

信息化与工业化 两化融合

研究与应用丛书

数据驱动的工业过程 故障诊断技术

—— 基于主元分析与偏最小二乘的方法

周东华 李钢 李元 著



科学出版社

信息化与工业化两化融合研究与应用丛书

数据驱动的工业过程故障诊断技术 ——基于主元分析与偏最小二乘的方法

周东华 李 钢 李 元 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书第1章综述了各种动态系统的故障诊断技术的发展现状及未来发展趋势。第2章~第6章主要介绍了主元分析模型以及基于该模型的各种故障检测、分离和辨识等方法。这一部分还讨论了主元分析模型的各种改进问题,如主元个数的选取问题、基于动态时间规整的改进、基于非正常子域的应用等。第7章~第11章主要介绍了偏最小二乘模型,以及基于该模型的故障检测、重构和诊断算法。这一部分包含了作者最新的研究成果,即对偏最小二乘模型结构的几何解释以及针对输出相关故障的模型改进。这些研究成果也揭示了主元分析和偏最小二乘在过程监控上的根本区别和内在联系。第12章、第13章主要讨论了该领域最新的研究方向——连续多变量过程的故障预测问题,书中分别基于主元分析模型和偏最小二乘模型对该问题进行了研究。

本书可作为自动控制专业研究生的教学参考书,同时对从事自动化系统研究、设计、开发和应用的广大工程技术人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

数据驱动的工业过程故障诊断技术:基于主元分析与偏最小二乘的方法/
周东华,李钢,李元著. —北京:科学出版社,2011
(信息化与工业化两化融合研究与应用丛书)
ISBN 978-7-03-030003-4

I. 数… II. ①周… ②李… ③李… III. 工业-自动控制系统-故障诊断
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 007489 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:李 影
责任印制:赵 博/封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年1月第一版 开本:B5(720×1000)
2011年1月第一次印刷 印张:17 1/2
印数:1—2 500 字数:333 000

定价:62.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

传统的工业化道路，在发展生产的同时付出了过量消耗资源的代价：产业革命 200 多年以来，占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化，在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的，而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程，从中国共产党的“十五大”提出“改造和提高传统产业，发展新兴产业和高技术产业，推进国民经济信息化”，到党的“十六大”提出“以信息化带动工业化，以工业化促进信息化”，再到党的“十七大”明确提出，坚持走中国特色新型工业化道路，大力推进信息化与工业化融合。这充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识不断深化。

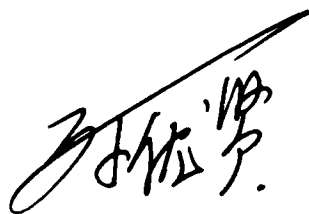
工业信息化是“两化融合”主要内容，它的主要内容包括生产设备、过程、装置、企业的信息化，产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化，其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系，大幅度降低资源消耗；在保持经济高速增长和社会发展过程中，有效地解决发展与生态环境之间的矛盾，积极发展循环经济，这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求，特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里，实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路，也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此，中国自动化学会与科学出版社共同策划出版《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》，旨在展示两化融合领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向，也可以是至今仍然活跃的传统方向；既注意横向的共性技术的应用研究，又注意纵向的行业技术的应用研究；既重视“两

化融合”的软件技术，也关注相关的硬件技术；特别强调那些有助于将科学技术转化为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信，有广大专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委会们的共同努力，本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后，衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。



中国自动化学会理事长

2010年11月

前 言

随着科学的发展和技术的进步，现代化大生产中的工业系统变得越来越庞大，系统复杂性也成倍增长。这些系统一旦发生故障，将造成巨大的财产损失和人员伤亡。因此，人们迫切需要提高复杂动态系统的可靠性和可维护性。动态系统的故障诊断技术可以有效地提高系统的可靠性与安全性，降低事故风险，提高经济效益。故障检测与诊断技术已经发展了40年，在诸多领域得到了广泛研究和成功的应用，如航空、航天、输油管线、机器人、化工、半导体制造、医药制造等。

现有的针对动态系统的故障诊断技术可以分为定性分析方法和定量分析方法两大类。其中定量分析方法又可以分为基于解析模型的方法和数据驱动的方法。定性分析方法包括图论的方法、专家系统方法和定性仿真方法等，它将人们对系统的认识，对故障的经验进行定性的描述，通过对现象的观察和分析，推导出系统中可能发生的故障。此类方法建模简单，但是整个过程需要专家的大量参与，且结果的描述具有一定的不确定性。基于解析模型的方法能够得到较为精确的故障诊断结果，但是前提是对系统有着准确的了解，能够对系统的各种输入输出以及内部状态之间的关系建立准确的动态和静态模型。但是人们逐渐发现在实际应用中有很多假设并不合理，特别是难以获得对象准确的数学模型。

