

文章编号: 1000-8055(2002)05-0524-04

二维引射—混合器流场的数值研究与验证

张靖周, 单 勇

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 本文运用一维引射特性方程和不可压缩流动 Navier-Stokes 方程, 对二维引射—混合流场进行了数值研究。首先用一维引射特性方程估算理想的引射气流流量; 然后用 N-S 方程对混合管内的气流混合流动进行计算, 用计算得到的混合管速度分布和壁面粘性剪切力来修正一维引射特性方程中的经验常数, 逐次逼近真实的引射流量比。计算结果表明, 本文的数值方法可以有效地预测引射流量比和混合流场。

关键词: 引射器; 混合器; 数值计算;

中图分类号: V 231. 3; V 211. 3

文献标识码: A

Numerical Computation and Examination of a Two-Dimensional Mixer-Ejector System

ZHANG Jing-zhou, SHAN Yong

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Numerical computation of 2-D flow fields inside a mixer-ejector was conducted using one-dimensional ejector pumping relationship and full Navier-Stokes equations. Firstly, the ideal pumping coefficient was determined based on the one-dimensional ejector pumping relationship. Then the coefficients in the one-dimensional ejector pumping relationship were corrected according to the velocity distribution and wall friction resulting from the calculation of Navier-Stokes equations. The final pumping coefficient can be obtained by repeating the above process until the residual is satisfied. From the comparison between the computation results and experimental data, it is concluded that the present method is reasonable in predicting the mixer-ejector pumping capacity.

Key words: ejector; mixer; numerical calculation

1 前 言

引射—混合器是一种利用主流的动量泵抽次流的流体动力装置, 在航空发动机上具有广泛的应用, 诸如垂直/短距起飞着陆飞机的起飞增推, 排气系统的尾焰红外辐射抑制以及噪声降低等^[1~3]。引射—混合器的性能主要取决于引射能

力和混合效率, 这就需要对引射喷管和混合管进行精心的设计和分析。对于强迫混合器流场的数值研究, 目前开展的研究很多, 数值计算方法也较成熟^[4, 5]。但对于引射—混合器的流场进行数值研究却极其缺乏, 关键在于引射流量比的数值预测非常困难。目前绝大多数的分析都是采用近似的一维分析方法, 这种方法是基于理想引射能力预

收稿日期: 2001- 11- 27; 修订日期: 2002- 04- 08

基金项目: 航空科学基金资助项目(94C52021)

作者简介: 张靖周(1964-), 男, 江苏东海人, 南京航空航天大学能源与动力学院教授, 博士, 主要从事燃烧、传热与红外隐身研究

测的基础,引入动量混合常数、壁面摩擦系数等经验公式,利用质量、动量和能量的宏观守恒推导出近似的一维引射特性方程^[6,7]。近年来国外有少数学者尝试用N-S方程的全流场计算来进行引射能力的预测,这种理论预测要求将内、外流场耦合计算,而且在边界条件的处理上要求将外流边界取得足够大,不便于工程应用和分析^[8]。

本文在引射能力的数值预测方法上提出了一种介于一维引射特性方程近似分析和全N-S方程精确分析之间的半精确分析方法,即将上述两种方法有机地结合起来,以避免前者过分依赖于实验数据,后者依赖于外流耦合计算的弊端。作为算例,本文对一典型的二维引射—混合器进行了分析,并与实验结果进行了对比验证。

2 数学方法

本文数值预测方法的基本思想是:首先用一维引射特性方程估算理想的引射气流量;然后用N-S方程对混合管内的气流混合流动进行计算,用计算得到的混合管速度分布和壁面粘性剪切力来修正一维引射特性方程中的经验系数,逐次逼近真实的引射流量比。

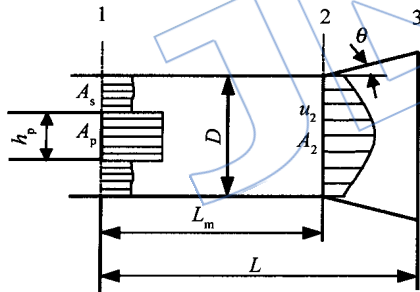


图 1 二维引射—混合器示意图

Fig 1 Scheme of a two-dimensional mixer-ejector

2.1 一维引射特性方程

对于图 1 所示的引射—混合器模型,其一维引射特性方程为^[7]:

$$\left(\frac{m_s}{m_p} \sqrt{\frac{T_{0s}}{T_{0p}}}\right)^2 \left\{ \zeta + \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{A_p}{A_s} \right)^2 \right] \right\} + 2 \left\{ \frac{m_s}{m_p} \sqrt{\frac{T_{0s}}{T_{0p}}} + \left[\zeta + 1 + \frac{A_s}{A_p} \right] \right\} = 0 \quad (1)$$

