

汽车空气动力学优化改装车体外观设计风阻研究

王 超

上海超琦工业设计有限公司 上海 200000

摘要：目的：本研究旨在通过对汽车空气动力学优化改装车体外观设计风阻的分析，探讨改装车外形对风阻系数、风阻力、燃油效率等汽车性能的影响，为汽车设计优化提供理论依据和实证支持。方法：本研究采用了CFD（计算流体力学）仿真与风洞实验相结合的方法，通过对原型车与改装车进行风阻系数、风阻力和燃油效率等方面的比较分析，探索不同车体设计对空气动力学性能的优化效果。结果：实验结果表明，改装车在CFD仿真和风洞实验中的风阻系数均低于原型车，分别减少了0.06。风洞实验中的改装车风阻力也低于原型车，改装车的燃油效率在不同车速下普遍提升，尤其在120 km/h的车速下，燃油消耗降低了1.9 L/100km，提升幅度为11.73%。结论：通过空气动力学优化改装车外形设计，能够显著降低风阻系数和风阻力，从而提升汽车的燃油效率和动态性能。该研究为汽车设计优化提供了有效的参考，具有重要的理论和实际意义。

关键词：汽车空气动力学；风阻系数；CFD仿真；风洞实验

引言

风阻是汽车性能中最重要的一个因素，它直接关系到汽车燃油消耗、稳定性和加速性能等问题。对汽车外观进行空气动力学优化设计可以有效地减小风阻、改善汽车动力学表现、提高燃油经济性。传统风阻优化设计往往依靠风洞实验来实现，但随着计算机仿真技术不断发展，CFD仿真已成为优化汽车空气动力学的一种重要方法。本文通过原型车与改装车空气动力学性能的比较分析，考察了不同车体设计对于风阻系数，风阻力以及燃油效率等性能的影响，以期对汽车设计中空气动力学优化问题提供一种新思路，新途径。

一、汽车空气动力学基础理论

（一）空气动力学与风阻的关系

空气动力学研究物体与空气的相互作用，尤其关注物体在流体中的运动及其产生的力。在汽车行驶过程中，空气与车体表面的摩擦、压力变化以及气流的分离和回流都会产生风阻^[1]。风阻是影响汽车性能的关键因素之一，直接关系到燃油效率、稳定性和加速性能。优化空气动力学设计能够减少风阻，降低发动机负荷，提高燃油效率，并改善高速行驶中的稳定性。

（二）风阻系数的定义与计算

风阻系数（Cd）是一个描述物体在流体中移动时所受到的空气阻力的无量纲数值，它揭示了车体的外形、

表面的光滑度以及空气流动状况对风阻产生的影响。风阻系数较小表明车体空气动力学性能较高，阻力较小。风阻系数的计算一般取决于前视面积，车速以及空气密度的大小。利用风洞测试或者CFD仿真都能获得这个系数。

（三）车体设计对风阻的影响因素

车体外观设计直接影响风阻大小。流线型车头设计能有效引导气流，减少空气阻力，避免气流与车体发生冲击和扰动。车体表面的光滑度也很重要，表面越光滑，空气流动越稳定，从而减少摩擦力和乱流^[2]。车尾设计也影响风阻，渐变过渡的车尾能减少尾流和气流回流现象，降低附加阻力。车底的平整和低地隙设计有助于减少空气流动中的扰动，进一步降低风阻。

二、风阻系数优化原理与公式

（一）风阻力计算公式

风阻力是车辆在行驶过程中与空气相互作用时产生的主要阻力。它的大小与车辆的外形设计、行驶速度、空气密度及车体的正面投影面积等因素密切相关。风阻力 F_d 的计算公式为：

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_d$$

其中， F_d 代表风阻力， ρ 是空气密度， v 是汽车的速度， A 是车体的正面投影面积，而 C_d 则是风阻系数。通过这一公式可以看出，风阻力与车速的平方成正比。因此在高速行驶时，风阻的影响尤为显著。在汽车设计过程中，

