

多智能体的分布式智能故障诊断

蒋伟进¹, 许宇胜², 孙星明¹, 许宇晖¹

(1. 湖南工业大学 计算机系, 湖南 株洲 412008; 2. 北京工业大学 机电学院, 北京 100022)

摘要: 基于分布式人工智能的思想, 将多 Agent 技术引入复杂故障诊断领域, 分析了基于 MAS 的分布式智能故障诊断方法和过程; 讨论了基于模式聚类的故障求解机制及对诊断问题任务辨识、分解; 研究了多 Agent 宏观上的约束和关联; 设计了应用 Agent 工作状态的表达机制; 确定了应用 Agent 间的工作状态影响关系及多 Agent 间的交互、协作和通讯; 构建了多 Agent 模糊关联模型; 给出了多 Agent 诊断系统局部诊断决策与全局诊断决策的集成描述结构; 建立了一种分布式 Agent 诊断系统结构及其原型系统. 在某电力企业安全监控系统的应用中, 取得了与专家相似的诊断结果, 显著提高了企业的安全生产效率.

关键词: 多 Agent 系统(MAS); 智能故障诊断; 任务分解; 互操作; 面向 Agent 编程(AOP)

中图分类号: TP277, TP206

文献标识码: A

Fault diagnosis model distributed intelligence based on multi-agent system

JIANG Wei-jin¹, XU Yu-sheng², SUN Xin-ming¹, XU Yu-hui¹

(1. Department of Computer, Hunan University of Industry, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2. School of Mechanical Engineering and Applied Electronics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Modern malfunction diagnosis is a dynamic, distributed, flexible, real-time and uncertain complicated system. The paper tried to introduce multi-agent technology to the complicated malfunction diagnosis. Based on the distributed artificial intelligence, the paper analyzed MAS based on the distributed intelligent malfunction diagnosis method and process, and discussed pattern-clustering based malfunction solution-finding mechanism and the identification and decomposing of a diagnosis task. It also studied the restriction and relationship of multi-agent in the sense of macroscopic, and designed the expression mechanism for applied agent's work status. Else it ascertained the influence and the communication and the interaction among applied agents, constructed a multi-agent fuzzy related model. The paper presented an integrated descriptive structure of local diagnosis decision and global diagnosis decision, established a distributed agent diagnosis system structure and its prototype model system too. When the model was applied to the power enterprise's security monitor system, the result was similar to expert system. The model overcame many deficiencies of precious monitor diagnosis system, enhanced the efficiency of the enterprise security running. Compared with the traditional diagnosis method, the proposed model has the special advantage in the distributed domain.

Key words: multi-agent system (MAS); intelligence fault diagnosis; task decompose; mutual operation; agent-oriented programming

1 引言(Introduction)

在工业生产和控制领域, 各种智能辅助方法日益得到研究和应用, 而以多种智能手段集成解决控制领域的相关问题已经成为研究重点, 其中分布式人工智能(Distributed artificial intelligence, DAI)技术作为一种建立在分布式控制结构基础上的智能手段的集成方法, 以其特有的优势正逐渐被人们重视^[1~5]. 起源于分布式人工智能的多 Agent 系统

(Multi-agent system, MAS), 是近年来飞速发展的技术, 它是为解决大规模问题的智能求解而发展起来的, 涉及并行计算、分布式系统、知识工程和专家系统等许多领域, 是传统对象技术的发展和飞跃. Agent 通过对问题域的描述、分解和分配, 构成分散的、面向特定问题相对简单的子系统, 并协调各系统并行和相互协作地进行问题求解, 其思想十分适合大规模诊断问题的智能求解. 对于一个动态的、分布

的、实时的和不确定的复杂系统,多 Agent 系统在故障的分辨、诊断和控制方面表现出了极大的优势.多个 Agent 通过与所处环境、人以及个体之间进行交互、协调与合作表现出一定的社会智能,从而解决一些传统 AI (Artificial intelligence) 无法解决的大规模复杂的问题.因此, MAS 技术已被描述为设计构建分布式复杂工程应用系统的下一代模型,有关智能 Agent 的概念和方法论正在成为信息科学最核心的内容之一,目前已成为 AI 领域研究的主流方向.

