

# C1 光滑平板层流附面层（边界层）发展实验

班 级 \_\_\_\_\_  
姓 名 \_\_\_\_\_  
实验日期 \_\_\_\_\_  
指导教师 \_\_\_\_\_

2019 年 10 月

## C1 光滑平板层流附面层（边界层）发展实验

### 实验内容与目的：

- 测量零压梯度层流边界层厚度发展规律，
- 验证边界层厚度与雷诺数的关系： $\frac{\delta}{x} \propto Re_x^{-0.5}$

### 涵盖原理：

- 附面层理论

因粘性力的作用，固体表面会形成一个边界层。在边界层内，时均速度逐渐变化。最终贴近固体壁面附近的流体速度等于壁面自身的运动速度。在边界层发展的初始阶段，粘性力起着主导性作用，边界层状态为层流状态，见图 1。布拉休斯的层流边界层理论指出，层流边界层厚度 $\delta_{0.99}$ （本地速度为来流速的 99%处为边界层边缘，以下用 $\delta$ 表示） $x^{0.5}$ 变化：

$$\frac{\delta}{x} \propto Re_x^{-0.5} \quad [1]$$

这里， $x$  为距离边界层开始发展位置的距离，单位[m]；雷诺数为

$$Re_x = \frac{Ux}{\nu} \quad [2]$$

$U$  为来流速速度，单位[m/s]； $\nu$ 为空气的动力粘滞系数，单位 $[\frac{m^2}{s}]$ 。动力粘性系数随温度变化，可使用气体性质表格进行插值。如无表格，可以使用如下公式估算

$$\nu = (0.0001T^2 + 0.0839T + 13.395) \times 10^{-6}$$

这里  $T$  为温度，单位[ $^{\circ}C$ ]

实验在图 1 所示下吹式实验装置出口进行。一个全压管被用来测量来流全压 $P_t$ （图 1），过全压与风洞侧壁的静压 $P_o$ 之差 $\Delta P$ 来计算速度

$$\Delta P = P_t - P_o \quad [3]$$

计算速度的方法为

$$u = \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad [4]$$

这里 $\rho$ 为空气密度，单位[kg/m<sup>3</sup>]，可以使用理想气体方程估算

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad [5]$$

这里气体常数为  $R=287.1$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]； $P$  为大气压，建议使用专门仪器进行测量，如无，可根据海拔填写大气压，比如，上海可考虑使用标准大气压 101325Pa。另外，这里的  $T$  为开尔文温度[K]（与前面估算动力粘滞系数的  $T$  不同，那里是摄氏度）。

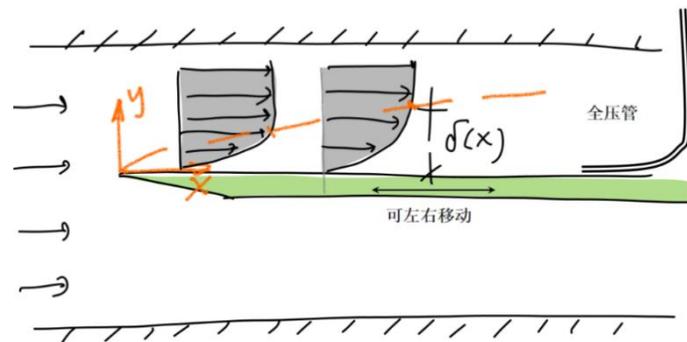


图 1 边界层试验测量方法示意图

### 实验仪器：

- 航华 WT03 风洞，见图 2
- 航华 PSU16 多通道压强扫描系统
- 航华 TPT1A “L”型边界层全压管
- 航华 T-MM 微米级数显手动移动台
- 平板模块 FP1

