

# 低年级物理实验课上学生创新能力培养的探索与实践

物理学系 周诗韵

## 一、项目背景

“十四五”规划提出，创新在我国现代化建设全局中处于核心地位。实验课程由于其特殊的实践性以及理论与实验的对照，成为一块很好的培养学生创新能力的实验田。然而，创新能力的培养特别需要厚积薄发，在低年级里，教会学生如何发现和分析问题，促使他们养成良好的思维模式，逐步提高他们解决实际问题的能力，显得尤为重要。

然而在教学中我们发现，学生在学习习惯于按照讲义完成实验内容，面对实验结果与理论预期期间的差异，往往显得无从下手，找不到合适的思路去分析。基于这一现实问题，我们提出需要在低年级实验课程中，通过教师的教学设计和教学引导，帮助学生学会分析的方法。

## 二、项目的具体实施方法与过程

物理学家非常善于做出合理的假设与近似，简化实际问题，再应用物理规律建立数学描述，最后对结果做出预测。我们把这个过程称为“物理建模”。不仅如此，模型的准确性需要实验检验。因此，物理建模的过程，还包括“模型预测——实验检验——修正模型/改进测量方法——再次检验”的迭代过程。这个过程完整的过程，事实上也是科学研究的一般过程。

以科学研究过程为主线，教学团队对授课内容进行梳理重组，通过整理授课讲义、制作实验告示牌、录制讲解视频等多种方式，给学生提供充足的学习资料，并在授课过程中，重视引导学生发现并讨论问题，努力让学生从被动完成实验操作，到主动思考“为什么这么做”，变获取知识为探究知识，并在这个过程中掌握科学研究的方法，培养创新思维能力。

表1列出了对单个实验项目的教学安排。其中前三项为单次实验课可以完成的部分，适用于《物理实验（上）》，即每次实验课（3学时）完成一个实验项目。而在《物理实验（下）》中，由于面向大二下的学生，学生有一定基础，课程要求学生以3次实验课（3学时\*3）为一个单元对实验课题做深入探究，因此设置

了表格的第四项，对学生提出了更高的要求，即学生需要根据实验结果进行分析讨论，修正理论并设计实验进行验证。

表 1 实验项目的教学安排示例

	学生	教师
上课前的预习	阅读讲义，回答思考题，撰写预习报告	重组讲义，强调模型的适用条件（如“无限大”“足够缓慢”“平行”等），并从实验设计的角度提出思考题。 例如，为了满足这些条件，你的实验需要如何设计？
上课时的讨论	观察实验现象，记录数据，并思考实际情况与理想化模型的差异	通过实验告示牌、随堂提问、小组讨论等方式，引起学生注意并思考。 例如，1) 你的实验装置和理想化条件一致吗？应该如何调节？ 2) 你的实验现象符合预期吗？需要为此如何修正理想化模型？
课后的实验报告	分析处理实验数据，查阅资料，并撰写实验报告	注重考察学生对模型适用和修正的分析
*重复以上过程，再次实验（仅限《物理实验（下）》）	设计实验，验证自己的修正模型合理性	与学生个别讨论，对其实验设计和分析提出建议

图 1 展示了一个具体的实验项目“落球法测量蓖麻油的黏滞系数”的教学 ppt 及学生相应的实验报告部分。

理想化模型

6

### 落球法的实验模型

- 对小球作受力分析：
  - 浮力： $f_{浮} = \frac{1}{2} \pi d^3 \rho g$       重力： $mg = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho' g$
  - 当液体无限深广，小球表面光滑，下落速度较小  
 $f_{黏} = 3\pi \eta v_1$  (斯托克斯公式)
- 小球运动加速度： $a = \frac{1}{m} (mg - f_{浮} - f_{黏})$

小球进入匀速直线运动，收尾速度为  $v_1$

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2}{18v_1}$$

小球：直径d，密度ρ'

蓖麻油：密度ρ

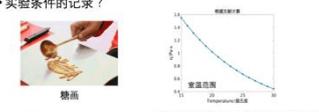
## 实验设计

### 实验设计1

- 对容器和小球大小的选择？
  - 近似无限深广、运动速度缓慢
- 匀速运动的判断？速度 $v_t$ 的测量？
 
$$v_t = \frac{\text{匀速运动的距离}}{\text{通过该距离的时间}}$$

### 实验设计2

- 如何进行重复实验？
  - 重复实验近似：直径相似（差别小于1%）的小球
- 实验条件的记录？



## 模型修正

### 模型的修正1：容器大小有限

- 液柱为直径 $D$ 、高度 $H$ 的圆柱体
- 小球沿中心轴线下落

$$\eta_1 = \eta \frac{1}{(1 + 2.4 \frac{d}{D})} \cdot \frac{1}{(1 + 1.6 \frac{d}{H})}$$

