

文章编号: 1000-8055(2007)12-2134-05

基于 MATLAB/SIMULINK 的航空发动机 建模与仿真研究

夏 飞, 黄金泉, 周文祥

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 基于 MATLAB/SIMULINK 高级图形仿真环境, 利用图形模块化技术开发了某型双轴涡扇发动机的通用部件级模型仿真系统。模型主要利用 SIMULINK 的模块库和 S 函数构建, 提出了构建发动机模型的四层次结构, 具有模型层次化、可封装模块化、面向结构图和高度可视化等特点。在 SIMULINK 中进行动态仿真, 并用试验数据曲线验证模型的正确性。为发动机控制系统和故障诊断研究建立了一种灵活的仿真平台。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 部件级模型; 图形模块化技术; SIMULINK; 仿真

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Modeling of and simulation research on turbofan engine based on MATLAB/SIMULINK

XIA Fei, HUANG Jin-quan, ZHOU Wen-xiang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A generic component-level simulation model of a turbofan engine was developed using graphical modularization technology in MATLAB/SIMULINK graphical simulation environment. With modular block library of SIMULINK and S-function of MATLAB, the goal of this model is to develop a four-layered, modular and highly visible engine structure facing structural diagram. Dynamic simulation was made in SIMULINK, and the model was validated from test data curve. This provides a flexible simulation platform for future research on engine control and fault diagnostics.

Key words: aerospace propulsion system; component-level model; graphical modularization technique; SIMULINK; simulation

航空发动机建模一直是航空发动机领域的重要研究方向,是航空发动机控制系统半物理仿真试验、检验控制器性能的基础。目前,控制系统研究中应用的发动机模型大部分是由 FORTRAN 或 C 语言等编写的部件级模型,基于这些语言的发动机模型在进行控制系统研究时常常遇到的难点是该平台缺少控制和分析方面的工具。所以,迫切需要一种可以快速实现控制系统分析、诊断的

图形化仿真平台^[1-2],能通过图形用户界面直接了解控制参数和发动机参数;并具有将控制系统设计转化为实时代码的能力。MATLAB 就是这样一种优秀的图形仿真平台,不仅有 SIMULINK 建模仿真工具包、CONTROL SYSTEM 控制工具包和 REAL-TIME WORKSHOP 实时代码转化工具,还提供了各种用于复杂非线性系统的仿真分析工具,发动机模型系统在其图形仿真环境

收稿日期: 2006-12-28; 修订日期: 2007-01-26

作者简介: 夏飞(1981-),男,江苏扬州人,硕士生,主要从事航空发动机建模和仿真研究。

中,是一种发动机控制设计和诊断的强大工具^[3]。

SIMULINK 是典型的面向图形对象的、高度可视化的建模仿真工具,在 SIMULINK 提供的图形用户界面上,以方块图表示对象模块,将系统分解成在物理和功能上相对独立的子系统,而各子系统模块采用分层结构,使整个系统直观明了,建模的自由度大大提高;而且对象模块的通用性和移植性更强,可以以极小的变动获得对整个模型的修改,从而大大提高建模效率和可维护性。

本文在 SIMULINK 平台,用面向图形对象方法建立某型双轴涡扇发动机的模型仿真系统,旨在建立一种方便灵活的发动机仿真平台,能轻易访问或修改发动机的各种参数,并且利用其强大的工具库可以快速实现系统的控制测试和诊断。

1 发动机模型平台及建模方法

建模对象为典型的双轴涡扇发动机,图 1 为考虑容积动力效应的涡扇发动机结构图。

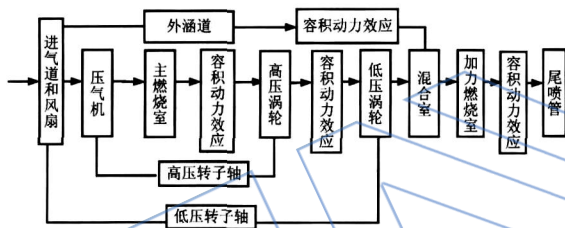


图 1 双轴涡扇发动机部件结构图

Fig. 1 Structure of a two-spool turbofan engine

模型以高、低压转速,风扇、压气机和高、低压涡轮的压比作为系统变量,以燃烧室供油量为控制量,采用容积动力学方法实现模型的动态仿真。发动机部件气动热力数学模型基于下列假设:忽略部件热惯性及燃烧滞后的影响,考虑转子惯量的影响;气体在发动机中的流动按一元流动处理。

