文章编号:1000-5870(2003)05-0073-03

一种改进的二维平面区域三角形化的前沿推进法

修荣荣[1], 徐明海[1], 黄善波[1], 陶文铨[2]

(1. 石油大学储运与建筑工程学院,山东东营 257061; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院,西安 710049)

摘要:结合两点前沿推进和三点前沿推进法,提出了一种改进的二维平面区域前沿推进式三角形网格生成算法。交替使用两点前沿的生点连点和三点前沿的补充连点方法,避免了两点前沿算法中许多重复无效的操作,提高了算法的计算效率,同时网格保留了两点前沿推进法的局部最优特点。网格剖分实例计算表明,当网格单元数很多时,该文中提出的方法较两点前沿推进法省时 50 %以上,提高了质量优良的网格单元比例,并可以剔除质量极差的网格单元。利用背景网格信息可生成各向异性的、贴体性较好的网格,并可以保证第一层网格节点至边界的距离基本相等。

关键词:非结构网格;三角形网格生成算法;前沿推进法;网格剖分

中图分类号:TK 124, TP 391.41 **文献标识码**:A

引 言

近几十年来,由于非结构化网格对复杂区域边界的良好适应性、易于局部加密以及在构造自适应网格方面的灵活性,使其在数值计算中得到了广泛应用。为了提高剖分效率和改善网格质量,对二维区域的非结构化网格的剖分,以前沿推进法和 Delaunay 算法为基础,提出了许多改进方法。Delaunay 方法理论成熟,生成的网格系统具有全局最优的特点,但这种算法对实数运算的舍入误差极为敏感,易产生非正常中止问题。前沿推进法是一种经验方法,又可分为两点前沿推进法和三点前沿推进法。两点前沿推进法[1]是指在选定前沿边的垂直平分线上生成内点,生成的三角形接近于正三角形或等腰三角形,具有局部网格最优的特点,但为了判断所生点的有效性,需要反复检验线段相交情况,运算量较大。三点前沿推进方法[2]以相邻三点(两条相邻的前沿边)为基础,检验该两边的夹角大小,若其夹角是钝角,则在角的平分线上生成一点,与三点相连生成两个单元;若其夹角为锐角,则将两条前沿的非公共点直接相连,生成一个单元。三点前沿推进算法简单,每步操作都是有效的,时间效率较高,其缺点是只能剖分单连通区域。笔者结合这两种算法的优点,提出一种两点前沿法生点连点,三点前沿法补充连点的方法。

1 算法介绍

1.1 算法思想与步骤

笔者提出的算法的基本步骤与两点前沿推进法相似。首先把待剖分区域按照网格步长要求,剖分成首尾相接的线段,作为初始前沿。内部单元的生成分生点和连点两步。图 1 是两点前沿法中某一步的前沿分布,按两点法的规则,先生成一个候选点,然后搜索近距离的前沿点,进行排序和相交检验判断,若以 AB(图 2(a))为基边,则生成的点位于 C_2 点附近,不满足插入点的要求,则放弃生成的候选点。从图 2 中可以看出,许多相邻前沿的夹角是锐角(如 C_2A 与 AB 的夹角),只要将 BC_2 相连就可形成非常好的单元。显然,前述所有运算都是无效的。可见两点前沿法的连点是不充分的,导致了许多无效的操作。因此,提出新算法对两点前沿推进法进行改进。图 2 为改进算法示意图。其步骤如下。

(1) 内点生成过程同两点前沿法,在前沿中找一条边为基边(设为 AB),生成候选点 C,检验 C 点的有效性。若 C 点有效,则生成单元 ABC,转(2);否则,放弃 C 点,进行连点,转(3)。

(2) 分别检验 AC 和 BC 相连的前沿夹角,如图 2(b)中的 $\angle C_1AC$, $\angle CBC_2$。若 $\angle C_1AC$ 为锐角,则

收稿日期:2002-06-13

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G2000026303)

作者简介:修荣荣(1977 -),女(汉族),山东莱阳人,硕士研究生,从事 CFD/CHT 技术研究。

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

连接 C_1C, 生成单元 C_1AC 和新前沿 C_1C,删去前沿 C_1A 和 AC;若 $\angle CBC_2$ 为锐角,则连接 C_2C, 生成单元 CBC_2 和新前沿 C_2C,删去前沿 C_2B 和 CB。

