

文章编号: 1000-8055(2007)01-0119-07

面向对象的涡扇发动机 及控制系统仿真平台

周文祥, 黄金泉, 窦建平, 沈 峰
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 研究了面向对象的航空发动机数值仿真平台实现机理, 构建了涡扇发动机及其控制系统模型库, 采用面向对象方法完成了模型库及辅助类库的代码实现; 研究了交互式仿真界面及模块化构建仿真系统的关键技术, 在此基础上结合模型库、辅助类库构建了涡扇发动机及其控制系统通用仿真平台, 仿真结果表明, 该平台可计算发动机从零加速到最大状态的全程实时动态仿真, 动态误差小于 8%, 控制系统响应快, 超调小, 能够满足发动机控制仿真的需求。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 仿真; 控制系统; 面向对象

中图分类号: V235. 1

文献标识码: A

Object-oriented simulation platform for turbofan engine and its control system

ZHOU Wen-xiang, HUANG Jin-quan, DOU Jian-ping, SHEN Feng
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The method of developing object-oriented aeroengine numerical simulation platform is investigated. Basic class hierarchy for turbofan engine and control system performance simulation was designed. These basic classes together with some other assistant classes were coded through object-oriented computer language. The key technology for programming interactive graphical user interface and modular simulation system was introduced. A general numerical simulation platform for turbofan engine and control system was developed. Simulation results show that the platform can simulate turbofan engine dynamic process from near zero to maximal state, and the dynamic simulation error is less than 8%. The control system has quick response with suitable percent overshoot. The platform is suitable for aeroengine and control system simulation.

Key words: aerospace propulsion system; simulation; control system; object-oriented

航空发动机及其控制系统建模与仿真是低成本、短周期、高效率研制先进水平航空推进系统的有效途径, 自上个世纪 90 年代以来, 面向对象建模技术由于其继承性、可重用性、开放性, 逐渐代替面向过程方法, 成为航空发动机及其控制系统

仿真领域的主流技术^[1,2], 国内外出现了一大批面向对象的推进系统仿真平台。

Onyx^[3] 是美国 Toledo 大学 Reed 博士应用面向对象 JAVA 语言开发的燃气轮机分布交互仿真平台, 它综合了多学科、多精度的分析方法,

收稿日期: 2006-05-23; 修订日期: 2006-10-13

作者简介: 周文祥(1980-), 男, 江苏南京人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事航空发动机建模、仿真与控制的研究。

能动态地加载模型,并且支持复杂任务的分布式计算. GSP^[4] 是荷兰国家航空航天实验室应用 Borland Delphi 面向对象环境开发的燃气轮机仿真软件,该软件提供了 2 个最基本的库:气流部件库和控制系统库. GSP 功能完善,使用灵活,可以方便地进行航空发动机的特性仿真和控制系统的分析. 2001 年,瑞典 Lund 学院采用面向对象语言 Modelica 也开发了航空燃气轮机仿真系统^[5]. 近年来,在 NPSS (Numerical Propulsion Simulation System) 计划的推动下,美国 NASA 刘易斯研究中心在 Onyx 仿真平台的基础上实现了航空发动机的全三维流场仿真计算^[6,7].

国内学者在航空发动机面向对象建模方面也做了大量的研究^[8-10],但真正类似国外 GSP 的界面友好的航空发动机及其控制系统通用性能仿真平台还未见报导. 文献[8,9]研究了航空发动机面向对象建模的类库框架及数据通信模式,在此基础上实现了涡扇、涡轴发动机的实时仿真. 文献[10]提出了基于信息传递的燃气轮机对象模型,实现了单轴燃气轮机的非设计点仿真和三轴燃气轮机动态仿真. 本文在文献[11,12]的基础上,在面向对象的 Visual C++ 环境下开发了涡扇发动机及其控制系统通用性能仿真平台,并通过某型发动机地面全程实时仿真验证了平台的有效性.

