

doi: 10.7690/bgzdh.2014.06.007

小型化无人机实时飞行仿真系统结构设计

刘树锋¹, 陈欣¹, 刘标²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 海军蚌埠士官学校, 安徽 蚌埠 233012)

摘要: 针对现有飞行仿真设备不能满足小型化、集成化设计要求的问题, 设计一种基于 MPC565 的小型化无人机实时飞行仿真系统。从无人机实时飞行仿真系统入手, 分析了以往仿真系统存在的不足, 从硬件系统和软件系统 2 部分分别对小型化的无人机实时飞行仿真系统结构进行研究, 设计出了基于小型化硬件系统的软件系统, 并进行实时飞行仿真, 使得某新型无人机在自主导航状态下飞行成功。仿真结果证明: 该仿真系统稳定可靠、操作简便, 很好地满足了仿真过程的实时性需求。

关键词: 无人机; 实时仿真; 结构设计; 小型化

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Real-Time Flight Simulation System Architecture Design for Miniaturization UAV

Liu Shufeng¹, Chen Xin¹, Liu Biao²

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

2. Bengbu Petty Officer School of PLA Navy, Bengbu 233012, China)

Abstract: According to the problem that the existing flight simulation devices usually can't meet the requirement of miniaturization and integration, a miniaturized real-time unmanned aerial vehicle (UAV) flight simulation system is designed which is based on MPC565. The previous real-time UAV flight simulation system is considered and some deficiencies are analyzed. The structure of the UAV flight simulation system is designed with parts of the hardware and software respectively. The software part of the simulation system is based on the miniaturization and integration requirement of hardware. The real-time flight simulation is implement and the new UAV flight successfully in the autonomous navigation status. The simulation results show that the simulation system is stable, reliable and easy to operate. It meets the requirements of real-time simulation process.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); real-time simulation; structural design; miniaturization

0 引言

由于无人机具有低成本、零伤亡、可重复使用和高机动等优点, 颇受国际军事和民用领域重视。军事上, 无人机在电子侦察、欺骗干扰、定点轰炸、空中格斗、试验靶机等作战方面应用前景广泛。民用上, 无人机在地质勘察测绘、国土资源调查、电力巡线、森林防火与林业规划等方面均有应用。随着科学技术的飞速发展, 无人机越来越向高速化、小型化、智能化、隐身化和长航时方向发展。在无人机飞行控制系统研发过程中, 实时飞行仿真实验非常重要, 具有安全可控、经济、可重复利用、无破坏性等特点, 在研发提高新一代无人机飞控系统综合性能等方面优势明显。当前实时飞行仿真设备大多系统复杂、价格昂贵、体积庞大, 扩展性差, 同时也不利于在野外和机动(车载)条件下运行。随着实验场地、实验样式的要求日趋多变, 实时飞行仿真设备的小型化、集成化要求越来越高, 在此大

背景下, 笔者把握前沿技术, 紧贴实战背景, 以无人机实时飞行仿真为切入点, 对无人机的小型化实时飞行仿真系统结构设计展开了研究。

1 实时飞行仿真技术

1.1 实时飞行仿真技术现状

小型化无人机实时飞行仿真系统较多, 发展也较成熟^[1], 各有优缺点, 具体如下:

1) 基于 DOS 操作系统设计的仿真软件, 该类软件如 RTX、CMX、RTKernel 等都采用了实时内核, 应用广泛。此类实时核通过调用 C 等基本库的部分可调用函数, 创建多任务、实现任务间通信以及分配任务优先级等一些专用功能。据此, 用户既减少了程序调度设计中大量繁杂的代码编写工作, 又省略了中断设置, 从而可以由一般编程技术实现多任务的实时应用程序。不足之处就是内核本身额外提高了一部分应用程序负荷, 代码空间使得 ROM 用量变大, 其数据结构也附带多占用内存量, 最值

