



东北大学八十周年校庆学术著作

容错控制

王福利 张颖伟 著

Fault Tolerant Control

Wang Fuli · Zhang Yingwei



NEUPRESS
东北大学出版社

东北大学八十周年校庆学术专著

容 错 控 制

王福利 张颖伟 著

东 北 大 学 出 版 社
· 沈 阳 ·

© 王福利 张颖伟 2003

图书在版编目 (CIP) 数据

容错控制/王福利, 张颖伟著. —沈阳: 东北大学出版社, 2003. 8
ISBN 7-81054-922-7

I. 容… II. ①王…②张… III. 容错系统 IV. TP302. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 070454 号

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024-83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024-83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress. com

http: // www. neupress. com

印刷者: 铁岭市新华印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 10

字 数: 190 千字

出版时间: 2003 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2003 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 冯淑琴

责任校对: 刘 然

封面设计: 唐敏智

责任出版: 秦 力

定价: 15.00 元

前 言

随着工业过程越来越趋向于大型化和复杂化,以及大规模高水平的综合自动化系统的出现,对控制质量的要求日趋突出。这类过程一旦发生事故就可能造成人员和财产的巨大损失,因此,对生产过程运行状态、产品质量的监测及诊断已成为衡量生产水平和控制水平高低的重要方面,同时也是进一步提高产品质量和生产效率的关键技术。切实保障现代复杂过程的可靠性与安全性,具有十分重要的意义,得到国内外广泛的高度重视。故障诊断与容错控制技术为提高复杂过程的可靠性开辟了一条新的途径。

容错控制是本书所要讨论的内容,它可分为被动容错控制和主动容错控制。被动容错控制是设计适当固定结构的控制器,该控制器除了考虑正常工作状态的参数值以外,还要考虑在故障情况下的参数值,不仅当所有控制部件正常运行时,且当执行器、传感器和其它部件失效时,保障系统具有稳定性和令人满意的性能。主动容错控制是在故障发生后调节控制策略,使系统能够保证稳定和有良好的性能,故障幅度为重构控制提供了有效的信息,这是设计主动容错控制律特别需要的。

在第2章被动容错控制中,首先基于 Hamilton - Jacobi 不等式研究了一类非线性不确定系统控制器设计问题。利用信息的解析冗余,设计了当且仅当一个执行器或传感器失效时的容错控制器,讨论了一类非线性系统解析冗余的情况下故障容错控制器的设计;基于观测器研究了不确定时滞系统的容错控制问题,当一些传感器和执行器在指定的子集内失效的情况下,设计鲁棒容错控制器,使得闭环系统不仅在正常运行时保证其稳定

性,而且执行器或传感器在允许失效的集合里仍能保证系统的稳定性和 H_{∞} 性能,为解决一类非线性不确定时滞系统的可靠控制问题提供了一条新的途径。另外,基于 LMI 讨论了执行器和控制平面失效时的容错控制器的设计。

在第 3 章至第 6 章的主动容错控制中,第 3 章根据估计出的故障幅度,基于 Riccati 方程提出输出反馈控制器的设计方法;第 4 章基于 RBF 神经网络提出一种基于神经网络逼近的故障补偿主动容错方法,在故障发生后进行权值更新,扩展 RBF 网络的调整律,使系统的动态变化可以很快被捕捉到,采用反馈误差学习方法,推导了所有参数稳定的更新 RBF 网络控制器的调整规则,确保了整个系统的故障稳定性,该方法易于工程实现;第 5 章在模型跟随(LMF)重构方法上,提出了一种基于模糊滑模自适应的模型跟随重构控制策略。它既保持了算法简单,实时性好的优点,同时又有效地调节系统参数以克服故障因素的不利影响,这种方法能够调节更多的未预料故障,可适用于一类动态系统的重构控制,该方法可保证闭环系统具有良好的重构性和鲁棒性;第 6 章基于 Backstepping(步进反推)讨论了带有未知非线性特性的不确定复杂非线性动态系统的稳定自适应容错控制器的设计方法,运用李雅普诺夫分析方法,发展了基于故障的非线性参数在线逼近模式的状态反馈自适应方案。

