

BEIYESI WANGLUO LILUN
ZAI ZHUANGBEI GUZHANG
ZHENDUAN ZHONG DE YINGYONG

贝叶斯网络理论 在装备故障诊断中的应用

李海军 马登武 刘 霄 姜 涛 编著
许爱强 主审



国防工业出版社
National Defense Industry Press



贝叶斯网络理论 在装备故障诊断中的应用

李海军 马登武 刘霄 姜涛 编著
许爱强 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了故障诊断及贝叶斯网络的基本理论,阐述了贝叶斯网络理论在智能故障诊断方法中的应用。提出了一种基于模型分解的复杂系统诊断模型建立方法,能够在最小领域专家负担情况下建立诊断贝叶斯网络模型;基于 Gibbs 抽样的诊断模型评估算法,采用等概率故障注入算法,能够实现对诊断模型的全面覆盖测试,对诊断模型进行全面评估。介绍了一种基于簇树的通用近似诊断推理算法,结合了簇树精确算法和重要性抽样原理,通用性好、计算效率高。基于进化计算的贝叶斯网络结构学习算法,对缺失数据处理是基于后验网络的,补充数据可信度比较高,在丢失数据较多的情况下网络结构学习性能较好。

本书适用于从事故障诊断研究领域的高等学校研究生和有关技术人员参考,对模式识别、知识发现等人工智能领域的研究人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

贝叶斯网络理论在装备故障诊断中的应用 / 李海军等
编著. —北京:国防工业出版社,2009.7
ISBN 978-7-118-06225-0

I. 贝… II. 李… III. 贝叶斯推断-应用-武器装备-故障诊断 IV. E92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 025526 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 12½ 字数 224 千字

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

随着电子技术、计算机技术、通信技术以及现代传感技术和精密加工技术的发展,武器装备的复杂程度越来越高,维护保障的难度也越来越大。这是因为对新型复杂的系统来说,人们对它的认知需要一个过程,在维护保障中也难免会遇到一些新的故障现象。同时,部队对新型装备的维修信息积累有限,故障诊断的先验信息少。而对日益发展的自动测试系统来说,测试技术日益成熟,制约测试系统发展的“瓶颈”就是诊断系统。

本书编写的目的,就是介绍一种基于贝叶斯网络的装备诊断模型建立及通用的推理算法,希望为装备故障诊断提供一理论及应用的支持。

本书介绍了装备故障诊断的理论基础和贝叶斯网络的基本理论,阐述了基于簇树的贝叶斯网络推理方法和信息更新方法。根据现代武器装备的技术特点,提出了武器装备诊断贝叶斯网络模型的构建及评估方法,系统深入地研究了贝叶斯网络的通用近似推理算法和不完整数据条件下网络结构学习方法。根据典型武器装备的试验测试数据,对所提出的诊断方法进行了试验验证。

本书由李海军、马登武、刘霄、姜涛等编著,由自动测试领域专家许爱强教授主审。全书共分9章,主要内容有:智能故障诊断的研究及发展、装备故障诊断的理论基础、贝叶斯网络理论基础、贝叶斯网络的精确推理方法、连接树的构造及信息传递、诊断贝叶斯网络的建立及评估方法、诊断贝叶斯网络的通用近似推理算法、诊断贝叶斯网络的结构学习方法以及诊断专家系统设计等。

在本书的编写中,参考和引用了许多国内、外专家学者的著作、论文和研究成果,在书后的参考文献中列出。作者对这些专家学者在故障诊断、知识发现等研究领域所作出的贡献表示崇高的敬意,对引用他们的研究成果表示由衷的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有一些错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2008年10月于海军航空工程学院

