

在空中游泳的鱼

《鱼的仿生推进研究》

■ 报告人：付华钰 陈博远 陈浏屹

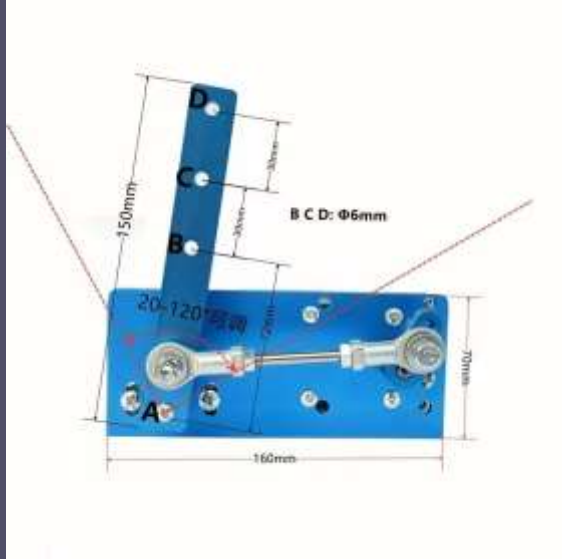
进化之路

01 软体鱼

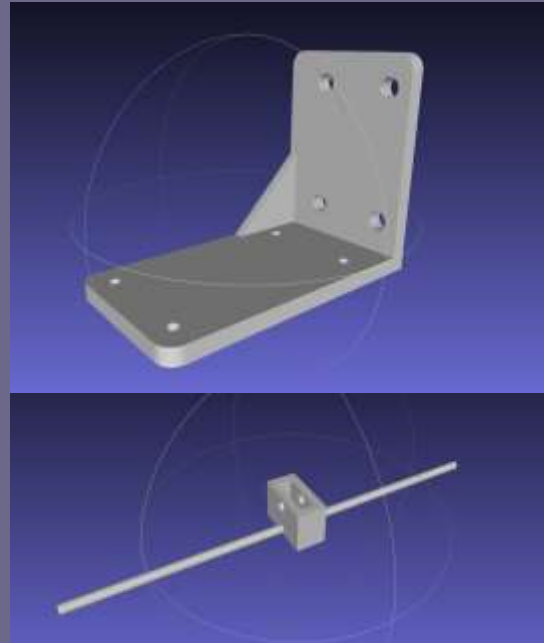
02 硬骨鱼

03 游动的鱼

01 软体鱼



摆动电机



连接件 (3D打印)



