



国防科技著作精品译丛

无人机系列

Safety and Reliability in Cooperating
Unmanned Aerial Systems

协同无人机 系统安全性与可靠性

【加拿大】 Camille Alain Rabbath Nicolas Léchevin 著
祝小平 周洲 邵壮 译



 World Scientific
Connecting Great Minds



国防工业出版社
National Defense Industry Press

协同无人机系统安全性 与可靠性

**Safety and Reliability in Cooperating Unmanned Aerial
Systems**

[加拿大] Camille Alain Rabbath Nicolas Léchevin 著
祝小平 周 洲 邵 壮 译



 国防工业出版社
National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字：军 - 2011 - 026 号

图书在版编目 (CIP) 数据

协同无人机系统安全性与可靠性/ (加) 拉巴特 (Rabbath, C. A.), (加) 莱舍万著; 祝小平, 周洲, 邵壮译. — 北京: 国防工业出版社, 2015. 10

(国防科技著作精品译丛. 无人机系列)

书名原文: SAFETY AND RELIABILITY IN COOPERATING UNMANNED AERIAL SYSTEMS
ISBN 978-7-118-10244-4

I. ①协… II. ①拉… ②莱… ③祝… ④周… ⑤邵… III. ①无人驾驶飞机—飞机系统—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 249697 号

Translation from English language edition:

Safety and Reliability in Cooperating Unmanned Aerial Systems

by C. A. Rabbath and N. Lechevin

Copyright © 2010 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Simplified Chinese translation arranged with World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore.

版权所有, 侵权必究。

协同无人机系统安全性与可靠性

[加拿大] Camille Alain Rabbath Nicolas Léchevin 著
祝小平 周洲 邵壮 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 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 710 × 1000 1/16

印 张 13¼

字 数 211 千字

版 印 次 2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 88.00 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

无人机系统是信息化战争装备体系的重要组成部分,已广泛应用于信息获取、信息对抗、通信中继和火力打击等领域。随着无人机系统技术和性能不断发展,以及军事需求的不断提高,很多情况下,单无人机系统已无法满足复杂的作战任务要求,需要由多无人机系统协同工作。协同无人机系统不但能完成单无人机系统无法完成的任务,而且能使整体作战效能大大提高。美国国防部 2011 年 10 月 17 日发布的《2011—2036 财年无人系统综合路线图》明确把无人机自主控制、协同编队飞行、无人机—有人机编队飞行等新技术列入未来需要重点发展的技术,以满足高技术信息化战争中联合作战的基本需求。然而,要实现无人机系统协同编队飞行、无人机—有人机编队飞行,协同无人机系统的安全性与可靠性变得非常重要。假设编队中一架无人机发生故障,此时如果故障无人机没有安装对故障的鲁棒控制或容错控制系统,或容错控制系统不能提供足够有效的故障修复能力,那么该故障无人机就很有可能失去稳定性或出现不可预知的情况,给整个飞行编队造成灾难性后果。因此,开展协同无人机系统安全性与可靠性研究具有十分重要的理论与实际意义。

本书是无人机系统协同控制、健康管理和容错控制方面第一部专著,系统介绍了协同无人机系统健康管理分析和设计方面的最新进展,提出了协同无人机系统健康管理概念,采取理论、实例研究与应用相结合的编写方法,并注重实际条件下动力学建模、算法和系统集成的有机融合。本书作者 Camille Alain Rabbath 和 Nicolas Léchevin 在协同无

人机系统协同控制、健康管理和容错控制方面取得了丰硕的研究成果。Camille Alain Rabbath 博士是加拿大国防研究与发展中心科学家, McGill 大学兼职教授, 具有丰富的理论与实际经验, 主要研究方向是无人机系统协同控制技术、导弹制导与控制技术、智能结构及分布式仿真。Nicolas Léchevin 是加拿大国防研究与发展中心博士后, 主要研究方向是自主飞行器、机器人等反馈控制和分布式仿真。本专著是无人机系统前沿技术, 学术思想新颖, 理论研究超前, 因此, 本书很值得我国无人机领域的科研人员和工程技术人员参考使用。相信本专著对我国无人机系统技术进步和装备发展具有较大的促进和推动作用。

协同无人机系统健康管理分析、设计理论和方法还正在大力发展中, 许多新理论、新方法会不断涌现和应用。原著中的一些错误, 译者做了更正。鉴于译者水平有限, 难免尚存在偏差, 敬请读者批评斧正。

