

doi: 10.7690/bgzdh.2015.08.021

无人机通用实时半物理仿真系统设计与应用

包 健, 顾冬雷

(总参谋部第六十研究所, 南京 210016)

摘要: 为了满足对无人机飞控系统有效性验证的需求, 设计一种基于嵌入式 PC104 平台、QNX 实时操作系统的通用半物理仿真系统。介绍了半物理仿真系统的硬件、软件和系统处理流程, 分析了各个结构的模型设计, 并对仿真机的软、硬件进行重新设计。分析结果表明: 该系统不仅可对直升机飞控进行仿真, 也可对定翼机飞控进行仿真, 满足飞控的实时仿真需求, 并已在多款无人机型号上得到实际验证。

关键词: PC104; QNX; 无人机; 仿真系统; 飞行控制

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Design of General Real-time Semi-physical Flight Simulation System for UAV

Bao Jian, Gu Donglei

(No. 60 Research Institute of General Staff Department of PLA, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to meet the requirements of unmanned air vehicle (UAV) flight control system validation, design a kind of general semi-physical flight simulation system based on embedded PC104 platform and the QNX real-time operating system. Introduces the hardware, software and system process of semi-physical flight simulation system, analyzes the model design of each structure, and redesign the hardware and software of the simulation computer. The analysis results show that the system not only can be simulated for helicopter's flight control, can also be simulated for fixed wing's flight control, meet the requirements of real time flight control simulation, and has been validated on a variety of actual UAV models.

Keywords: PC104; QNX; UAV; simulation system; flight control

0 引言

随着无人机性能要求的不断提高及功能的日益增加, 飞行控制系统越来越复杂。飞行控制系统的好坏决定着无人机的飞行性能。为了保证飞控系统的有效性, 降低飞机的试飞风险, 需要采取相应的措施进行验证。

某型无人机半物理仿真系统是为配合飞控系统研制而开发的计算机软件平台, 主要为无人机飞行动力学模型的验证与评估、飞行控制律的设计与优化、飞行参数的动态测量、飞行过程的显示、飞行品质的评价等提供强有力的软件技术支撑。这对于

提升无人机飞控系统设计的效率、减少设计差错、缩短设计周期、降低设计成本及提高快速反应的能力, 无疑有着十分重要和积极的意义。

1 仿真系统整体结构

1.1 仿真系统硬件构成

文中所说的半物理仿真系统是指仿真机和模型机, 但其他设备包括遥控地面站、操纵手柄、遥测计算机、飞控计算机均为仿真系统的组成部分, 配合组成具有完整功能的半物理仿真系统, 图 1 表明了设备间的数据接口以及数据流向。

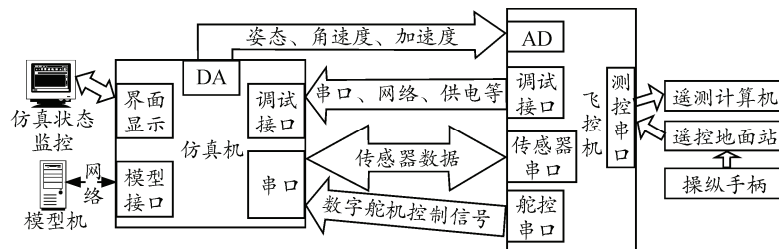


图 1 仿真系统整体结构

- 1) 模型机: 用于对仿真模型参数修改、模型调整及数据获取, 实时解算无人机的六自由度非线性模型;
- 2) 仿真机: 通过 Socket 网络通信方式接收模

收稿日期: 2015-03-28; 修回日期: 2015-05-11

作者简介: 包 健(1982—), 男, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事飞控系统设计和仿真系统测试研究。

型机的飞行状态信息，与飞控计算机交互控制量数据，计算后向模型机发出控制量，并模拟各种传感器的接口特性；

3) 遥控地面站：向飞控计算机发送内控键盘和外控手柄指令，完成无人机遥控驾驶、指令驾驶等操纵功能；

4) 遥测计算机：实时显示飞控计算机发出的遥测数据；

5) 飞控计算机：为实物和仿真对象，运行实时嵌入式飞控程序，将遥测信号传给遥测计算机显示。

此结构具有以下优点：

1) 便携性：① 硬件采用嵌入式 PC104 架构，板卡间采用堆叠式设计，特点是体积小、便于携带；② 模型接口可自主选择，当进行精度要求不高的

逻辑仿真时可选择内部基于圆盘理论的线性模型^[1]，不需外接模型机，进一步方便携带。

2) 通用性：① 仿真不同型号飞控器时只需更换接口线缆及仿真软件，通用性好；② 飞控计算机与仿真机的接口与实物接口兼容，可以方便地使用实物替换，需要时引入实物(传感器、舵机等)可以提高仿真精确度。

