

COOPERATIVE FLIGHT CONTROL SYSTEM



协同飞行控制系统

吴森堂 著



科学出版社



协同飞行控制系统

Cooperative Flight Control System

吴森堂 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从仿生学角度论述群体协同的社会性依存关系,给出由社会态、匹配态和任务态三层结构构建的社会性依存模型及其原则,并用于刻画分析“由简成繁”的个体与群体之间的协同关系,以此来设计和构建飞行器自主编队的协同飞行控制系统。本书系统地论述在社会性依存原则框架下协同飞行的基本概念与原理、自主编队飞行的数学描述与建模、协同飞行控制系统的体系结构与系统综合设计,以及飞行器自主编队协同飞行控制系统的仿真实验和验证试验等方面。

本书可供飞行器导航制导与控制、控制科学与工程,以及相关的理论方法与技术应用领域的教学与科研人员阅读,也可作为相关专业的研究生教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

协同飞行控制系统/吴森堂著. —北京:科学出版社,2018.6
ISBN 978-7-03-057575-3

I. ①协… II. ①吴… III. ①飞行控制系统—研究 IV.
①V249

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第112533号

责任编辑:任 静 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:师艳茹 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中国画美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张:26 1/4

字数:508 000

定价:148.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

当前，人类对于现代飞行器遂行任务的要求越来越高，其执行任务的多样化、复杂性和危险性也使得飞行器的智能化、网络化和体系化的发展需求越来越迫切。随着计算机技术和无线移动网络技术的迅速发展，以协同飞行控制技术为核心形成一定规模的编队协同遂行任务已经成为飞行器在民用和军用领域发展的崭新趋势。例如，无人机之间通过空中加油可实现大规模无人机群在更长时间和更大范围的巡察监测；由各类平台发射的多型导弹通过无线网络自主组成编队协同遂行作战任务，可对具有高防御能力的航母战斗群等高军事价值目标、大范围分布的大型重要军事设施以及具有高威胁能力的隐身目标等，在复杂高强度电子对抗条件下，实施突发性和高密度的饱和精确打击等。

自 2000 年开始，作者在原国防科工委和总装备部“十一五”“十二五”国防基础科研以及武器装备预研重点项目、重大项目的支持下，对飞行器自主编队协同飞行控制基本原理、系统设计方法以及技术实现与验证进行深入研究，并通过应用大量的风洞试验数据对所设计的飞行器自主编队协同飞行控制系统进行数字仿真分析、硬件在环（HIL）仿真测试以及嵌入式等效系统试飞验证。部分研究成果已申请 20 多项国家发明专利，发表若干学术论文，培养 20 余名工学博士和硕士，先后出版《飞航导弹制导控制系统随机鲁棒分析与设计》（国防工业出版社，2010）和《导弹自主编队协同制导控制技术》（国防工业出版社，2015）等专著。本书在这些研究成果的基础上，尤其是在基本概念和定义、理论方法的适用范围等方面做了进一步的拓展延伸，旨在为读者提供一部关于协同飞行控制理论与技术方面较为系统全面的专著，为进一步提高飞行器协同制导控制技术水平，促进国防科技和武器装备发展尽绵薄之力。

在本书撰写过程中，关于群体协同的社会性依存关系及其原则等方面的内容，作者吸纳中国科学院大学工程科学学院吴钟博给出的许多建设性的意见，北京航空航天大学张淼副教授在文献资料整理和图表编制方面做了大量工作，北京航空航天大学飞行信息处理与控制实验室贾翔博士、吴晓龙博士以及蔡达、文永明、姚征、邓佳、刘文磊和赵红波等同行给予作者大力帮助，在此表示诚挚的感谢。

