

第 79 期：一种从重启直接初始化的方法

——从 IMEX 水驱直接初始化进行 STARS 热采化学驱模拟

编写人：王建国

很多油藏工程师有这样的经历：油藏开发初期的衰竭开采或水驱开发阶段，一般使用 IMEX 做数值模拟（计算速度快），或者使用组分设置较简单的 STARS 模型；后期转入化学驱或其他提高采收率开发方式以后，需要转成组分设置更复杂的 STARS 模型。那么，组分增加之后，之前的阶段怎么处理？如果用新的组分设置重新跑一遍，浪费时间不说，速度一般会更慢，模拟结果可能还不一样。

针对上述情况，我们曾经在第 7 期的讲义中，介绍了用 CMG 的 Builder 导入模拟结果参数场的方法，该方法需要把压力、饱和度场等一个个读过来。本文给大家介绍另外一种更加方便、快捷的方法，也就是在 STARS 模型中直接从 IMEX 或 STARS 模型模拟结果进行初始化的方法。直接从 IMEX 模拟结果进行初始化时需要用到关键字*INIT_FROM_IMEX，直接从 STARS 模拟结果进行初始化时需要用到关键字*INIT_FROM_RESTART，这是两种不同的方式。本文分别进行介绍。

目 录

一、从 IMEX 模拟结果进行初始化	3
二、从 STARS 模拟结果进行初始化	7
附录 1.....	10
1.1 关键字*INIT_FROM_IMEX 介绍	10
1.2 缺省值.....	10
1.3 使用条件.....	11
1.4 说明.....	11
1.5 其他注意事项.....	12
1.5.1 模拟时间.....	12
1.5.2 IMEX 模型转化结果检验	12
1.5.3 无效网格与零孔隙度网格.....	12
附录 2.....	14
2.1 关键字*INIT_FROM_RESTART 介绍	14
2.2 缺省值.....	14
2.3 使用条件.....	14
2.4 说明.....	14
2.5 其他注意事项.....	15
2.5.1 改变组分设置.....	15
2.5.2 模拟时间.....	15
2.5.3 动态数据.....	15
2.5.4 扩展组分设置的一致性检验.....	16

一、从 IMEX 模拟结果进行初始化

先看个案例：

IMEX 自带算例“mxdrm001.dat”模拟的是含气油藏的衰竭开发，共有 3 口井，生产时间段是 1995.1.1-2015.12.31。

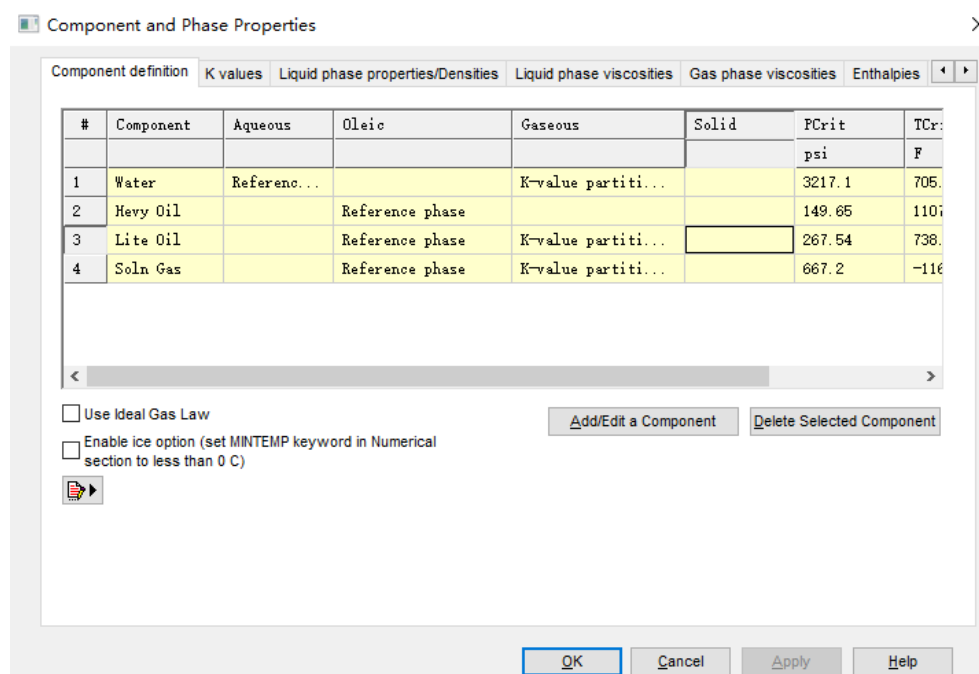
为了开展后续提高采收率开发方式的模拟，工程师决定把这个 IMEX 模型转成 STARS 模型——“stsmo058.dat”。

