

发动机模型的多目标优化标定

卢兆强 穆建华 刘昌业

(上汽通用五菱汽车股份有限公司)

摘要: 本文主要是利用 GT-Power 建立一款 1.2L 排量的汽油机模型, 运用多目标优化软件 modeFRONTIER 对模型进行标定, 找出对扭矩和油耗影响较大的参数, 并选出影响参数的最优值组合, 标定后的模拟值与试验值能够很好的吻合。多目标优化软件应用于仿真模型的标定, 快速的确定最佳参数值, 节约了大量的时间。

关键词: GT-Power 模型标定 modeFRONTIER

Abstract: This paper is the use of GT-Power to establish a 1.2L displacement gasoline engine model, and by using multi-objective optimization software modeFRONTIER, the model calibration, simulated and experimental values can be a good fit. Multi-objective optimization software used for model calibration is fast and time-saving.

Keyword: GT-Power model calibration modeFRONTIER

1. 前言

发动机仿真模型的标定是模拟计算工作中非常重要的一个环节。随着发动机电控化程度越来越高以及可变参数的增加, 需要调整的参数众多。例如扭矩与油耗是一对矛盾体, 在标定中需要根据工程要求, 取较为折中的方案, 传统的模型标定一般为手动调整, 往往会顾此失彼, 标定出的结果与试验值有较大的误差, 影响后续工作的开展, 如何在保证模型准确的前提下, 减少开发时间降低开发成本, 给工程师提出了更大的挑战。多目标优化软件的应用, 为模型标定提供了一个更加快捷的方法。

modeFRONTIER 是由意大利 ESTECO 公司开发的一款功能强大的多学科多目标稳健优化软件, 该软件将数字技术、智能推理、设计空间探索技术以及数理统计工具等有效结合, 很好的实现了 CAD/CAE 等软件工作流程的设计自动化、集成化和最优化操作。ModeFRONTIER 直接集成了众多 CAD/CAE 软件的接口, 非常方便于建模。本文就是利用 modeFRONTIER 与 GT-Power 的耦合来研究发动机一维模型的标定。

