



清华大学 行健书院  
Xingjian College, Tsinghua University

# 以长跑倒三角为例的破风阵型研究

## 流体力学

汇报人：郭锐冰、付华钰、李一德  
2024年6月28日

1

背景介绍

2

数值仿真

3

水槽实验

4

理论分析

1

背景介绍

2

数值仿真

3

水槽实验

4

理论分析



## 基普乔格两次破二挑战的阵型

配速团队总计41人。其中不乏美国中长跑巨星拉加特、欧洲半马纪录保持者万德斯、挪威三兄弟的亨里克-英格里格森、菲利普-英格里格森以及雅各布-英格里格森等名将。

41人被挑战团队分为六组，每组有5人以V字形跑在基普乔格身前，另有2人分别跑在基普乔格身后的左右两边。这样的配置，是挑战团队在实验后得出的最佳阵型，尽可能地减小风速的阻力。

1

背景介绍

2

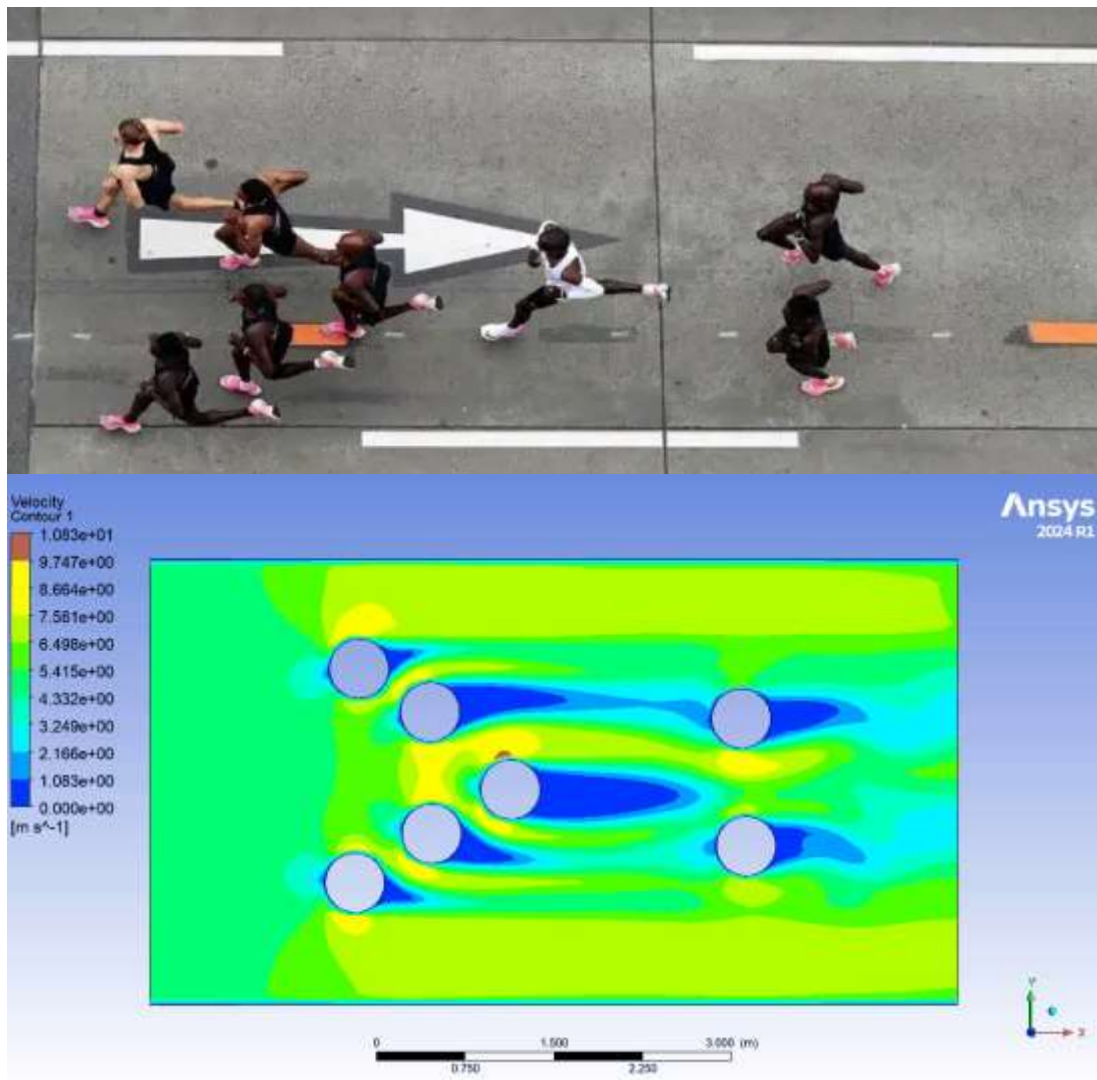
数值仿真

3

水槽实验

4

理论分析



