

# 远程协同故障诊断综述及研究

刘建辉, 胡立红, 刘琼

(西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 远程协同故障诊断技术随着分布式计算、远程信息处理技术、经典故障诊断理论等的学科发展正在受到越来越多关注;但是系统的总结该技术的应用及研究并不多见。在给出远程协同诊断定义基础上,从诊断方法(技术)协同和协同诊断支持构架两个角度详细分析当前研究现状,并针对性地提出了一个通用远程协同诊断系统原型,给出了该原型的关键问题及其解决思路,包括远程协同诊断现场故障信息预处理、协同诊断中心的诊断任务分配及协作机制研究、远程诊断资源的结果融合。结论肯定了远程协同诊断的光明前景。

关键词: RCFD; 信息预处理; 诊断任务分配; 结果融合

中图分类号: TH17 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)20-0076-05

## 0 引言

故障诊断作为一门交叉学科,其方法多样且充满活力。表现之一就是故障诊断方法分类描述各异但又有一些共同点<sup>[1]</sup>。当前故障诊断方法的大体分类如图 1 所示。

故障诊断方法														
基于模型					非基于模型					协同诊断				
定量模型			定性模型		基于信号处理			基于人工智能		基于机理	信息融合	方法集成	协同支持	
等价空司	状态估计	参数估计	定性仿真	图模型	结构抽象	功能抽象	时域处理	频域处理	时频域处理					专家系统

图 1 故障诊断方法分类表

Fig 1 Classifying list of fault diagnosis methods

目前在故障诊断领域的研究中,对单个系统、零部件或者某个具体的故障现象的研究较多,对整机或涉及多个系统的综合故障的研究较少;对系统可测得定量信息利用的问题研究较多,对定性(不确定)信息利用的研究较少;信息(特别是多源混合信息)的综合利用研究较少;依靠单一智能技术的诊断系统多,协同智能技术的研究应用少。针对复杂系统(如大型工程机械)一种诊断方法是不可靠和有局限的,复杂系统的结构和功能的分散性、移动性、环境复杂性等则使得远程协同诊断成为必需且可行的。

定义 1: 远程协同故障诊断(RCFD)是在计算机学、移动计算技术和分布式人工智能等学科的综合基础上为在时空二维空间内任务关联的多个领域专家和技术人员提供一个计算机支持的开放协同诊断环境。它是一种可以跟踪诊断过程,同时对诊断结

果进行综合,使得能够进行快速有效故障诊断、指导设备维护的体系模式。其数学描述可用一个映射函数表示为  $RCFD = f(D, T)$ , 其中,  $D = [O_p, U_p, C_p, P_c]$ ,  $D$  为协同诊断过程,  $O_p$  为当前需要控制的诊断目标主体,  $U_p$  为当前参加远程协同诊断(监测、分析、决策等)的人员或 Agent,  $C_p$  为当前协同诊断受到的约束,  $P_c$  为当前进行的协同诊断子过程。  $T = T_{fusion} \cdot (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 。  $T$  为协同诊断任务, 一般是可分解的总诊断任务,  $T_{fusion}$  则是诊断任务的分配、执行原则, 及远程诊断资源的调配原则等控制策略,  $T_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为分解后的单个诊断子任务。

## 1 远程协同诊断技术国内外现状

80 年代中期, 美国军方相继在正在研制的新一代武器系统中实施了综合诊断研究计划, 如空军的 GMADS 计划、海军的 DSS 计划等。1991 年美国国防部正式颁发 ML - STD - 1814《综合诊断》标准可看作是协同诊断具体提出的前身<sup>[2]</sup>。华中科技大学何岭松、杨叔子简述了基于因特网的设备故障远程协作诊断技术的国内外研究现状和关键问题<sup>[3]</sup>。Rodden T. U. Borghoff 等都介绍了 CSCW 的发展背景、基本概念、分类、关键技术、应用领域和发展趋势<sup>[4,5]</sup>。具体在协同及远程协同诊断技术研究领域可从两个方面进行汇总:

