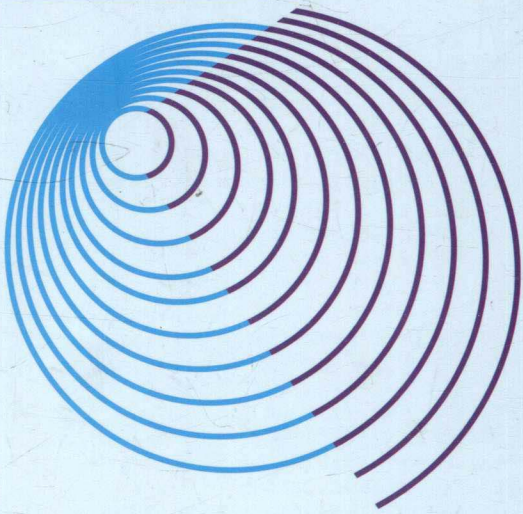
辽宁科技大学学术著作出版基金资助

基于自适应技术的鲁棒容错控制方法

武力兵 著



东北大学出版社
Northeastern University Press

辽宁科技大学学术著作出版基金资助

基于自适应技术的鲁棒容错控制方法

武力兵　著

东北大学出版社
·沈　阳·

© 武力兵 2018

图书在版编目（CIP）数据

基于自适应技术的鲁棒容错控制方法 / 武力兵著
. —沈阳 : 东北大学出版社 , 2018.12
ISBN 978-7-5517-2063-2

Ⅰ . ①基… Ⅱ . ①武… Ⅲ . ①鲁棒控制—研究 Ⅳ .
① TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 287138 号

出 版 者：东北大学出版社
地址：沈阳市和平区文化路三号巷 11 号
邮编：110819
电话：024-83687331（市场部） 83680267（社务部）
传真：024-83680180（市场部） 83687332（社务部）
网址：http://www.neupress.com
E-mail:neuph@neupress.com
印 刷 者：沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂
发 行 者：东北大学出版社
幅面尺寸：170mm × 240mm
印 张：11.5
字 数：160 千字
出版时间：2018 年 12 月第 1 版
印刷时间：2018 年 12 月第 1 次印刷
责任编辑：刘 莹 牛连功
责任校对：小 姬
封面设计：潘正一

ISBN 978-7-5517-2063-2 定 价：30.00 元

前 言

容错控制经历半个多世纪的研究，取得了一系列重要的理论研究成果，并在导航与制导、航空航天、机械自动化、过程控制、机器人、智能控制等工程领域得到了很好的应用和发展。尽管如此，目前仍然有许多理论与应用问题亟待解决，许多容错控制方案被提出并进一步推广。自适应鲁棒容错控制是主动容错控制中有效的主流方法之一，研究成果颇为丰富。然而，基于自适应技术的鲁棒容错控制方法仍然处于起步阶段，已有的方法还存在不足之处，而大量的实际工程问题也不断给自适应容错控制的研究提出各种新的挑战。为了更好地解决面临的新问题，研究带有执行器故障或非线性死区受限的不确定线性系统或非仿射非线性系统的自适应鲁棒容错控制方法具有重要的理论与实际意义。

本书是作者对基于自适应技术的鲁棒容错控制方法研究的总结与拓展。全书共分为7章，第1章绪论首先介绍了容错控制与自适应控制的研究现状和研究热点，进一步介绍了基于自适应技术的鲁棒容错控制的发展概况。第2章预备知识介绍了微分方程稳定性理论，并给出了书中将要使用的常用不等式及一些数学符号。后5章为作者近年来取得的研究成果。第3章研究了一类不确定线性多时延系统的容错跟踪控制问题。第4章在第3章研究结果的基础上，将其成果应用于解决一类带有不匹配参数不确定性、外部扰动、多时延扰动以及执行器故障不确定性系统的容错控制问题。第5章针对一类带有执行器死区受限的不确定非仿射非线性系统，分别给出了基于自适应模糊逼近技术的状态反馈和输出反馈的鲁棒跟踪控制方案。第6章在第5章研究结果的基础上，研究了一类不确定非仿射非线性系统的自适应鲁棒容错控制问题。第7章针对带有执行器死区受限的不确定随机非仿射非线性系统，基于自适应神经网络观测器，给出了输出反馈的鲁棒跟踪控制模式。本书讨论的内容思想新颖，在方法上有创新，相信本书的出版对进行该方向研究的人员有很好的参考价值。

