

滑翔弹一体化实时半实物仿真平台设计

刘继奎, 杨黔龙, 胡军照, 田传艳

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 针对滑翔弹飞行控制系统半实物仿真平台研制中的两个关键问题—仿真实时性与一体化建模, 建立了一套基于 Windows 操作系统的半实物仿真平台, 开展了在较低成本的工业控制计算机上实现高效、实时的飞控系统半实物仿真研究。文中采取了 Real Time Extension (RTX) 插件扩展系统实时性的方案, 既满足了仿真平台 1ms 精确定时的要求, 又大幅降低仿真平台的成本; 结合 Simulink 软件高效、安全的基于模型设计的解决方案, 建立了扩展实时 Windows 系统下自动生成代码与手工代码混合编程的方法, 重点解决了一体化建模方案在实时平台中的集成问题, 并进行了仿真平台实时性能测试。最后完成了发射高度为海拔 4 800 m, 初始速度为 202 m/s 以及不同误差组合条件下的滑翔弹半实物仿真试验, 整个飞行过程中侧滑角都稳定在 -3° 与 3° 之间, 满足飞控系统稳定裕度要求。

关键词: 滑翔弹; 飞控系统; 半实物仿真; 基于模型设计; 实时

Model—Based Design Research of Hardware—In—Loop Simulation of Flight Control System

Liu Jikui, Yang Qianlong, Hu Junzhao, Tian Chuanyan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69—8, Xi'an 710024, China)

Abstract: Real-time and integrative-modeling are two essential problems in the research of Hardware-In-Loop Simulation (HILS) of gliding bomb. To resolve these problems at a low cost, the paper should establish a HILS platform based on the Windows system, investigate the method of HILS of high efficiency and real time. The paper adopts Real Time Extension (RTX) software to extend the real-time property of Windows system in order to satisfy the real-time request of 1 ms; At the same time, integrates Model-Based Design (MBD) of Simulink software to establish HILS platform under the extended system. The paper combines the automatic code and handwriting code in Visual Studio platform and the real-time property is tested. At last, the gliding bomb HILS experiment is tested under the height of 4 800 m and original velocity of 202 m/s, sideslip angle is between -3° and 3° deg within the whole flight which satisfying the request of stabilization.

Keywords: gliding bomb; flight control system; hardware-in-loop simulation; model-based design; real-time

0 引言

飞行控制系统是整个滑翔弹系统的核心, 随着现代战争对飞行控制武器系统性能要求的不断提高, 滑翔弹飞行控制系统的设计也越来越复杂, 飞行控制系统的设计、验证以及性能优化越来越多地依赖于系统仿真手段, 尤其是半实物仿真^[1]。目前专门的半实物仿真操作系统虽可以满足半实物仿真实时性要求, 但是存在价格昂贵, 通用性不好, 建模不方便等问题。本文给出了一种解决方案, 利用实时扩展插件 RTX 解决 Windows 系统实时性不强的问题, 结合 Simulink 软件高效、安全的基于模型设计的解决方案, 建立了扩展实时 Windows 系统下自动生成代码与手工代码混合编程的方法, 实现了一体化建模方案在实时平台中的集成。

1 半实物仿真平台总体方案设计

根据飞行控制系统半实物仿真试验原理及飞行控制系统结构^[2], 确定该试验平台硬件组成如下:

1) 参试实物: 弹载计算机、惯导、舵机;

2) 仿真设备: 仿真计算机、飞行模拟转台及转台控制系统;

3) 支持服务系统: 数据记录、显示计算机及数据处理应用软件;

