

文章编号: 1000-8055(2007)10-1695-05

发动机总体与尾喷管三维并行设计研究

陈玉春¹, 黄 兴¹, 高本兵², 叶 伟¹, 张 宏¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航天科工集团 第三研究院, 北京 100074)

摘 要: 为解决某型涡扇发动机尾喷管改型中的流量匹配问题, 利用 iSIGHT 软件平台集成零维发动机性能计算程序和三维混合室和尾喷管的流场计算程序, 运用数值缩放 (Zooming) 技术, 实现了混合室和尾喷管型面以及进出口面积的自动修正, 解决了尾喷管和发动机流量匹配的问题, 并准确地反映了混合室和尾喷管三维流动效应对流量系数、推力系数以及发动机工作点的影响。该方法可为实现涡扇发动机其它部件的 Zooming 技术提供有意义的参考。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 涡扇发动机; 混合室; 尾喷管; 数值缩放技术; 流量匹配
中图分类号: V231 **文献标识码:** A

Parallel design of turbo engine and three-dimensional nozzle

CHEN Yu-chun¹, HUANG Xing¹, GAO Ben-bing², YE Wei¹, ZHANG Hong¹

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. The 3rd Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation,
Beijing 100074, China)

Abstract: In order to solve the problem of mass flow match between aero-engine and nozzle in the performance simulation, 0-D engine performance simulation programs and 3-D mixer and nozzle computation fluid dynamics software were integrated into iSIGHT platform. The method was presented solving the mass flow match and integrating multi-level of complexity analysis techniques (Zooming technology) that captured the appropriate physics of mixer and nozzle at the 3-D state for engine systems. By means of iteration computation of programs between 0-D and 3-D, the models and areas of the mixer and nozzle were adjusted automatically. The thrust coefficient and flow coefficient of nozzle were obtained at the same time. This method may provide a reference to application of Zooming technology in other parts of turbofan engines.

Key words: aerospace propulsion system; turbo-fan engine; mixer; nozzle;
zooming technology; mass flow match

零维 (0-D) 模型是发动机仿真的基础, 但是零维模型^[1]有两个主要的缺点: 第一是无法反映部件内部的流动细节; 第二是零维模型的准确性依赖于部件特性的准确性, 部件特性的获得主要是依靠进

行大量的实验。一旦部件有少许改动, 部件特性就要重新确定, 由此造成研制周期长, 耗资大。

要克服这两个缺点, 就要求模型不是建立在描述性的关联式的基础上, 而是建立在物理学定

收稿日期: 2007-03-23; 修订日期: 2007-07-25

作者简介: 陈玉春 (1967-), 男, 布依族, 贵州惠水人, 副教授, 博士, 主要从事航空宇航推进理论与工程的研究。

理的基础上,全三维模型就是建立在物理学定理基础上的仿真数学模型。在目前 0-D 发动机特性计算模型中,发动机各部件的计算结果并不能反映该部件的实际流动情况,因此对部件进行高维数的数值模拟在许多情况下是很重要的。这种对影响发动机工作的重要部件进行不同维数数值模拟的方法在美国 NPSS^[2] 计划中被称为 Zooming (数值缩放) 技术^[3]。作为一项重点技术,Zooming 技术在 NPSS 计划中得到了重点发展^[4],国内也有人将 Zooming 技术在涡扇发动机特性计算中的应用进行了初步的研究^[5]。

本文通过使用三维(3-D)尾喷管 CFD 计算和 0-D 发动机特性计算程序相结合的方法实现了在发动机性能计算中对混合室和尾喷管的 Zooming,准确地反映了混合室和尾喷管的实际流动情况,解决了某型涡扇发动机改型设计中,3-D 尾喷管和 0-D 发动机在设计点和非设计点流量匹配的问题。

