

不同进口条件对 OGV/ 前置扩压器流场大涡模拟结果的影响

张 腾, 李井华, 颜应文

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 为了研究不同进口条件对压气机出口导向叶片(Outlet Guide Vane, OGV)/前置扩压器流场性能的影响,分别采用合成涡方法与白噪声方法生成进口条件,研究不同进口条件对流场数值模拟结果的影响,并与文献给出的试验结果进行对比。结果表明:采用合成涡方法生成的进口速度场满足试验测得的时均速度分布与脉动均方根分布,且其生成的进口湍流结构可传播到下游较远处;合成涡方法能够较好地预测 OGV 内的流场,与白噪声方法相比,所预测的 OGV 吸力面分离区较小;在 OGV 出口截面、扩压器内和扩压器出口截面,采用 2 种方法得到的速度分布相差不大,与试验相比分布趋势相同。

关键词: 出口导向叶片;前置扩压器;大涡模拟;合成涡方法;进口条件;航空发动机

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.06.007

Effect of Different Inlet Conditions on Large Eddy Simulation Results of OGV/ Pre-Diffuser Flow Field

ZHANG Teng, LI Jing-hua, YAN Ying-wen

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to research the effect of different inlet conditions on the flow field performance of compressor outlet guide vane (OGV)/ pre-diffuser, the inlet conditions were generated by the method of synthetic eddy and white noise, respectively. The effect of different inlet conditions on the numerical simulation results of the flow field were researched and compared with the test results given in the literatures. The results show that the inlet velocity field generated by the synthetic eddy method satisfies the time-averaged velocity distribution and the pulsating mean square root distribution measured by the test, and the inlet turbulent structure generated by it can propagate to far downstream. The synthetic eddy method can better predict the flow field in OGV, and the predicted suction surface separation area of OGV is smaller than that of the white noise method. The velocity distribution obtained by the two methods is similar in the exit cross section of OGV and the exit cross section of diffuser and inside the diffuser, and the distribution trend is the same as the test.

Key words: outlet guide vanes (OGV); pre-diffuser; large eddy simulation (LES); synthetic eddy method (SEM); inlet conditions; aeroengine

0 引言

航空发动机燃烧室中燃气的高效稳定燃烧要求气流在燃烧室进口通过扩压器进行减速扩压且尽量减小气流的压力损失,因此压气机与燃烧室交界处的空气动力学优化对燃烧室设计尤为重要。国内外学者对压气机出口导向叶片的尾迹结构与前置扩压器的湍

流流场特性的相互影响进行了深入的试验研究和 CFD 模拟。Walker 等^[1]试验研究发现与传统设计方法相比,OGV/前置扩压器一体化的设计方法可以改善燃烧室进口的空气动力学特性,增大扩压器面积比,提高静压恢复系数并减小总压损失;徐磊磊等^[2]通过试验与数值计算相结合的方法研究了不同扩张角下前置扩压器性能的变化,发现前置扩压器的扩张角存

收稿日期:2017-12-27

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金、青年科技创新基金(NS2015029)资助

作者简介:张腾(1991),男,硕士,研究方向为湍流燃烧的大涡模拟;E-mail:zhangteng@nuaa.edu.cn.

引用格式:张腾,李井华,颜应文.不同进口条件对 OGV/前置扩压器流场大涡模拟结果的影响[J].航空发动机,2018,44(6):38-43. ZHANG Teng, LI Jinghua, YAN Yingwen. Effect of different inlet conditions on large eddy simulation results of OGV/ pre-diffuser flow field [J]. Aeroengine, 2018, 44(6): 38-43.

