

第 75 期：地热开发模拟操作流程（灵活井模型）

编写人：吴晓云、李罡

在《第 74 期：地热开发模拟操作流程（IMEX 转 STARS）》的基础上，本期讲义介绍 FlexWell 灵活井筒模拟地热开采，与 74 期中使用的源汇井模拟相比，它的优势有两个：精确模拟多个管柱，可以灵活模拟同一口井循环注采的情况；更精确地计算与 HDR（热干岩）相关的井筒动态，输出井筒内的参数变化。

目 录

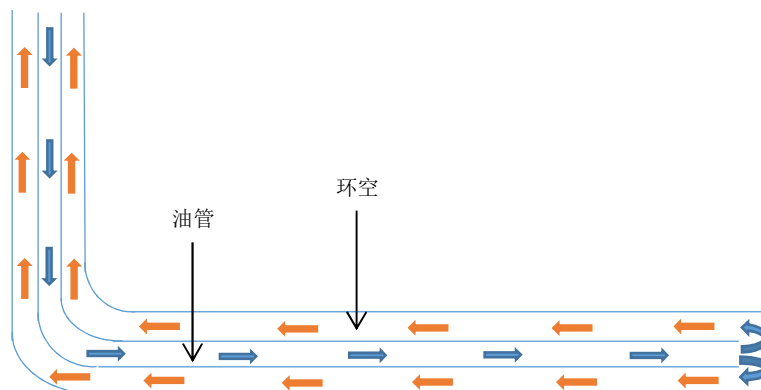
一、同一口井注入和产出.....	2
1. 更改井名	2
2. 通过复制创建新井	2
3. 添加灵活井 FlexWell	5
4. 输出信息设置	7
5. 计算并查看结果	8
二、一口井注入，另一口井生产.....	13
三、不同版本的水力压裂模拟说明.....	15

本期讲义中模拟两个灵活井案例。

- 1) 案例 1，从同一口井注入和产出水，也就是向油管管柱中注入冷水，环空产出热水，这与 SAGD 的循环预热阶段相似。
- 2) 案例 2，一口井注入，另一口井产出，先通过环空管柱向地层注入一段时间冷水，注入水在地层中吸收热量，然后通过另一口井环空管柱产出热水。

一、同一口井注入和产出

本期涉及灵活井筒，我们将定义一个环空管柱（作为生产井）和一个油管管柱（作为注入井），将对应井匹配到灵活井的环空和油管管柱。因此，需要再定义两口井（一个注入井和一个生产井）。同一口井循环注入和产出的示意图如下：

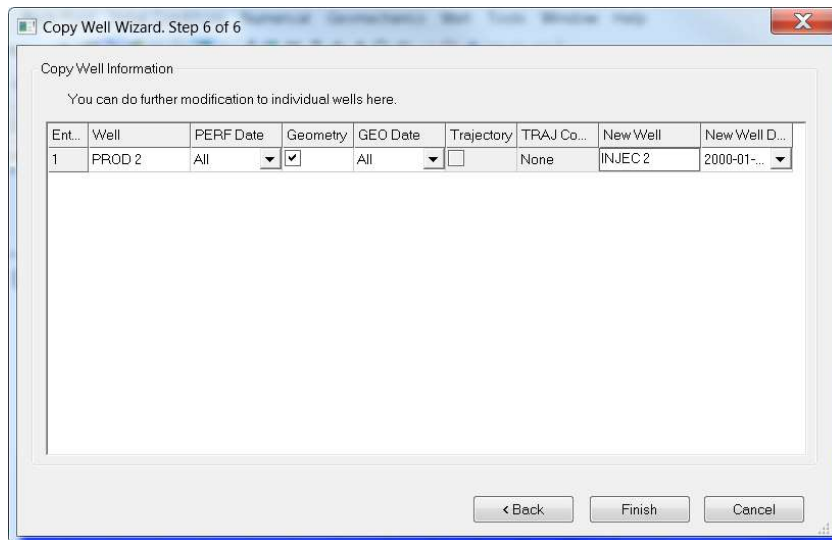
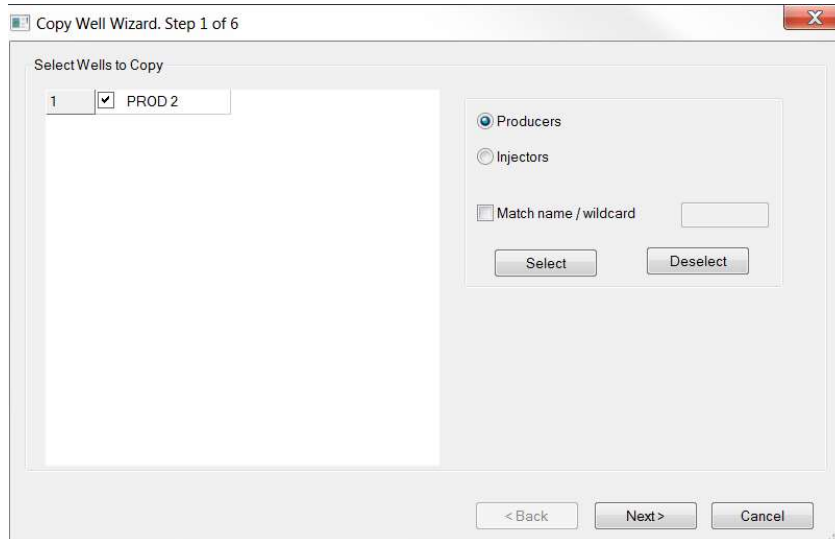


1. 更改井名

- 1) 在 Builder 中打开第 74 期讲义中的文件 EXERCISE_1_HDR_STARS.dat，并将文件另存为 EXERCISE_2_HDR_STARS_FlexWell_Sc1.dat。
- 2) 在 Wells & Recurrent（井和动态）部分，双击井名 INJEC。点击编辑框，将井名更改为 INJEC 1，点击 Apply。同样，点击井名 PROD 并将其名称更改为 PROD 2，点击 Apply 并确定。

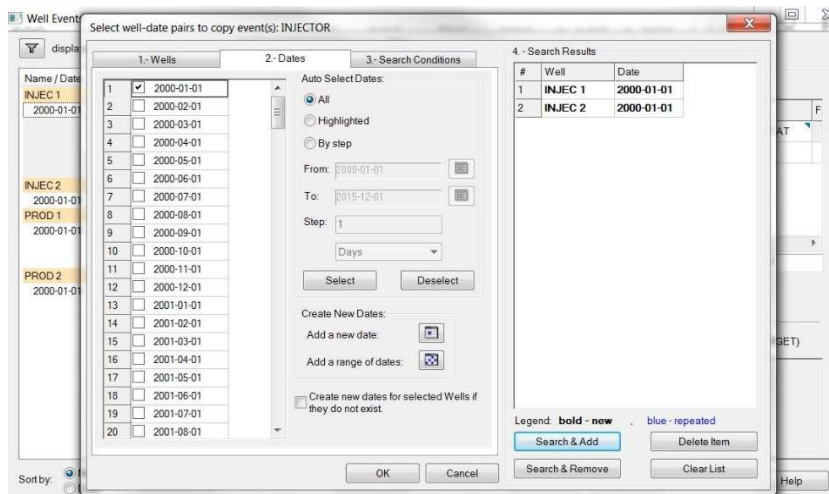
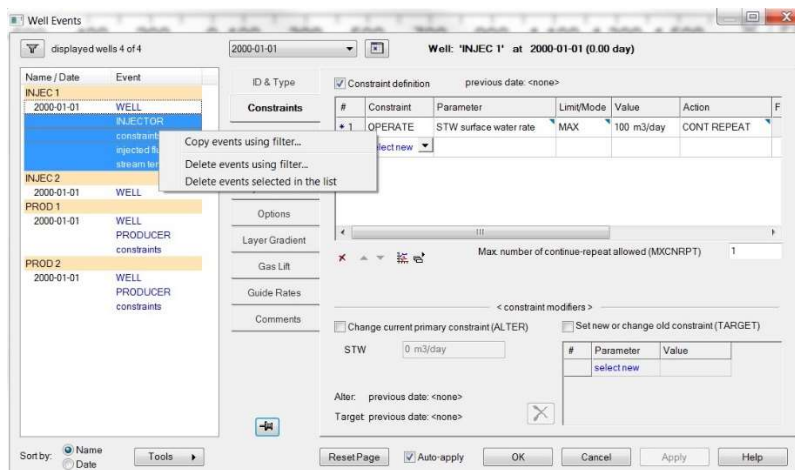
2. 通过复制创建新井

- 3) 现在我们要通过复制的方式创建另一个注入井和生产井。点击 Wells & Recurrent → Copy well ...。第 1 步，选择 Producers，选择 PROD 2，点击 Next；第 2 步，选择 Copy all perforation dates（复制所有射孔日期）；第 3 步，选中 Copy Geometry，点击 Next；第 4 步，当前井无井轨迹，略过，点击 Next；第 5 步，选中在下一步中手动输入新井名，点击 Next。将井命名为 INJEC 2。点击 Finish。

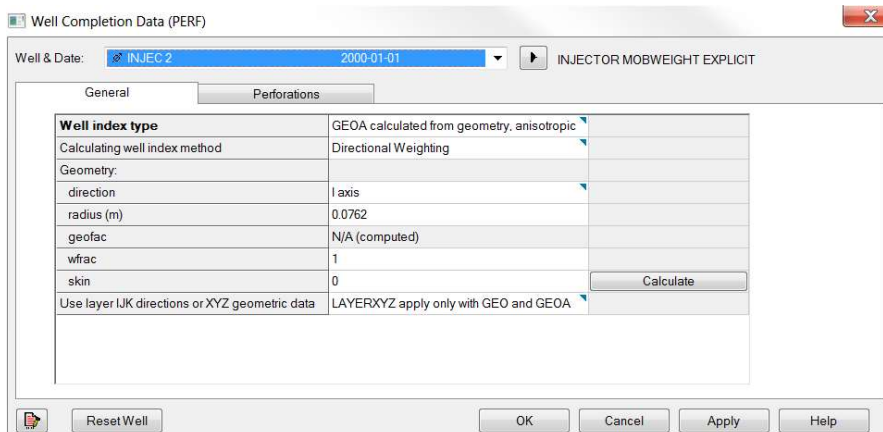


- 4) 重复上述步骤复制 INJEC 1 并创建一个名为 PROD 1 的井。
- 5) 现在定义新井的类型和约束条件。双击 Wells&Recurrent 下的 PROD 1 井。在 ID&Type 选项卡中，将井类型更改为 PRODUCER。单击窗口底部的 Auto-apply（自动保存）前的复选框。
- 6) 单击 Constraints 选项卡，定义井 PROD 1 的约束条件。OPERATE BHP MIN 10000 kPa CONT REPEAT。
- 7) 同样，将 INJEC 2 类型更改为 INJECTOR MOBWEIGHT EXPLICIT。将井事件（约束条件、注入流体和注入温度）从 INJEC 1 复制到 INJEC 2。

8) 用 Ctrl 键选中需复制的 INJEC 1 信息，右键选择 Copy events using filter..., 在弹出的窗口中的选项卡 1-Wells 下，选择 INJEC 2。在选项卡 2-Dates 下，选中第一个日期（2000-01-01）。点击右下角 Search & Add。窗口应该如下图所示。点击 OK。

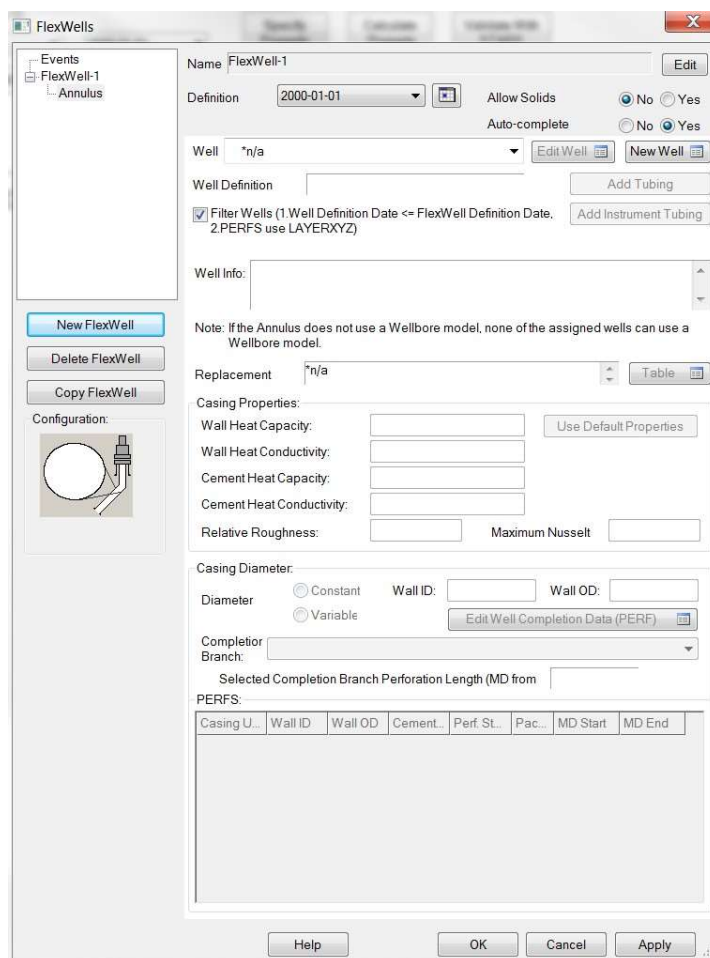


9) 使用 Flexwell 选项时，需把所有井的 Geometric data 更改为 LAYERXYZ。在 Wells & Recurrent 下，单击 Well Completion (PERF) ...将 General 选项卡中的最后一个框更改为 LAYERXYZ apply only with GEO and GEOA。对所有的井重复此操作。点击 OK 退出该窗口。

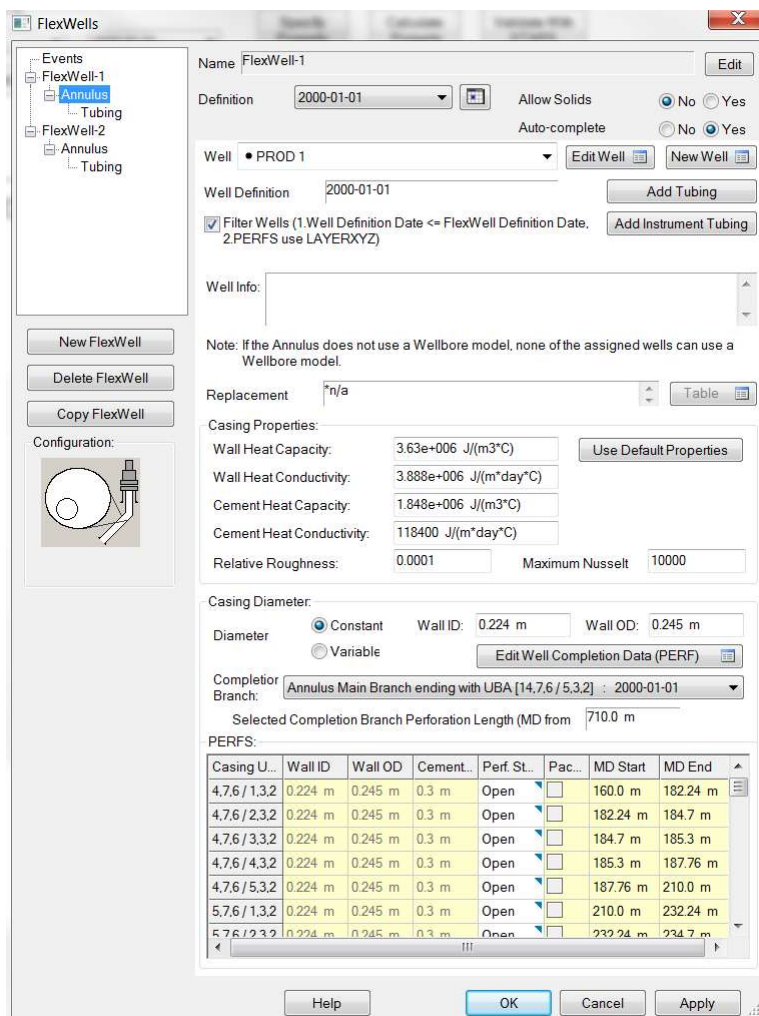


3. 添加灵活井 FlexWell

10) 在 Wells & Recurrent 下，双击 FlexWells (0)。在 FlexWells 窗口中，单击 New FlexWell 创建一个新的灵活井筒。这个 FlexWell 缺省命名为 FlexWell-1，也可以通过点击窗口顶部的 Edit 编辑按钮更改。



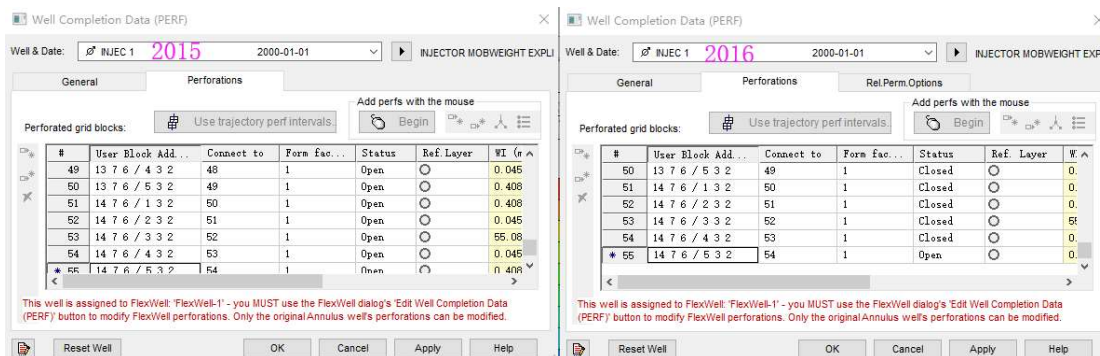
- 11) 先定义生产井灵活井筒，将生产井位置的两口井分别对应灵活井筒的环空以及油管管柱。从下拉菜单中选择 PROD 1，将其匹配给 FlexWell-1 的环空管柱。在 Casing Diameter 下方分别输入 0.224m 和 0.245m 的套管内径 ID 和外径 OD。点击 Apply。
- 12) 点击 Add Tubing 按钮（位于 Well Definition Date 右侧）。从井列表中选择井 INJEC 1，将其分配给 FlexWell-1 的油管管柱。如果弹出对话框，请选择“是”，以将第一个射孔层设置为参考层。将此油管管柱的内径 ID 和外径 OD 更改为 0.076m 和 0.089m。点击 Apply。
- 13) 点击 New FlexWell 按钮以添加新的灵活井，该名称为 FlexWell-2。重复上述步骤，将 PROD 2 和 INJEC 2 分别对应该灵活井筒的环空和油管管柱。窗口应该如下图所示。单击 Apply，OK 退出灵活井筒设置窗口。



14) 请注意，由于灵活井筒模拟功能一直在进步和完善，不同版本存在些许差异。本期讲义中，灵活井油管管柱对应的注入井是通过复制井生成的，具有和被复制井相同的射孔信息，即沿井筒全部射开。

a) 在 2015 以及之前版本中，将井关联到油管管柱后，射孔数据不变，同时会提示“如果想保留油管多个 OPEN 的射孔状态，需使用 FCD 关键字”。

b) 2016 版开始，将井关联到油管管柱后，油管管柱仅保留最后一个射孔为 OPEN，其他为 CLOSED。



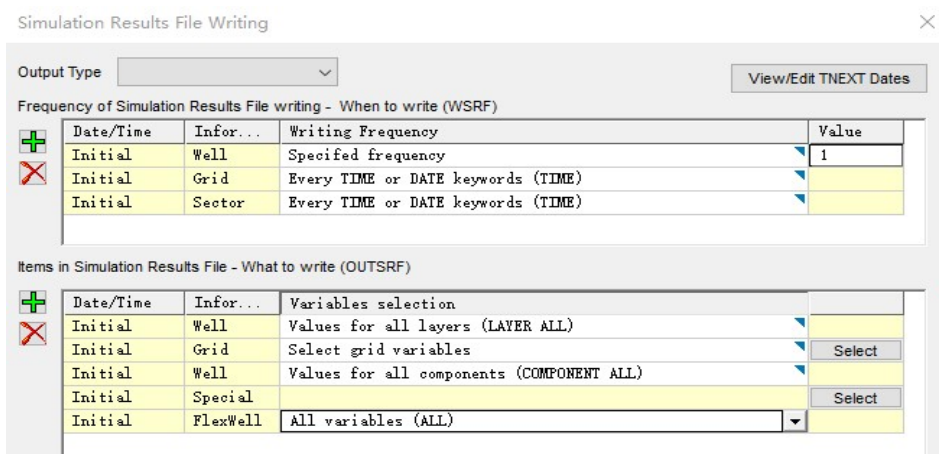
15) 这里我们使用新版本模拟的方式，油管 INJEC 1 和 INJEC 2 仅保留最后一个射孔 OPEN。可通过文本编辑器，直接在数据文件中修改。

4. 输出信息设置

16) 在输入/输出（I/O）控制部分，为所有井添加 Special 变量 WELLENERGY RATE 和 WELLENERGY CUM，可参考第 74 期讲义 P28-29。

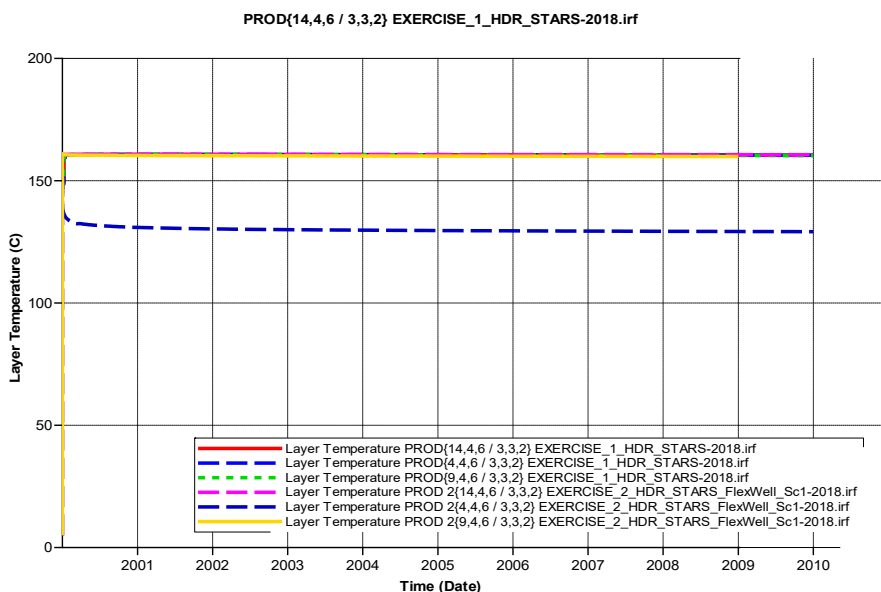
17) 回到 Simulation Results File Writing 窗口中，Well 信息输出为 LAYER ALL（输出小层信息）和 COMPONENT ALL（输出所有组分的产量信息）。

18) 通过点击表格左边的绿色加号按钮，在该表格（OUTSRF）中添加灵活井筒输出。选择 FlexWell，变量选择 ALL（所有变量）。该窗口应该如下所示：

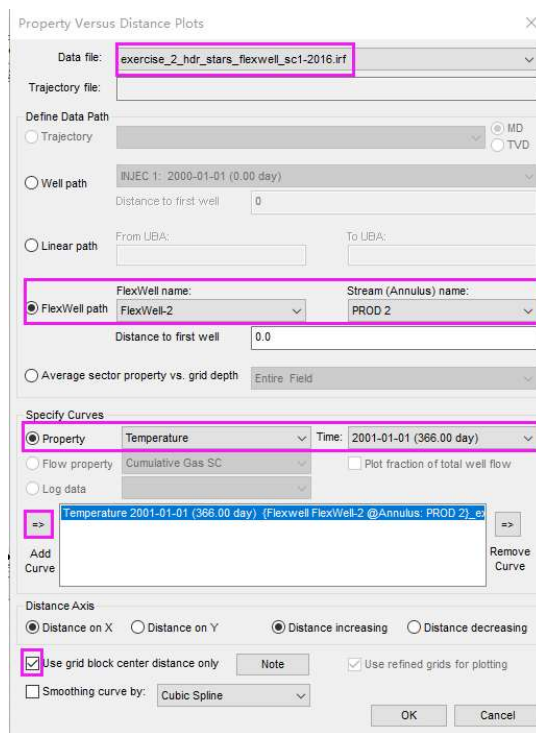


5. 计算并查看结果

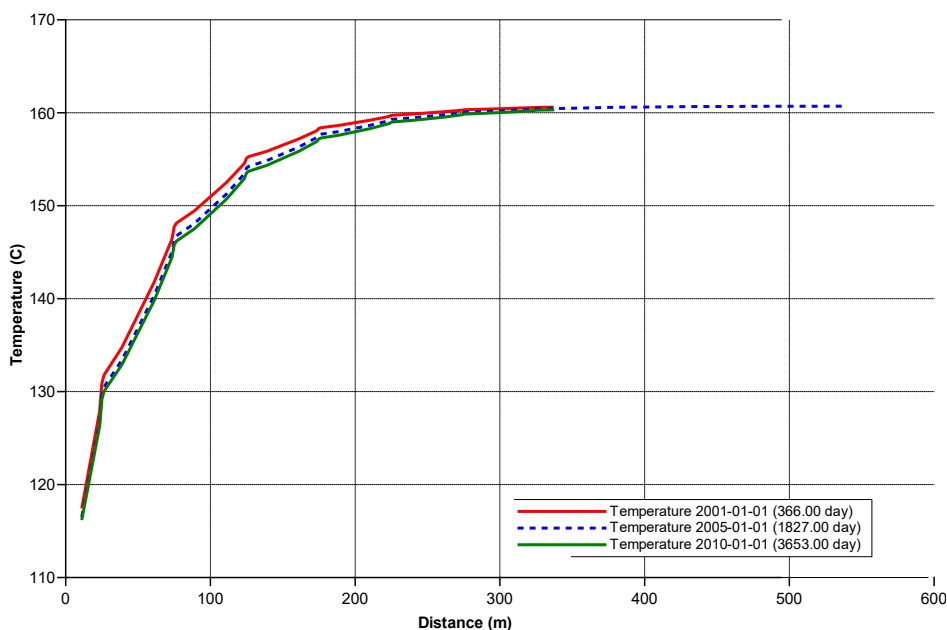
- 19) OK，并保存当前文件，然后在 Launcher 窗口将该文件拖至 STARS 模拟器运行。
- 20) 计算结束后，将 EXERCISE_2_HDR_STARS_FlexWell_Sc1.irf 拖到 Results Graph 中。
- 21) 在 Results Graph 中同时打开 74 期文件的*.irf 结果文件。点击 File → Open CMG simulation Results... 在弹出的文件夹窗口中选择 EXERCISE_1_HDR_STARS.irf。
- 22) 下图显示了沿生产井 PROD（第 74 期）和 PROD2（第 75 期）的裂缝的温度随时间变化的曲线。



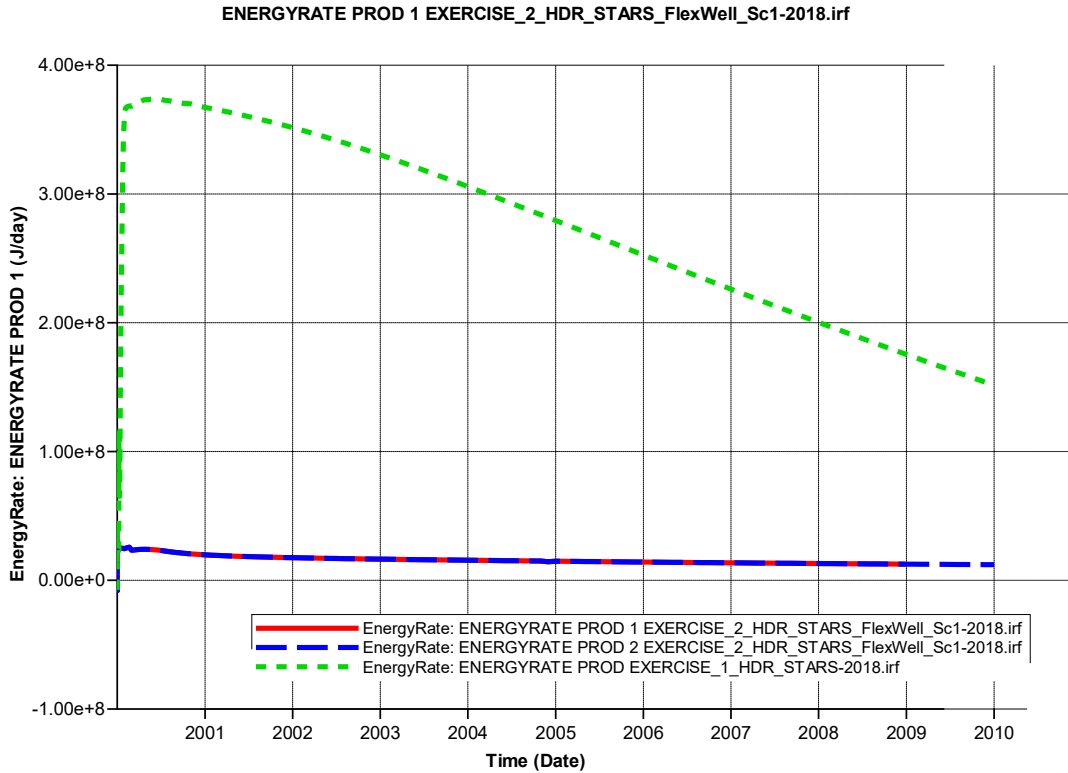
23) 第 74 期的源汇井模拟无法输出井筒内参数（例如温度、压力等），而对于灵活井模拟，则可以输出井筒内的流体温度变化曲线。操作如下：
 Edit → Curve → Add Property Vs. Distance，根据如下截图信息选择，绘制地热开发 1 年、5 年和 10 年的灵活井筒的生产管柱内的温度即可。从沿井温度曲线，可以看出井筒内产出热水的温度变化。