本书在撰写过程中得到了国家自然科学基金和辽宁科技大学学术专著出版基金的资助。同时，东北大学杨光红教授、辽宁工业大学佟绍成教授、天津大学张国山教授、辽宁科技大学何希勤教授及众多相关人员给予了悉心指导并提出了很多宝贵建议。作者还参阅了国内外许多专家学者在自适应鲁棒容错控制方面的理论与实践研究成果。此外，东北大学出版社的编辑也给出了细致的修改意见，在此一并深表谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者不吝指正，对本书提出宝贵意见和建议。

著　者

2018年2月于鞍山

目 录

第1章 绪 论 1
1.1 引言 1
1.2 容错控制 3
1.2.1 容错控制的基本概念 3
1.2.2 容错控制的研究现状 5
1.2.3 容错控制的研究热点问题 11
1.3 自适应控制 12
1.3.1 自适应控制的发展历程 12
1.3.2 自适应控制的基本原理 14
1.3.3 自适应控制的研究现状 18
1.4 基于自适应技术的鲁棒容错控制发展概况 19
1.5 本书的主要工作 20

第2章 预备知识 24
2.1 微分方程稳定性理论 24
2.1.1 常微分方程稳定性理论 24
2.1.2 随机微分方程稳定性理论 25
2.1.3 模糊逼近的相关理论 26
2.1.4 神经网络逼近的相关理论 28
2.2 常用不等式及其数学符号 30
2.2.1 本书涉及的重要不等式 30
2.2.2 本书使用的符号 31

第3章 带有多时延扰动不确定线性系统的自适应容错控制 32
3.1 引言 32
3.2 问题描述 33

3.3 主要结果 38
3.3.1 直接自适应控制器设计 39
3.3.2 稳定性分析 42
3.4 仿真算例 46
3.5 本章小结 53

第4章 带有多时延扰动不确定非线性系统的自适应容错控制 54
4.1 引言 54
4.2 问题描述 55
4.3 主要结果 57
4.3.1 自适应容错跟踪控制器设计 57
4.3.2 稳定性分析 60
4.4 仿真算例 65
4.5 本章小结 68

第5章 带有执行器死区受限的非线性系统自适应模糊跟踪控制 75
5.1 引言 75
5.2 问题描述 77
5.3 主要结果 80
5.3.1 自适应状态反馈模糊跟踪控制 80
5.3.2 自适应输出反馈模糊跟踪控制 86
5.4 仿真算例 93
5.4.1 仿真算例一 93
5.4.2 仿真算例二 95
5.5 本章小结 98

第6章 带有执行器故障的非仿射非线性系统自适应容错控制 103
6.1 引言 103
6.2 问题描述 103
6.3 主要结果 106
6.3.1 自适应模糊容错控制器设计 106
6.3.2 稳定性分析 110

6.4 仿真算例.....114
6.5 本章小结.....120
第7章 带有死区受限的随机非线性系统自适应神经网络控制.....121
7.1 引言.....121
7.2 问题描述.....123
7.3 主要结果.....126
7.3.1 自适应神经网络输出反馈控制器设计.....126
7.3.2 稳定性分析.....143
7.4 仿真算例.....145
7.4.1 仿真算例一.....145
7.4.2 仿真算例二.....148
7.5 本章小结.....149
参考文献.....153