本书得到了东北大学八十周年校庆学术著作出版基金的资助。

由于编者水平所限,本书的缺点及错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

著 者

2003 年 5 月 1 日

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 容错控制分类	2
1.2.1 被动容错控制方法	3
1.2.2 主动容错控制方法	7
1.3 容错控制存在的问题和发展展望	10
1.3.1 容错控制存在的问题	10
1.3.2 容错控制的发展展望	12
1.4 本书内容概述	13
参考文献	14
第 2 章 被动容错控制	20
2.1 被动容错控制现状	20
2.2 基于冗余的被动容错控制	21
2.2.1 系统描述	23
2.2.2 被动容错控制器设计	30
2.2.3 仿真算例	33
2.3 基于观测器的被动容错控制	34
2.3.1 系统描述	34
2.3.2 被动容错控制器设计	35
2.3.3 算例	37
2.4 基于 Riccati 方程的被动容错控制	37
2.4.1 系统描述	38
2.4.2 被动容错控制器的设计	39
2.4.3 算例	42
2.5 基于 LMI 的被动容错控制	43

2.5.1	系统描述	43
2.5.2	被动容错控制器设计	44
2.5.3	仿真算例	46
2.6	结束语	48
	参考文献	48
第3章	基于输出反馈控制的主动容错控制	55
3.1	输出反馈容错控制现状	55
3.2	不匹配故障的输出反馈容错控制	55
3.2.1	系统描述	55
3.2.2	主动容错控制器设计	57
3.2.3	仿真算例	59
3.3	匹配故障的输出反馈容错控制	62
3.3.1	系统的描述与预备知识	62
3.3.2	非线性系统的鲁棒观测器设计	64
3.3.3	主动容错控制器的设计	65
3.3.4	仿真算例	67
3.4	结束语	68
	参考文献	69
第4章	基于神经网络的主动容错控制	71
4.1	神经网络简介	71
4.1.1	人工神经网络具有的基本属性	71
4.1.2	人工神经网络连接的基本形式	72
4.1.3	BP网络的缺陷	73
4.1.4	BP网络的改进方案	74
4.1.5	基于数值优化方法的网络训练方法	76
4.2	基于神经网络的主动容错控制现状	79
4.3	基于神经网络逼近的线性系统的主动容错控制	80
4.3.1	主动容错控制器设计	81

4.3.2 仿真算例.....	85
4.4 基于神经网络逼近的不确定非线性系统主动容错控制.....	87
4.4.1 主动容错控制器设计.....	87
4.4.2 仿真算例.....	91
4.5 结束语.....	94
参考文献.....	95
第5章 基于模糊自适应的主动容错控制.....	97
5.1 模糊滑模控制概述.....	97
5.1.1 模糊理论概述.....	97
5.1.2 滑模理论概述.....	104
5.2 基于模糊滑模自适应的模型跟随主动容错控制.....	108
5.2.1 T-S FNN 系统.....	110
5.2.2 执行器故障调节.....	111
5.2.3 传感器故障调节.....	115
5.2.4 仿真算例.....	117
5.3 基于 H _∞ 观测器原理的模糊自适应主动容错控制.....	119
5.3.1 系统描述.....	119
5.3.2 执行器故障调节.....	120
5.3.3 仿真算例.....	122
5.4 结束语.....	123
参考文献.....	124
第6章 基于 Backstepping 容错控制.....	126
6.1 基于 Backstepping 的主动容错控制现状.....	126
6.2 基于 Backstepping 的执行器故障主动容错控制.....	128
6.3 算例.....	147
6.4 结束语.....	147
参考文献.....	148

