胡昌华 许化龙 著

控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计

Design and Analysis of Fault-tolerant Control and Fault Diagnosis for Control System

国防工业出版社

TP273
H56

465493

控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计

Design and Analysis of Fault-tolerant Control and Fault Diagnosis for Control System

胡昌华　许化龙　著

中国科学技术大学
图书馆藏

国防工業出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计/胡昌华，许化龙著 .—北京：国防工业出版社，2000.7

ISBN 7-118-02235-7

Ⅰ.控… Ⅱ.①胡… ②许… Ⅲ.①控制系统-故障诊断②容错系统：控制系统-分析③容错系统：控制系统-设计 Ⅳ.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 17252 号

JS157/03

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)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8⅜ 206 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月北京第 1 次印刷

印数：1－1500 册 定价：20.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

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，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. 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，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防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，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，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，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工业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

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

国防科技图书出版基金
第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员　怀国模

主　任　委　员　黄　宁

副主任委员　殷鹤龄　高景德　陈芳允　曾　铎

秘　书　长　崔士义

委　　员　于景元　王小谟　尤子平　冯允成
（以姓氏笔划为序）
刘　仁　朱森元　朵英贤　宋家树
杨星豪　吴有生　何庆芝　何国伟
何新贵　张立同　张汝果　张均武
张涵信　陈火旺　范学虹　柯有安
侯正明　莫梧生　崔尔杰

前　言

随着人们认识世界的深入，改造世界的拓展，出现了一些大型复杂系统。这些系统规模大，造价高，一旦出现故障，其后果往往是灾难性的，因此要求这种系统具有极高的安全性和可靠性。如何及时发现系统中的故障并加以定位，当系统出现故障时能否使系统仍然安全可靠地工作且维持一定的性能，客观生产实践向人们提出了故障诊断与容错控制的问题。

故障诊断和容错控制技术作为提高系统的安全性、可靠性的重要手段，日益引起人们的重视，成为控制理论继分析与综合技术之后的又一主要内容。国内外每年都有大量的文献报道这方面的研究，且已经取得了许多有价值的成果，但由于问题的复杂性，故障诊断和容错控制是一门涉及自动控制理论、计算机科学、信号处理、数理统计、优化理论、人工智能等多学科的新型边缘学科，仍然存在许多有待进一步研究的问题。笔者一直从事故障诊断与容错控制的学术、科研和研究生教学工作，感到有必要对过去的工作加以总结，为相关的学习研究提供一些参考。因此我们总结了十余年来在控制系统故障诊断与容错控制领域的学术、科研和教学工作，写成此书，并经两届研究生试用，深得学生好评。现承蒙国防科技图书出版基金资助，使得此书能得以正式出版。我们深信，本书的出版对我国控制系统故障诊断与容错控制的研究必将起一定的推动作用。

全书共十一章。第一章对故障诊断与容错控制的基本概念、方法及存在的问题和可能的发展方向作了综述性的分析；第二章研究了基于矩阵奇异值分解的鲁棒观测器设计及基于观测器的故障诊断；第三章探讨了基于参数估计和人工神经网络的不确定时变系统

的故障诊断;第四章研究了人工神经网络结构自调整方法和快速学习算法及基于人工神经网络的故障诊断;第五章研究了基于自适应模糊逻辑系统的故障诊断,提出了基于梯度下降、竞争学习、聚类、模拟退火的自适应模糊逻辑系统的构造方法,以及基于自适应模糊逻辑系统的故障诊断方法;第六章探讨了基于专家系统的故障诊断方法;第七章论述了故障的逻辑诊断与故障树分析;第八章论述了应用信息量确定最佳检测步骤和最佳故障特征集;第九章研究了系统逻辑关系的 Petri 网模型描述,基于 Petri 网模型的系统状态变迁的动态求解、故障诊断的关联矩阵求解法和梯形图求解法;第十章研究了基于稳定性理论和非线性优化的同时稳定容错控制设计问题;第十一章研究了基于 H_∞ 控制理论的多变量系统完整性设计。每章都有实物实验或应用仿真的结果和实例。

全书从内容到写作均由胡昌华教授完成,书中第三章、第六章为与许化龙教授的合作研究成果。胡昌华同志在西北工业大学攻读博士学位期间,得到了陈新海教授、许化龙教授的指导、关心和帮助,为本书的写作打下了坚实的理论基础,在邓方林教授、许化龙教授指导下进行的有关博士后研究也得益匪浅,二炮工程学院院领导及机关各部、处,学院许多同志一直关心和支持着本书的出版,在本书出版之际谨向他们表示衷心的感谢。

在本书的出版过程中,得到了中国科学院院士沈绪榜同志、中国工程院院士陈士橹同志、西北工业大学陈新海教授、西安交通大学刘文江教授的热情推荐和帮助,在此深表感谢!

