掠叶片进口流场中周向不均匀性的影响

唐明智¹,金东海^{1,2},郭 昕³,桂幸民^{1,2}

(1.北京航空航天大学 能源与动力工程学院,北京 100191; 2. 先进航空发动机协同创新中心,北京 100191;3. 中国航发四川燃气涡轮研究院,成都 610500)

摘要:为模化并分析迎角改变时掠叶栅流场中周向不均匀性的影响,将1 种应力输运模型整合到通流模型中,并应用于某掠 叶栅的计算。通过给定掠叶栅不同来流迎角开展 3D 数值模拟和通流计算,结果表明:主要由无黏叶片力所诱发的周向不均匀性会 重新组织叶片通道的进口流场,改变进口气流角,从而引发掠叶栅进口径向平衡的重新分布,随着迎角的提高,这种周向不均匀性 将加强,其对进口流动的影响也会进一步增大。加入该应力输运模型后,通流模型能够很好地预测周向脉动源项,在前缘前其计算 值与 3D 计算结果的偏差在 20%以内,对叶片通道进口气流角改变量的预测精度提高了 25%以上,对进口流动径向平衡的描述精度 提高了 60%以上。

Effect of Circumferential Non-uniformity on the Inlet Flow Fields of a Swept Blade

TANG Ming-zhi¹, JIN Dong-hai^{1,2}, GUO Xin³, GUI Xing-min^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aeroengine, Beijing 100191, China; 3. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to model and analyze the effect of the circumferential non-uniformity on the flow field of a swept cascade, a kind of stress transport model was integrated into the throughflow model. 3D numerical simulation and throughflow calculation of a swept cascade were carried out at different inlet angles of the given cascade. The results show that the non-uniformity induced by the inviscid blade force will reorganize the inlet flow field of the blade passage and change the inlet flow angle, thus causing the redistribution of the radial balance of the inlet. With the increase of incidence angle, the circumferential non-uniformity will be strengthened, and its influence on the inlet flow will also increase. After adding the stress transport model, the throughflow model could predict the circumferential pulse source well. The descrepancy between the throughflow value and the 3D calculation results is within 20% before the leading edge. The prediction accuracy of the inlet flow angle change of the blade passage raised by 25%, and the description accuracy of the radial balance of the inlet flow is raised by more than 60%.

Key words: swept blade; throughflow model; circumferential average method (CAM); circumferential non-uniformity; stress transport model

0 引言

现阶段 3D 数值模拟在风扇 / 压气机设计中得到 了广泛使用。然而在设计的初级阶段,通流模型由于 一方面可以快速提供风扇 / 压气机的性能及内部流 动特性,另一方面也易于将经验参数纳入到数值模拟 中^[1-2],因此仍具有重要作用^[3-4]。目前应用最广泛的 通流方法是流线曲率法,而基于周向平均 Euler^[5]或 Navier-Stokes(N-S)方程^[6-8]的通流模型也同样被广泛 研究,并应用于压气机的特性预测和流场模拟。这些通 流模型适用于跨声压气机的流场模拟和性能预测^[9]。

在对 N-S 方程进行周向平均的过程中,不可避 免地产生一些附加项,其中与表面力相关的项被模化 为无黏叶片力项和叶片黏性项,而对于由于流场的周

收稿日期:2017–12–23 基金项目:国家自然科学基金(51236001)、国家基础研究项目(2012CB720201)、北京自然科学基金(3151002)资助 作者简介:唐明智(1989),男,在读博士研究生,研究方向为叶轮机周向平均方法;E-mail: tangmz1120@buaa.edu.cn。

引用格式:唐明智,金东海,郭昕,等.掠叶片进口流场中周向不均匀性的影响[J].航空发动机,2018,44(4):8-15.TANG Mingzhi, JIN Donghai, GUO Xin, et al. Effect of circumferential non-uniformity on the inlet flow fields of a swept blade[J].Aeroengine,2018,44(4):8-15.

