

# 管道扩张室的数值模拟与形状优化

文海刚

(博士汽车部件(长沙)有限公司, 湖南 长沙 410100)

**摘要:** 使用 CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术对带有扩张室的管道建立二维数值模型, 在给定流体进口速度为 2 m/s 的初始条件下, 对扩张室长度为 40、60、80、100 mm, 直径为 65、70、75 mm 的管道分别进行仿真计算和分析。结果表明, 建立的 CFD 模型能够较好地描述扩张管内的流体流动状态, 通过改变扩张室的长度和宽度, 可以获得不同形状结构下的流场参数, 为扩张室管道的优化设计提供参考。

**关键词:** 计算流体力学; 扩张室; 管道; 形状优化; 数值模拟

中图分类号: O35

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)04-0072-03

## Numerical Simulation and Shape Optimization for Expansion-Chamber of Pipeline

Wen Haigang

(Changsha Bosch Automotive Products Co., Ltd., Changsha 410100, China)

**Abstract:** The two dimension of numerical model was constructed by CFD (Computational Fluid Dynamics) technology for a series of expansion-chamber in pipeline. Under the initial condition of inlet fluid rate at 2 m/s, as well as emulation calculation and analysis for different lengths and diameters of 40 mm, 60 mm, 80 mm and 100 mm, corresponded with diameter series of 65 mm, 70 mm and 75 mm were carried out. The result indicated that the CFD model could preferably describe the flowing state in the expansion-chamber and the fluent field parameters could be obtained through the model when the length and width of expansion-chamber varied, which, therefore, could provide reference for optimization design for the pipeline with Expansion-chamber.

**Key words:** hydrodynamics; expansion-chamber; pipeline; numerical simulation; shape optimization

在机械、石化、动力、水利等工程应用中, 常常涉及到带有扩张室的管道流体流动问题<sup>[1,2]</sup>。扩张室管道直径的突变是影响管内流场变化的主要因素。在流体力学中, 几何形状突变产生的阻力被定义为局部阻力, 国内外学者对局部阻力已有较多的研究。本文则从工程实际设计要求出发, 利用计算流体力学, 直接计算给定流体进口速度的条件下, 不同长度和直径的扩张室管流对应的出流速度, 同时分析管内流态及管内压强分布, 为扩张室管道的设计提供数值信息。

典型的带扩张室的管道如图 1 所示, 管道进、出口直径均为 50 mm, 扩张室前后段的长度均为 150 mm, 其中扩张室的长度为  $l$ , 直径为  $d$ 。

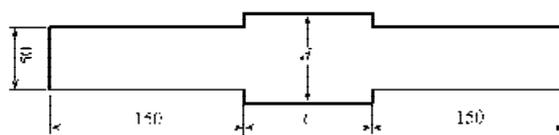


图 1 管道几何参数

Fig. 1 Geometry parameter of expansion-chamber

## 1 数值模型

本文利用 CFD 软件 Fluent 计算管道内的二维流, 使用  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[3]</sup>。初始条件为保持流入管道的流体水平速度恒定为 2 m/s, 管内流动为不可压缩流。用各向异性的湍流模型能够正确模拟扩张室湍流流场, 通过

收稿日期: 2008-03-06

作者简介: 文海刚 (1975-), 男, 湖南长沙人, 博世汽车部件(长沙)有限公司工程师, 主要从事专用设备项目技术管理工作。

对速度场、压力场的分析发现,切向压力梯度是由径向速度的作用产生的,而切向压力梯度正是驱使流体向扩张室壁面运移的动力,因而提出了根据扩张室的压力和轴向速度的变化,决定扩张室长度以及对管内流体状态进行分析的方法。

1.1 控制方程

在扩张室内,由于切向速度不随流动方向变化,可以将扩张室内流动简化为轴对称流动。在扩张室的

绝大部分区域内,有  $\frac{\partial \Phi}{\partial x} \gg \frac{\partial \Phi}{r \partial \theta}$ ,  $\frac{\partial \Phi}{\partial r} \gg \frac{\partial \Phi}{r \partial \theta}$ 。其中  $\Phi$

