

文章编号:1000-582X(2009)11-1268-06

船舶动力装置监测与故障诊断系统研制

段黎明^{1a}, 李敏^{1b}, 毛世红²

(1. 重庆大学 a. ICT 研究中心; b. 机械工程学院, 重庆 400030;

2. 重庆长江航道局, 重庆 400010)

摘要:结合模糊神经网络(Fuzzy Neural Network, FNN)与 Dempster-Shafer(D-S)证据理论,研制开发了船舶动力装置数字化监测与故障诊断系统。该系统由信号采集系统、软件控制系统和分析系统组成,主要对主推进机组、柴油发电机组、辅机进行监测。采用压力示功图法和瞬时转速法对主机运行状态进行实时动态监测,且并行构建热力性能参数和瞬时转速 2 个子模糊神经网络,再运用 D-S 证据理论进行主机状态信息融合判断,最后得到故障诊断结果。试验表明,该系统的实时性、测量精度满足要求,而且运用 FNN 与 D-S 证据理论进行故障诊断具有较高的可靠度。

关键词:船舶动力装置;信息融合;故障诊断;模糊神经网络;D-S 证据理论

中图分类号:U664.1

文献标志码:A

Development of monitoring and fault diagnosing system for ship power plant

DUAN Li-ming^{1a}, LI Min^{1b}, MAO Shi-hong²

(1a. ICT Research Center; b. College of Mechanical Engineering, Chongqing

University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Waterway Bureau of Chongqing Yangtze River, Chongqing 400010, P. R. China)

Abstract: A digital monitoring and fault diagnosing system for ship power plant based on fuzzy neural network and dempster-shafer(D-S) evidence theory is developed. The system includes data acquisition part, software control part and analysis part, which can monitor the main propulsion device, diesel generator and auxiliaries. The main propulsion device can be real-time dynamically monitored by acquiring cylinder pressure and instantaneous angular speed. Using thermodynamic parameters and instantaneous angular speed, two sub-fuzzy neural networks are parallel constructed. The fault of main propulsion device is judged by data fusing algorithm of D-S evidence theory, and finally the result of fault diagnosis can be obtained. Test shows that the system's real-time performance and measurement accuracy can meet requirements, and the fusion method of fuzzy neural network according to D-S evidence theory has relatively high reliability.

Key words: ship power plant; information fusion; fault diagnosis; fuzzy neural network; dempster-shafer evidence theory

船舶动力装置是船舶的动力心脏,对其进行监测和故障诊断是保证航运安全稳定运行的关键。目前,最传统的常用于船舶监测与故障诊断的方法有

油液分析法、振动分析法和热力参数分析法^[1-6]。但上述方法单纯地应用某种状态参数实现船舶部分装置进行监测和故障诊断,忽略了对不同源信息的综

收稿日期:2009-06-10

基金项目:重庆长江航道局科技计划项目(2008015)

作者简介:段黎明(1964-),男,重庆大学教授,博士,主要从事机械电子技术、制造自动化的研究,(Tel)023-86394823;
(E-mail) duanliming163@163.com。

合利用,判断参数面较窄。

将现代的故障诊断技术与传统的技术相结合应用到船舶柴油机的监测与故障诊断中,国内外也有相应的研究^[7-12],但也仅运用多源信息对柴油机单地进行监测和故障诊断,不能全面对船舶动力装置运行状态进行评估。

笔者结合模糊神经网络(Fuzzy Neural Network, FNN)与 Dempster-Shafer (D-S) 证据理论,基于 LabVIEW 研制开发了船舶动力装置数字化监测与故障诊断系统。该系统由主推进机组、柴油发电机组、辅机三大主要监测对象、六大子模块构成,采用压力示功图法和瞬时转速法对船舶主机运行状态进行动态实时监测,并行构建热力性能参数和瞬时转速 2 个子模糊神经网络,再运用 D-S 证据理论对主机故障信息进行融合判断,从而综合评价动力装置的性能。

