

著作精品译丛
无人机系列

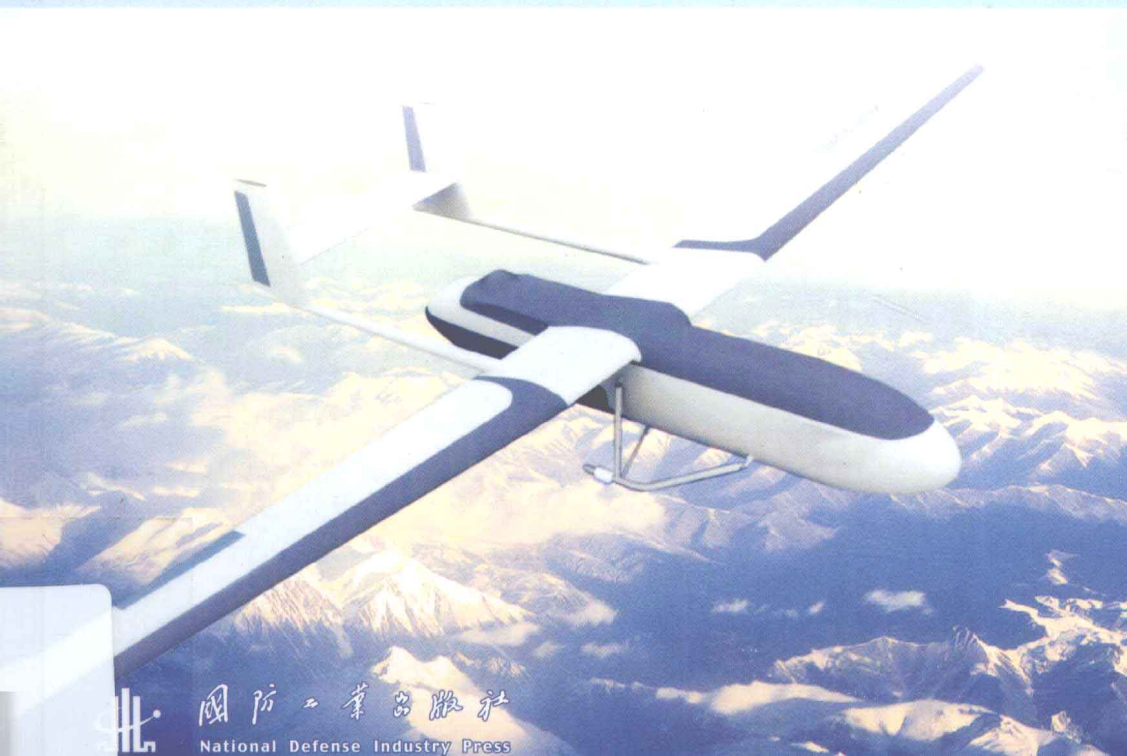
 Springer

Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems

Practical Methods for Small Unmanned Aerial Vehicles

容错飞行控制与导航系统 ——小型无人机实用方法

【瑞士】Guillaume J.J. Ducard 著 陈自力 谢志刚 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书由总装备部装备科技译著出版基金资助出版

容错飞行控制与导航系统

——小型无人机实用方法

**Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems:
Practical Methods for Small Unmanned Aerial Vehicles**

[瑞士] Guillaume J.J. Ducard 著

陈自力 谢志刚 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字:军-2011-021号

图书在版编目(CIP)数据

容错飞行控制与导航系统——小型无人机实用方法/(瑞士)迪卡德(Ducard, G. J. J.)著;陈自力,谢志刚译.—北京:国防工业出版社,2012.5
书名原文:Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems
ISBN 978-7-118-07723-0

I. ①容… II. ①迪… ②陈… ③谢… III. ①无人驾驶飞机—容错系统—飞行控制系统
②无人驾驶飞机—容错系统—导航系统 IV. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第063324号

Translation from the English language edition:

“Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems” by G.J.J. Ducard (edition: 1;
year of publication: 2009); ISBN 978-1-84882-560-4

Copyright©2009 Springer-Verlag London, United Kingdom
as a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

