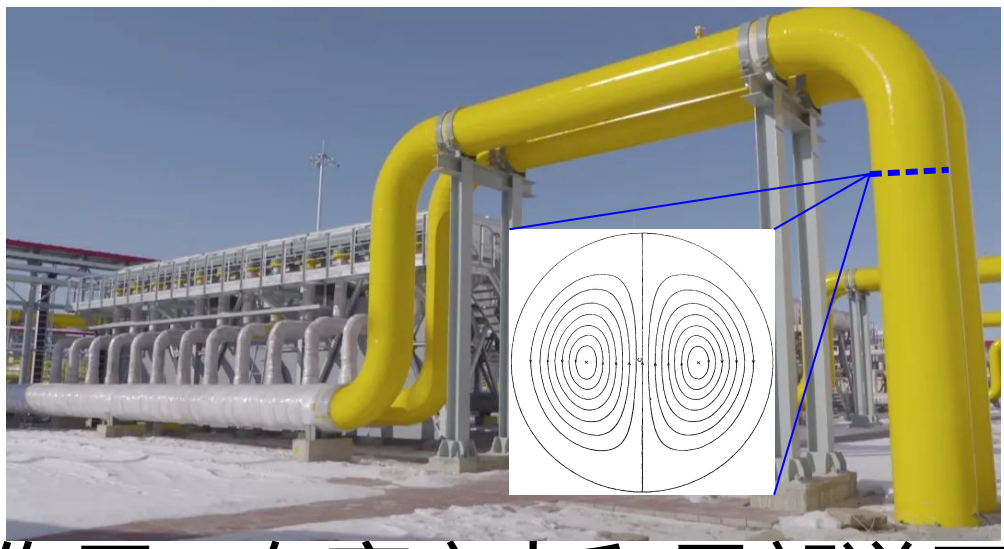


90°弯管湍流中迪恩涡摆动特性的直接数值模拟研究

王智欣
长江水利委员会长江科学院 水力学研究所

研究背景

90°弯管是城市给排水、水电站压力管道、船舶管路、油水气输运等大量复杂管道系统中应用极为广泛的重要部件，对改变流体运动方向以满足介质运输需求起重要作用。在离心力和局部逆压梯度共同作用下，弯管内通常会形成一对反向旋转的涡结构，即迪恩涡(Dean Vortices)。90°弯管湍流中出现的迪恩涡摆动现象(swirl switching)^[1]与弯管内流动振荡密切相关，会加大管壁热应力、引起流激振动，从而导致管道的热疲劳和机械疲劳，威胁管道系统安全运行。