译者

2015 年 8 月

前言

试想这样一个场景：几架无人机协同飞行执行一项任务，地面操作人员只监视这些无人机的进程而几乎不介入其中，然而这种场景在现实中尚未真正实现。在多无人机协同作战广泛运用之前，需要先设计出一些新的系统，其中包括用来保证无人机安全性与可靠性的系统。目前，很多的科研人员正不断致力于提出更有效的多无人机控制方面的概念和算法，并且在针对单无人机平台的容错控制、故障监测与修复技术方面做了大量的工作，但在如何实现多无人机自主操作可靠性和安全性方面的研究文献还很少。实际上，当前主要关注的问题是，如何确保在执行任务中的无人机关键部件动作出现偏离或性能降低的情况下依然能完成任务。虽然飞行器采用了机载嵌入式容错控制软件和硬件，但当系统出现功能障碍、损坏和失效等意外情况后，整个机群性能可能仍会降低。本书是第一本介绍协同无人机健康管理系统的分析和设计基本原则与算法的书籍。这种系统依赖于监视和故障适应性方法。协同健康管理系统是从编队的角度，利用互联的处理器、传感器和执行机构等资源，寻求对存在的故障提供适应性方法。尽管以有效的机群监视和故障适应性为目标的协同课题研究正在涌现，但当前关于协同无人机系统安全性与可靠性方面的文献还寥寥无几。

本专著是作者近几年研究的结晶，并且是基于早期获得的一些研究成果。在健康管理问题上我们提出自己的观点，并介绍一些概要内容。本书以定理、引理、命题和一步步程序的形式给出了相关的思想，并通过一些简单的实例和实际无人机系统操作的数值仿真来阐述健康管理的概

念。本书还介绍了密集编队控制和编队组网协同集结的相关知识。因此,我们期望本书对研究人员、教师、研究生和航空工程师将有所裨益。

感谢加拿大国防研究与发展中心,尤其是 Alexandre Jouan 博士对本书提供最初的支持。感谢加拿大自然科学与工程研究委员会(NSERC)的资助,以及感谢加拿大自然科学与工程研究委员会的资助与加拿大国防部提供的访问交流基金。还要感谢 Quanser 股份有限公司为我们提供了 ALTAV 模型的实验数据支持,并特别感谢 Jacob Apkarian 博士和 Ernest Earon 博士长期以来对我们工作的支持,他们在实时控制系统领域的渊博知识使我们受益匪浅。同时我们很荣幸能够与无人系统控制与容错领域的几位大学研究人员合作,特别要感谢康考迪亚大学的张友民教授,与张友民教授在单无人机容错控制方面的多次讨论使我们对该领域里的难题和挑战有了进一步的认识。我们还要感谢英国克兰菲尔德大学的 Antonios Tsovdos 博士和他的团队,我们很荣幸地与 Antonios 合作了几年, Antonios 帮助我们了解了更有效的协同控制、路径规划和制导方面的技术,同样感谢 Jean Bélanger 先生、Dany Dionne 博士以及圣劳伦斯河沿岸魁北克大学的 Pierre Sicard 教授。经过一年多加班加点的辛苦工作,本书终于得以完成,在此我们要对我们的家人和朋友在这一段时间给予我们生活上的热情支持表示最诚挚的感激和衷心的感谢!

C. A. Rabbath, Nicolas Léchevin

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 无人机系统	2
1.2 协同控制	3
1.3 突发事件	5
1.3.1 无人机部件故障与失效	6
1.3.2 无人机受损	7
1.3.3 信息流故障	7
1.3.4 编队异常与碰撞	8
1.3.5 环境影响	9
1.3.6 本书概要	9
第 2 章 单无人机健康管理: 回顾	11
2.1 被动与主动容错控制系统	12
2.2 故障/失效监测与诊断	13
2.3 控制重构	15
2.4 微型无人机和小型无人机的容错控制和故障/失效监测与 诊断技术	16
第 3 章 无人机编队健康监视与自适应控制	17
3.1 无人机动力学、飞行控制和故障模型	20

