

# 无人系统技术

## UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

主管：中国航天科工集团有限公司 主办：北京海鹰科技情报研究所



张丹（加拿大工程院院士）  
城市交通问题的空中解决方案  
——自主载人飞行器研究综述

ISSN 2096-5915



9 772096 591182

2018.2  
第1卷 NO.

# 《无人系统技术》期刊首届编委会会议、 创刊发布会暨智能与无人自主系统研讨会 成功召开

6月28日至29日，由北京海鹰科技情报研究所主办，《无人系统技术》编辑部承办的《无人系统技术》期刊首届编委会会议、创刊发布会暨智能与无人自主系统研讨会在中国科技会堂成功召开。

## 编委会会议

期刊主管主办单位领导、编委会主任/副主任、编委会委员共计40余人出席会议。会议在听取编委会组建说明、编委会名单、编委会章程后，与会专家根据期刊工作策划及会议议题展开热烈讨论，对无人系统学科建设、期刊发展定位、具体栏目设置及选题组稿方向等提出了诸多宝贵意见。

## 创刊发布会暨智能与无人自主系统研讨会

国家新闻出版署（原国家新闻出版广电总局）新闻报刊司李军司长，中国航天科工集团有限公司魏毅寅副总经理等领导出席会议，并为大会致开幕辞。大会特别邀请了来自科研院所和高等院校的8位专家分别从作战需求对无人系统的牵引、智能无人系统发展趋势以及无人系统关键技术发展等方面作了精彩的主题报告，我国无人系统研究领域和科技期刊出版界的150余名专家学者参加了此次会议。

## 后续

《无人系统技术》期刊将以创办一流的无人系统研究领域科技期刊为发展愿景，以反映无人系统学术研究水平、促进学科交叉融合，引领无人系统发展为办刊理念，坚持开放办刊、线上线下相融合的发展路径，将聚焦无人系统研究领域科技前沿，秉承“刊载无人系统领域新进展、新成果、新技术，促进学术交流，推动成果转化，提高我国在该领域的科研装备水平”的办刊宗旨，重点报道无人系统及其相关交叉学科的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结，促进跨学科技术领域的深度融合，努力打造无人系统领域一流的学术交流平台，竭诚为从事无人系统领域研究的科技工作者、工程技术人员、科研管理人员，以及无人系统应用部门的广大读者服务，为形成完善的无人系统学科体系贡献力量。



【中国工程院院士 李德毅题词】

把这个人变成无人船无人机  
作为智能时代  
军民融合的好手

李德毅



【中国工程院院士 刘永才题词】

賀《無人系統技術》創刊  
創一流神技期刊  
從無人技術發展

劉永才

二〇一八年五月



## 系统综述

城市交通问题的空中解决方案——自主载人飞行器研究综述.....	01
张 丹, 吴陈炜, 谢安桓	
智能化战争与无人系统技术的发展.....	14
李风雷, 卢 昊, 宋 闯, 郝明瑞	
无人车的场景理解与自主运动.....	24
薛建儒, 李庚欣	

## 技术研究

军用地面无人平台现状及发展趋势研究.....	34
李 楠, 李 晗	
国外舰载无人机着舰引导技术发展现状.....	43
李 强, 张淑丽, 蒙文巩	
无人机无线传能技术.....	49
张红生, 田晓威, 刘忠诚, 邢艳丽, 李 彦, 张 姮	
一种可变飞行状态的新型布局无人机.....	55
杨新垒, 刘晓慧, 聂万胜	

## 情报分析

无人系统发展及对国家安全的影响分析.....	62
吴 勤	

《无人系统技术》办刊宗旨是刊载无人系统领域新进展、新成果、新技术，促进学术交流，推动成果转化，提高我国在该领域的科研装备水平。

现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主，广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时，也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。



## Systematic Review

- Aerial Solution for Urban Traffic Problems: Overview of Autonomous Manned Aircraft..... 01  
ZHANG Dan, WU Chenwei, XIE Anhuan
- Development of Intelligent Warfare and Unmanned System Technology ..... 14  
LI Fenglei, LU Hao, SONG Chuang, HAO Mingrui
- Scene Understanding and Autonomous Motion of Unmanned Vehicles ..... 24  
XUE Jianru, LI Gengxin

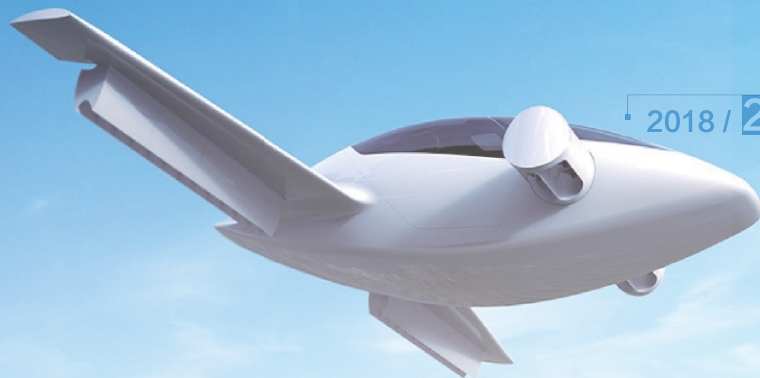
## Technical Study

- Research on the Development of Military Ground Unmanned Platform..... 34  
LI Nan, LI Han
- Surveys of Carrier Landing Techniques for UAVs ..... 43  
LI Qiang, ZHANG Shuli, MENG Wengong
- Wireless Power Transmission Technology of UAVs ..... 49  
ZHANG Hongsheng, TIAN Xiaowei, LIU Zhongcheng, XING Yanli, LI Yan, ZHANG Heng
- A New Type of UAV with Variable Flight State ..... 55  
YANG Xinlei, LIU Xiaohui, NIE Wansheng

## Information Analysis

- Unmanned Systems Development and Analysis of the Impact on National Security ..... 62  
WU Qin





# 城市交通问题的空中解决方案

## ——自主载人飞行器研究综述

张丹<sup>1,2</sup>, 吴陈炜<sup>1</sup>, 谢安桓<sup>1</sup>

(1.之江实验室, 杭州 311121; 2.约克大学, 多伦多 M3J1P3)

**摘要:** 随着城市化进程的推进、汽车的普及, 城市交通拥堵、安全事故、环境污染等社会问题日益严重。载人飞行器作为未来城市出行的新方式, 可以有效地缓解这些问题。综述了自主载人飞行器的基本原理和国内外研究进展, 重点论述其在无人驾驶的情况下飞行控制、通信链路、安全保障等关键技术。展望未来, 自主载人飞行器的研究, 将促进相关技术的突破, 也将带动新的产业发展, 乃至为人类生活方式带来新一轮变革。

**关键词:** 无人驾驶; 载人飞行器; 垂直起降; 城市交通

**中图分类号:** V279    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2018) 02-0091-13

## Aerial Solution for Urban Traffic Problems: Overview of Autonomous Manned Aircraft

ZHANG Dan<sup>1,2</sup>, WU Chenwei<sup>1</sup>, XIE Anhuan<sup>1</sup>

(1.Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, China; 2.York University, Toronto M3J1P3, Canada)

**Abstract:** Advancement of urbanization and popularity of automobiles have led to increasing serious social problems, e.g. traffic congestions, road accidents and environmental pollution. Hence, manned aircraft is believed to be a key breakthrough that will alleviate these problems. This article reviews the fundamental principles of autonomous manned aircrafts and also the research progress both at home and abroad. In particular, this article focuses on key technologies such as flight control, communication links, safety assurance etc, in the case of autonomous driving. With an eye to the future, the studies of autonomous manned aircraft will bring technological breakthroughs in related fields, development of emerging industries, and even dramatic changes in people's lifestyle.

**Keywords:** Autopilot; Manned Vehicle; VTOL; Urban Traffic

## 1 引言

自20世纪80年代以来,我国公共汽车快速发展、小汽车逐渐进入家庭;进入21世纪之后,随着城市面积和人口规模的迅速扩张,交通需求加速增长,以小汽车为代表的代步工具已然普及。尤其是在北京、上海等一批超(特)大城市、大城市,城市交通呈现高强度使用、高密度聚集态势。由于城市交通供需长期不均衡,交通拥堵、安全事故、环境污染等问题日渐凸显,社会大众议论广泛<sup>[1]</sup>。解决城市地面交通带来的诸多问题,是当前城市治理的重中之重。

自1903年莱特兄弟发明的第一架飞机试飞成功以来,人类的飞行梦与飞行探索从未止步。经过了100多年的发展,全球航空业已高度成熟,飞机已成为人类日常出行的交通工具之一,同时以多旋翼为代表的小型无人飞行器近年来也已经得到了广泛应用。面对城市不断发展所带来的交通拥堵问题,以及城市、山地、森林各类复杂环境的救援、特种任务执行等需求,常规民航客机、直升飞机等大型飞行器和各种地面交通工具已无法满足人们的出行需求,因此更为轻便、有效、安全的轻型载人飞行器备受人们期望。

美国国家航空航天局(NASA)提出了自由移动出行(On-Demand Mobility, ODM)战略框架,愿景“能够让任何人随时随地从一处飞向另一处”。报告指出,垂直起降(Vertical Takeoff and Landing, VTOL)轻型载人飞行器甚至被认为是未来城市内部出行的交通方式之一<sup>[2]</sup>。美国国防预先研究计划局(DARPA)则在报告中提出,自动驾驶、垂直起降飞行器(VTOL)发展的关键推动力。DARPA从安全和成本两个方面进行了分析,指出成熟的自动驾驶飞行器将免去飞行员繁琐的仪表操作,大幅减少飞行事故和死亡人数;将免去飞行员培训成本,并解决飞行员短缺的问题;自动驾驶让飞行器不受天气条件限制出行,在复杂的特殊环境下也能正常飞行<sup>[3]</sup>。

由此可见,对自主载人飞行器的研究具有重

要的现实意义,本文将对该领域的研究现状进行系统综述,对国内外已有成果进行分类介绍,阐述该技术的整体架构与关键技术,针对城市交通问题提出空中出行的解决方案。

## 2 国内外研究现状

### 2.1 国外研究现状

目前国外对于自动驾驶载人飞行器的研究较多且相对较成熟,相关企业如空客、奥迪等都陆续推出过不同类型的自主载人飞行器,相关资料披露不同型号的飞行器约有几十种,其中比较典型的有:德国Volocopter公司的Volocopter 2x、ASTRO公司的AA360及COAR公司的Kitty Hawk Cora飞行器。

#### (1) 德国Volocopter公司的Volocopter 2x

Volocopter 2x被誉为世界上第一台二座电动垂直起降无人驾驶飞机,通过机舱内置面板或移动客户端软件设置目的地,飞机就可实现自主飞行,2018年1月进行首次载人飞行。具体参数如表1所示。该机型配备一个弹道降落伞,如果出现任何问题,可确保安全着陆,获得了英特尔加速技术和戴姆勒股份公司的合作支持。



图1 Volocopter 2x机型

#### (2) ASTRO公司的AA360

AA360于2017年5月初开始飞行测试,历经几个月的密测试,最终在2017年8月完成第一次载人飞行试航。AA360作为电驱动垂直起降飞行器,可运送2名乘客,飞行过程中具有低噪音、零



表1 各类型飞行器性能参数表

	德国 Volocopter 2x	美国 AA360	美国 Kitty Hawk Cora	中国 亿航 184	中国 赛羚	吉利控股 Transition
机身总质量 (包括电池) /kg	290	240	/	260	100	440
最大起飞质量 /kg	450	360	/	360	/	650
最大有效载荷 /kg	160	120	181	100	/	210
最高时速 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	100	70	100	100	/	185
飞行时间 /min	20~25	20~25	19	25	/	270
机身长度 /m	3.2	2.3	/	4.0	/	6.0
整体高度 /m	2.15	2.3	/	1.4	/	2.0
机翼长度 /m	9.15	4.2	/	4.0	/	8.0
载客量 /位	2	2	2	1	0	2
旋翼数量 /个	18	16	/	8	4	0
推进器	电动机式三相永 磁同步电机	电动	电动	电动	电动	/

排放及低振动的特点。且具有自动补偿的控制策略，即使在恶劣的天气条件下，也能自主飞行。为了实现轻量化设计，在保证材料强度情况下，飞行器采用密度更小的碳纤维，摒弃传统的电缆转而使用轻质的光纤。



图2 AA360机型

### (3) Kitty Hawk Cora 飞行器

Kitty Hawk Cora 飞行器是由一家获得谷歌 (Google) 创始人拉里·佩奇 (Larry Page) 投资的飞行汽车初创公司所设计，Kitty Hawk Cora 采用旋翼垂直起降结合固定翼巡航的飞行方式，不需要跑道，并具备从屋顶等地方起飞的可能性。起飞时，通过旋翼旋转提供升力抬起飞机。在空中飞行时，大部分升力来源于机翼。Kitty Hawk Cora 使用自动飞行软件，结合人的监管，使没有受过训练的普通乘客也能够自由飞行。



图3 Kitty Hawk Cora机型

## 2.2 国内研究现状

中国在自主载人飞行器的研究上，走在世界的前列，比较典型的是亿航智能、中航工业和吉利控股集团，都推出了各自的载人飞行器。

### (1) 亿航 184

2016年国际消费类电子产品展览会上，亿航智能推出世界第一款真正意义上的载人无人机：亿航 184，如图 4 所示。亿航 184 采用多套独立飞行控制系统来实现自动导航，飞行途中会实时采集分析来自各种传感器的数据，重新规划路径，从而保证将乘客以最快速、最安全的路径送达目的地。亿航 184 具体参数如表 1 所示，此外还有空调系统和阅读灯，配有支持全天候飞行的全自动飞控、全电动飞机，还有多个旋翼备份保障安全，可在 1 小时内完成充电，螺旋桨收起后，可停在汽车停车位上。



图4 亿航184飞行形态和折叠形态

### (2) 中航工业赛羚

2015年第三届天津直升机国际博览会上，中航工业推出了赛羚旋翼式汽车，如图5所示。赛羚自重为100kg，由旋翼系统、动力臂系统、控制系统、行走系统、电气系统、车体等部分组成。旋翼系统可收放，展开时有六副旋翼，通过控制指令，产生纵向、横向以及航向的操纵力矩。动力臂系统用来联接旋翼系统与车体，可以伸缩，将旋翼系统的各种力传递到车体。控制系统用来控制飞行和地面行走的状态。行走系统包括车体的底盘、驱动等，可实现汽车的基本功能。电气系统仅包含直流电源系统，为整机提供直流电源。车体用来联接各个分系统，主要由车身的骨架、外壳构成。

### (3) 吉利Transition

2017年11月，吉利控股集团全资收购了美国的Terrafugia。2018年8月1号，吉利正式宣布，Terrafugia的飞行汽车Transition（如图6所示）于10月开启预定，首批正在量产，将于2019年问世。



图5 赛羚飞行汽车



图6 Transition飞行形态和折叠形态

仅需要40s左右，Transition的机翼就能完全伸展，且只需要30m的跑道就能够飞上天空，基本上能够在任何一条宽敞的马路上起飞。机翼收起情况下，Transition可以轻松进入家用车库。





在安全性方面，Transition配备有安全气囊、预紧式安全带、碰撞溃缩区等一系列安全装置，还装备了降落伞。

## 3 基本原理与技术框架

### 3.1 飞行器的基本原理及分类

从飞行原理和结构看，目前可用于载人的飞行器主要分为：固定翼飞行器、多旋翼飞行器、

表2 各类飞行器优缺点对比

飞行器种类	优点	缺点	代表飞行器	应用领域	飞行原理	实物图
固定翼飞行器	速度快、航程长、载重大；	起降需要跑道，无法空中悬停；	飞机、滑翔机	民用、军用	发动机驱动，机翼上下方气流流速差产生压力差，机翼下面的压力大于上面；	
多旋翼飞行器	操控性强，可垂直起降和悬停；	速度低、负载小，续航能力较差；	亿航184、surefly	民用、军用、消费	调节电机转速改变螺旋桨转速，从而改变升力；	
直升机	可以做低空、低速和机头方向不变的机动飞行，特别可在小面积场地垂直起降；	振动和噪声较高、维护检修工作量较大、使用成本较高，速度较低，航程较短；	军用直升机	民用、军用	发动机驱动桨叶，产生静压力拉起直升机；	
涵道风扇飞行器	机动性能独具特色，适于在城市复杂环境下执行任务，结构紧凑、推进效率高，噪声低；	发展仍处在起步上升的阶段，结构、气动以及控制理论和方法都不成熟；	Cypher II	军用	调节电机转速改变涵道风扇转速，从而改变升力；	
倾转旋翼飞行器	速度快、航程远，负载大，可垂直起降；	相关理论技术不成熟，控制难度较高；	V22鱼鹰倾转旋翼机	军用	旋翼提供垂直起降升力，巡航时机翼偏转提供升力；	

直升机、涵道风扇飞行器及倾转旋翼飞行器等。这些类型的飞行器搭载上无人控制系统，可以在一定程度上改造成无人驾驶即自主载人飞行器。不同类型的飞行器各有优缺点，如表2所示。

### 3.2 自主载人飞行器技术框架

从系统组成来看，自主载人飞行器系统主要包括机体结构、动力能源、航电系统、地面控制等，如图7所示。机体结构作为飞行器的骨架，包括机身、机架和座椅等。动力能源包括动力系统和电源系统，其中动力系统包括电机、电调和旋翼等，是飞行器升力的来源；电源系统包括电池、电池管理系统和各种电源转换模块，为飞行器各

模块提供能量，相当于飞行器的“心脏”；航电系统是飞行器的重要组成部分，主要包括飞控系统、通讯系统、人机交互等；飞控系统通过运算处理，实现对飞行器的控制，相当于飞行器的“驾驶员”；通讯系统是地面进行通讯的媒介，包括数传和图传通讯；人机交互系统用于乘客对飞行器的互动。地面控制用于显示飞行器状态，方便地面人员对飞行器进行指挥和控制。

在操控方面，消费型多旋翼无人机基本都采用地面遥控设备对其进行实时遥控操作来完成目标飞行任务。与此不同的是，自主载人飞行器可摆脱对遥控操作的依赖，实现自动驾驶飞行，这主要依靠飞行器的飞控系统。自主载人飞行器的

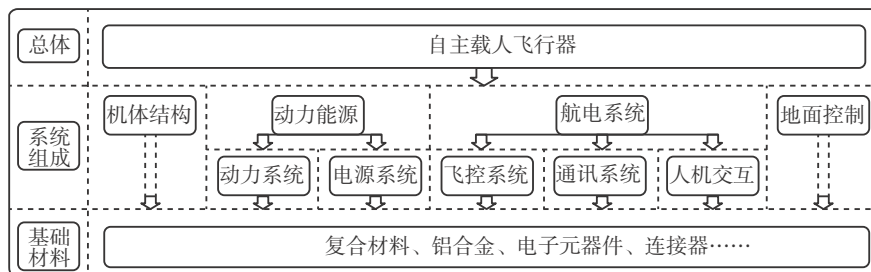


图7 自主载人飞行器整体组成框架

飞控系统可以根据任务自动生成合理的轨迹，并通过检测周围环境障碍物来实现自动避障，从而控制飞行器安全地飞行。同时因自动驾驶不需要飞行员驾驶，可避免人为误操作，从而可提高自主载人飞行器的安全性能。

与一般无人机的区别是，自主载人飞行器因为要载人，故需要重点关注安全技术；自主载人飞行器要广泛普及，首先需要保证飞行器安全性方面不差于汽车。自主飞行器设计上需要考虑安全因素，包括在硬件冗余、抗干扰、故障检测及处理等。同时自主载人飞行器也需要关注噪声方面，噪声不仅仅会引起地面上人们的反感，更会引起飞行器上人员的感受。因此需要研究降噪技术，以降低飞行器的噪声，保证在人们可接受的范围内。

## 4 关键技术分析

### 4.1 飞控系统

飞控系统是整个自主系统实现无人驾驶的核心，可以理解成自主载人飞行器的“驾驶员”，飞行器的姿态、位置、悬停、巡航飞行等控制都是依靠飞控系统来实现。飞控系统主要包括各种传感器（陀螺仪、加速度计、磁力计、GPS等）和机载计算机两大部分。各类传感器相当于飞控系统的“眼睛”，用于获取飞行器姿态角、位置、速度和高度等参数，是飞控系统的基础，其测量精度也决定了飞行器的控制精度。机载计算机是飞控

系统的“大脑”，通过各类传感器获取飞行器姿态位置状态，进行运算处理，输出指令给动力系统来完成相应的姿态调整等控制动作。

飞控系统作为飞行器的核心部件，能自动完成飞行器起飞、按设定轨迹飞行、自动返航和自主降落等整个飞行过程的控制。飞控系统涉及的技术主要有：飞行器的导航技术、位姿控制、轨迹规划、自动避障等。

#### (1) 导航技术

获得高精度、高可靠性的飞行器速度、位置和姿态是实现多旋翼无人机自主飞行的首要条件。事实上，每一种传感器的性能都具有一定局限性，无法完全满足飞行器的导航要求。为了同时满足高精度、高稳定性、高实时性的要求，可以选择将多种传感器组合在一起，构成组合导航系统。组合导航系统实质上是一种多传感器组合导航系统，可以获得多种信息源，研究如何将这冗余测量信息进行有机地信息融合，从而获得高精度、高可靠性、高鲁棒性、高实时性的导航信息，是目前组合导航系统研究的重点和关键技术问题。Fresk E等人<sup>[4]</sup>基于误差参数提出一种可以适用于任意无人机位姿估计的通用框架，利用拓展卡尔曼滤波的平方根公式来保证协方差矩阵的半正定性，通过增加计算的动态范围来解决小型嵌入式系统中的动态范围问题，同时整体计算量保持在一个较低的水平。Cordeiro T等人<sup>[5]</sup>提出了一种基于天线阵的姿态估计框架，通过ESPRIT算法获得一对天线所接收信号之间的相位差，这种估计称

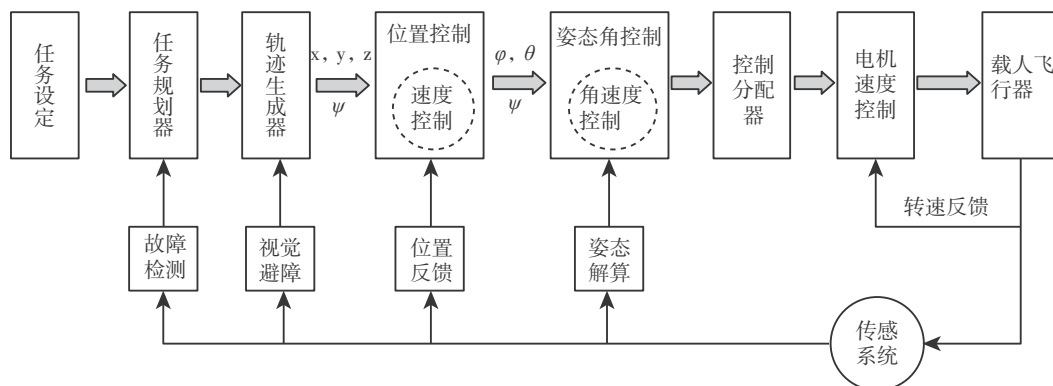


图8 自主载人飞行器的控制框图

为视线矢量测量，并且结合到拓展卡尔曼滤波、四元素等姿态估计算法中，另外，他们还使用已知的扰动模型找到相移均方误差，来分析计算视线矢量的误差协方差矩阵。Wu J等人<sup>[6]</sup>提出了一种基于四元数的新型姿态估计器，它具有磁、角速率、重力传感器阵列，作者设计了一种固定增益互补滤波器进行多传感器数据融合，为了避免使用迭代算法，将基于加速度计的姿态解算转换为线性系统，基于以上，作者设计了一种将陀螺仪和加速度计融合，不需要迭代的互补滤波器。

## (2) 位姿控制

位置和姿态控制是飞控系统中最重要的控制功能，它是飞行器稳定飞行和完成各种复杂的飞行任务的基础，其控制效果也决定了轨迹跟踪精度和抗干扰性能。国内外研究者在这方面开展了大量的研究工作。目前多旋翼飞行器的位姿控制方法主要有PID控制、滑模控制、反步法、LQR控制等<sup>[7]</sup>，其中PID控制因不依赖模型，且具有一定的鲁棒性，一般的开源飞控和消费级无人机产品采用的都是PID控制算法。

在此基础上，不少研究者开始结合现有控制方法来提高位姿控制性能。Chen F等人提出了一种结合滑模控制和反步控制技术的非线性控制器，提高了系统的鲁棒性<sup>[8]</sup>。Raffo G等人提出一种结合 $H_\infty$ 控制和反步法的控制方法，利用 $H_\infty$ 控制保证无人机姿态稳定控制，同时结合反演法实现对航迹跟踪控制<sup>[9]</sup>。Yacef F等人提出了一种利用自适应模糊控制来逼近未知的非线性反步的方法，该控制方法提高了轨迹跟踪性能和抗干扰能力<sup>[10]</sup>。

在飞行过程中，飞行器容易受到内外部综合干扰（如外部阵风影响），位姿控制效果也会受到影响，因此抗干扰飞行也成为了研究热点。Lyu X等人提出了一种基于扰动观测器的控制方法，可以提高在受风等外部干扰时的悬停精度<sup>[11]</sup>；Wang C等人针对无人机负载变化和变阵风干扰问题，提出了一种自适应鲁棒控制器，可用于一直扰动和估计系统参数<sup>[12]</sup>。Zhang C等人提出了一种用于微型

飞行器轨迹跟踪控制的自适应神经网络方法，可对不确定因素进行估计，从而提高系统抗干扰能力<sup>[13]</sup>。

## (3) 轨迹规划

与一般的消费级无人机不同，自主载人飞行器无需依赖地面实时遥操作，在确定好目的地后，可以进行合理的轨迹规划，然后自主飞行，这就要求飞控系统具有飞行轨迹在线实时规划能力。轨迹规划基本框架一般包含两部分内容，一部分是路径搜索，另一部分是轨迹拟合。由于无人机轨迹规划是在三维空间里进行的，相比于一般的平面机器人轨迹规划而言，更加复杂。

作为无人机自动驾驶的关键技术，轨迹规划是当前无人机研究领域内的另一热点。林鹏宏针对四轴飞行器多约束条件下的轨迹规划，结合使用基于RRT算法的路径搜索方法和基于模型预测的轨迹拟合法，仿真验证该方法的有效性<sup>[14]</sup>。Li M等人利用基于采样的RTT算法进行最优路径规划，来生成路径点序列，这种方法与林鹏宏方法类似<sup>[15]</sup>。Chen Y等人提出一种改进型中心力优化方法(MCFO)，在路径规划过程中，利用粒子群算法和遗传算法对原中心力优化方法进行改进<sup>[16]</sup>。

## (4) 自主避障

避障系统是自主载人飞行器顺利完成飞行任务的重要安全保障，很大程度上反映了自主载人飞行器的智能水平与实际飞行安全性。避障系统是指在自主载人飞行器的飞行过程中不断监控物理环境，及时发现障碍物，根据对应的深度信息来规划飞行路径，飞行控制器根据飞行路径来实现避障，完成飞行任务。要实现避障，最关键的一步是通过传感器实时获取周边环境信息，而获取周围环境信息的传感器就目前而言可分为超声波传感器、红外传感器、激光传感器以及视觉传感器等。目前国际上研究机构和无人机公司，针对不同应用场景下的障碍物识别展开了深入的研究，主要分为主动式避障、被动式避障和复合式避障。

Ramasamy S等人<sup>[17]</sup>针对其在飞行器系统感知

避障进行了深入研究，指出中小型飞行器由于经常在地面附近操作，并且由于驾驶员非常有限的观察和判别能力，进一步加剧了发生碰撞的可能性，他们提出了一种基于激光雷达的避障系统架构，该系统包括自动避障算法、人机界面交互、地面控制站。该系统为了实现导航信息和跟踪误差的实时处理，提出了解析模型。Sasongko R A 等人<sup>[18]</sup>提出了一种避障算法，当发现飞行路径上存在障碍物，根据所识别的障碍物几何信息建立受限椭圆区域，基于该椭圆区域计算避障路径。随着自主载人飞行器的迅速发展，对障碍物识别的分辨率、精度、速度的要求也越来越高，同时对飞行器的动态响应性能要求也越来越高，更优的传感器、识别算法和飞行器动态性能是未来的研究热点。

#### 4.2 通信链路

无人飞行器数据链，主要任务是将从飞行器上采集到的任务数据传送给地面站，并将地面站的遥操作指令返回给飞行器。如图9所示，数据链主要包括飞行数据与视频数据，它们的传输通过数传系统与图传系统完成。

数据链传输的关键技术包括调频技术、抗干扰技术和安全保密技术等。调频技术是将基带信号转换成传输信号，主要方式有调幅(ASK)、调频(FSK)和调相(PSK)<sup>[19]</sup>。目前无人飞行器主要采用线性的调制技术，如二相移相键控(BPSK)、四相移相键控(QPSK)和正交振幅调制(QAM)等。

抗干扰技术是为了降低数据链在传输过程中因远距离链路传输带来的损耗、遮挡物带来的信号衰落、飞行器高速移动带来的多普勒频移以及

在复杂环境下的干扰和阻塞等问题，目前常采用通常抗干扰编码、直接序列扩频、软扩频技术、跳频、跳时和扩跳结合技术等方法<sup>[20]</sup>。

数据链的安全性极为重要，它涉及到数据泄露、数据欺骗和服务器攻击等严重问题。目前使用的数据链安全技术一般有两种模式：空-地安全模式和端对端安全模式<sup>[21]</sup>。空-地安全模式的优点是安全操作对操作机构而言是透明的，攻击者很难在空-地网络中获取路由信息并进行数据分析，但它在地-地网络中没有内在的信息安全保护，不能防止来自内部的攻击。端对端安全模式保障了从飞机到操作机构地面主机的整条链路，即空-地链路与地-地链路的安全，但它需要操作机构本身进行安全防护。

#### 4.3 地面指挥中心

地面指挥中心是整个无人机系统的监控和指挥中心，主要任务是实现与无人飞行器的有效通讯，并在此基础上，实现对无人机的飞行状态进行监控，控制无人机的飞行状态<sup>[22]</sup>。基于这些要求，地面站通常包括显示模块和控制模块两大部分，显示模块包括：仪表显示模块，故障显示模块，跟踪显示模块以及航迹显示模块；控制模块可以实现无人机的航迹规划，设备自主起落，遇险自动返航以及设备悬停等功能<sup>[23]</sup>。国内外针对无人机的地面站，做出了很多研究<sup>[24]</sup>。亿航智能技术有限公司(EHANG)针对旗下的亿航184无人载人飞行器搭建了实施完备，功能全面的地面调度指挥中心。

