独立电源多智能体信息融合故障诊断方法

张 莉 袁海文 吕 弘 袁海斌

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对独立电源系统进行故障诊断与预测研究是保证整个复杂运动装置系统安全性工程的重要环节.分析了目前独立电源故障诊断系统中存在的问题,提出采用多传感器信息融合和多智能体技术相结合的方法来提高故障诊断的可靠性和系统的扩展性.利用智能体的自主性、分布性和协作性,构建了独立电源多智能体信息融合故障诊断系统.根据独立电源故障征兆的特点,将 D-S(Dempster-Shafer)证据理论引入到多神经网络的诊断结果融合技术中,阐述了多神经网络局部诊断智能体和 D-S证据理论融合诊断智能体的具体实现方法.最后,以某型航空电源故障诊断为例,给出了故障实例的诊断仿真,结果表明该方法可有效提高诊断可信度.

关 键 词: 独立电源; 故障诊断; 智能体; 传感器信息融合; 证据理论

中图分类号: TP 181

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2010) 08-0936-04

Fault diagnosis for independent power-supply system using multi-agent information fusion

Zhang Li Yuan Haiwen Lü Hong Yuan Haibin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The fault diagnosis and prognosis research for Independent power-supply system (IPSS) was an important step to ensure the safety for the complex moving devices system. Current fault diagnosis system problems for IPSS were analyzed. The method of combining multi-sensor information fusion with multi-Agent was put forward to improve the diagnosis reliability and the system expansibility. A fault diagnosis system for IPSS using multi-Agent and information fusion was established based on Agent automation, distribution and collaboration. According to the fault symptom feature, Dempster-Shafer evidential theory was introduced into diagnosis result fusion. The multi-neural network local diagnosis Agent and the Dempster-Shafer evidential reasoning Agent implementation were disserted in detail. Finally, taking an aircraft electric power system as an example, the diagnostic process was simulated. The results indicate that the method can improve the diagnosis reliability.

Key words: independent power-supply; diagnosis; agents; sensor data fusion; evidential theory

飞机、汽车、舰艇等这类复杂运动装置系统由于不能和工业大电网联网,需要配备独立、自成电网的电源系统[1]. 随着预测与健康管理 (PHM, Prognostics and Health Management)技术[2]日益成为新一代复杂系统设计和使用中的一个重要组成部分, 复杂运动装置系统对其各级子系统的状态监控、故障诊断与预测向实时、智能、集成发展的需求越来越迫切;为了减轻自身重量、提高其推重比和自动化程度, 大量轻便的电子设备装备到运动装置上.因此,在电气装置、电控单元以及用电设备大幅增加的趋势下,对其电源系统进行状态监控、故障诊断以及寿命预测是保证整个运动装置系统稳定、安全、降低使用与保障费用的一条有效途径[3].

收稿日期: 2009-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60974058); 航空科学基金项目 (2008ZD51060); 航空科学基金项目 (2009ZD51041)

作者简介: 张 莉 (1969-), 女, 陕西西安人, 博士生, zhangli03124@asee.buaa.edu.cn

近年来利用专家系统、模糊理论、神经网络[4-5]以及粗糙集理论[6]等各种智能方法进行电源系统故障诊断的应用取得了一定的效果. 独立电源系统变化参量多使得状态监测和故障诊断时需要监测的参数也多. 由于传感器测点位置和数量的限制, 导致信息的不完全性; 故障的相关性也导致故障部位与原因的不确定性. 因此, 单纯使用某一种方法有一定的局限性; 另一方面, 现有的诊断系统通常事先确定一种诊断方法, 故障诊断能力依赖于经验知识库的数量和质量, 一旦完成, 其功能难以扩充或修改, 不能随环境的变化而改变, 缺乏自学习和自适应能力, 降低了诊断系统的效率和自动化程度, 不能满足预测与健康管理系统开放性、通用性的要求.

为了提高故障诊断的准确率, 增加诊断系统自学习和自适应性能力, 易于与整个复杂运动装置预测与健康管理系统集成, 本文将多传感器信息融合故障诊断思想引入智能体(Agent)设计之中, 针对独立电源系统提出一种多 Agent信息融合故障诊断系统结构. 一方面, 利用信息融合的多维信息处理方式, 将多种方法进行融合, 实现功能互补、知识共享为目标的深度融合, 提高故障诊断的准确性和全面性; 另一方面, 利用 Agent的自治性等"智能"特点, 提高诊断系统对环境变化的适应性和扩展性, 有利于实现整个复杂运动装置预测与健康管理系统的高度集成.

1　多传感器信息融合的诊断模型

在独立电源典型系统的故障诊断中, 电压、电流、频率、转速、励磁电流等参数反映了系统基本的运行状态; 局部放电信号、功率因数、谐波含量等参数是反映故障的二次特征. 由于故障影响因素的复杂性, 故障类型之间存在参数交叉的模式识别问题, 诊断时需要对多个特征参数进行综合处理和协同分析. 单一诊断方法使系统需要处理的参数过多, 增加了诊断问题的维度和复杂性, 导致诊断结论的不确定程度较严重. 本文将多传感器信息融合技术[7]引入到独立电源故障诊断中, 采用如图 1所示的 3级故障诊断模型: 数据级、特征级和决策级融合诊断.

数据级融合直接对传感器采集的原始数据进行融合, 实现单个传感器基于时间的融合估计方法[8], 减少传感器测量中的不确定性, 提高故障诊断的准确性. 特征级融合根据不同诊断方法对知识和推理机制上的差异, 将状态特征和故障特征进行识别, 划分为多个子参数空间 S_i, 从不同侧面完成局部信息的融合并得到初步诊断结果. 对于不确定的诊断结果, 最后通过 D-S(Dempster-Shafer)证据理论[9]把各个诊断的识别结果进行决策级融合获得最终诊断结论.

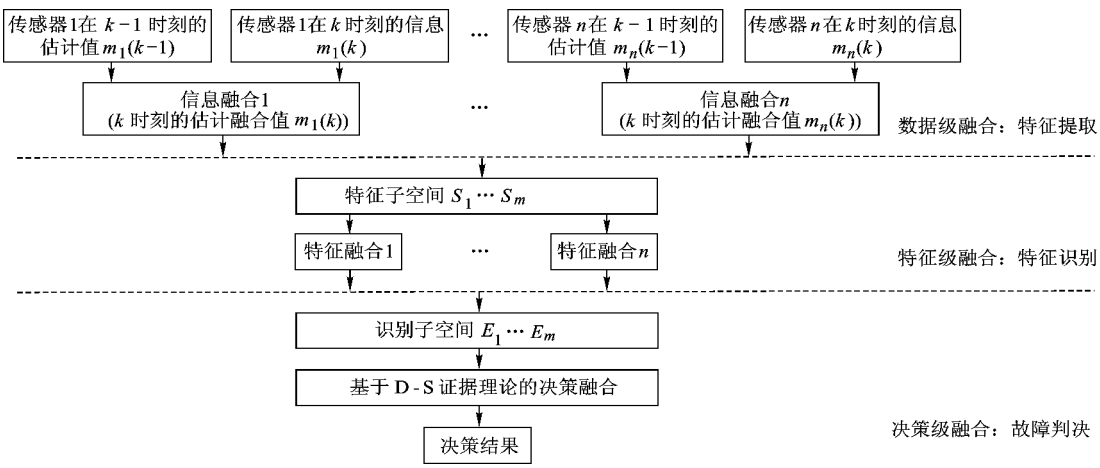


图 1　基于多传感器信息融合的故障诊断模型

2　多 Agent信息融合诊断系统结构

根据上述多传感器信息融合的故障诊断模型, 结合多 Agent系统的基础理论, 独立电源多 Agen信息融合故障诊断系统的结构如图 2所示.

2 1　信息采集 Agent

电源特征监测点为电源输出电压、三相电枢电流以及发电机转子位置, 分别安装电压传感器、电流传感器和转速传感器, 在中性点处安装超宽频带的电流传感器, 信息采集 Agent将不同传感器采集的电压、电流、频率、局部放电信号等现场信号分别通过变换、放大、滤波整形转换成数据采集卡所能识别的信号, 采用基于算术平均值与递推估计的融合算法进行数据处理, 得到相对准确

的融合估计测量值,利用基于可扩展标记语言(XML, Extensible Markup Language)的测试信息数据交换标准——自动测试标记语言(ATML, Automated Test Markup Language)对获得的基础测量数据进行标准化描述,实现分布式开放环境中从测试到诊断信息的表示、管理和共享的无缝交互,利于与整个运动装置预测与健康管理系统的信息集成[10].

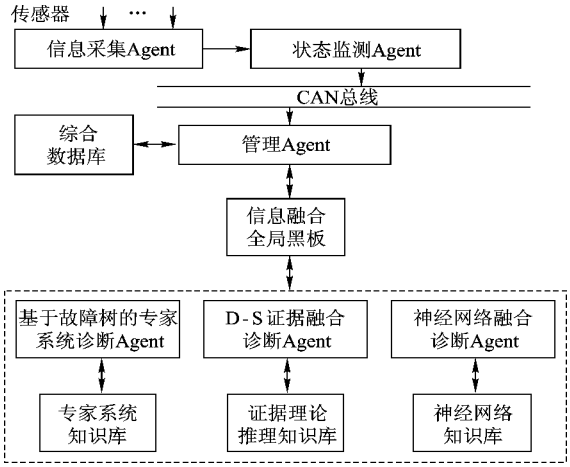


图 2 多 Agent信息融合故障诊断系统结构

2.2 状态监测 Agent

状态监测 Agent提供多种信号处理与分析方法,根据参数的特点和故障的征兆选择相应的方法进行处理、提取故障特征参数. 采用快速傅立叶变换(FFT, Fast Fourier Transforms)提取畸变分量和畸变的幅度;利用功率谱分析,获得信号的基频及各次谐波含量的幅值和频率;采用小波变换的多分辨率分析方法,从噪声中提取局部放电信号. 状态监测 Agent经过分析发现系统异常时,向管理 Agent发出诊断请求,并提供原始数据.

2.3 管理 Agent

管理 Agent担负整个系统的控制与协调,负责各 Agent间的协作,仲裁各诊断 Agent的诊断结果;另一方面,接受状态监测 Agent通过现场总线传送来的诊断请求和故障特征数据,根据电源系统的组成结构、故障类型的复杂程度,对问题进行任务分解、分配,降低输入特征的维度,调用最匹配的诊断 Agent进行故障诊断.

2.4 诊断 Agent

诊断 Agent包括基于故障树的专家系统诊断 Agent;基于神经网络的诊断 Agent和基于 D-S证据理论的融合诊断 Agent. 各诊断 Agent设计为异构的,根据各自的知识库、推理机制和诊断规则进行征兆的获取与推理. 当各诊断 Agent得到的诊断结果一致时,增加诊断结果的可信度;当各诊断结果不一致时,向管理 Agent发出协作诊断请求. 由管理 Agent对各诊断 Agent的诊断信息进行融合统一、数据关联,然后调用融合诊断 Agent,根据基于 D-S证据理论的诊断决策规则形成一个收敛的、可信度高的诊断结果,最后再由管理 Agent将最终的诊断结论提交给用户接口.

3 应用实例

在上述诊断系统结构研究的基础上,本文以实验室某交流航空电源半实物仿真平台为研究对象,设计实现了航空电源多 Agent信息融合故障诊断系统. 信息采集 Agent和状态监测 Agent由数字信号处理(DSP, Digital Signal Processing)编程实现,并提供符合控制局域网(CAN, Controller Area Network)总线协议的通信接口;采用分布式对象组件模型(DCOM, Distributed Component Object Model)技术实现管理 Agent和故障诊断 Agent,便于 Agent的移植、复用和更新,软件系统用 Visual C++.net实现. 整个系统采用基于融合系统的全局黑板进行协调组织,在黑板中存放所有的公用数据和全局数据,实现各 Agent之间的数据交换.

基于故障树的专家系统诊断方法在诊断过程中,故障的相关性容易产生不确定故障源的“瓶颈”问题. 针对该方法所产生的信息不确定性,本文采用多子神经网络特征融合诊断 Agent和 D-S证据理论决策融合诊断 Agent相结合的方法实现故障源的快速准确定位.

3.1 基于多子神经网络的特征融合诊断 Agent

将反映系统运行的状态特征即输出电压 u_0、频率 f、输出电流 i_0、某特定负载时的励磁电流 i_f 作为参数子空间 1;将反映故障的二次特征即局部放电信号、功率因数 Φ、输出基频 f_0、二次谐波频率 $2f_0$、三次谐波频率 $3f_0$、交流励磁机定子感应基频 f_1和二次谐波频率 $2f_1$作为参数子空间 2.

航空电源系统故障类型较多,通过对某型航空电源的主要功能部件常见故障现象和原因的分析,将各子故障空间确定为:正常 F_0、主发电机定子绝缘故障 F_1、主发电机转子励磁绕组短路故障 F_2、旋转整流器短路/开路 F_3、永磁副励磁机电枢绕组短路/开路 F_4、交流励磁机电枢绕组短路/开路 F_5、馈电线短路/开路 F_6、变换器故障 F_7、控制器故障 F_8.

根据参数子空间 1和参数子空间 2分别构造 2个诊断子网络,将所有特征参数的融合估计值

进行模糊归一化预处理作为网络的输入节点, 9种故障类型分别作为 2个诊断子网络的输出节点, 选择 BP网络模型, 确定网络结构 4×15×9(参数 1诊断子网络)和 7×12×9(参数 2诊断子网络); 网络训练和测试的样本数据来自于交流电源系统(额定输出电压 115V, 额定转速 8000r/min)的实测值、故障历史数据和一部分故障仿真数据, 最大迭代次数为 300次, 收敛误差为 0.001, 学习率为 0.05. 最后把待诊断的特征参数输入到子网络, 实现初步诊断.

3.2　基于 D-S证据推理的决策融合诊断 *Agent*

本文选取的各故障子空间相同, 识别框架 $\Theta = \{F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8\}$; 由于每个子网络都是通过大量样本学习得到的, 各子网络的初步诊断结果可以作为证据理论的独立证据, 因此以 2个诊断子网络的输出值进行归一化处理作为此证据下各命题的基本概率分配, 避免构造主观性较强的基本概率分配函数.

根据 D-S证据理论和合成法则计算不同证据联合作用下的信度函数和似真度函数, 确定 Θ中所有命题的信度区间[Bel, Pls]和证据的不确定信度函数值 $m(\Theta)$, 采用基于基本概率赋值的决策规则给出诊断结论 *F*: 判定的故障类型应具有最大的信度函数值, 并要大于某一阈值(本文取 0.2); 和其他类型的信度函数值之差要大于某个阈值(本文取 0.3), 并要大于不确定信度函数值 $m(\Theta)$(其中, $m(\Theta)$必须小于某一阈值, 本文取 0.1).

3.3　融合决策诊断结果分析

为验证方法的有效性, 以主发电机定子绕组绝缘故障 F_1和转子励磁绕组短路故障 F_2两种重要电气故障为例, 这两种故障类型的状态具有很大的相似性, 不易区分和识别, 随机抽取这两组故障模式样本:

F_1: {105, 140, 400, 1.45, 2.81, 0.746, 36.25, 7.32, 3.76, -1.78, -3.61};

F_2: {106, 138, 402, 1.50, 0.14, 0.810, 36.30, -2.25, -6.78, -1.67, -3.60}

表 1、表 2分别列出了 F_1和 F_2发生时两组特征向量分别经各自子网络融合后得到的输出值作为识别框架中各证据体, 并给出了识别框架中各目标的信度区间以及采用 D-S证据理论融合后根据诊断决策规则得出的诊断结论.

从表 1可以看出, 由于 F_1, F_2两种故障现象都表现为欠压、励磁电流和输出电流过大, 经过子神经网络 1(证据 E_1)融合得到的 Bel(F_1)和 Bel(F_2)很接近, 而证据体 E_1的不确定性过高, 大于 0.1, 不能给出确定的诊断; 局部放电信号幅值是检测定子绕组绝缘故障的重要特征参数, 因此在子神经网络 2(证据 E_2)中 Bel(F_1)最大, 经过对两个子网络输出的融合识别, 在证据的融合作用下, 实际目标的信度函数值 Bel(F_1)明显增大, 其它类型的信度函数值大大减少, 信度区间范围和证据的不确定信度函数值也明显减少, 不确定性显著减少, 因此能够准确识别系统的故障状态为 F_1.

表 1　各目标信度区间以及融合故障诊断结果

证据	$m(\Theta)$	识别框架中各目标信度区间 [Bel(F_j), Pls(F_j)]				诊断结论
		F_0	F_1	F_2	F_3	
E_1	0.186	0.001 0.184	0.383 0.566	0.367 0.550	0.016 0.199	F_1, F_2
E_2	0.071	0.015 0.086	0.734 0.805	0.010 0.081	0.034 0.105	F_1
E_1&E_2	0.019	0.005 0.023	0.843 0.861	0.060 0.078	0.015 0.033	F_1

表 2　各目标信度区间以及融合故障诊断结果

证据	$m(\Theta)$	识别框架中各目标信度区间 [Bel(F_j), Pls(F_j)]				诊断结论
		F_0	F_1	F_2	F_3	
E_1	0.186	0.001 0.184	0.383 0.566	0.367 0.550	0.016 0.199	F_1, F_2
E_2	0.024	0.002 0.026	0.006 0.030	0.810 0.834	0.001 0.025	F_2
E_1&E_2	0.003	0.001 0.005	0.025 0.029	0.906 0.910	0.001 0.005	F_2

在表 2中, 经过子神经网络 1(E_1)融合的结果同表 1; 当发生转子绕组短路故障时功率因数明显改变, 使得子神经网络 2(E_2)中 Bel(F_2)最大, 因此在证据的融合作用下, 经过对 2个子网络输出的融合识别, 也能够准确识别系统的故障状态为 F_2.

4　结　论

将多传感器信息融合技术应用于独立电源多 Agent的故障诊断中, 从数据采集、特征提取到故障识别, 进行了多次信息融合诊断, 提高了诊断的可信度. 通过给出实例说明了具体诊断过程, 验证了该方法的可行性. 另外, 将多传感器信息融合技术引入 Agent设计中, 使得系统具有开放式的多传感器信息融合结构和高效的融合算法, 支持异构环境集成, 实现了独立电源故障诊断系统设计的灵活性、适应性、智能性和可扩展性, 提高其基于领域的复用, 可以方便地与复杂运动装置其他故障诊断子系统集成, 构成基于分布式的复杂运动装置预测与健康管理系统.

(下转第 944页)

[4] Badesha S S, Euler A J, Schroder L D. Very high altitude tethered balloon parametric sensitivity study[R]. AIAA-96-0579, 1996

[5] Badesha S S, Euler A J, Schroder L D. Very high altitude tethered balloon trajectory simulation[R]. AIAA-96-3440-CP, 1996

[6] Badesha S S, Bunn J C. Dynamic simulation of high altitude tethered balloon system subject to thunderstorm windfield[R]. AIAA-2002-4614, 2002

[7] Pankine A A, Heun M K, Schlaifer R S. Advance balloon performance simulation and analysis tool[R]. AIAA-2003-6741, 2003

[8] 蔡国华. 超高空系缆气球的空气动力特性试验研究[J]. 上海航天, 2001, 18(3): 22-25
Cai Guohua. High altitude tethered balloons[J]. Aerospace Shanghai, 2001, 18(3): 22-25(in Chinese)

[9] 焦志强, 洪冠新, 杨超. 系缆气球的气动力估算和配平计算[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(5): 419-424
Jiao Zhiqiang, Hong Guanxin, Yang Chao. Aerodynamic estimation and trim analysis for a tethered balloon[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(5): 419-424 (in Chinese)

[10] 杜亮, 洪冠新. 双系缆气球绳网系统的建模、配平及稳定性[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(9): 901-904
Du Liang, Hong Guanxin. Modeling, equilibrium and stability for double balloon system with tether and net[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(9): 901-904 (in Chinese)

[11] 卢新来, 罗明强, 孙聪, 等. 系留气球的升空模拟[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 768-772
Lu Xinlai, Luo Mingqiang, Sun Cong, et al. Simulations of tethered balloon ascent[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 768-772(in Chinese)

[12] 高为炳. 运动稳定性基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 295-296
Gao Weibing. Motion Stability preliminary[M]. Beijing: Higher Education Press, 1988: 295-296(in Chinese)

[13] 霍伟. 机器人动力学与控制[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 69-70
Huo Wei. Robot dynamics and control[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 69-70(in Chinese)

(编 辑: 李 晶)

(上接第 939页)

参考文献 (References)

[1] Elbaluk M E, Kankam M D. Potential starter/generator technologies for future aerospace application[J]. IEEE AES System Magazine, 1997, 12(5): 24-31

[2] 孙博, 康锐, 谢劲松. 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(10): 1762-1767
Sun Bo, Kang Rui, Xie Jinsong. Research and application of the prognostic and health management system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(10): 1762-1767(in Chinese)

[3] Keller K, Swearingen K, Sheahan J, et al. Aircraft electrical power systems prognostics and health management[J]. IEEE Aerospace Conference, 2006, 1(9): 3737-3748

[4] 朱新宇, 沈颂华. 飞机电源系统故障诊断专家系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(6): 706-708
Zhu Xinyu, Shen Songhua. Fault diagnosis expert system for aircraft electric power system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(6): 706-708(in Chinese)

[5] 牛星岩, 沈颂华, 董世良. 基于模糊推理的飞机电源系统故障诊断专家系统[J]. 电子测量技术, 2007, 30(12): 59-62
Niu Xingyan, Shen Songhua, Dong Shiliang. Fuzzy fault diagnosis expert system in aircraft power system[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(12): 59-62(in Chinese)

[6] 安若铭, 谷吉海, 何传严, 等. 粗糙集在卫星电源系统故障诊断中的应用研究[J]. 中国空间科学技术, 2008(4): 59-64
An Ruoming, Gu Jihai, He Chuanyan, et al. Research on rough set applied to satellite power system fault diagnosis[J]. Chinese Space Science and Technology, 2008(4): 59-64(in Chinese)

[7] Hall D L, Llinas J. Handbook of multisensor data fusion[M]. NewYork: CRC Press, 2001

[8] 滕召胜, 罗隆福, 童调生. 智能检测系统与数据融合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 246-247
Teng Zhaosheng, Luo Longfu, Tong Tiaosheng. Intelligent detecting system and data fusion[M]. Beijing: China Machine Industry Press, 2000: 246-247(in Chinese)

[9] Dempster A. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. Am Math Statist, 1967, 38: 325-339

[10] Zhang Li, Yuan Haiwen, Yuan Haibin, et al. Research and application of atml for aircraft electric power diagnosis and prognostic system[C]// Proceeding of 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Beijing: IEEE Press, 2007: 3615-3618

(编 辑: 赵海容)