3.1.1	ALTAV 动力学与控制	21
3.1.2	四旋翼机动力学与控制	24
3.1.3	执行机构故障	26
3.2	编队控制	28
3.2.1	收缩理论基本原理	30
3.2.2	为实现编队控制综合的简化建模	31
3.2.3	编队控制目标	35
3.2.4	编队的闭环表达式	35
3.2.5	状态轨迹收敛性分析	40
3.2.6	考虑真实非线性动力学的无人机编队建模	49
3.2.7	长机航路与障碍/威胁规避	50
3.2.8	编队控制设计算法	51
3.3	基于观察器的分散式突发故障监测器	52
3.3.1	引言	52
3.3.2	无人机闭环动力学简化模型	54
3.3.3	干扰衰减的观察器相关概念	56
3.3.4	分散式突发故障监测器的综合	60
3.3.5	阈值的选取	67
3.3.6	分散式突发故障监测器设计算法	69
3.4	基于信号的分散式非突发故障监测器	69
3.4.1	引言	69
3.4.2	组网信息与耦合效应	71
3.4.3	航向角估计器	74
3.4.4	DNaFD 统计测试	75
3.4.5	DNaFD 设计算法	78
3.5	无人机指令自适应控制	79
3.6	仿真与试验	82
3.6.1	独轮车编队控制	82
3.6.2	四旋翼无人机编队控制	90
3.6.3	DAFD 与 ALTAV 编队控制	91
3.6.4	DAFD 与四旋翼无人机编队控制	99
3.6.5	DNaFD 与 ALTAV 编队控制	102

3.6.6	关于同时发生多类型执行机构故障的分散式故障监测	109
3.6.7	含单无人机 FDD 系统的闭合回路中的 DAFD/ DNaFD	112
3.6.8	关于数字实现的一些说明	115
第 4 章	协同无人机系统的决策制定与健康管理	116
4.1	无人机编队协同集结	119
4.1.1	引言	119
4.1.2	相关工作	121
4.1.3	多编队问题	122
4.1.4	模型	123
4.1.5	马尔可夫决策过程在无人机遭遇威胁建模中的应用	134
4.1.6	编队问题	138
4.1.7	决策策略: 信息完整	141
4.1.8	决策策略: 环境信息部分已知	144
4.1.9	协同健康管理 with 决策制定系统的设计	153
4.2	信息流故障下的协同问题	154
4.2.1	引言	154
4.2.2	信息流故障对无人机决策策略的影响	156
4.2.3	健康状态估计	157
4.2.4	$\tilde{W}'_{k, P_i, \gamma^E, \nu_j}$ 分布式计算	160
4.3	数值仿真	162
4.3.1	单目标区且环境信息完全已知	163
4.3.2	多目标且环境信息全部已知	168
4.3.3	马尔可夫决策过程受扰动情况	172
4.3.4	部分已知环境中的多区域监视	173
4.3.5	信息流故障	175
4.4	优化算法的分布式并行实现	176
4.4.1	引言	176
4.4.2	结构	176

4.4.3 分布式并行仿真环境	178
4.4.4 实验	179
参考文献	182
缩略词	199

目前,已有多种不同自主等级的无人机(UAV)投入到各种实战任务中^[1,2]。将来,无人以及无人与有人协同的任务包括:用于搜索、营救和监视的协同传感器网络;使用小型无人机(SUVA)和微型无人机(MAV)完成室内/室外的侦察与防卫^[3,4];以及无人战斗机(UCAV)的协同组网和用于对抗环境中攻击机动目标的武器投放。此外,无人机还用于消防、一些警务层面行动、自然灾害紧急救助、远程监视、科学研究、地理测绘等。众所周知,无人机系统发展的部分原因是替代人类完成十分“枯燥、肮脏或危险”任务的需要。然而,在实现多无人机系统、无人作战飞机和武器系统与有人机之间协同完成任务这一愿景之前,仍然有许多挑战性的障碍需要克服。

近年来,设计利用多架自主无人机协同执行任务的系统已经引起了极大关注^[5-8]。其中,多机控制方面存在的科学与技术挑战之一是在无人机、网络和环境变化中,甚至潜在异常的情况下如何保证有效和安全。因为在对抗条件下无人机的性能可能会下降,从而降低任务成功率和威胁附近居民的生命安全。

本书给出在复杂敌对环境中遇到实时突发的情况下,协同无人机系统健康管理系统设计与分析的基本原则和算法,采用理论、实例研究与小型无人机(SUAV)应用相互结合编写方法,并注重实际条件下动力学建模、算法以及系统集成的相辅相成。本书的目的是基于这样的事实:安装在无人机上用来提高可靠性的容错控制软件和多余度硬件出现异常时,整个机群性能会降低。例如,当发生严重的机体损伤或执行机构发生故障时,故障前后系统动力学的巨大差异可能引起控制权限的剧

