

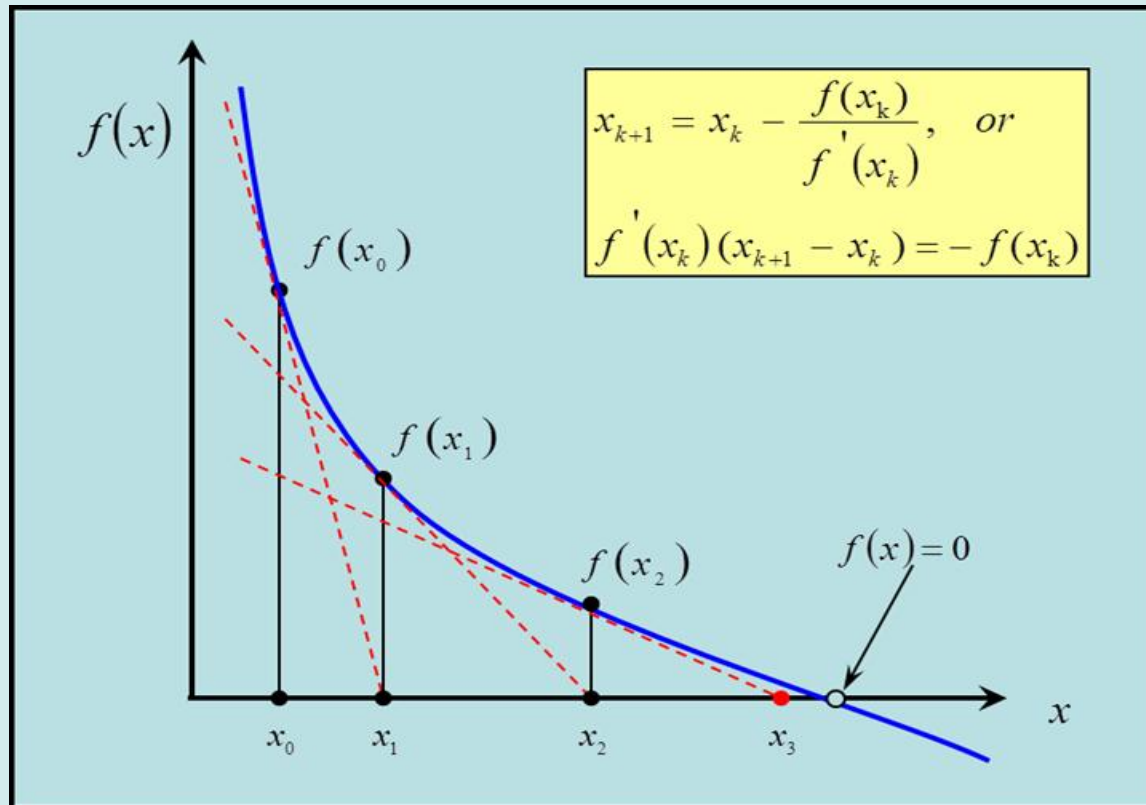
应用于高度非线性油藏模拟的 数值调控参数

第三届CMG模拟技术研讨会
2015年9月，北京

1. STARS_2015版新增的数值调控选项介绍
 - 加速牛顿迭代收敛的新选项
 - 控制时间步长的新选项
 - 助于诊断数值问题的新选项
2. 新选项的测试及计算结果比较
3. 结语

求解非线性方程的牛顿迭代法

- 单变量非线性方程的牛顿迭代求根 $f(x) = 0$



油藏模拟非线性方程组的牛顿迭代求解: $F(X) = 0$

$$f'(x_n)(\Delta x_{n+1}) = -f(x_n)$$

- 迭代方程式:

$$F'(X_k)(\Delta X_{k+1}) = -F(X_k)$$

变增量矢量:

$$\Delta X_{k+1} = X_{k+1} - X_k = \begin{bmatrix} (x_1)_{k+1} - (x_1)_k \\ (x_2)_{k+1} - (x_2)_k \\ \vdots \\ (x_N)_{k+1} - (x_N)_k \end{bmatrix}$$

残差矢量:

$$F(X_k) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ \vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots, x_N) \end{bmatrix}_k$$

偏导数矩阵
(雅可比):

$$F'(X_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{bmatrix}_k$$

$$X_{k+1} = X_k + \Delta X_{k+1}$$

牛顿修正

牛顿迭代的收敛准则

残差(规一化)准则:
或

$$\left| \frac{F(X_{k+1})}{M_{k+1}} \right| \leq \varepsilon_R$$

变化量准则:

$$\left| (X_{k+1} - X_k) \right| \leq \varepsilon_V$$

- ε_R : 残差容差
- ε_V : 变化量容差
- M : 本次迭代组份的摩尔质量或网格焓值

守恒方程中流动项的非线性

- 网格间 j 相中 i 组份的摩尔流量计算式

The diagram illustrates the calculation of the molar flow rate m_{ij} for component i in phase j . The equation is
$$m_{ij} = K \frac{k_{rj}}{\mu_j} \rho_j x_{ij} [\nabla p_j - \nabla(\rho_j g h)]$$
 The variables in the equation are linked to their physical meanings by arrows:

- K : 绝对渗透率 (Absolute permeability)
- k_{rj} : j 相的相对渗透率 (Relative permeability of phase j)
- μ_j : j 相的粘度 (Viscosity of phase j)
- ρ_j : j 相的摩尔密度 (Molar density of phase j)
- x_{ij} : 组份 i 在 j 相的摩尔分数 (Molar fraction of component i in phase j)
- ∇p_j : j 相的压力梯度 (Pressure gradient of phase j)
- $\nabla(\rho_j g h)$: j 相的重力梯度 (Gravity gradient of phase j)

如何解决模型的数值困难：步骤及注意

1. 诸事之首：去除模型中不必要的非线性，减弱必要的非线性；
2. 检查常规的数值控制参数是否适当；
3. 考虑选用新的数值调控选项 ***TUNING_TOOLS**，以进一步提速。

在上述任一步骤中，均应注意：

- 修改的模型应保持原模型中欲模拟的物理现象；
- 新模型的结果不应与原模型差别太大 (工程精度范围之内)；
- 新模型应改善原模型的数值困难。

1. 所有的新选项都由主关键字 ***TUNING_TOOLS** 引导.
2. 依照其功能，新选项可分为下列两组
 - 对于牛顿迭代收敛的控制
 - 对于时间步长的控制
3. 所有的新选项都可以反复应用以激活或终止该选项。

牛顿迭代收敛控制：1. 混合收敛

关键字： *CONVERGE_MIXTOL *imixtol*

作用： 对于任意 *icyc* (当下迭代次数) \geq *imixtol*, 残差准则和变化量准则(*MAXRES 和 VTOL)两者均被用来判敛。如依任一准则判定收敛，则认定该 网格迭代收敛。

