

航空发动机数控系统综合仿真平台设计

姚华廷¹, 王 曦¹, 苏三买²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 综合现有软硬件资源, 采用模块化方法设计了航空发动机数字电子控制系统综合仿真平台, 其框架主要包括发动机模型系统、传感器信号模拟与处理、控制器快速原型等子系统。发动机模型系统采用集成仿真环境调用液压执行装置和发动机数学模型库方式设计; 快速原型系统采用 Matlab/Simulink 环境下将控制程序封装成 S-Function 的方法设计; 软件设计重点描述了混合编程与定时器编程技术。以某双轴涡扇发动机为应用对象, 进行控制系统数字仿真、半物理模拟试验和台架试车, 在相同控制参数下, 仿真试验与台架试车结果相似, 表明所设计综合仿真平台具有工程应用价值。

关 键 词: 综合仿真平台; 航空发动机; 混合编程; 定时器; 半物理模拟试验; 台架试车

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Integrative simulation platform design for aero-engine digital electronic control system

YAO Hua-ting¹, WANG Xi¹, SU San-mai²

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Combined with existing software and hardware resources, integrative simulation platform for aero-engine digital electronic control system, which mainly includes aero-engine model subsystem, signal simulation and processing subsystem, controller rapid prototyping subsystem was designed with modular approach. Aero-engine model subsystem acts as a numerical simulation platform that calls aero-engine mathematical model library and mechanical hydraulic actuator mathematical model library. Rapid prototyping subsystem for controller runs in Matlab/Simulink environment, in which control code encapsulated into S-Function module. As key techniques in platform software design, mixed programming and WINDOWS timer programming method were described in detail. Applying the platform to a turbofan control system researchment, numerical simulation, semi-physical simulation and bed test results are consistent. It shows the platform is feasible and effective in engineering.

Key words: integrative simulation platform; aero-engine; mixed programming; timer programming; semi-physical simulation test; bed test

航空发动机数字电子控制系统(数控系统)是发动机性能发挥与工作可靠性保障的重要部件。

发达国家都将发动机数字电子控制技术作为航空技术中的重要内容来发展, 花费巨资(占发动机研

收稿日期: 2009-08-18; 修订日期: 2009-03-13

作者简介: 姚华廷(1966—), 男, 贵州松桃人, 高级工程师, 博士生, 主要从事航空发动机控制系统设计方面研究。

制费 15%~30%) 来研究^[1], 并在军机与民机发动机上广泛应用^[2-3].

发动机数控系统是一个多变量、非线性、多功能的复杂系统, 近年来逐步向小型化、综合化高性能、高可靠性方面发展^[1-6], 如美国 F22 战机的发动机 F119 采用的第三代全权限数控系统(full authority digital electronic controller, FADEC), 控制参数多达 12~13 个, 采用双通道-双余度结构, 无液压机械备份, 控制具有容错能力, 可以进行模块重构, 同时实现对发动机及矢量喷管故障诊断和处理, 并能根据飞机推进系统一体化来确定发动机的最佳工作参数^[7].

随着计算机技术的发展, 仿真技术已成为数控系统设计的重要手段, 由于发动机实际数控试车的高投入、高风险, 在数控系统装机之前的研发过程中, 需进行一系列仿真试验, 其中主要包括控制系统全数字仿真、硬件在回路仿真、半物理仿真三个环节, 各个环节相辅相成, 但功能、仿真回路、仿真目的不尽相同. 目前国外 FADEC 基于模块化设计^[3-7], 技术趋于成熟; 国内发动机数控系统研发在摸索中经历二十余年, 基本掌握了系统设计与仿真方法, 但以往针对型号研究所建立的相关仿真与试验系统, 由于各个仿真环节的语言环境、硬件体系不同, 各系统共享资源少^[8-9], 使得各阶段仿真结果的继承性、可移植性大打折扣, 严重制约了发动机数学模型与先进控制理论研究成果的验证以及数控系统的研发效率.

国内在 FADEC 各个仿真环节方面, 积累并初步形成计算方法与相关类库, 但没有有效地利用起来. 针对上述背景与发动机控制要求, 利用已有的技术资源, 本文进行发动机控制系统综合仿

真平台设计.

