

《海上风机海洋动力灾害风险评估技术规
程》（征求意见稿）
编制说明

浙江省海洋监测预报中心

2026 年 5 月 7 日

目 次

- 一、工作简况
- 二、标准编制原则和确定主要内容的论据
- 三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益
- 四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况
- 五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因
- 六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系
- 七、重大分歧意见的处理经过和依据
- 八、涉及专利的有关说明
- 九、实施标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议
- 十、其他应予说明的事项

海上风机海洋动力灾害风险评估技术规程

编制说明

一、工作简况

1.1 任务来源

本标准的编制任务来源于中国海洋学会《关于下达中国海洋学会标准计划的通知》（中海学字[2025]41号）文件，项目名称为《海上风机海洋动力灾害风险评估技术规程》，项目编号CS0-JH-65，项目承担单位为浙江省海洋监测预报中心。

1.2 协作单位

河海大学、浙江大学、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、浙江省水利河口研究院、自然资源部第二海洋研究所、国家海洋标准计量中心、自然资源部海洋减灾中心、浙江省海洋科学院、国家海洋信息中心、上海市水利工程设计研究院有限公司。

1.3 制定背景

当前全球海上风电产业向深远海、大容量、规模化方向快速发展，我国海上风电装机规模持续领跑全球，已成为海洋经济与新能源转型的核心支撑。海上风机作为海上风电场核心基础设施，长期服役于台风、巨浪、风暴潮、强海流、海底冲刷等复杂海洋动力环境中，面临极端灾害引发的结构失稳、基础冲刷、叶片损毁、塔筒屈曲等安全风险，直接威胁工程安全、运营稳定与全生命周期效益。

目前国内海上风电领域标准多聚焦于工程设计、施工建设、安全

监测等环节，缺少专门针对海上风机海洋动力灾害的风险评估、等级划分、量化方法与实操流程，行业内评估方法不统一、指标不规范、结果不可比，难以满足风电场选址、设计、运维、保险、应急处置等全链条风险管控需求。

为填补标准空白、规范评估行为、提升海上风电防灾减灾能力，保障海上风电安全高质量发展，编制一套科学统一、可落地、可推广的海上风机海洋动力灾害风险评估技术规程具有迫切的现实必要性与行业引领价值。

1.4 起草过程

1、前期研究与初稿编制阶段（2023 年 11 月-2025 年 9 月）

2023 年 11 月，浙江省海洋监测预报中心依托国家重点研发计划“极端海洋动力灾害风险预警及防控技术与应用”课题，开展海上风机海洋动力灾害风险识别、评估指标与等级划分研究工作。系统梳理国内外文献、实测数据与工程案例，赴海上风电场、设计单位、运维企业开展实地调研，优化安全管控指标与海洋动力要素耦合关系，编制完善框架体系，补充量化模型与计算方法，完成《海上风机海洋动力灾害风险评估技术规程》初稿和立项建议书。

2、标准立项与计划下达阶段（2025 年）

9 月，项目组提交了中国海洋学会团体标准申报书。11 月正式获批立项，中国海洋学会《关于下达中国海洋学会标准计划的通知》（中海学字[2025]41 号）下达了标准计划，项目名称为《海上风机海洋动力灾害风险评估技术规程》，项目编号 CS0-JH-65，项目承担单位

为浙江省海洋监测预报中心。

3、征求意见稿编制阶段（2025 年 11 月-2026 年 5 月）

立项后编制组全面整合资料、深化调研、多轮研讨，将危险性评估拆分为水上结构与水下基础两部分，优化脆弱性评估维度与修正规则，完善评估流程、等级划分、计算方法与报告编制要求，形成标准征求意见稿，并以广东省阳江市海上风电场开展示范应用，验证方法可行性与结果合理性。4 月 18 日项目组内部召开了标准内部审查会，对标准内容进行了讨论和进一步修改完善。

1.5 标准主要起草人及其所做的工作

本标准的主要起草人有：

二、标准编制原则和确定主要内容的论据

2.1 标准编制原则

为准确评估海上风险受海洋动力灾害影响风险，制定科学、合理、可应用性强的技术标准，编制组在编制过程中始终坚持以下三个原则：

1、综合性原则

综合考虑海上风机和所在海域的海洋动力灾害特点，统筹海上风机水上叶片、塔筒与水下基础结构的受灾特性，综合致灾危险性、承灾体脆弱性和风险等级，确保评估结果贴合海域实际与工程状态。

