

接触面积和流向涡对波瓣混合器 引射比的影响

叶宇琛^{1,2,3}, 黄勇^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 魏福清^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3. 中国航空工业集团公司 中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001)

摘 要: 通过对波瓣混合器的数值计算,研究了接触面积和流向涡对波瓣混合器引射比的影响. 计算结果表明:主次流的接触面积越大,波瓣混合器的引射性能就越好,引射比随波瓣周长比的增加而线性递增. 同时,流向涡的强度越大,波瓣混合器的引射比也越大,引射比随量纲一流向涡强度的增加而先快后慢增加,两者之间是指数的关系. 当波瓣张角未导致气流分离时,主喷管出口的流向涡角动能随波瓣张角的增加而先慢后快增加,两者之间是抛物线的关系. 而且,波瓣张角的增大不仅可以增加流向涡的涡量,还可以扩大流向涡的分布区域.

关 键 词: 波瓣混合器; 接触面积; 流向涡强度; 引射比; 波瓣张角

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effects of interfacial contact area and streamwise vortices on pumping ratio of lobed mixer

YE Yu-chen^{1,2,3}, HUANG Yong^{1,2}, LIU Lei^{1,2}, WEI Fu-qing^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. China Helicopter Research and Development Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Jingdezhen Jiangxi 333001, China)

Abstract: Numerical computations of the lobed mixer were conducted to study the effects of interfacial contact area and streamwise vortices on the pumping ratio of lobed mixer. The numerical results showed that the greater interfacial contact area of primary flow and second flow caused the better performance of the lobed mixer, and the pumping ratio grew linearly with the increase of lobe perimeter ratio. The same effects were found in streamwise vortices, but the pumping ratio grew sharply and then gently with the increase of non-dimensional streamwise vortices intensity; and an index relationship was found between them. In case no flow separation occurred, the streamwise vortices angular kinetic energy of nozzle outlet increased with the increase of lobe angle, and there was a parabolic relationship between them. Moreover, the increase of lobe diffusion angle not only can increase the vorticity of streamwise vortices, but also enlarge the streamwise vortices distribution area.

Key words: lobed mixer; interfacial contact area; streamwise vortices; pumping ratio; lobe angle

波瓣混合器由于其特殊的几何结构,具有高效的引射掺混能力,能够使主、次流在较短的距离得到充分掺混,在航空发动机上有着广泛的应用,可以起到降噪、增加推力、降低耗油率和抑制红外辐射的作用^[1-4].

目前,对波瓣混合器的研究已经进行了大量的实验和数值研究,揭示了波瓣混合器强化掺混的机制和诸多参数的影响规律^[5-11].总的来说,影响波瓣混合器引射性能的主要因素有接触面积、流向涡和展向涡^[12].在现有研究中,Belovich等人通过实验认为采用波瓣结构的主喷管可以增加主次流的接触面积,对主次流的掺混有利^[12].同时,更多的学者通过实验和数值模拟研究了流向涡沿主喷管出口下游的演变规律,也试图用速度环量和量纲一流向涡量来表征流向涡对波瓣混合器引射性能的影响^[13-16].本文则通过 FLUENT 软件研究量纲一流向涡接触面积与波瓣混合器引射比的关系,以及采用新的方法(即用能量比的方式表征量纲一流向涡强度)探讨流向涡对波瓣混合器引射比的影响.

1 数值研究

1.1 计算模型

由文献^[12]可知,在波瓣喷管后加上一定长度的波瓣直段(零波瓣张角)可基本消除因波瓣而

产生的流向涡,并可与圆管进行比较来研究主次流接触面积(以波瓣喷管出口线周长表征其大小)对波瓣混合器混合过程的影响.

有鉴于此,本文建立了3种基本模型,如图1所示.其中主喷管1是圆管,用于参考;主喷管2是加了波瓣直段的主喷管,共有9种波瓣喷管出口形状,如图2所示(L 为波瓣喷管出口线周长),用于研究接触面积对波瓣混合器引射比的影响;主喷管3是普通的波瓣喷管,在保证波瓣喷管出口形状一样的情况下(即不改变主次流接触面积),通过改变波瓣长度(即改变波瓣张角,如表1所示,共有6种波瓣张角)来研究流向涡对波瓣混合器引射比的影响.整个波瓣混合器的示意图(以主喷管2为例)如图3所示,整个模型由主喷管和混合管组成.

