

王占山 刘 磊 著

复杂非线性系统的故障诊断 与智能自适应容错控制



科学出版社

复杂非线性系统的故障诊断 与智能自适应容错控制

王占山 刘 磊 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕复杂非线性系统的故障诊断和智能自适应容错控制问题做了相关研究。结合作者多年的研究工作,介绍故障诊断与智能容错控制的发展历史及演化趋势、容错控制与经典控制理论之间的关系;设计状态观测器和故障诊断观测器来实现故障检测和故障估计;研究基于模型驱动的智能自适应容错控制问题和基于数据驱动的最优容错控制问题。本书构建了一套集故障检测、故障估计、参数学习和性能学习为一体的自适应控制体系。选材上既考虑了问题本身的实用性和客观性,又注意到控制概念的可读性、认识方法的广泛性以及控制方法的新颖性和前瞻性。

本书可供高等院校自动化等相关专业本科生、研究生以及对故障诊断和容错控制感兴趣的科研工作者、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂非线性系统的故障诊断与智能自适应容错控制/王占山,刘磊著. —北京:科学出版社,2018.7

ISBN 978-7-03-058217-1

I. ①复… II. ①王… ②刘… III. ①控制系统-故障诊断 ②自适应控制-容错技术 IV. ①TP271②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 141319 号

责任编辑:张海娜 赵微微/责任校对:何艳萍

责任印制:师艳茹/封面设计:蓝正设计

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>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 7 月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:398 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

复杂非线性系统的故障诊断和容错控制是基于数学、控制论、系统论和矛盾论等方法,研究如何保证动态系统在异常情况下安全稳定运行的一个控制学科分支。如何提高日益复杂多变的控制系统运行的安全性和可靠性一直是控制界研究的重要问题。不论哪种控制方法,都是在限定的约束下(如初始条件约束、边界条件约束和期望性能约束等)进行的容许控制,由此来实现一种问题向另一种问题的映射和转化,进而实现“条条大路通罗马”的目的。从这个意义上来讲,控制方法就是一种策略、一种变换、一种映射、一种函数关系、一种算法、一种协议、一种规约等。控制方法既可以简单实现,又可以以复杂方式构造,有机嵌入被研究系统当中,如当前研究的帅博客学一样。能够被嵌入或被移植到被研究系统或对象中,并能够由此带来期望的性能或行为的方式方法,都可称为控制方法。故障诊断和容错控制理论就是研究受控系统在故障侵入或故障产生时如何主动或被动地采取一系列生成式、对抗式或忍让式等应对方式和策略的理论,来保证整个人机交互系统的安全、稳定、经济、高效和可靠运行。

故障诊断和容错控制理论作为一门独立的学科,从 20 世纪 70 年代发展至今已有近五十年的历史,但是追溯故障诊断和容错控制的思想和技术,其历史将更久远。人与自然的融合过程中,面对生存、生活、生产等问题,都要与自身和外界环境进行交互作用,逐渐形成了故障诊断经验或技术。在《道德经》第七十七章中就有“天之道,损有余而补不足”的容错思想,并在社会管理系统中得到了充分发展。在自然科学领域,容错控制的思想最早可以追溯到 1971 年的“完整性控制”的新概念,基于解析冗余的故障诊断技术被公认为起源于 Beard 在 1971 年发表的博士论文。由于涉及生活、生产各个方面的认识和利益,每年世界上都有大量关于故障诊断和容错控制的文章发表,并有一定数量的著作问世,从不同的研究层面和角度、采用不同的技术手段等来阐述作者相应的心得和认识,并普惠学界众多学者。

本书第一作者自 1998 年攻读硕士研究生以来,就一直从事故障诊断和容错控制理论的研究,从 2005 年开始研究时滞系统稳定性理论以及神经网络自适应学习和优化控制等,这些研究内容融会贯通,逐渐形成了以稳定性为基础、自动控制思想为主线、优化控制为目标、故障诊断和容错控制为保障的立体化研究格局。通过指导研究生从事故障诊断和容错控制方面的工作,累积了一些经验,进而在独立指导的第一个博士研究生刘磊的毕业论文基础上不断扩充、增补和完善,形成了本书,旨在将近二十年的研究成果记录下来,与大家分享。

