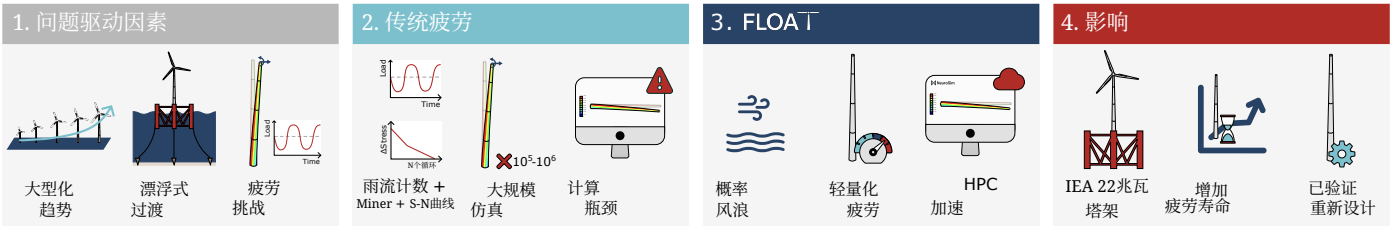
arXiv:2601.01657v1 [cs.CE] 4 Jan 2026

FLOAT：漂浮式海上风力机塔架的疲劳感知设计优化

João Alves Ribeiro、Francisco Pimenta、Bruno Alves Ribeiro、Sérgio M. O. Tavares、Faez Ahmed

图文摘要



亮点

- 提出一种轻量级疲劳估算方法，以加速塔架设计优化。
- 通过所提出的概率风浪采样方法，减少海上疲劳仿真的次数。
- 通过对IEA 22兆瓦浮式塔架进行疲劳感知设计优化，展示了该方法的应用。
- 进行纵摇/升沉—平台校准，并利用高性能计算提升浮式风力机仿真的效果和规模。
- 开放访问**FLOAT**框架以及重新设计的22兆瓦浮式塔架。

FLOAT：浮式海上风力涡轮机塔架疲劳感知设计优化

João Alves Ribeiro[a,b,c,*]、Francisco Pimenta[d]、Bruno Alves Ribeiro[e,f]、Sérgio M. O. Tavares[c]、Faez Ahme d[a]

[a]麻省理工学院机械工程系，美国马萨诸塞州剑桥[b]*LAETA-INEGI*，波尔图大学工程学院，葡萄牙波尔图[c]*TEMA*—机械技术与自动化中心，阿威罗大学，葡萄牙阿威罗[d]*CONSTRUCT*，波尔图大学工程学院，葡萄牙波尔图[e]代尔夫特理工大学机械工程学院，荷兰代尔夫特[f]布朗大学工程学院，美国罗得岛州普罗维登斯

摘要

大型化是海上风电降低成本战略的核心，转子和机舱尺寸日益增大，因此需要更高、更坚固的塔架。在浮式海上风力涡轮机（FOWT）中，风浪动力学与平台运动的耦合作用使这一趋势加剧了疲劳载荷。传统疲劳评估需要数百万次高保真仿真，导致计算成本高得难以承受，并减缓设计创新。本文提出海上风力机塔架疲劳感知轻量化优化与分析（Fatigue-aware Lightweight Optimization and Analysis for Towers），简称**FLOAT**，这是一种加速疲劳感知塔架设计的框架。该框架整合了三项关键贡献：一种支持高效优化的轻量级疲劳估算方法、一种基于蒙特卡洛的概率风浪采样方法（可减少所需仿真次数），以及通过俯仰／升沉–平台校准和高性能计算（HPC）执行来改进高保真建模。该框架应用于 IEA 22 MW 浮式海上风力机塔架，据作者所知，这是首次对这一基准模型进行面向疲劳的重新设计：FLOAT 22兆瓦浮式海上风力涡轮机塔架。通过与 6,468 次仿真进行验证，结果表明，优化后的塔架将估算疲劳寿命从 ~9 个月延长至 25 年，同时避免了共振；轻量级疲劳估算器则提供了保守预测，平均相对误差为 –8。6%。实现这一寿命需要增加塔架质量，而最终设计是在所选设计空间内质量最低且符合疲劳要求的配置。所有结果和报告的寿命延长均基于所考察的疲劳范围，即所选场址分布下风浪对齐条件中的 DLC 1.2。通过将仿真需求减少数个数量级，**FLOAT** 为下一代浮式海上风力涡轮机提供了一条计算高效的可靠、可扩展塔架设计途径，在满足工业需求与学术研究需要的同时，生成可支持数据驱动和人工智能辅助设计方法的高保真数据集。所有FLOAT 资源，包括该框架和 FLOAT 22 MW 塔架，均已公开发布，地址为**https://github.com/Joao97ribeiro/FLOAT** 和 https://github.com/Joao97ribeiro/FLOAT-22-280-RWT-Semi。

关键词： 疲劳、浮式海上风力涡轮机、塔架设计优化、国际能源署 22 兆瓦参考设计涡轮机、多学科优化、多物理场仿真

1. 引言

问题：浮式化与大型化加剧疲劳。海上风电行业正从固定式基础向浮式风电转型，以进入风力更强、更稳定的深水海域，开辟新的场址并推动容量增长。浮式风电从2010年代初期的先驱性2–3兆瓦示范项目（Hywind Demo [1], WindFloatl [2]），发展到2020年代的6–9.5兆瓦商业化部署（Hywind Scotland [3], WindFloat Atlantic [4], Kincardine [5],Hywind Tampen [6]），再到目前的15–20兆瓦设计方案 [7, 8]。研究模型也反映了这一发展路径，从NREL于2007年的5兆瓦模型 [9]，到国际能源署2024年的22兆瓦模型 [10]。尽管浮式风电部署和大型化提高了能量捕获能力并降低了平准化能源成本（LCoE），但也对塔架提出了新的要求：塔架必须增高以支撑更长的叶片，并维持从转子-机舱组件（RNA）到浮式平台的连续载荷传递路径，同时承受来自更重的机舱、更大的转子和平台运动的更大载荷，使疲劳成为主要设计约束条件之一，近期关于海上风电塔架设计与优化的综合评述也强调了这一点 [11]。

瓶颈：传统疲劳评估。标准疲劳评估依赖时域仿真、雨流计数、S-N曲线和Palmgren–Miner法则。对于固定式基础风力机，这已经需要大约 10^5 个载荷工况 [12]，，而对于漂浮式系统，由于额外的平台自由度以及气动-水动-伺服-弹性（AHSE）耦合扩大了设计空间，所需工况估计将增至 10^6 [13]。即使采用现代高性能计算（HPC），如此高的计算需求也使迭代式重新设计成本高得难以承受，疲劳评估因此成为限制新型塔架构型快速探索、拖慢浮式风电设计创新的核心计算瓶颈 [14]。

*通讯作者。电子邮箱： jpar@mit.edu (João Alves Ribeiro)

解决方案：迈向高效率的疲劳感知设计。为减轻浮式海上风力机（FOWT）疲劳评估的计算负担，人们提出了多种策略，包括仿真缩减 [15, 16]和基于人工智能的代理建模 [17, 18]。这些方法虽然展现出良好前景，但其主要关注疲劳评估，而非疲劳感知设计优化。启发式缩减技术可以提高效率，但可能导致环境覆盖度不完整；概率缩减策略则能通过依据发生概率纳入罕见但影响显著的载荷工况，提供更具代表性的结果。代理模型也展现出应用潜力，但其部署往往受限于庞大的训练数据集、场址特定数据的可用性，以及与底层物理机制的集成程度有限。此外，目前尚无开源框架能够整合概率抽样、轻量化疲劳估算和塔架重新设计，提供一体化解决方案。这一缺口凸显了对物理信息框架的需求：该框架既能加速疲劳评估、实现面向疲劳的设计优化，又能生成可支持新一代人工智能驱动方法的高保真数据集。

影响：作为基准的 ***IEA 22 MW*** 塔架。IEA 22 MW参考风机 [10]，虽然被广泛采用为参考模型，但其设计初衷是适用于固定式基础工况，且未明确考虑疲劳设计。该风机在浮式运行条件下的不适用性，体现了行业面临的关键瓶颈：无法在疲劳约束下快速迭代和优化塔架设计，根本上限制了下一代浮式风电系统的发展。加速疲劳感知设计，对于释放大型化浮式风机的全部潜力并实现商业可行性所需的成本降低至关重要。

1.1. 目标与贡献

本文旨在应对浮式海上风力机中疲劳感知塔架设计的计算挑战。为此，**FLOAT** （面向塔架的疲劳感知轻量化优化与分析）被提出作为一种框架，该框架集成了概率风浪采样、轻量化疲劳估算以及结合纵摇/升沉—平台校准的基于高性能计算的仿真，从而实现可扩展的塔架

在疲劳约束条件下重新设计。

本研究的主要贡献如下：

- 轻量级疲劳估算方法：通过利用参考仿真校准解析疲劳响应模型，实现快速、迭代式塔架设计优化，避免反复进行高保真仿真。

- 概率风浪采样：提出一种基于蒙特卡洛的策略，可减少海上疲劳评估所需的高保真仿真次数。

- ***IEA 22 MW*** 塔架的首次面向疲劳的重新设计：最终设计出 FLOAT 22兆瓦塔架。这一经 6,468 次仿真验证的设计，在 DLC 1.2 风浪对齐条件下实现了 25 年疲劳寿命，并展示了所提出框架的实际适用性。

- 高性能计算与俯仰/升沉—平台校准：整合高性能计算执行与平台稳定化技术，提升浮式风力机仿真的可扩展性和保真度。

这些贡献，以及将浮式海上风力机塔架的疲劳问题从提出到解决的过程，汇总于图 1中，该图展示了**FLOAT** 如何克服传统疲劳评估的计算瓶颈，并实现首个经过验证的 IEA 22兆瓦浮式塔架 25 年重新设计方案，由此形成 FLOAT 22 MW 浮式塔架。

1.2. 工作大纲

本文结构如下。第 2 节回顾浮式海上风力机塔架疲劳感知设计的背景与相关工作。第 3 节介绍所提出的 **FLOAT** 框架及其核心模块。第 4 节通过一项关于 IEA 22兆瓦浮式塔架面向疲劳的重新设计的案例研究，应用该方法。第 5 节报告主要发现，包括参考设计与优化设计的性能比较，以及对优化后的塔架的验证。第 6 节讨论所提方法的主要局限性及其缓解措施。最后，第 7 节总结关键贡献，并展望后续研究方向。

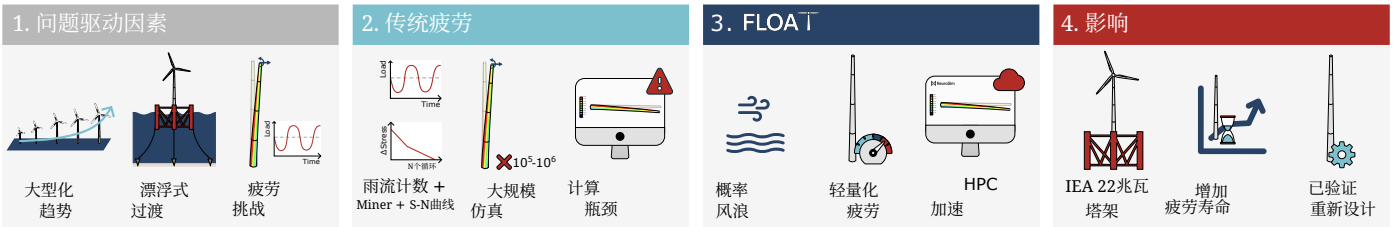


图 1：**FLOAT** 通过以概率抽样、轻量化疲劳估算和高性能计算支持的执行取代 ~ 10^6 IEC 仿真，克服了浮式风电塔架疲劳评估的计算瓶颈，并实现了经过验证的 IEA 22兆瓦浮式参考设计的面向疲劳的重新设计，最终形成 FLOAT 22兆瓦塔架。

2. 背景与相关工作

本节介绍浮式海上风力机塔架疲劳感知设计优化的技术背景，包括疲劳机制与寿命评估（第 2.1 节）、数值模拟要求与简化策略（第 2.2 节）、参考风力涡轮机模型，重点介绍 IEA 22 MW 塔架及其设计局限性（第 2.3 节）、软件工具及其与疲劳相关的约束条件（第 2.4 节），以及传统疲劳评估与所提出的**FLOAT** 框架之间的比较（第 2.5 节）。

2.1. 海上风力机塔架的疲劳

疲劳是海上风力机塔架中的一种关键失效机制，由风浪载荷引起的持续应力循环所驱动，这些应力循环可能引发裂纹并导致结构逐步退化 [19,20]。在浮式构型中，平台运动会加剧疲劳效应 [21, 22],，因此需要准确估算损伤，以确保塔架设计安全且具效。疲劳评估分为两个步骤（图 2）：事件疲劳评估（计算每种事件类型造成的损伤）；以及全寿命疲劳估算（结合事件损伤与预期发生次数）。

2.1.1. 事件疲劳评估

每种事件类型均由一条应力时间序列表征，该序列来自监测数据或数值模拟。使用雨流计数法处理该序列 [23, 24],，将其分解为单独的应力循环，并以i为索引；每个循环由循环计数n_i 和应力范围$\Delta\sigma_i$表征。对于每个应力范围，失效循环次数$N_i(\Delta\sigma_i)$由DNV-RP-C203 [25], 中的 S-N曲线定义；该曲线假设分项安全系数为1，并给出：

$$N_i(\Delta\sigma_i) = \bar{a}\left[\Delta\sigma_i\left(\frac{t}{t_{\text{ref}}}\right)^k\right]^{-m} \tag{1}$$

其中，项$(t/t_{\text{ref}})^k$ 用于调整板厚t 大于参考厚度t_{ref}时的疲劳强度。该参数 $\bar{a}$、m和k 是由 S-N曲线定义的材料常数。随后，使用 Palmgren-Miner 线性累积法则估算给定事件j 所对应的损伤：

$$D_j = \sum_i \frac{n_i(\Delta\sigma_i)}{N_i(\Delta\sigma_i)} \tag{2}$$

2.1.2. 全寿命疲劳估算

确定每种事件造成的损伤 D_j 后，通过将 D_j 乘以其在设计寿命内的预期发生次数 n_j，即可计算全寿命总损伤 D_t：

$$D_t = \sum_j D_j \cdot n_j \tag{3}$$

每种事件类型的预期发生次数 n_j 估算如下：

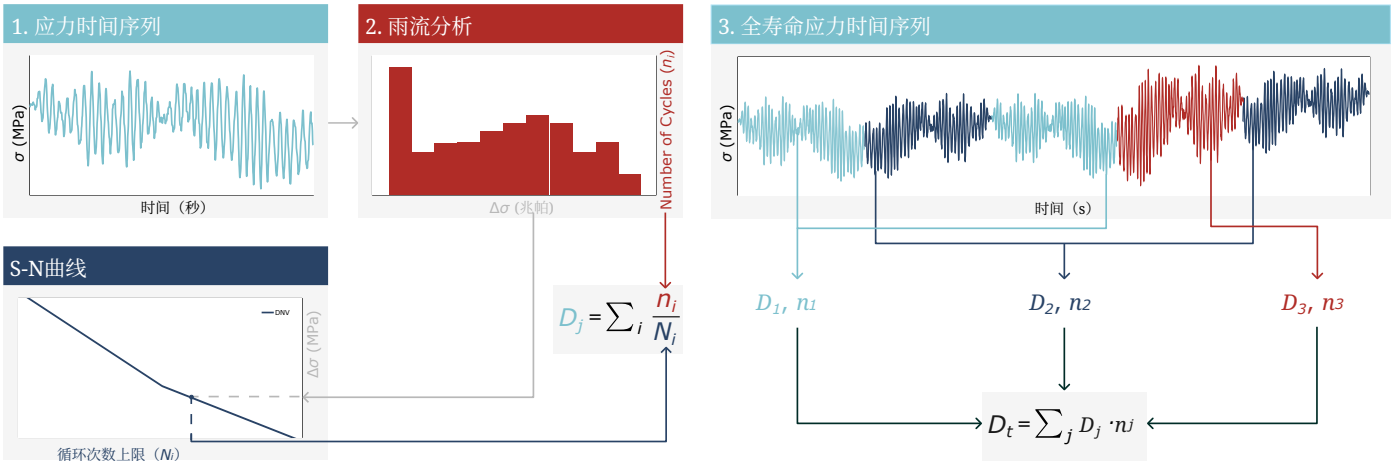
$$n_j = \frac{LT}{t_j} \cdot p_j \tag{4}$$

其中，LT 为设计寿命，t_j 为事件持续时间，p_j 为其发生概率（$\sum_j p_j = 1$）。事件通常为 10 分钟间隔，与 SCADA数据（运行数据）及标准 [26]一致。总疲劳损伤必须满足疲劳极限状态$D_t \leq 1/FDF$，其中疲劳设计系数（FDF）考虑了检查可达性和失效的结构后果 [25, 27, 28]。

虽然这一过程准确，但计算量大，且通常依赖大量监测或大规模仿真，这一挑战在浮式海上风力涡轮机中尤为突出。

2.2. 浮式海上风力涡轮机塔架疲劳的数值模拟

数值模拟对于评估浮式海上风涡轮机塔架在风浪耦合载荷作用下的结构行为至关重要，尤其是在设计早期阶段，此时尚无实验数据或监测数据。数值模拟可提供各种运行工况下的应力时间序列，作为疲劳评估和设计验证的输入。为准确进行疲劳评估，仿真必须能够反映真实环境条件，包括风况和波浪条件；后者由海况定义。



(a) 事件疲劳评估　　(b) 全寿命疲劳估算

图2：海上风力涡轮机塔架的疲劳估算流程。

2.2.1. 浮式海上风力涡轮机疲劳分析的设计载荷工况

国际电工委员会 61400 [26, 12, 13] 规定了为确保满足安全要求而应评估的风场特性和海况条件。

对于风场，IEC 61400-1:2019 [26] 定义了正常和极端风况，但在疲劳分析中仅关注前者。在这种情况下，风速剖面由正常风剖面模型（NWP）和正常湍流模型（NTM）描述，二者分别决定风速随高度的平均变化和湍流脉动。

在海况条件方面，海上风力涡轮机设计考虑以下三类：

- **正常海况（NSS）：** 发电期间有效波高（H_s）、峰值波周期（T_p）和平均波向（M_{ww}）的典型组合。
- **严峻海况（SSS）：** 以风速为条件的50年重现期海况。
- **极端海况（ESS）：** 具有50年重现期的风浪极值同时发生。

再者，在疲劳分析中，仅考虑正常海况。

确定需要评估的环境条件后，设计标准还规定了一组用于极限状态和疲劳分析的设计载荷工况（DLC）。后者是本研究的重点，需要考虑以下情景：

- **DLC1.2:** 正常发电。
- **DLC 2.4:** 发电运行并发生故障。
- **DLC 3.1:** 发电机启动。
- **DLC4.1:** 发电机停机。
- **DLC 6.4：** 停机（静止或空转）。
- **DLC 7.2：** 发生故障时停机。
- **DLC 8.3：** 运输、组装、维护和维修。

每种设计载荷工况还定义了环境条件的联合分布。由于风场生成本质上具有随机性，IEC 61400 要求针对给定的一组条件至少评估 6 个独立实现。由于 DLC 1.2 对应运行寿命的大部分时间，且通常对总疲劳损伤的贡献最大 [29], , 本研究聚焦于该设计载荷工况，尽管相同的流程也可应用于其余设计载荷工况。

2.2.2. 浮式海上风力涡轮机疲劳分析的仿真次数

基于关键环境参数（U、H_s、T_p，以及M_{ww}）的离散组合，按照 IEC 61400-3 [12, 13], 的规定，通过数值模拟量化 NTM 和 NSS 下的疲劳，其中 U 表示平均风速。离散化后得到 266112 种不同的环境条件，详见表 A.10 （参见附录 A），每种条件均需进行单独仿真。为捕捉随机变异，建议每个风速—湍流分箱使用六个随机种子，由此将产生超过 150 万次仿真，因此需要采取缩减策略以确保计算可行性。

2.2.3. 浮式海上风力涡轮机疲劳分析的仿真缩减

为降低浮式海上风力机疲劳仿真的高昂计算成本，Stewart [15] 提出了两种策略：将H_s、T_p和M_{ww} 的分箱宽度扩大四倍，使工况总数减少 4^3；以及排除发生概率极低的分箱，因为它们对疲劳的影响微乎其微，并通过采用 90% 的累积分布函数（CDF）阈值来保留代表性工况。Papi 等人 [16] 表明，结合这两种策略后，每个随机种子的仿真次数可降至 251 次（六个随机种子共 1506 次）。省去风浪不对齐还能进一步节省计算量，不过大多数罕见分箱已被排除。尽管仿真次数有所减少，筛选之前仍须生成所有工况。此外，Vlachogiannis 等人[30] 表明，分箱会系统性地高估疲劳，并研究了一个穷举式高性能计算框架以恢复精度。尽管该框架更精确，但其成本高得令人望而却步，不适用于设计优化，这凸显了直接选取代表性工况的策略的必要性。

2.3. 漂浮式海上参考设计模型

对于海上风电系统的仿真、基准测试和标准化设计，参考风力涡轮机模型至关重要。NREL、丹麦技术大学和国际能源署的模型已广泛应用于研究和工业领域。对于浮式海上风力机，表 B.11 （见附录 B）列出了主要的官方模型，包括 NREL 5 兆瓦 [9], IEA 15 兆瓦 [31], 和 IEA 22 兆瓦 [10]。除此之外，还有一些改进方案，例如将 DTU 10兆瓦模型 [32] 与立柱式支撑结构结合 [33]。

2.3.1. *IEA 22 MW*参考模型

最新的浮式海上风力机参考模型是 IEA 22兆瓦，该模型采用半潜式支撑结构。为满足日益增长的大型化需求，并适应从固定式基础向浮式基础的转变，该模型有望成为浮式风电研究中的核心基准，如近期研究所示 [34, 35, 36]。

2.3.2. *IEA 22 MW*塔架设计局限性

IEA 22 MW 塔架最初是针对固定式基础工况设计的，在浮式构型中未经修改便直接使用 [10]。如 [37], 所述，该塔架无法承受增加的动态载荷，即使在固定式基础使用条件下，设计时也未考虑疲劳因素。这些局限性降低了疲劳寿命和结构可靠性。在浮式运行中，塔架一阶主导固有频率接近转子三倍频，存在共振风险，并会放大疲劳载荷。这凸显了重新设计的必要性，以满足浮式海上应用的疲劳要求。

2.4. 塔架仿真与设计软件工具

用于浮式海上风力机塔架分析的软件工具主要分为两大类。仿真工具，如 OpenFAST [38],FAST.Farm [39], HAWC2 [40], 和 Bladed [41], ，执行高保真空气动力学-水动力学-结构-弹性耦合建模，以捕捉系统的动态响应。设计与优化工具，包括 WISDEM [42] 和 WEIS [43], ，整合结构和成本模型，为早期决策提供支持。目前商业平台和开源平台均在使用中，并且越来越重视透明性和可复现性，NREL 等机构的开源开发倡议也为此提供了支持。表 C.12（见 附录 C）总结了各类别中的主要工具。

2.4.1. 疲劳分析软件工具的局限性

疲劳是海上风力涡轮机设计与优化中的关键因素，但现有工具仍存在局限性。WISDEM 基于 OpenMDAO 构建，依赖稳态模型，不适用于需要动态应力序列的疲劳分析。WEIS 通过与 OpenFAST 集成来扩展 WISDEM，以进行动态仿真，但由于载荷工况数量庞大且需要反复评估，计算成本仍然很高。尽管 Inductiva [44] 和亚马逊云科技（AWS） [45] 等高性能计算（HPC）解决方案支持 OpenFAST [46, 47]，并行执行，反复进行疲劳评估仍然十分耗时。这些局限性凸显了对简化疲劳方法的需求：在保持预测准确性的同时降低计算成本。