涤纶黑布

实验方法

在不同实验条件下，本身没有强度的材料能否仅凭自身摆动实现推进

控制变量：

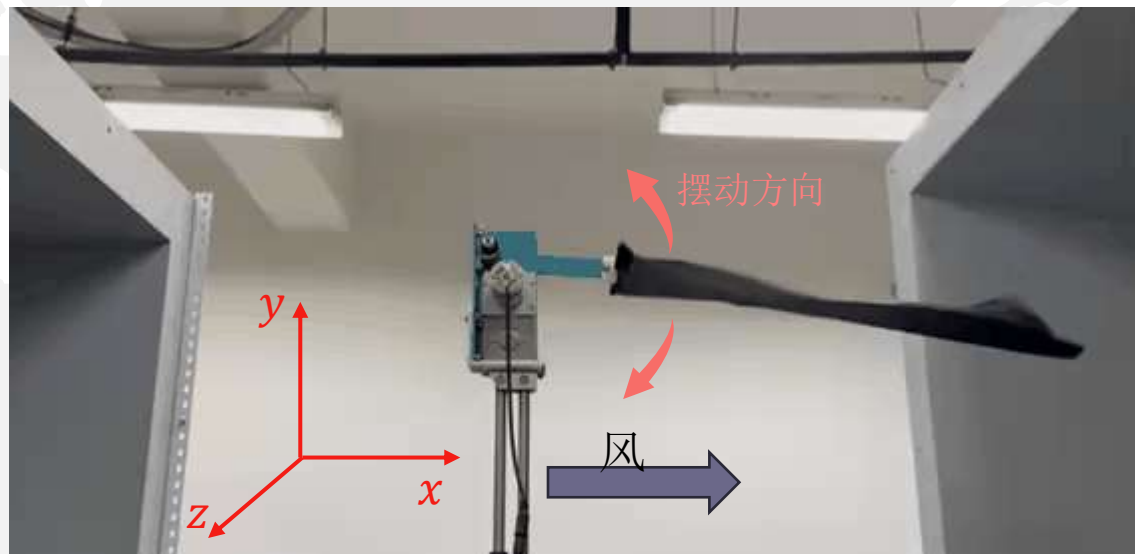
风洞风速：0.0, 5.0, 7.5, 10.0 m/s

布条长度：96.5, 49.6 cm

摆动频率：1.21, 2.40 Hz

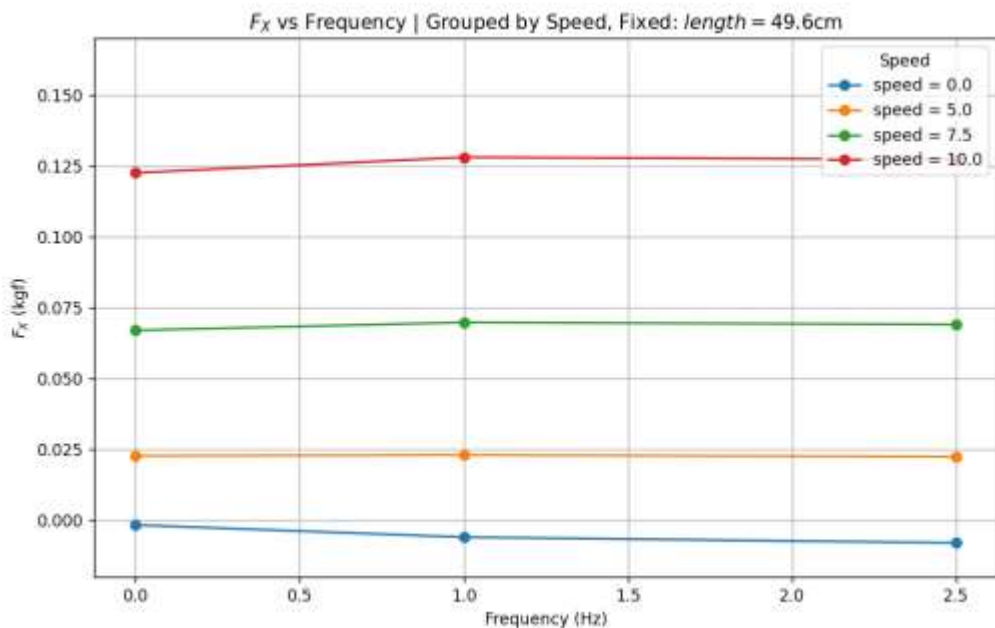
观测指标：

测力天平： $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$



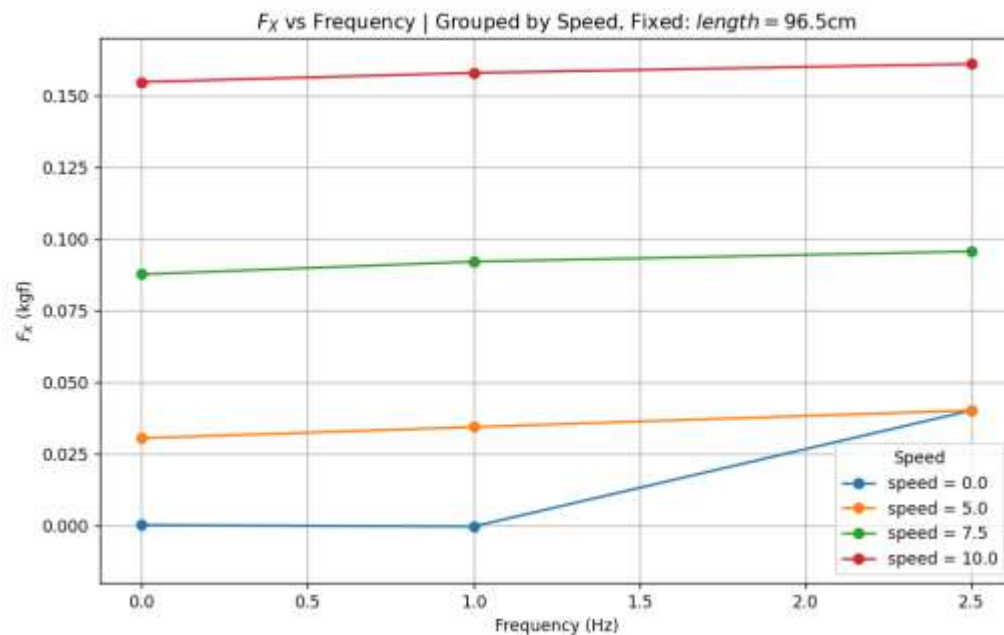
实验结果

水平方向受力 F_x 的变化



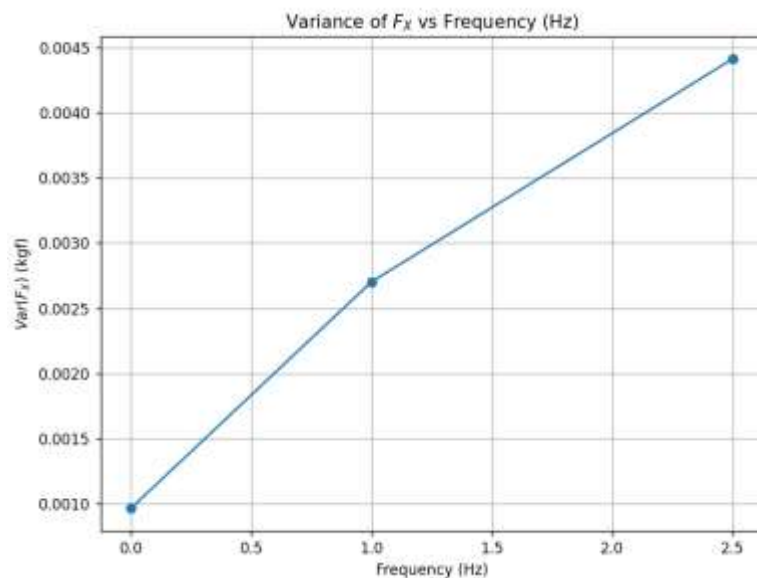
- 频率越高阻力越大
- 越长阻力越大

任何条件不产生推力，只有阻力



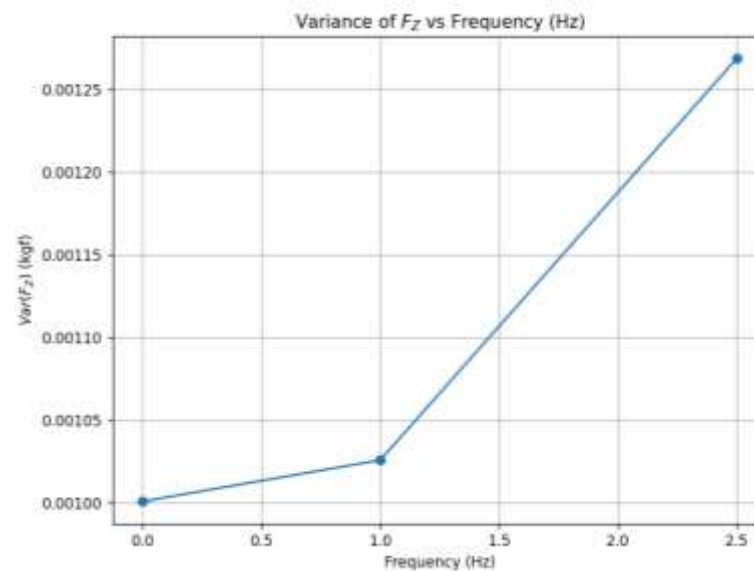
实验结果

数据的波动性



相对误差<10%

水平方向测量的受力可靠



相对误差<31%

- 水平方向自身摆动对测量的影响较小
- 竖直方向上的受力存在较大波动

理论分析

鱼的推进力来源：

鱼体尾鳍周期性往复摆动下，其两侧流场形成压力差并向后移动，在尾鳍产生两个旋转方向相反的漩涡，脱落形成反卡门涡街，并形成一系列连续的射流[1]

