

半实物飞行仿真教学平台的设计和开发

杨姗姗,王彪

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

摘 要:针对飞行控制系统等课程的实验教学要求,开发了一套便携式半实物飞行仿真控制实验平台。该平台把航模飞机、舵机、飞控板和操纵杆等实物接入仿真回路,使用 C 语言编写系统用户端软件和飞行控制软件。操纵杆产生的操纵指令可通过用户端软件传送给飞控板,飞控板生成控制信号给舵机,操纵舵面实时偏转,实现自动驾驶。将整个仿真回路与 FlightGear 软件连接,实现飞行视景的三维实时显示,使所设计的半实物飞控实验平台展示效果更加真实,响应曲线与物理动作直接关联,现象更加直观。该平台可以有效增强实验教学效果,提高学生设计飞行控制器的能力,并可为其他控制相关课程提供实验条件。

关键词:半实物仿真;飞行控制;实时;教学平台

中图分类号:TP273;V249.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)01-0120-04

Design and Development of Hardward-in-the-loop Simulation of Flight Control Teaching Platform

YANG Shanshan, WANG Biao

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: According to the experimental acquirement of flight control system courses, a portable hardward-in-loop flight control experimental platform was developed. On this experimental platform, aircraft, actuators, flight control board and control stick were accessed in the simulation loop, and system user and flight control softwares were compiled by C language. Control command manipulated by control stick was transferred to flight control board by system user software while control signal by flight control board was transmitted to actuators, through which control-surfaces real-time deflection was realized, and automatic flight control was implemented. The whole simulation loop with the maximum safety margin as the optimal target was connected to the FlightGear, and the real-time 3D visual flight simulation worked well. The results indicate that the hardward-in-loop flight control experimental platform has better demonstration, more direct correlation between response curves and physical actions and good visual results, which enhances students ability to understand and design flight control and facilitates experimental conditions for other relevant control courses.

Keywords: hardward-in-the-loop; flight control; real-time; teaching platform

0 引言

飞行控制系统是航空航天院校自动控制专业一门重要的专业课程,因其术语繁多、描述生涩,学生难以快速接受。因此,需要研制出一款与飞行控制及相关课程紧密结合的实验平台来为培养飞行控制专业基础扎实的创新型人才提供很好的支撑^[1-3]。

本项目小组前期研制出一套基于 FlightGear 的三维可视化飞行控制仿真实验平台,基于 Matlab/Simulink 编写飞机模型仿真和飞行控制设计实验界面,并与 FlightGear 直接对接,可实时三维立体显示飞机姿态。该平台提高了学生对飞行控制原理的三维立体直观的认识,加强了飞行控制设计理论的理解,锻炼了自主设计飞行控制器的能力^[4]。但是由于该平台无实物、纯仿真的特点,

缺乏被控对象的真实性,展示效果不够直观。

针对此问题,本文设计了一套半实物飞行控制仿真平台,将航模飞机、舵机、飞控板和操纵杆等实物集成在一起,使得学生不仅可以直观地观察到航模飞机上真实舵面转动的过程,还可以分别体验自动驾驶和人工驾驶的过程,且本实验平台保留了与 FlightGear 视景软件的连接,因此本平台还具备实时三维立体观测飞行姿态的特点。该实验教学平台既可以给教师作演示操作,也可以分难度开设飞行控制律设计实验,为提高学生综合飞行控制设计能力提供实验平台。该实验平台还可为自动控制、探测与制导及机械自动化等专业的本科生培养提供实验条件^[5-7]。

本文将从平台整体软硬件结构、用户端软件、飞行控制软件和 FlightGear 连接设计几个方面介绍上述半实物飞行控制实验平台,并以高度控制的实验仿真为例,验证

基金项目:南京航空航天大学实验技术与开发项目(2017050300043749)

第一作者简介:杨姗姗(1983—),女,江苏盐城人,实验师,工学硕士,研究方向为自动控制。

该平台的实用性。

1 半实物仿真实验平台的总体结构

半实物飞行控制仿真实验平台的总体设计结构如图 1 所示。整个半实物仿真平台实物部分包括航模飞机、舵机、飞控板和操纵杆。计算机上运行实验平台的系统用户端程序软件和 FlightGear 视景软件。飞行控制程序在飞控板上运行。