向不均匀性及控制方程的非线性所引发的高阶项,即 周向脉动应力项,早期研究认为其对流场的影响可以 忽略,即假设叶片通道进口前流动参数沿周向均匀分 布,这主要是由于在早期研究中,相对于控制方程中 的其他项,反映周向不均匀性的项的量级很小;另一 个原因则是设计者缺乏模型来预测这些项的值¹⁰⁰。然 而,随着当前压气机负荷的提高,以及弯掠叶片技术 的广泛应用,周向不均匀性的影响正被逐步认识到, 有助于更为精确地应用弯掠叶片技术。事实上,这些 项的作用可能会比黏性项的作用更大,并目随着负荷 的增大,其作用也会增强^四。此外,周向不均匀性会影 响流动参数的轴向和展向的分布[9,12-13],并能反映角区 失速和径向掺混等现象。对于掠叶片,叶片通道进口 的流动平衡也会被周向不均匀性所影响,并会诱导流 动参数的重新分配,而引发周向不均匀性的1个主要 来源就是无黏叶片力^[14]。

为了模化周向不均匀性,通常的方法是计算周向 脉动应力项,其中1种方法是开展S₁流面上的计算, 然后提取出周向脉动应力项。吴仲华采用中心流线法 来简化对S₁流面的计算^[15],并在之后得到了一定的发 展^[16-17]。由于周向脉动应力项具有谐波特征^[18],因此非 线性谐波平衡法也被用来模化周向不均匀性^[19],不过 这种方法并未获得广泛应用。

文献[20]通过应力输运模型对周向脉动应力项进 行建模,分析了具有不同掠角的掠叶栅在0°迎角下 流场中周向不均匀性的影响,结果表明周向不均匀性 会改变掠叶片进口流动参数,并引发进口新的径向平 衡。本文在此基础上应用该应力输运模型分析迎角改 变时掠叶栅进口流场中周向不均匀性的作用。

1 控制方程

1.1 周向平均通流模型

在相对柱坐标系中对 N-S 方程进行周向平均¹⁰, 并将周向脉动应力项整合为周向脉动源项 P,可得到 通流模型的主控方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{br} \frac{\partial}{\partial x} [br(F - F_{v})] + \frac{1}{br} \frac{\partial}{\partial r} [br(G - G_{v})] = S + F_{\rm B} + F_{\rm F} + P \qquad (1)$$

方程中各项定义为

$$\begin{split} \overline{U} &= \begin{bmatrix} \overline{\rho} \\ \overline{\rho} \overline{w_x} \\ \overline{\rho} \overline{w_v} \\ \overline{\rho} \overline{w_v} \\ \overline{\rho} \overline{w_v} \end{bmatrix}, \overline{F} &= \begin{bmatrix} \overline{\rho} \overline{w_x} \\ \overline{\rho} \overline{w_v w_x} \\ \overline{\rho} \overline{w_v w_x} \\ \overline{\rho} \overline{w_v w_v} \\ \overline{\rho} \overline{w_v w_v} \end{bmatrix}, \overline{G} &= \begin{bmatrix} \overline{\rho} \overline{w_v w_v} \\ \overline{\rho} \overline{w_v w_v} \\ \overline{\rho} \overline{w_v w_v} \\ \overline{\rho} \overline{w_v w_v} \\ \overline{\rho} \overline{w_v w_v} \end{bmatrix}, \overline{G}_v &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \overline{\tau_{xx}} \\ \overline{\tau_{xx}}$$

式中:U为守恒量;F和G为对流(无黏)通量;F_v和G_v 为扩散(黏性)通量;S为N-S方程组在相对柱坐标下 导出的源项;F_B为无黏叶片力;F_F为黏性叶片力。 定V由于叶片切向原度立生的探索系称;

$$b = \frac{\varphi_s - \varphi_p}{2\pi/N} \tag{2}$$

式中: Δ*φ*=*φ*_s-*φ*_p, 为叶片通道周向宽度; *N* 为叶片数。 在叶片区 *b*<1, 在非叶片区 *b*=1。周向脉动源项 *P* 中的高阶项即为周向脉动应力项,这些项是由于叶轮 机的周向不均匀性及 N-S 方程的非线性所导致的, 其与周向脉动源项均能够反映周向不均匀性的大小。

与文献[20]类似,为分析叶片通道进口径向平衡 的改变,对方程(1)中的径向动量方程进行推导及简 化,可以得到无黏形式的完全径向平衡方程

$$\frac{1}{\underline{b\rho}} \frac{\partial(\overline{bp})}{\partial r} = \frac{\overline{v_u}^2}{\underbrace{r}_{\text{CENT_W}}} + \frac{\overline{w_m}^2}{\underbrace{r_m}_{\text{CENT_M}}} \cos \sigma - \underbrace{\overline{w_m}}_{\text{AC_M}} \sin \sigma \frac{D\overline{w_m}}{dm} + P_r + F_{\text{Br}}$$
(3)

