

基于软 PLC 的船用柴油机监控系统设计

丁盼

(重庆川仪自动化股份有限公司, 重庆 401123)

摘要:为满足现代船舶对柴油机监控与智能运维的更高要求,该研究设计了一套基于软 PLC 的船用柴油机监控系统。该系统以树莓派 4B 为核心,采用模块化设计理念,软件设计结合使用 Linux 操作系统与 CODESYS 运行时,硬件设计主控板、安保模块、IO 模块、机旁仪表和遥控仪表等多个模块集成。通信方面,主控板通过 CAN 总线与发动机 ECU 通信,并利用 RS485 总线实现了安保模块的冗余通信。系统在功能上实现了数据采集与处理的多重备份、通信故障的自动转移以及故障预测的自学习。故障预测采用自编码器与随机森林的混合学习算法进行故障预测。相比较传统的基于 PLC 的监控系统,该系统设计具备软硬件开发的灵活性,还具有后续升级的潜力。

关键词:船用柴油机监控;软 PLC;CODESYS;多总线;混合学习;故障预测

中图分类号:TH17

文章编号:1000-0682(2026)02-0018-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.004

Design of a marine diesel engine monitoring system based on soft PLC

DING Pan

(Chongqing Chuanyi Automation Co., Ltd., Chongqing 401123, China)

Abstract: The increasing demand for intelligent monitoring and maintenance of modern marine diesel engines necessitates the development of advanced and flexible control systems. This paper presents the design of a novel monitoring system utilizing a soft Programmable Logic Controller (PLC) architecture. The system is centered on a Raspberry Pi 4B, adopting a modular design philosophy. The software architecture integrates the Linux operating system with the CODESYS runtime, while the hardware comprises a main control board, a safety module, an I/O module, and both local and remote instrumentation. Communication with the engine's Electronic Control Unit (ECU) is established via a CAN bus, with a redundant RS485 bus ensuring reliable data exchange with the safety module. Key system functionalities include multi-level redundancy for data acquisition and processing, automatic communication failover, and a self-learning capability for fault prediction. A hybrid machine learning model, combining an autoencoder with a random forest algorithm, is employed for predictive diagnostics. Compared to conventional PLC-based systems, the proposed design offers superior flexibility in both hardware and software development, presenting a scalable platform with significant potential for future upgrades in intelligent marine engine diagnostics.

Keywords: marine diesel engine monitoring; soft PLC; CODESYS; multiple fieldbus; hybrid algorithm; fault prediction

0 引言

柴油机是大多数民用船舶的动力源,海洋的恶劣工况影响着其工作状态。实时监测运行状态并预测故障,成了船用柴油机监控系统的发展方向^[1]。

目前,已有学者对船用柴油机监控系统进行了

收稿日期:2025-09-25

第一作者:丁盼(1991—),男,硕士,工程师,研究方向为机电一体化、嵌入式设计。

诸多研究。该系统也经历了由机械式、电气控制式再到集成控制的发展^[2]。传统基于硬 PLC 的监控方式已无法满足现代船舶的智能化需求^[3]。例如,文献[4]基于 PLC 及触摸屏的柴油机增压压力控制及监控安保系统,实现了基本的参数监测和安全保护与报警等监控安保功能。文献[5]等使用基于 S7-1500PLC 的船舶柴油机油温 PID 控制器设计及其监控系统,简化硬件接线设计,提升电气系统可靠性。王金豹^[6]等以西门子 PLC S7-1200 为核心开发设计了船舶柴油发电机组的安保监控系统。以上研究表明,有限的计算资源和封闭软件系统导致单机运行的硬 PLC 只能运行基于阈值触发报警监控系统,提高系统集成度。借助物联网平台,文献[7]为自定义监控及报警系统内各模块间以及外部通信接口,使用 STM32 硬件平台的船用柴油机监控及报警系统。文献[8]等研发了基于阿里云平台的远程柴油机监控系统。文献[9]基于深度学习的组合神经网络预测模型预测柴油机的排气温度,实时监测柴油机工作状态并及时做出故障预警反应。文献[10]等使用混合深度学习模型采用 LabVIEW 和 python 进行“端到端”的实时故障诊断系统分析柴油机震动信号,实现实时监控和故障诊断特性。验证了船用柴油机监控系统软硬件模块通用化、运维智能化的新趋势。但船舶航行时缺少互联网接入,无法借用外部算力,限制了应用场景。