收稿日期: 2014-01-05; 修回日期: 2014-02-13

作者简介: 刘树锋(1980—), 男, 安徽人, 硕士, 从事无人飞行器控制技术研究。

得一提的是对于各个任务而言, 会占据更大内存, 因为每个任务的栈空间累加较大。

2) 基于 RTLinux, VxWorks, iRMX, Windows 以及 OS/2 等嵌入式系统, 进行实时仿真软件的开发。此类系统本身特性就是实时、多任务, 所以用户的程序开发相对容易、开发周期也短, 因为该类系统编程是面向对象的, 通过操作系统按任务要求对应用程序展开调度和占先。但其实用性不高, 对用户的编程技术要求偏高, 通常需要用户精通实时多任务技术, 非常熟悉相应的操作系统。

3) 基于 RTW/Simulink/Matlab 工具展开的仿真软件研发。这是目前国内飞控研究方面较为成熟的飞行仿真系统开发技术之一。RTW (real-time workshop) 是从 Simulink 模型生成优化的, 可定制、移植的 ANSI C 代码, 它支持离散时间系统、连续时间系统和混合系统的代码生成, 还可通过生成优化的模型可执行程序代码实现快速仿真。Simulink 是 Matlab 最重要的组件之一, 它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境, 在此只需通过简单可视的鼠标操作, 而不用编写大批枯燥的程序代码即可实现多功能复杂系统。Simulink 结构及流程清晰, 仿真效率高、仿真效果精细灵活, 是 Matlab 中的一种可视化仿真工具, 它与 Matlab 紧密集成, 可以直接访问 Matlab 大量的工具来进行算法研发、仿真的分析和可视化、批处理脚本的创建、建模环境的定制以及信号参数和测试数据的定义。再者 RTW/Simulink/Matlab 工具和仿真控制台软件都基于 C 语言开发, 他们兼容性很强, 仿真效果逼真直观, 易于操作维护。

1.2 小型化实时飞行仿真系统特点

目前, 无人机实时飞行仿真系统研制越来越向小型化、集成化、便携式发展, 小型化实时飞行仿真系统除了具有一般仿真系统的共同点外, 主要还有以下特点^[2-3]:

1) 小型化、集成化、便携化。整个仿真系统硬件部分高度集成在一个小型便携盒内, 能满足各种复杂条件下的实验活动, 利于在机场和阵地环境中开展实验, 供电方式简易、功耗低。

2) 精度高、速度快、出错率低。系统能满足各种类型无人机系统的实时仿真精度要求, 具有高运行速度, 高数据吞吐能力且出错率低。

3) 外设装置丰富, 可扩充性强, 系统升级和维护方便。

4) 可移植性强、通用性好。软件系统采用模块化设计, 经过简单参数、数据调整即实用于多种类型仿真实验。

5) 性价比高。

1.3 小型化实时飞行仿真系统关键技术

小型化实时飞行仿真系统的关键技术主要有:

1) 无人机复杂模型的建模与仿真。对于小型化实时飞行仿真系统而言, 既要追求其精度和准确度, 更重要的是追求实时性, 要求仿真过程与真实无人机飞行过程在时间上是严格实时同步的。小型化实时飞行仿真系统通常由若干子系统组成, 部分子系统是实体设备 (如飞控机、传感器、执行机构等) 直接接入回路参与仿真, 部分子系统是以数学模型的形式运行于整个仿真过程, 这就要求整个系统在仿真过程中必须是绝对同步、严格实时的; 因此, 如何结合复杂飞机模型及其相关数据库进行建模与仿真, 是小型化实时飞行仿真系统开发研究工作中的核心技术之一^[4]。

2) 实时飞行仿真过程的人机界面监控、显示。设计友好的人机界面对仿真数据显示是实时仿真软件的又一主要工作, 为了体现系统在干扰过程或者模态转换中的连续动态响应, 人机界面就要对仿真数据有直观显示, 对历史数据进行连续曲线展现。随着无人机向高速化、小型化、智能化、隐身化和长航时发展, 其自主导航需求日趋增强, 对于实时飞行仿真而言, 人机界面的实时飞行航迹监控、显示既能逼真地反映出无人机对任务航线的执行偏差, 又直观地展现了仿真性能的好坏^[5]。