第1章 绪论

1.1 引言

随着工业过程越来越趋向于大型化和复杂化,以及大规模高水平的综合自动化系统的出现,对控制质量的要求日趋突出。这类过程一旦发生事故就可能造成人员和财产的巨大损失,因此,对生产过程运行状态、产品质量的在线监测及诊断已成为衡量生产水平和控制水平高低的重要方面,同时也是进一步提高产品质量和生产效率的关键技术。切实保障现代复杂过程的可靠性与安全性,具有十分重要的意义,得到国内外广泛的高度重视。故障诊断与容错控制技术为提高复杂过程的可靠性开辟了一条新的途径。国际自动控制界对故障诊断与容错制的发展给予了高度的重视^[1-5],从1991年起,IFAC每三年召开一次故障诊断与容错方面的国际专题会议。

“容错”原是计算机系统设计技术中的一个概念,容错(fault-tolerance)是容忍故障的简称。容错控制的思想最早可追溯到1971年,以完整性控制概念为标志^[4];1980年发表的关于可靠镇定的文章是最早开始专门研究容错控制的文章之一^[5]。容错控制(Fault tolerant control, FTC)的概念是1986年9月由美国国家科学基金会与美国电气和电子工程师学会(IEEE)控制系统学会共同在美国加州 Santa Clara 大学举行的控制界专题讨论会的报告中正式提出的。1993年,现任 IFAC 技术过程的故障诊断与安全性专业委员会主席 Patton 教授撰写了容错控制的综述文章^[2]。

容错控制系统不是一般的控制系统^[6-8],它不仅具有鲁棒性,而且可以适应其环境的显著变化。

容错控制的指导思想是一个控制系统一旦发生故障,而且这种故障会对系统的稳定性及性能有很大的影响,例如,在传感器和执行器发生故障的情况下,要求闭环系统仍然是稳定的,并且满足要求的性能指标,就称此闭环系统

MAG97/12

为容错控制系统^[2]。

容错控制是一门应用型边缘交叉学科^[18-12]。促使这门学科迅速发展的一个重要的动力来源于航空航天领域。20世纪70年代由于研制高性能航天器的需要,提出了容错控制器的设计问题,由此发展起来一系列容错控制技术^[13-15]。作为一门交叉学科,容错控制的理论基础涉及现代控制理论、信号处理、模式识别、人工智能、最优化方法、决策论、统计数学、计算机工程等以及相应的应用学科,容错控制与鲁棒控制,故障检测与诊断、自适应控制、智能控制等有着密切的联系。

1.2 容错控制分类

容错控制可以从不同的角度分类^[16-20]。例如,按系统分为线性系统容错和非线性系统容错控制,确定性系统容错控制和随机系统容错控制等;按克服故障部件分为执行器故障容错控制,传感器故障容错控制,控制器故障容错控制和部件故障容错控制,等等;按设计方法特点分为被动和主动容错控制^[21],被动容错控制(passive FTC)具有使系统的反馈对故障不敏感的作用,主动容错控制(active FTC),通过故障调节或信号重构保证故障发生后系统的稳定性和性能指标。

被动容错控制是设计适当固定结构的控制器,该控制器除了考虑正常工作状态的参数值以外,还要考虑在故障情况下的参数值。不仅在所有控制部件正常运行时,而且在执行器、传感器和其他部件失效时,保障系统仍然具有稳定性和令人满意的性能。被动容错控制是在故障发生前和发生后使用同样的控制策略,不进行调节。

主动容错控制是在故障发生后需要重新调整控制器参数,也可能改变控制器结构。大多数主动容错控制需要故障诊断(FDD)子系统,也有不需要FDD的,但是需要知道故障的先验知识。主动方法分为两种主要类型:信号重构、故障补偿、增益调度的方法和在线自动控制器设计方法。在增益调度的方法中,预计算的控制律按照故障情况进行选择,即依赖于FDD所隔离的故障类型。在线自动控制器设计方法包括新控制器构造和控制器参数的计算,称为可重构制或可重建控制^[22, 23],即为了获得重构或重建控制,主动容错系统需要预料型故障的先验知识和未预料型故障的检测和隔离机制,相关的故障位置和性质等信息用于重新调整控制器功能。可重构性(reconfigurability)是指对于系统中