1 面向对象仿真平台实现机理

面向对象建模思想的一个突出优点就是“封装”. 将航空发动机按功能划分为多个物理部件,然后对每个物理部件都加以“封装”,形成多个“部件类”,每个“部件类”包含多个“端口”与外界通讯(图 1),“连接器”负责不同“类”端口之间的数据传递. 采用“端口-连接器-端口”结构进行数据传

递,出于以下考虑:

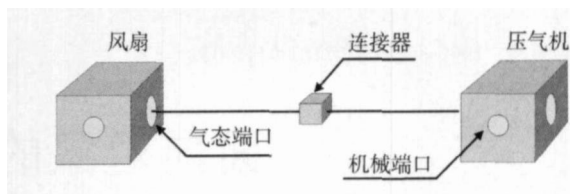


图 1 发动机部件数据传递示意图

Fig. 1 Scheme of data transfer model between engine components

(1) 发动机部件各自独立成一个模块,一个或多个部件算法改变不影响整个流路计算.

(2) 流路计算时发动机各个截面气动热力学参数封装在各个部件的端口类中,数据传递靠连接器类实现,避免传统面向过程仿真程序中全局变量的使用,程序易修改,扩充方便.

(3) 各个部件可以分布在不同的计算机上执行流路计算,连接器通过网络完成数据传递,容易实现分布式并行计算.

(4) 各个部件可根据需要采用不同形式(0~3 维)进行仿真计算,计算结果通过连接器传递给下游,作为下游部件仿真计算的进口边界条件,实现多学科变维仿真计算.

2 涡扇发动机性能仿真类库设计

面向对象建模与传统的面向过程建模侧重点不同,它强调的是系统的总体结构,而不是系统所涉及的具体过程;通过数据抽象、封装等技术,呈现在用户面前的是由对象(类的实例)作为基本成员的仿真系统. 要使该仿真系统容易扩充且达到最高的代码重用率,合理设计类层次结构是关键^[3].

本文设计的涡扇发动机性能仿真类库层次结构如图 2 所示,位于最顶层的 CEngElement 是所

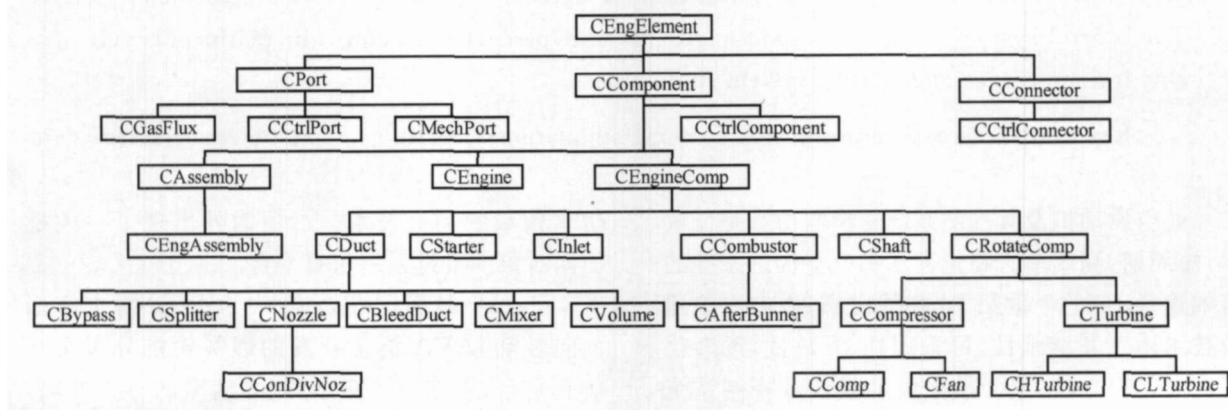


图 2 涡扇发动机性能仿真类库结构图

Fig. 2 Turbofan engine performance simulation class hierarchy

有类的父类,它派生出发动机性能仿真流程计算时所需的 3 个最基本的类:端口类 CPort、部件类 CComponent 以及连接器类 CConnector。它们分别派生出控制系统仿真计算时 3 个最基本的类:CCtrlPort、CCtrlComponent、CCtrlConnector。依据功能不同端口类 CPort 还派生出气态端口类 CGasFlux、机械端口类 CMechPort, 部件类 CComponent 派生出仿真组织类 CAssembly、整体发动机类 CEngine、广义发动机部件父类 CEngComp。CEngComp 类向下继续派生出更多的发动机元部件类,构成复杂的仿真类库,篇幅所限,不再一一赘述。

