

# 基于 modeFRONTIER 的 SUV 车型气动外形优化

## Aerodynamic Shape Optimization of SUV using modeFRONTIER

刘欢 张辉香 付杰

(奇瑞汽车股份有限公司)

**摘要:** 随着计算机技术的快速发展, 自动化气动造型优化方法成为一种热门降阻方法。本文给出一种基于 modeFRONTIER 构建的单目标 SUV 车型气动外形优化流程, 流程应用网格参数化变形技术对 CFD 网格进行变形得到新造型, 对参数的选取范围和敏感性进行了分析并得出气动阻力最优解。算例应用此自动化优化流程得到整车阻力降低 7.2% 的效果, 效率高, 满足工程化要求。

**关键词:** 造型优化、单目标、modeFRONTIER、DEP-Morpher、SIMPLEX

**Abstract** With the rapid development of computer technology, automatic aerodynamic shape optimization method becomes more and more popular. An automatic optimization process for the aerodynamic design of SUV shapes based on modeFRONTIER is presented. The process is based on using the parametric mesh morphing techniques to create new designs for analysis by morphing the CFD mesh of the original design. The range of parameters and the sensitivity are analyzed. Aerodynamic drag optimal solution is obtained. By using this process, the aero-drag decreased by 7.2%. The approach is highly efficiency and satisfies the requirement of engineering.

**Key words:** Shape Optimization、Simple Objective、modeFRONTIER、DEP-Morpher、SIMPLEX

## 1 前言

汽车空气动力特性对汽车的动力性、经济性等有着重要的影响, 降低气动阻力是改善燃油经济性的重要手段。由于高等级公路迅猛发展, 燃油价格上涨等重要因素, 汽车气动阻力的降低越来越占据重要地位。在满足结构设计、美学、人体工程学以及法规要求的同时, 降低气动阻力的设计空间不断缩小, 这使得空气动力学工程师面临更严峻的挑战。

整车气动性能设计分为风洞试验方法和 CFD 仿真分析方法。在过去的一段时间内, 各大型汽车企业针对车辆造型的空气动力学设计侧重风洞试验方法。其缺点是风洞试验所需模型制作成本高昂, 在风洞中对油泥模型进行修改需要大量时间, 进而带来试验成本的上升。传统仿真优化方法以经验设计为主导, 在仿真流程 (如图 1) 中的优化方案经常需要 CAD 工程师配合, 经历较长周期, 并且做着大量重复性工作, 有相当数量的仿真结果是无用的。传统流程面临着效率低、无法直接找到精确最优解的问题。

基于 modeFRONTIER 搭建自动化气动阻力优化流程 (如图 2) 集成变形软件 DEP-Morpher, 直接在网格文件上对造型进行自动更改, 可以代替从 CAD 数据更改再划分网格的过程; 自动化流程可以通过宏命令设置 CFD 分析过程中各项参数, 保证了其求解的稳定性, 同时节约了人工参与所需的时

间。自动化优化流程能够通过优化算法准确给出最优解以及对应的优化参数值，因此，自动化流程优化是未来气动降阻优化的重要途径。

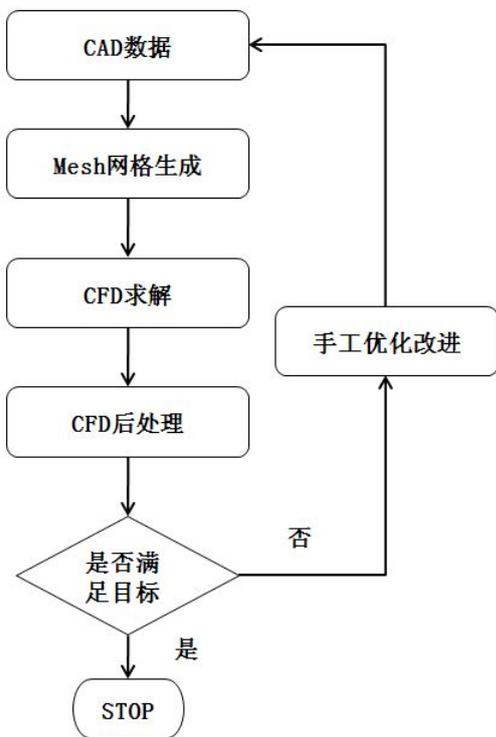


图1 传统优化流程示意图

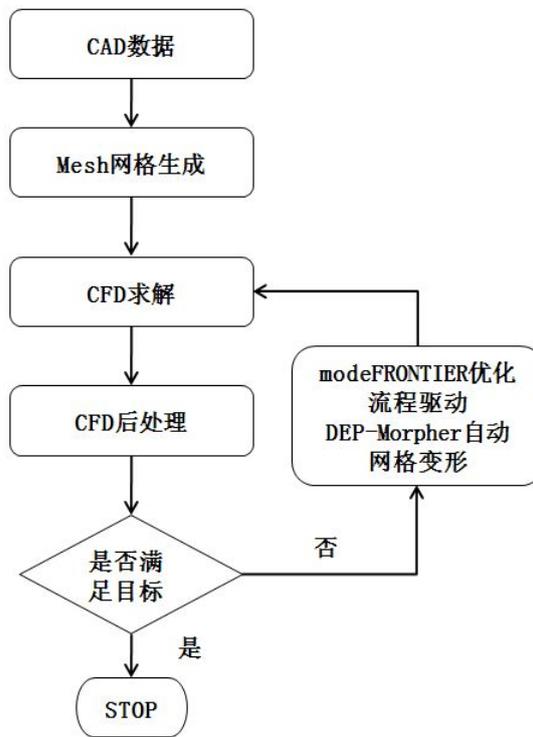


图2 自动化优化流程示意图

## 2 仿真优化流程

选取某 SUV 车型进行气动阻力仿真分析，基于基础模型分析结果以及同级别车优化经验选取敏感部位作为优化参数，基于 modeFRONTIER 优化软件搭建自动化优化平台，选取合适的 DOE 方法和优化算法，自动调用 DEP Morpher 进行网格参数化变形，给出新网格模型并利用 STAR-CCM+进行求解，利用 modeFRONTIER 对计算结果数据进行分析，确定敏感参数取值范围并给出最优解。

### 2.1 仿真模型描述及优化参数选取

模型采用半车对称面形式，模型简化处理了发动机舱、车身底部、车轮等位置。根据 Baseline 计算结果以及同级别车型优化经验，分别对前轮眉前方（如图 3）、后保附近（如图 4）、车顶扰流板（如图 5）三处选取五个参数进行优化设计。

表 1 优化参数说明表

参数名称	参数说明
front_bumper_y	变形区域如图 3，向车身外侧拉伸
rear_bumper_x	变形区域如图 4，向车身后侧拉伸
rear_bumper_y	变形区域如图 4，向车身外侧拉伸
spoiler_z	变形区域如图 5，扰流板向车身后侧拉伸
spoiler_x	变形区域如图 5，扰流板降低

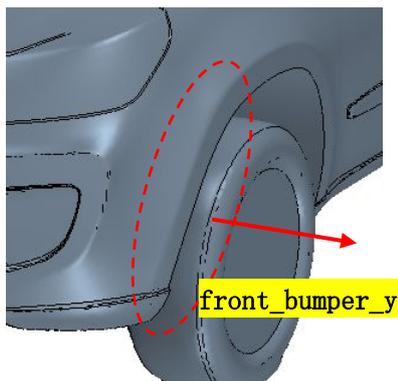


图 3 前轮眉前方变形区示意图

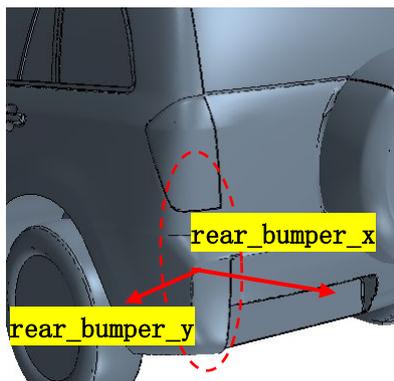


图 4 后保附近变形区示意图

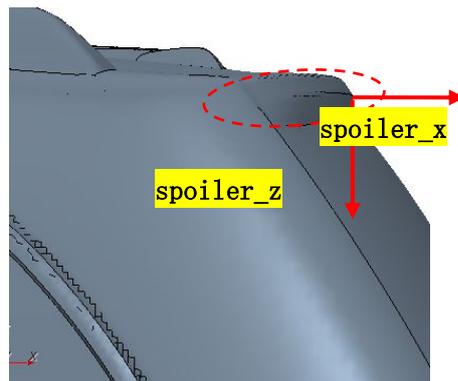


图 5 车顶扰流板变形区示意图

## 2.2 优化流程搭建

优化流程图（图 6）基于 modeFRONTIER 搭建，集成 DEP-Morpher 变形工具可以通过 DOS 命令流对其进行后台驱动，变形参数由优化流程中的 DOE 方法和 SIMPLEX 优化算法提供，变形后的网格文件自动传输至远程服务器供 STAR-CCM+ 流体分析软件调用；STAR CCM+ 由脚本文件进行控制，单点计算完成后自动输出力值，modeFRONTIER 利用 Calculator 判断计算是否收敛，如收敛，将此数值保存为此样本点结果。modeFRONTIER 通过优化算法自动寻优，给出最优解。优化流程如图所示：