1 混合室和尾喷管 3-D 计算

1.1 混合室和尾喷管的外型面设计

某型涡扇发动机改型设计中,需要将分别排气尾喷管改进为混合排气尾喷管,并且要求尾喷管尽可能短。为此,设计中考考虑采用简单强制混合式混合室和收缩尾喷管一体化的设计方法。为了能够将 0-D 发动机性能计算的数据应用于 3-D 混合室和尾喷管计算,本文采用维托辛斯基公式(式(1))来设计混合室和尾喷管的外壁面的型线。这种型面能够保证进口截面产生的横向压强梯度和径向分速逐渐减小,并在出口截面上趋于零,从而获得较为均匀的出口流场。

$$r = r_e / \sqrt{1 - [1 - (r_e / r_0)^2] (1 - 3x^2/l^2)^2 / (1 + x^2/l^2)^2} \quad (1)$$

式中 l 是混合室和尾喷管总长度; $l' = \sqrt{3}l$; r_0 是混合室进口外涵进口半径(内径); r_e 是尾喷管出口半径(内径); x 是混合室进口后的轴向指标。

可见,根据 0-D 发动机性能计算得到的混合室和尾喷管的尺寸数据,就可以直接进行混合室和尾喷管的几何造型,为混合室和尾喷管 3-D 计算提供几何边界条件。

1.2 3-D 混合室和尾喷管计算网格

计算中混合室和尾喷管计算域的选择如图 1 所示: I 区为整流区,其目的是在 3-D 模拟中使进

口流场分布尽量接近实际流场分布(注:在 I 区中,外涵道冷空气流由 A_{25} 进入混合器,核心机热燃气流由 A_{55} 进入混合器); II 区为混合室和尾喷管内部区域; III 区为尾部射流区,其目的是要考虑环境静压对尾喷管的流量系数和速度系数的影响而设定的; IV 区为扩散区,这一区域是为保证出口的真实流动而设置。

计算中混合室和尾喷管计算网格如图 2 所示,在靠近壁面和气流混合处等气流状态变化剧烈的区域都进行了网格加密处理,以保证计算精度。计算软件采用 FLUENT,选用 Coupled 联立求解三维雷诺平均 N-S 方程,时间离散方式选择隐式,湍流模型选用标准 $k-\varepsilon$ 模型。

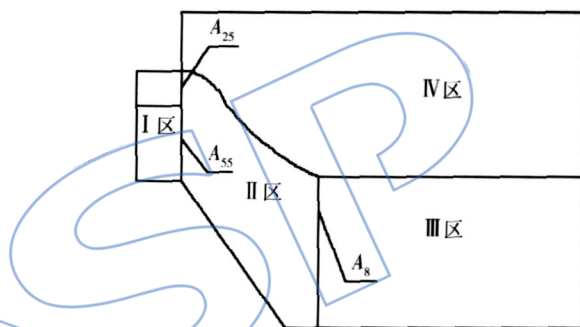


图1 混合室和尾喷管计算网格分区示意图

Fig.1 Partitions of computing grids of mixer and nozzle

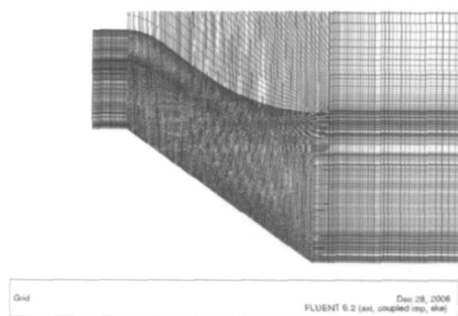


图2 混合室和尾喷管的计算网格

Fig.2 Computing grids of mixer and nozzle

2 Zooming 技术的应用

2.1 iSIGHT 软件平台中程序集成的简介

本文采用在 iSIGHT 平台中集成 0-D 发动机程序和 3-D 混合室与尾喷管 CFD 计算程序,实现了将混合室和尾喷管计算从 0-D 到 3-D 的“Zooming in”(数值放大)的发动机特性计算,由于 iSIGHT 提供了快捷的程序集成功能并且提供了多种优化方法,这样做可以免去大量的编程工作。

