

doi: 10.7690/bgzd.2014.04.006

某型自转旋翼无人机半实物仿真系统

王德爽, 李刚, 杨宁

(中国航空空气动力技术研究院第 11 总体设计部, 北京 100074)

摘要: 针对某型自转旋翼无人机飞行控制, 设计一种半实物仿真系统。介绍半实物仿真系统功能及组成、平台总体设计, 详细论述系统硬件、软件设计, 并对系统进行仿真试验。结果表明, 该半实物仿真系统能真实地模拟自转旋翼无人机飞行控制系统运行环境, 验证飞行控制系统逻辑功能及品质, 缩短此型号的自转旋翼无人机研制周期。

关键词: 自转旋翼无人机; 飞行控制; 半实物仿真系统

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Semi-Physical Simulation System of Certain Type Auto-Rotating Rotor UAV

Wang Deshuang, Li Gang, Yang Ning

(No. 11 General Design Department, China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

Abstract: Aiming at the certain type auto-rotating rotor UAV flight control, design a semi-physical simulation system. Introduce the semi-physical simulation system function, constitution, platform overall design, describe system hardware and software design, then carry out system simulation test. The results show that the semi-physical simulation system can actually simulate auto-rotating rotor UAV flight control system operation environment, verify flight control system logic function and quality, can shorten time on researching this type auto-rotating rotor UAV.

Keywords: auto-rotating rotor UAV; flight control; semi-physical simulation system

0 引言

自转旋翼无人机可跳飞短距起飞, 近似垂直降落时不需要机场, 具有安全性高、价格便宜、结构简单等诸多优点, 发展潜力大, 拥有广阔的应用前景。但对其进行飞行控制的理论研究需要借助于直升机发展所积累的技术成果, 在完善的风洞试验数据基础上精确控制模型, 需做大量数值仿真试验; 因此, 其技术潜力目前还没有被充分认识和挖掘。为减小设计周期, 降低研制成本, 在试飞之前做半实物仿真已经成为必备步骤^[1]。据美国研制无人机过程中经验统计, 运用半实物仿真技术, 试飞架次可减少 30%, 研制周期可缩短 35%^[2]。

笔者针对一种 500 kg 级自转旋翼无人机设计了半实物仿真系统, 并完成无人机半实物仿真回路的闭合、仿真过程的同步控制, 最终实现了相关功能。另外, 飞控软件和控制律的任何修改, 都可以通过半实物仿真系统快速验证, 大大缩短了设计周期。

1 半实物仿真系统总体设计方案

自转旋翼无人机飞行控制半实物仿真系统由硬件设备和应用软件 2 部分组成, 包括飞行控制计算机、仿真计算机(无人机数学模型、传感器仿真模型、执行机构模型)和地面控制站/仿真控制计算机, 系

统组成如图 1^[3]所示。

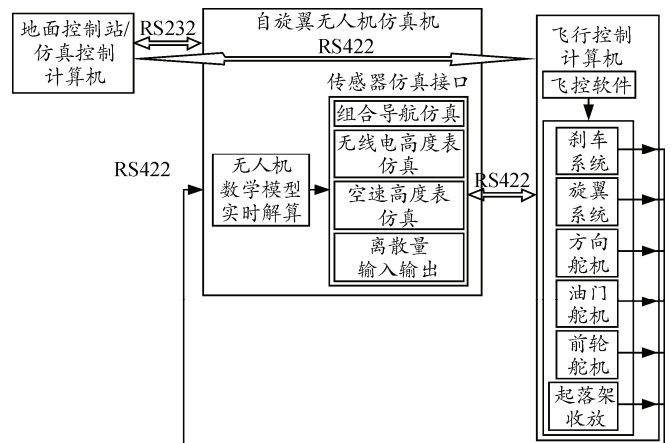


图 1 飞行控制半实物仿真系统结构

在飞行控制半实物仿真系统中, 飞控计算机为实物, 执行机构和传感器采用数学模型。将飞行控制计算机加入闭环, 当采用模拟无人机数学模型、传感器仿真模型、执行机构模型(以下简称仿真设备)对飞行控制计算机进行半实物仿真试验时, 主要功能与模块包括执行机构信号采集、数学模型解算、模拟传感器信号输出^[4]。

