

文章编号: 1000-8055(2003) 05-0709-04

弹用涡喷发动机全工况闭环仿真平台

牛 军, 于达仁, 冯国泰

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为真实反映实际发动机系统的各部分相互影响, 提出和建立了基于 MATLAB 环境的某弹用涡喷发动机及其供油调节系统的全工况闭环仿真平台。所用发动机模型采用了气动热力原理和神经网络相结合的建模方法, 供油调节系统模型采用了参数识别和机理分析的建模方法。在该平台下, 分析了膜片特性对发动机启动加速性能的影响。结果表明仿真平台具有较好的可信度, 能够反映发动机及其供油调节系统真实的工作过程。

关键词: 航空、航天推进系统; 弹用涡喷发动机; 闭环仿真平台; 建模; 供油调节系统

中图分类号: 233. 7

文献标识码: A

Full Process Circled Simulation Flat of Missile Turbojet

NIU Jun, YU Da-ren, FENG Guo-tai

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Full process circled simulation flat of some missile turbojet and its oil-supplied regulating system based on MATLAB is proposed for factually describing component interaction of engine system. The adopted engine model is built by methods of combing aerodynamics and thermodynamics theories with neural network, and oil-supplied regulating system is modeled by methods of mechanism analysis and parameter identification. On the flat, we analyze the effect of diaphragm characteristic upon engine starting and accelerating performance. The results indicate that the circled simulation flat is of high reliability, and it can reflect the actual working process of the turbojet and its oil-supplied regulating system.

Key words: aerospace propulsion system; missile turbojet; circled simulation flat; modeling; oil-supplied regulating system

1 引言

弹用涡喷发动机及其供油调节系统是一种复杂的动力系统。在实际导弹飞行过程中, 发动机及其供油系统性能之间存在强烈的相互影响。随着发动机的工作参数不断提高, 开环条件下的分析手段已经不能真实地反映发动机及其供油系统实际性能的变化。针对某弹用涡喷发动机, 国内已经做了大量的高空试验台和火箭橇试验及其试验分

析^[1,2], 获得了大量宝贵的试验数据和经验。在此基础上, 本文利用数值仿真方法建立了一套该型发动机及其供油系统闭环仿真平台, 并利用此平台进行了供油系统膜片特性对发动机启动加速性能的影响分析。

2 发动机及其供油调节系统模型

2.1 涡喷发动机全工况模型

发动机为单轴涡喷发动机。原有发动机的热

力计算模型是一个零维稳态工况的 FORTRAN 计算程序。由于启动加速过程研究是发动机设计中关键性问题,我们对其启动加速部分计算进行了编制。在启动加速过程中,认为在准定常假设条件下,流量守恒和各部件稳态特性仍然适用,但功平衡方程将不再满足,需要考虑转子动量平衡方程:

$$M_t - M_k - M_f = J \frac{dw}{dt} \quad (1)$$

其中: M_t 为涡轮功, M_k 为压气机功, M_f 为摩擦功, J 为转子惯量, w 发动机转子角速度。上式在积分时采用 4 阶 Runge-Kutta 法。求解过程中,稳态工况和启动加速过程均采用迭代方法,各部件的特性均用部件的稳定特性。

修改后的发动机性能计算程序由于缺乏低转速下(15000 r/min 以下)部件特性试验数据,因此不能保证其计算精度。为了仿真发动机从风车到巡航工作的全过程,我们采用了神经网络方法对低转速(0~15000 r/min)范围的发动机工作过程进行动态建模^[3]。但由于实测参数样本的限制,神经网络模型输出只有压气机出口压力 P_2 和发动机转速 n 两个参数。

2.2 供油调节系统数学模型

供油调节系统为气动液压式结构(如图1)。在发动机启动加速段的工作过程为:在来流推动下,风车效应使涡喷发动机的转子旋转加速,带动油泵工作,通过 G_3 孔向燃烧室供油,当油泵转速增加到一定值后,稳压阀开始溢流,将油压稳定在

