

文章编号: 1000-6893(2008)增-00S1-07

无人机飞行控制与管理

王宏伦, 王英勋

(北京航空航天大学 无人驾驶飞行器设计研究所, 北京 100083)

Flight Control and Management System of Unmanned Aerial Vehicles

Wang Honglun, Wang Yingxun

(Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

摘要: 从无人机工程研制的角度出发, 介绍了工程中常用的无人机飞行控制与管理系统的组成、结构、功能与外部接口; 分析了系统功能设计时在飞行控制、飞行任务管理与规划、机载设备故障判断与处理、遥控遥测管理以及任务设备管理等方面应考虑的主要问题; 从系统控制权限逐步增大的角度论述了无人机典型的遥控控制、人工干预自动控制以及自主控制等控制方式的特点、适用情形和发展前景; 讨论了系统研制过程中的控制律设计、控制与管理策略设计、软件开发和高逼真仿真试验等主要关键技术; 最后, 归纳了区别于有人机系统的显著特点以及通用化、综合化、智能化和网络化的发展趋势。

关键词: 无人机; 飞行控制与管理; 自主飞行控制; 遥控控制; 人工干预自动控制

中图分类号: V249.1 **文献标识码:** A

Abstract: From the engineering-development viewpoint, the system configuration, main functions, outer interface and structure of typical unmanned aerial vehicle(UAV) flight control and management systems(FCMS) are introduced first. Then, the main problems of system function design of flight control, mission management, airborne equipment failure diagnose and payload management, et al. are analyzed. Thirdly, the characteristics and applicabilities of three typical control modes, i.e. remote pilot, automatic control under man-surveillance and autonomous control are discussed. And then, the key technologies in system development such as control law design, control and management strategy design, real-time software development, et al. are analyzed. Finally, the system characteristics obtained from manned aerial vehicles and system development trends are induced.

Key words: unmanned aerial vehicle; flight control and management system; autonomous flight control; remote pilot; automatic control under man-surveillance

导航、制导与控制技术作为航空领域最具活力的技术之一, 为近年来无人机的发展起到了巨大的推动作用。从早期的主要依靠遥控操纵的无人机(Remotely Piloted Vehicle, RPV), 到具备一定自主飞行能力的无人驾驶飞行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV), 再到涵盖飞行器以外其他支撑系统的无人飞行系统(Unmanned Aerial System, UAS), 概念一再扩展, 无人机的功能日趋强大, 导航、制导与控制技术在其中的作用与地位也日益重要。

无人机中的导航、制导与控制功能主要由其中的飞行控制与管理系统来承担。无人机的飞行控制与管理是无人机遂行任务的关键部分, 一般

包括 3 大功能: 飞行控制、飞行管理和任务设备管理。飞行控制主要完成无人机的姿态/航向的稳定与控制、速度控制、高度稳定与控制、侧向偏离控制以及起飞/着陆控制等任务。飞行管理主要完成任务管理与规划、遥控指令处理、遥测参数收集、发动机/电气/测控等机载设备故障监测与处理、导航解算以及飞行性能管理等功能。任务设备管理主要完成机载任务设备工作状态监测与管理。

在无人机飞行控制与管理系统的研制中, 一般要涉及系统设计、控制律设计、控制与管理策略设计、实时控制与管理软件开发以及仿真试验等多个重要环节。如何针对无人机的特点和系统要求开展飞行控制与管理系统的研究是无人机研制中重中之重的工作。

本文从工程研制的角度对无人机飞行控制与管理系统的组成、功能和结构进行了介绍,对其控制与管理功能设计中应考虑的主要问题,3种典型控制方式的特点与使用情形,系统研制中的主要关键技术,系统区别于有人机系统的显著特点以及系统发展趋势等进行了分析。