式中:等式左边为径向压力梯度(RGP);等式右边分 别为周向速度引发的离心加速度项(CENT_W)、由于 子午流线的曲率而引发的离心加速度的径向分量 (CENT_M)、子午速度变化所引发的加速度的径向分 量(AC_M)、周向脉动源项的径向分量 *P*_r,*P*_r 与 *P*_r 的 区别在于二者的比值为密度,而下面将仍以 *P*_r表示 周向脉动源项的径向分量,并不再重复说明;*F*_{br}为无 黏叶片力的径向分量,由于主要分析周向不均匀性对 叶片通道进口流动平衡的影响,该处 *F*_{br}=0,因此后面 将不给出 *F*_{br} 的分布情况。

1.2 周向不均匀性的应力输运模型

类似雷诺平均后所产生的雷诺应力项,式(1)中 的周向脉动应力项w^w,w^w, 代表着周向不均匀性所带 来的影响,本节将简要介绍周向脉动应力项的应力输 运模型,详细建模过程可参考文献[20]。类比湍流模型 中的应力输运模型,可以推导出对于周向脉动应力项 的应力输运方程,以张量形式表示的无黏形式的应力 输运方程为



式中:方程左侧为对流项(CON);右侧分别为生成项 (PRO)、输运项(TRA)、速度 – 压力关联项(PRE,简称压力项)以及速度 – 源项(V-S)关联项,其中生成 项表征应力输运方程与平均后的轴对称流场之间的 关联,速度 – 压力关联项表征由于压力的脉动性而做 的功,输运项、压力项及速度 – 源项关联项均无法直 接获得,需要进行建模,而在这几项中,压力项为关键 项,其余几项则可忽略,因此下面简要介绍压力项的 建模方法,详细过程可参考文献[20]。

假设速度和压力可沿周向进行傅里叶级数展开, 并保留到1阶,则压力项可进一步推导为

$$\overline{w''_{i}\frac{\partial p}{\partial x_{j}}} = \frac{\partial w_{i}}{\partial \varphi} \frac{\partial^{2} p}{\partial x_{j} \partial \varphi} \frac{\Delta \varphi^{2}}{12} - \frac{\partial w_{i}}{\partial \varphi} \frac{\partial p}{\partial x_{j}} (\varphi_{1} - \varphi_{0}) + \frac{\partial w_{i}}{\partial \varphi} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi_{0}}{\partial x_{j}} (\varphi_{1} - \varphi_{0})$$
(5)

考虑到密度加权平均的定义, φ_0 和 φ_1 之间满足 关系

$$\varphi_1 = \frac{\Delta \varphi^2}{12\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} + \varphi_0 \tag{6}$$

从式中可见,当确定3个速度和压力的周向偏导数后,可解出压力项。进一步引入S2流面无黏形式的 周向动量方程以及绝对坐标系下流动无旋假设,并结 合连续方程和无黏形式下的能量方程,可推导出压力 和3个速度分量的周向偏导数,其形式为

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = -\rho w_{x} \frac{D(v_{u}r)}{Dx}$$
(7)

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial w_{x}}{\partial \varphi} = \frac{\partial w_{u}r}{\partial x} \\ \frac{\partial w_{r}}{\partial \varphi} = \frac{\partial w_{u}r}{\partial r} + 2\omega r = \frac{\partial w_{u}r}{\partial r} \\ \frac{\partial w_{u}}{\partial \varphi} = [\gamma R T (\frac{\partial (r\rho w_{r})}{\partial r} + \frac{\partial (r\rho w_{x})}{\partial x}) \\ \rho w_{u} (w_{x} \frac{\partial w_{x}}{\partial \varphi} + w_{r} \frac{\partial w_{r}}{\partial \varphi})] / [\rho w_{u}^{2} - \gamma R T] \end{vmatrix}$$
(8)

由此可实现对压力项的求解,从而实现应力输运 方程的封闭。另外从式(7)、(8)中可见,引发速度和压 力的周向不均匀性的1个主要因素是环量沿轴向和 径向的偏导数,即负荷的分配情况,而文献[21]中也基 于 S₂流面上周向动量方程分析了周向不均匀性产生 的原因,认为对于定常问题周向不均匀性来源于黏性 力的存在和气流的环量沿流线的导数不为零,而在未 发生大范围分离时,相比黏性力,环量改变所反映的 无黏叶片力是最主要的源项,因此环量改变对周向不 均匀性的产生应起主要作用。