仿真过程中, 飞行控制计算机主要接收来自地面站的指令, 并按相应的控制律做出响应, 无人机模型实时采集这些信息进行解算, 将解算出的数据

收稿日期: 2013-11-28; 修回日期: 2013-12-29

作者简介: 王德爽(1986—), 男, 山东人, 硕士, 工程师, 从事飞行器导航制导控制、操稳特性分析、半实物仿真研究。

传输到传感器仿真模块, 飞行控制计算机根据传感器仿真模块提供的传感信息, 解算出控制参数, 使飞机按指令正确平稳地飞行, 并将飞行数据回传到地面站进行显示和存储, 构成完整的闭环飞行系统。

仿真计算机、飞控计算机、地面站通过串口进行通讯。通过 RS422 接口, 飞控软件将执行机构(舵面、油门)信息传递给无人机仿真控制台, 后者实时模型解算后将传感器仿真信息反馈给飞控计算机, 地面软件及遥控遥测软件也通过串口与飞仿真控制台及飞控软件进行通信。

飞控计算机上电后, 默认为正常模式(实际飞行控制), 接到仿真口的仿真模式命令后, 进入仿真模式。在仿真模式下, 除组合导航和雷达高度表数据通过实际接口接收数据外, 其余传感器数据通过仿真口按约定的通讯格式进行接收。

进入仿真模式时, 飞控计算机将解算出的控制量输出, 一方面通过串口打包输出给仿真计算机, 另一方面按真实飞行要求通过飞控计算机硬件输出(包括 PWM 输出、I/O 控制量输出)^[5]。

2 半实物仿真系统功能与组成

1) 飞控计算机综合测试^[6]。

仿真系统除了能够完成整个系统闭环仿真, 验证飞控软件逻辑, 功能及控制参数设置是否合理, 还能够对飞控计算机进行全面测试, 这也是仿真系统的附加功能。

半实物仿真系统对飞控计算机的测试主要在以下几个方面: ① 验证硬件各通道是否正常; ② 验证飞行控制逻辑、导航与制导方案是否合理; ③ 验证飞控软件设计是否合理; ④ 验证各种状态下控制参数效果; ⑤ 验证传感器和执行机构的接口是否正常。

2) 无人机数学模型实时解算。

仿真系统的核心功能是开展半实物实时仿真, 需要对自转旋翼无人机非线性数学模型进行实时解算。对复杂数学模型的实时解算也是仿真设备小型化设计和高集成度设计的难点所在。

无人机的数学模型是无人机对象特性分析、飞行控制系统设计、飞行仿真的基础。建模过程需要将无人机的运动抽象为六自由度刚体运动的 12 阶微分方程。用 Matlab 的 S-function 建立描述无人机的非线性数学模型, 并将建立的模型移植到实时仿真系统 RTX(real-time extension for windows) 下的仿真控制平台。

3) 传感器接口仿真。

自转旋翼无人机机载传感器包括组合导航设备、雷达高度表、磁航向仪、大气数据计算机、气压高度表和触地开关等传感器部件, 均采用 RS422 串行接口信号。

仿真设备能够对上述全部传感器进行实时接口仿真, 实时接口仿真既可用于半实物仿真试验, 又可应用于系统综合测试。对于模拟信号传感器, 为了进行实时接口仿真, 仿真设备还具有对传感器的标定功能。

3 半实物仿真系统硬件设计方案

半实物仿真系统中的主要硬件设备及功能是:

1) 飞行控制计算机: 飞行控制计算机根据传感信息, 解算出控制参数使飞机按指令正确平稳地飞行, 同时将飞行数据回传显示和存储, 并按相应的控制律对指令做出响应, 构成完整的闭环飞行系统。CPU 采用高性能的 MPC555 微处理器平台, 采用 X86Task 实时内核管理, 外扩大容量 SRAM 和 FLASH, 集成 AD 和 DA 及隔离数字输入输出, 内部有信号调理电路。

2) 地面控制站/仿真控制计算机: 完成地检和飞行监控任务, 实现数据、地图和航迹显示功能。计算机采用 PXI 标准工业控制机, 通过串口与外界通讯。

3) 仿真计算机: 仿真计算机实现自转旋翼无人机非线性数学模型实时解算及传感器接口仿真。计算机采用 PXI 标准工业控制机, 与飞控计算机、地面控制站/仿真控制计算机通过串口进行通讯。

4) 三轴飞行转台: 根据仿真计算机和飞控计算机解算出的航行姿态运动量, 转换为 3 个方向的角度和角速度, 从而形成逼真的模拟姿态变化。另外可连接显示计算机以显示飞行轨迹的三维显示, 以形象、直观的形式实时显示半实物仿真的全仿真过程。

