

故障诊断专家系统及其发展

安茂春

(北京系统工程研究所, 北京 100101)

摘要: 文章对主要的故障诊断专家系统进行了系统的归纳和分类, 主要关注故障诊断专家系统在军事领域的应用; 重点讨论了基于规则的诊断专家系统、基于模型的诊断专家系统、基于人工神经网络的诊断专家系统、基于模糊推理的诊断专家系统和基于事例的诊断专家系统的技术要点、发展现状、优缺点及其在军事方面的应用; 最后, 对该学科的发展做出了预测, 指出基于多种模型结合的专家系统、分布式诊断专家系统、实时诊断专家系统是今后的发展方向。

关键词: 专家系统; 故障诊断; 军事应用; 基于规则推理; 建模技术; 神经网络; 模糊推理; 基于事例推理

A Survey on Fault Diagnosis Expert Systems

An Maochun

(Beijing Institute of System and Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: In this article we present a survey of fault diagnosis expert systems, and categorize them into 5 different types according to knowledge organization method and reasoning mechanism, which are rule-based fault diagnosis expert system, model-based fault diagnosis expert system, neural network fault diagnosis expert system, fuzzy fault diagnosis expert system and case-based fault diagnosis expert system, for each type we describe its technical properties, current status, advantages and disadvantages, and applications in military field. At the end of this article, we point out that hybrid model-based, distributed and real-time diagnosis expert systems are future directions.

Key words: expert system; fault diagnosis; military application; rule-based reasoning; modeling; artificial neural network; fuzzy reasoning; case-based reasoning

1 故障诊断专家系统及其分类

专家系统 (Expert System, ES) 是人工智能技术 (Artificial Intelligence, AI) 的一个重要分支, 其智能化主要表现为能够在特定的领域内模仿人类专家思维来求解复杂问题。专家系统必须包含领域专家的大量知识, 拥有类似人类专家思维的推理能力, 并能用这些知识来解决实际问题。

故障诊断技术是一门应用型边缘学科, 其理论基础涉及多学科, 如现代控制理论、计算机工程、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别等。故障诊断的任务是在系统发生故障时, 根据系统中的各种量 (可测的或不可测的) 或其中部分量表现出的与正常状态不同的特性, 找出故障的特征描述并进行故障的检测与隔离。

故障诊断专家系统是将专家系统应用到故障诊断之中, 可以利用领域知识和专家经验提高故障诊断的效率^[1]。目前专家系统在故障诊断领域的应用非常广泛, 如美空军研制的用于飞机喷气发动机故障诊断专家系统 XMAN^[2], NASA 与 MIT 合作开发的用于动力系统诊断的专家系统, 英国某公司为英美军方开发的直升机发动机转子监控与诊断专家系统^[3]等, 此外在电力、机械、化工、船舶等许多领域中也大量应用了故障诊断专家系统。

根据知识组织方式与推理机制的不同, 可将目前常用的故障诊断专家系统大致分为基于规则的诊断专家系统、基于模型

的诊断专家系统、基于人工神经网络的诊断专家系统、基于模糊推理的诊断专家系统和基于事例的诊断专家系统。

2 故障诊断专家系统对比分析

2.1 基于规则的诊断专家系统

在基于规则的诊断专家系统中, 领域专家的知识与经验被表示成产生式规则, 一般形式是: if<前提> then<结论>

其中前提部分表示能与数据匹配的任何模型, 结论部分表示满足前提时可以得出的结论。基于规则的推理是先根据推理策略从规则库中选择相应的规则, 再匹配规则的前提部分, 最后根据匹配结果得出结论。

基于规则的诊断知识表达方式直观、形式统一, 在求解小规模问题时效率较高, 并且具有易于理解与实现的优点, 因而取得了一定成功。20世纪90年代, 国外在军用水压系统、电力供应网络等方面进行了应用。

但是, 对于复杂系统, 所观测到的症状与对应的诊断之间的联系是相当复杂的, 通过归纳专家经验来获取规则有着相当的难度, 且诊断时只能对事先预想到的并能与规则前提匹配的事件进行推理, 存在知识获取的瓶颈问题。