随着科技特别是信息科学技术的快速发展，我国化工、冶金、机械、电子、电力、交通运输和物流等企业发生了重大变化。传统方法，即依据物理化学规律建立精确数学模型，并对生产过程和设备进行控制、决策、调度和故障诊断变得越来越困难。由于信息采集、存储、传输和处理技术的普遍应用和不断发展，上述企业每天都在产生大量反映生产过程和设备运行的各种数据，如何有效地利用这些离线与在线数据和其他知识，将数据挖掘、模式识别和计算机并行仿真等技术与控制理论和系统工程相结合，在难于建立机理模型的条件下，实现对设备和生产过程的优化决策、调度、控制和故障诊断，已成为我国乃至全球制造、交通运输和物流等企业迫切需要解决的新问题。

数据驱动技术泛指一类不需要事先已知一个系统的精确数学模型便能对它实现控制、故障诊断和容错控制等目的的技术。数据驱动的故障诊断技术基于工业过程中实时采集的海量数据，利用各种数据处理技术、统计建模等方法，在一定的范围内对过程建立适当的数据模型，从而检测和诊断过程中发生的故障。这一技术的研究不仅有诸多理论意义，而且有着广泛的应用背景，是未来故障诊断技

术的重要发展方向。

本书作者长期从事工业过程的故障检测与诊断技术的理论和应用研究工作，涉及一类重要的数据驱动技术——多变量统计过程监控技术。此技术于1990年左右提出，目前已受到研究人员的广泛关注。本书将从多变量统计过程监控技术中最基本的两类模型（主元分析模型和偏最小二乘模型）出发，介绍基本的故障检测和诊断技术以及作者在这些领域的最新成果。

本书第1章综述了各种动态系统的故障诊断技术的发展现状及未来发展趋势。第2章~第6章主要介绍了主元分析模型以及基于该模型的各种故障检测、分离和辨识等方法。这一部分还讨论了主元分析模型的各种改进问题，如主元个数的选取问题、基于动态时间规整的改进、基于非正常子域的应用等。第7章~第11章主要介绍了偏最小二乘模型，以及基于该模型的故障检测、重构和诊断算法。这一部分包含了笔者最新的研究成果，即对偏最小二乘模型结构的几何解释以及针对输出相关故障的模型改进。这些研究成果也揭示了主元分析和偏最小二乘在过程监控上的根本区别和内在联系。第12章、第13章主要讨论了该领域最新的研究方向——连续多变量过程的故障预测问题，书中分别基于主元分析模型和偏最小二乘模型对该问题进行了研究。

本书涉及的研究成果得到了众多科研机构的支持。其中特别感谢国家自然科学基金委员会资助的创新群体科学基金计划（60721003）“复杂系统控制与信息处理中的若干关键问题研究与应用”以及重点项目（60736026）“复杂工程系统故障预测与预测维理论及关键技术研究”。感谢国家重点基础研究发展计划资助计划（973）（2009CB320602）“复杂生产制造过程一体化控制系统理论和技术基础研究”。本书的作者之一李钢同志在美国南加州大学的秦泗钊教授指导下进行了许多研究工作，受益匪浅。在本书正式出版之际，谨向他们表示衷心的感谢。本书责任编辑等为提高本书质量也付出了辛勤劳动，在此一并致谢。

由于理论水平有限，以及所做研究工作的局限性，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2010年12月于北京

目 录

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

前言

第 1 章 动态系统故障诊断技术概述	1
1.1 引言	1
1.2 定性分析方法	2
1.2.1 图论方法	2
1.2.2 专家系统	3
1.2.3 定性仿真	4
1.3 定量分析方法	4
1.3.1 基于解析模型的方法	4
1.3.2 数据驱动的方法	6
1.4 故障预测	11
1.5 全书概况	11
参考文献	14
第 2 章 主元分析的基本理论	22
2.1 引言	22
2.2 主元分析模型	23
2.2.1 主元分析建模方法	23
2.2.2 主元分析的性质	23
2.2.3 主元子空间和残差子空间	24
2.3 基于主元分析的故障检测	25
2.4 传感器故障重构	27
2.5 基于主元分析的故障诊断	28
2.5.1 基于传统贡献图的故障诊断技术	28
2.5.2 基于传感器有效度指标的故障诊断技术	29
2.5.3 基于重构贡献图的故障诊断技术	30
2.6 PVC 生产过程的故障检测与诊断	30
2.6.1 PVC 间歇反应过程简介	30
2.6.2 PVC 生产过程 MPCA 模型的建立	31
2.6.3 基于 MPCA 的 PVC 生产过程故障检测	32