本文将多 Agent 技术引入复杂故障诊断领域,研究基于 MAS 的分布式故障智能诊断模型,设计了一种 Agent 诊断系统结构及其原型系统,对诊断问题任务辨识、分解、各 Agent 的内部诊断机制、多 Agent 间的交互、协作,以及诊断决策问题进行了深入研究.

2 Agent 结构与知识描述 (Describing of the agent construction and knowledge)

2.1 Agent 结构定义 (Definition of agent construction)

Agent 是指能在动态的多 Agent 领域采取灵活、自治活动的计算机实体,是具有实时处理多维信息、相互作用和有效传递信念、承诺、意图等智能的自治的软件实体.它具有智能性、自治性、灵活性、开放性、适应性、协作性和推理机制等特点,能自主工作和具有语义互操作及协作交互能力的智能实体,并且具有数据和模型处理能力,为此,我们采用下面结构来描述.其内部行为表现为:通信管理器接收外部环境的信息,由推理机根据这些信息和 Agent 状态,进行分析和理解,形成与其它 Agent 相一致的协同工作方式,并按该方式及自身能力(知识水平等),执行相关的动作,形成 Agent 新的状态,由此而进一步引起新的 Agent 推理活动. Agent 的活动行为是主动进行的,它的推理机每隔一时间片都要检测通信状态和自身状态,以确定其推理活动的趋势.基于上述思想,为完成控制领域实时系统的监控与诊断功能,本文构建的智能 Agent 是具有领域知识、特定问题求解能力的 Agent,其内部结构用统一模式来描述,如图 1 所示.

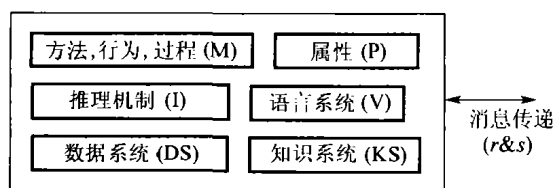


图 1 智能 Agent 的框架结构

Fig. 1 Frame structure of intelligence agent

2.2 领域知识的表示 (Expression of field knowledge)

Agent 具有领域专业知识 (KE) 是其重要内容, KE 既包含了问题求解的模型群, 又包含了基于经验的描述性专家知识. 考虑到 KE 的分布性和求解问题的复杂性, 基于知识语言 (KL) 的模型描述包括描述模型名、所属模型库、模型接口、引用的子模型、动态链接的 OBJ 文件和 LIB 文件等.

由于某些复杂问题的非结构化特性, 需要采用知识表达方式来描述其问题求解的策略, 采用基于规则的方法来描述问题求解策略, 也用语言 V 来描述经验类知识.

诊断 Agent 中经验类知识描述的 BNF:

〈领域经验知识〉:: = 〈领域经验知识头〉〈领域经验知识体〉

〈领域经验知识头〉:: = 〈领域经验知识名〉[〈经验知识代码〉][〈知识库名〉][〈说明表〉]

〈领域经验知识体〉:: = IF {〈前提条件〉} 〈运算符〉 + THEN 〈结论〉

〈前提条件〉:: = 项、变量或用户定义的表达式名

〈运算符〉:: = AND | OR

〈结论〉:: = 表达式.

3 多 Agent 诊断系统模型 (Model of the diagnostic system of multi-agents)

故障诊断模型是对所研究的故障诊断对象本质特性的描述, 诊断系统的性能直接取决于采用的诊断模型和方法. 智能集成故障诊断模型研究是以复杂过程为对象, 充分运用智能化方法的优势, 从而有效地描述生产过程中故障之间的复杂关系. 本文构建的模型系统包括数据采集子系统(数据获取与信息感知 Agent)、诊断任务分解子系统、任务控制子系统、诊断 Agent 子系统(信息处理 Agent)、用户接口子系统(界面 Agent)以及通讯接口子系统^[6~8], 如图 2 所示.