柔软布条推进失效的原因：

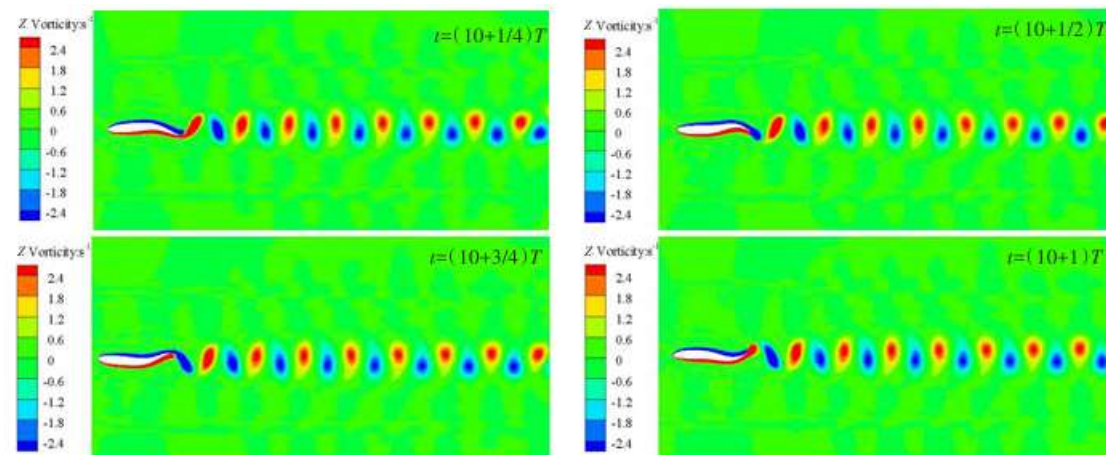
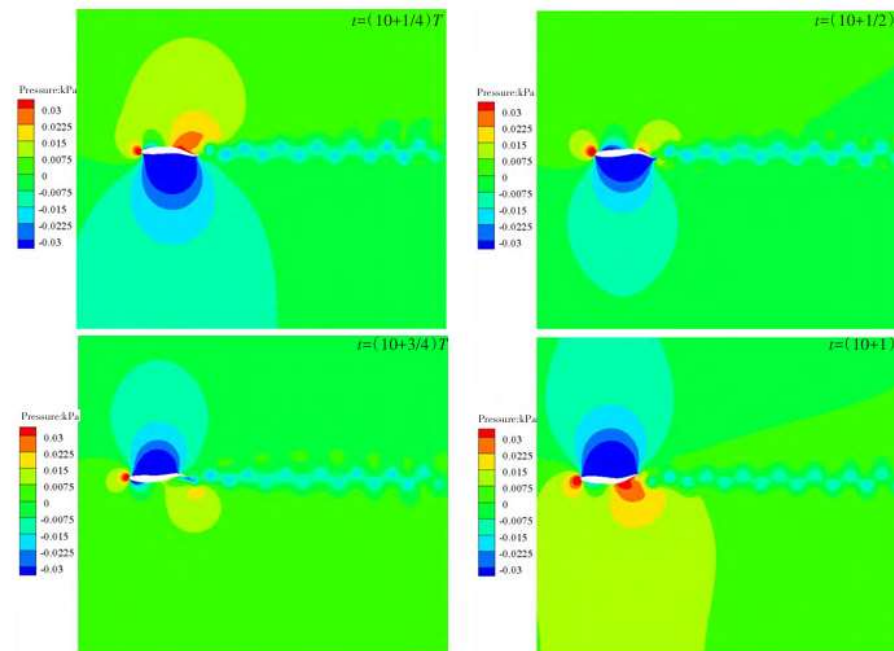
缺乏刚性支撑，强制推动；

形状的不断变化会引起显著无法传递力；

流体会绕过布的表面而不是被的能量损耗。

✓ “刚柔结合”

[1]贾瑞,杨光,万字,等.鱼类自主游动推进机理与游动性能二维数值模拟研究[J].船舶力学,2024,28(10):1559-1569.



02 硬骨鱼

02 硬骨鱼——探究问题



水母柔性扇动



鱼尾摆动



鸟翅扑动

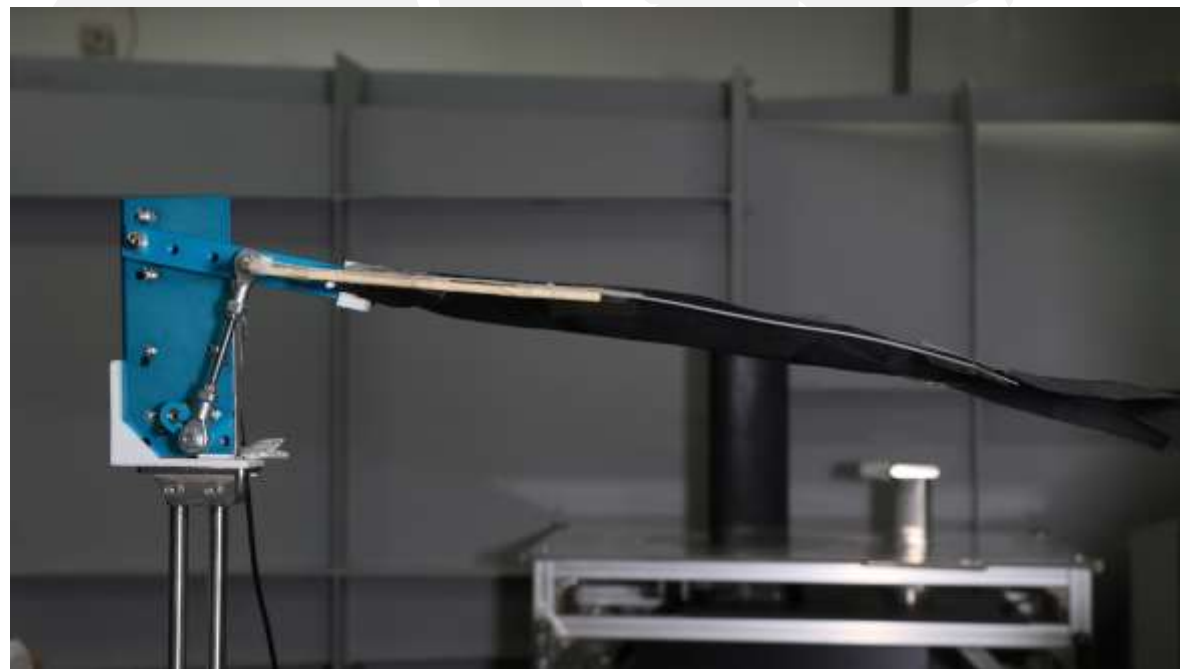
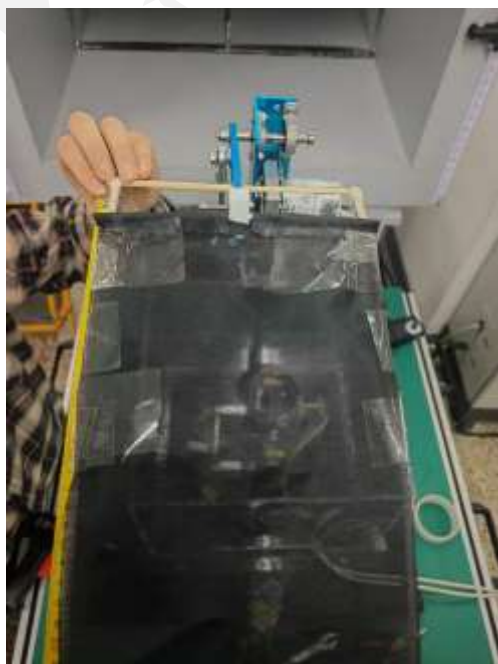
生物在流体中的推进方式在不断演进

