



飞航导弹  
*Aerodynamic Missile Journal*  
ISSN 1009-1319, CN 11-1770/TJ

## 《飞航导弹》网络首发论文

题目：面向多机协同的无人机协同模式分析  
作者：胡雷刚，罗波，郝齐  
DOI：10.16338/j.issn.1009-1319.20190220  
网络首发日期：2020-10-21  
引用格式：胡雷刚，罗波，郝齐. 面向多机协同的无人机协同模式分析. 飞航导弹.  
<https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.20190220>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 面向多机协同的无人机协同模式分析

胡雷刚 罗波 郝齐

**摘要** 针对当前无人机协同平台多种、协同场景多类、协同方式多样等因素导致无人机协同模式复杂多变、差异显著状况,梳理了无人机与有人机或无人机的多机协同模式,分析了有人/无人协同、多无人机协同两类协同模式的基本特征,总结了长僚机式、子母机式和对等配合式有人/无人协同三种具体模式,及大中型无人机多机协同、多量级无人机混合协同和微小型无人机多机协同三种具体模式的作战特点和技术特性,为推进有人/无人协同、多无人机协同作战运用理清思路、奠定基础。

**关键词** 无人机有人/无人协同多机协同 协同模式

DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.20190220

## 引言

无人机具有留空时间长、飞行升限高、无人员风险等优势,在执行战场侦察、目标监视、对地攻击等长时间或高风险任务时有较大的优势,且具备经济性高、灵活性好、实效性强、出勤率高等特点,成为各国军事力量不可或缺的组成部分;随着无人机小型化、微型化、智能化发展,以及自主、集群等应用的创新<sup>[1-3]</sup>,无人机在现代战争的作用和地位必将越来越重要。

目前,由于智能化、自主化程度有限,无人机尚不能全自主执行复杂任务,且为弥补单架机探测距离、载荷有限方面的不足,无人机作战使用向有人/无人协同、多无人机协同方向发展。开展面向无人机与有人机协同或多无人机协同的无人机协同模式梳理分析,对于更好地推进有人/无人协同、多无人机协同实战化具有现实意义。

## 1 多机协同模式

无人机平台有大中小型及微型差异,飞行速度有快中慢区别,任务载荷有侦察/通信/武器不同,有人机有战斗机、直升机、运输机/预警机等种类,多无人机或有人机协同时,根据有无有人机参与,可区分为有人/无人协同、多无人机协同两大类。

无人机与有人/无人机协作执行任务时,常涉及协同、编队和组网等概念,简单辨析如下:协同是无人机与有人/无人机共同遂行任务时,按照计划和实时需要在行动上进行的协调配合;编队是多无人机或有人机共同遂行任务时,按照要求或需要所采用的编组队形;组网是多无人机或有人机共同遂行任务时,可采取的网络化通信方式。多无人机或有人机协同中,编组飞行可采取编队形式,也可采取其他适宜形式。

## 2 有人/无人协同模式

由于目前人相对于无人机的决策判断优势,当前有人/无人协同中仍以有人机为控制决策中心。无人机平台众多,飞行速度有差异、任务载荷有区别,有人机则有战斗机、直升机、指挥机、运输机等种类,不同种类无人机、有人机的协同有不同特点;根据协同过程中无人机与有人机的从属关系,有人/无人协同大致分为长僚机式、子母机式和对等配合式3种模式。

3种有人/无人协同模式中,无人机与有人机的搭配各不相同,三者的区别主要体现在飞行高度、速度、航程等飞行器平台性能以及任务设备功能匹配方面。

## 2.1 长僚机式有人/无人协同

长僚机式有人/无人协同模式中,通常以有人战斗机或直升机作长机,以飞行高度、速度、航程等性能与之相近的若干无人机作僚机,组成编队共同遂行作战任务。此种模式下,无人机的任务载荷功能与有人机任务系统功能相近或互补<sup>[4]</sup>。

长僚机式有人/无人协同模式下,有人机对无人机的协同控制层级<sup>[4]</sup>在 2~5 级,无人机执行态势感知、武器攻击、欺骗干扰等作战任务,弥补有人机传感器和载弹量等限制,拓展有人机作战范围、作战资源和作战频次。

由于有人战斗机与有人直升机速度、飞行高度有较大差异,长僚机式有人/无人协同可区分为有人战斗机-无人机协同、有人直升机-无人机协同,两者在通信距离、时延等需求方面有区别。