1 综合仿真平台总体方案

综合仿真平台由发动机模型系统、液压执行装置、传感器信号模拟与调理、控制系统、飞控系统部分组成, 硬件上以控制器为中心分布式连接. 其中带阴影模块为发动机控制系统的真实组成部分, 在系统开发的不同仿真阶段作为可更换单元.

综合仿真平台设计结构原理如图 1 所示, 为实现仿真平台的通用性与继承性, 各个仿真环节采用模块化方法, 各模块软件设计可采用不同的开发环境和编程语言. 仿真平台的工作原理及可实现的功能如下:

- 1) 在数控系统总体方案设计阶段, 利用快速原型系统、发动机模型系统进行全数字仿真, 分析与确定控制算法及控制参数, 这种基于控制对象的快速原型设计, 为分系统设计提供依据;
- 2) 在部件集成阶段, 利用电子控制器、传感器模拟与信号调理装置、液压执行装置模型和发动机数学模型可进行硬件在回路仿真, 验证故障诊断与处理准则、数字信号处理准则以及控制软件与电子控制器的匹配性;
- 3) 在系统集成阶段, 利用电子控制器、液压执行装置(含管路连接和电气连接)、传感器信号模拟与调理装置、液压执行装置和发动机模型可进行半物理模拟试验, 验证整个数控系统工作的匹配性;
- 4) 在控制软件系统测试阶段, 利用飞控系统和上述半物理模拟单元可进行控制软件的系统级测试, 为控制软件可靠性评估提供依据.

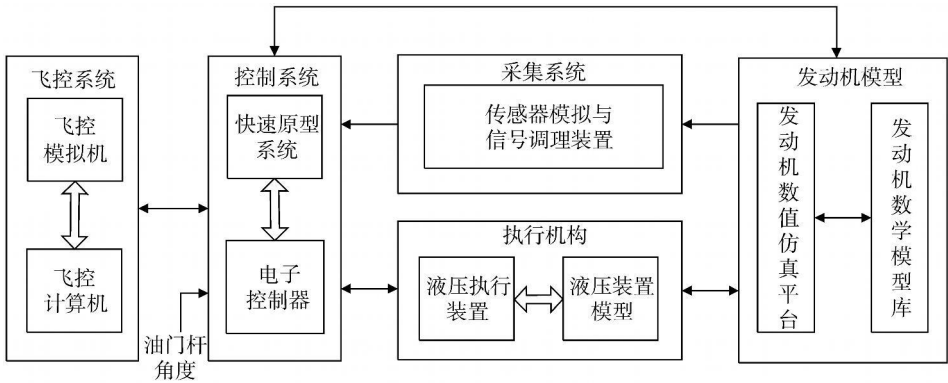


图 1 综合仿真平台结构原理图

Fig.1 Schematic of integrative simulation platform

2 分系统设计

2.1 发动机模型系统

发动机数学模型是仿真系统的核心组成部分.在以往的仿真与试验系统中,发动机模型针对型号设计、不具有通用性,同时为追求实时性,模型仿真过程参数的可视化程度不高.另一方面,国内已初步积累了各发动机的实时模型,但由于各自编程语言和输入输出接口不统一,制约实际应用.此外作为影响控制系统性能仿真的液压执行装置模型,以往在仿真系统中很少考虑.基于此,本系统发动机数学模型设计在硬件上采用一台 PC 机,软件上包括仿真过程可视化界面(数值仿真平台)、液压执行装置模型和发动机模型库三部分.

发动机数学模型库的主要任务是提供能可访问的发动机对象.对于已有的发动机模型以及目前型号研制中应用的专用数学模型,由于模型编程语言各异(Fortran, VC, C, Matlab/Simulink 等)、形式也不尽相同,为了实现仿真平台通用化,首先对各模型规定标准的输入输出接口,按各自的编程语言生成动态链接库(DLL),然后通过混合编程技术将各模型从形式上统一起来,供仿真平台调用.具体方法为用 VC 将各模型封装成统一形式的非托管 DLL,非托管函数按以下方式接口:

- 1) int Init(int flag,int exCondition[]);
- 2) int Run(double h,double m,double gto,
double gtf,double alf1,double alf2,double fkp,
double delth,double exCtrlVal[],int docircle,
double con[]).

