



# 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。

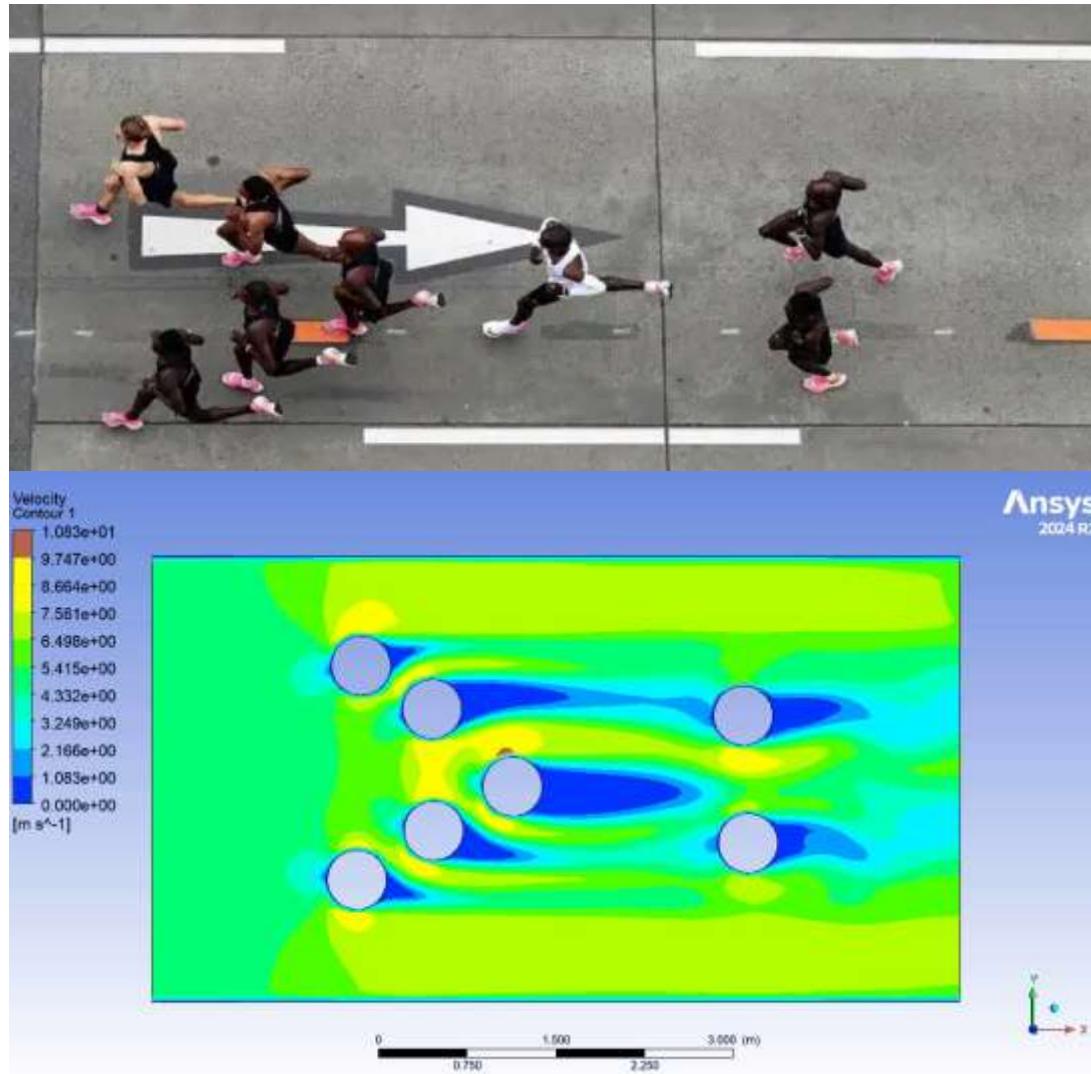
41人被挑战团队分为六组，每组有5人以V字形跑在基普乔格身前，另有2人分别跑在基普乔格身后的左右两边。这样的配置，是挑战团队在实验后得出的最佳阵型，尽可能地减小风速的阻力。