IMEX 转 STARS 主要涉及流体模型的转换，一般有两种方法：

（一）用 Builder 的转换工具，具体参考第 74 期讲义《地热开发模拟操作流程（IMEX 转 STARS）》第 21 页开始的部分。这种方法转成 STARS 后只有 1 个油组分。

（二）根据 IMEX 模型中的 PVT 数据，用 WinProp 重新生成流体模型，具体可以参考 learncmg.cn 网站上的 WinProp 系列教程。这种方法可以根据模拟的需要，为 STARS 模型设置多个油组分。比如“stsmo058.dat”中就有 'Lite Oil'、'Hevy Oil' 和 'Soln Gas' 三个油相组分。

STARS 模型“stsmo058.dat”的组分设置如下图所示。



该模型中有 3 个油相组分，其中 'Hevy Oil' 只能存在油相中，'Lite Oil' 和 'Soln Gas' 可以存在于油气两相中，通过 K 值劈分。

由于工程师之前用 IMEX 模型已经完成了历史拟合（1995.1.1-1998.12.31），现在转成 STARS 模型后，不想带着历史阶段的数据重新算了，想用 STARS 模型从 1998.12.31 开始算。

要想达到这个目的，需要这么操作：

第 1 步，把 IMEX 模型和 STARS 模型都放在 1 个文件夹下。

第 2 步，在 IMEX 模型中设置允许输出重启信息（并重新运算一遍）。比如“mxdrm001.dat”中第 31 行和 43 行。这是通用的语句，在别的模型中拷贝过去就能用，很简单。

```

31  *FILENAMES *OUTPUT *INDEX-OUT *MAIN-RESULTS-OUT
32
33  *TITLE1  '2-PHASE (OIL-WATER) DEPLETION, MXDRM001'
34  *TITLE2  '4 WELLS DEPLETION OPERATION'
35  *TITLE3  'COMPARE WITH WTRFLD & PSEUDO-MIS. FLOOD'
36  *CASEID  'MXDRM001'
37
38
39  **---INPUT/OUTPUT CONTROL SECTION-----
40
41  *INUNIT  *SI
42
43  *WRST          *TIME
44  *WPRN          *WELL *TIME

```

第 3 步，在 STARS 模型中设置能提供初始化信息的模型和时间步。比如“stsmo058.dat”中第 33-34 行。意思是指定初始化信息来自相同文件夹下的“mxdrm001.dat”模型，并从第 25 个时间步读取信息。

```

33  filename index-in 'mxdrm001'
34  restart 25

```

第 4 步，在 STARS 模型中设置初始化部分。除了设置初始温度（第 204 行）和脱气油中各组分的组成（第 207-208 行）外，最关键的是第 211 行：
*init_from_imex *sgas 'Soln Gas'。

```
202  *initial
203
204  *temp *con 93
205
206  ** Composition of dead oil (solution gas absent)
207  *mfrac_oil 'Heavy Oil' *con 0.25
208  *mfrac_oil 'Lite Oil' *con 0.75
209
210  ** Get *PRES, *SO, *SW and *PBC 'Soln Gas'
211  *init_from_imex *sgas 'Soln Gas'
```

关键字*INIT_FROM_IMEX 意思是这个 STARS 模型的初始压力、含油饱和度、含水饱和度、泡点压力都是从 IMEX 模型模拟结果中读出来的。

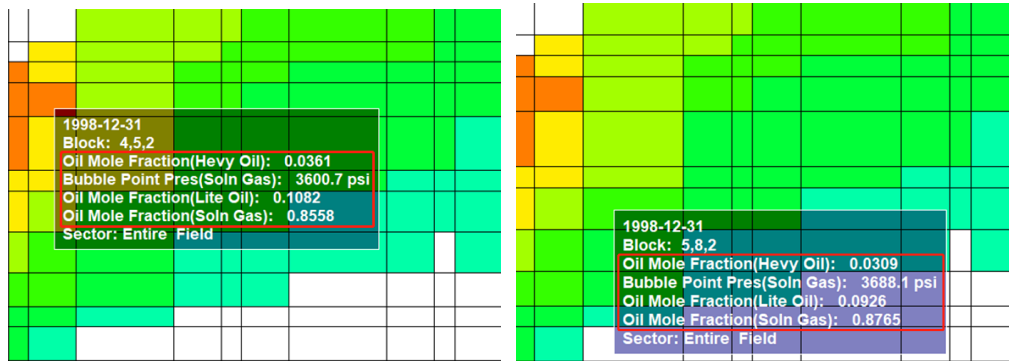
如果*INIT_FROM_IMEX 没有出现，就不会从 IMEX 的模拟结果文件中得到初始条件。

*INIT_FROM_IMEX 后面的*SGAS 和组分名称'Soln Gas'都不是必填的。

如果*INIT_FROM_IMEX 存在，但是*SGAS 没有出现，就不会从 IMEX 的模拟结果文件中读取泡点压力。

如果*INIT_FROM_IMEX *SGAS 存在，但是后面的组分名称没有出现，IMEX 的泡点压力就指定给*COMPNAME 列表中存在的第一个可能存在气相中的油相组分（该例中，如果'Soln Gas'没有出现，泡点压力就指定给'Lite Oil'）。这里'Soln Gas'的出现迫使泡点压力指定给组分'Soln Gas'。如果没有这样的组分，就当*SGAS 不存在。

STARS 模型得到这些信息后，将初始压力、含油饱和度和含水饱和度直接作为初始条件使用，将泡点压力转换成气相组分的摩尔分数。这里有个问题，IMEX 模型算到这个时间点时，每个网格的泡点压力会有差异，由此导致每个网格的油相中'Soln Gas'的摩尔分数不同。因为油相中有 3 个组分，'Soln Gas'的摩尔分数变化会导致另外两个组分的摩尔分数也会变化，那么其他油相组分的摩尔分数应该怎么调整呢？



液态油（对应 IMEX 的“dead oil”）由两个组分——'Lite Oil'和'Hevy Oil'来表征，其摩尔分数用*MFRAC_OIL 设置（第 207-208 行）。摩尔分数的归一化能调节'Soln Gas'的泡点压力，而 STARS 中液态油的各组分摩尔分数之比不会变化。

比如，上面的*MFRAC_OIL 数据表明，'Lite Oil'的摩尔分数是'Hevy Oil'的 3 倍，共同组成了 IMEX 中的“dead oil”。如果 IMEX 的泡点压力转成'Soln Gas'的油相摩尔分数为 0.4，那么'Lite Oil'和'Hevy Oil'的油相摩尔分数之和变成 $1 - 0.4 = 0.6$ ，各自分别调整为 0.45 和 0.15。这就确保了'Lite Oil'与'Hevy Oil'为 3:1 的比例，同时满足了油相摩尔分数之和为 1。这种调整在每个含有气相的网格中都会进行，如上图所示。

