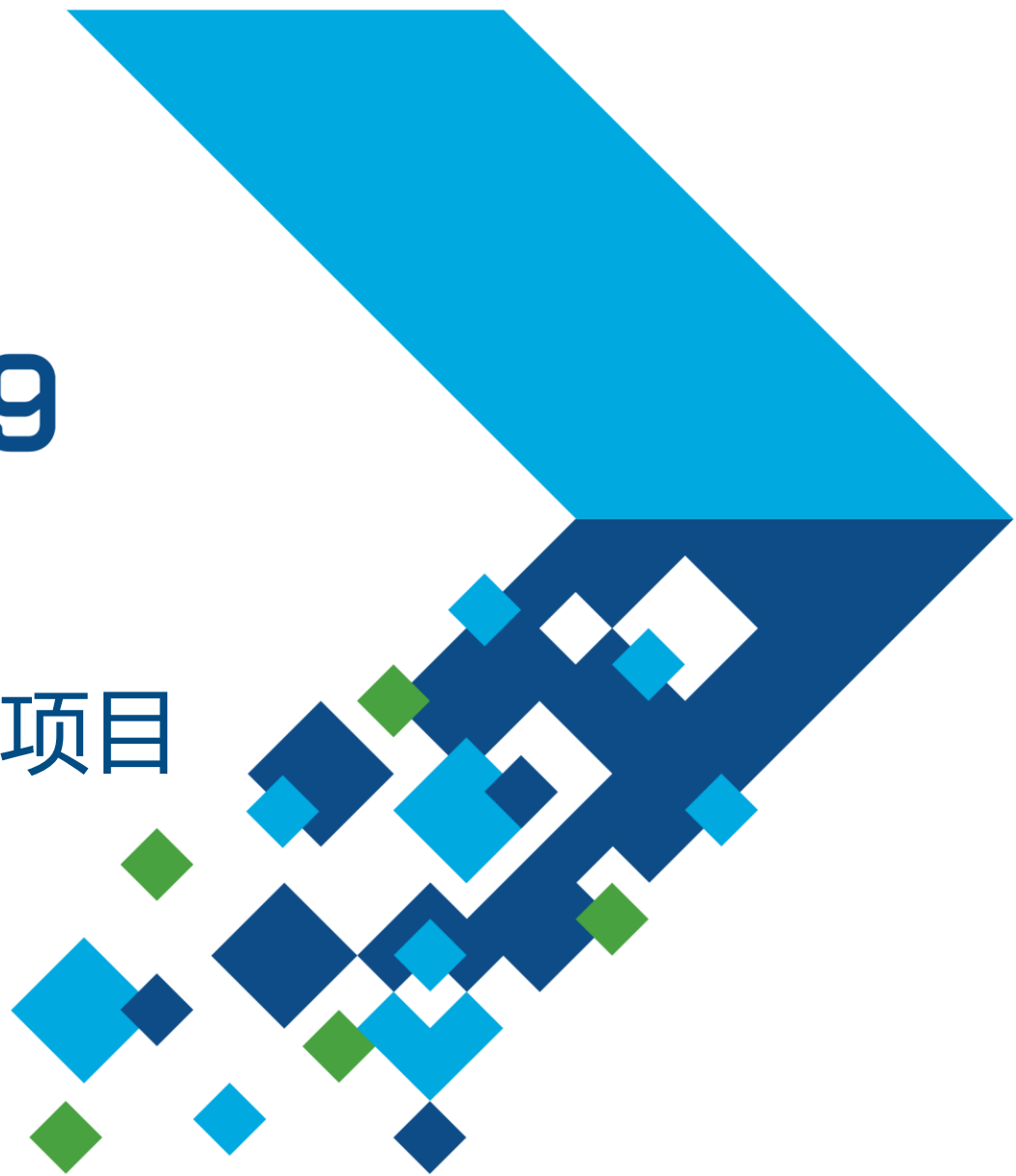


MATLAB EXPO 2019

基于模型标定的工程实践

- 东风国六汽油机台架标定项目

东风汽车技术中心



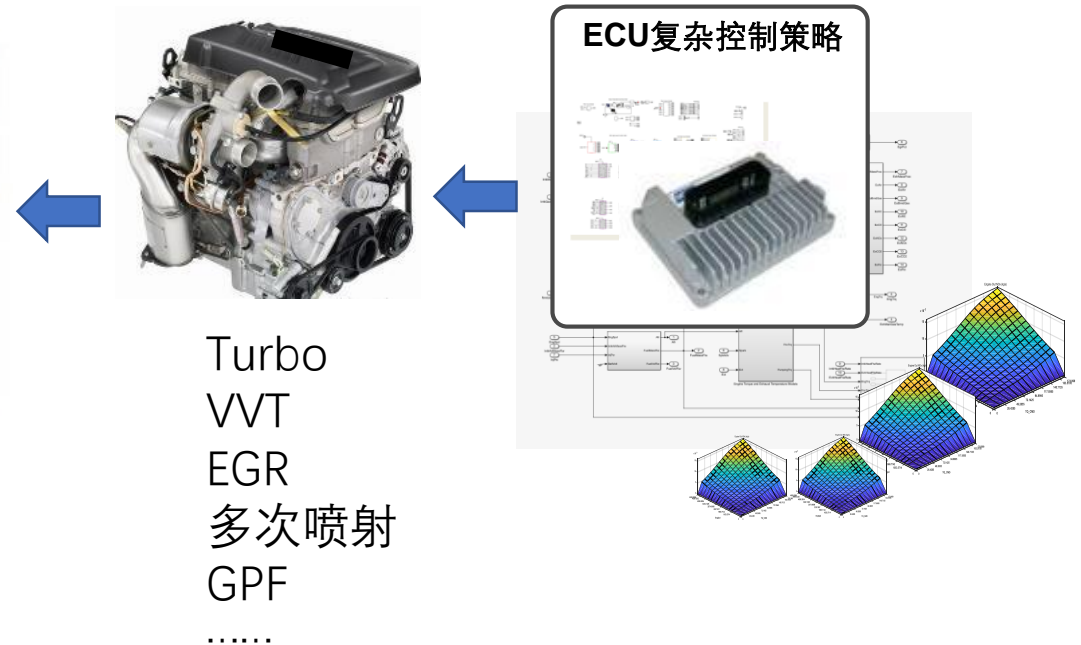
主要内容

- 发动机设计及标定开发面临的问题
- 基于模型的标定（MBC）基本思想和优势
- 东风汽油机台架标定（MBC）实践内容和结果
- 下一步工作展望

发动机设计及标定开发面临的问题

- 严苛的排放和油耗法规使得发动机设计越来越复杂；
- 满足国6b要求的汽油机需要Turbo，直喷，多次燃油喷射，VVT，EGR.....；
- ECU标定参数增多；

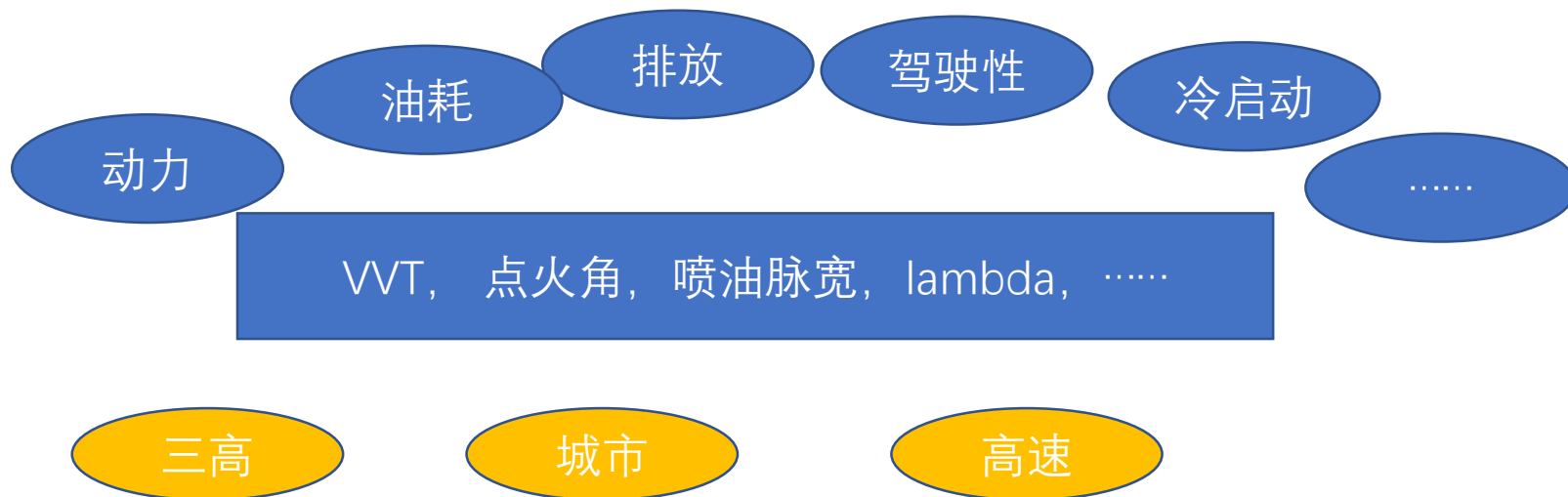
污染物	THC (g/km)		CO (g/km)		NOx (g/km)		NMHC (g/km)		N ₂ O (g/km)		PM (mg/km)		PN (#/km)	
	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油
国五	100	—	1000	500	60	180	68	—	无	无	4.5	4.5	无	6.0 × 10 ¹¹
国6a	100		700		60		68		20		4.5		6.0 × 10 ¹¹	
国6b	50		500		35		35		20		3		6.0 × 10 ¹¹	



发动机设计及标定开发面临的问题

• 传统标定方法问题

- 标定周期长：标定参数多；工况点多；影响因素多；
- 标定质量依赖工程师经验：
 - 平衡动力/油耗/排放；
 - 多维度高度非线性；
 - 人工难以取舍和找到最佳平衡点；



基于模型的标定 (MBC) 的价值



试验设计：制定试验计划，决定测试工况点，减少台架试验时间，节省成本；

优化运算：提高标定质量，减少对标定工程师经验的依赖；

提供自动脚本，提供相关工程咨询服务，帮助客户建立定制化的自动标定工具；

自动生成发动机的SIMULINK模型，用于MIL/HIL；无需软件/控制工程师额外工作；

东风汽油机台架标定（MBC）实践内容和结果

- 以东风新一代增压直喷机型的开发工作为例，介绍应用模型方法进行汽油机台架标定工作内容：
 - VVT标定
 - 进气效率标定
 - 多次喷油标定

这些内容为何适用于Model-Based Calibration方式？

这些内容为何适用于Model-Based Calibration方式?

