

基于 Matlab/Simulink 的航空发动机 部件级建模与分析

夏 超,王继强,商国军,周 淼
(南京航空航天大学 能源与动力学院,南京 210016)



夏超(1987),男,在读硕士研究生,研究
方向为航空发动机控制与仿真。

收稿日期:2012-01-13

摘要:借助 Matlab 搭建完整的双轴涡轮风扇发动机模型,对各部件进行封装,利用 Simulink 显示模块观察仿真结果。在动态仿真时,引入容积动力效应,避免反复迭代过程,提高模型实时性。与 GSP 仿真软件结果进行对比,结果表明:所建立的模型具有较高精度,可以准确捕捉航空发动机的动态响应和稳态响应。

关键词:部件级建模;无迭代动态模型;涡轮风扇发动机;仿真;容积动力效应

Component-Level Modeling and Analysis of Aeroengine Based on Matlab/Simulink

XIA Chao, WANG Ji-qiang, SHANG Guo-jun, ZHOU Miao
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Energy and Power
Engineering, Nanjing 210016, China)

Abstract: A integrated two-spool turbfan engine model was built by the Matlab to package each component. The simulation results were observed by Simulink's display module. The dynamic effects of volume was introduced to avoid the iterative process and improve the real time of the model. The simulation results compared with GSP show that the model has higher precision to captured accurately dynamic and steady state responses of aeroengine.

Key words: component-level modeling; uniteration dynamic model; turbfan engine; simulation; dynamic effects of volume

0 引言

在航空发动机部件级建模中,非线性微分方程组和平行方程的求解多采用迭代计算,但是在计算动态模型时,动态因素的存在使得迭代次数大大增加,模型实时性和全包线内的收敛均很难得到保证^[1]。

为了解决部件级建模中解非线性方程组时的迭代问题,引入容积动力效应,在 Matlab/Simulink 中搭建航空发动机的无迭代动态模型,最后与 GSP 软件仿真的结果进行比较,验证了该模型有效且准确。

1 基于 Matlab/Simulink 的涡扇发动机数学模型

1 个完整的涡扇发动机模型包括进气道、风扇、外涵道、压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮、混合室、尾喷管以及大气环境等大模块,并形成各自独立

的子模块。各模块之间通过气流的流向及匹配关系连接。所搭建的完整发动机 Simulink 方框图如图 1 所示,作为比较的发动机 GSP 自带的某模型方框图如图 2 所示。

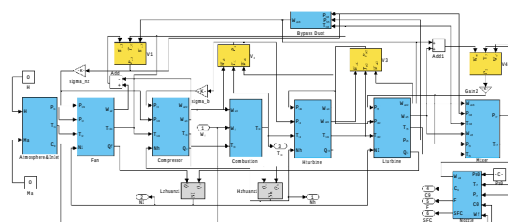


图 1 完整的发动机 Simulink 方框图

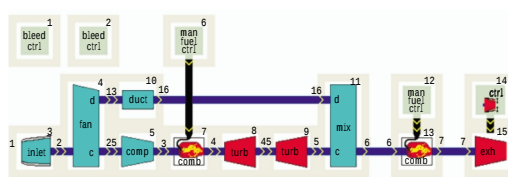


图 2 发动机 GSP 方框图

2 发动机的动态仿真

对于航空发动机来说,动态仿真指发动机加、减速等动态过程。一般在发动机动态仿真中,忽略容积动力学效应和热惯性,假定在动态过程中满足流量准平衡,由于模型在运行中要反复运行雅可比矩阵,计算量巨大难以达到实时性。本文采用考虑容积动力效应的无迭代方法,即在动态仿真中引入容积效应,认为动态时流量不再平衡,压力随流量变化而变化^[2]。