2.5. 从传统疲劳评估到 *FLOAT*

海上风力机塔架的传统疲劳评估需要针对 IEC 61400-3 规定的所有设计载荷工况进行高保真仿真。尽管这种方法精度较高，却会带来较高的计算成本、缓慢的迭代周期，以及分散在多个工具中的工作流。本文提出的 **FLOAT** 方法将概率风浪采样与轻量级疲劳估算器整合到统一的自动化工作流中，在保持预测精度的同时减少仿真次数和运行时间。 表 1对比了这两种方法，并说明了本文在 第 3 节中介绍的方法的提出动机。

表 1：传统疲劳评估与 **FLOAT** 框架的比较。

	传统	**FLOAT**
疲劳评估	每次迭代进行高保真评估（雨流计数、S-N曲线、Miner）	轻量级估算器 + 最终高保真检查
仿真	Full IEC 分箱（~10^5–10^6）	概率抽样 (~10^3–10^4)
模型	IEA 22兆瓦固定式基础用于漂浮式（过轻，未进行疲劳驱动设计）	FLOAT 22 MW: 疲劳驱动漂浮式 IEA 22兆瓦的重新设计
工具	多工具 ，手册	统一、自动化；高性能计算
效率	成本高、速度慢	成本低、速度快

3. 方法论

FLOAT(**疲**劳感知 **轻**量化 **优**化与**分**析 **塔**架)[1] 通过疲劳约束加速浮式海上风电机组塔架的迭代设计。尽管评估参考设计并验证优化设计候选方案需要高保真仿真，**FLOAT**通过引入轻量级疲劳模型，避免在优化的每个中间步骤都重新运行这些仿真，从而降低计算成本且不影响精度。E效率还通过风浪采样策略得到进一步提升，该策略选取数量较少但具有代表性的环境条件集，从而以更少的仿真实现准确的疲劳预测。系统还整合了高性能计算框架和俯仰/升沉–平台校准，以提高仿真真实性和计算性能。这些要素相结合，可实现快速且经济高效的疲劳感知塔架优化。尽管该方法是为浮式平台开发的，但也可轻松扩展至固定式塔架配置。

3.1. *FLOAT* 工作流程

以下小节介绍**FLOAT** 工作流程的两个主要组成部分。首先，详细说明工作流程本身，包括数值模拟和设计优化阶段。随后介绍验证流程，重点说明收敛准则和重新仿真步骤。

3.1.1. 工作流程说明

该**FLOAT**框架采用由数值模拟和设计优化组成的两阶段流程，如图3所示。首先进入数值模拟阶段，由风浪采样器选取具有代表性的环境风浪条件子集，并在 OpenFAST 中对参考塔架进行这些情景的仿真 [38]，并在数值模拟器中进行俯仰/升沉平台校准，以捕捉浮式动力学；同时借助 Inductiva 平台 [46] 利用高性能计算开展大规模分析。随后，频率响应分析器和疲劳分析器对所得输出进行处理，计算参考塔架的频率响应和疲劳损伤。频率响应用于定义频率约束，而疲劳损伤则为设计优化阶段的疲劳估算模型提供所需的校准。随后进入设计优化器，在疲劳约束条件下迭代更新塔架几何形状，并由疲劳估算器在每一步预测损伤。该估算器是一种轻量级解析模型，无需重新运行高保真仿真。收敛后，使用相同的风浪条件重新进行仿真，以评估优化后的塔架，并验证其相对于参考设计的性能。

[1]该**FLOAT** 框架可通过以下网址公开获取：https://github.com/Joao97ribeiro/FLOAT。

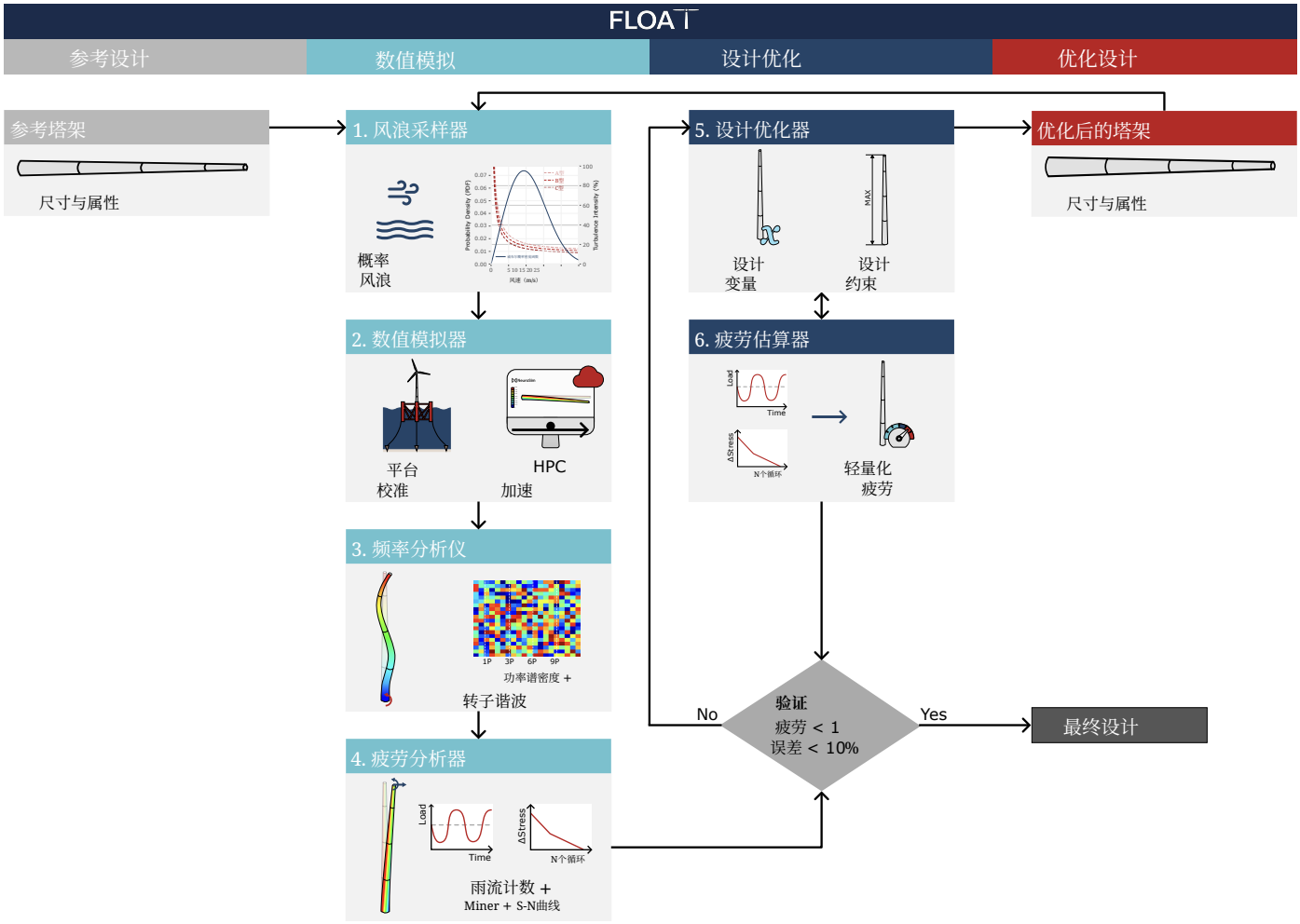


图3：**FLOAT** 工作流程。该框架由六个模块组成：风浪采样器 选择具有代表性的风浪条件；数值模拟器 运行大规模高性能计算模拟并进行平台校准；频率响应分析器和疲劳分析器 计算频率响应和疲劳损伤；设计优化器 迭代更新几何形状；疲劳估算器 则无需重新运行完整仿真即可预测损伤。流程从参考设计开始，通过**FLOAT**执行设计优化，并对每个优化设计进行验证；如有需要则重复额外循环，直至收敛到经过验证的最终设计。

3.1.2. 工作流程验证

工作流程验证依据两项标准：(i) 任意塔架截面的全寿命疲劳损伤不得超过允许限值（1）；(ii) **FLOAT**与 OpenFAST 高保真仿真所得分截面全寿命疲劳损伤之间的相对误差必须低于 10%。若任一标准未满足，则需进行额外的优化周期。第一项标准确保满足疲劳安全要求，第二项则评估**FLOAT**中嵌入的轻量级疲劳估算器的精度。两项标准共同确保优化后的塔架设计符合疲劳约束，且疲劳损伤预测与高保真仿真保持一致。在优化周期之间，仅根据最新设计更新疲劳损伤校准。每个周期均从原始参考塔架几何结构开始，并使用相同的振型；初步测试已确认振型不会影响疲劳响应。优化将持续进行，直至获得满足要求的解决方案。

以下小节将简要总结 **FLOAT** 工作流程的各个组件，而完整的流程和相应算法详见附录 E。

3.2. 风浪采样器

该风浪采样器定义了用于仿真并估算参考设计和优化设计塔架疲劳的环境条件。它不再仿真数千个影响较小的区间，也不采用 Stewart 提出的启发式筛选策略 [15]（参见 第 2.2.3 节），而是采用一种直接的概率抽样方法，该方法借鉴了海上风浪参数的联合建模。在本研究中，采用 Papi 等人提出的分布 [16]，但这些分布也可轻松调整以适用于不同地点。在这一概率框架下，采样器基于蒙特卡洛方法估算预期疲劳损伤，并据此选取固定数量的代表性环境状态。

该策略减少了所需高保真仿真的数量，从而降低计算成本并加快优化。其目标并非寻找最小仿真集或宣称实现了形式上的收敛，而是构建一组计算上可行且具有代表性的环境状态，以便可靠地进行全寿命疲劳评估。通过随后对优化设计进行高保真再仿真以开展验证，来处理剩余的抽样不确定性。完整流程详见 算法 1（参见 附录 E.1）。

3.2.1. 风浪采样器的解析公式

风浪条件的综合行为由平均风速（U）、有效波高（H_s）、波浪峰值周期（T_P）和风–浪不对准角（M_{ww}）的联合概率模型定义，其对应的概率密度函数（PDF）为：

$$f_{U,H_s,T_p,M_{ww}}(U,H_s,T_p,M_{ww}) = f_U(U)\cdot f_{H_s}(H_s \mid U) \cdot f_{T_p}(T_p \mid H_s)\cdot f_{M_{ww}}(M_{ww} \mid U) \tag{5}$$

其中 $f(\cdot)$ 表示环境参数的条件概率密度函数，其解析形式详见 附录 D，基于 Papi 等人的研究 [16]。

基于此，本研究将该公式扩展至考虑风机寿命（LT）内的疲劳损伤。令 $D(U, H_s, T_P, M_{ww})$ 表示给定环境状态（U、H_s、T_P、M_{ww}）下单位时间内的疲劳损伤。则预期全寿命损伤定义为：

$$D_t = LT \cdot \mathbb{E}_{U,H_s,T_p,M_{ww}}[D(U,H_s,T_p,M_{ww})] \tag{6}$$

其中，期望是针对环境参数的联合分布求取的：

$$\mathbb{E}_{U,H_s,T_p,M_{ww}}[D(U,H_s,T_p,M_{ww})] = \int D(U,H_s,T_p,M_{ww}) \cdot f_{U,H_s,T_p,M_{ww}}(U,H_s,T_p,M_{ww}) \cdot dU\, dH_s\, dT_p\, dM_{ww} \tag{7}$$

该积分可通过加权蒙特卡洛方法，利用N 个抽取的状态进行近似：

$$D_t \approx LT \cdot \sum_{j=1}^{N} w_j \cdot D(U_j, H_{s,j}, T_{p,j}, M_{ww,j}) \tag{8}$$

其中，$D(U_j, H_{s,j}, T_{p,j}, M_{ww,j})$ 表示环境状态 j 下单位时间的疲劳损伤，w_j 为归一化权重（$\sum_j w_j = 1$）。由于显式保留了风速分箱，而抽样仅应用于其余参数，因此需要进行归一化。在算法 1 中，U 保留为离散分箱，(H_s, T_P, M_{ww}) 则从相应的条件分布中抽取，因此 w_j 表示对应的概率质量；这些权重与各状态发生概率之间的关系详见附录 F。

3.3. 数值模拟器

为模拟抽取的环境条件
由风浪采样器与数值模拟器使用基于物理原理的俯仰/升沉–平台校准，对浮式海上风力机进行动态分析；该校准会调整平台的旋转（俯仰）和垂直位置（升沉），使其在平均环境载荷作用下达到静力平衡。仿真在 OpenFAST [38] 中执行，并通过 Inductiva 的高性能计算平台在云基础设施上并行执行 [46], ，从而显著加快计算速度。该模拟器支持使用 TurbSim 生成的稳态和湍流入流 [48] ，能够详细评估确定性和随机性结构响应。完整的实现步骤总结于算法2 （见附录E.2）。

3.3.1. 俯仰–平台校准的解析公式

俯仰–平台校准通过调整半潜式立柱中的压载水，稳定浮式平台的旋转。压载水产生补偿力矩，M_{colwater}，使其与总结构力矩相平衡，$M_{\text{struct}} = M_{\text{weight}} + M_{\text{aero}}$，其中 M_{weight} 和 M_{aero} 分别为重力贡献和气动力贡献。当 $M_{\text{colwater}} + M_{\text{struct}} = 0$时达到平衡。当 $M_{\text{struct}} < 0$时，向迎风侧立柱中添加压载水；当 $M_{\text{struct}} > 0$时，则将其等量分配至左舷和右舷立柱，如图 4所示。包括气动力矩显式公式、压载水高度计算以及平台质量调整在内的进一步实施细节，参见附录 G。

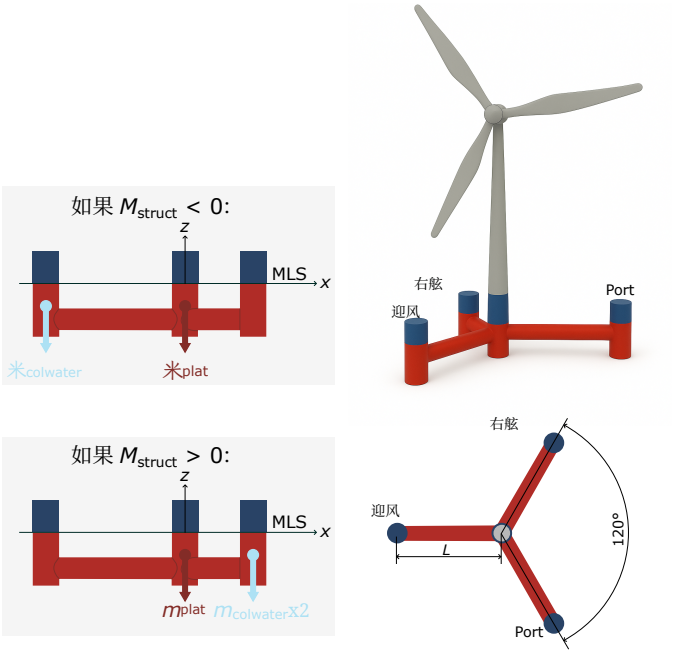


图 4：在 **FLOAT** 中实施的俯仰–平台校准策略，基于结构力矩 M_{struct}。

3.3.2. 升沉–平台校准的解析公式

升沉–平台校准通过调整浮式平台的总质量，稳定其垂向平衡。仅当塔架几何形状发生变化并且需要对优化后的塔架进行验证模拟时，才需要进行此项调整。塔架质量的变化通过对平台质量进行等量反向调整来补偿，从而确保静力平衡： $\Delta m_{\text{tower}} + \Delta m_{\text{plat}} = 0$。塔架质量增加时，通过减少平台质量来平衡；而塔架质量减少时，则通过增加平台质量进行补偿。

3.4. 频率响应分析器

该频率响应分析器通过估算数值模拟器特定输出的功率谱密度（PSD），量化不同频率和风速下的转子气动弹性激励。默认情况下，分析针对塔基前后向弯矩信号进行，因为该信号集中体现了最大的弯曲载荷，决定结构设计和疲劳评估，并突显动态放大和疲劳损伤累积的低频范围。生成的热图以对数10 刻度显示：行表示频率，列表示每个区间的代表性平均风速，从而揭示共振带和转子谐波贡献（1P、三倍转频、六倍转频和 9P）。完整流程概述见算法 3（参见附录 E.3）。

3.4.1. 频率响应分析器的解析公式

对于每次仿真i，使用 Welch 方法估算塔基前后向弯矩的单边功率谱密度（PSD），$\widehat{S}^{(i)}_{xx}(f)$。该方法采用预设采样频率$f_s$ 和长度为L 的汉宁窗，重叠率为 50%。随后，将每个功率谱密度与根据相应时间序列计算出的平均风速U_i 配对。

当多个仿真具有相同的平均风速时，其频谱会取平均值，得到 U_j 处的代表性功率谱密度：

$$\mathbf{S}(f, U_j) = \frac{1}{|\mathcal{J}(U_j)|} \sum_{i \in \mathcal{J}(U_j)} \widehat{S}^{(i)}_{xx}(f) \tag{9}$$

其中，$\mathcal{J}(U_j)$ 是平均风速落在组 U_j 中的仿真集合，$|\mathcal{J}(U_j)|$ 是其基数（组内仿真的数量），f 表示所评估的频率。

每个风速区间 U_b 内的时间平均转子转速（RPM）用于计算转子基频及其谐波：

$$f_{1\text{P}}(U_b) = \frac{\overline{\text{RPM}}(U_b)}{60}, \qquad f_{n\text{P}}(U_b) = n\, f_{1\text{P}}(U_b), \quad n \in \{3, 6, 9\} \tag{10}$$

并叠加在热图上，以显示以下各项之间的对应关系激励谐波和结构响应。

3.5. 疲劳分析器

该疲劳分析器根据数值模拟器生成的仿真输出计算疲劳损伤，并评估每个塔架截面中点处的损伤。随后，根据各环境条件的预期出现情况，对这些截面数值进行汇总，以估算全寿命疲劳。前后向弯矩被视为应力变化的主要驱动因素，因而也是疲劳累积的主要驱动因素。完整流程总结于算法 4 （参见附录 E.4）。

3.5.1. 疲劳分析器的解析公式

疲劳损伤按照 第 2.1 节所介绍的方法进行计算，将雨流计数法与 Miner 法则相结合。采用 DNV-RP-C203 标准中的 E 类 S–N 曲线 [25]，该曲线对应于欧洲规范 3：第 1-9 部分（EN 1993-1-9）中的细节类别 80 [50]，，该类别推荐用于焊接接头。该曲线包含两个斜率分别为 3 和 5 的线性区段，并在 10^7 个循环处发生过渡，如图 5所示。考虑厚度指数k 为 0.20，以计及板厚对疲劳强度的影响，并采用参考厚度t_{ref} 为 25 mm。

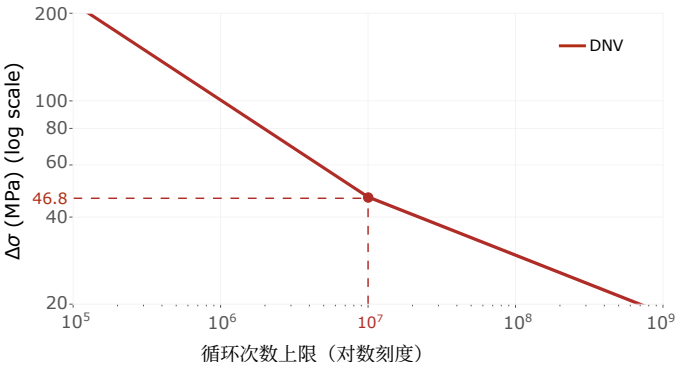


图 5：DNV-RP-C203 标准中的 E 类 S-N 曲线 [25]。

3.6. 设计优化器

该设计优化器通过在多个约束条件下最小化塔架质量，执行疲劳感知塔架设计优化。设计变量为塔架各离散节点处的外径和壁厚，节点之间采用线性锥度变化，从而在各截面形成圆锥台。疲劳是优化的主导因素，同时通过附加约束确保结构要求（应力、屈曲和固有频率）以及几何一致性（径厚比、锥度和单调性）。在多个约束条件下最小化质量时，优化过程中出现的任何增加，都反映了满足所有既定要求所需的额外材料。每次迭代均使用本研究所介绍的疲劳估算器评估疲劳（见第 3.7 节），从而避免高保真重新仿真。

该优化在 WISDEM [42]中通过序列最小二乘规划（SLSQP）实现，并采用中心有限差分梯度；同时也提供其他求解器。塔顶载荷根据一个具有代表性的设计载荷工况定义，并在优化循环中作为固定输入处理，

在优化循环中，这些载荷仅用于结构一致性检查，而疲劳约束决定最终的塔架尺寸设计。采用这一假设是为了提高计算效率，因为每次迭代都进行完全耦合的 AHSE 重新仿真，计算成本将高得难以承受。为进一步降低计算成本，优化循环中采用陆上塔架模型，并根据参考浮式构型对频率约束进行修正，且在各次迭代中始终一致地应用。所有简化仅限于优化阶段；随后通过在采样的环境条件下进行完整的高保真浮式仿真，对最终优化设计进行验证，确保其符合验收标准，并捕捉几何形状变化引起的任何载荷重新分配。完整流程总结见算法 5 （参见附录 E.5）。

3.6.1. 设计优化器的解析公式

设计优化的目标是确定风力涡轮机塔架的最佳几何形状。塔架分为 n个圆锥形分段，每段由底部直径 d_{i-1}、顶部直径 d_i、固定高度 h_i和均匀壁厚t_i定义，如图 6所示。分段高度 h_i 根据参考塔架固定。

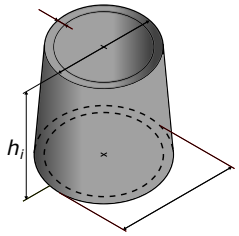


图 6：塔架截面i 由底部直径d_{i-1}、顶部直径d_i、固定高度h_i和壁厚t_i定义。

设计向量为：

$$\boldsymbol{x} = [d_0, \ldots, d_n, t_1, \ldots, t_n],$$

其中，d_i 和tj 分别表示外径和壁厚。每个变量均受以下边界约束：

$$d_i \in [d_{\min}, d_{\max}], \quad i = 0, \ldots, n,$$

$$t_j \in [t_{\min}, t_{\max}], \quad j = 1, \ldots, n.$$

目标是使塔架总质量最小化：

$$\min_{\boldsymbol{x}} \quad m_{\text{tower}}(\boldsymbol{x}) \tag{11}$$

其中设计须满足以下约束条件：

1. **应力约束**。 冯·米塞斯应力 σ_{vM} 必须低于材料屈服应力 σ_y，并按安全系数γ_f （载荷不确定性）、 γ_m （材料变异性）和 γ_n（失效后果）进行折减：

$$\frac{\gamma_f \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n \cdot \sigma_{\text{vM}}(\boldsymbol{x})}{\sigma_y} \le 1.0 \tag{12}$$

2.**屈曲约束**。 通过要求局部壳屈曲（LSF）和全局屈曲（GF）的利用率均低于 1，确保符合欧洲规范：

$$\text{LSF}(\boldsymbol{x}) \le 1.0, \quad \text{GF}(\boldsymbol{x}) \le 1.0 \tag{13}$$

3. **频率约束**。 为避免共振现象，塔架的一阶固有频率须处于规定的目标范围内：

$$f_1^{\min} \le f_1(\boldsymbol{x}) \le f_1^{\max} \tag{14}$$

4. **疲劳约束**。 各截面的疲劳损伤乘以 γ_d （疲劳不确定性）后，必须小于 1：

$$D_i(\boldsymbol{x}) \cdot \gamma_d \le 1.0 \tag{15}$$

5. **单调性约束**。 外径和壁厚从底部到顶部必须递减或保持不变：

$$d_{i+1} \le d_i, \quad t_{i+1} \le t_i \tag{16}$$

6.**径厚比约束**。 该
径厚比必须处于规定的边界范围内，以确保结构完整性和可制造性 ：

$$\left(\frac{d}{t}\right)_{\min} \le \frac{d_i}{t_i} \le \left(\frac{d}{t}\right)_{\max} \tag{17}$$