数值方法

直接数值模拟(DNS)计算采用基于高精度谱元法的开源CFD代码Nek5000^[2]。

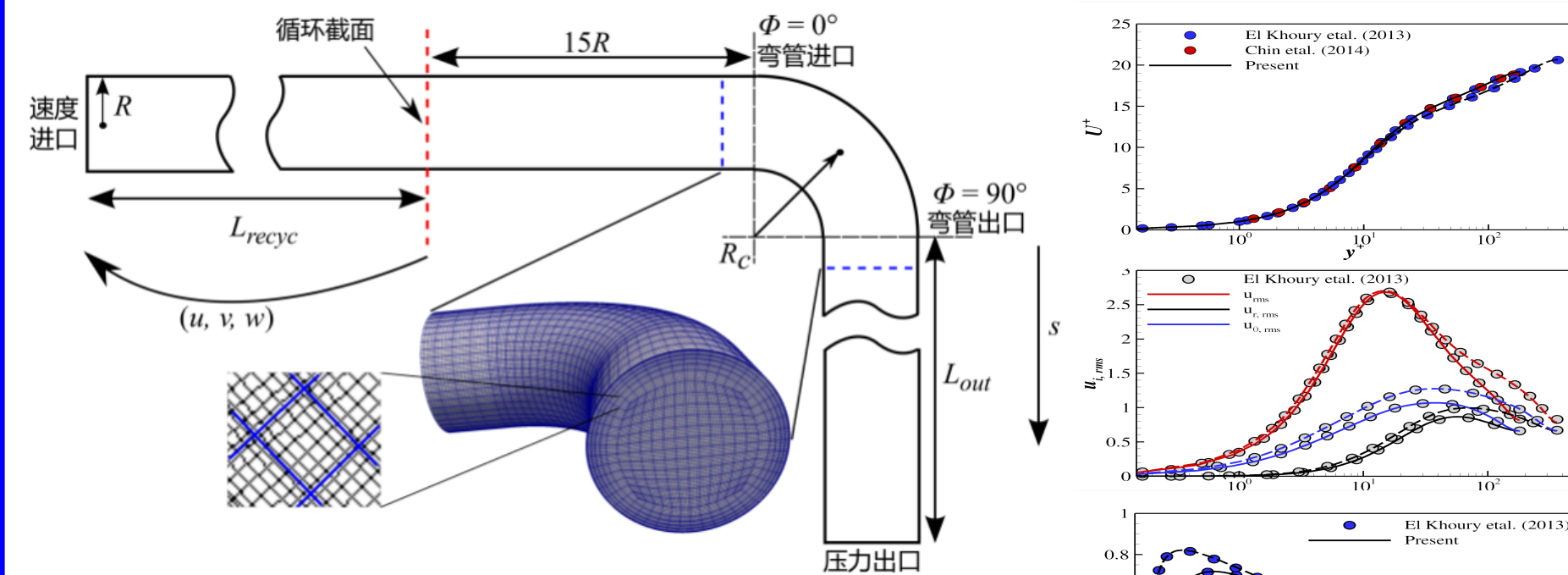


图1 计算域与网格划分
上游采用循环式速度进口实现充分发展湍流进流，下游采用压力出口

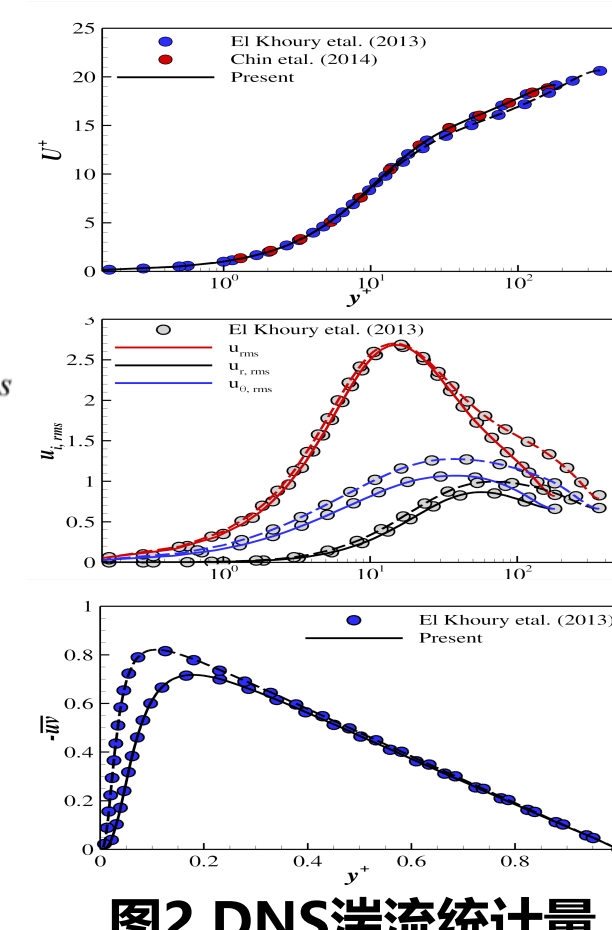


图2 DNS湍流统计量

计算成果

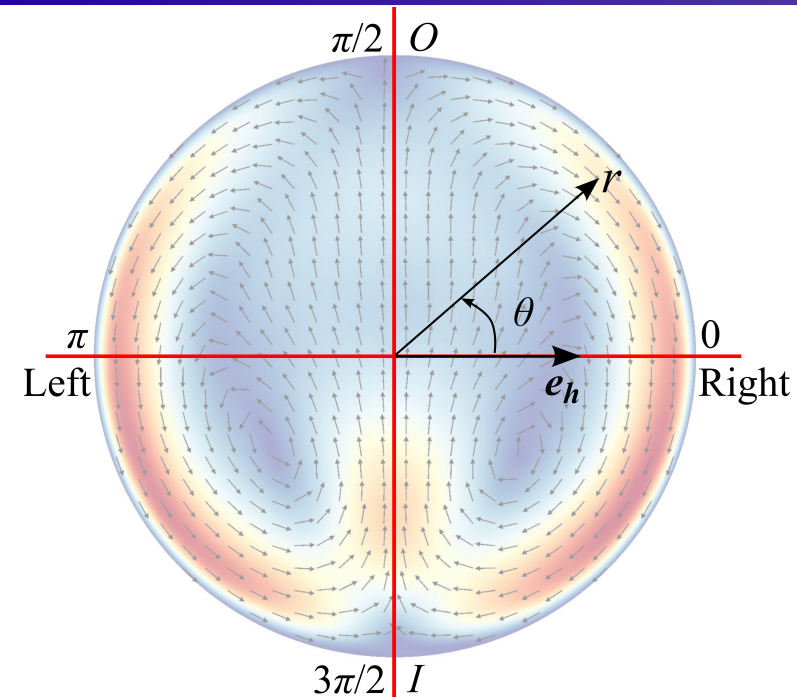