目 录

第1章 绪论	1
1.1 故障诊断与综合诊断	2
1.2 智能故障诊断方法的研究现状及发展	5
第2章 装备故障诊断的理论基础	11
2.1 武器装备故障特点	11
2.2 智能故障诊断系统中不确定知识的处理	13
2.3 不确定性推理模式	28
第3章 贝叶斯网络理论	58
3.1 概述	58
3.2 贝叶斯概率基础	61
3.3 贝叶斯学习理论	67
3.4 简单贝叶斯学习模型	75
3.5 贝叶斯网络的建造	81
第4章 贝叶斯网络的精确推理	89
4.1 引言	89
4.2 贝叶斯推理基础	93
4.3 基于簇树的贝叶斯网络推理	96
4.4 小结	112
第5章 连接树的构造与信息传递	113
5.1 连接树的构造	113
5.2 量化连接树	121
5.3 处理证据	126

5.4	近似推理·····	128
5.5	小结·····	130
第6章	诊断贝叶斯网络的建立和评估方法·····	132
6.1	基于故障树的贝叶斯网络建立方法·····	132
6.2	基于模型分解的复杂系统贝叶斯网络构建方法·····	136
6.3	诊断贝叶斯网络模型的评估方法研究·····	144
6.4	小结·····	151
第7章	诊断贝叶斯网络通用近似推理算法·····	152
7.1	概述·····	152
7.2	基于簇树的精确推理算法·····	153
7.3	基于簇树算法的通用近似推理算法·····	156
7.4	小结·····	167
第8章	诊断贝叶斯网络的结构学习·····	168
8.1	网络结构学习方法·····	168
8.2	不完整数据条件下的网络结构学习算法·····	172
8.3	小结·····	180
第9章	故障诊断专家系统·····	181
9.1	故障诊断专家系统简介·····	181
9.2	故障诊断专家系统的发展趋势·····	182
9.3	故障诊断专家系统的基本结构·····	184
9.4	故障诊断专家系统设计·····	185
9.5	故障诊断方法试验验证·····	188
参考文献	·····	192

第1章 绪 论

故障诊断是指根据测试所取得的有用信息,对被诊断对象进行分析处理,判断被诊断对象的状态是否处于异常或故障,确定故障的方位,以及预示故障的发生等。早期的故障诊断是依据人对被诊断对象的感觉、听觉、触觉等感官和以往积累的相关经验,对其状态特征进行分析,来判断某些故障的存在,或预测故障发生的时间。维修是指使设备保持或恢复到规定状态所进行的全部活动,不仅包括设备在使用过程中发生故障(损坏)时进行修复,以恢复其规定状态的修复性维修,而且还包括在故障(损坏)前,预防故障,以保持规定状态所进行的预防性维修活动。

随着现代工业及科学技术的迅速发展,现代的武器装备结构越来越复杂,自动化的规模越来越大。一个大型的系统往往由大量的工作部件组成,不同的部件之间互相关联,紧密耦合。单一部件的工作异常都可能经过系统的放大,造成整个系统故障或失效。因此,大型设备产生故障或失效的潜在可能性越来越大。设备的故障,特别是在航天、航空、航海、核工业、武器系统等部门中,倘若不能事先发现并加以预防,一旦发生事故将造成人员伤亡、环境污染,甚至战争失利的重大事件。目前,世界各国对设备的故障分析、诊断及预防工作已有了足够的认识。

美国是对故障诊断技术进行系统研究最早的国家之一。1961年,美国开始执行阿波罗计划后,出现了一系列设备故障。1967年,在美国航天局(NASA)倡导下,由美国海军研究室(ONR)主持美国机械故障预防小组(MFPG),积极从事对故障诊断技术的研究和开发。美国作为世界头号军事强国,非常重视军事装备的后勤补给和维护保障。由于系统越来越复杂,装备设计越来越多地考虑保障问题,以确保维修工作能简单有效地进行,使装备能时刻保持可用状态。因此,各种类型的故障诊断和维修专家系统已用于如美国F-15战斗机、B-1B轰炸机、海军舰艇、陆军军械装置等现役装备的故障诊断和维修中。