1 系统组成与结构

无人机飞行控制与管理系统一般由传感器子系统、控制与管理计算机、伺服作动子系统以及地面操控与显示终端组成,如图 1 所示。根据功能要求和系统配置的不同,传感器子系统可包括飞行器位置/速度(地速)传感器,如 GPS 接收机、惯性导航设备或其组合;空速、高度传感器,如大气机、动/静压传感器等;姿态/航向传感器,如惯性导航设备、垂直陀螺和磁航向传感器等;角速率传感器,如角速率陀螺等。伺服作动子系统包括控制副翼、升降舵、方向舵、发动机节流门和其他机构按要求进行偏转的舵机及其控制器。地面操控与显示终端包括任务规划、综合遥测信息显示、遥控操纵与飞行状态监控等,一般配置在测控系统的地面控制站中(该部分经常被按照所处位置划入测控系统,但从功能而言划入飞控与管理系统更为合适)。在整个飞行控制与管理系统中,控制与管理计算机处于核心位置,主要担负信息收集与处理、控制与导航解算、各种管理与监控以及控制输出等工作。

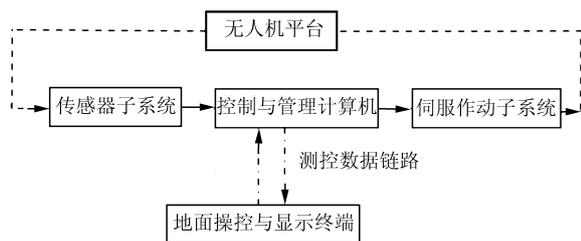


图 1 无人机飞行控制与管理系统的组成

Fig. 1 The general organization structure of UAV FCMS

无人机飞行控制与管理系统的配置取决于任务使命,可以是简单的由 GPS 接收机、动/静压传感器、垂直陀螺、速率陀螺、飞控计算机以及航模舵机组成的系统^[1-2],也可以是由冗余传感器、冗余计算机和冗余作动系统构成的复杂冗余系统。

无人机飞行控制与管理系统一般与测控系

统、任务设备、电气系统和动力系统等有外部电气接口关系。如图 2 所示。

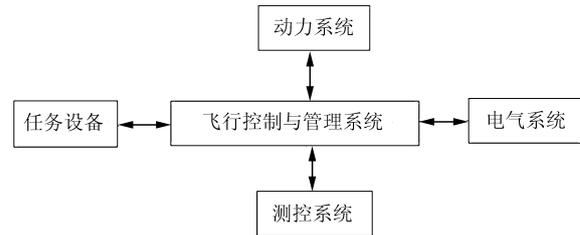


图 2 无人机飞行控制与管理系统的核心外部电气接口

Fig. 2 The outer interface of UAV FCMS

2 系统功能

2.1 飞行控制功能

飞行控制是无人机飞行控制与管理系统的最基本的功能。一般来讲,无人机飞行控制的基本模态包括俯仰/滚转姿态的控制与稳定、高度控制与稳定、速度控制与稳定、侧向偏离控制以及爬升/下降控制等。这是无人机执行任务中最常用的控制模态。

由于机上无人,加之高性能的侦察任务设备一般具有稳定平台,在巡航飞行中对于无人机的控制一般更侧重于对空速和轨迹的控制。

在起降阶段,对应于不同的起降方式,可有多种不同的用于起降控制的模态。其中最为复杂的轮式自动起降控制中专门设有起飞控制、下滑控制、拉平控制和地面自动纠偏控制等。

在发动机油门控制方面,小型无人机中一般采用开环控制方式,如爬升采用大油门,下降采用小油门,定高巡航采用中等油门等。但对于速度控制有较高要求的场合,如自动着陆控制则采用闭环油门控制。

无人机的飞行控制功能还体现在多种控制模态、控制方式之间的平稳转接以及根据飞行状态的不同,自动判断所处阶段并调用相应控制模态等方面。

2.2 飞行管理功能

无人机的飞行管理一般包括:飞行任务管理与规划、机载设备故障判断与处理、导航解算、遥控遥测管理以及飞行性能管理等。

飞行任务管理与规划主要包括任务航线的规划、装订和调整,航线/航点的切换控制、出航、巡航和返航的控制等。任务航线规划一般通过地

面控制站中的航线规划软件来实现, 规划好的航线可通过数据链路装订到机载的控制与管理计算机中, 而且可根据飞行中实时重规划的结果对装订的航线进行实时的调整。航点切换、出航、巡航和返航的控制一般可根据一定的策略通过控制与管理软件自动进行。

