

无人飞行器作战系统与技术丛书

多无人机 协同作战技术

Cooperative Combat Technology for Multi-UAVS

黄长强 翁兴伟 王勇 曹林平 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无人飞行器作战系统与技术丛书

多无人机协同作战技术

黄长强 翁兴伟 王勇 曹林平 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地阐述了多无人机协同作战技术、静止目标搜索决策、运动目标搜索决策、突防目标搜索决策、目标融合跟踪算法、多目标分配、有人机—无人机协同战术决策以及协同攻击技术等内容。

本书可供无人飞行器作战技术与指挥及相关专业本科高年级学生和研究生学习参考,同时也适合从事无人飞行器设计、无人飞行器战术战法研究等方面的作战指挥决策者参考。

图书在版编目(CIP)数据

多无人机协同作战技术/黄长强等编著. —北京:国防工业出版社,2012.5

(无人飞行器作战系统与技术丛书)

ISBN 978-7-118-07988-3

I. ①多... II. ①黄... III. ①无人驾驶飞机—协同作战—研究 IV. ①E844

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 069024 号

※

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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 17 字数 294 千字

2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 76.00 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

序

无人机自 20 世纪 20 年代问世以来,其在战争中的地位日益提高。尤其在近年来高技术条件下的信息化战场上,无人机已从传统单一的侦察、评估、监听及预警等战斗支援作用,向具有攻击和杀伤能力的方向迅速发展,并最终成为影响作战进程的重要力量。无人化、多平台联合作战将成为未来战争的一个重要发展方向,因此多无人机协同作战技术已成为各军事大国竞相研究和发展的热点。掌握了这一技术,在一定程度上赢得了现代战争的主动权。但多无人机协同作战涉及了无人机平台与控制、武器系统、传感与通信、战略和战术、指挥与协同、目标分析、作战效能评估等关键技术,是多学科交叉、综合性很强的新兴学术领域,对其研究具有很高的前瞻性和挑战性。

《多无人机协同作战技术》一书紧扣这一命题,分门别类、深入浅出地介绍了多无人机协同作战技术涉及的原理、方法和技术,并引入了实例进行具体剖析和仿真。

黄长强教授及其团队创建了“无人飞行器作战系统与技术”学科,培养了我国第一批无人飞行器作战系统与技术领域的硕士、博士和博士后。2009 年起,黄长强教授开始筹划出版“无人飞行器作战系统与技术丛书”,2011 年该丛书中的《无人作战飞机精确打击技术》和《机载弹药精确制导技术》两分册先后问世,而《多无人机协同作战技术》则是该丛书中的第三分册。《多无人机协同作战技术》一书,内容十分丰富,涵盖了多无人机协同作战的技术内涵:包括了多无人机协同搜索静止目标和运动目标决策;协同空战时的目标跟踪融合算法;协同作战时的目标威胁判断和多目标分配;有人机和多无人机协同作战等技术。可以说,这是对我国多无人机协同作战学术领域成果的总结、提炼和升华,书中的观点、技术、研究方法则是黄长强教授及其团队所取得成果的诠释,是一本具有丰富原创性理论的工程技术专著。

目前,无人机技术正处于蓬勃发展阶段,该书的出版必将对我国多无人机协同作战技术的发展起着重要作用。祝愿黄长强教授及其团队在无人飞行器作战领域百尺竿头,更进一步,取得更大的成绩。

衷心祝贺《多无人机协同作战技术》一书的出版面世。

中国工程院院士 

2012.03.26

前 言

在现代高技术条件下,无人机正在被越来越广泛地用于执行各种非杀伤性和软、硬杀伤一体的作战任务。在高度信息化战场上,无人机已从传统单一的侦察、评估、监听及预警等战斗支援作用,向具有攻击和杀伤能力的方向迅速发展,成为可以执行压制敌防空系统,对地攻击、拦截战术弹道导弹和巡航导弹,甚至可执行对空作战任务的作战装备,并最终成为影响作战进程的重要力量。近年来,无人机在侦察、反恐,尤其是在几次高技术局部战争中的卓越表现,引起了世界各国的高度重视,许多国家开始大力发展无人机技术。