数据采集子系统利用传感器和 A/D 数据采集卡, 采集诊断对象的状态数据并存储在数据库中, 供诊断 Agent 子系统读取. 诊断 Agent 子系统实现各种具体的分析和诊断算法, 包含 FFT Agent、小波分析 Agent、时序模型 Agent 等分析方法以及神经网络 Agent、遗传算法 Agent、专家系统 Agent 等智能诊断模型. 诊断任务分解子系统将诊断对象的全局诊断任务按其功能和结构有效地分解为局部的诊断子任务, 形成诊断任务集. 任务控制子系统负责诊断任务的分配、调度以及控制, 诊断 Agent 子系统接受任务控制子系统的诊断请求, 根据诊断请求从数据库读

取相应诊断对象的状态数据,应用合适的分析诊断方法完成相应的诊断子任务,并将诊断结果返回给任务控制子系统.用户接口子系统提供人机交互界面,将用户的诊断任务及其分解与控制策略输入系统,并将系统的诊断结果反馈给用户,供用户参考,以便辅助用户做出最终决策.

系统的描述为:Agent name service(ANS)是所有 Agent 进行信息交换的中心枢纽,它由 Router 和 Facilitator 组成.Router 的作用是负责 Agent 间消息的发送,把消息准确地发送到目的 Agent.Facilitator 主要负责解释 Agent 间的消息.Agent 在工作前要注册到 ANS,然后通过 ANS 与其他 Agent 进行通讯.同时,ANS 支持 Agent 的动态加入、动态地址改变.在消息处理机制方面,ANS 可采用消息队列方式,把消息存入文件或数据库,保证消息的成功发送和系统的鲁棒性.如果系统的规模很大,可以采用多 ANS 的方式确保系统的性能.这种 ANS 设计的优点在于:1) Agent 不需要记住其他 Agent 的实际地址;2) 系统的复杂行为易于控制;3) 适合于企业 Intranet 环境.

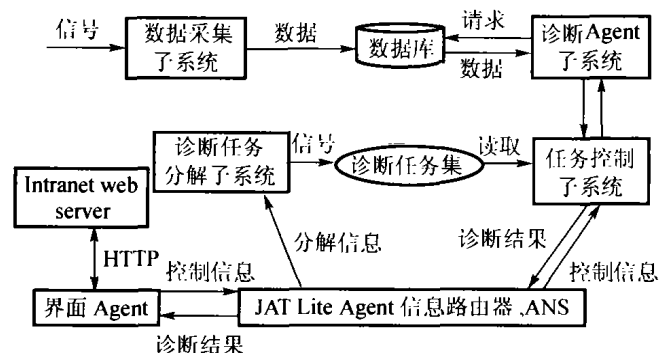


图2 智能故障诊断多 Agent 系统模型结构

Fig. 2 Intelligence fault diagnosis model structure of MAS

4 诊断问题分布式任务求解与控制策略 (Solution and the strategy of control of diagnosis)

在故障诊断领域应用多 Agent 系统理论设计构建分布式智能诊断多 Agent 系统,其关键是诊断任务的合理分解与控制,以及诊断 Agent 之间的合作与协调问题.

4.1 故障诊断问题的任务分解(Mission decomposition of the problem of failure diagnosis)

对应用领域问题进行任务分解,是分布式智能求解的第一步,也是关键的、决定系统有效性的一步.分布式任务分解主要有4种方法:1) 根据应用系统空间分布规律的分解方法;2) 基于应用系统子系统功能的分解方法;3) 根据系统输入类型的

分解方法;4) 根据系统输出类型的分解方法.

诊断问题的任务分解原则是诊断子任务目标明确,并且使子任务间的耦合尽量少,以简化完成子任务的诊断 Agent 之间的协作和通信.在高层(粗粒度上)多采用结构分解,底层(细粒度上)多采用故障分解.这种综合分解可以一直进行到设备某个基本结构的一个明确的故障问题.这种目标明确的诊断子任务称为诊断活动.诊断活动与一般的诊断子任务的区分是诊断活动包含明确的故障诊断操作.对诊断领域问题进行分布式任务分解,将得到一个层次结构清晰的诊断任务树.

4.2 故障诊断任务控制策略(Strategy of control of diagnosis)

通过分解的诊断任务树中可知,由于不存在耦合关系,同级的诊断子任务之间是并行的,而诊断父任务必须在所有的诊断子任务都完成后才能继续执行.因此,采用并行和串行两种基本的诊断任务控制策略.另外,还可以采用并行与串行相结合的混合任务控制策略.

