

扩压器内二维湍流流动的时间推进数值解

翁培奋 何友声

(上海交通大学工程力学系, 上海, 200030)

NUMERICAL ANALYSIS ON TURBULENT FLOW IN A DIFFUSER BY TIME MARCHING METHOD

Weng Peifen, He Yousheng

(Dept. of Engineering Mech., Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

摘要 首先研究了隐式近似因子(AF)有限差分理论。指出薄层N-S方程抛物化后右端粘性项是主元素变量矢的一个简单线性函数,这对实际计算很有用。应用隐式AF方法计算了为发动机进气道设计的典型扩压器内的复杂湍流流场。研究表明,计算结果与实验结果基本一致,这为三维非定常湍流流动进一步研究提供了基础。

关键词 数值分析,粘性流,二维流,扩压器

中图分类号 V211.3

Abstract An investigation is given on the theory of implicit approximate factorized finite difference firstly. The results show that the viscous Right-hand-side vector is a simple linear function of its basic variable vector, which is of great use for further application. A complicated turbulent flow field in a diffuser with typical geometric shape for aeroengine inlet design was calculated by the use of the implicit AF method. Studies show that the computational results are in agreement with the experimental data, which will provide the basis for the further study on three dimensional unsteady turbulent flows.

Key words numerical analysis, viscous flow, two dimensional flow, diffusers

隐式近似因子有限差分法具有较好的稳定性和适应性,现已广泛地用于计算机翼非定常绕流^[1,2]。受计算机发展的限制,我国在这方面的工作多为势流流动数值分析^[3]。内流流动受管道影响流动较复杂,粘性或湍流影响不容忽略。现试图应用隐式AF方法模拟内流流动,并为该方法推广到用于三维流动奠定基础。

1 控制方程

为数值模拟扩压器内的湍流流动,采用贴体曲线坐标系(N, G, S)以适应复杂边界。流动控制方程为

$$(\delta \hat{q} / \delta S + \delta E / \delta N + \delta F / \delta G = Re^{-1} \delta \hat{s} / \delta G) \quad (1)$$

其中

$$\hat{q} = (1/J)[Q, Q_n, Q_v, e]^T$$

$$E = (1/J)[QU, QuU + Np/MQvU + Np/M(e + p/M)U - Np/M]^T$$

$$F = (1/J)[QV, QvV + Gp/MQvV + Gp/M(e + p/M)V - Gp/M]^T$$

$$\mathbf{S} = (1/J)[0, Lm_1 u_G + LGm_2/3, Lm_1 v_G + LGm_2/3, Lm_1 m_3 + Lm_2(Gu + GT)/3]^T$$

$$U = N + Nu + NT, V = G + Gu + GT, m_1 = G^2 + G_y^2$$

$$m_2 = Gu_G + G_y T_y, m_3 = (u^2 + T^2)_G/2 + (M-1)^{-1} P_r^{-1} T_G$$

方程(1)用 Taylor 级数展开,取前两项并考虑近似因子添加项,得到下列隐式 AF 差分方程

$$(I + hDA^n - J^{-1} A_h \dot{y}_N S_N)(I + hDB^n - J^{-1} A_h \dot{y}_G S_G - hRe^{-1} DM^n) S \dot{q}^n = -St(DE^n + DF^n - Re^{-1} DS^n - A_2 St(D_{NN} + D_{GG}) \dot{q}^n) \quad (2)$$

在上述离散方程中, A、B 分别为对流项 E、F 的 Jacobi 矩阵; M 为粘性项 S 的 Jacobi 矩阵,分别定义为 $A = 5E/5\dot{q}$ 、 $B = 5F/5\dot{q}$ 、 $M = 5S/5\dot{q}$ 。可以看出,不仅 E、F 与 \dot{q} 之间存在简单的齐次函数关系 $E = A\dot{q}$ 、 $F = B\dot{q}$; 粘性项 S 和 \dot{q} 之间也有十分简单的线性关系, $S = -M\dot{q}$ 。由此,方程(2)中的右端项可表示为

$$RHS(B) = -St(DA^n + DB^n + ReDM^n) \dot{q}^n - A_2 St(D_{NN} + D_{GG}) \dot{q}^n \quad (3)$$

