

应用新型紊流模型 对压气机叶栅通道紊流流场进行数值研究

北京航空航天大学 李 玲* 陆亚钧

【摘要】 采用 3 种紊流模型来封闭 N-S 方程,它们分别是标准的 K-ε 两方程模型;发展的隐式 K-ε 两方程模型和基于 RNG 方法的紊流模型。与标准的 K-ε 两方程模型相比,发展的 K-ε 两方程模型通过在紊流耗散率方程中增加一项,来说明若干时间尺度,以提高对壁面附近流动的预测能力;基于 RNG 方法的紊流模型在紊流耗散率方程中增加一项 R,能较好地体现大剪切率所产生的强烈的各向异性效应及非平衡效应。应用 3 种紊流模型对三维压气机叶栅通道紊流流动进行数值分析,并与实验数据比较,结果表明,采用后两种紊流模型计算得到的值与实验数据更接近。

主题词: 紊流 粘性流动 数值模拟 压气机
分类号: V231.3

1 控制方程

对全三维定常不可压 N-S 方程进行无量纲化,得:

$$\partial(\rho u_i \overline{\varphi}) / \partial x_i = (1/Re)(\partial/\partial x_i)[\mu^{\varphi}(\partial \varphi / \partial x_i)] + S^{\varphi}$$

其中: $\mu = \mu_t + \mu_l$, S 为源项。

紊流模型:

(1) 标准的 K-ε 两方程紊流模型^[1]无量纲化后的形式为:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial K}{\partial x} + \rho v \frac{\partial K}{\partial y} + \rho w \frac{\partial K}{\partial z} &= \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_K \mu_t \frac{\partial K}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_K \mu_t \frac{\partial K}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha_K \mu_t \frac{\partial K}{\partial z} \right) \right] + G - \rho \epsilon \\ \rho u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \epsilon}{\partial z} &= \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_{\epsilon} \mu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_{\epsilon} \mu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha_{\epsilon} \mu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \right] + C_1 G \frac{\epsilon}{K} - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{K} \end{aligned}$$

紊流动能的生成项:

$$G = \frac{\mu_t}{Re} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

紊流粘性系数: $\mu_t = \rho C_{\mu} K^2 Re / \epsilon$

紊流模型常数: $C_{\mu} = 0.09, \alpha_K = 1.0, \alpha_{\epsilon} = 0.769, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$

(2) 发展的 K-ε 两方程紊流模型^[2,3]

在紊流耗散 ε 方程中多加一项: $C_3 G(\epsilon/K)Q$ 。其中 $Q = \min(3, G/\rho\epsilon)$, 紊流模型常数不变, C_3 取 0.25。

(3) 基于 RNG 方法的紊流模型

与标准的 $K-\epsilon$ 模型的主要区别是: (1) 其方程中的常数并非用经验方法确定, 而是利用 RNG 理论推导出的精确值。各常数取值为: $C_1=1.42$, $C_2=1.68$, $\alpha=1.39$ 。(2) ϵ 方程中有一附加项 R , 代表着平均应变率对 ϵ 的影响。

$$R = \{[C_\mu \eta^3 (1 - \eta \eta_0)] / (1 + \beta \eta^3)\} (\epsilon^2 / K)$$

式中: $\eta = (G/\mu) K / \epsilon$ 是无量纲应变或平均流时间尺度与紊流时间尺度之比, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.015$, $C_\mu = 0.0845$, $\mu = \rho [1 + (C_\mu / \epsilon) Re K]^2$ 。在低雷诺数区域, 如壁面附近, RNG 模型不需要象通常的高雷诺数紊流那样求助壁面函数。紊流粘性系数公式适应于全部雷诺数范围。

2 数值计算和结果分析

在数值离散方面, 采用了在非交错网格上的 SIMPLE 算法, 并解决了压力振荡问题。边界条件: 进口处给定进口边界上所有的流动参数分布, $K_{in} = 0.03 U_{in}^2$, $\epsilon_{in} = K_{in}^{1.55} / L$, 固壁处采用无滑移边界条件, 采用标准紊流模型和发展了的紊流模型在靠近壁面处应用壁面函数加以处理, 出口边界处所有参数均按导数条件给出。周期边界采用周期性边界条件。

