

# 装备智能故障诊断技术

Intelligent Fault Diagnosis Technology  
for Equipments

杨军 冯振声 黄考利 等编著



國防工業出版社

<http://www.ndip.cn>

# 装备智能故障诊断技术

## Intelligent Fault Diagnosis Technology for Equipments

杨 军 冯振声 黄考利 等编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书详细地阐述了以人工智能技术为基础的武器装备智能故障诊断的理论与方法,重点介绍了模糊逻辑、遗传算法、专家系统和神经网络及其相互结合的智能故障诊断技术,此外还结合武器装备的特点,构建了装备智能故障诊断通用平台,建立了某型装备智能故障诊断系统,同时还给出了智能故障诊断技术在相关领域中的应用实例。

本书主要作为高等院校相关专业的研究生和高年级本科生的教材,也可供有关院校、研究所和部队从事装备维修工程的广大工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

装备智能故障诊断技术 / 杨军等编著. —北京:国防工业出版社, 2004.8  
ISBN 7-118-03548-3

I. 装... II. 杨... III. 人工智能—武器装备—故障诊断 IV. E92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 065899 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 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$  308 千字

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—3500 册 定价:25.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 本书编委会

主 编 杨 军

副主编 冯振声 黄考利

编著人员(按姓氏笔画排序)

冯 振 声      李 岩   杨 军   张延生

欧阳晓黎      贾海鹏   黄考利

# 前 言

世界高新技术的发展及战争形态的变化对武器装备提出了越来越高的要求,现代化武器装备日趋复杂化、集成化、高速化、自动化和智能化。现代武器装备整体效能的发挥取决于两个方面,一是武器装备设计与制造的各项技术指标的实现,为此设计中要采用可靠性设计方法,要有提高安全性的措施;二是武器装备的安装、运行、管理、维修和诊断措施的实施。因此装备技术保障已成为战斗力的重要组成部分,它与作战性能居于同等重要的地位。为了保障武器装备经常处于良好的战斗准备状态,武器装备的性能检测和故障诊断是综合技术保障的核心,进一步讲,装备的故障诊断技术是武器装备管理、维护和维修工作的关键。针对现代化的武器装备,单纯地依靠传统的故障诊断方法和手段,已经不能为这种复杂的大型装备提供快速准确的故障诊断,进而也就不能保障武器系统避免严重的或灾难性的事故。正是在这样的背景下开展了智能故障诊断技术的研究。

智能故障诊断技术的研究始于 20 世纪 80 年代初期,现在还远没有达到成熟的阶段,但智能诊断的开展大大提高了诊断的效率和可靠性。本书是对多年研究智能故障诊断技术中所取得的研究成果的归纳总结,重点研究了以人工智能理论为基础的智能故障诊断技术及其大型复杂武器装备故障诊断之中的应用。

本书共分 7 章,第 1 章介绍了故障诊断领域的历史、现状和发展及智能故障诊断的基本概念和基本方法,重点阐述了各种智能故障诊断的方法和优缺点及智能故障诊断技术的发展方向;第 2 章阐述了智能故障诊断系统中知识的分类、深浅知识的关系和结合组织模型、知识获取的一般模型、不确定性诊断知识的表示和处理方法、不确定性推理的一般模型及机器学习策略;第 3 章阐述了一种把有向图、模糊理论和遗传算法相结合的智能故障诊断方法,用有向图来构造系统模型,用模糊集来解决模型中的不确定性问题,用遗传算法来对可能的故障传播路径进行搜索;第 4 章阐述了模糊理论、神经网络、专家系统、基于神经网络的专家系统和基于模糊神经网络的专家系统 5 种故障诊断理论与方法,在深入细致地研究了知识表示的基础上,给出了具体实现过程;第 5 章介绍了一般智能故障诊断系统的开发策略,建立了某型导弹武器系统智能故障诊断系统;第 6 章阐述了基于模式识别的故障诊断方法,针对现代化武器装备的特点,从通用性、实用性和可扩展性角度出发,构建了故障模式识别通用平台;第 7 章给出了专家系统、神经网络、模糊专家系统及专家系统与神经网络相结合的故障诊断方法在各相关领域中的应用实例。

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,并且将其提高到一个新水平——智能化诊断水平。诊断技术的智能化是当今故障诊断技术的发展趋势。本书是为开展装备的技术维护和维修而编写的,本书的出版对部队装备建设具有现实意义和工程实用价值。