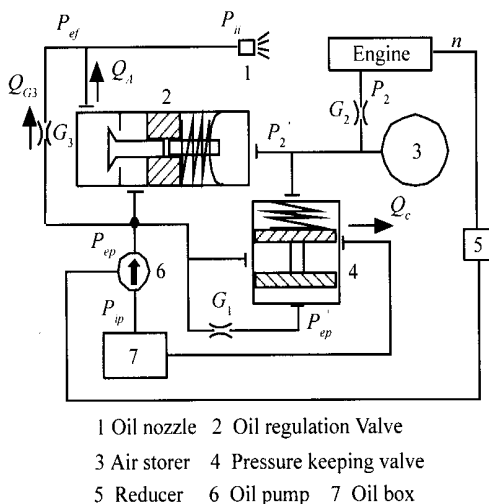


图1 供油调节系统物理简图

Fig. 1 Oil-supplied regulating system physical figure

给定值上,随着来流速度进一步上升,压气机出口

压力 P_2 增大,通过阻尼孔 G_2 和缓冲器作用后的压力 P_2' 也随之升高,作用在膜片上的气压力大于弹簧力后,燃油调节阀逐渐开大,增加燃烧室供油,发动机的转速迅速增加,直至达到稳定工作状态。供油调节系统与发动机之间根据某种 $Q = f(P_2)$ 关系实现开环调节规律。

在建立供油系统数学模型的过程中,需要考虑了两个问题:一是模型适用的频带宽度,二是系统中存在的诸多非线性因素。利用机理分析与参数识别相结合的方法,供油调节系统的数学模型在我们前期的工作^[4]中已经完成。对照此数学模型,利用 MATLAB 提供的 SIMULINK 工具箱^[5],可以形成供油调节系统仿真模型。

3 MATLAB 与 FORTRAN 程序的接口

在 MATLAB 中调用 FORTRAN 程序需要满足以下三个条件:

(1) 由 MATLAB 提供编译工具。在 Windows 下,编译工具为 MATLAB 提供的 mex.bat 文件。

(2) 为将 FORTRAN 语言编译成计算机可以执行的代码,需要一个 FORTRAN 编译器。这个编译器必须是 MATLAB 编译工具所支持的。对于 FORTRAN 语言, MATLAB 支持两种 FORTRAN 编译器 Visual FORTRAN 和 MS FORTRAN Power-Station。在本文中使用的是 MS FORTRAN Power-Station。

(3) 需要自行编写接口文件,接口程序要按 MATLAB 编译工具要求的格式编写。

下一步将 FORTRAN 语言编写的发动机性能计算程序改写成一个子例程序,即封装在一个子程序中,供接口文件调用。编译接口文件后,形成一个动态链接库(.dll)文件,在 MATLAB 中可以当作一个内部函数直接调用。已知条件和计算结果通过子例程序的哑元传递。

上述工作完成后,发动机性能计算模型和供油调节系统模型便可构成一套涡喷发动机闭环数值仿真平台(图2)。该平台外部输入条件包括飞行马赫数、飞行高度、进气道总压恢复系数、环境与标准状态温差和油泵进口压力。平台具有的功能包括:发动机及其供油调节系统开环、闭环仿真,发动机加速特性仿真、高度特性、速度特性与节流特性仿真等。