总体来说,本书有如下特点:①对容错控制与控制基础理论之间的关系进行了具体讨论,如对控制概念、控制系统、故障诊断和容错等的认识,这在以往的研究中是很少提及的;②针对一类 Lipschitz 非线性系统的抗扰性能及其故障估计性能进行了基于 H_∞ 性能指标下的定量分析,进而为这类系统研究的广泛性和合理性给出基础认识;③针对数学模型和学习算法之间的关系进行了初步探讨,为故障诊断算法与原模型系统之间的深度融合提供了基础解释;④针对智能自适应容错控制给出了一些初步认识,对初始域和目标集通过评判性能来进行沟通,实现一类系统的最优容错控制;⑤通过大量的注释来说明研究问题的内在动机,而不是仅着重于公式的推导和仿真验证对比,体现学与思、术与问相结合的研究特点。

本书共 10 章。第 1~4 章介绍故障诊断,主要来自王占山的前期研究工作和近期学与思所得的总结;第 5~9 章介绍容错控制,第 10 章是问题与展望,主要是基于刘磊的博士学位论文内容而形成的。具体的章节安排如下。

第 1 章是绪论,给出与本书研究题目相关的一些讨论,注重于对某些问题认识见解的阐释。例如,对智能控制和自适应控制及其相互关系、容错控制与传统自动控制理论的关系进行分析,这在以往故障诊断和容错控制的书籍中是没有介绍过的,甚至在经典的控制理论的书籍中也是没有介绍过的。具体来说,探讨容错控制与复杂系统建模的关系、容错控制与自动控制器设计的关系、容错控制与稳定性研究的关系和控制系统的本质等问题。期望通过对这些问题的探讨,加深对本专业领域知识的认识,进而为“源头活水”提供动力。

第 2 章主要研究一类 Lipschitz 非线性系统的抗扰能力以及故障情况下的诊断观测器设计等综合问题。例如,通过引入 H_∞ 跟踪性能指标,分析一类自适应观测器的估计性能,并将这种观测器用在故障估计问题中;基于 PID 控制思想设计 PI 观测器,并利用该估计故障构成故障补偿控制律,使系统在故障情况下仍能较好地跟踪给定参考模型。

第 3 章研究一类具有未知输入干扰的奇异双线性系统的观测器设计问题,讨论分解后系统解的存在性和状态估计误差的吸引域问题。针对同时存在干扰和故障情况的奇异双线性系统构造奇异双线性故障检测观测器,并对此故障检测观测器的存在性、故障检测的鲁棒性、故障阈值的选取和故障检测观测器设计步骤进行讨论。

第 4 章首先利用递归神经网络的动力学特性,研究一类非线性系统的故障参数估计问题,将研究问题的性质转化为一类优化问题,进而用神经优化方法实现故障参数估计与优化问题的直接映射;阐明固定权值递归神经网络的模型设计本身就是一类优化学习算法,数学模型在某种意义上就是一种结构、一种范式和约定以及一类算法或规律;以复杂互联神经网络模型为研究对象,对具有时滞的复杂互联神经网络的容错同步问题进行研究,并针对自同步和给定同步态等情况,设计自适

应观测器和容错控制器, 实现在传感器故障下的容错同步。

第 5 章研究一类具有三角结构的不确定多输入单输出离散系统的自适应执行器容错控制, 同时考虑执行器的失效和卡死两种故障, 运用径向基神经网络和反步法, 实现非线性离散系统的容错控制, 解决现有反步法难以解决多变量离散系统的容错控制的难题。

第 6 章研究一类带有执行器故障的多输入多输出系统的分散式神经网络输出反馈容错控制问题。根据微分同胚映射理论, 将初始系统转换成一个输入输出表达的系统, 转换后的系统适合运用输出反馈控制方法且能避免非因果问题。接着通过调节神经网络权重的未知界来减少响应时间, 实现该类系统的容错控制。

第 7 章研究一类多输入多输出非线性离散系统的容错控制问题, 同时考虑缓变故障和突变故障两种故障类型。基于神经网络的逼近能力, 将增强学习算法引入容错控制策略中, 分别用执行网络和评判网络来逼近最优控制信号和花费函数, 得到一个新的容错控制器, 此控制器可使发生故障系统的性能指标最小, 减少故障引起的破坏。