2. 多目标优化理论

2.1 多目标优化分析流程

根据实践经验, 总结出了发动机多目标优化分析流程如图 2-1 所示。

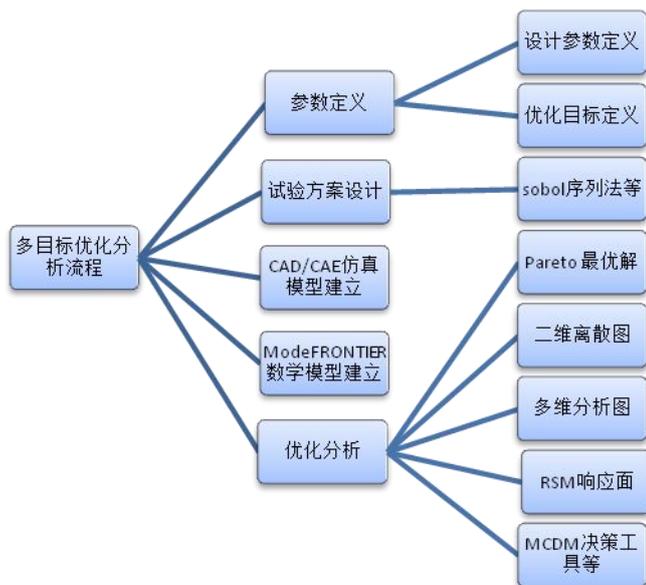


图2-1 多目标优化分析流程

2.3 试验方案和优化算法

本文试验方案设计选择Sobel序列法，优化算法选择NSGA II遗传算法。

Sobel序列法：该法也是随机序列法的一种，比Random Sequence一致随机序列法采样更均匀，针对2-20个输入变量的问题来讲这种方法较好。

优化算法选择了改良后的NSGA-II。NSGA-II算法是 Srinivas 和 Deb 于 2000 年在 NSGA 的基础上提出的，它比 NSGA算法更加优越：它采用了快速非支配排序算法，计算复杂度比 NSGA 大大的降低；采用了拥挤度和拥挤度比较算子，代替了需要指定的共享半径，并在快速排序后的同级比较中作为胜出标准，使准 Pareto 域中的个体能扩展到整个 Pareto 域，并均匀分布，保持了种群的多样性；该算法需要按照不受支配的级别，通过降低虚适应值对给定的个体种群进行排序，保留好的点；具有多目标寻优的Elitism卓越机制，该机制强化了了解的收敛特性能够指向真实的Pareto优化前沿；采用小生境方法，保证好的点所在子种群的稳定性；该法能够处理基于二进制代码的离散变量和基于真实代码的连续变量；引入了精英策略，扩大了采样空间，防止最佳个体的丢失，提高了算法的运算速度和鲁棒性，是目前最流行的多目标进化算法之一。^[3]

3、发动机模型建立

研究目标为一款 1.2L 排量的非 VVT 汽油机，发动机主要结构参数如表 1 所示。

表 1 发动机主要设计参数

项 目	参 数
排量	1.206L
压缩比	9.8: 1

缸径	69.7mm
行程	79mm
额定功率	56kW
额定转速	5600r/min
配气机构类型	DOHC
点火顺序	1-3-4-2
气门数(每缸)	4

3.1 GT-Power 模型

根据发动机图纸建立 GT-Power 仿真模型，其中进气歧管、进气道、排气歧管、排气道是根据三维数模运用 GEM3D 工具离散得来，保证了计算模型的精度。模型如图 3-2 所示。

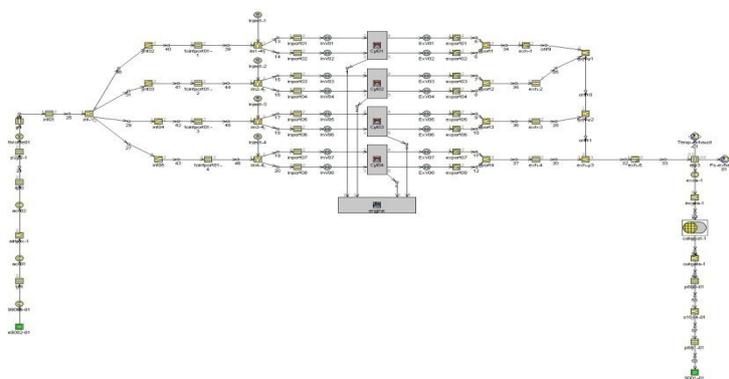


图 3-2 GT-Power 模型

3.2 模型参数设置

燃烧采用韦伯模型，燃烧参数 CA50 和 10%-90%燃烧持续角由于没有试验数据，将通过 modeFRONTIER 标定获得；传热采用 Woschni 模型；空滤压降和排气背压按照整车状态设置；

利用 modeFRONTIER 进行标定研究之前，发动机的功率与油耗曲线与试验数据对比如图所示，在大部分转速范围内，模拟值与试验值尽管趋势相同，但误差均在 5%以上，最大处达到 8%。