从无脊椎动物到有脊椎动物，从软骨鱼到硬骨鱼，生物为何走了这样一条进化之路？

“四段式”结构

模拟鱼尾

- 驱动段：电机摇臂（13cm）
- 刚性段：竹筷（20cm）
- 柔性段：匝条（22cm）
- 尾段：纯布带（8cm）



02 硬骨鱼——实验变量

改变摆动幅度

驱动装置连接方式决定

电机摇臂摆动幅度

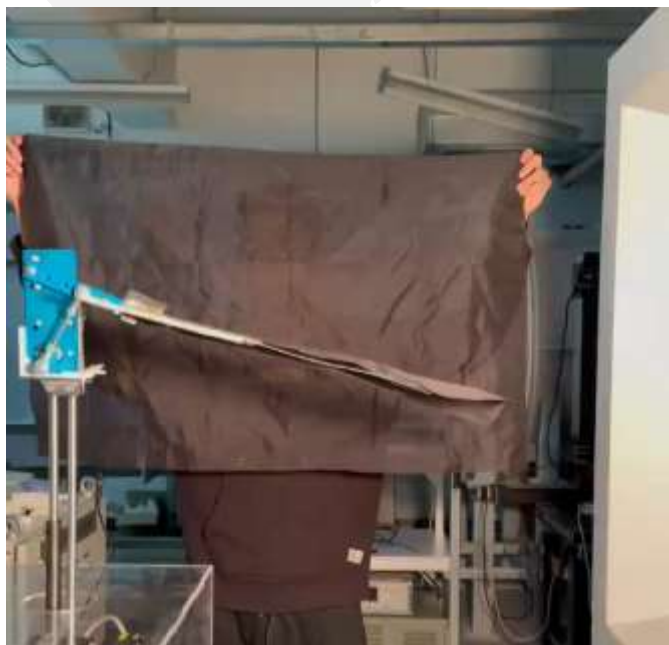
测得幅度为：

30° , 60° , 120°



改变摆动频率

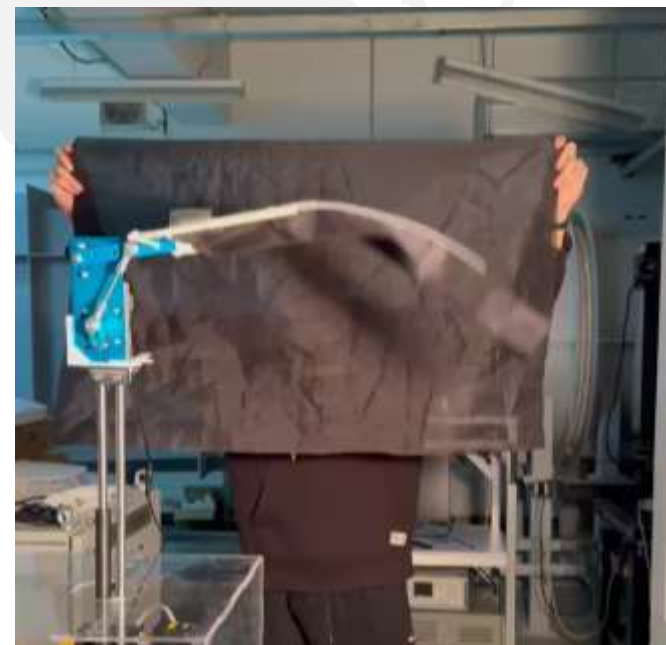
调节电机电压， 频率由秒表测得



静止



慢速



快速

02 硬骨鱼——实验方法

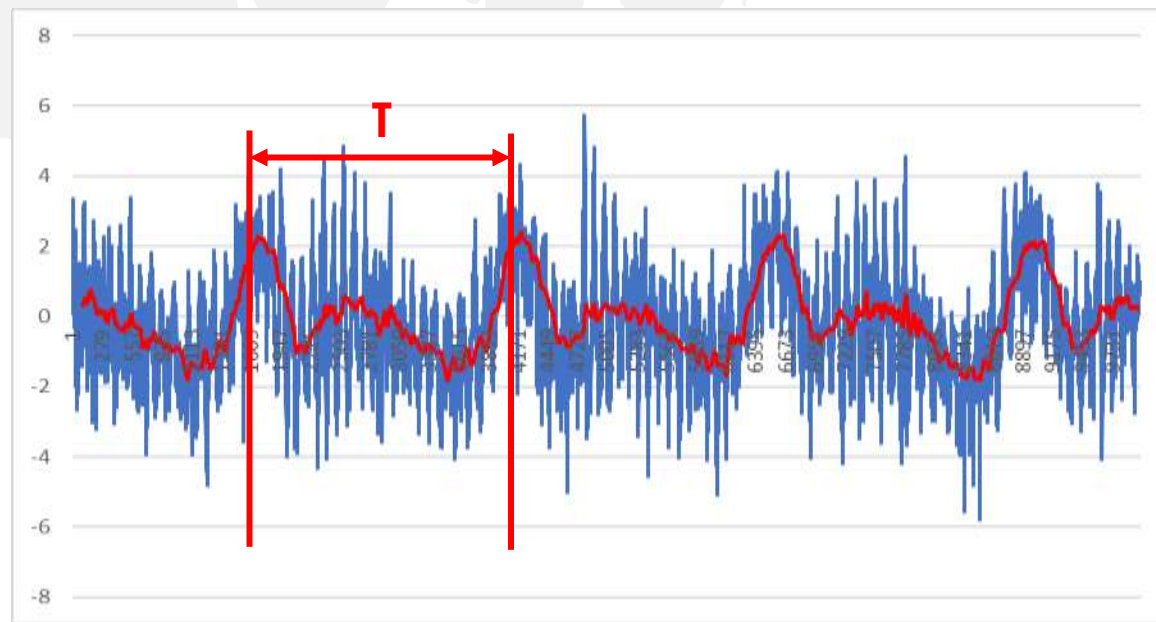
在无风情况下（主动推进），用测力天平测量机构受力问题：

- 原来的受力天平仅能测量离散的力，单个力测量收到很大误差
- 机构的摆动惯性很大，容易“淹没”推进力

原始采样频率为3000Hz，若采用原始数据，可以看到明显周期

为此，我们在每个实验条件下，均匀采样30个数据并取平均

平均值反应平均推力，方差表示力的平均振动幅度

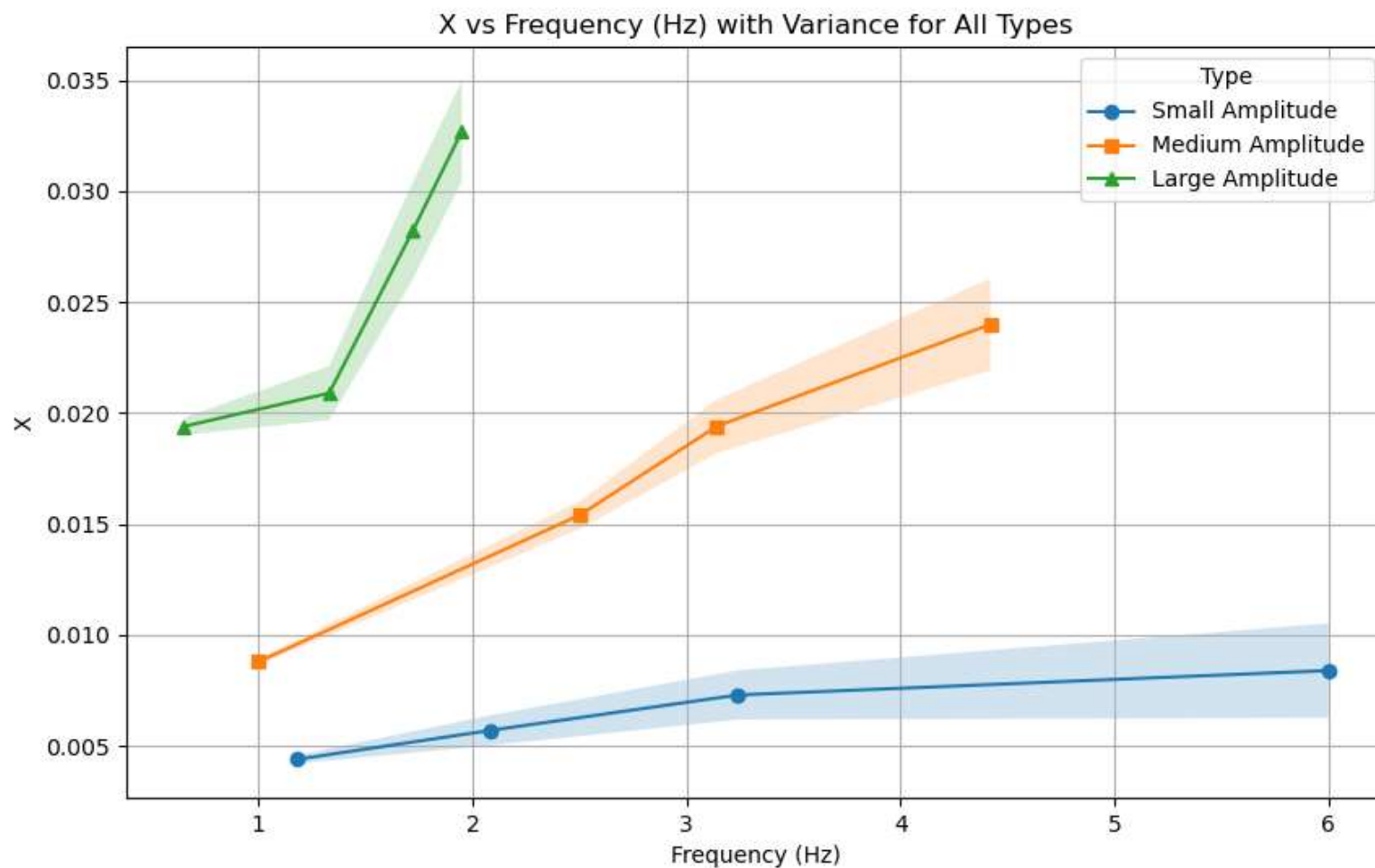


3.3s 内X方向受力采样示意

02 硬骨鱼——实验结果

06

