涡扇发动机地面起动过程性能模拟

朱之丽 高 超

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 用积分方法建立了混合排气加力涡扇发动机起动过程模拟模型并用该模型进行了仿真计算,模型基于气动热力学方程、各部件特性以及经验关系式,根据给出的发动机起动过程初始条件、燃烧室供油规律等进行计算. 为说明所建立的起动性能模型的模拟效果,将程序计算结果与试验结果进行了比较,结果表明该起动仿真模型能较准确地模拟混排加力涡扇发动机的地面起动过程. 还分析了计算过程中对起动过程有比较大影响的因素,包括计算时间步长,起动机脱开转速,燃烧室总压恢复系数的经验系数,大气温度、压力以及海拔高度等. 了解这些因素对起动过程及模拟结果的影响,便于通过修正的途径将该计算方法用于发动机地面起动性能的准确模拟.

关 键 词: 涡扇发动机; 起动; 模拟分析

中图分类号: V 231

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0280-04

Model for ground starting of turbofan engine

Zhu Zhili Gao Chao

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The simulation model of turbofan engine for ground starting was described. The simulation is based on thermo-aerodynamics relationship, the components' characteristics, experienced formulas. According to being given known condition and fuel regulation, the starting has been simulated by integral method. In order to show the effect of the simulation, the results of the simulation model calculated have been compared with the testing results. The compared result shows that the simulation model can simulate mixed flow turbofan engine with afterburner for ground starting effectively. These parameters and coefficients have been analyzed, including calculating time interval, the rotation speed of the starter off, experiential coefficient of combustion total pressure recovery coefficient, the environment temperature and pressure, the airport attitude. The results show that these parameters and coefficients have significant effect on ground starting simulation.

Key words: turbo fan engine; start; simulation analysis

航空发动机的地面起动是一个比较重要的问题,是发动机运行和使用所遇到的难点之一. 因为发动机的起动过程涉及到起动机、发动机供油系统和发动机部件的不稳定气动热力过程,是一个比较复杂的热动力学过程.

发动机的地面起动过程模拟,不但可以提供转子加速所需要的加速力矩、起动时间,并且可以给出起动过程中风扇、压气机的喘振裕度、各部件的性能参数、以及各个截面在各个时刻的总温、总压等,根据这些模拟结果可以分析各个参数对起动过程的影响.

本文用积分方法建立了混合排气加力涡扇发动机起动过程模拟模型并用该模型进行了仿真计算,该模型基于气动热力学方程、各部件特性以及经验关系式,根据给出的发动机起动过程初始条件、燃烧室供油规律等进行仿真计算. 为说明所建立的起动性能模型的模拟效果,将程序计算结果与试验结果进行了比较,结果表明该起动仿真模

收稿日期: 2005-03-29

作者简介: 朱之丽(1951-),女,北京人,教授, zhuzhili@buaa.edu.cn.

型能较准确地模拟混排加力涡扇发动机的地面起动过程. 文中还分析了计算过程中对起动过程有比较大影响的因素.

1　地面起动过程模拟方法

本文给出的混排加力涡扇发动机起动过程模拟模型主要基于气动热力学方程、各部件特性以及经验关系式,根据给出的发动机起动过程起始条件、燃烧室供油规律等,用积分方法模拟起动过程,其中特点描述如下.

1.1　运用转子部件特性及热力学关系

运用转子部件特性图和气动热力学关系式计算各个转子部件进出口截面的气动参数. 其中,风扇/压气机及涡轮部件特性由估算加试验修正的方法获取.

1.2　考虑气流通道的容腔效应

外涵道、主燃烧室、混合器、喷管的容腔效应主要运用[1]能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_V T) = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho C I) \tag{1}$$

流量连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho C) \tag{2}$$

式中,ρ, C, I, T, c_V, t 分别为气流的密度、速度、焓、总温、等容比热容以及时间.

由式(1),式(2)推导出外涵道出口总温、外涵道进口总压、低压涡轮出口总温、低压涡轮出口总压、混合器出口总温、燃烧室进口总压、燃烧室出口总温、喷管出口总温对时间的导数$\frac{\mathrm{d}T_{52t}}{\mathrm{d}t}$,$\frac{\mathrm{d}P_{25t}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}T_{51t}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}P_{51t}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}T_{6t}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}P_{3t}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}T_{4t}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}T_{8t}}{\mathrm{d}t}$.

1.3　经验公式的运用

1.3.1　各气流通道总压恢复系数估算经验公式和经验系数

1) 风扇出口到高压压气机进口气流通道的总压恢复系数

$$\sigma = 1.0 - e_1 \times (1.0 - \pi(\lambda_1)) \tag{3}$$

式中,e_1 为风扇出口到高压压气机进口总压恢复系数的经验系数;$\pi(\lambda_1)$为风扇出口 π 函数.

