

基于Workbench对矩形管道流固耦合分析

吴志龙, 仲梁维

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月1日; 录用日期: 2024年5月1日; 发布日期: 2024年5月7日

摘要

为深入探讨系统中弯道部分流态的演变以及结构场的变化, 实践中可采取实验测定法, 然而该方式在捕捉弯管流动细节方面显得力不从心。应用FLUENT软件搭载的实用型 $k-\epsilon$ 湍流模型, 对直矩形管道内的流态进行数值仿真研究。通过模拟分析工具, 便捷地获取了介质流过弯管时的压力场分布图及速度矢量分布图, 从而使介质的压力与速度变化得以直观呈现。在弯管的运作中, 由于曲率引起的离心效应, 导致管道外层压力超出内层。另一方面, 贴近弯道内侧的流速明显胜过外侧。结构场分析表明壁厚5 mm的管道在出风口发生了微小的变形。借助Workbench软件的仿真模拟, 展现了流体在弯管中流动的复杂现象及变化逻辑, 为理解实际流态分布提供了借鉴, 并且为后续的结构改善与设计优化奠定了基础。

关键词

矩形管道, 数值模拟, 流固耦合, Workbench

Fluid-Structure Coupling Analysis of Rectangular Pipeline Based on Workbench

Zhilong Wu, Liangwei Zhong

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 1st, 2024; accepted: May. 1st, 2024; published: May. 7th, 2024

Abstract

In order to investigate the evolution of the diverting state and the change of the structure field, experimental measurement method can be used in practice, but it is insufficient to capture the details of the flow of the bend pipe. By using the practical $k-\epsilon$ turbulence model installed by

FLUENT software, the numerical simulation of the flow state in a straight rectangular pipeline is carried out. The pressure field distribution diagram and velocity vector distribution diagram of the medium flowing through the bending pipe are easily obtained by the simulation analysis tool, so that the pressure and velocity changes of the medium can be intuitively presented. In the operation of bending pipe, the centrifugal effect caused by curvature causes the outer pressure of pipe to exceed the inner layer. On the other hand, the flow rate near the inside of the curve is significantly better than the outside. The structural field analysis shows that the pipe with a wall thickness of 5mm has a slight deformation at the outlet. With the help of the simulation of Workbench software, the complex phenomena and change logic of fluid flow in the bend pipe are shown, which provides a reference for understanding the actual flow distribution and lays a foundation for the subsequent structural improvement and design optimization.

Keywords

Rectangular Pipeline, Numerical Simulation, Fluid-Structure Interaction, Workbench

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

矩形管道在工业与农业上应用极其广泛,如在铝制易拉罐中的气动传输系统中[1][2]。影响该气动传输系统中效率的因素很多,最为重要的一个因素就是气动分流。矩形管道内的气流速度分布的不均匀性将会影响该传输系统的效率。此外气流的流速以及管道进风口面积大小也会影响到管道的变形。因此,研究矩形管道内的流体数值模拟以及结构场分析是十分有必要的。

管道内的流体数值模拟研究是流体动力学的关键研究方向之一,到目前为止以后很多的研究员进行了大量的实验研究[3][4]。在管道的设计中,气流在管道内的流场十分复杂。目前对管道内流体数值模拟的研究,国内外的研究员做了大量的仿真工作。王世忠[5]等对输液管道进行流固耦合分析采用反对称矩阵方法。杨向龙[6]等基于商用 FLUENT 软件和自主研制的有限元程序,建立了三维弹性薄膜结构和黏性流体耦合的有限元模型并进行分析,鄢奉林[7]对汽车排气管道进行了气-固耦合有限元分析。

鉴于此,本文利用 Workbench 软件,选用 Realizable k-ε 湍流模型来对矩形管道进行数值模拟以及结构场分析,旨在为矩形管道的结构优化提供依据。

2. 计算方法

2.1. 流体控制方程

本次主要的研究对象是空气在矩形管道内的流体数值模拟分析,假设它可以看作不可压缩的流体,所以在直角坐标系下的质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

式中, ρ 为流体密度; x_i 为在 i 方向上的坐标分量; u_i 为 i 方向上的速度。

流体在运动过程中也遵守动量守恒方程,动量守恒方程的表达式为:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_t + \mu_i) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

式中, p 为压强; μ_t 为分子黏性; μ_i 为湍流黏性。

2.2. Realizable k- ε 模型的湍动能运输方程以及湍流耗散率方程

经过计算的雷诺系数大于 2320, 因此流体的形态是湍流。

湍动能运输方程为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

湍流耗散率方程为:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

式中, G_k 为由平均速度梯度产生的湍动能; G_b 为由浮力影响产生的湍动能; Y_M 为扩散产生的波动; $C_{1\varepsilon}$, C_2 , $C_{3\varepsilon}$ 为模型常数。

2.3. 流固耦合方程

$$\begin{cases} \tau_f n_f = \tau_s n_s \\ d_f = d_s \end{cases}$$

式中: τ_f 和 τ_s 分别为流体和固体应力; n_f 和 n_s 分别为流体和固体单位方向向量; d_f 和 d_s 分别为流体和固体位移。

3. 数值计算

如图 1 所示是矩形管道仿真分析流程图。首先对仿真对象进行三维建模进行前处理并且导入 ANSYS 中进行网格划分, 然后设置流体模型的边界条件以及结果结算。将模型结果导入 Workbench 进行 4 面体网格划分, 在进行静力分析, 将流体计算结果作为载荷导入 Workbench 进行流固耦合分析, 得出等效应力以及总变形等结果。

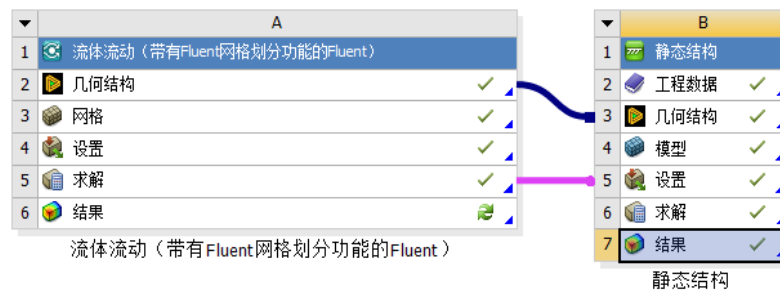


Figure 1. Flow of fluid-structure coupling analysis

图 1. 流固耦合分析流程

3.1. 物理模型以及基本参数

如图 2 所示是矩形管道的物理图模型。

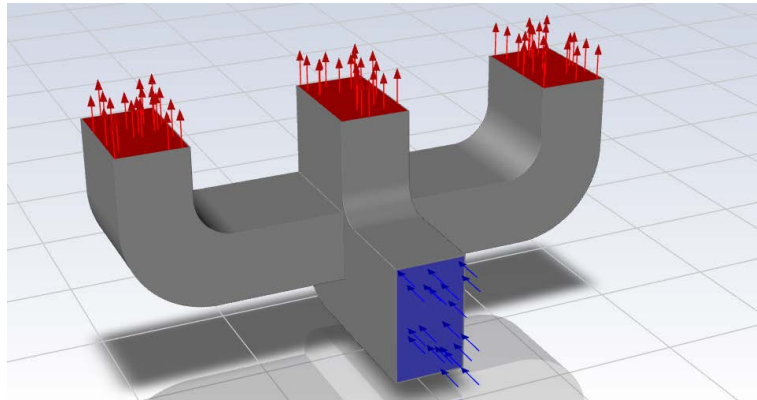


Figure 2. Physical model diagram of rectangular pipeline
图 2. 矩形管道的物理模型图

矩形管道材料为铝合金, 流体介质为空气, 具体参数如表 1 所示。

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 标准试验系统结果数据

	密度 Kg/m ³	弹性模量 GPa	泊松比	介质流速 m/s	动力粘度系数 Pa·s
矩形管道	7850	193	0.3		
空气	998			18	1.79×10^{-5}

3.2. 网格划分

将模型进行流体前处理。对矩形管道进行网格划分的时候选择 Mosaic 网格划分。Mosaic 网格可以通过减少网格面数量、更高质量的网格和高效的并行可扩展性来加速网格划分流程。Mosaic 网格划分技术能够实现不同网格类型之间的多面体连接。马赛克网格总数为 1,127,221 个, 网格划分图如图 3 所示。

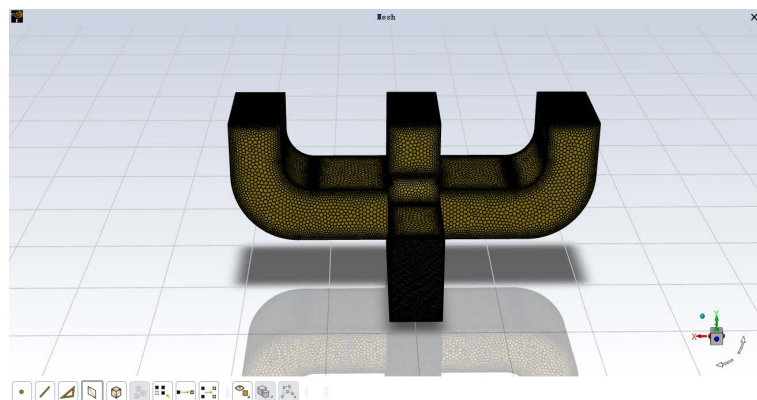


Figure 3. Fluid grid diagram based on "Mosaic" technology
图 3. 基于“马赛克”技术的流体网格图

将模型进行结构场前处理。对矩形管道进行网格划分的时候选择 4 面体网格划分。4 面体网格可以对复杂几何适应性好, 多用于自由网格划分, 可以快速生成网格。4 面体网格划分图如图 4 所示。

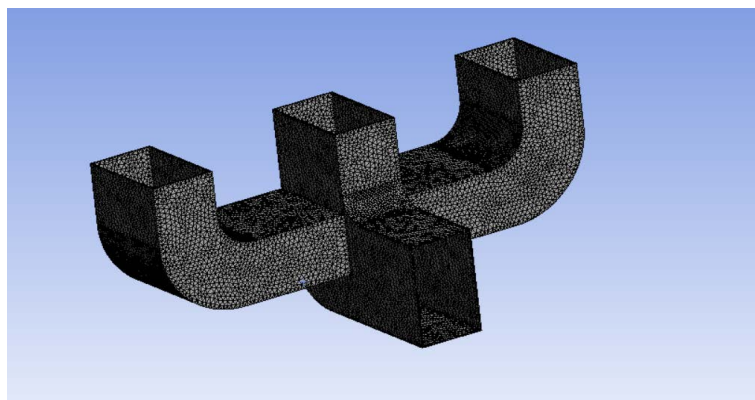


Figure 4. Pipe wall grid diagram
图 4. 管壁网格图

3.3. 边界条件

采用速度进口作为矩形通道入口的边界条件, 其中流体流速定为 18 m/s 。而将压力出口设定作矩形通道出口的边界条件, 设压力值为零, 并且外部环境的压力与一个标准大气压相符。

3.4. 计算方法

在 FLUENT Meshing 创建的马赛克网格在传递至分析解算阶段时, 运用了建立在压强基础上的解算器来执行运算。流动介质的摩擦影响透过较为贴近现实的 $k-\varepsilon$ 模型(即 Realizable $k-\varepsilon$)进行仿真, 同时扩展性的壁面函数帮助模拟了壁面的影响。此类模型搭配让我们能够更精确地推断流动特性。为保障仿真数据的精确性, 在分离动量与热能方程式时, 均采取了二阶迎风格式, 而在速度场和压强场的耦合计算中, 线性方法被采纳以插值压强, 并使用了 SIMPLEC 策略以增进计算速率。

4. 数值结果与分析

4.1. 流场分析

根据图 5 速度迹线图可以得知流体在矩形管道的流体流速的大体了解。矩形管道的流体从入口进入矩形管道后流体主要先从中间的出口流出, 在流出的期间流体会在管道内的两侧形成涡流。在中间出口没有流体后, 管道两侧的涡流会渐渐消失进而通过管道两侧的出口快速流出。

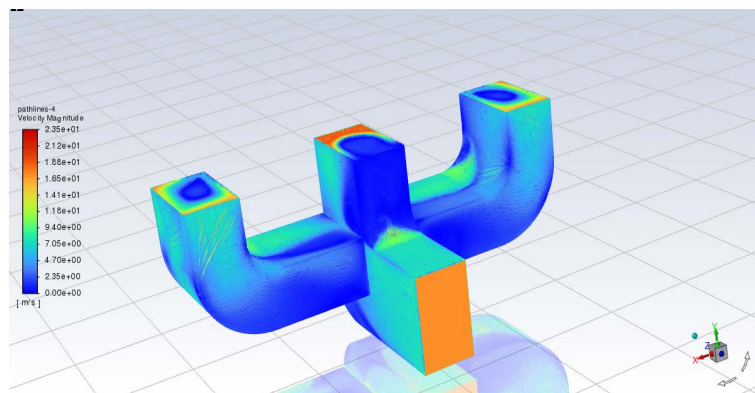


Figure 5. Velocity trace diagram
图 5. 速度迹线图

根据图 6 的压力云图可知, 矩形管道进口处的压强明显高于矩形管道三个出口处的压强, 压强从进口到出口的变化趋势呈下降趋势。主要由于矩形导管内弯道弧度所致, 在离心力影响之下, 流体在管道中流动时向导管的外部施压, 因而导致管弯内部的压强低于外部。

根据图 7 描绘的中间切面速度云图以及图 8 描绘的速度矢量分布图中明确看出, 流体在穿越曲管时其速度自管道内测渐变至外侧过程中逐步降低。这一变化趋势主要由于受曲管产生的离心力影响所致。

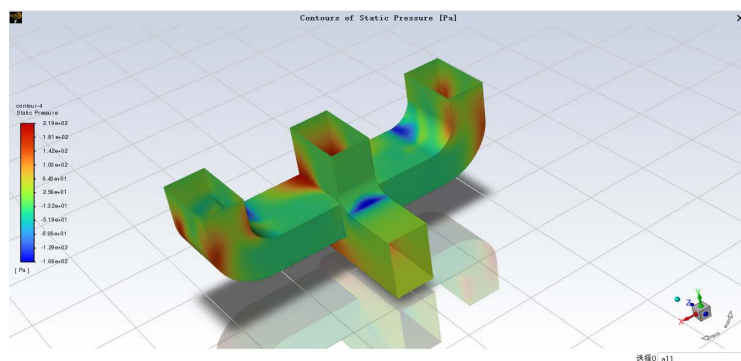


Figure 6. Pressure nephogram

图 6. 压力云图

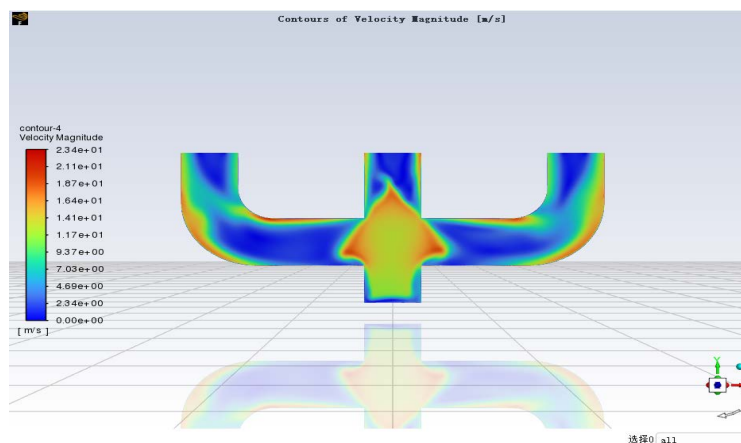


Figure 7. Middle section velocity cloud image

图 7. 中间切面速度云图

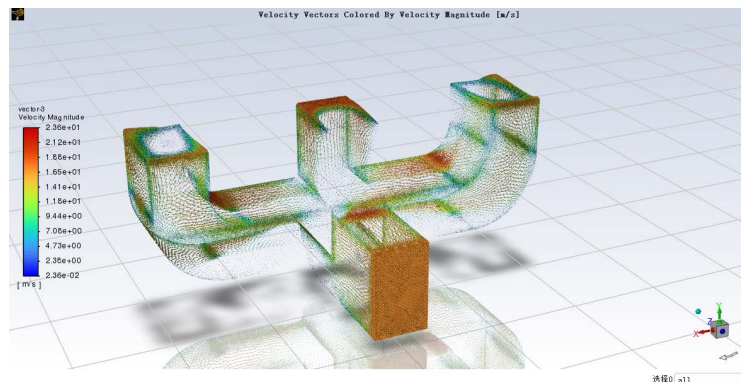


Figure 8. Velocity vector diagram

图 8. 速度矢量图

4.2. 结构场分析

根据图 9 等效应力图可以看出, 最大应力压力在矩形管道的内的拐角处。这主要是因为气体从进口到出口期间在管道内部的涡流所导致的。根据图 10 总变形图可以看出, 矩形管道在 5 mm 壁厚的情况下发生了微小的变形最大变形量为 0.359 mm。

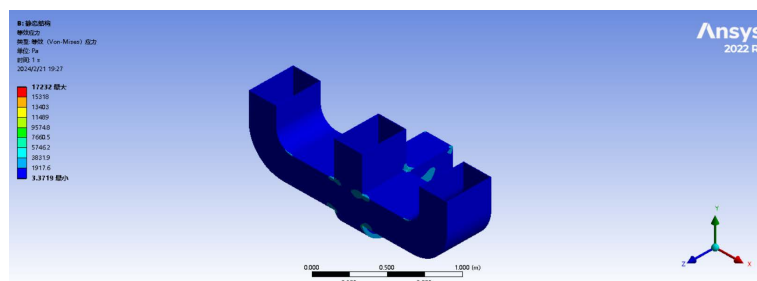


Figure 9. Equal-effect diagram

图 9. 等效应力图

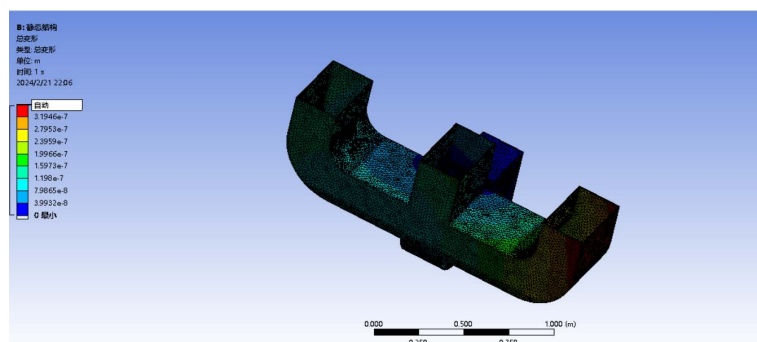


Figure 10. General deformation diagram

图 10. 总变形图

5. 结论

本文通过利用 SolidWorks 软件对矩形管道进行三维建模, 运用 FLUENT 软件对矩形管道进行流体的数值模拟和结构场分析。通过计算获取了介质(空气)流过弯管时的压力场分布图及速度矢量分布图, 从而使介质的压力与速度变化得以直观呈现, 进而得到压力与速度从进口到出口的速度变化趋势。通过计算获得等效应力图以及总变形图对矩形管道的结构优化提供有效依据。

参考文献

- [1] 叶凯. 铝质易拉罐成形技术及应用[J]. 轻合金加工技术, 2014, 42(6): 19-27+63.
- [2] 王俊. 铝质易拉罐模具的设计与优化[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [3] 尚虹, 王尚锦, 席光, 等. 90°圆截面弯管内三维紊流场实验研究[J]. 航空动力学报, 1994(3): 38-41+107.
- [4] Sudo, K., Sumida, M. and Hibara, H. (2001) Experimental Investigation on Turbulent Flow in a Square-Sectioned 90-Degree Bend. *Experiments in Fluids*, **30**, 246-252.
- [5] 王世忠, 王茹. 三维管道固液耦合振动分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1992(4): 43-49.
- [6] 杨向龙, 刘阳, 杨基明, 等. 三维薄壁结构与流体相互作用数值模拟[J]. 深圳大学学报(理工版), 2008(2): 111-116.
- [7] 吴永桥, 鄢奉林. 汽车排气总管的静力分析和模态分析[J]. 武汉汽车工业大学学报, 2000(3): 10-13.