iSIGHT 平台中 0-D 发动机特性计算程序实

现方法是:将各个部件计算程序均改进为可执行文件(.exe),数据交换均采用文件输入/输出方式.在发动机特性计算程序中实现 3-D Zooming 方法是:将用于混合器和尾喷管 3-D 计算的 Gambit 和 FLUENT 软件启动做成批处理文件(.bat),通过导入操作日志可以实现 Gambit 和 FLUENT 自动网格划分、流场计算以及结果后处理.

2.2 设计点 Zooming 计算流程

首先,利用 0-D 计算得到混合室内、外涵进口和尾喷管出口参数,根据这些参数进行 3-D CFD 计算,根据流量匹配准则采用优化方法对各面积进行修正,使混合室和尾喷管和发动机满足 0-D 计算所规定的流量匹配(如图 3 所示).具体的调整算法是:

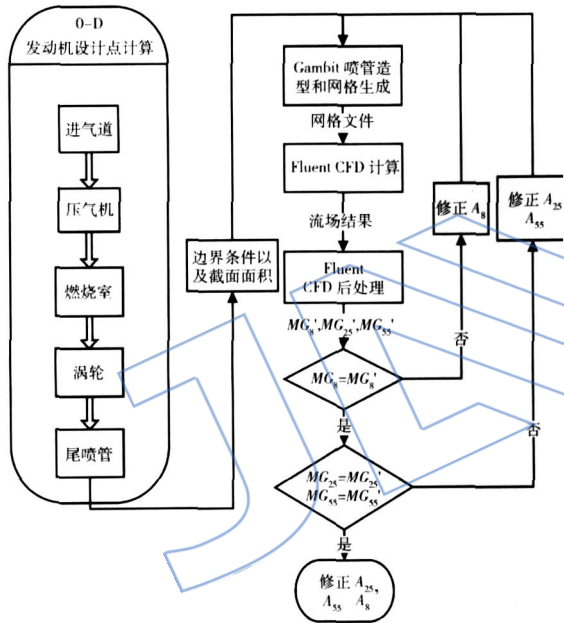


图 3 设计点 Zooming 计算过程
Fig. 3 “Zooming in” in design point computing

- (1) 首先由 0-D 计算得到的混合室进口以及尾喷管出口参数作为初值进行 3-D 计算,由于存在摩擦和分离现象,3-D 计算得到的流量必定偏小;
- (2) 通过优化方法自动调整尾喷管出口面积 A_8 ,使尾喷管出口流量等于发动机所需要的流量;
- (3) 根据流量变化调整混合室内、外涵进口面积 A_{55} 和 A_{25} ,使得发动机涵道比满足预定值;
- (4) 完成第(3)步调整后,尾喷管出口流量会有少量的变化,继续重复 2,3 步计算直到获得满足发动机流量匹配面积 (A_{55} , A_{25} 和 A_8) 为止(注:每次改变 A_{55} , A_{25} 和 A_8 时,混合室和尾喷管外壁面型面需重新造型).

2.3 非设计点 Zooming 计算流程

根据发动机在飞行包线范围内的工况,通过 0-D 计算得到的尾喷管可用落压比,为 3-D 尾喷管流场计算提供边界条件,经过多次单独的 3-D 计算,可以获得尾喷管特性: $C_D = f(\pi_{CP})$ (尾喷管流量系数与可用压力比之间的关系)以及 $C_{Fg} = f(\pi_{CP})$ (尾喷管推力系数与可用压力比之间的关系),然后利用 CFD 计算的结果更新 0-D 发动机特性计算中的尾喷管特性图,再进行 0-D 发动机特性计算.非设计点 Zooming 计算流程如图 4 所示.