1.2 仿真系统软件结构

仿真系统软件由模型机软件和仿真机软件组成：仿真机软件包括和飞控端通信的传感器仿真程序，仿真机对外接口的仿真界面软件；模型机软件主要是和仿真机通信程序和驱动仿真模型运行的接口软件，系统总体结构框图参见图 2。

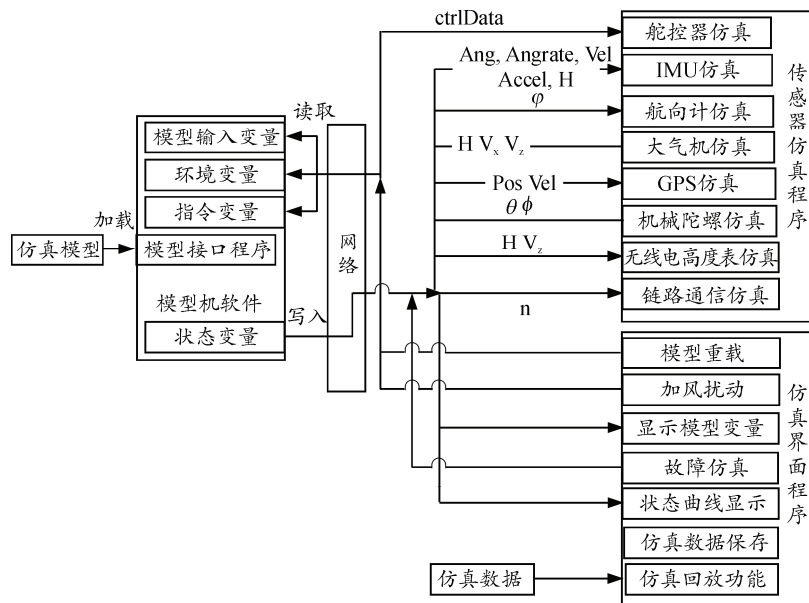


图 2 半实物仿真系统总体结构框图

1.3 仿真系统处理流程

系统处理流程为：模型解算→传感器仿真输出到飞控器→舵控器仿真输出模型形成闭环，执行机构和传感器故障仿真可以在线加到整个闭环回路，风扰动作为模型外部环境变量输入给模型，仿真结束后可以生成仿真数据以供仿真回放所用。系统处理流程如图 3 所示。

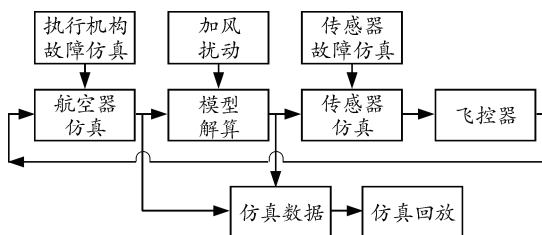


图 3 仿真系统处理流程

模型解算的实现过程为：模型定步长运行产生状态变化量，定时更新共享内存的状态量，同时读取外界给定的操纵输入量产生新的状态量。模型和环境变量的接口主要是风扰动可以作为扰动激励叠加到模型输入量。

传感器仿真的实现过程为：从网络端接收模型状态变量，针对不同传感器测量的状态量做相应的数据转换，按照不同传感器协议将状态量打包成数据报文，采用基本的设备读写方式通过数字量或者模拟量形式发送给飞控器，对飞控器发送报文指令的传感器同时接收报文指令并做解码处理。

舵控器仿真的实现过程^[2]是：读取飞控器给定的各舵机动作指令报文，解析成各舵机位移指令作为模型的操纵输入量。

传感器故障仿真的实现过程是：报文故障模拟串口通信的各种故障，在传感器仿真接口程序内置相应标志位，组帧程序按照不同类型故障标志组成不同的故障报文；功能故障模拟传感器不同类型测量误差写给各传感器仿真程序，通信进程读取相应故障内容具体实现。