1 总体方案

图 1 为船舶动力装置数字化监测与故障诊断系统的总体设计思路,系统主要由信号采集系统、软件控制系统和分析系统组成。其工作过程如下:一是将采集到的热力参数和瞬时转速信号经调理、A/D 转换后输入工控机,同时构造数据样本,并进行数据的保存、实时显示以及系统报警等;二是对构造样本处理和分析,提取主机的多故障征兆并结合模糊神经网络与 D-S 证据理论融合状态参数进行船舶主机状态识别和故障诊断。

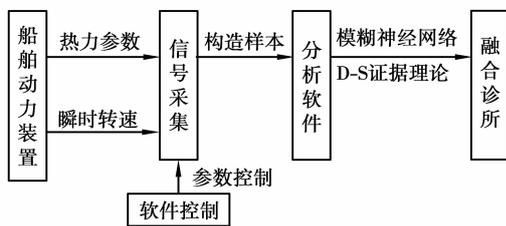


图 1 总体方案图

2 硬件系统

2.1 系统监测对象及参数分析

本系统的监测对象是长江三峡库区的航标船,其动力装置由以下几个部分组成:

- 1) 主推进机组——重庆康明斯发动机有限公司生产的 NT855-M240 型柴油机;
- 2) 柴油发电机组——50 kW 康明斯柴油发电机组 4BTA3.9;
- 3) 辅机——南京航海仪器二厂生产的 YSZ-80

型舵机、宁波意宁生产的 YJB-20/0.2 型绞盘、江苏振华泵厂生产的 50CWZ-6 型消防总用泵和 40CZY-20 型机动燃油泵等。

测量主要参数包括主推进机组、柴油发电机组和辅机的常规热力参数,如转速、滑油温度、滑油压力、冷却水温度、排气温度及系统压力等;齿轮箱的离合指示和低液位报警等开关量信号。此外,在主机上还增加了监测气缸压力和瞬时转速信号。系统监测对象及参数如图 2 所示。高速采集上述参数,分析处理后并将其直接引入数字化监测与诊断系统进行船舶动力装置的状态分析和故障诊断。

