

1-2-2019

## Design of Ground Online Flight Simulation System

Changgui Yu

*1.AVIC CHENG DU AIRCRAFT INDUSTRIAL (GROUP) CO., LTD, Chengdu 610091, China;;*

Hongrui Xiong

*1.AVIC CHENG DU AIRCRAFT INDUSTRIAL (GROUP) CO., LTD, Chengdu 610091, China;;*

Tian Kai

*1.AVIC CHENG DU AIRCRAFT INDUSTRIAL (GROUP) CO., LTD, Chengdu 610091, China;;*

Chuntao Li

*2.Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Design of Ground Online Flight Simulation System

### Abstract

**Abstract:** Aiming at the high cost and the immovable characteristics of the airplane iron bird test-bed and the semi-physical simulation laboratory, *a highly integrated and movable system named as ground online flight is introduced*. The dynamics and kinematics of unmanned aerial vehicle, sensors model, engines model and related subsystems are established and *integrated into a device; the connections of 1553B, RS422, analog signal, discrete signal, pulse signal, PWM signal and so on are implemented*. The wind model and the typical system faults are set up to study the robustness of the UAV, and test the UAV strategy which deals with the emergency. *The system is connected to the airborne equipment*, and the simulation of ground online flight is conducted to complete the entire flight process of preparation, taking off, voyage and landing. The correctness and rationality of the aviation software are examined, which can provide the UAV flight information for the pilots to ensure the flight safety.

### Keywords

unmanned aerial vehicle, airplane iron bird test-bed, semi-physical simulation laboratory, ground online flight, aviation software

### Recommended Citation

Yu Changgui, Xiong Hongrui, Tian Kai, Li Chuntao. Design of Ground Online Flight Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 513-520.

## 地面在线飞行仿真系统设计

余长贵<sup>1</sup>, 熊洪睿<sup>1</sup>, 田凯<sup>1</sup>, 李春涛<sup>2</sup>

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 针对铁鸟试验台和半物理仿真试验室成本高, 无法移动的现状, 介绍了一套高度集成的便携式地面在线飞行仿真系统。搭建无人机运动学模型、传感器模型和相关子系统, 将其集成于一体, 实现 1553B、RS422、模拟量和 PWM 波等多信号交联。建立风干扰模型, 以及各类系统故障, 验证无人机应急处置策略。将仿真系统与真实机载设备连接, 进行地面在线飞行模拟试验, 完成无人机从起飞、航行和着陆整个飞行过程的模拟, 检验机载软件的正确性、合理性, 保证了飞行安全。

**关键词:** 无人机; 铁鸟试验台; 半物理仿真试验室; 地面在线飞行; 机载软件

中图分类号: V216.7; V217+.21 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 02-0513-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802019

## Design of Ground Online Flight Simulation System

Yu Changgui<sup>1</sup>, Xiong Hongrui<sup>1</sup>, Tian Kai<sup>1</sup>, Li Chuntao<sup>2</sup>

(1. AVIC CHENG DU AIRCRAFT INDUSTRIAL (GROUP) CO., LTD, Chengdu 610091, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the high cost and the immovable characteristics of the airplane iron bird test-bed and the semi-physical simulation laboratory, a highly integrated and movable system named as ground online flight is introduced. The dynamics and kinematics of unmanned aerial vehicle, sensors model, engines model and related subsystems are established and integrated into a device; the connections of 1553B, RS422, analog signal, discrete signal, pulse signal, PWM signal and so on are implemented. The wind model and the typical system faults are set up to study the robustness of the UAV, and test the UAV strategy which deals with the emergency. The system is connected to the airborne equipment, and the simulation of ground online flight is conducted to complete the entire flight process of preparation, taking off, voyage and landing. The correctness and rationality of the aviation software are examined, which can provide the UAV flight information for the pilots to ensure the flight safety.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; airplane iron bird test-bed; semi-physical simulation laboratory; ground online flight; aviation software

## 引言

当今世界, 随着飞行器自主化、智能化地不断提高, 无人机越来越频繁地用于战场侦察、监控和

攻击等任务, 逐渐成为战争中一种必不可少的高效航空武器。为了节省研制费用, 加快研制速度, 降低试飞风险, 需要进行必要的仿真试验, 以保证无人机飞行安全。目前, 国内外研发单位主要采用基于 RTW<sup>[1-4]</sup>和 Vxworks<sup>[2-3]</sup>结合的半物理仿真试验<sup>[5]</sup>, 验证机载软件的正确性。然而, 基于数学模型驱动的半物理仿真试验不能有效地模拟无人机航电、机电、飞控、动力系统综合交联后的物理响应, 特



