

基于 modeFRONTIER 软件的 Ahmed 模型空气动力学多目标智能优化研究

Multi objective intelligent optimization of aerodynamics of Ahmed model based on modeFRONTIER software

刘欢, 韩思远, 崔健

(华晨汽车工程研究院)

摘 要:多目标智能优化方法在汽车空气动力学领域有着重要的工程应用价值,本文采用 modeFRONTIER 软件基于 Ahmed 模型搭建多目标智能优化流程展开相关研究。本研究使用优化拉丁方试验设计 (Design of Experiments, DOE) 方法对参数进行采样,经过 CFD 仿真后,选择神经网络 (Neural Network, NN) 搭建近似模型建立参数与阻力系数和升力系数的对应关系,后使用多目标遗传算法优化。经过优化, Ahmed 模型阻力系数降低 46.6%, 升力系数降低 36.5%。

关键词: modeFRONTIER , 神经网络, 遗传算法, 智能优化, Ahmed 模型

Abstract: Multi objective intelligent optimization method has important engineering application value in the field of automotive aerodynamics. In this study, modeFRONTIER software is used to build multi-objective intelligent optimization process based on Ahmed model. The design of experiments (DOE) method of this study uses optimized Latin squares to sample parameters. After CFD simulation, this study chooses Neural Network (NN) to build an approximate model, and establishes the corresponding relationship between parameters and drag coefficient and lift coefficient. On the basis of approximate model, multi objective genetic algorithm (MOGA) is used to optimize. After optimization, the drag coefficient of Ahmed model is reduced by 46.6%, and the lift coefficient is reduced by 36.5%.

Key words: modeFRONTIER, Neural Network, Genetic Algorithm, Intelligent Optimization, Ahmed Model

1. 引言

汽车空气动力学性能对汽车的动力性、经济性和操稳等有着重要的影响,降低气动阻力可以显著改善车辆动力性和经济性,降低气动升力有助于提升车辆操稳性能。由于高等级公路迅猛发展,国家相关法规标准的日趋严格和燃油价格上涨等重要因素,汽车空气动力学性能的提升越来越受到各制造商和消费者的重视。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,降低气动升力的方法又常常与降低气动阻力的方法产生冲突,这使得空气动力学工程师面临更严峻的挑战。^[1]

当今,人工智能在科技进步和社会发展中扮演着越来越重要的角色。计算智能是借鉴仿生学的思想,基于人们对生物体智能机理的认识,采用数值计算的方法去模拟和实现人类的智能。神经网络具有自学习、自组织、自适应、联想、模糊推理等能力,在模仿生物神经计算方面有一定优势。进化计算是一种模拟自然界生物进化过程与机制,进行问题求解的自组织、自适应的随机搜索技术。遗传算法是进化计算中具有普遍影响的模拟进化优化算法。^[2]

车身尾部角度是决定尾涡形状、大小和位置的重要参数,对汽车空气动力学性能起到决定性作用。传统依靠工程师经验对研究对象进行优化的方法效率低,尤其涉及到多目标问题,找

到最优解较为困难。国内虽对汽车空气动力学智能优化展开相关研究，但是对多目标智能优化研究较少。本研究基于 Ahmed 模型^[3]进行尾部优化，通过优化拉丁超立方的方法对多组参数进行样本点采集，利用样本点 CFD 计算结果进行神经网络近似模型构建，基于此近似模型继续使用遗传算法进行寻优。本研究基于寻优结果提取 Pareto 前沿，根据经验选取工程可行最优解。

2. 仿真模型

Ahmed 模型在汽车空气动力学研究过程中发挥了重要的作用，许多论文基于此模型展开研究，其实验数据更是研究的强有力支持，因此，本研究亦将此模型作为研究对象。

2.1 模型简介

Ahmed 模型是 S.R.Ahmed 在 1984 年为研究汽车尾涡而设计的，其前端具有类似汽车的钝体特征，模型的尾部变形可以产生多种不同尾涡流场，对 Ahmed 模型开展尾部变形的研究可以对汽车尾部流场研究产生重要意义。Ahmed 模型尺寸为 1044mm×389mm×288mm，前端倒角半径为 100mm，离地间隙为 50mm。模型如图 1 所示。^[4]

