

# 船舶冷却剂泵健康状态管理系统设计

王 翀<sup>1</sup>, 张 烁<sup>2,3,4</sup>, 郑 甦<sup>2,3,4</sup>, 刘 剑<sup>2,3,4</sup>

- (1. 海军装备部 装备审价中心, 北京 100071; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100043;  
3. 北京市高速交通工具智能诊断与健康重点实验室, 北京 100041;  
4. 装备全寿命周期状态监测与健康管理与应用国家地方联合工程研究中心, 北京 100041)

**摘要:** 随着船舶工业的发展, 船舶设备的健康管理越来越受到重视; 冷却剂泵作为船舶冷却系统的重要组成部分, 其健康状况直接影响到船舶的正常运行和安全; 对船舶冷却剂泵健康状态管理系统的设计进行了研究; 采用了数据采集及状态参数特征提取、设备状态识别、设备健康管理、数据管理、配置管理 5 个关键技术模块; 经测试准确、稳定地实现了船舶冷却剂泵设备状态识别; 通过对该系统的设计与实现, 可以有效地监控和管理船舶冷却剂泵的健康状态, 提高船舶的运行效率和安全性; 同时, 该系统也为其他船舶设备的健康管理提供了一种可行的解决方案。

**关键词:** 船舶; 冷却剂泵; 健康管理; 系统设计; 状态识别

## Design of Ship Coolant Pump Health Status Management System

WANG Chong<sup>1</sup>, ZHANG Shuo<sup>2,3,4</sup>, ZHENG Su<sup>2,3,4</sup>, LIU Jian<sup>2,3,4</sup>

- (1. Naval Equipment Department, Equipment Price Review Center, Beijing 100071, China;  
2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China;  
3. Beijing Key Laboratory of Intelligent Diagnosis and Health Management of High-speed Vehicles, Beijing 100041, China;  
4. National and Local Joint Engineering Research Center of Equipment Life Cycle PHM, Beijing 100041, China)

**Abstract:** With the development of the shipbuilding industry, the health management of ship equipment has become more and more attention. As an important component of the ship cooling system, the health status of the coolant pump directly affects the normal operation and safety of the ship. A health status management system for ship coolant pumps is designed and studied, adopting the key technical modules of the data acquisition and state parameter feature extraction, identification of equipment status, management of equipment health, data management, and configuration management. Through testing, the system accurately and stably achieves the identification of equipment status for the ship coolant pumps. By achieving the design and implementation of the system, it is possible to effectively monitor and manage the health status of the ship coolant pumps, improving the efficiency and safety of ship operations. Additionally, this system provides a feasible solution for the health management of other ship equipment.

**Keywords:** ship; coolant pump; health management; system design; status recognition

## 0 引言

船舶系统一旦发生重大事故, 将对船舶的安全运行产生严重影响<sup>[1-3]</sup>。因此, 提高故障诊断的效率成为船舶故障诊断的重要方向。随着船舶系统技术的不断提高, 设备内部结构之间的连接变得越来越复杂, 船舶系统的耦合工作也越来越高, 这使得实施有效的故障诊断变得更加困难<sup>[4-5]</sup>。船舶故障诊断是船舶系统维修决策的重要组成部分。冷却剂泵是关键设备, 在热量导出中扮演重要角色, 可确保船舶可靠运行和安全<sup>[6-7]</sup>。因此, 如何设计一套有效的船舶冷却剂泵健康状态管理系统设计成为目前研究的重点与发展方向。

自 2015 年我国提出“中国制造 2025”战略以来, 高端制造业已成为全球科技革命和产业变革的新焦点<sup>[8-9]</sup>。在

“中国制造 2025”强国战略中, 海洋工程装备和高技术船舶相关技术的研究被列为十大领域之一, 这为智能船舶的发展提供了难得的历史机遇<sup>[10-11]</sup>。

目前, 我国船舶智能集成平台系统的研发仍处于初级阶段, 主要应用于国内自主研发的智能船舶。2018 年 8 月, “智能船舶 1.0”的专项智能系统联合调试顺利完成, 全面测试了各应用功能, 确定了各智能系统的交互方案, 为智能系统装船奠定了基础<sup>[12-13]</sup>。全球首艘 30 万吨智能超大型油轮凯征轮及其姊妹船新海辽轮、全球首艘 40 万吨智能超大型矿砂船明远轮及其姊妹船明卓轮成功交付。这 4 艘智能示范船采用了“平台+应用”的设计理念, 建立了智能综合网络信息平台, 显著提高了运营效率和管理水平, 并获得了中国船级社和挪威船级社的智能船舶符号认证<sup>[14-15]</sup>。2023 年, 上海船舶研究设计院搭建风电运维母船智能系统,

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2023-12-12。

作者简介: 王 翀(1981-), 男, 硕士研究生, 工程师。

通讯作者: 张 烁(1995-), 男, 博士, 工程师。

引用格式: 王 翀, 张 烁, 郑 甦, 等. 船舶冷却剂泵健康状态管理系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(2): 105-113, 121.

采用数字孪生技术实现船舶核心动力设备和电力系统的建模仿真，保障船舶安全高效航行<sup>[6]</sup>。

本文旨在对船舶冷却剂泵健康状态管理系统进行论述，然后针对各关键组态系统展开阐述分析。紧接着从数据采集及状态参数特征提取、设备状态识别、设备健康管理、数据管理、配置管理出发，研究设计了健康状态管理系统并详细讲述其 4 个关键组成。最后，针对健康状态管理系统功能验证问题，设计了系统功能验证和设计验证方案。

### 1 总体设计方案

#### 1.1 系统架构

船舶冷却剂泵设备状态识别系统遵循低耦合原则，采用 B/S 架构，基础平台与业务系统的交互通过特定的接口实现。

系统页面交互采用轻量化前台框架和数字化报表工具，用户行为监控和可视化运维等主要功能。技术架构视图分为表现层、数据交换层、业务服务层、基础服务层、数据存储层和基础设施层，形成的船舶冷却剂泵设备状态识别系统架构如图 1 所示。