7. **锥度约束**。 对每个截面强制执行最大允许圆锥台锥度比：

$$\text{taper}_{\min} \le \frac{d_{i+1}}{d_i} \le \text{taper}_{\max} \tag{18}$$

由于优化采用陆基塔架模型，因此使用 [51]中提出的关系式转换浮式参考频率：

$$f_1^{\text{floating}} = \frac{f_1^{\text{land-base}}(\boldsymbol{x})}{r_I} \tag{19}$$

其中，对于这一特定案例研究，$1/r_I \approx 1.57$。

3.7. 疲劳估算器

疲劳估算器是一种嵌入设计优化器中的轻量化解析模型，用于加速疲劳感知塔架设计优化。在每次迭代中，直接根据几何参数、S–N曲线特性和校准损伤分布估算分段疲劳损伤，从而避免在优化循环中进行高保真重新仿真。通过将疲劳视为几何驱动代理模型来实现计算加速比：损伤根据几何变化引起的应力重标定进行更新，而不是重新计算完整的耦合 AHSE 仿真。当结构响应以弯曲为主，且几何更新与校准塔架相近时，这种近似是适用的。由于载荷重新分配效应并未

得到明确捕捉，因此最终设计的验收始终基于在采样环境条件下对优化几何进行高保真再仿真。第一次优化循环中的校准塔架对应参考设计，后续循环中的校准塔架则对应最近一次优化设计。完整流程总结于算法 6（见附录 E.6）。

3.7.1. 疲劳估算的解析公式 *ator*

根据 第 2.1.1 节中详述的公式，与给定事件 j相关的损伤可表示为：

$$D_j = \frac{1}{\bar{a}} \sum_i n_i \left[\Delta\sigma_i \left(\frac{t}{t_{\text{ref}}} \right)^k \right]^m \tag{20}$$

因此，损伤与应力范围和厚度因子成比例：

$$D_j \propto \left[\Delta\sigma_i \left(\frac{t}{t_{\text{ref}}} \right)^k \right]^m \tag{21}$$

另一方面，对于给定的塔架横截面，假设应力变化仅由弯矩 M 引起，则应力为 $\sigma = M/I_y\, r = M/\omega_y$，其中 σ 为轴向应力，I_y 为截面二次矩，ω_y为截面模量。进一步假设采用风力机塔架典型的薄壁圆形横截面，则表达式可简化为 $\sigma \approx M/\left(\pi r^2 t\right)$，其中 r 为外半径，t 为壁厚。因此，应力与半径和厚度成比例：

$$\sigma \propto r^{-2} t^{-1} \tag{22}$$

结合公式 21 和 公式 22，在斜率固定为m的情况下，塔架横截面处的疲劳损伤成比例于：

$$D = C r^{-2m} t^{-m} \left(\frac{t}{t_{\text{ref}}} \right)^{k \cdot m} \tag{23}$$

m 默认设为 4，即两种 S-N 曲线区间斜率的平均值（见 第 3.5.1 节），而C 是根据校准塔架的几何形状和疲劳损伤重新校准的常数。

4. 案例研究

为展示其实际应用价值，**FLOAT** 方法被应用于一项大型案例研究：重新设计 IEA 22 MW 浮式海上风力涡轮机塔架。原始参考模型采用半潜式支撑结构，但其塔架既未针对浮式工况进行定制，也未受疲劳要求约束。采用所提出的方法，通过结合快速疲劳估算与高保真仿真，完成了面向疲劳的重新设计。据作者所知，所得几何形状是首个公开发布的、针对疲劳进行优化的 22兆瓦浮式海上风力机塔架，称为 FLOAT 22 MW 塔架。这项案例研究凸显了**FLOAT**在应对新一代海上风力机实际结构挑战方面的有效性。

表 2：IEA 22 MW 参考风力涡轮机的主要参数 [10]。

参数	数值	参数	数值
额定功率（兆瓦）	22.0	最小转子转速（rpm）	1.807
叶片数量	3	最大转子转速（rpm）	7.061
转子直径（米）	284	转子机舱质量（吨）	1218.685
切入风速（米/秒）	3.0	轮毂高度（米）	170
额定风速（米/秒）	25.0	叶片长度（米）	137.8
塔架质量（吨）	1574	叶片质量（吨）	82.301

*4.1. IEA 22*兆瓦漂浮式海上参考塔架

该案例研究聚焦于 IEA 22 MW 浮式海上风力涡轮机参考机组。其主要规格列于表 2。

4.1.1. 塔架几何形状

塔架采用 30 个锥形圆柱段进行建模（图 7），每段均由底部直径 d_{i-1}、顶部直径d_i、高度 h_i和壁厚t_i （图 6）定义。完整尺寸见表 H.13 （参见附录 H）。

4.1.2. 塔架材料塔架材料为钢，其属性见表 3。

表 3：IEA 22兆瓦塔架所用钢材的属性 [10]。

属性	数值	属性	数值
密度	7850 kg m^{-3}	杨氏模量	200 吉帕
剪切刚度	79.3 吉帕	泊松比	0.265
屈服强度	345 兆帕	拉伸/压缩强度	450 兆帕

4.1.3. 塔架载荷

重新设计采用 IEA 22 MW参考模型中定义的塔顶极限载荷，且不会针对每次更新的塔架几何形状重新计算这些载荷。这一选择符合本研究的范围，本研究重点关注浮式海上风力机的疲劳驱动塔架重新设计。优化过程中，塔顶载荷仅用于施加结构一致性约束（应力、屈曲和频率），而疲劳约束决定最终的塔架尺寸设计。所施加的力和力矩分量汇总于 表 4。

表 4：作用于 IEA 22 MW 塔架顶部的力和力矩 [10]（x：顺风向，y：侧向，z：垂直方向）。

力	数值（兆牛）	力矩	数值（兆牛·米）
F_x	5.7	M_x	−1.6
F_y	0.09	M_y	−37.6
F_z	−11.3	M_z	10.7

*4.2. IEA 22 MW*塔数值模拟

进行了数值模拟，以计算参考塔架的初始疲劳损伤，并通过将其疲劳性能与参考塔架进行对比，验证使用**FLOAT**生成的优化设计。

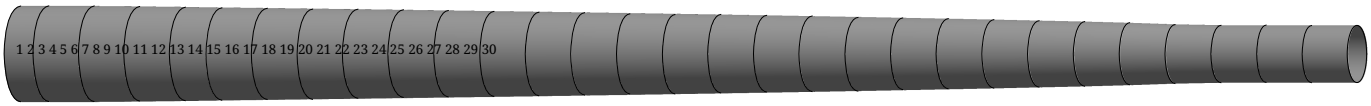


图 7：塔架几何形状划分为 30 个截面（从底部到顶部编号）。

4.2.1. 风浪采样

采用本文提出的方法，通过***Wind–Wave Sampler*** 模块**FLOAT**（见第 3 节）进行风浪采样，以定义用于浮式海上风力机疲劳评估的环境条件。根据 IEC A类规范，考虑了 22 个湍流风速，每个风速均采用 6 个相互独立的随机种子进行评估，以表示随机变异性。对于每个风速，采样 7 个有效波高；对于每个波高，选取 7 个峰值波周期，因此每个风速对应 49 个（H_s，T_P）波浪条件，每种设计共计 6,468 个（22 × 6 × 49）环境模拟。模拟数量的选择旨在平衡计算成本与运行时间，而不是确定用于正式收敛分析的最小集合。根据所采用环境分布推导出的发生概率权重，对采样状态的疲劳损伤贡献进行汇总。在本研究中，为限制所需的模拟数量，未考虑风向变化和风浪不对齐，这在设计和预设计阶段较为常见。因此，结果针对风浪对齐条件进行报告，但所提出的方法可以方便地扩展到其他构型。图8展示了完整的采样条件集合，并在附录 I中提供了风速为 12.5 m/s 时的风浪采样过程示例。

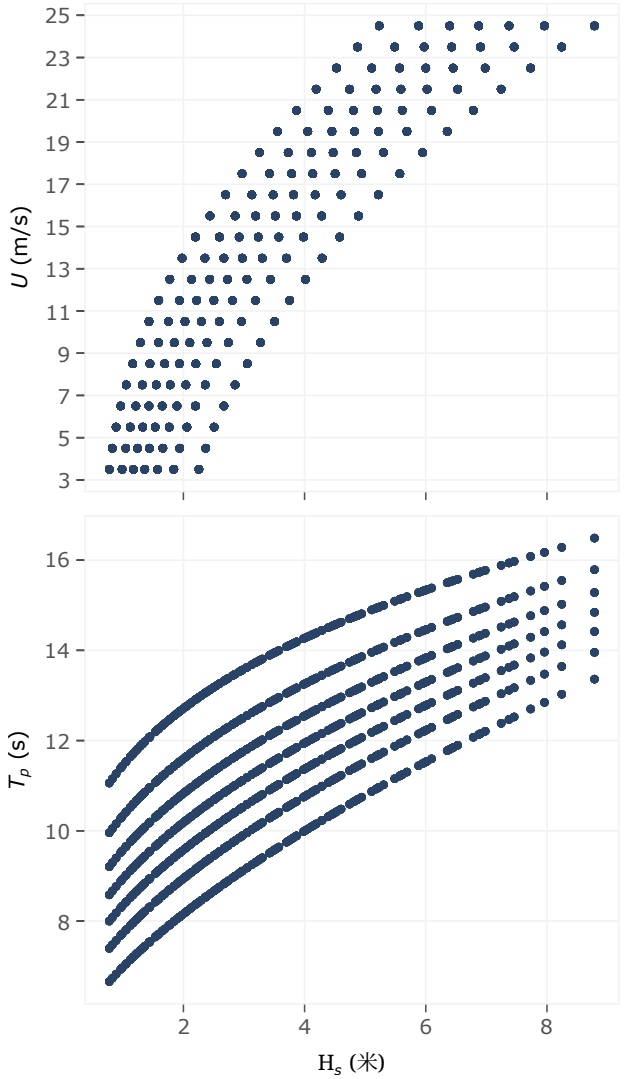


图8：FLOAT **风浪采样器**为案例研究生成的环境条件样本：风速U 与有效波高H_s 的关系，以及H_s 与峰值波周期T_P的关系；每种设计对应 6,468 个环境工况。

4.2.2. 数值模拟器设置

数值模拟器 **FLOAT**（参见第 3.3 节）用于执行带俯仰/升沉–平台校准的高保真动态模拟。通过将 IEA 22兆瓦仿真结果与参考研究中公布的结果进行基准测试，验证了其准确性 [10]，，详见附录J。所有 6,468 个采样案例均在 OpenFAST 中进行了仿真，每个案例的总持续时间为 1,000 秒，其中前 400 秒被舍弃以消除瞬态，从而得到 10 分钟的有效仿真时间。对于中间校准运行，采用了较短的 200 秒仿真，并舍弃前 100 秒以消除瞬态。附录K分析了通过俯仰/升沉–平台校准实现的动态改进，表明平台纵摇和升沉响应均显著降低，并被控制在接近于零的水平

校准后，仿真任务分布在 Inductiva 提供的 250 个云实例上 [46]，，每个实例均采用`c2d-highcpu-2` 型（2 个虚拟 CPU，4 GB 内存）。该配置在 12.6 小时内完成了全部 6,468 个工况，总成本为 ~$47；相比之下，在单个实例上顺序执行需要 124 天，约可实现 250× 的加速比。有关**FLOAT**数值模拟器的高性能计算基准测试详情，请参阅附录 L。

4.3. IEA 22 MW 浮式海上风力涡轮机塔架评估 *r*

在 FLOAT 框架内，通过数值模拟对参考塔架进行了频率响应和疲劳分析。

4.3.1. 频率响应分析

对 ***FLOAT***的**频率响应分析器**（见第3.4节）进行了应用，通过生成不同风速下塔基前后向弯矩的功率谱密度热图来评估塔架的动态行为，如图9所示。

分析范围限定在切入风速至额定风速之间，即 3–25 m/s，频率范围最高为 1.75 Hz。在约 0.35 Hz 的 3P 谐波附近，能量明显集中，这与浮式构型中塔架的一阶固有频率高度吻合（≈0.34 Hz）。该数值通过使用公式19将陆上频率 0.214 Hz 转换得到。3P 激励与浮体固有频率接近，表明在特定运行工况下存在潜在的共振风险。因此，优化后的塔架采用了刚-刚构型，以确保一阶固有频率高于 3P 激励范围。

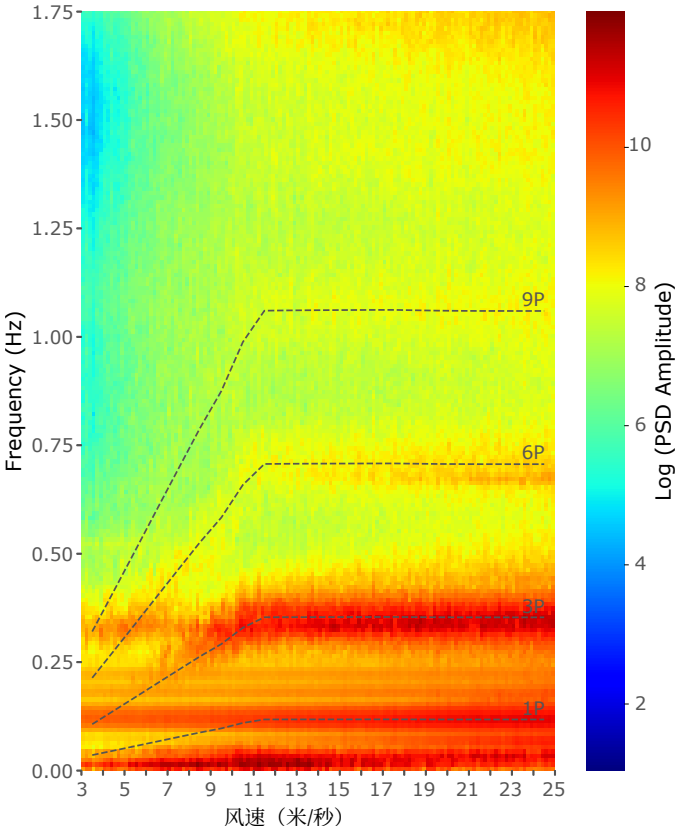


图 9：使用 **FLOAT**获得的 IEA 22兆瓦 浮式海上风力涡轮机在不同风速下的塔基前后向弯矩功率谱密度热图。虚线表示转子谐波（1P、3P、6P 和 9P）。

4.3.2. 疲劳分析

FLOAT 的疲劳分析器（**FLOAT**，参见第 3.5 节）用于评估沿塔架高度方向各塔架截面中点处的累积疲劳损伤，如图10所示。在 25 年的寿命期内，最大损伤出现在靠近底部的位置，达到 32.1，这意味着疲劳寿命仅为 9 个月。即使在顶部，最小值为 3.47，疲劳寿命也仅约为 7 年。这些结果确立了参考基准，并凸显了对 IEA 22 MW 浮式海上风力机塔架进行疲劳感知设计优化的必要性。

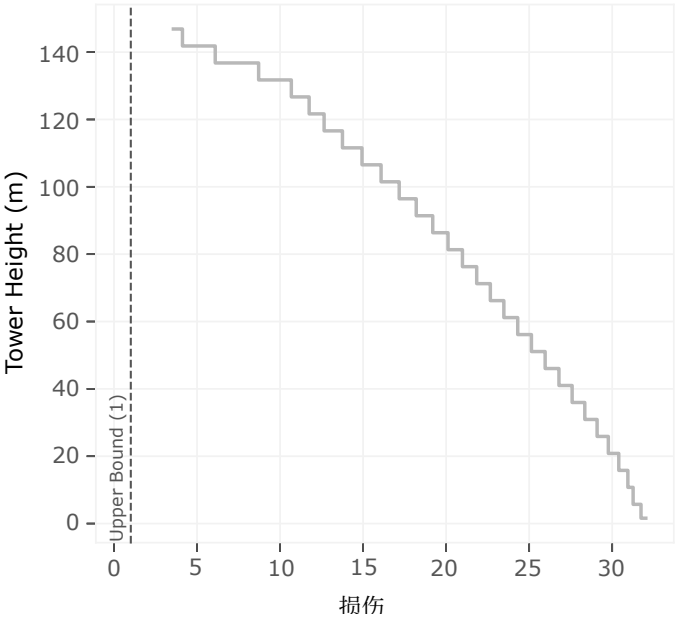


图10：使用 **FLOAT**获得的原始 IEA 22兆瓦 浮式海上风力涡轮机塔架疲劳损伤分布。

4.4. IEA 22 MW 参考模型的优化 *wer*

目标是在塔架设计过程中明确纳入疲劳因素，并在满足疲劳约束的前提下尽可能降低结构质量。该方法遵循 IEA 22 MW 参考研究的设计框架 [10], ，并进行有针对性的修改，以改善疲劳性能并延长结构寿命。

4.4.1. 对 *IEA 22 MW* 优化的修改

优化策略经过修改，以明确考虑疲劳驱动约束。在每个塔架截面的中点施加分段疲劳约束，以限制累积寿命疲劳损伤。在第一个循环中，采用疲劳不确定性系数 γ_d 1.0，因为设计距离收敛仍很远，此时若施加更严格的准则，会导致塔架不必要地过于保守。在后续循环中，γ_d 设为1.11，对应的有效损伤限值为ef，即D < 0。9，以便在几何形状更接近最终设计时引入鲁棒性裕度。为减轻塔架底部观测到的高疲劳损伤（见图10），并使其保持在允许限值内，底部直径的上界从10米增至12米，与浮体中央立柱的尺寸相匹配。此外，一阶固有频率从原始IEA 22兆瓦浮式海上风力机塔架的软刚设计调整为刚–刚构型，并限制在三倍转频（~0.35 Hz）和六倍转频（~0.71 Hz）转子谐波之间，同时留出15%的裕度（0.4–0.6 Hz）以避免共振；这一设定依据图9所示的动态响应分析。由于优化采用陆上模型进行，因此利用图9将浮式频率约束转换为陆上等效值，转换方法见公式19，得到0.25–0.38 Hz的目标范围。

4.4.2. 新塔优化

为实现结构重量最小的疲劳感知塔架设计，优化目标定义为使塔架质量最小化。设计变量为：

- **外径：** [6, 12] m
- **壁厚：** [0.0375,0.15]m

采用的设计约束包括：

径厚比：径厚比被限制在 80 至 160 之间，以满足可制造性要求。

- **单调性：**为避免出现不切实际的局部增厚，沿塔架高度方向的壁厚必须单调递减。

- **应力：** 塔架沿线的最大冯·米塞斯应力被约束为不得超过345兆帕的钢材屈服强度。载荷采用1.35的分项安全系数，材料强度采用1.3的分项安全系数，失效后果采用1.0的分项安全系数。

- **频率：** 一阶固有频率被约束为高于三倍转频且低于六倍转频转子谐波；在陆上模型中，该约束设定在0.25–0.38 Hz范围内（对应浮式工况下的0.4–0.6 Hz），以避免共振。

- **屈曲：** 根据DNV-RP-C实施全局屈曲和壳体屈曲约束 202 [52]。

- **疲劳：** 30个截面中每个截面中点处的全寿命疲劳损伤均被约束为低于1。第一次优化循环采用1.0的疲劳不确定性系数，后续循环增加至1.11，从而使有效损伤限值约为0.9。

在优化框架中，塔顶载荷保持不变，并与 IEA 22 MW参考模型的载荷相同。这些载荷仅用于验证应力、屈曲和频率约束，而疲劳损伤决定了最终的塔架几何形状。

未采用附属设备系数，因为辅助系统（例如平台、楼梯）不承载，因此不予考虑。

优化在**FLOAT**框架内进行，使用***DesignOptimizer***（参见第 3.6 节），并通过本研究提出的疲劳估算器处理疲劳问题（参见第 3.7 节）。采用 SLSQP算法求解优化问题，使用中心有限差分梯度，最优性容差为 10^{-3}，步长为 10^{-4}，最大迭代次数为 100 次。该流程通过 WISDEM 执行，并将疲劳估算器纳入优化循环。

5. 结果与讨论

使用 **FLOAT**模型获得的结果整理如下分为三类。首先，第 5.1 节介绍了优化流程，该流程为新型 22兆瓦浮式海上风力机塔架生成了面向疲劳的设计。接下来，第 5.2 节对参考设计与优化后的塔架进行了结构性能比较，而第 5.3 节则通过额外的频率响应和疲劳评估验证了优化设计。最终设计经过两个优化循环后得以实现。为清晰起见，每类结果均同时报告了第一次（优化方案 1）和第二次（优化方案2，对应最终的 FLOAT 22 MW浮式塔架设计）优化迭代的结果。

5.1. IEA 22 MW 浮式海上风力机塔架的疲劳感知设计优化

本节介绍了使用**FLOAT**，按照第 4.4 节中的流程，对 IEA 22兆瓦浮式海上风力机塔架进行疲劳感知设计优化的结果。目标是重新设计塔架，以减少全寿命疲劳损伤，同时尽量降低质量，并满足疲劳及其他设计约束。

5.1.1. 优化过程

图 11展示了目标函数（定义为塔架质量最小化）在两个优化周期（优化方案 1 和优化方案2）中的演变情况，而表5汇总了参考设计和优化设计对应的质量与成本数值。参考塔架质量为 1,574 t，设计时并未考虑在海上运行工况下满足 25 年疲劳寿命的要求，其估算运行寿命约为 9 个月。当施加抗疲劳性能要求和额外的结构约束后，为降低循环应力，需要增加壁厚和直径；经过第一次优化循环的 21 次迭代后，塔架质量增至 2,899 t（+84。2%）。在第二个周期中，经过 19 次迭代，更高效的材料重新分布使质量降至 2,656 t（+68。8%），相较第一次优化周期的设计降低了 15.4%。

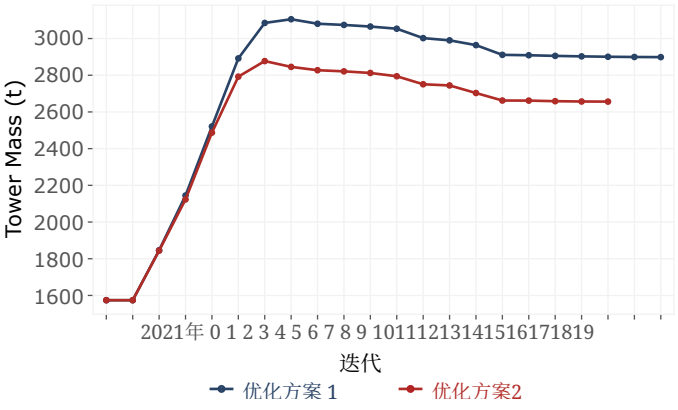


图 11：使用**FLOAT**对国际能源署 22 兆瓦浮式海上风力机塔架进行优化时目标函数（塔架质量）的演变。

表5：使用**FLOAT**获得的参考设计与优化后的IEA 22兆瓦塔架在质量和估算成本方面的比较。

参数	参考设计	优化方案 1	优化方案2
塔架质量 [吨]	1,574	2,899（+84.2%）	**2,656（+68.8%）**
塔架成本 [美元]	4.11M	7.11M（+73.2%）	**6.57M（+60.1%）**

尽管该构型比参考设计更重，但在选定材料和设计空间内，它是满足所施加的疲劳、频率、应力和屈曲约束条件的最小质量解。采用高强度钢并结合局部加强件，或可进一步减小壁厚和循环应力，从而实现更轻且抗疲劳的构型。估算成本呈现相同趋势：从 4.11 M USD（参考设计）增至优化方案 1 的 7.11 M USD（+73.2%），随后降至优化方案2 的 6.57 M USD（+60.1%）。这一设计演变将塔架寿命延长至 25 年，证实疲劳是最终塔架尺寸设计中的控制约束。下一小节将通过各项设计约束的演变，详细考察疲劳作为主导约束的影响。

