

海工装备故障分析模型的设计和应用

刘险峰

上海振华重工（集团）股份有限公司，中交振华海上起重铺管核心装备工程技术（上海）有限公司，上海 200125

DOI:10.61369/WCEST.2025120016

摘 要： 本文结合海工装备的故障定义、在线监测数据和历史数据等，提出一种较为新颖的故障分析模型系统，系统采用对话式交互形式与用户针对故障数据进行交流，通过查询反馈故障诊断、预测信息和优化建议，通过一种更为具象化的数据表现形式展示事故的风险点并评估其技术状态，告诉用户故障产生原因、解决方案、维修策略、产品缺陷等。

关 键 词： 海工装备；全生命周期；故障分析；故障诊断；分析模型

The Design and Application of Fault Analysis Model for Offshore Engineering Equipment

Liu Xianfeng

ZPMC, CCCC-Zhenhua Offshore Heavy-Lift & Pipe-Laying Core Equipment Engineering Technology
(Shanghai) Co., Ltd., 200125

Abstract： This paper combines the fault definition of marine engineering equipment, online monitoring data and historical data, etc., to propose a relatively novel fault analysis model system. The system adopts a conversational interaction form to communicate with users regarding fault data, and through query feedback, provides fault diagnosis, prediction information, and optimization suggestions, and assesses its technical status, informing users of the causes of faults, solutions, maintenance strategies, product defects, etc.

Keywords： marine engineering equipment; full life cycle; fault analysis; fault diagnosis; analysis model

前言

海洋工程行业现在正处在一个技术升级、绿色转型的关键阶段，未来会朝着更智能、更环保、更深海的方向发展，大量的海工装备如升降系统、吊机、锚绞机随着海洋工程的迅速发展而得到大量的应用。随着信息技术的发展，海工装备的范畴已不仅仅局限于装备本身，制造产商要与时俱进，提供更高层次的全方位的产品服务，才能在行业领域中始终处于领先地位。基于数字孪生、大数据、物联网等关键技术的应用，不仅可实现对海工装备的智能运维，更能进行全寿命周期健康管理，对进一步优化其使用和维修策略、提升生产制造能力具有重要意义，结合大型核心装备在智能制造、智能运维等应用现状进行分析，行业内呈现出对海工装备产品的全寿命周期管理以及智能运维的强烈需求，特别是装备的智能运维框架在船舶装备上面面临着巨大的挑战，故障分析逐渐成为运维框架中的核心技术问题，设备故障对于海工装备的运行具有严重的影响，尤其对于升降、起重等垂直运动系统，一旦出现故障，不经会导致巨大的维修费用和生产损失，而且会造成重大的人员安全事故，因此对设备的故障进行分析成为海工装备生产制造、运行使用过程中重要的技术环节^[1]。

一、系统概述

海工装备故障分析模型是保障海洋工程安全与经济运行的核心工具，其作用贯穿设计、制造、运维全生命周期。通过预测故障、优化维护、降低风险，它不仅提升了装备可靠性，还为海洋资源开发提供了关键技术支持。通过装备在设计和生产制造阶段的设计参数、预定义故障数据结合使用阶段的历史运行数据，经过故障分析模块的融合性分析，对海工装备进行故障的预测和诊断，进而评估其技术状态，结合性能退化规律^[2]，评估剩余寿命，用于维修策略制定等。本文结合海工装备的故障定义、在

线监测数据和历史数据等，提出一种故障分析模型系统^[3]，系统采用对话式交互与用户针对故障数据进行交流，查询反馈故障诊断、预测信息和优化建议，通过更为具象化的数据表现形式展示事故的风险点，并评估其技术状态，告诉用户故障产生原因、解决方案、维修策略、产品缺陷等。

二、分析方法

故障分析方法的选择是一个基于多重约束的系统性决策过程。合适的方法能以最低成本、最高效率获得最可靠的故障分析

结果^[4]。本文列举了多种用于故障分析方法的具体方法，详见表1，通过海工装备的运行特征来选择故障分析方法，在分析目标的精确性、可用资源的有限性以及工程实践的可行性三者之间找到的最佳平衡点。

