



基于MeshWorks/modeFRONTIER的 冷却系统流量修正及柴油机进气道优化

长城汽车动力研究院
关 昊、伊士旺
2013年11月

前言

案例一：冷却系统流量修正

案例二：柴油机进气道优化

总结



前言

案例一：冷却系统流量修正

案例二：柴油机进气道优化

总结



前言

- 如今，网格变形工具及集成优化平台越来越多地应用于工程设计开发中，本文结合我公司实际工作，基于MeshWorks/modeFRONTIER对某款发动机的冷却系统及进气道进行优化分析，与各位专家进行交流。



前言

案例一：冷却系统流量修正

案例二：柴油机进气道优化

总结



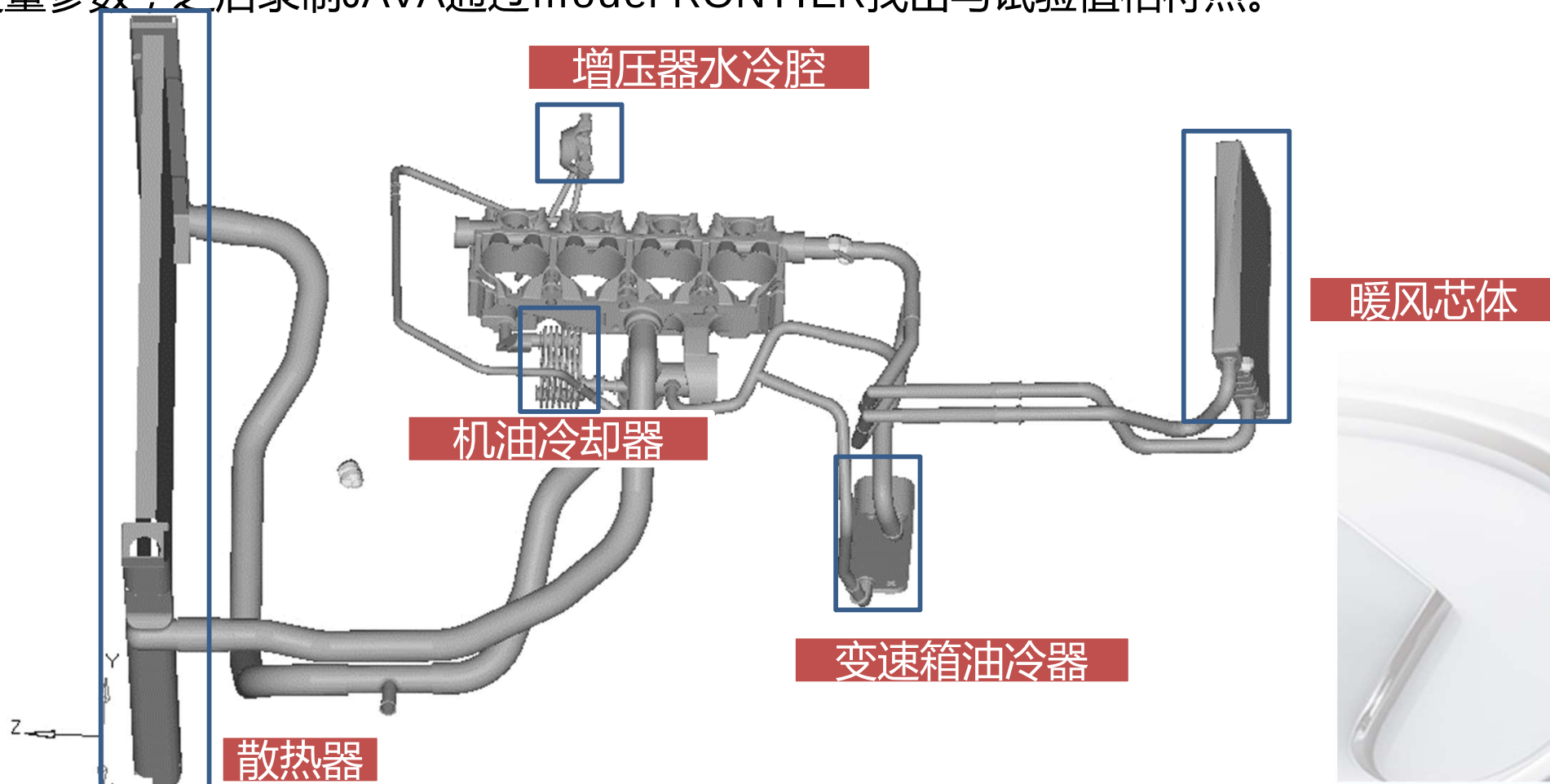
案例简介

- 通过发动机台架试验模拟整车实际运行中各个部件的流量，对整体的散热进行评估，是否满足设计要求，并达到最佳性能，本次试验在发动机测试试验台中连接整车散热器、水箱、暖风、油冷器，分别在各个部件的进出水口进行流量温度压力的监控，但是由于流量传感器的精度及电磁干扰问题，导致在低转速小流量及部分工况中流量读取出现误差，本文通过利用Meshworks及modeFRONTIER进行三维冷却系统仿真分析，对试验数据进行修正，通过计算结果与试验数据进行对比分析，计算结果更够很好地验证试验中出现的问题，精度达到要求，并为后期的工作提供理论依据。



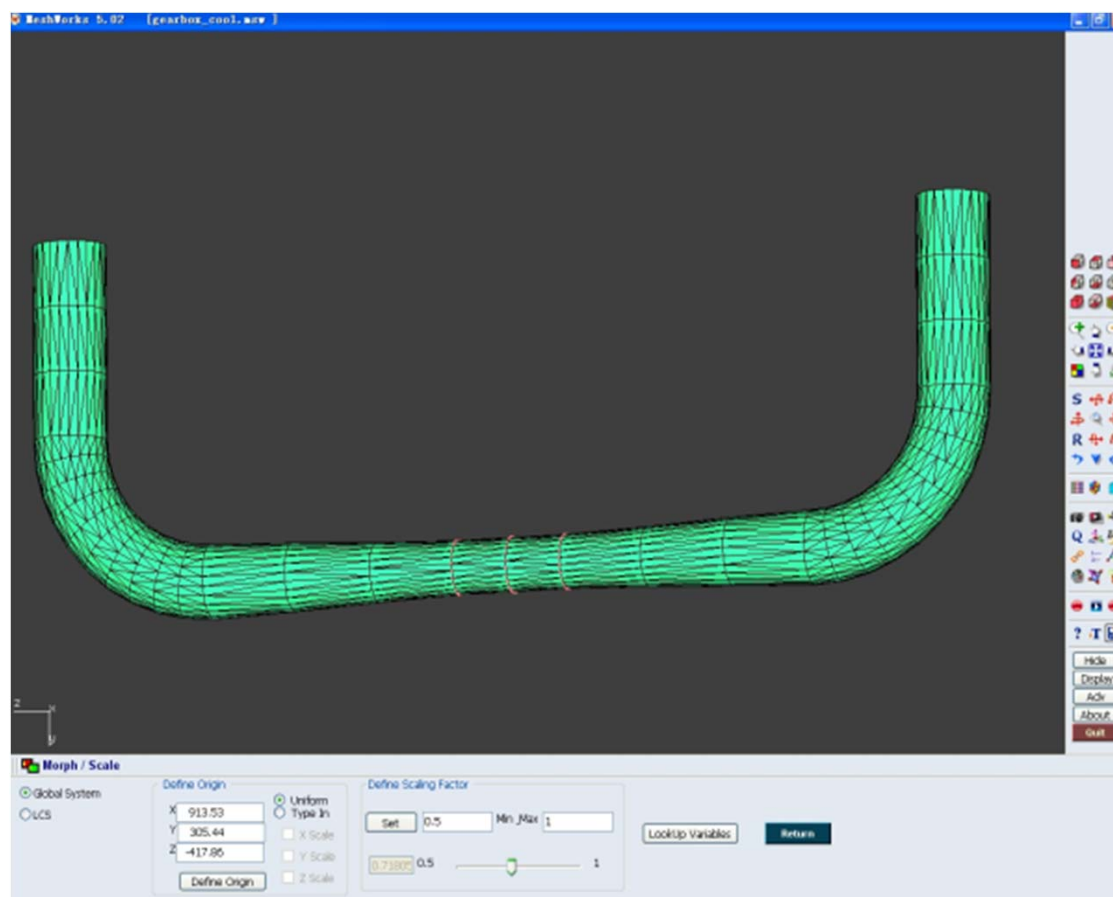
模型标定

- 为了提高计算速度及计算精度，将各复杂件进行简化处理，等效为相同流通性能的渐缩管，这样可以大大降低网格数量降低计算时间，并且可以确保计算结果的准确性。
- 通过Meshworks及modeFRONTIER对复杂模型进行简化处理。首先利用Meshworks定义变量参数，之后录制JAVA通过modeFRONTIER找出与试验值相符点。

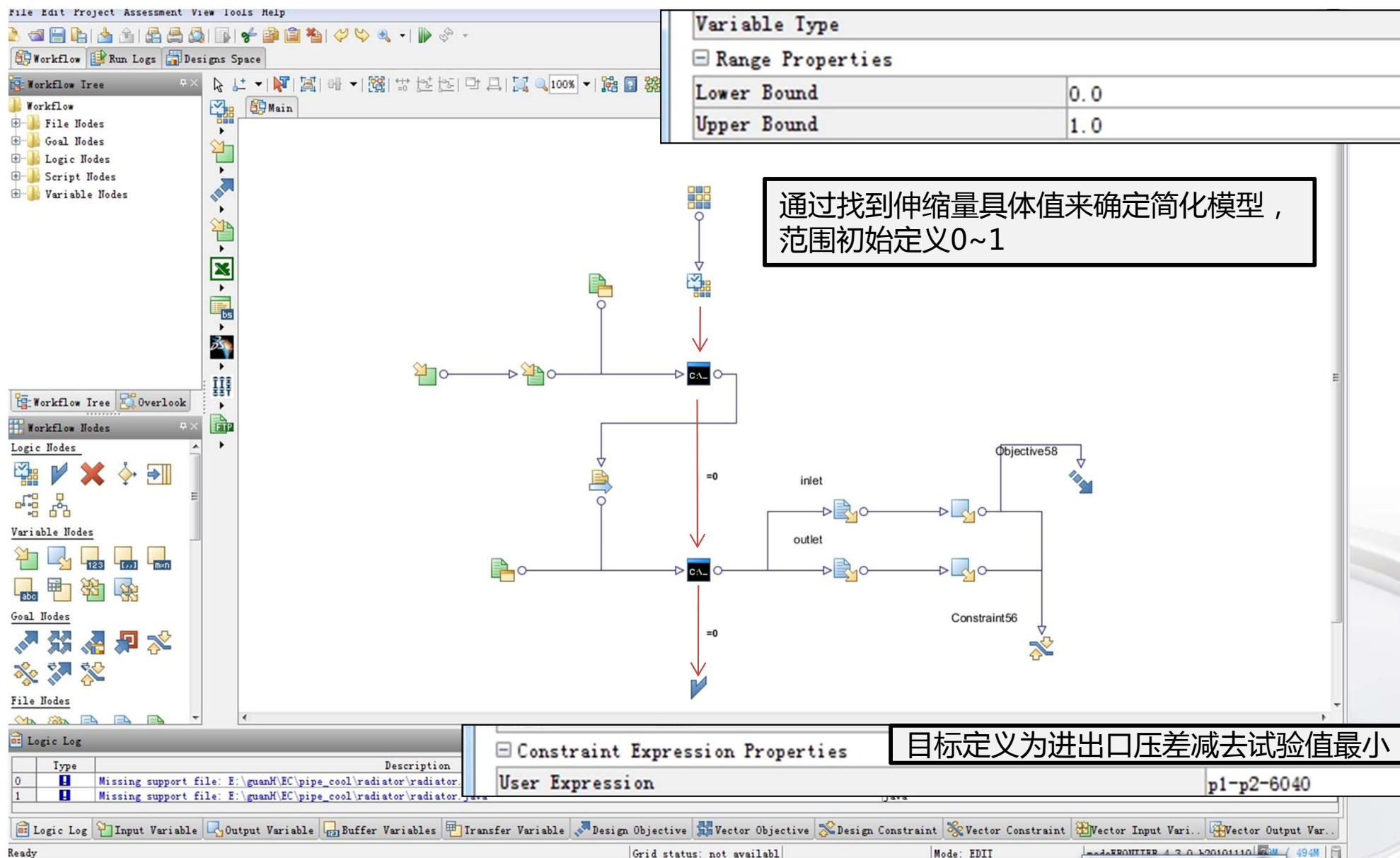


Meshworks

- 如图所示，将所有冷却系统部件简化为弯管或直管，将中间的多组网格设置为控制点，这样中间的直管减缩时过渡自然，计算便于收敛，两端设置为缓冲点，其它设定为固定点，控制点中心为原点，通过定义缩放比例因子来对网格进行控制。



modeFRONTIER



The image displays the modeFRONTIER software interface. The main workspace shows a workflow diagram with nodes for 'inlet', 'outlet', 'Constraint56', and 'Objective58'. The 'Variable Type' panel is open, showing 'Range Properties' with 'Lower Bound' set to 0.0 and 'Upper Bound' set to 1.0. The 'Constraint Expression Properties' panel is also open, showing the 'User Expression' as 'p1-p2-6040'. A text box in the center explains the purpose of the range properties.

通过找到伸缩量具体值来确定简化模型，范围初始定义0~1

目标定义为进出口压差减去试验值最小

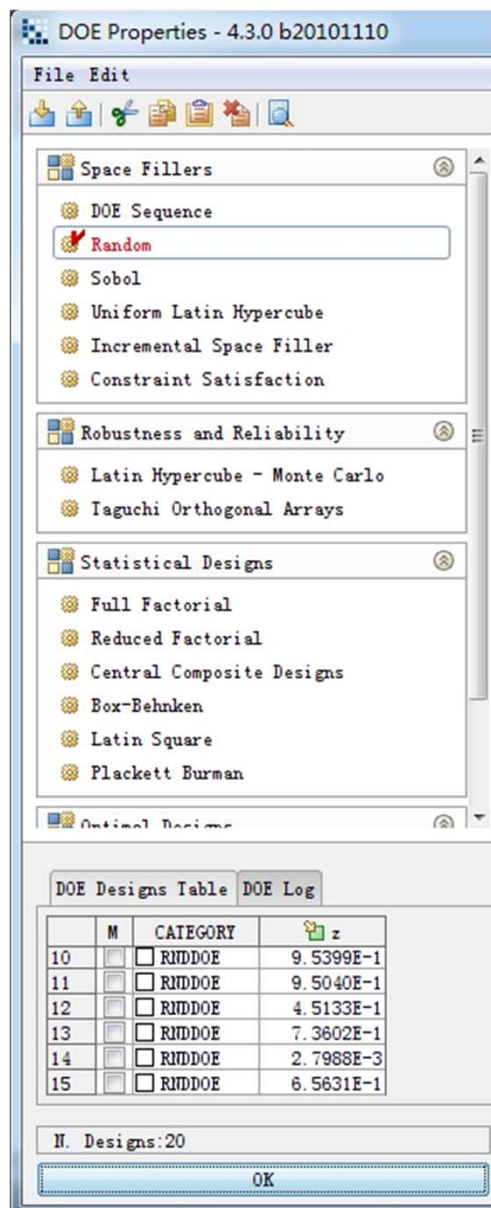
Variable Type

Range Properties	
Lower Bound	0.0
Upper Bound	1.0

Constraint Expression Properties

User Expression	
p1-p2-6040	

modeFRONTIER



DOE算法选择的是Random Sequence（一致随机序列法），设计数量为20。

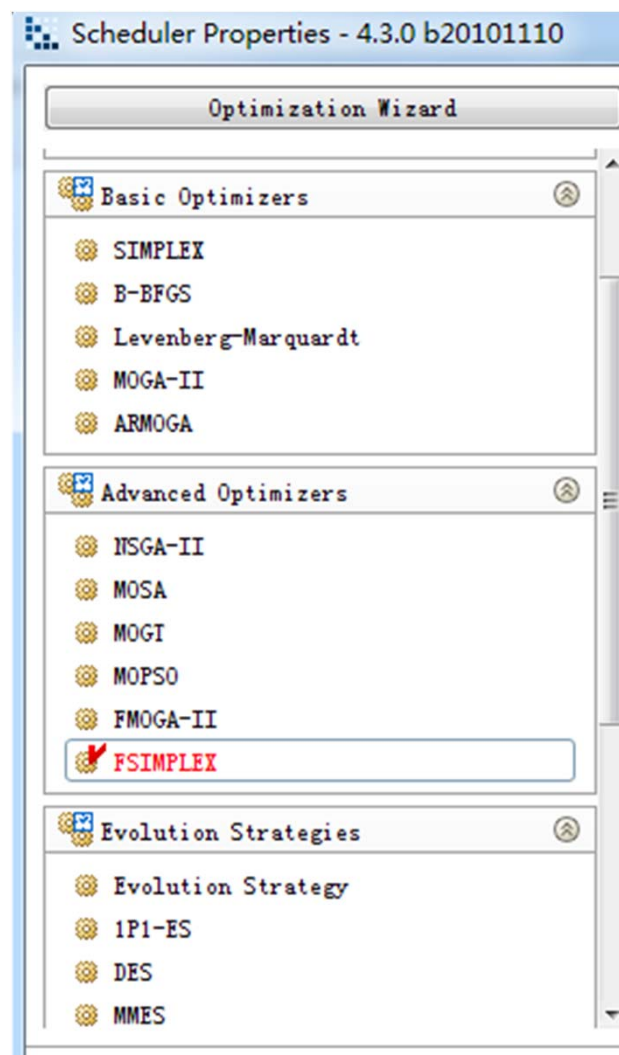
DOE Designs Table		DOE Log	
	M	CATEGORY	z
0	☐	RNDDOE	1.9374E-1
1	☐	RNDDOE	7.7541E-2
2	☐	RNDDOE	6.1557E-1
3	☐	RNDDOE	7.2163E-1
4	☐	RNDDOE	7.0259E-2
5	☐	RNDDOE	7.0199E-1
6	☐	RNDDOE	7.2599E-1
7	☐	RNDDOE	9.3893E-1
8	☐	RNDDOE	4.9479E-1
9	☐	RNDDOE	9.9757E-2
10	☐	RNDDOE	9.5399E-1
11	☐	RNDDOE	9.5040E-1
12	☐	RNDDOE	4.5133E-1
13	☐	RNDDOE	7.3602E-1
14	☐	RNDDOE	2.7988E-3
15	☐	RNDDOE	6.5631E-1
16	☐	RNDDOE	4.5653E-1
17	☐	RNDDOE	7.4175E-1
18	☐	RNDDOE	6.4699E-1
19	☐	RNDDOE	3.9770E-1