作 者

2017 年 7 月 18 日

主要符号表

$S_g - Ax_g y_g z_g$	地面坐标系
$S_e - Ax_e y_e z_e$	指北大地坐标系
$S_b - oxyz$	弹体坐标系
$S_a - ox_a y_a z_a$	速度坐标系
$S_w - ox_w y_w z_w$	风速坐标系
$S_p - ox_p y_p z_p$	弹道坐标系
$S_T - O_T x_T y_T z_T$	质心定位坐标系
V	空速
a	当地声速
Ma	马赫数
ρ	空气密度
$Q = \frac{1}{2} \rho V^2$	动压
S	翼参考面积
b	翼展长
c	翼弦长
$c(z)$	沿翼展向坐标 z 处的翼弦长
$c_A = \frac{2}{S} \int_0^{\frac{b}{2}} c^2(z) dz$	翼平均几何弦长
t	翼最大厚度
$\bar{t} = \frac{t}{c} \times 100\%$	翼相对厚度
f	翼最大弯度
$\bar{f} = \frac{f}{c} \times 100\%$	翼相对弯度
$A = \frac{b^2}{S}$	展弦比
c_t, c_r	翼尖弦长和翼根弦长
$\lambda = \frac{c_t}{c_r}$	梯形比

A_0	前缘后掠角
m	导弹的质量
G	导弹的重力
g	重力加速度
cg	导弹的重心
x_{cg}	重心到平均几何弦前缘点的距离
x_{acw}	翼气动焦点到平均几何弦前缘点的距离
$S_m = (x_{ac} - x_{cg})/c_A = \bar{x}_{ac} - \bar{x}_{cg}$	纵向静稳定度
θ	俯仰角
ψ	偏航角
ϕ	滚转角
θ	弹道倾角
φ	弹道偏角
γ	速度倾斜角
α	攻角
β	侧滑角
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	弹体坐标系角速度分量
$\bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z$	无量纲角速度分量
V_x, V_y, V_z	V 在弹体坐标系上的分量
δ_x	副翼偏转角
δ_y	方向舵偏转角
δ_z	升降舵偏转角
δ_T	油门操纵量
R_Σ	总空气动力
M_Σ	总空气动力矩
X, Z, Y	阻力、侧力和升力
M_x, M_y, M_z	滚转力矩、偏航力矩、俯仰力矩
C_x	阻力系数
C_y	升力系数
C_z	侧力系数
m_x	滚转力矩系数
m_y	偏航力矩系数
m_z	俯仰力矩系数

C_y^α	升力曲线斜率
C_x^α	阻力系数对攻角 α 偏导数
C_z^α	侧力系数对攻角 α 偏导数
m_x^α	滚转力矩系数对攻角 α 的偏导数
m_y^α	偏航力矩系数对攻角 α 的偏导数
m_z^α	纵向静稳定性导数
C_x^β	阻力系数对侧滑角 β 的偏导数
C_y^β	升力系数对侧滑角 β 的偏导数
C_z^β	侧力导数
m_x^β	横滚静稳定性导数
m_y^β	航向静稳定性导数
m_z^β	俯仰力矩系数对侧滑角 β 的偏导数
$C_x^{\delta_x}$	阻力系数对副翼 δ_x 的偏导数
$C_y^{\delta_x}$	升力系数对副翼 δ_x 的偏导数
$C_z^{\delta_x}$	侧力系数对副翼 δ_x 的偏导数
$m_x^{\delta_x}$	滚转操纵力矩导数
$m_y^{\delta_x}$	副翼操纵交叉力矩导数
$m_z^{\delta_x}$	俯仰力矩系数对副翼 δ_x 的偏导数
$C_x^{\delta_y}$	阻力系数对方向舵 δ_y 的偏导数
$C_y^{\delta_y}$	升力系数对方向舵 δ_y 的偏导数
$C_z^{\delta_y}$	方向舵侧力导数
$m_x^{\delta_y}$	方向舵操纵交叉力矩导数
$m_y^{\delta_y}$	航向操纵力矩导数
$m_z^{\delta_y}$	俯仰力矩系数对方向舵 δ_y 的偏导数
$C_x^{\delta_z}$	阻力系数对升降舵 δ_z 的偏导数
$C_y^{\delta_z}$	升降舵升力导数
$C_z^{\delta_z}$	侧力系数对升降舵 δ_z 的偏导数
$m_x^{\delta_z}$	滚转力矩系数对升降舵 δ_z 的偏导数
$m_y^{\delta_z}$	偏航力矩系数对升降舵 δ_z 的偏导数
$m_z^{\delta_z}$	俯仰操纵力矩导数

