

不同型面锥形扩压器的流场分析

闫 玥¹, 梁红侠¹, 李雅军², 索建泰¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072; 2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要:采用大涡模拟方法对面积比为5.3的不同型面锥形扩压器进行数值计算,包括直线、等压力梯度、等速度梯度和相切双圆弧4种型面,在进口均为30 m/s的条件下对比不同型面锥形扩压器的总体性能、流动特性和涡量分布。结果表明:等压力梯度和等速度梯度型面的扩压器总体性能更好,静压恢复系数分别为0.771 3和0.782 6,与基准直线型面相比分别提高了22%和23.83%;等压力梯度和等速度梯度型面的扩压器流动初始分离点相对延迟后,分离点与扩压器的轴向距离之比分别为0.5和0.43,直线和相切双圆弧型面的该值分别为0.18和0.21;等压力梯度和等速度梯度型面的扩压器内部涡对扩压器的堵塞较小,涡占扩压器径向截面比例分别为50%和45%,直线和相切双圆弧型面涡占比均大于95%。

关 键 词:锥形扩压器;型面设计;大涡模拟;流场特性;涡量

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.09.011

[引用本文格式]闫 玥,梁红侠,李雅军,等.不同型面锥形扩压器的流场分析[J].热能动力工程,2021,36(9):86-94. YAN Yue, LIANG Hong-xia, LI Ya-jun, et al. Analysis on flow field of conical diffusers with different profiles[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 86-94.

Analysis on Flow Field of Conical Diffusers with Different Profiles

YAN Yue¹, LIANG Hong-xia¹, LI Ya-jun², SUO Jian-qin¹

(1. College of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072;
2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: The large eddy simulation method is used to numerically calculate the conical diffusers with different profiles with an area ratio of 5.3, including four profiles of straight line, constant pressure gradient, constant velocity gradient and tangent double-arc, comparing the overall performance, flow characteristics and vorticity distribution of different conical diffusers with different profiles under the inlet condition of 30 m/s. The research results show that the overall performance of the diffusers with constant pressure gradient and constant velocity gradient profile is better, the static pressure recovery coefficients are 0.771 3 and 0.782 6, which are respectively 22% and 23.83% higher than the reference linear profile. The initial separation point of the diffuser flow with constant pressure gradient and constant velocity gradient profile is relatively delayed, and the ratios of the separation point to the axial distances of the diffuser are 0.5 and 0.43 respectively, the values of linear and tangent double-arc profiles are 0.18 and 0.21. The internal vortices of the diffuser with the constant pressure gradient and constant velocity gradient profile block the diffuser less. The vortices account for 50% and 45% of the diffuser radial cross-section re-

收稿日期:2021-03-31; 修订日期:2021-05-06

基金项目:航空发动机及燃气轮机国家重大专项(2017-I-0011-0012);船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室-海洋工程燃气轮机实验室资助

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project for Aviation Engine and Gas Turbine(2017-I-0011-0012); Supported by National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System-Laboratory for Ocean Engineering Gas Turbine

作者简介:闫 玥(1997-),女,陕西渭南人,西北工业大学博士研究生。

通讯作者:梁红侠(1979-),女,陕西宝鸡人,西北工业大学副教授。

spectively. The vortices of the linear and tangent double-arc profile account for more than 95% of the diffuser radial cross-section.

Key words: conical diffuser, profile design, large eddy simulation, flow field characteristics, vorticity

引言

现代涡轮发动机的压气机以高负荷工作,压气机出口气流速度达到 130 ~ 170 m/s,导致在燃烧室中组织燃烧非常困难;同时由于其出口马赫数也很高,高速气流在燃烧室内流动也会带来较大的压力损失,燃烧室内总压损失每增大 1%,单位燃油消耗率就会增大 0.5%^[1],所以合理设计扩压器对于改善燃烧条件和改进燃烧室性能具有重要意义^[2]。

扩压器有很多类型,如较常用的流线型扩压器和突扩扩压器等。目前也发展了其他新型扩压器结构,如抽吸壁面附近气流的涡流控制扩压器^[3]、将涡流控制与突扩扩压器组合起来的组合式扩压器、在通用电器 GEnx 上已使用的在扩压器内布置多个挡板的多通道扩压器、基于流阻挡板扩压器^[4]提出的分配器式扩压器^[5]及变几何扩压器^[6]等,而锥形扩压器由于结构简单、易观察流动现象等一直受到研究者们的青睐。

锥形扩压器表面粗糙度^[7]对其性能有较大影响,随着表面粗糙程度从光滑至完全粗糙,静压恢复系数不断下降,但在所有速度范围内粗糙表面的扩压器内部流动都十分稳定。设计者可根据目标静压恢复系数从锥形扩压器的性能图中^[8]选择锥角或面积比。当进口工况发生变化时,锥形扩压器的性能和流动特性也会不同:扩压器内发生严重失速时,进口增加旋流可改善性能^[9];进口湍流度增加,扩压器静压恢复系数会提高^[10];进口从一般的轴向变为径向进气^[11]时,会有层流单涡、湍流单涡和湍流双涡 3 种涡结构,伴随层流向湍流、单涡向双涡两种转变现象。以往研究中有关扩压器型面的内容很少,李长林等人^[12-13]对扩压器造型提出了理论计算方法但未做试验或数值研究,石建成等人^[14]研究了某混合型扩压器及其常规造型扩压器的内部流动特点,但其主要为离心叶轮叶片使用。为了系统研究型面对扩压器性能及内部流动的影响,本文选择相同面积比下不同型面的锥形扩压器进行研究。