### 2.1.1 长僚机式有人战斗机-无人机协同

长僚机式有人战斗机-无人机协同多采用编队形式,有人战斗机飞行速度快,作为僚机的无人机多是飞行速度相近的无人机作战飞机。

典型的长僚机式有人战斗机-无人机协同如美军忠诚僚机项目,其理念是在作战环境中无人机由有人机指挥控制,美军 F-22 有人机-无人机编队,1 架 F-22 有人机控制 4 架无人机,无人机前出承担突防、侦察、攻击任务。

长僚机式有人战斗机-无人机协同模式特点为:1) 飞行速度快,有人战斗机飞行速度为马赫数 0.7 马~2.25,与协同无人机速度相近;2) 通信距离远,战斗机与无人机、无人机与无人机之间距离可达数百米到数百公里不等;3) 节点数量有限,由于目前无人机作战飞机智能化程度有限、成本昂贵,作为长机的有人战斗机通常与数架无人作战飞机混合编队,无人机为一架至几架,数量不会很多;4) 隐身性要求高,有人机多为隐身战斗机,混合编队通常有较高隐身性要求。

### 2.1.2 长僚机式有人直升机-无人机协同

长僚机式有人直升机-无人机协同多采用编队形式,有人直升机飞行速度较快,但较战斗机慢,较中小型固定翼无人机快,作为僚机的无人机可以是速度相近的无人直升机,也可以是速度相近的中高速中小型固定翼无人机。

美国海军 MH-60R 海鹰有人直升机与 MQ-8B 火力侦察兵无人机直升机混合编队,火力侦察兵无人机直升机对目标或重点区域进行持续监视,为海鹰直升机对目标打击提供精确定位;有人直升机与无人直升机飞行高度、飞行速度相近,属于长僚机式有人直升机-无人机协同。

长僚机式有人直升机-无人机协同模式特点为:1) 飞行速度较快,直升机常用飞行速度约 50~56 m/s,攻击直升机最大飞行速度一般不超过 84 m/s,指挥、侦察、运输等直升机最大飞行速度一般不超过 79 m/s,无人机速度相近;2) 通信距离较远,直升机与无人机、无人机与无人机之间距离可达十余米至几十公里不等;3) 节点数量有限,有人直升机通常与数架无人机编队,无人机多为一架至几架,一般不超过十余架;4) 飞行高度较低,有人直升机擅长低空、超低空飞行,有人直升机与无人机协同编队多利用低空或超低空飞行降低被探测几率。

## 2.2 子母机式有人/无人协同

子母机式有人/无人协同模式中,以有人飞行器做空中指控平台,指挥多架无人机组成编队遂行作战任务,通常无人机编队前出执行任务,有人飞行器不参与无人机编队,多在后方指挥。由于空中指控平台不参与编队,有人飞行器对无人机飞行性能方面无匹配要求,但同构型或异构型无人机组成编队,其飞行高度、速度、航程等应相互间匹配。

大中型无人机与微小型无人机航程、体积、质量差异显著,起降方式及载荷能力等也有明显区别,根据无人机外型规模,子母机式有人/无人协同可区分为子母机式有人机控制大中型无人机、子母机式有人机控制微小型无人机。有人机对无人机的协同控制层级在 4~5 级,子母机式有人机控制大中型无人机多在 4 级,子母机式有人机控制微小型无人机理想状态是 5 级。

### 2.2.1 子母机式有人机控制大中型无人机

子母机式有人机控制大中型无人机协同模式,通常用有人指挥机、预警机或运输机做指控平台,

若干大中型无人机独立或在指控平台控制下起降, 无人机在有人机指挥控制下多采用编队形式前出执行任务, 进行侦察监视、引导照射、火力打击和毁伤评估等, 扩展了有人机的探测范围和攻击范围。

子母机式有人机控制大中型无人机与长僚机式有人/无人协同较相近, 当有人战斗机、直升机不作为长机参与编队, 主要在后方面承担指挥控制角色, 即由长僚机式协同转为子母机式协同, 无人机与有人机也不再需要在飞行高度、速度及航程等飞行性能上相互匹配。

例如, 美军忠诚僚机项目中 F-22 有人机-无人机编队, 无人机在 F-22 前 150~220km 处担负侦察、攻击任务时<sup>[5]</sup>, 可归为子母机式有人机控制大中型无人机协同模式——F-22 保持电子静默, 仅接收无人机或侦察机经卫星中继的数据, 在需要时通过简短指令控制无人机执行任务。

