文章编号: 2095-4980(2015)06-0903-05

某无人机飞控系统地面半实物仿真平台设计

鲍泳林

(中国工程物理研究院 总体工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要: 无人机(UAV)飞控系统地面半实物仿真平台用于对无人机飞控系统进行相关地面测试。针对某无人机飞行控制系统,提出了一种基于 MATLAB 实时工作空间和 VxWorks 实时操作系统的地面半实物仿真平台方案。针对无人机小扰动数学模型,构建了地面站上位机、控制器和模型机组成的实时系统闭环回路,对硬件及软件配置进行了说明,并设计了相关控制算法。该试验台可实时监测无人机系统状态,并可实时对模型注入扰动,实现系统在线调参。该半物理仿真平台结构简洁,功能明确,为相关控制律提供了便捷的研究设计手段。

关键词: 飞控系统; 实时工作空间; VxWorks 实时操作系统; 半物理仿真
 中图分类号: TN911.7
 文献标识码: A
 doi: 10.11805/TKYDA201506.0903

Design of a ground HIL simulation test platform for flight control system of UAV

BAO Yonglin

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A ground Hardware-in-Loop(HIL) simulation test platform is used to perform ground tests for flight control system of Unmanned Aerial Vehicle(UAV). For the purpose of such tests, a ground HIL simulation platform based on MATLAB Real-time Workspace(RTW) and real-time operating system VxWorks is designed. The mathematic model of the UAV is built, and the closed loop of the real-time system including a master computer, a control computer and a model computer is constructed. Hardware and software configuration, and also flight control laws are discussed. This platform enables the observation of system states in UAV flight process, the injection of disturbance, and online adjusting of parameters. This platform is simple but very functional, and it provides a valid way to test control laws of UAV.

Key words: flight control system; Real-time Workspace; VxWorks; Hardware-in-Loop simulation

无人机地面半实物仿真实验台是在无人机研发阶段提供综合测试功能的地面仿真系统。利用半物理仿真平台 对相关系统进行地面仿真实验,可以获得丰富的实验数据,这些数据可以作为评定的依据,使得设计周期缩短, 并且节省经费^[1]。飞行控制系统是无人机飞行保障的关键系统。它以飞行器为控制对象,对机载传感器进行高度、 空速、飞行姿态以及加速度信号的采集,用于飞控计算机内的控制律解算,解算出的控制信号驱动舵机系统,进 而控制无人机机体各个舵面的偏转从而实现无人机的飞行控制,保证无人机能够顺利起飞、安全飞行并有效地完 成各项任务。在舵机和转台等实物部件进入回路之前,先行搭建了简化的半实物仿真平台。该平台不包含无人机 系统实物部件,而是以多台计算机分别模拟系统的输入环节、控制环节和被控对象。这种以仿真计算机实现系统 模型和以航天器计算机或控制系统电子线路为实物的闭路试验,也可认为是半物理仿真。这种仿真重点在于检验 控制系统方案的正确性和可行性,或研究控制方式中的某些功能和参数,或对各研制阶段的控制系统进行闭路动 态验收试验。该无人机地面半物理仿真平台的主要用途,就是在无人机研发的地面测试阶段,提供一个能够实时 反映实时状态的环境,以验证无人机各项特性,同时为飞控系统提供控制律程序验证平台。

1 系统总体结构

完整的无人机飞控系统半实物仿真实验台总体结构见图 1。仿真平台主要由地面站上位机、飞行控制器、舵

ground

remote

control

command

机、无人机仿真模型、转台系统和大气数据模拟 系统等组成^[2]。地面站发送指令至飞控系统,飞 控系统接收数据进行控制律解算并驱动舵机, 舵机输出信号经 A/D 采集后作为无人机模型输 入信号,由模型实时模拟飞机的响应过程并将 解算出的角度、速度、高度等姿态量发送到转 台计算机和大气机,由转台带动航姿传感器运 动,将实际的飞机姿态量反馈给飞控系统,形 成闭环回路。同时,地面站可实时对无人机模 型进行在线参数调整,模拟扰动。