2.2 基于模型的诊断专家系统

在基于模型的诊断专家系统中, 领域专家的专业知识包含在建立的系统模型中, 这种基于模型的诊断更多地利用系统的结构、功能与行为等知识。相比基于规则的诊断专家系统, 这种诊断方式能够处理预先没有想到情况, 并且可能检测到系统存在的潜在故障。这类系统的知识库相对容易建立并且具有一定的灵活性, 已应用于航天器动力燃烧系统故障诊断等方面。

收稿日期: 2008-06-08; 修回日期: 2008-07-16。

作者简介: 安茂春 (1967), 山东莱阳人, 副研究员, 主要从事测试与故障诊断技术的管理工作。

但是，基于模型的诊断专家系统仍然依赖于专家的专业领域知识，在实时诊断中还将消耗巨大的计算资源，限制了其应用范围。

2.3 基于人工神经网络的诊断专家系统

神经网络只要求专家提出范例及相应的解，就能通过特定的学习算法对样本进行学习而获取知识。在基于人工神经网络的诊断专家系统中，知识表示不再是独立的一条条规则，而是分布于整个网络中的权和阈值。专家知识及经验的获取是利用领域专家解决实际问题的实例（样本）来训练获取，在同样输入条件下神经网络能够获得与专家给出的方案尽可能相同的输出。基于人工神经网络的专家系统在知识表示、知识获取、并行推理、适应性学习、理想推理、容错能力等方面显示了明显的优越性。同时，实际应用中的大多数被诊断对象往往是复杂的非线性系统，无法得到其精确模型，甚至无法建模，由于神经网络的构建与训练不需要了解被诊断对象的精确模型，因而对于非线性被诊断对象，神经网络也具有明显优势。

目前，基于人工神经网络的诊断专家系统已成为研究的热点，已经应用于在线故障诊断、引擎自动管理系统、军舰动力系统故障诊断等方面。

然而，神经网络专家系统也存在固有的弱点。首先，系统性能受到所选择的训练样本集的限制，训练样本集选择不当，特别是在训练样本集很少的情形下，很难获得较好推理能力；其次，神经网络没有能力解释自己的推理过程和推理依据及其存储知识的含义；再次，神经网络利用知识和表达知识的方式单一，通常的神经网络只能采用数值化的知识；最后，也是最根本的一点就是神经网络只能模拟人类感觉层次上的智能活动，在模拟人类复杂层次的思维方面，如基于目标的管理、综合判断与因果分析等方面还远远不及传统的专家系统。因此，人们正试图研究符号推理与数值推理相结合的集成式智能诊断系统，以期能更好地模拟人类的思维过程。

2.4 基于模糊推理的诊断专家系统

在基于模糊推理的诊断专家系统中，其知识表示采用模糊产生式规则。模糊产生式规则是将传统产生式规则“IF 条件 THEN 动作（或结论）”进行模糊化，包括条件模糊化、动作或结论模糊化等。引入模糊的概念是为了更好地模拟人类的思维与决策过程，使计算机结果不再是简单的黑或白。

在模糊推理中建立模糊隶属度是一个重要工作，确定隶属度的方法有对比排序法、专家评判法、模糊统计法、概念扩张法等。采用专家评判法，由专家根据经验直接给出论域中每个函数的隶属度，形成隶属度表，这样给出的隶属度比较准确。计算机在进行模糊推理时，先从用户接口接收证据及其相应的模糊词，如“很”“相当”“轻微”等，然后通过模糊属性表查出条件模糊词的隶属度，由此进行推理得到结论。基于模糊推理的诊断专家系统已应用在军用电力系统、集成电路、动态控制等方面。

基于模糊推理的诊断存在的主要问题在于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，且系统的诊断能力依赖模糊知识库，学习能力差，容易发生漏诊或误诊。由于模糊语言变量是用隶属函数表示的，实现语言变量与隶属

