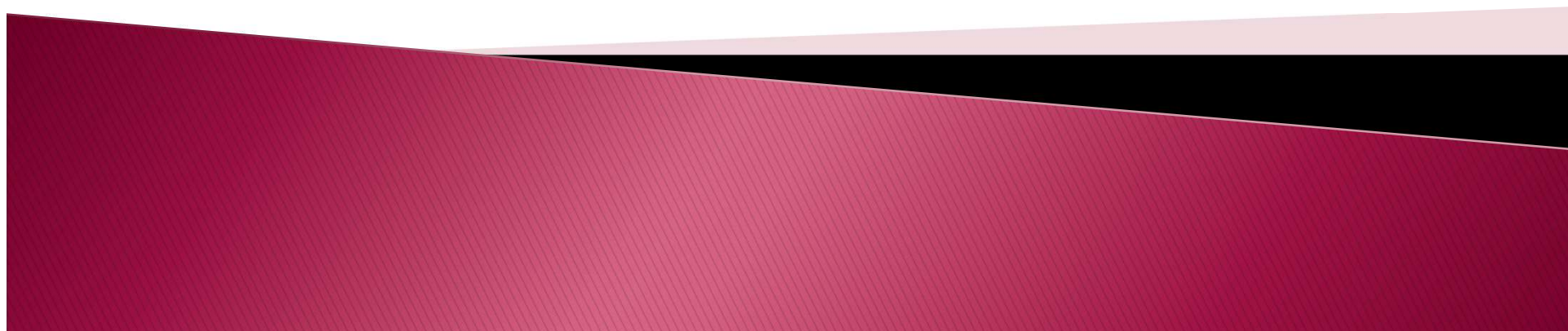


华北高校物理课程线上教学研讨会

物理实验线上教学的 实践与思考

北京大学基础物理实验教学中心 李智



面对疫情，积极应对

▶ 实验课怎么应对

数据处理？ 虚拟仿真？ 居家实验？



实验课的核心价值：

- 动手实践
- 处理复杂实际情况

居家实验

- ▶ 就地取材，自己动手。
- ▶ 利用生活中常用的测量工具(手机、电子秤、尺子等)，不提倡高端专门仪器
- ▶ 完整的实验过程：原理和设计、系统搭建、测量、数据分析、实验改进、完整报告



我们的对象和任务

- ▶ 物理类学生：《普通物理实验2》，第二学期实验



自主居家实验

- ▶ 非物理类学生：《基础物理实验》，一学期实验



线上网课+居家实验



《普物实验2》：自主实验、研究导向

▶ 自主：

- 自选题目：网上资料、往年CUPT、物理竞赛题、自行设计
- 独立设计并完成实验：两周一个实验

▶ 研究导向：

- 倡导实验物理的研究模式
 - 必须定量测量，并且要求变参数系统研究
 - 报告审稿制：两位教师独立评审，一周内给出详细审稿意见；要求两位老师全部通过，不通过可根据返回意见修改，一周后重新提交。
- 

《基础实验》：线上课+居家实验

▶ 正常教学：

绪论+3周预科实验（每周2个）+误差
+10周普通实验（每周一个）

➤ 本学期：

绪论+3周预科实验+误差	➡	线上课
+4次居家实验（2周一个）	➡	给定参考题目
+2次返校后普通实验		



基础实验示例：光衍射的定量研究

【学习重点】

- 1、观察不同衍射元件的光衍射图样；
- 2、研究光衍射规律并利用衍射场分布测量衍射物结构尺寸；
- 3、光路的共轴调节；
- 4、误差分析。

【仪器用具】

激光光源（激光笔），二维光栅（手机屏幕），单丝（例如头发丝，细金属丝等），单缝（例如两平行紧挨排列的刀片，或用刀片或针头在镜子背面刻划痕等），双缝或多缝（用刀片或针头在镜子背面刻划痕），刻度尺（塑料文具尺），米尺（钢卷尺或量衣服的小卷皮尺），衍射场接收屏（白纸或白墙），夹具（用来固定激光光源）。

