

汽车空气滤清器进气阻力分析

袁志群^{1,2}, 黄飞健¹, 刘金武¹, 许西安¹

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;
2. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 为了降低汽车空气滤清器进气阻力,应用计算流体动力学方法建立壳体和滤芯的耦合数值计算模型.利用正交分析方法研究进排气口结构参数对进气阻力的影响规律,总结进气阻力随流量变化的关系式,通过滤芯的流量-压降实验验证数值计算方法的可靠性.结果表明:进气阻力随着流量的增加呈抛物线趋势增加;在额定流量工况下,进气阻力随着出气口面积的增加而减小,负载时最大降幅达到 37.2%;进排气口圆角半径越大,进气阻力越小,负载时最大降幅分别达到 16.6%和 36.2%.

关键词: 空气滤清器; 进气阻力; 结构参数; 计算流体动力学; 数值计算

中图分类号: TK 402

文献标志码: A

进气系统性能是发动机性能的重要保障,结构设计缺陷将导致进气系统阻力增大,影响发动机燃油经济性和动力性.此外,进气阻力增加会导致内部真空度增加,对各接口密封性提出更高要求.空气滤清器是发动机进气系统的重要组成部分.以往进行空气滤清器结构设计时主要依靠经验公式及工程师的经验,通过试制的方法进行.因此,结构设计初期不能准确地预测产品的性能,而需要等到试制品完成后,通过实验的方法分析产品性能,耗时耗力.通过计算流体动力学的方法,能适时准确判断产品性能,并且获得许多实验方法难以实现的数据,找出结构设计中的问题,及时进行结构改进,从而降低成本,缩短产品研发周期^[1-6].文献[7]研究进气管管径大小和插入长度对进气性能和消声性能的影响.文献[8-9]对空气滤清器流动阻力特性进行实验和仿真研究.从现有研究成果来看,更多的工作主要是对不同车型的空气滤清器进行改进,不具有通用性,无法全面反映空气滤清器的结构参数对进气阻力的影响规律.基于此,本文对乘用车常用的褶皱干式空气滤清器进气阻力进行分析与研究.

1 数值计算模型的建立

为了总结空气滤清器结构参数对进气阻力影响的普遍性规律,建立乘用车常用的褶皱干式空气滤清器几何模型.该模型由上、下壳体及滤芯等 3 部分组成.利用 UG 建立内流场 1:1 几何模型,保留结构全部特征.空气滤清器数值分析模型与空气实际流动区域具有一致性,共分为上、下壳体自由流动区域和中间滤芯多孔介质流动区域.

在前处理软件 ICEM-CFD 中,采用 OCTREE 方法对空气流动区域进行离散,如图 1 所示.在空气滤清器壳体表面拉伸出与其平行的三棱柱网格,以满足壁面函数的需求,精确模拟壳体表面的附面层.在流动变化剧烈的区域进行网格加密,通过采用不同的网格数目验证

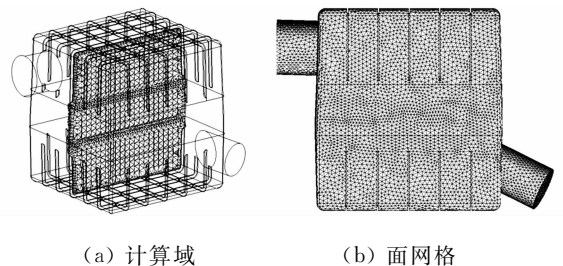


图 1 空气滤清器网格划分

Fig. 1 Air filter mesh

收稿日期: 2015-11-23

通信作者: 袁志群(1983-),男,讲师,博士研究生,主要从事车辆空气动力学的研究. E-mail: yzqhnu@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405517, 51405411);福建省教育厅科技项目(JB13151);福建省厦门市重大科技计划项目(3502Z20100080)

了网格的无关性. 数值分析模型网格达 90 万. 测试表明, 划分的网格单元数足以消除网格密度的影响.

