



中国计算机学会
学术著作丛书

基于知识的诊断推理

杨叔子 丁 洪
史铁林 郑小军

学出版社
学技术出版社



作者简介

杨叔子,1956年毕业于华中工学院(现名华中理工大学);现为中国科学院学部委员;博士生导师;任中国人工智能学会副理事长、中国振动工程学会常务理事,全国机械控制工程研究学会理事长,中国机械工程学会理事;1988年由国家人事部批准为有突出贡献的中青年专家,1989年被评为全国优秀教师,1990年被评为全国高校先进科技工作者,1991年被评为全国教育系统劳动模范。他在机械工程信息技术与智能技术领域进行着开拓性研究,科研成果通过部、省级鉴定25项,获国家自然科学基金与部、省级科技进步奖12项,获专利1项。他出版著作8部,发表学术论文370余篇。

Knowledge-Based Diagnostic Reasoning

Yang Shuzi Ding Hong
Shi Tielin Zheng Xiaojun

Abstract

This book systematically studies the theory, methodology and systems of knowledge-based diagnostic reasoning (KBDR) for the diagnostic problem solving of a complex system. It consists of twenty one chapters, being divided into seven sections. The first section introduces the background, state of the art and fundamental theories of KBDR. In the second section a conceptual framework about the KBDR is built and diagnostic strategies are studied in some detail. The techniques of diagnostic reasoning based on shallow knowledge models and those on deep knowledge models are presented in the third and the fourth sections respectively. Section five concentrates on the integration of symbolic reasoning with numerical calculation. And section six considers the knowledge acquisition and machine learning as well as the management and maintenance of diagnostic knowledge bases. The final section addresses the developing methodologies of a KBDR system and describes the implementation architecture of four practical systems built by authors.

清华大学出版社 广西科学技术出版社
计算机学术著作出版基金

评审委员会

主任委员 张效祥

副主任委员 周远清 汪成为

委 员 王鼎兴 杨芙清 李三立 施伯乐 徐家福
夏培肃 董韫美 张兴强 徐培忠

出 版 说 明

近年来,随着微电子和计算机技术渗透到各个技术领域,人类正在步入一个技术迅猛发展的新时期。这个新时期的主要标志是计算机和信息处理的广泛应用。计算机在改造传统产业,实现管理自动化,促进新兴产业的发展等方面都起着重要作用,它在现代化建设中的战略地位愈来愈明显。计算机科学与其它学科的交叉又产生了许多新学科,推动着科学技术向更广阔的领域发展,正在对人类产生深远的影响。

科学技术是第一生产力。计算机科学技术是我国高科技领域的一个重要方面。为了推动我国计算机科学及产业的发展,促进学术交流,使科研成果尽快转化为生产力,清华大学出版社与广西科学技术出版社联合设立了“计算机学术著作出版基金”,旨在支持和鼓励科技人员,撰写高水平的学术著作,以反映和推广我国在这一领域的最新成果。

计算机学术著作出版基金资助出版的著作范围包括:有重要理论价值或重要应用价值的学术专著;计算机学科前沿探索的论著;推动计算机技术及产业发展的专著;与计算机有关的交叉学科的论著;有较大应用价值的工具书;世界名著的优秀翻译作品。凡经作者本人申请,计算机学术著作出版基金评审委员会评审通过的著作,将由该基金资助出版,出版社将努力做好出版工作。

基金还支持两社列选的国家高科技重点图书和国家教委重点图书规划中计算机学科领域的学术著作的出版。为了做好选题工作,出版社特邀请“中国计算机学会”、“中国中文信息学会”帮助做好有关学术著作丛书的列选工作。