5.1.2. 设计约束演化

图12 展示了疲劳损伤的演变情况，并给出了所有截面中的最小值和最大值。在两个优化周期（优化方案 1 和优化方案2）中，若干塔架截面起初均超过允许限值，但随着几何形状不断调整并收敛至允许范围内，疲劳损伤逐步降低。两个周期的收敛趋势相似，但第二个周期所需的迭代次数较少，因为它更接近最终设计。这种收敛行为清晰地体现了塔架质量（见 图 11）与疲劳损伤之间的权衡：在前 6 至 7 次迭代中，疲劳驱动的几何变化会增加壁厚和质量，从而使疲劳损伤迅速降低。达到疲劳合规性后，后续迭代则着重于重新分配材料以提高质量效率，同时满足疲劳要求，最终在所考虑的设计空间内得到最小质量塔架构型。

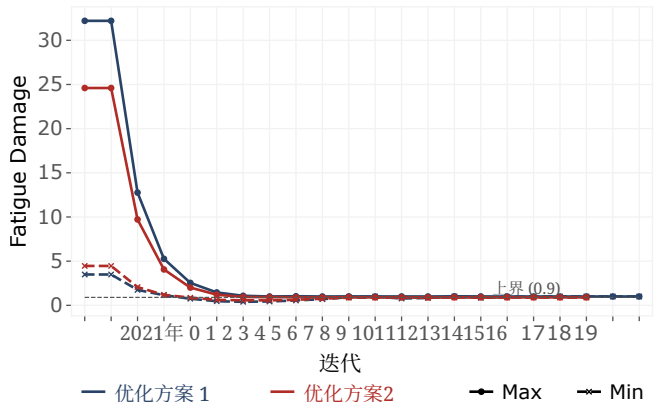


图12：使用 **FLOAT** 优化 IEA 22 MW 浮式海上风力机塔架期间，疲劳损伤（主导设计约束）的演化。

图 13将疲劳约束与其余结构约束进行比较，包括应力利用率、屈曲利用率和一阶固有频率，以及与径厚比、锥度和单调性限值相关的几何约束。在整个优化过程中，应力、屈曲和几何约束始终满足要求，因此主要起保障作用，而非设计的主动驱动因素。最初低于目标频带的一阶固有频率，在两个优化周期中均上移至满足要求的范围内，仅在前两次迭代中需要进行少量几何调整。相比之下，疲劳始终通过几何变化主导设计演变，并进而导致质量重新分配。结合上一小节讨论的质量变化趋势，这些结果证实，抗疲劳性能是塑造最终塔架构型的主导设计约束。

5.1.3. 优化后的*22 MW*浮式海上风力机塔架

图14 比较了 IEA 22 MW半潜式浮式海上风电机组塔架的原始几何形状与优化后几何形状，而表6 总结了主要几何参数，即塔架直径、壁厚和径厚比（D/t）。最终优化设计（优化方案2）增大了直径和壁厚：底部直径从 10.0 m 增至 12.0 m（+20.0%），壁厚从 66 mm 增至 118 mm（+78.2%）。顶部直径从 6.0 m 增至 6.741 m（+12.4%），壁厚从 38 mm 增至 45 mm（+15.8%）。与参考设计相比，最大直径差异出现在中间段，达到 +30.1%；最大壁厚差异出现在底部段，达到 +78.2%。这些变化使最小径厚比从 150.8 降至 101.5，从而提高了抗局部屈曲能力。参考塔架和最终优化塔架（FLOAT 22 MW半潜式浮式海上风电机组塔架）的完整几何参数分别列于附录 H 和附录 M。

表6：使用**FLOAT**得到的 IEA 22 MW 塔架参考设计与优化方案之间的几何对比。

参数	参考设计	优化方案 1	优化方案2
(1) 直径 [m]			
底部	10.000	12.000 (20.0%)	**12.000 (20.0%)**
Top	6.000	6.424 (7.1%)	**6.741 (12.4%)**
最大差值	–	3.069 (34.4%)	**2.766 (30.1%)**
(2) 厚度 [m]			
底部	0.066	0.124 (87.6%)	**0.118 (78.2%)**
Top	0.038	0.043 (13.1%)	**0.045 (15.8%)**
最大差值	–	0.058（87.6%）	**0.052（78.2%）**
（3）径厚比（D/t） [–]			
D/t比	150.8–160.0	96.4–160.0	**101.5–160.0**

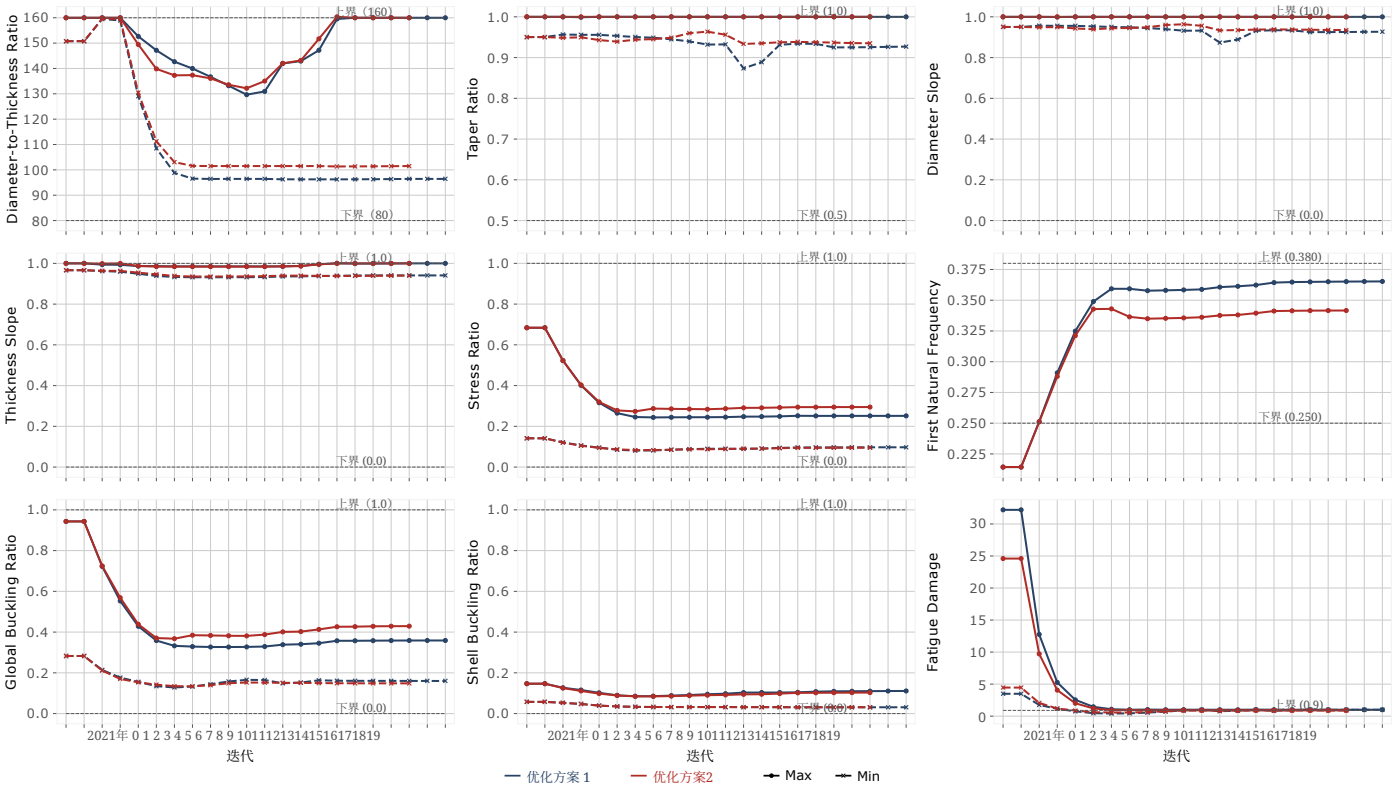


图13：使用 **FLOA** 优化 IEA 22 MW 浮式海上风力机塔架期间设计约束满足情况的演变 **T**.

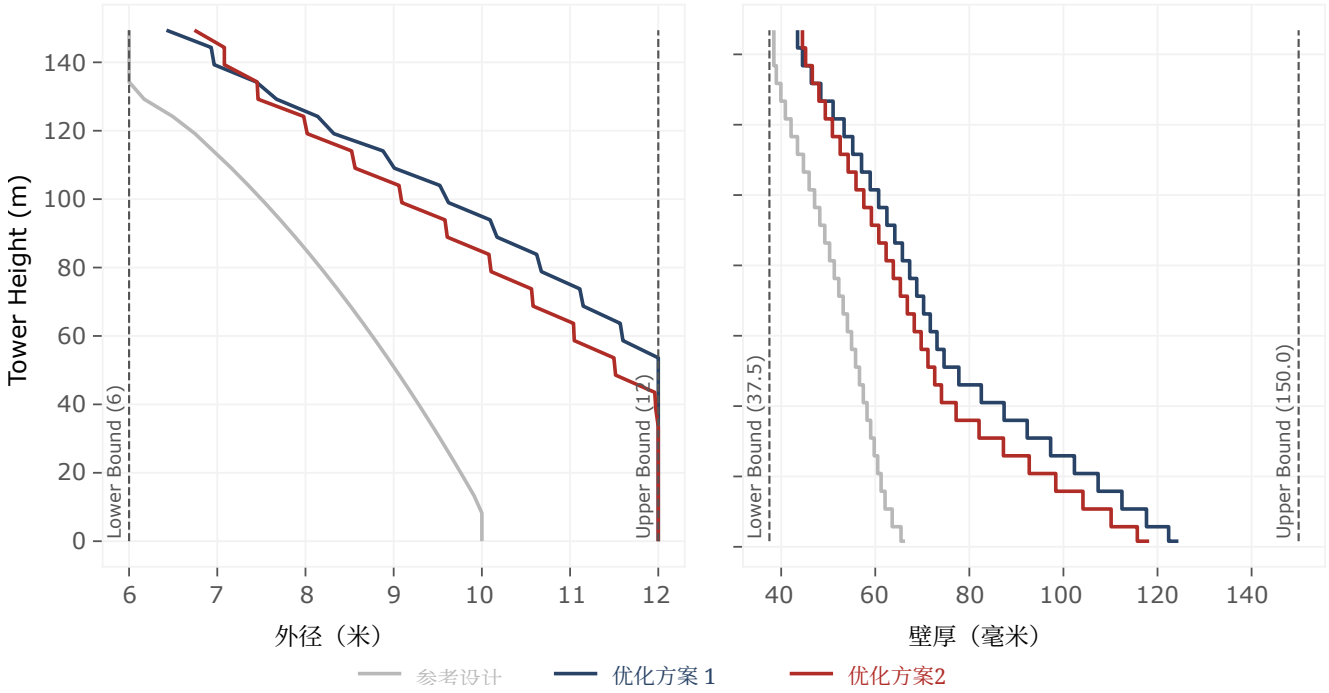
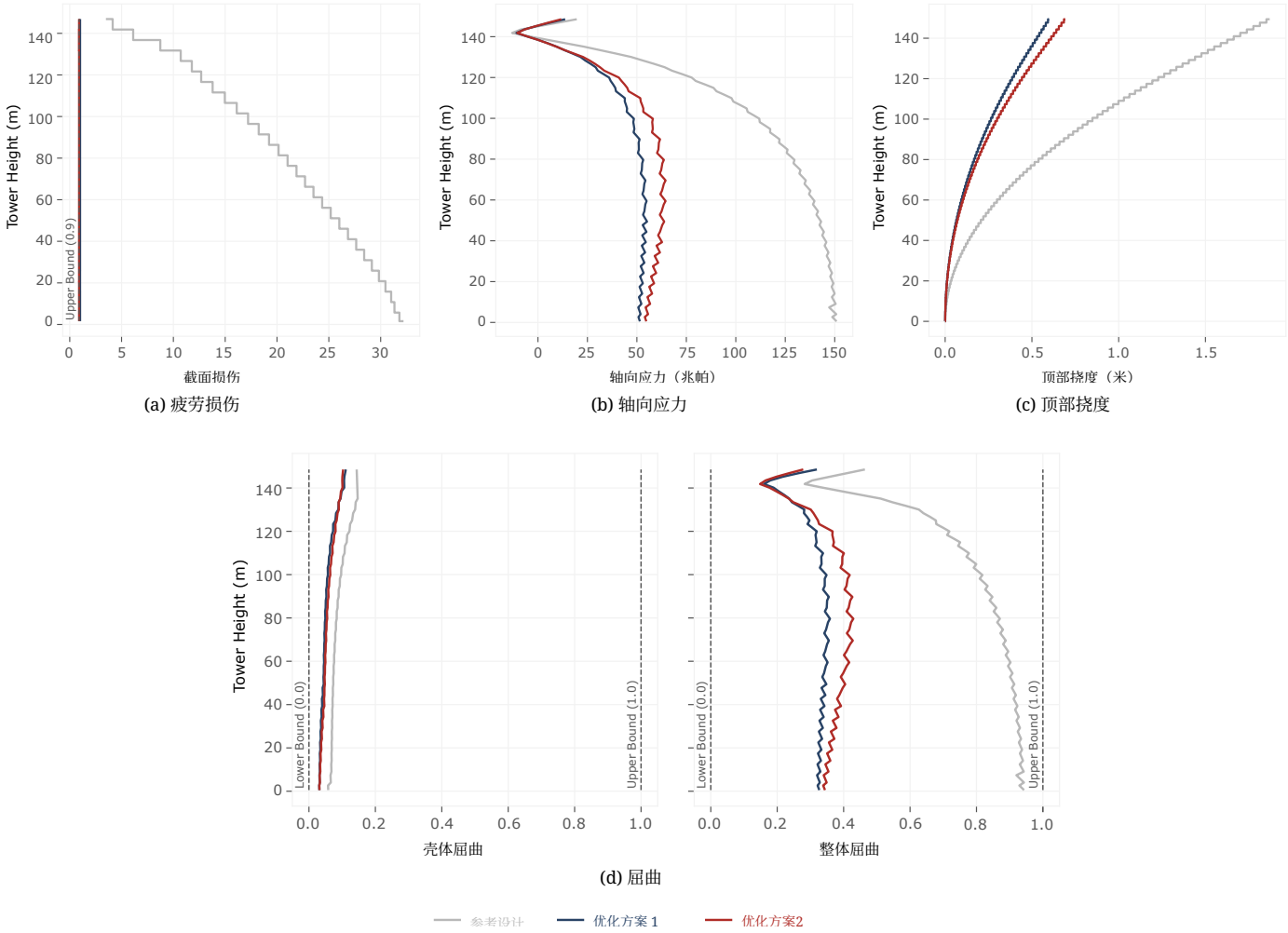


图14：使用 **FLOAT** 得到的原始与优化后的 IEA 22 MW 浮式海上风力机设计的塔架几何形状对比。

5.2. 原始与优化方案的*22 MW*浮式海上风力机塔架结构性能对比

本节详细比较原始 IEA 22 MW 浮式海上风力机塔架（参考设计）与第一次优化循环得到的优化构型（优化方案 1）和最终设计（优化方案2），重点关注关键结构性能指标。整体结果见图15，其中展示了疲劳损伤、轴向应力、顶部挠度和屈曲利用率分布，相应的数值汇总于表7。



(a) 疲劳损伤 (b) 轴向应力 (c) 顶部挠度

(d) 屈曲

图15：使用**FLOAT**的 IEA 22 MW 浮式海上风力机塔架的结构性能。

5.2.1. 疲劳损伤

如图 15a所示，参考塔架底部的疲劳损伤达到最大值（32.128），而最终设计将其降至0.900（−97。2%），这是降幅最大的位置。顶部的损伤则从3.471降至0.900（−74。2%），使所有位置的数值均低于1的临界阈值。

5.2.2. 轴向应力

图15b显示，最终设计中底部的参考应力从 150.944 兆帕降至 54.761 兆帕（−63。7%），这是降幅最大的截面。此项改进反映了为满足疲劳损伤约束条件而要求塔架具有更高的刚度。

5.2.3. 顶部挠度

在图15c中，参考塔架的顶部挠度为 1.870 m，最终设计将其降至 0.692 m（−63。0%），这是位移降幅最大的部位。再次说明，为满足疲劳损伤约束，塔架需要具备更高的刚度。

5.2.4. 屈曲

图15d显示，壳体屈曲利用率从参考设计到最终设计有所下降，沿塔架各处的降幅相近，最大降幅约为 0.053。整体屈曲利用率的改善幅度更大，尤其是底部，从 0.943 降至 0.344，降幅为 0.599（−63。6%），也是改善幅度最大的部位。再次说明，为满足疲劳损伤约束，塔架需要具备更高的刚度。

5.2.5. 一阶固有频率

一阶固有频率从参考塔架的0.214 Hz提高到最终设计的0.342 Hz（+59。4%），如表7所示。根据公式19从陆上工况转换为浮式工况后，参考值0.214 Hz对应约0.34 Hz，而最终设计则升至约0.54 Hz。这使优化后的塔架处于刚度–刚度刚–刚度构型中，安全地限制在三倍转频（~0.35 Hz）和六倍转频（~0.71 Hz）之间，从而确保避免共振，并体现出优化设计刚度的提高。

表7：使用 **FLOAT** 获得的参考设计与优化后的 IEA 22兆瓦塔架结构性能比较。

指标	参考设计	优化方案 1	优化方案2
(1) 疲劳损伤 [–]			
底部	32.128	1.000 (−96.9%)	**0.900 (−97.2%)**
Top	3.471	1.000 (−71.2%)	**0.900 （−74.1%）**
最大差值	–	−31.128 （−96.9%）	**−31。228 (−97。2%)**
(2) 轴向应力 [兆帕]			
底部	150.944	51.514 (−65.9%)	**54.761 （−63.7%）**
Top	19.601	13.744 (−29.9%)	**11.790 （−39.85%）**
最大差值	–	−99.430 (−65.9%)	**−96.183 (−63.7%)**
(3) 顶部挠度 [m]			
底部	0.000	0.000 (0.0%)	**0.000 (0.0%)**
Top	1.870	0.599 (−68.0%)	**0.692 （−63。0%）**
最大差值	–	−1.271 （−68.0%）	**−1.178 (−63.0%)**
(4a) 壳体屈曲 [–]			
底部	0.057	0.031 (−45.6%)	**0.032 （−45.6%）**
Top	0.144	0.111 （−22.8%）	**0.103 （−28.4%）**
最大差值	–	−0.052 （−35.1%）	**−0.053 (−35.8%)**
（4b）整体屈曲 [–]			
底部	0.943	0.327 (−65.4%)	**0.344 （−63.6%）**
Top	0.464	0.319 (−31.2%)	**0.278 （−40。0%）**
最大差值	–	−0.616 （−65.4%）	**−0。599 (−63。6%)**
（5）陆上运行一阶固有频率 [Hz]			
f_1	0.214	0.365 （+70.5%）	**0.342 （+59.4%）**

5.3. 优化方案*22 MW*浮式海上风力机塔架的验证

需要对优化后的22兆瓦塔架进行验证，以评估是否需要进一步的优化周期；本案例中观察到需要进行两次迭代。为此，分别使用频率响应分析器和疲劳分析器 对 **FLOAT**进行了额外的频率响应和疲劳评估。对于每个优化循环，均重新模拟参考风浪条件（见第 4.2.1 节），以评估优化后的塔架，并相对于参考设计评定其频率响应和疲劳性能。

5.3.1. 频率响应验证

图16证实了优化的有效性：通过比较参考塔架和优化后塔架的塔基前后向弯矩功率谱密度热图，展示了优化效果。参考设计的响应已在第 4.3.1 节中分析，结果显示，靠近三倍转频谐波处（~ 0.35 Hz）存在明显放大，且该频率接近参考塔架的第一阶浮体固有频率（~ 0.34 Hz），表明存在共振问题。验证结果凸显了优化设计对这一共振的抑制效果：第一次优化将部分能量从三倍转频转移至低于六倍转频的频率范围，而最终设计（第二次优化）则进一步减弱了三倍转频处以及接近六倍转频极限处（~ 0.71

赫兹）。这些观察结果与最终设计的一阶固有频率（0.54 赫兹）一致，该频率使优化后的塔架稳妥地处于三倍转频与六倍转频极限之间的刚-刚构型。随着迭代推进，谐波放大逐渐减弱，这证实最终设计的频率响应性能比参考设计更为稳健。

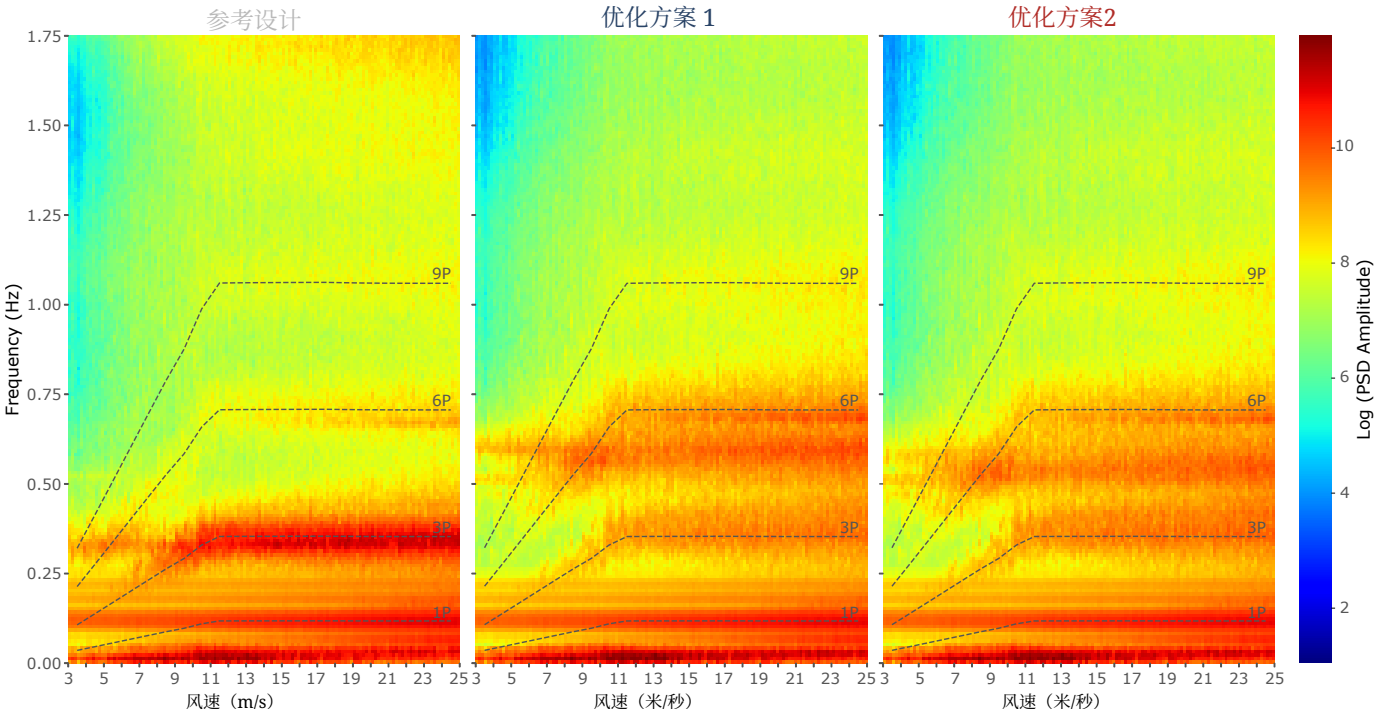
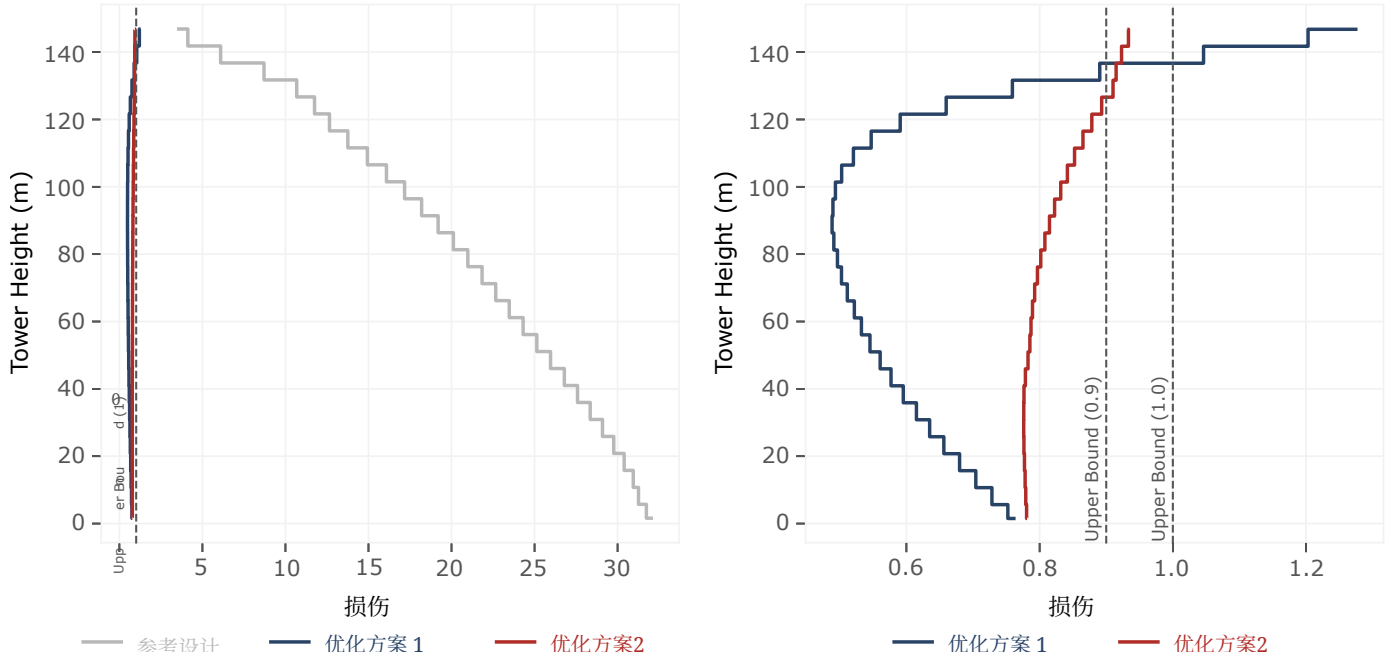


