使用 GAO-YONG 湍流方程组对扩压器流动的计算

任 鑫 高 歌

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 采用基于同位网格的 SIMPLE 方法求解 GAO-YONG 不可压湍流方程组, 对二维扩压器流动进行了数值模拟. 通过界面速度动量插值法解决了压力锯齿波问题, 并且采用了正交贴体网格和二阶 QUICK 格式离散对流项以提高计算精度. 与实验结果以及 BL(Baldw-Lomax) 模型计算结果的比较表明, 不需要任何经验系数及壁面函数的 GAO-YONG 不可压湍流模型方程组能够对有压力梯度的湍流流动做出很好的预测. 计算发现, 在机械能方程中引入平均流压力梯度的作用, 对 GAO-YONG 湍流方程组正确模拟逆压力梯度流动起到了关键作用.

关 键 词: 数值模拟; 湍流; GAO-YONG 湍流方程组; 扩压器

中图分类号: O 357.5

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2006)01-0036-04

Calculation of diffuser flow using GAO-YONG turbulence equations

Ren Xin Gao Ge

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A two-dimensional incompressible diffuser flow was numerically simulated employing no staggered grid arrangement and incompressible SIMPLE method to solve GAO-YONG turbulence equations. The problem of checkerboard prediction of pressure was cured by evaluating the cell face velocities by the momentum interpolated principle. In order to improve the calculation precision, an orthogonal body fitted coordinate system was selected and a second-order QUICK discretization for the convective part was used. The calculation results such as velocity profiles and friction coefficients are finely close to the experimental data and better than the results of BL(Baldw-Lomax) model. It shows the GAO-YONG turbulence equations can predict the real turbulent flow with pressure gradient well without using empirical coefficients and wall functions. The calculation proves that it is important to the GAO-YONG turbulence equations for simulating adverse pressure gradient flow to introduce the effect of mean pressure gradient into energy equation which describes the characteristic length scale of the turbulent flow.

Key words: numerical simulation; turbulence; GAO-YONG turbulence equations; diffuser

GAO-YONG 湍流方程组是基于侧偏平均方法获得的理性湍流方程, 其中不含任何经验系数, 也不使用壁面函数等经验处理, 对各种复杂的流动有很强的适应能力. 此方程组自 1999 年问世以来成功模拟了后台阶流动[1]; 解决了湍流微分方程模型而言的圆射流/平面射流异常现象[2]; 完成了不可压平板边界层自然转捩的模拟及近壁区和远壁区的统一计算[3]. 通过各种算例的验算, GAO-YONG 湍流方程组得到了进一步改进和完善, 正向实际工程应用迈进. 对于二维不可压流动, 翼型大攻角分离点的捕捉是至今数值模拟都没有很好解决的问题, 而这又是工程上极具研究价值和急待解决的问题. 本文使用 GAO-YONG 湍流方程组对扩压器的计算正是为了下一步模拟翼型大攻角分离这一流体力学难题打下基础. 对 A. Samuel 和 P. Joubert 给出的扩压器实验[4], GAO-YONG 湍流方程组计算得到的扩压器出口段二处速度型和实验结果吻合得很好. 此外还与实验结果比较了扩压器下壁面的摩阻系数的分布, 数值计算结果和实验结果有很好的一致性. 这说明 GAO-YONG

收稿日期: 2004-10-20

作者简介: 任 鑫(1979-), 男, 辽宁大连人, 博士生, renxin960@sohu.com.

湍流方程组能够成功地模拟有逆压梯度的流场.

1　控制方程和数值方法

GAO-YONG 不可压湍流方程组的推导详见文献[1]. 下面直接给出 GAO-YONG 不可压湍流方程组的平均流连续方程、平均流动量方程、以及漂移流连续方程、漂移流动量方程和联系平均流与漂移流之间能量传递关系的机械能方程(平均量省去上标, 漂移量有波浪上标):

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_j}\delta_{ij} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^{T}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i\tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial u_i\tilde{u}_j}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_j}\delta_{ij} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tilde{\sigma}_{ij} + \tilde{\sigma}_{ij}^{T} - \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{T}\right) \tag{4}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\left[\left(l_j\frac{\partial}{\partial x_j}\right)^n u_i\right]\cdot\tilde{u}_i}{n!} = l_i\left[-\frac{\partial u_i\tilde{u}_j}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_j}\delta_{ij} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tilde{\sigma}_{ij} + \tilde{\sigma}_{ij}^{T} - \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{T}\right) - \frac{\mathrm{D}u_i}{\mathrm{D}t}\right] \tag{5}$$