2.7 结束语	35
参考文献	35
第3章 基于子空间技术的多维故障重构及辨识	39
3.1 引言	39
3.2 故障检测与可检测性	40
3.2.1 主元分析与故障检测	40
3.2.2 故障可检测性的定义	41
3.2.3 可检测性的必要条件	41
3.2.4 可检测性的充分条件	43
3.3 故障重构与可重构性	43
3.3.1 故障重构	43
3.3.2 完全可重构性	44
3.3.3 部分可重构性	45
3.3.4 完全与部分可重构的关系	45
3.4 故障辨识	46
3.5 故障分离与可分离性	46
3.5.1 故障分离	47
3.5.2 完全可分离性	47
3.5.3 部分可分离性	48
3.6 仿真案例研究	50
3.6.1 可检测性与可重构性	51
3.6.2 故障可分离性	52
3.7 结束语	53
参考文献	54
附录	55
第4章 最优主元个数的选取方法	58
4.1 引言	58
4.2 主元模型	58
4.3 累计方差贡献率准则	60
4.4 PRESS 检验法模型	60
4.5 未重构方差模型	61
4.5.1 重构方差	61
4.5.2 重构误差方差	62
4.5.3 未重构方差模型	62
4.6 Scree 检验法模型	63

4.7 故障信噪比确定模型	63
4.7.1 故障信噪比的定义	63
4.7.2 基于故障信噪比确定主元数的原理	65
4.7.3 传感器故障方向的确定	65
4.8 Tennessee Eastman 过程应用研究	65
4.8.1 TE 过程简介	65
4.8.2 应用结果与讨论	68
4.9 结束语	75
参考文献	76
第 5 章 动态时间规整理论及应用	78
5.1 引言	78
5.2 动态时间规整	78
5.3 模式间匹配距离	79
5.3.1 模式间的局部距离	79
5.3.2 模式间的标准总体距离	79
5.3.3 模式间最短标准总体距离	79
5.4 最优路径	80
5.5 动态时间规整基本算法	80
5.5.1 对称式算法	81
5.5.2 非对称式算法	81
5.6 动态规划约束条件	83
5.6.1 终点约束	83
5.6.2 局部约束	83
5.6.3 全局约束	84
5.7 动态时间规整理论应用	85
5.7.1 多元批次轨迹同步化	85
5.7.2 基于 MSDTW 的多元批次轨迹的同步化	93
5.8 结束语	99
参考文献	99
第 6 章 基于非正常子域的故障分离	101
6.1 引言	101
6.2 基于非正常子域的故障分离原理	101
6.2.1 正常子域和非正常子域	101
6.2.2 基于 ANSR 的故障分离	102
6.3 基于主元分析的故障可分离性	104

6.3.1	可分离的充分条件	104
6.3.2	可分离的必要条件	105
6.4	基于主元分析的 PVC 生产过程故障传感器分离	106
6.4.1	基于非正常子域的故障分离	106
6.4.2	基于 ANSR 与基于 SPE 贡献图和 SVI 方法故障分离技术比较	110
6.5	基于非正常子域的故障分离的性能分析	111
6.5.1	高有效性	111
6.5.2	低计算复杂度	111
6.6	结束语	113
	参考文献	113
第 7 章	基于多块 PLS 的过程监测和诊断技术	116
7.1	引言	116
7.2	低密度聚乙烯过程	117
7.3	基于 PLS 的监测和诊断	119
7.3.1	潜结构投影模型 (PLS)	119
7.3.2	针对 LDPE 过程的 PLS 模型	120
7.3.3	利用 PLS 对 LDPE 进行故障检测	121
7.3.4	利用 PLS 对 LDPE 过程进行故障诊断	124
7.4	多块 PLS 模型	127
7.5	基于多块 PLS 的监测和诊断技术	128
7.6	结束语	134
	符号说明	135
	参考文献	136
	附录	137
第 8 章	基于递推 PLS 算法的自适应数据建模	140
8.1	引言	140
8.2	PLS 与递推 PLS	141
8.2.1	PLS 回归	141
8.2.2	递推 PLS 回归	143
8.2.3	非零均值的递推 PLS 回归	145
8.3	分块的递推 PLS 算法与自适应策略	146
8.3.1	分块递推 PLS 算法	146
8.3.2	带移动窗口的自适应技术	147
8.3.3	带遗忘因子的自适应技术	149
8.4	交叉验证和最终的递推分块 PLS 建模	150