图16：使用 **FLOAT** 获得的 IEA 22 MW 浮式海上风力机在不同风速下塔基前后向弯矩的功率谱密度热图。从左至右依次为：参考塔架、第一优化塔架和第二优化塔架。虚线表示转子谐波（1P、三倍转频、六倍转频、9P）。



(a) 沿塔架高度方向的参考设计与优化设计

(b) 标示出允许疲劳界限的优化设计

图 17：使用 **FLOAT** 得到的 IEA 22 MW 浮式海上风力机塔架疲劳损伤分布对比。

5.3.2. 疲劳性能验证

图 17a比较了参考设计与优化后的塔架在高保真仿真中的疲劳损伤。参考设计的损伤大幅超过允许水平（见 第 4.3.2 节），底部损伤达到 32.1；第一次优化显著降低了疲劳损伤，但上部区段仍超过允许限值，数值约为 1.3，如表8所示。由此，参考设计的寿命从 9 个月延长至采用优化设计1时的约 19 年，但仍未达到要求的 25 年寿命。如图 17b所示，第二次优化针对更保守的 0.9 上限进行优化，使疲劳损伤分布中所有截面的数值均低于 1 且接近 0.9，从而满足 25 年疲劳寿命要求，并验证了 **FLOAT**工作流程的第一收敛准则（见第 3.1.2 节）。

表8：使用**FLOAT**获得的参考设计与优化方案的 IEA 22兆瓦塔架损伤对比。

指标	参考设计	优化方案 1	优化方案2
底部	32.128	0.764（−97.6%）	**0.781（−97.6%）**
Top	3.471	1.277（−63.2%）	**0.932（−73.1%）**
最大差值	–	−31.364（−97.6%）	**−31。347 (−97。6%)**

为验证第二项收敛准则，计算了**FLOAT** 损伤估算值与高保真仿真结果之间的平均相对误差，并在表9中报告。对于最终设计，误差保持在10%以下，平均值为 −8。6%；顶部截面的最大偏差为3.9%，最小偏差为−13。8%，这表明**FLOAT** 对疲劳的估计略偏低以保守的方式估计损伤。这些结果证实两项收敛准则均已满足，并表明**FLOAT**在生成可靠的抗疲劳设计方面卓有成效。

表9：优化方案 IEA 22兆瓦塔架的高保真仿真结果与**FLOAT** 估算结果之间的损伤差异。

指标	优化方案 1（边界 = 1.0）	优化方案2（边界 = 0.9）
底部差异	−0.236（−23.6%）	**−0。119 (−13。2%)**
最大差异	0.277 (27.7%)	**0.032（3.5%）**
最小差异	−0.512（−51.2%）	**−0.124 (−13.8%)**
最大差值	0.277 (27.7%)	**0.035（3.9%）**
平均差异	−0.356 (−35.6%)	**−0。077（−8。6%）**

6. 局限性

本研究优先考虑中间设计阶段的计算可处理性，因此采用了一些应予以说明的建模简化。这些简化有意限定在优化循环内，不影响对优化后的塔架进行最终验收。具体而言，设计优化依赖于陆上塔架模型，并通过应用浮式到陆上频率修正来保持动态一致性；此外，在评估中间阶段的结构约束时，采用预先给定的塔顶载荷，且不会随着塔架几何形状的变化而重新计算载荷。此外，轻量级疲劳估算器采用基于解析几何的缩放，并使用平均 S–N 曲线斜率。尽管这种方法能够高效地进行迭代式重新设计，但在中间优化迭代过程中，它并未显式解析几何形状变化引起的耦合 AHSE 载荷重新分配，

这是为了在早期设计探索阶段实现快速收敛而有意作出的权衡。为缓解这些局限性，最终设计仅通过对相同的抽样环境条件进行完整的 OpenFAST 重新仿真来验收，并要求各截面的疲劳损伤均处于允许范围内，且结果与高保真结果的偏差在规定容差之内。

所展示的案例研究也体现了对环境条件和设计载荷工况范围的审慎界定。疲劳评估和重新设计仅针对 DLC 1.2（正常发电），该工况通常决定累积寿命疲劳损伤，因此构成塔架设计的主要尺寸设计范围。所展示的优化未明确纳入其他与疲劳相关的国际电工委员会设计载荷工况，例如故障、停机和停泊工况。

同样，为控制所需仿真的数量，案例研究未考虑风向变化和风浪不对齐。因此，所报告的结果仅适用于此处考察的风浪对齐条件，但所提出的概率公式很容易纳入这些影响。最后，用于抽样的风浪分布基于已发表模型，可能无法代表所有场址；将该框架扩展至场址校准分布将进一步增强其普适性。

7. 结论

本研究提出了 **FLOAT**，这是一个用于浮式海上风力涡轮机塔架疲劳感知设计优化的框架。主要成果如下：

- **概率风浪采样：** 将浮式海上风力涡轮机的IEC载荷工况减少至6,468个（减少 $\sim 1.5 \times 10^6$），同时保持了对主导疲劳损伤的高严重性海况的代表性。

- **高性能计算支持的仿真：** 使用250个云实例，以47美元的成本在13小时内完成了6,468个OpenFAST案例，而顺序执行则需要124天（快~250×）。俯仰/升沉校准提高了漂浮式动力学的保真度。

- **轻量级疲劳估算器：** 通过对IEA 22兆瓦塔架的6,468次仿真进行验证，得出了保守的疲劳预测；在30个截面上的平均相对误差为 −8.6%，最大正偏差为3.9%，同时无需重复运行高保真仿真即可支持迭代优化。

- **IEA 22 MW 塔架的面向疲劳的重新设计：** 形成了 *FLOAT 22*兆瓦浮式海上风力涡轮机塔架，将疲劳寿命从 ~9 个月延长至25年，并分别将底部和顶部损伤降低了97.6%和73%。重新设计使浮体的第一阶固有频率从0.34Hz（软刚耦合）提高至0.54Hz（刚刚耦合），消除了共振风险；相应的质量增加了69%，反映了满足长期疲劳要求所需的材料量，且这些要求处于所考虑的设计空间内。采用高强度材料或局部加强件以降低循环应力，可以缓解这一问题。

本文报告的所有定量疲劳寿命结果，都应在已展示的与DLC 1.2一致的风浪范围内进行解读；在相同框架下扩展至其他设计载荷工况以及环境条件不对齐的情况，是未来研究的自然下一步。

所提出的框架在 IEA 22兆瓦浮式塔架上进行了验证，具有通用性，可适用于其他塔架尺寸、场地条件和支撑结构，包括固定式基础和陆基配置，但需要对环境输入和验证设置进行适当的重新校准。综上，这些贡献使 **FLOAT** 成为在所示范围内扩展浮式海上风电塔架的计算高效工作流程，同时提供基准数据集，以支持未来的人工智能驱动的设计工具。

CRediT作者贡献声明

JoãoAlvesRibeiro：概念化、方法论、软件、形式分析、调查、数据整理、撰写——初稿、可视化。**Francisco Pimenta**：概念化、方法论、软件、形式分析、调查、验证、撰写——审阅与编辑。**BrunoAlvesRibeiro**：概念化、方法论、软件、调查、验证、撰写——审阅与编辑。**SérgioM. O.Tavares**：概念化、方法论、验证、调查、撰写——审阅与编辑、监督。**FaezAhmed**：概念化、方法论、验证、调查、撰写——审阅与编辑、监督。

利益冲突声明

作者声明，他们不存在任何已知的、可能被认为影响本文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

致谢

João Alves Ribeiro 感谢 Luso-American Development Foundation (FLAD) 提供的资助，以及博士奖学金 SFRH/BD/151362/2021（DOI: 10.54499/SFRH/BD/151364/2021 （访问日期：2024年11月18日）），该资助由葡萄牙科学技术基金会 (FCT)、科学、技术和高等教育部 (MCTES) 及葡萄牙的国家预算 (OE) 提供资金，并获得欧洲社会基金 (ESF) 和 MIT Portugal计划下 PorNorte 的支持；此外还获得能源转型联盟 (56)的资助，该资助通过欧盟的复苏与韧性计划 (PRR) 共同出资。

BrunoAlves Ribeiro 感谢 FCT 通过博士奖学金 2021/08659/BD 提供的经济支持。

Francisco Pimenta感谢项目2022.08120.PTDC获得的资金支持，M4WIND（DOI:

10.54499/2022.08120.PTDC（访问日期：2024年11月18日），该项目由FCT通过国家资金资助/MCTES（PIDDAC）提供支持；此外，UID/ECI/04708/2020-CONSTRUCT-研究与开发结构及建筑研究所也由FCT通过国家资金资助/MCTES（PIDDAC）提供支持。

作者谨向来自美国国家可再生能源实验室（NREL）的**Garrett Barter**、**PietroBortolotti**和**Daniel Zalkind**致谢，感谢他们提供宝贵的讨论和支撑结构。

数据可用性

所有**FLOAT** 资源，包括框架和重新设计的 IEA 22兆瓦塔架模型（FLOAT 22兆瓦浮式海上风力涡轮机塔架），均已开放获取，网址分别为https://github.com/Joao97ribeiro/FLOAT和https://github.com/Joao97ribeiro/FLOAT-22-280-RWT-Semi。

附录 A. 按照 IEC 标准进行海上风力机疲劳分析的仿真数量

通过对 IEC 61400-3 [12, 13]中定义的环境参数进行离散化，可得海上风力机疲劳评估所需的仿真总数：平均风速（U）、有效波高（H_s）、峰值波周期（T_P）和平均波向（M_{ww}）。表 A.10 列出了每个参数的范围、分箱宽度及所得分箱数量；每个平均风速和湍流强度对应一个随机种子。总工况数等于各分箱数量的乘积，再乘以随机种子数量。

表 A.10：按照 IEC 标准的分箱建议，采用每个平均风速和湍流强度对应一个随机种子进行海上风力机疲劳分析的仿真数量（改编自 [16]）。

参数	范围	分箱宽度	分箱数量
U (米/秒)	4 – 26	2	11
H_S (米)	0 – 14	0.5	28
T_P (秒)	3 – 21	0.5	36
米$_{ww}$ (°)	−180 – 180	15	24
总组合数			**266112**

附录 B. 浮式海上风力涡轮机参考模型

表 B.11 总结了由领先机构开发的浮式海上风力涡轮机主要参考模型，并提供了广泛用于设计、基准测试和仿真研究的标准化配置。

表 B.11：浮式海上风力涡轮机参考模型。

特征	NREL 5 兆瓦	IEA 15 兆瓦	IEA 22兆瓦
实体	NREL	IEA	国际能源署和丹麦技术大学
Year	2009	2021	2023
支撑结构结构	驳船式基础、单柱式基础，半潜式	半潜式	半潜式
转子直径（米）	126	240	284
轮毂高度 (m)	90	150	170
塔架质量（吨）	347.46	860	1574
参考文献	[9, 53, 54]	[31]	[10]

附录 C. 风力涡轮机仿真与设计软件工具

表 C.12 总结了风力涡轮机仿真与设计中常用的软件工具，包括其主要功能和关键参考文献。

表 C.12：风力涡轮机仿真与设计软件工具。

软件	开发者类别	描述	Ref.
（1）仿真工具			
OpenFAST	NREL	开源 AHSE 仿真工具，适用于陆上和海上风力涡轮机。模块化、经过验证且广泛采用。	[38]
FAST.Farm	NREL	开源风电场级仿真器，扩展 OpenFAST。模拟尾流、风力涡轮机相互作用、and 大气条件。	[39]
HAWC2	DTU	专有（免费供学术界使用）	高保真气动弹性工具用于风力涡轮机认证和学术研究。	[40]
Bladed	DNV	专有	行业标准商业用于设计的工具，配有图形用户界面和认证。	[41]
(2) 设计与优化工具			
WISDEM	NREL	开源设计与成本建模风力涡轮机的框架 and 风电场。支持多学科优化。	[42]
WEIS	NREL	专注于.....的 WISDEM 开源扩展 on 漂浮式风电、控制协同设计、and 可靠性分析。	[43]

附录 D. 风浪条件概率分布

本附录概述了 风浪采样器 中使用的概率分布，该采样器在 第 3.2 节中有所描述，涉及平均风速（U）、有效波高（H_s）、波浪峰值周期（T_P）以及风–浪不对准角（M_{ww}）。U、H_s和 T_P 的分布通过其累积分布函数（CDF）定义，然后对其求导以获得概率密度函数（PDF），而 M_{ww} 遵循 von Mises 分布。基于 Papi 等人 [16],得到的分布如 图 D.18所示。

附录 *D.1.* 平均风速

平均风速 U 被建模为服从幂指数 Weibull 分布的随机变量：

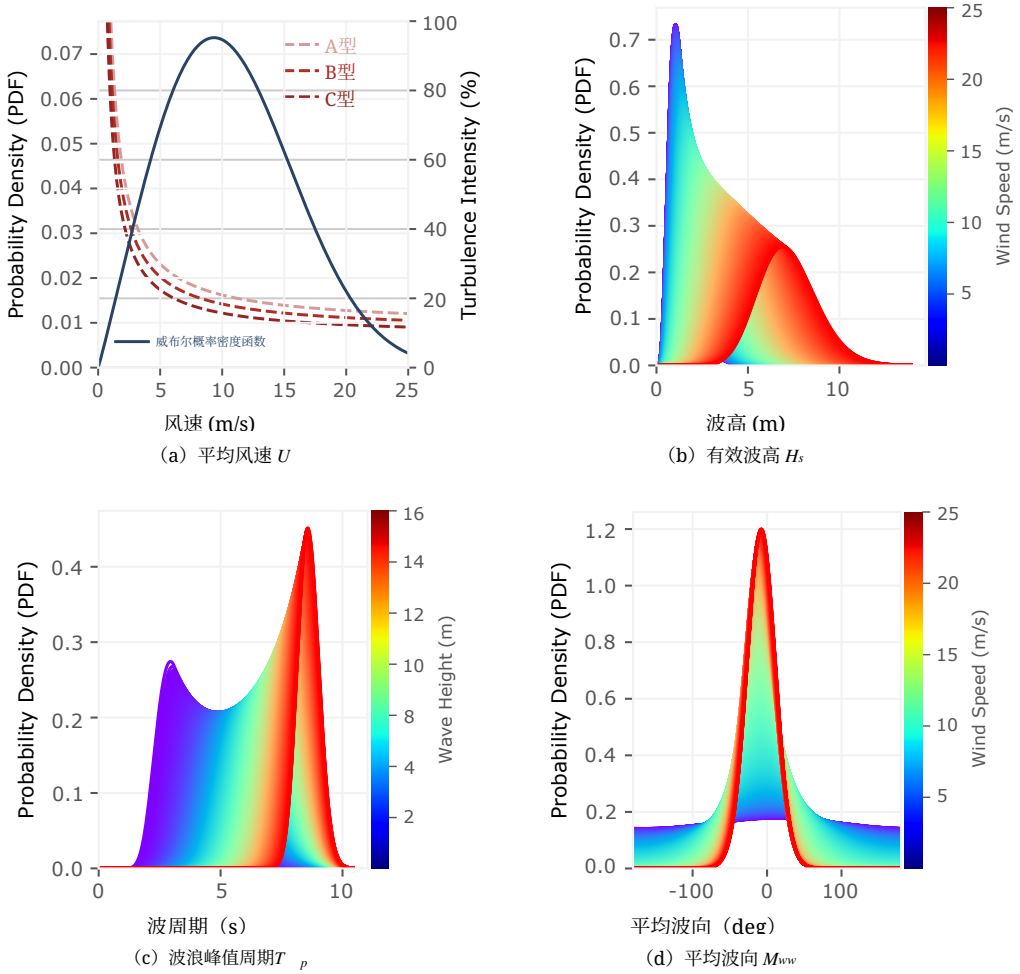
$$F_U(U) = \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{\alpha}\right)^{\beta}\right]\right)^{\delta} \tag{D.1}$$

对累积分布函数求导可得概率密度函数：

$$f_U(U) = \delta\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{U}{\alpha}\right)^{\beta-1}\left(1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{\alpha}\right)^{\beta}\right]\right)^{\delta-1}\exp\left[-\left(\frac{U}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{D.2}$$

取值为 $\alpha = 12.773$、$\beta = 2.345$ 和 $\delta = 0.880$。为考虑风湍流，选取一个 IEC 类别（A、B 或 C），其对应的参考湍流强度为 $I_{\text{ref}} \in \{0.16、0.14、0.12\}$。随后计算风速的标准差：

$$\sigma_w = I_{\text{ref}}\,(0.75 \cdot U + 5.6) \tag{D.3}$$



（a）平均风速 U　（b）有效波高 H_s

（c）波浪峰值周期 T_p　（d）平均波向 M_{ww}

图 D.18：**FLOAT** 风浪采样器中使用的环境参数的概率密度函数。

附录 *D.2*。有效波高

有效波高 H_s 被建模为以平均风速 U 为条件的随机变量，并服从指数化 Weibull 分布：

$$F_{H_s}(H_s \mid U) = \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{H_s}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right]\right)^5 \tag{D.4}$$

对累积分布函数求导可得条件概率密度函数：

$$f_{H_s}(H_s \mid U) = 5 \cdot \frac{\beta_{H_s}}{\alpha_{H_s}}\left(\frac{H_s}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}-1} \cdot \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{H_s}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right]\right)^4 \cdot \exp\left[-\left(\frac{H_s}{\alpha_{H_s}}\right)^{\beta_{H_s}}\right] \tag{D.5}$$

其中，参数 α_{H_s} 和 β_{H_s} 取决于 U，具体如下：

$$\alpha_{H_s} = \frac{1.25 + 0.01U^{1.98}}{2.0445^{1/\beta_{H_s}}}$$

$$\beta_{H_s} = 1.1 + \frac{1.37}{1 + \exp\left[-0.27(U - 15.86)\right]}$$

附录 *D.3*。波浪峰值周期

波浪峰值周期 T_P 建模为以有效波高 H_s 为条件的对数正态分布。其累积分布函数为：

$$F_{T_p}(T_p \mid H_s) = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln T_p - \mu_{T_p}}{\sqrt{2}\sigma_{T_p}}\right)\right] \tag{D.6}$$

对累积分布函数求导可得相应的概率密度函数：

$$f_{T_p}(T_p \mid H_s) = \frac{1}{T_p \sigma_{T_p}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln T_p - \mu_{T_p})^2}{2\sigma_{T_p}^2}\right] \tag{D.7}$$

其中，参数 μ_{T_p} 和 σ_{T_p} 取决于 H_s，如下所示：

$$\mu_{T_p} = \ln\left(5.94 + 9.42\sqrt{\frac{H_s}{g}}\right)$$

$$\sigma_{T_p} = 0.24\exp(-0.11H_s)$$

附录 *D.4.* 波风失配角

平均波浪—风向失准角 M_{ww} 采用以平均风速为条件的 von Mises 分布进行建模

风速U。相应的概率密度函数为：

$$f_{M_{ww}}(M_{ww} \mid U) = \frac{\exp\left[k\cos(M_{ww} - \mu_w)\right]}{2\pi I_0(k)} \tag{D.8}$$

其中，$I_0(k)$ 是零阶第一类修正贝塞尔函数。参数 k 和 mu_w 定义为 U的函数：

$$k = \frac{10.04}{1 + \exp\left[-0.28(U - 15.89)\right]} \tag{D.9a}$$

$$\mu_w = 0.24 - 0.05U + 0.0014U^2 \tag{D.9b}$$

附录 E. FLOAT 工作流程详情

本附录详细介绍了集成于 **FLOAT**中的核心模块的流程和算法。文中包含了与相应公式和章节的交叉引用，以确保内容清晰且可复现。每个算法均说明其对应模块的主要输入、步骤和输出。通过将这些流程形式化，本附录以透明、模块化的方式展现了整体方法。

附录 *E.1.* 风浪采样器

为生成具有代表性的疲劳仿真环境条件，需遵循算法 1 所列的关键步骤：

1. **风速采样**。 按照 IEC 61400-3 [12, 13],，将从切入（V_{in}）到切出（V_{out}）的运行范围（通常为 3–25 m/s）划分为 n_U 个均匀分箱，箱宽为：

$$\Delta_{\text{bin}} = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}}{n_U}. \tag{E.1}$$

在每个分箱中心对平均风速进行采样：

$$U_i = V_{\text{in}} + \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta_{\text{bin}}. \tag{E.2}$$

由于环境状态以 U 为条件，因此其概率对应于相关风速的概率，该概率由概率密度函数 $f_U(U)$（方程 D.2）计算得到：

$$p_{U_i} = \int_{U_i - \Delta_{\text{bin}}/2}^{U_i + \Delta_{\text{bin}}/2} f_U(U)\, dU \tag{E.3}$$

2. **波高采样**。 对于每个风速 U_i，从 (0,1) 中的均匀分布抽取样本，并通过逆条件累积分布函数$F_{H_s}(H_s \mid U)$（方程 D.4）进行映射，从而得到 U_i 对应的 j-th 个样本：

$$H_{s_{ij}} = F_{H_s}^{-1}\left(\frac{j - 0.5}{N_{H_s}} \,\middle|\, U_i\right) \tag{E.4}$$