如果看到这里还不太明白怎么用，可以仔细阅读附录 1 中的详细解释。

以上介绍的是从 IMEX 模拟结果进行初始化的方法。如果初期开发阶段用的是 STARS 模型，组分比较少，后面提高采收率阶段增加了组分，那么能否从组分较少的 STARS 模型模拟结果进行初始化呢？答案是肯定的，下面就详细介绍。

二、从 STARS 模拟结果进行初始化

首先，为什么要从重新启动进行初始化呢？

在某种开发方式（比如衰竭开采、水驱或蒸汽驱）结束之后，通过采用提高采收率的开发方式。提高采收率方法可能需要添加化学剂组分，比如溶剂、表面活性剂或空气。如果不采用这种初始化方法，一般采用下面的模拟方法：

模型 1：使用最少的组分模拟第 1 次开发方式。

模型 2：使用扩展的组分设置重新运算第 1 种开发方式，但是新组分不存在或没有注入，希望结果与第 1 个模型相同或至少接近。

模型 3：从模型 2 的重新启动开始模拟提高采收率开采方式。

这种方法的常见问题是，模型 2 的结果与模型 1 的差太多。模型 2 与模型 1 基本一样，只是带有“未使用的”组分，但是一些数值计算问题可能导致模型 2 结果与模型 1 不一致。很多情况下只有当两个模型的收敛容限都很紧时结果才能接近。

结果可能是收紧容限的模型 1 与原来的模型 1 结果明显不同。如果原来的模型 1 结果已经被采纳作为决策的依据，那就比较尴尬了。另一个问题是，模型 2 将比模型 1 消耗更多的资源（内存和 CPU 时间），因为每个网格都增加了方程。

从模型 1 的重新启动进行初始化，并且带有扩展的组分设置，这样的功能其价值在于省去了模型 2，也就是说，模型 3 的初始化直接来自模型 1 的重新启动。

下面看个例子，如果不明白再看后面的解释。

算例“stflu024.dat”和“stflu025.dat”是增加组分以后重新运算的一组例子。算例“stflu024.dat”模拟的是火烧项目中蒸汽预热的阶段。算例“stflu025.dat”模拟的是蒸汽预热和火烧这两个阶段，因此在“stflu024.dat”基础上增加了火烧阶段需要的组分：'co2'、'co/n2'和'oxygen'。

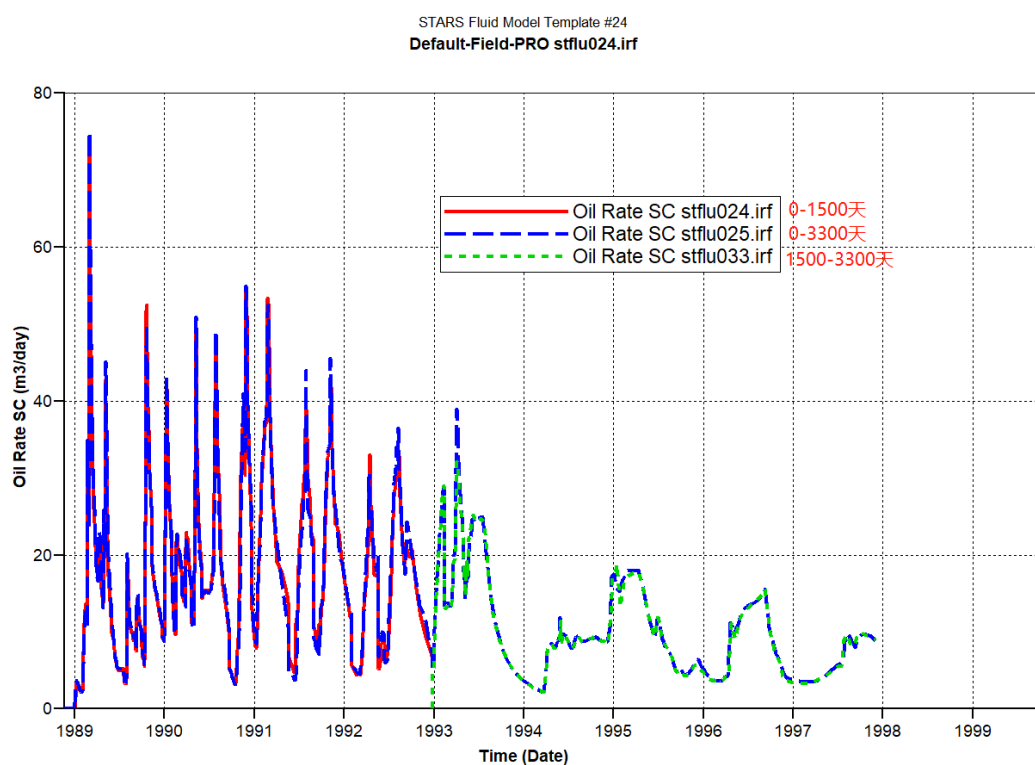
模型	模型 1	模型 2	模型 3
*COMPNAME	stflu024	stflu025	stflu033
'water'	√	√	√
'bitumn'	√	√	√
'ch4'	√	√	√
'co2'		√	√
'co/n2'		√	√

