

涡喷发动机涡轮改型匹配的数值仿真^{*}

黄家骅¹, 冯国泰², 于廷臣¹, 周 驰²

(1. 二炮驻 31 所代表室, 北京 100074 2 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: 改型后的涡轮在匹配上与发动机其余部件存在流量偏小和功率偏大的偏差, 解决方案是改变涡轮导流叶片的安装角和调节涡轮出口的背压, 采用将涡轮全三维仿真与发动机总体零维仿真相结合的设计方案, 对某单轴涡喷发动机的涡轮特性改进对发动机总体性能的影响进行了研究, 其结果可作为初步意见供以后部件改型设计参考。

关键词: 涡喷发动机; 涡轮; 匹配; 数值仿真

中图分类号: V235.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2005) 02-0151-05

Numerical simulation of redesigned turbine matching in turbojet engine

HUANG Jia-hua¹, FENG Guo-tai², YU Ting-chen¹, ZHOU Chi²

(1. The Second Artillery Representative office in the 31st Research Inst., Beijing 100074 China

2 School of Energy Science and Engineering Harbin Inst. of Technology Harbin 150001, China)

Abstract The turbine remodeled has lower material flux and higher power at design point than its antetype and is in trouble of matching with other components. The stagger angle of guide vane and back pressure should be changed. The hybrid model which combines three-dimensional simulation in turbine and zero-dimensional simulation in the other engine component is developed, and the matching of turbine remodeled with other engine component is studied. The simulation result as a preparatory conclusion, which reflects the effect of component performance changing on engine capability, could be referenced by engineering designer.

Key words Turbojet engine; Turbine; Matching; Numerical simulation

1 引 言

航空发动机的研制费用主要是试验设备投入与实验费用, 随着对发动机性能要求的不断提高, 这一投入急剧增加。为了解决这一问题, 国外正在开发大型的发动机数值模拟试验台^[1~4]。

三维数学模型是近年来发展起来的, 它能够比较全面地反映叶轮机械内的流动情况, 在粘性流计算时不需要气流角和损失的经验公式, 能够比较准确地描述流道内部的二次流动。三维数学模型的缺点是需要占用较大的计算时间和内存, 目前三维仿真只限于部件内进行, 在发动机通流部分内开展三维的定常计算十分困难。

为了解决发动机全通流部分的三维数值模拟的

需求与计算资源不足之间的矛盾, 作为一种过渡性的手段, ZOOMING 技术应运而生。ZOOMING 技术也称为不同复杂程度分析技术 (Variable Complexity Analysis), 就是把对整个发动机通流部分的低阶精度模型 (零维或一维) 的计算与局部某一部件内的高阶精度模型 (三维) 的计算结合起来的技术^[3,4]。

本文结合工程遇到的实际问题讨论了涡轮改型后某型单轴涡喷发动机的匹配问题, 根据航空燃气轮机原理中关于压气机和涡轮的流量平衡与功率平衡的要求, 分析了匹配的条件, 确定了以改变涡轮导流叶片的安装角并辅以调节涡轮出口背压为要点的匹配方案。先用三维粘性流计算预测这种调整给部件特性带来的影响, 检查部件之间匹配的情况, 然后用发动机的热力计算程序研究发动机的总体性能的变化。

* 收稿日期: 2004-09-01; 修订日期: 2004-11-23。

基金项目: 国家自然科学基金资助 (59976007)。

作者简介: 黄家骅 (1965—), 男, 博士, 研究领域为航空发动机气动仿真。

2 应用不同维数模型的数值仿真

哈工大气动中心在多功能数值仿真方面作了一些工作^[5,6],特别是前期已完成了零维涡喷发动机的稳态和启动加速的气动热力计算程序,以及针对涡轮和压气机的三维粘性流的多级计算程序,使得我们可以模仿 NPSS 的 ZOOM NG 技术,进行发动机整体零维与部件三维相结合的数值仿真。

发动机零维与部件三维相结合的数值仿真试验的作用,主要有以下几种:

(1) 部件改型设计。当涡轮改型设计时,在没有进行实验并取得改型涡轮的特性以前,通过三维粘性流计算预测涡轮特性,然后用发动机的热力计算程序(零维)研究发动机的总体性能的变化;当压气机改型设计时,原则上也可采用如上方法,但是三维粘性流计算对压气机特性进行预测时,其准确性不够理想。

(2) 部件改型以后的匹配研究。改型以后的部件应该是与发动机基本匹配的,但还会有少量偏差。此时可以采取一些措施(如:调节导叶的安装角和出口背压),来进行微调。三维粘性流计算可以预测这种微调给部件特性(如:效率等)带来的影响,并且检查部件之间匹配的情况,然后用发动机的热力计算程序(零维)研究发动机的总体性能的变化。有时匹配的措施是多种多样的,例如:当涡轮经过改型设计以后,效率提高了。此时可以有两个方向进行匹配:第一是提高涡轮的出口背压,力图将涡轮效率的提高转化为发动机推力的提高;第二是降低涡轮的入口温度,改善导叶的工作环境。

3 应用举例

3.1 问题的提出

现有某型涡喷发动机,经过对涡轮导叶采用弯叶片改型设计以后,发现改型后的涡轮在与原型相同的入口和出口条件下,效率和输出功率提高了,而折合流量却降低了。现在保持压气机的设计工作点不变,希望将涡轮效率的提高转化为发动机推力的提高,这就带来了发动机部件之间的匹配问题。

现在将涡轮三维数值模拟与发动机的气动热力计算相结合,通过改变涡轮入口导流叶片的安装角和涡轮出口背压的方法,研究发动机部件之间匹配的可能性,希望将部件效率的提高转化为发动机推力的提高。

3.2 问题分析及方案确定

首先认为原型发动机在设计工况下,各个部件特性都同时处在各自的设计点上。改型以后,压气机由于没有改变,它的工作点必须保持在原来的设计点上。

要满足流量平衡条件,须提高 A_{nb} ; 要满足功率平衡条件,须降低 ϵ_t^* 。

流量平衡要求提高 A_{nb} , 而提高 A_{nb} 的最简单的方法是改变涡轮导流叶片的安装角,这种作法的负作用是会影响到 σ_{nb2} 和 $q(\lambda_{nb})$; 功率平衡要求降低 ϵ_t^* , 而降低 ϵ_t^* 的最简单的方法是提高涡轮出口的背压,这种作法的负作用是会引起流量的变化。

根据以上分析,可以得出一种尝试性的匹配方案:改变涡轮导流叶片的安装角并辅以调节涡轮出口的背压。

应该指出以上分析都是以一元流理论为基础的定性分析,由于发动机通流部分内流动的复杂性,导流叶片的安装角的变化对面积 A_{nb} 的调节能力有限却会改变下游动叶的攻角,引起流道内涡系结构和波系结构的变化,加重局部的分离,使改型涡轮的效率下降,所以以上的方案是一种尝试。

4 数学模型及其求解

4.1 零维数学模型及求解

发动机的特性分为稳态特性和动态特性。这里只需计算稳态特性,即求解一组非线性代数方程组,包括:惯性环节的微分方程组,主要部件特性方程和参数联系方程。具体表达式见文献[7]。

对于尾喷几何不变的单轴涡喷发动机,试给压气机喘振裕度 S_m , 燃烧室出口温度 T_3^* 和涡轮膨胀比 π_t , 然后通过压气机与涡轮之间的流量平衡、压气机与涡轮之间的功率平衡和涡轮与尾喷管之间的流量平衡三个方程式,采用平衡循环法,计算求解。

4.2 三维数学模型及求解

时间平均的无量纲化任意曲线坐标系下的 N-S 方程为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + \frac{\partial G}{\partial \zeta} = \frac{1}{r} (f_1 + f_2) + \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \frac{\partial R}{\partial \eta} + \frac{\partial S}{\partial \zeta} \quad (1)$$