2、系统性原则

基于海上风机现状及其致灾机理，考虑致灾因子和海上风机之间的互馈关系，系统分析海上风机风险，构建涵盖致灾因子危险性和脆弱性的评估体系，实现风险识别、量化、分级全链条系统化。

3、可行性原则

评估方法兼顾理论严谨与工程易用，指标可获取、计算可操作、结果可应用，适配不同容量风机、不同基础形式、不同海域条件，满足设计、运维、保险、管理等多方使用需求。

2.2 确定主要内容的论据

本标准适用于海上风机海洋动力灾害风险评估，明确范围、规范性引用文件、术语定义、工作原则、评估流程、资料收集、危险性和脆弱性分级、风险评估、报告编制与预警单制作等核心内容。确定主要内容的论据如下：

1、海上风机类型确定

项目组收集了中国电建集团华东勘测设计研究院（以下简称“华东院”）的数据，根据华东院多年来在海上风电领域的设计与总包项目实践统计，截至 2026 年 4 月，已建海上风电场项目中，单桩基础形式的风机占有基础类型风机的 78%，该数据反映了单桩基础在实际工程中的主流应用地位。单桩基础在我国应用普遍，其成熟的施工工艺和可靠的结构性能，能够有效适配我国近海多数海域的海床地质条件，兼顾工程质量、施工效率与经济效益。

因此，本标准将适用范围确定为海上单桩基础风机，旨在针对性解决该类风机设计、选址、运维中的风险问题，为工程实践提供技术参考。

2、评估类型划分

将风险评估分为最大可能风险评估与实时灾害风险评估。前者面向历史极端海洋动力环境，评估区域潜在高影响风险；后者面向极端动力灾害期间，提供实时风险研判，支撑应急处置。

3、危险性分级（水上+水下）

水上部分：针对叶片、塔筒受风荷载主导，采用灰色关联度识别主控因子，以风速为核心指标，结合不同容量风机（ $< 8\text{MW}$ / $\geq 8\text{MW}$ ）极限位移与动力响应，将危险性划分为 A（高）、B（较高）、C（较低）、D（低）四级。

水下部分：聚焦基础局部冲刷，综合水深、潮流、波高、周期、桩径、底质中值粒径六大影响因子，以实际冲刷深度/设计冲刷深度为评估指标，同样采用四级分级，明确实测、经验公式、数值模拟、物理模型四种方法的适用场景与选用优先级。

1) 水上部分

对于海上风机的叶片结构，其工作环境具有鲜明的独特性：下部完全处于大气中，不受波浪、海流等水动力荷载的直接作用，其承受的全部外力均来源于上部的风荷载。

风机塔筒在海洋环境中处于风-浪荷载的复杂耦合场中，其结构响应同时受到上部极端风载与下部波浪冲击的共同驱动。为科学识别并量化主导其安全的决定性因子，采用灰色关联度的方法进行主控风险因子的识别。运用灰色关联度方法对数学模型计算出来的数据分析，找到其主控致灾因子，可见塔筒损伤的主要致灾因子为风速。

表 1 塔筒损伤与致灾因子的关联序列

评价项	关联度
风速 (m/s)	0.837
波高m	0.246

危险性的计算需要结合风机结构的动力响应特点，给出由风速强度评价的危险性。按照塔筒顶部位移的大小，结合动力响应分析将不同海上 10m 高度处风速所对应的塔顶位移与极限位移的比值定义为危险性 H。

首先对风机结构进行屈曲分析以判断极限状态，利用 ANSYS 进行非线性屈曲，对结构施加一定水平荷载使其产生水平位移，作为其结构缺陷。由于塔筒上部壁面较薄，屈曲发生在此范围内针对 4MW 风机其极限的顶部位移为 3.0411 m；针对 12MW 极限的顶部位移为 6.22m。分别对其进行有限元分析，得到不同风速下的塔筒顶部位移值，与其极限位移值作比，得到该风速下的危险性。

4MW 风机：

$$H = \begin{cases} 0.00022V_t^2 + 0.00278V_t - 0.06599, & V_t \leq 63 \\ 1, & V_t > 63 \end{cases}$$

