

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.009

## 基于在线仿真的无人机飞控系统智能校正技术

冉 剑<sup>1</sup> 佟佳慧<sup>1,2</sup>

(1.北京机电工程研究所,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:**针对程控无人机智能化程度不高的问题,提出了基于在线仿真系统的飞控系统智能校正方法,采用在线状态监控及分析、仿真模型实时更新等技术,设计了无人机在线仿真系统,实现了无人机航迹纠偏、速度调整等在线辅助控制,进一步提高了无人机飞控智能化程度。并通过无人机数学模型仿真系统与飞控系统硬件在回路的仿真测试系统,进行实验验证,实现智能校正技术与人在回路控制方法的有效结合。

**关键词:**智能校正;无人机;在线仿真系统;飞行控制系统

中图分类号:V248

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2019)06-0795-06

### Intelligent Correction Technology of UAV Flying Control System Based on Online Simulation

RAN Jian<sup>1</sup>, TONG Jiahui<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing, 100074, China; 2. Science and Technology on Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation Laboratory, Beijing, 100074, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low intellectualization of program controlled unmanned aerial vehicle (UAV), intelligent correction method for flight control system based on online simulation system is proposed. Online state monitoring and analysis, real-time updating of simulation model and other technologies are used. UAV online simulation system is designed to auxiliary control UAV's track correction and speed correction. Intelligence of UAV flight control is improved further. Through UAV mathematical model simulation system and simulation and test system of flight control system hardware in loop, experimental verification is conducted. The effective combination of intelligent correction technology and man in the loop control method is realized.

**Key words:** intelligent correction; unmanned aerial vehicle (UAV); online simulation system; flying control system

无人机是未来进行信息对抗、实施火力打击和夺取空域优势的重要手段。无人机飞行过程中,地面指挥控制系统在指控人员的决策后,形成人工参与的无人机远程控制。这极大依赖于指控人员及时对无人机的自身状态、战场态势进行判断,作出决策。

无人机的控制方式主要分为3类:基站控制、半自主控制和完全自主控制(智能控制)。无人机完全自主控制是无人机未来的发展方向,目前随着

智能化和信息化水平的提高,人机交互控制将处于主导地位。在复杂环境中,由于存在通信链路、人员操控能力等因素限制,人机融合交互控制仍然存在一定不足。提高无人机自主导航规划控制能力,在一定程度上能改善无人机智能化水平<sup>[1-2]</sup>。

国外针对无人机自主控制技术研究开展了深入有成效的工作,如Reichard等对智能态势感知技术进行了研究<sup>[3]</sup>,Ward等对战斗无人飞机的智能自主控制进行了研究<sup>[4]</sup>,Johnson等<sup>[5]</sup>提出了可靠自

收稿日期:2018-09-13;修订日期:2019-02-19

通信作者:冉剑,男,工程师,E-mail: 517220521@qq.com。

引用格式:冉剑,佟佳慧. 基于在线仿真的无人机飞控系统智能校正技术[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(6):795-800. RAN Jian, TONG Jiahui. Intelligent Correction Technology of UAV Flying Control System Based on Online Simulation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 795-800.

主控制技术,Cheng<sup>[6]</sup>将模型预测控制引入到无人机自主控制之中。

国内对无人机相关技术研究起步晚,技术水平发展较国外落后,平台自主能力也不发达。其中,韩泉泉等<sup>[7]</sup>从飞行安全的角度研究了自主控制和人工决策相结合的控制策略,以降低人为操作干预。黄建军<sup>[8]</sup>对典型威胁信息建模,采用粒子群优化(Partical swarm optimization, PSO)算法对无人机航迹在线重规划技术进行研究。郜晨<sup>[9]</sup>基于改进蚁群算法对多无人机协同搜索打自主任务规划进行研究。沈林成等<sup>[10]</sup>对多无人机自主协同的方法进行较为深入的研究。

