



# 无人机的自主飞行控制

Autonomous Flight Control of Unmanned Aerial Vehicle

北京航空航天大学无人机所 王英勋 蔡志浩



王英勋

研究员, 博士生导师, 主要研究方向为无人机自主控制。

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的控制已从遥控、程序控制,发展到可以针对自身的状态变化、具有故障诊断和重构的自适应控制。而无人机要替代有人驾驶飞机在具有不确定性环境中执行各类任务,必然面临着来自自主控制的巨大挑战。先进飞行控制和导航技术作为最主要的支撑技术,目前只能适应相对结构化任务环境的要求,而距解决动态、不确定环境下的自主飞行控制问题尚有很大的差距<sup>[1]</sup>。本文

随着自主控制技术的发展,无人机在使用范围上将会有较大的突破。高新技术的飞速发展及其在无人机上的不断应用,使无人机向多功能、快速反应及高可靠性方向发展。

在分析无人机自主控制的概念和研究现状的基础上,阐述了无人机自主控制包含的关键技术,并探讨了无人机自主控制的发展方向及一些核心技术的应用前景。

## 无人机自主控制的概念与研究现状

近年来,随着各种新技术的不断应用,无人机系统的复杂性及功能的自动化程度等日益增加。由于作战环境的高度动态化、不确定性以及飞行任务的复杂性,使得规划与决策成为无人机面临的新的技术挑战,各种基于程序化的自动控制策略已经不能满足未来先进多功能无人机对复杂作战环境下的多任务的需求,自主飞行控制能力的提高将是未来无人机飞行控制系统发展的主要目标<sup>[2]</sup>。

### 1 自动与自主

无人机早期的自动飞行控制系

统集稳定、轨迹控制、任务管理等功能于一身,随着无人机飞行功能的不断增加,飞控系统也越来越复杂。无人机可执行单机任务或多机协同完成诱饵、攻击和侦察等任务。但战场环境是复杂多变的,发现在任务规划时所未知的威胁时,如何进行躲避;如何在诱饵 UAV 或侦察 UAV 被击毁后重新将它们的任务自动分配给其他的 UAV,以继续达到或部分达到预定目标;这给无人机的飞行控制带来了一个新的课题。在目前的无人机控制中,多以地面控制站遥控或程序控制完成任务目标,这显然已不能满足未来战场高威胁环境的突防和完成任务目标的要求。因此,目前的无人机地面站已发展成为任务规划控制站(Mission Planning Control Station, MPCCS),对飞机进行任务规划和控制。无人机也开始具备一定的自主飞行的能力,在遭

遇到非预见的威胁或者任务变更时,自主式无人机将得益于其实时重新任务规划的能力。

由于 UAV 是无人驾驶的,因此其执行何种任务、如何执行,已成为无人机飞行控制的关键问题。任务控制则是整个 UAV 飞行控制的核心,目前一般有四种任务控制:

(1) 程序控制(Pre-programmed Mission Control, PMC)。

预编程的 UAV 按航路点 A、B、C……飞行,但并非自主飞行,它既不重新设定目标,也不根据改变的环境作出任务重组的反应,航路上未预见到的地空导弹(SAM)可以容易地击毁即使是很好的任务计划。

(2) 目标引导控制(Goal-directed Mission Control, GMC)。

目标引导 UAV 可以趋于一个固定目标,寻找局部正确的未制导结果。如果没有找到目标,此系统可以继续寻找另一个目标或返航。与 PMC 系统相比, GMC 可以独立改变其到达另一目标的状态。

(3) 自适应控制(Adaptive Mission Control, AMC)。

自适应 UAV 可以通过修改控制律和以额外的代价(速度、燃油、时间等),在系统部分损坏和恶劣气象条件下完成任务。其任务目标和活动保持预先设定的飞行计划不变。

(4) 自主任务控制(Autonomous Mission Control, ATMC)。

自主飞行的 UAV 在任务执行时亦可实时产生新的目标。先进的自主任务控制包括:环境分析、战略规划、故障探测以及威胁和干扰控制等。

自主飞行是 UAV 包含上述 4 种任务控制,尤其是自主控制在内的一种潜在的飞行能力。自主飞行依赖 UAV 通过传感器或数据链对其飞行环境的感知,一旦 UAV 确定预定任务的战场环境发生重大变化,它就可以修改任务目标。

