

# 船舶电力推进系统故障诊断与容错控制设计

金春植<sup>1</sup> 肖圣军<sup>(通讯作者)</sup><sup>2</sup>

1. 大光模具设备(淮安)有限公司 江苏省淮安市 223005

2. 蓬莱市渤海船舶修造有限公司 山东省烟台市 265601

**【摘要】:** 面向大型邮轮与电力推进破冰船等全电化船舶架构中能量链路耦合强、测点受限与工况切换频繁的问题, 提出一种船舶电力推进系统故障诊断与容错控制一体化方法。诊断侧构建改进加权故障树, 将故障发生概率权重与设备健康度及航行工况关联, 实现关键割集重要度排序与可解释定位, 并将诊断结果转化为风险权重与置信度输出。控制侧以模型预测控制为滚动优化框架, 将故障信息映射为约束收紧、代价权重更新及冗余重构决策, 实现电流限幅、母排电能质量与推进平顺性的折中。基于 Matlab 仿真平台对定子绕组短路与 IGBT 开路进行验证, 诊断准确率分别为 98.5% 与 97.2%, 诊断时间分别为 50 ms 与 45 ms, 容错后转速波动范围分别为  $\pm 0.4\%$  与  $\pm 0.6\%$ , 电流畸变率分别为 2.8% 与 3.2%。进一步在 5 万载重吨级散货船上开展转速传感器漂移场景测试, 验证了诊断定位与控制参数重整在实际控制周期约束下的可执行性与工程适配性。

**【关键词】:** 船舶电力推进系统; 改进加权故障树; 模型预测控制; 故障诊断与容错控制; 系统集成

## 0 引言

全电化船舶将发电、配电、变频与推进负载耦合为统一能量链路, 推进侧扰动可反向影响母排电能质量, 使单点器件失效易演化为系统级性能退化。海上工况切换、靠港低噪声等运行边界要求故障诊断在有限测点下实现可解释定位, 并能直接支撑降额与重构等处置决策。为提升系统在故障与扰动并存条件下的鲁棒性与可运营性, 有必要将诊断与控制由分离式设计转向闭环协同建模与一体化实现, 以形成面向工程约束的可落地解决方案。

## 1 船舶电力推进系统故障诊断与容错控制的需求分析及基础理论

在大型邮轮以及电力推进破冰船的全电化船舶架构中, 电力推进系统把发电、配电、变频调速以及推进电机负载耦合为统一能量链路, 推进侧的转矩波动会反向扰动母排电压与频率, 从而把单点器件失效演化为系统级性能退化。结合海上工况频繁切换与靠港低噪声运行等运行边界, 故障诊断需在有限测点条件下对关键部件退化进行可解释定位, 并把诊断结果转化为可执行的降额与重构指令, 避免由推进失配引发的失速与过流连锁。由此推导, 研究对象不宜停留在离散告警层面, 而应把故障诊断与容错控制作为闭环协同问题来开展建模与设计。电力推进系统的典型故障机理主要囊括功率器件开路或短路、传感器漂移与失真、推进电机绕组局部绝缘下降, 以及配电侧电压暂降所诱发的变流器直流母线能量失衡, 这些故障在电磁量上往往表现为相电流不对称、转矩脉动以及直流链电压纹波抬升。为适配船舶可用冗余受限的工程现实, 基础理论上需把加权故障树用于刻画故障因果与风险传播, 把模型预测控制作为