故障,固定结构的系统可以进行参数修改。而重建性(restructurability)包括重构性,意指为了调节故障的变化不仅改变系统参数而且改变系统结构本身。

被动容错使用固定的鲁棒性能的控制器的适应故障,确保系统的故障稳定性,往往牺牲系统的性能指标,且带有很大的保守性。而主动容错控制有时要解决故障诊断和容错控制两个问题,故障诊断系统能够对控制系统中的执行器、传感器和被控对象进行实时故障检测,并根据故障特征进行故障的动态补偿或切换故障源;容错控制器则根据故障检测环节所得到的故障特征作出相应的处理,可能要对反馈控制的结构进行实时的重构,这种结构的重构可能简单到只从已计算的表中读出一组新的控制增益,即简单的增益调度,也可能复杂到实时地再设计(redesign),保证系统在故障状态下仍能获得良好的控制效果。从目前发展来看,控制系统的故障诊断和容错控制的发展是相伴的,故障诊断是容错控制的基础,容错控制的发展为故障诊断研究带来了新的动力。

1.2.1 被动容错控制方法

如文献[85]所述,20世纪70年代后期,鲁棒控制设计成了最热门的研究课题。闭环系统通过仔细选择反馈设计,照顾到故障和系统不确定性的影响,能够具有一定的容错能力,称为被动容错系统^[9]。固定的鲁棒控制器能够补偿某些故障的影响,在设计控制器时,需要关于可能的故障特点和位置的信息。被动方法使用鲁棒控制技术确保闭环系统采用固定控制器而不使用在线故障信息,维持对某些故障不敏感。损坏的系统继续以同样的控制器和系统结构运行,其目标是恢复原系统的性能。通过提供可能的故障和它们影响控制功能的方式,实现系统对故障是“鲁棒”的,寻求在某些回路失效情况下,维持常数控制器设计是一种可行的途径。系统应用可得的功能冗余使某一传感器信号移去后闭环性能是最优的。任何控制系统,都要求对扰动和建模误差有鲁棒性,因为不可能在数学模型和实际过程之间完全匹配。如果故障的影响与建模误差和扰动的影响相似,设计对某些故障不敏感的控制器的,在实际应用中,某些故障对系统动态参数具有偏离的影响,称它们为加性故障信号。如果确保故障以有界的不确定性形式作用于系统,则可以通过仔细设计控制器获得容错控制。拓展鲁棒控制去处理被动容错的方法有定量反馈理论^[35],H_∞范数优化^[26],四参数控制器^[27]的鲁棒设计等。被动容错的基本思想是使闭环系统对不确定性和一些可能故障具有鲁棒性。被动容错控制器对待故障就像它是建模不确定性一样,控制器对一些特定故障是鲁棒的。

被动容错控制大致可以分成可靠镇定(reliable stabilization),同时镇定

(simultaneous stabilization), 完整性(integrity)控制, 鲁棒容错控制, 即可靠控制(reliable control)等几种类型。

(1) 可靠镇定

可靠镇定是采用两个或更多的补偿器来并行地镇定同一个被控对象。当任意一个或多个补偿器失效, 而剩余的补偿器正常工作时, 闭环系统仍然可以保持稳定, 就称此控制系统为可靠镇定。它是一种对控制器失效的容错控制。

使用多个补偿器进行可靠镇定的概念于 1980 年最先提出^[20], 随后又有一些深入研究^[28-33]。针对单个控制对象, 文献[28]证明了当采用两个补偿器时, 存在可靠镇定解的充要条件是被控对象是强可镇定的(strongly stabilization), 当被控对象不满足该条件时, 补偿器出现不稳定极点, 闭环系统在扰动的影响下将出现不稳定, 其缺点是问题即使有解, 设计过程也是非常困难的。文献[30]给出了设计两个动态补偿器的参数化方法, 以得到可靠镇定问题的解, 还给出了把一个稳定的控制器分解成两个并联的动态补偿器, 进而实现可靠镇定问题的有效方法, 其前提仍然是被控对象仍然是强可镇定的。文献[31]进一步给出了新颖的可靠镇定问题的求解方法, 即使对不是强可镇定的多变量系统依然有效, 其设计思想是采用多个并列的动态补偿器。每个补偿器需要其他补偿器的输出信号, 因此就需要辅助的传感器来观测其他执行器的运行状况。文献[34]使用冗余控制器实现容错功能。