4 半实物仿真系统软件设计方案

1) 飞控机机载软件设计。

飞控机机载软件是典型的嵌入式系统软件, 包含硬件初始化、实时内核、飞行控制软件应用程序、底层驱动程序以及外围扩展模块, 采用 X86Task 实时内核进行任务、时间管理, 各任务之间独立完成并可切换, 其软件采用 C 语言编程, 包括主程序、控制律解算线程和串口数据接收线程 3 部分, 流程

图如图 2^[7]所示。

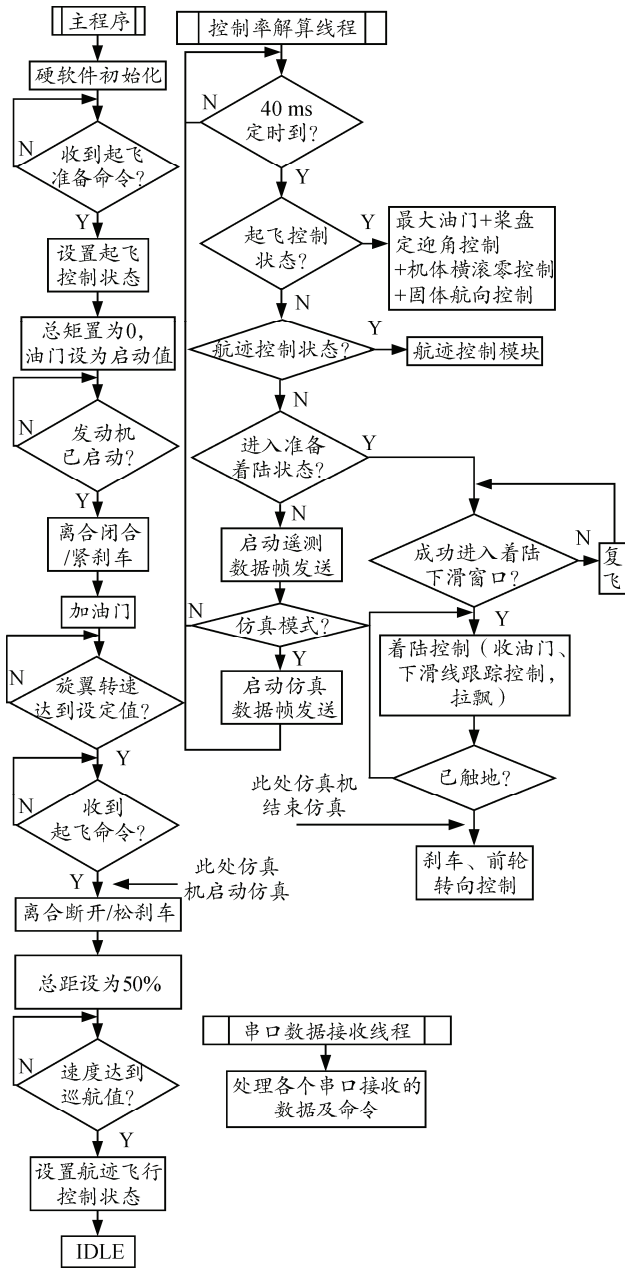


图 2 飞控机机载软件流程

2) 地面检测软件/遥控遥测软件设计。

地面检测软件/遥控遥测软件安装在地面控制站/仿真控制计算机中，在地面联试和无人机起飞前，可通过地面检测软件对无人机传感器、执行机构、控制参数、发动机等部件进行综合检测，还可以装订和回检飞行任务航路数据。遥控遥测软件可在飞机飞行时发送遥控指令控制飞行，经遥调指令更改飞行参数，实时接收遥测信息，监视飞行状态。

