

A Review on evaluation index of marine engineering disaster assessment and early warning system

Wentao Li Dongrui Han*

Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang, 316000, China

Abstract

Marine engineering has become a pivotal discipline within the broader field of engineering. Operating in the complex and harsh marine environment, structures are persistently subjected to multiple hazards such as wind and waves, corrosion, earthquakes, and tsunamis, which can lead to significant socioeconomic losses. To effectively mitigate the potential damage to marine projects, it is essential to establish a scientific and systematic disaster assessment and early warning system. The effectiveness of such a system fundamentally relies on the rational design and application of evaluation indicators, which are key to achieving precise warning and risk management. This paper systematically outlines an evaluation index system constructed from four dimensions: personnel, equipment, environment, and management. The personnel dimension examines operational compliance, safety awareness, and emergency response capabilities; the equipment dimension focuses on structural integrity, material durability, and monitoring system reliability; the environment dimension includes hydro-meteorological conditions, geological factors, and potential ecological impacts; the management dimension encompasses institutional frameworks, operational procedures, and risk control mechanisms. Future research should focus on the quantitative characterization of these indicators, the development of predictive models, and the integration of real-time monitoring technologies to continuously enhance the accuracy and applicability of the early warning system.

Keywords

Marine Engineering; Structural Health Monitoring; Early Warning System

海洋工程灾害评估预警系统评估指标综述

李文焘 韩东睿 *

浙江大学海洋学院，中国·浙江舟山 316000

摘要

在工程学科中，海洋工程已发展为一个关键的研究方向。其结构常年在苛刻的海洋条件下运行，持续受到风浪、腐蚀、地震及海啸等多种灾害因子的作用，可能引发显著的经济与社会损失。为实现对海洋工程的有效防护，构建一套具备科学基础与系统架构的灾害评估与预警系统至关重要。该系统的效能主要依赖于评估指标的合理设计与应用，这也是达成精确预警与风险管控目标的根本。本文系统阐述了从人员、设备、环境及管理四个层面构建的评估指标体系：人员层面主要考察操作合规性、安全观念与突发事件应对效能；设备层面聚焦于结构健全度、材料耐老化性能及监测系统的稳定程度；环境层面包含水文气象要素、地质环境及可能引发的生态效应；管理层面则围绕制度体系、运维规程与风险防范体系展开。后续的研究工作可着力于推进上述指标的量化表征、预警模型开发及动态监测技术融合，从而持续提升预警系统的精确度与工程适用性。

关键词

海洋工程；结构健康监测；预警系统

1 引言

海洋环境固有的极端性、复杂性和不可预测性，构成了对海洋工程结构长期安全服役的严峻挑战。首先，高盐度、高湿度的海洋大气与海水本身，是工程材料的“慢性毒药”。氯离子等侵蚀性介质能够穿透混凝土保护层，引发内部钢筋的锈蚀膨胀，导致结构开裂剥落；对于金属结构，则会引起均匀腐蚀、点蚀以及更为危险的应力腐蚀开裂，使其有效

承载截面不断削弱，材料韧性逐渐丧失^[1]。其次，海洋是一个永不停歇的能量场，由风生浪，由月球和太阳引力生潮，由地质活动引发海啸，这些动力荷载以随机、循环甚至冲击的方式持续作用于结构。它们不仅带来瞬时超载的风险，其长期的疲劳效应更是导致结构损伤累积、寿命折减的隐形杀手。此外，海底地震、海床液化、滑坡等潜在地质灾害，以及航行船舶的意外碰撞、恐怖袭击等人为或偶然事件，共同编织了一张多元、交织的风险网络。历史上一系列触目惊心的事故，如“亚历山大·基兰”号平台倾覆、旧金山海湾大桥地震损伤、以及诸多因腐蚀或疲劳导致的船舶与桥梁构件

【通讯作者】韩东睿（1994-），男，中国山东淄博人，博士，助理研究员，从事海洋工程防灾减灾研究。

失效案例，都在反复警示我们，传统的基于定期检测和事后维修的保障模式，已难以应对海洋工程日益增长的安全性与可靠性需求。在此背景下，发展一种能够贯穿工程全寿命周期，实现灾害“事前智能预警、事中精准干预、事后科学评估”的智能化系统，不仅是技术进步的自然趋势，更是保障人民生命财产安全、维护海洋生态环境、确保国家重大战略资产安全的必然要求。而这样一个预警系统能否有效运行，其核心与基石在于是否拥有一套科学、完备、灵敏且可操作的评估指标体系。这套指标体系如同系统的“感官”与“神经”，它必须能够全面感知结构健康状态的细微变化，准确辨识不同致灾因子的作用机理与风险等级，并为风险评估、预警发布和决策支持提供定量或定性的依据^[2]。因此，对海洋工程灾害评估预警指标体系进行系统性的梳理、归纳与前瞻性思考，具有极其重要的理论价值和实践指导意义。本文将遵循这一思路，从人员、设备、环境和管理这四个相互关联、相互影响的核心维度出发，对构成该体系的各类关键指标展开深入探讨。