这3种基本模型的结构参数如下:3种主喷管的进口直径 D 同为 40 mm;主喷管1的圆管长

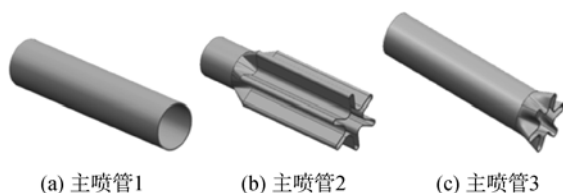


图1 3种主喷管的模型

Fig. 1 Models of three primary nozzles

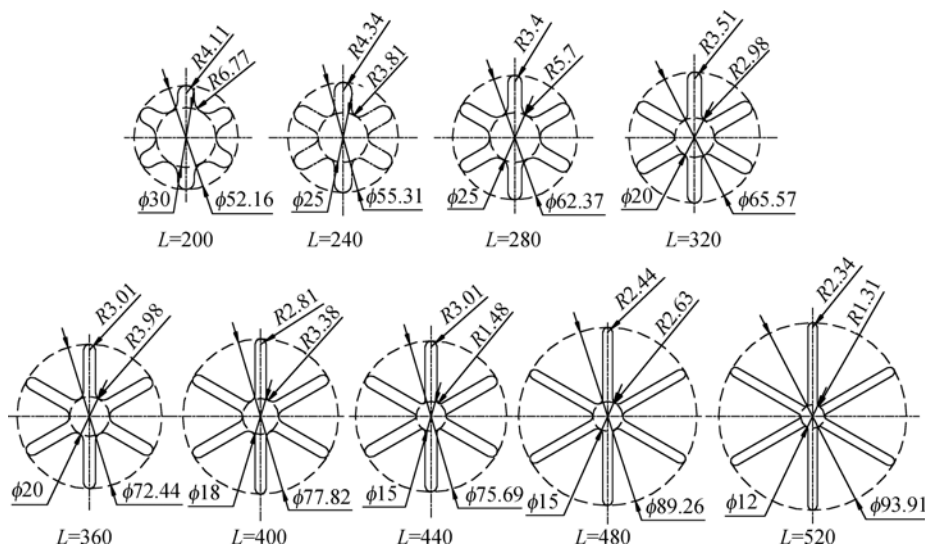


图2 9种波瓣结构尺寸图(单位:mm)

Fig. 2 Nine lobed structure size (unit:mm)

度为 180 mm;主喷管 2 的圆管长度为 40 mm,波瓣长度(有波瓣张角的部分)为 20 mm,波瓣直段长度为 120 mm,9 种主喷管出口的波瓣形状尺寸如图 2 所示;主喷管 3 的圆管直段长度为 160 mm,波瓣形状为图 2 中线周长 $L=280$ mm 的波瓣图,6 种波瓣的长度如表 1 所示;3 种主喷管的出口面积等于进口面积,并且共用一个混合管,混合管进口直径为 98 mm,混合管长度为 294 mm.

表 1 波瓣长度尺寸表
Table 1 Length of different lobes

波瓣上张角 $\theta/(\circ)$	波瓣长度 L_b/mm
5	87.50
10	43.41
15	28.57
20	21.03
25	16.42
30	13.26

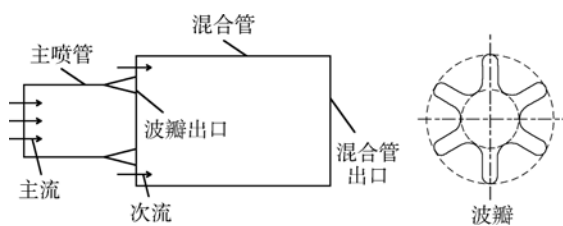


图 3 波瓣混合器的示意图

Fig. 3 Simplified lobed mixer configuration

1.2 计算方法

相关的实验研究已经表明引射比与主次流的温度比有关,主流为冷态的气动规律可以外推到主流为热态的情况下^[5,17].因此,本文所计算的主流都是冷态的.