热诚希望得到广大计算机界同仁的支持和帮助。

清华大学出版社
广西科学技术出版社

计算机学术著作出版基金办公室

1992年4月

· V ·

序 言

计算机是当代发展最为迅猛的科学技术,其应用几乎已深入到人类社会活动和生活的一切领域,大大提高了社会生产力,引起了经济结构、社会结构和生活方式的深刻变化和变革,是最为活跃的生产力之一。计算机本身在国际范围内已成为年产值达 2500 亿美元的巨大产业,国际竞争异常剧烈,预计到本世纪末将发展为世界第一大产业。计算机科技具有极大的综合性质,与众多科学技术相交叉而反过来又渗入更多的科学技术,促进它们的发展。计算机科技内容十分丰富,学科分支生长尤为迅速,日新月异,层出不穷。因此在我国计算机科技尚比较落后的情况下,加强计算机科技的传播实为当务之急。

中国计算机学会一直把出版图书刊物作为学术活动的重要内容之一。我国计算机专家学者通过科学实践,做出了大量成果,积累了丰富的经验与学识。他们有撰写著作的很大积极性,但相当时期以来计算机科技书籍由于印数不多,出版往往遇到不少困难,专业性越强越有深度的著作,出版难度越大。最近清华大学出版社与广西科学技术出版社为促进我国计算机科学技术及产业的发展,推动计算机科技著作的出版工作,特设立“计算机学术著作出版基金”,以支持我国计算机科技工作者撰写高水平的学术著作,并将资助出版的著作列为中国计算机学会学术著作丛书。我们十分重视这件事,并已把它列为学会本届理事会的工作要点之一。我们希望这一系列丛书能对传播学术成果、交流学术思想、促进科技转化为生产力起到良好作用,能对我国计算机科技发展具有有益的导向意义,也希望我国广大学会会员和计算机科技工作者,包括海外工作和学习的神州学人们能积极投稿,出好这一系列丛书。

中国计算机学会

1992年4月20日

前 言

我怀着十分欣慰的心情,看到《基于知识的诊断推理》这本专著出版了。

诊断推理在医疗领域、工程领域、经济领域乃至社会领域有着广泛的应用范围。特别是,近十几年来,一些关键的现代技术设备连续出现重大的事故,造成了严重的灾害性的后果,这不能不迫使人们在设备诊断方面进行大量的研究,形成了“设备诊断”这一当前的研究热点。这是情况的一方面。

情况的另一方面是,人工智能近十几年来得到长足进展,特别是它的分支——专家系统、基于知识的系统发展更为迅速,是人工智能所有分支中最为活跃、最少争议、最为实用、最富成果的分支。从1969年美国Stanford大学研制成功的第一个专家系统DENDRAL问世以来,特别是进入80年代以来,各种专家系统、基于知识的系统更如雨后春笋,不断涌现。

这两方面情况的结合,使基于知识的诊断推理,这一人工智能的重要分支发展迅速,成果迭出。从系统功能的角度来看,基于知识的系统主要可分为三大类型:分类型(即诊断型)系统,规划型(即设计型)系统与解释型系统。这三类系统有着十分不同的理论基础、问题求解策略与实现的途径。基于知识的诊断推理这一分支学科即为从事研究分类型系统的概念模型、知识表达与组织、知识获取与学习、推理策略诸方面的理论、方法与实现问题的专门学科。尽管这一分支学科发展迅速、成果迭出,然而,令人感到欠缺的是,目前还没有一本关于这一分支学科的系统专著。

鉴于上述,作者早有心于此,拟出一专著。在中国计算机学会、清华大学出版社、广西科技出版社与有关专家的支持下,这一心愿得以实现。本专著以我所指导的博士生丁洪、郑小军、史铁林他们三位的博士学位论文作为主要基础,采用我所指导的博士生钟毓宁博士学位论文、硕士生桂修文的硕士学位论文与研究成果的有关部分,以及丁洪、史铁林两位近年的研究成果,并结合国内外在这方面的最新成就,系统地阐述了基于知识的诊断推理的理论、方法与系统,介绍了作者将基于知识的诊断推理应用于实践的典型例子。