液压执行装置模型的任务是提供能够被发动机数值仿真平台访问的机械液压执行装置对象.由于目前几大主流液压建模软件(Simulation X, AMESim 等)对应用程序接口的支持不丰富以及这些软件建立的模型实时性不能保证,因此本系统先期设计支持液压执行装置经验模型,根据航空液压元件原理,这些模型在数学上可表示为具有分段线性系数的微分方程和代数方程组合.

数值仿真平台主界面(可视化界面)设计如图 2 所示,系统采用.NET 环境下的 C#语言开发,工作时接收前端控制器信号,调用后端的模型,实现与控制系统、发动机数学模型库、液压执行装置模型之间的信号交互,信号交互方式可选 AD/DA(模数转换/数模转换,用于半物理和硬件在回

路仿真)或 RS232(用于全数字仿真)形式.为辅助控制器性能仿真,在仿真界面设有模型出口参数及其扰动量可在界面上调整,发动机工作过程仿真参数变化曲线及其颜色通过界面右上方区域框选设置,全部参数可通过上下滚动条查看.

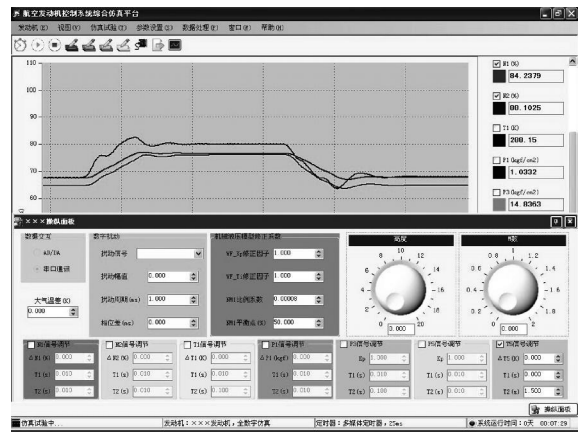


图 2 发动机数值仿真平台功能界面

Fig. 2 Engine numerical simulation interface display

数值仿真平台通过多线程、异步调用技术来动态显示参数曲线(非实时),通过定时器回调函数(实时)来执行 I/O(input/output)接口、数学模型计算、参数存储以及曲线显示线程的启动,定时器回调函数具有最高的优先级,保证仿真的实时性.

2.2 快速原型系统

控制方案设计的好坏直接影响控制系统开发的效率和质量,传统的基于经验设计的开发模式已不能解决型号需求的多样性和快速开发之间的矛盾,而快速原型可为解决此类矛盾提供了技术支持.

在控制方案设计阶段,首先根据发动机的控制要求,构建一个功能简单的控制系统原型,通过在综合仿真平台中的验证,对原型系统逐步求精,对控制算法、控制逻辑、故障诊断与处理等不断扩充完善,将方案中的错误及不当之处消除于设计初期,使设计修改费用减至最小,从而开发出最适合发动机的控制方案.当电子控制器制造完成后,可以将控制方案验证中生成的代码(自动的或手动的)直接移植到电子控制器的控制软件中.

快速原型系统是近年来控制系统设计与应用的热点技术,可选择专用设备(如 dSPACE)或基于 PC 的系统来实现要求的功能.在本综合仿真

系统设计中,在硬件上需要具备模拟量输入输出、数字量输入输出、PWM(pulse width modulation)支持、编码器、LVDT(linear variable differential transformer),RVDT(rotatory variable differential transformer)、同步分解器和其他高级的输入输出等 I/O 功能,在系统设计先期采用 PC 系统。

软件设计通过 Simulink 提供的应用程序接口技术,将 I/O 驱动、现有的 C/C++, Fortran 语言编写的控制以及数字信号处理程序封装成 Simulink 的模块,以图形化的方式供快速原型建模调用。同时,通过 RTW(real time workshop)进行 Simulink 环境下的实时仿真。

2.3 传感器信号模拟与调理装置

信号模拟与调理装置实现控制系统与发动机模型系统之间的信号转换与传输。

发动机控制系统中,传感器信号主要包括压力、温度、转速、PWM、频率等信号类型,在半物理仿真中,部分信号(如转速、燃油压力)可在试验台上直接测量,另一部分由于信号的特殊性(如温度、各截面总压),需要通过电路来模拟。