约束下的滚动优化框架来使用, 并把两者在同一状态估计与健康度量坐标系中进行耦合表述, 从而为后续诊断模型构建与容错控制策略落地提供一致的理论支撑。

## 2 船舶电力推进系统故障诊断与容错控制策略设计

### 2.1 基于改进加权故障树的故障诊断模型构建

针对船舶电力推进系统能量链路耦合紧密且测点数量受限的工程现实, 传统故障树在定性推演层面虽可刻画逻辑关系, 但因缺乏对不同失效模式发生概率与风险贡献差异的度量, 容易把故障传播简化为同等重要的布尔关系, 进而造成诊断排序与处置优先级难以契合实际运行约束。本研究把故障发生概率权重系数引入故障树建模过程, 用以描述同一父事件下不同子事件对上层失效的驱动强度差异, 并把权重的设定与设备健康度评估以及航行工况关联起来, 使诊断模型能在母排电压波动、推进负载突变以及散热条件变化等扰动背景下保持解释一致性。围绕推进侧失效的典型链路, 模型把功率器件故障、传感器漂移以及直流母线能量失衡作为关键中间事件来开展树形分解, 使 IGBT 开路或短路可沿着变流器输出畸变这一通道, 引发电机相电流不对称与转矩脉动, 并进一步表现为电机转速波动与推进指令跟踪偏差, 从而把单器件失效与系统级性能退化在同一因果路径中贯通表述。为把诊断从告警触发转向风险驱动的定位过程, 改进加权故障树在求解最小割集时不仅关注结构可达性, 还把权重参与到关键割集的相对重要度评估中, 使包含直流母线电压纹波抬升与相电流不平衡的割集在靠港低噪声与低速大转矩等边界工况下获得更高的诊断优先级, 进而为后续容错控制的降额幅度与重构范围给出可执行的依据。基于该建模思想, 父节点故障概率由子节点概率与权重的加权叠加

获得，其计算式可写为：

$$P = \sum_{i=1}^n p_i w_i$$

其中， $P$  表示目标故障节点的发生概率（单位：1）， $p_i$  为第  $i$  个子节点故障发生概率（单位：1）， $w_i$  为第  $i$  个子节点对父节点的概率权重系数（单位：1）， $n$  为参与传播的子节点数量（单位：1）。

## 2.2 基于模型预测的容错控制算法设计

电力推进系统在故障情形下呈现出约束强、耦合深与动态快的特征，单纯依靠固定参数控制器难以在电流限幅、母排电压约束以及推进转矩需求之间取得兼顾，因此本研究把模型预测控制当作容错控制的滚动优化框架来使用，并将其与诊断模块输出的故障类型与置信度进行联动。在数学模型层面，控制对象由变流器直流侧电压动态、交流侧电流环与电机电磁转矩方程共同构成，并把螺旋桨负载扰动以及母排等效阻抗波动以外扰形式纳入预测模型，使控制器在预测域内能够对转矩波动对母排的反向扰动进行提前补偿。当诊断模块识别到功率器件退化或传感器漂移等事件后，容错控制不把控制律简单切换为保守模式，而是把故障信息映射为可调的约束与权重更新策略，例如在疑似 IGBT 开路导致调制裕度下降时，把允许的相电流峰值约束收紧，同时把母线电压纹波相关的代价权重上调，以抑制直流链能量失衡进一步放大。对于仍具备硬件冗余的场景，控制器把备用 IGBT 模块的投入视为离散决策变量，并在滚动优化中综合考虑切换带来的电磁瞬态与热应力代价，使重构动作更贴合船用推进对平顺性的要求。与之相对应，针对未触发硬件切换而仅需参数重整的情形，控制器把 PI 电流环的比例增益与积分增益作为可在线修正对象，依靠预测误差与约束违背趋势对增益进行迭代修订，使控制性能在故障后不至于因积分饱和或相位裕度下降而诱发二次过流。该策略把仿真环境中的迭代整定结果固化为参数更新律的初始值与边界，并在实际运行中通过滚动优化持续修正，从而在不引入额外测点的前提下维持推进转矩输出与母排电能质量的可接受水平。