### 简要过程：

1. 安装光滑平板；安装 L 型边界层全压管及手动移动台；
2. 使用水平尺检查实验段水平度及平板水平度，如不平行，调节水平度
3. 测量并记录室温
4. 将全压管对准来流，水平移动平板，是全压管位置距离前缘  $x=50\text{mm}$ ，见图 3
5. 连接测压管，全压管接到测压表 H 端，侧壁接到测压表 L 端，见图 4
6. 运行风机，调节风速  $U$  至  $10\text{m/s}$  左右，测量并记录来流速度；
7. 使用手动移动台调节全压管距离壁面位置至  $y=1\text{mm}$ ；测量全压管与侧壁静压之差  $\Delta P$ ，并记录
8. 调节竖直位置至  $y=2$  至  $13\text{mm}$ ，每次调节后测量压强  $\Delta P$ ，并记录
9. 移动平板位置来改变全压管开口距离平板前缘距离  $x=100,150,200,300\text{cm}$ （图 5）。在每个位置上重复第 5,6 步。如果移动距离过短导致无法测量，建议使用不同全压管孔位

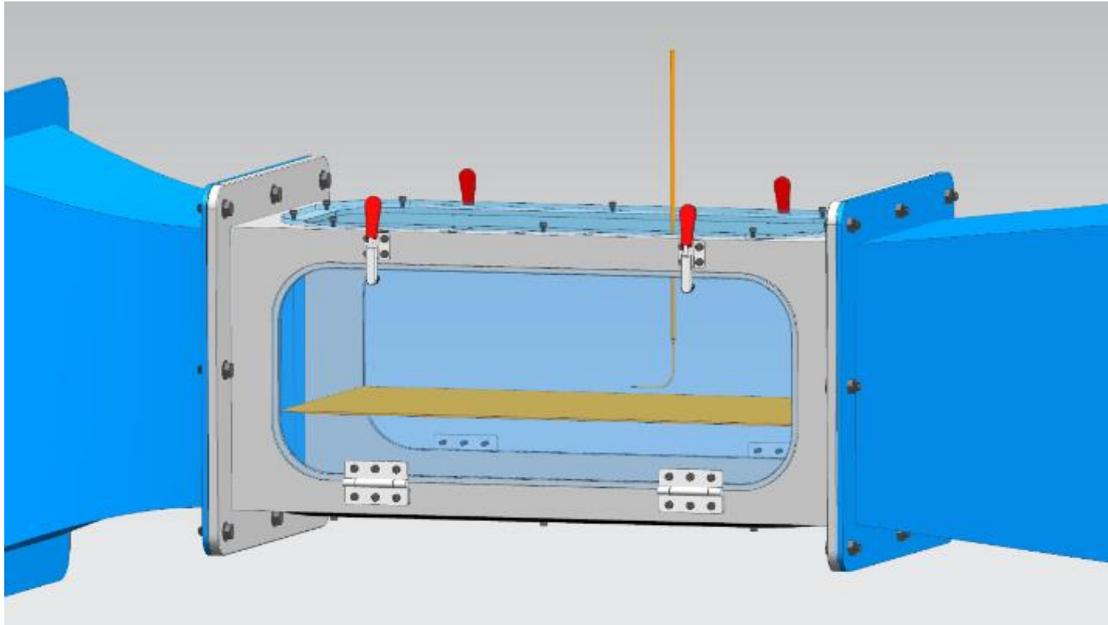


图 2 实验段视图

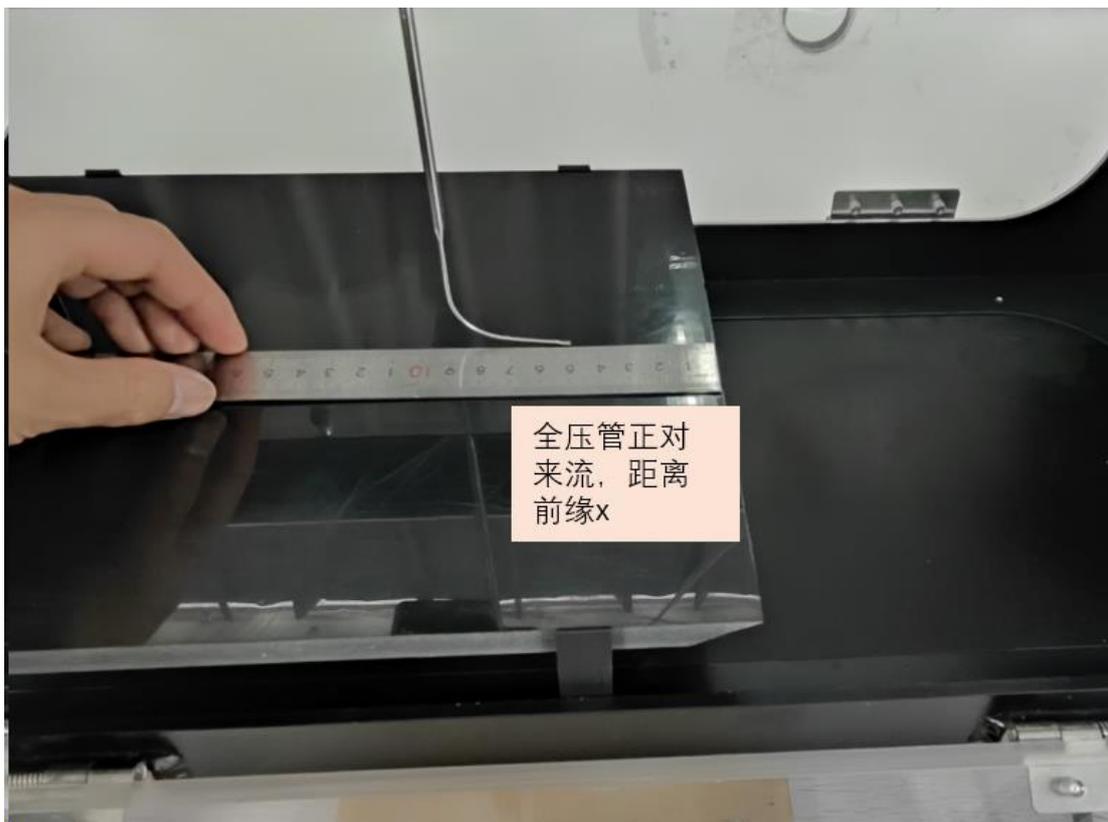


