

文章编号:1000-8055(2009)10-2319-07

三维分块非结构化网格上的可压缩流计算方法

王宝潼, 张楚华, 席 光

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘 要: 提出了分块非结构化网格生成方法,通过子块划分、子块网格划分、整体网格拓扑连接生成可局部加密的分块非结构化网格,既具备了非结构化网格对复杂区域的处理能力,又避免了分块结构化网格块间信息传递的复杂计算过程。通过将密度修正值引入压力修正方程,发展了非结构化网格上可压缩流动的SIMPLE算法。对孤立翼型及透平叶栅的流动进行了数值计算,压力系数、速度、折转角的数值结果与已有的实验值吻合较好,验证了数值方法的精度。

关 键 词: 分块非结构化网格; 可压缩流动; SIMPLE 算法; 孤立翼型; 透平叶栅

中图分类号: O354.1

文献标识码: A

Numerical method of compressible flow on three-dimensional sub-block unstructured grid

WANG Bao-tong, ZHANG Chu-hua, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A numerical method for calculation of internal flow in turbomachinery was developed. Firstly, the sub-block unstructured grid generation method was proposed. The complex multiple-connected flow domain was divided into several simple single-connected sub-blocks, and then each sub-block was discretized into body-fitting meshes, finally, each sub-block grid was united to form a whole grid, whose topological connection information was saved by unstructured grid manner. The sub-block unstructured grid not only has the advantage of unstructured grid in dealing with the complex domain, but also avoids the disadvantage of multi-block grid in treating the complicated flow field variable transfer on the interface between sub-blocks. Secondly, a three-dimensional compressible semi-implicit method for pressure linked equation (SIMPLE) algorithm on sub-block unstructured grid was developed by introducing the density correction term in the pressure correction equation. Finally, the proposed methods were used to numerically solve the flow fields around an isolated airfoil and in a turbine cascade. The accuracy of the method was validated by the good agreement between the numerical results and the experimental data. This work is of theoretical significance and applicable value to develop the numerical method for solving the complicated internal flow in turbomachinery.

Key words: sub-block unstructured grid; compressible flow;

semi-implicit method for pressure linked equation (SIMPLE) algorithm;

isolated airfoil; turbine cascade

收稿日期: 2008-10-07; **修订日期:** 2009-03-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(20060105Z2041, 2007AA05Z203); 国家自然科学基金(10572113);

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0847)

作者简介: 王宝潼(1982-),男,陕西潼关人,博士生,主要研究叶轮机械内流动数值方法。

随着上世纪90年代计算机硬件技术的提高和计算方法的发展,基于计算流体动力学(computational fluid dynamics,简称CFD)的流动数值模拟方法已成为目前研究流动问题的重要手段之一.叶轮机械作为应用于国民经济各行各业中的重大装备,其运行经济性对于能源节约及经济发展有着重要的意义,高性能叶轮机械的设计方法在很大程度上依赖于人们对其内部三维、非定常、可压缩、湍流流动的认识水平,因此建立起一套对叶轮机械内部流动进行精确预测的流场求解方法具有重要的学术意义及工程应用价值.

网格生成是流场计算的重要前处理部分.早期采用的结构化网格具有节点编号、定位、拓扑连接关系简单明了等优点,但对于复杂区域的适应性较弱;上世纪90年代发展的非结构化网格方法、多块网格方法有效地克服了有限体积法处理复杂流动区域的局限性,极大地拓宽了CFD方法的求解范围.叶轮机械内部流动覆盖了从不可压缩流动到亚声速、跨声速、超声速等宽广范围的流动,其数值求解方法主要分以密度为基本求解变量的时间推进法、以压力为基本求解变量的压力修正法,前者在求解可压缩流动,而后者在求解不可压缩流动方面各具优势.拓展这两种方法的适用范围是计算流体力学领域内的重要研究课题. SIMPL E(semi-implicit method for pressure linked equation)算法^[1-5]是最有代表性的以压力修正为基础的流场求解方法,自产生以来获得了广泛的应用,成为计算不可压缩流场的主要方法.文献[6-7]利用阵面推进法生成非结构化网格,建立了一种同位非结构化网格上的SIMPL E算法,并对二维孤立翼型绕流和三维离心风机内不可压缩流动进行了数值研究.文献[8]将这种方法与结构振动方程求解方法相结合,发展了一种任意非结构化运动网格上的流动求解方法,对三维非定常流动及流体诱发振动进行了数值研究,获得了与实验值符合较好的数值结果.本文在文献[6-8]的工作基础上,提出一种适用于叶轮机械内流场分析的分块非结构化网格生成方法,并通过将密度修正值引入压力修正方程,将已有方法扩展到可压缩流场求解领域.