为了简化计算, 对数值分析模型作如下 3 点假设: 1) 空气滤清器内部流动速度远小于音速, 空气密度变化基本为零, 假设为不可压缩流体; 2) 在入口流量一定的情况下, 空气滤清器内部流动作定常处理; 3) 滤芯内部各物性参数各向同性.

空气滤清器内部流场基本控制方程为三维不可压缩雷诺时均方程, 湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 方程, 壳体近壁区域采用壁面函数进行修正. 计算采用二阶迎风格式, 方程求解采用 SIMPLE 算法. 入口采用速度入口边界条件(根据厂家提供的额定空气流量和入口面积转化成速度数据), 出口采用压力边界条件, 壳体壁面采用无滑移壁面边界条件, 滤芯采用多孔介质模型. 流体流经多孔介质时遵循 Darcy 定律, 多孔介质流动控制方程是在雷诺时均方程中增加一个负的动量源项, 由黏性损失项和惯性损失项两部分组成. 对动量源项在滤芯厚度方向进行积分, 得到多孔介质模型计算经验公式为

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\mu}{\alpha} v + \frac{\rho c_2}{2} v^2.$$

式中: p 为压力; Δx 为滤芯厚度; v 为渗滤速度; α^{-1} 为粘性阻力系数; c_2 为惯性阻力系数.

通过试验台架测得空气滤清器滤芯的压降 (Δp)-流量 (Q) 变化关系, 结合多孔介质模型计算公式, 得到计算所需参数. 通过数值分析的方法计算滤芯的压降, 与实验数据进行对比, 误差控制在 6% 以内, 结果如表 1 所示. 表 1 中: η 为误差. 表 1 验证了文中数值计算方法的准确性.

滤芯试验在空气滤清器性能试验台架上完成, 其测试原理如图 2 所示. 图 2 中: 左端连接灰尘喷射器, 用于测验滤芯的粉尘过滤性能; 右端连接流量控制阀和抽气机, 用于测验滤芯在不同流量下的性能.

表 1 滤芯压降计算值和实验值对比

Tab. 1 Comparison of the calculated value and experimental value of the pressure drop in the filter

$Q/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\Delta p/\text{Pa}$		$\eta/\%$
	计算数据	实验数据	
80	137.4	144.4	4.8
120	233.5	244.6	4.5
160	351.1	368.4	4.7
200	486.0	506.8	4.1
240	601.2	634.2	5.2
280	721.7	762.1	5.3

2 分析与讨论

2.1 空气滤清器进气阻力分析

汽车空气滤清器流动性能的重要指标是进气阻力, 其大小直接影响进气效率. 进气阻力^[10]定义为: 当空气流过总成时, 其上、下游压力损失. 首先, 应确定上、下游压力降, 然后, 根据上、下游由于管道截面积变化引起的流速变化所产生的动压加以修正. 进气阻力的定义公式为

$$\Delta p_r = (p_{j, \text{下}} - p_{j, \text{上}}) - \left(\frac{\rho v_{\text{下}}^2}{2} - \frac{\rho v_{\text{上}}^2}{2} \right).$$

空气滤清器的进气阻力试验需要以空气滤清器的额定空气体积流量为标准, 按额定空气体积流量的 40%, 60%, 80%, 100%, 120% 分别进行测取. 空气滤清器在空载和负载情况下进气阻力与流量 (Q) 的变化关系, 如图 3 所示. 由图 3 可知: 随着进气量的增加, 进气阻力呈抛物线关系增长; 在负载工况下, 增加趋势更加明显, 壳体本身所引起的进气阻力占主要部分. 因此, 合理的结构设计对于降低进气阻力至关重要.

应用最小二乘法对数据进行拟合, 可得进气阻力与流量的关系式: 1) 负载时, $\Delta p_r = 0.0326Q^2 + 1.3551Q$; 2) 空载时, $\Delta p_r = 0.0272Q^2 + 0.0417Q$.

