

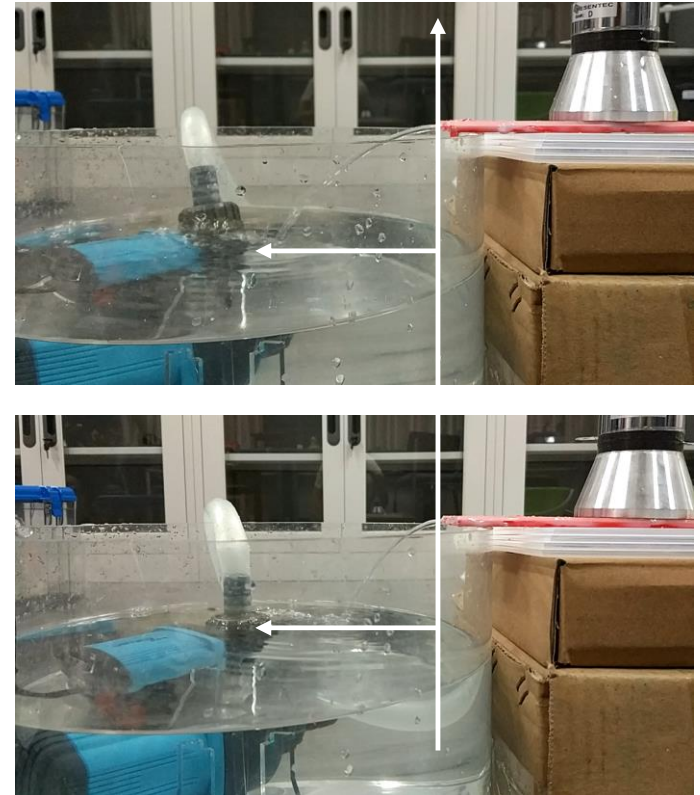
Problem No.10 “Tesla valve”

谢忠纽

题目回顾

A Tesla valve is a fixed-geometry, **passive, one-direction** valve. A Tesla valve offers **a resistance to flow** that is much greater in one direction compared to the other. **Create** such a Tesla valve and **investigate its relevant parameters**.

特斯拉阀门是一种固定几何形状的**被动单向**阀门。特斯拉阀门提供的**流动阻力**在一个方向上比另一个方向大得多。**创建**这样的特斯拉阀门并**研究**其相关参数。



实验现象

用小钢珠演示水在Tesla Valve中的流动



理论分析

被动阀：无开关控制

单向阀：流动阻力在一个方向上比另一个方向大得多

两种流向：Forward flow



Reverse flow



Forward flow: 较大的速度流量通过直线通道，流速较快且速度稳定，圆环通道内流速低且流量少

Reverse flow: 较大的速度流量在分叉口处流向圆环通道，直线通道内流速较低但速度稳定，圆环通道内流速较快但减速明显

定义特斯拉阀特征参数：阀效率 $D = \frac{\Delta P_f}{\Delta P_r}$

ΔP_f 、 ΔP_r 分别是在正向和反向流动的情况下，压强的变化量

理论分析

采用微分形式的流体力学方程组研究各物理量之间的关系

连续性方程：

（反映质量守恒定律）

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

运动方程：

（总动量变化率等于作用于其上的体力和面力的总和）

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{F} + \nabla \cdot \mathbf{P}$$

能量方程：

（反映能量守恒定律）

$$\rho \frac{dU}{dt} = \rho q + \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla (\mathbf{v} \cdot \mathbf{P}) - \mathbf{v} \nabla \cdot \mathbf{P}$$

纳维-斯托克斯方程

（描述粘性不可压缩流体动量守恒的运动方程）

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{F} + \mu \Delta \mathbf{v}$$

\mathbf{v} : 流体的流速

ρ : 密度

μ : 黏性系数

模拟计算

构建Tesla valve单元模型，采用Comsol软件对水在Tesla valve中正向或逆向运动的流速及压力进行模拟，并计算出阀效率

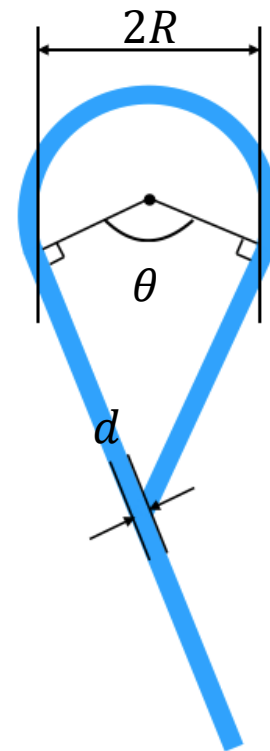
提升Tesla Valve的阀效率 D (单向导通率)

1. 增大逆向流动时对流体的阻碍作用
2. 保证逆向阻碍的同时，尽可能减小对正流动的阻碍作用

结果预计：

单元对个数越多，阀效率越大；
圆弧半径越大，阀效率越小；
圆弧角度越大，阀效率越小；
宽度越大，阀效率越大。

n : 单元对个数
 R : 圆弧半径
 θ : 圆弧角度
 d : 宽度



模拟过程

“湍流，k-ε”接口用于模拟高雷诺数单相流，适用于不可压缩流动和低马赫数（通常小于 0.3）可压缩流动。

该接口求解动量守恒的纳维-斯托克斯方程和质量守恒的连续性方程，湍流效应通过带有可实现性约束的标准两方程 k-ε 模型进行建模。近壁流动使用壁函数来建模。

该接口可用于稳态分析和瞬态分析。

Tesla_forward_CSSM.mph

定义 几何 材料 物理场 网格 研究 结果

模型开发器

Tesla_forward_CSSM.mph (root)