1 分块非结构化网格生成方法

1.1 分块非结构化网格

分块非结构化网格生成方法主要包括如下3个步骤:

1) 子块划分:按照子区域的几何形状规则、简单为原则,将整个流动区域细分为一系列互不重叠的子区域.例如图1中透平叶栅的流动区域划分为8个子块.

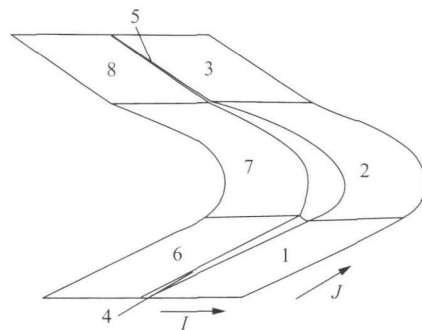


图1 透平叶栅流动区域子块划分

Fig. 1 Sub-blocks of flow domain for turbine cascade

2) 子块网格划分:对每一个子块,采用代数方法、保角变换方法、求解微分方程方法等生成贴体网格,并在流场参数变化剧烈的区域进行局部网格加密.

3) 整体网格生成:利用非结构化网格的拓扑连接关系,将所有的子块网格合并为一个整体网格,形成整场流体区域的分块非结构化网格.

分块非结构化网格方法结合了非结构化网格和多块网格的优点.首先,与结构化网格方法相比,分块非结构化网格将复杂的流动区域分解成一系列形状简单的子区域,能够处理复杂的流动区域;其次,与传统的多块网格法相比,分块非结构化网格方法通过非结构化网格数据结构将各块网格很自然地连接成了一个整体网格,块间交界面上的变量计算方法与内部网格界面完全相同,避免了在分块网格法中块间信息传递及块间连续性等复杂的处理过程;最后,与完全非结构化网格相比,分块非结构化网格在生成方向性加密网格方面有明显优势.总之,分块非结构化网格方法非常适合于叶轮机械内部流场网格生成,在处理叶顶间隙、密封、泄露等复杂流动过程具有广泛的应用前景.

1.2 网格生成实例

文献[9]给出了一孤立翼型的详细几何尺寸,并对其进行了吹风实验研究,测量出了翼型在不同攻角下表面压力分布.利用本文提出的网格生成方法对该孤立翼型计算区域进行网格划分.叶高方向长度为翼型1倍弦长,翼型上游方向延长4倍弦长,翼型下游方向延长10倍弦长,计算域

宽度取为 14 倍弦长.沿流向布置 191 个节点,计算域宽度方向布置 85 个节点,翼型高度方向布置 40 个节点,对翼型固壁以及前后缘附近的网格适当加密.生成的网格总顶点数为 660 879,面数为 1 924 520,单元数为 632 000(图 2 和图 3).