牛顿迭代收敛控制： 2. 容差松弛

关键字： *CONVERGE_RELAX *on / off*

作用： 如果选择 '*on*'，则当下所用判敛容差 (*MAXRES and VTOL) 被放大 f 倍。

松弛因子 f 计算式：

$$f = 1 + \frac{icyc}{maxn}$$

当下牛顿迭代次数

允许的最大牛顿迭代次数

牛顿迭代收敛控制： 3. 相对残差

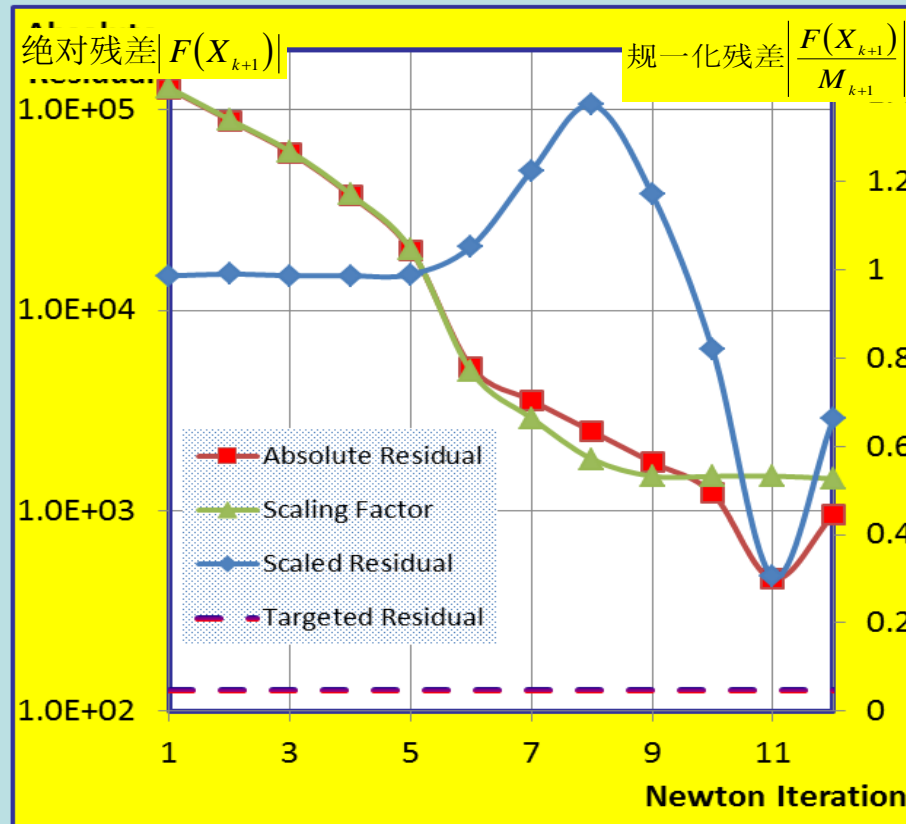
关键字： *RELRES_ABSL *r_ratio iacyc*
or *RELRES_NORM *r_ratio iacyc*

作用： 对任意 $icyc > iacyc$, 如果 $icyc$ 次迭代绝对残差 (ABSL) 或规一化残差 (NORM) 与 $iacyc$ 次迭代相应残差的比值等于或小于 *r_ratio*, 无论其他收敛准则结果如何, 该守恒方程则认为已收敛.

$$REARES_ABSL: \left| \frac{F(X_{icyc})}{F(X_{iacyc})} \right| \leq r_ratio$$

$$REARES_NORM: \left| \frac{F(X_{icyc})/M_{icyc}}{F(X_{iacyc})/M_{iacyc}} \right| \leq r_ratio$$

何时应用相对残差？



牛顿迭代收敛控制： 4. 平均残差

关键字： *CONVERGE_AVERES *itcyc*

作用： 对任意 *icyc* (当下牛顿迭代) \geq *itcyc*, 油藏平均残差 (*TOTRES) 将最终决定该计算步是否收敛。

判敛准则的实施一览

	*CONVERGE options	*TOTRES	*MAXRES	VTOL (p,T, ...)	RELRES
1	No *CONVERGE is entered at all	*TOTRES *LOOSE	*MAXRES = 100*TOTRES	Default VTOL are checked if icyc ≥ 7	x
2	*TOTRES entered without *MAXRES	✓	*MAXRES = 100*TOTRES	"	x
3	*TOTRES entered after *MAXRES	✓	✓	"	x
4	*MAXRES entered after *TOTRES	x	✓	"	x
5	Only *VARONLY entered or lastly entered	x	x	✓	x
6	Option 1, 2, 3 or 4 + *CONVERGE *PRESS ...	✓ 1, 2, 3 * 4	✓	✓ Apply if icyc ≥ 7	x
7	Option 1, 2 or 3 + *CONVERGE_MIXTOL	✓	✓	✓	x
8	Option 4, 5 or 6 + *CONVERGE_MIXTOL	✓ 1, 2, 3 * 4, 5	✓	✓	x
9	Option 1, 2 or 3 + *RELRES_ABSL or + *RELRES_NORM	✓	✓	"	✓
10	Option 4 + *RELRES_ABSL or + *RELRES_NORM	x	✓	"	✓
11	Option 5 + *RELRES_ABSL or + *RELRES_NORM (need *_MIXTOL)	x	✓	✓	✓
12	Option 1,2,3 or 4 + *CONVERGE_AVERES	✓	✓	"	x
13	Option 5 + *CONVERGE_AVERES (need *_MIXTOL)	✓	✓	✓	x

关键字： *AR_FF *DELTP_FF λ_{ff} *I_AR *ari* *J_AR *arj* *K_AR *ark*
*AR_FM *DELTP_FM λ_{fm} *AR *ar*

作用： 如果裂缝-裂缝网格间或裂缝-基岩网格间势差过小，人工阻尼因子(Artificial Resistance)将被激活以克服由高流率(high throughput)和低势差引起的数值不稳定。

为什么引入人工阻尼？

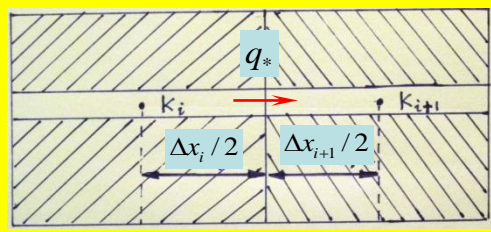
- 裂缝网格间 j 相的体积流量计算式及人工阻尼因子

$$a_{ri} \left[\frac{k_i k_{i+1} A}{(\Delta x_{i+1}/2)k_i + (\Delta x_i/2)k_{i+1}} \right] \left(\frac{k_{r*}}{\mu_*} \right) \Delta\phi = q_*$$

人工阻尼因子 (用户输入) 该相上游流量

激活人工阻尼因子 a_{ri} ，如果 $|\Delta\phi| \leq (\lambda_{ff} * 2.0 * p_{tol})$

裂缝-裂缝间人工阻尼坎值 (用户输入)



对牛顿迭代修正项的控制

关键字:

$$X_{k+1} = X_k + \Delta X_{k+1} \leftarrow \text{牛顿修正}$$

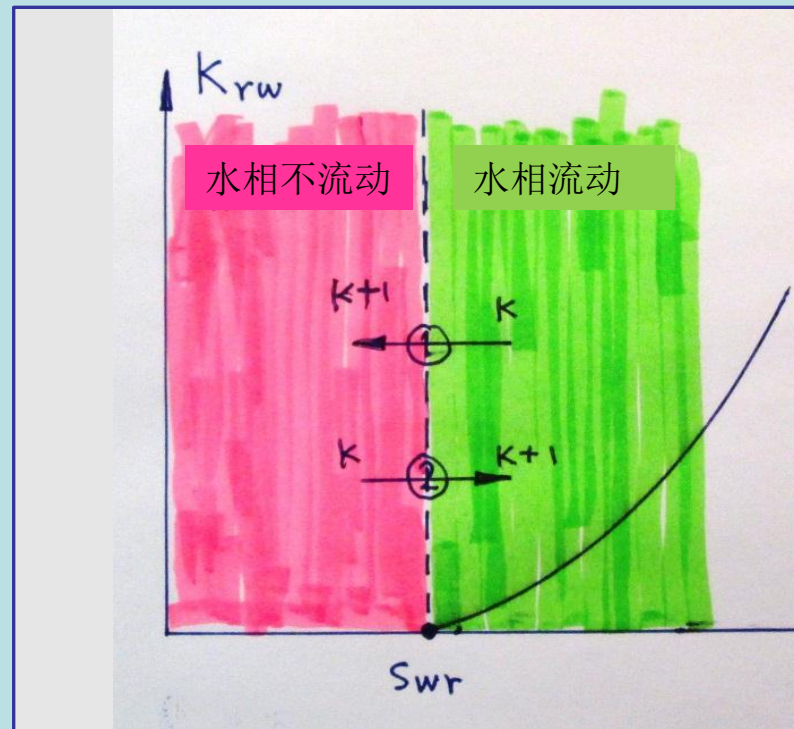
*UPDATE_CONTROL *SG *on / off* *SW *on / off*
*TEMP *t_update*

作用: 如果选择 '*on*', 则气相 (S_g) 和湿液相 (S_{wet}) 饱和度的牛顿迭代修正项将被调整以防止迭代间流度过度变化引起的收敛困难.

