

95

733

智能容错技术及应用

Intelligent Fault-tolerant Technology and its Application

王仲生 著

国防工业出版社

·北京·

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 崔士义 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

前 言

随着科学技术的飞速发展,工业设备日趋复杂,设备运行的安全性和可靠性越来越引起人们的重视,特别是大型复杂设备,在运行过程中如果任何一个部件发生故障而不能及时处理,不仅会造成巨大的经济损失,而且可能危及人身安全,产生严重的社会影响。在生产自动化日益发展的今天,仅仅靠传统的被动维修措施已远远不能满足现代设备的要求。为了保证设备安全、高效、可靠地运行,必须采用与之相适应的主动维修管理模式,智能容错技术为此提供了一条有效途径。

容错技术是 20 世纪 80 年代发展起来的一种高可靠性技术,目前已在航空、航天等领域得到了广泛应用。如何将人工智能和容错技术相结合,并用于设备的故障控制,是人们迫切需要研究和解决的一个重要问题。本书对此进行了比较深入系统的介绍。

全书共分九章。第一章简要地介绍了智能容错技术的有关概念、研究概况、研究内容和研究方法。第二章对智能容错控制的基本结构、构成原理、构成方法等进行了分析和讨论。第三章介绍了硬件、软件、时间、信息和冗余附加技术五种基本智能容错控制方式。第四章介绍基于状态反馈、故障补偿、多模冗余、功能模块、神经网络和专家系统六种智能容错控制方案及其实现技术。第五章对瞬时故障消除、多模块并行诊断决策、故障自适应学习控制、故障自适应补偿控制和故障自适应重构控制五种智能容错控制策略进行了分析和研究。第六章分析讨论系统重构、结构冗余、模型参考、故障自适应、神经网络和专家系统六种智能容错控制器设计方法。第七章介绍智能容错控制的具体实现方法和技术途径。第八章对智能容错控制的评价内容、评价准则和评价方法进行了分析

和讨论。第九章给出了五个工程应用实例。

本书是作者多年来在该领域科学研究工作的总结,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。在内容安排上力求作到深入浅出、理论与应用并重,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,以供广大科技人员和有关师生参考。

该书的出版得到了国防科技图书出版基金的资助,并在国防科技图书出版基金委员会的热情关怀和支持下完成。评委会专家对书稿进行了认真的评阅,提出了许多宝贵意见和建议。在此,对国防科技图书出版基金委员会、评委会专家、责任编辑和国防工业出版社表示诚挚谢意。

本书在写作过程中,参阅了许多国内外文献、专著和学位论文,顺向各位作者一并致谢。

智能容错技术尚处于发展初期,许多问题还在研究和探索之中。由于时间仓促和作者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

著 者

2001年12月于西北工业大学

目 录

第一章 概论	1
1.1 智能容错技术概述	1
1.2 智能容错技术的研究内容	8
1.3 智能容错技术的研究方法	9
1.4 小结.....	14
参考文献	14
第二章 智能容错控制的构成	16
2.1 智能容错控制的基本结构.....	16
2.2 智能容错控制的构成原理.....	18
2.3 智能容错控制的处理方式.....	21
2.4 智能容错控制的构成方法.....	22
2.5 小结.....	27
参考文献	28
第三章 智能容错控制方式	29
3.1 硬件智能容错控制	29
3.2 软件智能容错控制	33
3.3 时间智能容错控制	37
3.4 信息智能容错控制.....	37
3.5 冗余附加技术.....	38
3.6 小结.....	39
参考文献	39
第四章 智能容错控制方案	41
4.1 基于状态反馈的智能容错控制方案.....	41
4.2 基于故障补偿的智能容错控制方案	42

4.3	基于多模冗余的智能容错控制方案	43
4.4	基于功能模块的智能容错控制方案	44
4.5	基于神经网络的智能容错控制方案	48
4.6	基于专家系统的智能容错控制方案	51
4.7	小结	57
	参考文献	58
第五章	智能容错控制策略	59
5.1	瞬时故障的消除	59
5.2	多模块并行诊断决策	61
5.3	故障自适应学习控制	67
5.4	故障自适应补偿控制	76
5.5	故障自适应重构控制	78
5.6	小结	83
	参考文献	83
第六章	智能容错控制器设计	85
6.1	系统重构智能容错控制器设计	85
6.2	结构冗余智能容错控制器设计	92
6.3	模型参考智能容错控制器设计	96
6.4	故障自适应智能容错控制器设计	99
6.5	神经网络智能容错控制器设计	102
6.6	专家系统智能容错控制器设计	104
6.7	小结	107
	参考文献	107
第七章	智能容错控制的实现方法	109
7.1	故障信号检测	109
7.2	故障特征识别	111
7.3	故障状态预测	125
7.4	故障维修决策	133
7.5	故障容错控制	139
7.6	小结	148