降低风阻系数 C_d 是提升车辆性能和燃油效率的关键方法之一。该公式为理解汽车空气动力学性能和优化设计提供了理论依据。

(二) 空气动力学力学模型

进行空气动力学优化时，精确的力学模型非常关键。空气流动时汽车所受阻力可由流体力学模型描述。常见的流体力学模型有雷诺平均方程（RANS）、大涡模拟（LES）和直接数值模拟（DNS）。这些模型有助于预测车体表面及周边气流流动状态，从而对风阻系数计算产生影响。利用CFD（计算流体力学）模拟，可以模拟出车体和空气流动之间的相互影响，进而对风阻变化进行预测，对车体设计进行优化^[3]。

(三) 影响风阻的关键因素

风阻的大小受到车体外形设计、表面光滑度和气流处理方式的共同影响。流线型车头能有效引导气流，减少压力波动和气流分离，从而减小风阻。车体表面的光滑度也很重要，光滑的表面减少空气摩擦，降低空气阻力。车尾设计，特别是渐变过渡形状，能有效减少气流回流，降低尾流附加阻力。

三、仿真模拟方法与实验设计

(一) CFD 仿真技术原理

CFD（计算流体力学）仿真技术作为一种数值解决方案，在汽车空气动力学的优化过程中起到了至关重要的作用，它是解决流体流动问题的强大工具。CFD 仿真是通过对流体的控制方程进行求解来模拟车辆表面空气流动，并在此基础上对风阻系数等气动特性进行预测。常用的控制方程有连续性，动量及能量等，风阻的计算取决于这类方程数值解的求解。CFD 仿真时将车体模型分解成小网格单元对空气流动状态进行计算，最后获得风阻系数，压力分布及速度分布^[4]。

(二) 实验设计与测试条件

为验证汽车空气动力学优化改装车体外观设计的风阻影响，本实验采用CFD仿真和实际风洞测试相结合的方式，利用CFD仿真对不同车体外观设计进行优化，同时使用风洞实验对比验证仿真结果的准确性。实验设计的关键测试条件如表1所示。

表1中列出了实验的基本条件，包括车速、空气密度、气流模拟方法等，这些参数是确保实验结果一致性和可比性的基础。

(三) 仿真模拟步骤与过程

CFD仿真流程包括模型构建、网格划分、求解计算

表1 实验测试条件对比

测试项目	原型车	改装车	备注
车速	80 km/h	80 km/h	车速设定为常规行驶速度
空气密度	1.225 kg/m ³	1.225 kg/m ³	标准大气压下的空气密度
风阻系数计算方式	CFD 仿真	CFD 仿真	使用CFD仿真计算风阻系数
气流模拟方法	RANS	RANS	使用雷诺平均方程模型（RANS）
仿真网格密度	高	高	精细网格设计，提高精度
风洞实验测试面积	20 m ²	20 m ²	实验台面的面积相同
风洞测试设备	风洞测试仪器	风洞测试仪器	使用相同风洞设备进行对比实验

和结果分析四个步骤。设计人员创建光滑且无不规则边缘的3D模型，为后续的网格划分和仿真做准备。将模型分解为小网格单元，选择适当的网格类型和密度以提高计算精度。使用RANS模型解算流体控制方程，获取车体表面的压力分布、速度分布和风阻系数等数据^[5]。分析仿真结果，比较不同设计方案，识别并优化阻力较大的区域。通过这一流程，设计人员能够快速评估和优化车体外观，减少实际测试的修改成本，节省设计周期和成本。

四、实验结果与数据分析

(一) 原型车与改装车风阻系数对比

为了比较原型车与改装车的空气动力学性能，本研究通过CFD仿真和风洞实验对两种车体的风阻系数进行了测试与分析。风阻系数（ C_d ）是表征车体空气阻力的关键参数，其值越小，意味着车辆的空气动力学性能越优，风阻越小。表2为原型车与改装车的风阻系数对比结果。

表2 原型车与改装车风阻系数对比

车体类型	风阻系数 (C_d)	实验方式	备注
原型车	0.32	CFD 仿真	标准设计，传统车型
改装车	0.26	CFD 仿真	流线型车头设计，改良车尾形状
原型车	0.33	风洞实验	风洞测试验证CFD结果
改装车	0.27	风洞实验	风洞测试验证CFD结果