为了更好地控制无人机，提升可靠性，无人

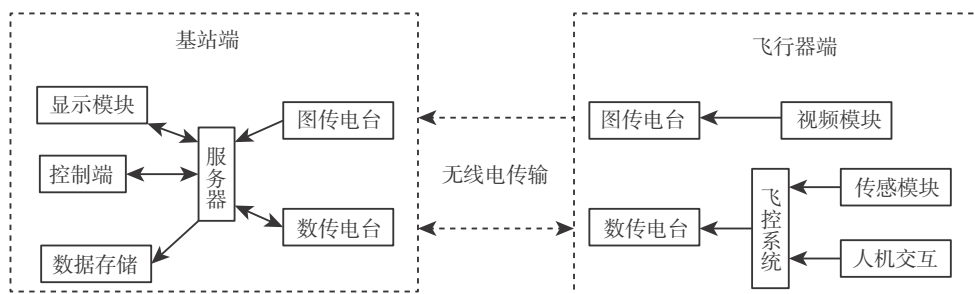


图9 无人飞行器数据链示意图



图10 亿航184配套地面指挥中心

机地面站在设计的过程中，往往需要考虑如下技术：抗干扰技术，无人机定位技术，信号快速捕获技术以及低仰角高速数据接收技术<sup>[25]</sup>。随着无人机技术的发展，地面站系统也从一站一机向一站多机方向转变<sup>[26]</sup>。即同时操控多架无人机，这样既提高了操作效率，也减少了人力成本。

#### 4.4 能源系统

飞行器的能源形式大致可以分为燃油、电池和油-电混合三大类。传统的内燃机，包括往复发动机和涡轮发动机等，其效率仅为20%~30%，远低于电机系统。加上化石燃料的不可再生性，对环境的负面影响，以及在短途飞行中的经济效益劣势<sup>[27]</sup>，“化石燃料+内燃机”的组合被其他更先进的能源方式取代也是大势所趋。广义上的电池，如锂电池、燃料电池、超级电容等，是燃油的理想替代者之一。尽管电池技术层出不穷，但是目前还远未达到可以完全替代的程度。另一个方案是油-电混合，结合燃油能量密度高和电能高效、环保的优势，用燃油发电驱动飞行器。

在电池技术中，应用最广的是锂电池技术。然而其发展却已经陷入困境，锂电池单体的能量密度不足1MJ/kg，远远达不到取代燃油的要求。而仅依靠更先进、更复杂的电芯制造技术，包括控制电池中活性颗粒的大小形态以及集电结构等，其能量密度无法再有大幅的提升<sup>[28]</sup>。锂电池技术需要更基础、更创新的理论突破。

相比之下，其他的新型能源，如氢能、可再生的生物燃料等，在应用广泛度、技术成熟度、

经济成本、环境影响等方面相比于电池都不具备优势<sup>[29]</sup>。在可预见的未来，电池仍然是最有前景的能源形式。

#### 4.5 安全保障

对于飞行器整体，需要进行状态健康监测与预测。可按阶段分为飞行前的健康检查、飞行中的健康监测、失效保护等方面。在传统的飞机等航空装备中，欧美等发达国家研发了直升机完好性与使用监测系统(Health and Usage Monitoring System, HUMS)、飞机故障预测和状态管理系统(Prognostics and Health Management System, PHM)、中央维护系统(CMS)<sup>[30]</sup>。通过健康监测与预测系统可以提升飞行器的任务可靠性和使用寿命。

随着无人机的快速发展<sup>[31]</sup>，其所带来的安全威胁已经引起了人们和各个国家政府机构的关注<sup>[32, 33]</sup>，相应的无人机反制技术也在不断发展。在2016年的315晚会上，央视演示了黑客入侵一架DJI的精灵无人机并完全获取无人机控制权的过程。无人机反制技术分类举例如表3所示<sup>[34]</sup>。

表3 无人机反制技术分类

拦截类	探测类
大功率无线频段压制	射频
激光武器破坏	音频
无人机捕捉	视频
劫持无线电控制信号	雷达

针对拦截和干扰，无人机的应对策略举例如表4所示。

表4 无人机干扰应对策略

干扰手段	应对策略
大功率无线频段干扰	根据内置安全策略返航或者自动降落
GPS 频段干扰	采用 GNSS，内置 GPS、Glonass、Galileo、北斗等多套卫星导航系统
声波干扰引起器件共振	采用多套不同共振频率的陀螺仪

载人方面，目前能大大提升挽救生命概率的方式是加装整机降落伞<sup>[35]</sup>。最著名的整机降落伞

公司是BRS，其产品如图 11 所示，在各种飞行事故中已经成功挽救了 300 多生命<sup>[36]</sup>。



图11 BRS整机降落伞<sup>[37]</sup>

## 5 其他相关技术

### 5.1 降噪技术

随着无人机的广泛运用，无人机噪声问题越来越受到人们的关注，无人机在飞行时，尤其是起降过程中常常产生强烈的噪声。以旋翼无人机为例，噪声来源主要是旋翼噪声和电机噪声。

南京航空航天大学宋辰瑶<sup>[38]</sup>基于声学时域公式建立了旋翼旋转噪声计算的方法和模型，实现悬停和前飞状态下旋翼厚度噪声和载荷噪声的计算，分析了桨叶片数、旋翼转速、旋翼直径、前飞速度等不同参数对旋翼噪声的影响。无刷直流电机驱动系统产生振动和噪声的因素很多，其中换向电流的急剧变化是引起电机振动和噪声的主

要原因之一。Jiao G<sup>[39]</sup>提出了一种正弦波代替方波驱动无刷永磁直流电动机，使输出的电流波形为正弦波，有效抑制换向电流的突变，降低了运行噪声。该项技术在大疆无人机上得到了应用，使飞行噪声降低了 4dB。

为了让无人机飞行时能够减少噪音，亚马逊基于仿生学原理，参照飞鸟翅膀和毛状植物，在螺旋桨边缘增加了锯齿状设计，并且根据类比思想，参照高尔夫球和潜艇螺旋桨，在螺旋桨表面增加了凸起设计，改变表面形态，起到了降噪的效果。

### 5.2 人机交互

人机交互系统是指飞行器内部，乘客与飞行器及乘客与地面控制中心之间交互的平台，其主要任务有三个：一是显示飞行器的飞行状态，二是对飞行器进行有限的控制，三是实现与地面控制中心之间的视频通讯。人机交互系统和地面站系统的功能十分类似，但是又有明显的区别：在显示功能方面，人机交互系统上显示的飞行状态参数是精简的，只显示乘客可能关心的参数，例如航速、高度等，对于一些专业的参数，只会在地面站系统上显示；在控制功能方面，人机交互系统只能对飞行器进行有限的控制，例如，只允许航迹规划、悬停、降落、返航等操作，不允许乘客随意控制飞行状态。基于以上需求，人机交互系统通常包括飞行器自身状态模块，飞行状态

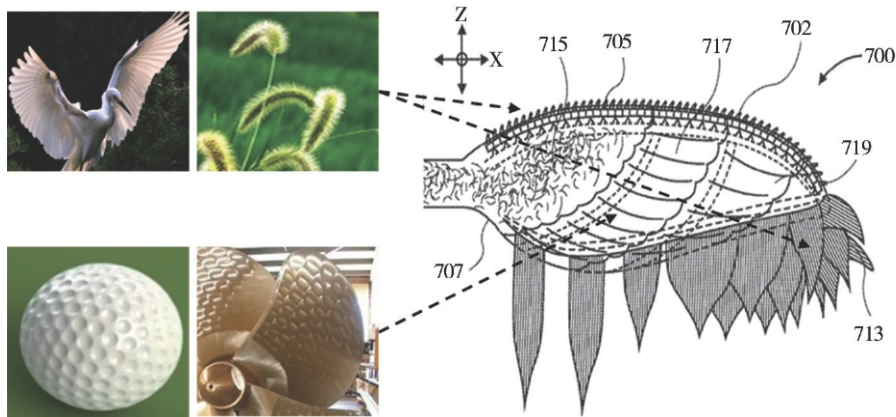


图12 亚马逊无人机螺旋桨降噪方案设计



模块和视频通讯模块三大部分，飞行器自身状态包括飞行器结构展示图，灯组控制，温度控制等，主要展示和控制一些与飞行无关的功能；飞行状态模块包括飞行状态显示和飞行控制；视频通讯模块利用摄像头、麦克风和视频通讯软件实现多方视频通话。



图13 人机交互系统

### 5.3 测试系统

为保证飞行器，尤其是自主载人飞行器稳定可靠地完成飞行任务，对系统各部分进行功能及性能测试是飞行器在研发阶段与飞行前后必不可少的环节。如图 14 所示，飞行器测试一般包含两部分内容：航电系统检测以及综合性能测试。

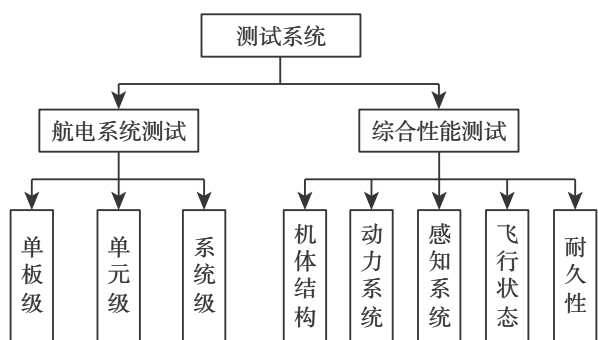


图14 飞行器测试系统的一般组成

航电系统检测主要涵盖单板级、单元级以及系统级的检测<sup>[40]</sup>。其中，系统级检测对各部分元器件的电信号、参数及兼容性等进行测试，是航电系统检测中最关键的部分。该技术目前已发展到第三代模块化自动测试系统<sup>[41]</sup>，即依靠测试总

线技术实现模块化的测试仪器方案，同步结合虚拟仪器技术自动完成测试任务。综合性能测试对象主要包括动力系统、感知系统、机体结构和飞行状态等方面，目前已发展到数值仿真、半物理仿真与实物测试相结合的方式<sup>[42-44]</sup>。

相较以往，目前的测试技术已能大幅降低研发周期与成本，但仍存在诸多问题：测试系统的开发成本依旧高昂、通用性不足并且缺乏统一的规范标准<sup>[45]</sup>。因此，如何更加经济、快速、安全、有效地完成测试任务，是未来测试技术的发展方向。

## 6 未来展望

1886年，“汽车之父”卡尔·本茨发明了世界上第一辆汽车——奔驰1号，汽车从当时18km/h的速度跑到现在，已经诞生了百公里加速度只需要3s的超级跑车以及“特斯拉”为代表的无人驾驶汽车，成为了当今世界最主要的交通工具。纵观整个汽车发展史，先后经历了追求功能与性能的起步阶段、追求安全与稳定的发展阶段、追求舒适与个性的成熟阶段和追求智能与环保的繁荣阶段。

按照汽车发展的历史，我们有理由相信，未来载人飞行器也将一步一步攻克性能、安全、续航、能效、环保等诸多技术壁垒，达到随时随地稳定地定制化出行(On Demand Mobility)要求。伴随着人工智能和网络信息技术的发展，未来的载人飞行器也必将朝着数字化、自动化、智能化的方向演进。

历史的经验告诉我们，技术的革命必将带动政策的革新。在民用航空器领域，适航政策是整个产业关键的一环。目前我国已经成为了世界上最大的无人机生产国，民航局等部门相继出台了一系列关于无人机管理、规范、应用等方面的法律法规和通知公告旨在规范无人机市场秩序的政策与文件。据统计，仅从2017年到2018年8月，我国出台的关于无人机方面的政策已有17条之多。

这也体现了我国对于无人机产业有序、持续发展的重视与支持。一方面，民用适航政策需要通过民用航空器设计、制造、使用和维修等环节进行科学统一的审查、鉴定、监督和管理，保障民机的安全稳定；另一方面，当今快速发展的无人机技术需要更灵活的适航政策来推动行业的快速发展。比如在无人机科研领域，需要出台专项政策，为研究人员提供试验空间和适航授权，这也将鼓励更多力量投入到无人飞行器的研究当中，促进整个城市空中交通产业的蓬勃发展。

我们可以构想这样一幅面向未来的美好蓝图：未来城市上空不同高度、不同轨迹上会出现无数无人驾驶的飞行器，载着乘客高速前往目的地，乘客可以按需定制出行，并且在机舱中享受各种服务。城市楼宇等建筑物顶部，会出现大量自动泊机位和充电桩，城市空中交通生态建成，人类的出行方式迈入“飞行时代”，社会生活方式将再一次发生变革。

## 参 考 文 献

- [1] 汪光焘. 中国城市交通问题、对策与理论需求 [J]. 城市交通, 2016, (6): 1-9.
- [2] NASA. Strategic Framework for On-Demand Air Mobility [EB/OL]. 2017 [2018]. <http://www.nianet.org/ODM/reports/ODM%20Strategic%20Framework%20%20Final%20170308>.
- [3] Graham D. Vertical Take-off and Landing (VTOL): Emerging and Transformational Capabilities [EB/OL]. 2018 [2018]. <https://vtol.org/files/dmfile/02-TVF2018-Graham-DARPA-Jan161>.
- [4] Fresk E, Nikolakopoulos G, Gustafsson T. A generalized reduced-complexity inertial navigation system for unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 25 (1): 192-207.
- [5] Cordeiro T, Costa J P, Júnior R T, et al. Improved kalman-based attitude estimation framework for UAVs via an antenna array [J]. Digital Signal Processing, 2016, 59: 49-65.
- [6] Wu J, Zhou Z, Chen J, et al. Fast complementary filter for attitude estimation using low-cost MARG sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (18): 6997-7007.
- [7] 刘昌龙. 四旋翼无人机建模与控制问题研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- [8] Chen F, Jiang R, Zhang K, et al. Robust backstepping sliding-mode control and observer-based fault estimation for a quadrotor UAV [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (8): 5044-5056.
- [9] Raffo G V, Ortega M G, Rubio F R. Robust nonlinear control for path tracking of a quad-rotor helicopter [J]. Asian Journal of Control, 2015, 17 (1): 142-156.
- [10] Yacef F, Bouhali O, Hamerlain M, et al. Observer-based adaptive fuzzy backstepping tracking control of quadrotor unmanned aerial vehicle powered by Li-ion battery [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 84 (1-4): 179-197.
- [11] Lyu X, Zhou J, Gu H, et al. Disturbance observer based hovering control of quadrotor tail-sitter VTOL UAVs using H-infinity synthesis [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3 (4).
- [12] Wang C, Song B, Huang P, et al. Trajectory tracking control for quadrotor robot subject to payload variation and wind gust disturbance [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 83 (2): 315-333.
- [13] Zang C, Hu H, Wang J. An adaptive neural network approach to the tracking control of micro aerial vehicles in constrained space [J]. International Journal of Systems Science, 2017, 48 (1): 84-94.
- [14] 林鹏宏. 四轴无人机多约束条件下的跟踪控制和轨迹规划方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [15] Li M, Wu H N, Liu Z Y. Sampling-based path planning and model predictive image-based visual servoing for quadrotor UAVs [C]. Chinese Automation Congress (CAC), 2017. IEEE, 2017: 6237-6242.
- [16] Chen Y, Yu J, Mei Y, et al. Modified central force optimization (MCFO) algorithm for 3D UAV path planning [J]. Neurocomputing, 2016, 171: 878-888.
- [17] Ramasamy S, Sabatini R, Gardi A, et al. LIDAR obstacle warning and avoidance system for unmanned aerial vehicle sense-and-avoid [J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 55 (1): 344-358.
- [18] Sasongko R A, Rawikara S S, Tampubolon H J. UAV Obstacle avoidance algorithm based on ellipsoid geometry

- [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 88 (2-4): 1-15.
- [19] 焦欣然. 浅析数字信号的载波调制 [J]. *西部广播电视*, 2004, (1): 26-31.
- [20] 邓雪群. 宽带数据链抗干扰传输技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [21] 王剑, 宋阳, 韩绍程. 基于国密SM4算法的ACARS数据链信息加密 [J]. *中国民航大学学报*, 2018.
- [22] 徐媛媛. 一种四旋翼地面站系统设计与实现 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [23] Ajami A, Balmat J F, Gauthier J P, et al. Path planning and Ground Control Station simulator for UAV [J]. 2018, 146 (1): 1-13.
- [24] 李瞳. 小型模块化无人机地面站系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [25] 张睿纯, 吴乐, 殷小房. 无人机遥测地面站系统设计要点分析 [J]. *电子世界*. 2013, (13): 113.
- [26] Perezd D, Maza I, Caballero F, et al. A ground control station for a multi-UAV surveillance system [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 69 (1-4): 119-130.
- [27] Stoll A M, Veble M G. Design studies of thin-haul commuter aircraft with distributed electric propulsion [C] //16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. 2016: 3765.
- [28] Goodenough J B, Park K S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135 (4): 1167-1176.
- [29] Johanning A, Scholz D. Comparison of the potential environmental impact improvements of future aircraft concepts using life cycle assessment [C] //CEAS: 5th CEAS Air&Space Conference: Proceedings. 2015.
- [30] 莫固良, 汪慧云, 李兴旺, 等. 飞机健康监测与预测系统的发展及展望 [J]. *振动.测试与诊断*, 2013, 33 (6): 925-930.
- [31] 梁丽雯. 在日本, AI已开始抢白领的饭碗 [J]. *金融科技时代*, 2017, (2): 87-87.
- [32] 王焯. 反无人机市场需求日增, 亟待规范发展 [J]. *中国安防*, 2016, 21 (6): 1393-1412.
- [33] 梁超. 基于无线信号的无人机探测与干扰方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [34] 潘兴宏, 秦志强. 反无人机系统浅析 [J]. *科学中国人*, 2016, (5).
- [35] Smith M. Parachute [J]. *Pleiades: Literature in Context*, 2017, 37 (1): 17-18.
- [36] Grant opperman. BRS: The Benefits of Whole Airplane Parachute Systems [EB/OL]. 2015.01.15. <https://brsaerospace.com/>.
- [37] Barker D. Des barker evaluates the special edition cirrus SR22-kalahari [J]. *World Airnews*, 2016.
- [38] 宋辰瑶. 基于尾迹分析的旋翼旋转噪声计算及桨-涡干扰噪声研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [39] Jiao G, Rahn C D. Field weakening for radial force reduction in brushless permanent-magnet DC motors [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, 40 (5): 3286-3292.
- [40] 张杰. 无人旋翼机控制与测试技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [41] 齐永龙, 宋斌, 刘道煦. 国外自动测试系统发展综述 [J]. *国外电子测量技术*, 2015, (12): 1-4.
- [42] Ryll M, Bühlhoff H H, Giordano P R. A novel overactuated quadrotor unmanned aerial vehicle: modeling, control, and experimental validation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23 (2): 540-556.
- [43] Kim K, Kim S, Suk J, et al. Flight test of flying-wing type unmanned aerial vehicle with partial wing-loss [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018.
- [44] 刘旭阳. 自动测试系统在新趋势下的发展与应用 [J]. *电子技术应用*, 2015, 41 (11): 4-5.
- [45] Zhang F, Fu M, Liu L, et al. Platform design and test analysis for UAV flight inspection and testing [C] //Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2016 4th International Conference on. IEEE, 2016: 1-6.

#### 作者简介:

张丹(1964-), 男, 博士, 加拿大工程院院士, 主要研究方向为并联机器人构型创新、运动静力学建模及操作性能优化等。

# 智能化战争与无人系统 技术的发展

李风雷<sup>1</sup>, 卢昊<sup>2</sup>, 宋闯<sup>2</sup>, 郝明瑞<sup>2</sup>

(1. 中国航天科工集团有限公司第三研究院, 北京 100074; 2. 复杂系统控制与智能协同技术重点实验室, 北京 100074)

**摘要:** 对军事领域无人系统技术的发展现状进行了综合评述, 并对未来研究进行了展望。首先分析未来战争的发展趋势, 指出未来战争将是智能化战争, 并且无人系统是未来战争的主力军。随后通过列举美国在军用无人系统技术领域的发展现状, 说明美国正在分布式、多域作战概念牵引下大力推动无人系统智能化技术的发展。最后从无人平台的智能化、武器系统的智能化及作战运筹的智能化三个方面对无人系统技术在未来智能化战争中的应用给出建议。综述表明, 智能化协同的无人系统集群作战是未来战争的主要形态, 人工智能、分布式是当前以及未来一段时间内无人系统技术的研究热点。

**关键词:** 智能化战争; 无人系统; 自主技术; 分布式作战

**中图分类号:** TP18   **文献标识码:** A   **文章编号:** 2096-5915 (2018) 02-0104-10

## Development of Intelligent Warfare and Unmanned System Technology

LI Fenglei<sup>1</sup>, LU Hao<sup>2</sup>, SONG Chuang<sup>2</sup>, HAO Mingrui<sup>2</sup>

(1. The Third Institute of China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100074, China;  
2. Science and Technology on Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation Laboratory, Beijing 100074, China)

**Abstract:** This paper analyzes the state of art of unmanned system technology in the military realm, and prospects the future researches. First, the development direction of future wars is pointed out that wars of the future will be intelligent, and unmanned system will play a lead role in future wars. Then the current research programs of military unmanned system technology are illustrated to show that the intelligent technologies for unmanned system are strongly promoted by the Pentagon under the guidance of distributed concept. At last, it suggests the potential applications of unmanned system technology in future intelligent wars from three aspects of intelligent unmanned vehicles, intelligent weapon systems, and intelligent battle management. It is indicated that the fight among intelligent cooperative swarms of unmanned systems is the major style of future war. Artificial intelligence and distribution are the research focuses of unmanned system technology at present and in the future.

**Keywords:** Intelligent Warfare; Unmanned System; Autonomous Technology; Distributed Warfare

收稿日期: 2018-06-13; 修回日期: 2018-07-02

基金项目: 国防基础科研计划资助 (JCKY2017204B064)

## 1 引言

习主席指出，筹划和指导战争，必须高度关注科学技术对战争的影响。科学技术是军事发展中最活跃、最具革命性的因素，每一次重大科技进步和创新都会引起战争形态和作战方式的深刻变革<sup>[1]</sup>。

冷兵器时代，金属冶炼技术给人类带来了金戈铁马，战斗组织开始讲究排兵布阵，拉开了军事革命的序幕。工业革命后的蒸汽机、内燃机、电力技术等推动了机械化战争，以微电子和计算机为代表的信息技术革命催生了信息化战争，同时分别伴随有“平台中心论”、“信息中心论”等作战理论。

科学技术的进步和军事理论的演变是推动军事革命的两个核心要素。先进的武器技术是军事革命物质的基础，是“硬件”。创新的军事理论是军事革命的灵魂，是“软件”，它不但决定了硬件如何执行具体功能，而且决定了硬件如何相互作用，如何发挥最大效能<sup>[2]</sup>。

当今世界正处于新一轮科技革命与产业革命发展的关键时期，在人工智能领域带动下，大量新技术涌现，必将对军事领域产生广泛而深远的影响。美国前空军部长麦克·韦恩就惊呼，“正如第一次世界大战使用20世纪的机械化部队却在以19世纪的方式作战，我们现在同样存在以20世纪的方式在21世纪作战的危险”。在不远的未来将会面临何种形态的战争，这是值得深入思考的问题。

## 2 未来战争的发展趋势

### 2.1 未来战争是智能化战争

自20世纪90年代末以来，美国在高端的传感系统、C<sup>4</sup>I系统、制导武器、太空技术、网络技术及隐身技术等领域享有的军事垄断优势已经逐渐被削弱，特别是中国在反航母、反卫星、反预警、反信息节点等方面所谓的“反介入/区域拒止”能

力进步使美国的军事担忧上升。然而，在经济复苏缓慢、债务快速增加、庞大的国防预算难以维持的大背景下，美国无法以较大的经济投入通过打造一个全新的装备体系进行军事能力全面提升。因此，2014年11月15日，为谋求长远的全球霸权地位，时任美国国防部长哈格尔宣布开始实施国防创新行动，集中资金发展对潜在对手具有威慑力的军事力量，确保美国持续的军事技术优势，被称为“第三次抵消战略”，以此为出发点演变出的军事理论思想势必引发新的军事变革。

第三次抵消战略聚焦于形成六大能力：一是分布式、远程打击实现作战效能的能力，加强单个平台独立作战能力，同时将平台分布式部署，实现分布式远程打击，使触角前伸，节点后置；二是利用作战距离、精确性及速度把握并维持先机的能力，重点开展高超声速武器化、高超声速作战平台等技术研究，重新塑造改变游戏规则军事力量；三是利用分散、新型的作战防护样式加强生存能力，分散部署海空基作战平台，推进海军一体化的防空火力，空军分散部署武库机，加固军事设施并形成联动；四是大规模集群数量优势能力，以大量低成本、自主协同的飞行器/航行器，构成侦打一体的联合体，形成协同作战能力，降低对手的防御火力消费比；五是发展新型分布式机动和近距离作战能力，主要利用动能武器、电子战武器、网络战武器，实现分布式机动作战和近距防空作战；六是适应复杂网络攻击和电子战环境下的更强作战能力，主要是提高信息网络平台的抗干扰能力和在电子战对抗环境下的适应能力。

第三次抵消战略拟重点发展的颠覆性作战能力与目前国际上公认的新一轮科技和产业革命的重要技术领域高度吻合，聚焦于人工智能和自主技术，重点关注五大关键技术领域：自主学习技术、人机交互技术、人类作战行动辅助系统、先进有人无人作战编组、针对网络与电磁战环境的网络使能自主武器。基于第三次抵消战略思想的军事能力建设将从三个维度引发新一轮军事变革：

从战场空间形态上看，向分布式发展；从作战时间进程上看，向高动态发展；从作战运筹过程上看，向智能化发展。

纵观科技革命对战争的推动以及美军对未来战争的布局，未来战争的武器技术、作战概念将向以智能为主要特征的高级战争形态演进。“制智权”将成为未来战争的核心要素，谁掌握了智力优势，谁将掌握未来战争的主动权。习主席在党的十九大报告中提出“加强军事力量运用，加快军事智能化发展，提高基于网络信息体系的联合作战能力、全域作战能力”新一代人工智能技术和自主技术快速走向战场，将催生新型作战力量，颠覆传统战争模式，基于网络信息化的联合作战、多域作战，智能化是其核心能力，所以未来战争必将是智能化战争。

## 2.2 无人系统是未来战争的主力军

在第三次抵消战略军事思想的牵引下，美国海空军开始探索研究应对未来智能化战争的“分布式”作战概念和装备发展体系。

2014年，美国海军战争学院进行了一次兵棋推演，蓝方利用濒海战斗舰加装了远程反舰武器，这一变化使得红方不得不花费大量宝贵的情报、监视与侦察(ISR)资源，试图发现这些更具威胁的舰艇。由此，美国海军提出了“分布式杀伤”概念，即把以平台为中心的集中式舰船编队向空间散开，使得作战舰艇由编队作战时的各司其职转变为独立实现整个打击链闭环。

另外，美国空军也提出“分布式作战”体系。为了实现多种平台跨域联合作战，美国空军首次提出“作战云”概念方案，核心理念是海、空、天、网络的跨域协同，将每个作战平台整合至一个由“ISR、打击、机动和保障”构成的综合体，使之成为该综合体中的一个节点，既是传感器，也是可以产生作战效果的武器，实现武器运用从平台为中心向互联的信息驱动模式转变，进而最大程度地发挥隐身飞机、精确打击武器、先进指挥与控制系统以及有人与无人系统集合的优势<sup>[3]</sup>。

美国国防预先研究计划局(DARPA)于2015年提出“体系集成技术和试验”(SoSITE)项目，项目概念如图1所示<sup>[4]</sup>。

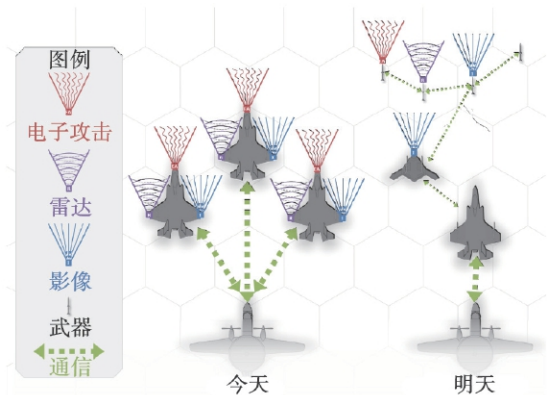


图1 SoSITE项目中的未来空中力量示意图

该项目聚焦于分布式空战的概念、架构和技术集成工具，利用现有航空系统的能力，通过开放式系统架构，把电子战、传感器、武器、定位导航和授时以及数据/通讯数据链等能力拆分到大量可实时通信的有人和无人平台上，执行ISR和目标打击任务；开放系统构架为发展可互换的组件和平台提供统一的技术标准和工具，如有需要进行快速的升级和替换。

在开放式的体系架构下，各种有人/无人平台的作战能力有机结合，能够盘活现有的三代机、四代机装备，通过加装适应性接口模块和工具，使它们能够快速纳入作战云的体系。装备发展思路由原来追求高精尖一体化的全能平台演变到快速地升级体系中某一个任务模块的功能，能够以较低的成本实现整个系统能力的快速模块化提升。

在未来智能化战争的“分布式”作战样式中，人是在后方的，执行具体战术任务的作战集群都是无人装备，关键在于如何让人能够从作战的各个任务和环节中解脱出来，实现战术和战役指挥的能力。对此，DARPA于2015年提出“拒止环境中的协同作战”(CODE)项目，旨在研究新型智能算法和软件，探索无人机的自主和协同技术，通过人机链路实现交互，使无人机群可以在一名

操作人员的管理下完成发现、识别、跟踪和攻击目标等作战的各个环节，实现有人机对无人机群“一对多”的操作，并能使无人机集群具备在复杂电磁环境中的执行任务能力，降低人的介入干扰程度。

基于上述作战概念和样式分析，未来的智能化战争将表现出三个主要特点：

(1) 机器主战。无人作战装备将取代士兵以及传统的作战装备成为主要的作战力量，人与武器将逐步分离，人由战争的前沿退向后方，主要负责战略决策和战役指挥；机器走向战争前沿，成为战术层面的主要执行者。

(2) 万物互联。分布式作战必然要求前出的武器或平台互联互通，自主和无人/有人系统实现互联，才能针对战场上瞬息万变的情况自主协同、配合行动。分布式作战、跨域协同要求有强大的信息高速公路，在复杂环境下构建低延时、高容量、高可靠的基础网络链路，基于智能网络算法实现动态连接、随遇接入、功能可重组、抗毁自愈、快速自组织等能力。