## ·马拉松队形

### 模拟参数:

模型简化: 2维流动、圆柱

圆柱直径: 0.5m

入口速度: 5m/s

流动材料: 标准大气

湍流强度: 5%

湍流粘度比: 10

### 分析:

“尾流”区域的速度小, 区域宽而且长

## ·大雁队形

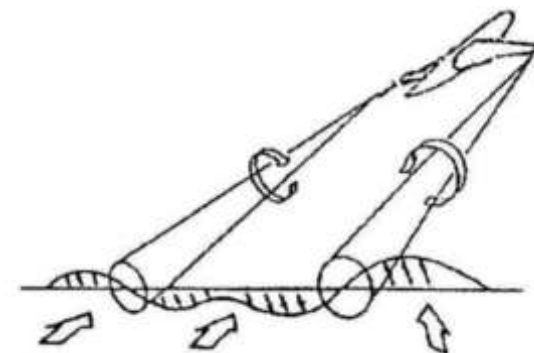
## 模拟参数：

入口速度：20m/s

流动材料：标准大气

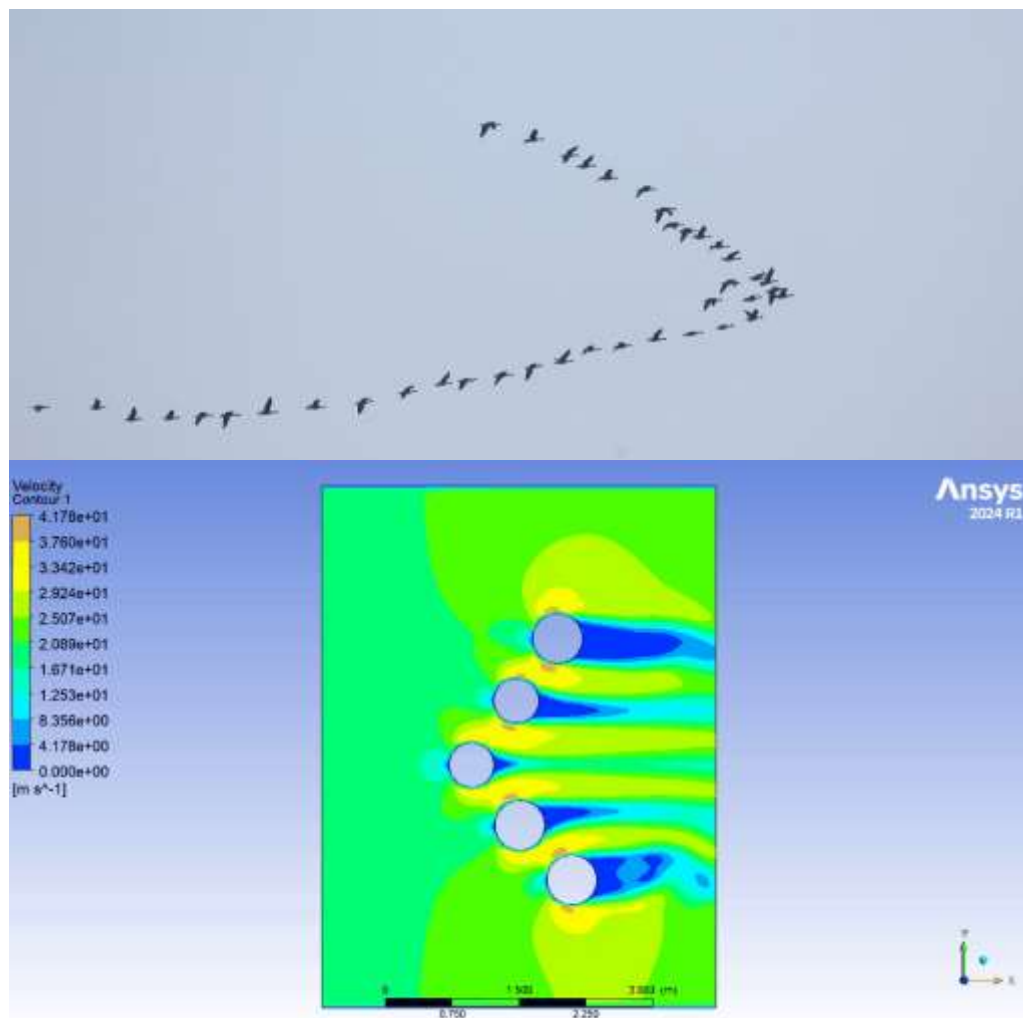
湍流强度：5%

湍流粘度比：10



## 分析：

大雁省力基于升力，而非阻力


[https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_21092257?commTag=true](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_21092257?commTag=true)