E, F, G 为无粘通量, Q, R, S 为粘性通量, f_1, f_2 为源项,详见文献[8]。

采用隐式方法。对于隐式部分,本文采用对角线化的 AF 方法,显式部分采用三阶精度的 Godunov 格

式。粘性项作为源项放在显式部分中。选取 B-L 代数模型与 MML 模型的混合修正作为湍流模型。采用代数法与微分方程法相结合的 H 型结构化网格。

5 计算结果

涡轮导叶安装角的变化会影响涡轮特性,所以每一种导叶安装角(配以不同的涡轮出口背压)对应一条涡轮特性。一个给定的导叶安装角和一个给定的涡轮出口背压,就构成了一个计算方案。不同的导叶安装角对应的特性如图 1 所示。

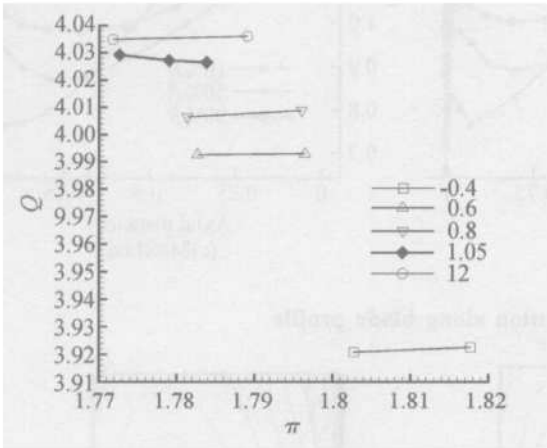


Fig 1 Turbine performance character

原型、改型与改型匹配的涡轮的数据如表 1 所示。从计算结果看,改型比原型在滞止效率方面提高了 1.28%,但是改型带来的涡轮滞止效率的提高,经过匹配以后也所剩无几。匹配以后,改型的滞止效率只比原型提高 0.31%。

Table 1 Data of original changed and matched turbine			
	Original	Changed	Matched
Stagger angle/(°)	0.000	-0.400	1.05
Mass flow /kg	6.60938	6.43907	6.61077
Turbine power/w	0.126697×10^7	0.128397×10^7	0.126677×10^7
Turbine relative stagnation efficiency	1.0000	1.0128	1.0033
Back pressure /Pa	156.005	156.005	157.000
Turbine flow function	4.02633	3.92258	4.02718
Turbine expansion ration	1.78910	1.81771	1.77897
Relative thrust	1.0		1.006

图 2 是静叶 90% 叶高处 S1 流面马赫数等值线图。从图上可以看出原型涡轮静叶中的流动是亚声速,在背弧后面有一个扩压区。由于采用了弯叶片,顶部背弧出口扩压段也小一些。

图 3 是静叶 10%、50% 与 90% 叶高的内背弧静压分布图,从图中可以看出,原型涡轮的静叶背弧进口段横向压力梯度大一些。尾缘压力有波动,这与尾迹的存在有关。改型以后进口段横向压力梯度比原型减小,这样可减少二次流损失。匹配以后,进口段横向压力梯度比匹配以前略有增加。

图 4 显示,静叶吸力面的靠尾缘部分存在着扩压区,并且越往上扩压区越大,扩压程度也越深。当导叶采用正弯曲叶片以后,叶片吸力面顶部前缘压力提高,这样有助于减弱顶部的间隙流。此外,静叶内背弧存在 C 型压力分布,这对减少横向与径向二次流损失是有好处的。