地面检测软件/遥控遥测软件采用 VC6.0 编译器+ Tilcon 专业界面开发工具，用标准 C 语言开发，软件界面如图 3、图 4 所示。

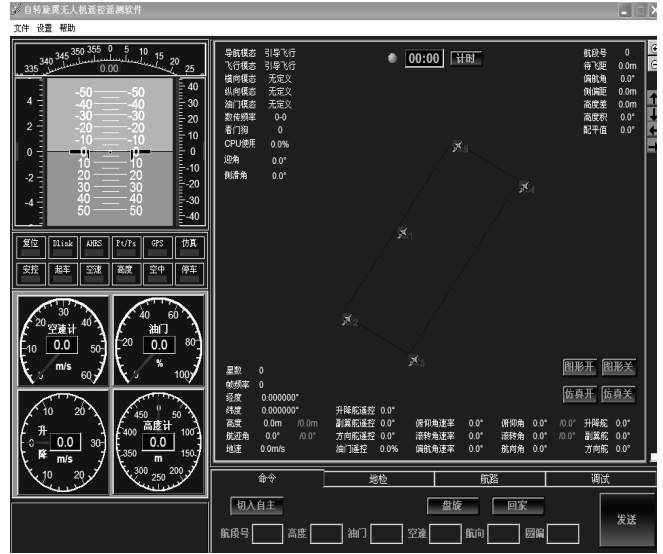


图 3 遥控遥测软件主界面

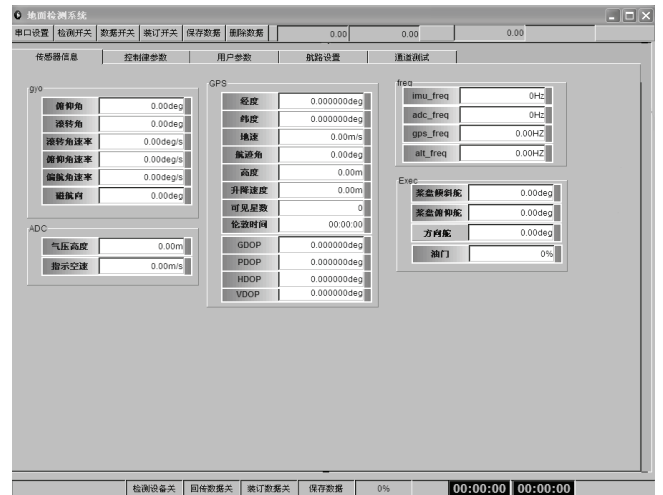


图 4 地面检测系统软件主界面

3) 仿真控制台软件设计。

仿真控制台软件运行在仿真计算机中，是开展系统测试和进行仿真试验的人机交互界面，是半实物实时仿真的核心部分，仿真系统的直观性、便捷性也都通过仿真控制台软件得以体现。

自转旋翼无人机信息量多，为了便于观察仿真数据，仿真控制台将实时飞行仿真数据分为 4 类：机体坐标系下的仿真数据(如三轴角运动)、大地坐标系下的仿真数据(如质点运动数据—位置、高度、地速等)、速度坐标系下的仿真数据(如迎角/侧滑角、空速等)、无人机本体仿真数据(如质量/惯量特性、发动机推力特性等)。通过数据的合理分类，容易观察上述繁多的仿真数据，如图 5 所示。

历史曲线显示是仿真控制台的一大特点。如果没有历史曲线显示，仅观察仿真数据的数字显示，将无法显示键状态量的动态响应过程，历史曲线显示方法则解决了这个技术问题，分别显示纵向状态

和横侧向状态,显示的都是角运动信息和舵面信息。时间长短可以自由选择,选择范围在 10~100 s 之间,纵坐标显示的数据范围也可以进行设置,以便更加细致地观察历史数据,如图 6 所示。

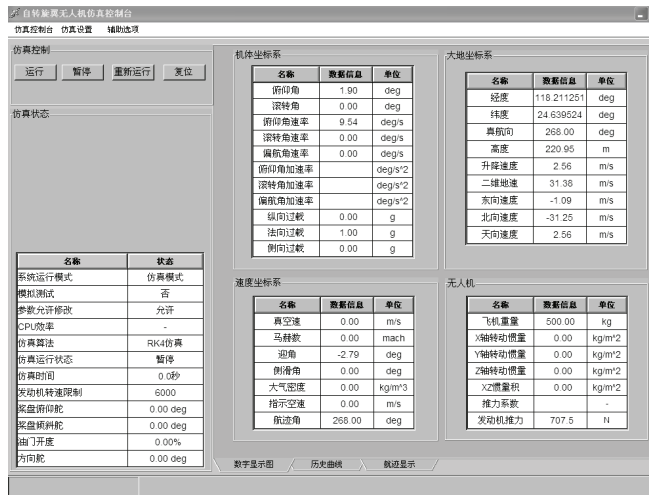


图 5 无人机仿真控制台软件主界面

航迹显示是仿真控制台的技术难点之一。有了航迹图的实时显示,自转旋翼无人机的半实物实时仿真试验就显得生动而丰富。航迹图显示了无人机的实时飞行航迹和预先设置的任务航线,将两者统一起来,就可以一目了然地了解无人机当前的飞行状态。大多数情形下,实时仿真试验过程主要以航迹图显示为主,如图 7 所示。