环量的分布特征在设计问题中是给定量,在分析 问题中则主要是源于无黏叶片力的作用,因此该模型 同时适用于设计问题和分析问题。 2 应力输运模型的验证及周向不均匀性的影响分析

2.1 研究对象及计算方法

采用1个前掠20°叶栅作为研究对象,该叶栅基 元的厚度分布采用文献 [22] 中的设计进口马赫数为 0.62 的可控扩散叶型,中弧线采用任意造型的方式获 得。叶栅的基本参数见表1。由于缺乏试验数据作为 验证,本文采用 3D 数值模拟的结果作为基准,并应 用了 NUMECA FINE/Turbo3D 数值模拟软件对各叶 栅算例进行数值模拟研究。通过对某单级跨声速风 扇、某风扇 / 增压级以及某单级离心压气机的数值计 算结果与试验结果的对比校核,NUMECA FINE/Turbo 的计算精度能够满足压气机设计过程中 的流场验算和分析[23]。边界条件的设置为:在计算域 的进口处给定总温、总压以及气流方向,通过改变进 口气流角来获得不同的名义迎角,这里的名义迎角是 指远前方均匀来流气流角与叶片几何进口角的夹角, 后面简称为迎角,给定的名义迎角为0°、±2°和±4°; 采用当地迎角的概念,即叶片通道进口处气流角与叶 片几何进口角的夹角。在出口给定流量以控制进口马 赫数,对于各个迎角,进口马赫数均为0.62;环壁和 叶片表面采用绝热无滑移边界。湍流模型采用 Spalart-Allmaras(S-A)方程模型,网格划分保证固壁

面第1层网格单元y≤ 10。3D数值模拟计算网 ⁻ 格采用 AUTOGRID 模块 ⁻ 自动生成,如图1所示。 对于不同迎角算例,均采 用同一套网格,总网格数 _ 约为162万。

表 1 叶栅基本参数			
参数		数值	
弦长/	mm	100	
进口金属角 /(°)		40	
叶型弯角 /(°)		40	
稠度		2.15	



图 1 3D 数值模拟网格

另外,为分析周向不均匀性的影响,开展了以下 2种类型的周向平均通流计算:

(1)CAM:未考虑周向不均匀性的周向平均通流 计算;

(2)CAM+MODEL:加入了以应力输运模型计算的周向脉动应力项的周向平均通流计算。

周向平均通流模型的计算网格如图 2 所示,总网格数为 3185。通流模型采用基于时间推进的有限体积方法来求解控制方程,时间离散格式为显式格式为Jameson4 步 Runge-Kutta 法。对无黏通量的空间离散采用 Edwards^[24]提出的低耗散通量分裂格式(LDF-SS)。对于边界条件的设置,进出口边界条件与 3D 数值模拟相同,环壁采用对称边界条件。



图 2 通流计算网格

本文主要关注的是周向不均匀性对叶片通道进口流场的影响,此处黏性作用不明显,虽然无黏叶片力在此处为0,但压力势已经会以周向不均匀性的形式造成一定影响,下面将分别从叶片通道进口气流角和径向平衡的角度进行分析。

2.2 周向不均匀性对叶片通道进口流动参数的影响

为考察迎角改变时周向不均匀性对叶片通道进口流场的影响,首先分析在引入周向不均匀性后叶片通道进口气流角的变化,本节将靠近叶片前缘处的气流角与计算域进口气流角做差以便于分析这一变化,结果如图 3 所示。从图 3(a)中可见,对于 20%展高处,随着迎角的增大,3D 和 CAM 预测的差值有一定的增长趋势,而 CAM+MODEL 则呈现出下降趋势,这主要是由于随着迎角增大,P_a的作用增强(图 4(a)),导致周向速度变化更大,但总体来说 CAM+MODEL 所预测的差值 CAM 要更接近 3D 的,在名义迎角从