本书第 1 章由欧阳晓黎、李岩和杨军编著,第 2 章由李岩和冯振声编著,第 3 章由杨

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第1章 绪 论                  | 1  |
| 1.1 故障诊断技术历史、现状及发展的系统分析  | 1  |
| 1.1.1 故障诊断技术历史、现状与发展     | 1  |
| 1.1.2 故障诊断基本方法           | 2  |
| 1.1.3 人工智能发展历程           | 4  |
| 1.1.4 智能故障诊断技术现状与发展      | 5  |
| 1.2 装备智能故障诊断基础           | 8  |
| 1.2.1 智能故障诊断的一般概念        | 8  |
| 1.2.2 智能故障诊断系统一般结构和功能特点  | 12 |
| 1.3 智能故障诊断方法             | 14 |
| 1.3.1 基于故障树的方法           | 14 |
| 1.3.2 基于案例的推理方法          | 14 |
| 1.3.3 基于模型的方法            | 15 |
| 1.3.4 基于专家系统的方法          | 18 |
| 1.3.5 基于模糊推理的方法          | 18 |
| 1.3.6 基于神经网络的方法          | 19 |
| 1.3.7 基于模式识别的方法          | 19 |
| 1.3.8 混合方法               | 20 |
| 1.3.9 发展方向               | 21 |
| 第2章 智能故障诊断中的知识策略         | 23 |
| 2.1 智能故障诊断系统中知识的分类       | 23 |
| 2.1.1 专家系统中知识的一般分类       | 23 |
| 2.1.2 智能故障诊断系统中知识的分类     | 23 |
| 2.1.3 深浅知识的关系和结合组织模型     | 25 |
| 2.2 智能故障诊断系统中知识的获取策略     | 27 |
| 2.2.1 知识获取是构建智能诊断系统的“瓶颈” | 27 |
| 2.2.2 传统的3种知识获取方法        | 28 |
| 2.2.3 智能故障诊断系统中知识获取的一般模型 | 29 |
| 2.3 智能故障诊断系统中知识的表示方法     | 30 |
| 2.3.1 知识表示的概念            | 30 |
| 2.3.2 诊断知识的复合框架与规则的表示方法  | 31 |
| 2.4 智能故障诊断系统中不确定知识处理     | 32 |

|            |                                      |           |
|------------|--------------------------------------|-----------|
| 2.4.1      | 诊断知识的不确定性及分类 .....                   | 32        |
| 2.4.2      | 不确定性诊断知识的表示方法 .....                  | 34        |
| 2.4.3      | 不确定性诊断知识的处理方法 .....                  | 35        |
| 2.4.4      | 智能故障诊断系统中不确定性推理的一般模型 .....           | 39        |
| 2.4.5      | 模糊集合理论不确定性知识的处理方法 .....              | 39        |
| 2.5        | 智能故障诊断中的机器学习与知识获取 .....              | 44        |
| 2.5.1      | 机器学习方法的回顾 .....                      | 44        |
| 2.5.2      | 知识获取与机器学习 .....                      | 46        |
| 2.5.3      | 各种学习方法在故障诊断系统中的适应性分析 .....           | 48        |
| 2.5.4      | 基于粗集理论的归纳学习方法 .....                  | 51        |
| 2.5.5      | 智能故障诊断系统中机器学习策略 .....                | 55        |
| <b>第3章</b> | <b>基于模糊逻辑和遗传算法的故障诊断技术 .....</b>      | <b>58</b> |
| 3.1        | 模糊逻辑基本理论 .....                       | 58        |
| 3.1.1      | 模糊集与隶属函数 .....                       | 58        |
| 3.1.2      | 模糊集的表示方法及其运算 .....                   | 60        |
| 3.2        | 遗传算法基本理论 .....                       | 62        |
| 3.2.1      | 遗传算法的基本概念 .....                      | 62        |
| 3.2.2      | 遗传算法的基本组成 .....                      | 63        |
| 3.3        | 模糊逻辑和遗传算法相结合的故障诊断方法 .....            | 65        |
| 3.3.1      | 用模糊逻辑对系统状态进行描述 .....                 | 65        |
| 3.3.2      | 用模糊有向图对系统进行描述 .....                  | 67        |
| 3.3.3      | 用遗传算法对可能的故障传播路径进行搜索 .....            | 69        |
| 3.3.4      | 诊断方法及步骤 .....                        | 72        |
| 3.4        | 应用实例 .....                           | 72        |
| <b>第4章</b> | <b>基于模糊理论、神经网络和专家系统的故障诊断技术 .....</b> | <b>74</b> |
| 4.1        | 基于模糊理论的故障诊断方法 .....                  | 74        |
| 4.1.1      | 基于模糊关系方程的故障诊断方法 .....                | 74        |
| 4.1.2      | 基于模糊规则的故障诊断方法 .....                  | 77        |
| 4.2        | 专家系统故障诊断方法 .....                     | 79        |
| 4.2.1      | 专家系统概述 .....                         | 79        |
| 4.2.2      | 专家系统的基本原理和结构特点 .....                 | 82        |
| 4.2.3      | 专家系统的结构与开发方法 .....                   | 84        |
| 4.2.4      | 专家系统中模糊性的处理方法 .....                  | 87        |
| 4.2.5      | 专家系统故障诊断方法存在的问题 .....                | 90        |
| 4.3        | 神经网络故障诊断方法 .....                     | 91        |
| 4.3.1      | 神经网络理论发展的历史及现状 .....                 | 91        |
| 4.3.2      | 神经网络的理论研究方法 .....                    | 94        |
| 4.3.3      | 基于神经网络的故障诊断方法 .....                  | 95        |
| 4.3.4      | 神经网络故障诊断方法的特点及存在的问题 .....            | 101       |