(3) 算法致胜。算法是人工智能的核心，算法优势赋予无人系统更高的自主性，取得行动优

势。人工智能算法在知识积累、重复性和准确性方面有较大优势，能够提高信息处理、感知和决策的质量和速度，加快“观察-判断-决策-行动”OODA环，取得战争主动权。以机器前出作战为主的无人系统在目标识别、情报分析、态势构建、威胁判断、协同攻击、多域作战、辅助决策、运筹管控等使命的牵引下，对智能化算法提出迫切需求，未来战争的博弈终将是智能算法的博弈。无人系统的平台技术是基础，但是智能算法是灵魂，智商欠佳、徒有肌肉的无人平台是不能赢得战争胜利的。

机器主战、万物互联、算法致胜也是未来智能战争的三大致胜机理，无人系统作为其主要载体，是未来智能化战争的主力军。

### 3 美国军用无人系统技术发展现状

美国海空军、DARPA、国防部战略能力办公室(SCO)等部门在作战体系概念、指挥/控制/管理系统、智能武器平台、网络通信系统四个方面设立大量研究项目对第三次抵消战略军事理论进行支撑，部分项目明细如表1所示。

表1 无人系统技术项目设置情况

基础能力	项目名称	主管部门	首次提出时间
作战体系概念	体系集成技术和试验 (SoSITE)	DARPA	2015年
	进攻性蜂群技术 (OFFSET)	DARPA	2017年
	跨域海上监视与瞄准 (CDMaST)	DARPA	2015年
指挥/控制/管理系统	拒止环境中的协同作战 (CODE)	DARPA	2015年
	分布式作战管理 (DBM)	DARPA、空军	2014年
智能武器平台	远程反舰导弹 (LRASM)	DARPA、海军	2009年
	山鹑 (Perdix)	SCO	2014年
	忠诚僚机 (Loyal Wingman)	SCO、空军	2016年
	小精灵 (Gremlins)	DARPA	2015年
	低成本无人蜂群技术 (LOCUST)	海军	2015年
	大直径无人潜航器 (LDUUV)	DARPA、海军	2013年
	持续追踪无人反潜艇 (ACTUV)	DARPA、海军	2012年
网络通信系统	对抗环境中的通信 (C2E)	DARPA	2015年
	用于任务优化的动态网络 (DyNAMO)	DARPA	2016年
	深水导航定位系统 (POSYDON)	DARPA	2015年

### 3.1 作战体系概念

在体系概念/架构论证方面，除了前文提到的SoSITE项目以外，DARPA还开展了OFFSET项目和CDMaST项目。

其中，OFFSET项目研究针对城市环境的“蜂群”作战概念，计划基于游戏环境开发开放式的系统架构和测试平台，通过作战仿真，开发并验证评估专为城市作战无人系统设计的“蜂群”战术战法，并牵引分布式感知、分散计算、弹性通信、自适应集体行为等新的无人系统技术。

CDMaST项目面向海上作战，其理念是把集中式的作战能力拆解、分散到大量低成本系统上，新型的反舰导弹与水下武器系统将大幅提高打击的范围和速度，低成本卫星、海底预置系统、无人系统与有人平台结合提供新型武器所需的监视与瞄准信息，通过将各型系统整合进一套协同网络形成作战体系，能够对敌方舰船和潜艇进行广域、跨域的监视、瞄准及打击，如图2所示<sup>[5]</sup>。

从项目设置的意图可以看出，美国正在通过将作战能力化整为零、作战力量分散部署，弱化平台的中心地位、真正体现以信息、火力的集成作为作战力量的核心，试图解决困扰集中式系统发展的瓶颈，是网络中心战的具体形式和抓手。

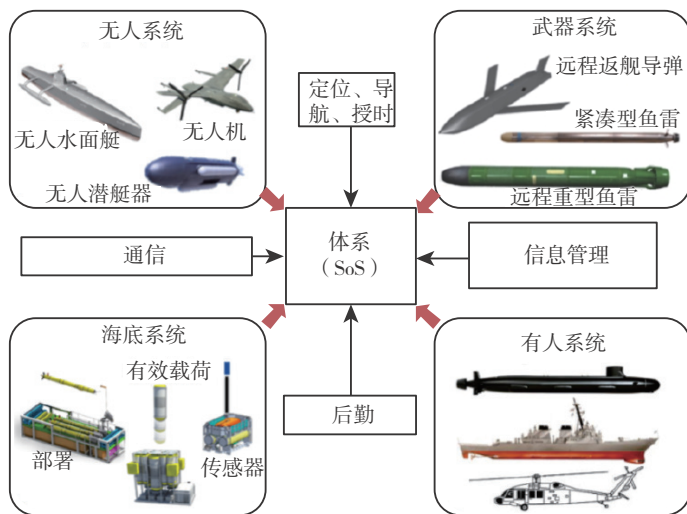


图2 CDMaST项目的作战体系示意图

### 3.2 指挥/控制/管理系统

CODE项目重点发展无人机群的自主协同技术，而DBM项目则侧重于分布式作战场景下的任务筹划技术，通过研究用于作战管理的任务规划算法、用于驾驶舱的先进人机交互技术、用于对抗网络环境的态势感知技术等，寻求发展可帮助预警机战斗管理人员及战斗机飞行员管理分布式空对空及空对地作战任务的智能辅助决策系统，项目的应用景象如图3所示<sup>[6]</sup>。

### 3.3 智能武器平台

LRASM是新型智能化武器装备的典型代表，在其宣传片中展现出多种智能特征，包括：自主感知突发威胁，并重新规划航迹规避威胁；利用自身传感器在远距离进行目标探测，完成虚假目标剔除，高价值目标识别和锁定；在近距离利用成像导引头实现目标的关键部位识别；三发导弹还完成了自主的目标打击任务分配。

DARPA正在开发的ACTUV无人艇和LDUUV无人潜航器都具备自主航行能力，作为节点前置，能够长时间部署执行侦查、监视、打击等作战任务。利用智能技术实现了诸如自主导航、目标识别、障碍规避、故障管理和容错、在线任务规划等功能。

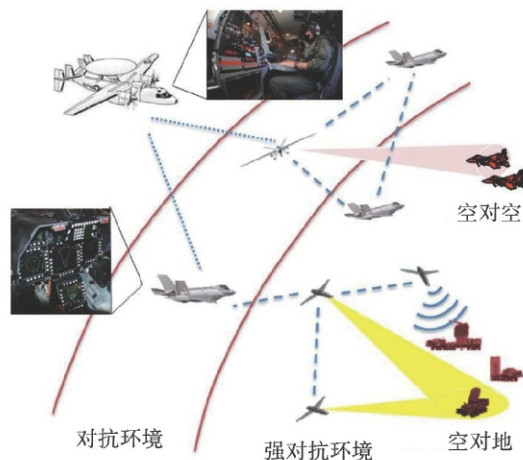


图3 DBM的应用景象



LRASM、ACTUV、LDUUV代表了单体智能化技术的发展趋势，在群体智能技术研究方面，最具代表性的项目是山鹑无人机项目和小精灵项目。

2016年10月，美国海军三架超级大黄蜂战斗机总共投放103架山鹑小型无人机，这些无人机不是按照预先规划编程的方式飞行，而是通过组网通信和智能协同，自行完成编队集结、搜索定位和攻击任务，该项目对相对导航、自适应编队、有效避障等集群智能关键技术进行演示验证，如图4所示。

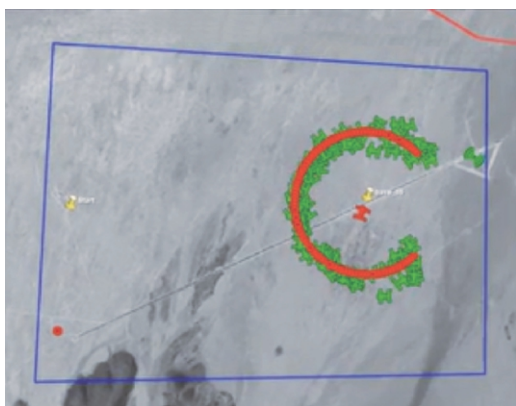


图4 山鹑集群进行编队

小精灵项目针对空中分布式作战模式进行技术集成验证。小型、低成本无人机作战半径小，无法进行远距离作战，该项目通过研究空中发射和回收技术，利用大型运输机对小型无人机进行远程投送，完成使命后能够快速回收，在24小时内完成重置并等待下次使用。小精灵项目将带来作战模式的改变，如图5所示。以执行压制敌防空

系统(SEAD)任务为例，以前的战法是电子战飞机贴近到敌方防空火力区外围，对敌方防空雷达进行干扰、压制，小精灵项目设想运载平台后撤，远离防区发射小型无人机群，小型无人机以分散部署的方式进入外围防区执行任务<sup>[7]</sup>。这种分布式的作战模式，一方面有人平台的安全性得到保证，另一方面无人平台任务成本低，任务执行效能更高。

### 3.4 网络通信系统

在强电磁对抗性空域中，协同作战的飞行器可能需要限制通信以免被对方发现，或者会被对方干扰而无法交换信息。一个性能稳定、抗干扰能力强的通信网络是实现分布式作战的基础。

DARPA在网络通信技术方面，提出C2E和DyNAMO两个研究项目，前者偏重射频硬件，后者研究网络管理。其中，C2E项目旨在发展抗干扰、难探测的通信技术，将来面临各种频谱战威胁时，能确保战场网络功能不被破坏。DyNAMO项目重点关注自适应网络管理技术，在干扰环境中或关键动态网络突然中断时，能通过不同路由方式使信息得到恢复，在C2E开发的射频硬件上进行验证。

另外，为了使水下潜艇不必浮出水面就可得到精确的定位信息，DARPA还提出POSYDON项目，计划通过在海床上安装声呐信标，组成类似GPS的系统，为潜航器提供无所不在的稳健定位、导航与授时能力(PNT)。

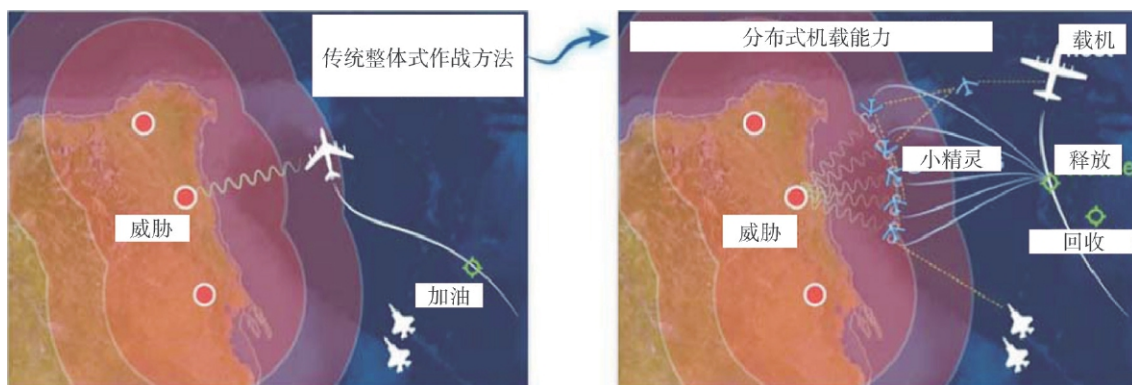


图5 小精灵作战模式

### 3.5 总结

从上面的项目分析中可以看出，美国在无人系统技术领域进行了体系化布局，在作战体系概念、指挥/控制/管理系统、智能武器平台、网络通信系统等几个方面同时推进；颠覆传统的作战理念和样式，注重分布式、多域作战概念牵引，空中、水面、水下全面发展；突出人工智能在无人系统技术领域的核心地位，大力推动无人系统智能化技术发展，形成技术优势。

## 4 无人系统技术在智能化战争中的应用思考

无人系统技术在未来智能化战争中的应用主要表现在以下三个方面：无人平台的智能化，武器系统的智能化和作战运筹的智能化。

### 4.1 无人平台的智能化

智能化的无人作战平台能够通过多维度广泛感知外部环境与内部状态信息，基于感知数据实时自主完成深度挖掘、推理和融合，实现战场态势构建，自主产生控制策略并执行，同时要具有一定的自主认知和学习能力。

根据未来智能化作战的需求，从OODA作战循环出发，无人作战平台的智能化技术主要包括：感知多源化、认知融合化、决策智能化、控制自主化、作战协同化、保障全局化等<sup>[8]</sup>。

(1)感知多源化：通过有效地接收、探测“客体”信号，并进行特征提取和样本积累，经过充分的学习、处理、分析，优化产生可供“主体”使用、响应的映射信息，从而完成测量、跟踪、识别和对抗相关任务。

(2)认知融合化：通过单一平台异构传感器信息的深度融合，以及分布在编组中各类传感器的互联互通、信息共享，将目前对环境的感知与理解从片面的、离散的、静态的感知提高到全局的、关联的、动态的感知。

(3)决策智能化：在感知、认知以及数据融合与挖掘的基础上，将自主任务决策从依靠预先规

划任务序列、进行程序化作战、适应性有限的层次提高到经验知识与数据相结合、作战使命驱动任务规划、有效应对未知态势变化的层次。

(4)控制自主化：基于环境特征信息，进行多种导航模式的智能配置和在线结构/功能重构，根据决策或自身状态的变化，实现行动轨迹自适应优化调整、高精度跟踪控制以及故障条件下控制策略的自诊断和自修复等。

(5)作战协同化：对无人系统集群建立基于多智能体行为特征和交互方式的协同技术体系，通过智能体之间的通信、空中动态自适应组网、多平台间的信息融合及任务分配，实现分散的平台在时间、空间、功能上的协调统一，具有体系开放、弹性互联、动态重构、自组织协同、集群认知等能力。

(6)保障全局化：以人工智能和大数据知识库为基础，实现对复杂武器系统全生命周期内的健康管理与维修保障等功能；依托虚拟现实、增强现实等技术，为导弹武器训练提供自主训练保障服务，推动武器装备保障模式由从传统的“任务驱动型响应式保障”向“状态驱动型主动式保障”转型。

### 4.2 武器系统的智能化

针对不同的作战场景，将智能化的无人作战平台相结合为智能化无人武器系统，例如，更多地使用无人系统作为智能化导弹的交付平台，能够发挥更大的作战效益。与有人系统相比，智能化无人武器系统能适应更广泛的威胁条件，具有更好的持久性和耐受力，能够支撑大范围任务系列。

登陆作战是在水下、水面、空中、岛屿以及电磁、信息空间进行的多域作战。导弹与无人机、无人战车、无人船、无人潜航器等结合作为智能化无人武器系统，与卫星、有人装备等形成协同作战体系，图6为作战概念示意图<sup>[9]</sup>。异构无人武器系统间的紧密配合协同，可进一步压缩定位、识别、跟踪和摧毁的杀伤链，提高对敌目标的反

应速率和杀伤概率。

在空地协同方面，无人机和无人车在突击上岸阶段可协同侦察、打击，无人机广域搜索侦察，与无人车共享态势，登陆力量和无人车发现特定目标立即请求无人机发射导弹进行火力支援打击，无人车对打击效果进行毁伤评估。

在空海协同方面，无人机与无人艇可以在集结和航渡阶段，执行重点区域警戒巡逻、对海面目标搜索侦察、协同反潜等任务。

在水面水下协同方面，无人艇释放无人潜航器，可在登陆前期完成水下地理环境勘测和扫雷任务。

针对近海防御中难以全面防范敌空中平台、水面舰艇、水下潜航器渗透的问题，将水下预置平台与导弹、鱼雷、无人机相结合形成一种高效费比的模块化水下武器系统，例如DARPA提出的“沉浮载荷”(UFPs)计划，预先放置于大陆架、重要航道、岛链等敏感海域，利用隐蔽前置优势进行长时间潜伏，并可通过远程手段激活，执行侦察、打击、航路封锁等任务，作战概念示意图如图7所示<sup>[10]</sup>。平时可以对其近海军事活动进行有效牵制，战时可以在前沿实施突然打击。

透过分布式作战的理念能够看到，作战能力分散至大量无人平台，无人平台又结合为异构武



图6 无人武器系统登陆作战概念示意图

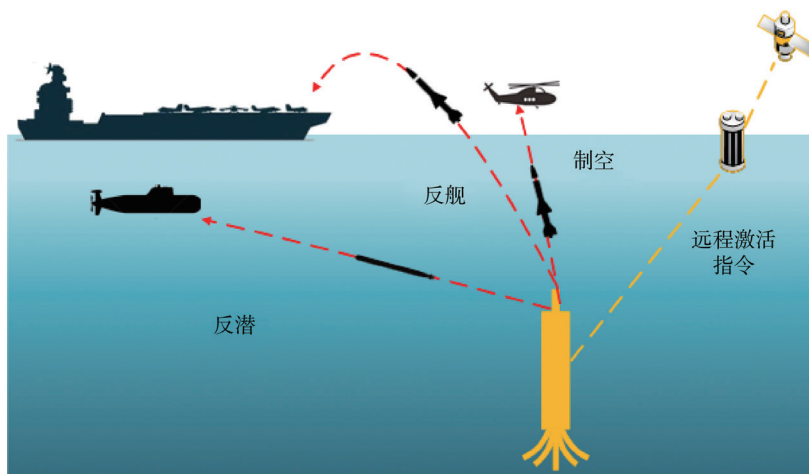


图7 水下预置武器系统作战概念示意图

器系统，就像组合乐高积木一样，能够针对不同的作战场景搭建不同的作战样式，由此得到的作战体系具有非常强大的适应能力。

### 4.3 作战运筹的智能化

在相当长的一段时间内，无人系统难以独立完成复杂的作战任务，有人系统指挥无人集群将是未来智能战争的主要作战模式，需要作战运筹系统的智能化，通过智能辅助，实现有人/无人协同作战能力跃升。

近几十年来，指挥自动化系统建设成果显著，信息采集、传输、存储、处理和显示等环节均已成型，作战仿真及数据工程建设逐渐完善，作战任务规划系统也初现雏形。然而，现有作战运筹系统发展遭遇到智能辅助能力滞后的问题，基本停留在辅助劳力而非智能阶段，对智能程度稍高的问题，如态势理解、决策辅助、作战任务规划、兵棋系统中对抗方案推演等，基本是无能为力，智能辅助已成为制约有人/无人协同作战能力形成的瓶颈问题。

由DARPA提出的“深绿(Deep Green)”计划旨在将人工智能技术引入作战辅助决策，利用仿

真推演战场变化，辅助指挥员决策并生成作战方案。虽然项目设想提出于十年之前，但到2014年验收时还远未完成，其指导思想仍具有借鉴意义。“深绿”由“指挥员助手”人机接口系统、“闪电战”仿真系统和“水晶球”控制系统三部分组成，其结构示意图如图8所示。

深绿的指挥员助手模块采用基于草图的人机交互方式，自动将指挥员的手绘草图和说明语言转变为行动方案，并向指挥员呈现各种可能的行动方案结果。近年来，人机交互技术发展迅速，未来将采用AR、VR、眼动、手势及语言等手段构建基于全息界面的多通道人机交互系统。高效的人机交互技术能让机器快速理解人的意图、显示处理结果，提高指挥效率。

深绿的闪电战模块用于快速仿真各种作战计划，大量生成可能的未来态势，是智能运筹系统的引擎。不是简单地进行成百上千次蒙特卡洛随机仿真，而是创造性地将定性推理和定量仿真相结合，可以识别各决策分支点，从而预测可能结果的范围和可能性。

水晶球是深绿的决策控制模块，在战前，通过多分支超实时推演仿真，超越实体战场提前预

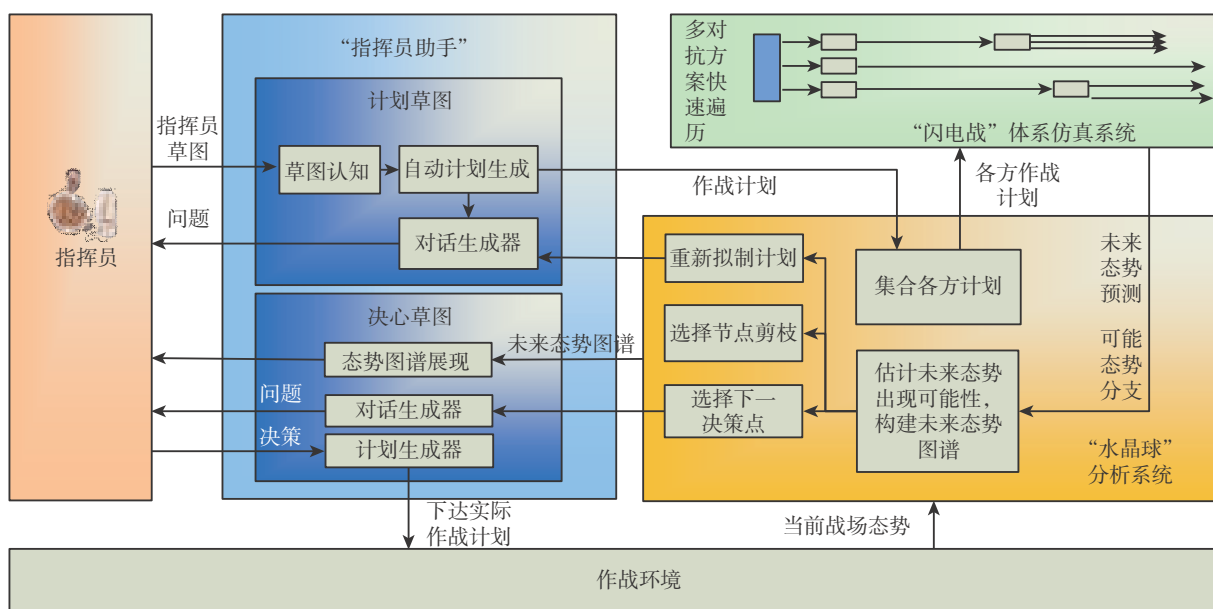


图8 深绿系统组成结构示意图

判敌方可能动向和战局走向,提前优化调整作战方案;在战中,根据态势监控信息,控制闪电战生成未来态势,构造一个平行战场,利用更新的战场态势信息剪裁一些仿真分支,辨识即将到来的决策点,形成草拟决策,能够很快给指挥员以选择性的提示,从而加速真实战场OODA循环<sup>[11]</sup>。

## 5 结束语

无人系统技术在多学科交叉融合发展推动下,正在向更高水平的智能自主方向发展,其广泛的覆盖性、复杂的系统性、开放的知识性,决定了它必将成为一个极富创造力的领域,从而形成新的科学前沿。无人系统技术具有巨大的理论与技术创新空间和广阔的应用前景。瞄准未来作战需求,各种作战域内无人自主系统已经成为当前以及未来一段时间内发展的热点,世界主要国家均先后出台了战略决策,发布针对自主系统的研究报告,为无人装备的发展提供宏观政策性指导和技术建议,并以此构建支撑自主作战能力实现的技术体系。如何实现无人系统技术从“专用”到“通用”的跨越式发展,既是无人系统技术发展的必然趋势,也是研究和应用领域的挑战。

## 参 考 文 献

- [1] 习近平.国防和军队建设重要论述选编[M].北京:解放军出版社,2014.
- [2] 朱光亚.工程技术发展与新军事革命[J].中国图象图形

学报,1997,2(1):55-57.

- [3] 蒋琪,申超,张东青.认知/动态与分布式作战对导弹武器装备发展影响研究[J].战术导弹技术,2016,(3):1-6.
- [4] DARPA. System of system integration technology and experimentation (SoSITE) [R]. DARPA-BAA-14-40, Virginia: DARPA, 2014.
- [5] DARPA. Cross domain maritime surveillance and targeting [R]. DARPA-BAA-16-01, Virginia: DARPA, 2015.
- [6] DARPA. Distributed battle management [R]. DARPA-BAA-14-17, Virginia: DARPA, 2014.
- [7] DARPA. Gremlins [R]. DARPA-BAA-15-59, Virginia: DARPA, 2015.
- [8] 赵振平,路瑞敏,梁海朝,等.智能无人飞行器技术发展展望[J].战术导弹技术,2017,(3):1-7.
- [9] 王文豪,姚振兴,李志鹏,等.无人作战体系在登陆场景中的运用[J].飞航导弹,2018,(3):33-35.
- [10] 袁亚,张木,李翔,等.国外水下预置无人作战装备研究[J].战术导弹技术,2018,(1):51-55.
- [11] 胡晓峰,郭圣明,贺筱媛.指挥信息系统的智能化挑战:“深绿”计划及AlphaGo带来的启示与思考[J].指挥信息系统与技术,2016,7(3):1-7.

### 作者简介:

李风雷(1966-),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行器总体设计。

卢昊(1989-),男,博士,工程师。主要研究方向:抗干扰控制技术、无人系统自主决策技术。

宋闯(1977-),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行器制导控制。

郝明瑞(1985-),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行器制导控制。





# 无人车的场景理解与自主运动

薛建儒, 李庚欣

(西安交通大学人工智能与机器人研究所, 西安 710049)

**摘要:** 无人车无疑将深刻改变我们未来的交通出行和运输方式, 正日益受到学术界、产业界和政府部门越来越多的关注。无人驾驶的感知-运动环路中存在两个紧密耦合的核心问题, 即场景理解与自主运动。场景理解通过融合处理车载多传感器的感知数据, 给出车辆运动决策的几何、物理层面的约束。而自主运动在场景理解给出的约束条件下实现安全、平稳的运动。主要综述无人车场景理解与自主运动的研究进展, 并结合团队十余年来在无人驾驶领域的探索与实践, 探讨复杂动态交通环境的无人车前沿技术。

**关键词:** 无人车; 场景理解; 自主运动; 自动驾驶; 自动驾驶

**中图分类号:** TP391.4   **文献标识码:** A   **文章编号:** 2096-5915 (2018) 02-0114-10

## Scene Understanding and Autonomous Motion of Unmanned Vehicles

XUE Jianru, LI Gengxin

(Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Driverless cars are well known disruptive technologies, and gain more and more attention ranging from academia, enterprise, to governments. There exists two important and coupled problems in the perception-motion loop of an unmanned vehicle. They are scene understanding and autonomous motion. Scene understanding outputs motion constraints via the fusion of sensing data from multiple sensors, and autonomous motion adaptively drive the vehicle in accordance with the dynamic constraints posed by traffic scenes. In this paper, we present a comprehensive survey of the state of the art on the aspects of basic concepts, methodologies, and technologies of scene understanding and autonomous motion, based on our past 10 years of research on intelligent vehicles. We also discuss future challenging problems in the frontiers of autonomous driving.