【实验内容】

一、基础内容

1、选取实验仪器用具，搭建和调节实验装置。

注意实验原理中要求的实验条件和各种假设应如何满足（光路的准直和共轴要求以及相应的调节方法和步骤）。

2、利用手机屏幕作为二维光栅，测定激光波长。

- （1）利用刻度尺和手机相关参数测量二维光栅周期；
- （2）利用二维光栅衍射测量激光波长。

注意光路共轴条件，特别是衍射元件与接收屏之间距离应尽量大些（满足远场条件）。
要求对测量结果计算不确定度，并进行误差分析。

3、利用单缝（或单丝）衍射场测定单缝（或单丝）的宽度。

（1）观察单缝（或单丝）的衍射场规律（亮纹、暗纹）；

（2）利用亮纹或暗纹的中心位置测定单缝（或单丝）的缝宽。要求对测量结果计算不确定度，并进行误差分析。

注：单缝和单丝衍射根据居家实验条件二选一即可。根据光学巴比涅原理，单丝和单缝为互补结构，其衍射场光强分布相同（除0级外）。因此单丝的衍射计算公式与单缝相同，实验光路与单缝大体一致（详见参考文献）。

二、提升内容

观察双缝或多缝的衍射，并测量双缝或多缝的缝宽和缝间距。要求对测量结果计算不确定度并进行误差分析。

三、拓展内容

- 1、光盘衍射的观察与测量。
- 2、其他元件（如单个圆孔、圆孔阵列等）的衍射图样的定性观察。

【说明】

- （1）基础内容全部必做，提升内容和拓展内容选做（可不做）。
- （2）附教材上“光衍射的定量研究”和“光栅特性及测定光波波长”以及一篇单丝衍射文献供参考。

通过要求：

- ▶ 大体上投入时间对应两次常规实验课
- ▶ 实验内容的丰富度达到一次普物课内容
- ▶ 报告内容完整、书写规范、无明显错误
- ▶ 提供自己与实验装置合影
- ▶ 评审制：第一次不通过，可根据返回意见修改，一周后重新提交。



灵活的方式——学生自选

- ▶ 居家实验：两周一个，通过/不通过，通过可替代两次常规实验，不计分。
- ▶ 返校后集中补课。

成绩评定：《普通物理实验2》、《基础物理实验》
最终成绩由集中补课部分的常规实验成绩平均分给出



支撑条件

- ▶ 教师：5位专任教师+25位系所兼职教师
- ▶ 网站：报告上传+教师批改系统
- ▶ 经费：每位同学报销400元的器材费



关于居家实验实践的小结和思考

- ▶ 成效：动手、自主设计、研究型、回复审稿意见
- ▶ 不足：精度、互动、效率
- ▶ 未来实验课建设：
 - 现有传统实验教学模式基础训练有效（实验条件保障、误差分析等）
 - 自主、研究方面还应进一步加强，类似综合实验进一步扩大



《普物实验2》自主居家实验部分题目列表

三线摆测量转动惯量和平行轴定理的验证

两种方法测量水的表面张力系数

激光衍射的定量实验

测定塑料尺的杨氏模量

非弹性碰撞实验

循环摆性质的探究

利用多普勒效应测定振子的阻尼系数

水瓶中空气柱振动发声特性的研究

水的贝纳特流的形成条件探究

灰尘干涉

多米诺骨牌

傅科摆

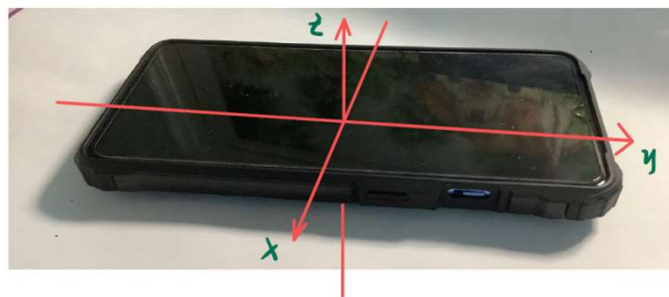
利用纹影法研究超声悬浮

对液体射流现象的研究

测量光盘光栅常数并测量液体折射率

手机刚体转动的定量研究

示例1：手机刚体转动的定量研究



简单情况：陀螺仪主轴与转动惯量主轴近似重合

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3 = 0$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_3 \omega_1 = 0$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2 = 0$$

由运动学方程知，当手机不受外力作用时，

$$\frac{\dot{\omega}_1}{\omega_2 \omega_3}, \quad \frac{\dot{\omega}_2}{\omega_1 \omega_3}, \quad \frac{\dot{\omega}_3}{\omega_1 \omega_2}$$

三个无量纲量均应不随时间变化，将上面三个量分别记为 η_1, η_2, η_3

$$\frac{I_2}{I_1} = \alpha, \quad \frac{I_3}{I_1} = \beta$$

$$\frac{1+\alpha}{\beta} \approx 1 = \eta_1, \quad \alpha < 1, \quad \beta > 1$$

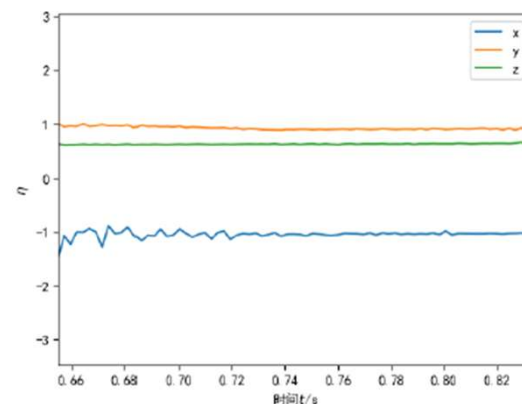


图 4: η 在自由转动区间内随时间变化示意图

$$\eta_1 = -0.98 \pm 0.03, \quad \eta_2 = 0.92 \pm 0.01, \quad \eta_3 = 0.632 \pm 0.005$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 0.233 \pm 0.003, \quad \frac{I_3}{I_1} = 1.21 \pm 0.01$$

由手机几何尺寸估算转动惯量：

$$\alpha = \frac{I_2}{I_1} \approx 0.23, \quad \beta = \frac{I_3}{I_1} \approx 1.22$$

$$\frac{1+\alpha}{\beta} = 1.02 \approx 1$$

示例1：手机刚体转动的定量研究



图 5: Ipad 与手机捆绑实物图

一般情况：陀螺仪主轴与转动惯量主轴有夹角

为了符合安卓系统的习惯 [1]，我们将表示旋转矩阵 R_0 的三个欧拉角记为：

- (1) Azimuth angle, 绕原 z 轴旋转 $\gamma \in [0, +2\pi)$
- (2) Pitch angle, 绕现 x 轴旋转 $\delta \in (-\pi, \pi)$
- (3) Roll angle, 绕现 y 轴旋转 $\theta \in (-\pi/2, +\pi/2)$

故 R_0 显式地写作：

$$R_0 = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2. 对于每一次的测量结果 ω ，将其变换到主轴坐标架下，记为 ω' ，即：

$$\begin{pmatrix} \omega'_1 \\ \omega'_2 \\ \omega'_3 \end{pmatrix} = R_0 \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix}$$

