

文章编号 1004-924X(2015)06-1742-07

多传感器集成氢气检测系统的知识推送故障诊断

王 冰^{1,2*}, 张洪泉³, 宋 凯⁴, 张震宇⁵

- (1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 中国电子科技集团公司第 49 研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
4. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
5. 中国船舶重工集团公司第 703 研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对现有多传感器集成氢气检测系统不能对自身工作状态进行诊断的缺点,对基于知识的故障诊断专家系统进行了分析,提出了一种基于知识管理和知识主动推送的故障诊断方法。对提出的用于多传感器集成氢气检测系统故障诊断的主要层次结构进行了研究。根据专家系统的基本原理介绍了基于知识推送的专家系统的总体结构。分析了系统故障模式,讨论了故障诊断单元知识库的设计方法。建立了知识主动推送的推理机构模型,给出了其推理方法和步骤。最后,给出了基于知识推送的多传感器集成氢气检测系统故障诊断单元的设计方法。实验结果表明:本方法的故障诊断准确率可达到 97% 以上,验证了该方法的有效性。提出的方法能够主动将知识在适当的时候传递给决策者,提高了故障诊断的速度和准确度。

关键词:氢气检测系统;多传感器集成;故障诊断;知识推送;专家系统

中图分类号: TP277; O659 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1742

Fault diagnosis based on knowledge pushing in multi-sensor integration hydrogen detection system

WANG Bing^{1,2*}, ZHANG Hong-quan³, SONG Kai⁴, ZHANG Zhen-yu⁵

- (1. College of Information and Communication Engineering,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. The 49th Research Institute, China Electron Technology Group Corporation, Harbin 150001, China;
3. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
4. School of Electrical Engineering and Automation,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
5. The 703th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: wangbing@hrbeu.edu.cn

Abstract: As multi-sensor integration hydrogen detection systems can not diagnose the working state by itself, an expert system of fault diagnosis based on knowledge was analyzed and a fault diagnosis method based on knowledge management and knowledge pushing was proposed. The hierarchical structure of the fault diagnosis method used in the multi-sensor integration hydrogen detection system

收稿日期: 2014-12-30; 修订日期: 2015-01-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61473095); 青年科学基金资助项目(No. 61201306)

was investigated. On the basis of the principle of expert systems, the texture of expert system based on knowledge pushing actively was presented. After the fault modes were analyzed, a knowledge base fault diagnosis design was discussed. Then the method and step of inference engine based on knowledge pushing actively were researched by its established model. Finally, the fault diagnosis unit for multi-sensor integration hydrogen detection system based on knowledge pushing was designed. Experimental results indicate that the fault diagnosis accuracy rate of the proposed method reaches above 97%, which verifies the effectiveness of the method. It can transfer initiatively the knowledge to the decision-maker at opportune moment, and improve the speed and accuracy rate of fault diagnosis.

Key words: hydrogen detection system; multi-sensor integration; fault diagnosis; knowledge pushing; expert system

1 引言

氢气浓度检测在能源、化工、冶金、国防等领域有着迫切需求,例如运载火箭发射过程中需要监测氢气含量;向宇宙飞船或核潜艇提供氧气的电解水制氧过程中(在制得氧气的同时也产生了大量的氢气)也需要监测氢气浓度以保证仓内人员的安全。多传感器集成的微结构检测系统可以实现全量程范围的氢气浓度测量,但其结构较常规传感器复杂^[1-2],故障发生概率也比较大,因此了解系统的工作状态是否正常,测量数据是否可信,也就是说对系统故障进行诊断非常重要。

故障诊断单元是多传感器集成氢气检测系统的重要组成部分。在氢气检测过程中它主要用于从故障检测算法的结果获得各个监测参数的状态和数值,并通过对这些状态和数值进行逻辑分析和推理,诊断出发生故障的原因和位置。

目前常用的故障诊断方法主要有三种,基于解析模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法^[3]。基于解析模型的方法能分析系统的动态性质并可进行实时诊断,但由于扰动及噪声的存在,通常很难获取精确的系统模型;基于信号处理的方法可直接利用信号模型,但研究计算较复杂;基于知识的故障诊断方法不需要定量的数学模型,而且其引入了诊断对象的其它信息,所以可以充分利用专家经验知识,在几种故障诊断方法中很有应用前景^[4]。例如:Ricadela A 提出了一种基于搜索引擎的个性化知识推送系统^[5],