收稿日期: 2016-02-17 修回日期: 2016-05-27;  
作者简介: 余长贵(1980-), 男, 四川成都, 硕士, 高工, 研究方向为飞行管理系统总体设计, 无人机试验与试飞; 熊洪睿(1989-), 男, 湖北随州, 硕士, 助工, 研究方向为飞控总体设计、飞行力学; 田凯(1983-), 男, 四川成都, 硕士, 工程师, 研究方向为飞行器控制系统总体设计。

<http://www.china-simulation.com>

别是机上出现的故障,在试验室无法出现或复现,无人机系统状态得不到全面检验;为此,一些研发单位便搭建与真实机载环境一致的铁鸟试验台,检验无人机系统状态,但搭建铁鸟试验台的费用过高,经济性不好,也不具有便携性。基于此,本文提出一套便携式地面在线飞行仿真系统,与真实机载设备连接,综合验证无人机系统的正确性和合理性。

该地面在线飞行仿真系统具有高内聚、低耦合的特点,与机载交联的信号多,能够实现实物/模拟切换功能,可以满足不同试验项目的需求,全面检验无人机的状态。同时,地面在线飞行仿真系统可以设置风场,模拟大气环境,验证无人机系统的稳定裕度;还可人为注入故障,研究无人机系统的鲁棒性,对无人机的安全试飞起到关键性作用。

## 1 地面在线飞行仿真系统原理

将地面在线飞行仿真系统接入到飞行控制与管理计算机和机载设备之间,替代各系统的传感器,模拟无人机速度、高度、航向、姿态等信息,飞行控制与管理计算机接收到模拟传感器信息

后,按照预定的控制逻辑及控制律对无人机进行控制,输出舵面偏转值和推力给定值,地面在线飞行仿真系统根据舵面偏转值和推力给定值,进行模型解算,生成传感器信息,发送给飞行控制与管理计算机,形成闭环控制回路。同时,仿真系统向航电管理计算机、机电管理计算机输出位置、油量等信息,驱动航电管理计算机、机电管理计算机,使其正常运行,达到航电系统、机电系统在环的测试目的。仿真系统组成结构图如图1所示。

## 2 地面在线飞行仿真系统设计

### 2.1 总体设计

地面在线飞行仿真系统欲在地面模拟无人机起飞、航行、着陆整个飞行过程,需要“欺骗”飞行控制与管理计算机、航电管理计算机和机电管理计算机(综合称为综管计算机),模拟飞行中必要的飞行参数和状态信息。因此,地面在线飞行仿真系统应包括无人机动力学和运动学特性模拟、动力系统特性模拟、传感器系统特性模拟、大气环境模拟以及无人机其它相关系统特性模拟。