- VVT标定的应用

工作量大，性能变化随工况和VVT有规律可循，适合模型描述

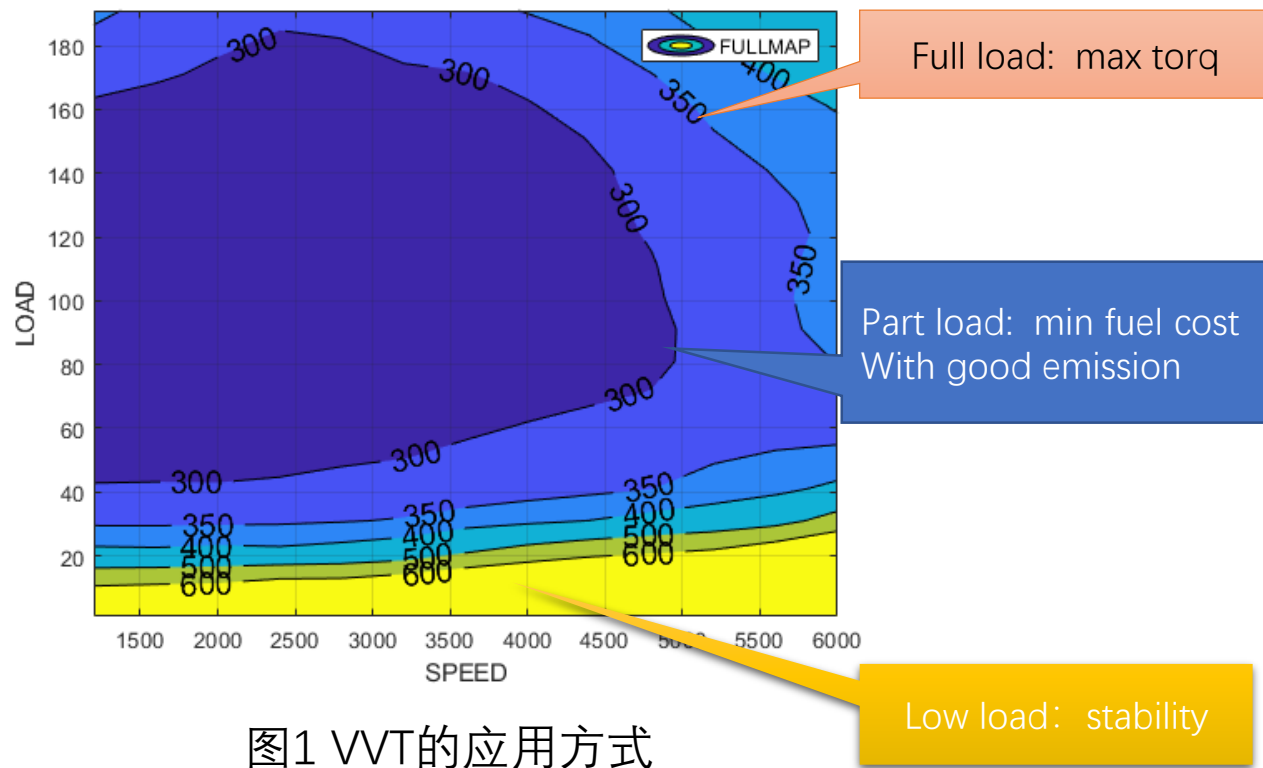
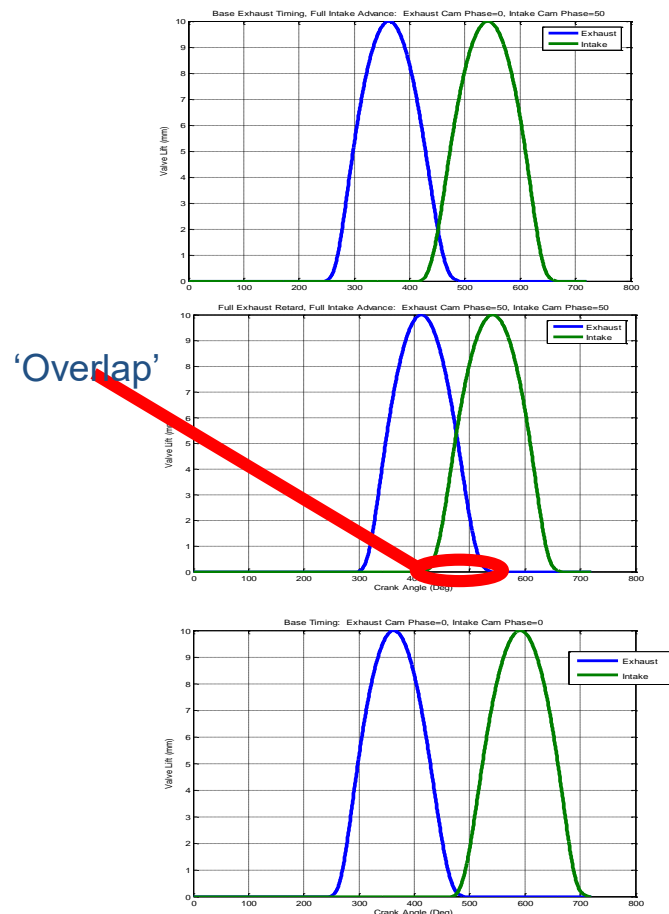


图1 VVT的应用方式



这些内容为何适用于Model-Based Calibration方式?