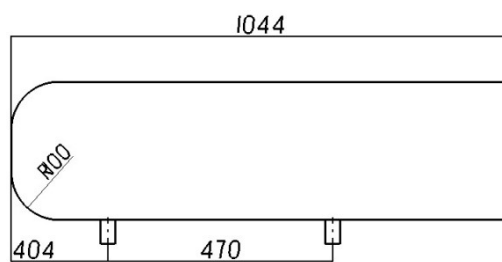


图 1 Ahmed 模型

2.2 参数定义

本研究拟对 Ahmed 模型尾部上方（Angle_top）、尾部下方（Angle_bottom）、尾部两侧（Angle_side）变形进行研究。变形量如表 1 所示，变形位置如图 2 所示。

表 1 Ahmed 模型尾部变形量说明

	Angle_top	Angle_bottom	Angle_side
范围	0~30°	0~10°	0~10°

本研究使用 ANSA 软件中自动参数化变形功能实现变形，利用 modeFRONTIER 软件控制变形参数的变化，调用 ANSA 软件对 Ahmed 模型进行参数化变形后，自动输出变形结果网格文件。

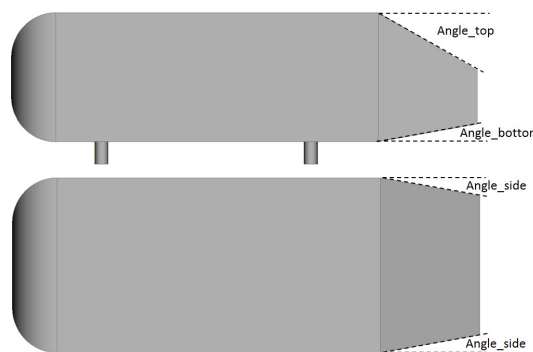


图 2 变形参数位置示意图

2.3 仿真模型标定

本研究采用 STARCCM+ 软件进行 CFD 求解计算，对于 Ahmed 基础模型（Angle_top=0°，Angle_side=0°，Angle_bottom=0°）进行 CFD 仿真计算，计算模型计算域入口到 Ahmed 模型前距离为 3 倍车长，计算域出口距 Ahmed 模型后端 7 倍车长，计算域入口尺寸 3m×3m，阻塞比约为 1.28%，满足工程分析对阻塞比要求。CFD 模型体网格总数约为 1200 万。本研究 CFD 求解选用 Realizable k-ε 模型进行稳态分析。仿真结果与试验结果误差如表 2。

表 2 Ahmed 模型仿真与试验结果对比

	仿真值	实验值	绝对误差
Cd	0.253	0.25	0.003

经过仿真结果与试验结果对比分析,误差小于 3%。认为本研究中 CFD 仿真方法精度满足智能优化流程计算,基于上述模型的 CFD 仿真求解设置可以应用与整体自动化优化流程求解。

3. 优化方法

3.1 理论基础

试验设计方法提供了合理而有效地获得信息数据的方法,在工程和科研中有着广泛的应用。本研究试验设计采用 modeFRONTIER 中的优化拉丁超立方设计方法,优化拉丁超立方设计使所有的试验点尽量均匀地分布在设计空间,具有很好的空间填充性和均衡性。优化拉丁超立方设计改进了随机拉丁超立方设计的均匀性,使因子和响应的拟合更加精确真实。

神经网络是基于人类大脑结构和功能建立起的启发的统计学习模型,神经网络可以从训练数据中通过学习建立近似模型来表征任意输入和输出变量之间的非线性关系。在人工神经网络中,被称为神经元的节点连接在一起,形成一个模仿生物神经网络的网络。人工神经网络与人类大脑类似,是由大量的简单处理单元相互连接构成的高度并行的非线性系统。结构上的并行使人工神经网络的信息存储采用分布式,其知识分布存储特性使得人工神经网络表现出良好的容错性。基于以上特点,神经网络模型呈现着高度的非线性,同时,神经网络能够处理连续的模拟信号以及不精确的、不完全的模糊信息,这使得神经网络给出的通常是满意解而非精确解。神经网络可以经过一段时间的训练或感知,对给定的输入产生期望的输出,因此,神经网络具有自学习、自组织和自适应性。人工神经网络的上述特点,使得它在优化计算中取得了较好的应用效果。^[5]

