

进气系统空气滤清器流阻特性仿真及试验研究

赵岩¹, 孟建军¹, 朱永梅¹, 肖颜开²

1. 东风越野车有限公司东风特种装备事业部
2. 武汉平东滤清器有限公司

【摘要】 进气系统阻力过大将严重影响发动机的燃烧效率和功率输出,甚至影响整车的动力性、经济性和使用寿命。降低空气滤清器的流动阻力,提高滤清效率,延长使用寿命成为车辆进气系统设计开发的关键。本文首先通过台架试验获得某类型纸质滤芯的多孔介质模型,然后将此多孔介质模型代入到某车型进气系统前期设计开发阶段流阻特性仿真过程中。通过对仿真结果进行处理,得到该空气滤清器内部的压力场、速度场、速度矢量等分布情况,同时还得到了流阻特性的变化曲线。最后,通过对该空气滤清器实体零部件进行台架试验,测得各流量下进出气口的压差数据。对比仿真结果和试验数据之间的误差,分析总结出空气滤清器流阻特性的计算方法,为下一步空气滤清器的设计开发与优化改进提供了重要依据。

【关键词】 空气滤清器, 流阻特性, CFD, 多孔介质, 惯性阻力系数, 黏性阻力系数

Simulation and Experimental Study on Flow Resistance Characteristics of Air Filter in Intake System

Zhao Yan¹, Meng Jianjun¹, Zhu Yongmei¹, Xiao Yankai²

1. Dongfeng Special Equipment Division, Dongfeng Off-road Vehicle Co., Ltd.
2. Wuhan Pingdong Filter Co., Ltd.

Abstract: Excessive resistance of the intake system will seriously affect the combustion efficiency and power output of the engine, and even affect the power, economy and service life of the vehicle. Reducing the flow resistance of the air filter, improving the filtration efficiency and prolonging the service life have become the key to the design and development of the vehicle intake system. In this paper, the porous medium model of a certain type of paper filter element is obtained by bench test, and then the porous medium model is substituted into the simulation process of flow resistance characteristics in the early design and development stage of a vehicle intake system. By processing the simulation results, the distribution of pressure field, velocity field and velocity vector inside the air filter is obtained, and the variation curve of flow resistance characteristics is also obtained. Finally, through the bench test of the air filter entity parts, the pressure difference data of the inlet and outlet at each flow rate are measured. Comparing the error between the simulation results and the experimental data, the calculation method of the flow resistance characteristics of the air filter is analyzed and summarized, which provides an important basis for the design, development and optimization of the air filter in the next step.

Key words: air filter, flow resistance characteristics, CFD, porous media, inertial resistance coefficient, viscous resistance coefficient

引言

进气系统是车辆的重要组成部分,进气系统的性能影响着发动机和整车性能^[1]。空气滤清器是发动机进气系统的一个重要部件,对于保证发动机的正常工作、延长发动机的寿命具有重要的意义^[2]。空气滤清器既是性能部件,又是功能部件,尤其是过滤效率、通气阻力和容尘量等性能参数直接影响发动机的动力性、燃油(气)经济性、使用可靠性和耐久性等^[3]。空气滤清器的内部流动十分复杂,涉及三维紊流流动、多孔介质流动、多相流、传热、传质等,受空气滤清器内部复杂结构和工作环境的限制,要完全真实地了解其内部流动特性十分困难,依靠经验和试验手段来研制空气滤清器不但浪费大量的人力、物力,花费大量的时间,还无法给出空气滤清器内部全面的流动信息^[4]。随着计算机技术的飞速发展,计算流体力学(CFD)技术被广泛用在设计初期研究空气滤清器内部的速度场、压力场和速度矢

