

# 基于汽油机燃烧室参数化的自动 DOE 优化仿真流程

## Automatic DOE Optimization Simulation Process for Gasoline Engine

### Combustion Chamber Parameterization

张丰 张昌明

Zhang Feng, Zhang Changming

(重庆宗申发动机制造有限公司)

(Chongqing Zongshen Engine Manufacturing Co., Ltd.)

**摘要:**Converge 在 CFD 软件中以自动化切割网格而闻名，其计算所需的面网格格式简单明了，非常适合参数化网格脚本的编写。因 Converge 还在高速发展阶段，其 GUI (Converge\_Studio) 还没有参数化方法，各后处理软件也无应对 Converge 的直接接口。本文通过编写“自动参数化脚本接口”，自动生成 Converge 求解所需文件（主要是.dat 网格文件），并建立基于 modeFrontier 的一般 DOE（或者优化）流程。

**关键词:**Converge、modeFRONTIER、自动网格接口、DOE

**Abstract:** Converge is well-known for automatically cutting grids in CFD software. The format of surface mesh required for calculation is simple and clear, which is very suitable for compiling parameterized grid scripts. As Converge is still in a high-speed development stage, the parameterization method for GUI (Converge\_Studio) is not available now, and no post-processing software has a direct interface with Converge. In this paper, by compiling an “automatic parameterization script interface”, the files (mainly a .dat grid file) required for solution by Converge are automatically generated, and a general DOE (or optimization) process based on modeFrontier is established.

**Key words:** Converge, modeFRONTIER, automatic grid interface, DOE

## 1. 课题背景

### 1.1 始因

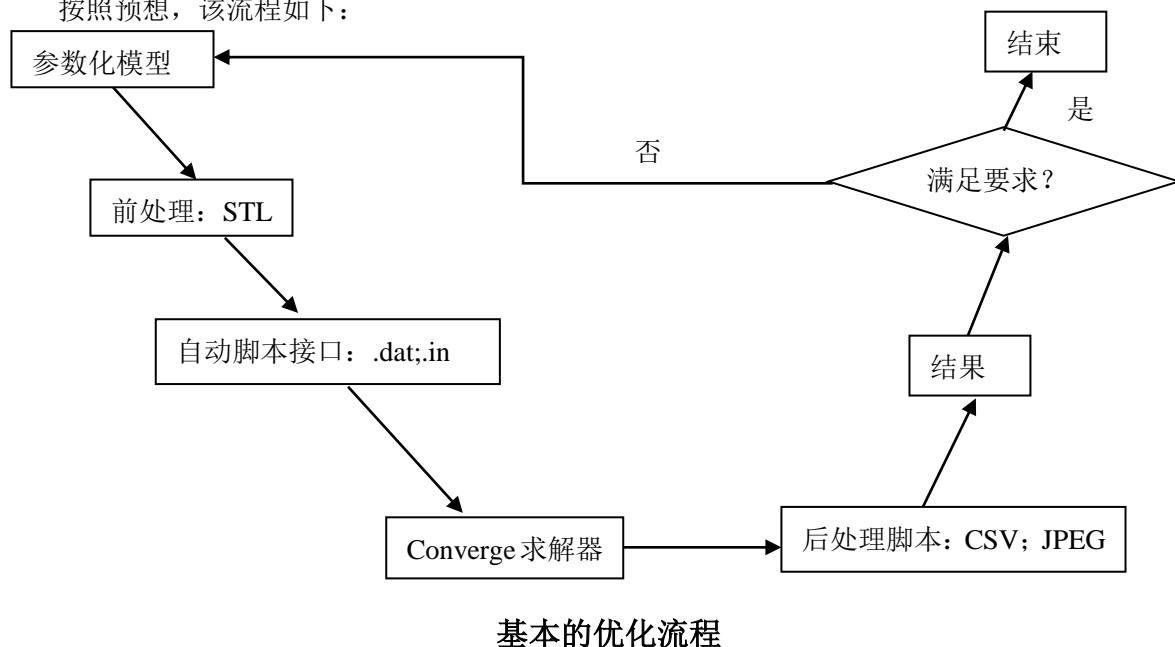
该课题始于宗申某 250 双缸水冷发动机的改型，因原发动机的压缩比、进排气道和燃烧室以及活塞的设计不合理，致使该发动机性能指标不符合要求。其中进排气道、燃烧室通过重新设计达到要求。但压缩比和活塞设计很难达到要求，主要原因是原机的压缩比非常小 8.6，要求改型后达到 11 左右，在这种前提条件之下，设计较为合理的活塞顶部形状（平顶或者凹顶）成为困难。为达到预定压缩比，退一步设计凸顶活塞，同时在凸顶之上设计凹坑，以提高发动机的燃烧状况。为确定活塞顶部的形状尺寸，期望建立参数驱动的自动化 DOE 或者优化流程。

