

信息技术丛书

周东华 叶银忠 著

# 现代故障诊断 与容错控制



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

信息技术丛书

# 现代故障诊断 与容错控制

周东华 叶银忠 著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

### 内 容 提 要

本书是关于现代故障诊断与容错控制技术的一本专著,主要汇集了作者近年来在故障诊断、容错控制以及安全控制领域的新理论与新方法、应用系统开发与系统实现技术方面的研究成果,同时也集中介绍了近年来国内外一些热点研究领域的基本技术原理和主要方法。本书涉及到的理论方法有:遗传算法、小波变换、神经网络、强跟踪滤波器、主元分析、模糊系统、定性推理等。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。

书 名: 现代故障诊断与容错控制

作 者: 周东华 叶银忠 著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研楼,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京市丰华印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22.75 字数: 547 千字

版 次: 2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-03907-0/TP·2283

印 数: 0001~4000

定 价: 26.00 元

# 《信息技术丛书》编委会

主 编 李衍达 郑大钟

编 委 边肇祺 金以慧 陈禹六  
杨家本 周东华 蔡鸿程

总责任编辑 蔡鸿程 王一玲

## 《信息技术丛书》

# 出版说明

当今的时代被称作为信息时代。信息科学技术的快速发展和广泛渗透已经成为现今社会的一个重要的时代特征。人类社会的生产活动和生活质量,比以往任何时代,都更加得益于和依赖于信息技术的成就和发展。自动化是信息技术领域的主要组成部分之一,包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统工程、机器人控制、计算机控制与应用、网络技术等在內,都和信息科学与技术有着直接和密切的关系,几乎涉及到了信息的检测、分析、处理、控制和应用等所有的方面。正是基于当今时代特点和科技发展态势这个大视野,结合自动化类专业人才培养模式及教学内容体系的改革,我们规划和组织了这套丛书的编写和出版。这套丛书的读者,定位为自动控制、过程自动化、计算机、电子工程、电气工程、动力工程、机械自动化等系科的高年级大学生和研究生,以及工作于这些领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

10年前,我们曾经组编和出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了比较大的社会影响,其中的许多著作至今仍然为国内很多高等学校采用作为教材,并为广大相关的科技人员采用作为进修和自学读物。现在组编和出版的这套《信息技术丛书》,从一定意义上可以说,就是先前的那套系列教材的发展和延伸,以反映新的进展和适应新的需求,匹配于变化了的时代和发展了的科技。列入这套丛书中的著作,大都是清华大学自动化系等所开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有在多年教学经验基础上新编而成的教材,也有属于原系列教材中的部分教材的修订版本,还有一些是反映信息技术最新发展的科技专著。总体上,这套丛书仍将保持原系列教材的求新与求实的风格,力求反映所属学科的基本理论和新近进展,力求做到科学性和教学性的统一,力求体现清华大学近年来在相应学科和领域中科学研究与教学改革的成果。

我们希望这套丛书,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容较新和论述较为系统的教材,也能为广大科技人员的继续学习与知识更新提供适合的和有价值的参考书。我们同时热忱欢迎,选用这套丛书的老师、学生和科技工作者提出批评和建议。

《信息技术丛书》编委会

# 前 言

故障诊断与容错控制技术的出现、兴起与迅速发展,是实际应用需求与多学科理论发展两个方面交替作用的结果。从实际应用方面看,随着现代自动化技术水平的不断提高,各类工程系统的复杂性大大增加,系统的可靠性与安全性已成为保障经济效益和社会效益的一个关键因素,得到了广泛高度的重视;从学科理论的发展方面而言,故障诊断与容错控制具有很强的学科交叉性,现代控制理论、信号处理、模式识别、最优化方法、决策论、人工智能等学科领域近 20 年来的迅速发展,为解决复杂系统的故障诊断与容错控制问题提供了有力的理论基础。

动态系统的故障诊断与容错控制技术迄今已得到了迅速的发展,并在航空航天、核反应堆、热电厂、石油输送、机器人、化工、铁路、船舶等一系列工程技术领域得到了成功的应用,取得了显著的经济和社会效益。它们也已经成为近年来国内外研究的一个十分活跃的领域,据统计,国际上每年都有上千篇论文发表。