1) 并行任务控制策略.并行控制策略中,每个诊断(子)任务具有一个线程,且由父任务线程启动,父任务线程必须等待其所有的子任务线程执行完毕后才能继续执行.因此,诊断系统从诊断任务树的顶端开始,先启动诊断全局任务线程,再根据其子任务情况启动子任务线程,并等待子任务结束;子任务线程再启动其下层的子任务线程,这样一直进行到诊断任务树中位于最底层的诊断活动,当诊断任务树中的所有子任务均结束后,诊断全局任务完成.并行任务控制策略的优点是子任务完全并行、执行速度快,但由于每个(子)任务拥有一个线程,容易造成诊断系统的线程过多,消耗过多的系统存储(内存)资源.

2) 串行任务控制策略.串行任务控制策略是诊断系统首先从诊断任务树中的全局任务开始,采用深度优先原则来遍历执行每个诊断(子)任务.在遍历所有诊断(子)任务的全过程中,始终采用单一线程的方式.串行任务控制策略的优点是(子)任务的执行路线简单、思路比较清晰、系统存储资源耗费较少,但所有的诊断(子)任务串行运行,执行速度慢.

3) 混合任务控制策略.混合任务控制策略是诊断系统在诊断(子)任务的大粒度上采用并行控制策略,在细粒度上采用串行控制策略.这样可以综合利用并行和串行控制策略各自的优点,使诊断系统在执行速度和存储资源之间取得合理的平衡.

5 Agent 之间的协作交互控制 (Alternate and cooperate controlling among the diagnosis agents)

当某故障问题的诊断可能或必须通过多个诊断 Agent 协作完成时, 需要考虑多个诊断 Agent 间的协调与合作问题^[9,10]. 对于某诊断任务, 各个诊断 Agent 具有不同的性能, 因此须选择耗费系统资源最少、诊断效果最好的诊断 Agent 来完成诊断任务. 这就是诊断 Agent 的协调问题. 量化诊断 Agent 诊断性能是解决 Agent 间协调问题的关键. 另外, 对于复杂的故障诊断问题须基于多 Agent 的思想, 将其分组并运用多种故障诊断方法协同完成, 这就是多诊断 Agent 间的使用问题. 为了完成共同诊断任务而合作的诊断 Agent 的集体形成一个诊断 Agent 联盟. 这要求每个 Agent 对其它 Agent 的功能、效率有较详细的了解. 因此, 在设计时要把其它 Agent 的资料放在 Agent 的数据库内, 并且 Agent 自身能够根据实际情况对数据库进行修改, 根据这些资料选择合作对象.

5.1 协作交互算法描述 (Describing of cooperate and alternate)

协作交互语言描述了 Agent 的行为, 包括个体行为和协作行为. 语言体系 V 中具有表达 Agent 间协作交互行动的谓词, 它采用函数传递方式, 实现各 Agent 间的信息交换. 以下是多 Agent 系统问题求解过程中协作交互算法.

设 A 为所有 Agent 的集合, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 则 A_i, A_j 表示 A 的不同的子集, $A_i, A_j \in A$.

Step 1 初始化, A 状态为 idle;

Step 2 A_i 接收用户输入的求解问题;

Step 3 A_i 根据自身的专业知识和能力, 进行问题求解, 状态改为 active;

Step 4 若 A_i 不能自身解决或问题太大时, 需其它 Agent 帮助解决, 转 Step 6;

Step 5 若 A_i 能自身解决问题, 则自身求解完成并结束, 状态改为 idle, 转 Step 11;

Step 6 A_i 寻找适合求解该问题的 A_j , 并向 A_j 发送求解问题的消息;

Step 7 A_j 根据自身状态 (idle), 接收任务;

Step 8 A_j 根据自身的专业知识和能力, 进行问题求解, 状态改为 active;

Step 9 A_j 若不能自身解决或问题太大时, 需其它 Agent 帮助解决, 转 Step 6;

Step 10 若 A_j 能自身解决问题, 则求解完成并

结果传给 A_i , 状态改为 idle, 转 Step 2;

Step 11 当所有参与行动的 Agent 状态为 idle 时, 问题求解完成; 否则局部完成, 等待;

Step 12 结束.

