

基于 Matlab 和 VxWorks 的飞控测试系统的实现

张剑锋, 刘秉华

(西北工业大学三六五研究所, 西安 710065)

摘要: 给出了一种动态测试某飞机飞行控制系统(自动驾驶仪)的新方法。基于 Matlab 的 RTW 工具箱提供的实时目标接口功能, 采用 VxWorks 作为运行平台, 利用 Matlab 的 SimuLink 工具箱建立了飞机模型, 并把模型下载到运行 VxWorks 的 PC/104 目标机中, 从而快速开发了某飞机自动驾驶仪的实时测试系统, 测试结果验证了该方法的可行性。

关键词: 测试系统; 自动驾驶仪; 实时仿真; 飞机

Realization of Automatic Pilot Test System Based on Matlab and VxWorks

ZHANG Jian-feng, LIU Bing-hua

(The 365 Institution, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065)

【Abstract】 A new method is proposed to develop a test system about a kind of automatic pilot of helicopter. Based on the interface to system target of RTW(real-time Windows target) toolbox, using VxWorks and SimuLink toolbox of Matlab, the model of helicopter can be embedded in PC/104. In this way, a real-time test system on automatic pilot of helicopter can be built easily. The final results validate the feasibility of this method.

【Key words】 test system; automatic pilot; real-time simulation; airplane

飞机自动驾驶仪是控制飞机正常飞行、顺利执行任务的核心设备, 在装机之前需要对自动驾驶仪进行全面的测试, 以确保飞机的飞行安全。

Matlab具有很强的运算与图形显示功能, 越来越多的工具箱(toolbox)也使它的功能日趋强大。但是用Matlab做实时系统的仿真相对困难, 一般需要编写MEX文件并加载驱动程序等。而把SimuLink、RTW(real-time Windows target)工具箱以及嵌入式操作系统VxWorks结合起来后, 利用Matlab进行实时系统的开发变得简单方便: 使用者只须在SimuLink中构建仿真模型, 通过RTW将其编译并下载到运行VxWorks实时操作系统的目标机上即可, 由此实现全数字仿真到半实物仿真的快速转换, 无须进行繁琐的代码编写及校核工作。一些科研人员已开始这方面的研究^[1], 本文通过所开发的某直升机自动驾驶仪实时测试系统对这种方法进行较为详细的讨论。

1 系统组成及硬件设计

要对飞机自动驾驶仪进行闭环测试, 首先需要在模型主机中建立飞机模型和舵机模型, 并把所建立的模型下载到仿真目标机中。飞机自动驾驶仪的控制输出通过 A/D 采集卡采集到目标机中, 控制信号通过舵机模型控制飞机(模型)的运动, 解算出的飞机姿态等信号通过以太网发送给航电系统, 再由其转换成 429 信号送给自动驾驶仪, 从而构成完整的闭环测试系统。飞机自动驾驶仪测试系统的组成如图 1 所示。

测试系统的硬件包括仿真目标机和信号采集部分。目标机采用 104-1541 嵌入式主机板, 该主机板是基于 PC104 总线的嵌入式控制器, 结构紧凑、功能强大、外部接口丰富, 装载 VxWorks 操作系统, 是运行飞机模型的平台, 也是本测试系统的前提和基础。

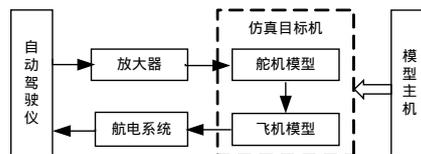


图 1 飞机自动驾驶仪测试系统组成

DMMv212 采集卡是基于 PC/104 总线的 A/D 采集卡, 这是一款高性能、多功能的数据采集卡, 用于采集自动驾驶仪的输出信号。由于该型飞机自动驾驶仪的控制输出是差动信号, 且电压有可能超出采集卡的采集电压范围, 因此开发了一个信号调理卡, 用于把差动信号转换成单端信号, 并把电压信号进行衰减、滤波等。调理电路原理如图 2 所示。