3. **波周期采样**。 对于每个 $H_{s_{ij}}$，n^{T_p} 个 (0，1) 内的均匀数值通过逆条件累积分布函数$F_{T_p}(T_p \mid H_s)$(公式D.6) 进行映射。对于 $H_{s_{ij}}$，第 k 个样本为：

$$T_{p_{ijk}} = F_{T_p}^{-1}\left(\frac{k - 0.5}{N_{T_p}} \,\middle|\, H_{s_{ij}}\right) \tag{E.5}$$

算法 1 风浪采样器工作流程。

输入：

分布：

- $f_U(U)$ （平均风速的概率密度函数，公式 D.2）
- $F_{H_s}(H_s \mid U)$（有效波高的累积分布函数，公式 D.4）
- $F_{T_p}(T_p \mid H_s)$ （波浪峰值周期的累积分布函数，公式 D.6）

参数：

- n_U （风速样本数量）
- n_{H_s} （波高样本数量）
- n_{T_p} （波周期样本数量）
- $M_{ww} = 0$ （固定平均波浪方向）
- V_{in}, V_{out} （切入和切出风速）
- 湍流风 （真：湍流风；假：定常风）
- 等级$_{\text{IEC}}$ （IEC湍流等级，如为湍流风）
- $n_{U_{\text{随机种子}}}$ （每个风速对应的随机种子数量，若为湍流情况）

步骤1：风速采样
$id = 0$
$\Delta_{\text{bin}} = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}}{n_U}$ (Eq. E.1)
for $i = 1$ to n_U **do**
  $U_i = V_{\text{in}} + \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta_{\text{bin}}$ (Eq. E.2)
  $p_{U_i} = \int_{U_i - \Delta_{\text{bin}}/2}^{U_i + \Delta_{\text{bin}}/2} f_U(U)\, dU$ (Eq. E.3)
  Step 2: Wave Height Sampling
  for $j = 1$ to n_{H_s} **do**
    $H_{s_{ij}} = F_{H_s}^{-1}\left(\frac{j-0.5}{n_{H_s}} \,\middle|\, U_i\right)$ (Eq. E.4)
    Step3 and We end 2 采样
    for $k = 1$ to n_{T_p} **do**
      $T_{p_{ijk}} = F_{T_p}^{-1}\left(\frac{k-0.5}{nT_p} \,\middle|\, H_{s_{ij}}\right)$ (Eq. E.5)
      S步骤: M平均方向分配
      $id \leftarrow id + 1$
      $Sim_{id} \leftarrow (U_i, H_{s_{ij}}, T_{p_{ijk}}, M_{ww})$
      $p_{id} \leftarrow p_{U_i}$
    结束循环
  结束循环
结束循环
$N_{\text{sim}} = id$
步骤 5：湍流扩展（如适用）
如果湍流**则**
  对于$id = 1$ 到 N_{sim} **执行**
    $(U_i, H_{s_{ij}}, T_{p_{ijk}}, M_{ww}) \leftarrow$ 模拟$_{id}$
    对于 $s = 1$到n_{Useeds} **执行**
      $Sim_{id_{\text{turb}}} \leftarrow (U_i,\ s,\ \text{类别}_{\text{IEC}},\ H_{s_{ij}}, T_{p_{ijk}},\ M_{ww})$
    结束循环
  结束循环
结束条件判断
步骤 6：概率归一化
$Z = \sum^{N_{\text{sim}}} \text{标识符}=1\ p_{id}$
对于标识符 $= 1$到 N_{sim} **执行**
段落$_{id} \leftarrow$ 段落$_{id}$ $\frac{Z}{}$ (Eq. E.6)
结束循环

输出：

仿真样本（适用于所有标识符）：

- Sim_{id} （标识符标识符的仿真样本）
- p_{id} （Sim_{id} 的概率）将这两个合并

4. **平均波向分配**。 如图 D.18所示，平均波向集中在零附近，因此设置为$M_{ww} = 0$。

5. **湍流扩展**。 对于湍流风，湍流强度 σ_w 根据每个U_i（公式 D.3）中的 IEC 等级（A、B 或 C）计算。使用$n_{\mathrm{U_{seeds}}}$ 个随机种子生成随机风场。不适用于定常风。

6. **概率归一化**。 为每个样本分配其对应风速的概率 $p_{id} = p^{U_i}$，并在全部 N_{sim} 个样本中进行归一化，以确保 $\sum p_{id} = 1$:

$$p_{id} = \frac{p_{id}}{\sum_{id=1}^{N_{\mathrm{sim}}} p_{id}} \tag{E.6}$$

仿真的总数量变为:

$$N_{\mathrm{sim}} = \begin{cases} n_U \cdot n_{H_s} \cdot n_{T_p} \cdot n_{\mathrm{U_{seeds}}}, & \text{turbulent wind} \\ n_U \cdot n_{H_s} \cdot n_{T_p}, & \text{steady wind} \end{cases} \tag{E.7}$$

附录*E.2.* 数值模拟器

执行疲劳仿真时将执行以下步骤，详见 算法2:

1. **生成湍流风**。 对于湍流风况，TurbSim 根据平均风速 U_i、随机种子 s和 IEC湍流等级生成随机风场。随后将这些风场作为 OpenFAST 的输入。

2.**计算初始值**。针对每个风速，在静水条件下运行稳态风 OpenFAST 仿真，并禁用平台纵摇自由度；丢弃初始数秒后，获得叶片桨距角、转子转速、平台纵荡和平台升沉的时间平均值，并将其用作初始条件以加快收敛。该仿真还可提供用于俯仰校准的平均转子力和力矩。

3.**俯仰–平台校准**。对于半潜式浮式风力机，使用预仿真的F_{rotor} 和M_{rotor}进行平台俯仰校准。给定安全系数后，计算所选立柱中的所需水深（方程 G.4）和平台总质量（方程 G.5）。

4.**升沉–平台校准（可选）**。对于半潜式浮式风力机，当塔架几何形状发生变化时，会重新校准平台升沉，以保持静力平衡。通过重新分配平台质量来抵消塔架质量变化，从而进行调整。

5. **运行仿真**。定义所有初始值和平台校准参数后，通过 Inductiva 在高性能计算平台上使用 OpenFAST 运行仿真。必须指定仿真时间和虚拟机数量。

算法2 数值模拟器工作流程。输入：仿真样本（适用于所有 id）：Sim_{id} （包括风速 U、种子 s 和湍流等级 Class $_{\mathrm{IEC}}$）参数：t_{sim_0}、t_{init_0} （仿真和截取时间，稳态风）t_{sim} （仿真时间，湍流风）SF（平台纵摇校准安全系数）N_{vm} （用于高性能计算的虚拟机数量）1：步骤1：生成湍流风 2：定义风场参数：U 、 s 和 $\mathrm{Class}_{\mathrm{IEC}}$3：使用 TurbSim 生成风场 [48]4：步骤2：计算初始值 5：在静水条件下，关闭平台纵摇自由度，运行时长为 t_{sim_0} 的稳态风 OpenFAST [38] 仿真 6：舍弃前 t_{init_0} 秒，以去除启动瞬态 7：计算叶片桨距角、转子转速、平台纵荡、平台升沉、F_{rotor} 和 M_{rotor} 的时间平均值 8：步骤3：俯仰–平台校准 9：使用 F_{rotor}、M_{rotor} 和 SF：选择用于纵摇平衡的立柱 计算立柱水高（公式 G.4）计算平台总质量（公式 G.5）10：步骤4：升沉–平台校准（可选）如果塔架质量发生变化，则调整平台质量 确保平衡： $\Delta m_{\mathrm{tower}} + \Delta m_{\mathrm{platform}} = 011$：步骤5：运行仿真 12：使用步骤1生成的风场 13：使用步骤2得到的初始值 14：使用步骤3得到的平台校准参数 15：对每个 Sim_{id}，运行时长为 t_{sim} 的 OpenFAST [38] 仿真 16：通过 Inductiva [46]在 N_{vm} 台虚拟机上执行 输出：仿真输出（适用于所有 id）：$\mathrm{Response}_{id}$ （仿真编号 id 对应的时间序列输出）

附录 *E.3.* 频率响应分析器

以下步骤总结于 算法 3，用于通过功率谱密度评估塔基前后向力矩的频域特性:

1.**仿真功率谱密度估计**。 对于每次仿真，按以下步骤处理塔基前后向弯矩时间序列:

1.1. **去除启动瞬态**。 舍弃时间序列的初始部分，以排除瞬态效应。

1.2. **计算功率谱密度**。使用 Welch 方法 [49]，估计单边功率谱密度，并指定采样频率、分段长度、汉宁窗和 50% 重叠。

2.**谐波频率识别**。 识别与转子诱导周期性相关的谐波分量:

算法 3 频率响应分析器工作流程。（N_{sim} 个仿真，编号为 id $= 1$、……、N_{sim}）（N_{U_b} 个风速分箱，编号为 b $= 1$、……、N_{U_b}）（N_{U_j} 个平均风速组，编号为 j $= 1$、……、N_{U_j}）输入：仿真输出（针对所有 id）：响应$_{id}$（仿真编号对应的时间序列输出）U_{id}（仿真编号对应的平均风速）参数：t_{sim_0}、t_{init_0}（仿真时间和截取时间，稳态风）t_{sim}、t_{init}（仿真时间和截取时间，湍流风）f$_s$（采样频率）L（Welch 分段长度）（f_{min}、f_{max}）、（U_{min}、U_{max}）（绘图范围）1：步骤1：仿真功率谱密度估计 2：对于 id $= 1$至 N_{sim} 执行 3：步骤1.1：移除启动瞬态：4：响应$_{id} \leftarrow$ 响应$_{id}[t_{init}$、$t_{sim}]$5：步骤1.2：计算功率谱密度：6：使用 Welch 方法计算单边功率谱密度 [49]，使用 f_s 和 L 7：循环结束 8：步骤2：谐波频率识别 9：对于 b $= 1$至 N_{U_b} 执行 10：步骤2.1：计算平均转子转速 11：在静水条件下运行稳态风 OpenFAST [38]仿真，仿真时间为 t_{sim_0}，并进行纵摇/升沉—平台校准 12：丢弃前 t_{init_0} 秒以移除瞬态 13：计算时间平均转子转速，RPM(U_b) 14：步骤2.2：计算谐波频率 15：$f_{1P}(U_b)$ =RPM(U_b)/60 16：$f_{nP}(U_b) = n\, f_{1P}(U_b)$，其中 $n \in \{3, 6, 9\}$17：循环结束 18：步骤3：PSD热图组装 19：步骤3.1：PSD聚合 20：对于 j $= 1$至 N_{U_j} 执行 21：S(f, U_j) $= \frac{1}{|\mathcal{J}|} \sum_{i \in \mathcal{J}(U_j)} S_{(i)xx}(f)$ 22：循环结束 23：步骤3.2：热力图可视化 24：Heatmap(f, $\overline{U_j}$) $= \log_{10} S(f, U_j)$ 25：在（f_{min}、f_{max}）×（U_{min}、U_{max}）范围内绘制，并叠加谐波叠加线。输出：功率谱密度热图（$\log_{10} S(f, U_j)$，带 nP 叠加线）

(Eq. 9)

(Eq. 10)

2.1.**计算平均转子转速**。 对于每个风速区间，在静水条件下进行稳态风 OpenFAST 仿真，并进行纵摇/升沉—平台校准。去除瞬态后，计算时间平均转子转速。

2.2. **计算谐波频率**。 根据平均转子转速（计算 1P频率和高阶谐波公式 10）。

3. **PSD热力图组装**。 组装跨风况的统一谱表示：

3.1.**PSD聚合**。 按平均风速对仿真进行分组，并对相应频谱取平均（公式 9），再将其组装成 PSD矩阵。3.2. **热力图可视化**。 绘制 PSD 的对数$_{10}$ 随频率 [f_{min}、f_{max}] 以及风速 [U_{min}、U_{max}]变化的热图，横轴为风速、纵轴为频率，并叠加谐波曲线（1P、3P、6P、9P）。

附录 *E.4.* 疲劳分析器

以下步骤概述了 算法4中所述的疲劳分析流程：

1. **仿真疲劳评估**。 对于每次仿真以及每个塔架截面i，损伤按如下方式计算：

1.1. **去除启动瞬态**。 截去力矩时间序列的初始部分，以排除瞬态效应。1.2. **力矩插值**。 由于前后向弯矩仅在离散塔架高度处记录，因此根据最接近的可用数据对各截面中点处的力矩时间序列进行插值。1.3. **计算雨流循环**。 对插值得到的力矩序列M_{FA}进行雨流计数，得到以j为索引的循环，每个循环的计数为n^{ij}，力矩范围为 $\Delta M^{\mathrm{FA}_{ij}}$。根据圆形截面的弹性弯曲理论，将其转换为应力范围：

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{\Delta M_{\mathrm{FA}_{ij}} \cdot r_i}{I_i} \tag{E.8}$$

其中，r_i 为外半径，$I_i = \frac{\pi}{4}\left(r_i^4 - (r_i - t_i)^4\right)$为截面 i 处的截面二次矩，$t_i$表示壁厚。1.4. 计算失效循环次数。使用方程 1 中的 S-N 曲线，计算每个应力范围 $\Delta\sigma_{ij}$对应的失效循环次数 N_ij。1.5. 计算样本损伤。根据 Palmgren–Miner法则（方程 2），使用 n^{ij} 和 N^{ij} 计算损伤。

2. **全寿命疲劳估算**。 对于每个仿真 标识符，其损伤将根据其预期发生次数进行加权n_{id} （参见 方程 4），并在设计寿命内进行计算。随后使用 方程 3 计算总累积损伤。

附录 *E.5.* 设计优化器

以下步骤概述了设计优化流程，详见 算法 5：

1. **初始化设计向量**。 根据参考塔架几何结构，设置各塔架截面的外径和壁厚初始值。

算法 4 疲劳分析器工作流。

(n 个选定的塔架横截面，索引为$i = 1, \ldots, n$)
(N_{sim} 个仿真，索引为标识符 $= 1, \ldots, N_{\text{sim}}$)

输入：
塔架（对所有i）：
r_i (截面i处的外半径)
t_i （截面i处的壁厚）
S-N曲线参数:
m （斜率）
k （厚度指数）
t_{ref} （参考厚度）
仿真输出（适用于所有 标识符）：
响应$_{id}$ （仿真标识符的时间序列输出）
p_{id} （仿真标识符的概率）
参数:
t_{sim} （仿真时间）
t_{init} （启动修整时间）
LT （风力涡轮机寿命）

步骤1：仿真疲劳评估
对于标识符 $= 1$至 N_{sim} **执行**
  步骤1.1：移除启动瞬态
  响应$_{id} \leftarrow$ 响应$_{id}$[时间$_{\text{init}}$,时间$_{\text{sim}}$]
  对于$i = 1$到n，**执行**
    步骤1.2：力矩插值
    使用响应插值$M_{\text{FA}}(z_i, t)_{id}$
    步骤1.3：计算雨流循环
    对$M_{\text{FA}}(z_i, t)$ $\leftarrow$ ΔM_{ij}, n_{ij}应用雨流法
    $\Delta\sigma_{ij} = \dfrac{4 \cdot \Delta M_{ij} \cdot r_i}{\pi\left(r_i^4 - (r_i - t_i)^4\right)}$ （公式 E.8）
    步骤 1.4：计算失效循环次数
    $N_{ij}(\Delta\sigma_{ij}) = \left[\dfrac{\Delta\sigma_{ij}}{\text{次}_i\text{次}_{\text{ref}}}\right]^{-m}$ （公式 1）
    步骤 1.5：计算样本损伤
    $D_{id,\ i} = \sum_j \dfrac{n_{ij}(\Delta\sigma_{ij})}{\text{北}_{i\text{焦耳}}(\Delta\sigma_{i\text{焦耳}})}$ （式 2）
  结束循环
结束循环
步骤2：全寿命疲劳估算
对于$i = 1$到 n **执行**
  $t_{id} = t_{\text{sim}} - t_{\text{init}}$
  $n_{id} = \dfrac{LT}{t_{id}} \cdot p_{\text{标识符}}$ （公式 4）
  $D_i^{\text{t}} = \sum_{=1}^{N_{\text{id}}}$ 标识符$D_{id,\ i} \cdot n_{id}$ （公式 3）
结束循环

输出：
塔架疲劳损伤（对于所有i）：
D_i^{t} （各塔架截面的预期疲劳损伤）

2. **计算塔架响应**。 使用结构模型评估所选设计载荷工况下的应力、屈曲安全系数和一阶固有频率。

3. **估算疲劳损伤**。 使用疲劳估算器 根据参考塔架几何结构及其

算法 5 设计优化器工作流程。

（优化使用陆上塔架模型；漂浮式频率限值通过 公式 19进行映射。）
（n 个选定的塔架横截面，索引为 $i = 1, \ldots, n$）

输入：
参考塔架（对于所有 i）：
d_i^{ref} （截面i处的外径）
t_i^{ref} （截面i处的厚度）
D_i^{ref} （截面i处的疲劳损伤）
安全系数：
$\gamma_f, \gamma_m, \gamma_n, \gamma_d$
设计变量：
$d_i \in [d_{\min}, d_{\max}]$ （外径，对于 i $= 0, \ldots, n$）
$t_j \in [t_{\min}, t_{\max}]$ （壁厚，对于 j $= 1, \ldots, n$）
设计约束：
$\dfrac{\gamma_f \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n \cdot \sigma_{\text{vM}}(\boldsymbol{x})}{\sigma_{\text{局部壳屈曲，几何因子}}} \le 1.0$ (应力，公式 12)
(屈曲，公式 13)
$f_{\text{最小值}_1} \le f_1 \le f_1^{\max}$ (频率，公式 14)
$D_i \cdot \gamma_d \le 1.0$ (疲劳，式 15)
$d_{i+1} \le d_i,\ t_{i+1} \le t_i$ (单调性，式 16)
$\left(\dfrac{t}{d}\right)_{\min} \le \dfrac{t_i}{d_i} \le \left(\dfrac{t}{d}\right)_{\max}$ (直径厚度比，公式17)
锥度$_{\min} \le \dfrac{d_{i+1} - d_i}{\text{锥度}_{\max}}$ (锥度，公式18)
优化设置：
SLSQP （优化方法）
中心有限差分 （梯度估计）
δ （有限差分步长）
$N_{\max}$ （最大迭代次数）
ϵ_{opt} （最优性容差）
载荷：
$\mathbf{F}_{\text{top}}$, $\mathbf{M}_{\text{top}}$ （塔顶处施加的力和力矩）
米$_{\text{RNA}}$, 转/分$_{\text{CoM}}$, 转动惯量$_{\text{RNA}}$ （RNA：质量、质心、惯性）

步骤1：初始化设计向量
  $\boldsymbol{x}^{(0)} = \{r_i^{\text{ref}},\ t_i^{\text{ref}}\}$ (初始设计)
对$k = 0$至 $N_{\max}$ **执行**
  步骤2：计算塔架响应
  使用 $\mathbf{F}_{\text{top}}$、$\mathbf{M}_{\text{top}}$、m_{RNA}、$\mathbf{r}_{\text{CoM}}$、$\mathbf{I}_{\text{RNA}}$ 计算响应
  计算应力 σ_i、局部壳屈曲、几何因子、f_1
  步骤 3：估算疲劳损伤
  估算 D_i，使用疲劳估算器 (算法 6)
  步骤 4：检查约束条件
  检查所有已定义的约束条件。
  步骤 5：计算目标函数
  计算塔架质量 $M(\boldsymbol{x}^{(k)})$ (公式 11)
  步骤 6：更新设计
  $\boldsymbol{x}^{(k+1)} \leftarrow \text{SLSQP}(\boldsymbol{x}^{(k)})$，使用有限差分（$\delta$）
  步骤 7：检查收敛
  如果 $\|\nabla\mathcal{L}(\boldsymbol{x}^{(k+1)})\| < \epsilon_{\text{opt}}$ **则**
    中断
  结束如果
结束循环

输出：
优化输出(对于所有i和j):
$d_i^*,\ t_j^*$ （优化方案直径和厚度）

对应的损伤作为参考，计算当前设计中各塔架截面的疲劳损伤。

4. **检查约束条件**。 验证当前设计是否满足所有施加的约束条件。

5. **计算目标函数**。 计算目标函数，即塔架总质量。

6. **更新设计**。 在规定的边界内，采用中心有限差分和固定步长的 SLSQP算法更新设计向量。

7. **检查收敛**。 如果满足由最优性容差定义的收敛准则，则优化终止。否则，流程将返回步骤2，并继续执行，直至收敛或达到最大迭代次数。

附录 *E.6.* 疲劳估算器

以下步骤概述于算法 6，描述了疲劳估算程序：

1. **校准阶段（校准塔架）**。对于每个选定的截面i，使用校准塔架几何形状（r_i^{cal}和t_i^{cal}）、相应的疲劳损伤（D_i^{cal}）以及S-N曲线参数来计算常数C_i：

$$C_i = D_i^{\text{cal}} \cdot \left(r_i^{\text{cal}}\right)^{2m} \cdot \left(t_i^{\text{cal}}\right)^{m} \cdot \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t_i^{\text{cal}}}\right)^{k\cdot m} \tag{E.9}$$

2. **预测阶段（新塔架）**。校准好每个C_i 后，模型使用新塔架设计在同一截面i处的几何形状（r_i^{new}和t_i^{new}）以及相同的S-N曲线参数，估算其疲劳损伤D_i^{new}：

$$D_i^{\text{new}} = C_i \cdot \left(r_i^{\text{new}}\right)^{-2m} \cdot \left(t_i^{\text{new}}\right)^{-m} \cdot \left(\frac{t_i^{\text{new}}}{t_{\text{ref}}}\right)^{k\cdot m} \tag{E.10}$$

附录F. 蒙特卡洛权重与全寿命疲劳概率的等价性

对每个环境状态j 模拟持续时间t_j，得到总损伤D_j。因此，损伤率可表示为：

$$D(U_j, H_{s,j}, T_{p,j}, M_{ww,j}) = \frac{D_j}{t_j}. \tag{F.1}$$

代入蒙特卡洛近似（公式8）可得：

$$D_t \approx \sum_{j=1}^{N} D_j \cdot n_j, \tag{F.2}$$

其中，每种状态的有效重复次数定义为：

$$n_j = \frac{LT}{t_j} \cdot w_j. \tag{F.3}$$

将此结果与方程 4 中的期望计数公式进行比较可知，蒙特卡洛权重 w_j 等同于p_j 各环境状态发生的概率，从而确保概率模型与抽样模拟之间的一致性。

算法 6 疲劳估算器工作流程。

(n 个选定的塔架横截面，其索引为 $i = 1, \ldots\ldots, n$)

输入：

校准塔架（对于所有 i）：

r_i^{cal} （截面i处的外半径）

t_i^{cal} （截面i处的壁厚）

D_i^{cal} （截面 i 处的疲劳损伤）

S-N曲线参数：

m (slope)

k （厚度指数）

t_{ref} （参考厚度）

新塔架（适用于所有 i）：

r_i^{new} （截面i处的外半径）

t_i^{new} （截面i处的壁厚）

步骤1：校准阶段

for $i = 1$ to n **do**

$$C_i = D_i^{\text{cal}} \cdot \left(r_i^{\text{cal}}\right)^{2m} \cdot \left(t_i^{\text{cal}}\right)^{m} \cdot \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t_i^{\text{cal}}}\right)^{k\cdot m} \quad \text{(Eq. E.9)}$$

en 或

步骤2：预测阶段

对于$i = 1$至n**执行**

$$D_i^{\text{new}} = C_i \cdot \left(r_i^{\text{new}}\right)^{-2m} \cdot \left(t_i^{\text{new}}\right)^{-m} \cdot \left(\frac{t_{\text{新}i}\ t_{\text{参考}}}{\quad}\right)^{k\cdot m} \quad \text{(Eq. E.10)}$$