本书共分七篇。第一篇“总论”,介绍了基于知识的诊断推理的产生、发展、现状与趋势,阐述了诊断推理的主要研究内容与有关基础知识。第二篇“概念体系与诊断策略”,系统地研究了基于知识的诊断推理的概念体系与诊断策略,这是从宏观角度对基于知识的诊断推理的研究。第三篇“基于浅知识的诊断推理”,研究了基于浅知识的诊断推理,介绍了具有代表性的诊断推理方法。第四篇“基于深知识的诊断推理”,研究了基于深知识的诊断推理,介绍了作者与国内外在这方面的最新研究成果。第五篇“符号推理与数值计算的集成诊断”,研究了基于数值的诊断推理,特别介绍了神经网络技术在诊断推理中的应用。第六篇“诊断推理的可靠性”,研究了诊断知识的分类、特征、组织模型、知识库的管理与维护,并从知识库的角度研究了诊断的可靠性问题。第七篇“基于知识的诊断系统与应用实例”,研究了基于知识的诊断系统的基本结构与建造过程,介绍了几个典型的诊断专家系

统开发工具与作者所完成的四个应用实例。丁洪同志撰写了第一、二、三、九、十二、十四、十五、二十章和第二十一章的第一节,根据周曼丽教授提供的鉴定材料,整理出第二十一章第四节的内容;并对第四章内容作了部分修改与整理。郑小军同志撰写了第七、十三、十九章;史铁林同志撰写了第四、五、八、十、十一章和第二十一章的第三节;钟毓宁同志撰写第十六章的前四节和第十七章;桂修文同志撰写了第六章和第十六章的第五节;吴波同志撰写了第十八章和第二十一章的第二节。

在这里,我不能不十分感谢丁洪、郑小军、史铁林、钟毓宁、桂修文、吴波、周安法诸同志与周曼丽教授,没有他们的共同努力,就没有这本专著的出版。这本专著出版的联系是郑小军同志所完成的。他是我所指导的第一个从事诊断推理研究的博士生。这本专著的编写大纲是据郑小军、史铁林两位提出初稿,由我、丁洪同志与他们共同修改而确定的。特别应提出,这本专著的汇总与统稿工作是由丁洪同志完成的,定稿也是在丁洪同志参加下,与我共同完成的,丁洪同志承担了大部分工作。而且,丁洪同志是在科研任务特别繁忙的情况下完成这些工作的,这不仅显示了他的艰苦奋斗的献身精神,而且显示了他在人工智能、基于知识的诊断推理方面的研究水平。我曾在一本专著的前言中引用过,“有心酬岁月,无梦到功名”这一名句,在这里,我愿再引用一次,送给我所指导过的研究生们和一直给我巨大帮助的周曼丽教授。

当然,作者都一致衷心感谢中国计算机学会、清华大学出版社、广西科技出版社与有关的专家,没有他们的大力支持与合作,这本专著至少不会这么迅速问世。感谢中国计算机学会秘书长陈树楷教授和北京系统工程研究所何新贵研究员对本书的积极推荐。在这里,我还要特别感谢我的诸位同行:清华大学严普强教授和刘西拉教授,中科院自动化所戴汝为教授、北京航空航天大学渠川璐教授和朱心雄教授、北京科技大学涂序彦教授、中国科学院北京管理学院张志方教授、机电部电子科学研究院刘锡荟教授、北京理工大学王遇科教授、天津大学彭泽民教授和刘又午教授、哈尔滨工业大学黄文虎教授、西安交通大学屈梁生教授和何钺教授、上海交通大学林少培教授和陆鑫森教授、浙江大学童忠钊教授和何志均教授、东南大学黄仁教授、华中理工大学师汉民教授、周济教授、熊有伦教授、程时杰教授以及有关专家教授,他们都曾对丁洪、郑小军、史铁林等同志的博士学位论文和研究工作提出了积极的意见和给予了有益的指导。这些深刻的意见都已汇于本书之中。作者还得感谢华中理工大学有关部门、有关专家与我所在的教研室的同志给予的支持;感谢我室郭华、张保国同志在成书打印过程中所付出的辛勤劳动。