机械能方程是 GAO-YONG 湍流方程组赖以封闭的关键, 方程本身表征了湍流平均流到漂移流的能量耗散过程, 其求出的漂移位矢 $\boldsymbol{l}$ 是构成正交各向异性涡粘系数的基本量; 另外湍流应力在平均流中是耗散项, 在漂移流中是生成项, 由此可见漂移位矢起到了联系平均流到漂移流纽带的作用. 漂移位矢实质上对应了湍流的旋涡尺度, 在有压力梯度作用的湍流场, 漂移位矢应该能够反映出压力梯度对湍流的旋涡尺度分布的影响, 而机械能方程(5)中却没有显式的压力梯度项. 已往的数值计算发现机械能方程右端是否记入 $-\mathrm{D}u/\mathrm{D}t\cdot\boldsymbol{l}$ 项对计算结果影响很大. 进一步分析可见在机械能方程中记入 $-\mathrm{D}u/\mathrm{D}t\cdot\boldsymbol{l}$ 其实隐含了压力梯度项的影响, 由平均流的动量方程(2)可得

$$\mathrm{D}u/\mathrm{D}t\cdot\boldsymbol{l} = \left[\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_j}\delta_{ij} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^{T})\right] l_i$$

本文将对机械能方程中 $-\mathrm{D}u/\mathrm{D}t\cdot\boldsymbol{l}$ 是否包含了压力梯度项的影响, 分别计算研究. 此外, 机械能方程的左端级数项对应不同阶数的能量方程, 一阶能量方程构成大涡模拟模型, 高阶能量方程构成统计平均方程[1]. 扩压器流动的计算采用了二阶能量方程.

扩压器长 3.5 m, 入口高 0.412 m, 出口高 0.627 m. 来流 Re 数为 $1.14\times10^{6}\ \mathrm{m}^{-1}$. 本文采用无量纲化方程, 计算方法采用同位网格, SIMPLE 方法, 采用界面速度动量插值法解决了压力锯齿波问题[5], 对流项离散采用二阶 QUICK 格式, 粘性项离散采用中心差分, 尽量避免数值粘性的污染. 计算网格为正交贴体网格, 并在近壁区域加密, 网格数为 70 × 80. 入口近似均匀来流条件, 出口速度边界条件为齐次 Neumann 条件, 并采用总体质量守恒修正[6].

2　计算结果

由于 A. Samuel 和 P. Joubert 给出的扩压器实验在全场并无分离, 因此本文亦采用了 BL 模型计算, 以同 GAO-YONG 湍流方程组比较.

图 1 是 GAO-YONG 湍流方程组计算的全场压力分布. 对于不可压流动得到的是压力的相对值, 从结果看, 压力由入口处的 −0.255671 上升到出口的 −0.015592, 压力等值线光滑过渡, 很好地模拟了扩压器的扩压过程.

实验给出的检验要求是扩压器下壁面接近出口位置的 2 处速度型, 以及沿扩压器下壁面的摩阻系数分布. 图 2、图 3 分别是扩压器下壁面距离入口 2.87 m 和 3.4 m 处的 u 速度型, 在图 1 无量

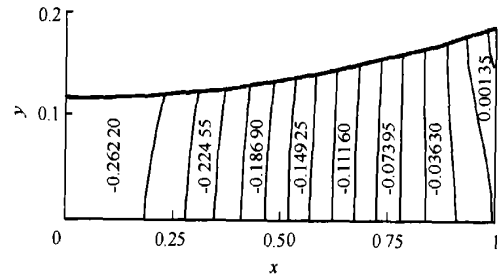


图 1　GAO-YONG 湍流方程组计算的全场压力分布

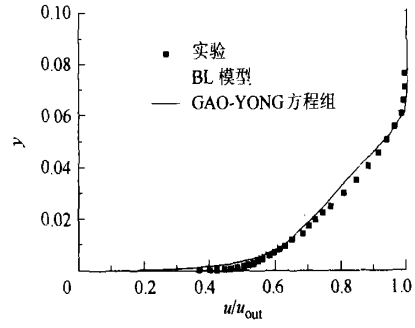


图 2　x = 0.82 位置扩压器下壁面的速度型

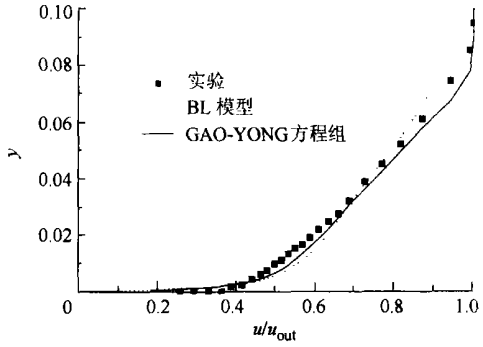


图3 $x=0.97$ 位置扩压器下壁面的速度型

纲区域上的位置分别在 $x=0.82$ 和 $x=0.97$ 处. 图2、图3中, 横坐标是无量纲速度, 其中 u_{out} 是实验测量点的最后一个速度; 纵坐标是距离下壁面的实际尺寸. 这2个空间位置距离仅0.53m, 速度型却从一个饱满的形状很快过渡到在逆压力作用下有一定亏损的形状, 这明显反映了在临界分离的扩压器内, 压力梯度对速度型的影响. GAO-YONG 湍流模型对这两个速度型的计算结果与实验值符合的很好, 而 BL 模型却稍有差别.

