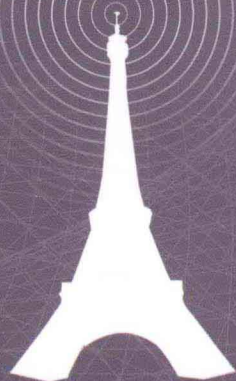


ACTIVE FAULT-TOLERANT
CONTROL THEORY
—ADAPTIVE METHODS

主动容错控制理论

自适应方法

金小峥 原忠虎 李彦平 | 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

主动容错控制理论

——自适应方法

金小峥 原忠虎 李彦平 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要基于自适应技术来研究连续时间系统的主动容错控制方法,所涉及的系统元件故障包括执行器和传感器的中断、部分失效、偏移和非参数化时变卡死故障,以及关联链接的信号衰减、恶化等网络关联链接故障。提出了多种直接、间接和切换组合的自适应方法设计故障补偿控制器,保证了系统正常和故障情况下的稳定性,并优化了系统性能。所提出的方法适用于连续时不变线性系统、不确定系统、非脆弱系统,以及分布式控制系统、复杂网络和多智能体系统的容错控制设计,并且能推广应用于非线性系统、时滞系统和随机系统等多类系统。本书适合控制理论与控制工程、导航、制导与控制以及相关专业的科研人员,工程师和在读硕博研究生的阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

主动容错控制理论:自适应方法/金小峥,原忠虎,李彦平著. —北京:电子工业出版社,2014.1

ISBN 978-7-121-22057-9

I. ①主… II. ①金… ②原… ③李… III. ①自适应控制-容错技术 IV. ①TP273.2②TP302.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第287607号

责任编辑:赵娜

特约编辑:王纲

印刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

开本:720×1000 1/16 印张:14.75 字数:330千字

印次:2014年1月第1次印刷

定价:45.00元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

随着科技的发展和人类各方面需求的不断提高，人们对控制系统运行的效率、精度、时间和强度要求越来越高。为了实现系统运行的高效性和多应用性，系统结构的设计越来越精妙和细致。而这带来的是复杂且繁多的系统元件组合，执行器、传感器和连接部件在空间上大量分布和应用。为了保证系统在长时间高强度运行下的精度和安全可靠，容错控制（Fault-tolerant Control, FTC）策略的构造就成为复杂工程系统设计的重要部分。

容错控制系统的特点表现在当系统执行器、传感器、控制器、对象本身等系统各类组成元件发生故障时，系统的安全运行仍然得到保障并能保持满意性能。一方面，执行器和传感器作为系统运行驱动元件及信息获取和发送元件，故障的发生和解决已经得到人们的极大关注；另一方面，随着工业制造的复杂化和生产目标的多元化，各个子系统通过网络或关联链接互相传递信息，对关联链接安全可靠性的研究也随之进入容错控制领域。容错控制系统的研究也面临着新的挑战。

从 20 世纪 70 年代系统完整性被提出以来，容错控制的发展已经历了四十多年。在其理论研究中，容错控制系统设计方法分为基于鲁棒控制技术的被动容错控制方法和基于故障补偿技术的主动容错控制方法。两者重点描述容错控制系统的全局特征和实时动态特征。现有的针对预判故障的传统被动容错设计方法在维数较低、故障源较少的简单控制系统中有较好的应用。其具体的应用实例可以在液位系统、倒立摆系统、质量-弹簧-阻尼系统，以及经过解耦降维的飞控系统上实现。但对于

系统维数高且故障源较多的结构复杂系统,被动容错方法设计的容错控制策略较为保守,并不能保证系统在合理性能下运行,甚至会由于遗漏可能发生的故障模式而计算得到错误控制策略,导致系统发生故障时崩溃。更需要指出的是,被动容错控制方法仅仅对有限的故障模型,如中断、部分失效等有较好效果,它并不具备补偿严重故障(如偏移、卡死等故障)的能力。因此,不需要预判故障,而通过在线调节控制器参数或重构控制器的主动容错控制就成为人们重点研究的方法。