系统设计时,通过将模型 DA 输出的 0~10V 直流电压信号转换成符合相应传感器要求的模拟物理信号,所有转换信号需要满足一定的精度和稳定性要求。比如压力与温度传感器输出模拟,可将 DA 输出的 0~10V 先送入低漂移运算放大器,进行增益为 1 的阻抗变换使输入信号不受负载大小的影响,运放输出经负载电位器和电阻形成分压输出,调整电位器可以精确调出所模拟物理参数对应的传感器电压输出。

另外信号模拟与调理装置还应具有直流-直流(DC-DC)转换功能并能够提供 RS232/422, TCP/IP 通道,以满足综合仿真平台不同阶段的仿真需求。

国内关于各传感器信号模拟技术成熟,并在型号研制中多次成功应用。

2.4 飞控系统

在飞/推一体化和无人机发动机控制中,发动机的许多控制指令来自飞控系统,通过飞控系统控制发动机运转,并通过飞控制系统与发动机控制系统通讯获取发动机状态参数。

在综合仿真平台中,飞控系统主要用于确定飞发系统通讯的硬件接口及数据传输协议,以及验证飞发系统通讯的可靠性,工作原理为飞控计

算机输出高度、马赫数、油门杆角度(PLA)等参数给发控系统,同时接收发控回传的发动机工作与状态参数。

3 关键技术

3.1 混合编程

综合仿真平台设计中,快速原型系统软件设计、发动机模型系统中模型库函数,可重新编写代码,也可采用以往积累的算法与模块。这些模块既有 Fortran, C/C++ 等程序设计语言的,又有 Matlab/Simulink 等专业建模与仿真软件的,在综合仿真系统中,需要通过混合编程技术实现资源共享。

混合编程主要语言与具体实现技术:

1) C#与 Fortran, C/C++ 混合编程

通过 DllImport, C#语言可以静态访问已有的所有 Win32 的应用程序接口(API),从而大大扩展了.NET 应用程序所适用的空间。

使用 DllImport 访问 C/C++ 语言编写的库函数中的函数,只要参数定义保持统一就能准确调用;对于 Fortran 语言,由于不同于 C/C++ 的种种特性,从 C#语言中访问 Fortran 语言编写的 DLL 中的函数,需注意函数命名、函数调用、参数传递等地方,否则将不能获得期望的调用结果。

将 kernel32.dll 中与动态库调用有关的函数 LoadLibrary, GetProcAddress, FreeLibrary 封装成类 CDllInvokeFrame2,可以实现动态调用 Fortran, C/C++ 编写的 DLL,动态调用时需要遵循的规则同 DllImport。

由于 C#中没有函数指针,CDllInvokeFrame2 可采用下面任一方案来达到函数调用的目的:利用 Marshal.GetDelegateForFunctionPointer;结合使用 System.Reflection.Emit 及 System.Reflection.Assembly 里的类。

2) C#与 Matlab 混合编程

在 Matlab R2006a 或以上版本中,通过 Matlab Builder for .NET 将 Matlab 函数编译成 .NET 组件,可以供任何符合 CLS(common language specification)的语言来调用,使用时可以脱离 Matlab 环境。

C#调用这些组件时按下列步骤执行:

①对 mwcomutil.dll, mclmcr78.dll 进行注册;

②添加引用-.NET-MathWorks,.NET MWar-ray API-OK;

③添加引用-Browse-.NET 组件-OK,同时保持 *.ctf 在同一文件夹下;

④文件头需添加引用命名空间“using MathWorks. MATLAB. NET. Arrays;”和“using MathWorks. MATLAB. NET. Utility;”。

3) Simulink 与 C/C++ 混合编程

Simulink 与 C/C++ 混合编程涉及的主要问题是 S-Function 对 C/C++ 代码的封装, 主要实现步骤如下:

①用 S-Function Builder 生成初始. dll 文件, 例如模块名称为“XXX”, 在向导里面将控件的输入输出接口对应后 build 生成;

②删除 XXX.c 和 XXX. dll 之外的文件;