## 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

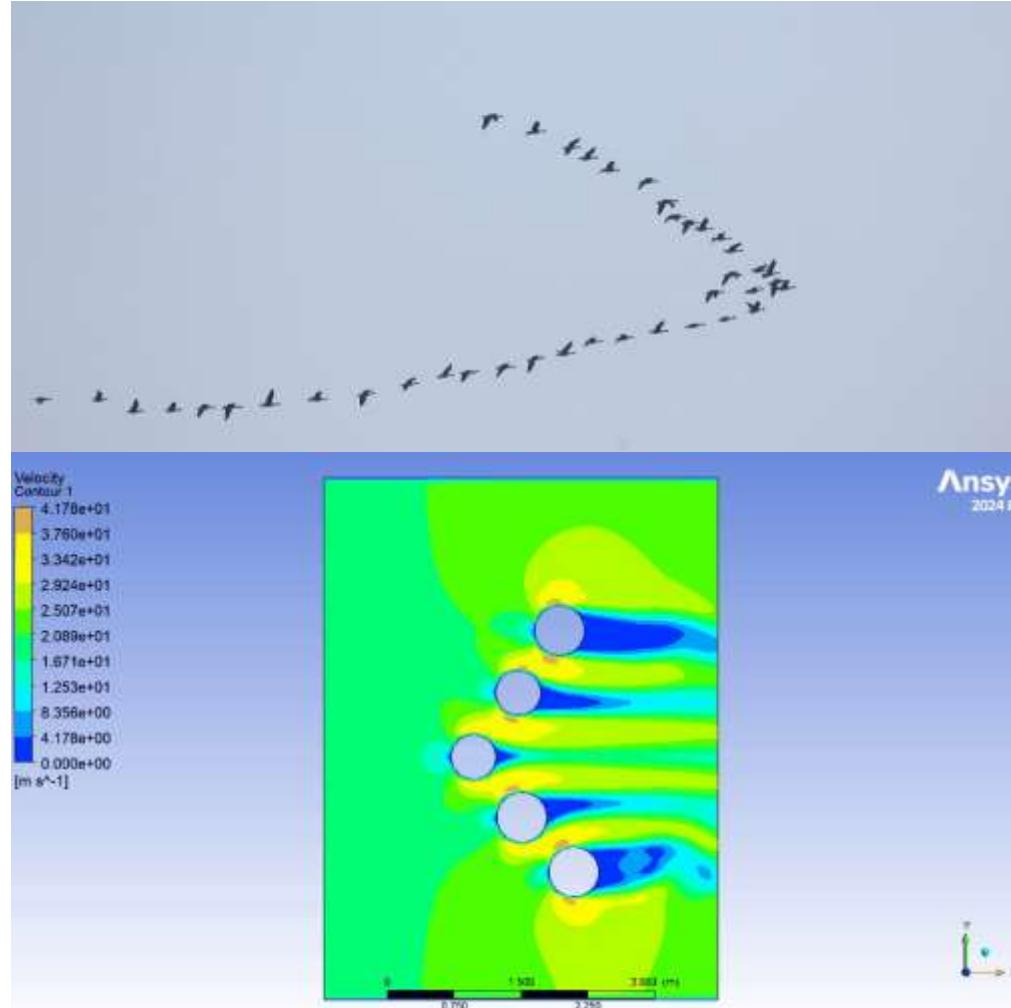
流动材料：标准大气

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

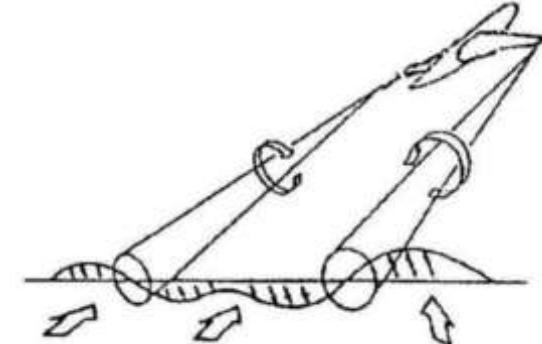