$m_x^{\bar{\omega}_x}$	滚转力矩阻尼导数
$m_x^{\bar{\omega}_y}$	交叉动导数
$m_y^{\bar{\omega}_x}$	交叉动导数
$m_y^{\bar{\omega}_y}$	偏航力矩阻尼导数
$m_z^{\bar{\omega}_z}$	俯仰力矩阻尼导数
P	发动机的推力
P_x, P_y, P_z	推力 P 在弹体坐标系的分量
M_{xp}, M_{yp}, M_{zp}	推力 P 产生的滚转力矩、偏航力矩和俯仰力矩
l_x, l_y, l_z	推力 P 作用点在弹体坐标系的位置
μ_p, η_p	发动机推力的偏置角
$J_x, J_y, J_z, J_{xy}, J_{zy}, J_{xz}$	转动惯量和惯性积
n_y	法向过载
n_z	横侧向过载
ε_i	导弹成员 (节点)
n	编队规模
$\mathbf{q} = \text{col}(q_1, \dots, q_n)$	节点组成的队形 (向量)
q_i	ε_i 在惯性坐标系中的位置
D_{ij}	相对向量
\hat{D}_{ij}	相对向量 D_{ij} 的数学期望
D_{si}	安全向量
R_{ij}	匹配向量
λ_{ij}	安全系数
D_{Ti}	测量和控制误差分量
D_{Mi}	机动性能分量
D_{Ni}	网络诱导分量
n_{ai}	邻接度
$C\{\varepsilon_i\}$	透光系数

目 录

前言	
主要符号表	
第 1 章 概论	1
1.1 协同飞行控制系统概述	1
1.2 相关研究及其发展状态	4
1.2.1 无线自组织网络	5
1.2.2 战术数据链	6
1.2.3 动态航路规划	7
1.2.4 任务规划/目标动态分配	8
1.2.5 编队队形控制	9
1.2.6 网络控制系统	9
1.2.7 导弹协同制导控制技术	12
1.3 本书的主要内容和特色	13
第 2 章 协同飞行控制原理	14
2.1 群体协同基础理论	14
2.1.1 社会性依存原则	14
2.1.2 群体效能的度量	21
2.1.3 群体协同系统结构	26
2.2 自主协同飞行基础	30
2.2.1 协同性的概念	30
2.2.2 自主性定义与分级	31
2.2.3 自主编队协同飞行控制基础	34
2.3 协同飞行控制系统	57
2.3.1 社会性依存模型框架	57
2.3.2 协同飞行控制系统结构	59
2.3.3 导弹自主编队作战效能评估	66
第 3 章 协同信息获取系统	68
3.1 系统的结构组成	68

3.1.1	局部节点信息	68
3.1.2	网络特征信息	69
3.1.3	任务环境信息	69
3.2	系统的时空配准	69
3.2.1	时空配准的任务	69
3.2.2	偏差估计与补偿	70
3.2.3	空间配准方法	70
3.2.4	空间配准方法评价与选择	73
3.2.5	多传感器的时间配准	74
3.2.6	时间配准方法评价与选择	76
3.3	自主编队的相对导航	76
3.3.1	相对导航的任务	78
3.3.2	相对导航技术要求	79
3.3.3	基于卫星全球定位系统的相对导航	79
3.3.4	基于数据链的相对导航	88
3.3.5	基于单目视觉的相对导航	95
3.4	自主编队协同探测	105
3.4.1	概述	105
3.4.2	目标认知关联	105
3.4.3	目标协同定位	116
第 4 章	协同决策与管理系统	121
4.1	系统结构与运行机制	121
4.1.1	系统结构	121
4.1.2	导弹自主编队原则	122
4.1.3	作战效能指标	122
4.2	任务规划与目标动态分配	122
4.2.1	概述	122
4.2.2	任务规划的模型	124
4.2.3	静态任务规划	133
4.2.4	动态任务规划	142
4.2.5	分布式动态目标分配	151
4.3	协同航路规划	156
4.3.1	协同航路规划方法	157
4.3.2	航路平滑与指令转换	167