版权所有,侵权必究。

容错飞行控制与导航系统——小型无人机实用方法 [瑞士] Guillaume J. J. Ducard 著 陈自力 谢志刚 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路23号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京奥鑫印刷厂

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 17

字 数 259千字

版 印 次 2012年5月第1版第1次印刷

印 数 1—3000册

定 价 78.00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

译者序

容错飞行控制是一门新兴的交叉技术,它将自适应控制技术、非线性控制技术、智能控制技术、鲁棒控制技术等先进控制理论与容错控制方法相结合,在飞机某些部件发生故障导致性能指标降低(但可接受)的情况下,按照新的任务规划进行飞行控制,实现安全飞行,因而具有很强的实际应用价值。在无人机先进飞行控制系统设计方面,正在受到国内外研究机构和学者的高度重视。

由于无人机飞行任务的特殊性,客观上需要采用容错飞行控制技术来提高系统的安全性和任务可靠性。在飞行过程中,一旦发生故障或者遭受战斗损伤而未及时采取有效措施,将会造成不可挽回的损失。无人机容错飞行控制系统能够快速、准确地检测、隔离故障,采取重构策略,确保系统能继续安全飞行、或完成一定的任务飞行。在可以预见的将来,容错飞行控制技术在无人机飞行控制与导航领域将会得到更广泛的应用。

本书以作者长期从事这一领域的理论研究为背景,结合多年在无人机导航与控制系统设计的工作实践,参考相关领域的最新研究工作,对容错飞行控制理论的发展、最新技术以及工程应用进行了系统、全面的论述。全书内容由浅入深、循序渐进、结合工程实际,理论性、实用性都很强,使读者能够迅速掌握容错飞行控制的基本原理、关键技术及其应用。本书是

作者多年研究成果的积累,体现了作者在该领域较高的学术水平,是一本容错飞行控制方面不可多得的专业书籍。

全书由陈自力教授和谢志刚翻译,朱安时参与了本书的校对工作。由于译者水平有限,书中涉及较多新的专业词汇及新的概念,译文若有不当之处,恳请读者指正。

陈自力
2012年1月

前言

本书是基于我在瑞士联邦技术学院测试与控制实验室的无人机 (UAV) 研究组过去几年的部分研究成果编写的。无人机研究组是 H. P. Geering 教授于 1986 年开创的。起初研究工作主要集中在导航算法开发和鲁棒控制技术在无人直升机上的应用。2006 年, 我的同事 Markus Möckli 成功完成了飞机自主特技飞行实验。2007 年, Marco Gerig 利用一架小型自主直升机, 完成了特技飞行, 验证了导航与控制算法。

与此同时, 我在 2007 年完成了博士论文研究, 开始了针对小型无人机设计容错飞行控制和导航系统的新课题研究。研究工作主要集中在飞机传感器、作动器的故障检测与隔离技术、飞行控制律和飞行航路点自适应重构开发方法。控制算法设计的主要要求是: 适度的复杂性、实时性和模块化。

我首先感谢 Hans Peter Geering 教授, 他为我提供了良好的工作环境, 指导我有机会开展本书所描述内容的研究, 非常感谢他在各方面对我不断的支持。

我同样感谢我们的前任秘书 Brigitte Rohrbach, 她完成了本书部分文稿的编辑并给予我很多方面的帮助和全过程的友好支持。

同样感谢 Oliver Jackson, Sorin Moosdorf, Aislinn Bunning, Michael Johnson 教授和 Mike Grimble 教授给予的帮助。

最后, 还要感谢我的父母、兄弟, 他们以各种方式、在各个方面给予了我长期的支持和帮助。

Guillaume Ducard

ETH 苏黎世, 瑞士

Spring 出版社

2009 年

缩写词

本书所用缩写表

EKF	扩展卡尔曼滤波器	NFZ	禁飞区
EMMAE	扩展多模型自适应估计	PD	比例微分
FDI	故障检测与隔离	PI	比例积分
KF	卡尔曼滤波器	PID	比例积分微分
LPV	线性参数变化	PRM	概率路线图
MMAE	多模型自适应估计	RLS	递推最小二乘
MMST	多模型切换和调整	SLS	序列最小二乘
MPC	模型预测控制	SPF	西格玛点滤波器
MRAC	模型参考自适应控制	SVs	奇异值
MSLS	改进序列最小二乘	UAV	无人机
NASA	国家航空航天局	UKF	无迹卡尔曼滤波器
NDI	非线性动态逆		

