

便携式 APU 数控系统硬件在环仿真平台研究

王超, 杨恒辉

(中航工业西安航空计算技术研究所, 西安 710119)

摘要: 针对 APU 数控系统硬件在环仿真平台体积大、重量大, 难以满足控制器在外场测试、实验的要求, 设计便携式硬件在环仿真设备; 普通硬件在环仿真平台, 发动机模拟功能和飞控模拟及监控功能分别使用一台工控机; 为了实现便携式, 综合这两个功能于一台高性能便携式 PXI 工控机。设计便携式信号调理箱、传感器模拟和执行机构模拟方法组成平台的硬件系统; 使用 LabWindows/CVI 的多线程方法, 提高软件实时性, 设计平台的软件系统; 使用系统辨识法设计 APU 启动停车模型, 使用部件法设计 APU 稳态工作模型; 组成硬件在环仿真平台; 便携式仿真平台与电子控制器联合进行 APU 启动、稳态运行、停车等工作模式的仿真试验, 仿真试验结果表明: 该平台能够稳定、实时模拟 APU 工作状态。

关键词: 辅助动力装置; 硬件在环仿真; 便携式设备; LabWindows/CVI

Portable HIL Simulation Platform for APU Digital Control Systems

Wang Chao, Yang Henghui

(Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xi'an 710119, China)

Abstract: As HIL simulation platform for APU Digital Control Systems is bulky and heavy, and difficult to satisfy the controller requirements in outfield test environment, design portable HIL simulation platform. Engine simulation function and flight control simulation and monitoring functions use different computer in a ordinary HIL simulation platform. For portable, using a high-performance portable PXI IPC performs two functions. Design portable signal conditioning boxes, analog sensors and actuators simulation consisting of hardware platform. Use LabWindows / CVI multithreading methods to improve the real-time of software. Use system identification method design APU start-park model, use element-method design steady-state work model. Use the HIL platform to simulation experiment. Experiment results show that the platform has the ability of the real-time simulation of the working mode of APU stably.

Keywords: APU; hardware-in-loop simulation system; portable device; LabWindows/CVI

0 引言

辅助动力装置 (auxiliary power unit, APU) 是大型飞机上的一套独立小型燃气涡轮动力装置, 其功用是为带转主发动机起动的空气涡轮起动机和飞机环控系统提供压缩空气, 同时带动发电机向飞机提供电源, 也称为飞机第二动力装置, 是飞机重要的功能子系统^[1]。

数字电子控制器 (electronic control unit, ECU) 是 APU 控制系统的核心部件, 具有技术复杂、控制精度与安全要求高, 在进行与发动机的综合试验时, 面临试验环节多, 工作模式复杂、控制难度高、可重复性差, 以及试验成本高等诸多问题。因此, 前期设计与仿真验证就显得尤为重要, 是发动机研制过程的首要工作之一^[2-3]。发动机数控系统硬件在环仿真平台是航空发动机控制器设计、研发、交付使用过程中的重要工具之一, 能够极大地节约设计成本、缩短研发周期、降低发动机台架试验的风险, 硬件在环仿真平台能够发动机全状态功能、性能的仿真模拟, 且具备强大的发动机系统故障模拟功能, 因此, 已成为发动机控制系统研制过程中的关键技术之一。

随着外场保障要求的不断提高, 需要实现外场故障的快速检测、定位。当前, 航空发动机仿真测试系统多设计为大型柜式或者半物理仿真系统, 大型仿真验证设备体积大、重量大,

导致灵活性差、搬运困难, 难以满足航空产品在外场测试、升级与故障检测要求。因此, 测试设备的小型化、便携化具有重要的工程意义, 且已逐渐成为发展趋势。

本文以飞机辅助动力装置仿真系统为需求对象, 开发了一套辅助动力装置的 FADEC 便携式硬件在环仿真平台, 具备大型 HIL 的功能性能, 且兼具小型化、轻量化, 便于外场的灵活使用。

1 仿真平台总体架构

辅助动力装置控制系统硬件在环仿真平台由软件系统和硬件系统组成。软件系统主要实现功能有发动机模拟功能, 飞控模拟功能, 监控功能; 硬件系统主要实现功能有传感器模拟功能, 执行机构模拟功能, 负载模拟功能等。普通硬件在环仿真平台, 发动机模拟功能和飞控模拟及监控功能分别使用一台工控机。为了实现便携式, 综合这两个功能于一台高性能便携式 PXI 工控机。