参考文献	148
第八章 智能容错控制的评价	152
8.1 智能容错控制的评价内容	152
8.2 智能容错控制的评价准则	155
8.3 智能容错控制的评价方法	165
8.4 小结	166
参考文献	167
第九章 智能容错技术的工程应用	168
9.1 翼形风洞智能容错控制	168
9.2 发电机组智能容错控制	173
9.3 空气压缩机智能容错控制	178
9.4 转子碰摩智能容错控制	184
9.5 强度自适应智能容错控制	190
9.6 小结	198
参考文献	198

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Outlook on Intelligent Fault-tolerant Technology	1
1.2 Research Contents of Intelligent Fault-tolerant Technology	8
1.3 Research Method of Intelligent Fault-tolerant Technology	9
1.4 Summary	14
References	14
Chapter 2 Constitution on Intelligent Fault-tolerant Control	16
2.1 Fundamental Structure of Intelligent Fault-tolerant Control	16
2.2 Constitution Principle of Intelligent Fault-tolerant Control	18
2.3 Disposal Manner of Intelligent Fault-tolerant Control	21
2.4 Constitution Technique of Intelligent Fault-tolerant Control	22
2.5 Summary	27
References	28
Chapter 3 Way on Intelligent Fault-tolerant Control	29
3.1 Intelligent Fault-tolerant Control on Hardware	29
3.2 Intelligent Fault-tolerant Control on Software	33
3.3 Intelligent Fault-tolerant Control on Time	37
3.4 Intelligent Fault-tolerant Control on Information	37

3.5	Redundancy Addition Technology	38
3.6	Summary	39
	References	39
Chapter 4	Scheme on Intelligent Fault-tolerant Control	41
4.1	Scheme on Intelligent Fault-tolerant Control Based on State Feedback	41
4.2	Scheme on Intelligent Fault-tolerant Control Based on Fault Compensation	42
4.3	Scheme on Intelligent Fault-tolerant Control Based on Multi-Mode Redundancy	43
4.4	Scheme on Intelligent Fault-tolerant Control Based on Function model	44
4.5	Scheme on Intelligent Fault-tolerant Control Based on Artificial Neural Network	48
4.6	Scheme on Intelligent Fault-tolerant Control Based on Expert System	51
4.7	Summary	57
	References	58
Chapter 5	Tactics on Intelligent Fault-tolerant Control	59
5.1	Elimination of Instant Fault	59
5.2	Diagnosis Policy on Multi-Mode Parallel	61
5.3	Learning Control on Fault Adaptive	67
5.4	Compensation Control on Fault Adaptive	76
5.5	Reconfiguration Control on Fault Adaptive	78
5.6	Summary	83
	References	83
Chapter 6	Design on Intelligent Fault-tolerant Controller ...	85
6.1	Design of Intelligent Fault-tolerant Controller Based on System Reconstruction	85
6.2	Design of Intelligent Fault-tolerant Controller Based	

on Structure Redundancy	92
6.3 Design of Intelligent Fault-tolerant Controller Based on Model Reference	96
6.4 Design of Intelligent Fault-tolerant Controller Based on fault Adaptive	99
6.5 Design of Intelligent Fault-tolerant Controller Based on Artificial Neural Network	102
6.6 Design of Intelligent Fault-tolerant Controller Based on Expert System	104
6.7 Summary	107
References	107
Chapter 7 Realization Technique on Intelligent Fault-tolerant Control	109
7.1 Detection on Fault Signals	109
7.2 Identification on Fault Characteristic	111
7.3 Forecast on Fault Condition	125
7.4 Policy on Fault Maintenance	133
7.5 Fault-tolerant Control	139
7.6 Summary	148
References	148
Chapter 8 Evaluation on Intelligent Fault-tolerant Control	152
8.1 Evaluation Content of Intelligent Fault-tolerant Control	152
8.2 Evaluation Criterion of Intelligent Fault-tolerant Control	155
8.3 Evaluation Method of Intelligent Fault-tolerant Control	165
8.4 Summary	166
References	167
Chapter 9 Engineering Application on Intelligent	

Fault-tolerant Control	168
9.1 Intelligent Fault-tolerant Control on Aerofoil Wind Tunnel	168
9.2 Intelligent Fault-tolerant Control on Generator Units	173
9.3 Intelligent Fault-tolerant Control on Air-compressor	178
9.4 Intelligent Fault-tolerant Control on Rotor Rub-impact	184
9.5 Intelligent Fault-tolerant Control on Intensity Adaptive	190
9.6 Summary	198
References	198