多无人机协同作战技术正是顺应这一历史潮流诞生和发展的,并表现出了一种全新的作战模式和技术。多无人机协同作战是指两架或两架以上无人机相互配合、相互协作执行战斗任务的方式,这不仅是多无人机作战在现代高技术战争中的主要发展方向之一,也是我军在现代信息化战争中取得胜利所拥有的一种竞争力。掌握了这一技术,在一定程度上就赢得了现代战争的主动权。

多无人机协同作战的出现转变了作战模式,由单机自主的作战模式转变为机群对机群和机群对地/水面目标攻击的作战模式。多无人机协同作战势必要求友机间通过信息数据链的共享,进行统一决策,协调分工。由此,对无人战斗机群提出了新的要求:

一方面要加强其自主性,使其能够自主处理各种敏感信息,对当前和未来战术任务做出规划与预测,遵循感知、评价、决策这样的认知决策过程。在具备条件时,实施攻击;不具备条件时,进行规避,以达到最大的作战效能。

另一方面,在无人机群内,友机间的协同作战要保证多目标决策的最优化。不仅能对来自友军和敌军的信息进行融合,自行提取有效信息,评估态势,分析决策,自主攻防;而且机群间能快速进行数据交换。使无人机群成为一个战斗系统,相互配合,互相协调,达到以最小的损失实现效用最大化。

本书纵向、横向涉及的军事高技术知识比较广泛,为了使所涉及的各军事高

技术领域的内容完整广博,本书分门别类、深入浅出地介绍了多无人机协同作战技术涉及的原理、方法和技术,并引入了实例进行具体剖析和仿真。为掌握本书内容,除学习一般基础知识外,还应了解无人机相关原理、计算机技术、仿真技术等多种技术知识。本书以多无人机协同作战技术、静止目标搜索决策、运动目标搜索决策、突防目标搜索决策、目标融合跟踪算法、多目标分配、有人机—无人机协同战术决策以及协同攻击技术为主,侧重基本原理的论述,每章配以具体实例,做到了理论与实际的相结合。

本书共 11 章,分别从多无人机协同作战综述、多无人机协同作战体系结构、多无人机协同搜索目标决策、多无人机协同突防时的搜索运动目标决策、多无人机协同突防时的随机目标决策、多无人机协同空战时的目标跟踪融合算法、多无人机协同作战时的目标威胁判断、多无人机协同作战时的多目标分配、多无人机综合战术决策、有人机—多无人机协同作战技术和多无人机及有人机—多无人机协同攻击技术等方面进行论述。

本书由空军工程大学教授黄长强任主编,翁兴伟、王勇、曹林平任副主编,赵辉、杜海文、丁达理、程华、韩统、黄汉桥、侯洪宁、朱收涛、吴文超、刘杰、轩永波、唐上钦、蔡佳、陈诚等参加了全书的撰写和修改。在此,对为本书付出辛勤劳动的同志们致以衷心的感谢,同时向本书引用参考文献的各位作者表示诚挚的谢意。

尽管编著者在本书的编写过程中投入了大量的时间和精力,但由于水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请同行专家和广大读者予以指正。

编著者
2011 年 12 日

目 录

第 1 章 多无人机协同作战综述	1
1.1 引言	1
1.2 多无人机协同作战的需求和发展	1
1.2.1 多无人机协同作战的需求	1
1.2.2 多无人机协同作战的发展	2
1.3 多无人机协同作战的概念及特点	4
1.3.1 多无人机协同作战的概念	4
1.3.2 多无人机协同作战的特点	5
1.4 研究多无人机协同作战的意义	5
1.5 小结	6
第 2 章 多无人机协同作战体系结构	8
2.1 多无人机协同作战体系结构分析	8
2.2 基于智能单元的多无人机协同作战体系结构	8
2.2.1 智能单元理论	8
2.2.2 基于智能单元的多无人机协同作战集中式体系结构	13
2.2.3 基于智能单元的多无人机协同作战集散式体系结构	15
2.2.4 改进的多无人机协同作战体系结构	16
2.3 小结	20
第 3 章 多无人机协同搜索目标决策	21
3.1 多无人机协同搜索静止目标决策	21
3.1.1 战场环境及无人机模型	23
3.1.2 不确定信息更新和存储算法	27
3.1.3 协同搜索航路规划	33
3.1.4 仿真试验分析	41