机载设备故障判断与处理通常针对飞控系统各设备、遥控链路、发动机以及电气系统等关键设备进行。可通过飞行中自检测、比较监控和模型监控等方式检测故障, 也可监测故障。判故后的处理根据设备功能、飞行阶段以及控制方式的不同有很大不同。如链路中断对于自主飞行而言可以暂不处理, 但对于遥控控制就必须立即转为自主。

导航解算主要功能在于结合飞行任务管理为飞行控制提供无人机相对于目标航线的偏差、偏差变化率和待飞距离等数据。

遥控遥测管理的主要作用在于接收并处理与飞行控制、任务控制相关的各种遥控指令, 收集所需的遥测参数并打包下传。由于无线传输的可靠性相对较差, 遥控指令处理时应该首先完成指令的有效性判断、容错处理等工作。

飞行性能管理主要通过控制无人机的空速、迎角以及爬升率等随着高度、时间和重量等状态按照某种指标的最佳为原则进行变化。如最快爬升、最省油巡航和最速下降等。

2.3 任务设备管理

目前, 侦察型无人机上的任务设备主要包括相机、红外热像仪、集可见光/红外/激光测距/激光目标指示于一体的光电侦察平台以及具有地面运动目标指示功能的合成孔径雷达(SAR)等。

任务设备管理主要包括对任务设备的工作状态进行监测与管理。在链路畅通的条件下, 任务设备管理可通过任务设备状态自检测和地面操作人员人工监测与管理相结合的方法进行。但在实际执行任务时, 遥控链路时常会受到干扰, 有时还要求以遥控静默的方式工作, 这时寻求程控或自主的任务设备管理就很有必要了。

3 控制方式

3.1 遥控控制

遥控控制是无人机最基本的控制方式。尽管目前无人机的自主飞行程度已明显提高, 但遥控

控制功能还基本保留。

遥控控制主要应用于两种场合。一是对于一些小型的不做风洞试验的无人机, 其控制参数的确定通过试飞过程中的逐步调整得到。通过有经验的操纵手的遥控飞行, 了解无人机的动态特性, 为控制参数的确定提供依据。这种遥控飞行一般要进行多次。

遥控控制的另一种用途在于具有自主飞行能力的无人机的降级控制。由于风洞数据总存在误差, 无人机在实际飞行中可能出现超出设定的自动控制能力的情况, 或者控制律赖以存在的传感器出现故障, 此时, 可通过地面操作手的遥控控制提供安全保障。也有一些小型无人机对于自动控制难度较大的阶段采用遥控控制, 而其他阶段采用自动控制。如起飞、降落用遥控, 巡航飞行用自控。

遥控控制的最大特点在于能够充分发挥操纵手的高级人类智能行为的能动性和经验优势, 达到自动控制难以达到的控制效果。事实上这种智能行为的效果已在战斗机上得到了充分证明, 众所周知的眼镜蛇机动以及许多高难度的战术动作就是飞行员智能行为的结晶。但是无人机由于链路带来的不可避免的大的操纵延迟(一般在 200 ms 量级, 航模用遥控器要小一些, 但作用距离很小)以及缺乏有人机座舱的切身感受, 人的综合智能传感器的感受效果被大大削弱, 控制的效果也大打折扣。另外, 遥控控制对于操纵手有很高要求, 易受其技术、技能、情绪和心理素质等影响。因而在一些大型无人机上, 往往通过系统的余度配置以及控制规律、控制策略、控制软件的精心设计和充分试验验证提高其安全性, 而逐渐淡化遥控控制的作用。

3.2 自主控制

自主控制是目前先进无人机采用的主要控制方式(严格地说, 目前的自主控制实际上是一种可变权限的自主控制^[3])。无人机在完成地面准备工作并收到起飞指令后, 自主进行地面滑跑和纠偏控制, 自主进行离地判断和阶段转换, 自主收起落架并按照预定最佳爬升规律进行爬升, 同时自动切入预定航线, 到达预定的巡航高度后, 自主转入定高飞行, 并实施最佳巡航控制, 到达预定的任务区域时, 自动开启相应的任务设备, 完成任务后自动按照给定的返航路线返回预定机场, 自动放起落架, 自动进入下滑航线, 自动拉平、