## 2.3 故障诊断与容错控制的系统集成框架设计

为避免诊断与控制各自独立运行导致的信息割裂，本研究构建了面向船舶电力推进系统的诊断与容错一体化集成框架，使数据链路、决策链路以及执行链路在统一时序下闭环运转。数据采集模块把母排电压与频率、直流母线电压纹波、三相电流以及电机转速等信号进行同步采样，并在边缘侧完成抗干扰滤波与时间对齐，向故障检测模块输出可用于残差生成的标准化测量向量。故障检测模块依据残差统计特征与阈值自适应机制触发疑似故障事件，并把事件标签与窗口化特征送入诊断分

析模块，由改进加权故障树完成故障定位与传播路径回溯，输出包含故障类型、关键割集中情况以及风险权重的诊断结果。容错执行模块接收诊断结果后，选择把结果解释为控制约束收紧、代价权重调整或硬件冗余切换指令，并将其注入模型预测控制器的滚动求解过程，使控制输出在下一控制周期即可体现对故障的抑制与对性能的折中。该框架还把控制器的约束违背次数、饱和和持续时间与预测误差序列反馈给诊断模块，用于修正权重与置信度演化，使诊断与控制在同一健康度量坐标系中实现协同更新。系统从故障发生到容错动作落地的完整流程如图 1 所示，流程中同时包含检测触发、诊断推理、策略生成以及执行反馈等关键环节，使推进系统在多工况切换条件下具备可解释的降额与重构能力。

见图 1。

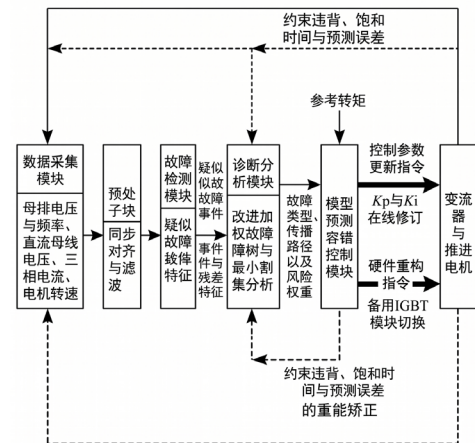


图1 船舶电力推进系统故障诊断与容错控制集成流程图

## 3 船舶电力推进系统故障诊断与容错控制效果验证

### 3.1 仿真实验验证

为把故障诊断与容错控制的一体化机制落到可复现的工程语境中，本研究在 Matlab/Simulink 中搭建船舶电力推进系统仿真平台，将发电机组等效模型、母排阻抗与负载扰动模型、PWM 变流器平均值与开关值混合模型、以及推进电机矢量控制与螺旋桨负载特性纳入统一仿真框架，使能量链路耦合关系与母排电能质量约束能够在同一时间步长下被观察。平台在测点设置上对齐船舶现场常见配置，仅保留母排电压与频率、直流母线电压、三相相电流以及电机转速等信号，并把改进加权故障树的诊断输入限定为这些量经同步采样与抗干扰滤波后的窗口化特征，从而避免仿真条件对诊断性能的非现实放大。典型故障场景选取定子绕组短路以及 IGBT 开路两类事件，其中定子绕组短路通过在电机相绕组支路引入可调短路电阻来体现局部绝缘退化的渐进过程，IGBT 开路则通过关断某一桥臂器件的驱动脉冲并保留反并联二极管导通通道来表征功率器件失效

后的非对称导电特性。诊断与控制联动的验证流程把故障注入时刻与工况切换同时加入扰动背景，使诊断模块需要在推进转矩阶跃、母排电压波动与散热条件变化叠加的情况下完成定位，并把诊断结果以风险权重与置信度形式传递给模型预测控制器，用于触发约束收紧与代价权重更新。性能评价侧重可被工程验收复核的指标体系，诊断端记录故障识别准确率以及从异常触发到故障定位完成的时间，控制端则把容错后的转速波动