12MW 风机：

$$H = \begin{cases} 0, & V_t < 18 \\ 0.00022V_t^2 + 0.001V_t - 0.0824, & 18 \leq V_t \leq 67 \\ 1, & V_t > 67 \end{cases}$$

该公式中 V_t 为海上风机位置处的海上 10m 高度处的最大风速。

危险性 H 依据海上风机位置处的海上 10m 所在风速划分，具体划分为 A（高）、B（较高）、C（较低）、D（低）四级，对应危险性 H

值 0.75-1、0.5-0.75、0.25-0.5、0-0.25。依据上述研究，根据风机单机容量危险性等级划定如下。

表 2 海上风机危险性等级表

危险性等级		A (高)	B (较高)	C (较低)	D (低)
最大风速 V_t	单机容量 <8MW	>51.0m/s (>15级)	41.5 ~ 50.9m/s (14 ~ 15级)	28.5 ~ 41.4m/s (11 ~ 13级)	13.9 ~ 28.4m/s (7 ~ 10级)
	单机容量 ≥ 8MW	>61.2m/s (>17级)	51.0 ~ 61.2m/s (16 ~ 17级)	37.0 ~ 50.9m/s (13 ~ 15级)	20.8 ~ 36.9m/s (9 ~ 12级)

2) 水下部分

在波浪与水流共同作用下，风电基础周围的局部冲刷涉及多个关键参数，包括桩体特性、底质特性、流体性质及水动力荷载。

水深通过改变水流垂向分布、波浪特性及风电基础暴露高度，影响局部冲刷，其影响规律受波浪-水流-底质泥沙耦合作用主导，在 30m 水深范围内，表现为水深 (h) 与相对冲刷深度 (S/D) 先负相关后正相关，相对而言，浅水区冲刷风险更甚；

潮流流速是驱动风电基础局部冲刷的核心动力因素，已有大量研究表明，其对相对冲刷的影响呈正相关规律，在流速低于泥沙起动流速时冲刷缓慢，高于起动流速后冲刷迅速增强，随后增长速率逐渐减缓，在流速范围为 2.0-4.0m/s 内，可见其基本呈幂指数关系增长；

波高、周期是反映波浪能量大小的动力指标，其对局部冲刷的影响基本呈正相关关系，在波流耦合作用下的冲刷增幅往往更为显著，核心机制是波浪与潮流的流速矢量叠加，形成了更大的近床复合流速，增强了近床流速和床面剪应力；

风电下部基础桩径是决定风电基础（单桩、吸力桶等）周围流场

形态的关键结构参数，其对局部冲刷的影响主要通过改变水流绕流特性和床面剪应力分布实现；桩径越大，迎流面阻滞面积越大，因此，其形成的马蹄涡与尾涡强度也随桩径的增大而增强；与相对冲刷 S/D 相比，其呈负相关关系；

底质 d_{50} （泥沙中值粒径）是反映海底沉积物抗冲刷能力的指标，直接决定泥沙起动难易程度，在淤泥质、粉砂范围内，其随着 d_{50} 增大，细颗粒泥沙的泥沙粘结力弱、起动流速减小，易被桩周扰动水流带走，快速形成冲刷坑局部，相对冲刷增大。

风电基础局部冲刷是上述六大因素协同作用的结果，综合可知：大桩径、粉砂底质、浅水、大波高、长周期、强潮流流速的组合，会使风电冲刷达到较大值，形成深且大冲刷坑，严重威胁基础稳定性；而小桩径、淤泥质底质、深水、小波高、短周期、低潮流流速的组合，冲刷强度较弱。

本标准公式由国家重点研发计划“极端海洋动力灾害风险预警及防控技术与应用”课题团队根据 Zhang et. al. (2023) 由现场波、流耦合下实测的冲刷数据拟合的公式简化得到，即不考虑原公式中的倾斜桩工况。其中现场冲刷数据如下表所示。

表 3 水下部分危险性等级

序号	地点	沉积物中值粒径 (mm)	年平均有效波高 (m)	最大潮流流速 (m/s)	平均水深 (m)	桩径 (m)	局部冲刷深度 (m)	参考文献
1	Scroby	0.26	1.0	1.10	7.5	4.20	5.80	Høgedal M.; Hald T. Scour