(3) 检验前沿集中的边数 N_F 是否少于 3 个。若 $N_F > 3$ 则转(1),否则结束剖分。

同两点前沿推进法相比,本算法加强了连点操作,不仅是新生点与基边的两个点相连,而且还检验新点与基边相连的另两条前沿边的关系,并在适合的情况下生成单元。这样使得前沿围成的多边形边界趋于平滑,避免了锯齿状分布,从而使得每个生点过程都趋于有效,减少了无效运算。

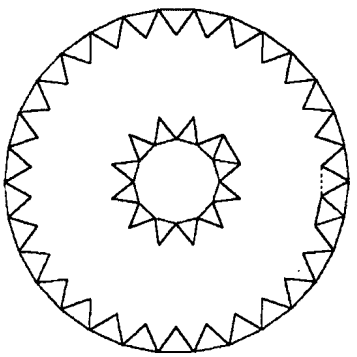

图 1 两点前沿法中某一步的前沿分布

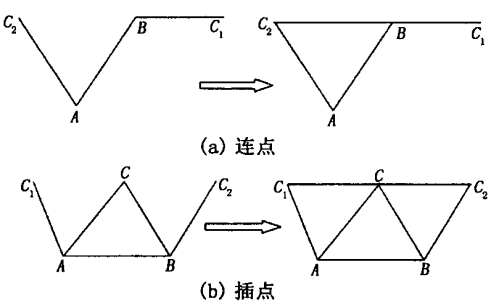

图 2 改进算法示意图

1.2 剖分结果分析

利用 C + + 语言对本算法编制了程序,针对不同复杂程度的区域进行了剖分检验,并就时间效率和网格质量两个方面同两点前沿方法进行对比。

1.2.1 时间效率对比

图 3 为四孔圆剖分图。对图 3 所示区域进行了剖分试验,得到了图 4。图 4 为两点前沿法[1]与本文算法的占用机时与网格单元数的对应关系。由图 4 可以看出,单元数相同时本文算法所需的 CPU 时间远小于两点前沿算法的,而且单元数越多节省时间越明显。当单元数为 60 000 左右时,占用的 CPU 时间可减少一半以上。

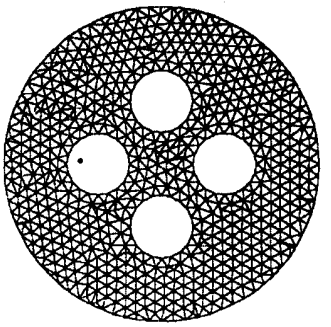

图 3 四孔圆剖分图

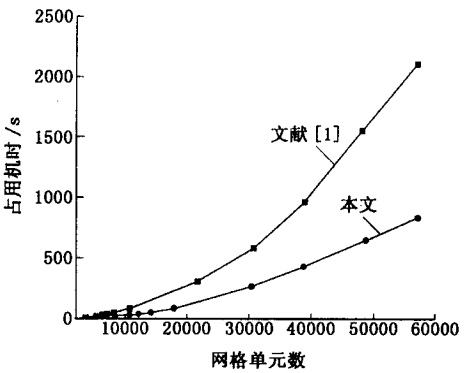

图 4 占用机时与网格单元数的关系

1.2.2 网格质量对比

生成的网格质量对数值计算有较大影响。若网格系统中有较多的斜三角形单元,将会影响数值计算的性态。对于各向同性的问题,一般要求单元也是各向同性的,且单元应尽量接近于正三角形。为评价网格单元的质量,须给出单元质量的定义。单元质量定义有许多种,例如最长边与最短边之比、内切圆半径与外接圆半径之比、三角形面积之比及边长平方和之比等。本文中定义单元质量 q 为内切圆半径 r_i 与外接圆半径 r_o 之比的 2 倍,即

$$q = 2\, r_i / r_o. \tag{1}$$

显然,对于正三角形, $q = 1$。q 值越小,表明偏离正三角形越远,网格质量越差。表 1 给出了两种算法的网格质量对比。

表 1 两种算法的网格质量统计结果对比

q	网格数目比例/ %	
	文献[1]	本算法
0.9～1.0	74.73	85.80
0.8～0.9	12.85	5.64
0.7～0.8	4.89	2.85
0.6～0.7	2.38	1.53
< 0.6	5.16	4.19