- 喷油标定的应用

工作量大，包括轨压/喷射压力/1/2/3喷比例/角度。

单工况点规律性强，DOE有减少测试点的潜力

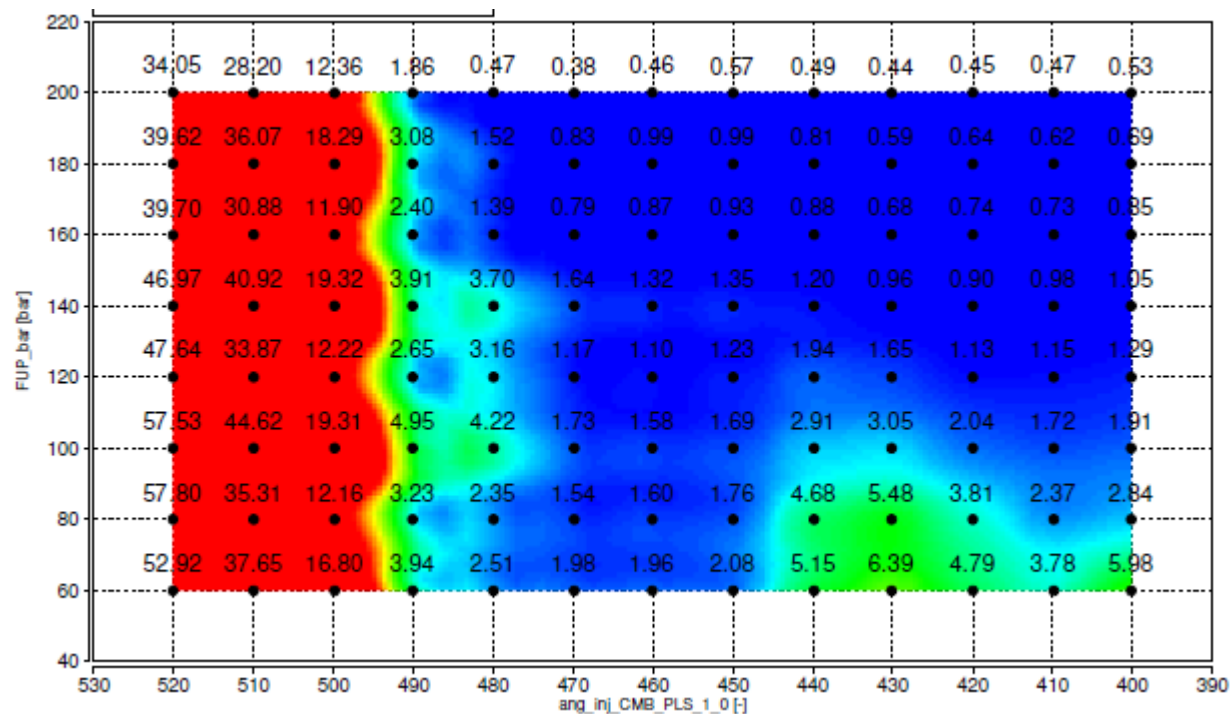
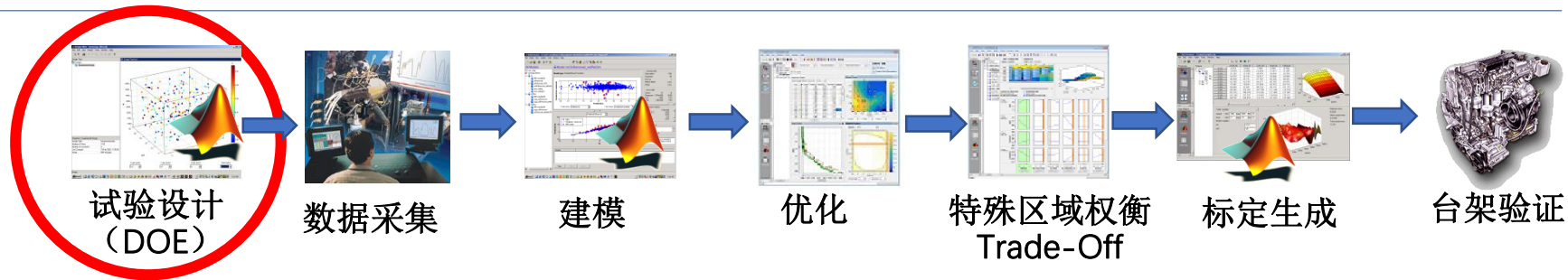
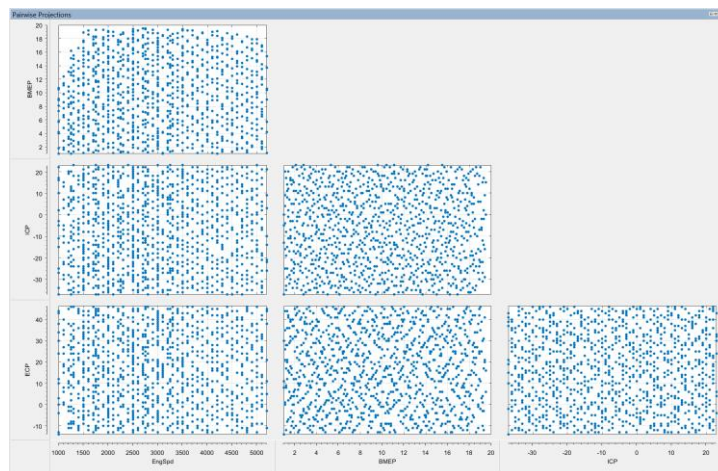
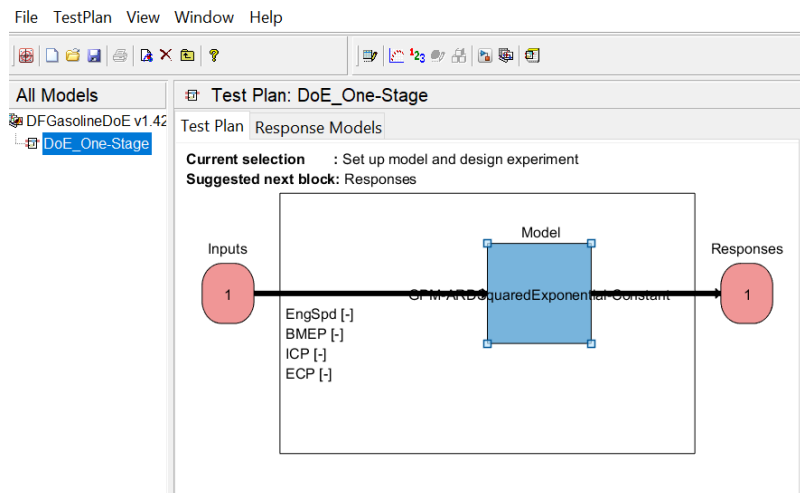


图2 轨压/喷射角度对PN的影响

VVT标定



- 因子：发动机转速，BMEP，进气VVT，排气VVT
- 传统方法点数： $11 \times 20 \times 6 \times 6 \approx 8000$
- DoE方法点数：1000；实际在低负荷区域补充100点；
 - 分区：增加WLTC工况区域权重，优化试验点分布
 - DoE方法：Space Filling-Sobol Sequence



低负荷区域增加测试

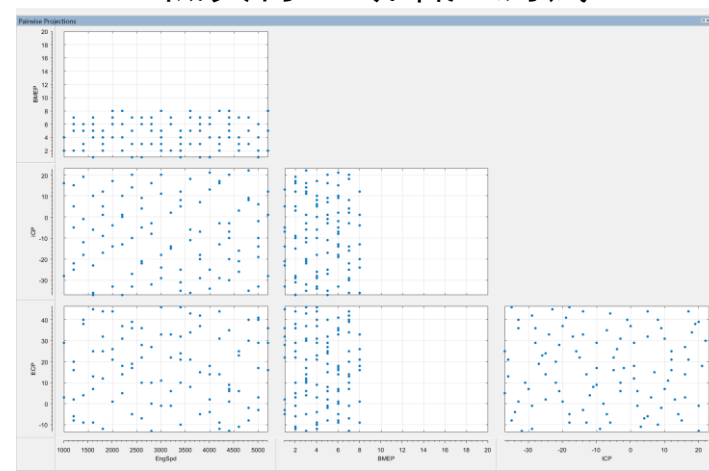
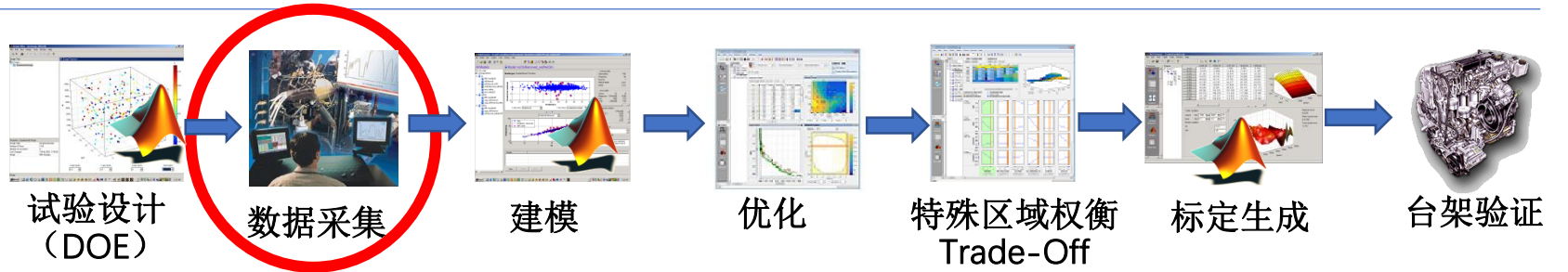


图3 VVT DOE建模示例

VVT标定



• 台架试验，数据采集注意点：

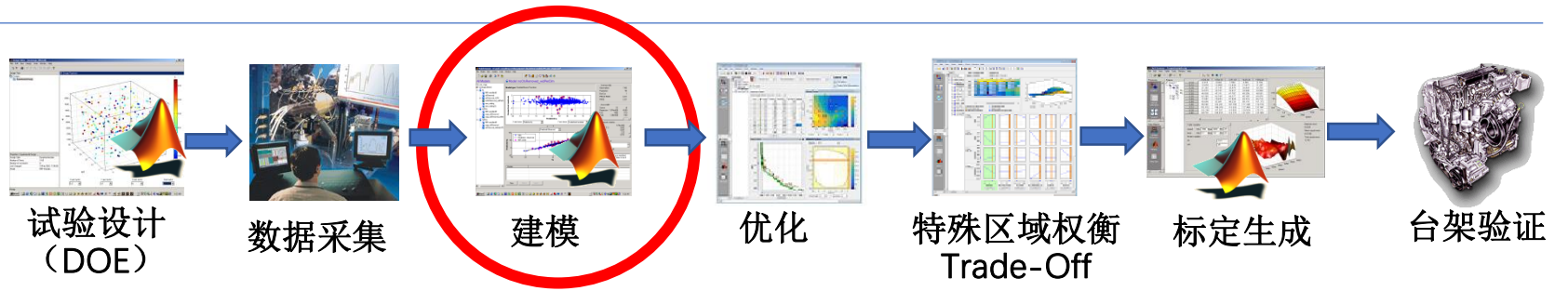
- 确保数据准确，发动机工作稳定；
- 台架运行条件：按照试验计划，每一个工况点下，控制MBT或KBL点火角， $\lambda=1$ ；

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	SPEED	TORQUE	bmep	P	zwout	GEVlv_ag	ICEVlv_ag	VVT_ov	IMEPH_ov	INDI
2	转速	扭矩	BMEP	功率	点火角	ICP	ECP	VVT_ov	IMEPH_ov	IMEPH
3	1000.00	12.30	1.02	1.28	35.04	-37.09	-13.71	-23.39	99.41	155
4	1000.00	21.20	1.80	2.22	20.70	16.01	-0.01	-16.02	2.49	1
5	1000.00	46.90	4.01	4.89	44.54	-33.99	9.93	-43.92	19.31	5
6	1000.00	49.30	4.19	5.16	39.43	-11.04	29.97	-41.00	3.70	2
7	1000.00	67.90	5.79	7.11	25.72	20.21	12.09	8.12	1.87	2
8	1000.00	68.30	5.82	7.16	12.47	-15.01	-4.07	-10.94	2.47	2
9	1000.00	84.20	7.17	8.82	8.03	10.01	42.95	-32.94	3.46	2
10	1000.00	95.70	8.14	10.02	-1.67	-26.90	33.91	-60.80	3.13	2
11	1000.00	102.10	8.69	10.70	-5.98	-25.02	23.98	-49.00	3.03	3
12	1000.00	108.90	9.27	11.40	1.02	1.99	2.97	-0.98	3.23	2
13	1000.00	94.70	8.06	9.92	6.28	17.07	37.94	-20.87	3.63	2
14	1000.00	111.80	9.51	11.71	-1.35	-4.99	-13.10	8.11	3.27	2
15	1100.00	34.00	2.90	3.92	27.75	12.93	17.86	-4.93	1.92	1
16	1100.00	56.40	4.81	6.50	16.99	6.97	0.97	6.00	1.85	1
17	1100.00	75.10	6.39	8.65	15.89	15.00	33.01	-18.01	2.47	1
18	1100.00	78.80	6.71	9.08	9.01	-30.03	15.04	-45.07	2.37	1
19	1100.00	90.30	7.69	10.40	5.77	-4.80	24.10	-28.90	2.44	2
20	1100.00	100.00	8.51	11.52	2.03	-9.95	35.05	-45.00	2.74	2
21	1100.00	114.10	9.72	13.15	-3.48	-28.02	27.02	-55.04	2.72	2
22	1100.00	130.50	11.10	15.04	-3.83	-13.01	-0.01	-13.01	2.87	2



图4 VVT 数据的采集及筛选

VVT标定



建模的目的是为了后面的优化，通过统计模型找出发动机特性

- 建立统计响应面模型 (RSM)
- Response模型包含：

- 油耗：用作后续优化的目标
- 扭矩：参考优化目标
- COV：约束条件
- 爆震系数：约束条件
- HC：参考约束条件
- Nox：参考约束条件
- 排气温度：约束条件
- 进气温度：约束条件
- 气门重叠角：参考
- 点火角：参考

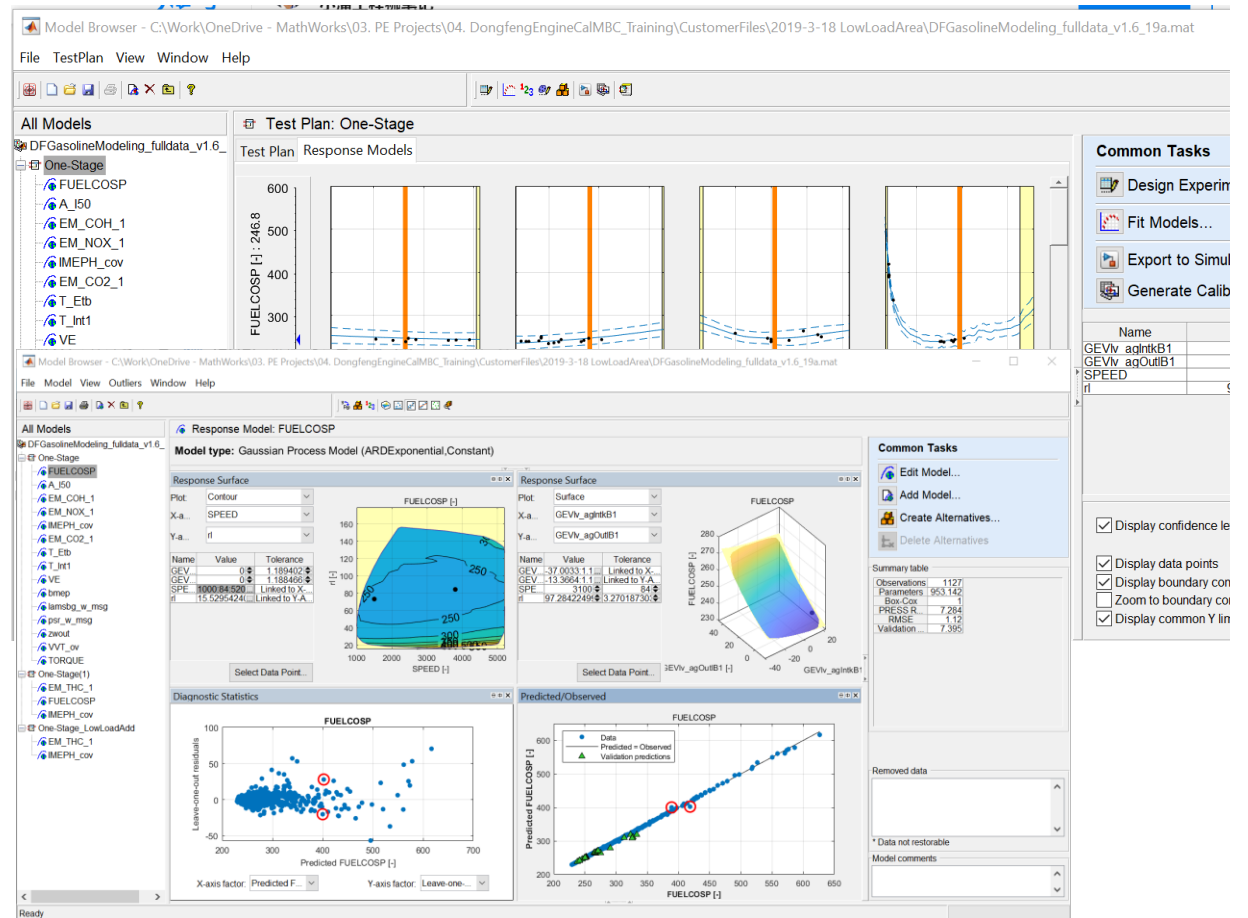
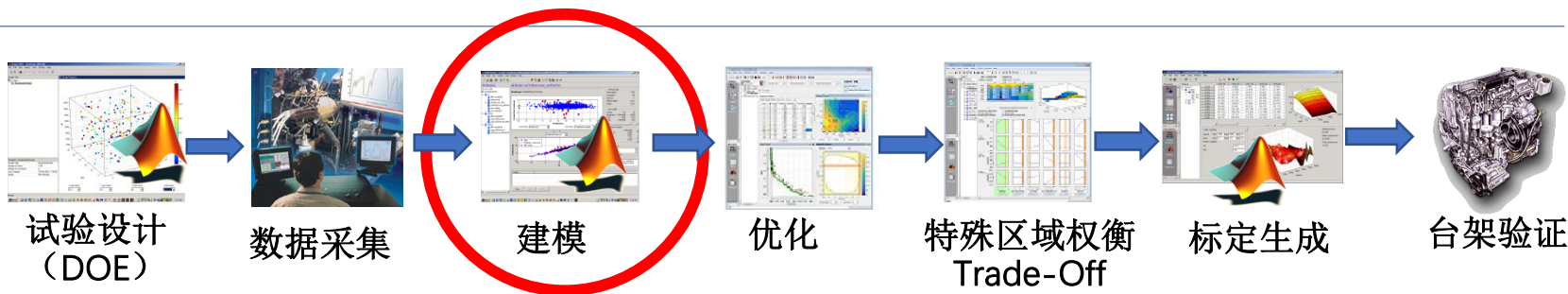


图5 建模示例

VVT标定



模型评估

统计指标:

- 均方根误差RMSE: 值越小, 越准确, 但可能过度拟合;
- PRESS RMSE: 值越小越好, 越不容易过度拟合;
- 其他: R^2 , 残差, 学生化残差, 留一法残差.....