### 模拟参数：

入口速度：20m/s

流动材料：标准大气

湍流强度：5%

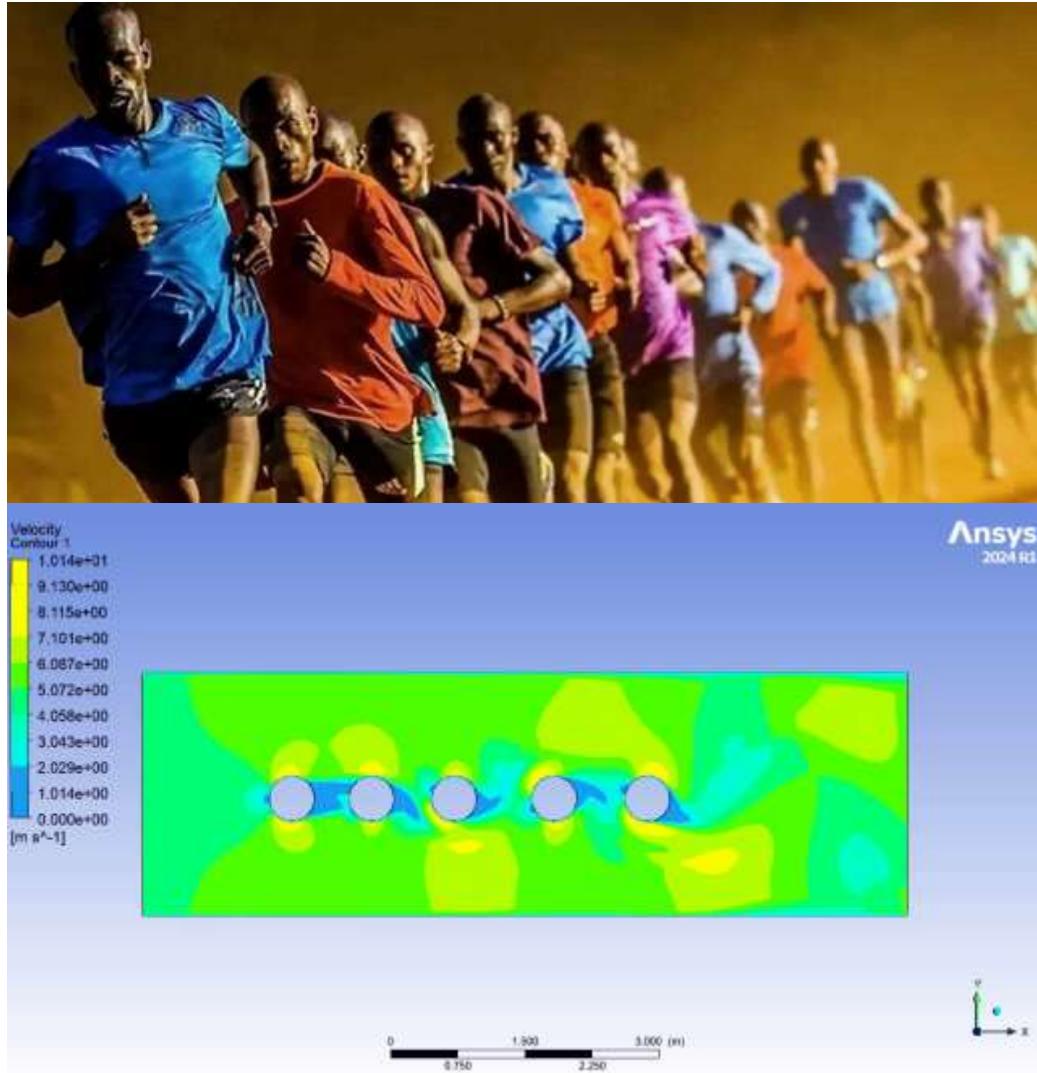
湍流粘度比：10



### 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:  $5 m^1 s^{-1}$



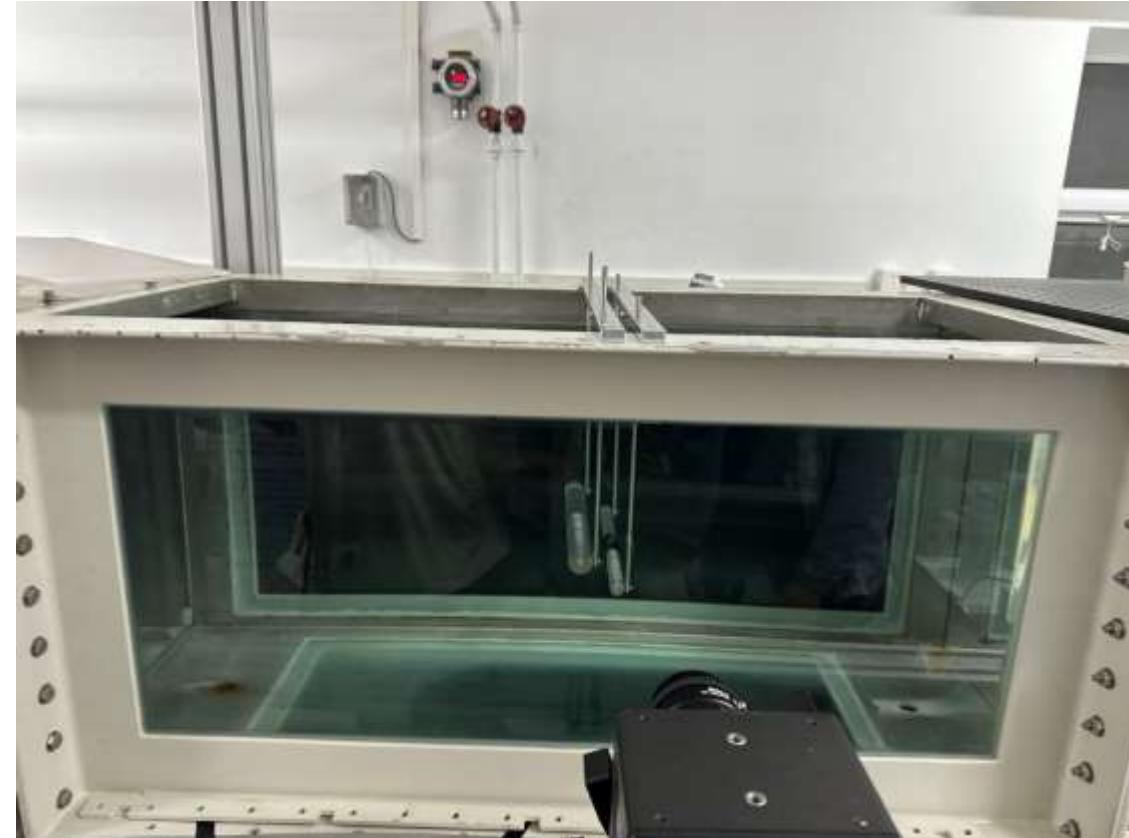
