

边界层与磁场对金属流体的方柱绕流MHD问题影响研究

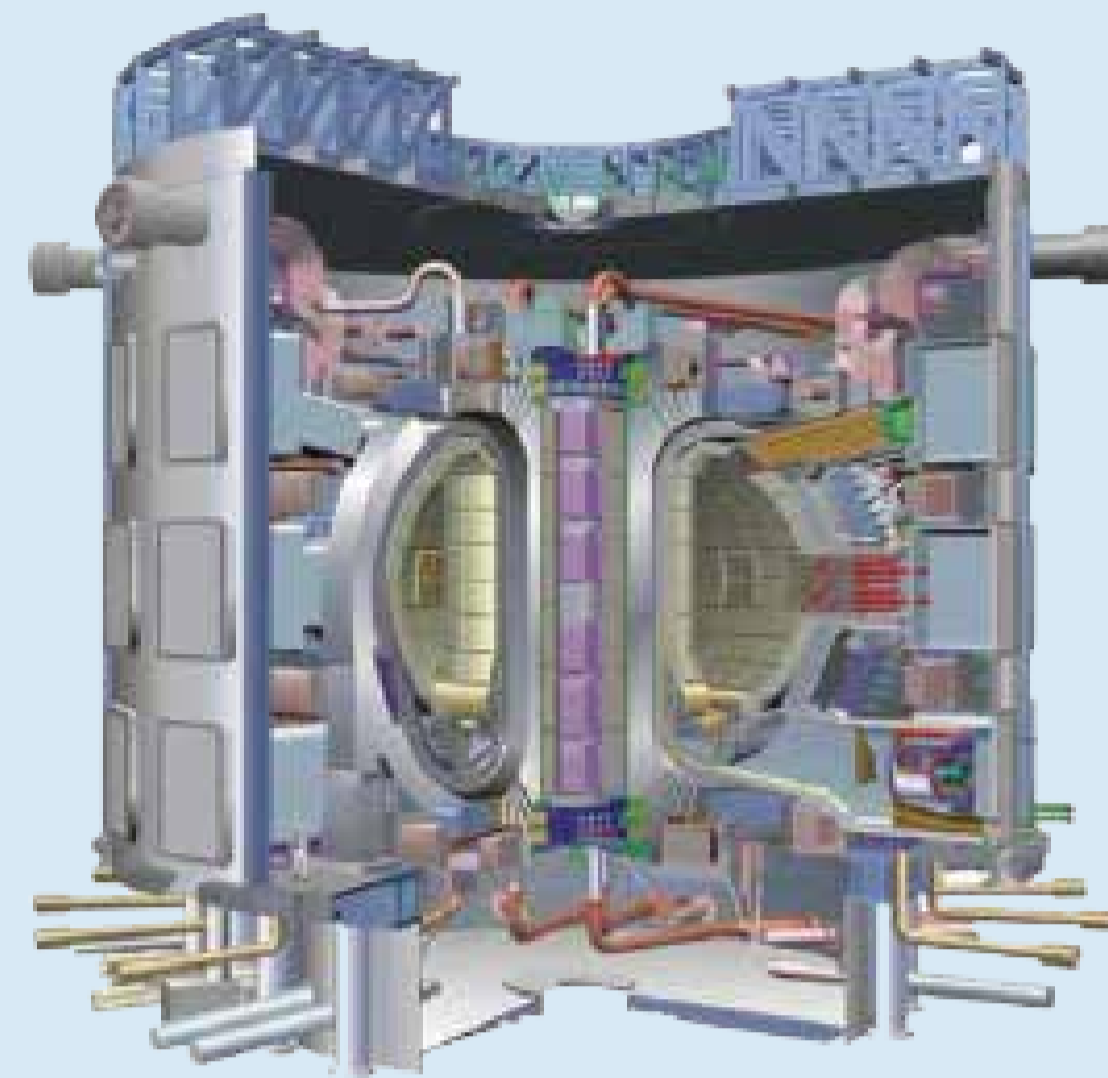
王汉伟, 倪明玖, 张年梅*
中国科学院大学工程科学学院, 北京 101408



1. 研究内容与方法

托卡马克是利用磁约束实现可控核聚变的装置, 本文依据反应装置中液态金属包层部件结构形式研究了流道内含有方柱的MHD问题。

研究采用有限体积法对进行了数值模拟, 依据准二维问题的SM82模型, 选取了相互作用数 $N \gg 1$ 系列工况, 分析研究了管道 $Re=10,000$ 时磁场大小和方柱相对位置对脱涡模式的影响。