全局定义

参数

几何零件

材料

组件 1 (comp1)

定义

几何 1

材料

湍流, k-ε (spf)

流体属性 1

壁 1

初始值 1

入口 1

出口 1

网格 1

研究 1

结果

设置

湍流, k-ε

方程形式:

稳态

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}$$
$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0$$
$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{k} = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \mathbf{k} \right] + \rho_k \cdot \rho \epsilon$$
$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1k} \frac{\epsilon}{k} \rho_k \cdot C_{2k} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = e\rho$$
$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$
$$\rho_k = \mu_T [\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)]$$

求解方程

物理模型

湍流

湍流模型类型:

RANS

湍流模型:

k-ε

壁处理:

壁函数

— 湍流模型参数

☐ 编辑湍流模型参数

因变量

图形

入口

出口

出口

入口

934 MB | 8627 MB

出口设定

$$[-p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \mathbf{n} = -\hat{p}_0 \mathbf{n}$$
$$\hat{p}_0 \leq p_0,$$
$$\nabla \mathbf{k} \cdot \mathbf{n} = 0, \nabla \epsilon \cdot \mathbf{n} = 0$$

边界条件

压力

压力条件

压力:

p_0 1[atm] Pa

☐ 法向流

☒ 抑制回流

入口设定

$$\mathbf{u} = U_0 \mathbf{n}$$
$$U_{rel} = U_0$$
$$k = \frac{3}{2} (U_{rel} l_T)^2, \epsilon = C_\mu \frac{k^3}{l_T}$$

边界条件

速度

速度

☒ 法向流入速度

☐ 速度场

U_0 Voc m/s

湍流条件

☒ 指定湍流长度和强度

☐ 指定湍流变量

湍流强度:

l_T spf.IT_init 1

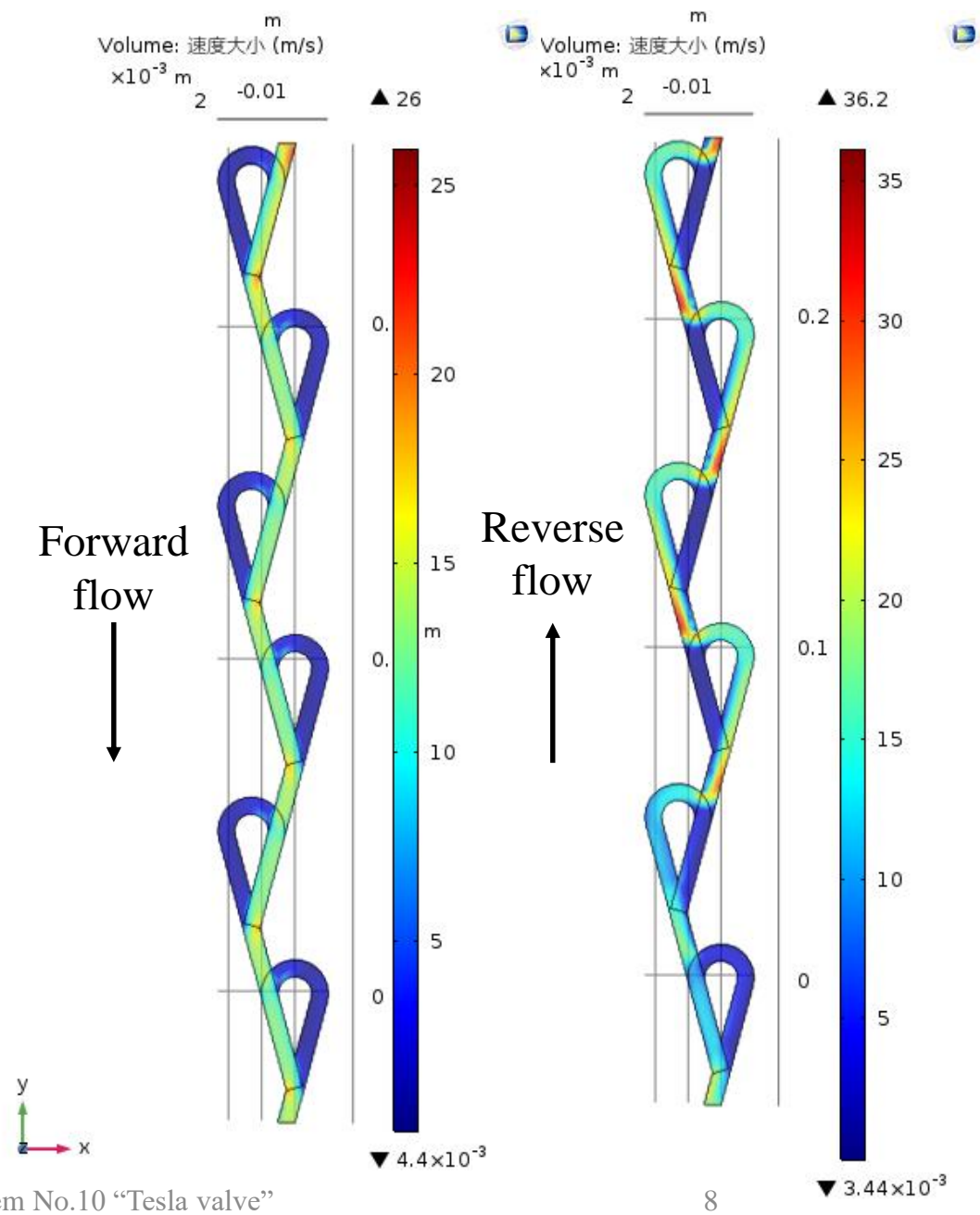
湍流长度:

L_T spf.LT_init m

速度分布

Tesla valve参数
单元对个数：3个
水流宽度：0.005m
圆弧半径：0.005m
水流深度：0.005m
圆弧角度：210°

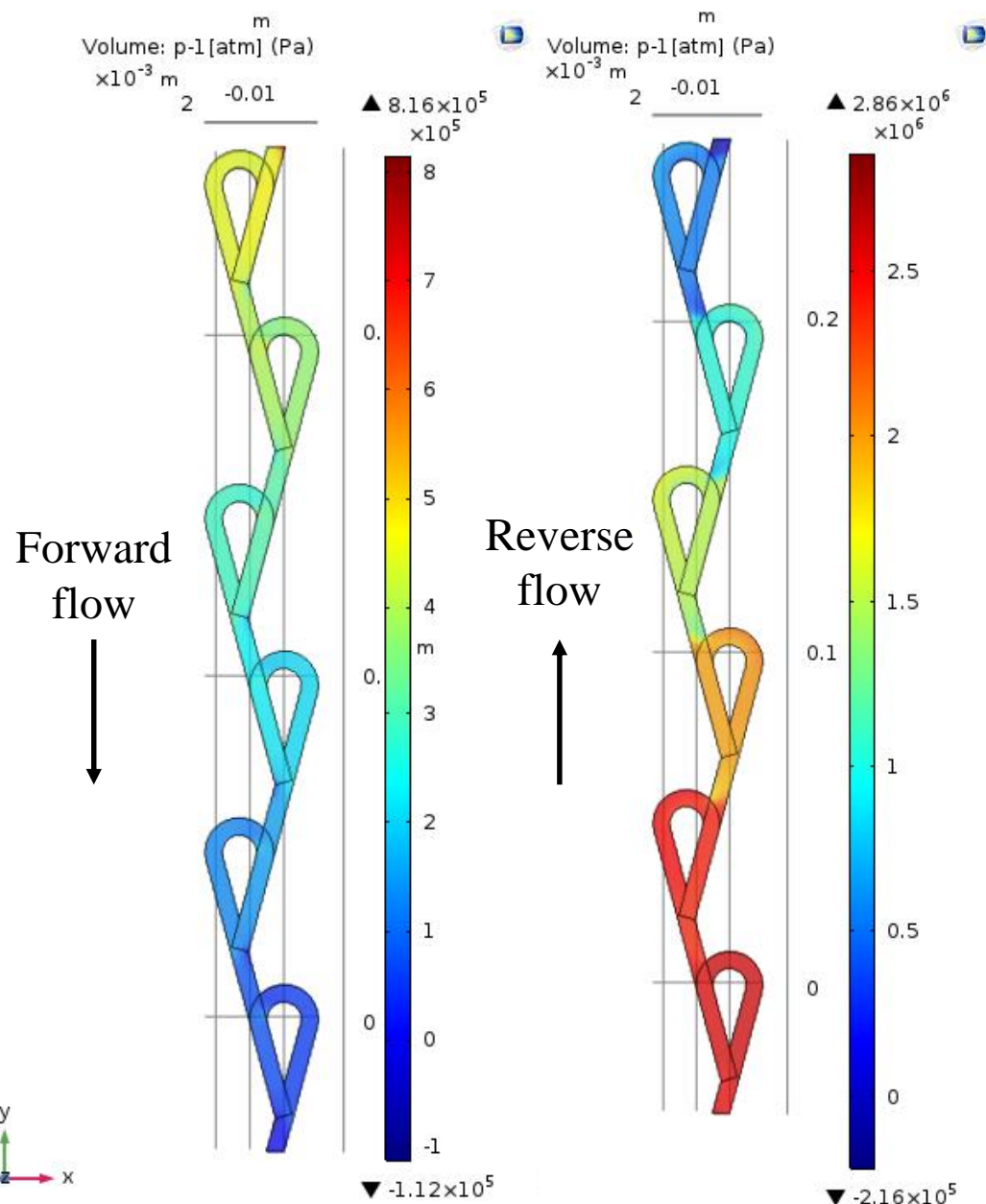
流向种类	速度	数值 ($10^{-4}m^3/s$)
Forward flow	入口	4.6012
	出口	4.7573
	差值	0.1561
Reverse flow	入口	4.6012
	出口	5.0226
	差值	1.4214



压力分布

Tesla valve参数
 单元对个数: 3个
 水流宽度: 0.005m
 圆弧半径: 0.005m
 水流深度: 0.005m
 圆弧角度: 210°

流向种类	压力	数值 (N)	阀效率
Forward flow	入口	16.0890	4.9931
	出口	2.6331	
	差值	13.4559	
Reverse flow	入口	68.8650	4.9931
	出口	1.6782	
	差值	67.1868	