表1：故障分析方法汇总

分析方法	优势和特点
故障树分析法（FTA）	支持定性（如逻辑路径分析）和定量（如最小割集计算）分析，国际标准如NRC NUREG - 0492、ARP4761均纳入该方法。
失效模式与影响分析（FMEA）	属于主动预防工具，通过评估失效后果的严重度、发生频率和可探测性确定优先级。
动态故障树分析方法	能更真实地反映系统动态特性，如马尔可夫模型、GO法、贝叶斯网络等扩展方法。
软件测试故障模型	软件测试，如输入缓冲区溢出、错误数据组合等场景。
马尔可夫模型	研究系统状态转移，适用于动态冗余、多阶段等复杂行为建模。
GO法	面向成功的分析技术，将系统图翻译成GO图进行定性定量分析。
贝叶斯网络	用节点和弧表示变量关系，表达不确定性知识。

故障树分析法是一种自上而下、演绎式的系统可靠性分析方法^[5]。它从一个不希望发生的顶事件（如“平台失控漂移”、“钻井井喷”）开始，逐层向下分析导致其发生的所有直接和间接原因（中间事件、底事件），并用逻辑门（与门、或门等）连接，形成一棵倒置的树状图。通过逻辑门组合低阶事件来识别系统失效路径的演绎式分析方法。根据海工装备行业特性和运行机制，其核心在于构建由事件节点、逻辑门和顶事件组成的逻辑模型，通过计算最小割集评估失效概率。

（一）主要优点^[6]：

1. 系统性与逻辑清晰

优点：强迫分析人员系统性地、结构化地追踪所有可能的故障路径，避免遗漏。逻辑门（尤其是“与门”）能清晰展示多重故障同时发生才导致系统失效的安全冗余设计。

2. 强大的根本原因识别能力

优点：通过层层递推，最终定位到最基本的部件失效、人为失误或外部事件（底事件），有助于找到事故的根本原因，而非停留在表面。

3. 支持定性分析与定量计算

定性分析：通过求解最小割集（导致顶事件发生的最小故障组合），可以识别系统的薄弱环节。单个事件即导致失效的最小割集（一阶割集）是最高风险点。

定量分析：当底事件的发生概率已知时，可以计算顶事件发生的概率，以及各底事件的概率重要度、关键重要度，从而进行风险评估和优化。

4. 优秀的可视化与沟通工具

优点：故障树图形直观，易于向管理层、监管机构和操作人员展示系统的风险构成和关键路径，便于沟通和达成共识。

5. 适用于多类型失效源

优点：不仅能分析硬件失效，还能将软件故障、人为操作失误、维护差错、环境冲击（如极端波浪、海冰）作为底事件纳入

同一分析框架。

（二）当然该分析方法也存在着缺点，同时也提出了挑战：

1. 构建过程复杂且高度依赖专家经验

缺点： 构建一个完整、准确的故障树需要分析人员对系统有极其深入的理解。不同专家可能构建出不同的树，存在主观性。对于复杂系统，故障树可能变得异常庞大和繁琐。

海工挑战：海工装备系统高度集成（机械、电气、液压、控制系统），构建全面故障树需要跨学科专家团队长期协作，成本高。

2. 难以处理动态与时序相关故障

缺点：传统静态 FTA 假设事件是布尔状态（发生/不发生），对故障顺序、反馈回路、时序依赖、性能退化等动态行为建模能力弱。例如，“A 故障导致 B 超载进而失效”的动态过程难以精确描述。

海工挑战：海工装备的许多故障是动态的，如动力定位系统的失位过程、顺次启动失效等，需要结合动态 FTA 或仿真来补充。

3. 数据依赖性强，数据稀缺影响定量精度

缺点： 定量分析的准确性严重依赖底事件的失效概率数据。对于海工新型装备或低概率高后果事件，往往缺乏历史数据，概率估计不确定性大。

海工挑战：水下设备、特殊材料的失效数据非常稀缺，常常需要使用通用数据库或专家判断，导致定量结果可信区间宽。

4. 关注单一顶事件，可能忽略常见故障

缺点： FTA 针对一个特定的顶事件进行分析，可能忽略那些不导致该顶事件但频繁发生、影响经济性的常规故障。

海工挑战：适合分析安全相关的“灾难性”事件，但对于优化总体运营效率和经济性，需要与 FMEA（关注所有故障模式）等方法结合^[7]。

5. 模型更新维护困难

缺点：一旦系统设计或运营策略改变，整个故障树可能需要重新审视和修改，维护成本高。

海工挑战：海工装备在生命周期内会进行改造、系统升级，保持 FTA 的实时准确性是一项持续投入。

总而言之，故障树分析法在海工装备安全工程和风险管理中是不可或缺的权威工具，但其应用需要清醒认识其局限，并与其他分析方法形成互补，才能构建起全面、有效的故障分析与风险防控体系^[8]。