1) 异构诊断方法(技术)协同。江苏理工大学施国洪基于复杂系统的设备故障诊断的要求, 按故障信息流动的方向将诊断过程分为实时监测层、故障诊断层及综合决策层, 根据不同诊断层次的特点赋予其不同的诊断方法, 并建造一种分布式多级黑

板诊断结构模型<sup>[6]</sup>。大连海事大学邱赤东介绍了一种针对船舶机电控制设备的智能在线远程故障协同诊断系统,利用自组织特征映射网络完成连续属性值的聚类量化,采用粗糙集理论解决诊断专家系统的决策规则推理;还引入了由航运指挥中心的远程网络会诊,与智能在线诊断系统一起为远洋船舶提供强有力的技术协同支持<sup>[7]</sup>。上海交通大学杨杰研究了流程工业中模糊控制和故障诊断的建模和网络综合集成;提出了基于人工神经网络和遗传算法的模糊控制建模方法,以及基于综合模型(人工神经网络、案例、规则、对象模型)的故障诊断的建模和推理<sup>[8]</sup>。清华大学方泽南提出了一种汽轮发电机组故障诊断模型-并行关联诊断模型(PRDM);PRDM将复杂问题分解成为相对简单又相互关联的子问题,再根据各个子问题的具体特性由多个相对独立的子系统并行协同工作<sup>[9]</sup>。澳大利亚 Murdoch 大学的 Y. Power 用 Petri 网先动态确定复杂系统(飞机驾驶仪)中的故障区间,再由其触发神经网络进行故障细化定位的两步协同故障诊断方法<sup>[10]</sup>。新西兰 Massey 大学的 A. C. M. Fong 运用将神经网络和基于规则、基于案例分析协同应用的智能数据挖掘技术,实现支持远程在线机械故障诊断的桌面帮助系统<sup>[11]</sup>。挪威能源技术研究所的 D. Roverso 介绍了电力设备早期故障诊断系统 Aladdin 中的瞬时分类器,集成了循环神经网络、在线小波预处理(WOLP)、自动递归任务分解(ARID)等技术<sup>[12]</sup>。

2) 协同诊断支持研究。中科院自动化研究所操龙兵、戴汝为认为面对当前众多复杂的重大决策问题,应以综合集成理论作为决策研究的指导,建立综合集成型决策支持系统<sup>[13]</sup>。西安交通大学张金玉系统研究了网上群体诊断支持系统的基本原理、数学模型和通用结构,给出了一个实用的大型机械设备网上远程诊断处理支持中心的总体构架<sup>[14]</sup>。华中科技大学史铁林、杨叔子论述了诊断任务的可分性和诊断推理过程的并行性,建立了诊断任务分担模型,提出了一种基于生成树的动态层次控制组织方法,使得平行结构型的分布式诊断系统既适用于无固定层次的诊断任务又具有层次结构型系统的优点<sup>[15]</sup>。华中科技大学季长印认为传统的故障诊断模糊综合决策法存在着 3 个不足:只由某一征候决定诊断结果、权值的归一化引起只由权值(而不是故障征候)决定诊断结果、一种征候对所有故障取相同权值;给出了改进的故障诊断模糊综合决策法模型并将其用于液压泵故障诊断<sup>[16]</sup>。俄罗斯科

学院的 B. Darkhovskii 运用一个基于游戏理论的、非纯统计和非纯几何的方法来解决动态系统故障诊断面对不确定输入参数的决策问题<sup>[17]</sup>。美国 Purdue 大学的 S. Dash 简要列出了过程故障诊断应用难点,提出了一个基于混合黑板构架的协同诊断方法<sup>[18]</sup>。

## 2 远程协同故障诊断研究的特点

通过对上述故障诊断现状分析,认为当前远程协同故障诊断研究有以下几个特点:

1) 多研究的是单一机、电、液设备领域的诊断方法,对异构耦合故障研究不够,而且各诊断方法关注点不一,对过程系统、机群系统等复杂系统缺少通用且具体的诊断思想或理论支撑。其中值得一提的是,国外可重复使用的飞行器的最新诊断系统多采用基于模型推理方法。

2) 远程诊断带来了一些问题。现有的远程诊断系统多是针对于某一特定诊断领域的单一智能技术的专科诊断,且较少考虑诊断设备的异构性,从而容易造成诊断设备的重复投资和信息孤岛。

另外由于异地,诊断中心对现场状态信息认知不完全;困扰远程诊断的安全性、传输速度(实时性)、远程诊断执行复杂、传输效率问题亟需且正在解决;对数据的分析处理一般都在远程诊断中心完成,但现场测量数据极其庞大,无法利用网络进行实时传输,解决方法应该是在现场就对原始监测数据进行预处理。

其它如诊断计算量呈指数关系增长、诊断方法难移植、Agent 技术及 MAS 系统仍大体属于概念级研究开发、不同行业背景及工业要求使得各类技术标准难以统一(仅现场总线就有十几种)等因素使得远程诊断实用性(在线性、快速性、简易有效性)、开放性(分层化、模块化)不够。

3) 虽然远程诊断的一些瓶颈问题可由远程协同诊断方式解决,但远程协同诊断同样也引起了一些新问题:

远程协同诊断处于应用黎明期的一个原因就是远程协同诊断过程研究和描述不彻底,多是仅涉及远程会议的应用,没有关注协同诊断功能的完善及决策、协同支持等技术要求及多因素协同诊断作用。从而使得协同系统开发难。

由于多诊断资源的远程协同引起的故障信息管理问题。故障信息、解决方案及其它知识的安全性、合理性及管理需要从软件工程的角度全面考虑。

如何对诊断目标做合理的任务分配?即何

何时何地何状况下调用何远程诊断资源完成何任务？包括多远程诊断资源的选择、组合优化问题。

如何在众多远程诊断结果中判定最佳诊断方案(多诊断结果融合)？

4)虽然有着上述很多问题,但各类系统装置的耦合化、整体化、微型化、协作化使得故障诊断技术发展趋势为智能化、远程化、协同化、标准化、微型化(嵌入式)。而且应该把诊断看作整个智能维护的一个环节来全面考虑。

### 3 远程协同诊断系统通用原型

综合上述现状,本文针对性地提出了一个远程协同诊断系统通用原型,图示如图 2。

本远程协同诊断方法的技术路线(诊断流程)图示如图 2。在被诊断设备现场端,数据层信息融

合模块依据诊断中心具体要求,有选择地对现场故障信息进行深、浅两个层次的预处理;其中,深层预处理采用粗集理论实现故障信息提取,而浅层处理则为各常用信息处理方法的集合。

诊断中心依据现场上传的故障信息类型及远程协同诊断资源信息建立诊断任务集,同时运用层次任务关系图进行任务分解,通过以改进合同网方式与相应诊断资源建立协作关系,在子任务执行过程中,以 TBAC为策略对其进行监控并提供子任务执行所需服务。当各远程协同诊断资源完成子任务并给出候选诊断结论,诊断中心依据多个诊断指标将所有候选诊断结果进行排序,先对最有可能诊断结果进行模型输入仿真或用替换测试的方法进行假设检验,若该诊断结果不正确则对次最大可能诊断结果进行验证,直至诊断成功。