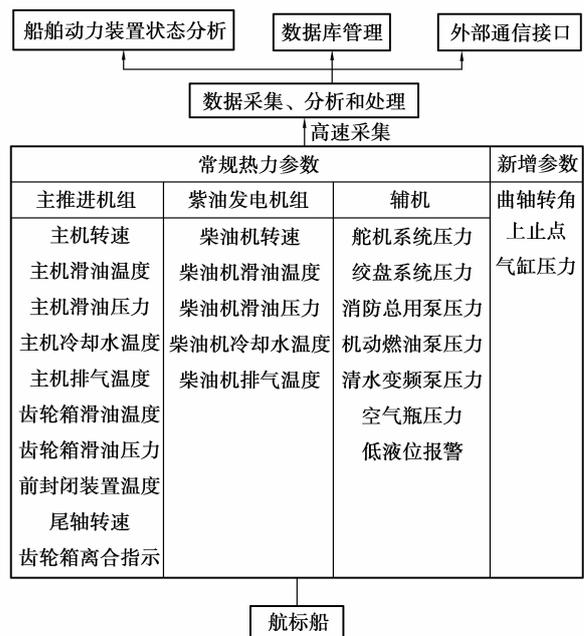


图 2 系统监测对象及参数

2.2 监测系统的硬件组成

船舶动力装置监测系统的硬件由传感器、数据采集设备和工控机组成,监测系统硬件如图 3 所示。

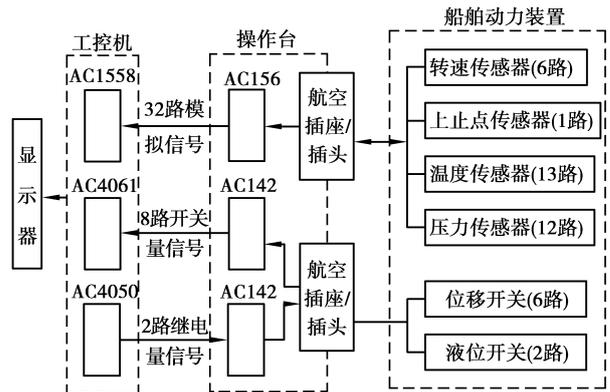


图 3 监测系统硬件组成图

1)传感器。选用转速传感器、上止点传感器、温度传感器和压力传感器等。转速传感器和上止点传感器均选用的是磁电式转速传感器,气缸压力传感器选用压电式传感器,温度测量选用热敏电阻传感器。位移开关和液位开关分别用于齿轮箱的离合指示、低液位报警,此开关将这些参数直接引入数字化监测系统。

2)数据采集设备。A/D 输入、I/O 输入、继电器输出控制分别选用的是北京双诺测控技术有限公司 ISA 系列: 32 路 AC1558 卡、16 路 AC4061 卡、AC4050 小功率 8 路继电器输入。AC1558 是低价位、高性能比的 12BIT A/D 板,具有隔离功能,保护 PC 机不受外界干扰信号的影响及损坏,输入带有程控放大器,特别适合多路模拟信号的采集、检测。AC4050 主要实现主机紧急刹车和停港刹车两路继电器信号的输出。AC1558 配置端子板 AC156,

AC4061、AC4050 配置端子板 AC142。

3)工控机。选用研祥组装工控机 IPC-810A 系列。该工控机具有良好的抗震性,在工控机中安装监测系统和分析软件,可以实现对信号采集控制、数据分析和存储。

3 系统软件功能设计

监测诊断系统是在虚拟仪器技术 LabVIEW 平台下设计开发的,它由主推进机组、柴油发电机组、辅机三大主要系统、六大模块构成。系统软件结构如图 4 所示,各模块既可以单独使用完成某子系统的监测,又可以相互结合,再运用模糊神经网络与 D-S 证据理论,完成动力装置综合监测与诊断。系统所有测量参数都可以自动或者手动存储到数据库 (SQL Server20000)中。

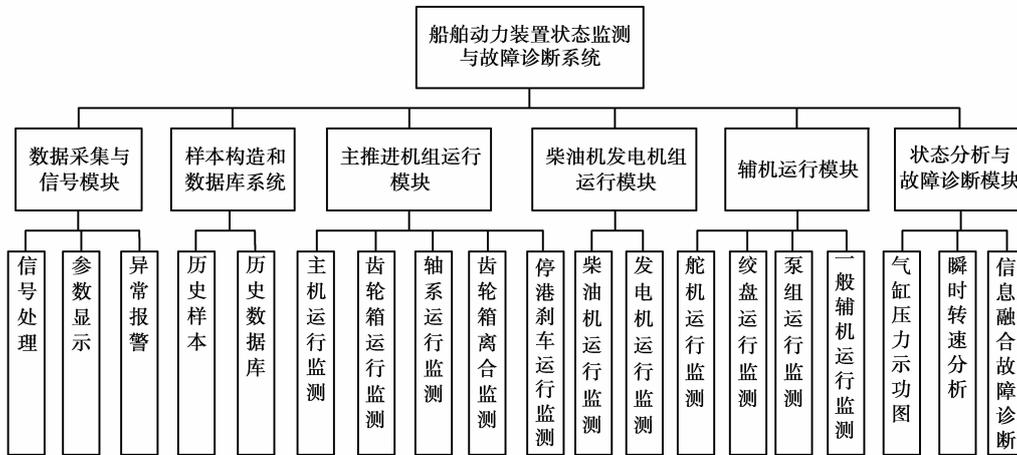


图 4 监测系统软件框图

3.1 数据采集与信号处理模块

设置设备号、采样通道、采样点数、采样率、触发类型等测量控制参数。采集的信号波形可用不同的颜色进行实时显示,并且设定常规热力参数的极限值进行报警。信号处理主要对现场采集的信号进行预处理,包括对信号进行放大、滤波等。