以有人战斗机作为指控平台的子母机式有人机控制大中型无人机模式, 其特点与以有人运输机、直升机作为指控平台的长僚机式有人直升机-无人机协同模式基本相同, 主要区别在于有人战斗机、运输机、直升机作为指控平台多在后, 不参与前出无人机编队。

### 2.2.2 子母机式有人机控制微小型无人机

子母机式有人机控制微小型无人机模式, 以有人指挥机或运输机做指控平台, 多采用空中投放/发射方式放飞多架微小型无人机, 以微小型无人机编队组成集群或蜂群, 前出执行情报侦察或攻击等作战任务; 目前, 无人机智能化程度有限, 为更高质量完成任务, 微小型无人机集群或蜂群多需要指控平台参与决策控制。

美军的小精灵、低成本无人机蜂群技术研究、低成本无人机蜂群技术研究、近战隐蔽一次性自主无人机等无人机蜂群项目, 现阶段多属于子母机式有人机控制微小型无人机模式。小精灵无人机可由运输机、轰炸机、战斗机或无人机等空中平台(如 C-130 运输机, B-52、B-1 轰炸机, MQ-9 死神无人机)搭载、发射, 无人机快速渗透进入敌防区, 完成任务后撤离或空中回收。

子母机式有人机控制微小型无人机模式特点为: 1) 作为指控平台的有人机在后, 微小型无人机编队前出, 多数微小型无人机与有人机距离为几公里至数十公里, 少数小型无人机与有人机距离较远, 如山鹑飞行距离约 30 km, 郊狼作战半径 37 km, 小精灵作战半径 556~926 km; 2) 多数编队内无人机之间通信距离较近, 数米至几公里, 乃至十余公里, 少数可达数十公里, 甚至数百公里; 3) 多数微小型无人机飞行速度较慢, 少数小型无人机飞行速度较快, 如山鹑飞行速度 21~31 m/s, 郊狼最大飞行速度 44 m/s, 小精灵最大速度约为马赫数 0.7~0.8 (238~272 m/s); 4) 节点数量较多, 外型较大的小型无人机可能为几架至十几架, 微小型无人机可能为十几架、几十架甚至数百架。

### 2.3 对等配合式有人/无人协同

在对等配合式有人/无人协同中, 无人机与有人机相互配合, 没有从属关系。在此模式中, 有人机可控制无人机的任务载荷乃至飞行控制, 协同控制层级在 2~3 级; 但两者可不采用编队形式, 飞行性能方面无匹配要求; 无人机搭载与有人机功能相近或互补的载荷, 配合有人机执行作战任务。

对等配合式有人/无人协同模式特点为: 1) 节点数量有限, 有人机与无人机一般为一对多或一对一, 或者多对一, 较少采用大规模方式; 2) 通信距离近, 有人机与无人机间距离一般为数公里或十余公里, 远可达数十公里; 3) 节点间关系较松散, 有人机与无人机飞行性能匹配要求弱, 交互控制需求少。

## 3 多无人机协同模式

大、中、小、微型无人机平台多样, 系统规模差异显著, 根据参与协同无人机的规模, 多无人机协同大致分为大中型无人机多机协同、多量级无人机混合协同和微小型无人机多机协同三种类型。

### 3.1 大中型无人机多机协同

为简化有人机担负空中长机或者指控平台, 长僚机式有人/无人协同与子母机式有人机控制大中型无人机模式已发展为大中型无人机多机协同, 即在不同无人机间态势共享、协同以完成较复杂任务。大中型无人机多机协同多采用同构型或异构型大中型无人机编队形式, 有时也可不注重编队形式。



无人机编队是指两架以上无人机在空中按规定的间隔、距离和高度差组成的编组队形；无人机也可与有人飞机、有人直升机等有人飞行器组成混合编队即有人机与无人机协同模式。

大中型无人机多机协同模式特点与长僚机式有人/无人协同、子母机式有人机控制大中型无人机模式特点的主要区别在：1) 不需要有人机直接参与，人工决策控制可在地面控制站介入；2) 参与协同的无人机飞行高度、速度、航程等飞行性能匹配要求较弱。

### 3.2 多量级无人机混合协同

为了将大中型无人机替换有人机为控制中心，子母机式有人机控制微小型无人机模式已发展为多量级无人机混合协同，即一架或若干大中型无人机与多架微小型无人机形成不同量级无人机混合协同。

多量级无人机混合协同主要形式是一架或若干大中型无人机与微小型无人机编队形成的无人机集群。数量较多的无人机协同或多个无人机编队协同行动时，形成无人机集群。无人机集群通常是由遂行同一任务、受统一指挥并保持视距联系或战术联系的若干个无人机或无人机编队组成无人机编组。