作者近十年来一直从事本领域的研究工作,深感有必要结合本领域的新成果、新进展和新趋势撰写一本学术专著,对各种新的故障诊断与容错控制理论与方法及其应用作系统性的介绍。这也正是本书《现代故障诊断与容错控制》名称的由来。我们相信,本书的出版将对我国这方面的研究和应用起到一定的推动作用。

全书分“理论与方法”和“仿真与应用”上下两篇。上篇共分 11 章,第 1 章“绪论”概述了现代故障检测与诊断技术及其容错控制技术的发展概况、现有的主要方法以及热点与难点问题。第 2 章至第 9 章以理论与方法为主线,介绍了多种故障诊断的理论与方法,包括主元分析、小波变换、强跟踪滤波理论、遗传算法、神经网络、模糊理论、定性与定量过程知识的集成方法、模式识别方法等,其中小波变换、遗传算法、神经网络、模糊理论等是近年来国内外研究的重要方面,强跟踪滤波理论反映了作者在该领域长期研究的成果。一些基于神经网络和模糊理论的较有特色的故障诊断方法也将在有关章节中予以介绍。第 10 章以作者的研究成果为主要基础,介绍了线性系统容错控制的一些设计方法;第 11 章介绍了一种非线性系统的自适应容错控制方法,也是作者尚未公开发表的最新研究成果。本书下篇共分 5 章,重点介绍了故障诊断与容错控制的一些仿真与应用成果,包括双线性故障检测观测器及其在液压驱动系统中的应用、连续搅拌釜反应器的集成故障诊断与容错控制方法、非线性自适应观测器及其在元部件故障诊断中的应用、船舶舵桨装置控制系统的故障检测与诊断系统的开发以及船舶机舱系统的一种综合安全控制策略,其中后四个方面的内容是作者近两年来取得的研究成果。

由于作者理论水平有限以及研究工作的局限性,特别是现代故障诊断与容错控制本身技术正处在不断地发展之中,书中难免存在一些不足和错误。恳请广大读者批评指正。

本书的许多研究内容得到了国家自然科学基金会、国家 863 计划、国家教育部、上海市



教委和上海市教育发展基金会长期的大力支持,在此表示作者衷心的感谢。本书的部分章节承蒙汤天浩教授审阅并提供了不少有益的建议,本书的责任编辑为本书的高质量出版也付出了辛勤的劳动,在此一并致谢。

周东华 叶银忠

2000年1月于北京



**周东华**: 1963年生,1990年在上海交通大学获博士学位。现为清华大学自动化系教授。博士生导师,兼任中国自动化学会副秘书长、中国自动化学会技术过程的故障诊断与安全性专业委员会秘书长。IEEE高级会员。主要从事故障诊断与容错控制方面的研究工作,已在国内外发表学术论文100余篇,出版学术专著1部,获省部级科技进步奖2项。曾荣获德国洪堡研究奖学金、国家教委资助优秀青年教师基金、第六届中国青年科技奖、中国博士后科学基金会“国氏”博士后奖励基金以及霍英东教育基金会(研究类)青年教师奖。



**叶银忠**: 1964年生,1989年于华东理工大学获工学博士学位。现为上海海运学院电气自动化系教授,兼任中国自动化学会技术过程的故障诊断与安全性专业委员会委员、上海市造船工程学会船舶自动化专业委员会委员。主要从事故障诊断、安全控制、系统仿真等方面的研究,已在国内外发表学术论文60余篇、出版学术著作1部,完成各类科研项目10余项,获省部级科技进步奖1项。曾获交通部跨世纪人才,上海市教委和教育发展基金会“曙光计划”及交通部部级重点学科学术带头人培养对象等基金资助以及国务院政府特殊津贴。

# 目 录

前言 .....	V
----------	---

## 上篇 理论与方法

<b>第 1 章 绪论</b> .....	3
1.1 引言 .....	3
1.2 非线性系统的故障检测与诊断技术 .....	4
1.2.1 动态系统故障检测与诊断技术的一些概念与名词 .....	4
1.2.2 方法的分类与概述 .....	5
1.2.3 当前的热点问题 .....	10
1.3 容错控制技术 .....	11
1.3.1 容错控制中的基本概念与名词 .....	11
1.3.2 容错控制的主要方法 .....	11
1.3.3 热点与难点问题 .....	15
1.4 本书内容概述 .....	16
本章参考文献 .....	18
<b>第 2 章 基于主元分析的传感器故障诊断与重构方法</b> .....	24
2.1 引言 .....	24
2.2 基于主元分析的故障检测 .....	26
2.2.1 主元分析(PCA) .....	26
2.2.2 基于 PCA 的故障检测 .....	28
2.3 基于 PCA 的故障传感器重构 .....	30
2.3.1 迭代方法 .....	31
2.3.2 未重构的方差 .....	31
2.4 重构残差与故障的传播 .....	32
2.4.1 基于重构变量构成的残差(重构残差) .....	32
2.4.2 故障在残差序列中的传播 .....	33
2.5 基于传感器有效度指标的故障辨识 .....	35
2.5.1 设计方法与特性 .....	36
2.5.2 基于残差指数加权移动平均(EWMA)的故障辨识 .....	36
2.6 锅炉过程的应用研究 .....	39