托卡马克装置

控制方程

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} - \frac{\vec{u}}{\tau}$$

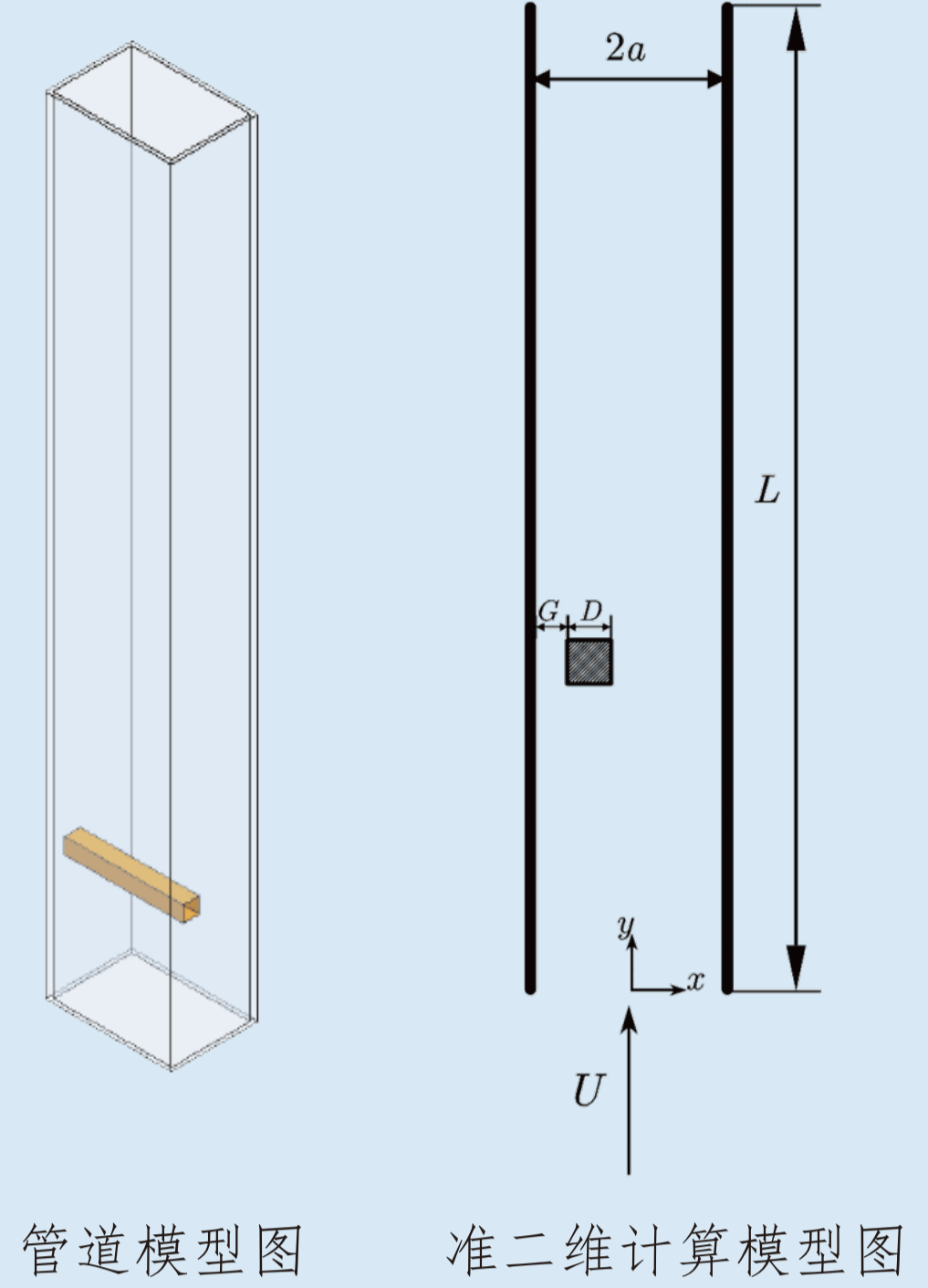
$$\Delta p = -\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

速度边界条件 压力边界条件

$$\vec{u} = (0, U_e) \text{ (入口)} \quad p = 0 \text{ (入口)}$$

$$(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = 0 \text{ (出口)} \quad \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = 0 \text{ (出口)}$$

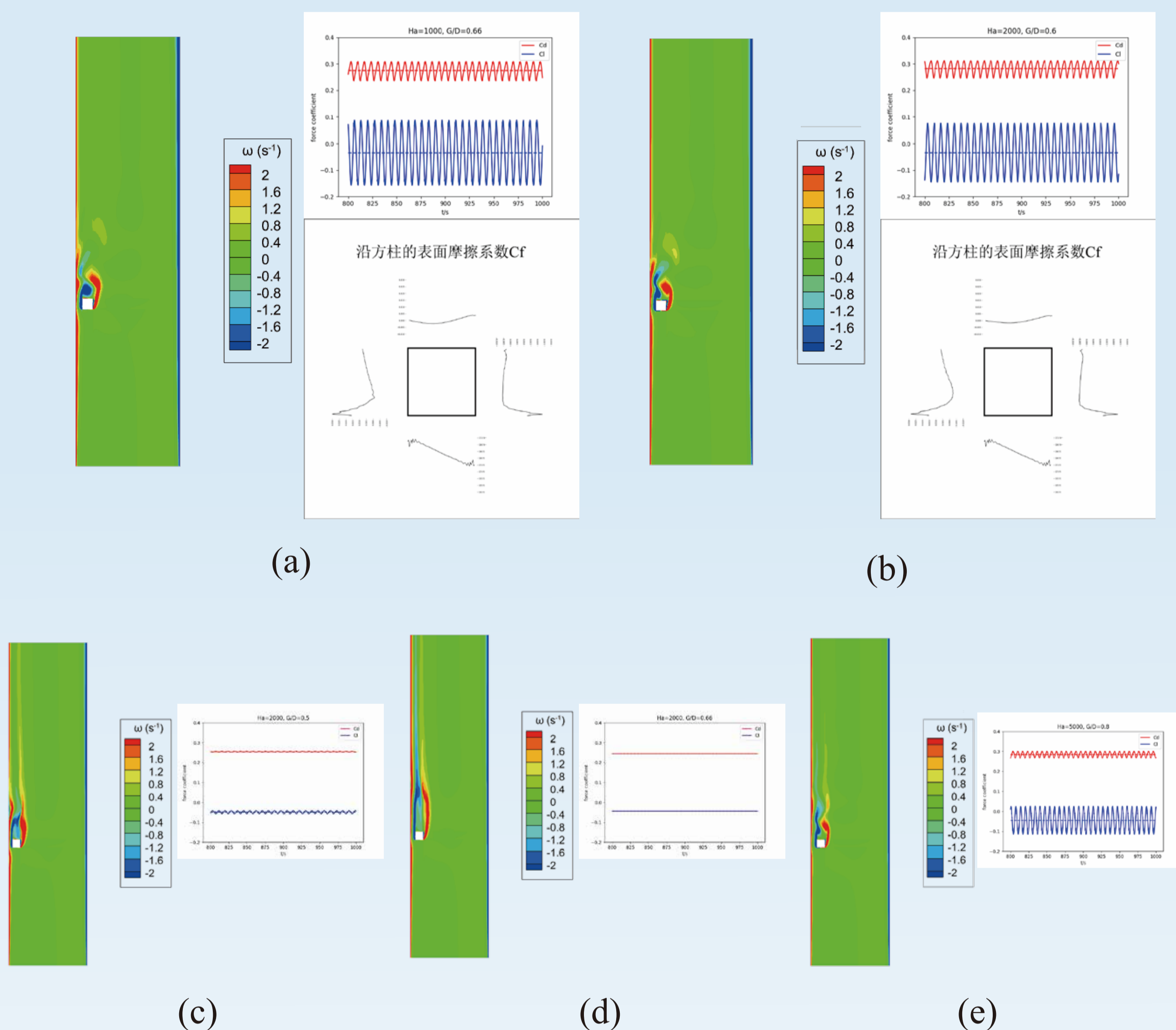
$$\vec{u} = \vec{0} \text{ (壁面)} \quad \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = 0 \text{ (壁面)}$$



