



地热模拟器

Geothermal Simulator

TOUGH2/TOUGH3 (美国LLNL),
Waiwera (新西兰奥克兰大学)



TOUGH2_MP/TOUGH3

TOUGH2, 有限差分法, **笛卡尔网格**. 之前的各版本的TOUGH2, 包括串行的TOUGH V2.1, TOUGH2_MP V2.0及模拟器组件iTOUGH2 V7.1合并形成**TOUGH3**。**TOUGH3**通过增加**与PETSc的接口**(Balay et al., 2016), 引入了**新的非线性求解技术**。

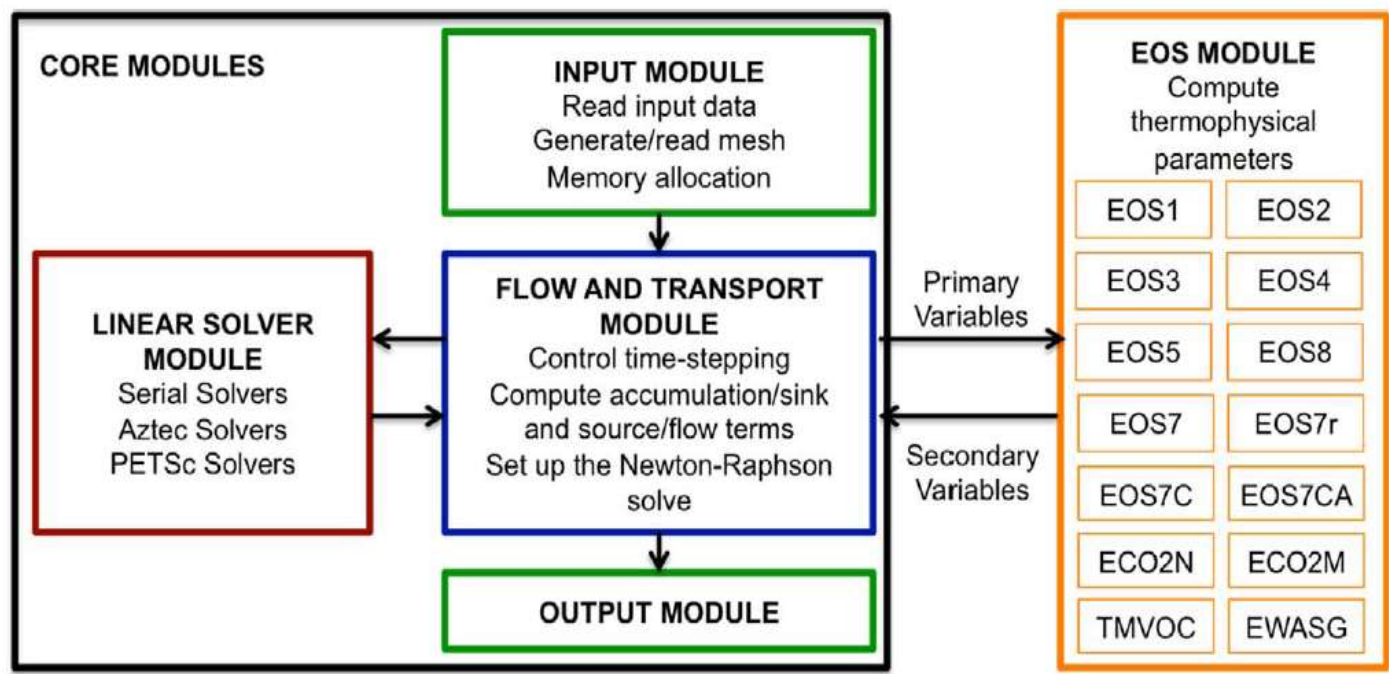
新的流体混合模块EOS: **ECO2N**, ... 设计用于模拟地层**CO₂封存**, 需要求解高度非线性问题, 这得益于TOUGH3的并行化。



TOUGH2_MP/TOUGH3

TOUGH3采用有限差分法，笛卡尔网格。尚缺少并行化I/O。

Pollyea et al. (2014) 的储存层模拟由3D笛卡尔网格组成，计算域范围5000m \times 10000m \times 1800m，单个网格单元几何尺寸25m \times 50m \times 25m。



TOUGH3的模块架构



Waiwera (hot water)

geothermal flow (地热流) 多相流模型 (并行化)，新西兰Auckland大学开发 (2017, 2020)。

Waiwera利用PETSc库的DMPIex数据结构，并行化处理**非结构网格**，包括网格输入 (支持多种文件格式，例如 GMSH, CGNS, ExodusII 等)、区域分解、网格拓扑操作和创建分布式向量与矩阵。使用PETSc的Vec分布式向量数据结构存储液相、岩石、数值解和其他主要数据，以及并行进程间的虚拟区数据交换“halo exchange”。所有进程间通信由PETSc库处理，通过MPI通信。



Waiwera (hot water)

非等温 (non-isothermal) 地下流动模拟器，如FEFLOW, OpenGeoSys, COMSOL都用于地热模拟，但不具备boil and condense的功能用于高温地热油藏模型。一些模型如FEHM, STARS, ECLIPSE提供该功能，但尚未广泛用于地热模拟。

TOUGH2是地热油藏模拟的工业标准 (O' Sullivan and O' Sullivan, 2016)。奥克兰大学维护AUTOUGH2的一个分支 (Yeh et al., 2012)，突出地热油藏模拟功能，如相转换行为、地热steamfield的产油与注水行为的模拟。

TOUGH2_MP (Zhang et al., 2003) 与TOUGH3 (Jung et al., 2017) 都并行化，但不包含AUTOUGH2的地热特征模拟功能。对于大规模模型 ($>10^6$ 个单元)，期望TOUGH2与TOUGH3的输入与输出有格式化文本文件选项。

TOUGH3，模块化FORTRAN编程，引入一些FORTRAN95 module和动态内存分配特征，但大部分软件设计未改变。FORTRAN 2003和2008的面向对象编程。Waiwera采用面向对象的FORTRAN 2003编程及并行化，开源。



1D沸腾柱状和CO₂柱状测试问题

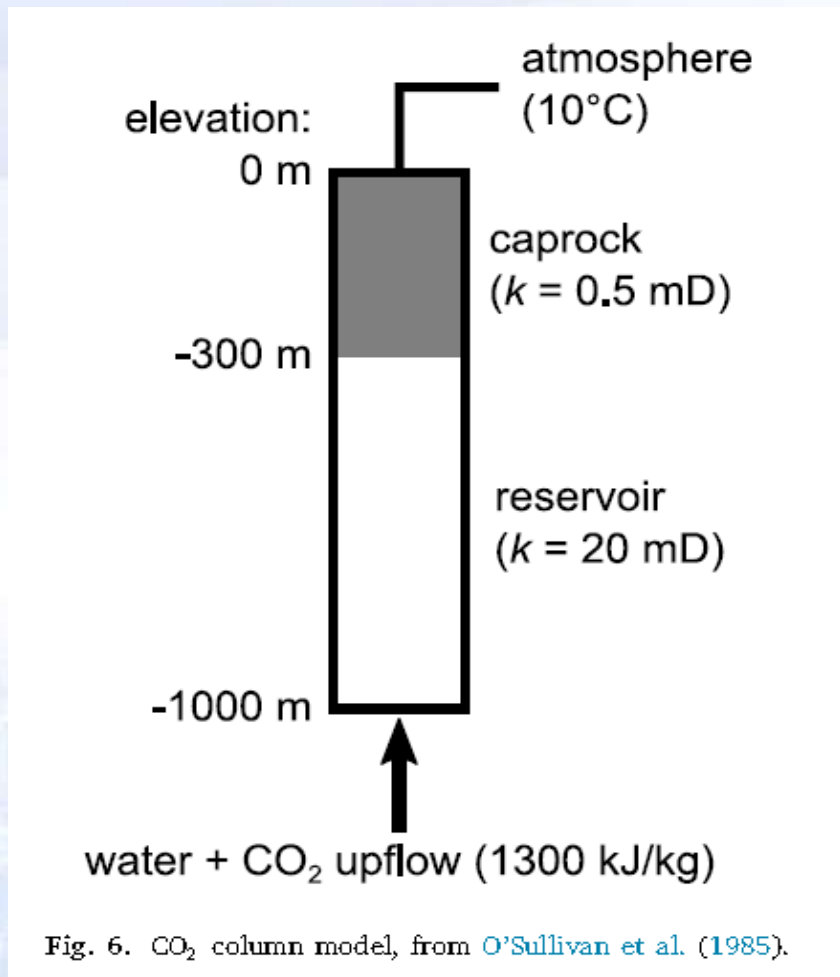
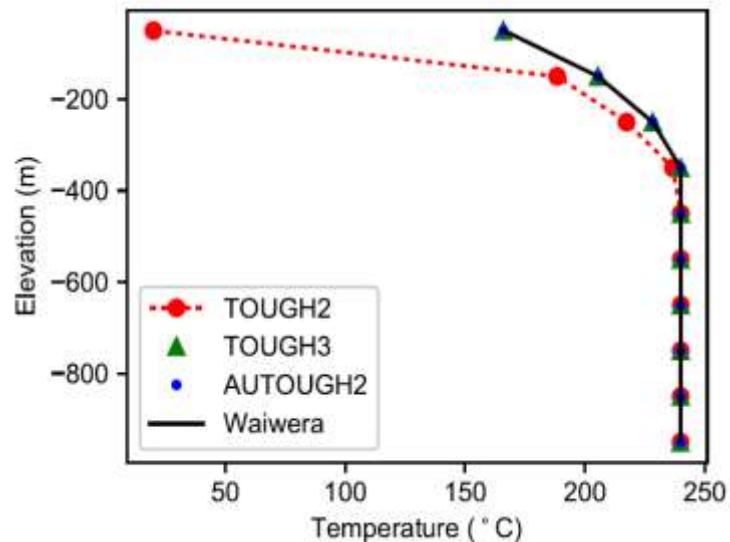
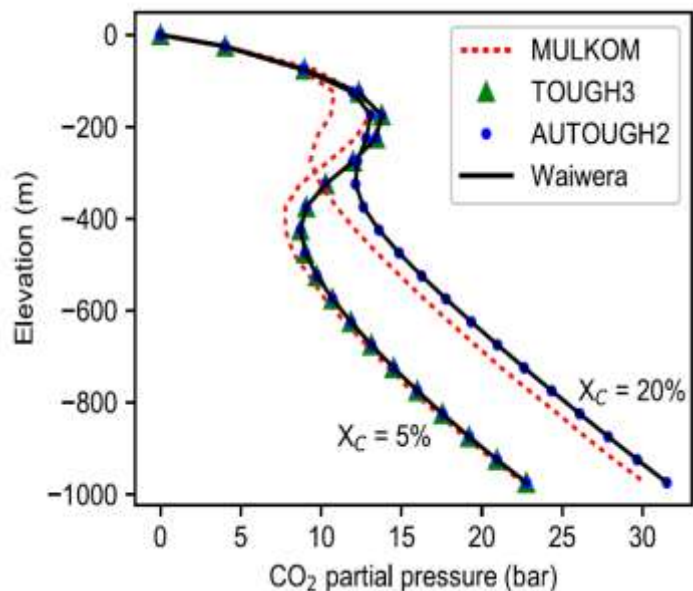


Fig. 6. CO₂ column model, from O'Sullivan et al. (1985).

1D测试算例





并行strong scaling测试

模拟简化的3D地热储层（5kmx4kmx3km深度），网格：80x64x160层，共819200个单元。

PETSc要获得满意的尺度化，建议求解问题规模至少每个进程有10000~2000自由度。

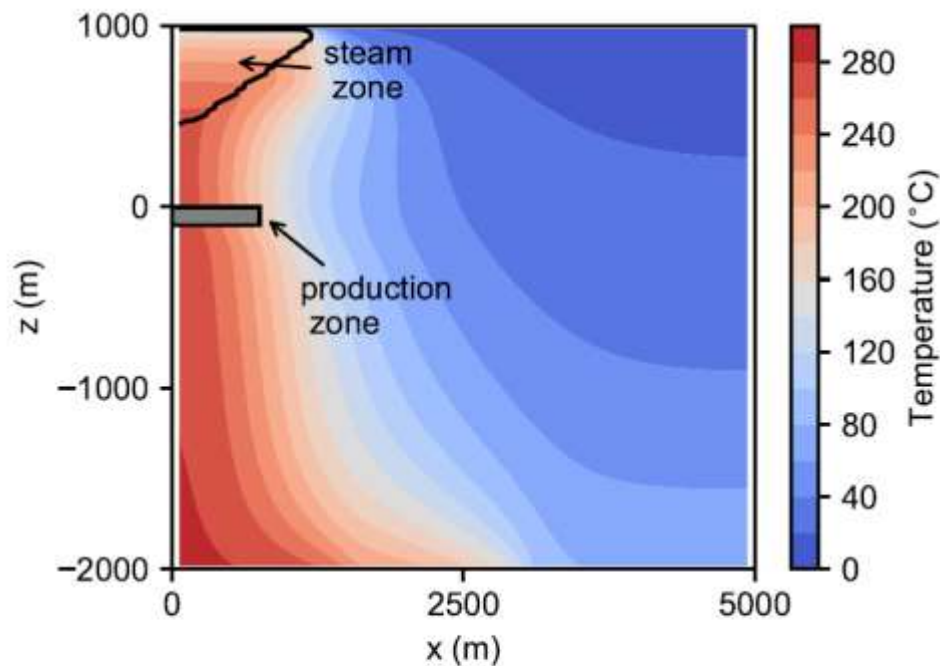


Fig. 9. Vertical slice at $y = 0$ through parallel strong scaling test model, showing temperature distribution and steam zone position (vapour saturation = 0.01 contour) for steady-state solution, and location of production zone.

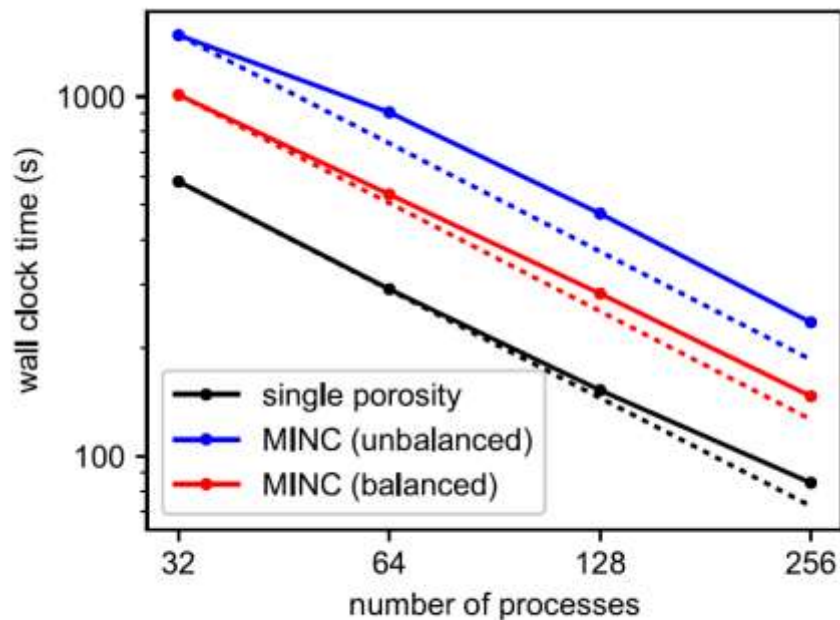


Fig. 10. Run time versus process count for parallel strong scaling test. Dashed lines represent ideal (linear) scaling.



完整尺度的产出模型

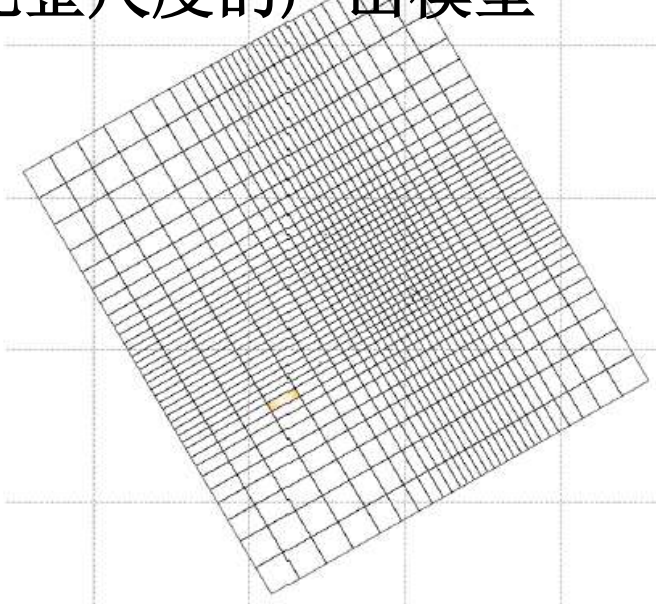


Figure 1: Plan view of grid for the Ngawha model

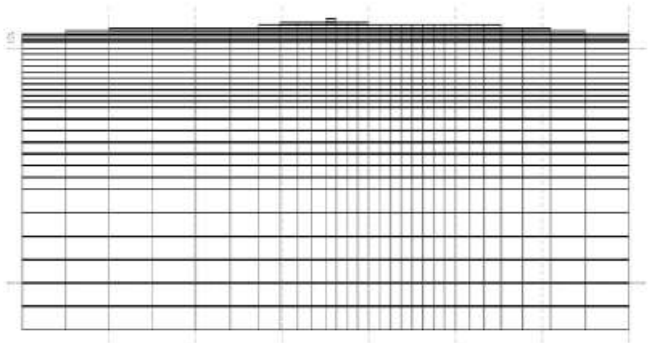


Figure 2: Vertical slice through the Ngawha model

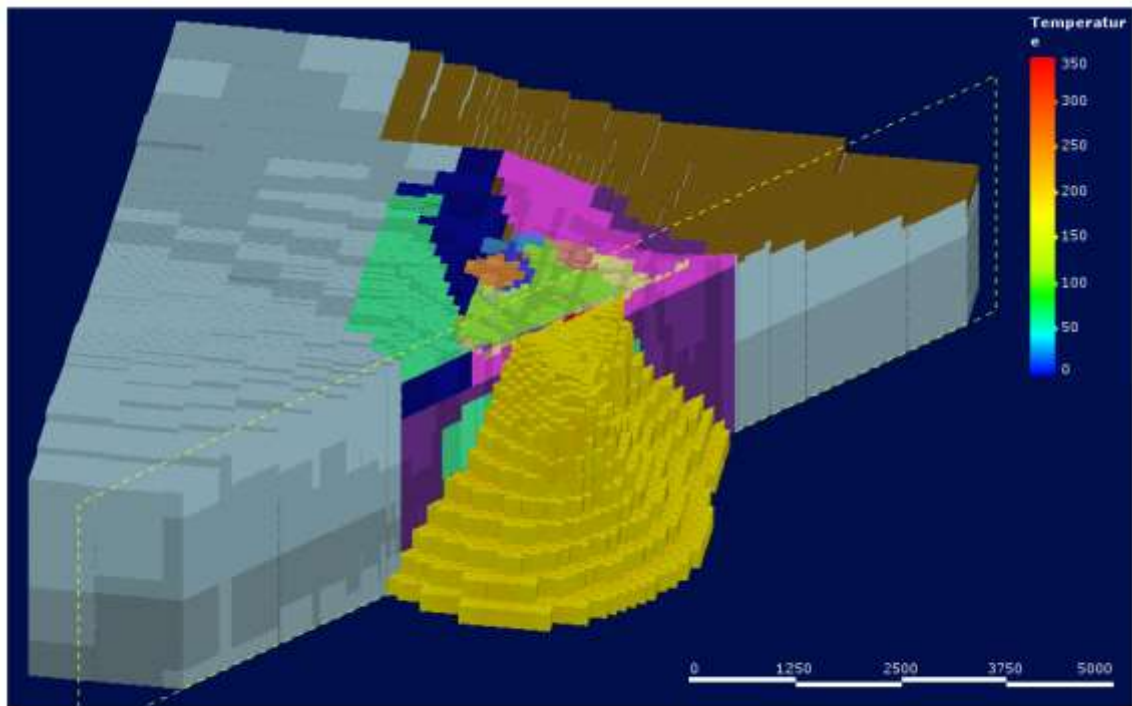


Figure 3: The System B model shown in Leapfrog Geothermal. The back half of the slice shows the model rock type groupings and the front half of the slice shows the blocks with temperatures above 180°C.

文档说明做的不大好