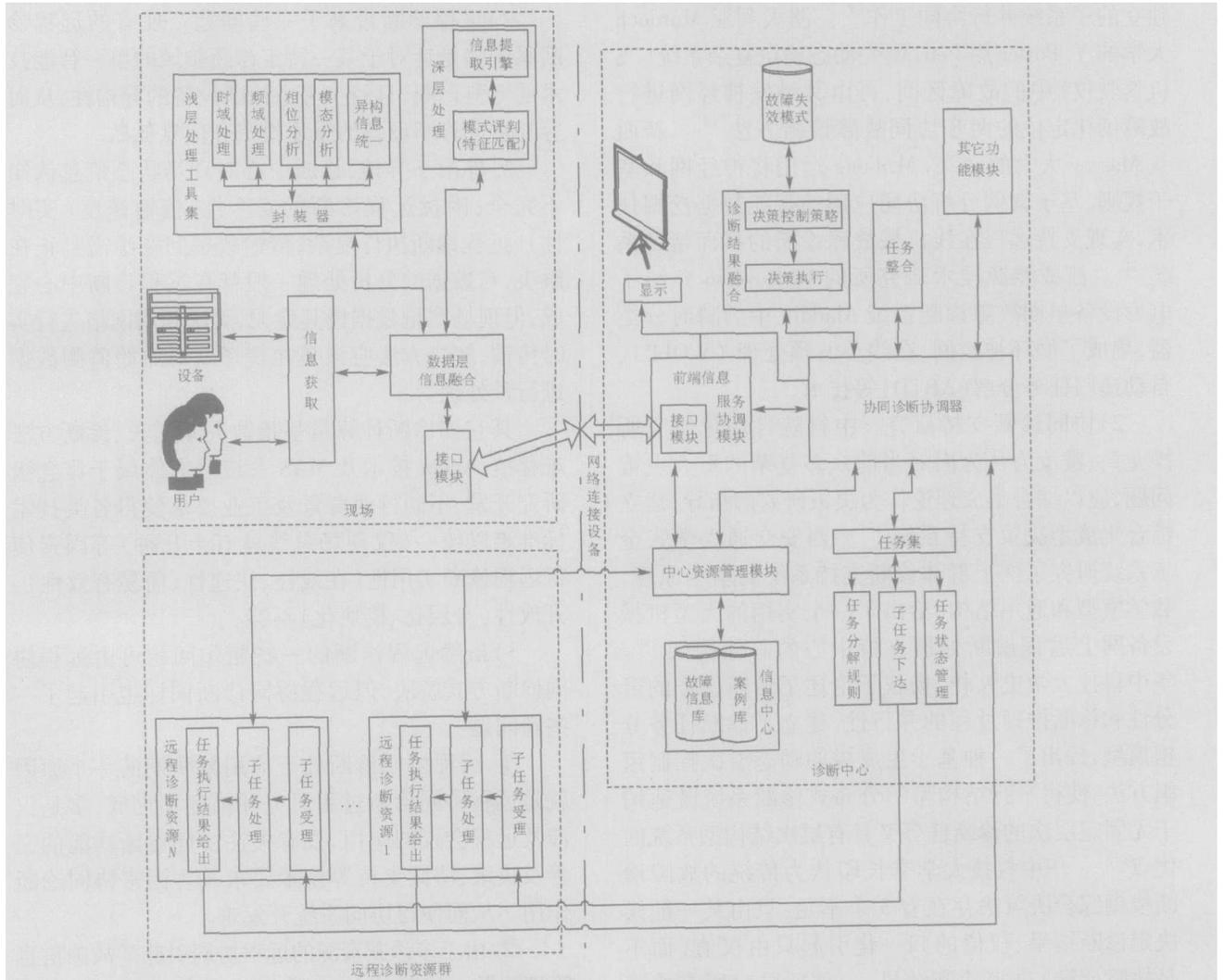


图 2 远程协同诊断模块流程图

Fig 2 RCFD modularization flow chart

在此技术路线下的几个须解决的关键问题及其解决思路如下:

1)信息挖掘技术在远程协同诊断现场故障信息预处理中的应用。

针对现场故障信息数据量大信息量小引起的实时性不够远程问题,考虑到粗集理论可在不损失原始数据重要信息的前提下通过约简原始数据中的信息提取有用特征信息的优点,应研究粗集理论在数据层故障信息融合的应用;鉴于经典粗集的局限性,考虑采用主元分析技术来拓展粗集理论。另外,数据层信息融合模块应该可以根据被诊断对象在不同使用阶段中性能衰退过程的实际程度,及时自适应调整相应故障信息的传输频率、数量及质量。