水槽流速:  $0.5 m^1 s^{-1}$



### 粒子成像速度场仪PIV

#### ➤ 固定样品

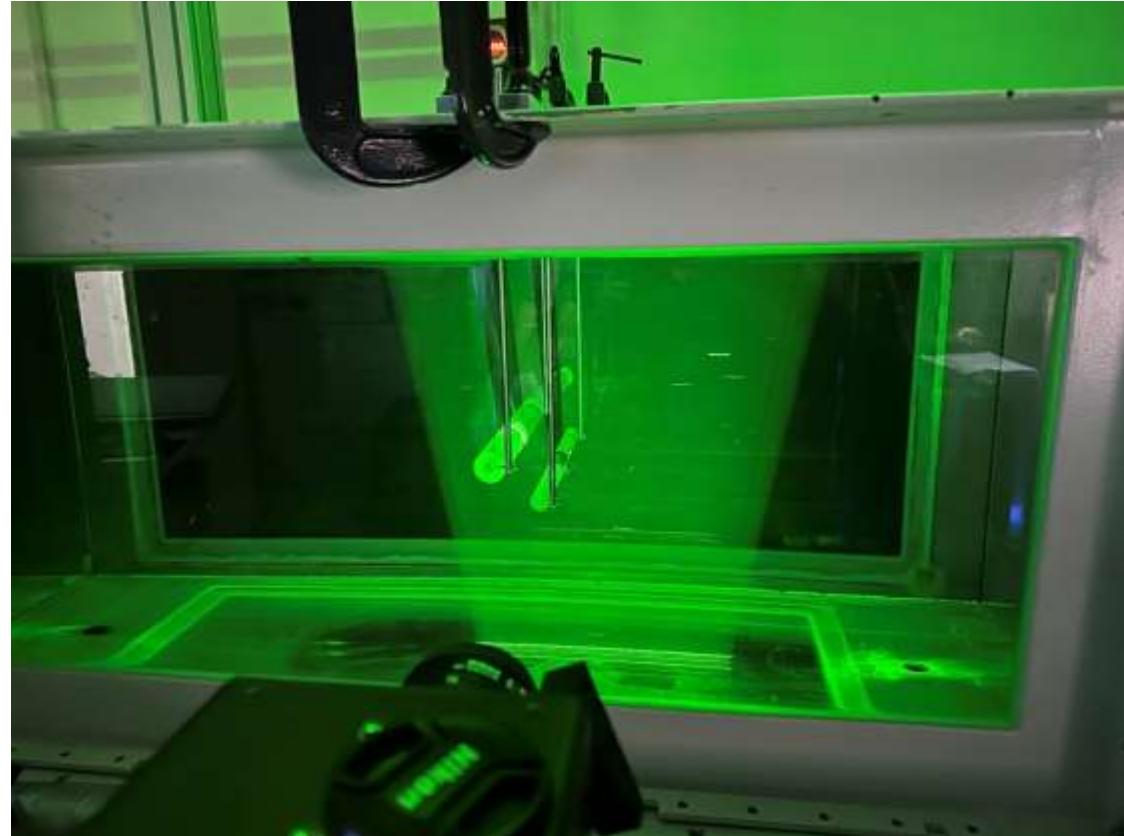
- 2、打开激光，照亮粒子
- 3、调节相机等设备；调整流速等参量
- 4、放入网格参照物，标定坐标
- 5、调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果