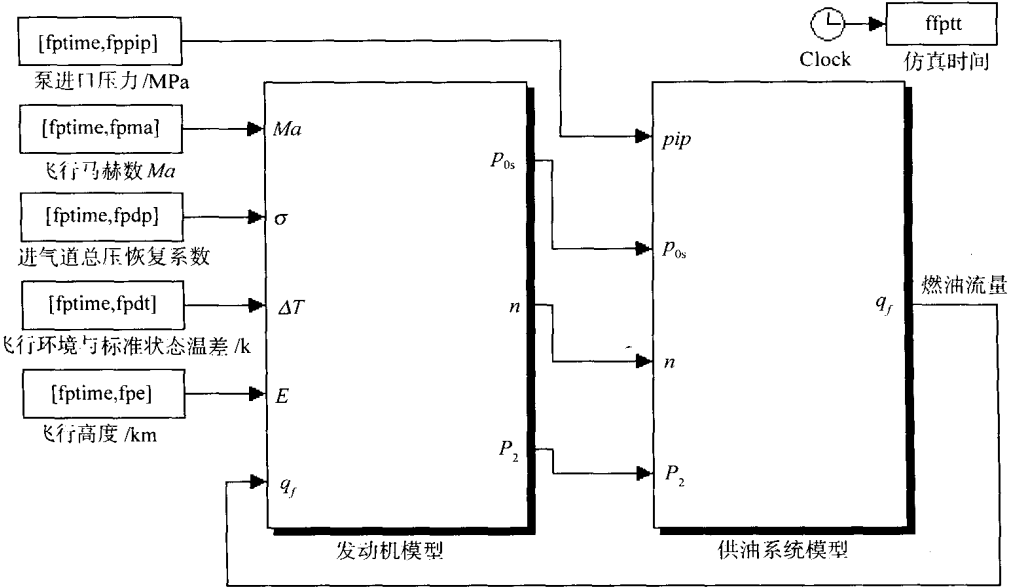


图2 发动机闭环仿真模型
Fig. 2 Engine closed simulation model

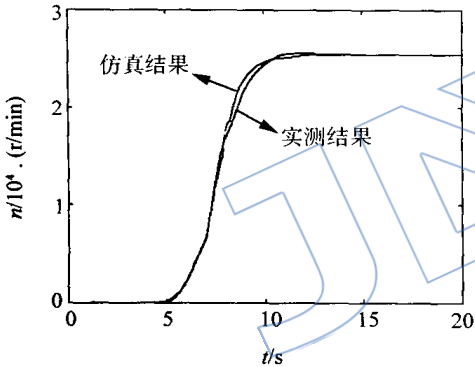


图3 发动机转速
Fig. 3 Engine speed

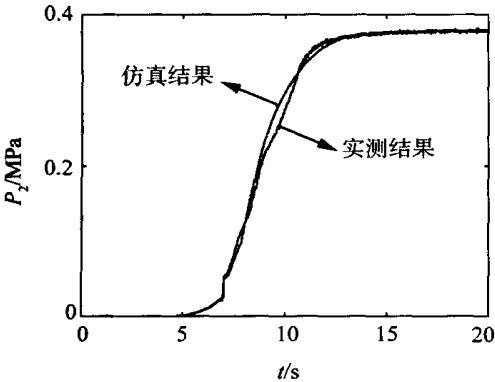


图4 压气机出口压力
Fig. 4 Compressor outlet pressure

4 实例分析

4.1 模型验证

弹用涡喷发动机的启动加速过程是一个非稳态过程。由于该过程存在诸多不确定因素,它是发动机故障的多发区,也是弹用涡喷发动机研究的重点。根据高空台试验条件,图3~6给出了仿真平台发动机正常启动加速过程的仿真结果。

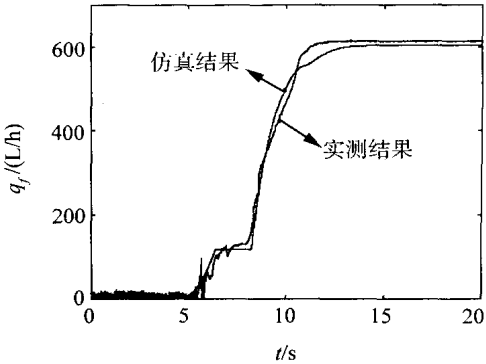


图5 发动机供油量
Fig. 5 Engine oil-supplied flow

表1对发动机及其供油系统的启动加速特性进行了分析,其中加速过程是从发动机点火到90%最大转速的过程。通过与实测数据进行了比较结果看,发动机转速最大相对误差为3.30%,压气机出口压力最大相对误差为7.03%,发动机供

