

波瓣喷管引射-混合器的数值研究与验证*

单 勇, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 对基于 CFD 数值预测波瓣喷管引射-混合器引射流量比的计算方法进行了探讨, 在计算过程中, 主流进口采用速度边界条件, 二次流进口采用总压压力边界条件, 混合流出口采用静压压力边界条件, 两者均设置为环境大气压力, 与相关实验数据的对比验证表明计算结果与实验结果仅相差 10% 左右; 同时通过改变混合管结构参数, 得到了混合管结构参数对引射-混合特性的影响规律, 进一步揭示了波瓣喷管有利于强化引射-混合的内在机理。在波瓣喷管出口对应于波谷区域存在一个相对低的静压区, 对于引射-混合器系统存在一个最优的性能设计点, 计算结果符合物理过程本质。

关键词: 喷管; 引射器⁺; 混合器; 数值计算

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 04-0320-05

Numerical computation and examination of a lobed mixer-ejector

SHAN Yong, ZHANG Jing-zhou

(Coll. of Energy and Power, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A research on the analytical prediction of pumping performance for the lobed mixer-ejector was performed by way of CFD technique. In the computation, the inlet of the primary flow used the velocity boundary condition. The total pressure boundary condition was applied to the inlet of the second flow and the static pressure boundary condition was applied to the outlet of the mixing flow, both were defined as ambient pressure. Compared with the experimental data, it is indicated that the relative error between the computational and experimental results is about 10%. A series of computations are conducted to obtain the effects of mixing-duct parameters on pumping-mixing performance and reveal further mechanism of the lobed nozzle on pumping-mixing enhancement, which shows that there exists a relative low static pressure region corresponding to the lobe valley at lobe nozzle exit and there is an optimum performance design for the particular mixer-ejector system. These results are verified with the physics nature.

Key words: Nozzle; Ejector⁺; Mixer; Numerical calculation

1 前 言

波瓣喷管引射-混合器是一种高效地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]。波瓣喷管引射-混合器的性能主要取决于引射能力和混合效率, 实验表明混合管参数与引射流量、混合效率密切相关。

对于波瓣喷管强迫混合器的性能已经开展了大量的实验和数值研究, 揭示了波瓣喷管强化掺混的机

理和诸多参数的影响规律^[4~7]。但对于波瓣喷管引射-混合器, 目前开展的实验研究较多, 关于引射特性的数值研究却相对缺乏^[8~12]。无论从降低研究费用, 还是缩短研究周期的角度, 开展基于 CFD 的引射-混合器性能理论分析都是十分必要的。

由于在引射-混合器中, 二次流是依靠主流动量吸入的, 因此引射流量的理论预测是一个复杂的问题。最初的数值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

* 收稿日期: 2003-07-09; 修订日期: 2003-12-15。

作者简介: 单 勇 (1978—), 男, 博士生, 研究领域为传热与红外隐射。E-mail: nuaasy@hotmail.com

进行计算^[8]。本文作者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-混合器进行了数值方法研究,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^[11]。国外一些学者曾对利用 N-S 方程来数值预测引射流量比的方法进行了探索,除了对引射-混合器内部流动进行计算之外,还需要对外部较大空间进行计算,计算工作量大^[10]。

本文基于 FLUENT 商用 CFD 软件对三维波瓣喷管引射-混合器的流场和引射特性进行数值研究,着重通过对主流和引射气流进出口边界条件的设定寻求数值预测引射流量比的计算方法,并通过对改变混合管面积比(混合管进口面积与波瓣喷管出口面积比 λ)和长径比(混合管长度与直径比 L/D),获得混合管结构参数对引射-混合特性的影响规律,进一步揭示了波瓣喷管有利于强化引射-混合的内在机理。通过与已有的实验结果相对比,验证本文计算方法和结果的正确性。

