

## 壁湍流相干结构的实验教学(二)

### ——单丝热膜探针的标定

姜楠

(天津大学力学系, 天津 300072)

**摘要** 介绍热膜测速的基本原理, 水探针校准器的基本构造以及标定单丝热膜探针的基本方法和步骤, 为在水槽中用热膜测速仪测量平板湍流边界层作准备。

**关键词** 热膜测速仪, 水探针, 标定

#### 1 实验目的

热膜测速仪的输出电压  $E$  和流体的速度  $U$  之间存在着一定的对应关系, 在已知这种对应关系的前提下, 根据输出电压可以求出液体速度。因此, 准确地给出  $E-U$  之间的对应关系是测速的前提。在已知流速的标准流场中通过实验求得  $E-U$  之间对应关系的过程称为热膜探针的标定。在每一次测速实验中, 由于受多种因素的影响, 例如探针的材料、制造工艺、几何尺寸、流体的物理性质和流速范围、流场的温度、实验仪器之间的差异等,  $E-U$  之间的关系是不一样的。因此, 每一次测速实验前都要进行探针的标定。通过本实验要求达到以下目的: 掌握热膜测速的基本原理; 了解 TSI-10180 水探针校准器的基本构造; 掌握使用 TSI-10180 水探针校准器标定单丝热膜探针的基本方法和步骤; 画出单丝热膜探针的标定曲线。

#### 2 基本原理

在流场中放置一根很细的金属丝, 其上通电流加热, 由于热交换的作用, 金属丝产生的热量将传给流体, 并被流体带走。当流体速度变化时, 这种热交换也会产生变化, 金属丝的温度随之改变, 从而使电阻值发生变化; 若将该金属丝接到电桥的一个桥臂上, 电桥将输出电压信号, 其大小与流体速度之间存在一定的对应关系。通过测量电桥输出的电压, 达到测量流速的目的。根据这个原理制成的测量流体速度的仪器, 称为热线热膜测速仪。其中热膜探针是测量液体流速的热膜测速仪的传感器, 测量时被放置于液体流场中, 与液体直接进行热交换, 感受流体速度信息。从物理上看, 热膜与液体的热交换与下列因素有关: 1) 流体的速度; 2) 热膜与流体之间的温度差; 3) 流体的物理性质; 4) 热膜的几何尺寸与物理性质; 5) 流

动方向与热膜方向之间的夹角。

根据 KING 的研究结果, 流体速度与热膜垂直时, 流体速度与输出电压之间的关系为

$$Nu = A'' + B''\sqrt{Re} \quad (1)$$

其中  $Nu$  为 Nusselt 数,  $Re$  为 Reynolds 数,  $A'', B''$  为与液体和热膜有关的常数。(1) 式也可以表示为

$$I_w^2 R_w = (T_w - T_F)(A' + B'\sqrt{U}) \quad (2)$$

其中  $I_w$  为热膜上通过的电流;  $R_w$  为热膜电阻;  $T_w$  为热膜温度;  $T_F$  为液体温度;  $U$  为液体速度;  $A', B'$  为与液体和热膜有关的常数。

经过整理, 上式也可以写为

$$E^2 = A + B\sqrt{U} \quad (3)$$

其中  $E$  为热膜测速仪的输出电压。

#### 3 主要仪器设备简介

##### 3.1 TSI-10180 型热膜探针校准器

美国 TSI 公司生产的 10180 型热膜探针校准器(图 1)是用来标定实验中所用水探针的专用设备。其主要部分有电机、水泵、水箱、三量程转子式流速计、校准单元等。

水流采用闭路循环式运转, 水路循环如图 2、图 3 所示。电机带动水泵将水从水箱中抽出, 经过导管注入校准单元, 然后返回水箱。校准所用的标准速度产生于校准单元中喷嘴前的射流核心区, 流速在  $0\text{ m/s} \sim 7.5\text{ m/s}$  范围内连续可调。校准单元是校准器的关键精密部件, 要求流场具有稳定、重复性好、湍流度低的特点, 标定时流场湍流度小于 1%。