第 8 章研究一类多输入多输出非线性离散系统的容错控制问题, 运用增强学习的自适应跟踪控制方法来解决容错问题, 该方法具有较少的学习参数, 从而减小计算量。

第 9 章研究一类无模型多输入单输出离散系统的自适应传感器故障检测和容错控制问题。主要工作是利用回声状态网实现对故障检测、故障函数进行估计以及设计容错控制器。在故障被检测出来后, 基于回声状态网和最优性准则, 提出容错控制策略, 并证明包含跟踪误差在内的所有信号都有界。

第 10 章对未来可行的研究内容进行论述, 以期对故障诊断和容错控制理论有更多的探讨。

本书中的部分研究成果得到了国家自然科学基金 (61473070、61433004、61627809)、流程工业综合自动化国家重点实验室基础研究基金 (2013ZCX01、2018ZCX22) 以及中央高校基本科研业务费 (N140406001) 的资助, 在此一并表示感谢。

随着网络化、人工智能化和帅博客学等的发展, 现实世界中的复杂非线性系统不断出现新的问题和不同的表现形式, 针对这类系统的安全可靠运行研究, 具有重要的理论意义和实际意义。伴随这种变化, 故障诊断和容错控制理论及其相关的研究内容在不断变化, 研究方法和研究理念也在不断推陈出新。知识来源于生活, 回归于生活, 这其中的来去就是学习和认识。应对这些纷繁的变化, 作者认为应该不执着于相, “应无所住, 而生其心”, 才会以不变应万变, 直达本性。智慧是心的开放程度, 是能动性的高度体现。作为人机和谐系统中的人, 应该善于协调这些自控与他控、自力与他力、人与自然等关系, 这样才能保证系统的容错控制, 真正实

现自动化控制,才能在故障情况下保证安全稳定运行,进而深刻认识研究课题的意义,激发研究问题的兴趣。基于这样的感悟,撰写成本书,并愿与读者共勉之。

限于作者的能力和水平,本书在对某些概念的认识和理解上可能存在一些局限,在内容的组合上可能存在一些不足,另外,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

王占山 刘 磊

东北大学 辽宁工业大学

2018 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 故障诊断概述	3
1.3 自适应控制概述	7
1.4 智能控制与自适应控制	11
1.5 容错控制与控制基础理论的关系	14
1.6 模型驱动与数据驱动的认识	25
1.7 预备知识	31
1.7.1 神经网络近似原理	31
1.7.2 增强学习算法	32
1.8 主要研究内容	33
第 2 章 Lipschitz 非线性系统的故障观测器设计	37
2.1 引言	37
2.2 观测器基础知识	37
2.3 Lipschitz 非线性系统的抗扰能力分析	42
2.3.1 问题描述与基础知识	42
2.3.2 抗扰能力分析结果	44
2.4 一类自适应观测器的故障估计性能	47
2.4.1 问题描述与基础知识	47
2.4.2 自适应观测器的性能	48
2.4.3 仿真算例	50
2.5 故障估计的自适应观测器设计	51
2.5.1 问题描述与基础知识	51
2.5.2 故障估计自适应观测器主要结果	53
2.5.3 仿真算例	55
2.6 具有干扰抑制和故障估计的 PI 观测器设计	57
2.6.1 问题描述与基础知识	57
2.6.2 不存在外界干扰时的补偿控制	58
2.6.3 存在外界干扰时的补偿控制及干扰抑制	60