4) 各种接口设备: RS422 串口板卡、PCI-GPIB 板卡、DSP 仿真连接器、参试实物设备接口等。

半实物仿真试验平台硬件连接关系和数据交互关系如图 1 所示。仿真计算机模拟载机发出“发射”仿真同步信号的同时开始弹体方程解算, 弹载计算机收到该同步信号后开始控制率解算, 仿真计时开始。仿真计算机实时解算弹体的运动学和动力学模型, 并将解算出的姿态信息通过 GPIB 板卡发送给飞行模拟转台, 线加速度信息通过串口发送给惯导; 惯导安装在飞行模拟转台上, 实时敏感转台姿态变化并按照 5 ms/帧的速率发送组合导航数据给弹载计算机, 弹载计算机根据组合导航数据进行控制率解算并以 10 ms/帧的速率向舵机发送舵角控制电压, 舵机组件输出 4 个舵角信息 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 经过弹载计算机 A/D 采样后发送给仿真计算机, 仿真计算机开始下一个周期的弹体运动学和动力学解算, 从而构成一个闭环的半实物仿真系统, 当飞行弹道满足预置的判断条件时, 该条弹道半实物仿真结束。

1.1 半实物仿真软件架构

半实物仿真软件承担着仿真进程控制、时序控制、弹体运

收稿日期:2014-04-15; 修回日期:2014-05-17。

作者简介:刘继奎(1986-),男,吉林公主岭人,硕士研究生,主要从事飞行控制系统仿真方向的研究。

境下的 Visual Studio, 代码执行时间不包括接口耗时。从图中可以看出, 自动生成的代码单步耗时在 0.05 ms 左右, 对于采样周期为 1 ms 的半实物仿真试验来说, 完全能够满足单步解算实时性要求。

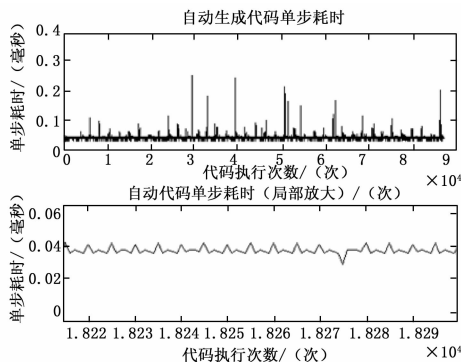


图 3 自动生成代码单步执行时间测试

4 半实物仿真系统实时性研究

要使用 Windows 系统进行半实物仿真试验必须解决定时精度不高、线程调度以及中断响应不确定等问题。美国的 IntervalZero 公司的 RTX 软件作为 Windows 系统的实时软件插件, 能够提供单独集成系统和实时系统的解决方案。半实物仿真软件的实时进程运行在 RTSS 子系统下, 实时的内容主要体现在仿真模型代码的实时解算和 I/O 接口的实时数据传输两方面^[8]。

Windows 系统的非实时特性导致在该系统下厂商提供的原有驱动程序实时性得不到保障, 进而导致仿真计算机无法与捷联惯导、弹载计算机等外部设备实时通讯, 整个半实物仿真试验的实时性遭到破坏, 仿真的可靠性大打折扣, 所以必须重新开发在 RTX 环境下的实时驱动程序。

仿真计算机与设备实时通讯涉及到的接口主要有两类: PCI-GPIB 接口和 RS422 串口, 我们将自动生成的算法代码与重新开发的实时驱动程序整合到 Visual Studio 平台中并进行测试, 测试环境为经过 RTX 扩展后的实时系统, 仿真算法 1 ms 解算一次, 串口数据 5 ms 传输一次, 测试结果如图 4 所示。从图中可以看出, 仿真算法加上实时串口的总执行时间基本上在 0.05 ~ 0.15ms 之间, 比图 3 中单纯算法执行时间稍长, 这主要是由实时串口传输时间叠加引起的, 但总的执行时间远远小于 1 ms, 并且执行时间的均匀性明显好转, 也验证了经过 RTX 扩展后的 Windows 系统实时性。

5 滑翔弹半实物仿真试验考核

利用建立的半实物仿真系统对滑翔弹制导控制系统进行仿真试验, 以检验制导控制系统的性能及控制率的正确性。当发射高度为海拔 4 800 m, 初始速度为 202 m/s, 发射方向为北偏东 17°, 初始滚转角速度为 30°/s, 滚转干扰 0.5°, 偏航和俯仰是 1°舵干扰情况下的仿真结果见图 5~7。