多量级无人机混合协同模式特点与子母机式有人机控制微小型无人机模式特点的主要区别在于空中指控平台由有人机替换为无人机，协同中也可有其他大中型无人机参与：1) 微小型无人机编队前出，作为指控平台的大中型无人机与微小型无人机之间距离较远，多数微小型无人机间距离几公里至数十公里，少数小型无人机或大中型无人机距离较远；2) 多数编队内无人机之间通信距离通常较近，数米至几公里，乃至十余公里，仅少数可达数十公里，甚至数百公里；3) 多数微小型无人机飞行速度较慢，少数小型无人机飞行速度较快；4) 节点数量较多，外型较大的小型无人机或大中型无人机可能为几架至十几架，微小型无人机可能为十几、几十架甚至数百架。

### 3.3 微小型无人机多机协同

子母机式有人机控制微小型无人机模式的发展趋势是实现无人机集群或蜂群高度自主化，不再需要人工决策的控制中心。微小型无人机多机协同的主要形式是微小型无人机集群，其高级状态是无人机蜂群。

自主化程度和协同能力较高的微小型无人机集群，称为无人机蜂群。无人机蜂群通常指遂行同一任务且由较多数量无人机组成，通常具有较高自主和协同能力的无人机集群，多采用微小型无人机。

美军小精灵、低成本无人机蜂群技术研究、低成本无人机蜂群技术研究、近战隐蔽一次性自主无人机等无人机蜂群项目，发展目标是实现无人机蜂群。1) 小精灵无人机由空中平台防区外发射，快速渗透进入敌防区，携带侦察、监视或电子战载荷，采用分布式协同遂行任务，可压制敌方导弹防御系统、切断敌方通信、引导精确火力打击，或入侵敌方数据网络实施赛博攻击，完成任务后撤离、空中回收；2) 低成本无人机蜂群技术研究项目的郊狼可由空中平台投放，也可由地面/舰载发射管发射，发射后打开降落伞，展开机翼和螺旋桨飞行，进入预定路线飞行，或自主同步编队飞行；3) 低成本无人机蜂群技术研究项目的山鹑可由战斗机搭载、发射，或从地面或海上发射，能够在空中自主编组、协同作战；4) 近战隐蔽一次性自主无人机项目的蝉无人机可由空中平台进行布撒投放，高空滑翔自主导航飞行到预定地点，降落地面后通过数据链互连成自组织网络。

微小型无人机多机协同模式特点为：1) 节点数量较多，微小型无人机可能为十几、几十架甚至数百架，外型较大的小型无人机数量可能略少，为几架至十几架；2) 节点间分布协作，单架微小型无人机载荷有限，需要若干架搭配不同任务载荷组合实现较复杂功能，不同特性任务载荷数据量不同，致使无人机间通信速率具有非均匀特征；3) 多数无人机之间通信距离较近，数米至几公里，仅少数可达十余公里至数十公里，甚至数百公里；4) 多数微小型无人机飞行速度较慢，少数小型无人机飞行速度较快。

## 4 结束语

多无人机与有人机或有人机协同时，根据有无有人机参与，可区分为有人/无人协同、多无人机协同两大类：根据协同过程中无人机与有人机的从属关系，有人/无人协同大致分为长僚机式、子母

机式和对等配合式三种模式；根据参与协同无人机的规模，多无人机协同大致分为大中型无人机多机协同、微小型无人机多机协同、多量级无人机混合协同 3 类。

其中，长僚机式、子母机式有人/无人协同能够综合有人决策、无人损伤优点，成为下一阶段有人/无人协同的两个重要方向；微小型无人机多机协同、多量级无人机混合协同由于低成本、长航时等非对称作战优势，成为多无人机协同的发展方向。综上，针对不同协同模式开展协同特点梳理分析，总结不同协同模式的作战特点和技术特性，对推进有人/无人协同、多无人机协同实战化有现实意义。

### 参考文献

- [1] 梁晓龙, 张佳强, 吕娜. 无人机集群. 西安: 西北工业大学出版社, 2018
- [2] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制. 北京: 科学出版社, 2018
- [3] 符小卫, 高晓光. 威胁联网环境下多无人机协同控制. 北京: 科学出版社, 2018
- [4] 顾海燕, 徐驰. 有人/无人机组队作战技术. 指挥信息系统与技术, 2017, 8 (6)
- [5] 王炜华. 外军无人机与有人机协同作战技术研究. 空军装备研究, 2015, 9 (4)