

《空气动力学实验》

D7 光滑与粗糙圆球模型阻力

班 级 _____

姓 名 _____

实验日期 _____

指导教师 _____

年 月

目录

1 实验内容与目的:	1
2 原理:	1
3 设备介绍.....	2
4 准备工作.....	5
4 实验过程:	7
5. 实验数据.....	8
附录 A: 变频器设置方法.....	13
附录 B: 软件操作方法.....	14
附录 C 标定天平.....	17
附录 D: 分析程.....	18
附录 E: 模型安装方式.....	21
附录 F 数据表格:	22

1 实验内容与目的:

- 测量并研究圆球阻力与雷诺数的关系

圆球的阻力在高雷诺数会出现下降的趋势。这一现象与边界层从层流边界层转换为湍流边界层有关。转换为湍流边界层后，大尺度湍流结构会增加掺混能力，促进具有较高动量的流体进入回流区，进而缩小了分离区，增加了分离区压强，降低了形状阻力。

- 研究粗糙表面对阻力的影响

相对于光滑球，粗糙表面球体的边界层会在较小的雷诺数下出现。在一定雷诺数下，粗糙球的阻力会低于相同雷诺数下的光滑球的阻力。本次实验将对这一现象进行验证

2 原理:

- 球体阻力

本次实验，我们使用无量纲数阻力系数 C_D 与雷诺数 Re 来表示阻力与流速的关系。

球的阻力系数

$$C_D = \frac{2D}{\rho U^2 A}$$

其中阻力 D ，单位 N，来流速度 U ，单位 m/s，球体的迎风截面积 $A = \frac{\pi d^2}{4}$ ， d 为球体直径，本次实验使用模型 d 为 5cm。

雷诺数

$$Re = \frac{Ud}{\nu}$$

这里 ν 为空气的动力粘滞系数，单位 $\frac{m^2}{s}$ ，随温度发生变化，可通过查表插值获得（大部分流体力学书籍均附流体性质表，也可以通过网络查询 air properties 获得）

- 圆球边界层转捩与分离

当雷诺数较小的时候圆球表面的边界层初始状态为层流边界层。层流边界层条件下，因为掺混能力较弱，圆球尾流区域通常较大。当边界层转捩为湍流边界层后，掺混能力明显增强，尾流区减小，阻力系数大大降低。粗糙表面的球体，转捩发生的雷诺数通常较低（相对于光滑球而言）。本次实验课我们直接对比光滑和粗糙球的阻力。

3 设备介绍

本次实验使用的主要设备包括：

a. WT03 实验风洞

航华 WT03 风洞是专门为空气动力学、流体力学实验课程设计的小型桌面风洞。风洞为直流闭口式（埃菲尔式）。入口设钟型收口、整流蜂窝、两层整流网（见图 1）。收缩段收缩面积比 4: 1。实验段两侧壁可开启，方便使用。WT03 风洞湍流度低、稳定性好，不仅可以满足低速空气动力学、流体力学教学需求，可用于圆柱扰流、背向台阶、烟线流场显示、PIV 流场测量、翼型升阻力测量、飞行器模型动稳定测试等试验。

b. DAQ16 数据采集仪

航华 DAQ16 数据采集仪把传感器输出的电压信号转换成计算机可记录的数字信号（见图 2）。该系列数采仪集高精度（16 位测量精度）、高采样频率

(250kS/s)、良好可扩展性（支持外部触发，可实现多个采集仪同步测量）等特点于一身。支持多种编程软件（Labview, Matlab, Python 等），可与航华系列仪器形成可靠搭配。DAQ 系列采集设备内置高精度压强传感器（ $\pm 2.1\text{kPa}$ 量程，精度 $\pm 2.0\text{Pa}$ ），可直接配合航华 WT 系列风洞或毕托管测量风速。

c. FB02 升、阻力天平及模型

航华 FB02 测力天平是专门针对空气动力学实验加教学设计的二分量（升、阻力）盒式测力天平（见图 3）。具有测量稳定、精度合理、重复性好等特点。手动调节迎角，迎角范围 -15 度到 15 度之间，定位精度 ± 0.5 度。FB02 可以用于测量翼型升阻力，圆柱、方柱模型气动力，以及汽车、飞机等模型的阻力。• 钝体模型 BBM1（包括投影面为 5 厘米直径圆形的光滑、粗糙圆球各一个、半球一个、流线型纺锤体一个，本次实验使用其中的光滑及粗糙球）