由于计算模型是中心对称结构,因此只采用了 1/6 的计算模型进行计算,并设置了周期性的边界条件.考虑到波瓣的复杂型面,在计算时采用非结构网格,并在波瓣处进行局部加密.

主流进口采用质量流量进口边界条件,流量为 0.00375 kg/s ^[8](总流量的 1/6),温度为 300 K;次流进口为压力进口边界条件,压力为大气压,温度设为环境温度 300 K;混合管出口为压力出口边界条件,压力为大气压,温度为 300 K.

计算中采用 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,主流和次流进口的湍流耗散率设为 3% ^[8].近壁区采用

标准壁面函数进行处理;流动控制和温度控制方程采用 2 阶迎风差分格式,压力和速度耦合采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equation) 算法.在计算中设置一个混合管出口流量的监控量,待混合管出口流量基本不变时,可认为此时的计算已收敛.然后对次流进口的流量进行积分,确定引射比 $C=m_s/m_p$ (式中 m_s 为次流进口流量, m_p 为主流进口流量).

在计算时,保持主喷管 2 的出口面积等其他参数不变,通过改变主喷管出口的波瓣线周长 L 来研究接触面积对波瓣混合器引射比的影响;保持主喷管 3 出口波瓣形状等其他参数不变,通过改变波瓣长度 L_b (即改变波瓣张角)来研究流向涡对波瓣混合器引射比的影响.

2 计算结果与分析

2.1 计算方法与数值验证

在进行数值计算之前,本文先验证了算法的可靠性,验证的模型是按照文献[17]建立的,并在冷态工况下计算出不同主次流面积比 n 下的引射比 C .相关的参数对照如表 2 所示,由于文献[18]中的计算模型与文献[17]中的实验模型一致,因此本文参考文献[18]选定验证模型的主流流量为 0.45 kg/s (文献中模型的主流进口速度为 21 m/s).该主流流量可能与实验的主流流量有差异,但是在同一种结构的波瓣混合器下,主流流量的变化并不会引起波瓣混合器引射性能的变化^[19].

表 2 参数对照

Table 2 Parameter contrast

参数	数值	
	实验	计算
主流进口直径/mm	150	150
次流集气室进口直径/mm	100	100
主喷管收缩段直径/mm	78	78
主流流量/(kg/s)		0.45
主流温度/ $^{\circ}\text{C}$	25	25

图 4 给出了数值计算的结果,与实验值相比,计算值偏高于实验结果.偏高的原因可能在于:影响实际引射混合过程的因素在计算中未能充分考虑,如引射气流进口型面、流道结构、混合管壁面的表面粗糙度以及实验段之间联结等对气流引射混合特性有一定的影响^[18].但是,总的来说,两者

之间的相对误差在8%以内,采用本文提出的计算方法对引射比的预测是令人满意的.下文中的数值计算将在此计算方法上进行.

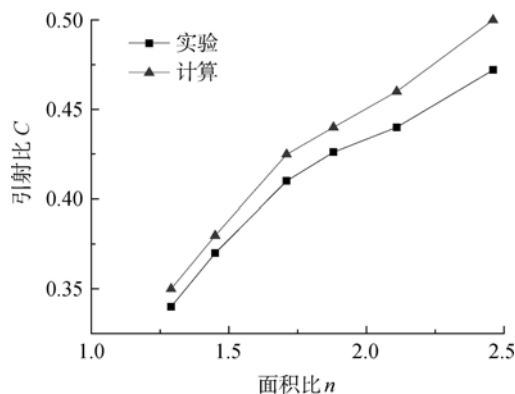


图4 引射比与面积比

Fig. 4 Pumping ratio vs. area ratio

2.2 主喷管结构参数对流向涡的影响

在单独分析接触面积或流向涡对波瓣混合器引射比的影响之前,本小节将分析主喷管结构参数对流向涡的影响,以证明本文计算模型的可行性.