3 控制系统仿真类库设计

一般而言,航空发动机最基本的控制要求为在保证不超温、不超转等前提下保护燃油变化速度不超过限幅的主燃油控制规律。更为先进的则包括风扇/压气机导叶角、加力燃油、放气、防喘、尾喷管等控制规律。基于发动机控制需求,参照发动机类库,设计出发动机控制系统部件类库层次结构,如图 3 所示。

由 CCtrlComponent 类派生出用于控制的各个子类,包括主控制规律如高、低压转速调节规律 CNHRegulate、CNLRegulate 类等,风扇、压气机导叶角控制 CAngleCtrl 类,尾喷口面积控制 CA8Ctrl 类,放气控制 CDeflate 类,加力燃油控制 CWfaCtrl 类等。

为保证发动机不超温、不超压、不超转、转速变化不超过限幅、燃油流量不超过极值等,建立了限制器父类 CLimitCtrl 类及下属各子类。

另外,还有一些只负责计算,与发动机本身无关联或关联很小的类如 CPID 控制环节, CInte-

gral 积分环节, CDelay 延时环节, CSelect 高、低选环节等,共同继承父类 CNumeration。

4 辅助类库设计

仿真系统类库中除以上的结构性类以外,还定义了一些辅助的工具类,如 CVarTable、CVarMap、CGasState、CSolver 等。其中 CVarMap 是用于处理风扇、压气机及涡轮等从特性图上插值的工具类,它从部件特性图数据文件中读取数据,并根据插值参数计算插值结果。CVarMap 中的 LoadMap() 方法从文件读入旋转部件特性数据, InterpolateMap() 方法负责插值,可被外界调用。

在仿真过程中经常要了解各端口气体状态参数, CGasState 类提供由气体已知参数计算未知参数的方法,它封装了很多常用的计算气体状态的函数,例如:

CalcuH(faratio, total T); // 已知油气比、总温计算焓

CalcuK(faratio, total T); // 已知油气比、总温计算 k

CalcuMass(faratio, total P, total T, mahe, Area); // 计算流量

CalcuArea(faratio, total P, total T, mahe, mass); // 计算面积

CalcuMach(faratio, total P, total T, mass, Area); // 计算马赫数

CalcuH2T(han, faratio, Tmin, Tmax); // 由焓计算总温,二分法迭代

仿真时,如果需要计算气体状态,只需定义一个 CGasState 类对象,传送有关参数,然后调用 CGasState 类的相关函数即可完成计算,方便快捷。

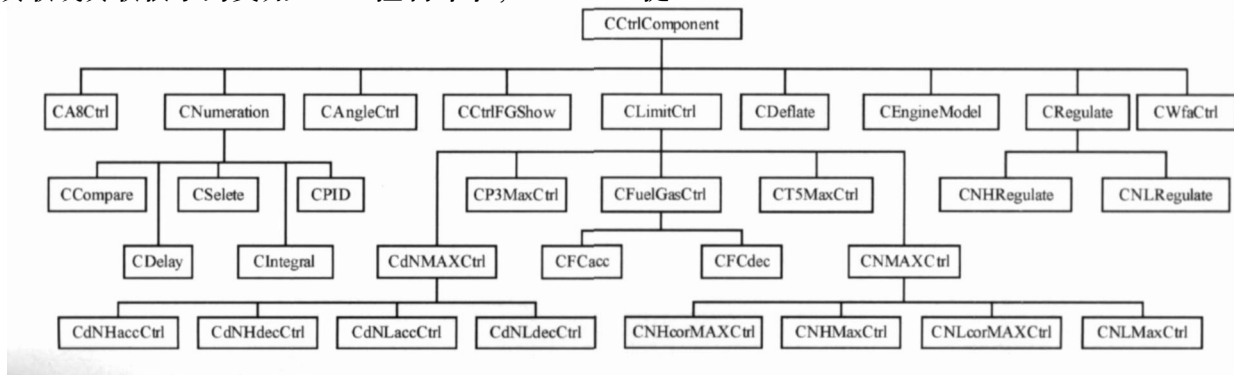


图 3 涡扇发动机控制系统部件类库结构图

Fig. 3 Turbopan engine digital control system simulation class hierarchy

CSolver 类中封装了常用的发动机数值计算方法,如拟牛顿法(Broyden())、牛顿-拉夫森法(UseNR())和最速下降法(Grads())等.