目录

第 1 章 引言	1
1.1 无人机容错控制的必要性	1
1.2 本书结构	2
第 2 章 回顾 (基本概念)	3
2.1 容错系统定义	3
2.1.1 故障	3
2.1.2 失效	5
2.1.3 容错控制系统	5
2.1.4 应用中故障和失效的应对	6
2.2 重构控制系统设计面临的挑战	6
2.2.1 可靠的 FDI 系统设计困难	6
2.2.2 飞行控制器与 FDI 系统之间的相互作用	7
2.2.3 其它应用挑战	7
2.3 FDI 系统的不同实现手段	7
2.3.1 FDI 系统滤波器设计发展趋势	8
2.3.2 主动故障检测发展趋势	9
2.4 飞行控制系统的不同实现方法	10
2.5 容错飞行控制系统设计技术	10
2.5.1 多模型技术	11

2.5.2	控制分配技术	12
2.5.3	模型参考自适应控制	13
2.5.4	其它重构控制方法	14
2.6	可重构导航系统	15
2.7	实际飞行验证	15
	参考文献	16
第 3 章	飞机非线性模型	29
3.1	坐标系的定义	29
3.1.1	导航坐标系 (参考坐标系)	29
3.1.2	机体坐标系	29
3.1.3	欧拉角	29
3.1.4	方向余弦矩阵	31
3.1.5	四元数表示	32
3.1.6	气流坐标系	32
3.2	风扰动	34
3.3	低空大气模型	35
3.4	刚体运动方程	35
3.4.1	作用力方程	35
3.4.2	力矩方程	38
3.5	发动机	38
3.5.1	发动机转速	38
3.5.2	推力	39
3.6	空气动力模型	39
3.6.1	升力	39
3.6.2	侧向力	39
3.6.3	阻力	39
3.7	气动力矩模型	40
3.7.1	滚转力矩 L^b	40
3.7.2	俯仰力矩 M^b	41
3.7.3	偏航力矩 N^b	41
3.8	飞机非线性模型总结	41
	参考文献	42

第 4 章 非线性故障检测与隔离系统	43
4.1 引言	43
4.2 采用 MMAE 方法的 FDI	44
4.2.1 MMAE 方法的优点	44
4.2.2 MMAE 方法的局限性	45
4.2.3 MMAE 方法的新扩展 —— EMMAE 方法	45
4.3 基于 EMMAE 方法的一种新 FDI 策略	46
4.3.1 作动器故障建模	46
4.3.2 EMMAE 方法	46
4.4 飞机作动器结构和非线性动力学特性	49
4.4.1 飞机结构	49
4.4.2 飞机非线性动力学特性	50
4.5 扩展卡尔曼滤波器设计	51
4.5.1 扩展卡尔曼滤波器方程	51
4.5.2 无故障情形扩展卡尔曼滤波器设计	55
4.5.3 利用故障作动器参数 δ_i 增广状态向量	56
4.5.4 副翼 1 故障下的扩展卡尔曼滤波器设计	57
4.6 作动器故障隔离	59
4.6.1 假设检验	59
4.6.2 高斯条件概率密度	61
4.7 无监督系统的 EMMAE-FDI 仿真结果	63
4.7.1 仿真条件	63
4.7.2 故障情形	64
4.7.3 仿真结果分析	65
4.7.4 首次应用 EMMAE-FDI 系统说明	66
4.8 EMMAE-FDI 系统改进	67
4.8.1 主动监督模块 (监督器) 设计	67
4.8.2 带有监督系统的 EMMAE-FDI 性能	69
4.9 一个真实的飞行过程	71
4.9.1 无风、作动器无故障情况	72
4.9.2 有风、作动器无故障情况	75
4.9.3 强风、作动器故障并有主动监督模块情况	77