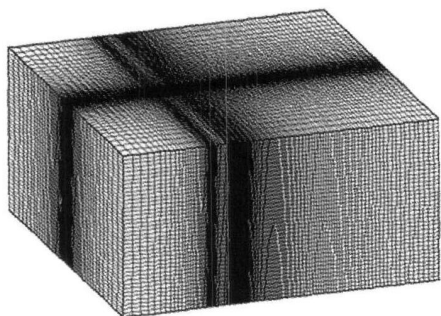


图 2 孤立翼型三维网格

Fig. 2 Three-dimensional grid around isolated airfoil

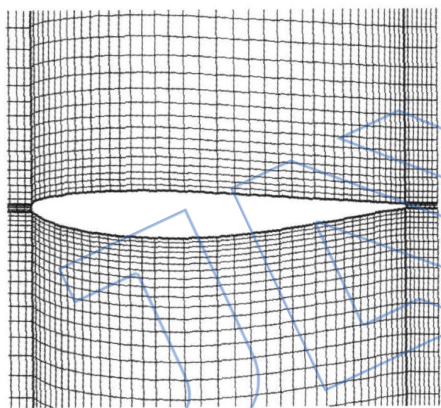


图 3 中间截面翼型附近网格划分

Fig. 3 Local grid of mid-span section near the airfoil

文献[10]给出了直列透平叶栅的几何及实验条件,并对其内部流动进行了实验测量,给出了每个截面上的气流角、速度值及静压损失系数等流动参数.利用本文提出的分块非结构化网格生成方法对其流道进行网格生成,周向取两个栅距的距离,为了保证数值模拟尽量接近实验条件,叶栅后延长 1.2 倍弦长距离.将流动区域划分为 13 个子块,对接近轮毂、轮盖及叶栅表面的网格进行了方向性加密.生成的网格总顶点数为 615 691,面数为 1 781 640,单元数为 583 200,如图 4 和图 5 所示.

2 非结构化网格可压缩

SIMPLE 算法

将三维笛卡尔坐标系下非定常可压缩 Navier-Stokes(N-S)方程整理成如下通用的对流扩散

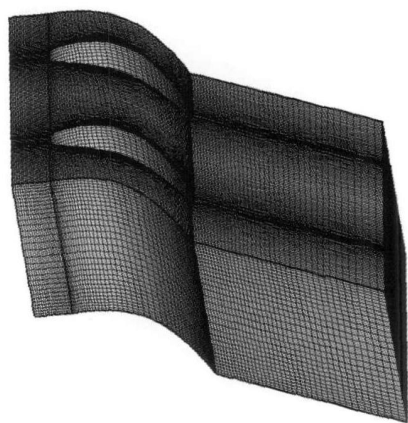


图 4 透平叶栅流场三维网格

Fig. 4 Three-dimensional grid in turbine cascade

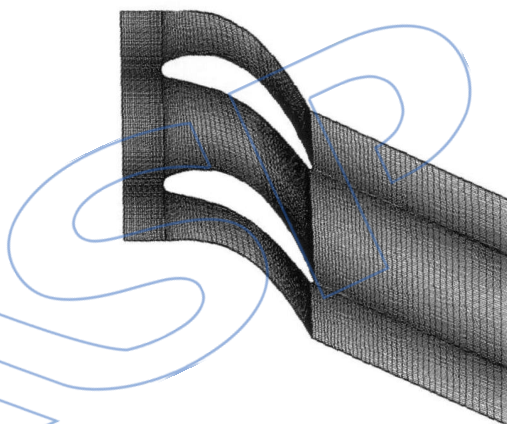


图 5 透平叶栅叶高中间截面网格

Fig. 5 Local grid of mid-span section in turbine cascade

方程形式:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S \quad (1)$$

方程(1)中 ϕ 代表单位质量 1,速度分量 u, v 和 w ,温度 T ,湍动能 k ,湍动能耗散率 ε ,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型及壁面函数法.

将通用对流扩散方程在任意一个非结构化网格上离散^[6-8].利用中心与二阶迎风格式的组合式格式离散对流项,二阶中心格式离散扩散项及压力梯度项.在扩散项的离散中,为了避免在离散中计算网格顶点处的变量值,界面上的梯度采用线性重构方法获得.非定常项采用二阶隐式后向差分的离散格式.为了避免非物理压力振荡,界面上的质量流量采用 Rhie^[11]方法计算.

在压力修正方程的推导中,密度修正值按照如下方法处理:

当节点 p 为控制界面 f 的左单元时

$$\rho_f' = \rho_{up}' = \frac{p_b'}{ZRT_p} \left[\left| \frac{m_f}{m_f} \right|, 0 \right]_f + \frac{p_{nb}'}{ZRT_{nb}} \left[\left| \frac{-m_f}{m_f} \right|, 0 \right]_f$$

当节点 p 为面 f 右单元时

$$\rho_f' = \rho_{up}' = \frac{p_b'}{ZRT_{nb}} \left[\left| \frac{m_f}{m_f} \right|, 0 \right]_f + \frac{p_p'}{ZRT_p} \left[\left| \frac{-m_f}{m_f} \right|, 0 \right]_f$$

下标 f 代表界面, up 代表在流动方向上游节点, p 代表网格单元, nb 表示通过界面 f 与 p 单元相邻的网格单元. 变量 m 代表通过界面 f 的流量, p, T 分别代表压力和温度, Z 代表气体压缩因子, 本文中按理想气体计算取为 1, R 为气体常数.