## ·一条纵列

### 模拟参数：

入口速度：5m/s

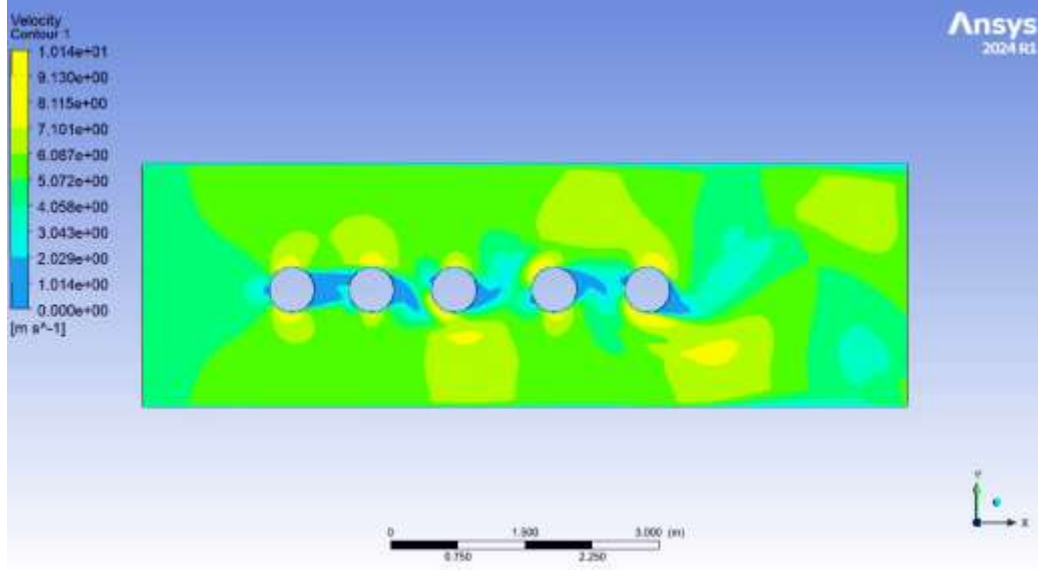
流动材料：标准大气

湍流强度：5%

湍流粘度比：10

### 分析：

该排列作为基准方法





1

背景介绍

2

数值仿真

3

水槽实验

4

理论分析



运动粘性系数 $\nu$  (标准状态)