8.5 动态和非线性的递推 PLS 回归建模	152
8.5.1 动态过程建模	152
8.5.2 非线性过程建模	153
8.6 在化工过程建模中的应用	153
8.7 结束语	156
参考文献	157
附录	158
第 9 章 偏最小二乘模型用于过程监控时的几何特性研究	160
9.1 引言	160
9.2 偏最小二乘模型 (PLS)	161
9.3 PLS 对 X 空间的分解特性及其与 PCA 的比较	162
9.4 PLS 对 X 空间分解的几何解释	164
9.4.1 PCA 的空间分解结构	164
9.4.2 PLS 的空间分解结构	164
9.4.3 其他 PLS 变形算法的空间分解结构	165
9.4.4 从空间分解的角度比较三种 PLS 模型	166
9.5 不同的 PLS 模型用于过程监控时的比较	167
9.5.1 基于标准 PLS 的过程监控策略	167
9.5.2 基于 SIMPLS 的过程监控策略	168
9.5.3 基于 WPLS 的过程监控策略	168
9.5.4 三种监控策略的比较	169
9.6 仿真及案例研究	170
9.6.1 数值仿真研究	170
9.6.2 TE 过程案例研究	172
9.7 结束语	173
参考文献	173
附录	174
第 10 章 全潜结构投影模型及其在过程监控上的应用	177
10.1 引言	177
10.2 潜结构投影模型 (PLS)	178
10.3 全潜结构投影模型	179
10.3.1 单变量输出下的全潜结构投影算法 (T-PLS1)	179
10.3.2 T-PLS 模型的性质	180
10.3.3 T-PLS 与 O-PLS 的关系	181
10.3.4 T-PLS 的投影结构	182

10.3.5 多变量输出下的 T-PLS 模型 (T-PLS2)	184
10.4 基于 T-PLS 模型的故障检测技术	184
10.5 数值仿真和 TE 过程案例研究	186
10.5.1 数值仿真研究	186
10.5.2 TE 过程案例研究	193
10.6 结束语	195
参考文献	195
附录	196
第 11 章 基于 T-PLS 的输出相关故障重构技术及其应用	198
11.1 引言	198
11.2 输出相关的故障检测与可检测性	199
11.2.1 基于 T-PLS 的故障检测	199
11.2.2 一种新的混合检测指标 φ	200
11.2.3 基于 φ 的故障可检测性	201
11.3 输出相关的故障重构与可重构性	202
11.3.1 基于混合指标的故障重构和估计	202
11.3.2 重构误差和故障估计误差	203
11.4 故障子空间的抽取	203
11.4.1 故障子空间的抽取	204
11.4.2 和 Y 相关的故障子空间抽取	204
11.4.3 降维的故障子空间抽取	205
11.5 基于重构的贡献图技术的故障诊断	205
11.5.1 基于重构的贡献图技术	205
11.5.2 基于 T-PLS 的广义重构贡献图方法	206
11.5.3 RBC 的几何意义	207
11.5.4 广义 RBC 方法总结	208
11.6 仿真及案例研究	208
11.6.1 数值仿真研究	208
11.6.2 TE 过程案例研究	209
11.7 结束语	221
参考文献	222
附录	223
第 12 章 基于 PCA 重构的连续过程故障预测	225
12.1 引言	225
12.2 问题描述	226

12.3 基于重构的故障估计	226
12.3.1 基于 PCA 的故障检测	227
12.3.2 基于重构的故障估计	227
12.3.3 一个新的故障检测指标	228
12.4 基于小波和向量自回归模型的故障预测技术	228
12.4.1 基于小波的去噪技术	228
12.4.2 基于向量自回归模型的故障预测	229
12.4.3 剩余有效寿命预测	230
12.4.4 故障预测方法小结	230
12.5 案例研究	231
12.5.1 CSTR 案例研究	231
12.5.2 TE 过程案例研究	236
12.6 结束语	240
参考文献	241
第 13 章 基于 T-PLS 和向量 AR 模型的输出相关故障预测	243
13.1 引言	243
13.2 问题描述	244
13.3 基于 T-PLS 的输出相关故障估计	245
13.3.1 全潜结构投影模型	245
13.3.2 输出相关的故障检测与诊断	245
13.3.3 输出相关的故障估计	246
13.4 基于带噪声 VAR 模型的故障预测	246
13.4.1 带噪声的向量自回归模型	246
13.4.2 模型参数的估计	246
13.4.3 基于 Kalman 滤波的故障预测	248
13.4.4 剩余有效寿命的预测	249
13.5 案例研究	249
13.5.1 一个数值仿真例子	249
13.5.2 TE 过程案例研究	257
13.6 结束语	260
参考文献	260
附录	262