主动容错控制中基于故障检测与分离(Fault Detection and Isolation, FDI)技术的控制方法和基于自适应技术的控制方法是研究最为广泛的方法。其中基于FDI方法的容错控制策略由于其高效性和较高的应用价值,近年来备受学者的青睐。它的设计依赖于故障诊断机构的诊断结果,其更为重要的意义在于设计故障诊断机构正确及时地诊断出故障信号。因此,在这类主动容错控制中,控制器的重组(Reconfiguration)或控制系统的重构(Reconstruction)需要FDI子系统提供精确及时的故障信息,从而构造有效的容错控制策略。但故障诊断机构的诊断会受到外部扰动、时滞、系统模型不精确性及其他环境因素的影响,给出不够精确甚至错误的故障诊断信号。显然,应用误诊的故障信号重组或重构容错策略控制系统会给系统带来灾难性的破坏。所以,另一类不需要精确故障信息的主动容错控制方法——自适应方法迅速成为学者们研究的热点。自适应技术可以获取未知参数每个时刻的估计信息,且控制增益可以响应参数的变化而实时变化。根据此特点,在故障未知的情况下,利用自适应技术估计故障信号代替故障诊断机构的诊断信号,再应用估计信号作为间接信号辅助构造容错控制策略。因此,与基于FDI技术的容错控制方法不同,基于自适应技术的容错控制策略不需要估计准确的故障信息,对容错控制系统也更能保证它的可靠性。

本书主要考虑基于自适应技术的主动容错控制方法。所涉及的系统元件故障包括执行器、传感器和关联链接的故障,而故障类型则有中断、部分失效、偏移和非参数化卡死执行器和传感器故障,以及信号衰减、恶化等网络关联链接故障。本书所包含的系统不仅有连续时不变线性系统和不确定系统,还有分布式控制系统、复杂网络和多智能体系统,所

提出的方法也能推广到非线性系统、时滞系统和随机系统等。所提出的自适应方法对故障有极强的补偿能力和鲁棒性,但本书中的方法也不是完美的容错控制方法,也存在着一些缺点,如计算负担较重,系统得不到解析解,特别是对实际工业的应用还需要进一步改进。因此,作者希望本书能起到抛砖引玉的作用,给学者们提供一个别样的思维平台,并期待学者们能提出更好的、更有应用价值的容错控制方案,进一步提高系统运行的安全性、可靠性和运行效率。

本书的写作是在导师杨光红教授悉心教导下完成,杨老师以他渊博的知识和雄厚的科学研究功底给本书的形成创造了基本条件,在此对杨老师表示深深的感激和敬意。本书的出版得到了沈阳大学相关领导的重视和帮助,并获得控制理论与控制工程学科建设经费资助,在此十分感谢领导的关怀,为我们解决后顾之忧。本书部分章节是在常晓恒博士,朱训林博士的讨论下完成的,写作阶段更得到家人的理解和支持,在此对他们以及所有关心鼓励我的人表示感谢!

由于时间较为仓促,书中难免有不妥之处,希望各位读者见谅并不吝指正!

金小峰

2013年9月于沈阳

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为，歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：（010）88254396；（010）88258888

传 真：（010）88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第1章 绪论	1
1.1 容错控制系统概述	1
1.1.1 背景	1
1.1.2 动机	3
1.1.3 发展概况及分类	5
1.2 被动容错控制	6
1.3 主动容错控制	9
1.3.1 基于 FDI 技术的主动容错控制	9
1.3.2 基于自适应技术的主动容错控制	11
1.4 容错控制研究的热点与难点问题	13
1.5 本书的研究范围	16
第2章 线性系统自适应容错控制	19
2.1 执行器故障下容错控制系统描述	20
2.2 间接自适应容错控制系统设计	23
2.3 直接自适应容错控制系统设计	29
2.3.1 切换自适应控制增益方程	29
2.3.2 自适应控制增益方程	32
2.4 数值仿真算例	36
2.4.1 飞控系统仿真算例	36
2.4.2 火箭整流罩模型仿真算例	40