鉴于作者业务水平有限,撰写时间紧迫,而基于知识的诊断推理的国内外研究工作发展很快,因此,本书中的错误、不妥、欠缺之处一定难免。作者以抛砖引玉之心情将此书奉献给读者,希望专家与读者在阅读中,多方面加以审查,不吝指教,帮助我们提高,帮助此书趋于完善,我们将不胜感激。

杨叔子

于华中理工大学

1992. 5. 1

目 录

第一篇 总 论

第一章 基于知识的诊断推理的产生、现状与发展	2
1.1 诊断推理的产生背景	2
1.2 存在的问题与对策	3
第二章 诊断知识的本质特征	9
2.1 树状结构	9
2.2 知识层次	10
2.3 知识深度	13
2.4 不完全性	14
2.5 不确定性	15
第三章 诊断推理的主要方法与分类	17
3.1 按推理方式分类	17
3.2 按确定性分类	18
3.3 按知识层次分类	20

第二篇 概念体系与诊断策略

第四章 诊断推理的概念体系	30
4.1 诊断问题的概念体系	30
4.2 诊断问题的形成与形式化定义	37
4.3 故障诊断的基本内容、过程与特点	40
第五章 基于知识的诊断推理策略	45
5.1 诊断策略的研究内容	45
5.2 影响诊断策略的主要因素	54
5.3 机械设备的诊断策略	57
第六章 不确定性表示理论与推理方法	58
6.1 不确定性信息的表示	58
6.2 概率方法	61
6.3 证据理论	63
6.4 可能性理论	66
6.5 发生率计算	67
6.6 实用的不确定性推理方法	69

第三篇 基于浅知识的诊断推理

第七章 符号推理与概率推理的集成	76
7.1 节约覆盖集理论与其概率模型	76
7.2 新的概率模型	80
7.3 并发诊断问题求解	84
7.4 序贯诊断问题求解	85
7.5 综合诊断策略	88
第八章 符号推理与模糊推理的集成	89
8.1 诊断模型的建立	89
8.2 模糊覆盖集诊断模型的求解算法	91
8.3 不完全解释诊断解的产生	95
8.4 一个简单的诊断实例	96
8.5 小结	96
第九章 层次因果诊断模型	97
9.1 基本概念与假设	97
9.2 层次因果诊断策略	100
9.3 不确定性层次推理	102
9.4 复合诊断假设的集成	105
9.5 小结	107
第十章 层次分类诊断模型	108
10.1 引言	108
10.2 层次分类方法	108
10.3 层次分类诊断模型	110
10.4 推理、控制与解释机制	117

第四篇 基于深知识的诊断推理

第十一章 基于因果网络模型的诊断推理	120
11.1 诊断模型的建立	121
11.2 并发诊断问题求解	126
11.3 序贯诊断问题求解	128
11.4 综合诊断策略	129
第十二章 基于物理过程描述的诊断推理	130
12.1 引言	130
12.2 化油器诊断问题的描述	130
12.3 基于物理过程描述的知识组织模型	133
12.4 一个简单的诊断实例	135
12.5 小结	136

第十三章	基于结构与行为功能模型的诊断推理	137
13.1	引言.....	137
13.2	基本概念.....	137
13.3	问题的形式化.....	140
13.4	并发诊断问题求解.....	141
13.5	序贯诊断问题求解.....	145
13.6	综合诊断策略.....	147

第五篇 符号推理与数值计算的集成诊断

第十四章	基于状态知识的诊断推理	150
14.1	引言.....	150
14.2	状态知识源的概念.....	151
14.3	状态知识的表示与获取.....	152
14.4	基于状态知识的推理.....	154
14.5	波形的智能理解.....	155
14.6	小结.....	165
第十五章	神经网络计算与符号推理的集成	166
15.1	人工神经网络与状态识别.....	166
15.2	基于神经网络的知识处理方法.....	169
15.3	神经元计算与符号推理的集成.....	176