在最佳值,扩张角大于该值时气流会出现流动分离;LI 等^[3]采用不同 RANS 湍流模型对 OGV/ 前置扩压器的流场特性进行数值研究,结果表明虽然 RANS 模型能够合理地预测出整体的流动结构和性能,但却无法正确预测出 OGV 的流动,尤其是导向叶片附面层上所发生的流动,因此采用大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 进行初步计算,但由于 LES 进口速度场中没有叠加任何脉动,所预测的吸力面上有较大的流动分离。

采用 LES 模拟湍流流动时如何生成符合湍流统计特性的进口条件,一直是学者们研究的重点。目前最简单的方法是在进口的速度场加入随机脉动,如白噪声 (White noise, WN)^[4],但这种方法生成的进口速度场没有任何的时间-空间关联性,而且在下游会很快耗散掉。近年来,为解决这个问题,许多学者提出不同方法。Batten 等^[5]采用傅里叶合成方法得到较为真实的湍流脉动能谱,并考虑到近壁面流动的各向异性,但是在进口下游较长的一段距离后才能发展为真实湍流;Lund 等^[6]提出预前模拟 (Precursor simulation) 的方法,通过在进口前加入独立的计算区域,并对其进、出口采用周期性边界条件,以此生成充分发展的湍流流动瞬态速度场,并通过重整 (rescaling) 的方式将瞬时脉动加入到 LES 进口条件中,但是该方法需要单独的计算域,所需的计算成本较高;Jarrin 等^[7]提出 1 种新的合成涡方法 (Synthetic Eddy Method, SEM),所需计算成本较少,适用于任意进口几何形状与流动情况,且所需的信息较为简单,在进口下游发展为实际湍流所需长度较短。合成涡方法在槽道流动^[7-9]、后台阶流动^[7]、机翼绕流^[10]等简单流动中都得到应用;对于具有复杂几何结构的流场,国内近年也开始进行相关研究,如杨帆等^[11]采用合成涡方法生成湍流进口边界条件,对强旋流预混火焰进行大涡模拟研究。

本文在已有试验测得的进口统计数据的基础上^[12],分别加入白噪声与合成涡的方法生成进口条件,采用大涡模拟方法数值计算 OGV/ 前置扩压器的流场特性,分析不同进口条件对数值模拟结果的影响,并与试验结果进行对比。

1 数学模型

1.1 LES 亚网格模型

湍流流动由不同尺度的漩涡组成,其中大尺度涡

旋对流动影响较大,而小尺度涡旋则主要起耗散作用。因此,可以采用大涡模拟对于大尺度的可解分量通过控制方程直接求解,对于小尺度结构可通过亚网格模型化求解。

本文采用 Smagorinsky 亚网格尺度模型^[13],将亚网格雷诺应力模化为

$$\tau_{ij}^s = -2\mu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk}^s \delta_{ij} \quad (1)$$

式中: μ_t 为亚网格黏性,可写为

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| = \rho (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (2)$$

式中: C_s 为模型常数,对于内部流动一般取 0.1; Δ 为滤波尺度,取 $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$; $\bar{S}_{ij}$ 为过滤后的应变率张量。

同时在近壁面区域引入 Van Driest^[14]近壁阻尼函数减小近壁面的涡黏性。

1.2 合成涡方法 (SEM)

合成涡方法可以高效便捷地生成进口脉动速度场,该方法假设脉动速度由进口平面附近空间 B 内随机分布的 N 个涡共同作用产生。由这 N 个涡产生的速度表示为

$$u = U + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N c^k f_{\sigma(X)}(X - X^k) \quad (3)$$

式中: U 为进口平均速度场,由试验测得或由 RANS 结果得到; X^k 为 N 个涡的空间位置坐标; c^k 为涡的相对强度,定义为

$$c_i^k = a_{ij}^k \varepsilon_j^k \quad (4)$$

式中: a_{ij}^k 为雷诺应力 R_{ij}^k 的 Cholesky 分解^[10]; ε 为独立随机变量,以相等概率取 -1 或 1

$$\varepsilon \in \{-1, 1\} \quad (5)$$

$f_{\sigma(X)}(X - X^k)$ 为处在 X^k 位置的涡附近的速度分布函数

$$f_{\sigma(X)}(X - X^k) = \sqrt{V_B \sigma^{-3}} f\left(\frac{x - x^k}{\sigma}\right) f\left(\frac{y - y^k}{\sigma}\right) f\left(\frac{z - z^k}{\sigma}\right) \quad (6)$$

