

船舶柴油机故障诊断专家系统研制

臧 军, 马善伟, 刘 赞

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 结合神经网络和 D-S 证据理论, 采用 JAVA 作为开发工具, JESS 作为诊断工具, 研制开发了柴油机故障诊断专家系统。系统可根据推理模型, 结合历史数据和柴油机实时监测数值, 在柴油机发生故障时, 显示故障的有关信息、故障的可能原因以及维修建议。

关键词: 船舶柴油机; 故障诊断; 专家系统

中图分类号: TP277.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)03-0025-04

Development of Fault Diagnosis Expert System of Marine Diesel Engine

Zang Jun, Ma Shanwei, Liu Yun

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200011)

Abstract: Based on Dempster-Shafer (D-S) evidence theory and neural network theory, the fault diagnosis expert system of marine diesel engine was developed, which adopted JAVA as the development tool and JESS as the diagnostic tool. According to the inference model, and combined with historical data and real-time monitoring data, this system can display diesel engine's faults when they occur, showing the relative information, the possible reasons and maintenance suggestions.

Keywords: marine diesel engine; fault diagnosis; expert system

0 概 述

柴油机作为船舶的重要动力设备, 不管是用作主机推进还是发电输出, 都是决定船舶能否可靠工作的关键因素。利用现代测试理论, 借助于先进的计算机平台和人工智能技术, 可以对柴油机的运行状态进行在线监测, 提出设备检查与维修建议, 提前预报柴油机可能发生的故障, 从而可以减少重大事故的发生, 提高设备的有效利用率, 减少维护费用, 从而提高经济效益。

传统的柴油机故障诊断技术通常采用热力参数分析法、磨粒监测分析法、声发射监测和振动分析法。现代故障诊断方法主要采用基于专家系统的智能化诊断方法、基于神经网络的诊断方法和神经网络和专家系统相结合等方法对柴油机进行故障诊断。

本柴油机故障诊断专家系统结合神经网络和 D-S 证据理论, 采用 JAVA 作为开发工具, JESS 作为诊断工具。

1 系统总体方案

本系统针对船舶主机研制开发了一套故障诊断系统功能样机。系统主要包括柴油机故障知识库、柴油机故障数据库、推理机制、专家系统软件等。

系统框图如图 1, 整个系统由两层网络组成, 上层为以太网(管理)网络, 下层为 CAN 总线。故障诊断计算机通过网关与 I/O 模块相连, 网关有两路 CAN 和两路以太网接口, 兼具交换机功能。

本套功能样机的监测对象为柴油机主机, 左右舷各一台, 为了较好地模拟柴油机的运行状况, 本功能样机采用实物触发(模拟柴油机在线参数)和虚拟(模拟发数程序产生柴油机参数)相结合的方法。

收稿日期: 2010-07-23; 修回日期: 2010-11-09。

作者简介: 臧军(1987-), 男, 硕士, 主要研究方向为机舱自动化, E-mail: iamzangjun870314@126.com。

式为故障诊断计算机提供柴油机故障诊断在线参数信息。

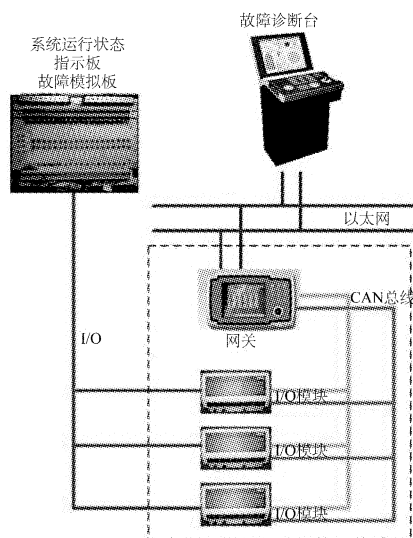


图1 系统框架图

故障诊断计算机接收模拟发数程序发送的测点数据，结合故障诊断模型和知识库进行故障判断、状态显示和趋势分析。监控装置故障诊断系统软件测量的参数包括：低压管路燃油压力、高压油管压力、起动空气压力、滑油压力、冷却水压力、活塞冷却油压力、涡轮排气温度、燃油进机压力等常规热力参数，其中左右舷柴油机各有 69 个测点，模拟板上有 45 个测点，共计 183 个测点。

