

CMG第59期讲义

CMOST操作实战之敏感性分析



(2016.10 版)

编写人：李罡

CMOST 软件是一个进行敏感性分析、历史拟合、优化、及不确定评价的有效工具。CMOST 软件能够自动创建模型、自动提交作业、自动进行结果分析，从而极大地提高数值模拟工作的效率和精度。本文将典型的单井蒸汽吞吐为例，讲述用 CMOST 进行敏感性分析工作的全部操作流程。对于希望使用 CMOST 进行其他开发方式模拟的工程师，本文同样具有指导意义。

问题综述

某先导试验区单井蒸汽吞吐三个周期。公司想要模拟三个周期的蒸汽吞吐过程，试图找到最优的开发方案，判断油藏参数和操作条件对经济指标的重要程度，为其他相似油藏的开发提供参考，同时考察油藏参数的敏感性。

缺乏工作经验的油藏工程师小 A 建立了单井径向模型：

- 模型包含四个小层，每个小层油藏属性未知
- 相渗曲线不确定，可能会影响井的注入和生产能力
- 压实-膨胀不确定，可能会影响渗透率

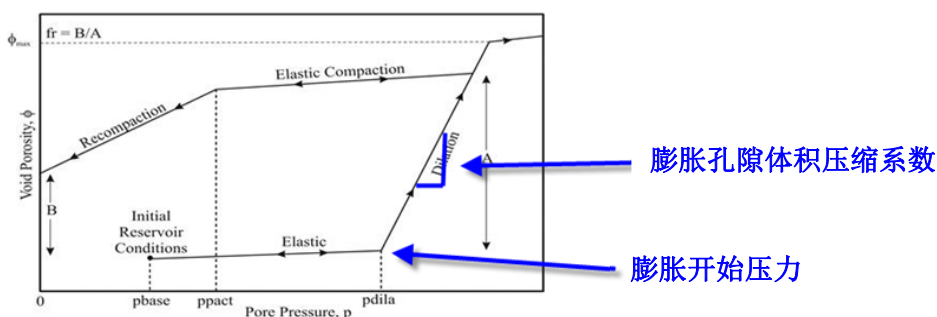
因为负责该项目的工程师小 A 没有任何研究成果，所以被公司解雇。作为专家，你被邀请来改善目前现状，并为你提供如下数据：