3.2 样本构造和数据库模块

此模块的输入是数据采集和信号处理的输出。本模块的结构如图 5 所示。首先构造历史样本,把数据文件保存到对应的文件目录下,并提取状态参数保存到历史数据库中,便于以后的分析和查询。根据各测点的位置(主机、柴油发电机组和辅机)建立数据库。所构造主机的历史样本保存在对应的数据库中,数据库能够自动完成对历史样本的管理。

为了便于查询,数据库以年、月、日的方式进行分类管理。

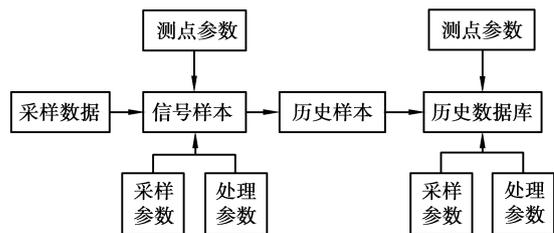


图 5 样本构造和数据库模块示意图

3.3 主推进机组运行模块

左、右推进机组参数实时状态显示。主要对其常规热力参数进行监测及报警。对齿轮箱离合、停

港刹车的运行情况也进行监测。

3.4 柴油发电机组运行模块

监测柴油发电机组的运行状态。除了其常规热力参数外,还对电压、电流、频率和绝缘指标等参数进行监测并报警,对监测船电、岸电、主开关合分闸等进行数字显示。

3.5 辅机运行模块

监测舵机、绞盘、泵组和一般辅机的运行状态。其中,一般辅机包括空气瓶、油水分离器、生活污水处理装置和清水压力柜等装置。

3.6 动力装置状态分析与故障诊断模块

动力装置状态分析与故障诊断在整个系统占有重要的地位,是故障特征提取的关键所在。该模块主要对主机气缸压力信号和瞬时转速信号进行分析,故障诊断功能是建立在对样本数据进行多种分析和数据库基础上,借助一些故障诊断理论,进行动力装置的融合诊断。

3.6.1 气缸压力示功图监测

利用气缸压力示功图对主机工作过程进行监测是最常用的评价其性能的方法,它综合反映了输出机械功的热力转换过程。气缸压力示功图的测量包括上止点信号、曲轴转角信号和气缸压力信号。主机飞轮端安装有磁电式上止点传感器,上止点的定位采用静态上止点和气缸压缩线相结合的方法;在正对飞轮齿位置安装有磁电式转速传感器。图 6 是数据处理后某工况下监测系统测得的主机的上止点信号和气缸压力信号。

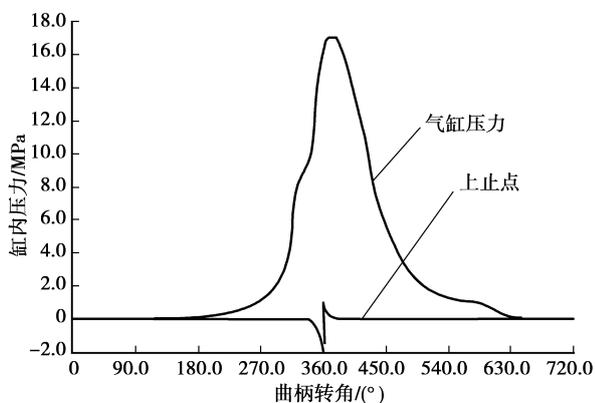


图 6 某工况下主机示功图

气缸压力示功图的数据处理主要有气缸压力示功图的等曲柄转角处理,即等曲柄转角 P-Q 示功图转化为 P-V 示功图^[13];多周期平均化处理;五点三次平滑法对气缸压力信号进行平滑处理;并结合其