从上述 4 种任务控制可见,前 3 种仍然属于“自动”控制的范畴。第 4 种才具有了“自主”的含义。

国外的研究中对“自主”的概念有不同的定义:

自主控制是不需要人的干预以最优的方式执行给定的控制策略,并且具有快速而有效地自主适应的能力,以及在线对环境态势的感知、信息的处理和控制的重构。自主控制与自适应控制的区别可以认为是这两种方法所能处理不确定性的量值,自适应控制可以少量地补偿中等程度的不确定性,自主控制则可以对在不确定动态变化环境中出现的大量不确定性实现控制。

美国学者 Panos J. Antsaklis, Kevin M. Passino 和 S. J. Wang 指出自主意味着具有自治的能力,自主是控制的目的<sup>[3]</sup>。自主控制器(Autonomous Controller)在执行控制功能时拥有自我支配的能力和权限。自主控制器由一系列硬件和软件构成,能够在脱离人的干预活动的情况下,在一段时间内持续完成必要的控制功能。

美国学者 M. Pachter 和 P. R. Chandler 将自主控制定义为应用于非结构化环境下的高度自动化<sup>[4]</sup>,其

中的自动化强调了无人参与,非结构化强调了各类不确定性,例如,参数不确定性、未建模动态、随机干扰、传感器或测量的随机噪声、分散控制中的多控制作用与复杂的信息模式、由非协作体操作的附加控制信号、强度由协作或非协作干扰体控制的测量噪声、由非协作体引入或控制的测量误差等。

可以看出,自主控制应该具有“自治能力”,必须能够在不确定性的对象和环境条件下,在无人参与的情况下,持续完成必要的控制功能。因此,无人机的“自动”与“自主”的主要区别就在于:“自动”是指一个系统将精确地按照程序执行任务,它没有选择与决策的能力;“自主”是指在需要作出决定的时候,这个决定由无人机做出。

## 2 自主性评估

2000 年美国提出了自主作战的概念(Autonomous Operations, AO),它是由美国海军的海军研究办公室和美国空军的空军研究实验室(AFRL)的传感器飞机项目组率先提出并推广的。对于未来的无人机,增强飞行器的信息处理能力是实现 AO 的关键。为了深入研究无人机的 AO, AFRL 又定义了 10 个自

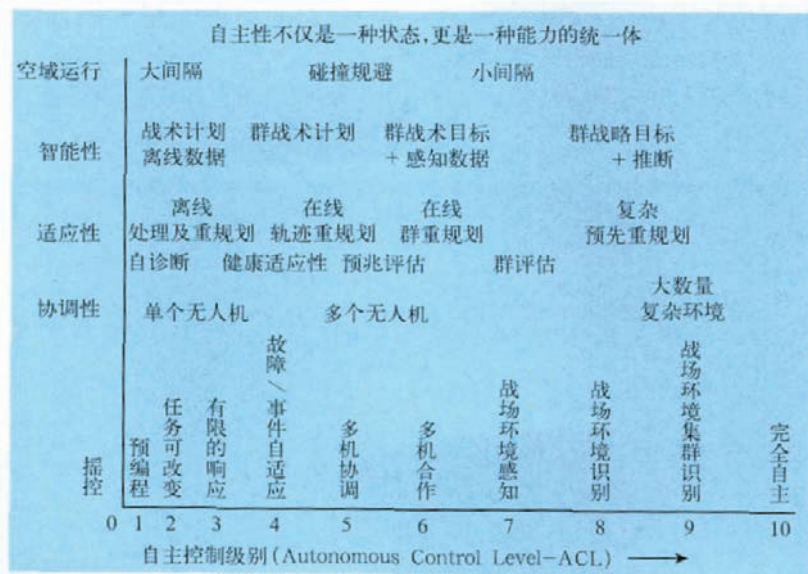


图1 无人机自主控制等级

主控制级别(Autonomous Control Level, ACL,见图1),作为标准衡量无人机的进步,即可以量化衡量一架具体的 UAV 的自主程度。例如,最常见的“全球鹰”的 ACL 为 2 和 3 之间,“捕食者”的为 2,而 ACL 最高的无人机为美军计划中的无人作战武装旋翼机(Unmanned Combat Armed Rotorcraft, UCAR)为 8 和 9 之间<sup>[5]</sup>。