图 1 半实物飞行控制实验平台结构图

本仿真实验平台选取一款典型固定翼飞机为控制对象,使用 C 语言编写系统用户端程序和飞行控制程序。仿真控制台软件通过串口接收飞控板解算出来的执行机构指令和发送软件中飞机模型解算出来的传感器信息给飞控板,飞控板将执行机构指令,即舵面指令,通过 PWM 信号发送给航模飞机上的舵机,从而实现舵面的实时偏转。同时,仿真控制台软件通过 FlightGear 视景软件,实时显示三维视景。系统用户程序中的遥控遥测软件通过串口接收飞控板上传来的飞控数据进行数据展示,并发送控制指令和控制律参数给飞控板,从而对飞控板上的控制律进行调整。操纵杆指令由操纵杆产生,通过仿真控制台软件接收操纵杆指令,再转发给飞控板,实现操纵杆对飞行器模型的人工控制。

2 半实物仿真实验平台设计

2.1 动力学模型

飞机模型为一个典型的六自由度固定翼飞机模型,其模型基于 12 阶运动方程建立^[7-8]。飞机模型的气动参数、飞机模型的输入和输出参数均与本项目之前设计的 Matlab 仿真平台中的飞机模型参数相同^[4]。本实验平台中的飞机模型是在 VC 环境下用 C 语言实现,写在仿真控制台软件中,以便于进行飞行模型解算和数据交互^[9-10]。

2.2 系统用户端程序设计

系统用户端程序由两部分组成:仿真控制台软件和遥控遥测软件。两个软件的功能介绍如下。

1) 仿真控制台软件

仿真控制台的软件架构如图 2 所示。

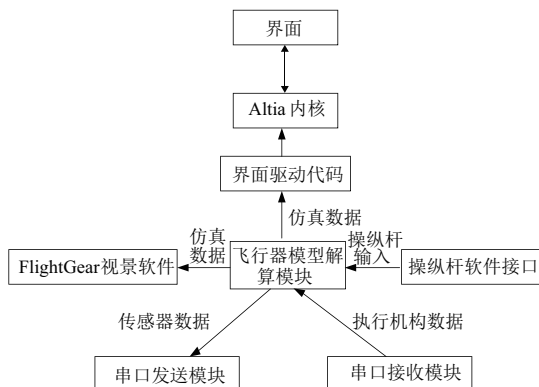


图 2 仿真控制台软件架构

仿真控制台软件主要实现的功能为:飞机模型解算,通过串口发送传感器数据给飞控板,接收飞控板控制律解算出来的执行机构指令,通过 UDP 协议将飞机状态数据发送给三维实时视景软件 FlightGear,实现用户端界面的显示和设置参数,接收操纵杆输入数据,对飞机实现人工控制操作。

图 3 所示为仿真控制台用户端界面。界面的设计主要可以分为 4 个部分,分别是串口选择模块、仿真初值设置模块、数据显示模块和仿真控制模块。串口选择模块用于设置正确的串口,以便与飞控板进行数据交互。初值设置模块用于设置飞机起飞时候的状态,初值保存在配置文件中,当仿真控制台软件打开时自动读取该配置文件中的初值。数据显示模块用于实时显示当前的飞机状态参数和飞控板返回的执行机构参数。仿真控制模块用于控制仿真的运行过程,包含运行、暂停和复位 3 种模式。

点击界面中的“记录”按钮,仿真数据就被记录在文件中,然后通过 Matlab 软件打开该文件进行画图分析即可得到仿真曲线。



图 3 仿真控制台软件界面

2) 遥控遥测软件

遥控遥测软件架构框图如图 4 所示。

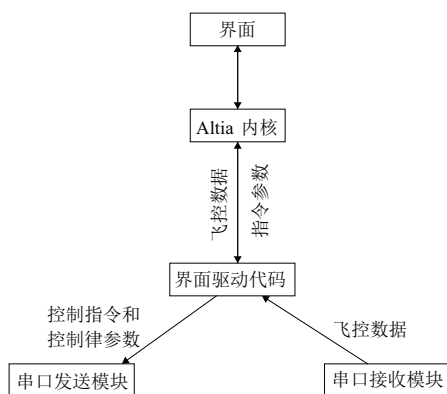


图4 遥控遥测软件架构

遥控遥测软件实现的功能主要为:通过串口接收飞控板发送的飞控信息,实现用户端界面显示并设置控制指令和控制律参数,发送控制指令和控制律参数给飞控板,在界面上显示飞机状态数据和执行机构指令。