2 专家诊断系统推理方法

故障的发生一般有两种情况，一种为突发性故障，一种为渐变性故障。突发性故障在发生前无明显征兆，这类故障发生时间很短，发展极快，通常伴随状态监测参数的突变。渐发性故障是因为设备在使用过程中零部件因为疲劳、腐蚀、磨损等因素而导致设备性能逐渐下降，最终超出允许值。

由此可见，柴油机的故障表现形式具有一定的复杂性和多样性。针对这种情况，对于突发性故障和渐发性故障，分别采用了最大值比较评判法和统计量综合评判法，最后采用 D-S 证据理论对结论进行融合。D-S 证据理论是针对事件发生后的结果（证据），探求事件发生的主要原因（假设）的一种信息融合方法。

如表 1 所示，方法 1 表示最大值比较评判法，方法 2 表示统计量综合评判法， F 表示采用该方法得到的柴油机故障概率， N 表示柴油机不发生故障的概率， U 表示发生故障的不确定度。

表 1 证据方法描述表格

方法	F	N	U
1	F_1	N_1	U_1
2	F_2	N_2	U_2

为进行数据融合计算，需要定义一个中间参数 ζ ，且 ζ 的值由下式确定：

$$\zeta = F_1 F_2 + F_1 U_2 + N_1 N_2 + N_1 U_2 + U_1 F_2 + U_1 N_2 + U_1 U_2 \quad (1)$$

将上述两种方法得到的结果进行数据融合便得到最终的故障发生概率、不发生故障概率和不确定度，如下面公式所示：

$$F = (F_1 F_2 + F_1 U_2 + U_1 F_2) / \zeta \quad (2)$$

$$N = (N_1 N_2 + N_1 U_2 + U_1 N_2) / \zeta \quad (3)$$

$$U = (U_1 U_2) / \zeta \quad (4)$$

系统根据计算得到的故障概率值进行判断，当发生故障的概率超过临界值时，结合故障模式表格，系统会给出相应的故障原因以及维修建议。柴油机出现故障时的故障现象、故障原因、相关参数以及建议检查相关内容是向有关柴油机专家咨询获得。

表 2 给出柴油机故障诊断基本模式的部分内容，以柴油机的燃油系统为例，当燃油进机压力低时，给出故障原因：低压油路供油不畅、输油泵运行不正常。相应建议检查：①低压油路漏油；②粗滤器脏堵；③回油系统、输油泵、燃油不足或无油；④燃油输送泵传动机构故障。

3 专家系统软件功能设计

本软件在实时数据库 RDB (Realtime Data Base) 的基础上，利用基于 Java 的专家系统 JESS (Java Expert System Shell) 对各测点的实时数据进行监测，利用神经网络模型推理和符号推理两种模式，推理得出故障发生的概率、不发生故障的概率和推理结论的不确定度。在最终给出的结论中包含故障可能发生的部位、建议检查的部件等内容。得出的故障结果将实时写入 SQL Server2000 数据库，供在故障查询模式下，按时间点、时间段、测点号、关键字等来查询历史故障结论。软件框架结构如图 2 所示。

软件部分主要由模拟发送数据模块、实时数据库管理模块、WEB 后台管理模块和 JESS 专家诊断数据处理模块组成。

3.1 模拟数据发送模块

由于本系统目前是一套功能样机，监测的数据并未真正来源于安装在柴油机上的传感器。对于柴油机的监测点数值的获取，采用了两种方式：一种

是设计制作了一套可调节模拟发数板，模拟了柴油机的四十多个参数点，每个测点可以输出 4 ~ 10 mA 的信号，并可实时进行调节。另一种是基于 C# 语言编制了一套数据发送程序，模拟发送左右舷两台主机上的各 79 个测点。每个测点的数值满足一

定的规律，即在既定的时间范围内，发送的数据以一定的概率(可根据实际需要修改)超出测点的正常工作范围。模拟数据发送程序比较真实地模拟了柴油机的工作状态，为柴油机故障诊断专家系统提供了较好的数据源。

表 2 柴油机故障诊断的基本模式

序号	系统	现象	故障原因	相关参数	建议检查
1	燃油系统	燃油进机压力低	低压油路供油不畅、输油泵运行不正常	燃油进机压力	①低压油路漏油；②粗滤器脏堵；③回油系统、输油泵、燃油不足或无油；④燃油输送泵传动机构故障
2		高压燃油管泄漏	高压油管泄漏、高压油泵故障、高压油泵传送机构故障	高压油管燃油压力	①高压油管管路密封情况；②高压油管燃油压力；③高压油泵及其传送机构工作状态

