

基于滑模理论的 故障检测与容错控制

Fault Detection and Fault-Tolerant
Control Using Sliding Modes

[英 国] 哈利姆·阿尔维 克里斯托弗·爱德华

著

[马来西亚] 陈品潭

周浩 叶慧娟 吴茂林 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014057345

TP273
728

基于滑模理论的 故障检测与容错控制

Fault Detection and Fault - Tolerant
Control Using Sliding Modes

[英国] 哈利姆·阿尔维 克里斯托弗·爱德华 著
[马来西亚] 陈品潭
周 浩 叶慧娟 吴茂林 译



TP 273
728

国防工业出版社

· 北京 ·



北航 C1742844

著作权合同登记 图字:军-2014-048号

图书在版编目(CIP)数据

基于滑模理论的故障检测与容错控制/(英)阿尔维
(Alwi, H.), (英)爱德华(Edwards, C.), (马来)陈品
潭著;周浩,叶慧娟,吴茂林译. —北京:国防工业出版
社, 2014. 6

书名原文: Fault detection and fault-tolerant
control using sliding modes

ISBN 978-7-118-09546-3

I. ①基... II. ①阿... ②爱... ③陈... ④周... ⑤叶
... ⑥吴... III. ①鲁棒控制-故障检测 ②鲁棒控制-容
错技术 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第126231号

Translation from English Language Edition:

Fault Detection and Fault-Tolerant Control Using Sliding Modes

by Halim Alwi, Christopher Edwards and Chee Pin Tan

Copyright © 2011

Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media.

All right reserved.

版权所有,侵权必究。

※

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100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 18 字数 406 千字

2014年6月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 58.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

在苛求安全性的系统中有一内在要求,这就是系统内发生严重故障或失效时也必须维持一定程度的仅仅是性能下降的状态。处理故障和失效状况的能力,最初被称为“自我修复控制”,现在通常指“容错控制”。航空航天工业应用一直是这类研究的推动力和应用重点。最近伦敦和马德里的坠机事件表明,统计学意义上的不可能事件在民航中却时有发生,重大的损失几乎完全依赖于飞行员正确的判断和技能来预防。一般来说,容错控制(FTC)方案分为被动和主动方式。被动容错控制方案不依赖任何故障信息,主要探求基本控制范式的鲁棒性。这类方案通常不太复杂,但较保守,以应对“最坏情况”的故障影响。主动容错控制器对故障做出反应,通常利用来自 FDI(故障检测与隔离)方案的信息,并引起某种形式的再配置,这代表一种更灵活的结构。早期的著作重点研究所谓的规划法,即如果某一特定故障被检测和识别出来,来自预先设定、计算好的控制器集的相应控制法则就被选定和在线切换。随后的方法就重点研究在线调试或在线控制器合成。在发生严重故障如执行器/传感器总体失效时,通常需要进行再配置。如果传感器或执行器总体失效,反馈回路内的任何调整都无法使其恢复性能,除非重新选择跟控制器耦合的执行器和传感器(即再配置)。容错控制被认为是众多研究领域的一个交叉点,越来越受到研究人员的重视。毋庸置疑,许多鲁棒控制范例已被用作容错控制器的基础。在航空航天领域上的应用上探索了滑模容错控制的固有鲁棒性。文献[128]表明,滑模控制具有替代再配置控制的潜力。

基于观测器的方法是基于模型的故障检测滤波器最盛行的一种形式。通常情况下(在线性观测器方案中)对输出估计误差,即测得的设备输出和观测器输出之间的差值,进行缩放以形成残差。在无故障运行时残差应为“零”,但出现故障时应该“放大”并发出警报。由本书作者开创的工作是故障估计滑模观测器的研发,它是通过对“等效输出误差注入”(它代表非线性输出误差注入维持滑动所采用的平均值)进行适当的缩放和滤波实现的。这是滑模观测器的独有特性,它来源于这样一个事实,即滑动的引入迫使观测器的输出准确跟踪设备测量值。即使在执行器故障时,滑动模型也会迫使观测器的输出完美地跟踪测量值,准确的状态估计仍是可能的。故障重构信号的计算并不依据基于输出估计误差(滑行运动时为零)的残差的计算,而是根据等效输出误差注入信号。因此准确的状态估计和故障估计原则上能够同时由一个滑模观测器实现。这与传统的 FDI 线性观测器状况截然不同,(传统线性观测器)要求鲁棒性与状态估计、故障检测灵敏度(基于输出误差的残差)之间的权衡。鲁棒状态估计,同时保持故障灵敏度,是滑模观测器的独特属性。