图3 弯管下游横截面二次流时均流场

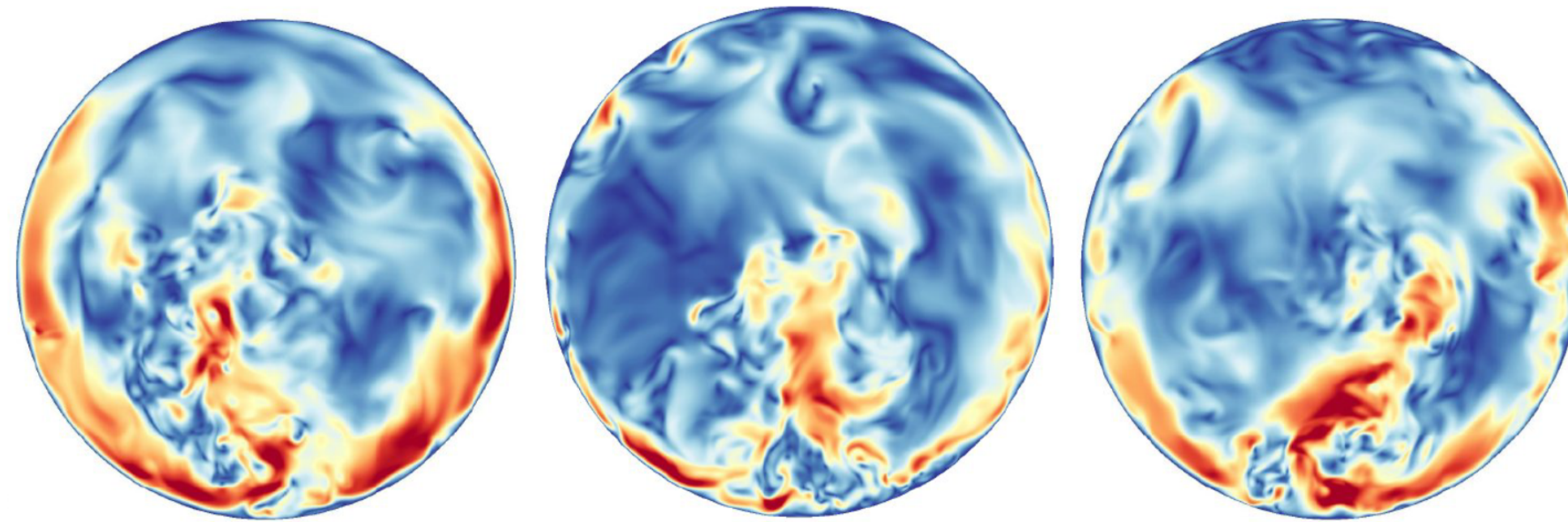


图4 弯管下游横截面二次流瞬时流场

- 时均流场中迪恩涡完全对称
- 瞬时流场中迪恩涡左右摆动，两侧涡的大小和强度呈交替主导状态
- 迪恩涡的非定常运动即为迪恩涡摆动现象，且仅在湍流条件下出现

$G(s) = \int_0^{2\pi} p(s, \theta) n d\theta$ 迪恩涡摆动导致管壁两侧受力不均匀，引入流体作用在管壁上的合力对其进行研究^[5]。