将密度修正引入连续性方程, 得压力修正方程表示如式(2)

$$a_p p_p' = \sum_{nb} a_{nb} p_{nb}' + b \quad (2)$$

式(2)中系数表示如下:

当 p 为 f 的左单元时

$$a_{nb} = \left[\frac{\rho^* \Delta V A}{A_p ds} \right]_f + \frac{U_f^* \cdot A_f}{ZRT_{nb}} \left[\left| \frac{-m_f}{m_f} \right|, 0 \right]_f$$

当 p 为 f 的右单元时

$$a_{nb} = \left[\frac{\rho^* \Delta V A}{A_p ds} \right]_f - \frac{U_f^* \cdot A_f}{ZRT_{nb}} \left[\left| \frac{m_f}{m_f} \right|, 0 \right]_f$$

$$a_p = \sum_f^n \left[\frac{\rho^* \Delta V A}{A_p ds} \right]_f + \sum_{左单元} \frac{U_f^* \cdot A_f}{ZRT_p} \cdot \left[\left| \frac{m_f}{m_f} \right|, 0 \right]_f - \sum_{右单元} \frac{U_f^* \cdot A_f}{ZRT_p} \left[\left| \frac{-m_f}{m_f} \right|, 0 \right]_f$$

$$b = - \sum_f^n m_f^*$$

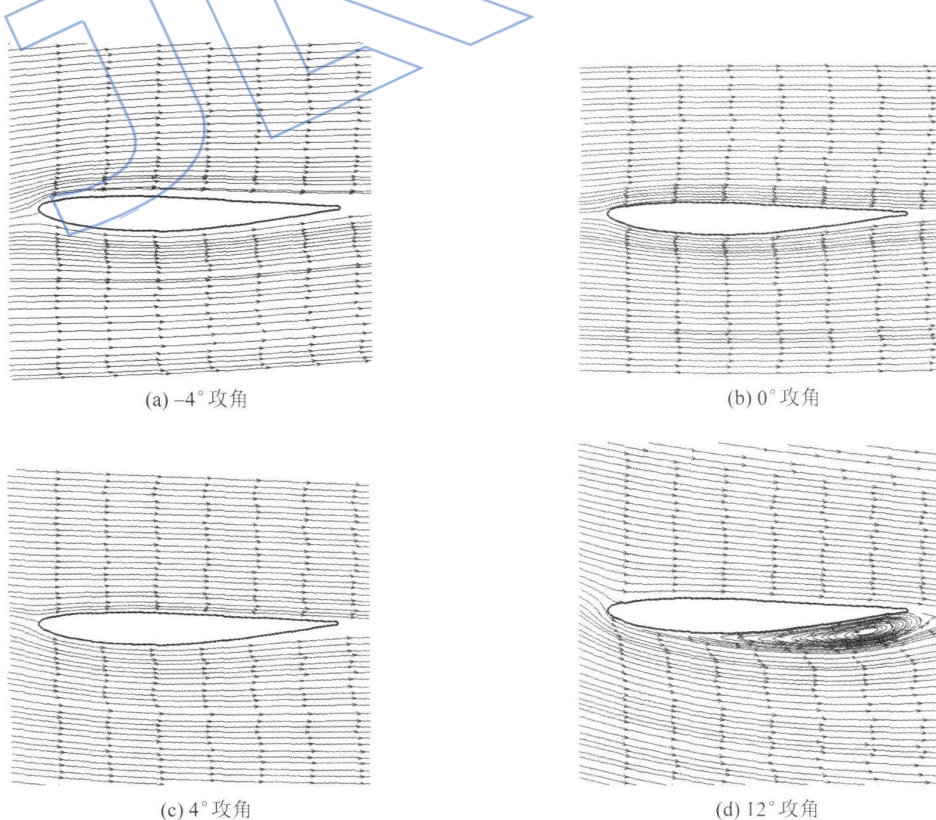
式中上标 $*$ 代表预估值, U_f 代表通过面 f 的速度矢量, A_f 表示面 f 的面积矢量, A 代表界面 f 的面积大小, ΔV 表示节点 p 的控制体积, A_p 代表动量方程中节点 p 的对角元系数, ds 代表节点 p 与节点 nb 之间的距离.