### 粒子成像速度场仪PIV

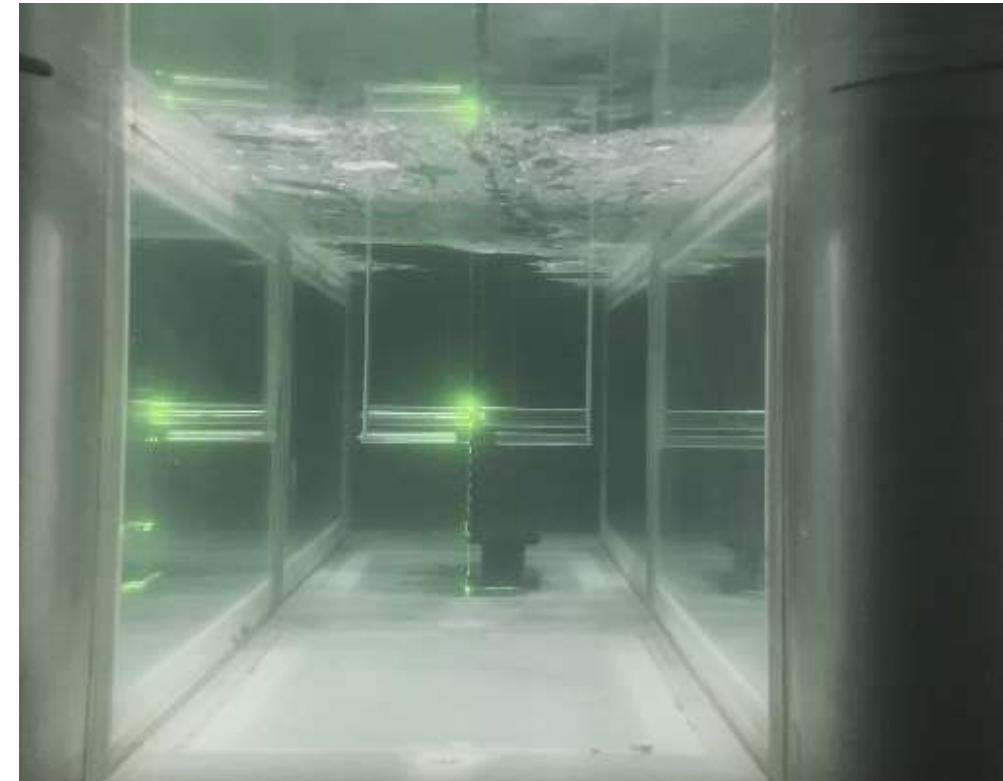
- 1、固定样品
- 打开激光，照亮粒子
- 3、调节相机等设备；调整流速等参量
- 4、放入网格参照物，标定坐标
- 5、调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果





### 粒子成像速度场仪PIV

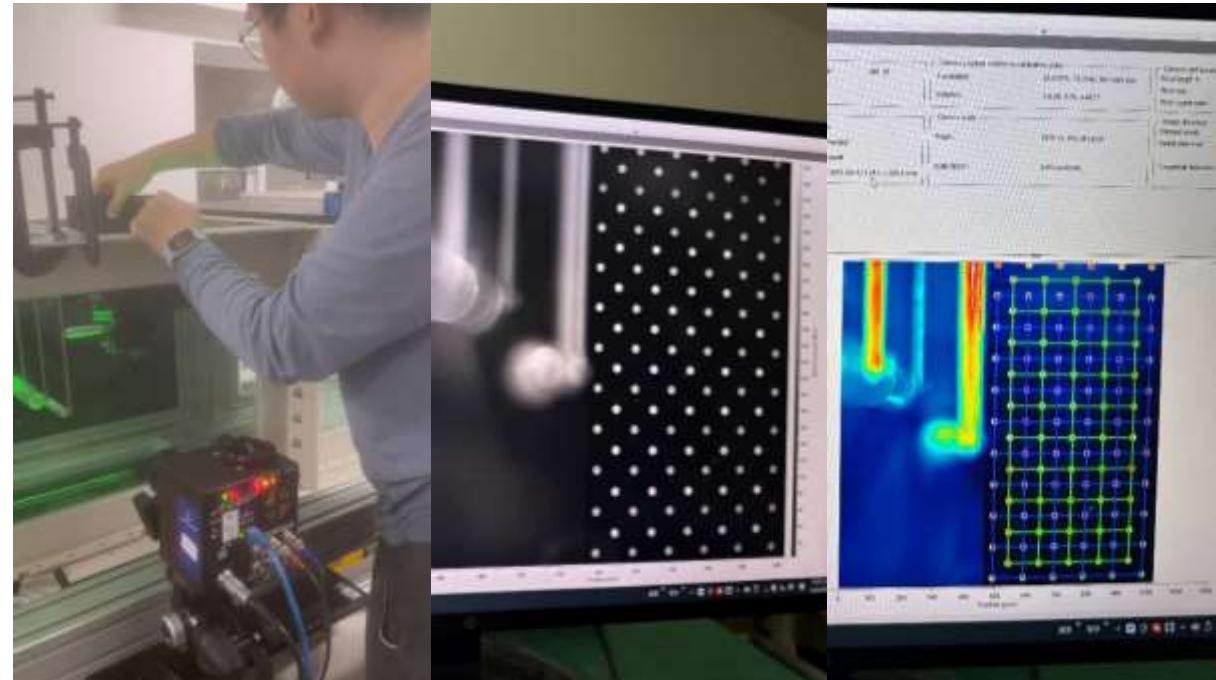
- 1、固定样品
- 2、打开激光，照亮粒子
- 调节相机等设备；调整流速等参量
- 4、放入网格参照物，标定坐标
- 5、调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果