- 累积注入量、累积产油量、累积产水量及井底流压
- STARS 模型

你最初认为以下参数敏感：

- 孔隙度
- 每个小层渗透率
- K_v/K_h
- Carmen-Kozeny 指数因子
- 膨胀开始压力
- 膨胀孔隙体积压缩系数

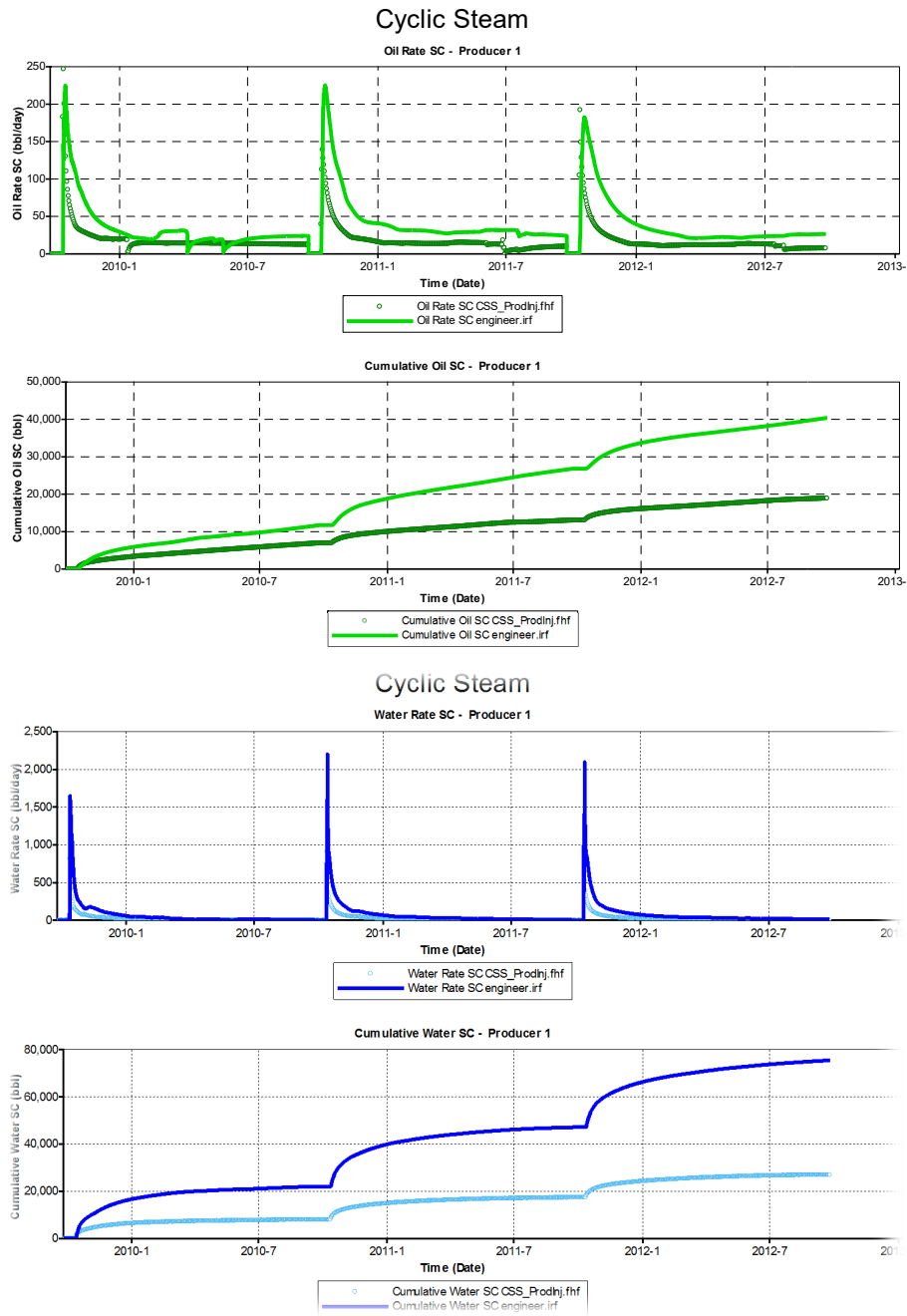
注意：以上没有考虑相对渗透率。



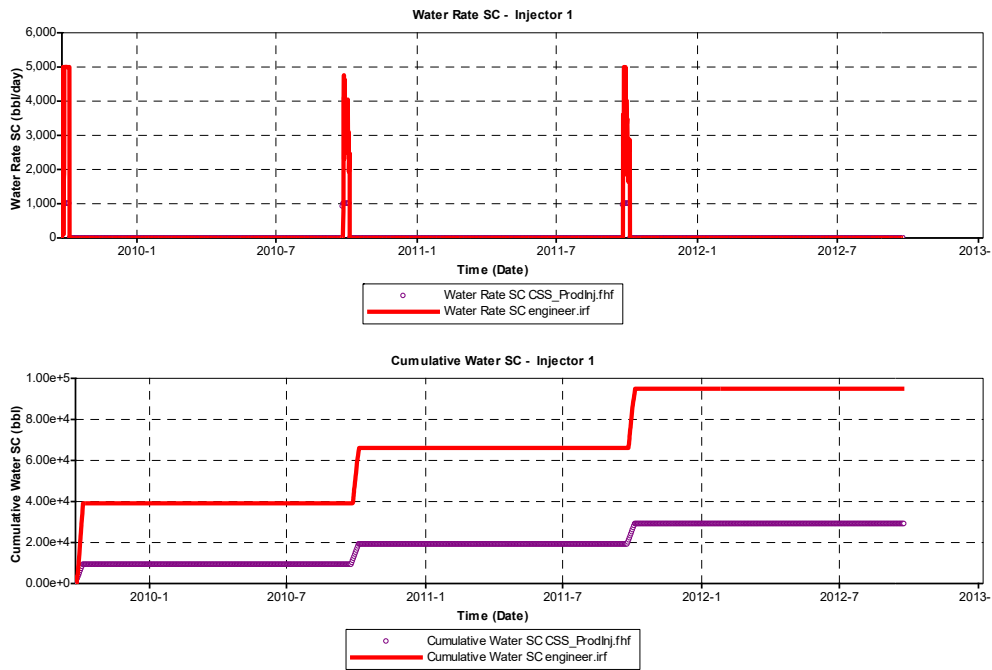
蒸汽吞吐膨胀再压实模型

基础模型模拟结果

1. 在 **REQUIRED DATA** 文件夹中找到模型 **Engineer.dat**，用 **Builder** 打开，熟悉模型参数。完成后退出 **Builder**。
2. 在文本编辑器中打开上述模型文件。熟悉数据体中油藏参数关键字位置。完成后退出文本编辑器。
3. 用 **Results Graph** 打开 **Engineer.ses**。这是先前已经创建的 **SES** 文件。检查模拟结果。

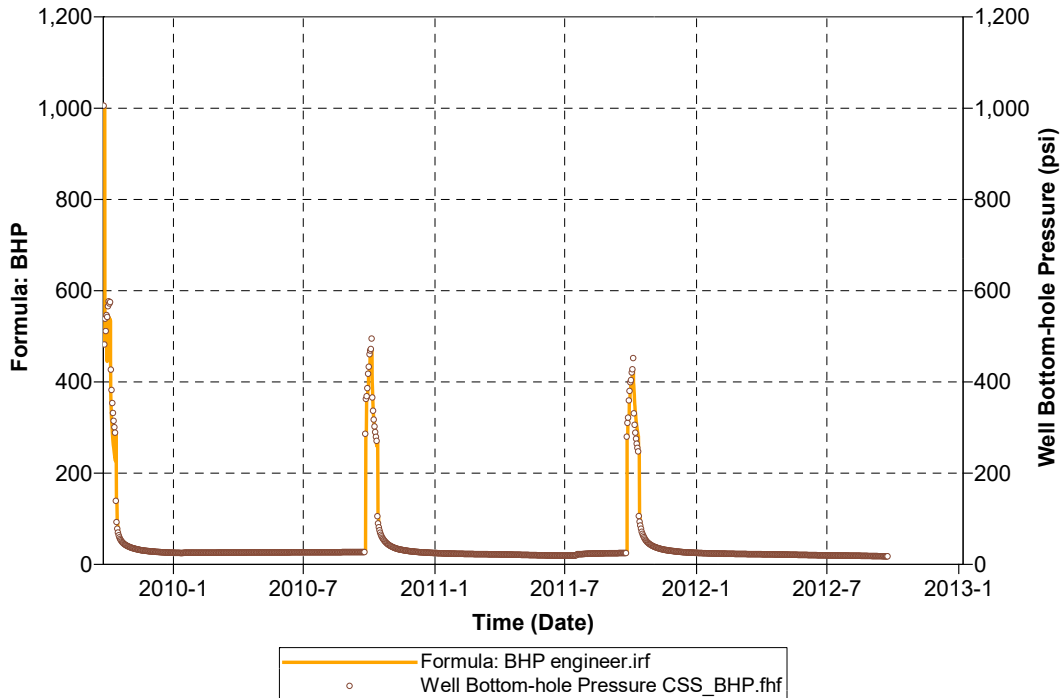


Cyclic Steam



Cyclic Steam

Well Bottom-hole Pressure



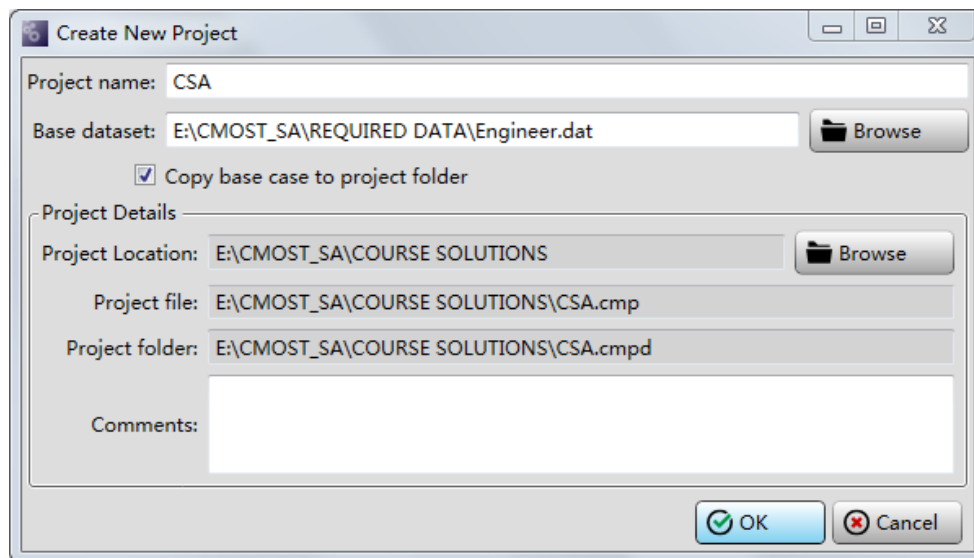
敏感性分析

注意：

敏感性分析用来判定不同油藏参数在特定取值范围内对目标函数的敏感程度。尤其是历史拟合，我们想知道调整的参数是如何影响井的生产和注入情况的时候。这种敏感性分析是非常有用的，这样我们在做历史拟合时，就知道如何进行调参。敏感性较强的参数对模拟结果影响较大，这些参数是我们历史拟合调参的首选。在历史拟合末期可以对次敏感参数微调，以达到最优的历史拟合结果。另外，需要注意的是，一些历史拟合中不重要的参数，可能在预测阶段非常重要。

创建 Project 和 Study

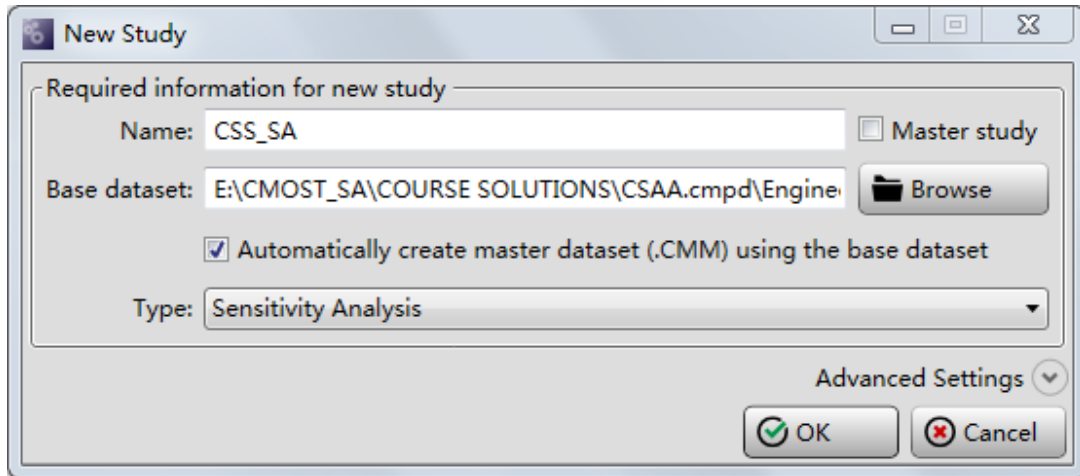
1. 打开 **CMOST**，选择 **File -> New -> Project**
2. 将 Project 命名为 **CSA**，然后从 **REQUIRED DATA** 文件夹选择 **Engineer.dat**。
3. 将创建的 Project 文件保存在 **COURSE SOLUTIONS** 文件夹，然后点击 **OK**。



