

文章编号:1000-8055(2012)12-2850-07

基于 GasTurb/MATLAB 的航空发动机部件级模型研究

张书刚, 郭迎清, 陆 军

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 基于航空发动机总体性能分析软件 GasTurb 及其源代码, 利用动态链接库技术实现在控制系统开发平台 MATLAB 下直接调用 GasTurb 部件级动态模型, 并在 Simulink 下建立了包含涡喷、涡扇、涡轴、涡桨在内的 22 种发动机类型的部件级模型库, 实现了两者之间的无缝衔接. 应用实例与仿真结果验证了所建模型的有效性与高度可定制性. 消除了从总体性能分析阶段过渡到控制系统开发阶段存在的交互障碍, 为发动机控制和故障诊断研究提供了一种灵活的仿真平台.

关 键 词: 部件级模型; 动态链接库; GasTurb/MATLAB; 仿真平台; 发动机控制和故障诊断

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Research on aircraft engine component-level models based on GasTurb/MATLAB

ZHANG Shu-gang, GUO Ying-qing, LU Jun

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aircraft engine component-level models were developed in MATLAB using the dynamic link library technology based on GasTurb which is an aircraft engine performance analysis software. An aircraft engine component-level model library consisted of 22 models including turbojet, turbofan, turboshaft, and turboprop engine types was built in Simulink. Then the seamless transition was achieved from GasTurb to MATLAB. The application example and simulation results verified the validity and high customizability of the models. The interaction barrier between performance analysis and control system development was eliminated and a flexible simulation platform was provided for the future research on engine control and fault diagnosis.

Key words: component-level model; dynamic link library; GasTurb/MATLAB; simulation platform; engine control and fault diagnosis

总体性能分析与控制系统开发是发动机研制过程中两个不同的领域. 为了满足控制系统开发阶段对发动机模型的需求, 传统的处理方法是, 根

据总体性能分析平台下设计的发动机模型参数, 在控制系统开发平台下重新建立具有一定动、静态精度的专用模型^[1]. 而按照发动机内在的气动

收稿日期: 2011-11-26

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2850_014.html

基金项目: 航空科学基金(2011ZB53)

作者简介: 张书刚(1985—), 男, 河北清河人, 博士生, 主要从事航空发动机控制与故障诊断技术研究.

热力学规律建立其数学模型,是发动机总体性能分析专家们的专长,并不为控制工程师所熟悉^[2]。这就明显增加了工作量,降低了部门间交互效率以及扩大了出现潜在错误的风险。

在总体性能分析领域,由德国 MTU (Motoren-und Turbinen-Union) Aero Engines 公司 Kurzke 博士开发的 GasTurb 软件,以其友好的人机界面、优秀的仿真精度、完备的压气机/涡轮特性图处理等配套辅助工具,在该领域得到了广泛的应用与认可^[3-7]。而在发动机控制系统开发领域, MATLAB 及其 Simulink 建模仿真工具包、control system 控制工具包、real-time workshop 实时代码转化工具包等配套工具,组成了可以快速实现控制系统开发与设计的图形化仿真平台^[8-14]。

本文提出一种通过动态链接库技术实现在 MATLAB 下直接调用 GasTurb 中部件级动态模型的方法。旨在实现在控制系统开发平台下,直接调用在总体性能分析平台下完成设计的发动机模型,从而使得总体性能分析与控制系统开发两者之间能够无缝衔接,有效解决传统建模方式存在的问题。

1 MATLAB 调用 GasTurb 下模型的动态链接库方法

所谓 MATLAB 下直接调用 GasTurb 部件级动态模型的动态链接库方法,主要是指先以 GasTurb 的 Pascal 语言源代码为基础,添加必要的代码,在 Delphi 平台下建立扩展名为 DLL (dynamic

link library) 的动态链接库 A。然后以 C/C++ 方式的 S 函数接口技术在 MATLAB 中建立扩展名为 MEXW32 的动态链接库 B。通过动态链接库 B 对动态链接库 A 及发动机模型配置文件的调用,实现在 MATLAB/Simulink 中以图形化模块方式直接调用 GasTurb 的发动机部件级动态模型。具体实现方式如图 1 所示。