NASA 飞行器系统计划(Vehicle Systems Program, VSP)高空长航时部(Department of High Altitude Long Endurance, DHALE)在对以上划分分析的基础上,提出了评价高空长航时无人机自主性的量化方法,该方法划分的层次和意义更加明确,并具有更好的实际可操作性,如表 1 所示<sup>[6]</sup>。

综合国内外的研究和分析,我们提出一种自主控制的能力分级,供各位学者研究参考,根据国内无人机行业及学术研究的发展,制订出适合自己切实可行的自主性评估方案。

自主控制能力的分级:

0. 完全结构化的控制方案和策略,对自身和环境变化没有作出反应的能力;(自动控制)

1. 能够适应对象和环境的不确定性,具有变参数、变结构的能力;

2. 具有故障实时诊断、隔离,和根据故障情况进行系统重构的能力;

3. 能够根据变化的任务和态势进行决策和任务重规划的能力;

4. 具有与其它单体或系统进行交互、协同的能力;

5. 能够自学习,具有集群自组织协调的能力。

以上“自主控制”可以分成以下的类型:

适应性自主:即以适应各类不确定性为目标的自主控制,其中涵盖了由对象、环境以及任务、态势等带来的不确定因素,使系统在无人参与时实现控制目的。

协同性自主:系统作为独立自主的智能体与其他智能体或人协同时,可进行自主协调、协作、协商等控制行为。以自身适应性自主控制为基础,通过协同性自主可以实现多平台或人机协作,在资源、效率等众多方面得到更优化的控制效果。

学习型自主:高级的自主系统必须具备自学习能力,及能够根据对象、环境、任务及控制效果,通过自主的修正、优化和学习的行为,提高控制性能。

因此,高级的自主系统具有适应性、自修复、智能性、协同性、自学习等特点。

## 无人机自主控制关键技术

自主控制包括自动完成预先确定的航路和规划的任务,或者在线感

知形势,并按确定的使命、原则在飞行中进行决策并自主执行任务。自主控制的挑战就是在不确定性的条件下,实时或近乎实时地解决一系列最优化的求解问题,并且不需要人为的干预。面对不确定性的自动决策是自动控制从内回路控制、自动驾驶仪到飞行管理、多飞行器管理、再到任务管理的一种逻辑层次的进步,也是自动控制从连续反应的控制层面到离散事件驱动的决策层面的一种延伸。

### 1 无人机自主控制结构

#### 1.1 递阶开放的无人机控制结构

从效能的角度出发,未来无人机的工作方式将涵盖单机行动和多机协同的模式。为此,飞行控制应当提供编队飞行、多机协同执行任务的能力,控制结构的选择应该能满足这类需要。在设计系统结构时应对诸多要素进行综合考虑,其中包括将整个机群的使命分解为每个无人机的具体目标、在线任务计划、在线优化编队的任务航线、轨迹的规划和跟踪、编队中不同无人机间相互的协调、在兼顾环境不确定性及自身故障和损伤的情况下实现重构控制和故障管理等。因此,先进的无人机控制必须具有开放的平台结构,并面向任务、面向效能包含最大的可拓展性。针对这样的要求,当前广泛接受的解决方案是选择层阶分解的控制结构和控制技术。

递阶式系统的每一层都有相对独立的功能划分,各层间通过往复的传输实现信息的共享。越往下就越接近具体的执行层,控制算法的具体和局部化程度以及执行的速度就越高;越往上则信息的内容和决策就越具全局意义,并且决策的时间尺度也将变得更长。由于信息的共享,实际上每一层都有相当的“全局观”,这有利于在必要时相对各层开发适当的推理和决策算法,从而提高整个系统的智能化水平和自主程度。

表 1 NASA 飞行器系统计划高空长航时部定义自主等级

等级	名称	描述	特征
0	遥控	人在回路的遥控飞行。(100% 掌控时间)	遥控飞机
1	简单的自动操作	依靠自控设备辅助,在操作员监视下执行任务。(80% 掌控时间)	自动驾驶仪
2	远程操作	执行操作员预编程序任务。(50% 掌控时间)	无人机综合管理预设航路点飞行
3	高度自动化(半自主)	可自动执行复杂任务,具有部分态势感知能力,能做出常规决策。(20% 掌控时间)	自动起飞/着陆链路中断后可继续任务
4	完全自主	具有广泛的态势感知能力(本体及环境),有能力和权限做全面决策。( <5% 掌控时间)	自动任务重规划
5	协同操作	多架无人机可团队协作。	合作和协同飞行