图5给出了9种不同波瓣线周长的主喷管出口流向涡总涡量 W_z 的计算结果(其中 $W_z = \sum \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$),图6给出了6种不同波瓣张角的主喷管出口流向涡总涡量 W_z 的计算结果.

从图5可知,前7种不同线周长的主喷管出口流向涡总涡量相对较小,后2种线周长的主喷管出口流向涡总涡量相对偏高一些.将图5和图6中不同主喷管结构参数下的主喷管出口流向涡总涡量进行比较可知,图5中前7种不同线周长的主喷管出口流向涡总涡量平均值为 $1.18 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$,而图6中波瓣张角为 15° 的主喷管出口流向涡总涡量为 $1.87 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$,两者相差10倍以上,由此可知本文中加了波瓣直段(长度为主喷管进口直径的3倍)的主喷管基本上可以消除流向涡对引射比的影响(此处将图5中的前7种计算模型的流向涡总涡量与图6中波瓣张角为 15° 的主喷管出口流向涡总涡量相比较的原因是:波瓣张角为 5° 和 10° 的主喷管由于波瓣张角较小,其引射效果自然和无波瓣情况下主喷管的引射效果相近;即便如此,这两种波瓣张角下的主喷管出口流向涡总涡量仍大于图5中任一种计算模型的流向涡总涡量).因此,本文中加了波瓣直段的主喷管可单独分析接触面积对波瓣混合器引射比的

影响.

图5中后2种线周长的主喷管出口流向涡总涡量相对偏高一些的可能原因有:①在该线周长下,主喷管如果要消除流向涡的影响需要更长的波瓣直段;②波峰和混合管壁面的间隙产生流向涡增加了主喷管出口的流向涡涡量.

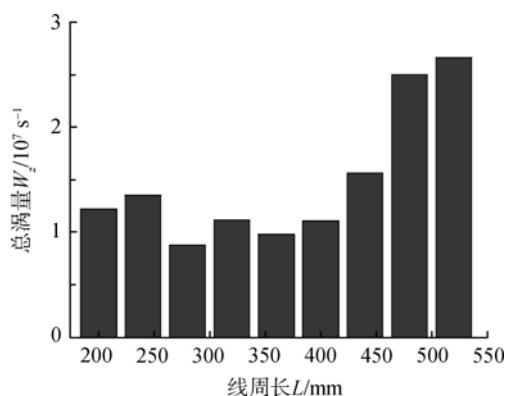


图5 总涡量与线周长

Fig. 5 Total vorticity vs. line perimeter

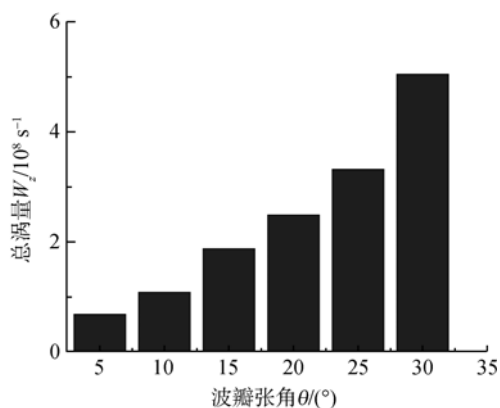


图6 总涡量与波瓣张角

Fig. 6 Total vorticity vs. lobe diffusion angle

从图6中,还可以看出主喷管出口的流向涡总涡量随波瓣张角的增加而增加,说明增加波瓣张角对波瓣引射性能有利.由于本文在研究流向涡对波瓣混合器引射比的影响时,选用了同一种主喷管出口形状,可认为6种不同波瓣张角计算模型的主次流接触面积是一样的,因此也可单独分析流向涡对波瓣混合器引射比的影响.

2.3 接触面积对引射比的影响

在探讨接触面积对波瓣混合器引射性能的影响时,可以从波瓣混合器的引射比 C 与周长比 δ 来分析,周长比定义为 $\delta = L/D$,即波瓣的线周长 L 与主喷管进口周长 D 之比.