第六篇 诊断推理的可靠性

第十六章	诊断知识的组织、管理与维护	182
16.1	诊断知识的特征.....	182
16.2	动态版本管理理论模型.....	185
16.3	诊断知识的组织模型.....	188
16.4	诊断知识的版本管理.....	193
16.5	知识库的检验.....	193
第十七章	诊断推理的可靠性模型	200
17.1	诊断知识的冗余.....	200
17.2	智能诊断的可靠性模型.....	201
17.3	智能诊断的可靠性评估.....	205
第十八章	面向对象的诊断知识表达与推理	206
18.1	面向对象的思想和方法学.....	206
18.2	面向对象的知识表达方法.....	207
18.3	面向对象的诊断知识的组织和表达.....	209
18.4	面向对象的诊断推理.....	215
第十九章	诊断知识的获取与学习	220

19.1	知识获取的证据网络方法	220
19.2	归纳学习的粗糙集方法	223
19.3	知识获取系统	231

第七篇 基于知识的诊断系统与应用实例

第二十章	基于知识的诊断系统的开发策略	234
20.1	诊断系统的研究与发展	234
20.2	诊断系统的组成与基本结构	235
20.3	诊断系统的知识获取与机器学习	236
20.4	诊断系统的开发策略	237
20.5	机械设备诊断专家系统工具	238
第二十一章	基于知识的诊断系统应用实例	246
21.1	基于知识的汽车发动机诊断系统	246
21.2	基于知识的舰艇发动机诊断系统	255
21.3	基于知识的汽轮发电机组在线工况监测与故障诊断系统	260
21.4	基于知识的雷达显示设备故障诊断系统	269
参考文献		279
名词索引		290

第一篇 总论

第一章

基于知识的诊断推理的产生、现状与发展

人类在对各种事物进行分析、综合并最后作出决策的过程中,通常都要从已掌握的事实出发,运用事物之间的相互关系(如因果关系等),找出其中蕴含的更多事实,这个过程通常称之为推理。推理是人类的重要智能活动,研究该(自然)推理过程的本质,并建立适当的逼近模型,以便实现(人工)推理过程的自动化是人工智能技术中的一个重要研究领域,即自动推理(Automatic Reasoning)。近十多年来,人工智能技术在诊断领域中得到了广泛的应用,取得了可喜的成果,在此基础上发展起来的一门新兴学科——基于知识的诊断推理,正是自动推理中的一个重要研究分支,也是智能诊断系统的理论与技术基础。

1.1 诊断推理的产生背景

“诊断”这个术语来自医学诊断(Medical Diagnosis)。它的含义虽可从“医学诊断”这个术语去理解,然而其研究范畴却已远远超出医学诊断。“诊断技术”(Diagnostic Technology)在医疗领域、工程领域乃至社会领域均有广泛的应用范围。尤其是在工程领域,人们总是希望工业生产中的各种设备完好、正常、并充分发挥效益,尤其是对于那些通常凭直观很难把握其状态的大型复杂的机电设备。然而,随着现代工业及科学技术的迅速发展,现代设备的结构越来越复杂,功能越来越完善,自动化程度也越来越高,不仅同一设备的不同部分之间互相关联,紧密耦合,而且不同设备之间也存在着紧密的关系,在生产过程中形成一个整体。因此,一处故障就可能引起链式反应,导致整个设备甚至整个生产过程不能正常运行。轻者造成巨大的经济损失,重者还会产生严重的灾难性的人员伤亡和社会影响。近年来,因关键的设备故障而引起的灾难性事故时有发生,譬如:1972年日本关西电力公司南海电厂3号600MW汽轮发电机组因振动引起的断轴毁机事件,1985年中国大同电厂和1988年中国秦岭电厂的200MW汽轮发电机组的严重断轴毁机事件,1986年美国航天飞机“挑战者”号的空中爆炸事件,1986年苏联切尔诺贝利核电站的大量放射性元素外泄事件,1988年英国北海油田帕尔波·阿尔号大型采油平台的爆炸失火事件等等。这些严重的、或灾难性的事件的不断发生,迫使人们在设备诊断方面进行了大量的研究,形成了“设备诊断”这一研究领域,并不断提出新的任务和更高的要求。虽然,以传感器技术为基础,以信息处理技术为手段的“现代设备诊断技术”已经历了近30年的发展与应用过程,并取得了明显的经济效益,但进一步的理论研究与应用结果表明,它本身存在着如下几个方面的局限性:

(1) 各种检测手段和诊断方法都未将诊断对象看成是一个有机的整体,大多是利用

诊断对象所表现出的特定信号(特征信号)来诊断特定类型的故障,未能有效地考虑多故障同时发生和各种故障之间可能存在的相互联系及影响。

(2) 这种设备诊断技术只是种类繁多的检测手段和多种具体的诊断方法在某种程度上的“堆积”,缺乏统一的概念体系和系统化的理论基础。

(3) 利用信息处理技术和计算机技术,仅仅在一定程序上弥补了人类在数值处理上的不足。然而大量的理论研究与应用结果表明,为了进一步地提高诊断效率和水平,几乎在每个主要环节上都需要领域专家的知识和处理问题的方法,尤其是辩证思维和符号处理能力。

(4) 基于这种现代设备诊断技术构造的诊断系统专用性非常强。一旦完成,它们的诊断能力在很大程度上也就确定了,其功能难以扩充或修改,并且人-机接口“柔性”很差。

另一方面,人工智能技术近十几年来得到了很大发展,特别是专家系统、知识工程发展得更为迅速。自1969年美国Stanford大学研制成功了第一个专家系统DENDRAL,特别是面向诊断领域的专家系统MYCIN于1974年问世以来,基于知识的诊断问题求解一直是人工智能中的一个研究焦点。早期的著名专家系统中有近一半是用于医疗诊断的,如INTERNIST, CASNET等。近几年来,这些研究成果被广泛应用于设备诊断领域,先后建造了面向不同对象的DELTA, REACTOR, PDS, KBSSED, KBMED, KBTMD等专家系统。设备诊断技术正向它的智能化阶段迈进。在这一阶段,领域专家的知识将得到充分的重视,诊断问题的研究将致力于模拟专家的推理过程、控制和运用各种诊断知识的能力以及诊断问题的实质等问题的解决。诊断对象将作为一个有机整体被研究,故障产生与传播机理的研究将与诊断对象的结构、功能等方面的知识描述联系起来,研究与应用将面对诊断对象的多故障同时发生的诊断问题。值得指出的是,这里所讲的“智能化”,不是指在诊断过程的某些环节实现“智能化”,或建立几个诊断专家系统,而是指在概念和处理问题的方法上“知识化”,即将目前基于信息处理的设备诊断技术发展为基于知识处理的设备诊断技术,以知识处理技术为基础,在知识的层次上,实现辩证逻辑与数理逻辑的集成、符合处理与数值处理的统一、推理过程与算法过程的统一、知识库与数据库的交互等。

人工智能技术与诊断学科的结合,导致了一门崭新的分支学科——基于知识的诊断推理的诞生与发展。该学科所研究的就是基于知识的诊断问题求解所涉及到的主要理论问题,包括概念体系、诊断知识处理与应用、诊断系统的结构与实现等。从发展的成熟程度来看,诊断专家系统或基于知识的诊断系统是最为优秀的一种专家系统或基于知识的系统。而构造这些系统的一个重要理论基础就是基于知识的诊断推理。基于知识的诊断推理也已经历了两个发展阶段,即基于单一深度领域知识源的诊断推理和基于多种深度领域知识源复合的诊断推理。研究工作发展迅速、成果迭出。

1.2 存在的问题与对策

近10年来,基于知识的诊断推理技术虽然有了长足的发展,但从分支学科的要求来看,无论在理论体系的建立方面,还是解决实际问题方面,仍有一段艰苦的路程要走。影响诊断推理技术发展的因素很多,其中,有些关键问题已被研究多年,正被逐渐解决;而有些