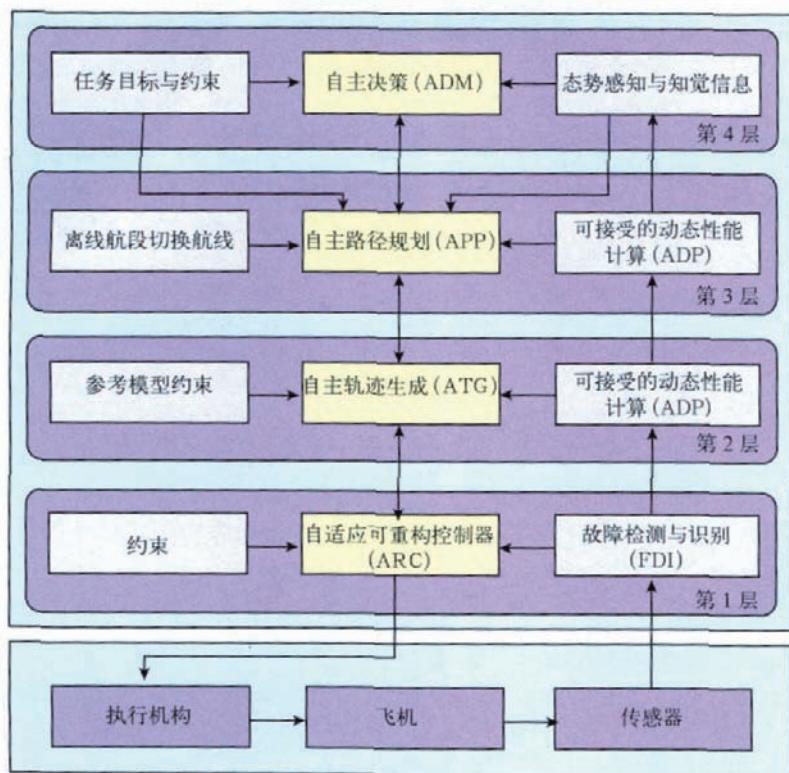


图2 递阶智能控制结构图

图2是一种典型的基于无人作战飞机设计的控制和协调的分层结构,具有一定的代表性。这种控制结构分为4层:任务控制层、战略层、战术层和调节规划层。下面的3层位于每一架无人机个体上,最上的一层即任务控制层,位于指挥站或长机上。在这种结构下,每架无人机可以局部地优化自身的行为,同时还可以方便地与其他无人机协调合作来完成任务<sup>[7]</sup>。

单架无人机的分层递阶结构的示意如图3所示。其中决策管理层为自主控制的最高层,它依据对系统状态的感知,决策和规划系统的任务目标、任务序列和机动轨迹。适应层根据任务规划结果以及飞机的状态产生相应的导引方案和具体的制导指令,控制执行层生成飞机各操纵效率机构(包括气动效率机构及推力效率机构)的控制指令。

### 1.2 包容式结构

包容式结构是由麻省理工学院的R. Brooks提出的一种体系结构

思想。一般的分层递阶体系结构把系统分解为功能模块,并按感知—规划—行动的过程进行构造,属于垂直分片的结构。该结构中,仅有最底层的模块能与外界进行交互,即一个输入的信号经过若干道处理之后,只有负责驱动控制的模块才能产生动作。这对于环境变化的反应有时不够灵敏,而且系统功能的增加将引起整体的重构。水平分片结构由多种能独立输入输出的模块组成,构成一种典

型的包容式体系结构。

包容式体系结构的特点:子系统独立产生动作行为,直接接收传感器信号产生行为动作;各子系统平行工作,由一个协调机制负责集成,进而产生总体行为。

包容式体系结构的设计目标包括多任务、判断性强、鲁棒性和可扩充性。由于阶层间的控制机制仅仅协调每个层次的输出行动,并不干扰各个层次的内部工作,因此各层次平行并发工作,同时完成多种任务。所有的传感信号不必集中在某中心用统一方式表达,而是可分布在各个层次中,分别起到不同方面的行为感知作用。多传感器输入的独自处理增加了系统鲁棒性。包容式结构增加了系统的可扩充性。