在建立自动化流程的过程中发现 Converge 建立 DOE 或优化流程有诸多不便，主要原因在于各有限元前处理软件都没有 Converge 的直接接口，且 Converge Studio 本身缺少参数化驱动的功能。

所以笔者根据 ANSA 的 STL 网格文件格式和 Converge 的 dat 网格文件格式的特点编写了适用与该两软件的脚本接口，同时根据脚本框架，增加参数化方法，比如自动调整压缩比等。

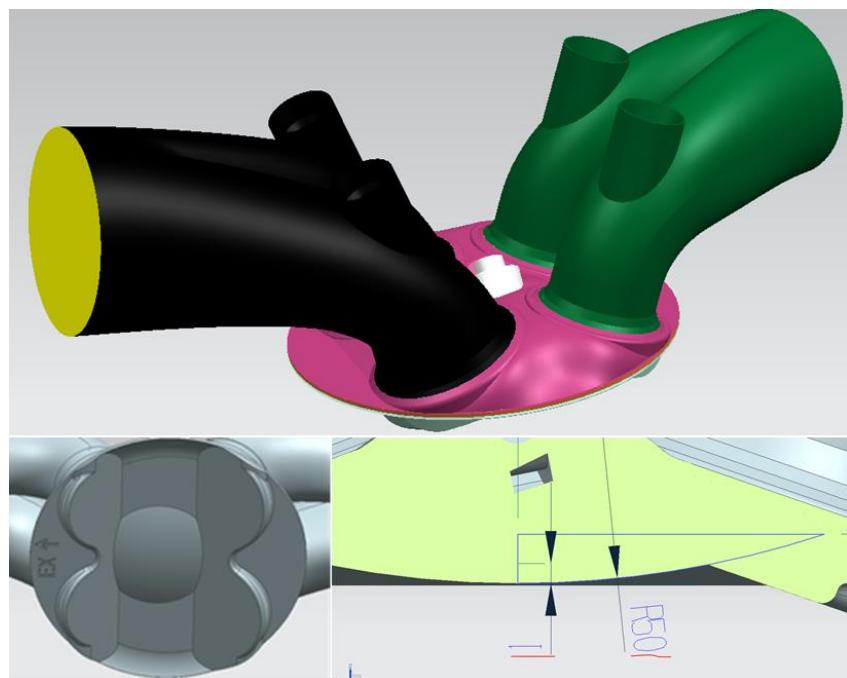
## 1.2 流程图

按照预想，该流程如下：



## 2. 自动优化流程的建立

### 2.1 模型参数化



将需要变更的形状在 UGNX 中实现参数化，在此例中参数为活塞顶部凹坑的半径和深度。同时在 UG 中将面分区（对应 Converge 中的 boundary），分区的方式采用装配方式，后面 ANSA 可以提取装配件的名字作为 SET 集合的名字，该名字也是最后 Converge Boundary 的名字。

