

第 108 期：GEM - CCS 模型数值调参技巧

编写人：吴晓云

数值调参一直是油藏工程师面临的一项挑战。我们对牛顿迭代法、雅克比矩阵等概念似乎了然于胸，却又常常感到困惑。面对参数列表中的众多选项，即便我们再三斟酌，也难以确定如何设置才能有效改善模拟结果。这往往是许多人在大多数时间里感到无能为力的问题。然而，作为油藏工程师，数值模拟是研究工作中不可或缺的工具，而数值调参是一个不可避免的议题。今天，就让我们尝试攻克这个难题。

对于大多数人来说，掌握数值模拟技巧无非是通过搭建多个模型和解决各种错误来积累经验，而后者显然能更快地促进个人成长。

在数值参数调整过程中，有两个关键点需要注意：首先，对输入数据的检查总是比参数调整本身更为重要；其次，数值参数调整并不存在唯一的解决方案。

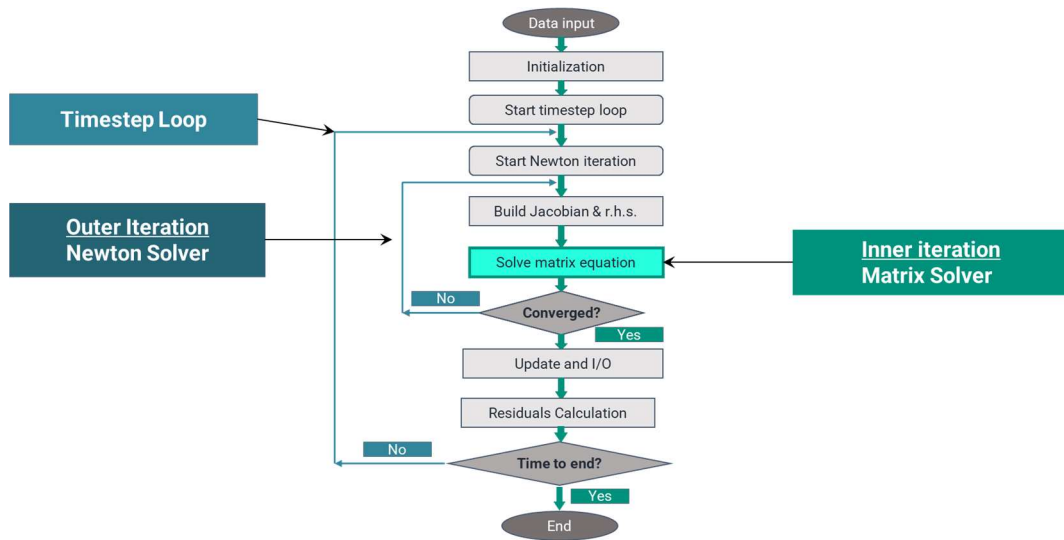
如果我们难以直接从答案入手，那么不妨换个角度，回到问题的源头，分析导致收敛问题的根本原因，并尝试总结出一份可能的解决方案清单。

本期讲义将介绍 CMG 数值计算的相关知识点，以及 GEM CCS 模拟中一些常见错误的处理方法。虽然这些内容具有一定的针对性，但对于 IMEX、STARS、GEM 也同样适用。

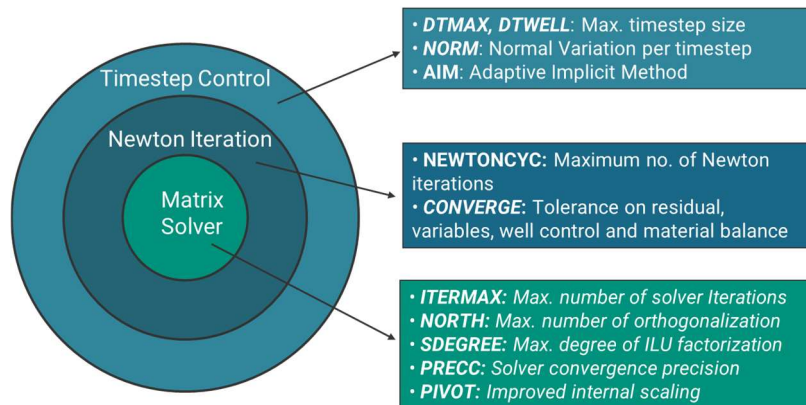
一、数值控制参数

了解一下数模计算的流程图:

在数值计算过程中,包含三个嵌套的循环:时间步循环—外迭代(牛顿迭代)—内迭代(矩阵求解)。数值计算是在一系列时间点上求解方程组,从一个时间步到下一个时间步的过程被称为时间步长,时间步循环即是从初始时间迭代到模型的最终时间。对于每个时间步长,使用牛顿法来求解方程,以获得下一个时间步长的属性值。牛顿法是一种迭代技术,因此它本身也是一个循环。在牛顿迭代内部,需要求解雅可比矩阵和线性方程组。根据矩阵的规模,使用迭代线性求解器。