烈下降,因而故障无人机不可能再以原来期望的效能来完成指定的任务,该无人机的任务就需要重新规划。协同健康管理 (CHM) 系统是在操作人员介入最少的情况下,利用各种可用的互联资源和共享的关键信息,使编队机群能够适应于执行性能已经降低的条件。

1.1 无人机系统

无人机系统一般包括执行机构、控制舵面、发动机、传感器、飞行计算机,以及通信设备^[2]。图 1.1 为典型的无人机控制系统结构框图。图中的平台即指飞行器或无人机,执行机构一般是指用电动机带动控制舵面(如副翼、升降舵、方向舵、垂直尾翼、鸭翼等)来改变平台空气动力学特性的机构。小型无线电控制的无人机伺服电机是在一般市场上可以买到的货架产品(COTS)。图 1.1 中的执行机构模块也可能包括由发动机和螺旋桨组成的推进系统。传感器通常由惯性测量单元(IMU)和惯性导航系统(INS)部件组成,包括测量滚转、俯仰和偏航运动的角速率陀螺,多轴加速度计,测定方向的数字罗盘,测量空速与高度的气压计,测量与周围物体间距离的超声波测距器,光电(EO)和红外(IR)摄像机等。制导、导航与控制系统(GNC)、估计/滤波系统和健康管理(HM)系统是在飞行计算机上运行的。发射机/接收

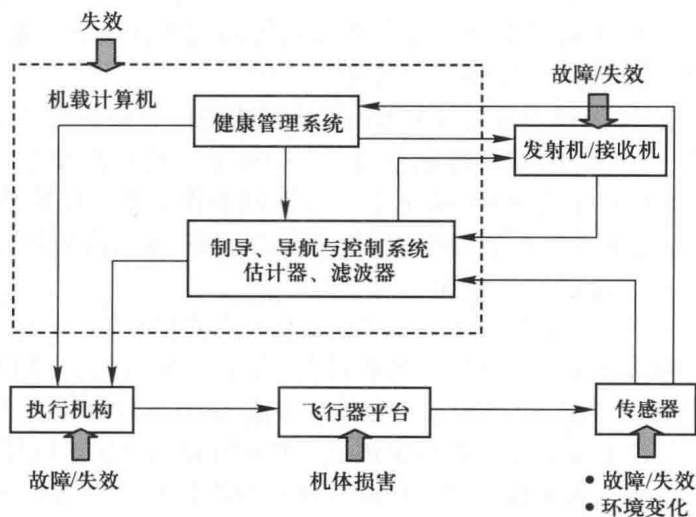


图 1.1 典型的无人机控制系统结构框图

机 (Tx/Rx) 与飞行计算机相连。从接收机和传感器获得的数据经飞行计算机处理, 进而驱动执行机构和发射机传递给机群中相应的无人机, 并把相关信息传递给编队中其他成员和地面操作人员。

不同无人机系统的尺寸和自主等级也各不相同, 无线电遥控飞机的自主等级最低, 而完全自主机群的自主等级最高^[9]。提高无人飞行平台自主等级有利于减少单无人机所需的操作人员数量, 进而大大减轻操作人员在复杂环境下操作无人机的工作强度, 并节省相关费用。本书主要研究对象是小型无人机 (SUAV) 和微型无人机 (MAV)^[3,9-16]。UAS 是指小型无人机平台与微型无人机平台连同用于飞行控制和执行任务的机载及地面设备系统。这些无人机尺寸为几厘米到几米, 可以在小范围近地飞行。

1.2 协同控制

协同控制的含义是一组动力学实体通过交换信息完成一个共同的目标^[17]。两个或多个无人机的协同控制需要任务规划、协调和执行三个层面, 无人机协同控制一个典型的实例是编队飞行。典型的飞行编队包括一架长机和若干僚机, 其基本控制策略是保持编队的几何队形不变。僚机的任务是尽可能保持与邻机的相对位置不变, 而长机则负责航迹跟踪^[18]。