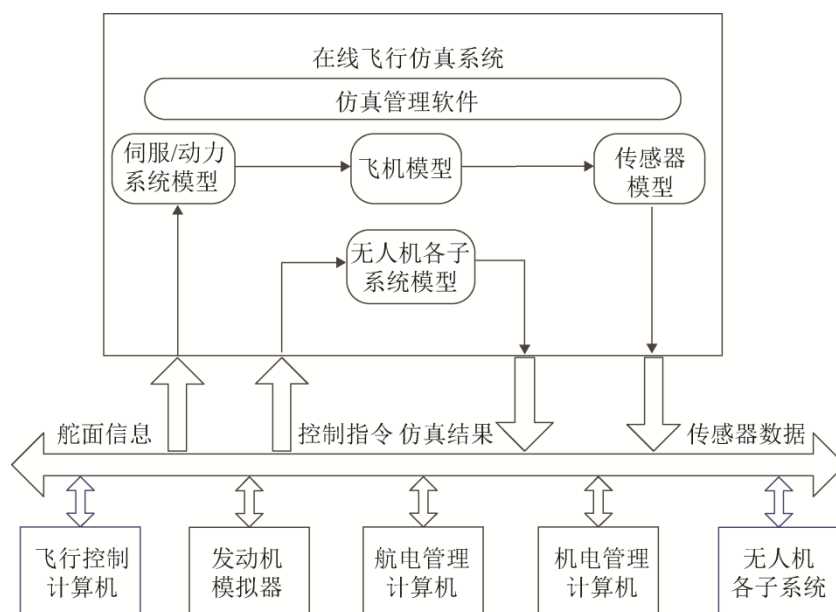


图1 仿真系统组成结构图  
Fig. 1 Simulation system composition

以某型无人机为平台, 基于 Vxworks 和 Matlab 快速原型技术<sup>[6-8]</sup>设计开发地面在线飞行仿真系统。该型无人机具有光纤捷联惯导、激光捷联惯导、速率陀螺、DGPS/BD2 系统、标准大气机、左大气机、右大气机、无线电高度表, 给飞控传输无人机位置、姿态等信息, 地面在线飞行仿真系统需要模拟这些传感器动态特性, 输出相关参数。飞行模拟中, 不能启动真实发动机, 导致燃油子系统、发电机系统不能工作, 故地面在线飞行仿真系统需要设计发动机模拟器, 接收飞行控制与管理计算机控制指令、控制参数。另外, 地面在线飞行仿真系统需要将起飞着陆子系统和液压冷气子系统的信号设计为模拟/实物可切换的模式, 便于适应试验的不同状态。

在系统性能方面, 为保证仿真结果的高置信度, 准确模拟真实的飞行状态, 以及长航时模拟飞行需求, 地面在线飞行仿真系统的动力学仿真补偿不高于 2 ms, 按照机载通信协议实时通信, 产生的延迟不高于 2 ms, 连续工作时间不低于 24 h。

### 2.2 系统接口设计

地面在线飞行仿真系统包含 1 553 B 总线信号、串行通信信号、模拟量信号、开关量信号、脉冲输入输出信号, 以相同的接口方式与机载设备相连, 模拟对应的传感器和无人机其他子系统, 达到飞控计算机、综管计算机在环测试的目的。

为解决地面在线飞行模拟试验中, 部分机载设备需模拟, 部分机载设备需实物的问题, 在仿真系统接口上做如下设计:

- 1、对于需要模拟的设备, 地面在线飞行仿真系统直接模拟;
- 2、对于需要实物的设备, 采用通过仿真系统直连机载设备的方式;
- 3、对于需要模拟/实物切换的设备, 在仿真系统内部设置开关, 可切换模拟状态和实物状态。

### 2.3 无人机本体建模

地面在线飞行仿真系统在于检验飞控软件、航

电软件和机电软件的正确性、合理性, 因而不必考虑无人机的弹性变形、颤振等因素, 建模时需作以下假设:

- 1) 假设无人机本体为刚体;
- 2) 将地球作为惯性系统看待, 忽略地球自转和公转的影响;
- 3) 忽略地球的曲率, 视地面为平面;
- 4) 重力加速度为常值, 9.8 m/s<sup>2</sup>;
- 5) 无人机具有对称的外形。

根据无人机气动数据和发动机推力数据, 利用线性插值算法, 结合刚体动力学和运动学理论, 建立无人机六自由度非线性模型<sup>[9]</sup>和动力系统模型。

由牛顿运动定律, 在机体轴系下, 无人机动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{u} = vr - wq - g \sin \theta + F_x/m \\ \dot{v} = -ur + wp + g \cos \theta \sin \phi + F_y/m \\ \dot{w} = uq - vp + g \cos \theta \cos \phi + F_z/m \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{p} = [I_{zx}N + I_zR + (I_yI_z - I_x^2 - I_{zx}^2)qr + I_{zx}(I_x - I_y + I_z)pq] / (I_xI_z) \\ \dot{q} = [(I_z - I_x)pr + I_{zx}(r^2 - p^2) + M] / I_y \\ \dot{r} = [I_xN + I_{zx}R + (I_x^2 + I_{zx}^2 - I_xI_y)pq + I_{zx}(I_y - I_z - I_x)qr] / (I_xI_z - I_{zx}^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $(u, v, w)$  表示机体坐标轴系下的速度分量,  $(\phi, \theta, \psi)$  表示机体坐标轴系下的欧拉角,  $(p, q, r)$  表示机体坐标轴系下的角速率,  $(F_x, F_y, F_z)$  表示合力在机体坐标轴系下的分量,  $(L, M, N)$  表示力矩在机体坐标轴系下的分量,  $(I_x, I_y, I_z)$  表示机体坐标轴系下的惯性矩。

无人机运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{\phi} = p + (q \sin \phi + r \cos \phi) \tan \theta \\ \dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} = (q \sin \phi + r \cos \phi) / \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u \cos \theta \cos \psi + v(\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) + w(\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \\ \dot{y}_e = u \cos \theta \sin \psi + v(\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi) + w(\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \\ \dot{h} = u \sin \theta - v \sin \phi \cos \theta - w \cos \phi \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $(x_e, y_e, h)$  表示机体坐标系下的位置。