实验装置

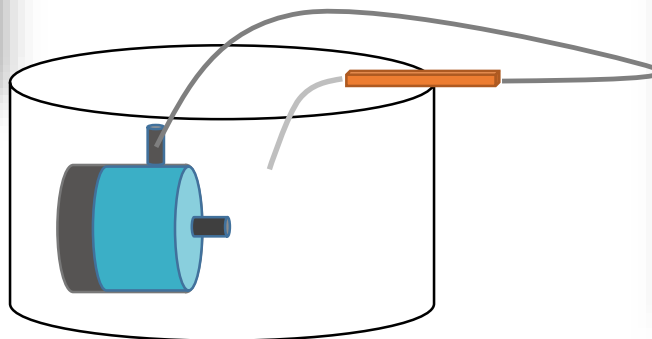


实验仪器：

水泵

3D打印Tesla Valve

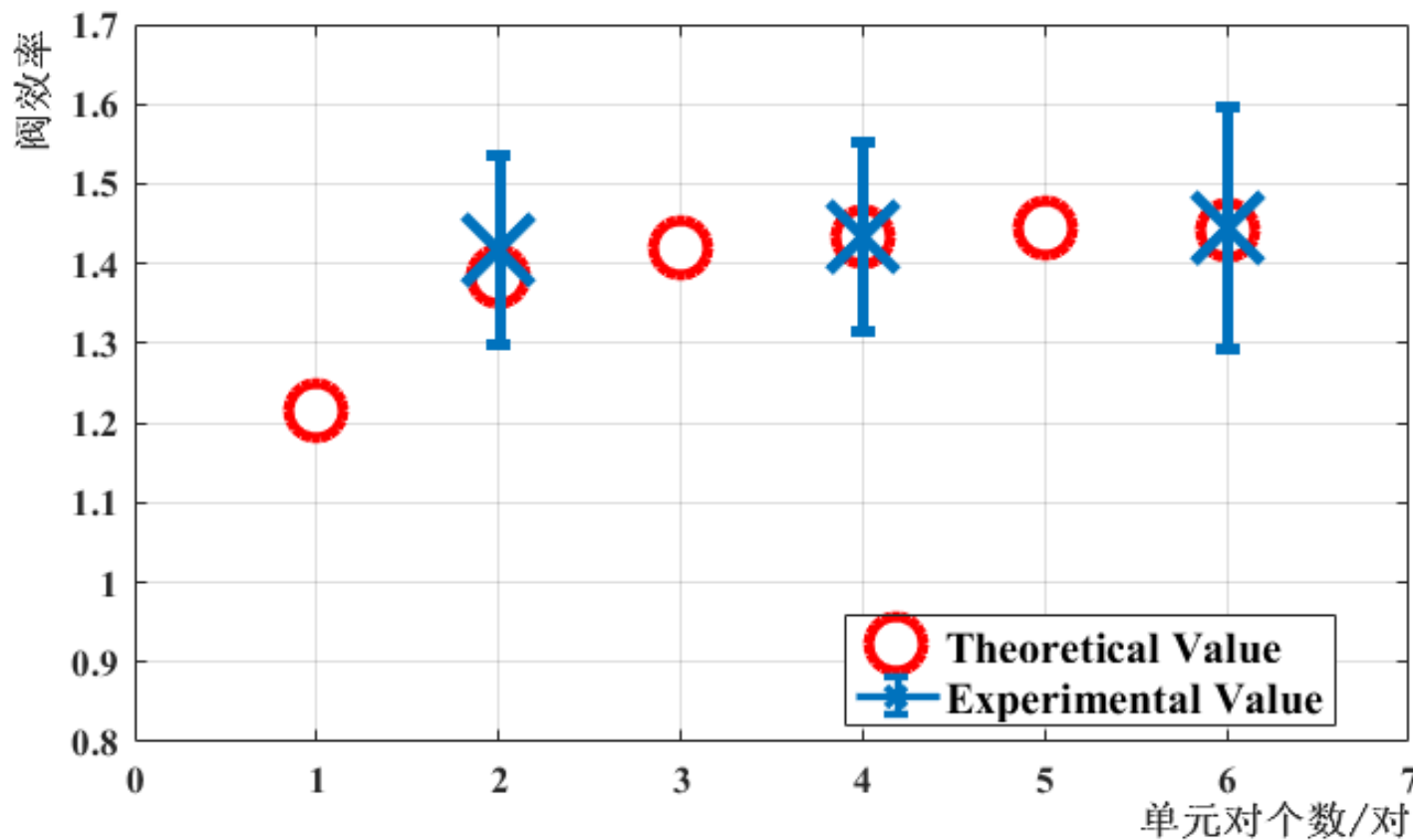
50ml量筒、皮托管



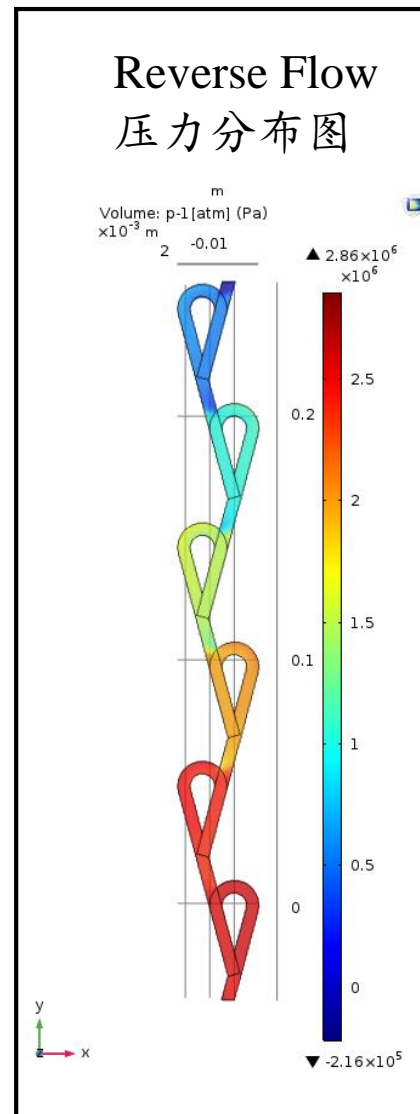