遗传算法的基本思想是用模拟生物和人类进化的方法来求解复杂问题。它从初始种群出发,采用“优胜劣汰,适者生存”的自然法则选择个体,并通过杂交、变异来产生新一代种群,如此逐代进化,直到满足目标为止。^[2]本研究采用 modeFRONTIER 中的多目标遗传算法(MOGA-II),MOGA-II 是多目标遗传算法的专有版本,它使用智能高效的多搜索精英法,能够保持优秀(Pareto 解或非劣解)解决方案,而不会过早地收敛到局部最优。精英法改进了算法的收敛性,并确保每新一代的适应度大于父代的适应度。

3.2 优化流程

本研究拟通过 DOE 优化拉丁方的方法对不同的参数组合选取足够数量的样本点进行 CFD 仿真计算,计算给出阻力系数和升力系数数值,基于计算结果通过神经网络近似模型构建参数与目标(阻力系数、升力系数)之间的关系,基于此近似模型继续应用多目标遗传算法进行寻优。优化流程如图 3。

本研究应用优化拉丁超立方方法选总计取 130 个样本点,基于计算结果利用神经网络分别对阻力系数、升力系数构建近似模型,对近似模型进行 R^2 检验,当 R^2 值大于 0.9 时,认为近似模型精度满足使用要求。建立近似模型后,基于此近似模型选择多目标遗传算法寻优。多目标遗传算法进行了 100 代进化,基于近似模型的计算量为 22000 余次,计算时间约 3 分钟。

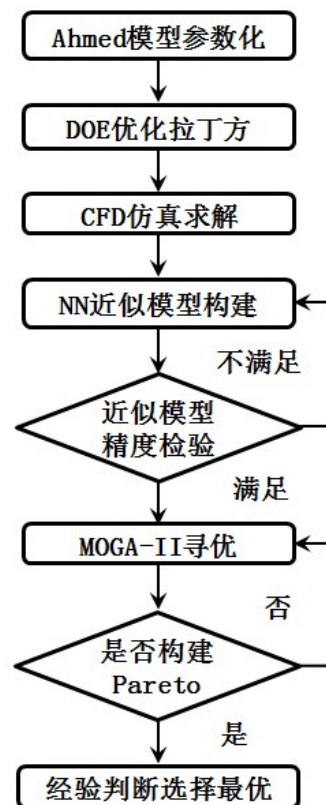


图 3 智能优化流程图

4. 结果分析

4.1 参数分析

通过对参数进行分析，Ahmed 模型三组参数中尾部两侧（Angle_side）变形对阻力系数影响最大；尾部上方（Angle_top）、尾部下方（Angle_bottom）变形对升力系数影响最大。其中，阻力系数随着 Ahmed 模型尾部两侧角度增大而降低，升力系数随着 Ahmed 模型尾部上方角度增大而升高，升力系数随着 Ahmed 模型尾部下方角度增大而降低。参数与目标关系如图 4、图 5 所示。

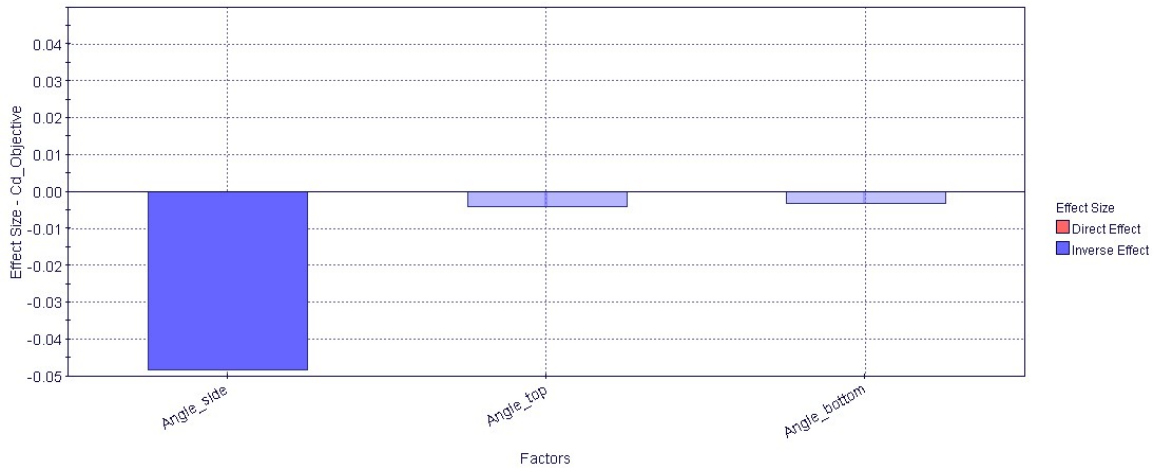


图 4 参数变化对阻力系数影响主效应图

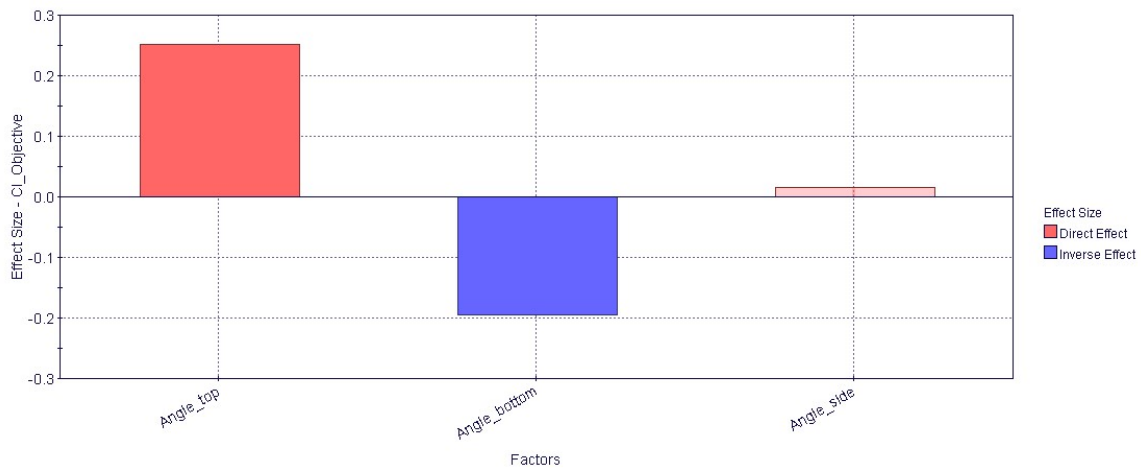


图 5 参数变化对升力系数影响主效应图

4.2 近似模型分析

DOE 计算完成后，基于计算结果利用神经网络分别对阻力系数、升力系数构建近似模型，通过 R^2 检验，利用神经网络对阻力系数构建的近似模型 R^2 值为 0.984；利用神经网络对升力系数构建的近似模型 R^2 值为 0.999，均大于检验标准 0.9，认为二者近似模型精度满足使用要求。

4.3 优化结果分析

对于阻力系数和升力系数基于各自的神经网络近似模型选择多目标遗传算法寻优后，得出 Pareto 前沿如图 6 所示。经过分析，认为本次寻优升力系数小于零既可以接受，故选择 Pareto 前沿图中最左侧结果作为最终结果。

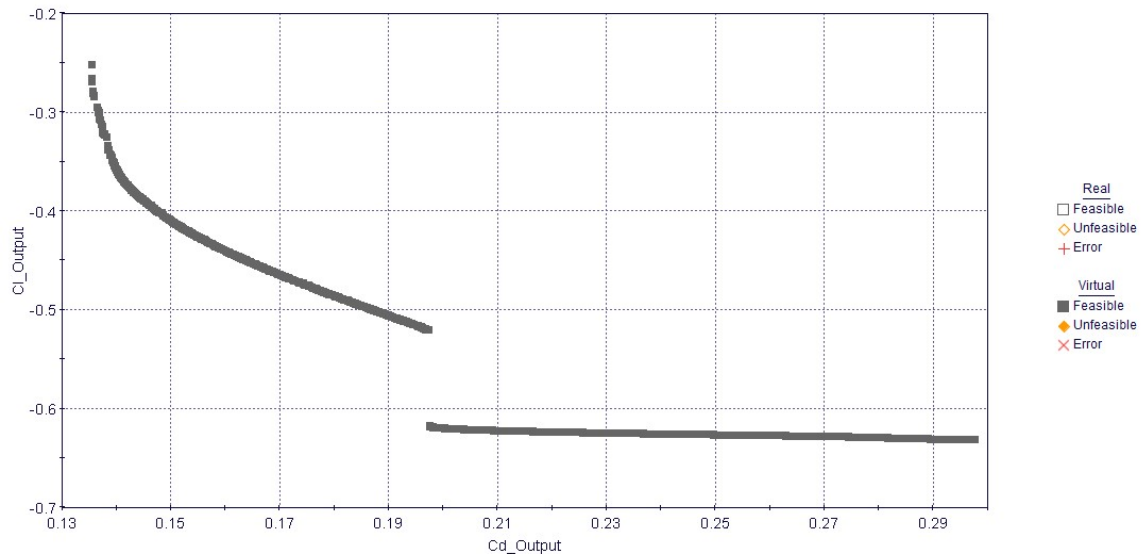


图 6 Pareto 前沿图

Ahmed 模型利用多目标遗传算法基于神经网络近似模型优化结果如表 3 所示。

表 3 Ahmed 模型最优结果

	Angle_top	Angle_bottom	Angle_side	Cd	Cl
最优值	15.2°	7.3°	10°	0.135	-0.251

将优化结果与基础模型对比，通过湍动能云图对比可知，经过尾部优化后，Ahmed 模型尾涡区明显减小，优化效果明显。

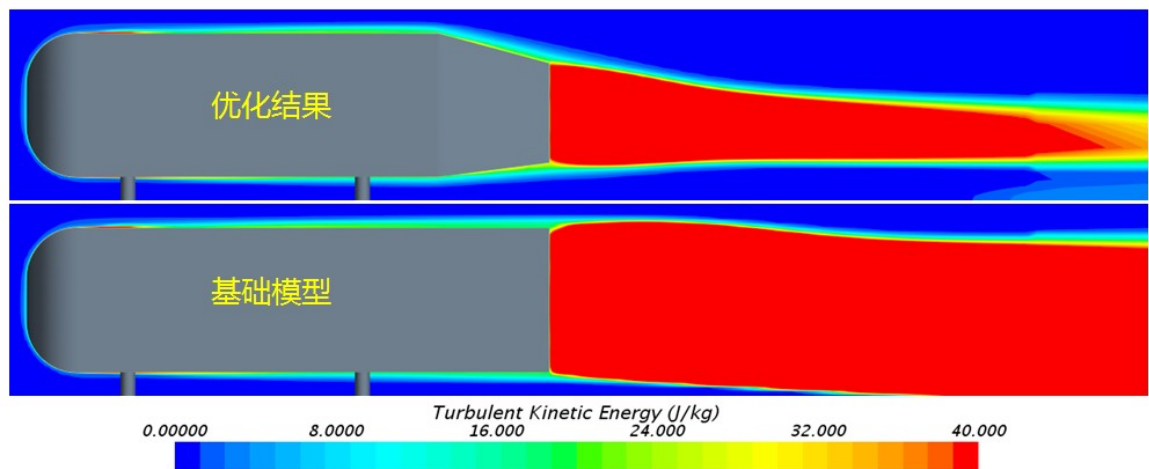


图 7 Ahmed 模型优化前后 Y=0 截面湍动能损耗对比图

将优化结果与基础模型对比,通过表面压力系数云图对比可知,经过尾部优化后,Ahmed 模型尾部压力明显升高,优化效果明显。

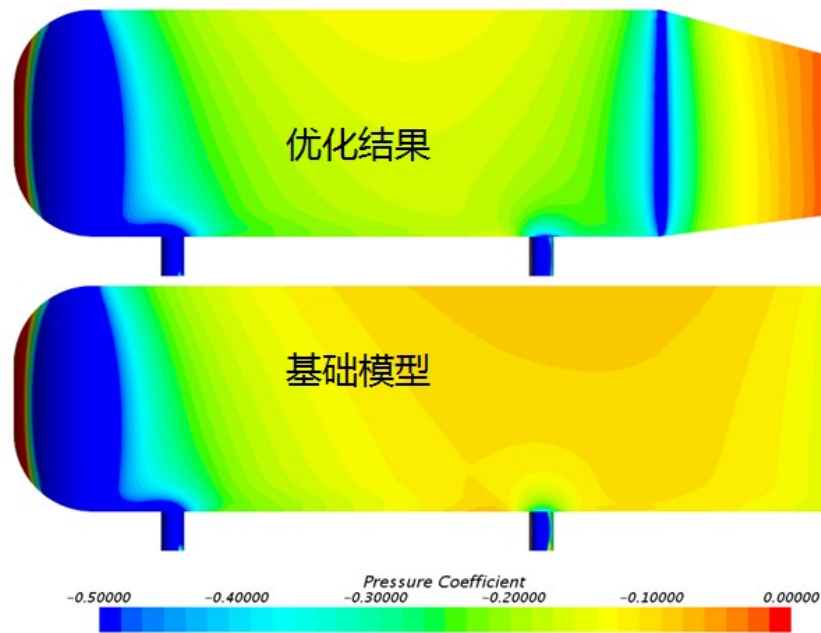


图 8 Ahmed 模型表面压力系数云图对比图

4.4 结果验证

因基于近似模型求解的最优结果与 CFD 仿真求解结果存在误差,故本研究对基于近似模型求解得出的最优参数进行 CFD 计算验证。验证结果为阻力系数误差-1.7%,升力系数误差 4.0%。如表 4 所示。

表 4 Ahmed 模型最优结果验证对比

	Angle_top	Angle_bottom	Angle_side	Cd	Cl
近似模型	15.2°	7.3°	10°	0.1354	-0.2518
CFD 计算	15.2°	7.3°	10°	0.1377	-0.2421