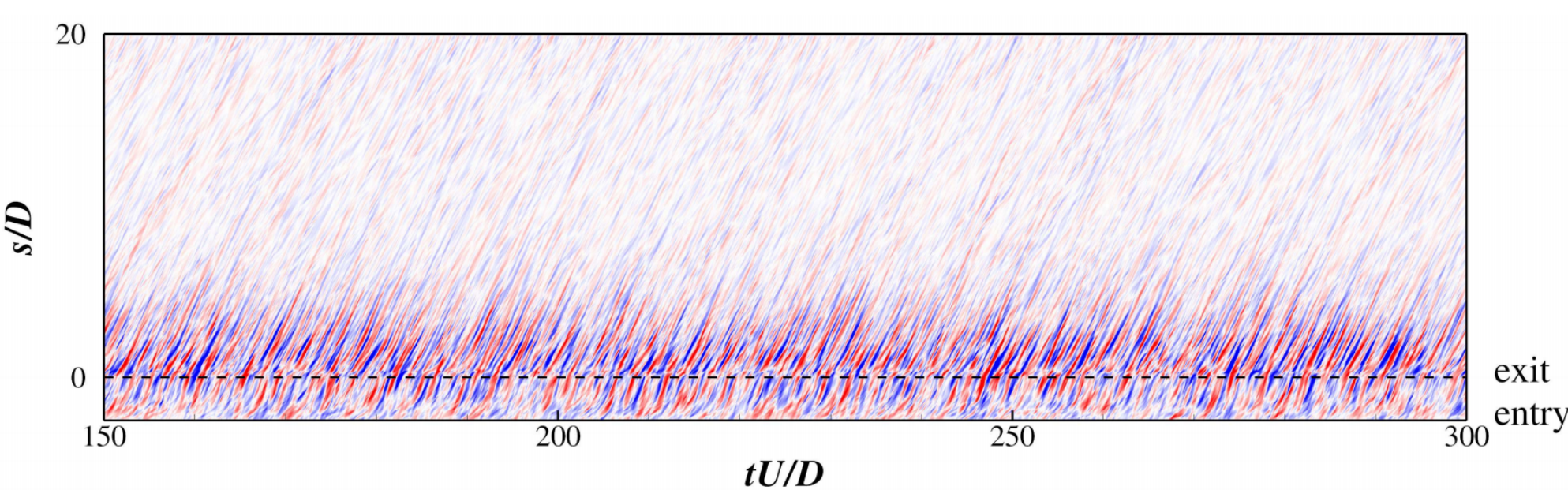


图5 弯管下游沿程管壁所受侧向力的时程变化

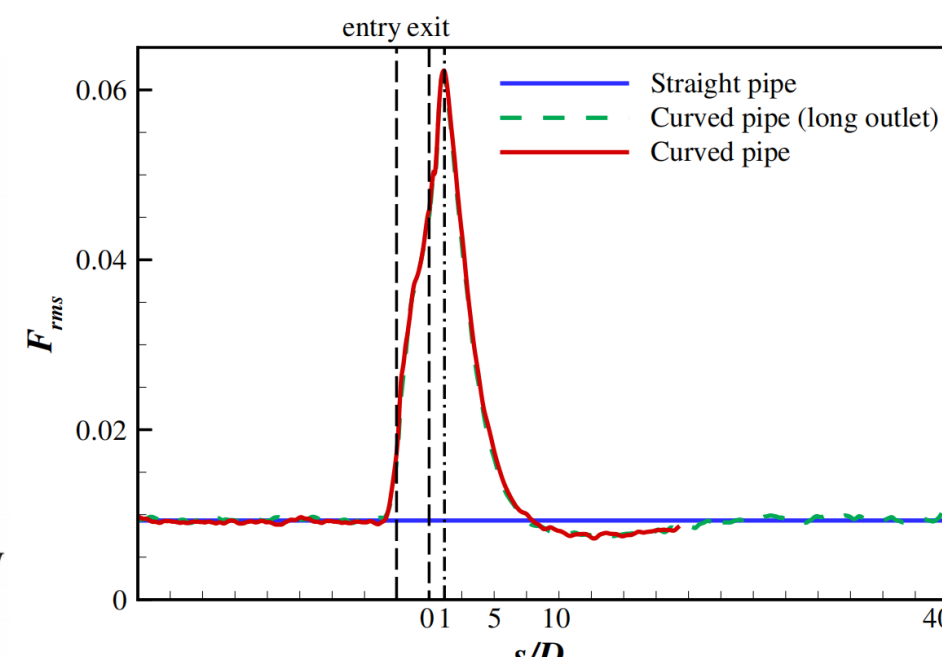


图6 弯管沿程管壁所受侧向力的均方根值

- 90°弯管显著加剧了管壁所受侧向力的脉动大小
- 弯管下游 1D 处管壁受力波动达到最大，随后逐渐衰减
- 迪恩涡的交替摆动导致了管壁所受合力的方向不停变化

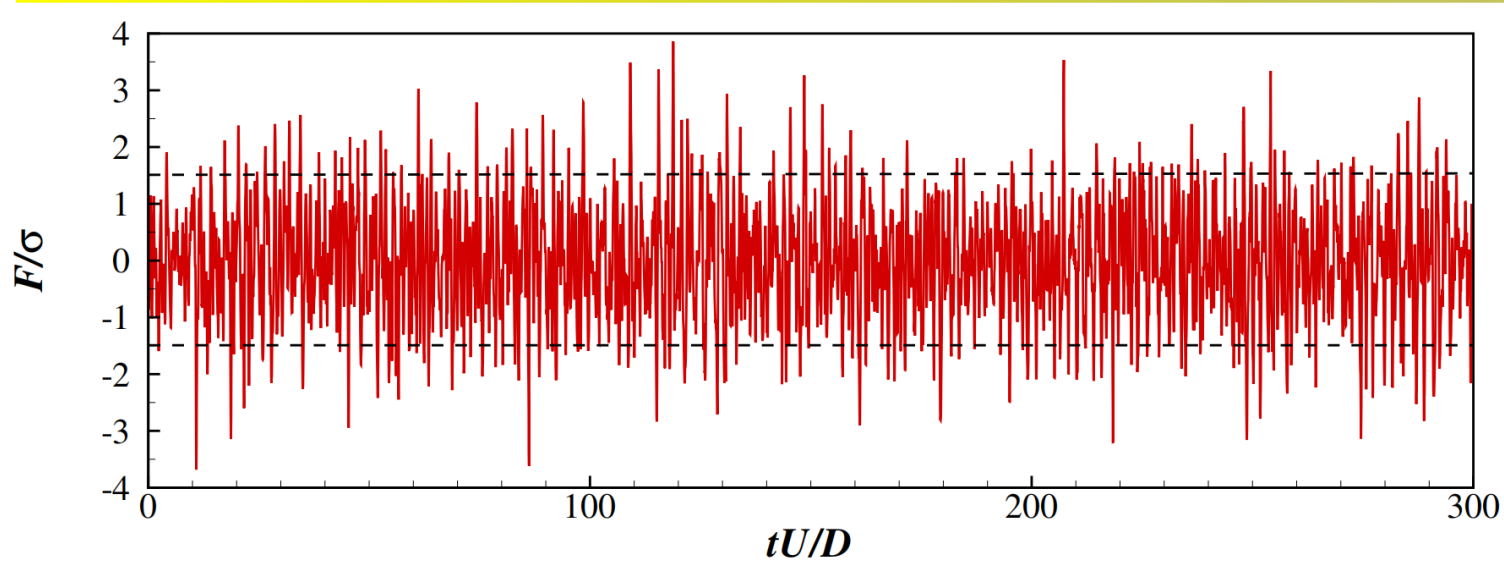


图7 弯管下游1D处管壁所受侧向力的瞬时值