分层递阶结构与包容式结构对构建适应性自主控制系统均有各自的贡献。可利用递阶控制系统的设计方法对自主控制系统进行分析,划分形成具有不同时间尺度和功能的模块;同时,将包容式结构中各模块可独立产生行为的特性借鉴到递阶智能控制中。然后借鉴人类神经系统“知识型控制—经验型控制—反射式控制”的结构,分别处理和应对不同的任务。

### 2 故障诊断与自修复重构

无人机故障诊断与自修复重构是其实现自主控制的保障,能够提高

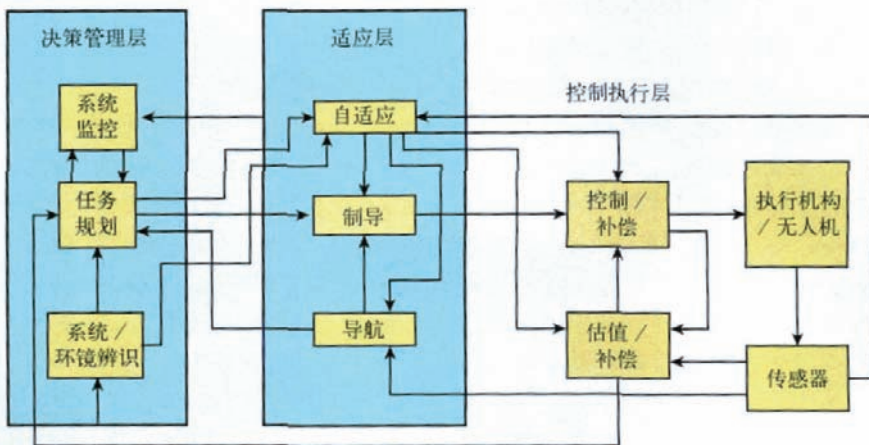


图3 单架无人机的分层递阶系统结构

无人机的生存能力以及飞行安全性。故障容错与重构控制的重要问题包括:如何对不同情况的重大故障和结构损伤进行建模,而且避免模型量太大;如何将不同的在线故障检测与识别(FDI)和自适应可重构控制(ARC)算法进行综合,以覆盖不同类型的错误,包括传感器故障、控制效应器故障、以及结构和战场损伤;在出现故障时,如何改变控制分配算法(CAA)。

具有故障诊断和自修复重构功能的控制系统如图4。

### 3 可变自主权限的自主控制

先进无人机飞行控制技术的目标是实现可变自主权限的自主控制。近年来,对于在环境和自身存在不确定条件下的自主和多机协同控制已经进行了大量的研究。应当指出,控制器要实现的功能目标在相当程度

在递阶结构的基础上,以鲁棒、自适应和智能控制相互交叉、融合所发展出的先进飞行控制技术,具有功能强大的特点,适用于无人机控制领域。其中,基于多模型的自适应控制技术,可以降低各种不确定性的复杂度,从而有利于在线决策和重构控制。

### 4 在线态势感知和自主决策

与有人作战飞机不同,非自主无人机执行战术任务时的攻击决策(如目标识别与分配、武器投放、任务变更等)是由地面操作员完成的。在这种运行机制下,操作员只能进行近实时的决策。自主控制意味着不需要人的干预,必须建立以在线态势感知为中心的实时自主决策能力。无人机任务管理能力和机载控制系统的在线感知和可变自主权限控制能力将是无人机自主执行战术任务成败的关键<sup>[8]</sup>。