工程经验

- 不合理的奇异点
- 趋势不符合工程实际

实测数据验证

- 另做一组试验作为验证数据

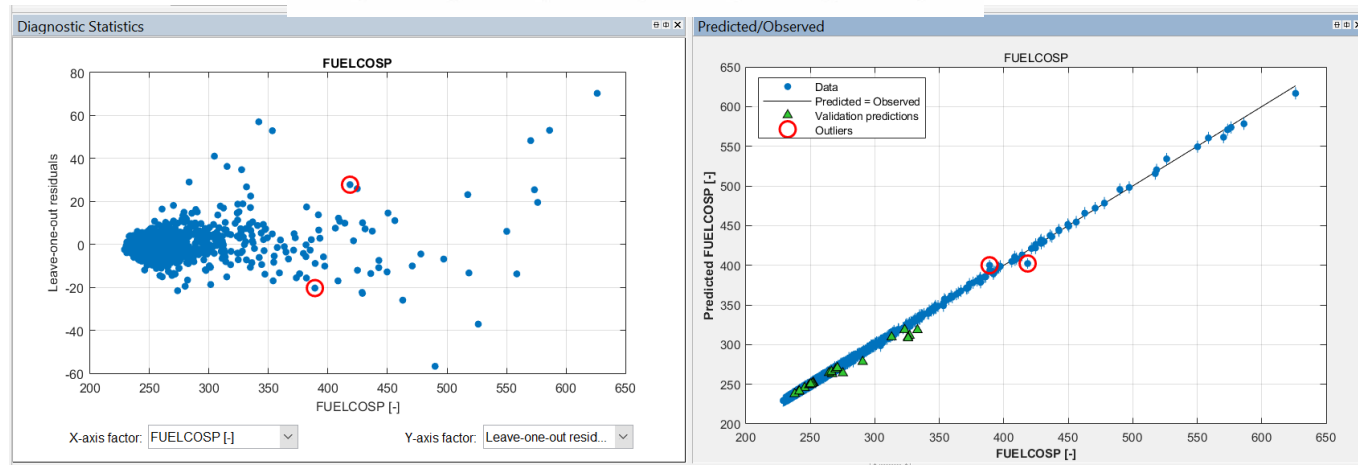
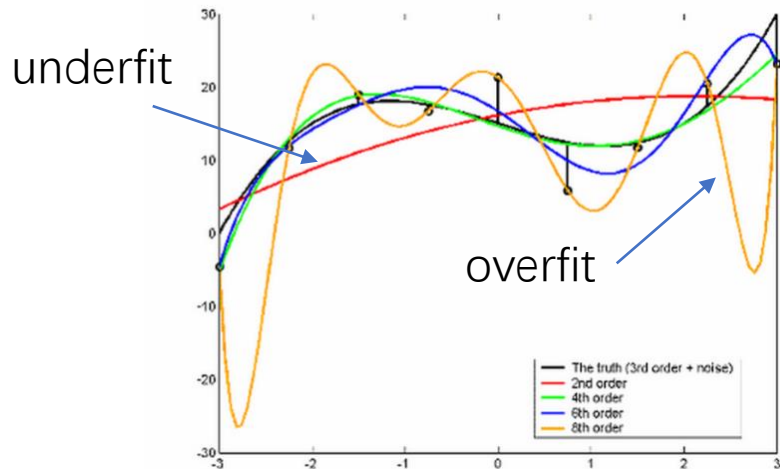
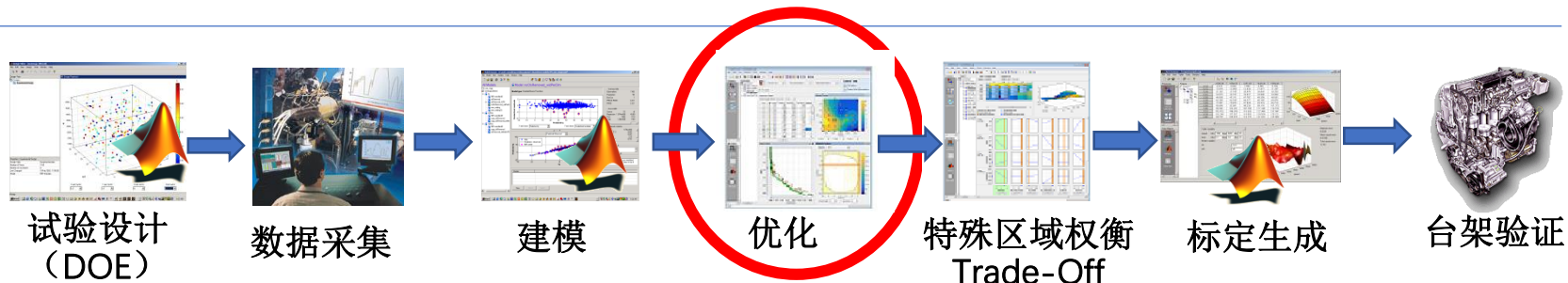


Table	
Iterations	1127
Parameters	953.142
DOF	-1
RMSE	7.284
RMSE	1.12
R^2	0.999
Validation RMSE	7.395

图6 模型评估示例

VVT标定



- 最优化运算：目的是找出标定想要的点，多因子问题，人工很难找到最优；
- 以上一步建立的模型为基础进行优化运算

– 油耗最小为优化目标

– 约束条件：

- 排温 ≤ 930
- $COV \leq 3$
- 爆震系数 ≤ 2
- 进气温度 ≤ 80
- VVT梯度限值

– 可变参数：VVT

– 转速/负荷定义的工况点

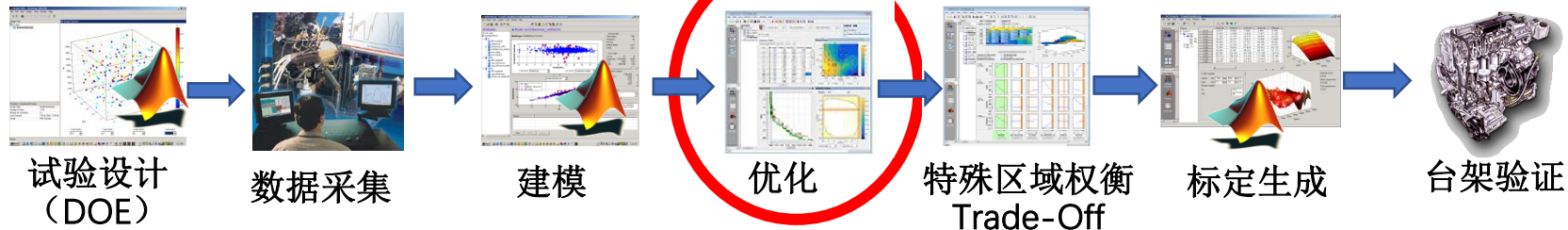
The screenshot shows the CAGE Browser optimization interface for 'DFGasolineModeling_v1.6_19a.cag'. It displays the following components:

- Objectives:** A table with one entry: 'FUELCOSP' (Weighted sum of FUELCOSP/GEVv a) to be minimized.
- Constraints:** A table listing various constraints such as 'FUELCOS', 'COV', 'Knock', 'EXHT', 'MAT', 'ECP', and 'ECP'.
- Optimization Point Set:** A summary showing 313 optimization points.
- Free Variables:** A table listing variables like 'GEVv' and 'GEVv' with their values across 19 points.
- Fixed Variables:** A table listing variables like 'FUEL', 'SPEED', and 'r1' with their values across 19 points.

Handwritten labels in Chinese identify these sections: '目标' (Objective) for the Objectives table, '约束条件' (Constraints) for the Constraints table, '可变参数' (Variable Parameters) for the Free Variables table, and '工况点' (Operating Points) for the Fixed Variables table.

图7 目标优化设定示例

VVT标定



• 优化结果分析

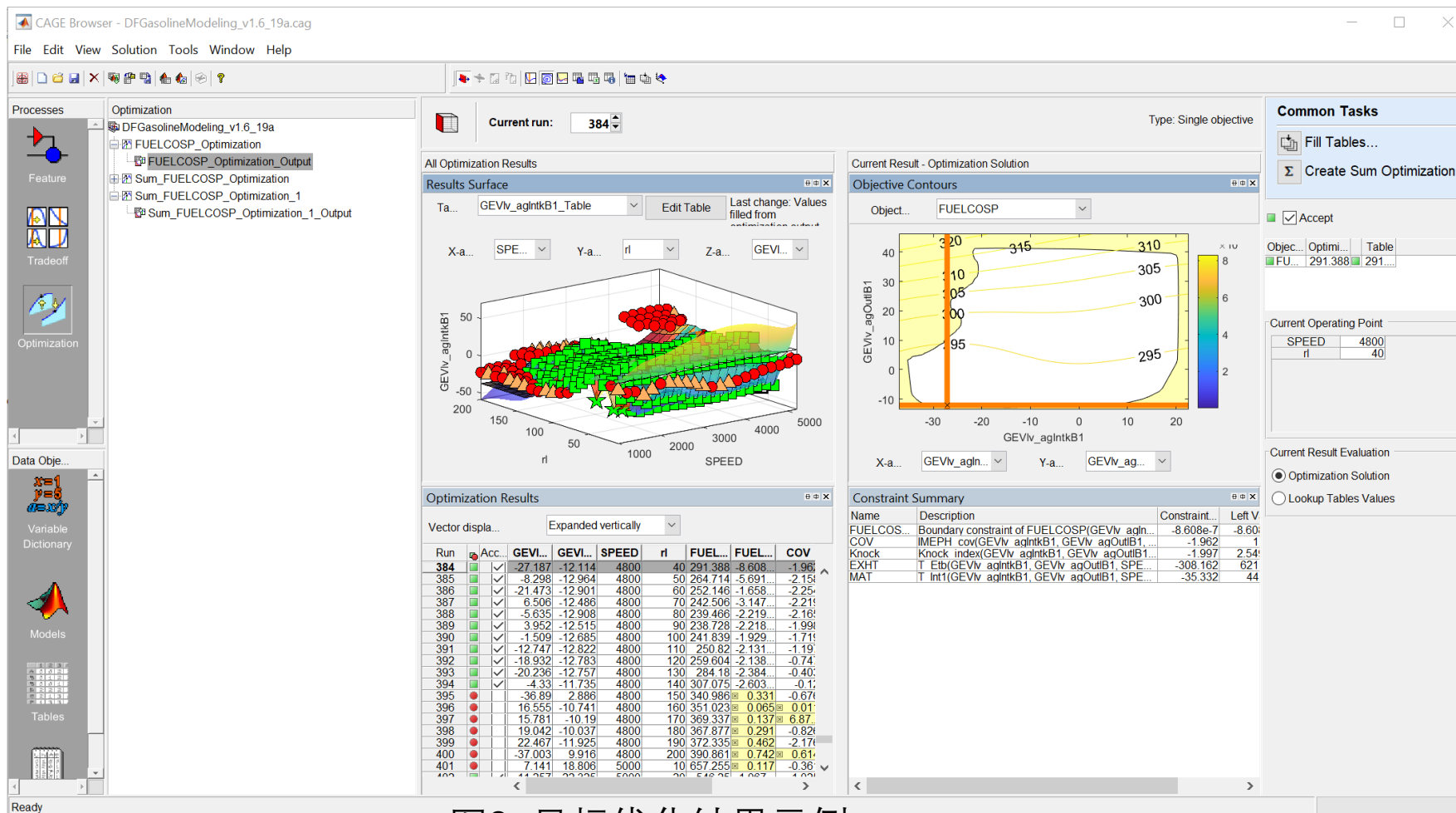
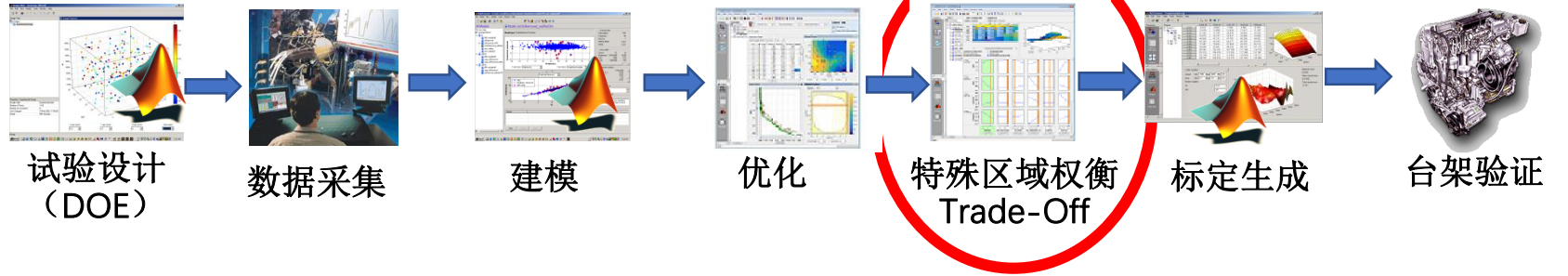