为研究管壁受力脉动与迪恩涡摆动的联系，对 $|F| > 1.5\sigma_F$ 的瞬时流场进行条件平均。

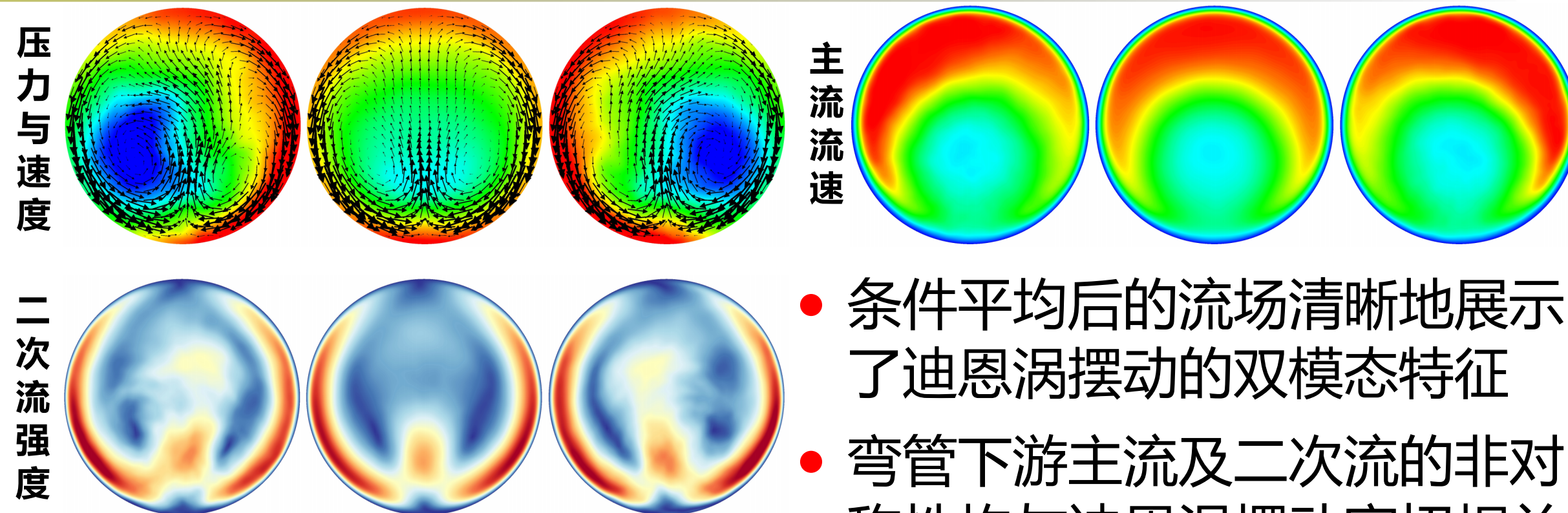


图8 弯管下游1D处条件平均后的速度、压力场

- 条件平均后的流场清晰地展示了迪恩涡摆动的双模态特征
- 弯管下游主流及二次流的非对称性均与迪恩涡摆动密切相关

参考文献

1. Tunstall & Harvey, *J. Fluid Mechanics*, 1968.
2. Fischer, et al., <http://nek5000.mcs.anl.gov>, 2008.
3. El Khoury, et al., *Flow Turbul. Combust.*, 2013.
4. Chin, et al., *Phys. Fluids*, 2010.
5. Wang, et al., *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2018.

资助项目

本项目由中央级公益性科研院所基本科研业务费资助 (CKSF2021453/SL)。

通讯方式: wangzx@mail.crsri.cn