油量最大相对误差为8.79%,证明该发动机闭

环仿真平台具有较高的可信度。

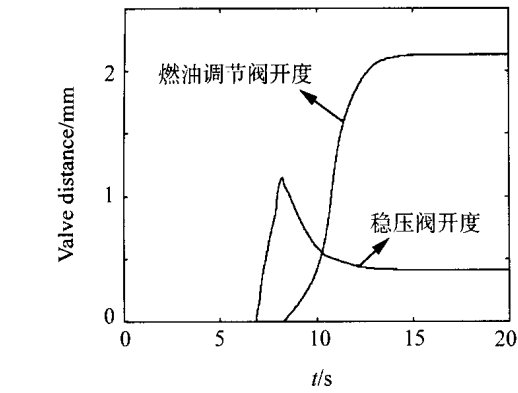


图6 供油系统阀开度

Fig.6 Oil-supplied system valve distance

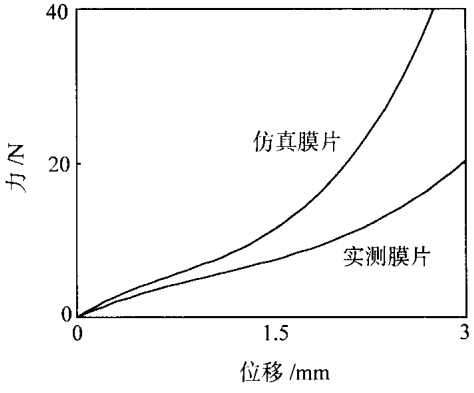


图7 膜片刚度特性

Fig.7 Diaphragm stiffness performance

表1 发动机及其供油系统的正常启动加速特性

Table 1 Normal starting and accelerating performance of engine and its oil-supplied system

分析方法	燃油调节阀开启时刻/s	稳压阀开启时刻/s	点火时刻/s	加速所用时间/s	巡航转速/(r/min)
仿真	8.27	6.88	7.04	2.01	25440
试验			6.99	2.45	25420

表2 膜片刚度对发动机启动加速特性的影响

Table 2 The effect of diaphragm stiffness upon engine starting and accelerating performance

膜片刚度	点火时刻/s	加速所用时间/s	巡航转速/(r/min)
+ 30%	7.04	2.04	25300
- 30%	7.04	1.97	25610

4.2 膜片特性对发动机启动加速性能的影响

燃油调节阀膜片是供油系统中重要的组件之一,其主要作用是感受压力信号 p_2' 的变化,从而控制阀芯的运动,实现燃油调节的作用。在实际生产加工中,膜片的特性离散度较大,分析膜片特性对发动机性能的影响具有重要意义。图7给出了仿真膜片和实测膜片刚度特性的比较。表2给出了膜片刚度加减30%对发动机启动加速过程的影响。与表1的结果相比,表明膜片刚度对发动机启动加速过程的影响不大。在实际生产加工中,可以适当放宽对膜片的公差要求。

5 结 论

本文建立基于 MATLAB 环境的某弹用涡喷发动机及其供油调节系统的全工况闭环仿真平台。根据仿真与试验对比,该平台具有较高的可信

度,可代替部分试验进行该型号发动机特性分析。但由于该平台低转速下的发动机神经网络模型还是一个初步模型,具有一定的局限性,需要今后进一步研究。

参考文献:

[1] 郑严. 导弹用涡轮喷气发动机启动加速过程试验[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 5- 8.

[2] 郑严, 史新兴. 弹用涡轮喷气发动机火箭撬试验研究[J]. 推进技术, 2001, 22(1): 26- 29.

[3] 于达仁, 牛军, 鲍文, 等. 基于神经网络的弹用涡喷发动机全工况建模[R]. 北京21世纪航空动力发展研讨会, 2000: 69- 73.

[4] 鲍文, 闫志刚, 何保成, 等. 某涡喷发动机燃油压力高频脉动现象的分析及解决[J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 109- 112.

[5] 程为国, 冯峰, 姚东, 等. MATLAB5.3应用指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.