|            |                                |            |
|------------|--------------------------------|------------|
| 4.4        | 基于神经网络的故障诊断专家系统 .....          | 102        |
| 4.4.1      | 专家系统与神经网络的特点 .....             | 102        |
| 4.4.2      | 专家系统与神经网络结合的途径和方法 .....        | 104        |
| 4.4.3      | 基于神经网络的故障诊断专家系统 .....          | 106        |
| 4.5        | 基于模糊神经网络的故障诊断专家系统 .....        | 108        |
| 4.5.1      | 模糊神经网络方法概述 .....               | 108        |
| 4.5.2      | 基本模糊神经元和模糊神经网络 .....           | 110        |
| 4.5.3      | 前馈型模糊推理网络 .....                | 113        |
| 4.5.4      | 输入矢量的模糊化过程 .....               | 114        |
| 4.5.5      | 输出矢量的去模糊化过程 .....              | 117        |
| 4.5.6      | 诊断样本的模糊性表示 .....               | 117        |
| <b>第5章</b> | <b>装备智能故障诊断系统的开发与建立 .....</b>  | <b>119</b> |
| 5.1        | 智能故障诊断系统开发策略 .....             | 119        |
| 5.1.1      | 人机接口模块的开发 .....                | 120        |
| 5.1.2      | 知识库和数据库管理模块的开发 .....           | 120        |
| 5.1.3      | 诊断推理模块的开发 .....                | 121        |
| 5.1.4      | 诊断信息获取模块的开发 .....              | 121        |
| 5.1.5      | 机器学习模块的开发 .....                | 121        |
| 5.2        | 某型导弹智能故障诊断系统设计 .....           | 122        |
| 5.2.1      | 某型导弹武器系统基本构成 .....             | 123        |
| 5.2.2      | 某型导弹武器系统智能故障诊断系统总体技术 .....     | 123        |
| 5.2.3      | 某型导弹武器系统智能故障诊断系统总体构成 .....     | 126        |
| 5.2.4      | 基于神经网络的导弹智能故障诊断专家系统 .....      | 129        |
| 5.2.5      | 基于模糊神经网络的导弹智能故障诊断专家系统 .....    | 131        |
| <b>第6章</b> | <b>装备故障模式识别通用平台 .....</b>      | <b>138</b> |
| 6.1        | 基于模式识别的故障诊断方法 .....            | 138        |
| 6.1.1      | 模式识别在故障诊断问题中的描述 .....          | 138        |
| 6.1.2      | 模式分类问题的数学描述 .....              | 139        |
| 6.1.3      | 基于模式识别的故障诊断方法 .....            | 139        |
| 6.2        | 故障模式识别通用平台总体结构设计 .....         | 143        |
| 6.2.1      | 总体设计 .....                     | 143        |
| 6.2.2      | 程序设计 .....                     | 145        |
| 6.3        | 工作原理 .....                     | 147        |
| 6.3.1      | 故障模式识别通用平台工作原理 .....           | 147        |
| 6.3.2      | 故障模式识别通用平台使用方法及步骤 .....        | 161        |
| <b>第7章</b> | <b>智能故障诊断技术在其他领域中的应用 .....</b> | <b>174</b> |
| 7.1        | 专家系统在电子设备故障诊断中的应用 .....        | 174        |
| 7.1.1      | 电子设备故障诊断专家系统 .....             | 174        |
| 7.1.2      | 电子设备故障诊断专家系统设计 .....           | 175        |

|            |                                 |     |
|------------|---------------------------------|-----|
| 7.1.3      | 2000t 多功能锻压电子设备故障诊断专家系统 .....   | 175 |
| 7.2        | 人工神经网络在电力系统故障检测和诊断中的应用 .....    | 179 |
| 7.2.1      | 神经网络与模式识别 .....                 | 180 |
| 7.2.2      | 神经网络故障检测和诊断方法 .....             | 180 |
| 7.2.3      | 人工神经网络对电力系统的故障检测和诊断 .....       | 181 |
| 7.3        | 模糊专家系统在汽车发动机故障诊断中的应用 .....      | 184 |
| 7.3.1      | 模糊专家系统结构 .....                  | 184 |
| 7.3.2      | 自然语言接口模块 .....                  | 185 |
| 7.3.3      | 诊断知识库 .....                     | 185 |
| 7.3.4      | 模糊推理机 .....                     | 186 |
| 7.4        | 基于 ANN - ES 混合智能诊断系统的应用实例 ..... | 188 |
| 7.4.1      | 变压器故障诊断系统概述 .....               | 189 |
| 7.4.2      | ANN 与 ES 合成系统结构 .....           | 190 |
| 7.4.3      | ANN 与 ES 合成系统实现 .....           | 192 |
| 7.4.4      | 测试结果分析 .....                    | 195 |
| 7.5        | 自主式水下机器人智能故障诊断系统 .....          | 198 |
| 7.5.1      | 自主式水下机器人 .....                  | 198 |
| 7.5.2      | 智能故障诊断系统结构 .....                | 198 |
| 7.5.3      | 智能故障诊断系统的设计 .....               | 201 |
| 7.5.4      | 智能故障诊断系统实现与测试 .....             | 204 |
| 参考文献 ..... |                                 | 207 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 故障诊断技术历史、现状及发展的系统分析

### 1.1.1 故障诊断技术历史、现状与发展

所谓故障诊断是指系统在一定工作环境下查明导致系统某种功能失调的原因或性质,判断劣化状态发生的部位或部件,以及预测状态劣化的发展趋势等,它包括故障检测、故障定位和故障预测。