5 图形化仿真界面设计及实现

在 Visual C++ 平台上,开发了发动机及控制系统通用性能仿真平台,程序界面如图 4 和图 5 所示.

仿真主程序基于 MFC 的单文档视图(SDI)

构架开发,发动机各个部件及常用控制算法都被封装为一个图标存于模型库中,每个图标由部件和一个或更多的端口构成.以压气机为例(图 6),图标前后两侧各包含一个气流进、出端口,顶部有一个机械能端口.仿真时,用户将模块库中的部件拖入仿真主窗口,用实线(连接器)将各个物理部件端口连接起来,就构成了整个仿真系统.

为实现上述功能,专门定义 CSchematicIcon 类用于部件图标管理,它不仅包含图标显示、命

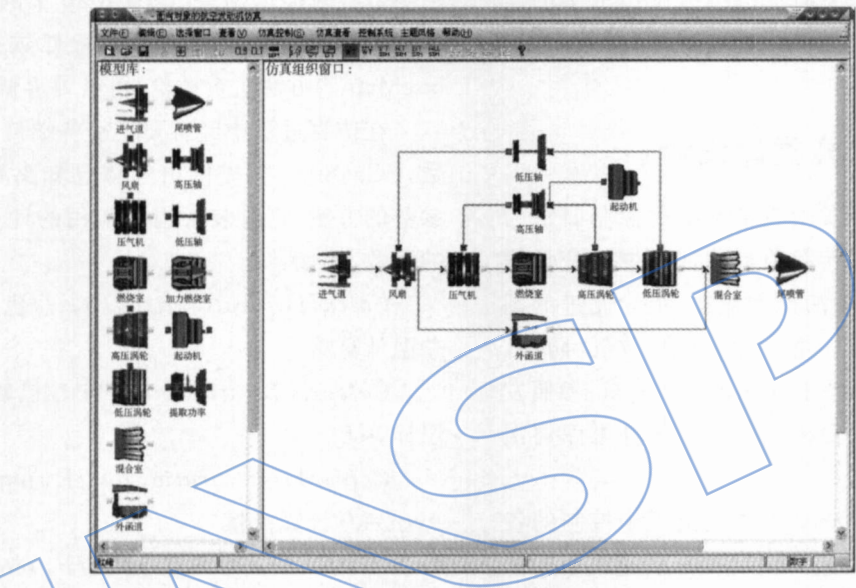


图 4 航空发动机性能仿真程序界面

Fig. 4 Aeroengine performance simulation program mainframe

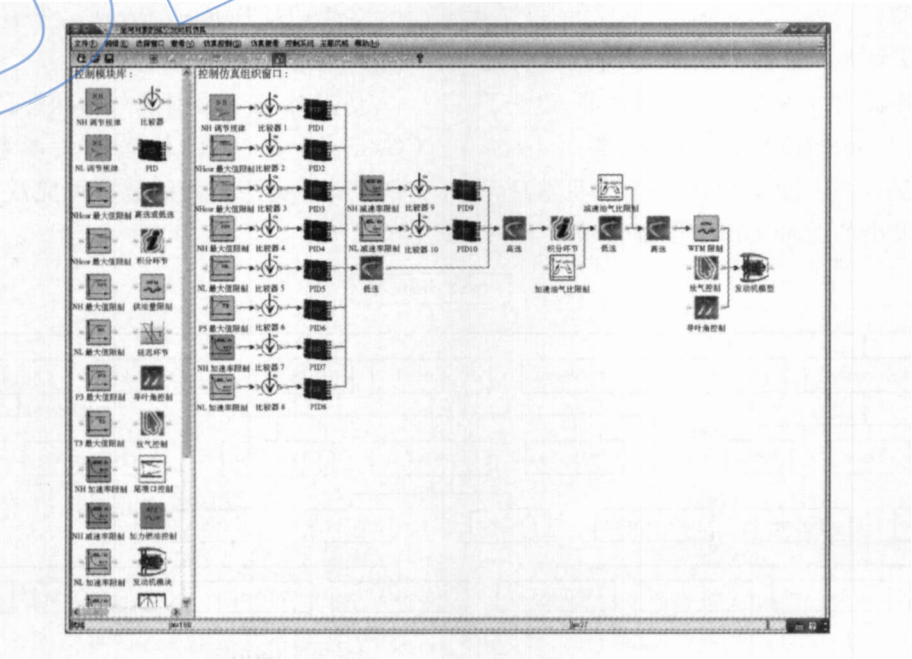


图 5 航空发动机控制系统仿真程序界面

Fig. 5 Aeroengine control system simulation program mainframe

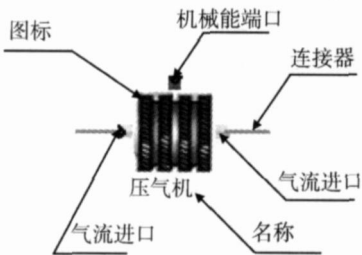


图 6 压气机部件图标

Fig. 6 Compressor icon

名、增添端口等常用功能,同时还负责记录图标及其所包含端口各个矩形的坐标,当鼠标指针落在矩形区域时,表示该矩形对应的部件或端口被选中,它是交互仿真的基础.

连接信息类 CVConnector 记录了图标之间连线的连接信息,图 4 和图 5 中包含很多连接信息类对象,通过记录对象起始和终了部件的 ID 号来相互区分.为记录仿真窗口中各部件之间连接关系,采用二维数组编码的方式来保存已构建好的仿真系统.编码规则如下:

$Component\ Flux\ Connect[0][1] = true;$
// 0-进气道编号,1-风扇编号,此处表示进气道出口接风扇进口(气态端口)

$Component\ Mech\ Connect[10][1] = true;$
// 1-风扇编号,10-低压轴编号,此处表示低压轴出口接风扇进口(机械能端口)

模型构建好后,需要对发动机各个部件及总体仿真参数进行设置,因此针对每一个模型库部件,都编写了参数设置对话框,用户通过它来完成仿真部件参数的设置.此外,仿真平台还具有通过数据文件快速设置系统各仿真部件参数的功能,适用于较多模块的仿真系统.发动机部件有了参数设置对话框,既可单独组织仿真,亦可作为总体仿真的一个模块(图 7).