本文以 4 种不同型面的锥形扩压器为研究对象,采用大涡模拟方法(LES)对扩压器内流动特性进行研究,揭示扩张管内不同的涡结构以及型面对涡发展的影响。

1 模型及计算方法

1.1 物理模型

图 1 为 4 种扩压器的物理模型:直线(DL);等压力梯度(DP);等速度梯度(DV);相切双圆弧(DC)。4 种模型进出口半径相同,分别为 28.5 和 65.3 mm 面积比均为 5.3,长度为 300 mm。

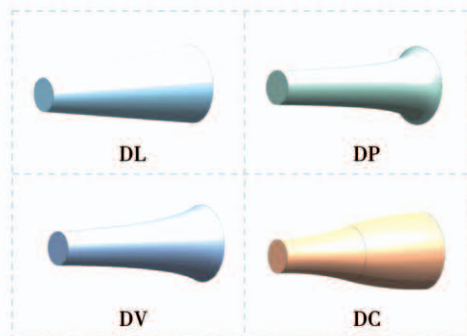


图 1 不同型面扩压器模型

Fig. 1 Diagram of the diffuser models with different profiles

DL 为传统锥形扩压器,型面设计为直线,扩张角为 6.7°,扩压器进口半径为 28.5 mm,轴向长度为 300 mm,

根据压力梯度相等,可得 DP 型面的设计方法:

$$\frac{p_x - p_1}{N_x} = \frac{p_2 - p_1}{N} \quad (1)$$

式中: p_x —某位置处静压, Pa; p_1 —进口静压, Pa; p_2 —出口静压, Pa; N —扩压器总长度, m; N_x —所求位置的轴向距离, m。

联立伯努利方程、连续性方程和式(1),可得某一轴向位置的横截面积:

$$A_x = \frac{A_1}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right) \frac{N_x}{N}}} \quad (2)$$

式中: A_x —某位置处横截面积, m^2 ; A_1 —进口面积, m^2 ; A_2 —出口面积, m^2 。

由速度梯度相等可得 DV 型面设计方法:

$$\frac{u_1 - u_x}{N_x} = \frac{u_1 - u_2}{N} \quad (3)$$

式中: u_x —某位置处速度, m/s ; u_1 —进口速度, m/s ; u_2 —出口速度, m/s 。

联立连续性方程和式(3), 得到某一轴向位置的横截面积:

$$A_x = \frac{A_1}{1 - (1 - \frac{u_2}{u_1}) \frac{N_x}{N}} \quad (4)$$

DC 型面采用一凹一凸两个圆弧相切连接, 圆弧半径均为 620.6 mm, 圆心角均为 13.987° 。

1.2 计算方法

对于扩压器而言, 其总体性能是否满足要求之外, 内部流场特性及涡系结构也十分重要。LES 方法在预测层流到湍流的转换、非定常湍流和高速湍流方面具有无可比拟的优势^[15], 其主要思想是直接数值模拟大尺度湍流运动, 利用次网格尺度模型模拟小尺度湍流对大尺度湍流运动的影响。

不可压缩常粘性系数的湍流运动控制方程为 N-S 方程^[16]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma \cdot 2S_{ij})}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$S_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2 \quad (6)$$

式中: S —拉伸率张量, m/s ; γ —分子粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ —流体密度, kg/m^3 。

根据 LES 基本思想, 必须采用一种平均方法以区分可求解的大尺度涡和待模化的小尺度涡, 将变量 u_i 分解为 $\overline{u_i}$ 和 u'_i , $\overline{u_i}$ 可以采用 Leonard 提出的算式:

$$\overline{u_i}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(x - x') u_i(x') dx' \quad (7)$$

其中, $G(x - x')$ 为过滤函数, $G(x)$ 满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(x) dx = 1 \quad (8)$$

常用的过滤函数有帽型函数(top-hat)、高斯函数等。帽型函数因为形式简单而被广泛使用:

$$G(x - x') = \begin{cases} 1/\Delta, & |x - x'| \leq \Delta/2 \\ 0, & |x - x'| > \Delta/2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: Δ —网格平均尺度, m 。三维情况下 $\Delta =$

$(\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3}$, Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 方向的网格尺度, 当 $\Delta \rightarrow 0$ 时, LES 转变为 DNS。

将过滤函数作用于 N-S 方程的各项, 得到过滤后的湍流控制方程组:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{u_i} \cdot \overline{u_j})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \gamma \frac{\partial(2 \overline{S_{ij}})}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (10)$$

式中: τ_{ij} —亚网格张力, N/m , 代表小涡对大涡的影响。

上述的过滤器属于非均匀过滤器, 实际应用中还有均匀过滤器, 如盒式过滤器、高斯过滤器和谱空间低通过滤器等。

为了能够对 τ_{ij} 进行模化, 有学者提出亚格子模型, 壁面附近由黏性作用主导, 中、高雷诺数湍流需要采用近壁面大涡模拟(Wall Modeled LES, WM-LES)方法^[17], 经计算本文进口雷诺数为 $5.516\,129 \times 10^4$, 大于 2 300, 所以本文采用 WMLES 亚格子模型。