在三个循环迭代流程中,分别对应不同的控制参数。在数值调参过程中,我们应该首先解决最内层的线性求解问题,如果线性求解失败了,其他外层也必然会出现问题。因此,首先尽可能从降低线性求解器失败率开始,然后向外层逐层解决。



矩阵求解: 我们需与尽可能减少线性求解器失败的次数。

如果求解计算失败, 可以尝试增大以下参数:

- ITERMAX (最大迭代次数)
- NORTH (GMRE 使用的最大正交基向量, 需要额外内存)
- PRECC (线性求解收敛容差)

预处理器(COMBINATIVE): Combinative 预处理主要是为了减少求解器迭代次数, 降低求解器运行时间, 但是每个迭代的工作量也会增加。

COMBINATIVE 的两个次级关键字 AMG 和 ILU, ILU 比 AMG 压力迭代次数更多, 但是每个迭代的工作量更少。

牛顿迭代: 牛顿迭代的收敛性由 CONVERGE 控制。而 NEWTONCYC 控制牛顿迭代的最大次数。

- 通过修改主要的变量值修改收敛标准。
- 当所有变量或者所有网格残差收敛到指定标准时, 则认为牛顿迭代已收敛。如果定义 CONV-RESONLY ON, 则仅检查方程残差。

时间步控制:

- 基于压力(1000 kPa)、组成(0.15)、饱和度(0.15)、温度(10C)的变化, NORM 确定下一个时间步长。NORM 值较小, 则时间步长也小, 同时能避免过多的时间步 cut。而 NORM 值较高, 时间步长也长, 但是可能会出现较多的时间步 cut。
 - 在 CCS 模型里, NORM AQUEOUS 推荐取值为 0.3 或更高, 以达到理想的时间步长, 同时确保较低的物质平衡误差。
- 当任意网格的压力(10,000 kPa)、组成(0.5)、饱和度(0.5)、温度(20 C)的 MAXCHANGE 超过设定值时, 将引起时间步截断。
- NORM 和 MAXCHANGE 识别最大变化量的网格及变量。
- 可通过 WPRN ITER NEWTON / DIARY CHANGES-UNCONV 输出变量变化值, 用于帮助用户为正确变量选择合适的参数。

```

-----
NEWTONIAN ITERATION 3 ( 36 Solver iterations)
Changes criterion :
Unconverged variables :      2049 Block variables not conv ? :      2000
Blocks :      1,1      2,1      3,1      4,1      5,1
Max. Changes Since Last Timestep :
Max DP :      1,15      1.768E+02, Max DS :      1,15 w -9.635E-02, Max DZ :      2,17      1 1.092E-06
Max DAQ :      1,1      1 0.000E+00
Max Updates in this iteration (last is well bottom hole pressure) :
      1,15      -5.79051E+00      1,14      -1.09444E-02      1,15      3.02924E-06      1,1      0.00000E+00
      1,15      2.99861E-03
      -1      -4.79271E+00
  
```

- 通常我们需与修改最大时间步长 (DTMAX)，也可以在井和动态部分手动调整。
- DTWELL 用于在有新井投产或者操作条件变化时，降低初始时间步长。

隐式/显式算法

- AIM 和 AIMSET 控制隐式计算程度。
- 全隐式 (FIM) 隐式求解压裂和组成变化
- 显式 (IMPES) 压力求解为隐式，组成求解为显式
- 隐式求解更稳定，时间步长较大，但是在构建和求解雅克比矩阵时计算量较大。
- 显式求解更简单，但是对时间步长有限制。

GEM 人工智能调参

ADTSC (nsteps) (*ON) (*ALLOW allow-element)

allow-element = NORMS_MAXCHANGES | DTMAX | DTWELL | NEWTONCYC | AND-THRESH | CONV_MAXRES | ALL

CCS 模型中，推荐如下的数值控制：

```
ADTSC ALLOW AND-THRESH
ADTSC ALLOW DTMAX
ADTSC ALLOW NEWTONCYC
AIM STAB AND-THRESH 1 0.0001
DTMAX 30
NEWTONCYC 30
DTMIN 1.E-09
COMBINATIVE ILU （也可以缺省，允许 ADTSC 去选择最优的预处理器方式）
```

使用 DEBUG CPUTIME 可输出详细的 CPU 统计信息，通常雅克比（牛顿迭代）和（线性）求解器占用大部分的运行时间。

CPU and Clock Timing Statistics				
Task	CPU(sec)	%of tot CPU	Clock(sec)	%of tot Clock
Dyn Dim Scan	0.00	0.00	0.01	0.14
Setup	0.34	0.92	0.21	4.29
Flux reading	0.00	0.00	0.00	0.00
Jacobian	13.09	35.22	1.66	33.77
Solver	7.44	20.01	0.90	18.26
Pointers	0.02	0.04	0.00	0.02
Non-Darcy	0.00	0.00	0.00	0.00
Compaction	0.00	0.00	0.00	0.00
Prop. updates	0.19	0.50	0.03	0.61
Restor	0.14	0.38	0.03	0.67
Vrec	3.83	10.30	0.48	9.79
Conver	1.47	3.95	0.19	3.87
Matbal	0.06	0.17	0.01	0.18
Well setups	0.22	0.59	0.02	0.33
Well updates	0.02	0.04	0.00	0.08
Well Manage	0.42	1.13	0.04	0.79
Output	9.88	26.57	1.33	27.07
Total	37.11	95.83	4.91	99.90

二、数据文件的质量控制

数据文件的质量检查用于是数值调参的第一步,有很多常见的警告(Warning)或错误(Fatal Error)都可以通过质量控制方式解决。

1. 储层部分-PV (孔隙体积)

PVCUTOFF

```

--- Repeat time step: composition variation too large, block: 9136 ( 38,28,7 ) 0.9591
--- Repeat time step: composition variation too large, block: 9170 ( 38,29,7 ) 0.8470
--- Repeat time step: saturation variation too large, block: 9068 ( 38,26,7 ) 0.8921
--- Repeat time step: maximum number of cycles reached
--- Repeat time step: maximum number of cycles reached
--- Repeat time step: maximum number of cycles reached
--- Repeat time step: maximum number of cycles reached
--- Repeat time step: maximum number of cycles reached
--- Repeat time step: saturation variation too large, block: 9102 ( 38,27,7 ) 0.8679
--- Repeat time step: saturation variation too large, block: 9204 ( 38,30,7 ) 0.9740

===== FATAL ERROR (from subroutine: TMSTEP) =====
Calculated time step size = minimum timestep (*DTMIN). Writing restart, if
necessary, and stopping..
  1 Warning messages.  1 Error messages.
=====

Terminating simulation: Fatal error.

End of Simulation: Abnormal Termination

```

当我们在 GEM 的 log 文件中看到这些收敛问题时,可能就是由于一些异常小的孔隙体积导致的。使用 PVCUTOFF 可以将这些小孔隙体积的网格无效化。

```

34035  ** 0 = pinched block, 1 = active block
34036  PINCHOUTARRAY CON          1
34037  PRPOR 11800
34038  CPOR 5.8e-7
34039
34040  PVCUTOFF 100 ** min PV in m3
34041
34042  MODEL PR
34043  NC 2 2
34044  COMPNAME 'CO2' 'CH4'

```

2. 尖灭网格 (PINCHOUTS)

缺省条件下,角点网格中,小与 0.001m 厚度的网格会被识别为尖灭网格。我们也可以使用 PINCHOUTARRAY / PINCHOUT-TOL 将一些比较薄的网格设置为尖灭网格。

尖灭网格并不影响垂向的流动,但是水平方向不能流动。关键字形式如下:

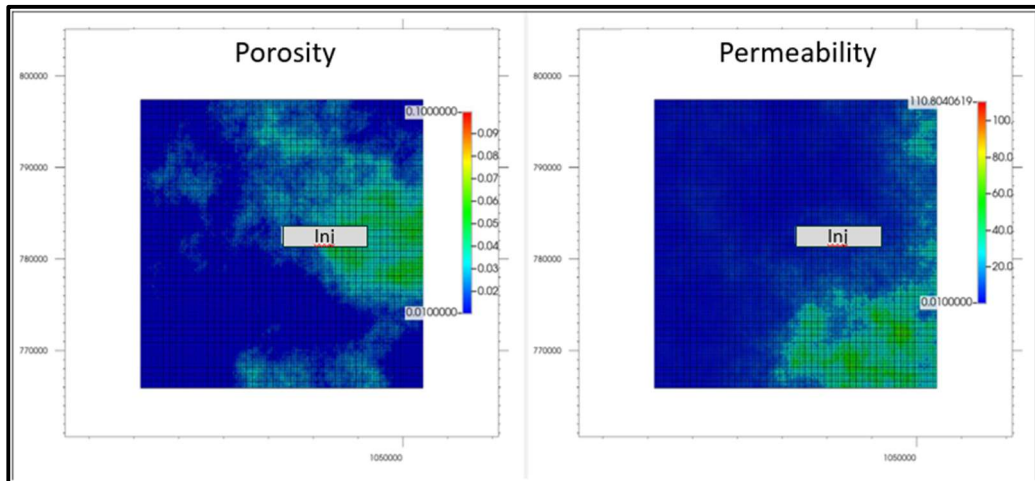
```

34036 PINCHOUTARRAY CON 1
34037 PRPOR 11800
34038 CPOR 5.8e-7
34039
34040 PINCHOUT-TOL 1 ** min cells thickness
34041 PVCUTOFF 100 ** min PV in m3
34042
34043 MODEL PR
34044 NC 2 2
34045 COMPNAME 'CO2' 'CH4'
    
```



3. 储层部分-孔/渗质量控制

较强的孔渗相关性也至关重要, 良好的孔渗相关性会有助于我们快速历史拟合。通过肉眼对比或者绘制孔渗关系交会图进行查看, 必要时需要再次确认并修正。



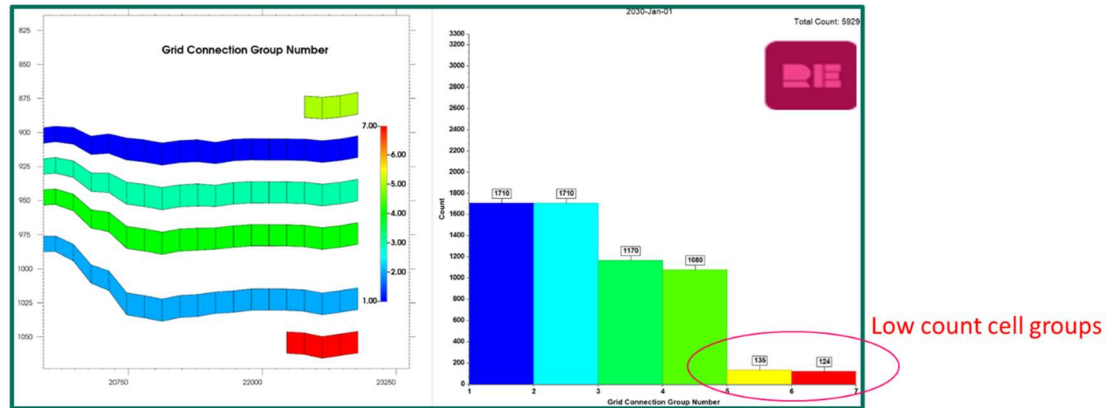
我们也可以对异常高/低值加以限制, 使用 MAXVAL 和 MINVAL。例如:

- PERMI MAXVAL 500 MINVAL 1 ALL ...
- **设置 I 方向所有网格渗透率, 同时限制最高值为 500mD, 最低值为 1mD。
- PERMI MAXVAL 500 400 MINVAL 1 10 ALL ...
- **设置 I 方向所有网格渗透率, 如果该值高于 500, 则赋值 400mD, 如果低于 1, 则赋值 10mD。

4. 储层部分-相连网格组 (CONNECTION GROUPS)

在后处理中，缺省输出网格连接组 (Grid Connection Group Number)，该参数能够统计每一组相连的网格组的网格个数。对于个数比较低的相连网格组，说明这些网格的连通性较差，容易引起收敛问题。

识别出有多少个水力不连通的区域至关重要，特别是在热模型中。我们可以决定将数量较低的区域设为无效网格。



5. 相渗和初始化部分-毛管力定义

GEM 的相渗曲线是为三相设计的模拟器，CCS 模型中仅有水气两相，但是，GEM 的三相相渗曲线仍适用于 CCS 系统。对于一般的水湿储层，水相为润湿相，气相为非润湿相，其对应的相对渗透率直接从 SWT 或 SGT 中读取饱和度对应的数值，因而将 K_{rw} 和 K_{rg} 对应输入到两个表格中即可，而 K_{ro} 值使用符合规律的一组数值即可，并不参与计算。

在 CCS 模型中，正确输入水气相渗的毛管力至关重要： P_{cwg} 需要在 SWT 表格的 P_{cwo} 列输入。气相压力等于网格压力，而水相压力需要减去 P_{cwg} ：

$$P_g = P, \quad P_w = P - P_{cwg}$$

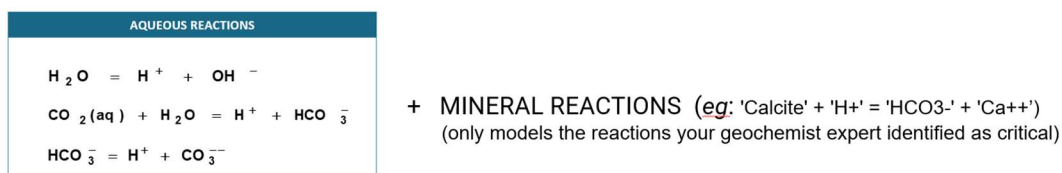
如果在两个表格中同时输入 P_{cwg} ，则会出现 $P_w = P - P_{cwg} - P_{cwg}$ 。

数据检查也很重要。检查输入的最大 P_c 值，过高的数值可能引起速度变慢；检查不同区域相渗曲线的 P_c 值变化，差异较大将导致初始化出现非平衡，进而导致时间步截断。

6. 地球化学部分

在使用地球化学反应时出现问题时, 如何甄别是不是地球化学反应的问题: 在添加这些反应之前, 试试仅考虑溶解等选项的模型是否运行正常。

对于 CCS 模型, 推荐至少以下的反应配置:



化学反应调参, 推荐检查输入数据, 包括反应速度、初始离子浓度、矿物质含量等。其次, 在使用地球化学反应时, 推荐如下的关键字:

- 平衡条件 (Equilibrated Conditions) :

EQUIL-REACT-RATE ON

CHEM-EQUIL-SET ON

- 比例因子 (Scaling Factors) :