**Keywords:** Unmanned Vehicles; Scene Understanding; Autonomous Motion; Autonomous Driving; Automated Driving

收稿日期: 2018-06-11; 修回日期: 2018-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61773311, 61751308)

## 1 引言

自动驾驶是目前人工智能领域的研究前沿和热点技术,将彻底颠覆我们的出行方式,因此受到了学术界、企业界和各国政府部门等多方面的关注。美国Nature杂志在2015年2月份发表文章<sup>[1]</sup>中描绘了无人车技术发展的三个愿景:更安全、便捷的出行,交通事故将急剧减少;更绿色环保、车辆共享、拥堵减缓、油耗下降10%;保守估计将节省出8亿个停车位空间,让位于其他社会生活空间。

自动驾驶技术主要沿自主智能与互联智能两条路线并行发展:自主智能车,即通过提高车辆自身的智能化水平,利用多传感融合和鲁棒的规划控制,使其能够适应交通环境。以谷歌公司2012年展出的无人车为典型代表;车联网下的自动驾驶,即通过车与车、车与路的网络通讯,实现整个交通系统的智能。这条技术路线大幅度降低了自动驾驶对车的自主智能水平的要求,例如,红绿灯、交通标识会和车辆通讯,直接获得交通规则,无需考虑高动态范围下的红绿灯和交通标识的识别。毫无疑问,这两条技术路线最终会交叉融合。

本文主要讨论自主智能车这条技术路线的核心问题和关键技术。当前市场上已有的、声称具备自动驾驶功能的汽车大多只能实现特定条件下的自动驾驶。参照美国汽车工程师学会(SAE)定义的五级自动驾驶水平<sup>[2]</sup>,现有的自动驾驶距离真正无人自动驾驶尚需经过多个不同的自动化阶段。SAE的自动驾驶分级按自动驾驶系统对车辆的控制程度分为L1-L5级(不包括零级,零级即无自动化)。L1包括自适应巡航系统、车道保持系统等类似系统。L2级将L1级的环境感知技术(如车道检测、前方障碍物检测与跟踪等)与运动控制技术集成(如车道保持和自适应巡航控制系统中的车辆横向纵向控制等),实现跟车、泊车入位、前方障碍物紧急制动等自动驾驶任务。目前市场上声称的自动驾驶大多属L2级。L3级允许驾驶员在少许特定场景中切换到自动驾驶状态,比如在高速公路上堵车时。L1-L3级的技术全部需要依靠人类驾

驶员处理车辆行驶过程中的紧急情况。L4级(高度自动化)的自动驾驶系统可在大多数交通环境中实现自动驾驶。L5级是真正的无需人参与的完全自动驾驶,也是自动驾驶的最高阶段。

企业的自动驾驶研发重点主要集中在L2、L3级,即人机共驾阶段,自动驾驶水平接近L3级。例如,利用过去几十年在传统的巡航控制系统中积累的技术,可以让汽车在公路上自动保持匀速行驶。目前广泛应用的自适应巡航控制系统可保持适当车速和车距,并可以协调摄像头、传感器收集的信息,利用方向控件使车辆维持在车道中间行驶。

实现真正的无人驾驶远比人们想象的复杂,现有的自动驾驶水平距离L4级仍然有较大差距,而要实现完全的自动驾驶,需要跨越巨大的技术鸿沟。与现有的自动驾驶系统相比,人类驾驶员还是非常善于避免严重车祸的发生,2011年美国交通安全统计数据 displays,综合所有司机的驾驶情况,大概行车330万小时会发生一起致命碰撞,行车64000小时会发生一起致伤碰撞。这些数字为自动驾驶系统设立了重要的安全目标,即自动驾驶的最低安全标准不得低于人类驾驶时的标准。因此,自动驾驶的安全性要达到这个标准。显然,现有自动驾驶技术的安全性远远没有达到这个标准。

为此,本文将综述自动驾驶所面临的难点问题,主要聚焦于开放、真实的交通环境自动驾驶(L4级及以上的自动驾驶)所面临的挑战性问题及其研究进展,涵盖的难点问题包括:准确可靠的场景感知与理解;合理的驾驶决策、规划和运动控制。本文的其余部分组织如下:第二节给出了场景理解和自主运动的定义,第三、第四节分别综述场景理解和自动驾驶的研究进展,最后总结并探讨无人车面临的挑战性问题。

## 2 自动驾驶的核心问题

无人车是一类典型的软硬件协同的自主智能运动系统。硬件部分由车辆本体、环境传感器、



图1 无人车的硬件系统组成：车辆本体、环境感知传感器、计算与执行。此图由文献 [3] 修改而成

计算平台、控制和执行四个部分构成，如图1所示。常用的环境传感器可分为三大类：相机（以可见光相机为主，也有采用红外相机）、激光雷达和毫米波雷达，这三类传感器的感知范围、作用距离各不相同，选型和安装配置的基本原则是确保车辆周围一定距离内360度全覆盖<sup>[3]</sup>。

无人车的软件部分主要完成传感数据获取、处理，并形成从感知到运动的闭环反馈环路。具体而言，就是通过多传感器的有效融合得到交通场景的结构化描述，然后通过任务路径规划、驾驶行为决策、轨迹规划给出符合交通规则、安全合理的路径或轨迹，输入给运动控制器，进而驱动方向盘和油门/刹车，使车辆跟踪期望轨迹运动。这一闭环环路的形成依赖于对场景理解和自主运动两个耦合的核心问题的解决。

场景理解就是将来自多个异构、异步传感器的离散、片面、非完整的场景感知数据转化为决策规划的空间与拓扑约束，形成自主运动的决策依据。行车过程中，司机只需看一眼，可以立刻得到驾驶所需要的所有信息：交通标识、标线及与周边车辆之间的关系。场景理解的目标就是希望通过传感器融合，得到与驾驶任务密切关联的度量、符号和概念，形成场景的结构化描述。这一问题也是各种移动机器人的共性问题<sup>[4, 5]</sup>。

场景的结构化描述主要表征场景的几何结构及交通要素的分布，并要能预测结构场景变化。

场景理解的计算任务可划分为底层、中层和高层等三个层次：底层处理，针对场景地图和定位的深度求取、光流及场景流；中层分析，针对障碍物避让的检测与识别、交通规则；高层理解，针对运动规划的场景变化预测。

自主运动就是主动获取、组织感知数据并做出自适应于场景变化的敏捷运动。需要在场景理解给出的运动约束基础上完成行为决策、局部运动规划和反馈控制，最终实现适应交通环境变化的自主运动。具体而言，一般需要经历四个主要环节：路线规划、行为决策、运动规划和运动控制（如图2）。第一个环节是规划路线，可以在地图上离线计算，其余三个环境需在线实现。驾驶行为决策就是在沿给定的路线行驶中确定左转、右转、车道保持、超车等驾驶行为。局部路径规划就是在确定行为后，让车根据环境感知的结果规划路径或轨迹。运动控制就是通过控制方向盘、油门和刹车使车沿着预期规划好的路径行驶。

### 3 场景理解

无人车的场景理解的目标就是通过分析处理多传感器的实时感知数据，实现车辆定位、导航和安全行驶。车辆定位和导航需要的几何度量信息主要包括车辆位置、前方车道线、道路边界以及和车之间的相对位置关系。安全行驶则需要场



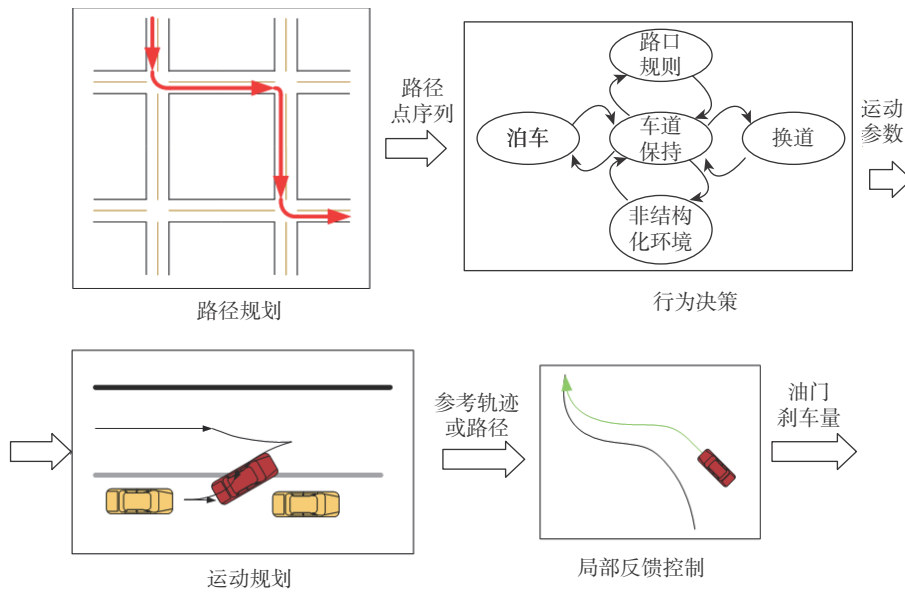


图2 实现自主运动的四个环节：路径规划、行为决策、运动规划和运动控制

景理解给出周围车辆和行人的运动意图，以此推测将来一段时间无人车该如何适应场景变化，实现无碰撞的安全行驶。

如前所述，场景理解的底层处理获得交通场景的三维信息和运动信息，基础构建场景的拓扑结构。具体而言，场景的拓扑结构包含的主要信息为周围有哪几辆车、它们占据了哪几个车道、距道路边界的距离等多个问题。中层分析与识别交通标志和交通标识，得到交通规则信息。高层理解主要完成推理和判断，即当前无人车应该车道保持还是换道、前方路口要左转还是右转。最终实现从环境感知、几何度量到推理预测的转变（如图3所示）。

按照自主运动对场景理解的需求，场景理解可进一步分解为静态场景理解和动态场景理解两个子问题。

### 3.1 静态场景理解：定位与导航

全球卫星定位系统（GPS）与地图相结合的定位和导航已非常普遍。具体工作过程如图4所示，GPS给出车辆的当前位置，然后映射到地图中，从地图中获取相应的导航信息。由于GPS信号易受高层建筑物、树木等的遮挡，无法保证每个时刻都能有效接收。此外，现有的地图分辨率低、对交通环境的描述能力有限，不能直接应用于无人车的定位和导航。例如，无人车车道保持所需要的定位精度必须在分米级，自动泊车所需的定位精度必须在厘米级，而现有地图的定位精度基本在几十米甚至上百米，对于道路形状通常用折线表示。

因此需要构建满足自动驾驶需求的高精度地图，即通过高分辨率的感知数据构建地图。这种离线创建的地图一般使用视觉数据或激光数据，需要解决SLAM（Simultaneous Localization and

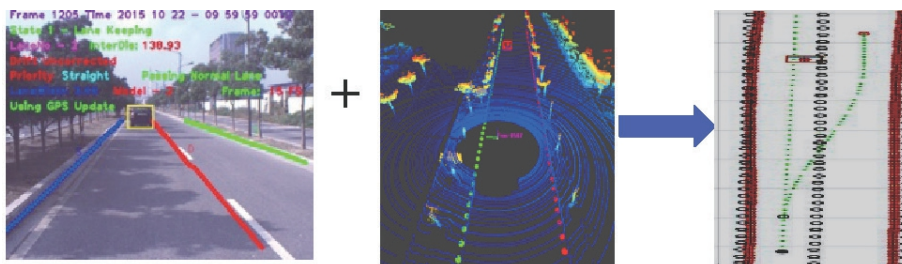


图3 场景理解要在识别交通要素的基础上，形成结构化描述，实现从几何度量到推理预测的转变

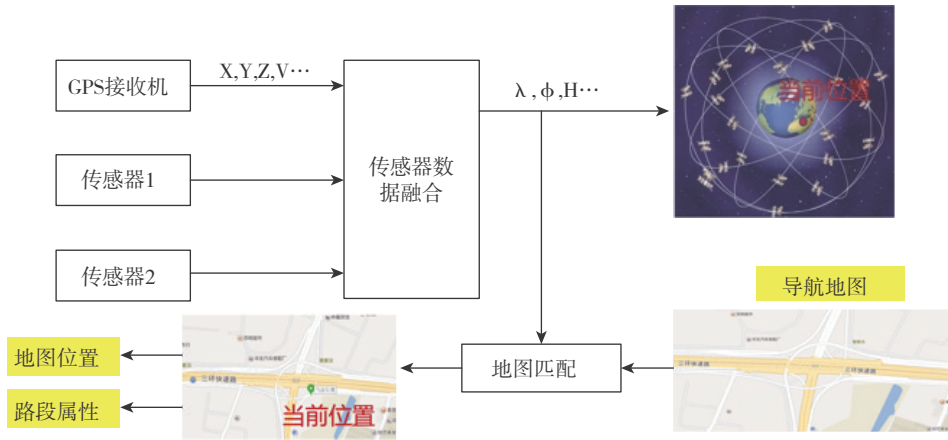


图4 全球卫星定位系统与地图结合的定位与导航示意图

Mapping)问题<sup>[6]</sup>。实际地图创建中,为提高地图的准确性和精度,也可使用高精度的差分GPS以及高精度惯导系统来实现定位。这时,地图创建问题就退化为局部拼接问题,可以用最近邻点集合配准(ICP)算法求解<sup>[7]</sup>。

无人车的定位与导航需要从环境感知数据中提取静态场景要素,通过与高精度地图的匹配,确定无人车在地图中的位置。定位和导航主要依赖静态的场景要素,不考虑运动的车辆和行人等动态要素。因此,静态场景理解的主要任务是从激光点云和图像等环境感知数据中提取道路边界、道路宽度、车道数、车道线位置、车道线属性(黄线、虚线、实直线)等静态场景要素。为实现鲁棒精确的静态场景要素提取,常用的方法是引入地图提供先验信息<sup>[3]</sup>。

大范围场景的高精度地图创建必须解决好三个问题。首先是地图表征问题。大范围高精度地图应该能同时表示拓扑和度量信息,拓扑仅考虑点与点之间的连接关系,无方向和引导信息,度量地图有方向和引导信息,无人车需要考虑拓扑和度量混合的地图表征,以期提供更加快速和精准的导航信息。其次,利用多传感数据融合创建地图需解决时空对齐问题。对于图像数据而言,即帧间特征提取与关联问题。目前的主流方法是从图像中提取旋转和尺度不变特征点,并进行邻近帧特征点的关联匹配<sup>[8]</sup>。这种方法的问题是由于图像特征的局部特性以及场景中大量重复纹

理,导致误匹配经常发生。为减少错误匹配,直接匹配法基于灰度不变假设,通过像素点帧间匹配创建稠密地图。这种方法存在灰度不变假设过强、单个像素区分度不足等缺点,限制了适用范围。最后,准确估计无人车状态需要设计高效的序贯滤波器<sup>[9]</sup>,根据传感器获取的数据不断进行无人车的状态估计。地图的精度取决于状态估计的精度。

车辆行驶中所遇到的场景可划分为结构化(如高速公路)和非结构化(如乡村土路等)两大类。描述这两类场景的高精度地图的表达形式不完全相同。例如,地下车库就是一个典型的非结构化场景,一般用栅格地图<sup>[10]</sup>。对结构化场景而言,高精度地图需要包含车道线信息以及道路边界信息。由于不能单靠视觉创建地图,而且多传感器的数据采集频率和尺度不一致,因此通过激光和视觉的融合来创建场景地图时需要解决多源传感器数据的时空对齐和尺度统一。图5是我们提出的一种高效的高维点集配准算法,并将其成功用于车道线级别地图的创建与定位<sup>[11]</sup>。

基于高精度地图与局部感知相结合的精确定位与导航技术已经在智能车领域普遍应用。引入高精度地图可以有效提升环境感知对于路口的车道引导、特定区域如收费站的检测以及交通信号灯的识别。例如,单纯依赖计算机视觉算法实现真实交通环境中交通信号灯的鲁棒识别是一个远未解决的问题。为此,可在地图里面加入了交通

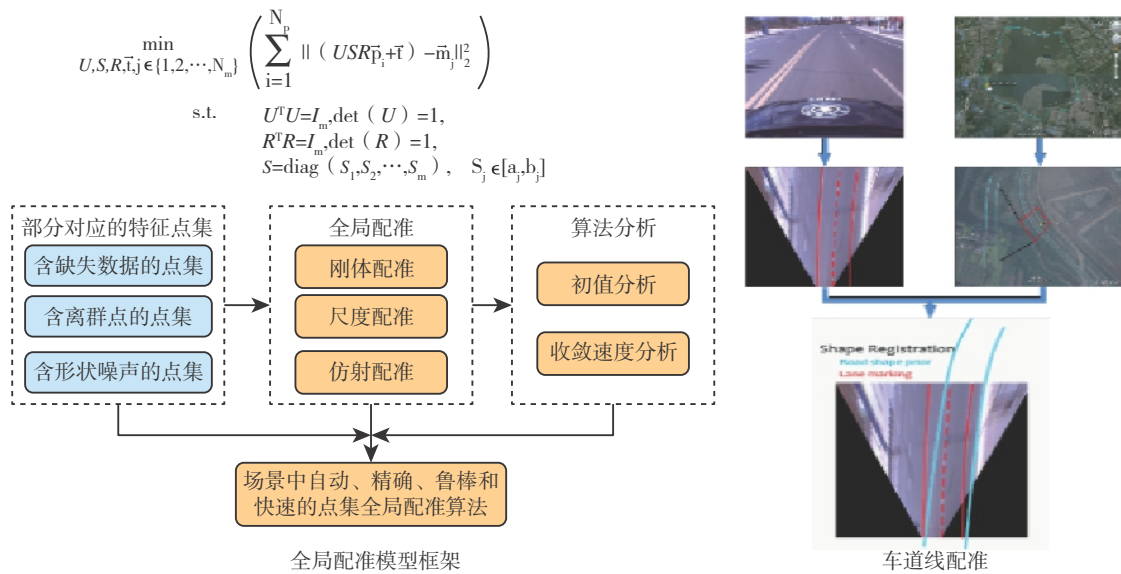


图5 车道线场景地图创建的多源数据时空配准及车道线地图构建<sup>[9]</sup>

灯位置信息，这样就可以根据当前车辆位置预测交通灯出现在图像的什么区域，以此减小搜索范围，会显著降低虚警率<sup>[10]</sup>。近期的地图创建研究中开始引入了语义信息，主要思路是将度量地图创建、物体识别及场景语义结合起来，实现度量、拓扑和语义的多层次导航地图<sup>[11]</sup>。

### 3.2 动态场景理解：安全行驶

无人车能否遵守交通规则且安全行驶，取决于对动态障碍物运动意图的准确判读，即需要准确识别车辆、行人的行为模式。图6与图7分别给出了路上和路口车辆的行为模式示例。为此，需结合障碍物跟踪和检测技术，引入交通规则的视觉知识表示，同时对人、车混交场景中的突发事件进行实时检测与识别。具体而言，就是需要离线建立交通规则的视觉知识表示，在线识别车辆、行人的行为模式。

交通规则的视觉知识表示与学习需要准确感知交通场景中静态要素与动态要素的分布可能的运动空间。静态的交通场景要素如道路、车道线、红绿灯等一起组成了场景的交通规则，同时也构成了动态要素运动的上下文约束。同时，无人车需实时检测交通场景的动态变化及其造成的交通拓扑规则变化，以便为运动规划提供可靠的时空

约束。在线行为识别需要克服感知不确定性所引入的误差及干扰问题。

具体而言，由于运动规划是对将来运动的规划，因此需要基于当前的场景理解推测出场景动态要素未来占据的空间，即需要基于行人、车辆的历史运动轨迹预测未来一段时间内被这些动态要素占据的空间，以便实现安全避让。

预测行人、车辆的运动意图需要交通规则的视觉知识表示。如图6、图7所示，通过标注交通

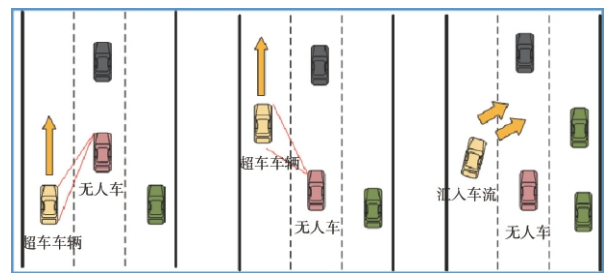


图6 路上车辆的交通行为模式

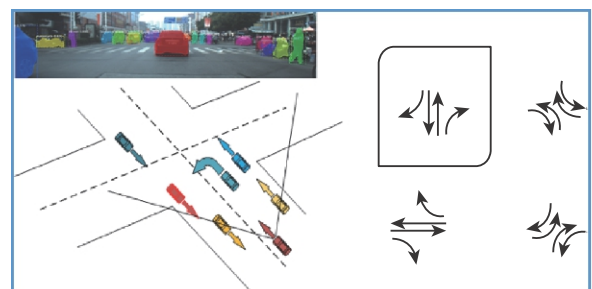


图7 路口车辆交通行为模式

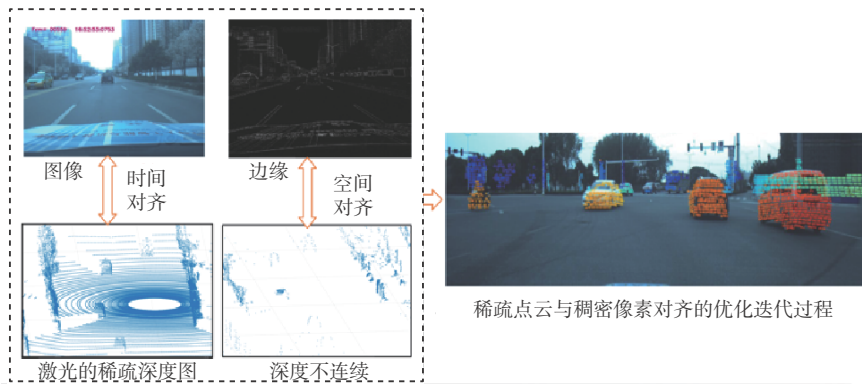


图8 激光与图像的数据融合：3D激光点云投影到图像中的视觉障碍物检测，具体方法参见文献 [ 12 ]

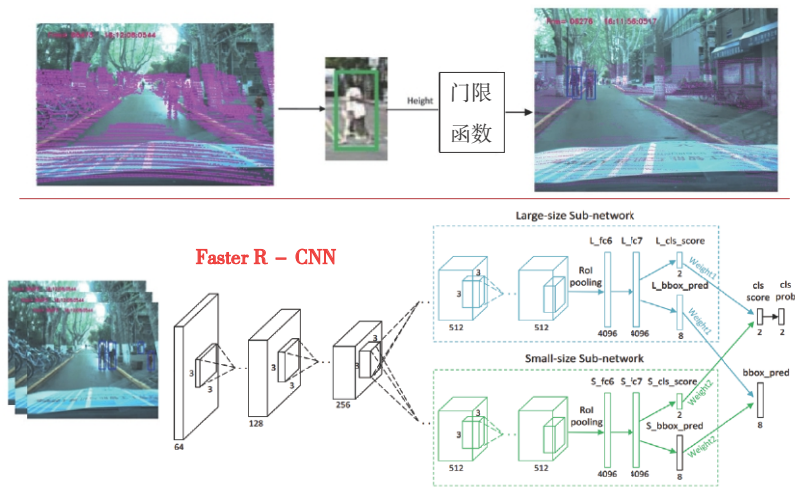


图9 融合3D激光点云的视觉障碍物检测，具体方法参见文献 [ 14 ]

场景的感知数据或基于目标检测、跟踪，得到行人、车辆的位置序列，然后构建运动意图的预测模型。其中的难点问题是如何设计鲁棒的目标检测与跟踪算法，尤其是对路口区域的车辆、行人通行的行为模式表征和识别算法。以往的方法将障碍物的检测、跟踪与识别研究视为孤立问题单独处理，但实际应用中这三个问题紧密耦合，应视为一个整体问题来研究<sup>[13]</sup>。

另外一个值得关注的问题是多传感信息融合，大量研究及实验结果表明，场景感知与理解不能仅靠单个传感器。现有的在公开数据库上测试性能最好的行人、车辆的视觉检测算法在真实交通场景中的检测率约为80%，并不能满足无人驾驶需求。我们提出了一种激光数据与图像数据融合方法<sup>[9]</sup>（见图8），并用于提高视觉目标检测的准

确率<sup>[14]</sup>（见图9）。虽然相机与激光雷达可以离线标定，但行车过程中，由于安装位置会随车身颠簸，标定误差会随距离发生非线性变化。尤其是自动驾驶对于障碍物的检测范围应在100米左右，这时误差将变得非常大，因此需要在线标定。可把图像里的几何结构与激光的几何结构对应，即利用3D点云深度边缘和图像边缘来对应，将三维激光点云数据映射到图像上。然后利用Faster RCNN<sup>[15]</sup>实现行人和车辆的检测和识别，对视觉检测结果用三维点云校验，有效降低了视觉检测的虚警率（见图9）。

图10是我们提出的视觉主导的无人车场景理解框架。该框架实现了多传感器信息对齐配准，以及基于高精度地图的实时定位和行驶移动环境的理解。这个框架从2010年到现在一直在智能车

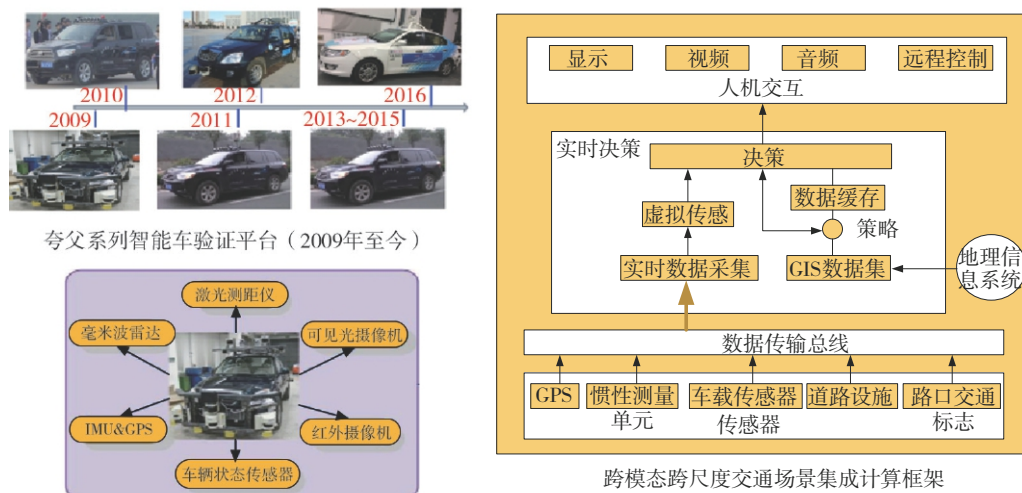


图10 视觉主导的场景计算框架

上进行真实交通环境的实地验证，并在不断改进。

目前，场景理解的深度学习方法得到广泛应用，并在场景图像的语义标注上取得了令人兴奋的结果<sup>[16-20]</sup>。深度神经网络对每一个像素到底属于天空、道路，行人还是车辆都可以标注出来。这种语义信息对无人车做出更加智能的运动决策和规划将起到坚实的支撑作用。

## 4 自主运动

无人车运动决策的主要依据是场景的结构化描述，同时还需考虑场景理解和运动控制的不确定性。例如，提取的场景要素位置存在误差、车辆运动控制也存在误差。运动规划时必须同时考虑这两方面的不确定性<sup>[21]</sup>。为此，通常采用分而治之的策略，采用驾驶行为决策、运动规划和运动控制的分层决策架构。

驾驶行为决策通常被定义为要选择跟车还是超车等问题，相应地运动规划就是在车辆的位形空间中搜索最优路径。一般用一个6维向量表示无人车位姿，即3维位置和3个姿态角。求解运动规划时，需先把场景的结构化描述映射到无人车的位姿空间里，然后在位姿空间中寻找一个满足时空约束的无碰撞位姿序列。运动规划分路径规划和轨迹规划两种。运动规划输出的路径是几何描

述，输出的轨迹是在几何信息基础上增加了时间信息，也就是说每一个时刻对车不仅仅有位置约束，而且对速度也有约束。这个位姿序列是后续运动控制的期望输入。车辆运动受非完整性约束，比如有转弯半径、速度极限等。如何在同时满足非完整约束及场景理解给出的时空约束的情况下得到最优路径是运动规划问题的核心。

交通环境往往同时含有结构化场景和非结构化场景。对于结构化场景来讲，路径规划可用参数曲线减少搜索空间。例如，车道保持只要求行驶在车道中间，换道时仅需从当前车道中间换到相邻车道中间。但对于路口、收费站等非结构化场景则往往需要使用随机搜索算法。为寻求一种能同时用于结构化和非结构化环境的运动规划算法，我们提出了一种高效的快速扩展随机树算法<sup>[22]</sup>，对非结构化场景的运动规划算法RRT进行了扩展，同时能适应结构化场景与非结构化场景。

与分层决策架构不同，最近的研究思路是把决策、规划与控制统一考虑，即建立输入为当前感知信息及驾驶任务，输出即时动作的一体化决策模型。此时，自主运动就是求解感知到动作间的映射，即驾驶策略。目前针对驾驶策略的研究工作可大致分为以下两类：

(1) 驾驶策略的强化学习方法，通过车辆跟环境的交互来学会自动驾驶策略<sup>[23-27]</sup>。无人车面临

交通场景复杂多样、高度动态、多智能体并存等情况，因此无人车应具备一定的自主策略学习能力，能够通过与环境的自主交互，学习当前环境和自身状态下所应采取的最佳动作，并具备学习和推理能力。

(2) 利用端对端的学习则直接建立起场景图像序列与运动控制序列的映射。这类方法直接跨越了场景理解到运动控制之间的技术链路<sup>[28, 29]</sup>，使无人车能够在复杂交通场景实现类人的自动驾驶。

考虑到多智能体并存所带来的交通场景的动态性和不确定性，为更好地与人类驾驶员交互并保证安全，无人车研究需进一步借鉴人类驾驶员的驾驶认知机制，深入研究灵巧、敏捷的自主运动方法。

## 5 讨论与展望

众所周知，无人车从场景理解到自主运动的技术链路已经形成，并开始在一定应用场景中落地应用。然而，场景理解与自动驾驶的核心问题远未解决，还至少存在以下三个挑战性问题：

第一，与人类驾驶员相比，现有的自动驾驶系统尚处于初期发展阶段。环境感知依然严重依赖激光、毫米波雷达等传感器，视觉未能充分发挥作用，也不能应对高水平人类驾驶员轻而易举的处理实际交通情境。为此，需要构建从底层视觉信息到高层交通模式的映射模型，以提高无人车对动态复杂场景的适应性。

第二，基于感知-规划-决策-控制分层计算架构的无人车越来越明显地表现出计算效率低、环境适应性差、自学习能力不足的问题，尤其在应对复杂交通环境时远远不及人类驾驶员。研究者们逐渐认识到一个被长期忽视的问题，即感知-规划-决策-控制这一计算过程与人类驾驶员的认知行为过程及其信息处理机制有显著区别。人类驾驶员开车是一个不断对交通场景认知理解的过程。如何参照人类驾驶过程的认知心理层次来理解和处理来自传感器的环境感知数据？如何让自主驾

驶系统具有记忆、推理和经验更新的机制，从而能够应对高噪声、高动态和强随机性的交通场景？这些问题的解决将极大提高无人车对环境的自适应和自学习能力，有望使无人车达到甚至超过人类驾驶员的智能水平。然而解决这些问题已经超出了当前无人车的感知-规划-决策-控制框架的层次，需要从认知、心理科学层次，探讨适合描述人对交通场景认知基本过程的新方法<sup>[30]</sup>。

最后，无人车的应用必须解决无人车的安全性测试。安全性测试的实质是解决一个小概率事件问题。我们能够想到的交通场景是有限的，而真实交通场景变化是无穷的。实地测试+仿真+云端这种模式已广泛使用。具体而言，就是把车辆行驶数据上传到云端，云端基于数据改进与更新算法，再升级车的自动驾驶性能。这已经验证为目前无人车走向实际应用的一条可行途径。

## 参考文献

- [1] Mitchell W M. Autonomous vehicles: no drivers required[J]. Nature, 2015, 518 ( 7537): 20-23.
- [2] Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for On-Road Motor Vehicles, SAE International, <http://SAE.org>.
- [3] Xue J R, Wang D, Du S Y, et al. A vision-centered multi-sensor fusing approach to self-localization and obstacle perception for robotic cars[J]. Frontiers of IT & EE 18, 2017, ( 1): 122-138.
- [4] Chaumette F, Corke P, Newman P. Editorial: special issue on robotic vision[J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29 ( 2-3): 131-132.
- [5] Danica Kragic, Hager Gregory D. Editorial: special issue on robot vision[J]. International Journal of Robotics Research, 2012, 4: 379-380.
- [6] Durrantwhyte H F, Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13 ( 2): 99-110.
- [7] Gold S, Rangarajan A, Lu C, et al. New algorithms for 2D and 3D point matching: pose estimation and correspondence [J]. Pattern Recognition, 1998, 31 ( 8): 1019-1031.

- [ 8 ] Tao Z, Xue J, Wang D, et al. Accurate localization in underground garage via cylinder feature based map matching [ J ]. Intelligent vehicles symposium, 2018, 4.
- [ 9 ] Cui D, Xue J, Zheng N. Real-time global localization of robotic cars in lane level via lane marking detection and shape registration [ C ]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 17, ( 4 ): 1039–1050, 2016.
- [ 10 ] Zhang Y, Xue J R, Zhang G, et al. A multi-feature fusion based traffic light recognition algorithm for intelligent vehicles” Proc [ C ]. IEEE 33rd CCC, 2014, 4924–4929.
- [ 11 ] Davison A. From visual SLAM to generic real-time 3D scene perception [ C ] // In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, invited talk, 2014.
- [ 12 ] Girshick R B. Fast R-CNN [ J ]. International Conference on Computer Vision, 2015, 1440–1448.
- [ 13 ] Kosecka J, Marchand E, Corke P. Editorial: Special issue on robot vision [ J ]. International Journal of Robotics Research, 2015, 34 ( 4–5 ): 399–401.
- [ 14 ] Hoiem D, et al. Guest Editorial: Scene understanding [ J ]. International Journal of Computer Vision, 2015. 112 ( 2 ): 131–132.
- [ 15 ] Geiger A, Lenz P, Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite [ J ]. Proc IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition ( CVPR2012 ), 2012.
- [ 16 ] Geiger A, et al. 3D traffic scene understanding from movable platforms [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014. 36 ( 5 ): 1012–1025.
- [ 17 ] Tighe J, Niethammer M, Lazebnik S. Scene parsing with object instance inference using regions and per-exemplar detectors [ J ]. International Journal of Computer Vision, 2015. 112 ( 2 ): 150–171.
- [ 18 ] Ma C, Xue J, Liu Y, et al. Data-driven state-increment statistical model and its application in autonomous driving [ J ]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015.
- [ 19 ] Ma L, Xue J, Kuniaki K, et al. Efficient sampling-based motion planning for on-road autonomous driving [ J ]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16 ( 4 ): 1961–1976.
- [ 20 ] Zhang J, Kyunghyun C. Query-efficient imitation learning for end-to-end simulated driving [ C ]. AAAI, 2017.
- [ 21 ] Santana, Eder, George H. Learning a driving simulator [ J ]. arXiv preprint arXiv: 1608.01230. 2016.
- [ 22 ] Chae H, Kang C M, Kim B D, et al. Autonomous braking system via deep reinforcement learning [ J ]. 2017.
- [ 23 ] David I, Akansel C. To go or not to go: a case for Q-learning at signalized intersections [ C ]. International Conference on Machine Learning, 2017.
- [ 24 ] Lecun Y, Muller U, Ben J, et al. Off-road obstacle avoidance through end-to-end learning [ C ]. International Conference on Neural Information Processing Systems, MIT Press, 2005, 739–746.
- [ 25 ] Sallab A E, Abdou M, Perot E, et al. End-to-end deep reinforcement learning for lane keeping assist [ J ]. 2016.
- [ 26 ] Bojarski, Mariusz, et al. End to end learning for self-driving cars [ J ]. arXiv preprint arXiv: 1604.07316 . 2016.
- [ 27 ] Fuentespacheco J, Ruizascencio J, Rendonmancha J M, et al. Visual simultaneous localization and mapping: a survey [ J ]. Artificial Intelligence Review, 2015, 43 ( 1 ): 55–81.
- [ 28 ] Cadena C, Carlone L, Carrillo H, et al. past, Present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age [ J ]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32 ( 6 ): 1309–1332.
- [ 29 ] Li T, Fang J, Zhong Y, et al. Online high-accurate calibration of RGB+3D-LiDAR for autonomous driving [ C ]. international conference on image and graphics, 2017, 254–263.
- [ 30 ] Dou J, Fang J, Li T, et al. Boosting CNN-based pedestrian detection via 3D LiDAR fusion in autonomous driving [ C ]. International Conference on Image and Graphics, 2017, 3–13.

