

文章编号: 1000-8055(2009)02-0409-05

基于拟压缩方法的扩压器低速流场数值研究

高丽敏¹, 雷 蒋², 王 欢¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院

翼型、叶栅空气动力学重点实验室, 西安 710072;

2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘 要: 发展了基于拟压缩方法的求解叶轮机械低马赫数流场的方法, 研制了时间推进方法对叶轮机械全流速范围流场的求解计算程序, 且对拟压缩因子的取值进行了讨论. 通过对离心压缩机叶片扩压器的数值计算表明, 发展的基于拟压缩方法能够快速正确的预测叶轮机械内的低速流场; 引入拟压缩方法是对时间推进方法的一个很好补充, 使时间推进方法的应用范围得到了拓展.

关 键 词: 拟压缩方法; 时间推进法; 叶片扩压器; 低速流动

中图分类号: V235.113

文献标识码: A

Numerical investigation of low-Mach number flowfield inside of vaned diffuser based on the pseudo compressibility method

GAO Li min¹, LEI Jiang², WANG Huan¹

(1. Laboratory of Aerofoil and Cascade Aerodynamics, School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

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

Abstract: Owing to the type of the flow governing equation system, and the low efficiency of standard time-marching algorithm in solving the low Mach number flows, a time marching code was explored to solve the incompressible internal flow field of turbomachinery based on the pseudo compressibility method. In the full paper, we explained our exploration in some detail; in this abstract, we just added some pertinent remarks listing three topics of explanation. In the first topic, a universal N-S equation system was derived, which can govern both high subsonic and low Mach number flow by a pseudo compressibility factor developed by Chorin. In the second topic, four step Runge-Kutta time-marching method with the central difference scheme was employed to resolve the N-S equations. Also in the second topic, we pointed out how the optimal pseudo compressibility factor was determined. In the last topic, some numerical results and the analysis for a vane diffuser of a tested centrifugal compressor were presented. The analysis of these results shows preliminarily that: (1) for the low Mach number flowfield, both efficiency and accuracy of the time marching algorithm based on the pseudo compressibility method is higher than that of the traditional time-marching algorithm; (2) the pseudo compressibility method is a compensator for the time-marc-

收稿日期: 2008-01-09; 修订日期: 2008-04-28

基金项目: 教育部博士点新教师基金(20070699034); 西北工业大学高层次人才科研启动费以及"翱翔之星"计划

作者简介: 高丽敏(1973-), 女, 陕西韩城人, 副教授, 博士, 主要从事专业研究方向叶轮机械气动热力学.

hing algorithm, and the application of the time marching algorithm is extended by introducing the pseudo compressibility method.

Key words: pseudo compressibility method; time marching method; vaned diffuser; low Mach number

目前,时间推进法广泛应用于叶轮机机械流场数值研究中,它解决了跨声速流动情况下微分方程类型混杂的问题^[1-2].然而,时间推进法是用来求解双曲型方程的,对于低速不可压流动,流动方程类型为椭圆型,仍采用时间推进方法会导致计算效率降低,计算成本增加.叶片扩压器是离心式压缩机最重要的静止部件之一,它对于提高离心压缩机的整机性能、改变最佳工况点位置、扩大稳定工作范围起着十分重要的作用.因此,对离心式压缩机叶片扩压器内部三维湍流流动进行研究是一项很有价值的工作^[3-4].本文采用文献[5]提出的拟压缩性方法,把椭圆型方程转化为双曲型方程,实现采用时间推进方法对从低速到高亚声速流场的求解,并对一实验叶片扩压器内的低速流动的进行了有效计算.

1 基本方程

为了满足时间推进的求解要求,对不可压缩流动的连续方程 $\Delta \cdot V = 0$ 中引入压力的时间导数项及人工声速,拟压缩连续方程可写为

$$\frac{1}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho V) = 0 \tag{1}$$

其中 $\beta = \sqrt{\delta p / \Phi}$, 被称为人工声速,或者拟压缩因子,对应于物理声速.引入拟压缩因子后的相对圆柱坐标系 (r, θ, z) 下三维积分守恒型 N-S 方程可表示为

$$\oint \frac{\partial U}{\partial t} dV + \oint M(H_i) \cdot n dS = \oint (G_i + G_v) dV \tag{2}$$