其中,动态链接库 A 包含 GasTurb 发动机部件级动态模型计算程序,但不包含模型参数;动态链接库 B 包含 S 函数主体计算程序、调用动态链接库 A 需要的输入/输出接口、与 MATLAB/Simulink 模块交互输入/输出接口;发动机模型配置文件由 GasTurb 设计生成,包含动态链接库 A 需要的各种模型参数,并可以根据需要随时对发动机的各种参数进行访问或修改。

这样,通过构建 A、B 两种方式的动态链接库,在实现 Pascal、C/C++ 以及 M 三种编程语言之间数据衔接的同时,保证了高度可定制的通用特性,为 GasTurb 下的总体性能分析过渡到 MATLAB 下控制系统开发提供了简便的交互途径。

1.1 Delphi 下建立动态链接库 A

动态链接库 A 中包含发动机配置文件读取程序、发动机部件级动态模型计算程序、与动态链接库 B 的输入/输出接口程序,由 Pascal 语言编程实现,在 Delphi 平台下编译生成。具体实现方式如下:

1) 定位 GasTurb 源代码中用于部件级动态模型计算的功能函数,主要包括:

① 配置文件读取函数: ReadEngineModel(),

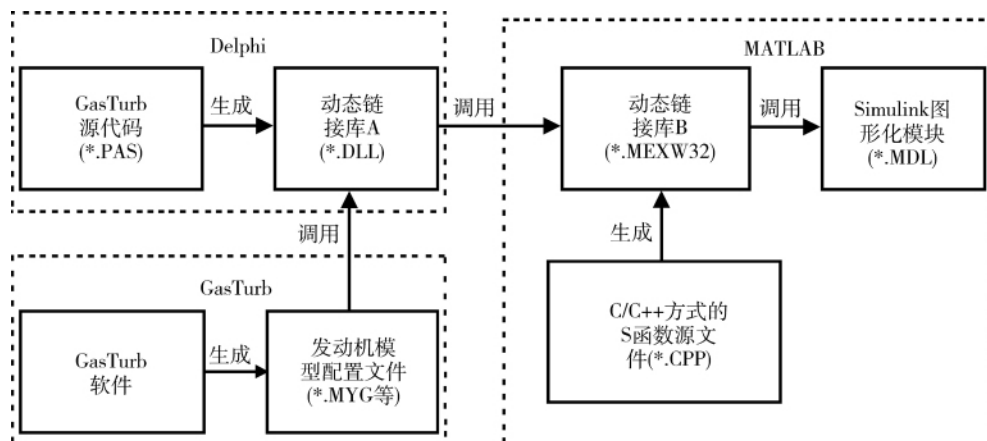


图 1 动态链接库方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the dynamic link library

可以读取发动机模型配置文件中发动机性能参数,供后续模型计算程序使用。

② 设计点计算函数:Engine_cycle(),完成设计点计算功能,为非设计点计算提供初始值。

③ 初始化过渡态函数:InitializeTransition(),完成对过渡态计算的参数初始化功能。但是只能以高压转子转速或者燃烧室出口总温作为输入,不能以主燃油流量作为输入。

④ 过渡态计算函数 calculate_transient_point(),按照控制指令完成过渡态计算功能。

2) 在 1) 中功能函数的基础上,添加必要的代码,完成发动机部件级动态模型计算程序,计算程序包含 3 个函数,过渡态初始化函数、过渡态计算函数、释放内存函数。

① 过渡态初始化函数 TransitionInitialize()。

该函数主要完成对指定发动机类型、配置文件以及外部输入情况下的过渡态初始化,只在模型计算开始阶段运行 1 次。在原有初始化过渡态函数 InitializeTransition() 的基础上,采用迭代修正概念,以设计点为初始值进行逐步赋值,直至逼近外部输入,实现以主燃油流量作为输入的过渡态计算初始化。需要说明的是给定配置文件中的控制值函数 evaluate_pilot_input() 部分,这是指在 GasTurb 软件中已设定的放气、引气、变几何等开环控制规律并保存在模型配置文件中,在进行过渡态计算时,如果后面的外部输入中没有对其相应参数进行重新赋值,那么这些可控量就按配置文件中的控制规律工作。这样不仅可确保已设计的控制规律体现在 MATLAB 中,而且可通过提供的接口随时进行重新设计。具体实现流程如图 2 所示。