## 2.4 大气环境仿真设计

为充分描述无人机所处的大气环境,验证无人机本身及飞行控制系统应对大气环境中各类风扰动的能力,及各类风扰动对无人机飞行品质带来的影响,需要在地面在线飞行仿真系统中模拟大气环境,针对无人机经常遇到的风场,仅选择水平常值风、阵风、风切变以及大气紊流4种大气环境模拟。

水平常值风是指在惯性坐标系下风速和风向都为常值的风场特性。在地里坐标系下,建立水平常值风模型,数学模型如下:

$$\begin{cases} V_{wx} = V_w \cos \theta \\ V_{wy} = V_w \sin \theta \\ V_{wz} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $V_w$  为设定的风速大小;  $\theta$  为风向(来风方向)相对地理坐标系正北方向的夹角;  $V_{wx}$ 、 $V_{wy}$ 、 $V_{wz}$  为风速在地理坐标系三个轴向上的分量。

阵风是指在较短时间内,风速相对规定时段的平均值出现明显的起飞,有确定性的风速变化。阵风模型有多种描述方式,包括“1-cosine”型、“三角形”、“梯形”等,其中“1-cosine”型阵风模型较为常用,其数学模型为:

$$V_w = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ V_m/2(1 - \cos(\pi x/d_m)) & 0 \leq x \leq d_m \\ V_m & x > d_m \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $d_m$  表示阵风尺度;  $x$  为无人机在阵风风场中的飞行距离;  $V_m$  为阵风最大速度。

风切变是指在大气中,风矢量在一段相对较短距离内的变化,通常表现为风速和风向在水平距离或垂直距离上的变化。根据实际情况,风在垂直方向上的变化对无人机的起飞和着陆有很大的影响,因此针对风的垂直切变进行模拟,其数学模型为:

$$u_w = W_{20} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{20}{z_0}\right)}, 3ft < h < 1000ft \quad (7)$$

式中:  $W_{20}$  为实际测得的距地面6m处的风速;  $z_0$  为常值( $z_0=0.15$  或  $z_0=2.0$ );  $h$  为无人机当前所处高度。

大气紊流的基本特征是速度场沿空间和事件分布的不规则性。本仿真系统采用 Dryden 大气紊流模型,其数学模型为:

$$\begin{cases} \Phi_u(w) = \frac{2\sigma_u^2 L_u}{\pi V} \frac{1}{1 + \left(L_u \frac{w}{V}\right)^2} \\ \Phi_v(w) = \frac{\sigma_v^2 L_v}{\pi V} \frac{1 + 3\left(L_v \frac{w}{V}\right)^2}{\left[1 + \left(L_v \frac{w}{V}\right)^2\right]^2} \\ \Phi_w(w) = \frac{\sigma_w^2 L_w}{\pi V} \frac{1 + 3\left(L_w \frac{w}{V}\right)^2}{\left[1 + \left(L_w \frac{w}{V}\right)^2\right]^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $(L_u, L_v, L_w)$  为在地面坐标系上的紊流尺度;  $(\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w)$  表示在地面坐标系上的紊流强度。

## 2.5 故障模拟

地面在线飞行仿真系统除了仿真无人机的正常飞行,还应具有故障模拟<sup>[10]</sup>的功能。模拟无人机飞行中的故障,检验飞管系统是否能够对出现的故障做出正确、合理的处置,使无人机安全返航着陆。

针对机载设备较为常见的故障类型,地面在线飞行仿真系统可模拟以下故障,包括:偏差、漂移、死区、饱和、延迟、噪声、舵效下降、舵面卡死、传感器状态类故障、链路通断和更新率故障,截获各个舵机、传感器与飞控系统之间的底层通信信息,并按各类故障类型的特性对这些信息进行处理,从而叠加了故障特性的数据代替原有数据对飞控系统进行“欺骗”,使其认为系统出现故障,触发其应急处置策略的条件,检验无人机系统的响应情况。故障模型结构图如图2。