Random Sequence（一致随机序列法）：

- 类似于抛硬币试验。
- 能在设计变量的范围内均匀采样。
- 在输入变量存在约束的时候能够滤掉不满足输入约束

的解。

modeFRONTIER

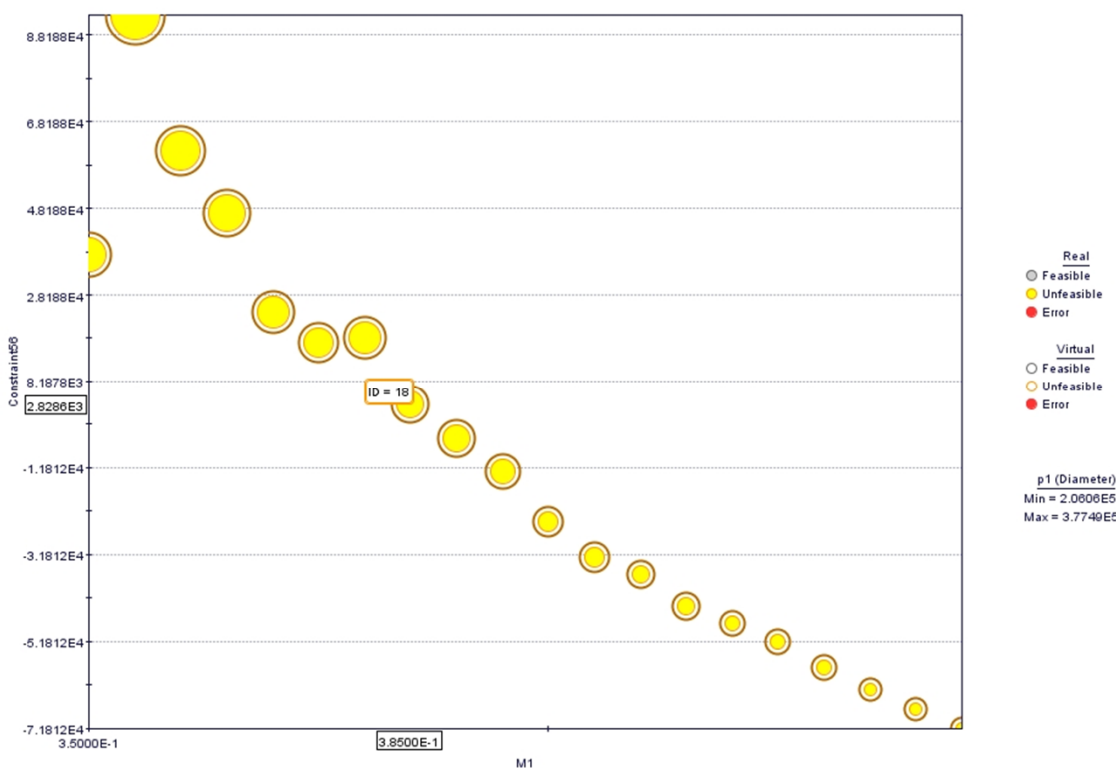
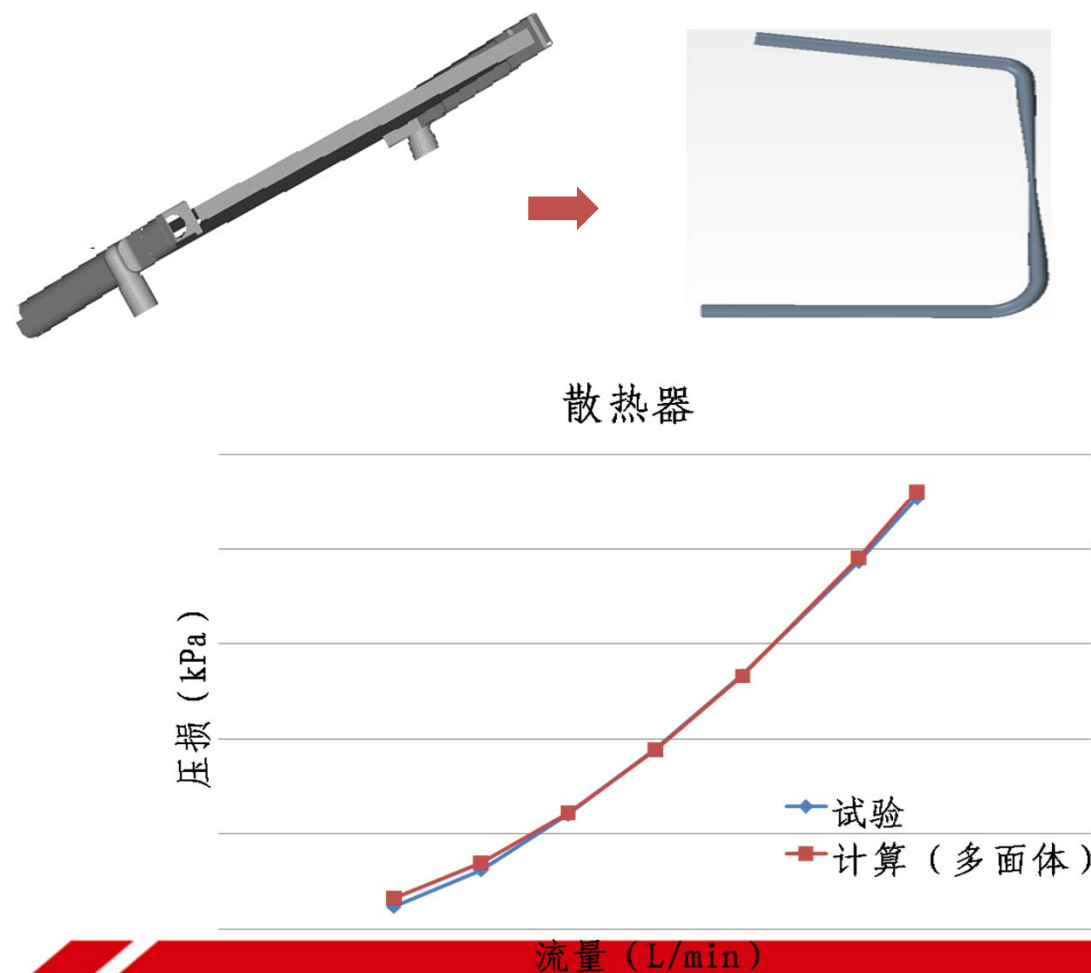


优化算法采用的是F-SIMPLEX，采用了Kring响应面法的快速SIMPLEX算法与SIMPLEX法相比，计算速度更快，在全局搜索中收敛速度更快。与Simplex最大不同在于其采用Kring响应法来加快计算速度，一般情况下会快到2~3倍。

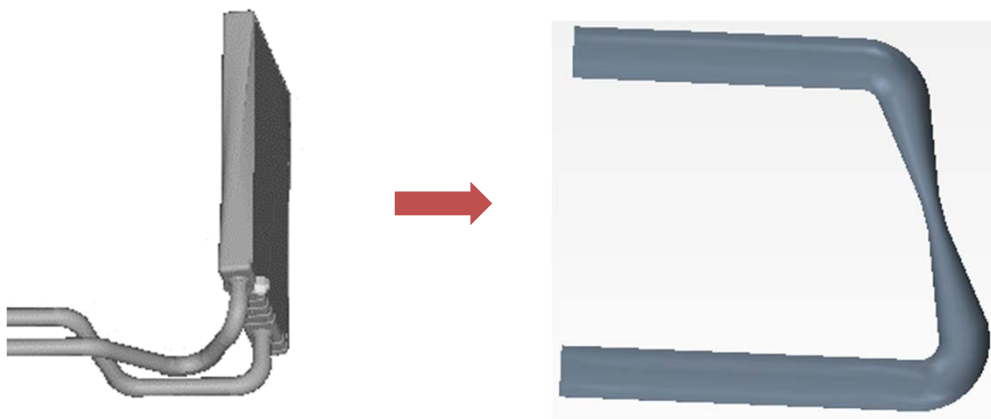


简化模型

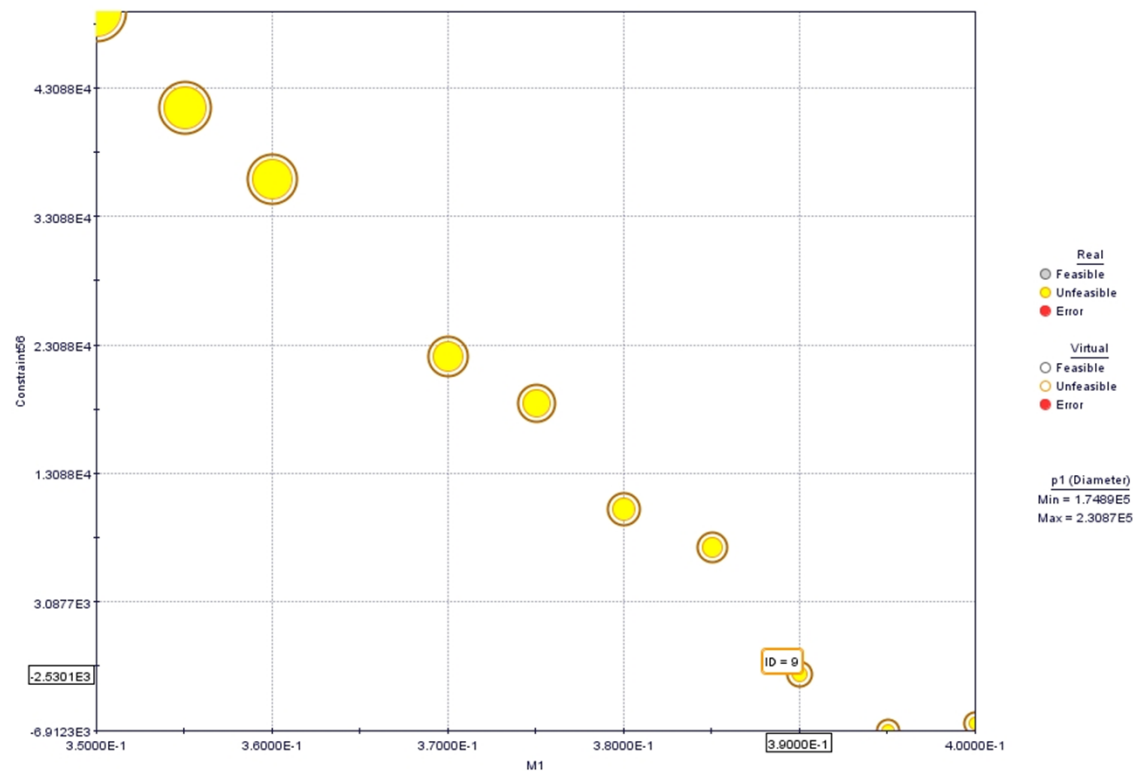
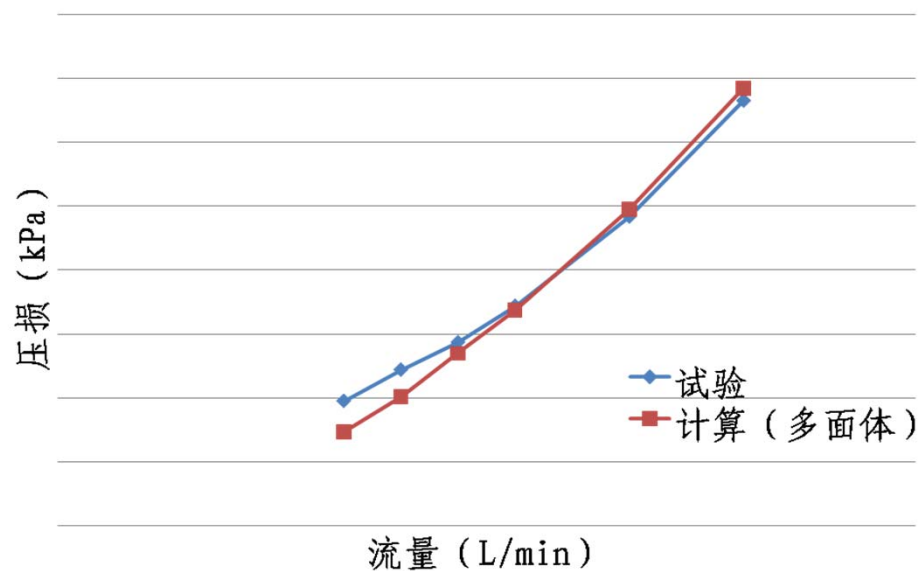
- 将确定的模型带入三维CFD软件进行计算与试验值对比，简化后的模型可以替代实际的零部件。
- 为了确保计算精度，在进行各个部件的简化时，网格大小及边界层层数厚度都与后期系统计算保持一致，采用多面体网格。



简化模型



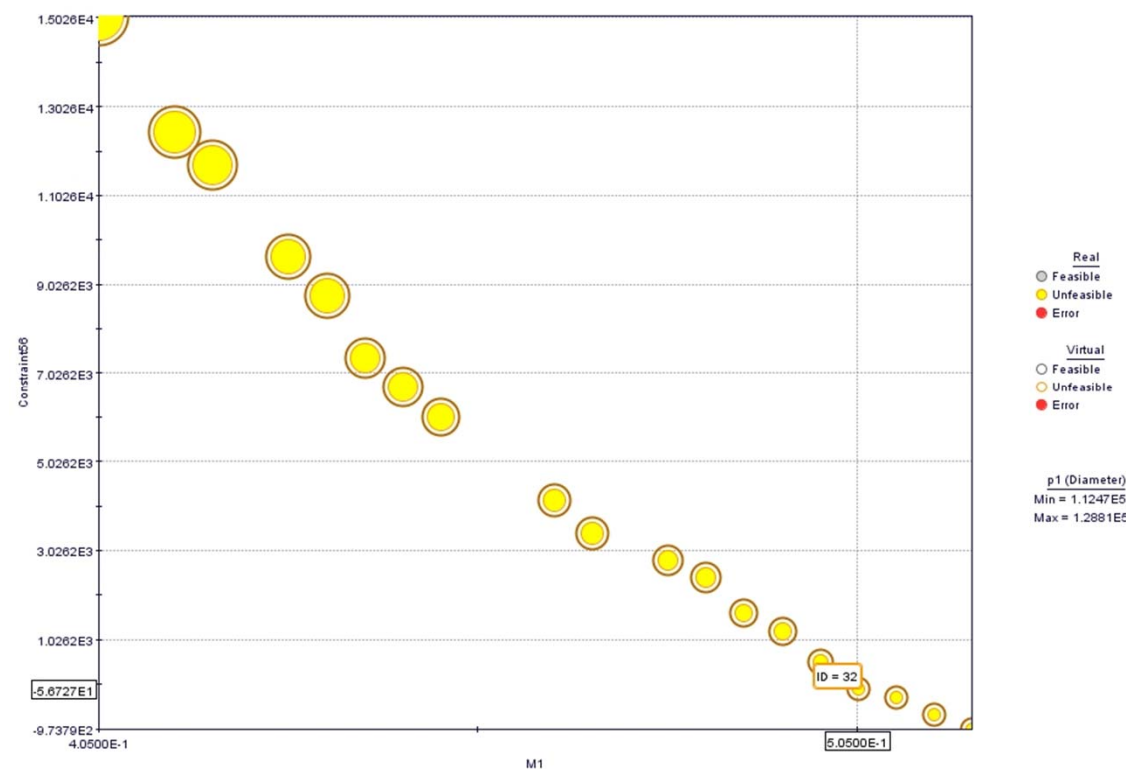
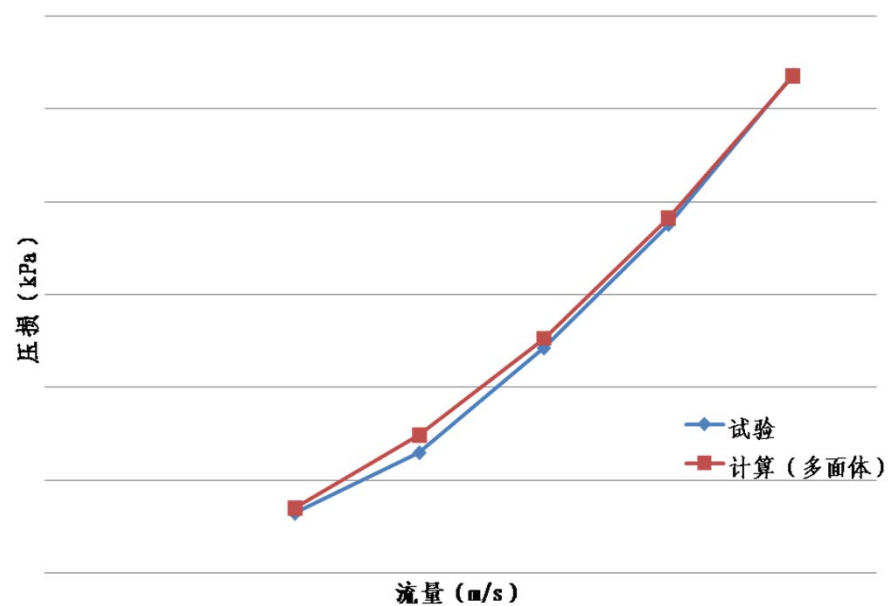
暖风