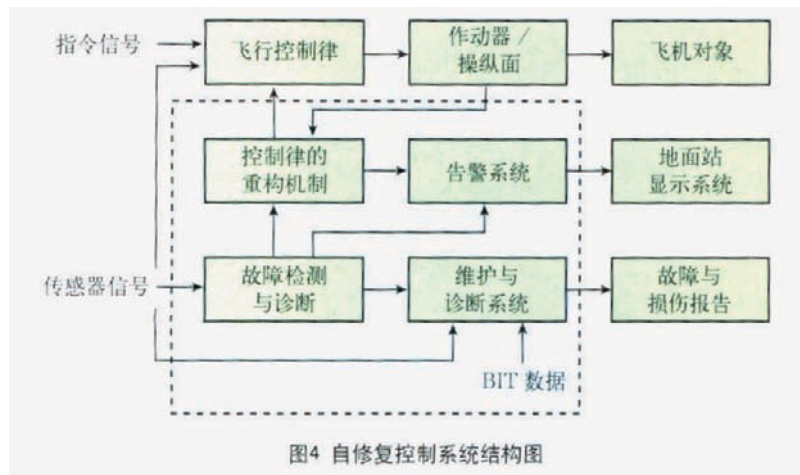


图4 自修复控制系统结构图

上决定了其应适应的不确定性程度。在递阶控制结构中,随着时间尺度的增长以及控制和决策功能的逐渐分离,面对的不确定性程度也将大大提高。在现已建立的知识库和专家系统的基础上,将人工智能(AI)应用到飞行中决策和在线规划,是一个很有实用价值的技术方向。研究结果表明,自适应控制可以适应很高程度的不确定性;而当不确定因素是动态并且瞬变时,则最适用的是重构控制技术;当必须在控制过程中更新对象模型时,则可以采用学习控制。

当前,无人机在线态势感知的重点问题之一在于如何实现不确定条件下信息的快速获取与处理,从而实现飞行中再规划,也就是当接收到新的信息以及发生了非预见的事件时如何实时最优地更新预先制定的计划和导引策略,以应对数据链缺失、实时威胁以及复杂的故障和损伤等控制站无法实时干预的紧急情况。

### 5 自主着陆控制技术

对于自主飞行的无人机而言,安全着陆是一个很困难的问题。由于着陆阶段飞行高度低,所以对飞行安

全的要求也最高,尤其是在终端进近时,飞机必须高精度保持所有状态,直到准确地在一个规定的点上接地。着陆涉及的问题主要包括飞机的定位导引与制导控制两个方面。而且在与外界数据通信链断开的情况下,无人机需要自主完成安全着陆。因此高精度的距离和位置测量设备是无人机能够正常降落的保证。

采用类似有人驾驶飞机的方式进行自主着陆是无人机的发展趋势,其中精确的控制律设计对于无人机的安全自主着陆也必不可少。即使在发生多起故障、存在严重扰动以及飞机动态数据存在不确定性的情况下,仍能在误差容许的范围内使无人机安全地着陆。

### 6 UCAV 及多 UAV 协同中的自主控制

无人机的自主能力在其执行作战或协同任务时显得尤为重要。无人作战飞机(UCAV)面临的作战任务复杂,态势变化快,不确定因素多,无人作战飞机必须自主完成对目标的探测、识别,制定诸如目标分配、战术规划和机动决策等攻击决策,无人作战飞机的指挥控制系统应是具有驻留性、反应性、社会性、主动性等特征的计算实体,因此要求其能在快速全面感知环境的基础上实时做出决策。

多无人机协同是将一组不同位置、不同价值、不同威胁程度的目标合理地分配给类型、价值和战斗力都不同的无人机,以达到整体作战效能最大、代价最小的目的。协同的前提条件是无人机平台间的通信和信息共享,无人机平台之间信息是高度分布的,无人机平台的运动以及通信拓扑的变化,以最小信息流为基础的多平台分散协调控制系统结构如图5所示<sup>[7]</sup>。

多无人机协同搜索也是多UAV协同控制的一个重要研究内容,多架UAV同时对一个不确定区域进行搜

索,目的在于更快速、全面地获取搜索区域的信息,降低环境的未知性。协同工作时考虑不同 UAV 飞行和探测传感器的约束,在不确定的环境中采用协同自主控制的方法,从而达到整体任务效能的最优<sup>[9,10]</sup>。

## 无人机自主控制展望

### 1 无人机自主控制的发展趋势

未来无人机技术将要体现的是一种在特定领域中应用的先进机器智能技术。由于对象的开放性、复杂性和所面对信息模式的多样性、不确定性,无人机的自主飞行控制是一项高度综合的研究项目,是智能控制技术和飞行控制技术的高度有机结合,一定程度上代表了未来航空尖端技术的最新研究方向。应站在大系

益<sup>[11,12]</sup>。

无人机朝智能化、高性能、多功能、高科技的方向发展都离不开其自主控制能力的发展。无人机自主飞行控制/决策系统的研究是一个极具挑战性的研究课题。未来的研究主要有以下方向<sup>[13,14]</sup>:

(1) 如何生成基于实时信息、分层分段分区多方法相融合的实时任务规划策略,以及在受限制条件下实施航迹的精确跟踪技术,使其对环境的变化具有快速的反应能力,在面对不确定性和遇到突发事件时能实时做出有效的决策和机动。