#### 作者简介:

薛建儒(1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为计算机视觉与模式识别、无人车环境理解及自主运动。

李庚欣(1992-), 男, 博士, 主要研究方向为无人驾驶汽车运动决策与规划。



# 军用地面无人平台现状及 发展趋势研究

李楠, 李晗

(航天科工智能机器人有限责任公司, 北京 100070)

**摘要:** 军用地面无人平台是无人作战系统的重要组成部分。首先从军用地面无人平台技术内涵的分析出发, 其主要涉及传感器、伺服、能源动力、机构、运动控制、系统以及智能七项关键技术。继而, 对国外典型先进的军用地面无人平台发展现状进行论述, 并且针对美军以及俄罗斯在实战中军用地面无人平台运用模式展开研究。同时, 对国内军用地面无人平台研究现状进行了分析, 给出典型的国内研制单位与产品指标对比。在此基础上, 总结了军用地面无人平台后续在态势感知、互操作性以及支援作战能力等方向的发展趋势。

**关键词:** 地面无人平台; 运用模式; 移动机器人; 人工智能

**中图分类号:** TJ819    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2018) 02-0124-09

## Research on the Development of Military Ground Unmanned Platform

LI Nan, LI Han

(Aerospace Science & Industry Intelligence Robot Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** The Military Unmanned Ground Vehicle (MUGV) is an important part of the UCAV system. Firstly, based on the analysis of the technical connotation of MUGV, it mainly involves seven key technologies: sensor, servo, energy power, mechanism, motion control, system and intelligence. Then, the development status of typical advanced Military Unmanned Ground Vehicle in foreign countries is discussed, and the application mode of MUGV in the actual combat of the United States and Russia is studied. At the same time, the domestic research status of MUGV is analyzed, and the typical research institutions and products are listed and compared. On this basis, the future development trend of MUGV in the direction of situational awareness, interoperability and supporting combat capability is given.

**Keywords:** Unmanned Ground Vehicle; Application Mode; Mobile Robot; AI



## 1 引言

军用地面无人平台是一种用于完成军事任务的自主式、半自主式和人工遥控的机器人，以完成预定战术或战略任务为目标，以智能化信息处理技术和通信技术为核心的智能化武器装备。军用地面无人平台能够代替士兵完成各种极限条件下的特殊危险的军事任务，使得军人在战争中免受伤害。

无人平台是无人作战系统的重要组成部分，可以协助作战人员、或者独立参与作战，可执行侦察、后勤运输甚至火力支援等军事任务，主要从事的任务性质为单调、枯燥、肮脏的工作，并且没有人类士兵的负面情绪的影响。在海湾战争后，大量的无人平台被广泛应用于现代化战场中，担负着越来越重要的角色。图1给出了在伊拉克战场中应用的机器人，包括在战场中被破坏的排爆机器人以及小型抛投无人机。军用地面平台具有较好的隐蔽性、快速机动能力以及较强的战场适应能力，与传统武器可形成战场的不均衡态势，将引发军队组织结构、体制及战术的变化。

## 2 无人平台技术内涵

无人平台涉及到多个学科和领域的研究成果，机械、电子、自动控制、计算机、人工智能、脑科学、传感器、通讯及网络等多个学科和领域，按照专业技术体系可归纳出七项主要专业技术，包括：传感器技术、伺服技术、能源与动力技术、

机构技术、运动控制技术、智能技术以及系统技术，如图2所示。

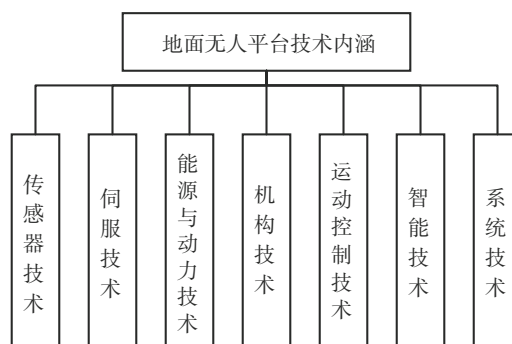


图2 无人作战平台专业技术体系

### (1) 传感器技术

无人平台传感器可以分为内部传感器和外部传感器两大类。内部传感器用来检测无人平台组成部件的内部状态，一般用于无人平台伺服与稳定控制，包括：位置、角度、角位移、加速度、姿态和航向等。外部传感器主要用于对外部环境的感知，包括：视觉、触觉、力觉、接近觉以及嗅觉、温度等。要使无人平台拥有智能，对环境变化做出反应，首先必须使无人平台具有很强的环境感知能力，用传感器获取外部环境信息是无人平台智能化的必要条件。

### (2) 伺服技术

无人平台伺服系统是无人平台的基本运动单元，主要研究内容包括伺服电机技术、伺服驱动器技术、精密减速器技术、液压泵技术、伺服阀技术、运动控制器技术。按能源输出类型主要包括电动、液压和气动伺服系统。其中，电动伺服

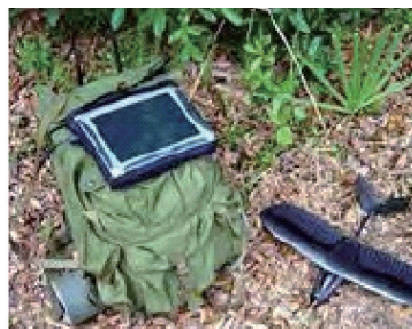


图1 战争中实际应用的无人平台

系统可分为直接和间接控制两种方式，液压伺服系统也可分直接控制（电静液伺服系统）和间接控制（阀控液压伺服系统），气动伺服系统可分为冷气式和燃气式。

### （3）能源与动力技术

能源与动力技术包含为无人平台提供稳定能源和能源管理两个部分，是无人平台运行、工作的基本条件。固定式智能无人平台主要通过电缆提供动力源，移动式智能无人平台大多是通过电池来提供动力源。电池分为化学电池、燃料电池和生物电池等。能源与动力技术涉及化学、电子、物理、材料等多个学科，主要研究高能比电池技术、燃料电池技术、无污染能源技术、非接触充电技术、电源智能诊断与管理技术。

### （4）无人平台机构技术

无人平台机构是由各种机械构件和运动副组成的多自由度机械系统，是无人平台实现各种运动和完成各项任务的载体。无人平台机构技术主要研究直角坐标机构、串联机构、并联机构以及各种移动机构和仿生机构的构型综合、运动学和动力学等相关内容。在无人平台所用的机构中，包括轮式、履带式、复合式等行走机构，以及机械臂等执行机构。

### （5）运动控制技术

运动控制技术是在复杂的情况下，将任务规划制定转变成期望的无人平台机械运动。运动控制的目的是使无人平台实现精确的位置控制、速度控制、加速度控制、力矩和力的控制，以及这些被控制量的综合控制。其主要研究方向包括基于运动学和动力学模型的控制技术、基于传感器的运动控制技术、基于行为的控制技术以及基于仿生机理的运动控制技术。运动控制技术一定程度上影响了无人平台的运动精度与可靠性，进而对无人平台的任务执行效能产生影响。同时，其控制的复杂程度也在一定程度上影响无人平台的硬件需求。

### （6）智能技术

无人平台的智能体现在能够感知视觉、语音、

触觉等各种传感器信息，并对多传感器信息进行融合，并据此进行决策，从而实现各种任务，如自主移动等。无人平台的感知、决策、执行各部分通过特定的控制体系结构有机的结合在一起。因此无人平台智能技术研究的主要内容包括：智能控制体系技术、传感器信息处理技术、多传感器信息融合技术、智能规划技术、自主移动技术等。

### （7）系统技术

无人平台作为光机电一体化复杂集成体，涉及众多学科技术领域，特别是在工作过程中面对的环境是未知的、非结构化的。因此，在整个设计验证过程中，仿真成为系统级技术的重要手段；同时，针对无人平台实时操作、状态反馈、环境再现等问题，稳定、友好的人机交互系统成为无人平台不可分离的组成部分；作为信息交互的通信链路，掌握并应用好通信技术发展的最新成果，搭建人与平台、平台与平台之间交流的桥梁是无人平台关键技术之一；将熟知的武器装备在研制生产过程中普遍采用的测试实验方法，系统、有针对性地应用到无人平台技术发展过程中，是保障无人平台技术成功转化为装备，产品的技术保障措施。同时，无人平台作为一种智能化新兴装备在可靠性、安全性等方面的技术标准的研究与制定也需要重点关注。

## 3 国外军用地面无人平台现状

### 3.1 地面无人作战平台

#### （1）Gladiator（角斗士）机器人<sup>[1]</sup>

美国的Gladiator角斗士机器人使用混合动力，有电动机、柴油机和蓄电池。如果需要它悄无声息地行动，可以关闭柴油机，使用蓄电池备用电源，保障完成特殊任务。最大速度为26km/h，在野外路面上速度约降低1倍，能跨越1m宽的壕沟、70cm深的小河。

#### （2）Sword军用地面无人平台<sup>[2]</sup>

Sword军用地面平台是以Talon（魔爪）机器人作为底盘，并且加装了武器作战系统，武器系统

的光瞄系统主要由4台摄像机、夜视传感器组成，能装备5.56mm口径的M249机枪，或是7.62mm口径的M240机枪，有效控制距离可以达到1km。无人平台以及直流电池为动力源，远程控制终端质量13.6kg，可以同时实现遥控武器站和平台本体控制。

### (3) 英国特拉卡尔和黑骑士无人地面车<sup>[3, 4]</sup>

英国的Trakkar（特拉卡尔）无人车是全自动式平台，能够承载4名士兵或者250kg载荷，具备创新的跟随能力，能够跟随操作人员通过路面。此外，在美国国防预先研究计划局（DARPA）和英国BAE系统公司的主持下，名为黑骑士的履带式无人车辆由BAE系统公司、卡内基·梅隆大学机器人研究中心等研究机构研究而成，与以往只承受辅助性任务、仍需人类干预遂行任务的无人平台不同，它拥有堪比有人战车的自重、20mm速射火力系统、全地形通过能力、全频谱感知器组、完善的战术数据链以及先进的人工智能指挥系统。

### (4) 俄罗斯平台-M机器人<sup>[5]</sup>

平台-M（Platforma-M）是一种最新式机器人作战系统，其设计目的是与敌人进行非接触性战斗。按照设计构想，该系统为多用途作战单元，既能充当侦察兵，也能巡逻并保护重要设施。凭借其武器装备可用于火力支援。其武器制导系统

可自动运行，无需人工操作。平台-M虽然体型很小，但威力强大，装有榴弹发射器和机枪系统。

### (5) 俄罗斯狼-2移动机器人<sup>[6, 7]</sup>

狼-2（Volk-2）质量高达1t（平台-M只有800kg），作战任务依然为与敌人非接触战斗为目标。狼-2采用履带式底盘进行机动，具有较强的野外通过能力，可实现较为高速的野外机动能力；不配备乘员，在5km内通过无线电频道控制，测试中完美地克服了春天的泥泞路面。狼-2装备有卡拉什尼科夫机关枪、峭壁（Utes）和绞线（Kord）重机枪，可在35km/h的时速下开火。狼-2具有防护装甲，同时利用包含热成像仪、激光测距的光瞄系统实现对战场态势的侦察与跟踪，遥控武器站实现打击。

## 3.2 多用途移动平台

### (1) Crusher（破碎者）无人车<sup>[8]</sup>

破碎者无人车是由DARPA投资，卡内基·梅隆大学机器人研究中心设计研制，计划装备陆军的新一代无人武装侦察车。该车具有无人操控、能够运载任何货物、防范敌人攻击并轻而易举地高速通过使悍马车也会翻车的地形等特点。该车除了拥有无人驾驶技术以外，还装备了美军开发



美国的Gladiator角斗士机器人



美军Sword机器人



英国特拉卡尔



黑骑士



俄罗斯平台-M



俄罗斯狼-2战斗机器人

图3 国外军用地面无人平台

的用于无人车辆的混合动力发动机和先进的悬架系统，能够携带质量1800kg的负载，爬越1m高的垂直台阶。破碎机的设计时速为40km/h，当操作人员输入目的地信息后，能够以完全自主控制的方式行走约450km。

### (2) SMSS (公牛) 无人车<sup>[9]</sup>

SMSS是班组支援无人平台，由洛克希德马丁公司研制，可实现半自主控制以及遥控控制，采用六轮独立驱动，具有全地形的适应能力，主要实现伴随运输功能，同时可搭载相应的态势感知以及打击载荷实现侦察、火力支援等任务。

### (3) MULE (骡子) 多用途无人平台<sup>[10]</sup>

MULE是通用型无人平台的典型产品，主要采用摇臂式主动悬挂方式，轮毂电机驱动，可翻越1.5m的障碍，野外通过性能得到保障；同时越壕宽度可达到1.5m以上，纵坡以及横坡的通过能力均可达到40°以上，具有一定的涉水能力。同时可搭载ANS自动导航系统以及运输组件，实现自主以及半自主的运输、作战支援等任务，混合动力方式在保障其隐蔽性的同时满足长时间使用的要求。

### (4) 以色列的卫士无人平台<sup>[11]</sup>

卫士是一款具有高度自主能力的多用途无人平台，由以色列G-NUS公司研制，有三代主要产

品：MK-1、MK-2、MK-3。前两代主要为半自主运动模式，可实现自主避障；第三代无人平台可识别障碍物，可实现局部的路径规划实现障碍的自主绕行策略。以色列将该型平台部署于边境区域以及机场，通过搭载不同的载荷，可分为运输、侦察、引导以及作战四种用途。

## 3.3 单兵无人平台

### (1) PackBot 机器人系统<sup>[12]</sup>

该型机器人自重较小，适于单兵携带，利用OCU进行远程遥控完成侦察、排爆等作业，质量18kg，最大速度3.7m/s，涉水可达3m，每次充电行驶距离13km。通过模块化机械与电气接口，可以扩展为侦察机器人、排爆机器人以及小型作战机器人，性能稳定、用途广泛。2008年PackBot机器人全球销售突破2000台。

### (2) Talon (魔爪) 军用地面无人平台<sup>[13]</sup>

美国的魔爪军用地面无人平台目前被大量部署到阿富汗和伊拉克等地区，首要任务是辅助军事人员完成一些极端危险的工作，如侦察和拆除敌方部队为攻击己方部队而设置的路边炸弹及一些简易爆炸装置(IED)，有效降低人员处置危险物品的风险。魔爪能够在不装备爆炸物处理装置(EOD)和战斗工程设备的情况下遥控拆除简易爆



美国Crusher多用途平台



美军SMSS多用途平台



美国MULE无人平台



以色列卫士系列MK1 MK2 MK3

图4 国外多用途地面无人平台



图5 单兵无人平台

炸装置，载荷为45kg，可翻越最高43°的台阶、45°的斜面、38cm深的雪地及拆迁废墟。

### (3) SandFlea沙蚤机器人系统<sup>[14]</sup>

DARPA联合波士顿动力公司研制出一种新型的小型无人地面车，被称为“沙蚤”，它是一种跳跃式机器人，呈鞋盒状，质量约4.5kg，通常采用4轮行驶，但也能垂直跳跃，高度达9m，能独立越过壕沟和障碍，其跳跃能力是凭借一个集成的、向下喷火的助推装置并附着填充CO<sub>2</sub>的药筒，一次装药可使该车进行20~30次跳跃。

### (4) Dragon runner龙行者机器人<sup>[15]</sup>

Dragon runner由美国海军陆战队战斗实验室、海军研发办公室会同卡耐基·梅隆大学机器人研究中心合作研制，核心装置是一个无线调制

解调器和UHF图像传输系统。龙行者体积很小(0.394m×0.28m×0.13m)，质量轻(7.45kg)，但机动性强，样机的速度达到8.9m/s。龙行者的用途是在城市街巷代替士兵开展侦察，协助实施精确打击，减少伤亡。

## 3.4 仿生无人平台

### (1) Bigdog(大狗)仿生机器人<sup>[16]</sup>

由于履带式和轮式机器人不能真正到达所要保障的士兵可能要去的一个地方，美国国防部联合MIT和波士顿动力公司等研制的Bigdog高70cm，重约75kg，采用汽油动力，最高负载量为120磅，速度为3.3miles/h，1.5m/s内装维持机身平衡的回转仪，由本身的立体视觉系统或远程遥控器确认路径，主要用来运送军用物质。

### (2) Petman以及Atlas机器人战士系统<sup>[17, 18]</sup>

Petman是波士顿动力公司开发的一款仿人机器人，其拥有人类的身高，像人一样行走，最高步速达到约2m/s，可实现跳跃、下蹲促膝和俯卧撑等行为。PetMan能够保持自身平衡，保持稳定的行走状态，初始研制目标为暴露在化学武器或者放射性环境下，代替人类士兵完成指定动作，实现防化服测试过程中的信息采集与评价。

Atlas为波士顿动力开发的另一款较为典型的仿人机器人，其采用便携式液压泵站进行能源供给，同时具有28个液压伺服关节实现各关节自由度，可采用遥控以及半自主运动方式。最新发布

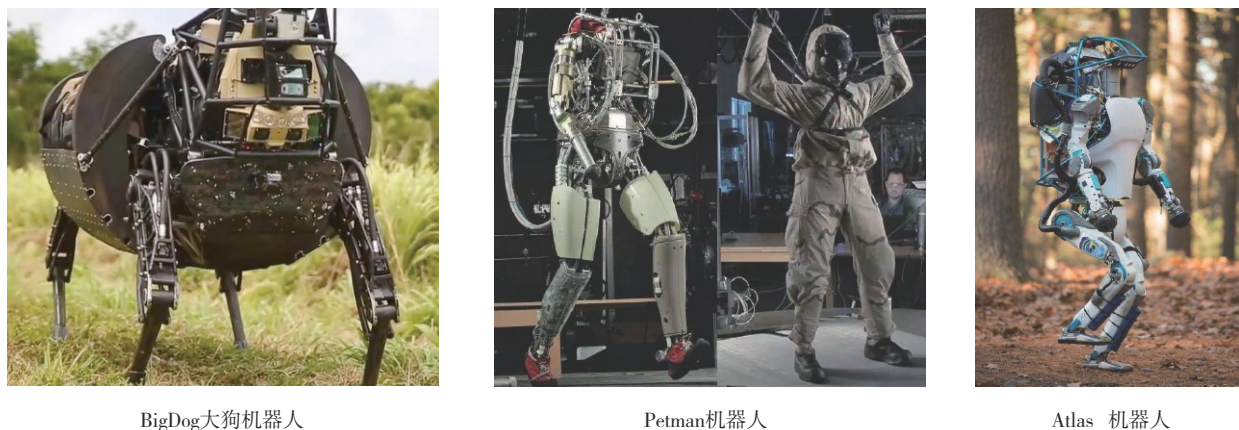


图6 国外仿生无人平台

的资料中显示，该型机器人具备在丛林、草地等非结构地面条件下的通过性。该型机器人具有与人类接近的构型与自由度配置，可以实现替代人类在狭窄环境、城市巷战等环境下执行多种作战、支援等任务，同时可以使用与驾驶人类的工具与载具。

#### 4 国内军用地面无人平台现状

我国的无人作战体系主要集中于无人作战平台的研究，并且这些研究还处于原理样机阶段，鲜有产品能够真正投入大规模研制和应用。我国无人作战体系还没有较为完整的规划，对其研究主要集中在高校等一些专门研究单位，体系创新和集成能力差，很难具有综合完成无人体系的研发能力，距达到体系间的协同技术水平也有很大的差距。比较典型的无人平台如图7所示。

##### (1) 锐爪系列无人平台<sup>[19]</sup>

锐爪1型无人平台，采用履带式行走机构，自重120kg，可用对敌人目标侦察、打击，对已隐藏于建筑物、坑道内的恐怖分子进行搜索打击，对于受困人员实施援救等任务。该平台可以自主安

全驾驶、完成多通道的通讯及远距离遥控武器射击，具备多种侦察手段。

##### (2) 班组任务支援平台<sup>[20]</sup>

班组任务支援平台是一款无人驾驶的轻型全地形车，该车总体结构采用6×6无悬架全地形车身，增程式混合动力驱动，大数据量的路径规划处理计算机。该产品主要作战用途包括：搭载班组人员及装备执行前线搜索、巡逻、战斗等任务；运输弹药、医疗用品等军用物资；战场救护和自主边境巡逻等。

##### (3) 多用途小型无人平台

中国航天科工飞航技术研究院研制的500kg级别多用途小型无人平台采用轮毂电机的驱动方案，实现6轮行走机构模块化设计，构型为六轮独立悬挂与四轮独立转向方式，在非结构化环境中具有良好的机动性能与通过性能，最高行驶速度达到30km/h。该型平台具有较小的体积与较高的承载能力，可搭配大型液压机械臂（末端负载70kg以上）、遥控武器站等上装载荷，采用远程遥控方式，可在城市环境以及野外环境中执行打击、救援、危险物排除等任务。



锐爪1型



班组任务支援平台



500kg排爆机器人

图7 国内军用地面无人平台

## 5 军用地面无人平台发展趋势

根据实战化需求,美军制定了详细的近期、中远期规划,重点在降低士兵的体能以及感知方向的能力需求,同时在通用化、模块化方面给出持续发展规划。在分析美军的发展规划基础上<sup>[21, 22]</sup>,结合其他先进平台的技术发展路径,给出军用地面无人平台的发展趋势。

(1)更加强调一体化作战支援能力。未来战场更加强调联合作战能力,其基于信息化技术的发展,动态化与不可预测的特性更加明显,因此需要地面无人平台具有一体化的作战支援能力,既可实现快速运输、伴随保障、通信中继等后勤保障任务,也可实现快速精确打击、情报侦察等作战任务。这就要求重点提升地面无人平台态势感知、作战应用、多机协同、自主控制、战场防护以及战场机动等六个方面的能力。伴随着人工智能、传感器信息感知以及通信技术的发展,军用地面无人平台逐渐由执行远程遥控、排爆、侦察等特定任务发展到执行班组跟随、前导侦察等半自主复合型任务功能<sup>[23]</sup>。

(2)重点提升自主性能,加强态势感知能力。除了大小与功能外,反映地面无人平台的主要特性为其自主水平,从100%的远程遥控控制,到部分功能自主直至全自主。现阶段主要是以远程遥控为主,存在两个方面的问题:一方面是需要操作人员时刻关注平台与周边环境状态,操作人员的负担较重;另一方面,远程遥控对于通信的带宽以及实时性具有较高的要求,同时对通信的安全性及稳定性要求也较高。半自主以及全自主地面无人平台通过内部以及外部传感器实现对环境以及自身状态感知,借助决策系统将任务分解至规划层与控制层,实现地面无人平台的自主行为与路径规划,实现在非结构环境下的障碍物检测、感知以及规避功能。

(3)提升地面无人平台的互操作性。互操作性是制约地面无人平台走向实战的关键技术,需要重点解决多个平台以及系统之间的信息共享能力,

互操作性的提升有助于降低对地面无人平台的后勤保障需求以及总体部署经费需求。提升系统的互操作性需要重点解决接口、数据类型与格式、通信频带与设备的标准化问题,采用开放式体系架构,在各层次架构基础上采用公开的标准化接口。美军正在制定无人平台与有人平台的接口标准,基于与北约标准化协议相兼容的标准,提出一系列针对地面无人系统的互操作性发展原则<sup>[24]</sup>,以期能够协调各平台之间的发展,使各类新型无人平台能够快速融入无人作战系统,有效简化系统测试以及集成流程。

## 6 总结

随着战争形态的变化以及无人化战场的需求,军用地面无人平台大规模进入战场已经成为一种必然趋势。通过分析发现,在无人平台的研制与运用方面,我国与先进国家仍然存在一定差距。因此,建议从顶层进行规划设计,充分论证地面无人平台发展路线图,梳理关键技术体系;同时,加强关键产业链建设,确保关键元器件、外协配套体系持续完善,并且加强原创性无人平台设计能力。

## 参考文献

- [1] 杨晓波,毛翔.“世界第一”多用途作战机器人:“角斗士”战术无人车[J].轻兵器,2010,(7):1122-1127.
- [2] 隋萌萌.世界军事强国无人作战平台发展历程[J].2015,(1):20-24
- [3] 佚名.英国“特拉卡尔”无人车[J].国外坦克,2011,(9):30-30.
- [4] 杜明,王威.“黑骑士”无人装甲概念车[J].兵器知识,2008,(7):53-55.
- [5] 王东梅,许忠勇.俄罗斯地面无人平台[J].兵器知识,2006,(6):56-58.
- [6] 梓文.俄罗斯 Uran-9 无人地面战车[J].兵器材料科学与工程,2017,40(1):114-114.
- [7] 阳亮,赵媛媛,刘川.俄罗斯地面无人战车的发展[J].

- 国外坦克, 2017, (10): 110-113.
- [ 8 ] Young S H, Mazzuchi T A, Sarkani S A. Frame-work for Predicting Future System Performance in Autono-mous Unmanned Ground Vehicles [J]. IEEE Transactionson Systems, Man, and Cybernetics Systems, 2017, 47 (7): 1192-1206.
- [ 9 ] Roosevelt A. Lockheed martin SMSS aims toward program of record [J]. Defense Daily, 2013, (6): 10-17.
- [ 10 ] Heimfarth T, Araujo J P D, Giacomini J C. Unmanned aerial vehicle as data mule for connecting disjoint segments of wireless sensor network with unbalanced traffic [C] // IEEE, International Symposium on Object/component/service-Oriented Real-Time Distributed Computing. IEEE, 2014, 246-252.
- [ 11 ] 王军良. 以色列展示无人车新能力 [J]. 国外坦克, 2016, (11): 5-5.
- [ 12 ] Rudakevych P. PackBot EOD firing system [J]. 2005, 58 (4): 758-771.
- [ 13 ] Endo Y, Balloch J C, Grushin A, et al. Landmark-based robust navigation for tactical UGV control in GPS-denied communication-degraded environments [C] // SPIE Defense + Security. International Society for Optics and Photonics, 2016, 98 (3): 558-571.
- [ 14 ] Aoki T, Ogihara K. Design of quadruped walking robot with spherical shell [J]. American Transactions on Engineering & Applied Sciences, 2014, 3 (4): 75-78.
- [ 15 ] Army T B. The British Army - DRAGON RUNNER bomb disposal robot [J].
- [ 16 ] 贾伟杰. BigDog四足机器人关键技术研究 [J]. 信息通信, 2018, (1): 25-26.
- [ 17 ] Nelson G, Saunders A, Neville N, et al. Petman: a humanoid robot for testing chemical protective clothing [J]. 日本ロボット学会誌, 2012, 30 (4): 372-377.
- [ 18 ] Wiedebach G, Bertrand S, Wu T, et al. Walking on partial footholds including line contacts with the humanoid robot atlas [C] // Ieee-Ras, International Conference on Humanoid Robots. IEEE, 2017, 1312-1319.
- [ 19 ] 赵阳. 军用无人地面平台的发展现状与趋势 [J]. 商业文化, 2011, (5): 310-310.
- [ 20 ] 徐峰. 下一代军用无人地面车辆发展趋势探究 [J]. 现代军事, 2015, (2): 80-84.
- [ 21 ] 王军良. 军用无人平台的未来 [J]. 国外坦克, 2007, (11): 24-26.
- [ 22 ] 高劲松, 陈哨东. 对美国无人系统路线图中自主性初步研究 [C] // 2014, 25-29.
- [ 23 ] 卓琨, 黄国策, 张衡阳, 等. 美国无人系统路线图中通信和互操作性发展研究 [J]. 飞航导弹, 2015, (5): 72-76.
- [ 24 ] 杨亚丽, 贾欢欢, 薛晓东. 美国无人系统未来发展路线 [J]. 飞航导弹, 2015, (5): 18-24.

作者简介:

李 楠(1983-), 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向为移动机器人系统设计、自主定位与导航。







# 国外舰载无人机着舰引导 技术发展现状

李 强<sup>1</sup>, 张淑丽<sup>2</sup>, 蒙文巩<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军海军舰船办航空系统处, 北京 100071; 2. 中国船舶工业系统工程研究院五所, 北京 100094)

**摘 要:** 对国外舰载无人机着舰引导技术这一热门领域的发展情况进行了综合评述。首先, 总体概括了国外舰载无人机着舰引导的技术手段; 随后, 讨论了美国、法国、奥地利等国着舰引导技术的发展现状、无人机着舰回收特点、系统组成及使用范围; 最后, 分析了舰载无人机着舰引导技术的发展趋势。综述表明, 国外舰载无人机着舰引导技术相对成熟, 对我国发展类似技术具有重要借鉴意义; 并应考虑陆基及舰基技术的通用化。

**关键词:** 无人机; 着舰引导技术; 雷达着舰引导; 光电着舰引导; 卫星着舰引导

**中图分类号:** V243.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2018) 02-0133-06

## Surveys of Carrier Landing Techniques for UAVs

LI Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Shuli<sup>2</sup>, MENG Wengong<sup>2</sup>

(1. Aviation Systems Department of Warships Division, the Academy of Navy Equipment, Beijing 100071, China;

2. Fifth Department of Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A survey of overseas carrier-based Unmanned Aerial Vehicle (UAV) guidance techniques development was evaluated. Firstly, landing techniques of overseas carrier-based UAV were reviewed. Secondly, state-of-art of carrier-based UAV's guidance techniques and also recovery characteristics, system compositions, application field were discussed. Finally, development trends of carrier-based UAV's guidance techniques were analyzed. This review shows that overseas guidance techniques of carrier-based UAV are relatively mature, which provides significant reference to develop similar techniques. The universalization of this techniques between carrier-based and land-based should be considered vitally.