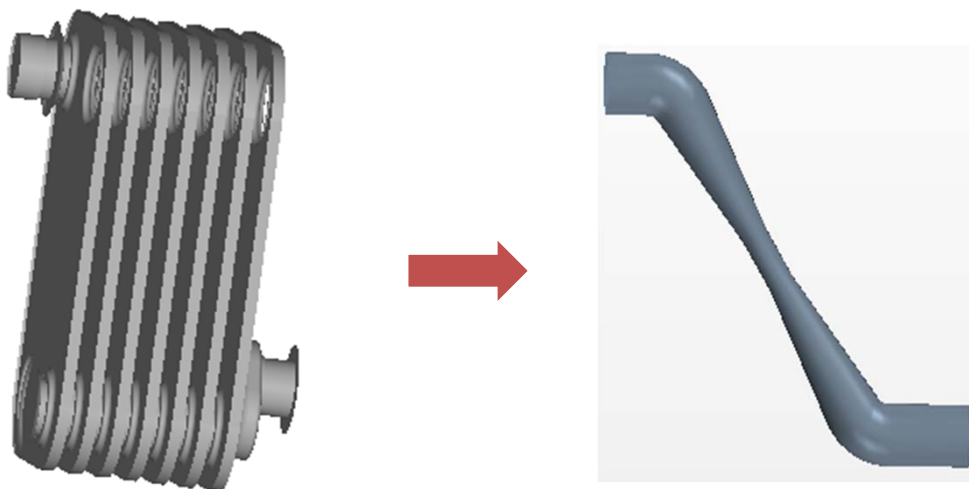
简化模型



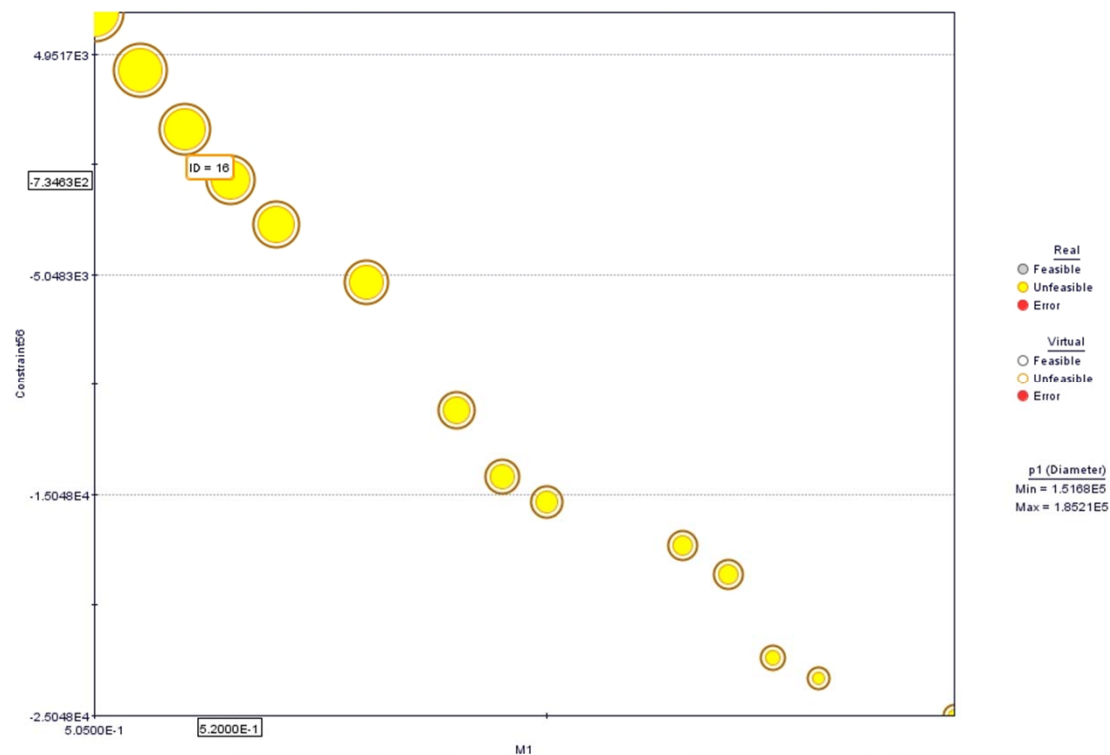
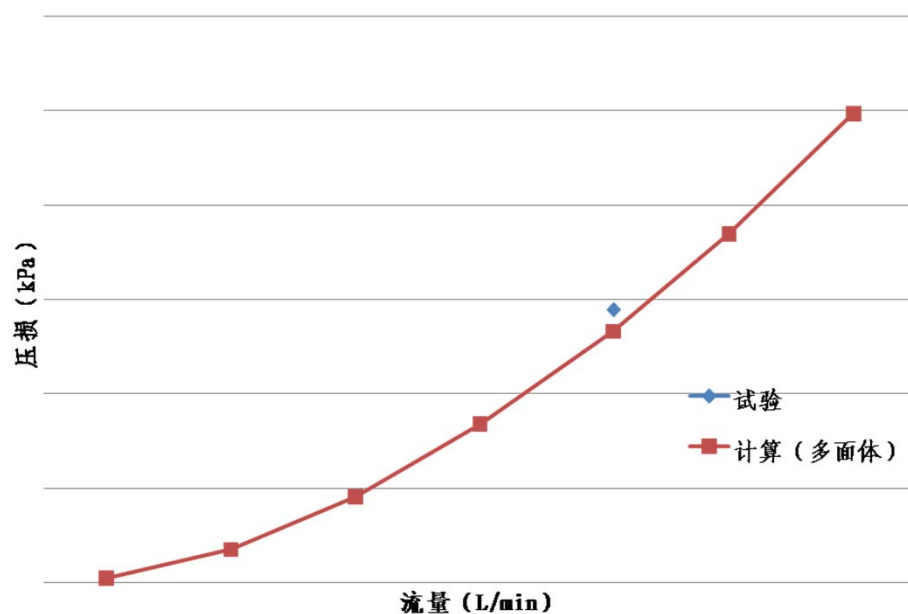
变速箱油冷器



简化模型

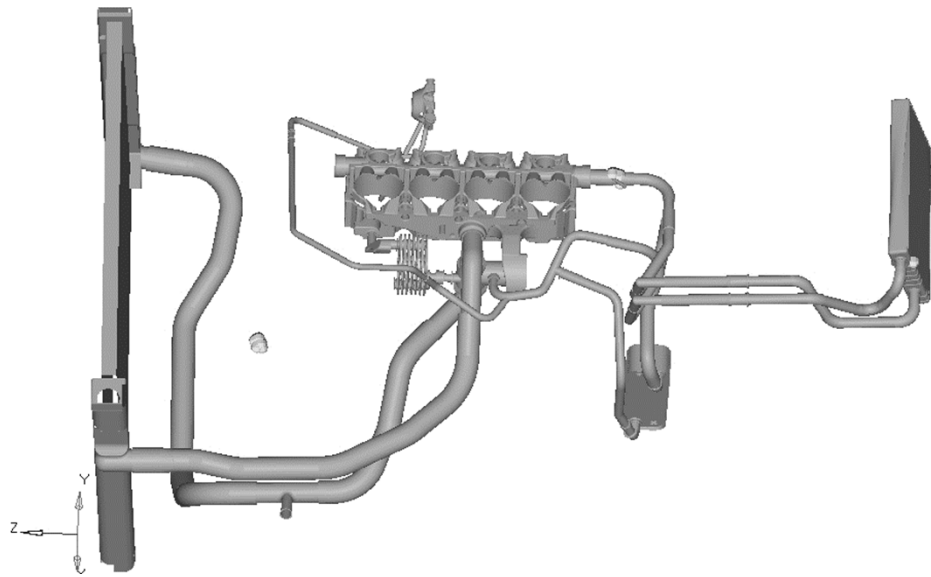


机油冷却器

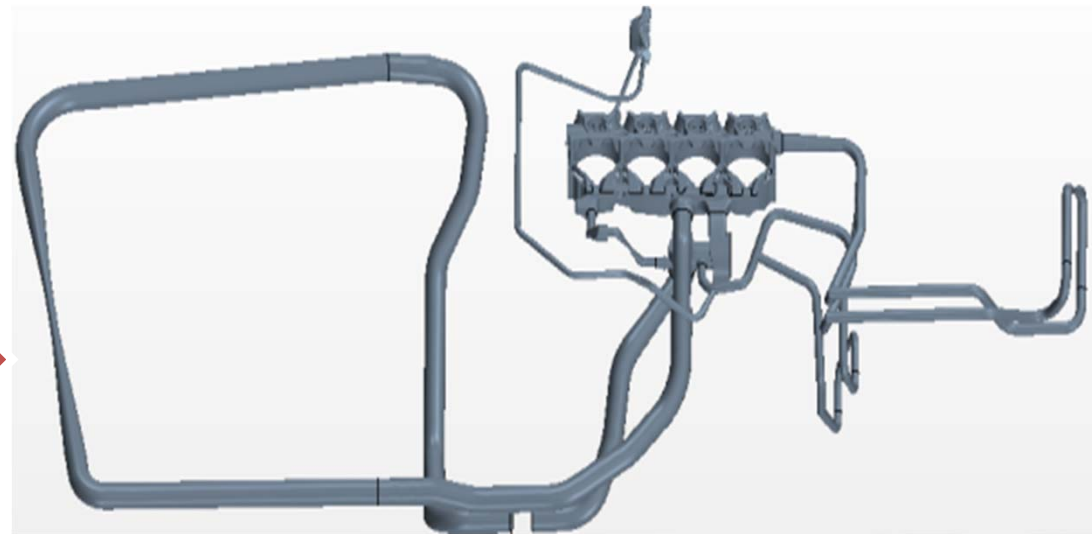


冷却系统三维模型

简化模型

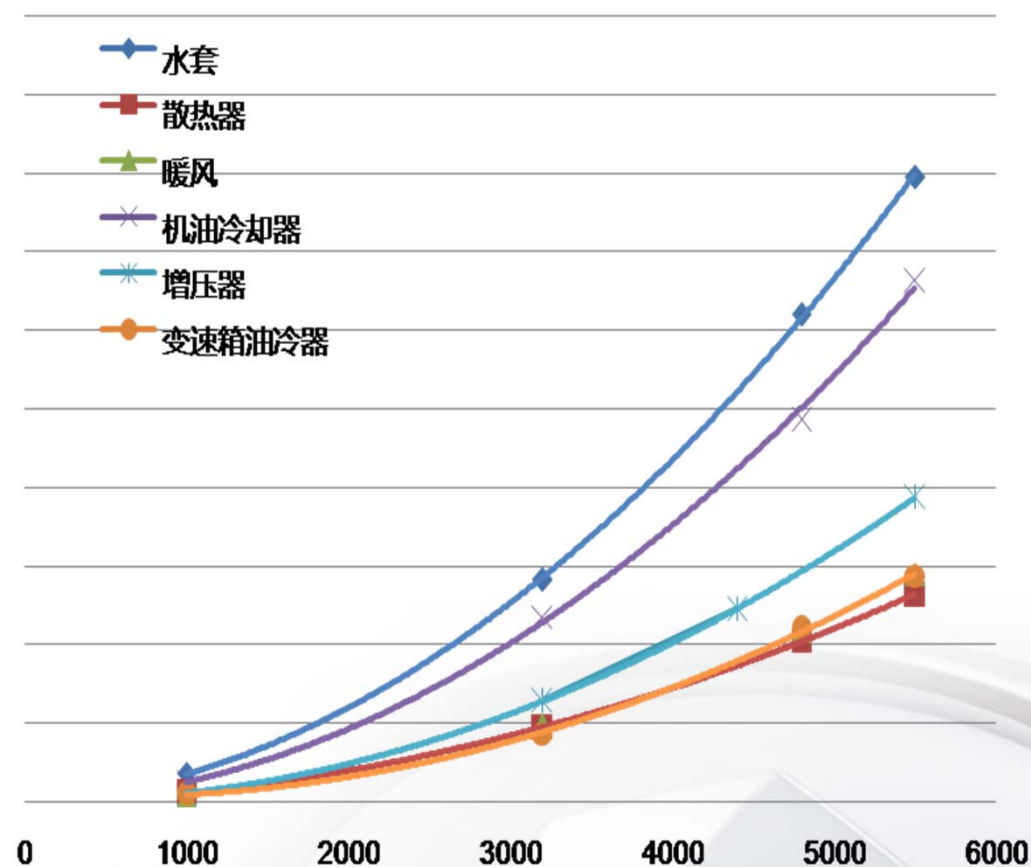
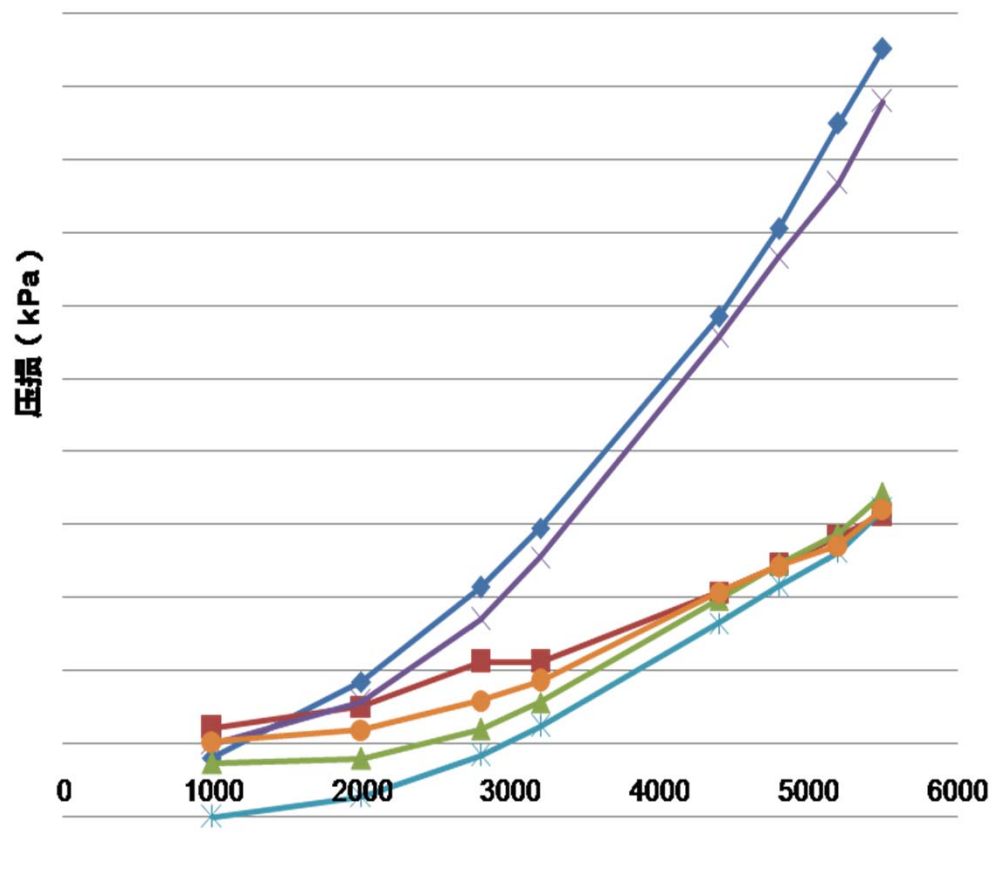