5.2 面向 Agent 的通讯机制 (System of communication mechanism of diagnosis face to the agent)

面向 Agent 的软件机制是设计各应用领域的多 Agent 的软件技术基础, 包括面向 Agent 的分布式软件协议 (CORBA, COM/DCOM), Agent 间的通讯语言 KQML、面向 Agent 的开发环境平台以及面向 Agent 的程序设计 (AOP) 等. 本故障诊断系统是基于 CORBA 结构来实现诊断 Agent 间的通讯.

CORBA 的平台无关性和语言无关性对分布式智能诊断系统研制和功能实现提供了很大方便, 因为分布式故障诊断系统运行时的数据传输量可能很大, 且各子系统很可能分布在异种平台上, 不考虑操作系统和编程语言的差异将大大减轻系统开发的工作量. 远程协同诊断的提出, 更要求各终端级诊断系统具有充分的互访和互操作性.

诊断 Agent 间要相互协作就需要进行通讯. KQML (Knowledge query and manipulation language) 是用来实现 MAS 中 Agents 交互的消息格式和消息处理协议. 它使得 Agent 能够和其他的 Agent 以及 Agent 所运行的环境进行知识和信息的交换. 它提供了一套标准的 Agent 通讯原语, 从而使得使用这种语言的 Agent 之间都可以进行交流和共享信息. KQML 定义了一种 Agent 之间传递信息的标准语法和动作. 此外, KQML 与 Agent 间的具体通讯方式 (如采用的协议和网络的具体形式) 无关.

6 应用 (Application)

在一个电力安全监控决策支持系统中, 作者开发了基于多 Agent 的智能监控与诊断系统. 现代电力生产系统和设备的物理结构和功能特征使诊断问题日益呈现出一种分布化的趋向, 相应地需要建立分布式诊断结构, 以提高问题求解的效率、可靠性, 使建造的系统更适合领域问题特征, 并具有良好的开放性. 作为变电站监控系统, 应具有以下功能: 1) 能用各种图形画面来从不同角度实时反映变电站的运行状态; 2) 能用各种数据表格实时地反映各条线路、主变、母线上的电压、电流、有功、无功、温度等各种电量和非电量的实时值; 3) 能及时地发现任何异常现象并以多种形式做出相应的报警; 4) 能分类记录和查阅各种历史记录、历史数据等;

5)能及时准确地对被选中的设备发出控制命令;6)能及时诊断和排除故障;7)由于电力系统的特殊性,要求监控系统具有很高的安全性与稳定性。

鉴于变电站运行情况复杂,所以该系统规模较大,在收集 1000 多例变电站故障的基础上,对常见变电站故障总结了 800 余个案例,编制规则达到 1500 条以上,参量达到 2000 个以上,以案例库、规则库和模型库的形式放在统一的知识库中。系统以在线方式运行,能在短时间内完成推理过程,给出故障处理决策意见。

该变电站安全监控决策支持系统的结构如图 3 所示。系统主要由通讯接口 Agent、数据获取 Agent、故障感知 Agent、故障诊断 Agent、决策形成 Agent、界面 Agent 和 JATLite Agent 信息路由器等多个 Agent 系统构成。在线实时数据由数据采集与监控系统提供;故障诊断 Agent 的知识库建立和维护采用了 C++ Builder 开发平台,把领域专家的知识转化为符号表示,存入知识库中。知识库当中保存认知对象的信息以及它们之间的关系。Agent 可以通过访问私有的或者共有的知识库来获取所需要的知识,从而做出决策判断。

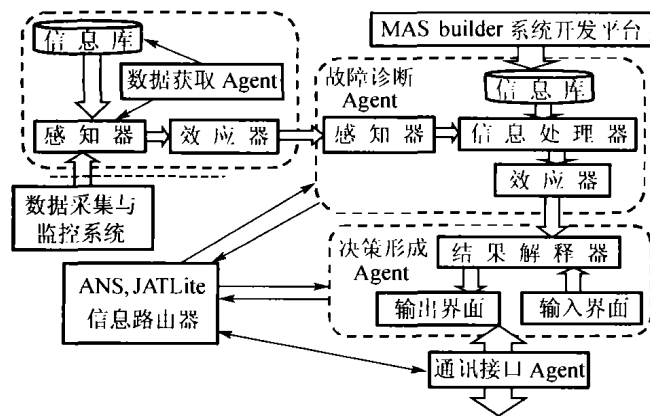


图 3 基于新模型的电力安全监控与诊断决策系统结构

Fig. 3 Electronics power safety monitor & control and diagnosis decision system stucture based on the new model