管道模型图

准二维计算模型图

2. 涡脱落模式

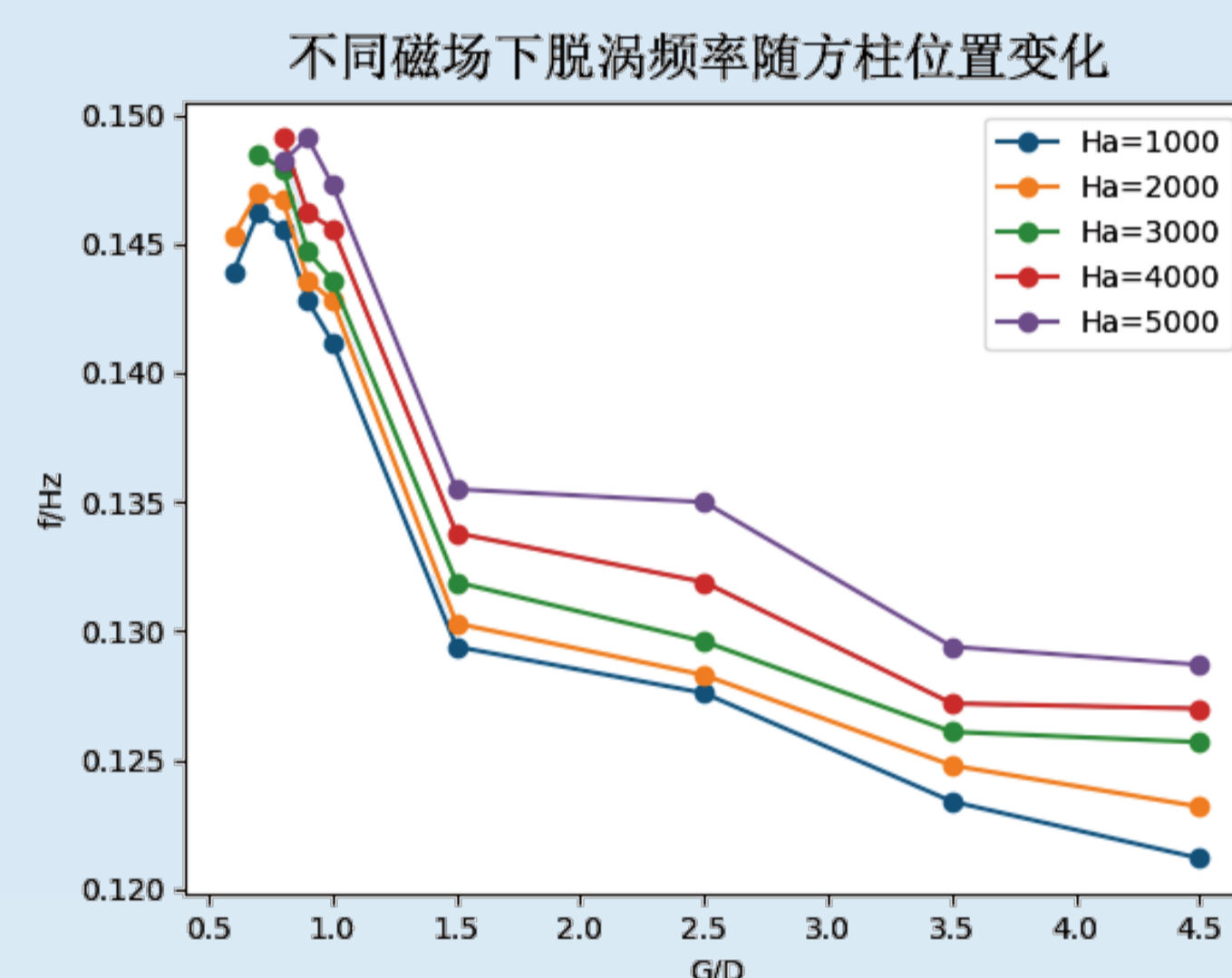


受磁场大小和方柱位置影响的五种脱涡模式

- (a) $Ha=1,000, G/D=0.66$ 时呈双侧脱涡
- (b) $Ha=2,000, G/D=0.60$ 时呈单侧脱涡
- (c) $Ha=2,000, G/D=0.50$ 时不脱涡(i)
- (d) $Ha=2,000, G/D=0.66$ 时不脱涡(ii)
- (e) $Ha=5,000, G/D=0.80$ 时不脱涡(iii)