(2) 结合系统的问题描述,如何开发适合飞行控制系统的智能分层递阶控制基本结构模式,以满足自主无人机任务的特殊需求,使其能够在

不确定的环境下,自主地实现导航、制导与控制。

(3) 如何在自主条件下对无人机进场着陆时进行精确定位,以及着陆控制技术的开发,使其在外界干扰以及存在内部故障的情况下,能安全地完成着陆过程。

(4) 如何在复杂未知环境下自主地对任务环境进行建模,包括环境的不确定性表示、三维环境

包括传感器的图像序列和无人侦察机图像,以及数据库中的地形图,目标区图像等,还有数据链的控制指令等,如何利用先验信息,通过信息融合技术实现无人机对环境的更好感知具有一定的挑战性,也是提高无人机自主能力的一项关键技术。

### 3 人工智能技术的应用

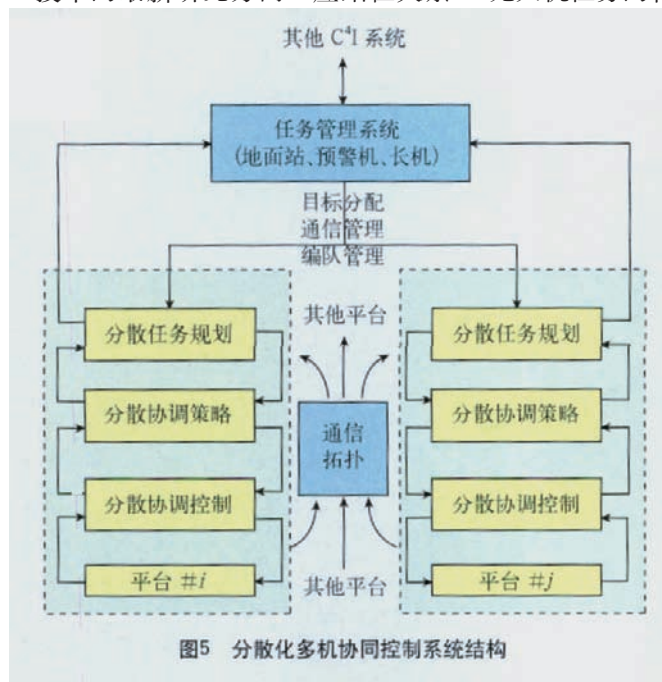
自主控制水平的高低也依赖于智能技术的发展,可获得信息的完整和准确程度对人工智能系统感知形势、解释环境和做出反应的能力和结果有很大影响。近年来,随着人工智能和计算机技术的快速发展,将人工智能技术应用于无人机的控制系统已经成为可能,其中应用最多的当属神经网络和模糊逻辑技术,这主要是因为该方法具有很好的学习和推理的能力。比较典型的应用是无人机神经网络来学习动态逆误差或者作为前馈补偿控制器。通过学习可以使无人机控制系统具有很好的性能和跟踪精度<sup>[15,16]</sup>。

## 结束语

当前各国均很重视无人机的开发、研制、试飞、批产与装备使用,赋予其更多的使命,并将其列为面向未来的重要装备。相信在不久的将来,随着自主控制技术的发展,无人机在使用范围上将会有较大的突破。高新技术的飞速发展及其在无人机上的不断应用,使无人机向多功能、快速反应及高可靠性方向发展。无人机在现代作战中不仅能够执行情报侦察、战场监视、目标指示任务,而且还在电子干扰、防空压制,空中格斗、对地攻击等方面大显身手,成为重要战斗力量并最终有望代替有人机,成为未来作战的主力。

注:本文有参考文献 16 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。

(责编 侧卫)



统的概念下来看无人机自主飞行控制系统的研究,所面临挑战在于如何在不确定的飞行条件下实现一定的实时自主控制决策能力,如何充分体现这种无人控制系统的鲁棒性、容错性、自适应性和智能性,最终在局部取代并超过人的决策作用。只有这样,才可以使未来的无人机具备超速的反应能力、超人的决策能力和超常的机动能力,发挥出其最大的综合效

特征的提取、目标的辨识与识别、态势的评估等等。

(5) 其它一些相关技术,如故障诊断与容错控制、知识表达、机器学习等等。

### 2 信息融合技术的应用

目前大多数机载传感器融合方法是针对像素级的,同时信息特征理解技术不很成熟,无法直接实现环境感知。无人机获得的信息比较复杂,