SIMULINK 具有进行动态复杂系统建模、仿真和综合分析的能力,该建模平台不仅提供了建立发动机各部件数学模型所需的数值计算模块。建模思想是利用 SIMULINK 的图形模块库建立层次化的发动机模型结构,依据可重用性和扩展灵活的需求,每一层的设计采用可封装模块,并按照发动机及其各部件的气动热力特点建立各自独立的部件模块及其子模块,每个子模块内也是图形模块化的数学模型。本文提出了发动机模型的四层次结构:发动机层、发动机部件层、气动热力模块层和最基本的数值计算层。

1.1 发动机层

发动机层,也叫做仿真层,是整个发动机仿真

平台的最顶层,如图 2 所示。仿真层的功能有以下几方面:环境参数包括环境压力 p_0 和温度 T_0 的输入;飞行参数包括高度 h 、马赫数 Ma 的输入;控制量即燃烧室供油量 W_f 的输入;模型全局变量管理,包括全局仿真标志位设定、全局变量暂存空间管理等;仿真起始、结束时间,动态步长,算法选择等仿真参数的设置;以及仿真结果的保存与显示。双击“部件级模型”封装模块,会出现模块功能说明和被封装变量的赋值。

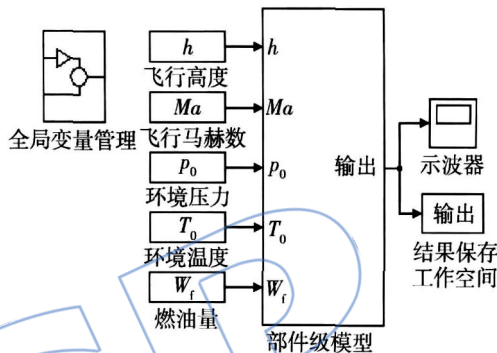


图 2 发动机层示意图

Fig. 2 Scheme of engine-level model

1.2 发动机部件层

发动机部件层,是连接发动机各部件模块进行流路计算的,如图 3 所示。具体的部件模块有:进气道、风扇、压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮、外涵道、混合室、尾喷管等。发动机各部件的数学模型被封装成独立的模块,部件间的信息传递由节点及连线完成。部件层接受上一层仿真层的输入到各部件模块参与流路计算,所得到的各性能参数再传递到上一层。控制量 W_f 和系统变量 $N_h, N_1, PI_F, PI_C, PI_{HT}, PI_{LT}$ 组成变量流,贯穿整个发动机流路计算^[4]。

1.3 气动热力模块层

气动热力模块层,部件层的下一层,是根据发动机各部件的气动热力特点,将部件典型气动热力参数的数学模型进行独立模块化,每个模块封装一类气动热力计算。这种方式可以方便地对部件模型进行修改和扩展,提高了建模的灵活性。

以压气机为例介绍气动热力模块层的结构特点,如图 4 所示。根据压气机数学模型的特点将部件模型划分为以下的子模块:相似转速计算子模块、流量与效率特性插值计算子模块、出口总压计算子模块、出口总温计算子模块、出口流量及冷却气流计算子模块、放气模拟计算子模块、压气机功计算子模块以及变量流子模块等。这些子模块代