(2) 同时镇定

同时镇定是给定多个被控对象, 同时镇定问题的目标是: 构造一个固定的控制器, 使其可以分别镇定上述的任意一个被控对象, 则该控制器对控制对象的特性变化具有鲁棒性, 对系统故障具有稳定意义上的容错能力。这是关于被控对象故障的容错控制。

同时镇定有两个主要作用。其一, 当被控对象发生故障时, 可以使其仍然保持稳定, 具有容错的功能; 其二, 对非线性对象, 经常是采用线性化控制的方法在某一工作点上对其进行控制。当工作点变动时, 对应的线性模型也会发生变化。文献[35]是最早开始研究同时镇定问题的文章之一。因其工程意义明显, 随后出现了许多更深入研究, 且取得了重要进展^[36-41]。近年来关于同时镇定的容错控制器研究, 大多集中在 Q 参数化互质分解的同时镇定控制系统设计方法和基于稳定性理论的同时镇定的设计方法。基于广义的采样数据保持函数, 给出了同时镇定问题有解的充分条件, 及其控制律的构造方法, 在满足同时镇定的基础上同时实现线性二次型最优控制的充分条件, 以及相应的控制律构造方法, 但是一次只考虑一种故障情况^[37]。文献[38]利用 Hurwitz 稳定理论和状态反馈理论研究了单输入单输出系统的同时镇定问题, 作者考虑了在有解

的情况下尽可能多的故障情况的潜力,由于他们研究的单输入单输出系统,采用的是状态反馈,而许多实际问题是多输入多输出系统,而系统的可测信息往往是系统的输出,系统的状态变量并不总是能够直接得到的。文献[24]利用逆系统方法得到了同时镇定问题的解。文献[40]介绍了一种同时镇定的控制器参数化设计方法,并得到了同时镇定问题解的参数化结果,导出了参数需要满足的一系列二次方程的约束条件。

同时镇定容错控制设计方法将控制系统表达为离散参数的多重模型,根据对应的传递函数构造线性全状态公共控制器,使其对具有离散参数集合的控制系统稳定。在基于同时镇定的容错控制器设计中,一个期望的设计目标是同时考虑尽可能多的故障情况以及实现用同一个公共的控制器对尽可能多的故障容错,并兼顾到动态和静态的系统品质要求,同时还要考虑到易实现性。

(3) 完整性

完整性是如果在发生执行器或传感器卡死、饱和与断路故障时,尤其指断路情况下,或同时发生执行器和传感器故障时,闭环系统仍然是稳定的,那么就称此系统是具有完整性的系统,通常也称此回路为具有完整性的控制回路。从一定的意义上说,完整性所研究的是传感器和执行器故障情况下的系统稳定性,而对系统故障情况下的性能指标未作具体要求,它是针对传感器与执行器故障的容错控制。完整性设计一直是被动容错控制中的热点研究的问题,并且这方面的理论研究成果也较多^[44-57]。完整性问题也称做完整性控制(integral control),研究的一般是MIMO线性定常控制系统。文献[45]明确给出了完整性问题的清晰的数学描述,基于LQR理论得到了一种对传感器或执行器失效具有完整性的充分必要条件。文献[46]基于Lyapunov稳定性理论得到了一种能同时保证系统正常和系统故障情况下稳定的完整性控制器设计方法。文献[48]研究了关于执行器断路故障的完整性问题,推导出了求解静态反馈增益阵的一种极其简单的伪逆方法,该方法的缺点是并不能保证故障状态下的闭环系统是稳定的。