3.2	多无人机协同搜索运动目标决策	44
3.2.1	矩形搜索区域的运动目标搜索决策	44
3.2.2	圆形搜索区域的运动目标搜索决策	52
3.3	小结	68
第4章	多无人机协同突防时的搜索运动目标决策	69
4.1	引言	69
4.2	问题描述	70
4.3	目标位置的不确定性处理	72
4.4	运动目标突防搜索算法	79
4.4.1	无人机突防过程	80
4.4.2	运动目标的搜索过程	84
4.4.3	不确定区域的无人机分配	87
4.5	仿真验证	89
4.6	小结	92
第5章	多无人机协同突防时的搜索随机目标决策	93
5.1	引言	93
5.2	基于长条的搜索任务决策	93
5.2.1	问题描述	93
5.2.2	基于长条的搜索策略	94
5.2.3	不可行区域躲避策略	97
5.2.4	基于长条的搜索仿真	99
5.3	基于质心 V 图划分的搜索任务决策	101
5.3.1	问题描述	101
5.3.2	质心 V 图划分数学模型	102
5.3.3	基于质心 V 图划分的无人机搜索空间划分	103
5.3.4	收敛性证明	104
5.3.5	基于质心 V 图划分的多无人机动态环境协同 搜索决策	105
5.3.6	基于质心 V 图划分策略的仿真及仿真结果分析	107
5.3.7	结论	109
5.4	无人机重负载搜索任务决策	110
5.4.1	随机动态环境描述	110

5.4.2	无人机运动模型	110
5.4.3	无人机搜索航路设计	112
5.4.4	目标平均等待时间上界	115
5.4.5	不可行区的躲避决策	116
5.4.6	多架无人机的协同搜索策略	117
5.4.7	仿真试验	118
5.4.8	结论	119
第 6 章	多无人机协同空战时的目标跟踪融合算法	120
6.1	空中目标运动模型	120
6.1.1	匀速模型	121
6.1.2	匀加速模型	121
6.1.3	匀速转弯运动模型	122
6.1.4	Singer 模型	123
6.1.5	“当前”统计模型	124
6.2	无人机对空中目标的量测模型	126
6.2.1	坐标系的选择	126
6.2.2	量测方程的建立	127
6.3	单架无人机对单个目标的状态估计融合算法	127
6.3.1	基于 Unscented 卡尔曼滤波的交互多模型空中目标 状态估计与预测	128
6.3.2	基于粒子的交互多模型算法空中目标状态 估计与预测	134
6.4	多无人机协同多目标状态估计融合系统	141
6.4.1	多传感器对目标的状态估计融合系统	141
6.4.2	多无人机协同多目标状态估计融合系统结构	143
6.4.3	多无人机协同多目标状态估计融合	144
6.5	小结	147
第 7 章	多无人机协同作战时的目标威胁判断	148
7.1	威胁判断常用的基本方法及技术手段	148
7.2	空中目标威胁系数算法	150
7.2.1	层次分析法	150
7.2.2	能力指数法	156

7.3	定性与定量指标相结合的威胁评估方法	157
7.3.1	威胁目标排序值的计算步骤	157
7.3.2	基于离差平方和的威胁排序指标权重确定	158
7.3.3	定性指标相对威胁度的计算	161
7.3.4	定量指标相对威胁度的计算	162
7.3.5	仿真分析	162
7.4	小结	165
第8章	多无人机协同作战时的多目标分配	166
8.1	多无人机协同作战多目标分配算法	166
8.1.1	协同作战多目标分配问题与旅行商问题的关系	166
8.1.2	蚁群算法基本原理	166
8.1.3	粒子群算法基本原理	167
8.1.4	蚁群算法与粒子群算法的算法复杂度分析	168
8.2	多无人机超视距协同作战多目标分配	169
8.2.1	超视距作战的基本战术	169
8.2.2	超视距作战的威胁估计	170
8.2.3	超视距作战多目标分配算法	172
8.2.4	超视距作战多目标分配数值仿真	173
8.3	多无人机协同近距离作战多目标分配	175
8.3.1	近距离作战的威胁估计	175
8.3.2	近距离协同作战多目标分配模型	176
8.4	基于离散粒子群算法的近距离协同作战多目标分配仿真	180
8.4.1	离散粒子群算法	180
8.4.2	基于离散粒子群算法的多目标分配算法	182
8.4.3	基于离散粒子群算法的多目标分配数值仿真	183
8.5	小结	192
第9章	多无人机综合战术决策	193
9.1	战术决策技术	193
9.1.1	战术决策任务分析	193
9.1.2	战术决策系统研究现状	193
9.2	无人机综合战术决策系统	195
9.2.1	无人机综合战术决策系统组成	195