选择文献[18]中一种新的涡量计算方法, 该方法可以同时区分强涡和弱涡, 并且将涡量规范在 0 ~ 1 之间, 便于调节分析。基于速度梯度场 ∇V 得:

$$\nabla V = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (11)$$

∇V 也可以被写为 $\nabla V = A + B$, 其中 A 和 B 分别为 ∇V 中对称和反对称部分, 分别代表变形和涡量, ∇V^T 为 ∇V 的转置矩阵, 按如下定义:

$$A = \frac{\nabla V + \nabla V^T}{2} \quad (12)$$

$$B = \frac{\nabla V - \nabla V^T}{2} \quad (13)$$

则新定义的涡量 Ω 如下, 该值被规范在 0 ~ 1 之间:

$$\Omega = \frac{\|B\|_F^2}{\|A\|_F^2 + \|B\|_F^2} \quad (14)$$

其中, 假设 ∇V 不为零, $\| \cdot \|_F$ 为 F 范数, 若 ∇V 为零, 则涡量 Ω 为常数 0.5, Ω 小于 0.5 为弱旋流, 大于 0.5 为强旋流。

1.3 网格划分

本文使用结构化网格如图 2 所示, 4 个模型网

格质量均大于 0.5,并且在壁面附近进行局部加密,划分边界层网格,网格总数为 718 万。

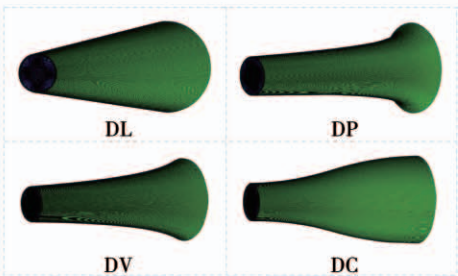


图 2 网格划分示意图
Fig. 2 Diagram of the grids

1.4 数值验证

图 3 为文献[19]中的模型,本文中 DL 模型尺寸和进、出口工况与文献中的试验件和试验条件完全一致,采用 LES 方法、SIMPLE 算法、二阶迎风格式与实验结果进行对比,如图 4 所示。

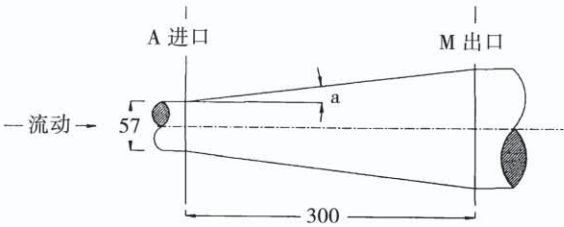


图 3 文献[19]模型示意图(mm)
Fig. 3 Diagram of model of literature[19] (mm)

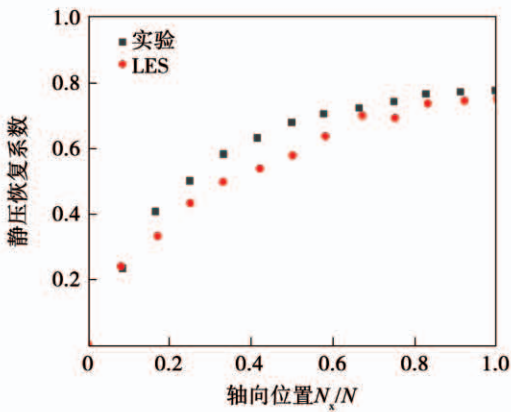


图 4 数值计算与试验结果对比图
Fig. 4 Comparison of numerical calculation and experimental results

使用互相关函数(correl function)计算得到两组数据的相关性系数为 0.986 616,呈强相关,说明此

计算方法可靠,所以采用此方法进行计算。
计算的具体边界条件为:进口为速度进口,速度为30 m/s,出口为自由流,参考工况压力为 101 325 Pa。

2 计算结果及分析

2.1 静压恢复系数

在扩压器总体性能方面,对比 4 个扩压器的静压恢复系数,如表 1 所示,可以看到 DV 和 DP 的静压恢复系数最高,分别为 0.778 26 和 0.771 3,相比 DL 提高了 22% 和 23.83%,相切双圆弧型面的扩压器性能最差,静压恢复系数为 0.552 2。

表 1 不同扩压器的静压恢复系数

Tab. 1 Static pressure recovery coefficient of different diffusers

扩压器类型	静压恢复系数
DL	0.632 0
DP	0.771 3
DV	0.782 6
DC	0.552 2

2.2 流场与涡量场

由图 5 可知,直线型面扩压器的初始壁面分离点与扩压器总长度比约为 0.18。在初始时刻,扩压器前半段中心截面两侧分别形成 4 个“分离泡”,出口处沿周向产生较大旋涡,由于壁面附近流体流速慢而主流速度相对较快,流体具有粘性作用,使得主流与低速流体产生剪切,导致旋涡产生。随着流体向下游流动,前半段分离泡之间变紧密,后半段旋涡逐渐变大且趋于稳定,这一时段为旋涡发展阶段。之后旋涡逐渐失去稳定性进而破碎,分解为多个小涡,形成“耗散涡”消耗能量,并在扩压器上游重新诱导产生大涡且随着流体流动向下游流动发展。