如果应用了 *TEMP, 温度的牛顿修正项将不大于用户输入值 *t_update*.

牛顿迭代修正项的控制之解释

- 假定用户输入 ***UPDATE_CONTROL *SW on**



对流体相频繁出现和消失的控制

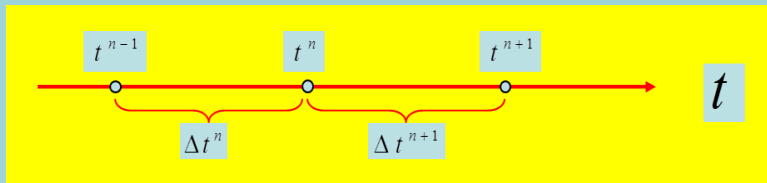
关键字: *TOL_GAS_APP *IGASAPP *igcyc* *NFLIPG *ng* *DSATG *dsatg*
*TOL_WAT_APP *IWATAPP *iwcyc* *NFLIPW *nw* *DSATW *dsatw*
*TOL_OIL_APP *IOILAPP *iocyc* *NFLIPO *no* *DSATO *dsato*

作用: 某相流体 (气, 油, 水), 如果已出现, 消失 n^* 次, 则自 i^*cyc 次牛顿迭代起, 应用饱和度偏移 $dsat^*$ 来确定该流体是否再次出现。

某相流体出现, 消失次数可用下列关键字输出并在 Results 3D 图形显示。

**OUTSRF *GRID NGPHSWITCH NWPHTSWITCH NOPHTSWITCH*

时间步长控制



新计算公式:
$$\Delta t^{n+1} = \Delta t^n * \left[\frac{1.0+d}{(\Delta V/N)+d} \right]$$

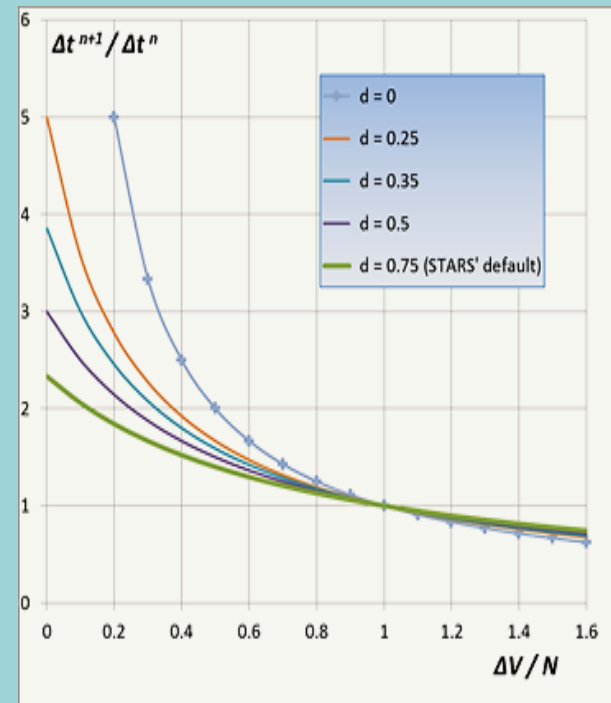
$$(\Delta V/N) = \max_{i,k} \left| \frac{\Delta V_{i,k}^n}{N_{i,k}} \right|$$

最终时间步长由下列线性插值确定:

$$\left(\frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \right)_{final} = \left(\frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \right)_d + \left(\frac{icyc - 1}{maxn - 1} \right) \left[\left(\frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \right)_{0.75} - \left(\frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \right)_d \right]$$

当下牛顿迭代次数

允许的最大牛顿迭代次数

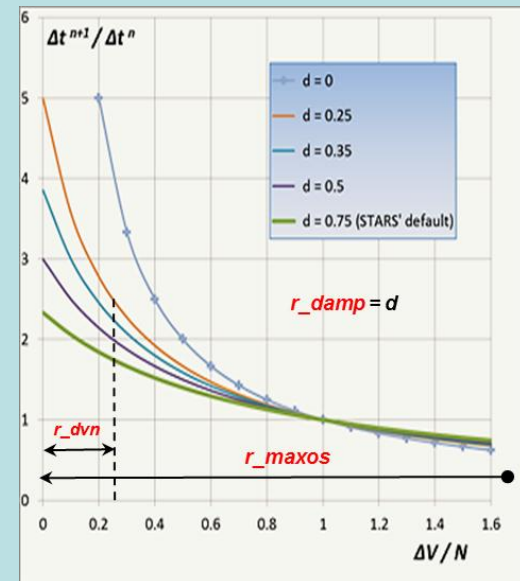


时间步长控制关键字及解释

关键字: *DT_CONTROL *DAMPING r_damp *DVN_THRSH r_dvn
*MAX_OS r_maxos

作用: 如果 $(\Delta V / N) \leq r_dvn$, 则下一时间步长由曲线 $d = 0.75$ 和曲线 $d = r_damp$ 间线性插值得.

如果 $(\Delta V / N) \geq r_maxos$, 则终止迭代并即作时间步截短。



新数值控制选项模拟结果比较

算例 1. 阿尔伯塔北部碳酸岩油藏蒸汽吞吐模拟

算例 2. 中东大型裂缝油藏模拟：340万网格 200口井

算例 3. 中东裂缝油藏注蒸汽模拟

新数值控制选项模拟结果比较

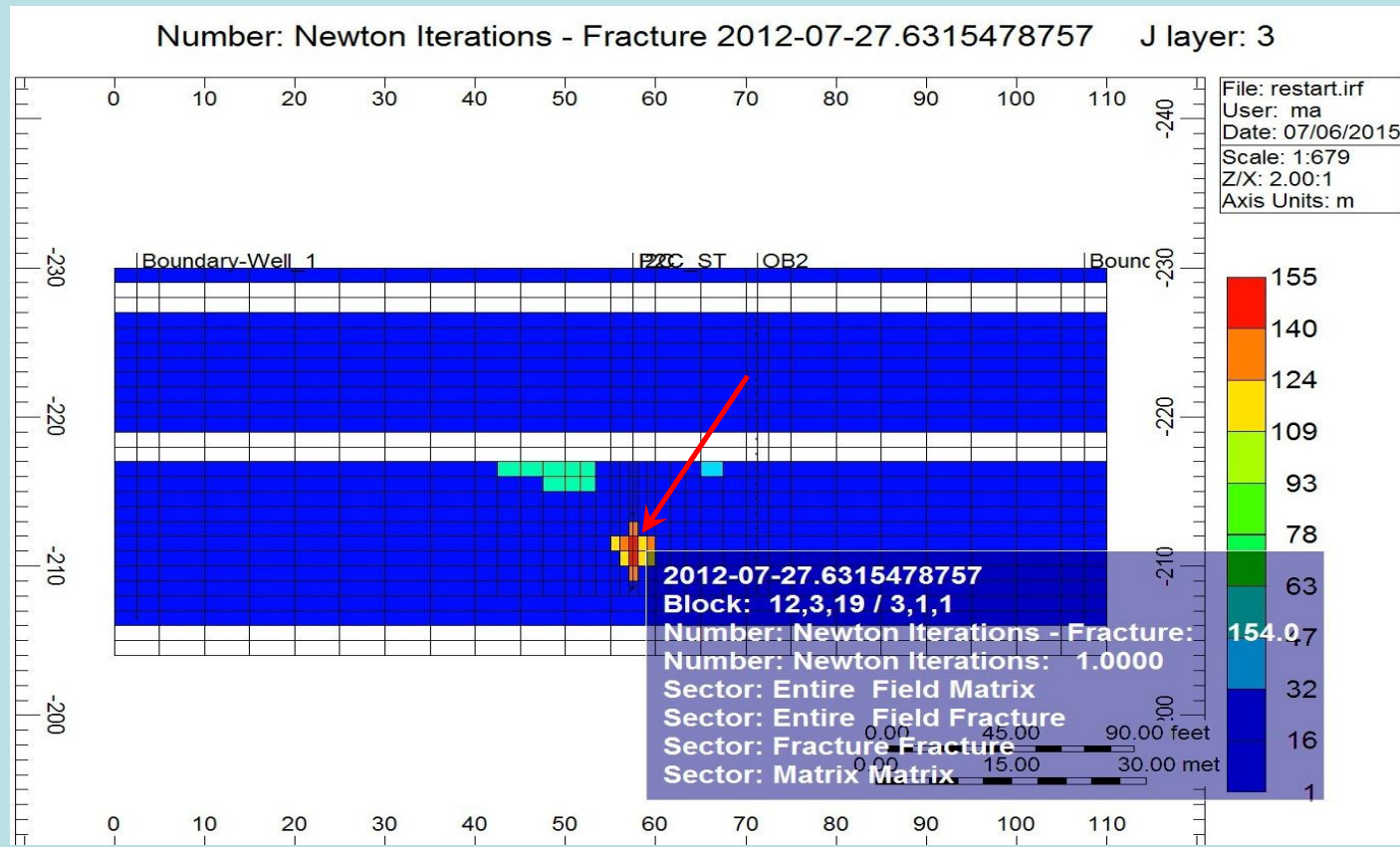
算例 1. 阿尔伯塔北部碳酸岩油藏蒸汽吞吐模拟

- 3000有效基岩网格，2400有效裂缝网格
- 应用双渗模型 (*DUALPEAM)
- 两口注汽井, 一口生产井, 两口边界井
- 蒸汽吞吐模式, 压力变化很快 (750 – 2800 kPa)
- 九个月模拟 (3个循环)
- 应用岩石扩张模型 (dilation-compaction model)
- 原始模型运行困难

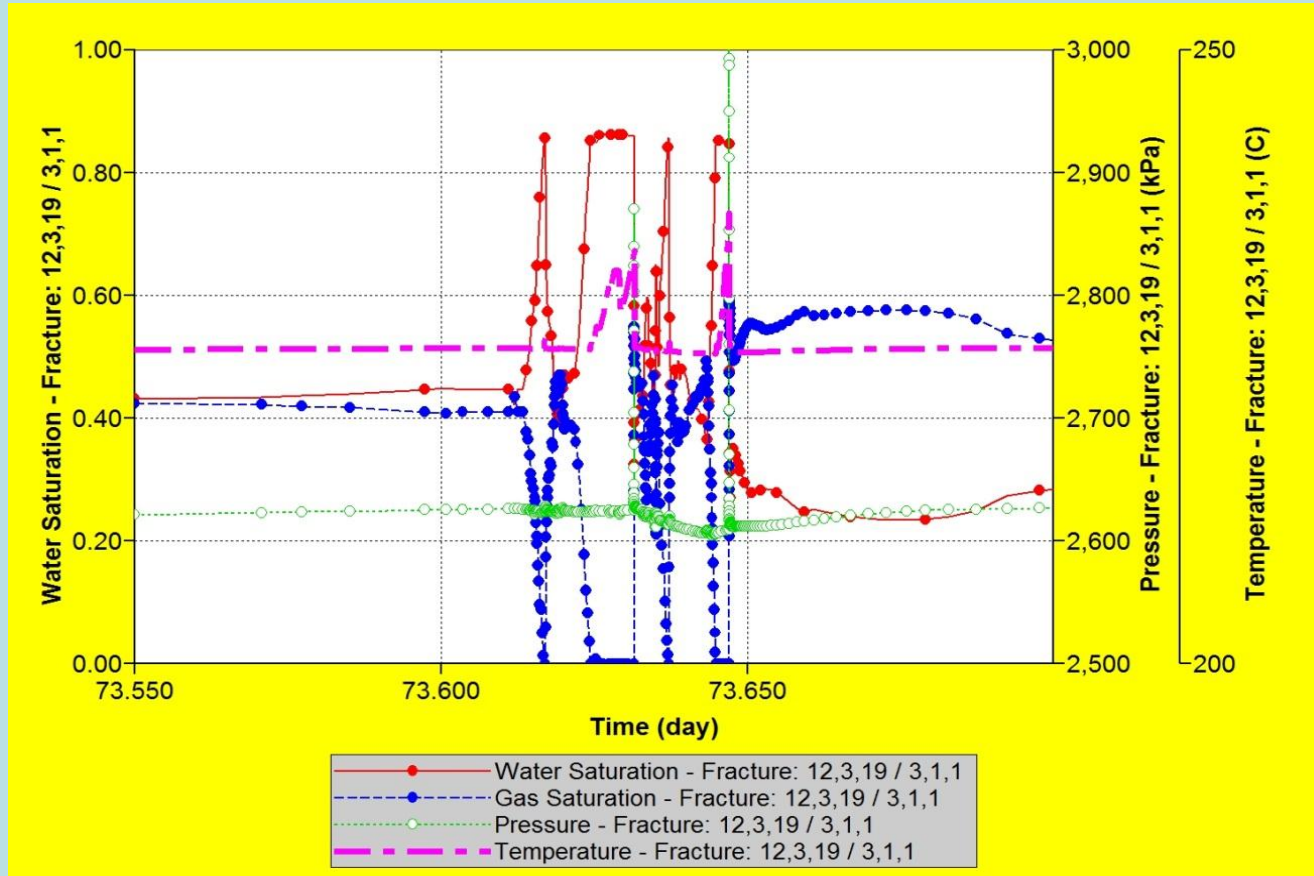
```
===== FATAL ERROR (from subroutine: PRTOUT)
Timestep size is too small.
Convergence not achieved.
6 Warning messages.      1 Error messages.
=====
```

新输出变量：网格收敛迭代次数

- 应用 *OUTSRF *GRID NCONITER



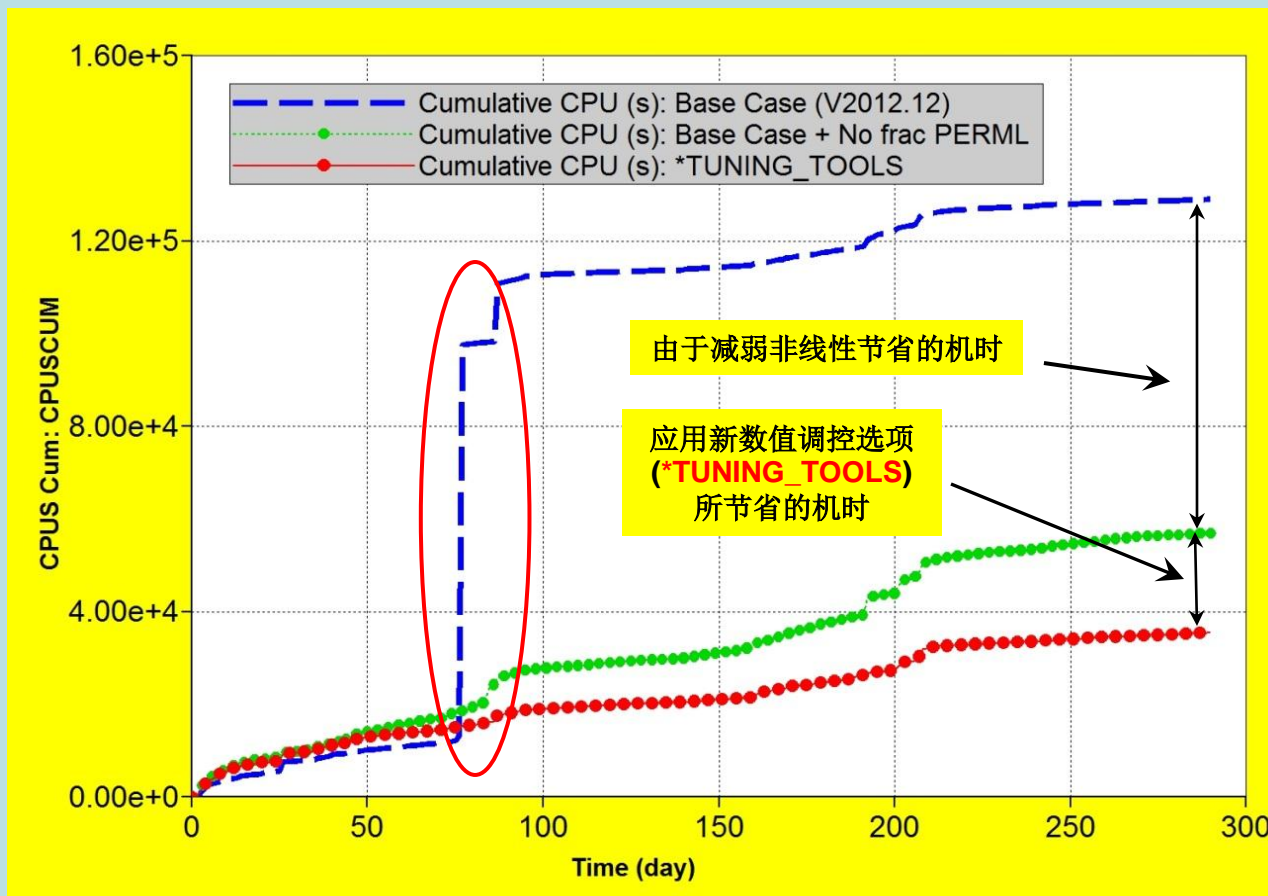
数值困难网格的流动变量非线性变化



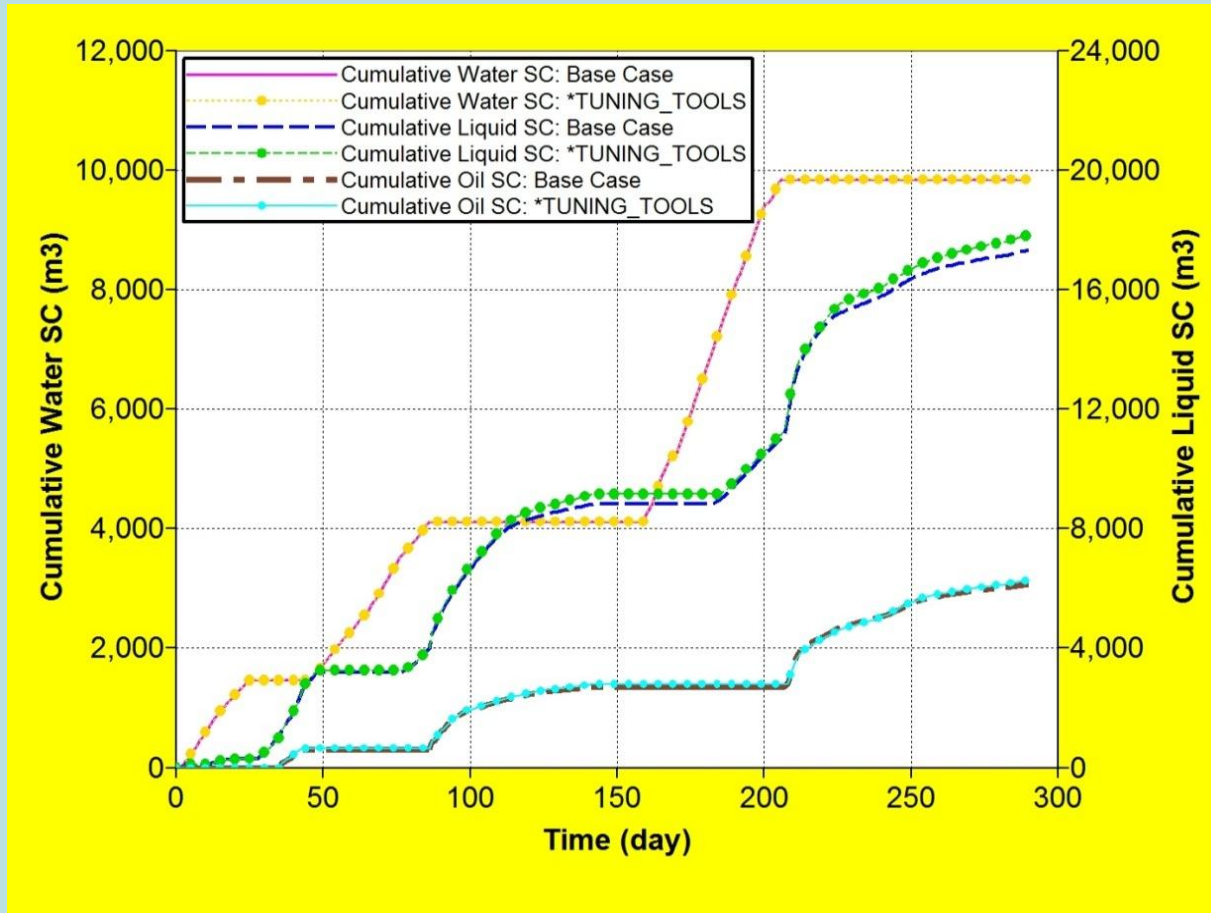
算例1：数值表现结果比较

Cases tested	Numerical control feature	Time steps	Newton cycles	Solver cycles	No. cuts	Solver fails	Matbal err %	CPUs	Newton (N) Solver (S) CPU (C) %
Case A	From Allan, finished only with v2012.12	7747	96840	1841835	2081	797	0.331 water	6h5m	Reference case
Case B	Coarsen refinement (5 1 1 to 3 1 1) and no perm multipliers	6311	19085	569030	109	152	0.956 water		N: -80.3 S: -69.1
Case C	Only remove frac perm multipliers	7645	22937	664475	198	269	1.033 water	1h59m	N: -76.3 S: -63.9 C: -67.4
Case D	Based on C, add MIXTOL & RELAX	7217	15012	446679	141	207	3.18 water		N: -84.5 -34.6 S: -75.7 -32.7
Case E	Based on D, add _AVERES 3	7531	14442	428083	85	230	3.44 water	1h16m	N: -85.1 -37.0 S: -76.8 -35.5 C: -79.1 -36.1
Case F	Based on D, add _ABSL 0.1 3	6824	13925	413032	99	150	3.31 water	1h14m	N: -85.6 -39.3 S: -77.5 -37.8 C: -79.7 -37.8
Case G	Based on F, add AR_FF *DELTP_FF 0.05 *I_AR 0.8	6668	13336	383488	71	212	3.21 water		N: -86.2 -41.8 S: -79.2 -42.2