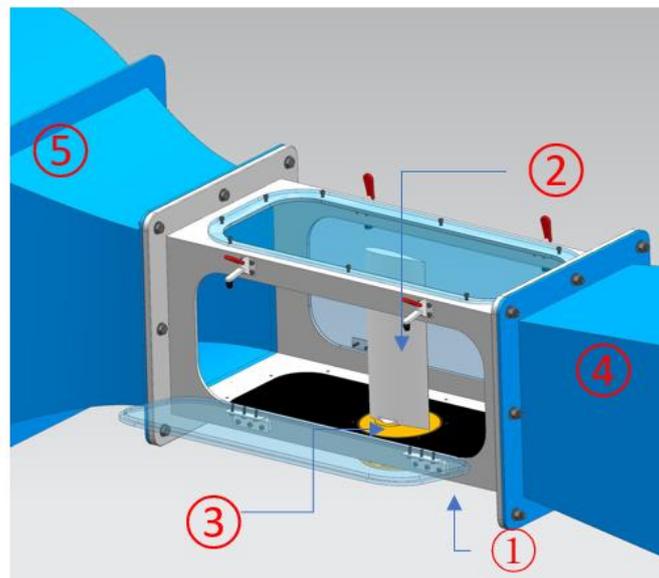


图 1 安装在风洞实验段内的 FB02 升、阻力天平与 NACA0018（航华 AM1）实验模型： 1 实验段； 2 实验模型； 3 天平； 4 扩散段； 5 收缩段



图 2 航华 DAQ16 数采仪照片



图 3 实验模型

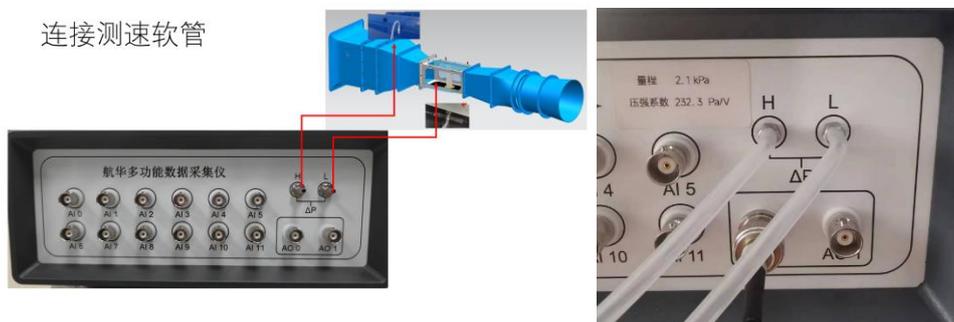


图 4 DAQ16 数采仪内置压强传感器连接图片

4 准备工作

准备工作包括如下几个关键步骤：

1. 测压管

将压力传感器两端连接在风洞收缩段两侧的测压管上；收缩段前的测压管为高压，连接在压力传感器（H）接口，收缩段后的测压管为低压，接（L）接口（图 4）；

2. 电源

连接风洞变频器电源；连接 DAQ16 数采仪电源线，打开数采仪开关。

3. 数据线

连接 DAQ16 数采仪数据线（TypeC-USB）到电脑 USB 插口（图 5）。连接后，检查电脑“设备管理器”下是否正确出现“NI Data Acquisition Devices”。点击“NI Data Acquisition Devices”后，是否正确出现“USB-6210”（见图 6）



图 5 DAQ16 数采仪背板及 1 数据线、2 温度传感器、3 天平插口照片



图 6 正确安装 DAQmx 驱动后，DAQ16 数采仪设备显示在设备管理器中

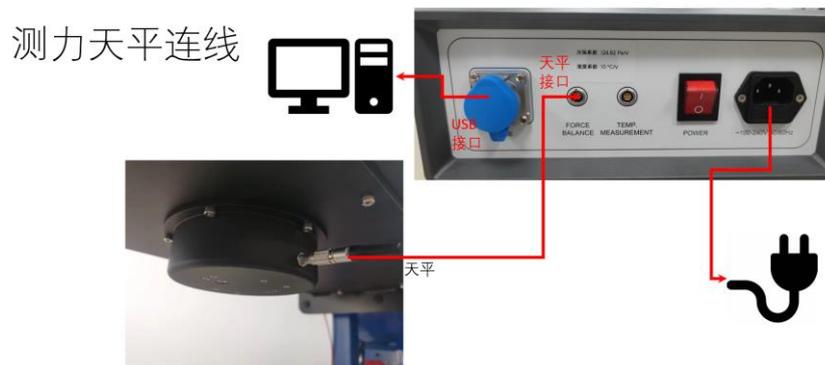


图 7 连接天平数据线

4. 将航华 TS02 温度传感器连入 DAQ16 数采仪背板温度传感器插孔 (图 5)
5. 使用数据线连接 FB02 天平与 DAQ16 数采仪背板天平插孔 (图 5 与图 7)
6. 设置变频器

参照附录 A 设置变频器。其中 P003 参数为 2

7. 运行计算机软件

参照附录 B 运行风洞控制软件。

8. 标定天平

请参照附录 C 对天平进行标定。上次标定以后，若无大幅度环境温度变化、无拆装、无撞击等，可不必再标定。

4 实验过程:

- 1) 记录风洞收缩段前后尺寸、实验段尺寸、模型直径;
收缩段前尺寸: 50cm × 50cm
收缩段后尺寸: 25cm × 25cm
模型直径: 5cm
- 2) 接入风洞电源, 设置变频器至“自动”模式 (参照附录 A)
- 3) 运行风洞控制软件
- 4) 安装光滑圆球模型, 参照附录 E 模型安装方法
- 5) 在计算机软件上为传感器归零, 请确保此时风洞没有运行
- 6) 软件设置采集组数至 10 (或者根据需求设置其他数字);
- 7) 软件设置风洞输出功率至 0.3 (运行功率为最大功率的 30%), 点击“运行风洞”按钮, 风洞开始运行;
- 8) 当风速稳定后, 点击“开始采集”, 软件采集 10 组数据 (包括收缩段前后压差、模型升、阻力, 本次实验使用球模型, 升力约为 0), 并逐一输出均值;
- 9) 依次调节功率至 0.5, 0.7, 0.9。重复步骤 5,6
- 10) 根据收缩段面积比 (本次实验为 4:1) 和收缩段前后压差, 利用伯努利方程计算流速, 雷诺数;
- 11) 参照附录 D 附 Matlab 程序处理数据, 计算阻力系数
- 12) 绘制雷诺数 vs 阻力系数曲线曲线
- 13) 安装粗糙球模型,
- 14) 第 4-12 步骤

5. 实验数据

光滑圆球；风机输出功率：0.3

	压差, Pa	风速, m/s	温度, C	C _l	C _d	L, N	D, N
1	18.894	5.844	27.371	0.144	0.395	0.005	0.015
2	19.103	5.877	27.372	0.091	0.388	0.003	0.015
3	19.173	5.887	27.372	0.006	0.39	0	0.015
4	18.765	5.824	27.37	0.108	0.393	0.004	0.014
5	18.665	5.809	27.367	0.083	0.395	0.003	0.014
6	18.817	5.833	27.374	0.155	0.385	0.006	0.014
7	18.788	5.828	27.375	0.141	0.393	0.005	0.014
8	18.943	5.852	27.371	0.014	0.381	0.001	0.014
9	18.845	5.837	27.368	0.111	0.38	0.004	0.014
10	18.878	5.842	27.368	0.164	0.393	0.006	0.015

粗糙圆球；风机输出：0.3

	压差, Pa	风速, m/s	温度, C	C _l	C _d	L, N	D, N
1	18.909	5.845	27.168	0.122	0.203	0.005	0.008
2	18.851	5.836	27.166	0.118	0.212	0.004	0.008
3	18.679	5.809	27.166	0.068	0.203	0.003	0.007
4	18.78	5.825	27.171	0.202	0.208	0.007	0.008
5	18.863	5.838	27.172	0.147	0.204	0.005	0.008
6	19.13	5.879	27.168	0.119	0.206	0.004	0.008

7	19.027	5.863	27.166	0.078	0.219	0.003	0.008
8	19.23	5.894	27.17	0.109	0.214	0.004	0.008
9	18.922	5.847	27.168	0.163	0.202	0.006	0.007
10	18.971	5.854	27.168	0.104	0.204	0.004	0.008