图 7 给出了 9 个不同波瓣线周长的波瓣混合器和 1 个圆管混合器的计算结果. 从图中可以看出, 引射比基本上随着周长比的增加而线性增加. 即在固定进口尺寸的情况下, 波瓣的线周长越大, 波瓣混合器的引射性能越好, 圆管的线周长 ($\delta=1$) 最短, 引射比最小, 引射性能最差. 出现这种现象的原因是: 在没有流向涡强化掺混的情况下, 主喷管 2 的主次流掺混机制与主喷管 1 引射次流的掺混机制一样, 都是靠主流动量的横向扩散, 由于波瓣的褶皱结构使得主喷管 2 的主次流接触面积增加, 主流对次流的黏性剪切作用增大, 加快了主流的动量扩散, 因此带有波瓣结构的主喷管具有更高的引射效率, 更好的引射性能.

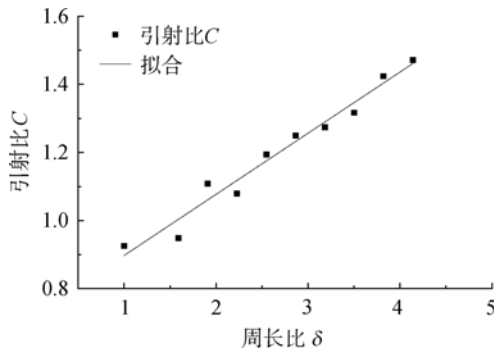


图 7 引射比与周长比

Fig. 7 Pumping ratio vs. perimeter ratio

此外, 本文对引射比与周长比的关系进行了线性拟合, 拟合公式如式(1)所示, 拟合相关度为 0.96374.

$$C = 0.17974\delta + 0.71742 \quad (1)$$

2.4 流向涡对引射比的影响

波瓣混合器之所以具备高效的掺混能力, 主要归功于波瓣可以诱发阵列的流向涡对, 起到强化主次流掺混的效果. 有鉴于此, 本文提出了一种新的方法来探讨流向涡对波瓣混合器引射比的影响, 即用能量比的方式表征量纲一流向涡强度 λ , 并探讨其与引射比 C 之间的关系.

量纲一流向涡强度 λ 定义为主喷管出口截面的流向涡角动能 E_w 与主喷管进口动能 E_k 之比, 即 $\lambda = E_w / E_k$. 主喷管进口动能 E_k 可表示成式(2), 主喷管出口截面的流向涡角动能 E_w 可表示成式(3), 其中 ρ 为气体质点的密度, A 为截面的微元面积, V_{in} 为主喷管进口速度, V_z 为气体质点的 z 轴方向的速度, x 和 y 为气体质点的坐标, x_0 和 y_0 为流向涡涡心的坐标, W'_z 为流向涡涡量 (即

$W'_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$). E_w 和 E_k 都可以在 FLUENT 里通过定义计算公式并积分得到.

$$E_k = \sum \frac{1}{2} \rho A V_{in}^3 \quad (2)$$

$$E_w = \sum \frac{1}{2} \rho V_z A [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] W_z'^2 \quad (3)$$

图 8 给出了波瓣上张角 θ 为 15° 的波瓣混合器的主喷管出口流向涡等值线图, 从图中的涡量值正负可知, 每个波瓣的尾缘都会产生一对正反旋的流向涡对 (流向涡分布对称, 但方向相反). 但是, 如果从能量的角度出发, 可认为每个波瓣产生的流向涡对的角动能是一样的. 因此, 在探讨流向涡角动能时, 可以只分析流向涡对中的一个流向涡.