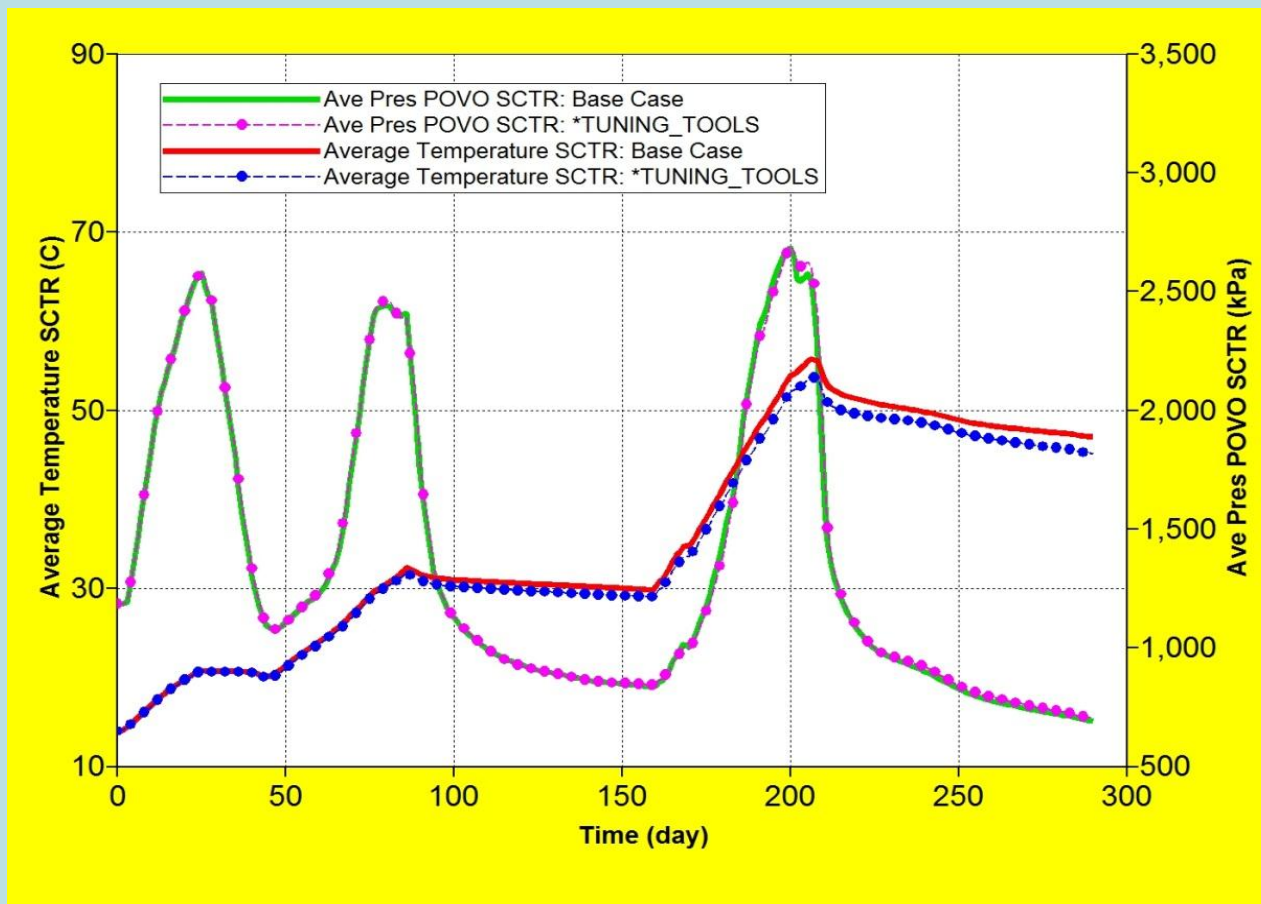
算例1: 累积计算机时间比较



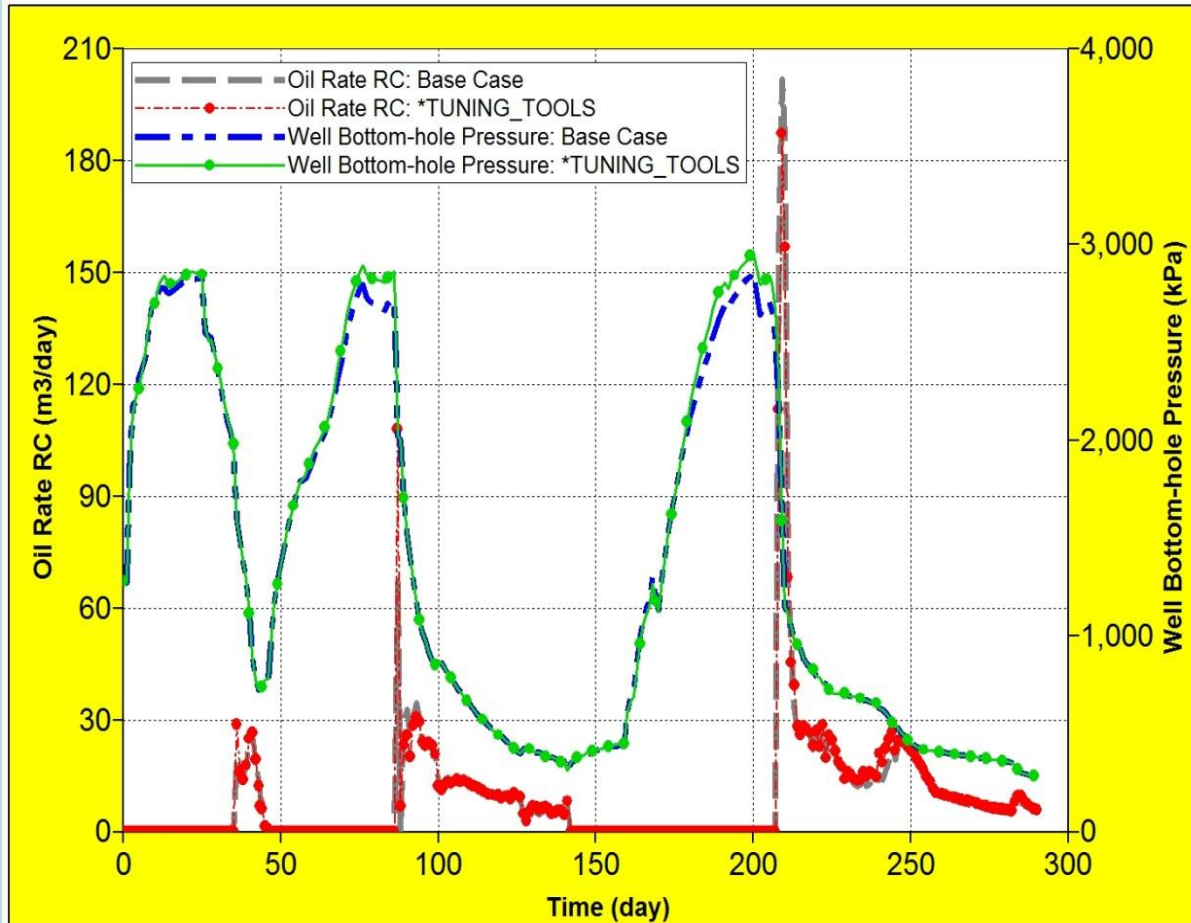
算例1 模拟结果比较：油藏累积产注体积



算例1 模拟结果比较：油藏平均压力温度变化

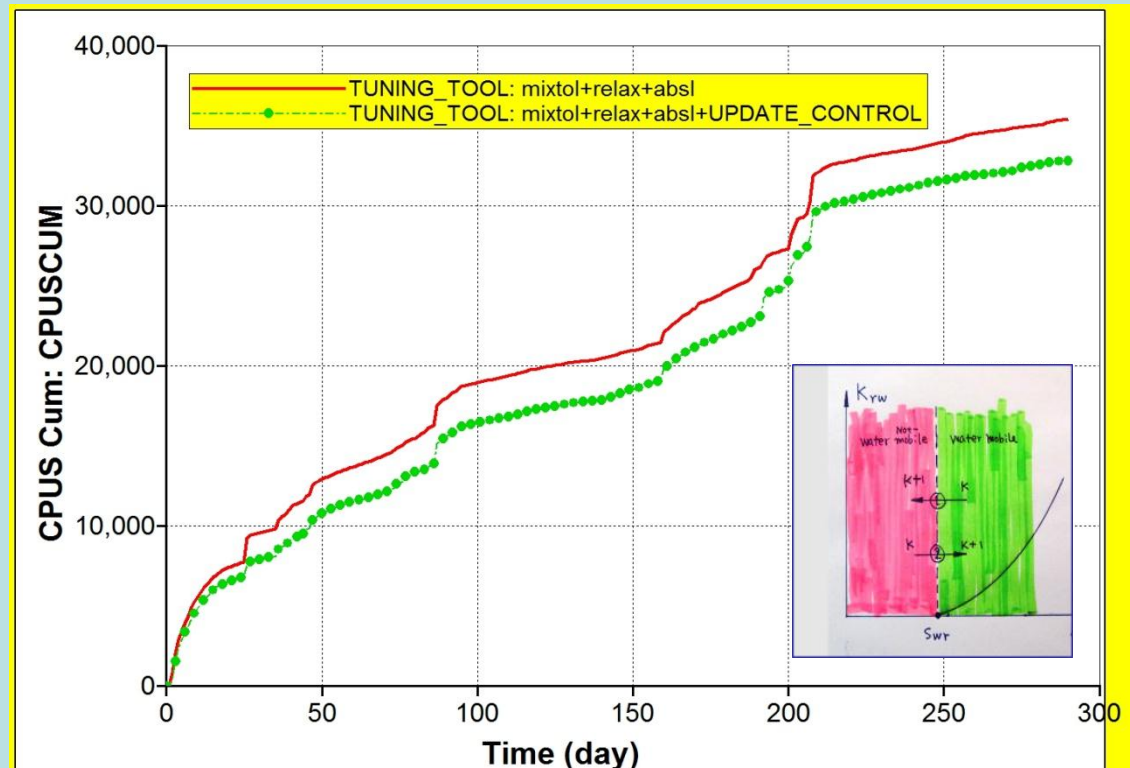


算例1 模拟结果比较：单井产油率，井底压力变化



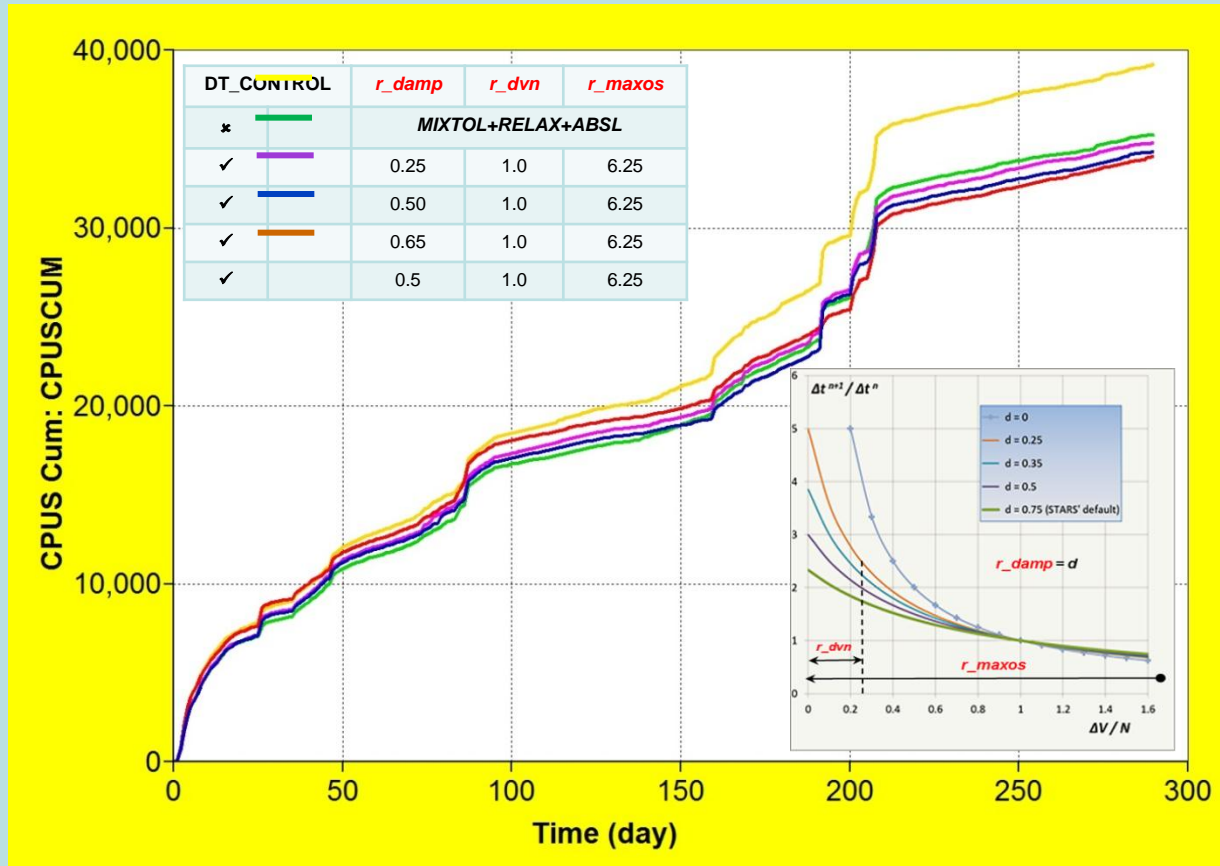
算例1: 牛顿修正项控制效果

- 应用 *UPDATE_CONTROL *SW on *SG on



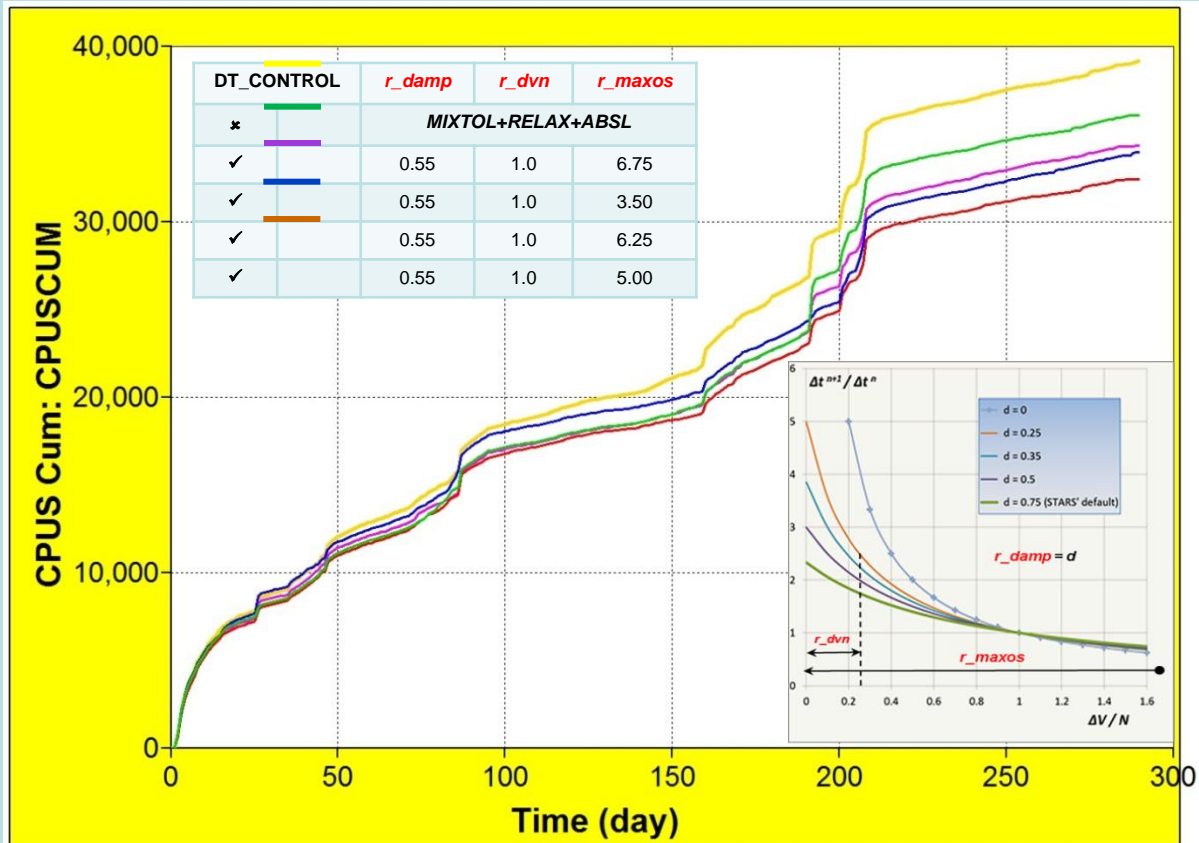
算例1: 时间步长控制效果

- 应用 *DT_CONTROL 变化 r_damp



算例1: 时间步长控制效果

- 应用 *DT_CONTROL 变化 r_maxos



算例 2.

- 裂缝油藏注蒸汽：340万网格 200口井
- 模拟时间从1976年1月1日至2013年2月1日，31年冷采，尔
后6年热采。

模拟结果比较