简化前

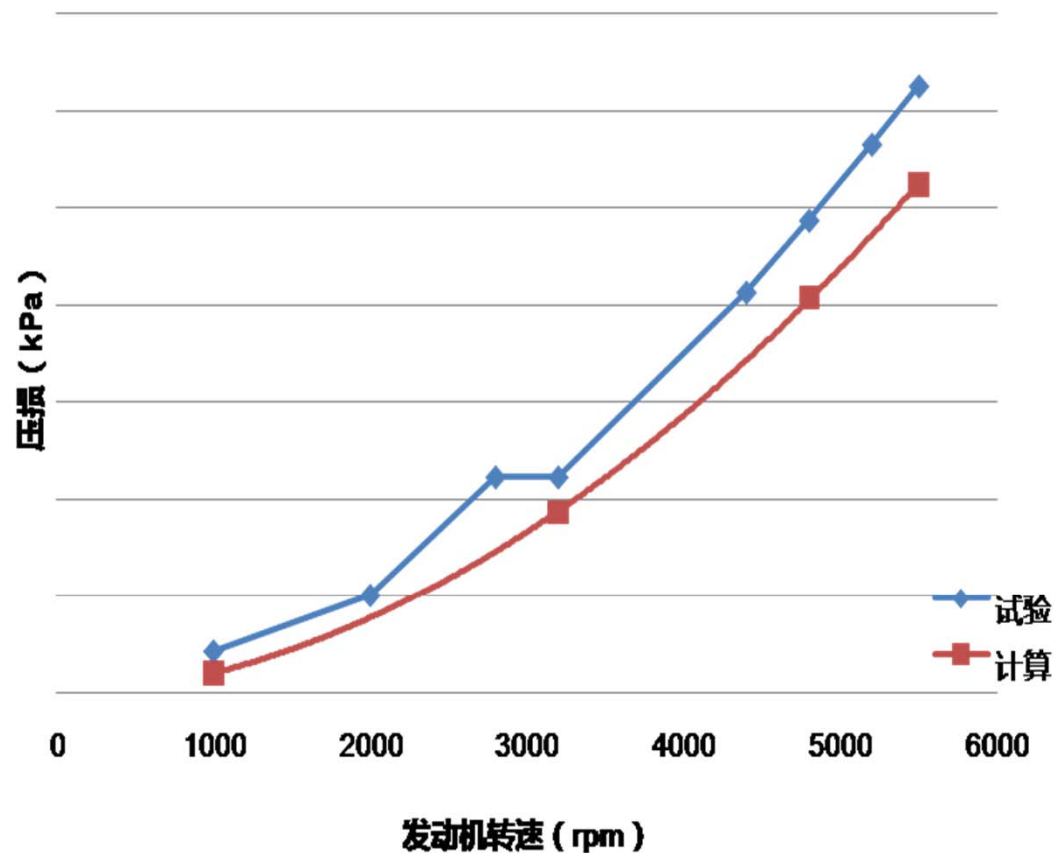


简化后

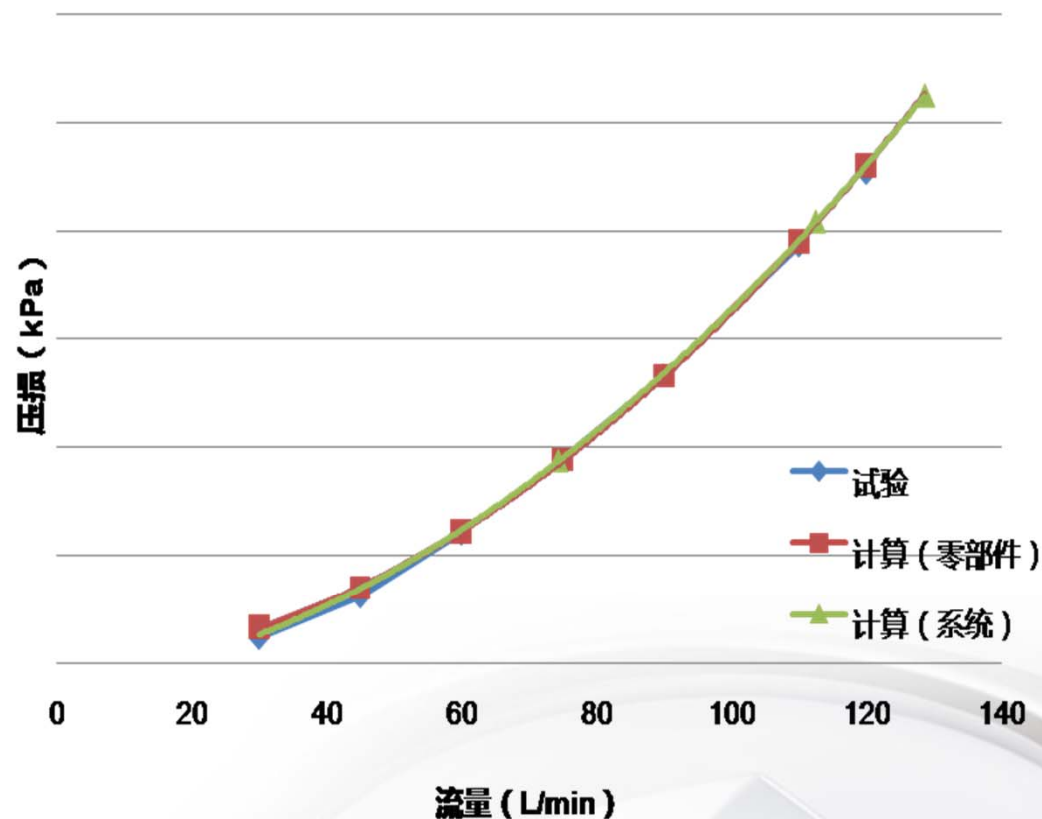
压损计算结果分析



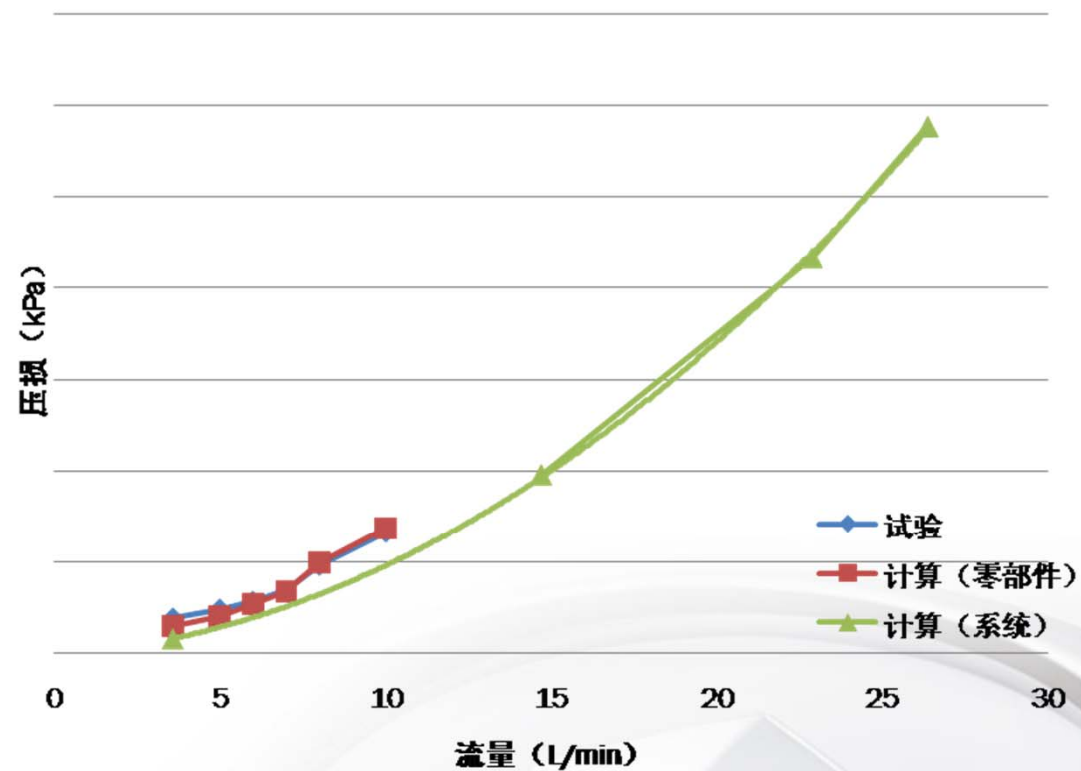
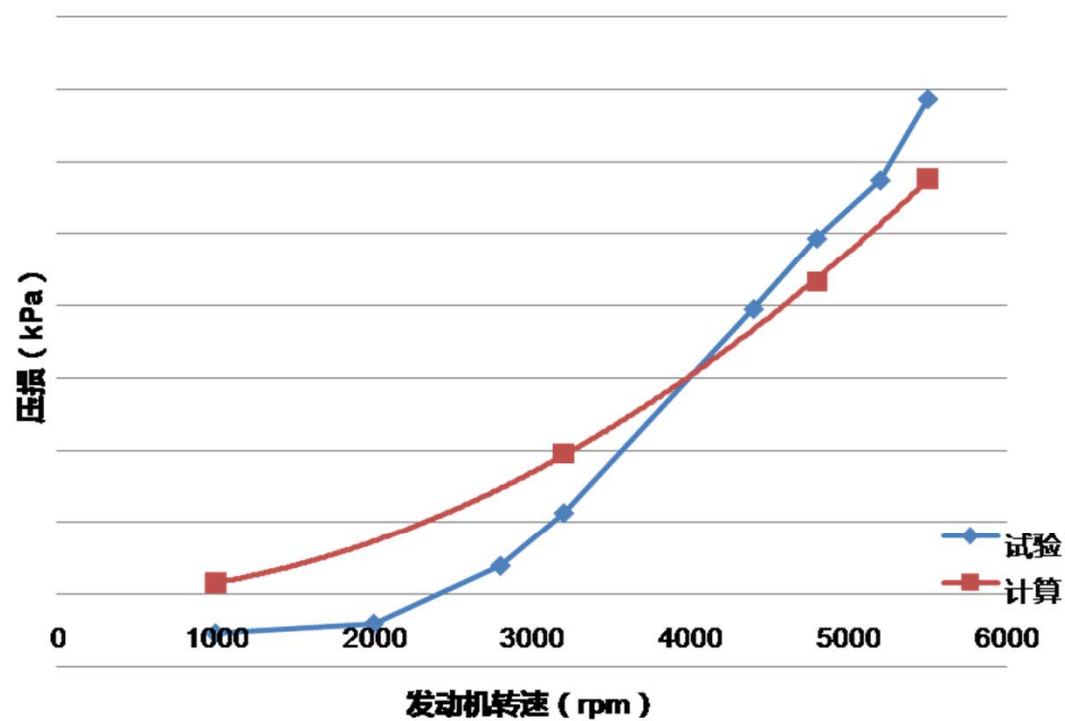
压损计算结果分析



散热器

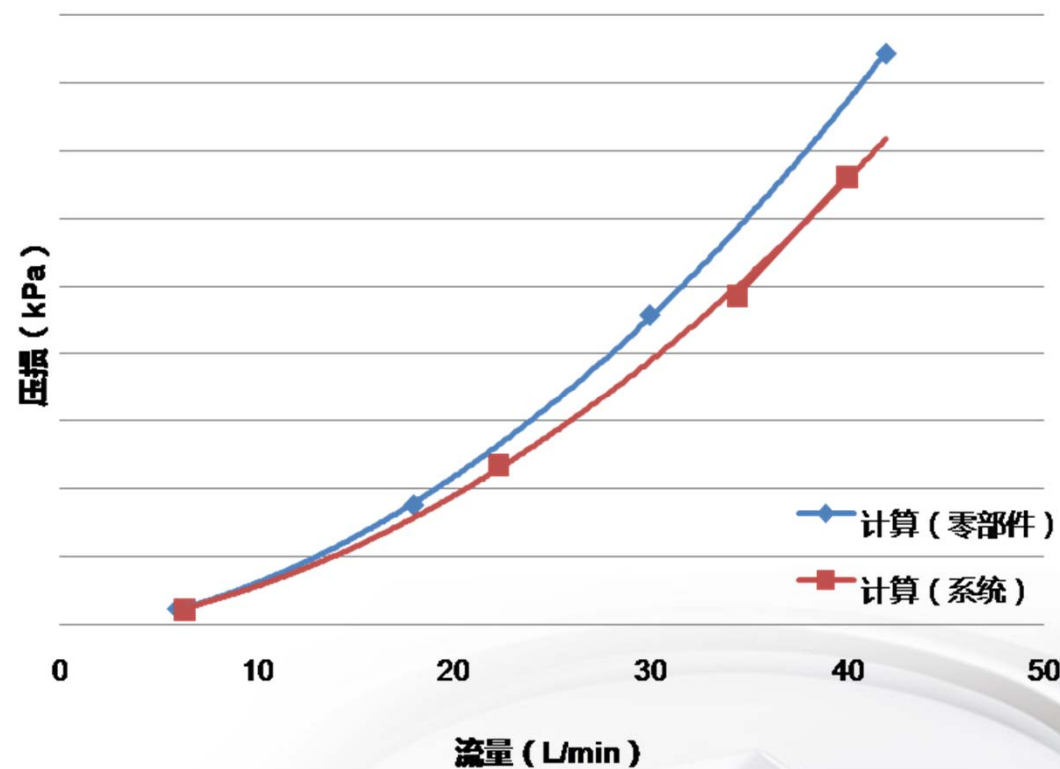
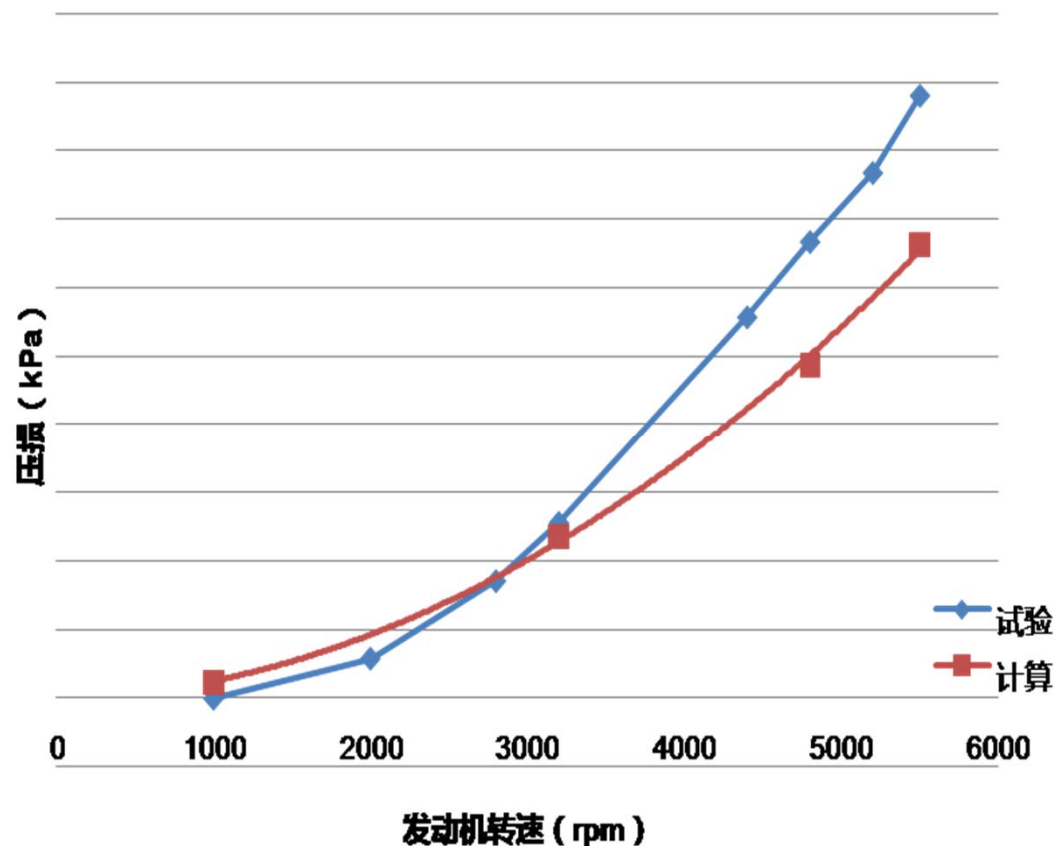