图 3 全压管初始位置图片

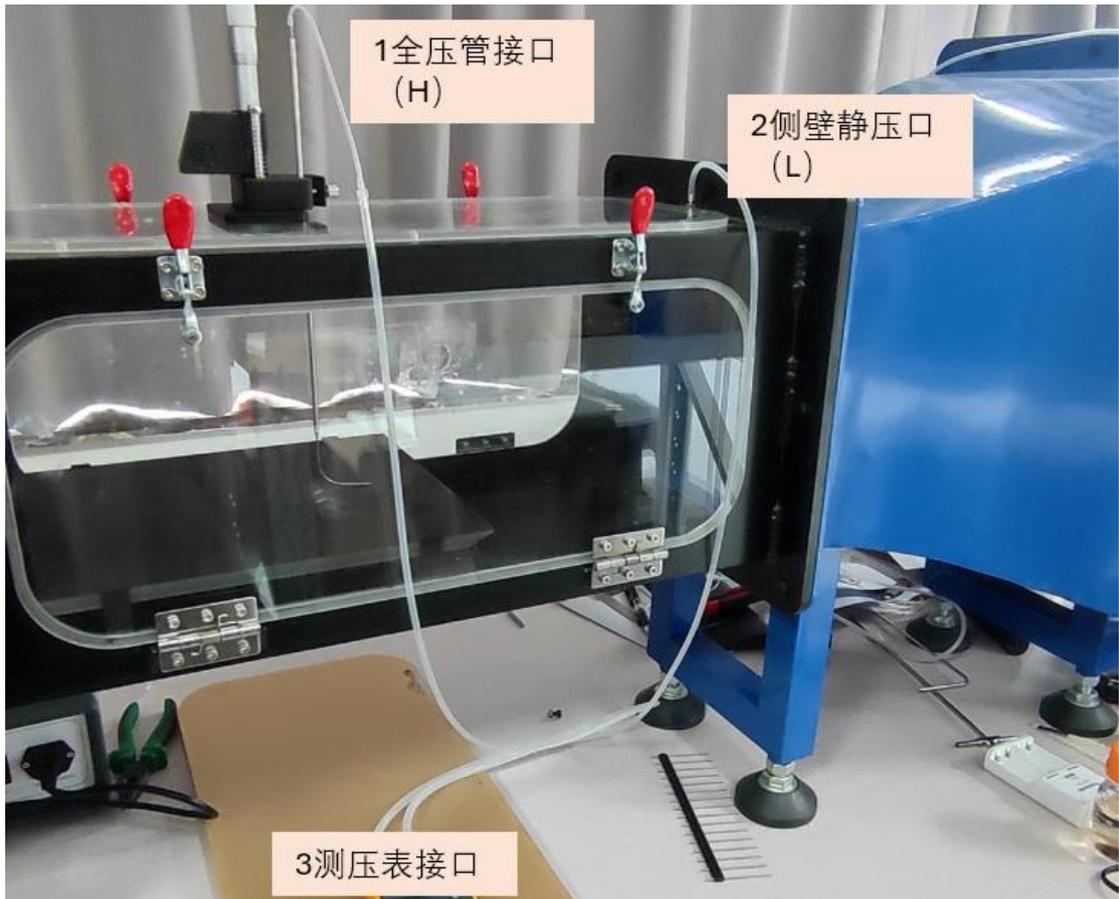


图 4 全压管接到测压表 H 端，侧壁接到测压表 L 端



图 5 水平移动平板，获得不同  $R_{ex}$ ，如果位置受限，考虑使用不同全压管孔位

#### 四、数据处理：

1. 根据温度查询（或计算）粘性系数 $\nu$
2. 根据温度计算密度 $\rho$
3. 每一个位置  $x$  做如下计算
  - a. 使用来流速度  $U$  与测量位置  $x$ ，根据公式[2]计算雷诺数  $Re_x$
  - b. 使用公式[4]，利用压差计算速度  $u$  及  $u/U$
  - c. 根据  $u/U$  分布，识别边界层厚度 $\delta$
  - d. 计算  $y/\delta$
  - e. 绘制各个  $x$  位置  $y/\delta \sim u/U$ 图
4. 使用所有  $x$  位置的 $\delta/x$  与 $Re_x$ 数据绘图
5. 使用所有  $x$  位置的 $\delta/x$  与 $Re_x^{-0.5}$  数据绘图，并进行线性拟合，获得拟合参数

#### 六、实验数据

平板	光滑				
风机频率	26.31	Hz			
来流速度	10	m/s	空气密度 $\rho=P/RT$	1.247088	kg/m <sup>3</sup>
室温：	23.6	°C	动力粘滞系数 $\nu$	1.42E-05	m <sup>2</sup> /s
距离前缘 $x$	50	mm	雷诺数 $Re=Ux/\nu$	35102.5	
边界层厚度 $\delta$ :	8	mm	$\delta/x$	0.16	
竖直位置 $y$ , mm	压差 $\Delta P$ , Pa	速度 $u$ , m/s	$u/U$	$y/\delta$	
1	3	2.24	0.22	0.13	
2	7	3.43	0.34	0.25	
3	13	4.67	0.47	0.38	
4	21	5.93	0.59	0.50	
5	30	7.09	0.71	0.63	
6	41	8.29	0.83	0.75	
7	50	9.16	0.92	0.88	
8	57	9.78	0.98	1.00	
9	60	10.03	1.00	1.13	
10	62	10.20	1.02	1.25	
11	63	10.28	1.03	1.38	
12	64	10.36	1.04	1.50	
13	64	10.36	1.04	1.63	
45	64	10.36	1.04	5.63	