光滑圆球；风机输出：0.5

	压差, Pa	风速, m/s	温度, C	C_l	C_d	L, N	D, N
1	56.332	10.091	27.345	0.002	0.298	0	0.033
2	56.068	10.067	27.341	0.198	0.301	0.022	0.033
3	56.091	10.069	27.343	0.147	0.296	0.016	0.033
4	56.503	10.107	27.395	0.133	0.298	0.015	0.033
5	56.552	10.112	27.401	0.144	0.303	0.016	0.034
6	56.516	10.108	27.372	0.125	0.3	0.014	0.033
7	56.907	10.143	27.36	0.12	0.299	0.013	0.033
8	55.335	10.001	27.344	0.131	0.293	0.014	0.032
9	55.959	10.058	27.34	0.028	0.292	0.003	0.032
10	56.669	10.121	27.341	0.123	0.295	0.014	0.033

粗糙圆球；风机输出：0.5

	压差, Pa	风速, m/s	温度, C	C_l	C_d	L, N	D, N
1	55.653	10.027	27.14	0.151	0.249	0.016	0.027
2	56.265	10.082	27.14	0.1	0.249	0.011	0.027
3	55.458	10.009	27.141	0.035	0.247	0.004	0.027
4	55.875	10.047	27.139	0.162	0.246	0.018	0.027
5	55.89	10.048	27.14	0.127	0.246	0.014	0.027
6	56.023	10.06	27.135	0.086	0.25	0.009	0.027

7	56.537	10.106	27.139	0.111	0.244	0.012	0.027
8	55.484	10.012	27.143	0.07	0.246	0.008	0.027
9	56.186	10.075	27.139	0.047	0.248	0.005	0.027
10	56.365	10.091	27.141	0.202	0.252	0.022	0.028

光滑圆球；风机输出：0.7

	压差, Pa	风速, m/s	温度, C	C_l	C_d	L, N	D, N
1	110.193	14.114	27.343	0.052	0.287	0.011	0.062
2	110.916	14.16	27.343	0.068	0.288	0.015	0.063
3	111.229	14.18	27.344	0.031	0.288	0.007	0.063
4	110.561	14.137	27.344	0.089	0.285	0.019	0.062
5	110.128	14.109	27.344	0.057	0.284	0.012	0.061
6	110.388	14.126	27.343	0.11	0.289	0.024	0.063
7	110.892	14.158	27.345	0.05	0.291	0.011	0.063
8	110.5	14.133	27.343	0.036	0.284	0.008	0.062
9	109.708	14.082	27.342	0.014	0.285	0.003	0.061
10	110.126	14.109	27.344	0.006	0.288	0.001	0.062

粗糙圆球；风机输出：0.7

	压差, Pa	风速, m/s	温度, C	C_l	C_d	L, N	D, N
1	109.38	14.057	27.17	-0.231	0.195	-0.049	0.042
2	109.905	14.091	27.167	-0.219	0.197	-0.047	0.042
3	109.546	14.068	27.167	-0.216	0.195	-0.047	0.042
4	109.474	14.063	27.166	-0.229	0.2	-0.049	0.043
5	109.83	14.086	27.166	-0.218	0.2	-0.047	0.043
6	110.353	14.12	27.166	-0.226	0.196	-0.049	0.043

7	110.834	14.15	27.168	-0.237	0.198	-0.052	0.043
8	109.525	14.067	27.171	-0.225	0.198	-0.048	0.042
9	108.556	14.004	27.165	-0.235	0.197	-0.05	0.042
10	110.375	14.121	27.168	-0.226	0.198	-0.049	0.043

光滑圆球；风机输出：0.9

	压差, Pa	风速, m/s	温度, C	C_l	C_d	L, N	D, N
1	174.73	17.772	27.352	0.008	0.306	0.003	0.105
2	176.414	17.858	27.351	0.01	0.307	0.004	0.106
3	175.747	17.824	27.353	-0.018	0.304	-0.006	0.105
4	177.01	17.888	27.35	0.034	0.304	0.012	0.106
5	174.472	17.759	27.352	0.015	0.305	0.005	0.104
6	175.112	17.792	27.349	-0.011	0.304	-0.004	0.105
7	175.911	17.832	27.35	0.036	0.307	0.012	0.106
8	177.462	17.911	27.35	-0.028	0.307	-0.01	0.107
9	176.906	17.883	27.349	-0.016	0.303	-0.006	0.105
10	174.187	17.745	27.349	0.02	0.304	0.007	0.104

粗糙圆球；风机输出：0.9

	压差, Pa		风速, m/s	温度, C	C_l	C_d	L, N	D, N
1	177.214	0	17.892	27.142	-0.108	0.161	-0.038	0.056
2	177.208	0	17.892	27.145	-0.103	0.16	-0.036	0.056
3	174.988	0	17.779	27.143	-0.101	0.162	-0.035	0.056
4	174.384	0	17.749	27.142	-0.098	0.165	-0.034	0.056
5	177.851	0	17.924	27.143	-0.106	0.16	-0.037	0.056
6	177.554	0	17.909	27.135	-0.097	0.161	-0.034	0.056
7	177.762	0	17.919	27.114	-0.092	0.165	-0.032	0.058

8	176.664	0	17.864	27.115	-0.086	0.167	-0.03	0.058
9	177.83	0	17.923	27.121	-0.092	0.168	-0.032	0.059
10	174.588	0	17.758	27.116	-0.092	0.169	-0.032	0.058

附录 A：变频器设置方法

将插头插入 220V 插座内。风机最大电流 10A，插座需要接地，以免漏电。推荐使用带开关插座。

	变频器工作状态下，长按PROG键（左上）进入设置状态，P001闪动
	使用上、下键，调至P-003参数，按Enter进入设置该值
	调节P-003的值至002，按Enter输入。变频器进入“自动”模式
	使用上下键调节P-003的值至001。变频器进入手动模式
	长按PROG键，变频器从设置状态返回工作状态
	按Run键，左下角绿灯闪烁。系统已经准备好。

附录 B: 软件操作方法

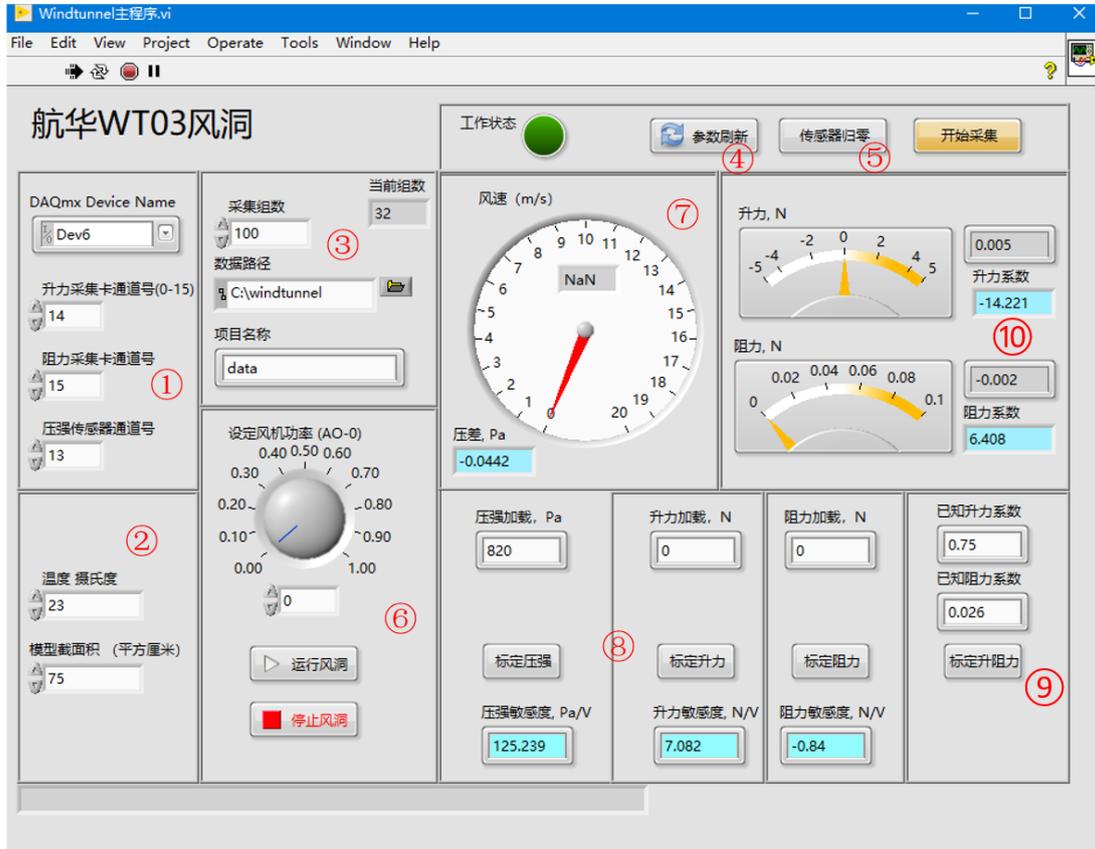


图 8 风洞控制程序前面板

电脑软件可以操作航华 DAQ16 数采仪。使用方法如下。

1. 首先使用 USB 数据电缆连接航华 DAQ16 数采仪到电脑
2. 使用测压管连接风洞收缩段前后测压孔到 DAQ16 数采仪压强传感器口：H 接收收缩段入口，L 接实验段入口
3. 将天平数据线与 DAQ 数采仪相连

完成上述连接后，运行桌面 WindTunnel 软件，进入上图界面，界面内各个功能区如下

1. 设置数据采集卡参数，点击‘Device Name’选取卡的名称。比如“Dev1”。如果有多个采集卡，请拔掉 DAQ16 数采仪，观察那个名称消失，以确定 DAQ16 对应的设备号。选择争取设备号以后，填入压强传感器、升、阻力天平对应的采集通道好，分别是 13,14,15;
2. 填入当前室温与模型参考面积。比如，圆柱实验请输入迎风面积（直径*长度），

- 球体输入 ($3.14 \times R^2$)，翼型实验输入翼面积 (展长*弦长)
3. 输入采集数据参数，包括：采样组数 (每组数据将独立存储成一个数据文档)；数据文件存储的位置；项目名称 (数据文档名合适为：项目名称.txt)
 4. 输入参数以后，点击“刷新”，参数将存盘。当程序再次执行后，参数将自动被读取。每次修改参数后，都需要刷新，这样可保证程序使用正确参数运行
 5. 点击“归零”按钮为压强传感器与天平归零。注意，归零一定要在没有风速的情况下，归零对以上传感器非常重要 (可以不经常标定，但一定要经常归零)
 6. 设定风洞功率。设定风速有两种方式：直接调节变频器旋钮，或通过调节此区域内的电子旋钮设定输出。两种模式需要在变频器上进行设定：如果设定为手动模式，仅接受手动调节。反之亦然。当设定为电脑调节以后，需将变频器输入端与 DAQ16 数采前面板的模拟输出 AO-0 端口相连。用户调节旋钮 (数字对应 0-100% 输出功率) 后点击“风洞运行”按钮。AO-0 端口发送 0-5V 控制信号给变频器，驱动变频器在不同转速下工作
 7. 压强传感器测量的收缩段前后压差及对应的实验段速度显示在此区域
 8. 在此区域内可对压强传感器及升阻力天平进行标定。首先对相应传感器加载已知大小的载荷，点击相应“标定”按钮以后，系统提示输入管理员口令 (口令为数字“999”)。输入后，系统读取传感器输出电压，并计算相应敏感度。对升阻力天平的标定可采用两种方法：1 使用砝码、张线直接加载力，或 2 使用一个标准的对称翼型，并设定迎角 (利用手册给出的相应升阻力) 直接对传感器进行标定。
 9. 点击右上角“开始测量”，进行测量。“工作状态”显示灯亮，3 区“当前组数”显示当前的组数，当当前组数等于设定的“采样组数”时，系统停止采集工作。“工作状态”显示灯关闭。

另外，左上角  分别对应着“运行”，“连续运行”，“停止”，“暂停”操作

数据储存

*data - 记事本							
文件(F)	编辑(E)	格式(O)	查看(V)	帮助(H)			
0.439	0.000	0.857	0.000	-2.066	3.300	-0.022	0.036
0.450	0.000	0.868	0.000	-1.981	3.220	-0.022	0.036
0.448	0.000	0.866	0.000	-2.005	3.233	-0.022	0.036
0.447	0.000	0.865	0.000	-2.024	3.243	-0.022	0.035
0.445	0.000	0.863	0.000	-2.038	3.256	-0.022	0.036
0.446	0.000	0.864	0.000	-2.035	3.252	-0.022	0.036

每组数据的统计结果被记录在 3 区指定的目录及文件名（项目名）。每行代表一个数据组的结果，每行 8 个数字，分别代表

1. 收缩段前后压差, Pa
2. Re 雷诺数
3. 风速, m/s
4. 温度, 摄氏度
5. 升力系数
6. 阻力系数
7. 升力, N
8. 阻力, N

如果用户不修改“项目名”，数据会持续添加进该项目名对应的数据文件。

附录 C 标定天平

我们建议使用一支 NACA0018 翼型，将其安置在 10 度迎角，并在 Re 约为 66,000 条件下 ($U=10\text{m/s}$, $c=0.1\text{m}$) 测量升阻力，对天平进行标定。根据 XFOIL 软件计算，NACA0018 翼型在 10 度迎角条件下升力系数 $C_L=1.03$ ，阻力系数 $C_D=0.04$ 。具体标定过程如下：