第1章 绪 论

1.1 引言

在自然科学与工程技术领域，随着导航与制导、航空航天、信息电子、生物工程等技术的发展，以及现代工业、农业、机械加工、化工材料等生产系统的规模和功能日益提高，控制系统的自动化程度及其精密程度也不断增大。与此同时，由于自身结构的复杂性和长时间大功率、高负荷地连续工作，系统设备在运行过程中，随着时间的增长和内外部环境等因素的变化，执行机构、传感机构及系统的内部元件都不可避免地会发生不同程度的故障，如飞行器方向舵失效、电子驱动信号中断、电动阀门被卡死等。这些故障都会直接影响到系统运行的安全性和可靠性，轻则使得系统的稳定性受到破坏，控制性能显著下降；重则导致巨大的经济损失，甚至危及人身安全。例如，1985年日本JAL–747飞机局部结构断裂而撞山坠毁，机上的520人遇难；1986年美国“挑战者”号航天飞机的一个密封圈失效，导致飞行器爆炸，7名机组宇航员全部遇难，经济损失达12亿美元；1996年中国的西昌“长征三号”运载火箭事故，造成了重大的经济损失和技术人员伤亡；1998 –1999年，NASA的雅典娜、大力神和德尔它火箭又连续发生了5 次事故，造成30 亿美元的直接经济损失；2000年4月19日，菲律宾航空公司一架波音737–200客机在菲南部城市达沃附近坠毁，机上的131人无一幸存，这也是菲律宾历史上最严重的一次空难；2003年8月22日，巴西耗资650 万美元研制的第三颗VLS系统运载火箭由于一个固体燃料推进器意外点火，使得整个火箭及发射架被毁，造成21名工作人员殉难，成为巴西航天发展史上最大的悲剧；2009年6月，法国空客A330可能遭遇强对流天气，导致无法控制而急速下坠，落入大西洋，机上

的228人无一生还；2010年6月，韩国“罗老”号运载火箭因整流罩分离异常，再次发射时失败；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17时43分，中国台湾复兴航空1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，机上的48名乘客全部遇难；2015年3月4日，土耳其航空“726”号班机，一架载有238人的空中巴士A330–300客机，在执飞伊斯坦堡到加德满都的航班时，在加德满都特里布万国际机场滑出跑道，虽然无人受重伤，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、物力和财产上的巨大损失。1986年4月26日，苏联“切尔诺贝利”核电站4号机组因故障发生爆炸事故，8 吨多强辐射物质倾泄而出，造成30余人遇难、300多万人遭受核辐射的侵害，经济损失不可估量。

因此，如何实施使操作者人身安全能得到更好的保障，提高生产效率和经济效益，并且能保证控制系统安全性和可靠性的鲁棒容错策略，已经成为控制科学领域研究的热点和难点课题。正是在这种背景下，动态系统的容错控制研究被推到了前沿位置，并得到了飞速的发展，同时为提高复杂系统的安全性、可靠性和有效性开辟了一条新的途径。

另一方面，随着控制对象的复杂性和精密性日益增加(如精密伺服控制、复杂网络、飞行器姿态控制、工业机器人、多智能体协同控制等)，系统参数变化范围大、干扰源多、环境复杂，精确地描述系统模型是非常困难的，而系统模型的不确定程度及外部扰动也将影响控制系统性能的优劣。因此，在设计控制器过程中，应考虑系统不确定性及外部扰动对闭环控制性能和稳定性的影响。自适应鲁棒控制能够

随时辨识系统的数学模型，并按照此模型去调整最优控制律，是处理这种复杂不确定系统的有效控制策略。其基本思想是：当被控对象内部的结构和参数具有不确定性及存在外部环境干扰时，在系统运行期间，系统自身能够对相关信息实现在线测量和处理，从而不断地修正系统结构的有关参数和控制作用，使之处于所要求的最优状态，实现人们所期望的控制目标，这就使得自适应控制具有鲁棒性强、响应快速、无需系统在线辨识、物理实现简单等诸多优点。近年来，自适应鲁棒控制在工程应用研究方面有了相当大的进展，它涉及几乎所有的控制领域，如导弹与航空飞行器的自适应控制、电机与电力系统的自适应鲁棒控制、机器人的自适应控制、智能交通系统的自适应控制、混沌系统的自适应鲁棒控制等。