第3章 不确定系统自适应容错控制	45
3.1 不确定容错控制系统描述	47
3.2 直接自适应非脆弱容错控制器设计	48
3.3 一类特殊执行器故障下自适应容错控制	56
3.4 不确定火箭整流罩模型仿真算例	61
3.4.1 直接自适应方法应用	61
3.4.2 间接自适应方法应用	65
第4章 自适应容错H_∞控制	69
4.1 容错 H_∞ 控制系统描述	70
4.2 状态反馈情况	76
4.2.1 H_∞ 补偿跟踪控制器设计	77
4.2.2 飞行器系统状态反馈仿真算例	84
4.3 动态输出反馈情况	90
4.3.1 ε -稳定控制器设计	90
4.3.2 飞行器系统动态输出反馈仿真算例	100
第5章 线性系统容错H_∞非敏感滤波	106
5.1 容错 H_∞ 滤波系统描述	108
5.2 非敏感可靠 H_∞ 滤波系统设计	109
5.3 F-404 发动机系统数值仿真	119
第6章 关联部件故障自适应容错控制	122
6.1 分布式控制系统链接失效容错控制	124
6.1.1 关联部件故障描述	124
6.1.2 分布式自适应跟踪控制系统设计	128
6.1.3 分布式系统仿真算例	133
6.2 动态混沌系统自适应滑模容错控制	137
6.2.1 非线性耦合混沌系统	137
6.2.2 滑模 FTC 设计下的自适应同步	140
6.2.3 一类一致混沌系统仿真	145

第7章 分布式系统自适应容错控制 149

- 7.1 分布式系统容错问题描述 149
- 7.2 分布式系统间接自适应容错控制 151
 - 7.2.1 间接自适应控制器设计 151
 - 7.2.2 分布式控制策略仿真算例 155
- 7.3 分布式系统组合自适应容错控制 159
 - 7.3.1 组合自适应控制器设计 159
 - 7.3.2 质量弹簧系统仿真算例 165

第8章 复杂系统分布式自适应容错跟踪控制 171

- 8.1 分布式系统模型参考容错跟踪控制 171
 - 8.1.1 分布式容错跟踪控制问题描述 172
 - 8.1.2 分布式直接自适应鲁棒跟踪控制系统设计 175
 - 8.1.3 组合大系统仿真算例 180
- 8.2 主从大系统分布式容错同步控制 184
 - 8.2.1 主从大系统容错问题 184
 - 8.2.2 主从大系统容错控制系统设计 186
 - 8.2.3 复杂小车系统仿真算例 193
- 8.3 多智能体容错滑模跟踪控制 197
 - 8.3.1 多智能体系统容错控制问题描述 197
 - 8.3.2 容错滑模跟踪控制器设计 200
 - 8.3.3 多智能体系统仿真算例 206

参考文献 210

第1章 绪论

“容错”，顾名思义，就是“容忍错误”的意思。它是计算机系统设计技术中的一个概念，而对控制系统来讲，则是针对高可靠性控制系统的一种综合策略。容错控制系统是一个不仅在正常情况下，而且在某些元部件发生故障的情况下，都能够保证系统稳定性，并具有恰当性能指标的控制系统。容错控制系统的研究可以提高系统的安全可靠性、可维修性和使用寿命，具有重要的实际意义和理论价值。