便携式硬件在环仿真平台由一台性能优异的便携式工控机和信号调理箱组成。便携式工控机中包含 APU 的实时高精度数学模型、传感器与执行机构数学模型、数据采集板卡、信号模拟板卡等, 信号调理箱组主要完成大功率电磁阀等装置的模拟。

便携式硬件在环仿真平台结构如图 1 所示。

仿真平台工控机选用高可靠的 PXI 架构, 便携式工控机中运行仿真测试软件, 通过高效的多任务软件设计, 完成 APU 实时高精度数学模型运行、硬件板卡的调度、数据采集、控制指令的实时运算、数据通讯、故障模拟控制、人机界面显

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-02-29。

作者简介: 王超 (1988-), 男, 陕西西安人, 助理工程师, 主要从事硬件在环仿真方向的研究。

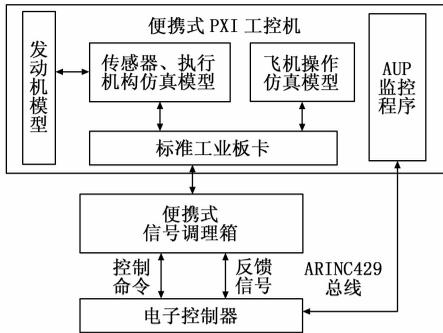


图 1 便携式硬件在环仿真平台结构图

示、实时数据存储等功能; 便携式信号调理箱模拟 APU 系统的电磁阀等大功率负载, 同时对信号进行调理用于状态识别, 因此, 接收 APU 电子控制器的大功率驱动指令, 同时将信号调理后输入给便携式工控机进行采集, 用于判定 APU 的运行状态响应。

2 仿真平台硬件设计

便携式硬件在环仿真平台硬件设计主要根据 APU 控制系统中与电子控制器交联附件的信号特征, 以及仿真系统的功能性能要求, 确定系统的硬件资源选择、配置, 和调理电路的设计。

2.1 信号调理箱设计

调理/负载箱中的调理部分由供电转换电路、调理电路、和继电器矩阵组成, 如图 2 所示。供电转换电路将输入负载箱的 28 V 供电电源转换为负载箱工作的 +5 V, ±15 V 二次电源; 负载箱对输入的离散量信号进行光电隔离处理。



图 2 信号调理箱板卡配置

2.2 传感器信号模拟

2.2.1 转速信号模拟

转速信号为高频正弦信号, APU 数学模型根据其供油量和运行所处模式计算得出数字量, 通过板卡模拟成为 ECU 可识别的正弦波信号, 正弦波信号的频率值与转速成正比, 比值为测速传感器的齿轮数比, 幅值随转速增加而增大。转速信号通过函数发生器板卡 PXI5402 模拟。信号范围 10 V_{pp}, 伏值具有 14 位分辨率, 频率分辨率小于 1 Hz。

2.2.2 微小电压信号模拟

热电偶信号和压力传感器信号的微小电压使用 PXI-4461 模拟, 且使用屏蔽电缆直接输出到激励器, 保证信号不受外部干扰。板卡输出电压具有 24 位的分辨率, 满足信号 ±0.03 mV 精度要求。

2.2.3 电阻信号模拟

APU 上滑油温度、燃油温度等使用 PT1000 传感器采集, 仿真设备需要模拟传感器电阻信号。电阻信号模拟使用高精度电阻卡 Pickering (40-297-003) 实现。板卡内部是由电阻

开关矩阵实现电阻的阻值调节, 为真实的电阻实现。板卡输出电压分辨率 0.125 Ω。

2.2.4 位置、角度传感器信号模拟实现

燃油控制执行机构位置反馈信号使用 LVDT 传感器, 引气阀、防喘控制阀位置反馈信号使用 RVDT 传感器。位置、角度传感器信号通过仿真卡 cPCI-75DL1 和 cPCI-75DS1 模拟。仿真卡激励信号来自电子控制器的激励输出。根据信号要求按 3 线制 LVDT/RVDT 信号连接方式使用。