② 过渡态计算函数:TransitionState()。该函数根据配置文件中的控制规律以及外部输入进行过渡态计算,每个采样时间运行一次。

③ 释放内存函数:TransitionFree()。该函数主要将模型计算程序所分配的内存空间进行释放,模型计算终止阶段运行一次。

3) 与动态链接库 B 的输入/输出接口程序。定义与动态链接库 B 对应的输入/输出接口结构体,其中基本输入/输出参数、非设计点输入/输出参数的定义完全对应于 GasTurb 程序配置文件(*.NMS)中相应参数,并增加主燃油流量与仿真步长等作为额外输入。通过与动态链接库 B 之间约定的参数传递方案,在不改变动态链接库 A 的情况下,实现输入接口自定义配置。

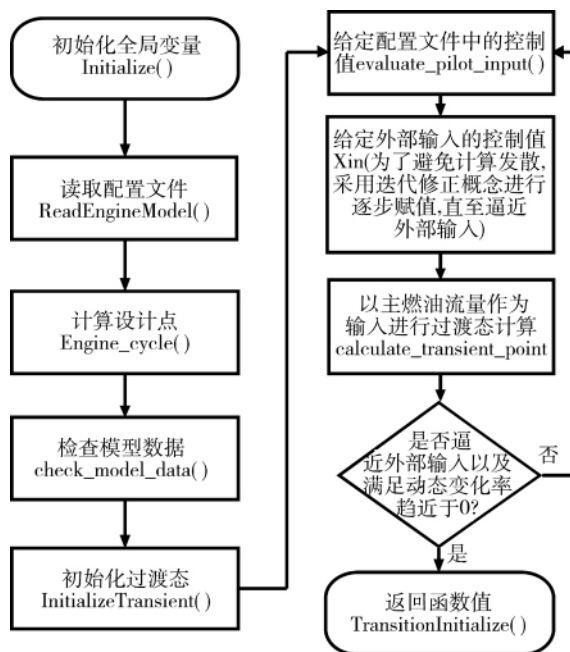


图 2 过渡态初始化函数流程图

Fig. 2 Schematic diagram of TransitionInitialize()

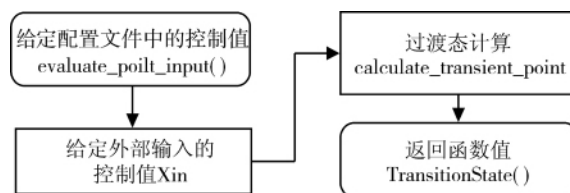


图 3 过渡态计算函数流程图

Fig. 3 Schematic diagram of TransitionState()

① 输入与输出结构体定义:

InputValue=record// 输入结构体

EngineType:integer;// 发动机类型

pGasTurbDir:Pchar;// GasTurb 安装路径

pModelFileName:Pchar;// 发动机模型配置

文件名

WFM:real;// 主燃油流量

SampleTime:real;// 采样时间

bio_data_i_value:array[1..max_basic_i_names] of single;// 基本输入参数

od_data_i_value:array[1..max_offdesign_i_names,1..max_offdesign_options] of single;

// 非设计点输入参数

end;

OutputValue=record// 输出结构体

bio_data_o_value:array[1..max_basic_o_names] of single;// 基本输出参数

```
od_data_o_value:array[1..max_offdesign_o_
_names,1..max_offdesign_options] of single; //
非设计点输出参数
```

```
end;
```