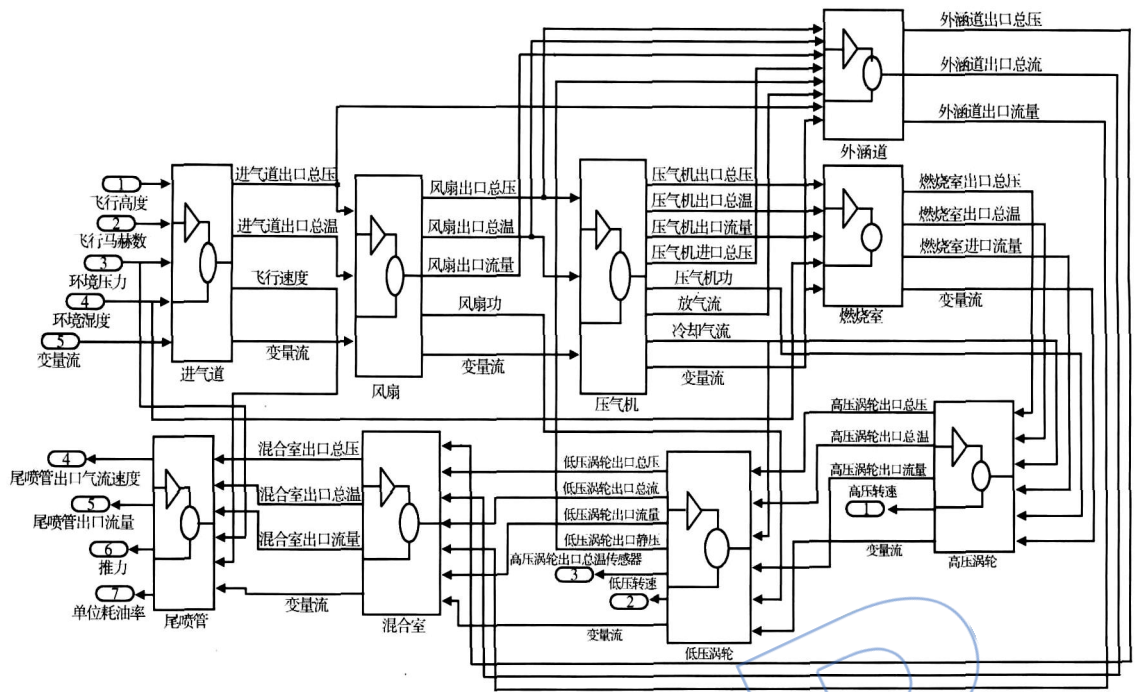


图 3 发动机部件层模型

Fig. 3 Scheme of component-level model

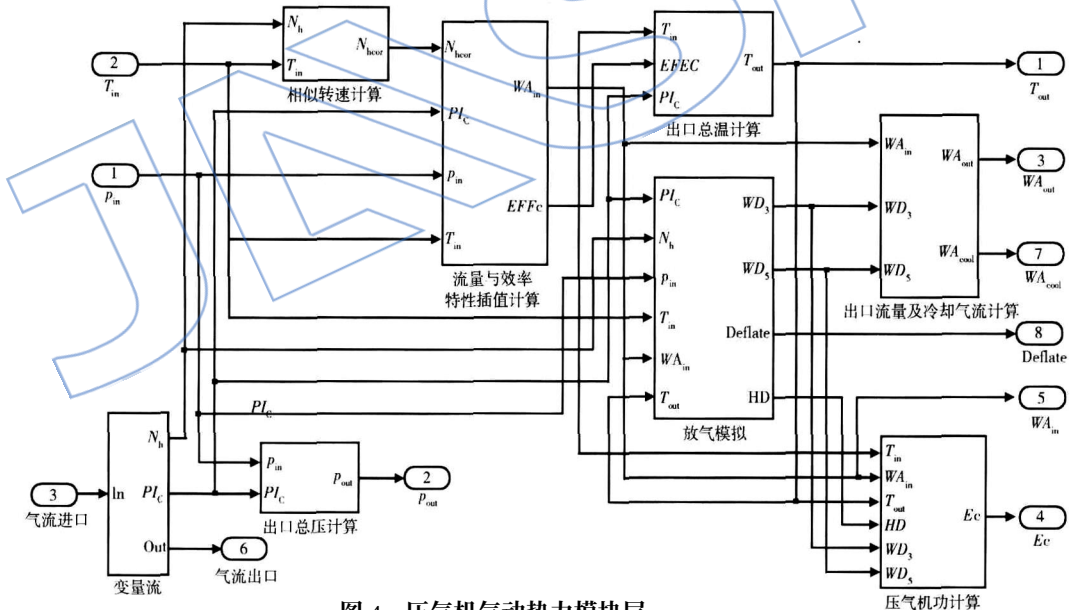


图 4 压气机气动热力模块层

Fig. 4 Scheme of thermodynamic-level model

表了压气机的典型气动热力参数,修改时可以针对某一个子模块而不影响其它参数的子模块.还可以方便地对其它的压气机参数的计算子模块进行扩展.

1.4 数值计算层

数值计算层,是模型的最底层,主要完成各气动热力模块内部的数值计算.简单的数值计算利用 SIMULINK 模块库中各类数值计算模块.如遇到更复杂的问题,例如迭代、分段函数等;或者

SIMULINK 不能解决的函数问题,就要用到 S 函数(System Function). S 函数是 SIMULINK 提供的一种模板,可以 C 语言或 MATLAB 语言编程,然后形成 S 函数模块嵌入到 SIMULINK 模型中参与计算.

以压气机为例介绍各气动热力模块内部数学模型的计算过程^[5].

