

海上风电塔筒疲劳寿命理论预测方法研究

杨 扬

华电重工机械有限公司 天津市 300402

摘 要：随着海上风电机组向大功率和远海深水方向发展，塔筒结构所承受的载荷类型愈加复杂，疲劳问题逐渐成为其设计寿命评估中的关键限制因素。现有疲劳寿命预测方法多采用Miner线性累积模型，但该方法在面对风、浪、流等多源不规则载荷耦合作用时存在明显局限，难以准确反映结构真实的疲劳损伤演化过程。本文结合海上风电塔筒的服役环境特征，梳理其疲劳载荷谱的时变特性与应力响应模式，在此基础上构建基于非线性损伤累积的理论预测模型。通过对比分析不同疲劳敏感部位的应力演化趋势与寿命分布规律，进一步明确边界条件、焊接接头形式与材料性能对疲劳寿命的影响机制。研究结果为海上风电塔筒结构的安全性评估与全生命周期设计提供了理论支撑。

关键词：海上风电；塔筒结构；疲劳寿命；非线性累积；寿命预测

引言

海上风电作为实现“双碳”战略目标的重要支撑方向，近年来在全球范围内呈现快速发展态势。为满足远海深水环境中更大装机容量的需求，风电机组塔筒结构不断向高强度、大直径方向演进，受力复杂性显著提升。在波浪、风载与潮流等不规则循环载荷长期耦合作用下，塔筒容易发生低应力高频次的疲劳损伤。相较于陆上风电结构，海上塔筒服役环境更加恶劣，疲劳寿命问题已逐渐成为其设计与运维的核心挑战之一。

目前，塔筒疲劳寿命的分析方法主要基于Palmgren-Miner线性损伤叠加理论，并辅以S-N曲线数据库进行寿命评估。这类方法在理论结构清晰、应用便捷方面具有优势，但在面对真实载荷工况与结构响应耦合时，往往不能充分反映损伤非线性积累与应力不确定性因素的影响。此外，不同材料、焊接工艺及边界条件对局部疲劳性能的削弱效应也未能在模型中得到有效表达，导致实际寿命预测结果偏保守或不准确。

为提升疲劳寿命预测的科学性与适用性，亟需构建更贴合实际工况的理论模型，涵盖载荷时变特征、局部应力放大效应与非线性损伤演化过程。本文以海上风电塔筒为研究对象，从理论层面对疲劳破坏机制进行系统解析，重点探讨疲劳寿命的构成路径与影响变量，旨在为塔筒结构设计优化与规范模型改进提供理论基础与方向指导。

1. 海上风电塔筒疲劳破坏特征与研究现状

1.1 疲劳载荷特性分析

海上风电塔筒在全生命周期中需承受多种类型的循

环载荷，其中以风载、波浪力与潮流激励的组合作用最为典型。这些外部载荷具有显著的时变性与不确定性，尤其是波浪荷载呈现周期性叠加与非高斯分布特征，导致结构应力响应存在多频次、低幅值的不规则波动。在这种载荷背景下，塔筒结构虽难以发生瞬时破坏，但长期的微小应力累积将对焊缝、连接段及开孔区域等局部构造造成疲劳损伤。

此外，海上塔筒的基础形式通常采用单桩或导管架型结构，与塔筒形成刚柔过渡连接，进一步放大了结构底部的动响应。塔筒中部与上部则受机舱回转与风向变化影响，局部扭转与轴向拉压交替出现，构成典型的多轴应力场。与陆上塔架相比，海上风电塔筒更易在全结构范围内产生分布广泛的微观裂纹演化过程，因此其疲劳载荷特性必须以全时程、全空间视角予以刻画。

1.2 疲劳失效模式与影响机制

从结构破坏路径来看，海上风电塔筒的疲劳失效大多起始于焊接接头、法兰连接、门框开口及应力集中区。这些部位由于构造不连续性以及几何尺寸变化，容易在循环荷载作用下产生应力集中，从而形成微裂纹并逐步扩展。在实际工程案例中，多数疲劳破坏呈现“低应力-高循环”的渐进式损伤特征，其初始阶段难以通过常规检测手段识别，最终可能在服务期中后期快速恶化并演变为不可控断裂。

影响塔筒疲劳寿命的因素包括材料强度等级、焊缝残余应力、制造精度、安装误差与服役环境等。其中，焊缝区域的不均匀性与残余应力分布是造成疲劳寿命波动的核心原因之一。不同制造工艺下形成的焊接热影响

区可能具备截然不同的疲劳强度等级，且与S-N曲线标准值存在一定偏差。此外，海洋环境中的腐蚀作用亦会加速表面裂纹扩展速度，从而缩短塔筒的有效疲劳寿命。以上因素共同作用，构成了海上塔筒疲劳演化路径中的关键环节。