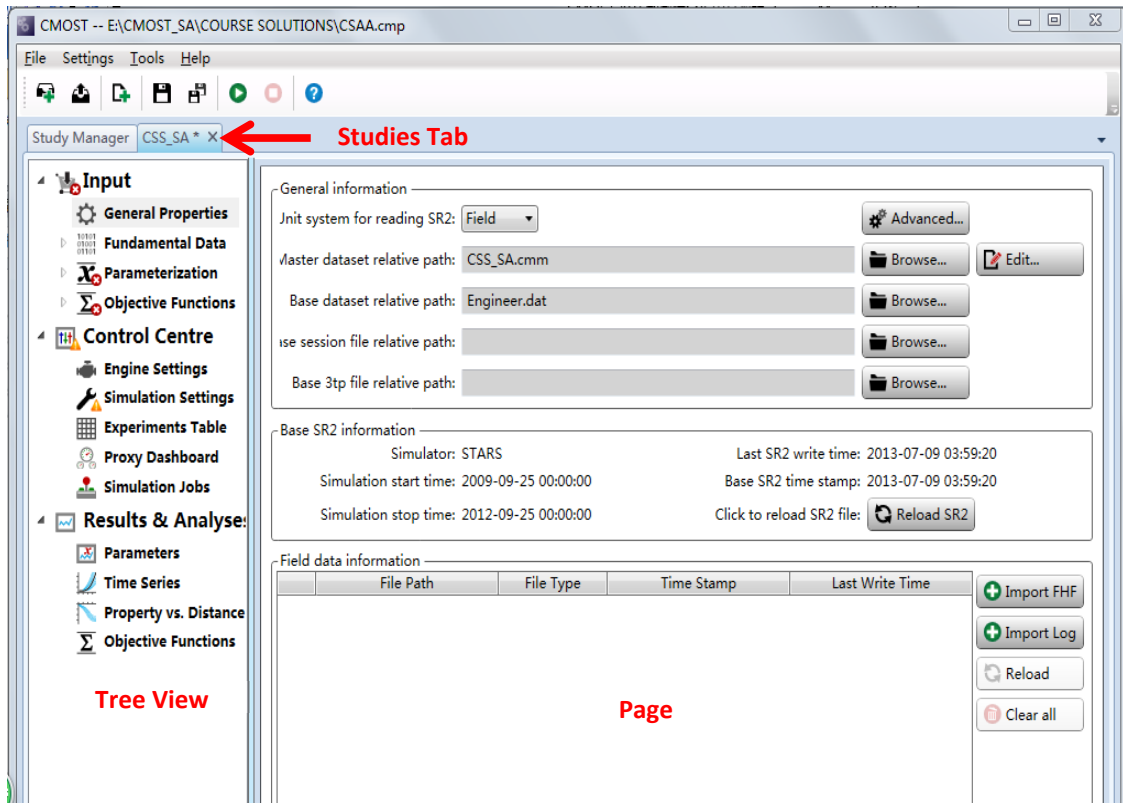
每个 Study 包含所有的输入信息及执行某一特殊任务的结果文件。在创建 Study 之前，首先将基础模型提交给模拟器进行运算，得到基础模型的运算结果。

4. 点击 **New Study** 按钮，创建 Study

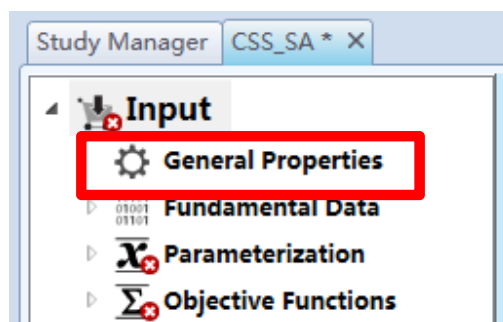
将 Study 命名为 **CSS_SA**。指定 **Engineer.dat** 作为基础模型。任务类型选择 **Sensitivity Analysis**，然后点击 **OK**。



CMOST 是由不同界面组成，每个界面包含不同的信息，可以在制表栏中任意切换。



常规属性



在常规属性界面定义 **unit system**，缺省时 CMOST 选择的单位制和基础模型的单位制一致。如果选择的单位制和基础模型不同，CMOST 将自动转换模拟结果单位。

我们跳过 **master dataset**，**base dataset**，他们已经定义。

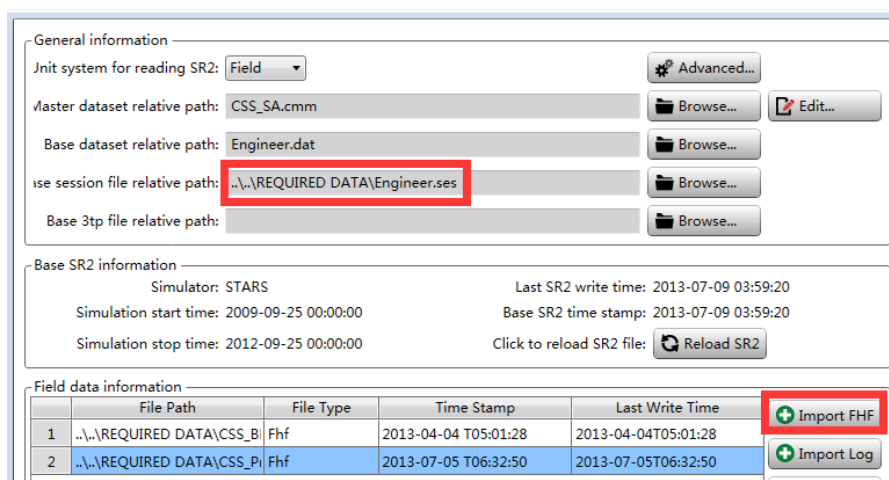
5. 在 **Base session file** 点击 **Browse** 按钮，在 Required Data 文件夹选择文件 **Engineer.ses**。

所有 CMOST 使用的文件都将存储于 Study 目录中。CMOST 会询问是否复制到目录中，点击 **Yes**。

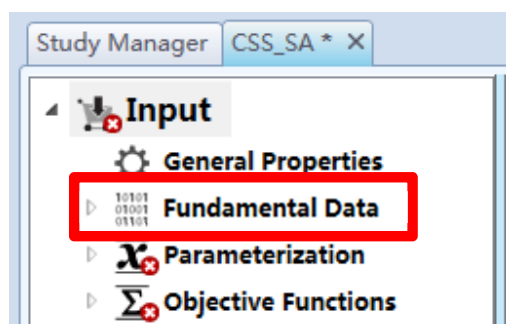
其他一些实测数据，例如井日产数据、井底流压或测井数据也需要在常规属性界面定义。

6. 点击 **Import FHF** 按钮，选择文件 **CSS_BHP.fhf** 和 **CSS_ProdInj.fhf**，然后点击 Open。

出现一条相似的信息，询问是否需要复制文件到 CMOST Study 目录，点击 **Yes**。




基础数据



基础数据部分定义了想要查看的结果曲线。通常，CMOST 分析模拟结果后会将大部分数据删除。基础数据部分保存了部分模拟结果信息，可以被重复查看。

在这个例子中，我们希望查看井的生产和注入数据。

7. 点击 **Insert** 按钮 ，输入以下信息：

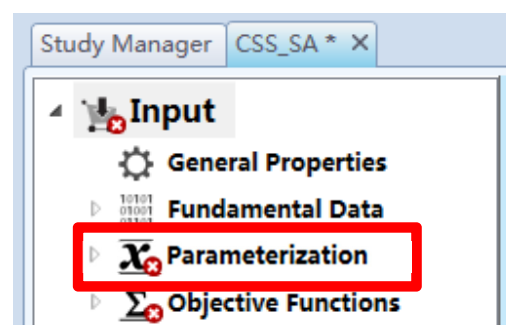
Origin Type	Origin Name	Property
WELLS	Producer 1	Cumulative Oil SC
WELLS	Producer 1	Cumulative Water SC
WELLS	Injector 1	Cumulative Water SC

提示：如果想要在多口井应用同样的属性，定义一口井的多个属性，然后点击 **Repeat**，复制属性到其他井。

8. 点击 **Save**，保存当前 Study。

注意：Ses 文件已经使用先前定义的 Study 名称“CSS Sensitivity Analysis”保存。

参数化



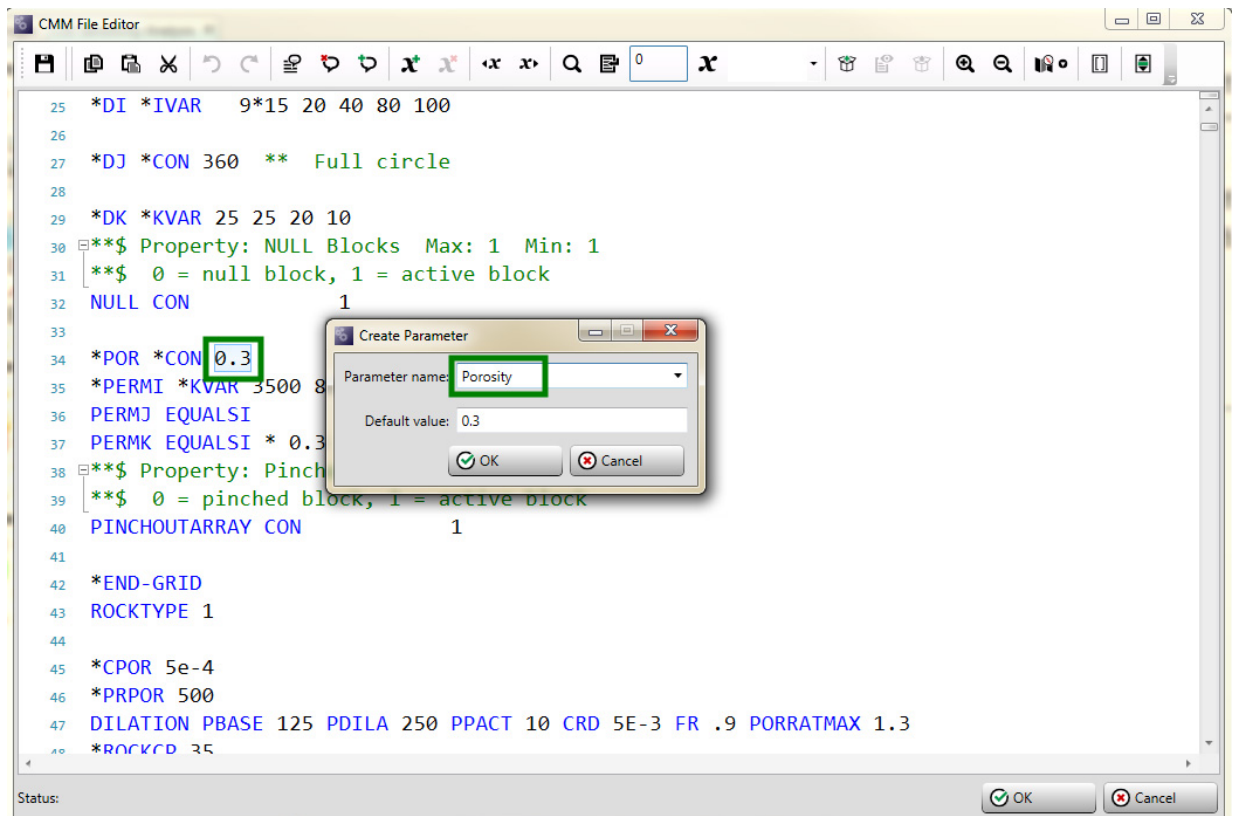
在参数化部分，我们选择想要调整的变量参数。对于该 Study，我们想要调整以下参数，将其添加至 CMOST 主文件(*.cmm)。

变量	相关的模拟器关键字
Porosity (single value)	POR
Permeability of each layer (4 values)	PERMI
Kv/Kh ratio	PERMK
Carmen-Kozeny exponential factor for permeability as f(porosity)	PERMUL (I/J/K)
Dilation onset pressure	PDILA
Dilation compressibility	CRD