第 1 章 动态系统故障诊断技术概述

基于解析冗余的动态系统的故障诊断技术在过去的 40 年中得到了迅猛的发展，已提出了大量的方法。因此，有必要对这些方法进行整理、归类和分析，探讨已经解决的和尚未解决的故障诊断问题。此外，最近十几年来发展起来的故障预测技术也引起了学术界和工程界的高度重视。本章将重点概述数据驱动的故障诊断与预测技术。

1.1 引言

随着科学的发展和技术的进步，系统的能力和现代化水平日益提高。与此同时，系统的投资和规模也越来越大，复杂性越来越高。这类复杂大系统一旦发生事故，便会造成巨大的财产损失和人员伤亡。因此，复杂系统的可靠性和安全性迫切 need 提高，以减少重大事故的发生。动态系统的故障诊断（fault diagnosis）技术是提高系统可靠性和降低事故风险的重要方法。故障诊断主要研究如何对系统中出现的故障进行检测、分离和辨识，即判断故障是否发生、定位故障发生的部位和种类，以及确定故障的大小和发生的时间等。过去的几十年中，故障诊断问题受到了国内外学者的广泛关注，取得了丰硕的研究成果^[1~11]。传统的分类思想一般将故障诊断方法划分为基于数学模型的方法、基于知识的方法和基于信号处理的方法三大类^[5~8]。然而近年来随着理论研究的深入和相关领域的发展，各种新的诊断方法层出不穷，传统的分类方法已经不再适用。本章从一个全新的角度对现有的故障诊断方法进行了重新分类，将其整体上分为定性分析方法和定量分析方法两大类，如图 1.1 所示。其中，定量分析方法又分为基于解析模型的方法和数据驱动的方法，后者又进一步包括机器学习类方法、多元统计分析类方法、信号处理类方法、信息融合类方法和粗糙集方法等。本章对每类方法的基本思想和研究进展等进行了较为详细的论述，其中重点讨论了数据驱动的方法。此外，本章还概述了故障预报技术的发展现状。最后，介绍了全书其他章节的主要内容。