本书涵盖滑模容错控制的理论发展和实现。本书一个创新之处在于考虑了基于积分作用和模型参考框架的滑模容错控制分配方案。不同于文献中的许多控制分配方案,本

书的主要贡献之一一是使用了执行器有效性水平,以在发生故障/失效时将控制信号重新分配到其他正常的执行器。从理论的角度对该方案进行了严谨的稳定性分析和过程设计。在无法获得执行机构有效性水平信息的情况下,也分析了一个固定的控制分配结构。提出的方案表明,即便出现故障甚至某些特定的执行器总体失效也无需重新配置控制器就可直接处理。本书后面的章节给出了代尔夫特大学六自由度 SIMONA 飞行模拟器(GARTEUR AG16 计划的一部分)实时硬件实现结果。

第 1 章概述了故障诊断与容错控制领域的最新进展,指明了后续章节的理论研讨分析的目的。

第 2 章首先给出故障和失效的定义,简要讨论了执行器和传感器中不同类型的故障和失效,并辅以具体的飞行器案例。本章介绍容错控制的概念,给出不同 FTC 和 FDI 研究领域的总体概述,对文献中 FTC 和 FDI 方案涉及的主要概念、策略以及优缺点分别进行讨论。

第 3 章简要介绍了滑模控制的概念,并检验其特性。本章还强调了滑模控制应用于 FTC 和 FDI 领域的优势。用单摆的例子对概念加以介绍,讨论多输入系统的单位向量法、滑动面设计和跟踪需求(积分作用和基于参考模型的跟踪法)。最后讨论了滑模控制应用于 FTC 和 FDI 领域的优势和目的。

第 4 章考虑滑模应用于观测器设计问题。概述某一特定类型的滑模观测器的发展历程,该观测器的应用贯穿全书。本章将展示如何利用和等效注入信号(保持滑动的必要条件)相关的特性来重构执行器和传感器故障(可建模为设备输入和输出的人为干扰)。提出基于线性矩阵不等式(LMI)的设计方法,这些方法探求与观测器增益的选择有关的所有自由度。本章介绍了可重构故障的并对干扰和不确定性(可导致观测器所设计的模型和实际模型的失配进而影响重构质量)具有鲁棒性的滑模观测器,该设计方法起初是针对执行器故障而提出的。本章还对滑模观测器方案与文献中经常提到的传统线性未知输入观测器进行了比较。

第 5 章检验了第 4 章中提出的观测器方案的可行性假设,这些假设实际上是传递函数矩阵的最小相位约束,传函矩阵将未知故障信号和测量值联系起来。本章探讨了创建级联观测器结构来消除这些限制。级联结构的组成部分将构成第 4 章中的滑模观测器,通过给出明确的构建算法以确保总体方案仍可以准确地估计故障,即便在故障和测量值之间的差异度大于或等于 2 的情况下。本章还将描述这些方案相比于传统的线性方法(特别是 UIO(奇异值分解))的优势。

第 6 章重点关注传感器故障。在不同的构想中,对所测得的输出信号进行滤波,得到“虚构系统”,此虚构系统中传感器故障表现为“执行器故障”。因此,前面章节中提到的执行器故障重构思路,就可应用到虚构系统以重构传感器故障。其结果也将被延用到设备不稳定的情形。

第 7 章考虑在实验用起重设备和小型直流电动机上对传感器故障重构方案(对 FDI 和 FTC)进行实时实现。这些设备为第 6 章提出的思路提供了廉价、安全、实用的演示模型。使用 MATLAB[®]及 dSPACE[®]已经实现了数据收集和(后续的)控制器实现。由在线滑模 FDI 方案得到的传感器故障估计,已被用于校正传感器的测量输出。“虚拟传感器”用于控制算法中以形成输出跟踪误差信号,对该误差信号进行处理后产生容错控制信号。

第8章提出了一种新的实现再配置控制的滑模结构。其控制器基于状态反馈方案,当检测到故障开始时,该方案中的非线性单位矢量可以自适应地增加。该方案被应用于基准飞行器问题。与先前已在此模型上实现的其他容错控制器相比,本书中提出的控制器更简单,还可工作在完全游离飞行包线的条件下。然而该控制器却不能直接处理执行器总体失效。本章的后半部分,描述了在控制法则计算之前使用传感器故障重构方案来校正故障测量,进而产生了容错控制,同时对所得方案进行闭环分析。最后介绍该方法应用到基准飞行器问题的一个实例。