图4是沿扩压器下壁面的摩阻系数计算值与实验值的比较. GAO-YONG 湍流方程组计算出的摩阻系数是在实验曲线上下不规则振荡. 这是由于 GAO-YONG 湍流方程组给出离散的粘性系数分布造成的[1]. 虽然BL模型能够给出光滑的摩阻系数分布, 但是和实验的符合程度却没有 GAO-YONG 湍流方程组的结果好.

这2种模型的计算结果在扩压器的入口段与实验值有着相同趋势的差别, 而且差别较大. 入口段的这个差别源于入口来流条件, 实验条件下未给出入口边界层速度型, 但是计算中如按入口近似均匀来流计算会导致入口段的近壁面区域内的速度梯度计算过大, 这样进一步导致湍流方程组在这个区域内模拟的湍流粘性发生奇异, 综合作用导致入口段摩阻系数偏大. 针对此问题, 对 GAO-YONG 湍流方程组的漂移流入口条件做了改进. 取入口段中摩阻系数与实验值一致的某一位置处的漂移速度和湍流粘性系数值作为漂移流的

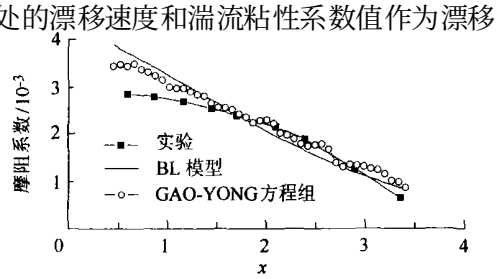


图4 扩压器下壁面摩阻系数分布

入口条件来计算, 得到图5的结果, 在入口段有一定的改善. 同时 0.82 和 0.97 位置处的速度型也与实验值符合的很好. 其实此算例的入口湍流强度可不计, 所以不给漂移流入口能够计算出 0.82 和0.97 处的速度型和下壁面摩阻系数; 而给定了漂移流的入口条件仅仅只是削弱了进口段湍流粘性的偏差, 对扩压器后面部分的计算影响很小. 这是因为一方面湍流粘性有明显的输运特性, 另一方面它的局部耗散特性更起主要作用.

GAO-YONG 湍流方程组在机械能方程中包含了压力梯度项的影响, 压力梯度的大小变化改变了漂移位矢的分布, 进而反映在湍流粘性中. 然而压力梯度是否产生了作用, 本文做了考察. 图6、图7是机械能方程没有计入压力梯度计算得到的速度型. 一个明显的特征是速度型曲线在 u/u_{out}

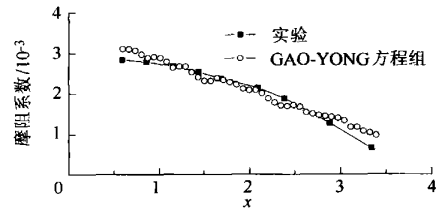


图5 给漂移流入口条件后的扩压器下壁面摩阻系数分布

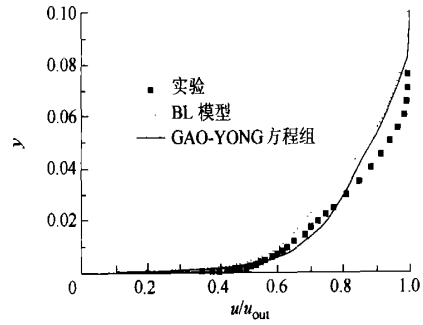


图6 机械能方程中没有计入压力梯度影响时 $x=0.82$ 位置处扩压器下壁面速度型

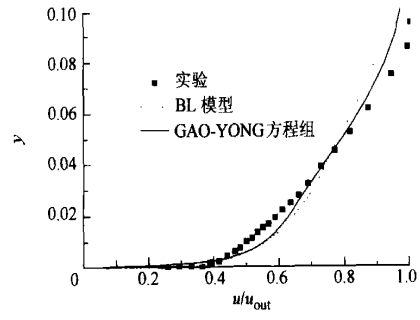


图7 机械能方程中没有计入压力梯度影响时 $x=0.97$ 位置处扩压器下壁面速度型

接近 1 时的拐点位置没能算准, 其结果同没有压力修正的 BL 模型的结果很接近. 可见压力的影响在机械能方程中确有体现. 而图 8 是不计压力影响的摩阻系数分布, 改变并不是很大.