结束循环

输出：

塔架疲劳损伤 （对于所有 i）：

D_i^{new} （截面 i 处的疲劳损伤）

附录 G. 俯仰–平台校准的实现细节

总结构力矩由重力和气动力贡献产生，具体定义如下，并在 图 G.19中进行了说明。

重力矩为：

$$M_{\text{weight}} = g \cdot (m_{\text{nacelle}} \cdot x_{\text{nacelle}} + m_{\text{hub}} \cdot x_{\text{hub}} + m_{\text{blades}} \cdot x_{\text{blades}}) \tag{G.1}$$

其中，g 表示重力，m 表示各部件的质量，x 表示其水平位置。气动力矩为：

$$M_{\text{aero}} = F_{\text{rotor}} \cdot \cos(\theta) \cdot (z_{\text{hub}} - z_{\text{struct}}) + F_{\text{rotor}} \cdot \sin(\theta) \cdot x_{\text{hub}} + M_{\text{rotor}} \tag{G.2}$$

其中，θ 表示轴倾角，F_{rotor} 和M_{rotor} 分别表示在定常风和静水条件下，采用固定平台俯仰角计算得到的平均转子推力和力矩。

为在仿真中实现俯仰–平台校准，根据恢复力矩计算所需的压载质量：

$$m_{\text{colwater}} = \frac{M_{\text{colwater}}}{L \cdot g} \tag{G.3}$$

其中，L 表示立柱到平台中心的水平距离，如图 4 所示（L 表示迎风方向；$L \cdot \cos(60°) \cdot 2 = L$ 表示港口/右舷方向）。相应的水高为：

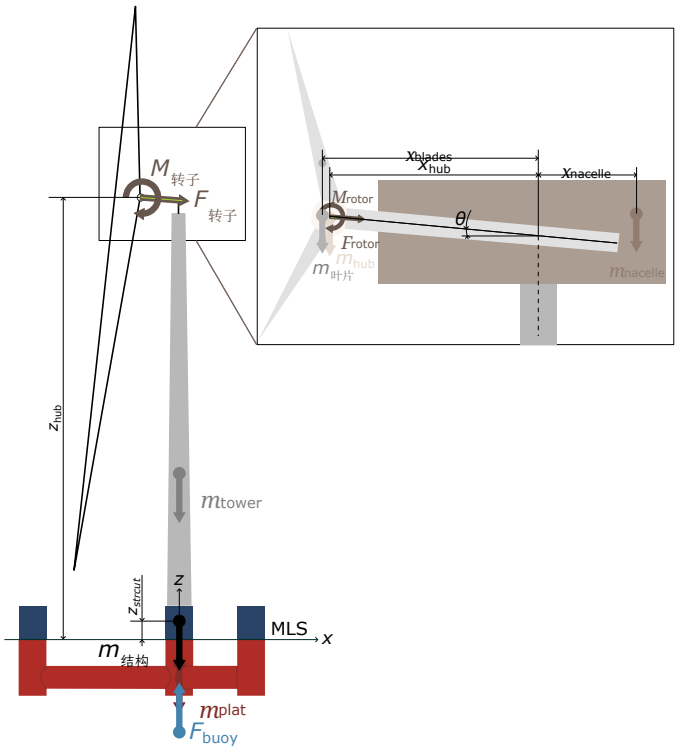


图 G.19：用于计算俯仰–平台校准结构力矩的施加载荷和几何参考。

$$h_{\text{colwater}} = \frac{m_{\text{colwater}}}{\rho \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{colwater}}^2}{4}} \cdot SF \tag{G.4}$$

其中，ρ表示水密度，d_{colwater} 表示立柱直径，SF 表示安全系数。为保持平台总质量不变，需减少等效结构质量，以补偿增加的水质量：

$$m_{\text{platform}} = m_{\text{platform,init}} - n_{\text{colwater}} \cdot m_{\text{colwater}} \cdot SF \tag{G.5}$$

其中n_{colwater} 为 1（迎风）或 2（左舷/右舷）。

附录 H. IEA 22 MW 半潜式浮式海上风力机参考塔架的几何参数

表 H.13汇总了 IEA 22 MW 半潜式浮式海上风力机参考塔架的几何参数，包括 31 个外径（d_i）、30 个分段高度（h_i）和 30 个壁厚（t_i，这些参数按从底部到顶部的顺序对应 30 个塔架截面。

表 H.13：IEA 22 MW 半潜式浮式海上风力机参考塔架的几何参数 [10]：31 个直径 d_i、30 个高度 h_i和 30 个厚度t_i，分布于 30 个截面中（从底部到顶部）。

i	d_i (米)	h_i (m)	t_i (mm)
0	10.000	-	-
1	10.000	3.1885	66.329
2	10.000	5.0410	64.618
3	9.912	5.0420	62.569
4	9.799	5.0410	61.597
5	9.683	4.0400	60.882
6	9.565	5.0410	60.151
7	9.444	5.0420	59.404
8	9.320	5.0410	58.639
9	9.194	5.0410	57.857
10	9.064	5.0420	57.056
11	8.931	5.0410	56.234
12	8.794	5.0410	55.391
13	8.654	5.0420	54.526
14	8.510	5.0410	53.636
15	8.361	5.0410	52.720
16	8.207	5.0420	51.775
17	8.049	5.0410	50.800
18	7.885	5.0410	49.792
19	7.715	5.0420	48.748
20	7.538	5.0410	47.663
21	7.353	5.0410	46.533
22	7.161	5.0410	45.354
23	6.954	5.0420	44.109
24	6.747	5.0410	42.818
25	6.494	5.0410	41.380
26	6.171	5.0420	40.387
27	6.000	5.0410	39.479
28	6.000	5.0410	38.444
29	6.000	5.0420	38.444
30	6.000	5.0405	38.444

附录 I. 案例研究的风浪采样示例

该风浪采样器模块（隶属于**FLOAT**；参见第 3.2 节）用于为数值模拟定义环境条件。在案例研究中（参见第 4 节），共考虑了 22 个离散风速。采样策略如图 I.20所示

针对 12.5 m/s 的代表性风速，并遵循以下六步流程：

1. **波高概率密度函数**。 有效波高（H_s）的概率密度函数由风浪联合分布得到。2.**按风速筛选**。 根据选定的风速对H_s 分布进行了条件化。3. **波高样本**。 根据累积概率，使用分层抽样选取了七个具有代表性的H_s 数值。4. **波周期概率密度函数**。 对于每个抽取的H_s，获取峰值波周期（T_p）的条件概率密度函数。5.**按波高筛选**。 根据对应的波高对T_p 分布进行了条件化。6. **波浪周期样本**。 从每个条件分布中抽取七个具有代表性的T_p 数值，最终为选定的风速得到49组（H_s，T_p）组合。

针对案例研究中考虑的所有风速，系统地应用了相同的六步采样流程。每种风速采用六个独立的湍流种子，因此每种塔架设计共计产生 6,468 个环境情景。

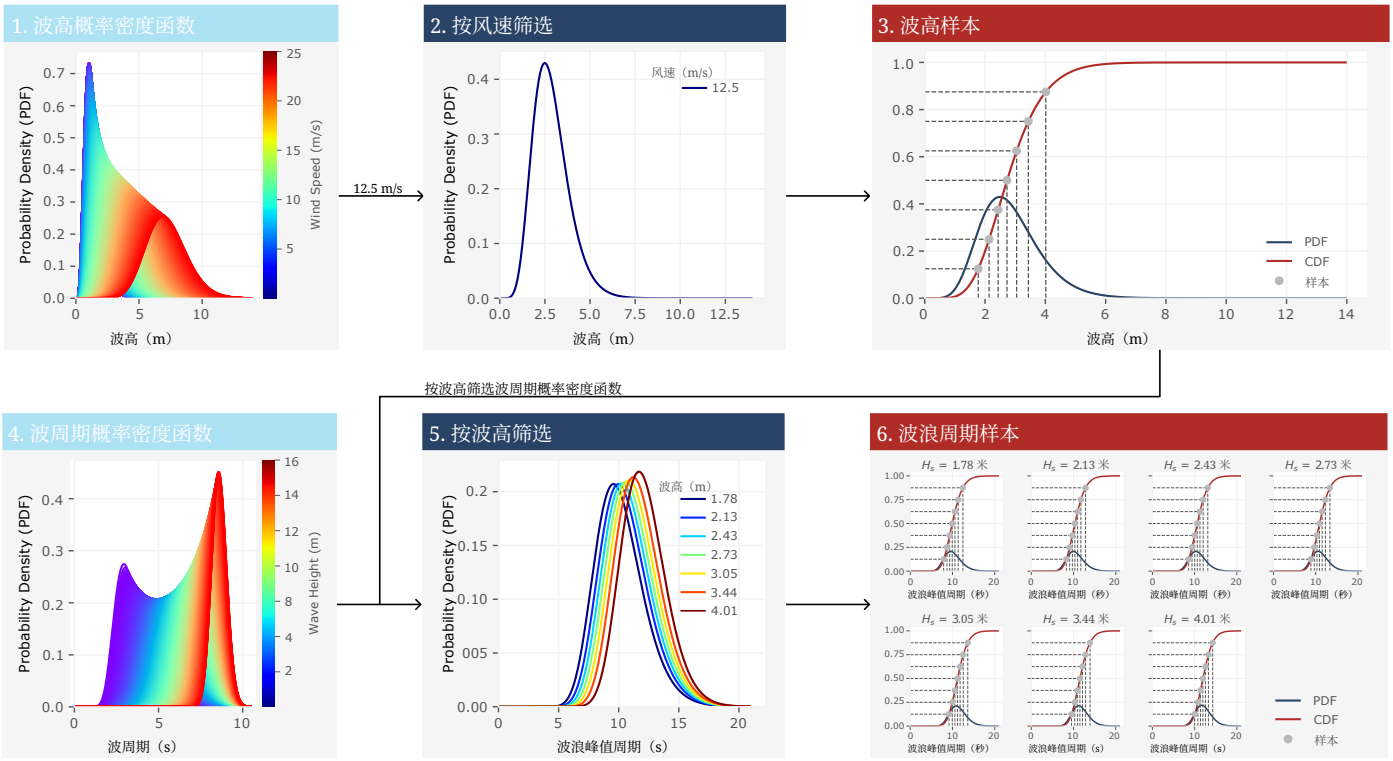


图 I.20：使用 **FLOAT** 风浪采样器 对风速为 12.5 m/s 的情况进行采样：选取了七种有效波高（H_s），并为每种波高选取七个峰值周期（T_p），共得到 49 种（H_s，T_p）组合。案例研究中的所有风速均采用了相同的流程。

附录J. 使用国际能源署 22 兆瓦参考设计对 FLOAT 数值模拟器进行基准测试

本附录介绍了一项基准研究，用于评估数值模拟器模块在 **FLOAT**中的准确性。研究结果与 IEA 22 MW 参考风力涡轮机模型进行比较 [10]。

附录*J.1.* 仿真设置

针对案例研究中定义的 22 种风速进行了仿真（见 第 4 节），仿真条件为定常风和静水。每次仿真运行 200 秒，并舍弃最初的 100 秒以消除瞬态效应。

附录*J.2.* 结果与比较

比较主要关注两个关键方面：转子性能和频率响应，二者均显示于图 J.21。

转子性能。 由**FLOAT** 生成的叶片桨距角、功率输出、推力、角速度和扭矩曲线与 IEA 22 MW参考模型的结果高度一致。观察到桨距角和推力存在轻微偏差，这归因于平台倾斜效应，因为参考风机采用固定式系统建模，而基准测试是在浮式工况下进行的。

频率响应。 转子转速随风速变化的频谱图显示了 1P、三倍转频、六倍转频和 9P 的谐波趋势，与 IEA 22 MW参考模型中报告的趋势一致。这些与转子诱发激励相关的谐波在整个运行过程中呈现一致的缩放规律。

附录 *J.3.* 验证总结

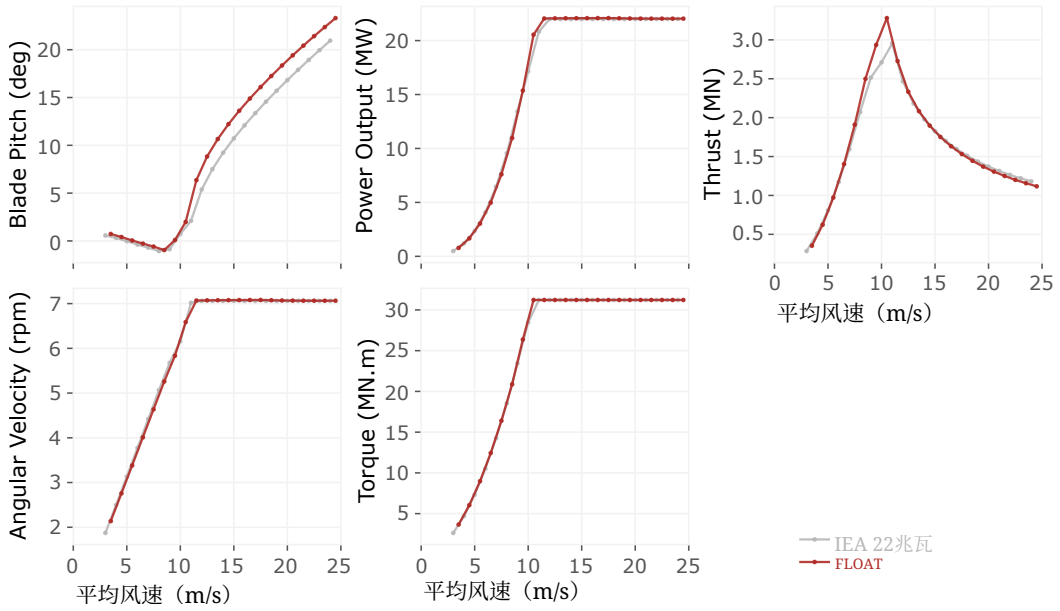
转子性能和频率响应均与 IEA 22 MW参考模型高度吻合，验证了仿真器的准确性。这些结果支持使用该仿真器生成案例研究中展示的疲劳仿真（参见 第 4 节）。

附录K. 纵摇/升沉–平台校准分析：FLOAT 数值模拟器

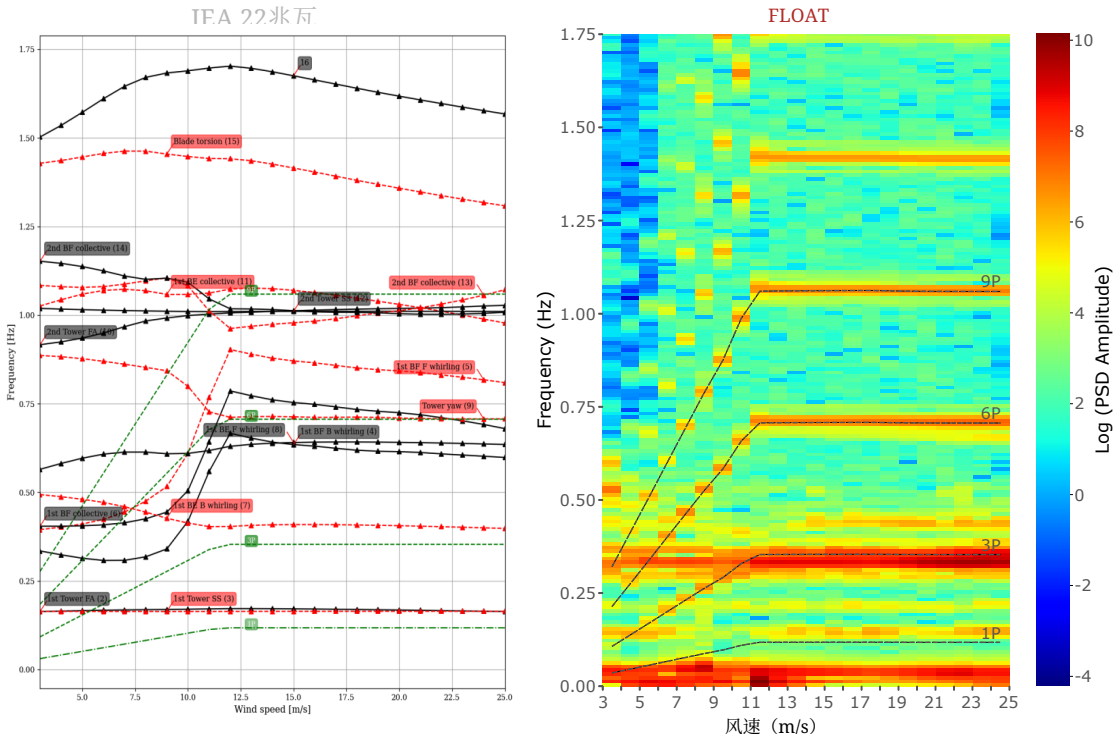
本附录通过比较校准前后平台的旋转（俯仰）和平移（升沉）响应，评估数值模拟器 模块在**FLOAT**框架中实现的纵摇/升沉—平台校准，并突出平台稳定性的改善。

附录 *K.1.* 仿真设置

在案例研究中定义的 22种风速下进行了仿真（见 第 4 节），条件为稳态风和静水。每次仿真持续 200 s，并舍弃前 100 s，以消除瞬态。俯仰校准使用 IEA 22 MW参考塔架进行，而升沉校准则使用 IEA 22 MW参考塔架第一次优化循环后得到的塔架设计（优化方案 1）进行评估。



(a) 转子性能



(b) 频率响应

图 J.21：对 **FLO** **AT** 数值模拟器 与 IEA 22 MW 参考模型 [10] 在定常风和静水条件下针对 22种风速 .

附录 *K.2.* 结果与比较

图 K.22 比较了平台经过和未经过俯仰–平台校准时的平移与旋转响应，并特别关注俯仰旋转子图（单位为度），这是本分析中最相关的指标。未经校准时，俯仰响应范围为 −1° 至5°，大多数情况集中在 1° 和 3°之间。经过校准后，该范围缩小至 −0。2°–0。4°，大多数数值集中在 0° 和 0.2°之间。

图 K.23 对比了升沉–平台校准前后的平台响应，特别关注平移升沉子图（单位为米），这是本分析中最相关的指标。未校准时，升沉响应在 −2.75 米和 −2.55 米之间变化。校准后，范围缩小至 −0.15 米–0.05 米，大多数情况集中在 0.05 米附近。

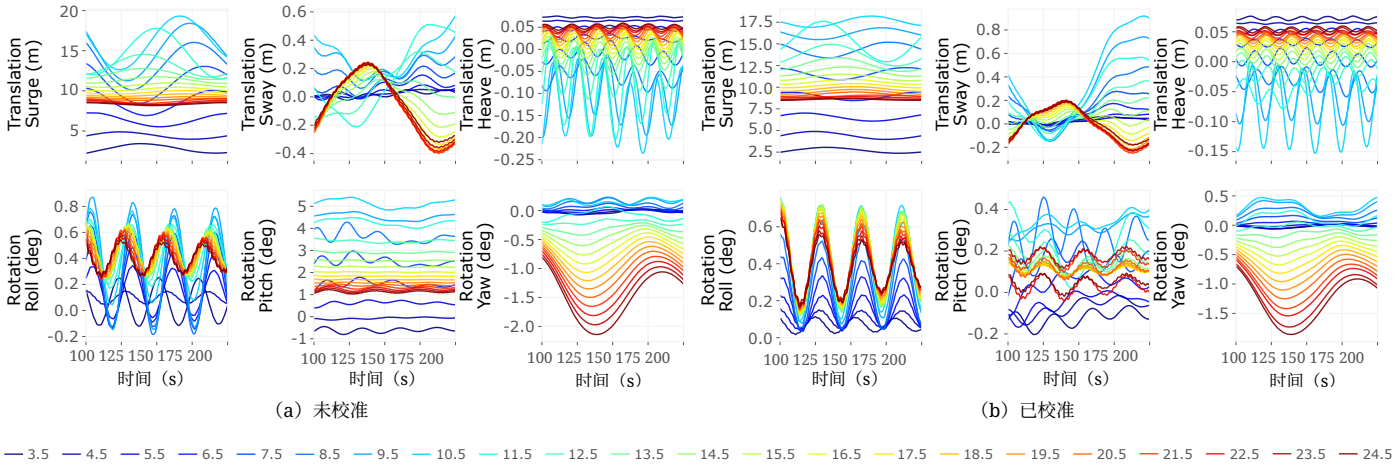


图 K.22：俯仰–平台校准：使用**FLOAT** 数值模拟器对 IEA 22 MW参考塔架在定常风和静水条件下的 22种风速（3.5–24.5 m/s）进行平台运动响应分析。

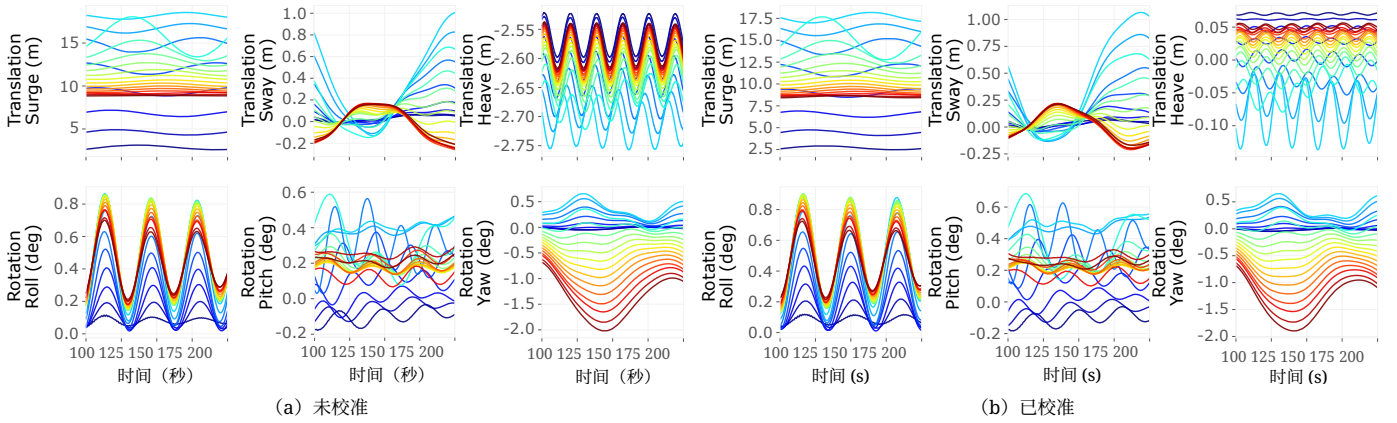


图 K.23：升沉–平台校准：使用 **FLOAT** 数值模拟器对 22 MW优化型1号塔架在定常风和静水条件下进行仿真，展示 22种风速（3.5–24.5 m/s）下的平台运动响应。

附录*K.3.* 验证总结

对比结果证实，俯仰/升沉–平台校准通过稳定平台的旋转（俯仰）和线性（升沉）响应，提高了模拟器的保真度，使校准后的响应值接近零，并确保其行为符合物理实际。这些结果验证了该数值模拟器可用于案例研究中所述的疲劳和性能仿真（见第 4 节）。

附录L. FLOAT 数值模拟器的高性能计算基准测试

本附录介绍了 Inductiva 平台上的 **FLOAT**数值模拟器 [46] 使用 Google Cloud虚拟机进行的基准测试。每台虚拟机均遵循 family-configuration-vCPUs 的命名约定（例如 c2d-highcpu-2）。除非另有说明，本节中的成本估算均基于可抢占（竞价型）虚拟机的价格，其中竞价型实例是指以较低价格提供、但在提供商需要将资源用于其他用途时可能被中断的虚拟机，其价格通常比按需费率低 60–91%。

附录*L.1.* 顶级虚拟机类型

为确定最高效的虚拟机类型，通过使用来自 c2、c2d、c3、c3d、n2、n2d和 e2 系列的 36 个 Google Cloud实例开展了基准测试。这些实例包括标准型、高CPU型和 高内存型构型，虚拟 CPU 数量（vCPUs）范围为 2 至 22。通过两次重复仿真对每种虚拟机类型进行评估，以考虑结果的变异性；所采用的环境条件完全相同：湍流风速为 12 m/s，波高为 0.83 m，波周期为 6.9 s。每次仿真运行 1000 s，时间步长为 0.01 s。对结果取平均值，平均值报告于图 L.24。