1) 基础设施层：为船舶冷却剂泵设备状态识别系统构建一个运行稳定、安全可靠的基础支持环境，主要包括容器运行环境和部署容器化环境等。

2) 数据存储层：提供船舶冷却剂泵设备状态识别系统存储环境。关系型数据库对于结构化的数据存储和获取十分友好。关系数据库关注在关系上，时序数据库关注在存储上。由于设备信号数据量较大，且数据种类较多，故采用关系型数据库+时序数据库的技术路线。系统接入的数据、知识模型和分析结果存储在关系型数据库与时序数据库中，并将热点数据存放于缓存数据库中，可以提高访问速度。

3) 数据存储层：提供船舶冷却剂泵设备状态识别系统存储环境。系统数据存储主要有两种类型的数据：一种是基于关系型的用户数据和模型数据，另一种是基于设备传感器参数的时序数据，所以使用关系型数据库和时序数据库的技术存储方案。

关系型数据库主要存储用户基本信息数据、参数的基本信息数据、算法的基本信息数据和算法模型的基本信息数据。时序数据库主要存储设备传感器参数等。

由于设备信号数据量较大，且数据种类较多。系统接入的数据、知识模型和分析结果存储在关系型数据库与时序数据库中，并将热点数据存放于缓存数据库中，可以提高访问速度。

数据库主要的功能包括数据库子系统和数据计算与处理子系统两个部分。其中数据库主要包括 3 类：1) 存放用户数据和故障维修建议；2) 与设备运行相关的数据库原始数据、时序型数据库；3) 算法库。数据计算与处理主要包括机器学习算法<sup>[17-20]</sup>。

#### 1.2 系统组成

船舶冷却剂泵健康状态管理系统功能设计首要目的是达到异常状态的监测，即有故障或无故障，以及异常定位，完成该任务前提下再进行故障诊断等。船舶冷却剂泵健康状态管理系统功能组成如图 2 所示。

设备健康状态管理软件可实现对冷却剂泵设备的数据采集、状态特征提取、设备状态识别、设备健康管理、数据管理、配置管理等方面的功能。

1) 数据处理及状态特征提取：该模块根据冷却剂泵设备状态识别系统需求，通过设备和系统自带传感器获取设

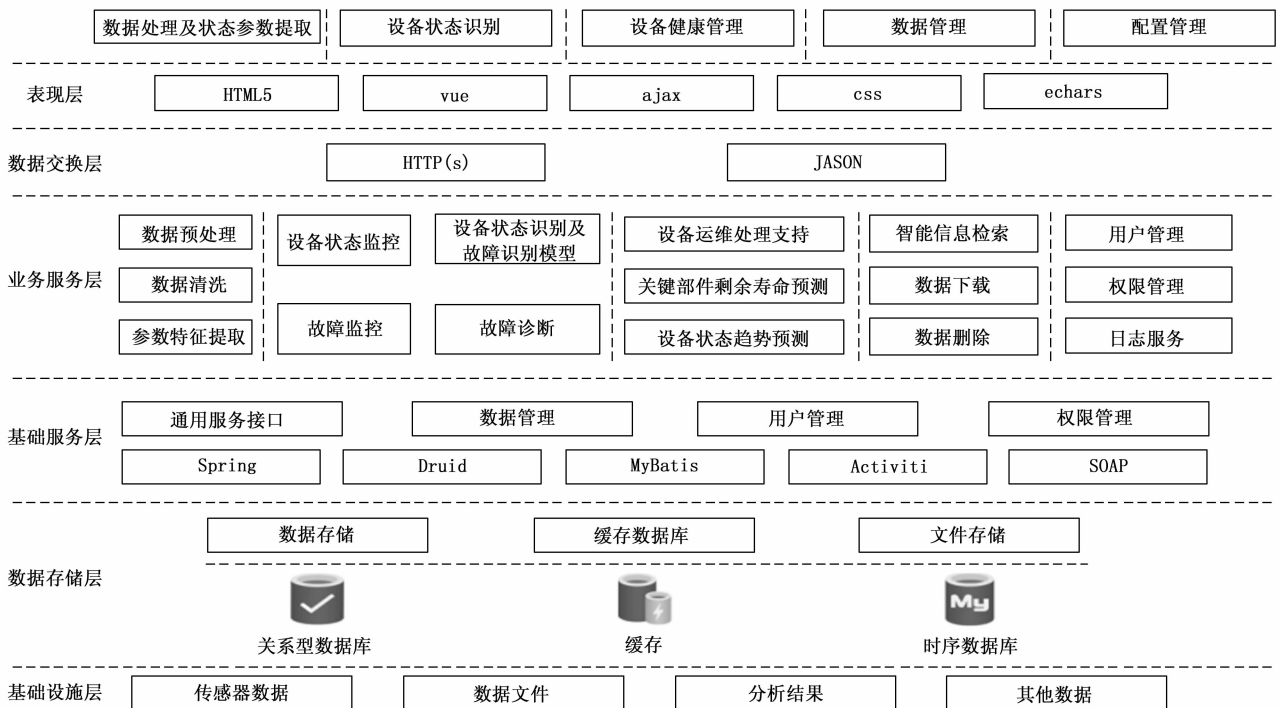


图 1 船舶冷却剂泵设备状态识别系统架构图

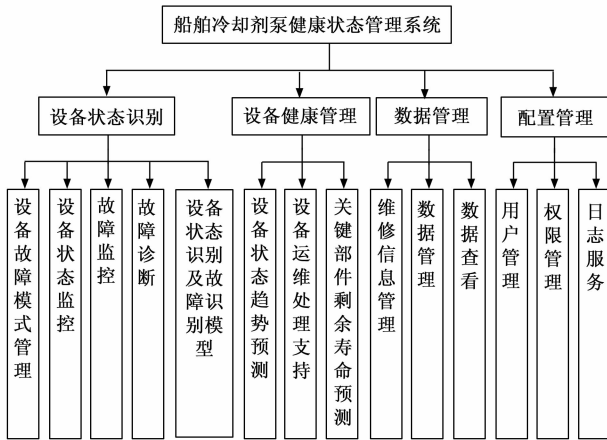


图 2 船舶冷却剂泵健康状态管理系统功能组成

备信号, 并对冷却剂泵设备运行状态参数信号进行处理, 对状态识别所需的设备信号特征参数进行特征提取, 支持设备状态参数特征提取模型和算法的扩展。

2) 设备状态识别: 针对船舶冷却剂泵设备状态特征参数进行数据分析, 通过设备状态识别算法程序实现对设备运行状态、关键参数监控评价、识别系统异常信号和故障信号, 并给出异常预警, 基于多种故障诊断方法进行故障定位, 实现对设备运行状态的识别。后续支持集成结合接口要求, 可集成满足接口要求的设备状态识别模型和算法。