结构参数,从示功图中获得主机性能参数:平均指示压力 P_{mi} 、平均指示功 W_i 、爆发压力 P_{max} 、爆发压力相位 θ_{pmax} 、压缩压力 P_c 、膨胀压力 P_{exp} 和压力升高值 P_{mrc} 等。

3.6.2 瞬时转速监测

由于主机一个工作循环内的不同冲程的做功能力不一样,曲轴飞轮端瞬时转速存在着有规律的波动。从正对飞轮齿的磁电式转速传感器高速采集瞬时转速信号,采用过零点法计算出瞬时转速 v_{insp} 来监测主机的工作状态^[14]。图 7 为某工况下测量的瞬时转速波形,为主机性能分析和运行状态监测提供了有利的手段。

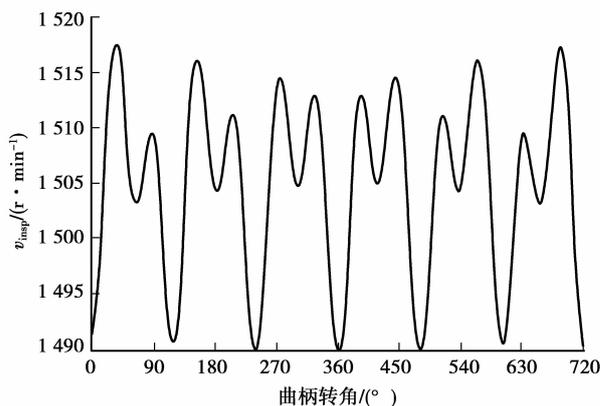


图 7 某工况第 4 缸瞬时转速波形

3.6.3 信息融合故障诊断

为了充分利用来自传感器的信息,应用基于模糊神经网络技术和 D-S 证据理论构建了船舶主机的故障诊断系统,其模型如图 8 所示。

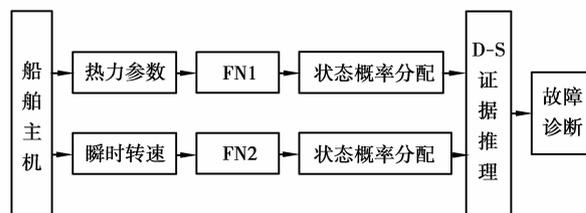


图 8 船舶主机故障诊断模型

1) 子模糊神经网络的构建。笔者采用一种 4 层的模糊神经网络结构,子神经网络采用 BP 算法训练,其网络如图 9 所示,由模糊量化函数部分、神经网络结构部分和去模糊化部分组成^[15]。网络第 1 层为输入层,输入层的每个神经元对应一个输入变量并直接将输入数据传给第 2 层神经元,其权值为 1;网络第 2 层为模糊化函数层,定义模糊子集上的隶

属度函数对输入的连续变量值进行模糊化处理,将输入的连续数值转换成相应的隶属度;第 3 层为隐含层,用于实现输入变量模糊值到输出变量模糊值的映射,作用函数为 Sigomid 函数;第 4 层为输出层,输出层分别对应主机所发生的异常故障,其数值的大小代表该故障的可能性。

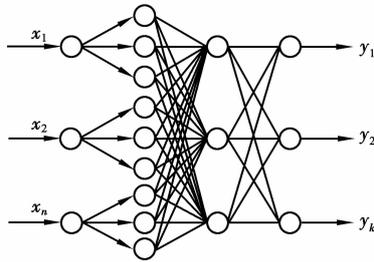


图 9 模糊神经网络结构模型

基于热力性能参数的主机子模糊神经网络的输入是排气 $T_e, W_i, P_{mi}, P_{max}, \Theta_{pmax}, P_c, P_{exp}, P_{m-c}$ 。构建神经网络结构为: $8 \times 16 \times 256 \times 8$ 。

