

1. 建设目标

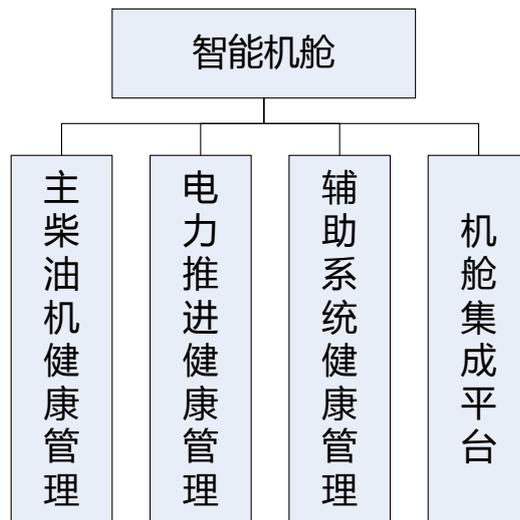
在交船时可获得 CCS 智能机舱（i-ship M）符号。

2. 建设内容

在柴油机、发电机、电力推进舱、辅助设备已有状态监测的基础上，根据智能机舱规范的进一步要求，在柴油机、电力推进系统、机舱辅助设备常规状态监测的基础上，通过新增相应的状态监测传感器，信号采集装置、软件故障算法等手段扩展状态监测的广度和深度，实现柴油机、电力推进系统、机舱辅助设备进行状态监测、故障诊断、健康评估,并为船舶操作提供决策建议。

系统柴油机部分功能符合《智能船舶规范》，并为该规范充实电力推进系统、机舱辅助系统提供样例模板及现实依据。

智能机舱智能化加装主要涉及四个部分内容，分别为：柴油机健康管理、电力推进健康管理、辅助系统健康管理、机舱集成平台。各部分通过感知平台建设、数据分析实现智能化机舱，为船员提供机舱状态、健康情况、辅助决策，降低船员劳动强度，一定程度上提高本船运营效能。



4.1 柴油机系统

4.1.1 工作目标

根据中国船级社《智能船舶规范》要求，结合国内外柴油机健康管理及辅助

决策系统技术发展趋势及实践经验，建立柴油机的健康管理及辅助决策系统，满足《智能船舶规范》对“主推进发动机的各缸燃烧性能、燃烧室相关部件、摩擦部件、增压器性能等的状态监测”的功能要求，实现柴油机的热工、油液、燃烧、振动等多种特征参数的信息融合，对可获取信息进行分析评估，并根据分析与评估结果，提出纠正建议，提供决策建议。

4.1.2 系统功能及实现方式

1 柴油机健康管理及辅助决策系统

接收柴油机机旁箱（取自瑞特）、柴油机转速信号（一次信号，来自转速传感器）、柴油机上止点信号（一次信号，来自转速传感器）、滑油油液在线监测系统、柴油机振动监测系统、柴油机缸内燃烧性能分析系统、柴油机主要辅助设备监控系统等数据并分析处理，提取特征参数、构建柴油机健康模型进行状态监测与健康状况评估，并提供辅助决策。

实现方式：采用一台柴油机健康管理及辅助决策软件微机，安装于机舱集控室内。

2 滑油油液在线监测系统

监测柴油机润滑油中粘度、含水率、油品品质、及铁磁颗粒浓度及分布，判别柴油机设备润滑及磨损状态并进行显示报警。

实现方式：由船厂在施工过程中预留出接口（滑油管路接口、滑油循环泵电源接口），由 711 所提供设备，船厂负责安装。

3 柴油机振动监测系统

通过在柴油机表面贴装振动传感器采集柴油机表面（缸盖及曲轴箱等）振动信号，提取信号的特征参数，并对其进行分析与计算。实现在柴油机不解体情况下，对气阀漏气、主轴承磨损、增压器等旋转部件的不平衡和磨损状况的诊断。向“柴油机健康管理及辅助决策系统”软件发送柴油机的振动数据及特征参数，提供故障诊断结果建议。