本文考虑利用交互式仿真技术<sup>[11]</sup>将无人机实时数学仿真系统嵌入到飞控系统的地面操控与监测终端,将无人机仿真模型解算数据与飞行遥测数据进行实时比对,通过合理的数据在线监测算法,实现无人机飞行过程的故障判别与自动告警,从而构建无人机辅助决策指挥系统<sup>[12]</sup>,支撑无人机智能校正系统设计,实现无人机航迹纠偏、速度调整等在线控制,提高无人机飞行控制精度,增强无人机飞控系统智能化程度。通过缓解完全依靠人工决策的指挥控制压力,增强无人机复杂环境下长航时飞行的可靠性、生存力,最大限度地保证无人机上设备的安全。

## 1 系统组成及原理

图1为无人机辅助决策指挥与智能校正系统的组成图,将在线实时仿真系统嵌入到地面指挥控制站,通过遥控遥测链路和无人机飞行控制与管理系统进行信息交互。其中,在线实时仿真系统由在线仿真模块、模型更新模块、故障监测模块、实时比对模块和智能校正模块等5大模块组成,是本文介绍的重点。

### 1.1 在线仿真模块

在线仿真模块实现了无人机飞行系统的实时

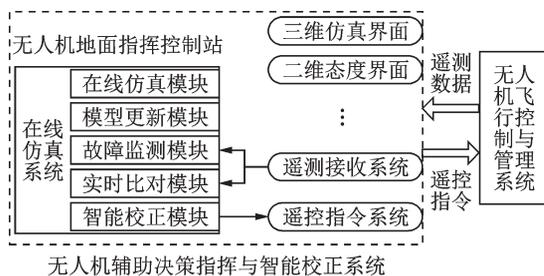


图1 无人机辅助决策指挥与智能校正系统组成图

Fig.1 Composition of UAV aided decision command and intelligent correction system

在线仿真过程,通过仿真方法对无人机数学模型进行二次建模,完成无人机滑跑起飞、任务管理、空中巡航和着陆停止等全飞行周期的数学仿真。在线仿真模块实现与无人机飞行实时同步仿真。

### 1.2 模型更新模块

模型更新模块主要将传感器采集的信息及其他飞机固有的随机干扰偏差条件等交互到仿真模型中,完成基准模型的更新与校正的功能。通过开展在线仿真试验,进行无人机的辅助决策和智能校正,为时刻确保仿真系统作为参考基准的真实性和有效性,需要将真实的环境条件引入到仿真模型的解算中。

### 1.3 故障监测模块

无人机在线仿真系统中,故障监测模块主要完成无人机故障的自动判别和告警提示,给出故障的种类和程度,以提供给操控人员指示信息。无人机飞行故障信息将通过遥测链路反馈到地面指挥控制站,通常操控人员可以通过遥测信息判断大致的故障情况,并进行相应的应急操作等。

### 1.4 实时比对模块

实时数据比对模块通过大数据量的在线监测算法,完成在线仿真模块解算的仿真数据与实飞遥测数据的实时比对,一方面相关的传感器采集数据更新仿真模型的输入值支持模型更新模块运行,能实现仿真模型的实时校正;另一方面根据仿真基准数据与实际飞行数据的关键量偏差给出偏差超限情况。

### 1.5 智能校正模块

智能校正模块依据故障监测模块提示的故障信息和告警提示辅助人工决策;最主要的是获得实时对比模块的偏差信息,经计算得到关键纠偏控制量。通过人在回路的方法,实现无人机的辅助决策指挥和智能校正系统的功能。

从图2中可以看到,仿真指令介入控制系统的途径及交互有:

(1)飞控系统采集真实的环境条件通过遥测引入到仿真系统。

(2)仿真模型解算得到的期望位置、速度等信息上传到飞控系统。

(3)飞控系统以仿真系统期望值替代装订值进行程控飞行。

(4)较严重故障情况直接发送返航乃至自毁等极限应急操作。

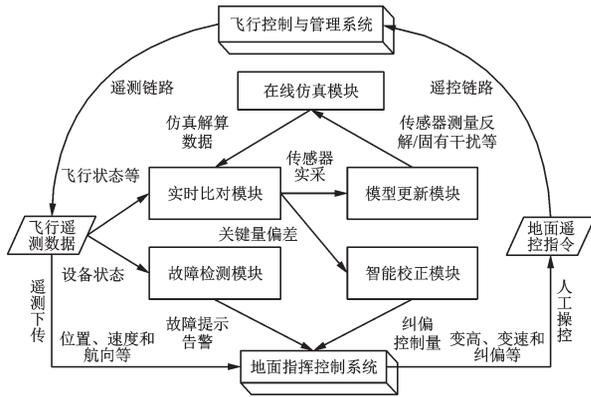


图2 无人机在线仿真系统控制原理结构图

Fig.2 Control principle structure of UAV online simulation system

## 2 无人机实时监测与飞控系统智能校正控制关键技术

无人机飞行控制系统智能校正建立在无人机飞行实时监测技术基础上。结合仿真模型解算数据,对飞行数据进行检测分析,开展了飞行控制系统智能校正。

### 2.1 无人机数据实时监测及分析

数据的实时监控与分析,主要有3个方面的作用:(1)为仿真模型提供外部传感器测量的参数输入,由模型进行解算实现仿真模型更新,保持仿真模型运行基准的有效性;(2)为故障监测模块提供输入,以建立工作状态偏差异常,进行提示告警,为指挥控制人员提供决策信息;(3)为实时数据比对模块提供输入,完成数据比对,建立关键纠偏量值。

#### 2.1.1 仿真模型更新校正

通过无人机传感器子系统(例如空速管、发动机温度传感器等)的反馈信息<sup>[13]</sup>,能够反映出仿真数学模型与真实设备状态之间的偏差,可以用作仿真模型的更新与校正。

以无人机的大气传感通道为例,在仿真系统模型解算中,根据伯努利原理得

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = C \quad (1)$$

式中: $C$ 是一个常量; $\frac{1}{2} \rho v^2$ 为动能项。式(1)可以写为

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

$$L = f(q, S, C) \quad (3)$$

$$M = g(q, S, C, v) \quad (4)$$

无人机的动能、气动力和力矩计算如式(2—4)所示,其中参数 $q$ 为动压, $v$ 是空速, $\rho$ 为流体密度, $S$ 为受力面积。可见,动能项以及空速直接影

响了气动力和气动力矩的计算。因此空速值的准确性对无人机飞行影响很大。而在飞机数学模型中,通过使用空速的测量值代替仿真系统中数学模型的解算值,进行飞机动力学解算有据可行。

#### 2.1.2 飞行数据实时分析

将仿真系统的实时解算数据与无人机实际飞行的遥测数据进行实时比对,并且给出无人机偏差超限情况。根据经过更新校正的仿真模型,为无人机飞行提供基准。数据实时分析流程如图3所示。