2)诊断中心以诊断任务为元单位的诊断协作机制研究。

诊断任务分配问题是一类典型的组合优化问题,包括任务分解、子任务下达及任务状态管理三部分研究内容。任务分解在图论中可属于匹配问题,分层任务关系图(HTDN)是其实现方法之一;子任务下达解决的是如何在某具体条件下将各任务合理地分配给合适的执行对象问题,合同网的易扩展、易理解和实现、近似全局最优分配的特点使得其为解决子任务下达问题的较优选择;又基于当前任务分配少从全局综合考虑诸如任务定义、任务分解、任务迁移、负载平衡等方面,本任务状态管理研究旨在解决任务整个生命期的管理问题。而基于任务的访问控制(TBAC)作为一种以任务为活动的最小单位、采用动态授权的主动安全模型,它的引入对诊断任务状管理及诊断中心资源管理都是有益的。

定义 2: TBAC通过下列方式描述每一诊断任务所需角色,

$\langle DTask\ n, Role \rangle: [ \{ RoleDomain, (roles) \}, \{ RD\_1, (A, B, C, \dots) \}, \{ RD\_2, (X, Y, \dots) \} \dots ]$ 。其中,  $\langle DTask\ n, Role \rangle$ 表示对诊断任务  $n$ 的所需角色分配;  $RD\_1, RD\_2$ 等是某一特定角色域,它们的有限集就是诊断角色集;  $A, B, C, X, Y$ 等则是  $RD\_1, RD\_2$ 等域中的特定诊断角色。

3)远程诊断资源的结果融合。

系统故障的关联性和隐秘性使得在协同诊断中各诊断方法或诊断结论之间难免产生不一致,其可能产生原因有表征故障现象的故障征兆不充分、诊断信息的获取不准确、数据预处理或异类诊断方法

并用产生的冲突。此时需要一个协同决策过程,这也属于决策层信息融合。诊断结果决策思路也大体有三:利用人工智能技术(专家系统、神经网络、遗传算法、机器学习、自然语言理解、对策论、群过程决策理论等)进行;对诊断结果进行假设验证(测试);通过诊断决策支持系统解决诊断结果冲突和决策诊断结果。

可采用多目标决策方法为基础,在综合考虑故障信息的案例匹配度、故障元件可靠率、故障元件性能衰退度、故障元件重要度及其间关联度、领域诊断专家意见、诊断测试代价等多个指标基础上,对各候选诊断结果进行排序,进而用模型仿真或实际元件替换检验的方法对其依次进行验证。

## 4 结论

远程协同诊断意义体现在:资源共用,信息共享;诊断准确度提高,诊断系统鲁棒性增加;减少整体设备重复投资,提高设备利用率,节省人力物力。此领域研究必会随着其它相关学科的发展而充满活力地步入应用成熟期。

## 参考文献:

- [1] Venkatasubramanian V. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis, Part I Quantitative Model-based Methods [J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27.
- [2] 刘金甫. 美国军队武器装备维护中的综合诊断 [J]. 测控技术, 2003, (11): 1-3.  
L U Jin-fu. Integrated Diagnostics Applied in the Weapon System Supports in the US Army [J]. Measurement & Control Technology, 2003, (11): 1-3
- [3] 何岭松, 杨叔子. 基于因特网的设备故障远程协作诊断技术 [J]. 中国机械工程, 1999, (3): 104-106.  
HE Ling-song, YANG Shu-zi. Internet Based Remote Cooperative Diagnostics for Machine Faults [J]. China Mechanical Engineering, 1999, (3): 104-106
- [4] Rodden T A Survey of CSCW Systems [J]. Interacting with Computer, 1991, 3 (3): 36
- [5] Borghoff U, Schlichter J. Computer Supported Cooperative Work-Introduction to Distributed Applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [6] 施国洪. 面向复杂设备的分布式故障诊断研究 [J]. 中国安全科学学报, 2000, (2): 78-82.  
SHI Guo-hong. Study on Distributed Fault Diagnosis of