1.1 容错控制系统概述

1.1.1 背景

如今，控制系统在工农业各个领域的广泛应用极大地推动了社会经济的发展，人们的生产和生活对控制系统的依赖程度也越来越高。因此，系统设备在有效运行时的安全性和可维护性受到了人们广泛关注。虽然控制系统的可靠性可以通过保证不发生故障得到提高，但在许多实际控制系统中，由于结构复杂，加之大功率、高负荷的不间断工作，元部件发生故障不可避免。并且，故障的产生不仅仅是由于元部件的老化变弱，人们在安装维修时的错误操作也会引起故障。因此，容错控制技术的出现和发展，为保证系统在元部件发生故障时有效运行，并提高系统的安全可靠性与可维护性开辟了一条新的途径。

如果将一个系统比作一个人的话，则控制器可以视为人的大脑，发布控制指令；执行器可以看作人的手和脚，执行大脑的各项指令；传感器便

是人的眼、鼻、耳、口、舌等感观部分,收集和发布当前信息;而人体内的经络、血管等则对应于系统的关联链接,负责各部分的信息关联。由此可见,在众多系统部件中,执行机构担负着整个系统的驱动功能,所有运行状态的变化都需要通过执行器的运作调整得以实现。因此系统的执行器负荷最大,结构最为复杂,也是最容易发生故障的机构,并且执行器故障对系统的可靠性、安全性和有效性影响最大。而传感器作为为系统、控制器、滤波器等机构接收并发送所需正确信息的部件,故障的存在也直接影响到系统的有效运行及安全可靠性。在多个系统组成的复杂系统中,关联链接和耦合网络的连接作用对整个系统的稳定性和跟踪同步性能而言不可忽视。因此,关联部件的故障也能造成整个耦合系统的崩溃。另一方面,随着系统外部环境的变化、运行时间的延续和其他不可预测外力的影响,系统对象本身也会出现故障性变化,如零件老化受损或脱落、机体发生化学反应及出现裂缝等,使得原有系统模型失效,导致系统不稳定。对一个控制系统而言,控制器的正常工作是一个系统正常运行的最基本条件。因此,控制器发生故障而给系统其他机构发送错误指令,对整个系统安全性来讲会产生灾难性的后果。另外,系统的其他部件,如接口、回路和一些软件的故障也会对系统运行产生较大影响。总体来说,这些故障都会直接影响到系统的安全可靠运行。在众多相关实际工程领域,曾经发生过许多造成重大人员伤亡和严重经济损失的悲惨事件。这些事件都是由于机构设计不能抵制外部扰动或者系统部件发生故障等原因导致系统安全性的下降,直至毁坏设备而发生的。

在航空航天领域,1985年日本JAL-747飞机因局部结构断裂而撞山坠毁,机上524名人员中只有4人幸免。1986年美国挑战者号航天飞机上的一个密封圈失效,导致价值12亿美元的飞行器爆炸,7名宇航员全部遇难。1996年6月4日,Ariane5号火箭在升空37秒后爆炸,主要原因在于惯性参考单元(IRU)的软件反对,导致提供姿态和轨道信息到控制系统,使正常的姿态信息被一些控制系统无法辨别的诊断信息取代。1996年土耳其波音757-200飞机因空速表故障而坠毁,13名机组成员和176名旅客全部遇难。2000年法国协和客机在起飞过程中机翼起火爆炸,造成机上109人全部死亡,地面死亡5人。2001年我国两架某型飞机在训练时因尾翼积冰相继坠毁,16名机组人员全部遇难。2003年2月,美国哥伦比亚号航天