③将编写的 YYY. c(YYY. c++, 需要将 C++ 代码包装在 extern “C” 声明中) 文件放到该目录下, 修改 XXX. c 文件里面的内容, 将自动定义的 extern 函数和变量名改成与自己编写代码文件中的一致, XXX. c 中代码的执行函数也要相应进行改动;

④在 MATLAB 环境下使用“mex XXX. c YYY. c(YYY. c++)”指令进行重新编译, 就得到了支持 Simulink 仿真的 XXX. dll 文件。

3.2 定时器编程

仿真系统要求仿真周期与实际电子控制器的控制周期保持一致, 这就需要综合仿真平台再操作系统下通过提高定时器的性能来解决仿真实时性的问题。

C# 程序中可直接利用. NET Framework 中自带的 Windows 定时器, 基于服务器的定时器和线程定时器进行定时任务调度。另外, 还可以将定时精度达到 ms 级的多媒体定时器进行封装后使用。C# 中可以通过. NET 的 Stopwatch 类测量程序实际运行时间, Stopwatch 可以精确到 1/10000 ms, 完全满足控制系统仿真定时要求。

Simulink 可以通过 RTW 将自动生成的 C 或 Ada 代码编译后下载到专用硬件平台实现准确定时, 也可通过修改 RTW 自动生成的 C 代码, 在 C 代码中加入时钟中断来实现 Simulink 在 Windows 下的实时仿真, 具体实现包括以下几个步骤:

1) 新建 Simulink 模型

2) 设置模型参数

Solver-Solver options-Type=Fixed-step, 仿真算法为 discrete, Fixed step size 根据具体仿真周期要求设置。

Real-Time Workshop-Target selection-System target file=grt. tlc; Interface=External mode; 其他保持默认值。

3) 实时工作空间参数设置

在 Target configuration 里选择通用实时 malloc 代码格式-grt. tlc, 将 Category 切换至 GRT code generation options, 选择 External mode 复选框, 使产生的代码支持外部模式。

4) 修改 grt_main. c 文件, 在其中加入时钟中断代码, 把时间控制代码和 rt_OneStep() 分离出来, 放在时钟中断中执行, grt_main. c 位于 <matlabroot>\rtw\c\grt 目录下。

5) 生成代码

保存好参数设置后单击 Build 按钮或者单击工具栏的 Build All 图标生成代码。

6) 运行仿真程序, 查看仿真结果

在命令提示符下运行仿真程序, 命令为 mdl-name-tf-inf-w, 然后将 Simulink 切换至外部模式启动实时仿真程序。仿真期间, 从模型的信号显示模块中看到动态实时仿真结果, 通过 External Mode Control Panel 还可实现在线参数调整等功能。

4 应用实例

在现有设备基础上, 综合上述设计技术与现有软件资源, 建立综合仿真平台, 并以某双轴涡扇发动机数字电子控制系统研制为例, 说明综合仿真平台在型号研制中的具体应用。

该型发动机控制系统采用电子-液压机械控制方案, 由液压机械附件实现节流状态下主燃油流量的控制, 最大状态及加力状态下主燃油流量的控制则通过电子控制器的限制计划来实现, 以保证在最大状态和加力状态下获得最大可能的推力。电子控制器有 N_1 、 N_2 和 T_5 三个通道同时用于调节发动机主燃油流量, 通过测量各个通道相应参数, 与程序给定的限制值进行比较, 计算产生 N_{m1} 占空比信号, 执行机构选择三个通道输出参数的最大值作为主燃油调节的指令选择器, 通过控制计量活门位移来实现对主燃油流量的调节。在快速原型系统中, 通过 Simulink 搭建的控制系统如图 3 所示。

根据最终确定的控制参数, 在数值仿真平台上获得发动机全转速段仿真结果(N_1 、 N_2 和 T_5) 如图 4 所示, 其中在最大状态, 能够稳定限制 N_2 参数, 且 N_{m1} 与 N_2 无波动。

