

# 基于肥皂膜直立水洞的典型钝体绕流实验研究

潘松, 王怀成, 李欣, 田新亮\*

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海, 200240)

**摘要:** 本研究描述了一种由重力驱使的直立式肥皂膜水洞装置, 提供了一种模拟较高雷诺数下的二维水动力实验研究方法。此装置通过使用液体流量计, 能够提供不同的稳定流速的实验条件。采用了几种典型钝体模型放置在水洞装置平行实验段, 利用低压钠灯干涉法显示流场以及钝体尾流基本特征, 并通过激光反射法测定模型所受的阻力大小。结果显示, 实验能很清楚地揭示不同形状钝体尾流旋涡特征, 并较好地实现对二维流场中钝体实际受力情况的实验测量。

**关键词:** 直立肥皂膜水洞; 钝体绕流; 二维流动; 水动力学

## 1 引言

钝体绕流一直以来都是流体力学领域最为经典而复杂的研究内容之一。钝体有着丰富的形状, 应用领域十分广泛, 例如航空、航天、船舶海洋工程等, 因此了解其水动力学性质和流场特性有重要的意义。但是由于流动的复杂性, 其中的很多机理仍没有研究清楚。人们为了简化实际流动问题, 提出了一些二维流场模型, 进行了相当多的理论和实验研究, 取得了相当显著的成果。

肥皂膜水洞装置是一种典型的用于模拟二维流场的实验装置, 核心在于使用肥皂液拉开的流动肥皂膜, 其横向尺度通常可达厚度的  $10^6$  倍。该装置有操作简单、维护方便、重复性好、稳定可靠等优点, 广泛应用于二维流场实验。肥皂膜装置经历了几个发展阶段<sup>[1-2]</sup>, 目前较为成熟的类型是速度较高的直立式肥皂膜装置<sup>[3]</sup>和速度较低的水平式或倾斜式肥皂膜装置<sup>[4]</sup>, 二者分别可以模拟高速和低速情形下的二维流动。1996年, M. A. Rutgers 等<sup>[5]</sup>研究了直立式肥皂膜装置的层流速度分布情况, 结果表明肥皂膜在流动时受到自身重力和

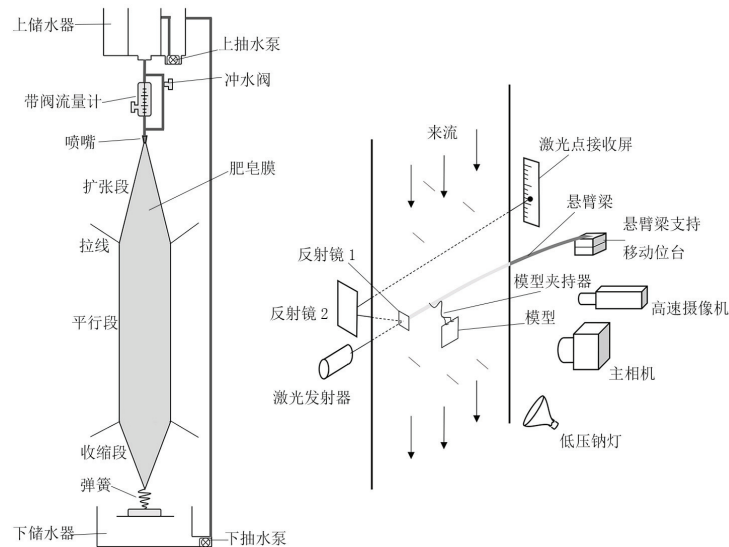
基金项目: 国家自然科学基金项目“海底溃坝式异重流演化机理及海洋结构物动力响应研究”资助, 项目编号: 51779141  
通信作者: 田新亮。E-mail: [tianxinliang@sjtu.edu.cn](mailto:tianxinliang@sjtu.edu.cn)

空气阻力的共同作用。1998年, B. K. Martin 等<sup>[6]</sup>使用垂直式肥皂膜装置研究了二维栅格湍流中空气阻力对湍流衰减的影响。1999年, P. Vorobieff 等<sup>[7]</sup>使用倾斜式肥皂膜装置和 DPIV 技术测量了等距排列的圆柱插入肥皂膜后产生的栅格湍流的实时同步速度和厚度, 并计算了平均能量衰减、涡量拟能以及速度、涡量和涡通量等的结构函数。2015年, Ildoo Kim<sup>[8]</sup>在倾斜式肥皂膜装置中放置了不同形状的钝体, 分析了钝体形状对  $St$  数和  $Re$  数之间关系的影响。上述实验虽然对肥皂膜的流场特性进行了很好的研究, 但是对于钝体在流场中的水动力学性能例如升阻力大小等却没有涉及。因此, 本研究基于上述垂直式肥皂膜装置进行了改进, 设计制作了一个能够进行高精度阻力测量的直立式肥皂膜水洞装置。