图8 目标优化结果示例

VVT标定



目的:

- 敏感区域进行分析，平衡多个性能指标；
- 数据误差带来的问题进一步筛选和修正；

敏感区域/特殊区域:

- 排放敏感区
- 发动机低负荷不稳定区域
- 外特性区域

通过模型提供的特性变化趋势，结合工程经验，选取最佳的权衡点

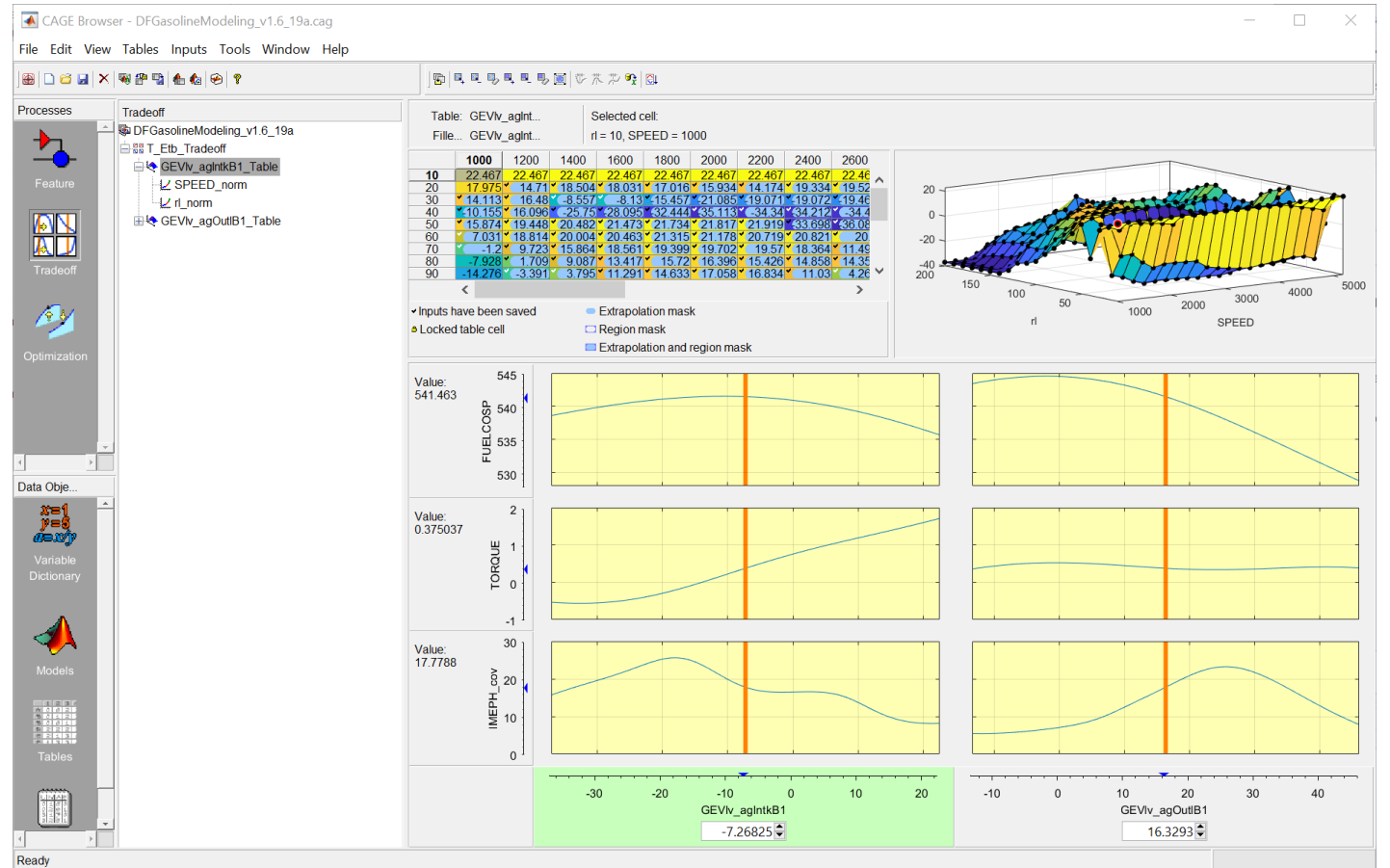
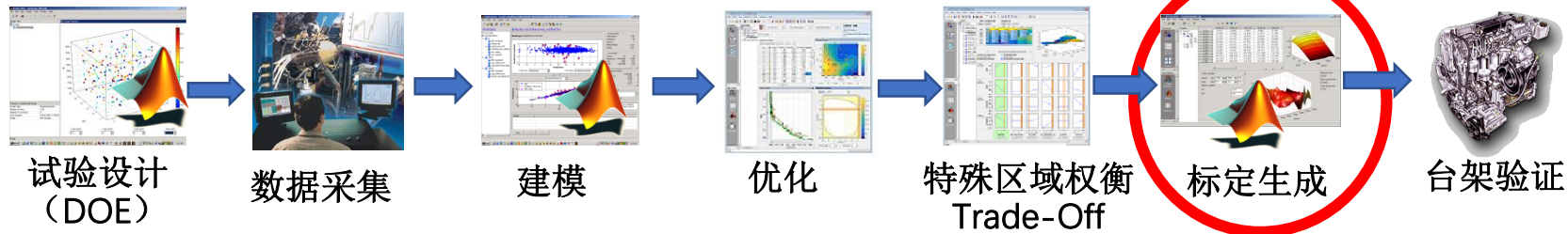


图9 手动调整示例

VVT标定



- 标定表格生成 - 自动化

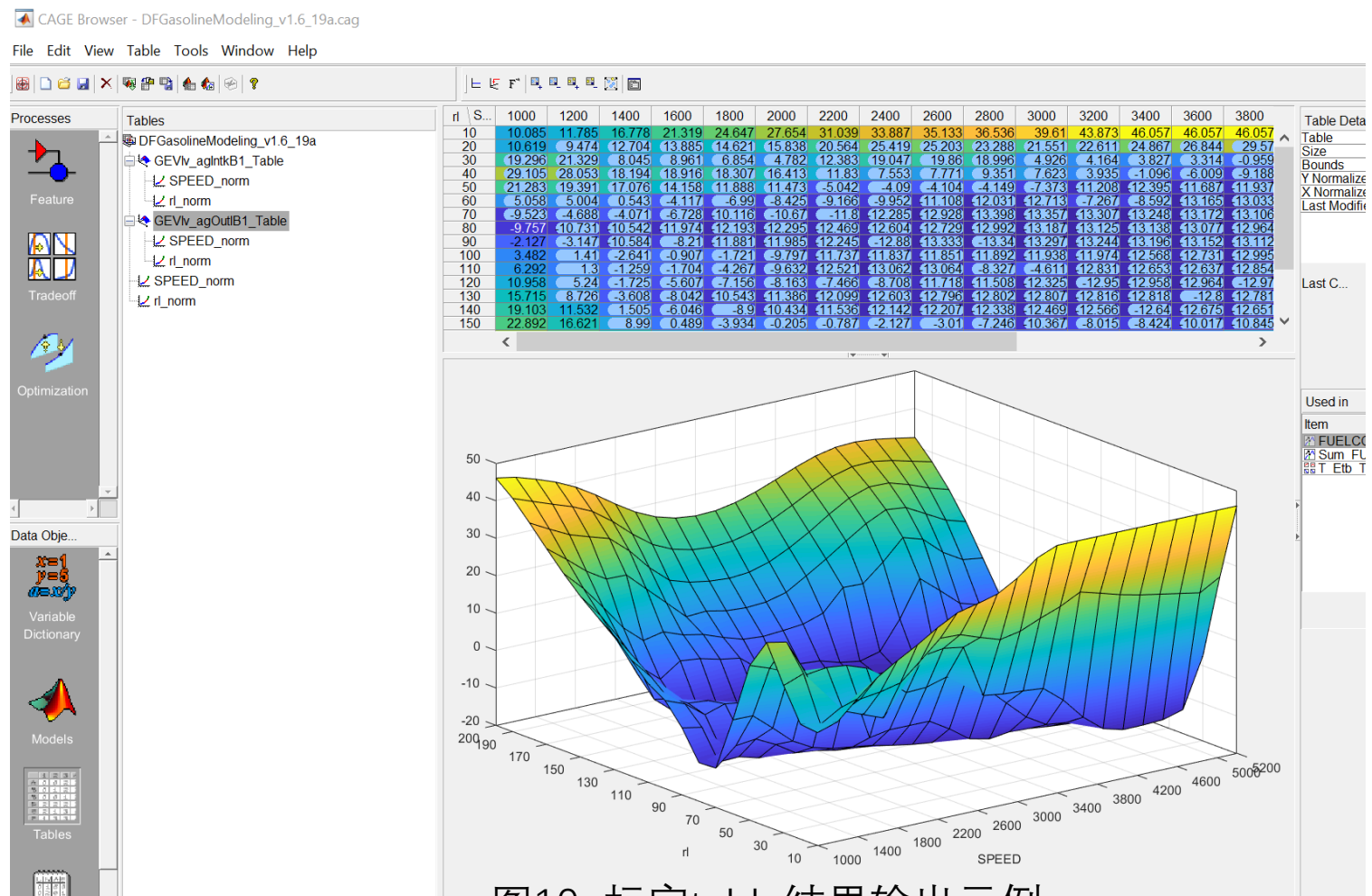
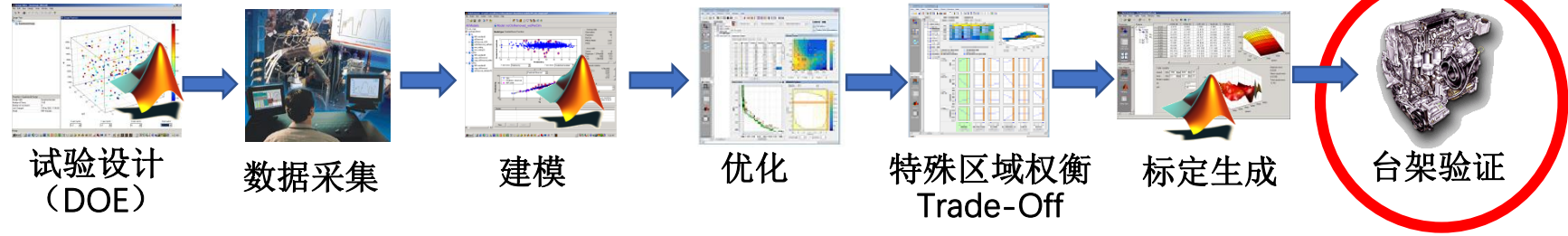