-4°增大到 4°的过程中,CAM+MODEL 与 CAM 所预 测的气流角差值间的偏差量从约 0.1°增加到了约 0.7°,预测精度提高了 25%以上;对于 50%和 80%展 高处,在加入周向不均匀性的影响后,对气流角的预 测精度同样提高,并且随着名义迎角的增大,3D 和 CAM+MODEL 预测出的 α_{IE}-α_{inlet} 的值均呈现出下降 趋势;与 20%展高处的结果类似,加入周向不均匀性 模型后通流模型对气流角改变量的预测精度也同样 有所提高,提高 50%以上。



图 3 掠叶栅不同展高处 $\alpha_{LE}-\alpha_{inlet}$ 随名义迎角的变化

由于叶片通道进口处无黏叶片力为 0,因此上述 气流角的改变是由于周向不均匀性所诱发的,周向脉 动源项的轴向和周向分量 P_{*}、P_u 会分别影响叶片通道 进口轴向和周向速度,从而造成气流角的改变,并且 随着迎角的增大和负荷的提高,周向不均匀性的影响 也在增大。

由于 P_u 会对环量造成影响,因此对其预测是否 准确很重要。叶栅不同展高截面叶片上游距前缘约 4%弦长处无量纲 P_u 随迎角的变化情况如图 4 所示, 其中 P_u 是由计算域进口对应流动参数进行的无量纲 化。对于 3 个不同展高处,P_u 的分布呈现出相近的特 征,都是随着迎角的增大 P_u 的绝对值增加,说明其作 用将增强。此外,对于不同迎角,应力输运模型计算得 到的 P_u 与 3D 结果的偏差在不同截面都很小,都在 20%以内,说明对于非设计工况,应力输运模型能够 很好地预测周向脉动源项。

在加入应力输运模型后,通流模型的计算时间比 未加入应力输运模型时的约增加40%,这是由于在主 控方程中加入6个微分方程,但计算时间仍远远少于 3D数值模拟。各算法的计算时间见表2。





图 4 周向分量 P_u随名义迎角的变化掠叶栅不同展高处 周向脉动源项

2.3 周向不均匀性对叶	表 2 叶桃	册基本参数
片通道进口流动径向平	方法	计算时间 /min
衡的影响	3D	119.3
上述分析表明 在加	CAM	8.2
上达力切农切, 在加 人国向天均匀姓后 吐臣 。	CAM+MODEL	11.6
八周四小均刁性加,町万 '		

通道进口气流角发生了改变,即当地迎角发生了改变。对于掠叶栅,各展向截面当地迎角的变化会改变叶片负荷沿展向的分布情况,进而改变进口径向流动平衡。为进一步考察名义迎角和当地迎角改变对径向平衡的影响,给出了不同名义迎角下叶栅上游距前缘约4%弦长处径向平衡方程(3)中各项沿展向的分布情况(如图5所示),并以流道进口的流动参数对这些项进行了无量纲化。图中的命名规则以"-2_3D"为例,其中-2表示名义迎角为-2°,3D指3维计算的结果。

对比图 5(a)~(e)中各项,从量上来看,与 RGP 处于同一量级的项为 CENT_M 和 P,, 而 CENT_W 和 AC_M 则要比其余 3 项小 1~2 个量级,表明周向不 均匀性明显影响叶片通道进口径向平衡及径向压





力梯度。

对于 RGP 随名义迎角的变化情况(图 5(a)),对 于 3D 结果,迎角从 -2°~0°增大时,RGP 有所减小,但 并不明显;而从 0°~2°增大时,RGP 的值则明显减小。 这说明名义迎角的增大会使径向压力梯度得到加强, 而 CAM 的结果中 RGP 随着名义迎角的增大则呈现 出相反的趋势,对径向压力梯度变化的描述不足。在 加入周向不均匀性的影响之后,CAM+MODEL 计算 得到的各名义迎角下 RGP 的分布都更接近 3D 结果, 随迎角的变化趋势也要更接近 3D 结果。结合图 5(b) ~(e)可见,在加入周向不均匀性的影响后,RGP 的变 化主要来源于 CENT_M 和 P,,并且 P,对于 RGP 的变 化起主要作用。