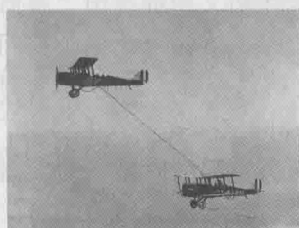
4.4	制导交班与协同制导	175
4.4.1	制导交班边界设计与分析	175
4.4.2	带角度和时间约束的协同制导律	179
4.4.3	分布式协同制导时间一致性	186
4.4.4	协同末制导仿真实验	195
4.5	自主编队离入队管理	201
4.5.1	离入队管理方法	201
4.5.2	离入队管理策略	203
4.5.3	离入队管理仿真实验	205
第5章	编队飞行控制系统	207
5.1	系统的结构组成	207
5.2	编队队形生成与导引	207
5.2.1	节点运动的动力学模型	207
5.2.2	随机系统模型与分析	215
5.2.3	队形控制系统的性能指标	217
5.2.4	编队队形生成与导引仿真实验	219
5.3	疏松编队飞行控制	222
5.3.1	导弹编队运动模型	225
5.3.2	编队飞行控制器设计	228
5.3.3	编队飞行控制器仿真实验	231
5.3.4	自主编队避障控制	233
5.4	密集编队飞行控制	238
5.4.1	动物群体运动行为分析	239
5.4.2	编队飞行控制的避碰方法	243
5.4.3	密集编队避碰问题	244
5.4.4	密集编队的避碰机理	247
5.4.5	密集编队控制器设计	250
5.4.6	密集编队避碰仿真实验	255
5.4.7	编队队形变换方法	258
5.4.8	编队转弯方式与队形拆分方法	265
第6章	成员飞行控制系统	270
6.1	系统结构与	270
6.1.1	系统的结构组成	270
6.1.2	飞航导弹典型弹道	271

6.1.3	飞行力学基础	274
6.1.4	导弹运动方程组	293
6.1.5	系统分析与设计	295
6.2	成员飞行控制系统鲁棒设计实例	302
6.2.1	导弹过载控制器设计	303
6.2.2	成员飞行控制器设计	306
第 7 章	协同支撑网络系统	312
7.1	概述	312
7.2	自主编队协同支撑网络系统	313
7.2.1	协同支撑网络分析	313
7.2.2	协同支撑网络系统结构	315
7.3	协同支撑网络协议	330
7.3.1	网络支撑协议的概念	331
7.3.2	网络通信协议总体设计	332
7.3.3	自组织时分多址访问	338
7.3.4	时隙分配协议	338
7.3.5	网络管理协议	345
7.3.6	分布式冗余簇首决策协议	351
7.3.7	分布式边界决策协议	353
第 8 章	协同飞行控制系统设计与验证	360
8.1	概述	360
8.2	系统验证试验环境	360
8.2.1	系统功能体系框架	361
8.2.2	实时数字仿真系统	361
8.2.3	硬件在环仿真测试系统	376
8.2.4	嵌入式等效试飞验证系统	380
8.2.5	等效试飞验证试验	391
	参考文献	394
	术语中英文对照表	407

第 1 章 概 论

1.1 协同飞行控制系统概述

自发明有动力装置的可控飞行器以来，人类一直不懈地追求克服飞行器的留空飞行时间和飞行航程的局限。为了进一步提高飞行器的综合应用效能，飞行器之间空中相互加油的编队协同飞行技术应运而生。从早期有人驾驶飞机的完全人工加油的编队协同飞行（图 1.1（a）），到现代无人机的人在回路的半自主加油的编队协同飞行（图 1.1（b）），一直向着未来的完全自主自治的遂行复杂任务的飞行器编队协同飞行发展（图 1.1（c）），正是飞行器编队协同飞行理论与技术由人工阶段向自主协同阶段发展的典型例证。



(a) 有人机加油编队（早期）



(b) 无人机加油编队（现代）



(c) 飞行器自主编队（未来）

图 1.1 飞行器编队协同飞行技术的发展路线

1997 年美军提出“网络中心战”的概念，并将其视为军事领域未来最重要的革命和新的全球军事战略的核心。“网络中心战”是指应用强大的计算机信息网络，将分布的各种传感器与各类武器合成一个统一高效的大系统，实现战场态势和武器协同的互联互通互操作。在这种模式下，作战单位可以实时地综合来自侦察卫星、预警机、无人/有人侦察机、水面舰艇、情报系统和地面侦察单位获得的各种作战信息；作战人员可以迅速、全面、可靠地洞察整个战场局势，互相协同指挥本平台或其他平台的武器，以更快的指挥速度、更高的毁伤概率实施连续作战，以获得更大的综合作战效能。图 1.2 给出了“网络中心战”框架下武器系统协同作战模式的示意图。