空气:  $1.5 \times 10^{-5} m^2 s^{-1}$

水:  $1.0 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

空气中运动速度:  $5 m^1 s^{-1}$

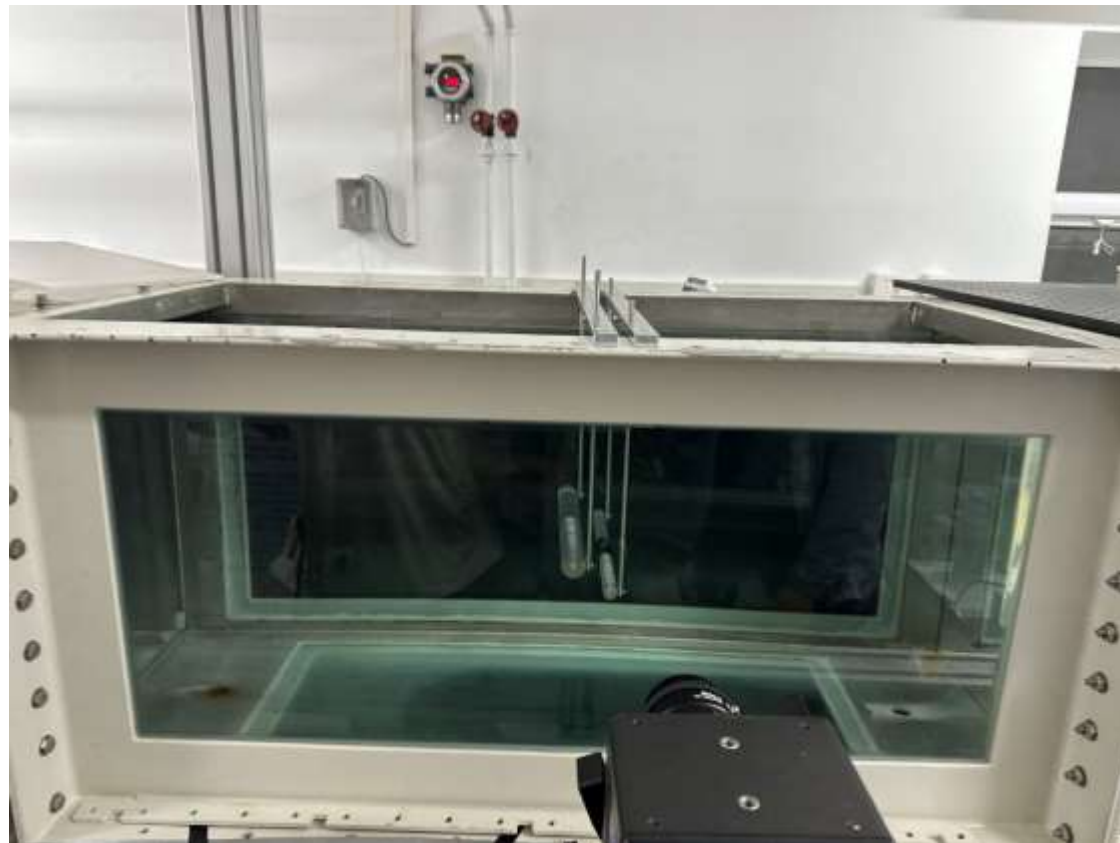


水槽流速:  $0.5 m^1 s^{-1}$

## 粒子成像速度场仪PIV

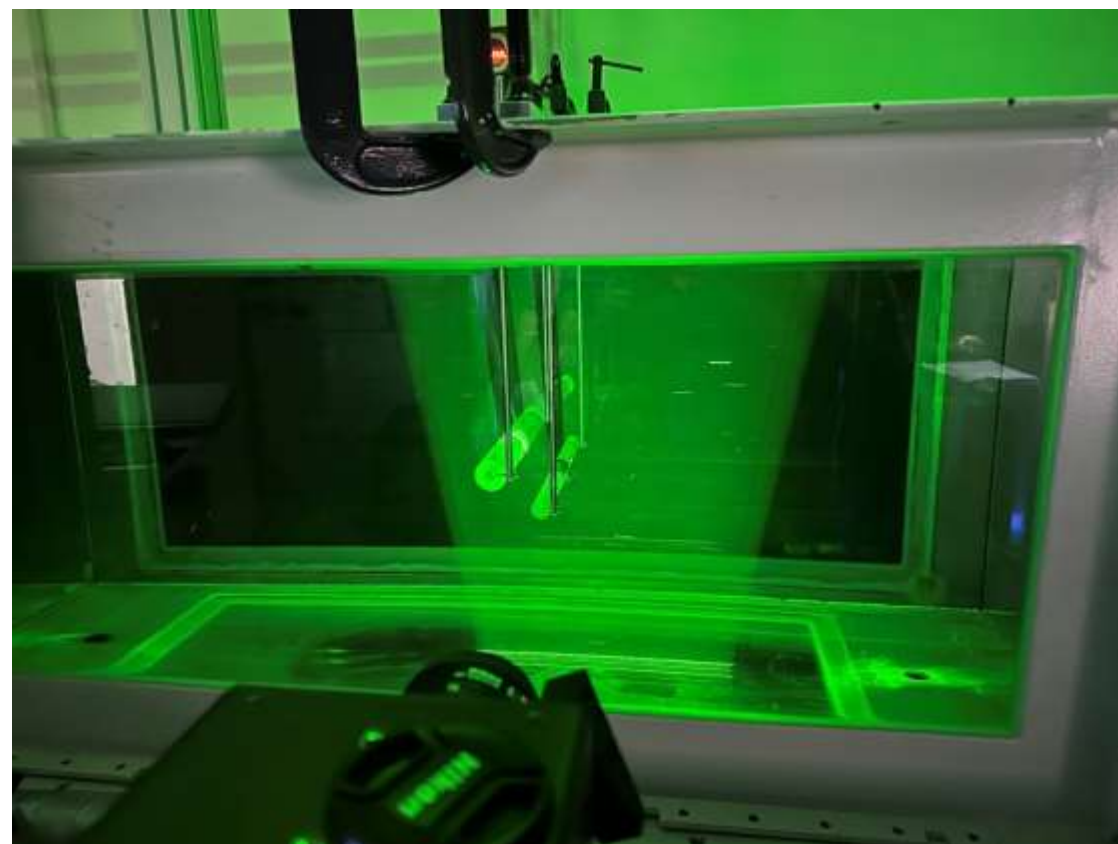
### ➤ 固定样品

- 2、打开激光，照亮粒子
- 3、调节相机等设备；调整流速等参量
- 4、放入网格参照物，标定坐标
- 5、调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果