图5为遥控遥测界面,可以分为4个部分实现,分别是串口选择模块、数据显示模块、指令设置模块和参数设置模块。其中指令设置模块用于设置控制指令,本软件可以设置高度、航向和速度指令。参数设置模块用于设置控制律参数,用于调整飞控板中的控制律。串口选择模块和数据显示模块的功能与仿真控制台软件中的相同。



图5 遥控遥测软件界面

2.3 飞行控制器软件设计

半实物仿真实验平台中的飞行控制器基于 STM32 开发板开发,飞控软件基于 VC 环境用 C 语言实现^[11-13]。飞行控制器软件主要用于实现接收仿真控制台界面发送的传感器数据和遥控遥测界面发送的控制指令,进行控制律解算,将解算出来的执行机构数据发回给仿真控制台软件和遥控遥测软件。同时,飞控软件将飞机模型舵面操作指令输出给飞机模型中的舵机,从而实现舵面实时偏转。

飞控软件中已经基于参考文献[7-8]设计出了一款经典飞行控制律,以便于初学者参考及教师课堂演示。针对更高难度的实验,控制律可以通过遥控遥测界面中的参数设置进行修改并发送给飞控板。

图6所示为飞控系统的软件架构。半物理仿真系统

基于 STM32 开发板进行开发,所以底层需要有 STM32 板卡驱动。在板卡驱动的基础上移植 $\mu\text{cos-II}$ 实时操作系统到 STM32 开发板,然后分别设计传感器任务、执行机构任务、飞控数据发送任务、指令参数接收任务、舵机指令发送任务和控制律解算任务,由实时操作系统的任务调度统一管理,实现完整的飞行控制系统任务。

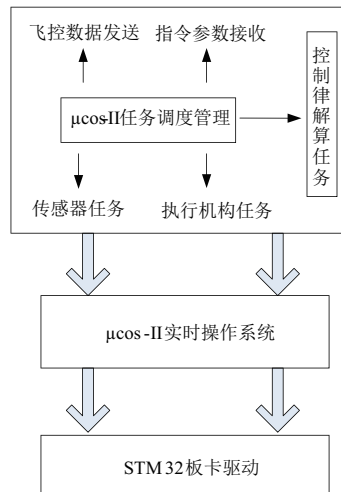


图6 飞控系统的软件架构

2.4 FlightGear 的连接

本平台中采用了开源软件 FlightGear 来实现虚拟场景的三维显示。该软件代码开放,场景逼真,且接口简单,仅通过 UDP 协议即可发送数据给 FlightGear 软件^[4]。

FlightGear 软件 I/O 接口设置如图7所示,其中 Protocol 设置为 native-fdm; Medium 设置为 socket; Hz 设置为 100; Direction 设置为 in; 端口选择 5500,数据传输选择 UDP 模式。

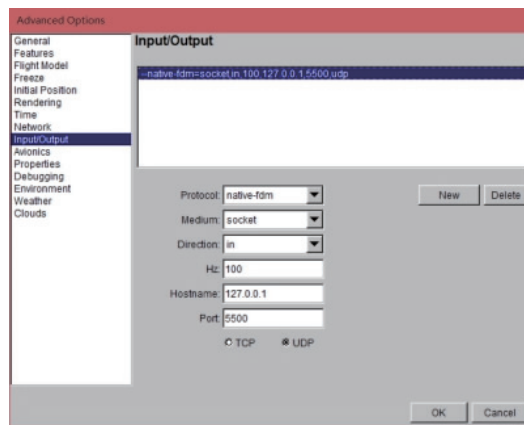


图7 FlightGear 软件接口设置

3 仿真实验

文中以控制飞机高度为例详细演示本实验平台的实验过程并展示了本半实物平台的易用性。半实物仿真平台实物如图8所示。



图8 半物理飞控实验平台

实验步骤如下:

1) 打开 FlightGear 视景软件,设置视景软件将仿真地点设为禄口国际机场(LUKOU)的早晨,起飞点为机场跑道,可以使用户更加直观地进行观测。FlightGear 视景软件中飞机起飞效果如图9所示。