实现方式：由船厂预留走线管及支架，传感器的安装需主机施工完成后由 711 所上船施工，柴油机振动监测采集箱由 711 所提供，船厂安装。

转速传感器与上止点传感器由 711 所提供并安装，船厂配合。

4 柴油机缸内燃烧性能分析系统

采用手持式电子示功器，通过气缸压力传感器和上止点传感器的测量，获得以曲轴转角为横坐标、气缸压力为纵坐标的示功图，并进行示功图分析，获得瞬时放热率曲线、累计放热率百分比曲线、工质温度曲线、多变指数曲线、压缩压力曲线、工质燃烧的最高温度及对应的曲轴转角、放热量（急燃、稳燃、后燃放热量、总放热量）、循环功、单缸功率、着火点、爆压及爆压对应的曲轴转角等、压升率等。

根据示功图分析获得的特征参数可对负荷不平衡、气缸漏气或充气不足、供油定时异常、爆震或爆震倾向、爆压异常和燃油喷射异常做出诊断，向“柴油机健康管理及辅助决策系统”软件发送关于主机缸内燃烧分析的特征参数，提供故障诊断结果和建议。

实现方式：主机厂家提供主机示功阀的详细图纸，711 所根据图纸进行缸压传感器的订货。

- 5 向智能机舱集成平台发送柴油机的特征参数及决策建议。

4.1.3 工作内容

- 1 柴油机健康管理及辅助决策系统的方案设计，包括传感器、控制箱布置方案与施工设计方案。

- 2 柴油机的滑油在线监测系统、振动监测系统、缸内燃烧性能分析系统的设备成套。

- 3 柴油机状态监测相关的数据采集与记录。

- 4 柴油机状态监测数据的特征参数提取。

- 5 多参数融合的状态监测模型的建立。

- 6 柴油机健康状况评估。

- 7 为柴油机提供辅助决策建议。

- 8 向下提供与 IAS 系统、滑油在线监测系统、振动监测系统、缸内燃烧性能分析系统的通信接口，向上提供智能机舱集成平台的通讯接口。

- 9 确定本系统的数据库结构，数据采集、存储与接口的形式及标准。

4.1.4 系统应用

- 1 布置滑油在线监测箱、振动传感器、振动数据采集测试分析分站、手持式燃烧分析仪于机舱合适位置，用于数据的采集。

2 柴油机健康管理及辅助决策系统放置在机舱集控室内，使用角色为轮机人员。

3 传输有效数据给智能机舱集成平台，使用角色为轮机人员。

4.1.5 初始化数据及来源

1 柴油机各工况台架试验数据，来源于主机厂家。

2 柴油机的机旁监测参数，来源于 IAS 系统(测点清单详见附件 1: Wartsila 12V32 测点需求、附件 2: Wartsila 8L32 测点需求)。