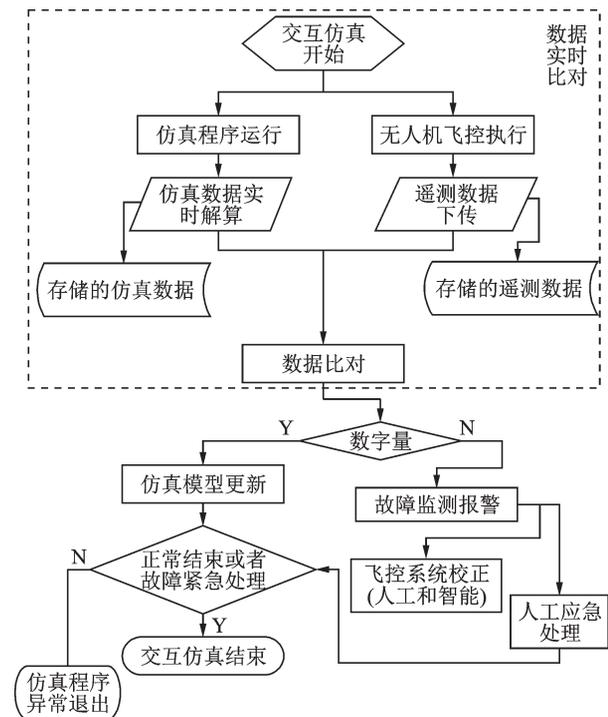


图3 数据实时分析流程图

Fig.3 Flow chart of data real-time analysis

#### (1) 无人机飞行状态变量

在数据实时比对时,需要将重点关注的飞行状态变量进行解析,并与仿真基准程序解算的状态变量进行实时比对,得出输出结果,作为智能校正模块的输入参数。

#### (2) 无人机系统工作状态

将某一工作状态字,与正常工作时状态字进行比较,对不一致的情况进行记录和传输。设备异常状态根据分系统经验设计得到。设备工作状态偏差由故障监测模块进行确认、分类和告警。

#### 2.1.3 设备故障监测告警

对无人机飞控各子系统的实时监控是保证飞机安全飞行的重要手段<sup>[14]</sup>。而通常设备工作状态信息通过遥测数据下传获得。无人机系统故障监测处理流程如图4所示。

根据无人机遥测数据,就特定的设备工作状态进行监测,当与正常工作状态字不符时,给出系统

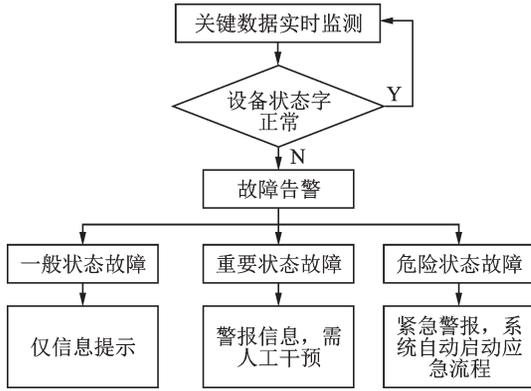


图4 无人机系统故障监测处理流程图

Fig.4 Flow chart of UAV system fault monitoring and processing

的预警提示,可判断为一般、重要和危险3个等级。一般状态的故障,给予提示信息,供指控人员知悉,密切关注即时状态,避免风险;对于重要状态的故障,给予警报信息,由人工决策进行干预以确保飞行安全,例如起落架收放异常、链路延时失真等;对于设备危险故障状态,通常会由飞控系统自动执行迫降和自毁,也可由人工启动应急流程操作,将损失尽可能降低到最小<sup>[15]</sup>。

## 2.2 无人机飞控系统智能校正控制

飞控系统校正主要是由实时比对的数据判断是否超限,通过人工操控或者智能校正的手段改变无人机的飞行控制律,依据仿真基准程序指导无人机实际飞行。

对于表征无人机运动状态值,需要在偏差超过阈值时,直接通过遥控指令操控的手段予以纠正。保证无人机能够保持按照期望信息飞行。以下提供几种手段进行人工或者智能校正无人机飞行,包括通过高度、速度和位置等的跟踪。

### 2.2.1 变高变速航线纠偏

无人机按照装订导航数据的方式进行程序控制飞行,飞行高度和速度航向等往往与期望值接近。而在实际飞行过程中,由于干扰的存在,诸多因素会导致飞行高度过高过低、空速与期望值偏差过大,且没有在期望的航线上,当偏差超过一定的阈值,认为超限。需要对无人机进行高度速度的调整和航向纠偏,使得无人机能够较好地吻合期望飞行状态。通过人工进行干预,实现无人机变高、变速和航线的纠偏。

无人机直线飞行时,理论上侧向偏差会逐渐趋于零,控制系统在横侧向没有纠偏控制信号。但是干扰的存在使无人机不能始终保持期望航路上,但是侧向偏差计算值却为近零值。因此,通过人为增加侧偏常量,无人机进行舵面偏转动作实现

航向纠偏,重新回到航线上。

$$u = f(\bar{\phi}, \bar{\phi}_r, \bar{\phi}_i) \quad (5)$$

$$\phi_p = f(D, D_r, D_i) \quad (6)$$

式(5)计算副翼舵控电压,  $\bar{\phi}$  为滚动角差量,式(6)计算期望滚动角,  $D$  为侧向偏差,  $D_r$  为积分项,  $D_i$  为微分项。人为增加  $D$  的基准量会引起控制电压的变化,控制副翼舵面偏转,实现无人机航线纠偏。