平板	光滑				
风机频率	26.1	Hz			
来流速度	10	m/s	空气密度 $\rho=P/RT$	1.19111	kg/m <sup>3</sup>
室温:	23.3	oC	动力粘滞系数 $\nu$	1.54E-05	m <sup>2</sup> /s
距离前缘 x	100	mm	雷诺数 $Re=Ux/\nu$	64917.53	
边界层厚度 $\delta$ :	12	mm	$\delta/x$	0.12	
竖直位置 y, mm	压差 DP, Pa	速度 u, m/s	u/U	y/ $\delta$	
1	17	5.34	0.53	0.08	
3	25	6.47	0.65	0.23	
5	34	7.55	0.76	0.38	
7	42	8.39	0.84	0.54	
9	51	9.25	0.92	0.69	
10	54	9.52	0.95	0.77	
11	57	9.78	0.98	0.85	
12	60	10.03	1.00	0.92	
13	62	10.20	1.02	1.00	
14	63	10.28	1.03	1.08	
15	64	10.36	1.04	1.15	
16	64	10.36	1.04	1.23	
17	64	10.36	1.04	1.31	
45	64	10.36	1.04	3.46	

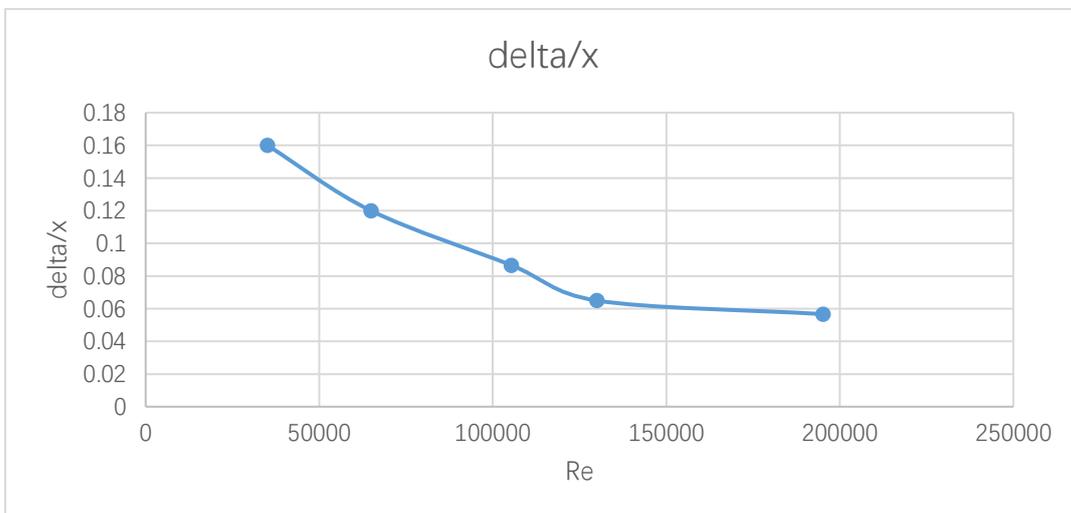
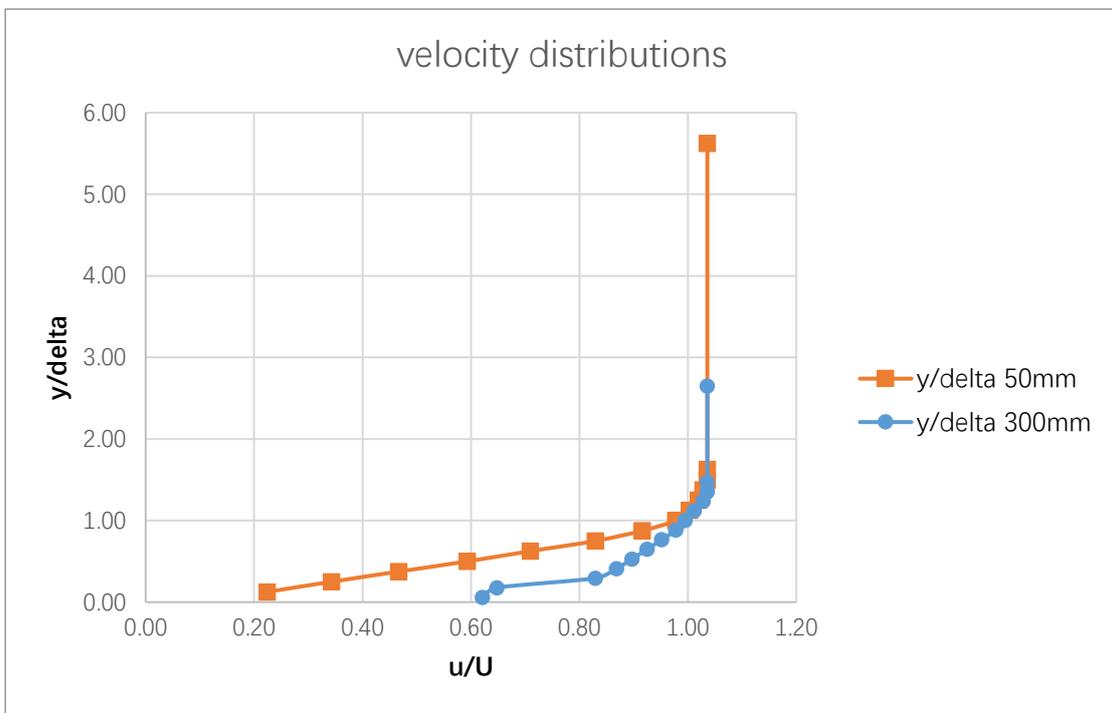
平板	光滑				
风机频率	26.06	Hz			
来流速度	10	m/s	空气密度 $\rho=P/RT$	1.247088	kg/m <sup>3</sup>
室温:	23.2	oC	动力粘滞系数 $\nu$	1.42E-05	m <sup>2</sup> /s
距离前缘 x	150	mm	雷诺数 $Re=Ux/\nu$	105307.5	
边界层厚度 $\delta$ :	13	mm	$\delta/x$	0.086667	
竖直位置 y, mm	压差 DP, Pa	速度 u, m/s	u/U	y/ $\delta$	
1	22	6.07	0.61	0.08	
3	33	7.44	0.74	0.23	
5	39	8.09	0.81	0.38	
7	44	8.59	0.86	0.54	
9	49	9.06	0.91	0.69	
11	54	9.52	0.95	0.85	
13	58	9.86	0.99	1.00	
15	61	10.11	1.01	1.15	
17	63	10.28	1.03	1.31	
19	64	10.36	1.04	1.46	
21	65	10.44	1.04	1.62	
23	65	10.44	1.04	1.77	