由于实验条件限制,在舵机和转台等实物 部件进入回路之前,先行搭建了简化的半实物 仿真平台。系统组成结构见图 2。

该系统用 3 台计算机分别模拟了上 位机地面站、控制机飞控系统和充当被控 对象的模型机。控制机内实时运行飞控程 序,模型机内实时运行无人机数学模型。 上位机给定的控制输入经串口传递给控 制机,由飞控程序进行控制律解算后将控 制输出由串口传递给模型,同时模型解算 出的姿态信息也实时地经串口传回控制 机,形成闭环控制回路。上位机与模型机 间可直接通过网口通信,允许上位机对模 型进行实时的参数调整,以及对返回数据 的实时显示。

系统开发流程如下:

1) 在上位机 Simulink 下建立无人机六自由度小扰动模型,对无人机模型施加扰动,按照控制指标设计控制器,得到数字仿真结果。

2) 构建半实物仿真系统闭环实时回路:将无人机模型转换为 VxWorks 实时操作系统下的实时代码,载入模型机;将 MATLAB 下的飞控程序改写为 C 程序,装载至控制计算机,模拟飞控系统;采用针对 Tornado 目标的 实时工作空间(RTW)外部模式,建立地面站上位机与模型机之间的实时数据回路,由上位机 Simulink 程序施加扰 动输入,对模型进行实时调参;同时 Simulink 作为上显界面实时显示姿态反馈。

3) 系统调试通过后,将飞控程序移植至控制单片机。

4) 在飞控系统和模型机之间接入舵机及转台实物,开发 A/D 采集板卡等外设。

2 无人机建模

描述无人机的 12 个微分方程中存在着非线性关系,且方程中的力、力矩系数与运动参数密切相关。考虑到 飞机运动方程的解析解对于分析飞机特性和飞机的稳定性、操纵性之间的关系更加方便,采用小扰动线性化方法, 选取某一工作点来线性化飞机的运动方程。

在进行小扰动线性化时,选取定常直线无侧滑飞行为基准状态,并且将无人机的运动近似地分解为纵向运动和横侧向运动这2个耦合较弱的运动。由小扰动原理得到无人机纵向和横侧向小扰动线性化方程,将其在状态空间中描述为^[3]:

$$\dot{X} = AX + BU, \quad Y = CX \tag{1}$$

式中:第1式为状态方程;第2式为输出方程;X为系统状态矩阵;U为系统输入矩阵;Y为系统输出矩阵;A,B和C分别为系统特征矩阵。对于纵向运动有:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} V & \alpha & q & \theta \end{bmatrix}^{\mathrm{I}}, \quad \boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} \delta_{\mathrm{t}} & \delta_{\mathrm{e}} \end{bmatrix}^{\mathrm{I}}$$
(2)

式中: V为速度; α 为迎角; q为俯仰角速率; θ 为俯仰角; δ_i 表示油门控制; δ_e 表示舵机控制。

station remote test data t

online adjustment

actuators

elevator

aileron

rudder

flight





图 2 简化的半实物仿真平台系统结构

UAV

model

computer

A/D

angle

deflection

根据任务要求,选取某型无人机在高度 9 144 m,速度 137.16 m/s 条件下飞机做定常直线无侧滑飞行为基准 状态,根据无人机动力学方程,结合风洞吹风参数,得到该无人机纵向小扰动状态方程如下:

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \begin{bmatrix} -0.0081 & 6.7491 & -0.5936 & -32.170 \\ -0.0001 & -0.6352 & 0.9643 & 0 \\ 0 & -0.6083 & -0.8246 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{X} + \begin{bmatrix} 0.0016 & 0.1120 \\ 0 & -0.0014 \\ 0 & -0.1835 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}$$
(3)

3 控制模型

为了对仿真平台进行验证,就无人机纵向控制设计了稳定控制律,包括:

1) 俯仰保持控制律:

$$\Delta \delta_{\rm e} = L_{\dot{\theta}} \Delta \dot{\theta} + L_{\theta} \Delta \theta \tag{4}$$

2) 高度稳定控制律:

 $\Delta \delta_{e} = K_{z}^{\theta} \Delta \theta + K_{z}^{\dot{\theta}} \Delta \dot{\theta} + K_{z}^{h} (\Delta h - \Delta h_{g}) + K_{z}^{\dot{h}} \Delta \dot{h} \quad (5)$ 3) 速度稳定控制律:

 $\Delta \delta_e = K_z^{\dot{\theta}} \Delta \dot{\theta} + K_z^{\dot{h}} (\Delta \theta - \Delta \theta_g), \ \Delta \theta_g = K_V (V - V_g)$ (6) 式中: Δ 表示小扰动增量; 变量 L 和 K表示控 制系数; h 为飞行高度; 下标 g 表示给定量; 下 标 z 表示增稳控制。在 MATLAB/Simulink 下对 无人机模型及控制律进行建模封装,得到 Simulink数字仿真模型。其中无人机模型见图 3。

图 3 中包含的高度解算模块可根据迎角和



Fig.3 Simulink model of UAV 图 3 无人机 Simulink 模型框图

俯仰角增量计算出当前飞行高度及法向加速度增量。控制律模块框图见图 4(a),其中的 Chart 为 Stateflow 模块,由其作为状态转换控制器,对 3 种控制律的相互切换进行控制。KT,KH 和 KV 分别为俯仰角、高度以及速度扰动量。Stateflow 模块封装见图 4(b)。



图 4 控制模块 Simulink 框图和 Stateflow 模块结构框图

将无人机模型和控制律模块连接,给定输入小扰动,可以得到该控制算法对无人机模型控制效果的数字仿真 结果见图 5。图 5(a)为俯仰角响应曲线,可以看到对于输入为 5°的扰动,俯仰角增量在 5 s 内恢复到 0.5°内;图 5(b)为高度响应曲线,当施加 20 m 的高度扰动时可以在 30 s 左右恢复到初始高度;图 5(c)为速度响应曲线,当 施加 1 m/s 的速度扰动时无人机可以在 20 s 内消除扰动。由此可见,该控制律控制效果较好。

4 实时回路搭建

4.1 硬件配置

上位机为 IPC-610H 工控机,工作在 Windows 系统下,运行 MATLAB/Simulink/RTW;控制机 ARK5260 工

控机,工作在 VxWorks 系统下,实时运行飞控程序;模型机为 PC104,工作在 VxWorks 系统下,实时运行无人 机模型。各计算机之间采用串口通信。



4.2 软件方案

利用 RTW 的 Tornado 目标支持功能,可将 Simulink 下的无人机模型转换成针对 Tornado 目标(VxWorks)的实时 C 代码。RTW 提供的外部模式可实现参数的实时调整而无需对模型进行重新编译,并且可对多种类型模块输出进行观察和记录,实现全数字仿真到半实物仿真的快速转换^[4-6]。具体实现步骤如下:

1) 输入输出端口全局变量定义

首先,在 VxWorks 中加载定义了需要进行多机数据传递的端口全局变量名称和类型的用户模块。其次,在 Simulink 中选中这些端口,将其用 Input 和 Output 模块连接。然后用 Signal Properties 菜单将选定的信号线定义 为和上述变量相同的名称,对输入输出数据分别选用 ImportedExtern 和 ExportGlobal 储存类型。通过这些全局变 量,飞控计算机装载的程序模块就可以自由对这些信号和数据端口进行读写操作。

2) 实时代码转换

在进行代码转换前,需要将 RTW 解算类型设置为 Fixed-step,并选择合适的数字微分算法和计算步长。其次要对 Matlab 安装目录 rtw\c\tornado 文件夹下的 tornado.tmf 文件进行修改,该文件向 RTW 提供了 Tornado 编译环境的信息,通过对该文件的修改使 RTW 生成的代码能够被目标识别^[5]。具体的改动见相关文献^[7]。然后在

"System Target File"下选择编译模版文件为 Tornado.tlc,更改"Template makefile"为 Tornado.tmf。.tlc 文件在 这里描述了根据目标配置生成代码的规则。最后在"Tornado Target"选项下,设置任务优先级和大小,并在

"External mode option"中选中"External Mode"复选框。完成以上配置之后,在Simulink界面选择Tools>Real-Time Workshop>Build Model,即可开始对模型进行代码转换。

3) 模型装载

生成的模型.lo 文件可通过手动装载和在线下载的方式载入下位机。对于在线下载的方式,需首先建立上位 机与模型机的通信,主要是对 Tornado 的 FTP server 和 Target server 进行配置^[8]。对于模型机,与上位机正确连 接后,就可以启动 Tornado Shell,从"Targets"下拉菜单中选择设置好的目标服务器,此时出现 Shell 窗口。用 Shell 命令 ld 或 Tornado 集成开发环境中工具栏的 Load 工具即可下载目标模型文件。

ld 指令的格式为: ld<模型.lo 的存放路径\模型.lo

对于控制机,采用 CF 卡将转换好的控制程序.lo 文件装载。

4) 通信配置

控制机和模型机中载入实时代码之后,调用 VxWorks 串口驱动程序,发起串口通信任务。在控制机中运行 控制程序,由于此时模型机中的模型尚未启动,需要在串口接收程序中设定接收数据的初始值,使控制程序优先 于模型代码运行起来。