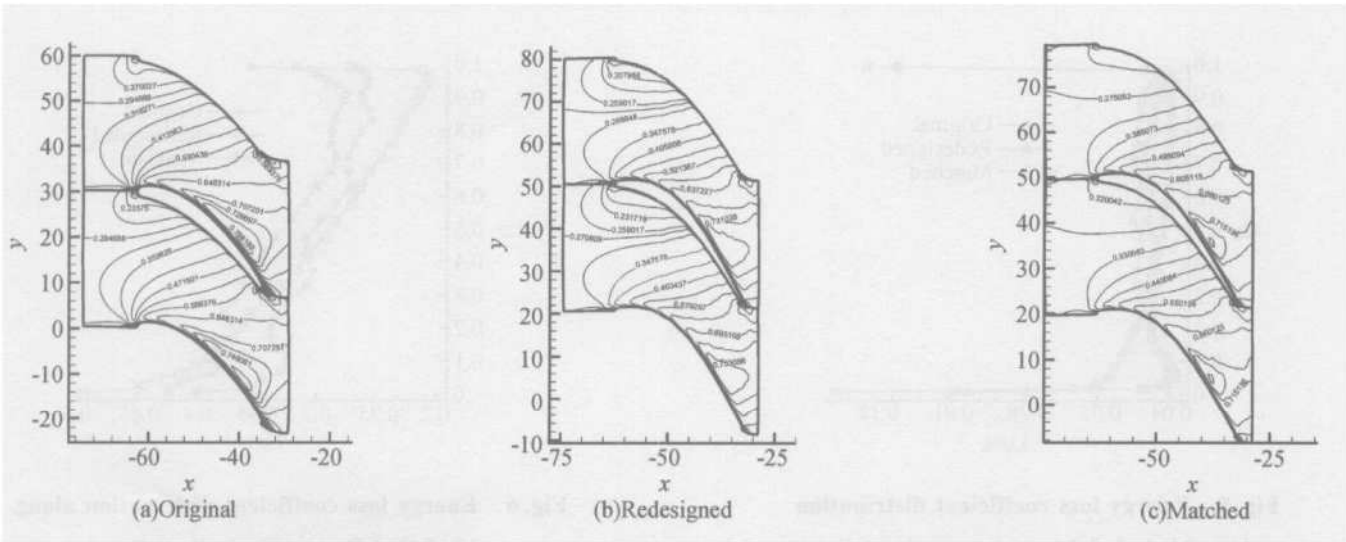


Fig 2 Mach number contours distribution on S1 surface at 90% height of stator

图 5 是静叶出口气流角分布, 原型静叶出口气流角沿叶高是增加的 (从 25.5° 变化到 38.5°), 出口气流角的变动范围比较大, 这对反动度的沿叶高变化与动叶攻角会有很大的影响。改型以后静叶出口气流角沿叶高变化不大 (从 29.5° 变化到 32.5°), 如果不计两端的值, 静叶出口气流角沿叶高变化在 1° 以内。

经过匹配以后, 静叶出口气流角平均增加了 1.5° , 但是沿叶高的分布形态与匹配以前基本一致。图 6 是动叶出口气流角分布, 由图可见, 动叶出口气流角分布的范围比较大, 大致为 $30^\circ \sim 51^\circ$; 如果不考虑叶片两端的影响, 则动叶出口气流角沿叶高由上向下是逐步提高的。这与动叶的扭曲形状是一致的。