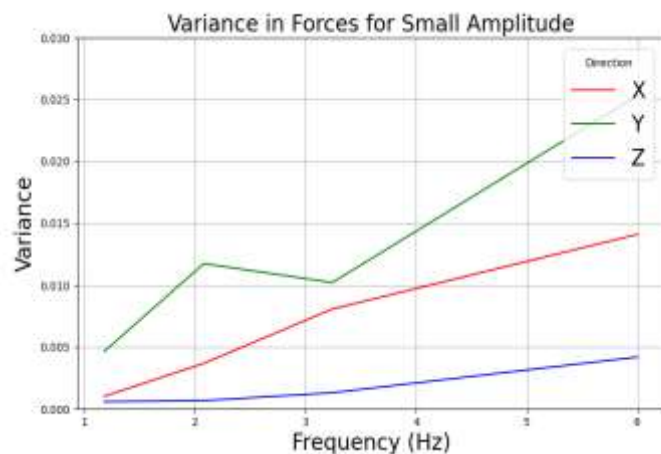
- 摆动幅度增大，
推力增大
- 摆动频率增大，
推力也增大，
且方差增加



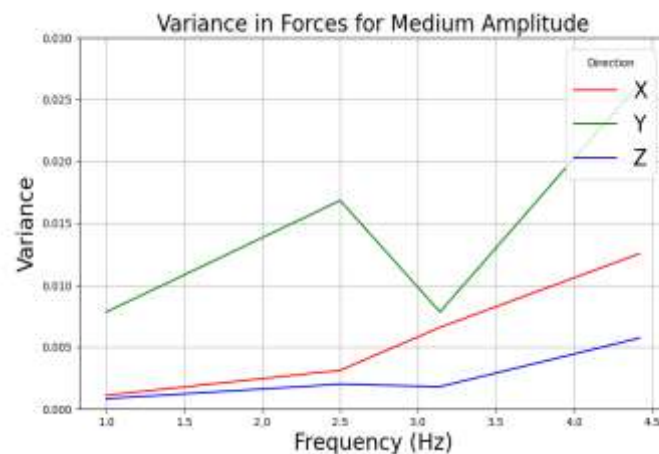
02 硬骨鱼——振动影响分析

- 力的振动幅度从小到大依次是Z、X、Y（不符合直觉？）
- 频率越大、摆臂振动幅度越大，力的振动幅度越大（注意横轴）
- 反常现象可能与共振有关
- 力的振动幅度不小，但对平均值的测量影响不大

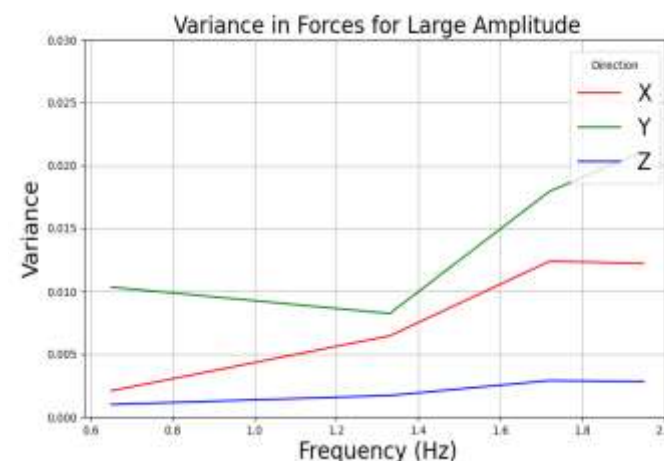
——如何在干扰信号中提取有用信号



小幅



中幅



大幅

02 硬骨鱼——雷诺数计算

——我们能模拟鱼的游动吗？

摇臂机构的雷诺数

静止流场中尾部速度

$$\dot{\theta}_{\max} = \omega \theta_{\max} = (4\pi) \times \left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{4\pi^2}{3} \approx 13.159 \text{ rad/s.}$$

$$v_{\max} = r \dot{\theta}_{\max} = 0.5 \text{ m} \times \frac{4\pi^2}{3} = \frac{2\pi^2}{3} \approx 6.58 \text{ m/s.}$$

