

doi: 10.7690/bgzdh.2013.08.010

无人机飞行控制地面仿真

赵祯俊¹, 钟韶君¹, 李佳乐², 沈佩珺¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 浙江省地方统计调查局二产处, 杭州 310006)

摘要: 针对某型无人机飞行设计要求, 对无人机空中飞行进行模拟仿真, 并综合测试仿真状态下的控制律运行情况。根据仿真试验的目的和要求, 搭建适合无人机半实物仿真系统, 介绍半实物仿真系统的组成; 设计无人机的基本控制规律和逻辑, 在此基础上建立某型无人机的简化数学模型, 确定相关模型参数; 对飞行控制系统进行仿真, 构造某型无人机半实物仿真系统, 并对无人机全飞行控制双机进行仿真试验、分析。试验结果表明: 无人机飞行控制系统具有良好的控制效果, 满足飞行控制要求。

关键词: 无人机; 数学模型; 飞行控制系统, 半实物仿真

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Ground Simulation of UVA Flight Control

Zhao Zhenjun¹, Zhong Shaojun¹, Li Jiale², Shen Peijun¹

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Secondary Industry, Zhejiang Provincial Local Bureau of Statistics & Survey, Hangzhou 310006, China)

Abstract: For a certain type of UAV design requirements, carry out the simulation of the UAV flight, and synthetically test the operation of the control law in simulation state. Firstly, according to the purpose and requirements of the simulation, set up a suitable UAV semi-physical simulation system and introduce the composition of the simulation system. Secondly, design a UAV control law and logic, and establish a simplified mathematical model of a UAV on this basis, and determine the relevant model parameters based on simulation requirements. Finally, construct a UAV semi-physical simulation system, underway the dual-UAV flight control simulation and analyze the simulation results. The test result shows that UAV flight control system has good control to meet the flight control requirements.

Key words: UVA; mathematical model; flight control system; semi-physical simulation

0 引言

无人机是一个具有较多特性未知的复杂的被控对象, 需要进行大量的地面实验来决定样机的性能。因为在实物上试验具有很大的局限性和风险性, 所以通常需要仿真平台来对系统进行仿真试验^[1], 检测其飞行任务逻辑和功能, 在这之后才能进行整机的外场试飞试验, 做最终的控制参数整定。基于此, 笔者提出了一种无人机半实物仿真技术——双机仿真, 进行无人机全飞行控制仿真试验。

1 无人机飞控地面仿真系统

1.1 仿真目的与要求

地面仿真试验全面检验和验证飞控系统, 综合测试其性能指标。仿真试验的目的与要求主要有以下几点^[2]:

1) 通过仿真运行, 对无人机的简单动力学模型进行评价与验证, 了解其操作、耦合等重要特性, 为飞行控制系统的设计积累先验知识。

2) 在飞行控制系统控制规律设计过程中, 进行

姿态控制、高度控制和航向控制等过程的仿真试验。

3) 开展飞控计算机等实物在内的半实物仿真, 进行无人机全飞行控制的仿真试验, 以检测某型无人机系统的任务逻辑和功能。

1.2 无人机半实物仿真系统的组成

本次试验的无人机半实物仿真系统主要由飞控计算机、仿真计算机和地面测控台 3 大部分组成。半实物仿真系统结构如图 1 所示。

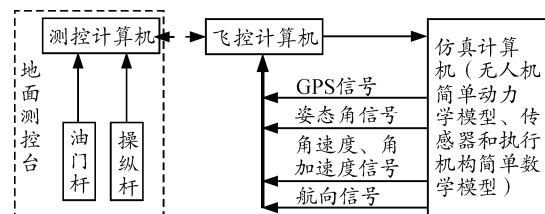


图 1 无人机半实物仿真系统结构

1) 飞控计算机。

飞控计算机是无人机的中央控制单元, 里面主要是飞行控制规律与逻辑的实现及设计。本系统选用 DSP TMS320F28335 微控制器, 能满足无人机飞

收稿日期: 2013-03-25; 修回日期: 2013-04-08

作者简介: 赵祯俊(1989—), 男, 浙江人, 硕士, 从事导航、制导与先进飞行控制技术研究。

行控制系统多方面的要求。

飞控计算机要完成的主要任务^[3]包括：① 接收来自地面测控台的地面指令信号，并同时向地面测控台返回无人机的各种状态信号；② 完成无人机纵向通道和横侧向通道的增稳控制；③ 采用数字控制算法，实现无人机三轴角位置的闭环控制，保证无人机在各种飞行条件下实现姿态与指令相一致；④ 根据导航控制给定的航迹指令，完成无人机的航迹控制。