范围与电流畸变率作为稳定性与电能质量的代表性量，进而形成面向故障类型的对比结果，用以说明在有限测点条件下改进加权故障树对关键割集的排序能力，以及模型预测容错在电流限幅与推进平顺性之间的折中效果。表 1 给出了两类故障的仿真对比数据，数据组织形式与诊断控制闭环的输入输出关系一致，可用于后续章节对参数整定边界与工程部署节拍的讨论。

表1 仿真实验故障诊断与容错控制效果对比表

| 故障类型   | 诊断准确率(%) | 诊断时间(ms) | 容错后转速波动范围(%) | 容错后电流畸变率(%) |
|--------|----------|----------|--------------|-------------|
| 定子绕组短路 | 98.5     | 50       | $\pm 0.4$    | 2.8         |
| IGBT开路 | 97.2     | 45       | $\pm 0.6$    | 3.2         |

3.2 实船测试与结果分析

为检验所提诊断与容错策略在真实海上运行边界下的适配性，本研究选取 1 艘 5 万载重吨级散货船的电力推进系统开展实船测试，系统结构为中压母排供电加两电平变流器驱动推进电机的典型配置，测试期间维持船舶在近海航线的常规航速区间运行，并把试验动作嵌入既有自动化系统的安全连锁框架之内。故障场景围绕转速传感器漂移展开，通过在测速反馈链路中叠加可控偏置并引入缓慢漂移斜率，模拟海上潮湿与振动环境下传感器零点变化所导致的反馈失真，使诊断模块需要在未出现明显硬件告警的条件下从残差统计特征中识别异常，并借助改进加权故障树把故障归因到测量链路而非功率回路。容错控制侧把诊断输出映射为控制器内部权重与约束的在线调整，使模型预测控制器在保持电流与母排电压约束不被破坏的前提下，对速度环参考与电流环增益进行重整，降低漂移引发的指令跟踪偏差向推进侧放大的趋势。实船效果分析以可运营性指标为主线，将螺旋桨推力的波动水平以及单位推进功对应的燃油消耗率作为对照对象，把相同航速与相近海况下策略介

入前后的运行数据进行对比归一化处理，以削弱风浪、吃水与载荷变化带来的外生干扰。结合船端数据记录器的时间戳与报警日志，可以把诊断触发、故障定位、参数更新以及推进响应的时间关联关系进行回溯，从而评估该一体化框架在船舶控制周期约束下的执行节拍是否与实际自动化系统相容，同时也为后续在更复杂故障类型下引入硬件冗余切换的离散决策提供工程参考。

结语

本文面向电力推进系统故障传播快、约束强与测点受限的特点，构建了改进加权故障树与模型预测容错控制的协同方案，并给出诊断输出驱动控制约束与权重更新的集成框架。仿真结果表明该方法在典型故障下具备高准确率与毫秒级诊断响应，并能在限流与推进平顺性之间实现有效折中；实船测试验证了对传感器漂移等隐性故障的适配性与执行节拍可行性。后续可结合更多故障类型与冗余切换策略，进一步完善多工况下的工程部署与验证体系。

参考文献

[1]高善彬, 罗朝发, 陶凤虎. 船舶综合电力推进安全控制系统智能体系结构分析[J]. 船舶工程, 2025, 47 (04):191-192.

[2]王豪, 李献领, 宁哲远, 乔新宇, 蒋宇辰, 罗浩. 数据驱动的船舶动力冷凝器系统容错控制策略研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40 (06):101-109.

[3]张建良, 韩涛, 季瑞松. 基于CNN-BiLSTM-Transformer的舰船中压直流全电推进系统故障诊断设计[J]. 实验技术与管理, 2025, 42 (01):11-18.

[4]李迎飞, 徐杰. 船舶甲板机械自动化控制系统的架构设计与优化[J]. 舰船科学技术, 2025, 47 (08):185-189.

[5]杨宏伟. 基于新能源应用的船舶电力系统设计创新[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33 (11):68-70.

作者简介：金春植（1974—），男，朝鲜族，大专，研究方向为机电工程。