目前,在美国,航空、航天、核工业,以及军事部门中的诊断技术占有领先地位。而日本、欧洲的一些发达国家也开始进行设备故障诊断技术的研究和应用。其中,英国在摩擦磨损、汽车、飞机发动机监测和诊断方面的诊断技术具有领先优势;日本在钢铁、化工、铁路等民用工业方面的诊断技术处于领先地位。

我国虽然对故障诊断技术的研究起步较晚,但近年来得到迅速发展。华中理工大学研制了用于汽轮机组工况监测和故障诊断的智能系统 DEST;哈尔滨工业大学和上海发电设备成套设计研究所联合研制了汽轮发电机组故障诊断专家系统 MMMD-2;清华大学研制了用于锅炉设备故障诊断的专家系统等。我国军方在重要系统和装备的研制中提出了明确的测试性要求,制定了《装备测试性大纲》(GJB-2547—1995)、《测试与诊断术语》(GJB-3385—1998)等国家军用标准。国内军用测试系统也随着军用设备对测试诊断技术的要求逐步开展研究。

目前,国内对装备的故障诊断技术,尤其是电路板级故障诊断技术的研究有了较大的进展。

1.1 故障诊断与综合诊断

应用综合诊断技术对机器设备进行监测和诊断,是及时发现机器故障,并预防设备恶性事故发生的有效方法,而故障诊断就是综合诊断的关键要素之一。综合诊断的概念和思想初步形成于 20 世纪 80 年代,经过在武器系统中的实践与应用后,这一概念逐步趋于完善。

美国学者 William Keiner、Brown,以及美国开放系统综合诊断方法论证项目组(OSA IDD)分别给出了综合诊断的定义,其核心思想是:综合诊断是一个系统工程,实现所有相关要素的有效综合,包括系统的测试性、自动测试、手工测试、诊断预测、安全评估与预测、维修培训、维修辅助工具和技术资料、自治后勤等。将其综合功能分配到系统工程的各个阶段,包括系统设计、使用、维修和保障等。其目标是经济有效地检测和准确隔离武器系统中所有已知的或可能发生的故障,以满足任务要求,并使寿命周期费用最少。美军的 F-35 多用途联合攻击机(JSF)、UH-60 黑鹰直升机和 SH-60 海鹰直升机等都引入了综合诊断的思想,针对不同的武器系统使用了不同的综合诊断结构和技术,其中 JSF 飞机采用的故障预测和健康管理系統(PHM),充分体现了武器系统故障诊断维修保障体系的发展趋势。

综合分析美军装备综合诊断的体系结构,其支撑技术包括如下几类。

1.1.1 系统建模技术

综合诊断涉及系统设计、诊断、预测、维修等各个阶段。因此,其系统模型应尽量简单、直观,并使不同阶段的设计和使用能够理解和使用,还要尽量适用于系统的整个寿命周期。

1.1.2 测试性设计和 BIT 技术

测试性设计与分析、BIT 技术是综合诊断的基本要素。因此,有效的方法和辅助设计及分析工具是综合诊断中要研究的内容之一。

1.1.3 故障诊断技术

故障诊断是实现综合诊断的关键要素之一。故障检测是实现进一步诊断的基础,包括智能传感技术和非传统检测技术的研究。在美军的武器系统综合诊断中,已应用了包括谱分析、小波理论和模糊逻辑、神经网络、信息融合等先进信号处理技术和人工智能技术。

此外,在飞机类武器系统的综合诊断中包括机载实时诊断和地面远程诊断两个层次:机载实时诊断,是在飞行过程中对系统状态进行实时监测、故障预测、系统重构以及飞行员辅助决策等;远程诊断以通过数据传输链路接收的机载实时诊断和预测结果为基础,同时结合维修信息和专家知识等,实现融合诊断,对空中实时诊断结果中的故障未知和可疑模块进行进一步的诊断,为维修和保障系统提供信息。

1.1.4 预测技术

预测技术是综合诊断的关键技术之一,包括故障、系统安全、剩余寿命、可靠性、维修、后勤采购预测等方面。目前研究主要集中于预测模型、预测系统结构与推理、预测所需信息的选择与获取等方面的研究。