	Sands OWF							assessment and design for monopile foundations for offshore wind turbines. In Proceedings Copenhagen Offshore Wind: Copenhagen, 2005.
2	N7, North Sea	0.20	1.1	0.75	7.0	6.00	6.30	Whitehouse, R.J.S.; Harris, J.M.; Sutherland, J.; Rees, J. The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations. Mar. Pollut. Bull. 2011, 62, 73-88.
3	Scarweather Sands OWF	0.28	1.4	1.10	11.0	2.20	2.50	
4	Destin tidal inlet bridge pier	0.28	0.0	0.60	3.8	0.86	1.10	
5	Barrow OWF	0.22	1.2	0.80	15.0	4.75	5.75	
6	Otzumer Balje inlet bridge	0.36	0.0	1.40	11.7	1.50	2.20	
7	Gunfleet Sands OWF	0.20	1.6	1.10	11.4	4.70	8.00	Dixen, F.H.; Dixen, M.; Pedersen, J.; Dahl, J.F. Scour Development Around Offshore Wind Turbine Foundation: Field Measurement & Analysis. In 6th International Conference on Scour and Erosion: Paris, 2012.
8	Robin Rigg OWF	0.25	1.2	1.60	9.0	4.50	7.60	Harris, J.M.; Whitehouse, R.J.S.; Sutherland, J. Marine Scour and Offshore Wind: Lessons Learnt and Future Challenges. In 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Rotterdam, The Netherlands, 2011.
9	China Dafeng OWF	0.02	0.8	1.66	20.0	7.25	8.00	Wang, Z.; Huan, C.; Chen, L. Research of Real-time Monitoring for Local Scour of Offshore Wind Power Pile Foundation Based on

								Sonar Image. Journal of Ocean Technology 2023, 42, 91-99.
10	Hangzhou Bay bridge	0.05	0.5	2.89	13.2	4.06	10.10	Zhang, Z.; Du, S.; Guo, Y.; Yang, Y.; Zeng, J.; Sui, T.; Wei, R.; Li, Z. Field study of local scour around bridge foundations on silty seabed under irregular tidal flow. Coast. Eng. 2023, 185, 104382.
11	Xiangshan bridge	0.004	0.5	1.50	18.6	8.00	1.90	

如图 1 所示，相比于其它公式对局部冲刷现场数据的预测，本标准公式对现场数据的拟合更好。图 1 中紫色为现场冲刷数据，黄色为漆文刚公式 (Qi, W.; Gao, F. Equilibrium scour depth at offshore monopile foundation in combined waves and current. Sci. China Technol. Sci. 2014, 57, 1030-1039.) 预测结果，灰色即本公式结果，黄色为 HEC-18 公式 (Richardson E. V.; Davis S. R. Evaluating scour at bridge. 4th edn. Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18); Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation: Washington, DC, 2001.) 预测结果，蓝色为 DNV 公式 (即认定 $S/D=1.3$) 预测结果。各局部冲刷公式与现场数据的相对误差见表 4，本公式的相对误差是最小的，这是选用本公式作为波流耦合工况下现场局部冲刷预测得依据。