仿真结束后，仿真软件按照规定格式自动保存仿真数据，作为仿真回放的数据源。对仿真回放要求能提供快进快退方式，仿真回放时能以文本框和曲线两种方式显示。

2 模型机设计

2.1 模型机功能

模型机有 3 大功能，分别为控制参数接收、模型计算和状态数据发送；控制参数接收任务是将仿真机发送来的纵横向变距、总距、尾桨距和油门变距数据写入模型^[3]操纵量数据结构；模型计算任务为启动仿真模型实时运行，模型机启动仿真模型任务的处理过程如下所述：由非线性模型首先生成仿真模型，再由模型接口进程驱动该仿真模型运行；状态数据发送任务是将模型解算得到的状态信息如三轴姿态角及角速度、三轴机体速度、高度、位置、加速度^[4]等信号量打包发送给仿真机。模型机结构框架如图 4 所示。

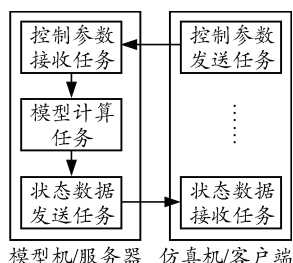


图 4 模型机结构框架

2.2 模型机通信方式

模型机与仿真机之间的通信的设计是一难点，设计中采用网络进行通信，实现手段采用 Socket 编程，采用 TCP/IP 协议、C/S 模型。模型机作为服务器，仿真机作为客户端。

Socket 实际上是网络传输层提供给应用层的编程接口。传输层则在网络层的基础上提供了进程到进程间的逻辑通道，而应用层的进程则利用传输层向另一台主机的某一进程通信。Socket 就是应用层与传输层之间的桥梁，双方通过套接字建立服务连接请求。

2.3 通用化风场扰动模型设计

直升机与定翼机在风场扰动建模时根据项目组不同需求构建不同复杂度的风场模型，且各机型扰动方式不统一，通过通用化风场扰动模型设计，统一各机型风场扰动状态和接口设计，并且具备三维空间内风场干扰量值、方向和类型(常值风、突风)的可操控性。

风干扰类型分为常值风和突风，常值风模型的输入量为风向和风速，风向为三维空间内风向(铅垂面，水平面)，通过调用通用化风模型方程实现常值风干扰仿真；突风与常值风相区别，其接入时机随机，持续时间随机，风向、风速随机，因此应用随机过程理论产生上述随机量，作为风模型的输入条件，再调用通用化风模型仿真实现突风的干扰仿真。

通用化风模型方程的建设需要对飞行运动方程进行速度矢量的干扰，即将大气稳流特性柔和到飞行运动方程中，实时参与到模型的每次迭代解算中，通过风速和风向进行速度坐标系下分解，与飞机当前速度、攻角和侧滑角等状态结合解析，形成新的速度、攻角和侧滑角，作为模型解算的更新状态，实现风模型的动态响应。建模流程如图 5 所示。

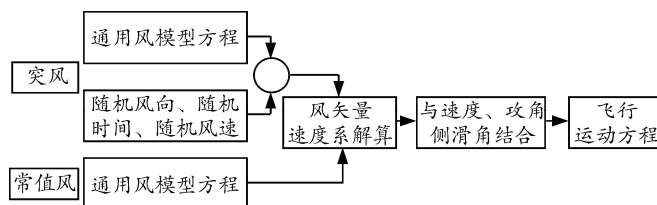


图 5 风场扰动统一化建模

2.4 舵系统动态特性模型设计

对于已有的舵系统模型，采用通用化方式集成进舵系统模型库；对于尚无舵系统模型的型号，开展扫频辨识^[5]建模工作，辨识得到舵系统模型。

对于舵系统监控软件保存的试验数据，利用 CIFER 专业辨识工具辨识出各通道舵机模型，辨识过程流程如图 6 所示。

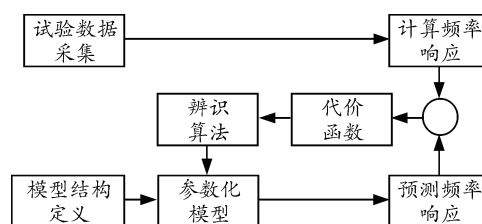


图 6 频域辨识过程流程

3 仿真机设计

3.1 仿真机硬件设计

仿真机硬件采用 PC104 架构,通过 Socket 网络编程接收模型机的飞行状态信息, CPU 模块采用 X86 处理器,通过 ISA 总线实现与多串口模块、AD/DA/DIO 模块通信,通过多串口板实现传感器、舵机和其他外设信息的交互,通过 A/D、D/A 转换模块实现模拟量信息的交互,通过 DIO 模块实现离散量信息的交互,通过电平转换模块实现飞控器 +28 V 航电与仿真机的 +5 V 供电的 I/O 口电平转换。各板卡间采用堆叠式设计,特点是体积小、可靠性高。硬件组成如图 7 所示。