5 半实物仿真系统仿真结果

自转旋翼无人机飞行控制功能,包含姿态控制、高度控制、滚转控制以及航迹、航向控制等,均用半实物仿真系统进行了仿真验证,以检验飞行控制系统的性能及控制逻辑正确性、飞控计算机软硬件工作的可靠性和稳定性。仿真时设定自转旋翼机飞行初始条件,按预先装订的任务航线,不发送人工指令,加入了风和其他干扰力矩考验旋翼机的稳定性和抗干扰能力。最终,仿真结果与期待飞行曲线吻合良好,逻辑正确,达到了预期效果。由于篇幅所限,笔者仅列举了自转旋翼无人机爬升段仿真结果,如图 8~图 12^[8-9]所示。

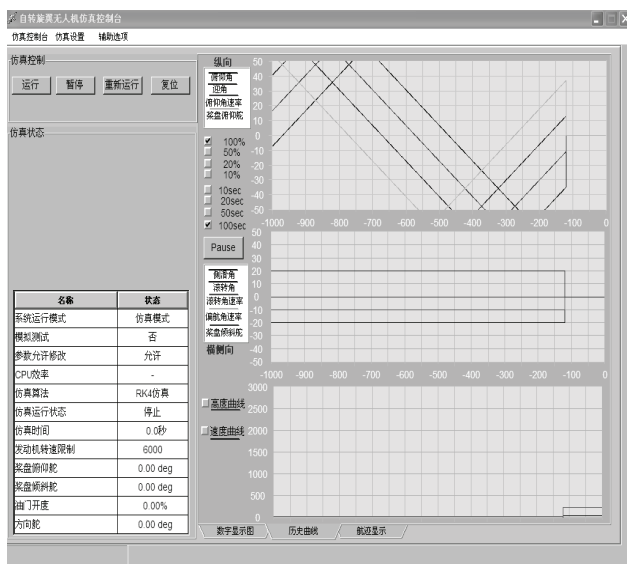


图 6 无人机仿真控制台历史曲线显示

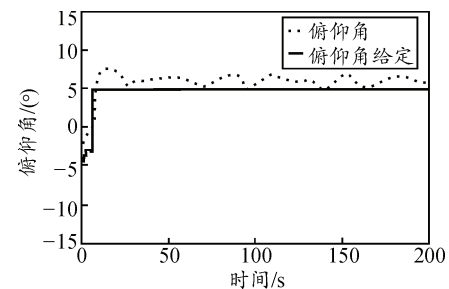


图 8 爬升段无人机俯仰角及俯仰角给定值变化曲线

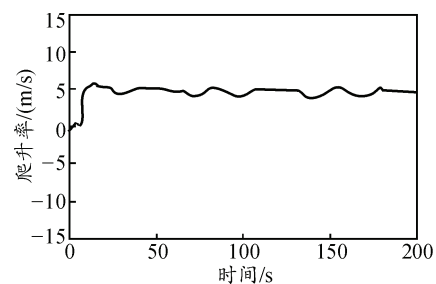


图 9 爬升段无人机爬升率变化曲线

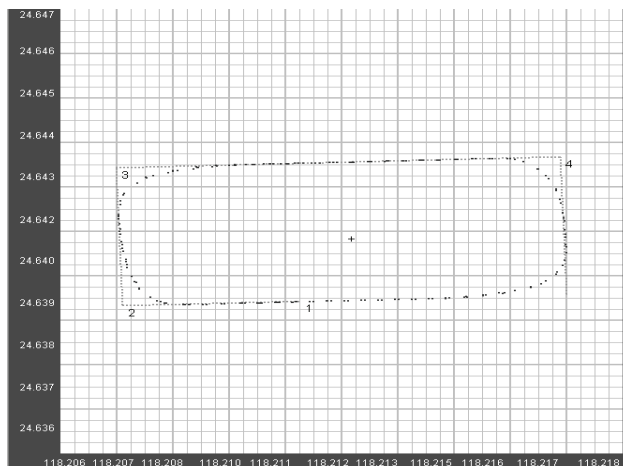


图 7 无人机仿真控制台航迹显示

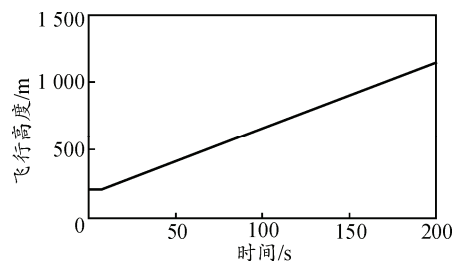


图 10 爬升段无人机飞行高度变化曲线