2) 外涵道总压恢复系数

$$\sigma = 1.0 - e_2 \times \lambda_2^2 \tag{4}$$

式中,e_2 为外涵道总压恢复系数的经验系数;λ_2 为外涵道进口速度系数;其他气流通道的总压恢复系数的估算方法均可参考上述经验公式.

1.3.2　计算燃烧室效率的经验公式和经验系数

燃烧室效率经验公式为

$$\eta_{\mathrm{Comb}} = \eta_2 \times \eta_{\mathrm{C}} - \eta_1 \tag{5}$$

式中,η_2 为燃烧效率修正系数;η_1 是油气比的函数(见图 1). 图中 f 为油气比. η_2 的计算方法:

$$\eta_2 = 1.0 - 0.043(C_1 - 1.0) - 0.000\,33(C_1 - 1.0)^2 \tag{6}$$

式中,C_1 为修正系数.

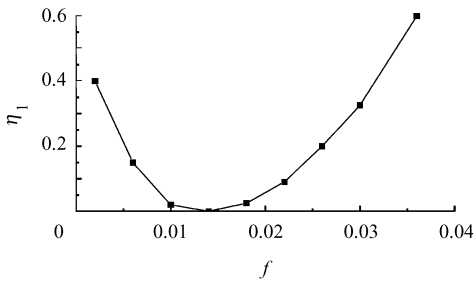


图 1　η_1 随 f 的变化

2　起动过程模拟与试验结果的对比

为了说明本文所建立的发动机地面起动过程模型的有效性,利用某型混排加力涡扇发动机低状态叶轮机械部件特性和供油规律对该发动机的起动性能进行了模拟计算,并将计算结果与地面试验数据进行了对比,见图 2 ~ 图 5. 对比结果表明,该模型能有效地完成发动机地面起动过程性能模拟. (试验数据的环境条件为大气压力为 99 570 Pa,大气温度为 303.4 K)

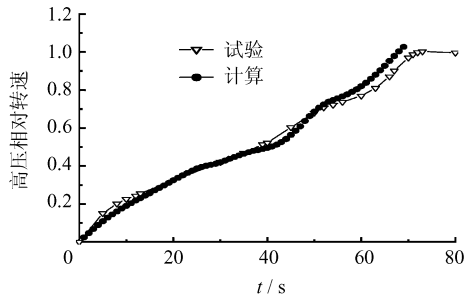


图 2　高压转子相对转速随起动时间 t 的变化

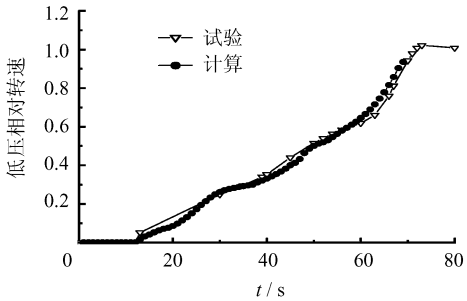


图 3　低压转子相对转速随 t 的变化

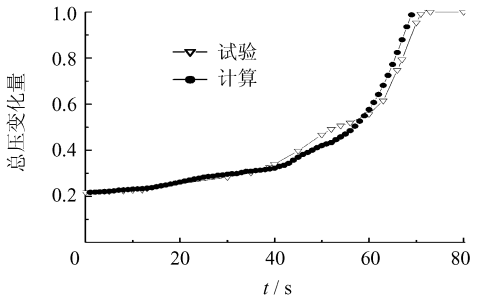


图4 高压压气机出口总压变化量随 t 的变化

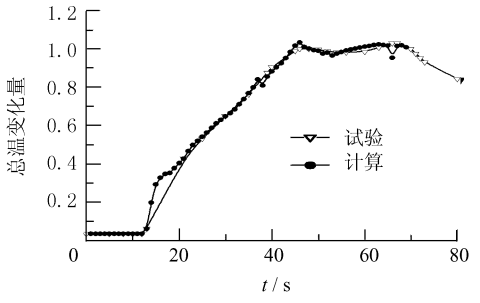


图5 低压涡轮出口总温变化量随 t 的变化

3 起动过程影响因素分析

由以上描述可知,在起动模拟过程中,某些参数和经验系数必定对模拟结果产生影响,因此从中选择一部分进行如下的计算分析.