2.3 执行装置模拟

APU 控制系统中的执行装置主要包括燃油控制装置、导叶控制装置和防喘控制装置。控制装置的模拟主要包括电液伺服装置数学模型建立和负载特性模拟。电液伺服装置数学模型根据发动机实际试车数据, 利用 Matlab 系统辨识工具建立电液伺服装置的数学模型, 实现负载的实时响应; 负载特性通过简化的阻性模拟负载替代电机阻抗特性。

3 系统软件设计

3.1 软件功能与架构

系统软件采用 NI 公司的 LabWindows/CVI 平台开发。仿真设备测试软件主要实现系统自检、控制运算、任务调度、人机界面、数据管理和系统帮助等功能, 软件结构和仿真软件界面分别如图 3 和图 4 所示。

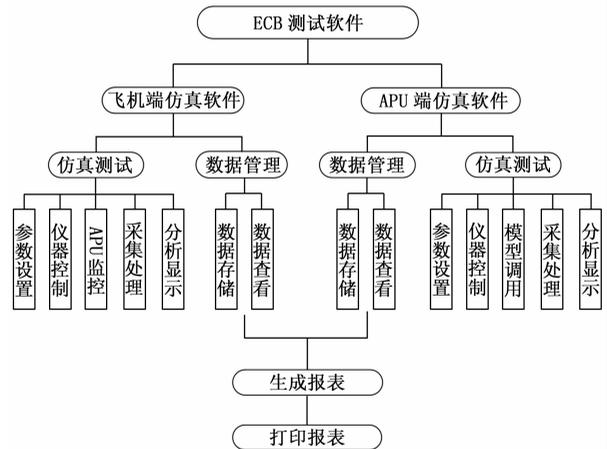


图 3 软件结构框图

硬件在环仿真平台系统软件需要完成 APU 控制指令模拟、数据采集、控制运算、APU 仿真运算、数据通讯、人机交互、数据存储等任务, 在大型仿真设备中多采用 2 台或以上计算机协同完成上述任务, 在使用单一计算的便携式平台中需充分发挥 Windows 的多任务能力, 利用多线程技术完成上述任务的实时运行。

3.2 多线程技术

本系统中, APU 仿真运算功能和数据通信功能的实时性要求很高。CVI 提供的常用控件是 timer 控件, 是同步定时器。当程序线程在别的功能任务处停滞时, 有可能影响定时器计时, 导致定时器消息延迟甚至丢失。

CVI6.0 后增加了异步定时器控件, 与同步定时器相比, 异步定时器最主要的特点在于运行于独立的线程中, 从而避免了由于程序主线程或用户界面操作产生的延迟。异步定时器实际上是多线程技术的一种形式。

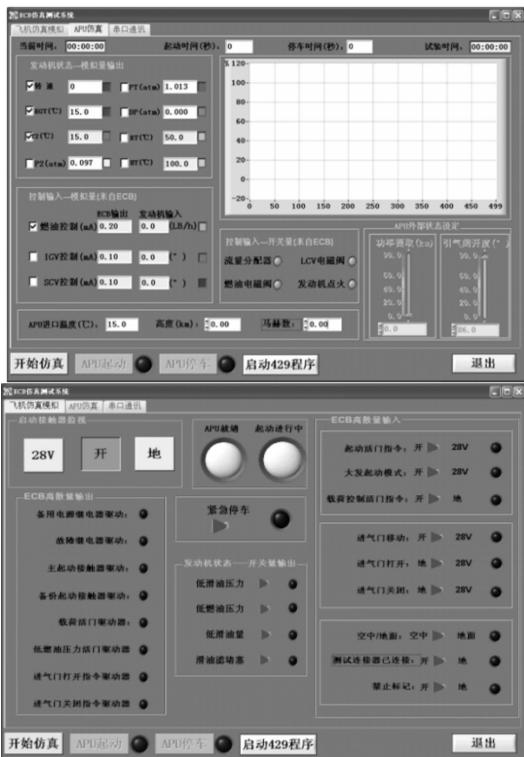


图 4 仿真软件界面

本程序中生成两个异步定时器，分别运行仿真运算功能和数据通信功能，提高两个任务的实时性。使用 NewAsyncTimer () 函数启动定时器：

timerID = NewAsyncTimer (Delay _ Time, Count, enabled, MyTimerCallback, Null);

