

双燃料主机天然气泄漏风险评估与主动防御系统设计

乔利明

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘要: 本文聚焦双燃料主机天然气泄漏风险评估与主动防御系统设计。先分析双燃料主机天然气泄漏风险,包括系统结构与泄漏源识别、泄漏场景建模及风险因素分解;接着对比传统评估方法,构建动态风险评估模型;然后设计主动防御系统,涵盖总体架构、关键技术实现及人机交互界面;最后通过搭建实验平台验证系统性能,提出持续优化策略。研究成果可提升双燃料主机天然气泄漏防控水平,保障其安全运行。

关键词: 双燃料主机; 天然气泄漏; 风险评估

引言: 在全球能源结构转型与船舶节能减排的大背景下,双燃料主机因其兼具燃油与天然气两种燃料供给能力,成为船舶动力领域的重要发展方向。然而,天然气作为易燃易爆介质,其泄漏风险直接威胁主机运行安全与人员生命财产。传统风险评估方法存在静态化、单一化局限,难以应对复杂工况下的动态风险演变。因此,开展双燃料主机天然气泄漏风险评估与主动防御系统研究,具有重要的现实意义与迫切性。

1 双燃料主机天然气泄漏风险分析

1.1 系统结构与泄漏源识别

双燃料主机天然气供给系统由储存罐、汽化器等组件经法兰等连接成密闭通道。泄漏源识别要结合运行工况与结构特性,重点排查高频失效部位:储存罐密封垫圈因低温压力循环易老化开裂;汽化器换热管受冲刷腐蚀或产生针孔泄漏;喷射阀组阀芯阀座频繁启闭形成密封间隙;连接管路焊接接头有缺陷会泄漏;压力调节器膜片组件疲劳损伤会渗漏。可用红外热成像等手段精准定位、监测泄漏源,为风险防控提供数据^[1]。

1.2 泄漏场景建模

泄漏场景建模需基于系统实际运行参数与环境条件,构建多维度场景体系。针对不同泄漏源特性设定场景参数,包括泄漏孔径分为微孔($\leq 1\text{mm}$)、小孔($1\text{--}5\text{mm}$)、中孔($5\text{--}20\text{mm}$)及大孔($\geq 20\text{mm}$),泄漏压力覆盖低压($0.1\text{--}0.5\text{MPa}$)、中压($0.5\text{--}1.5\text{MPa}$)、高压($1.5\text{--}3.0\text{MPa}$)三个等级,环境风速设定 0.5m/s 、 2.0m/s 、 4.0m/s 三种典型工况,环境温度涵盖 -10°C 、 25°C 、 45°C 等极端条件。采用FLUENT数值模拟软件,构建天然气泄漏扩散三维模型,模拟不同场景下泄漏速率、扩散范围及浓度分布规律。微孔泄漏场景中,天然气以渗流形式缓慢释放,在泄漏点周围形成局部高浓度区域;大孔高压泄漏场景中,天然气呈射流状快速扩散,短时间内可

形成大范围爆炸危险区域。

1.3 风险因素分解

双燃料主机天然气泄漏风险,用故障树分析法按设备、操作、环境、管理四类分层分解。设备因素包括组件制造缺陷、材料性能退化、安装质量不合格,如喷射阀阀芯加工精度不足致密封失效等;操作因素有操作流程不规范等,如启动未气密检测;环境因素含温度等干扰,低温使密封垫圈弹性降低;管理因素有维护保养等不足,如未换老化密封件、检测设备未校准、人员缺乏应急技能。

2 天然气泄漏风险评估方法

2.1 传统评估方法对比

天然气泄漏传统风险评估方法包括安全检查表法、故障类型和影响分析法、危险与可操作性分析、定量风险评估法,它们在评估精度、适用场景和成本上差异大。安全检查表法以标准化清单核查风险点,简便、成本低,但主观性强,仅能定性评估,适合初步筛查。故障类型和影响分析法分析组件故障对系统的影响,可明确关键故障模式,却无法量化风险概率,适用于设备级评估。危险与可操作性分析识别工艺参数偏差风险,对人员经验要求高、周期长,适用于系统级工艺评估。定量风险评估法精度最高,但数据需求大、建模复杂、成本高,适用于关键系统精准评估,实际应用需组合使用。

2.2 动态风险评估模型构建

动态风险评估模型以实时数据为核心,结合设备状态与环境参数实现风险动态更新。模型架构分为数据采集层、特征提取层、风险计算层及结果输出层。数据采集层通过传感器实时采集设备运行参数(压力、温度、振动)、泄漏检测数据(浓度、流量)及环境参数(风速、温度),采样频率设为 10Hz 确保数据时效性。特征提取层采用小波变换处理振动信号提取故障特征,通过卡尔曼滤