3) 仿真计算机与上位机 (仿真控制台) 的实时数据传输。仿真系统实验的实时性要求仿真数据通信也必须是实时的, 其对仿真信息的实时传输显示、实时仿真运行过程的监控以及仿真效果都起着决定作用^[6]。飞行仿真的实时性特点, 要求必须先选择适用的通信模块, 再确定合理的通信方式, 然后设计出实时高效的通信协议, 此三点决定着系统通信实时的成功与否。

2 实时飞行仿真系统组成结构

2.1 小型化实时飞行仿真系统典型结构

无人机的小型化实时飞行仿真系统是包含控制系统、执行机构和反馈机构等实物在内的实时系统。从系统的观点去看, 此实时仿真允许在系统中接入部分实物^[7], 其典型系统结构主要有:

图 1 代表了无人机小型化实时飞行仿真系统的第 1 种典型结构：其数字仿真部分有飞机模型、执行机构和所有传感器构成；物理部分是飞行控制计算机。

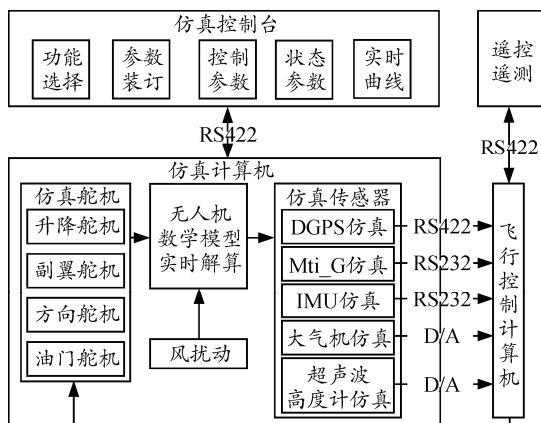


图 1 小型化实时飞行仿真系统结构 1

图 2 代表了无人机小型化实时飞行仿真系统的第 2 种典型结构：其数字仿真部分有飞机模型和所有传感器构成；物理部分是飞行控制计算机和执行机构(物理舵机)^[8]。

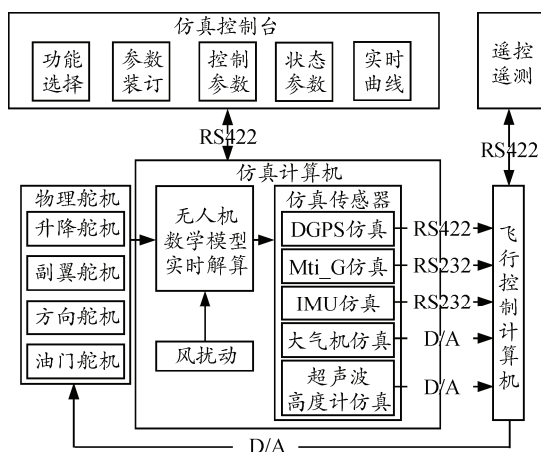


图 2 小型化实时飞行仿真系统结构 2

结构 2 和结构 1 的本质区别就是执行机构(舵机和油门电机)的参与方式不同：结构 1 中的执行机构是以数学模型的形式参与仿真，而结构 2 中的执行机构是以实物的形式直接接入回路参与仿真。前者能够在回路实验中快速验证飞控系统的品质，后者在前者的基础上验证系统受舵机和油门电机等执行机构特性(频带、滞后性以及死区等)影响的大小。在飞控系统中，伺服系统(舵回路)是主要组成部分之一，影响着整个系统带宽，通过指令产生设备输出信号控制舵机偏转，从而实现无人机的航迹运动或角运动的自动控制。在伺服系统中，执行机构就是舵机。

2.2 仿真控制台

参照图 1，仿真控制台在个人笔记本电脑上实现，是小型化仿真系统中的控制与监测系统，其功能主要体现在以下几个方面：

1) 通过串行仿真接口与“飞控机”通信，对机体参数、仿真初值等数据进行设置；标定传感器和执行机构；装订无人机在自主导航状态下的飞行航线；显示“飞控机”所连部分设备的状态信息。

2) 向“仿真计算机”发送控制信号，控制“仿真计算机”中模型解算模块、舵机模型模块、传感器仿真模块、风扰动模块等展开实时仿真运行；对实时飞行仿真过程、结果、数据进行监控、记录、存储。