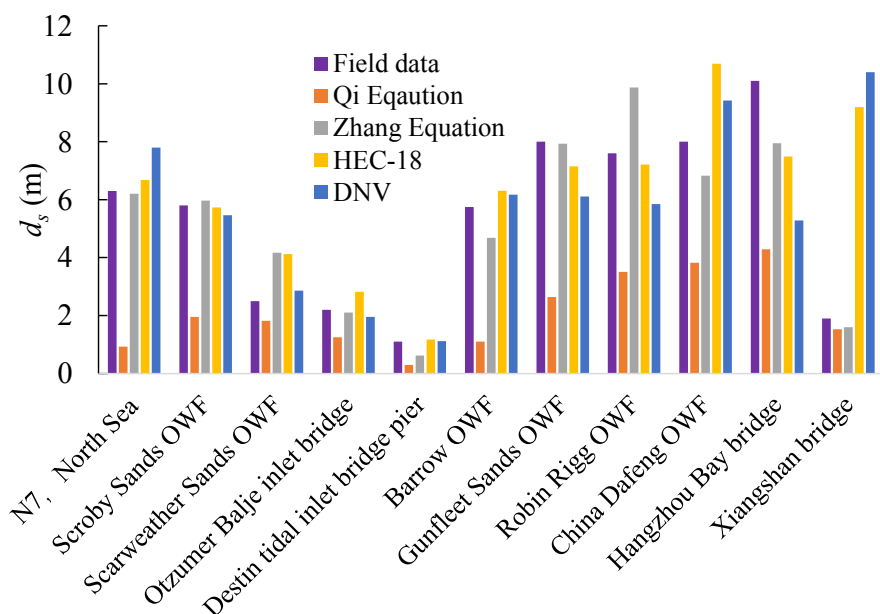


图 1 不同局部冲刷公式与现场冲深数据的比较

表 4 各部冲刷公式与现场数据的相对误差

冲刷公式	本公式	Qi	HEC	DNV
相对误差 (%)	21	56	52	56

4、脆弱性分级

以风机设计等级为核心，建立“50 年一遇风速+50 年一遇有效波高+场址适配性验证”三维评估体系，区分单桩、高桩承台基础差异化控制条件，将脆弱性分为 a（高）、b（中高）、c（中低）、d（低）四级，并设置适配度系数修正规则，确保脆弱性判定贴合场址实际。

1) 核心指标：50 年一遇最大风速（ V_{50} , m/s），参考 GB/T 18451 并衔接 IEC 61400-3-1 对风荷载的极端值计算方法；

2) 辅助指标：50 年一遇最大有效波高（ HS_{50} , m），参考 IEC 61400-3-1 对浪荷载的设计要求，为海上风机水下结构（单桩/高桩承台）的核心抗浪设计指标，不同基础形式的设计波高取值需符合 IEC 61400-3-1 第 8 章基础结构设计的荷载要求。

风机设计的 50 年一遇风速、波高指标越大，其对台风-海浪复合动力灾害的固有抗灾能力越强，在同等灾害强度下的结构失效概率、功能损坏程度越低，脆弱性等级越低。建立风力发电机组等级+风-浪双设计指标与脆弱性等级的一一对应关系，根据风力发电机组等级（GB/T 18451）将海上风机脆弱性 V 划分为 a（高）、b（中高）、c（中低）、d（低）四级，具体对应关系见下表。风、浪指标需同时满足对应机组等级要求，若其中一项指标未达标，按就高原则判定脆弱性等级。

表 5 风力发电机组等级与脆弱性等级对应关系表

脆弱性等级	a（高）	b（中高）	c（中低）	d（低）
风力发电机组等级	IV 级	III 级	II 级	I 级
50 年一遇最大风速 V50（m/s）	30	37.5	42.5	50
50 年一遇最大有效波高 HS50（m）	< 8	8 ~ 2	12 ~ 16	≥ 16
脆弱性程度描述	抗风-浪联合 灾害 能力最弱	抗风-浪联合 灾害 能力一般	抗风-浪联合 灾害 能力较强	抗风-浪联合 灾害 能力最强

风机设计指标需与场址实际海洋动力灾害特征匹配，因此本规程脆弱性划分需增加场址适配性验证环节，验证未通过则对脆弱性等级进行修正，对比风机设计的 V50、HS50 与风电场址实测的 50 年一遇最大风速、50 年一遇最大有效波高，计算适配度系数 K。若 $K \geq 1.0$ ，说明风机设计指标高于场址灾害强度，按原等级判定；若 $0.8 \leq K < 1.0$ ，说明设计指标略低于场址灾害强度，脆弱性等级升高一级；若 $K < 0.8$ ，说明设计指标远低于场址灾害强度，脆弱性等级升高两级，同时判定该风机不适配本场址。

1) 单桩基础：抗浪载荷为控制因素，若设计波高满足场址要求但风速略低（偏差 $\leq 5\%$ ），可按原等级判定，无需修正；

2) 高桩承台基础：抗风载荷为控制因素，若设计风速满足场址要求但波高略低（偏差 $\leq 5\%$ ），可按原等级判定，无需修正。

三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

3.1 试验验证分析与论证

编制组整合现场实测数据、物理模型试验、数值模拟计算、工程案例四类验证依据，对本规程核心方法开展系统性验证：

1、水上结构危险性验证：基于 4MW、12MW 典型风机 ANSYS 非线性屈曲分析与动力响应计算，验证风速—塔顶位移—极限位移比值的危险性计算方法可靠，分级阈值与风机破坏临界状态匹配度高。

2、水下基础冲刷验证：收集国内近海、深远海风电场冲刷实测与模型试验数据，验证水深、流速、波高、周期、桩径、底质与冲刷深度的量化关系，经验公式与模型结果偏差满足工程精度要求。