2.7 结束语	43
本章参考文献	44
<b>第3章 基于小波变换的故障诊断方法</b>	<b>46</b>
3.1 引言	46
3.2 小波变换的基本原理	46
3.2.1 预备知识	46
3.2.2 小波与小波变换	47
3.3 基于小波变换的函数的局部正规性描述	49
3.4 奇异性的检测	51
3.5 基于小波变换的动态系统的故障检测	53
3.5.1 基于连续小波变换的极值点进行故障检测	53
3.5.2 基于离散小波变换检测随机信号频率结构的突变	55
3.6 仿真研究	56
3.7 结束语	57
本章参考文献	58
<b>第4章 强跟踪滤波器理论及其在非线性系统故障诊断中的应用</b>	<b>60</b>
4.1 引言	60
4.2 强跟踪滤波器(STF)的引入	60
4.3 一种带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器(SFEKF)	63
4.3.1 一个有用的定理	63
4.3.2 次优渐消因子的确定	65
4.4 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器(SMFEEKF)	68
4.4.1 SMFEEKF 的导出	68
4.4.2 STF 与扩展卡尔曼滤波器(EKF)的性能比较分析	72
4.5 相关噪声干扰下的 SMFEEKF 算法	76
4.6 有色噪声干扰下的 SMFEEKF 算法	80
4.6.1 一种非线性平滑器	81
4.6.2 SMFEEKF 算法	82
4.7 非线性系统状态与参数的联合估计方法	83
4.8 非线性系统的伪偏差分离估计(PSBE)算法	85
4.9 相关噪声下非线性系统的 PSBE 算法	89
4.10 有色噪声下的 PSBE 算法	91
4.11 关于 STF 鲁棒性的仿真研究	96
4.12 六种带遗忘因子的递推估计算法的比较研究	101
4.12.1 模型与算法	101

4.12.2	Monte Carlo 随机仿真实验 .....	103
4.12.3	SFEKF 与递推最小二乘(RLS)类算法的关系 .....	105
4.13	基于 STF 的非线性系统的故障诊断 .....	105
4.13.1	一种非线性系统“参数偏差”型故障(FDDPB)的检测 与诊断方法 .....	106
4.13.2	FDDPB 算法的典型应用 .....	109
4.14	结束语 .....	113
	本章参考文献 .....	113
<b>第 5 章</b>	<b>基于遗传算法的故障诊断方法 .....</b>	<b>117</b>
5.1	生物学中的一些基本概念 .....	117
5.1.1	DNA 编码 .....	117
5.1.2	遗传信息的流动 .....	117
5.1.3	重组(recombination) .....	118
5.1.4	变异(mutation) .....	118
5.2	(人工)遗传算法的基本知识 .....	119
5.2.1	概述 .....	119
5.2.2	经典的遗传算法 .....	119
5.3	基于遗传算法的最优统计聚类分析 .....	121
5.3.1	典型故障数据集的聚类问题 .....	121
5.3.2	高维数据聚类问题的遗传算法 .....	123
5.3.3	仿真例子 .....	124
5.4	遗传算法在故障诊断专家系统中的应用 .....	125
5.4.1	基于遗传算法的推理方法 .....	126
5.4.2	基于遗传算法的学习方法 .....	126
5.5	结束语 .....	127
	本章参考文献 .....	127
<b>第 6 章</b>	<b>神经网络技术及其在故障诊断中的应用 .....</b>	<b>128</b>
6.1	引言 .....	128
6.1.1	神经网络与故障诊断 .....	128
6.1.2	神经网络技术的发展与现状 .....	129
6.2	神经网络基础 .....	131
6.2.1	神经元模型 .....	131
6.2.2	神经网络的拓扑结构 .....	133
6.2.3	神经网络的学习规则 .....	134
6.3	典型结构的神经网络 .....	137

6.3.1	反向传播(BP)网络	137
6.3.2	径向基函数(RBF)网络	140
6.3.3	Hopfield 网络	141
6.3.4	自组织特征映射网络	142
6.3.5	递归神经网络	143
6.4	改进型 BP 算法及其在故障诊断中的应用	144
6.4.1	改进型 BP 算法	145
6.4.2	在船舶主柴油机冷却系统故障诊断中的应用	146
6.5	集成 BP 算法、多重结构神经网络(MNN)及其应用	150
6.5.1	集成 BP 算法	150
6.5.2	基于层次分类诊断模型的 MNN	151
6.5.3	在船舶主柴油机故障诊断中的应用	153
6.6	结束语	156
	本章参考文献	156
<b>第 7 章</b>	<b>模糊理论及其在故障诊断中的应用</b>	<b>158</b>
7.1	引言	158
7.2	模糊集合理论基础	159
7.2.1	模糊集合的概念及基本运算	159
7.2.2	模糊关系与模糊矩阵	165
7.2.3	模糊模式识别	167
7.3	模糊逻辑系统	168
7.3.1	模糊逻辑系统结构	168
7.3.2	模糊规则库	169
7.3.3	模糊推理机	170
7.3.4	模糊化和反模糊化单元	173
7.3.5	高木—关野模糊逻辑系统	175
7.3.6	模糊逻辑系统在故障诊断中的应用	175
7.4	模糊神经网络	178
7.4.1	模糊逻辑系统与神经网络	178
7.4.2	神经网络—模糊推理协作系统	179
7.4.3	模糊神经网络模型	180
7.4.4	模糊神经网络(FNN)学习方法	182
7.4.5	网络的剪裁	183
7.5	基于 FNN 和模糊逻辑的 FDD 系统示例	184
7.5.1	FDD 系统概述	184
7.5.2	知识获取与学习样本组织	185

7.5.3	FNN 系统构造与仿真结果 .....	187
7.5.4	FNN 输出的模糊规则解释 .....	189
7.6	结束语 .....	190
	本章参考文献 .....	190
<b>第 8 章</b>	<b>基于定性与定量过程知识的集成故障诊断方法 .....</b>	<b>191</b>
8.1	引言 .....	191
8.2	定性推理:符号定向图(SDG)方法 .....	192
8.2.1	定性模型 .....	192
8.2.2	故障诊断 .....	192
8.3	定性与定量的集成推理方法 .....	193
8.3.1	模糊集 .....	193
8.3.2	定量知识的图形描述 .....	194
8.3.3	应用领域 .....	195
8.3.4	定性与定量模型的仿真方法 .....	196
8.4	故障诊断方法 .....	196
8.4.1	定性与定量模型的构造 .....	197
8.4.2	规则的推导 .....	199
8.5	应用例子 .....	200
8.5.1	诊断系统 .....	200
8.5.2	诊断结果 .....	201
8.6	多重故障情形 .....	202
8.7	结束语 .....	204
	本章参考文献 .....	204
<b>第 9 章</b>	<b>基于模式识别方法的动态多变量系统的故障诊断 .....</b>	<b>207</b>
9.1	引言 .....	207
9.2	动态时间规整(DTW)算法 .....	209
9.2.1	约束条件的选取 .....	210
9.2.2	DTW 算法 .....	211
9.3	基于 DTW 算法的故障诊断方法 .....	213
9.4	实例研究 .....	214
9.4.1	过程描述 .....	215
9.4.2	仿真研究 .....	217
9.5	基于 PCA 与 DTW 的故障诊断方法 .....	220
9.6	结束语 .....	222
	本章参考文献 .....	222

<b>第 10 章 线性系统的容错设计方法</b> .....	225
10.1 引言 .....	225
10.2 基于参数空间的容错极点配置方法 .....	227
10.2.1 问题描述 .....	228
10.2.2 极点可行区域与特征多项式系数之间的关系 .....	229
10.2.3 对执行器故障的容错控制器设计 .....	231
10.2.4 对执行器及传感器故障的输出反馈容错控制律设计 .....	233
10.2.5 仿真示例 .....	234
10.2.6 小结 .....	235
10.3 基于 Riccati 型方程的容错设计方法 .....	236
10.3.1 Riccati 方程的一个性质 .....	237
10.3.2 对执行器故障的容错状态反馈控制律 .....	238
10.3.3 对传感器故障的容错控制律设计 .....	239
10.3.4 仿真示例 .....	240
10.4 时滞不确定性系统的鲁棒容错控制 .....	241
10.4.1 问题描述 .....	242
10.4.2 基本容错控制器的设计方法 .....	242
10.4.3 鲁棒容错控制器设计 .....	243
10.4.4 仿真示例 .....	245
10.5 控制律容错重组方法 .....	246
10.5.1 问题陈述 .....	246
10.5.2 基本设计方法 .....	247
10.5.3 仿真示例 .....	249
10.6 容错控制系统设计的计算机辅助设计(CAD)方法 .....	250
10.6.1 问题陈述与方法原理 .....	251
10.6.2 控制器参数设计的 CAD 方法 .....	252
10.6.3 多变量稳定容错控制器的设计 .....	254
10.6.4 设计示例 .....	256
10.6.5 设计过程的实施 .....	257
10.7 结束语 .....	258
本章参考文献 .....	259
<b>第 11 章 非线性系统的自适应容错控制</b> .....	261
11.1 引言 .....	261
11.2 一般模型控制的基本原理 .....	262
11.3 基于强跟踪滤波器的自适应一般模型控制(AGMC) .....	263
11.3.1 基于参数估计的 AGMC 方法 .....	263

11.3.2	基于输入等价干扰的 AGMC 方法	264
11.3.3	实验研究	265
11.4	非线性系统的自适应容错一般模型控制	271
11.4.1	传感器自适应容错一般模型控制	271
11.4.2	仿真研究	273
11.5	结束语	275
	本章参考文献	275

## 下篇 仿真与应用

<b>第 12 章</b>	<b>双线性故障检测观测器及其在液压驱动系统中的应用</b>	279
12.1	引言	279
12.2	双线性故障检测观测器(BFDO)	279
12.2.1	双线性模型	279
12.2.2	BFDO 的结构	280
12.2.3	BFDO 的设计	282
12.3	液压系统的故障检测与分离	284
12.3.1	液压系统的建模	284
12.3.2	液压系统的故障诊断	291
12.4	结束语	297
	本章参考文献	297
<b>第 13 章</b>	<b>一个连续搅拌釜式反应器(CSTR)的集成故障诊断与容错控制</b>	299
13.1	引言	299
13.2	CSTR 的故障模型	299
13.3	集成故障诊断与容错控制策略	301
13.4	仿真研究	303
13.5	结束语	306
	本章参考文献	307
<b>第 14 章</b>	<b>非线性自适应观测器及其在闭环非线性系统元部件故障诊断中的应用</b>	308
14.1	引言	308
14.2	非线性自适应观测器	309
14.2.1	非线性自适应观测器的设计方法	309
14.2.2	仿真研究	309
14.3	闭环非线性系统元部件故障的检测与诊断	311
14.3.1	CSTR 模型	312

14.3.2	控制律与故障诊断算法 .....	312
14.3.3	仿真研究 .....	313
14.4	结束语 .....	315
	本章参考文献 .....	315
<b>第 15 章</b>	<b>船舶舵桨装置控制系统的 FDD 系统开发 .....</b>	<b>317</b>
15.1	引言 .....	317
15.2	对象系统概述 .....	319
15.2.1	系统结构及工作原理 .....	319
15.2.2	主要故障现象与原因 .....	320
15.3	故障诊断方案 .....	321
15.3.1	故障树诊断方法 .....	322
15.3.2	专家系统方法 .....	324
15.3.3	神经网络方法 .....	327
15.4	故障诊断系统总体结构及辅助功能 .....	329
15.5	结束语 .....	332
	本章参考文献 .....	333
<b>第 16 章</b>	<b>船舶机舱系统的一种综合安全控制策略 .....</b>	<b>334</b>
16.1	引言 .....	334
16.2	安全控制系统结构与实现方法 .....	336
16.2.1	系统结构 .....	336
16.2.2	信号校验的实现方法 .....	338
16.2.3	船舶主机故障诊断仿真系统 .....	341
16.2.4	误操作检测与处理——计算机辅助操作(CAO)系统 .....	343
16.2.5	针对外部因素的安全控制实现方法 .....	345
16.3	结束语 .....	347
	本章参考文献 .....	347



# 上篇 理论与方法