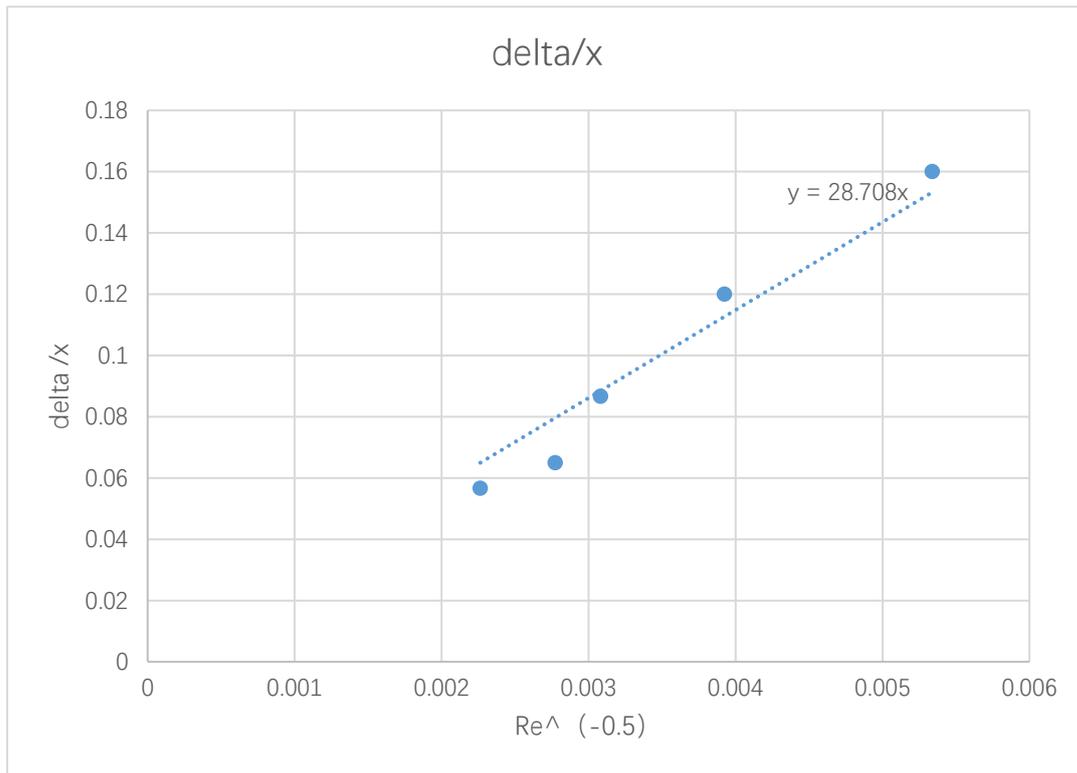
25	65	10.44	1.04	1.92	
45	65	10.44	1.04	3.46	