3、脆弱性评估验证：对接 GB/T 18451、IEC 61400-3-1 国际国内标准，验证风机设计等级、风-浪设计指标与抗灾能力的对应关系，场址适配性修正规则经多场址校核合理可行。

4、示范应用验证：以广东阳江海上风电场为对象开展全流程评估，评估结果与现场风险状态一致，可直接支撑运维调度与防灾部署，证明规程具备现场可操作性。

3.2 预期效益

1、经济效益

降低海上风机灾害损毁概率，减少维修、更换、停机损失；为风电保险提供统一风险定级依据，推动保险产品精细化，降低企业保险成本；支撑风电场优化选址与结构设计，提升投资回报率，保障海上风电产业可持续盈利。

2、社会效益

填补我国海上风机海洋动力灾害风险评估标准空白，提升行业防灾减灾标准化水平；保障海上风电安全运营，支撑国家“双碳”目标与能源安全战略；为海洋灾害应急管理、海上施工安全、海域综合管理提供技术支撑，提升公共安全保障能力。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况

目前国际、国内标准主要聚焦海上风电施工安全、作业规范、设计要求、安全性评价等方向，未针对海上风机海洋动力灾害形成专门的风险评估、等级划分、量化方法体系，本标准对提升海上风机受灾防御能力具有重要意义。

（一）国际上已有一些组织制定了海上风电施工安全风险管控相关的安全标准和指南，主要如下。

IEC TS 61400-31: 2023 是国际电工委员会（IEC）发布的技术规范，提供了陆上风电机组可能对公众造成的风险评估指南；ISO 29400 是国际标准化组织（ISO）发布的标准，涉及海上风电港口和海上作业的规划和工程要求；G+ Good Practice Guidelines 是由 G+全球海

上风电健康与安全组织发布的一系列良好实践指南，涵盖了海上风电施工的各个方面，包括风险评估和管理。

（二）国内针对海上风电施工安全风险管控的标准或指南，主要如下。

《海上风电场工程施工安全技术规范》（NB/T 10393-2020）针对施工安全，不涉及运行期灾害风险评估；《海上风电场设施施工检验指南》（GD01-2020），提供了海上风电场设施施工过程中的技术要求和检验指南；《海上风电开发建设管理暂行办法》规范了海上风电项目开发建设管理等环节的行政组织管理和技术质量管理；《海上风电场工程结构安全监测建设规范》（NB/T 11085-2023）主要适用于风电场的安全监测设计和要求；《风能发电系统 海上风力发电场安全性评价技术规程》（GB/T 44680-2024）规定了安全性评价相关内容，包括设施及设备、劳动安全和作业环境、生产管理三个方面；《海上风力发电场设计标准》（GB/T 51308），为安全性评价提供设计阶段的基准依据等。

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因

本标准未以国际标准为基础起草，合规引用国内相关国家标准与行业标准，未采用国际标准的主要原因：国际标准未覆盖海上风机海洋动力灾害风险评估核心内容，我国海域环境、风机类型、工程模式与国外差异显著，需立足本土实际制定专属技术规程。

六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本标准严格遵循法律法规，与 GB/T 18451、IEC 61400-3-1、NB/T10105 等现有标准协调衔接。当前国家、行业、地方标准均无海上风机海洋动力灾害风险评估专项规定，本标准是对现有标准体系的重要补充与完善，具有明确的指导作用与规范效力。

七、重大分歧意见的处理经过和依据

标准编制全过程经多轮专家咨询、行业研讨、内部评审，无重大技术分歧。

八、涉及专利的有关说明

本标准不涉及任何专利及知识产权问题。

九、实施标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

1、本标准批准发布后，建议在自然资源主管部门、海洋预报机构、风电开发企业、设计单位、施工运维单位、保险机构等宣贯实施。

2、由编制单位联合中国海洋学会开展标准培训、技术指导与应用答疑。

3、为了全面掌握标准的执行情况，为进一步修改完善标准做准备，相关单位应将本标准的执行情况以及所发现的问题及时反馈到主管部门或本标准的主编单位，以便及时修订完善本标准。

十、其他应予说明的事项

本标准编制过程严格遵守团体标准制定程序，充分调研行业需求，广泛征求产学研用各方意见，确保标准科学、公正、公开、实用，

无其他需要特别说明的事项。