空气中雷诺数

$$\text{Re} = \frac{v_{\max} L}{\nu} = \frac{(6.58 \text{ m/s})(0.5 \text{ m})}{1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \approx 2.19 \times 10^5.$$

鱼的雷诺数

鱼游泳时，尾部摆动产生的最大线速度或游泳速度约 $U = 1 \text{ m/s}$

一般鱼的身长约 $L = 0.3 \text{ m}$

水中的雷诺数

$$\text{Re} = \frac{U L}{\nu} = \frac{(1 \text{ m/s}) \times (0.3 \text{ m})}{1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 3.0 \times 10^5.$$

两者接近，能够模拟！

03 游动的鱼

3-1 实验内容

01

设备：

使用航华公司生产的SW02型烟线设备，可显示一个铅锤平面内的流场，拍摄装备为佳能7d2单反摄像机。

参数：

调节风速为五米每秒左右，电压为120伏特，使得烟线足够长能够覆盖试验段全部的流场。实验装置置于黑暗中，摄影机的触发延迟为50ms左右，调节ISO 100，快门1/100s，光圈5.6，闪光灯1/8。



3-2 实验现象

02

1. 帆布静止时迎风面流场变得密集，且流场距离布面较近；
2. 背风面与来流方向的夹角内几乎没有烟线；
3. 且有烟线显示的空间和没有烟线显示的空间相接处的位置烟线流动较为混乱，推测背风面出现边界层分离。