FlexWell-2 @Annulus: PROD 2 EXERCISE_2_HDR_STARS_FlexWell_Sc1-2018.irf

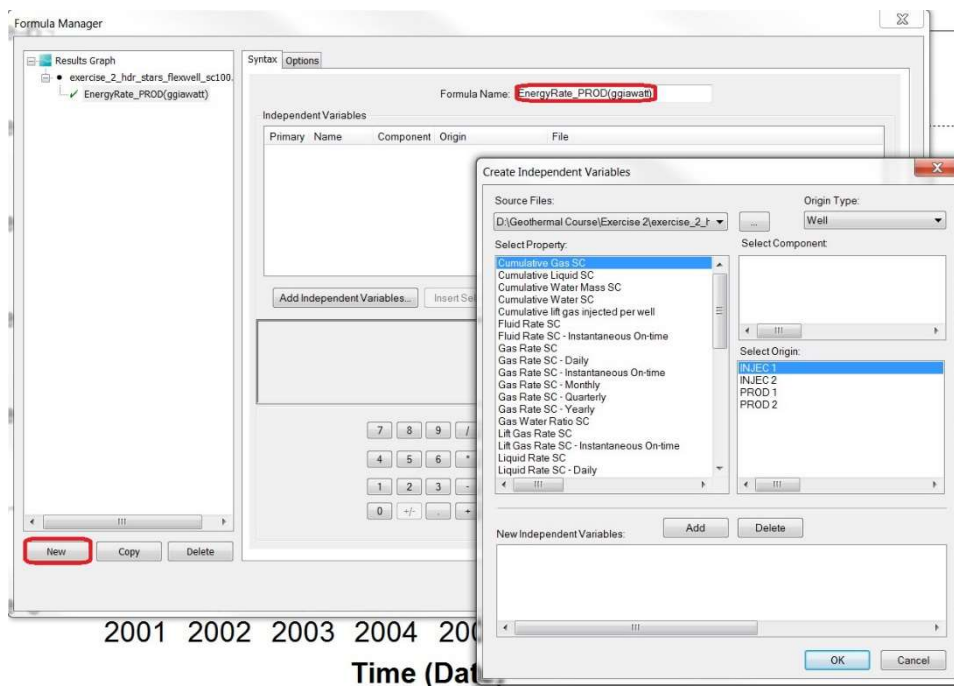


24) 另一个对分析热量产出很有必要的参数是 Energy Rate（能量率）。下图显示，循环注入和产出的能量率远远低于与从两个不同的井注入和生产的能量率，主要是循环注入和产出未能动用到井间热干岩的热量导致。

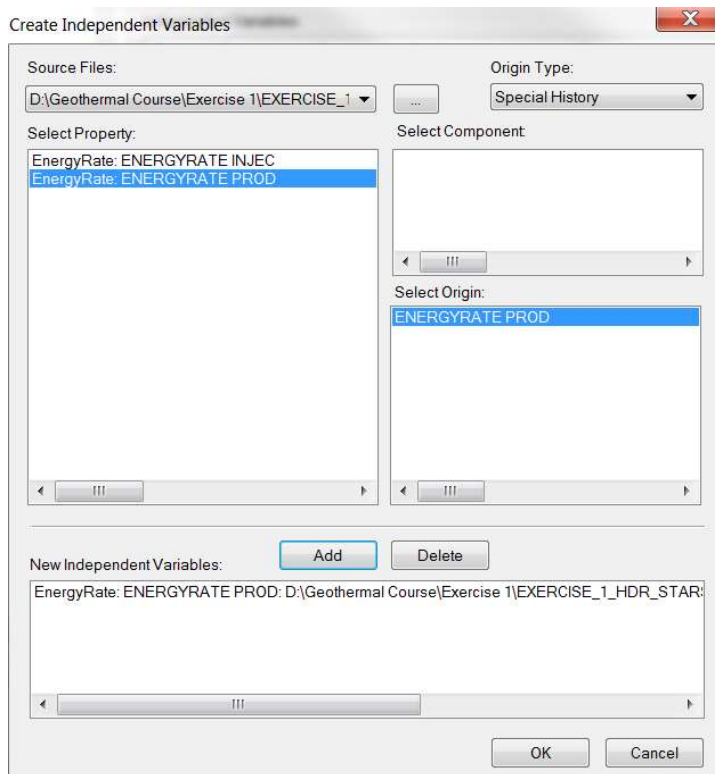


25) gigawatt（千兆瓦）是更为常见的能量率单位，因此我们将使用 Results Graph 的公式编辑器功能转换能量率单位。点击 Tools → Formula Manager，打开公式编辑器窗口。

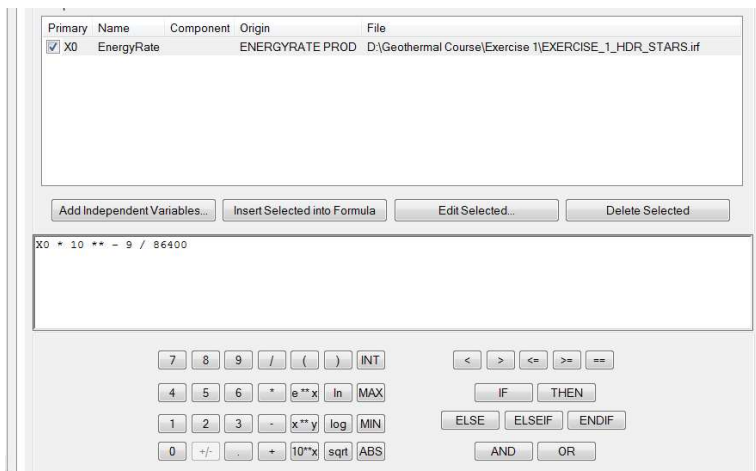
26) 点击窗口左下角的 New（新建）按钮，创建一个新公式。将公式的名称更改为 EnergyRate_PROD(gigawatt)。点击 Add Independent Variable，添加公式中用到的变量。



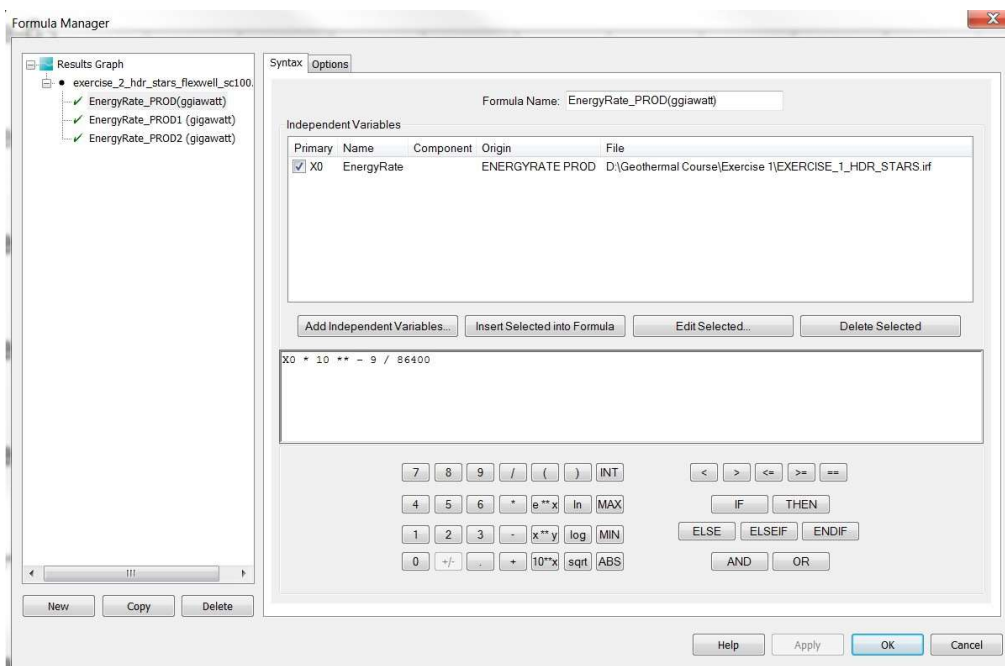
27) 在 Create Independent Variables (创建独立变量) 窗口中, 在 Source Files (源文件) 中选择 EXERCISE_1_HDR_STARS.irf, 在 Origin Type 中选择 Special History, 从属性列表中选择 EnergyRate: ENERGYRATE PROD。点击 Add, 然后 OK。



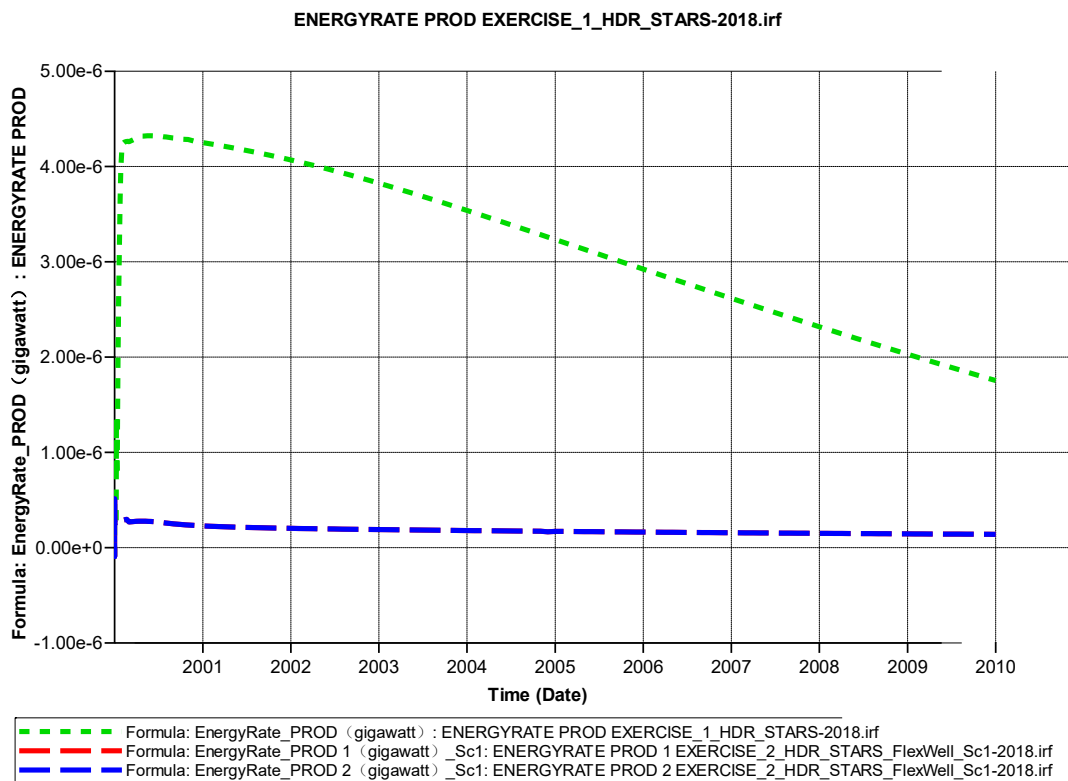
28) 在公式编辑框中写下公式，以将 J/day 转换为 ggiawatt，如下所示，点击 Apply 保存这个公式。



29) 重复上述操作，为 EXERCISE_1_HDR_STARS_flexwell_Sc1.irf 的两口生产井 PROD 1 和 PROD 2 创建相同的公式。Formula Manager 窗口如下图所示。点击 OK。



30) 重复上面添加曲线的操作，即可绘制 ggiawatt（千兆瓦）单位的能量率曲线。回到 Results Graph 界面，File → Save Session as，保存为 Results.ses。

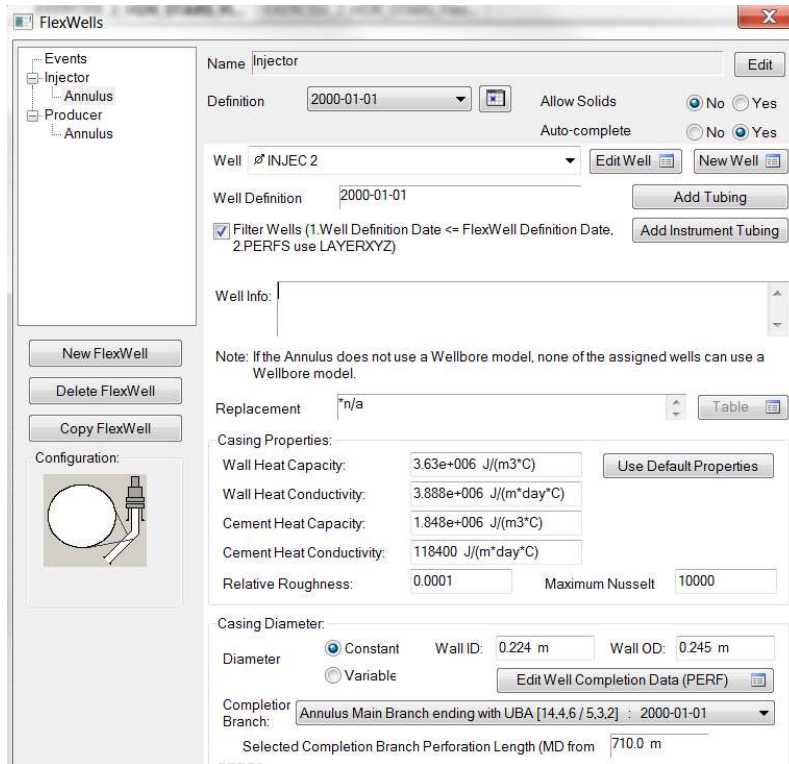


二、一口井注入，另一口井生产

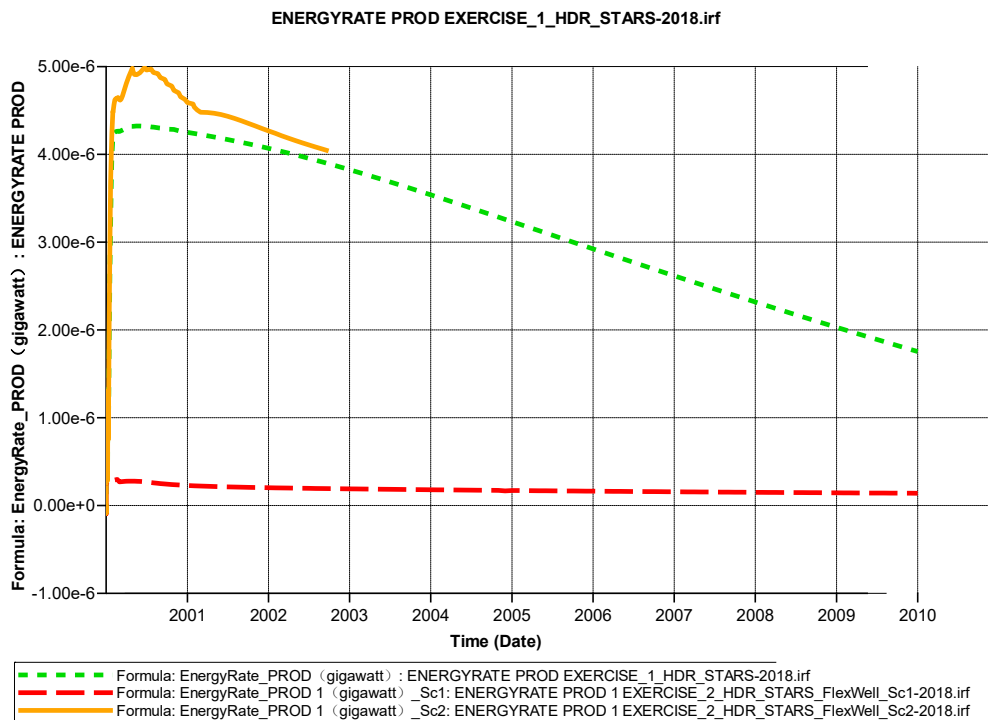
类似于第 74 期模拟的情况，冷水从一口井注入，然后从另一口井产出。

- 1) 在 Builder 中打开 EXERCISE_1_HDR_STARS_flexwell_Sc1.dat 文件。
- 2) 在 Wells & Recurrent 部分，双击 INJEC 1，点击 Options 选项卡，并将 Status 改为 SHUTIN，INJEC 1 关井。
- 3) 对 PROD 2 重复此操作，PROD 2 关井。
- 4) 打开 FlexWells 窗口，在左侧的树视图中，依次选择两个灵活井筒的油管管柱 Tubing，点击右侧 Delete Tubing 删除。
- 5) 单击窗口右上角的 Edit 编辑按钮，将 FlexWell-1 的名称更改为 Producer，将 FlexWell-2 更改为 Injector。
- 6) 将灵活井筒 Injector 的 Annulus 环空管柱改为 INJEC 2，在套管属性中输入内径 0.224 m，外径 0.245 m。OK。
- 7) 前面我们仅保留了油管管柱 INJEC 2 的最后一个射孔为 OPEN，在将该井由油管管柱转为环空管柱的过程中，我们需将该井的所有射孔状

态均改为 OPEN，可通过文本编辑器，直接在数据文件中修改。



- 8) 将文件另存为 EXERCISE_2_HDR_STARS_FlexWell_Sc2.dat，在 Launcher 窗口将该文件拖到 STARS 模拟器计算。
- 9) 在 Results Graph 中打开 Results.ses。点击 File → CMG Simulation Results，选择 EXERCISE_2_HDR_STARS_FlexWell_Sc2.irf 加载案例 2 结果文件。
- 10) 添加公式，将 J/day 转换为 gigawatt 单位，以获得 PROD 1 的能量率，并比较两个案例的能量率。保存 Results-2.ses。



三、不同版本的水力压裂模拟说明

第 74 期的数据文件是在 2018.10 版本 Builder 上操作保存的，大家在使用不同版本的时候，需留意以下几点：

- 1) 从 2014.10 版开始，Builder 的水力压裂模板有很大改进，也修改了关键字系统。使用 2014 以及之前版本，按照第 74 期讲义流程操作是没有问题的，但保存的数据文件与 2018 版相比，水力压裂部分的关键字有很大不同。
- 2) 使用 2014-2017 版本 Builder 打开第 74 期提供的数据文件时，软件提示 “The expected keyword is . But 0.001 was found at line 48.”（48 行有错误），“确定”之后，无法保留水力压裂裂缝。这是因为该行对应的关键字 WF1 是 2018 版新增的，低版本无法识别该关键字。

WF1 是模拟主裂缝宽度的关键字，增加此关键字，可将其作为可调参数进行优化，人工裂缝模拟更加便捷。另外，2018 版删减了 PERMK MATRIX 等关键字。使用低版本可参考补发的 74 期数据文件 EXERCISE_1_HDR_STARS-2016.dat（2016 版）。