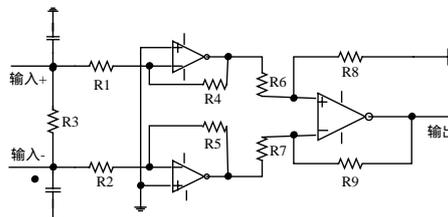


图 2 调理电路原理

2 软件设计及测试结果

2.1 板载支持包(BSP)的设计

在嵌入式实时操作系统 VxWorks 的应用中, 需要生成硬件抽象层, 它是操作系统内核和硬件之间的媒介, 并以板载

作者简介: 张剑锋(1980 -), 男, 硕士、工程师, 主研方向: 飞行控制系统的设计与仿真, 测控系统的开发; 刘秉华, 教授

收稿日期: 2006-11-10 **E-mail:** zjf1830@126.com

支持包的形式出现。针对不同的处理器体系结构以及硬件环境设计不同的板载支持包^[2~3], VxWorks可以用于不同的硬件环境。为了在PC/104目标机中运行VxWorks,需要在Tornado环境下对其提供的板载支持包进行修改, Tornado是和VxWorks配套的主机开发环境。板载支持包通常存放在Tornado的安装目录下面,其路径是Root/target/config/bspname, Root代表tornado的安装目录。BSP的配置可简单分为如下几步:

(1)修改 config.h 中的启动引导行以确定正确的启动控制器。此处, ata=1。

(2)修改 config.h 中有关 ATA 配置的部分。这里选用闪盘(CF卡)作为存储器,所以,相关的操作都以CF卡为准。

(3)VxWorks 操作系统的移植。VxWorks 操作系统支持DOS的FAT文件系统,因此,使用DOS 6.22启动PC/104,使用format命令格式化整个CF卡为一个主DOS分区,并在DOS用户界面输入如下指令即可完成VxWorks系统的移植:

```
A:\>copy bootrom.sys c:
A:\>copy vxworks c:
C:\>lock c:
A:\>vxsys c:
```

2.2 RTW 的配置和模型的构建

RTW是MathWorks公司提供的代码自动生成工具,它可以使SimuLink模型自动生成面向不同目标的代码,其中也包括Tornado环境的C代码,这样就可以使用Tornado的C编译器编译生成的代码。

RTW提供了一个实时的开发环境,它能直接从SimuLink的模型中产生优化的、可移植的个性化代码,并根据目标配置自动生成多种环境下的程序。它的体系结构是开放的,其代码生成器是完全结构化的。RTW还提供了TLC扩展自己的功能,可以修改、优化RTW生成的C代码,扩充RTW的功能。此处使用RTW的开发步骤如下:

(1)在SimuLink中构建离散化的飞机模型 heli_model.Mdl;

(2)编写采集模块和数据发送模块的S函数。S函数^[4]是一个动态系统的计算机语言描述,可以和SimuLink交互,RTW的S函数是C语言格式,这里需要编写数据采集和数据发送的S函数,和飞机模型一起下载到目标机中;

(3)打开模型的Simulation Parameters的Real-Time Workshop选项,并在Configuration对话框上打开目标配置界面,选择系统目标文件为tornado.tlc;

(4)设置调整heli_model.mdl的相应参数,如这里选择仿真步长为20ms;

(5)编译heli_model.mdl模型,并将生成的目标代码下载到目标机;

(6)在目标机中运行飞机模型,进行对自动驾驶仪的实时闭环测试。

下面对S函数的编写作详细的说明,由于在测试时需要采集自动驾驶仪输出的控制信号,同时需要把飞机模型解算出的各种信号通过以太网发送给航电系统,因此这里采用C语言格式的S函数来完成这些功能。S函数具有MdlStart, MdlOutputs, MdlUpdate等编程接口,一般只须编写MdlOutputs接口即可完成S函数的输出功能。例如在发送飞机飞行姿态时,在S函数中需要初始化发送套接字、绑定发送数据的端口、调用UDP函数发送数据等,该段程序简单示

例如下:

```
//飞机姿态输出S函数
#define SERVER_PORT_NUM 5150 //用于绑定的服务器端口
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid) //函数输出部分
{
    if (sendto(sFd, (caddr_t) &myrequest, sizeof(myrequest), 0,
        (struct sockaddr *) &serverAddr, sockAddrSize) == ERROR)
    {
        perror("error for sendto ! \n");
        close(sFd);
    }
}
```