第9章提出了容错控制在线滑模控制分配方案。当发生故障或失效时,控制分配方案根据执行器的有效性水平向其他的执行器重新分配控制信号。本章分析了滑模控制分配方案,并确定了维持滑动所需的非线性增益。分配方案显示,无需重新配置控制器就可以直接处理故障甚至特定的执行器总体失效。

第10章介绍了具有在线控制分配功能的自适应模型参考滑模容错控制方案。当出现故障或失效时,控制分配方案根据执行器的有效性水平给其余的执行器重新分配控制信号。同时,自适应非线性增益和参考模型为控制器提供在线调试。本章给出了模型参考方案的稳定性分析,该方案已经过 ADMIRE(自动诊断维护信息检索)飞机模型的线性化测试,这表明多种故障甚至执行器总体失效都能加以处理。

第11章介绍了第9章中提出的滑模分配方案的实现,该方案是在荷兰代尔夫特理工大学的六自由度飞行模拟器 SIMONA 上实现的。第9章提出的控制器(基于C语言)在与 SIMONA 相连的飞行控制计算机上运行。最后探讨了实时实现问题,并对一系列产生于 AG16 GARTEUR 基准的故障情形进行测试和讨论。

第12章介绍了航班 ELAL1862 庇基莫米尔坠机事件,它是 GARTEUR AG16 的研究案例之一。本章的研究论证了“飞行测试”和 GARTEUR AG16 最终研讨会(2007年11月代尔夫特理工大学)的成果。该成果代表了滑模控制器在 SIMONA(由经验丰富的试飞员飞行)上的成功实时实现,以及控制器评估的实时实现。

最后,第13章做了结论性的评价,并对今后的工作方向提出建议。

莱斯特,英国
莱斯特,英国
班达尔威,马来西亚

哈利姆·阿尔维(Halim Alwi)
克里斯托弗·爱德华(Christopher Edwards)
陈品潭(Chee Pin Tan)

致 谢

本书内容是3位作者的研究成果,同时 Jan Albert (Bob) Mulder 教授(航天工程系控制与仿真研究室)和 Ir. Olaf Stroosma (荷兰代尔夫特理工大学的仿真、运动和导航(SIMONA)国际研究所)对第11和12章做出的贡献也非常显著。如果不是 Mulder 教授提议将 SIMONA 模拟器用于 GARTEUR FM - AG16^① 项目,就不会有第11和12章中讨论的结果。Ir. Stroosma 的技术专长(连接控制器代码和 SIMONA 平台)又让该结果得以实现。我们感谢他们的帮助。

除了用于测试控制器的硬件平台,基准飞机模型(作为模拟器的基础)是由许多研究者耗费大量时间完成,研究者包括 Hafid Smaili 和 Jan Breeman(来自荷兰国家航天实验室)以及 Andres Marcos 博士(之前在美国明尼苏达大学,现在在西班牙马德里 Deimos 的空间站)。为基准模型的发展做出贡献的其他人包括 Coen van der Linden 和 Thomas Lombaerts 博士(代尔夫特理工大学), Gary Balas 教授(明尼苏达大学), David Breeds (QinetiQ 公司)和 Runham Stuart (DSTL)。我们要感谢所有参与 GARTEUR FM - AG16 容错控制研究团队的人。感谢他们对 AG16 项目的支持和贡献。

笔者感谢所有为本书提供图片和插图的合作者,插图仍保留版权。

对工程和物理科学研究理事会(EPSRC)资助的两笔赠款表示衷心的感谢,这些款项帮助我们完成本书的大部分工作。

^① 致力于容错控制研究方向的欧洲飞行力学研究小组 FM - AG(16)成立于2004年,2008年任务完成后解散。它代表了一种广泛的合作,涉及来自工业界、大学和研究机构的13个欧洲合作伙伴,这些机构都是由欧洲航空技术研究集团赞助。