由图 6 可知,壁面附近一直存在大量体积较小、涡量较大的区域(红圈),即“分离泡”,其形貌特征如图 7 所示。图 7 中箭头所指为轴向,可以看到随着流体向下游流动,“分离泡”逐渐由相连的一整块变为零碎、独立的个体,并且厚度也逐渐增大。由于“分离泡”是流动分离又再附着产生的,所以随着流

体流动,管内湍流度逐渐增加,边界层内流体无法从主流获得足够的能量再附着至壁面,“分离泡”由扁平形发展为球形最终脱落,形成大的旋涡。

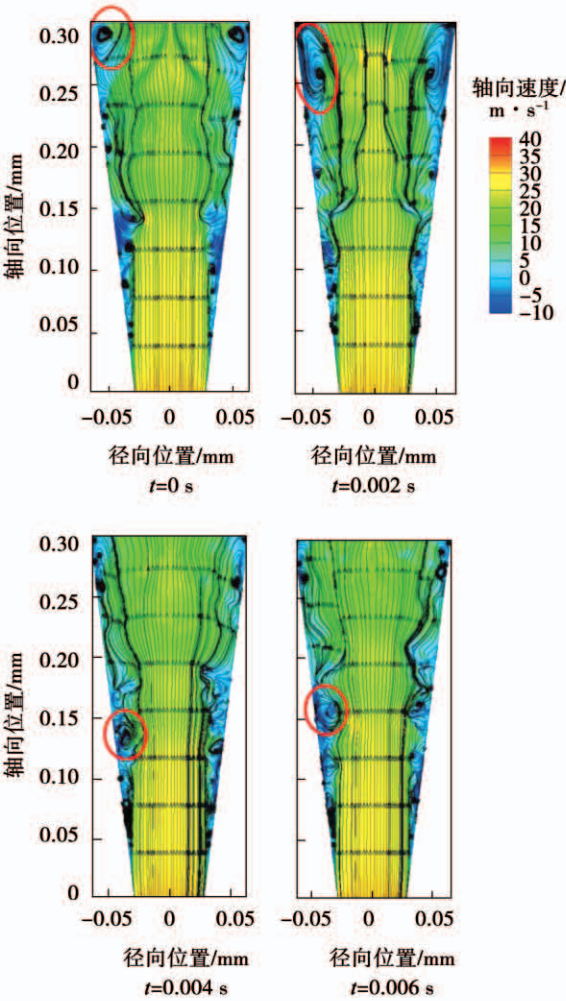


图 5 DL 轴向速度与流线叠加图

Fig.5 Layout chart of the axial velocity and streamline on DL

由图 6 可知,在扩压器下游涡量分布比较无序,并且随着时间发展涡量分布更加分散、零碎。在扩压器内部存在涡量较大的区域(黑圈),该区域随着流体流动也向下游发展。

由图 8 可知,DP 壁面初始分离点与扩压器总长度之比约为 0.5。在初始时刻轴向位置 50% ~ 80% 处均分布“分离泡”,在靠近出口处形成较大旋涡,随着流体流动,大旋涡继续向下游稳定发展,最后破碎形成 3 个尺寸小的“耗散涡”,“分离泡”尺寸也相应变大,之后在轴向位置 70% 左右再次形成大旋涡。

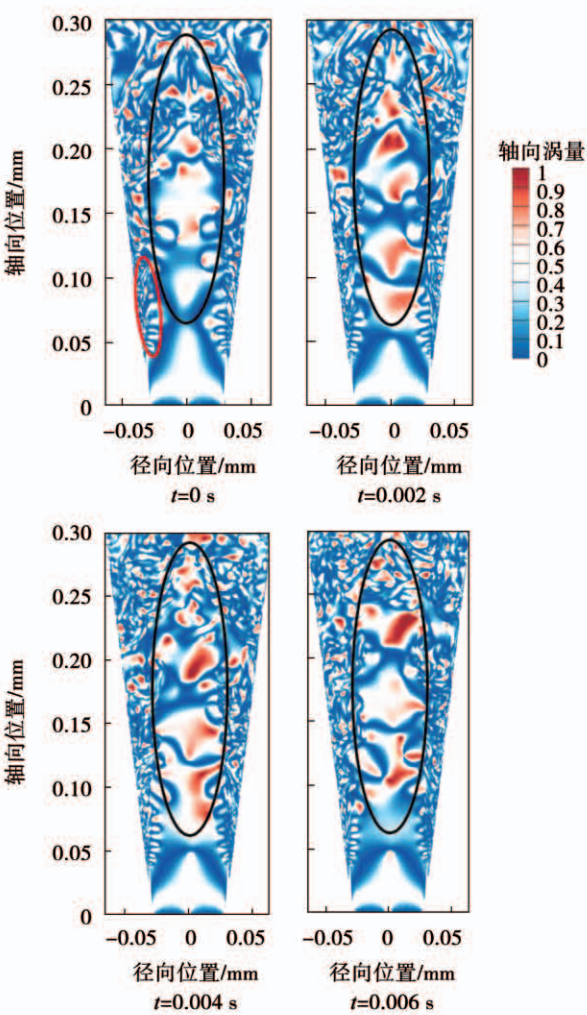


图 6 DL 涡量分布云图

Fig.6 Cloud chart of the vorticity distribution on DL

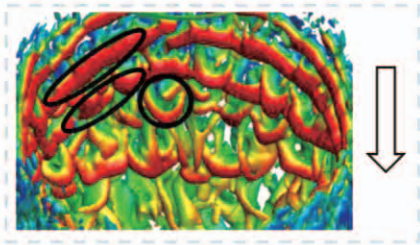


图 7 壁面附近的“分离泡”

