

复杂断块油藏 Delaunay三角网格自动剖分技术

李玉坤, 姚 军

(中国石油大学(华东)工程力学系, 山东 东营 257061)

摘要:以平面散点集逐点插入 Delaunay三角化的方法为基础,根据复杂断块油藏数值试井计算精度的要求,在布点和三角化过程中采用一定策略,将 Delaunay三角网格方法改进成一种简单易用且适用于复杂断块油藏数值模拟的三角网格自动剖分方法,编程实现了复杂断块油藏 Delaunay三角网格自动剖分技术,根据该技术编写的程序控件成为数值试井软件中的一个高效模块。

关键词:数值计算;三角剖分;不规则边界;断块油藏

中图分类号: TE319

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2006)03-0058-03

近年来,中外许多油田先后进入中后期开发阶段,数值试井研究工作广泛开展。数值试井模型主要包括数值模拟器和参数估计器 2 个基本部分,其中数值模拟器与一般油藏数值模拟相比,其计算要求的精度高、网格大小、时间步长以及网格类型选择严格,建立的储层模型更精细、结构更复杂。而应用传统的规则矩形网格剖分渗流区域不够灵活,对于复杂断块油藏尤其突出。矩形网格虽然可以采用不等长间距来加密网格,但由于结点的增加使得计算工作量增大;另一方面,应用该方法只能用折线边界来近似弯曲渗流区域的边界,把复杂断块油藏的断层一般处理为一个特殊的渗流带。而三角网格的边界则更接近弯曲渗流区域的边界,并能方便地处理渗流区内的断层^[1-2]。因此,三角网格油藏数值模拟的研究工作^[3-4]已广泛开展,并逐步应用于工程实际。基于复杂断块油藏网格剖分的特殊要求,结合平面散点集 Delaunay三角剖分特点,实现了复杂断块油藏 Delaunay三角网格自动剖分。

1 Delaunay三角网格剖分基本原理

令 $D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_N\}$ 为平面域上 N 个离散点的集合,尽管有多种方法进行点集的三角剖分,但是苏联数学家 Delaunay 在 1934 年证明^[5]:必定存在且一定存在一种三角剖分(Delaunay三角剖分)的算法,使得所有三角形的最小内角之和最大。因此, Delaunay三角剖分能够尽可能地避免病态三角

形的出现,而这正是油藏数值模拟计算所期望的。

一般情况下,一个完整的 Voronoi 图由多个 Voronoi 多边形组成,第 i 个 Voronoi 多边形的数学表达式为

$$V_i = \left\{ x \mid R^2 \parallel x - D_i \parallel \right. \\ \left. \parallel x - D_j \parallel, i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j \right\} \quad (1)$$

式中: V_i 为第 i 个 Voronoi 多边形; x 为离散点; R^2 为平面域; $x - D_i$ 和 $x - D_j$ 为平面域上的点与节点 D_i 和 D_j 之间的欧氏距离; D_i 和 D_j 为节点。

式(1)说明 Voronoi 多边形内任意点和节点 D_i 之间的距离比到点集中任何其他节点的距离更近,因此, Voronoi 多边形由节点 D_i 和每个相邻节点的垂直平分线所形成的开式半平面的交集组成,故 Voronoi 多边形必为凸多边形。一般情况下, Voronoi 图的一个顶点同时属于 3 个 Voronoi 多边形,每个 Voronoi 多边形内有且仅有一个节点。连接 3 个共点的 Voronoi 多边形内对应的节点就形成一个 Delaunay 三角形,这样的三角形集合就是 Delaunay 三角剖分^[5-8](图 1)。

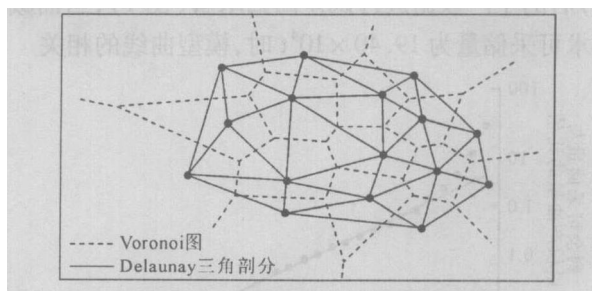


图 1 Delaunay三角剖分与 Voronoi图

收稿日期 2006-02-13; 改回日期 2005-04-11。

作者简介:李玉坤,男,1999年毕业于石油大学(华东)工程力学系并获工学硕士学位,现为中国石油大学(华东)油气田开发专业在读博士研究生,主要从事油气田工程力学计算方面的科研工作。联系电话:(0546)8398171, E-mail: mliyk@126.com。