'oxygen'		√	√
'coke'	√	√	√

理论上讲，这两个算例中注蒸汽阶段的结果应该一样，但是实际上由于数值收敛问题造成不一样。只有在收敛控制条件非常严格时，这两个算例才能给出接近相同的结果，并且运算时间会增加 2-4 倍。这种收敛控制技术虽然能使两种模拟结果非常接近，但是对于那些动不动就算很长时间的模型并不实用，尤其是更加复杂的模型可能需要更加严格的收敛控制条件，计算时间更长。

算例“stflu033.dat”使用*INIT_FROM_RESTART 关键字，从蒸汽预热阶段（stflu024）的期末得到火烧阶段的初始条件，避免了重复计算蒸汽预热阶段，效率大幅提升。

这 3 个模型的运算结果放在一起如图所示：



使用这种初始化方法需要进行如下操作：

第 1 步，在模型 1 中设置输出重启信息，例如算例“stflu024.dat”的第 1890 行。


```
1890  *WRST *TNEXT
1891
1892  *TIME 1500.
```

第 2 步，在模型 1 的基础上，调整流体模型，做成模型 3，即“stflu033.dat”。

第 3 步，在模型 3 中设置能提供初始化信息的模型和时间步。比如“stflu033.dat”中第 32-33 行。意思是指定初始化信息来自相同文件夹下的“stflu024.dat”模型，并读取第 1500 天的信息。

```
31  ** Get *INIT_FROM_RESTART info
32  *FILENAME *INDEX-IN 'stflu024'
33  *RESTIME 1500
```

第 4 步，在模型 3 中设置初始化部分。初始化部分的关键字设置非常简单：

```
228  *INITIAL
229
230  *INIT_FROM_RESTART
```

到此完成，保存，运算。

如果看到这里还不太明白怎么使用，可以仔细阅读附录 2 中的详细解释。

最后总结一下：

1. 无论是从 IMEX 还是从 STARS 模型的重启动进行初始化，这两种方法本质上都属于特殊的初始化方法；
2. 虽然这两种方法都使用了重启动的关键字，但是不同于单纯的重启动；
3. 模拟开始时间等于本模型第 1 个时间点(关键字 RUN 后面第 1 个时间)；
4. 如果需要输出该油藏的累积产量或累积采出程度，需要使用公式管理器编辑公式（参考第 68 期讲义），把提供初始化信息的模型的累产量加到本模型上才能得到正确的数值。

附录 1

1.1 关键字*INIT_FROM_IMEX 介绍

关键字*INIT_FROM_IMEX 用在 STARS 中, 用于设置初始条件是来自己 IMEX 运算结果的模拟结果文件。

关键字*INIT_FROM_IMEX 的使用格式是:

*INIT_FROM_IMEX (*SGAS (*sgas_name*))

其中, IMEX 的模拟结果文件名是通过关键字*FILENAME *INDEX-IN 设置的。该文件中特定的时间记录是通过关键字*RESTART 或*RESTIME 或*RESDATE 设置的。

*SGAS (*sgas_name*) 是可选子关键字, 可以将 IMEX 的泡点压力指定给 STARS 模型的一个组分。如果*SGAS 没有出现, 就不会从 IMEX 的模拟结果文件中读取泡点压力, 这样就需要使用关键字*MFRAC_OIL 或*PBC 来设置溶解气的含量。

*SGAS 后面引用的字符串 *sgas_name* 是可选的, 用于指定 STARS 的哪个组分采用 IMEX 的泡点压力进行初始化。*sgas_name* 必须出现在*COMPNAME 列表中。该组分必须是油相的组分, 并且还能存在气相中 (K 值非零)。

1.2 缺省值

如果*INIT_FROM_IMEX 没有出现, 就不会从 IMEX 的模拟结果文件中得到初始条件。

如果*INIT_FROM_IMEX 存在, 但是*SGAS 没有出现, 就不会从 IMEX 的模拟结果文件中读取泡点压力。

如果*INIT_FROM_IMEX *SGAS 存在, 但是 *sgas_name* 没有出现, IMEX 的泡点压力就指定给*COMPNAME 列表中存在的第一个可能存在气相中的油相组分 (上面的例子中, 如果'Soln Gas'没有出现, 泡点压力就指定给'Lite Oil')。如果没有这样的组分, 就当*SGAS 不存在。

1.3 使用条件

使用关键字*INIT_FROM_IMEX 进行初始化时需要注意以下使用条件：

- 1) 不能用于重启动的模型。这是一种初始化方式，虽然跟重启动很像，但不是重启动。重启动是从相同模拟器的模拟结果读取数据，而这个是从不同模拟器的模拟结果读取数据。并且，这种初始化跟重启动的另一个重要区别是：重启动要求重启前后 2 个模型的物性参数完全相同，而这种初始化对此没有要求，只要 IMEX 和 STARS 模型网格一致就行，孔隙度、渗透率甚至单位制都可以不同。
- 2) 关键字*INIT_FROM_IMEX 在每个模型中最多只能出现一次。
- 3) IMEX 和 STARS 模型必须具有相同数量的有效网格或同样的网格，也就是说地质构造要完全一致。
- 4) *INIT_FROM_IMEX 的*SGAS 选项不能与*MASSBASIS 一起使用。
- 5) 使用*INIT_FROM_IMEX 时，溶解气的含量有 3 种定义方式：*SGAS，或者*MFRAC_OIL 或者*PBC，必须从这三种方式里面选择一种进行初始化。

1.4 说明

使用*INIT_FROM_IMEX 关键字，能够从 IMEX 模型生成的模拟结果文件中获取一些参数，作为 STARS 模型的初始条件。这两个模型的有效网格数必须完全相同，这也意味着网格定义相同。

下面的参数可以从 IMEX 模型中得到：

参数	IMEX	STARS
	*OUTSRF *GRID	初始条件数据
流体压力	*PRES	*PRES
含油饱和度	*SO	*SO
含水饱和度	*SW	*SW
泡点压力	*BPP	*PBC <i>sgas_name</i>

具体从哪个时间点的模拟结果重新启动是由关键字*RESTART 或*RESTIME 或*RESDATE 设置的，只使用该时间点记录的参数。所有这些参数都在 IMEX 重新启动记录里。如果该时间点没有重启记录，可以通过*WSRF *GRID 和相应的*OUTSRF *GRID 子关键字输出该时间点的参数。

