

射流引起的携带气泡的自由表面湍流

李荣^{1,2,a}, 杨子轩^{1,2,b}

¹中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室 ²中国科学院大学工程科学学院

邮箱: ^a lriong@imech.ac.cn ^b yangzx@imech.ac.cn

介绍

携带气泡的湍流是自然界和工程应用中普遍存在的现象，如海洋破碎波和船舶航行尾流等，自由表面翻卷激起的水柱冲击水面是自由表面湍流中气泡夹带的重要来源，因此射流模型常用于研究复杂流动中的气泡夹带机制。

算例设置和研究方法

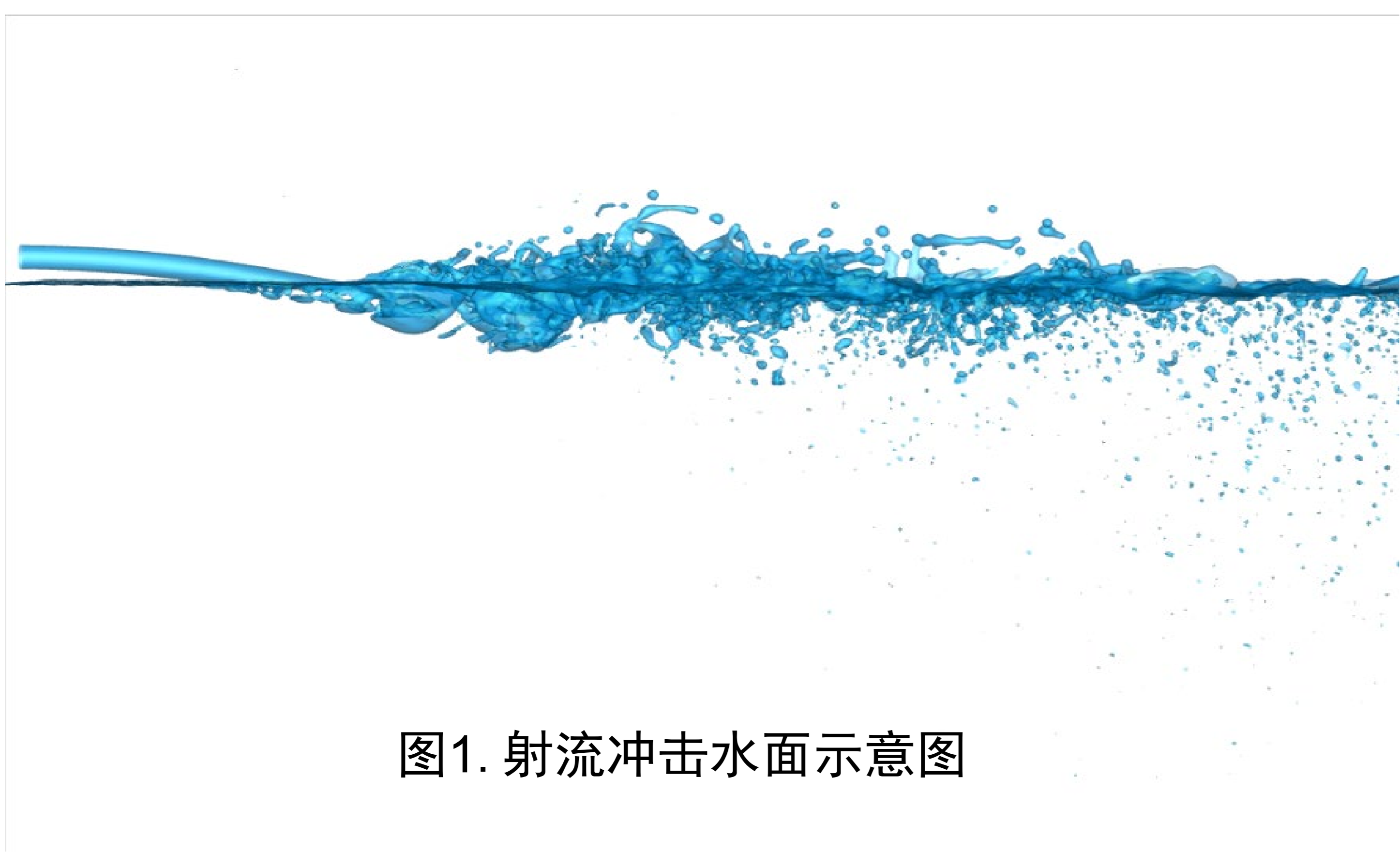


图1. 射流冲击水面示意图

如图所示，直径为 d 射流以水平初速度 U 在重力作用下射向静止水面，其中射流距水面为一倍的射流直径。

我们通过数值手段求解三维两相不可压Navier-Stokes方程来模拟该流动模型，其中两相界面捕捉采用了耦合level-set和volume-of-fluid(CLSVOF)方法,关于数值方法的具体内容可参考文献[1]。