控制器设计完成并集成后进行半物理模拟试

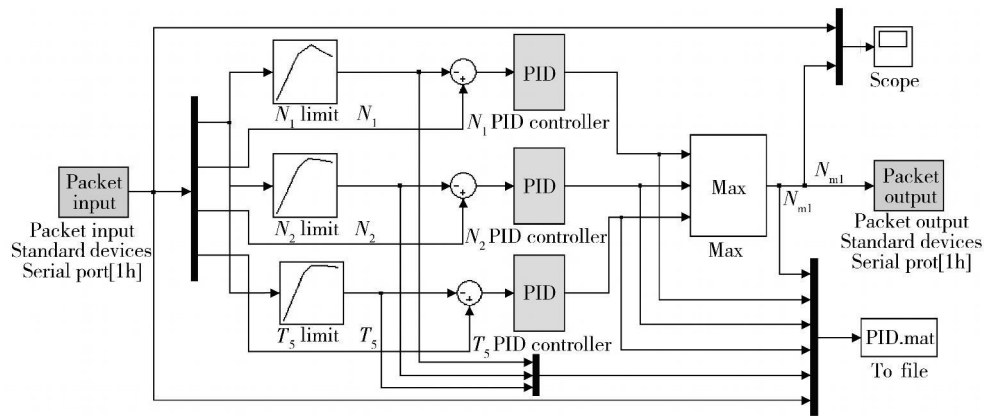


图 3 快速原型控制原理图

Fig. 3 Simulink scheme of rapid prototyping

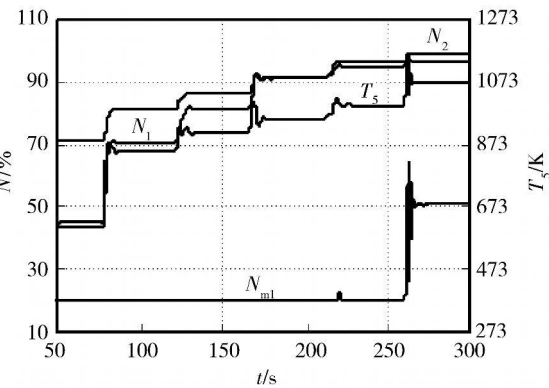


图 4 快速原型系统数字仿真曲线

Fig. 4 Prototyping system numerical simulation result

验,其中发动机数值仿真平台通过 AD 采集泵调节器输出流量,将流量作为输入参数传递给数学模型,数学模型计算所得的 N_2 转速信号转换为 DA 驱动电机系统带转泵调节器,同时将计算所得的发动机状态参数通过信号模拟与调理装置传输给电子控制器;电子控制器采集发动机状态参数和电机转速进行计算,输出开关量信号和占空比信号驱动执行机构完成相应的开关量控制和计

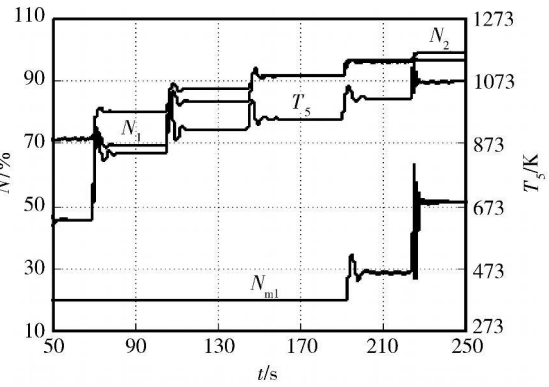


图 5 半物理模拟试验曲线

Fig. 5 Semi physical simulation result

量活门位移控制. 相同控制参数的半物理仿真结果如图 5. 由于高速电磁阀响应存在死区,最大状态 N_{m1} 波动 $\pm 1.5\%$, N_2 波动 $\pm 0.25\%$.

半物理模拟试验通过评审后可参与发动机地面台架数控试车,根据试车情况在综合仿真平台上可对控制软件参数进行进一步修改,同时也可对试车中出现的异常现象进行模拟复现. 相同控制参数下,台架试车测得的参数变化如图 6 所示,最大状态 N_{m1} 波动 $\pm 2\%$, N_2 波动 $\pm 0.2\%$,与数值仿真(图 3)和半物理仿真(图 4)吻合,其中在 N_2 大于 94% 以后,实际试车过程要求暖机,压气机效率提高,所设计的数学模型模拟这段工作过程的发动机性能的变化不准确,使得台架试验中 N_1 与 T_5 变化与数值仿真和半物理仿真存在明显差异.