式中: A 为流通面积, m 为质量流量, T_0 为总温,下标 p 和 s 分别对应于主流和次流。系数 ζ 与扩压器压力恢复系数、摩擦系数和动量修正因子有关。

$$\zeta = \beta \left(\frac{C_p}{2} C_F \frac{L}{D} - 1 \right) \quad (2)$$

这里: 动量修正因子定义为 $\beta = \frac{\int_{A_2} u^2 dA}{A_2 u_2^2}$, 反映了直管段出口截面的混合程度,下标 2 即表征该直管段出口截面, u 为速度; 扩压器压力恢复系数定义为 $C_p = \frac{2(p_3 - p_2)}{\rho_2 \beta u_2^2}$, 下标 3 表示扩压段出口截面, p 为压力, ρ 为密度; 摩擦系数定义为 $C_F = \frac{2\tau}{\rho_2 \beta u_2^2}$, τ 为壁面剪切应力。

2.2 二维流动控制方程

在笛卡尔直角坐标系 (x, y) 中, 记各自对应的速度分量为 u, v 。二维流动的稳态、不可压、常物性流动的时均输运守恒方程为:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \Phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \Phi) \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) \right] + S^\Phi \quad (3)$$

式中: Γ^Φ 和 S^Φ 分别表示变量 Φ 所对应的有效扩散系数和源项^[9]。

考虑到计算域几何形状的不规则性, 为准确地处理曲边边界, 本文采用坐标变换法。引入曲线坐标系 $x = x(\xi, \eta), y = y(\xi, \eta)$, 通用控制方程式 (3) 可以变换为:

$$\left[\frac{\partial}{\partial \xi} (\rho U \Phi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho V \Phi) \right] = \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma \alpha}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\Gamma \gamma}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma \beta}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\Gamma \beta}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) \right] + JS(\xi, \eta) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} U &= uy_\eta - vx_\eta, \quad V = vy_\xi - ux_\xi \\ \alpha &= x_\eta^2 + y_\eta^2, \quad \beta = x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta \\ \gamma &= x_\xi^2 + y_\xi^2, \quad J = x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta \end{aligned}$$

2.3 紊流模型

本文采用常用的区域紊流模化方法, 在核心区采用标准的 $k-\epsilon$ 模型, 在近壁区采用低雷诺数两方程模型^[10,11]。

在高雷诺数区域中采用标准的 $k-\epsilon$ 模型:

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho \epsilon)}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &C_{\epsilon 1} \rho \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, G_t 为紊流动能生成率。紊流粘度为 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ 方程中的常数取为:

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.22$$

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92$$

在低雷诺数区域中, 为提高 $k-\epsilon$ 模型的有效性, Launder 和 Shama 把一些特殊的经验衰减函数引入到 μ_t 和 ϵ 的方程中。令 $\tilde{\epsilon} = \epsilon / D$, 有:

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho G_t - \rho(\tilde{\epsilon} + D) \quad (7)$$

$$\frac{D(\rho \tilde{\epsilon})}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \tilde{\epsilon}}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{\epsilon 1} f_1 \rho \frac{\tilde{\epsilon}}{k} G_t - C_{\epsilon 2} f_2 \rho \frac{\tilde{\epsilon}^2}{k} + E + [YC] \quad (8)$$

式中的 D 项和 E 项是为了考虑壁面对近壁区域紊流流动的影响而引入的附加项。

$$D = 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_j} \right)^2, \quad E = \mu \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k \partial x_j} \right)^2 \quad (9)$$

符号 $[YC]$ 代表 Y_{ap} 修正项, 以防止在流动分离区, 计算出的近壁紊流长度尺度过大。

$$[YC] = \max \left[0.83 \left(\frac{l_\epsilon}{l} - 1 \right), \left(\frac{l_\epsilon}{l} \right)^2 \frac{\tilde{\epsilon}^2}{k}, 0 \right] \quad (10)$$

