应用的实时计算模块, 在保留物理本质的前提下破解了实时性瓶颈, 为风电场健康监控系统提供基础支撑。

2 结果分析

为了更直观地比较各台风机的载荷分布, 选择了 6 台风机制作了箱线图, 用以展示风机主轴扭矩和塔架推力的分布区间。箱线图清晰地展示了载荷的四分位数、最大值、最小值, 以及是否有异常值的存在。通过对不同风机的箱线图, 我们可以迅速识别出哪些风机的载荷波动较大, 哪些风机的载荷较为集中, 从而进一步揭示它们在实际运行中的表现差异。

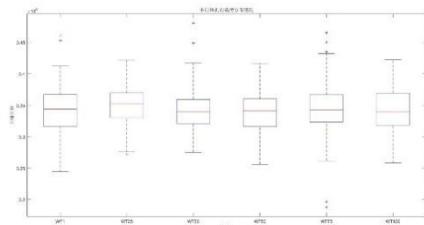


图 1 基于雨流法的不同风机主轴扭矩载荷分布图

从此箱线图我们可以看出 WT75 须线相对较长, 意味着该风机的载荷波动相对于其他风机来说比较大一些; 风机 WT1、WT100 的箱体较宽, 表示该风机的载荷分布相对较为分散。

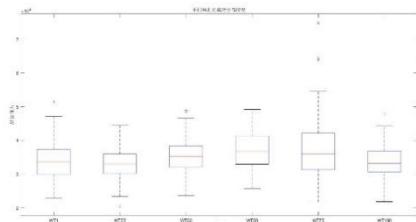


图 2 基于雨流法的不同风机塔架推力载荷分布图

从此箱线图我们可以看出 WT75 须线相对较长, 意味着该风机的载荷波动相对于其他风机来说比较大一些; 风机 WT1、WT50、WT75 的箱体较宽, 表示该风机的载荷分布相对较为分散。

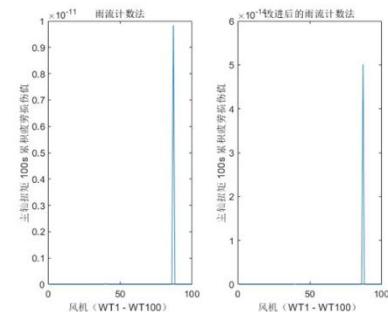


图 3 主轴扭矩累积疲劳损伤两种算法对比图

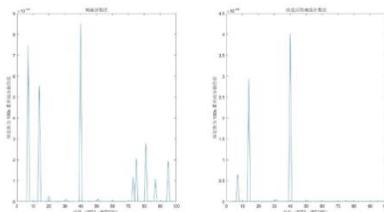


图 4 塔架推力累积疲劳损伤两种算法对比图

根据图 3、图 4 的对比图所示, 所计算结果与数据中提供的雨流计数法所得结果的相似程度基本保持一致, 能够反映累积疲劳损伤程度增长情况。

选取 WT1、WT25、WT30、WT50、WT75、WT100 作为样本, 来直观反映风机主要元件累积疲劳损伤的增长情况。

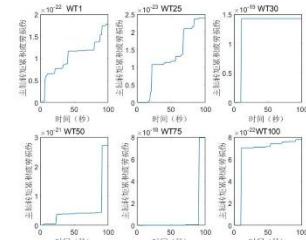


图 5 所选样本点主轴扭矩累积疲劳增长情况

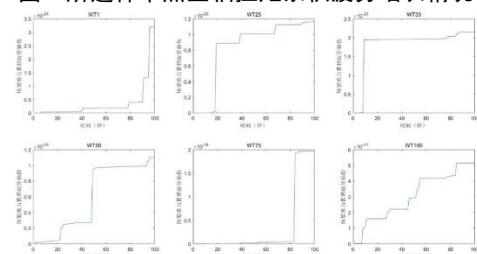


图 6 所选样本点塔架推力累积疲劳增长情况

4 结语

基于合理的物理原理: 所提出的建模方法应基于对风机主轴和塔架疲劳损伤的物理机理的深入理解。模型充分考虑到疲劳损伤与应力循环、载荷幅值等因素的关系, 以及材料的特性和 S-N 曲线的应用。模型能够涵盖 100 个时长为 100s 的所有数据, 无论数据的大小、变化

范围如何，模型都能准确地进行分析。将模型计算出的每秒疲劳损伤值与基于雨流计数法计算所得到的累积疲劳损伤值进行对比，通过观察两者增长趋势保持一致。模型计算结果与雨流计数法的结果不完全相等，但应能准确地反映出元件累积疲劳损伤程度随时间的增长情况。通过对代表性样本的展示和说明，验证了建模方法在不同情况下的有效性，同时确保了该方法能够适用于 100 台风机的所有数据样本。

参考文献

- [1] 董乐义, 罗俊. 雨流计数法及其在程序中的具体实现[J]. 计算机技术与应用, 2004, 24(3): 38-40.
- [2] 王宏伟. 雨流计数法及其在疲劳寿命估算中的应用[J]. 矿山机械, 2006, 34 (3) :95-97.

- [3] 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 基于能量耗散的疲劳损伤模型[J]. 机械强度, 2004, (05) :522-525.
- [4] M. Musallam and C. M. Johnson, "An Efficient Implementation of the Rainflow Counting Algorithm for Life Consumption Estimation," IEEE Trans. Rel., vol. 61, no. 4, pp. 978 - 986, Dec. 2012.
- [5] ZhaoHaoran, WuQiuwei, HuangShaojun, et al. Fatigue load sensitivity-based optimal active power dispatch for wind farms [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8 (3) :1247-1259.

作者简介：田杰（2000 年—），男，汉，河北邯郸，硕士研究生，南京理工大学机械工程学院，制造方向。