Fig.7 Diagram of “separation bubble” around wall surface

由图 9 可知,在扩压器前半段基本没有强旋流,随着流体向下游流动,管内流体湍流度增大,最高涡量向下游流动,并且可以看到内部大涡是由壁面附近小涡卷起形成。DP 的结构特征为越靠近下游,壁面扩张更剧烈,所以在靠近出口处形成角区,压力损失较大。

由图 10 可以看到, DV 壁面初始分离点与扩压

器总长度之比约为 0.43, DV 结果与 DP 结果相似, 但是下游旋涡尺寸稍大。

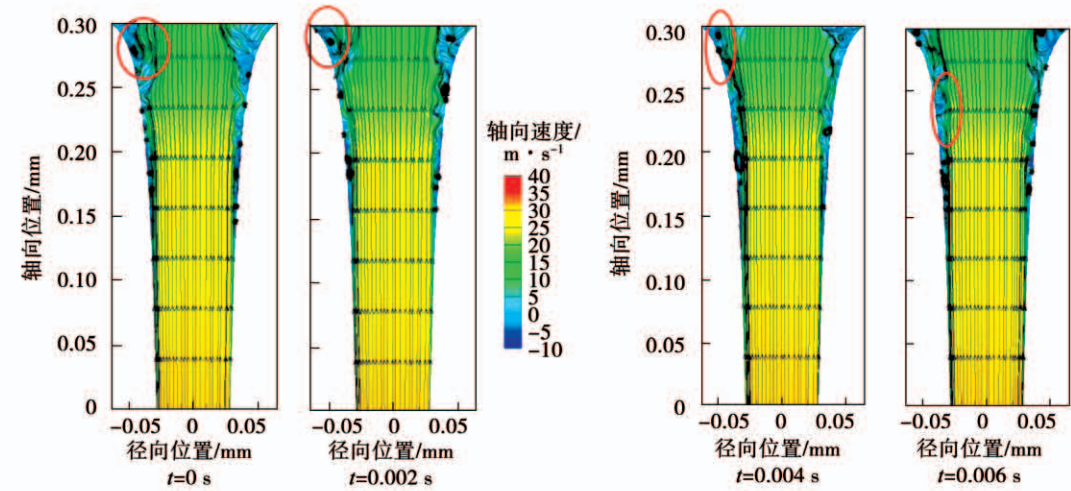


图 8 DP 轴向速度与流线叠加图
Fig.8 Layout chart of the axial velocity and streamline on DP

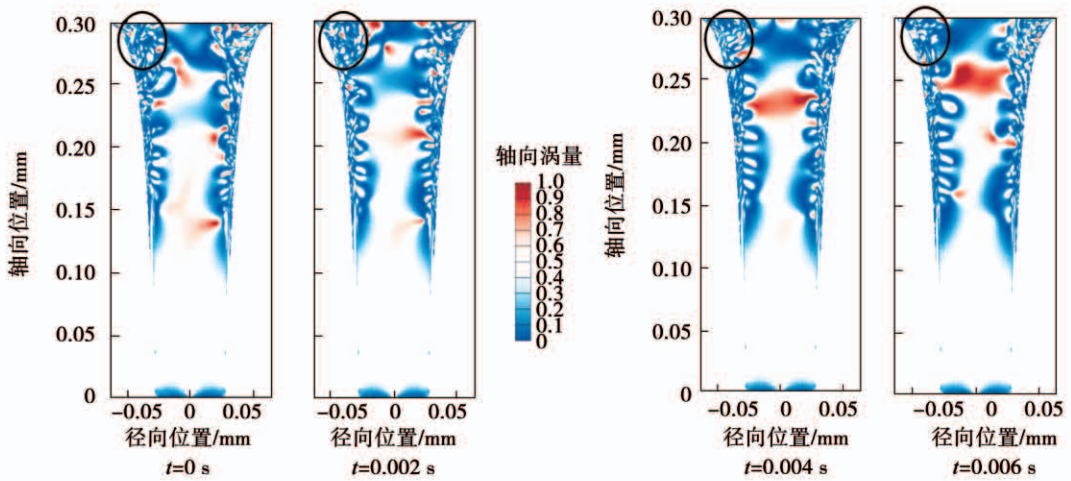


图 9 DP 涡量分布云图
Fig.9 Cloud chart of the vorticity distribution on DP

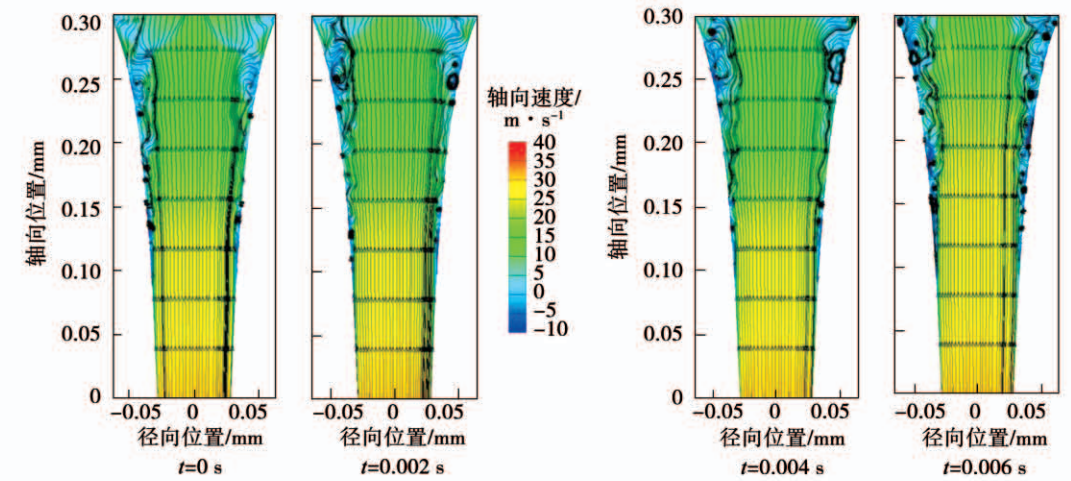


图 10 DV 轴向速度与流线叠加图
Fig.10 Layout chart of the axial velocity and streamline on DV