2 海洋工程发展现状

全球范围内，海洋工程的建设热潮方兴未艾，其发展轨迹清晰地呈现出向深海、远海进军，结构形式不断创新，并与数字化、智能化、绿色化理念深度交融的特征。在跨海大桥领域，人类不断挑战着跨度、深度和复杂环境的极限。回顾国际实践，美国在应对高烈度地震区桥梁建设方面进行了诸多创新，如旧金山-奥克兰海湾大桥新东桥采用了独特的自锚式悬索桥与单塔柱支撑体系；日本作为多地震、强台风国家，其明石海峡大桥的建设集中体现了在抗风、抗震及防船撞方面的极致化设计思想^[3]。中国虽起步相对较晚，但已凭借一系列超级工程后来居上，成为世界瞩目的中心。港珠澳大桥作为集桥、岛、隧于一体的超大型跨海集群工程，不仅在规模上创下世界纪录，更在长效防腐、工厂化施工和自动化监测等方面推动了行业技术变革。当前，正在建设的深中通道、甬舟铁路西堠门大桥等，继续在超大规模、复杂水文地质条件下结构设计、高速铁路荷载适应性等方面引领技术发展。展望未来，跨海大桥的设计将更加注重全寿命周期的性能与成本优化，超高性能混凝土、智能碳纤维复合材料等新材料的应用将提升结构耐久性，而集成于结构内部的智能传感网络与自适应减震控制系统，将使桥梁具备自我感知、自我调节的能力，成为真正的“智能生命体”^[4]。

在海洋油气资源开发的主战场——海上平台领域，技术的演进史就是一部向更深水域、更恶劣环境不断探索的历史。从扎根于大陆架的固定式导管架平台，到适用于中等水深的张力腿平台和顺应性更好的深水半潜式平台，再到为超深水及边际油田经济开发而生的 Spar 平台、圆筒型平台以及功能集成的浮式生产储卸装置，平台的形态与功能持续演进。欧洲北海油田的长期开发，催生了高度数字化、自动化

和无人化的平台运营模式，通过远程操控中心与平台本体的数据互联，极大减少了高风险海域的常驻人员，提升了本质安全水平。巴西在开发盐下超深水油田的过程中，带动了浮式装备设计、深水系泊系统和复杂海底生产系统工程技术的全面进步。中国通过“海洋石油 981”深水半潜式钻井平台等一系列重大装备的自主设计与成功应用，已初步建立了从资源勘察、工程设计、装备建造到海上安装的完整深水工程能力链，并在南海深水区展开了大规模的实质性开发。未来的海上平台将不仅仅是资源开采的设施，更将成为一个高度集成的信息物理系统，通过布设于结构、设备、管线上的海量传感器，结合环境与生产数据，构建起平台的数字孪生体，实现对结构健康、设备状态、生产流程和潜在风险的实时洞察与预测性维护，决策过程将从经验驱动转向数据与模型驱动^[5]。

海上风电作为可再生能源领域的明星，正经历着爆发式增长与技术快速迭代。欧洲长期扮演着全球引领者的角色，英国、德国、丹麦等国不仅在近海建立了大规模的风电场群，更在积极探索适用于更深水域的漂浮式风电技术，以突破海底固定式基础的水深限制，开启深远海风能利用的新篇章。中国凭借强大的工业制造能力和巨大的市场需求，已成为全球最大的海上风电市场。在江苏、福建、广东等沿海省份，绵延数十甚至上百公里的风电场已蔚为壮观。国内企业在超长柔性叶片研制、大容量机组集成、巨型桩基础施工以及柔性直流输电等关键技术领域取得了显著突破。然而，中国东南沿海频繁的台风活动、复杂的海洋地质条件以及东西部能源消纳的时空矛盾，也对风机的极端抗风设计、基础长期防腐、智能化运维以及大规模并网技术提出了独特而严峻的挑战^[6]。行业未来的发展轨迹将指向更大单机容量以降低度电成本，更成熟的漂浮式技术以开拓深远海资源，全生命周期的数字化运维以提升可用性和经济性，以及探索“海上风电+”模式，如与海洋牧场、海水制氢、旅游观光等产业融合发展，实现海域空间与资源的立体化高效利用。

3 主要海洋工程面临的灾害类型

3.1 跨海桥梁

跨海桥梁在服役期内面临一系列特殊风险：强风环境可能诱发大跨度桥体的气动失稳现象，如颤振和涡激振动；高盐度、高湿度的海洋气氛会导致混凝土结构劣化与钢筋腐蚀，并伴随波浪冲刷与生物附着侵蚀；强烈地震作用可能造成桥墩损伤或上部结构落梁，致使交通干线中断；通航水域内的船舶意外撞击也对桥墩安全构成直接威胁；同时，材料性能退化与施工缺陷也可能在长期运营中演化为安全隐患^[7]。