创建主文件

主文件几乎和基础模型文件一样，仅仅是用 CMOST 语句替代了基础模型中的部分关键字。

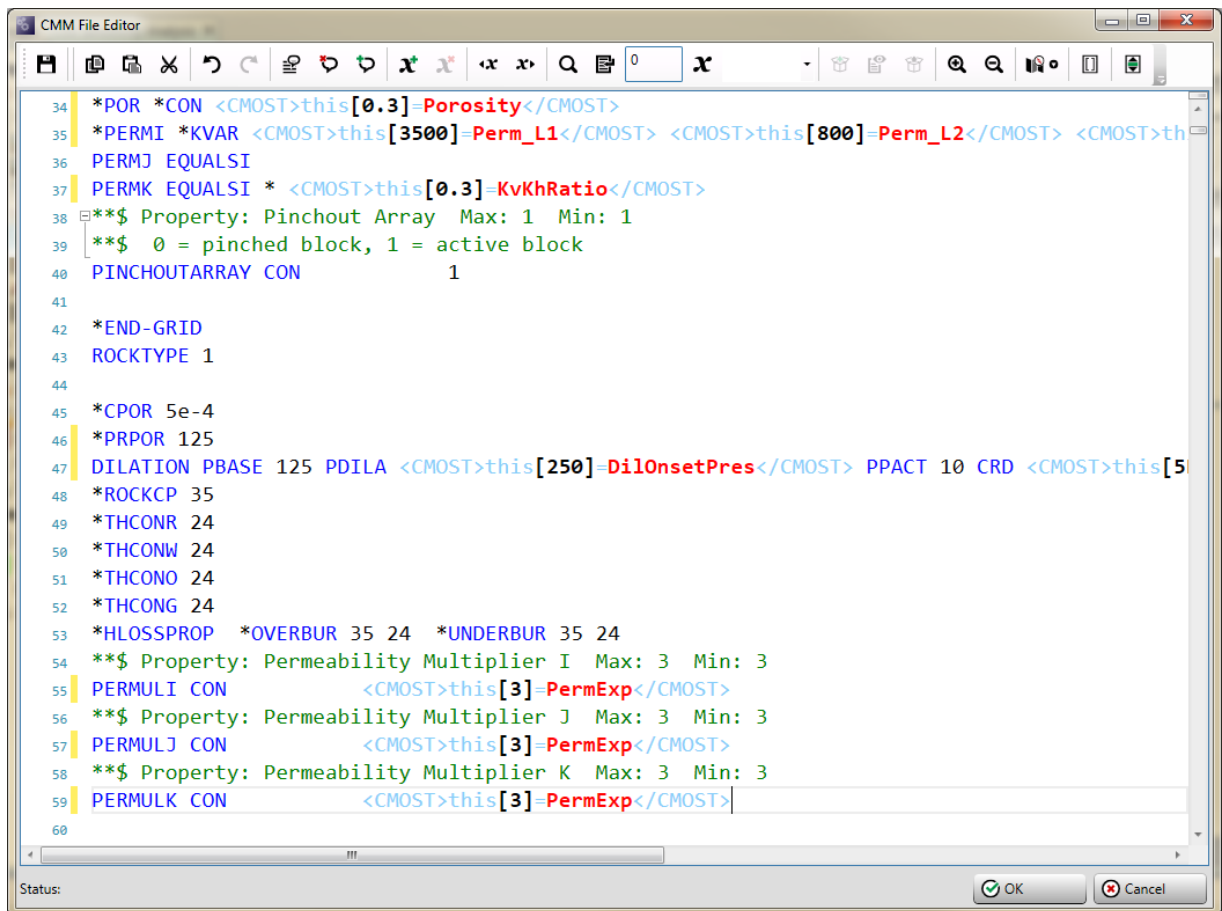
9. 在树状图中，点击 **Parameterization** 选项，切换到参数界面。
10. 点击 **Edit** 按钮，打开 CMM 文本编辑器。
11. 在文件中找到关键字 **POR**，选中关键字后面的数据 **0.3**。右键，选择 **Create Parameter**。重新定义参数名称为 **Porosity**。保持缺省值为基础模型中的原始值。



12. 对于其他参数，重复上述步骤：

变量	相关的关键字	参数名称
Porosity (single value)	POR	Porosity
Permeability of each layer (4 values)	PERMI	Perm_L1, Perm_L2, Perm_L3, Perm_L4
Kv/Kh ratio	PERMK	KvKhRatio
Dilation onset pressure	PDILA	DilOnsetPres
Dilation compressibility	CRD	DilCompress
Carmen-Kozeny exponential factor for permeability as f(porosity)	PERMUL (I/J/K)	PermExp

完成后，主文件如下图所示，点击 **OK**，然后 **Save**。



```

34 *POR *CON <CMOST>this[0.3]=Porosity</CMOST>
35 *PERMI *KVAR <CMOST>this[3500]=Perm_L1</CMOST> <CMOST>this[800]=Perm_L2</CMOST> <CMOST>th
36 PERMJ EQUALSI
37 PERMK EQUALSI * <CMOST>this[0.3]=KvKhRatio</CMOST>
38 **$ Property: Pinchout Array Max: 1 Min: 1
39 **$ 0 = pinched block, 1 = active block
40 PINCHOUTARRAY CON 1
41
42 *END-GRID
43 ROCKTYPE 1
44
45 *CPOR 5e-4
46 *PRPOR 125
47 DILATION PBASE 125 PDILA <CMOST>this[250]=DilOnsetPres</CMOST> PPACT 10 CRD <CMOST>this[5
48 *ROCKCP 35
49 *THCONR 24
50 *THCONW 24
51 *THCONO 24
52 *THCONG 24
53 *HLOSSPROP *OVERBUR 35 24 *UNDERBUR 35 24
54 **$ Property: Permeability Multiplier I Max: 3 Min: 3
55 PERMULI CON <CMOST>this[3]=PermExp</CMOST>
56 **$ Property: Permeability Multiplier J Max: 3 Min: 3
57 PERMULJ CON <CMOST>this[3]=PermExp</CMOST>
58 **$ Property: Permeability Multiplier K Max: 3 Min: 3
59 PERMULK CON <CMOST>this[3]=PermExp</CMOST>
60

```

注意：

- 在同一主文件中，同一个参数可以用于多个位置。当 CMOST 运行时，在这些位置使用相同值。
- CMOST 参数名称区分大小写。在多个位置使用同一个参数时，请保持大小写一致。

- *CMOST 字符串中不能有空格。在参数名称中间可以使用下划线。*
- *公式可以应用于变量部分（例如<cmost>Par1+Par2</cmost>）。缺省值不需要公式。*

当完成后，参数界面被参数变量填充。每个参数缺省的取值范围为 $\pm 25\%$ ，也可根据需要自行调整。

13. 按照下表，输入参数取值范围：

参数	下限	上限
DilCompress	0.002	0.007
DilOnsetPres	200	500
KvKhRatio	0.15	0.5
PermExp	0	4
Perm_L1	2000	4000
Perm_L2	600	1000
Perm_L3	250	450
Perm_L4	1500	3000
Porosity	0.25	0.35

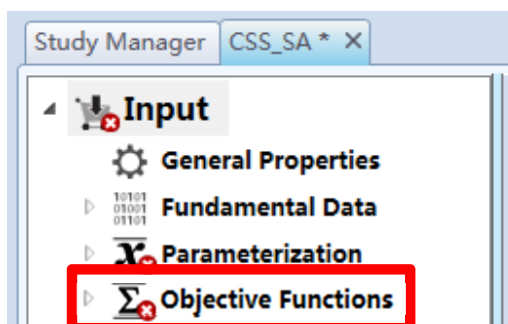
参数类型设置为连续参数，可以选择连续实数。当然在 **Source** 栏，也可以将类型修改为离散值，如果某个参数和另外参数相关的话，也可选择使用公式。

	Name	Comment	Active	Default Value	Source
1	DilCompress		<input checked="" type="checkbox"/>	5E-3	Continuous Real
2	DilOnsetPres		<input checked="" type="checkbox"/>	250	Continuous Real
3	KvKhRatio		<input checked="" type="checkbox"/>	0.3	Continuous Real
4	PermExp		<input checked="" type="checkbox"/>	3	Continuous Real
5	Perm_L1		<input checked="" type="checkbox"/>	3500	Continuous Real
6	Perm_L2		<input checked="" type="checkbox"/>	800	Continuous Real
7	Perm_L3		<input checked="" type="checkbox"/>	340	Continuous Real
8	Perm_L4		<input checked="" type="checkbox"/>	2600	Continuous Real
9	Porosity		<input checked="" type="checkbox"/>	0.3	Continuous Real

<ul style="list-style-type: none"> ▾ Data Range Settings <ul style="list-style-type: none"> Lower Limit 0.002 Upper Limit 0.007 ▾ Discrete Sampling Settings <ul style="list-style-type: none"> Number of Discrete Lev. 11 ▾ Prior Distribution Settings <ul style="list-style-type: none"> Prior Distribution Funct. Unspecified Synchronize Distribution True
--