最终构建的整个模型如图3所示。

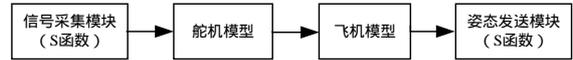


图3 测试模型组成

2.3 飞机模型的嵌入

在做自动驾驶仪的测试或半实物仿真时,需要建立飞机的六自由度模型。该六自由度模型可以是线性化模型,也可以是非线性化模型。为了加快实现过程、更有利于分析结果,这里采用了飞机六自由度线性化模型。

利用小扰动法可以得到描述飞机运动的六自由度动力学微分方程^[5],经过线性化可以得到飞机受扰运动的线性化方程,化简后的飞机全机状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases}$$

$$X = \begin{bmatrix} u & v & w & \vartheta & \gamma & \psi & \dot{\vartheta} & \dot{\gamma} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T, U = \begin{bmatrix} BIC & AIC & \delta_{rc} & \varrho_c \end{bmatrix}^T$$

其中,矩阵A、B、C分别为状态转移矩阵、输入控制矩阵和输出控制矩阵。 ϑ, γ, ψ 分别为俯仰角、倾斜角和偏航角; u, v, w 分别为前飞速度、侧向速度和垂直速度; δ_{rc} 和 ϱ_c 分别为对尾桨的桨距操纵输入量和总矩操纵输入量; BIC, AIC 分别为纵向和横向周期变矩操纵输入量。上述方程根据参考书和《某飞机气动导数表》得出。飞机状态方程中的系数矩阵预先存放于Matlab的工作空间里,在SimuLink工具箱里面把离散状态方程模块(discrete state-space)放置在仿真框图中,其参数矩阵即为工作空间中的K、A、B、C。这些值随飞行状态的变化而变化,对应某一特定状态时,这些系数均为确定值。

2.4 实时闭环测试及其结果

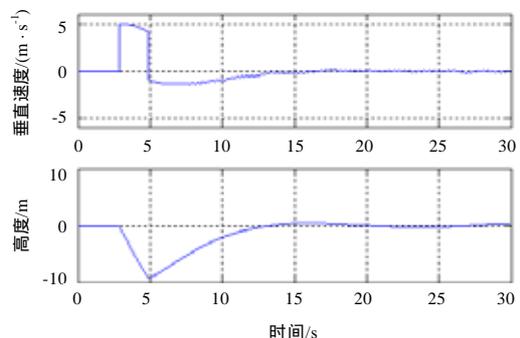


图4 无线电高度保持功能测试曲线

在构建好飞机模型后,即可进行对自动驾驶仪的测试,实时闭环测试的步骤如下:

(1)打开目标机和模型主机,构建测试模型,设定仿真步长、时间等参数,然后在模型框图中点击Build All,Matlab会自动生成和模型文件同名、但扩展名为.lo的目标文件。

(2)给自动驾驶仪、操纵台等上电,在模型主机的 Tornado 开发环境下使用 load 命令把编译生成的 heli_model.lo 目标文件加载到运行 VxWorks 操作系统的目标机中。

(3)在 Tornado 开发环境中启动目标机中的模型文件,开始闭环测试,测试结果可以通过以太网发送给模型主机进行显示和存储。

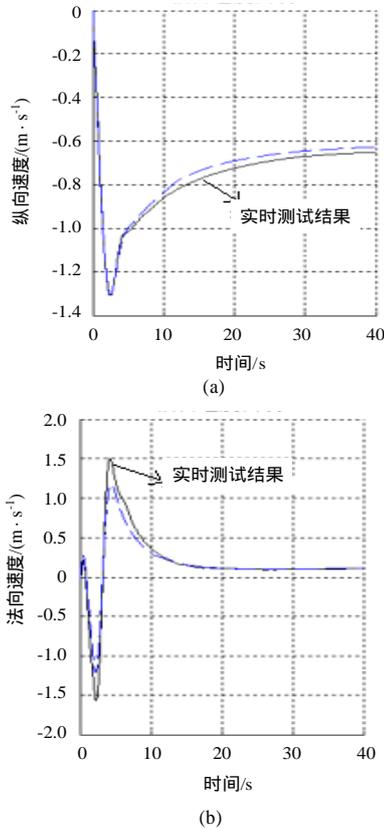


图 5 实时测试结果和全数字仿真结果的对比曲线

为了验证所开发的测试系统的正确性,选用一台无故障的自动驾驶仪进行测试,对测试数据进行分析并和要求的指标以及全数字仿真进行对比,结果证明所做的测试是正确、可靠的。图 4 所示是飞机无线电高度保持功能的测试,在某一时刻加入 5m/s 的垂直速度(V_z)的扰动,飞机高度有所下降,但在较短的时间内可以在自动驾驶仪的控制下回到原高度。