符号表

缩略词	
air, ail	内侧右副翼,内侧左副翼
aor, aol	外侧右副翼,外侧左副翼
cmd	指令信号
ru, rl	上方向舵,下方向舵
sp	扰流板
6 - DOF	六自由度
ATC	航空管制(航空控制塔台)
CA	控制分配
CFIT	地形控制飞行
CG	重心
DFDR	数字飞行记录器
DI	动态逆
DME	距离测量装置
EPR	引擎压缩比
FBW	线传飞行控制
FDI	故障检测与隔离
FPA	航迹角
FTC	容错控制
GARTEUR	欧洲航空科技集团
GS	滑翔道,滑翔斜率
IAS	指示空速
ILS	仪表着陆系统
IMM	交互式多重模型
KIAS	节表指示空速
KLM	荷兰皇家航空公司
LMI	线性矩阵不等式
LOC	定位信标捕获
LPV	线性变参数
LTI/LTV	线性时不变/变
MAC	平均气动弦长
MCT	最大连续推力

MMST	多重模型转换
MPC	模型预测控制
MRAC	模型参考自适应控制
NLR	荷兰国家航空实验室
PIM	伪逆法
ROV	远程操作运载器
SIMONA	仿真,运动,导航(飞行模拟器)
SMC	滑模控制
s. p. d.	对称正定
TAS	真空速
VOR	甚高频全向信标

数学符号

p, q, r	滚转速率,俯仰速率,偏航速率 (rad/s)
V_{tas}	真空速 (m/s)
α, β	攻角,侧滑角 (rad)
φ, θ, ψ	滚转角,俯仰角,偏航角 (rad)
h_e, x_e, y_e	沿地球 x, y, z 轴的几何位置(m)
$\ \cdot \ $	欧几里得范数或诱导的谱范数 $\bar{\lambda}(\cdot), \underline{\lambda}(\cdot)$
$\lambda(\cdot)$	特征值
$\bar{\lambda}(\cdot), \underline{\lambda}(\cdot)$	最大特征值,最小特征值
Γ	积分作用设计矩阵
$\nu(t)$	虚拟控制输入和伪控制
A^T	矩阵 A 的转置
\mathbb{C}	复数域
\mathbb{C}_-	负实部复数集
D, E	鲁棒滑模观测器增益
F, G	前馈控制矩阵,反馈控制矩阵
$G(s)$	传递函数
G_l, G_n	滑模观测器增益矩阵
J	成本函数
K	执行器故障/失效分布矩阵
κ	滑模设计矩阵
L	滑模观测器设计矩阵
L_x	滑模控制设计矩阵
M	执行器故障分布矩阵(观测器)
N	传感器故障分布矩阵
$\mathcal{N}(A)$	矩阵 A 的零空间
Q	不确定性分布矩阵

Q, R	线性二次调节器/线性矩阵不等式加权矩阵
\mathcal{R}	二维矩形
\mathbb{R}	实数域
\mathbb{R}_+	严格的正实数集
$\operatorname{Re}(\cdot)$	复数的实部
s	滑模切换函数
s	拉普拉斯变量
$\operatorname{sgn}(\cdot)$	符号函数
S	滑模矩阵
S	滑动面
V	李雅普诺夫函数
\mathcal{E}_r	截断椭球
V, W	加权矩阵
W	执行器有效性分布矩阵
\mathcal{W}	允许的故障集
X	线性矩阵不等式变量

目 录

第1章 引言	1
1.1 容错控制系统的研究目的	2
1.2 容错控制(FTC)和故障检测与隔离(FDI)的滑动模型	4
第2章 容错控制和故障检测与隔离	5
2.1 故障和失效定义	5
2.2 容错控制概述	7
2.3 冗余控制	9
2.4 容错控制	11
2.4.1 自适应控制	11
2.4.2 模型转换或合成	12
2.4.3 预测	13
2.4.4 控制信号再分配	13
2.4.5 鲁棒控制(\mathcal{H}_∞ 控制)	15
2.5 故障检测与隔离	16
2.5.1 基于残差的 FDI	16
2.5.2 故障识别和重构	17
2.5.3 参数估计	18
2.5.4 非基于模型的 FDI(智能 FDI)	19
2.6 小结	19
第3章 一阶滑模概念	20
3.1 滑模理论简介	20
3.1.1 规范形式	20
3.1.2 滑模特性	22
3.2 简单实例:单摆	23
3.2.1 仿真与结果	25
3.2.2 实用控制法则	25
3.3 单位向量法	28
3.3.1 闭环系统的稳定性分析	29
3.3.2 单位向量伪滑动项	30