着陆和停车,最后自动关机。在整个过程中,能够自动对重要机载设备的状态进行监测和管理,一旦出现发动机空中停车、遥控链路持续中断以及电源故障等问题,自动进行相应处理。

在自主控制方式下,地面操作人员主要进行高级的监控工作,工作负担大大减小。目前的自主控制水平普遍不高,关键是缺乏对于不确定事件的感知、判断与处理能力^[3-5]。

3.3 人工干预自动控制

人工干预自动控制介于遥控控制和自主控制之间,无人机的飞行主要还是通过飞行控制系统自动控制来实现,但是控制模态的转换需要人工干预实现,或者可以人工调整控制目标。实际上是一种决策信息不够全面或者决策不够确定,继而通过人的感知进行补充的控制方式。如在大范围搜索目标时,无人机一般以盘旋飞行的方式在特定区域的上空游曳,何时进入盘旋何时退出盘旋要地面控制人员根据侦察图像的具体情况确定,无人机很难自主确定,这时通过人工干预下的自动控制,可以达到好的控制效果。另外在起飞着陆阶段根据具体飞行情况对于控制目标的调整可以起到削弱不确定因素的不利影响的作用,如导航系统误差飘逸引起的一定范围内的偏离跑道等。

人工干预自动控制既有自动控制能力,又有人可以参与控制的特点,可以综合发挥自动控制系统施行精确控制的优点,又可发挥人类在目标图像判读、不确定信息处理以及能动地处理特殊情况、经验优势等方面的优点,是无人机在侦察任务段、起飞降落段等对外界敏感又缺乏自主感知能力情况下的很实用的控制方式。这种控制方式中,操作人员只需监控无人机的飞行状态,并适时做出是否需要改变控制模式或调整控制目标的决策,一旦需要,只需简单地发出指令,无人机的控制与稳定还是由飞行自动控制系统完成,其工作负荷远小于遥控控制,而链路延迟带来的影响也要小得多。

上述从遥控到人工干预自动控制再到自主控制,实际上反映了控制和决策的权限从操作手到控制与管理系统的演变。遥控控制中控制和决策的权限全在人,控制与管理系统仅是执行器;人工干预自动控制中,控制的权限交给了飞行控制与管理系统,而决策的权限还在人;到了自主控制,决策的大部分权限也交给了飞行控制与管理

系统,而这种权限是可以根据需要动态调整的,是一种可变权限自主控制,随着控制技术的不断发展,最终将达到完全的自主控制^[5]。

4 主要关键技术

4.1 控制律设计

无论是有人机还是无人机,控制律都是关系到飞行安全的核心问题。无人机相对而言对控制律更为依赖。控制律设计一直都是飞行控制领域研究的焦点^[6-15]。从经典的根轨迹和频域设计方法到以现代控制理论为基础的最优控制、极点配置以及特征结构配置等方法再到以非线性动态逆、非线性 H_∞ 鲁棒控制和神经网络自适应控制等为代表的非线性设计方法^[6-15],各种方法各有利弊。

经典的根轨迹和频域设计方法简单实用,设计过程透明,工程设计人员可清晰地看到系统的动态和性能是如何被修改的。凭借自身丰富的设计经验,通过使用多模态控制律以及调参等技术,设计人员通常可以设计出性能较为满意的飞行控制律^[6]。这也是当前工程研制中使用最为广泛的设计方法。基于现代控制理论的设计方法和非线性设计方法具有很大的发展潜力,也有一些实际应用的先例^[7-15],但要成为一种通用的工程化的设计方法还有不少的工作要做。

对于无人机飞行控制的工程设计而言,首要的问题是工程上可实现且安全可靠,因而对控制律的基本要求是满足系统指标要求前提下尽可能简捷。

目前大多数无人机控制律的设计采用简单实用的经典根轨迹法和频域法就能满足要求,在一些对控制有很高要求或者飞机模型难以线性化的情况,才采用现代控制或非线性控制的设计方法。随着控制技术的发展和无人机要求的不断提高,现代控制和非线性控制将发挥越来越大的作用。

4.2 控制与管理策略设计

除了多模态控制律外,飞行控制与管理功能中的大部分都表现为状态切换与逻辑关系形式的控制与管理策略,如飞行阶段的判断与转换,控制方式、控制模态的切换,发动机、链路等重要机载设备的故障监测与安全处理,系统余度管理,特殊情况下的应急安全处理以及反映系统自主能力的决策方面的其他内容等。从递阶控制的角度

看,多模态控制律处于执行层,而控制与管理策略则处于协调层和组织管理层,通过控制与管理策略的协调和组织管理,形成一个有机的整体,共同完成复杂的控制与管理工作的。

由于要处理大量复杂的、与安全飞行息息相关甚至致命性的状态变换和逻辑关系,控制与管理策略设计的优劣已成为影响无人机功能和安全性的很关键因素,国内外无人机飞行出现的问题很多都与控制与管理策略有关。随着无人机技术的发展,特别是自主性要求的不断提高,控制与管理策略将更为复杂。

4.3 控制与管理软件设计与实现

在目前的数字式飞行控制与管理系统中,控制律、控制与管理策略等大部分的控制与管理功能是通过飞行控制与管理软件来实现的,软件已成为影响系统功能、性能和可靠性的至关重要的因素。随着无人机自主程度的不断提高,控制与管理软件的重要性将会进一步增加。如何确保软件在任何情况下都能够安全、可靠地实现系统的要求,这是无人机飞行控制与管理系统中又一个关键的问题。

通过测试发现软件中的问题是提高软件质量的重要手段,但测试易受软件文档编写水平等因素的制约,从理论上讲也不可能发现所有的问题。提高控制与管理软件的质量必须从设计、实现、测试和更改等各个环节入手,严格按照软件工程的要求进行。

4.4 系统仿真试验

系统仿真试验是在地面对飞行控制与管理系统进行验证和确认的重要环节。通过数字仿真和半物理仿真不但能够检验系统实现预定的飞行控制功能和性能的情况,测定各控制回路的稳定裕量,还能检验在各种常值风、突风、紊流等大气扰动和气动参数可能的变化等情况下的飞行控制情况,为控制参数的调整或优化提供依据。

高逼真的地面仿真试验能极大地减小飞行试验的风险,是先进无人机研制中的关键技术。

5 系统特点

5.1 链路延迟

无线数据链路是无人机和地面控制站交换数

据的唯一通道。地面对于无人机机载各系统的各种控制指令都必须通过上行的遥控信道传送,而无人机的各种遥测参数以及大量的侦察图像数据都必须通过下行的遥测信道传送到地面站。

由于信道带宽的限制,遥控遥测数据都不可避免地存在延迟。在视距链路的情况下,信息延迟在 100~200 ms,在卫星通信的情况下,遥控遥测信息要通过通信卫星进行转发,信息延迟将达到秒级。尽管测控研究领域提出了很多提高传输能力的机制,但高分辨率任务载荷、信息传输的高安全性和高可靠性对信道又提出了更高的要求。因而无人机飞行控制与管理系统设计,必须充分认识到这种延迟的影响,并尽可能减小对于地面控制站的依赖。

5.2 对系统要求更高

相对于有人机,无人机的飞行控制乃至飞行安全更依赖于飞行控制与管理系统。有人机尚可通过飞行员感受飞机状态的变化并施加控制,而无人机地面控制站中的控制人员对于飞行状态的掌握完全得靠机载传感器感受并通过遥测下传。一旦传感器失效,在无法目视看到无人机的情况下,要遥控好无人机相当困难。因而先进无人机上的飞行控制与管理系统被赋予了更高的工作权限和工作时限,人工干预对于飞行系统的自动控制只起辅助作用,至于遥控控制只有在自动控制完全失效的、万不得已的情况下才采用。从而对于飞行控制与管理系统的功能、性能和可靠性提出了很高的要求。

更重要的是,飞控计算机一般作为无人机上的控制与信息处理中心,其软硬件系统功能的完整性、工作的可靠性直接关系到无人机系统的飞行安全。

6 发展趋势

6.1 通用化、系列化

由于控制律、控制与管理策略等一般随着具体无人机的气动特性、控制要求而变化,因而无人机飞行控制与管理系统经常是专用于特定无人机系统的。但这种专用机制开发效率低下,重复工作,严重影响了系统的发展。实际上,随着无人机系统标准化程度的提高,飞行控制与管理中大多数模块是可以做成通用模块的,如遥控指令处理、遥测数据收集和导航解算等,就连与无人

机气动特性紧密相关的控制律部分, 如果采用适当的数据与代码分离技术, 也可以做到代码的通用。另外目前无人机操作界面五花八门, 急需要制定统一的标准, 方便用户的使用。特别是到了无人机大发展的年代, 通用化、系列化可以极大地提高研制效率, 降低研制成本。捕食者无人机的成功, 在这方面提供了典范。

6.2 综合化

综合化主要表现在两方面, 一是无人机设计伊始, 就开展气动、结构与控制的一体化综合设计, 避免了先设计飞机, 再被动地配置控制系统的不利局面; 二是无人机上飞行控制与任务设备控制、火力控制等的综合控制, 以消除系统间的信息壁垒, 提高整体性能。综合化是先进飞机设计理念在无人机领域的体现。

6.3 自主化、智能化

自主控制意味着能够在线感知态势, 并按确定的使命、原则在飞行中进行决策并自主执行任务^[3]。自主控制的挑战就是在不确定的条件下, 实时或近实时地解决一系列最优化的求解问题, 而不需要人的干预。从根本上说, 需要建立不确定前提下处理复杂问题的自主决策能力^[5]。智能控制是解决自主控制问题的重要手段, 自主控制水平的提高有赖于智能技术、计算机处理能力和感知技术的突破性发展。

由于链路延迟和缺乏真实座舱感受, 无人机对于自主控制的要求更为突出。特别是具有大机动能力的无人作战飞机, 要求飞行员在地面站遥控无人机完成复杂的战术机动几乎是不可能的。但由于技术条件的限制, 目前无人机的自主化程度还很低。按照美国 2005 版无人机系统发展路线图给出的自主程度的分级, 目前享誉全球的捕食者仅达到 2 级的自主程度, 全球鹰无人机也只有 2~3 级的自主程度^[4,16]。未来无人机要想取代有人机成为天空的主宰, 自主程度的大幅提高是必须突破的关键技术。

6.4 网络化

任何一架无人机的力量是有限的, 只有加入信息化网络中, 实现资源的共享, 才能更程度地发挥团体优势。网络化是网络中心战赋予无人机的新的要求。

网络中心战是指将所有的侦察探测系统、通

信联络系统、指挥控制系统以及武器系统等, 组成一个以计算机网络为中心的一体化联合作战体系, 各级作战人员利用该网络作战体系实时感知战场态势、交流作战信息、指挥与实施作战行动, 达成信息优势、决策优势和行动优势的作战模式^[17-18]。网络中心战的重要特征是从传感器到打击平台的链路中信息的高效流动。在该网络中, 无人机将发挥重要作用, 既可担当传感器, 实施战场侦察与监视, 又可担当通信中继乃至携带武器对目标实施打击的任务, 还可进行打击效果评定^[17]。