为此,该文基于树莓派 4B 运行的 Linux 系统和 CODESYS^[11]运行时的软 PLC,设计了一套低成本、通用化的船用柴油机监控系统。该系统采用硬件模块化设计,通过多种通信总线链接各模块,提高扩展性和冗余安全性。同时软件上本地部署自编码器与随机森林的混合学习故障预测算法,可更换维护,提高功能升级系统智能化水平。实验表明,基于软 PLC 的船用柴油机监控系统硬件可靠、软件可扩展,实现柴油机监控系统的稳定工作和升级能力。

1 系统总体设计

1.1 系统需求

结合使用场景分析,船用柴油机的监控系统需要实现以下需求:(1)实时监测发动机转速、水温、油压、油温、电瓶电压、燃排气温度压差等关键参数;(2)具备声光报警功能,当参数超出设定范围时及时告警;(3)具备安保停机功能,确保发动机能人工停车;(4)支持远程监控,实现机旁和遥控两种操作模式;(5)具备故障诊断功能,能够识别并记录故障

信息;(6)根据历史运行数据记录和故障记录,预测故障类型。

1.2 系统架构

船用柴油机监控系统工作流程主要为:收集 I/O 模块采集的发动机运行状态参数,解析得到的发动机实时状态和报警信息传输到机旁仪表。根据遥控信号开启或关闭,接收机旁仪表指令或者遥控仪表指令实现设置参数、清除报警、上电、启动和停机功能。为使系统需要具备高可靠性,设置了系统主控板与安保模块保护功能互相备份、发动机电子控制单元(Engine control unit, ECU)与 I/O 模块数据采集互为备份,遥控仪表与机旁仪表控制输入互为备份,CAN 与 RS485 通信互为备份等多重安全冗余设置。

结合需求分析,如图 1 所示,整个系统分为感知执行层、核心层和交互层等 3 层架构:(1)感知执行层:包括 I/O 模块、发动机 ECU 上连接的各类传感器和执行器,负责数据采集和控制输出;(2)核心层:以树莓派 4B 为核心的软 PLC 系统,运行 CODESYS Runtime,负责数据分析、存储和逻辑控制,以及故障预测;(3)交互层:包括机旁仪表和遥控仪表,用于轮机舱或驾驶台。

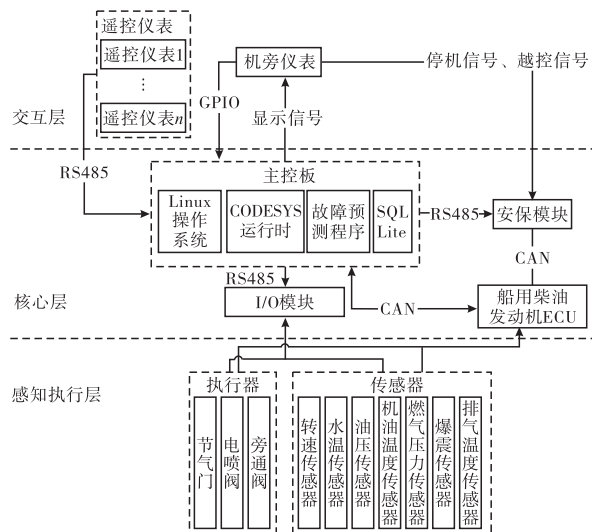


图 1 系统总体架构图

2 硬件功能设计

2.1 主控板

主控板是监控系统的核心处理模块,主要功能包括:(1)数据采集:根据 J1939 协议解析 ECU 发送发动机状态报文,并保存于 SQL lite 数据库;(2)提供服务:提供 CAN 总线、RS485、以太网等通信接口,为机旁仪表显示信号,为遥控仪表提供 Modbus 信息服务;(3)电源管理:为子模块提供稳定的电源