量等流场数据,为空气滤清器的开发和优化提供指导方向,缩短零部件开发周期,节省人力资源和研发费用的投入。

对空气滤清器进行流阻特性仿真的一般流程如下:首先,通过台架试验获得某类型纸质滤芯的惯性阻力系数和黏性阻力系数,建立滤芯的多孔介质模型;然后,建立整个进气系统含空气滤清器的3D模型,将多孔介质模型参数代入CFD仿真软件中,计算得到空气滤清器的流阻特性;最后,将该空气滤清器实体零部件进行台架试验,对比仿真结果和试验数据之间的误差。

1 多孔介质

1.1 多孔介质理论

对于滤芯,可以把它看作是一个多孔的连续空间,采用多孔介质模型。多孔介质模型的实质是在动量方程的源项中添加附加的动量损失项。多孔介质模型控制方程的附加动量源项由两部分组成,一部分是黏性损失项,另一部分是惯性

损失项。在 STAR-CCM+ 中, 流体在多孔介质区域, 单位长度的理论压降可用式 (1) 表示:

$$\frac{\Delta p}{L} = -(P_i | v | + P_v) v \quad (1)$$

式中, Δp 为通过多孔介质的压力损失, 单位为 Pa; L 为其长度, 单位为 m; v 为多孔介质表面的平均流速, 单位为 m/s; P_i 和 P_v 分别是决定多孔介质阻力的惯性阻力系数和黏性阻力系数, 单位分别为 kg/m^4 和 $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ 。这两个系数可以通过试验获得, 或者通过经验公式计算。本文即通过试验方法获得这两个系数。

1.2 滤芯多孔介质模型建立

根据空气滤清器厂家提供的该滤芯的阻力-流量试验数据, 见表 1, 拟合出 $\Delta p/L$ 与速度 v 的二次曲线, 如图 1 所示。与 (1) 式进行比较, 对应系数相等, 可以得到本模型的惯性阻力系数 $P_i = 395.11 \text{ kg}/\text{m}^4$, 黏性阻力系数 $P_v = 1321.5 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ 。

表 1 滤芯阻力特性试验结果

$v / (\text{m/s})$	$\Delta p / \text{Pa}$	L / m	$\Delta p / L / (\text{Pa/m})$
1.0	100	0.055	1818.2
1.3	130	0.055	2363.6
1.6	160	0.055	2909.1
1.8	210	0.055	3818.2
2.1	240	0.055	4363.6
2.3	290	0.055	5272.7
2.6	340	0.055	6181.8
2.9	390	0.055	7090.9
3.1	440	0.055	8000.0
2.4	300	0.055	5454.5
3.0	410	0.055	7454.5
3.6	540	0.055	9818.2
4.2	710	0.055	12909.1
4.8	850	0.055	15454.5
5.4	990	0.055	18000.0
6.0	1190	0.055	21636.4
6.6	1410	0.055	25636.4
7.2	1660	0.055	30181.8