② 与动态链接库 B 约定参数传递方案,当动态链接库 B 传入的输入不为 888888 时,则按照动态链接库 B 给定的输入值对参数赋值,否则就按照读取的配置文件中的参数值进行模型计算,从而实现在不改变动态链接库 A 的情况下,对输入接口进行自定义配置。

4) 利用 Delphi 的 DLL 程序框架进行编译生成动态链接库 A。

① 在 Delphi 平台下创建 library 工程文件。

② 在该工程文件下添加 2) 中过渡态初始化函数、过渡态计算函数、释放内存函数程序代码。

③ 在 exports 子句中将上述函数列出,以输出供其他应用程序使用。

④ 利用 Delphi 平台将 library 工程文件编译生成扩展名为 DLL 的文件,即动态链接库 A。

1.2 MATLAB 下建立动态链接库 B

动态链接库 B 中包含 S 函数主体计算程序、与动态链接库 A 的输入/输出接口程序、与 Simulink 模块输入/输出接口程序,在 MATLAB/Simulink 提供的 S 函数模版的基础上完成,由 C/C++ 语言编程实现,在 MATLAB 平台下编译生成。具体实现方式如下:

1) 在 S 函数声明段,定义与动态链接库 A 对应的输入/输出接口结构体,以确保参数传递的正确性。

2) 在 S 函数模版函数:mdlStart 中添加以下程序:

① 按照与动态链接库 A 约定的参数传递方案对基本输入参数和非设计点输入参数赋初值 888888。

② 通过 windows API 函数实现 C/C++ 调用动态链接库 A 中功能函数。其中,LoadLibrary 用于装载包含动态链接库 A 的 DLL 文件并获取其句柄;GetProcAddress 用于获取相关功能函数的指针,从而实现将动态链接库 A 中的函数转变为 C/C++ 下的函数,以过渡态初始化函数为例:

```
hModule=LoadLibrary("GT10DLL.dll");
//装载 DLL 并获取其句柄
```

```
TransitionInitialize = (PTransitionInitial-
ize) GetProcAddress (hModule," TransitionIni-
```

```
tialize"); //获取 TransitionInitialize 函数指针
```

③ 确定发动机类型、配置文件名以及文件安装路径。通过指定发动机类型、配置文件名以及文件安装路径等,就可让动态链接库 A 的功能函数根据相应配置实现不同类型发动机的性能计算。

```
InputStr.EngineType=6; //发动机类型
```

```
InputStr.pGasTurbDir="D:\GT10\Gas-
turb10\Gasturb"; //GasTurb 安装文件路径
```

```
InputStr.pModelFileName="Sim_gtf.
MYG"; //发动机模型配置文件名
```

3) 在 S 函数模版函数:mdlOutputs 中,定义动态链接库 B 所需的 Simulink 模块输入/输出接口,并添加部件级动态模型主体计算程序代码。动态链接库 A 中所提供的输入/输出接口非常完备,但在一般情况下,诸多输入参数并不需要改变,也无需考量所有输出参数。为此可根据实际应用需求自定义 Simulink 模块下的发动机输入/输出接口,并完成与动态链接库 A 的参数传递方案。

① 输入接口,以发动机飞行高度为例。

```
InputRealPtrsType pAlt = ssGetInputPort-
RealSignalPtrs(S,1); //与 Simulink 输入接口
```

```
InputStr.bio_data_i_value[1-1] = * pAlt
[0]; //对基本输入参数重新赋值,不再为 888888
```

② 部件级动态模型主体计算程序

```
if(Time==0)
```

```
OutputPtr=TransitionInitialize(InputStr);
```

//过渡态初始化函数,在初始时刻运行一次

```
else
```

```
OutputPtr=TransitionState(InputStr); //
```

过渡态计算函数,每个采样时间运行一次

③ 输出接口,以发动机高压转子转速为例。

```
real_T * pXNHPC = ssGetOutputPort-
RealSignal(S,0); //与 Simulink 输出接口
```

```
* pXNHPC = OutputPtr->od_data_o_val-
ue[1-1][2-1]; //根据基本输出参数,对 Simulink
输出接口赋值
```