MRDAMP-ALL

CRDAMP-ALL

(该关键字也可以基于网格定义, 关键字为 **MRMULT**)

DER-CHEM-EQUIL NUMERICAL

DER-REACT-RATE NUMERICAL

- 水蒸发

SWR-H2OVAP

SATWCUTOFF

PSAT -1

- 如果当前孔隙度低于阈值, 设定反应速度为 0:

PRORMCUTOFF

- NUMERICAL 部分推荐关键字:

NORM MINERAL-VFR

MAXCHANGE MINERAL-VFR

三、案例分析

面对模型的收敛难题,首要任务永远是对数据进行详细的检查,其次才是着手于数值参数的调整。本节通过具体的咸水层 CCS 模型案例分析,探讨一些具有针对性的解决策略。

基本情况:咸水层,300 万有效网格,2 个组分,107 口井,其中 7 口 CO₂ 注入井,等温模拟,仅考虑 CO₂ 溶解以及滞后模拟,运行时间 33 小时。

3.1 质量检查及调参

1) Reservoir 部分

300 个小层,平均厚度 7ft,但是在网格的边缘和底部发现有一部分网格厚度 0.5~3,使用下述关键字:

```
PINCHOUTARRAY SIP_DATA
PINCHOUT-TOL 3
PRPOR 2925
CPOR 7.6772e-6
```

2) PVT 部分

将第二个组分 CH₄ 作为痕量组分。

```
MODEL PR
NC 2 2
COMPNAME 'CO2' 'CH4'
HENRY-CORR-CO2
TRACE-COMP 2          ** CH4 is a Trace Component
```

注:该关键词用于标识一种不溶于水且不流动的痕量组分,以防止烃类完全从网格块中消失。通过指定组分编号来识别该痕量组分。在含水层中进行 CO₂ 封存时,痕量组分通常是性质与 CO₂ 相似的气态组分,其亨利常数为零。初始化时,含水层中包含痕量组分的混合物,以保持 CO₂ 的水相摩尔分数与测量值一致。

3) INITIAL 部分

初始条件下气相为 100% CH₄。

```
INITIAL
VERTICAL DEPTH_AVE WATER_GAS NOTRANZONE EQUIL
ZGAS
** CO2      CH4
0          1
```

4) Numerical 部分

原文件设置:

```
NUMERICAL
```

ADTSC ON ALLOW AND-THRESH
 ADTSC ALLOW DTMAX
 ADTSC ALLOW NEWTONCYC
 AIM STAB AND-THRESH 1 0.01
 DTMAX 45
 NEWTONCYC 30
 DTMIN 1.0E-09

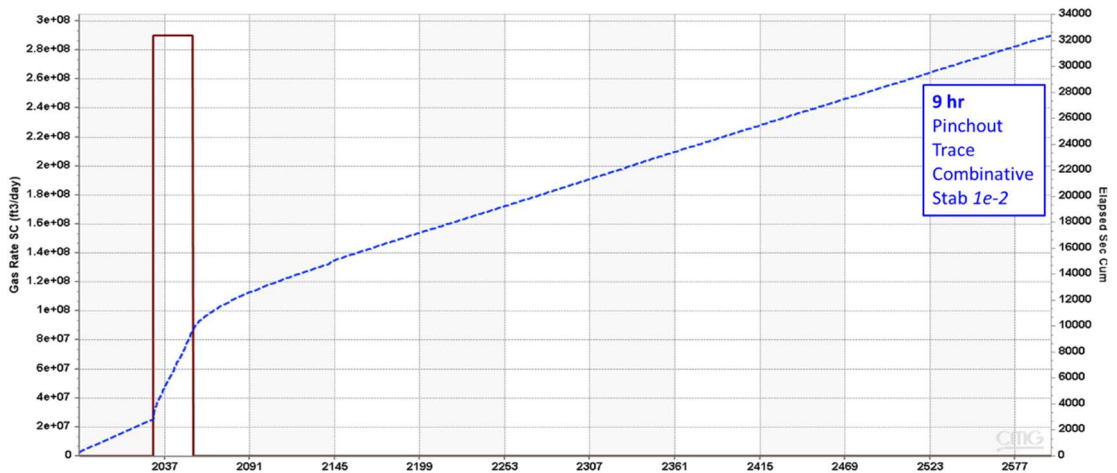
从计算结果的 log 文件看出, 迭代次数较高, 推荐增加线性求解预处理器 COMBINATIVE 关键字, 降低迭代次数。

GEM TIME STEP SUMMARY														
Time Step		Time		Maximum Changes						Mat	Cum	Solver		
No.	Size Newton days cycls	Days	Date	Pressure Block psia	Saturation Block	Fraction	Composition Block	Fraction	Err %	step cuts	Iter/ Cum	Cum	Fail	
81w	10.13	1	2922	1991.01.01	81,41,111	.2971	72,131,10	0 (w)	96,1,1	(1)	28e-7	0	20.0	0
82	39.93	2	2962	1991.02.09	124,70,23	-415	124,70,14	-10e-8(w)	96,1,1	(1)	28e-7	0	39.0	0
83	45.00	1	3007	1991.03.26	124,69,3	-95.5	124,69,2	-26e-9(w)	96,1,1	(1)	43e-7	0	30.0	0
84	45.00	1	3052	1991.05.10	124,69,3	-33.5	124,69,2	9.7e-9(g)	96,1,1	(1)	60e-7	0	28.0	0
85	45.00	1	3097	1991.06.24	124,69,3	-15.5	101,78,91	7.4e-9(g)	96,1,1	(1)	75e-7	0	28.0	0
86	45.00	1	3142	1991.08.08	122,65,1	-10.2	101,78,91	-7.e-9(w)	96,1,1	(1)	86e-7	0	29.0	0
87	45.00	1	3187	1991.09.22	118,64,14	-7.64	101,78,91	-7.e-9(w)	96,1,1	(1)	75e-7	0	30.0	0
88	45.00	1	3232	1991.11.06	121,61,16	-6.12	101,78,91	6.6e-9(g)	96,1,1	(1)	10e-6	0	31.0	0
89	45.00	1	3277	1991.12.21	121,61,16	-5.30	101,78,91	6.1e-9(g)	96,1,1	(1)	10e-6	0	32.0	0
90w	10.07	1	3287	1992.01.01	121,61,16	-1.15	101,78,91	-1.e-9(w)	96,1,1	(1)	10e-6	0	18.0	0
91	39.92	2	3327	1992.02.09	121,70,38	33.77	121,70,38	1.1e-8(w)	96,1,1	(1)	10e-6	0	42.5	0
92	45.00	1	3372	1992.03.25	121,68,31	7.859	101,78,91	-3.e-9(w)	96,1,1	(1)	11e-6	0	37.0	0
93	45.00	1	3417	1992.05.09	122,66,2	3.732	101,78,91	2.5e-9(g)	96,1,1	(1)	11e-6	0	38.0	0
94	45.00	1	3462	1992.06.23	74,145,113	-2.12	72,131,10	2.1e-9(g)	96,1,1	(1)	11e-6	0	38.0	0
95	45.00	1	3507	1992.08.07	74,145,113	-1.54	72,131,10	-2.e-9(w)	96,1,1	(1)	11e-6	0	38.0	0
96	45.00	1	3552	1992.09.21	74,145,113	-1.19	72,131,10	1.9e-9(g)	96,1,1	(1)	11e-6	0	38.0	0
97	45.00	1	3597	1992.11.05	81,41,111	1.018	72,131,10	-1.e-9(w)	96,1,1	(1)	11e-6	0	39.0	0
98	45.00	1	3642	1992.12.20	81,41,111	.9983	72,131,10	1.7e-9(g)	96,1,1	(1)	12e-6	0	39.0	0
99w	11.08	1	3653	1993.01.01	78,26,92	-2.259	72,131,10	0 (w)	96,1,1	(1)	12e-6	0	22.0	0
100	40.13	2	3693	1993.02.10	121,70,38	9.655	121,70,38	-3.e-9(g)	96,1,1	(1)	12e-6	0	44.0	0

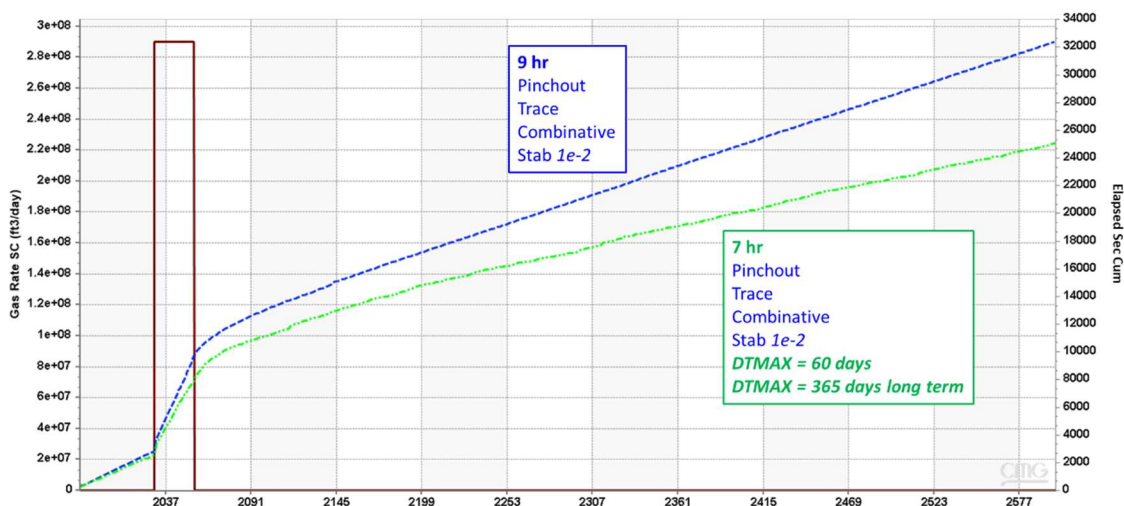
3.2 运行结果对比

使用 OUTSRF SPECIAL SIMPERF 能够输出累积时间步、牛顿迭代次数、运行时间等模拟性能参数, 进行对比。

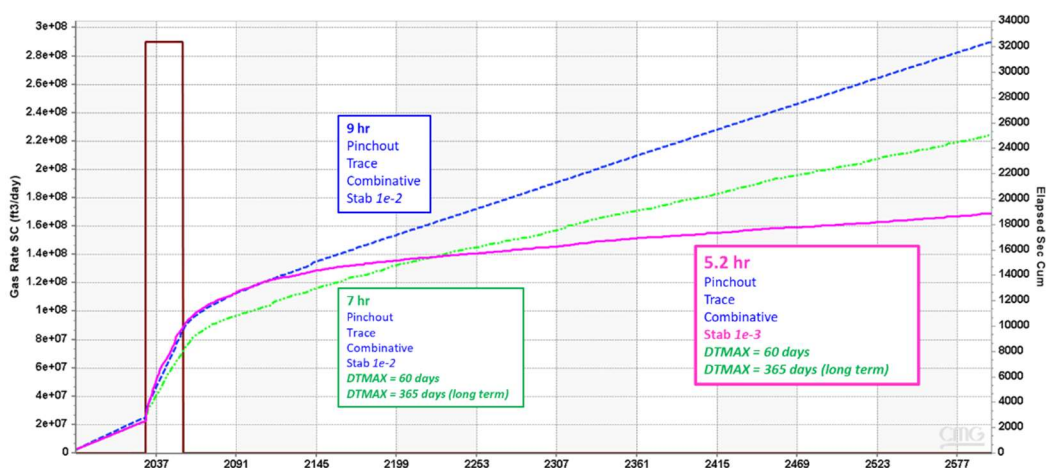
经 1) ~4) 调整之后, 运行时长缩短到 9 hr。



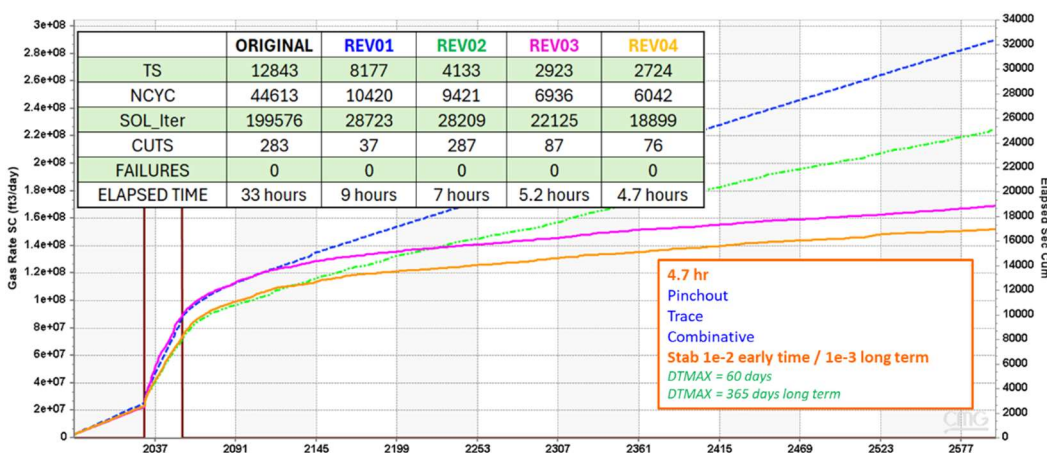
调整 DTMAX, 运行时长缩短到 7 hr。



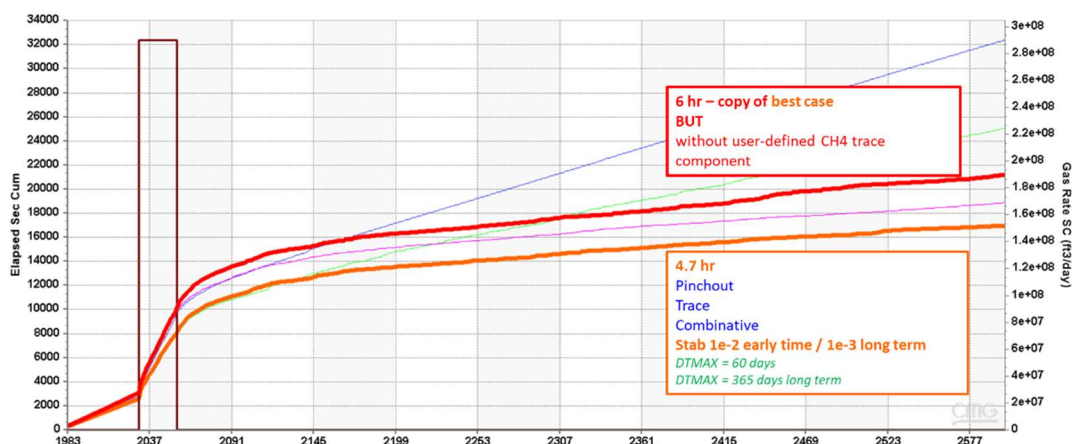
调整 stab, 运行时长缩短到 5.2 hr。



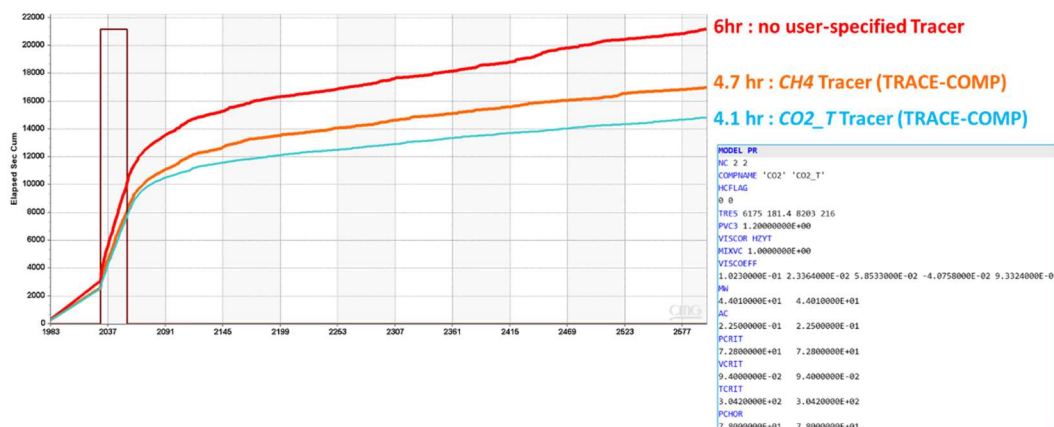
继续调整 stab, 运行时长缩短到 4.7 hr。



对比是否将 CH4 定义为 Trace 组分的模型, 如果在最优模型中未定义该关键字, 运行时间延长到 6 hr。

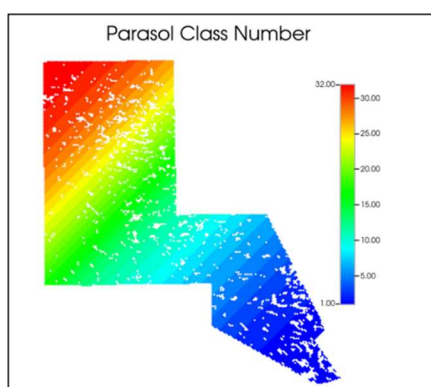


复制 CO2 组分，命名为 ‘CO2_T’，并定义为 Trace 组分，运行时间缩短到 4.1 hr。



3.3 并行计算+自动 Combinative