本书首先针对带有匹配参数不确定性、匹配扰动与执行器故障的线性时延系统，使用直接自适应方法，研究了鲁棒容错跟踪控制问题。此外，针对带有不匹配参数不确定性、外部扰动与执行器故障的非线性时延系统，使用自适应模糊逼近方法，深入地研究了鲁棒容错跟踪控制问题；进一步地，针对几类带有不匹配参数不确定性、外部扰动的非仿射非线性系统，在执行器死区受限或执行器发生故障的情况下，利用自适应鲁棒控制方法，对非线性系统的容错跟踪控制问题进行了深入研究。本书问题选择具有重要的理论意义与工程应用价值。

1.2 容错控制

1.2.1 容错控制的基本概念

容错(Fault-Tolerant)，顾名思义，是容忍故障的简称。可以说，当今许多容错思想来源于人们对大自然生物界很多现象的基本认识和总结。例如，一只脚受伤的天鹅可以利用另一只脚和翅膀帮助前行；壁

虎的尾巴在断了以后，很快能再生出一条完全一样的尾巴；人的大脑细胞在人的一生中不断地衰亡，一个人一生中失效或者死亡的脑细胞高达10^9个，相当于脑细胞总数的十分之一。但令人惊奇的是这并不影响任何生理系统的正常工作，一个正常人的神经系统能毫无故障地工作一辈子；某些动物的脑血管发生流通障碍，旁边的支血管就会自动涨大变粗，代替发生故障的动脉，使肢体不致因缺血而衰亡。20世纪60年代，“计算机之父”冯·诺依曼对此就给出了生物界容忍故障的论断，从而为控制界的容错控制研究奠定了基础。

在控制领域，容错控制(FTC, Fault-Tolerant Control)的思想最早可以追溯到70年代。1971年，Niederlinski首先提出完整性控制（Integral Control）的概念[1]，将容错控制策略引入到控制系统中。作为一门应用型边缘交叉学科[2]，促使其迅速发展的一个重要的动力来源于航空航天领域。美国空军从70年代开始就不断地投入大量的资金来发展容错控制技术，力求开发出具有强鲁棒容错能力的高性能战斗机[3]。进一步地，为了提高控制系统安全性和可靠性的技术，容错控制在80年代开始蓬勃发展起来。Siljak于1980 年发表了关于可靠镇定的文章，该文章是最早专门研究容错控制的结果之一[4]。相继地，1985年，Eterno等人将容错控制方法分为主动容错控制(Active FTC)方法和被动容错控制(Passive FTC)[5]方法，如今已经成为现代容错控制研究策略分类的依据。此后，国内外很多学者致力于容错控制方面的研究工作[6–10]，使得容错控制系统理论逐步完善。所谓容错控制系统(FTCs, Fault Tolerant Control system)[11]，是指在执行器、传感器以及内部元件等发生故障的情况下，仍然能保证闭环设计实现期望控制目标的系统，其科学意义就是要保证动态系统在发生故障时，仍然可以稳定运行，并具有较理想的性能指标。其系统结构图如图1.1所示。

从20世纪90年代至今，国内外很多学者都在容错控制的理论研究和实践应用方面开展了卓有成效的工作，取得了大量的研究成果[12–26]。容错控制是一门应用型交叉学科，它的理论基础涉及故障诊

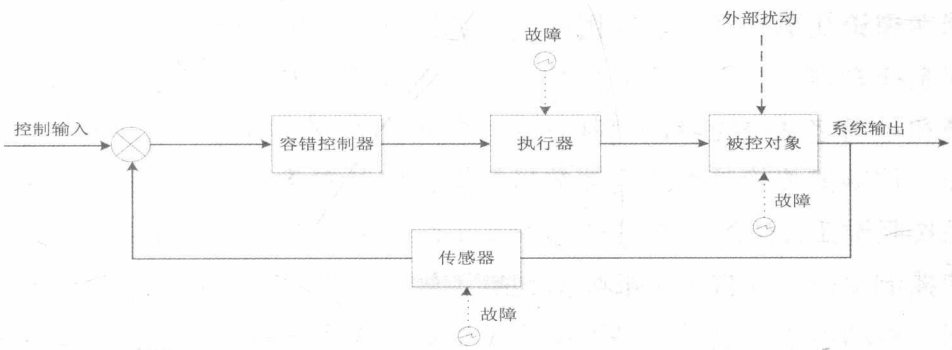


图 1.1 容错控制系统结构图

断、智能控制、信号处理、数理统计、决策论、模式识别、现代控制理论和最优化方法等各个学科的知识。目前，已有很多的容错控制技术被成功地应用于航空航天[5, 27-28]、电气自动化[29]、机械化工[30-31]、多智能体[32]、机器人[33]及核能源[34]等领域的控制系统设计中，并且得到了很好的应用和发展。此外，容错控制与鲁棒控制、自适应控制、非线性控制等也有着密切的联系，并且有大量的研究成果被应用到如双倒立摆[35]、城市交通网络[36]、船舶运输[37-38]及其他工业过程控制[39-40]等领域。

1.2.2 容错控制的研究现状

控制系统由于长时间高负荷地工作，不可避免地会出现故障。一旦发生故障，除了停运进行检修外，真正提高系统安全性和可靠性的有效措施是充分利用容错控制技术。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，容错控制的方案按照系统来划分，可以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的容错控制方法；按照故障位置不同，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，最为常用的是按照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)，如今已经成为现代容错控制研究方法分类的依据。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。

1.2.2.1 被动容错控制方法

被动容错控制的设计思想是根据预知故障来构造一个固定控制器，以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年代发展起来的鲁棒控制技术[41]，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。进一步地，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控制、同时镇定控制、完整性控制、可靠控制(鲁棒控制)等几种类型。

(1) 可靠镇定控制

可靠镇定控制方案的主要思想是利用两个或更多的补偿器来并行地镇定同一个受控对象。当其中一个或几个补偿器失效，而剩余的补偿器能够正常运行时，闭环控制系统仍然可以保持稳定，并具有期望的性能。该控制思想首先是由著名学者Siljak于1980年在文献[4]中提出

的，随后，一些学者的研究[42-45]使得可靠镇定技术基本上趋于成熟。文献[42]给出了两个动态补偿器的参数化方法，并且得到可靠镇定问题的解。针对单个被控对象，文献[43]证明了设计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。文献[45]进一步针对不是强可镇定的多变量系统，给出了利用多个动态补偿器进行可靠镇定问题的求解方法，采用多项式矩阵的互质分解方法，给出了存在可靠镇定解的充分条件。

(2) 同时镇定控制

同时镇定控制方案的主要思想是针对系统内部软件的故障，设计一个控制器去镇定一个多模型动态系统，即一个固定控制器分别镇定给定的多个线性连续时不变被控对象。近30年，同时镇定控制问题引起了许多学者的关注[46-49]。文献[46]是最早关于联立镇定问题的研究之一。进一步地，通过引入广义的采样数据保持函数，文献[47]得到了联立镇定问题有解的充分条件和控制器的构造方法，并且给出了实现线性二次型最优控制的充分条件和相应控制器的构造方法。

(3) 完整性控制

完整性控制方案的主要思想是针对执行器或传感器发生卡死、中断等断路故障，设计合适的控制器来保证闭环系统仍然能够稳定，并具有期望的性能，通常，也称此回路为具有完整性的控制回路。众所周知，控制系统中的传感器和执行器是控制系统最容易发生故障的部件，因此自从文献[1]提出完整性控制(Integral Control)的概念后，此问题在被动容错控制领域一直备受关注[50-55]。首先，文献[50]明确给出了完整性问题的清晰的数学描述，并基于LQR理论给出一种对传感器或执行器失效具有完整性的充要条件。相应地，文献[51]针对执行器中断故障的完整性问题，提出了求解静态反馈增益阵的一种极其简单的伪逆方法。进一步，基于Lyapunov稳定性理论，文献[52]得到了一种系统无论在正常和还是在故障情况下都能够稳定运行的完整性控制器设计方法。另外，在实现完整的同时，文献[53]提出的执行器中断