在“网络中心战”框架下各类武器系统从平台类型上可分为陆基、海基、空基和天基四大类，分别对应陆地、海洋、空中和太空部署的武器装备与设施，其中无人飞行器（Unmanned Air Vehicle, UAV）在“网络中心战”中扮演着至关重要的角

色。目前,无人飞行器在军事中的应用主要包括以下方面:军事测绘、侦察探测、电子战、信息战、精确打击、战场评估以及与其他平台协同作战等^[1]。

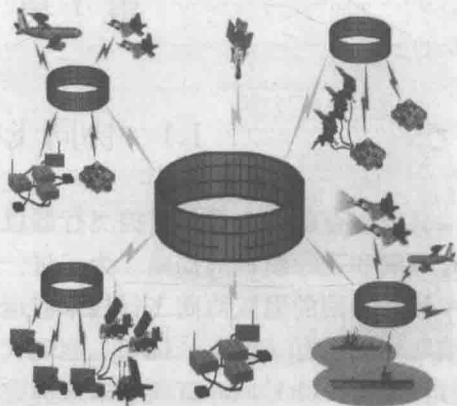


图 1.2 “网络中心战”框架下武器系统协同作战模式的示意图

作为“网络中心战”概念的延伸,美军在 20 世纪 90 年代初又相继提出“赛博战 (Cyber war)”的概念,2005 年美国空军将其作战任务范围扩展为“空中、空间和赛博空间 (Cyber space)”,并于 2006 年 11 月成立空军赛博司令部。2009 年 5 月 29 日,时任美国总统的奥巴马在白宫公开发表“确保国家赛博空间安全”的讲话,宣布赛博空间安全是美国的最高国策,并认为现在是关键的历史转型时刻,美国需要建立全新的、全面的、保卫赛博空间的战略。奥巴马的讲话表明现阶段美国对信息技术的战略谋划,在全世界引起广泛关注。

赛博空间是信息流与能量密度动态分布交互作用的网络空间形式,是信息空间与能量空间的交集,具有分布式、网络化、信息化的主要特征,赛博空间的品质取决于其自组织能力、协同能力和信息安全能力,其组成的要素是网络、电磁场以及人在其中的信息交互。它不仅有物态的网络,还包含交互的人,形成以信息感知、认知、存储、处理、传输、运用和安全为一体的空间集合。

信息和资源共享为人类带来巨大的机遇,同时也提升了人们对信息安全的需求。赛博空间作为一种特殊的空间,因其分布式、网络化而易遭受各种威胁。美国国防部公布的《国防部赛博空间行动战略》中特别强调赛博安全面临的三种威胁,即数据窃取或利用;服务或接入中断、拒绝;针对网络或组网的一系列讹误、操纵、直接破坏或降级行动。在军事领域中,赛博空间已经成为继陆、海、空、天之后的第五维作战空间,赛博空间作战也作为一种全新的作战形式,具有分布式、信息化和网络化等主要特征。赛博空间和赛博空间作战的产生与发展,不仅新增战争体系对抗领域,更是对信息化战争环境和理念的重大变革。

为了适应“网络中心战”和“赛博战”全新军事战略发展需求,形成新的牢固的国家赛博空间疆域,无人飞行器作为一类可用于陆地、海洋、空中和太空的陆基、海基、空基与天基部署的武器装备和设施,将是支撑“网络中心战”和“赛博战”全新作战形式的至关重要的一环。无人飞行器已广泛应用于国防和民用领域,世界军事强国竞相研发具有综合智能制导控制能力的无人飞行器,并采用多类型配合、多批次和成规模的无人飞行器自主式的协同突防作战方式,旨在充分发挥低成本无人作战系统的规模优势,利用协同电子对抗、饱和打击等手段,形成新型的战术级的体系威慑能力和有效的体系对抗能力。