进行动态仿真时,采用 GSP 软件中 1 个模型的数据,利用本文建立的发动机模型进行仿真,最后与 GSP 软件仿真的结果进行比较,以验证该模型的准确性。

2.1 考虑容积动力效应的无迭代方法

考虑容积动力效应的涡扇发动机方框图如图 3 所示。

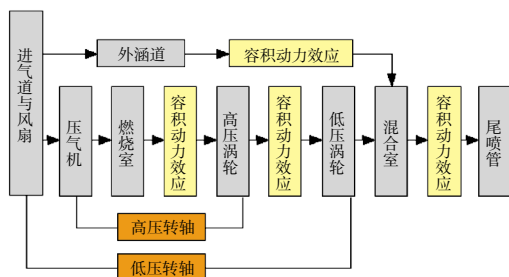


图 3 考虑容积动力效应的涡扇发动机方框图

在动态过程中,由于容腔内气体质量与能量的积聚和释放而引起压力变化,气流的进、出口参数不再相等,且满足一定的动力学方程。该动力学方程包括质量与能量方程,其中质量方程占主导,本文为了简化计算,仅考虑质量方程^[3]。

假设 1 股总温、总压、流量分别为 T_1 、 P_1 、 W_{a1} 的气流流入容腔,以 T_0 、 P_0 、 W_{a0} 流出,对于单输入、单输出的容腔仅考虑质量方程可描述为

$$\frac{dP_0}{dt} = \frac{(W_{a1} - W_{a0}) \cdot R \cdot T_0}{V} \quad (1)$$

式中: R 为气体常数; V 为容腔体积^[4]。

由于涡扇发动机流路计算选用了 4 个压比(分别为 π_1 、 π_c 、 π_t 、 h 、 π_{t1}) ,故选用外涵道容腔(I)、燃烧室容腔(II)、高压涡轮之间的容腔(III)和混合室容腔(IV)4 个容腔分别求取对应的压比。描述 4 个容腔的容积动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{P}_{16} = \frac{(W_{a13} - W_{a16}) \cdot R \cdot T_{16}}{V_I} \\ \dot{P}_{14} = \frac{(W_{a3} - W_{a4}) \cdot R \cdot T_{14}}{V_{II}} \\ \dot{P}_{142} = \frac{(W_{a41} - W_{a42}) \cdot R \cdot T_{142}}{V_{III}} \\ \dot{P}_{17} = \frac{(W_{a6} - W_{a7}) \cdot R \cdot T_{17}}{V_{IV}} \end{cases} \quad (2)$$

给定初始条件便可以积分求解 P_{16} 、 P_{14} 、 P_{142} 、 P_{17} 。已知 P_{16} 可以求得 P_{113} 、 P_{121} 、 P_{122} 、 $P_{121}=P_{122}=P_{113}=P_{116}/\sigma_{bp}$; 已知 P_{14} 可以求得 P_{13} 、 $P_{13}=P_{14}/\sigma_b$; 已知 P_{142} 可以求得 P_{141} 、 $P_{141}=P_{142}$; P_{13} 、 $P_{13}=P_{14}/\sigma_b$; 已知 P_{17} 可以求得 P_{155} 、 $P_{155}=(P_{17}W_{a7}/\sigma_m - P_{116}W_{a16})/W_{a55}$ 。则 4 个压比分别为

$$\pi_f = \frac{P_{121}}{P_{12}}, \pi_c = \frac{P_{13}}{P_{122}}, \pi_t = \frac{P_{14}}{P_{141}}, \pi_{t1} = \frac{P_{142}}{P_{15}} \quad (3)$$

另外,再考虑 2 个转子动力学方程

$$\frac{dN_h}{dt} = \frac{\eta_h Q_{t1} h - Q_c}{N_h \cdot J_h \left(\frac{\pi}{30} \right)^2}, \frac{dN_l}{dt} = \frac{\eta_l Q_{t1} l - Q_f}{N_l \cdot J_l \left(\frac{\pi}{30} \right)^2} \quad (4)$$

式中: Q_t 、 h 、 Q_{t1} 分别为高、低压涡轮输出功率; η_h 、 η_l 分别为高、低压转轴的机械效率; J_h 、 J_l 分别为高低压转轴转动惯量; Q_c 、 Q_f 分别为压气机和风扇消耗的功率。已知 N_l 、 N_h 、 π_f 、 π_c 、 π_t 、 h 、 π_{t1} 就可以进行各流路的计算,随时间推移便可完成动态仿真^[5]。