MyTimerCallback 即定时器的回调函数，异步定时的回调函数与同步定时器的回调函数形式上是一样的。

4 APU 数学模型

APU 是一种小型航空发动机，是一个复杂的非线性系统。APU 的运行分起动加速阶段、稳态工作阶段和停车阶段。起动加速是 APU 转速由 0 加速到 96% 的阶段；稳态工作是 APU 转速在 96% 至 100% 的阶段；停车是 APU 转速由运行转速降至 0 的阶段。本系统中起动阶段和停车阶段模型采用数学辨识模型，工作阶段按照部件法，采用变比热计算建立了模型^[6]。

起动加速以及停车阶段的建模思路是：使用 APU 的典型数据，转换为相似参数，然后采用系统辨识法建立动态模型。

工作阶段的建模思路是：APU 主发动机结构与单轴涡轴发动机相似，负载压气机和发电机可以当作发动机的功率负载，利用已知的发动机各部件特性，按发动机部件的结构顺序，由进气道到尾喷管，依次分别从气体流动过程与热力过程建立方程，组成非线性方程组，联立求解此方程组，便可计算出发动机的共同工作点。

选取负载压气机压比，主压气机压比，转速 N 和涡轮流量四个参数作为独立变量，构建 APU 共同工作非线性方程。

主压气机出口的空气流量 W_c 与燃油流量 W_f 混合燃烧产生涡轮出口的燃气流量 W_t ，所以建立流量平衡。

$$W_t = W_c + W_f \tag{1}$$

负载压气机的功率 P_1 、主压气机功率 P_c 、电机提取功率 P_p 均由涡轮功率 P_T 提供，所以建立功率平衡。 η_T 代表涡轮的机械效率； I 代表转子转动惯量。

$$P_T \eta_T = P_1 + P_c + P_p + I * \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 * N \frac{dN}{dt} \tag{2}$$

与涡轮出口燃气流量 W_t 和负载压气机喘振放气流过 SCV 阀的流量 W_{scv} 都经过尾喷管排出，通过尾喷管气流量 W_n ，所以建立流量平衡。

$$W_n = W_{scv} + W_t \tag{3}$$

负载压气机出口根据压气机特性插值的流量 W_1 与根据引气出口负载要求所计算的空气流量 W_{lcv} 和 SCV 阀放气流量 W_{scv} 建立流量平衡。

$$W_l = W_{lcv} + W_{scv} \tag{4}$$

5 仿真结果与分析

本文设置 APU 的仿真工作条件为：高度 $H=0$ km；飞机马赫数 $Ma=0$ ，APU 进口温度为 15℃、燃油温度和滑油温度为 30℃。通过便携式仿真设备与电子控制器模拟 APU 起动、稳态运行、停车工作状态如图 6 所示。

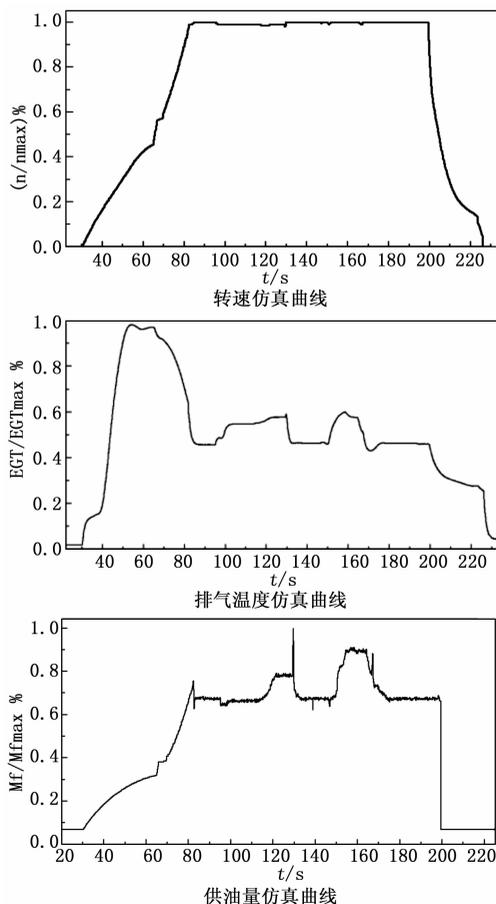


图 5 发动机启动、运行、停车仿真曲线

在图 5 中，APU 起动阶段约 50 s，达到稳态运行。APU 达到稳态工作后，进行负载压气机引气和功率提取操作。经过大量的使用验证，本系统设计的便携式硬件在环仿真平台能够 (下转第 117 页)