设备的故障诊断自有工业生产以来就已存在,但故障诊断技术作为一门学科是 20 世纪 60 年代以后发展起来的,它是适应工程实际需要而形成和发展起来的一门综合学科。纵观其发展过程,故障诊断可依据其技术特点分为以下几个阶段。

#### 1. 原始诊断阶段

原始诊断始于 19 世纪末至 20 世纪初,由于机器设备比较简单,故障诊断主要依靠个体专家或维修人员通过感官、经验和简单仪表进行。

#### 2. 基于传感器与计算机技术的诊断阶段

基于传感器与计算机技术的诊断始于 20 世纪 60 年代的美国。1961 年美国在开始执行“阿波罗计划”以后,出现了一系列由设备故障酿成的悲剧,导致了美国机械故障预防小组(MFPG)于 1967 年成立,同时也揭开了现代诊断技术的进程。在这一阶段,诊断技术融合吸收了大量的现代科技成果:由于传感器技术的发展,使得对各种诊断信号和数据的测量变得容易;计算机的使用弥补了人类在数据处理上的低效率和不足,从而使各种诊断方法应运而生,涌现了状态空间分析诊断、对比诊断、函数诊断、逻辑诊断、统计诊断和模糊诊断等诊断方法。信号检测、数据处理与信号分析的手段和方法构成了这一阶段故障诊断技术的主要研究和发展内容。然而,不论诊断技术本身还是从其发展出的诊断系统,几乎在诊断过程的每一个阶段都需要专家或专业技术人员的参与,以提供诊断过程所必须的领域知识和处理问题的策略及最终决策。因此,这一阶段的诊断技术缺乏智能性。

#### 3. 智能化诊断阶段

智能化诊断技术始于 20 世纪 80 年代初期。这一阶段的特点是将人工智能的研究成果应用到故障诊断领域中,以常规诊断技术为基础,以人工智能技术为核心。人工智能技术的发展为设备故障诊断的智能化提供了可能性,使诊断技术进入了新的发展阶段,以数值计算和信号处理为核心的诊断过程被以知识处理为核心的诊断过程所代替,对诊断技术的研究是从知识的角度出发来系统地加以研究。虽然智能诊断技术还远远没有达到成熟阶段,但智能诊断的开展大大提高了诊断的效率和可靠性。

就世界范围来看,美国是最早研究故障诊断技术的国家。1967 年,在美国宇航局和

海军研究所的倡导和组织下,成立了美国机械故障预防小组,开始有计划地对故障诊断技术分专题进行研究。很多学术机构、政府部门以及高等院校和企业公司都参与或进行了与本企业有关的故障诊断技术研究,并取得了大量的成果。目前美国的故障诊断技术在航空航天、军事以及核能等尖端技术领域仍处于领先地位。

英国对故障诊断技术的研究始于20世纪60年代末、70年代初,以R.A.Collacott博士为首的英国机器保健中心,在宣传、培训、咨询及诊断技术的开发方面做了大量的工作,并取得了很好的效果。目前,英国在摩擦磨损、汽车、飞机发动机监测和诊断方面具有领先优势。

日本的诊断技术研究始于20世纪70年代中期,1971年新日铁以丰田利夫教授为首率先开展对故障诊断技术的研究,到1976年已达到实用的阶段。尽管日本的起步较晚,但发展很快,其做法是密切注视世界各国的发展动向,特别注意研究美国故障诊断技术的发展,积极引进消化最新技术。目前,日本在钢铁、化工、铁路等民用工业的诊断技术方面处于领先地位。

故障诊断技术的研究在我国起步较晚,在20世纪70年代末期开始。广泛的研究则从20世纪80年代开始发展起来,随后在各领域分别确定了故障诊断的目标、方向和试点单位。特别应指出,尽管我国故障诊断技术的研究起步较晚,但发展还是比较快的。目前,故障诊断技术在我国的化工、冶金、电力和铁路等行业得到了广泛的应用,取得了可喜的成果。

目前,故障诊断领域中的几大研究课题为故障机理研究、信号处理与模式识别的诊断方法研究、故障诊断专家系统的研究和现代监测与诊断系统的应用开发研究等方面。基于知识的智能化故障诊断专家系统已成为现代设备故障诊断技术的一个最有前途的发展方向。故障诊断技术的发展呈现出以下3方面的趋势。

(1) 诊断系统智能化。专家系统、模型推理、神经网络、故障树、模式识别和模糊诊断等方法及不确定性理论正走向成熟,并将在故障诊断系统中得到广泛的应用。

(2) 诊断系统集成化。诊断系统的开发转向现有技术的组合和集成,软件更加规范化、模块化,硬件更加标准化、专业化。

(3) 诊断系统综合化。由过去的单纯的监测和诊断,向今后的集监测、诊断、管理、咨询和训练于一体的综合化方向发展。

### 1.1.2 故障诊断基本方法

故障诊断技术是一门综合性技术,它不但与诊断对象的性能和运行规律密切相关,而且还涉及多门学科,如现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别和人工智能等学科理论。故障诊断的任务可以分为以下4个方面的内容<sup>[1]</sup>。