2 数值研究

2.1 计算模型

本文研究的物理模型是根据实验模型^[12]确定的。由于实验模型是中心对称结构,计算模型只采用了实验模型的一半。其中心对称截面结构如图1所示。主流进口直径为 150mm,经一收缩段与直径为 80mm 的波瓣喷管联接,12 个波瓣沿周向均布,波峰直径为 108mm,波谷直径 52mm,波瓣宽度为 7.2mm,波瓣扩张角为 20°。引射气流入口在集气室上、下方各布置一个,入口直径分别为 80 mm 和 100 mm。考

虑到波瓣喷管的复杂型面以及三维模型的复杂结构,计算中采用非结构化网格,在波瓣喷管内部及其外侧采用局部加密网格,整个计算区域的网格数达到 517249。

在计算中,波瓣喷管的结构参数保持不变,通过改变混合管的直径和长度得到一系列不同的混合管参数。

2.2 边界条件及计算方法

由于二次流依靠主流的动量驱动,二次流入口难以给定速度边界条件。考虑到外部环境的大气压力是一定的,二次流入口处的总压便可设定为环境大气压力 101325Pa,温度为环境温度 300K。在初始计算时,按照进口速度为 5m/s 假定一个均匀的进口静压,通过迭代计算对静压值进行修正,同时对进口速度进行修正。

主流入口处采用速度进口边界,主流速度取为 21 m/s,温度 620K;混合管出口采用压力边界条件,静压设为环境大气压力,其它变量按沿流向偏导数为零处理。

本文采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型,主流和二次流入口处的紊流动能和紊流动能耗散率按照经验关系选取^[13];近壁区采用标准壁面函数法进行处理。

$$k_{in} = 0.03u_{in}^2, \epsilon_{in} = \frac{k_{in}^{1.5}}{0.005D} \quad (1)$$

式中 D 为对应于主流和二次流入口的管道直径。

对称面除周向速度设置为零外,其它变量按沿周向偏导数为零处理。

流动与传热的控制方程采用一阶迎风差分格式离散,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法。速度和 k, ϵ 的收敛精度都达到 10^{-4} ,温度收敛精度达到 10^{-6} 。

迭代收敛后,对二次流入口的质量流量进行积分,最终确定引射流量比:

$$\Phi = m_s / m_p \quad (2)$$

式中 m_s 为二次流质量流量, m_p 为主流质量流量。

3 计算结果与分析

3.1 混合管内流场和温度场

图2为混合管面积比 3.3,长径比 2.0 时波瓣喷管出口截面的速度矢量和静压分布图。从图2(a)可以看出,在波瓣出口处存在主流沿径向向外流动的速度分量,以及引射气流沿径向向内流动的速度分量,从而形成大尺度的阵列二次环流,并在混合管下游诱发成流向涡,加强了冷热气流在出口及其下游区域的

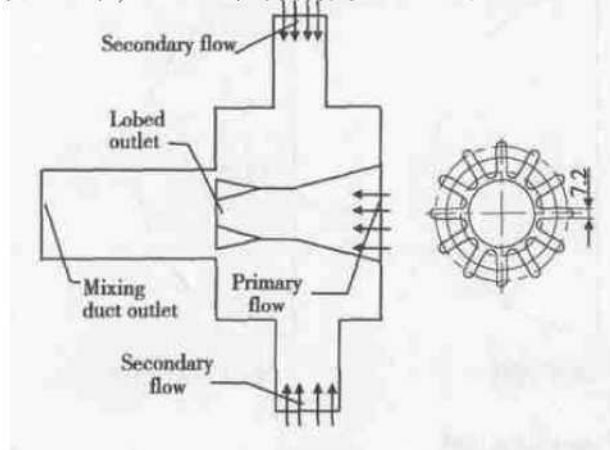


Fig. 1 Symmetry section of lobed mixer-ejector

掺混。值得注意的是,从图 2(b) 可以看出,在对应于引射气流的波谷区域存在一个相对低压区,一方面有利于环境空气的吸入,另一方面有利于增大引射气流沿径向向内流动的速度分量,提高波瓣喷管出口截面的二次环流速度环量,强化主流与引射气流之间的混合。