图10 标定table结果输出示例

VVT标定



东风台架验证及优化结果

- 首先对建模数据进行验证，将建模优化计算得到的油耗进行实测试验，复测模型精度。从下图1可以看出，实测与模型值的偏差基本在5%以内
- 在确认模型精度后，利用CAGE进行FC的寻优，结合工程经验的平顺性要求，最终得出的油耗结果与手动全维扫点优化结果相比，在大部分工况区域DOE略优，同时采数量降低了近80%。

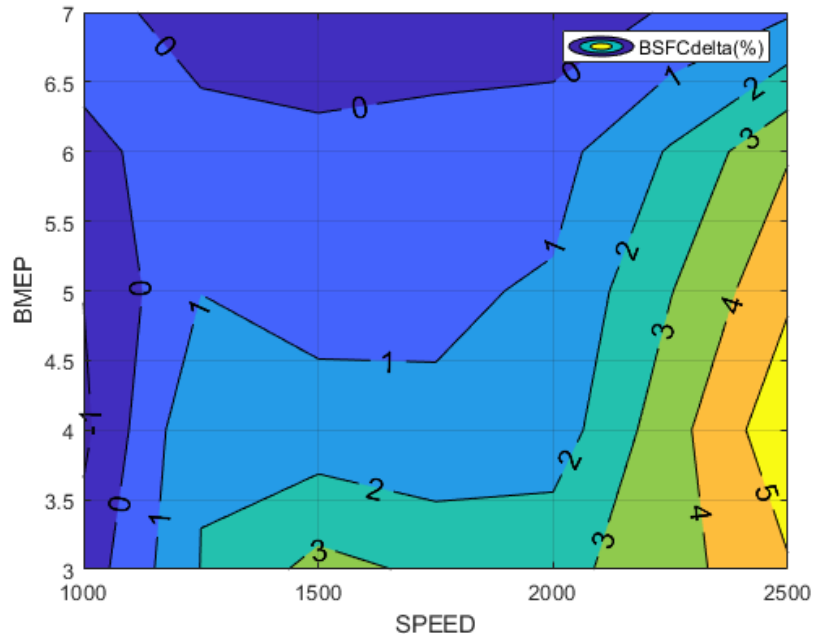


图11 油耗模型检验

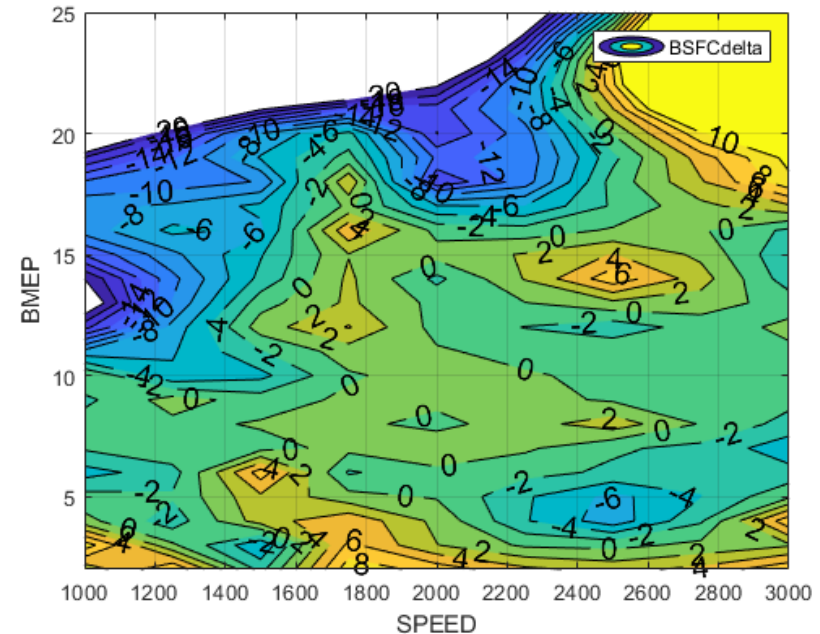


图12 油耗结果检验

VVT标定

• 遇到的难点及问题:

1. 燃烧稳定性参数cov的预估精度差，燃烧的恶化有突变性，当建模样本少，很难预估准确，尤其容易发生在低负荷区域，在该区域的预估必须增加样本数
2. VVT的平顺性采用CAGE目前做的效果不好，易出现无解的情况，需要工程经验进行平顺，并进行瞬态工况测试是否有过渡不好造成燃烧不稳的情况

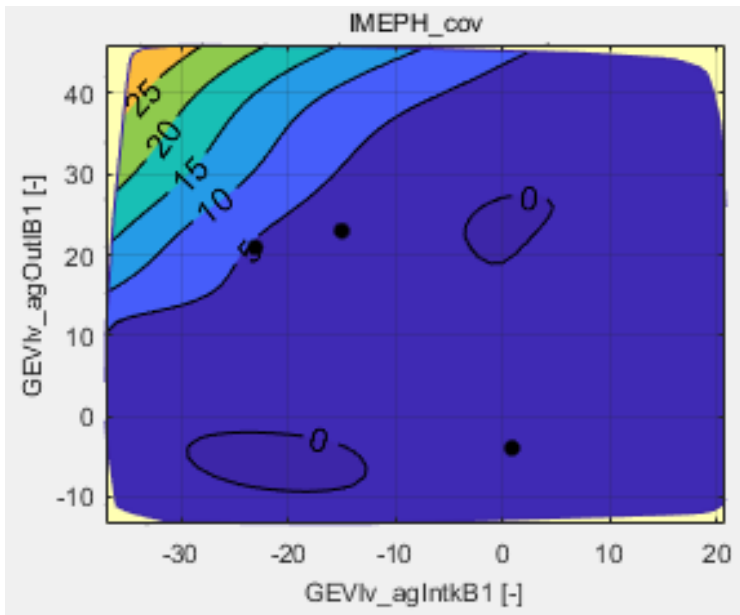


图13 DOE的COV结果

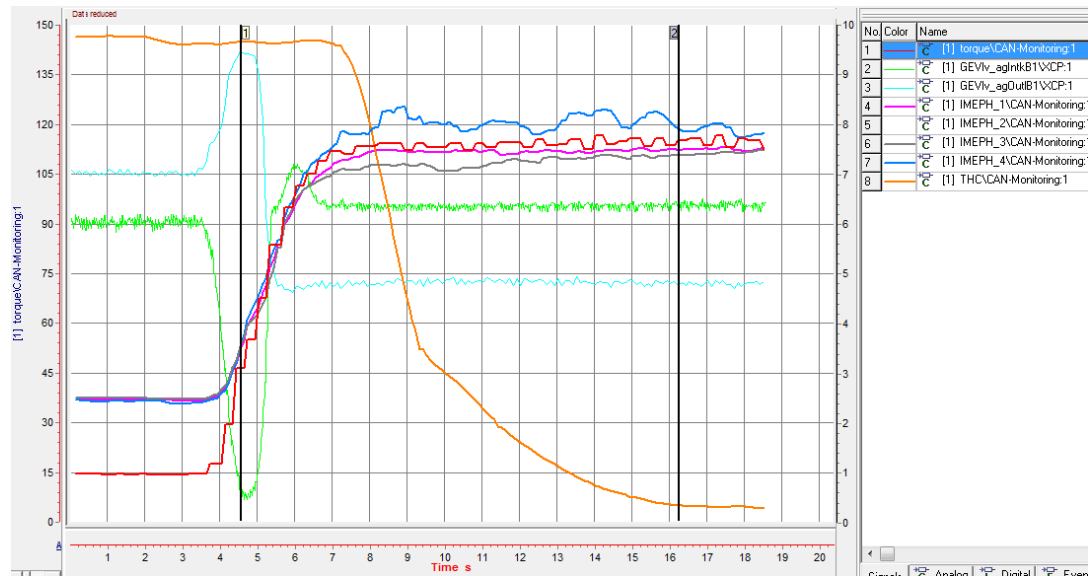


图14 VVT平顺性验证

多次喷射标定

- 目前该工作仍在进行中，单次喷射的工况开始仍采用one-stage（单层级模型），这样PN建模会造成有负值出现，模型无效。
- 改善方法：1.继续增加采样点；2.采用point to point（双层模型）