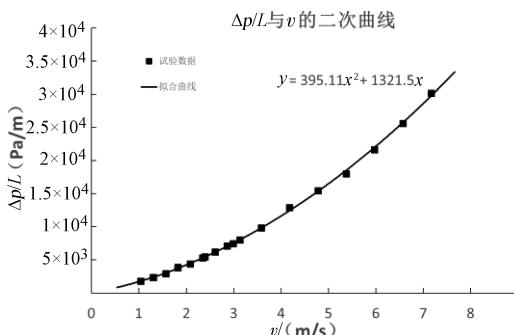


图 1 $\Delta p/L$ 与 v 的二次关系曲线

2 空气滤清器流阻特性仿真

2.1 3D 几何模型

利用三维建模软件 CATIA 建立整个进气系统的 3D 几何模型, 包括进气引入管、空气滤清器和出气胶管, 如图 2 所示。

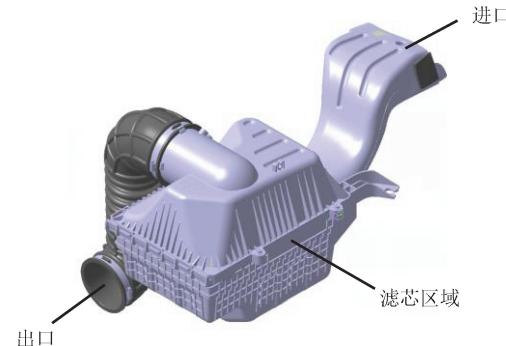


图 2 进气系统几何模型

2.2 网格模型

本实例中用到的计算域是指进气引入管、空气滤清器和出气胶管内部空气流经的区域。将整个进气系统几何模型简化, 删除不必要的零部件, 然后导入流体仿真软件中, 抽取内部流场并进行网格划分。本文采用多面体网格, 壁面生成棱柱层网格, 得到的 CFD 网格模型如图 3 所示。网格模型含节点 14829254 个, 单元 3718279 个。



图 3 进气系统 CFD 网格模型

2.3 简化与假设

为了简化模型, 本文做出如下假设。

- 1) 流体在流动过程中密度不变, 是不可压缩流体。
- 2) 工作过程中温度不变, 是等温过程, 整个流动过程中不存在热量交换。
- 3) 流体的物性与多孔介质 (滤芯) 为各向同性。

2.4 求解设置

选择三维、定常、恒密度、气体、分离流、K-Epsilon 湍流模型, 参考压力为一个标准大气压, 即 101kPa。进气系统直接吸入外部大气环境中的空气, 因此设定模型中流体介质为常温状态下的空气, 其基本参数见表 2。

表 2 空气参数

温度/K	压强/kPa	密度/kg·m ⁻³	动力黏度/Pa·s
298	101	1.184	1.855×10^{-5}

2.5 边界条件设定

1) 进口边界条件: 由于进气系统是在发动机作用下主动吸入外界空气, 因此, 进口可设定为停滞进口, 总压力为 0Pa。

2) 出口边界条件: 设定为质量流量出口, 质量流量分别为 0.11kg/s、0.14kg/s、0.17kg/s、0.2kg/s、0.23kg/s、0.26kg/s、0.29kg/s、0.31kg/s、0.34kg/s, 其中, 0.29kg/s 为发动机的额定流量。

3) 多孔介质区域: 滤芯区域设置为多孔介质, 惯性阻力系数和黏性阻力系数根据 1.2 部分试验获得。

4) 壁面条件: 均为无滑移壁面条件。

2.6 计算结果与分析

对不同流量下空气滤清器的内流场分别进行仿真计算。以发动机的额定流量 0.29kg/s 为例, 设置进口质量流量为监视量, 经过多次迭代计算直至结果收敛。对计算结果进行后处理, 得到流场的仿真结果, 见表 3。下面对计算得到的压力场、速度场和速度矢量场进行分析。取 X = -140mm, Y = 385mm, Z = 560mm 为关键截面。

表 3 0.29kg/s 流量下的仿真结果

流量/(kg/s)	进出口压差/kPa	滤芯阻力/kPa	滤芯阻力所占百分比
0.29	2.00	0.107	5.4%

2.6.1 压力场

整个进气系统的压力场如图 4 所示。由图中可以看出, 从进口到出口, 进气系统的压力逐渐降低, 滤芯下部腔体内压力较高, 滤芯区域自下而上压力有下降趋势; 滤芯上部腔体压力基本相等; 在出口管附近, 由于截面突然收缩, 压力梯度变化较为明显。进气系统压力损失主要包括 3 个方面, 一是壳体内壁面与气流摩擦产生的摩擦压力损失; 二是管路折弯和截面变化等引起的结构上的压力损失; 三是气流流经滤芯存在滤芯阻挡而产生的压力损失。在流量为 0.29kg/s 的情况下, 进出口压差为 2.00kPa, 其中滤芯阻力为 0.107kPa, 占总压差的 5.4%。