14. 点击“Save Current Study”，保存 Study。

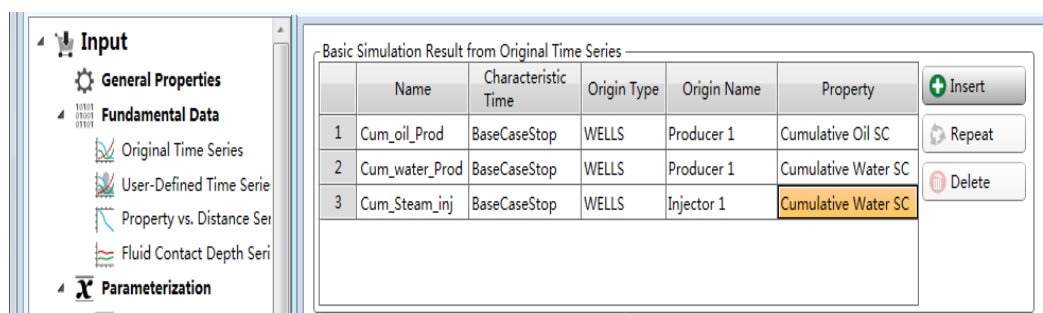
目标函数



目标函数决定了 CMOST 分析的结果。在这个例子中，我们想要查看参数对累注汽、累产油和累产水的影响。对敏感性分析来说，目标函数类型选择“Basic Simulation Results”要比选择“History Match Quality”更为合适，因为如果选择不合适的话，历史拟合误差高度非线性可能会导致错误的结果。

15. 切换到 **Basic Simulation Results** 界面。
16. 点击 **Insert** 按钮。
17. 将目标函数命名为 **Cum_Oil_Prod**。设置 **Origin Type**→Wells, **Origin Name**→**Producer 1**, **Property** → **Cumulative Oil SC**。
18. 再添加两个目标函数：

Name	Origin Name	Property
Cum_Water_Prod	Producer 1	Cumulative Water SC
Cum_Steam_Inj	Injector 1	Cumulative Water SC



控制中心



控制中心定义了如何模拟，以及CMOST引擎启动及停止。需要你选择计算机、模拟器版本及处理器数等。

19. 点击 **Engine Settings** 界面。Study 类型已经定义为 **Sensitivity Analysis** Engine Name 设置为 **Response Surface Methodology**。其他使用缺省值。
20. 点击 **Simulation Settings** 界面。如果通过 Launcher 设置了多个 Scheduler，将会在这个界面显示。‘**Local**’ scheduler 表示引用当前计算机。确认 Scheduler **Local** 设置为 **Active**。设置 **Max Concurrent Jobs** 为 **1**。
21. 确认选择 STARS 最新版本。

有时模型运算时可能会遇到数值控制的问题，这样会需要较长的时间完成模型的运算。如果超出预期运算时间，CMOST 会自动终止模型的运算。因为我们本次的模型运算时间小于 1 分钟，所以设置 **Max Run Time per Job** 为 **0.1** 小时（6 分钟）。

Schedulers: Connected using schedulers in Launcher. Please do not close Launcher when the study is running.

	Active	Scheduler Name	Type	Max Concurrent Jobs	Max Failed Jobs	Work Plan	Job Priority	Additional Switches	Host Computer
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Local	Local	1	25	All Time	Low		

Simulator settings

Simulator: STARS

Simulator version: 2016.11

Number of CPUs per job: 1

Method to find executable: Find Exact Version

Max run time per job (hours): 0.1

Additional simulator switches:

Apply simulator license multiplier:

Write SR2 files on execution host:

Write log file on execution host:

Disable restart records writing:


Disable grid records writing in OUT:

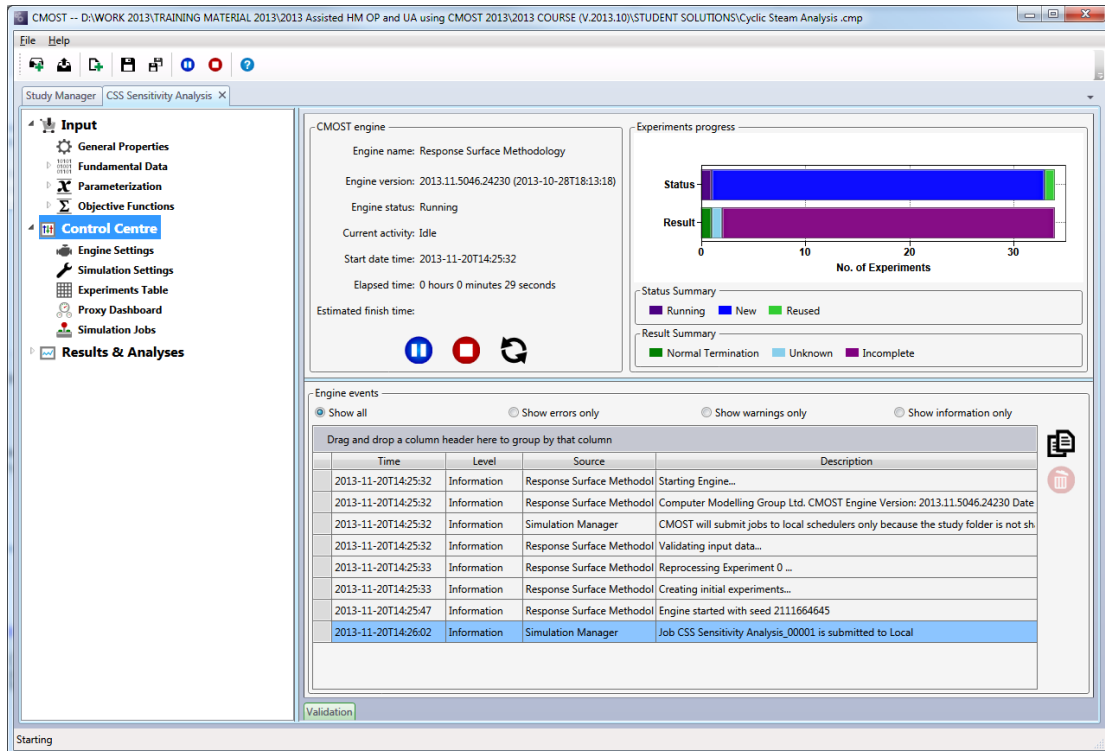
Disable grid records writing in SR2:

Job record and file management

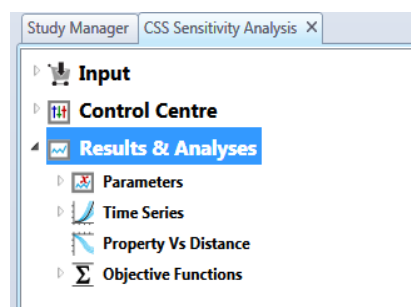
Job Status	Clear Job Record	Delete .d	Delete .ic	Delete output files (.irf, .mrf, ...)
Normal Termination	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Abnormal Termination	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Failed	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

1. For normal termination jobs, the user can specify the number of optimum experiments to keep simulation files in Engine Settings page.
 2. Abnormal termination jobs are jobs terminated by the simulator due to numerical problems.
 3. Failed jobs are jobs that couldn't run to completion due to hardware/software/license problems.