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ \rho W_z \\ r \rho W_\theta \\ \rho W_r \\ \rho E \end{bmatrix}, H_i = \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho W_z W + p e_z \\ r \rho W_\theta W + r p e_\theta \\ \rho W_r W + p e_r \\ \rho W \end{bmatrix}$$
$$G_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2\omega r W_r \\ \frac{W_\theta^2}{r} + r\omega^2 + 2\omega W_\theta + \frac{p - \alpha_0}{r} \\ \kappa \Delta T + \dot{q} \end{bmatrix}$$

$$G_v = \begin{bmatrix} f_z \\ r f_\theta \\ f_r \end{bmatrix}, f = \begin{Bmatrix} f_z \\ f_\theta \\ f_r \end{Bmatrix} = \Delta \cdot [q]$$
$$M = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 n 为微元面积的外法线单位矢量, dS 为微元面积, dV 为微元体积, p 为压力, ρ 为密度, T 为温度, $\dot{q}$ 为反映热源影响的热流密度, κ 为热传导系数, E 为单位质量流体的内能, ω 为旋转角速度矢量, I 为转子焓, $[q]$ 为粘性应力张量, W_z , W_r 及 W_θ 为相对速度矢量 W 在圆柱坐标系三个坐标方向的投影, U_1 为本研究新引入的变量.

上述方程通过拟压缩因子 β 与变量 U_1 的引入,使不同流速的流动控制方程统一为双曲型方程,可采用时间推进算法进行求解.同时,通过参数 β 与 U_1 的选择可实现上述方程对高亚声速和低速两类不同流动问题的求解:即 $\beta = 1$, 则 $U_1 = \rho$, 方程为常规的三维 N-S 方程,为高亚声速、跨声速流动问题的控制方程;求解低速不可压缩流动时 $\beta \neq 1$, 为拟压缩因子, $U_1 = p$, 流动控制方程成为基于拟压缩性方法的求解方程.这样则实现了时间推进方法求解不同流速问题控制方程类型的统一,便于数值求解程序的改进和通用化.对于不同流速的问题,可以在程序逻辑判断的基础上,自动分类求解,扩展了时间推进算法程序的使用范围.

2 计算方法及拟压缩方法

采用 H 型网格对计算区域进行空间离散,并且在网格中心点上来存储变量,用变量的线性插值来求得通过相邻网格中心点界面上的通量.因此在光滑变化的网格上保证了空间精度是二阶的,并且确保了总体的守恒性.采用 B-L 的混合长度理论模型来求得紊流粘性系数,它的优点是在 N-S 方程求解中无需估算边界层的厚度,粘性应力则可通过定义当地曲线坐标和用链锁法计算

而得. 在离散方程中加入 Jameson 构造的自适应人工耗散项, 以避免计算过程中在光滑解区出现“奇偶失联”, 并抑制解在强压力梯度区的振荡. 对于时间导数项, 用四步 Runge-Kutta 进行时间上的离散. 为了改善算法收敛效率, 程序还采用了多重网格法、当地时间步长、以及隐式参差光顺等加速收敛技巧, 在本文的计算中采用的是三重网格.

拟压缩方法实质上是一种扰动方法, 连续方程中压力导数项的出现只是为了构造扰动过程, 并没有真实的物理意义. 对方程进行分析, 可以发现: 当 β 无穷大时, 方程在任何时间层都满足速度散度为零, 即 $\Delta \cdot V = 0$, 这时, 可以进行非定常时间精确求解, 然而, 此方法实际数值计算中不可能实现; 当 β 有限大时, 方程在达到稳态前的任何时间层都不满足速度散度为零的条件, 当方程收敛到定常状态时, 连续方程中压力的时间导数项等于零, 可以得到 $\Delta \cdot V = 0$, 即控制方程还原到不可压缩方程, 低速流动的不可压缩特性得到满足. 因此, 与时间推进法类似, 拟压缩方法在到达稳态前各时间层的解, 都是不真实的. 在拟压缩方法中, 拟压缩因子 β 与当地时间步长 Δt , 对算法的收敛过程起着至关重要的作用. 文献[6]提出了不同的最佳拟压缩因子的取值建议. 本文基于文献[7]的研究, 只考虑长波误差在上下游边界之间的传播特性, 对拟线性一维 Euler 模型方程进行的特征分析发现, 存在一个最优的拟压缩因子可保证拟压缩方法的收敛达到最快: $\beta_{opt} = 1.4627u \sqrt{1 - M^2}$, 相应的当地时间步长为