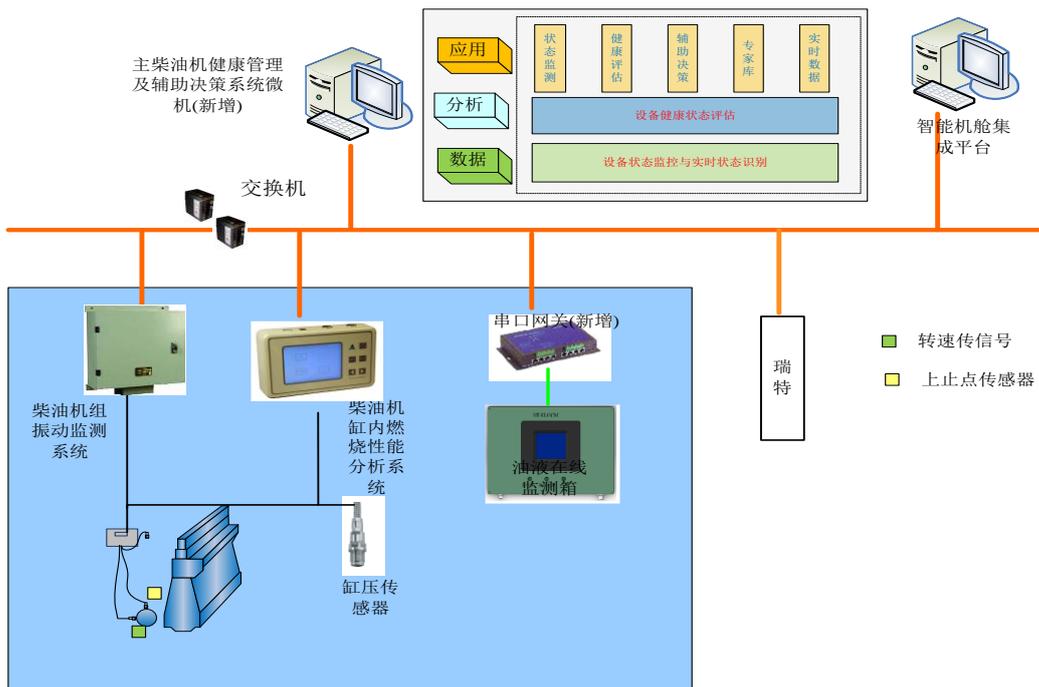
3 柴油机的滑油监测信息，来源于滑油在线监测系统。

4 柴油机的关键部位振动监测信息，来源于振动监测系统。

5 柴油机的各缸燃烧性能，来源于缸内燃烧性能分析系统。

4.1.6 系统方案

4.1.6.1 系统框图



4.1.6.2 系统功能

1) 滑油在线监测子系统功能

(1) 实时监测及报警

➤ 粘度监测及报警 (按照柴油机换油指标)

➤ 水分监测及报警 (按照柴油机换油指标)

- 油品品质指数监测及预警
- 各档铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒浓度监测及报警（进行趋势监测及变化趋势预报警）

(2) 显示粘度、水分、滑油品质、各档铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒浓度实时趋势曲线

(3) 存储监测结果，并查询历史数据

(4) 进行信息输出（采用 Modbus RTU 通讯协议），供柴油机健康管理及辅助决策系统进行综合健康评估。

2) 柴油机振动监测子系统

(1) 振动采样并提取特征参数

通过对监测到的振动测点数据进行分析处理，可以获得以下方面的特征参数：

➤ 时域统计分析：最大值、最小值、平均值、方差、标准差、有效值、峰值等。

➤ 自相关与互相关分析：自相关系数、互相关系数。

➤ FFT 自谱分析：幅值谱、相位谱、RMS、功率谱和功率谱密度。

➤ FFT 互谱分析：互功率谱，相干系数。

➤ 微积分转换：振动信号量加速度（A）、速度（V）、位移（D）。

➤ 小波和小波包分析：多尺度系数。

(2) 故障分析

根据振动数据处理获得的特征参数，可以对以下方面的柴油机故障进行监测和诊断：

➤ 进气阀、排气阀类别故障。监测可能由于气阀间隙过大/过小、配气定时不正确、阀与阀座工作面接触不良等因素导致的振动异常，根据气缸盖振动信号的功率谱，分析及对比各缸进气阀、排气阀的振动频率及幅值，结合各缸排气温度的，必要时需进一步检查缸内动态压力，以确定振动测点附近进气阀、排气阀类别的故障。

➤ 机架与机座类别故障。监测可能由于连接螺栓断裂、松动等因素导致的振动异常，根据柴油机底座振动信号和柴油机自由端振动信号的功率谱，分析振动频率及振动烈度，以确定振动测点附近机架与机座类别的故障。

➤ 连杆轴承、主轴承及轴颈类别故障。监测可能由于轴颈擦伤、蚀坑，轴承轴瓦烧蚀、磨损等因素导致的振动异常，根据曲轴箱侧面振动信号的功率谱，分析及对比主轴承及轴颈相关的振动频率及幅值，结合主轴承温度、连杆轴承温度、润滑油温度、润滑油金属颗粒、曲轴箱油雾高报警，以确定振动测点附近连杆轴承、主轴承及轴颈类别的故障。

➤ 废气涡轮增压器类别故障。废气涡轮增压器类别故障。监测可能由于由于转子（含叶片）损坏、轴承缺陷等因素导致的振动异常，根据增压器振动信号的功率谱，分析振动频率及幅值，结合增压空气温度、压力和润滑油温度、压力与废气温度、发动机转速，以确定振动测点附近废气涡轮增压器类别的故障。3)

手持缸压监测系统功能

(1) 测量示功图

通过气缸压力传感器和上止点传感器的测量，获得以曲轴转角为横坐标、气缸压力为纵坐标的示功图。

(2) 示功图分析

通过对示功图的分析，获得以下曲线和特征参数：

➤ 瞬时放热率曲线分析

每度曲轴转角气缸内燃油燃烧放出的热量随曲轴转角变化的曲线。

➤ 累计放热率百分比曲线分析

某个曲柄转角位置气缸内燃油燃烧已经放出的热量和整个循环总放热量之比随曲轴转角变化的曲线。

➤ 工质温度曲线分析

根据示功图计算出的气缸内工质的温度随曲轴转角变化的曲线。

➤ 多变指数曲线分析

每度曲轴转角气缸内压力的增量的对数与气缸容积的增量的对数之比随曲轴转角变化的曲线。

➤ 压缩压力曲线分析

根据着火点前的压缩过程，根据气态方程拟合出纯压缩压力随曲轴转角变化的曲线。

➤ 特征参数

工质燃烧的最高温度及对应的曲轴转角、放热量(急燃期、稳燃期、后燃期)、最高温度时累计放热率百分比、整个循环的总放热量、估算的指示效率、循环功、单缸功率、着火点、爆压及爆压对应的曲轴转角、压升率等。

(3) 故障分析

根据示功图分析获得的特诊参数可对负荷不平衡、气缸漏气或充气不足、供油定时异常或滞燃期异常、爆震或爆震倾向、爆压异常和燃油喷射异常做出诊断，并对故障诊断的依据和建议进行的下一步检查做出提示。

4) 柴油机健康管理及辅助决策系统功能

(1) 柴油机状态监测相关的数据采集与记录

采集来自 IAS 系统、滑油在线监测系统、振动监测系统、缸内燃烧性能分析系统的通讯原始参数及特征参数。

(2) 利用柴油机状态监测数据的特征参数进行多参数融合，构建柴油机的状态监测模型。利用统计学方法，结合柴油机的实船采集到的热工参数、振动特征参数、柴油机缸内燃烧性能特征参数以及构建的柴油机状态监测模型、专家知识库及故障库进行柴油机的运行状态监测及评估。具体见下表：

序号	设备/性能	主要检测参数	典型故障
1	燃烧性能	增压器进口温度、增压器进口压力、单缸动态压力、循环功，最高爆发压力、放热规律、单缸排温及排温偏差	1. 排烟温度异常； 2. 输出功率不足。 3. 负荷不平衡或超负荷
2	气缸盖	高温冷却水进口温度、高温冷却水进口压力	1. 缸盖、阀孔周围各连接凸缘贯穿性裂纹、烧蚀等缺陷； 2. 冷却水腔积垢及腐蚀。
3	活塞	高温冷却水进口温度、高温冷却水进口压力、高温冷却出口温度，气缸套温度，油液中的金属颗粒，油雾浓度高报警值	活塞与气缸套摩擦副异常
4	活塞环	最高压缩压力，气缸套温度，油液中的金属颗粒，油雾浓度高报警值	由于磨损、变形、挫伤、断裂、咬死等因素造成的活塞环密封失效故障。
5	气缸套	缸套温度、高温冷却水进口温度、高温冷却水进口压力、高温冷却出口温度，油雾浓度高报警值	由于贯穿性裂纹、擦伤和过度磨损等因素导致的气缸套故障

6	排气阀	振动、排气温度、最高压缩压力、多变指数	由于弹簧裂纹、阀与阀座工作面接触不良等因素导致的排气阀故障。
7	喷油器	着火点异常、压升率、放热规律、排温及排温偏差	喷油定时异常或滞燃期异常、喷油器脏堵、磨损、泄漏等造成的雾化不良。
8	曲柄箱及安全装置(如适用)	柴油机曲柄箱压力、油雾浓度高报警值	曲柄箱内压力升高导致的安全隐患
9	曲柄销轴承	滑油温度、连杆大端轴承温度、金属颗粒，油雾浓度高报警值，曲轴箱侧面振动信号。	1. 由于过热、脱落、磨损等因素导致的曲柄销轴承异常； 2. 轴承间隙异常。
10	主轴颈和主轴承座	金属颗粒、滑油温度、滑油压力、各档主轴承温度、曲轴箱侧面振动信号，油雾浓度高报警值	1. 由于轴颈擦伤、蚀坑、2轴承轴瓦烧蚀、磨损等因素造成的主轴承异常。 3. 主轴承间隙异常
11	废气涡轮增压器	转速、压力、振动、温度、进出口压差	由于转子(含叶片)的裂纹、弯曲、变形、崩缺、腐蚀等缺陷导致的异常；轴承缺陷导致的异常；压气机叶片污染导致的工作能力下降，壳体裂纹、冷却水腔积垢及腐蚀
12	柴油机润滑状况	粘度、滑油品质、滑油中含水量	1、滑油中进水 2、滑油中进入燃油 3、滑油综合性污染及品质劣化(金属磨损、水分、滑油品质劣化)

(3) 柴油机健康状况预警

建立通过柴油机的运行参数统计建立柴油机的设备健康状况模型，当柴油机及其部件健康状况劣化到某一程度后，进行柴油机故障预警，列出影响健康状况的主次要因素（机械磨损、配气故障、滑油污染、温度异常、压力异常、润滑温度等）。

(4) 柴油机辅助决策系统。

当故障发生时，根据影响健康状况的主次要因数、利用故障发生前后的数据，结合及专家系统的经验建议进行的下一步检查并做出提示。

(5) 实时数据库

实时数据库单元，对柴油机的实时数据温度、压力等实时数据和报警数据进行压缩存储，提供无损压缩存储算法和高效数据检索接口，通过后台程序生成统计分析数据（均值、方差等），实现数据分块检索，提供数据的历史趋势分析、报警查询、报警前后与报警相关数据的在线建模、数据导出等。

(6) 趋势分析

柴油机多关键测点在一个历史趋势图中显示和分析。

(7) 专家知识库

结合本机型的设计数据、台架试验数据、柴油机的使用说明书及维修使用说明书、专家经验知识等构建专家知识库，为故障排查提供专家经验知识。

(8) 数据上传

根据机舱集成平台要求，向平台发送数据信息、报警信息、故障诊断信息等，为机舱集成平台提供数据支持。

4.1.6.3 系统技术指标

1) 滑油油液在线监测技术指标：

可检出铁磁磨粒： $\geq 40\mu\text{m}$

可检出非铁磁磨粒： $\geq 135\mu\text{m}$

油品质量：0-100 油品单位

油品传感器精度： $\pm 4\%FS$

粘度传感器精度： $\pm 2\%FS$

2) 柴油机振动监测模块指标

振动加速度量程： $\pm 250g$

振动加速度峰值： $\pm 500g$

频率响应：10KHz

3) 柴油机缸内燃烧分析系统指标

量程：0~30 MPa

超载：35 MPa

灵敏度：150 pC/MPa（左右）

线性度： $<1\%FS$

工作温度： $-40\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$

固有频率：27kHz

4) 柴油机健康管理及辅助决策系统指标

界面响应时间 <5 秒

历史数据加载时间 <15 秒

虚警率：30%

误警率：10%

4.1.6.4 震动传感器安装位置

区域	传感器数量（支）	传感器类型	所需传感器总数（支）
气缸盖	1/缸	单向	40
增压器		单向	6
柴油机自由端	1/机	3向	4
曲轴箱侧面	3/机	单向	12
柴油机底座	2/机	3向	8

注：12缸柴油机振动传感器安装详见附件3。

8缸柴油机振动传感器安装详见附件4。

➤ 缸体振动测点



➤ 上止点测点

安装于柴油机自由端凸轮轴齿盘上。



➤ 柴油机的滑油油液在线监测系统的滑油测点

油管：Φ10mm 油管，卡套式安装，进油口位于柴油机回油管路的旁路上，回油口回到滑油主管路。

➤ 柴油机的燃烧分析测点：

利用示功阀进行安装，示功阀部署安装在柴油机的气缸盖上。



缸压传感器安装位置