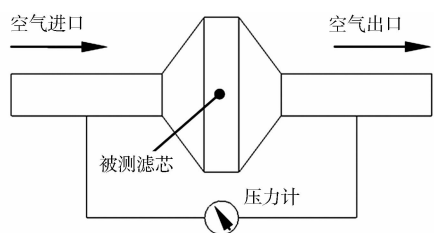


图 2 滤芯压降测试原理

Fig. 2 Testing principle of pressure drop in the filter element

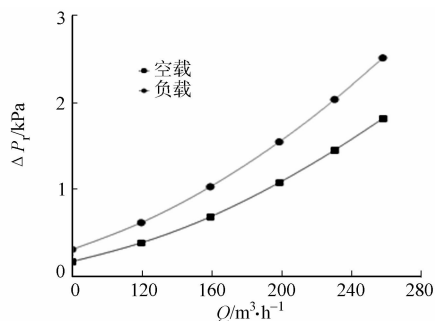


图 3 空气滤清器进气阻力与流量关系

Fig. 3 Relationship between air intake resistance and flow rate in the air filter

入口截面压力的分布云图, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 空气滤清器内部压力呈现递减趋势, 空气从进

气口进入上壳体以后,在正对入口截面的上壳体壁面上,气流受到阻滞,速度下降,压力上升.因此,出现局部的压力升高.结合图3数据分析可知:气流在空气滤清器内部流动过程中,压力损失主要来自于壳体本身,滤芯所占比重较小,并且随着流量的增加,趋势越明显.

空气滤清器的三维流场,以及入口截面速度云图与流线图,分别如图5,6所示.由图5,6可知:空气滤清器内部流场主要存在2个涡系,分布在上壳体中,分别在平行和垂直于滤芯平面的截面上;涡系的存在使气流不能顺畅地通过滤芯,并且滤芯表面的速度分布不均匀;进气管与壳体过渡部分为直角,气流从进气管进入后,存在局部的分离涡系;下壳体气流平均速度偏小,不能及时从出气口流出.这些因素都降低了进气效率,造成进气阻力偏大.

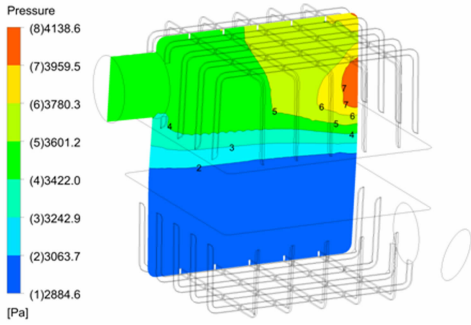


图4 入口截面压力分布云图

Fig. 4 Pressure distribution of inlet section

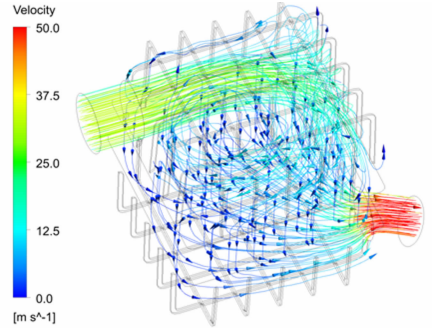
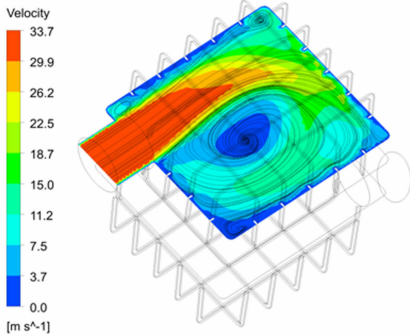
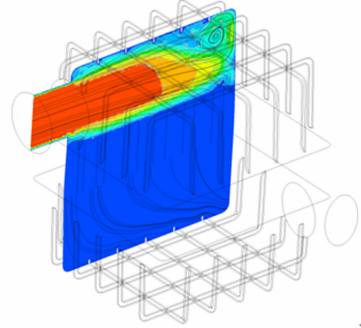