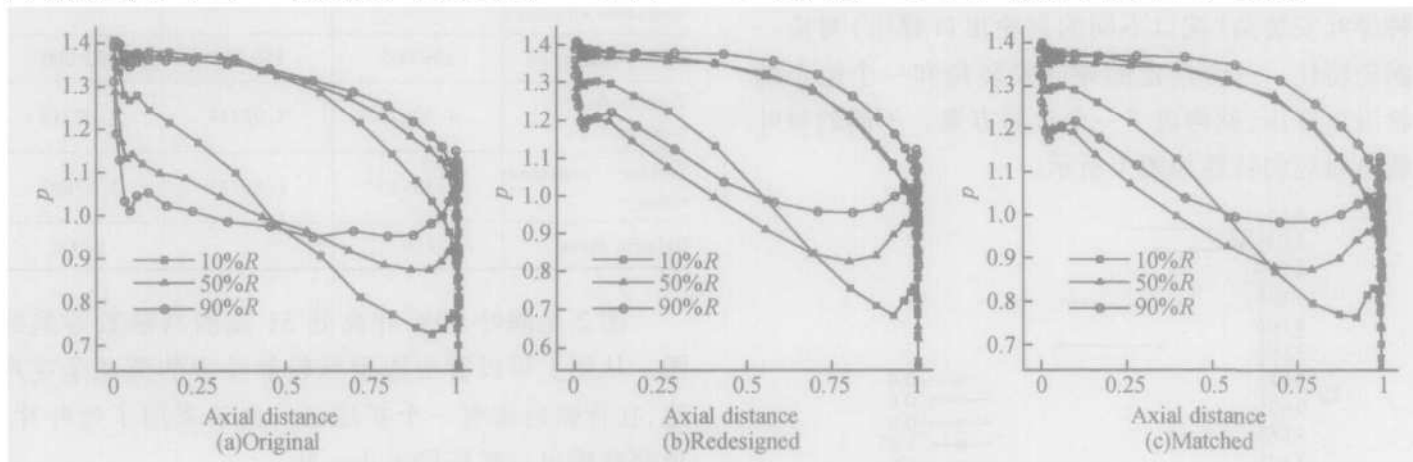


Fig 3 Static pressure coefficient distribution along blade profile

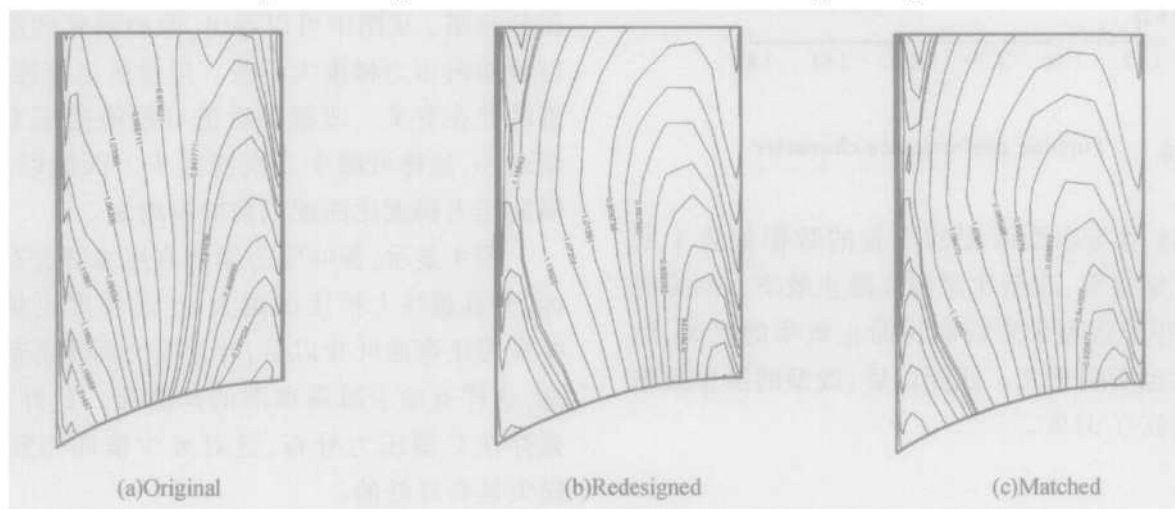


Fig 4 Static pressure contour on suction surface of stator blade

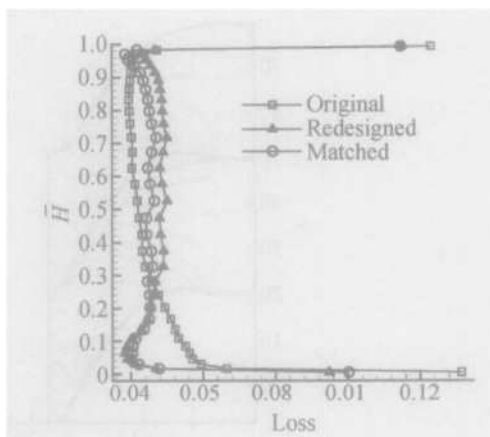


Fig 5 Energy loss coefficient distribution along blade height at stator exit section