1.3 国内外研究进展与不足

针对塔筒疲劳寿命问题，国际上已有较为成熟的理论框架和分析工具。欧美国家普遍采用DNVGL-RP-C203和IEC 61400系列规范进行结构疲劳验算，并配合有限元软件进行应力响应分析与寿命评估。研究方法多以Miner线性累积理论为基础，结合实测载荷谱与S-N曲线进行预测。部分研究开始探索基于断裂力学的寿命评估方法，以应对焊接缺陷、表面裂纹及多轴疲劳问题。

在国内，疲劳研究主要集中于局部应力分析与有限元模拟层面，相关成果逐步拓展到焊接工艺、检测方法及运维监测等方向。然而，目前大多数研究仍依赖于线性理论模型，缺乏对海洋环境下非线性累积过程与多源扰动相互作用的系统性建模。同时，对结构细节变化、焊缝等级影响与长期荷载响应的不确定性考虑不足，导致预测结果在工程应用中可靠性不高，存在偏保守或偏宽松的问题。

总体来看，现有疲劳寿命评估方法在工程可操作性方面已具备一定基础，但在应对复杂服役条件、非线性演化机制与高不确定性载荷情形时仍显不足。为提升预测精度与适应性，后续研究需聚焦模型本构关系的优化、参数辨识方法的改进以及多工况下理论模型的融合发展。

2. 疲劳寿命理论预测方法构建

2.1 生命周期疲劳累积过程建模

疲劳寿命本质上是一种受应力循环影响的逐步损伤累积过程。对于海上风电塔筒而言，其全生命周期内经历的不规则、多源载荷作用显著不同于实验室条件下的标准疲劳试验环境。因此，寿命预测模型必须以实际工况为依据，建立能够反映长期应力演化与损伤增长路径的理论框架。

传统疲劳寿命分析多以Palmgren-Miner线性累积理论为基础，该理论假设每一应力幅值下的疲劳损伤与其循环次数成正比，且各级载荷引起的损伤可线性叠加。该方法简便易用，但忽略了应力路径、加载顺序及应力幅值之间的耦合关系。在海上风电塔筒中，载荷频率、幅值及持续时间均存在显著波动，结构响应呈现出非恒定特征，导致线性模型对寿命的预测常出现偏差。

因此，疲劳寿命理论模型的构建应涵盖三个基本阶段：首先，定义服役周期内的载荷谱，并进行有效分类

与离散化处理；其次，根据应力响应特征划分疲劳敏感区段，提取对应应力幅值与循环次数；最后，引入非线性累积函数以代替传统线性累加方法，从而更真实地反映塔筒在多工况扰动下的损伤演化机制。

2.2 荷载谱简化与等效应力力处理

海上风电塔筒所承受的载荷具有典型的非稳定性特征，必须通过合理的谱化方法转换为可识别的疲劳输入。常用的处理方式包括雨流计数法与等效应力力法。前者通过对实测时程信号进行循环识别与分类，提取出不同应力幅值对应的循环次数分布，是目前工程界应用最为广泛的方法之一。后者则通过对整段时程信号进行统计处理，将所有不规则波动转化为等效的恒幅载荷，便于与S-N曲线进行匹配分析。

在理论预测过程中，应力响应数据需进行时间域与频域的联合处理。一方面，结构在随机波浪作用下产生的短周期冲击载荷易诱发局部疲劳；另一方面，长周期风致响应又可能改变结构的变形趋势与初始应力状态。因此，应力谱的处理不宜仅基于单一时间窗口，而应采用多尺度分段方式进行拟合。

此外，在焊接连接、门框开孔与法兰结合处，应力集中现象显著，其局部应力幅值远高于整体结构平均应力。为提升模型精度，需在理论模型中引入应力放大系数，对这些敏感部位予以单独计算与处理。通过局部细化与整体平均相结合的方式，可以更准确地反映塔筒结构在复杂载荷作用下的疲劳响应状态。

2.3 非线性累积损伤模型建立

考虑到海上服役环境中的应力变幅效应与损伤路径依赖特性，单一的线性累积方法难以满足高精度寿命评估的要求。近年来，学者们提出了多种基于非线性演化理论的疲劳损伤模型。其中，Chaboche模型、Miner-OK模型及能量耗散型模型在多个研究中展现出良好的理论适应性与工程可推广性。

在本研究中，拟采用非线性累积方式引入应力幅值修正函数，构建如下分析框架：将每一级应力幅值下的损伤贡献视为一个递减或加权变量，其大小与前一循环的加载路径、卸载位置及残余应力状态相关。这一方法能够有效模拟塔筒在多源扰动中呈现出的“加载-卸载-再加载”模式，避免传统方法中损伤评估偏大的问题。

3. 疲劳影响因素与理论分析

3.1 材料强度与焊缝质量因素

海上风电塔筒的疲劳寿命不仅取决于外部载荷谱的特征，还与结构本体的材料属性密切相关。当前塔筒钢

材主要选用Q345、Q420以及更高等级的高强钢，这些材料具备较高的屈服强度与承载能力，但在疲劳性能方面存在差异。高强钢在微裂纹萌生阶段表现出较大的应力敏感性，裂纹扩展速率亦随应力幅值上升而显著增加，若未在设计中引入合理的安全系数，容易导致疲劳寿命被高估。