供应;(4)模拟自检:为静止状态发动机提供各监测通道模拟自检功能,确保系统健康。

主控板核心采用树莓派 4B 作为核心控制单元,其主要硬件参数如下:采用四核 1.5 GHz 的 Cortex - A72 内核 CPU,板载内存为 4GB LPDDR4 - 3200 SDRAM;系统盘采用 32G micro SDHC 卡,存储盘采用 USB3.0 接口转接 1TB 固态硬盘。外设接口方面支持 40Pin GPIO、有线网络、4 个 USB 和 2 个 HDMI,可支持机旁仪表显示屏、SPI 转 CAN 适配器、SPI 转 Modbus 适配器等外设。软件系统为基于 Linux 的官方 Raspberry Pi OS (64bit) Bookworm,并安装 CODESYS Control for Raspberry PI 4.13.0.0.package 的 CODESYS 运行时。系统内核安装 patch - 6.6.78 - rt52 实时补丁,能够满足监控系统的实时性要求。

2.2 安保模块

安保模块是系统安全的冗余备份,主要功能包括:(1)安保参数监测:独立监测发动机转速、油压等关键安保参数;(2)就地控制相应:响应控制操作面板的启动、停机信号,当检测到燃油泄漏、飞车等危险状态时,立即执行停机操作;(3)通信接口:通过 RS485 与主控板通信,作为主控板与发动机 ECU 的 CAN 通信失效补充,实现通信冗余;(4)故障自诊断:监测自身工作状态,指示自身状态,确保安保功能正常。

2.3 人机交互

主要由机旁仪表和遥控仪表组成,两者硬件相同,仅通过软件限制遥控仪表的参数设置功能。以图 2 机旁仪表为例进行介绍。

显示系统硬件采用 7 寸 1280 × 720 分辨率的液晶显示屏,通过 HDMI 接口连接到树莓派。显示界面基于 CODESYS WebVisu 环境开发,并开启“标准键盘处理”功能。使用 Linux 中 systemd 的自定义守护进程在系统上电后延时 60 秒开启 Chrome 浏览器全屏模式,访问本机 IP 上 8080 端口运行的 CODESYS WebVisu 可视化服务。

按键板提供 13 个物理按键,其中包括:(1)方向键:上、下、左、右 4 个方向键,用于菜单导航;(2)功能键:确认和取消 2 个功能键,用于菜单设置;(3)控制键:复位、消音、越控、调光等控制键,用于快捷控制;(4)F1 - F5 共 5 个自定义快捷按钮,如图 2 所示。此外有启动与停机按键同时单独接入主控板与安保模块,电源按键接入主供电电路。

按键板通过屏蔽电缆与树莓派的 GPIO 接口连

接,通过 Linux 下注册的按键检测服务,将物理按键的 GPIO 信号转换为 WebVisu 管理器能识别的标准键盘事件,包括在工控页面中常用的上下左右方向键、Tab 键、Esc 键和 Enter 键等标准事件。



图 2 控制面板按钮布局

3 软件系统设计

3.1 总体架构

系统选用 CODESYS V3.5 SP20 Patch3 集成开发环境进行软 PLC 项目开发。功能上,系统主要模组间通信、发动机控制、人机界面和故障维护 4 个部分组成,如图 3 所示。系统会采集柴油机运行参数,当参数大道预设报警值后会开启声光告警。此后将详细报警记录通过 CODESYS 数据存储功能存于部署在 Linux 上的 SQL lite 数据库中。CODESYS 在通过 Linux 内核 uinput 模块设备树(/dev/input)挂载的虚拟输入设备接收 GPIO 按键的信号,响应用户指令外;故障诊断算法会预测故障写入到 SQL lite 数据库中,人机界面会读取故障预测记录表,并展示在机旁仪表或遥控仪表界面中。

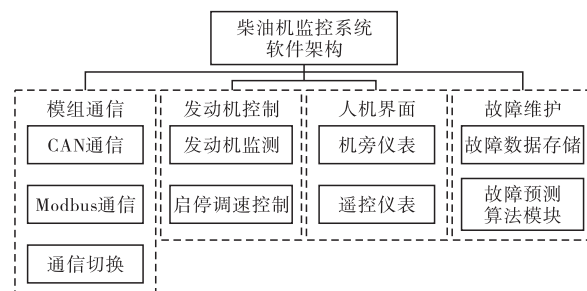


图 3 系统功能框图

3.2 模组通信

模组间通信利用 CODESYS 对 CAN 和 Modbus 协议的内置支持。功能设计上,CAN 总线上应用于柴油机 ECU 与上层模块的实时通信,包括主控板与安保模块。正常工作发动机监控、启动、停止、调速等命令均由主控板发出,安保模块监听 ECU 通信。当主控板发生故障后,安保模块可执行紧急停车功能,实现安全冗余功能。RS485 总线的中心节点为