函数之间的转换是一个难点。

2.5 基于事例的诊断专家系统

基于事例的推理是利用以事例形式表示的以往求解类似问题的经验知识进行推理，从而获得当前问题求解结果的一种推理模式。一个有效的事例表示包括三部分内容：事例发生的原因或背景；事例的特点及过程；事例的解决方法和结果。事例推理的关键步骤包括事例检索、事例重用、事例修改/修正和事例保留等。基于事例的推理避免了采用基于规则的推理方法进行知识获取时的瓶颈问题，利用相关事例扩大了解决问题的范围，简化了求解过程，解的质量也得到提高，在军事制造业控制诊断、舰艇水压机等方面获得应用。几种主要故障诊断专家系统优缺点对比如表 1 所示。

基于事例的推理的缺点是在处理小规模问题时，其推理效率不高。

表 1 主要故障诊断专家系统优缺点对比

故障诊断专家系统	优点	缺点
基于规则的诊断专家系统	知识表达直观、统一；易于理解与实现；不需要系统模型；效率较高。	无法处理新遇到的情况；无法自动进行知识更新；严重依赖领域专家；开发与维护成本过高。
基于模型的诊断专家系统	能够处理新遇到的情况；可能检测系统潜在故障；可以进行动态故障检测。	依赖专业领域知识；难以隔离故障。
基于人工神经网络的诊断专家系统	不需要系统模型；对噪声不敏感；应用范围广；诊断速度快；复杂非线性系统适用。	训练时间不受控；严重依赖训练样本集；无法处理动态系统；无法给出推理说明。
基于模糊推理的诊断专家系统	更接近人类思维方式；结果便于实用。	模糊诊断知识获取困难；依赖模糊知识库；学习能力差。
基于事例的诊断专家系统	知识获取容易；知识更新方便；可以自动获取经验知识。	严重依赖事例知识库。

3 故障诊断专家系统发展方向

(1) 基于多种模型结合的诊断专家系统^[4-6]。这里所说的模型是指专家系统的知识表示模型与推理模型。现有的各种模型都具有各自优势和特点，同时它们各自也存在着局限性，各种模型具有各自适用的领域。随着工业自动化发展对故障诊断的要求不断提高，实际被诊断对象也将更加复杂，这样必然造成对象的故障诊断知识的复杂化，因此，融合多种知识表示方法是提高故障诊断知识表示准确度的有效途径。故障诊断知识表示与推理方法有着密切的联系，这就要求将多种诊断方法加以融合，克服各诊断方法的局限性，从而提高诊断专家系统的智能性和诊断效率。

(2) 分布式诊断专家系统^[7-8]。现有的诊断专家系统大都是面向单机或单服务器的，可扩充性、灵活性、通用性较差，各诊断系统之间相互独立，即使是不同开发单位研制的针对同

类问题的诊断系统之间也不能进行有效的信息交流和共享,造成了巨大的资源浪费。现在很多大型系统或设备由远程分布的不同类子系统组成,相应地,其诊断系统中的系统级诊断和各子诊断也需要诊断信息的传输交流。同时,由于故障源的不确定性和时发性,导致异地诊断和远程诊断的需求不断增加。随着网络的普及,通过局域网、因特网来传输诊断信息成为一种趋势,网络架构下的分布式多故障诊断成为新的研究热点^[9],因此,建立远程分布式跨平台综合智能诊断系统,可以实现异地多种专家系统对同一系统、设备的协同诊断以及多台设备共享同一诊断系统,提高诊断的成功率和效率,同时也有利于诊断案例的积累,以弥补单个诊断系统领域知识的不足,提高诊断的智能化水平。

(3) 实时诊断专家系统^[10]。随着用户对系统可靠性、稳定性的要求不断提高,故障诊断技术已经由原来简单的对故障设备进行离线故障检测、隔离,发展为对系统、设备全寿命周期提供可靠性保障,主要包括基于传感器网络的健康状态在线检测,故障的早期预报以及故障发生后的在线实时定位与排除。这些都对未来故障诊断专家系统的实时性提出了很高的要求。

参考文献

- [1] 吴明强,李界红. 故障诊断专家系统综合智能推理技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(10): 932-934.
 [2] Miller L, Lewis D, Ronald De Hoff. XMAN II- a real time main-

tenance training aid [C]. Aerospace and Electronics Conference, 1990: 1360-1364.