5) 启动仿真

VxWorks 实时程序定义了一个函数 rt_main(),用来创建和执行模型代码,完成在外部模式下与 Simulink 的 通信。rt_main 函数在文件 rt_main.c 中定义,位于目录%Matlabroot%\rtw\c\tornado 中。在 WindSh 窗口中调用 rt_main 函数,即开始解析模型:

sp(rt_main,UAVmodel,"-tf inf -w ","*",0,30,17725)

运行后可以看到模型机的屏幕上显示 Waiting for start packet from host。

在 Simulink 中打开 External Model Control Panel,点击 Connect,即建立了与模型机的连接,此时在外部模式下 Start real-time cold 键由灰色变为黑色(可选),点击它就启动了半物理仿真。

5 结果与讨论

通过 Simulink 中的 Scope 模块,可以实时观测到模型机反馈回来的输出响应。图 6显示了速度稳定控制的半物理仿真结果与数字仿真的对比。图 6中由上至下依次显示了无人机速度 *V*、迎角 α、俯仰角速率 *q*和俯仰角 θ 对于速度扰动的响应。可以看到,对于在系统运行 30 s 左右给定的速度扰动,半物理仿真的输出曲线与数字仿真曲线吻合程度较高,能够满足设计要求。但是两者曲线也存在一定的偏差,其原因可能与不同系统的计算步长及精确度、MATLAB 和 C 语言函数的数值算法差异有关。



图 6 速度稳定控制数字仿真与半物理仿真结果

总体而言,利用面向对象的快速模型代码开发方法,建立了一个以 MATLAB RTW 以及 VxWorks 为支撑的 实时仿真系统,为无人机设计提供了一个可在线调参、实时数据反馈的研究平台。利用 RTW 外部模式与 VxWorks 实时数据交互相结合的数据传递模式,以 Simulink 为主体的交互界面,操作简便明了。该系统的建立,为无人 机半物理仿真平台的后续开发奠定了核心技术基础。

参考文献:

- [1] 吴立新,刘平生,左重. 无人机研制程序研究[C]// 第二届无人机发展论坛论文集. 中国,南昌:[s.n.], 2010:176-186.
 (WU Lixin,LIU Pingsheng,ZUO Chong. Research on develop procedure of UAV[C]// Proceedings of the 2nd UAV Development Symposium. Nanchang, China:[s.n.], 2010:176-186.)
- [2] 黄鑫鑫. 小型无人机飞控系统设计与实现[D]. 西安:西北工业大学, 2013. (HUANG Xinxin. Design and implementation of flight control system for small UAV[D]. Xi'an, China: Northwestern Polytechnical University, 2013.)
- [3] 吴森堂,费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009. (WU Sentang, FEI Yuhua. Flight Control System[M]. Beijing:Beihang University Press, 2009.)
- [4] 杨涤,李立涛. 系统实时仿真开发环境与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2002. (YANG Di, LI Litao. Real-time Simulation Development Environment and its Applications[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2002.)
- [5] 张杨,于银涛. VxWorks内核、设备驱动与 BSP 开发详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2009. (ZHANG Yang, YU Yintao. VxWorks Operate System, Drives and BSP[M]. Beijing:Posts & Telecom Press, 2009.)
- [6] 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 based on MATLAB/RTW and VxWorks[J]. Software Guide, 2010,9(12):86-87.)
- [7] 鲍泳林. 某无人机非航电系统半物理仿真平台设计与实现[D]. 西安:西北工业大学, 2013. (BAO Yonglin. Design and realization of hardware-in-loop simulation platform for UAV non-avionics system[D]. Xi'an, China: Northwestern Polytechnical University, 2013.)
- [8] Tornado User's Guide(Windows Version) Version 2.0[Z]. Wind River System Inc., 1999.

作者简介:



鲍泳林(1988-),男,四川省攀枝花市人,硕士,主要从事无人机系统设计方面相关工作.email: yonglin_bao@hotmail.com.