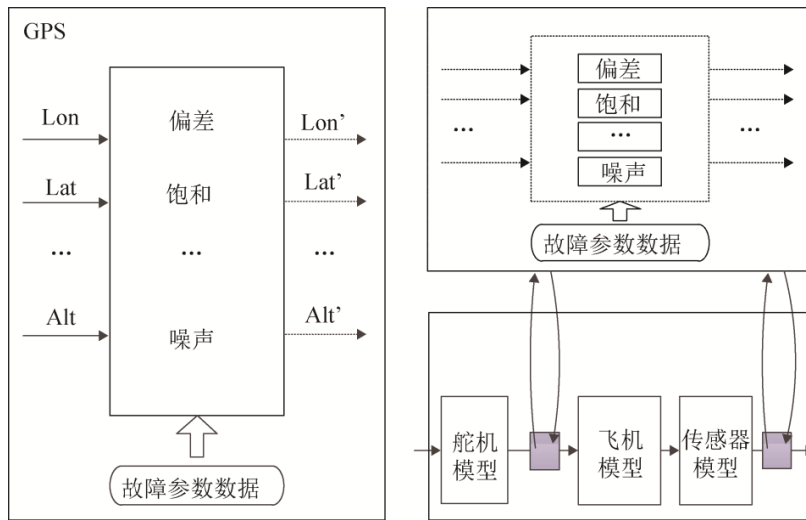


图 2 故障模型结构图  
Fig. 2 Fault model structure

### 3 地面在线飞行仿真系统验证

#### 3.1 地面在线飞行仿真系统功能验证

风扰动功能验证本文仅选取水平常值风显示。拟定无人机以  $10^\circ$  左右俯仰角平稳爬升的过程中, 先后注入风速为  $9\text{m/s}$ , 风向分别相对正北  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ, -45^\circ$  的五组水平常值风扰动, 仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知, 当常值风的风向与无人机机体轴纵轴方向相同时, 其对无人机的真空速与迎角影响较大, 对侧滑角影响较小。而当水平常值风扰动的方向与机体轴横轴方向一致时, 其主要对无人机的侧滑角影响较大。因此可以说明仿真系统的水平常值风扰动满足要求。

故障注入仿真选取主惯导传感器的滚转角信息作为对象, 在无人机处于平飞状态时, 向主惯导的滚转角分别注入以下几种故障:

- 1)  $5^\circ$  偏差; 上限为  $15^\circ$ , 下限为  $-15^\circ$  的饱和故障;
- 2) 均值为 1、均方根为 0.1 的噪声故障;
- 3) 左边界为  $2.5^\circ$ 、右边界为  $2.5^\circ$  的死区故障;
- 4) 漂移速度为  $0.1^\circ/\text{s}$  的漂移故障。

仿真结果如图 4。由仿真结果可知, 仿真系统的故障注入能够模拟偏差、饱和、噪声、死区、漂移等故障特性, 并能实现在仿真系统运行过程中动态地注入或切除各类故障特性。

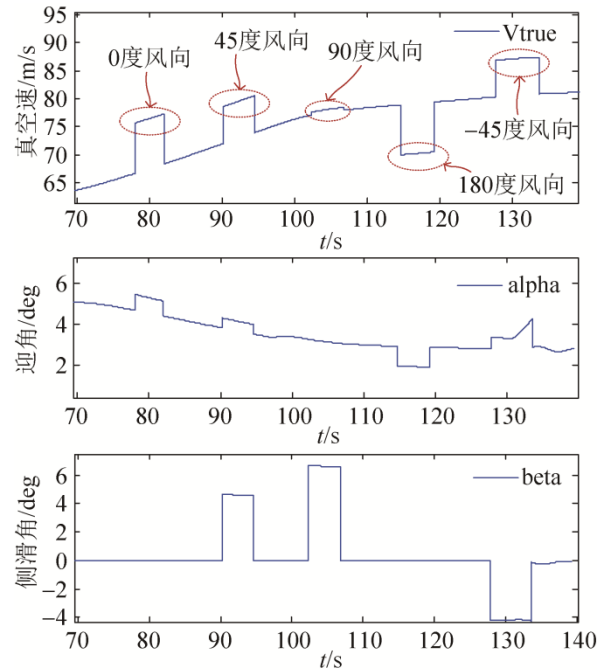


图 3 大气环境仿真  
Fig. 3 Atmospheric environment simulation

#### 3.2 地面在线仿真系统实时性验证

通过记录各个任务在各个周期内开始执行和执行完成时的系统时间戳, 可以获取仿真系统中各个任务的执行时间, 如图 5 和表 1。由测试结果可知, 仿真系统中各个任务都能在其周期时间内执行完毕。因此, 可以说明各个任务的运行都满足系统实时性要求。