图 5~7 表明: 滑翔弹的攻角经过短暂减小后开始增大, 之后稳定在 2 度; 弹道则表现为前 20 s 下降, 之后进入平飞阶段; 当飞行高度达到 3 000 m 时, 滑翔弹转入俯冲阶段, 攻

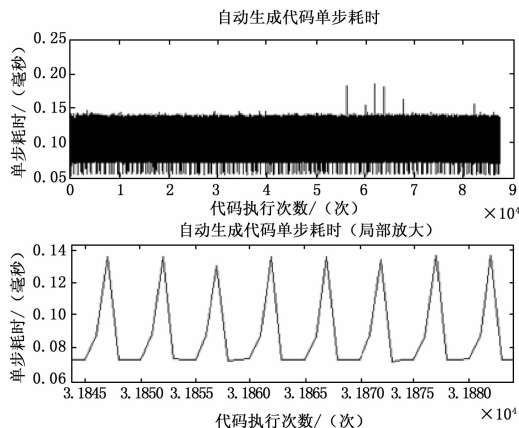


图 4 生成代码及数据传输单步执行时间测试

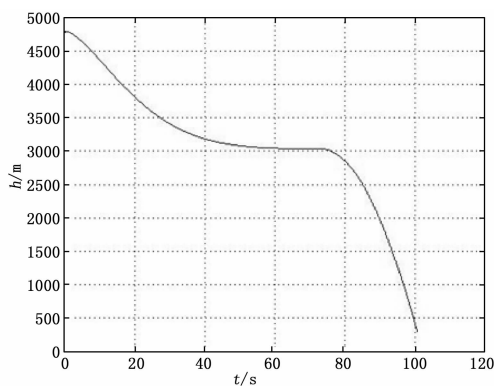


图 5 滑翔弹弹道曲线

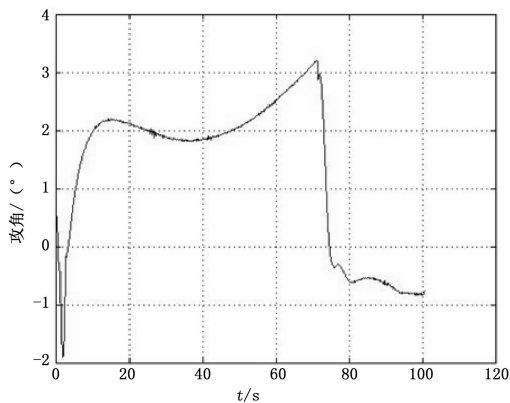


图 6 滑翔弹攻角曲线

角减小, 对目标进行攻击。在整个飞行过程中侧滑角都稳定在 $D-3^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 之间, 满足系统稳定裕度要求。

6 结论

本文成功将基于 Simulink 模型设计的方法应用在滑翔弹半实物仿真试验中, 实现了半实物仿真平台的低成本、小型化、易扩展及高可靠性; 由于实时平台涉及到的软件工具较多, 各个软件工具链之间的整合与集成应用比较困难, 采用的基于 Simulink 模型设计的方法无需进行代码实时性改造, 直接将模型转化成的代码以完整的封装形式集成到 Visual

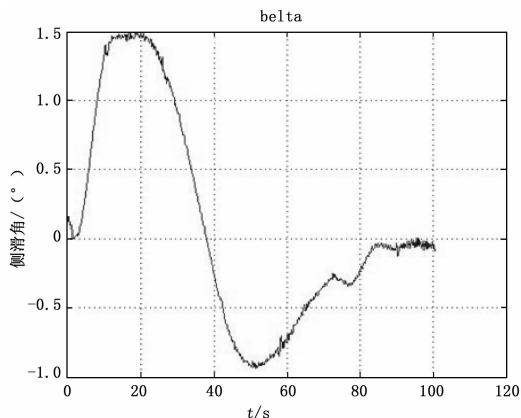


图 7 滑翔弹侧滑角曲线

Studio 环境中, 实现了模型到代码、再到 RTX 实时平台的无缝连接。该方法可以应用于导弹以及无人机等飞行控制系统开发, 也可以应用于汽车、舰船控制系统研制, 有效降低系统开发的成本, 提高系统开发效率以及可靠性。

参考文献:

- [1] 雷虎民. 导弹制导与控制原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 单家元, 孟秀云, 丁 艳. 半实物仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] 李晓晖, 严卫生, 范 欣. 基于 RTX 的水下航行器实时仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (4): 850-853.
- [4] BacicM. On hardware-in-the-loop simulation [A]. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005 Seville [C]. Spain, 2005: 12-15.
- [5] 刘 杰. 基于模型的设计及其嵌入式实现 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [6] CamusJL, DionB. Efficient Development of Airborne Software with SCADE Suite [M]. Esterel Technologies, 2003.
- [7] 刘 杰, 翁公羽, 周宇博. 基于模型的设计: MCU 篇 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [8] 马继峰. 基于 RTX 的导弹半实物仿真系统接口技术研究 [J]. 航天控制, 2010, (2): 56-62.

(上接第 2982 页)

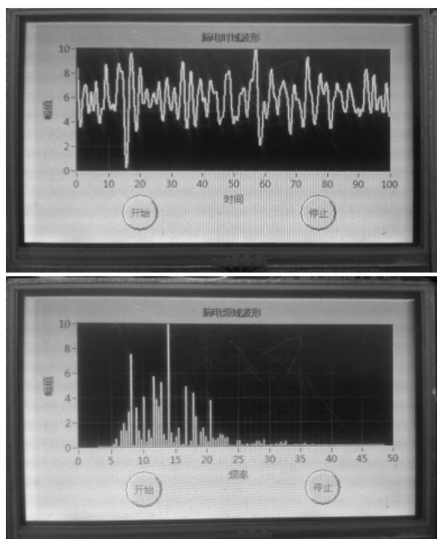


图 5 LCD 实时显示预处理 (时域) 和特征提取 (频域) 信号

以数组的形式实时发送给后端的 STM32 处理器, 收到数据后实时转存入显示数组, 由显示函数实时显示在用 GUI 做的横坐标分别代表时间 (s) 和频率 (Hz), 纵坐标代表幅值的界面里, 准确的显示收到的脑电数据属于哪个特征频率下的脑电信号。操作界面实现了简单的人机交互, 手动按下开始和停止按钮可以控制设备是否将收到的数据显示在坐标轴上^[7-8]。如下图 5 是 14 Hz 信号经过预处理和特征提取后在 LCD 上的信号显示。

5 结语

经过实验的结果分析, 5 名受试者均实现了从刺激器刺激出脑电信号, 采集后传入 DSP 中, 经过预处理和特征提取后实时显示在 LCD 屏幕上。无线传输数据稳定, 证明了本系统的实用性和可靠性, 完成了设计的初衷。本系统实现了便携式的处理显示平台, 与当前的产品相比成本低, 有较好的可移植性, 便于移植到其他集成的处理器上, 如 OMAP 系列双核处理器等。为进一步开发便携的脑电产品提供了技术基础, 具有很好的适用性和前景。

参考文献:

- [1] 丁 超. 便携式脑电采集系统设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [2] 张 锋, 徐光华. 稳态视觉诱发电位的研究与展望 [J]. 仪器仪表学报, 2010, (8): 156-165.
- [3] 王 永, 何庆华, 田逢春, 等. 基于 FPGA 的脑机接口实时系统 [J]. 电子技术应用, 2009, 35 (4): 133-136.
- [4] 陶炳坤, 陈鹏宇. FIR 数字滤波器的 MATLAB 仿真和 DSP 的实现 [J]. 电子设计工程, 2013, 21 (9): 177-179.
- [5] 史明泉. 基于 DSP 的 FIR 滤波器的 C 语言算法实现 [J]. 无线工程, 2011, 41 (1): 13-21.
- [6] 罗熹之, 张 勇. 扫频式 FFT 频谱分析仪数字中频全软化设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (9): 1259-1264.
- [7] 张 磊, 江海河. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的嵌入式 GUI 研究与应用 [J]. 微计算机信息, 2008, 24 (17): 50-52.
- [8] 刘 苍, 王建业. 基于 ARM 的便携式数据采集存储系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2013, (8): 89-92.