图 7 压气机图标对话框

Fig. 7 Compressor icon dialog

该仿真平台可执行涡扇发动机全包线内全程仿真,动态仿真曲线实时显示(图 8),可在部件特

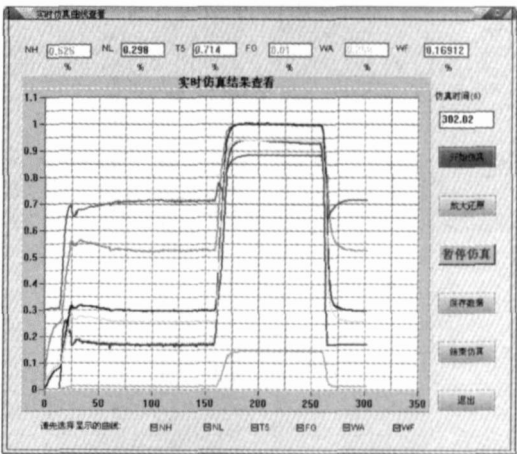


图 8 发动机性能动态仿真界面

Fig. 8 Engine transient performance simulation

mainframe

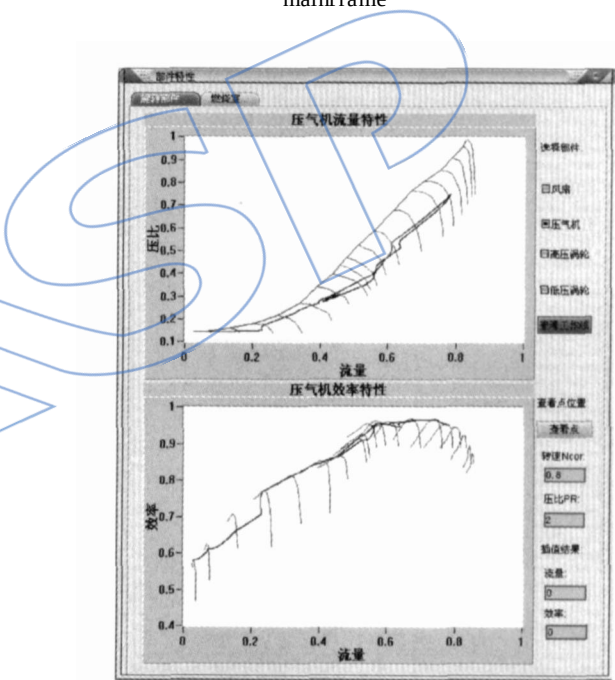


图 9 发动机性能动态仿真压气机共同工作线

Fig. 9 Compressor speed line during engine transient performance simulation

性图上查看稳、动态仿真发动机共同工作线(图 9),篇幅所限,具体实现过程在此从略.

6 仿真结果及分析

6.1 发动机性能仿真模型仿真结果及分析

选取与地面试车相同的燃油流量曲线(图 10(a)),执行地面状态下发动机从零加速到最大状态的全程动态仿真,并与试验结果进行对比,仿真结果如图 10(b)~(d)所示.