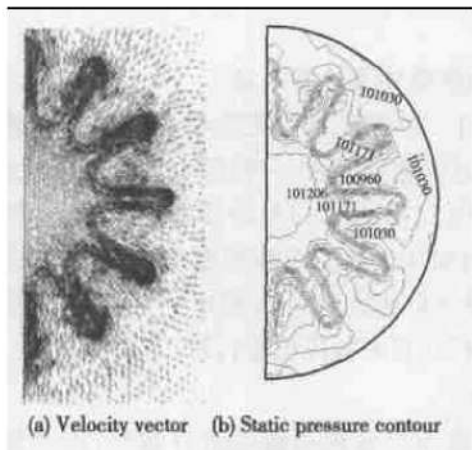


Fig. 2 Velocity and pressure fields at lobed nozzle exit cross section

图 3 为波瓣出口下游混合管沿程轴向速度分布变化, $x=0$ 表示波瓣出口截面位置, L 为混合管长度。可以看出轴向速度差异很大的主流与引射气流在进入混合管后,由于流向涡的作用发生剧烈的径向和周向掺混,引射气流速度增加,主流速度降低,到达混合管出口处时速度梯度已显著减小。

图 4 为波瓣出口下游混合管沿程温度分布变化。可以看出从混合管入口处到出口处,由于掺混的作用,主流核心温度降低,高温区域缩小,整个温度场沿周向趋向均匀。

图 5 为混合管面积比 $\lambda=3.3$, 长径比 $L/D=1$ 时的出口径向温度分布的实验值与计算值比较。 $r/R=0$ 表示在混合管出口截面的轴线, $r/R=1$ 表示在混合管出口截面的边缘。可以看出,计算结果与实验结果^[15] 趋势一致,两者之间基本吻合。