3) 设备健康管理: 基于船舶冷却剂泵设备状态识别结论, 结合设备运行、维护、维修经验, 提出设备运维处理方案和故障清除措施建议, 并基于设备状态识别结果、预测模型实现设备关键部件的剩余寿命预测和设备状态趋势预测。

4) 数据管理: 提供采集参数数据的管理、维护维修信息管理、离线数据导入、数据检索、下载等功能。

5) 配置管理: 提供用户管理、权限管理和日志服务等功能。

## 2 软件开发及组态

### 2.1 数据采集及状态参数特征提取

根据船舶冷却剂泵设备的状态识别系统需求, 通过设备和系统布置的传感器获取设备信号, 并对船舶冷却剂泵设备的运行状态参数信号进行采集, 对状态识别所需的设备信号特征参数进行特征提取, 以获得可应用于设备状态识别和故障识别模块算法程序的特征信号。

#### 2.1.1 数据采集

数据采集模块可接收泵设备系统实时采集的数据, 供用户进行监测、诊断和预测。

船舶冷却剂泵采集监测参数包括温度、振动、转速、液体测量、零序电流、电流、流量和压力。

#### 2.1.2 数据处理

针对采集到的船舶冷却剂泵的数据, 需要对众多测点进行数据处理。

针对不同数据源和不同测点的信号特点, 对应进行适

合的数据处理方式。数据处理实现对监测数据的采集、问题数据处理等。

针对船舶冷却剂泵测点需要分别进行如表 1 的数据处理方法。

表 1 算法模型功能模型及输入输出

序号	算法名称	功能边界	输入	输出
1	数据清洗—缺失值填充	缺失值补充	K 最近距离填充模型、采集数据	无缺失值的数据
2	数据预处理—数据归一化	数据归一化	简单缩放模型、采集数据	数据归一化的数据
3	相关性分析—皮埃尔相关系数	皮埃尔相关系数	多维度测点数据	多维度数据的相关性度量
4	基于时域/频域/时频域的振动信号特征提取方法	振动信号特征参数提取	振动信号	加速度通频值、加速度最大值、加速度最小值、加速度峰峰值、振动烈度、振动歪度、振动峭度、振动基频值、倍频值、频率重心等

1) 数据预处理: 一方面, 在实际监测数据中, 由于受到很多干扰因素影响, 监测数据中存在着普遍的非平稳、空值无效数据等现象; 另一方面, 系统本身也会产生非平稳信号, 监测数据存在不连续的现象, 这也给基于监测数据的监测工作带来一定的困难。为了改善数据质量, 节约处理时间, 需要对监测数据进行预处理。

数据预处理模块其输入是来自监测海量数据, 输出是经过预处理后的数据, 传递到设备状态识别和健康管理等模块进行处理。数据预处理的主要功能是对数据进行野值去除空值插补的处理。数据预处理软件分为 2 个模块: 野值剔除、空值填充。

2) 信号相关性分析: 由于采集的船舶冷却剂泵都是稳定工作的正常数据, 不同测点的时、频域图像近乎相同, 因此需要进一步进行信号相关性分析, 以及时频域特征分析, 以进行异常判定<sup>[21-22]</sup>。针对高相关性变量, 首要保证的是变量间逻辑关系正确, 即检测变量间时刻维持线性相关性。为了利用变量间关系, 刻画突变型异常和变量间关系异常, 这里结合波动率, 采用差分线性回归方法评估异常。两个变量之间的皮尔逊相关系数定义为两个变量之间的协方差和标准差的商, 表示了两个变量之间的总体相关系数。估算样本的协方差和标准差, 可得到皮尔逊相关系数。

#### 2.1.3 参数特征提取

特征提取是船舶冷却剂泵设备异常检测中至关重要的一步<sup>[23-24]</sup>。有效的特征提取方法可以降低振动信号中噪声等无用信息的影响, 提取出反映设备状态的有效信息, 用

于设备异常检测。目前常用的特征提取方法包括时域特征提取、频域特征提取和时频域特征提取。参数特征提取主要针对状态识别所需的设备信号特征参数进行提取,以获得可应用于状态识别和故障识别模块算法程序的特征信号。

泵类设备典型故障诊断或寿命预测需采用时域计算、时频计算、频域计算等常用信号处理方法提取和转换特征作为模型构建的输入,因此平台预设特征提取与转换算法所示,用户可通过建模数据预处理模块自行调用需要提取的频域特征或时域特征。除此之外,系统还提供应变信号分析数据特征处理方法和测量系统特征数据处理方法。

本模块功能后续支持集成结合接口要求,可集成满足接口要求的设备状态参数特征提取新增模型和算法,从而实现对数据处理及状态参数特征提取模块的功能扩展和进一步优化完善。

1) 基于时域/频域/时频域的振动信号特征提取方法:振动信号分析模块实现振动信号的时域和频域分析,完成特征参数提取,包括加速度通限值、加速度最大值、加速度最小值、加速度峰峰值、振动烈度、振动歪度、振动峭度、振动基频值、倍频值、频率重心等。

基于设备正常运行数据与典型故障数据样例,研究设备典型故障发生的参数关联关系和故障数据增广技术,针对电流、振动等 4 种信号,研究提取数据的时域特征和频域特征。

2) 基于频域/时频域分析的失效与退化特征分析:利用时域参数可以快速实现对设备的简易诊断,即判断是否存在故障,常用于对齿轮或滚动轴承等机械结构的在线监测。当需要分析故障类型、故障位置以及故障严重程度时,就需要对齿轮或滚动轴承的振动信号进行频谱及时频域分析。根据频谱图中的频率成分以及各时频域有关频率成分的幅值大小进行进一步诊断。