实验步骤：

Comsol软件建模，打印Tesla Valve
调节水泵档位，控制入口流速
用量筒测出口的流量
用皮托管测出口的流速

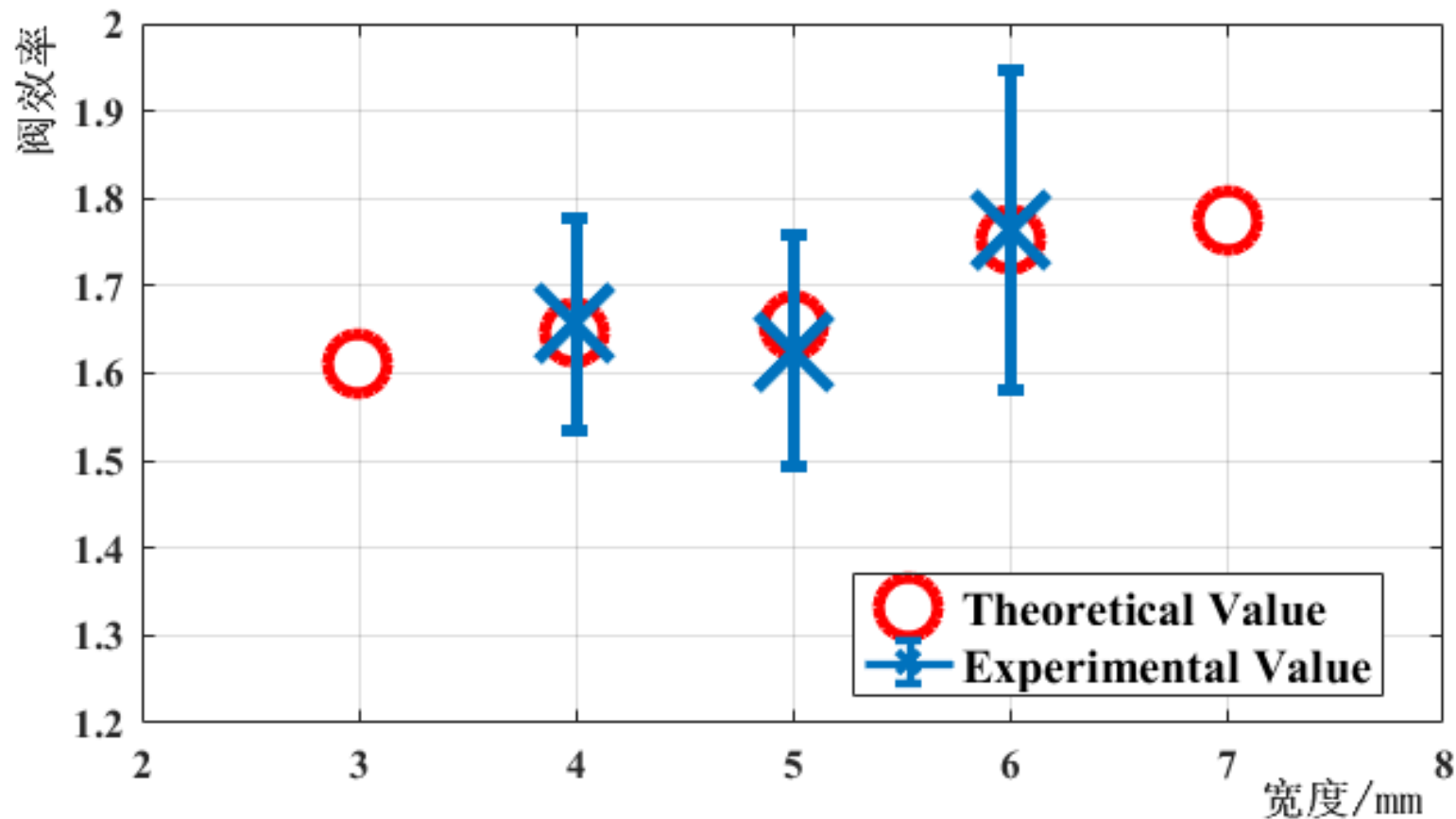
单元对个数



单元对个数越多，水流进行分流、汇集的循环次数越多，阻碍效果累积，阀效率呈上升趋势。