图 7 仿真机硬件组成

3.2 仿真机软件设计

3.2.1 QNX 实时^[6]系统概述

仿真机软件的开发基于工业级的 QNX 实时多任务操作系统,它是一个实现了 POSIX^[7]实时规范的类 UNIX 的操作系统,微内核的结构使它可以被大幅度地裁剪,便于构成各种规模的嵌入式系统,满足复杂系统的需求。

QNX 较之常见的实时嵌入式系统,其各项性能得到了明显地提升,和 VxWorks 实时系统的性能比较^[8]如表 1 所示。可以看出:QNX 在中断响应、线程切换、信号量测试中性能均优于 VxWorks 实时操作系统,即稳定性高于后者,这表明它能够胜任于大型繁重任务。

表 1 QNX 与 VxWorks 系统性能比较 μs

测试项	QNX		VxWorks	
	平均时间	最大时间	平均时间	最大时间
中断延时	1.7	4.1	1.7	6.8
创建线程	229	280	260	299
删除线程	4.1	10.1	85	103
创建一个信号量	3.1	7.7	7.4	19.4
删除一个信号量	3.0	9.1	9.0	20.4

3.2.2 功能描述

仿真机软件负责和飞控、模型接口,主要实现了以下功能:

- 1) 舵控指令接收解算并转换成 4 个操纵量作为模型输入信息;
- 2) 传感器仿真实现——机械陀螺、IMU、大气机、GPS、航向计、无线电高度计;
- 3) 无线链路等机载设备模拟实现;

4) 与模型端网络通信,发送操纵量并接收模型状态量;

5) 运行仿真界面程序、接受用户手工输入。

在仿真机 QNX 系统上以定步长多进程的方式设计舵机接口特性模块、传感器接口特性模块、串口通信模块,并使用 QNX 系统中提供的 Photon 嵌入式图形用户开发工具开发显示界面。其中,舵机接口特性模块解析通过串口接收到的舵机位置信息;传感器接口特性模块按照相应的传感器数据格式进行编码,通过多串口板模块发送出去。软件原理结构如图 8 所示,每个单元都是一个独立的进程,进程间通过共享内存读写数据。界面显示进程通过共享内存读取飞行状态数据,主要负责模型状态量的曲线显示、各种传感器故障类型仿真、模型运行与重载控制等功能实现。

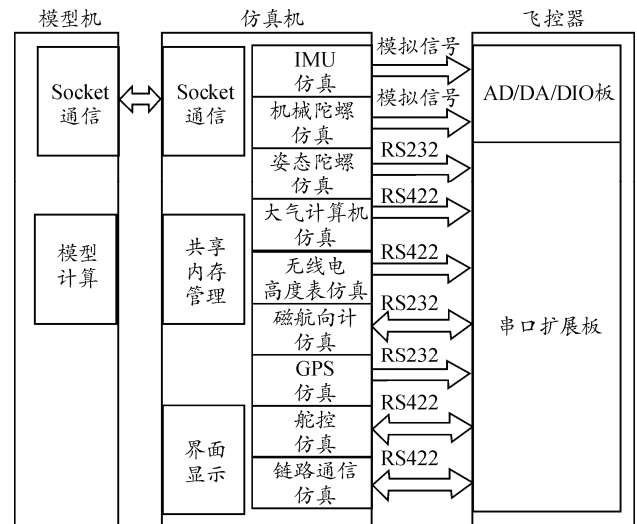


图 8 仿真机软件结构

3.2.3 传感器动态特性模型^[9]设计

仿真机软件模拟传感器特性的准确度是设计的难点。这里传感器模型以“一阶惯性+等效时延”环节表示,对于传感器时间常数 T 的确定,可以通过查阅传感器技术手册,也通过实验检测实际传感器动态特性^[10]获取。

传感器模型如下式表示:

$$G(s) = \frac{e^{-\tau s}}{as + 1} \quad (a \text{ 为时间常数}) \quad (1)$$

经过 Tustin 变换离散化为

$$G(z) = \frac{T(z+1)}{(2a+T)z - 2a+T} Z^{-\frac{\tau}{T}} \quad (T \text{ 为采样时间}) \quad (2)$$

转化成差分方程形式表示为: