

第五届全国流体力学数值方法讨论会

流体力学数值方法

论文集

中国·重庆

一九九一年



数据加载失败，请稍后重试！

03-5/26

第五届全国流体力学数值方法讨论会

流体力学数值方法

论文集

中国·重庆

一九九一年



数据加载失败，请稍后重试！

前 言

《第五届全国流体力学数值方法讨论会》于1991年11月6日至11月10日在重庆市重庆建筑工程学院召开。这次学术会议受到了我国计算数学及计算流体力学工作者的热情支持，会议组织委员会收到了一百三十余篇论文。本论文集按组织委员会规定的排版格式收集了九十三篇论文摘要。它们反映了最近三年来我国流体力学数值方法研究和应用方面的许多新成果：如高分辨率差分格式的研究和应用；并行算法的研究和应用；有限元方法在流体力学中的发展和应用；数值网格及自适应网格技术的研究及应用等。它们涉及航空、航天、能源、气象、海洋及其它众多的应用领域，内容十分丰富。有部分论文摘要，因收到较晚或不符组织委员会规定排版格式而未能编入论文集，是为憾事。

这次会议是我国流体力学数值方法研究工作者的一次盛会，共计有一百位左右从事流体力学数值方法研究和应用的专家、学者参加会议。通过这次学术交流，必将促进我国流体力学数值方法的研究和应用向更高的水平发展。

重庆建筑工程学院数学系为这次会议的召开做了大量工作，具体承担了会务工作，提供了会议条件，我代表与会同志在此表示衷心的感谢。

本论文集的制版、胶印、装订等工作由北京应用物理与计算数学研究所承办，我代表会议领导小组对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢！

李德元
1991.9.15.

《第五届全国流体力学数值方法讨论会》

组 织 委 员 会 名 单

(以姓氏笔划为序)

王汝权	水鸿寿	卢中政
刘中和	李荫藩	李德元
应隆安	周天孝	张景琳
张耀科	祝家麟	徐国荣
袁国兴	曾庆存	滕振寰

秘书长： 袁国兴 刘金瑜 李子木

目 录

- 1 NAVIER-STOKES 方程组的边界元解 祝家麟 (1)
- 2 应用 GRGES 软件生成分区组合网格 敖 超 张耀科 王平治 (4)
- 3 网格生成软件 GRGES 的初步应用 张耀科 王平治 敖 超 蔡宗绪 (7)
- 4 粘性不可压缩流动的 SUPG(orSD)有限元模拟 周天孝 (10)
- 5 计算地球流体力学问题的若干新进展 曾庆存 季仲贞 (15)
- 6 守恒律方程的质点法 滕振寰 (16)
- 7 流体力学问题的并行计算 袁国兴 张景琳 (17)
- 8 流体力学中全位势方程的多处理机向量计算的 PGCR 算法
..... 刘兴平 (21)
- 9 注化学溶液油藏模拟的特征混合方法和分析 袁益让 (23)
- 10 高度非线性激波捕捉格式 徐树荣 龚大平 李文生 (27)
- 11 一类非线性对流扩散方程的有限差分格式 杜明笙 (30)
- 12 固体炸药冲击起爆过程的数值模拟 王 垒 梁树青 李维新 (33)
- 13 LEG--Rezoning for Calculations of Material Large-Deformation
High-Strain-Rate Problems..... 王 垒 李维新 梁树青 (35)
- 14 处理接触间断的一种线性场修正方法 金保侠 (36)
- 15 分子动力学问题的数值计算 张景琳 王继海 (39)
- 16 $\|A^{-1}\|_{\infty}$ 的估计和等对角优势(二) 胡家贇 (42)
- 17 PE_k 方法的收敛性 王邦荣 胡家贇 (45)
- 18 EPM 计算方法及程序 段庆生 袁国兴 张玉华 王丽华 (48)
- 19 关于求解波动方程的算术平均分组建式方法 陈 劲 张宝琳 (52)
- 20 Viscous Splitting for the Exterior Problem of the N-S Equation
..... Zhang Pingwen (张平文) (55)
- 21 可压缩混流问题沿特征线的混合元方法 陈焕祯 (56)
- 22 轴对称喷管流动的数值模拟 邱继锋 温功碧 吴望一 (58)
- 23 广义有限元方法收敛的充要条件 王申林 (59)
- 24 裂缝-孔隙介质油藏单相可压缩流动的特征差分格式及理论分析
..... 芮洪兴 (62)
- 25 定常对流扩散方程的双侧逼近的高精度算法 袁天浩 史汉生 (65)
- 26 一类可压缩渗流驱动问题的有限元全离散方法 程爱杰 (67)
- 27 隐式 ENO 格式和 Euler 方程数值解研究 马汉东 马延文 (70)
- 28 捆绑运载火箭气动干扰计算及特性研究 张国富 蔡小庆 (73)