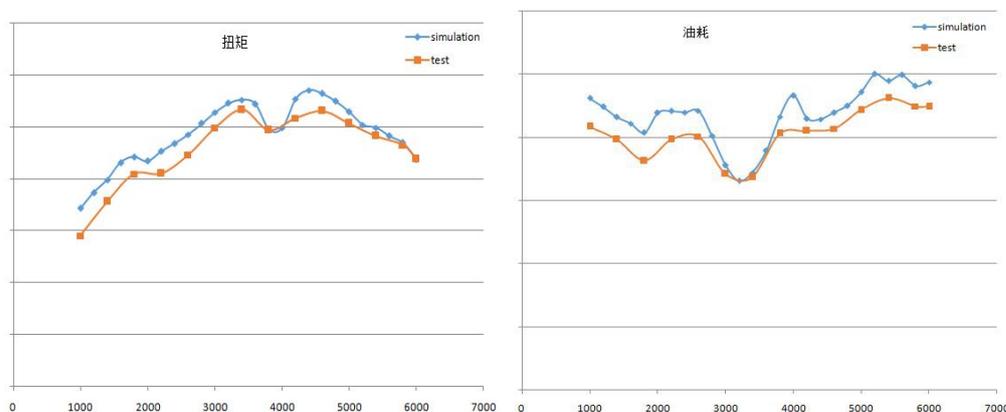


图 3-3 优化前模拟值与试验值对比

4. 设计参数及优化目标定义

此发动机为量产机型，进气歧管、进气道、排气歧管、排气道等对性能影响较大的结构参数均已定型，因此没有把相关结构参数设为变量。对于壁温、热传导系数、摩擦系数，没有试验数据，这些参数会直接影响着进气量，从而影响到发动机的性能，一般主要依靠经验来设置。把这些参数设为变量，在对模型标定的同时，也研究其对发动机性能的影响。

4.1 设计参数定义

输入变量和目标函数设置如表 2 所示。

表 2 设计参数

变量	名称	状态	最小值	最大值	步长
CA50	CA50	输入	-10	30	2
Dura10%-90%	Dura10%-90%	输入	0	30	2
Intake_Heat_Multi	进气歧管传热系数	输入	0.5	2	0.05
Intake_Fric_Multi	进气歧管摩擦系数	输入	0.5	2	0.05
Intake_Wall_Temp	进气歧管壁温	输入	300	400	5
Intakeport_Wall_Temp	进气道壁温	输入	300	400	10
Intakeport_Fric_Multi	进气道摩擦系数	输入	0.5	2	0.05
Intakeport_Heat_Multi	进气道传热系数	输入	0.5	2	0.05
Exhport_Fric_Multi	排气道摩擦系数	输入	0.5	2	0.05
Exhport_Heat_Multi	排气道传热系数	输入	0.5	2	0.05
Exhport_Wall_Temp	排气道壁温	输入	300	600	10
Exh_Wall_Temp	排气歧管壁温	输入	500	900	10
Exh_Fric_Multi	排气歧管摩擦系数	输入	0.5	2	0.05
Exh_Heat_Multi	排气歧管传热系数	输入	0.5	2	0.05
Brake_Torque	扭矩	输出	Target	Target	--
BSFC	油耗	输出	Target	Target	--

4.2 耦合模型建立

根据所设定好的输入和输出变量，建立 GT-Power 与 modeFRONTIER 耦合计算模型，转速计算范围从 1000rpm 到 6000rpm，每隔 400rpm 一个点。如图 4-1、表 3 所示。