3) 向“飞控机”发送遥控信息，引导、控制飞机运行，同地面站(遥控遥测)配合工作对部分遥测数据显示、存储。

2.3 仿真计算机

参照图 1，仿真计算机主要由无人机数学模型解算模块、舵机模型模块、传感器仿真模块、风扰动模块以及接口通信模块等部分组成，是一种基于 MPC565 硬件结构的嵌入式计算机，主要功能有：

1) 捕获“飞控机”传输过来的舵面和油门信号，由数学模型解算模块对无人机的运动轨迹和运动特征进行实时仿真，将仿真数据实时传输给“飞控机”。

2) 利用舵机模型模块采集舵机控制数据，对舵机进行仿真；通过传感器模型模块仿真产生 DGPS、MTi_G、IMU、大气机和超声波高度计等各传感器数据，并输出到飞行控制计算机和仿真控制台。

3) 通过接口通信模块实现“仿真计算机”和“仿真控制台”、“飞控机”之间的数据通信传输。

4) 根据“仿真控制台”送来的控制指令，对仿真过程实时控制，并将仿真数据实时反馈至“仿真控制台”^[9]。

5) 将仿真遥测数据通过“飞控机”发送给地面站(遥控遥测)。

3 基于 MPC565 的仿真计算机硬件结构

为实现仿真系统的小型化设计，同时又要满足系统仿真过程中的高数据处理能力和高实时性要求，“仿真计算机”硬件设计选定了 Motorola 32 位微控制器 MPC565。MPC565 具有强大的浮点运算处理能力并支持复杂算法，能在 $-45 \sim 125$ °C 的恶劣环境下工作，是专为航空航天、智能系统等高端嵌入式控制系统所设计的芯片。

MPC565 是 Power PC 结构体系中的一员，主要功能模块为：1) 32 位的 CPU；2) 系统接口模块，其中有总线监视器、复位控制器、中断定时器、时钟合成器以及电源管理单元等；3) 增强型中断控制器；4) 内部 Flash 和 RAM；5) 通用的 I/O 支持；6) 3 个定时器处理单元(TPU3)；7) 22 通道的 MIOS14 模块子系统；8) 2 个队列式模/数转换模块；9) 3 个 TouCAN 模块；10) 2 个队列式串行模块；11) 工作环境要求低。这些特点很好地满足了仿真设备需要处理大量数据和高实时性要求。

仿真计算机硬件设计主要是基于 MPC565 的扩展模块组成，如图 3 所示。

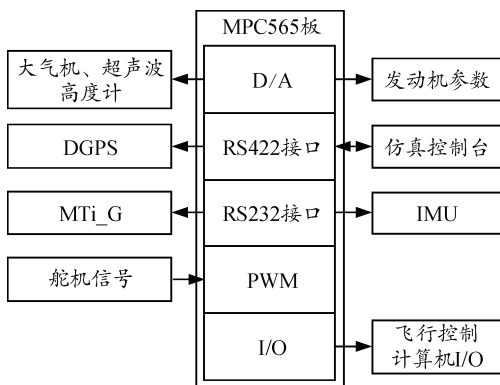


图 3 仿真计算机硬件接口

仿真计算机硬件系统通过 1 个 RS422 串口与仿真控制台通信，与用户进行交互，在仿真控制台完成键盘输入和图形处理，降低了仿真计算机工作量，确保了仿真系统高实时性。有 RS232 串口输出仿真 MTi_G、IMU 信息；通过 RS422 串口输出仿真传感器 DGPS 信息；通过 D/A 通道输出仿真大气机、超声波高度计和发动机信息等；通过 PWM 波转换通道采集飞行控制系统的执行机构(升降舵、方向舵、副翼舵和油门舵偏角)信息；离散量输出/输入通道和飞行控制计算机的离散量输入/输出通道相连。