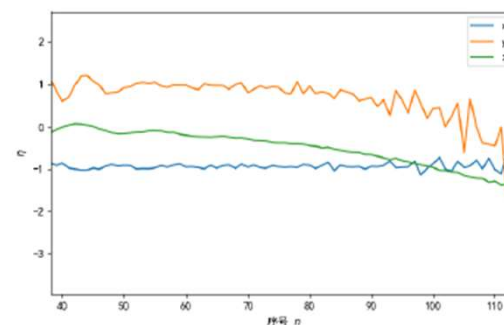


图 6: 优化前，对于刚体 Φ 的 η 计算值

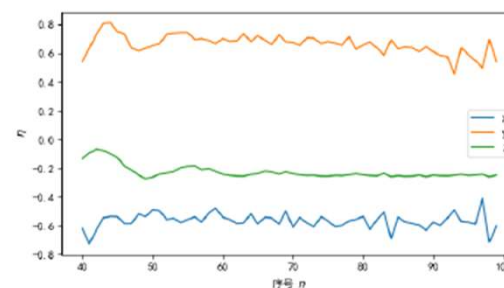


图 7: 优化后的 η' 变化曲线

编写python程序，用梯度下降法调夹角优化不变量

$$(\gamma, \delta, \theta) = (40.5^\circ, -9.5^\circ, -10.8^\circ)$$

示例2：利用纹影法研究超声悬浮

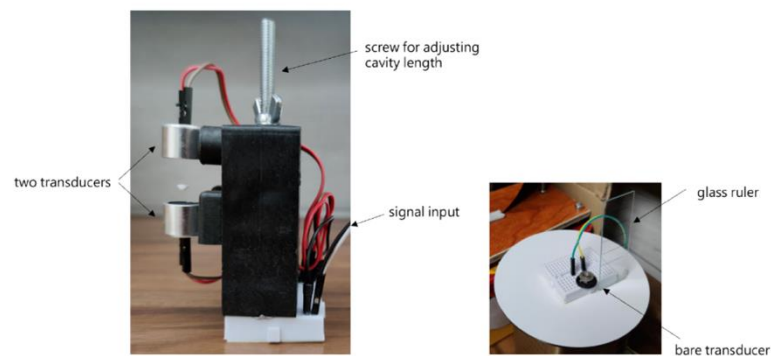
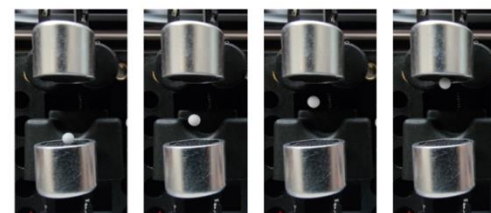
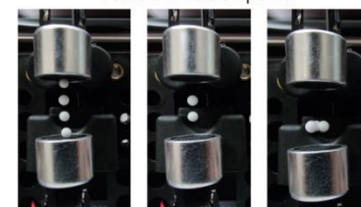


图 3: 超声悬浮装置



4 stable levitation points



multi-particle levitation

图 8: 实现超声悬浮

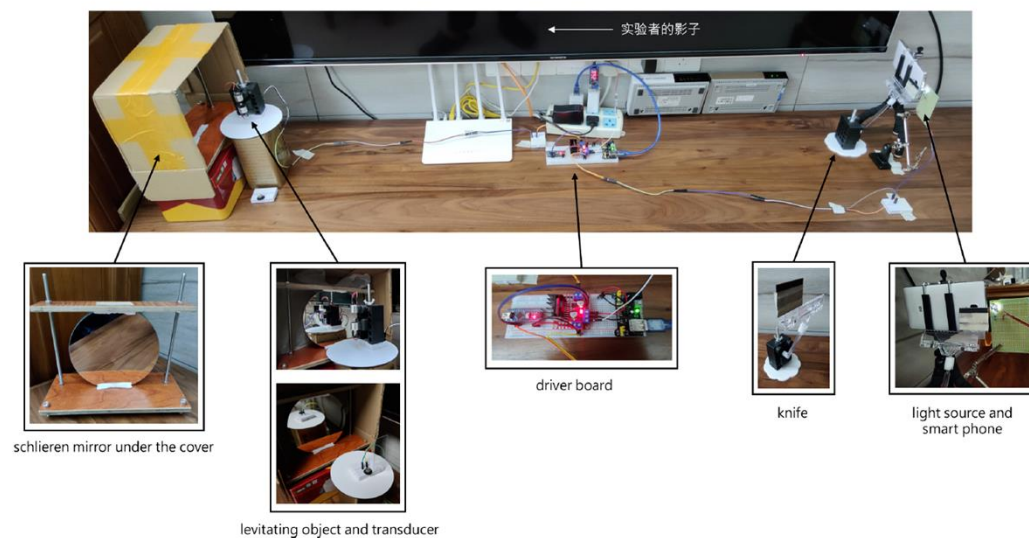


图 4: 纹影成像装置

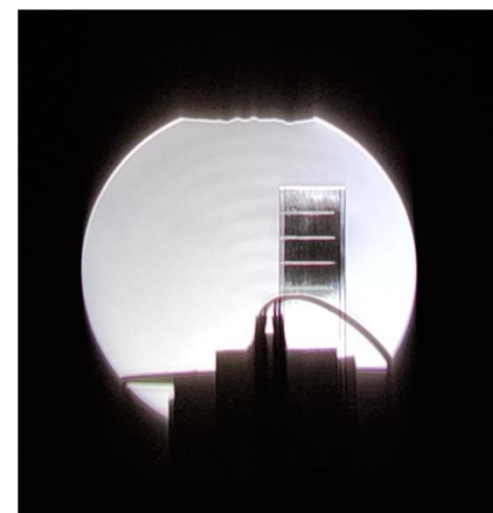


图 10: 标尺和行波的成像

示例2：利用纹影法研究超声悬浮

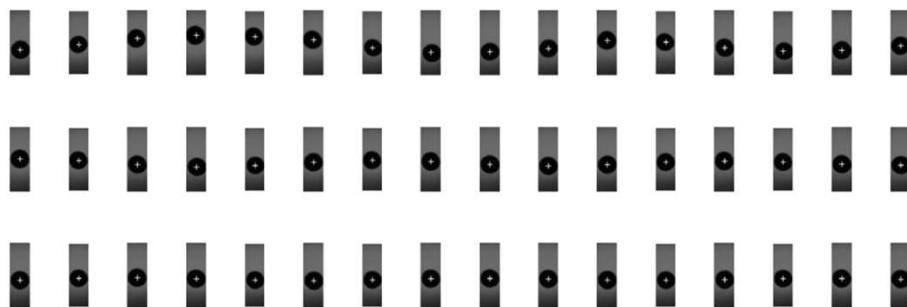


图 12: 识别小球的位置，白色十字为识别出小球中心的水平位置

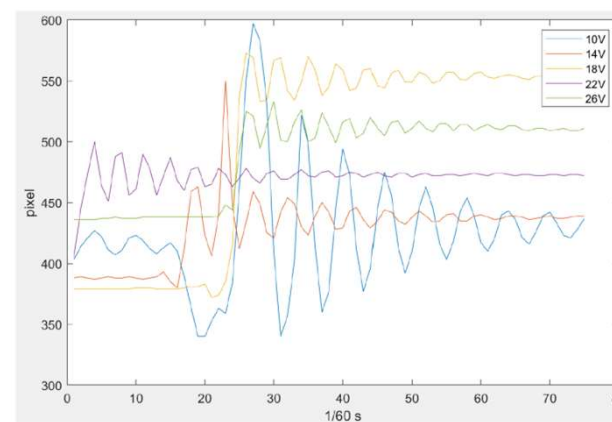


图 13: 识别出的物体 $x-t$ 关系

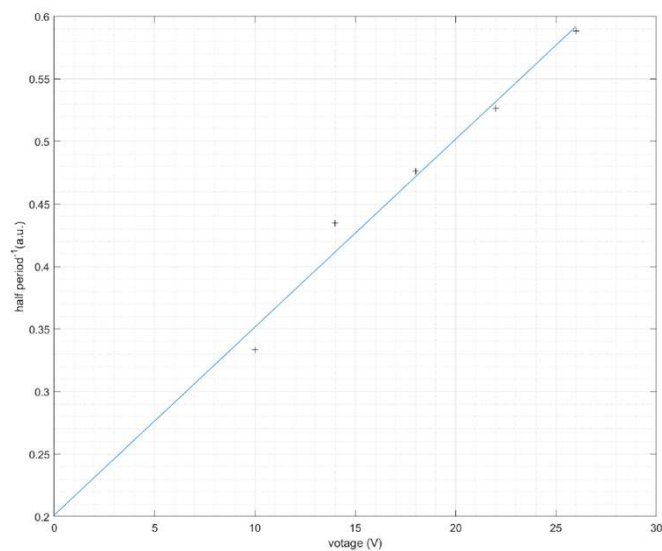


图 14: 电压与半周期倒数关系

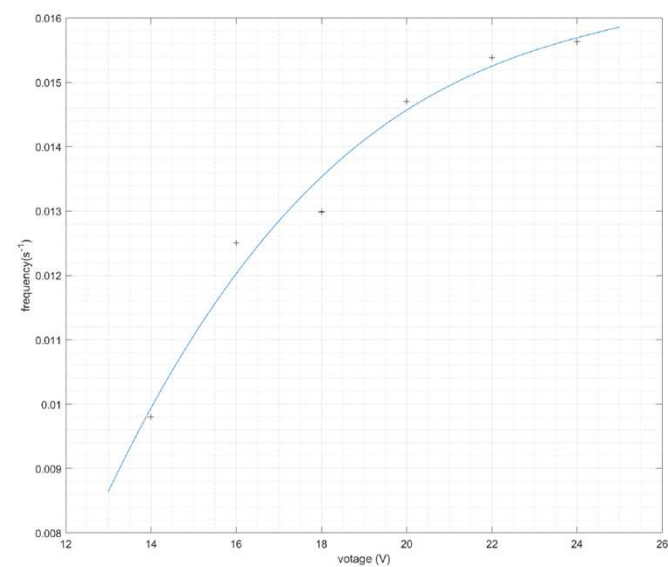