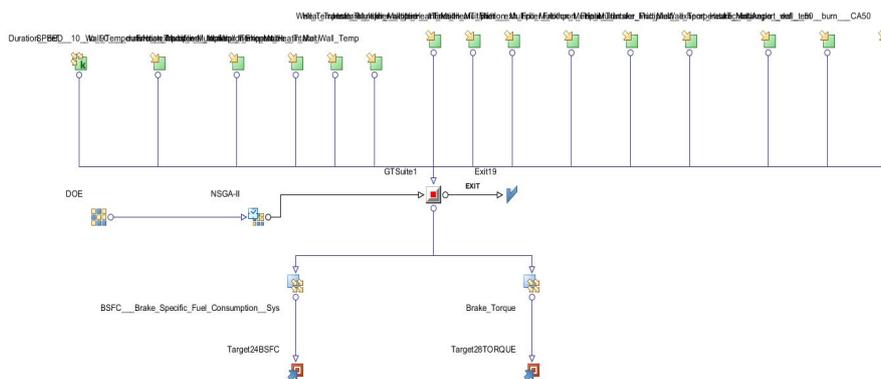


图 4-1 GT-Power 与 modeFRONTIER 耦合计算模型

表 3 模拟计算状态

初始个数	10
进化代数	50
总的模拟状态	500

5. 结果分析

从 Pareto 最优解可以清楚的看出，所有设计点计算出来的扭矩和油耗带，已经完全覆盖了设计目标，能够获得与试验值吻合较好的参数值。

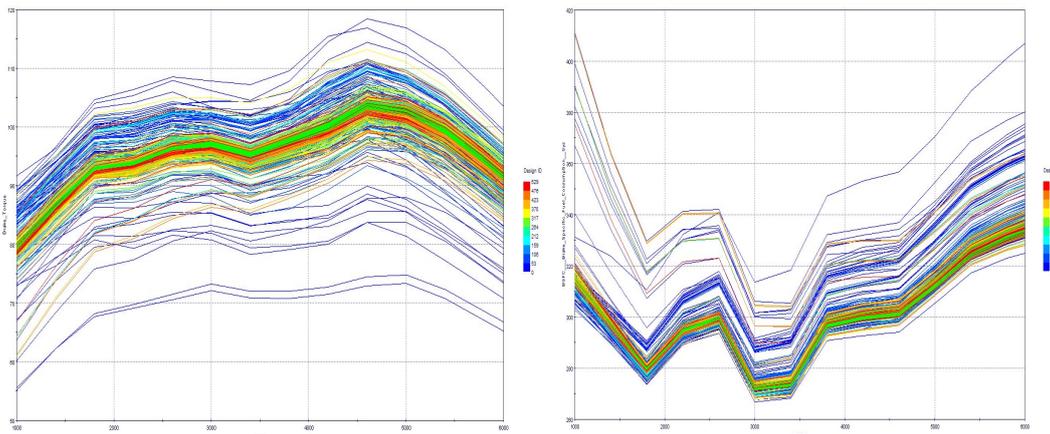


图 5-1 Pareto 最优解图

Parallel 折线图能够手动的对变量进行过滤，模型建立初期设置的参数范围可能比较宽泛，在这里可以对参数进行进一步的过滤，根据工程经验，把参数值限定在了一个比较合理的范围之内。如图 5-3 所示。

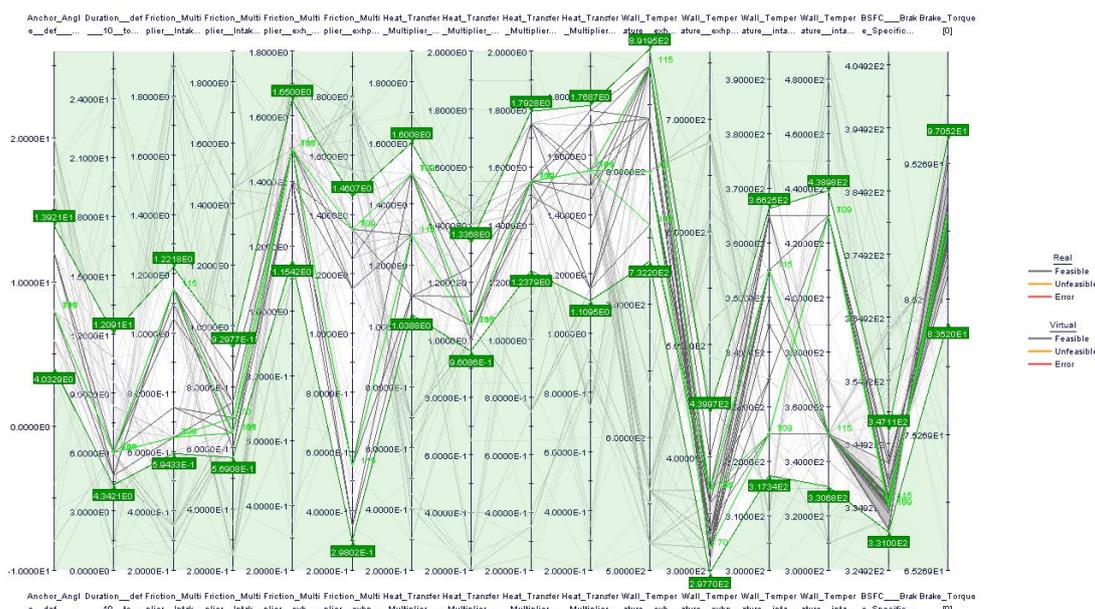


图 5-3 Parallel 折线图

5.1 参数优选

由于计算转速点较多, 本文将以 6000rpm 为例进行说明。从历史图 4-2 可以看到, 6000rpm 时功率和扭矩的变化情况, 逐渐的向目标值靠近, 其中绿色点为 Pareto 标记出的最优点。