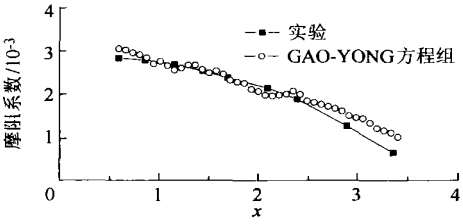


图 8　机械能方程中没有计入压力梯度影响时摩阻系数分布

3　结　论

1) 对 A. Samuel 和 P. Joubert 给出的扩压器实验, GAO-YONG 湍流方程组计算得到的速度型, 壁面摩阻系数分布与实验值符合得很好, 说明 GAO-YONG 湍流方程组能够模拟有压力梯的湍流流动;

2) 本文考察了机械能方程中压力梯度项对湍流模拟的影响, 证实了 GAO-YONG 湍流方程组是通过机械能方程来反映压力梯度的影响的;

3) GAO-YONG 湍流方程组虽然对 A. Samuel 和 P. Joubert 给出的扩压器计算得到很好的结果, 但是毕竟此扩压器的流场相对简单, 扩压程度不大, 也没有分离发生, 所以 GAO-YONG 湍流方程组在有强逆压梯度和分离流中的发展还需做进一步的研究工作.

参考文献 (**References**)

[1] Gao Ge, Yong Yan. Partial-average based equations of incompressible turbulent flow [J]. International Journal of Norr-Linear Mecharrics, 2004, 39: 1407~ 1419

[2] 李维冰, 高　歌. 解决湍流圆/平射流异常现象的数值研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(3): 262~ 266
Li Weibing, Gao Ge. The solution of round-jet/plane-jet anomaly using GAO-YONG incompressible turbulence equations [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 262~ 266(in Chinese)

[3] 陈广业, 高　歌, 尹幸愉. 使用 GAO-YONG 方程组对不可压转捩/湍流平板边界层的计算[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 2~ 7
Chen Guangye, Gao Ge, Yin Xingyu. The calculation of incorrpressible wall boundary layer using GAO-YONG turbulence equations [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 2~ 7(in Chinese)

[4] Samuel A E, Joubert P N. A boundary-layer developing in an increasingly adverse pressure gradient[J]. J Fluids Mechs, 1974, 66: 481~ 505

[5] CHAE-MYUNG RHIE. A numerical study of the flow past an isolated airfoil with separation[D]. Urbanar-Champaign: University of Illinois, 1981

[6] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2000
Tao Wenquan. Advances in numerical heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese)

(上接第 **21** 页)

2) 该方法省去了结构数学建模过程, 只需建立结构的有限元模型, 有限元模型更接近真实结构, 结构响应分析更精确, 据此进行的控制设计与仿真也更准确;

3) 有限元法及其分析软件的普遍使用为该方法的使用奠定了基础;

4) 经过适当开发可将结构设计、优化、分析、振动控制设计与仿真结合在一起, 并在同一环境中一次完成, 真正实现结构-控制一体化设计.

参考文献 (**References**)

[1] Mercedes C Reaves, Lucas G Horta. Test cases for modeling and validation of structures with piezoelectric actuators[R]. AIAA-2001-1466, 2001

[2] MSC/NASTRAN for windows reference manual[M]. Los Angeles: The MacNeal-Schwendler Corporation, 2000

[3] 周　舟, 任革学, 周玉勋. 分布传感/执行器智能梁的振动控制及 APDL 仿真[J]. 压电与声光, 2001, 23(6): 494~ 495
Zhou Zhou, Ren Gexue, Zhou Yuxun. Vibration control of the smart beam with distributed sensor/actuator and APDL simulation[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23(6): 494~ 495(in Chinese)

[4] PCL library[M]. Los Angeles: The MacNeal-Schwendler Corporation, 2000

[5] 李俊宝, 葛建明, 扬庆佛. 智能桁架结构机电有限元分析与实验研究[J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(6): 577~ 584
Li Junbao, Ge Jianming, Yang Qingfo. Electromechanical coupled finite element analysis and experimental study on intelligent truss structure [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1998, 29(6): 577~ 584(in Chinese)

[6] 赵国伟, 黄　海, 夏人伟. 柔性自适应桁架及其振动最优控制实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(4): 434~ 438
Zhao Guowei, Huang Hai, Xia Renwei. Experimental research on active control of adaptive structures vibration[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(4): 434~ 438 (in Chinese)