基于瞬时转速的主机子模糊神经网络的输入是磁电式转速传感器采集瞬时转速信号 v_{insp} , 构建神经网络结构为: $1 \times 4 \times 40 \times 8$ 。

子网络输出故障变量有失火、雾化燃烧不良、漏油、燃烧提前、燃烧延迟、燃烧不平衡、活塞-缸套组件磨损和气门漏气, 分别用 $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8$ 表示。

2) D-S 证据组合理论。D-S 证据组合理论是讨论一个辨识框架 U, U 的幂集 2^U 构成命题集合^[16]。

通过基本概率分配函数 m 对所有命题(包括 U 在内)赋予一个信任函数 Bel, m 则满足下述的条件映射

$$m: 2^U \rightarrow [0, 1], m(\emptyset) = 0, \sum_{A \subset 2^U} m(A) = 1.$$

由基本概率分配函数可定义与之相对应的信任函数: $Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B); A, B \subset 2^U$ 。

假设 Bel_1, Bel_2 都是 2^U 的信任函数, m_1 和 m_2 分别是其对应的 2 个相互独立的基本概率幅值, 相对应的焦元分别是 A_1, A_2, \dots, A_K 和 B_1, B_2, \dots, B_g , 设 $K = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1$, 组合后证据集合 C 的基本概率幅值

$$m_{(C)} = m_1 \oplus m_2 = \left. \begin{aligned} & \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1-K} \quad \forall C \subset U, C \neq \emptyset; \\ & 0, \quad C = \emptyset. \end{aligned} \right\} (1)$$

对于多个证据的组合, 可采用式(1)对证据进行综合, 得到组合后的基本概率赋值和信任函数。

3) 主机故障诊断实例分析。通过对主机历史数据库故障样本进行大量的训练, 训练过程中不断调整网络的各个连接权值和阈值。当完成学习并达到稳定状态, 就可以利用实时采样数据对故障诊断系统进行仿真。某次网络训练得到的故障征兆参数, 其子模糊神经网络的输出如表 1 所示, m_{FN1}, m_{FN2} 表示子神经网络输出概率分布。

表 1 模糊神经网络归一化后故障置信度

概率分布	输出故障							
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
m_{FN1}	0.728 0	0.027 0	0.093 0	0.007 6	0.005 9	0.007 3	0.127 0	0.004 2
m_{FN2}	0.653 0	0.212 0	0.102 0	0.002 8	0.002 9	0.012 0	0.011 6	0.003 7

利用式(1)进行信息融合, 得到 $K=0.507 8$ 和融合后的故障置信度, 分别如下所示:

$$\begin{aligned} m_{FN1 \times FN2}(F_1) &= 0.965 78, m_{FN1 \times FN2}(F_2) = 0.011 63, \\ m_{FN1 \times FN2}(F_3) &= 0.019 27, m_{FN1 \times FN2}(F_4) = 0.000 04, \\ m_{FN1 \times FN2}(F_5) &= 0.000 35, m_{FN1 \times FN2}(F_6) = 0.000 10, \\ m_{FN1 \times FN2}(F_7) &= 0.003 00, m_{FN1 \times FN2}(F_8) = 0.000 03. \end{aligned}$$

通过对 2 个子神经网络故障的融合, 可以判断主机最可能发生的故障为 F_1 , 其置信度为 0.965 78, 融合后得到的故障诊断结果可信度比任一子模糊神经网络的结果更高。

4 结 语

1) 利用 LabVIEW 构建的船舶动力装置监测系统具有人机界面友好、设计开发简单、信息表达多样和开发效率高等特点, 系统具有实时性好、信号处理功能强大和易于扩展的优点。