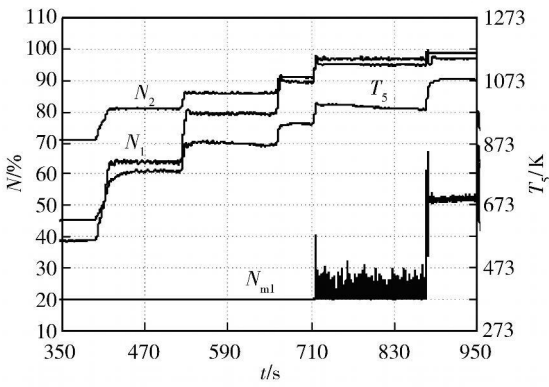


图 6 台架试车曲线

Fig. 6 Bed test result curve

在上述系统辅助下,顺利完成发动机试验阶段发动机地面台架数控试车. 仿真与试验结果表明,采用综合仿真平台设计的控制系统能较好地实现系统控制功能要求,可作为航空发动机数字

电子控制系统设计的辅助手段应用到型号研发任务中。

5 结 论

本文针对国内目前航空发动机控制仿真系统的不足,充分利用已有的软硬件资源,提出并开发了数控系统综合仿真平台。平台采用模块化设计,将数学模型、快速原型系统、信号模拟与处理等部分独立设计,能够实现数字仿真、硬件在回路仿真、半物理仿真的无缝衔接,不仅能够避免代码的重复开发、有效缩短开发周期,而且还可以有利于继承与扩展,具有良好的工程实用性,可以为发动机数字式电子控制系统设计与仿真提供支持。

参考文献:

- [1] 闫月亮,董照飞.航空发动机控制发展趋势及新技术浅析[J].国际航空,2006(7): 79-81.
YAN Yueliang, DONG Zhao-fei. Development of aero-engine control and technology[J]. International Aviation, 2006(7): 79-81. (in Chinese)
- [2] Pace S. F-22 raptor: America's next lethal war machine [M]. New York: McGraw-Hill Companies, ISBN 0-07-134271-0, April 2002.
- [3] 张正洋.波音 737 飞机发动机控制及指示技术的发展[J].航空工程与维修,2002(6): 34-36.
ZHANG Zhengyang. Development of Boeing 737 aircraft-engine control and indication[J]. Aviation Engineering and Maintenance, 2002(6): 34-36. (in Chinese)
- [4] 金茂贤.航空发动机先进控制概念及最新进展[J].航空科学技术,2005(1): 24-27.
JIN Maoxian. Advanced aero-engine control concepts and its development[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005(1): 24-27. (in Chinese)
- [5] Hiller S J, Hirst M, Ducloux O. ADVACT—An European program for actuation technology in future aero-engine control systems[R]. AIAA 2006-3511, 2006.
- [6] 方昌德.美国第四代战斗机发动机的研制理念和研制程序[DB/O L]. [2008-06-28], <http://www.aeroinfo.com.cn>.
- [7] 张绍基.航空发动机控制系统的研发与展望[J].航空动力学报,2004,19(3): 375-382.
ZHANG Shaoji. A review of aeroengine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 375-382. (in Chinese)
- [8] 刘爱萍,姚华.高推重比发动机全权限数字电子控制系统研究和半物理仿真试验验证[J].航空发动机,2003(1): 23-26.
LIU Aiping, YAO Hua. Investigation and semi-physical simulation of the FADEC system on a high thrust-weight ratio engine[J]. Aeroengine, 2003(1): 23-26. (in Chinese)
- [9] 袁春飞,姚华,杨刚.航空发动机机载实时自适应模型研究[J].航空学报,2006,27(4): 561-564.
YUAN Chunfei, YAO Hua, YANG Gang. On-board real-time adaptive model of aero-engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(4): 561-564. (in Chinese)
- [10] Kimura A, Maeda I. Development of engine control system using real time simulator[C]. //Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design. Dearborn, MI: IEEE, 1996: 157-163.
- [11] Rabbath C A, Bensoudane E. Real-time modeling and simulation of a gas turbine engine control system[R]. AIAA 2001-4246, 2001.
- [12] 杨涤,李立涛,杨旭,等.系统实时仿真开发环境与应用[M].北京:清华大学出版社,2002.