平板	光滑				
风机频率	26.06	Hz			
来流速度	10	m/s	空气密度 $\rho=P/RT$	1.191914	kg/m <sup>3</sup>
室温:	23.1	oC	动力粘滞系数 $\nu$	1.54E-05	m <sup>2</sup> /s
距离前缘 x	200	mm	雷诺数 $Re=Ux/\nu$	129984.5	
边界层厚度 $\delta$ :	13	mm	$\delta/x$	0.065	
竖直位置 y, mm	压差 DP, Pa	速度 u, m/s	u/U	y/ $\delta$	
1	25	6.47	0.65	0.06	
3	36	7.77	0.78	0.18	
5	42	8.39	0.84	0.29	
7	46	8.78	0.88	0.41	
9	51	9.25	0.92	0.53	
11	55	9.60	0.96	0.65	
13	58	9.86	0.99	0.76	
15	61	10.11	1.01	0.88	
17	63	10.28	1.03	1.00	
19	64	10.36	1.04	1.12	
21	65	10.44	1.04	1.24	
23	65	10.44	1.04	1.35	
25	65	10.44	1.04	1.47	
45	65	10.44	1.04	2.65	

平板	光滑				
风机频率	26.06	Hz			
来流速度 U	10	m/s	空气密度 $\rho=P/RT$	1.1927199	kg/m <sup>3</sup>
室温	22.9	oC	动力粘滞系数 $\nu$	1.537E-05	m <sup>2</sup> /s
距离前缘 x	300	mm	雷诺数 $Re=Ux/\nu$	195201.29	
边界层厚度 $\delta$ :	17	mm	$\delta/x$	0.0566667	
竖直位置 y, mm	压差 DP, Pa	速度 u, m/s	u/U	y/ $\delta$	
1	23	6.21	0.62	0.06	
3	25	6.47	0.65	0.18	
5	41	8.29	0.83	0.29	
7	45	8.69	0.87	0.41	

9	48	8.97	0.90	0.53	
11	51	9.25	0.92	0.65	
13	54	9.52	0.95	0.76	
15	57	9.78	0.98	0.88	
17	59	9.95	0.99	1.00	
19	61	10.11	1.01	1.12	
21	63	10.28	1.03	1.24	
23	64	10.36	1.04	1.35	
25	64	10.36	1.04	1.47	
45	64	10.36	1.04	2.65	





讨论：

实验数据表明边界层发展规律为

$$\frac{\delta}{x} = 28.7 Re_x^{-0.5}$$

实验数据证明

$$\frac{\delta}{x} \propto Re_x^{-0.5}$$

需要指出的是，本次实验结果测得的边界层厚度约为理论的 5 倍，这很可能是因为来流与平板之间存在一个较小的迎角（水平尺难以分辨的迎角）