图 9(a) 即为图 8 中波瓣左侧的流向涡, 由于图 9(a) 中的流向涡是由大尺度流向涡和小尺度

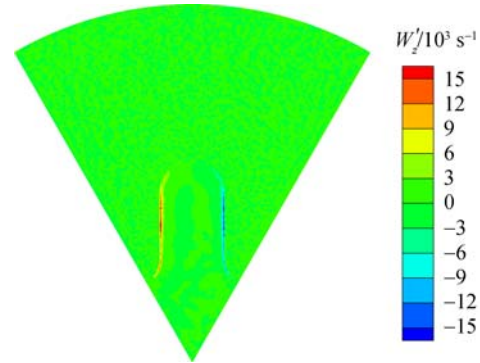
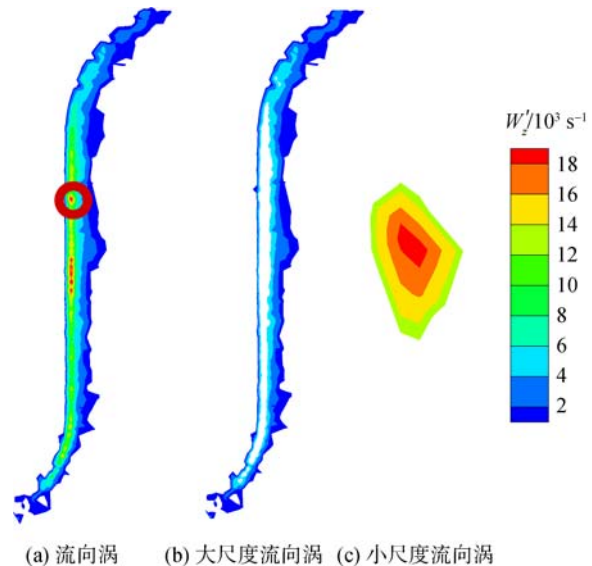


图 8 主喷管出口流向涡的等值线图

Fig. 8 Contour of z -vorticity at nozzle outlet

(a) 流向涡 (b) 大尺度流向涡 (c) 小尺度流向涡

图 9 流向涡提取

Fig. 9 Streamwise vortices extracting

流向涡组成,因此本文分别对这两种涡进行提取(利用 FLUENT 中的 ISO-clip 功能),图 9(b)即为从图 9(a)中提取的大尺度流向涡,图 9(c)为从图 9(a)中提取的一个小尺度流向涡(图 9(a)中红色圆圈处).在 FLUENT 中通过编写公式(3),并对图 9(b)和图 9(c)中的流向涡角动能进行积分,发现大尺度流向涡的角动能为 0.0070 J/s ,小尺度流向涡的角动能为 $1.49 \times 10^{-7} \text{ J/s}$,两者的量级相差 10^{-3} 以上,可认为流向涡的角动能约等于大尺度流向涡的角动能.因此在分析流向涡的角动能时,只考虑大尺度流向涡的角动能.

图 10 给出了本文所计算的 6 种不同波瓣张角的波瓣混合器的大尺度流向涡等值线图(本文中所述的波瓣混合器在波瓣张角处气流均未发生分离),从图中流向涡颜色及所占面积的变化可以

看出,波瓣张角的增大不仅可以增加流向涡的涡量,还可以扩大流向涡的分布区域.这是因为波瓣张角的增加会导致径向速度 v 的增加,最终使得流向涡的涡量 W_z 增加.因此,波瓣张角的增加对主次流的掺混有利.

图 11 给出了 6 种不同波瓣张角的波瓣混合器的角动能与波瓣张角之间的关系,其中流向涡的角动能 E_w 是从图 10 中的大尺度流向涡积分得到的.从图中可知,在波瓣张角处气流未发生分离的情况下,主喷管出口的流向涡角动能随着波瓣张角的增加而增加,两者之间是一个抛物线的关系.这说明增加波瓣张角可以增加流向涡的强度,对主次流的掺混有利.