3) 特征分析与趋势分析:提取的特征需要判断其与异常特性的关联度,利用数据对异常诊断进行简单测试,进行特征敏感校验与对比。当提取的异常特征能够清晰地显示出泵体的故障,也可以根据其运行特点设置合适的阈值,用于简单的异常判定,而其他的就需要通过借助数据驱动的方式来进行判定。信号特征也需要同采集信号一样进行趋势分析,相比于直接对信号进行趋势分析,特征的趋势分析能够更清晰地显示出设备当前的状态。

## 2.2 设备状态识别

基于船舶冷却剂泵设备运行特点、设备故障模式和故障原因,针对设备状态特征参数进行数据分析,通过设备状态识别算法程序实现对设备运行状态评价、设备状态趋势预测、对阈值内异常信号的预警和发展趋势分析、对超限值异常信号的故障识别和故障定位,实现对设备运行状态的识别。

此外,本模块功能后续支持集成结合接口要求,可集成满足接口要求的设备状态识别模型和算法,能够根据设备运行数据实现状态识别模块算法、程序的更新,从而实

现对设备状态识别模块的功能扩展和进一步优化完善。

设备状态识别功能包括设备故障模式管理、设备状态监控、异常信号预警、故障监控和设备状态趋势预测。设备状态识别的总体流程如图 3 所示。

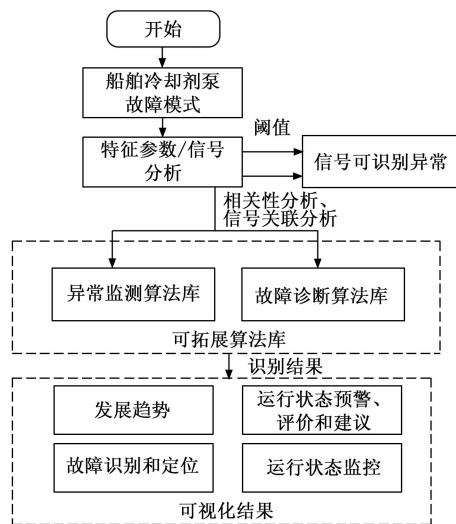


图 3 设备状态识别流程图

### 2.2.1 设备故障模式管理

设备故障模式管理功能针对泵体的故障模式进行分析,对其涉及到的故障部位和相关测点进行分析,并对船舶冷却剂泵相关故障模式进行管理。设备故障模式管理可实现对泵设备的故障情况进行整合管理,包括对泵的部件名称、故障部位及模式、故障影响、故障原因、故障检测方法等内容进行管理。

### 2.2.2 设备状态监控

设备状态监控通过对设备的运行情况、运行时间、关键参数等内容进行集中参数监控,在监控过程中,可通过数值、曲线等方式进行设备状态的集中展示。

设备状态监控系统允许用户实时掌握船舶冷却剂泵设备的运行状态,及时了解船舶冷却剂泵设备的故障及预警情况,提前做好应急处置准备,保障船舶冷却剂泵设备的运行。设备状态监控系统实时获取船舶冷却剂泵设备运行数据,并以友好、直观的形式展示给用户,这将有效帮助用户及时、准确地掌握船舶冷却剂泵设备的运行状态,及时获取相关故障信息并及时做出维修决策。

设备状态监控系统主要提供设备关键参数监控和设备运行状态监控等功能。系统一方面接收船舶冷却剂泵设备运行动态数据;另一方面,根据状态识别模型分析设备运行状态,识别异常信号和故障信息,并实时显示转入下一步综合处理。

此外,设备状态监控模块支持设备状态监控历史数据的回放功能。

### 2.2.3 设备运行状态监控

#### 2.2.3.1 设备关键参数监控

船舶冷却剂泵的关键参数监控包含:主要故障模式的

时序信号源、主要信号源的关键频域特征及主要引起异常报警的关键参数阈值。

设备关键参数监控模块提供船舶冷却剂泵监测的关键参数实时显示功能。用户可直观获知船舶冷却剂泵当前运行过程中关键参数的异常情况, 提前发现设备异常状态信息进行预防性维修。点击设备关键参数监控模块, 进入设备关键参数监控界面。用户可以以列表的方式查看船舶冷却剂泵设备监测参数的变化情况, 通过“查看图形”功能, 可以以图形的方式显示所选参数的数据图形。

同时提供设备关键参数监控页面的编辑功能, 用户可以根据需要调整监控页面的显示参数。

将参数采集值与参数限值进行比较, 若超出限值, 系统给出告警提示。

系统提供用户自定义参数信息的触发逻辑, 比如以固定时间间隔实时触发。在设备运行过程中, 当其满足用户或系统定义的特定逻辑条件时, 自动将相关参数快照发送至系统。

### 2.2.3.2 异常监测

泵体异常监控界面主要展示泵体出现异常情况, 可实现对泵体的实时异常状态进行监控, 具体包括:

1) 监控内容: 当通过异常监测融合判定后, 就应该将指定的位置的异常结果展示出来, 并利用异常监控模块进行管理。异常监控模块将集中显示所有接收到的且尚未关闭的异常信息(包括异常、超限及警告), 具体数据项目包括: 型号、异常部件名称、异常现象、状态、异常发生时间、消息等级。

异常显示可按型号、名称、异常描述等条件查询数据。异常监控显示是异常诊断的唯一入口, 点击异常现象可以进行后续的异常诊断操作。

2) 异常确认: 异常确认模块允许用户对尚未关闭的异常(包括超限和警告类的数据)进行标识和处理, 用户可选择立即处理、推迟处理以及忽略警告等, 处理结论包括:

(1) 异常: 系统自动将其转移至“异常诊断”模块进行后续处理, 记录将消失;

(2) 虚警: 系统将其自动归档到故障历史库;

(3) 观察(主要是针对暂时无法给出明确结论的数据): 系统将保留对此记录的显示, 供后续处理。

3) 异常通知: 系统捕捉到异常信息后, 将异常数据和信息提示发送至个人桌面, 同时可以通过系统消息的方式将此异常信息通知给相关用户。

### 2.2.3.3 泵体异常监控分析

故障监控需要针对冷却剂泵主要的故障模式, 运行特点进行分别设计。其异常监测的主要分为 5 种方式。最终的船舶冷却剂泵的异常监测结果, 需要经过设立合适的阈值, 并进行异常监测结果融合, 保证异常监测结果的准确率。其详细的异常监测技术方案主要分为 5 个重要步骤, 如图 4 所示。