4 实时飞行仿真系统软件

4.1 仿真计算机软件

仿真计算机软件是基于 Power PC565 运行的。为便于实时目标编程，整个系统细化为若干个模块进行设计^[10]，由初始化模块、实时多任务调度模块、无人机模型模块、传感器模型模块、舵机模型模块、风扰动模块、干扰设备模型模块、接口通信模块以及底层驱动模块等组成。各模块之间除了数据交换之外相互独立，自成体系，能分别实现各自功能，这就使得程序结构更加清晰，层次感强，也便于使用过程中的维护和升级。总体模块如图 4。

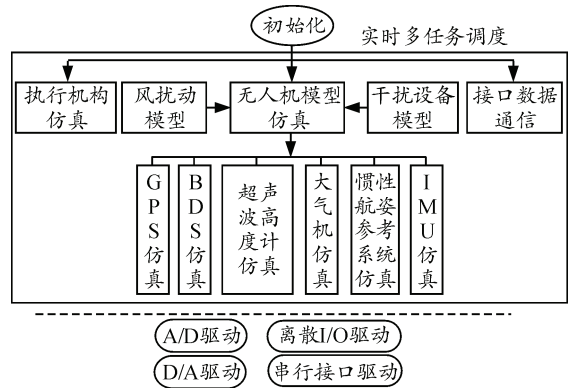


图 4 仿真计算机软件结构

1) 初始化模块：该模块在系统上电时对其初始化，初始化串口接口、仿真初值等，并在系统处于测试模式时，配置系统参数，整定系统。

2) 实时多任务调度模块：对系统任务进行时间片管理，资源调度，中断处理等。系统任务优先级：无人机模型解算高于捕获采集舵机输入，也高于传感器输出飞控机和传感器输往控制台。

3) 无人机模型模块：该模块是仿真计算机核心模块，主要用于实时模拟无人机飞行状态，同时输出相应状态数据。

4) 传感器模型模块：用来从模型模块获得各传感器数据，并输出到飞行控制计算机和仿真控制台。

5) 舵机模型模块：捕获采集舵机控制信号，对舵机进行仿真，并输出数据到飞机模型模块。

6) 风扰动模块：主要从常值风和突风 2 种状态模拟飞行仿真过程中的环境，用于对飞行控制计算机中飞行控制律的考验。

7) 干扰设备模型模块：模拟飞机上干扰设备，以验证飞控机干扰指令逻辑。

8) 接口通信模块：实现“仿真计算机”和“仿真控制台”，“仿真计算机”和“飞控机”之间的数据通信。

9) 底层驱动模块：包括 A/D 驱动单元、D/A 驱动单元、I/O 驱动单元、串行接口驱动单元等。

图 5 显示了仿真计算机软件的整个流程，系统开机上电初始化后，接收到仿真控制台送来的控制指令开始运行。按照指令对机体参数、仿真初值等数据进行设置后，系统的无人机模型解算模块开始工作，解算出飞行数据，之后结合控制台的传感器参数设置，运算出各传感器的输出数据给仿真控制台和飞控机。飞控机然后根据无人机的运行状态和控制需求，给出无人机的舵面偏转信息送至无人机模型解算模块，从而产生新的飞行数据。