了一套主备总线智能切换机制。系统优先采用传输高效且可靠的 CAN 总线与柴油机 ECU 进行数据交互,同时配置 RS485 总线作为冗余备份通信链路。

该切换逻辑基于状态机架构实现:系统持续监测 CAN 总线状态,一旦发生通信中断且超时达到 500 毫秒阈值,守护进程将自动禁用 CAN 通信任务,并激活基于 Modbus 协议的 RS485 备用链路,从安保模块获取关键发动机工况参数,从而保障核心功能的持续运行。为避免在临界状态下发生通信链路的频繁切换(即“状态震荡”),切换算法中引入了延时机制以确保过渡的平稳性。在整个过程中,系统通过全局变量列表(GVL)对主备总线的 I/O 数据进行统一映射,确保了无论在何种通信模式下数据都保持一致。当监测到 CAN 总线恢复正常且所有网络从站均达到可运行状态后,系统将执行回切操作,恢复主通信链路。该故障切换与恢复的完整流程如图 5 所示。

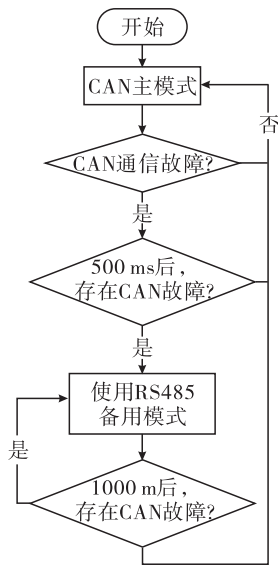


图5 通信切换算法流程图

3.3 故障预测

该系统设计了数据存储和故障预测两个模块。数据存储模块将 ECU 故障码出现前后一段时间的 ECU 数据存储在主控板上的 SQLite 中的故障记录表,并可用于故障预测算法推理。由于柴油机 ECU 数据具有多传感器采集导致的多维冗余和故障样本数据少、时间分布稀疏的特点,这使得分类算法容易偏向多数类别,导致少数样本对应的故障被遗漏。堆叠自向量机(Stacked auto encoder, SAE)作为一种强大的无监督深度学习模型,其核心优势在于数据

重构与特征降维。它能够通过逐层学习,从高维原始数据中自动提取出蕴含核心信息的低维、非线性特征。然而,SAE 的本质是为特征提取而生,其自身的分类判别能力相对较弱。若直接在其编码层后附加标准向量机(Standard Vector machine, SVM)这类简单的分类器,在应对柴油机故障这类源数据标签稀疏的故障分类时,难以构建清晰的决策边界,从而导致分类精度不足。相比之下,随机森林通过构建多棵决策树并集成其结果,获得了卓越的分类性能和抗过拟合能力。它对于类别不平衡的数据集具有天然的鲁棒性。然而,RF 的性能同样会受到输入数据质量的严重影响。当直接将未经处理的高维、冗余 ECU 数据作为输入时,RF 会面临挑战:(1)冗余特征会稀释关键特征的重要性,干扰决策树节点的有效分裂;(2)高维数据使得构建每棵树时随机抽样的特征子集很可能包含大量噪声,从而降低精度和计算效率。

为此该文结合 SAE 和 RF 两种算法取长补短,设计了混合学习算法如图 6 所示。使用 SAE 将高维数据“化繁为简”,通过在 SAE 构建的精简特征空间特征转换后的,随机森林发挥其分类优势,最终实现了在柴油机稀疏故障数据场景下的故障预测。

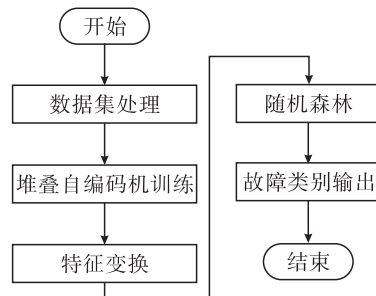
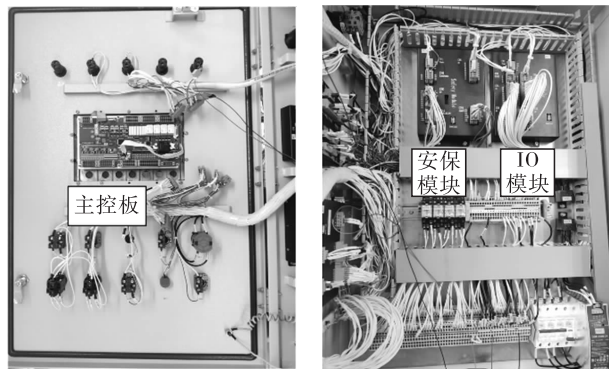