压损计算结果分析



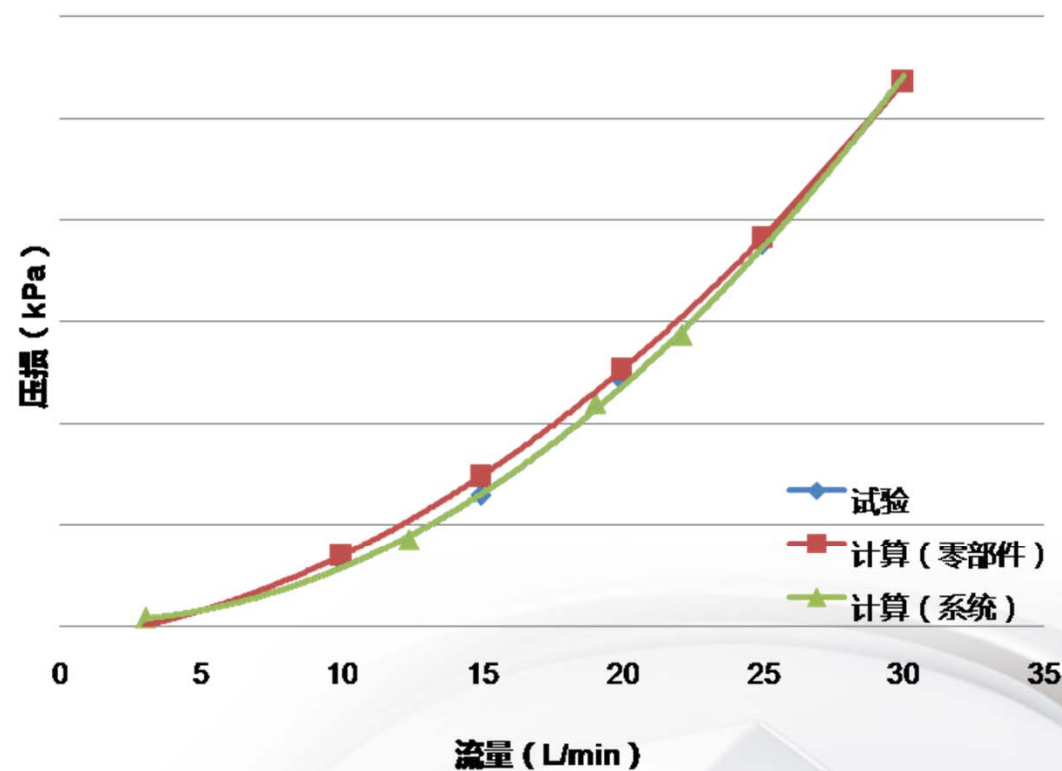
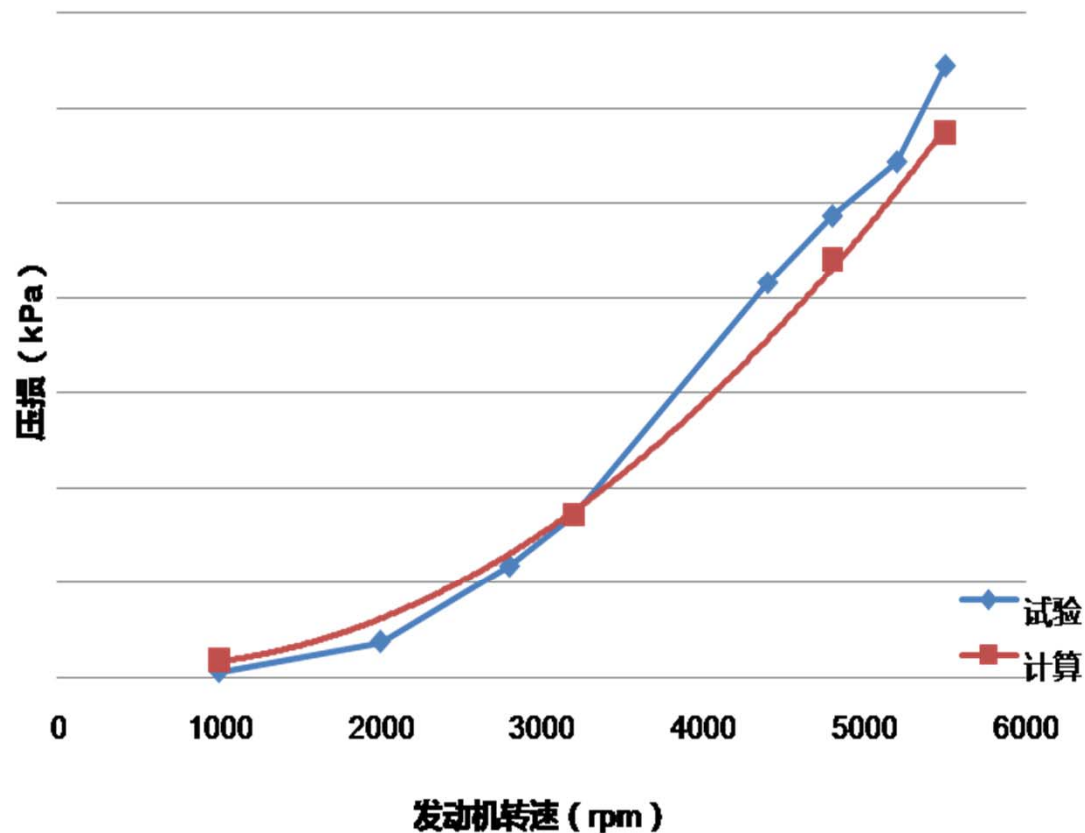
暖风