$$\Delta t = \frac{a \cdot \Delta x}{u + \sqrt{u^2 + \beta_{opt}^2}} \tag{3}$$

以上 β_{opt} 选取的理论分析是建立在一维模型方程以及无粘假设之上的, 对于二维、三维粘性低速流动, 严格的理论结果很难得到. 根据以上结果以及多次的数值实验, 最终选取最优 β_{opt}

$$\beta_{opt} = 1.4627 \sqrt{\frac{u^2 + v^2 + w^2}{1 - M^2}} \tag{4}$$

相应的当地时间步长

$$\Delta t = 0.3608a \cdot \left(\frac{\Delta s}{V_{min}} \right) \tag{5}$$

3 计算结果及分析

基于时间推进有限体积方法编制的叶轮机械全三维湍流场计算程序已经用于可压缩流的计算^[8], 计算结果表明自行发展的可压缩 CFD 程序可以用于工程计算及设计分析. 在本文工作中, 采

用上述拟压缩方法将原计算程序扩展到不可压缩流场的数值模拟, 并对某离心压缩机叶片扩压器内的低速流场开展了数值研究工作. 针对此叶片扩压器已有较为详细的实验研究数据^[9], 实验测量截面如图 1 所示, 自行生成的叶片扩压器三维通道计算网格见图 2.

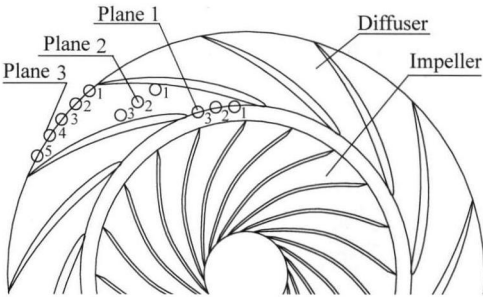


图 1 扩压器流道内测量点分布
Fig. 1 Measuring positions arrangement in

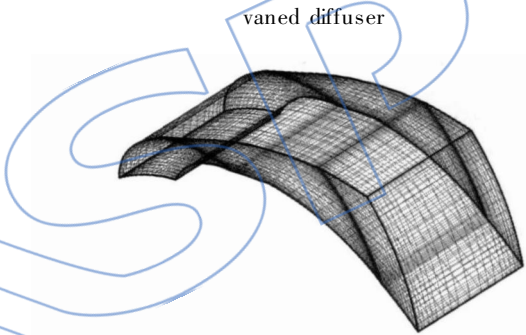


图 2 叶片扩压器的三维计算网格
Fig. 2 Computational 3-D mesh of vane diffuser

对扩压器内部流场进行实验测量时, 其进口前存在离心叶轮, 出口后存在回流器等静止部件, 由于部件之间的干扰及场的三维性, 使得叶片扩压器的进出口流场极不均匀, 难以根据实验给定合适的进出口边界条件, 这成为对孤立叶片扩压器进行数值研究的一个主要问题. 经过反复的计算考核, 本文最后选定了平均流动参数的方法. 即在扩压器进口截面, 给定平均的总压、总温和进口切向、径向气流角, 在扩压器出口截面给定平均背压. 根据选择的流量工况确定进口速度的初始值, 继而依据一维等熵管流假设来给定各网格单元上各变量的初始值.

采用拟压缩方法与原四阶 Runge-Kutta 格式的时间推进法对叶片扩压器内的流场进行了数值计算, 其计算收敛过程如图 3 所示. 拟压缩法在收敛速度上较四阶 Runge-Kutta 格式有一定的优势 (如果没有采用多重网格及当地时间步长等加速收敛技术, 这种优势会更加明显); 但计算收敛后

拟压缩方法的整场总残差 RMS 比较高,这主要是由于在拟压缩方法中,压力 p 代替密度 ρ 成为求解变量,因而微小密度脉动引起的压力脉动相对较大.因此,拟压缩方法在低速流动计算方面的效率比较高.文献[3]的研究表明,对于低马赫数流动,如果密度当作常数处理,拟压缩方法的计算效率与压力修正法(SIMPLE 算法族)相当.