步骤 1: 进行异常预测时, 需要先导入各个阈值, 权重

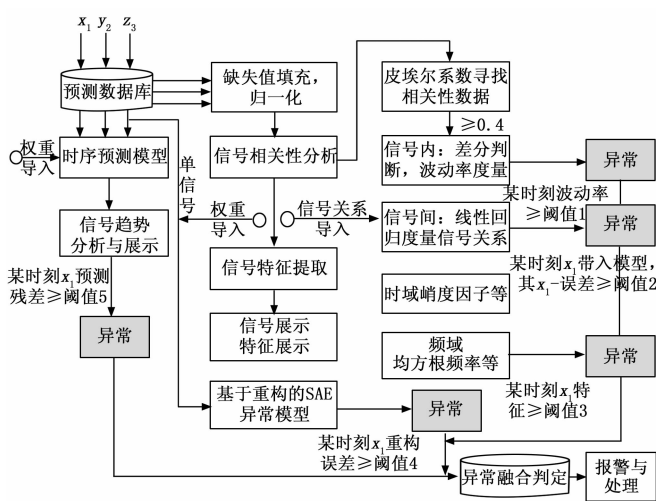


图 4 异常监测技术方案

等参数;

步骤 2: 从泵采集到的多源数据集, 这里用  $x_1, y_1, z_1$  表示, 并导入到数据库中;

步骤 3: 在进行数据处理后, 分别进行 5 种异常判定;

步骤 4: 阈值 1~5 分别代表了 5 种异常判定方法, 需要进行阈值的分析与修正;

步骤 5: 最后进行异常融合判定, 精确地进行异常报警与进一步处理。

异常监测判定方法如图 5 所示。

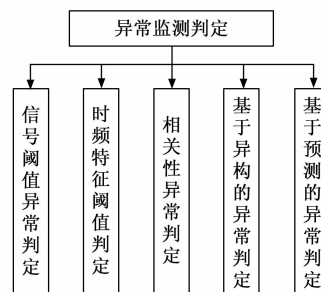


图 5 异常监测判定方法

1) 常量信号数据, 通过设立合适的阈值即可判断异常。针对异常监测, 冷却剂泵的异常数据, 主要包含多个测点的时序数据, 即要通过多个测点的时序数据进行异常监测。首先需要排除数据获取本身的异常, 例如对于叶轮损伤故障, 其相关的测点包含了 1 个电机顶部的振动测点, 电机顶盖处的两个转动测点等, 通过对多个测点进行异常分析, 部分异常现象能够从数据获取判断出异常。

2) 信号提取的时/频域特征, 通过设立合适的阈值即可判断异常。针对有明显特征的异常, 部分可以通过时/频域的特征分析, 通过设置阈值来判断异常。

3) 信号相关性分析, 测点信号内和信号间的异常。针对有明显异常特征的异常, 时间序列的异常检测更为复杂, 主要包含自相关性和互相关性两个层面。其根本就是对于

多维度数据的异常检测问题,除了单维度信号当前时刻与历史信息的自相关性,还需要考虑不同信号间的数据相关性。多变量之间存在着一定的时间和空间上的联系,也即同一时刻或相近时刻之间的互相关性。针对高相关性变量,首要保证的是变量间逻辑关系正确,即检测变量间时刻维持线性相关性。两个变量之间的皮尔逊相关系数定义为两个变量之间的协方差和标准差的商,表示了两个变量之间的总体相关系数。通过估算样本的协方差和标准差,可得到皮尔逊相关系数。通过皮尔逊相关系数得到高相关变量后,再利用差分方程寻找信号内的异常,进一步通过线性回归找出信号间的异常。

4) 基于重构的异常监测算法。针对没有明显特征的故障,除了考虑泵体本身测点之间的相关性异常。由于存在数据量大、异常数据类别不平衡、异常数据标注不完整、特征工程复杂等情况,异常检测问题常常被归结为无监督分类问题。为了避免训练数据中代表每种攻击类型的样本不平衡,并避免模型无法通过观察现有攻击类型来学习新的攻击类型,需要利用机器学习模型来检测异常,常见为利用 AE 自动编码器和重构误差来检测异常。针对时序信号异常检测的应用场景,异常样本相对于正常样本是绝对少数。自编码模型利用两者编码前后的重构误差来判断异常。如果重构时序信号与原始信号有所差异,则判定当前时刻异常。

5) 基于预测的异常监测算法。另外,由于存在一些不可预测的影响因素存在,如手动控制、不受监控的环境条件、负荷等等。为了考虑这些不可控变量对预测变量的影响,提高模型泛化性,需要预测未来时刻时序信号来监控设备状态。

#### 2.2.4 故障诊断

故障诊断根据当前接收到的设备故障信息,提供强大的自动检索分析引擎,将用户提供的故障信息处理,结合历史故障案例和故障决策树,自动检索具有类似现象的历史故障信息,并生成同类型的故障报表,为用户故障诊断提供技术分析依据。故障诊断包括故障诊断界面、故障案例诊断、人工智能诊断算法库管理、故障分析报表等功能。

1) 故障诊断界面:故障诊断显示模块能够列出所有的故障信息以及信息来源,其功能结构包括:

(1) 故障影响度排序模块。对当前故障信息根据故障分类模型,确定当前故障的严重程度,根据严重程度对当前故障进行排序,越严重越紧急的故障信息排在越前面。

(2) 历史故障次数统计模块。针对船舶冷却泵等设备,对其故障历史记录进行统计分析,列出故障历史发生次数。

(3) 故障可视化显示模块:融合上述信息,以不同颜色、不同图标形状等可视化方式综合显示当前故障的重要性和紧迫性。

2) 故障案例诊断。根据当前故障信息相关特征信息,对历史故障案例进行搜索和匹配,自动检索出具有类似现象的历史故障案例,以辅助用户进行故障隔离。

故障案例检索的典型工作流程如图 6 所示。

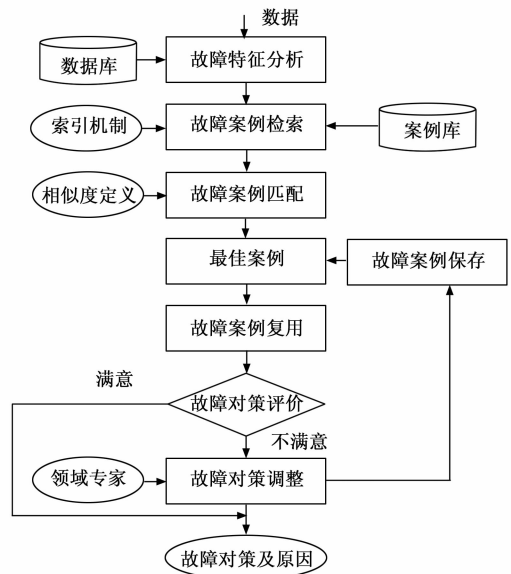


图 6 故障案例检索工作流程图

根据故障案例检索的工作原理,模拟上述领域专家解决问题的过程,上述过程共有 4 大子模块:案例查询模块(包括故障特征分析、故障案例检索)、案例匹配模块(即故障案例匹配)、案例浏览模块(即故障案例复用)、案例处理模块(包括故障对策评价、故障对策调整和故障案例保存)。

(1) 案例查询模块:根据当前故障信息和参数信息,从故障案例库的故障案例库查询与当前相似的故障案例集。主要包括故障特征分析和故障案例检索两个子模块:

(2) 案例匹配模块:根据系统设定的相似度计算算法,从检索出的故障案例集中选出最佳故障案例。

(3) 案例浏览模块:根据案例的检索和匹配结果,显示当前故障的快照信息,以及对应的故障案例的详细信息;用户根据一定的案例复用原则,采用最佳故障案例中的故障对策解决当前故障。

(4) 案例处理模块:案例处理模块提供标准的流程机制,辅助用户将当前故障的处理结果,作为新的案例注入到系统中,从而不断丰富系统的故障案例库,提升系统的诊断能力。

3) 人工智能诊断:人工智能诊断提供人工智能算法管理功能,支持算法模型的自定义。具体包括人工智能算法模型管理、人工智能算法诊断分析等功能。

(1) 人工智能算法通用算法库。系统提供人工智能算法通用模型库,并对算法模型进行分类管理。系统提供公共算法包,并支持用户导入第三方算法文件以及在线编辑算法。

系统已经预置算法,包括神经网络、深度神经网络算法等,这些预置算法已经封装,用户只能查看对应的代码,不能对其进行修改和删除。此外,系统提供通用算法的新

建功能。

(2) 人工智能算法诊断分析。利用船舶冷却剂泵设备故障现象收集所有设备相关数据, 利用人工智能方法, 实现典型设备的故障诊断。故障诊断算法包括神经网络、深度神经网络算法等。

(3) 基于神经网络的故障诊断方法。人工神经网络通过模拟生物神经元处理外部刺激的方式来解决传统线性方法无法处理的许多复杂的非线性问题<sup>[25-26]</sup>。神经网络出色的非线性问题处理能力有助于在典型机械、机电设备的故障诊断中解决故障诊断与预测等难点问题, 因此得到了大量的应用。本项目利用径向基神经网络来实现对驱动机构的故障诊断与寿命预测。

(4) 基于深度神经网络的故障诊断方法。根据正常数据对模型进行训练, 得到的模型能够预测出正常情况下相关数据的当前以及未来变化, 当系统本身出现异常时, 该模型肯定会出现偏差, 当偏差较大时, 可以认为模型与当前的系统拟合出现异常, 而该模型是基于正常的数据进行训练得到的, 故而可以反推知当前系统出现了异常<sup>[27-28]</sup>。

系统会对预测数据和真实数据之间的偏差做一个分级预设, 分为偏离较小, 偏离较大, 偏离很大。偏离较小是在模型训练及测试过程中对大量正样本数据统计, 得出的一个经验值。偏离较大和偏离很大是暂时设定的一个初始值, 这个值会在获取各个部件预警和告警信息后, 进行联动验证, 动态调整。当预测数据和实际数据偏离较小时, 为正常状态。当预测数据和实际数据偏离较大时, 为预警状态, 会去获取相关设备组件的预警信息, 然后发出预警信息。当预测数据和实际数据偏离很大时, 为告警状态, 会去获取相关设备组件的告警信息, 然后发出告警信息。

4) 故障分析报表:

根据当前故障诊断信息, 生成故障分析报告表, 用户可查看同类型故障案例信息、故障系统/部件履历信息和性能历史变化曲线, 帮助用户更为直接地了解设备的运行情况和故障情况, 为后续故障诊断分析提供技术依据。

故障分析报表涵盖该类型故障现象、故障定位信息、故障机理、故障措施和问题复现, 并以可视化图形的方式直观显示诊断信息。以不同的颜色展示故障因子遍历路径。同时, 用户可在故障分析报表中查看故障系统中各部件、元器件的履历信息和部件的历史性能变化曲线。

2.3 设备健康管理

基于船舶冷却剂泵设备状态识别结论, 结合设备运行、维护、维修经验, 提出设备运维处理方案和故障清除措施建议, 并基于设备状态识别结果实现设备关键部件的剩余寿命预测。

具体功能包括故障诊断、设备运维处理支持、关键部件剩余寿命预测和设备状态趋势预测。设备健康管理的总体流程如图 7 所示。

2.3.1 关键部件剩余寿命预测

剩余寿命预测子功能根据船舶冷却剂泵设备关键部件

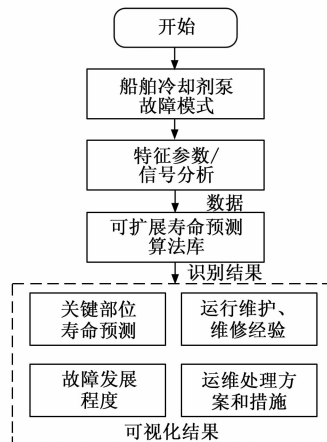


图 7 设备健康管理总体流程图

工作中获取的失效数据, 分析系统的失效规律, 得到的关键部件的性能退化规律<sup>[29-30]</sup>。基于性能退化规律, 结合实时检测的系统参数及状态特征估计关键部件的剩余寿命, 为后续船舶冷却剂泵设备的健康评估提供必要的基础。关键部件剩余寿命预测如图 8 所示。