3.4	滑动面设计	31
3.4.1	二次最小化	31
3.5	跟踪控制器设计	32
3.5.1	积分作用法	32
3.5.2	模型参考法	35
3.6	容错控制滑动模型	37
3.7	小结	38
3.8	注释和参考文献	38
第 4 章	故障检测滑模观测器	39
4.1	滑模观测器简介	39
4.2	Utkin 观测器	39
4.2.1	滑动运动的特性	41
4.2.2	实例	42
4.2.3	抗扰性能	45
4.2.4	平滑其间断性的伪滑模控制	47
4.2.5	插入线性项的修正	48
4.3	故障重构 Edwards - Spurgeon 观测器	50
4.3.1	观测器构想及稳定性分析	51
4.3.2	执行器故障重构	54
4.4	线性矩阵不等式(LMI)设计方法	55
4.4.1	软件实现	56
4.5	采用滑模观测器的鲁棒故障重构	57
4.5.1	鲁棒执行器故障重构	60
4.5.2	实例:垂直起降飞机模型	64
4.6	观测器变型	65
4.7	与 UIO(线性未知输入观测器)的比较	66
4.7.1	基于起重系统的比较研究	71
4.8	小结	75
4.9	注释与参考文献	75
第 5 章	采用观测器串联的鲁棒故障重构	76
5.1	观测器串联方案简介	76
5.2	鲁棒故障重构方案	76
5.2.1	设计算法	77
5.3	重构条件	87
5.3.1	总体坐标变换	87
5.3.2	定理 5.2 的证明	92
5.3.3	降阶滑模的稳定性	94

5.4	设计实例	97
5.4.1	观测器设计	98
5.4.2	仿真结果	100
5.5	小结	102
5.6	注释与参考文献	102
第6章	传感器故障重构	103
6.1	传感器故障重构简介	103
6.2	传感器故障重构方案	103
6.2.1	重构准备	103
6.2.2	稳态条件下的故障重构	104
6.2.3	动态传感器故障重构	105
6.2.4	不稳定系统的故障重构	108
6.3	鲁棒传感器故障重构	117
6.3.1	实例	119
6.4	非最小相位系统中的故障重构	121
6.4.1	主要结果	124
6.4.2	实例	129
6.5	小结	134
6.6	注释与参考文献	134
第7章	案例研究:传感器故障重构方案的实现	135
7.1	起重系统中的应用	135
7.1.1	起重系统的建模	136
7.1.2	实现	137
7.2	直流电动机中的应用	140
7.2.1	准备工作	141
7.2.2	关于电动机设置的说明	142
7.2.3	建模	142
7.2.4	观测器设计	144
7.2.5	实现	144
7.2.6	结果	145
7.3	小结	149
7.4	注释与参考文献	149
第8章	自适应滑模容错控制	150
8.1	自适应滑模容错控制简介	150
8.2	执行器容错控制	150
8.2.1	滑模控制器设计	152

8.2.2	滑模超平面设计	157
8.3	仿真结果	159
8.3.1	无故障仿真	160
8.3.2	有效性增益的变化	161
8.3.3	升降舵总体失效仿真	162
8.3.4	骤风条件下的升降舵总体失效	164
8.3.5	有效性和升降舵失效的综合损失	165
8.4	传感器容错控制	168
8.4.1	准备工作	168
8.4.2	闭环分析	170
8.5	B747 的鲁棒传感器故障重构	173
8.6	传感器容错控制仿真结果	174
8.6.1	无故障仿真	174
8.6.2	故障仿真:FDI 关闭	176
8.6.3	故障仿真:FDI 开启	176
8.6.4	噪声条件下传感器故障仿真	177
8.6.5	阈值选择	178
8.7	小结	178
8.8	注释与参考文献	178
第 9 章	基于在线控制分配的容错控制	180
9.1	简介	180
9.2	控制器设计	180
9.2.1	问题描述	181
9.2.2	稳定性分析	185
9.2.3	滑模控制法则	186
9.3	不完善故障重构的影响分析	187
9.4	滑模设计问题	190
9.5	ADMIRE 仿真	191
9.5.1	控制器设计	191
9.5.2	利用观测器估计执行器故障	193
9.5.3	ADMIRE:仿真结果	194
9.6	小结	197
9.7	注释与参考文献	197
第 10 章	模型参考滑模容错控制	198
10.1	模型参考滑模容错控制简介	198
10.2	在线控制分配	199
10.2.1	稳定性分析	202