边界层

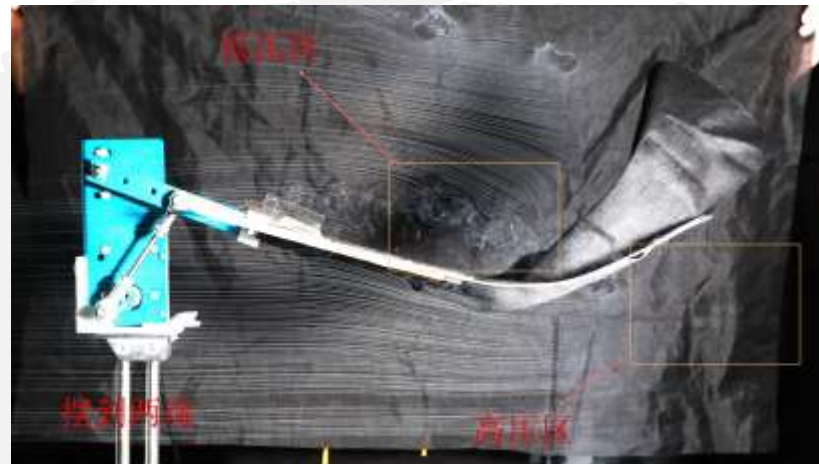
3-3 实验现象

04

1、摆动起来后迎风面仍然有密集的烟线，且烟线贴近布表面，然而背风面却出现两种不同的现象。

2、布在两边加速或减速摆动时，背风面有混乱的烟线几乎填满帆布与来流方向的夹角。

3、布在接近中间（加速到最大速度）时，背风面有平滑的烟线贴近表面



摆到两边



摆到中间

低压区

高压区

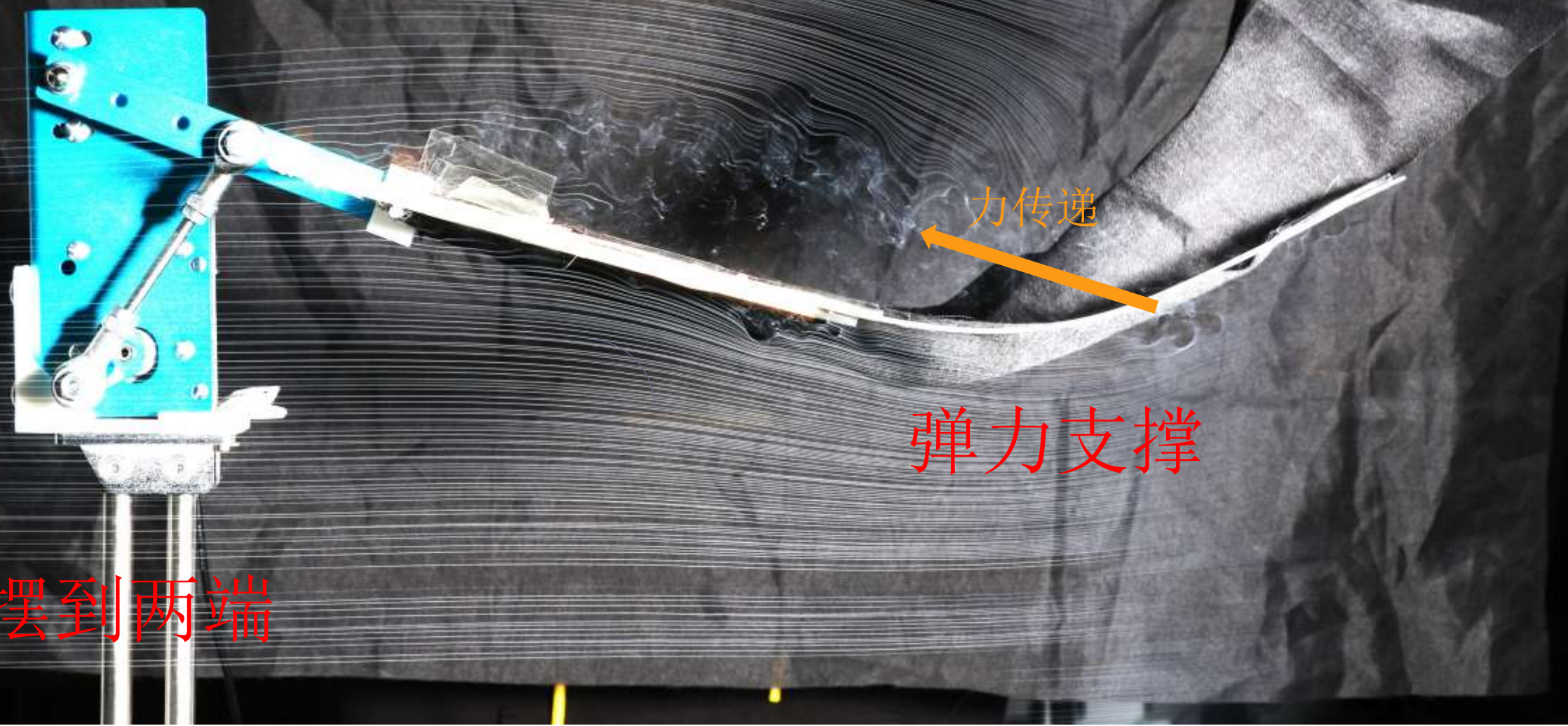
摆到两端



摆到两端

弹力支撑

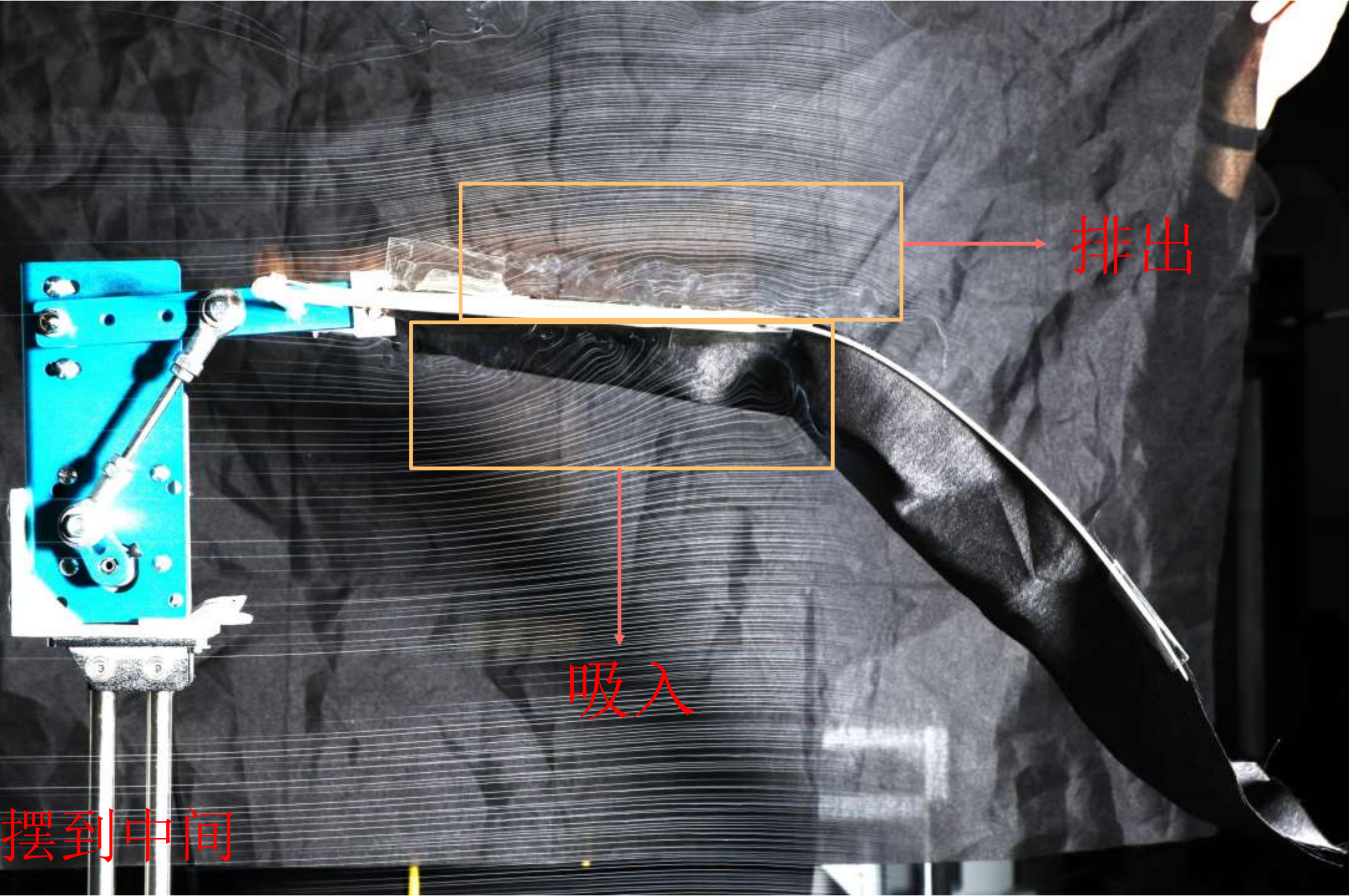
力传递



摆到中间

吸入

排出



3-3 现象分析

07

静止时

- 静止时鳍面与来流方向夹角较大，在鳍端容易产生边界层分离，而当鱼鳍以来流速度同等量级的速度摆动时，鱼鳍便会带动流体产生法向的速度，使得流场更加贴合布面，便抑制了边界层分离。

摆动时

- 但是当鱼鳍摆动到两端时便会有较大的加速度，流场的法向速度与鱼鳍的速度相差的越来越大冲击在鱼鳍表面形成涡流打乱了流场。
- 当鱼鳍摆到两边就会在中间背风处形成一个低压区，在尾鳍后形成高压区推动鱼前进