活塞顶部凹坑参数表

序号	名称	基本值	取值范围
1	半径	40	20 ~ 60
2	深度	0.8	0.1 ~ 1.5

## 2.2 STL 文件和面区域划分

将参数化的 CAD 文件通过 ANSA 的脚本文件完成表面离散，并导出 stl 格式文件。

其中该 ANSA 脚本有三种功能，一是自动根据 UG 的各个面区域生成 set 集合，二是根据 ANSA 的 Batch Mesh 功能进行表面离散，三是导出带有 set 集合信息的 STL (ASCII 格式) 文件。

由此，该 STL 文件包含了 Converge 计算网格文件 (surface.dat) 中的所有必要信息，只是两者的格式不同而已。

```

1 solid Piston-TC250R
2 . . color ..... 0.57647 0.97647 0.011765
3 . . facet normal -0.102860554 -0.261471006 0.959714864
4 . . outer loop
5 . . . vertex -0.0181187279 0.0213453539 -0.00175868767
6 . . . vertex -0.0172295986 0.0216220224 -0.00158801496
7 . . . vertex -0.0177336495 0.0216514046 -0.00163403318
8 . . endloop
9 . endfacet

```

## 2.3 自动化脚本接口

### 2.3.1 Converge 计算网格文件 (.dat) 格式 (无 Seal)

Table 3.1: Surface geometry file format.

Row Number	Information Provided	Description
Row 1	<i>numverts_tot</i> <i>numverts</i> <i>numtriangles</i>	<i>numverts_tot</i> : maximum vertex identification number, <i>numverts</i> : number of vertices defined below, <i>numtriangles</i> : number of surface triangles.
Row 2 to Row (1+ <i>numverts</i> )	<i>vert_id vx vy vz</i>	Unique vertex identification number followed by the x, y, and z coordinates of the vertex.
Row (2+ <i>numverts</i> ) to Row (1+ <i>numverts</i> + <i>numtriangles</i> )	<i>vert1 vert2 vert3 bound_id</i>	Identifiers of the vertices making up the corners of the surface triangle and the boundary ID corresponding to the surface triangle.

Annotations for the data file:

- 最大节点数, 节点数和网格面数: Points to the first row (1-12).
- 节点ID和节点坐标: Points to the second column of the vertex data (e.g., 1 -100 50 50).
- 面网格形成的顺序: Points to the third column of the vertex data (e.g., 1 2 3 3).
- Boundary 的ID号: Points to the 'bound\_id' column in the last row (2 7 5 1).

```

1 8·8·12·
1 -100·50·50
2 -100·50·0
3 -100·-50·0
4 -100·-50·50
5 100·-50·0
6 100·-50·50
7 100·50·0
8 100·50·50
9
10 1·2·3·3
11 3·4·1·3
12 4·3·5·2
13 5·6·4·2
14 6·5·7·2
15 7·8·6·2
16 8·7·2·3
17 2·1·8·3
18 8·1·4·3
19 4·6·8·3
20 5·3·2·1
21 2·7·5·1

```

该图是 Converge 计算表面的格式和数据含义，值得指出的是 Converge 网格中并不带名字信息，所有信息都是以 ID 为索引，Converge 求解所需的其他文件 (.in;.out) 信息也是以 ID 为索引。所以 Converge Studio 中的面区域名字只是一个“标记”，储存在“Boundary.in”中，便于查看。

### 2.3.2 脚本编写

理解 STL 和 dat 格式后便可以利用编程语言来编写“格式转化脚本”，该脚本采用笔者熟悉的某动态编程语言编写。

同时该自动化脚本可以增加“参数化功能”，比如自动调整压缩比，替换气门运动曲线等，理论上可以将所有的 Converge 计算所需的“.in”文件参数化，输出整个 Converge 计算所需文件。