随着计算机技术和无线移动网络技术的迅速发展,无人飞行器自主编队协同飞行控制(Autonomous Formation Cooperative Flight Control of UAV, AFCFC-of-UAV)技术将发挥越来越重要的作用,必将成为支撑现代战争崭新作战样式和手段的关键技术。无人飞行器自主编队的协同作战方式,是对具有高防御能力和高军事价值目标,尤其对航母战斗群与大范围分布的大型重要军事设施等,在复杂高强度电子对抗条件下,实施突发性和高密度的精确打击的重要手段,是未来突发性地区战争的主要打击形式。当前世界各军事大国都先后投入大量的人力、物力和财力,加强无人飞行器自主编队协同攻击系统的总体技术研究,不断提高协同攻击武器系统的作战效能。随着无人飞行器自主编队协同飞行控制技术的快速发展和日益完善,自主编队协同攻击武器系统将成为影响现代战争进程的杀手锏武器装备之一。

无人飞行器自主编队协同飞行控制是指根据作战任务要求,保证无人飞行器通过协同支撑网络组成具有态势感知和群体认知能力的编队,能依据综合作战效能最大原则,自主地实施编队的协同决策与管理,并导引与控制编队完成作战任务的原理、方法和技术^[1]。其中协同飞行控制(Cooperative Flight Control, CFC)是实现不同类型的无人飞行器自主组成编队,遂行多批次和成规模的有效协同作战任务的重要理论基础与技术核心,是提升“网络中心战”和“赛博战”框架下无人作战系统的电子对抗能力、突防能力、大范围分布目标的搜索能力和识别能力,降低作战消耗,提高效费比等综合作战效能的主要技术支撑。

本书虽然是以一类无人作战飞行器(Unmanned Combat Air Vehicle,UCAV)(图1.3),甚至是以飞航式导弹(Winged Missile,WM)作为主要的论述对象,包括像美国“战斧”系列的巡航导弹、“鱼叉”一类的反舰导弹、类似LOCAAS和LAM低成本自主巡逻攻击导弹以及像俄罗斯X-59M类型的空对面电视制导导弹等都属于此列(图1.4),但是所构建的关于群体协同系统的理论与模型,以及所提出的系统分析与设计方法等相关结论具有更广泛的适应性^[2]。