图 15: 转动频率与电压关系

示例3：对液体射流现象的研究



图 1: 液体射流现象



系统研究：

- 农夫山泉大桶Vs冰露矿泉水瓶
- 自来水Vs酒精Vs浓盐水
- 不同开孔直径

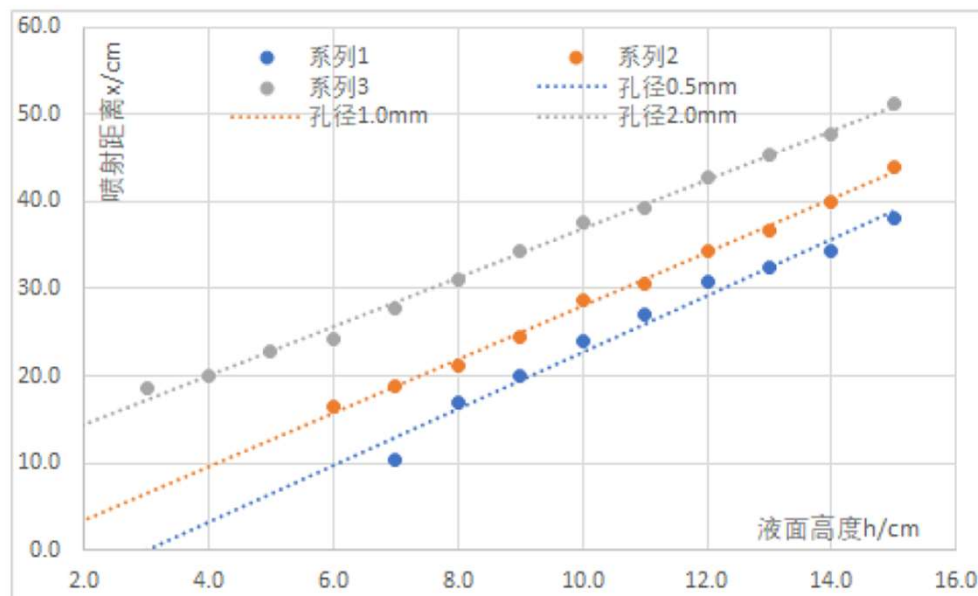


图 6: 不同孔径下喷射距离 x 与液面高度 h 的关系

示例3：对液体射流现象的研究

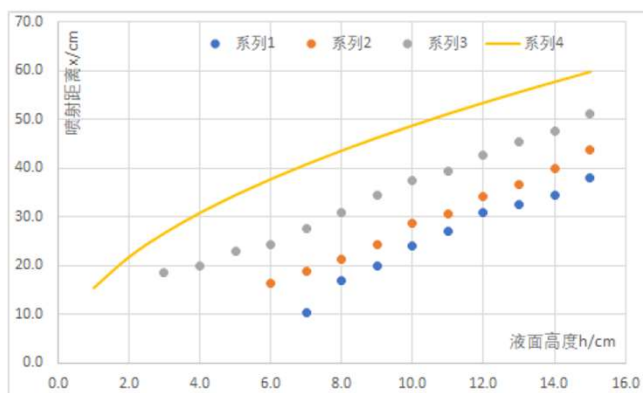


图 7: 系列 1、2、3、4 分别代表孔径 0.5mm、1.0mm、2.0mm 的实验数据散点图和理论曲线



图 4: 红圈处小孔中液体贴壁流下而非喷射。

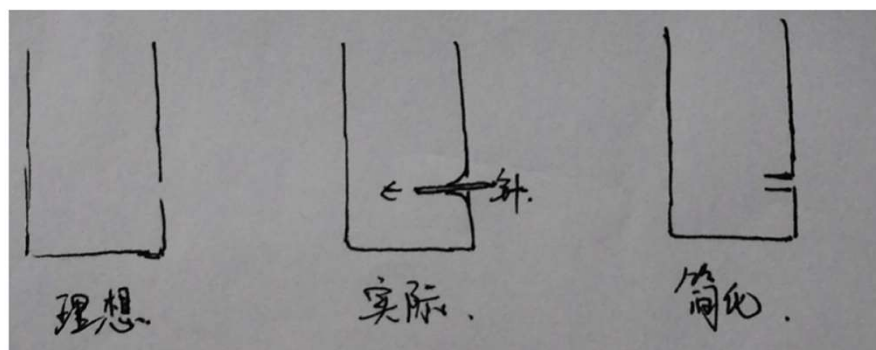
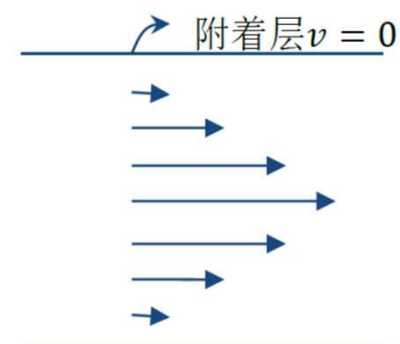


图 8: 小孔的理想模型与实际情况



谢谢大家！

祝身体健康！