由表 1 可以看出,本文中网格质量为中等及以下的单元网格数目都比文献[1]中的有所减少,而质量最好的网格数却有了较大幅度提高,即质量在 q

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

=0.9～1.0 时网格数目比例较文献[1]的提高了 11 %之多。

1.3　网格的优化及光顺

网格的优化分为局部优化和整体光顺两步。

1.3.1　局部优化

由于前沿推进法的连点规则仅满足局部最优条件,这样会出现少数网格单元质量较差的情况,这对于数值计算非常不利[3]。局部优化的任务就是删除不适当的节点,改善网格质量。在剖分过程中,出现网格质量最差的情形是一个内节点仅有 3 或 4 个相邻节点。这样会在网格系统中出现钝角三角形,此时须进行局部优化。对于只有 3 个相邻节点的内节点,亦即 3 个较小的三角形位于一个较大的三角形内,将其删除,共享该点的 3 个单元合并为一个单元;对于只有 4 个相邻节点的内节点,将其删除,连接较短的对角线,合并成两个单元,如图 5 所示。

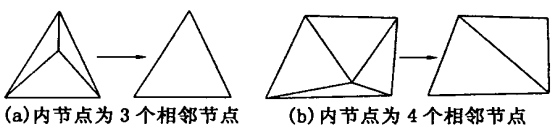

图 5　局部优化图

1.3.2　Laplacian 光顺

利用局部优化技术对极少数质量较差的单元进行处理后,再利用 Laplacian 光顺可进一步提高网格质量。Laplacian 光顺的本质是移动网格内部节点的位置,使其处在由共享此点的三角形单元所组成的多边形中心,计算式为

$$(x_i, y_i)^{\text{new}} = (x_i, y_i)^{\text{old}} + \frac{\omega}{n}\sum_{k=1}^{n}[(x_k, y_k) - (x_i, y_i)]. \tag{2}$$

式中,(x_i, y_i) 为被移动节点的坐标;(x_k, y_k) 为共享 (x_i, y_i) 点的所有三角形单元的顶点坐标;n 为节点 i 的相邻节点数目;ω 为松弛因子。

由于在光滑计算时每个节点周围的节点坐标不变,故需要反复迭代,可取 $\omega = 1$～1.2,一般迭代 10～20 次即可。

1.4　边界层网格的生成

非结构化网格虽然具有非常好的区域边界适应性,但不象结构化网格那样生成贴体性较好的各向异性网格。而在紊流和边界层流计算中贴体性较好的网格是必需的。如在高 Re 数的外掠物体流动中,为适应垂直于固体壁面方向上流动参数的剧烈变化,须采用扩展比很高的单元,即沿壁面切线方向网格步长较大,垂直于壁面方向网格步长较小,并且紧靠壁面的第一层网格节点到壁面的距离最好都相等。针对这种情形,笔者根据初始前沿的背景网格信息进行插点,生成第一层网格,更新前沿,再连接前沿点中的相邻节点形成第二层网格,这样沿着扩展方向层层推进,最终生成一层或多层扩展比很高的各向异性单元。

2　区域剖分实例

为验证本方法的有效性,利用其对单连通区域和多连通区域等不规则区域进行了剖分,剖分结果经过光滑后如图 6 所示。从图 6 可以看出,本方法可以生成均匀、可局部加密的及贴体性较好的各向异性非结构化网格。其中网格的局部加密是通过函数给出背景信息来实现的[4]。另外,壁面附近的各向异性网格的纵横比是可以控制的,以适应边界层流动和紊流中壁面函数法的要求。同时,第一层边界层的网格节点到壁面的距离相等,这对于计算表面换热系数和阻力系数非常有利[5]。

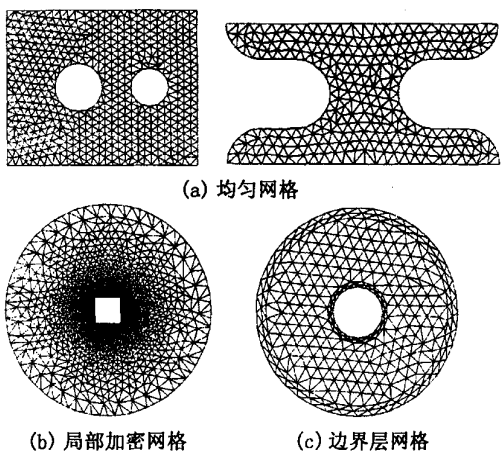

图 6　实例剖分结果

3　结束语

根据三点前沿推进法的思想,改进了两点前沿推进法,保留了其满足局部最优的生点策略,克服了其连点的不充分所导致的剖分效率低的缺点,明显改善了网格质量,大幅度提高了剖分效率,特别是网格数目较多时,可使剖分效率提高一倍以上。采用局部优化方法可以剔除质量极差的网格单元。利用背景网格信息可以生成各向异性的、贴体性较好的网格,并可以保证第一层网格节点到边界的距离基本相等。

(下转第 80 页)

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

表 7 3 种凝点计算方法偏差统计

计算方法	验证点数/个	凝点平均偏差/ ℃	凝点平均绝对偏差/ ℃	标准偏差/ ℃
线性加权法	60	- 2.96	3.16	3.89
式(1)法	59	- 0.71	1.19	1.44
式(1)+式(7)法	60	0.43	1.40	1.83

注:平均偏差 $= \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(T_c - T_m)$,

平均绝对偏差 $= \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}|T_c - T_m|$,

标准偏差 $= \sqrt{\frac{n\sum(T_c - T_m)^2 - \left[\sum(T_c - T_m)\right]^2}{n(n-1)}}$。

其中,n 为凝点验证总个数,T_c 为凝点计算值,T_m 为凝点实测值。

5 应用实例

某海上油田开发,需要设计混合原油的海底管道,但由于目前没有油样,不能测定两组分油等比例混合时的凝点,因而不能按现有的混合原油凝点计算模型确定混合原油的凝点。已知主力油层 1 的原油凝点约为 20～28 ℃,主力油层 2 的原油凝点约为 - 1～7 ℃。要求确定两种原油在不同配比条件下的凝点。用本文中提出的方法计算的混合原油凝点见图 2。

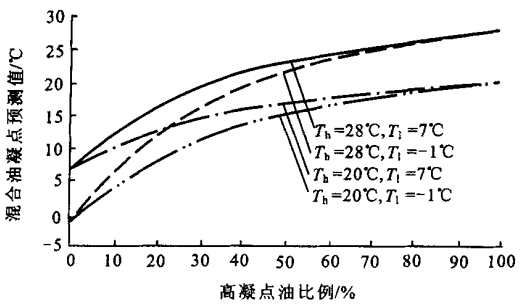

图 2 混合原油凝点计算实例

由图 2 可知,对凝点不完全确定的两组分原油的混合油,用新方法还可预测各配比条件下混合原油凝点的变化范围。

6 结 论

(1) 两组分油按 1∶1 混合后,混合原油凝点的实测值与线性加权方法计算值之差的绝对值与两组分原油各自凝点之差的绝对值之间具有良好的相关性,由此提出了混合原油凝点计算的一种新方法。对于任意组分的混合原油,在每两组分原油按 1∶1 混合后的混合原油凝点未知时,用新方法即可计算其在任意混合比例条件下的凝点。

(2) 新方法对混合原油凝点的计算结果与现有模型的计算结果的准确性相当。

(3) 对凝点不完全确定的两组分原油的混合油,此方法不仅可以进行凝点预测,还可预测各配比条件下混合原油凝点的变化范围。

参考文献:

[1] 刘天佑,孙维中,高艳清,徐诚. 多组分混合原油常温输送技术[J]. 油气储运,1999,18(9):1 - 7.

[2] 刘天佑,张秀杰,徐诚. 新疆混合原油凝固点的计算[J]. 油气储运,1993,12(2):37 - 42,45.

[3] 李闯文. 混合原油流变学及其配伍规律的研究[D]. 北京:石油大学石油天然气工程学院,1992.

[4] 徐诚,张秀杰,刘天佑. 多组分混合原油凝点与粘度的图示方法[J]. 油气田地面工程,1995,14(2):16 - 18.

[5] THOMASON W H. Start-up and shut-in issues for subsea production of high paraffinic crudes [A]. Offshore Technology Conf, Houston, Texas, 2000, OTC - 11967,503 - 513.

(责任编辑 沈玉英)

(上接第 69 页)

参考文献:

[1] 张彦廷,李增亮,王旱祥. 地面驱动螺杆泵油井生产系统的优化设计[J]. 石油矿场机械,2000,29(1):24 - 26.

[2] 王旱祥,娄晖,张彦廷. 单螺杆泵气液两相混输试验研究[J]. 石油矿场机械,2000,29(3):44 - 46.

(责任编辑 沈玉英)

(上接第 75 页)

参考文献:

[1] PERAIRE J, VAHDATI M, MORGAN K, *et al*. Adaptive remeshing for compressible flow computations [J]. J Computer Physics,1987,72:449 - 466.