误差	-	-	-	-1.7%	4.0%

5. 结论

本研究讨论了 Ahmed 模型尾部上方、下方和两侧角度的改变对空气动力学性能影响,通过分析可知,阻力系数随着 Ahmed 模型尾部两侧角度增大而降低,升力系数随着 Ahmed 模型尾部上方角度增大而升高,升力系数随着 Ahmed 模型尾部下方角度增大而降低。本次优化阻力系数优化 46.6%,升力系数优化 36.5%。

本研究给出了多目标智能优化的方法,基于 modeFRONTIER 搭建了智能优化流程,利用神经网络近似模型构建了参数与阻力系数和升力系数两个目标的关系,在此基础上,使用多目标遗

传算法进行了优化，经过 CFD 验证，基于近似模型优化精度较高，对工程应用有着重要的指导意义。

5 参考文献

- [1] 刘欢等，基于 modeFRONTIER 的 SUV 车型气动外形优化，2013 年 idaj 中国区用户年会，2013
- [2] 王万森，人工智能原理及其应用（第三版）[M]，北京：电子工业出版社，2012.9
- [3] S. R. Ahmed, G. Ramm, G. Faltin. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake[R/OL]//(1984-02-01)<http://papers.sae.org/840300>
- [4] 刘欢等，基于 Ahmed 模型的汽车空气动力学智能优化方法研究，2017 汽车空气动力学分会学术年会，2017
- [5] 马锐，神经网络原理 [M]，北京：机械工业出版社，2010.7