图5为通过期望信息程序飞行与通过人工遥控变高飞行的高度曲线图,图6为在同一航线下的空速曲线比对图。其中黑色曲线显示的是按照预先装订的航路信息进行飞行的数据,红色曲线显示的是通过人工遥控指令改变航迹后实现飞行高度和空速的改变。

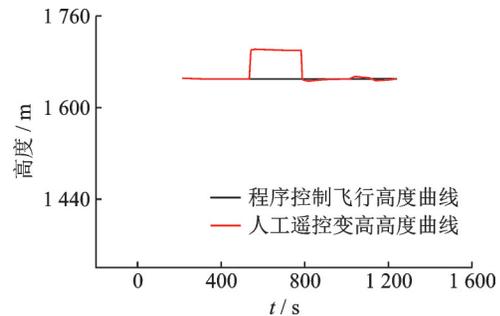


图5 人工遥控变高曲线图

Fig.5 Curves of manual remote control changing height

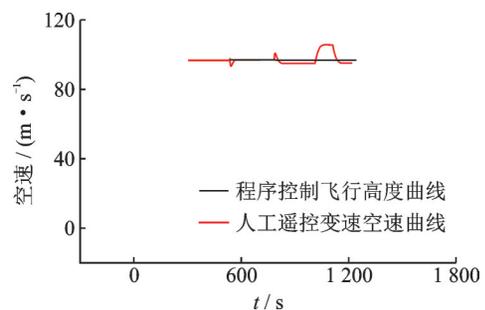


图6 人工遥控变速曲线图

Fig.6 Curves of manual remote control changing speed

### 2.2.2 主从机速度追踪

为了保证无人机能够依据仿真基准程序飞行,参照无人机双机协同的思想<sup>[16]</sup>,可以采取从机追踪主机的策略进行操作。从机追踪多于直线段执行,因为直线飞行时,飞机保持当前稳定的期望航向,期望高度,适合平飞时发动机转速控制进行速度的调整和追赶。算法简述为

$$\lambda_c = \lambda_1 + k_1 \cdot f_1(\varphi_c, \beta_1) \quad (7)$$

$$\beta_c = \beta_1 + k_2 \cdot f_2(\varphi_c) \quad (8)$$

$$D = f_3(\lambda_1, \beta_1, \lambda_c, \beta_c, \lambda, \beta) \quad (9)$$

$$V_{p1} = V_p + f_4(D, \int D \cdot dt) \quad (10)$$

式(10)用于计算追踪速度。式(7—9)中的各参数,

$\lambda_c\beta_c$  为经纬度偏差,  $\lambda_1\beta_1$  为目标经纬度,  $V_{p1}$  为追踪速度,  $V_p$  为期望飞行速度。

设定主机仿真程序运行 30 s 后, 从机运行。为了简化, 设定基本航迹为沿直线向北飞行, 两者经度不同, 分别为  $120^\circ$  和  $120.23^\circ$ 。图 7, 8 是两者纬度比对曲线图。从图 8 可以看出, 在主机运行至 696 s, 从机运行在 666 s, 从机能追踪到主机到达的纬度。