为什么需要特别强调无人机协同控制的安全性及可靠性呢? 实际上, 用软件系统完全替代人来执行飞行控制任务本身即是一种挑战, 因而不得不考虑其安全性问题。例如, 当若干无人机编队飞行时, 它们的机载设备系统会利用通信网络来交换必要的信息, 从而得到各编队成员的相对位置、速度和高度, 另外, 它们可以利用机载近距传感器获得相关信息。随后机载计算机, 即飞行控制系统, 利用这些信息实现协同飞行。假设编队中一架无人机的执行机构发生故障, 此时如果故障无人机没有安装对故障的鲁棒控制或容错控制系统, 或容错系统不能提供足够有效的故障修复能力, 那么该无人机很可能失去稳定性或出现不可预知的情况。由于编队飞行的无人机控制系统是把无人机的相对位置、速度和高度参数保持在标准条件下的设定值上, 那么飞行编队的稳定性和一致性就有可能丧失。如果控制系统是针对标准运行条件而设计的, 那么当长机遇到故障时, 僚机就会简单地跟随长机的错误航迹而

不会有任何修正或补救措施。除非在单无人机制导、导航与控制系统和多无人机协同控制系统中加入容错控制机制, 否则执行的任务就可能失败。故障无人机以及简单跟随它们的无人机会造成无效的资源消耗、任务失败甚至威胁人员安全。

图 1.2 和图 1.3 为关于协同控制的两个例子。图 1.2 中, 3 架无人机以线型编队飞行, 保持编队飞行一致性的策略是: 一号僚机 F_1 的控制系统保持其与长机 L 的相对位置不变, 二号僚机 F_2 的控制系统则保持其与一号僚机 F_1 的相对位置不变。信息由 L 传递到 F_1 , 再由 F_1 传递到 F_2 。图 1.2 中: 传递信号 d_L, v_L 分别为 F_1 与 L 之间的相对距离和速度; d_{F_1}, v_{F_1} 分别为 F_2 与 F_1 之间的相对距离和速度, 这组信号是由通信网络或机载近距离传感器测量而得到的。每架飞机上反馈控制系统利用飞机间信号交换来比较相对距离与速度, 并采取一定的修正措施确保相对距离和速度等于规定值。图 1.2(b) 给出了该反馈回路的结构框图。从图 1.2(b) 可以看出, 各飞机反馈控制系统是相互依赖的。有关编队飞行的相关问题将在第 3 章详细介绍。