9.2.2	无人机综合战术决策基本手段	196
9.2.3	无人机综合战术决策复杂性分析	197
9.2.4	无人机综合战术决策的信息不完备性分析	198
9.2.5	无人机综合战术决策信息系统	199
9.3	战场信息不完备条件下的无人机综合战术决策	200
9.3.1	条件属性值缺失条件下的粗糙集方法	200
9.3.2	决策属性值缺失条件下的灰色定权聚类粗糙集方法	201
9.3.3	扩展不完备信息条件下的灰色粗糙集方法	204
9.3.4	无人机综合战术决策仿真及结果分析	205
9.4	小结	210
第 10 章	有人机—多无人机协同作战技术	211
10.1	引言	211
10.2	有人机—多无人机协同作战体系结构	211
10.2.1	有人机—多无人机协同作战集中式体系结构	211
10.2.2	有人机—多无人机协同作战集散式体系结构	211
10.3	有人机—多无人机协同作战任务分配	212
10.3.1	有人机—多无人机协同作战目标分配	212
10.3.2	有人机—多无人机协同作战任务规划	215
10.4	有人机—多无人机协同作战效能	217
10.5	小结	218
第 11 章	多无人机及有人机—多无人机协同攻击技术	219
11.1	引言	219
11.2	多无人机协同作战攻击系统概述	219
11.2.1	多无人机协同作战攻击任务	219
11.2.2	多无人机协同作战武器系统构成	219
11.3	有人机—多无人机协同作战攻击系统概述	220
11.4	基于博弈论和粗糙集协同攻击的武器—目标分配	221
11.4.1	多无人机协同武器—目标分配系统	221
11.4.2	无人机武器—目标分配系统	224
11.4.3	基于纳什均衡的多无人机动态武器—目标相互 最优分配	228
11.4.4	基于策略型粗糙集冲突分析的多无人机动态武器—目标单方	

最优分配.....	237
11.5 协同攻击决策	241
11.5.1 有人机—多无人机协同空战攻击决策.....	242
11.5.2 有人机—多无人机协同对地攻击决策.....	243
11.5.3 多无人机协同空战攻击决策.....	243
11.5.4 多无人机协同对地攻击决策.....	244
11.6 小结	246
参考文献.....	247

第1章 多无人机协同作战综述

1.1 引言

现代战争中,无人机需要对多个目标进行攻击,也面临着多个威胁的攻击,同时单机的搜索能力、携带的武器及干扰资源有限。因此,单机与单机的对抗和单机执行作战任务的战斗模式将难以满足未来军事斗争的需求,而更多的将是机群与机群的对抗和机群协同对敌目标的攻击。另外,未来战争的空间范围将不断增大,达到了全球的打击范围,而作战中留给地面操纵人员决策的时间将大大缩短。如果完全依靠地面操纵人员来实现多机协同多目标攻击,就使得地面操纵人员在空战态势瞬息万变的极短时间内,要及时处理战场环境中的大量战场信息,特别是有价值信息的处理,并与友机协同分享这些信息,然后迅速、正确地作出攻击或退出攻击决策。但是这对于地面操纵人员来说是很难做到的。因此,发展和研究多无人机协同作战技术具有十分重要的意义^[1,2]。

1.2 多无人机协同作战的需求和发展

1.2.1 多无人机协同作战的需求

无人驾驶飞行器(Uninhabited Aerial Vehicle, UAV)简称无人机,一般定义:无人驾驶、自行推进、利用空气动力承载飞行并可重复使用的飞行器。无人机是充分利用信息技术革命成果而发展的高性能信息化武器装备,它对提高战场空间感知能力、高风险目标突防能力、通信导航支援能力、电子战能力、压制敌防空系统能力、固定和移动目标攻击能力、联合作战能力等方面有着显著作用。