衷心感谢国防科技图书出版基金对本书给予的资助!感谢国防科技图书出版基金委员会和国防工业出版社的同志们给予的支持和帮助!

由于我们水平所限,书中难免有许多错误,敬请广大读者批评指正。

胡 昌 华

1999 年 10 月于西安

目　　录

第一章　概述 …… 1
1.1　问题的提出 …… 1
1.2　故障诊断 …… 3
1.2.1　故障诊断的任务及其研究的内容 …… 4
1.2.2　系统故障的特征量及其获取 …… 4
1.2.3　故障的决策与分离方法 …… 4
1.2.4　故障诊断的方法 …… 5
1.3　容错控制 …… 7
1.3.1　鲁棒容错控制 …… 8
1.3.2　重构容错控制 …… 9
1.4　容错控制和故障诊断技术中存在的问题及其发展趋势 …… 10
参考文献 …… 13
第二章　基于观测器的故障诊断 …… 15
2.1　引言 …… 15
2.2　故障检测观测器的特征结构配置方法 …… 15
2.3　基于矩阵奇异值分解的鲁棒故障检测观测器和基于鲁棒观测器的故障诊断 …… 22
2.3.1　问题的描述 …… 22
2.3.2　基于矩阵奇异值分解的鲁棒观测器设计 …… 24
2.3.3　基于多重模型假设下的并行鲁棒观测器残差输出的故障分离 …… 29
参考文献 …… 35
第三章　基于参数估计的故障诊断 …… 38

3.1 引言 …… 38
3.2 基于模参-物参关联方程灵敏度分析的故障模式识别 …… 41
3.3 变结构变参数系统参数估计 …… 45
3.4 变结构变参数系统辨识的自适应算法 …… 57
3.5 基于参数估计和人工神经网络的动态测试与故障诊断的原理 …… 63
3.5.1 基于参数估计和人工神经网络的动态测试与故障诊断的原理 …… 63
3.5.2 应用实例——基于参数估计和人工神经网络的某导弹姿态控制系统动态测试与故障诊断系统 …… 64
参考文献 …… 67
第四章 基于人工神经网络的故障诊断 …… 69
4.1 引言 …… 69
4.2 多层前向神经网络和一种改进的多层前向网络快速学习算法 …… 70
4.2.1 多层前向网络的结构及数学描述 …… 70
4.2.2 一种多层前向神经网络的结构自调整算法 …… 72
4.2.3 误差的后向传播原理及 BP 学习算法 …… 73
4.2.4 一种改进的快速误差后向传播学习算法(FBP) …… 75
4.3 基于 BP 和 FBP 学习算法的多层前向网络在故障诊断中的应用 …… 77
参考文献 …… 82
第五章 自适应模糊逻辑系统和基于自适应模糊逻辑系统的故障诊断 …… 83
5.1 引言 …… 83
5.2 模糊逻辑的数学基础 …… 84
5.3 自适应模糊逻辑系统及基于自适应模糊逻辑系统的故障诊断 …… 88
5.3.1 自适应模糊逻辑系统的数学描述 …… 89
5.3.2 自适应模糊逻辑系统的函数逼近能力分析 …… 91

5.3.3 自适应模糊逻辑系统的梯度下降学习算法 …… 92
5.3.4 基于模拟退火的自适应模糊逻辑系统学习算法 …… 94
5.3.5 自适应模糊逻辑系统的最近邻学习算法 …… 97
5.3.6 自适应模糊逻辑系统的竞争学习算法 …… 99
5.3.7 基于自适应模糊逻辑系统的建模与故障诊断实验研究…… 100
参考文献 …… 103
第六章 基于专家系统的故障诊断方法 …… 105
6.1 引言 …… 105
6.2 专家系统的建造 …… 106
6.3 知识的表示与获取 …… 108
6.3.1 知识的表示 …… 108
6.3.2 知识的获取 …… 110
6.4 推理机 …… 114
6.4.1 推理策略 …… 115
6.4.2 推理控制策略 …… 115
6.5 应用实例 …… 118
6.5.1 系统的结构 …… 118
6.5.2 基于 STD 智能检测的某运载火箭实时在线监测 …… 119
6.5.3 基于 STD 实时在线监测的故障诊断专家系统 …… 120
6.5.4 系统的功能特点、应用情况及结论 …… 121
参考文献 …… 121
第七章 逻辑诊断与故障树分析 …… 123
7.1 逻辑诊断 …… 123
7.1.1 逻辑代数 …… 123
7.1.2 故障诊断中的逻辑问题 …… 125
7.1.3 故障的逻辑诊断 …… 125
7.2 故障的故障树分析方法 …… 127
7.2.1 故障树的建造与数学描述 …… 129
7.2.2 故障树的定性分析 …… 135
7.2.3 故障树的定量计算 …… 140
参考文献 …… 146
第八章 应用信息量确定最佳检测步骤和最佳故障特征集 … 147

