



角点网格及前后处理 (Corner-Point Grid and Pre- & Post- processing)

Li



提纲

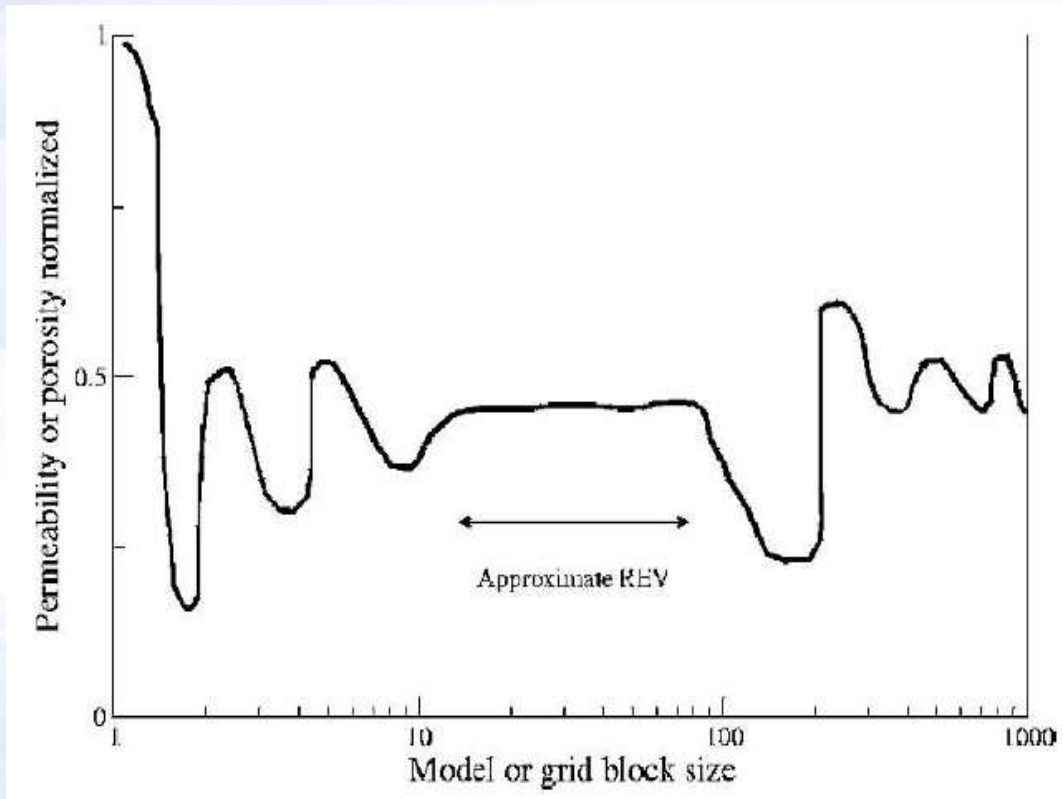
多孔介质模拟的尺度问题

角点网格原理

角点网格数据结构



多孔介质模拟的尺度问题

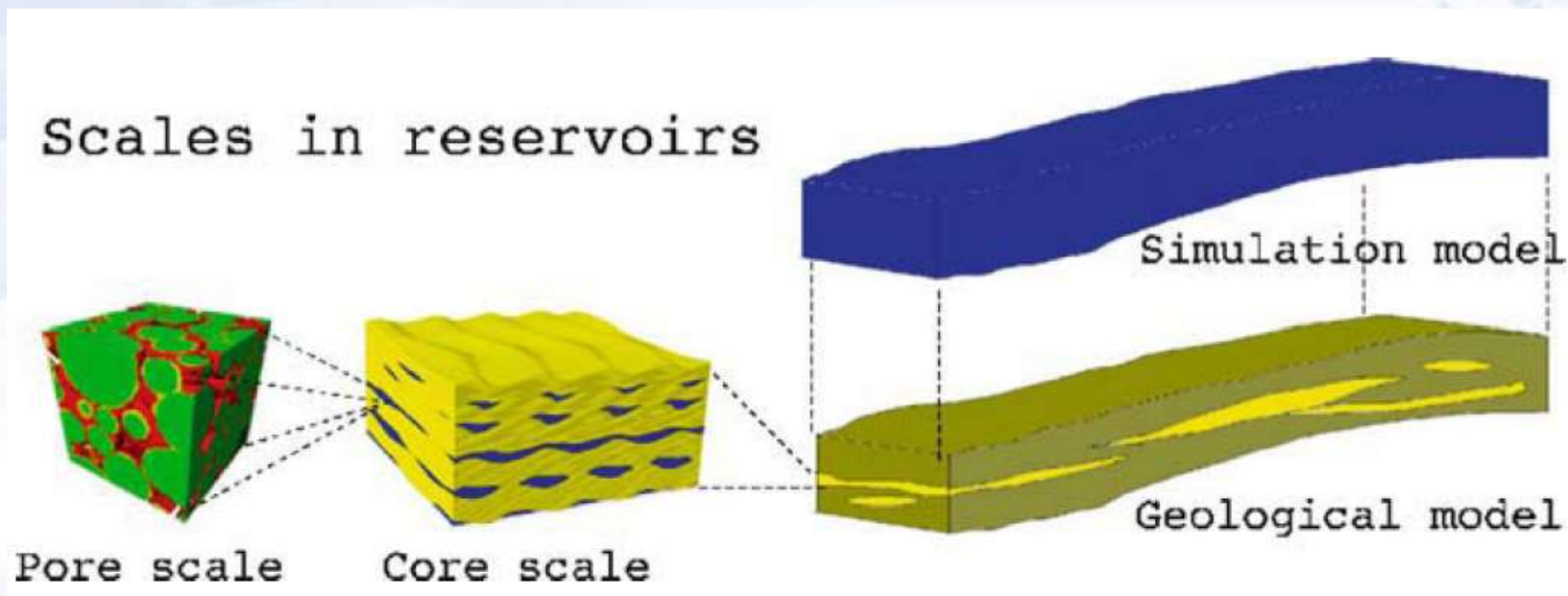


选择模型尺度，依靠representative elementary volumes (REVs)

Jorg E. Aarnes, Vegard Kippe, Knut-Andreas Lie, et al. Modelling of Multiscale Structures in Flow Simulations for Petroleum Reservoirs.