1.1.5 自动测试技术

自动测试设备(ATE)是综合诊断的基本要素之一,是武器系统离线测试的必要手段,也是机内测试和机载实时诊断的有效补充。美国国防部将自动测试设备也作为一个系统工程来对待,所定义的自动测试系统(ATS)包括 ATE、测试接口和测试软件开发环境等。

1.1.6 外场维修技术和手段

随着武器系统及其相关技术数据数字化的迅速增长,美军外场维护普遍采用便携式辅助维修设备(PMA)。PMA 是一种用于外场维修的移动计算设备,通常用于技术数据的显示、故障诊断隔离、维修指导、零配件查询与订购管理、维修文档管理与分析、状态监测与预测,以及操作数据的上传和下载等。PMA 还含有相应武器系统的交互式电子技术手册(ITEM),用于故障诊断隔离与维修指导。

1.1.7 自治后勤

自治后勤,也称为自主式后勤,是美军 JSF 项目采用的一项创新性保障方案,在一定程度上代表了 21 世纪美军武器装备后勤保障的发展方向。自治后勤的目标,是设计一种先导式而非反应式的后勤保障系统,以最大程度地识别问题并自主启动正确的响应。飞机的全部通用后勤和维修活动都将实现自动化,从而最大程度地消除人力和人为差错。自治后勤系统通过实现诊断、维修和后勤保障的信息共享,可以缩短维修和供应保障过程,减少使用和保障费用,提高飞机的出动架次率,在飞机着陆前就为下次任务做好准备。这种革命性的保障方案将使军方在未来的战场中,高效地保障武器装备,实现成功的作战部署。

1.1.8 交互式辅助维修与虚拟维修技术

未来作战环境对武器装备作战使用高强度的需求,要求维修人员能够迅速、准确判断故障性质和故障部位,及时处理故障,恢复系统正常运行,这就要求维修人员具有相应的技术水平,交互式辅助维修和训练系统就是解决这一问题的有效途径。它可对具体的维修过程以图像、声音等形式进行技术指导,并对维修人员按其技术水平进行自适应的技术培训。此外,利用计算机仿真技术构建一种虚拟维修环境,模拟武器系统的整个维修过程,不仅可对综合诊断系统进行评估,还可对维修人员进行训练。

1.1.9 信息管理技术

美军在武器系统的综合诊断中,采用综合信息管理系统对 BIT 信息、系统实时诊断信息、故障预测信息、远程诊断信息、维修信息、后勤保障信息,以及系统的模型信息、地面测试信息、飞行员反馈信息、系统设计信息等进行综合管理,为综合诊断过程的所有环节提供信息共享。同时,为了更好实现综合诊断功能,系统工程与并行工程也已成为美军近年来的研究重点。利用智能数据仓库、数据挖掘、计算机网络、无线网络、并行工程、系统工程等方法构成成套的综合诊断设计、分析与验证系统,使武器系统的维修保障方式进入一个全新的阶段。

故障诊断是综合诊断技术的关键要素之一,就测试诊断系统而言,测试是基础,技术比较成熟,诊断是关键,是制约故障诊断率和隔离率的瓶颈。研究智能故障诊断方法,有效利用装备运行、维修、维护保障过程的各种信息,准确判断装备的运行状态,及时发现并妥善处理各种突发或隐藏的各种故障,是确保装备良好的运行状态,保障装备战斗力提高的重要手段,是非常必要和急需的。

1.2 智能故障诊断方法的研究现状及发展

故障,这里可以理解为任何系统的异常现象,使系统表现出所不期望的特性。而故障诊断,就是在一定的检测策略的指导下,实施对被诊断系统的自动检测。通过检测获取诊断对象的故障模式,提取故障特征。在此基础上,根据预定的推理原则,对故障信息作出综合评估,并向系统操纵者或控制者提示所要采取的措施。

目前,故障诊断技术已成为一个十分活跃的研究领域,主要包含以下三方面的内容:

- (1) 故障检测,是判断系统中,是否发生了故障及检测出故障发生的时刻;
- (2) 故障隔离,是在检测出故障后确定故障的位置和类型;
- (3) 故障辨识,是指在分离出故障后确定故障的大小和时变特性。

从本质上讲,故障诊断技术是一个模式分类与识别问题,即把系统的运行状态分为正常和异常两类,而异常的信号样本究竟又属于哪种故障,这又属于一个模式识别的问题。

近几十年来,故障诊断技术得到了深入广泛的研究,提出了众多可行的方法。现有的故障诊断方法,概括起来可分为以下三大类:

1. 基于信号处理的方法

基于信号处理的方法,是以传感器技术和动态测试技术为基础,以信号处理技术为手段的常规诊断技术。通常是利用信号模型,如相关函数、频谱、自回归滑动平均、小波变换等,直接分析可测信号,提取如方差、幅值、频率等特征值,从而检测出故障。该方法简单且易于实现,但因为故障原因与设备故障征兆之间存在一定的不确定性关系,容易出现故障的错判和漏判。

2. 基于解析模型的方法

基于解析模型的方法,是在明了诊断对象数学模型的基础上,按一定的数学方法对被测信息进行处理诊断,可分为状态估计法、等价空间法和过程参数估计法。其中状态估计法,是通过重构被诊断过程的状态,并构成包含各种故障信息的残差序列。在此序列基础上,通过构造适当的模型并采用统计检验法检出故障,并做进一步的分离、估计和决策。过程参数估计法,是通过建立故障与过程参数间的精确关系,根据参数变化的统计特性来检测故障的发生,而后进行故障分离、估计和分类。目前,基于解析模型的方法得到了深入的研究,其特点是通过建立被诊断对象的精确数学模型,运用数理统计、解析函数等数学方法,使诊断过程能深入系统本质,实现故障的实时、动态诊断。但在实际应用中,常常难

以构建被诊断对象的精确数学模型,加上大型复杂设备的非线性特征,这就大大限制了基于解析模型诊断方法的使用范围和效果。

3. 基于知识的诊断方法

近年来,人工智能及计算机技术的飞速发展,为故障诊断技术提供了新的理论基础,产生了基于知识的故障诊断方法。此方法由于不需要对象的精确数学模型,而且具有某些“智能”特性,因此是一种很有生命力的方法。基于知识的故障诊断方法主要可以分为:专家系统故障诊断方法、模糊故障诊断方法、故障树故障诊断方法、神经网络故障诊断方法、数据融合故障诊断方法,以及基于贝叶斯网络的故障诊断方法。这些诊断方法,对诊断技术的研究不再离散地进行,而是从知识的角度出发,系统地研究诊断技术与诊断过程的每一步,包括从信息的检测到特征抽取、状态识别到故障分析、干预决策到维修计划都实现知识的引导,使诊断技术不仅为领域内少数专业人员所掌握,而成为一般人员也能使用的工具。

人类专家的知识,包括领域的专业知识和各种问题求解的方法、策略,在诊断过程中起着主导作用。而诊断技术研究内容与实现方法已发生了重大的变化,诊断过程的知识化使得人们致力于研究知识的获取、表达与组织、推理方法、诊断模型,以及诊断策略,建立基于知识的设备诊断理论体系和开发智能诊断系统。

1.2.1 智能故障诊断的研究现状

现代高技术战争对武器装备的可靠性、维修性、保障性提出了很高的要求,武器装备的综合保障能力事关战争的成败,成为战斗力的重要组成部分。研究复杂武器装备的故障诊断系统,特别是智能故障诊断系统,以之辅助进行装备故障的检测、定位、维修,将会改革传统的维修方法,缩短维修时间,提高保障能力。

智能故障诊断是人工智能的一个重要研究内容。人工智能在故障诊断领域中的应用,实现了基于人类专家经验知识的设备故障诊断,并将其提高到智能化诊断水平。智能诊断是故障诊断领域的前沿学科之一,目前正处于研究热点之中。