Siontorou 将知识的方法应用在绝缘半导体的故障诊断中^[6],李恺钦将其应用于航空发动机的故障诊断系统中^[7],高美铃将其应用于齿轮的故障诊断系统中^[8]。

目前大多数知识故障诊断方法都采用自动搜索的方法,针对该方法不能主动地将专家知识在合适的时候传递给决策者的缺点,本文提出采用基于知识主动推送的故障诊断方法。知识推送是指对检测到的故障信息进行分析,将存储在知识库中的符合故障信息标准的知识按照存储顺序及时准确地传递给决策者,从而减少了诊断过程中的搜索时间。这是知识管理向实用化发展的一种非常关键、重要的技术,是知识服务的一种具体表现形式。目前,知识推送在故障诊断领域中的应用研究的较少,主要集中在航天动力等试验系统中^[9]。本文通过分析数据的故障特征,根据现有知识库的资源,利用知识推送引擎,主动将匹配的故障知识推送给决策者,协助其进行故障诊断,大大加速了推理机的推理速度,提高了故障诊断的速度和准确性。

2 基于知识推送的专家系统设计

2.1 总体结构

基于知识的专家系统由推理机模块、知识库模块、知识获取模块和解释模块等几部分组成^[10],其原理框图如图1所示。

专家系统根据经检测系统处理过的信号和知识库中的知识对发生的故障进行推理和分析,判

断出故障的类型和原因,并将结果经过人机接口显示出来。

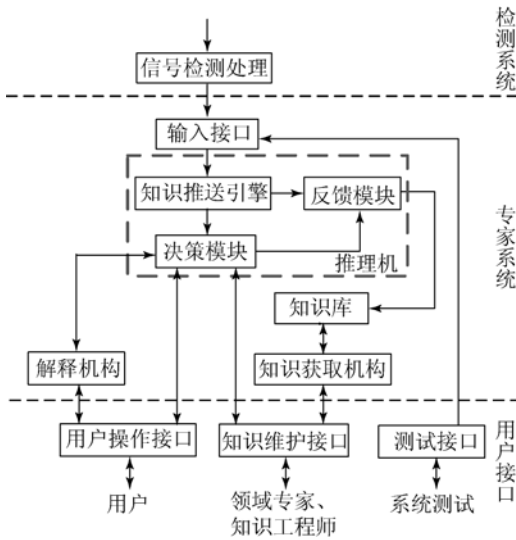


图 1 基于知识推送的专家系统原理图

Fig. 1 Block diagram of expert system based on knowledge pushing

推理和知识分离是设计专家系统首先要考虑的问题,为了保证专家系统知识库和系统整体的开放性,应使其推理机的工作机制和具体的知识无关。因此,专家系统设计最重要的部分就是知识库和推理机的设计。在本文的专家系统设计中,通过对知识库中知识的标准化设计实现了推理和知识的分离。

2.2 专家系统知识库设计

知识库是专家系统的重要组成部分之一,从一定程度上讲,知识的水平决定了专家系统的水平^[1]。本文通过充分了解多传感器集成氢气检测系统的工作情况、故障机理及其表现形式,总结出故障模式与其征兆之间的关系,按照一定的规则对征兆进行标准化编码,将其转化为专家系统可以处理的知识。

根据故障模式分析,测试系统的故障知识主要由两部分组成。第一部分是从历史经验中获得的,第二部分是通过故障机理进行分析获得的。为了将知识库中的信息进行标准化编码,需要分析各种故障模式及其对应的参数和参数属性。知识库设计原理框图如图 2 所示。