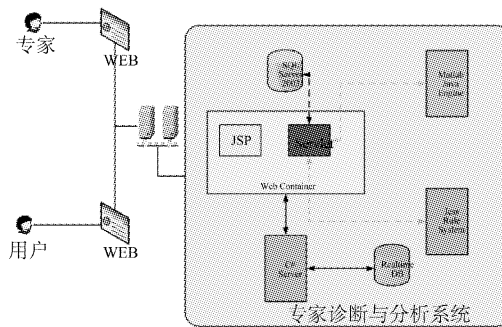


图 2 专家系统软件框架图

3.2 实时数据库管理模块

实时数据库管理模块是故障诊断系统与现场传感数据的直接接口，它负责对各网关、模拟仿真台等以太网终端设备实时测点数据的监控，为 WEB 后台管理模块与 Jess 模块提供分析诊断的原始数据或者是经过处理的数据。在整个系统中，它作为一个相对独立的模块实现对从实时数据库中取出所需数据，处理后将结果交给 WEB 后台管理模块处理。

从程序流程来划分实时数据库管理模块，将该模块划分为两大部分：数据库的连接及查询操作部分和与 JAVA 的通信部分。

3.3 WEB 后台管理模块

WEB 后台管理模块可以分为五大部分：实时后台监控子模块、实时数据查询子模块、历史数据查询子模块、历史故障查询子模块、历史故障详细数据查询子模块。

3.3.1 实时后台监控子模块

WEB 后台管理系统在处理实时、历史数据时，都需要对实时数据库管理系统有一个常时的监控应答，在这里，设计了一个基于 Tomcat WEB 服务器之上的一个监听控制，此模块实现每隔一定时间对实时数据的取样，并传递给相应模块处理。

如果实时页面不打开，后台监控程序将实时数据的诊断故障结果写入 SQL Server；在实时页面打开的情况下，后台监控程序需要将实时数据和诊断结果实时传输给 WEB 页面。

3.3.2 实时数据查询子模块

本模块是针对在 WEB 页面中点击实时数据查看功能时的后台服务处理。当用户打开实时数据查看页面时，页面将会每隔一定时间向服务器发送数据显示请求，本模块将响应此请求，并将从后台监控模块取得的数据采样实时地发送到 WEB 页面，图 3 是低压管路燃油压力的实时曲线。

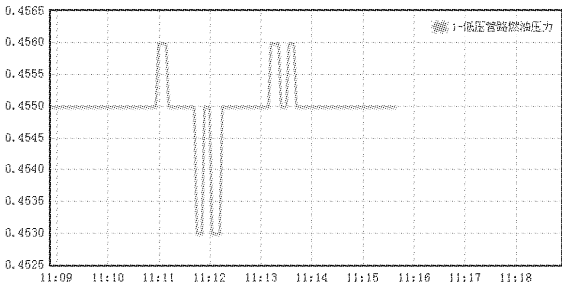


图 3 实时曲线显示模块

3.3.3 历史故障查询子模块

本子模块是针对 WEB 页面中历史故障查询功能的后台服务处理。当用户打开故障查询页面时，页面将向服务器发送历史故障显示请求，本模块将响应此请求，从 SQL Server 数据库中，取出诊断故障概要信息，并发送到客户端。

图 4 是故障诊断结果的显示界面，包括测点名称、测点编号、报警时间、报警编号、测点数值、故障位置、所属系统、发生故障的原因以及建议检查。用户如果想查看该测点的历史趋势可以点击“查看历史和实时曲线”链接，详见图 5。用户还可以点击“查看故障概率详细信息”，详见图 6。

故障报警信息	
测点名称: 低压管路燃油压力	测点编号: 86080
报警时间: 2010-07-05 11:17:01.0	报警编号: 141262
测点数值: 0.455	故障位置: 模拟柴油机
测点正常工作最小值: 0.1	所属系统: 燃油系统
测点正常工作最大值: 0.4	
报警警报: 测点已超出正常工作范围, 请关注低压管路燃油压力随时变化, 建议立即进行检查。	
原因: 低压管路供油不畅、输油泵不正常	
建议检查: 1、低压管路漏油; 2、输油泵故障; 3、燃油系统、输油泵、燃油不足或无油; 4、燃油输送系统机构故障	
点击查看历史实时曲线	点击查看故障概率详细消息