(1) 相似转速计算子模块

$$N_{hcor} = (N_h / \sqrt{T_{in}}) / (N_{hd} / \sqrt{T_{ind}}) \quad (1)$$

其中, N_{hd} , T_{ind} 分别为高压转速与压气机进口总温的设计值, 它们都被封装为模块变量, 由建模人员输入。

(2) 流量与效率特性插值计算子模块

$$\begin{cases} WA_{in} = f_1(N_{hcor}, P_{IC}) \\ EFF_C = f_2(N_{hcor}, P_{IC}) \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_{IC} 为压气机压比, f_1, f_2 代表压气机特性插值计算, 是以 S 函数形式完成。

(3) 出口总压计算子模块

$$p_{out} = p_{in} \times P_{IC} \quad (3)$$

(4) 出口总温计算子模块

$$T_{out} = (1 + (P_{IC}^{(k-1)/k} - 1) / EFF_C) \times T_{in} \quad (4)$$

其中, k 为气体常数。

(5) 出口流量及冷却气流计算子模块

$$W_{out} = WA_{in} - WHT_{cool} - WLT_{cool} - WD \quad (5)$$

其中, WHT_{cool} 为高压涡轮冷却流量, WLT_{cool} 为低压涡轮冷却流量, WD 为压气机 3 级与 5 级放气量之和, $WD = WD_3 + WD_5$ 。

(6) 压气机功计算子模块

$$E_C = WA_{in} (h_{out} - h_{in}) \quad (6)$$

其中, h_{out} 出口气体比焓, h_{in} 进口气体比焓。

SIMULINK 模型中的系统模块都被规范化封装, 模块封装标准包括模块的名称标识、功能描述、输入输出参数说明、内部变量封装与初始化以及模块美化等方面, 与模块的通用性、可读性和易用性有着密切的关系。模型具有针对发动机重要参数进行监视并提示错误的功能, 一旦被监视的参数数值超出某种范围, 立即弹出对话框提醒用户。

通过上述四层次模型结构, 建立了发动机的 SIMULINK 功能模型, 随后可在此基础上扩展建立稳态模型和动态模型并进行仿真。

1.5 稳态模型

稳态性能仿真的部件级模型包括部件模型、气路计算及稳态共同工作方程求解。部件模型模拟了部件内的气动热力过程, 气路计算则按一定的顺序计算发动机各部件进出口截面气流参数, 算得的有关气流参数须受共同工作方程的约束。

SIMULINK 稳态模型可以通过扩展功能模型得到, 因为只要求稳态模型计算残差向量。稳态求解是在 MATLAB 平台上, 以 M 文件形式完成稳态共同工作方程组的初始化及迭代过程, 由稳态求解 M 文件向稳态 SIMULINK 模型传递控制

量和初猜向量, 模型计算得到的残差向量返回至 M 文件求解雅可比矩阵, 并进行牛顿 - 拉夫森迭代修正初猜值直至满足稳态条件, 最终求得一组某控制量下的稳态系统向量。图 5 显示了稳态仿真的过程。

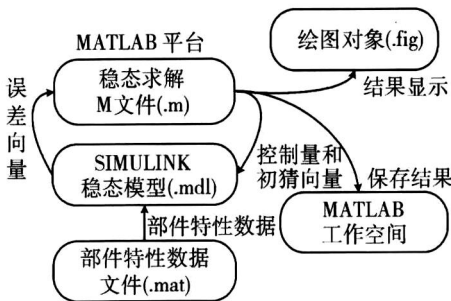


图 5 发动机稳态仿真示意图

Fig.5 Scheme of steady simulation

1.6 动态模型

确定了初始稳态值后就可以进行动态模型的建立及其仿真。在 SIMULINK 功能模型的基础上增加转子动力学模块和容积动力学模块就建立了动态 SIMULINK 模型。动态仿真过程: 先设定仿真参数; 在动态 SIMULINK 模型中嵌入初始稳态点; 从 MATLAB 工作区 (WORKSPACE) 导入供油量; 进行发动机流路计算, 得到各部件截面参数; 再分别由转子动力学模块与容积动力学模块计算下一步的转速和压比, 即下一步的系统向量; 系统向量暂存在仿真层的全局变量暂存空间中用于下一步仿真, 随着仿真的进行, 全局变量暂存空间中的系统向量会在每一步更新, 这样的循环保证了动态仿真的顺利进行。图 6 显示了动态仿真的过程。