3.2 海上作业平台

随着开发活动向深远海推进，海上平台面临的风险源日趋复杂。来自自然环境的威胁主要包括飓风、巨浪、海冰、地震等引起的结构过载或疲劳损伤；非结构性的风险则多源

于生产运营过程，如井喷、爆炸、火灾以及供应船舶的碰撞等。平台长期固定于特定海域，也易受到其他船舶误入或非法靠近的干扰。因此，建立覆盖结构状态、环境载荷及周边动态的综合监控与预警体系显得尤为必要。

3.3 海上风力发电机

海上风电机组的主要灾害源于极端自然事件。台风过境时，极大的风速和湍流强度可能造成叶片断裂、机舱损坏甚至塔架整体倾覆。尽管风机属于高柔结构，但其在地震作用下的动力响应及潜在破坏仍需在设计中予以考虑。此外，长期往复的波浪荷载对基础（尤其是漂浮式基础）的稳定性构成挑战，海冰堆积与撞击也可能对基础及支撑结构产生不利影响^[8]。

3.4 海上航行船舶

船舶在航行过程中直接暴露于海洋气象环境之下。浓雾会严重降低能见度，增加船舶偏航、搁浅或碰撞的风险，同时湿滑甲板也威胁船员安全^[4]。台风系统带来的狂风与狂浪会导致船舶产生剧烈的横摇、纵摇和垂荡运动，严重影响其操纵性与稳定性，极端情况下可导致倾覆。海啸引发的异常巨浪和强大水流则可能对船舶造成毁灭性冲击。

4 评估预警系统的指标体系架构

4.1 人员要素

该要素重点考察参与工程运营、维护及应急响应人员的综合能力与状态。安全意识水平可通过关键岗位人员接受安全培训的时长与效果进行间接评估；专业技能涵盖理论知识掌握程度、实际操作熟练度、心理承受能力及生理健康状况；团队结构与素质可通过人员职称构成、教育背景等指标进行衡量。海事安全统计显示，约八成的事故与人为因素存在关联，尤其在碰撞事故中，人为因素的贡献率可高达九成以上^[6]。

4.2 设备要素

设备要素关注工程结构本体及其附属设施的安全状态。日常维护与检修的及时性与有效性是保障设备功能完好的基础；各类安全保护装置（如限位、超压保护）需保持高可靠性，以在参数超标时及时干预；电气系统的设计与安装必须符合防爆、防水等特殊规范，确保线路稳定；特种设备（包括起重机械、压力容器等）的管理必须严格遵守国家法规，实施定期检验与注册制度^[3]。

4.3 环境要素

环境要素分为自然环境和作业现场环境两个层面。自然环境参数如风速、波高、潮位、地震动等是直接的灾害驱动因子，需实时监测。作业现场的环境条件，包括照明、噪声水平、空气质量（粉尘、有害气体）等，直接影响作业人

员的生理状态与认知判断，不当的环境可能诱发人为失误。现场管理应严格遵循危险区域最小化人员数量、危险物料限制存量、危险操作独立分隔等原则^[1]。

4.4 管理要素

管理要素是维系整个安全体系有效运行的制度保障。其主要内容涵盖：安全生产责任制的建立与落实；针对特定试验或作业制定的安全方案与管理规定；规范化的安全审批流程；作业前、中、后各阶段的安全检查制度；面向全员的安全教育与技术交底；针对潜在事故的应急预案及定期演练；以及作业结束后的安全撤收程序。对此类要素的评价可采用分级方法，例如划分为安全、关注、警告、危险四个等级，以实现半定量化考核。

5 结语

构建系统化的评估指标体系，是深化认识海洋工程结构风险、提升其灾害预警与防控能力的关键路径。本文从人、机、环、管四个维度系统梳理了影响海洋工程安全的主要风险因子及其评价指向，为预警系统的开发提供了理论框架。未来的研究方向包括：发展关键指标的精确量化方法与标准；融合多源监测数据与人工智能技术，开发智能预警预测模型；以及推动实时、在线监测技术与评估系统的深度集成，最终实现海洋工程灾害预警系统从“事后应对”向“事前预防”的智能化演进。

参考文献

- [1] 谢博祐.风暴潮作用下的海岸工程建设研究—以厦门市为例[J].工程技术研究,2020,5(15):16-18.
- [2] 丁薇,顾仕强,刘杨.基于自然灾害的设备风险评估与预警应用[J].电子技术与软件工程,2020(16):153-154.
- [3] 王静,郑伟,姜传炜,邓天勇,陈存.船舶行业试验系统安全评估指标分析研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2019,41(06): 567-572.
- [4] 管日升,孙鹏.海洋平台安全环境监测系统构建[J].中国海洋平台,2020,35 (5) :98-100.
- [5] 俞庆,肖熙.海洋平台结构风险评估[J].海洋工程, 1997,15 (3) :1-7.
- [6] CHOI E. Gradient height and velocity profile during typhoons[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1984, 13(1): 31-41.
- [7] 孙彦杰,李良碧,尹群.碰撞、爆炸灾害下海洋平台风险评估研究初探[J].中国海洋平台,2017, 22 (5) : 38-43.
- [8] Particulate Gravity Currents: Theory, Experiments, and Environmental Applications[M], Wiley, 2025. ISBN: 978-1-39-421672-7.