### 3.3 地面在线飞行仿真

将地面在线飞行仿真系统与真实机载设备相连,进行地面在线飞行仿真,通过飞行参数记录设

备,显示了无人机可以实现完整的飞行过程,如图6,表明地面在线飞行仿真系统设计的正确性,可以仿真无人机虚拟飞行。

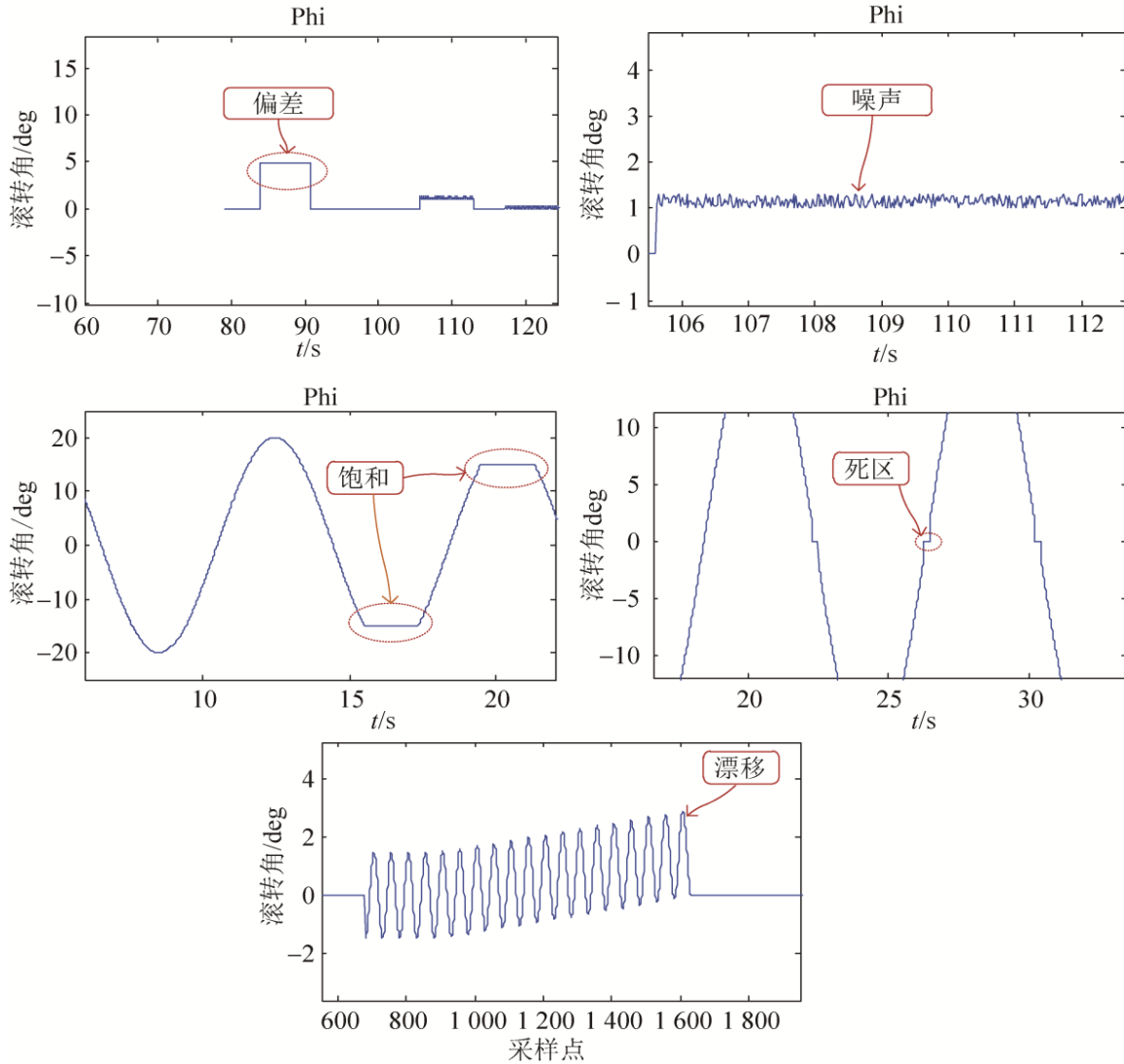
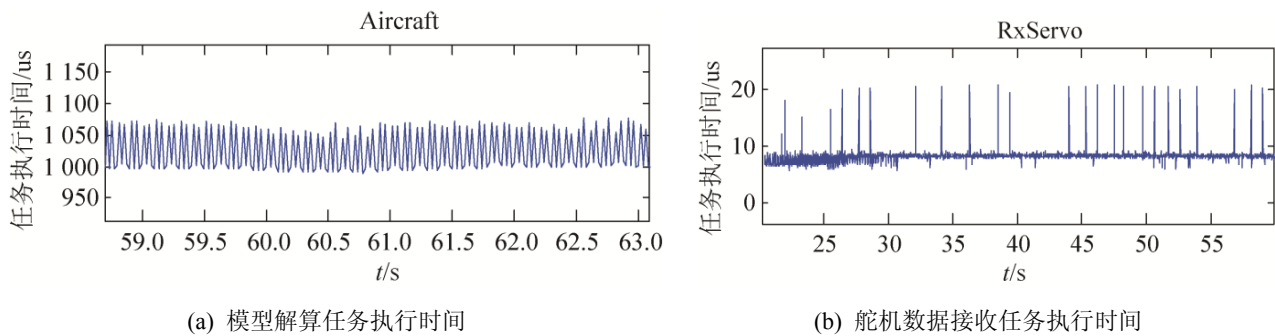


