

# 水轮发电机组智能故障诊断技术综述

曹林宁<sup>1</sup>, 花敏辉<sup>2</sup>, 沈祖诒<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 江西柘林水电开发有限责任公司, 江西 九江 330317)

**摘 要:** 重点介绍了基于经验和基于模型的智能诊断技术发展和特点, 以及在水电机组中的应用情况。比较了两类诊断技术的优缺点, 指出相对于基于经验的启发式诊断方法, 基于模型的诊断方法具有较多的优点, 是水电机组智能诊断发展的重要方向。

**关键词:** 智能故障诊断; 经验诊断; 模型诊断; 水轮发电机组

## Summary on Intelligence Fault Diagnosis of Hydro Generating Unit

Cao Linning<sup>1</sup>, Hua Min Hui<sup>2</sup>, Shen Zuyi<sup>1</sup>

(1. College of Conservation and Hydropower Engineer of Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098;

2. Jiangxi Zhelin Hydropower Development Co., Ltd., Jiujiang Jiangxi 330317)

**Abstract:** The development and characteristics of experience-based and model-based intelligent diagnosis technology and the applications in hydro generating unit are introduced. After the comparison of two diagnostic techniques, the model-based diagnostic method has more advantage and is the development direction of hydroelectric generating units.

**Key Words:** intelligence fault diagnosis; experience-based diagnosis; model-based diagnosis; hydro generating unit

中图分类号: TM312; TV737

文献标识码: B

文章编号: 0559-9342(2010)01-0073-04

目前, 基于人工智能、专家系统、ANN 等的智能故障诊断理论的深入研究和基于现代检测技术、虚拟仪器技术、嵌入式微处理器技术等新型故障诊断系统的研制都使智能故障诊断领域发生了新的变化。从所使用的知识库类型可将水轮发电机组智能诊断系统分为两类: 一类是基于经验知识(浅知识)的诊断系统, 另一类是基于模型知识(深知识)的诊断系统。本文针对智能诊断近年来的发展情况, 对其在水轮发电机组故障诊断中的应用进行介绍。

## 1 基于经验的诊断系统

基于浅知识的故障诊断系统是以领域专家和操作者的启发性经验知识为核心<sup>[1]</sup>, 通过演绎推理或产生式推理来获取诊断结果, 其目的是寻找一个故障集合使之能对一个给定的征兆(包括存在的和缺席的)集合产生的原因作出最佳解释。长久以来, 研究工作者主要是从经验知识的获取、表达、推理等方面借鉴发展其他的信息处理技术如模糊集合、神经网络等来推动专家系统的发展。这也是我国水电行业智能诊断系统研究近年来的主要的研究方向之一, 相关成果做如下介绍。

### 1.1 基于模糊集合理论的故障诊断

基于模糊的诊断方法就是依据专家经验的故障征兆空间与故障原因空间之间建立模糊关系矩阵, 再将各条模糊推理规则产生的模糊关系矩阵进行组合, 根据一定的判定阈值来识别故障。有两种基本方法, 一种是先建立征兆和故障类型之间的因果关系矩阵, 再建立故障与征兆的模糊关系方程; 另一种是先建立故障与征兆的模糊规则库, 再进行模糊逻辑推理的诊断过程。这两种方法在水轮发电机组故障诊断领域都得到了一定的应用<sup>[4,5]</sup>。在已知故障征兆的情况下, 对多故障同时发生和多故障具有相同征兆的诊断问题, 利用模糊诊断技术, 确定机械设备故障类别的隶属度值, 经模糊综合诊断后确定设备的故障。但是, 模糊诊断知识获取困难, 尤其是故障与征兆的模糊关系较难确定, 学习能力差, 容易发生漏诊或误诊。另外, 由于模糊语言变量是用模糊数(即隶属度)表示的, 如何实现语言变量