通过求解方程(2)获得压力修正值后修正压力、密度、速度, 进而求出温度 T 、湍动能 k 、湍动能耗散率 ε 等其它变量.

3 孤立翼型绕流数值模拟

对文献[9]中的孤立翼型绕流进行数值研究, 边界条件为进口给定速度分布; 出口采用远场边界条件; 翼型宽度方向及叶高方向 4 个边界均采用对称边界条件.

图 6 为孤立翼型在不同攻角下的流线分布及



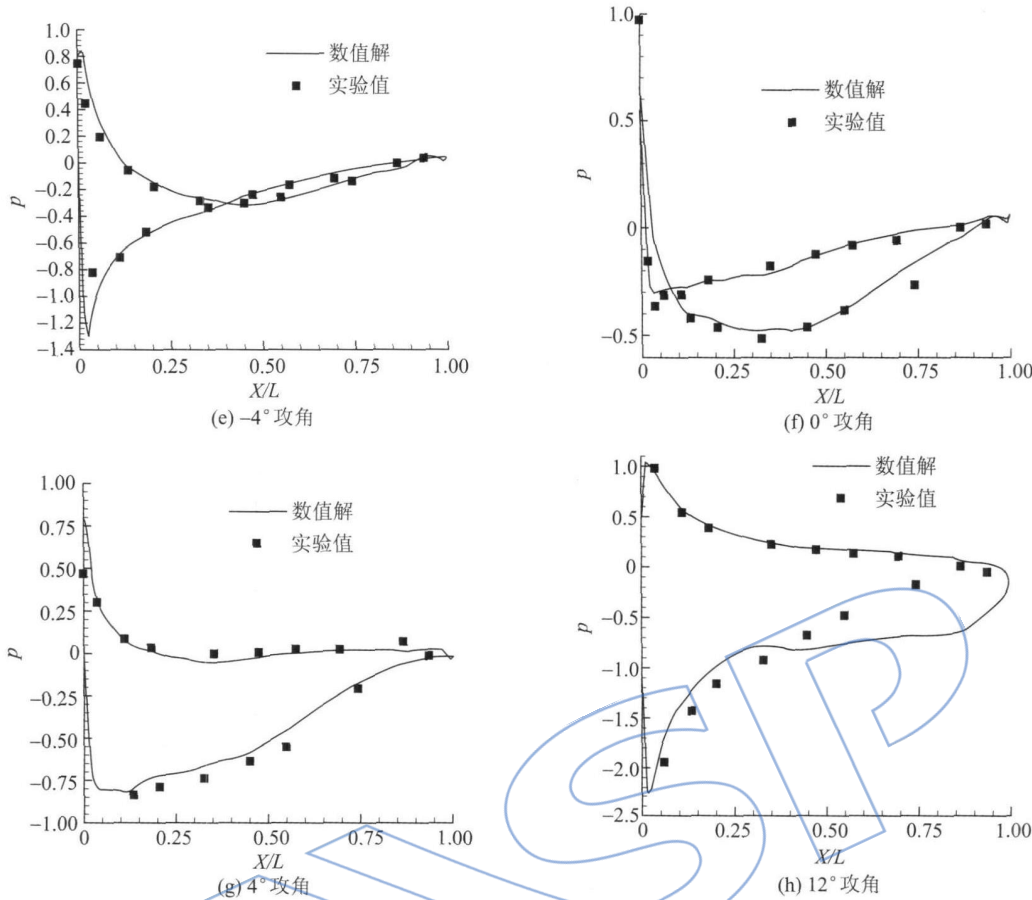


图 6 不同攻角下流线图及压力系数

Fig. 6 Streamline and pressure coefficient at various angle of attack

压力系数. 为了验证本文的算法的精确性, 将翼型表面压力系数的数值计算结果与文献[9]的实验结果进行了对比, 可以看出, 在小攻角范围 ($-4^{\circ} \sim 4^{\circ}$) 内实验值与计算值符合很好; 当攻角增大至 12° 时在翼型压力面上的实验值与计算值符合也很好, 在翼型吸力面上从前缘到相对弦长约为 0.35 的区域内, 计算结果与实验值符合较好, 其后至翼型尾缘范围内计算值与实验值存在一定差别, 其主要原因在于在大攻角情况下吸力面后缘发生了分离流动现象(图 6(d)), 标准 $k-\varepsilon$ 模型及壁面函数法在预测分离区内的湍流结构时出现误差. 分离流内的湍流模型仍是未来湍流研究的重要研究内容.

4 透平叶栅内流动数值模拟

对文献[10]中透平叶栅内流动进行数值研究, 边界条件为进口给定总温、总压及气流角; 出口给定静压; 周向采用平动周期边界条件; 叶高方向的两个边界采用固壁边界条件. 文献[10]对流动内 14 个截面位置的流动参数进行了测量, 测量

截面布置如图 7 所示. 图 8、图 9 和图 10 分别为叶高中间截面 S_1 面, 测量截面 7 处 S_3 面以及靠近吸力面 S_2 面上的静压系数数值结果与实验结果对比情况. 可以看出, 实验结果与数值结果符合很好, 验证了本文算法及模型对透平叶栅流动内静压分布的计算是合理的.

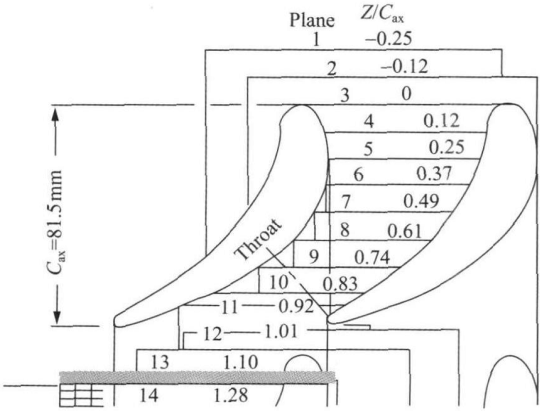


图 7 文献[10]测量截面位置图

Fig. 7 Measurement sections in literature [10]