图4 故障注入仿真

Fig. 4 Fault injection simulation



(a) 模型解算任务执行时间

(b) 舵机数据接收任务执行时间

图5 仿真系统任务执行时间测试结果

Fig. 5 Test results of task execution time for simulation system



表 1 仿真系统任务执行时间统计结果  
Tab. 1 The statistics of task execution time for simulation system

任务名	最大执行时间/us	最小执行时间/us	平均执行时间/us	周期/ms	说明
Model	1 150.90	989.62	1 041.50	2	模型解算任务
TxFCC_MINS	46.63	17.34	31.700	20	主惯导数据发送任务
TxFCC_DGPS	54.78	30.48	37.600	50	DGPS 数据发送任务
TxFCC_Gyro	20.47	20.15	20.280	50	速率陀螺数据发送任务
TxFCC_AtmosL	47.77	20.66	32.810	50	左大气数据系统发送任务
RxServo	21.01	5.61	8.722 5	—	舵机数据接收任务

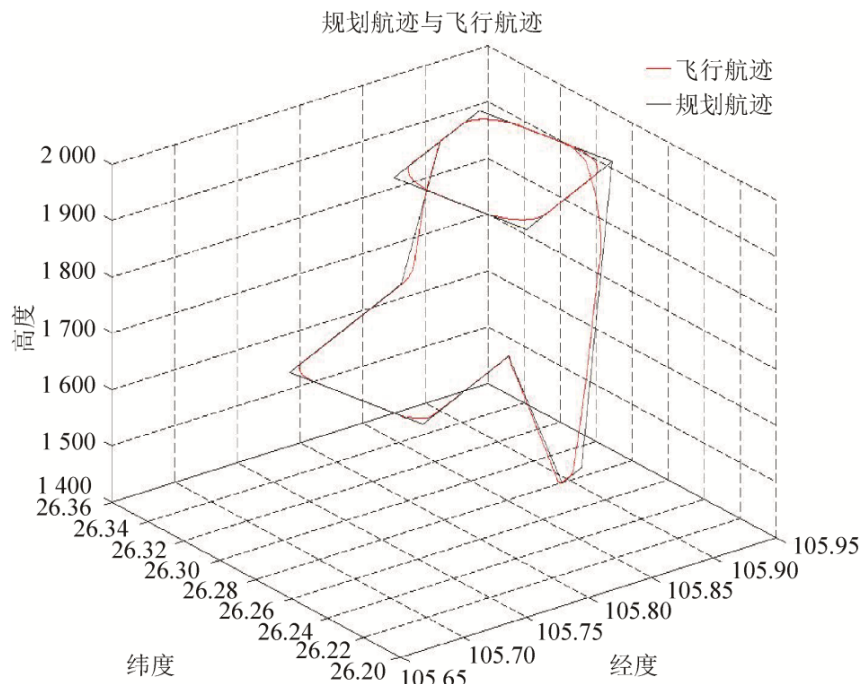


图 6 无人机航迹图  
Fig. 6 Track map of UAV

### 4 结论

通过对地面在线飞行仿真系统的测试, 可以得出以下结论:

- 1) 地面在线飞行仿真系统的风扰动功能可以正常注入, 试验结果符合实际大气环境情况; 仿真系统的故障注入有效地模拟了几类机载设备故障, 可以检验无人机的应急处置策略和鲁棒性;
- 2) 通过对地面在线飞行仿真系统的实时性进行验证, 各个任务都能在规定周期内执行完毕, 能够完成机载实时通信的模拟;
- 3) 将地面在线飞行仿真系统接入机载设备中联试, 结果表明仿真系统各项功能正常, 能够检验

无人机各系统协同工作的正确性, 实现多信号综合集成, 完成了地面模拟起飞、航行、着陆完整的飞行过程, 可以为无人机试飞提供高置信度的仿真数据参考;