4.10	EMMAE-FDI 系统增加额外滤波环节	77
4.11	同时多故障的检测与隔离	80
4.12	利用 EMMAE-FDI 的可重构飞行控制系统	82
4.12.1	控制分配	82
4.12.2	有监督模块控制分配器的优点	82
4.13	EMMAE-FDI 的计算复杂性	83
4.14	结论	83
	参考文献	84
第 5 章	控制分配	87
5.1	控制分配简介	87
5.2	可重构飞行控制系统	88
5.3	副翼和升降舵行为模式	92
5.3.1	理想模式: 模式 0	92
5.3.2	单作动器故障模式: 模式 1 到模式 4	95
5.4	多故障	97
5.4.1	同时两个故障: 模式 5	97
5.4.2	同时故障多于两个: 模式 6 和模式 7	97
5.5	方法扩展	97
5.6	计算量分析	97
5.7	仿真结果	98
5.7.1	控制分配器对控制器的影响	100
5.7.2	控制分配计算量比较	101
5.8	结论	102
	参考文献	103
第 6 章	非线性控制设计	104
6.1	动态逆的概念	104
6.1.1	动态逆控制器推导	104
6.1.2	一般情形	105
6.1.3	可产生期望动态输出 $\dot{y}_{des}(t)$ 的信号表达式	105

6.2	理想的或完美的动态逆	106
6.3	期望动态特性的控制器结构	107
6.3.1	PI 控制器的选择	107
6.3.2	控制信号 y_c 的前反馈	109
6.3.3	开环增益	110
6.3.4	控制前反馈增益 f_c 的设计规则	111
6.3.5	控制信号 \dot{y}_c 的前向反馈	113
6.3.6	参考模型和显式模型跟踪	113
6.3.7	积分器防饱和	114
	参考文献	115

第 7 章 纵向运动的自动驾驶 117

7.1	纵向运动模式分析方程	117
7.1.1	俯仰速率微分方程	118
7.1.2	空速微分方程	118
7.1.3	攻角微分方程	119
7.1.4	俯仰角微分方程	119
7.1.5	纵向模式矩阵	119
7.2	飞机系统纵向动态模式	120
7.2.1	短周期模式	120
7.2.2	长周期模式	120
7.3	线性纵向模型验证	121
7.3.1	升降舵控制命令扰动	121
7.3.2	发动机转速 n_{mot} 的扰动	121
7.4	不确定动态逆的稳定性分析	124
7.4.1	不确定模型参数和测量数据	125
7.4.2	不确定动态逆的线性建模	125
7.4.3	纵向运动的模型简化	126
7.4.4	俯仰轴线性模型和动态逆过程	127
7.4.5	矩阵 A_{DI} 中不确定项的估计	131
7.4.6	不确定性对动态逆的影响	133
7.4.7	不确定模型参数的数学选择	134

7.5	纵向运动通用控制结构	139
7.5.1	非线性变换 T_3	140
7.5.2	非线性变换 T_2	140
7.5.3	非线性变换 T_1	140
7.6	俯仰角速率控制	140
7.6.1	稳定性/鲁棒性要求	141
7.6.2	俯仰角速率闭环传递函数	145
7.7	攻角控制回路	147
7.7.1	开环和闭环增益	148
7.7.2	结果说明	148
7.8	爬升率控制器	153
7.8.1	开环增益	155
7.8.2	闭环增益	156
7.9	高度控制器	157
7.9.1	开环增益	158
7.9.2	闭环增益	159
7.9.3	高度控制器性能	160
7.10	空速控制器	161
7.10.1	本节内容	161
7.10.2	目的	161
7.10.3	发动机转速	163
7.10.4	推力	163
7.10.5	非线性变换	163
7.10.6	空速期望动态特性控制器	165
7.10.7	仿真结果	165
	参考文献	166

第 8 章 侧向运动的自动驾驶 169

8.1	侧向运动方程分析	169
8.1.1	滚转角速率 p 的微分方程	170
8.1.2	偏航角速率 r 的微分方程	170
8.1.3	侧滑角 β 的微分方程	171
8.1.4	滚转角 ϕ 的微分方程	171