本文于 1998-03-12 收到。

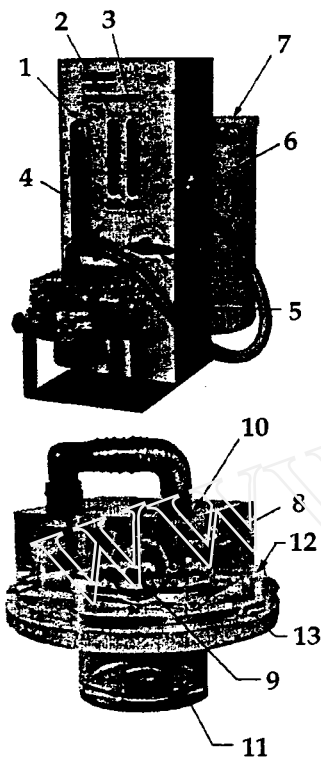


图1 TSI-10180型热膜探针校准器

1 高量程旋转式流量计, 2 中量程旋转式流量计和细调, 3 低量程旋转式流量计, 4 高量程细调, 5 粗调, 6 回流阀门, 7 水箱, 8 探针支架 (0mm~25mm 偏置), 9 探针支架 (25mm~50mm 偏置), 10 校准单元, 11 流动矫正腔, 12 探针高度调节, 13 旋转刻度.

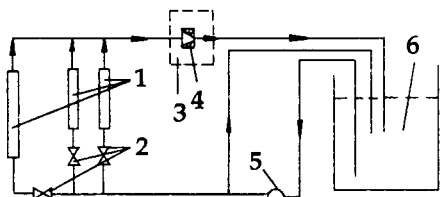


图2 校准器水路循环图

1 转子式流速计, 2 流速微调, 3 校准单元, 4 喷嘴, 5 水泵, 6 水箱

### 3.2 TSI-1210W 热膜探针

TSI-1210W 圆柱形热膜探针如图4所示, 其敏感元件部分长1mm, 结构比较复杂(图5), 芯是石英丝, 外镀一层铂膜做敏感元件, 其外又喷镀一层很薄的石英覆盖层, 以和液体介质电绝缘. 它在一定程度上克服了热线敏感元件的易脆性、易污染和热漂移等缺点, 性能比较稳定; 同时它又克服了普通热膜探针频率响应范围窄, 热惯性大等缺点, 具有较高的空间分辨率, 是一种比较先进的探针结构.

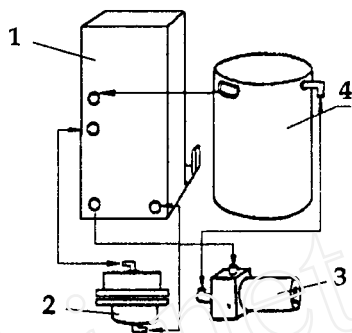


图3 校准器水路循环示意图

1 转子式流速计, 2 校准单元, 3 水泵, 4 水箱

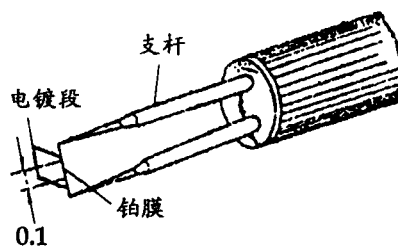


图4 TSI-1210W 圆柱形热膜探针

做引线用的厚金属膜



图5 圆柱形热膜敏感元件构造

### 4 实验步骤

(1) 按照实验装置图(图6)安装实验装置并连接实验仪器.

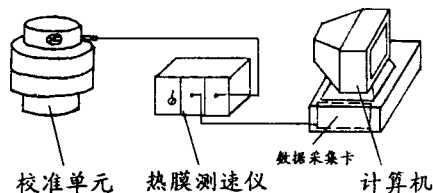


图6 实验装置图

将探针支杆用5m的10110型专用电缆连接, 并将电缆另一端插入测速仪探针插孔, 将1210-20W热膜探针安装在探针支杆上, 并将探针缩回保护套内. 测速仪输出插孔与计算机数据采集卡连接, 测速仪桥路输出(Bridge Output)插孔与示波器相连. 将探针支杆安装在10180型水探针校准器的校准单元内.

检查测速仪的恒温测速仪 (Constant Temperature Anemometer) 旋钮处于预置 (Stand By) 位置, 将稳定性 (Stability) 旋钮逆时针转到底, 接通测速仪电源预热.