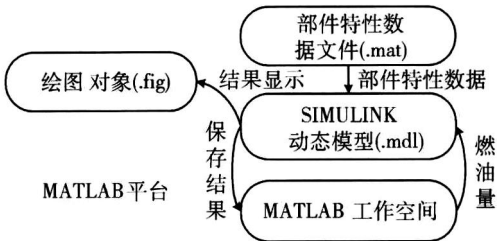


图 6 发动机动态仿真示意图

Fig.6 Scheme of dynamic simulation

随着建模的深入, 当对动态模型进行仿真后, 可能对前面的模型有修改、扩充和完善, 这就会造成模型之间的不一致, 因此必须检查模型的一致性。初次建立的模型可能还不完善, 如果反复上述过程, 仔细检查各模型, 逐步得到完整精确的模

型^[6].最终,利用 REAL-TIME WORKSHOP 工具将模块模型转换为 C 语言代码,可实现模型实时仿真.

2 动态仿真验证

模型的动态仿真采用基于容积动力学的无迭代方法.为了验证 SIMULINK 仿真平台,开展了慢车以上的加减速过程动态仿真研究,并将发动机地面试车曲线和模型仿真曲线进行比较,图 7 和图 8 是高低压转速的仿真对比结果.对比可见,仿真曲线和试车曲线存在一定“延迟”,这主要是仿真供油量数据的测量延迟造成的.如果排除“延

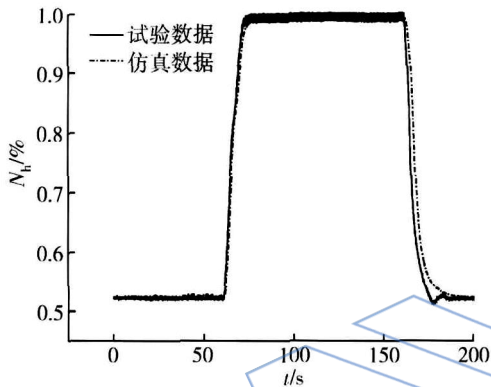


图 7 高压转速曲线

Fig. 7 High pressure spool speed

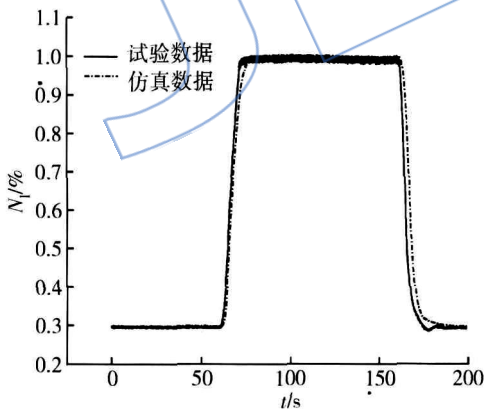


图 8 低压转速曲线

Fig. 8 Low pressure spool speed

迟’的影响,动态仿真的相对误差小于 5%.此外,模型的稳态误差小于 3%.

3 结 论

SIMULINK 建模是目前较直观、较灵活的建模方法,建立发动机模型的过程符合人们的感官思维,给人以直观的物理概念和过程;其高可靠性、高精度的数值计算模块,让建模工作量大为减少.本文利用 SIMULINK 开发涡扇发动机部件级模型仿真系统,提出了建模的四层次结构,建立了一种方便灵活的发动机仿真平台,可以此为基础快速实现系统的控制测试和诊断.动态仿真与试验数据进行比较验证表明,SIMULINK 具有对非线性动态系统建模仿真的强大功能,并具有较高的建模精度.

参考文献:

- [1] Curlett B P, Felder J L. Object-oriented approach for gas turbine engine simulation[R]. NASA TM-106970, Ohio: Lewis Research Center, 1995.
- [2] Reed J A. Onyx: An objected-oriented framework for computational simulation of gas turbine systems[D]. America: The University of Toledo, 1998.
- [3] Parker K I, Guo T H. Development of a turbofan engine simulation in a graphical simulation environment [R]. NASA/ TM-2003-212543. Cleveland, Ohio: Glenn Research Center, 2003.
- [4] Khary I P, James L F, Thomas M L, et al. Integrated control modeling for propulsion systems using NPSS[R]. NASA- TM-2004-212945, 2004.
- [5] 周文祥,黄金泉,窦建平. 涡扇发动机部件级起动模型研究[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.
- [6] 窦建平,黄金泉,周文祥. 基于 UML 的航空发动机仿真建模研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 684-688.
DOU Jianping, HUANG Jinquan, ZHOU Wenxiang. Research for aeroengine modeling based on UML[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 197-201.