由图 11 可知,在 DV 中每个时刻都存在一个十分明显的上下不对称分布的“尖角区”,与此模型计算得到的不同时刻的瞬态流线图对比发现,此处正

好对应第一次出现的“分离泡”,说明涡量图对“分离泡”的捕捉更加准确。

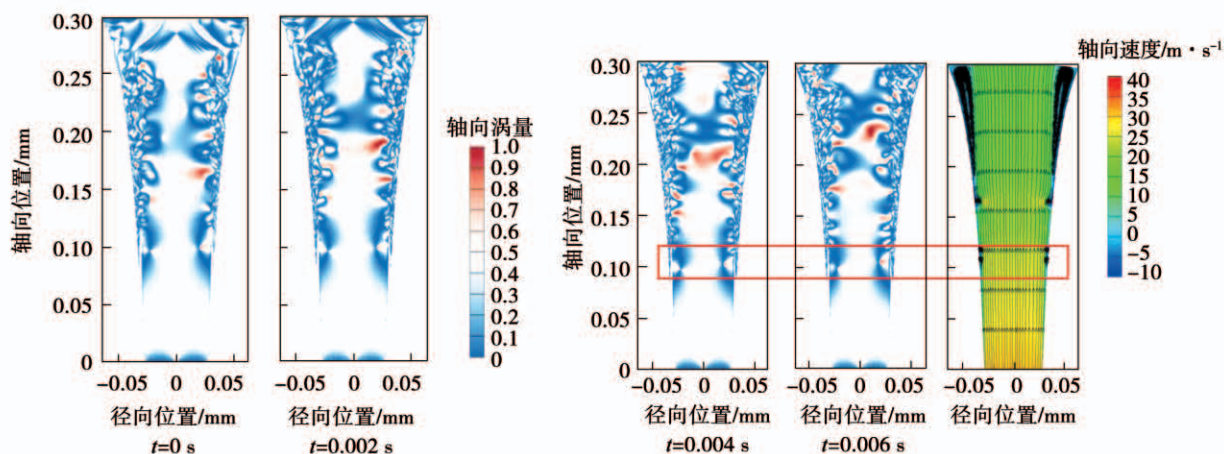


图 11 DV 涡量分布云图

Fig. 11 Cloud chart of the vorticity distribution on DV

由图 12 可知,相切双圆弧型面的扩压器壁面分离点与扩压器总长度之比约为 0.21,在该型面扩压

器前半部分就发生较大流动的分流,形成较多旋涡,所以该扩压器性能较差。

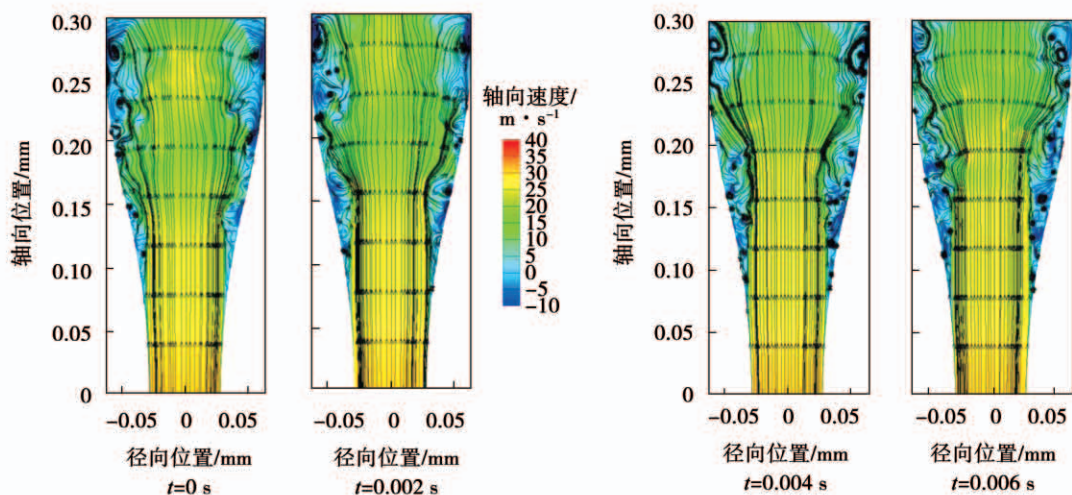


图 12 DC 轴向速度与流线叠加图

Fig. 12 Layout chart of the axial velocity and streamline on DC

由图 13 可知,随着时间的发展涡发生分裂破碎,并且随着涡的形成、发展和消耗,强旋流区域逐渐向下游发展。与图 6、图 9 和图 11 对比,DC 涡量最强,DL 和 DC 涡都较零散细碎,性能也都较差。所以对于锥形扩压器的型面而言,要达到压力性能好,必须使旋涡强度降低。

2.3 轴向速度分布

由图 14 可知,不同型面位于不同轴向位置的径

向尺寸不同。在轴向 1/3 处扩压器内部轴向速度分布相同,DL 已经出现了部分负速度区域,即流动已产生轻微分离;随着其向下游发展,DL 分离加重,DP 和 DC 也发生轻微分离;在轴向 2/3 处,DL 达到最低负轴向速度,为 -9.75 m/s ,DP 和 DV 已无负速度区;出口处各模型速度均已恢复。可以看到在扩压器轴向范围内 DV 都未发生较大的失速,所以其性能最好。

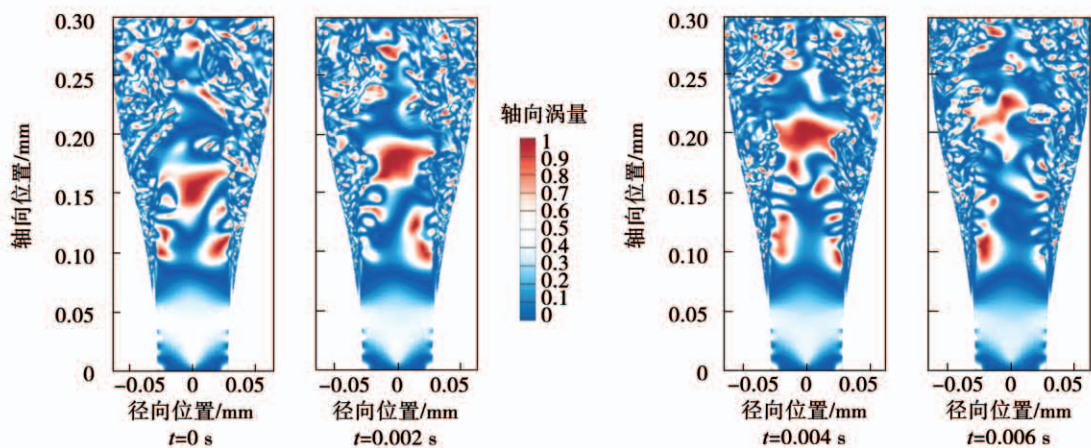


图 13 DC 涡量分布云图

Fig. 13 Cloud chart of the vorticity distribution on DC

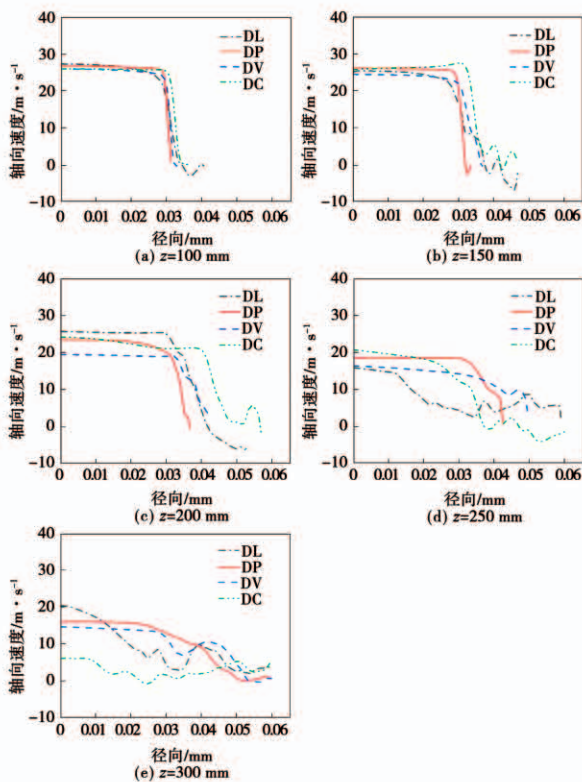


图 14 不同轴向位置轴向速度沿径向分布

Fig. 14 Diagram of axial velocity distribution along the radial direction at different axial positions

2.4 涡量分布

根据 Q 准则得到三维涡量等值面图,并用轴向速度进行染色,如图 15 可知,DL 的涡占据出口截面 100%, DP 中涡占比 50%, DV 中占比 45%, DC 占比 95%。从出口截面来看,DL 和 DC 涡量边缘光滑度较高, DP 和 DV 相反,所以型线出口与轴向夹

角越小,出口截面涡量分布边缘越光滑,壁面附近涡越饱满,小涡数量越多,也就是涡在壁面附近对流动堵塞更严重,相应的,扩压器压力恢复性能更差。

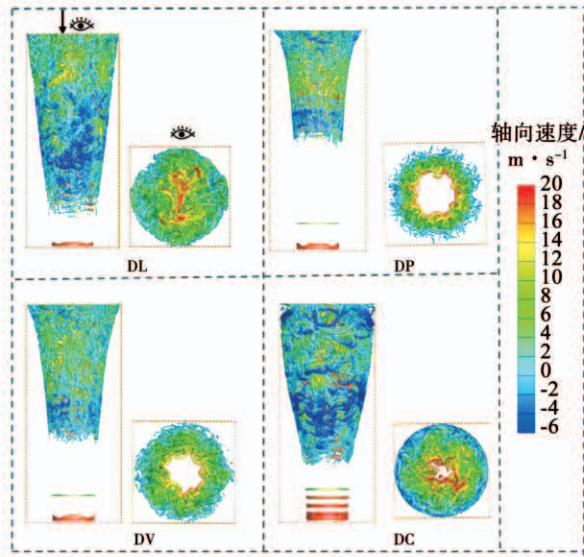


图 15 $Q = 600\,000$ 等值面与轴向速度叠加图

Fig. 15 Layout chart of $Q = 600\,000$ iso-surface and axial velocity

3 结 论

- (1) 等压力梯度和等速度梯度型面的锥形扩压器总体性能较好,静压恢复系数分别为 0.771 3 和 0.782 6,与基准直线型面相比分别提高了 22% 和 23.83%。
- (2) 等压力梯度和等速度梯度型面的扩压器流动初始分离点相对延后,且扩压器内部涡对流动的

堵塞较小。

(3) 扩压器型线出口涡量边缘光滑程度有关与轴向夹角大小有关,角度越小,边缘越光滑,对壁面附近流道堵塞也越严重,扩压器性能越差。

参考文献:

- [1] 金如山,索建秦.先进燃气轮机燃烧室[M].北京:航空工业出版社,2016.
JIN Ru-shan, SUO Jian-qin. Advanced gas turbine combustor[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016.
- [2] 刘长福,邓明.航空发动机结构分析[M].西安:西北工业大学出版社,2006.
LIU Chang-fu, DENG Ming. Aeroengine structure analysis[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.
- [3] ADKINS R C. A short diffuser with low pressure loss[J]. Journal of Fluids Engineering, 1975, 97(3): 297.
- [4] SCHUBAUER G B, SPANGENBERG W G. Effect of screens in wide-angle diffusers[J]. Technical Report Archive & Image Library, 1949, 246(1260): 341-343.
- [5] 王蓉隽,索建秦,梁红侠,等.燃烧室分配器式扩压器性能数值研究[J].推进技术,2011,32(3):343-347.
WANG Rong-juan, SUO Jian-qin, LIANG Hong-xia, et al. Numerical study of distributor type diffuser performance for combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(3): 343-347.
- [6] BOHAN B T, POLANKA M D, GOSS L P. Development and testing of a variable geometry diffuser in an ultra-compact combustor[C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Texas, 2017.
- [7] PERSH J. The effect of surface roughness on the performance of a 23 degree conical diffuser at subsonic Mach numbers[J]. British Medical Journal, 1952, 2(5353): 387.
- [8] MCDONALD A T, FOX R W. An experimental investigation of incompressible flow in conical diffusers[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1966, 8(2): 125, 131-130.
- [9] FOX R W, MCDONALD A T, VA R R V. Effects of swirling inlet flow on pressure recovery in conical diffusers[J]. AIAA Journal, 1971, 9(10): 2014-2018.
- [10] KLEIN A. Effects of inlet conditions on conical-diffuser performance[J]. Journal of Fluids Engineering, 1978, 103(6): 250-257.
- [11] SO K L. Vortex phenomena in a conical diffuser[J]. AIAA Journal, 2015, 53(6): 1072-1078.
- [12] 李长林.扩压器型面局部张角的计算及附面层修正[J].西北工业大学学报,1988(3):58-67.
LI Chang-lin. The calculation of the local opening angle of the diffuser profile and the correction of the surface layer[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1988(3): 58-67.
- [13] 李长林.环形扩压器造型计算方法[J].航空动力学报,1989(1):61-62.
LI Chang-lin. Calculation method of annular diffuser modeling[J]. Journal of Aerospace Power, 1989(1): 61-62.
- [14] 石建成,刘宝杰.混合型扩压器流动特点分析[J].推进技术,2008,29(5):583-590.
SHI Jian-cheng, LIU Bao-jie. Analysis of flow characteristics of hybrid diffuser[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(5): 583-590.
- [15] 张兆顺,湍流大涡数值模拟的理论和应用[M].北京:清华大学出版社,2008.
ZHANG Zhao-shun. Theory and application of numerical simulation of turbulent large eddy[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [16] 彭涛,钱若军.大涡模拟(LES)理论研究述评[C]//全国现代结构工程学术研讨会学术委员会,天津,2008.
PENG Tao, QIAN Ruojun. Review of large eddy simulation (LES) theoretical research[C]//Academic Committee of the National Symposium on Modern Structural Engineering, Tianjin, 2008.
- [17] LIU C Q, WANG Y Q, YANG Y, et al. New omega vortex identification method[J]. Science China, 2016, 59(8): 684711.
- [18] 吴霆,时北极,王士召,等.大涡模拟的壁模型及其应用[J].力学学报,2018,50(3):453-466.
WU Ting, SHI Bei-ji, WANG Shi-zhao, et al. Wall model of large eddy simulation and its application[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(3): 453-466.
- [19] MAHALAKSHMI N V, KRITHIGA G, SANDHYA S, et al. Experimental investigations of flow through conical diffusers with and without wake type velocity distortions at inlet[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2008, 32(1): 133-157.

(王治红 编辑)