- 29 非线性对流为主扩散问题的特征差分方法及其最优误差估计 羊丹平 (76)
- 30 破片分束式战斗部的数值模拟
..... 秦承森 张同金 袁国兴 段庆生 袁仙春 廖振民 张铁桥 (79)
- 31 Domain Decomposition and Parallel Processing for Forced Convection
..... Mingyu Wang and John G.Georgiadis (82)
- 32 求二维非定常流数值解的一种拉氏方法 刘邦弟 (85)
- 33 二维锋生过程的数值模拟 王 斌 季仲贞 (87)
- 34 一个近岸海流数值模式及若干模拟结果 季仲贞 曾庆存 李荣凤 (88)
- 35 用光线追踪描绘流体力学数值模拟图像的方法 王宝兴 (89)
- 36 Numerical Simulation of the Vapour Flow in the Keyhole in Penetration
Welding with a Laser
..... Wu Shengchang, John Dowden, Phiroze Kapadia (92)
- 37 总熵增小格式 SEI 对不定常激波的计算 黎 志 (94)
- 38 物态方程数据库 王正言 (97)
- 39 可压核废料污染问题的特征混合元方法 李 潜 (98)
- 40 三维油气盆地发育问题的数值模拟及其应用软件
..... 袁益让 王文洽 羊丹平 韩玉芄 杨成顺 (101)
- 41 多孔介质中驱动问题的迎风差分格式 梁 栋 (104)
- 42 关于轴对称 Stokes 流动的无限元方法及其数值实验 魏万明 应隆安 (107)
- 43 特征值计算和边界层稳定性研究 唐登斌 成国玮 (110)
- 44 建筑空间二维流场的分析 李群宏 王政贤 (113)
- 45 二维非线性 Schrodinger 方程的数值解 张石峰 雷光耀 (114)
- 46 一维尤拉方程的隐式大粒子方法 于 彤 (117)
- 47 平面激波在物面上反射的数值计算 赵 毅 (120)
- 48 二维恒定流流场的有限元计算 史金松 庄卫华 章卫军 (124)
- 49 铝靶板在激光辐照下剪切断裂的数值模拟——动态图形输出
..... 陈诗笠 杨淑霞 徐平均 郭尤楠 (127)
- 50 STOKES 方程单向周期问题的 B-B 条件 曹卫明 (129)
- 51 时间相关有限体积多重网格法求解平面叶栅跨音绕流 张耀科 祁昌军 (132)
- 52 流场计算的全局自适应和分区解法 王平洽 祁昌军 (135)
- 53 应用再生解析数值方法求解粘性流场 冯国泰 吴勃英 张池平 崔明根 (138)
- 54 激波数值计算几个问题的讨论 张熙华 (140)
- 55 非线性自由表面流数值模拟进展 吕玉麟 (143)
- 56 任意三角形网格下 N-S 方程的显式差分求解 林建国 (146)
- 57 迎风紧致差分格式与驱动方腔流动的数值模拟 ... 刘 宏 傅德薰 马延文 (148)
- 58 两步二阶高分辨率差分格式 郭祥东 (152)