2.2 动态数学模型和仿真设置

为了实现动态仿真,引入容积动力学模块和转子动力学模块。其中通过容积动力学模块可以计算得到 P_{16} 、 P_{14} 、 P_{142} 、 P_{17} ,从而得到 π_f 、 π_c 、 π_t 、 h 、 π_{t1} ;而通过转子动力学模块可以计算得到 N_l 、 N_h 。这样就可以建立动态模型进行动态仿真。

在 simulink 仿真前设置好参数和输入、输出方式:(1) 设置仿真起始时间和终结时间分别为 0 和 10;(2) 设置算法仿真,选择变步长龙格-库塔连续算法,最小、最大步长和初始步长及误差容限为默认;(3) 输入和输出设置,选择从工作区导入(load from workspace),并将数据保存至工作区(save to workspace),限制输出数据量为 10000,其他参数为默认^[6]。

2.3 动态仿真

选择相对成熟的 GSP 软件中的 1 个模型作为参照,来验证本文模型的准确性。先设置动态仿真时的初始稳态点和燃油变化量,在地面进行发动机加、减速仿真。选择典型的参数,如高、低压转速 N_h 、 N_l 和涡轮前温度 T_{14} 、发动机推力 F 作为比较量,进行动态仿真,仿真结果如图 4 所示。

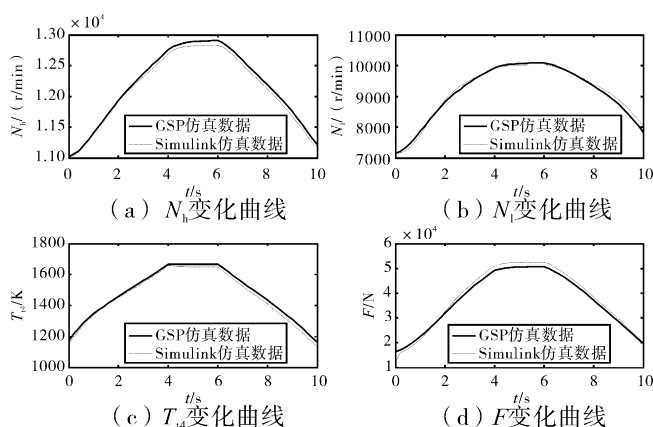


图4 动态仿真对比

从图4中可见,本文建立的发动机动态模型 Simulink 仿真的结果与 GSP 仿真的结果相近,除推力初始的个别数据误差大于5%,其余数据的实际相对误差均小于5%(如图5所示)。

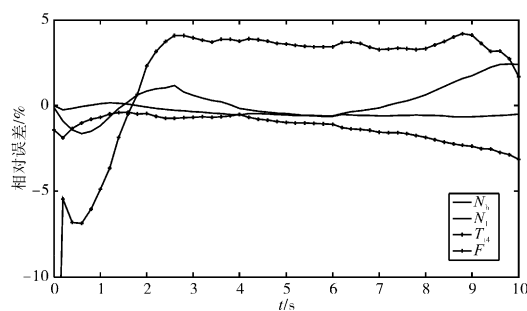


图5 相对误差分析

3 发动机稳态仿真

发动机稳态仿真是指发动机处于稳定工作状态,对各特征截面的物理参数求解。常规方法是使用 Newton-Raphson 方法对共同工作方程组进行求解,此方法需反复运行雅可比矩阵,不仅运算量大,求解速度慢,而且对初值敏感,计算易发散^[7]。本文对发动机稳态仿真创新地采用基于发动机的动态仿真模型,以避免反复迭代过程,通过与 GSP 软件稳态仿真的结果对比,来验证本方法的可行性和该模型的精度。