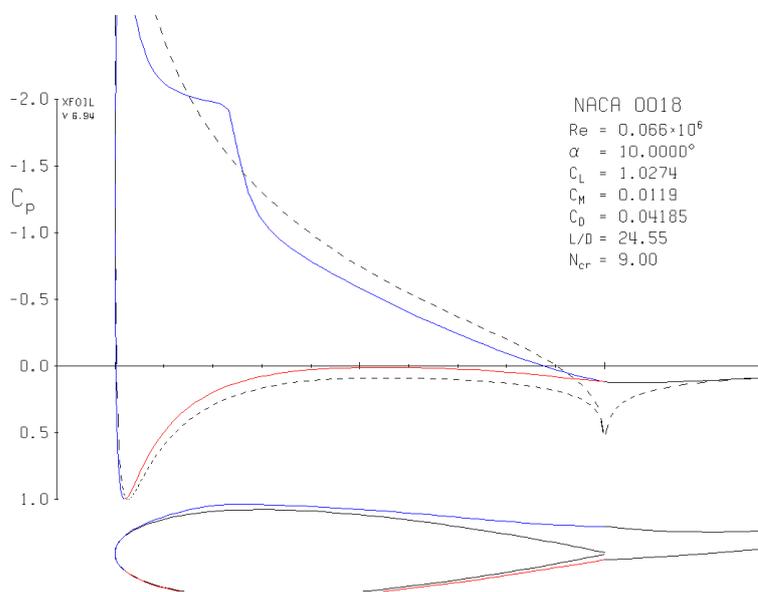


图 9 XFOIL 软件给出的 $Re=66000$ ，迎角 10 度条件下 NACA 的升阻力系数

1. 安装翼型模型，基本流程与本文附录 E 相似。取出锥形套筒、通过螺纹将模型拧入套筒、将套筒放入天平、调整角度至 10 度、轻轻按套筒，保证套筒落位。
2. 运行软件，具体见本文附录 B
3. 在软件上点击“传感器归零”，此时风洞需停止运转。归零结束后，进入下一步
4. “风机输出功率”设为 0.5，点击“运行风洞”按钮
5. 右下方“已知升力系数”填入 1.03，“已知阻力系数”填入 0.04。点击“标定升阻力”，输入管理员密码“999”。标定完成

附录 D: 分析程

```
d=0.05; %m
A=3.14*d^2/4;
sys_err=0.002; %balance, system error, less than 0.002N
dir={'smoothsphere',
    'roughsphere', 'streamlinesphere', 'plate'};
mycolor=['brkc'];

f1=figure,
for j=1:2
    k=0;
    for i=[3:1:10]
        k=k+1;
        data=load([dir{j} '_' num2str(i) '.txt']);
        mean_val=mean(data);
        %Delta P; Re; U; T; Cl; Cd; L; D
        std_val=std(data);
        U=mean_val(3);
        T=mean_val(4);
        sys_err2=sys_err/(0.5*air_den(T)*U^2)/A;
        Re(k)=U*d/nu(T);
        Cd(k)=mean_val(6);
        std_Cd(k)=std_val(6);
        rand_err=std_Cd(k)*2;
        err(k)=sqrt(sys_err2.^2+rand_err.^2);
    end

    figure(f1),
```

```
semilogx(Re, Cd, ['o-' mycolor(j)]); hold on  
end  
  
grid on;  
legend('Smooth', 'Rough', 'location', 'Northwest')  
xlabel('Re')  
ylabel('Cd')
```