焊缝作为连接结构的重要节点，是疲劳破坏最频发的位置。焊接工艺的热影响区往往存在组织不均、硬度变化和残余应力集中等问题，成为裂纹萌生的首要诱因。不同焊接方法如埋弧焊、气体保护焊对焊缝成形质量与残余应力水平有不同影响，进而影响疲劳强度。理论上，疲劳寿命对焊接接头处应力集中系数高度敏感，在荷载循环数较高的情况下，即使微小的焊缝缺陷也可能显著缩短结构服役年限。因此，在理论模型中必须对焊缝处引入局部疲劳影响系数，并将其与材料等级、接头形式相耦合，形成疲劳可靠性评估的关键节点。

3.2 结构响应与局部应力集中分析

结构的全局受力状态往往不足以准确描述疲劳风险的空间分布。在实际运行中，塔筒不同部位所承受的应力类型与幅值存在显著差异。底部段落因靠近基础，受波浪力与回转惯性影响大，多表现为弯矩主导型应力场；中上部则因风致载荷影响，易产生轴向拉压与扭转耦合，呈现多轴应力叠加态。这种空间非均质性的应力分布特点直接决定了疲劳敏感区域的定位与寿命预测的准确性。

局部几何变化构造是应力集中形成的关键来源。例如，塔筒门框开口区、法兰连接部位、支撑加劲肋根部等结构过渡区，其几何不连续性会在循环荷载作用下产生显著的局部应力放大。若不在模型中引入结构形状对应力的放大效应考虑，将无法真实反映损伤的空间分布规律。因此，理论模型应结合有限元分析或结构局部细节评估方法，识别并量化高风险节点的应力集中程度，并将其作为疲劳预测的核心参数之一。

3.3 工况与边界条件敏感性探讨

海上风电塔筒的运行工况高度依赖于其地理布置、基础形式与运行策略。不同海域的风速、浪高、海流流速具有显著差异，结构所承受的载荷频率与幅值也呈现复杂变化。即便相同类型的塔筒，在不同部署区域也可能展现出完全不同的疲劳寿命分布。这一现象表明，疲劳寿命模型必须具备对工况变化的响应能力，不能仅依赖标准谱或单一设计工况进行简化处理。

边界条件是影响疲劳性能的另一个重要变量。塔筒与基础之间的连接刚度、阻尼系数以及约束形式决定了整个结构的动力响应特征。例如，刚性连接基础可有效降低高频响应幅值，从而延缓疲劳损伤积累；而柔性基

础如导管架型支撑则可能引发更复杂的振动模式，加剧局部疲劳程度。因此，在寿命理论建模中应引入边界条件参数，构建与连接形式相适配的应力传递路径模型，以提升对实际工况的适应性。

结束语

海上风电塔筒作为连接基础与风机的重要承力结构，其疲劳性能直接关系到整机系统的服役寿命与运行安全。本文围绕塔筒在海洋多源循环载荷作用下的疲劳问题，系统梳理了结构响应特征与破坏机理，明确了其疲劳寿命受材料性能、构造细节、边界条件与服役环境等多重因素共同影响的基本规律。在分析现有疲劳评估方法的基础上，提出了基于非线性损伤累积理论的寿命预测思路，强调应力幅值演化、局部应力集中和载荷路径依赖性在理论模型中的关键地位。

理论研究表明，传统线性寿命叠加方法在处理不规则载荷序列和复杂结构节点时存在适用性不足问题，亟需建立更贴近实际服役工况的寿命预测模型。本文所构建的分析框架，在引入非线性参数修正与时变应力处理机制的基础上，提高了对疲劳演化路径的识别能力。通过结构局部与整体响应的耦合分析，模型能够更真实地反映多工况下的寿命分布趋势，为风电塔筒的结构优化与风险控制提供了理论支持。

后续研究仍需在模型参数标定、极端事件模拟与实际运行数据融合方面持续推进，以增强理论模型的适应性与工程指导性。对于寿命预测的工程应用，应在保证安全冗余的同时，推动设计方法由保守预估向基于风险评估的精细化控制过渡，以适应海上风电规模化、深远海化发展的需求。

参考文献

- [1] 裴兵兵. 海上风电塔筒法兰结合面腐蚀磨损性能研究[D]. 太原科技大学, 2024.
- [2] 林辰, 骆汉英, 王志敏. 海上风电塔筒钢构防腐涂料耐循环老化性能研究[J]. 环境技术, 2024, 42(02): 58-64.
- [3] 李睿刚, 刘凯. 浅谈海上风电塔筒制造质量通病及预防措施[J]. 中国战略新兴产业, 2022, (29): 134-136.
- [4] 王芳. 海上风电塔筒全副武装防腐蚀[J]. 风能, 2022, (01): 30-33.
- [5] 李庆超, 李伟, 吉飞, 等. 海上风电塔筒用超高性能灌浆料的制备及性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024, (10): 12-17.