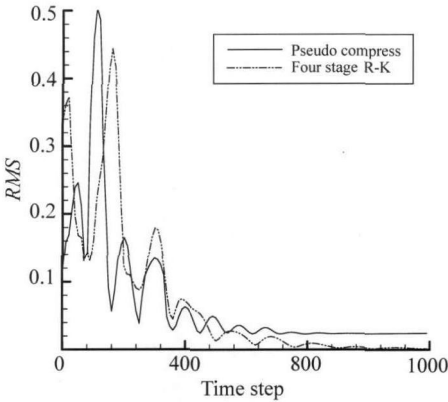


图 3 收敛曲线
Fig. 3 Convergence curve

图 4 详细比较了设计流量下叶片扩压器通道内不同测量截面上计算与实验的无量纲径向分速 C_r .在进口截面上,计算值和实验测量值在大多数叶高位置吻合很好,尤其在 50% 叶高处,然而,由于本文计算采用的是均匀进口边界条件,因而计算得到的速度沿展向呈对称分布.在中间截面上可以发现,在叶片压力面附近与叶片通道中间的全部叶片高度上,计算结果与实验值吻合非常好,但在叶片吸力面附近的大部分叶高范围内计算得到的径向分速出现负值.当流动达到出口截面,吸力面附近的回流占据了整个叶高.然而,实验数据上并未现示出回流现象,但文献[9]曾经表明在实验过程中观测到了此处流动的脉动比较大,流动处于不稳定状态,但受到测试仪器的限制,未能捕获回流现象.

图 5 分别叶片扩压器 5%、50% 和 95% 栅距处(从压力面到吸力面) S_2 流面速度矢量图.在压力面附近与中间栅距截面上,流动情况较好,速度沿展向呈对称分布,速度矢量清晰的显示了轮盘与轮盖附面层的影响;由于叶片扩压器通道几何扩张程度及吸力面曲率的影响,在吸力面附近逆压梯度的影响下,在流动方向约 50% 处吸力面附近产生了严重的回流,且一直延续到叶片扩压器出口.