(1) 故障建模。按照先验信息和输入输出关系,建立系统故障的数学模型,作为故障检测与诊断的依据。

(2) 故障检测。从可测或不可测的估计变量中,判断运行的系统是否发生故障,一旦系统发生意外变化,应发出报警。

(3) 故障分离与估计。如果系统发生了故障,给出故障源的位置,区别出故障原因是执行器、传感器和被控对象或者是特大扰动等。故障估计是在弄清故障性质的同时,计算

故障的程度、大小及故障发生的时间等参数。

(4) 故障分类、评价与决策。判断故障的严重程度,以及故障对系统的影响和发展趋势,针对不同的工况采取不同的措施,其中包括保护系统的启动。

故障诊断技术发展至今,人们已提出了许多方法。按照国际故障诊断权威德国 Frank 教授的观点,所有的故障诊断方法可以划分为 3 种:基于数学模型的方法、基于信号处理的方法和基于人工智能的方法。

### 1. 基于数学模型的方法

(1) 参数估计诊断法。当故障由参数的显著变化来描述时,可利用已有的参数估计方法来检测故障信息,根据参数的估计值与正常值之间的偏差情况来判定系统的故障情况。

(2) 状态估计诊断法。通过被控过程的状态直接反映系统的运行状态并结合适当的模型进行故障诊断。首先重新构造被控过程状态,并构造残差序列,残差序列中包含各种故障信息及基本残差序列,然后通过构造适当的模型并采用统计检验法,把故障从中检测出来,并做进一步分离、估计及决策。通常可用 Luenberger 观测器及卡尔曼滤波器进行状态估计。

(3) 等价空间诊断法。利用系统的输入输出的实际测量值检验系统数学模型的等价性(即一致性),以检测和分离故障,与基于观测器的状态估计法等价。

### 2. 基于信号处理的方法

(1) 直接测量系统输入输出的方法。在正常情况下,被控过程的输入输出在正常范围内变化,当此范围被突破时,可以认为故障已经发生或将要发生。另外,还可以通过测量输入输出的变化率是否突破规定范围来判断故障是否发生。

(2) 基于小波变换的方法。首先对系统的输入输出信号进行小波变换,利用该变换求出输入输出信号的奇异点,然后除去由于输入突变引起的极值点,则其余的极值点对应于系统的故障。

(3) 输出信号处理法。系统的输出在幅值、相位、频率及相关性上与故障源之间会存在一定的联系,这些联系可以用一定的数学形式(如输出量的频谱)表达,在发生故障时,则可利用这些量进行分析与处理,来判断故障源的所在。常用的方法有频谱分析法、概率密度法、相关分析法及互功率谱分析法等。

(4) 信息匹配诊断法。此方法引入了类似矢量、类似矢量空间和一致性等概念。将系统的输出序列在类似空间中划分成一系列的子集,分析各子集的一致性,并按一致性强弱进行排列,一致性最强的一组子集的鲁棒性也最强,而一致性最差的子集则可能已发生故障。正常情况下类似矢量值很小,而当故障发生时,类似矢量的值将在此故障相应的方向上增大,因此类似矢量值的增加表明了故障的发生,而其方向给出了故障传感器的位置。

(5) 基于信息融合的方法。故障诊断实际上是根据检测所获得的某些故障征兆以及系统故障源与故障征兆之间的映射关系,找出系统故障源的过程。为了充分利用检测量所提供的信息,在可能的情况下,可以对每个检测量采用多种诊断方法进行诊断,这一过程称为局部诊断。将各诊断方法所得结果加以综合,得到系统故障诊断的总体结果称为全局诊断融合,对局部——全局融合方案的实现,可用模糊推理方法或用 M-ary 理论进

行决策。

(6) 信息校核的方法。系统的信息校核是进行故障诊断的比较简单有效的方法,因为信息是进行系统过程检测的依据,利用错误的信息进行计算和推理是徒劳无益的,而且会得出错误的结论。可依据物理化学定律及数理统计知识来进行信息的校核。信息的矛盾一般意味着信号获取上的故障或矛盾。

### 3. 基于人工智能的故障诊断方法

(1) 基于专家系统的故障诊断方法。专家系统是人工智能领域中最活跃的一个分支,已广泛应用于故障诊断系统。专家系统方法不依赖于系统的数学模型,而是根据人们长期的实践经验和大量的故障信息知识,设计出一套智能计算机程序,以此来解决复杂系统的故障诊断问题。

(2) 基于神经网络的故障诊断方法。神经网络具有处理复杂多模式及进行联想、推测和记忆功能,它非常适合应用于故障诊断系统。它具有自组织、自学习能力,能克服传统专家系统当启发式规则未考虑到时就无法工作的缺陷。将神经网络应用于故障诊断系统已有不少成功的实例。

(3) 基于图论的模型推理方法。基于图论方法的故障诊断技术,实质上是根据一个实际系统中各个元件之间所存在的非常普遍的故障传播关系,构成故障诊断网络,利用搜索和测试技术进行故障定位。这种方法已在大型工业生产过程和空间飞行器等领域中得到了应用。