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

8.1 引言 …… 147
8.2 信息及其度量与计算 …… 147
8.2.1 熵函数 …… 148
8.2.2 信息及其度量 …… 153
8.3 用信息量的方法确定最佳故障特征集和最佳诊断步骤 …… 153
参考文献 …… 157
第九章 系统动态行为的 Petri 网描述及基于 Petri 网的故障诊断 …… 158
9.1 Petri 网的基本概念 …… 158
9.2 逻辑运算的 Petri 网建模 …… 161
9.3 Petri 网的简化 …… 163
9.4 基于 Petri 网模型的系统分析 …… 165
9.4.1 由 Petri 网模型求系统失效率 …… 165
9.4.2 由 Petri 网模型求系统的最小路集与最小割集 …… 165
9.5 基于 Petri 网的系统状态动态变迁的描述与求解 …… 172
9.5.1 基于 Petri 网的系统状态动态变迁的关联矩阵求解法 …… 172
9.5.2 基于 Petri 网的系统状态动态变迁的梯形图求解法 …… 174
9.6 基于 Petri 网的故障诊断 …… 175
参考文献 …… 179
第十章 基于同时稳定的容错控制 …… 181
10.1 引言 …… 181
10.2 基于互质分解的多重系统同时稳定容错控制设计 …… 182
10.2.1 基于互质分解的同时稳定问题的数学描述 …… 182
10.2.2 基于稳定的互质分解的同时稳定控制器设计 …… 186
10.3 基于 Hurwitz 稳定性理论和非线性优化的容错控制 …… 190
10.4 应用仿真 …… 196
10.4.1 某导弹姿态控制系统数学模型描述 …… 196
10.4.2 同时稳定控制器设计 …… 198
参考文献 …… 200

第十一章　基于 H_∞ 控制的多变量系统完整性设计 …… 203
11.1　引言 …… 203
11.2　H_∞ 控制问题的表示 …… 204
11.3　对执行器失效具有 H_∞ 范数界的完整性控制器设计 …… 207
11.3.1　具有执行器失效的控制系统状态空间描述 …… 207
11.3.2　对执行器失效具有 H_∞ 范数界的完整性控制器设计 …… 209
11.3.3　应用仿真 …… 215
11.4　对传感器失效具有 H_∞ 范数界的完整性控制器设计 …… 217
11.4.1　具有传感器失效的控制系统状态空间描述 …… 217
11.4.2　对传感器失效具有 H_∞ 范数界的完整性控制器设计 …… 219
11.4.3　应用仿真 …… 225
参考文献 …… 227
附录 …… 229
附录 A　状态重构的基本结果 …… 229
附录 B　参数估计的基本结果 …… 238
附录 C　系统的稳定性 …… 240
参考文献 …… 242

Contents

Chapter 1 Background and Outlook 1
1.1 Introduction 1
1.2 Fault Diagnosis 3
1.2.1 Task of Fault Diagnosis for Control System 4
1.2.2 Characteristic Quantity of the System's Fault and Its Acquisition 4
1.2.3 Method of Fault Isolation 4
1.2.4 Method of Fault Diagnosis 5
1.3 Fault-tolerant Control 7
1.3.1 Robust Fault-tolerant Control 8
1.3.2 Reconstruction Fault-tolerant Control 9
1.4 Outlook and Problems in the Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control 10
References 13
Chapter 2 Fault Diagnosis Based on Observer 15
2.1 Introduction 15
2.2 Eigen-structure Assignment Method for Fault Detection Filter 15
2.3 Observer Based on Singular Value Decomposition (SVD) 22
2.3.1 The Mathematical Description of the Problem 22
2.3.2 The Robust Observer Based on SVD 24
2.3.3 The Fault Isolation based on the Parallel Multiple Robust Observers 29
References 35