4) 在 S 函数模版函数:mdlTerminate 中,添加如下代码:

```
TransitionFree(true); //释放模型计算程序
所占内存空间
```

```
FreeLibrary(hModule); //释放句柄
```

5) 根据 S 函数接口技术进行 mex 编译实现动态链接库 B。动态链接库 B 可以在 MATLAB/Simulink 中以图形化模块方式直接调用。

2 发动机部件级动态模型库

按照本文所述的动态链接库方法,在得到发动机配置文件、动态链接库 A 以及相应 S 函数源文件的情况下,根据实际需求对 Simulink 及 S 函数源文件的输入/输出接口进行简单定义,就可以快速得到可在 MATLAB/Simulink 下直接调用

的 GasTurb 各种类型发动机部件级动态模型。从而在 MATLAB 平台下构建了用于航空发动机控制与故障诊断系统开发的包含涡喷、涡扇、涡轴、涡桨在内 22 种发动机类型的部件级模型库,如图 4 所示。需要说明的是,模型库中的模型输入/输出只进行了简单定义,用户在使用其中某个模型时,可以根据实际需求对输入/输出进行自定义。

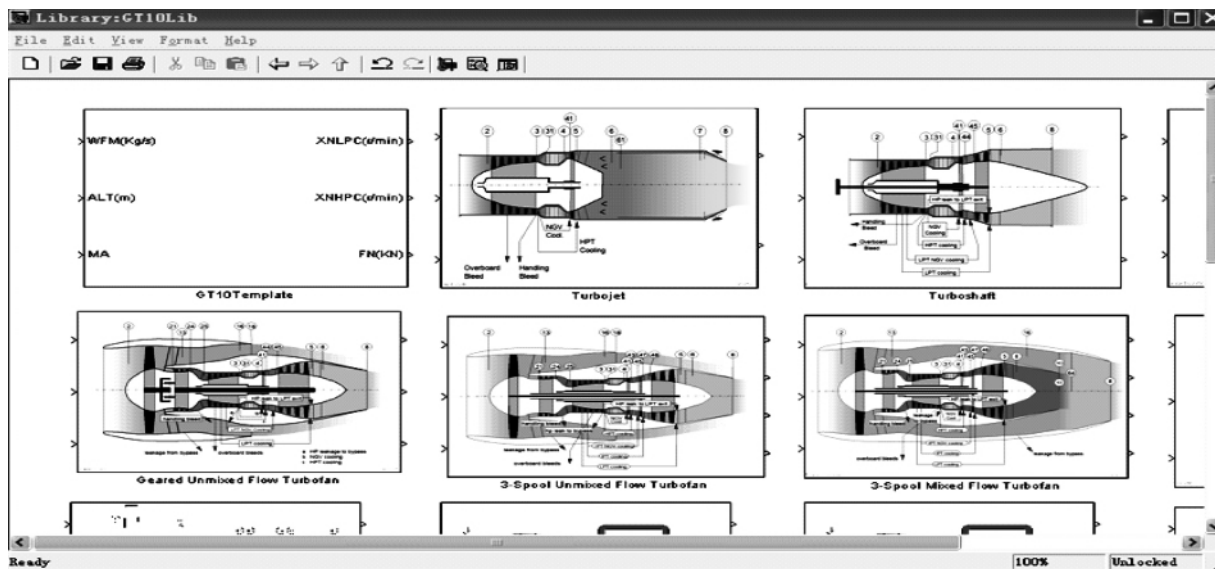


图 4 MATLAB 平台下发动机部件级模型库

Fig. 4 Aircraft engine component-level model library in MATLAB

3 应用实例与仿真实验

在开展适合国内大型飞机需求的民用涡扇发动机控制与故障诊断系统研究时,需要大涵道比涡扇发动机模型作为研究对象。但由于国内对大涵道比涡扇发动机的研究尚处于方案阶段,发动机总体部门不能提供相应的模型。采用本文方法,可以初步设计并建立能在一定程度上代表大涵道比涡扇发动机稳态与过渡态特性的发动机模型。