- 59 欧拉方程组隐式 AF 算法及其在定常跨音速流计算中的加速技术研究
..... 戴嘉尊 戚 晔 (155)
- 60 有限差分方法中的反演法 杨志峰 (158)
- 61 A Perturbational Method for Developing High-order Compact Upwind
Schemes for The Convection-Diffusion Equation
..... Chen Guoqian, Yang Zhifeng, Gao Zhi (161)
- 62 一个求解气动方程的特殊矩阵分裂格式 郭文海 马延文 (164)
- 63 一类计算 Euler 方程的最小耗散的扩散-反扩散格式 李松波 黎文安 (168)
- 64 激光聚变研究中的 JB 系列数值模拟方案及应用 张永慧 罗平庆 (171)
- 65 TVD 格式计算 Euler 方程组间断解存在的几个理论问题 李松波 (174)
- 66 用适应性网格差分求解硅晶生长中的固液界面和温度场
..... 阳述林 (177)
- 67 PNS 方程的一种隐-显 TVD 空间推进解法 刘铁刚 王汝权 宋松和 (180)
- 68 飞机/进气道系统内外流场计算
..... 刘国俊 王永宝 郑秋亚 程 平 王宝园 (183)
- 69 底部流动的数值模拟研究 高 艳 王汝权 (187)
- 70 湖水中纵向污染物分布的数值模拟 谭 宏 (190)
- 71 原子核耗散流体动力学研究中有有效薛定谔解法 冯仁发 (193)
- 72 两同心球之间 Couette 流的数值模拟 傅德薰 苏莉萍 马延文 (196)
- 73 一类非线性对流-扩散问题的特征-差分解法 由同顺 孙 澈 (199)
- 74 求解 Burgers 方程的部分迎风有限元方法 胡健伟 田春松 (202)
- 75 一类确定咸水锋面位置的积分 刘保东 (205)
- 76 航天飞行器高超声速绕流计算 杨明亮 邬华谟 胡长青 王厘尔 (208)
- 77 强激光与铝靶相互作用的数值模拟 王心正 曹莉华 (211)
- 78 流体现象的计算机模拟——多粒子格子气模型 何 军 (214)
- 79 园管汇流问题的格子气模拟 聂思翔 (216)
- 80 定常 Navier-Stokes 方程的 Petrov-Galerkin 和 Streamline Diffusion
有限元方法 李开泰 马逸尘 化存才 (218)
- 81 速度-涡形式的 N-S 方程的数值研究 张英健 冯国泰 石道中 (222)
- 82 多介质二维 LES 流体力学计算程序 柳进转 王元书 (225)
- 83 地下水电站通风竖井事故烟气的温降 王厚华 蔡增基 赵鸿寿 (226)
- 84 球面大气中保守流的轨迹计算分析 陆汉城 雷兆崇 (229)
- 85 迎风通量差分分裂方法对边界层特性的准确模拟
..... 薛具奎 王汝权 赵金保 (231)
- 86 二维抛物问题的 Chebyshev-Tau 数值方法 赵金保 吕克璞 孙建安 (234)

- 87 An Implicit, Upwind, Finite Volume Scheme for the Simulation of
Three-Dimensional Steady Inviscid Flows Rangfu Chen (陈让福) (237)
- 88 研究含灰气体激波的一种高分辨率数值方法 吴清松 王柏懿 (240)
- 89 一种数值计算弹塑性流的拉格朗日差分方法及其在高速碰撞问题中的应用
..... 李荫藩 梁珍璇 吴 坚 徐赤斌 (243)
- 90 Benard 花纹的格子气模拟 李元香 康立山 (246)
- 91 多孔介质中不可压缩流体的可混溶驱动问题的配置法 鲁统超 (249)
- 92 大攻角气动力数值计算方法的研究 张池平 王尊正 孙 同 冯国泰 (252)
- 93 椭圆截面导弹体大攻角涡流三维时均 N-S 方程数值计算
..... 王尊正 孙 同 张池平 冯国泰 (255)

NAVIER-STOKES 方程组的边界元解

祝家麟
(重庆建筑工程学院)

NUMERICAL SOLUTION OF NAVIER-STOKES EQUATIONS BY BOUNDARY ELEMENTS

Zhu Jialin
(Chongqing Institute of Architecture and Engineering)

ABSTRACT

This paper summarizes the numerical procedures based on boundary integral equations for the solution of Navier-Stokes equations in terms of different variables. The approaches to deal with the non-linearity are discussed.

一. 前言

计算流体力学的一个核心问题是数值求解由 Navier-Stokes 方程和连续性方程组成的方程组(简称 N-S 方程组)。传统的方法是用有限差分法和有限单元法。近十余年来边界元法或称为边界积分方程法也广泛用于不可压缩粘性流问题的数值计算。边界元法有特别适应于处理外部绕流问题等优点。但由于 N-S 方程组的非线性性,用边界元法求解时在边界积分方程中仍要出现含未知量的体积分。这要大大降低边界元法能减少空间维数、节省计算量的优点。因而边界元法的引入并不意味着它应取代有限差分法和有限单元法,而是作为这两种方法补充的一种方法。不同的方法各据优势,把它们耦合起来使用往往能得到更好的效果。本文介绍用边界元法求解 N-S 方程组时基于不同变量的边界积分公式以及处理非线性积分方程的方法。边界元法的基本思想是利用 Green 公式(广义 Green 公式或分部积分)和基本解把区域上的积分转化为边界上的积分。事先知道可用于实际计算的基本解是实现边界元方法的前提。由于求解 N-S 方程组存在着几种不同的公式体系,采用的变量也各不相同。为了得到积分表达式,要根据不同的公式化途径采用相应的线性微分算子的基本解。

二. 积分方程的推导方法

边界元法处理带时间变量的问题通常有以下几种方法:

1. 对时间变量作 Laplace 变换,把原方程转化为椭圆型后再导出边界积分方程求解。最后要作数值反变换才得到依赖于时间的解。由于反变换本质上是一个曲线拟合过程,参数的选取对结果的稳定性和有效性影响很大。目前还未见有把这种方式用于求解 N-S 方程组的文献。

2. 把非线性惯性力项移到方程右端,形式上视为非齐次 Stokes 方程组。

$$\begin{aligned} u_i - \nu \Delta u + \nabla p &= f - (u \cdot \nabla)u \\ \nabla \cdot u &= 0 \end{aligned}$$

利用线性非定常 Stokes 方程组的基本解[3]和相应的 Green 公式可将问题转化为带时间和空间变量的非线性积分方程组[5]。

3. 把时间变量的导数用差分表示, N-S 方程组可表示为椭圆型方程

$$\begin{aligned} \lambda u_k - \nu \Delta u_k + \nabla p_k &= \lambda u_{k-1} + f_k - (u_k \cdot \nabla) u_k \equiv g \\ \nabla \cdot u_k &= 0 \end{aligned}$$

λ^{-1} 是时间步长, ν 是运动粘性系数, u_k, p_k 是第 k 步时的速度和压力。可利用对应的齐次方程的基本解[1, 2]和广义 Green 公式得到边界积分方程。

4. 以速度-涡量为变量的边界元解法以 Wu 等人的工作为代表[7, 4]。涡量定义为 $\omega = \nabla \times u$, 把涡量输运方程的非线性部分移到方程右端, 视为非齐次扩散方程

$$\nu \Delta \omega - \omega_t = -\nabla \times (u \times \omega)$$

可利用线性非定常扩散方程的基本解得出关于涡量和速度的积分方程, 并据此用迭代方法计算出涡量的分布(首先要计算出涡量的边界值和区域内前一步的速度场), 最后速度由涡量的积分表达式计算。这个表达式只涉及到流动的运动学部分, 可用 Green 公式和 Laplace 方程的基本解推导出。

至于定常问题, 如果采用速度-压力作为基本变量, 可把 N-S 方程组视为非齐次的 Stokes 方程组, 用 Stokes 算子的基本解即可分别得出速度和压力的积分表达式。这种方法的好处是可把求速度和求压力分别开。根据边界条件的不同, 可采用第一类或第二类直接的或间接的等不同形式的积分方程[6, 8, 9, 11-14]。

定常问题仍可采用涡量-速度作为关联变量。采用 Laplace 算子的基本解可得出涡量的积分方程和速度的积分表达式。涡量由边界涡量和水头、区域内速度逐步迭代计算, 只是粘性区才需要计算涡量。这种公式便于分区计算无粘区、粘性区和边界层的流动[7]。

二维问题可用涡量和流函数或单独用流函数[10]作为变量。流函数满足四阶偏微分可视为非齐次重调和方程, 利用重调和算子的基本解可推导出积分方程。

三. 非线性积分方程的边界元处理方法

对带体积分项的边界积分方程, 在进行边界元离散化时也必须将区域剖分为单元。对非滑动或滑动边界条件问题也可用 Galerkin 边界有限元方法离散得出代数方程组[6, 11-14]。对混合边值问题, 一般用配置法(配点法)离散得到代数方程组。有两种方式:

1. 采用边界单元和内部单元联合求解的方式, 将以边界节点(设总数为 NB)和内部节点(设总数为 ND)为配置点建立方程(个数为 $NP = NB + ND$)。选定单元插值形函数, 可得到下列形式的非线性矩阵方程。对非定常问题, 在第 k 步时间段

$$[H]\{u_k\} - [G]\{q_k\} = [D]\{u_{k-1}\} + \{f_k\} - \{N(u_k)\} \equiv \{g(u_k, u_{k-1})\}$$

对定常问题是 $[H]\{u\} - [G]\{q\} = \{f\} - \{N(u)\} \equiv \{g(u)\}$

其中 $[H]$ 是 $NP \times NP$ 阶, $[G]$ 是 $NP \times NB$ 阶系数矩阵, 其元素由基本解和插值函数在边界单元上的积分确定。 $[D]$ 是 $NP \times ND$ 阶系数矩阵, $\{N(u)\}$ 是非线性惯性力项, $\{f\}$ 是节点力向量, 它们涉及到基本解和插值函数在区域内部单元上的积分, $\{u\}$ 是所有节点的速度向量, $\{q\}$ 是边界节点面力向量, 引进初、边界条件后得到以 $\{x\}$ 为未知向量 $\{y\}$ 为已知向量的非线性代数方程组 $[A(u)]\{x\} = \{y\}$ 。可采用 Newton-Raphson 等形式的迭代方法来求解这类非线性代数方程组[5]。一旦代数方程组解出, 全部节点值就