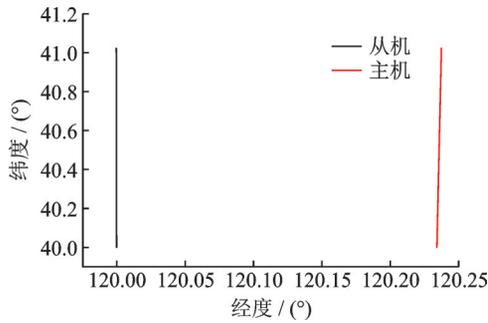


图 7 主从机飞行航迹(经纬度)曲线图

Fig.7 Flight path curves of master UAV and slave UAV

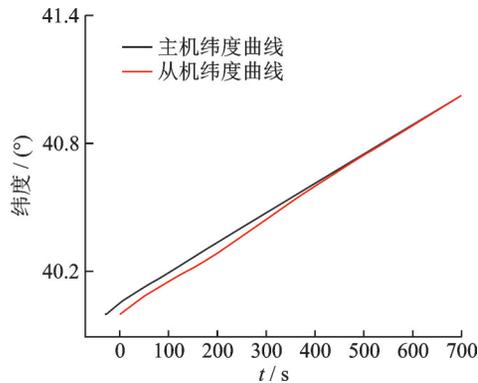


图 8 主从机纬度曲线图

Fig.8 Latitude curves of master UAV and slave UAV

从图 8 中可以看出, 本文追踪算法可以实现一定时间内, 从机按照主机的飞行速度进行调整, 完成位置的跟踪。

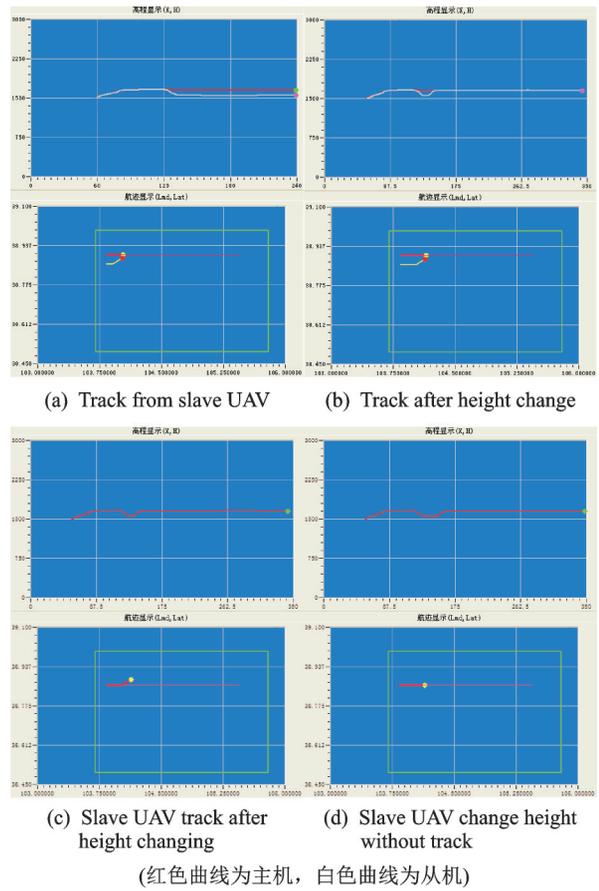
采用在线交互仿真方法需要考虑时间同步因素。主要采取如下思路:

(1) 在地面数学仿真阶段, 通过光纤、以太网等接口形式, 于仿真系统与飞控系统间传递时间戳, 作为时间推进的同步标志。

(2) 数学仿真系统采用 RTX 实时操作系统, 达到对仿真模型解算的强实时性控制。

(3) 在天地一致同步飞行的状态下, 存在数据链路的延迟, 需要将其考虑在实时仿真系统构建中。

图 9(a—d) 所示分别为从机(对主机)开始追踪、变高后追踪、进行变高再追踪、仅变高不追踪的



(红色曲线为主机, 白色曲线为从机)

图 9 双机智能校正仿真模拟实现

Fig.9 Simulation realization of intelligent correction of dual UAVs

仿真实现截图, 每个图的上半部分是时间-高度图, 下半部分为经-纬度图。

### 3 结 论

本文在当前主要针对无人机模型数学仿真系统与飞行控制管理系统在回路的仿真测试系统, 两者通过光纤接口进行连接, 实现实时通讯以在线介入飞控系统控制, 对提出的方法完成原理验证。后续考虑采用逐步增加实物在回路的不同条件, 进行相应验证。