第一章 概 论

智能容错技术 IFTT(Intelligent Fault-Tolerant Technology)是设计高可靠性系统必不可少的技术。它是一门涉及系统论、信息论、控制论、故障诊断、人工智能、专家系统和计算机等多学科知识和技术的新兴综合性学科。本章对智能容错技术的有关概念、研究的目的是和意义、研究内容、研究方法等进行简要介绍。

1.1 智能容错技术概述

1.1.1 智能容错技术的有关概念

1. 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^[1]。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。这种不正常状态可分以下几种情况:

- (1) 设备在规定的条件下丧失其功能;
- (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,以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,导致严重或灾难性事故。

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,可将其概括为硬故障和软故障两类。硬故障指设备硬件损坏引起的故障,如结构件或元器件的损伤、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^[2]:

(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。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、相互影响。一种故障可能对应多种征兆,一种征兆也可能对应多种故障。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。

2. 状态监测与故障诊断

状态监测 CM(Condition Monitoring)就是监测设备的运行状态,即确定设备是否发生了故障。设备没有发生故障称正常,设备发生了故障称异常。

故障诊断 FD(Fault Diagnosis)就是当设备发生故障后,不但要确定出故障原因、部位、类型及严重程度,还要对其状态及发展趋势进行预测和维修决策。

状态监测可以及时发现故障,故障诊断可以确定出故障原因、部位、类型及程度,并为容错控制提供必要的信息。状态监测与故障诊断 CMFD(Condition Monitoring and Fault Diagnosis)的准确性和适时性,直接影响对设备故障的容错能力^[3]。

3. 征兆和特征信号

征兆(Symptom)是指故障的表现特征。它是故障发生之前或发生和发展过程中的客观反映。狭义上讲,征兆是设备出现的异常现象;广义上讲,征兆是有助于判断故障的各种现象或事实和证据。在某些情况下,特征信号可以作为征兆,但一般来讲,特征信号难以直接判断设备的正常与异常,即有故障或无故障。因此,也

可以说征兆是用不同的方法和手段,通过对特征信号去粗取精后得到的、可直接用于进行诊断的信息。

特征信号 CS(Characteristic Signal)是指与设备状态紧密相关的、最有用的、能表征设备状态特征的信息。CS 不是设备的全部信息。CS 一方面能反映设备的性能和状态,另一方面利用特征信号能够容易地对设备状态进行监视。

特征提取 CE(Characteristic Extraction) 是联系状态监测与故障诊断的桥梁。CE 一般分两步进行:

(1) 对数据采集和状态监测得到的基本数据进行必要的分析处理,使其转换成特征数据(如各种频率成分的大小、振幅等);

(2) 特征数据再经过征兆获取程序,使其成为具有可信度大小的征兆事实,以供诊断推理使用。

4. 智能

智能 (Intelligence) 泛指人们认识客观事物并运用知识解决实际问题的能力^[4],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。智能有低级智能和高级智能两种。低级智能表现为感知环境、作出决策和控制行为;高级智能不仅具有感知、学习、分析、比较和推理能力,而且还具有根据复杂环境变化作出正确决策和适应环境变化的能力。智能通常应具备三个条件:

(1) 感知能力。就是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。

(2) 思维能力。就是记忆、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)作出反应(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,它随不同的主体、客体,时间、空间,环境、条件等,会有不同的智能水平。

5. 容错

容错(Tolerance)就是容许错误^[5],是指设备的一个或多个关键部分发生故障时,能够自动地进行检测与诊断,并采取相应措施,保证设备维持其规定功能,或用牺牲性能来保证设备在可接受范围内继续工作。

错一般可分为两类:第一类是先天性的固有错,如元器件生产过程中造成的错、线路与程序在设计过程中产生的错。这一类错需对其拆除、更换或改正,它是不能容忍的。第二类是后天性的错,它是由于设备在运行中产生了缺陷所导致的故障。这种故障有瞬时性、间歇性和永久性区别。对瞬时性及间歇性故障不能采取检测定位等措施(因检测时也许不见了,过一段时间可能又会出现),但可以考虑随机地消除其作用,使其不影响设备的正常工作。对于运行中产生的永久性故障,可先诊断出它存在的范围和部件,然后将有关零部件或分系统切换或修理。如果任其存在,就会使它与另一故障(永久性或瞬时性故障)相遇而构成双重故障,甚至造成灾难性后果。容错技术是提高系统可靠性的重要途径。常用的容错方法有硬件容错、软件容错、信息容错和时间容错。

6. 智能容错控制

智能容错控制^[6] IFTC(Intelligent Fault-Tolerant Control)就是设备在运行过程中一个或多个关键部件发生故障或即将发生故障之前,利用人工智能理论和方法,通过采取有效措施,对故障自动进行补偿、抑制、消除、修复,以保证设备继续安全、高效、可靠运行,或以牺牲性能损失为代价,保证设备在规定时间内完成其预定