如果没有找到初始化参数，就用 STARS 缺省的方法。流体压力没有缺省的初始值，所以如果不能从 IMEX 的模拟结果文件中得到初始压力，必须用 STARS 初始条件关键字*PRES 设置。

注意不要使用初始条件关键字*SG，因为含气饱和度来自缺省的方法。用户必须为其他参数设置初始条件，比如用*TEMP 设置温度，用*MFRAC_OIL 设置除 *sgas_name* 外的油相组分的摩尔分数。

1.5 其他注意事项

1.5.1 模拟时间

重启的时间步、时间点或日期点仅用于设置 IMEX 的模拟结果文件中的时间记录，STARS 的运算从第 0 天开始。

1.5.2 IMEX 模型转化结果检验

从 IMEX 转到 STARS 后，用户应该检查转换的正确性，可以通过比较 STARS 的原始储量和 IMEX 在读入时间点的储量来完成。注意考虑地层孔隙模型、流体压缩系数和挥发模型的差异。一般 STARS 的属性数据应该与 IMEX 的属性一致，但是两种模型的差异也可能导致初始条件下的属性只能接近，无法完全一致。

1.5.3 无效网格与零孔隙度网格

在等温模型中，孔隙体积为 0 或者低于*PVCUTOFF 的网格自动变为无效网格。这与关键字*NULL 和尖灭（零厚度）无关。由于 IMEX 总是等温模式，IMEX 重启记录中可能包含这些基于临界条件的无效网格。当 STARS 以等温模式运算同样网格数的模型时，也会生成同样的无效网格。这样 IMEX 和 STARS 就具有同样数量的有效网格数。

在变温模式下，有效网格绝不会因为孔隙体积变成无效网格，因为要模拟岩石吸热的过程。因此，在变温模式下，STARS 可能比具有同等数量网格的 IMEX 模型有更多的有效网格。STARS 中增加的这些有效网格都是零孔隙体积和零网

格体积的。当流体性质从 IMEX 重新启动转过来时，STARS 中的这些零孔隙度的有效网格没有数值。这些网格唯一需要的属性是温度，必须由 STARS 提供。

一般，IMEX 和 STARS 模型使用相同的网格数据，在相同的初始压力和温度下，对于每个网格和 sector，IMEX 和 STARS 应该都生成相同（或接近相同）的孔隙体积。差别大可能是因为地层压缩系数不一致（STARS 关键字*CPOR，*PORFORM，等）。

为了让 STARS 把 IMEX 中基于临界值的无效网格转成 STARS 变温模型的零孔隙度网格，IMEX 重新启动必须用*RESTART_SR2 *MAIN（不是缺省值）来写。其他的重启动记录选项（例如，*REWIND）也可以用。

注意：IMEX 模拟结果的*.out 文件展示了从 IMEX 模拟结果文件中能得到的参数，在重新启动信息区：

```
MESSAGES FOR RESTART FILE READING:
```

```
Reading initial conditions from IMEX restart:
```

```
- pressure  
- water saturation  
- oil saturation  
- bubble-point pressure
```

如果某个参数没有出现在这个列表中，就不能从 IMEX 的模拟结果文件中得到。

附录 2

2.1 关键字*INIT_FROM_RESTART 介绍

STARS 中的关键字*INIT_FROM_RESTART，是用于设置初始条件是来自 STARS 运算结果的模拟结果文件。该关键字位于*INITIAL 关键字后面，并且*INITIAL 部分其他关键字不必出现。该关键字使用非常简单，不需要其他子关键字。因此，*.dat 文件中看到的应该是这样的：

```
*INITIAL
*INIT_FROM_RESTART
*NUMERICAL
...
```