22. 所有的敏感性分析输入都已完成，点击 **Save**，保存 Study。
23. 点击 **Control Centre** 界面。点击  按钮，启动 CMOST 引擎。现在，CMOST 将开始创建模型，提交给模拟器进行运算。



结果分析



引擎停止运算完成后，我们可以查看最终的结果。当引擎运行时，我们可以查看初步的模拟结果，随着模型运算数量的增加，模拟结果随时更新。

注意：

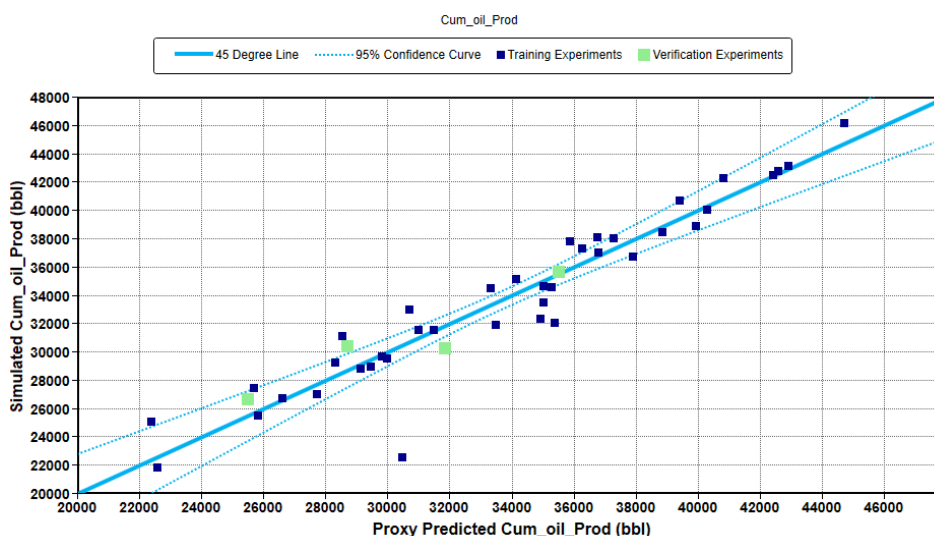
由于选择的实验方案是随机的，呈现的结果可能略有差异。

24. 在树状图中，切换到 **Results & Analyses** -> **Objective Functions** -> **Proxy Analysis** -> **Cumulative_Oil_Prod**

25. 首先，我们需要验证代理模型的精度。目测 **Model QC** 图。

这张图是模拟器运算结果与代理模型预测结果的对比。数据点离 45° 线之间的距离表示代理模型预测结果偏离实际模拟结果的程度。如果所有的数据点都落在 45° 线上，表示代理模型精度为 1。

在该例子中，大部分点落在了 45° 线附近，表示代理模型精度足够高。验证方案没有用于创建响应面，但也落在了 45° 线附近。这表明代理模型有很强的预测能力。



26. 切换到 **Statistics** 标签。

在 “**Summary of Fit**” 表格：

- 核实“**R-Square**”、“**R-Square Adjusted**”和“**R-Square Prediction**”是否都大于 0.5，如果大于 0.5 表示拟合精度够高。
- 核实“**Prob > F**”是 ≤ 0.05 。

“**Effect Screening Using Normalized Parameters (-1, 1)**” 表格给出了每个参数变量敏感性的评估，

- 核实“**Prob > |t|**”列。评估较好的参数系数，其“**Prob > |t|**”较低，一般 (< 0.1)。与它们的系数相比，这些参数的标准差都较低。
- 核实“**VIF (方差膨胀因子)**”列。参数 **VIF** 值较高 (大于 3) 可能有多重共线性的问题。这可能表示参数系数是无效的。



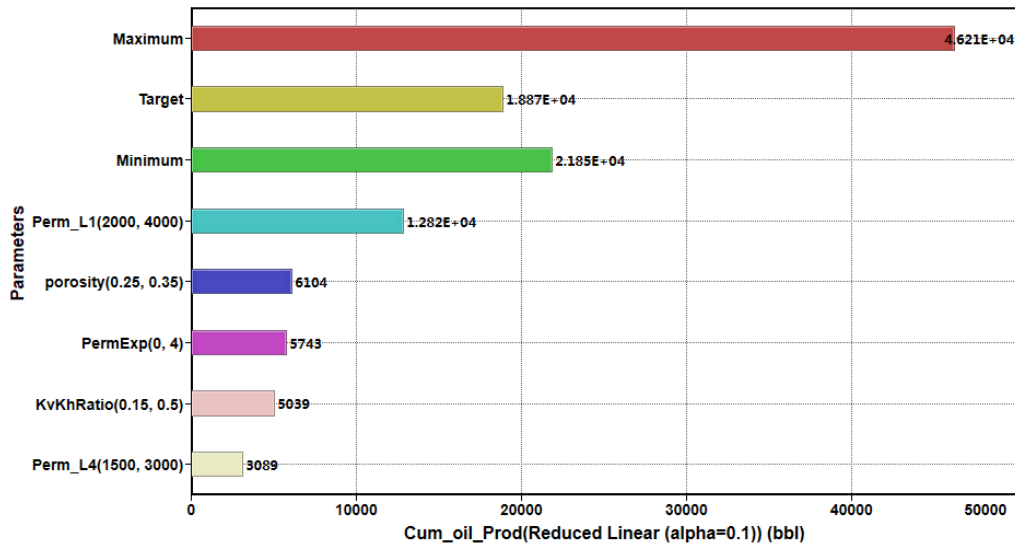
Model QC	Statistics	Effect Estimates	Proxy Settings		
Objective Function Name: Cumulative_Oil_Production					
Model Classification: Reduced SimpleQuadratic (alpha=0.1)					
Summary of Fit					
R-Square	0.950501				
R-Square Adjusted	0.931056				
R-Square Prediction	0.892907				
Mean of Response	34044.8				
Standard Error	1454.57				
Analysis of Variance					
Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	11	1.13759E+09	1.03417E+08	48.8793	<0.00001
Error	28	5.92416E+07	2.11577E+06		
Total	39	1.19683E+09			
Effect Screening Using Normalized Parameters (-1, +1)					
Term	Coefficient	Standard Error	t Ratio	Prob > t	VIF
Intercept	36770.7	577.294	63.6949	<0.00001	0.00
DilOnsetPres(200, 500)	-967.031	442.734	-2.18422	0.03748	1.42
KvKhRatio(0.15, 0.5)	1763.81	395.204	4.46304	0.00012	1.12
PermExp(0, 4)	2541.63	382.624	6.64264	<0.00001	1.18
Perm_L1(2000, 4000)	6624.17	385.991	17.1615	<0.00001	1.16
Perm_L2(600, 1000)	1214.41	423.319	2.86878	0.00775	1.21
Perm_L3(250, 450)	791.432	396.065	1.99824	0.05549	1.13
Perm_L4(1500, 3000)	1463.62	426.333	3.43305	0.00188	1.22
Porosity(0.25, 0.35)	3004.36	429.618	6.9931	<0.00001	1.44
DilOnsetPres*DilOnsetPres	-2792.85	726.503	-3.84423	0.00064	1.26
PermExp*PermExp	-1356.88	784.657	-1.72927	0.09477	1.37
Perm_L3*Perm_L3	-1817.34	731.205	-2.4854	0.01918	1.22

27. 切换到 **Effect Estimate** 标签。

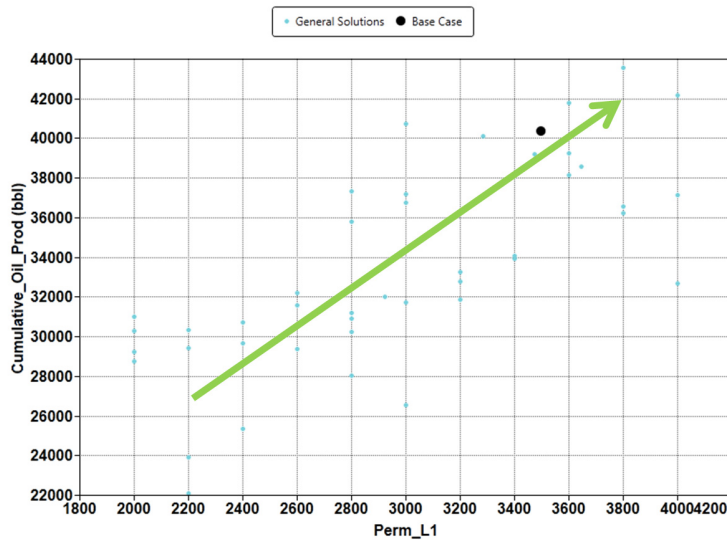
Tornado 图利用可视化方式表示参数敏感性。表格中的值显示两倍归一化系数值（归一化参数范围是 2）。