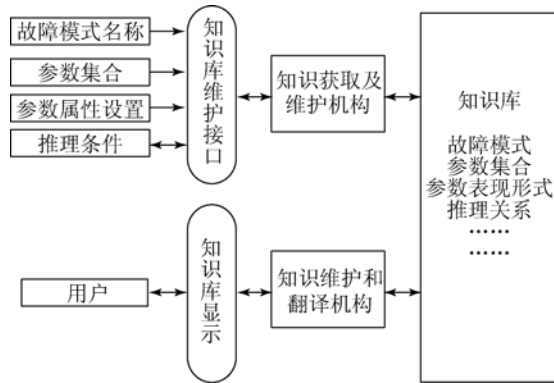


图 2 知识库设计原理图

Fig. 2 Block diagram of knowledge base

2.3 基于知识推送的推理机设计

本文将知识推送的思想应用于多传感器集成氢气检测系统故障诊断单元中的推理机模块,将系统的推理机构进行改进,在经典推理机构采用分层推理以及正反向推理相结合的基础上增加了知识推送环节,并保存系统每次故障诊断的结果。在以后的故障诊断中若出现同样的征兆,可立即将诊断结果推送给用户,使推理机的推理速度大幅度提高。其推送过程如图 3 所示。

根据图 3 可知,推理机构在进行征兆求解后,进入知识推送环节与推理结果记忆知识库中的历史推理条件进行匹配,如果匹配成功则直接输出推理结果,如果推理失败则进入经典推理过程,并将推理结果反馈到结果记忆知识库中。

知识推送引擎是知识推送的核心方式,它能够选择合适的方法将知识管理层提供的各类知识按制定的方式推送给决策模块。如果以决策程序作为决策模块的决策者,知识推送引擎就会提供能够与决策程序接口匹配的格式的数据;如果以用户、专家作为决策模块的决策者,知识推送引擎就会以用户自定义的可读形式推送给决策者,并且协助决策者完成故障诊断决策。

本文设计的推理机还能够将决策处理后的故障特征和与其相关的知识通过反馈模块推送至知识管理层。知识管理层根据相关度对知识和特征进行加权处理,并将处理结果储存到结果记忆知识库中。待再次处理类似故障时,可以将权重大的知识优先推送给决策模块,从而提高推理机的推理速度和准确度。