式中: $l_\epsilon = k^{3/2} / \epsilon$, $l = 2.55Y$

其中: Y 代表方程中该点到壁面的垂直距离。

将低雷诺数衰减函数 f_μ 引入紊流粘度表达式:

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$f_\mu = \exp \left[\frac{-3.4}{(1 + Re_t/50)^2} \right] \quad (11)$$

紊流模型中的系数取为:

$$f_1 = 1.0, \quad f_2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2)$$

2.4 计算步骤

计算步骤如下:

(1) 主流流量已知, 引射流量的初始值先按照理想引射流量计算, 即假设完全混合, 忽略壁面摩擦。

$$\beta = 1, \quad C_F = 0, \quad C_P = 1 - (A_2/A_3)^2$$

(2) 根据主流和引射气流的进口条件, 进行混合管内的流场计算。

(3) 基于流场计算的速度分布结果, 得到修正的 β , C_F 和 C_P 值, 重新由引射特性方程确定引射流量。

(4) 比较引射流量的前后值, 直至两者趋于

一致。

3 计算结果与分析

本文对图 1 所示的二维引射—混合器进行了计算。具体结构参数如下: 主喷管高度 $h_p = 0.05$ m, 混合管高度 $D = 0.155$ m, 混合管长度 $L_m/D = 1 \sim 4$, 扩压器面积比 $A_3/A_2 = 1.34$, 半扩张角 $\theta = 8.22^\circ$, 主流速度 $u_p = 60$ m/s。计算网格划分为 120×200 。图 2 为混合管 $L_m/D = 2$ 时的混合流场速度分布。

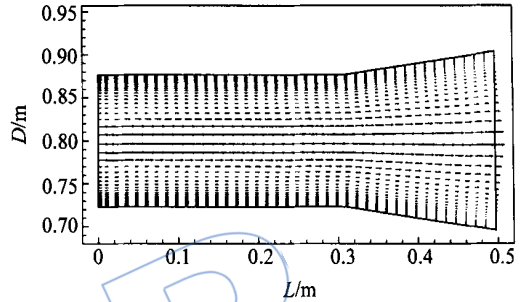


图 2 混合管 $L_m/D = 2$ 时的混合流场速度分布

Fig 2 Velocity distribution in mixing duct with $L_m/D = 2$

图 3 为混合管 $L_m/D = 3$ 时的混合流场速度分布。

可以看出: 依靠主流和引射气流之间的速度差形成的剪切混合, 混合管内部沿程的速度型面发生了一定的变化, 由于剪切掺混的效率较低, 主流核心区和引射气流外缘受到的扰动很小, 在剪切层内的速度变化较为明显, 其变化趋势符合二股气流混合的物理机理。

图 4 为在不同混合管长高比下扩压器进口截面上的速度分布。随着混合管长高比的增加, 速度分布的均匀性得到改善, 有利于引射能力的提高。

图 5 为计算分析获得的引射流量比 (m_s/m_p) 与混合管长高比之间的变化关系。与实验数据相比^[12], 理论预测值偏高于实验结果, 估计引起这种的原因在于: 影响实际引射混合过程的因素在一维引射特性近似理论分析模型中未能充分全面考虑, 如引射气流进口型面、流道结构、混合管壁面粗糙度等对气流的引射混合具有一定的影响; 流场计算与真实流动之间存在的误差会导致引射流量比计算的准确性; 实验数据自身也可能存在微小的误差。但从总的预测效果分析, 采用本文提出的计算方法对引射流量比的预测程度是令人满意的。