## 3. Converge 求解与后处理脚本

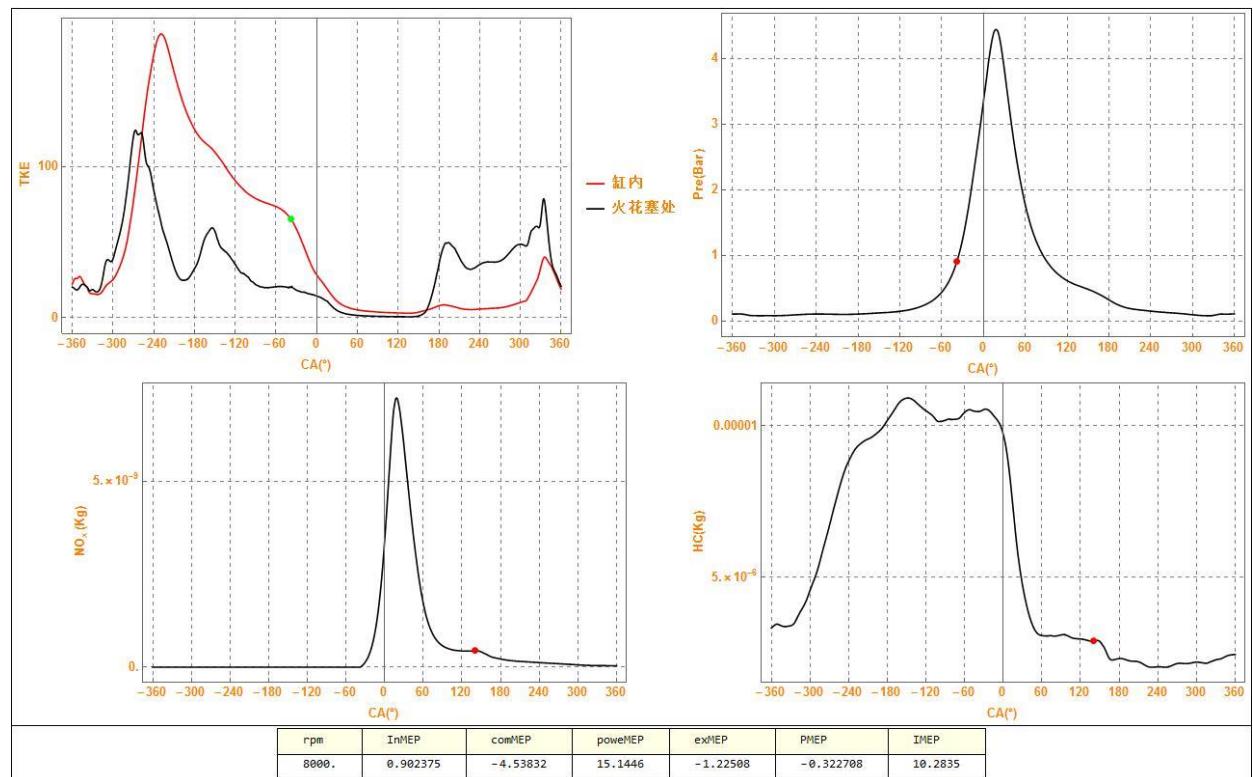
### 3.1 Converge 求解

Converge 提交计算后生成“.out”文件，记录二维结果信息和三维结果信息。

### 3.2 后处理脚本

二维的“.out”文件是一些遵循特定格式的文本文件，使后处理中数据提取、计算、画图成为可能，可以根据具体需求来编写本，自动输出大量重复性的后处理数据。

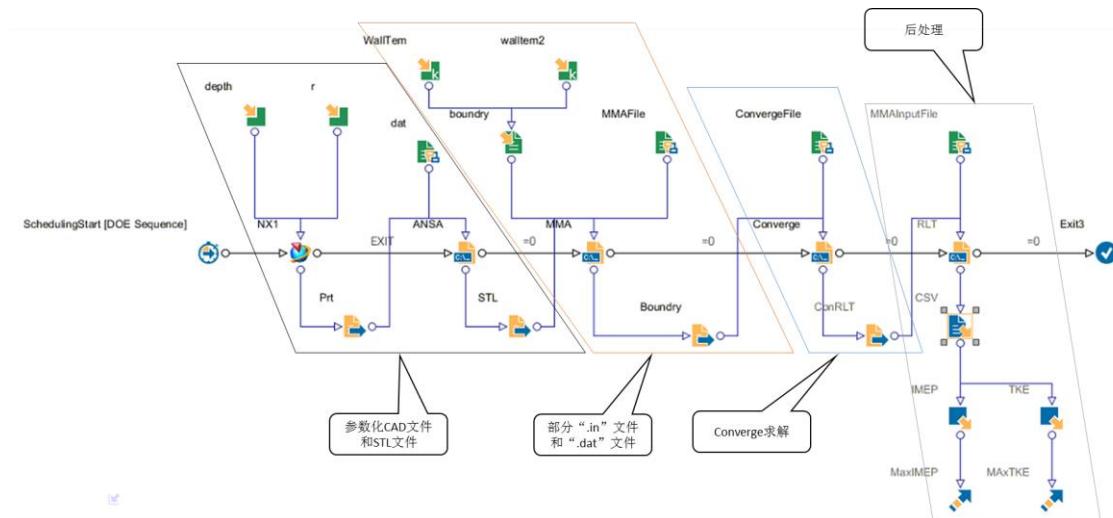
在本例中主要输出了缸内 TKE（点火角标记），火花塞处的 TKE（点火角标记），缸压（点火角标记），氮氧（排气门关标记）、碳氢（排气门关标记），以及各个阶段的指示功等数据，然后以图形和表格形式保存，以便在 modeFrontier 计算过程中查看：



## 4. modeFrontier 自动化 DOE 或优化

### 4.1 流程建立

综合以上的内容，在 modeFrontier 中建立自动化流程的模型：



该流程具有一定的通用性，针对不同的发动机和后处理需求，改变输入参数和后处理结果即可。

### 4.2 本例 DOE 结果和分析

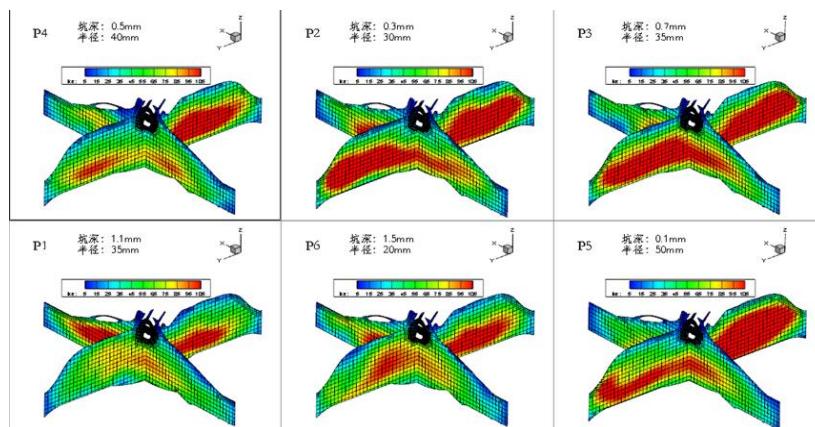
本 DOE 随机计算了 8 组数据，成功 6 组，另外两组因气门碰撞活塞失败。

#### 4.2.1 IMEP 与点火前缸内 TKE 的关系：

MEP 与 TKE

Project	InMEP (bar)	comMEP (bar)	poweMEP (bar)	extMEP (bar)	PMEP (bar)	IMEP (bar)	TKE ( $m^2/s^2$ )	TKEMonit ( $m^2/s^2$ )
P4	0.902666	-4.45839	14.5948	-1.22468	-0.322017	9.81444	58.0517	17.1158
P2	0.902704	-4.40882	14.2216	-1.22335	-0.320645	9.49213	69.5113	18.125
P3	0.903489	-4.47605	14.1345	-1.22354	-0.320049	9.3384	65.4558	21.8206
P1	0.902187	-4.5479	14.12	-1.22527	-0.323079	9.24899	53.7409	20.8755
P6	0.902536	-4.51171	13.9153	-1.22469	-0.322151	9.08146	57.0385	28.7982
P5	0.902647	-4.416	13.5991	-1.22258	-0.319933	8.86312	65.7293	16.3376