图 4 故障诊断结果显示

3.3.4 历史数据查询模块

本模块是针对在 WEB 页面中测点历史数据查看功能时的后台服务处理。图 5 为测点历史曲线和实时曲线图。图中 max、min 表示柴油机正常工作时的最大最小值, left、right 表示柴油机测点报警的下限值和上限值。图中第二条线即为低压管路燃油压力测点的历史和实时曲线, 曲线首先显示出该测点历史半小时时间内的数值变化情况, 再从当前时间开始绘制除测点的实时曲线。

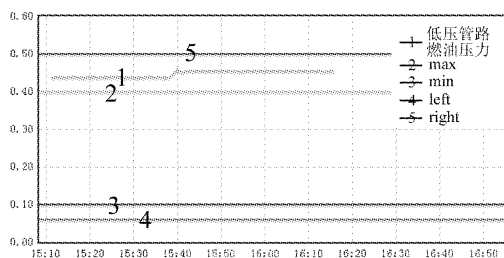


图 5 历史和实时曲线

3.3.5 历史故障详细数据查询子模块

本子模块是针对 WEB 页面中历史故障详细数据信息查询的后台服务处理。根据用户请求, 取出故障发生时测点参数详细信息, 并发送到客户端。

图 6 为故障诊断的详细结果, 显示了数据融合方法得到的发生故障的概率, 不发生故障的概率以及不确定度。用户还可以分别点击查看统计量方法和最大值方法得到的发生故障的概率, 不发生故障的概率以及不确定度。

3.4 JESS 专家诊断数据处理模块

Jess 是一个用 Java 语言编写的专家系统开发平台, 由美国 Sandia 国家实验室分布式系统计算组成员 Ernest J. Friedman2Hill 在 1995 年开发出来, 以 CLIPS 专家系统外壳为基础。Jess 将专家系统的开发过程与功能强大的 Java 语言结合起来, 允许在 Applet 和 Java 的其他应用当中使用规则, 并且可以在系统运行环境下直接调用 Java 的类库等, 这些都使 Jess 开发出的专家系统具有良好的移植性、嵌入性, 而且具有非常高的效率。Jess 已被广泛用于人工智

能的很多领域, 具有非常广阔的开发前景。

模型诊断结果:	
方法一: 数据融合	
发生故障的概率:	0.97072
不发生故障的概率:	1.7785596E-5
不确定度:	0.02920218
☒ 统计量方法概率	
发生故障的概率:	0.92912093
不发生故障的概率:	0.0
不确定度:	0.17087908
☒ 最大值方法概率	
发生故障的概率:	0.8290168
不发生故障的概率:	1.04136315E-4
不确定度:	0.17087908

图 6 故障诊断详细结果

Jess 采用产生式规则作为基本的知识表达模式, 其核心由事实库、规则库、推理机三大部分组成。在本系统中 Jess 模块负责对从各网关、模拟仿真台、机组振动传感器等以太网终端设备传过来的测点参数进行正向推理, 得出故障是否发生, 以及故障发生的概率、不发生的概率和推理结论的不确定度。

在整个系统中, Jess 模块作为 Java Web 服务器进程的一部分, 负责对 Java 从实时数据库 (RDB) 中取得的每个站点数据利用 Jess 的规则系统进行正向推测, 并把推测的结果和概率作为一个数据结构返回给 Java 后台程序。

4 结 论

(1) 本系统基于数据融合方法建立对柴油机的故障诊断, 综合考虑了导致故障发生的因素, 比较科学地对柴油机进行故障诊断, 避免了采用单一故障判断方法带来的不够全面性的弊端。

(2) 本系统对船舶柴油机实现智能化在线监测和故障诊断, 减小重大事故的发生概率, 使柴油机的维修更具有针对性, 减小成本, 提高了经济效益。

(3) 专家维护功能保证了日后专家系统数据库的事实库规则库以及结论-检查的规则添加及修改, 使得故障诊断专家系统功能日趋完善, 对于不同的柴油机有着较好的适应性。

参考文献

- [1] 白广来. 船舶柴油机智能监测与智能诊断的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2004.
- [2] 徐章遂, 房立清, 王希武. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

(下转第 45 页)