**Keywords:** Carrier UAVs; Carrier Landing Techniques; Radar Guidance; Optoelectronic Guidance; GPS Guidance

## 1 引言

无人机机动灵活、隐身性能好，可借助其上的侦察、干扰、通信等设备大大延伸舰船的作战范围。因此，相关国家都在大力推广舰载无人机。然而，由于受到海浪、舰船、无人机性能、舰上着舰区气流等因素的影响，舰载无人机起降极其复杂，如何引导其按要求的航迹飞行实现自动起降是舰载无人机的关键技术之一，也是各国发展舰载无人机需要考虑的重点之一。

目前，舰载无人机的回收着舰方式主要有撞网回收<sup>[1]</sup>、自动着舰<sup>[2, 3]</sup>等方式。随着无人机执行作战任务能力要求的提高，无人机的质量也越来越大，撞网回收已无法满足中大型无人机的着舰需求。因此，自动着舰已成为无人机回收的重要方式。舰载无人机自动着舰引导技术发展比较成熟的国家有美国、法国、奥地利等，采用的技术手段主要有雷达、光电和卫星等。

雷达着舰引导是利用舰上安装的雷达，测量无人机的高度、方位、速度等参数，通过解算处理，产生与理想着舰轨迹的误差信息，并发送给无人机，控制无人机按预定轨迹下滑着舰。目前，采用雷达引导技术体制的无人机着舰引导系统主要有美国Sierra Nevada公司的无人机通用自动回收系统(UAV Common Automatic Recovery System, UCARS)<sup>[4, 5]</sup>和法国DNCS公司开发的一种舰载无人机自动着舰系统D2AD。

光电着舰引导是以光电传感器为基础的着舰引导体制。由于光电具有分辨率高、抗电磁干扰、多径效应能力强、体积小、质量轻等一系列技术优势，这种技术一出现就引起世界各国的关注，并表现出良好的应用和发展前景。目前采用光电引导技术体制的无人机着舰引导系统主要是法国DNCS公司研制的SADA<sup>[6]</sup>自动甲板起降系统、美国DRS公司研制的进近着舰虚拟成像系统(Virtual Imaging System For Approach and Landing, VISUAL)<sup>[7]</sup>。

利用卫星信号作为引导手段，是舰载无人

机自动起降技术的重要发展方向。20世纪90年代，全球卫星定位系统(Global Positioning System, GPS)技术逐渐发展成熟。作为一种卫星导航系统，GPS自建立以来给导航和定位技术带来了巨大改变，它从根本上解决了各类导航和定位问题。其接收设备简单，无需庞大的地面设备，又可全球覆盖。将GPS用于舰载机全自动着舰引导，可降低着舰系统对舰岛安装尺寸和母舰电磁辐射特性的需求；可发挥GPS精确测量相对位置的优势，有效提高导航和定位精度，特别适合近距离的相对定位。因此，GPS在舰载无人机自动着舰方面的应用得到了飞速发展。目前，采用卫星引导技术体制的无人机着舰引导系统主要有法国SIREHNA公司研制的自主着舰系统(Automatic Decking System, ADS)<sup>[8]</sup>、美国的联合精密进近着陆系统(Joint Precision Approach and Landing System, JPALS)<sup>[9, 10]</sup>、奥地利S100型舰载无人机上使用的基于GPS自动着舰系统<sup>[10]</sup>。

## 2 美国着舰引导技术

舰载无人机已成为美国海军装备的重要组成部分，其正在研制的火力侦察兵代表了舰载无人机的发展方向之一。舰载无人机的广泛应用，促进了美国无人机自动着舰引导技术的发展，且其技术最为成熟，可采用的技术手段包括雷达、光电、卫星等。

### 2.1 UCARS无人机自动回收系统

UCARS是美国Sierra Nevada公司研制的一种雷达引导体制无人机自动起降系统，由舰载系统和机载系统两部分组成。其中舰载系统用于定位并精确跟踪无人机，提供无人机相对理想着舰点的相对位置。其雷达天线能够实现俯仰和方位两个方向上的跟踪，具有较大的运动范围，这样可以在高海况下保障无人机自动着舰。

舰载系统布置在飞行甲板上，或通过基座安装在船上，如图2所示。



图1 UCARS舰载系统



图2 UCARS在舰上的安装方式



图3 UCARS机载设备

机载系统主要部件为异频雷达收发机，如图3所示。

UCARS可在明朗天气、雾、雨、夜间和多数海况下实现无人机的起飞和回收；易与任意舰船和陆基无人机系统集成，可以应用到几乎所有的无人机；不需要外部额外的位置信息就能够满足甲板运动的稳定性要求，具有广泛的应用潜力。



图4 火力侦察兵舰载无人直升机

UCARS前后发展了UCARS-V1和UCARS-V2两个版本。UCARS-V2是为保障诺·格公司RQ-8A火力侦察兵无人机的自动着舰回收开发的。1996年9月开始，美国在马里兰州利用VC-6先锋无人机成功完成了UCARS的地面和飞行试验；1997年1月在Shreveport上完成了UCARS的海上试验。UCARS与先驱者无人机的集成始于1997年，与掠夺者无人机的集成始于1998年。之后，UCARS完成了岸上和海洋环境下的20000次自动着陆/着舰试验，包括在庞巴迪CL-227无人机上进行的8次自动起降试验。2006年1月，SNC宣称

在Nashville号军舰上利用RQ-8A火力侦察兵完成了UCARS-V2的第一次自动着舰试验。

## 2.2 VISUAL进近着舰虚拟成像系统

为提高舰载机在复杂电磁环境、无线电静默条件下的使用率，美国提出了对光电着舰引导技术的军事需求。在此需求牵引下，20世纪80年代中后期，DRS公司为美国海军研制了VISUAL光电着舰引导设备。该设备利用人眼安全激光测距、双频红外辅助监视等技术，提供舰载机的着舰信息。VISUAL已广泛装备于美军现役航母上，还可在LHA/LHD两栖攻击舰上保障无人机着舰使用。

## 2.3 JPALS联合精密进近着陆系统

1996年5月，美国国防部提出基于卫星导航的联合精密进近着陆系统（JPALS）研制计划，以期实现三军联合、军民融合，雷神公司负责具体技术开发。美军对其使用的需求如下：

(1) 可在现有军事基地进行精密进近着陆；

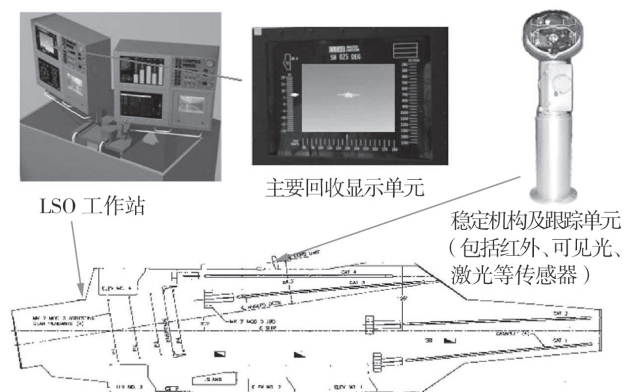


图5 美国VISUAL系统示意图

- (2)可在简易机场快速部署，如伊拉克巴格达机场；
- (3)可针对特殊军事任务，如精确兵力投送；
- (4)可引导有人舰载机和无人舰载机自动着舰。



图6 JPALS任务需求

2013年，美国X-47B舰载无人验证机在JPALS支持下，完成了首次着舰回收。

美国原规划JPALS 2016年形成初始运行能力（IOC），并装备美军舰母、两栖攻击舰、濒海战斗舰等。但根据最新掌握的情况，目前JPALS仍在测试中，还没实现初始运行能力的目标。

### 3 法国着舰引导技术

法国在舰载无人机自动着舰技术方面的研究走在世界前列，技术手段包括光电、雷达和卫星等。

#### 3.1 SADA自动甲板起降系统

SADA是法国DNCS公司开发的一种舰载无人机自动着舰系统。该系统使用红外传感器精确跟踪无人机，同时发出飞行指令调整航线直到确保无人机的“鱼叉”式着舰装置对准降落格栅的中心。

SADA能够在5级海况下，在移动的飞行甲板上保障无人机垂直起降，所需时间不到2分钟。SADA的跟踪精度为30cm，比仅使用GPS定位的系统精确很多，因此总的安全性和可靠性更有保障，从而克服目前无人机在海上进行舰船回收面临的技术难题，扩大了无人机的部署。同时，SADA

具有开放式体系结构，能很容易地、不引起冲突地与任何垂直起降UAV和任意类型的舰船集成在一起。

2008年10月9日和10日，DCNS公司依靠SADA成功地使一架无人机以自动模式在一艘正在地中海航行的法国海军驱逐舰蒙特卡姆号（Montcalm）上完成降落。由于这项创新，DCNS能够向海军提供部署舰载无人机的综合解决方案，包括任务规划、发射、任务执行和回收。因此该部分可用于垂直起降无人机与海军舰船的使用集成。

#### 3.2 D2AD无人机自动着舰系统

D2AD是法国DNCS公司开发的一种舰载无人机自动着舰系统，于2008年启动，致力于降低自动起降系统风险，且能够保证垂直起降无人机在舰上的安全使用。

D2AD包括机上和舰面两部分。机上部分是无人机的指引标，舰面部分在飞行甲板上使用传感器进行船体运动预报，是无人机的导航站，主要由雷达传感器、鱼叉系统、着舰管理操纵台、D2AD模拟器组成。D2AD不依赖任何卫星定位系统就能够实现无人机的自动着舰引导。

目前，法国武器装备采办总署及其工业合作伙伴DCNS公司和泰勒斯公司已经完成了D2AD真实海洋环境下30次成功起降试验，并在拉斐特级护卫舰上完成了海试，试验标志着D2AD项目的技术验证成果。

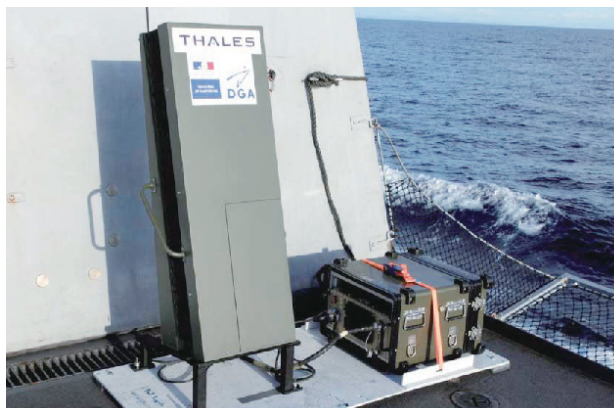


图7 D2AD舰面设备



图8 D2AD海上试验情况

### 3.3 ADS自主着舰系统

目前，SIREHNA公司完成了一个为期三年的垂直起降无人机自动着舰系统的演示验证项目。项目的主要目标是实现无人机在5级海况下的自主着舰。ADS自主着舰系统就是该项目的产物。

ADS由分别安装在舰上和机上的GPS/惯性导航组合导航系统提供连续并准确的舰机相对位置信息，通过数据链实现舰机的信息传输，从而实现无人机的着舰引导。

SIREHNA公司已经完成数值仿真试验、甲板传感器试验、硬件闭环仿真试验、缩比物理仿真试验、全尺寸物理仿真试验。

## 4 奥地利着舰引导技术

奥地利在S100型舰载无人机上实现了依靠GPS自动起降。S100的地面/舰上控制设备主要包括控制站部分、数据链模块、支持设备(如可选的掩蔽部、发电机)及其它可选组件等，如图10所示。

当控制站处在一个固定位置时，GPS基准模块提供坐标信息使飞机导航更加精确，在移动操作期间，也能提供控制站的位置信息，从而确保系统的可用性。

## 5 发展趋势分析

着舰引导技术需要同时保障不同类型无人机的着舰使用。目前，舰载无人机由旋翼飞机向大型高速固定翼无人机发展，满足不同的作战使用需求。美国发展旋翼舰载无人机火力侦察兵，并同步开展X-47B舰载无人验证机项目，目前调整为MQ-25黄貂鱼舰载无人加油机项目，这对着舰引导技术提出了更高通用化的要求。基于卫星的着舰引导技术已应用于美国大型高速固定翼舰载无人机X-47B和奥地利旋翼舰载无人机的着舰回收。

多手段融合是舰载无人机着舰引导技术的发展方向。雷达、光电、卫星是舰载无人机着舰引导技术的三种主要手段，各有特点。雷达技术相对成熟，但在无线电干扰、静默情况下着舰引导使用受到限制；光电技术应用普遍，但环境要求较高，在低能见度下着舰引导使用效果不佳；卫星技术设备相对简单，但严重依赖天基卫星，信号完好性差，且容易受到干扰。为此，需要发展多种手段融合的着舰引导技术，形成技术体系，满足不同的使用环境要求。

多领域通用是舰载无人机着舰引导技术发展的重要途径。无人机在各领域的作用越发重要，

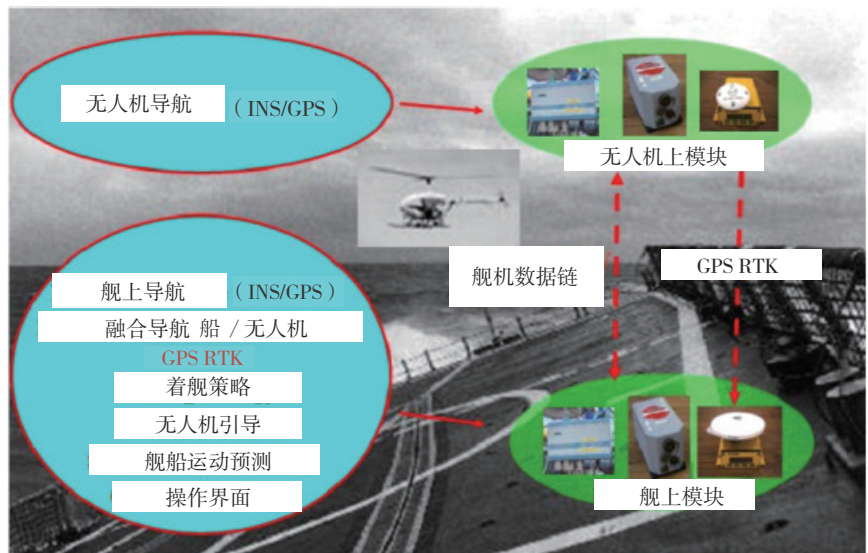


图9 ADS功能及组成

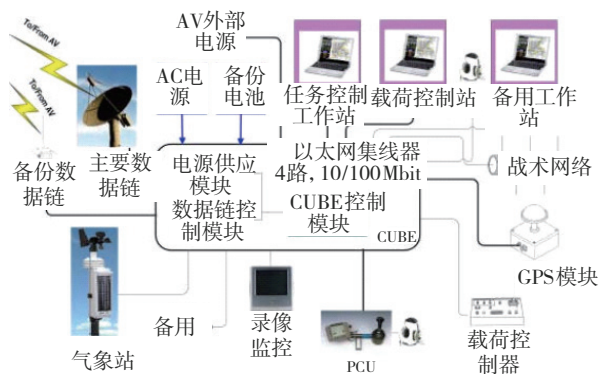


图10 S-100地面设备

如何形成通用的无人机优势以便快速部署，是当前无人机发展的关注点之一。为此，陆基与舰载无人机的通用化、快速衔接成为衡量其生命力的标准之一。与之对应的着舰引导技术也要求具有较强的通用化，以降低成本和技术难度。美国JPALS同时发展了陆基和舰基两个通用化版本。

## 6 结束语

随着科技、经济、政治的发展，舰载无人机在维护海洋主权、发展海上经济、反恐等领域的作用越发重要。与陆基无人机着陆不同，舰载无人机需要在狭小、运动的舰船环境下完成着舰。如何安全、可靠着舰回收是发展舰载无人机的关键技术，应重点予以突破。

美、法等国对舰载无人机着舰引导技术的研究相对深入，技术成熟，设备齐全，手段多样，代表了世界先进水平，对发展舰载无人机具有重要借鉴意义。

海陆通用、海空通用是舰载无人机着舰引导技术发展的重要方向，可同时满足多种无人机自动着舰、着陆使用需求。

## 参考文献

- [1] 蒋毅, 孙春贞, 王凯. 舰载无人机撞网回收自适应制导技术 [J]. 飞行力学, 2015, (01): 43-47.
- [2] 王宏新, 刘长亮, 成坚. 无人机回收技术及其发展 [J]. 飞航导弹, 2016, (01): 27-31.
- [3] Ferrier, Bernard. UAV all weather autonomous ship board operations [C]. International Specialists' Meeting - Unmanned Rotorcraft: Design, Control and Testing, January 23-25, 2007
- [4] Gerhart, Michael. MQ-8B fire scout program support analysis for commander helicopter maritime strike wing atlantic fleet [D]. Monterey, California. Naval Postgraduate School Theses and Dissertations, 2009.
- [5] Ferrier, Bernard. Fire scout UAV launch and recovery system performance improvement [C]. AUVSI Unmanned Systems, 2014, 1106-1128
- [6] 张宇. 基于红外探测器的无人机地基视觉引导着陆关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [7] 刘鑫. 基于惯导系统的舰载光测设备伺服控制系统设计 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2013.
- [8] Wasson J P, Moresve J. Automatic decking of UAV helicopters on a ship [J]. Navigation, 2009, 57 (228): 19-44.
- [9] 钟涛, 王晓旺. 美军JPALS系统现状与发展趋势分析 [J]. 现代导航, 2016, 7 (2): 152-156.
- [10] Beers, Brandon. Joint precision approach and landing system (JPALS) [C]. Proceedings of the National Technical Meeting, 2004, 52-72.
- [11] 尚绍华, 杜若. 世界舰载ISR无人机发展概况 [J]. 飞航导弹, 2009, (12): 50-56.

### 作者简介:

李强(1980-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为指挥自动化技术。

张淑丽(1990-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为工程项目管理技术。

蒙文巩(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航空保障技术。



# 无人机无线传能技术

张红生<sup>1</sup>, 田晓威<sup>1</sup>, 刘忠诚<sup>1</sup>, 邢艳丽<sup>1, 2</sup>, 李彦<sup>3</sup>, 张姮<sup>4</sup>

(1.海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074; 2.解放军装备学院航天装备系, 北京 101416;  
3.中国航天科工集团有限公司空间工程部, 北京 100048; 4.中国人民解放军95894部队, 北京102211)

**摘要:** 续航时间有限、航程短成为制约无人机发展的关键性问题。即使如此, 人类对于提高无人机续航能力的技术研究从未停止, 技术人员不断地打破常规, 无线能量补给技术已悄然发展。分析了几种无线传能技术, 介绍了各国无线传能技术的应用情况, 并进一步给出无人机无线传能的可能架构和关键技术, 以期在不久的将来, 非接触式远程能量补给技术逐渐成熟, 大规模的走向实际应用, 更好的拓展无人机的能力, 赋予无人机新使命。

**关键词:** 无人机; 无线传能; 架构; 激光; 续航时间

**中图分类号:** TP2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2018) 02-0319-06

## Wireless Power Transmission Technology of UAVs

ZHANG Hongsheng<sup>1</sup>, TIAN Xiaowei<sup>1</sup>, LIU Zhongcheng<sup>1</sup>, XING Yanli<sup>1, 2</sup>, LI Yan<sup>3</sup>, ZHANG Heng<sup>4</sup>

(1.HIWING General Aviation Equipment Corporation Limited, Beijing 100074, China;  
2. Department of Space Equipment, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China;  
3.China Aerospace Science & Industry Corporation Limited, Beijing 100048, China;  
4.95894 PLA troops, Beijing 102211, China)

**Abstract:** Limited endurance time and short flying rang has become the key problem that restricts the development of UAVs (unmanned aerial vehicles) . Even so, the technical research on improving the endurance capability of UAVs has never been ceased, conventional technology is constantly being broken, and the technology of wireless energy supply has been quietly developed. This paper analyzes several wireless energy transmission technologies, and the applications of wireless energy transmission technology in different countries are introduced. Several possible frameworks and key technologies of UAV wireless transmission are described, We expect that the technology of non-contact remote energy supply technology is gradually developing mature and will be largely used in the near future. Which will greatly enhance the capability of UAVs.

**Keywords:** UAVs; Wireless Power Transmission; Framework; Laser; Endurance Time

## 1 引言

无线传能技术采用非接触的方式实现电能传输<sup>[1]</sup>，该技术并不是一项新兴技术，可以追溯到1890年，塞尔维亚科学家尼古拉·特斯拉的最初构想是利用地球和电离层间构建8Hz低频共振实现电能无线传输，受技术条件的限制，该构想在相当长的一段时间内并没有成为现实。然而这并没有阻止人们对无线传能技术追求的愿望。

随着技术的发展，电磁感应、电磁共振、微波、超声波、激光、飞秒激光等离子通道等不同形式的无线充电技术逐渐出现。2008年，世界无线充电联盟成立，无线传能技术发展到一个新的阶段。近几年，随着手机、智能穿戴设备等小功率消费级电子产品和中等功率电动汽车等无线充电技术的迅速发展，为了全球范围内进行技术推广和产品通用化发展需要，人们制定了一系列的无线传能标准，主要有无线电联盟WPC的Qi无线充电标准、电力事业联盟PMA和无线充电联盟A4WP发起的Air Fuel Alliance充电标准和大连硅展科技有限

公司发起的iNPOFi技术标准。Qi标准是基于法拉第电磁感应定理、适用于100~205kHz的无线充电技术，Air Fuel Alliance标准包含了电磁感应和电磁共振两种技术，适用于277~357kHz无线充电技术。iNPOFi标准适用于脉冲式低频电场实现无线传能的技术领域。相对而言，无线传能技术在无人机领域的应用发展缓慢，滞后很多，但这并不影响人们对无人机远程能量补给技术的期许和探索。

## 2 无线传能技术概况

当前，主流的无线传能技术从传输方式可以分为三个大类：电磁感应、电磁辐射、电磁共振。无线电波、激光<sup>[2-5]</sup>、微波<sup>[6]</sup>以及超声波均属于电磁辐射式无线传能技术，电磁感应和无线电波的传输距离相对较近，微波和激光的能量传输距离较远。不同无线传能技术的性能特点描述如表1所示。不同无线传能技术的系统原理示意图如图1所示。

表中描述的无线传能技术各有利弊，当前可实际应用于无人机领域的无线传能技术较少。在

表1 不同无线传能技术的性能特点

类型	原理	特点 (传输功率、传能距离、优势、弊端)	成熟度
电磁感应	发射器线圈和接收器线圈分离，发射器线圈内交流电产生变化磁场，接收器线圈产生感应电动势，从而实现无线电能传输。	数十千瓦；mm级；传输效率高、可达95%；传输距离短。	成熟
电磁共振	发射线圈与能量源相连，接收线圈与发射线圈以相同频率谐振，发生强电磁耦合，实现能量无线传输。	数百瓦；3~5m；与电磁感应比，磁场相对较弱、辐射小、效率高、对人体或周围物体危害小、不受磁性障碍物影响；体积大、稳定性差。	不成熟
超声波	发射端借助压电材料的逆压电效应将电能转化为超声波，接收端通过压电材料的压电效应将超声波转化为电能。声波频率大于20kHz。	高达数千瓦；米级；传输距离远，方向性强、能量易集中、无电磁干扰；但功率小、能效比高，随距离增加衰减快。	尚不成熟
微波	在发射端，借助磁控管将电能转化为微波，由发射天线传出；在接收端，由整流设备将微波能量转换为电能。	数千瓦；数十公里；传输距离远、频率高、大气中传播损耗小、效率高达86%；散射损耗大、易干扰通信设备、效率低。	成熟度较高
激光	发射端借助光电器件将电能转换为激光。接收端将激光转化为电能。	数千瓦；数十公里；方向性强、能量集中，可实现小功率长距离传能；能耗大，易受云层散射或障碍物遮挡传输效率低。	成熟度较低
飞秒脉冲激光等离子体通道	飞秒脉冲激光在大气环境中传输时因非线性克尔自聚焦效应和诱发等离子体散焦作用的动态平衡，使得激光脉冲自导引传输，在时间和空间分布上相对稳定，形成等离子体通道。激光自聚焦条件：激光强度达到相对论强度，即电子在激光场中的振动速度接近光速。	等离子通道内光强可达 $10^{14} \text{W/cm}^2$ ，传输功率达吉瓦；数十公里；能量消耗低，可达能量高、传能效率高，波束定向容易、大气影响小、成本低。	技术探索阶段，不成熟



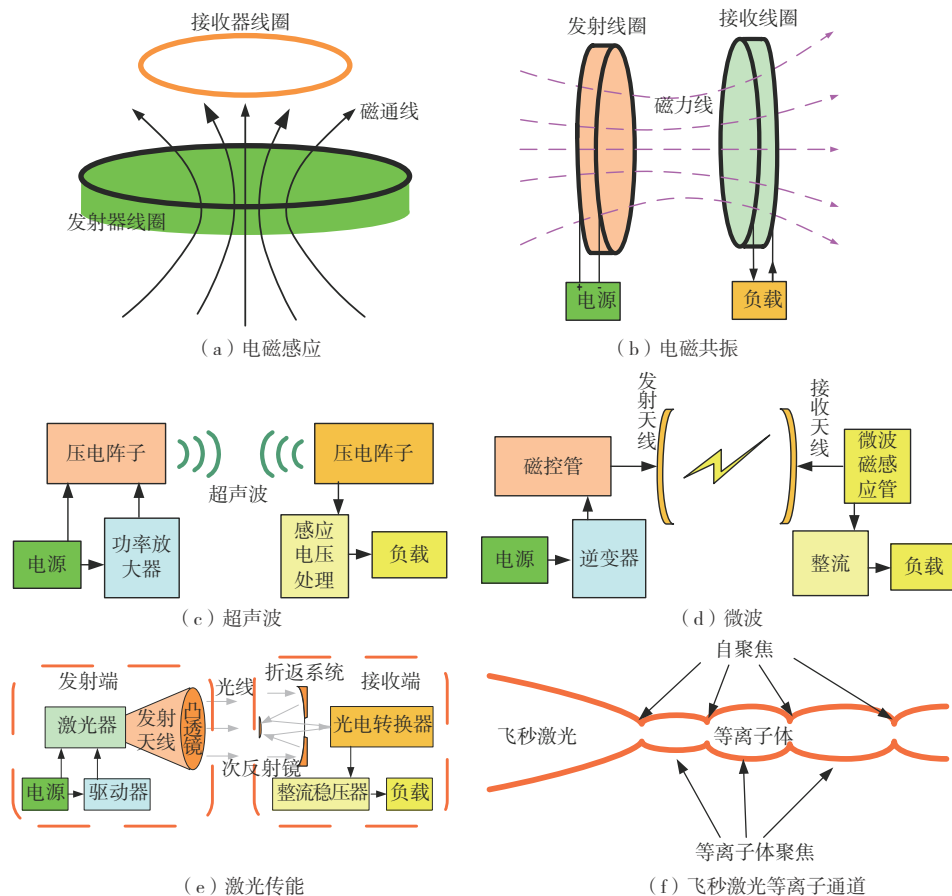


图1 不同无线传能技术的示意图

世界范围内很多国家或地区一直处于不断的探索过程中,各种技术均不够成熟。相对来说,对电磁共振、微波、激光的研究较多,且是比较公认的无线传能方式,在未来小型无人机或中大型无人机的无线供电领域应用前景十分广阔。飞秒激光等离子通道无线传能技术<sup>[7]</sup>在无人机领域的应用正处于概念性和可行性的探索、研究阶段。

### 3 无人机无线传能技术的应用

#### 3.1 美国

无人机的诞生时间并不是很长,然而,随着人类需求的增加,无论是消费级无人机还是军用级无人机,都面临着续航能力不足的问题。在大家还没有意识到问题的严重性时,美国已经开展大量的尝试和探索,在该领域进行了大量的技术储备<sup>[8]</sup>。

2003年,美国NASA地面激光器用输出波长为940nm、功率500W的强激光照射相距15m的无人机表面Ga:In:P2三结光电池,为无人机飞行提供6W电能。

2009年,美国激光动力公司采用激光为PELICAN四旋翼直升机无线供能,使直升机在空持续飞行12.5h。同年,美国防务研究协会DRA在城市电力线警戒PLUS项目中研发出可通过高压线缆电磁感应为机载电池充电的DevilRay小型无人机,该型号无人机可在飞行过程中充电,但潜在风险是可能引起高压导线短路。

2010年,美国激光动力公司采用激光充电系统为1km外的鹈鹕号无人机供电,用波长810nm、输出功率3600W的激光照射1km外无人机表面的16个砷化镓光伏电池,激光传输功率为1kW,光伏电池温度63℃,使无人机的续航时间由未用

激光充电时的5min提高至用激光无线供电时的12h26min。

美国洛克希德·马丁公司旗下的臭鼬工厂与Laser Motive公司联合研发的激光充电系统，应用于该国2006年投入服役的潜行者stalker无人机上<sup>[9]</sup>。2012年，该型号无人机在风洞飞行试验中接收激光供能，首次留空飞行时间长达48h，比最初仅采用电池供电时的飞行时间提高了23倍；同年，完成户外大风、高温条件下距离600m以外的激光供能飞行试验，连续无故障飞行24h。该型号无人机是美特种部队用于执行情报监视和侦察任务的小型电动无人机，此次激光无线传能系统可实现对多架无人机共同无线传能。2011年，该公司曾为提高无人机的续航时间，用燃料电池供能，续航时间可达8h。

2013年，美国采用绰号为隐形塔的无线激光充电系统完成了为一架四旋翼垂直起降无人机进行无线供能的试验。

2015年，Solace Power公司和波音公司合作研发小型无人机无线充电技术，利用谐振阻容技术，实现小区域电能转化为电场。无需接触，通过悬停即可实现充电，有效充电距离为25cm左右<sup>[10]</sup>。

2016年，概念无人机Dronztr的设计者提出采用无线感应充电技术为无人机进行充电，同时借助无人机的自动跟随功能对电动汽车进行无线充电，以解决电动汽车的充电桩安装问题。