飞机因左翼出现裂纹而发生爆炸坠毁，机上7人全部罹难。2009年6月，法国空客A330可能因遭遇强对流天气无法控制而坠毁，机上228人全部遇难。2010年6月，韩国首枚运载火箭“罗老号”因整流罩出错导致发射失败。2013年7月7日，韩亚航空一架波音777客机在美国旧金山机场着陆时失事，导致2名中国公民不幸遇难，事故原因初步鉴定为油箱破裂导致韩亚航班坠机着火。在核工业领域，1979年3月，美国宾夕法尼亚州三哩岛核电站制冷系统出现故障，造成美国最严重的一次核泄漏事故，至少15万居民被迫撤离。1986年4月26日，切尔诺贝利核电站发生核泄漏事故，其主要原因在于有缺陷的过时技术和故障处理机构的缺失。1993年4月，俄罗斯西伯利亚托姆斯克市托姆斯克化工厂的一个装满放射性溶液的容器发生爆炸，附近的几个村庄被迫整体迁移。2011年3月，日本发生9.0级地震，福岛第一核电站发生泄漏，辐射半径10公里范围内的约45000人被迫撤离。此外，矿物开采、卫星导航、石油化工生产等领域，多种故障的发生均导致了人员伤亡、财产损失和生产停滞。因此，为了更好地保障人们的人身安全和生存环境，同时提高生产运行效率和经济效益，系统的可靠性和安全性问题亟待解决。

正是在这样一种系统部件故障不可避免并不可忽视的背景下，容错控制技术的研究被推到了科学研究的前沿位置，并得到了飞速的发展。现代控制系统通过容错控制技术设计提高系统的可靠性和自动应变能力已经十分普遍，它作为提高系统安全性、可靠性的一种重要手段，被广泛应用到工业控制系统的许多领域。并且随着实际系统背景的演化，容错控制技术必将进一步深入发展。

1.1.2 动机

一般控制系统能否进行容错控制，关键看系统是否有富余的机构或者信息来消除补偿故障所带来的影响。这种富余称为冗余。值得一提的是，在航空航天领域，有很多实际系统，如飞行器、火箭、卫星等都能提供冗余信息。这些冗余信息的存在，保证了容错控制系统设计的可实现性。需要指出的是系统冗余有多种形式，主要包括硬件冗余和解析冗余。硬件冗余仅仅依赖现有系统的冗余度来容忍性能退化，是指给一个运行机构备份多个与之功能相同的机构，机构发生故障则由备份机构取代执行。显然硬

件冗余虽然可以精确提高系统可靠性,但成本代价十分昂贵,一般工业系统的执行机构很难做到。现实系统应用比较多的硬件冗余方式是传感器备份、设置多台计算机等。另一类冗余方式是利用系统中不同部件在功能上的冗余性来实现的,这类冗余被称为解析冗余。基于解析冗余的容错控制在多个控制领域得到了应用,如多翼多舵面的航天飞行器。这些功能冗余信息对容错控制器的设计与实现有着重大意义。

目前容错控制领域研究最多的是对系统执行器和传感器故障的容错控制。实际系统中,执行器和传感器的故障模式包括部分失效、中断、偏移和卡死。其中最为严重的故障为卡死故障。它还可以细分为常值卡死和时变卡死。其中时变卡死还可以分为参数化卡死和非参数化卡死。非参数化卡死是一类不能用方程描述的未知卡死故障,它包含了常值卡死和参数化卡死。因此,容错控制问题如果解决了非参数化卡死故障,则其他故障也能顺其自然地被解决。另外,容错控制系统设计中需要考虑两大问题,即性能优化和动态补偿。这两大问题相互对立,故障的动态补偿会使系统的性能下降,因此,如何协调系统性能和故障补偿是一个值得深究的问题。针对系统可能发生的故障模式,通过合理设计控制器同时补偿时变失效、中断、偏移和非参数化卡死故障问题,以及系统的干扰抑制问题和优化不同模式下的性能问题,将对系统容错控制的解决有较大的实际意义。