首先,按照参考文献[15-17]提出的大涵道比涡扇发动机总体性能设计方案,在 GasTurb 平台下初步设计得到 150 座干线客机用、137.2 kN 推力级、民用大涵道比涡扇发动机模型,并将模型参数保存于 GasTurb 模型配置文件(*.MYG)中。同时,通过调用该模型配置文件及动态链接库 A,并定义大涵道比涡扇发动机控制与故障诊断需要的输入/输出接口,在 MATLAB 平台下也得到了

一个大涵道比涡扇发动机模型,如图 5 所示。图中 NGV 表示涡轮导向叶片,HP 表示高压,HPT 表示高压涡轮,LPT 表示低压涡轮。在不同飞行条件、不同功率状态下,分别对 GasTurb 和 MATLAB 下的大涵道比涡扇发动机模型按照给定的供油规律进行稳态与过渡态仿真。

限于篇幅,这里仅给出巡航状态(高度为 11 km,马赫数为 0.8)下,GasTurb 和 MATLAB 下模型的过渡态仿真结果,如图 6 所示。仿真结果表明,两者相对误差小于 0.01%。仿真结果验证了本文建模方法的有效性。

需要指出的是,当发动机总体部门给出更详细的设计参数时,可以根据需要随时对仿真实例中的大涵道比涡扇发动机模型配置文件(*.MYG)中的发动机各种参数进行访问或修改,而这也验证了本文建模方法高度可定制的通用特性。