(4) 基于模糊数学的诊断方法。基于模糊数学的诊断方法本质上是在分析系统异常现象的基础上,由症状推断出故障的原因。

(5) 基于定性模型的方法。用表示系统物理参数的定性变量和表示各参数间相互关系的定性微分方程构成约束模型,描述并模仿系统的结构,以确定从给定的初始状态出发得到的系统状态。

## 1.1.3 人工智能发展历程

人工智能这门学科于 1956 年正式诞生,现已成为人类科学技术中一门充满生命力的前沿学科。回顾人工智能的发展历史,可归结为孕育、形成和发展这 3 个阶段。

### 1. 孕育阶段(1956 年以前)

19 世纪以来,数理逻辑、自动机理论、控制论、信息论、仿生学、计算机、心理学等科学技术的进展,为人工智能的诞生准备了思想、理论和物质基础。1847 年,英国科学家 G. Boole 首先提出了双数值数理逻辑,即布尔代数,他试图找出思维模拟的机械变化规律。A. M. Turing 在 1936 年提出了一种理想计算机的数学模型,即图灵机,为后来电子计算机的问世奠定了理论基础。1943 年,美国科学家 W. McCulloch 和 W. Pitts 提出了 M-P 神经网络模型,开创了人工神经网络的研究。1946 年美国数学家 J. W. Mauchly 和 J. P. Eckert 研制出了世界上第 1 台电子数字计算机 ENIAC,为人工智能的研究奠定了物质基础。

### 2. 形成阶段(1956 年—1969 年)

1956 年夏季,在美国新罕布什尔州 Dartmouth 大学举行的一次青年科学工作研讨会上,由 J. McCarthy 提议,决定正式使用 Artificial Intelligence (AI)这一术语,标志着人工智能作为一门新兴学科正式诞生,开始了具有真正意义的人工智能研究。

起初的人工智能以博弈、游戏、定理证明为对象进行研究。1956年,A.L.Samuel 研制出具有自学习能力的启发式博弈程序。美籍华人数理学家王浩于1958年在计算机上证明了《数学原理》中的有关命题演算的全部定理及谓词演算中的大部分定理。1960年 J. McCarthy 开发出了人工智能程序设计语言 LISP,不仅可以处理数值,而且可以更方便地处理符号,为人工智能研究提供了重要工具。进入20世纪60年代初期,人工智能以搜索算法、通用问题求解的研究为主。1960年,A.Newell 编制了通用问题求解程序(GPS),使启发式程序有了更大的普适性。1961年,M.L.Minsky 发表题为《走向人工智能的步骤》的论文,推动了人工智能的发展。1965年,E.A.Feigenbaum 研制成功了 DENDRAL 化学专家系统,使人工智能从着重算法研究转向知识表示的研究,这是人工智能研究走向实用化的标志。

1969年,国际人工智能联合会(IJCAI)成立,标志着人工智能这门新兴学科已经得到了世界的肯定和公认。从1969年起,每两年召开一次国际人工智能学术会议,由IJCAI 主办的人工智能学报“Artificial Intelligence”于1970年创刊。

### 3. 发展阶段(1970年以后)

20世纪70年代以后,人工智能的研究以自然语言理解、知识表示为主。1972年,法国马赛大学的 A.Comerauer 创建了 PROLOG 逻辑程序设计语言。斯坦福大学的 E.H.Shortliffe 研制成功用于疾病诊断治疗的专家系统 MYCIN。1977年,E.A.Feigenbaum 在“第5届国际人工智能联合会议”上提出了“知识工程”的概念,对以知识为基础的智能系统的研究与建造起到了重要的作用,为人工智能的进一步实用化奠定了基础。进入20世纪80年代,人工智能的研究蓬勃发展,专家系统开始广泛应用,出现了专家系统开发工具,开始兴起人工智能的产业。特别是1981年,日本政府正式宣布投资开发第5代计算机,极大地推动了人工智能的发展。许多国家制订相应的计划,进行人工智能和智能计算机系统的研究。我国也将智能计算机系统的研究列入国家“863”计划。

经过几十年的发展,人工智能的研究取得了可喜的进展,特别是知识表示、搜索策略、推理机制和机器学习的方法等方面都有了深入研究。人工智能的理论和技术在专家系统、自然语言理解、智能控制、智能机器人、机器学习和智能决策支持系统等领域发挥着重要的作用,人工智能在应用方面的成就也促进了其自身的发展。当前以知识信息处理为中心的知识工程是人工智能的显著标志。目前,人工智能技术逐渐与数据库、多媒体、虚拟现实和网络等主流技术相结合,并融合在主流技术当中,旨在使计算机更聪明、更有效,与人更接近。

## 1.1.4 智能故障诊断技术现状与发展

智能故障诊断过程的实质是知识的运用和处理的过程,知识的数量和质量决定了智能诊断系统能力的大小和诊断效果,推理控制策略决定了知识使用的效率。因此,关于智能诊断理论研究的核心内容为:知识的表示与知识的使用。

### 1.1.4.1 关于智能故障诊断系统中知识的研究

知识的形式化表示决定了系统所使用的推理控制策略,所以它是智能诊断研究的核心内容之一。Hayes - Roth 曾提出“范围—目的—有效性”三维空间来进行知识的描述和