式中: σ 为涡的特征尺度,由湍动能、耗散率、网格尺度共同决定^[15]; f 为形函数,定义为

$$f = \begin{cases} \sqrt{\alpha} (1 - |x|), & \text{if } |x| \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中: α 为形函数系数,为保证脉动速度与试验测量值准确符合,本文取 $\alpha = 1.61256$ 。

每个迭代时间步,第 k 个涡的位置为

$$X^k(t+dt)=X^k(t)+U_c dt \quad (8)$$

式中: U_c 为涡的运动速度,其值一般取进口平面的平均速度。由此保证了每个时间步的脉动速度场与上一时间步的时间关联。

应用合成涡方法生成进口脉动速度场的步骤为:

- (1)在已知进口各输入量(如平均流场、雷诺应力分布等)的基础上,确定进口平面附近涡的运动空间 B ;
- (2)随机生成每个涡的位置 X^k 和脉动强度 ε ;
- (3)计算由 N 个涡合成的脉动速度并叠加到进口平均速度场中;
- (4)涡在空间 B 中以平均速度 U_c 运动;
- (5)对运动到空间 B 外的涡,在相对的面上重新生成新的位置 X^k 和脉动强度 ε 。重复步骤(3)~(5)。

2 研究对象

本文研究对象为压气机出口导向叶片与前置扩压器组合结构,如图1所示。OGV叶栅平均半径为375 mm,高度 $h=36.6$ mm,全环OGV叶栅包含160个弦长为39 mm的直叶片。IGV(进口导向叶片)叶栅包含80个叶片,为考虑IGV尾迹对OGV/前置扩压器中流场的影响,数值模拟取2个OGV叶片,角度为 4.5° 。前置扩压器进、出口面积比为1.6,长度 $L=2.33h$ 。

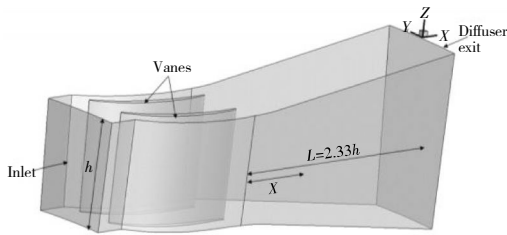


图1 压气机出口导向叶片与前置扩压器组合结构

计算域和计算网格如图2所示。采用RR公司网格生成程序PADRAM^[16]生成结构化分块网格,OGV区域流向和展向的无量纲网格步长分别为 $\Delta x^+ \approx 25$ 、 $\Delta z^+ \approx 40$,叶片附近第1层网格 $\Delta y^+ \approx 1$;扩压器区域流向的无量纲网格步长为 $\Delta x^+ \approx 100$,展向网格步长对OGV尾迹区域内为 $\Delta z^+ \approx 8$,尾迹区域外为 $\Delta z^+ \approx 20$,壁面附近第1层网格高度 $\Delta y^+ \approx 5$ 。网格总量约为900万,利用自编软件DELTA并行计算。在计算域的周向上采用周期性边界条件;内、外环壁面及叶片壁面采用无滑移壁面边界条件;进口平均速度为45 m/s ($Ma=0.13$),其方向与进口平面法向呈 45° ,进口在试

验测得的2维速度分布的基础上,分别采用加入白噪声与合成涡方法生成脉动速度场,进口温度和压力与试验环境的相同,分别为288 K、101325 Pa;出口采用零梯度出口边界条件。时间步长为 1×10^{-6} s,稳定后取3个流通时间的时间段计算平均流场。



图2 OGV/扩压器结构化分块网格

3 计算结果及分析

3.1 合成涡方法生成进口条件

本文将试验测得的OGV进口平均速度场、脉动均方根分布、湍动能、耗散率分布作为合成涡方法的输入信息。在计算 a_{ij} 时取

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} \sqrt{R_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{R_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{R_{33}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u' & 0 & 0 \\ 0 & v' & 0 \\ 0 & 0 & w' \end{bmatrix}$$

式中: u', v', w' 分别为试验所测得的3个方向上的脉动均方根。

采用2种方法所生成的脉动速度场的统计平均如图3所示。从图中可见,采用2种方法所生成的时均轴向 U 和周向 V 速度均与试验结果高度契合,而径向速度 W 由于数值较小,受计算误差影响稍大,但分布趋势与试验测量基本符合。采用2种方法所生成的速度场的脉动均方根分布如图4所示。从图中可见,采用White noise方法生成的脉动均方根远远大于试验值,并不满足进口湍流的统计特性;而采用

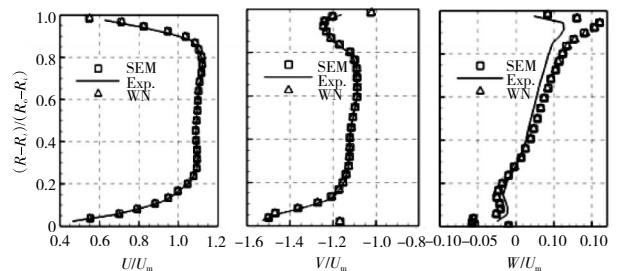


图3 OGV进口周向平均时均速度沿径向分布

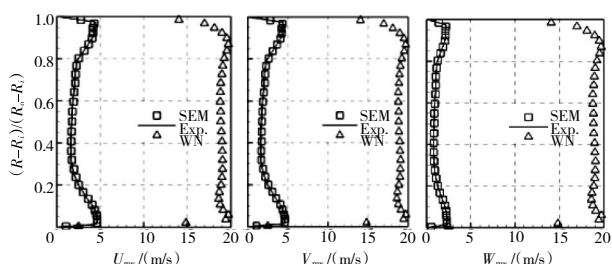


图4 OGV 进口周向平均脉动均方根沿径向分布

SEM 方法产生的 3 个速度分量的脉动均方根与试验结果十分吻合,在近壁湍动能较大处稍有偏差,但误差最大不超过 4%。

进口中心点速度能谱如图 5 所示。从图中可见,在频率小于 10 kHz 范围内为大尺度含能区,在频率为 10~12 kHz 范围内满足湍流理论中的惯性子区 $-5/3$ 律,在频率大于 12 kHz 时也出现了湍流理论中迅速衰减的耗散区。

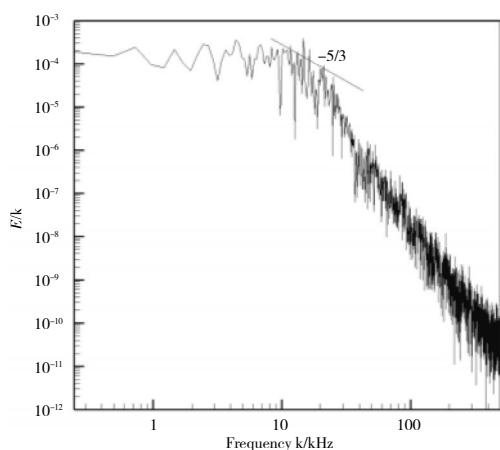


图5 进口面上中心点 A 轴向瞬时速度能谱

从上述结果可见,合成涡方法产生的瞬时速度场的统计特性能够满足目标要求,平均速度场即为目标进口平均速度场,雷诺应力满足目标进口雷诺应力分布要求。

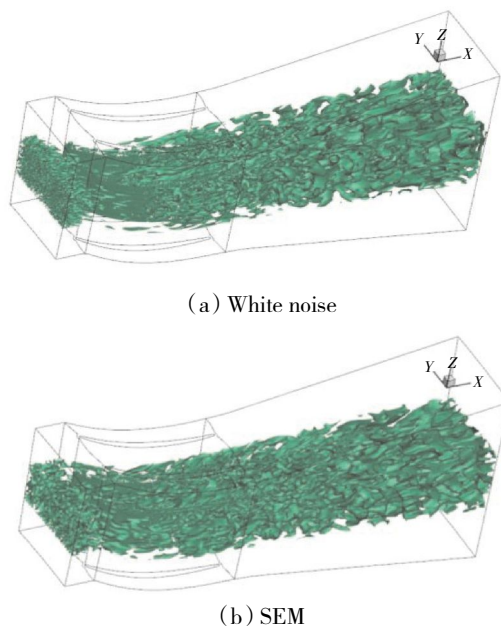
3.2 流场结果分析

引入速度梯度张量的 2 阶不变量 Q 准则^[17]

$$Q_{ij} = -\frac{1}{2}(S_{ij}S_{ij} - \Omega_{ij}\Omega_{ij}) \quad (9)$$

Q 取决于应变率张量 S_{ij} 与转动张量 Ω_{ij} 之间的关系。 Q 准则可以用来评价所求解的湍流中的拟序结构。在 2 种进口条件下 OGV/ 扩压器中部 Q 准则等值面如图 6 所示。从图中可见,SEM 方法中可以观测到进口流动中的 3 维湍流结构,而在 White noise 方法

中为不相干的小尺度湍流结构且很快耗散掉。SEM 方法生成的湍流结构在下游由于叶片前缘的层流化而消失,但在叶片表面下游会再次出现,White noise 方法中也会在下游再次出现湍流结构,但 SEM 方法出现得较早。同时在扩压器中可以看到导向叶片尾迹的复杂湍流结构。

图6 中心高度处 $Q=1000$ 等值面

距离 OGV 吸力面壁面约 0.2 mm 处的时均轴向速度如图 7 所示,从图中可见,在 2 种进口条件下,气流到达叶片前缘并滞止,随后在叶片吸力面上经历了层流化过程、加速、层流到湍流的转捩及附面层的分离再附着。虽然流动过程相似,但很显然 SEM 进口方法预测的吸力面上的分离区要小,由于受测量方法的限制,在试验中并没有相关的叶片吸力面分离区的数据。同时在这一流动分离区域附近产生较大应力,从而导致尾迹在叶片尾缘处分离并在下游迅速混合。从图中还可见,叶片前缘后的流动跨度较大,由于通道内、外壁面边界层与叶片的相互作用,以及叶片前缘后空气的加速,使得靠近叶片内、外端壁处形成 2 个动量较低的区域,且该区域不断扩大并在叶片尾缘处

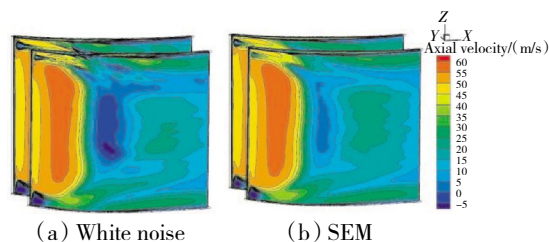


图7 叶片吸力面时均轴向速度分布

形成2个分别靠近内、外端壁的低动量“包”。

SEM方法中通道中心高度截面处瞬态轴向速度与径向速度分布如图8所示。从图中可见,来自叶片吸力面和压力面的气流在叶片尾缘处交汇并相互作用,使尾迹在扩压器中的不稳定混合掺混,并在趋近扩压器出口时逐渐均匀。

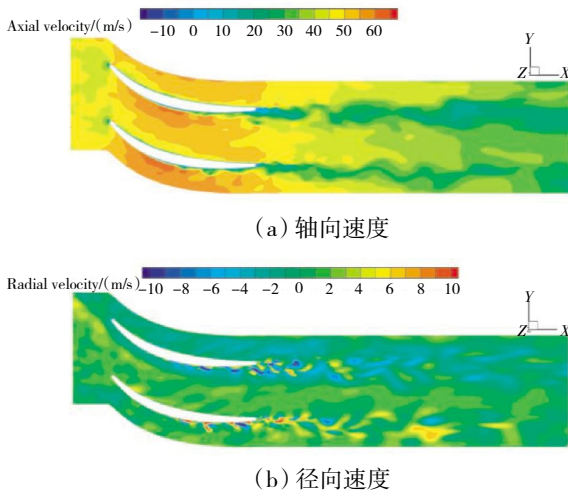


图8 中心高度处瞬态轴向速度与径向速度分布(SEM方法)

扩压器出口截面上的时均轴向速度的分布如图9所示。从图中可见,与试验结果相比,计算预测结果捕捉到扩压器出口的速度分布趋势,OGV尾迹由于混合作用在扩压器出口截面已经趋向均匀,但仍能明显看出其影响痕迹;2个明显不同的高速度区分别对应上游的2个OGV叶片通道,而其不同则体现上游IGV尾迹对下游的影响(2个OGV叶片对应1个IGV叶片);在扩压器逆压力梯度的作用下,气流经过扩压器后减速增压,可能导致在出口壁面处发生流动分离,二次流也导致在2个加厚的尾迹区与壁面边界层之间产生低动量区,很明显无论是数值计算还是试验都没有检测到流动分离。

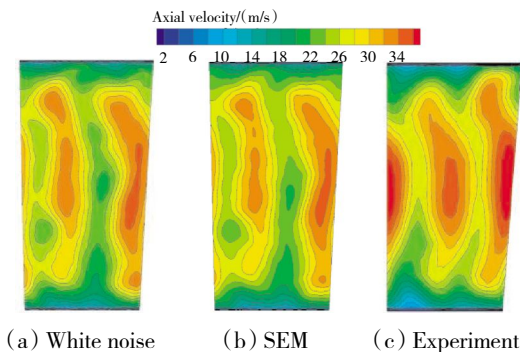


图9 扩压器出口时均轴向速度分布

OGV出口截面轴向速度沿周向平均的径向分布如图10所示。从图中可见,2种方法所预测的速度分布大致相同,与试验数据相比,在中间高度处速度分布符合得很好,但在近壁面处稍有误差。

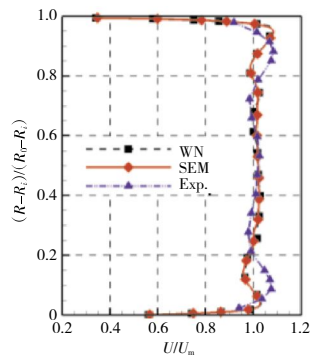


图10 OGV出口时均轴向速度周向平均沿径向分布

前置扩压器内某截面($x/L=0.442$)和出口截面($x/L=1.0$)轴向速度沿周向平均的径向分布如图11所示。从图中可见,采用2种方法得到的分布曲线与试验结果的分布趋势相同,但在内壁面附近与通道中间高度处符合较差,与试验值相比,预测结果分布较为平缓。部分原因是在试验中测量IGV出口速度时布置的测点有限,在数值模拟时需要对试验测得的2维速度场插值作为进口平均流场,可能无法完全反映IGV出口流场特性,由此在计算中对下游流场产生一定影响。

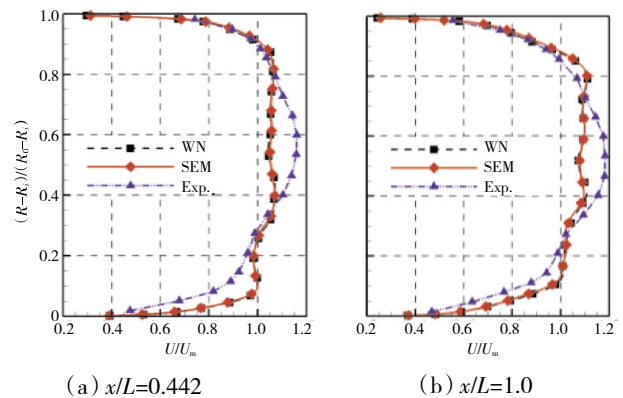


图11 扩压器内不同位置时均轴向速度沿周向平均的径向分布

4 结论

本文对1种OGV/前置扩压器组合结构的流场性能进行大涡模拟数值研究,分别采用白噪声与合成涡方法生成进口条件,研究不同进口条件对数值模拟结果的影响。得到如下结论:

(1)采用合成涡方法所生成的进口脉动速度场的时均速度分布和脉动均方根分布与试验结果十分符合,速度能谱分布符合湍流经典理论。与白噪声方法相比,合成涡方法在进口下游产生的湍流结构不会立即耗散掉,可传播到下游较远处。

(2)与白噪声方法相比,合成涡方法在吸力面上预测的分离区较小。

(3)在 OGV 出口、扩压器内及扩压器出口截面,采用 2 种方法所预测的速度分布相差不大,与试验结果相比,分布趋势相同,但在内壁面附近与通道中间高度处符合较差。

参考文献:

- [1] Walker A D, Carotte J F, McGuirk J J. Enhanced external aerodynamic performance of a generic combustor using an integrated OGV/prediffuser design technique [J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2007, 129(1): 80–87.
- [2] 徐磊磊,阮灿,方晓远,等. 前置扩压器几何参数对突扩扩压器性能的影响[J]. 推进技术,2015, 36(7):1054–1061.
XU Leilei, RUAN Can, FANG Xiaoyuan, et al. Effects of pre-diffuser on performance of dump diffuser [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(7):1054–1061. (in Chinese)
- [3] LI Jinghua, Gary P, Jim M G. Turbulence modelling of the aerodynamic interaction of OGV wakes and diffuser flow [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10):2302–2312.
- [4] Neto A S, Grand D, Métais O, et al. A numerical investigation of the coherent vortices in turbulence behind a backward-facing step [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 256:1–25.
- [5] Batten P, Goldberg U, Chakravarthy S. Interfacing statistical turbulence closures with large-eddy simulation [J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 485–492.
- [6] Lund T S, Wu X, Squires K D. Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations [J]. Journal of Computational Physics, 1998, 140(2):233–258.
- [7] Jarrin N, Benhamadouche S, Laurence D, et al. A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large-eddy simulations [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, 27(4): 585–593.
- [8] Poletto R, Craft T, Revell A. A new divergence free synthetic eddy method for the reproduction of inlet flow conditions for LES [J]. Flow, turbulence and combustion, 2013, 91(3):519–539.
- [9] 李栋,王翔宇. 嵌入式 RANS/LES 混合方法在槽道流动数值模拟中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2015(5): 799–803.
LI Dong, WANG Xiangyu. Applying embedded hybrid RANS/LES method to channel flow [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015(5):799–803. (in Chinese)
- [10] Jarrin N. Synthetic inflow boundary conditions for the numerical simulation of turbulence[D]. Manchester: University of Manchester, 2008.
- [11] 杨帆,林博颖,隋春杰,等. 湍流强旋流预混火焰大涡模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(4):895–900.
YANG Fan, LIN Boying, SUI Chunjie, et al. Large eddy simulation of turbulent strongly swirling premixed flame [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(4):895–900. (in Chinese)
- [12] Barker A G, Carotte J F, Luff J, et al. Design of an integrated OGV/diffuser system—final report of lopocotep project [D]. Loughborough: Loughborough University, 2003.
- [13] Smagorinsky J. General circulation experiment with the primitive equations[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3):99–164.
- [14] Driest ERV. On turbulent flow near a wall [J]. Journal of Aeronautical Sciences, 1956, 23(11):1007–1011.
- [15] Jarrin N, Prosser R, Uribe J C, et al. Reconstruction of turbulent fluctuations for hybrid RANS/LES simulations using a Synthetic-Eddy Method [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2009, 30(3): 435–442.
- [16] Shahpar S, Lapworth L. PADRAM: Parametric design and rapid meshing system for turbomachinery optimisation [R]. ASME 2003-GT-38698.
- [17] Keating A, Piomelli U, Balaras E, et al. A priori and a posteriori tests of inflow conditions for large-eddy simulation [J]. Physics of Fluids (1994–present), 2004, 16(12):4696–4712.

(编辑:刘 静)