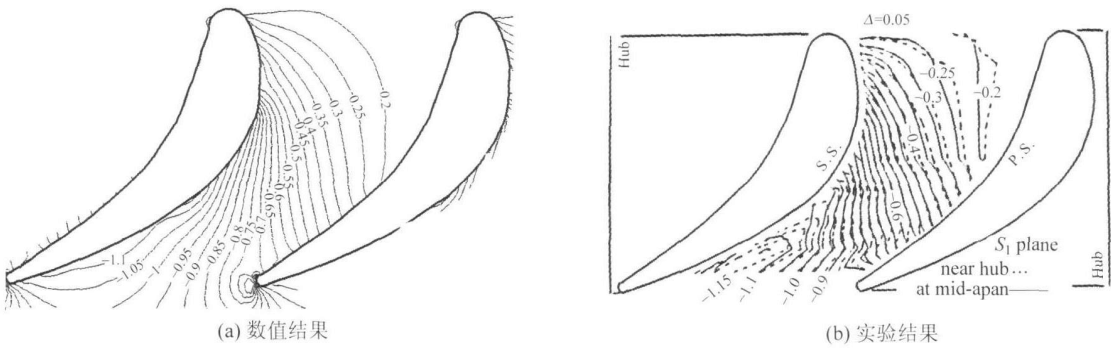


图 8 叶高中间截面 S_1 面静压系数
Fig. 8 Static pressure coefficient at mid-span S_1 section

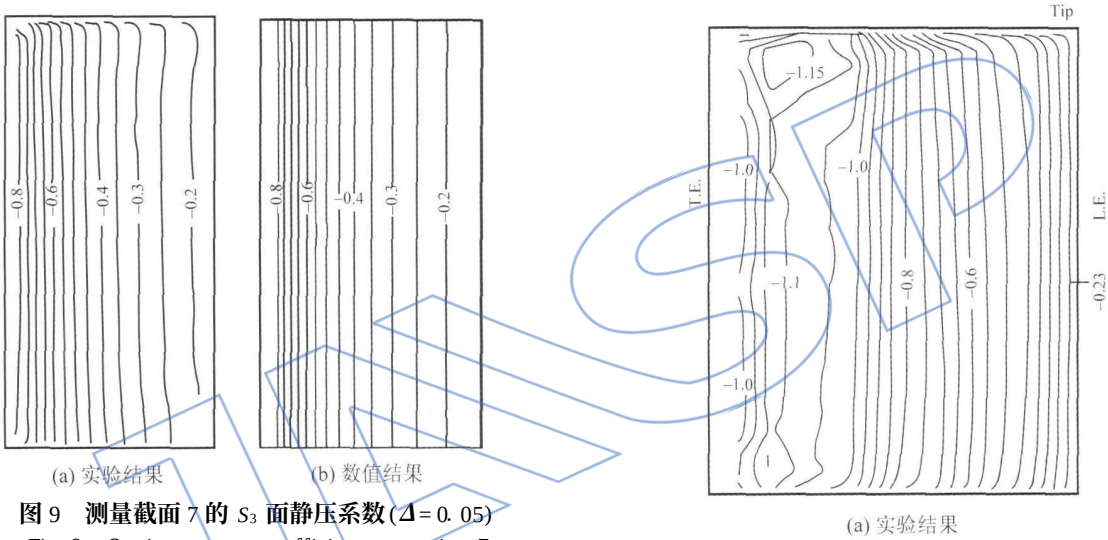


图 9 测量截面 7 的 S_3 面静压系数 ($\Delta=0.05$)
Fig. 9 Static pressure coefficient at section 7
($\Delta=0.05$)

图 11 为不同测量截面上沿叶高方向的质量加权平均气流角和速度值的数值结果与实验结果比较情况. 通过气流角对比可以看出: 在流道中部的测量截面 5 和截面 8, 实验结果和计算结果符合非常好; 在接近叶栅出口的测量截面 11 上出现了一定误差, 最大相对误差约为 3.5 %. 