2.2 缺省值

如果*INIT_FROM_RESTART 没有出现，那么模型的所有初始条件来自*INITIAL 数据段。

2.3 使用条件

关键字*INIT_FROM_RESTART 只可用于不是重新启动的模型。该功能不可与下面的功能一起使用：

- ✓ *AQUIFER
- ✓ 动态或变化的网格。

两个模型必须都是热采模型，或者都是等温模型，不可变化。

两个模型必须具有相同的网格数或者网格。

2.4 说明

使用*INIT_FROM_RESTART 可以从具有相同网格（或相同网格数）的模型中拷贝重新启动记录作为当前模型的初始条件。该功能在不能直接使用重新启动时很有用，比如当第 2 个模型需要接着第 1 个模型继续模拟，但是增加了组分。

井和水层的累积项无法继承过来，所以初始化为 0。第 2 个模型的模型网格数必须与第 1 个模型一致，这就意味着网格定义是相同的。

已有组分在每个网格的含量从重新启动记录中得到。这就假设已有组分的 PVT 性质是不变的。决定物质的量（比如密度）的性质的任何变化都会造成物质平衡误差，并且不可调和，可能导致计算中断。这种物质平衡限制要求两个模型必须使用相同的网格设置。而且要求组分的 PVT 性质相同，特别是 K 值和密度。这一点与关键字*INIT_FROM_IMEX 有很大差异。

使用关键字*INIT_FROM_RESTART 时，就不需要*INITIAL 数据段的其他数据了，出现的数据也会忽略。需要特别指出的是，当*INIT_FROM_RESTART 没有出现时，初始压力数据是必须要有的。

2.5 其他注意事项

2.5.1 改变组分设置

组分的性质是从组分名称得来的，也就是说，只有两个模型使用相同的组分名称时，组分信息才会拷贝。

第 2 个模型的组分名称可以通过关键字*COMPNAME 重新排序。新的组分可以根据关键字*MODEL 和*COMPNAME 对组分类型的描述插在任意位置。对每一个新组分，其摩尔分数、固相浓度、吸附量和物质的量都初始化为 0。

2.5.2 模拟时间

如果计划将两个模型的曲线放在同一时间坐标上，需要在两个模型的*RUN 后面紧跟着都使用*DATE，而不是*TIME。这样即使两个模型从不同的时间开始，Results Graph 也可以使用同一个时间坐标。在其他的时间点使用*TIME 或*DATE 都行，但在实际模型中，全部使用*DATE 更容易管理数据。

2.5.3 动态数据

对于在两个模型中都使用的动态变化参数（比如井的产量压力变化、传导率倍数变化），数据可以从第 1 个模型中得到。传递这些数据时，确保第 2 个模型的初始化条件能够代表第 1 个模型重启时间点的条件，其中可能需要包含中间时间点的修改。

从第 1 个模型中拷贝数据时，可能发现两个模型的井数不一致。如果使用了井序号的话，建议从*WELL 关键字中删除井序号，只用井名。

可以在两个模型中使用相同的井名，并且很方便，但是在第 2 个模型中该井的累积项开始为 0，因为井的累积项是不会拷贝过来的。注意*INCOMP 跟组分设置有关，所以如果*INCOMP 是从第 1 个模型中拷贝过来的，就可能需要修改。

2.5.4 扩展组分设置的一致性检验

第 2 个模型建好以后，应该检查组分 PVT 和动态数据是否正确。最好的办法就是对比下面两个模型的几个时间点的结果：

- ✓ 第 1 个模型，从原始重新启动记录重启（如果重启的时间是原始运算的结束时间就带有*DATE/*TIME）
- ✓ 第 2 个模型（带有*INIT_FROM_RESTART），没有使用新组分（即没有注入或反应生成新组分）。

这两个模型应该得到相同的结果，除非第 2 个模型有“未使用的”组分。可以通过使用*OUTPRN *GRID *ALL 和*OUTPRN *WELL *ALL （或者*WELLCOMP），并对比相应的*.out 文件来进行对比。这两个模型的结果对于共有的组分应该一样，井的累积项（*INIT_FROM_RESTART 不能从重新启动记录拷贝）和输出顺序除外。此外，在 Results Graph 中画曲线也可以进行对比。