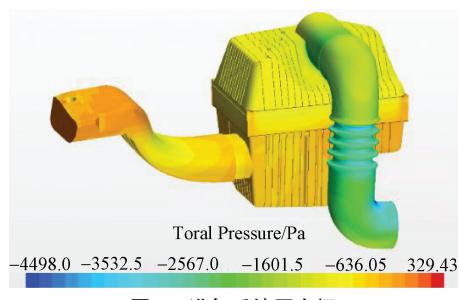


图 4 进气系统压力场

关键截面的压力场如图 5 所示。由图中可以看出, 压力的分布基本上可以分为四个区域, 其中压力最大区域为空气滤清器前端引气管部分。进气系统由于受到发动机吸气的作用, 整个系统内部基本处于负压状态, 且随着流动负压呈现逐渐增大的趋势。

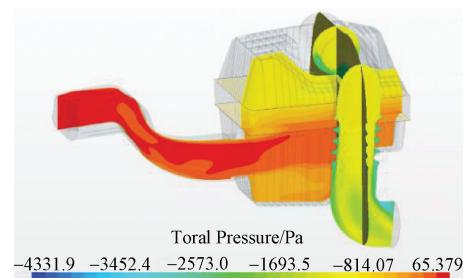


图 5 关键截面压力场

2.6.2 速度场

图 6 为进气系统内部的速度分布。由图中可以看出, 空气以接近 22m/s 的速度从进气引入管进口处流入, 在进气引入管区域流速基本不变。当空气由进气引入管流入滤芯下部区域时, 由于流通截面突然变大, 流速明显下降。之后空气又流经滤芯进入滤芯上部区域, 在此区域中速度没有明显变化。随后空气又进入出口管, 由于流通截面突然变小, 流速明显增大, 气流在出口管受到波纹段的影响, 使得此处的速度几乎为整个系统中速度最大的区域。

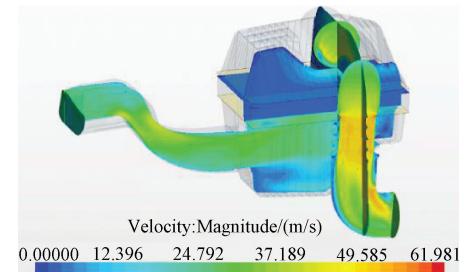


图 6 关键截面速度场

2.6.3 速度矢量场

图 7 为进气系统内部的速度矢量场。由图中可以看出, 空气可以顺利通过多孔介质滤芯区域, 且滤芯对空气速度有明显的阻碍作用, 空气经过滤芯后速度有明显减小。在滤芯内部, 速度矢量没有出现折返现象, 呈现层流状态, 这与设置的惯性阻力系数和黏性阻力系数的方向一致。在滤芯下部最低端排水口处速度有一部分向外发散的涡流矢量, 有助于将过滤的灰尘颗粒和雨水带到空气滤清器外部。

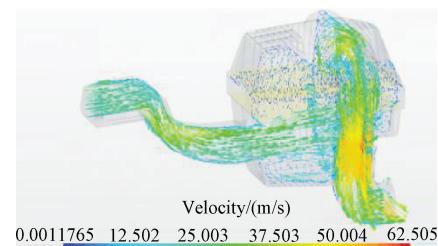


图 7 速度矢量场

(续)

3 台架试验

3.1 试验目的

本试验的目的在于测试该进气系统在不同流量下的进出气口的压力差，与仿真计算结果进行对比分析。

3.2 试验方法

将该进气系统放置于试验台架上，如图 8 所示。按照标准 QC/T 32—2017《汽车用空气滤清器试验方法》的要求进行试验，分别记录在流量 0.11kg/s 、 0.14kg/s 、 0.17kg/s 、 0.2kg/s 、 0.23kg/s 、 0.26kg/s 、 0.29kg/s 、 0.31kg/s 、 0.34kg/s 下进气系统进出气口的压力差。