另一方面,随着控制系统日趋复杂和网络技术的不断发展,实际工作控制系统中出现了各种子系统关联的大系统。这些系统由大量空间分布的关联单元组成,每个单元都有自己的传感器和执行器输入/输出信号。因此,此类大系统中有大量的传感器和执行器输入/输出信号,如造纸工业、微机电系统、自动高速公路系统、飞行器编队系统和流量控制系统等。由于子系统关联通道传递着各个子系统的信息,对整个复杂系统的安全性起到至关重要的作用,因此对关联链接的容错也极其有意义。加之复杂系统中执行器的大量分布,执行器故障不可避免,容错系统的设计就更加重要。研究表明,关联网络与系统的稳定性、同步性和收敛性有着密切关系。在网络化复杂系统情况下,整个网络的一致同步由网络拓扑结构和耦合强度保证,如果网络处于非理性状态甚至发生网络恶化情况,整个动态网络极有可能失去一致同步性。因此对动态网络的容错也是研究重点之一。容错控制在网络化复杂系统中正在发生深刻的变化。

综上所述,当前容错控制系统的研究目的在于利用系统的冗余条件,设计合适的控制机构,解决系统执行器、传感器、系统本身和关联链接等机构的各类故障的自动补偿和抑制,以及不同故障模式下的性能优化问题。

1.1.3 发展概况及分类

容错控制问题的提出由来已久,而随着计算机技术的发展和控制理论的成熟,容错控制的发展在四十多年来有目共睹。学者 Niederlinski 早在 1971 年即提出完整性控制(Integral Control)的概念^[1],将容错控制思想引入控制系统中。接着 Siljak 于 1980 年发表了关于可靠镇定的文章^[2],意味着容错控制发展成一种高可靠技术。1985 年,Etterno 等人将容错控制进行分类^[3],进一步完善容错控制体制。1986 年 9 月,美国国家科学基金会和美国电气和电子工程师协会(IEEE)控制系统学会在美国加州桑塔卡拉(Santa Clara)大学联合召开了关于控制所面临的机遇与挑战的讨论会,参加这次会议的有全世界最著名的 52 位控制理论与应用专家,他们在一份提交给大会的报告中,把容错控制列为当今和未来 7 个挑战性课题之一^[4]。在 1993 年和 1997 年,Patton 教授撰写了容错控制方面比较有代表性的综述文章,全面阐述了容错控制所面临的问题和基本的解决方案^[5,6]。国际自动控制界对容错控制的发展给予了高度重视。在国际上,1993 年成立了 IFAC 技术过程故障诊断与安全性技术委员会。从 1991 年起 IFAC 每三年召开一次故障检测与诊断和容错控制方面的国际专题学术会议。近年来,许多国际会议如 2007 年 IEEE CCA 等针对容错控制的应用设立了专题报告。最近,综述文献[7~9]全面解析了容错控制发展中所出现的方法,并进行了相应的比较。我国在容错控制理论上的研究基本上与国外同步,并且我国学者不论在容错控制领域的理论研究还是实际应用方面都有杰出的贡献。张翰英教授在 1986 年就发表论文提出必须加速发展实用性容错系统研究^[10]。1987 年叶银忠等就发表了容错控制的论文^[11],并于次年发表了这方面的第一篇综述文章^[12]。此后,我国学者周东华、程一、葛建华、胡寿松等又将容错技术用于动态系统及传感器失效研究。1994 年葛建华等出版了我国第一部容错控制的学术专著^[13]。近二十年来,国内陆续出版了多本关于故障诊断和容错控制的专著^[14~18],还发表了大量的综述性文章^[19~21]。

在容错控制的发展过程中, Eterno 等人在 1985 年将容错控制分为主动容错控制 (Active FTC) 和被动容错控制 (Passive FTC), 如今这已成为现代容错控制研究方法分类的依据。被动容错控制基于鲁棒控制技术, 不需要任何在线的故障信息, 只针对预知的故障设计一个固定控制器来确保闭环系统对故障不敏感, 保持系统的稳定和性能。而主动容错控制一方面可以直接利用在线的故障诊断信息, 通过诊断信号在线选择或重构/重组控制器以保证故障发生后系统的稳定性和性能指标; 另一方面, 也可以利用间接的故障估计信号或者故障所产生的系统变化, 在线调节控制信号, 保持系统稳定性。被动容错控制和主动容错控制各有其特点, 前者重点描述系统的全局特征并优化系统性能, 而后者则侧重于描述系统的实时动态特征, 补偿故障影响。两者在实际系统中都有相关的应用。综述文献[9]则对被动和主动容错控制方法进行了全面的比较。