本研究将介绍直立式肥皂膜水洞测力装置, 以及基于此装置所做的一些关于 4 种形状的钝体模型: 圆形、正方形、等边三角形和薄板的二维钝体绕流实验。利用低压钠灯干涉法显示流场特征, 使用激光反射法进行钝体阻力的测量。

## 2 实验装置介绍

如图 1 所示, 本文实验使用的直立式肥皂膜水洞装置包括 3 个主要组成部分: 肥皂膜水洞主体、测力支撑机构、显示测量系统。本研究使用的肥皂液配方为 90%去离子蒸馏水、4%商业洗洁精和 6%的甘油, 可保证良好的肥皂膜寿命和实验质量。



(a) 肥皂膜主体 (b) 测力机构及流场显示系统

图 1 实验装置

上述肥皂膜配置完成后, 需先放置在下储水器中, 在下抽水泵的作用下完全泵入上储

水器的外部。上储水器中的上抽水泵将肥皂液泵入上储水器的内部直到溢出，这样可保证使肥皂液流下的压力水头不变，在实验过程中表现为流速不会变化。打开流量计的阀门后，肥皂液通过流量计向下流。流量计和喷嘴下方是由两根尼龙线组成的导线框，间距  $L_g=11\text{cm}$ 。如图 1(a)所示肥皂液在此处被拉成膜，即肥皂膜。导线下部被弹簧拉紧，保证线上的张力。导线框分为三部分，扩张段、平行段和收缩段。所有实验内容均在肥皂膜平行段进行。

为达到调节流量和控制流速的目的，笔者在上储水器和喷嘴之间设置了一个带阀流量计，可实时读取通过管路的流量大小并通过控制阀门开关大小进行调节，进而得到不同的肥皂膜流速。由于在实验过程中一些操作不可避免会使肥皂膜破裂，这时空气会在喷嘴处进入管路形成气泡，严重影响管路中肥皂液的速率，导致肥皂膜速度减小。为保证实验连续性重复性和可实施性，我们设置了另一条冲水带阀管路。在正常实验过程中此管路闭合，不影响正常流动。一旦肥皂膜破裂，需将流量计关闭，打开冲水管路，此时没有流量计的限制因此流速很大，可将喷嘴处的气泡冲走，恢复之前的流速，误差可控制在 3%以内。

由于肥皂膜极薄且流速较快，单凭肉眼和环境光是无法观察的，因此我们使用了低压钠灯进行照明，并由一台高清单反相机和一台高速摄像机进行拍摄。由于钠灯光是一种单色光，波长为  $589.0\text{nm}$  &  $589.6\text{nm}$ ，具有很好的相干性，可以显示肥皂膜的厚度变化和流场变化。单反相机用来记录流场的高清图像，具有很高的分辨率；高速摄像机分辨率为  $1280\times 1024$ ，最高拍摄速率为  $1357\text{fps}$ ，用于连续记录流场变化，此相机必须正对肥皂膜平面，否则图像产生畸变导致失真。

通常钝体模型在肥皂膜中所受阻力大小为  $10^{-5}\text{N}$  量级，即  $1\text{dyn}$ 。使用常规的天平或测力机构是无法精确测得此值的。因此，本研究开发了一种用于测量单向微小力的测力天平，如图 1(b)中所示。钝体模型的形状各异，要在同一个流场内同时测得阻力大小比较困难。因此采用的方案是一种可更换的模型夹持器。此装置可比较方便地更换肥皂膜中的钝体模型而不至于使得肥皂膜破裂，这样在相同的外部条件下可测量不同模型所受的阻力大小进行比较，具有较好的准确性。