收稿日期: 2009-02-19

作者简介: 曹林宁(1977—), 女, 河北衡水人, 讲师, 硕士, 从事水力机组仿真、故障诊断研究。

与模糊数之间的转换,是实现上的一个难点。

## 1.2 基于实例的故障诊断

实例推理 (CBR, Case Based Reason) 是一种使用过去的经验实例指导解决新问题的方法。CBR 系统中的知识库不是传统的专家系统中的规则库,它是由领域专家以前解决过的一些历史案例组成。一个故障实例可用一个多元组  $C=\{E,S,R,P\}$  来表示<sup>[6]</sup>。其中,  $E,S,R,P$  为 4 个有限的非空集合,分别表示故障实例名、故障的征兆集、故障结论集和维修方案集。基于实例诊断的优点是根据过去实例解决新问题,不需人从实例中提取规则,降低了知识获取的负担,解题速度快。将 CBR 引入故障诊断领域面临的问题是所能搜集到的诊断实例是有限的,不可能覆盖所有解空间,搜索时可能会漏掉最优解;当出现异常征兆时,由于找不到最佳匹配,可能造成误诊或漏诊。另外,还存在实例之间的一致性维护问题。

## 1.3 基于粗糙集的故障诊断

该理论由波兰学者 Z.Pawlak 于 1982 年提出,它是一种新的数学工具,用于处理不确定性或不精确知识的表达,经验学习并从经验中获取知识,进行知识分析、矛盾分析、不确定性知识推理等。粗糙集是由集合的下近似、上近似来定义的。下近似中的每个成员都是该集合的确定成员,而不是上近似中的成员可能是该集合的成员,但不是确定的成员。可以认为粗糙集是具有三值隶属函数的模糊集合,即是、不是、也许。粗糙集理论用于水力机组故障诊断也是近几年的事情。它在该领域内得到了很好的应用<sup>[8,9]</sup>。

## 1.4 基于神经网络的故障诊断

知识的自动获取一直是专家系统研究中的难点,解决知识获取问题的途径就是机器学习,即让机器自身具有获取知识的能力,使其能在实际工作中不断总结成功和失败的经验教训,对知识库中的知识进行自动调整和修改。解决的办法,是神经网络与专家系统的结合。这种结合有两种策略:其一,将专家系统构成神经网络,即原来传统专家系统的基于符号的推理变成基于数值运算的推理;其二,把神经网络视为一类知识源的表达与处理模型,与其他知识表达模型一起去表达领域专家知识。也就是说,基于神经网络的故障诊断方法是一类新的知识表达体系,它是一种低层数值模型,信息处理是通过大量称之为节点的简单处理单元之间的相互作用而进行的。而且同时,它具有分布式信息保持方式,为专家知识的获取和表达以及推理提供了全新的方式。通过对经验样本的学习,将专家知识以权值和阈值的形式存储在网络中,并利用网络的信息保持

性来完成不精确诊断推理。ANN 在故障诊断中的应用主要在故障定位和故障类型识别两个方面<sup>[10-12]</sup>。

神经网络在故障诊断中应用的主要问题为:训练样本获取的困难性,利用知识和表达知识的方式单一,而且其权重形式的知识表达难以理解等。

在实际中经常把粗糙集与神经网络相结合,用粗糙集方法对信息进行预处理,即把粗糙集作为神经网络的前置系统,它通过简单的决策表简化得到输入输出空间的映射关系,而且通过去掉冗余属性,可以大大简化知识表达空间维数,因而基于粗糙集-神经网络诊断方法是很有意义的。

## 1.5 基于遗传算法的故障诊断

遗传算法是模拟生物遗传学和自然选择机理,通过人工方式构造的一类优化搜索算法。用于知识学习的思想,是根据给定的少量样本,将与结论有关的一个、两个或  $m$  个条件集合作为编码单元进行编码,计算该编码所对应的  $m$  个 ITV (适应度) 和总的 ITV 值;利用遗传算子,对当前一代的个体进行繁衍,产生出其后代,按照一定的规则淘汰,得到最好的基因串,并进行解码,符合要求的存入知识库,否则继续进行繁衍。在专家系统中利用遗传算法可对规则集进行修正,即在运行时对规则应用的情况进行评价,并将评价结果作为适应度,重复遗传算法的过程,得到满意的修正规则集。

近几年有关于遗传算法的应用开始出现在电力系统的故障诊断中<sup>[13,14]</sup>。遗传算法虽然在故障诊断中得到了一定的运用,但在水力机组振动故障诊断领域中的大规模应用仍然比较少见。

## 2 基于模型的诊断系统

本文所讨论的模型都是关于系统结构性知识的模型,基于模型的诊断均特指基于系统结构模型的诊断。有的学者把系统的故障模型 | 从系统的表现直接到它的故障结论 (不是通过系统描述推理得到的而是凭经验得到的) 的一个基于经验的推理模型 | 也称为归于基于模型的诊断是不严格的。