2.6.4	仿真算例	62
2.7	鲁棒故障诊断观测器设计	63
2.7.1	问题描述与基础知识	63
2.7.2	自适应鲁棒观测器设计和性能分析	65
2.7.3	仿真算例	73
2.8	小结	75
第 3 章	奇异双线性系统的故障诊断	77
3.1	引言	77
3.2	奇异双线性系统的观测器设计	78
3.2.1	问题描述	79
3.2.2	变换系统的解	81
3.2.3	观测器设计	81
3.2.4	仿真算例	84
3.3	双线性系统的故障诊断观测器设计	87
3.3.1	系统描述	88
3.3.2	奇异双线性系统的变换	89
3.3.3	系统的解	90
3.3.4	BFDO 设计	91
3.3.5	故障检测	96
3.3.6	仿真算例	102
3.4	小结	106
第 4 章	复杂互联非线性系统的故障诊断和容错同步	107
4.1	引言	107
4.2	基于 Hopfield 神经网络的非线性系统故障估计方法	108
4.2.1	Hopfield 神经网络故障估计器	110
4.2.2	仿真算例	113
4.3	离散时间复杂互联网络的故障诊断观测器设计	115
4.3.1	问题描述与基础知识	117
4.3.2	状态观测器设计	119
4.3.3	基于自适应观测器的故障诊断	125
4.3.4	仿真算例	128
4.4	一类时滞复杂互联神经网络的容错同步	135
4.4.1	问题描述与基础知识	138
4.4.2	传感器故障下的复杂互联神经网络的容错同步	140
4.4.3	传感器故障下基于驱动-响应网络框架的自适应容错同步	145

4.4.4 具有期望同步态的自适应容错同步	150
4.4.5 仿真算例	154
4.5 小结	165
第 5 章 基于反步法的状态反馈容错控制	166
5.1 引言	166
5.2 问题描述和预备知识	167
5.3 控制器设计	168
5.4 仿真算例	176
5.5 小结	184
第 6 章 基于神经网络的输出反馈容错控制	186
6.1 引言	186
6.2 问题描述和预备知识	187
6.3 坐标系变换	189
6.4 基于最少调节参数的容错控制	192
6.5 仿真算例	199
6.6 小结	209
第 7 章 基于增强学习算法的容错控制	210
7.1 引言	210
7.2 问题描述和预备知识	211
7.2.1 系统描述	211
7.2.2 预备知识和控制目标	212
7.3 基于增强学习的容错控制设计	213
7.3.1 执行网及其权重自适应律	213
7.3.2 评判网及其自适应律	216
7.3.3 性能结果及稳定性分析	218
7.4 仿真算例	222
7.5 小结	229
第 8 章 基于最少调节参数的最优容错控制	230
8.1 引言	230
8.2 问题描述和预备知识	231
8.2.1 问题描述	231
8.2.2 预备知识以及主要控制目标	232
8.3 基于增强学习的自适应跟踪容错控制设计	233
8.3.1 执行网设计	233
8.3.2 评判网设计	235

8.3.3 执行网和评判网的更新律	237
8.4 基于增强学习的容错控制的性能分析	239
8.5 仿真算例	246
8.6 小结	256
第 9 章 基于数据的无模型系统的容错控制	257
9.1 引言	257
9.2 问题描述和预备知识	258
9.3 故障检测机制	260
9.4 基于回声状态网的容错控制	261
9.4.1 基于回声状态网的故障估计	262
9.4.2 容错控制器设计	264
9.5 仿真算例	270
9.6 小结	275
第 10 章 问题与展望	277
参考文献	280
索引	304

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着工业系统的复杂程度不断加深以及控制规模的不断扩大,多变量特性在许多实际的系统(如航空航天、核工业、机器人等高技术和民用工业领域技术)中越来越常见。这就使得传统的控制难以满足当今的许多工业生产的需求,也对现代的工业控制提出新的难题和挑战。很多针对单变量系统的控制是一种较低级的控制,只适合于结构简单的系统,如小型企业、家庭作坊等。当系统的自动化水平日益提高、投资越来越大时,如果出现故障而不能及时检测、定位、隔离和排除,就可能使整个系统失效、瘫痪以及造成人员、财产的巨大损失,甚至导致灾难性后果^[1-4]。例如,2012年8月,俄罗斯的携带两颗通信卫星上天的“质子-M”运载火箭在入轨过程中发生故障,从而导致卫星发送任务失败;2013年10月3日,尼日利亚一架载有20人的私人飞机从拉各斯起飞后不久出现发动机故障,在机场附近的一个油库旁坠毁,事故造成14人死亡;2014年7月23日,中国台湾复兴航空一架GE222班机从高雄小港机场飞往澎湖马公机场,由于天气原因在迫降着陆时发生重大事故坠毁,机上48名乘客全部遇难;2015年3月4日,土耳其航空从伊斯坦布尔飞往加德满都的航班(载有238人的空中客车A330-300客机)在加德满都特里布万国际机场着陆后滑出跑道,虽无人受伤,但客机受损严重。除了在航空航天领域,石油化工生产过程、煤矿开采、核电设施等工业过程控制领域,多种故障的发生均会导致人力、财产和物力上的巨大损失^[5]。因此,如何及时地发现和预测故障并保证系统在工作期间始终安全、有效、可靠地运行,是摆在人们面前的一项艰巨的任务。故障检测与诊断(fault detection and diagnosis, FDD)技术和容错控制(fault tolerant control, FTC)技术的出现和发展,为提高系统的可靠性与安全性开辟了一条新的途径。