### 粒子成像速度场仪PIV

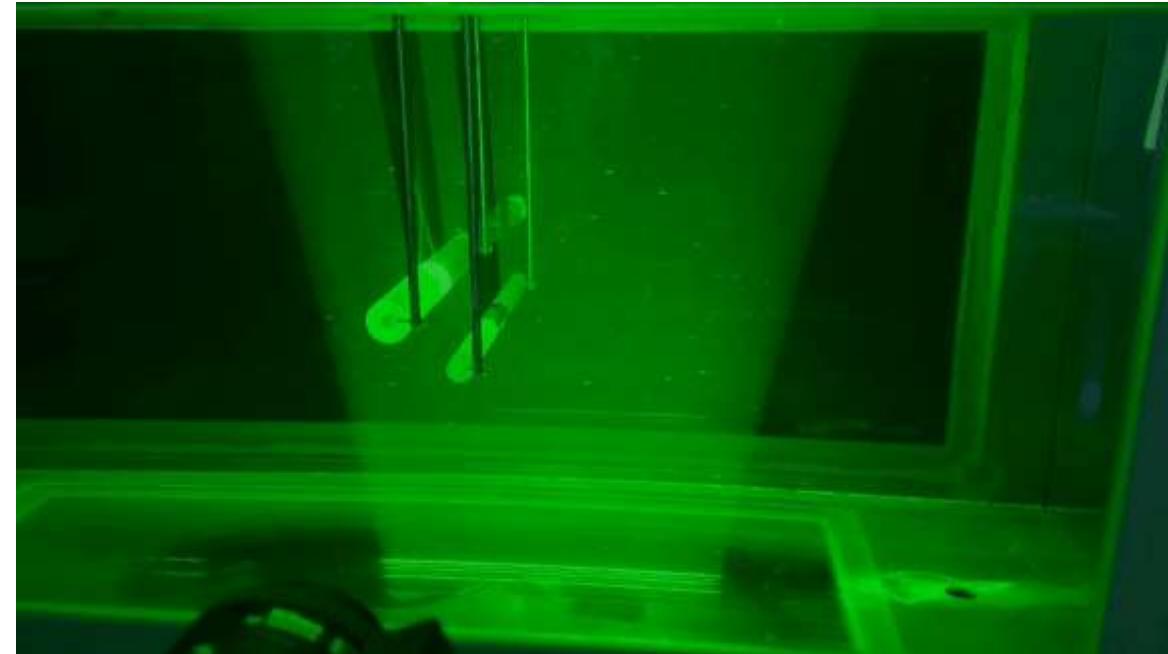
- 1、固定样品
- 2、打开激光，照亮粒子
- 3、调节相机等设备；调整流速等参量
- 放入网格参照物，标定坐标
- 5、调整相机频率等参量；测量
- 6、计算机计算流场质点的速度，导出结果