在 Ha 数在 1000-5000, 方柱位置 G/D 在 0.5-4.5 变化范围内, 共观察到五种不同的涡脱落模式。分离涡形成的过程中, 大量能量被耗散, 部分能量被传递到更远处形成后续的分离涡。从各个模式的升阻力系数变化曲线可以看出, 有涡脱落的模式升阻力有幅值较大的周期性变化, 蕴含的能量能够维持持续的涡脱落。值得注意的是, (e) 中虽然也有周期性变化的升阻力, 但其振荡幅值还不足以使尾涡脱落, 因此形成了不稳定的非脱涡态。在 (c)(d) 两种不脱涡形式中, 升阻力振荡极小, 因此也没有脱涡发生。在发生脱涡的情形中, 靠近壁面一侧的方柱表面摩擦系数是影响脱涡形式的直接原因, 当该侧摩擦系数变化较大时, 这一侧的涡难以从尾部脱落, 从而形成 (b) 中的单侧脱涡形式, 反之则产生 (a) 中的双侧脱涡。

3. 磁场与方柱位置影响

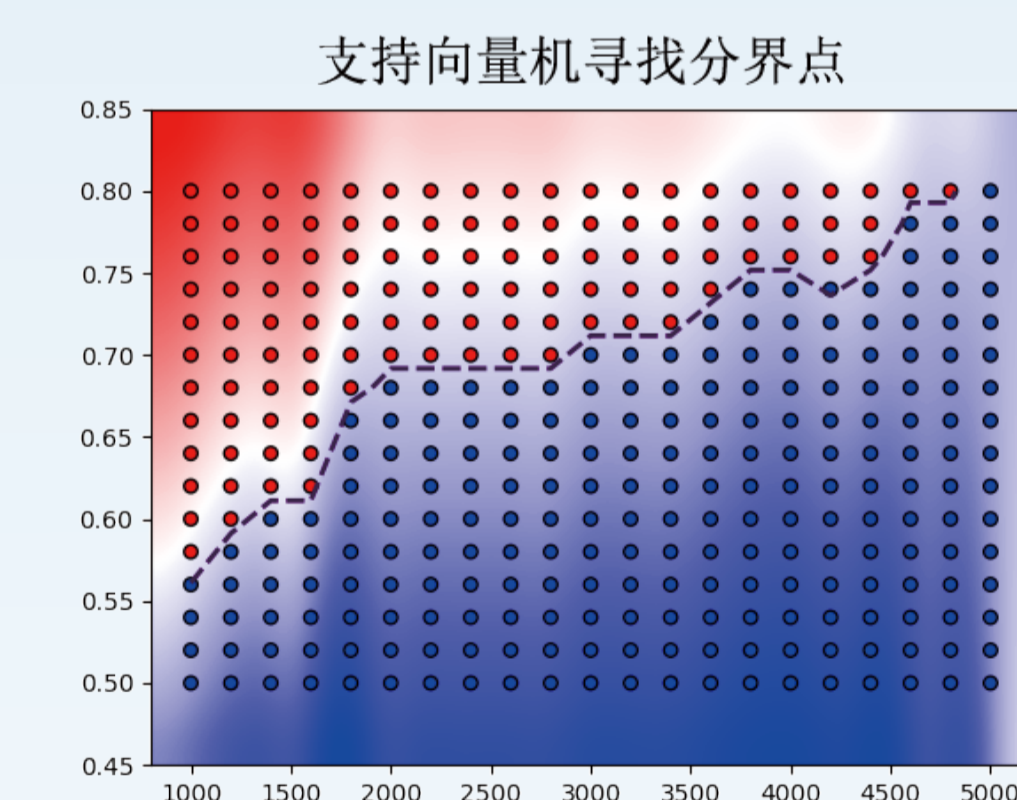


磁场
对脱涡起抑制作用, 但能够提升脱涡频率

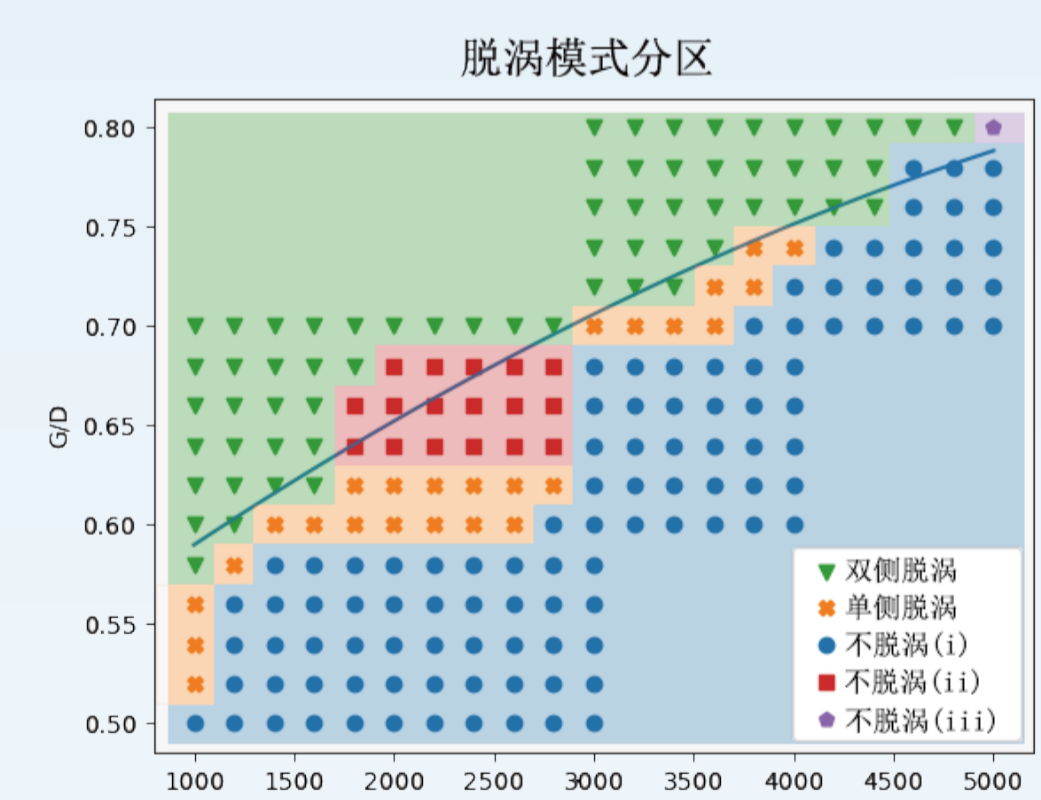
壁面
对脱涡起抑制作用, 对频率有双重影响

磁场在流动中主要起到致稳的作用, 随着磁场的增大, 方柱尾部的涡量范围逐渐减小。当磁场增加到一定范围后 ($Ha=5,000$), 虽然方柱距离壁面足够远, 但尾部涡量只能交替摆动, 仍然不能脱落。边界层附近粘性剪切力有较大变化, 在方柱距离壁面较近时对脱涡有较大的抑制作用, 随着方柱远离壁面, 脱涡频率会先小幅增大然后减小。

4. 机器学习分区



支持向量机是适用于小样本分类问题的优秀方法。通过支持向量机将双侧脱涡模式与其他脱涡模式分界, 更准确地将来未计算工况进行分类, 从而获得更多的训练样本。



不同于传统的最小二乘法, 符号回归算法不需给定表达式具体形式, 通过遗传算法获得误差最小的表达式。通过该算法获得了双侧脱涡与其他脱涡模式的近似分界曲线:

$$\frac{G}{D} = -0.0676728 Ha^2 + 0.3 Ha + 0.0038503116288 Ha^{\frac{1}{2}} + 0.5190312$$

5. 参考文献

- Tao. Effect of fringing magnetic field on magnetohydrodynamic flow in rectangular duct. Fusion Engineering and Design, 2011, 86: 2352-2357.
- Shahri. Quasi-two-dimensional case studies of MHD flow and heat transfer behind a square cylinder in a duct. International Journal of Applied Electromagnetics, 2015, 49: 123-132.
- Sommeria. Why, how, and when, MHD turbulence becomes two-dimensional. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 118: 507-518.
- Soni. Capturing functional relations in fluid-structure interaction via machine learning. Royal Society Open Science, 2022, 9: 220097.
- Luo. Parse-matrix evolution for symbolic regression. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25: 1182-1193.
- Schlichting. Boundary Layer Theory[M]. 8 Edition. Berlin, New York: Springer, 2000: 146-164.
- Chatterjee. MHD flow and heat transfer behind a square cylinder in a duct under strong axial magnetic field. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 88: 1-13.