当前,设备故障诊断领域最活跃的两类诊断系统,是基于知识的专家系统和基于神经网络的智能诊断系统。

专家系统实际上是人工智能计算机程序系统,它能够利用目前大量人类专家的专门知识和方法,用仿人类专家推理过程的计算机模型,来解决那些在现实生活中只有专家才能解决的复杂问题。

20 世纪 90 年代以来,人工神经网络智能诊断系统迅速发展,已成为国际上

故障诊断领域最新的热点。神经网络具有独特的容错、联想、推测、记忆、自适应、自学习和处理复杂多模式等优点：

在知识获取上,神经网络的知识不需要由知识工程师进行整理、总结以及消化领域专家的知识,只需要用领域专家解决问题的实例或范例来训练神经网络;

在知识表示方面,神经网络采取隐式表示,在知识获取的同时,自动产生的知识由网络的结构和权值表示,并将某一问题的若干知识表示在同一网络中,通用性强,便于实现知识的自动获取和并行联想推理;

在知识推理方面,神经网络通过神经元之间的相互作用来实现推理。

智能诊断系统是一项综合性极强的复杂系统工程,涉及故障诊断、人工智能、模式识别、计算机网络、通信等方面的理论,存在许多问题有待解决和研究。因此,将其同当代的前沿学科相结合,借鉴和引入相关学科的新思维和新方法,在生产实际现场中逐步提高故障诊断的智能化水平,是这一领域专家和学者共同的研究任务。

1.2.2 几种智能故障诊断模型比较

现有的智能故障诊断模型主要有:基于规则的诊断、基于实例的诊断、模糊诊断、基于神经网络的诊断,以及近年来成为研究热点的基于贝叶斯网络的诊断模型。各种诊断模型在诊断知识获取、诊断结论的可靠性(主要指对异常类故障的诊断能力),以及解释能力上具有各自的特点和优势。

1. 基于规则的诊断

基于规则的诊断系统是通过专家诊断经验的积累而建立的。这些经验由规则形式描述,将征兆与潜在的故障联系起来。通过这些规则来模仿专家在故障诊断过程中的关联推理过程,是一种基于经验知识,而不是基于系统结构或行为过程知识的诊断方法。

该方法的特点是:诊断规则的表现形式易读,知识变更容易,解释方便、诊断推理过程较简单,可借鉴一些成熟的医疗诊断方法。但是,基于规则的诊断方法又存在着知识获取困难,知识间上、下文敏感,不确定推理及自适应能力差等问题。在诊断方面,存在的问题是对机器系统的依赖性强,即每一种新机器都需要一组新规则,而积累这些规则是需要很长时间的,知识成了经验的封装。在故障诊断之前,必须要有相当多的经验规则,否则无法进行诊断。如果诊断经验不多,不仅会出现新的情况,还会发生漏诊现象。

2. 基于实例的诊断模型

实例推理(Case-Based Reason, CBR)是 AI 中新兴的一种推理技术,是一种使用过去的经验实例指导解决新问题的方法。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。

基于实例推理的关键,是如何建立一个有效的实例索引机制与实例组织方式。将 CBR 引入故障诊断领域面临的问题是,能搜集到的诊断实例是有限的,不可能覆盖所有解空间,搜索时也可能漏掉最优解。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,产生严重后果。此外,故障实例之间的一致性维护困难,改写新实例需要更多的知识。

3. 基于模糊理论的诊断模型

模糊语言变量接近自然语言,知识的表示可读性强,模糊推理逻辑严谨,类似人类思维过程,易于解释。但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。此外,由于模糊语言变量是用模糊数(即隶属度)表示的,如何实现语言变量与模糊数之间的转换是实现上的一个难点。

4. 基于人工神经网络的故障诊断模型

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)是由大量简单处理单元广泛连接而成的复杂的非线性系统,具有学习能力、自适应能力、非线性逼近能力等。模式识别是 ANN 最突出的应用领域之一。