自20世纪70年代,故障检测与诊断已经得到了迅速的发展。1971年,美国麻省理工学院Beard博士首先提出了用解析冗余代替硬件冗余^[6],并通过系统自组织使系统闭环稳定,通过比较观测器的输出得到系统故障信息的思想,标志着故障诊断技术的开端。容错控制是伴随着基于解析冗余的故障诊断技术的发展而发展起来的。如果在执行器、传感器或元器件发生故障时,闭环系统仍是稳定的,并具有较理想的特性,就称此闭环系统为容错控制系统。容错控制的思想最早可以追溯到Niederlinski^[7]在1971年提出完整性控制的概念。80年代以来,每年的国际自动控

制联合会 (International Federation of Automatic Control, IFAC)、IEEE 控制与决策会议 (IEEE Conference on Decision and Control) 以及美国控制会议 (American Control Conference) 都把故障诊断和容错控制列为重要的讨论专题。1993 年, IFAC 成立了技术过程的故障诊断与安全性技术委员会, 中国自动化学会也于 1997 年成立了技术过程的故障诊断与安全性专业委员会。在近几届的 IFAC 世界大会上, 关于故障诊断与容错控制方面的论文在不断增加, 并且有逐年升温的趋势, 成为这几年最热门的几个研究方向之一。时至今日, 不论是基于模型、信号、知识、智能还是基于数据的方法, 故障诊断和容错控制已取得了很大的进展, 国内外出版和发表了很多专著、学位论文和科技论文 [8-30]。但实际中对于被监测诊断的多变量系统不可能做到完全准确的建模, 对多变量系统中一些复杂的动态行为、噪声、干扰等因素难以进行精确的描述, 所应用的多变量模型不可避免地具有一定的不确定性或者未知动态, 这将对复杂非线性系统的故障诊断与智能容错控制的结果产生重大影响。这样, 针对不同工业过程以及不同的过程描述, 关于故障诊断和容错控制的研究方兴未艾。

故障是指系统至少一个特性或参数出现较大偏差, 超出了可接受的范围。此时系统的性能明显低于其正常水平, 所以已难以完成其预期的功能。“故障”既可能是导致控制系统的性能下降到了不可接受的情形, 也可能是系统元器件突然失效而导致系统根本不能继续正常运转。即使“故障”可能不会表现为系统的物理损坏或崩溃, 但它会妨碍或扰乱自动控制系统的正常操作与运转, 从而导致系统功能方面产生人们不期望的损坏, 甚至导致异常危险的情况发生。应当尽快诊断出系统故障 (即使它在早期萌生阶段是可容许的), 以防止其进一步恶化而导致各种更严重的后果。

通常说的故障诊断是指基于系统模型或解析冗余, 运用计算机进行系统的故障诊断, 包括对系统是否发生故障、故障类型、故障原因、故障程度、故障后果等进行分析和判断, 并得出结论。

控制系统中用来检测和诊断系统故障的发生位置以及轻重程度的整套系统称为故障诊断系统。该系统通常包含如下几种功能。

(1) 故障检测: 能够判断是某些部件发生了故障还是系统正常运转, 这就要求故障诊断系统能及时地发现故障, 给出故障信息。

(2) 故障隔离: 能够判断系统故障发生的位置, 即判断是哪个传感器或哪个执行器发生了故障。

(3) 故障识别: 能够判断出故障的类型、性质或者轻重程度。

从主观需求方面来说, 这三大功能的相对重要性都是不言而喻的。故障检测对于任何实际系统而言, 都是必不可少的。故障隔离也同样重要, 而故障识别虽然对系统也是非常重要的, 但是如果系统不需要重构估计故障, 此项功能可有可