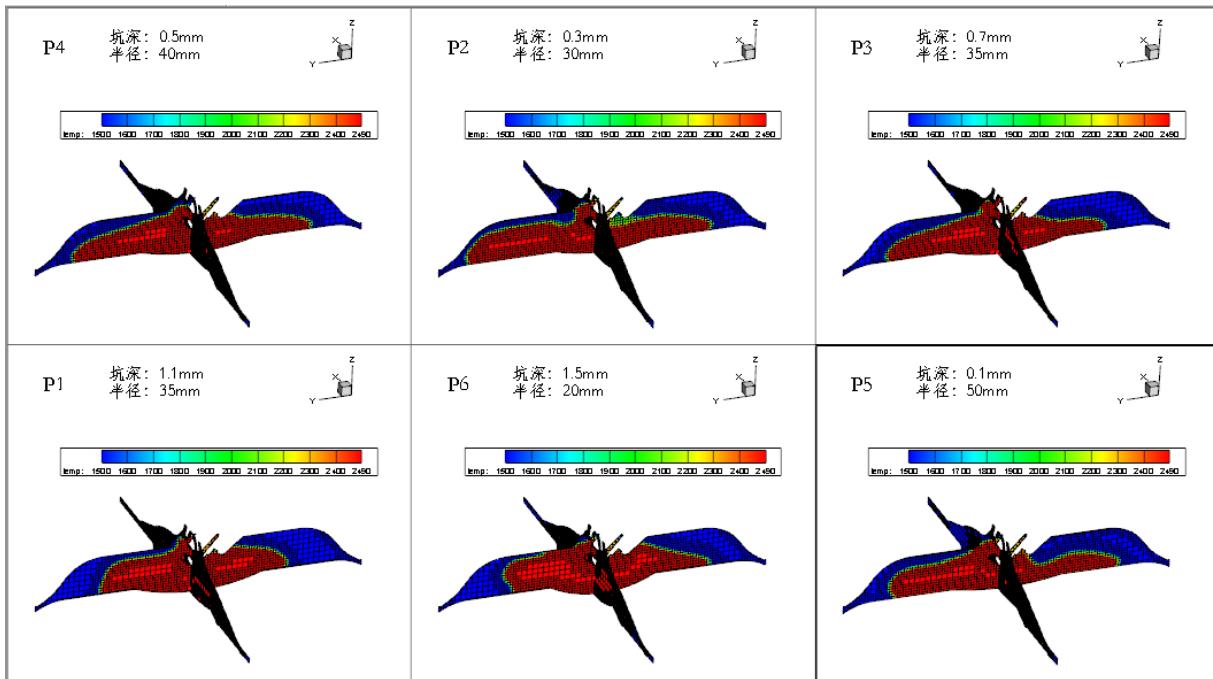
TKE 分布



以上两图为做功情况和 TKE 的二维及三维信息。从结果来看, P4 的 IMEP 最高, 主要是其做功冲程做功较大, 泵气损失和压缩损失基本相当, 因此根据这几组数据研究做功与 TKE 之间的关系较为理想。其中点火前 P4 的缸内 TKE 值处于中上, 火花塞处 TKE 处于中下, 都不是最高或者最低, 说明有效地做功需要较为合适的 TKE 大小和分布。