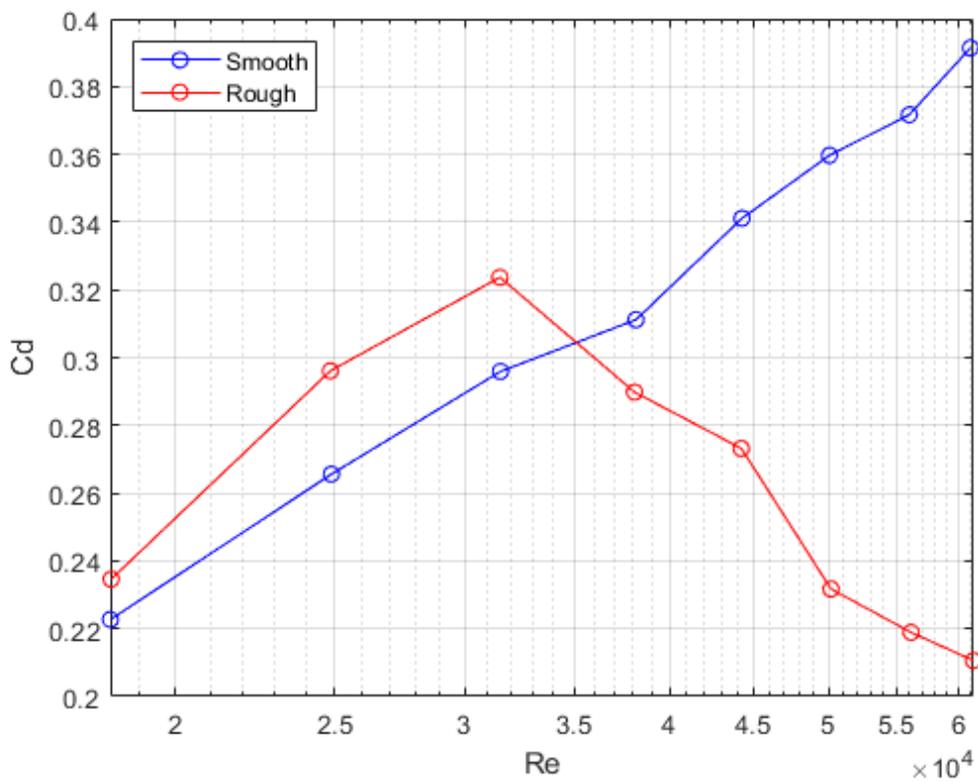


图 10 光滑球和粗糙球在不同雷诺数下的阻力系数对比图

附录 E: 模型安装方式

模型安装分为如下几步:

1. 将图 9 零件 a (锥形套筒) 从天平中取出 (需先将天平下方固定用螺栓取下, 见图 10 左侧, 然后向上拔出)。本次实验是低速实验, 锥形套筒周围的摩擦力足够大, 套筒不会转动, 所以不需要使用天平固定螺栓
2. 将零件 b (模型支杆) 顺时针旋转拧入锥形套筒内部, 至上表面齐平
3. 将零件 c (球模型) 顺时针旋转拧入支杆顶部。注意, 拧至不转即可, 不要使劲。
4. 将组装好的零件 a-c 放入天平, 轻轻旋转, 调整方向。然后, 轻轻下压。注意, 使劲掰或者击打天平有可能损坏力传感器

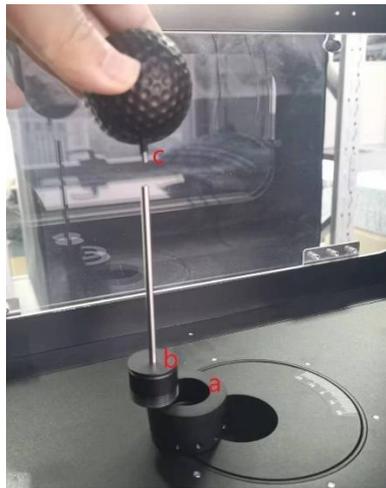


图 11 圆球模型安装图片。

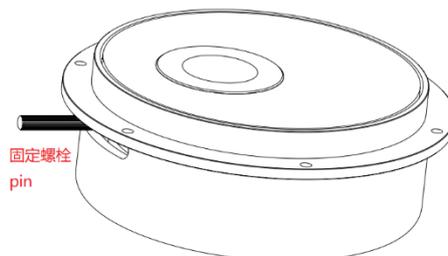


图 12 航华 FB02 天平立体图

附录 F 数据表格:

球: 光滑/粗糙; 风机输出功率: _____

	压差, Pa	风速, m/s	温度, ° C	升力 L, N	阻力 D, N	升力系 数 C_L	阻力系 数 C_D
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

球: 光滑/粗糙; 风机输出功率: _____

	压差, Pa	风速, m/s	温度, ° C	升力 L, N	阻力 D, N	升力系 数 C_L	阻力系 数 C_D
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

球: 光滑/粗糙; 风机输出功率: _____

	压差, Pa	风速, m/s	温度, ° C	升力 L, N	阻力 D, N	升力系 数 C_l	阻力系 数 C_D
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

球: 光滑/粗糙; 风机输出功率: _____

	压差, Pa	风速, m/s	温度, ° C	升力 L, N	阻力 D, N	升力系 数 C_l	阻力系 数 C_D
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							