3.1 稳态共同工作方程

上文中引入了4个容积动力学方程和2个转子动力学方程,由于供油量随时间的变化,不断有变化的积分值输出。而在发动机稳态共同工作时,供油量为常值,流量满足平衡,高、低压转子功率平衡,此时4个容积动力学模块和2个转子动力学模块应满足

$$\begin{aligned} W_{a13} &= W_{a16}, W_{a3} = W_{a4}, W_{a41} = W_{a42}, W_{a6} \\ &= W_{a7}, Q_{t,h} \cdot \eta_h = Q_c, Q_{t,l} \cdot \eta_l = Q_f \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $W_{a13} = W_{a21} - W_{a22}$, $W_{a4} = W_{a3} + W_f \approx W_{a3}$ (燃油量相对于 W_{a3} 可以忽略), $W_{a6} = W_{a5} + W_{a16}$, 这样就满足了6个平衡方程,6个未知数 $N_1, N_2, \pi_f, \pi_c, \pi_t, h, \pi_t, 1$ 就可以求得。在稳态仿真开始时,4个容积动力学模块和2个转子动力学模块还不满足平衡条件,但随着时间的推移,逐渐趋于平衡。其平衡时的数值即为稳定工作时的数值。

3.2 稳态仿真

在地面进行发动机稳态仿真,仿真结果如图6所示。

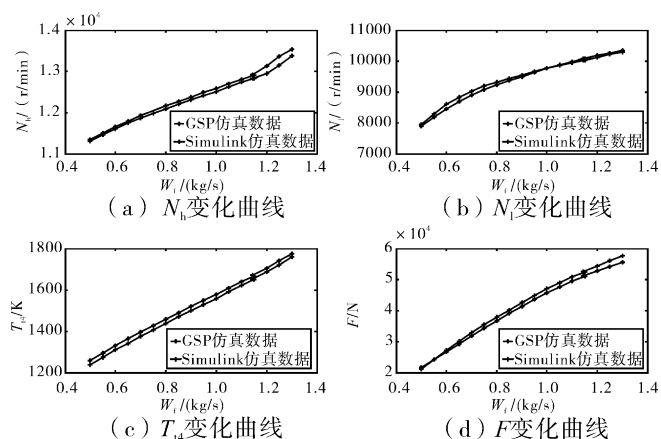


图6 稳态仿真对比

本文建立的发动机稳态模型基于其动态模型,同样取决于部件特性的准确度和部件数学模型的准确度。由图5可知,其 Simulink 仿真的结果与 GSP 仿真的结果相近,实际相对误差小于4%(如图7所示)。

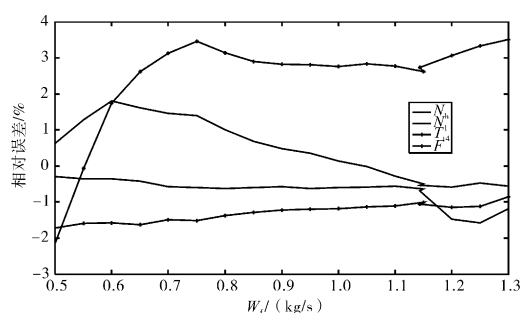


图7 相对误差分析

4 结论

(1)通过引入容积动力效应,避免了反复迭代;在 simulink 中搭建了涡扇发动机的部件级模型,由已封装的模型构成了涡扇发动机专业模型库,具有一定的通用性和扩展性。

(2)对发动机进行了动态和稳态仿真,并与 GSP 仿真的结果进行对比,可知该模型误差较小,精度较高,具有良好的实时性,在航空发动机建模方法研究

中具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 刘长福,邓明. 航空发动机结构分析[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006:18-29.
- [2] 韩晓光,曲文浩,董瑜,等.基于 Simulink 的燃气轮机动态仿真模型[J]. 航空发动机,2010,36(3):20-25.
- [3] Reed J A ,Afieh A A .Computational simulation of gas turbines Part I-foundations of component-based models [J]. J Eng Gas Turbines Power, 2000, 122(3):366-377.
- [4] Evans A L, Follen G, Naiman C, et al. Numerical propulsion system simulation's national cycle program [R]. AIAA-98-3113.
- [5] 夏飞. 基于 MATLAB/SIMULINK 的航空发动机建模与仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- [6] 张志涌,杨祖樱. MATLAB R2010a 教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010:252-266.
- [7] 季春生. 航空发动机全数字仿真平台设计[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [8] 李家瑞. 航空发动机建模技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005.
- [9] 樊思齐,李华聪等. 航空发动机控制:下册[M].西安:西北工业大学出版社,2008:50-157.
- [10] 黄家骅,冯国泰.航空发动机特性仿真技术的进展与展望[J]. 推进技术,2002,23(4):346-351.