- 4) 地面在线飞行仿真系统没有考虑无人机的颤振和弹性变形, 在一定程度上影响动力学和运动学特性, 有必要做进一步研究。

### 参考文献:

[1] Duan X, Dong H, Wu K, et al. UAV Flight Control Based on RTX System Simulation Platform[J]. Sensors & Transducers (S1726-5479), 2014, 166(3): 1-6.  
[2] Jung D, Ratti J, Tsiotras P. Real-time implementation and validation of a new hierarchical path planning scheme of

- UAVs via hardware-in-the-loop simulation[M]// Unmanned Aircraft Systems. Springer Netherlands, 2009: 163-181.
- [3] Wei Y, Blake M B, Madey G R. An operation-time simulation framework for UAV swarm configuration and mission planning[J]. *Procedia Computer Science* (S1877-0509), 2013, 18(1): 1949-1958.
- [4] Xiaojun D, Changgui Y, Zongchao T, et al. Modifying Parameters Online for Real-time Simulation of UAV Flight Control Sensor System Based on RTX[J]. *Sensors & Transducers* (S1726-5479), 2014, 166(3): 7-11.
- [5] 云超, 李小民, 郑宗贵. 基于 Matlab/Simulink 的硬件在回路无人机仿真系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(12): 3306-3308.
- Yun Chao, Li Xiaomin, Zheng Zonggui. UAV Simulation System Design Based on Matlab/Simulink[J]. *Computer Measurement & Control*, 2012, 20(12): 3306-3308.
- [6] 孔繁峨, 陈宗基. 基于 RTW 和 VxWorks 的飞行控制系统实时仿真[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(11): 2455-2457.
- Kong Fan-e, Chen Zongji. Real-Time Simulation of Flight Control System Based on RTW and Vxworks[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11): 2455-2457.
- [7] 徐文忠. 某型无人机实时仿真系统设计与研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 8-17.
- Xu Wenzhong. Design and Research on Real-time Simulation System for UAV[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010: 8-17.
- [8] 郭鸿昌, 陈欣, 洪春霞, 等. 基于网络的无人机实时仿真系统软件[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(B12): 38-42.
- Guo Hongchang, Chen Xin, Hong Chunxia, et al. Real-Time Simulation System Software for UAV Based on Net[J]. *Journal of University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(B12): 38-42.
- [9] 何湘智, 王荣春, 周伟. 基于 MATLAB 的无人机六自由度仿真与研究[J]. *机械工程与自动化*, 2010(4): 32-34.
- He Xiangzhi, Wang Rongchun, Zhou Wei. Simulation and Research of UAV Based on MATLAB[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2010 (4): 32-34
- [10] 花良浩. 基于 VxWorks 下的无人机故障注入与诊断实时仿真平台研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 15-22.
- Hua Lianghao. Research of UAV Fault Injection and Diagnosis Real-time Simulation Platform Based on Vxworks[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013: 15-22.
- [11] 赵祯俊, 钟韶君, 李佳乐, 等. 无人机飞行控制地面仿真[J]. *兵工自动化*, 2013, 32(8): 32-34.
- Zhao Zhenjun, Zhong Shaojun, Li Jiale, et al. Ground Simulation of UAV Flight Control[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2013, 32(8): 32-34.
- [12] 辛国柏, 卢京潮, 闫建国, 等. 一种小型无人机半物理仿真系统实现[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(6): 66-69.
- Xin Guobai, Lu Jingchao, Yan Jianguo, et al. Realization of Semi-physical Simulation System for Small UAV[J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(6): 66-69.
- [13] 齐振恒, 孙中杰, 李涛. RTW 嵌入式代码自动生成机制与代码结构分析[J]. *计算机测量与控制*, 2010, 18(3): 639-642.
- Qi Zhenheng, Sun Zhongjie, Li Tao. RTW Embedded Code Auto Generation Mechanism and Code Structure Analysis[J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(3): 639-642.
- [14] 尹超. 基于 MATLAB/RTW 和 Vxworks 的飞行模拟器实时仿真研究[J]. *软件导刊*, 2010, 9(12): 86-87.
- Yin Chao. Research on Real-Time Flight Simulator Base on MATLAB/REW and Vxworks[J]. *Software Guide*, 2010, 9(12): 86-87.
- [15] 申楠. 基于 VxWorks 的小型无人机飞行控制系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012: 11-27.
- Shen Nan. Flight Control System For Small UAVS Based On Vxworks[D]. Harbin Institute of Technology, 2012: 11-27.