多孔介质模拟的尺度问题



下面讨论如图4种尺度的模型：

- pore scale models
- core scale models
- geological models
- simulation models



- pore scale models

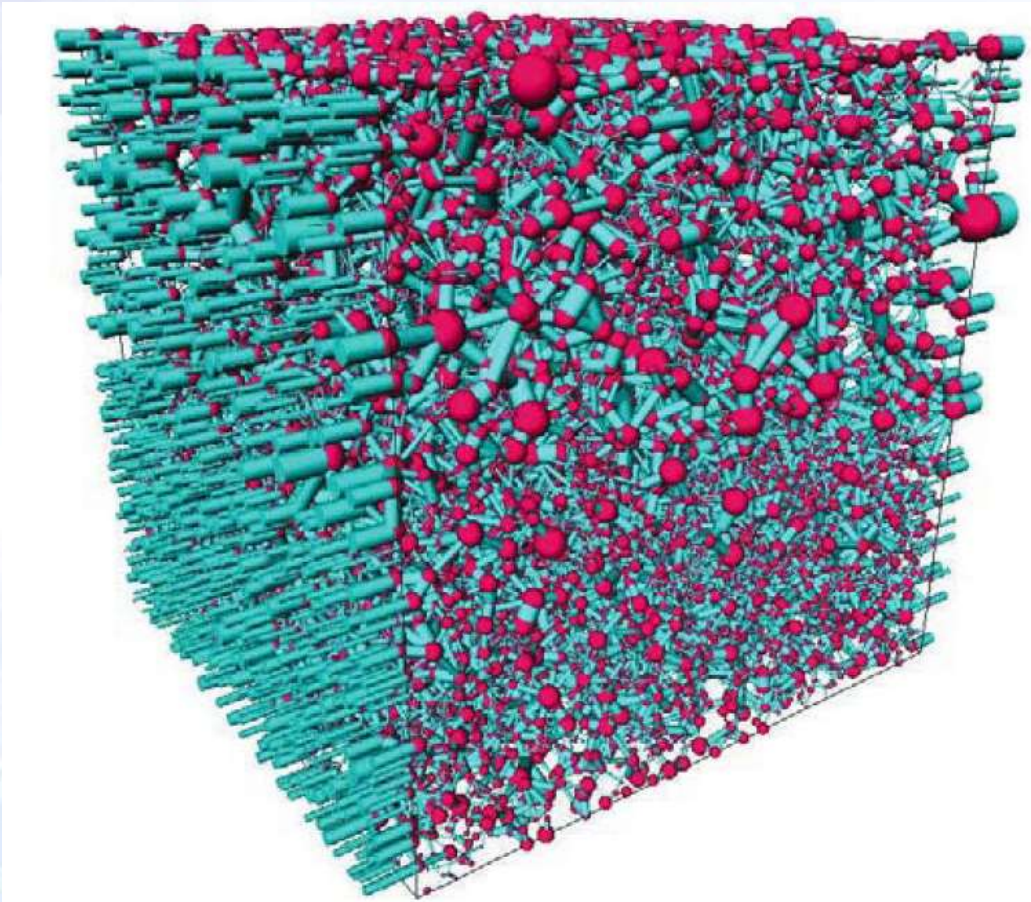


Fig. 4. Graphical illustration of a pore network.

invasion-percolation
process



- core scale models



Fig. 5. Three core plugs with diameter of one and a half inches, and a height of five centimetres.

Cores can therefore seldom be classified as representative elementary volumes.
more influenced by capillary forces than flow on a reservoir field scale.



• geological models

porosity and permeability

地质模型联合使用 stratigraphy (the study of rock layers and layering), sedimentology (study of sedimentary rocks), and interpretation of measured data.

Wells (Well-logs, limited resolution)

Seismic survey (ten meters)

Cores from wells (X-ray, CT-scan, electron microscope)

Geostatistics (地质建模)



多孔介质模拟的尺度问题

upscaling

do the partial differential equations modelling porous media flow at the coarse scale take the same form as the equations modelling flow at the subgrid level?

how do we honour the fine-scale heterogeneities at the coarse scale?



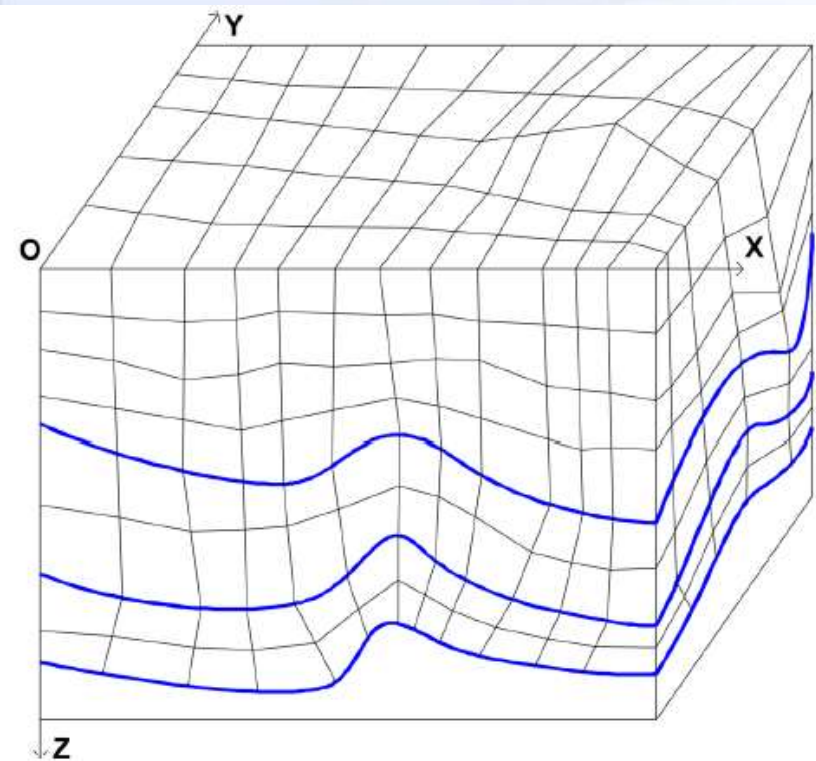
角点网格原理

一个角点网格 (Corner-point Grid)，是由一套六边形单元组成，以笛卡尔方式平行排列。在一个水平层上，分配到待模拟的沉积床面上。以最简单的形式，一个角点网格以一套垂直或倾斜的柱子 (pillar) 来定义，这些柱子定义在一个侧向方向上的有一定面积的笛卡尔2D网格上。体角点网格内的各单元由4个柱子约束，通过指定单元的8个角点来定义一个体角点网格。

Jørg E. Aarnes, Stein Krogstad, Knut-Andreas Lie. Multiscale mixed/mimetic methods on corner-point grids. Comput Geosci (2008) 12:297-315.



角点网格原理



柱状网格单元的退化，可表述各种复杂的地质构造。

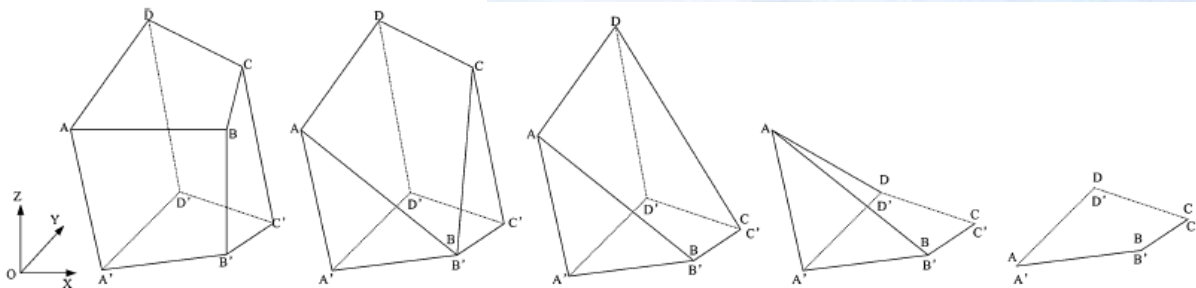


Fig. 3 Irregular hexahedron and its degenerative process



角点网格原理

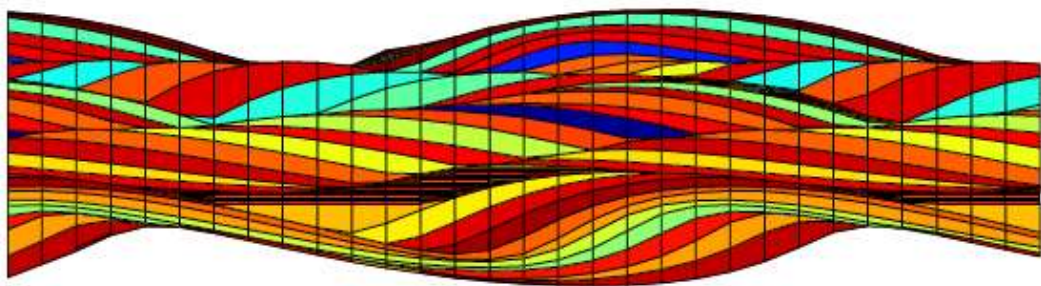


Fig. 1 Side view in the xz -plane of corner-point grid with vertical pillars modelling a stack of sedimentary beds (each layer indicated by a different colour)

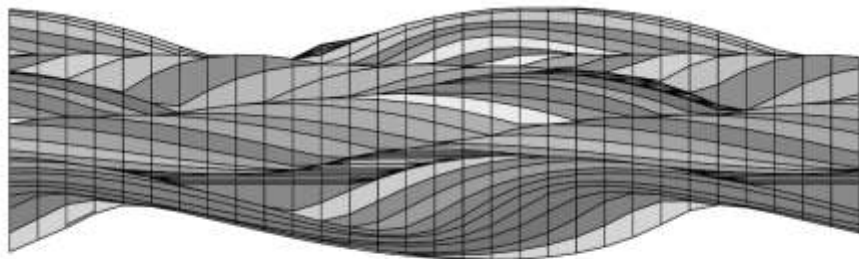


Fig. 2. Side view in the xz -plane of corner-point grid with vertical pillars modelling a stack of sedimentary beds (each layer indicated by a different colour).

图2显示了一个角点网格的侧视图。注意：有退化单元的情况，退化单元角点少于8个（不重叠的）角，其中的岩床部分冲蚀掉了。一些单元完全消失，因此引入新的单元连接，这些单元在笛卡尔网格上是不相邻的。

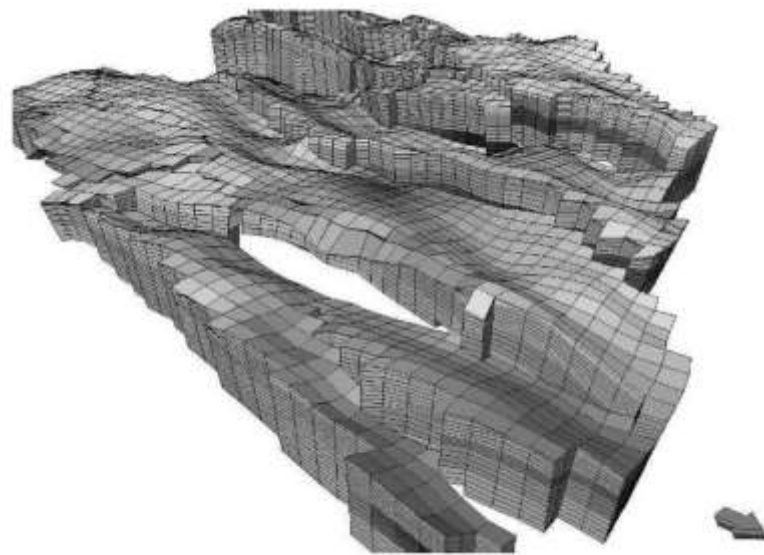


Fig. 3. Example of a geological grid model.



角点网格原理

使用地质模型作为流体模拟的输入会引入一些数值困难。首先，一般油藏在侧向上绵延数百或数千km，但包含碳水化合物的区域在垂向上仅数十m，由不同岩石特性的分层组成。因此，地质模型的网格单元有很高的长宽比通常大部分流体进出单元都发生在很小面积的界面上。类似地，渗透场的强各向异性和不均匀性通常会在离散流体方程引入高条件数。这些困难在规则的六面体单元组成的网格模型中也能观察到。



角点网格原理

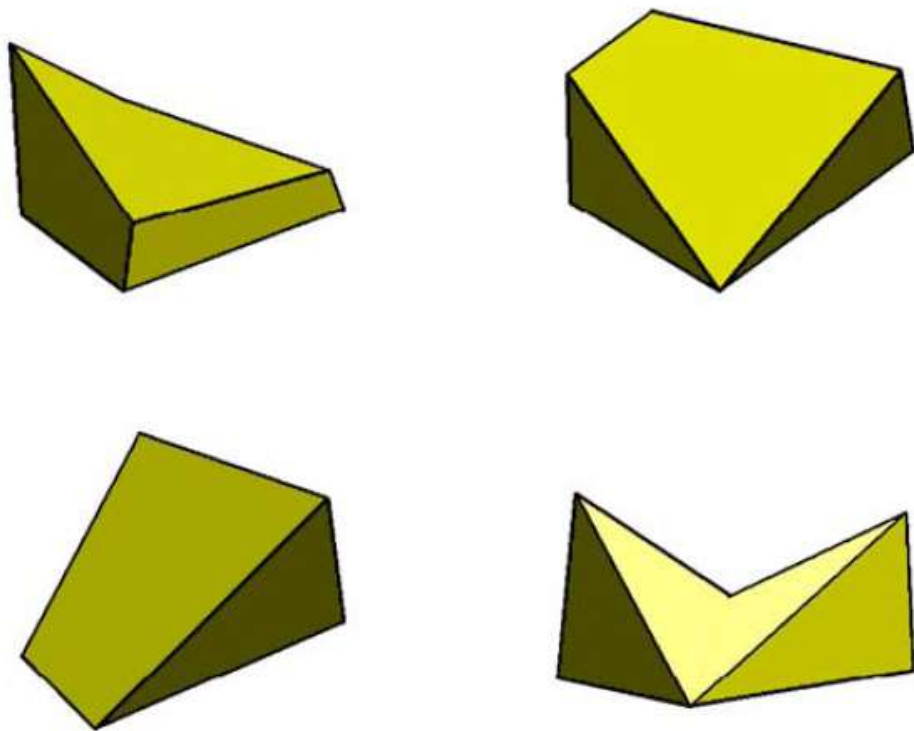


Fig. 2 Examples of deformed and degenerate hexahedral cells arising in corner-point grid models

角点格式的灵活几何单元引入其他困难。首先，因为网格单元的各面由4个任意点定义，网格中的单元界面通常为bilinear面，或者是曲面。第二，角点单元可能有不相邻单元耦合引入的0体积单元，引入具有复杂稀疏模式的矩阵。最后，有退化的单元，角点成对收缩，意味着这些单元会使多边形，或者包含bilinear或平面三角形面（见图2）。



角点网格原理

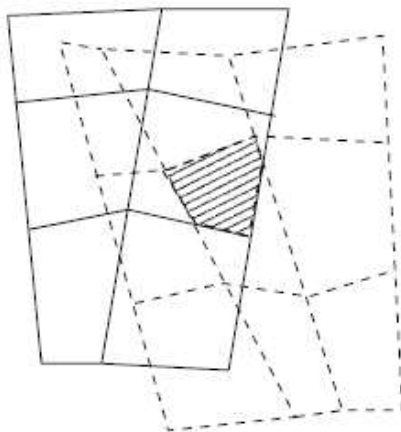
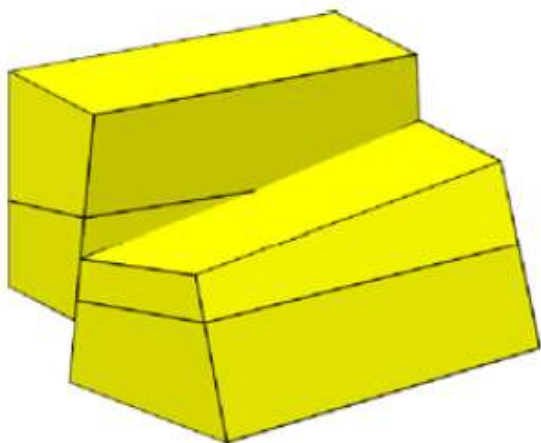


Fig. 3 Two examples of fault surface in a three-dimensional model with non-matching interfaces across the faults. *Left*, three-dimensional view. *Right*, two-dimensional view, where the *shaded patch* illustrates a “sub-interface” on the fault surface

这些都要要求灵活的离散方法，对各单元的结合形状、面的数目或角点不敏感。并且，离散方法能够处理 nonconforming 网格。使用角点网格时，Nonconforming 网格在断层区域产生，沿着超平面位移，如图3。另一个后果是，使用生成的粗网格，即 upscaling，通常很难。



角点网格数据结构

角点网格中的网格块(block)以笛卡尔逻辑形式排序。各网格块编号为 ijk ，其中整数 i 、 j 、 k 分别与3D空间坐标 x 、 y 、 z 相关。因此，角点网格与3D坐标系有关。逻辑编号 (i, j, k) 、局部坐标 (x, y, z) 和全局坐标 (x, y, z) 系统。 z 正方向总是向下（深度方向）。网格上的属性使用 i 编号，依次 j 编号，最后 k 编号的方式定义。角点网格支持不相邻的连接，意味着在 ijk 空间上不相邻的网格块可以定义为相邻关系。这种特征很适合表征有显著分离的断层形态。



角点网格数据结构

定义网格的关键词(ECLIPSE)

SPECGRID: 空格隔开的3个数字, nx , ny , nz , 各方向上的单元数。

MAPAXES: 6个数字, 在全局xyz坐标上的map点, 定义全局坐标到局部坐标的转换。

COORD: 各pillar的6个数字, pillar的顶部和底部角点的局部xyz坐标。

$(nx+1)*(ny+1)*6$ 个数字。

ZCORN: 对各单元的8个角点, 以一种特殊方式(见ECLIPSE手册)定义z值。

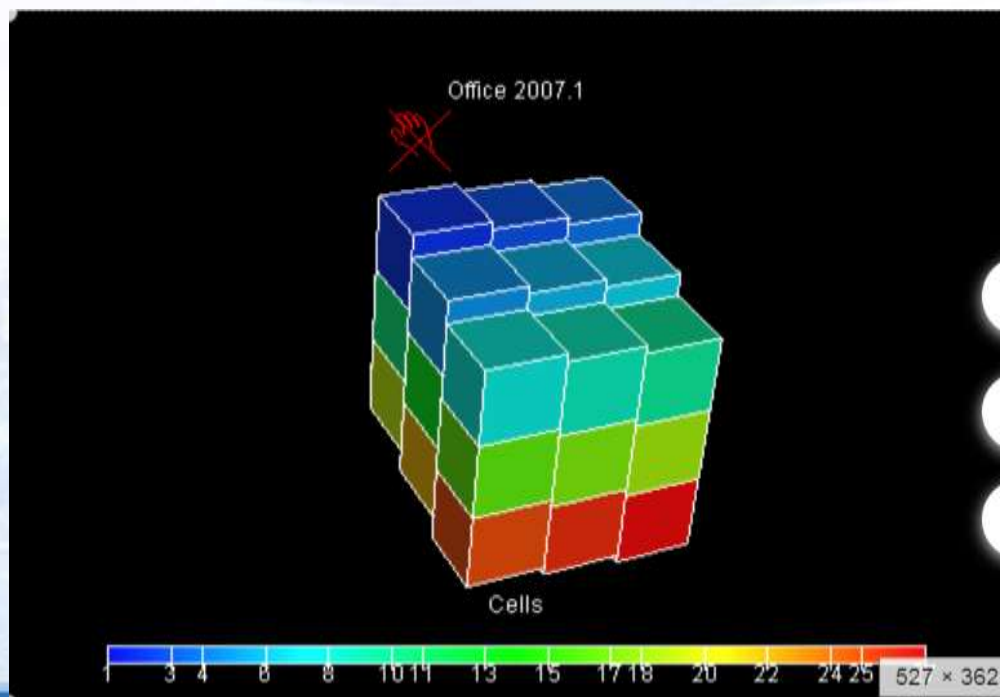


角点网格数据结构

ECLIPSE定义角点网格的由两个关键字，即COORD和ZCORN

(1) 先用COORD定义线，一共有 $(NI+1) * (NJ+1)$ 条线，其中N表示XY平面网格数目，一条线由两个点来定，一个点有X、Y、Z三个数据，所以紧跟在COORD后面的数据一共有 $(NI+1) * (NJ+1) * 2 * 3$ 个！注意：定义线的顺序是一条线一条线的定义，方向是从左到右，再从左到右。

例如以3*3*3的网格系统，COORD就定义16条线。在eclipse中就有16行数据。





角点网格数据结构

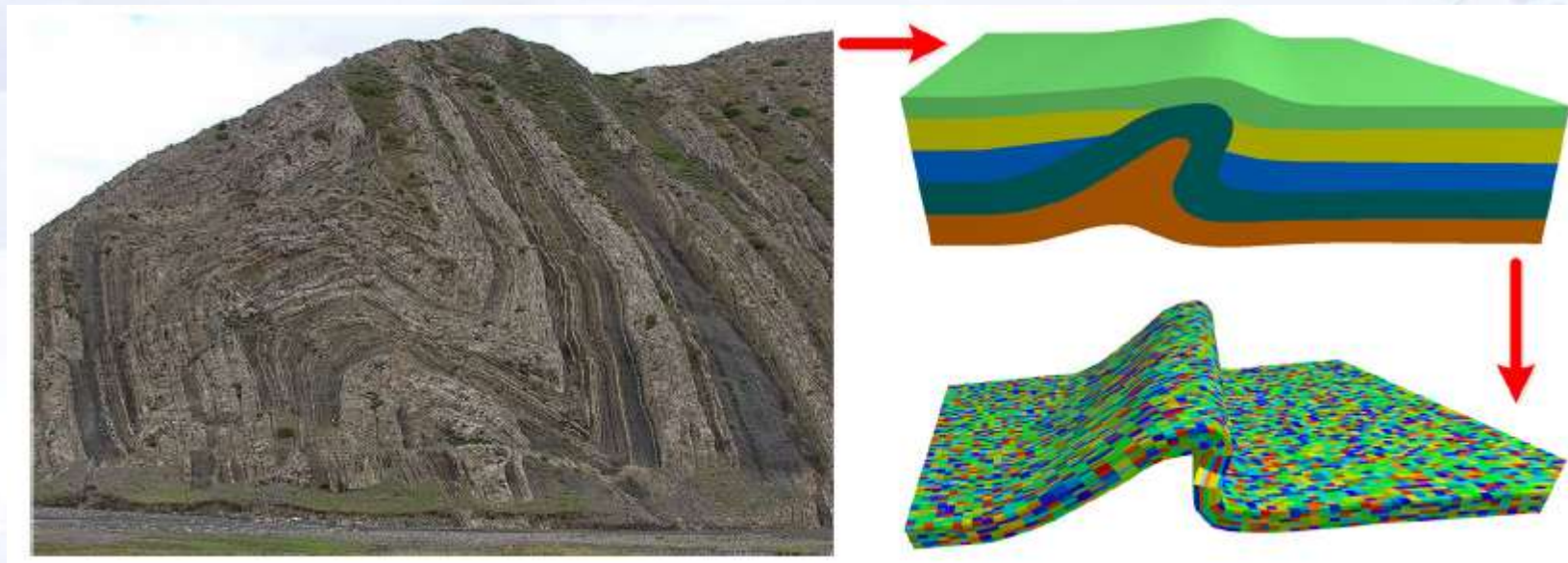
(2) 然后用ZCORN定义每个网格的点，一个网络8个点嘛，所以紧跟在ZCORN后面的数据应该有 $N*8$ 个！，这8个点全是Z值。注意：定义网格角点的顺序都是从左到右，再从左到右 从顶到底！

如图1中的 $3*3*3=27$ 个网格，第一层网格有9个网格，则首先定义网格编号为(1,1,1),(2,1,1),(3,1,1)的上边的Z值，然后定义网格编号为(1,1,1),(2,1,1),(3,1,1)的下边的Z值；然后才是第二排网格和第三排网格。平面网格数量为 $3*3$ ，每排(1)有六个数，共有6排。

排完第一层网格的顶面，排完第一层网格的底面，排完第2层网格的顶面，排完第2层网格的底面，排完第3层网格的顶面，排完第3层网格的底面。显然，数据点为 $36*6=216$ 。



褶皱的角点网格建模与可视化

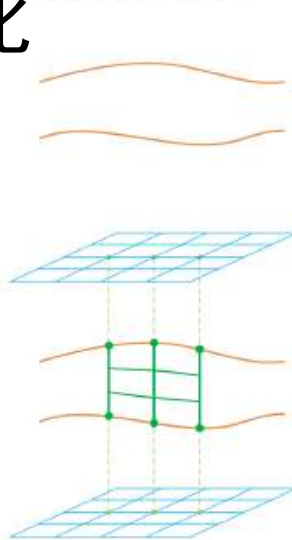


Chen Qiyu, et al., A corner-point-grid-based voxelization method for the complex geological structure model with folds. J. Vis, 2017: DOI 10.1007/s12650-017-0433-7

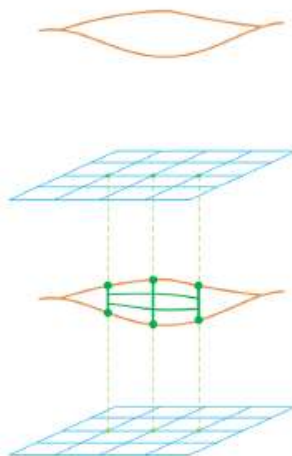


褶皱的角点网格建模与可视化

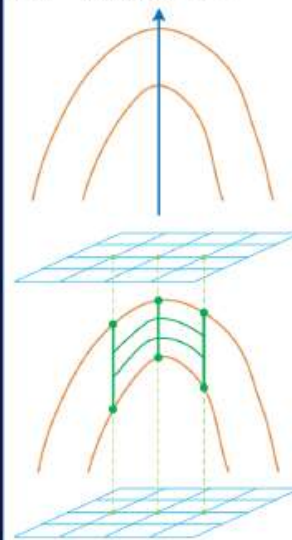
(a) general stratum



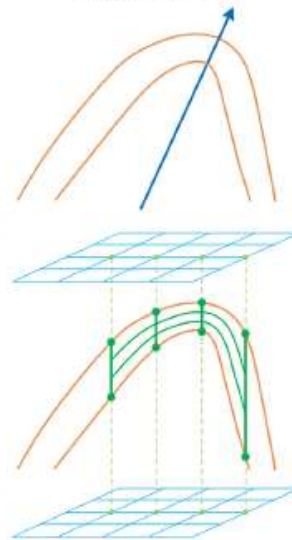
lenticle



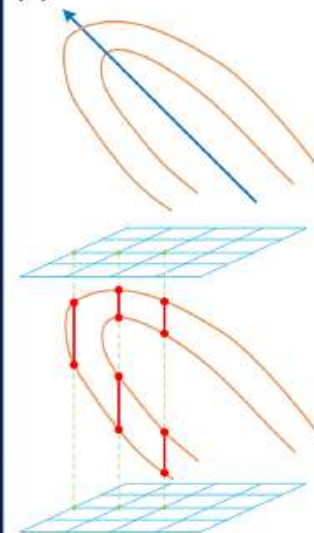
(b) upright fold



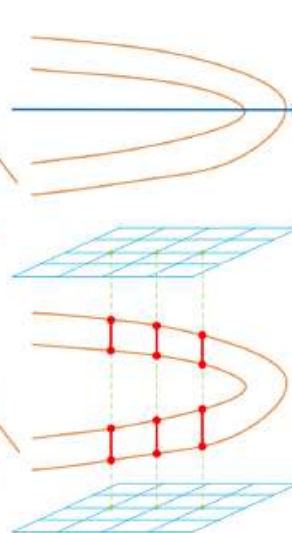
inclined fold



(c) overturned fold



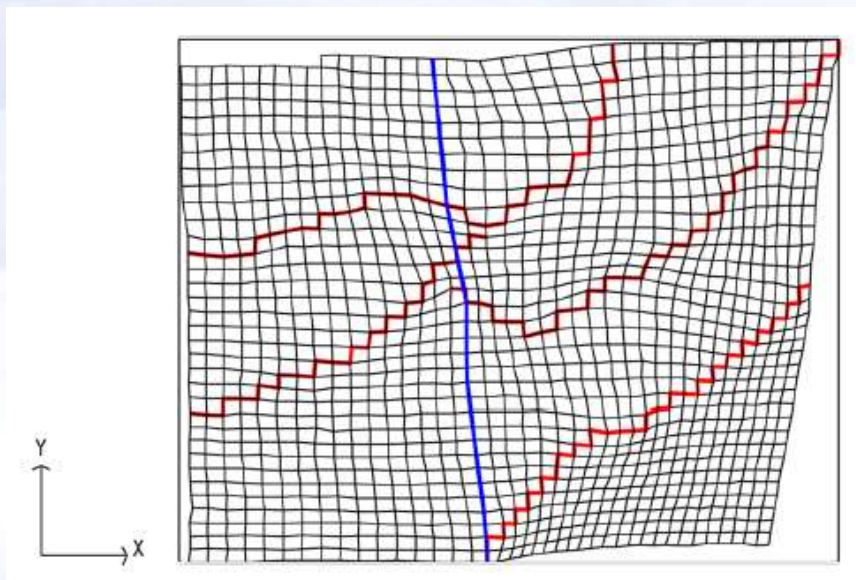
recumbent fold



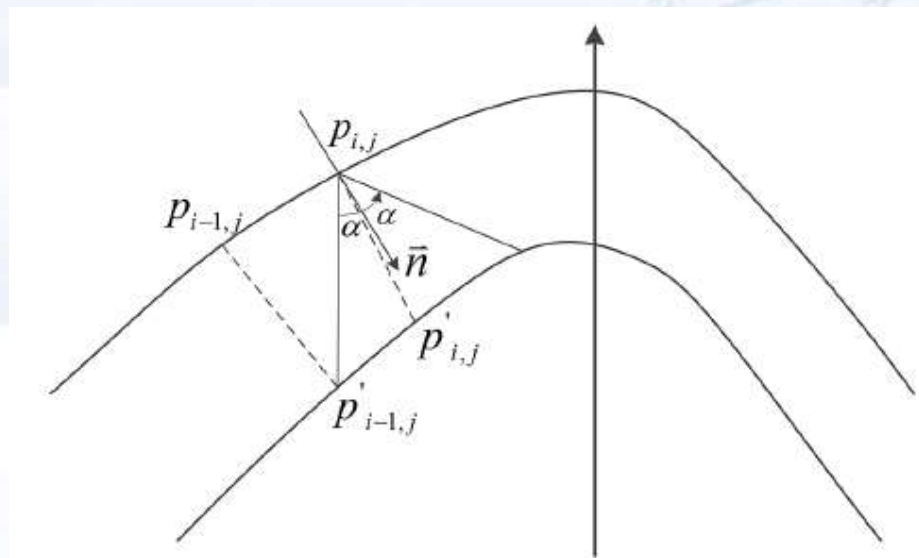
褶皱的垂向网格化
多值表面的问题



多值表面的问题解决



水平向角点网格划分



褶皱的垂向网格化方法



角点网格转换为有限单元网格

地质建模软件，具有反映复杂地下构造（断层、褶皱、不整合接触等）的强大建模功能。而有限单元模型，通常用于执行PDE的求解，模拟油气藏、地应力、地热流、地下水及物质输移等复杂的物理过程。

将地质模拟（三角形网格或角点网格化）建立的网格模型，转换为有限元网格（Tetgen, Gmsh等），将地质建模与有限元模拟优势互补。

近年开展了一些petrel模型转换为有限元网格格式文件的研究，如：

petrel2ANASYS (Liu et al., 2019), petrel2OGS (Park, 2014),

petrel2OpenGeoSys (Wang and Bauer, 2016)



角点网格转换为有限单元网格

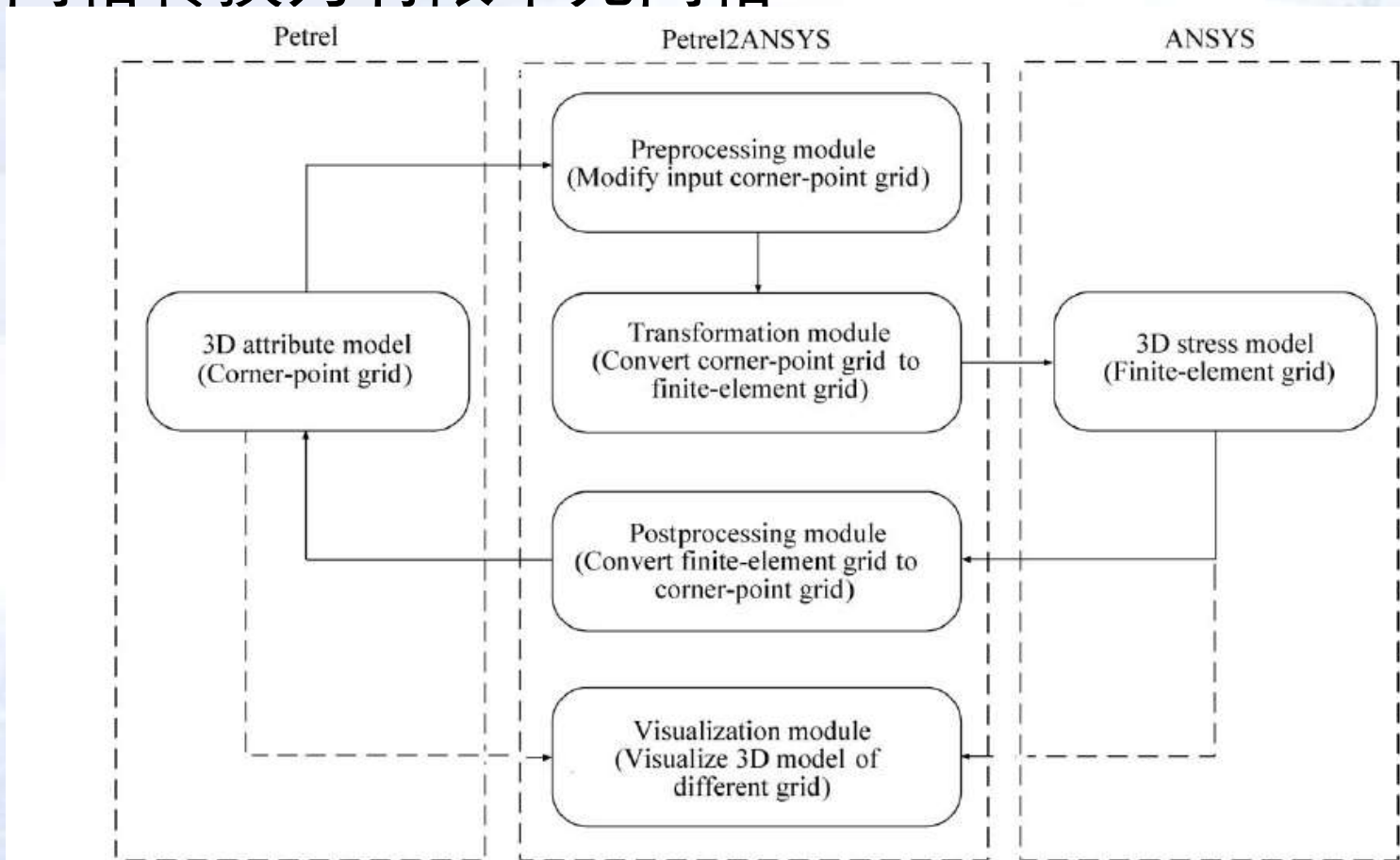


Figure 1 Major simulation workflow and module composition of Petrel2ANSYS software platform

LIU Yu-yang, PAN Mao, LIU Shi-qi. Petrel2ANSYS: Accessible software for simulation of crustal stress fields using constraints provided by multiple 3D models employing different types of grids. J. Cent. South Univ. (2019) 26: 2447–2463



角点网格转换为有限单元网格

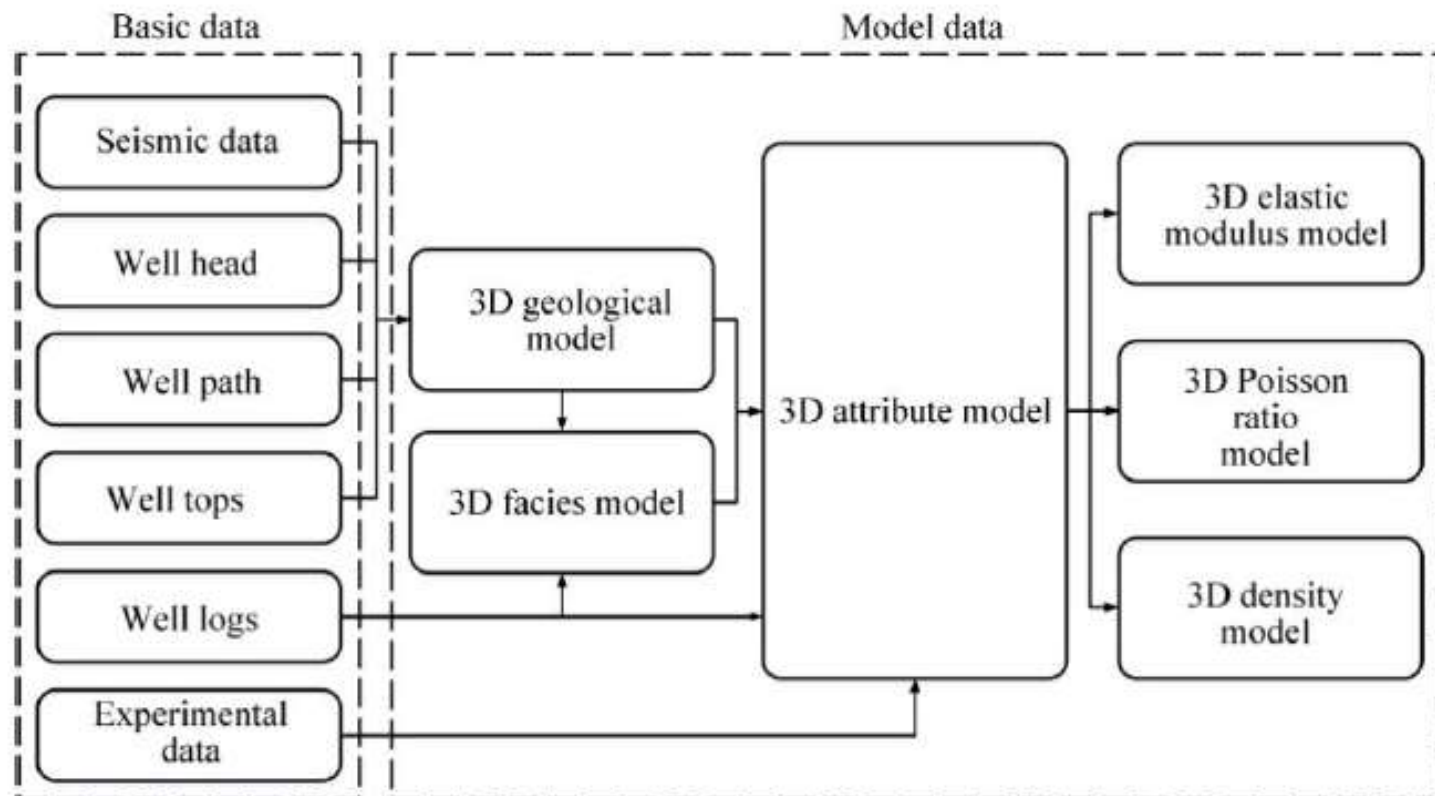


Figure 3 Procedure used to establish a corner-point grid model using Petrel software package



角点网格转换为有限单元网格

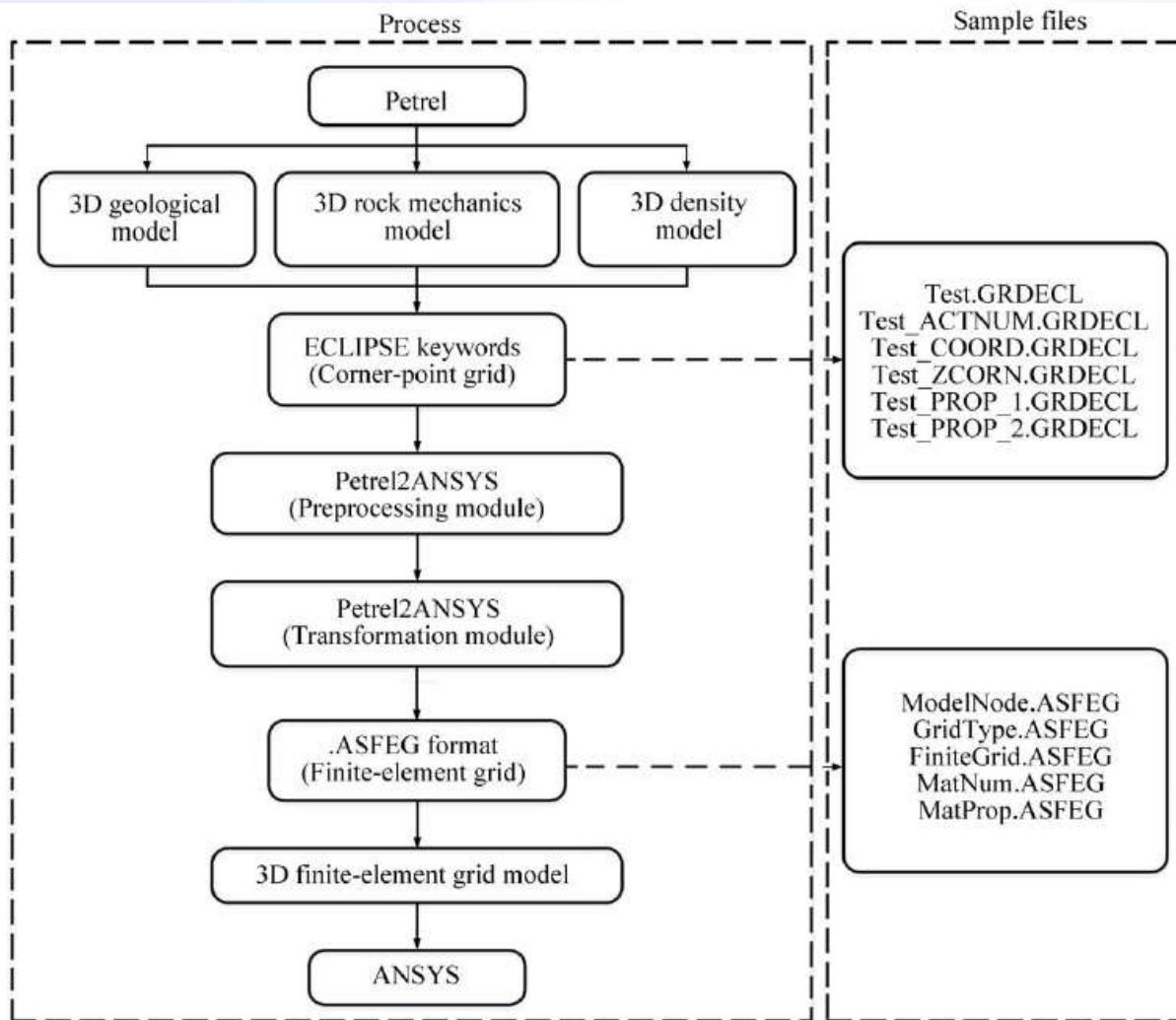


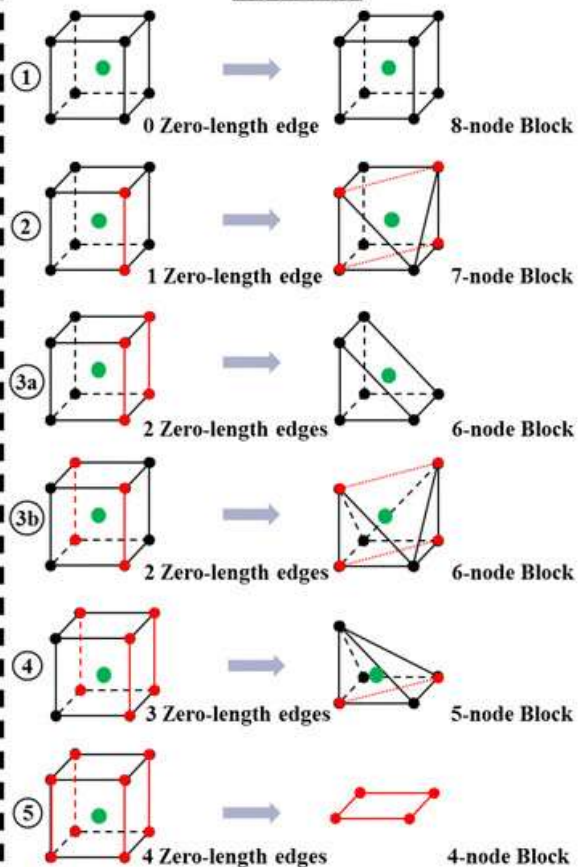
Figure 4 Workflow used to transform 3D corner-point grid models in Petrel and 3D finite-element grid models in ANSYS and sample files



角点网格转换为有限单元网格

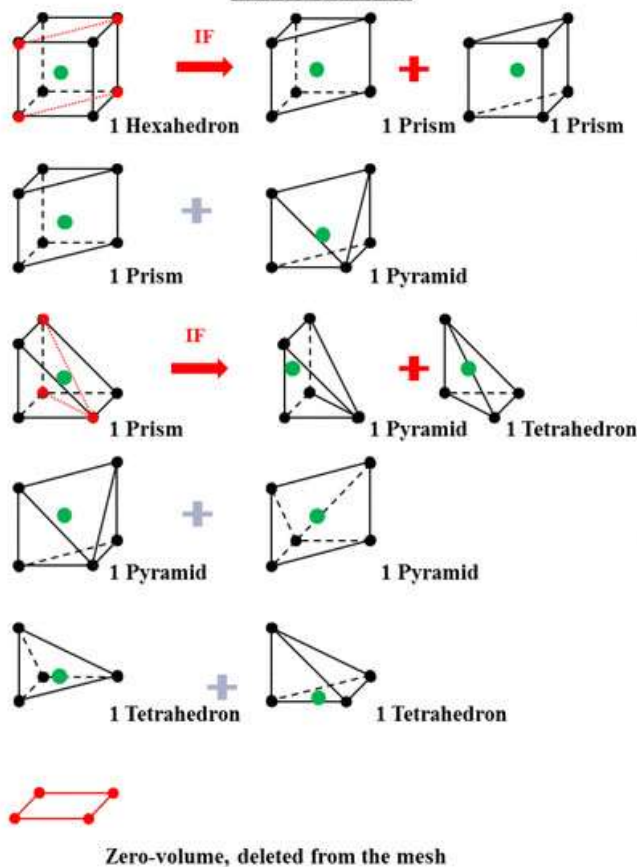
Corner Point Grid

Block Types



Finite Element Mesh

Hybrid elements



将Petrel建立的地质模型（包括属性模型），转换为其他FEM模型的网格格式。



角点网格转换为有限单元网格

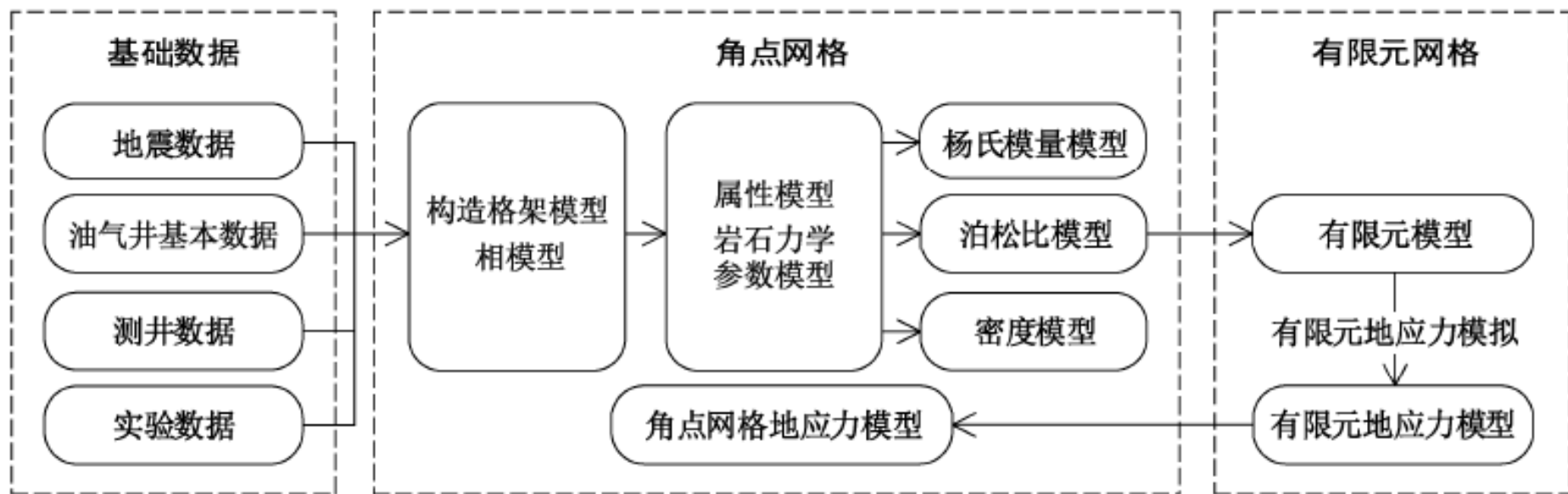


图 1 基于角点网格的有限元应力模拟流程设计



Eclipse Keywords格式的数据文件

在Eclipse Keywords格式表示的数据文件中，其数据存储方式如图11所示，其中GRDECL引导文件主要存放其他的相关文件内容和存储地址；ACTNUM文件中存储网格有效性，COORD文件中存储上下层网格的三维坐标，ZCORN文件中存储不同层网格的z值坐标，PROP是一组文件，对应网格存储不同的地质属性。

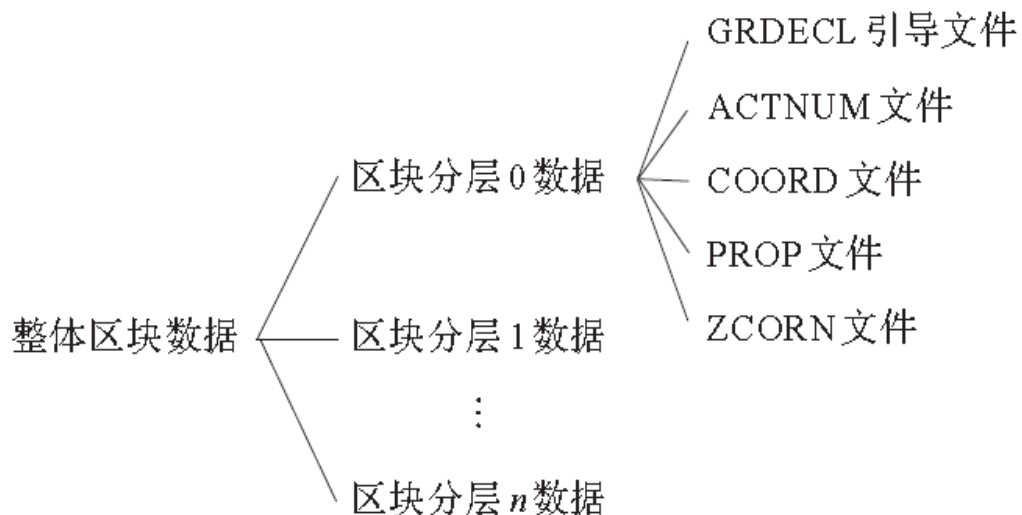


图 11 源数据文件组织方式



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学



椭圆方程的数值离散

The Two-Point Flux-Approximation (TPFA) Scheme

Multipoint Flux-Approximation (MPFA) Schemes

A Mixed Finite-Element Method (FEM)

A Mimetic Finite Difference Method (FDM)

压力方程的多尺度方法

The Multiscale Finite-Volume Method (MsFVM)

A Multiscale Mixed Finite-Element Method (MsMFEM)

拓展MsMFEM算法至角点网格。



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学