从图 10(b)和(c)可以看出,高、低压转速除慢车过渡状态(25~50 s)误差略大外(8%),其余

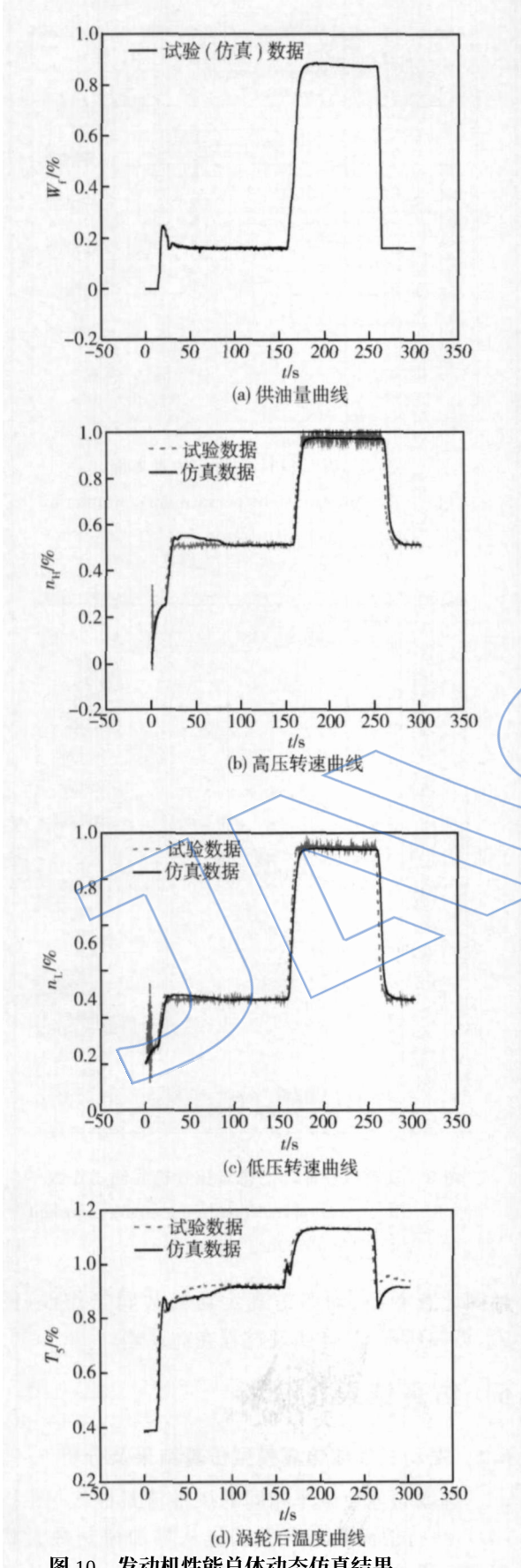


Fig. 10 Engine performance total simulation results

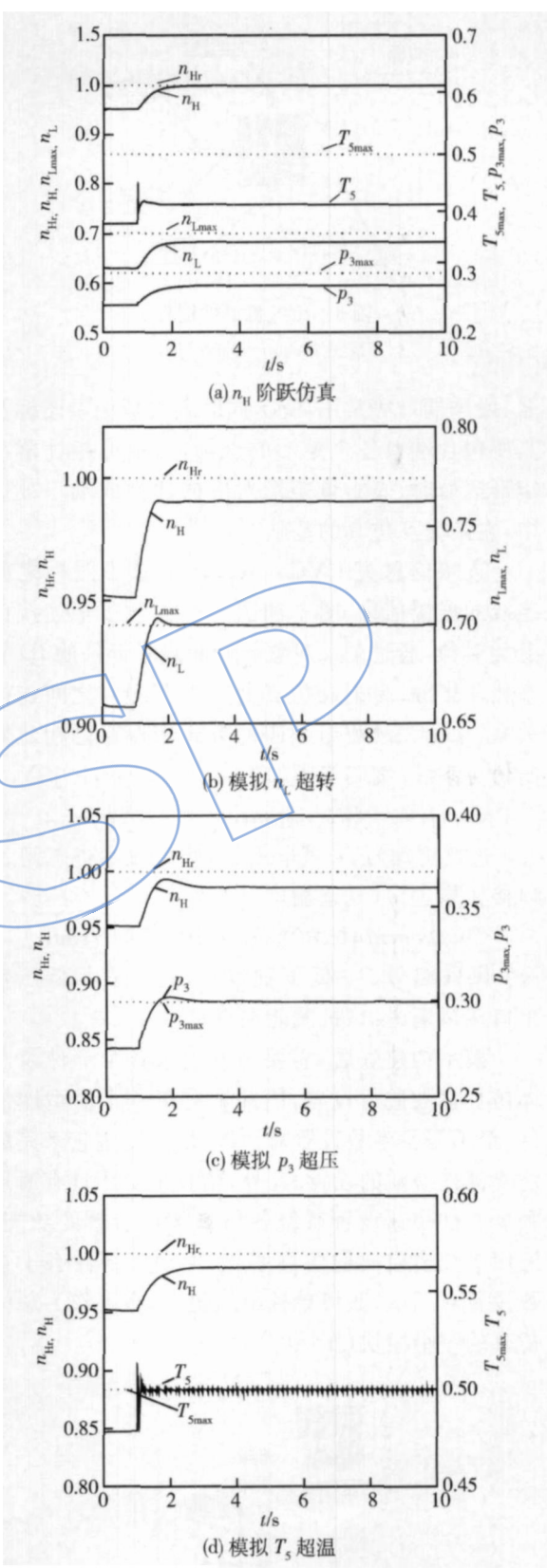


图 11 发动机控制系统仿真结果
($H=0, Ma=0$)

Fig. 11 Engine control system simulation results

阶段都与试验结果吻合的较好,动态误差小于 5 %。分析认为:这一阶段发动机处于起动富油燃

烧过程,燃烧效率偏小,加之此时受热惯性影响,燃烧室及涡轮气体温度偏低,发动机剩余功率减小,转速小于理想值,仿真模型在此阶段虽然已考虑了热惯性及油气比带来的燃烧效率影响,但仍需要修正.由于同样的原因,涡轮后温度在这一阶段也存在较大的误差(图 10(d)).采用容积动力学方法,本次 300 s 仿真在 P4 2.4 G 主频的计算机上实际仿真时间仅花费 80 s,满足实时仿真要求.