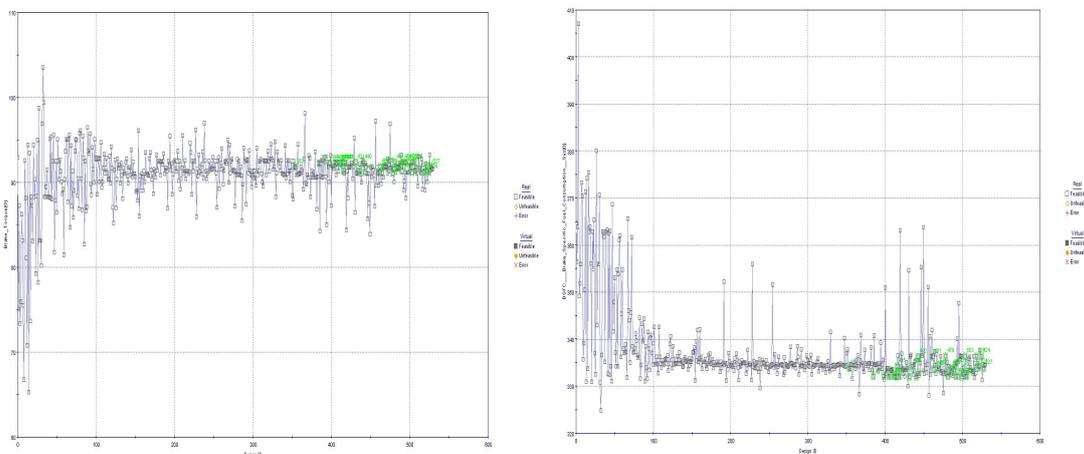


图 4-2 历史图

油耗和扭矩气泡图如图 4-5 所示, X 轴为油耗, Y 轴为扭矩, 红色越深代表扭矩越高, 气泡直径越小代表油耗越小。从 Pareto 解集里选出最符合要求的点 Design ID 109, 把此点所对应的参数值输入到 GT-Power 中。以此类推, 优选出其他各转速点对应的参数值。