2 网格剖分流程及实现技巧

鉴于复杂断块油藏数值模拟中网格剖分的特殊要求,网格剖分在遵循 Delaunay 三角网格基本原理的同时,还应遵循如下原则^[3,9-10]:油、水井必须是节点;在近油、水井带网格大小要与渗流压力分布规律相吻合;在断层附近网格的尺寸要合理;处理好井眼网格和断层网格之间的关系;保证井眼和断层附近网格质量。在满足上述条件的同时,实现复杂断块油藏网格自动剖分流程还需要以下 5 步。

2.1 绘制渗流区域边界形状

在指定区域上绘制油水井和断层,为数值模拟提供渗流边界条件(内外边界)。

2.2 内边界控制渗流节点的生成

生成的节点既要满足 Delaunay 三角化网格的要求,还要满足复杂断块油田网格剖分的要求。根据渗流场压力分布特点和压力计算精度要求,布点须分 4 个层次。

2.2.1 井眼周边的布点

平面渗流的压力分布公式为

$$p = p_w + \frac{p_e - p_w}{\ln \frac{R_e}{R_w}} \ln \frac{R}{R_w} \quad (2)$$

式中: p 为求解域压力, MPa; p_w 为井底压力, MPa; p_e 为原始地层压力, MPa; R_e 为求解半径(因变量), m; R 为求解域外半径, m; R_w 为井筒半径, m。

从式(2)中可知,在油、水井近井地带存在压力漏斗。当求解半径成等比变化时,求解域压力成等差变化。为了更好地控制计算精度,节点应分布在以井眼为中心的同心圆上(图 2)。把半径扩展比例因子定义为

$$= \frac{R_k}{R_{k-1}} \quad (3)$$

式中: 为比例因子; R_k 为第 k 布点层的半径, m; R_{k-1} 为第 $k-1$ 布点层的半径, m。

比例因子的大小可以根据网格规模和计算精度要求由用户自主调整和设定。另外,在第 k 个圆上,当求解半径等于第 k 布点层的半径时,为了控制三角形网格剖分的质量,使网格形状因子等于或近似等于 1,布点距离采用一个等长弦长(等长弦长 $l = R_k - R_{k-1}$)来平分圆周长。该弦长把圆分为 n 等分,其中 n 几乎无法取到整数,将 n 四舍五入得到一个

整数,再重新计算弦长。这样得到的形状因子几乎全部约等于 1,即 $l_1 \approx l_2 \approx l_3$ (图 2)。

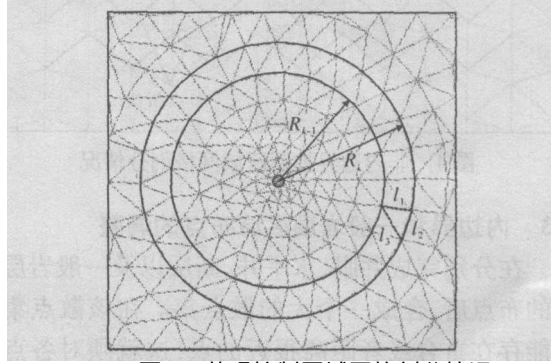


图 2 井眼控制区域网格剖分情况

2.2.2 水平井附近的布点

在水平井周边布点,首先要在水平井直线段上布点。根据计算精度要求,可以修改最小单元和比例因子大小(图 3)。在水平井段以外的部分,为了更好地控制网格规模和质量,布点方式与普通井眼类似。

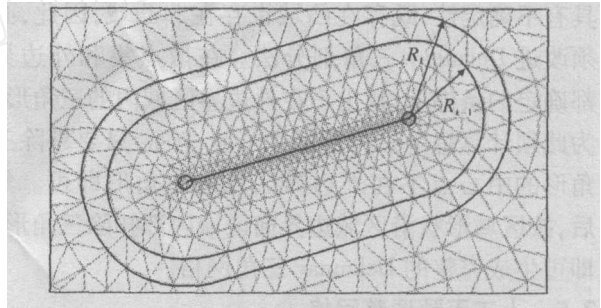


图 3 水平井眼控制区域网格剖分情况

2.2.3 断层附近的布点

在断层渗流速度为零即压力导数等于零的内边界上,其位置和形状等因素对计算结果精度有着举足轻重的影响。因此,控制断层周边的网格尺寸和形状十分重要。

为了更好地控制网格规模和质量,采用与水平井眼类似的做法(图 3)。在断层上先布置第一层结点,结点的距离一般参考整个区域网格尺寸。采用该方法进行的多次试算结果表明,网格尺寸控制在整个区域网格的 $1/3$ 即可,当然也可以根据计算精度和计算规模来控制断层上的结点间距。

2.2.4 边界和未填充区域的布点

前面介绍了内边界控制区域的布点,但还有一部分区域没有布点。这些区域的布点多采用余弦折线法^[7],采用余弦规律的折线来保证三角形单元的质量。通过图 4 可以直观地看出 $l_1 \approx l_2 \approx l_3$,单元的形状因子约等于 1。

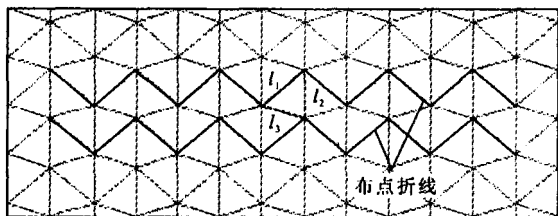


图 4 非内边界控制区域网格剖分情况

2.3 内边界和一般岩层区域布点的调整

在分别完成井眼、水平井、断层以及一般岩层区域的布点后,合成一个大的散点集。在该散点集中可能存在重合或者距离很近的点,这就须对各点进行循环查找并计算最近两点间的距离,若该距离小于定义的最小距离,就把其中一个点从该散点集中剔除,最后形成一个新的 Delaunay三角化散点集。

2.4 Delaunay三角化过程

根据 Delaunay三角网格剖分基本原理, Delaunay三角剖分只适用于凸域,不适用于非凸域和内部边界情况。但是复杂断块油藏的内、外边界形状具有不确定性,既存在凸域也存在非凸域,因此,必须改进 Delaunay三角剖分法。在散点集和外边界都确定的条件下,找出不在外边界区域内的三角形,为此须计算每个三角形的中心点坐标,只要剔除三角形的中心点不在外边界区域的三角形即可。然后,按区域形状沿区域边界向区域内部扣除三角形,即可生成完整的 Delaunay三角网格。

2.5 人工干预调整网格

采用改进的 Delaunay三角网格自动生成整个区域的网格后,可能不会完全满足实际工程计算要求。此时,可以手动加密部分区域的网格,并最终生成数值计算所需的节点和网格数据文件。图 5 是某渗流区域的网格剖分结果图,图中共有 1 370 个节点, 3 399 个单元,各比例因子都等于 1.4。

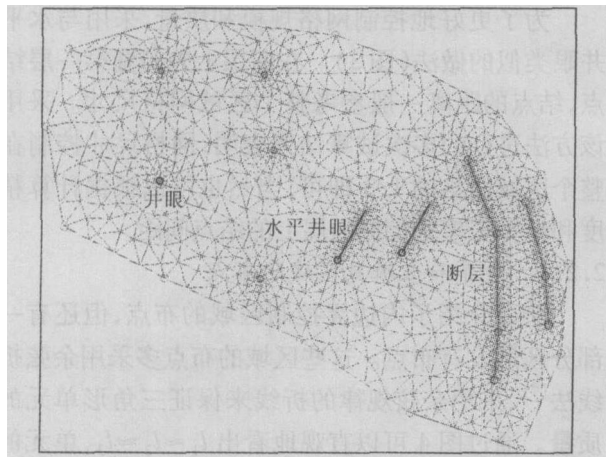


图 5 某渗流区域的网格剖分

3 程序实现

基于 windows 平台进行 Visual Basic 编程,把复杂断块油藏 Delaunay三角网格自动剖分技术集成在一个独立的控件里,使之成为数值试井软件系统中一个独立编程的模块。根据复杂断块油藏网格剖分流程及实现技巧,采用独立控件的形式进行了代码编写。

4 结束语

通过复杂断块油藏 Delaunay三角形网格自动剖分软件的一些关键技术介绍,对复杂断块油藏渗流机理和数值试井计算精度要求提出了布点原则,引入了 Delaunay三角形网格剖分技术并加以改进后能够适用于各种复杂的油藏边界条件。据此编写的控件模块程序已成功地应用于数值试井软件系统,成为数值试井软件系统快捷、高效的前处理模块。

参考文献:

- [1] 张艳玉,崔红霞,韩会军,等.低渗透油藏天然气驱提高采收率数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2005,12(4):61-63.
- [2] 李士伦,周守信,杜建芬,等.国内外注气提高石油采收率技术回顾与展望[J].油气地质与采收率,2002,9(2):1-5.
- [3] 谢海兵,桓冠仁,郭尚平,等.PEBI网格二维两相流数值模拟[J].石油学报,1999,20(2):57-61.
- [4] 谢海兵,马远乐,桓冠仁,等.非结构网格油藏数值模拟方法研究[J].石油学报,2001,22(1):63-67.
- [5] 李世森,朱志夏,秦岭,等.任意平面区域的自动三角剖分[J].天津大学学报,2000,33(5):592-598.
- [6] Yang Qin, Xu Yongan, Chen Qining, et al Research on 3D constrained Delaunay triangulation [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12(8): 590-594.
- [7] Avis D, Toassaint T. An efficient algorithm for decomposing a polygon into star-shaped polygons[J]. Pattern Recognition, 1981, 13(6): 395-398.
- [8] 德乔姆凡 P,封查那帕尼 S 用于高速可压缩流体分析的带多维耗散格式的自适应 Delaunay三角剖分[J].应用数学和力学,2005,10(2):1216-1228.
- [9] 张培军,戴宗,杨锦林.非均质油藏数值模拟的网络自动剖分[J].成都理工学院学报,1996,23(4):68-74.
- [10] 武兵厂,姚军,张继宏,等.水平井与直井联合井网见水时间的确定方法[J].石油学报,2005,26(4):111-114.