对于 CENT_W (图 5 (b)), 3D、CAM+MODEL 和 CAM 之间的偏差反映出周向分速度的变化,即在靠 近叶片通道进口处环量已经由于周向不均匀性的作 用而发生改变。CAM+MODEL 相比 CAM 偏离 3D 更 多,说明加入周向不均匀性模型后通流计算得到的 v₁ 所受到的影响要大于 3D 数值模拟,但从图中横坐标 的数值可见,CAM+MODEL 与 CAM 和 3D 之间的实 际区别并不大。而从趋势上来看,CAM 与 3D 之间确 实存在偏差,而且在加入周向不均匀性模型后, CAM+MODEL 的结果向着 3D 的方向移动,表现出了 一定的一致性, 说明在叶片通道进口 v_u确实会由于 周向不均匀性的作用而发生改变;此外,当迎角从 -2°~2°增大时,CAM 与 3D 之间的偏差增大,反映出 了周向不均匀性的作用在增强,与此同时,CAM与 CAM+MODEL 之间的偏差也随着迎角的变化呈现出 了相似变化,说明加入周向不均匀性模型后通流模型 能够与 3D 数值模拟一样反映出负荷变化对叶片通 道进口流场的影响。

CENT_M(图 5(c))在名义迎角从 -2°~2°增大后, 其值呈现出减小趋势,说明迎角增大后子午流线曲率 增大。而 CAM 对 CENT_M 的预测要高于 3D 的结果, 趋势也相反;在引入周向不均匀性的影响后, CAM+MODEL 所预测的 CENT_M 的精度有所提高, 可达 60%以上,趋势也与 3D 一致,说明加入周向不均 匀性影响后通流模型能够更好地刻画子午流线曲率。

AC_M(图 5(d))在名义迎角发生改变时变化并 不是很明显,其值略有增加。在引入周向不均匀性的 影响后,CAM+MODEL的分布相比 CAM 更接近 3D。 从图 5(e)中可见,随着名义迎角的增大,周向脉动源项的径向分量 P,的绝对值增大,反映出负荷沿展向有增大的趋势。此外,应力输运模型计算得到的 Pr 的分布与 3D 结果基本一致,最大偏差在 50%以内。

综上所述,CAM+MODEL 能够得到与 3D 相接近 的分布,说明应力输运模型在迎角改变的情况下有能 力反映出与 3D 计算相近的周向不均匀性的影响,提 高通流计算的预测精度。同时,加入周向不均匀性后, 通流模型能够更好地反映出掠叶栅在不同迎角下流 场中周向不均匀性的影响。

3 结论

研究表明,周向不均匀性会对叶轮机流场造成影响,因此有必要在通流模型中计入周向不均匀性的影响,以使其更好地计入真实 3D 流动效应,提高设计、分析通流模型的预测精度。为模化并分析迎角改变时掠叶栅进口流动周向不均匀性的影响,本文将1种模化周向平均通流模型中周向脉动应力项的应力输运模型结合到周向平均通流模型中,针对掠叶栅在不同迎角下的结果对比分析了该模型的可行性及周向不均匀性的作用,得出了以下结论:

(1)随着迎角的增大,周向脉动源项的绝对值及 其对叶片通道进口流场的影响都随之提高,在本文算 例中受周向不均匀性的影响叶片通道进口气流角的 改变量可达 0.7°。

(2)在加入周向不均匀性模型后,在迎角改变的 条件下通流计算预测的进口气流角均更接近 3D 结 果,对叶片通道进口气流角的改变量的预测精度普遍 提升 30%以上,对叶片通道进口流动径向平衡的描 述精度提高 60%以上。引入周向不均匀性有助于提 升通流分析软件对采用掠设计的压气机流场的计算 精度。

(3)对于处于不同迎角下的叶栅流场,该应力输运模型都能较好的预测出周向脉动源项,在前缘前模型预测结果与 3D 结果的相对偏差普遍在 20%之内,最大不超过 50%。

(4)由于应力输运模型在主控方程中增加了6个 微分方程,因此对通流模型的计算时间影响较大,加 入该模型后计算时间在原通流模型的基础上增加了 约40%,但仍远远少于3D数值模拟所用时间。该模 型将周向不均匀性与环量分布关联,可以为设计或分

析问题提供周向脉动应力项的预测。

参考文献:

- JIN Hailiang, JIN Donghai, LI Xiaojuan, et al. A time-marching throughflow model and its application in transonic axial compressor [J]. Journal of Thermal Science, 2010, 19(6):519–525.
- [2] Denton J D, Dawes W N. Computational fluid dynamics for turbomachinery design [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1998, 213 (C2):107-124.
- [3] Smith L H. The radialequilibrium equation of turbomachinery [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1966, 88(1):1.
- [4] Denton J D, Horlock J H. A review of some early design practice using computational fluid dynamics and a current perspective [J]. Journal of Turbomachinery, 2005,127(1):5–13.
- [5] Spurr A. The prediction of 3D transonic flow in turbomachinery using a combined throughflow and blade-to-blade time marching method [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1980, 2(4):189-199.
- [6] Fay G, Lawerenz M, Przewozny H. Calculation of pitch averaged viscous flow in annular compressor cascade[R]. Computational Methods in Experimental Measurements IX, 1999, 22:185–194.
- [7] Simon J F, Leonard O. Modeling of 3D Losses and deviations in a throughflow analysis tool [J]. Journal of Thermal Science, 2007, 16(3): 208–214.
- [8] Simon J F,Thomas J P,Leonard O. On the role of the deterministic and circumferential stresses in throughflow calculations [J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(3):2085–2099.
- [9] Baralon S, Eriksson L E, Hall U. Validation of a throughflow time-marching finite-volume solver for transonic compressors [R]. ASME 98-GT-74.
- [10] Baralon S, Erikson L E, Hall U. Evaluation of high–order terms in the throughflow approximation using 3D Navier–Stokes computations of a transonic compressor rotor [R]. ASME 99–GT–74.
- [11] Simon J F. Contribution to throughflow modelling for axial flow turbomachines [D]. Liège: University of Liège, 2007.
- [12] Jennious I K, Stow P. A quasi-three-dimensional turbomachinery blade design system:part I – throughflow analysis [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1985, 107(2):301–307.
- [13] Jennious I K,Stow P. A quasi-three-dimensional turbomachinery blade design system: part II – computerised system [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1985, 107(2):308-314.
- [14] GUI Xingmin, ZHU Fang, WAN Ke, et al. Effects of inlet circumfer-

ential fluctuation on the sweep aerodynamic performance of axial fans/compressors [J]. Journal of Thermal Science, 2013, 22 (5): 383–394.

- [15] WU Chunghua, Brown C A. A theory of the direct and inverse problems of compressible flow past cascade of arbitrary airfoils [J]. J.A.S., Mar. 1952, 19(3): 183–196.
- [16] 蔡睿贤. 解轴对称环形流道位流的中心流线法——中心流线法的 某些发展[J]. 机械工程学报,1979,15(2):53-64.
 CAI Ruixian. Mean stream line method for solving potential flow in axisymmetric annular passages - some development of mean stream line method [J]. Journal of Mechanical Engineering,1979,15(2):
- [17] 龚一方, 蔡睿贤. 三元中心流线法 [J]. 工程热物理学报, 1990, 11 (4): 393-395.

53-64. (in Chinese)

Gong Yifang, CAI Ruixian. 3D Mean-Stream-Line method [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1990, 11(4):393-395.(in Chinese)

- [18] Thomas J P,Simon J F,Léonard O. Investigating circumferential non-uniformities in throughflow calculations using a harmonic reconstruction[R]. ASME. 2008–GT–50328.
- [19] Thomas J P, Léonard O. Toward a high order throughflow: part II investigation of the nonlinear harmonic method coupled with an immersed boundary method for the modeling of the circumferential stresses[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(1): 112-121.
- [20] Tang M, Jin D, Gui X. Modeling and numerical investigation of the inlet circumferential fluctuations of swept and bowed blades[J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(1):1-10.
- [21] 李根深,陈乃兴,强国芳.船用燃气轮机轴流式叶轮机械气动热 力学(原理设计与试验研究)[M].北京:国防工业出版社,1980: 102-103.

LI Genshen, CHEN Naixing, QIANG Guofang. Marine gas turbine axial flow turbomachinery aerodynamics (theory, design and experimental study) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980: 102-103. (in Chinese)

- [22] Steinert W, Eisenberg B, Starken H. Design and testing of a controlled diffusion airfoil cascade for industrial axial flow compressor application[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(4):583–590.
- [23] 冀国锋. 轴流 / 离心压气机通用叶片造型设计系统及应用 [D]. 北京:北京航空航天大学,2009.
 JI Guofeng. A general blading design system and its application for axial/centrifugal compressor [D]. Beijing; Beihang University,2009
- [24] Edwards J R. A low-diffusion flux-splitting scheme for Navier-Stokes calculations [J]. Computers and Fluids, 1997,26(6):635-659.

(编辑:刘 静)