无。因而,“故障诊断”在相关文献中通常是指故障检测和隔离(fault detection and isolation, FDI)。

1.2 故障诊断概述

故障(fault)是指系统的特性表现出任何不希望出现的异常现象,或因系统中的部分元器件功能失效而引起整个系统的性能出现异常。控制系统由于长时间高负荷工作不可避免地会出现故障。这里所说的故障诊断是指,计算机利用系统的解析能力完成工况分析,对生产是否正常、故障原因、故障的程度等问题进行分析、判断,得出结论。故障诊断技术是一门应用型的综合性技术,它的理论研究基础涉及多门学科,如现代控制理论、可靠性理论、计算机工程、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别、人工智能等学科理论。

当系统发生故障时,系统中的各种量(可测的或不可测的)或其中部分量会表现出与正常状态不同的特性,这种特性差异就包含丰富的故障信息,如何找出这种故障的特征描述,并利用它来进行故障的检测与隔离就是故障诊断的任务。

故障可根据不同的标准进行分类,例如,根据故障发生的部位可分为传感器故障和执行器故障等;根据故障的性质可分为间歇性故障、突发性故障和缓变性故障等;根据故障持续的时间可分为永久性故障和间断性故障等;根据故障间的相互关系可分为单故障、多故障和局部故障等;根据故障发生的形式可分为加性故障和乘性故障等^[25]。系统一旦发生故障,系统的各种测量参数会表现出与正常状态不同的特性差异。由于实际工业过程规模庞大、结构复杂,且工业对象一般具有时变、非线性、多尺度多模态等复杂特性,这给如何及时检测故障的出现(即故障检测)以及如何准确定位故障原因并估计故障的严重程度(即故障分离和估计)提出了严峻的挑战。

为应对上述挑战,研究人员陆续提出了许多过程监控与故障诊断的方法。故障检测是指判断系统是否发生故障,故障隔离是指判定故障的发生部位及种类,故障估计(也称故障辨识)是指确定故障参数的大小及故障发生时间。当故障发生时,故障检测和故障隔离的目的是在一组可能发生的故障集合中确定具体哪个故障真正地发生了,故障估计的目的则是估计出故障的大小、类型。

在整个故障检测过程中,需要综合考虑几个重要的性能指标:灵敏性、鲁棒性、及时性以及故障的误报率和漏报率^[30],如图 1.1 所示。

(1) 灵敏性:故障检测系统对故障信号的检测能力。对于特定的系统,灵敏性越高,则检测能力越强。

(2) 鲁棒性:故障检测系统在系统存在外部扰动、噪声及建模误差等情况下仍能保持一定的故障检测能力。对于特定的系统,鲁棒性越强,表明它受噪声、干

扰、建模误差的影响越小,可靠性也就越高。

(3) 及时性:可反映检测系统对故障形状、大小、发生时刻及时变特性估计的准确程度。故障检测越及时,表明检测系统对故障的估计越准确,也就越有利于故障的评价与决策。

(4) 误报率和漏报率:误报是指系统没有发生故障却被错误判定出现故障的情形;漏报是指系统中发生了故障而故障检测系统却没有报警。在实际系统中,一个可靠的故障检测与隔离系统应当保持尽可能低的误报率及漏报率。