从图 6 中可以看出:当混合管面积比保持在 $\lambda=3.3$ 时,随着混合管长径比的增加,出口处的核心温度有所降低,两股气流的温度分布越均匀。这是由

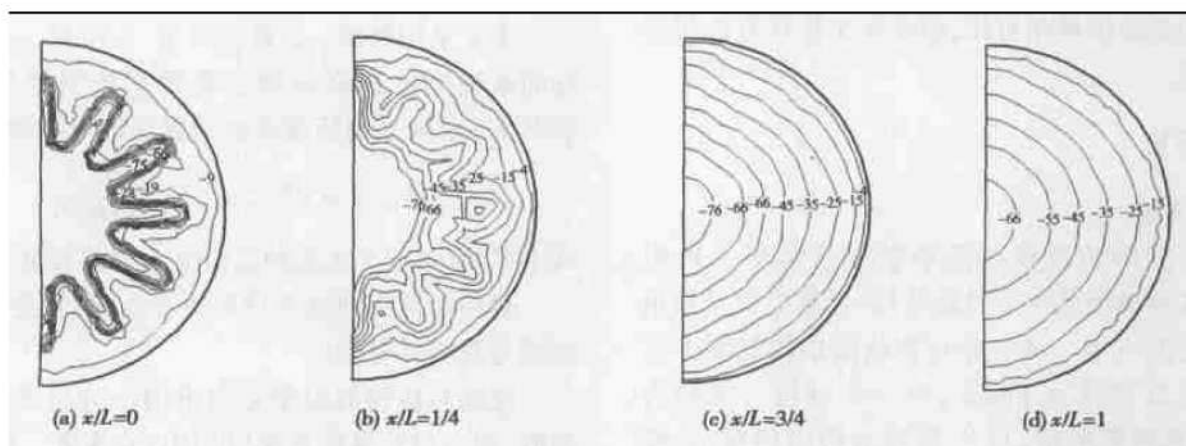


Fig. 3 Axial velocity contour along mixing duct

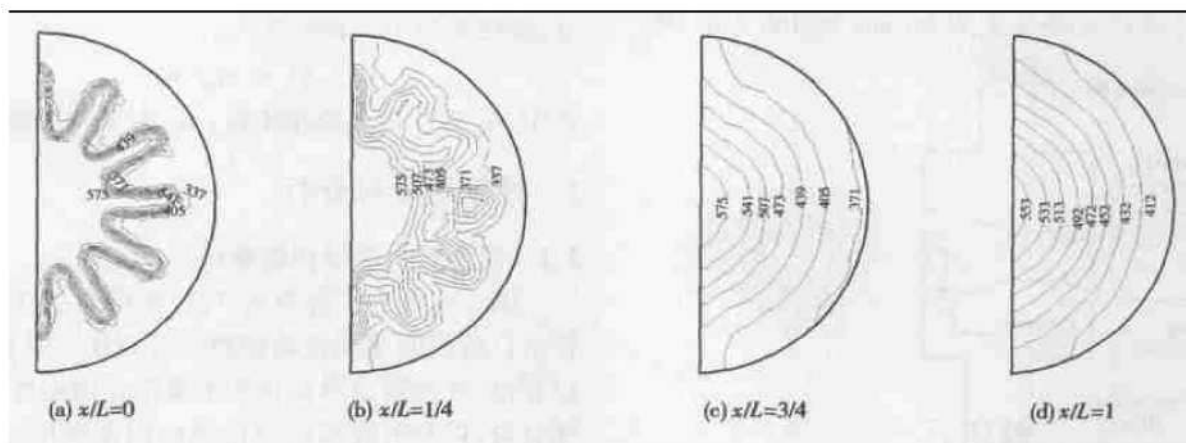


Fig. 4 Temperature contour along mixing duct

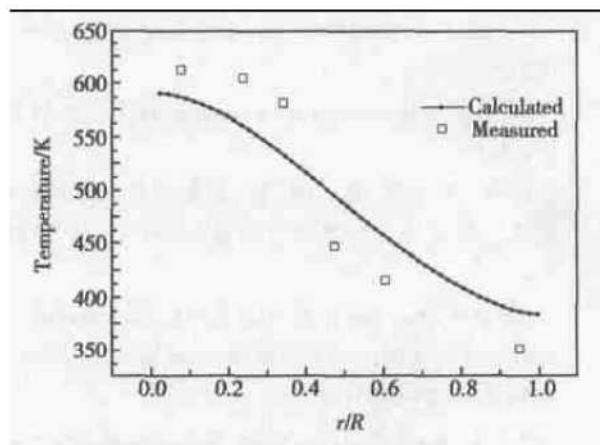


Fig. 5 Comparison of calculated and measured temperature radial distributions

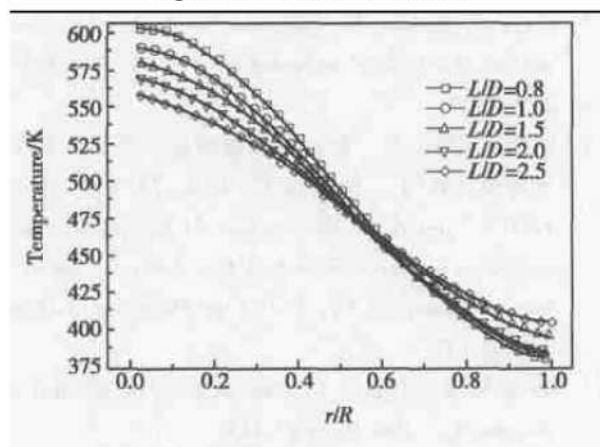


Fig. 6 Temperature radial distributions at mixing duct exit (varying length)