为已知, 可像有限元方法那样由形状函数直接计算边界和内部速度值。内部压力值是另由离散化的积分表达式计算的。

这种方法已经不是经典意义上的边界元方法, 但由于是从积分方程为出发点用配点法来得出离散的代数方程组, 我们还是把它归到边界元方法类。

2. 只取边界节点为配置点形成 NB 阶代数方程组(仍要对边界和内部区域剖分单元)

$$[H]\{u\} - [G]\{q\} = \{f\} - [B]\{b\} \equiv \{g\}$$

设定初始速度场(在以后的迭代中取为上一步的计算值), 则 ND 维向量 $\{b\}$ 为已知, NB \times ND 阶矩阵 $[B]$ 和 NB 维向量 $\{f\}$ 均由包含基本解和插值函数的被积函数在内部单元上的积分确定, 其中不包含未知量。引进边界条件后得到关于未知边界量的线性代数方程组 [8]。内点值要由离散化的积分表达式计算, 这个计算量是很大的。这种方法实质上是用仿体力和仿面力来代替线性边界积分方程中的体力和面力。迭代过程相当于有限元法解非线性问题时的增量法, 因而有限元法中一些很有成效的迭代措施及加速收敛方法可引入到这种边界元法中来。

参考文献

- (1) Borchers, W., Heibeker, F.K., The Boundary Element Spectral Method and Applications in 3-D Viscous Hydrodynamics, in: Boundary Elements VIII, Eds. Tanaka M., Brebbia C.A., Springer, 1986, 823-828.
- (2) 程纬, 三维非定常 Stokes 问题的边界元方法及其误差估计, 重庆建筑工程学院硕士研究生论文, 1988.
- (3) Ladyzhenskaya, O.A., The Mathematical Theory of Viscous Incompressible Flow, Gordon and Breach, New York, 1963.
- (4) Skerget, P., Alajevic, A., Brebbia, C.A., Vorticity-Velocity-Pressure Boundary Integral Formulation, in: Boundary Elements VIII, 1986, 829-834.
- (5) Tosaka, N. and Kakuda, K., Numerical Simulations for Incompressible Viscous Flow Problems Using the Integral Equation Methods, in: Boundary Elements VIII, Eds. Tanaka M., Brebbia C.A., Springer, 1986, 813-822.
- (6) Wendland, W.L., Zhu, J., The Boundary Element Method for Three-Dimensional Stokes Flow Exterior to an Open Surface, Mathl. Comput. Modelling, Vol. 15, No. 6, 1991, 19-41.
- (7) Wu, J.C., Problems of General Viscous Flow, Developments in Boundary Element Methods, Vol. 2, Ch. 4, Appl. Sci. Publ., 1982.
- (8) 夏军飞, 袁政强, 谭宏, 祝家麟, 二维定常纳维叶-司托克斯方程组的边界元方法, 1991 计算数学天津会议论文集, 357-360.
- (9) Yuan Zhengqiang, Zhu Jialin, A Boundary Element Method for Steady Oscen Flow, Proc. of 2nd China-Japan Symp. on BEM., Eds. Du, Q., Tanaka M., Tsinghua Univ. Press, 1988, 213-220.
- (10) 祝家麟, 用边界积分方程法通过流函数解二维 Stokes 问题, 重庆建筑工程学院学报校庆三十周年特刊, 1982.10, 182-189.
- (11) Zhu Jialin, A Boundary Integral Equation Method for the Stationary Stokes Problem in 3D, in: Boundary Elements, Eds. Brebbia C.A. et al. Springer-Verlag, 1983, 283-292.
- (12) 祝家麟, 定常 STOKES 问题的边界积分方程法, 计算数学, 3(1986), 281-289.
- (13) Zhu Jialin, Asymptotic Error Estimates of BEM for Two-Dimensional Flow Problems in: Theory and Applications of Boundary Element Methods, Eds. M. Tanaka, Q. Du, Pergamon Press, Oxford, 1987, 295-304.
- (14) Zhu Jialin, The Boundary Integral Equation Method for Incompressible Viscous Flows with Slip Boundary Condition, ZAMM., 70(1990)6, T717-T719.