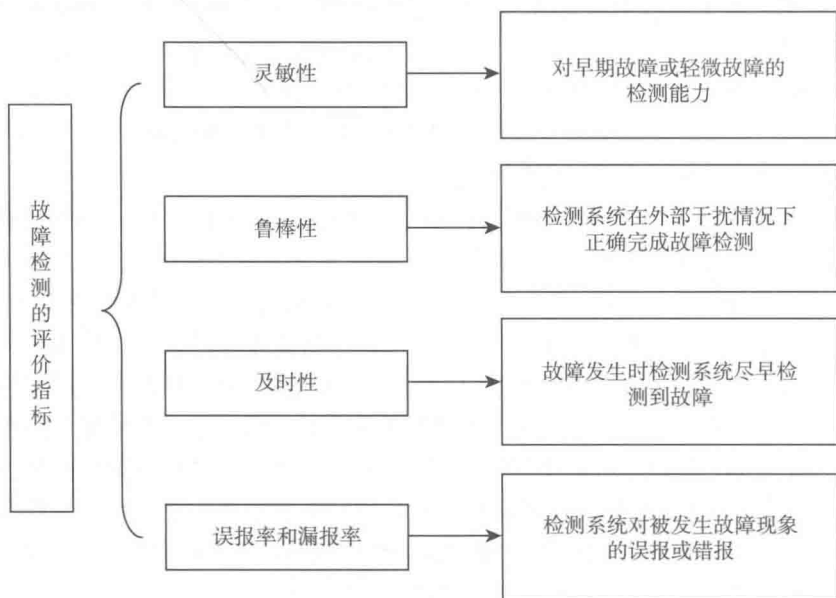


图 1.1 故障检测的评价指标

故障诊断的任务具体包括故障检测、隔离和辨识。故障检测是指根据系统的参数或状态来确定系统是否发生了故障;故障隔离是指故障检测结束后,对故障的种类和发生部位进行确定;故障辨识是指对故障的发生时间、大小和性质进行确定,并进行故障评价等工作。因此,故障诊断是一个综合评判的过程,其最终目的是为了消除故障,从而使系统恢复正常运行。整个故障诊断过程需要考虑的几个重要的性能指标如图 1.2 所示。

根据建模方式和所利用信息类型的不同,故障检测方法可分为基于解析模型的方法、基于定性模型的方法和基于数据驱动的方法^[26, 27]。基于解析模型的方法需要获得对象和故障准确的数学模型,利用可观测输入输出量、构造残差信号来反映系统的期望行为与实际运行模式之间的不一致,然后对基于残差信号进行分析诊断。

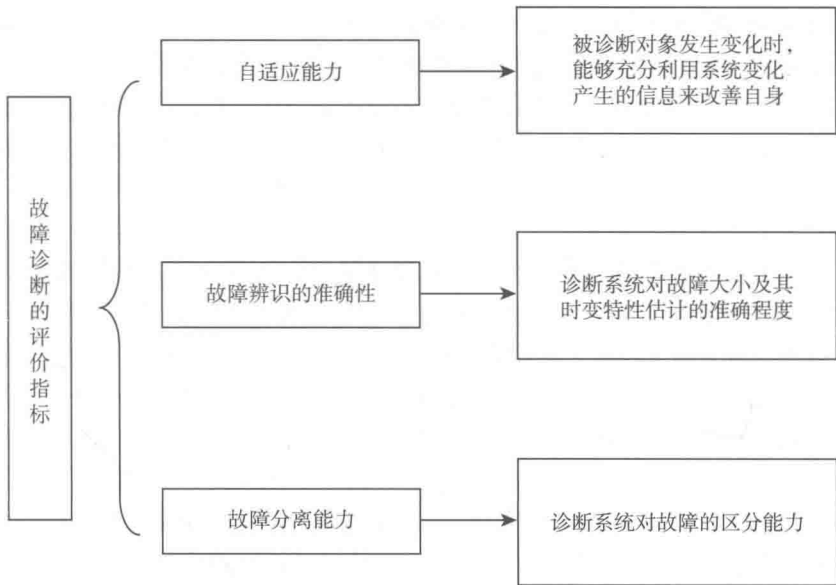


图 1.2 故障诊断的评价指标

Reiter^[31] 提出一个基于模型的诊断方法, 该方法采用逻辑谓词描述系统结构, 找出冲突集后生成碰撞集及最小诊断, 得出故障所在。然而该方法的缺点是: 一阶逻辑谓词难以描述现实系统, 碰撞集 HS-树的生成算法是 NPC 问题。为了克服 Reiter 方法中的问题和解决定量方法无法描述的现实中的复杂问题, 人们把定性模型、定性推理方法引入基于模型的诊断。Dvorak 等^[32] 给出了一种基于定性模型的诊断方法 Mimic, 其诊断过程是: 首先建立系统的结构模型和行为模型; 然后比较观察值的行为模型的预测值, 用向上回溯的方法在结构模型中找出候选故障部件; 最后进一步用观察值和行为模型的预测值比较, 确定故障。其缺点是当系统较为复杂时, 候选故障很多, 诊断效率降低; 而且很难做到穷尽所有可能的故障模型。