2) 打开仿真控制台软件,设置串口,点击界面中的初值设置按钮,设置飞机模型的仿真初值。

3) 点击仿真控制台软件界面中的操纵杆按钮,打开操纵杆界面,设置操纵杆指令初值,成功连接操纵杆。

4) 打开遥控遥测软件,设置串口。在界面中设置控制律参数和高度、航向、速度指令,其中高度指令 1000 m,航向 57.9°,速度 200 m/s。设置好后点击发送按钮,发送给飞控板。

5) 点击仿真控制台界面左下角的运行按钮开始仿真。

6) 点击仿真控制台中的记录按钮,仿真过程中的数据将被记录在文件中,然后通过 Matlab 软件打开该文件进行画图分析仿真结果。

仿真开始后,操作者可以通过修改遥控遥测界面的指令参数调整飞机姿态,也可以通过操纵杆人工控制飞机姿态。飞机姿态通过飞控板直接发送数据给航模舵机控制舵面实时偏转,并通过 UDP 协议将数据发送给 FlightGear 视景软件实现三维实时显示。飞机高度响应曲线如图10所示。



图9 FlightGear 视景效果图

4 结语

为满足飞行控制实验仿真平台被控对象的真实性,设计了本文中介绍的半实物仿真平台。该平台将航模飞机、舵机、飞控板和操纵杆作为实物加入到飞控实验平台中,

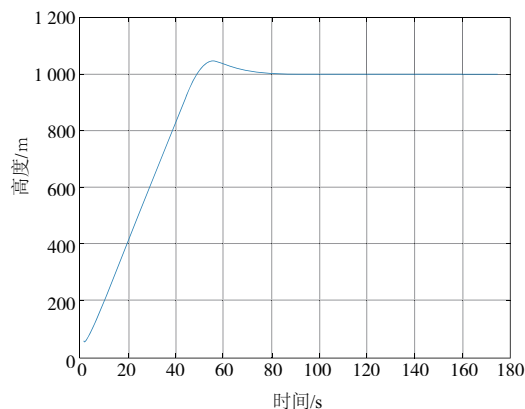


图10 高度响应曲线

使得被控对象更加直观。学生可以直接看到自己所设计的飞行控制律被下载到飞控板,然后飞控板通过发送控制信号给舵机,从而控制飞机舵面实时转动,并由 FlightGear 视景软件实时三维立体显示飞机姿态。整个过程更加直观生动。该平台还可以通过操纵杆实现人工驾驶功能,直接对飞机姿态进行控制。平台的软件界面简洁友好,操作方便灵活,便于学生尽快上手设计,具有很强的实用性。

参考文献:

- [1] 刘根旺. 飞行器控制系统设计与仿真实验平台的构建[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(3): 26-28.
- [2] 郭卫刚, 韩维, 王秀霞. 基于 Matlab/FlightGear 飞机飞行性能的可视化仿真系统[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(10): 110-112.
- [3] 夏洁. 舵机在回路的半实物飞控实验教学系统[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(9): 14-17.
- [4] 杨姗姗, 王彪. 基于 FlightGear 的三维可视化飞行控制仿真实验平台的设计与开发[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(7): 113-117.
- [5] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 陈复扬. 自动控制原理: 中文版[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [7] 吴森堂. 飞行控制系统[M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
- [8] NELSON R. Flight stability and automatic control (second edition)[M]. New York: McGraw-Hill Education, 1997.
- [9] 李瑞, 史莹晶, 李青松. 基于 VxWorks 的小型四旋翼飞行器半实物仿真平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(8): 88-93.
- [10] 于秀萍, 刘涛, 吴新峰, 等. 导弹制导控制半实物仿真实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(2): 94-97, 140.
- [11] 赵耀, 黎阳, 韩利军, 等. 飞行器控制系统全流程半实物仿真技术研究[J]. 航天控制, 2016, 34(1): 78-83.
- [12] 臧皖晋. 基于 FlightGear 的四旋翼无人机半实物仿真系统[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(8): 12-14.
- [13] 张红梅, 赵国立. 飞行控制系统仿真实验研究[J]. 实验室科学, 2015, 18(5): 36-38, 42.

收稿日期:2019-11-13