- Complex Equipment [J]. China Safety Science Journal, 2000, (2): 78-82
- [7] 邱赤东. 船舶实时远程故障诊断系统及其仿真 [J]. 系统仿真学报, 2002, (10): 116-119.  
Q U Chi-dong A Real-time Remote Fault Diagnosis System for Marine Vessels with Simulation Studies [J]. Journal of System Simulation, 2002, (10): 116-119.
- [8] 杨杰. 流程工业中模糊控制和故障诊断的建模及网络综合集成 [J]. 上海交通大学学报, 1999, (11): 37-41.  
YANG Jie Modeling and Network Integration of Fuzzy Control and Fault Diagnosis in Process Industry [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, (11): 37-41.
- [9] 方泽南. 汽轮发电机组故障诊断的并行关联模型 [J]. 清华大学学报, 1998, (4): 58-61.  
FANG Ze-nan Parallel Relative Model for the Fault Diagnosis of Turbo Generator Sets [J]. Journal of Tsinghua University, 1998, (4): 58-61.
- [10] Power Y. A Two-step Supervisory Fault Diagnosis Framework [J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 28
- [11] Fong A C M. An Intelligent Online Machine Fault Diagnosis System [J]. Computing & Control Engineering Journal, 2001, (11).
- [12] Roverso D. Fault Diagnosis with the Aladdin Transient Classifier [J]. System Diagnosis and Prognosis: Security and Condition Monitoring Issues III, 2003.
- [13] 操龙兵. 综合集成与决策 [J]. 计算机研究与发展, 2003, (4): 24-30.  
CAO Long-bing On Metasynthesis and Decision Making [J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, (4): 24-30.
- [14] 张金玉, 谢友柏. 机械故障诊断支持系统的构架研究 [J]. 中国机械工程, 2003, (5): 66-69.  
ZHANG Jin-yu, XIE You-bai Research on the Structure and Principle of Diagnosis Support System of Machinery Faults [J]. China Mechanical Engineering, 2003, (5): 66-69.
- [15] 陈培林, 史铁林. 分布式故障诊断系统中控制的组织方法 [J]. 华中理工大学学报, 1996, (6): 42-44.  
CHEN Pei-lin, SHI Tie-lin The Organization of Controls in a Distributed Fault Diagnostic System [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1996, (6): 42-44.
- [16] 季长印. 设备故障诊断的模糊综合决策法 [J]. 中国机械工程, 1999, (8): 40-41.  
JI Chang-yin General Fuzzy Decision for Fault Diagnosis of Equipment [J]. China Mechanical Engineering, 1999, (8): 40-41.
- [17] Darkhovski B. A Game-Theoretic Approach to Decision in FD I [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 5.
- [18] Dash S Challenges In the Industrial Applications of Fault Diagnostic Systems [EB/OL]. venkat@ecn.purdue.edu

收稿日期: 2006-05-12; 修回日期: 2006-06-19

作者简介:

刘建辉 (1976 - ), 男, 博士研究生, 从事远程协同故障诊断及 CSCW 的理论研究、工程实践和教学。E-mail: liujianhui1997@163.com

## Review and research on remote collaboration fault diagnostics

LIU Jian-hui, HU Li-hong, LU Qiong

(Machinery and Electronics Engineering College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Accompanying with the developing of distributed computing, Information Tele-processing, classical fault diagnostics theory, and the like, RCFD (Remote collaboration fault diagnostics) becomes more important, but there is not summarization for it. Currently, researching status is particular analyzed from two aspects of diagnosis methods collaboration and collaboration diagnosis support frame. One universal RCFD system prototype and the solution on its key issue are also proposed technically, which includes local fault information preprocess, diagnostics task distribution and collaboration strategy, fusion of remote diagnostics results. In the conclusion, the prospect of RCFD is summarized.

**Key words:** RCFD; information preprocess; diagnostics task distribution; results fusion