

《工程流体力学》

流动参数综合测量技术与圆柱绕流实验 实验指导书



上海交通大学机械与动力工程学院
基础实验与创新实践教学中心

2023 年

流动参数综合测量技术与圆柱绕流实验

一、实验目的

- 1、了解热线风速仪的测速原理，掌握热线风速仪的测速方法；
- 2、了解涡街流量计的测速原理，通过压力波动频率计算流体速度；
- 3、了解孔板流量计的测速原理，测量节流孔板不同雷诺数下的阻力系数。

二、实验装置及仪器

1. 实验装置

本实验采用内径 $\phi 350\text{mm}$ 的风洞，测试一段长度 600mm ，出口接内径 $\phi 100\text{mm}$ 圆管，测试二段长度 1000mm 。

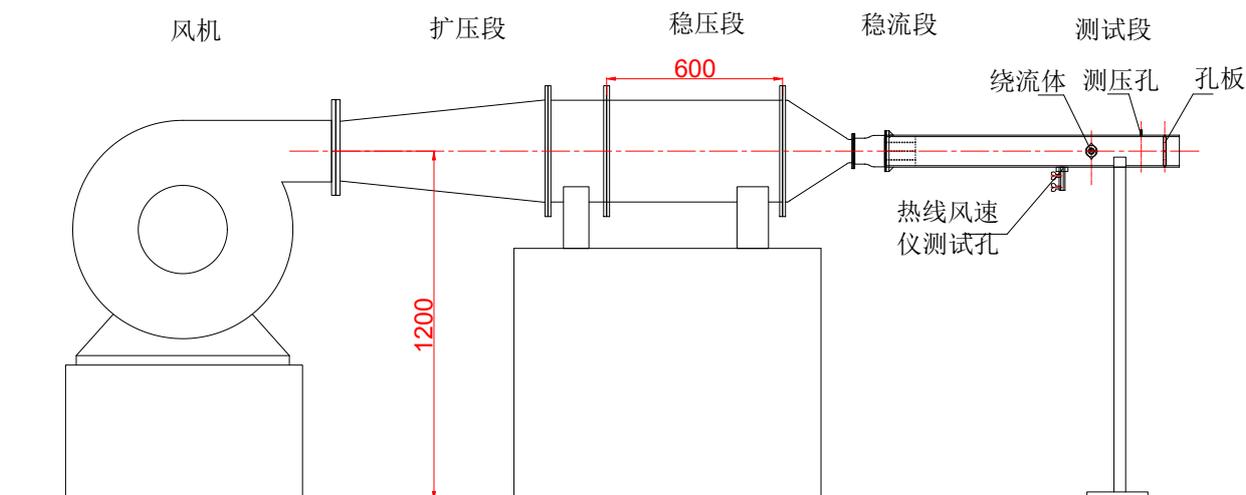


图1 风洞装置

2. 设备组成

1) 风机

风机型号：CF72 500A

风量： $1400\text{m}^3/\text{h}$

全压： 2900Pa

功率 5.5kW

风机转速采用变频控制。

2) 流量控制变频器

风量采用风机变频控制，变频器可 0~50Hz 手动调整电机频率，并显示风机电动机电流。

3. 测试仪器

1) 热线风速仪：

热线风速仪型号：9565-P-NB

2) 压力变送器：

TRYB-3000，测量量程：0-8000Pa。

三、实验原理

1. 热线风速仪测量原理

热线风速仪（Hot-Wire Anemometry）是利用放置在流场中具有加热电流的细金属线（或金属膜）来测量风速的仪器。设一细导线放在速度为 U 的场中，当通入电流时，产生热量，在周围环境进行热耗散后会达到热平衡。在一定的条件下，该热平衡主要与流体流动速度、加热电流和热线温度（或热线电阻）等有关。如果速度变化，热耗散也将变化，热线温度也将变化，最后达到一个新的热平衡。常用的热线风速仪为恒温式热线风速仪，通过保持温度恒定，可以得到热线加热电流和风速之间的对应关系，从而通过测量电流得出风速。

热线风速仪主要具有如下优点：

- 探头尺寸小，对流场干扰小；
- 频响高（可达 1000kHz），可响应很快的气流脉动；
- 灵敏度高，可以测出非常低的速度及其脉动速度；
- 连续测量，是测量湍流参数最理想的仪器之一。