3.1 计算时间步长对起动加速性的影响

见图6,当计算时间步长 Δt 大于0.005 s时,计算结果误差较大,计算结果错误. 当 Δt 小于0.000 5 s时,Δt 对计算结果的影响基本上可以不考虑,但是 Δt 取的太小又会使程序的计算时间延长,因此一般取 Δt 为0.000 1 s左右,这样既可以得到正确的计算结果,也可以缩短计算时间. Δt 大于0.005 s时,计算结果错误的原因是由于每个对时间的导数都受到 Δt 大小的影响,Δt 过大,必然会使每一步的导数计算误差都较大,如此一步一步累积,必然使计算结果错误.

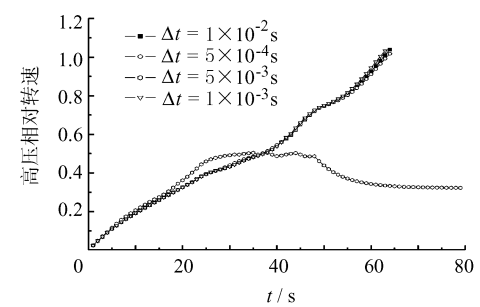


图6 不同 Δt 下高压转子相对转速随 t 的变化

3.2 起动机脱开转速 N_2 对起动加速性的影响

由图7可见,当 N_2 小到30%时,起动机脱开过早,涡轮不能产生满足发动机需要的带转功率,起动不成功. 同时涡轮出口温度一直保持高温,对发动机的寿命也有比较大的影响. 当 N_2 在30%以上时,增加 N_2 可以显著减少 t. 但当 N_2 大于43%时,增加 N_2 对缩短 t 不明显,因此应适当选择 N_2.

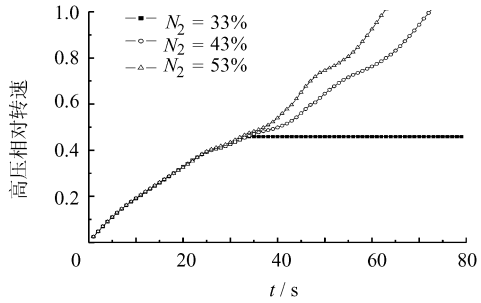


图7 不同的 N_2 时高压转子相对转速随 t 的变化

3.3 燃烧效率修正对加速性的影响

$\eta_{Comb}=\eta_2\times\eta_C-\eta_1$,其中 η_2 和 η_1 均为 η_C 的修正系数(η_2 的计算公式见式(6)).

由图8和图9可知 η_1 即 f 对起动过程的影响比较大,也就表明起动过程供油规律对起动过程的影响显著. 而 η_2 与 η_1 相比,对起动加速性的影响较小. 因此在计算过程中对于不同发动机可以对系数 η_1 进行修正,从而实现更准确的模拟该发动机的地面起动.

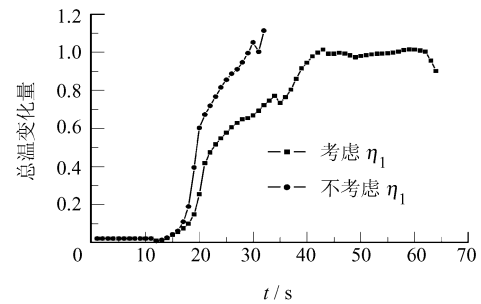


图8 η_1 对低压涡轮出口总温变化量随 t 变化的影响

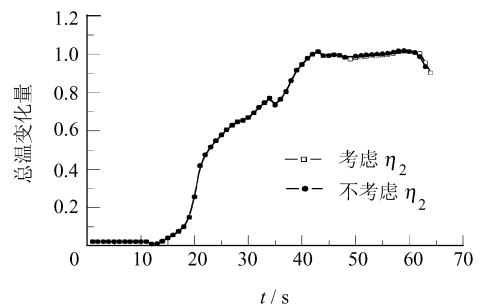


图9 η_2 对低压涡轮出口总温变化量随 t 变化的影响

3.4 燃烧室总压恢复对加速性的影响

燃烧室总压恢复系数计算公式:

$$\sigma_{Comb}=1.0-e_3\lambda_2^2 \qquad (7)$$

式中,e_3 为燃烧室总压恢复系数的参考值;λ_2 为燃烧室进口气流速度系数.

由图 10 可见,e_3 增大到 0.4,t 将延长5.5 s,而且起动机工作时间也要相对变长 3 s,低压涡轮出口总温也要升高. 可见 e_3 对 t 的影响还是比较大的,因此减少燃烧室总压损失,可以缩短发动机的 t. 原因是,燃烧室总压损失增大时,燃烧室出口总压降低,而在起动过程中,高低压涡轮导向器以及喷管一般都为亚临界工作状态[2],可知高压涡轮进口总压降低,高低压涡轮输出功率都要减小,因此 t 要延长.