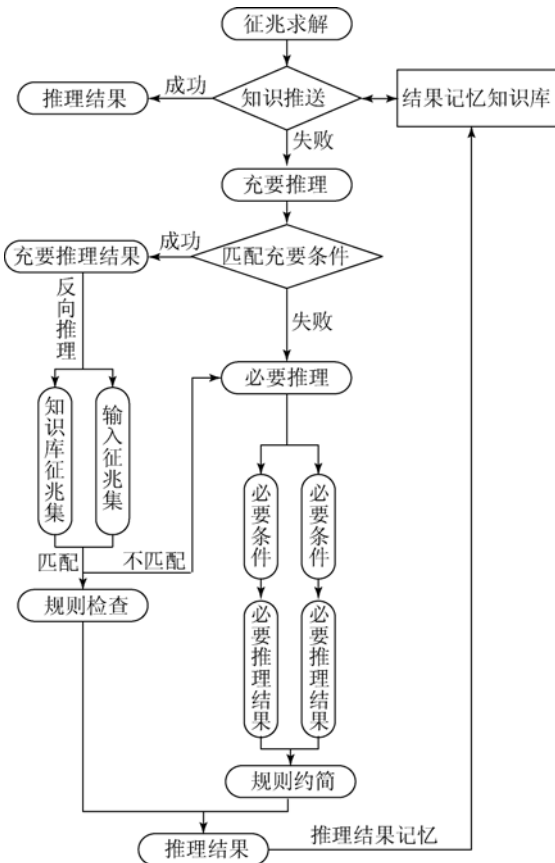


图 3 基于知识推送的推理机构流程图

Fig. 3 Flowchart of inference engine based on knowledge pushing

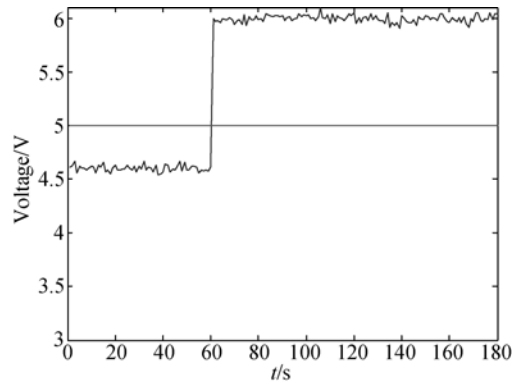
3 试验验证

本文研究的多传感器集成氢气检测系统是要实现低浓度、中浓度、高浓度的氢气检测,即体积分数 0~100% 全量程无缝测量,其敏感单元集成了 3 种不同原理的敏感芯片,即半导体式(测量低浓度氢气,体积分数 0~0.8%)、催化燃烧式(测量中浓度氢气,体积分数 0.3%~4%)和热导式(测量高浓度氢气,体积分数 1%~100%)。通过对敏感单元输出信号三值性问题进行分析,建立了小样本标定数据情况下氢气浓度与敏感单元三值输出的数学模型,进而重构出全量程范围的氢气浓度。在此基础之上,系统集成了温湿度敏感元件,采用软件补偿的方法对各敏感单元的输出进行修正,实现了温湿度补偿。

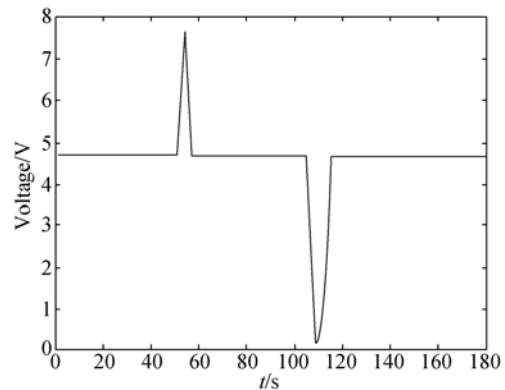
根据分析,多传感器集成氢气检测系统发生故障时,其输出信号的值可能表现为超出(高于或低于)测量范围;变化规律可能表现为突变的、缓

慢的或冲击的;也有可能是特定的敏感元件(温、湿度)参数发生了故障。

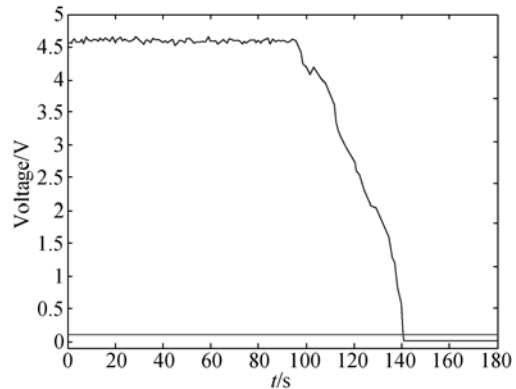
本文以半导体敏感芯片为例,举例说明了在浓度为 5 000 mg/L 时,敏感芯片输出信号的几种表现形式,如图 4 所示。图 4(a)为参数高于阈值时,变化规律为阶跃,图 4(b)为参数变化规律为冲击时的表现形式,图 4(c)为参数低于阈值时,变化规律为缓变。



(a) 参数高于阈值
(a) Parameter above the limen



(b) 参数冲击变化
(b) Parameter impact change



(c) 参数低于阈值
(c) Parameter below the limen

图 4 参数表现形式

Fig. 4 Parameter representation forms

每一种参数表现形式都有其对应的标准化编码。表 1 列出了参数数值特征及其对应的二进制编码,表 2 列出了参数变化规律及其对应的二进制编码,表 3 列出了温湿度特征参数的数值特征及其二进制编码。