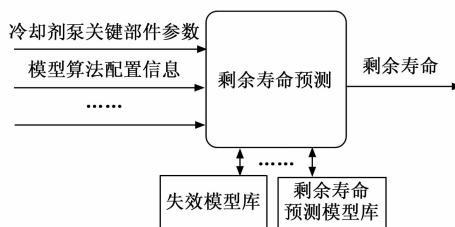


图 8 关键部件剩余寿命预测示意图

2.3.2 设备状态趋势预测

设备状态趋势预测提供船舶冷却剂泵设备状态值预测界面, 完成未来指定时间内, 船舶冷却剂泵设备状态预测的调用和结果显示 (趋势以及与指定历史数据的对比)。

1) 趋势预测: 趋势预测主要利用的船舶冷却剂泵设备参数历史数据, 加载预测模型, 实现对船舶冷却剂泵设备状态参数的趋势预测, 及时了解船舶冷却剂泵设备的性能衰减的变化规律, 预测异常发生时间, 生成预测结论包括系统的异常性质、程度及异常发展趋势, 同时能够初步进行异常来源判断或影响分析, 并提出干预措施建议, 以便相关人员提前做好参数控制准备。状态趋势预测如图 9 所示。

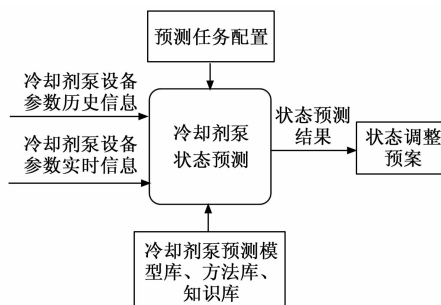


图 9 状态趋势预测示意图

状态趋势预测功能将大量的设备状态参数数据作为输入,分析不同参数的数据特点,利用相适应的趋势分析算法,给出船舶冷却剂泵设备性能衰减的变化规律、当前状态和未来状态趋势预测,为相关工作人员提供更加全面的船舶冷却剂设备性能状态分析手段。

对于满足一定条件的趋势形态,趋势预测功能能够进行相应报警,并以图形化的方式直观显示出趋势预测的结果。

性能衰减趋势预测子模块的工作流程如下:

(1) 数据抽取。数据抽取层处于系统的最低层,是系统的数据提供者。“数据抽取层”负责从数据库中按一定的策略进行数据的读取并根据分析的需要进行预处理。

(2) 数值特征分析。数值特征分析主要对系统采集的原始数据进行初步分析和基本数字特征描述。数值特征分析部分提供数字特征量(包括最大值、最小值、平均值和标准差)的选择。

(3) 趋势预测算法分析。利用历史数据,基于趋势分析算法进行事后趋势预测,分析该段时间参数表征设备的状态。

(4) 预测分析结果输出。趋势预测分析的表现形式包括:散点图、曲线图、分析报表。

(5) 性能衰减趋势预测查询分析。该功能单元主要是根据生成的趋势预测结论,实现对关键参数的性能衰减趋势预测分析的详细参数进行查询、分析、排序等功能,对关键参数的健康性能参数进行详细地了解,从中获取用户需要的信息。

(6) 性能衰减趋势预测报告生成。该功能单元主要是根据用户配置信息,结合性能衰减趋势预测的结果,生成相应的系统趋势分析报告。

2) 数据比对:开发船舶冷却剂泵设备数据比对功能,实现船舶冷却剂泵设备参数当前数据与指定历史数据的对比。用户可以根据实际需要选择比对参数及设置比对时间,系统根据用户设置条件对数据库进行相应数据的查询和结果显示。

## 2.4 数据管理

系统主要数据分为两类:一类是知识型数据主要包括设备运行特点和工作原理、维修经验、故障处理经验,关键部件更换周期经验等数据,属于结构化或半结构化数据(如:文本类),这类数据主要通过导入方式;另一类是系统(设备)运行数据,属于时序数据(如:温度、压力、振动等),这类数据通过 CSV 文件导入。因此数据管理提供存储数据的维护维修信息录入、维护维修信息查询、数据导入、数据查看下载等功能。

### 2.4.1 维护维修信息管理

维护维修信息主要包括船舶冷却剂泵设备运行特点和工作原理、维修经验、故障处理经验,关键部件更换周期经验等数据,对这些信息数据进行录入、修改、删除、查询等管理。

1) 维护维修信息录入:维护维修信息数据主要来自各

种 PDF 技术文档以及结构化的文档数据。针对不同的文档类型定义多个数据表进行存储:

(1) 首先如果是结构化的文档数据直接通过接口导入方式进行录入;

(2) PDF 技术文档如果属于格式化的文档可系统进行文档批量读取解析然后转换成表数据进行存储;

(3) 若技术文档无法进行格式转换如表信息,首先进行该类文档的数据结构定义,然后通过人工方式进行录入,再设定录入标签页可进行对照查询。

2) 维护维修信息查询:维护维修信息通过条件查询方式对设备运行特点和工作原理、维修经验、故障处理经验,关键部件更换周期经验等信息进行查询。主要提供查询方式:多条件联合查询方式、按参数名称查询方式、按照设备名称查询、按照设备型号查询、按照关键字查询,支持对查询结果的排序显示。

输入查询条件时,系统可以根据用户输入的部分文字进行匹配,显示与所输入文字相匹配的字段,以提示用户输入正确的查询条件。

筛选条件:参数名(多选下拉框)、时间筛选(多选下拉框)、设备型号筛选(多选下拉框)、设备名称筛选(多选下拉框)、关键字(输入框)。

3) 维护维修信息修改和删除:维护维修信息的修改和删除,首先通过查询找到对应修改或删除的位置,然后对具体维护维修信息进行修改或删除。

### 2.4.2 参数数据导入

船舶冷却剂泵设备运行数据,作为时序数据(如:温度、压力、振动等),主要通过 CSV 文件导入。导入后的参数数据可以通过页面进行数据趋势及数据对照查看。参数数据导入流程如图 10 所示。