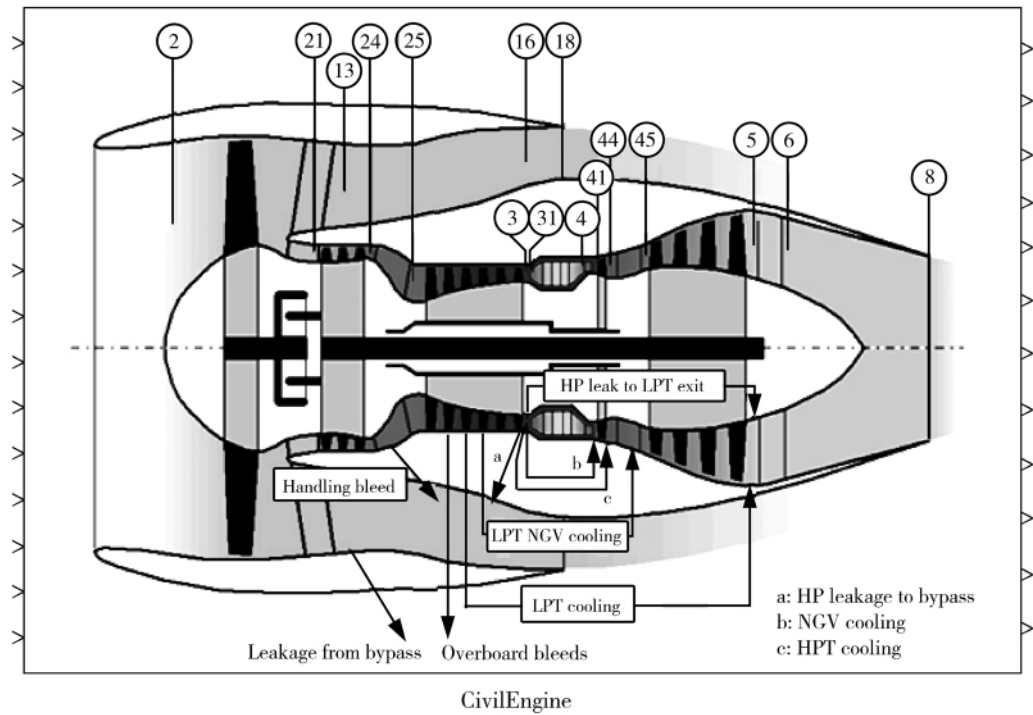


图 5 MATLAB 下民用大涵道比涡扇发动机模型

Fig. 5 Civil high bypass-ratio turbofan engine model in MATLAB

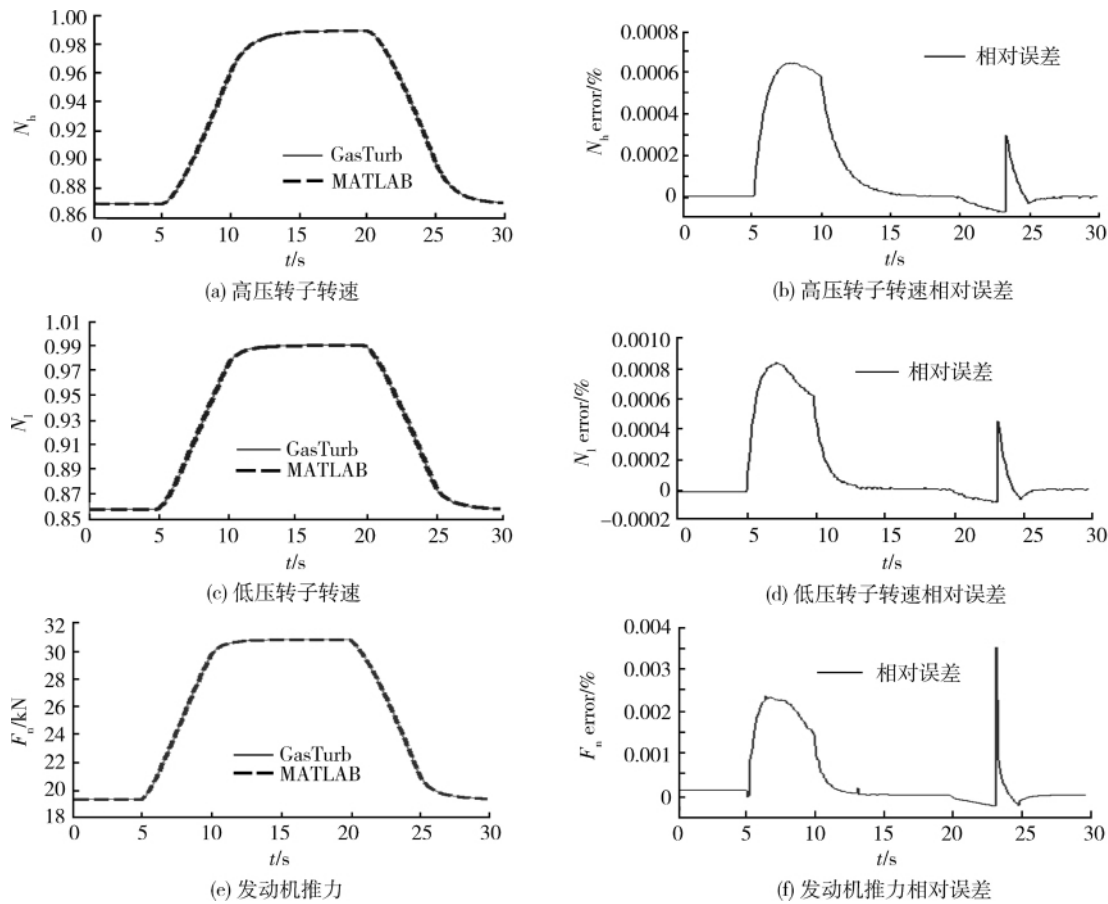


图 6 GasTurb 和 MATLAB/Simulink 下的过渡态仿真结果

Fig. 6 Simulation results in the transition state in GasTurb and MATLAB/Simulink

4 结 论

1) GasTurb 与 MATLAB 分别满足了发动机研制流程中总体性能分析与控制系统开发两个环节的应用需求. 本文利用动态链接库技术, 实现了两者之间的无缝衔接. 提高了部门间交互效率, 降低了工作量及出现潜在错误的风险, 使控制工程师从烦琐的建模工作中解放出来.