编辑 刘文强

IPR of the horizontal wells, and the new method should be adopted.

Key words: inflow performance relationship, horizontal well, three - phase fluid, calculation model, correlation analysis

Chen Dechun, College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying City, Shandong Province, 257061, China

Qu Zhanqing, Zhang Qi, Wu Zhimin et al. Experimental research on electric analogy of the productivity of fractured horizontal well. *PGRE*, 2006, 13 (3) : 53 ~ 55

The productivity of the horizontal well should be forecasted before fracturing. Voltage and current density of the model of fractured horizontal well are measured in the electric analogy experiment. The productivity of the horizontal well may be calculated through converting the experimental data into the simulated oil reservoir data. The results of this experiment reveal that the adopted prediction formula is much accurate, and the tested productivity agrees with the reality. As a result, the data of electric analogy experiment may characterize the values of the productivity of the fractured horizontal well under the similar conditions. The goal of high - speed prediction on the productivity of the horizontal well was achieved.

Key words: horizontal well, fracturing, shape factor, electric analogy, productivity prediction

Qu Zhanqing, College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying City, Shandong Province, 257061, China

Zhang Jialiang, Yu Yuanzhou, Xing Weidong et al. Improvement and application of Logistic model to recoverable reserves forecast in oil - gas reservoir. *PGRE*, 2006, 13 (3) : 56 ~ 57

An oil - gas reservoir certainly will go through the reality of production rate decline and balanced revenue and expenditure of production. For more accurately forecasting the future economic recoverable reserves of oil - gas reservoir, Logistic model is derived and improved when abandonment oil production rate under currently economic technical condition is considered. Effective production time and economic recoverable reserves of the oil - gas reservoir are predicted according to the relationship among technical recoverable reserves, oil production and time as well as the abandonment oil production rate. The practice proves that the result predicted by the improved Logistic model is more fit for the real production of the oil - gas reservoir, and can provide the reliable theory basis for its reserves management of the oil - gas reservoir.

Key words: oil - gas reservoir, forecasting model, economy,

recoverable reserves, abandonment oil production rate, production time

Zhang Jialiang, Energy College, Chengdu University of Technology, Chengdu City, Sichuan Province, 610059, China

Li Yukun, Yao Jun. The automatic dissected technology of Delaunay triangular grids for complex fault - block oil reservoir. *PGRE*, 2006, 13 (3) : 58 ~ 60

Based on the Delaunay triangular method inserted point by point in planar scattered set, Delaunay triangulation method is improved to an automatic dissected method of triangular grids suitable to numerical simulation of the complex fault - block oil reservoir by using certain strategy during dotting and triangulation according to the demands of calculation accuracy of numerical well testing in the oil reservoir. The new method may be realized through programming. Program control unit programmed according to the technology has become an efficient module in the well testing software.

Key words: numerical calculation, triangulation, irregular boundary, fault - Block oil reservoir

Li Yukun, Department of Engineering Mechanics, China University of Petroleum (East China), Dongying City, Shandong Province, 257061, China

Lu Guangqin. Change mechanism of permeability in high - saliferous reservoir by waterflooding. *PGRE*, 2006, 13 (3) : 61 ~ 63

In order to study the change mechanism of permeability in high - saliferous oil reservoir by waterflooding, the change of it is studied under different displacement rate, salinity, core permeability, injected water quality, multiple of displacement volume on the basis of experiments in microscopic pore model of core slice. Microscopic images of describing pore change are compared during the displacement process. The result shows that the changing trend of permeability is different with the various core permeability, salinity and displacement conditions after water drive. Particulates migrated during the displacement process. The dissolution of salt is the essential factors resulting in the change of reservoir permeability. The dissolution of dissoluble salt, existing as cementing matter, leads to the dropout and migration of rock particulates, which is the direct reason of the change of reservoir permeability.

Key words: high - saliferous oil reservoir, permeability, pore model, microscopic experiment

Lu Guangqin, Guizhou Geochemical Institute, CAS, Guiyang City, Guizhou Province, 550022, China

Jiang Haiyan, Lei Zhanxiang, Jiang Hanqiao et al. Re-