在现代高技术条件下,无人机正在被越来越广泛地用于执行各种非杀伤性和软、硬杀伤一体的作战任务。在高度信息化战场上,无人机已从传统单一的侦察、评估、监听及预警等战斗支援作用,向具有攻击和杀伤能力的方向迅速发展。以便能够成为执行压制敌防空系统,对地攻击、拦截战术弹道导弹和巡航导弹,甚至可执行对空作战任务的作战装备,并最终成为影响作战进程的重要力量。专家指出,无人机将成为21世纪陆、海、空、天、电一体化作战的“杀手锏”。面

对未来战争样式和技术发展趋势,发展我国无人作战飞机(Uninhabited Combat Aerial Vehicle,UCAV)是快速形成对敌威胁、打赢未来信息化条件下非对称战争的捷径。无人机能够在战略、战役作战中发挥多种独特的作用,然而面对日趋复杂的现代战场环境,战术任务具有多重性与复杂性,单架UCAV无法完成指定的作战任务。首先,由于载重限额和隐身性能等战技要求,UCAV单机一般难以同时具有较强的目标探测、目标跟踪或目标攻击能力,许多战术任务通常需要多UCAV协同完成;其次,UCAV通常用于执行高危险任务,毁伤概率较高,为了增加任务成功的机会,多UCAV作战必须进行冗余配置,并实现相互支援、相互补充与能力互补,从而即使有部分UCAV被毁或者任务失败,其余的UCAV仍有很大的概率协同完成任务;最后,利用不同用途无人机的优势可以组成一个有机的战斗系统,提升作战能力。无人机与有人驾驶飞机混合编组、协同作战是无人机运用战术的一个重要发展趋势。因此,多UCAV协同已经成为UCAV作战使用的必然选择。

多无人机协同作战的出现转变了作战模式,由单机自主的作战模式转变成成为机群对机群和机群对地/水面目标攻击的作战模式。对多无人机协同作战势必要求友机间通过信息数据链的共享,进行统一的决策,协调分工。因此,这对无人战斗机群而言提出了新形势下的新要求:一方面要加强其自主性,使其能够自主处理各种敏感信息,对当前和未来战术任务做出规划与预测,遵循感知、评价、决策这样的认知决策过程。在条件具备时,实施攻击;在条件不具备时,进行规避,以达到最大的作战效能。另一方面,在无人机群内,友机间协同作战,保证多目标决策的最优化。不仅能对来自友军和敌军信息进行融合,自行提取有效信息,评估态势,分析决策,自主攻防;而且能进行机群内快速数据交换。使无人机群成为一个战斗系统,相互配合,互相协调,达到以最小的损失实现效用最大化^[2]。

1.2.2 多无人机协同作战的发展

无人机单机航路规划始于20世纪60年代,70年代—80年代机器人的发展给无人机航路规划提供了许多思想。80年代中期开始,用于无人机航路规划的方法中出现了结合奇异摄动法的庞特里亚金最小值原理、动态规划法、神经网络算法、遗传算法等纯数学方法和以A搜索、A*搜索为代表的人工智能方法。90年代以后,随着计算机技术的飞速发展,以及先进防空武器的出现,世界各国对飞行自动化有了更高的要求。这就需要轨迹生成能够适应更加复杂的飞行环境,尤其是能够对许多非确定性因素(如不确定信息、不完全信息、意外情况等)判断推理后再进行飞行中的轨迹重规划,因此近年来国际上又开始探索新的解

决途径。主要的算法有动态规划法、电势理论法、遗传算法、最优控制法和 Voronoi 图形法等,这几种算法重点解决的是单架无人机的航路规划和航迹产生问题。

多架无人机协同飞行的航路规划,比单架无人机的航路规划要复杂得多,计算量也更大。Inalham 提出了一种分解的思路,用基于连续局部最优的博弈法来产生近似全局最优解。但对要求时间协同的问题,不能解决。另一种方法是在考虑任务分配时,把时间因素考虑进去。John Bellingham 应用混合整数规划法^[3]来解决有时间限制的紧密耦合问题,该方法的优点是能得到最优解,但计算量大。