定义,从而将数据库和知识库合二为一,形成一个广义的知识库,知识库的内容包括事实和规则。但一般来讲,在关于专家系统问题的研究中,普遍是知识库和数据库相对分离,系统的求解过程实际上是知识库对数据库的操作进而实现推理的过程。

关于智能故障诊断系统中知识表示方法的研究,最初是从专家系统的知识表示方法出发,按照传统的方法建立诊断系统的知识库。随着知识工程被作为一门专门学科来研究,而且智能故障诊断逐渐形成一个独特的研究领域,人们对智能诊断系统的知识也进行了深入的研究。在专家系统中,知识被划分成描述性知识、过程性知识和控制性知识。描述性知识表示系统中的概念和事实;过程性知识表示描述性知识的特性以及它们之间的相互关系;控制性知识表示控制和运用以上两种知识的策略。

对于知识层次的研究,最早是由 Davis 和 Sternberg 分别从人工智能研究领域和从关于问题求解的心理学模型方面进行研究,提出将专家系统中的知识分为元级知识和目标级知识两个层次,并证明这种分法的合理性和应用价值。在此基础上,Wielinga 进一步对专家系统知识细分,并引入知识层次(Layer of Knowledge)的概念,并从认识论的角度出发,将知识划分为领域、推理、任务和策略 4 个层次。其中领域层次包含概念、关系和结构等方面的知识;推理层次包含元术语、知识源描述等应用于描述领域层次的知识;任务层次包含各种目标和任务的描述知识,它应用推理层次的知识来完成目标和问题的求解;策略层次由规划、元规则、维修策略等组成,用于控制目标和问题的求解。Milne 将诊断知识划分为 4 个层次,分别为结构层次、行为层次、功能层次和编译模式层次。不同层次的知识采用不同的推理策略和求解方法。结构层次的知识采用基于结构模型的推理策略;行为层次的知识采用基于定性模型的推理策略;功能层次的知识采用基于功能模型的推理策略;编译模式层次的知识采用基于浅知识的诊断策略。

对于知识深度的研究,存在有“深知识”与“浅知识”之说。浅知识是指领域专家的经验知识,深知识则是指诊断对象的结构、性能和功能的知识。有学者认为,知识深度是反映对研究领域的“透视”程度,而又有学者则对知识深度给出了如下的定义:“对于两个模型  $M$  和  $M'$ ,如存在  $M$  中的某些隐性知识,在  $M'$  中被显式表达和计算,则认为模型  $M'$  比模型  $M$  深”。很多文献给出了与此相类似的定义。

事实上,知识的划分是多样性的,知识层次的划分和知识的“浅”与“深”也是相对的。按某种方式描述的模型  $M$  与按另一种方式描述的模型  $M'$  往往存在着相互包容。多种知识模型的相互包容,常常为诊断推理提供更多的信息。许多文献从不同的侧面论述了深浅知识模型之间的区别。有关复杂问题的知识组织模型是知识工程的重要研究内容,一直受到广泛的重视。一般来讲,采用的知识策略与领域问题的性质有关,并且求解思想和知识推理路径包含于知识组织模型。

#### 1.1.4.2 关于智能诊断系统中推理方法的研究

知识的处理和运用在诊断系统中的行为表现构成了推理和问题求解的过程。传统的基于知识的诊断推理,常常依赖于诊断知识的组织模型。依赖于专家经验推理的专家系统,被称为第 1 代诊断专家系统,其推理被称为基于浅知识的推理;依赖于诊断对象结构、性能与功能知识构造的专家系统,被称为第 2 代诊断专家系统,其推理被称为基于深知识的推理。

早期关于诊断推理的研究,主要集中在单故障诊断推理方面,它要求做出诊断对象1次只发生1个故障的假设。在推理方法中,一般采用不精确推理,其方式有确定性因子、可能性因子、置信函数和 Bayes 概率等。由于推理以使用浅知识为主,所以推理机制比较简单,如规则演绎推理等。

随着诊断对象复杂程度的不断增加,基于浅知识的诊断系统出现了许多难以克服的缺陷,如它的局限性、脆弱性、弱解释能力以及知识获取困难等,从而促使研究者开始使用深知识,并且这类知识是以模型的形式来组织的,因而也叫做模型知识,其推理方法也是基于模型的推理机制。目前在这方面的研究已取得了重要的进展,有著名的 Reggia 的节约覆盖集方法, Bassat 的基于模式的方法, Peng 的概率因果模型, Yager 的模糊解释模型, Josephson 的最优解释假设集成器, Davis 的基于结构与功能的诊断推理模型以及 Gensereh 和 Milne 的推理方法等。

目前在许多诊断系统中,是将浅知识和深知识结合起来同时使用,也就是既有基于经验知识的推理,也有基于结构、性能和功能知识的推理。已经有研究者在深浅知识混合使用的诊断系统开发方面做了许多研究工作。如 David 在浅知识推理的基础上,通过引入因果“剧本”(causal scenario)来增强系统的求解能力; Govindaraj 提出了假设框架知识模型,该模型用浅知识辅以系统的结构知识共同导引假设框架的建立与否定; Bylander 等人的诊断模型并不区分深浅知识,而是采用统一的表达与组织结构,它是一个完全混合的推理模型; 史铁林在 Console 的基于因果模型推理方法的基础上,给出了一种基于因果网络模型的诊断推理模型。以上这些方法极大地促进了复杂装备故障诊断系统中诊断推理方法的发展。