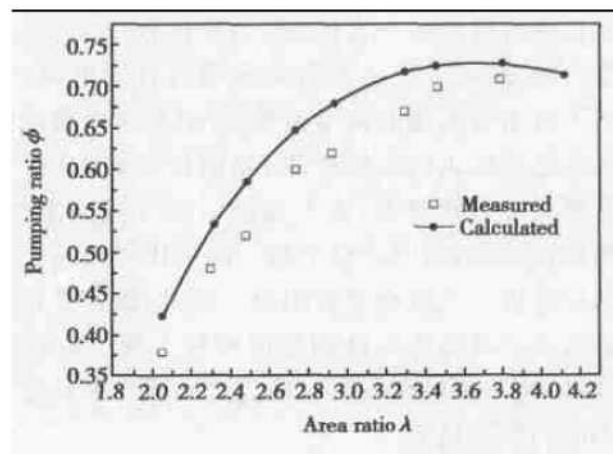


Fig. 7 Pumping ratio vs area ratio

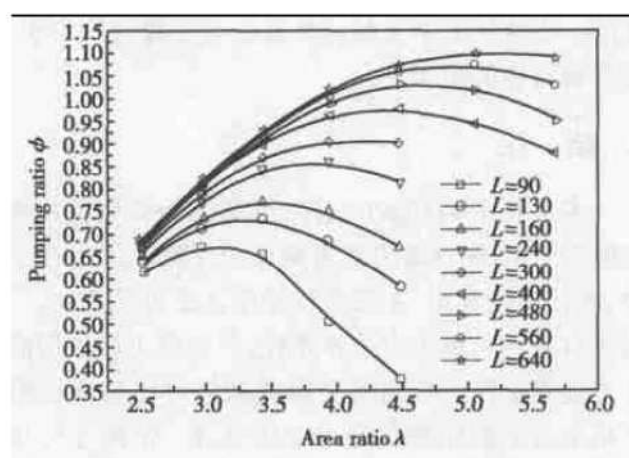


Fig. 8 Effects of area ratio on pumping ratio

于:一方面,长径比增加,引射流量比增加(如图8所示),进入混合管内进行掺混的冷气量增加;另一方面,混合距离加长,使得掺混更加充分,有利于主流核心区温度的衰减。

3.2 引射流量比

在本文的计算中,分别按照文献[12]实验的8个模型尺寸建模,计算出对应不同面积比下的引射流量比(图7)。与实验值相比,计算值偏高于实验结果,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计算中未能充分全面考虑,如引射气流进口型面、流道结构、混合管壁面粗糙度以及实验段之间联结等对气流的引射混合特性具有一定的影响;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。总体上看,两者的相对误差在10%以内,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。

在上述基础上,通过改变混合管结构参数,得到了混合管结构参数对引射-混合特性的影响规律,图8

为不同混合管长度下引射流量比与面积比的变化关系计算结果,可以看出:

对于给定的混合管长度,对应于某一面积比存在一个引射流量比峰值;随着混合管长度的增加,出现引射流量比峰值的最佳面积比数值也增加。在很短的混合管长度下($L=90\text{mm}$),当混合管与主喷管面积比超过最佳面积比时,引射流量比呈现急剧下降趋势;而当混合管长度较长时(如 $L=400\text{mm}$),当混合管与主喷管面积比超过最佳面积比时,引射流量比下降趋势很微弱。

对于给定的面积比,总体上看混合管长度增加对提高引射流量比是有利的。这种影响在很小的混合管面积比下并不显著,当 $\lambda=2.5$ 时,混合管长度从90mm增加到640mm,引射流量比仅从0.62增大到0.67;当 $\lambda=3.5$ 时,混合管长度从130mm增加到640mm,引射流量比从0.73增大到0.94。在混合管长度达到某一值后,引射流量比变化就非常微弱了。