压损计算结果分析



机油冷却器

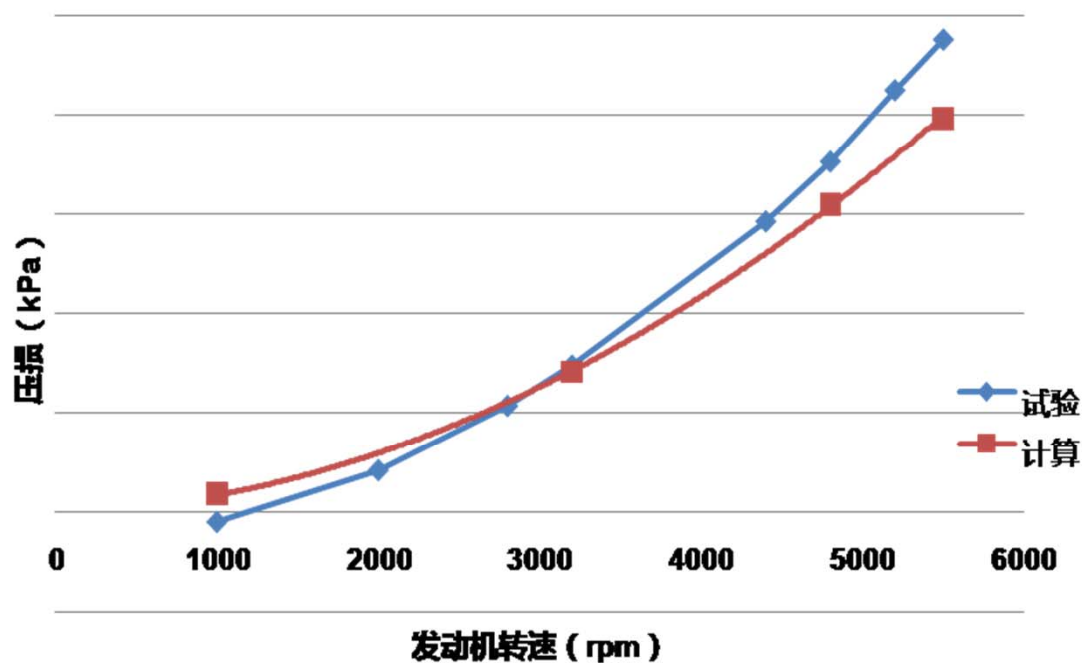
压损计算结果分析



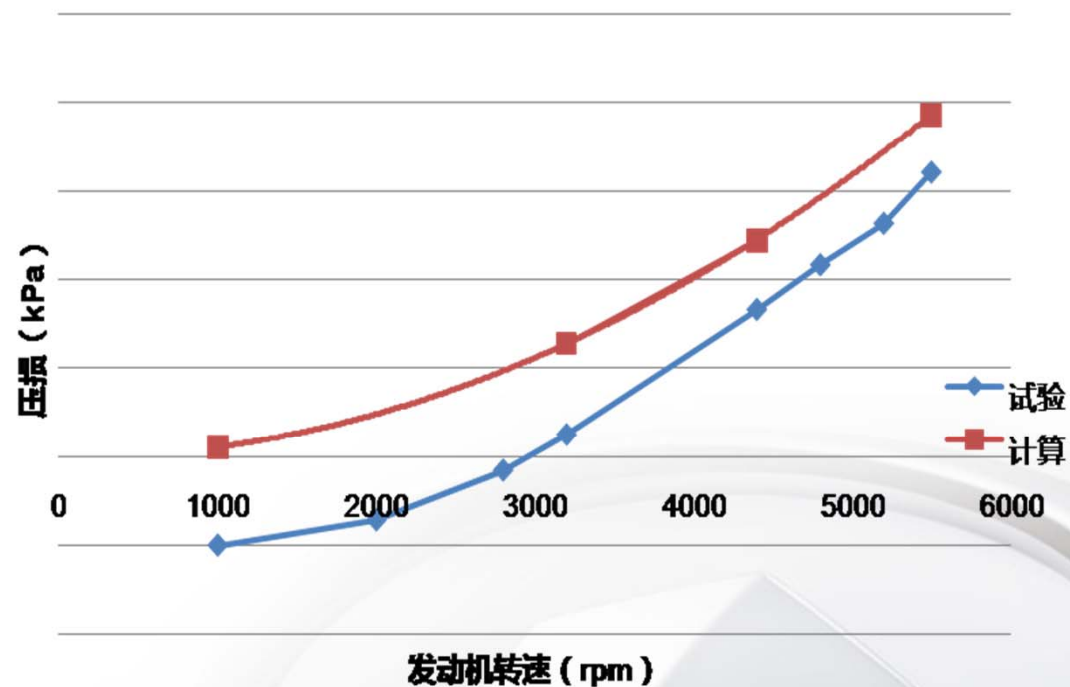
变速箱油冷却器

压损计算结果分析

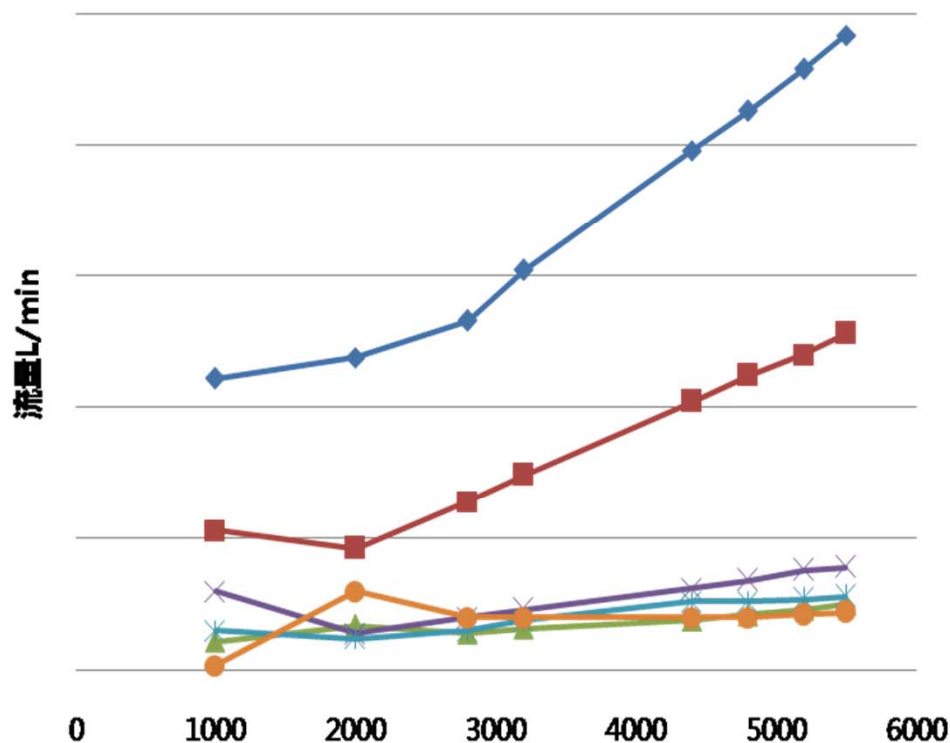
水套



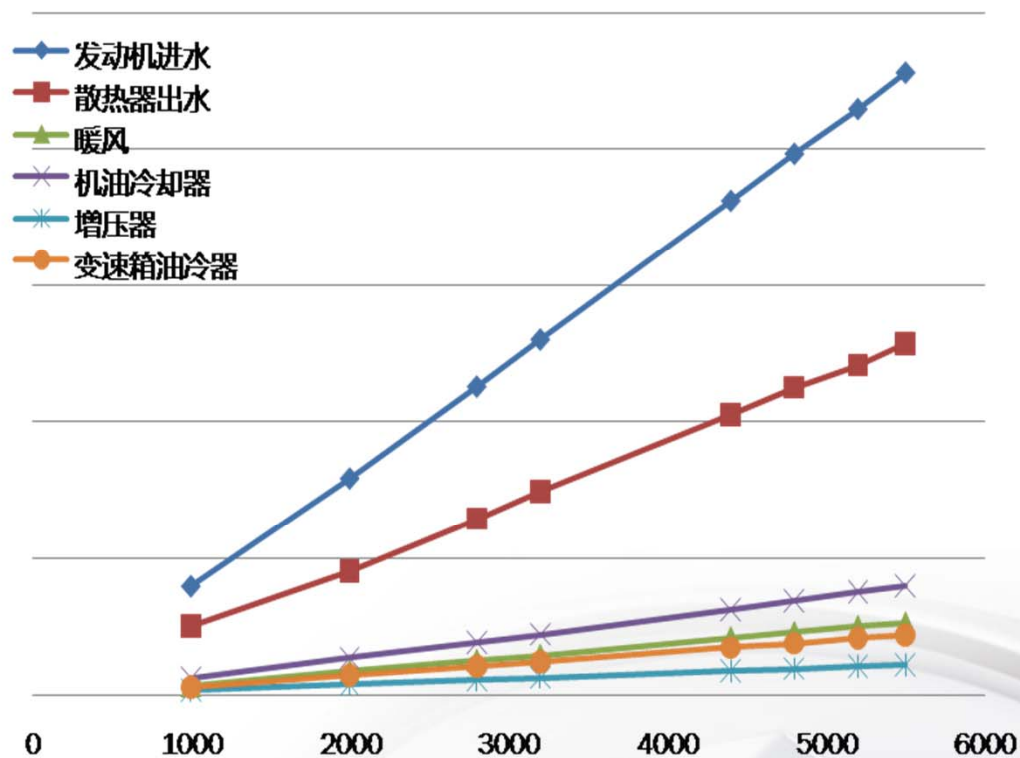
增压器



流量计算结果分析



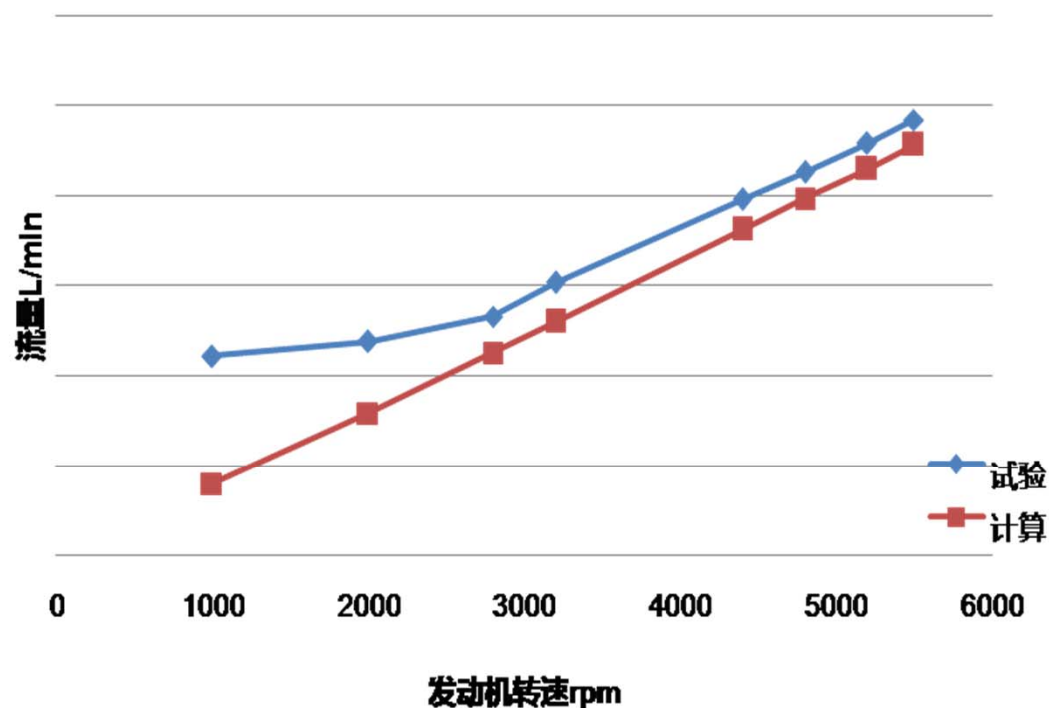
流量分配试验结果



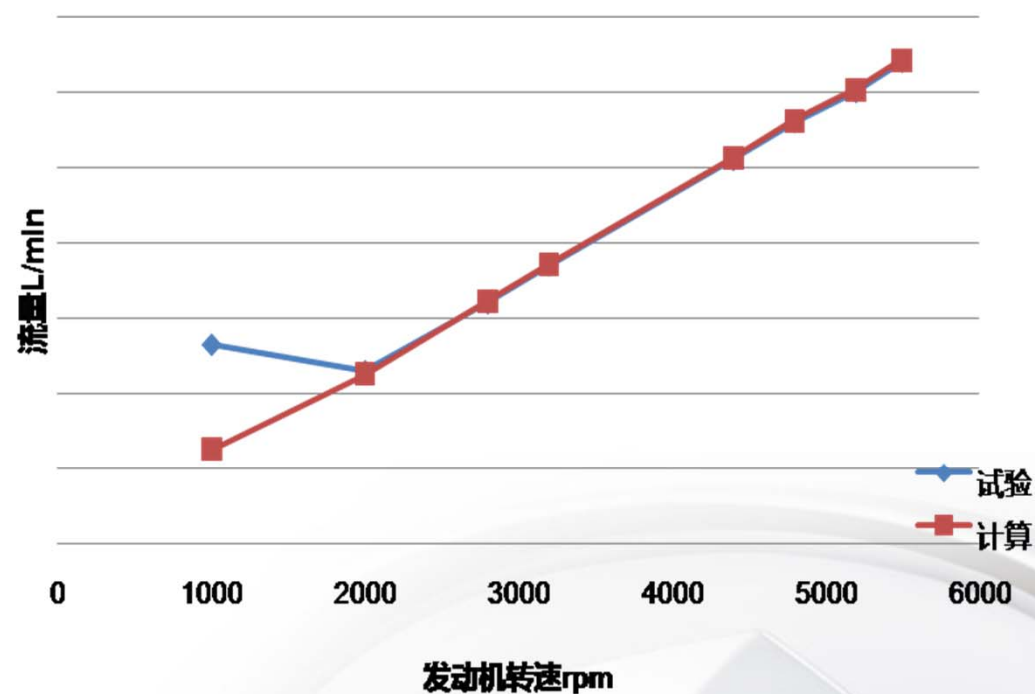
流量分配计算结果

流量计算结果分析

发动机进水

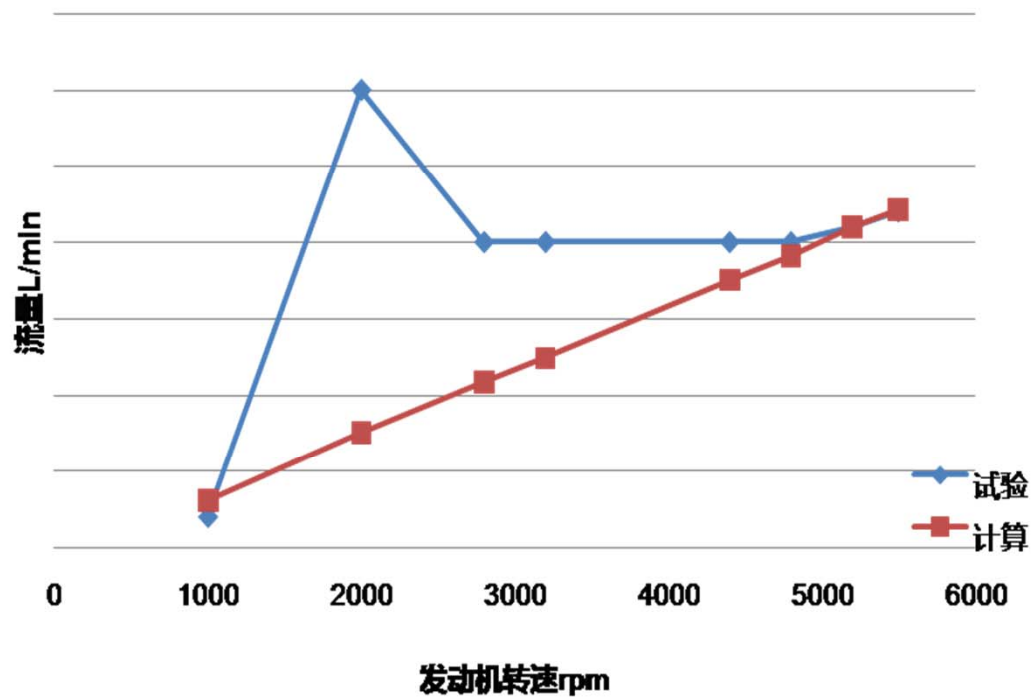


散热器

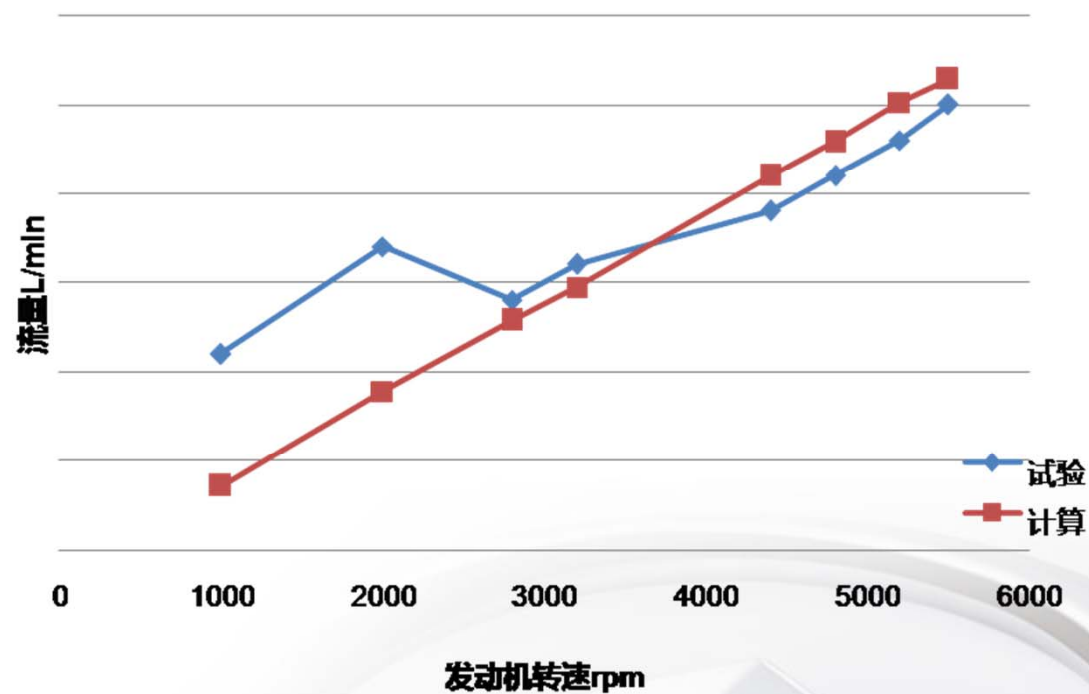


流量计算结果分析

变速器油冷器

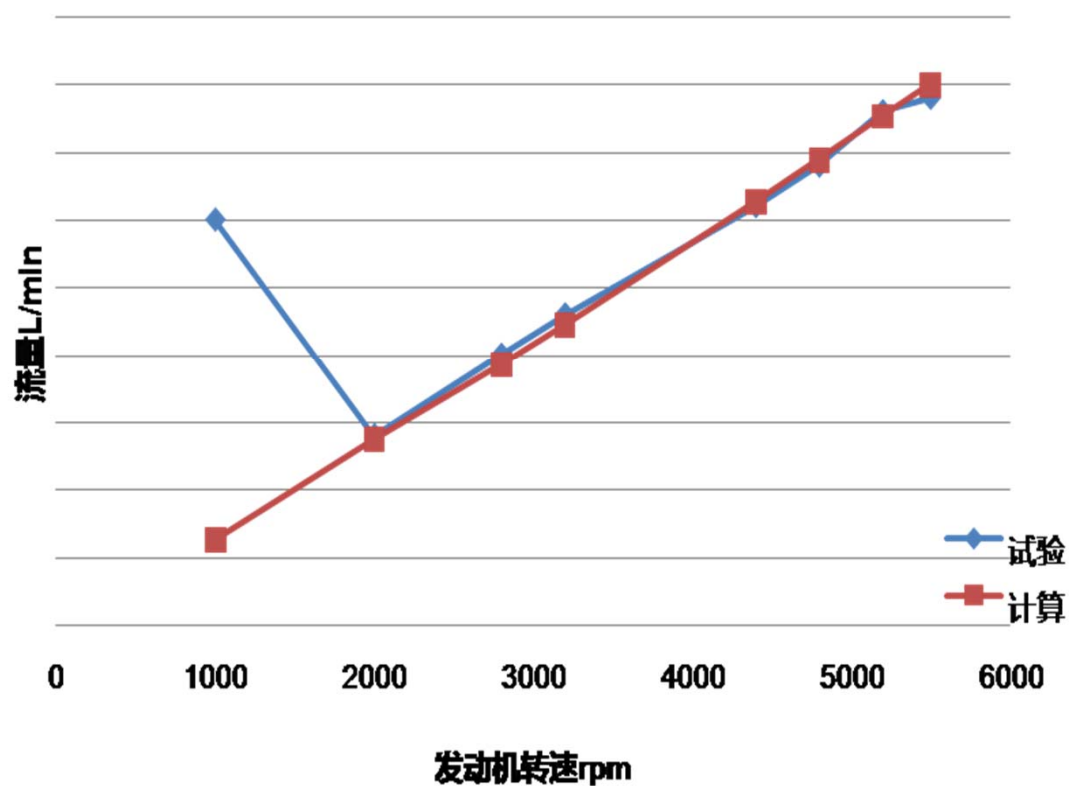


暖风

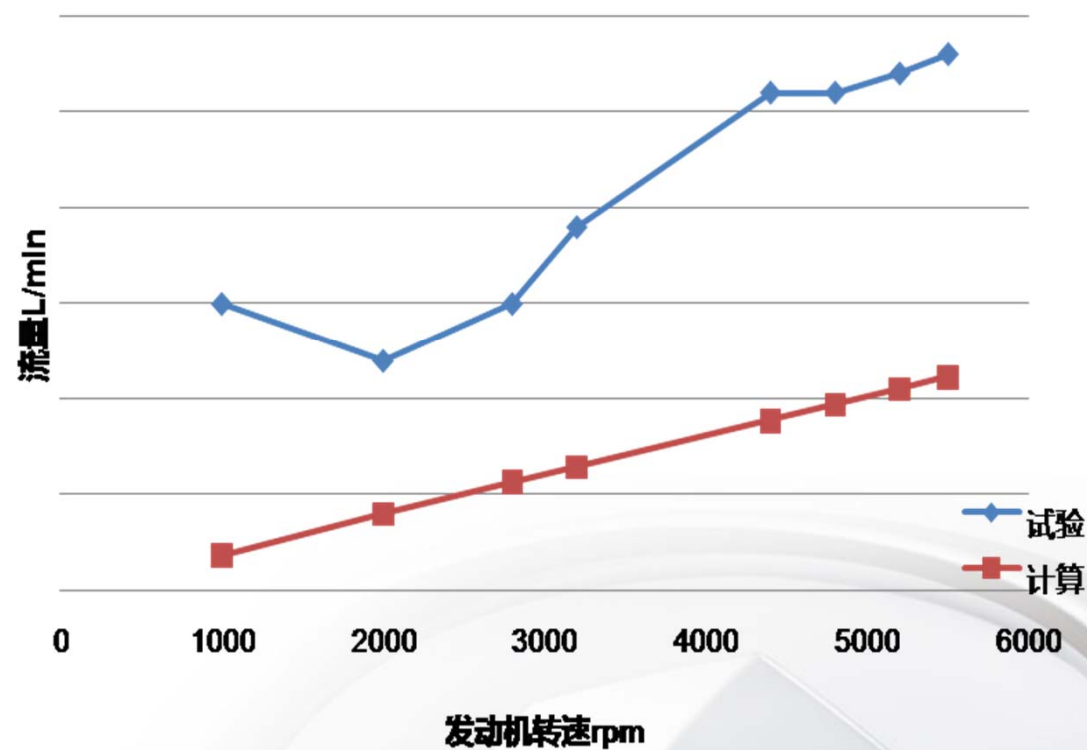


流量计算结果分析

机油冷却器



增压器冷却

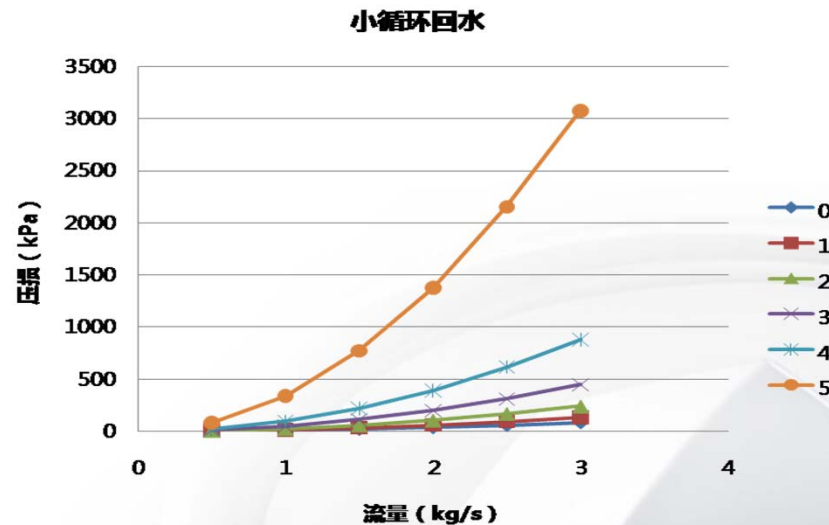
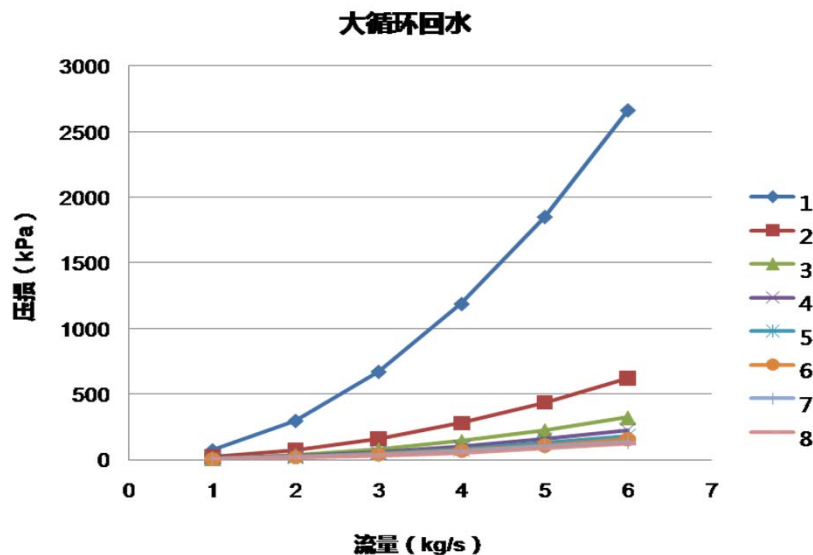


流量计算结果分析

- 从试验数据上可以发现在发动机运行在高转速的时候由于此时水泵流量较大且风扇没有开启，流量计的工作条件比较好，所测数据也比较准确，但是在发动机转速降低时，风扇开启对流量计造成电磁干扰，导致流量计读取出现误差。随着发动机转速进一步降低部分零件的流量超出流量计的测量范围，导致流量计测量误差更大，出现较明显的拐点。从计算数据上可以看出在高转速时计算值与试验值基本相同，误差很小，在整个转速范围内各部件的流量与转速线性变化，且没有交集，所以计算结果更能反映出实际流量变化。
- 由于试验工装等问题，一些数据出现负值，所以相比较计算值更准确一些。

案例小结

- 此方法可以准确地分析真实发动机台架运行状态下的流量分配，但是如果模拟整车状态下流量分配需要检测机冷出水，发动机出水及发动机进水温度来判断节温器开启状态，实际工况下节温器大部分处于半开状态，所以要判断节温器的位置，这样可以准备的模拟出整车实际的流量分配。



节温器升程与压损的关系

前言

案例一：冷却系统流量修正

案例二：柴油机进气道优化

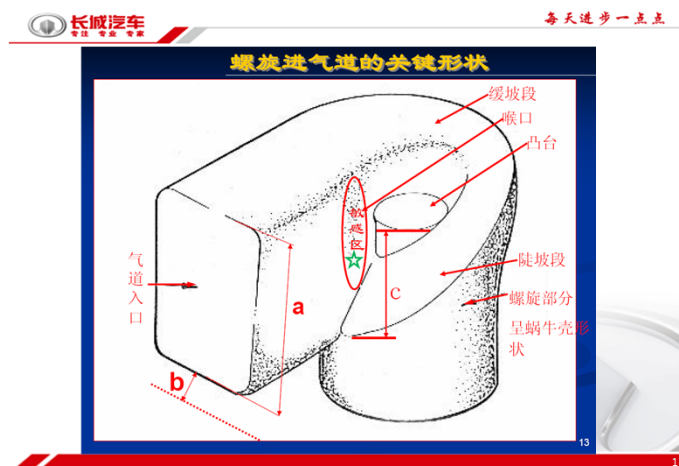
总结



案例简介

- 进气道性能包括流量系数和滚（涡）流比。流量系数影响发动机的充气效率，从而影响动力性指标；滚（涡）流比是为了提高火焰传播速度，减小爆燃倾向，提高燃烧稳定性。但滚（涡）流比的提升会制约流量系数的提高，需均衡两者关系，来满足发动机的性能和排放要求。
- 传统的CFD 优化是在上一轮计算结果的基础上提出改进建议和方向，然后通过更改CAD 模型再次进行CFD 计算，直至得到满意的结果为止。这种方法效率低、重复工作量大，且难以协调多目标之间的关系。
- 本文以某柴油机进气道为例，基于MeshWorks 网格变形技术和modeFRONTIER 优化集成功能，实现对不同升程状态下气道自动优化。通过结果分析，不仅可以找出最优解，还可以得到设计变量和结果之间的相关性。

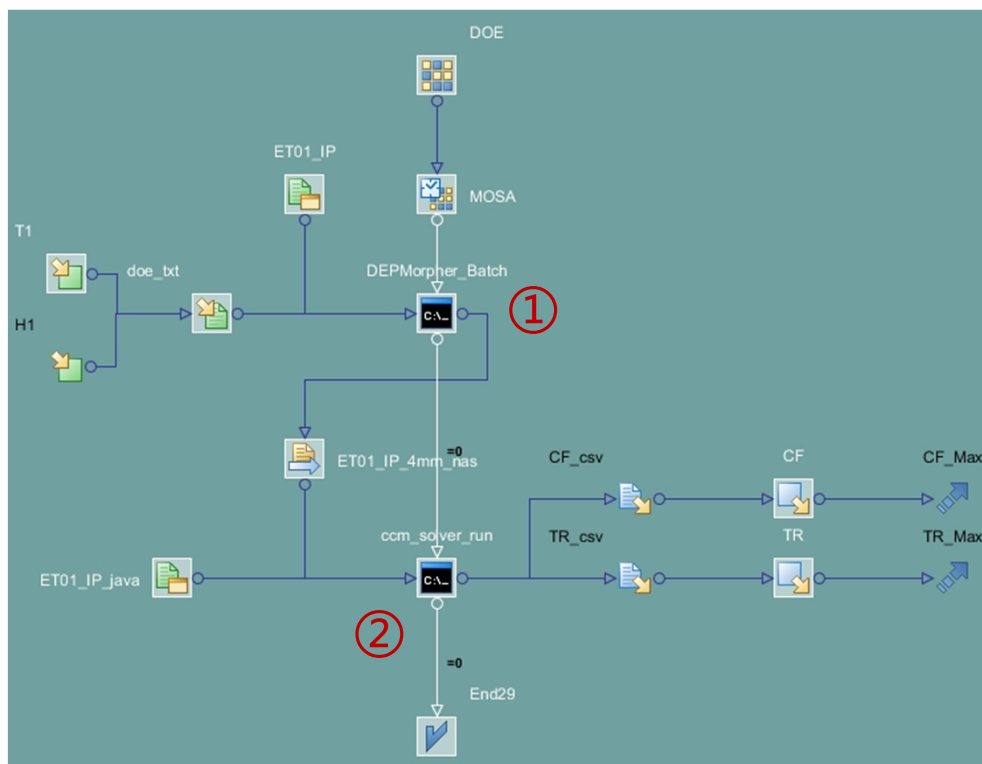
计算模型



- 影响气道性能的形状参数很多，考虑网格变形实现性，这里只将喉口截面大小定义为设计变量
- 定义设计变量的极限值为2mm
- 本次优化基于4mm、7mm气门升程



计算模型



优化模型

- 优化模型是运用modeFRONTIER集成 MeshWorks①和STAR-CCM+ ②
- 前期优化策略采用多岛遗传算法，但结果稳健性不好，后期采用全因子DOE算法，设计变量步长为0.2mm，共121个算例