波对浓度数据降噪,提取泄漏速率、压力波动等关键特征参数^[2]。风险计算层构建融合贝叶斯网络与马尔可夫链的评估模型,利用贝叶斯网络计算各风险因素后验概率,通过马尔可夫链描述风险状态转移规律,引入设备健康指数修正风险值。模型设定风险阈值分级标准,一级(风险值 ≤ 0.3)、二级($0.3 < \text{风险值} \leq 0.6$)、三级(风险值 > 0.6),实时输出风险等级与预警信息。通过历史故障数据训练模型,使泄漏概率预测误差控制在5%以内,实现风险动态精准评估。

3 双燃料主机天然气泄漏主动防御系统设计

3.1 系统总体架构

双燃料主机天然气泄漏主动防御系统采用分层分布式架构,分为感知层、决策层、执行层及交互层,各层通过工业以太网与CAN总线实现数据交互。感知层部署多类型传感器,包括催化燃烧式天然气浓度传感器、超声波泄漏传感器、温度传感器及振动传感器,覆盖储罐、管路、阀组等关键区域,实现泄漏信号全方位采集。决策层以工业控制计算机为核心,搭载智能决策算法,接收感知层数据并进行分析处理,判断泄漏状态并生成控制指令,同时具备数据存储与日志记录功能。执行层由紧急切断阀、通风设备、报警装置及备用燃料切换装置组成,接收决策层指令后执行切断气源、强化通风、声光报警及燃料切换等操作。交互层包括触摸屏与远程监控终端,实现系统参数设置、运行状态显示、报警信息提示及远程控制功能,各层协同工作形成“感知-决策-执行-反馈”闭环防御机制。

3.2 关键技术实现

3.2.1 多传感器融合检测

多传感器融合检测技术通过融合不同类型传感器数据提升泄漏检测精度与可靠性。系统采用“局部检测+全局监测”布局,在关键密封点部署超声波泄漏传感器,利用超声波信号识别微小泄漏;在管路沿线及设备周围布置催化燃烧式浓度传感器,实现天然气浓度分布式监测;在主机与管路连接部位安装振动传感器,通过振动特征变化辅助判断泄漏状态。数据融合采用三级处理机制,一级为数据预处理,通过均值滤波去除浓度传感器噪声,采用阈值法筛选超声波有效信号;二级为特征层融合,提取各传感器信号的时域(峰值、均值)与频域(主频、带宽)特征,构建特征向量;三级为决策层融合,基于D-S证据理论融合各传感器决策结果,设定证据权重系数优化融合规则。

3.2.2 智能决策算法

智能决策算法采用“故障诊断+风险分级+指令生成”

三级决策逻辑,基于改进的BP神经网络与专家系统构建。故障诊断模块通过训练后的BP神经网络处理传感器融合数据,识别泄漏位置、泄漏孔径及泄漏速率,网络隐含层采用ReLU激活函数,通过自适应动量梯度下降法优化权重,诊断准确率达95%以上。风险分级模块结合泄漏参数与运行工况,参照预先建立的风险评估标准,将风险分为轻微、一般、严重三个等级,轻微风险仅启动报警,一般风险启动通风与报警,严重风险执行切断气源、燃料切换等紧急操作。指令生成模块基于专家系统规则库,根据风险等级与设备状态生成精准控制指令,规则库涵盖120余种典型场景的处置方案,并支持在线更新。

3.2.3 执行机构设计

执行机构设计遵循“快速响应、可靠运行、冗余备份”原则,核心组件包括紧急切断阀、通风设备、燃料切换装置及报警装置。紧急切断阀采用气动驱动方式,选用不锈钢阀体与聚四氟乙烯密封件,耐压等级 $\geq 4.0\text{MPa}$,响应时间 $\leq 0.3\text{s}$,具备手动与自动双重控制功能,确保在断电断气情况下可手动操作^[3]。通风设备采用防爆轴流风机,单台风量 $\geq 1000\text{m}^3/\text{h}$,根据泄漏浓度实现多级调速,浓度低于爆炸下限10%时低速运行,高于30%时高速运行,同时具备故障自诊断功能。燃料切换装置采用电磁换向阀控制,切换响应时间 $\leq 1\text{s}$,切换过程中确保主机转速波动 $\leq 5\%$,保障运行稳定性。报警装置集成声光报警功能,报警声压级 $\geq 100\text{dB}$,报警灯光采用红色闪烁模式,同时向交互层发送报警信息,各执行机构通过冗余设计提升可靠性,关键组件采用一用一备配置。