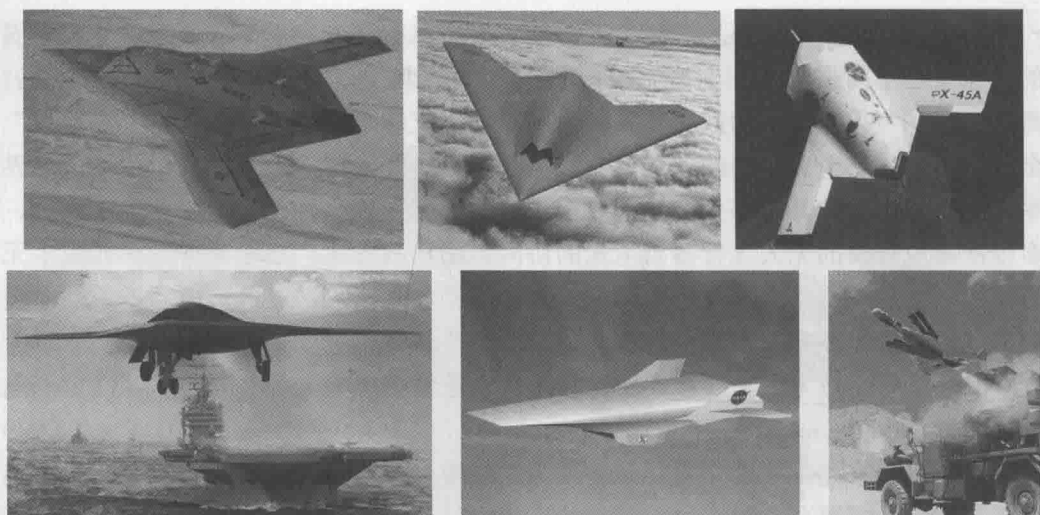


图 1.3 无人作战飞行器

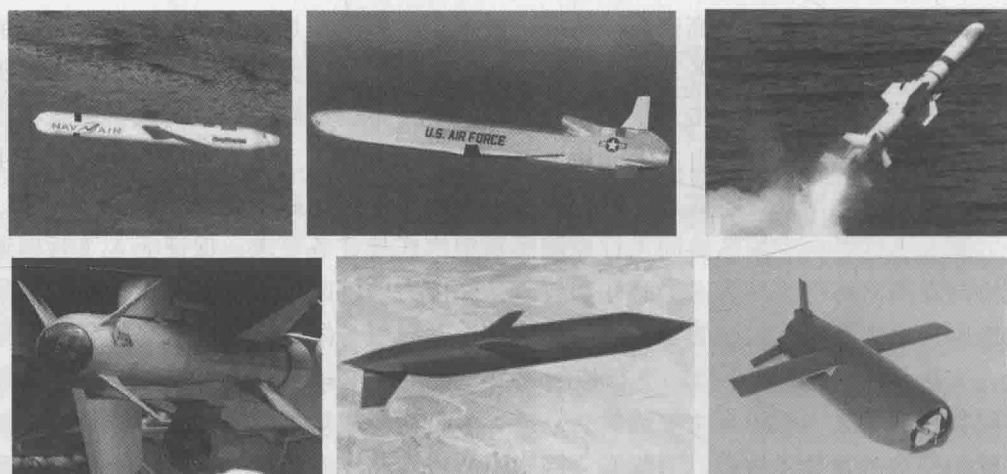


图 1.4 飞航式导弹

1.2 相关研究及其发展状态

协同飞行控制系统 (Cooperative Flight Control System, CFCS) 理论与技术是涉及飞行力学、飞行器导航制导与控制、移动无线通信等多个领域, 甚至是仿生学、生态学和社会学等多个学科交叉融合的新兴研究方向, 目前国内外在该领域的相关研究工作还处于起步与加速发展阶段。下面首先对与该领域相关的一些基本理论、方法和技术应用的研究现状及发展趋势进行介绍。

1.2.1 无线自组织网络

无线自组织网络，又称无线自主网络或无线 Ad Hoc 网络，IEEE 也将其称为 MANET（移动 Ad Hoc 网络），是一种无基础设施，具有自组织、自适应以及自愈能力的无线移动网络。1972 年美国国防部高级研究规划署（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）出于军事应用的目的，启动分组无线网络（Packet Radio Network, PRNET）的特别项目，试图保证作战人员和武器装备在复杂战场环境中实现“动中通”。1993 年 DARPA 启动自愈式自适应网络（Survivable Adaptive Network, SURAN）项目，随后又启动全球移动信息系统（Global Mobile Information Systems, GloMo）项目，开始对能够满足快速部署、高抗毁性和移动性等军事需求的无线网络进行全面的研究。

综合分析来看，无线自组织网络的概念范畴可以包括无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）和移动自组织网络（Mobile Ad Hoc Network, MANET）等领域。

作为自主编队网络系统的节点的无人飞行器，具有运动速度快、机动性强、飞行环境复杂、对抗强度高特点，节点间通信网络既具有无线自组织网络的共性，又有其一定的特殊性，尤其是抗毁性的要求较高。用于无人飞行器自主编队的无线自组织网络涉及开放系统互连（Open System Interconnection, OSI）模型中从物理层到应用层的诸多关键技术，其中媒体访问控制（Media Access Control, MAC）协议是 Ad Hoc 网络协议的重要组成部分，其控制着节点如何接入无线信道，是分组在无线信道上发送和接收的直接控制者。信道接入协议能否有效地使用无线信道的有限带宽，将对 Ad Hoc 网络性能起着决定性作用^[3]。下面仅对无线自组织网络中与本书研究内容关系较大且较重要的 MAC 协议进行介绍。

1. MANET 的典型 MAC 协议

MACA（Multiple Access with Collision Avoidance）协议是一种用于单频网络的媒体接入控制协议，其着力于解决 Ad Hoc 网络中的隐藏终端和暴露终端问题，当网络负荷比较大时，MACA 协议在 RTS/CTS 交互期间也存在冲突，且不具备链路层确认机制，当发生冲突时，需要上层超时重发，从而降低效率；MACAW（MACA for Wireless）协议是对 MACA 协议的改进，其更好地解决了隐藏终端和暴露终端问题。MACAW 的主要缺点是通信中控制信息交互次数太多；MACA-BI（MACA by Invitation）协议是在 MACA 的基础上改进的由接收方驱动的 MAC 协议。它没有使用 RTS/CTS 握手信号，只是采用 RTR（Ready to Receive）信号。对于不变比特速率（Constant Bit Rate, CBR）业务，MACA-BI 工作得很好，但是对于突发业务，其性能不如 MACA 协议；双忙音多址接入（Dual Busy Tone Multiple Access,