### 3 实验内容

实验中通过使用高速 CCD 相机追踪平行段中的示踪粒子，间隔拍摄时间为  $1\text{ms}$ ，测量相邻两次拍摄照片中粒子移动的距离即可得其速度，示踪粒子的速度就是粒子所在流体微团的流速，选择中线处的粒子来测得流速。另外，经过多次多点测量实验结果表明，距离喷嘴下方  $30\sim 40\text{cm}$  处肥皂膜速度已经达到了最终速度，可作为理想的实验区域。本实验中通过取中心线处的多个示踪粒子的移动速度，得到平均速度  $v_m=1.786\text{m/s}$ 。根据液体流量计的读数，本实验中肥皂液流下的流量  $Q=20\text{mL/min}$ 。根据流速和流量之间的关系，即可得到示踪粒子所在位置的肥皂膜平均厚度：

$$B_{\delta} = \frac{Q}{UL_g} \quad (1)$$

式中,  $Q$  为肥皂液流量;  $L_g$  为导线间距即肥皂膜水洞宽度。计算得  $B_{\delta} = 1.70\mu\text{m}$ 。

另外我们关心的肥皂膜属性还包括其运动黏性系数  $\nu$ , 只有知道肥皂膜的黏性后才能计算雷诺数  $Re$ 。但是肥皂膜的黏性系数  $\nu$  还和肥皂膜的厚度  $B$  有关, 因此无法事先测得。现考虑的方法则恰恰相反, 采用  $St-Re$  拟合公式来先计算得出  $Re$ , 进一步可得  $\nu$ 。本文实验中在肥皂膜中放置了一个直径  $D_c = 2\text{mm}$  的圆柱测其脱涡频率  $f$  并算出  $St = 0.158$ , 使用的圆柱绕流拟合公式<sup>[9]</sup>计算  $Re$ , 进而得出运动黏性系数  $\nu \approx 4 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

使用的钝体模型共有 4 种形状: 圆形、矩形、等边三角形和薄板, 材料为紫铜 ( $\rho = 8.89\text{g/cm}^3$ ), 特征尺度  $L_p$  均相同并垂直于来流方向, 雷诺数定义为  $Re = UL_p / \nu$ 。 $L_p = 10\text{mm}$  时,  $Re \approx 420$ 。

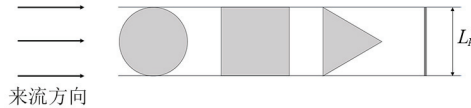


图 2 模型示意图

## 4 实验结果

### 4.1 流场显示

实验中由于雷诺数较大, 若模型过大则无法显示涡街形状, 因此取  $L_p = 10\text{mm}$ 。

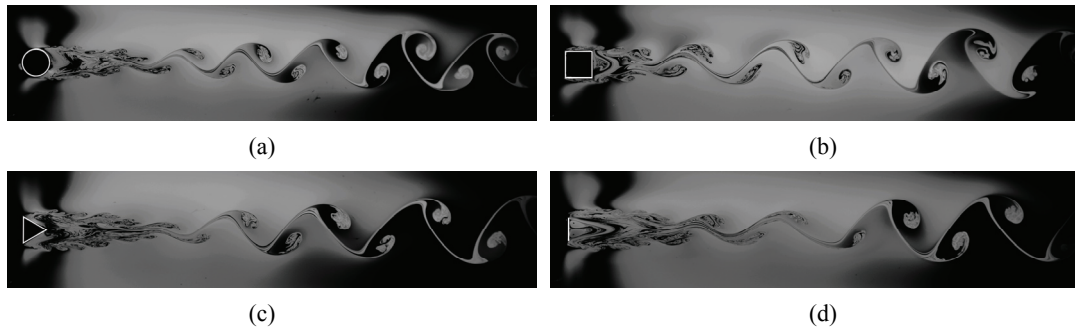


图 3 四种形状钝体的尾迹流场

图 3 中可观察到 4 种形状的钝体后均会产生旋向相反的双列线涡, 即卡门涡街结构。可见在  $Re \approx 420$  时, 不同形状钝体后尾迹中涡结构的差异并不大。

## 4.2 阻力结果

实验实际测得阻力大小十分微小,当 $L_p=25\text{mm}$ 时4种形状钝体的阻力大小如表1所示。

表1 测量阻力结果 ( $L_p=25\text{mm}$ ,  $v=1.786\text{m/s}$ )