图5 空气滤清器三维流场

Fig. 5 3D airflow of air filter



(a) 速度云图



(b) 流线图

图6 入口截面速度云图与流线图

Fig. 6 Velocity contour and flow chart of inlet section

从以上分析可知,空气滤清器上壳体涡系较为复杂,下壳体平均速度偏小,因此,进气效率低,进气阻力偏大.

2.2 空气滤清器结构参数对进气阻力的影响

空气滤清器结构参数示意图,如图7所示.以下将主要从对上下壳体流动特性影响较大的进出气口结构参数入手,分析进出气口结构参数,如进出气口面积比(S_1/S_2)、进气口圆角半径(R_1)和出气口圆角半径(R_2)对进气阻力的影响规律,结果如图8所示.

2.2.1 进出气口面积比 保持进气口截面积 S_1 不变的情况

下,改变出气口 S_2 的大小,分析空气滤清器在额定空气流量工况下进气阻力随进出气口面积比变化规律,如图8(a)所示.由图8(a)可知:随着进出气口面积比的增加,空气滤清器在空载和负载情况下进气阻力基本呈线性趋势增加.这是因为进出气口面积比越大,出气口面积相对较小,气流从出气口流出不顺畅.因此,在结构设计时应该尽可能加大出气口面积,提高空气滤清器进气效率.

由图8(a)还可知:进出气口面积比变化对滤芯的阻力基本无影响.此外,进出气口面积比由1.5减小为0.8,相应的出气口面积增加89.8%,则空气滤清器空载时进气阻力降低49.6%,负载时进气阻力

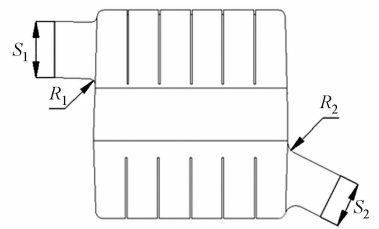


图7 空气滤清器结构参数示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the structural parameter of the air filter

降低 37.2%。

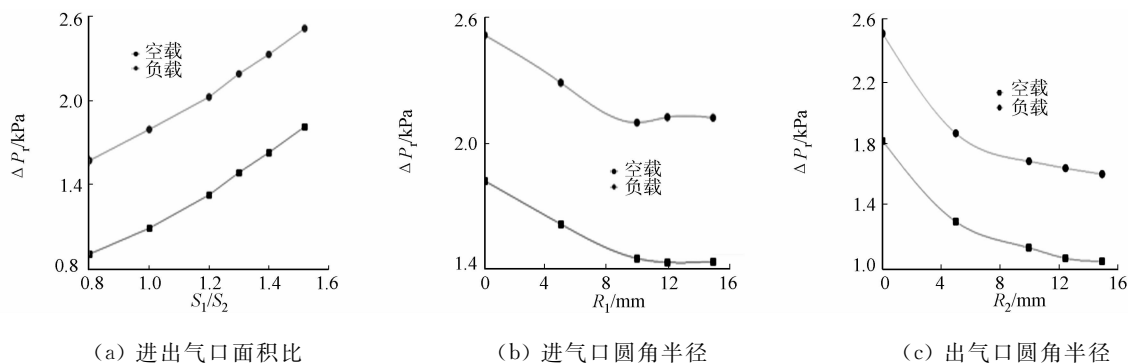


图 8 空气滤清器结构参数对进气阻力影响

Fig. 8 Influence of structural parameters of air filter on air intake resistance

2.2.2 进气口圆角半径 保持进/出口面积比为定值 1.5, 改变进气口与壳体的圆角半径 R_1 , 分析空气滤清器在额定空气流量工况下进气阻力随进气口圆角半径的变化规律, 如图 8(b) 所示。由图 8(b) 可知: 随着进气口圆角半径的增加, 空气滤清器在空载和负载情况下, 进气阻力都随着原角半径的增加而降低; 增加圆角半径可以避免气流从进气口流入壳体后出现局部的气流分离, 提高了进气效率; 当圆角半径达到一定值时, 进气阻力不再减小, 圆角半径的变化对滤芯阻力基本没有影响。此外, 当进气口圆角半径由 0 增加到 10 mm 时, 空气滤清器空载时, 进气阻力降低 20.4%; 负载时, 进气阻力降低 16.6%。

2.2.3 出气口圆角半径 保持进/出口面积比为定值 1.5, 改变出气口与壳体的圆角半径 R_2 , 分析空气滤清器在额定空气流量工况下, 进气阻力随出气口圆角半径的变化规律, 如图 8(c) 所示。由图 8(c) 可知: 随着出气口圆角半径的增加, 空气滤清器在空载和负载情况下, 进气阻力都随着原角半径的增加而降低。增加圆角半径相当于增加出气口截面积, 气流从出气口流出更加顺畅, 提高了进气效率。当圆角半径达到一定值时, 进气阻力不再减小, 圆角半径的变化对滤芯阻力基本无影响。此外, 出气口圆角半径由 0 增加到 15 mm 时, 空气滤清器空载时, 进气阻力降低 42.9%; 负载时, 进气阻力降低 36.2%。

2.3 进/出口结构参数正交分析法

应用正交分析方法分析进/出口面积比 (S_1/S_2)、进气口圆角半径 (R_1)、出气口圆角半径 (R_2) 等 3 个影响因素的主次关系以及相互作用规律。选用 $L_9(3^3)$ 三因素三水平正交分析方案, 水平选取遵循等间距原则, 计算得到 9 种方案进气阻力 (Δp_t), 如表 2 所示。

按极差分析法得到正交试验结果分析, 如表 3 所示。表 3 中: $Y_{j,k}$ 表示 j 影响因子的 k 水平所对应的进气阻力平均值, 由 $Y_{j,k}$ 大小可以判断 j 影响因素的优水平; R_j 为 j 影响因素水平变动时进气阻力的变动幅度, R_j 越大, 说明该因素对进气阻力影响越大。由表 3 及前述分析可知: 组合优化方案比单因素优化方案效果更好。本次试验对进气阻力大小影响的主次因素依次是: 进/出口面积比、进气口圆角半径、出气口圆角半径。最优组合是进/出口面积比 (S_1/S_2) 为 0.8, 进气口圆角半径 (R_1) 为 15 mm, 出气口圆角半径 (R_2) 为 15 mm。

3 结论

通过对乘用车常用的褶皱干式空气滤清器进气阻力进行分析与研究, 得出以下 5 点结论。

1) 空气滤清器进气阻力随着流量的增加呈抛物线趋势增加。利用最小二乘法拟合出空气滤清器进气阻力与流量的关系式, 对结构和尺寸相似的空气滤清器初期结构设计, 预测进气阻力大小具有一定指

表 2 正交分析方案和进气阻力结果

Tab. 2 Orthogonal analysis scheme and air intake resistance results

S_1/S_2	R_1/mm	R_2/mm	$\Delta p_t/kPa$
0.8	5	5	1.185 4
0.8	10	10	1.059 6
0.8	15	15	0.975 5
1.1	5	10	1.255 6
1.1	10	15	1.099 9
1.1	15	5	1.122 2
1.4	5	15	1.284 5
1.4	10	5	1.388 1
1.4	15	10	1.140 2

表 3 正交分析表

Tab. 3 Orthogonal analysis table

因素	S_1/S_2	R_1/mm	R_2/mm
$Y_{j,1}$	1 073.5	1 241.8	1 231.9
$Y_{j,2}$	1 159.2	1 182.5	1 151.8
$Y_{j,3}$	1 270.9	1 079.3	1 119.9
R_j	197.4	162.5	80.1

导意义.

2) 在流量一定的情况下,空气滤清器进气阻力主要来自于壳体自身,滤芯所占比重较小,随着流量增加,这种趋势越明显.因此,合理的结构设计至关重要,其中,进出气口结构参数影响最大.

3) 进气阻力随着出气口面积和出气口圆角的增加而降低.在结构设计时,可优先考虑增加出气口圆角半径,当圆角半径达到约 15 mm 时,进气阻力基本保持不变,空载和负载时,降低幅度分别达到 42.9% 和 36.2%.

4) 进气阻力随着进气口圆角半径增加而降低.当圆角半径达到 10 mm 左右时,进气阻力基本保持不变,空载和负载时,降低幅度分别达到 20.4% 和 16.6%.

5) 组合优化方案优于任意单因素优化方案,结构设计时可结合实际情况选择进出气口面积比及进出气口圆角半径.对进气阻力影响的主次因素依次为:进出气口面积比、进气口圆角、出气口圆角.

参考文献:

- [1] REBAL M, PRAT M, MEIRELES M, et al. A semi-analytical model for gas flow in pleat filters[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(1): 2835-2846.
- [2] NAGARAJAN G, KUMAR S, CHOWDHURY D. CFD analysis of air filters for an off-highway vehicle[C]//SAE Motosports Engineering Conference and Exhibition, Detroit: [s. n.], 2007: 559-567.
- [3] 刘联璠, 郝志勇, 刘迟. 空气滤清器流动阻力与噪声特性的仿真和优化[J]. *汽车工程*, 2011, 33(12): 1092-1097.
- [4] LIU Chi, HAO Zhiyong, CHEN Xinrui. Optimal design of acoustic performance for automotive air-cleaner[J]. *Applied Acoustics*, 2010, 71(5): 431-438.
- [5] 关英俊, 张力锋, 李想, 等. 汽车空气滤清器的模态分析及结构优化[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(4): 124-128.
- [6] 何志霞, 蒋兆晨, 王硕, 等. 空气滤清器的空气动力学仿真及优化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(3): 1179-1184.
- [7] 王鹏宇, 康宁. 某型号空滤器进气系统的气动和消声性能研究[J]. *汽车科技*, 2013(4): 1-7.
- [8] 唐刚志, 张力, 邓涛, 等. 发动机用平板型空滤器流动阻力特性分析和改进[J]. *重庆大学学报*, 2015, 38(4): 18-23.
- [9] 赵树恩, 蒋艾伶. 某发动机空滤器的 CFD 优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2015(8): 163-166.
- [10] 重庆汽车研究所. 汽车用空气滤清器试验方法: QC/T 32-2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006: 1-30.

Analysis on Air Intake Resistance of Automotive Air Filter

YUAN Zhiqun^{1,2}, HUANG Feijian¹, LIU Jinwu¹, XU Xi'an¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To reduce the air intake resistance of automotive air filter, a coupled numerical model of shell and filter element was established by using computational fluid dynamics technique. The influence of the inlet and outlet structure parameters on air intake resistance was analyzed by orthogonal analyses method, and the relationship between the air intake resistance and the mass flow rate was summarized. The reliability of the numerical calculation method is verified by the experiment of flow rate versus pressure drop in the filter element. The results showed that the air intake resistance increased at parabola trend with the increasing mass flow rate. Under rated flow conditions, the air intake resistance decreased with the increasing outlet area and the maximum drop was 37.2% under load conditions. The air intake resistance decreased with the increasing inlet and outlet fillet radius, the maximum drop was 16.6% and 36.2% under load conditions.

Keywords: air filter; air intake resistance; structure parameters; computational fluid dynamics; numerical analysis

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 杨建红)