评价参数

- 流量系数

流量系数表征了进气道的流通能力，Ricardo流量系数公式如下： $C_F = \frac{Q}{AV_0}$

其中, Q : 试验测得的实际空气流量

A : 气门座内截面面积, $A = \frac{\pi d_v^2 n}{4}$

d_v : 气门座内径

n : 进气门数目

V_0 : 理论进气速度, $V_0 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$

Δp : 进气道压力降

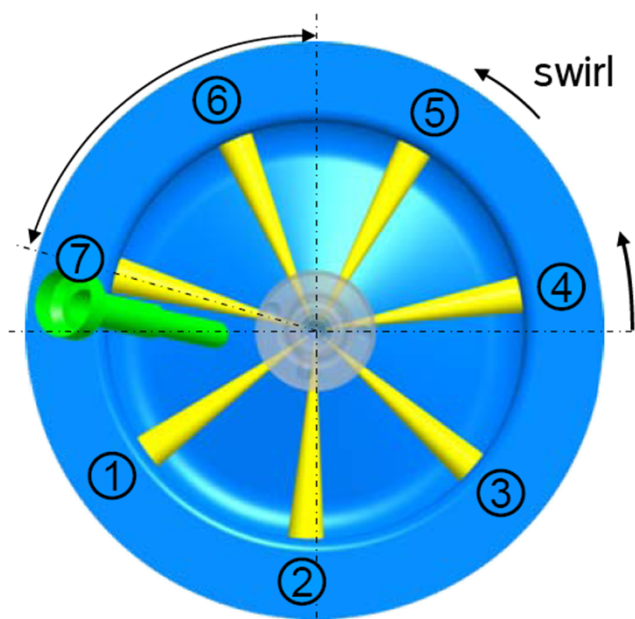
ρ : 气门座处气体的密度



评价参数

- 涡流比

涡流是在发动机进气过程中形成的一种宏观大尺度涡流，涡流的旋转轴与气缸轴线平行，涡流比的定义如图所示。



Ricardo涡流比计算公式： $N_R = \frac{8M}{GDV_0}$

M：涡流计测得的face面上的角动量

G：为流量计测得的face面上的空气流量，kg/s

D：为气缸直径，m

V_0 ：理论流速 $V_0 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$

Δp ：为进气道压力降，Pa

ρ ：为进气道前空气密度，kg/m³

评价参数

- 平均流量系数和平均涡流比

为了评价发动机在整个进气过程中气道的平均阻力与气缸内平均涡流强度，定义了平均流量系数和平均涡流比，这两个参数反映了气道在整个进气过程中的宏观流动特性。

Ricardo进气道评价方法假设进气过程在进气门开启到关闭的区间，则平均流量系数和平均涡流比为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ricardo 平均流量系数: } C_{Fm} = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F d\alpha \\ \text{Ricardo 平均涡流比: } R_S = L_D \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F N_R d\alpha}{\left(\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F d\alpha \right)^2} \end{array} \right.$$

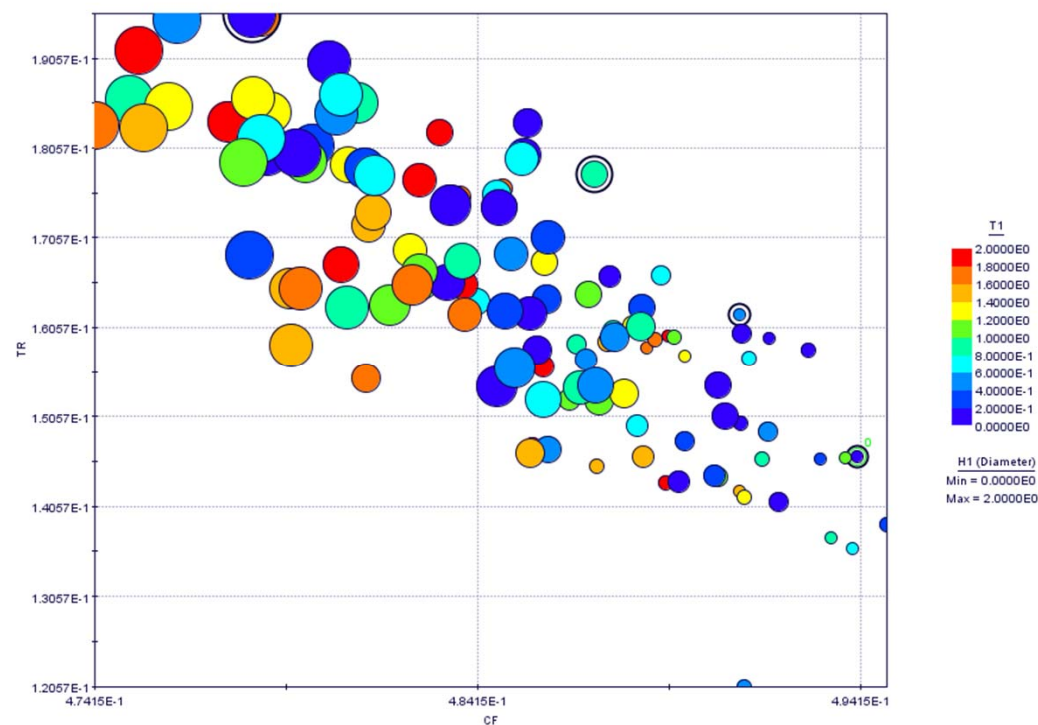
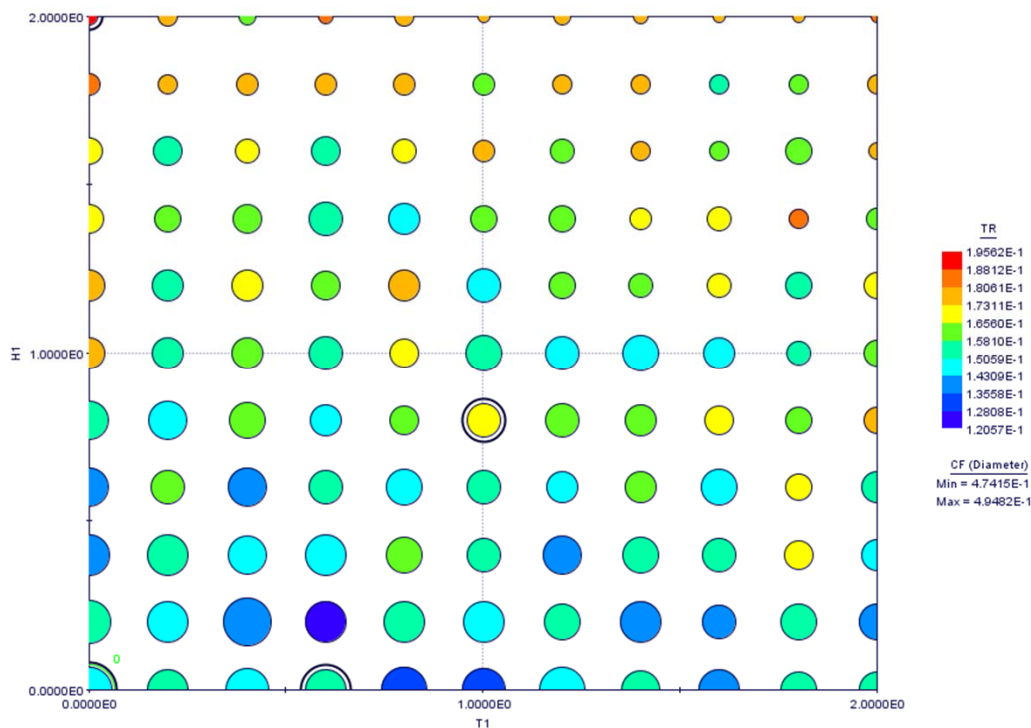
$$L_D = \frac{DS}{nd_v^2} \text{ 为发动机形状因数}$$

n为每缸进气门数目

α_1 , α_2 分别为相应于进气门开、关的曲轴转角，rad

优化结果

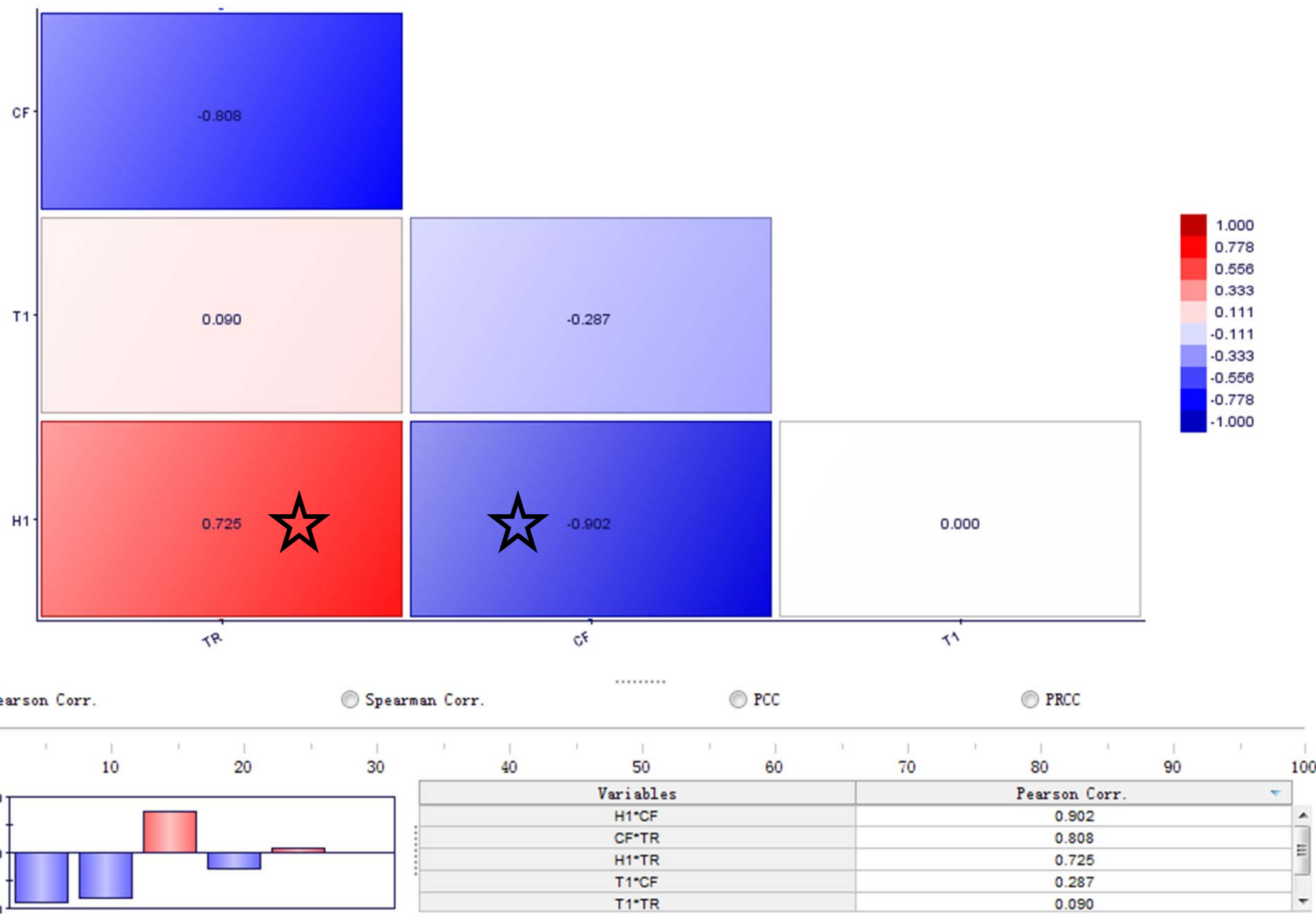
4mm气门升程



图示为全因子模型结果气泡图。从中选出较优结果用黑色圆框标识，共计3个优化点（3#、49#、110#）和原始点（0#）

优化结果

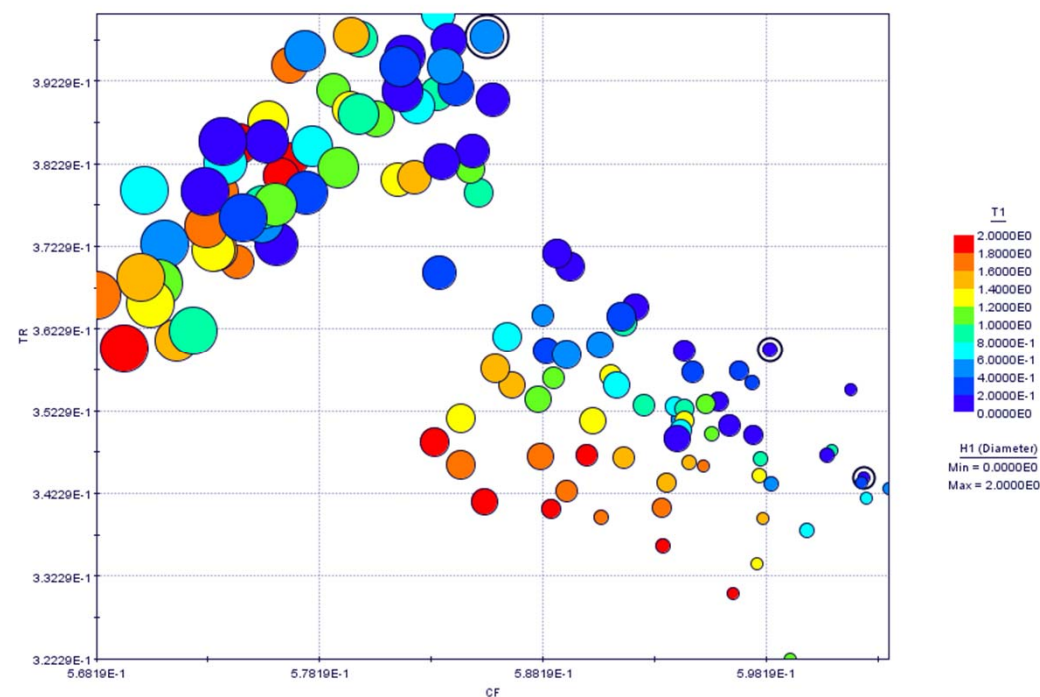
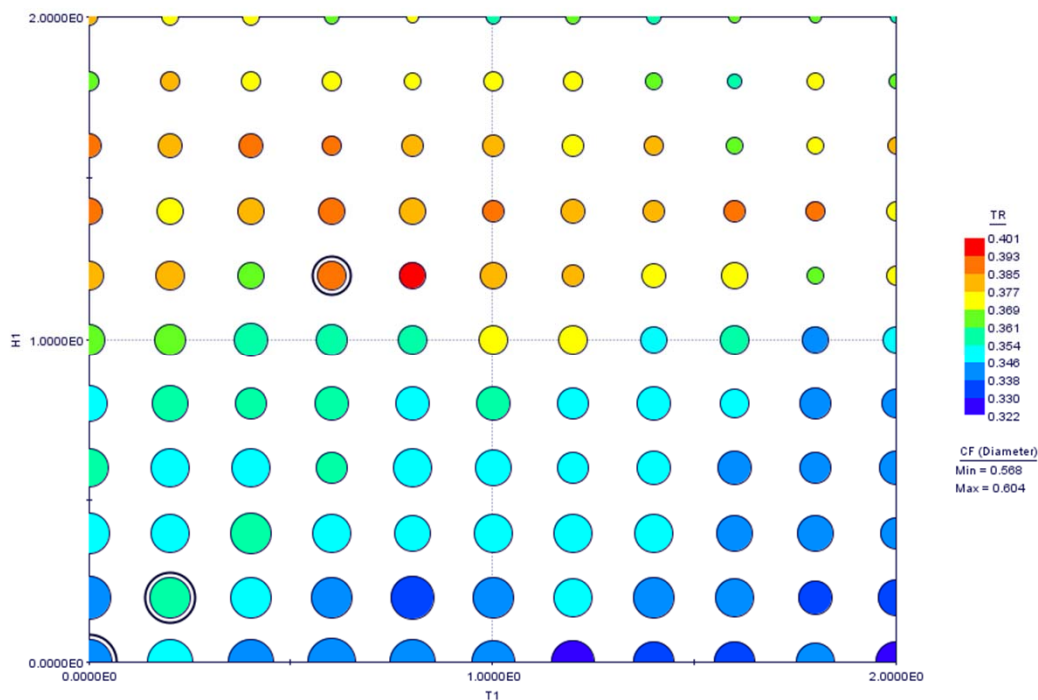
4mm气门升程