基于模型的诊断方法可以分为参数估计方法、状态估计方法、等价空间方法和鲁棒故障诊断方法。但大多数工业过程规模复杂、变量维数高且具有高度非线性, 其精确的数学模型难以获得。因此, 基于解析模型的方法在航空航天、机械以及电力电子等易于建模的领域有重要影响和广泛应用, 但在流程工业中则鲜有应用^[28]; 基于定性模型的方法一般也只适用于规模小、机理清楚的工业过程, 且其诊断结果比较粗糙模糊、容易产生虚假解^[29]。基于数据的方法主要依赖于历史过程数据, 如主元分析方法、部分最小二乘方法等, 这些方法都是基于历史数据提取统计特征, 以达到故障诊断的目的。基于数据的诊断技术的缺点是故障的分离和估计比较困难, 尤其不便于故障的在线诊断。

当故障被检测出来以后,另一个问题自然就会浮出水面:如何设计恰当的控制来抵消或者补偿故障。在此需求下,故障容错控制技术备受关注。容错控制是伴随着基于解析冗余的故障诊断技术的发展而发展起来的。如果在执行器、传感器或元器件发生故障时,闭环系统仍是稳定的,并具有较理想的特性,就称此闭环系统为容错控制系统。

容错控制方案根据不同的特征,可以分为硬件冗余方法和解析冗余方法。硬件冗余对重要部件及易发生故障部件采用多重备份的办法来提高系统的容错性能,是一种有效的容错控制方法,但是硬件冗余容错控制需要耗费更多的成本和占用更大的硬件空间。为了克服上述限制,基于解析冗余的容错控制应运而生,其设计思想是利用系统中不同部件在功能上的冗余性来实现系统的容错性能。对于实际的控制系统,设计有效的解析冗余容错控制器在理论上更有意义,应用范围更为广泛。

另外,容错控制方案按系统类型可分为线性系统和非线性系统的容错控制、确定系统和不确定系统等容错控制方法;按故障位置的不同可分为执行器故障、传感器故障、系统内部故障等容错控制方法。其中,最常用的是按设计方法的特点来分类,即主动容错控制(active FTC)和被动容错控制(passive FTC),这两类方法如今已成为现代容错控制研究方法的两大分支。被动容错控制具有使系统的反馈对故障不敏感的作用;主动容错控制通过故障调节或信号重构来维持故障发生后系统的稳定性能,这两种方法在实际系统中都有广泛的应用,介绍如下。

被动容错控制的设计思想是根据预知故障构造一个固定控制器来保证闭环系统对故障不敏感,同时维持系统的稳定性能,是一种相对简单的基于鲁棒控制技术的控制器设计方法。而在 20 世纪 70 年发展起来的鲁棒控制技术,主要用来处理系统中不确定参数的摄动和外部扰动问题,以保证闭环系统的稳定性并具有期望的性能。进一步,如果把系统故障归结为系统参数摄动问题,那么根据鲁棒控制方法就可以设计容错控制策略。一般来说,基于这种技术下所设计的被动容错控制器的增益参数为常数,对于特定的故障不需要在线调整控制器结构和参数。但这种方法的容错能力是有限的,其有效性要依赖于原始无故障时系统的鲁棒性,并且需要获得预知故障的先验信息。被动容错控制大致可以分为可靠镇定、同时镇定、完整性、可靠控制/鲁棒控制等几种类型。

主动容错控制就是基于解析冗余的策略,利用现有的硬件设施实现对未知故障的有效容错。其设计思路是在故障发生后,通过故障参数调节或信号重构,甚至改变控制器的结构重新调整控制器的参数来在线补偿故障。因此,与容错能力有限的被动容错控制相比较,主动容错控制具有设计灵活、容错能力更强的特点。目前,一部分主动容错控制需要故障诊断与隔离子系统提供准确的故障信息,而另一部分则不需要故障诊断与隔离子系统,但是需要获知相应故障信号的参数估计信