### (2) 测量热膜探头的冷电阻

旋转放大器参照偏置 (Ref Set) 旋钮, 使桥路电压调至 2 V, 调节十进制电阻, 直到按与不按电阻测量 (Rrs Meas) 按钮桥路电压不变为止. 此时十进制电阻上的读数即为探针的冷电阻值.

将上面测量的探针的冷电阻值乘以过热比 1.08 为探针工作电阻, 置于十进制电阻上.

### (3) 调试热膜测速仪的最佳频率响应

旋转放大器参照偏置旋钮, 使桥路电压调至 4 V, 将恒温测速仪旋钮从预置位置转到运行 (Run) 位置, 将方波开关置于 1 K 位置. 测速仪桥路输出插孔与示波器相连, Trim(5:1) 逆时针转到底, 然后慢慢顺时针旋转最佳频率响应 (Trim) 旋钮, 顺时针旋转稳定性旋钮, 直到在示波器上看到最佳波形为止 (如图 7 所示), 关上方波发生器.

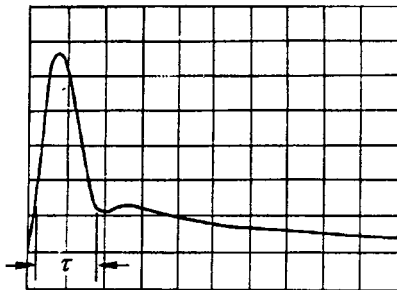


图 7 最佳频率响应方波

### (4) 标定热膜探头

a. 接通水校准器电源, 打开水闸, 启动水泵. 在

测速范围内调节转子流量计, 使流速达到所标定的最大速度.

b. 查看表头电压读数, 若电压超过 5 V, 则调节信号适调器 (SIGNAL CONDITIONER) 旋钮, 使电压衰减至 5 V 以下.

c. 启动计算机数据采集程序, 以 1K 采样频率采集电压数据, 采样时间 1s, 并将数据存入磁盘.

d. 改变流速, 重复过程 c.

(5) 将探针缩回保护套内, 将恒温测速仪旋钮从运行位置转到预置位置, 将探针文杆从校准器上取下, 将探针取下放入盒内.

画出探针标定  $E-U$  曲线 (图 8), 并用最小二乘法拟合出标定公式 (3), 求出  $A, B$  值.

(6) 实验完毕, 关闭水泵电源, 整理实验仪器, 编写实验报告.

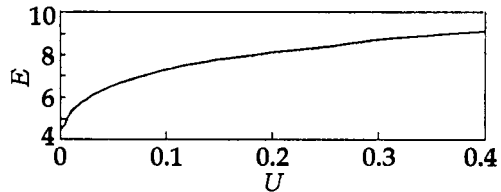


图 8 1210-20W 水探针校准曲线

## 5 讨论与思考

(1) 在标定过程中, 水的温度是如何变化的? 对探针标定有何影响?

(2) 探针的输出电压是如何随探针的方向变化的?

## 参 考 文 献

- 1 盛森芝, 沈熊, 舒玮. 流速测量技术. 北京: 北京大学出版社, 1987
- 2 戴昌晖. 流体流动测量. 北京: 航空工业出版社, 1992

(上接第 60 页)

在 2 点的曲率中心就是  $oa$  上的 1 点, 因此若以  $b$  狗为参照系,  $a$  狗的牵连速度恒为 0, 故  $a$  狗的相对速度就是绝对速度.

综合以上讨论, 对狗的轨迹曲线的性质作如下总结:

(1) 曲线的渐开线与原曲线形状相同. 我们由解析几何的知识可知, 旋轮线也有此性质. 从微分几何可知, 两平面曲线形状相同的充要条件为对应弧长处的曲率相同.

(2) 曲线在渐开的过程中, 如图 1, 切点 1 与端点 2 的运动速率相同, 而此性质是旋轮线所没有的.

(3) 曲线具有自相似性. 如图 1, 曲线  $oa$  的一段  $o1$  位于小正方形 1234 中, 而小正方形 1234 与大正方形  $abcd$  是相似形, 因此只要把  $o1$  按比例放大, 即可得到与“整段” $oa$  完全一样的曲线, 这意味着它是自相似的.

(4) 曲线在  $o$  点附近是无穷回旋的. 因为如图 1, 线段 12 的角速度为  $v/s$ , 则它在整个运动过程中的转角为  $\int_0^a \frac{v}{s} ds$ , 此积分发散, 说明此曲线无穷回旋.