2) 仿真计算机。

仿真计算机是仿真系统的核心部件，无人机简单动力学模型、传感器和执行机构的简单数学模型均由仿真计算机实现模拟。仿真时积分步长的选择是一个关键问题，积分步长的选择应以计算稳定为前提^[4]，需要考虑飞行控制器的控制步距、控制系统中信号的最高频率和仿真计算机的运算速度等因素。因此半实物仿真选择步长为 5 ms，可保证计算机在一个周期内完成 A/D 采样等若干计算工作量。

3) 地面测控台。

地面测控台是以测控计算机为核心，配以油门杆和操纵杆等设备构成的，是飞控系统在地面人员通过无线通讯链路电台进行信息交换，从而对无人机实施有效控制的主要系统，构成人机交互界面。

2 某型无人机的简单模型

笔者以无人机的基本控制规律为基础，建立了无人机的简化数学模型。

2.1 基本飞行控制规律

根据运动特性的初步分析及控制要求，该无人机飞行控制系统采用的基本控制规律如下。

2.1.1 俯仰与滚转姿态控制

俯仰和滚转姿态控制实际上是增稳控制和姿态控制。以俯仰控制为例，俯仰角速度 ω_z 的引入，起到增大飞机纵向短周期运动的阻尼，增加了飞机的稳定性^[5]。俯仰角的姿态控制采用比例式控制规律，直接将给定俯仰角的偏差送到舵面。

2.1.2 高度稳定与控制

在飞行高度的稳定与控制系统中需要直接测量飞行高度，使用高度差传感器，根据高度差的信息来直接控制飞机的飞行姿态，从而改变航迹倾角，以实现飞行高度的闭环稳定与控制^[5]。为了精确地控制无人机的高度，当高度差超过设定阈值后，将航向信号的偏差积分加入高度控制的控制律中，

用于消除高度静差。

2.1.3 航向控制与保持

航向控制仍然是比例控制，将当前航向和给定航向的偏差变号后引入方向舵，从而引起飞机的滚转，导致飞机的航线发生变化。为了精确地控制无人机的航向，当航向偏差超过设定阈值后，将航向信号的偏差积分加入到航向控制的控制律中，积分的引入是为了提高控制稳态精度，精确定位航向。

2.2 无人机的简化数学模型

笔者所介绍的无人机结构简单，采用各个通道的传递函数对该型无人机进行描述。

2.2.1 纵向控制通道

以升降舵偏转增量 $\Delta\delta_e$ 为控制输入，俯仰角速度增量 Δq 为输出的传递函数^[5]，即

$$\frac{\Delta q}{\Delta\delta_e} = \frac{s+a}{s^2+2\xi\omega s+\omega^2} \quad (1)$$

本次仿真，取模型数据 $a=0.8$ ， $\xi=1$ ， $\omega=5$ 。

以油门杆增量 $\Delta\delta_T$ 为控制输入，飞行速度增量 ΔV 为输出的传递函数^[5]，即

$$\frac{\Delta V}{\Delta\delta_T} = \frac{K_1}{\tau_1 s+1} \quad (2)$$

本次仿真，取模型数据 $K_1=2$ ， $\tau_1=0.8$ 。

2.2.2 高度控制通道

以升降舵偏转增量 $\Delta\delta_e$ 为控制输入，高度增量 Δh 为输出的传递函数^[5]，其中俯仰角增量和航迹倾角增量的关系为

$$\frac{\Delta\gamma}{\Delta\theta} = \frac{b}{s+b} \quad (3)$$

本次仿真，取模型数据 $a=0.8$ ， $\xi=1$ ， $\omega=5$ ， $b=1$ 。

2.2.3 横侧向控制通道

以副翼偏转增量 $\Delta\delta_a$ 为控制输入，滚转角速度增量 Δp 为输出的传递函数^[5]，即

$$\frac{\Delta p}{\Delta\delta_a} = \frac{K_2}{\tau_2 s+1} \quad (4)$$

本次仿真，取模型数据 $K_2=1$ ， $\tau_2=0.2$ 。

以方向舵偏转增量 $\Delta\delta_r$ 为控制输入，偏航角速度增量 Δr 为输出的传递函数^[5]，即

$$\frac{\Delta r}{\Delta\delta_r} = \frac{s+a}{s^2+2\xi\omega s+\omega^2} \quad (5)$$