(4) 鲁棒容错控制/可靠控制

早期某些研究完整性的作者称他们的工作为可靠控制,而近期的可靠控制与容错控制的完整性方法还是有区别的。可靠控制更多地强调的是除了实现故障稳定性外,还需关心控制回路失效时,能够维护可接受的性能,可靠控制主要采用鲁棒控制技术设计容错控制系统,或者直接称为鲁棒容错控制。基于线性特征系统理论及参数空间设计方法,文献[58]给出了关于执行器断路故障的可靠控制问题的求解方法。该方法的一个特点是可以实现完整性的同时,在执行器各种故障下,都可以将系统的闭环极点配置在预定的区域内。因此,此方

法在满足容错控制的条件下, 还可以兼顾闭环系统的动态特性。

应用鲁棒控制理论设计容错控制系统的方法已有一些成果^[59-73]。这些成果考虑了系统故障影响的同时也关注了系统建模不可避免的误差, 鲁棒容错控制具有现实的意义。如用参数空间方法设计针对传感器故障的鲁棒控制器^[59], 通过解矩阵 Riccati 方程和矩阵 Lyapunov 方程设计状态反馈对执行器故障具有稳定性的方法^[60, 61], 定义 U-矩阵实现对任意反馈回路故障保证系统稳定的方法^[62]; 用互质分解理论确保反馈系统部分传感器或执行器故障时系统的稳定性^[63]; 提出基于线性 H_∞ 控制理论的代数 Riccati 方程等几种方法设计控制器以维持系统稳定性和 H_∞ 性能, 通过解 Riccati 方程或不等式来确定状态反馈 H_∞ 控制问题的解。这些体现了被动容错中比单纯的多变量系统的完整性设计更进一步的结果。

作为一种多变量频域理论, H_∞ 优化奠定了经典控制的设计思想, 求解中需要高深的数学理论, 经由 DJSK 的努力工作, 标准的 H_∞ 控制器设计已可全部用时域方法解决, 简化为求解两个 Riccati 方程的形式, 所得的控制器是时不变的, 易于实现, 但阶次较高。目前 H_∞ 优化理论已基本成熟, 借助 H_∞ 方法的容错控制设计可谓很丰富^[64-72]。

近年来, 分散大系统的容错问题受得了广泛关注^[74-81]。文献[76]针对执行器开路故障, 基于 Lyapunov 方法得到了分散系统满足完整性的充分条件, 即使此条件不满足也不能判定完整性控制律不存在。文献[79]使用鲁棒控制技术设计输出反馈形式的控制律, 解决不确定性问题, 对于组合对称大系统文献[81]采用谱分解的方法处理执行器或传感器在部分失效的情况下的容错问题, 缺点是工程实现计算复杂。

被动容错控制系统的 CAD 方法: 复杂系统设计问题的解决, 以及由此导致的控制系统设计技术的不断丰富和发展, 都与计算机技术的发展和應用密切相关。近年来, 数学规划、参数最优化等方法已经成为系统设计技术的一个重要组成部分, 并且在许多工程问题中得到了应用。控制系统的容错控制问题也是如此, 与 CAD 技术的紧密结合几乎从一开始就成为它的一个重要特征。无硬件冗余的被动式容错控制系统结构方法是目前容错控制技术的一个重要组成部分。在这一类容错控制问题中, 由于系统的结构与一般的控制系统完全相同, 因此, 获得系统容错性能将完全依赖于控制器的合理设计。当选定控制器的结构后, 使系统对考虑的各种故障因素都有容错性能的要求, 一般可以表示成控制器的参数所需满足的一组约束函数。因此, 这类容错控制系统的设计问题往往可以归纳为这组约束函数下的确定控制器的数学规划问题, 该数学规划