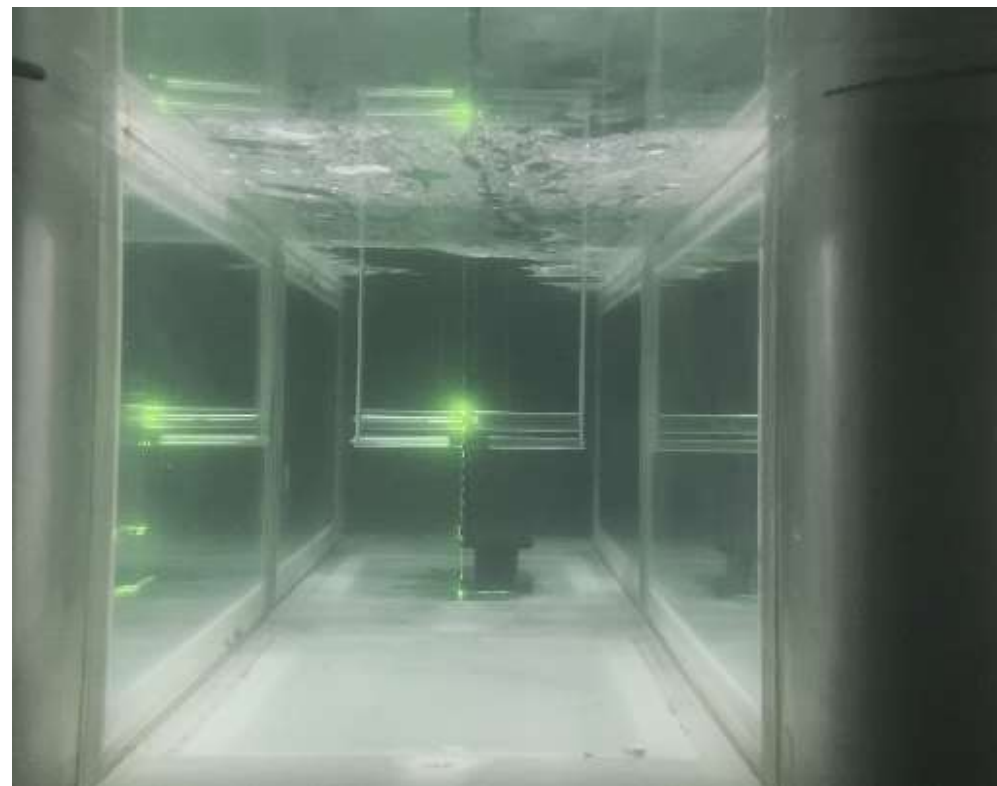
## 粒子成像速度场仪PIV

- 1、固定样品
- 打开激光，照亮粒子
- 3、调节相机等设备；调整流速等参量
- 4、放入网格参照物，标定坐标
- 5、调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果



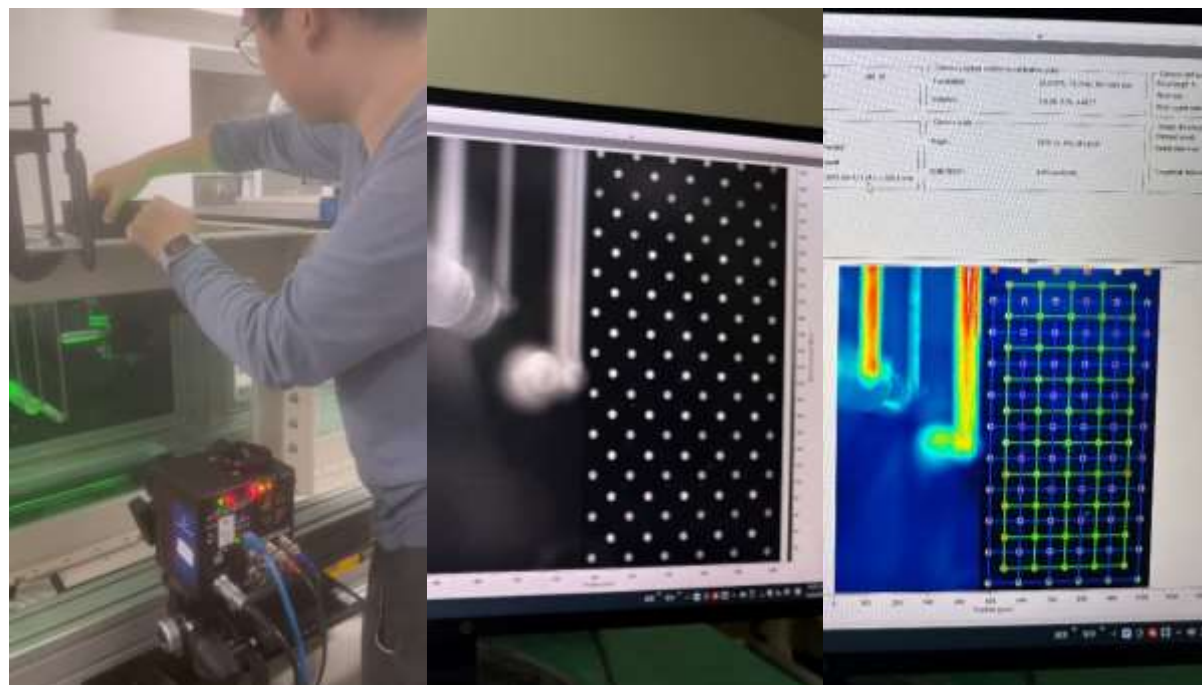
## 粒子成像速度场仪PIV

- 1、固定样品
- 2、打开激光，照亮粒子
- 调节相机等设备；调整流速等参量
- 4、放入网格参照物，标定坐标
- 5、调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果