根据这些结果，表 L.14展示了两种效率最高的效率虚拟机类型。两者每次仿真均耗时 ~1650 秒，但c2d-highcpu-2成本略低，因此成为大规模 **FLOAT** 仿真的首选。

附录*L.2.* 可扩展性评估

为评估性能最佳的虚拟机类型（c2d-highcpu-2）的可扩展性，我们将估算成本和运行时间

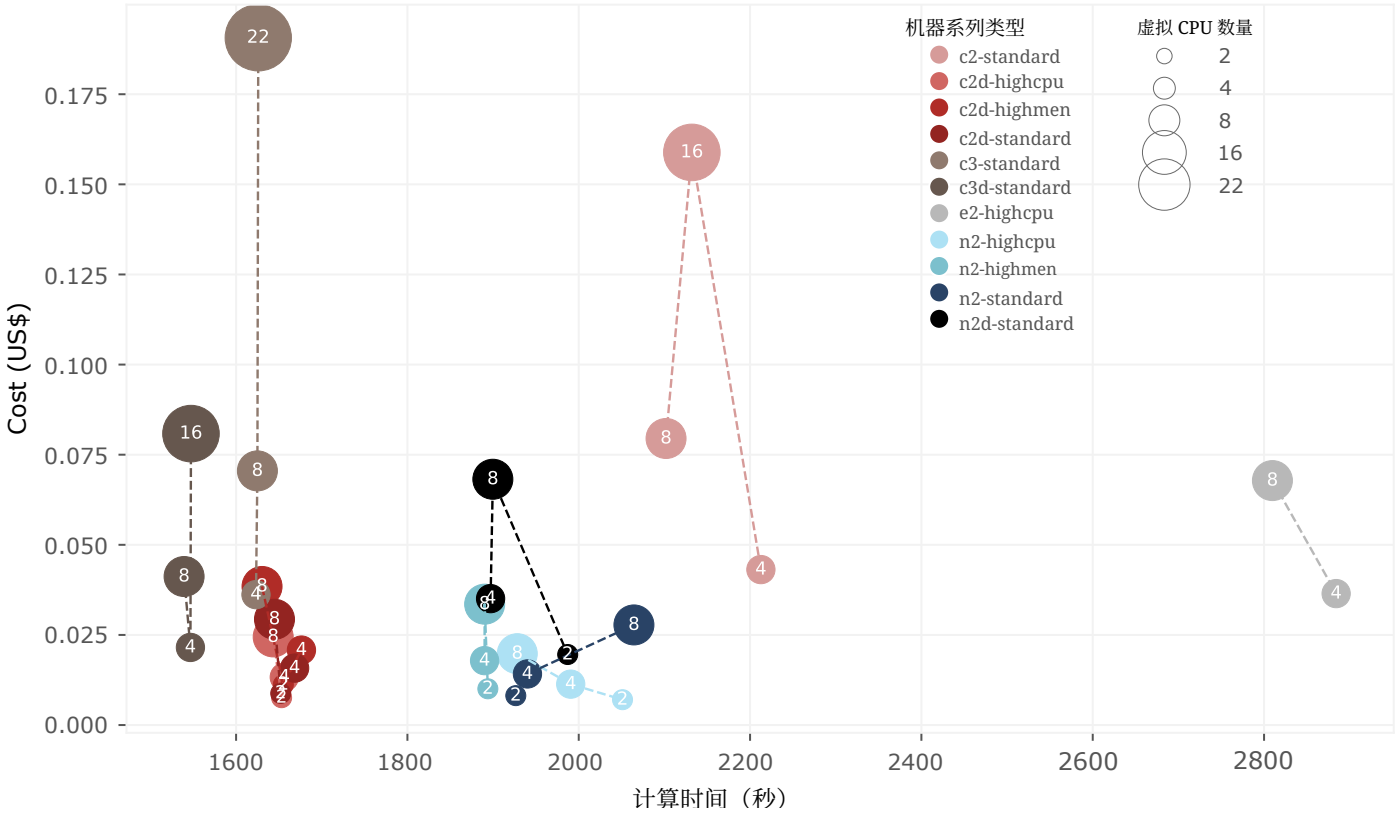


图 L.24：**FLOAT** 数值模拟器在 Inductiva 平台上进行基准测试 [46]。36 种 Google Cloud 虚拟机类型的计算时间（秒）与每小时成本（美元）的关系。气泡大小表示虚拟 CPU 数量，颜色表示虚拟机系列。每个点对应两次模拟运行的平均值。

表 L.14：排名前两位的 Google Cloud 虚拟机类型（单台机器）每次仿真的计算时间和成本。

机器 Type	计算时间（秒）	成本/小时（美元）
c2d-standard-2	1652.1	0.0088
c2d-highcpu-2	1653.1	0.0076

从单次仿真（1653 秒， ~27.5 分钟）外推至案例研究中的全部 6,468 次仿真（见第 4 节）。如果在一台配备 2 个虚拟 CPU 的机器上顺序执行，则需要 1070 万秒的墙钟时间（5939 CPU 小时），即 123.8 天，因此大规模疲劳分析在实际中难以实施，如表 L.15所示。

表 L.15：在 c2d-highcpu-2 上对 6,468 次仿真进行顺序执行和并行执行时的预计墙钟运行时间、CPU 小时和成本。数值根据单次模拟运行时间（1653 秒，2 个虚拟 CPU）外推得出。

执行 Mode	墙上时钟 Time	CPU 小时	机器数量	总成本（美元）
顺序执行	123.8 天	5939	1	22.61
并行执行	11.9 小时	5939	250	22.61

这正是高性能计算优势显现之处：通过将工作负载分配到 250 台机器（500 个虚拟 CPU）上，预计墙钟运行时间缩短至 ~11.9 小时，预计总成本为 22.61 美元。值得注意的是，虽然墙钟时间缩短了两个数量级以上，但 CPU 小时总数和成本基本保持不变，因为两者都取决于整体计算工作负载。

这相当于将运行时间缩短了 ~250×，相较于顺序执行，这与并行部署的机器数量相符，并展现出接近理想线性加速的可扩展性。这证实，在保持成本效益的同时，通过高性能计算部署，能够在 **FLOAT**框架内高效生成大规模疲劳数据集。

附录 *L.3.* 使用公开定价进行基准验证

为确保透明度，本文将**FLOAT** 框架中执行 6,468 次仿真的估算成本 22.61 美元，与表 L.16中 Inductiva 和 Google Cloud 的公开定价进行比较。由于**FLOAT** 高性能计算部署是通过 Inductiva 使用竞价型实例完成的，因此主要依据 Inductiva 的竞价定价进行估算验证。与 Google Cloud 的比较证实，估算成本与各提供商当前的市场价格一致。总体而言，结果表明，竞价定价尽管相较于按需费率大幅降低成本，但仍显著减少了执行成本；估算的 22.61 美元处于两家提供商预期的竞价定价范围内。

附录 *L.4.* 实际案例比较

针对性能最佳的虚拟机类型 c2d-highcpu-2 的估算，已通过实际的高性能计算部署进行验证

表 L.16：c2d-highcpu-2 虚拟机的单机成本比较，总成本按 6,468 次仿真进行推算。

云提供商	价格型号	成本/小时（美元）	总成本（美元）
Google Cloud	按需	0.075	~223.13
Google Cloud	Spot	0.0067 – 0.0300	~19.89 – 89.25
Inductiva	按需	0.083	~246.93
Inductiva	Spot	0.0075 – 0.0332	~22.31 – 98.86
FLOAT	Inductiva 现货	0.0076	22.61

如表 L.17所示，共有 6,468 次仿真。实际案例验证了外推结果，所有仿真均在 12.58 小时内完成，仅比估算的 11.87 小时多 43 分钟。然而，总成本从估算的 22.61 美元增至 47 美元。这种差异反映了云服务提供商的计费模式：按每台机器的墙钟时间分配收费，此外还包括在 250 个节点上进行调度和并行执行所产生的开销。

表 L.17：在 250 台 c2d-highcpu-2 机器上进行 6,468 次仿真的运行时间和成本估算值与实际值对比。

	墙钟时间（小时）	机器数量	Cost（美元）
估算	11.87	250	22.61
Real	12.58	250	47.00

附录 *L.5.* 验证总结

c2d-highcpu-2 实例被确定为最佳选择，在成本和速度之间实现了最佳平衡。结合高性能计算部署，该实例使 6,468 次浮式海上风力机仿真得以在 ~13 小时内由 250 台机器完成，总成本为 47 美元；相比之下，单台机器需要 100 多天（加速比为 ~205×）。

附录 M. FLOAT 22兆瓦半潜式浮式海上风电机组塔架的几何参数

表 M.18总结了 FLOAT 22 MW 半潜式浮式海上风力机塔架的几何参数，即基于 IEA 22 MW 半潜式参考塔架并采用**FLOAT** 框架优化得到的最终设计。该表列出了沿塔架从底部至顶部定义的 31 个外径（d_i）、30 个分段高度（h_i）和 30 个壁厚（t_i）。

表 M.18：FLOAT 22 MW半潜式浮式海上风电机组塔架的几何参数：31 个直径d_i、30 个高度h_i和 30 个厚度t_i，涵盖 30 个截面（从底部到顶部）。

i	直径$_i$ (米)	高度$_i$ (米)	t_i（毫米）
0	12.000	-	-
1	12.000	3.1885	118.225
2	12.000	5.0410	113.191
3	12.000	5.0420	107.086
4	12.000	5.0410	101.219
5	12.000	4.0400	95.529
6	12.000	5.0410	89.934
7	12.000	5.0420	84.557
8	11.973	5.0410	79.579
9	11.960	5.0410	74.789
10	11.516	5.0420	73.361
11	11.497	5.0410	71.914
12	11.048	5.0410	70.489
13	11.039	5.0420	69.020
14	10.581	5.0410	67.560
15	10.563	5.0410	66.073
16	10.104	5.0420	64.599
17	10.080	5.0410	63.076
18	9.608	5.0410	61.535
19	9.582	5.0420	59.966
20	9.093	5.0410	58.392
21	9.060	5.0410	56.728
22	8.563	5.0410	55.083
23	8.523	5.0420	53.392
24	8.020	5.0410	51.695
25	7.980	5.0410	50.080
26	7.462	5.0420	48.672
27	7.452	5.0410	47.376
28	7.080	5.0410	45.860
29	7.080	5.0420	44.524
30	6.741	5.0405	44.524

参考设计

[1] Statoil（现为 Equinor），Hywind Demo（Statoil），2009年。网址：https://qu estfwe.com/wp-content/uploads/2018/02/Windfloat-Presen tation-PPI.pdf，访问日期：2025-08-21。[2] Principle Power，WindFloat 1，2011年。网址：https://www.principlep ower.com/projects/windfloat1，访问日期：2025-21-08。[3] Equinor，Hywind Scotland，2017年。网址：https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland，访问日期：2025-21-08。[4] Principle Power，WindFloat Atlantic，2020年。网址：https://www.pr inciplepower.com/projects/windfloat-atlantic，访问日期：2025-21-08。[5] Principle Power，Kincardine，2021年。网址：https://www.principlep ower.com/projects/kincardine-offshore-wind-farm，访问日期：2025-21-08。[6] Equinor，Hywind Tampen，2022年。网址：https://www.equinor.com/en ergy/hywind-tampen，访问日期：2025-21-08。[7] Adnan Memija，Ocergy 浮式平台上的 15+ MW 风力涡轮机示范项目启动，2011年。网址：https://www.offshore wind.biz/2025/06/23/project-to-demonstrate-15-mw-tu rbine-on-ocergys-floating-platform-kicks-off/，访问日期：2025-21-08。[8] Kaif Shaikh，《20 MW：全球最大的浮式风力涡轮机横跨7个足球场，并在中国接受测试》，2011年。网址：https://interestingengin eering.com/energy/china-largest-floating-wind-turbine- qihang，访问日期：2025-21-08。[9] J. M. Jonkman，《海上浮式风力涡轮机的动力学建模与载荷分析》，技术报告，美国国家可再生能源实验室，美国科罗拉多州戈尔登，2007年。doi:10.2172/921803。[10] F. Zahle、T. Barlas、K. Lonbaek、P. Bortolotti、D. Zalkind、L. Wang、C. Labuschagne、L. Sethuraman、G. Barter，《IEA Wind 22兆瓦海上参考风力涡轮机的定义》，技术报告，美国国家可再生能源实验室与丹麦技术大学，美国科罗拉多州戈尔登及丹麦林比，2024年。doi:10.11581 /DTU.00000317。[11] J. Alves Ribeiro、B. Alves Ribeiro、F. Pimenta、S. M.O. Tavares、J. Zhang、F. Ahmed，《海上风力涡轮机塔架设计与优化：综述及人工智能驱动的未来方向》，《Applied Energy》397（2025年）126294。doi:10.1016/j.apenergy.2025.126294。[12] IEC 61400-3-1:2019，《风能发电系统——第3-1部分：固定式海上风力涡轮机设计要求》，标准，国际电工委员会，瑞士日内瓦，2019年。网址：https://webs tore.iec.ch/publication/29360。[13] IEC 61400-3-2:2019，《风能发电系统——第3-2部分：浮式海上风力涡轮机设计要求》，标准，国际电工委员会，瑞士日内瓦，2019年。网址：https://webs tore.iec.ch/en/publication/29244。[14] M. Barooni、T. Ashuri、D. Velioglu Sogut、S. Wood、S. Ghaderpour Taleghani，《浮式海上风力涡轮机：现状与未来展望》，Energies 16（2023年）。网址：h t t p s : / / w w w . m d p i . c o m / 1 9 9 6 - 1 0 7 3 / 1 6 / 1 / 2。doi:10.3390/en16010002。[15] G. M. Stewart，《两种浮式海上风力涡轮机概念的设计载荷分析》，博士论文，马萨诸塞大学阿默斯特分校，2016年。doi:10.7275/7627466.0。[16] F. Papi、Y. Perignon、A. Bianchini，《浮式风力涡轮机仿真所需海洋气象条件的推导：欧洲案例研究》，Journal of Physics: Conference Series 2385（2022年）012117。doi:10.1088/1742- 6596/2385/1/012117。[17] X. Li、W. Zhang，《真实环境条件下浮式海上风力涡轮机的长期疲劳损伤评估》，Renewable Energy 159（2020年）570–584。doi:10.1016/j.renene.2020.06.043。[18] D. P. Liu、G. Ferri、T. Heo、E. Marino、L. Manuel，《使用代理模型估算浮式海上风力涡轮机的长期疲劳损伤》，Renewable Energy 225（2024年）120238。doi:10.1016/j.renene .2024.120238。[19] J. McMorland、M. Collu、D. McMillan、J. Carroll，《浮式风力涡轮机的运行与维护：综述》，《可再生能源与可持续能源评论》163（2022年）112499。doi:10.1016/j.rs er.2022.112499。[20] G. Rinaldi、P. R. Thies、L. Johanning，《当前状况与未来趋势海上风力涡轮机的运行与维护：综述，Energies 14（2021年）。doi:10.3390/en14092484。[21] Y. Yang, J. Fu, Z. Shi, L. Ma, J. Yu, F. Fang, S. Chen, Z. Lin, C. Li，考虑气动-水动-伺服-弹性耦合效应的一体化浮式风流能系统性能与疲劳分析，Renewable Energy 216（2023年）119111。doi:10.1016/j.renene.2023. 119111。[22] X. Yuan, D. Song, S. Chen, J. Yang, M. Dong, R. Wei, M. Talaat, Y. H. Joo，浮式风力涡轮机功率调节对疲劳载荷和平台运动的深入分析，Ocean Engineering 313（2024年）119667。doi:10.1016/j.oceaneng.2024.119667。[23] M. Matsuishi, T. Endo，承受变应力的金属疲劳，《日本机械工程学会九州分会论文集》（1968年）37–40。[24] N. Dowling，复杂应力-应变历程下的疲劳失效预测，Journal of Materials（1972年）。[25] DNV-RP-C203，海上钢结构疲劳设计，标准，DNV，Høvik，挪威，2024年。URL: https://www.dnv.com/oilgas/d ownload/dnv-rp-c203-fatigue-design-of-offshore-steel- structures/.[26] IEC 61400-1:2019，风能发电系统—第1部分：设计要求，标准，国际电工委员会，日内瓦，瑞士，2019年。URL: https://webstore.iec.ch/publicat ion/26423.[27] X. Wang, Z. Cheng, P. H. Wirsching, H. Sun，海上结构疲劳设计中隐含的疲劳设计系数和安全等级，载于：第24届国际海洋工程与北极工程会议：第3卷，2005年，第231–236页。doi:10.1115/OMAE2005-67488。[28] W. Zhao，基于疲劳试验数据库的海上结构设计疲劳系数标定，International Journal of Fatigue 145（2021年）106075。doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.106075。[29] J. Pacheco, F. Pimenta, S. Pereira, Á. Cunha, F. Magalhães，风电场范围疲劳损伤估算策略的实验评估，Engineering Structures 285（2023年）115913。doi:10.1016/j. engstruct.2023.115913。[30] P. Vlachogiannis, C. Peyrard, A. C. Pillai, D. Ingram, P. Bousseau, M. Collu，重新定义疲劳预测：一种面向浮式海上风力机的多海况高性能计算框架，Ocean Engineering 338（2025年）121961。doi:10.1016/j.ocea neng.2025.121961。[31] C. Allen, A. Viscelli, H. Dagher, A. Goupee, E. Gaertner, N. Abbas, M. Hall, G. Barter，为IEA风能15兆瓦海上参考风力涡轮机开发的UMaine VolturnUS-S参考平台定义，技术报告，美国国家可再生能源实验室，戈尔登，科罗拉多州，美国，2020年。doi:10.2172/1660012。[32] C. Bak, F. Zahle, R. Bitsche, T. Kim, A. Yde, L. C. Henriksen, M. H. Hansen, J. P. A. A. Blasques, M. Gaunaa, A. Natarajan，DTU 10兆瓦参考风力涡轮机，载于：丹麦风电研究会议论文集，哥本哈根，丹麦，2013年。URL: https: //orbit.dtu.dk/en/publications/the-dtu-10-mw-reference-wind-turbine.[33] M. Borg, A. M. Hansen, H. Bredmose，动态计算中大型10兆瓦海上风力涡轮机平台浮式下部结构的柔性，Journal of Physics: Conference Series 753（2016年）082024。doi:10.1088/1742-6596/753/8/082024。[34] F. Zahle, A. Li, K. Lønbæk, N. N. Sørensen, R. Riva，22兆瓦风力涡轮机的多保真稳态气动弹性建模，Journal of Physics: Conference Series 2767（2024年）022065。doi:10.1088/1742- 6596/2767/2/022065。[35] N. Dangi, J. Sodja, C. S. Ferreira, W. Yu，大气流中的湍流相干结构对风力涡轮机载荷的影响，Renewable Energy 241（2025年）122248。doi:10.1016/j.renene.2024.122248。[36] W. Collier, D. Ors, T. Barlas, F. Zahle, P. Bortolotti, D. Marten, C. S. L. Jensen, E. Branlard, D. Zalkind, K. Lønbæk，使用IEA 22兆瓦参考风力涡轮机进行气动弹性代码比较，Journal of Physics: Conference Series 2767 0520 42 2024 052042 10 1088 1742 6596 2767 5 ( ) . doi: . / - / / / .[37] F. Zahle, T. Barlas, P. Bortolotti, D. Zalkind, W. Collier，国际能源署22兆瓦海上参考风力涡轮机，技术报告，美国国家可再生能源实验室，戈尔登，科罗拉多州，美国，2024年。doi:10.2172/2409185。[38] J. Jonkman，FAST风力涡轮机的新模块化框架

CAE工具，载于：第51届AIAA航空航天科学会议（含新视野论坛和航空航天展览会），2013年。doi:10.2514/6.2013- 202。[39] J. Jonkman, K. Shaler，FAST.Farm用户指南与理论手册，美国国家可再生能源实验室，2021年。URL: https://research-hub.nrel.gov/en/publications/fastfarm-users-guide-and-theory-manual。[40] T. Larsen, A. Hansen，HAWC2入门：用户手册，编号1597（版本3-1）（EN），丹麦。Forskningscenter Risoe。Risoe-R, Risø国家实验室，2007年。URL: https://orbit.dtu.dk/en/publications/how-2-hawc2-the-users-manual。[41] DNV，Bladed，2025年。URL: https://www.dnv.com/software/servi ces/bladed/，访问日期：2025-07-19。[42] K. Dykes, S. A. Ning, G. Scott, P. Graf, G. Barter, P. Bortolotti, A. Key, N. Abbas, E. Gaetner, J. Quick等，WISDEM® v3 2 2024 15. .（风电场集成系统设计与工程模型）[14 05], 2024 10 115 SWR- -78 20240502 1 美国国家可再生能源实验室，. doi: . /dc. . .[43] 用于实现浮式海上风力涡轮机控制协同设计的WEIS工具集功能需求，载于：ASME 2021年第三届国际海上风电技术会议，国际海洋工程与北极工程会议卷，2021年。doi:10 . 1115/IOWTC2021-3533。[44] L. Sarmento, H. Penedones, S. Santos, P. Barbosa，使用Inductiva Python API大规模运行水力学仿真，载于：第一届海洋与海岸生态系统技术国际会议，IARIA，瓦伦西亚，西班牙，2024年，第1–2页。URL: https://www.thinkmind.org/li brary/COCE/COCE_2024/coce_2024_1_10_30003.html。[45] 亚马逊网络服务公司，AWS，2024年。URL: https://aws.amazon .com/，访问日期：2024-11-05。[46] I nductiva，OpenFAST教程，2024年。URL: https://tutorials.inductiva.ai/simulators/OpenFAST.html，访问日期：2024-11-12。[47] 亚马逊网络服务公司，AWS上的物理学：使用OpenFAST数字孪生优化风力涡轮机性能，2024年。URL: https: //aws.amazon.com/blogs/architecture/physics-on-aws-optimizing-wind-turbine-performance-using-openfast-in-a-digital-twin/，访问日期：2024-11-12。[48] B. Jonkman, J. M.L. Buhl, TurbSim用户指南，技术报告，美国国家可再生能源实验室，戈尔登，科罗拉多州，美国，2006年。URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy06osti/39797.pdf。[49] P. Welch，利用快速傅里叶变换估算功率谱：一种基于对经过修改的短周期图进行时间平均的方法，IEEE音频与电声学汇刊15（1967年）70–73。doi:10.1109/TAU.1967.1161901。[50] EN 1993-1-9，欧洲规范3：钢结构设计—第1-9部分：疲劳，标准，欧洲标准化委员会，布鲁塞尔，比利时，2005年。URL: https://www.en-standard.eu/csn-en-1993-1-9-eurocode-3-design-of-steel-structures-part-1-9-fatigue/。[51] F. Pimenta, D. Ribeiro, A. Román, F. Magalhães，浮式风力涡轮机的模态特性：公用事业规模风力涡轮机的解析研究与运行模态分析，Engineering Structures 301（2024年）117367。doi:10.1016/j.engstruct.2023.117367。[52] DNV-RP-C202，壳体的屈曲强度，标准，DNV，Høvik，挪威，2021年。URL: https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-c202-buckling-strength-of-shells/。[53] J. Jonkman，OC3第四阶段浮式系统定义，技术报告，美国国家可再生能源实验室，戈尔登，科罗拉多州，美国，2010年。doi:10.2172/979456。[54] A. Robertson, J. Jonkman, M. Masciola, H. Song, A. Goupee, A. Coulling, C. Luan，OC4第二阶段半潜式浮式系统定义，技术报告，美国国家可再生能源实验室，戈尔登，科罗拉多州，美国，2014年。doi:10.2172/1155123。