2) 系统监测参数丰富, 能满足动力装置各项性能指标技术分析的要求; 系统集热力参数法、示功图法和瞬时转速法于一体, 实现了主机多方法的综合

监测;采用数据库存储数据,方便历史数据的查询。

3)运用 D-S 证据理论对模糊神经网络输出进行信息融合,提高了故障的置信度,方便工作人员判断主机状态,并为其对船舶进行维修提供了帮助。

参考文献:

- [1] CANAKCI M, OZSEZEN A N, ARCAKLIOGLU E, et al. Prediction of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with biodiesel produced from waste frying palm oil [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(5): 9268-9280.
- [2] BURDEN J, MCWHORTER C R, GRATZ D M. Embedded oil analysis sensor implementation joint effort by common embedded diagnosites (CED) and army oil analysis program(AOAP)[C] //IEEE systems Readiness Technology Conference, Sept 20-23, 2004, San Antonio, TX, USA. [S. 1.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005, 3:546-549.
- [3] VULLI S, DUNNE J F, POTENZA R, et al. Time-frequency analysis of single-point engine-block vibration measurements for multiple excitation-event identification [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 321(3/5):1129-1143.
- [4] CHARLES P, SINHA J K, GU F, et al. Detecting the crankshaft torsional vibration of diesel engines for combustion related diagnosis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 321(3/5):1171-1185.
- [5] CONEY M W, LINNERMANN C, ABDALLAH H S. A thermodynamic analysis of a novel high efficiency reciprocating internal combustion engine; the isoengine [J]. *Energy*, 2004, 29(12/15):2585-2600.
- [6] JIANG J, GU F, GENNISH R, et al. Monitoring of diesel engine combustions based on the acoustic source characterization of the exhaust system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22 (6): 1465-1480.
- [7] AL-ALAWI A, AL-ALAWI S M, ISLAM S M. Predictive control of an integrated PV-diesel water and power supply system using an artificial neural network[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32 (8): 1426-1439.
- [8] WU J D, LLU C H. An expert system for fault diagnosis in internal combustion engines using wavelet packet transform and neural network [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3):4278-4286.
- [9] KIMMICH F, SCHWARTE A, ISERNANN R. Fault detection for modern diesel engine using signal-and process model-based methods[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(2):189-203.
- [10] WANG C D, ZHANG Y Y, ZHONG Z Y. Fault diagnosis for diesel valve trains based on time-frequency images[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(8):1981-1993.
- [11] REN Y P, HU T Y, YANG P, et al. Approach to diesel engine fault diagnosis based on crankshaft angular acceleration measurement and its realization [C] // 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, July 10-12, 2005, Niagara Falls, Canada. [S. 1.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005, 3:1451-1454.
- [12] QUY B, ZHANG Y. An application of the combination of ant colony algorithm and neural network [C] // Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition, August 20-23, Weihai, Shangdong, China. [S. 1.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006, 5:1067-1070.
- [13] 李震宇,杨建国,余永华. 船舶柴油机监测系统的开发与应用[J]. *船海工程*, 2007, 36(2):58-61.
LI ZHEN-YU, YANG JIAN-GUO, YU YONG-HUA. Development and application of monitoring system for marine diesel engine[J]. *Ship and Ocean Engineering*, 2007, 36(2):58-61.
- [14] 俞水良,秦培军,王璐婷. 瞬时转速的提取方法[J]. *小型内燃机与摩托车*, 2005, 34(4):20-22.
YU SHUI-LIANG, QIN PEI-JUN, WANG LU-TING. The analysis method of engine instantaneous speed [J]. *Small Internal Combustion Engine and Motorcycle*, 2005, 34(4):20-22.
- [15] YANG Z Z, WANG L J, XIONG S S, et al. Research on the optimizing control technology based on fuzzy-neural network for hydrogen-fueled engines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(15):2370-2377.
- [16] WU D S. Supplier selection in a fuzzy group setting: A method using grey related analysis and Dempster-Shafer theory[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(5):8892-8899.

(编辑 张 苹)