系统的结构性知识模型,从认识论的角度来说,就是因果知识和第一定理知识。因果知识反映诊断对象内部结构和功能的知识,建立在经验知识基础之上,能把诊断对象内部结构显式表示出来,相对于经验知识只表示对象外部可见属性,它包含了诊断对象可见和不可见的全部属性。第一定理知识指与诊断对象物理性质、功能和原理有关的知识,它以明确的科学理论为基础,具有普遍性和通用性,如能量守恒定律、质量守恒定律、电压与电流的关系等。对诊断对象每一环节建立明确的输入输出表达关系,根据实际输出与期望输出的不一致生成引

起不一致的原因集合,然后根据诊断对象内部特定约束关系(因果关系)和第一定律知识,寻找可能故障源<sup>[15]</sup>。

## 2.1 基于模型诊断的概念

基于模型的故障诊断,是智能诊断在思想上的一个重大突破。它主要是针对电子、电器、软件等产品的故障诊断,在诊断时,它与传统的最早的基于经验的人类疾病的诊断,如美国的 MYCIN 系统,有着很大的不同。Reiter 提出了基于模型的诊断<sup>[16]</sup>,之后,Console 和 Torasso<sup>[17]</sup>,以及其他的一些学者,做了大量的后续研究工作。这类系统的知识库主要使用系统的结构性知识。诊断系统的主要思想是利用系统的结构性知识构建系统的模型,在给定系统输入的情况下,系统的模型会产生预期的输出,如果这个预期的输出与观察到的实际系统的输出不同,则说明系统存在故障,利用逻辑的推理理论就能够确定引发故障的元件集合,即提出了诊断问题。诊断的目的是要找出那些可能有毛病的元件,然后通过更换有毛病的元件来修复系统。基于模型诊断又可细化为诊断的产生、诊断的测试和诊断的鉴别等步骤。

系统的经典模型采用一阶逻辑表示,描述系统的组成和行为,通常包括正常行为,也包含异常行为。基于模型的诊断的基本概念可参见文献[16]

## 2.2 基于模型诊断的主要方法

基于模型的诊断有两个主要的研究方法,一个是基于一致性的诊断,另一个是溯因诊断。Console 和 Torasso 把诊断问题看成是带有一致性约束的溯因问题,融合了两种方法。事实上,溯因诊断空间是包含在一致性诊断空间里的。

在基于模型的诊断中,模型起着十分关键的作用。在基于模型的诊断的 30 多年的发展历程中,研究者提出了各种各样的模型,下面做简单介绍。

(1) 分级结构抽象方法。在 Reiter 之后的研究中,人们发现基于模型诊断的计算复杂性与待诊断系统的元件数量有着极为密切的关系。当系统较为复杂、元件数量很多时,诊断计算的复杂性急剧上升,导致诊断无法进行。为减少诊断计算复杂性,人们自然地想到把系统分成若干个组,先按组做出诊断,然后对确定的组再诊断到元件。但是,Luca Chittaro 和 Roberto Ranon<sup>[18]</sup>经认真研究后指出,这种简单的抽象方式对诊断效率的改进并不是总有作用,有时甚至起反作用。于是他们提出分级结构抽象的思想,其核心是给出构建诊断模型中关于抽象过程的概念,然后把简单的诊断模型抽象问题转换为在多个抽象诊断模型中选取“最优”诊断模型的问题,给出了判断诊断模型优劣的准则,力求在诊断过程

中选用“最优”诊断模型,提高诊断的效率。他们还给出了自动产生“最优”诊断模型的算法。由于在诊断过程中采用了“最优”模型,这种方法的诊断效率要比传统的诊断方法高出许多。他们在含有水泵和管线的供水系统的实验诊断中证明了这种方法是十分有效的。这种方法的缺点是选用“最优”诊断模型过程中会产生过多的候选模型,影响效率。