作者分析产生误差的主要原因是标准 $k-\varepsilon$ 模型将压力应变项采用了梯度扩散模型近似处理, 在预测由压力梯度主导的二次流结构时存在一定误差, 使得流动转折角的计算值偏小. 但从速度值对比来看, 在测量截面 6, 7 和 9 上, 实验值和数值解符合都很好, 说明本文算法及模型在对透平叶栅内部流动速度、静压系数预测比较合理, 而预测二次流结构, 尤其是叶道出口附近气流转折角方面需要湍流研究人员建立更合理的湍流模化方法.

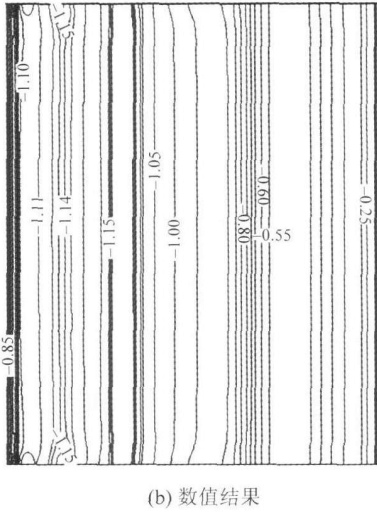
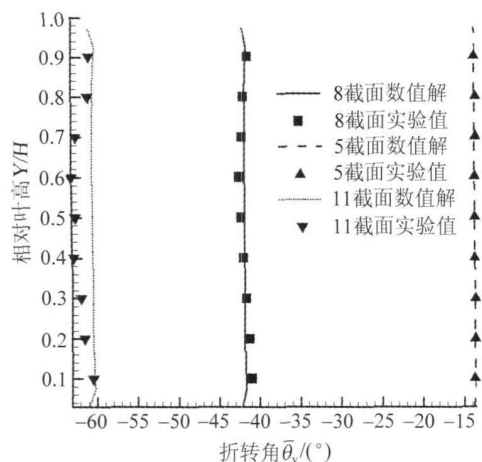
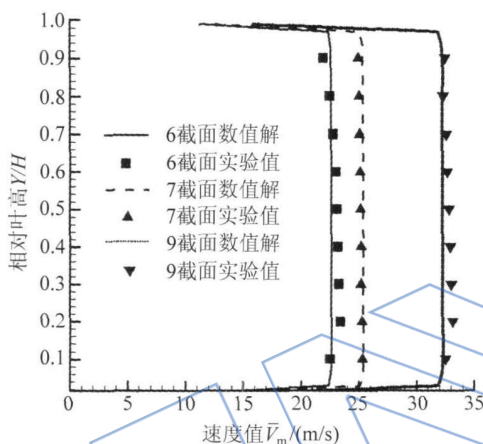