故障完整性求解方案也保证了系统闭环极点配置在指定区域内，实现期望的容错控制目标。

(4) 可靠控制/鲁棒控制

一般来说，可靠镇定、同时镇定和完整性控制都包括在可靠控制范畴里，该方法在系统构造思路上与鲁棒控制技术相类似，都是采用固定的控制器来保证闭环系统对特定的故障具有不敏感性。具体地说，可靠控制系统是指能够容忍系统元部件故障，并且保持闭环系统所期望的稳定性能的控制系统。因此，可靠控制与前面介绍的完整性控制相比，还需要考虑控制回路失效时，能够维护系统具有可接受的性能[57, 59]。需要指出的是冗余是所有的控制系统实现容错的必要条件，而容错控制系统的不同之处就是冗余方式的不同。容错控制系统中主要基于两种冗余方式，一种是硬件冗余，它必须依赖现有系统的同类硬件设施冗余度去获得容忍性能退化。另一类冗余方式是解析冗余，它利用控制系统中不同类部件在功能上的冗余性来实现。可靠控制一般基于硬件冗余的方式实现容错的目的，这类基于鲁棒控制技术的可靠控制器一旦被设计好，就保持固定，不需要任何故障信息调节控制器。其优点之一是在设计控制器的阶段已经考虑了所能发生的故障。也就是说，无论系统是否出现故障，都能保证系统稳定和期望的性能指标。

基于以上的分析，可靠控制不需要故障检测与诊断机制来在线获得相应的故障信息，因此可靠控制的另一个优点是易于实现且能快速容错。这也使得可靠控制在近几十年来丰富的研究成果不断出现，如参数空间设计方法[56]、矩阵Riccati方程方法[57–59]、线性矩阵不等式设计方法[60–68]等。此外，可靠控制技术已经成功应用到液位系统[66]等实际工程系统中。但随着系统复杂度的增加，随之出现的故障也会迅速增加，控制器的设计过程变得愈加复杂，而且只能针对有限个故障所设计的控制器并不完全能够保证系统的期望的性能。因此，通过在线调节或重构控制器来有效补偿故障的主动容错控制方法已成为目前研

究的热点。

1.2.2.2 主动容错控制方法

在许多实际工程系统中，传感器的造价成本相对较低，因此对传感器故障实现硬件冗余比较容易实现。但对执行器来讲，高成本或者物理受限等原因难以使系统利用执行器硬件冗余来实现故障容错。这也使得被动容错控制中的硬件冗余方式在许多实际控制系统中难以实现。相应地，设计系统中不同部件在功能上的冗余性算法来实现容错目标的解析冗余就成为了研究的焦点。主动容错控制就可以利用现有的硬件设施基于解析冗余的策略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的影响。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(FDI)子系统提供准确的故障信息，而另一部分则不需要(FDI)子系统，但是需要获知相应故障信号的参数估计信息[13]。主动容错控制方法大体上也因此可以分为两大类，即故障诊断与隔离方法和自适应容错控制方法。其中基于故障诊断与分离方法的主动容错控制方法又可以分为控制律重新调度、控制律重构和模型跟踪重组三大类。

(1) 控制律重新调度

该主动容错控制方案的主要思想是根据故障诊断机构提供的故障信息，选择针对不同的故障模式，已经离线设计好的相应容错控制器来补偿故障带来的影响[69, 70]。这种容错控制思想较为简单，比较实用而且快速，但它过于依赖故障诊断机构的精确性与实时性，故障诊断机构的任何误检、漏检都可能对控制系统产生巨大的影响。因此在采用这类控制策略时，需要对被控系统的认知程度比较深。另外，采用实时专家系统进行控制器的切换将会产生很好的效果，这类容错控制已经应用于具有多个冗余机翼的战斗机F－16的容错控制中[13, 43]。