- ST_2014版和 ST_2015版+新选项 模拟结果基本相同；
- 应用 ST_2015版+新选项 **TUNING_TOOLS** 减少机时40%。

新数值控制选项模拟结果比较

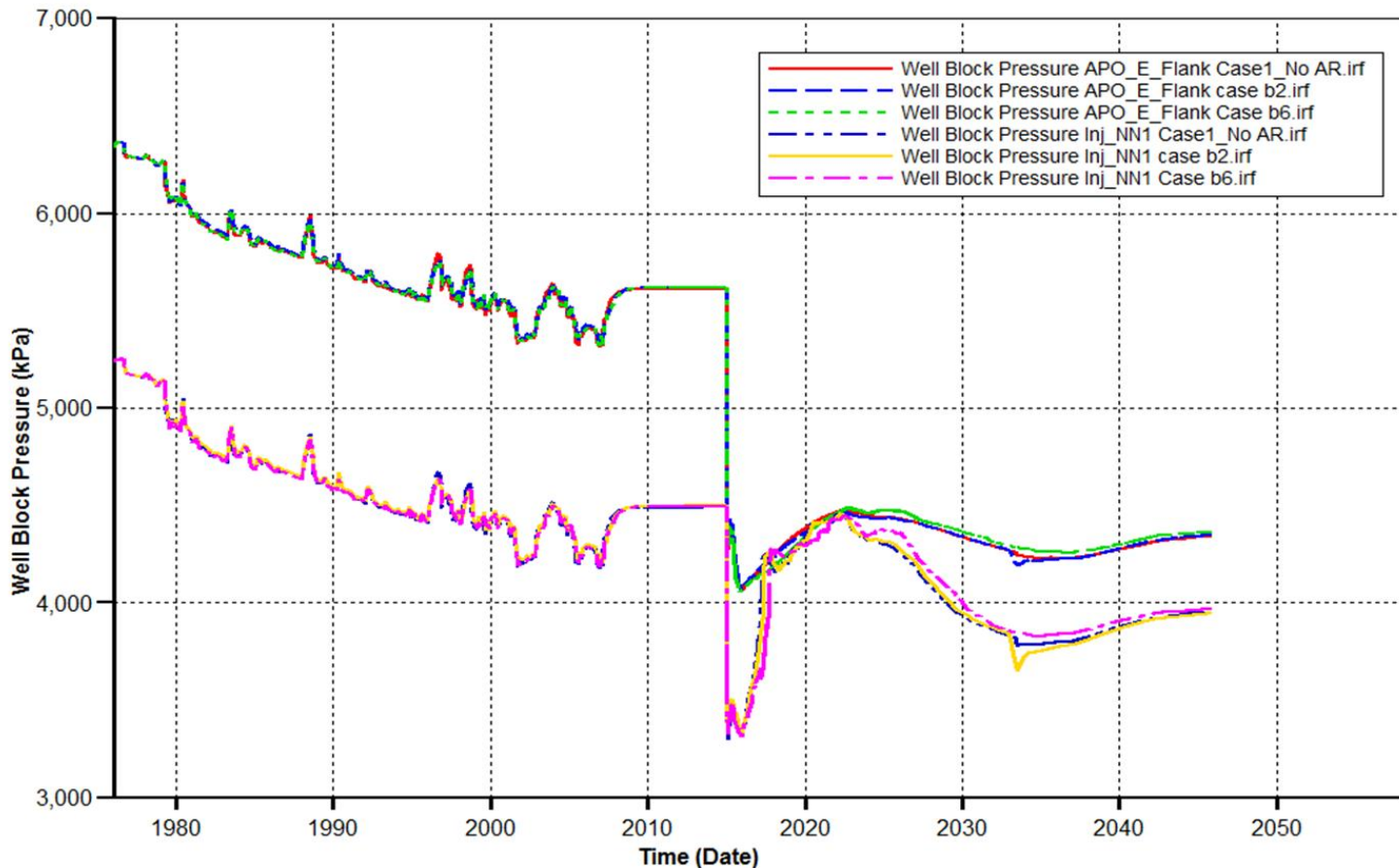
算例 3.

- 裂缝油藏注蒸汽
- 模拟时间从1976年2月1日至2045年2月1日 (25506.0 天)

比较结果

1. 人工阻尼没有改善该模型的数值表现;
2. 应用下列新选项减少牛顿迭代次数60%;
 - *CONVERGE_MIXTOL 1
 - *CONVERGE_RELAX on
 - *RELRES_ABSL 0.1 1
3. 应用下列新选项减少牛顿迭代次数60%。
 - *CONVERGE_MIXTOL 1
 - *CONVERGE_RELAX on
 - *CONVERGE_AVERES 5

算例3 模拟结果比较：井网格压力变化



改善裂缝油藏数值困难的两点建议

如果在应用双孔模型(*DUALPOR)或双渗模型(*DUALPERM)模拟裂缝油藏时遇到数值收敛困难,

- 你总可以尝试对裂缝网格输入小于1.0 的传导率系数 (transmissibility multiplier), 如下例所示

```
*TRANSI *FRACTURE CON 0.9
```

```
*TRANSJ *FRACTURE CON 0.9
```

```
*TRANSK *FRACTURE CON 0.7
```

- 你可能试图应用全隐式算法(Fully Implicit) (*AIM OFF)以增大步长, 但这一做法很可能导致更长的计算机时间由于增多的时间步截短和牛顿迭代。

1. 面对任何数值困难的模型，应首先尝试去除或减弱问题的非线性，但同时应保持原模型的物理实质；
2. 当运用不同收敛准则时，应确认所有使用的容差值大小 ($\epsilon_R, \epsilon_V, \dots$)；
3. 无论何种非线性困难，一些新数值工具总可直接使用并极可能获得积极结果 (譬如 *CONVERGE_MIXTOL, *CONVERGE_RELAX, ...); 但另一些新选项则取决于模型个案且选项参数需悉心调试；
4. 绝大多数新数值工具可用于任何非线性数值问题；而某些工具则只适用于裂缝模型 (譬如人工阻尼)；
5. 所有新数值选项均可叠加使用；
6. 所有新数值选项均可根据需要多次激活或终止。

谢谢！

欢迎提问和批评指正！