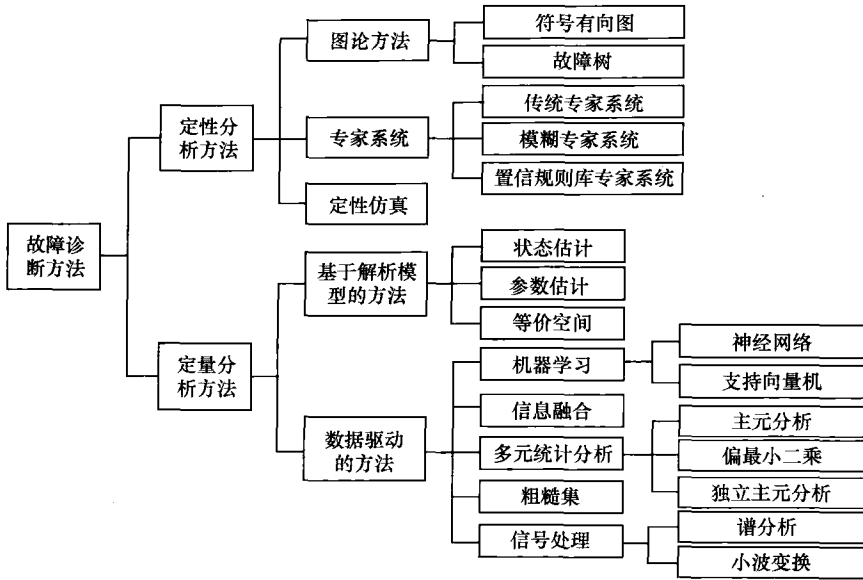


图 1.1 故障诊断方法分类示意图

1.2 定性分析方法

1.2.1 图论方法

基于图论的故障诊断方法主要包括符号有向图 (signed directed graph, SDG) 方法和故障树 (fault tree) 方法。SDG 是一种被广泛采用的描述系统因果关系的图形化模型。在 SDG 中, 事件或者变量用节点表示, 变量之间的因果关系用从原因节点指向结果节点的有方向的边表示。在系统正常时, SDG 中的节点都处于正常状态, 发生故障时故障节点的状态将会偏离正常值并发生报警, 根据 SDG 给出的节点变化间的因果关系, 并结合一定的搜索策略就可以分析出故障所有可能的传播路径, 判明故障发生的原因, 并且得到故障在过程内部的发展演变过程。Iri 等首先将 SDG 模型用于过程故障诊断^[12]; 文献 [13] 提出用因果图来简化 SDG 方法中的图建立过程和搜索逻辑; 文献 [14] 基于混杂键图和改进的时间因果图研究了混杂系统的传感器与执行器故障诊断。传统基于 SDG 的故障诊断方法是完全定性的, 文献 [15] 利用模糊集合理论将节点间的因果关系模糊化为隶属度函数; 文献 [16] 则提出了一种概率符号有向图方法, 利用条件概率描述节点间的因果关系。在定性 SDG 模型中引入定量描述, 可以更好利用系统的信息, 减少对故障发展路径的错误理解, 从而提高故障诊断的准确性。文

献 [17] 研究了基于 SDG 模型的大型化工过程的故障诊断问题, 并将所提出的方法用于多级闪式海水淡化过程。故障树是一种特殊的逻辑图。基于故障树的诊断方法是一种由果到因的分析过程, 它从系统的故障状态出发, 逐级进行推理分析, 最终确定故障发生的基本原因、影响程度和发生概率。Caceres 等最早研究了基于故障树的故障诊断问题, 提出了由系统结构框图建立故障树的方法^[18]。文献 [19] 提出了时间故障树模型来描述动态系统中故障与原因事件在时间上的动态关系, 并给出了基于时间故障树的分析方法。近年来这方面的主要研究是将故障树方法和其他方法相结合。文献 [20] 将故障树与模糊推理相结合用于动态系统的故障诊断; 文献 [21] 利用粗糙集讨论了故障树方法中基本事件的排序问题; 文献 [22] 研究了基于故障树的模糊专家系统。基于图论的故障诊断方法具有建模简单、结果易于理解和应用范围广等特点。但是, 当系统比较复杂时, 这类方法的搜索过程会变得非常复杂, 而且诊断正确率不高, 可能给出无效的故障诊断结果。

1.2.2 专家系统

基于专家系统 (expert system) 的故障诊断方法是利用领域专家在长期实践中积累起来的经验建立知识库, 并设计一套计算机程序模拟人类专家的推理和决策过程进行故障诊断。专家系统主要由知识库、推理机、综合数据库、人机接口及解释模块等部分构成。知识库和推理机是专家系统的核心, 传统专家系统中, 专家知识常用确定性的 IF-THEN 规则表示。文献 [23] 最早利用专家系统对沸水反应器的故障进行了诊断; 文献 [24] 提出了对专家知识进行结构化处理的层次分类方法, 适用于对复杂大系统建立专家系统; 文献 [25] 研究了基于任务框架建立知识专家系统的方法; 文献 [26] 将专家系统应用于化学搅拌过程的故障诊断, 所提出的方法首先判断故障是由误操作、系统干扰还是设备故障引起的, 然后利用专家系统给出将过程修复到正常状态的方案。通常专家知识不可避免地具有不确定性。模糊专家系统在专家知识的表示中引入了模糊隶属度的概念, 并利用模糊逻辑进行推理, 能够很好地处理专家知识中的不确定性。文献 [27] 将语言表达中的模糊性利用模糊集合进行描述, 并将语言条件关系转化为模糊集合之间的模糊关系, 建立了对核电厂蒸汽泄露故障进行早期检测的模糊专家系统; 文献 [28] 将模糊专家系统用于摩托车发动机的故障诊断。模糊理论善于描述由于不精确所引起的不确定性, 证据理论则能够描述由于不知道所引起的不确定性。Yang 等在综合模糊理论、证据理论和决策理论的基础上提出了基于置信规则库的证据推理专家系统方法^[29,30]。置信规则库是在传统规则库中 IF-THEN 规则的基础上加入了置信度的概念, 从而能够表示具有不确定性的各类数据之间复杂的因果关系。置信规则库中大量参数需要专家根据经验给出, 针对规则较多时