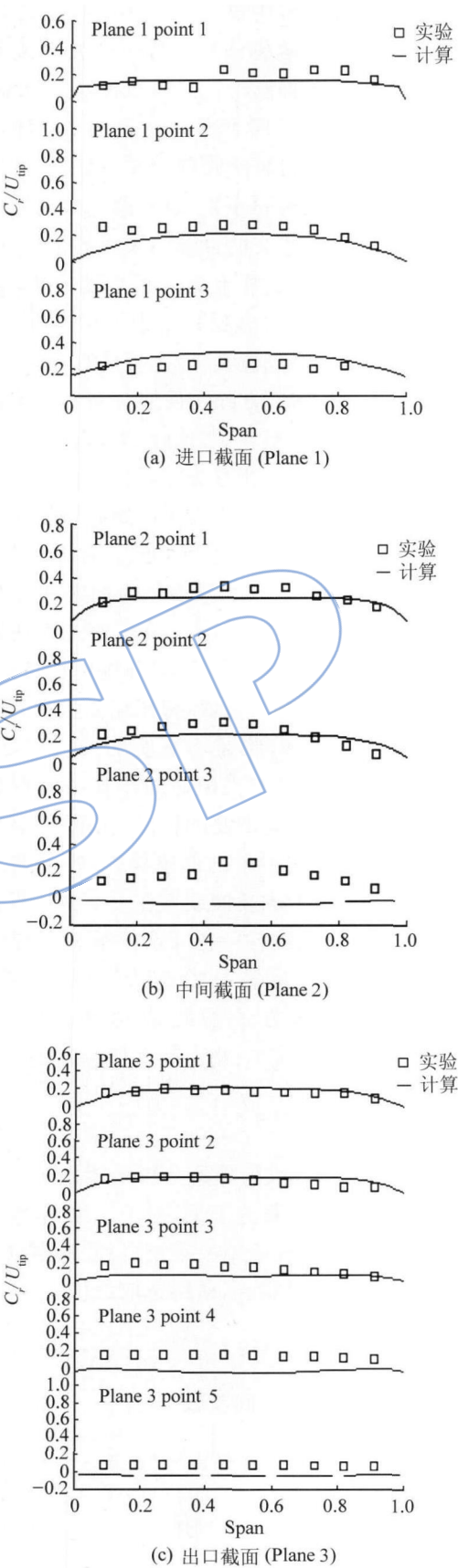


图 4 测量面上计算值与实验值的对比

Fig. 4 Comparison between experiment and computation

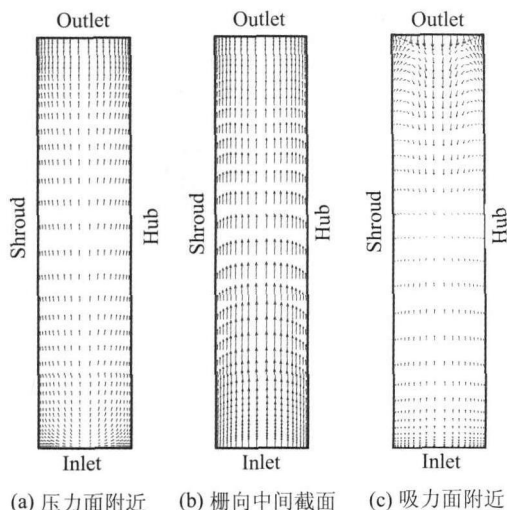
图 5 扩压器 S_2 流面速度矢量图

Fig. 5 Velocity distribution on three meridian surfaces

4 结 论

本文在原自行开发的时间推进有限体积方法求解叶轮机械可压缩流场的基础上, 引入拟压缩因子并对其取值进行讨论, 发展了时间推进法求解叶轮机械低速不可压缩流场的数值模拟程序, 实现了原数值模拟程序对全流速范围流场的数值模拟. 在上述基于拟压缩方法的基础上, 对一叶片扩压器内的低速流场进行了数值求解. 计算结果表明, 拟压缩方法在求解低速流动时具有较高的计算效率, 对本实验叶片扩压器的数值模拟表明计算结果在绝大多数位置与实验测量吻合得较好, 且计算结果捕捉到了在叶片扩压器吸力面附近出现回流现象. 采用拟压缩方法求解不可压缩方法是对时间推进方法的一个很好补充, 使时间推进方法的应用范围得到了拓展.

参考文献:

[1] 杨策, 蒋滋康, 索沂生. 时间推进方法在叶轮机械内部流场计算中的进展[J]. 力学进展, 2000, 30(1): 83-94.

YANG Ce, JIANG Zikang, SUO Yisheng. An assessment of time marching method in calculating internal flow fields of turbomachinery[J]. Advanced in Mechanics, 2000, 30(1): 83-94. (in Chinese)

[2] Jameson A, Schmidt W, Baker T J. Numerical solution of the Euler equations by finite volume methods using Runge-Kutta time stepping scheme [R]. AIAA 81-1259, 1981.

[3] Yoshinaga Y. Aerodynamic performance of a centrifugal compressor with vane diffusers [J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 1982, 102(12): 486-493.

[4] 刘小民, 席光, 王尚锦. 叶片扩压器内三维流场数值计算与实验研究 [J]. 航空动力学报, 1997, 14(2): 131-135.

LIU Xiaomin, XI Guang, WANG Shangjin. FEM calculation and experimental study of the 3D flow in vane diffuser [J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 14(2): 131-135. (in Chinese)

[5] Chorin A J. A numerical method for solving Incompressible viscous flow problems [J]. Journal of Computational Physics, 1967, 2(1): 188.

[6] Kwak D. A three dimensional incompressible N-S flow solver using primitive variables [R]. AIAA 84-0253, 1984.

[7] Walker P J, Dawes W N. The extension and application of three dimensional time marching analyses to incompressible turbomachinery flows [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(3): 385-390.

[8] 高丽敏, 席光, 王尚锦, 等. 高速离心压气机叶轮性能预测及流场分析 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(4): 427-430.

GAO Limin, XI Guang, WANG Shangjin, et al. The prediction of the performance and flow field in a high speed centrifugal impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(4): 427-430. (in Chinese)

[9] 高丽敏, 席光, 王尚锦, 等. 用热线风速仪测量叶轮后叶片扩压器流场 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(4): 599-601.

GAO Limin, XI Guang, WANG Shangjin, et al. Experimental investigation on a vane diffuser flowfield behind a centrifugal impeller using constant temperature anemometer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(4): 599-601. (in Chinese)