(2) 基于状态转换的历程重构方法。针对该提出的经典模型只能处理静态模型的缺点,P. Baron<sup>[19]</sup>等人和 P. Struss<sup>[20]</sup>等人提出了一种描述动态系统的模型。这种模型的主要思想是把整个系统划分为若干个模块,不再详细地考虑模块的结构部分包括元件和它们的连接,只考虑模块的行为及其相互作用,用有限状态自动机表示模块所能产生的所有状态,用状态间的弧表示激发状态转换的事件,转换结果和转换过程发出可供观察的信息。这种模型的诊断问题的实质是给定模型的初始状态和一个观察到的信息序列,如何给出一个激发状态转换的事件序列(历程),使描述待诊断系统的有限状态自动机在这个事件序列的激发下运转,在运转时观察到的信息就是给定的信息序列这个过程也称为历程重构。于是,在给定的信息序列中有出错信息时,用重构的历程就可以获得诊断。这种方法的优点是对系统从宏观上加以控制,可以诊断大型随时间变化的动态系统。李书明<sup>[21]</sup>把这种有限状态机转换应用在水电机组诊断中,取得了较好的效果。这种方法的缺点是其诊断的定义与经典的诊断定义差别很大,对系统的描述较粗。另外,因为不是基于逻辑的模型,无法在诊断中实行推理。

此外, M. Sachenbacher 等提出了依赖于任务的定量抽象方法<sup>[22]</sup>,基于原有的模型对实际的系统描述过细的问题,针对现有状态的观察,以及诊断任务,进行定量抽象。我国的学者如姜云飞、欧阳丹彤等<sup>[23-29]</sup>,也都做了大量研究,在系统参量的约束问题简化诊断方面有了较大的成果。

基于模型的故障诊断,已应用于很多不同的领域,如电路故障查找系统、医学诊断系统,以及汽车故障诊断,然而,在我国的水电机组故障诊断中,应用还较少,除李书明<sup>[21]</sup>提出了基于 BOND 图的建模以及把有限状态机来进行历程重构方法外,还很少看到实际意义上的基于水电机组系统结构和功能结构模型的故障诊断的相关文献。

## 3 两类诊断方法的比较

(1) 智能诊断是依赖知识的系统,而基于经验的诊断仅仅使用了专家的知识缺乏对系统结构描述的知识。这些知识,在某些诊断中占有十分重要的

地位。在缺乏这些知识的情况下,无论我们对基于经验的诊断系统做何种改进都不会对诊断系统的质量有显著的提高。

(2) 基于经验的诊断类似于中医的诊断,基于模型的诊断类似于西医的诊断<sup>[30]</sup>。对于基于经验的诊断,特别是对医学诊断系统来说,其诊断的一个重要目的是为诊断的对象病人开出药方,病人在服用了开出的药方之后,改善了生理的运行机理,恢复了健康。而对于电子、电器、软件产品来说,这种诊断的思路是不适用的。对电子、电器产品来说诊断的目的是找出有毛病的元件然后更换这些元件,使系统恢复正常工作。这类诊断需要大量的关于系统结构的知识,而模型就是对系统结构性知识的描述。

(3) 当前电子、电器、软件等产品的更新换代步伐非常快,这类产品的生命周期一般都很短。而基于经验的诊断主要依赖于专家知识的形成、总结和积累,需要一个较长的过程。等到专家知识积累起来,再依据这些知识研制出诊断系统,它所要诊断的产品可能已经被淘汰了,或者已经过时了,而对基于模型的诊断而言只要有了系统的设计,就可以从设计抽取出现系统的模型,把系统的模型嵌入到诊断系统中,就可以形成对新产品的诊断系统。于是,在新产品推向市场的同时,产品的诊断软件系统就可以同时开发并投入使用了。

(4) 基于模型的诊断依据待诊断系统的结构知识,其诊断结果是指出那些功能上有问题的元件,对系统故障能给出合理的解释,有利于系统的修复。

## 4 结 语

从水轮发电机组的简单介绍来看,这是一个较为复杂的系统<sup>[31]</sup>,由各个子系统组合而成,这种组合是多层次的,在子系统内,层次之间的联系可能是不确定的,在功能上系统的输入与输出之间,存在着由构造所决定的一般并非严格的定量的或逻辑的因果关系,因而其故障与征兆之间不存在一一对应的简单关系,使故障诊断问题复杂化。因而其故障具有层次性、传播性、相关性、放射性、延时性、不确定性。

相对于基于经验的诊断,基于模型的诊断具有较多的优点,这是我们想要提高诊断系统质量时,必须认真考虑的一种途径。

## 参考文献:

- [1] 王海. 水轮发电机组状态检修技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [2] 王道平, 马少平. 故障诊断系统中深浅知识集成表示方法的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2001, 22(9): 1025-1028.