数值求解时,应用公式(3)有方便之处。由于 SS^n 的 Taylor 展开式为 $SS^n = S^{n+1} - S^n = M^n(\dot{q}^{n+1} - \dot{q}^n)$,且 SS^n 又可表示成 $SS^n = S^{n+1} - S^n = -M^{n+1}\dot{q}^{n+1} + M^n\dot{q}^n$,因此

$$(M^{n+1} + M^n) \dot{q}^{n+1} = 2M^n \dot{q}^n \quad (4)$$

式(4)可以用作程序调试的考核公式。

2 湍流模型

用 N-S 方程求解时,湍流作用由涡粘系数 L_t 进行模化,即 $L_{total} = L_i + L_t$ 。现选择 Baldwin-Lomax 代数湍流模型,它通过分层求解得到 L_t 计算结果^[4]。

3 边界条件及解法

现对 dMa/dx 为常数的高亚音速扩压器内的湍流流动进行计算。边界条件取为:进口为给定值,物面上为粘性无滑移条件;管道出口为导数边界条件,即 $5/5N = 0$ 。

采交替方向迭代求解一组大型块三角矩阵线性代数方程组。在时间推进过程中,各变量用低松弛因子进行处理,以保证运算具有良好收敛性。编程时考虑了通用性,程序可方便地计算无粘流动、层流及湍流,也可推广至跨音速或带激波流场的数值计算。

4 计算结果

图1给出扩压器的计算模型网格和进口速度分布,进口高度为 51mm,出口高度为 106mm,进出口面积比为 2.08,扩压器长度与进口高度比为 6.35。扩压器一边是平面壁,另一边是按 dMa/dx 为常数设计的曲壁。进口 Mach 数 $Ma_i = 0.7$,进口压力 $P_i = 1.013 @ 10^5$ Pa,进口温度 $T_i = 25K$,来流雷诺数 $Re_i = 5.7 @ 10^5$ 。计算网格通过 TTM 法解一组 Laplace 方程获得,网格疏密度靠指数分布来调整。

图2给出扩压器流场速度矢量场和流场压力变化的计算结果。随管道面积增大主流速

度逐渐减小。计算数据显示,曲线壁面附近的边界层比平壁附近的边界层厚些。只在个别计算点上存在负速度。由压力变化曲线(图 2(b))看到,在同一流动横截面上靠近曲线壁面的压力比平壁附近的压力小些。