使用 OUTSRF GRID IPSTCA 输出并行域，推荐 PDEGAB 0 改善并行，继续提速。



推荐使用下面的 Numerical 配置，Combinative 缺省，由 ADTSC 控制：

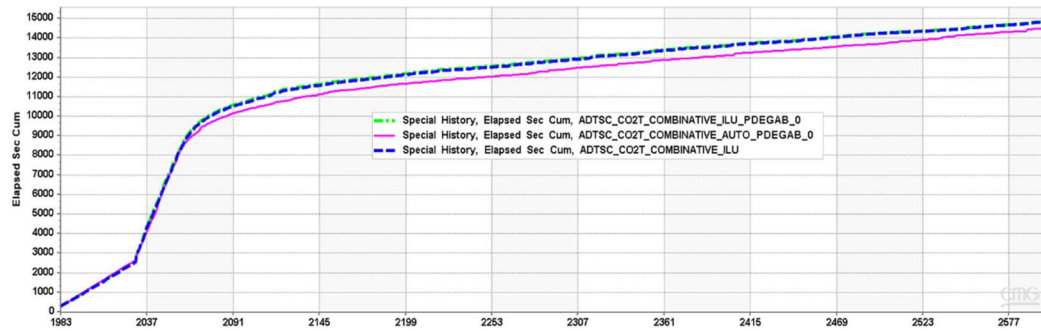
```

NUMERICAL
ADTSC ON ALLOW AND-THRESH
ADTSC ALLOW DTMAX
    
```

```

ADTSC ALLOW NEWTONCYC
AIM STAB AND-THRESH 1 0.01
DTMAX 30
NEWTONCYC 30
DTMIN 1.0E-09
PDEGAB 0
RUN
...
DTMAX 60
...
AIM STAB AND-THRESH 1 0.001
DTMAX 365
    
```

使用 ADTSC + (default COMB) + PDEGAB 0, 运行时间缩短到 4 hr。



	ADTSC + COMB ILU	ADTSC + COMB ILU + PDEGAB 0	ADTSC + (default COMB) + PDEGAB 0
Elapsed Time	14,834 sec (4.1 hr)	14,845 sec (4.1 hr)	14,541 sec (4 hr)