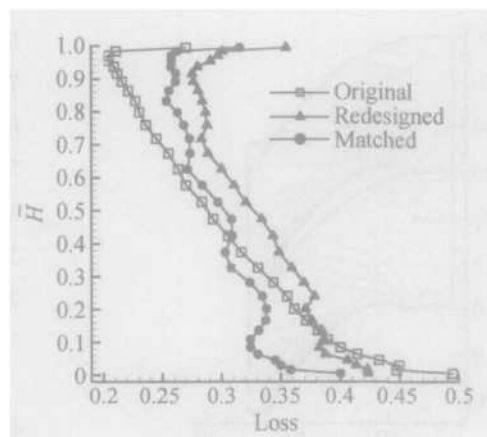


Fig 6 Energy loss coefficient distribution along blade height at rotor exit section

(下转第 183 页)

(4)分析认为该“沉积层”由硼、积炭和少量的三氧化二硼组成,且基本惰性。

参考文献:

- [1] 胡松起,李葆萱,王英红,等.含硼富燃料推进剂低压燃烧特性研究[J].推进技术,2002,23(6). (HU Song-qi LI Bao-xuan, WANG Ying-hong et al Combustion characteristics of boron-based fuel-rich propellant at low pressure [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(6).)
- [2] 郑剑.四十二所复合固体推进剂技术研究四十年回顾与展望[C].中国宇航学会固体火箭推进专业委员会2003年年会论文集:4~17.
- [3] 王英红,李葆萱,等.含AP包覆硼的富燃料推进剂燃烧机理研究[J].火炸药学报,2004,26(2).
- [4] Pein R, Anders S. Investigation of fuel-rich boron combustion in a pressurized bomb[R]. *Thirty Symposium (Inter-*

national) on Combustion/The Combustion Institute, 2000 427~437.

- [5] 王英红,李葆萱,李进贤,等.含硼富燃料推进剂凝相反应对低压燃烧的影响[J].推进技术,2004,25(2). (WANG Ying-hong LI Bao-xuan, LI Jin-xian et al Effect of condensed-phase reaction on combustion of fuel-rich solid propellant based on boron in low pressure[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(2).)
- [6] Kuo K K. Combustion of boron-based solid propellant and solid fuels[R]. *CRC Press Inc*, 1993 375~385
- [7] Alessandro Gomez, Rosner Daniel E, Roni Zvuloni. Recent studies of the kinetics of solid boron gasification by $B_2O_3(g)$ and their chemical propulsion implications[R]. *CRC Press Inc*, 1993 113~132

(编辑:朱立影)

(上接第154页)

6 结 论

(1)采用改变涡轮导流叶片的安装角并辅以调节涡轮出口背压为内容的匹配方案可以达到发动机涡轮与压气机之间匹配的要求,在本算例条件下以损失改型涡轮的部分的效率提高为代价。

(2)改型涡轮由于采用了正弯叶片,两端的损失下降,顶部背弧出口的扩压段减小,经过匹配以后,这些特点仍然得到保留。

(3)改型以后静叶出口气流角沿叶高的分布趋于均匀。经过匹配以后,静叶出口气流角平均增加了 1.5° 。

参考文献:

- [1] John Lytle, Greg Follen, Cynthia Naiman et al Numerical propulsion system simulation (NPSS) [R]. *NASA/TM* - 2000-209795
- [2] Ivanov M, Ja Nigmatullin R Z. Meridional viscous simula-

tion for multistage turbomachinery design application[C]. *ISABE 99-7063*, 1999 or *AIAA Paper 99-34064*, 1999

- [3] Follen G, Aubuchon M. Numerical zooming between a NPSS engine system simulation and a one-dimensional high compressor analysis code[R]. *NASA/TM* -2000-209913
- [4] John L, Gregory F, Cynthia N, et al 2001 numerical propulsion system simulation review [R]. *NASA/TM* -2002-211197
- [5] 冯国泰,黄家骅,李海滨,等.涡轮发动机三维多场耦合数值仿真试验台的数学模型研究[C].中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议,2000
- [6] 周驰,冯国泰,王松涛,等.涡轮叶栅气热耦合数值模拟[J].工程热物理学报,2003,24(2).
- [7] 杨海涛.涡轮发动机数值仿真及部件特性改变对总体性能影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000
- [8] 王松涛.叶轮机三维粘性流场数值方法与弯叶栅内涡系结构的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,1999

(编辑:朱立影)