1)故障感知 Agent 故障感知 Agent 的作用是自动感知变电站的开关变位、摇控、保护等信息,捕捉异常信息并传递给故障诊断 Agent。它对应于模型中的信息感知 Agent。它由事件感知数据处理和通信控制三个模块组成事件感知模块与环境直接交互,感知并自动获取变电站动态信息及用户信息;数据处理模块接收来自事件感知模块的信息,经过滤处理为特征信号;通信控制模块负责与故障诊断 Agent 的数据交换。故障感知 Agent 以实时方式运行,在没

有故障时处于休眠状态。其中的感知器承担监测 4 类信息的作用,当事故或故障发生时,立即启动效应器并设置等待时间以保证所有相关故障信息都能到位。当等待时间为零时就将异常信息传递给故障诊断 Agent。

2)故障诊断 Agent。故障诊断 Agent 的作用是接收由故障感知 Agent 传递来的故障信息,然后调用相应的知识,分析故障成因,作出变电站部位发生故障的预测,并从运行角度、检修角度等各方面准确判断故障具体的机理,最终生成故障诊断结果。它对应于模型中的信息处理 Agent。在初始化时它读入知识库中的相关故障诊断信息,保存在内存中;其中的感知器在接收到故障信息以后,激活信息处理器。信息处理器由此开始推理,根据开关变位信息及变电站主接线图获知故障点位置,然后提取知识库相关知识进行诊断,形成故障诊断结果,最后经由效应器将诊断结果传递到结论形成 Agent。信息处理器诊断完以后又重新进入休眠状态。

在故障诊断时,为了防止新产生的故障不能被迅速处理的情况,故障诊断 Agent 采取了后来先分析的方法。即感知器在获知新的故障信息后,判断信息处理器是否处在休眠状态;如果不是,则强行将信息处理器挂起,并保存先前的故障信息,待诊断完当前的故障信息以后再回到先前的故障处,获取先前的故障信息并进行诊断。故障诊断 Agent 为移动 Agent,当遇到新情况或知识库与实例库中没有覆盖到的故障而在本地不能诊断时,可在上移动到其他区域与相应的协作诊断,以吸取目前最权威的专家知识,从而使系统组成物理上分布、逻辑上统一的协同系统,为本地和异地故障诊断提供全方位的专家指导。

监控与诊断决策模型中的未来状态预测算法 EP 如下(用专业知识语言(KEL)描述)。

Model(“EP”)

{Description}

1)决策者对未来状况的预测

2)引用算法公式 $EP = Count(i, j, x, p)$

}

Keywords {“EP”, “未来状况”}

Submode {“Count”, “/mbms/submb”} // * EP

是一个复合模型

Interface

function float EP(i, j, x, p, n)

long i : INOUT; long j : IN; float $x[i, j]$;

long n : IN; float $p[j]$: IN;

```
Linkage{"mbms/mb/EP.o";"mbms/submb/
Count.o";"mbms/mb/libm.a"}
End
```

3) 决策形成 Agent. 决策形成 Agent 负责诊断结论的形成和诊断结论的图形显示,同时还根据用户的输入对系统的运行方式进行调整.它对应于模型中的用户界面 Agent^[10].该 Agent 具有一定的自学习能力,能够根据不同类别用户的操作习惯和提供内容提供一定程度上的指导性操作风格,使得用户的操作效率有了很大的提高,而这一点对于时间敏感性很高的变电站故障处理具有很重要的意义.

以下给出两个诊断实例,用改进的混合遗传算法求解.遗传算法参数为:种群大小 = 28,交叉率 = 0.6,染色体长度 = 8,变异率 = 0.1.

1) 变电站 5[#] 主变,气相色谱检测如下 ($\times 10^{-6}$): H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO , CO_2 的气相色谱分别为 2.1, 80.22, 32.1, 140, 1.0, 128, 1580.在进行的电气实验中测得三相不平衡为 2.4%,接地电流为 0.15 A.个体最优适应度在第 20 代时为最大,适应度为 0.016,以后不再上升,此时染色体编码为 1000010,表明故障为分接开关及引线故障兼磁路故障.这台变压器的实际吊芯结果铁芯多点接地并 A 相分接开关烧毛.实际情况与诊断结果一致.

