

涡扇发动机燃烧室三维冷态流场的计算^{*}

周玉珍, 邵文清, 王菊金

(航天机电集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 论述了某型号涡扇发动机带甩油盘燃烧室从建模到流场计算的整个过程, 对半折流式环形燃烧室进行了冷态流场三维流动数值模拟, 运用先进的数值计算软件, 模拟甩油盘旋转甩油的过程, 数值计算得到了燃烧室的速度场、总压恢复系数的分布以及燃油分布情况。为燃烧室的热态流场计算和燃烧室的设计、反设计及改型奠定了基础。

关键词: 涡轮风扇发动机; 环形燃烧室; 三维流; 数值仿真

中图分类号: V235.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2001) 06-0480-03

Flow-field computation for turbofan engine combustion chamber

ZHOU Yur-zhen, SHAO Wen-qing, WANG Ju-jin

(The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: The process of turbofan engine combustion chamber non-reaction flow computation was discussed. Non-reaction three-dimensional flow in turning back-flow annular combustion chamber was simulated. Velocity field, restoring coefficient of total pressure and fuel distribution were gained. It can be the fundament to compute reaction flow, design and counter-design. It is also important to improve engine performance in the future.

Key words: Turbofan engine; Annular burner; Three dimensional flow; Numerical simulation

1 引 言

近年来, 随着计算方法与计算机技术的迅速发展, 虽然已发表了一些有关燃烧室数值模拟的方法与计算文献[1~6], 但采用的计算方法多为二维或准三维方法, 三维计算也常用结构化网格。文献[3, 4]对涡扇发动机加力燃烧室内的三维冷态流场进行了数值模拟。本研究则采用先进的流场计算软件和非结构化网格, 对某型涡扇发动机半折流式环形燃烧室进行了三维冷态流场计算, 并且真实地模拟了甩油盘高速旋转供油过程。

2 模型的建立

2.1 物理模型的建立

应用美国 Unigraphics Solutions 公司的三维 CAD 软件对其进行造型, 建立火焰筒内外壳所围成体积,

并截取周向 20°角内的体积, 转换成 PARASOLID 和 IGES 软件后, 在 GAMBIT 内划分面网格, 运用 GAMBIT 软件可以在几小时之内划分几十万的网格, 而运用人工编程划分将大大增加工作量, 而且划分的网格数量有限。这次计算首先对各进气孔划分面网格, 而后划分体网格, 网格数量为 23×10^4 , 某轴向截面示意图见图 1。其网格类型为非结构化网格, 网格元素有四面体、六面体和金字塔形等多种形状。各进气孔和进油孔都进行了加密, 就一个进油孔, 网格数量就达到了 166 个面元素, 这次计算遇到的最大困难是模拟甩油盘高速旋转下甩油, 后经 GAMBIT 对模型处理, 在转动面和非转动面之间设置 Interface, 在数值计算软件内形成 Grid interface, 从而使旋转部分流场与非旋转部分流场进行有效的数据传递。另外, 由于模型是截取周向 20°角内的体积, 所以在计算中必须设置周期面。

^{*} 收稿日期: 2001-03-15; 修订日期: 2001-06-11。

作者简介: 周玉珍 (1970—), 女, 硕士生, 工程师, 研究领域为航空发动机燃烧室设计。

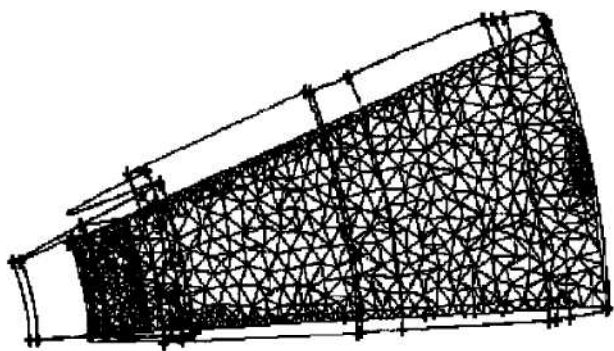


Fig 1. Mesh on one section

2.2 冷态流场的计算模型

计算采用通用的 SIMPLE 算法, 模型采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型。另外在计算过程中, 假设流体为连续性的粘性牛顿流体, 定常不可压, 忽略重力和浮力等项。流场的控制方程为:

连续方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3$$

动量方程

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_1 + \mu_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_1 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k \delta_{ij}) \quad i, j = 1, 2, 3$$

k 方程

$$\frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left[\mu_1 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \varepsilon \quad i, j = 1, 2, 3$$

ε 方程

$$\frac{\partial \rho u_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_1 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad i, j = 1, 2, 3$$

在上面公式中 μ_1 为紊流粘性系数, σ_k , σ_ε , c_1 , c_2 和 c_μ 为常数, 其值为

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, c_\mu = 0.09$$

由于 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型是属于高雷诺数流动的紊流模型, 所以对壁面附近的流动必须进行修正, 在这次计算中用壁面函数法对近壁区的流场进行修正。

3 计算边界条件、方法及结果分析

3.1 定解边界条件

计算中采用发动机最大工作状态下的进口边界

条件、出口边界条件、固体边界条件、周期性边界条件。对于固体边界条件, 计算时采用绝热壁面条件, 壁面为不可渗透。对于周期性边界条件是始边与终边上的流动参数相等。

进口边界条件是指燃烧室火焰筒各进气孔的参数, 计算中给定了火焰筒各进气孔的速度大小、方向、密度、温度等。此燃烧室供油是由燃油衬套上的 12 个直径为 0.7 mm 的孔预分配喷入甩油盘, 再由甩油盘上的 18 个小孔甩出。由于计算时模拟甩油盘的旋转, 所以进口边界条件给定了甩油盘的转速、燃油的相对速度、初始的紊流动能和紊流耗散率, 并定义它为液相。

对于出口边界条件, 在计算之前是未知的, 这里采用压力出口, 初步估计一个压力值。

3.2 计算方法

在计算中采用先进的数值计算软件, 对进油孔的燃油流量、进气孔的进气量以及残差进行监视。由于流动控制方程为严重的非线性方程, 所以它的离散方程也是非线性的, 求解过程采用低松弛的方法, 对速度、压力、紊流动能、紊流动能耗散率、粘性系数这几个流动参数进行低松弛迭代求解, 保证迭代收敛。

收敛准则, 采用全场前、后两次迭代结果之差的绝对值的最大值小于某个小量, 即

$$\max | \phi_i^{n+1} - \phi_i^n | < 10^{-4}$$

每一轮计算结束, 检查流场的速度矢量图, 若流场速度矢量图没有形成较好的回流区, 则对各进气孔的进气速度进行调整。

4 结果分析

燃烧室内周向中间截面的流场速度矢量分布如图 2 所示。从图中可以看出, 燃烧室内回流区比较明显, 它主要是由外火焰筒头部 3 处缝隙进气, 前部两处小孔进气、火焰筒外壁大椭圆孔进气及内火焰筒一处进气形成。火焰筒外壁的 18 个椭圆形大进气孔, 进气气流被分成两部分, 一部分进入回流区参与燃烧, 另一部分气体则进入掺混区。它的流线图如图 3 所示, 该股气流十分重要, 当它进入火焰筒时, 几乎穿透了整个回流区, 把回流区和掺混区从中分开。其穿透深度对于加大燃烧室回流区的形成、高温燃气的冷却掺混、火焰筒内壁的冷却及燃烧室出口温度的分布都有很大的影响。当今世界上多种发动机的折流式燃烧室, 在类似此处位置上加了大进气风斗, 以增强该进气孔射流的穿透深度。这都说明了该股气流对