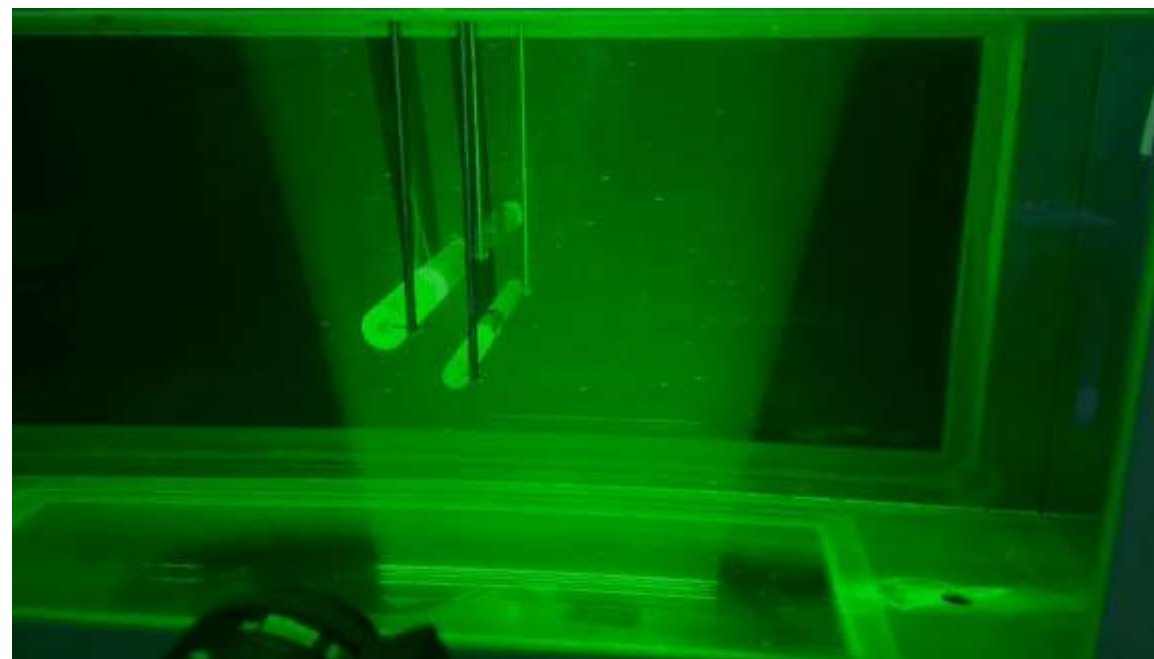
## 粒子成像速度场仪PIV

- 1、固定样品
- 2、打开激光，照亮粒子
- 3、调节相机等设备；调整流速等参量
  - 放入网格参照物，标定坐标
- 5、调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果



## 粒子成像速度场仪PIV

- 1、固定样品
- 2、打开激光，照亮粒子
- 3、调节相机等设备；调整流速等参量
- 4、放入网格参照物，标定坐标
- 调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果