本文研究了基于在线仿真系统的无人机飞控系统智能校正控制技术, 详细论述了无人机基于仿真系统辅助决策与智能校正控制律的关键技术。对构建智能校正系统控制律重构, 实现智能校正技术与人在回路控制方法的结合。可支撑在线仿真交互系统的无人机辅助决策指挥与智能校正系统的设计和实现, 有效地提高了无人机飞控系统在当前阶段的智能化水平。

#### 参考文献:

[1] 朱华勇, 牛轶峰, 沈林成, 等. 无人机系统自主控制技术的研究现状与发展趋势[J]. 国防科技大学学报,

- 2010,32(3): 115-120.
- ZHU Huayong, NIU Yifeng, SHEN Lincheng, et al. State of the art and trends of autonomous control of uav systems [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(3): 115-120.
- [2] 陈宗基,魏金钟,王英勋,等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011, 6: 1075-1082.
- CHEN Zongji, WEI Jinzhong, WANG Yingxun, et al. UAV autonomous control levels and system structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 6: 1075-1082.
- [3] REICHARD K M, BANKS J, EDDIE C C, et al. Intelligent self - situational awareness for increased autonomy, reduced operational risk, and improved capability: AIAA 2005 - 2692 [R]. USA: AIAA, 2005: 1-8.
- [4] WARD D G, SHARMA M, RICHARDS N D, et al. Intelligent control of unmanned air vehicles-program summary and representative results: AIAA 2003-6641[R]. USA: AIAA, 2003: 1-10.
- [5] JOHNSON T L, SUTHERLANDH A, BUSH S F, et al. The TRAC mission manager autonomous control executive[C]//Proc IEEE Aerospace Conf. [S.l.]: IEEE, 2001: 639-646.
- [6] CHENG Z Q. Dynamic inversion and model predictive control for unmanned aerial vehicles[D]. Ottawa: University of Ottawa, 2004.
- [7] 韩泉泉,席庆彪,刘慧霞,等. 基于飞行安全的无人机控制技术发展趋势研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(13): 22-25.
- HAN Quanquan, XI Qingbiao, LIU Huixia, et al. Development trends of UAVs control technology based on flight safety [J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(13): 22-25.
- [8] 黄建军. 无人机自主飞行轨迹规划与重规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- HUANG Jianjun. Research on methods of path planning and replanning for UAVs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [9] 郜晨. 多无人机自主任务规划方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- GAO Chen. Autonomous mission planning method for multiple unmanned aerial vehicles[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [10] 沈林成,牛轶峰,朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- SHEN Lincheng, NIU Yifeng, ZHU Huayong. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [11] 张卿,冉剑,侯育军. 无人机飞控系统在线交互仿真方法研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(8): 1853-1860.
- ZHANG Qing, RAN Jian, HOU Yujun. Research on online interaction simulation method of UAV flight control system [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8): 1853-1860.
- [12] 吴江,赵世钰,周锐,等. 基于面向服务的多无人机辅助决策仿真集成方法[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(12): 2525-2529.
- WU Jiang, ZHAO Shiyu, ZHOU Rui, et al. Simulation integration of decision aiding based on service-oriented for multiple UAVs [J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(12): 2525-2529.
- [13] 盛蔚,韩啸,孙丁圣. 低成本无人机空速测量偏移在线校正[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(5): 159-164.
- SHENG Wei, HAN Xiao, SUN Dingsheng. Online airspeed measurement drift calibration for low-cost UAV [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015, 35(5): 159-164.
- [14] 贾彩娟,祝小平,周洲. 无人机控制系统传感器故障诊断的方案与仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 11(22): 53-55.
- JIA Caijuan, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou. The study and simulation of sensor fault diagnosis for an UAV control system[J]. Computer Simulation, 2005, 11(22): 53-55.
- [15] YU X, LIU Z X, ZHANG Y M. Fault-tolerant formation control of multiple UAVs in the presence of actuator faults [J]. Journal of Robust and Nonlinear Control, 2016, 26(12): 3467.
- [16] 程晓明. 无人机双机协同航迹规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- CHENG Xiaoming. Research on cooperative path planning for two unmaned aerial vehicles[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

(编辑:陈璐)