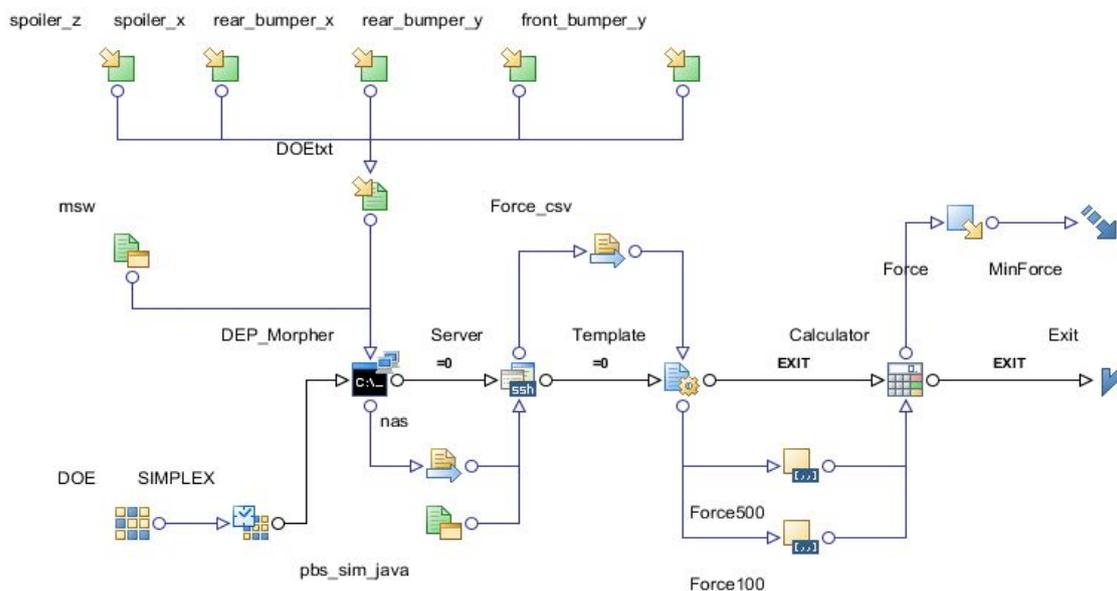


图 6 优化流程图

## 2.3 实验设计与优化算法

为了保证采样点在设计空间均匀分布，本优化流程采用 DOE 方法是优化拉丁方（Uniform Latin Hypercube）方法。因共选取五个参数作为输入变量，根据 Nelder-Mead SIMPLEX 算法要求，DOE 选取 N+1 个点进行初始计算，即通过优化拉丁方选取 6 个初始样本点，每个样本点分别由五个参数组成。

考虑到气动降阻优化具有较强的非线性度，并且满足在短时间内给出优化结果的工程需求，优化算法采用Nelder-Mead SIMPLEX算法。该方法的基本思想是：先给出若干个待反演参数初始值，算出目标函数值，根据这些函数值的大小关系找出目标函数下降的方向；在下降的方向上再找出一组反演参数值，计算出该组参数的目标函数值，比较新值和原来的函数值，找出新的函数下降方向；如此不断搜索，直到满足要求为止。

Nelder-Mead SIMPLEX 算法是使用单纯形的思想，对于 $N$  维空间可以构成 $N + 1$  顶点的多面体，亦即对于拥有 $N$ 个变量的函数，可以构成 $N + 1$ 个点。在计算开始时，先计算出每个点的函数值，查找出最大值的点( $G$ )和最小值的点( $S$ )，再计算除 $G$  点外的其他点的中点( $M$ ，一般取平均)，在 $G M$  连线方向上，计算 $G$  的反射点、扩展点、压缩点，若没有找到这些点，则在 $G$  至 $S$  的线段上计算一个收缩点若在这些点中，存在一个最佳点，则使用这个点作为一个新的有效点，替代 $G$  点，重现构成一个新的 $N + 1$ 多面体，如此进行，直到找到函数的最小值点。

### 3 结果分析

当优化历史图（图 7）显示其最优解波动较小、趋于平稳时，可以手动终止优化流程。

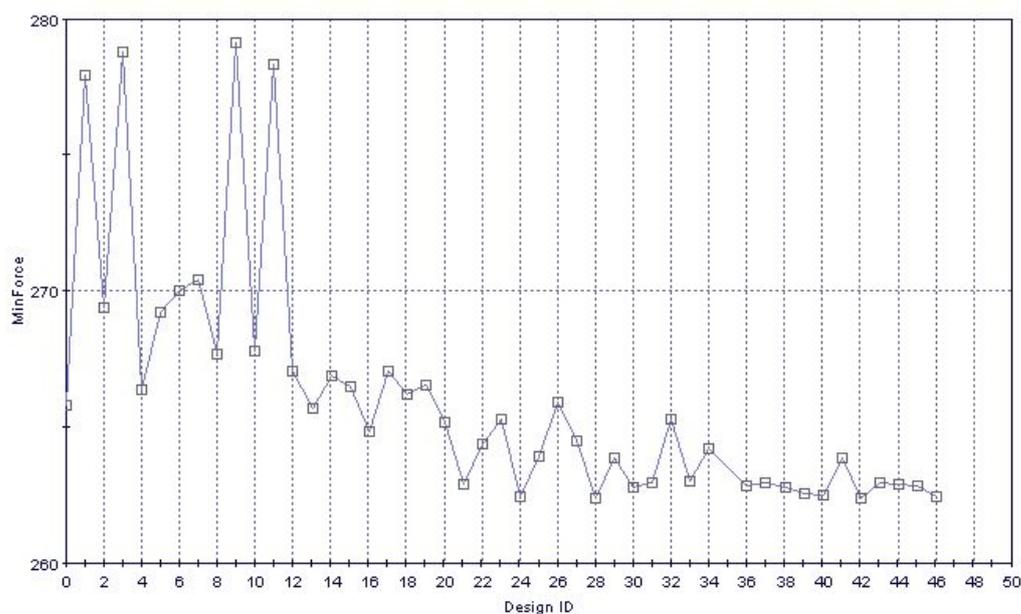


图 7 优化结果历史图

由优化历史图（图 7）可以看出，本优化总共进行 46 次计算，在 36#以后优化结果波动较小且趋于稳定，认为优化流程可以终止。

设计变量与优化目标相关性图能够表示出每个设计变量对结果的灵敏度。

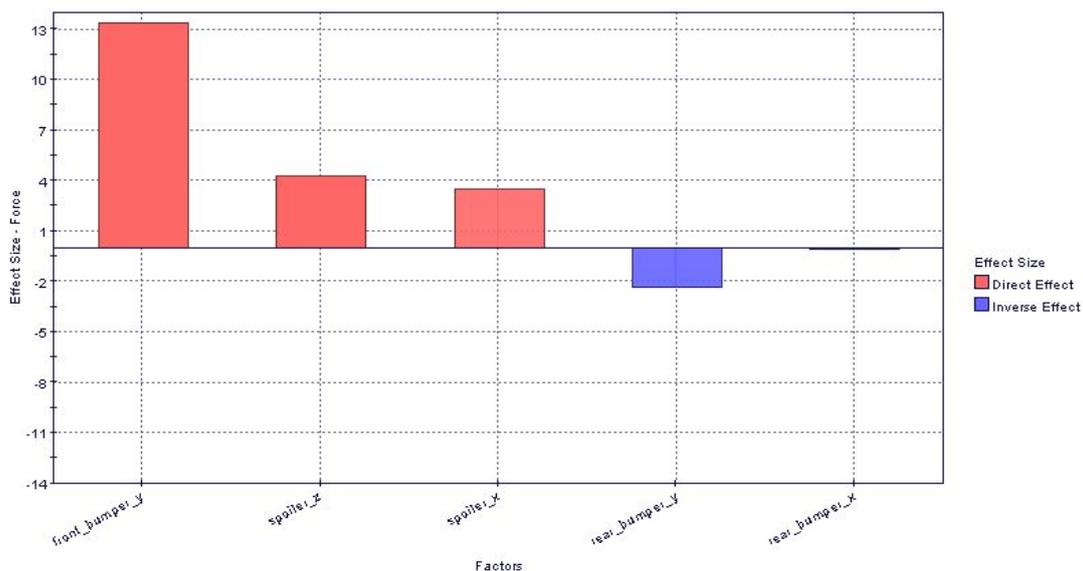


图 8 设计变量与优化目标相关性图

通过对设计变量与优化目标相关性图（图 8）分析可知，参数 front\_bumper\_y 对结果影响是显著的，从 CFD 后处理结果图（图 10、11）也可以看到此参数对车身压力分布的改善起到重要作用。故在有限的资源与约束条件下，应重点考虑采纳此处优化结果；参数 spoiler\_z 对尾部流场影响较明显，应予以重视；spoiler\_x 和 rear\_bumper\_y 对整车阻力影响相对较小；rear\_bumper\_x 对整车阻力几乎无影响，故可以中止对此参数的分析。

平行坐标折线图（图 9）给出了优化可达到的最小气动阻力值，同时给出了最优解对应的优化参数变化。

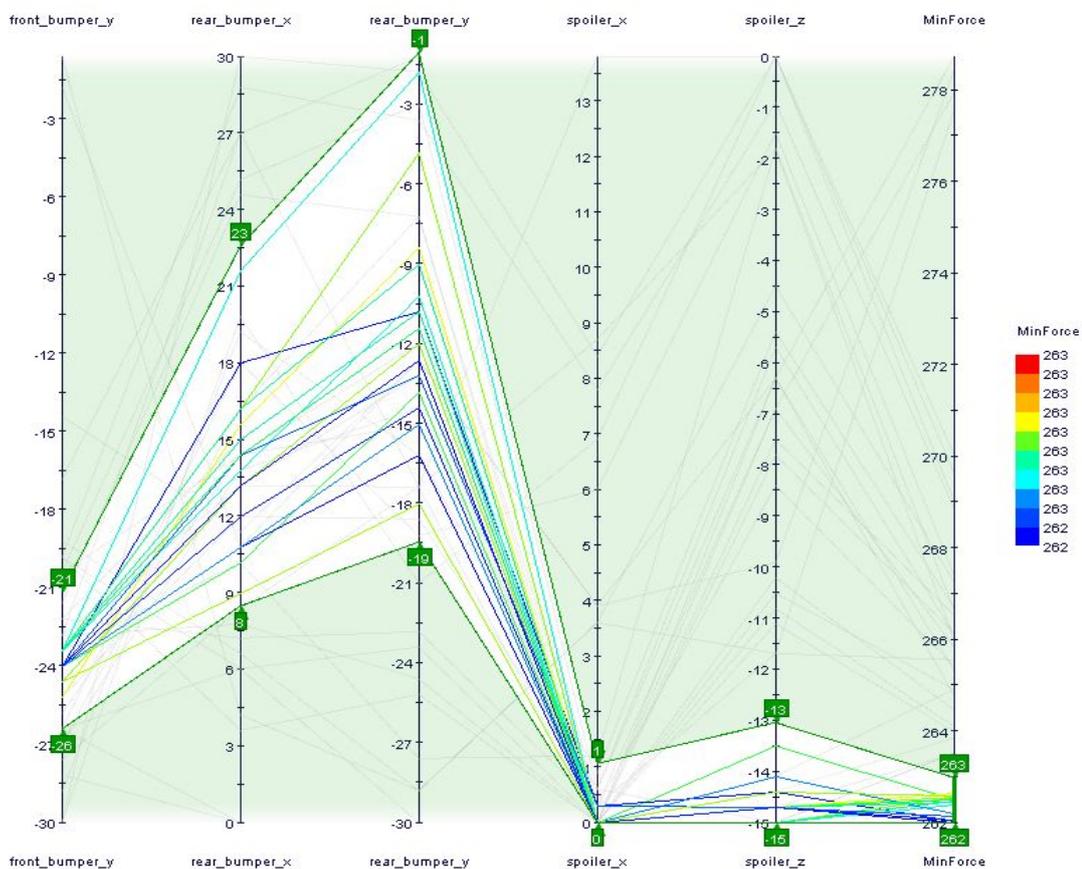


图 9 平行坐标折线图

参数 front\_bumper\_y 对整车的影响主要表现在前轮附近，spoiler\_x、spoiler\_z 和 rear\_bumper\_y 对整车影响主要表现在尾涡的分布。