问题可以利用适当的 CAD 算法和计算机程序求解,从而实现控制系统容错问题设计的目标。对于这一问题有一些成功应用的例子。

1.2.2 主动容错控制方法

如文献[85]所述,主动容错控制方法较多。例如应用反馈线性化的方法,应用伪逆建模的方法,基于模型跟随原理的方法,应用自适应的方法,应用智能控制器设计的方法,等等。主动容错的优点在于使用了在线故障信息,控制器的参数或结构一般是可变的,使用未预料故障概念和 FDI 功能,重建或重构控制是热门的研究课题。例如自修复控制系统使用控制混合器概念,当控制器失效发生时,对剩余控制因素重新分配。Looze 等使频率域系统性能量度最大化的自动再设计技术的重构控制^[82]。Rauch 对 F/A-18 飞行提供了预计算控制律再调度方法^[83],系统引入控制面故障和在扰动飞行条件下的飞行测试。Walker 等把滤波控制律应用于直升飞机上^[84]。

主动容错控制的主要方法如下。

(1) 控制律再调度

获得容错的最简单方法是采用存储计算的增益参数的控制律增益再调度。其基本思想是离线计算出各种故障下所需的合适的控制律增益参数,列表存储在控制计算机中。系统运行过程中,基于在线 FDI 机制得到故障信息后,挑选一个合适的增益参数,得到重构的容错控制律。在许多应用中,现调度机制由测量启动。该方法现已用于航空控制、航天控制、化学过程控制等。Moerder 等设计了切实可行的方法,使用了 FDI 单元监视控制器损坏状态,提供了状态估计,用之在优化增益调度的方法。控制律再调度可看做反馈控制系统增益或结构可由前馈补偿器调整。意味着控制器再调度的正确运行非常依赖于 FDI 机制的鲁棒性,任何不正确的隔离都可能导致闭环系统的不稳定,FDI 的可靠性对于整个系统的稳定性起到决定性的作用。

(2) 反馈线性化重构

一般地对于状态或控制变量小的变化,线性系统工作得比较好,反馈线性化概念用于补偿非线性动态特性的影响,以离散时间形式用递推最小二乘估计方法去估计的参数,用于更新控制器的新参数。研究者将该方法用于容错控制。反馈线性化的一个重要特点是联合使用控制分配器 CD(Control Distributor)和一般输入 GI(Generic Input)。引入 CD 减少了真实输入到 GI 的向量,它与输出向量具有相同数目的元素。当故障发生时,基于参数估计的自适应来改变控制律。由于在辨识过程中使用了 GI,减缓了耦合引起的问题,但是构造实际输

入时,必须修改 GI 使参数能够正确地辨识,同时考虑了执行器动态特性和使用了虚拟(imaginary)执行器的概念产生特定的 GI 信号。

(3)模型跟随方法重构

模型跟随是反馈线性化的一种特例。有三种方式的模型跟随策略:隐式跟随;显式跟随;多重模型 Kalman 滤波跟随。

控制故障系统使之在某种意义上接近于原系统的思想是自然的。模型跟随重构飞行控制系统首先由 Huang 等提出,考虑重构控制隐模型跟随方法的适用性。Morse 等应用多变量自适应控制器实时调节控制器增益强迫对象跟随期望模型轨迹^[94]。多重模型 Kalman 滤波跟随系统在无须知道故障的情况下,在其余的执行机构中隐含地分配了控制能力^[82]。该法减少了对 FDI 的可靠性及误报对重构的危险。模型跟随自适应容错控制基于命令产生器跟随器,获得了稳定性的详细讨论,构造了嵌入前馈动作的回路以使该方法能够用于非最小相位对象,随着前馈增强只可能保证跟随误差有界,不能保证渐近稳定。这表明了多重故障存在时,使用参数估计间接地识别故障的自适应系统能够具有容错能力。

(4)伪逆建模法重构

伪逆建模法(PIM)重构控制方法被很好地用于飞行仿真研究中。PIM 原理是修改常数反馈增益以使重构的系统在某种意义上接近于正常系统。该法经常不使用 FDI 机制且事先假定了某些故障模型。对于许多预料型故障可解出增益,然后存储于飞行控制计算机中。一旦某些故障被检测、隔离和识别出,即获得了故障系统的模型,修改反馈增益。对于镇定故障对象,这是相对快的解决办法,已用于预料型故障,但不能保证故障系统的稳定性时,导致了某些故障情形下不期望的特性。