2) 应用实例与仿真结果验证了本文方法的有效性 & 高度可定制性, 可以根据需要随时对发动机模型配置文件中的发动机各种参数进行访问或修改.

3) 在 MATLAB/Simulink 下建立了与 GasTurb 对应的 22 种发动机类型的部件级模型库, 为发动机控制和故障诊断研究提供了一种方便灵活的仿真平台.

参考文献:

- [1] 夏飞, 黄金泉, 周文祥. 基于 MATLAB/SIMULINK 的航空发动机建模与仿真研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2134-2138.
XIA Fei, HUANG Jinquan, ZHOU Wenxiang. Modeling of and simulation research on turbofan engine based on MATLAB/SIMULINK[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2134-2138. (in Chinese)
- [2] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 97-102.
SUN Jianguo. Prospects of the aeroengine control development in the early time of the 21st century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 97-102. (in Chinese)
- [3] Kurzke J. Advanced user-friendly gas turbine performance calculations on a personal computer[R]. ASME Paper 95-GT-147, 1995.
- [4] Kurzke J. Gas turbine cycle design methodology: a comparison of parameter variation with numerical optimization[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(1): 6-11.
- [5] Kurzke J. Model based gas turbine parameter corrections[R]. ASME Paper GT-2003-38234, 2003.
- [6] Kurzke J. How to create a performance model of a gas turbine from a limited amount of information[R]. ASME Paper GT-2005-68536, 2005.
- [7] Kurzke J. About simplifications in gas turbine performance calculations[R]. ASME Paper GT-2007-27620, 2007.
- [8] Parker K I, Guo T H. Development of a turbofan engine simulation in a graphical simulation environment[R]. NASA/TM-2003-212543, 2003.
- [9] 李军伟, 郭迎清, 袁小川. 某型涡扇发动机分段线性化模型的建立[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12): 37-40.
LI Junwei, GUO Yingqing, YUAN Xiaochuan. Turbofan engine modeling of piece-wise linear model[J]. Computer Simulation, 2007, 24(12): 37-40. (in Chinese)
- [10] Kumar A, Viassolo D. Model-based fault tolerant control[R]. NASA/CR-2008-215273, 2008.
- [11] 陆军, 郭迎清, 王斌正. 基于 RTWEC 的控制算法自动代码生成技术[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 1131-1134.
LU Jun, GUO Yingqing, WANG Binzheng. Automatic code generation technology for control method based on RTWEC[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 1131-1134. (in Chinese)
- [12] 陆军, 郭迎清, 王海泉. 基于快速原型化的数控系统实时仿真平台研制[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(6): 1098-1101.
LU Jun, GUO Yingqing, WANG Haiquan. Digital electronic engine control real-time simulation platform based on rapid prototyping[J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(6): 1098-1101. (in Chinese)
- [13] Simon D L. Propulsion diagnostic method evaluation strategy (ProDiMES) user's guide[R]. NASA/TM-2010-215840, 2010.
- [14] 薛薇, 郭迎清, 李睿. 航空发动机状态监视、故障诊断研究及验证[J]. 推进技术, 2011, 32(2): 271-275.
XUE Wei, GUO Yingqing, LI Rui. Algorithm and experimental validation for condition monitoring, fault detection for gas turbine engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(2): 271-275. (in Chinese)
- [15] 刘大响, 金捷, 彭友梅, 等. 大型飞机发动机的发展现状和关键技术分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 976-980.
LIU Daxiang, JIN Jie, PENG Youmei, et al. Summarization of development status and key technologies for large airplane engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 976-980. (in Chinese)
- [16] 李继保, 张力, 李泳凡, 等. 大型客机发动机总体方案研究[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 深圳: 中国航空学会、中国工程院机械与运载工程学部, 2007: 493-501.
- [17] 梁彩云, 张恩和, 李泳凡, 等. 大涵道比涡扇发动机总体性能设计技术研究[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 深圳: 中国航空学会、中国工程院机械与运载工程学部, 2007: 458-491.