2) 变电站 3[#] 高备变,气相色谱检测如下 ($\times 10^{-6}$): H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO , CO_2 的气相色谱分别为 29, 26.3, 1.8, 27, 82.4, 522.9, 398.3.在进行的电气实验中测得三相不平衡为 2.5%,接地电流为 0.15 A.个体最优适应度在第 6 代时为最大,适应度为 0.003286,以后不再上升,此时染色体编码为 0000001,表明故障为绕组导线故障.这台变压器的实际检查结果低压绕组明显变形且绕组严重受损.实际情况与诊断结果一致.

7 结论(Conclusion)

在传统智能诊断系统的基础上,结合 Agent 技术,提出了一种基于多 Agent 系统的分布式智能诊断决策模型,在一电力企业变电站安全支持系统的应用中,该模型能快速、准确地进行故障成因分析,给出合理的、建设性的决策意见,取得了与专家相似的诊断结果;克服了变电站以往诊断决策系统的很

多不足,较好地实现了对变电站各种仪器设备的监控,提高了变电站的安全运行效率.与传统的智能故障诊断系统相比,本系统具有集体智能性、可扩充性和容错性、支持异构环境集成和资源可重用等优点.

参考文献(References):

- [1] BUI T, LEE J. An agent-based framework for building decision support systems [J]. *Decision Support System*, 1999, 25(6): 225 - 237.
- [2] GUESOUM Z, PIERRE J. From active objects to autonomous agents [J]. *IEEE Concurrency*, 1999, 7(3): 68 - 75.
- [3] 张汝波, 顾国昌, 刘照德, 等. 强化学习理论、算法及应用 [J]. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 637 - 642.
(ZHANG Rubo, GU Guochang, LIU Zhao-de, et al. Reinforcement learning theory, algorithms and its application [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 637 - 642.)
- [4] WOOLDBRIDGE M J. Agent-based software engineering [J]. *IEEE Trans on Software Engineering*, 1997, 144(1): 26 - 27.
- [5] WOOLDBRIDGE M J, JENNINGS N R. Intelligent agents: theory and practice [J]. *Knowledge Engineering Review*, 1995, 10(2): 115 - 152.
- [6] ARESHA K A, OZCAN F, ROSS R. Impact: a platform for collaborating agents [J]. *IEEE Intelligent Systems*, 1999, 14(2): 64 - 72.
- [7] 刘贵全, 陈小平, 范焱, 等. 多主体协作系统的一种形式模型 [J]. 计算机学报, 2001, 24(5): 529 - 535.
(LIU Guiquan, CHEN Xiaoping, FAN Yan, et al. A formal model of multi-agent cooperative systems [J]. *J of Computer*, 2001, 24(5): 529 - 535.)
- [8] SALLANS B. *Reinforcement learning for factored Markov decision processes* [D]. Toronto: University in Toronto, 2002.
- [9] 蒋伟进. 基于 GA 和 MAS 的分布式任务调度算法研究与实现 [J]. 计算机科学, 2002, 29(9): 443 - 447.
(JIANG Weijin. Research and implementation of distributed MSP algorithm based on GA & MAS [J]. *Computer Science*, 2002, 29(9): 443 - 447.)
- [10] 蒋伟进. 基于 MA 和 BP 的虚拟企业动态建模及关键技术研究 [J]. 信息与控制, 2002, 31(4): 329 - 335.
(JIANG Weijin. Research on key technologies of virtual enterprise and dynamic modeling based on MA & BP [J]. *Information and Control*, 2002, 31(4): 329 - 335.)

作者简介:

蒋伟进 (1964 —), 男, 副教授, 高级工程师, 在国内外重要期刊及国际会议上发表论文 50 余篇, 主要研究方向: 计算智能、复杂系统建模与软件理论研究, E-mail: jwj3666@163.com;

许宇胜 (1976 —), 男, 博士生, 主要研究方向: 控制理论与应用;

孙星明 (1963 —), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 信息安全及软件理论;

许宇晖 (1969 —), 女, 讲师, 主要研究方向: 计算机应用.