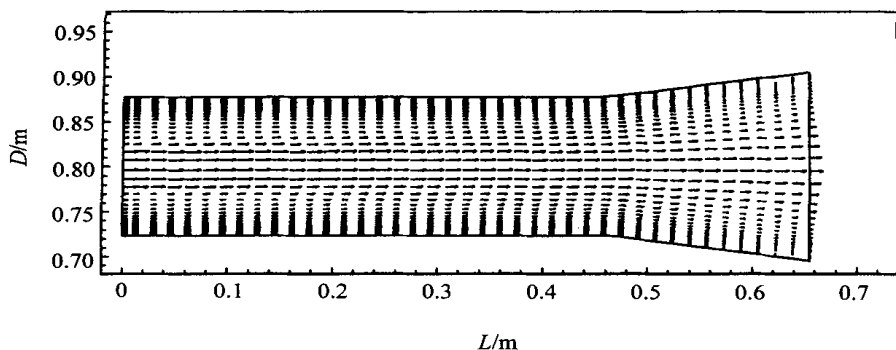
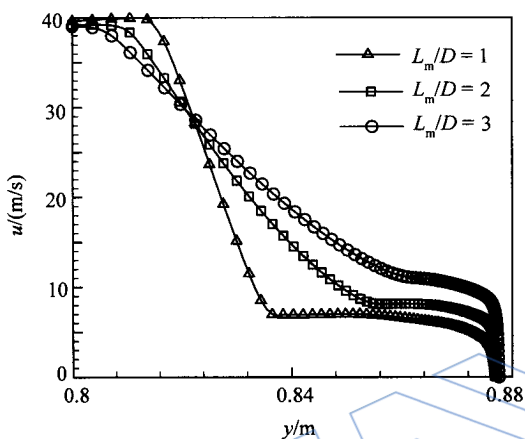
图 3 混合管 $L_m/D = 3$ 时的混合流场速度分布Fig 3 Velocity distribution in mixing duct with $L_m/D = 3$ 

图 4 扩压器进口截面上速度分布

Fig 4 Velocity distribution an inlet plane of diffuser

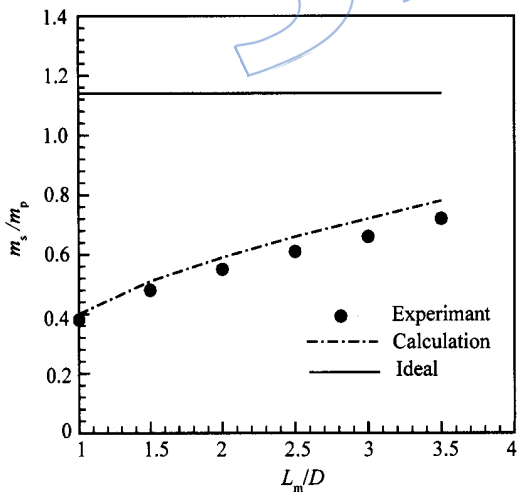


图 5 引射流量比计算值与实验值对比

Fig 5 Comparison of m_s/m_p with experiment data

4 结 论

本文运用一维引射特性方程和不可压缩流动 Navier-Stokes 方程, 对二维引射—混合流场进行了数值研究。在引射流量比的数值预测上, 首先用

一维引射特性方程估算理想的引射气流量; 然后用 N-S 方程对混合管内的气流混合流动进行计算, 再用计算得到的混合管速度分布和壁面粘性剪切力来修正一维引射特性方程中的经验常数, 逐次逼近真实的引射流量比。作为算例, 本文对二维引射—混合器进行了计算并与实验结果进行对比, 结果表明本文的数值方法是合理可行的。

参考文献

- [1] Presz W M, Reynolds G, McComick D C. Thrust Augment Using Mixer-Ejector-Diffuser Systems[R]. AIAA Paper 94-0020, 1994
- [2] Presz W M. Mixer/Ejector Noise Suppressors[R]. AIAA Paper 91-2243, 1991
- [3] 张靖周, 李立国, 高潮, 等. 波瓣喷管红外抑制系统的实验研究[J]. 航空动力学报, 1997, 12(2): 212-214
- [4] Malecki R, Lord W. Navier-Stokes Analysis of a Lobed Mixer and Nozzle[R]. AIAA Paper 90-0453, 1990
- [5] 张靖周, 李立国, 吴国钊. 波瓣混合结构三维流场数值计算[J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(6): 745-749
- [6] Presz W M, Gousy R G, Morin B L. Forced Mixer Lobes in Ejector Designs[R]. AIAA Paper 86-1614, 1986
- [7] Presz W M, Morin B L, Blinn R F. Short Efficient Ejector Systems[R]. AIAA Paper 87-1837, 1987
- [8] DeBonis J R. Full Navier-Stokes Analysis of a Two-Dimensional Mixer/Ejector Nozzle for Noise Suppression[R]. AIAA Paper 92-3570, 1992
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992
- [10] Launder B E, Shama B I. Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc[J]. Letters in Heat and Mass Transfer, 1974, 1: 131-134
- [11] Yap C R. Turbulent Heat and Momentum Transfer in Recirculating and Impinging Flows[D]. University of Manchester, Faculty of Technology, 1987
- [12] Skebe S A, McComick D C, Presz W M. Parameter Effects on Mixer-Ejector Pumping Performance[R]. AIAA Paper 88-0188, 1988