2017年4月，美国西雅图机器人无线充电公司WiBotic完成高达250万美元的融资，致力于机器人领域和无人机领域的无线充电平台研发。无人机的飞行、着陆、充电全程无需人工参与，自主实现飞行或返航充电。该公司100W的电磁共振无线充电板可在2h内完成对无人机的充电，在不久的将来，该公司的充电板可搭载在诸如汽车的移动平台上，为小型化无人机充电。同年，为解决水下无人机不能长航时漂浮，需要返回基地充电的困难，美国某公司开发了水下无线充电装置，为水下无人机充电。

2018年1月，美国国防部计划研发采用激光

无线充电技术驱动模拟自然的蝙蝠自主飞行无人机，专注提高不受人干预、可自主改变方向、可自主避障、无线能量驱动和传输的无人机技术。

### 3.2 其他国家

随着全球无人机技术的推进和发展热情的高涨，其他国家无人机技术逐步向前推进，跟随潮流慢慢探索、拓展无人机续航能力的技术。

2016年，英国帝国理工大学Samer Aldhaher采用13.56MHz逆变器和整流装置，为距离无线能量发送装置12.7cm的小型四轴无人机供电。

2016年，俄罗斯能源火箭航天公司利用激光无线传能系统为1.5km外的移动电话充电1h，该激光无线充电技术将来可为无人机进行远程充电。

2017年，华为与中国移动合作研究的X Lab项目中提出四轴无人机可借助信号塔实现无线充电，同时增加无人机的GPS信号和无线充电双重功效。

2017年，德国柏林Sky Sense无人机公司研发出适用于多旋翼无人机长途飞行的无线充电平板技术，该型号充电平板技术将解决无人机的长途持久飞行问题。

2017年，加拿大安大略省无人机公司Sky X研发了X Station无线充电平台，为Sky One固定翼无人机进行无线供能充电，该型号无人机起飞、着陆采用垂直起降的方式。

## 4 无人机无线传能的关键技术

### 4.1 无人机无线传能系统的可能架构

结合国内外正在探索和研究的无线传能技术，本文构想未来可能出现的无人机无线传能架构主要有：地基无人机无线传能系统架构、空基无线传能系统架构、天基无线传能系统架构，如图2所示。

地基无人机无线传能技术比较有前景的形式有两种：一种是中小型旋翼或固定翼无人机借助悬停实现小功率无线充电技术，无线能量供给平台位于固定建筑物顶端或移动汽车顶端等，借助电磁辐射、电磁共振技术实现能量补给，传能距

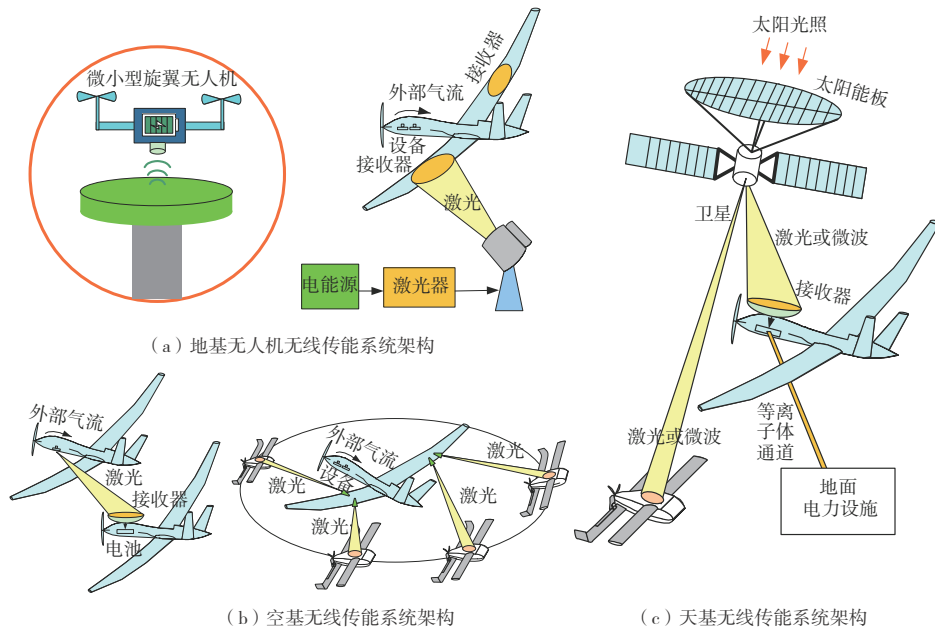


图2 空、天、地基无线传能技术

离相对有限；另一种形式是为中大型固定翼无人机借助追踪扫描实现大功率无线充电技术，激光无线能量发射平台布置在郊外，能够同时为一架或多架无人机进行无线能量传输。

空基无线传能系统架构典型形式有两种：一种是类似“空中加油模式”，一架无人机主要用于提供能量，另一架无人机用于带载和执行任务，因系统的传输效率和体积质量等因素影响，这种模式系统架构还存在诸多技术困难；另一种是采用无人机“蜂群技术”，一架无人机作为其他无人机蜂群的供能平台，所有执行任务的小型无人机在无线供能平台的作用下，实现系统分布式布置，达到分工协作和功能重构，拓展系统在空能力和执行任务能力的效果<sup>[11]</sup>。

天基无线传能系统架构是借助外太空卫星平台实现清洁、廉价、永久太阳能的收集，然后借助激光、微波或等离子通道为临近空间高空无人机或中空无人机进行无线传能，因等离子通道无线传能技术需要借助空气离子实现，从卫星平台到大气层外或临近空间无人机平台可采用激光或微波技术进行无线能量传输；大气层外或临近空间无人机平台可采用等离子通道将电能传输至

地面电力设施。

## 4.2 关键技术

### 4.2.1 激光无线传能

目前，各国技术人员都在积极探索未来无人机的无线传能技术途径，激光在无人机领域的应用不仅仅局限于通信、致盲等功能，各国对激光无线传能技术的概念和使用模式并不陌生，都在努力推动激光无线传能技术走向应用。

激光无线传能技术可能需要对以下三个关键技术进行攻关和探索<sup>[12]</sup>：

(1) 激光传能系统效能。包括发射端电-光转换效率、接收端光-电转换效率、远距离传输效率等方面。现有激光器中光纤激光器和薄片激光器最高效率为25%，半导体激光器效率为50%，尚在研发中的二极管泵浦碱金属蒸汽激光器效率可达40%，虽然半导体激光器效率高，但辐射率仅有 $10^{10} \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ ，影响整体系统效能，二极管泵浦碱金属蒸汽激光器的辐射率高达 $6 \times 10^{15} \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ ，是最有前景的激光器技术<sup>[13]</sup>。接收端光伏电池转换效率较高的有单晶硅电池（效率24.8%）、单结砷化镓电池（效率27%）、多结砷化镓电池（效率50%）。多结砷化镓电池或以后更高功率电池有望

提高激光传能系统的整体效率。

(2) 激光传能系统小型化和轻量化。发射端和接收端因效率低, 导致发热严重, 冷却散热系统庞大; 同时因接收端效率低, 维持无人机飞行所需功率大, 致使接受面积大; 整体导致无人机无线传能和接收系统体积和质量较大, 严重制约无线传能系统应用。

(3) 激光跟踪及对准精度。无人机在空中飞行过程中, 能量的发射端和接收端需要克服大气密度变化、信标光偏移等因素对实时精确对准的影响, 保障能量能够源源不断的高效传送至接收端。

#### 4.2.2 飞秒激光等离子通道无线传能

飞秒激光等离子通道无线传能技术与现有微波、激光等传能机理完全不同, 等离子通道类似虚拟导线(电阻率 $<10^{-5} \Omega \cdot m$ ), 通道内直接传输电能。当前该技术仍停留在构想或概念方面。飞秒激光具有非常高的瞬时功率, 经过聚焦后光强非常高, 同时没有热效应, 无需庞大的冷却系统, 技术优点明显。在不久的将来, 能否在无人机领域得以应用和实现, 还需要在材料、系统稳定性等方面进行大量技术攻关。

## 5 结束语

无线传能技术在改变人类生活方式的同时, 也逐渐与无人机发展深度融合, 提高无人机的续航能力, 将无人机在未来的植被监测、抗震救灾、军事侦察等领域的潜能发挥到极致。虽然无线传能技术受制于当前的技术水平, 无线传能系统的发射端、传输过程、接收端等过程中的技术机理、能量等级、传输效率、体积质量等方面或多或少仍存在一些技术瓶颈, 限制无线传能技术的发展和应用, 但这并不影响无线传能技术会在未来推动无人机走向新的时代。

## 参考文献

[1] 赵昕. 基于无线电能传输模式的无人机悬停无线充电技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

[2] 周玮阳, 金科. 无人机远程激光充电技术的现状和发展 [J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45 (6): 784-791.

[3] Wu N Z, Kumar H, Davari A. Performance evaluation of OFDM transmission in UAV wireless communication [C] // System Theory, 2005. SSST '05. Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on. IEEE Xplore, 2005: 6-10.

[4] Simic M, Bil C, Vojisavljevic V. Investigation in wireless power transmission for UAV charging [J]. Procedia Computer Science, 2015, 60 (1): 1846-1855.

[5] Yao S, Wang T, Guan Q, et al. Noisy image reconstruction based on low-rank in UAV wireless transmission [J]. Cluster Computing, 2017, (5): 1-12.

[6] 李修乾. 无人机激光充电技术研究 [J]. 激光杂志, 2013, 34 (4): 18-19.

[7] 金星, 常浩, 崔晓阳. 激光输能无人机的概念研究 [J]. 航空学报, 2013, 34 (9): 2074-2080.

[8] 李伟, 石敏超, 黄敏. 便携式无人机远程能量激光补给技术研究 [J]. 飞航导弹, 2013, 10: 45-48.

[9] Myung H G, Lim J, Goodman D J. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007, 1 (3): 30-38.

[10] 侯欣宾. 空间太阳能电站及其对微波无线能量传输技术的需求 [J]. 空间电子技术, 2013, 3: 1-5.

[11] Jenn D. Short range Wireless Power Transfer (WPT) for UAV/UAS battery charging - Phase I [J]. Approved for public release: distribution is unlimited. 2014.

[12] 李维, 刘勋, 阮宁娟, 等. 利用等离子通道实现空间太阳能无线能量传输 [J]. 航天返回与遥感, 2014, 35 (2): 87-93.

[13] Lu M, Bagheri M, James A P, et al. UAV wireless charging: a review, reconceptualization, and extension [J]. IEEE Access, 2018, 99.

#### 作者简介:

张红生(1987-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为无人机能源管理、环控。

田晓威(1974-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为无人机测控技术。

刘忠诚(1976-), 男, 硕士, 主要研究方向为无人机综合航电技术。

邢艳丽(1977-), 女, 硕士, 主要研究方向为无人机综合航电技术。



# 一种可变飞行状态的新型 布局无人机

杨新垒，刘晓慧，聂万胜

(航天工程大学宇航科学与技术系，北京 101416)

**摘要：**无人机具有成本低，生存能力强的优点，在作战中发挥着越来越重要的作用，但调研目前无人机发展现状发现，现有无人机存在飞行包线较小、机动能力不足等问题。提出一种可变飞行状态的新型布局无人机，详细介绍该新型无人机的任务剖面、总体参数、动力装置、飞行状态的设计及转换过程等内容。该新型布局无人机不仅可大大扩展现有无人机的飞行包线，而且具有较强的机动性，有利于提升我国未来的战略威慑和防御能力。

**关键词：**无人机；总体设计；飞行状态可变；高机动性

**中图分类号：**V221   **文献标识码：**A   **文章编号：**2096-5915 (2018) 02-0145-07

## A New Type of UAV with Variable Flight State

YANG Xinlei, LIU Xiaohui, NIE Wansheng

(Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering of University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** The UAV has the advantages of low cost and strong survivability, it is playing an increasingly important role in combat. However, the existing UAV have problems such as small flight envelope, insufficient maneuverability and so on. A new type of UAV with variable flight condition is proposed, the mission profile, overall parameters, power unit, flight condition design and conversion process of the new UAV are introduced. The new type of UAV can greatly expand the flight packet line of the existing UAV and it has strong mobility. It can enhance strategic deterrence and defense capability of our country in the future.

**Keywords:** UAV; Overall Design; Variable Flight State; High Mobility

收稿日期：2018-03-14；修回日期：2018-04-27

基金项目：国家自然科学基金（91441123）

## 1 引言

自20世纪70年代提出用于作战的无人机以来,各国竞相发展<sup>[1-5]</sup>。美国走在了最前面,已开发出空军和海军的无人战斗机(UCAV),波音公司已签订压制地方防空武器的无人战斗机先进技术验证计划的第一阶段,并于2000年9月展出了无人战斗演示验证机X-45A,诺格公司已与美国国防预先研究计划局(DARPA)签署了一项作战评估项目合同,继续为美军联合无人作战系统(J-UCAS)验证计划发展X-47B无人战斗机。英国将在2018—2020年服役的未来攻击航空器系统(FOAS)中考虑使用无人战斗机或有人/无人飞机混编系统。法国也在考虑将阵风战斗机改装为无人战斗机的控制机<sup>[6]</sup>。

从越南战争到海湾战争,从科索沃战争到阿富汗战争,无人机以其出色的表现预示着在作战中的重要作用和未来的不可替代性。然而,在防空兵器不断更新和争夺制空权的今天,无人机却屡屡受挫。1999年,在巴尔干半岛的“崇高铁砧行动”中,美国至少有两架无人机因飞行高度较低被高射炮或导弹摧毁<sup>[3]</sup>。在2003年伊拉克战争中,一架捕食者无人机在禁飞区上空与一架伊拉克米格-25喷气机交火后坠毁<sup>[2]</sup>,说明无人机的机动性能有待提高。美国捕食者无人机巡航马赫数为0.2左右<sup>[7]</sup>,X-45A巡航马赫数为0.8,X-45B的巡航马赫数为0.8,X-47B的巡航马赫数为0.75<sup>[8]</sup>,由此可见常见无人机的巡航马赫数多为亚声速,其在飞行速度方面还有待提高。另外,即使某些型号的无人机速度突破声速,甚至实现了高超声速飞行(如X-43<sup>[7]</sup>),但在非设计状态下其性能大大降低,并且不能完成地面起飞,需要由B-52携带至设计高度并达到一定速度后才能释放。

从上述分析可以看出,目前的无人机存在飞行速度较低、飞行高度低、机动能力不足、非设计状态下性能大大降低等问题。针对这些问题,本文提出了一种可变飞行状态的新型布局高空无

人机,取名为“先驱者”。并且进行了气动外形的设计,各部分质量的估算,动力装置的设计,对最大航程、翼载荷、起飞/降落滑跑距离等参数进行了计算,给出了先驱者的总体参数和性能参数,最后对先驱者飞行状态的设计及转换过程、飞行状态的控制和飞行方向的改变进行了详细说明。先驱者最大的创新点是设计了亚声速和超声速两种不同的飞行状态,并且可以实现两种飞行状态的转换,使其在两种状态下均具有较高的气动效率,大大提高了机动性能。

## 2 先驱者无人机

先驱者外形酷似一个菱形,采用翼身融合体、飞翼布局,双向三角翼设计,发动机可转向,具有亚声速和超声速两种不同的飞行状态。亚声速飞行状态如图1,超声速飞行状态如图2。

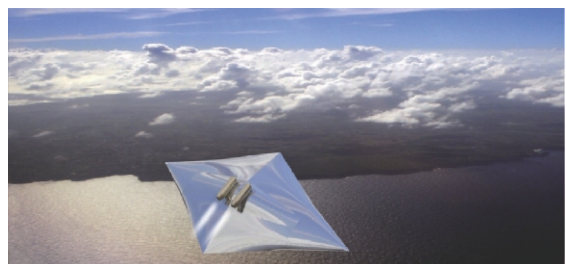


图1 亚声速飞行状态



图2 超声速飞行状态

### 2.1 任务剖面

先驱者先安装任务载荷,然后牵引至停机坪,以亚声速状态起飞,到达18km的巡航高度后转为超声速状态,巡航马赫数为2。飞行器到达目标区域上方,执行侦察、监视任务期间再次转变为亚声速状态,巡航马赫数为0.8。被敌发现或完成任

务后迅速切换为超声速状态返回机场，到达机场上空后以亚声速状态着陆。随后，先驱者进行维护并准备下一次任务。

## 2.2 起飞质量

将先驱者起飞质量划分为机身、机翼、起落架、动力装置、控制系统、燃油及载荷七部分，对各部分质量进行了估算，如表1所示。

机身、机翼、起落架、燃油质量分别利用经验公式计算得到，可参考文献[10]。其中由于先驱者拥有亚声速和超声速两种机翼，故机翼的最终质量取为计算值的1.5倍。

如机身质量计算公式为

$$M_B = 0.039(2 \times L_F \times D_F \times \sqrt{V_D})^{1.5}$$

式中： $L_F$ 为机身全长， $D_F$ 为机身等效半径， $V_D$ 为设计期望速度。

动力装置、控制系统、载荷通过调研现有无人机进行确定。动力装置包括三台中等推力的涡扇发动机，两台用于提供推力，一台用于驱动升力风扇，参考国产ARJ-21支线运输机的发动机——美国通用公司的CF-34-10A，其改型发动机可以提供41.85kN推力，质量仅760kg。控制系统质量设计为500kg。载荷分为侦察用有效载荷和打击用任务载荷，先驱者侦察用有效载荷设计为红外传感器、数字电视/照相机、合成孔径雷达等，打击用任务载荷设计为8~10枚LS-6/50微型50kg级制导炸弹或BA-7激光半主动制导空地导弹，也可携带2~3枚FT-3这一类250kg级别的制导炸弹<sup>[11, 12]</sup>。

表1 先驱者起飞质量

部件名称	质量/kg
机身	3500
机翼	2236
起落装置	700
燃油	4500
动力装置	3000
控制系统	500
载荷	1000
起飞质量	15436

## 2.3 主要参数

利用Catia建立了先驱者的三维几何模型，三视图如图3所示。主要设计参数如下：

亚声速状态下，机长11.5m，翼展25m，机高3.65m，后掠角22.4°，展弦比5.192，翼型的相对厚度设计为0.08，巡航马赫数0.8。超声速状态下，机长25m，翼展11.5m，机高3.65m，后掠角67.56°，展弦比1.099，翼型的相对厚度设计为0.03，巡航马赫数2.0，巡航高度18km。

运用文献[10]中的经验公式对最大航程、起飞/降落地面滑跑距离、翼载荷等参数进行了计算。得先驱者的最大航程为4200km，起飞地面滑跑距离为420m，降落地面滑跑距离为530m，翼载荷为349.72kg/m<sup>2</sup>。

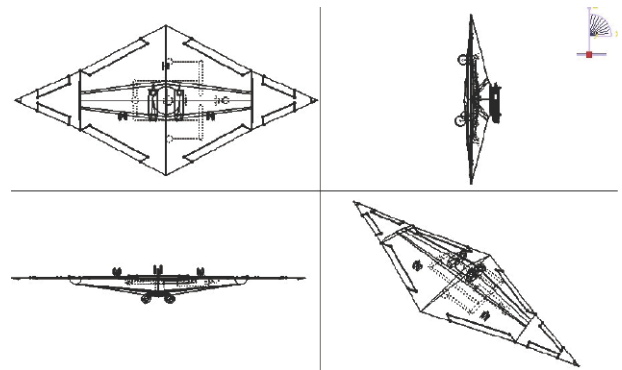


图3 先驱者三视图

## 3 动力装置的选择及安装

先驱者<sup>[13]</sup>的动力装置包括发动机和一套升力系统，下面主要介绍发动机的设计选择过程和安装位置，以及升力风扇的设计方案和主要参数。

### 3.1 发动机的设计及安装

先驱者采用了关于纵轴与横轴对称的翼身融合体造型，为了保证在亚声速状态和超声速状态下均能提供动力，且不产生偏航力矩，发动机安装在了对称中心处，如图1和图2所示。两台发动机安装在一个可旋转的转台上，转台由液压伺服机构驱动，可实现转向，如图4所示。

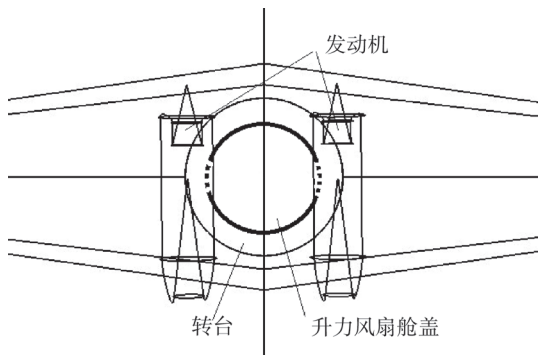


图4 发动机安装局部放大图

当先驱者在18km高度进行超声速巡航时，使用ANSYS软件对先驱者三维模型进行数值仿真，来流马赫数设为2，攻角设为4°。得到此时的阻力为78.4kN，飞机在小攻角飞行时，近似认为推力与阻力相等，故每台发动机需提供推力39.2kN。美国通用公司的CF-34-10A改型发动机每台可提供41.85kN推力，因此其能够满足动力需求，也说明了参考其进行质量设计是合理的。

### 3.2 升力系统的设计及安装

为了弥补先驱者飞行状态转换时升力的不足和增加飞行器稳定性，设计了独特的升力系统。

升力系统由升力风扇和稳定性控制喷管共同组成，如图5所示。图中①-④为四个稳定性控制喷管，中间为升力风扇，由涡轮发动机通过涡轮轴驱动，灰色直线表示连接管路或传动轴，升力系统产生向上的推力。

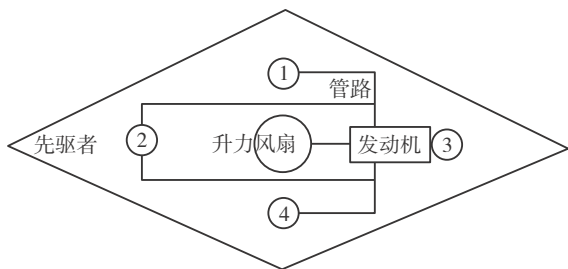


图5 升力系统管路图

升力风扇安装在发动机转台（转台直径2m）中间，直径设计为1.5m，高度设计为1.6m。在升力风扇不使用时，升力风扇舱盖关闭，使得其有

良好的外形，不会影响先驱者的气动性能；当升力风扇使用时，舱盖打开，升力风扇启动，如图6所示。

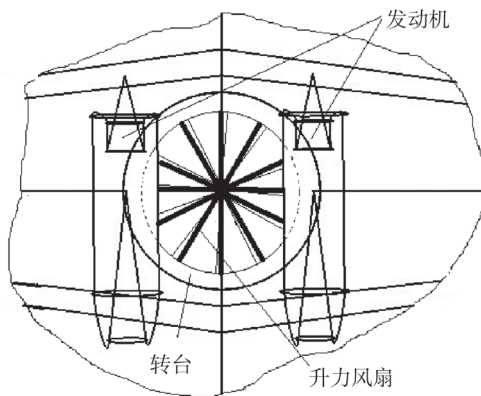


图6 升力风扇安装局部放大

先驱者超声速和亚声速机翼翼根处安装四个稳定性控制喷管，通过管路从发动机引出高压燃气，向下喷气，产生推力。燃气流量可通过电气阀控制，有利于实现先驱者的平衡。

参考文献[14]，先驱者的升力风扇可产生推力设计为80kN，翼翼根处每个稳定性控制喷管推力设计为20kN，故总推力为160kN。而先驱者最大起飞质量为15436kg，因此设计的升力系统能够满足所需。

## 4 飞行状态的设计及转换过程

介绍了先驱者两种不同的飞行状态，详细描述了飞行状态转换过程，提出了两种需要变向的情景。分析表明，两种飞行状态的设计大大增强了先驱者的机动性，从而提高了无人机的生存性能和作战能力。

### 4.1 飞行状态的设计

先驱者进行超声速飞行时的状态如图2所示，机翼如图7所示。超声速飞行状态下，先驱者可以实现前后两个方向的飞行，此时，机翼前缘的副翼锁死，后缘的两个副翼发挥作用，反方向飞行时，前缘副翼打开，后缘副翼锁死。



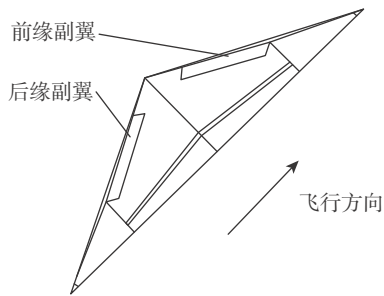


图7 超声速机翼

先驱者在超声速状态下有着较小的展弦比及较大的后掠角，有利于提高超声速状态下的性能；超声速飞行时需要较薄的翼型，而先驱者的翼型的相对厚度为3%，并且这个比例沿着展长方向保持恒定，这与超声速飞行的要求一致；超声速翼型有着尖锐的前缘，在超声速状态下可以有效减少脱体激波的产生，与传统的一些超声速翼型相比，激波阻力将极大减小；此外，翼型上表面设计为关于弦长中点对称的圆弧，可实现前后两个方向的飞行；扁平的翼型下表面，可降低向下的激波传播以及音爆。

相对于超声速飞行状态，亚声速飞行状态下发动机旋转了90°，飞行状态如图1所示。先驱者在亚声速状态下，同样可实现前后两个方向的飞行。以图8所示方向为例，此时机翼前缘的副翼锁死，机翼后缘的两个副翼发挥作用。

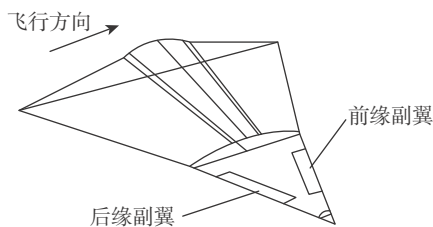


图8 亚声速机翼

亚声速状态下先驱者有着较大的展弦比及较小的后掠角，翼型的相对厚度设计为0.08，沿着翼展方向保持恒定，这些设计使得先驱者在低速时能够产生相对大的升力，有利于飞机的起飞/降落。翼型扁平的下表面和关于弦长中点对称的圆弧上表面，有利于实现亚声速状态下的双向飞行。

亚声速机翼尖锐的前缘使得先驱者在起飞降

落时容易失速。为了增加失速裕度，在亚声速机翼前缘安装了空气射流装置，装置原理如图9所示。通过在机翼前缘提供一个点源流（点源流流体由压气机提供）与均匀的空气来流叠加，最终获得一个钝角的绕前缘流动，来提高有效前缘半径，从而提高失速攻角和升力特性。此外，通过改变压气机的压力大小，可改变点源流流动的强度，控制有效前缘半径，实现不同的气动特性。



图9 空气射流装置示意图

## 4.2 飞行状态的控制

当先驱者以亚声速或超声速飞行时，通过副翼控制实现俯仰、滚转和偏航。先驱者具有八个副翼，其中四个用于超声速状态的控制，另外四个用于亚声速状态的控制。在不同状态下，相应状态的副翼将被激活工作，与此同时另一状态的副翼将被锁定而不发挥作用。

先驱者的副翼与传统的副翼不同，每个副翼由上下两部分组成，并且可以独立地进行向上或向下偏转，以补偿缺少垂直安定面带来的影响，以亚声速状态副翼为例进行介绍，如图10所示，实线部分表示副翼上半部分，虚线表示副翼下半部分，二者可以独立进行操作。

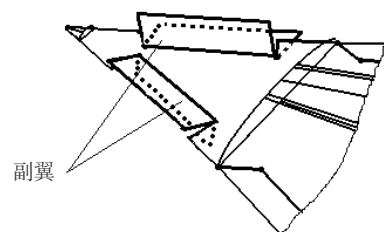


图10 副翼结构图

在俯仰控制中，当需飞机抬头时，副翼的上半部分将被使用，同时下半部分将维持锁定状态。当需飞机低头时，仅使用副翼下部分，上部分将被锁定而不工作。

在滚转控制中，从飞机尾部观察，逆时针滚

转时，左侧副翼的上部分和右侧副翼的下部分工作，而左侧副翼的下部分和右侧副翼的上部分将被锁定而不工作。顺时针滚转时，左侧副翼的下部分和右侧副翼的上部分工作，而左侧副翼的上部分和右侧副翼的下部分将被锁定而不工作。

在偏航控制中，当需飞机逆时针偏航时，仅左侧副翼起作用，此时左侧副翼的上下部分都将被激活工作，而右侧副翼将被锁定不工作；当需飞机顺时针偏航时，与上述相反。

### 4.3 飞行状态的转换

以亚声速状态转换为超声速状态为例说明先驱者如何实现亚声速飞行状态和超声速飞行状态的相互转换。

转换过程主要分为三步，第一步启动升力系统，第二步实现发动机转向，第三步实现飞行方向调整，具体操作流程及分析如下：

(1) 先驱者减速，启动升力系统。打开升力风扇舱盖，启动升力系统，同时减小发动机油门。发动机推力减小，在阻力的作用下，先驱者飞行速度减小，受到的空气升力减小。飞控系统调节升力风扇的功率，使先驱者垂直方向上受力平衡。

(2) 实现发动机转向。发动机的推力不断减小，直至处于待机状态，发动机在电气阀控制伺服机构的驱动下旋转 $90^\circ$ ，使先驱者转变为超声速状态。

(3) 逐渐增大油门，调整飞行方向。发动机推力增大，飞行速度增大，大气升力不断加大，飞控系统调节升力系统的功率不断减小直至关机。先驱者逐渐加速突破音障，最终加速至 $Ma=2$ 的超声速巡航状态，在此过程中调整飞行方向至原飞行方向。

### 4.4 飞行方向的改变

未来的空中对抗将朝着高速化、智能化发展，传统的喷气式飞机需要通过转弯逐渐实现飞行方向的转变，这将极大地影响其生存能力和作战效率。先驱者独特的外形设计使得其具有更直接、

更快速的机动方式——四个方向( $90^\circ$ 变向和 $180^\circ$ 变向)的直接变向，而这样非常规的突然变向往往也让敌方雷达难以预测和捕捉。作为新型无人机，这样的功能极大的增强了先驱者的生存能力和作战能力。

#### 4.4.1 空中变向

空中变向的方法同飞行状态转换基本相同，但只需完成飞行状态转换的前两步。假想先驱者以亚声速执行侦查任务，进入敌防御区后被发现，飞行器需要选择最短的路线，并且以最快的速度逃离敌防御区。此时先驱者选择空中变向( $90^\circ$ 变向)，这样逃离距离最短，同时飞行状态由亚声速转换成了超声速，飞行速度最快，如图11所示。这样的设计符合战场实际需求。

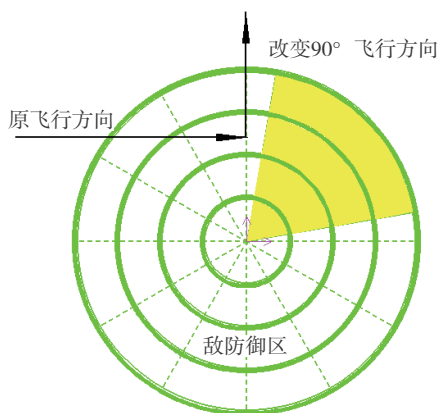


图11 空中变向示意图

#### 4.4.2 空中倒车

当先驱者以亚声速或者超声速飞行状态进入敌防御区被发现后，先驱者在飞控系统的作用下，启动升力风扇，发动机迅速调整到待机状态后旋转 $180^\circ$ 再次启动，促使先驱者速度迅速降低后反向加速，实现空中倒车，从而迅速逃离敌防御区，如图12所示。

## 5 结束语

先驱者作为一款先进的未来高空无人机，相比于现有无人机，在气动外形、动力装置、飞行状态以及状态控制与稳定性方面均有所创新。

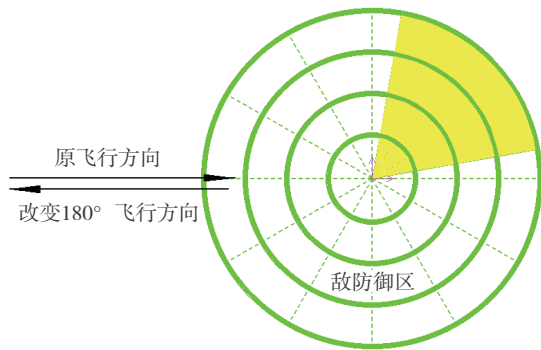


图12 空中倒车示意图

(1) 气动外形的设计。翼身融合体外形加之无垂尾的飞翼布局,可减少由于翼身干扰带来的阻力和提高隐身性能。双向三角翼的设计使得先驱者具有中心对称的外形,以实现飞行状态和飞行方向的改变。

(2) 动力装置的设计。先驱者发动机安装在一个可旋转平台上,实现了发动机的转向。独特的升力系统,既可减小起飞/降落滑跑距离,又可在特殊情况下实现垂直起降,还能在飞行状态转变时提供向上的推力。

(3) 不同飞行状态的设计。在亚声速和超声速飞行环境下分别采用不同的飞行状态:当先驱者起飞/降落或对地侦察时以亚声速状态飞行,当需要快速到达或快速机动时以超声速状态飞行,两种飞行状态之间可实现转换。可实现空中变向、空中倒车,大大增强了无人机的机动性能。

(4) 状态控制与稳定性。副翼独特的设计和稳定性控制喷管的设计有利于先驱者实现状态控制和获得良好稳定性。

## 参 考 文 献

[1] 李磊. 无人机技术现状与发展趋势 [J]. 硅谷, 2011, (1): 46-46.

