

基于FLUENT的制动管路流阻特性 分析与结构优化

王道斌¹, 赵文利²

(1. 上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州 545007; 2. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对某车型在生产线上加注制动液时因加注时间紧凑而影响生产节拍等问题, 将FLUENT技术应用到四通-左前轮和四通-右前轮硬管的内流场分析中。开展了数值模拟和仿真分析, 建立了弯头局部阻力系数与各影响因素之间的关系, 提出了优化改进弯管结构参数的方法; 在不影响制动管路布置的基础上对制动液加注量、管长和流阻进行了评价, 并进行了管路优化后的加注验证试验。研究表明, 经结构优化后, 该车型四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管总长缩短了153.5 mm, 同时两根硬管的流阻均大约减小了10%, 制动液在硬管内的流动特性得到了改善, 加注时间得以缩短; 四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管空腔体积之和减少了1 338 mm³, 每台车的制动液加注量及硬管原材料的消耗也相应减少, 从而降低了生产成本。

关键词: 制动液加注; FLUENT; 制动管路流阻特性; 弯管结构参数优化

中图分类号: U463.5; TH137.5; TH164

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1171-04

Flow resistance characteristics analysis and structure optimization of braking pipeline based on FLUENT

WANG Dao-bin¹, ZHAO Wen-li²

(1. SAIC-GM-Wuling Automobile Co. Ltd., Liuzhou 545007, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the problem of production tempo which is affected by the compact filling process when certain vehicle is being charged with braking fluid in the production line, the technology of FLUENT was investigated in the analysis of the flow field of hard pipes of four way-left front wheels and four way-right front wheel. After the analysis of numerical simulation and simulation analysis, the relationship between elbow coefficient of local resistance and respective influencing factors was established. A method was presented to optimization of pipe structure parameters. The brake fluid charging amount, pipeline length and flow resistance were evaluated with no effect of the braking pipeline layout, and the filling verification experiments after structure optimization were tested. The research results indicate that, total length of both hard pipes of four way-left front wheel and four way-right front wheel is been shortened 153.5 mm and flow resistance of each hard pipe is been reduced about 10%, which improves flow characteristics of brake fluid in hard pipes and shortens filling time, total cavity volume of both hard pipes is reduced 1 338 mm³, which saves brake fluid charging amount and hard pipe materials of each vehicle accordingly, thus reduces production cost.

Key words: braking fluid charging; FLUENT; flow resistance characteristics of braking pipeline; optimization of pipe structure parameters

0 引言

汽车制动管路是用于连接制动系统中各制动装置管路, 包括制动硬管和软管^[1]。某车型制动管路中有20个管接头, 硬管9根, 软管3根。每台车经总装

后要对其加注制动液, 而制动液的加注是通过加注机来自动完成的。制动液加注机的基本工作流程是: 预抽真空—第1次抽真空—真空保压—第2次抽真空—加注—回吸—加注枪放回枪架。生产线上每台车在加注制动液之前要进行两次抽真空, 使制动管路在加

收稿日期: 2012-05-10

作者简介: 王道斌(1971-), 男, 湖北随州人, 主要从事整车制造质量方面的研究。E-mail: daobin.wang@SGMW.com.cn

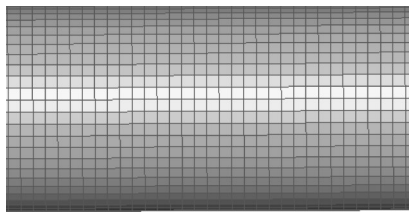
注之前呈负压状态,一方面排净管内的空气和水汽,以防影响加注效果;另一方面使管内产生一定的真空度,便于形成负压加注^[2]。

从预抽真空一直到制动液加注完成,制动管路起到传输气体和液体的作用。硬管和软管管径均较小,且存在大量的弯角,在抽真空和加注过程中,整个管路的流阻和几何结构是制约加注时间和加注质量的关键因素。因此,研究者有必要采用有限元分析方法对关键制动管件的内部流场进行分析。

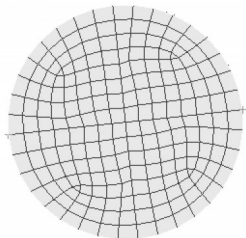
某车型生产线上加注时间紧凑,可以通过缩短加注时间缓解这一问题。制动液管路几何结构复杂,其布置没有统一的国家标准^[3]。本研究从某车型制动管路的实际布置情况出发,结合FLUENT软件进行数值模拟和仿真分析,根据制动管路布置的相关原则,探索优化制动管路设计和布局的关键点。笔者通过现场调研,发现四通-左前轮和四通-右前轮硬管的结构存在优化改进的可能性。