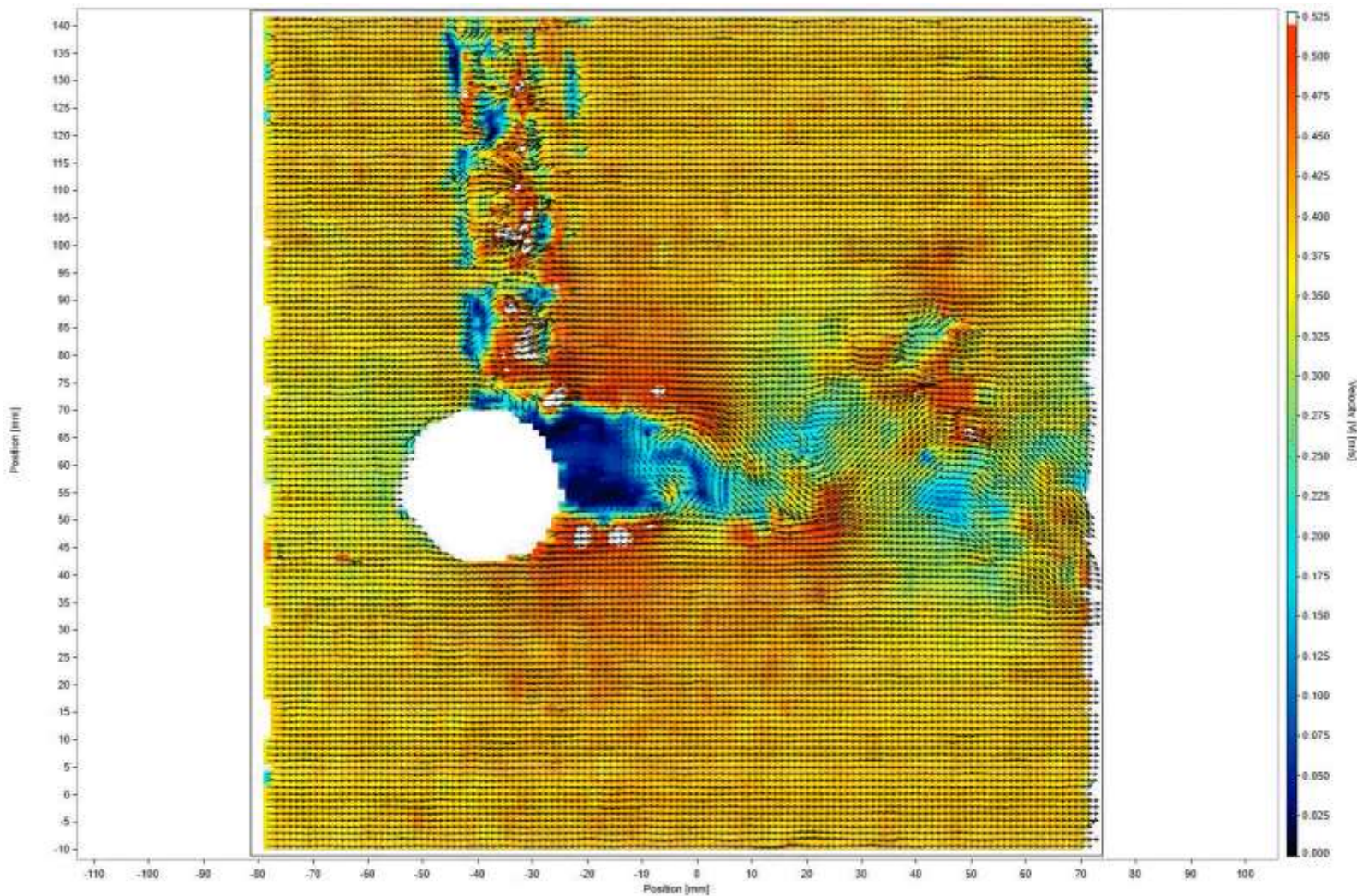


## 粒子成像速度场仪PIV

- 1、固定样品
  - 2、打开激光，照亮粒子
  - 3、调节相机等设备；调整流速等参量
  - 4、放入网格参照物，标定坐标
  - 5、调整相机频率等参量；测量
- 计算机计算流场质点的速度，导出结果



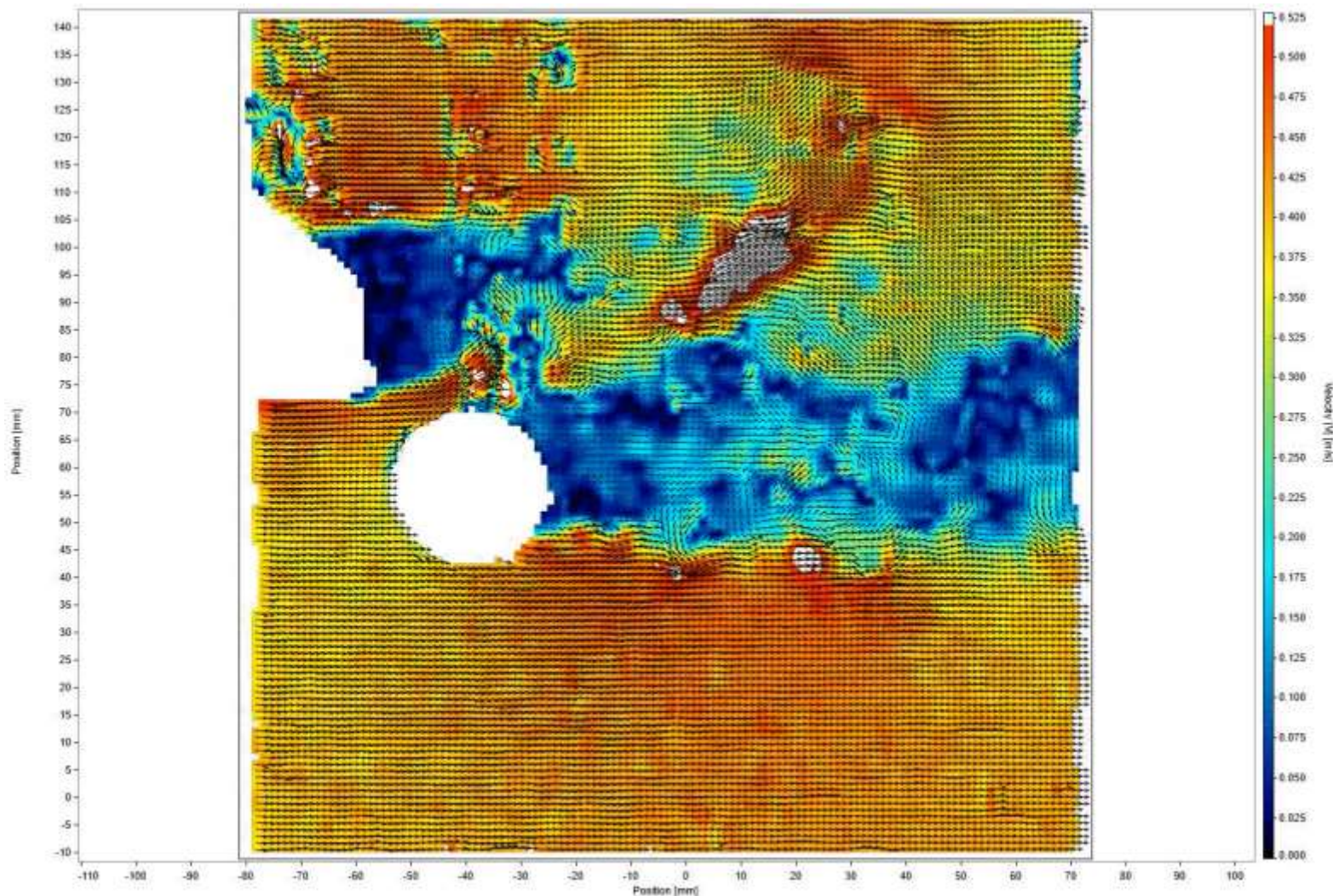
## 实验1：单个圆柱（小尾流）







## 实验2：两个圆柱（大尾流）



1

背景介绍

2

数值模拟

3

水槽实验

4

理论分析



## 多圆柱绕流问题的解析解的存在情况：

一般来说，针对两个相同圆柱的情况（称为双圆柱问题），存在一些经典的解析解。

然而，当圆柱数量增加到三个或更多时，除了特定的几何排列，通常情况下很难获得精确的解析解。多圆柱的情况下，流场变得更为复杂，涉及到更多的干扰和相互作用效应，使得解析求解变得非常困难甚至不可行。此时，通常会采用数值方法（如计算流体力学方法）来模拟和分析流场，以获得解决方案的近似解。