2. 孔板流量计的测量原理

孔板流量计工作原理是采用节流装置，在节流件处形成局部收缩，从而使流速增加，静压降低，从而在节流件前后产生压力差，通过测量该压力差得到流道的流量或平均流速。

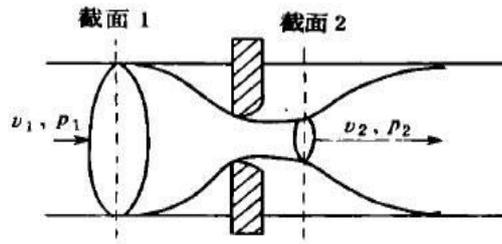


图 2 孔板流量计原理图

孔板测量流量的计算公式如下：

$$Q = a \times \frac{\pi}{4} d^2 \varepsilon \sqrt{2g\Delta p / \rho_1}$$

$$Q = 0.1252 a d^2 \varepsilon \sqrt{\Delta p / \rho_1}$$

$$Q = K \sqrt{\Delta p}$$

Q ——工作状态下体积流量， m^3/h ；

a ——流量系数；

ε ——流体膨胀系数；

d ——节流圈的开孔直径， m ；

Δp ——孔板两侧压差， Pa ；

ρ_1 ——工作状态下流体密度， kg/m^3 ；

K ——孔板系数。

3. 圆柱绕流的基本规律及涡街流量计的测量原理

实验和数值模拟均发现，当 $\text{Re}_D > 40$ 时，圆柱下游将会出现旋涡交替脱落的卡门涡街现象。随着 Re 数的增加，圆柱表面的阻力系数会呈现逐渐减小的规律，当 $10^2 < \text{Re} < 2.5 \times 10^5$ 时，阻力系数变化缓慢，称为亚临界状态，其阻力主要来自压差阻力，流动分离点约为距驻点 78° 位置。当 $\text{Re} > 2.5 \times 10^5$ 时，阻力系数会突然减小，产生“阻力危机”，其主要原因是流动分离从层流分离转捩为了湍流分离，其流动分离点约为距驻点 130° 位置。

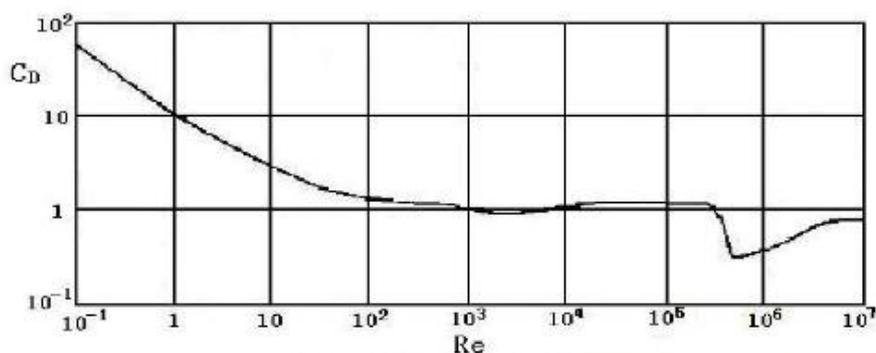


图3 不同 Re 数下，阻力系数变化规律

此外，在亚临界状态时，有研究表明，表征旋涡脱落频率的 Strouhal 数与流动的雷诺数 Re 基本满足下式：

$$St = \frac{fD}{V} = 0.198\left(1 - \frac{19.7}{Re}\right)$$

当 Re 较大时，可认为 St 基本保持常数，在 0.2 左右。因此，也可以根据该原理，通过在流道中引入一直径已知的圆柱并测量其旋涡脱落频率计算得出流速。

四、实验步骤

1. 热线风速仪测试风速

- 记录环境温度，查表得到空气密度和粘性系数；
- 准备实验设备，开启风机；
- 利用热线风速仪，用等面积法测量管内的流速，通过改变电机频率（5~10组），记录不同风机转速下的空气流速（每次记录三组，然后取平均），给出电机频率、电机功率与空气流量的拟合规律；

2. 流量计测试

- 测量不同流量下节流圈前后压差，根据孔板流量计原理计算出流量与压差的对应关系，同时得出流体在孔板截面处雷诺数与孔板系数 K 的关系；

3. 圆柱绕流测试

- 开展圆柱绕流实验，首先，设定风机功率，通过旋转测孔位置（5~10组），利用 Kulite 动态压力传感器记录流动稳定后的压力信号，得出不同测孔对应的压力信号特征，包括平均压力和压力变化频率，其次，继续改变风机功率，从而改变流速，得出不同风速下的涡脱落频率，并利用热线风速仪测定的风速，计算得到 St 数；

- 实验完毕，关闭风机，还原实验设备。

五、实验记录

环境温度 $T = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

空气动力粘性系数 $\mu = \underline{\hspace{2cm}}$ N·s/ m²

空气密度 $\rho = \underline{\hspace{2cm}}$ kg/m³

小圆管内径: $D_n = \underline{\hspace{2cm}}$ m;

孔板内径: $\underline{\hspace{2cm}}$ mm

孔板厚度: $\underline{\hspace{2cm}}$ mm

将实验数据记入附表中。

六、数据分析

- 1、根据热线风速仪测量结果，绘制风机流量、电机功率与风机频率关系图；
- 2、根据孔板前后压差的测量结果，以热线风速仪数据为标准值，根据节流圈前后压力差计算得出的不同工况下的孔板系数，得出孔板系数与雷诺数的关系曲线；
- 3、根据圆柱绕流实验保存的动态压力数据，完成下列内容：
 - a) 利用 matlab 中的 FFT 函数，以任意一组结果绘制频谱图并得出相应的脱落涡频率；
 - b) 绘制圆柱表面压力分布图；
 - c) 绘制不同流速与脱落涡频率的变化规律。