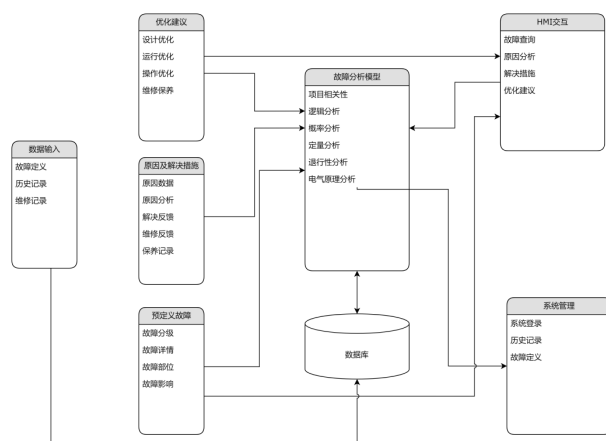
三、设计方案

（一）系统结构

分析方法是整个系统的数据算法模块，系统需为这个算法配置数据输入输出、人机交互、数据管理、算法训练等模块，形成完整的实用型系统设计。系统基于 SQL SERVER 数据库，采用 WEB SERVER 平台结构和 BS 构架，各类系统功能按模块化设计，可独立装载，平台融合数据并提供核心算法，可根据用户要

系统采用模块化和开放式设计，可接入外部 AI 接口，实现更多的查询和分析功能，系统提供向外部系统提供数据的标准接口，无论是数据库数据和界面图像都具备标准的 API 或信号接口，形成更高等级的系统功能和管理功能。

系统采用 TCP/IP 的网络结构, 以单服务器形式承载软件运行, 数据库和程序皆部署于服务器中, 前端界面程序通过 WEB API 接口与服务器程序对接, 所有的对话、管理、数据导入导出都以 http 协议与 API 接口进行数据交换, 面向用户的主要功能通过浏览器交互, 实现故障的各类查询和呈现分析结果, 在后续版本中将接入 DEEPSeek / QWEN 接口, 进一步提高故障模型算法的智能化程度。除了用户的交互功能, 系统的管理功能, 可不断修正数据完整度和积累历史数据, 提高系统优化的数据基础, 详见图 2。



四、系统应用

https://192.168.0.101:8080。如需要发布在外网供更多用户使用，可选择可被域名访问的云服务器，当然一旦暴露在外网中，需配置网络安全措施以保证数据安全。

系统通过融合人工智能技术提升查询的效率和准确性，支持自然语言查询、语义检索、智能推荐与自动分析、多维度筛选与排序、混合检索方法，采用对话式交互更为合理，用户的提问可包含项目信息、故障代码、故障内容等，在输入栏中输入后对话框内显示提交内容和系统的回复内容，具体应用形式详见图3，以下几种常见的提问的内容及回复内容：

- 1.故障代码，系统回复包含该故障代码的项目信息，及可能的产生原因，概率大小，以及解决方案；
- 2.项目信息和故障代码，系统回复该项目的故障定义，及可能产生的原因，概率大小，以及解决方案；
- 3.项目信息、故障内容片段，系统回复该项目的涉及到该故障内容片段的故障定义，及可能产生的原因，概率大小，以及解决方案；



（二）系统管理

系统的管理界面呈现数据总览信息，系统管理首页的左侧为主菜单，右侧区域为数据总览显示界面，项目类型统计区统计了海工主营的抬升、起重机、锚绞机等项目的数量，装备数量统计了各种类型的装备数量，故障分析区显示了数据库内故障记录总数及历史数据总数，并对故障的各级别比例做出图形化显示，最下方的故障记录可直接进行故障的条件查询，各功能的分布详见图4。



（三）数据管理

044 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