### 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

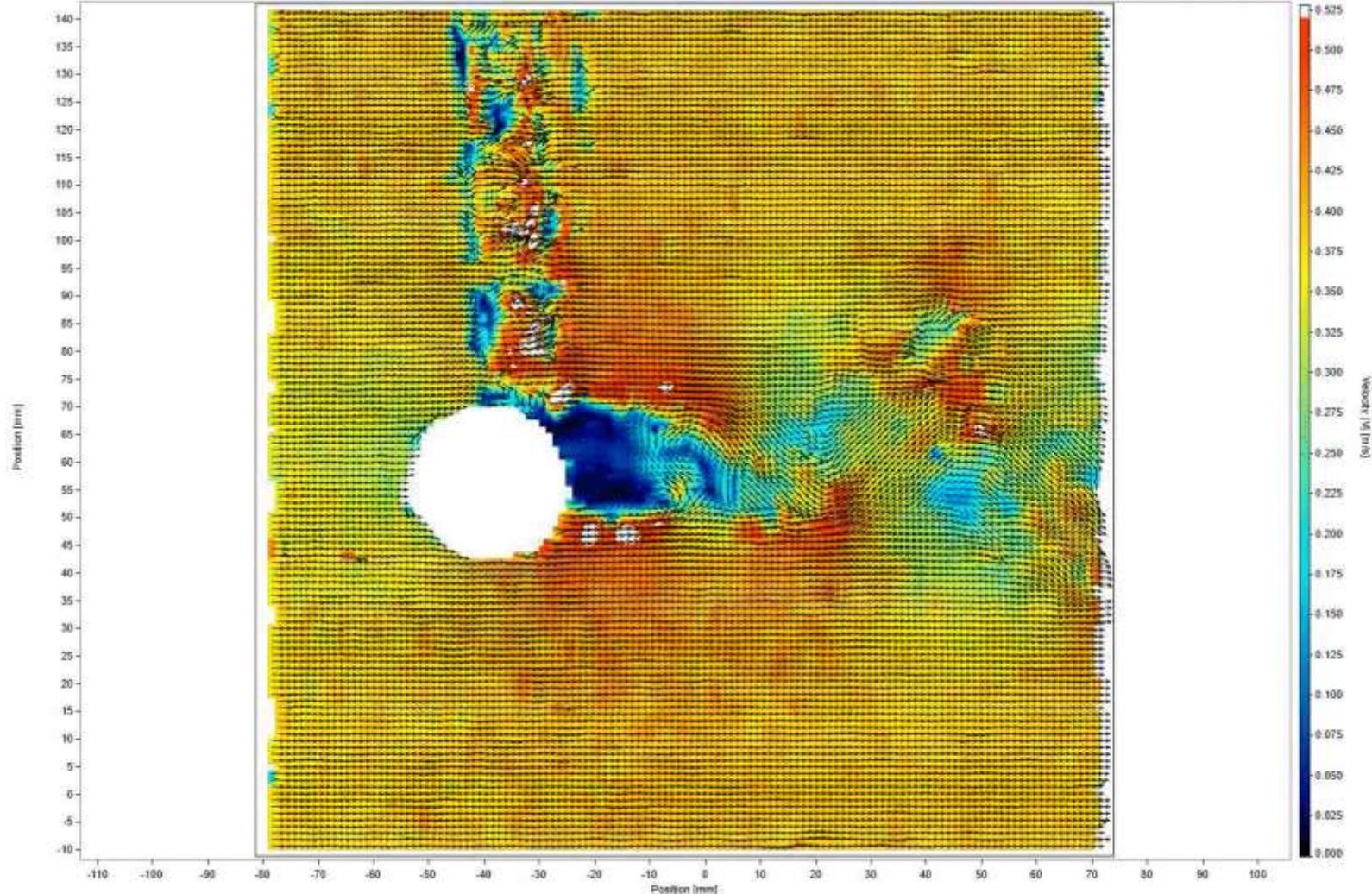




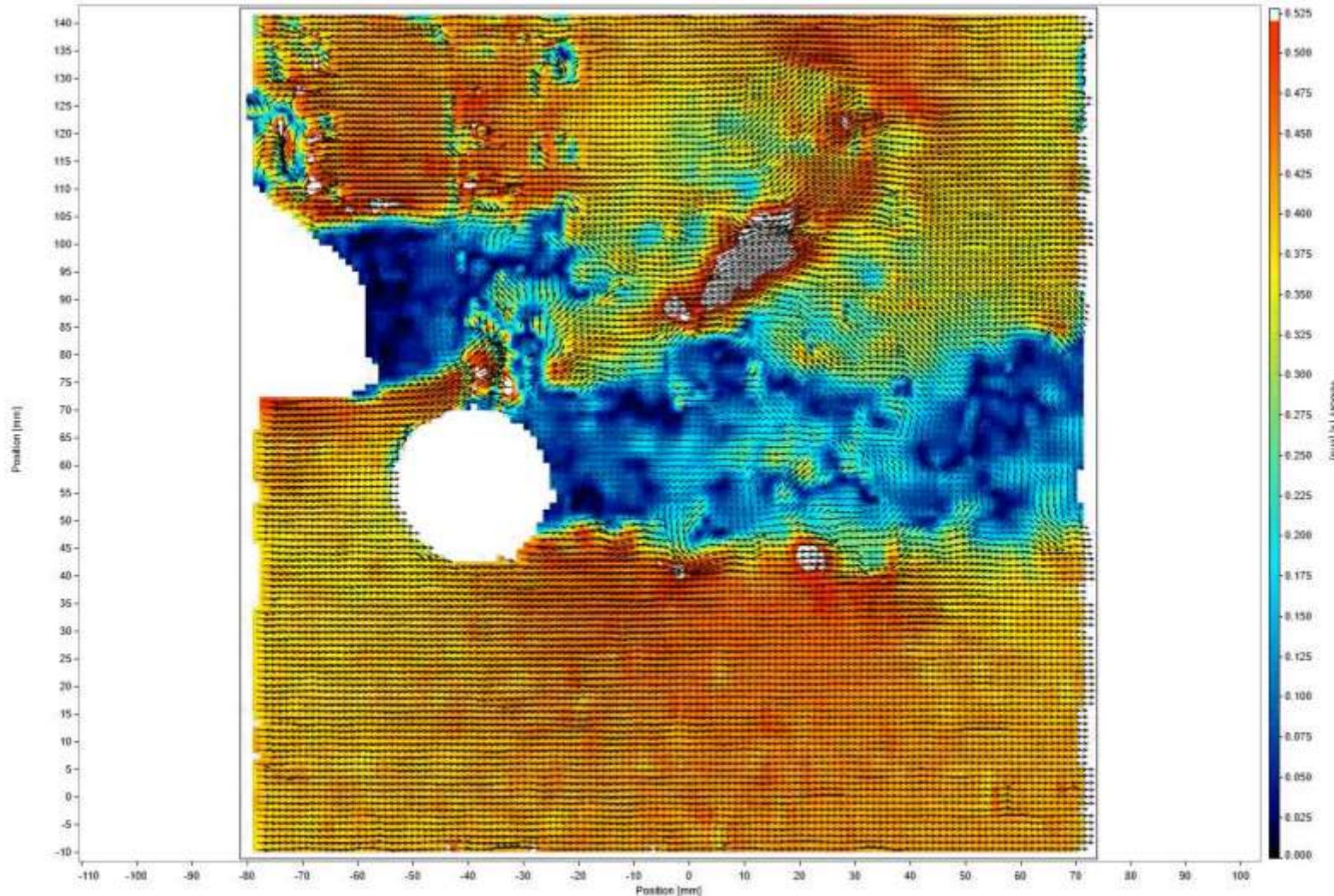
### 粒子成像速度场仪PIV

- 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 [4-7].