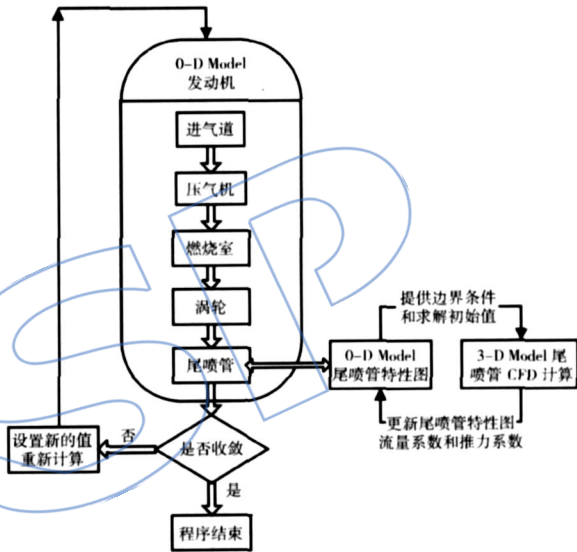


图 4 非设计点 Zooming 计算过程
Fig. 4 “Zooming in” in off-design points computing

3 发动机设计点性能计算算例

以双轴混排涡扇发动机为算例(由于篇幅所限具体的发动机参数省略),由于 0-D 计算不考虑粘性和三维效应,所以计算结果和实际情况相比有较大差异.将 0-D 计算得到的数据作为边界条件,在混合室和尾喷管中进行 3-D 计算.这个计算过程在发动机特性计算中就称为对混合室和尾喷管的“Zooming in”计算过程.未进行面积调整和调整后的混合室进口到尾喷管出口的流场分布结果见图 5 和图 6,具体的面积和流量数值见表 1.

从图 5,图 6 和表 1 中(表 1 中: $\dot{m}_{25}$ - 混合室外涵进口空气流量, $\dot{m}_{55}$ - 混合室内涵进口燃气流量, $\dot{m}_8$ - 尾喷管出口燃气流量.)的数据可以看出,由于附面层和气流壁面分离对总流量存在较大影响,在相同的混合室和尾喷管面积下,0-D 与 3-D 计算得到的流量存在较大的误差,所以仅仅使用 0-D 特性计算得到的结果是不够准确的.为

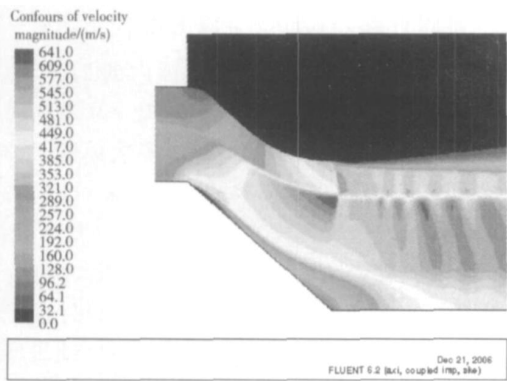


图 5 调整前的流场分布-速度

Fig. 5 Flow field of origin nozzle-velocity

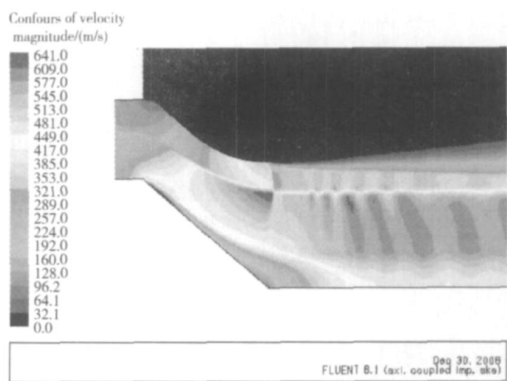


图 6 调整后的流场分布-速度

Fig. 6 Flow field of modified nozzle-velocity

表 1 面积调整前的 0-D 到 3-D 面积和流量对比

Table 1 Comparison of area and mass flow between 0-D and 3-D results of origin nozzle