综上，对于多圆柱绕流问题，解析解的可行性取决于圆柱数量和具体的流体动力学情况。一般而言，对于两个圆柱问题可能会找到某些解析解，但对于三个或更多圆柱的情况，解析解可能不容易或不存在。

---

目前，柱体绕流研究方法主要包括实验和计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟. 国内外学者已对柱体绕流做了大量实验研究<sup>[4-7]</sup>.

doi: [10.6052/0459-1879-17-346](https://doi.org/10.6052/0459-1879-17-346)



流动方程：

- 连续性方程：  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$
- 动量方程 (x方向)：  $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$
- 动量方程 (y方向)：  $u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$

边界条件：

- 无滑壁条件：圆柱表面上流体速度与圆柱表面的相对运动速度为零，即  $u(x, y) = 0$  和  $v(x, y) = 0$ 。
- 远场边界条件：远离圆柱的地方，流体速度趋近于远场速度  $U$ ，即  $u(x, y) \rightarrow U$  当  $x \rightarrow \infty$ 。

解析解：

速度场的一般形式可以表达为：

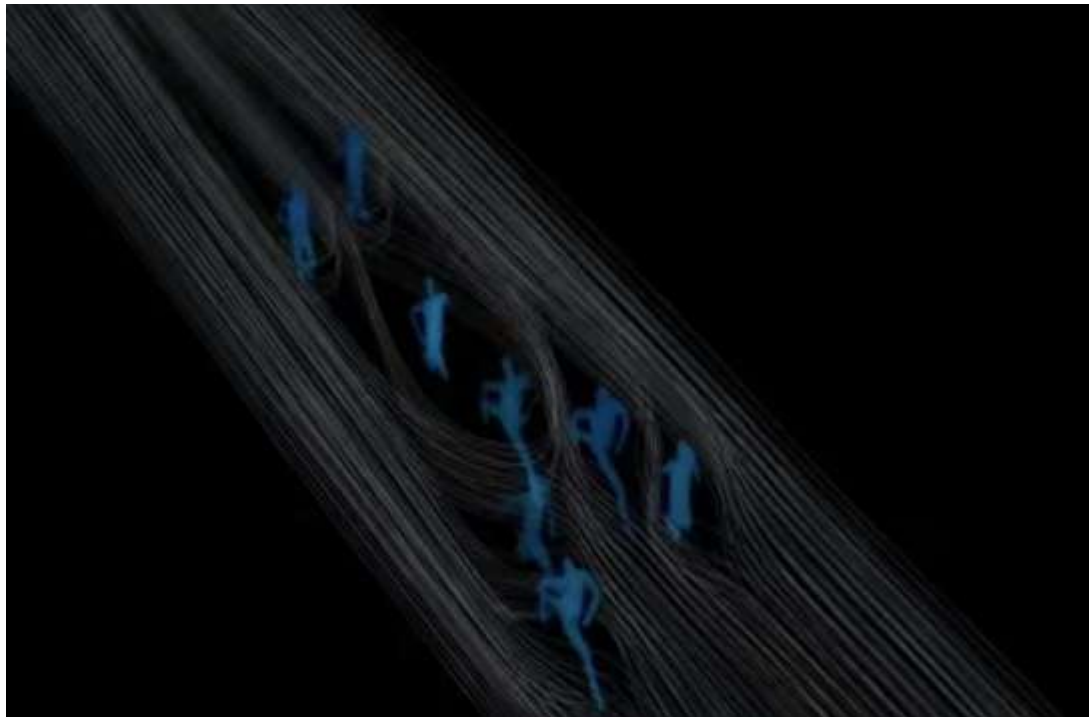
$$u(x, y) = U \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \frac{\sinh\left(\frac{n\pi(D/2-y)}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi D}{2L}\right)} \right]$$

其中，

- $L$  是两个圆柱的中心距离；
- $D$  是圆柱的直径；
- $U$  是远场流速。

Kármán-Vortex Street Theory





- **"Flow around two circular cylinders in tandem arrangement"** - M. M. Zdravkovich, Journal of Fluid Mechanics, 1969.
- **"Flow around two circular cylinders arranged in tandem and side by side in a uniform stream"** - P. K. Sinha and D. Rockwell, Journal of Fluid Mechanics, 1981.
- **"Flow around two circular cylinders in a side-by-side arrangement"** - P. K. Sinha and D. Rockwell, Journal of Fluid Mechanics, 1981.
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021929021002372>
- <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.2022.0836>
- doi: 10.6052/0459-1879-17-346





# 请老师批评指正

—— 行健不息，须自强 ——