[2] ROBERT E. Mathematical and numerical properties of control-volume finite-element scheme for reservoir simulation [J]. SPE Reservoir Eng,1994,12:283 - 289.

[3] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京:科学出版社,2000. 19 - 22.

[4] 武洁,冯晋利. 三角形网格生成方法中一种提供背景信息的方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,1999,11(4):300 - 303.

[5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988. 439 - 447.

(责任编辑 沈玉英)

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

Abstract: An oil well production system with an electric submersible screw pump was studied. According to the production capacity of an oil well, and properties of screw pump, and the coordination of the whole assembly, the basic models for the subsystem of electric submersible screw pump in oil well were established by the use of the node analysis method and optimization technique. The highest efficiency or the lowest energy lost of the system under given output of a well was regarded as the object function in the model. The concerned conversion formulas and the optimization design process were proposed. The feasibility of the new optimization method was validated by an example in the actual application. This design method is effective for the optimization design of electric submersible screw pumps used for oil well production systems.

Key words: electric submersible pump; screw pump; optimization design method; node analysis method; mathematical model

NUMERICAL SIMULATION ON TURBULENT DIFFUSION FLAME OF GAS BURNER WITH SPINNING AIR/ *WANG Zong-ming, DUAN Xi-li, SUN Tao, et al. College of Mechanical and Electronic Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying* 257061/ *Shiyou Daxue Xuebao*, 2003, 27(5): 70～72

Abstract: The k-ε turbulent model, three-gas mixing combustion model and composite radiation model were applied to numerical simulation of the turbulent diffusion flame in a gas burner with spinning air. The results show that gas and air are mixed and burned rapidly with air spinning in the burner tile and near the front of the burner tile, and a central back flow region is formed. A high-temperature flow region exists in the front of the flame. The diameter of the gas orifice has a great influence on the flame length, and the position of the top gas orifice and the cone angle of the burner tile have a little effect on the flame length. As the excess coefficient of air and the air content in the combustion gas increase, the flame length decreases gradually. In the practice, the structures of burner and the operating conditions should be considered in order to enhance the efficiency and safety of the burner.

Key words: gas burner; turbulent; diffusion flame; numerical simulation; turbulent model; three-gas mixing combustion model; radiation model

AN IMPROVED TRIANGULATION METHOD FOR ARBITRARY TWO-DIMENSIONAL PLANAR DOMAIN USING ADVANCING FRONT TECHNIQUE/ *XIU Rong-rong, XU Ming-hai, HUANG Shan-bo, et al. College of Transport & Storage and Civil Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying* 257061/ *Shiyou Daxue Xuebao*, 2003, 27(5): 73～75

Abstract: An improved triangulation method for discretization of arbitrary two-dimensional planar domain was illustrated. It is a modified advancing front method and maintains the desirable features of Peraire's two-point algorithm and Robert's three-point algorithm. Compared with the two-point algorithm, it puts more emphases on the connecting nodes. Therefore, much invalid computation may be avoided, and the computation efficiency can also be improved. In addition, the mesh maintains the characters of local optimization of two-point algorithm. The mesh generation examples show that the consumption of CPU time is a half of that by two-point algorithm if the number of elements is enormous, and the percentage of high-quality elements also increases dramatically.

Key words: unstructured grid; triangulation method; advancing front technique; mesh generation

A NEW MODEL FOR DETERMINING GEL POINTS OF MIXED CRUDE / *CHEN Jun, ZHANG Jin-jun and ZHANG Fan. College of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China, Beijing* 102249/ *Shiyou Daxue Xuebao*, 2003, 27(5): 76～80

Abstract: When the gel points of mixed crude of two types of oils with one-to-one mixing ratio are calculated by commonly used models, it is necessary to determine the gel points of every mixture of bicomponent crude with one to one mixing-ratio, which causes great difficulties when the oil samples are unavailable. The analysis on the gel points of a large amount of crude mixtures shows that there exists a good correlativity between the measured values of gel points for mixed crude with one-to-one mixing ratio and the calculated ones by a linear weighted method. Based on this fact, a new method for calculating gel points of mixed crude with any mixing-ratio was put forward. This method has independence on the gel point of the mixed crude with one-to-one mixing ratio. The experimental data of mixed crude of five groups of two-component to five-component oils verified that the new calculating method has an average deviation equivalent to that of the commonly used models.

Key words: mixed crude; gel point; calculation; mathematic model

CORROSION RESISTANCE OF GLASS COATING ON METAL SURFACE WITH THERMAL DEPOSITION

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.