图中数值高的参数表示敏感性强。对于线性参数，其数值表示参数从最小值变化到最大值的平均变化的目标函数的平均变化。

Maximum 和 **minimum** 表示所有实验方案中最大和最小目标函数。**Target** 表示从生产历史文件得到的数据。



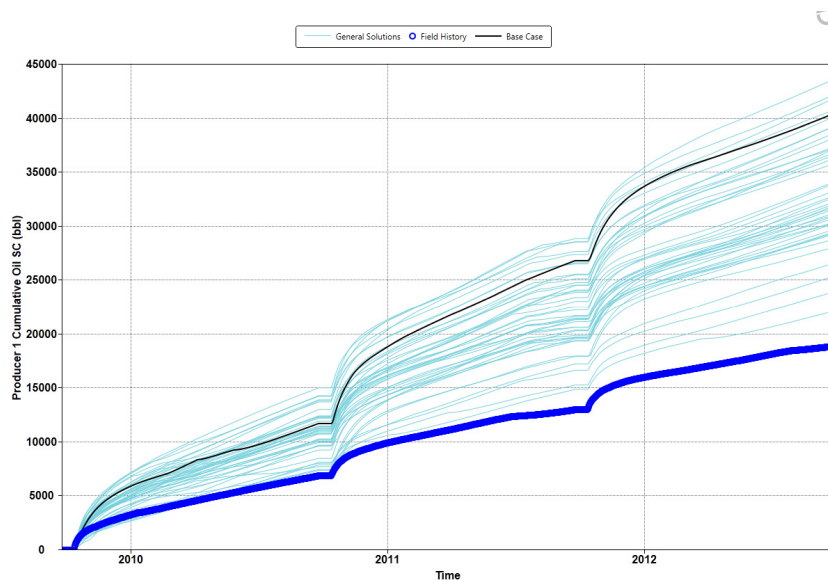
28. 切换到 **Results & Analysis -> Objective Functions -> Cross Plot -> Cumulative_Oil_Prod**。
29. 选择 **Perm_L1** 前面复选框。



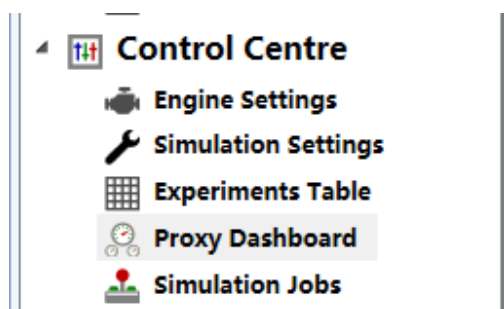
在交汇图中，我们可以明显看出 Cumulative_Oil_Prod vs. Perm_L1 之间的线性关系，证实了结果与响应面模型的关系。

30. 在代理分析下，对所有的目标函数重复步骤 26-29。
31. 切换到 **Results & Analyses -> Time Series -> Observers**，查看结果。

大部分模拟结果都高于生产历史数据。这表示某些参数的取值范围需要调整，以便于生产历史数据拟合。



主要参数对结果影响（代理仪表盘）

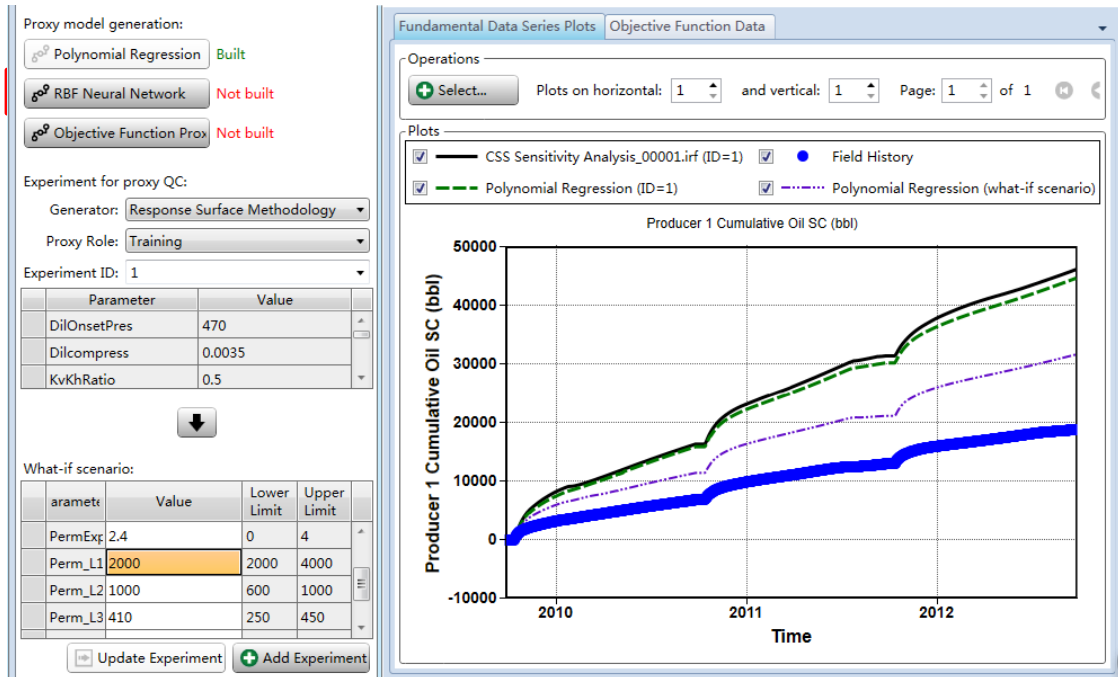


代理仪表盘可以快速评价参数改变时对结果的影响。我们可以使用代理仪表盘查看参数在整个模拟过程对结果的影响。

32. 切换到 **Control Centre** -> **Proxy Dashboard**
33. 在 **Plot Settings**，选择 SR2 时间序列曲线-**WELLS_Producer 1_Cumulative Oil SC**
34. 点击 **Build Proxy Model button**，保留普通克里金代理作为缺省模型。
35. 在 **What-if scenario** 点击参数值，使用滑动条调整参数 **Perm_L1** 数值大小，通过调整参数，使得模拟结果靠近生产历史数据。

敏感性分析有两个目标，第一个目标是确定那些参数比较敏感，第二个目标是找到与实测参数相近的取值范围。这些信息对历史拟合非常有用。

在这个练习中，最敏感的参数是 **Perm_L1**，在“**What-If scenario**”部分，使用滑动条调节该参数，使其靠近生产历史数据曲线。对于这个例子，需要将渗透率调节至下限 **2000 md**，然后再使用滑动条调节参数数值。依据选择的渗透率数值，将重新计算累产油结果。对于其他参数，使用同样的方法进行调整，达到拟合精度。



点击 **Add experiment**，根据选择的参数取值创建试验方案。

36. 切换到 **Control Center** 界面，启动引擎，运行新实验方案，验证结果。
37. 保存 **Project**，然后关闭 **CSS_SA Study**。