	A_{25}/m^2	A_{55}/m^2	A_8/m^2	$\dot{m}_{25}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$\dot{m}_{55}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$\dot{m}_8/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
0-D	0.015 68	0.025 46	0.025 42	4.002 8	4.070 2	8.073 0
3-D	0.015 68	0.025 46	0.025 42	3.471 4	4.405 9	7.877 4
$\Delta/\%$	0	0	0	- 13.28	+ 8.25	- 2.42

表 2 面积调整后的 0-D 和 3-D 面积和流量对比

Table 2 Comparison of area and mass flow between 0-D and 3-D results of modified nozzle

	A_{25}/m^2	A_{55}/m^2	A_8/m^2	$\dot{m}_{25}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$\dot{m}_{55}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$\dot{m}_8/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
0-D	0.015 68	0.025 46	0.025 42	4.002 8	4.070 2	8.073 0
3-D	0.018 49	0.022 65	0.027 51	4.013 0	4.065 2	8.078 2
$\Delta/\%$	+ 17.92	- 11.04	+ 8.22	+ 0.25	- 0.12	+ 0.06

了保证实际的气流流量与 0-D 中的一致(发动机流量匹配的要求),在实际中需要对混合室和尾喷管面积进行适当的调整.混合室和尾喷管面积的调整采用 iSIGHT 提供的优化方法 - 线性规划(原理从略)来实现.

表 2 是对混合室和尾喷管面积进行调整后的 3-D 计算结果与 0-D 计算结果的对比.从上表比较可以看出,混合室外涵气流与固体壁面的接触周长较内涵的大,因而气流摩擦损失与内涵比相对较大,这就是调整混合室进口面积后 A_{25} 增加和 A_{55} 减小的原因.从混合室进口到尾喷管出口,由于气流同时受到摩擦阻力和气流分离的影响, A_8 则需适当放大后才能满足流量匹配的需要.经过面积调整之后,3-D 计算得到的流量满足 0-D 的要求(混合器内外涵流量和尾喷管流量的误差均不大于 0.3 %).

4 发动机非设计点算例

类似设计点性能计算,在非设计点性能计算时也可以使用 Zooming 技术,以便更全面地考察由于混合室和尾喷管的三维流动效应对尾喷管特性的影响,以及对发动机工作点的影响.

图 7 和图 8 分别是由 3-D 计算得到的尾喷管流量系数 C_D 和推力系数 C_{Fg} 随可用压力比的变化关系(相对值).

显然,图 7 和图 8 中喷管特性的变化趋势具有普遍性.

在发动机非设计点平衡计算时,如果每一步都要进行 3-D 计算,那么计算时间是不允许的.类似 NCP 中的做法^[2],本文在发动机特性非设计点计算时,将 3-D 计算得到的尾喷管特性(图 7 和图 8)代替 0-D 中的尾喷管特性,以考察在非设计点