#### 4.2.2 上止点后 10° 的温度场分布:

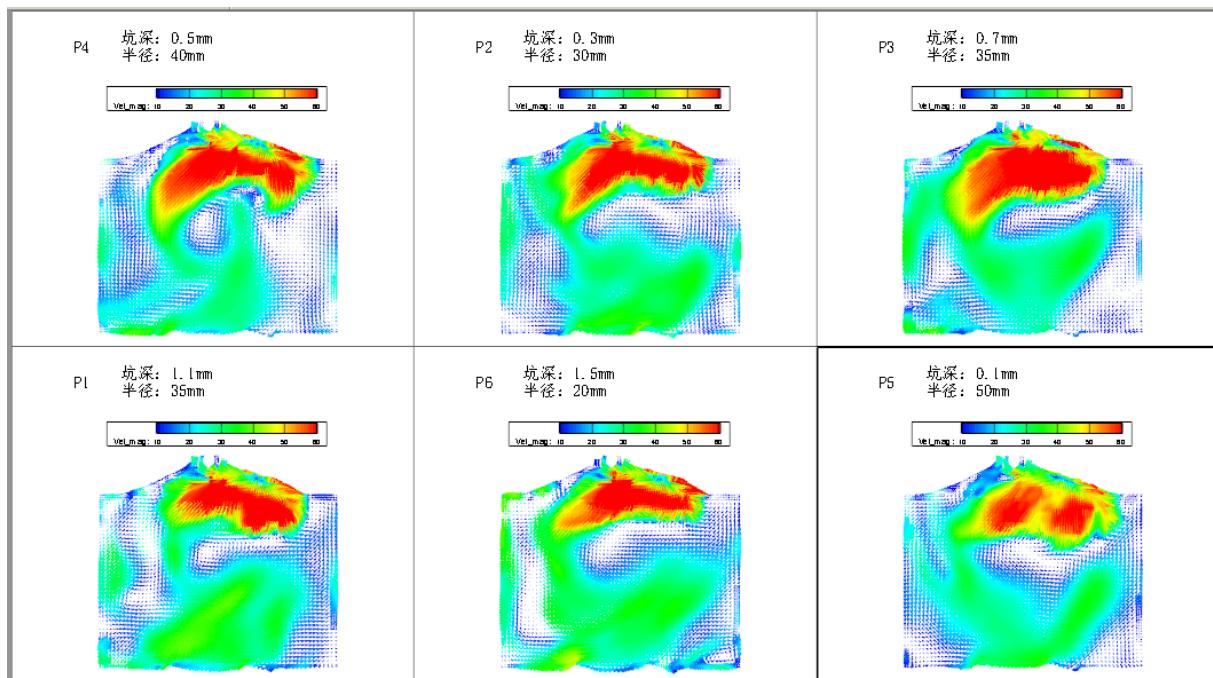
温度场



上图所示为上止点后 10° 的温度场分布, 也是按照 IMEP 从大到小排序, 可以看出做功多的方案在径向上的火焰传播速度更快。

#### 4.2.3 气门关闭后缸内速度场:

速度场



上图是 IVC 的速度场图，同样是按照 IMEP 从大到小排序。因为气道是相同的，在不同的活塞顶部形状下，形成的缸内流场有较大的差别，所以气道设计时需要考虑燃烧室形状。从上面几组数据来看，进气结束后若能在缸内中心形成大的、较为一致的滚流，有利于燃烧，会有更好的做功情况。大的、较为一致的滚流运动，在活塞上行的过程中逐渐被压缩、破碎，转化为具有特定大小、特定分布的湍动能，该部分有效影响初始火焰和火焰的发展。

## 5. 结束语

本文主要介绍了一种实现 modeFrontier 联合 Converge 完成缸内燃烧 DOE 或者优化的方法，提供一种企业自主优化平台搭建的思路。

Converge 简单明了的计算网格和文件适合自主开发脚本文件，未来可以将更多计算变量进行参数化，实现功能更强大和完整的一键式自动优化流程。

## 参考文献

- [1] Converge Science. Inc CONVERGE\_2.4\_Manual
- [2] ESTECO Spa modeFRONTIER User Guide
- [3] BETA CEA Systems ANSA User's Guide