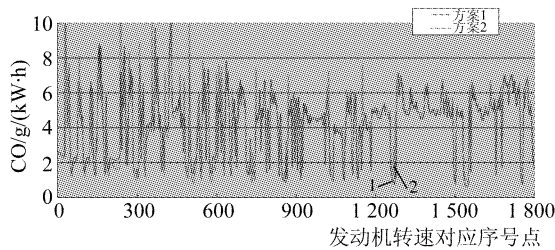


图 12 ETC CO 对比

表 2 各方案下排放结果对比

单位: $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$

方案	状态	NO_x	HC	CO	PM
1	旋风式油气分离器 ETC	10.44	0.012	0.247	0.017
2	强制通风状态油气分离器 ETC	10.212	0.005	0.254	0.013

4 试验结果分析

由试验可以看出,在加装强制通风装置与不加装强制通风装置时,发动机的活塞漏气量是不一样的。加装强制通风装置时,由于进气负压的影响,活塞窜气量是呈增加趋势的。在强制通风系统的调节下,柴油机曲轴箱压力在 $-1.5 \sim 0.5 \text{ kPa}$ 范围内变动,油气分离器的出气口含油量在 3 g/h 以内(而开式循环油气分离器的出气口含油量在 11 g/h),柴油机均能可靠正常工作,而且方案二曲轴箱正压不大,不致于引起油气沿各密封面处及油封处往机体外渗漏。

同时通过排放测试,强制通风状态下,ETC 循环 PM 值要小于非强制通风下 PM 排放,发动机排

放达到法规要求。各种状态下, CO 、 NO_x 、HC 基本没有什么变化,这说明曲轴箱强制通风对于 CO 、 NO_x 、HC 排放基本无影响,从而有效地控制了含油气体直接排入大气,同时确保发动机可靠地工作。

当然一款新型的闭式循环曲轴箱通风系统的可靠性需要通过发动机的可靠性试验来验证,并对用户的使用情况进行追踪,以最终确定整个系统的可靠性问题。

通过对强制通风油气分离器中膜片材料的合理选择,可以提高其使用寿命;滤芯材质的合理选择,可使压降更小,达到更好的分离效率和更长的使用寿命;对油气分离器外观尺寸的合理选择,可便于不同柴油机的安装,和对排出气体的流速进行有效控制。

5 结 论

通过闭式循环曲轴箱强制通风系统的合理匹配使用,能有效控制柴油机直接向大气排放含油气体,合理调节曲轴箱的压力并具有安全旁通功能。通过分离器部件材料和结构的合理选用,能够尽可能地提高滤芯的使用寿命,确保发动机安全可靠地工作。

参考文献

- [1] 汽车工程手册编辑委员会. 汽车工程手册[M]. 人民交通出版社,2001.
- [2] 机械设计手册编辑委员会. 机械设计手册(第5册)[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [3] 傅德薰,马延文. 计算流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.

(上接第 28 页)

- [3] 韩静,陶云刚. 基于 D2S 证据理论和模糊数学的多传感器数据融合算法[J]. 仪器仪表学报,2000, 21(6): 644 - 647.
- [4] 曹龙汉,曹卡修,孙颖楷,等. 柴油机故障诊断技术的现状及展望[J]. 重庆大学学报,2001(6):45 - 48.
- [5] 曹龙汉. 柴油机智能化故障诊断技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [6] 马善伟,乐正伟,吕健,等. 柴油机故障诊断技术综述[J]. 上海第二工业大学学报,2008(6):122 - 128.
- [7] 郭文勇,朴甲哲,张永祥. 基于多信息的柴油机缸套磨损故障诊断研究[J]. 海军工程大学学报,2005(1):67 - 70.
- [8] 吴茶平,余世林. 船舶柴油机故障诊断专家系统的研究[J]. 中国水运,2006(3):32 - 33.
- [9] 蒋磊,杨朔. 柴油机故障诊断技术现状及发展趋势[J]. 船舶,2007(4):3 - 40.
- [10] 杨占才,张来斌. 发动机活塞-缸套磨损过程声发射机理研究[J]. 石油矿场机械,2001(4):1 - 3.
- [11] 杨叔子等. 机械设备的诊断理论、技术与方法[J]. 振动工程学报,1992(5):193 - 201.
- [12] Shubhalaxmi Kher, Chande P K, Sharma P C. Automobile engine fault diagnosis using neural network[C]. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2001, Oakland(CA), 2001.
- [13] Geng Zunmin, Chen Jin, Hull J B. Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosing approach[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45(8): 1391 - 410.