图示为设计变量和结果的相关性。
切向T与流量系数的负相关性和与涡流强度的正相关性不及螺旋H

优化结果

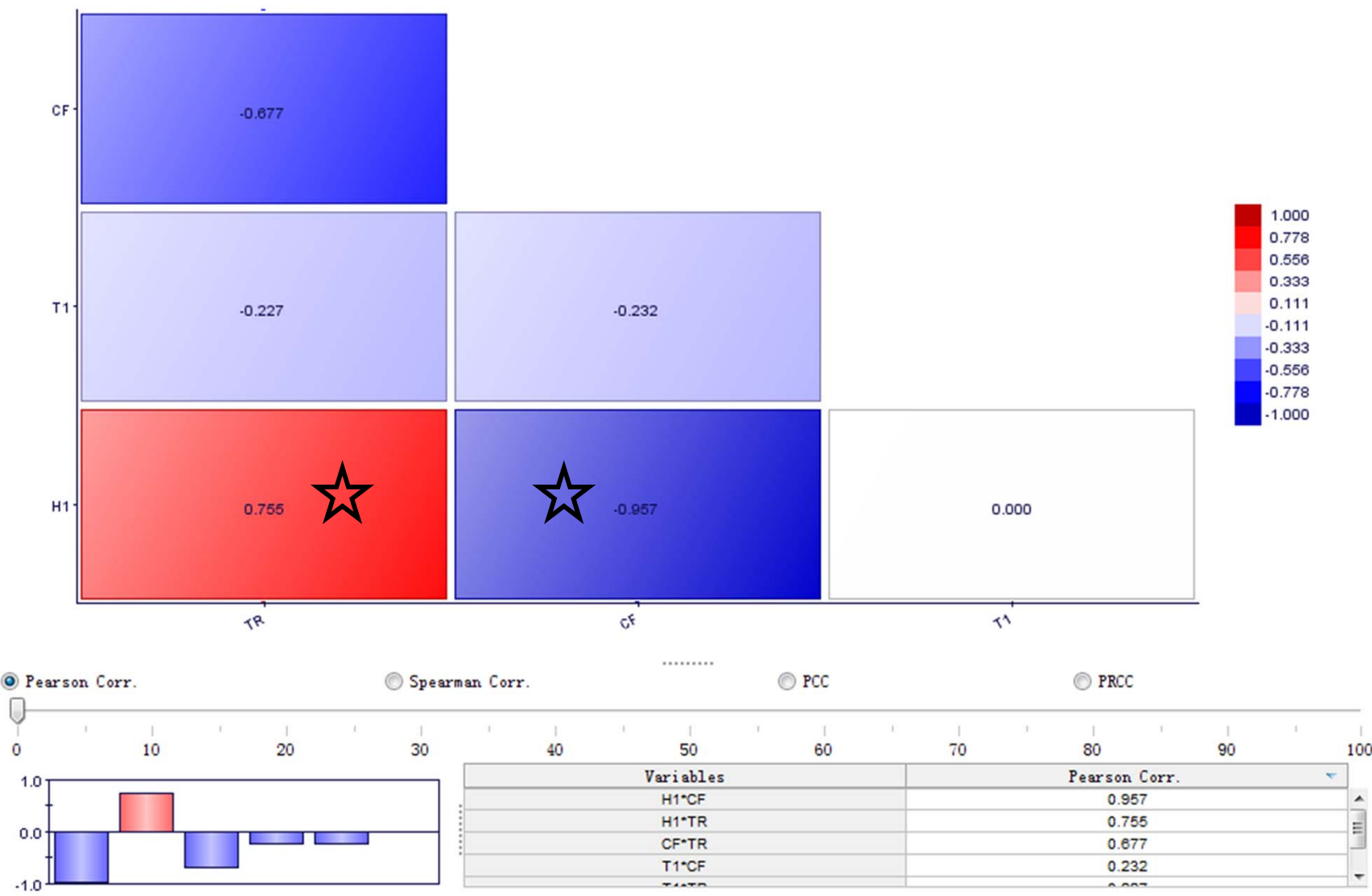
7mm气门升程



图示为全因子模型结果气泡图。从中选出较优结果用黑色圆框标识，共计2个优化点（12#、69#）和原始点（0#）

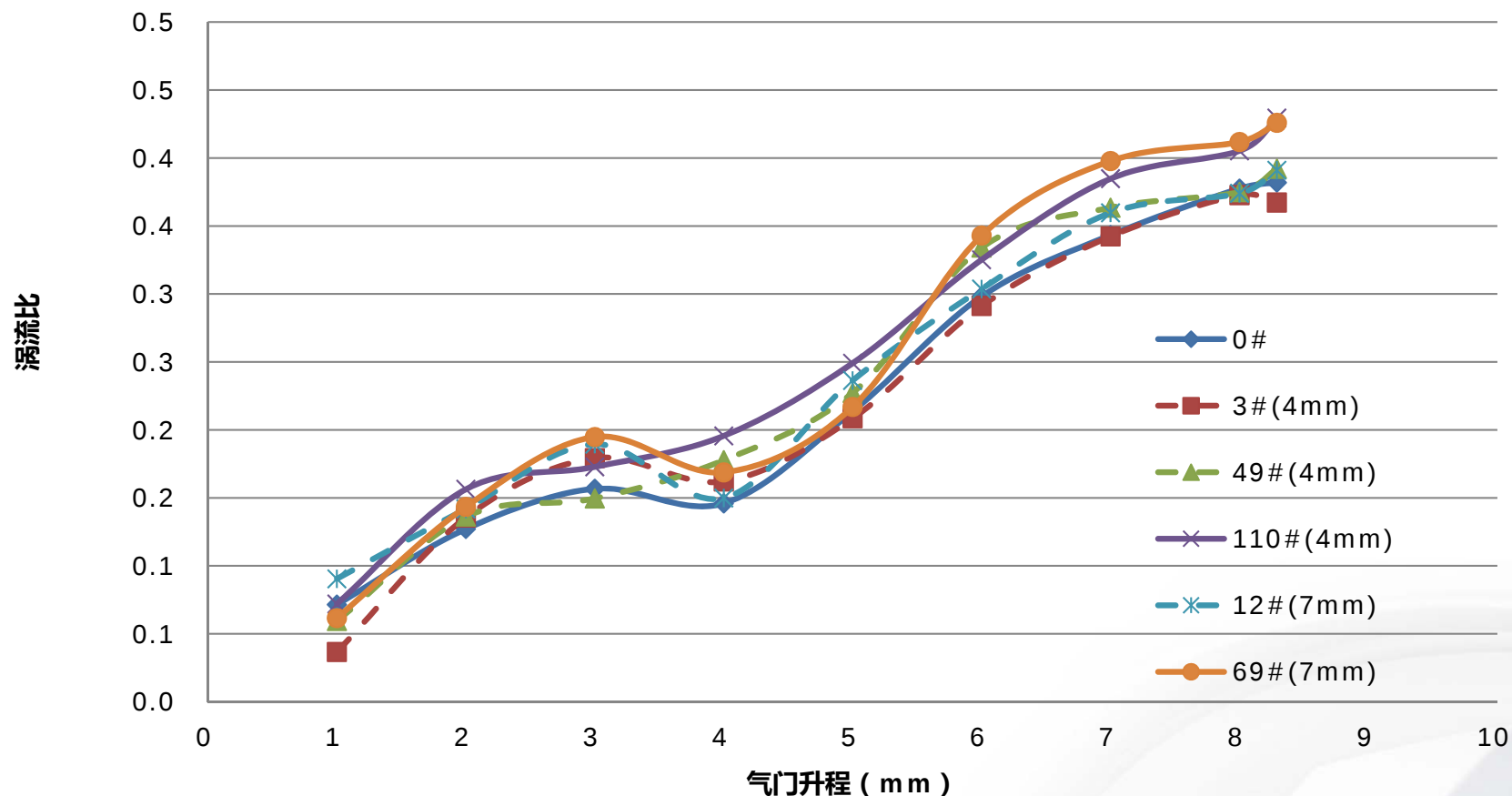
优化结果

7mm气门升程



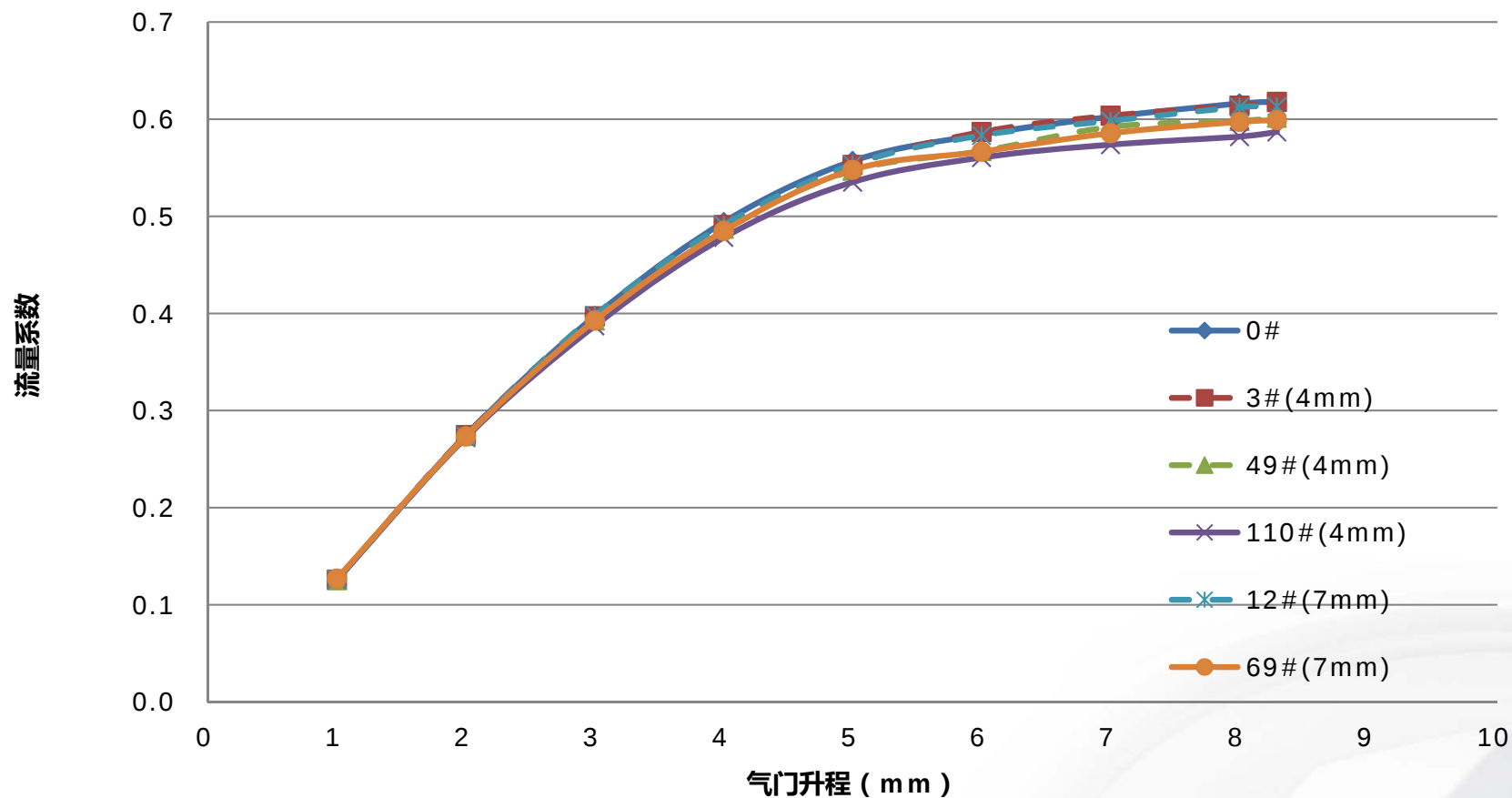
图示为设计变量和结果的相关性。
与气门升程4mm的结果不同，切向T不仅与流量系数成负相关性，也与涡流强度成负相关性；螺旋H对流量系数及涡流强度的相关性依然高于切向T

优化结果



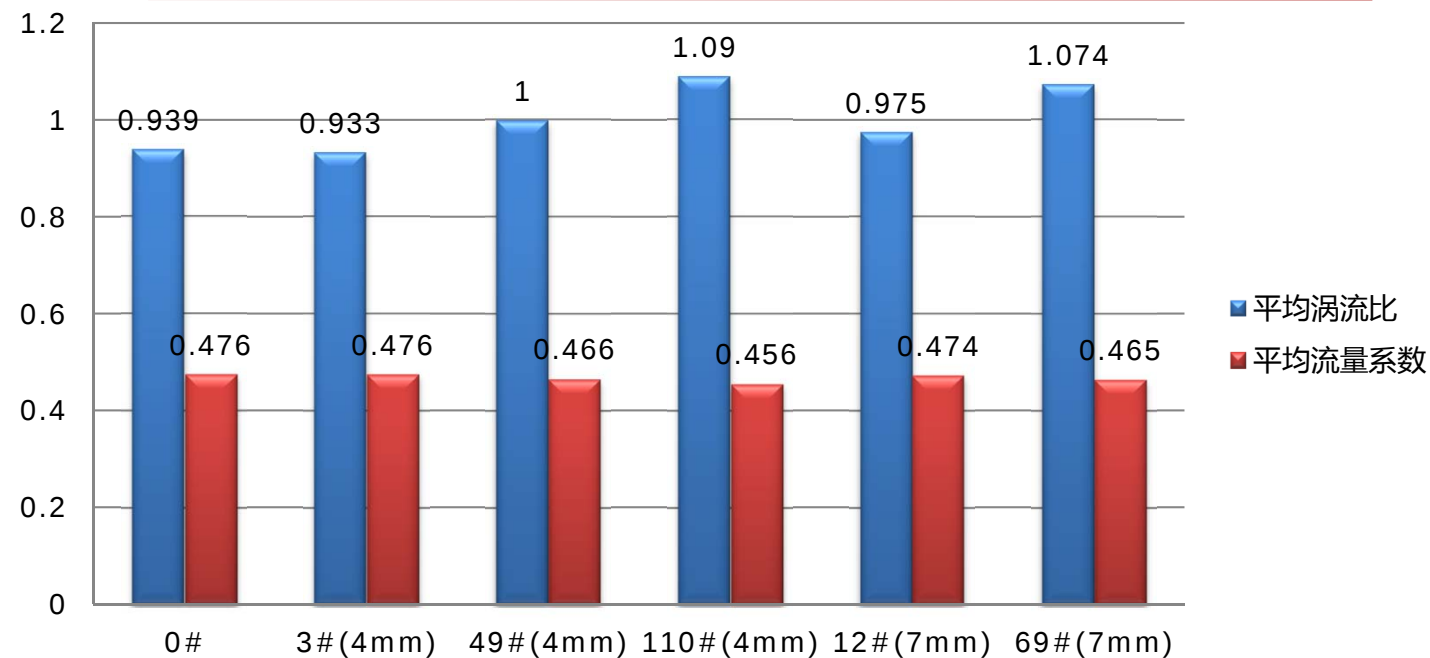
对以上选取的优化点进行全升程计算，110#(4mm)、69#(7mm)优化点的涡流强度提升明显

优化结果

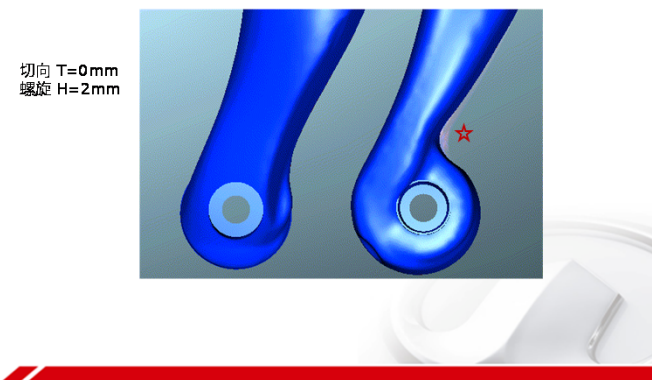


对以上选取的优化点进行全升程计算，各优化点流量系数略有降低

优化结果



	切向变量T (mm)	螺旋变量H (mm)	流量系数 变化	涡流比 变化
0#	0	0	--	--
3#(4mm)	0.6	0	0	-0.64%
49#(4mm)	1	0.8	-2.10%	6.50%
110#(4mm)	0	2	-4.20%	16.08%
12#(7mm)	0.2	0.2	-0.42%	3.83%
69#(7mm)	0.6	1.2	-2.31%	14.38%



➤螺旋变量H=2mm，可以得到较高的涡流比提升，同时流量系数有所降低

➤切向变量T=0.6mm，螺旋变量H=1.2mm，涡流比也可提升，流量系数降低较小

前言

案例一：冷却系统流量修正

案例二：柴油机进气道优化

总结



总结

- 相比与传统的CFD 优化模式，通过网格变形优化方式，可节省CAD 模型修改及网格重新划分步骤，大大减少人工工时。
- 通过集成优化技术可以实现仿真流程的自动化，同时运用优化策略，找到满足设计要求的目标，并找出各设计变量与目标值的相关性，可为其他机型设计提供理论依据。
- 基于三维分析软件、Meshworks网格变形技术和modeFRONTIER搭建的仿真优化平台，可以大大缩短发动机及整车开发周期，满足发动机各个设计阶段的要求，并在后期逐渐作为一种快捷的“试验”验证手段，提高效率并找出最优方案，是未来重要的发展方向。



长城汽车
专注 专业 专家