图 10 吸力面测 S_2 面静压系数 ($\Delta=0.05$)
Fig. 10 Static pressure coefficient at S_2 section
near the suction face
($\Delta=0.05$)



(a) 折转角



(b) 速度值

图 11 流动折转角和速度值的计算值与实验值比较

Fig. 11 Comparison of yaw angle and resultant velocity between calculation and measurement

5 结 论

1) 提出了分块非结构化网格生成方法,该方法结合了非结构化网格和分块网格的优点,适合于叶轮机内部流动分析。

2) 推导并发展了非结构化网格上可压缩SIMPLE算法,在压力修正方程中引入了密度修正值的影响。

3) 对孤立翼型绕流进行了数值研究,通过流场分析及压力系数的计算结果与实验结果的比较,定量验证了计算方法及程序在附着流动状况下的精度。

4) 对透平叶栅进行了数值研究,通过静压系数、气流角及速度值的计算值与实验值的比较,发现本文方法及模型对静压系数、速度预测比较精确,可以用以指导透平叶栅气动设计,但在预测二

次流,尤其是出口附近的气流转折角及叶栅落后角方面尚需湍流研究人员给出更合理的湍流模型。

参考文献:

- [1] Pantankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat, mass and moment transfer in three-dimensional parabolic flows[J]. Int J. Heat Mass Transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [2] Pantankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1980.
- [3] Mathur S R, Murthy J Y. A pressure-based method for unstructured meshes[J]. Numerical Heat Transfer (Part B), 1997, 31(2): 195-215.
- [4] Mathur S R, Murthy J Y. Pressure boundary conditions for incompressible flow using unstructured meshes [J]. Numerical Heat Transfer (Part B), 1997, 32(3): 283-298.
- [5] Davidson L. A pressure correction method for unstructured meshes with arbitrary control volumes[J]. Int J. Numer Methods Fluids, 1996, 22(4): 265-281.
- [6] 张楚华, 谷传纲, 苗永森. 利用非结构化网格方法对翼型绕流的数值研究[J]. 应用力学学报, 2000, 17(3): 35-40.
ZHANG Chuhua, GU Chuangang, MIAO Yongmiao. Numerical study on flow characteristics around airfoils with unstructured grid method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2000, 17(3): 35-40. (in Chinese)
- [7] 张楚华, 谷传纲, 苗永森. 离心叶轮及无叶扩压器内湍流的非结构化网格数值解法[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(4): 446-450.
ZHANG Chuhua, GU Chuangang, MIAO Yongmiao. Numerical simulation of turbulent flows in backswept impeller and vaneless diffuser [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(4): 446-450. (in Chinese)
- [8] 张楚华. 三维流体诱发振动的理论模型与数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 512-516.
ZHANG Chuhua. Theoretical model and numerical simulation of three-dimensional flow induced vibration [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(5): 512-516. (in Chinese)
- [9] 钱泽球. 大型轴流压缩机性能预测及设计方法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1993.
QIAN Zeqiu. Investigation of performance prediction and design method for large scale axial compressor[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1993. (in Chinese)
- [10] Yamamoto A. Production and development of secondary flows and losses in two types of straight turbine cascades: Part I—A stator case[J]. Journal of Turbomachinery, 1987, 109(2): 186-200.
- [11] Rhie C M, Chow W L. A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation [J]. AIAA J., 1983, 21(11): 1525-1552.