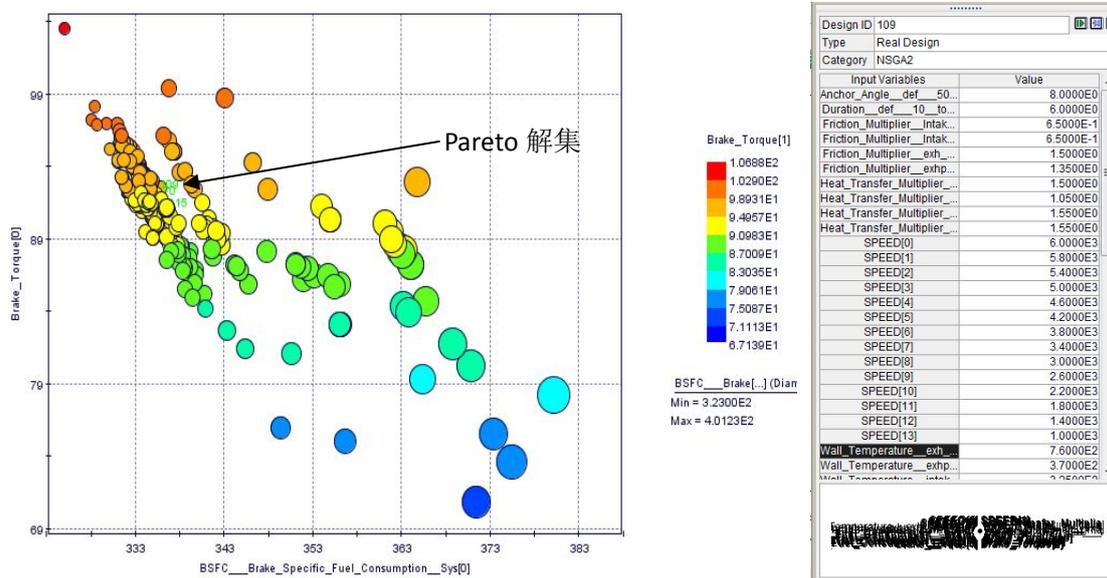


图 4-5 气泡图

优化过后的扭矩与油耗曲线与试验值对比如图 4-6 所示, 经过 500 个设计点的计算, 扭矩与油耗与试验值的误差在 0.5% 以内。

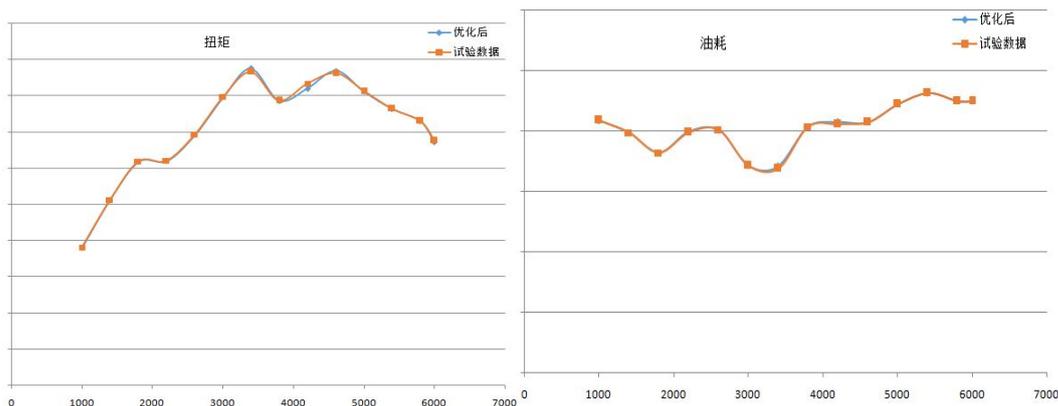


图 4-6 优化后扭矩与油耗曲线

5.2 变量与目标关系矩阵

从矩阵图 4-7 上可以看出对油耗影响较大的变量为点火角、10%–90%燃烧持续角、进气管道摩擦系数、排气道壁温、进气管道壁温，且各变量对油耗为正相关，即随着变量值的增加，油耗也相应的增加；对扭矩影响较大的变量为 10%–90%燃烧持续角、进气管摩擦系数、进气管道摩擦系数、进气管道壁温，且各参数对扭矩为负相关，即随着参数变量值的增加，扭矩值会减小。右下角深蓝色方块的值为-0.747，说明油耗和扭矩有着强负相关性。对于无相关性以及弱相关性的参数，在下一轮计算的时候可以剔除。各个变量与目标函数相关性如表 4 所示。