图6 故障预测算法流程图

4 验证测试

4.1 监控系统基础功能

为验证监控系统可行性,使用 PC 机通过 USB 转 CAN 通信转换器模拟玉林柴油机厂船用 YC6MJ 型柴油机 ECU,将整体系统如图 7 进行接线装机。测试机旁/遥控仪表功能,根据实机测试效果见图 8,测试结果汇总如表 3 所示。该系统在启停机保护、水温油压异常、稳定调速、故障记录、数据保存、故障预测等方面的测试表现满足设计需要。



(a) 主控板及按钮 (b) 安保模块及IO模块

图7 监控系统测试现场



(a) 按键控制测试 (b) 历史错误记录

图8 功能测试

表3 柴油机监控系统测试汇总表

序号	项目	操作描述	结果
1	启动	按下启动按钮, 启动电磁阀和燃油限制电磁阀动作, 发动机启动	正常
2	停车	按下停止按钮, 控制停车电磁阀立即动作, 发动机停止	正常
3	高温冷却水温度高停车	提升水温传感器读数直到触发高温报警, 控制和安全停车电磁阀立即动作, 发动机停止	正常
4	滑油压力低停车	触发油压底报警, 停车电磁阀立即动作, 发动机停止	正常
5	CAN 总线通信	与 ECU 通过 CAN 总线进行数据交换, 接收发动机参数	正常
6	RS485 通信	PC 上位机监听主控板与安保模块、远程仪表的 RS485 通信	正常
7	越控功能	按下越控按钮, 除超速外其他保护功能失效	正常
8	远程监控	通过以太网访问 WebVisu 远程监控界面	正常
9	参数设置	设置报警阈值、停机阈值、延时时间等参数	正常

续表3

序号	项目	操作描述	结果
10	历史数据查询	查询历史运行数据和故障记录	正常
11	传感器标定	通过标准校准设备对传感器进行在线标定	正常
12	转速控制	通过 TSC1 报文控制发动机目标转速	正常

4.2 故障诊断功能

在树莓派 4B 上指定一个 CPU 核心运行使用 Tensorflow lite 框架, 针对运行随机森林、自编码器加标准向量机和自研混合故障预测算法, 使用 Diesel Engine Faults Features Dataset 3500^[12] 中提取的进气压力降低故障发生前数据作为数据源, 进行性能对比的结果如表 4 所示。

表4 故障预测算法对比

算法	准确率	精确率	召回率	F1 分数	推理时间/ms
仅随机森林	0.874	0.876	0.874	0.873	15.2
自编码器 + SVM	0.892	0.895	0.892	0.890	45.8
SAE + 随机森林	0.987	0.988	0.987	0.987	35.4

根据表格数据显示与单独使用分类算法相比使用 SAE 和随机森林结合的混合学习算法在故障预测精度均有优势, 35.4 毫秒满足工业实时应用。如图 9 所示, 在系统系统整体运行时, 树莓派 CPU 核心占用率分别为 38%, 内存占用率为 22%, 硬件资源足可支持系统稳定运行。



图9 硬件资源占用

5 结束语

该文基于软 PLC 设计开发船用柴油机监控系统, 实现了既定需求, 并部署量化模型对典型故障进行故障预测。通过 Linux 任务模块化设计、CODE-SYS 任务分离、多总线通信、Web 可视化等实现了柴油机监控系统的基本功能, 还使用量化后的混合学

(下转第 51 页)

工况条件,在爆发压力检测过程中更接近实际工况条件,提高检测结果准确性和一致性,实验结果表明,此检测装置稳定可靠,结果准确,对比传统检测方式,有效地解决了爆发压力的测试问题,可以通过爆发压力的准确计量,及时发现仪表潜在的安全风险,排除影响柴油机正常工作的故障,从而保持柴油机高效、高可靠运行,在保障安全方面和减少不必要的费用及损失等都有十分重要的意义^[10]。同时该装置的研究也揭示了各相互变量之间的影响关系,为爆发压力表的检测提供了新的思路和选择,能够有效解决当前爆发压力检测的弊端,更为今后技术规范以及标准的制定提供良好的研究基础。

参考文献:

- [1] 岳奇,袁亚飞,陶于佳娃,等. 共轨柴油机缸内压力与整机振动噪声关系研究[J]. 现代车用动力, 2020(01):16-20+60.
- [2] B. A D, J. P S, Simon J. Comparison of Cylinder Pressure Measurements on a Heavy - Duty Diesel Engine Using a Switching Adapter[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(8):081014. 1-081014. 15.
- [3] Jeon J, Jeon M, Cho S, et al. Development of Virtual Cylinder Pressure Sensing Using Knock Sensor for Diesel Generator Engine In - Cylinder Pressure Diagnosis [J]. The Korea Content Societg, 2023(12):55-56.
- [4] 陈宗煌,陈红佑,吴超. 大功率船用柴油发动机缸压测量研究[J]. 内燃机与配件, 2020(18):14-17.
- [5] 李贺,张立新,胡雪,等. 基于 PLC 的水压复合设备压力控制系统[J]. 机械工程与自动化, 2022(02):145-147.
- [6] 江晨,朱鲲鹏,刘驰,等. 压力容器充放气特性研究[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(05):60-62+66.
- [7] 杨志. 流量检测仪表在大口径管道气体检测中的应用[J]. 设备管理与维修, 2018(19):43-44.
- [8] 白鑫,万小芸,张科. 输气场站高流速工况分析与管控措施研究[J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(11):24-27+52.
- [9] 张伟,蒋军成,王志荣,等. 连通容器单/双口泄爆压力特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(08):43-48.
- [10] 伍赛特. 机车柴油机开发流程研究及技术趋势展望[J]. 机械管理开发, 2023, 38(12):64-68.

(上接第 23 页)

习模型进行故障预测测试。随着船用柴油机故障数据不断积累完善,升级故障预测模型,或者升级算力更强的 Linux 工控机,系统功能会有更大的提高。软 PLC 监控系统方案在船用柴油机智能运维会有着更为广阔的应用。

参考文献:

- [1] 徐传博. 船舶机舱智能监控系统设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2024.
- [2] Nguyen, M.; Tran, L. From Shore to Sea: IoT Solutions for Enhanced Vessel Monitoring and Maritime Safety[J]. Asian American Research Letters Journal, 2024, 1(4).
- [3] 王瑞涵,陈辉,管聪. 基于机器学习的船舶机舱设备状态监测方法[J]. 中国舰船研究, 2021(01):158-167.
- [4] 贾炜. 船用柴油机增压压力控制及监控安保系统设计[D]. 镇江:江苏大学, 2023.
- [5] 邱祥坚,王瑞,张存喜,等. 基于 S7-1500 PLC 船舶柴油机油温 PID 控制器设计及系统监控[J]. 机械工程师, 2023(06):33-35.
- [6] 王金豹,孔立胜,刘洋,等. 基于 PLC S7-1200 的船舶柴油发电机组安保监控系统的研究设计[J]. 科学技术创新, 2021(09):158-159.
- [7] 宋鑫,吴萌萌,王泽川,等. 船用柴油机机旁监控及报警系统设计[J]. 舰船科学技术, 2021(S1):63-68.
- [8] 王建晖,孔维霆,张春良,等. 基于物联网的柴油机 ECU 状态监控系统设计[J]. 电子器件, 2025(01):66-73.
- [9] 纪振国. 基于深度学习的船舶柴油机故障预警系统研究[D]. 大连:大连海事大学, 2024.
- [10] 张益铭,白巴特尔,朱小龙,等. 基于深度学习的柴油机故障诊断系统开发[J]. 内燃机与配件, 2025(06):5-11.
- [11] 潘健,陈为,马骏明. 基于 CODESYS 的多轴激光雕刻机运动控制系统设计[J]. 电子设计工程, 2025, 33(18):85-90.
- [12] 郑钧,盛善智. 基于多传感器信息融合的船舶动力机械设备故障自动化监测方法[J]. 自动化与仪表, 2024(12):114-118.
- [13] Denys Viana (2021). Diesel Engine Faults Features Dataset (DEFault). IEEE Dataport. <https://dx.doi.org/10.21227/3q67-j268>.