8.1.5	侧向模型矩阵	171
8.2	侧向运动的动态模式	172
8.2.1	“荷兰”滚转模式	173
8.2.2	滚转沉降模式	173
8.2.3	螺旋模式	173
8.3	线性侧向模型验证	173
8.3.1	副翼控制扰动	173
8.3.2	方向舵控制扰动	174
8.3.3	不同工作点的线性化	175
8.4	不确定动态逆的稳定性分析	176
8.4.1	模型参数和测量数据的不确定性	176
8.4.2	不确定动态逆建模	177
8.4.3	侧向运动的线性表示	178
8.4.4	侧向模型中矩阵 A_{DI} 、 B_{DI} 和 C_{DI} 的定义	178
8.4.5	从 p_{des} 到 p_{meas} 通道的稳定性	180
8.4.6	从 \dot{r}_{des} 到 r_{meas} 通道的稳定性	183
8.5	滚转和偏航角速率控制器	184
8.5.1	控制器结构	186
8.5.2	滚转和偏航角速率控制器开环分析	186
8.5.3	频域稳定性和鲁棒性能界	187
8.6	协同转弯控制器	189
8.6.1	侧滑角控制器	189
8.6.2	倾斜角期望的动态特性	189
8.6.3	侧滑角期望的动态特性	190
8.6.4	仿真结果	190
	参考文献	192

第 9 章 可重构导航系统 193

9.1	引言	193
9.2	侧向导航系统	194
9.2.1	航路跟踪侧向导航控制律	194
9.2.2	侧向导航控制律的特点	196
9.2.3	方法的不足点	196

9.2.4	L_1 的选择	196
9.2.5	航路规划的目的	197
9.3	固定航路点跟踪	197
9.3.1	参考点 P 的计算	197
9.3.2	线段切换逻辑	198
9.3.3	滚转角控制信号 ϕ_{com} 的计算	200
9.4	高度导航率	201
9.5	禁飞区和飞行障碍	202
9.5.1	NFZ 定义	202
9.5.2	选择一个合适的前视探测距离 R_{LA}	203
9.6	NFZ 的探测	204
9.7	NFZ 规避算法	208
9.7.1	在线选择一个规避航路模板	208
9.7.2	进入圆形模板航路	209
9.7.3	选择规避侧边	209
9.7.4	模板航路产生	209
9.7.5	离开圆形航路模板	212
9.7.6	导航算法的性能	212
9.8	仿真	214
9.8.1	仿真条件	214
9.8.2	仿真结果	214
9.9	结论	216
	参考文献	217
第 10 章	无人机性能下降评估	219
10.1	引言	219
10.2	FDI 系统	220
10.2.1	带有控制舵面偏转量传感器的 FDI	220
10.2.2	没有检测控制舵面偏转量传感器的 FDI	220
10.3	转弯性能下降评估	220
10.3.1	左/右转弯时最大倾斜角的确定	221
10.3.2	右/左转弯时最小转弯半径的确定	223
10.3.3	最大滚转角速率的确定	223

10.3.4	达到最大滚转角 ϕ_{\max} 所需最大时间 τ_{roll} 的确定 . . .	224
10.4	与导航系统的接口	224
10.5	稳定性分析	225
10.6	仿真结果	225
10.6.1	无故障情形	225
10.6.2	有故障但没有重构	225
10.6.3	有故障但可重构	227
10.7	俯仰和偏航性能的下降	227
10.7.1	俯仰轴	227
10.7.2	偏航轴	228
10.8	结论	228
	参考文献	229
第 11 章	结论和展望	230
11.1	未来工作	230
11.1.1	FDI 系统	230
11.1.2	可重构导航系统	230
11.2	无人机容错控制系统的未来	231
11.3	一般结论	231
附录 A	有关 V_T, α, β 的微分方程	233
附录 B	离散化线性状态空间模型	236
B.1	连续模型	236
B.2	离散模型	237
B.2.1	离散噪声过程协方差矩阵 Q_k 的推导	239
B.2.2	卡尔曼滤波器转移矩阵	239
附录 C	纵向控制器应用的非线性变换	240
C.1	高度二次微分 \ddot{h} 和飞机法线加速度 a_n 之间的非线性 变换 T_1	240
C.2	攻角 α 和飞机法线加速度 a_n 之间的非线性变换 T_2	241
C.3	攻角变化率 $\dot{\alpha}$ 和俯仰角速率 q 之间的非线性变换 T_3	242