应用 GRGES 软件生成分区组合网格

敖超 张耀科 王平洽

(中国科学院计算中心)

一. 分区组合网格及其在应用中意义

在[1][2]中我们介绍了平面区域网格生成软件 GRGES 的设计及其初步应用, 作为软件研制的第一阶段, 主要实现的是对网格生成方法的选择、考验、改进和物理平面上单个连通区域到计算平面上单个矩形区域坐标变换的网格生成。最近我们在原有工作基础上, 将软件扩充为适合于平面分区组合网格的生成软件, 并作了一些典型实例应用。

所谓分区组合, 即在物理区域内引进一些分支切口, 将区域划分为若干个子区域, 对每个子区域选用适当的变换方法生成相应的网格, 整个区域的网络则由所有子区域网格组合而成。[3]中对有关问题作了较系统的论述。

对于比较复杂的物理区域中的网格, 希望将它变换到计算平面上单个矩形区域中的均匀网格, 往往是困难的。采用分区组合方法是克服上述困难的简单途径。从而使网格生成软件具有更加广泛的适当性和实用意义。

采用分区组合方法, 用户可以通过合理地划分子区域, 恰当地确定各子区域网格的类型和网格生成方法, 来达到改善整体网格分布及网格其它质量的目的。

用分区组合方法生成网格, 将一个总体网格生成问题, 分解成若干个子区域网格生成问题, 往往能降低问题的困难程度, 减少计算工作量, 提高网格生成效率。

二. 有关分区组合网格生成及应用的几个问题

(1) 网格线通过子区域边界的光滑性: 网格线的光滑性是生成的网格质量检查标准之一。分区组合网格如果各子区域公共边界上设置的格点分布一致, 可以保证网格线在子区域边界上的连续过渡。GRGES 软件方法库中选用的生成方法, 多数能保证网格线与区域上、下边界的正交要求, 能控制邻近上、下边界网格线与边界的网格距。合理地利用这些性质, 可以在某些子区域的公共边界上得到较高光滑程度的过渡。

(2) 子区域的划分: 子区域的划分和布局, 对于生成的网格将产生直接的影响。在实际应用时需要认真对待。结合 GRGES 软件的应用, 以下几点是值得注意的。

每个子区域都是一个曲线四边形, 它能较自然地变换到计算平面上的单个矩形。

子区域的划分, 应当同其网格类型的确定和生成方法的选择结合起来考虑。

子区域划分应尽可能保持物理区域具有的对称性或局部间的相似性。

子区域上、下边界的指定适应于网格线对边界正交性和光滑过渡的要求。

(3) 网格逻辑结构的复杂化及其影响: 物理平面连通区域到计算平面单个矩形区域变换所生成网格具有简单的逻辑结构, 区域每个格点都是相邻四个网格单元的公共顶点。采用分区组合方法生成网格, 由于子区域的划分及各子区域网格类型(H,O,C型)的选定, 整个网格的逻辑结构可能变得较为复杂。在子区域交界面上的某些点, 可能呈现不同类型的非正规结构[3]。利用这种网格求解实际问题, 网格度量系数的计算、被求解方程的坐标变换以及计算过程的控制均需作相应的特殊处理。

三. GRGES 软件的扩充及应用实例

在 GRGES 软件的设计阶段, 就充分地考虑了软件功能扩充的需要, 使得将它扩充为分区组合网格生成软件是很直接的工作. 扩充后的软件仍然保持原来具有的各种特色.

软件补充了子区域网格的平移、放大、旋转、对称等处理功能. 对于具有某种相似或对称特征的物理区域, 利用这些功能可以达到节省准备和计算工作量的效果.

利用扩充后的 GRGES 软件生成分区组合网格, 对物理区域的几何形状, 子区域的数目和划分方式原则上没有限制; 每个子区域的网格类型, 网格生成方法, 控制参数的确定都有较强的灵活性. 因此, 扩充后的软件具有较广泛的适应性.

图 1-6 给出了几个应用实例. 以下用 A(0)代表超限双线性插值方法; A(1) 多曲面方法; E(0) Laplace 方程方法; E(1) Poisson 方程方法; P 抛物型方程方法.

前台阶外流场网格(图 1). 区域划分为两个子区域, 都用 A(1)方法生成. 网格线与区域边界平均交角为 89.7° , 内点网格线最小交角 84.44° , 平均交角 88° . 这个例子虽然比较简单, 但不采用分区组合希望得到较好的计算网格也有一定困难.

含两个园孔的三连通区域网格(图 2). 区域划分为两个子区域. 在 O 型网格中嵌套一个 H 型网格. 分别选用 A(1)及 A(0)方法生成. 网格线与边界平均交角约 85° , 最小交角 64.83° , 平均交角约 84° . 此例若不分区选用 A(1)方法生成的网格分布很差, 有的同族网格线几乎相交. 说明采用分区组合方法, 可使生成的网格分布得到明显改善.