分别采用上面描述的 3 种紊流模型对 NGTE 10C4/30C50^[4] 叶栅进行计算。叶型安装角为 -15° , 展弦比 1.0, 流动雷诺数为 400000。几何形状与测量点位置如图 1。图 2 为叶中截面的压力系数 C_p 沿着叶片弦长的分布。用 3 种紊流模型计算得到的 C_p 值与实验值吻合得很好, 但采用发展的 $K-\epsilon$ 模型和 RNG 紊流模型对壁面附近的预测精度更高些。标准的 $K-\epsilon$ 模型的计算结果低于实验点较多, 误差由叶片的前缘到尾缘最大值为 20%。

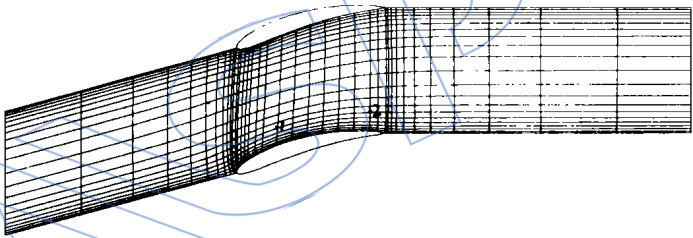


图 1 计算网格与测量点位置

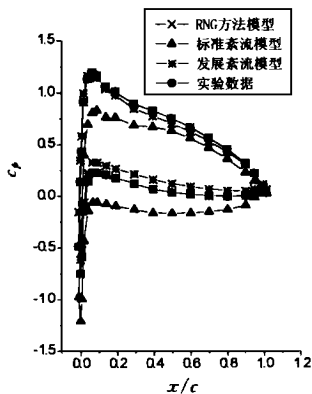


图 2 压力系数分布

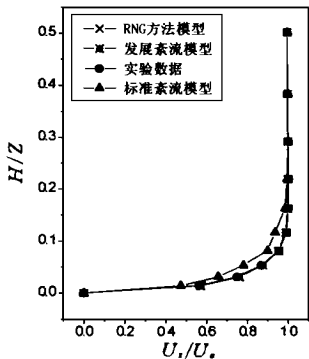


图 3 在测点 1 处轴向速度分布图

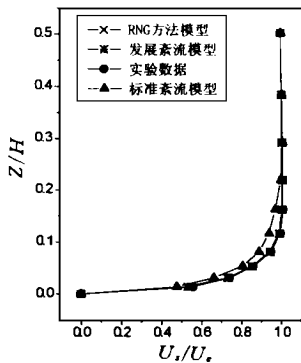


图 4 在测点 2 处轴向速度分布图

图 3 为在 44% 弦长测点 1 处的主流速度分布图, 图 4 为在 88% 弦长测点 2 处的轴向速度分布图, 从两图中可以看到在远离壁面处, 利用 3 种紊流模型计算得到的值与实验值相差无

几,只是在近壁区,虽然借助于壁面函数,标准的 $K-\epsilon$ 模型的计算结果与实验值仍有差别,最大误差到达 15%,说明标准 $K-\epsilon$ 模型不具备预测壁面流动的能力。而采用发展的 $K-\epsilon$ 模型和 RNG 紊流模型计算得到的结果与实验值吻合得很好。

图 5 为在 44%弦长测点 1 处的周向速度分布图,图 6 为在 88%弦长测点 2 处的周向速度分布图。从两图中可以看到发展的 $K-\epsilon$ 模型和 RNG 紊流模型较之标准 $K-\epsilon$ 模型更好地预测了端壁附面层的迂回的流动,而且转折点的峰值计算得很准确,这进一步说明了发展的 $K-\epsilon$ 模型和 RNG 紊流模型对近壁区的流动有很好的预测能力,而且对高雷诺数区的流动模拟得很准确。而采用标准的 $K-\epsilon$ 模型计算所得结果表明二次流不明显,转折点的峰值偏小,误差达到 20%,端壁区复杂的流动现象没有准确地模拟出来。

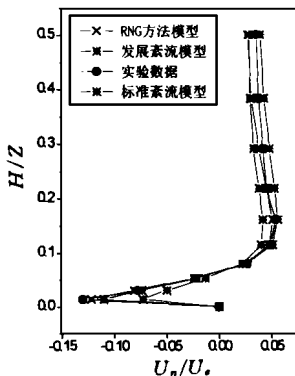


图 5 在测点 1 处周向速度分布图

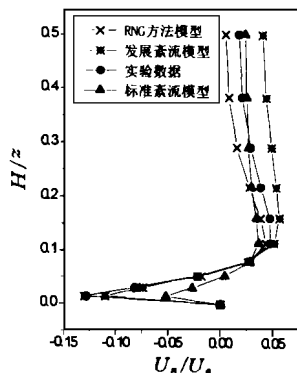


图 6 在测点 2 处周向速度分布图

3 结 论

(1) 本文分别用标准的 $K-\epsilon$ 模型,发展的 $K-\epsilon$ 模型和 RNG 紊流模型对三维压气机叶栅通道紊流场进行数值分析,结果表明,采用后两种紊流模型对端壁区流动的预估有很大改进,而且与实验值吻合得很好。(2) 发展的 $K-\epsilon$ 模型和 RNG 紊流模型既能够很准确地预测近壁区的流动情况,又能兼顾高雷诺数区域的流动,因此特别适用于风扇和压气机的三维流动计算。(3) RNG 紊流模型中不包含任何经验常数和可调节的参数,其模型常数是利用 RNG 理论精确地推导出来的,因而是通用的,不需要针对特定的问题进行调整和修正。(4) RNG 紊流模型适用于各种雷诺数范围,它可以考虑固壁和界面的影响而无须求助于壁面函数。

参 考 文 献

- 1 Launder B E, Spalding D B. The Numerical Calculation of Turbulent Flow. Comput. Methods in Applied Mech and Eng., 1974, 4(1): 269- 289
- 2 Chen Y S, Kim S W. Computation of Turbulent Flows Using an Extended $K-\epsilon$ Turbulent Closure Model. NASA - CR-179204, 1987
- 3 Tuber M G, Jennions I K. An Investigation of Turbulent Modelling in Transonic Fan Including a Novel Implementation of an Implicit $K-\epsilon$ Turbulence Model. ASME 92- GT- 308
- 4 Flot R, Papailiou K. Couches Limites et Effects D'Extremities Dans Les Turbomachines. Metraflu, Contract, D. R. M. E. 73/ 373, 1975

(责任编辑 魏星禄)

TECHNICAL NOTES

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW FIELD IN AN AIR PARTICLE SEPARATOR

Lin Guohua and Yuan Xiugan

(5th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

A general differential equation in oblique curvilinear coordinates has been established according to the tensor analysis and has been used to simulate the 3-D flowfield in a particle separator. Computational grid are set up with the body-fitted coordinates and a $k-\epsilon$ turbulence model is adopted in computation. Special fluid phenomena in a helicoidal pipe have been simulated. The particle trajectory model has also been established and has been used to analyze the performance of the vortex tube. The results are in good agreement with the experiment.

Key Words Particles separation Three dimensional flow Numerical simulation

NUMERICAL ANALYSIS OF COMPRESSOR CASCADE FLOW WITH NOVEL TURBULENCE MODELS

Li Ling and Lu Yajun

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

An explicit N-S solver has been written at the option of one of three turbulence models: Standard K- ϵ model is an implicit K- ϵ model coupled with the explicit N-S solver in a novel way which takes account of multiple time scales by adding an extra term to the dissipation equation, and turbulence model based on RNG method which takes account of unbalance effect by adding an extra term to the dissipation equation. The code has been applied to numerical analysis of the flow in the compressor cascade. Three solutions obtained with the three correspondent turbulence models are compared with the experimental results by Flot, R and Papalio, K. It is shown that the results with later two turbulence models become closer to the experimental results.

Key Words Turbulence Viscous flow Numerical simulation Compressor

A CALCULATION OF CROSS-SECTIONAL STIFFNESS OF COMPOSITE HELICOPTER BLADE

Xiang Jinwu and Zhang Xiaogu

(5th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

An approach is presented for calculation of composite helicopter