表 1 参数数值标准化编码

Tab. 1 Standardized coding of parameter values

数值	正常范围	低于下限	高于上限	非正常 (高或低)
标准化编码	00	01	10	11

表 2 参数变化规律标准化编码

Tab. 2 Standardized coding of parameter variation law

变化规律	标准化编码
正常	000
突变	001
冲击	010
缓慢	011
突变+冲击	100
突变+缓慢	101
冲击+缓慢	110
其他非正常	111

表 3 温湿度参数特征标准化编码

Tab. 3 Standardized coding of temperature and humidity parameter characteristics

温湿度 参数数值	正常	温度异常	湿度异常	温湿度 均异常
标准化编码	00	10	01	11

将所有参数的标准化编码集成一组逻辑变量,每组逻辑变量都有与其对应的推理条件,将其作为推理的征兆信息,如图 5 所示。

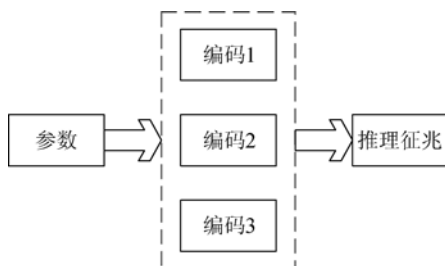
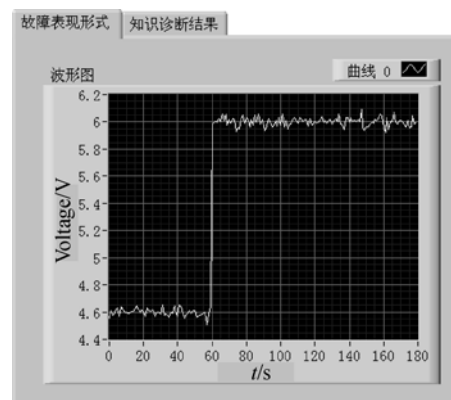


图 5 参数及其属性与征兆的对应关系

Fig. 5 Relationship between parameters and its properties and signs

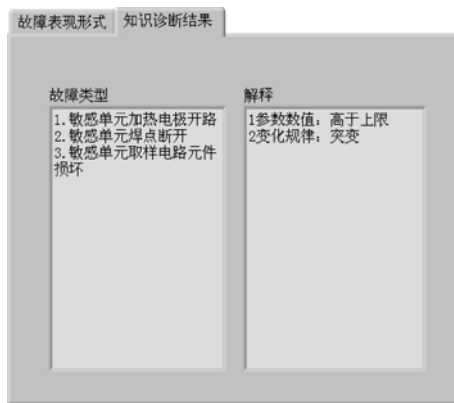
基于以上原理,以检测系统常见的几种故障为例,当半导体敏感芯片加热电极开路时,可能会发生过载故障,对应的二进制码为 1000100;当热导敏感芯片焊点接触不良时,可能发生冲击故障,对应的二进制编码为 1101000;当整个敏感单元的补偿电路导线短路时,可能发生掉电故障,对应的二进制编码为 1001000。由此,将所有可能的故障按上述原理编码,存入多传感器集成氢气检测系统故障诊断专家系统知识库中。

对多传感器集成氢气检测系统的结构,由于目前用于测量的敏感芯片数量有限,使得有些故障模式在现有参数表现形式下无法区分。如敏感单元加热电极开路、焊点断开、取样电路元件损坏 3 种故障参数表现形式一致,均为过载故障,参数值变大,变化规律为阶跃。当输入的测试样本参数表现形式符合上述条件时,推理机将按照 3 种故障模式在知识库中的存放顺序依次给出。假设经查证此故障为加热电极开路,则在基于知识推送的推理机制中对此种故障进行标记,当下次再出现同样表现形式的测试样本时,基于知识推送的推理机将首先认为此样本为加热电极开路,并给出相关的故障知识,然后再推理出其他两种故障模式。仿真结果如图 6 所示,图 6(a)给出了故障数据的结果图,图 6(b)显示了其诊断结果。



(a)故障表现形式

(a) Fault representation form



(b) 诊断结果

(b) Diagnosis results

图6 知识故障诊断结果

Fig. 6 Knowledge fault diagnosis results

本文选取了100组数据进行验证,将知识推送的故障诊断方法与无推送的方法进行了比较,结果如表4所示。由表4可知,基于知识推送的方法在诊断速度和准确度上都优于无推送的方法,且故障诊断准确率达到97%以上。没有正确诊断出的故障基本都是在传感器变化率异常故障模式下,有部分测试样本被误分为正常数据,原因是在故障发生前后短时间内故障数据的特征不明显,因此在数据编码时可能会出现错误,误分类的可能性较大,这是符合实际情况的。

参考文献:

- [1] 黄斌,陈世静,张文伟,等. 气浮式测力传感器静特性的影响因素[J]. 光学精密工程,2014, 22(2): 390-396.
HUANG B, CHEN SH J, ZHANG W W, *et al.*. Influence factors on static characteristics of flotation force transducers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 390-396. (in Chinese)
- [2] 郑高峰,何广奇,刘海燕,等. 电纺氧化锌纳米纤维乙醇、丙酮气敏传感器[J]. 光学精密工程,2014, 22(6): 1555-1561.
ZHENG G F, HE G Q, LIU H Y, *et al.*. Electrospun zinc oxide nanofibrous gas sensors for alcohol and acetone [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1555-1561. (in Chinese)
- [3] LO K L, NG H S, GRANT D M, *et al.*. Extended Petri net models for fault diagnosis for substation automation [J]. *IEEE Proceedings: Generation*,

表4 知识推送与无推送方法的比较

Tab. 4 Comparison between two methods with and without knowledge pushing

方法	诊断时间/s	诊断准确率/%
知识推送	0.241 2	97
无推送	0.803 1	94

4 结论

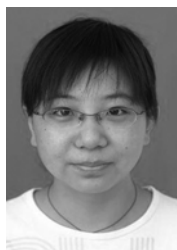
本文提出了一种基于知识管理及知识主动推送的多传感器集成氢气检测系统故障诊断方法的体系结构。在分析了其主要原理及层次结构的基础上,提出了以知识主动推送方式进行系统故障诊断检测的方法,并以多传感器集成氢气检测系统为例,进行了知识库及基于知识推送的推理机的设计,实现了基于知识推送的故障诊断,经验证其准确率能达到97%以上。本文所提出的基于知识主动推送的多传感器集成氢气检测系统故障诊断方法,提高了故障诊断的速度和准确率,为其他系统的故障诊断提供了新的解决思路。本方法在知识的获取上主要依靠专家的经验知识及已出现的故障知识,还存在着一定的局限性,这也是接下来要研究的重点内容。

Transmission and Distribution, 1999, 146(3): 229-234.

- [4] 刘晶红,孙辉,沈宏海,等. 机载光电成像设备的可测试性系统设计[J]. 光学精密工程,2008, 16(12):2435-2440.
LIU J H, SUN H, SHEN H H, *et al.*. Design of testable system for airborne optoelectronic imaging equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2435-2440. (in Chinese)
- [5] RICADELA A. Microsofts knowledge push [J]. *InformationWeek*. 2000, (805):151.
- [6] SIONTOROU, CHRISTINA G. A knowledge-based approach to online fault diagnosis of FET biosensors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(9): 2345-2364.
- [7] 李恺钦. 基于改进遗传算法的航空发动机故障诊断专家系统[D]. 南昌:南昌航空大学,2012.
LI K Q. *Based on an improved genetic algorithm for aero engine fault diagnosis expert system* [D].

- Nanchang: School of Aeronautical Manufacturing Engineering Nanchang Hangkong University, 2012. (in Chinese)
- [8] 高美铃. 基于 PCA-RS 智能技术的齿轮故障诊断研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
GAO M L. *Research and application of gear fault diagnosis based on PCA-RS intellectual technology* [D]. Wuhan: Wuhan university of technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 杨思锋, 王祁, 刘鲁. 一种基于知识推送的故障诊断系统[J]. 航空动力学报, 2010, 25(1): 203-207.
YANG S F, WANG Q, LIU L. Fault diagnosis system based on knowledge pushing [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25 (1): 203-207. (in Chinese)
- [10] LEE H J, AHN B S, PARK Y M. A fault diagnosis expert system for distribution substations [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15 (1): 92-97.
- [11] 王磊, 陈青, 高湛军. 输电网故障诊断的知识表示方法及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4): 85-92.
WANG L, CHEN Q, GAO ZH J. Representation and application of fault diagnosis knowledge in power transmission grids [J]. *Proceedings of the CSEE*. 2012, 32(4): 85-92.

作者简介:



王 冰(1984—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,工程师,2005年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事传感器故障检测、诊断及恢复等方面的研究。E-mail: wangbing@hrbeu.edu.cn



张洪泉(1965—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,2008年于哈尔滨理工大学获得博士学位,2011年于中国电科第49研究所博士后出站,主要从事传感器与微系统技术研究。E-mail: zhanghq1@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)