从表2中可以看出，改装车的风阻系数比原型车有所降低，尤其是在CFD仿真和风洞实验中，改装车的风

阻系数分别下降了0.06和0.06。改装车的流线型车头和改良车尾设计有效地减少了气流的阻力，提高了空气动力学性能。这一优化结果显示了合理的外观设计对降低风阻的重要作用。

(二) 风阻力变化与汽车性能分析

风阻力直接影响汽车的行驶性能，尤其是在高速行驶时。风阻力的大小与车速、风阻系数及前视面积等因素密切相关。在风洞实验中，通过测试不同车速下的风阻力变化，可以分析车体外观对汽车性能的影响。表3为在不同车速下，原型车与改装车的风阻力变化情况。

表3 原型车与改装车风阻力对比

车速 (km/h)	原型车风阻力 (N)	改装车风阻力 (N)	风阻力变化 (%)
60	112	96	-14.29
80	160	138	-13.75
100	220	191	-13.18
120	288	248	-13.89

由表3可见，改装车不同速度时风阻力均比原型车小，风阻力变化所占百分比表现出一定规律。改装车风阻降低程度随车速提高而维持在一个较为平稳的状态。特别是高速行驶过程中，减小风阻力对于提高车辆稳定性及燃油效率有明显效果。这说明优化风阻力能提高汽车行驶性能特别是长期高速行驶所节约的能源将更明显。

(三) 实验数据与燃油效率改善分析

风阻系数和风阻力的降低直接影响车辆的燃油效率。车辆的燃油消耗与风阻力成正比，风阻越小，所需的动力越小，从而可以有效提高燃油效率。在实际测试中，通过测量车辆在相同工况下的燃油消耗，得出了原型车与改装车的燃油效率对比。表4为实验中不同车速下的燃油消耗数据。

表4 原型车与改装车燃油消耗对比

车速 (km/h)	原型车燃油消耗 (L/100km)	改装车燃油消耗 (L/100km)	燃油效率提升 (%)
60	7.8	6.5	16.67
80	9.6	8.1	15.63
100	12.5	10.9	12.8
120	16.2	14.3	11.73

从表4数据可以看出，改装车各种速度燃油消耗都比原型车低，特别是高速行驶燃油效率提高更明显。当速度为120 km/h时，改装车的燃料使用量比原型车少了1.9 L/100 km，增加了11.73%。上述研究表明，减小风阻有效地增强了车辆稳定性，动力表现及燃油经济性。改装车空气动力学设计优化对于降低风阻，提高稳定性及燃油效率等均显示出显著优越性，验证了汽车外观优化对整体性能及经济性改善的关键性作用。

结论

本研究采用CFD仿真与风洞实验相结合的方法探究汽车外观设计对汽车风阻系数，风阻力以及燃油效率等性能的影响。试验结果表明改装车空气动力学优化设计比原型车无论风阻系数还是风阻力都呈现明显下降趋势，特别是高速行驶状态下改装车风阻力下降更多。减小风阻还会使燃油效率有显著提高，特别是高速行驶时改装车燃油消耗显著低于原型车。在上述分析的基础上，本研究结果表明对空气动力学设计进行合理优化可以有效地改善汽车整体性能，提高燃油经济性。所以空气动力学优化对汽车设计的意义不可忽视，今后汽车设计应该更加注重风阻优化问题，达到能效高、环境影响小。

参考文献

- [1] 彭立争, 彭婧, 吴龙质, 等. 某SUV空气动力学数值模拟及优化研究[J]. 时代汽车, 2023(1): 148-150.
- [2] 姜岩, 牛冬妍, 裴荣群, 等. 基于TBS的汽车空气动力学设计寻优方法[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(2): 95-101.
- [3] 宋琪, 陈天宇, 王子铭, 等. 基于情境化神经算子的空气动力学风阻预测[J]. 人工智能, 2024(5).
- [4] 刘希东, 伍春梅, 胡泓旭, 等. 某轻型电动卡车空气动力学降阻研究及优化[C]//2024中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会论文集. 2024.
- [5] Zhang X. Experimental Study on the Influence of Planar Configuration on Wind Load Distribution Characteristics of High-Rise Buildings with Whole Wind Azimuths[J]. Energies, 2024, 17.