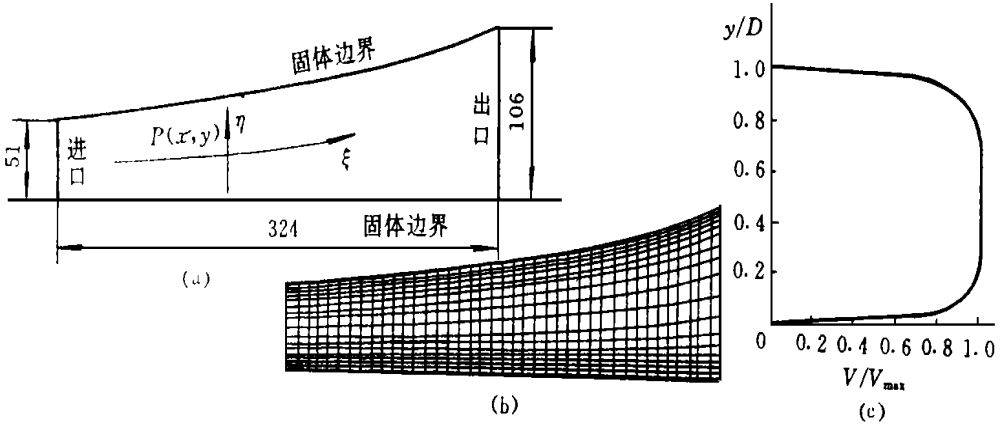


图 1 计算模型、网格和进口速度分布

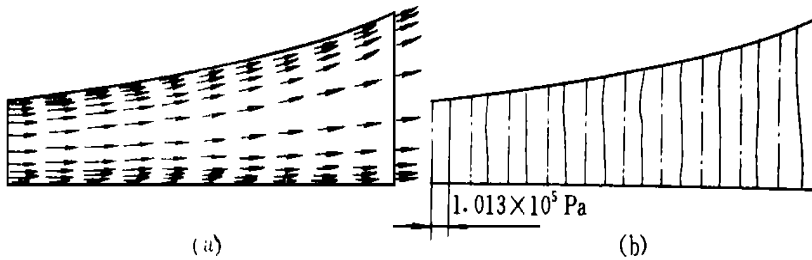


图 2 计算域中流场速度矢量场和流场压力变化计算结果

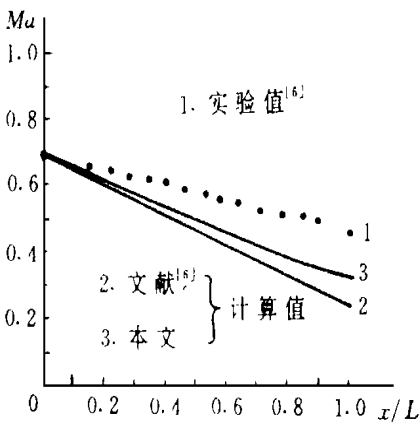


图 3 主流 Mach 数的变化曲线

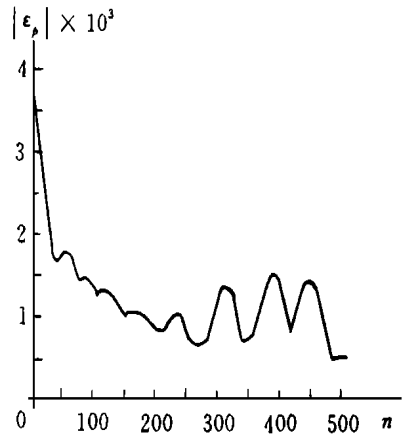


图 4 压力残差迭代收敛过程

图 3 给出沿轴向主流 Mach 数变化的计算结果, 并和文献[5]中的有关数据进行了比较。

图4给出压力残差的时间迭代收敛过程, 压力残差 $|E_p| = \max_{i,j} [(p_{i,j}^{n+1} - p_{i,j}^n) / p_i]$ 。压力残差随时间步长的推进为振荡性收敛。其中前200步(n)收敛较快, 后300步收敛变慢。为得到目前的计算结果需在DC/486上运行1.5h。

参 考 文 献

- 1 Steger J L. Implicit finite difference simulation of flow about arbitrary geometries with application to airfoils. AIAA paper 77 - 665, 1977
- 2 Pulliam T H, et al. Recent improvements in efficiency, accuracy, and convergence for implicit approximate factorization algorithms. AIAA paper 85- 360, 1985
- 3 侯晓等. 用隐式近似因子法计算喷管跨音速流场. 推进技术, 1990; (3): 12- 19
- 4 Baldwin B S, et al. Thin layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows. AIAA paper 78- 257, 1978
- 5 方良伟等. 按 dMa/dx 为常数设计的二元高亚音速扩压器的试验研究. 工程热物理学报, 1983; 4(1): 7- 14

学术会议
征 文

第一届国际工程计算与计算机仿真学术会议征文

第一届国际工程计算与计算机仿真学术会议将于1995年11月27日至29日在湖南长沙举行。这次会议, 由瑞典学者发起, 并得到国内外许多著名学者的激烈响应。本届大会的名誉主席由湖南大学校长担任。已初步确定的大会报告有美国的 T. Blytscho 教授, 瑞典的 L. Nilsson 教授, 中国的钟万勰院士, 英国的 O. C. Zienkiewicz 教授等。第一届会议委托湖南大学主办, 我国机械工业部、中国科学院、大连理工大学、中国力学学会计算力学委员会等单位协办。会议交流的学术领域主要针对汽车工程、航空和航天工程、土木与机械工程、材料加工、核反应堆技术、压力容器与管道系统、岸外结构与造船以及采矿工程等, 涉及基础建设、经济建设与国防等诸多领域。

征文范围:

包括数值分析的理论与方法、结构/多体动力学、接触与碰撞问题、结构优化、结构的耐撞性(耐坠性)设计、混凝土结构、非线性分析、几何造型与计算机图象学以及本构模型、复合材料分析方法、断裂力学问题、材料成形、摩擦与磨损、流体-结构-热力学耦合问题、地质力学、生物力学、工程数据库系统、专家系统、可视化与活化等众多主题。

现已开始征文, 在1995年5月31日前可投寄文章摘要至会议秘书处, 7月15日发出录用通知, 10月16日前投寄论文全文。文章摘要限2页, 包括题目、作者姓名、单位、地址、电话和传真号码、详细摘要与关键词(叙词), 并请标明该文属于会议的(上述)哪一个主题。国内秘书处设在湖南大学机械工程系, 通讯地址为410082 湖南长沙 湖南大学 机械工程系

第一届工程计算与计算机仿真国际会议(ECCS- 1)秘书处(Guangyiao Li)。电话 731- 8883171, 传真 731- 8884287。

(龚尧南)