七、思考题

- 1、从安装便捷性和测量精度等方面，简要分析三种流速测量方法的优缺点？
- 2、根据热线风速仪测量实验，解释截面处不同位置的流速分布现象？
- 3、根据孔板测量原理，试分析孔板系数与哪些因素有关？
- 4、根据孔板实验，解释孔板系数与雷诺数的关系？
- 5、在圆柱绕流实验中，说明其中可能存在的误差（包括装置影响和测量误差）。

附表 1 实验数据记录表

名称	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
电机频率	Hz					
电机电流	A					
热线风速仪 位置 1 速度	m/s					
热线风速仪 位置 2 速度	m/s					
热线风速仪 位置 3 速度	m/s					
孔板前 后压差	Pa					
圆柱绕 流频率	Hz					
孔板入口处雷诺数 Re	-					

附录 频谱分析

频谱是指一个时域的信号在频域下的表示方式，可以针对信号进行 Fourier 变换而得，所得的结果会是以分别以幅度及相位为纵轴，频率为横轴的两张图，不过有时也会省略相位的信息，只显示不同频率下对应的幅度信息。通过分析幅度随频率变化的情形，可以找出一个信号的频率特征。对于周期信号，其在频谱中会表现为对应频率的离散尖峰。

通过对时域信号的采样，我们得到的时域信号的离散形式，因此，在实际信号处理中，需要采用离散 Fourier 变换。所谓离散 Fourier 变换，就是 Fourier 变换在时域和频域上都呈现离散的形式，将时域信号的采样变换为在离散时间 Fourier 变换频域的采样。在形式上，变换两端（时域和频域上）的序列是有限长的。离散 Fourier 变换的计算公式如下：

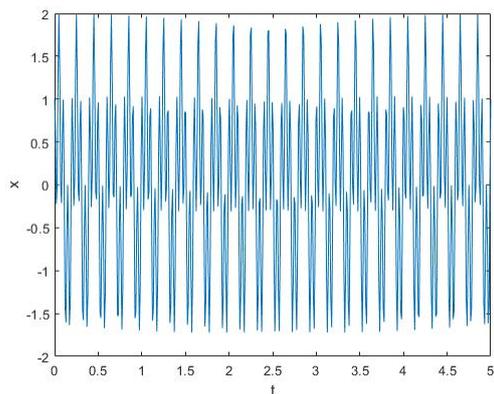
$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-2k\pi i \frac{n}{N}}$$

式中， N 为样本总数； $k, n=0, 1, 2, \dots, N$ 。 $f(n)$ 为采样得到的时域信号， $F(k)$ 即为离散 Fourier 变换后的频域结果。根据采样定理，当采样频率为 f_s ，其最高可分辨的频率为 $\frac{1}{2}f_s$ ，所以横坐标的范围为 $[0, \frac{1}{2}f_s]$ 。由于离散 Fourier 变换的共轭性，也只取前一半的结果进行作图。

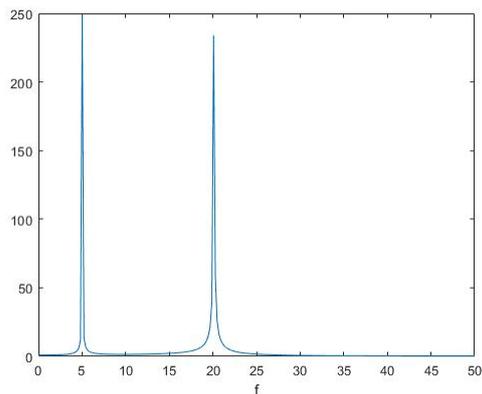
以下为采用 matlab 编写的一个测试程序：

```
N=500;          %采样长度
fs=100;         %采样频率
T=N/fs;        %采样时长
ft1=5.0;       %测试频率 1
ft2=20.0;      %测试频率 2
t=linspace(0,T,N);          %采样时间
x=sin(2.0*pi*ft1*t)+cos(2.0*pi*ft2*t); %测试信号
y=abs(fft(x));             %频谱图的纵轴（幅值）
f=linspace(0,fs/2,N/2);    %频谱图的横轴
figure(1)               %时域图
plot(t,x)
xlabel('t')
ylabel('x')
figure(2)               %频域图
plot(f,y(1:N/2))
```

xlabel('f')



(a) 时域图



(b) 频域图

附图 测试信号的时域图和频域图

附图显示的是上述程序的运行结果。从频域图可见，在 $f=5$ 和 20 处出现两处明显的尖峰，符合测试信号的频率特征。

电子实验报告封面及参考模板下载地址：

<https://lcme.sjtu.edu.cn/openlab/syjsx/rdlisy/20180103151711>