近几年,国、内外掀起了一股基于神经网络的故障诊断研究热潮,其中大多数是关于 BP 网络的诊断方法研究。

BP 网络具有较强的非线性逼近能力,能进行故障模式识别,还能进行故障严重程度评估和故障预测,因此应用最广。但由于 BP 算法在迭代时,采用梯度下降法,尚存在着收敛慢、振荡和局部极小等问题。从公开发表的文献看,对故障诊断中的 ANN 算法的各种改进研究,都是为了解决 BP 算法的问题。除此之外, BP 算法用于故障诊断的一个突出问题,还在于对异常类故障的处理能力低,以及不具备增量学习功能等问题。

虽然 ANN 算法存在的问题可以通过对算法的进一步研究而改进,但 ANN 由于知识的隐式表示导致解释能力差,用户对其诊断行为理解困难,这才是本质性的问题。

5. 基于贝叶斯网络的故障诊断模型

在设备故障诊断领域中,不确定性问题占多数,这主要是由诊断对象的复杂性、测试手段的局限性、知识的不精确性决定的。尤其是大型复杂的机电设备,其构件之间及构件内部都存在很多错综复杂、关联耦合的相互关系,不确定因素及不确定信息充斥其间。其故障可能是多故障、关联故障等复杂形式。面对具有不确定性(包括不完整性)的信息,如何尽快定位故障是一个棘手的问题。

基于概率推理的贝叶斯网络(BayesianNet-work)就是为解决不确定性、不完整性问题而提出的,它对于解决复杂设备不确定性和关联性引起的故障有很大的优势,在多个领域中获得了广泛关注。

贝叶斯网络又称为可信度网络(belief networks),是 Bayes 方法的扩展,是目前不确定知识表达和推理领域最有效的理论模型之一。在 1988 年由 Pearl 提出后,已经成为当前的研究热点。

贝叶斯网络是一种基于网络结构的有向图解描述,是人工智能、概率理论、图论、决策分析相结合的产物。适用于表达和分析不确定性和概率性的事物,应用于有条件地依赖多种控制因素的决策,可以从不完全、不精确或不确定的知识或信息中做出推理。

应用贝叶斯网络(BN)进行故障诊断有如下许多优势:

(1) 贝叶斯网络方法有坚实的理论基础。贝叶斯网络以概率推理为基础,推理结果说服力强。而且相对贝叶斯方法来说,贝叶斯网络对先验概率的要求大大降低。同时,贝叶斯网络表达的条件独立性能有利于表达设备故障之间的关联关系;

(2) 应用贝叶斯网络的概率推理算法,对已有的信息要求低,可以进行在信息不完全、不确定情况下的推理;

(3) 贝叶斯网络更适合于表达设备故障诊断问题。用故障树模型表达故障诊断问题是常用的方法,可以进行诊断策略优化的研究。但故障树模型一旦建造好就不容易更改,不容易接受和处理新信息,不容易进行人机信息交互,而且难于将与设备故障无关,但可以用以诊断故障的相关信息纳入故障诊断过程之中。而贝叶斯网络通过实践积累可以随时进行学习,以改进网络结构和参数,提高故障诊断能力;

(4) 贝叶斯网络具有很强的学习能力。具有学习能力是人工智能的重要特征,贝叶斯网络学习就是寻找一个能最好匹配一个给定训练样本集的网络(DAG)的过程,包括学习网络结构 G 和学习条件概率表 P 。

BN 非常适合于表达诊断决策问题,用图形与统计结合的模型表达设备的部件、元件和可以用来诊断它们的测试手段(包括观测)以及它们的相互关系。目前,贝叶斯网络在故障诊断领域已经有成功应用,包括工业上的故障诊断(如美国通用电气公司的 Auxiliary Turbine Diagnosis)、航天故障诊断(如美国航空航天局和 Rockwell 公司联合研制的 Diagnosis of Space Shuttle Propulsion System)、打印机故障诊断系统(惠普公司的 SASCO)等。