(5)基于自适应控制的主动容错控制

正如文献[16]中预示的那样,多变量鲁棒控制、自适应控制和容错控制是相关的控制课题,有着内在的联系。使用自适应的成果解决容错控制问题得到了一定的应用。自适应理论较引人注意的是模型参考自适应和多模型自适应,其中模型参考自适应能够使得被控过程的输出始终跟踪参考模型的输出,这种容错不需要 FDI,当发生故障时,实际被控过程随之发生变化,控制律就会相应地调整,保证了被控对象跟踪参考模型输出,可见这是采用隐含的方式处理故障。多数文献中以实验和仿真的方式验证了方法的可行性和有效性,但是缺乏有效综合方法。而多模型自适应在一定意义上与同时镇定相似,克服线性系统的局限性,使得设计非线性控制系统时直接采用线性控制理论,当系统因为故障工作点发生变化时,系统依据适应律调整控制参数克服故障影响。需要指

出的是, 无论是否因故障造成系统变化, 适应和调整的过程必须及时, 以满足系统稳定的最低要求。可以考虑通过对故障动态剧烈变化在线快速学习和调节、模型降阶、减少可调整参数的个数等办法提高自适应容错控制的能力。

预测控制是工业过程控制中受青睐的先进算法, 在容错控制中也有一些工作, 应用预测控制的一个优点是很方便地解决执行器的饱和问题, 因为它的工作方式是一种在线的滚动优化过程。当然, 预测容错控制需要一定的先验知识并有部分不可预见性。

(6) 鲁棒重构

鲁棒重构控制不仅要求系统在一定的容错目标下对考虑的故障具有容错能力, 要求当被控对象的模型特性发生一定程度的变化时这种容错性能依然成立, 而且系统还需要充分利用故障诊断的信息, 是以鲁棒控制器为基本控制器的主动容错控制系统。基于鲁棒控制器设计重构控制方法, 同时与 FDI 设计及实现集成在一起是一个挑战。几位研究者考虑鲁棒控制器设计和鲁棒故障估计的统一设计, 但没包括完整的 FDI 的功能, 他们认为故障估计影响控制器的鲁棒性。尽管控制器确实影响故障检测和隔离任务的鲁棒性, 当故障检测和隔离采用“开环”方法实现时, 控制器的鲁棒性问题与 FDI 设计是解耦的。

(7) 智能容错控制器设计

在上面的叙述中, 并没包括直接的智能控制器的容错控制系统设计。由航空航天驱动的容错控制, 研究者们似乎对于借助模糊理论、神经网络理论来解决他们的容错问题不感兴趣, 这主要的原因有:

①容错控制器设计一般都是在稳定性分析基础上进行的, 而基于神经网络控制系统的稳定性分析存在一定的困难;

②由于对安全准则系统发生故障的快速响应的实时性需要, 使得神经网络控制系统面临速度的挑战;

③对神经网络进行离线训练能够解决的大部分问题是预料型故障, 这也使得神经网络的应用具有一定的局限性。

将神经网络用于容错控制器设计是一个富有挑战性的开放课题, 目前这方面的成果还不多。基于神经网络的容错控制大致有以下几种方法: 比较早的将神经网络嵌入到容错控制中的工作。作者采用广义回归网络的统计估计功能用于估计故障幅度。该网络对输入过程的输入输出和残差信号, 需要进行在线学习, 进一步的控制交给其他单元, 其缺点是不能保障闭环系统稳定, 且受学习的限制, 神经网络起到的作用并不显著。直接采用神经网络对一个反应器进行建模, 进而实现预测控制, 该文方法限于传感器故障, 且需要对网络进行离线完备的训练, 事实上神经网络只确定了对故障变量的估计输出。神经网络有两