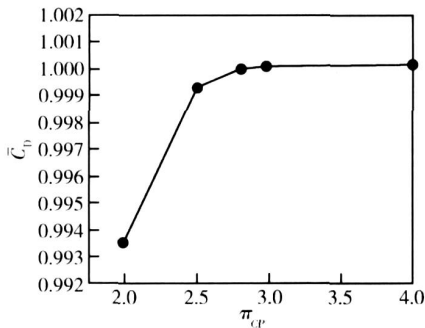


图 7 流量系数与可用压力比的关系

Fig. 7 Nozzle characteristic- C_D vs. π_{cp}

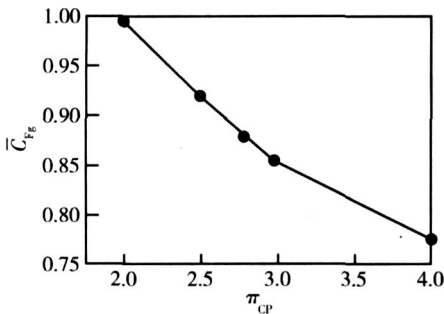


图 8 推力系数与可用压力比的关系

Fig. 8 Nozzle characteristic- C_{Fg} vs. π_{cp}

条件下尾喷管和发动机流量匹配的情况. 发动机的非设计点飞行条件为: 高度 $H = 9\,000\text{ m}$ 、马赫数 $Ma = 0.85$, 控制规律为: 涡轮进口总温 $T_4 = 1\,150\text{ K} = \text{常数}$. 非设计点的 3-D 尾喷管 Zooming 计算结果如表 3 所示.

由表 3 中数据可见, 0-D 和 3-D Zooming 计算得到的决定发动机共同工作的参数(风扇压比比 Z_F 、风扇百分比转速 n_F 、压气机压比比 Z_C 、压气机百分比转速 n_C 、高压涡轮换算流量 $\dot{m}_{cor, hpt}$ 以及低压涡轮换算流量 $\dot{m}_{cor, lpt}$) 均非常接近(误差最大不超过 1%), 因此, 通过 3-D 尾喷管与 0-D 发动机流量匹配调整得到的混合室和尾喷管, 在非设计点条件下也能够满足发动机/尾喷管流量匹配的要求. 由于尾喷管出口气流具有 3-D 效应, 部分气流分离使得在 3-D 流动情况下尾喷管中的气流呈现出类似收-扩尾喷管的流动现象(如图 6 所示), 喉部前移到尾喷管内部, 故 3-D Zooming 计算得到的尾喷管出口气流速度 v_8 偏高许多(达 8.86%), 这对发动机的推力和耗油率有积极的影响, 这些现象在 0-D 特性计算中是无法被揭示的.

表 3 非设计点 Zooming 计算结果

Table 3 Results of “Zooming” in nozzle at off-design point

	Z_F	$n_F / \%$	Z_C	$n_C / \%$	$\dot{m}_{cor, hpt}$	$\dot{m}_{cor, lpt}$	$v_8 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0-D	0.692	92.862	0.873	94.836	50.025	129.399	445.35
Zooming	0.686	93.184	0.873	94.987	50.023	129.598	484.80
$\Delta / \%$	- 0.86	+ 0.35	0	+ 0.16	- 0.004	+ 0.15	+ 8.86

5 结 论

(1) 本文在 iSIGHT 平台中实现了 Zooming 技术在发动机特性计算的应用, 并成功应用于某型涡扇发动机尾喷管改型设计中, 这种实现 Zooming 技术的方法可为类似的研究提供有价值的参考.

(2) 由于在混合室和尾喷管特性计算中采用了 3-D Zooming 技术, 使得混合室和尾喷管的计算结果能够反映气流的实际流动情况.

(3) 实现了对混合室和尾喷管面积的自动匹配调节, 解决了混合室、尾喷管和发动机流量匹配的问题.

(4) 采用 Zooming 技术能够准确的反映了尾喷管流量系数和推力系数的变化, 使得发动机特性计算的精度比 0-D 的计算精度更高.

参考文献:

[1] Sellers J F, Daniel C.J. DYNGEN-A program for calculating steady state and transient performance of turbojet and turbofan engines[R]. NASA- TN-D-7901, 1975.

[2] Evans A L, Pollen G, Naiman C, et al. Numerical propulsion system simulation’s national cycle program[R]. AIAA-98-3113.

[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 K L, Greg F, Cynthia N, et al. Numerical propulsion system simulation (NPSS) 1999 industry review [R]. NASA/ TM-2000-209795.

[5] 黄家骅, 冯国泰, 于廷臣, 等. 涡轮发动机涡轮改型数值匹配的数值仿真[J]. 推进技术, 2005, 26(2): 151-154.

HUANG Jiahua, FENG Guotai, YU Tingchen, et al. Numerical simulation of redesigned turbine matching in turbojet engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(2): 151-154.