图 12 给出了 6 种不同波瓣张角的波瓣混合器的引射比与量纲一流向涡强度(对应相应的波

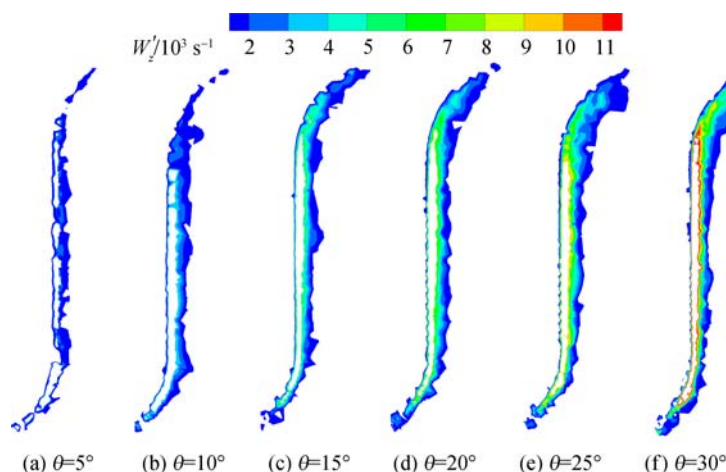


图 10 不同波瓣张角下的大尺度流向涡

Fig. 10 Large-scale vortices of different lobe angles

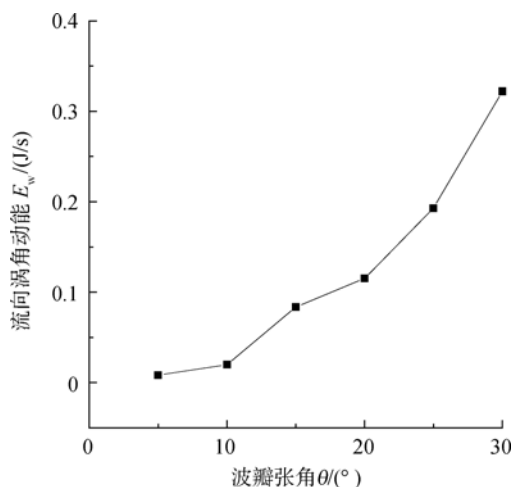


图 11 流向涡角动能与波瓣张角

Fig. 11 Variation of angular kinetic energy with lobe angle

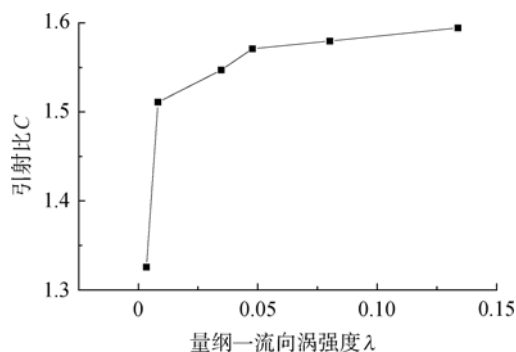


图 12 引射比与量纲一流向涡强度

Fig. 12 Pumping ratio vs. non-dimensional streamwise vortices intensity

瓣张角)之间的关系.从图中可以看出,引射比随量纲一流向涡强度的增加而先快后慢增加,两者之间是一个指数的关系.这是因为当波瓣张角比较小

时,主喷管出口截面的径向速度比较小,使得流向涡的涡量较小,即流向涡强度小,而流向涡是主次流掺混的主要因素,流向涡强度小就意味着主次流掺混不强烈,因此较小的波瓣张角会限制波瓣混合器的引射性能。随着波瓣张角的增加,流向涡的强度会变大,对主次流的掺混有明显的影响。当波瓣张角继续增加后,会面临波瓣张角处气流分离以及主次流过早地触附混合管壁面从而限制了主次流的流通面积的不利影响,因此会出现波瓣张角继续增加而引射比变化不大的现象。

3 结 论

在本文研究的参数范围内,通过对影响波瓣混合器引射性能的两个因素接触面积和流向涡的研究,得到了如下结论:

1) 主次流的接触面积越大,波瓣混合器的引射性能越好,引射比随波瓣周长比的增加而线性增加。

2) 波瓣张角的增大,不仅可以增加波瓣混合器流向涡的涡量,还会扩大流向涡的分布区域。

3) 在波瓣张角未导致气流分离的情况下,主喷管出口的流向涡角动能随波瓣张角的增加而先慢后快增加,两者之间是抛物线的关系。同时引射比随量纲一流向涡强度的增加而先快后慢增加,两者之间是指数的关系。