1.2 被动容错控制

被动容错控制的概念源于它对系统故障进行被动处理。设计被动容错控制器之前, 需要对系统可能发生的故障进行预判, 然后将这些预知的故障概括到统一的故障模式下进行容错控制。研究被动容错控制方法, 就必须了解鲁棒控制原理^[22]。鲁棒控制是 20 世纪 70 年代发展起来的控制技术, 鲁棒控制器使闭环系统对不确定参数摄动和外部扰动具有不敏感性, 以保证系统的稳定性和性能。一般被动容错控制是一种相对简单的基于鲁棒控制技术的控制器设计方法, 也称为可靠控制 (Reliable Control)。如果把系统故障归结为系统参数摄动问题, 根据鲁棒控制技术就可以设计容错控制系统。然而, 传统鲁棒控制和可靠控制还是有本质区别的。前者处理的是小参数变量或者不确定性, 而后者处理的则是系统中由元部件故障产生的剧烈的系统结构变化。基于鲁棒控制思想设计的被动容错控制器的参数一般是固定常数, 针对特定预知的故障不需要在线调整控制器结构和参数。

被动容错控制包含了完整性、可靠镇定、同时镇定控制等几种类型。它们分别研究的是传感器和执行器故障、控制器故障和被控对象故障。由于完整性控制是针对系统传感器和执行器的容错控制, 自从 1971 年 Niederlinski 提出完整性控制 (Integral Control) 的概念后, 它一直是被动容错

控制中的热点研究问题^[23-27]。完整性控制器保证了传感器和执行器发生中断故障后,闭环系统仍能稳定。文献[23]明确给出了完整性问题的清晰的数学描述,基于线性二次调节器(Linear Quadratic Regulator, 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[24]基于李亚普诺夫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[25]研究了关于执行器中断故障的完整性问题,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。文献[26]给出的执行器中断故障完整性求解方法在实现完整的同时,保证系统闭环极点配置在预定区域内,但系统是高维时,解析解就不再存在。文献[27]针对执行器失效故障设计了具有完整性的动态补偿控制器,保证系统稳定。

Siljak 于 1980 年在文献[2]中首先提出针对控制器的失效故障的可靠镇定控制方法。它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,闭环控制系统仍然可以保持稳定。随后一些学者的研究使得可靠镇定问题基本上趋于成熟。针对单个被控对象,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 Stabilizable)。文献[29]进一步给出了对不是强可镇定的多变量系统采用多个动态补偿器的可靠镇定问题的求解方法,采用多项式矩阵的互质分解技术,给出了可靠镇定问题存在解的充分条件。

由于被控对象发生故障会导致一个动态系统的模型描述发生变化,同时镇定容错控制思想在于设计一个控制器去同时镇定多个动态系统模型,其实质是设计一个固定控制器分别镇定给定的多个有限维连续时间线性时不变对象。该问题近十几年来已引起了许多学者的注意。其中文献[30]是最早关于联立镇定问题的研究之一。文献[31]在此问题的研究上取得了重要进展。基于广义的采样数据保持函数,该文献得到了联立镇定问题有解的充分条件和控制律的构造方法,以及实现线性二次型最优控制的充分条件和相应的控制律的构造方法。

不仅仅针对传感器和执行器故障、控制器故障和被控对象故障,一个控制系统被设计成能容忍系统部件故障,并且保持闭环系统稳定性和可接受的性能,这个系统就被称为可靠控制系统。显然,可靠控制包含前三种