- [3] Li Y G. Performance Analysis Based Gas Turbine Diagnostics [J]. Journal of Power and Energy, 2002: 363-377.
 [4] Frang P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results [J]. Automatic, 1990, 26(3): 459-474.
 [5] Frank P M. Analytical and qualitative model-based fault diagnosis: a survey and some new results [J]. European Journal of Control, 1996, 2: 6-28.
 [6] Kay H. Robust identification using semiquantitative methods [A]. Proceedings of the IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes [C]. 1998, Oxford: Pergamon, 277-282.
 [7] Grove R F. Internet-based expert systems [J]. Expert Systems, 2000, 17(3): 129-136.
 [8] Huntington D. Web-based expert systems are on the way: Java-based web delivery [A]. PC AI Intelligent Solutions for Desktop Computers [C]. 2000, 14(6): 34-36.
 [9] Angeli C. Online expert systems for fault diagnosis in technical processes [J]. Expert Systems, 2008, 3: 115-132.
 [10] Yusong P, Veeke H P M, Lodcwijks G. A simulation based expert system for process diagnosis [A]. Proceedings of the EURO-SIS 4th International Industrial Simulation Conference [C]. 2006, Ghent: Eurosiss-ETI, 393-398.

(上接第1216页)

- [5] Smith G, Schroeder J B, Navarro S, etc. Development of a prognostics & health management capability for the joint strike fighter [A]. Autotestcon1997 [C]. 1997.
 [6] Johnson S B. Introduction to system health engineering and management in aerospace [A]. First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace [C]. Napa, California, USA. 2005.
 [7] Haller K A, Anderson K. Smart Built-In-Test (BIT) [C]. IEEE 1985 AUTOTESTCON, 1985: 140-147.
 [8] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理工作的发展及应用 [A]. 国防科技工业试验与测试技术高层论坛文集 [C]. 2007: 36-42.
 [9] Byington C S, Roemer M J, Galie T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [C]. 2002 IEEE Aerospace Conference, 2000.
 [10] Scheuren W. Safety & The Military Aircraft Joint Strike Fighter Prognostics & Health Management [C]. AIAA 98-3710.
 [11] Gandy M, Line K. Joint Strike Fighter-Prognostics and Health Management (PHM) [Z]. Lockheed Martin Aeronautics, 2004.
 [12] Turbo machinery Prognostics and Health Management via Eddy Current Sensing: Current Developments [C]. 1999 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1999.
 [13] Kacprzyński G J, Hess A J. Health management system design: development, simulation and cost/benefit optimization [C]. 2002 IEEE Aerospace Conference, 2002.
 [14] Hess A, Fila L. Prognostics, from the need to reality-from the

fleet users and PHM system designer/developers perspectives [A]. 2002 IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2002.

- [15] Malley M E. A Methodology for simulating the joint strike fighter's (JSF) prognostics and health management system [Z]. Air Force Institute of Technology, 2001, 5.
 [16] Haller K A, Anderson K. Smart built-in-test (BIT) [A]. IEEE 1985 AUTOTESTCON [C]. 1985: 140-147.
 [17] Prosser W H. Development of structural health management technology for aerospace vehicles [C]. NASA-2003-janaf-whp. 2003.
 [18] Boltryk P J. Intelligent sensors - a generic software approach [A]. Journal of Physics: Conference Series 15 [C]. 2005.
 [19] Oosterom M, Babuska R. Virtual sensor for fault detection and isolation in flight control system fuzzy modeling approach [C]. IEEE, 2000.
 [20] Hess A. The prognostic requirement for advanced sensors and non-traditional detection technologies [A]. DARPA/DSO Prognosis Bidder's Conference [C]. 2002, 9.
 [21] Gandy M. Wireless sensors for aging aircraft health monitoring [Z]. Lockheed Martin Aeronautics Company, 2000.
 [22] Borinski J W, Meller S A. Aircraft health monitoring using optical fiber sensors [A]. Structure Health Monitoring Conference [C]. 2004.
 [23] Wilson A. Mems based corrosion and stress sensors for Non-Destructive Aircraft Evaluation [C]. Structure Health Monitoring Conference, 2004.