本次仿真，取模型数据 $a=1$ ， $\xi=1$ ， $\omega=10$ 。

3 无人机飞控地面仿真试验

3.1 半实物仿真系统的构造

首先，测控计算机通过通讯链路把控制指令传送给飞控计算机，飞控计算机通过该通讯链路把飞行姿态和位置等飞行参数信息传送到测控计算机。

然后，飞控计算机把测控计算机给定的控制指令，以及从大气数据模拟器送出的飞行速度信号，按在其中设定的控制规律进行闭环反馈控制，从而进行无人机飞行控制。

最后，仿真计算机从飞控计算机得到信号指令，经过仿真计算机中的无人机简单动力学模型计算后，每 5 ms 输出控制指令，以及模拟出无人机的姿态角及姿态角速率等信号，将这些信号反馈给飞控计算机，形成完整的闭环控制回路。

这样，无人机仿真系统将真实的控制器、执行机构和传感器包括进回路，以进行半实物仿真试验。

3.2 双机仿真结果分析

由于每个航段的飞行高度不同；因此，在某型无人机的仿真过程中，需要通过姿态控制模态和高度控制模态实现^[6]。

3.2.1 俯仰姿态控制

俯仰姿态控制双机仿真结果如图 2 和图 3 所示，从图中可以看出，俯仰姿态控制具有良好的跟踪特性，能够根据地面测控系统给定的输入指令做出及时正确的响应。

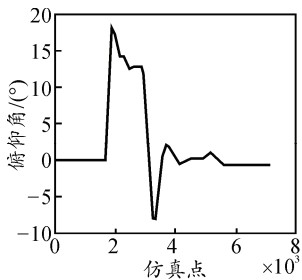


图 2 俯仰角响应曲线

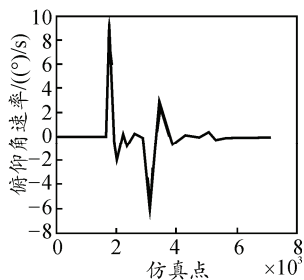


图 3 俯仰角速率响应曲线

3.2.2 滚转姿态控制

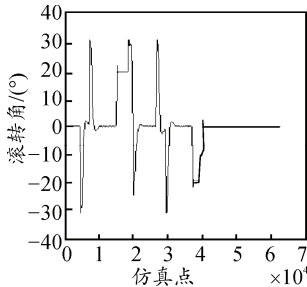


图 4 滚转角响应曲线

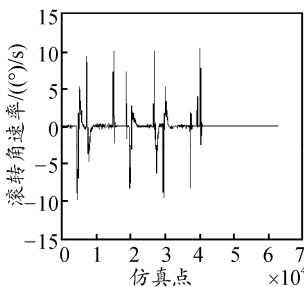


图 5 滚转角速率响应曲线

滚转姿态控制双机仿真结果如图 4 和图 5 所示，从图中可以看出，滚转姿态控制具有良好的跟踪特性，能够根据地面测控系统给定的输入指令做出及时正确的响应。

3.2.3 高度控制

高度控制双机仿真结果如图 6 和图 7 所示。通过分析可知，期望高度为 200 m，故高度响应一开始为斜坡变化，即无人机需要连续爬升，大约一段仿真时间后达到稳态。再运行一段时间后，进入平飞状态，在此过程中无人机速度先升后降，并进入平飞稳速飞行阶段，中间的高度和速度波动可能是由于模型停止导致的，但并不影响无人机的整体飞行性能分析。

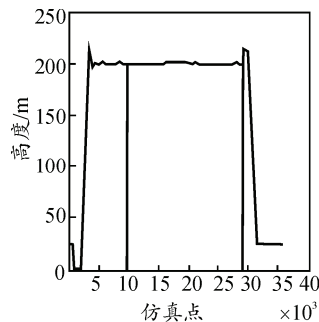


图 6 高度响应曲线

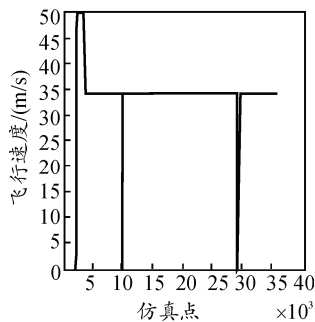


图 7 飞行速度相响应曲线

4 结束语

由双机仿真试验结果可以看出：除去系统噪声以及转台非线性环节等影响，总的来说，系统实现了对双机仿真全过程的运行和控制。由此证明：控制系统的相应特性达到了某型无人机系统的任务逻辑和功能，符合设计要求，具有良好的控制效果。

参考文献：

[1] 陈欣, 夏云程, 黄小虎. 一种全数字半物理飞行控制实时仿真系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 200-202.

[2] 陈健. 无人直升机飞行控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 1-2.

[3] 丁锐. 无人直升机飞控技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 56-58.

[4] 徐士良. C常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 167-216.

[5] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 80-96, 239-240.

[6] 胡木, 李春涛. 无人机在线航路规划技术研究及其工程实现[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(3): 14.