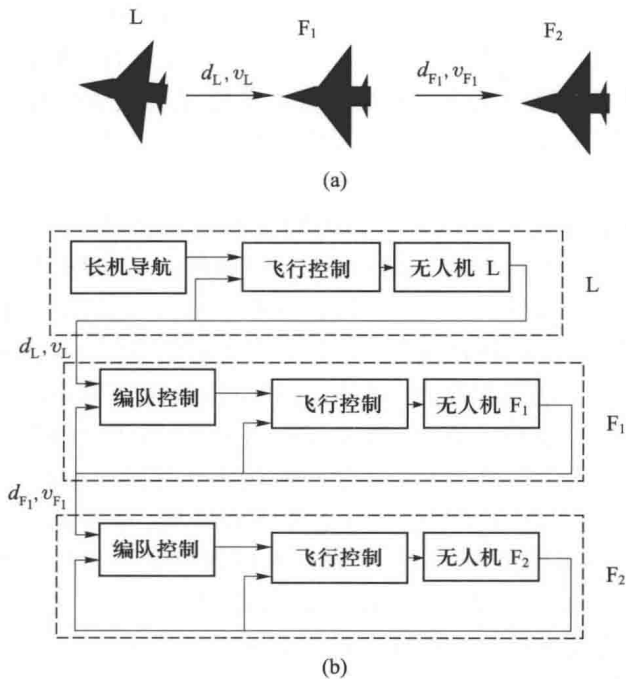


图 1.2 编队飞行

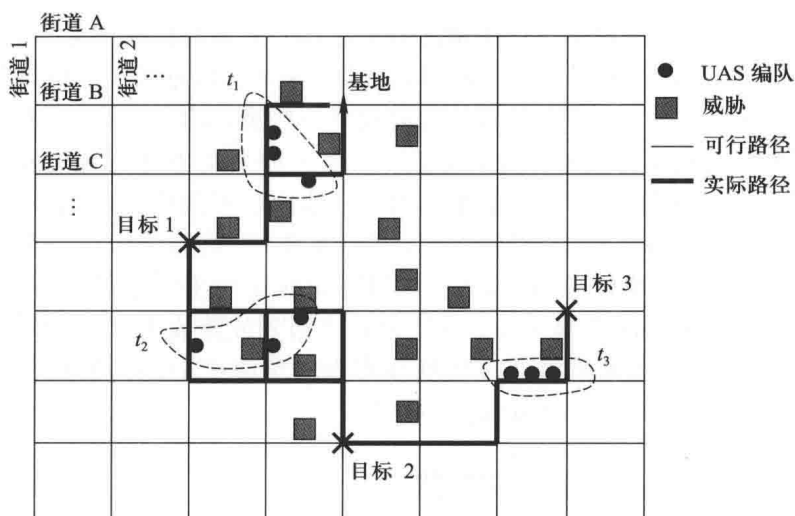


图 1.3 协同路径规划和集结

图 1.3 为关于协同控制与决策制定的例子。要求由小型无人机组成的三个编队在受限的敌对环境中，按照规划的路径协同飞行到达三个目标上空集结。图 1.3 中的网格代表城市街道，无人机从基地起飞，以较低的高度飞行，因而飞行路径受到附近建筑物的约束。图 1.3 中给出了 $t_1 \sim t_3$ 时刻各编队的分布情况。每一个小方块代表一个威胁源，若无人机沿着含有方块的路径飞行，则面临安全威胁。这些威胁包括极端环境影响、危险区域、充满障碍物的区域等。 t_1 时刻有两个编队沿着同一路径飞行， t_2 时刻各编队沿着不同的路径飞行， t_3 时刻三个编队沿着相同路径飞行。在岔路口，各编队需要综合考虑安全风险、同时到达目标的要求以及自身能源限制等因素来选择适合的路径。

决策制订依赖于路径选择优化问题的求解，以及无人机通过含有威胁路径时的损失概率。路径选择优化是确保抵达目标区域的完好无人机数量最大化。因此，协同控制与决策制定系统需要通过通信网络以获取机群的状态信息。编队状态包括编队位置和编队中完好无人机数量。有关协同控制与决策制定内容将在第 4 章讨论。

1.3 突发事件

飞行过程中，各种各样的突发事件都有可能影响到无人机的正常操

作。这些突发事件包括飞行关键部件的故障、失效或彻底毁坏,机体损伤,机间信息流传递错误或故障,以及诸如突风、极端天气、机体结冰等异常环境因素。一些突发事件可能较另一些突发事件常见,且有可能遇到几个突发事件同时发生的情况,甚至一种突发事件还会诱发其他事件发生,比如寒冷天气可能导致舵面结冰而达不到期望的操作效果。操作人员不能及时有效地应对的这些异常条件,就需要设计一种系统来应对这些突发事件,以确保多无人机操作的安全性与可靠性。本书不研究单无人机飞行关键部件、软件和系统遇到故障或失效时的修复方法,而是给出多无人机编队在出现异常降级情况下的协同监视与适应性技术和算法,建立相关的基本原理。

1.3.1 无人机部件故障与失效

无人机关键部件的故障与失效包括受影响的传感器、执行机构、飞行计算机、发动机以及控制舵面等。如果图 1.1 所示的控制回路中出现部件故障,则可能危及无人机的正常飞行。这些故障称为部件级(CL)故障。本书主要考虑执行机构、控制器和传感器故障情况。

常见的故障有执行机构或控制器被卡在某一位置而不能正确响应给定的指令、执行机构失去作用、执行机构或控制器处于上/下饱和位置、执行机构增益偏离正常值等^[19,20]。例如,若固定翼无人机的控制面(副翼、方向舵或升降舵)被卡住,这些控制面就不能响应执行机构指令或者只能部分响应指令。控制面故障的后果可能会造成系统性能下降与不稳定,其程度取决于健康管理系统的效能。故障与失效的区别是:故障是功能失常;而失效意味着系统部件或功能彻底不起作用^[21]。

在图 1.1 所示的无人机反馈回路中,传感器主要有硬故障和软故障两种,硬故障是灾难性的但易于监测,软故障较难监测但依然很关键^[22]。硬故障一般由传感器在线测量和确定。软故障包括:测量中的小偏差、慢漂移或两者同时出现的情况,精度损失,以及传感器在某一固定值上冻结不动等情况^[23]。对于装有全球定位系统(GPS)接收机的无人机,常见的故障还有 GPS 数据受到干扰和多径反射引起的延迟,从而导致定位不准确,这在城市密度较大的地形区域可能引起严重的后果^[24]。对于视觉反馈的传感器也可能遇到同样故障情况^[25]。传感器故障会改变控制器所需的测量值,根据故障的严重程度,闭环回路性能会有所降低。