4) 本文用能量比表征量纲一流向涡强度的方法是合理可行的,可以用来探讨流向涡对波瓣混合器引射比的影响。

参考文献:

- [1] Crouch R W, Coughlin C L, Paynter G C. Nozzle exit flow profile shaping for jet noise reduction[J]. *Journal of Aircraft*, 1977, 14(9): 860-867.
- [2] Presz W M, Jr. Thrust augmentation with mixer/ejector systems[R]. AIAA 94-0200, 1994.
- [3] Power G D, McClure M D, Vinh D. Advanced IR suppressor design using a combined CFD/test approach[R]. AIAA 94-3215, 1994.
- [4] 张靖周, 单勇, 李立国. 直升机排气系统用波瓣喷管引射-混合式红外抑制器研究[J]. *航空学报*, 2007, 28(1): 32-36.
ZHANG Jingzhou, SHAN Yong, LI Ligu. Investigation on lobed nozzle mixer-ejector infrared suppressor for helicopter exhaust system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(1): 32-36. (in Chinese)
- [5] Presz W M, Morin B L, Gousy R G. Forced mixer lobes in ejector designs[R]. AIAA 86-1614, 1986.
- [6] Skebe S A, Paterson R W, Barber T J. Experimental investigation of three-dimensional forced mixer lobe flow fields[R]. AIAA 88-3785, 1988.
- [7] Presz W M, Jr, Walter M. Multi-stage mixer/ejector systems[R]. AIAA-2002-4064, 2002.
- [8] Cooper N J, Merati P. Numerical simulation of the vortical structures in a lobed jet mixing flow[R]. AIAA-2005-0635, 2005.
- [9] Presz W M, Jr, Morin B L. Short efficient ejector systems [R]. AIAA 87-1837, 1987.
- [10] Yu S C M, Xu X G. Turbulent mixing of coaxial nozzle flows with a central-lobed mixer[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, 13(4): 517-523.
- [11] Mickelsen J, Yarrington C, Bons J, et al. The effect of core flow turbulence on planar lobed-mixer nozzle effectiveness [R]. AIAA 2006-18, 2006.
- [12] Belovich V M, Samimy M. Mixing process in a coaxial geometry with a central lobed mixer-nozzle[R]. AIAA 96-0118, 1996.
- [13] McCormick D C, Bennett J C. Vortical and turbulent structure of a lobed mixer free shear layer[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(9): 1852-1859.
- [14] Hu H, Saga T, Kobayashi T, et al. Simultaneous measurements of all three components of velocity and vorticity vectors in a lobed jet flow by means of dual-plane stereoscopic particle image velocimetry[J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(7): 2128-2138.
- [15] Hu H, Saga T, Kobayashi T, et al. Mixing process in a lobed jet flow[J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(7): 1339-1345.
- [16] 单勇, 张靖周. 波瓣喷管引射-混合器涡结构的数值研究[J]. *空气动力学学报*, 2005, 23(3): 355-359.
SHAN Yong, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation of vortical structures in the lobed mixer-ejector[J]. *Acta Aeronautica et Sinica*, 2005, 23(3): 355-359. (in Chinese)
- [17] 刘友宏, 陈镭, 李立国. 圆排波瓣圆柱混合管的气动特性实验研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2000, 32(4): 375-380.
LIU Youhong, CHEN Qiang, LI Ligu. Experimental investigation of internal aerodynamics of periodically axis-symmetry lobed exhaust-ejector mixers[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2000, 32(4): 375-380. (in Chinese)
- [18] 单勇, 张靖周. 波瓣喷管引射-混合器的数值研究与验证[J]. *推进技术*, 2004, 25(4): 320-324.
SHAN Yong, ZHANG Jingzhou. Numerical computation and examination of a lobed mixer-ejector[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(4): 320-324. (in Chinese)
- [19] 叶宇琛, 黄勇. 波瓣混合器红外抑制性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
YE Yuchen, HUANG Yong. Study on lobed mixer infrared suppression performance[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)