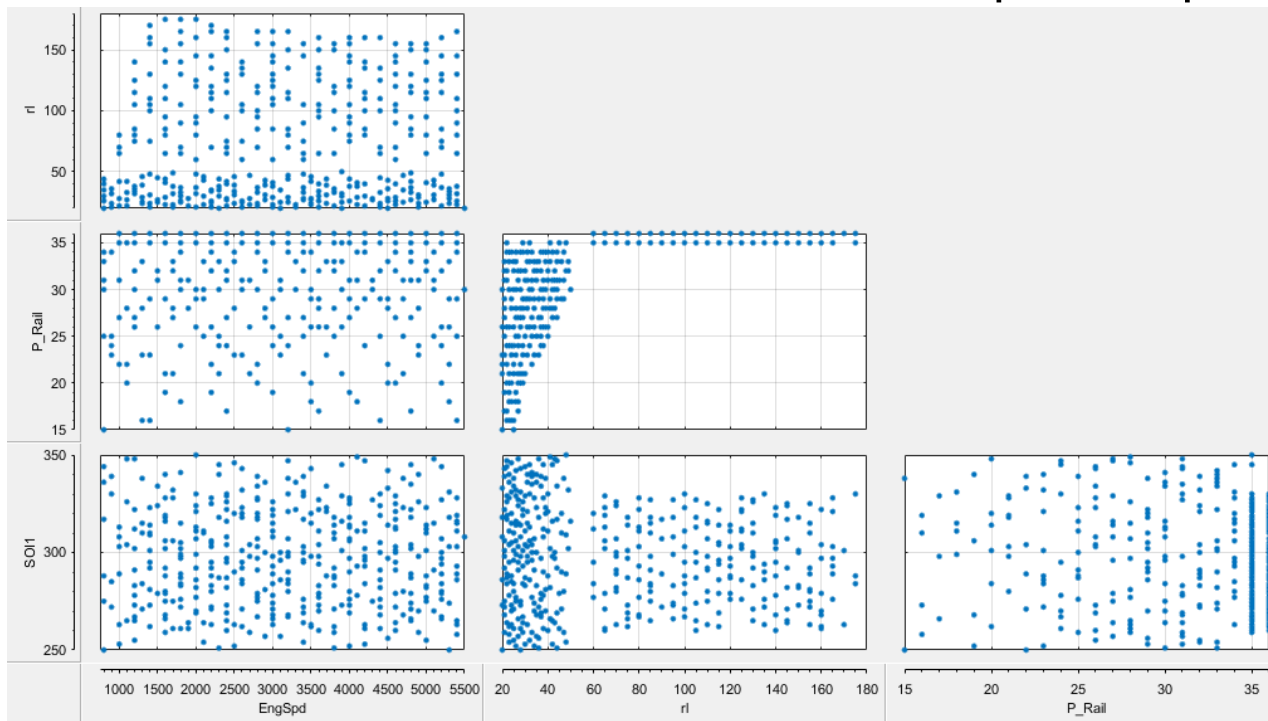


图15 一次喷射*轨压DOE

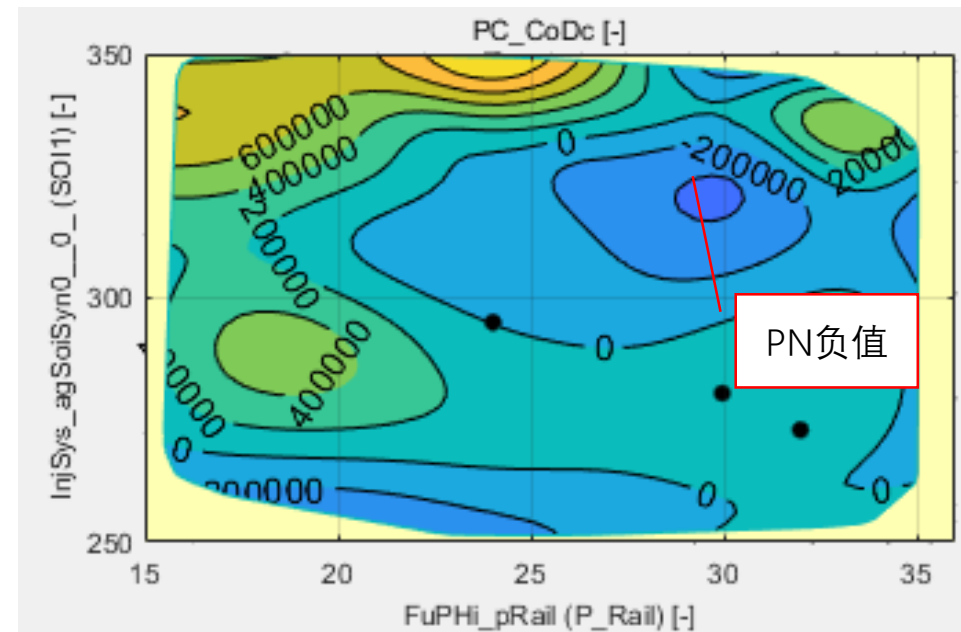


图16 建模结果

总结：

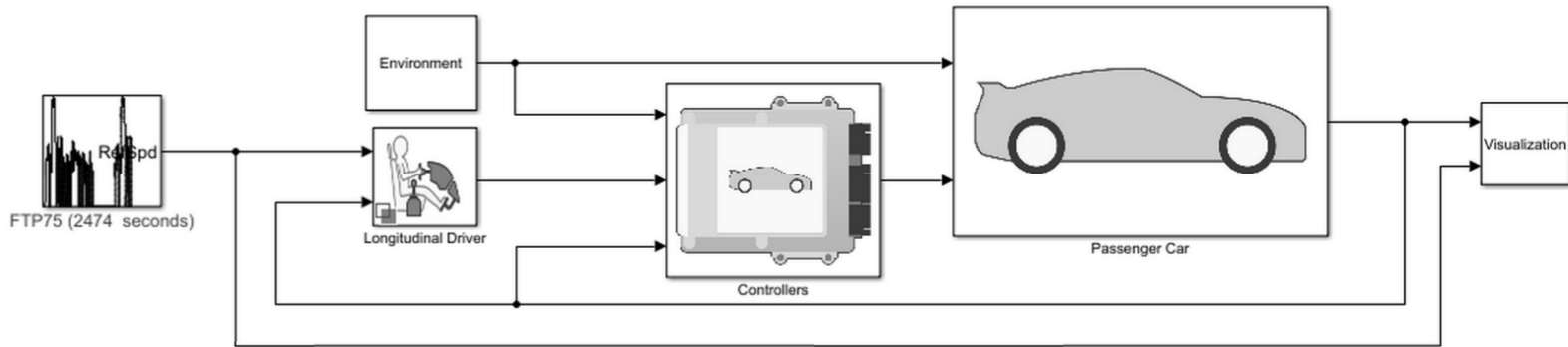
东风针对国六机型应用基于模型的标定方法，可以有效地解决多维度优化性能的问题，对发动机标定工作中占比较高的VVT优化，基于同一数据可计算充气模型标定，在满足精度的情况下可以大幅节约试验周期及资源。

目前多喷优化在进行中，由于喷油-PN的结果具有突变性，采用point to point模型的看来是必要的，但这样会使样本数大幅增加，收益尚待确认。

本项目中积累了若干建模经验，如在建立IMEP循环变动率模型时，其在小负荷区域VVToverlap变化过程中容易突变，样本点少将导致预估不准，因此在该区域必须增加样本数；H-RBF函数虽然会在试验点有较高的精度，但是容易出现过拟合，Gaussian模型相比PRESS RMSE会较低。

下一步工作展望

- 发动机数值模型的建立：
 - 用于后期研究总结性能参数影响趋势及潜力挖掘；
 - 相近机型的预标定；
- 整车标定优化：
 - 排放优化，催化器起燃；
 - 驾驶性优化
 - 后处理：GPF标定（瞬态标定）
- 混合动力模式切换优化标定（结合Powertrain Blockset工具箱）



混动整车模型

下一步工作展望

- 发动机开发全流程来看，基于模型标定可与其他部门展开的工作：
 - 系统仿真组：结合Powertrain Blockset进行整车动力性经济性仿真；
 - 自主ECU软件开发组：软件测试评估；直接从MBC生成实时发动机模型
 - 发动机设计组：GT-Power联合仿真，性能开发和预标定；