- [3] 闫志强. 随动系统智能故障诊断与仿真综述[J]. 机电工程技术, 2005, 34(11): 46-50.
- [4] 刘利娜, 韩凤琴, 张双全, 等. 模糊理论在水轮发电机组故障诊断的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(1): 20-24.
- [5] 何勇, 方红芳. 模糊诊断技术在旋转机械设备故障诊断中的应用[J]. 中国纺织大学学报, 1998, 24(3): 41-45.
- [6] 张培先, 董泽, 刘吉臻. 智能故障诊断技术的发展及应用[J]. 山西电力, 2001, (3): 57-59.
- [7] 孙培峰. 基于 CBR 的水利工程机械智能化故障诊断技术研究[J]. 机械与电子, 2008 (10): 38-40
- [8] 梁武科, 赵道利, 王荣荣, 等. 水电机组振动故障的粗糙集-神经网络诊断方法 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 35 (7): 223-226.
- [9] 周庆敏, 李永生, 殷展波, 等. 基于粗糙集理论的故障诊断规则获取方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2004, 24(1): 73-76.
- [10] 王国利, 郝艳梅, 李彦明. 油中典型局部放电模型放电波形特征参数的提取[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 34-37.
- [11] 张文炬, 苏清祖. 基于小波分析的多通道信息融合技术的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22(2): 102-106.
- [12] 叶昊, 王桂增, 方崇智, 张永光. 一种基于小波变换的导弹运输车辆故障诊断方法[J]. 自动化学报, 1998, 24(3): 301-306.
- [13] 周祥平, 赵炳全. 利用遗传算法的核电厂故障诊断方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(2): 47-50.
- [14] 李旭, 徐心和. 遗传算法在故障诊断专家系统中的应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(4): 377-378.
- [15] 吴令培. 智能故障诊断技术的发展和展望[J]. 振动、测试与诊断, 1999, 19(2): 79-86.
- [16] Reiter R. A theory of diagnosis from first principles [J]. Artificial Intelligence, 1987, 32(1): 57-95
- [17] Console L, Torasso P. A spectrum of logical definitions of model-based Diagnosis[J]. Morgan Kaufmann. San Mateo. CA. 1992, 78-87.
- [18] Chittaro L, Ranan R. Hierarchical model-based diagnosis based on structural abstraction [J]. Artificial Intelligence. 2004, 155: 147-182.
- [19] Baronni P, Lamperti G, Pligiano P, et al. Diagnosis of large active systems[J]. Artificial intelligence. 1999, 110: 135-183.
- [20] Struss P. Fundamentals of model-based diagnosis of dynamic systems[J]. In: proc, DCAI-97, Nagoya, Japan, 1997, 140-485.
- [21] 李书明. 水力发电机组故障诊断方法研究 [D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [22] Sachenbacher M. Struss P. Task-dependent qualitative domain abstraction[J]. Artificial Intelligence, 2005. 162: 121-143.
- [23] 欧阳丹彤, 姜云飞. 广义因果理论的基于模型的诊断[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(1): 31-35.
- [24] 陈荣, 姜云飞. 含约束的基于模型的诊断系统[J]. 计算机学报, 2001, 24(2): 127-135.
- [25] 栾尚敏, 戴国忠. 利用结构信息的故障诊断方法[J]. 计算机学报, 2005, 28(5): 801-808.
- [26] 李占山, 姜云飞, 王涛. 基于模型的诊断问题分解及其算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(9): 1177-1182.

(下转第 79 页)



表 4 发电机摆度、振动数据								$\mu\text{m}$	
方向	上导水下导水		上机架水 平摆动	下机架振动		定子机座 水平振动	定子铁 心振动		
	平摆度	平摆度		水平	垂直			水平	垂直
X 方向	164	203	28.6	51.9	64.1	86	—	—	—
Y 方向	150	195	19.2	48.4	52.4	111	—	—	—
位置	I	—	—	—	—	—	16	15.5	—
	II	—	—	—	—	—	10.9	9.05	—
	III	—	—	—	—	—	9.84	17.9	—