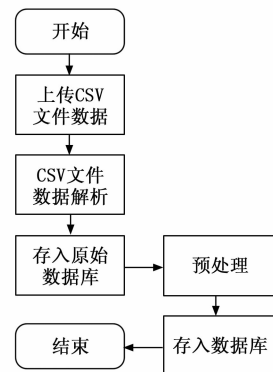


图 10 参数数据导入流程图

## 2.5 配置管理

配置管理主要针对反应对船舶冷却剂泵系统的配置管理,包含用户管理,权限管理和日志服务等相关配置。

### 2.5.1 用户管理

用户管理提供对用户的集中管理,即根据用户管理策略,集中授权用户对各应用的访问权限。用户管理模块建立统一用户身份视图,实现对用户身份的集中管理。通过



对外部服务封装, 调用外部接口或 API, 按要求将封装成支持系统自身的用户管理服务。

同时, 系统提供统一的用户身份生命周期管理、完整的管理审批工作流程、委派管理和用户自主服务以及账号口令管理, 包括: 主账号体系管理、半自动化映射、账号映射、账号生命周期管理、半自动化账号生命周期管理、用户自服务管理、帐号口令管理。

用户管理可以实现系统用户的基本维护功能, 包含新增用户、编辑用户、用户查询、导入导出等功能。具体功能包括:

1) 添加用户: 提供用户信息添加功能。用户信息包括用户名、姓名、性别、部门、职位、状态、工卡号、移动电话、办公电话、邮箱、办公室、密码、重复密码等;

2) 编辑用户信息: 选择需要修改的用户信息, 点击修改, 可修改用户信息;

3) 查询用户信息: 输入查询项, 点击查询按钮, 系统匹配符合查询条件的用户信息;

4) 删除用户信息: 选择需要删除的用户信息, 点击删除按钮, 用户确认删除后, 系统删除该用户信息;

5) 用户信息批量导入: 提供用户信息批量导入功能。导入完毕后, 给出信息导入结果信息;

6) 用户信息查看: 选择需要查看的用户信息, 点击查看按钮, 可查看用户信息;

7) 操作日志查看: 提供用户操作日志查看功能, 包括用户登录信息与操作信息等;

8) 用户信息列表显示: 以列表的形式显示系统用户信息, 包括用户名、姓名、部门、职务、邮箱、最近登录时间、上次登录 IP、操作日志;

9) 密码重置: 提供用户密码重置功能;

10) 账号禁用: 提供账号禁用功能。账号禁用后, 用户将无法访问本系统;

11) 账号启用: 提供账号启用功能。用户信息创建成功后, 系统账号处于启用状态。禁用账号启用后, 用户可访问本系统;

12) 分配角色: 可为指定用户分配系统角色, 授权该用户相应的功能模块操作权限和数据使用权限功能。

13) 分配权限: 可为指定用户单独分配权限。

14) 完成自定义用户 ID、登录密码、角色等基本属性以及其他附带属性的定义, 以及用户的增加、删除、属性编辑等。

### 2.5.2 权限管理

权限管理实现角色、用户等的权限管理和组织、操作日志等信息的管理, 主要是对角色、用户等权限信息和组织信息的增、删、改、查操作, 及对操作日志的查看、查询操作。通过对用户权限的管理实现对用户对文件和数据库权限的控制。实行权限的分级管理, 文件权限支持目录级和文件级, 包括目录支持读、写、执行权限; 文件支持读、写、执行权限; 数据库访问权限支持数据库表级和字段级, 包括表

支持更新、读取权限; 字段支持更新、读取权限。

### 2.5.3 日志服务

日志管理功能实现对操作日志的记录显示功能, 用户可以对其进行查看、查询等操作, 需维护信息包括日志名称、系统名称、操作类型、操作人员、操作时间、来源、重要性等。系统按照要求将日志模块封装成日志服务, 并提供调用接口, 能够分应用、分级记录关键信息。

## 3 功能验证

针对冷却剂泵状态识别系统, 开展设备状态识别系统功能测试, 验证设备状态识别系统的识别准确性。

为保证整个项目在交付阶段能够达到合同中技术协议的要求, 体现出系统的可用性、扩展性, 实现系统能够支撑实际应用过程, 需要进行在开发过程中及系统搭建后进行大量的测试试验及集成验证过程。本系统需要主要从两个方面进行了测试试验及集成验证。

### 3.1 功能验证范围

功能验证内容包括:

1) 系统功能针对用户需求的覆盖性;

2) 系统功能及操作逻辑的正确性;

3) 用户操作系统工作流程的正确性;

4) 系统各功能模块和子系统之间内部接口的匹配性;

5) 各功能模块、子系统之间工作的协调性;

6) 对各个工况下的冷却剂泵的运行状态进行监测和状态评价;

7) 对故障特征进行故障模式识别, 判断设备故障的类型、部位和成因;

8) 针对不同故障模式提供维护决策;

9) 对设备状态评价、趋势预测、故障定位等识别结论进行可视化呈现, 并实现数据管理的人机交互。

### 3.2 性能验证范围

软件通过至少 72 h 的长期稳定性运行试验。

验收准则为程序所有的输出功能检查结果 (趋势预测结果、故障诊断维护维修决策) 均正确。

## 4 结束语

船舶冷却剂泵健康状态管理系统主要解决如何将维修方式从事后维修、定期维修转变为视情维修、预防性维修的问题, 降低维修保障费用, 缩短维修时间, 提高船舶冷却剂泵设备完好率和任务成功率, 加快装备维修方式向基于状态维修转变的进程。通过对装备的状态参数特征提取、状态识别、健康管理等方法的研究, 突破了多方法融合的健康状态评估模型、基于故障诊断、深度学习、寿命预测等关键技术, 实现了数据处理、状态检测、健康评估、预测评估等功能, 具有健康状态评估智能程度高、体系结构开放、状态评估结果可视化等特点, 可推广应用于船舶各系统和部件的寿命预测、状态综合分析、健康状态评估等。

(下转第 121 页)