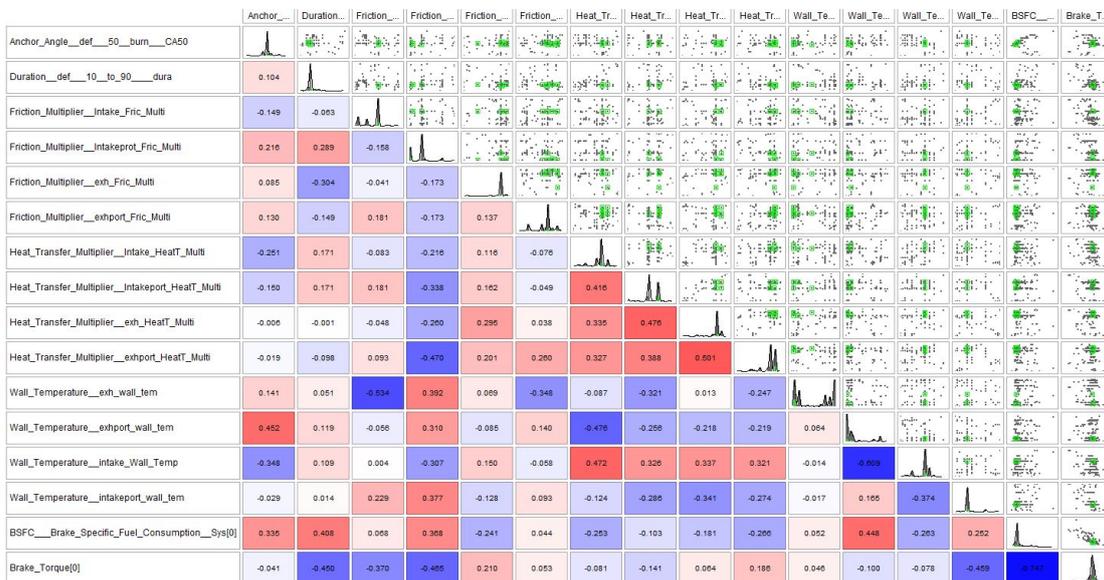


图 4-7 变量与目标关系矩阵

表 4 变量与目标函数相关性表

变量	名称	油耗相关性	扭矩相关性
CA50	CA50	正	无
Dura10%–90%	Dura10%–90%	正	负
Intake_Heat_Multi	进气歧管传热系数	负	无
Intake_Fric_Multi	进气歧管摩擦系数	无	负

Intake_Wall_Temp	进气歧管壁温	负	无
Intakeport_Wall_Temp	进气道壁温	正	负
Intakeprot_Fric_Multi	进气道摩擦系数	正	负
Intakeport_Heat_Multi	进气道传热系数	弱负	弱负
Exhport_Fric_Multi	排气道摩擦系数	无	无
Exhport_Heat_Multi	排气道传热系数	负	弱正
Exhport_Wall_Temp	排气道壁温	正	弱负
Exh_Wall_Temp	排气歧管壁温	无	无
Exh_Fric_Multi	排气歧管摩擦系数	无	无
Exh_Heat_Multi	排气歧管传热系数	弱负	无
Brake_Torque	扭矩	强负	--
BSFC	油耗	--	强负

5.3 响应面

分别提取出针对油耗和扭矩影响较大的两个参数，建立响应面，对油耗有较大影响的是进气歧管壁温和 dura10%~90%，随着进气歧管壁温和 dura10%~90%的增加，油耗也随之增加；对扭矩有较大影响的是进气歧管摩擦系数和进气道摩擦系数，随着进气歧管与进气道摩擦系数的增大，扭矩逐渐减小。

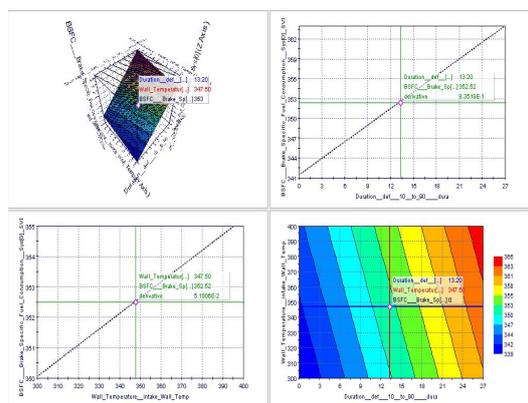


图 5-7 油耗的两个相关参数响应面

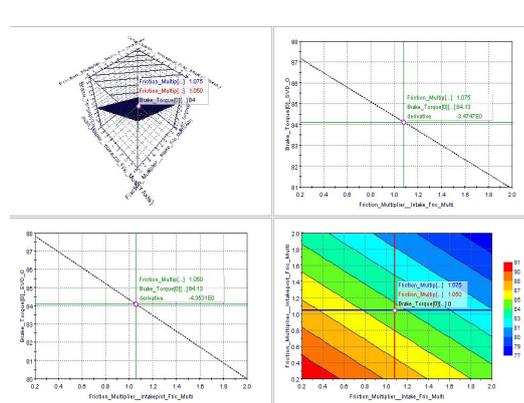


图 5-8 扭矩的两个相关参数响应面

6. 结论

- (1) 利用 modeFRONTIER 对一个 GT-Power 一维仿真模型进行标定，试验值与模拟值能够很好的吻合；
- (2) modeFRONTIER 软件应用于模型标定，能够快速确定参数的最佳值，节约了大量的模型标定时间；
- (3) 通过 modeFRONTIER 能够对参数与目标函数的相关性进行研究，得出对目标函数影响较大的参数，指导相关设计。

参考文献:

- [1] 周龙保. 内燃机学 (第 3 版) [M] .北京: 机械工业出版社, 2010
- [2] ModeFRONTIER User Guide
- [3] IDAJ.modeFRONTIER 算法介绍
- [4] GT-POWER user' s manual and tutorial [CP]. America Gamma Technologies, Version 7.0.0, 2003