规律见图 2,但随负荷的增加没有明显变化。定子机座水平振动主要振动分量为 1 倍、2 倍、3 倍转频下幅值较高,且随定子电压的上升而增大。其中,2 倍转频振动分量最大,在额定电压下超过 30  $\mu\text{m}$ 。通过两次机组小修检查,并未发现定子机座及铁心异常情况,该振动幅值、频率特性亦没有明显变化。初步可以判断未造成器质性损害,需要进一步研究该振动产生原因。GB/T 8564—2003 要求立式水轮发电机定子机座水平振动不应超过 30  $\mu\text{m}$ ,但并未说明所适用定子高度。对于定子铁心高度达 3.3 m 的发电机是否适用还需要进一步商榷。

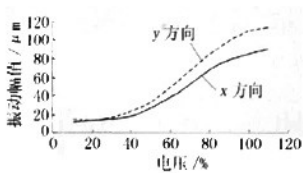


图 2 1 号发电机定子机座水平振动与电压曲线

2.4 电气性能情况

发电机在空载工况和负载工况下的励磁参数见表 5,空载、负载情况下的励磁电流、励磁电压均小于设计值。

龙滩水电站 1 号发电机在投产之初按规范要求进行了短路特性和空载特性试验,额定定子电流时励磁电流为 1 758 A,额定定子电压时励磁电流为 1 909 A,发电机同步电抗为 0.921 (标么值),短路比为 1.086,略小于合同要求的 1.11。

在忽略定子电阻的情况下,根据设计参数(同步电抗除外)计算稳定运行极限<sup>[1]</sup>(数据见表 6)。从计算结果可看出,发电机仍有较高的静态稳定性能,

表 5 电磁性能数据				
项目	空载励磁		额定励磁	
	电流/A	电压/V	电压/A	电流/V
设计值	1 979	190.7	3 439.8	455.9
实际值	1 909	183.6	3 113	340

注:因厂用电电压限制,运行值为有功 683 MW、无功 180 MW 下的实测值。

表 6 发电机稳定性分析数据					
参数	相位角 $\psi/(^{\circ})$	励磁电势 $E^*$ (标么值)	功率角 $\theta/(^{\circ})$	极限功率 $P^*_{max}$ (标么值)	静态过载 倍数 $k_m$
数值	51.66	1.622	76.69	1.792	1.99

过载能力较强。

3 结 论

(1) 龙滩水电站 1 号发电机投产至今一直安全稳定运行,各部通风、温升状况良好,各部轴承运行瓦温分布均匀稳定,摆度、振动情况总体良好。发电机电气性能优良,各电气指标满足技术要求,静态稳定极限及过载能力余度较大。

(2) 龙滩水电站水轮发电机的选型、设计、制造所采取的措施得当,解决了选用全空冷发电机的技术难点,为安全稳定运行提供了保障。

(3) 尽管定子机座振动较大,但尚未发现明显损害,需要进一步研究分析。对于巨型发电机定子机座的振动考核标准,建议考虑机组的具体结构特点。

(4) 发电机在理论状态下有较好的静态稳定性和过载能力,但需要进行实际参数测试,分析实际情况,需要进一步分析发电机的其他电气性能和效率性能。

(5) 龙滩水电站水轮发电机运行总体安全稳定,各方面性能满足要求,证明了巨型水轮发电机采用全空冷技术是可行的,不仅减少了辅助设备,降低了制造、安装、运行的难度,提高了可靠性能,降低了工程造价,对水电行业巨型水轮发电机的选型、设计、制造也有成功的借鉴意义,为水电行业的发展起到了巨大的促进作用。

参考文献:

[1] 许实章.电机学[M].北京:机械工业出版社,1994.  
(责任编辑 刘书秋)

(上接第 76 页)

[27] 姜云飞,李占山.基于模型诊断的元件替换与替换测试[J].计算机学报,2001,24(6):666-672.  
[28] 李占山,姜云飞,王涛.基于模型诊断问题的分解及其算法[J].计算机学报,2003,26(9):1171-1176.  
[29] 欧阳丹彤,姜云飞.基于一致性的中心诊断及中心溯因诊断[J].计算机学报,1986,(6):540-545.  
[30] 姜云飞,范昭斌.关于智能诊断中模型的构建和应用[J].计算机科学,2006,33(2):193-196.  
[31] 杨苹,吴捷.复杂系统故障诊断综述[J].测控技术,1998,17(2):8-10.  
(责任编辑 刘书秋)