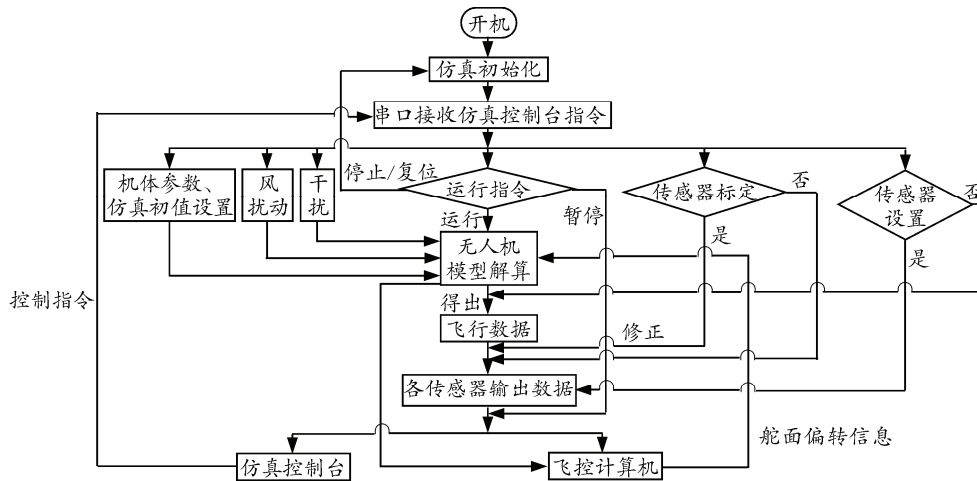


图 5 仿真计算机软件流程

4.2 仿真控制台软件

为了强调系统小型化、便携式特点，在笔记本电脑上运行仿真过程的人机界面，对飞行仿真过程进行监控、记录。经过综合考虑，笔者采用 VC++ 和 CodeWarrior 软件开发友好的控制台显示界面，完成实时飞行仿真管理及全信息传输的综合显示要求。CodeWarrior 开发软件是一个单一独立的开发环境，它提供的高度可视自动化框架，可以加速对复杂应用的开发，因此对于各种水平的开发人员来说，创建应用都是简单而便捷的。

图 6 是仿真过程的人机界面结构图，分为 3 个线程，主线程功能主要有：一是进行系统初始化，二是用来子线程的创建和终止，三是对主窗口管理，显示、存储仿真数据、历史曲线；串行接口通信子线程对“仿真控制台”和“仿真计算机”之间的数据通信进行调度、管理，对通信数据按照协议进行组帧、解帧；参数设置、初值设置和传感器标定以及仿真方式等子窗口主要有仿真参数子线程管理。

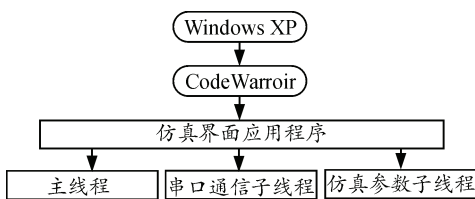


图 6 仿真控制台软件结构

该人机界面系统开发遵循了 3 方面要求：1) 确保数据传输的实时性和准确性；2) 注重实时显示内容侧重点异同，重要信息在重要位置显示，次要信息作为辅助显示，并尽可能兼顾全面性；3) 注重动态显示、静态显示相结合和数据存储功能的实现。

5 结束语

无人机仿真设备的小型化、集成化、便携式发

展已成为该领域的主要研究方向之一，笔者抓住核心技术，首先对硬件系统做了系统的小型化设计，设计出了基于 MPC565 的小型化硬件系统，并在此基础上研发出了高效、简洁、实时性强的仿真软件。整个系统遵守小型化、便携化、模块化的设计思想，它吸收仿真领域的成功经验，解决以往仿真系统存在不足，是一种性能优良、结构紧凑、组态灵活、功能齐全的新形态无人机小型化仿真系统。该系统已成功完成了某新型无人机的实时飞行仿真，对样例无人机的控制律完成验证，确保了该新型无人机在自主导航状态下的飞行成功。实验结果表明：该仿真系统稳定可靠、操作简便，满足了仿真过程的实时性需求。该款小型化仿真系统对于以后新型无人机飞行控制系统的研发、评估有着实用价值。

参考文献：

- [1] 张云生. 实时控制系统软件设计原理及应用[M]. 北京：国防工业出版社，1998：3-11.
- [2] Brian L. Stevens, Frank L. Lewis. Aircraft control and simulation[M]. New York: Wiley, 1992: 6-10.
- [3] Tam H., Liu H.H.T., Rabbath C.A. Hardware-In-The-Loop Simulation for an UAV Example[C]. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2005.
- [4] 卢惠民. 飞行仿真数学建模与实践[M]. 北京：航空工业出版社，2007：7-17.
- [5] 张明廉. 飞行控制系统[M]. 北京：航空工业出版社，1994：58-112.
- [6] Stuart Bennett. Real-Time Computer Control[M]. New York: Prentice Hall, 1988: 13-41.
- [7] 姜玉宪. 控制系统仿真[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，1998：26-59.
- [8] 陈欣, 夏云程, 董小虎. 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.
- [9] 王行仁. 飞行实时仿真系统及技术[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，1998：13-32.
- [10] 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.