#### 1.1.4.3 关于智能故障诊断系统

智能故障诊断系统开发的历史虽然短暂,但已在许多领域取得了令人瞩目的成就。

在电路和数字电子设备方面出现了许多著名的智能诊断系统。具有代表性的有:由 MIT 研制的,用于模拟电路操作并演绎出故障可能原因的 EL 系统;由美国海军人工智能研究中心研制的,用于诊断电子设备故障的 IN-ATE 系统;由波音航空公司研制的,诊断微波模拟接口 MSI 的 IMA 系统;由 IBM 和 Stanford 大学联合研制的计算机诊断系统 DART;由 Bell 实验室研制的电线故障寻找系统 ACE;由 Lockhend 研究实验室研制的,用于复杂开发网络诊断的专家系统开发工具 LES、模拟与数字电路设备诊断系统等。

在机电设备方面,由于机电设备在整个生产领域中所占的地位最重要,比重也最大,而且机电设备诊断系统的研究面又广,因此,所出现的智能诊断系统也较多。如 EGG Idaho 公司研制的用于诊断和处理核反应堆事故的诊断系统 REACTOR;通用电器公司研制的用于内燃电力机车故障排除的专家系统 DELTA;日立公司研究的用于核反应堆的故障诊断系统;日本三菱电机公司研制的用于列车机车的诊断系统;用于直升机故障诊断的专家系统 HELIX;航天飞机主发动机异常信息处理的专家系统 SCOTTY;意大利米兰工业大学研制的汽车启动器电路诊断系统; Carnegie-Mellon 大学与 Westinghouse 公司联合研制的汽轮发电机组监控与诊断专家系统 PDS 等。

我国开展设备故障诊断技术是从 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始的。尽管起步较晚,但近年来发展迅速,国内许多高校和研究机构联合厂家开展了设备故障诊断技术的理

论和应用研究,并取得了一定的研究成果,故障诊断技术渐渐在我国国民经济重要行业中得到应用,并取得了显著的经济效益。如哈尔滨工业大学研制的“微机对机组振动监测和故障诊断系统 MMMD-1”;西安交通大学研制的“大型旋转机械计算机状态监测与故障诊断系统”;上海汽轮机厂的“125MW 汽轮机组微机监测分析管理系统”;华中理工大学研制的“HZ-1 型汽轮发电机组振动监测与故障诊断系统”;军械工程学院研制的“雷达指挥仪印制板故障诊断系统”以及屈梁生教授提出的全息谱技术等。

智能故障诊断技术无论在理论上还是在系统研制方面都取得了很大的进展,但是真正具有实用价值并已投入使用的系统并不多,尤其是在我国使用的更少。造成理论与实际脱节主要有以下几方面的原因,一是由于理论研究所限定的条件与实际系统应用时的具体情况相距甚远;二是由于缺乏对诊断对象本身的深刻认识和研究;三是由于人工智能技术,特别是知识工程技术领域有许多问题还未解决,有待于进一步发展和完善。可以预计,随着智能诊断理论和技术的不断发展,随着对智能问题的深入研究和认识水平的不断提高,大批高性能的智能故障诊断系统将走出实验室,直接服务于生产实际。

## 1.2 装备智能故障诊断基础

### 1.2.1 智能故障诊断的一般概念

#### 1.2.1.1 复杂装备系统的构成

为了进行诊断问题的研究,首要问题是对诊断对象的认识。虽然实际诊断对象总是千差万别,但从系统论的角度来看又有许多本质的共性。

**定义 1.1** 元素是指构成复杂装备的最基本的、具有相对独立功能的结构。

**定义 1.2** 联系是指装备元素之间的关系。

复杂装备作为一个系统,是由有限的、完成特定功能的零部件按一定的方式和要素聚合而成,零部件是构成复杂装备的元素。

关于“系统”一词,有着各种不同的定义,但不论哪一种定义都有“相互作用的若干元素的整体”之意。这里我们采用以下的定义。

**定义 1.3** 系统是由若干个相互关联、相互制约的元素组成的具有某种特定功能的整体。

**定义 1.4** 装备系统的层次性是指从系统到元素之间的纵向可分解性。

较低层的元素可以聚合成较大的高层元素,以此类推,直至最高层的元素,也就是原级系统。一般来说,一个复杂装备系统可以分解为系统级、子系统级、……、部件级和元件级等多个层次。图 1-1 是某型导弹系统的部分层次分解示意图,系统级是实现它的总体设计功能;系统级在结构上可分解为战斗部、控制系统、弹体和发动机系统等子系统;控制子系统由惯性测量组合、弹上二次电源和弹载计算机等组成。

正确地从结构或功能上分解诊断对象,可以准确描述智能诊断系统中的静态知识,同时为领域知识库的分层、分块管理提供基础。

诊断技术在其长期发展和应用过程中,诸如故障、征兆和原因等一些共性的概念及其相互关系尚未形成较为统一的描述。关于故障的定义,目前主要存在以下 3 种类型。