3-3 实验现象

08

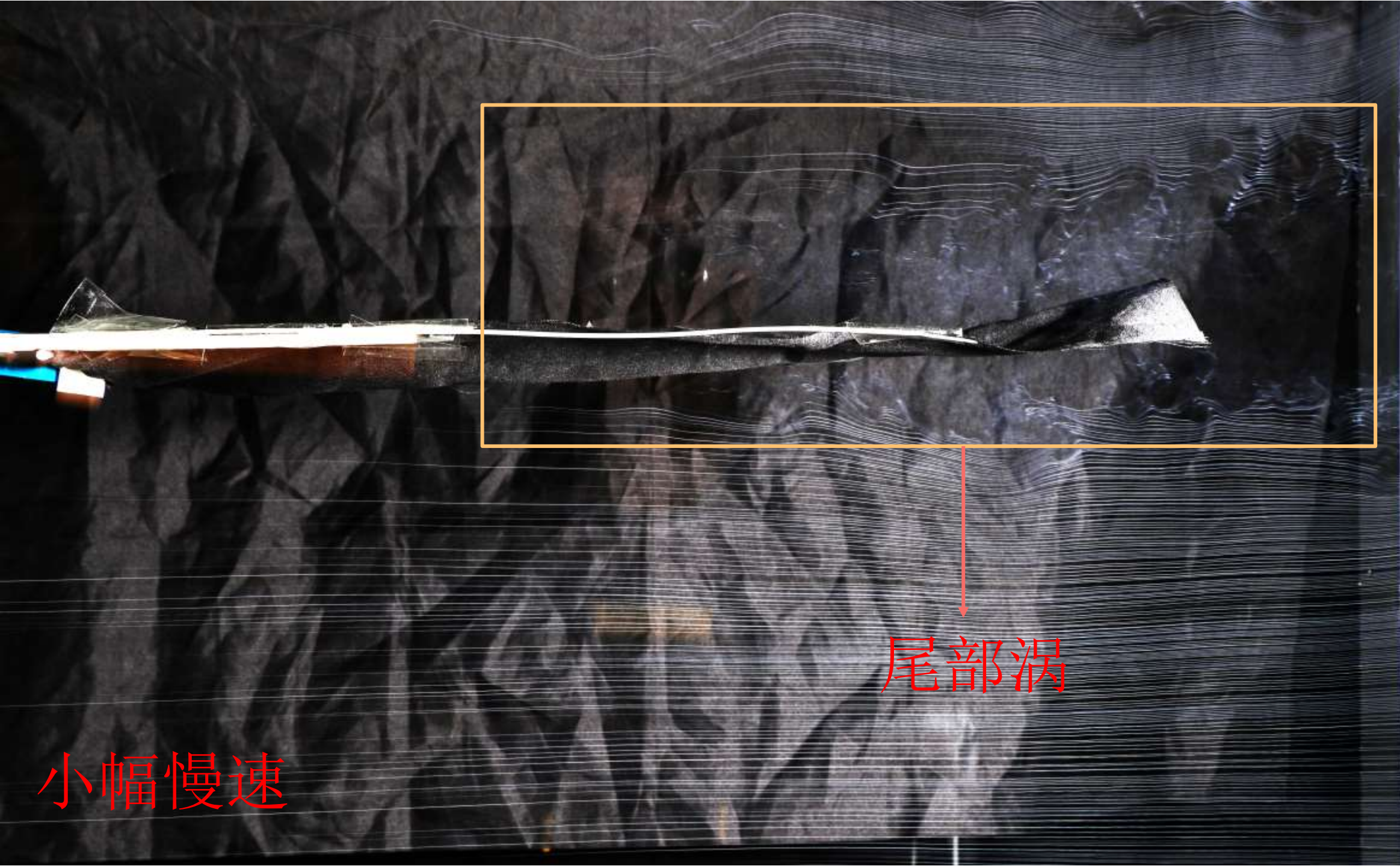
测量不同幅度和速度的结果显示，布的摆动产生流动湍流的影响范围较小，仅仅局限于布的附近。布后的尾流也没有产生大面积的湍流。



小幅慢速



大幅中速



尾部涡

小幅慢速



大幅中速

尾部涡

3-4 理论分析

风场中雷诺数计算：

$$Re = \frac{u, L}{\nu} = \frac{(5, \text{m/s})(0.5, \text{m})}{1.5 \times 10^{-5}, \text{m}^2/\text{s}} = \frac{2.5}{1.5 \times 10^{-5}} \approx 1.67 \times 10^5.$$

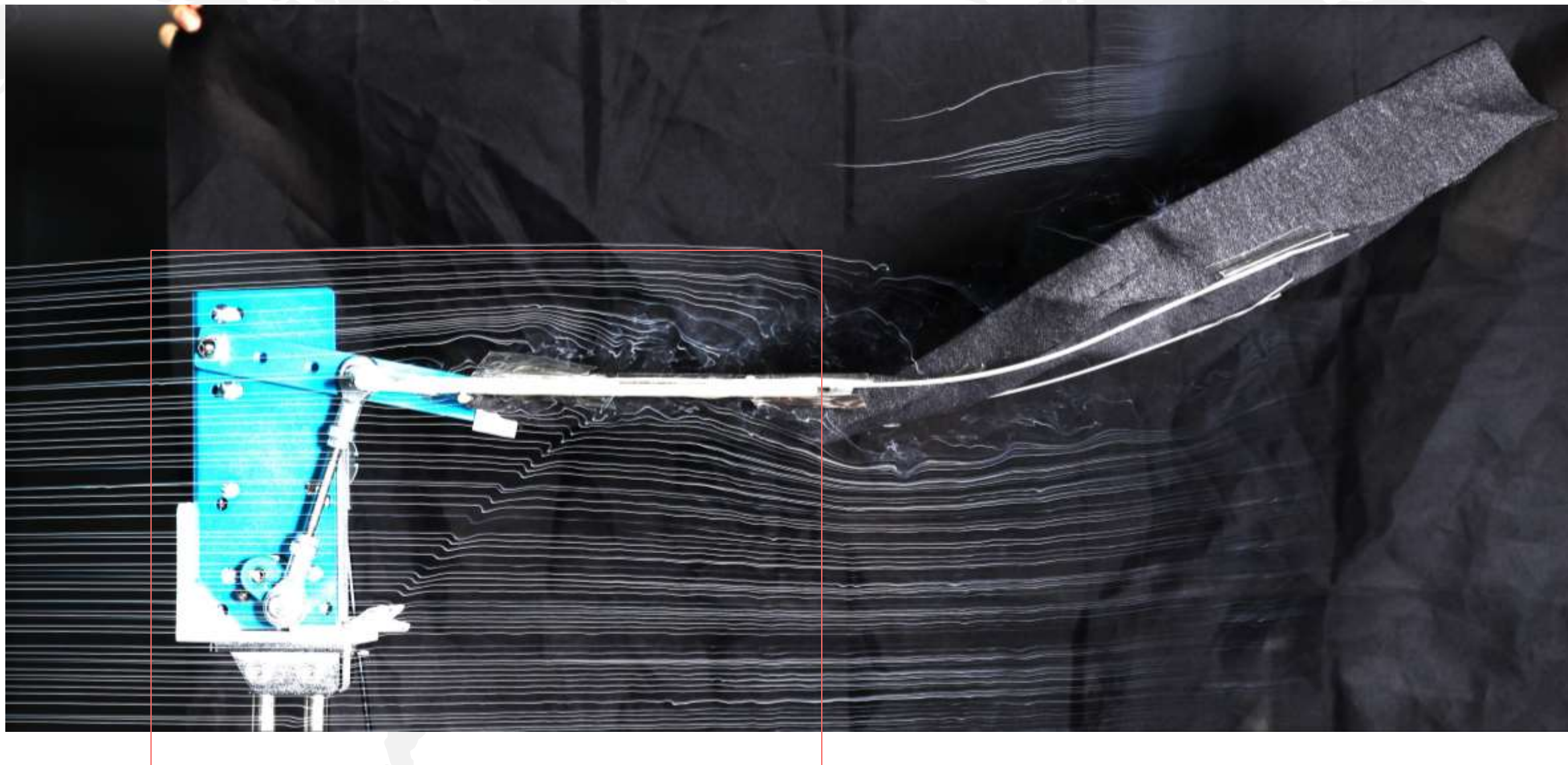
雷诺数很大，足以产生边界层现象和尾部涡结构



然而各种情况下，湍流的影响范围都较小。出现这种现象的原因有可能跟布的柔性有关，除了惯性和骨架的因素，布的运动基本和流场相同，这导致了流场几乎没有大面积的产生湍流，尤其是尾部，已经没有骨架，几乎和流场形状相同。

3-5 一个有趣的现象

12





感谢聆听！

《鱼的仿生推进研究》

■ 报告人：付华钰 陈博远 陈浏屹