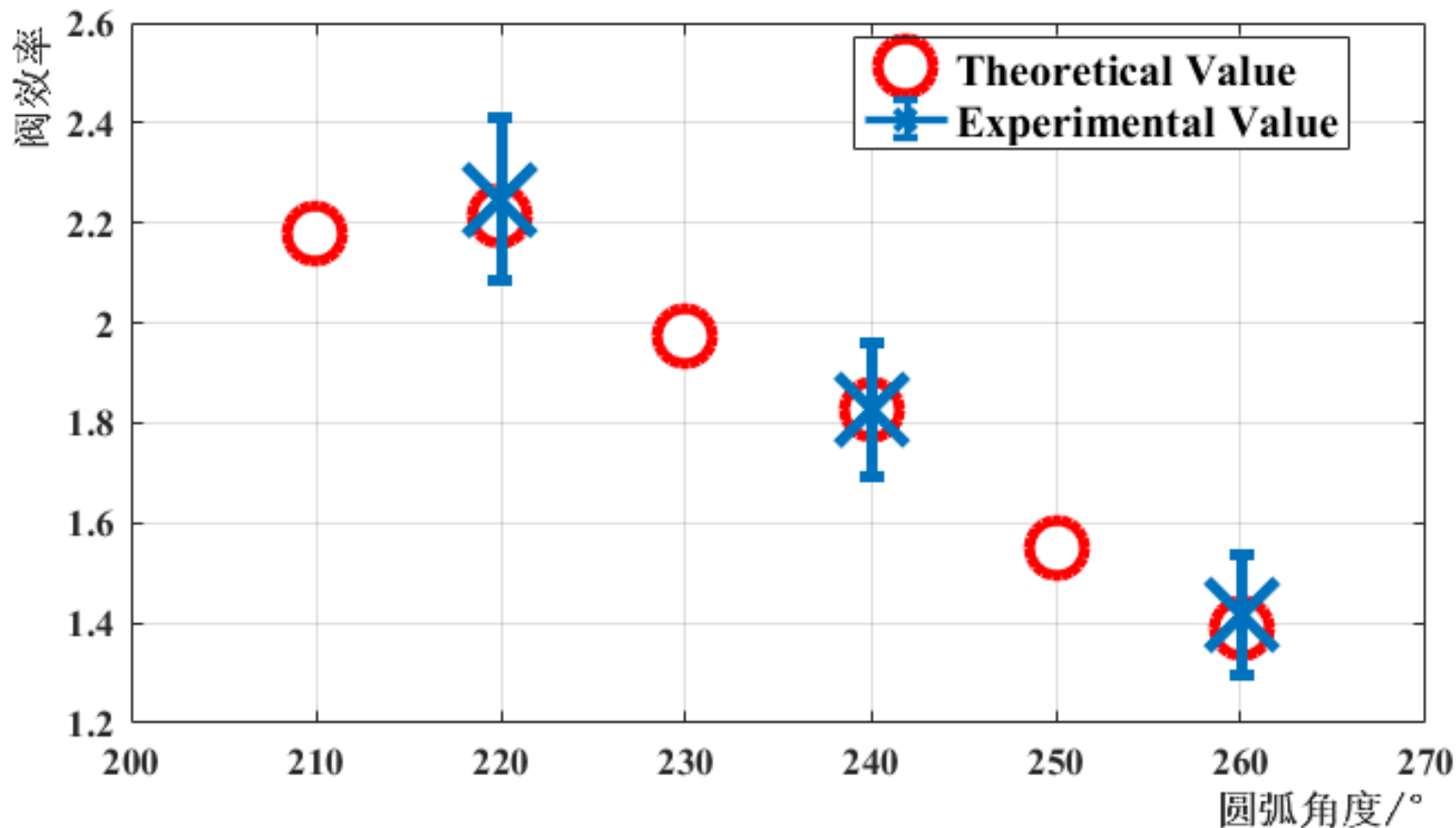


宽度

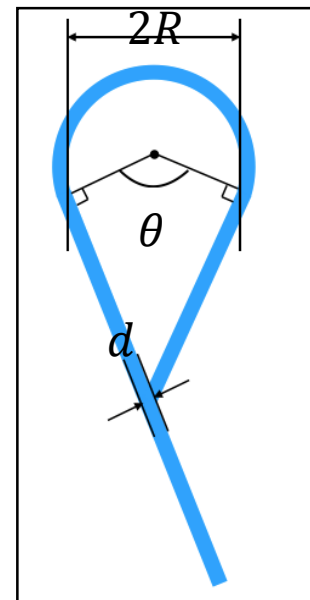


宽度越大，水流更容易通过，流速增大，根据 $Re = \rho v d / \mu$ ，雷诺数越大，越容易形成湍流，阻碍作用越明显，阀效率越大。