经过以上对各种智能故障模型的分析比较,基于贝叶斯网络的故障诊断方法是解决复杂系统不确定性问题的有效途径,故本书重点研究基于贝叶斯网络

的智能诊断方法。

1.2.3 智能故障诊断的发展趋势

1. 集成型智能故障诊断系统

故障诊断与知识表示和推理方法有着密切的联系,其领域知识可用对象模型、经验规则、神经网络模型、案例等来表示。基于对象模型、基于经验规则、基于神经网络模型、基于案例的,以及基于贝叶斯网络的诊断方法各有其优势和特点,但它们各自也存在着局限性。对于实际对象的故障诊断,如用单一的知识表示方法,有时难以完整表示对象的故障诊断领域知识。因此,集成多种知识表示方法则能更好地表示对象的故障诊断领域知识。集成基于对象模型、经验规则、神经网络模型、案例的集成型诊断方法能综合各诊断方法的特点,克服各诊断方法的局限性,从而提高诊断系统的智能性和诊断效率。集成型的故障诊断系统还能有效地处理真值维护、结论解释、机器学习等。

2. 基于机器学习的智能故障诊断系统

智能系统的核心问题是它的学习能力。知识的自动获取一直是智能故障诊断专家系统研究中的难点。解决知识获取问题的途径是机器学习,即让机器自身具有获取知识的能力,能在实际工作中不断总结成功和失败的经验教训,对知识库中的知识自动进行调整和修改,以丰富和完善系统的知识。机器学习是提高故障诊断系统智能的主要途径,也是衡量一个系统智能程度的主要标志。因此,发展和完善现有的机器学习方法,探索新的学习方法,建立实用的机器学习系统,特别是多种学习方法协同工作的智能诊断系统,将是今后研究的一个重要方向。

3. 由单机诊断到远程分布式全系统智能诊断

现有的设备诊断系统大部分都是面向单台、单机或单类设备的,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设备的异构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。目前,很多大型成套设备或机构由远程分布的不同类子系统组成,相应其诊断系统中的系统级诊断系统和各子诊断系统也要进行诊断信息的传输交流。因此,建立远程分布式全系统智能诊断系统,可以实现异地多专家对同一设备的协同诊断,以及多台设备共享同一诊断系统,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,促进诊断学的综合发展。

第2章 装备故障诊断的理论基础

故障诊断是人工智能的一个重要研究内容。人工智能在故障诊断领域中的应用,实现了基于人类专家经验知识的设备故障诊断技术,并将其提高到智能化诊断水平。智能诊断是故障诊断领域的前沿学科之一,目前正处于研究热点之中。

2.1 武器装备故障特点

随着高技术及现代工业的发展,武器装备智能化程度越来越高,系统越来越复杂。复杂的武器装备故障具有以下几个基本特点:

2.1.1 复杂性

复杂性是复杂装备系统故障的最基本的特性。由于构成装备的各部件之间相互联系、紧密耦合,致使故障原因与故障征兆之间表现出极其错综复杂的关系,即同一种故障征兆往往对应着几种故障原因,同一种故障原因又会引起多种故障征兆,如图2-1所示。这种原因与征兆之间不明确的对应关系,使得其故障诊断具有极大的复杂性。

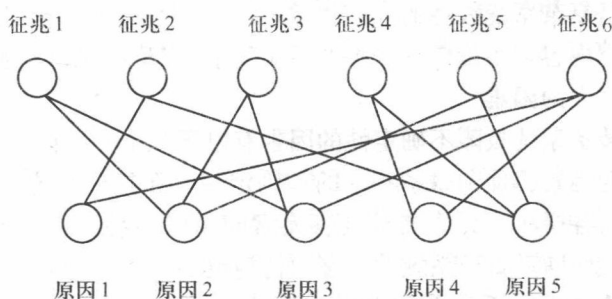


图2-1 故障征兆与原因的复杂关系

2.1.2 层次性

复杂装备系统一般都是多层次系统,这就决定了其故障的层次性。任何故