图 8 试验台架

4 对比分析

表 3 和图 9 分别给出了在不同流量下，进出口压差的计算结果与试验结果的对比。可以看出，进出口压差会随着空气流量的增加而增大，且压差-流量的关系曲线表现出斜率随空气流量增加而变大的非线性特征。流量从 0.11kg/s 增加到 0.34kg/s 时，滤芯阻力数值在总进出口压差中所占的比例仅从 2.5% 增加到 6% ，由此也可以看出，该进气系统的结构阻力是整个系统总流阻的主要贡献部分。仿真计算得到的不同流量下的进出口压差与试验结果吻合良好，误差在可接受范围内。

表 3 计算结果与试验结果对比

空气流量 /(kg/s)	进出口压差/kPa		滤芯阻力 数值/kPa	滤芯阻力 所占百分比	
	计算结果	试验结果			
0.11	0.35	0.39	10%	0.00873	2.5%
0.14	0.53	0.59	10%	0.0176	3.3%
0.17	0.76	0.81	6%	0.0278	3.7%

空气流量 /(kg/s)	进出口压差/kPa			滤芯阻力 数值/kPa	滤芯阻力 所占百分比
	计算结果	试验结果	误差		
0.20	0.99	1.10	10%	0.0405	4.1%
0.23	1.25	1.42	12%	0.0552	4.4%
0.26	1.61	1.79	10%	0.079	4.9%
0.29	2.00	2.15	7%	0.107	5.4%
0.31	2.49	2.76	10%	0.144	5.8%
0.34	2.74	3.04	10%	0.164	6.0%

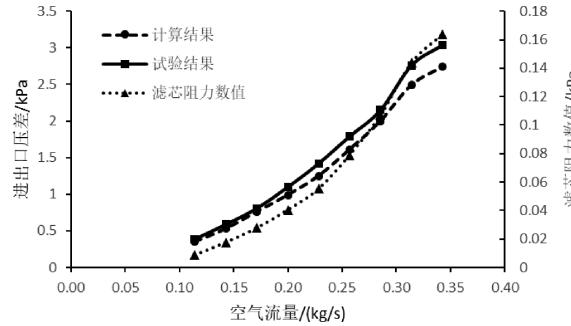


图 9 计算结果与试验结果对比

5 结论

本文通过台架试验获得纸质滤芯的多孔介质模型参数，将此多孔介质模型应用到进气系统内部流场的 CFD 仿真计算中，获得了压力场、速度场和速度矢量等数据，并进行了试验研究，对比分析得到以下结论与收获。

1) 通过对进气系统进行流阻特性仿真，全面评价了系统内部的气体流动情况，这些数据是试验方法无法获得的，为空气滤清器设计前期的流体动力学性能预测和快速低成本地优化改进提供很好的研究手段。

2) 稳态工况下进出口压差仿真结果与试验结果吻合良好，证明本文中多孔介质模型的建立及仿真分析流程方法的可靠性，仿真结果具有足够的精度。

3) 随着空气流量的增加，滤芯阻力占系统总阻力的比例有所增长，但在各试验流量条件下，系统的结构阻力才是整个系统总流阻的主要贡献部分。

4) 该进气系统在发动机负荷范围内具有较好的流阻特性，额定流量为 0.29kg/s 时进出口压差仿真结果为 2.00kPa ，试验结果为 2.15kPa ，误差仅为 7% ，满足小于 3.7kPa 的设计目标。

参 考 文 献

- [1] 王治林. 基于 CFD 的车辆进气系统流场仿真与分析 [J]. 工程设计学报, 2011, 18 (4): 265-269.
- [2] 刘峰. 高尘环境下车用新型组合滤清器的设计及仿真 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [3] 陈晓玉. 摩托车空气滤清器性能检测方法探讨 [J]. 摩托车技术, 2005, 7: 25-2.
- [4] 孙阳. 不同多孔介质模型对空气滤清器仿真分析结果准确性影响的研究 [C]//2014 中国(北京)国际过滤技术高峰论坛会议论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2014.