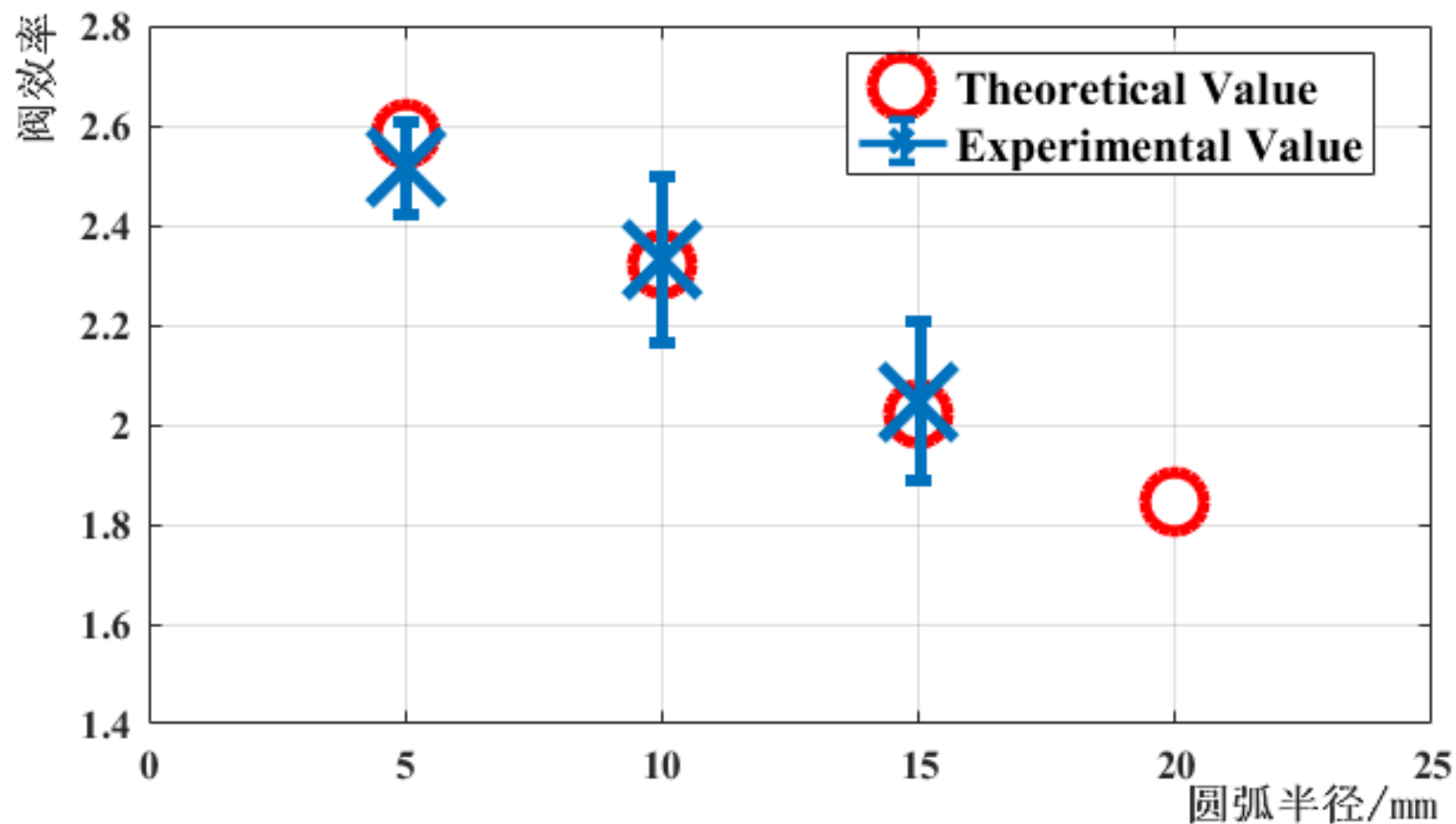
圆弧角度



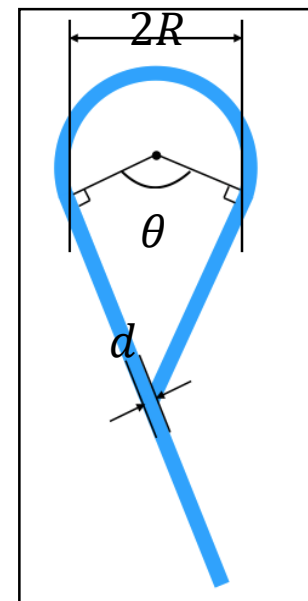
圆弧角度增大，直线通道作用效果明显增加，削弱水流向的选择性，水流更倾向于朝着固定的方向流动，系统的状态更稳定，阀效率越小。



圆弧半径

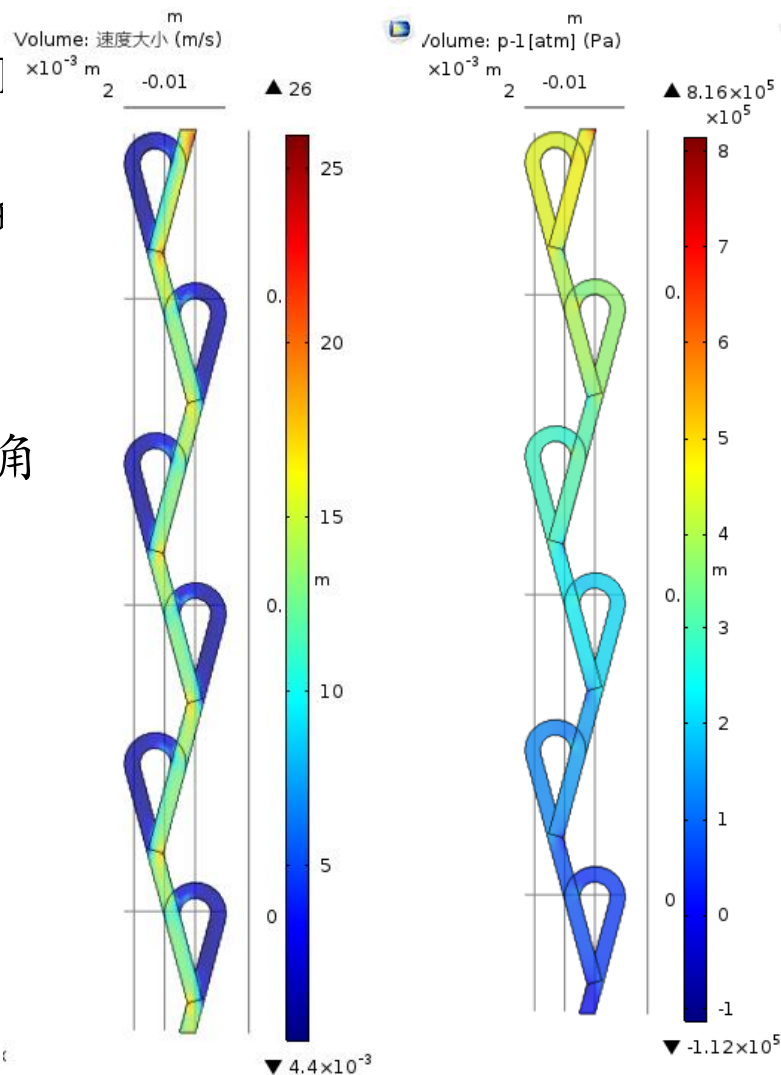
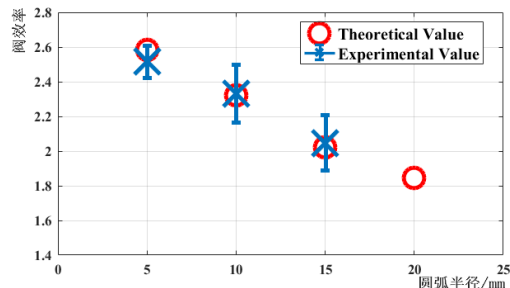
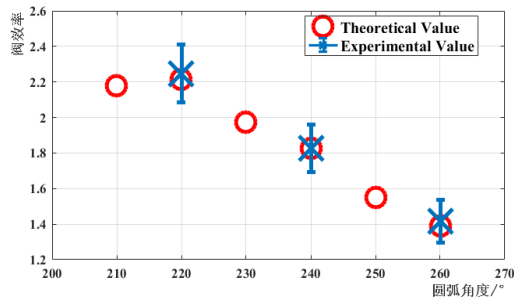
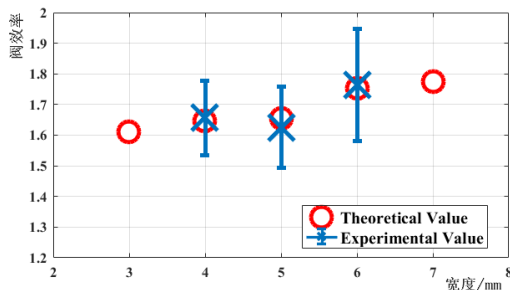
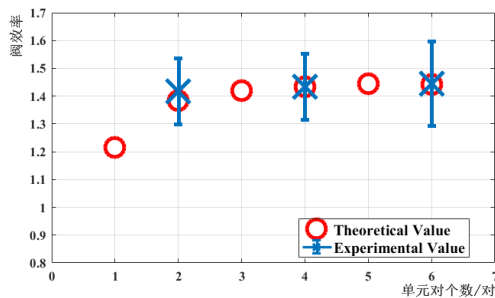


圆弧半径增大，直线通道长度缩短，正向流动时的阻碍增大，阀效率越小。



结论

- 用正反流向下出入口的压强差之比来定义 Tesla Valve 的单向导通率；
- 采用微分形式的流体力学方程组研究各物理量对单向导通率的影响；
- 用 Comsol 软件对 Tesla Valve 内部的流动流体的速度和压力进行模拟，求出数值解；
- 探究单元对个数、宽度、圆弧半径、圆弧角度对阀效率的影响，与模拟符合较好。



参考文献

- Wikipedia: Tesla valve, https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_valve
- S. M. Thompson, B. J. Paudel, T. Jamal and D. K. Walters. Numerical investigation of multistaged Tesla valves. J. Fluids Eng. 136, 8, 081102 (2014)
- S. Bendib and O. Francais. Analytical study of microchannel and passive microvalve: application to micropump simulator. Proc. SPIE 4593, 283-291 (19 Nov 2001)
- T.-Q. Truong and N.-T. Nguyen. Simulation and Optimization of Tesla Valves. Tech. Proc. Nanotech 2003, vol. 1 (2003)
- Nikola Tesa. Valvular conduit. US patent US 1329559 A (1920)
- The Tesla Valve (epicphysics.com)
- The Tesla Valve (youtube, YTEngineer, Jan 7, 2014)
- Tesla Valve - Nikola Tesla's Valvular Conduit best video (youtube, PhysicsHack, Nov 1, 2013)

Thanks For Watching

谢谢观看！