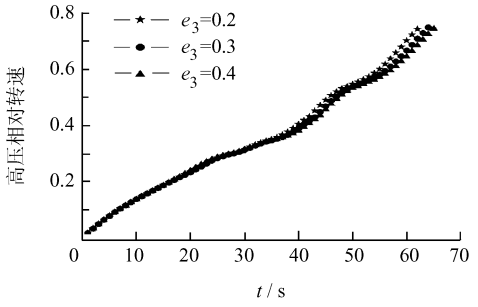


图 10　不同 e_3 时高压转子相对转速随 t 的变化

3.5　不同大气温度 t_0 对起动加速性的影响

由图 11 可见,在相同的大气压力和海拔高度下,环境 t_0 越低,由起动机产生的输出功率也就越大,因此起动加速性越好;当 t_0 比较低时,气流易于被压缩,压气机消耗的功较小,有利于起动加速.

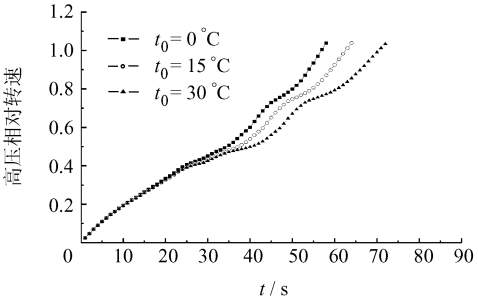


图 11　不同 t_0 时高压转子相对转速随 t 的变化

3.6　不同大气压力 P_0 对起动加速性的影响

由图 12 可见,在相同的大气温度和海拔高度下,P_0 越高,起动加速性越好.

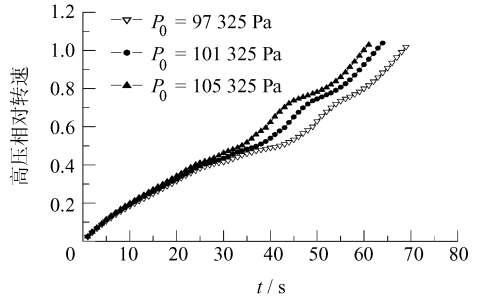


图 12　不同 P_0 时高压转子相对转速随 t 的变化

3.7　不同海拔高度 H 对起动加速性的影响

由图 13 可见,在相同的起动机输入力矩的条件下,H 越低,起动加速性越好,这是由于当海拔越高时,首先起动机产生的输入力矩也就越小;同时 H 越高,压气机进口温度,压力也越低,这样燃烧室进口压力也较低,燃烧室的燃烧特性就较差,涡轮功也就相对较小,这样不利于起动加速性.

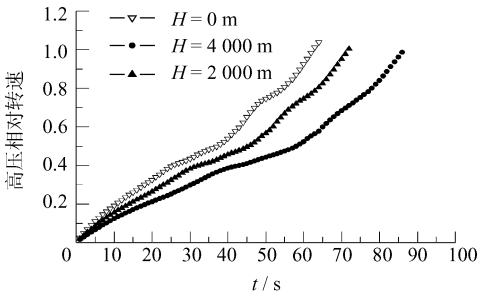


图 13　不同 H 时高压转子相对转速随 t 的变化

4　结　论

本文用积分法建立了混排加力涡扇发动机起动过程模型,模型计算结果与试验结果对比表明该方法能有效地进行发动机地面起动过程模拟. 该模拟方法利用部件特性、气动热力学关系式、经验公式以及计算各参数对时间的导数来实现对起动过程的模拟,不会出现不收敛的情况,但由于每一次运算都是用前一次运算的结果作为初值,可能会使累积误差偏大,因此要合理选择时间步长. 起动机脱开转速、燃烧室效率经验公式中的经验系数、燃烧室总压恢复系数的经验系数对起动过程的模拟结果有显著影响,应合理选择这些参数.

参考文献 (**References**)

[1] 潘锦珊. 气体动力学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000
Pan Jingshan. The base of air dynamic[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2000 (in Chinese)

[2] 廉小纯. 航空燃气涡轮机原理[M]. 北京:国防工业出版社,2001
Lian Xiaochun. The principle of aerogas turbine[M]. Beijing: The Nation Defence Industry Press, 2001 (in Chinese)

[3] Chappell M, Mclaughlin P. An approach to modeling continuous turbine engine operation from startup to shutdown[R]. AIAA-91-2373, 1991

[4] Agrawal R K, Yunis M. A generalized mathematical model to estimate gas turbine starting characteristics[J]. Journal of Engineering for Power, 1982 ,104:194 ~ 201