作为无人机的控制、管理与信息中心, 飞行控制与管理系统向网络化发展是必然的趋势。

参 考 文 献

- [1] 陈天华, 郭培源. 小型无人机自主飞行控制系统的实现[J]. 航天控制, 2006, 24(5): 86-90.
Chen Tianhua, Guo Peiyuan. Realization of autonomous flight control system of mini-unmanned aerial vehicle[J]. Aerospace Control, 2006, 24(5): 86-90. (in Chinese)
- [2] 陈坚, 郑忠培. 一种小型无人机简易飞行控制系统的方案[J]. 实验流体力学, 2006, 20(4): 99-105.
Chen Jian, Zheng Zhongpei. A design of the small-scaled UAV's simple flight control system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(4): 99-105. (in Chinese)
- [3] 杨晖. 无人作战飞机自主控制技术研究[J]. 无人机, 2007(1): 27-29.
Yang Hui. Research on autonomous flight control technology of UCAV[J]. Unmanned Aerial Vehicle, 2007(1): 27-29. (in Chinese)
- [4] 高劲松, 陈峭东, 邹庆元, 等. 美国无人机的自主性研究[J]. 无人机, 2006(5): 37-39.
Gao Jinsong, Chen Shaodong, Zou Qingyuan, et al. On autonomy of US unmanned aerial vehicles[J]. Unmanned Aerial Vehicle, 2006(5): 37-39. (in Chinese)
- [5] 张新国. 从自动飞行到自主飞行——飞控与导航技术发展的转折和面临的挑战[J]. 无人机, 2003(6): 33-36.
Zhang Xinguo. From automatic flight to autonomous flight[J]. Unmanned Aerial Vehicle, 2003(6): 33-36. (in Chinese)
- [6] 王美仙, 李明, 张子军. 飞行器控制律设计方法发展综述[J]. 飞行力学, 2007, 25(2): 1-4.

- Wang Meixian, Li Ming, Zhang Zijun. Developing status of control law design methods for flight[J]. Flight Dynamics, 2007, 25(2): 1-4. (in Chinese)
- [7] 张怡哲, 邓建华. 逆系统方法在飞行控制律设计中的工程应用[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(1): 35-39.
- Zhang Yizhe, Deng Jianhua. Nonlinear control law design for high angle of attack flight[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(1): 35-39. (in Chinese)
- [8] 刘林, 车军, 唐强, 等. 现代飞行控制律评估与确认先进方法研究[J]. 飞行力学, 2007, 25(1):1-4.
- Liu Lin, Che Jun, Tang Qiang, et al. Study on the advanced approaches for clearance of modern flight control law[J]. Flight Dynamics, 2007, 25(1): 1-4. (in Chinese)
- [9] 刘燕斌, 陆宇平. 基于反步法的高超音速飞机纵向逆飞行控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 313-317.
- Liu Yanbin, Lu Yuping. Longitudinal inversion flight control based on back stepping for hypersonic vehicle[J]. Control and Decision, 2007, 22(3): 313-317. (in Chinese)
- [10] Beh H, van den Bunt R, Fisher B. High angle of attack approach and landing control law design for the X-31A[R]. AIAA-2002-0247, 2002.
- [11] Walker G P, Allen D A. X-35B STOVL flight control law design and flying qualities[R]. AIAA-2002-6018, 2002.
- [12] Reiner J, Balas G J, Garrard W L. Flight control design using robust dynamic inversion and time-scale separation[J]. Automatica, 1996, 32(11): 1439.
- [13] Steinberg M L. A comparison of intelligent, adaptive, and nonlinear flight control laws[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 1999: 9-11.
- [14] Kim B S, Calise A J. Nonlinear flight control using neural net-works[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(1): 26-33.
- [15] Singh S N, Steinberg M. Adaptive control of feedback linearizable nonlinear systems with application to flight control[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(4): 871-877.
- [16] Cambone S A, Krieg K J, Pace P, et al. Unmanned aircraft systems(UAS) roadmap,2005-2030[R]. Washington: Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [17] 崔麦会, 周建军. 无人机在信息化战争中的地位和作用[J]. 无人机, 2005(1):20-22.
- Cui Maihui, Zhou Jianjun. The position and function of unmanned aerial vehicles in the information-warfare[J]. Unmanned Aerial Vehicle, 2005(1): 20-22. (in Chinese)
- [18] 张玮, 周小平. 电子对抗无人机在网络中心战中的应用前景[J]. 无人机, 2006(1):14-17.
- Zhang Wei, Zhou Xiaoping. The applied foreground of electronic-countermeasure-UAV in the network-centric warfare[J]. Unmanned Aerial Vehicle, 2006(1): 14-17. (in Chinese)

作者简介:

王宏伦(1970—) 男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 无人机自主飞行控制与管理系统、无人机攻击武器系统。

Tel: 010-82317390

E-mail: hl_wang_2002@yahoo.com.cn

王英勋(1964—) 男, 硕士, 研究员, 总工程师。主要研究方向: 无人机自主飞行控制与管理系统、无人机总体设计。

(责任编辑: 鲍亚平)