随着无人机的迅速装备和大量部署,以及无人机作战的高密度化,需要无人机具备自主协同作战的能力,以满足未来作战系统作战单位的侦察、监视、目标、捕获(RSTA)及其他任务需要。多无人机自主协同作战将在多个不同无人机平台、传感器及其他有效载荷之间起着构架桥梁的作用,同时应用规划和感知等新技术可使无人机在最少的人工干预情况下有效地执行任务。为此,美国陆军航空兵应用技术管理局(AATD)发起了无人机自主协同作战项目,罗克韦尔科学公司(RSC)领导成立了由研究机构、政府部门以及工业界组成的联合研究项目小组,开发并验证多无人机协同作战能力。该小组具体成员包括:卡内基·梅隆大学、IA 科技公司、爱达荷州国家工程与环境实验室、高层顾问公司、雷锡恩公司以及罗克韦尔柯林斯公司。罗克韦尔科学公司的自主协同作战(ACO)项目旨在对执行指定任务的联网无人机编队的协同作战性能进行研究和论证,其最终目标是应用先进的协同作战技术,以最少的人工干预使无人机群协作完成任务。AATD 为该项目确定了 4 项性能,包括:协同侦察/警戒,确立多个最佳观测点,通信网络适配性以及部件发生故障时无人机群内部的相应调整。

2004 年,美国波音公司的爱德华兹空军基地,以 X-45A 无人机为验证机(图 1-1),完成了空中作战系统的试飞。飞行中,X-45A 无人机与 T-33 有人驾驶战斗机进行了空中通信。时隔不久,该公司又利用 X-45A 无人机与 F-15E 有人驾驶战斗机进行了协同飞行能力的验证飞行。同年 8 月,波音公司还在美国航空航天局的德赖登飞行试验中心,首次进行了 X-45A 无人机的双机疏散队形编队飞行,全程飞行约 40min。据报道,美国空军通过计算机模拟 110 架无人机的集群活动,集群中的每架无人机共享战场信息,以便协同作战。

此外,为了适应多平台协同作战、自主作战以及网络中心战等先进的作战模式,在美国国防部高级研究计划局的主持下,美国霍普金斯大学、波音公司、诺斯罗普·格鲁曼公司正在联合研究通用作战系统(Common Operating System,

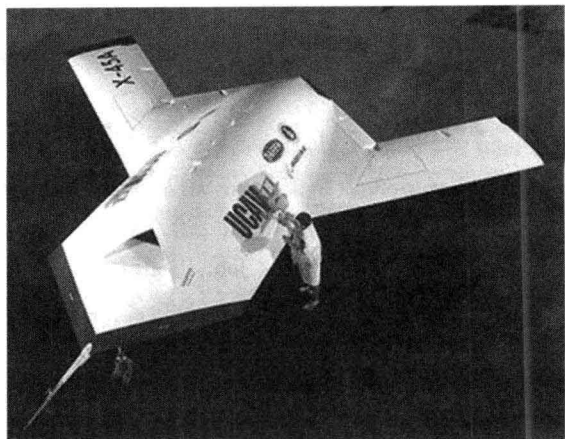


图 1-1 X-45A 无人机

COS), 计划将不同的UCAV, 以及UCAV与有人机、地面控制站及通信卫星连接成一个能有效作战的有机整体, 促进其整体效能的充分发挥。与此同时, 英国开始实施其“未来空军进攻性系统”计划, 其目的是探讨由有人机、无人机和空射巡航导弹组成的混合作战能力。

1.3 多无人机协同作战的概念及特点

1.3.1 多无人机协同作战的概念

“协同作战”这个概念属于现代军事学的范畴, 也是现代战争中必须贯彻的原则之一。《中国人民解放军军语》对“协同动作”的定义: “各军兵种、专业兵和专业部队之间, 为执行共同的作战任务, 按照战斗的目标、时间和地点协调一致地行动。”在古代, 虽然还没有产生现代意义上的“协同动作”这一概念, 也没有这一专业术语, 但是早已经有了相互配合作战的行动和相关论述。比如, 《孙子兵法·九地》篇云: “故善用兵者, 譬如率然; 率然者, 常山之蛇也。击其首则尾至, 击其尾则首至, 击其中则首尾俱至。”强调了作战中各部队通过协调一致的行动, 形成对敌方的有利态势, 进而击败敌军^[4]。

因此, 概括起来, 现代战争中的多无人机协同作战, 就是把单个战机作为独立单元来思考, 各个作战无人机相互之间运用系统功能组成进行信息融合、协同搜索、目标分配等, 进行协调一致的行动, 利用各种机载武器, 实现对敌目标的打击, 完成作战任务。