1 几何模型与计算模型

四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管分别与左前轮和右前轮软管连接,其几何结构类似,均有8个弯头,且都有7个弯头,弯曲角度为90°。本研究利用前处理软件Ansa对制动硬管进行几何清理,只保留内壁面,封闭进口和出口。通过map准则可以生成结构化网格,形成了比较规则的弯管流场计算区域^[4]。划分网格后的数值模拟计算模型如图1所示。



(a) 直管段网格



(b) 端面网格

图1 硬管数值模拟计算模型

2 数学模型与边界条件

2.1 数学模型

描述定常不可压粘性流体的基本方程是Navier-Stokes方程,由于计算机计算能力的限制,目前还

不能实现N-S方程的完全求解,现在工程中应用最广泛的是雷诺时均N-S方程^[5]:

$$(\bar{u}_i)_t + \bar{u}_j(\bar{u}_i)_{x_j} + \frac{(\rho)_{x_i}}{\rho} - \gamma \cdot \Delta^2 \cdot (\bar{u}_i) + \frac{(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)_{x_j}}{\rho} = 0; (\bar{u}_j)_{x_j} = 0 \quad (1)$$

式中: i, j —坐标轴的3个方向, $i, j=1, 2, 3$; x_{ij} —坐标轴的3个分量。

本研究中湍流模型采用RNG k- ε 湍流模型,RNG k- ε 湍流模型传输方程如下:

k 方程:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (2)$$

ε 方程:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} G \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

其中:

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

式中: μ_t —涡粘性系数, $\mu_t = \rho C_\mu \varepsilon^2 / k$ 。

RNG k- ε 湍流模型既适应高雷诺数情况,也适应于低雷诺数下的湍流流动,即提供了一个微分形式的有效粘性系数表达式,以说明低雷诺数流动效应^[6]。此外,对于湍流Prandtl数,RNG k- ε 湍流模式提供了一个解析式,而标准k- ε 湍流模式使用了经验常数^[7]。

2.2 边界条件

进口为速度入口(velocity-inlet),5 m/s;出口为自由出流(outflow);壁面定义为无滑移边界条件。本研究在Turbulence Specification Method中选择Intensity和Hydraulic Diameter,定义湍流强度为6.71%,水力直径为3.33 mm。

3 求解与分析

四通-左前轮和四通-右前轮硬管的压力场如图2、图3所示。

通过分析四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管压力场可知,从进口到出口,静压力逐渐降低。实际上,制动液在管路中流动时,存在沿程阻力损失和局部阻力损失,制动液的静压能不断损耗,转化成热能。

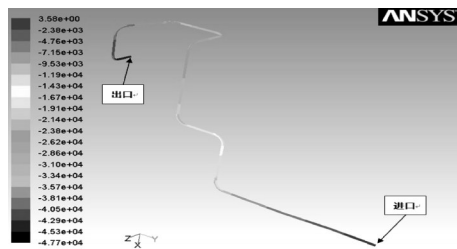


图2 四通-左前轮硬管压力场

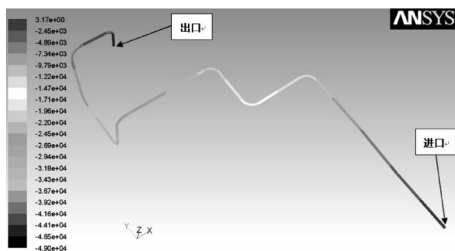
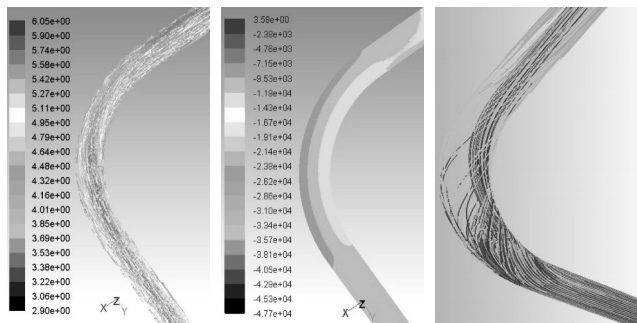


图3 四通-右前轮硬管压力场

进口速度为5 m/s时,研究者可求得四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管从进口到出口的流动阻力损失分别为44 457.7 Pa和45 971.6 Pa。

由于四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管弯头较多,本研究以四通-左前轮硬管进口处的第1个弯头为例,分析弯头的流动特性。弯头速度场矢量图、弯头速度分布云图和弯头迹线图如图4所示。



(a) 弯头速度场矢量图 (b) 弯头速度分布云图 (c) 弯头迹线图

图4 弯头速度矢量图

在图4(a)的90°弯头中,由于弯头对流体介质产生的转向作用,流体受到了从曲率中心指向弯头凸边壁面的离心力,使得流体从管路的直线管段过渡到弯曲管段时,管内流体在弯头部位凸边壁面附近产生扩散效应,此处流速减小;而在靠近凹边壁面处则产生收缩效应,流体流速增大。因此,在凸边壁面部位的流体压力增高形成一个高压区域(如图4(b)中凸边壁处的深色区域),而凹边壁面的压力降低形成减压区(如图4(b)中凹边壁面处区域);图4(c)中,制动液质点旋转着通过弯管,迹线具有螺旋形态,由于边界层的扰动出现了漩涡,速度分布发生了变化,形成了比较集中的能量损失,使流动阻力增强^[8]。四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管均存在8处弯头,通过数值分析,弯头造成的阻力损失分别为59%和58%,因此,弯头是形成管内流阻的主要原因,研究者可通过减小弯头流阻来改善加注状况。

4 管路优化

4.1 优化参数的确定

制动硬管的水力特性对加注的影响主要体现在其阻力特性的影响,几何结构或布置不一样,对加注

的影响也就不一样。在抽真空或加注过程中,气体或制动液均是靠压差在管内流动。在对制动管路加注制动液时,文献[9]中的不稳定流的运动方程如下:

$$\frac{p_{\text{泵}}}{\gamma} = H_{\text{位}} + \frac{p_{\text{管}}}{\gamma} + \frac{v_{\text{管}}^2}{2g} + h_w + h_i \quad (4)$$

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j$$

制动液靠加注泵和管内真空度形成的压差 $(p_{\text{泵}} - p_{\text{管}})/\gamma$,把制动液吸入制动系统内。同时,一部分能量转化为动能 $v_{\text{管}}^2/2g$,并要克服位差 $H_{\text{位}}$ (这里可忽略)和流动阻力 h_w (包括沿程阻力损失 $\sum h_f$ 和局部阻力损失 $\sum h_j$)以及惯性水头损失 h_i 。因此,流动阻力越大,动能的增量就越少,流量的增量也会相应变少,加注时间也会越长。

由FLUENT模拟结果及分析可知,弯头是形成流阻的主要原因。文献[10]推荐的弯头阻力系数的计算公式如下:

$$\xi = [0.131 + 0.163(\frac{d}{r})^{3.5}](\frac{\theta}{90})^{0.5} \quad (5)$$

式中: ξ —弯头局部阻力系数, θ —弯角, d —管径, r —轴线曲率半径。

根据公式(5),弯头轴向曲率半径 r 、弯头弯曲角度 θ 、弯管内径 d 和弯头数目 n 等硬管参数都会对管内流阻构成影响。制动管路中,大部分管线是硬管,其总体布局也体现在硬管的布置上。由于某车型产量很高,研究者要想进一步改善加注效果和缩短加注时间,可以将改进硬管的几何结构作为辅助手段。根据以上分析并结合实际情况,研究者可以通过增大制动硬管弯头轴向曲率半径 r 、减小弯头弯曲角度 θ 和减少弯头数目 n 等措施对管路结构进行优化改进。

4.2 硬管结构参数优化

四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管的优化改进需要考虑一些约束条件:① 要避免与汽车零部件发生干涉;② 保证硬管两端仍能正常装配;③ 保证管夹的安装。在约束范围内,尽可能地增大制动硬管弯头轴向曲率半径 r 、减小弯头弯曲角度 θ 和减少弯头数目 n 。

从进口至出口,对弯头编号,优化前为弯头1、2、3、4、5、6、7、8,优化后为弯头1、2、3、4、5、6、7。两根硬管的结构具体有如下改进:① 根据实际情况,本研究分别只对弯头1~5进行改进,改进后,两根硬管均由8个弯头减少至7个弯头;② 两根硬管弯头1~5的弯曲角度均为90°依次变为53°、37°、41.5°和90°;③ 改进前的弯头1~5和改进后的弯头1~4的轴向曲率半径均为15 mm。

改进不会影响各零部件的布置,也不会影响装配

工艺,只需在硬管成型时调整弯管成型架中相应的倒圆位置和直管段的长度。四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管优化前后几何模型对比如图5、图6所示。

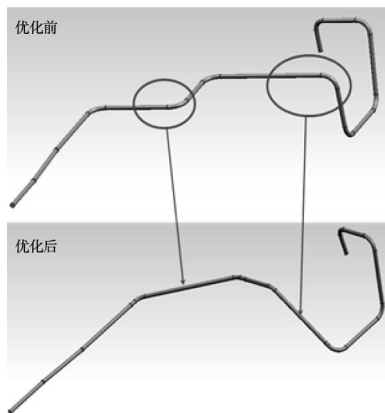


图5 四通-左前轮硬管优化前后对比

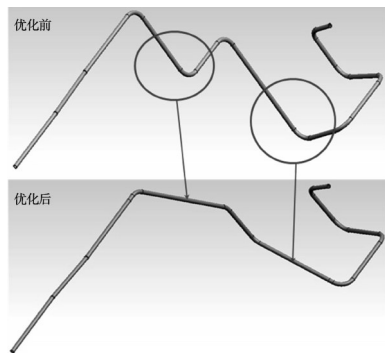


图6 四通-右前轮硬管优化前后对比

优化后,减少了管内流动阻力,同时缩短了管长即缩短了传输距离,改善了管内流体流动特性,缩短了加注时间。本研究通过FLUENT求解和UG的相关功能,分别得到优化前和优化后的四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管的空腔体积、管长和流阻,如表1所示。

表1 制动液硬管优化前后结果对比表

		优化前	优化后	绝对 减少量	相对 减少量
四通- 左前轮 硬管	空腔体积/mm ³	7 357	6 734	623	8.5%
	管长/mm	844.7	773.2	71.5	8.5%
	流阻/Pa	44 457.7	39 986.9	4 470.8	10.1%
四通- 右前轮 硬管	空腔体积/mm ³	7 570	6 856	715	9.4%
	管长/mm	869.2	787.2	82	9.4%
	流阻/Pa	45 971.6	40 390.3	5 581.3	12.1%

4.3 试验验证

为了验证改进后的加注效果,本研究在生产线上进行了相关的对比实验,按照管路改进后的方案加工并装车,改进后的四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管没有和其他部件发生干涉,可正常装配。笔者在生产线上对该车进行制动液加注,观察加注机显示屏上的加注时间和加注量,结果发现加注时间缩短了1.1 s,加注量减少了约1 330 mm³,在一定程度上改善了加注状况。

5 结束语

本研究基于FLUENT开展了制动管路流阻特性分析,对某车型的四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管的结构进行了优化改进,研究结果表明:

(1) 制动管路的流动阻力大约减小了10%,改善了制动液在硬管中的流动特性,增大了硬管的流量,缩短了加注时间,提高了加注效率;

(2) 该车型四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管总长之和亦即制动管路硬管总长缩短了153.5 mm,相应缩短了气体或制动液的传输距离,从而进一步缩短了抽真空时间、保压时间和加注时间,缓解了加注节拍紧张现象;

(3) 该车型四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管总体积之和亦即制动管路空腔体积减少了1 338 mm³,使得每台车上四通-左前轮硬管和四通-右前轮硬管的制动液加注量和材料的消耗相应减少约9%,从而降低了生产成本。

参考文献(References):

- [1] 林慕义,宁晓斌. 工程车辆全动力制动系统[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [2] 杜建政,路佳斌. 汽车装配线油液加注系统[J]. 汽车工艺与材料,2010,54(4):57-60.
- [3] 刘惟信. 汽车制动系的结构分析与设计计算[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [4] STEPHANE V. Local mesh refinement and penalty methods dedicated to the direct numerical simulation of incompressible multiphase flows [C]//Proceedings of the ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference. Honolulu:[s.n.],2003:1299-1305.
- [5] 韩占忠,兰小平. 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 2版. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [6] 江山,张京伟,吴崇健,等. 基于FLUENT的90°圆形弯管内部流场分析[J]. 中国舰船研究,2008(1):37-41.
- [7] WISSINK J G. DNS of separating low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming wakes[J]. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 2003, 24(4):626-635.
- [8] 宋波,冯妍卉,张欣欣. 几种典型管路局部压强损失的数值模拟分析[C]. 第七届全国工业炉学术年会论文集,2006:61-64.
- [9] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 7版. 北京:石油工业出版社,2007.
- [10] 董志勇. 弯头(弯管)阻力系数比较与流动特性分析[C]. 第五届全国水动力学学术会议暨第十五届全国水动力学研讨会文集,2001.

[编辑:张翔]