以射流直径为特征长度，射流速度为特征速度定义的Re数、Fr数和We数如表1所示。

表1. 参数设置

case	Re	Fr	We
1	1.6×10^5	6.39	8.89×10^3
2	1.6×10^4	6.39	8.89×10^3
3	1.6×10^3	6.39	8.89×10^3

[1] Yang, M. Lu, S. Wang, A robust solver for incompressible high-Reynolds-number two-fluid flows with high density contrast, Journal of Computational Physics 441 (2021) 110474.

结果与讨论

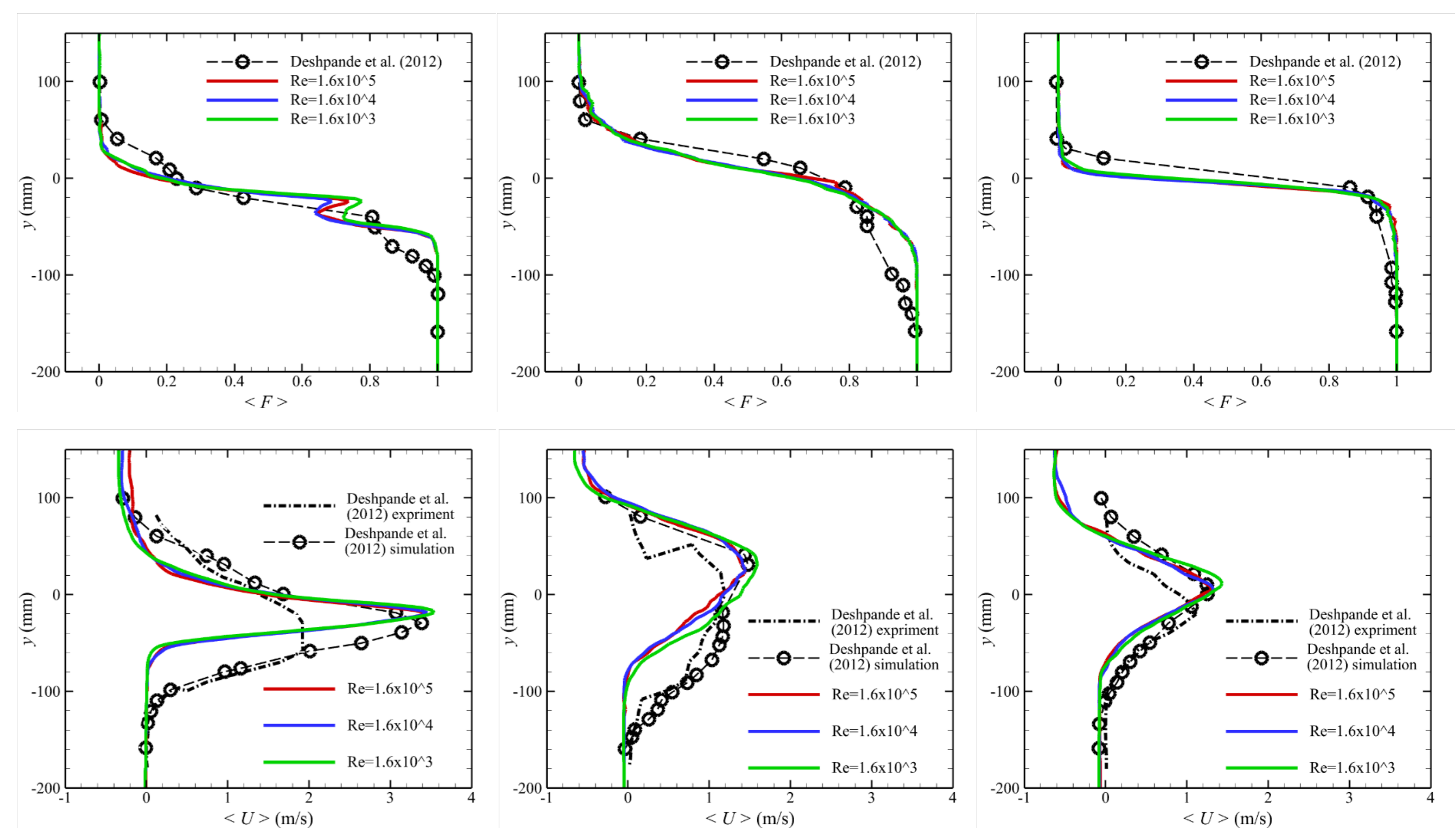
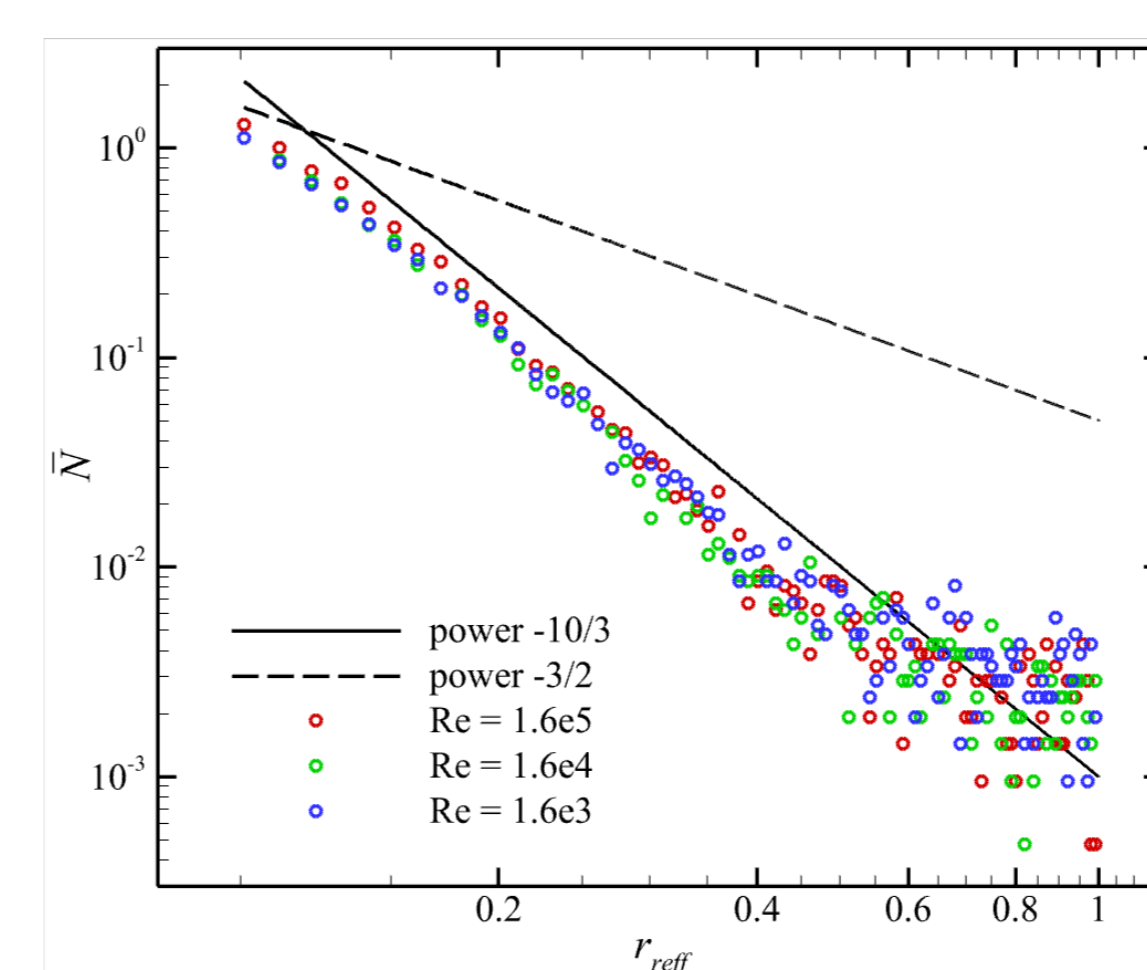


图2. 从左至右分别为流向不同位置平均液相体积分数（上）和平均速度（下）沿展向中心的垂向分布图



给定区域体积 V ，给定有效半径区间长度 b ，气泡半径密度谱计算公式：

$$\overline{N}(r_{eff}) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{n(r_{eff}, t; b)}{V \cdot b} dt$$

图3. 气泡半径密度谱

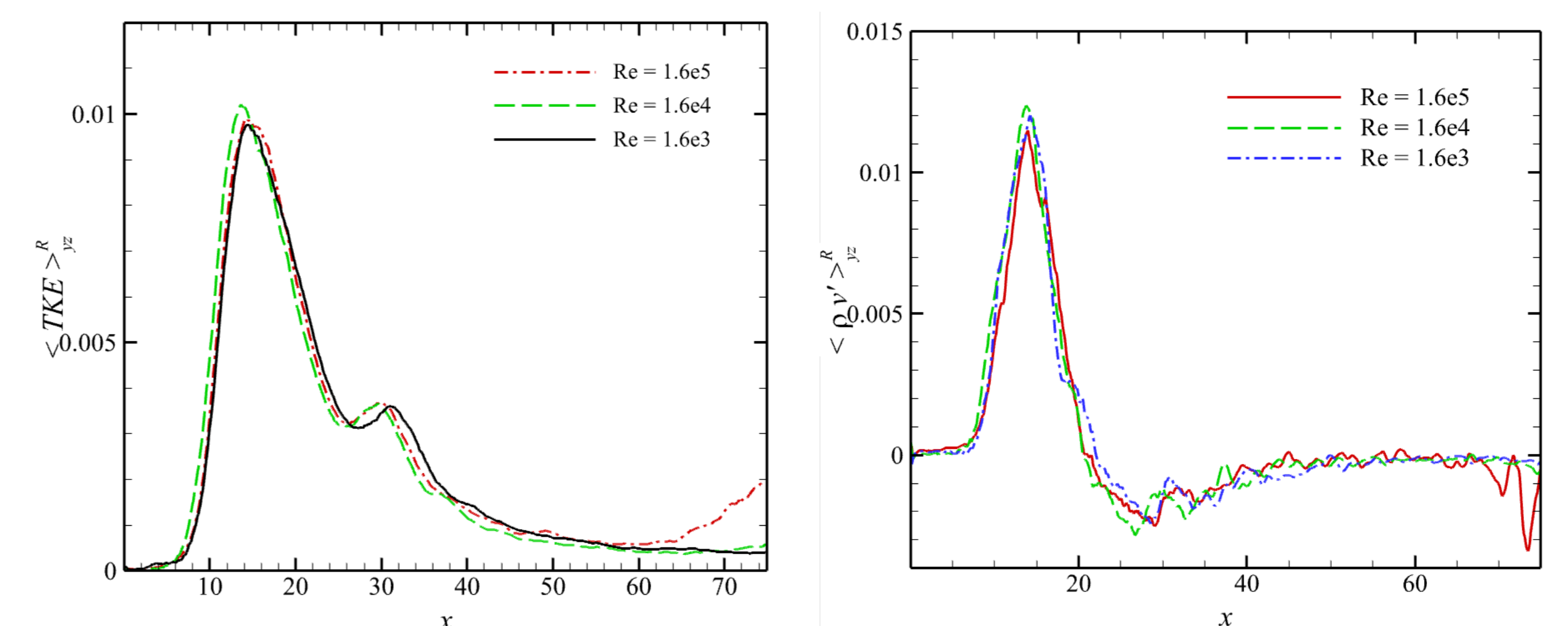


图4. 混相区内湍动能（左）和湍流质量通量（右）沿流向的分布图

总结与展望

我们对射流冲击水面形成的带有气泡的自由表面湍流进行了高保真的数值模拟，并定量统计了相关结果。平均体积分数和平均速度的结果与文献的实验和数值模拟结果吻合，气泡的半径密度谱也符合公认的一 $10/3$ 次方律，验证了我们模拟结果的准确性。现有的结果表明雷诺数对平均量、气泡分布以及湍流统计量影响不大，后续工作我们将进行Fr数和We数效应对上述结果的影响的研究