- [2] 张明亮, 赵全习, 王还乡. 美国无人战斗机的发展现状及趋势 [J]. 飞航导弹, 2011, (9): 25-28.
- [3] 秦亮, 张继勇, 郭予并. 各国大型主战无人机研究进展 [J]. 航空制造技术, 2015, 485 (15): 14-17.
- [4] 张建华, 赵晨皓, 吕诚中. 察打一体无人机发展现状及趋势 [J]. 飞航导弹, 2018, (2): 25-28.
- [5] 李屹东, 李悦霖. 察打一体无人机的特点与发展 [J]. 国际航空, 2014, (9): 24-27.
- [6] 韩冰, 张秋菊, 徐世录. 无人战斗机的现状与发展趋势 [J]. 飞航导弹, 2005, (10): 45-49.
- [7] 李洪兴. 印度制定30亿美元的无人机发展计划 [J]. 现代军事, 2016, (5): 15-15.
- [8] 王蕾. 捕食者无人机综述 [C] // 中国航空学会轻型飞行器专业委员会2005年学术交流会, 2005.
- [9] McClinton C R, Rausch V L, Nguyen L T, et al. Preliminary X-43 flight test results [J]. Acta Astronautica, 2005, 57 (2-8): 266-276.
- [10] 顾诵芬. 飞机总体设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [11] 杨英. 无人机的侦察、监视用有效载荷现状与发展动向 [J]. 飞航导弹, 2007, (1): 38-41.
- [12] 野舟. 高性能有效载荷将推动无人机技术进步 [J]. 战术导弹技术, 2011, (6): 118-118.
- [13] 王明凯, 张曙光, 唐鹏, 等. 动力增升对翼身融合飞机沉降特性的改善 [J]. 航空动力学报, 2017, 32 (11): 2752-2760.
- [14] 姜浩. F-35战斗机三维重建及气动、隐身特性分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

### 作者简介

杨新奎 (1992-), 男, 硕士, 主要研究方向为飞行器总体技术。

刘晓慧 (1991-), 女, 硕士, 主要研究方向为飞行器总体技术。

聂万胜 (1969-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器总体技术。

# 无人系统发展及对国家安全的 影响分析

吴 勤

(北京航天情报与信息研究所, 北京 100039)

**摘 要:** 对无人系统发展现状及发展趋势进行了研究, 并对其产生影响进行分析。首先研究了空中无人系统、地面无人系统和海上无人系统的当前发展现状; 随后从技术能力、使命任务、装备数量、发展方向等方面研判了无人系统的未来发展趋势; 最后从战争形态、作战样式、装备建设、反恐维稳、航空安全以及法律监管等方面分析了无人系统对国家安全产生的影响。研究表明, 无人系统近年来发展迅猛, 已成为国民经济新的增长极、新质战斗力的重要源头以及国防科技新的战略制高点。随着后续不断发展, 无人系统的技术水平将不断提升, 使命任务将不断拓展, 装备数量将不断增长。无人系统将极大的改变作战样式与生产生活方式, 并在军事、产业、监管、伦理等方面给国家安全和社会治理带来新的挑战。

**关键词:** 无人系统; 智能化; 蜂群作战; 自主化; 国家安全

**中图分类号:** TP18    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-5915 (2018) 02-0152-07

## Unmanned Systems Development and Analysis of the Impact on National Security

WU Qin

(Beijing Institute of Aerospace Information, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The present paper conducts the research on the unmanned systems. Firstly, the current development status of the unmanned aerial vehicles, unmanned vehicles and unmanned ships are studied; then the future development trend of the unmanned system is judged from the aspects of technical capability, mission, quantity of equipment and development direction; finally, the impact of unmanned systems on national security are analyzed from the war Forms, combat styles, equipment construction, anti-terrorism stability, aviation safety, and legal supervision. Studies have shown that unmanned systems have developed rapidly in recent years and have become new source of growth for the national economy, an important source of new-quality combat capability, and a new strategic commanding height for national defense technology. As the follow-up continues to develop, the technical level of unmanned systems will continue to increase. The mission will continue to expand and the number of equipment will continue to grow. Unmanned systems will greatly change the style of warfare and production and lifestyle, and bring new challenges to national security and social governance in military, industrial, regulatory, and ethical aspects.

**Keywords:** Unmanned Systems; Intelligence; Swarm Battle; Autonomy; National Security

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-05-11

## 1 无人系统发展概况

无人系统通常包括空中无人系统、地面无人系统、海上无人系统。无人系统在枯燥任务、恶劣环境和危险任务领域具有独特优势，在军事、科技、经济、社会生活等各方面日益发挥重要的作用。未来，无人系统将呈现出智能化、自主化、体系化、集群化等发展趋势。

### 1.1 无人空中系统形成完整全谱体系

无人机是发展最成熟、装备量最大、参战最频繁、应用最广泛的无人系统，已基本形成大、中、小结合，远、中、近程搭配的无人机体系<sup>[1]</sup>。

(1) 应用领域持续拓展。在军用领域，情报、监视、侦察仍是无人机最基本、最核心的应用领域，美军在其反恐作战中，约80%的侦察监视任务由无人机完成。随着察打一体无人机的出现，军用无人机开始向主力作战平台转变，以货运无人机在阿富汗战争中的成功使用为开端，军用无人机开始在后勤保障领域崭露头角。在民用领域，农林作业、治安反恐、地理测绘、摄影娱乐、应急救援、气象监测等应用需求快速增长，以中小型无人机为代表的民用无人机正在世界范围掀起发展热潮。

(2) 部署规模不断增大。美国列装的无人机总数超过1万架，捕食者、死神、长航时察打一体无人机、全球鹰高空侦察无人机等中高端无人机数量超过400架；俄罗斯、以色列、英国等也在快速扩大其中高端无人机装备规模；我国的翼龙、彩虹、利剑等无人机已形成系列化产品并装备部队。

(3) 积极推进技术验证。美国X-47B验证了无人机航母起降、自主空中加油等多项技术<sup>[2]</sup>；美国军方启动小精灵、忠诚僚机等项目推进有人/无人协同编队、无人机空投与回收、无人机蜂群作战等新技术发展；俄罗斯、欧洲等国在中空长航时、高空长航时、无人作战飞机等方面均进行了多次飞行验证。

(4) 产业规模持续增长。从产业规模看，预计



图1 美国全球鹰无人机



图2 X-47B隐形无人机

2020年全球民用无人机年销售量将超过400万架，市场规模达到260亿美元；从研制企业看，全球共有超过500家无人机公司，我国民用无人机研制单位超过130余家；从出口贸易看，我国2016年无人机出口接近70亿元，2017年预计超过90亿元<sup>[3]</sup>。

### 1.2 无人地面系统数量功能不断扩展

(1) 无人地面系统已大量装备使用。目前，国外发展的地面无人系统超过300种，列装的约200种<sup>[4]</sup>。其中，便携式占比达到85%，主要应用于侦察监视等辅助作战任务；车载式大约占10%，用于执行探测、摧毁和路线清障等作战任务；自行机动式地面无人系统的占比很小，主要用于执行班组支援、地雷探测与处理。美国装备的地面无人系统数量超过1万，约占全球地面无人装备总量的80%，在阿富汗、伊拉克等战场中投入使用；以色列现装备了前卫、守护者等无人车；英、法等欧洲国家已装备并正在积极发展多款地面无人系统；俄罗斯自2011年以来地面机器人装备数量

增长了3倍，曾经一度落后世界先进水平的局面正在扭转。

(2)重点加强提升自主能力水平。美、欧等国近期重点开展识别模式、自主控制传感器、自主防护系统、威胁识别与自适应响应、越障、集群协同等多项无人系统自主技术研究。已装备的无人地面系统中，以色列守卫者和先锋哨兵无人车具备一定自主能力，能够自动设定行驶路线、规避障碍，在网络中可与其他无人车协同作战，可自主跟随车辆或士兵行进。



图3 以色列守卫者无人巡逻车

(3)地面机器人已应用于作战。2016年地面武器装备机器人首次成功应用于实战，将对未来地面作战模式产生重大影响<sup>[5]</sup>。俄罗斯在叙利亚作战行动中，首次使用多个地面武装机器人参与进攻，开创了地面武装机器人实战的先例。作战中，两型地面机器人与无人机协同作战，无人机负责战场监视，控制人员通过自动化指挥系统遥控机器人攻击。

(4)地面无人系统向民用领域拓展。无人驾驶汽车成为各国科技巨头关注的焦点，谷歌、特斯拉、Uber等多家公司相继推出无人驾驶项目<sup>[6]</sup>。特斯拉公司宣称已生产出能匹配完全无人驾驶的系统硬件，2018年将在美国范围内演示无人驾驶系统汽车；谷歌无人驾驶汽车已实现200多万英里的道路测试，并计划在2020年前完成无人驾驶汽车商业化生产；中国的百度、乐视等非汽车制造

商，也高调进入无人驾驶领域。此外，无人救援机器人、无人消防机器人、无人拖拉机、家庭服务机器人等均已投入使用，正在深刻影响人们的工作与生活方式。



图4 谷歌waymo无人车

### 1.3 无人海上系统呈现快速发展态势

水面和水下无人系统主要执行反水雷、情报监视侦察、反潜战、港口保护、科学探测等任务，目前已实现服役并日益受到各国的关注。



图5 斯巴达侦察兵

(1)无人水面舰艇方面。美国、以色列、法国等均开展了无人水面舰艇方面的相关装备研制。美国浮潜级的遥控猎雷系统和舰队级的斯巴达侦察兵反潜无人艇已经服役，X级和港口级无人艇正处于研发阶段。近期，美国在新型无人艇研发和测试方面取得了较大进展，特别是在反潜持续跟踪无人艇海上猎手的研发方面取得了阶段性突破。

海上猎手可对安静型潜艇实施长期贴身跟踪，有望在近期内装备<sup>[7]</sup>。此外，美国近期重点关注无人水面艇蜂群技术发展，已验证了多艘无人艇自主区域巡航、敌我识别、探测追踪、跟踪敌船等复杂任务能力。



图6 美国海上猎手号无人艇

(2) 无人潜航器方面。在无人潜航器方面，美国、俄罗斯、以色列、挪威等国已将多型装备交付部署，另有大直径无人水下航行器、海洋航行器等多型号航行器正处于探索和开发中。在已部署系统中，多数无人潜航器用于反水雷，其余用于海洋调查、潜艇搜索和通信等任务；在研型号除用于反雷外，重点用于侦察/察打一体任务。世界先进国家已基本掌握单个无人潜航器技术，并向多系统自主集群协同及海陆空集群协同发展，体系化、集群化以及对新概念无人潜航器的探索成为其显著特点。我国无人潜航器技术已取得突出进展，中国科学院、哈尔滨工程大学等单位都



图7 俄罗斯马尔林-350无人潜航器

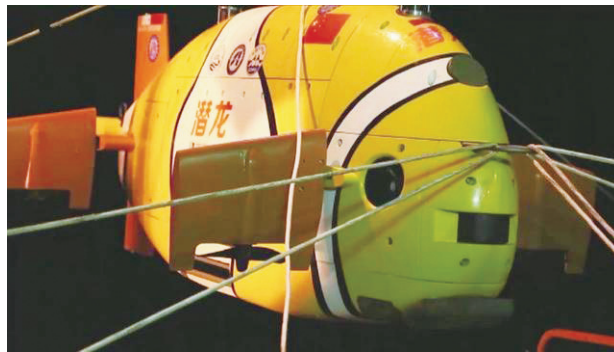


图8 中国潜龙水下无人潜航器

在该领域进行了大量研究，研发了探索者、潜龙等标志性成果<sup>[8]</sup>。

## 2 无人系统发展趋势

展望未来，无人系统的技术水平将不断提升，使命任务将不断拓展，装备数量将不断增长。同时，无人系统将持续向多样化、智能化、集群化等方向发展，以更好地适应各类复杂环境。

(1) 不断提高系统性能水平。随着新型动力与能源、多样化探测、识别技术、先进通信和控制等技术的发展，未来无人系统持续任务时间、态势感知、信息传输、自主控制等能力将大幅增加，更高、更远、更大、更小、更快的无人系统将不断问世应用。

(2) 持续拓展应用任务领域。在军事方面，将继续提升无人系统的运用范围、灵活性、效能和



图9 无人机协助地震救援

适应性，最终全面覆盖对地、对海、对空、导弹防御和网电攻防等各任务领域；在民用方面，将在农林牧副渔、娱乐、物流、应急救援、公共服务等行业领域拥有广阔的市场发展前景。

(3)着力提升智能自主水平。掌握自主能力是无人系统发展的最终目标。随着无人系统自主性的逐渐提高，将来无人系统在完成任务过程中所需人类干预将大大减少。最终无人系统将具备自主学习并适应环境的能力，并能自主决策和向人类提供建议，从而达到更自主的“人在回路上”甚至是“人在回路外”的更高层次。此外，无人系统智能技术还将朝着聚合众多单体智能实现群体智能、鲁棒性体系架构、更高效费比方向快速发展。

(4)发展无人系统协同能力。实现有人与无人、无人系统间的协同作战能力是各类无人系统未来的重要发展方向。美军在其最新的无人系统路线图中进一步强调了无人装备的协同发展和联合应用<sup>[9]</sup>；美国陆军计划建设一支由有人-无人系统团队组成的现代化部队；美国空军验证了有人/无人机组对目标进行自主打击的能力；美海军正在大力推进空中、水面和水下无人系统协同能力发展，已验证了水下-水面-空中人机组跨域协同作战能力，力图打造高效协同的新型海上作战体系。

(5)加快形成集群作战优势。无人系统集群是指数十或数百同类低成本无人系统像蜂群成群结队执行任务，在局部区域迅速集结形成大规模装备优势，具有集群替代机动、数量提升能力、成本创造优势等特点，是无人系统重要的发展方向<sup>[10]</sup>。美国已经开展了无人系统的集群研究，进行了数十次无人机、无人艇的集群测试以及编组和机动飞行试验。近两年，中美四次刷新无人机集群飞行的规模记录，2017年我国共完成了119架次无人机集群飞行试验，再次刷新无人机集群试验世界纪录，中美两国在该领域的竞争日趋激烈。

### 3 对国家安全影响

无人系统已经渗透到工业生产、社会治理、

战场空间等领域，极大改变了作战样式与生产生活方式，在军事、产业、监管、伦理等方面给国家安全和治理带来新的挑战。

(1)对战争形态产生新变革。军用无人系统的快速发展，对传统战争形态产生强烈冲击，使以往战场上单纯由人操作装备、人与人直接搏杀对抗的局面得以改变，开启了战争走向无人化战场的大门。这种变革所产生的深刻影响包括：一是使传统战争理念不断更新突破，无人系统武器化、隐形化、智能化程度不断提高，现代战争日益呈现出零伤亡、非接触、小型化等特点，作战目的转向节点摧毁、结构破坏、体系瘫痪；二是大幅减少时空因素对作战行动的影响，无人系统无需考虑人的生理极限因素，能够长时间、快速度、高强度执行各种作战和勤务保障任务，活动范围可达太空、深海、高原、核生化污染等人类行动受限区域；三是对抗空间拓入全域多维，无人作战系统将广泛渗透到战场各个角落，使未来战争成为完全意义上的全天候、全方位战争；四是对抗重心转向智能较量。无人作战系统的广泛应用使现代化战争更多地依赖于智能较量，并对战斗范围和战争进程产生直接性或决定性作用；五是使得战与非战的界限模糊，战争进程和毁伤程度可控，明显降低战争的政治、外交风险。

(2)对作战样式提出新挑战。无人装备不受人类生理因素的限制，具备有人装备难以具备的能力，将改变传统作战样式，甚至产生新的作战样式，催生新的作战理论。一方面，无人系统的大量使用对传统的侦察发现、武器对抗、军事行动方式等均构成挑战，传统的作战方式已日益不合时宜。另一方面，无人系统大量使用后，出现了“蜂群理论”、“遥控作战”、“武库机”等新的无人作战理论，应用无人装备进行精确打击成为重要的作战样式<sup>[11]</sup>。其中，运用大量小型廉价智能化无人系统，以蜂群或有人-无人协同作战方式实施侦察监视、突防、攻击等行动，将对雷达、防空火力、各种保障平台等构成严重威胁，现有防御武器难以有效应对，将颠覆传统作战方式。



(3)对装备建设提出新要求。随着无人系统发展日趋成熟并走上战争前线,无人化作战力量将具备全谱系任务完成能力,从信息支援/攻击与特种作战支援为主转向战场各领域:从地面、海上、空中对作战对手实施全天时、不间断的侦察监视,实时发现和传递各种信息;通过电磁干扰和直接摧毁对手雷达系统,成为电子对抗的中坚力量;遂行对地、对海、对空等实行打击任务,成为冲锋陷阵的主角;执行自动加油、装卸运输、维护保养等任务,成为装备保障的平台<sup>[12]</sup>。无人系统的这些发展趋势将极大改变未来作战力量与装备体系之间的构成,对现有装备建设思路与模式提出新的要求。如何适应无人作战新要求,加快推进无人系统独立编队和“无人+有人”混编装备体系建设,将成为未来部队装备建设的新课题。

(4)对反恐维稳构成新威胁。小型无人系统具有用途广、获取容易、使用门槛低、威胁模式多等特点,很契合恐怖主义、极端组织的需求。随着无人系统的应用日益广泛,恐怖分子、极端组织、犯罪团伙等开始逐步使用无人机、无人车等进行侦察、袭击,对国家反恐防暴、社会维稳构成威胁。主要威胁包括:闯入军事设施、政治场所等进行拍摄、监听,为后续恐怖袭击提供准确情报;进入人口密集区、大型活动、重要集会等场所制造恐慌气氛,进行爆炸袭击、投放生化毒剂等;在国境边境等地区偷运毒品、爆炸物等违禁品。2017年1月,美国观察者网报道称“伊斯兰国”武装力量在摩苏尔使用商用无人机投掷爆炸物,造成平民伤亡。因此,如何增强对无人系统的防御,逐渐成为世界主要国家维持安全稳定面临的新问题。

(5)对航空安全形成新影响。小型无人机等“低慢小”无人航空器“黑飞”、侵扰事件不断增多,其破坏威力与影响程度不容小觑,对国家空域管理、航线安全等提出了新的挑战。近年来,美、英、法以及我国等多个国家先后数十次遭受各类小型无人机侵扰,无人机挑战公共安全、挑衅执法能力的势态愈演愈烈。2015年1月,一架无

人机失控后坠落白宫院落东南部<sup>[13]</sup>;2015年7月,德国汉莎航空一架航班在华沙上空与无人机擦肩而过,迫使随后的20架客机改变航线;2015年加拿大发生与无人机相关的事件82起。在我国,北京、上海、深圳、成都等地多次发生无人机违法违规飞行影响民航运行的事件。2014年北京某公司在不具备航空摄影测绘资质且未申请空域的情况下,组织无人机航拍测绘,导致多架民航飞机避让延误。2017年4月份以来,成都连续发生8起无人机扰航事件,其中6起影响航班运行,造成138架次航班返航备降。

(6)给法律监管带来新命题。由于无人系统的特殊性,其在规范运行、法律责任以及监管等方面存在的问题已成为全球共性难题,对国家安全与社会治理产生了新的威胁。主要原因如下:一是对无人系统的法律监管缺乏。近年来,全世界各类无人机“黑飞”挑战法律底线,造成人员与财产损害的事件不断增多,已暴露出在无人系统法律方面存在的漏洞。在我国,虽然已有一些关于无人机生产使用的规定,但较为原则、笼统,缺乏制定性,且多为临时性、部门性的规定,效力不强;对于有关审批程序、管理规定、适航标准、处罚标准等规定也相对滞后,飞行条件、飞行区域等问题尚未得到解决。二是无人系统出现违法行为的事故赔偿与责任追究,无人系统是否享有权利并对自身行为是否承担责任等一系列新的法律问题不断涌现。2016年谷歌无人驾驶汽车与一辆公交大巴发生摩擦,引发人们对无人系统卷入犯罪案件中责任主体界定的争议。今后,无人系统的自主性不断提升,将对传统法律体系产生巨大的冲击和颠覆。

(7)对社会伦理造成新冲击。无人系统的大量运用导致一些公认战争和社会伦理受到前所未有的挑战。主要为以下几个方面:一是无人系统智能化和自主化水平的不断提升,导致超出人类规则设置与控制的风险出现,可能对人类产生伤害;二是由于技术故障、判断失误等原因,在使用无人系统作战时可能出现对人类的误伤甚至是

误杀，如美军从2004年至2012年在阿富汗发动了300多次无人机空袭，误杀的平民和儿童高达1100人；三是具有自主攻击能力的无人作战系统难以准确识别和判断战场上主动放下武器或被剥夺武器的敌方人员的真正意图，或将造成滥杀无辜的情况发生；四是在无人化战场上，“死伤”的主要是可以大量再造的智能机器，这就会因战争风险的降低而导致武力的随意与过度使用，降低触发战争的门槛；五是无人作战系统操控人员与无人作战平台形成空间分离，对战争残酷性的感知度降低，进一步弱化了人类对战争的约束力。

## 4 结束语

发展无人系统是有效应对传统与非传统威胁，确保国家安全与加强社会治理的客观要求和重要举措。我国必须高度重视无人系统这一重大战略前沿技术发展，准确把握全球无人系统发展态势，找准突破口和主攻方向，结合我国实际需要，加快推进无人系统发展与应用。

## 参 考 文 献

- [1] 陈瑛, 刘丽, 曾勇虎. 美军未来无人系统发展的关键技术 [J]. 飞航导弹, 2010, (7): 33-37.
- [2] 陈娇叶, 罗卫兵, 杨钦河. 美国无人系统发展重点及趋势分析 [J]. 飞航导弹, 2012, (11): 35-37.
- [3] Chase M S, Gunness K A, Morris L J, et al. Emerging trends in China's development of unmanned systems [M]. RAND Corporation, 2015.

- [4] Zhang T, Qing L I, Zhang C S, et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18 (1): 68-85.
- [5] 尤里. 外军反无人机“蜂群”作战 [J]. 兵器知识, 2017, (3): 44-49.
- [6] 薛春祥, 黄孝鹏, 朱咸军, 等. 外军无人系统现状与发展趋势 [J]. 雷达与对抗, 2016, (1): 1-5.
- [7] Meng H, Zhu S. The development and future trends of unmanned ground systems [J]. Acta Armamentarii, 2014.
- [8] 赵涛, 刘明雍, 周良荣. 自主水下航行器的研究现状与挑战 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35 (6): 1-6.
- [9] 沈卫. 国外地面无人系统发展综述 [J]. 现代军事, 2016, (11): 47-52.
- [10] 杨亚丽, 贾欢欢, 薛晓东. 美国无人系统未来发展路线 [J]. 飞航导弹, 2015, (5): 18-24.
- [11] 祁圣君, 张立丰. 美国军用无人系统综述 [J]. 飞航导弹, 2015, (7): 21-24.
- [12] 孟红, 朱森. 地面无人系统的发展及未来趋势 [J]. 兵工学报, 2014, (1): 1-7.
- [13] 龙威林. 美军无人系统发展现状及启示 [J]. 无线互联科技, 2014, (5): 85-86.
- [14] 薄文娟. 无人机系统的发展趋势 [J]. 通讯世界, 2017, (5): 294-294.
- [15] 刘丽, 曲珂, 汪涛. 美国空军无人机系统发展综述 [J]. 飞航导弹, 2016, (12): 22-27.
- [16] 刘力, 马岑睿, 袁东, 等. 无人机系统发展与作战使用研究 [J]. 飞航导弹, 2011, (12): 38-41.

### 作者简介:

吴勤, (1981-), 男, 硕士, 研究员。主要研究方向为空天防御、前沿技术等领域情报与战略研究。





# 征稿启事

## 《无人系统技术》期刊

《无人系统技术》期刊是由中国航天科工集团有限公司主管、北京海鹰科技情报研究所主办，中国指挥与控制学会无人系统专业委员会、中国无人系统产业联盟（筹）协办的科技学术期刊。现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。

### ◆ 约稿方向

稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主，广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时，也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。

### ◆ 投稿方式

期刊网络采编系统正在建设中，目前通过互联网邮箱：[chinauas310@163.com](mailto:chinauas310@163.com)，进行投稿。

### ◆ 投稿要求

1. 本刊选录稿件主要视其是否有创新点及其价值大小，并综合考虑：立题的科学 / 工程意义；对科研进展的了解和引用；方法或其应用的创新性；方法和论证的科学性；结论 / 结果的合理可信性和写作质量。
2. 投稿时须提交“保密审查表”电子版，稿件正式录用后请将保密审查证明邮寄至：北京 7254 信箱 4 分箱《无人系统技术》编辑部，邮编：100074。

### ◆ 写作要求

1. 来稿应含中英文题目、中英文摘要（说明研究目的、创新试验方法、研究成果和最终结论等，重点是方法创新和成果结论。中英文摘要对应，英文摘要最好在 150 个实词左右）、关键词（5 ~ 8 个）。引言应说明课题的背景，引述该领域的国内外同行已经取得的进展，以说明本文的选题意义和创新点所在。
2. 量和单位应符合国家规定。外文字符要分清大小写、正斜体，上下角字符的位置高低应区别明显。
3. 图、表应提供中英文图题、表题；图表的设计，一般不超过 8cm 宽。
4. 参考文献引用文献应遵循“最新、关键、必要和亲自阅读过”的原则；在正文中顺次引述；数量以不少于 15 篇为宜，未公开发表的资料一般不宜引用。
5. 建议提供全部作者简介，以便于读者了解和联系。作者简介内容应包括：姓名、出生年、性别、学位、职称、研究方向、电子邮箱、联系电话等。

### ◆ 关于稿酬

稿件一经录用，将按照字数和文章质量情况，向作者一次性支付稿酬。

## 《无人系统技术》顾问

李德毅 封锡盛 李伯虎 徐德民 刘永才 费爱国 樊邦奎 陈杰 魏毅寅 王飞跃

## 《无人系统技术》第一届编委会

主任

李风雷

副主任

王长青 宋斌 谷满仓 张涛

委员 (按姓氏拼音排序)

昂海松 蔡顺才 陈斌 戴江勇 邓宏彬 都基焱 方浩 符文星 郭继锋 黄长强

黄强 李必军 李东光 李贻斌 林平 刘建湖 刘莉 刘培志 罗均 马洪忠

孟红 潘泉 齐俊桐 时兆峰 田大新 王宏伦 吴向阳 薛建儒 向锦武 徐昕

夏元清 颜国正 于进勇 于林宇 张冬青 张梅 张山 张卫平 朱枫 朱小燕

Simon X.YANG Wei Ren Yang SHI Yantao Shen

无人系统技术 2018年创刊 (双月刊)

主管单位: 中国航天科工集团有限公司

主办单位: 北京海鹰科技情报研究所

协办单位: 中国无人系统产业联盟 (筹)

中国指挥与控制学会无人系统专业委员会

主编: 张冬青

副主编: 蔡顺才 孙柏原 李东光 陈少春

执行主编: 王一琳

编辑出版: 《无人系统技术》编辑部

地址: 北京 7254 信箱 4 分箱 (100074)

电话: 010-68190652 (编辑部)

010-68375084 (发行部)

邮箱: chinauas310@163.com

国内发行: 北京海鹰科技情报研究所

印刷单位: 北京博海升彩色印刷有限公司

Unmanned Systems Technology Started in 2018 (Bimonthly)

Administrated by: China Aerospace Science & Industry Corporation Limited

Sponsored by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Co-organized by: Association for Unmanned Vehicle Systems of China  
Technical Committee on Unmanned Systems, CICC

Editor-in-Chief: ZHANG Dongqing

Associate Editor: CAI Shuncai SUN Baiyuan LI Dongguang  
CHEN Shaochun

Executive Editor: WANG Yilin

Edited & Published by: Editorial Office of Unmanned Systems  
Technology

Add: P.O. Box 7254-4, Beijing 100074, China

Tel: (8610) 68190652 (Editorial office)

(8610) 68375084 (Circulation office)

E-mail: chinauas310@163.com

Distributed by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Printed by: Beijing BOHS Colour Printing Co., Ltd.

本期责任编辑: 李志

ISSN 2096-5915  
CN 10-1565/TJ

国内定价: 30元/期