图 5 给出了无线电高度保持功能下实时测试和全数字仿真结果的对比曲线,由图 5 可以看出二者的结果是一致的。

3 结论

通过以上的讨论以及对实时测试结果的分析,得出以下结论:以 PC/104 嵌入式主机板和实时操作系统 VxWorks 为运行平台,利用 Matlab 的 SimuLink 工具箱构建测试模型,并通过 RTW 工具箱的实时目标接口可以快速地实现实时测试系统的开发。由于这种方法无须编写 MEX 文件、驱动程序和繁琐的模型代码,实现起来快速可靠,且容易扩展,针对不同的飞机型号,只须载入相应的气动参数即可进行新的测试,和传统的测试方法相比,其优越性显而易见。实际测试结果证明,这种方法简单方便,是一种切实可行的实时测试方案。

参考文献

- 1 杨 涤. 系统实时仿真开发环境与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002-10.
- 2 安军社, 刘艳秋. VxWorks 操作系统板载支持包设计与实现[J]. 计算机工程, 2003, 29(1): 87-88.
- 3 Tornado API Reference Version 2.0[Z]. Wind River System, Inc., 1999.
- 4 施 阳. MATLAB 语言精要及其动态仿真工具 Simulink[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1997-06.
- 5 张明廉. 飞行控制系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994-07.
- 6 Application Program Interface Guide[Z]. The MathWorks, Inc., 1998-01.

(上接第 264 页)

在图 7 和图 9 中,两条曲线分别代表了干预前后干河和石头河洪水到达魏家堡处的洪水过程,在图 8 中两条曲线重合,表明进行辅助决策前后,洪水过程没有发生变化,这也符合实际情况,因为它显示的是林家村处的洪水在调度前后到达魏家堡处时的洪水过程,而在渭河干流没有大水库,不能对其洪水过程进行干预,所以,在辅助决策前后其洪水过程不会发生变化。验证表明辅助调度可以削弱魏家堡处洪水的峰值,使得洪水过程变得比以前平稳,保证了渭河下游地区的安全。

4 小结

本文的错峰调度决策支持系统采用 DCOM 技术和地理信息技术,将 MapX 开发平台与 Delphi 开发工具结合,应用多种技术实现了洪水错峰调度决策支持系统的实现。事例测试表明系统的开发不但能够削弱渭河干流的洪峰,避免了渭河流域洪水灾害的发生,而且通过合理调度能够充分发挥石头河水库和冯家山水库的发电和灌溉潜能,提高水库运行的经济效益,同时也保证了流域内生态环境的可持续发展和良性循环。

参考文献

- 1 孙 毅, 方英武, 冯 慧, 等. 渭河流域洪水演进仿真的研究[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(2): 75-78.
- 2 翟宜峰, 尚志宏, 李研军. 黑龙江省防洪决策支持系统的研究与设计[J]. 东北水利水电, 1999, 4(28): 13-15.
- 3 Simonovic S P. Reservoir Systems Analysis-closing Gap Between Theory and Practice[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1992, 118(3): 262-280.
- 4 Wurbs R A. Reservoir-system Simulation and Optimization Models[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, 119(4): 455-472.
- 5 裴晋义, 孙芹芳. 水电厂水情自动测报与水库调度自动化[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 12-14.
- 6 张基温, 王一平. 信息系统开发案例(第一辑)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- 7 徐新华. Delphi3 编程指南(上、下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1998.
- 8 方英武, 孙 毅, 王 轶, 等. 渭河洪水错峰调度决策支持系统的研究[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(6): 66-69.
- 9 周振红, 杨国录, 陈燕萍, 等. Delphi 开发 MTS/COM+应用系统的架构[J]. 计算机应用, 2002, 22(7): 101-103.