形状	圆形	薄板形	正方形	三角形
阻力值 (dyn)	14.88	19.44	18.73	18.57
重复误差	1.47%	0.07%	0.67%	1.34%

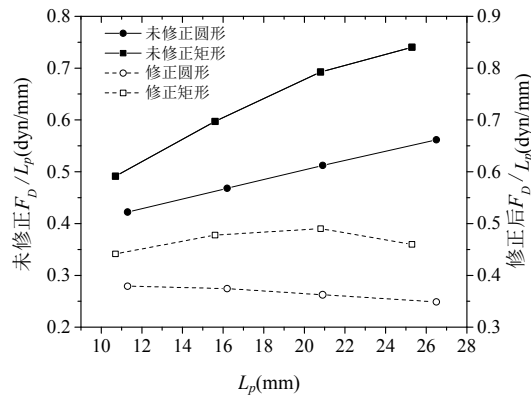


图4 圆形和矩形钝体阻力随 $L_p$ 变化 ( $v=1.786\text{m/s}$ )

由于矩形、三角形、薄板形钝体在同一流速下阻力差异不大,因此如图4所示仅列出圆形和矩形钝体阻力 $F_D$ 随特征长度 $L_p$ 变化的情况,阻力使用 $L_p$ 去除模型长度影响。考虑到二维平板绕流的阻塞效应<sup>[11]</sup>,随模型特征长度与管路直径之比 $L_p/L_g$ 的增长,平板阻力系数 $C_d$ 会增大。值得注意的是,文献[11]给出的阻塞效应修正公式源自三维流场中的实验数据,用于二维肥皂膜的问题是否合适,尚不得而知。无论如何,图4中比较了原始测量阻力数据和修正阻塞效应后的阻力系数,结果显示在肥皂膜中放置钝体模型时必须考虑阻塞效应,即使用 $L_p/L_g$ 修正阻力系数 $C_d$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Couder Y. The observation of a shear flow instability in a rotating system with a soap membrane . Journal de Physique Lettres, 1981, 42(19): 429-431.
- 2 Gharib M, Derango P. A liquid (soap film) tunnel to study two-dimensional laminar and turbulent shear flows . Physica D: Nonlinear Phenomena, 1989, 37: 406-416.
- 3 Rutgers MA, Wu XL, Daniel WB. Conducting fluid dynamics experiments with vertically falling soap films . Review of Scientific Instruments, 2001, 72(2): 3025-3037.
- 4 Georgiev D, Vorobieff P. The slowest soap-film tunnel in the Southwest . Review of Scientific Instruments,

- 2002, 73(3): 1177-1184.
- 5 M. A. Rutgers, X-I. Wu, R. Bhagavatula. Two-dimensional velocity profiles and laminar boundary layers in flowing soap films . *Phys. of Fluids*, 1996, 8(11): 2847-2854.
  - 6 B. K. Martin, X. L. Martin, W. I. Goldburg. Spectra of decaying turbulence in a soap film . *Physical Review Letters*, 1998, 80(18): 3964-3967.
  - 7 P. Vorobieff, M. Rivera, R. E. Ecke. Soap film flows: statistics of two-dimensional turbulence . *Physics of Fluids*, 1999, 11(8): 2167-2177.
  - 8 Ildoo Kim. Unified Strouhal-Reynolds number relationship for laminar vortex streets generated by different-shaped obstacles . *Physical Review E*, 2015, 92(043011): 1-5.
  - 9 Jia L B, Li F, Yin X Z. Coupling modes between two flapping filaments . *J Fluid Mech*, 2007, 581: 199-220.
  - 10 M. Takeuchi, T. Okamoto, Effect of side walls of wind-tunnel on turbulent wake behind two-dimensional bluff body, *Proceedings of the Fourth Symposium on Turbulent Shear Flows*, Karlsruhe, Germany, September 12–14, 1983, 5:25–30.

## **An experimental study of flow past typical bluff bodies in vertical soap film tunnel**

PAN Song, WANG Huai-cheng, LI Xin, TIAN Xin-liang

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 200240.

Email: panine@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** In this paper a gravity driven vertical soap film tunnel is described. The soap film tunnel can provide a two-dimensional hydrodynamic experimental method at high Reynolds numbers. The device can provide different conditions of steady flow rate using liquid flowmeter. Several typical bluff body models were placed in the parallel section of the soap film. The basic characteristics of the flow wake were displayed by low pressure sodium lamp, which can show the interference fringes. The experimental results indicate that the wake vortices behind bluff bodies with different shapes can be clearly revealed, and the measurement of drag forces on bluff body in quasi-2D flow field can be well realized.

**Key words:** Vertical soap-film tunnel; Flow around bluff body; Two-dimensional flow; Hydrodynamics.