从引射特性方程^[8]分析,影响混合-引射器引射能力的主要因素有:面积比,混合均匀性和壁面粘性

力。在混合管长度一定时,若面积比较小,主流从喷管流出之后,尚未完全发展便触附混合管壁面,从而限制了其引射通道的流通面积,并引起碰壁形成的自混合而造成较大的粘性损失;当面积比较大时,主流没有触及混合管壁面,无力加速引射气流的流动,混合均匀性较差;所以对应于某一面积比存在一个引射流量比峰值。在混合管面积比一定时,混合管长度的影响取决于混合均匀性和壁面粘性力两个方面的综合效果,这一效果在不同的混合管面积比和长度下呈现不同的影响趋势。

本文的计算结果所反映出的特征与文献[9]的平面波瓣喷管引射-混合器实验研究中得到的结论是一致的。也验证了本文的计算方法对于理论预测引射-混合器特性的适用性。

4 结 论

本文利用 FLUENT 软件,对基于 CFD 数值预测波瓣喷管引射-混合器引射流量比的计算方法进行了探讨,在计算过程中,主流进口采用速度边界条件,二次流进口采用总压压力边界条件,混合流出口采用静压压力边界条件。与相关实验数据的对比验证表明计算结果与实验结果仅相差 10% 左右,计算方法是可行的。

通过三维 CFD 计算,进一步揭示了波瓣喷管有利于强化引射-混合的内在机理:在波瓣喷管出口对应于波谷区域存在一个相对低的静压区,既有利于环境空气的吸入,又有利于增大引射气流向心内流动的速度,提高波瓣喷管出口截面的二次环流速度环量。

同时通过改变混合管结构参数,得到了混合管结构参数对引射-混合特性的影响规律:对于给定的混合管长度,对应于某一面积比存在一个引射流量比峰值,而且随着混合管长度的增加,出现引射流量比峰值的最佳面积比数值也增加;对于给定的混合管面积比,混合管长度增加对提高引射流量比是有利的,这种影响在很小的面积比下并不显著,在混合管长度达到某一值后,引射流量比变化就非常微弱了。计算结果符合物理过程本质。

参考文献:

[1] Presz W M, Reynolds G, McCormick D C. Thrust augment

using mixer-ejector-diffuser systems [R]. *AIAA Paper* 94-0020.

[2] Presz W M. Mixer/ejector noise suppressors[R]. *AIAA Paper* 91-2243.

[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] Skebes S A, Paterson R W, Barber T J. Experimental investigation of three dimensional forced mixer lobe flow fields[R]. *AIAA Paper* 88-3785-CP.

[5] Tsui Y Y, Wu P W. Investigation of the mixing flow structure in multilobe mixers[J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(7): 1386~1391.

[6] Ooba Y, Kodama H, Nakamura Y. Large eddy simulation analysis of a 18-lobe convoluted mixer nozzle[R]. *AIAA Paper* 2002-0717.

[7] 张靖周,谢志荣,李立国.三维强迫混合波瓣结构流场的数值计算[J].推进技术,2001,22(3):225~228. (ZHANG Jing-zhou, XIE Zhi-rong, LI Li-guo. Numerical investigation of three-dimensional flow fields for forced mixer lobe configuration [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(3).)

[8] Presz W M, Morin B L, Blinn R F. Short efficient ejector systems[R]. *AIAA Paper* 87-1837.

[9] Skebe S A, McCormick D C, Presz W M. Parameter effects on mixer-ejector pumping performance[R]. *AIAA Paper* 88-0188.

[10] Malecki R E, Mityas S J, Lord W K. Navier-Stokes analysis of an ejector and mixer-ejector operating at pressure ratio in the range 2~4[R]. *AIAA Paper* 90-2730.

[11] 张靖周,单勇.二维引射-混合器流场的数值研究与验证[J].航空动力学报,2002,17(5):524~527.

[12] Liu Y H. Experimental and numerical investigation of circularly lobed nozzle with/without central plug[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 2577~2585.

[13] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,1992.

(编辑:梅 瑛)