包含多孔的多连通区域网格(图 3). 网格由两个 O 型网格之间嵌套六个 H 型子区域网格生成. 生成时区域划分成十八个子区域. 用 E(1)方法生成其中三个子区域的网格. 其余子区域网格由旋转一定角度得到. 网格线最小交角 48.54° , 平均交角约 84° , 与中心孔平均交角 89.26° , 与其余孔平均交角约 71° .

绕园柱外流场网格(图 4). 区域划分为五个子区域, 除中心 O 型网格选用 A(1)方法生成外, 其余用 A(0)方法生成. 网格线与柱面交角 90° , 网格线最小交角为 42.6° , 平均交角约为 86° .

绕物体外流场网格(图 5). 此例与例 4 类似, 仅物体形状比较复杂. 区域划分为七个子区域, 除绕物体的 O 型网格选用 A(1)方法生成外, 其余用 A(0)方法生成. 网格线与物面平均交角 80.96° , 网格线最小交角 46.1° , 平均交角约 80° .

涡轮叶片外流场网格(图 6). 区域划分为四个子区域, 形成 H 型与 C 型组合网格. 为了适应上下外边界周期条件的要求, 相应格点的 x 坐标选得相同, 所以叶片尾部网格线交角较小, 最小的交角只有 20.76° , 叶片表面与网格线交角为 69.13° , 平均交角约 54° . 以上是选用 A(1), A(0)方法的结果, 选用其他方法可望得到一些改善.

参考文献

- [1] 张耀科, 王平治, 敖超, 蔡宗绪, 网格生成软件GRGES的设计与实现. 空气动力学报 1991 年第 1 期.
- [2] 张耀科, 王平治, 敖超, 蔡宗绪, 网格生成软件GRGES初步应用, (本会议论文集).
- [3] J. F. Thompson, Z. V. A. Warsi, C. W. Mastin Numerical Grid Generation Foundation and Applications, North-Holland, 1985.