10.2.2	滑模控制准则	203
10.3	固定控制分配	206
10.3.1	滑模控制准则	208
10.4	自适应参考模型	211
10.5	ADMIRE 仿真:在线控制分配	211
10.5.1	控制器设计	211
10.5.2	采用最小二乘法进行执行器故障估计	213
10.5.3	仿真结果	213
10.6	ADMIRE 仿真:固定控制分配	215
10.6.1	控制器设计	215
10.6.2	仿真结果	215
10.7	小结	217
10.8	注释与参考文献	217
第 11 章	SIMONA 实现结果	219
11.1	简介	219
11.2	试验设备(SIMONA)	219
11.2.1	SIMONA 仿真器	219
11.2.2	基准 V2.2 - FTLAB747 V6.5/7.1/2006b	220
11.3	控制器设计	221
11.3.1	横向控制器设计	223
11.3.2	纵向控制器设计	224
11.4	SIMONA 实现	224
11.5	应用结果分析	226
11.5.1	无故障响应	226
11.5.2	执行器有效性水平	226
11.5.3	水平稳定翼失稳	226
11.5.4	升降舵偏移阻塞	229
11.5.5	副翼偏移阻塞	229
11.5.6	方向舵脱离	229
11.5.7	方向舵失控	229
11.6	小结	234
11.7	注释与参考文献	234
第 12 章	案例分析:ELAL Bijlmermeer 事件	235
12.1	简介	235
12.2	ELAL 1862 事件	235
12.3	ELAL 1862 飞机损伤分析	238
12.3.1	ELAL 1862 飞机可控性和性能	239

12.4	控制器设计	241
12.4.1	横向控制器设计	242
12.4.2	纵向控制器设计	243
12.5	SIMONA 实现	245
12.5.1	ILS (仪表着陆系统)着陆	245
12.6	飞行员操作的 SIMONA 仿真结果	247
12.6.1	经典控制器	248
12.6.2	SMC 控制器	251
12.7	小结	255
12.8	注释与参考文献	256
第 13 章	结束语	257
参考文献	258

第 1 章 引 言

过去的 50 年中,控制方法论的应用从简单的机械反馈结构到复杂先进的电子装置,降低了高性能、非稳定系统的费用并优化了控制效果。某些控制方法,如 PID(比例 - 积分 - 微分)控制器^[12]和卡尔曼滤波器^[237, 268]在工业上已得到广泛应用并获成功。其他复杂的控制方法在工业中并未被如此广泛应用。

过去几十年中受到广泛关注的一些策略方法是多变量鲁棒控制和自适应控制方法(例见文献[175, 216, 228, 297])。安全性苛求系统(如飞行器、化工设施以及核能设施)要求控制系统能应对设备运行条件下的各种变化,这一类优化性能需求促成了上述方法受到广泛关注。然而一些无法预期的情形或罕见的异常状况可能导致控制器瞬间过载、性能和稳定性下降等情况的发生。这些异常状况的具体体现就是故障、失效和系统损毁,这在设计过程中通常不可能考虑到。

当异常状况发生时,为保证系统特别是安全性苛求系统(化工设施及核能设施等)和造价昂贵的自主系统(如卫星和水下远程操作运载器(ROV))达到一定的性能和稳定性水平,需要采取不同的控制策略而不是仅仅具有鲁棒控制性能和自适应控制性能的控制(其只保证通常情况下系统的性能和稳定性)。需要这种控制策略的一个例子是在飞行过程中执行器/传感器发生故障或失效以及结构损坏时如何提升飞行器耐受性。在这种状况下,飞行器需要采取某些紧急策略以使飞行员将飞机安全着陆。这个挑战催生了一种在诸多文献中称为容错控制(FTC)的策略。

许多不同的控制模式被应用于容错控制(FTC)问题。表 1.1 列出了现有的一些控制方法,同时表 1.2 给出了采用容错控制的不同系统。本书将以飞行器系统为例阐述安全性苛求系统采用容错控制(FTC)的效果。

表 1.1 容错控制(FTC)中的方法列举(选自文献[294])

设计方法	参考文献
参考模型适应控制	[142, 143, 230, 292]
自适应控制	[14, 76, 143]
多重模型转换	[10, 30, 41, 109, 111, 148, 195, 196, 253]
交互式的多重模型	[149, 170, 214, 284, 290]
增益规划	[165]
线性变参数系统	[16, 105, 182, 185, 215, 223, 224, 273]
模型预测控制	[176 - 178, 220]
伪逆控制	[106, 132, 187, 206, 284]
控制分配	[29, 31, 37 - 39, 63, 89, 122, 127, 222]
动态逆	[137, 138, 144, 172, 249, 250]
\mathcal{H}_∞ 等鲁棒控制	[178, 228]
滑模控制	[85, 127, 256]