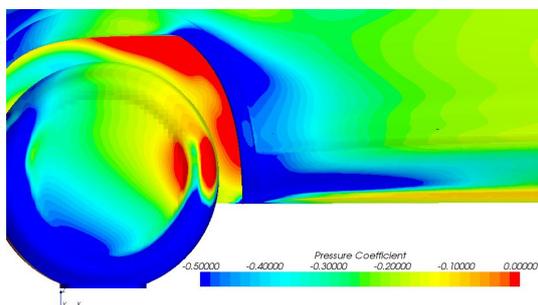


图 10 原车压力系数分布图

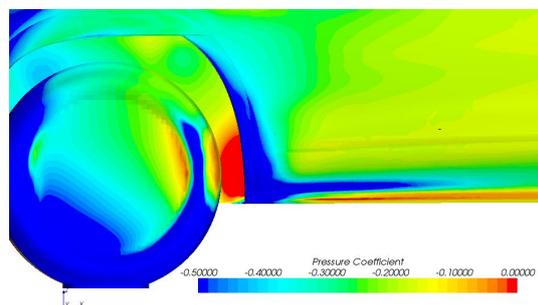


图 11 最优解压力系数分布图

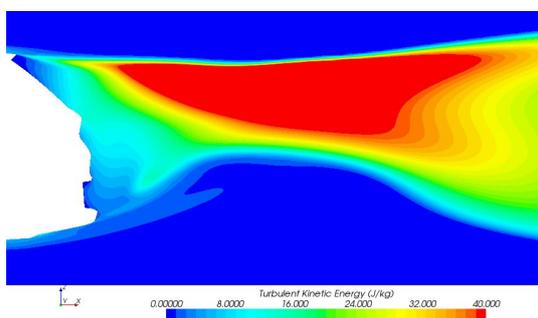


图 12 原车尾部湍动能损耗图

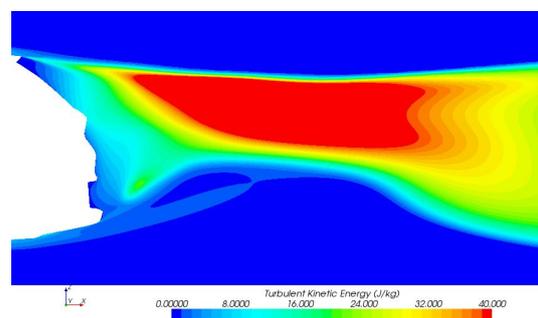


图 13 最优解尾部湍动能损耗图

通过结果对比，优化后整车阻力相对于原始模型降低了 7.2%，优化效果是可观的。从压力系数云图（图 10、11）对比可知，经过对前轮眉前方的优化后，车轮后方负压区有明显减小；从车辆尾部湍动能损耗图（图 12、13）可以看出，优化后的模型湍动能损耗区明显小于原车区域。

## 4 结论

本文基于 modeFRONTIER 给出了一种高效率的单目标自动化优化方法，其优点为能够迅速在设计空间内找到最优解，相对于代理模型优化方法，本方法每个样本点结果均为 STAR CCM+ 真实计算结果，流程简单、计算周期短，满足工程需求。

通过利用 modeFRONTIER 搭建自动化优化流程，可以较准确的找出某 SUV 车型的敏感区域，并能够得到最优解以及对应的变形参数值；各变形位置对结果的影响程度以及最优解对应的参数分布范围可以通过优化流程得出；由优化结果对比可知，优化效果可观，对于同类问题有着借鉴意义。

本优化流程效率与硬件资源密切相关，充足的计算资源是基本保障。利用 SIMPLEX 算法得到的最优解稳健性较差，本方法旨在抛砖引玉，对于最优解的稳健性需要进一步研究。

## 5 参考文献

- [1] 傅立敏编 《汽车空气动力学》[M] 机械工业出版社 2010 年 3 月

- [2] 龚旭, 谷正气, 李振磊, 等. 基于代理模型的集装箱载货车侧风下气动阻力的优化[J]. 汽车工程, 2012, 34(2): 133-137.
- [3] Robert Louis Lietz, Vehicle Aerodynamic Shape Optimization, [R]. SAE, 2011-01-0169, 2011
- [4] Rajneesh Singh, Automated Aerodynamic Design Optimization Process for Automotive Vehicle, [R].SAE , 2003-01-0993, 2003
- [5] Rajneesh Singh, Kevin Golsch, A Downforce Optimization Study for a Racing Car Shape, [R].SAE , 2005-01-0545