6.2 发动机控制系统仿真结果及分析

按照图 5 搭建发动机控制系统,高压转速作阶跃响应,低压转速、压气机出口压力及涡轮后温度模拟超限的响应如图 11 所示.

从图 11(a)中可以看到,调节时间 1 s 时,对高压转速作 5 %的阶跃,响应迅速,调节时间小于 1 s,无超调.由于 n_L 、 T_5 和 p_3 未达到其限制值 $n_{L\max}$ 、 $T_{5\max}$ 和 $p_{3\max}$,故各限制器未起作用.图 11(b)~(d)分别模拟发动机工作过程中超转、超压、超温等状态,由于各个限制器的保护作用, n_L 、 T_5 和 p_3 一旦超出其限制值就会受限制器作用而迅速下降到其最大限制值,故 n_H 上升到一定位置后停止,与期望的阶跃终值 n_{Hr} 保持一个差距.

7 结 论

本文采用面向对象的方法建立了涡扇发动机及其控制系统模型库,并在此基础上构建了涡扇发动机及其控制系统通用性能仿真平台,仿真结果表明,该平台能实现发动机从零加速到最大状态的动态实时仿真,动态误差小于 8 %,控制系统响应快,超调小,各限制器正常工作,能够满足一般的控制需求.在交互式仿真、模块化构建仿真模型等方面也做了一些有益的尝试.今后,在提高现有涡扇发动机性能仿真精度的基础上,可考虑扩充发动机及控制系统模型库,实现涡轴、涡桨发动机及其控制系统的性能仿真.

参考文献:

[1] Drummond C K, Follen G J, Putt C W. Gas turbine system simulation: an object-oriented approach [R]. NASA-TM-106044. Lewis Research Center Cleveland: NASA. 1992.

[2] Curlett B P, Felder J L. Object-oriented approach for gas turbine engine simulation [R]. NASA-TM-106970. Lewis Research Center Cleveland: NASA. 1995.

[3] Reed J A. Onyx. An object-oriented framework for computational simulation of gas turbine systems [D]. Toledo, USA: The University of Toledo, 1998.

[4] Visser W P J, Broomhead M J. GSP: A generic object-oriented gas turbine simulation environment [R]. NLR-TP-2000-267, Holand: National Aerospace Laboratory NLR, 2000.

[5] Alejandro A. Modeling of a gas turbine with modelica TM [D]. Master Thesis, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden: May 2001.

[6] Turner M G, Norris A, Veres J P. High-fidelity three-dimensional simulation of the GE90 [R]. NASA TM-2004-212981, 2004.

[7] Turner M G, Reed J A, Ryder R, et al. Multi-fidelity simulation of a turbofan engine with results zoomed into mini-maps for a zero-D cycle simulation [R]. NASA TM-2004-213076, 2004.

[8] 唐海龙, 张津. 面向对象的航空发动机性能仿真程序设计方法研究 [J]. 航空动力学报, 1999, 14(4): 421-424.
TANG Hailong, ZHANG Jin. A study of object-oriented approach for aeroengine performance simulation [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(4): 421-424.

[9] 唐海龙, 张津. 数据通信模式及其在面向对象的航空发动机性能仿真系统中的应用 [J]. 航空动力学报, 2000, 15(3): 298-302.
TANG Hailong, ZHANG Jin. Data communication model and its application in object-oriented aeroengine simulation system [J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(3): 298-302.

[10] 谢志武. 面向对象的燃气轮机仿真研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 1998.
XIE Zhiwu. Research on object-oriented gas turbine simulation [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 1998.

[11] 窦建平, 黄金泉, 周文祥. 基于 UML 的航空发动机建模研究 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 684-688.
DOU Jianping, HUANG Jinquan, ZHOU Wenxiang. Research of aeroengine modeling based on UML [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 684-688.

[12] 周文祥, 黄金泉, 窦建平. 涡扇发动机部件级起动模型 [J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 248-253.
ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan, DOU Jianping. Development of component-level startup model for a turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 248-253.