doi: 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:

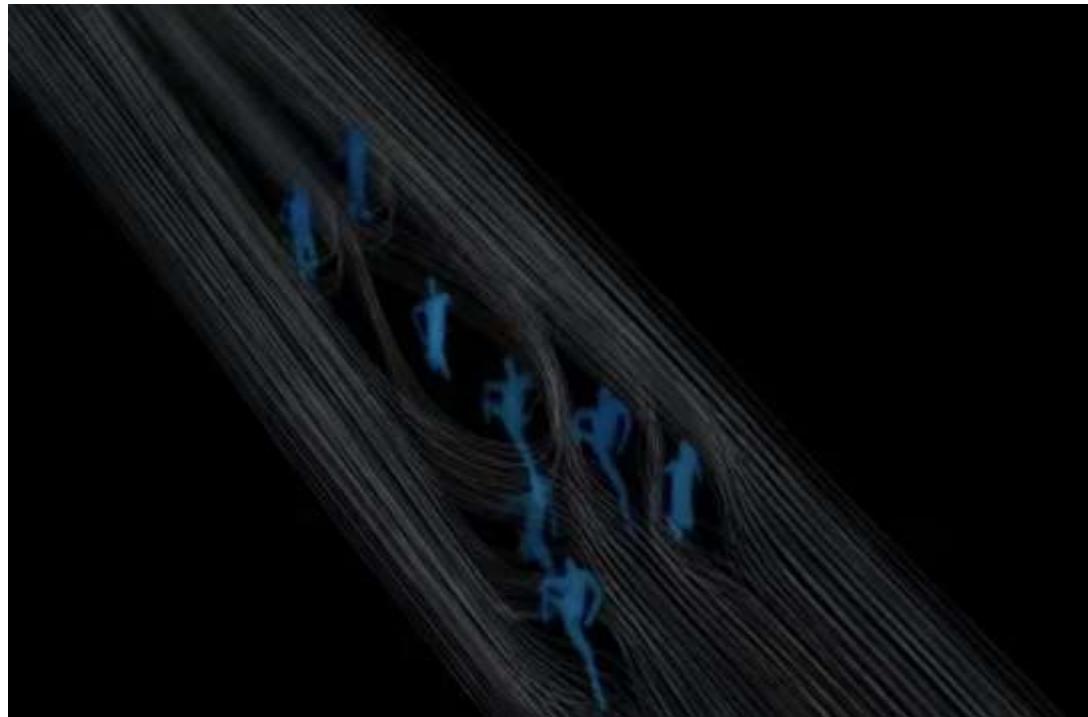
速度场的一般形式可以表达为:

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

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