3.3 人机交互界面

人机交互界面采用“本地操作+远程监控”双模式设计,本地界面为10英寸工业触摸屏,远程界面为基于B/S架构的监控平台。本地界面布局分为状态显示区、参数设置区、报警信息区及操作控制区,状态显示区采用组态图实时展示系统架构与各组件运行状态,以不同颜色标识正常、故障、报警状态;参数设置区支持泄漏阈值、传感器采样频率等关键参数调整,具备参数修改权限管理功能。报警信息区以列表形式显示报警时间、位置、类型及处置建议,支持报警信息查询与导出。操作控制区设置手动/自动切换按钮及紧急操作按键,自动模式下系统按算法指令运行,手动模式下操作人员可直接控制执行机构。远程监控平台通过云服务器实现数据传输,支持多终端访问,具备数据存储、趋势分析及远程报警功能,操作人员可通过手机或电脑实时监控系统运行状态,实现远程运维管理。

4 系统验证与优化

4.1 实验平台搭建

实验平台以16V240ZJ型双燃料主机为原型,按1:2比例搭建模拟实验系统,涵盖天然气供给系统、主机模拟运行系统、泄漏模拟系统及检测评估系统。天然气供给系统包括10m³高压储气罐、汽化器及调压装置,可实现0.1-3.0MPa压力调节;主机模拟运行系统采用电机驱动模拟主机负载,负载调节范围0-500kW,配备转速、扭矩传感器监测运行参数。泄漏模拟系统通过在管路及阀组关键部位设置可控泄漏点,采用电磁阀控制泄漏启停,可模拟不同孔径(0.5-20mm)与压力下的泄漏场景。检测评估系统部署与实际系统一致的传感器与数据采集设备,搭载数据采集卡与实时监控软件,采样频率10Hz,同时配备红外热像仪、气体分析仪等第三方检测设备用于数据校准。平台搭建符合《船舶双燃料发动机技术要求》标准,具备泄漏模拟、数据采集、性能测试等功能,为系统验证提供真实的实验环境。

4.2 性能指标评估

性能指标评估从检测性能、决策性能、执行性能及系统可靠性四个维度展开,制定12项具体评估指标。检测性能评估中,在0.5mm微孔、0.1MPa压力泄漏场景下,系统检测响应时间 $\leq 0.8s$,检测准确率 $\geq 98\%$;在20mm大孔、3.0MPa压力泄漏场景下,响应时间 $\leq 0.3s$,准确率100%。决策性能评估通过100组典型泄漏场景测试,风险分级准确率 $\geq 95\%$,指令生成时间 $\leq 0.5s$,无决策失误案例。执行性能评估中,紧急切断阀关闭时间 $\leq 0.3s$,密封性能测试无泄漏;燃料切换装置切换时间 $\leq 1s$,切换后主机转速波动 $\leq 3\%$;通风设备在30s内将泄漏区域浓度降至爆炸下限10%以下。系统可靠性评估采用连续运行720小时测试,平均无故障运行时间 ≥ 200 小时,故障修复时间 ≤ 30 分钟,各项指标均满足设计要求,部分指标优于行业标准。

4.3 持续优化策略

持续优化策略采用“数据驱动+迭代升级”模式,构

建“运行监测-问题分析-优化改进-验证应用”闭环体系。数据驱动优化通过系统运行日志收集传感器数据、决策结果及执行反馈数据,建立数据库并采用大数据分析技术挖掘数据关联规律,识别传感器检测偏差、算法决策延迟等问题^[4]。针对检测偏差问题,采用自适应校准算法动态修正传感器参数,结合环境温度、湿度对检测结果的影响建立补偿模型;针对决策延迟问题,优化BP神经网络结构,减少隐含层节点数量,将算法响应时间缩短至0.4s以内。迭代升级分为硬件与软件两方面,硬件上研发更灵敏的光纤泄漏传感器替代部分传统传感器,提升极端环境适应性;软件上定期更新专家系统规则库,融入新场景处置方案,优化人机交互界面操作流程。建立用户反馈机制,收集现场运行问题与改进建议,每季度完成一次小版本优化,每年进行一次系统升级,确保系统性能持续提升。

结束语

双燃料主机天然气泄漏风险评估与主动防御系统设计研究意义重大。通过全面分析泄漏风险,构建动态评估模型,设计分层分布式主动防御系统,并经实验验证与持续优化,实现了对泄漏风险的精准评估与有效防控。未来,随着技术发展,可进一步融合新技术提升系统性能,拓展应用场景,为双燃料主机安全运行提供可靠保障,推动相关领域技术进步与安全发展。

参考文献

- [1]陈延龙,赵杰.浅析某天然气液化装置冷箱液化换热器焊缝开裂维修措施及防范要点[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(17):41-43.
- [2]赵保磊,余建星,刘源.FLNG甲板上部天然气管线破断低温损伤后果研究[J].中国海洋平台,2016,31(4):37-44.
- [3]李永生.天然气净化厂闪蒸气回收技术研究与应用[J].四川化工,2023,26(01):31-33+41.
- [4]党世皓,马悦,鲁大勇,李勇,罗元,李爱民.高负荷工况天然气净化厂硫磺品质控制优化[J].石油与天然气化工,2023,52(01):6-11.