表示  $u, v, w, p$  等参数,因而可以忽略  $\frac{\partial \Phi}{r \partial \theta}$  项,对描述扩张室内流体三维流动的控制方程及边界条件可进行简化。

$$\text{连续方程为: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0; \quad (1)$$

$$\text{动量方程为: } \frac{\partial \rho}{\partial t} (f m_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (f m_i u_j) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + F_i; \quad (2)$$

$$\text{湍动能方程为: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \quad (3)$$

耗散方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} + \frac{C_{2\varepsilon}}{k} (G_k + G_b, G_t) - C_{3\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \quad (4)$$

方程(1)~(4)中的变量均为时均值,其中:

$\rho$ 为介质密度,其值不变;

$u$ 为方向流速; $k$ 为湍流动能;

$\varepsilon$ 为湍流动能耗散率;

$\mu_t$ 为动力粘性系数,  $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \varepsilon$ ;

$G_k$ 为湍流动能剪力产生率;

经验常数取:  $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_{\mu}=0.09, \sigma_k=1.0,$

$\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

1.2 网格

本文所取扩张室为具有规则形状几何体,因此选用四边形结构网格<sup>[4]</sup>。取网格间隔为2 mm,在扩张室长度  $l$  为100 mm,直径  $d$  为70 mm的算例中,管道节点数为5 736。边界条件如图2所示,左端进口设定为速度入口边界,速度为2 m/s,右端出口设定为压力入口边界,上下侧为壁面,外部环境为1个标准大气压。



图2 网格及边界条件

Fig. 2 Grid and boundary condition

2 结果分析

为对比带有不同扩张长度和直径的管道扩张室对管道内流体的影响,本文分别计算了管道扩张室扩张长度为40、60、80、100 mm,直径为65、70、75 mm的管道局部样本。

2.1 管内压力与速度

由图3可见,在扩张长度为100 mm,直径为70 mm的管道扩张室中,图中标记的管道突变处都出现负压,同时伴随着速度的增加,流体经过扩张室之后,压力逐步降低;在经过突变扩张口后,速度快速降低;经过突变收缩口后,速度快速增加。扩张室在整个流体流动中对流体速度具有较大影响。

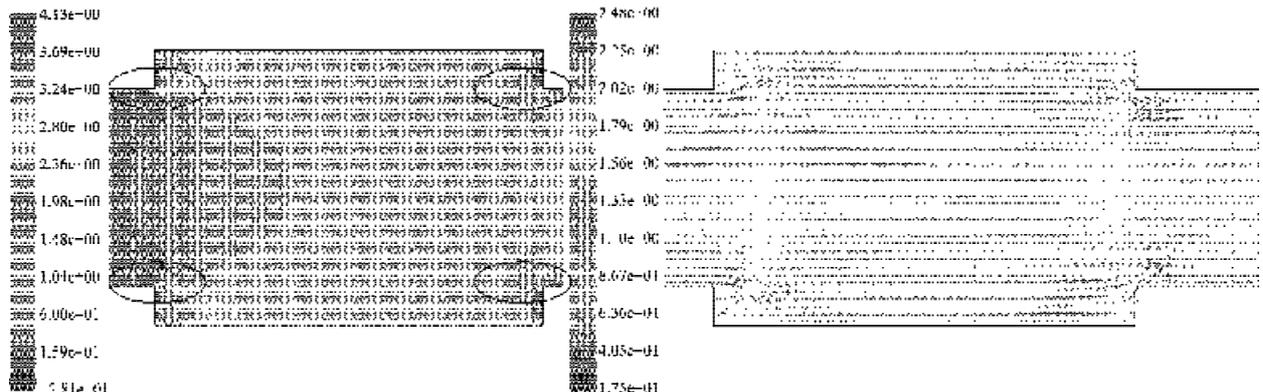


图3 管道扩张长度为100 mm,直径为70 mm时的压力云图及速度向量场

Fig. 3 Pressure and velocity vector diagram for expansion-chamber (Length 100 mm and diameter 70 mm)

图4为扩张室内流线分布。在管道扩张和收缩口处都存在明显的漩涡，管道中心则保持原有流动趋势。



图4 扩张室内流线图

Fig. 4 Streamline diagram inside expansion-chamber

### 2.2 出口速度分布

如图5所示，出口处沿管道中心线的速度分布大于边壁两侧，中心速度大于2 m/s，受壁面摩擦影响，边壁速度下降较明显，出口的平均流速小于2 m/s。

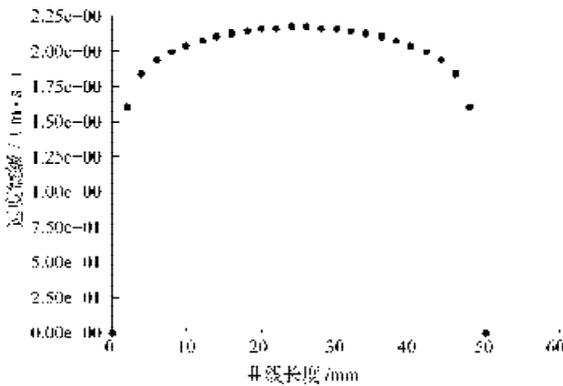
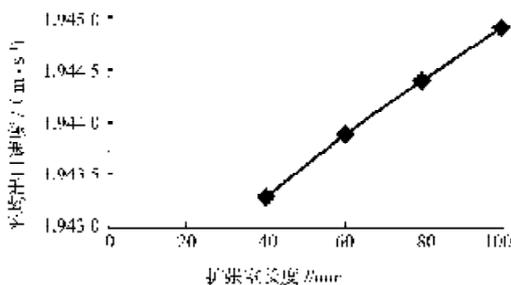


图5 出口速度分布

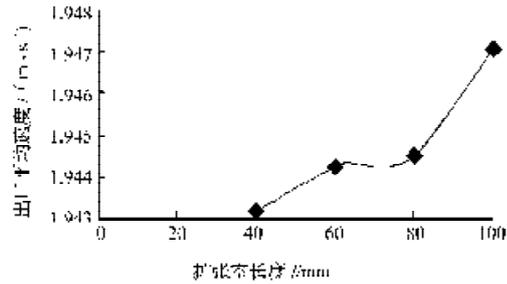
Fig. 5 Velocity distribution diagram

### 2.3 扩张长度对速度的影响

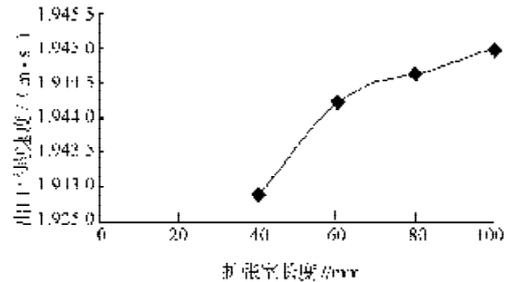
图6显示，随着扩张长度的增加，管道出口的平均流速增加，表明扩张室突变导致的阻力作用随扩张长度的增加而减小，增加扩张室长度能更好的保持管道流体整体的流动性能。



a) 扩张室直径为65 mm



b) 扩张室直径为70 mm



c) 扩张室直径为75 mm

图6 出口速度随扩张室长度变化图

Fig. 6 Diagram for the velocity distribution various with different length expansion-chamber

## 3 结论

1) 运用CFD软件能较好地模拟带有扩张室结构的管道流体流动，通过CFD软件计算能得到管内压力分布、速度分布、流线等相关信息；

2) 恒定速度的流体流入带有扩张室的管道，出口中心处流体速度大于流入速度；

3) 扩张室的流体流动中，扩张长度 $l$ 对出口速度有较大影响， $l$ 增加有利于减小管道突变对流动性能的影响；

4) 通过CFD软件技术，能快速计算管内流体流动速度，对工业管道形状的快速优化设计、分析具有一定意义。

### 参考文献:

[1] 李丰, 黄协清, 王广庭. 复杂腔体扩张室消声器消声性能数值计算[J]. 噪声与振动控制, 2004, 24(1): 14-16.

[2] 李健蓉, 张淑荣, 尹洪超. Y型喷嘴性能数值分析[J]. 热科学与技术, 2006, 5(3): 279-281.

[3] Yakhot V, Orszag S A. Renormalisation group analysis of turbulence[J]. Journal of Science Computing, 1981(1): 39-51.

[4] Parchen R R. An experimental and numerical study of turbulent swirling pipe flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 1998, 120(3): 54-61.

[5] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(责任编辑: 张亦静)