图 1

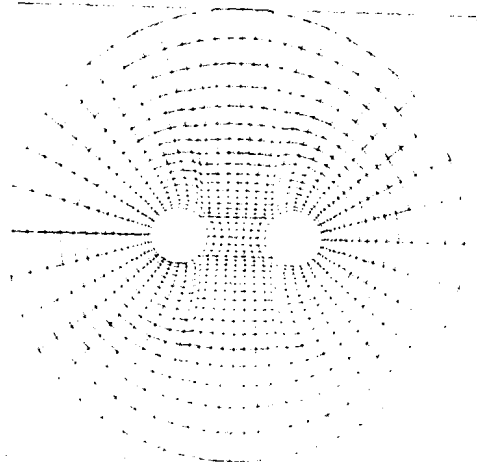


图 2

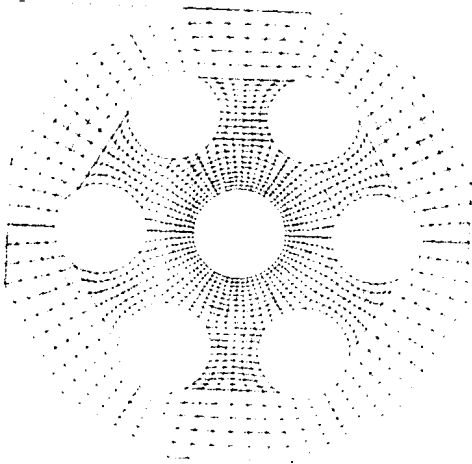


图 3

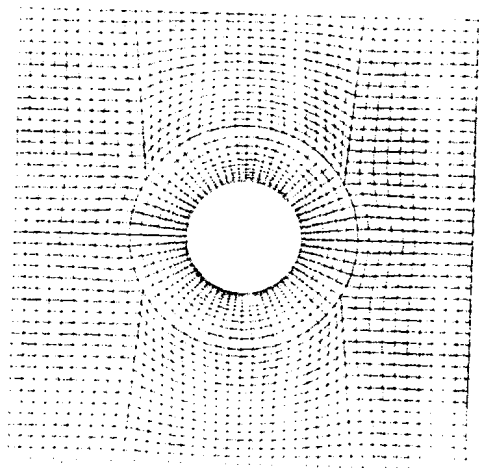


图 4

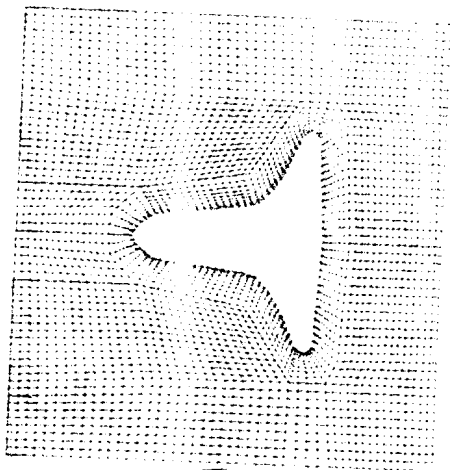


图 5

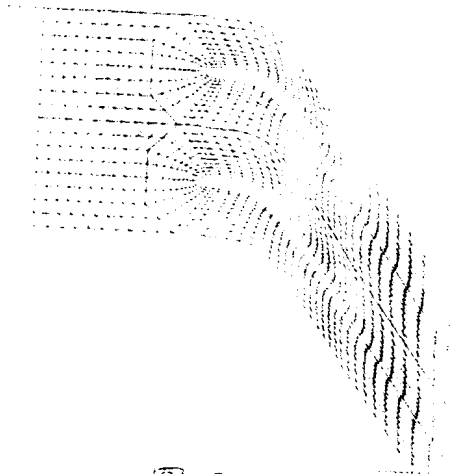


图 6

网格生成软件 GRGES 的初步应用

张耀科 王平洽 敖超 蔡宗绪

(中国科学院计算中心)

一. 前言

为了配合计算流体力学的迅速发展, 为了适应航空航天高科技问题数值求解的迫切需要, 我们研制了平面区域网格生成软件 GRGES. 这个软件包括七大模块, 即: 输入、预处理、服务性程序、方法库、网格质量自检程序、输出、总控分析程序, 程序全长约 6200 行 Fortran 语句. 作为通用的网格生成软件, GRGES 具有以下 4 点特色:

1. 对选用的网格生成方法作了局部改进和适当的技术处理, 使网格生成达到了正确快速的目标.

2. 关于边界形状数据和分支切口信息的设计实现了通用性、灵活性、简单性结合的原则, 能够满足计算流体问题的复杂需要.

3. 网格质量自检程序算出有关网格质量的特征数据, 帮助人们正确评估网格优劣.

4. 输入输出模块直观易用、灵活方便、录入程序具有较强的检错功能, 修改数据容易.

本软件生成的网格已用于高技术任务的计算, 对烧蚀钝头体流场、压缩拐角流场生成了适于超音粘流计算的网格, 在网格线合理布局、局部加密、物面上正交性等方面达到实用要求, 使流场计算精度有了明显提高. 在计算具有前台阶的管道超音流场时, 使用了本软件与自适应方法结合产生的网格, 使得激波反射的分辨率也有了明显提高.

GRGES 的设计思想已在文[1]中作了全面阐述, 本文只就初步应用情况讨论网格质量评估方法和网格生成方法的优缺点, 目的是帮助用户正确使用 GRGES 来生成符合自己流场计算需求的贴体网格.

二. 网格生成方法简介

GRGES 的方法库包括了四个网格生成程序:

1. 椭圆型方程网格生成. 计算平面上采用的拟线性椭圆型方程来自物理平面上的 Poisson 方程或 Laplace 方程, 作为第一边值问题差分化后采用松弛迭代法求解^[2]. 本方法适应范围广, 生成的网格光滑性好, 除少数情况外, Poisson 方程生成的网格在物面正交性上能达到较高质量.

2. 抛物型方程网格生成. 生成网格的抛物型差分方程是从椭圆型差分方程退化后得到的, 采用初边值问题解法从物面边界推进到外边界^[3], 网格生成速度比较快, 网格线光滑分布, 在物面边界上正交性比较好.

3. 代数方法网格生成. 包括超限双线性插值方法^[4]和多曲面方法^[5]两种网格生成. 本方法适应范围广、网格生成速度快, 多曲面方法生成网格在物面正交性上一般能达到较高质量.

4. 拟正交网格生成. 根据文[6], 从一个非正交网格开始, 保留一族网格线, 利用代数方法产生与其接近正交的另一族网格线, 网格生成速度快但适用范围比较小.

三. 网格生成例

按总体设计文件规定, 定义网格区域分类信息为:

IRG = 1 单连通区域 H 型网格

IRG = 2 双连通区域 O 型网格

IRG = 3 双连通区域 C 型网格

物理区域内一点的直角坐标和曲线坐标分别记为 (x, y) 和 (ξ, η) , 经 (x, y) 到 (ξ, η) 的坐标变换, 物理平面上三种网格区域皆变成计算平面上的矩形区域正方形网格, 定义: