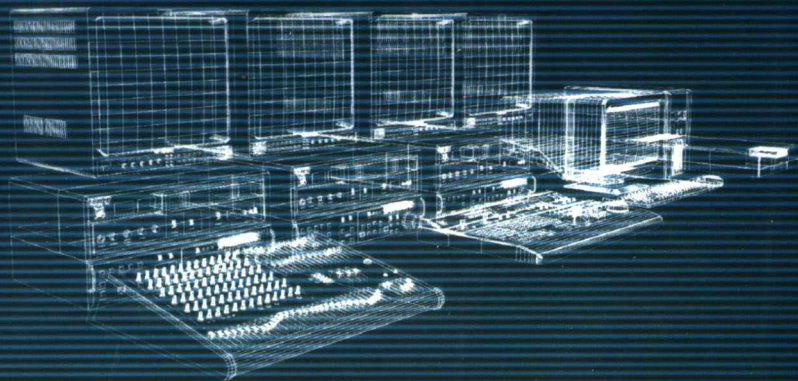


控制科学与工程



智能故障诊断与容错控制

王仲生 编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划专著

智能故障诊断与容错控制

王仲生 编著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书比较全面系统地阐述了智能故障诊断与容错控制的基本理论和方法。主要内容包括智能故障诊断与容错控制的构成原理、构成方法、控制方案、控制策略及其实现技术,同时对模糊、专家系统、神经网络、信息融合、智能体、智能结构、BIT、集成化和网络化智能故障诊断与容错控制方法也分别做了介绍。

本书可作为高等院校工业自动化、设备工程、安全工程、机械电子工程、控制科学与工程等专业高年级学生和研究生教材或教学参考书,也可供广大科技工作者和从事过程控制、故障诊断、武器装备使用与维护等人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能故障诊断与容错控制/王仲生编著. —西安:西北工业大学出版社, 2005.4

ISBN 7-5612-1920-2

I. 智… II. 王… III. 人工智能—故障诊断 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 023894 号

智能故障诊断与容错控制

王仲生 编著

责任编辑 李阿盟 责任校对 韩书琪

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844, 88491757

<http://www.nwpu.com>

西安新华印刷厂印制 各地书店经销

开本: 850 mm×1 168 mm 1/32 印张: 14.375 字数: 348 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷 印数: 1~2 000 册

ISBN 7-5612-1920-2 定价: 30.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：	王文生	王泽山	卢伯英	乔少杰
	刘建业	张华祝	张近乐	张金麟
	杨志宏	杨海成	肖锦清	苏秀华
	辛玖林	陈一坚	陈鹏飞	武博祎
	侯深渊	凌 球	聂 武	谈和平
	屠森林	崔玉祥	崔锐捷	焦清介
	葛小春			



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转



移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对



经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防



科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

随着现代科学技术的飞速发展,工程设备日趋复杂,自动化程度越来越高,设备运行的安全性和可靠性也越来越受到人们的重视。在过去的 30 多年里,传统故障诊断技术得到了快速发展并在工程中发挥了重要作用。传统故障诊断技术对于比较简单的设备或单一故障,能够发挥其独特作用,但对于大型复杂设备或多个故障交互情况,却显得无能为力,这时就必须采用智能故障诊断理论和方法。智能故障诊断与容错控制就是为适应现代设备需要而提供的一类新型技术。

本书由两大部分共 14 章组成。第 1 章到第 5 章为理论基础部分,主要介绍智能故障诊断与容错控制的有关概念、目的意义和研究方法,智能故障诊断与容错控制的构成原理和构成方法,智能故障诊断与容错控制方案、控制策略及其实现方法。第 6 章到第 14 章为技术方法部分,主要介绍模糊故障诊断与容错控制、专家系统故障诊断与容错控制、神经网络故障诊断与容错控制、信息融合故障诊断与容错控制、智能体故障诊断与容错控制、智能结构故障诊断与容错控制、BIT 故障诊断与容错控制、集成化故障诊断与容错控制、网络化故障诊断与容错控制,并给出了若干工程应用实例供使用时参考。

本书是作者多年来在故障诊断与容错控制方面研究工作的总结,并得到了国家自然科学基金、国家 863 计



划、航空科学基金、航天科学基金等项目资助,同时也综合了国内外在该领域的重要研究成果和最新发展动态。在内容安排上力求做到深入浅出、理论与实际应用相结合,既注意反映本学科的基础理论、新技术和新发展,又注重理论联系实际和突出工程应用性,以供广大科技人员和有关师生参考。

西北工业大学陈新海教授、第二炮兵工程学院王汉功教授、西安科技大学吴慎言教授对书稿进行了认真的评审,提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

本书在写作过程中参阅了大量国内外文献、专著和学位论文,并得到了国防科工委和西北工业大学出版社的支持与关怀,在此向文献作者及相关单位和个人表示诚挚谢意。

智能故障诊断与容错控制技术尚处于发展初期,许多问题还在研究和探索阶段。由于作者水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 绪论

1.1 智能故障诊断与容错控制的有关概念	1
1.2 智能故障诊断与容错控制的目的和意义	6
1.3 智能故障诊断与容错控制的研究内容	7
1.4 智能故障诊断与容错控制的研究方法	8
1.5 智能故障诊断与容错控制的国内外研究概况	11
1.6 本书的结构体系和特色	13
1.7 小结	14
参考文献	14

第 2 章 智能故障诊断与容错控制的构成

2.1 智能故障诊断与容错控制的基本结构	17
2.2 智能故障诊断与容错控制的构成原理	21
2.3 智能故障诊断与容错控制的构成方法	35
2.4 智能故障诊断与容错控制的评价指标	42
2.5 小结	44
参考文献	44

第 3 章 智能故障诊断与容错控制方案

3.1 基于状态反馈的故障诊断与容错控制	47
3.2 基于故障补偿的故障诊断与容错控制	48
3.3 基于多模冗余的故障诊断与容错控制	49
3.4 基于功能模块的故障诊断与容错控制	50
3.5 基于神经网络的故障诊断与容错控制	54
3.6 基于专家系统的故障诊断与容错控制	58
3.7 小结	64
参考文献	64



第4章 智能故障诊断与容错控制策略

4.1 瞬时故障的消除	66
4.2 多模块并行诊断决策	69
4.3 故障自适应学习控制	74
4.4 故障自适应补偿控制	85
4.5 故障自适应重构控制	86
4.6 小结	91
参考文献	91

第5章 智能故障诊断与容错控制的实现方法

5.1 故障信号检测	94
5.2 故障特征识别	106
5.3 故障状态预测	121
5.4 故障维修决策	132
5.5 故障容错控制	141
5.6 小结	147
参考文献	147

第6章 模糊故障诊断与容错控制

6.1 模糊故障诊断原理	151
6.2 模糊故障诊断方法	154
6.3 模糊故障容错控制	163
6.4 几个问题的处理方法	166
6.5 小结	170
参考文献	171

第7章 专家系统故障诊断与容错控制

7.1 专家系统概述	172
7.2 专家系统故障诊断原理	190
7.3 专家系统故障诊断方法	200
7.4 专家系统故障容错控制	205
7.5 翼型风洞运行过程故障诊断与容错控制	209
7.6 小结	214
参考文献	214



第 8 章 神经网络故障诊断与容错控制	
8.1 神经网络简介	216
8.2 神经网络故障诊断原理	219
8.3 神经网络故障诊断方法	227
8.4 神经网络故障容错控制	231
8.5 大型复杂机电设备多故障神经网络诊断	234
8.6 发动机转子系统神经网络故障诊断	239
8.7 小结	251
参考文献	251
第 9 章 信息融合故障诊断与容错控制	
9.1 信息融合的概念	253
9.2 信息融合故障诊断原理	262
9.3 信息融合故障诊断方法	268
9.4 信息融合故障容错控制	275
9.5 高精度容错卫星姿态确定系统	282
9.6 飞行器信息融合故障诊断专家系统	285
9.7 小结	290
参考文献	291
第 10 章 智能体故障诊断与容错控制	
10.1 概述	293
10.2 智能体故障诊断原理	304
10.3 智能体故障诊断方法	320
10.4 智能体故障容错控制	334
10.5 基于 Agent 的飞行器智能故障诊断	341
10.6 小结	347
参考文献	348
第 11 章 智能结构故障诊断与容错控制	
11.1 智能结构的概念	352
11.2 智能结构故障诊断系统的组成	358
11.3 智能结构故障诊断的关键技术	363
11.4 智能结构故障容错控制	367



11.5 小结	372
参考文献	372
第 12 章 BIT 故障诊断与容错控制	
12.1 概述	374
12.2 BIT 故障诊断原理	382
12.3 BIT 故障容错控制	385
12.4 无人机 BIT 故障诊断与容错控制	387
12.5 小结	393
参考文献	393
第 13 章 集成化故障诊断与容错控制	
13.1 集成的概念	395
13.2 集成化故障诊断体系结构	398
13.3 集成化推理和诊断策略	403
13.4 神经网络与模糊逻辑集成故障诊断	405
13.5 专家系统与神经网络集成故障诊断	407
13.6 神经网络与案例集成故障诊断	411
13.7 集成化故障容错控制	412
13.8 小结	413
参考文献	413
第 14 章 网络化故障诊断与容错控制	
14.1 概述	415
14.2 网络化故障诊断的结构模式	420
14.3 网络化故障诊断的实现方案	429
14.4 网络化故障诊断的关键技术	434
14.5 网络化故障诊断的评价指标	436
14.6 网络化故障容错控制	437
14.7 飞行器网络化远程诊断与故障防护	438
14.8 小结	444
参考文献	444

第 1 章 绪 论

随着科学技术的飞速发展,工程设备日趋复杂,自动化程度也越来越高。如何保证设备安全、高效、可靠地运行,是人们迫切需要研究和解决的一个重要问题。智能故障诊断与容错控制 IFDTC(Intelligent Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control)为此提供了一条有效途径。本章主要对智能故障诊断与容错控制的有关概念、研究目的和意义、研究内容、研究方法及国内外研究概况等进行简要阐述。

1.1 智能故障诊断与容错控制的有关概念

1. 智能

智能(Intelligent)是指能随内、外部条件的变化,具有运用知识解决问题和确定正确行为的能力^[1]。或者说,智能就是用计算机执行某些与人的思维有关的复杂行为的能力。智能往往通过观察、记忆、想像、思考、判断等表现出来。推理、学习和联想是智能的三个基本要素。推理就是从一个或几个已知的判断(前提),逻辑地推断出一个新判断(结论)的思维形式。推理过程包括从个别到一般(归纳推理)和从一般到个别(演绎推理)两种方式。学习就是根据环境变化,能动态地改变知识结构。学习方式有机械学习、指导学习、实例学习、类比学习等。联想就是通过与其他知识的联系,能正确地认识客观事物和解决实际问题。

智能有低级智能和高级智能两种。低级智能表现为感知环境、做出决策和控制行为。高级智能不仅具有感知、学习、分析、比较和推理能力,而且还能根据复杂环境变化做出正确决策和适应



环境变化的能力。智能通常应具备以下三个条件：

(1)感知能力：就是能感知外界变化和获取感性知识的能力。如人能通过眼、耳等感官接受文字、声音、图像等信息，并通过中枢神经进行信息处理、模式识别、语音理解等能力。

(2)思维能力：就是具有记忆、联想、推理、分析、比较、判断、决策、学习等能力。

(3)行为能力：就是对外界刺激(输入信号)能做出反应(输出信息)并采取相应动作的能力。行为的智能特性通常表现在对于环境变化的灵敏性和适应性。

智能具有以下共性：

(1)智能的基本要素是信息。

(2)智能是普遍存在的。即人、动物、机器等都可能具有智能。

(3)智能是多层的。如高层智能(思维)、中层智能(感知)、基层智能(行为)等。

(4)智能是进化的。如先天进化(遗传、变异)、后天进化(学习、训练)等。

(5)智能是相对的。随不同的主体、客体，时间、空间、环境、条件等，会有不同的智能水平。

智能主要体现在知识的干预和运用。一个智能系统除了具有较强的知识表达能力和解释能力，还应具有较强的知识获取能力和学习能力。

智能的核心是思维，思维的器官在人脑，而人脑活动的主要内容是处理来自外部的信息。

2. 故障

故障(Fault)通常指设备在规定条件下不能完成其规定功能的一种状态^[2]。这种状态往往是由不正确的技术条件、运算逻辑错误、零部件损坏、环境变化、操作错误等引起的。这种不正常状态可分为以下几种情况：

(1)设备在规定的条件下丧失功能；



(2)设备的某些性能参数达不到设计要求,超出了允许范围;

(3)设备的某些零部件发生磨损、断裂、损坏等,致使设备不能正常工作;

(4)设备工作失灵,或发生结构性破坏,导致严重事故甚至灾难性事故。

设备故障通常包括对象故障、仪表故障和系统故障三种。根据故障发生的性质,可将故障概括为两类:硬故障和软故障。硬故障指设备硬件损坏引起的故障,如结构件或元部件的损伤、变形、断裂等。软故障如系统性能或功能方面的故障。设备故障一般具有以下特性^[3]:

(1)层次性。故障一般可分为系统级、子系统级、部件级、元件级等多个层次。高层次的故障可以由低层次故障引起,而低层次故障必定引起高层次故障。故障诊断时可以采用层次诊断模型和层次诊断策略。

(2)相关性。故障一般不会孤立存在,它们之间通常相互依存和相互影响。一种故障可能对应多种征兆,而一种征兆可能对应多种故障。这种故障与征兆之间的复杂关系,给故障诊断带来了一定困难。

(3)随机性。突发性故障的出现通常都没有规律性,再加上某些信息的模糊性和不确定性,就构成了故障的随机性。

(4)可预测性。设备大部分故障在出现之前通常有一定先兆,只要及时捕捉这些征兆信息,就可以对故障进行预测和防范。

3. 容错

容错(Tolerant)就是容忍错误^[4]。它是指设备的一个或多个关键部分发生故障时,通过采取相应措施,能够维持其规定功能,或在可接受的性能指标下,保证设备继续安全完成其基本功能。

容错的思想最早起源于对生物体中天然存在的容错特性的模仿。由于国防、军工等特殊需要,容错技术首先在 VLSI、WSL、航空、航天等领域得到了成功的应用^[5,6]。随后,容错技术得到了迅