Chapter 3 Fault Diagnosis based on the Parameter Estimation 38
3.1 Introduction 38
3.2 Fault Pattern Recognition based on the Sensitivity Analysis and Correlation Equation of the Model-parameters and Physical-coefficients 41
3.3 An Fast Iterative Algorithm for Identifying Concurrently the System's Order and Parameters 45
3.4 An Adaptive Identification Algorithm for the Time-varying System Based on the Self-tuning of the Forgetting factor 57
3.5 The Dynamic Measurement and Fault Diagnosis of the Control System based on the Parameter Estimation and Artificial Neural Network 63
3.5.1 Principle of Fault Diagnosis Based on Parameter Estimation and Artificial Neural Network 63
3.5.2 Application——Dynamical Measurement and Fault Diagnosis for Missile's Attitude Control System Based on Parameter Estimation and Artificial Neural Network 64
References 67
Chapter 4 Fault Diagnosis Based on Artificial Neural Network 69
4.1 Introduction 69
4.2 Multi-layer Feed-forward Neural Network and an Improving Learning Algorithm 70
4.2.1 The Structure and the Description of the Multi-layer Feed-forward Neural Network 70
4.2.2 An algorithm for the Self-tuning of the Structure of the Neural Network 72
4.2.3 Error-back Propagation Learning Algorithm (BP) 73
4.2.4 A Fast Error-back Propagation Learning Algorithm (FBP) ... 75

4.3 Fault Diagnosis based on BP and FBP 77
References 82
Chapter 5 Adaptive Fuzzy System and the Fault Diagnosis Based on the Adaptive Fuzzy System 83
5.1 Introduction 83
5.2 The Mathematics Description of the Fuzzy Logic 84
5.3 The Adaptive Fuzzy System and the Fault Diagnosis Based on the Adaptive Fuzzy System 88
5.3.1 The Mathematics Description of the Adaptive Fuzzy System ... 89
5.3.2 The Approximation Ability of the Adaptive Fuzzy System 91
5.3.3 Learning Algorithm for the Adaptive Fuzzy System based on the Gradient Decent Principle 92
5.3.4 Learning Algorithm for the Adaptive Fuzzy System based on the Simulation Annealing Principle 94
5.3.5 Learning Algorithm for the Adaptive Fuzzy System based on the Nearest Neighborhood Cluster Principle 97
5.3.6 Learning Algorithm for the Adaptive Fuzzy System based on the Competition Cluster 99
5.3.7 The Experiment Applying the Adaptive Fuzzy System to Model and Diagnosis the System 100
References 103
Chapter 6 Fault Diagnosis Expert System 105
6.1 Introduction 105
6.2 Building the Expert System 106
6.3 Knowledge Representation and Acquisition 108
6.3.1 Knowledge Representation 108
6.3.2 Knowledge Acquisition 110
6.4 Inference Engine 114
6.4.1 Inference Strategy 115
6.4.2 Inference Control Strategy 115
6.5 Application Example 118

6.5.1 System's Seructure ····· 118
6.5.2 On-line Mouitor to Carrier Rocket Based on STD Intelligent Measurement ····· 119
6.5.3 Expert System for Fault Diagnosis Based on Real-time Measurement ····· 120
6.5.4 System's Feature, Application and Conclusion ····· 121
References ····· 121
Chapter 7 Logic Diagnosis and Fault tree Analysis ····· 123
7.1 Logic Diagnosis ····· 123
7.1.1 Logic Algebra ····· 123
7.1.2 The Logic Relation in the Fault Diagnosis ····· 125
7.1.3 Fault Diagnosis based on the Logic Relations ····· 125
7.2 Fault Tree Analysis ····· 127
7.2.1 Building and Representation of the Fault Tree ····· 129
7.2.2 The Quality Analysis of the Fault Tree ····· 135
7.2.3 The Quantity Analysis of the Fault Tree ····· 140
References ····· 146
Chapter 8 Determination the Optimum Measurement Step and the Optimum Fault-Characteristic-set ····· 147
8.1 Introduction ····· 147
8.2 Information and its Measurement ····· 147
8.2.1 Entropy Function ····· 148
8.2.2 Information and its Measurement ····· 153
8.3 Determination the Optimum Measurement Step and the Optimum Fault-Characteristic-set by the Information Quantity ····· 153
References ····· 157
Chapter 9 Petri net and the Fault Diagnosis Based on the Petri-net ····· 158
9.1 The Petri-net ····· 158
9.2 Description the Logic Relation by Petri-Net ····· 161

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com