- 测量液柱直径 $D$ 、高度 $H$
- 在你的实验中，哪一修正项的影响程度更大？

### 模型的修正2：小球下落速度“不够缓慢”

- 雷诺数（表征流体流动情况的无量纲数） $Re = \rho d v / \eta$
- 当 $Re < 10$ ，斯托克斯公式的修正
- 修正后的黏滞系数

$$\eta_2 = \eta \left( 1 + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1280} Re^2 \right)^{-1}$$

在你的实验参数条件下，修正项的影响程度有多大？

## 学生实验报告

用(3)式计算结果和不确定度为

$$\eta_1 = (\rho' - \rho) g d^2 t / (18l) = 0.86488 = 0.865 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$u(\eta_1) = \eta_1 \sqrt{\frac{u^2(\rho') + u^2(\rho)}{(\rho' - \rho)^2} + \left(\frac{u(g)}{g}\right)^2 + \left(2 \frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2} = 0.004 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

相对误差 $\delta = (\eta - \eta_0) / \eta_0 = 9\%$ 。如果用修正宽广的(4)式计算，结果为：

$$\eta_2 = \eta_1 \left[ \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right) \left(1 + 1.6 \frac{d}{H}\right) \right]^{-1} = 0.788 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$u(\eta_2) = \eta_2 \sqrt{\left(\frac{u(\eta_1)}{\eta_1}\right)^2 + 2.4 \left[ \left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 \right] + 1.6 \left[ \left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(H)}{H}\right)^2 \right]} = 0.007 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

相对误差 $\delta' = -0.3\%$ 。此时雷诺数为 $Re = \rho d v / \eta = \rho d l / (\eta t) \approx 0.0054 < 0.1$ 可以不进行进一步修正<sup>[4]</sup>。故可得结果为 $\eta = (0.788 \pm 0.007) \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

图 1 落球法测量液体黏滞系数：课程 ppt 及学生报告示例

## 三、项目的主要成效

教学团队在 2021 年春季《物理实验（下）》（总人数 124 人）、2022 年秋季学期《物理实验（上）》（总人数 142 人）两门课程中开展了教学实践。

### 1) 2022 年秋季学期《物理实验（上）》教学成效分析

物理实验（上）主要面向大二上学期的学生。我们考察学生的实验报告，重点统计他们是否能够从模型建立的条件和修正方法入手进行数据分析和讨论。

本次修读的学生有一个较大的特点：由于疫情影响，大部分学生未能在 2022 年春季完整修读过前期课程《基础物理实验》，这对我们的教学带来了较大的挑战。从图 2 中也能明显看出这一点：把修读学生按照做实验的先后顺序分为 4 组，第一组（刚开学）学生的正确率明显更低（约 70%），但是经过系统的学习后，从第二组开始，学生正确率上升，整体维持在 90%左右。可见通过实验教学，预期目标基本达成，学生已经掌握了分析模型适用条件和进行修正的方法。

此外，我们欣慰的发现，有部分同学还在实验中独立发现了一些与模型不一致的细节，并定量评估了这些细节对实验结果的影响。这些内容没有出现在

讲义中，也未经教师提醒，因此很好的反映了学生已经掌握分析方法，并能主动灵活的应用到实践中。学生报告示例如图 3 所示。

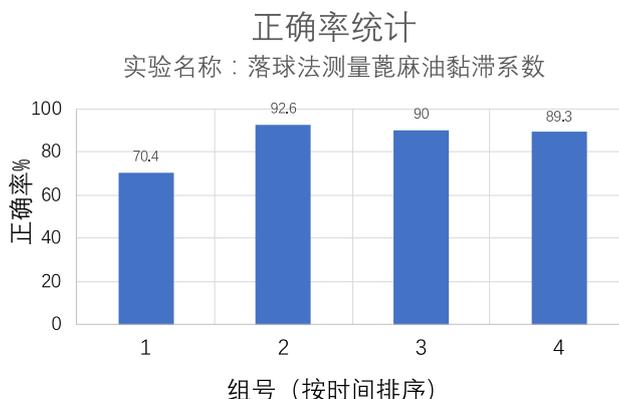


图 2 统计学生实验报告中“模型修正”部分的正确率  
以“落球法测量蓖麻油的黏滞系数”为例，样本总量为 73

<p>还要考虑试管底部的形状造成的影响。实际观察发现试管底部下凸，故高度 <math>h</math> 测量不够准确。实际观察发现，试管底部在钢尺零刻线一下 3-5mm 左右，即可以认为 <math>h</math> 偏小了 4mm 左右，对(4)式微分得：</p> $d\eta' = 1.6\eta d / \left[ \left( 1 + 2.4 \frac{d}{D} \right) \left( 1 + 1.6 \frac{d}{h} \right)^2 h^2 \right] dh$ <p>可得误差在 0.002% 量级，可以忽略不计。</p>	<p>更加偏离查阅到的 <math>\eta_0</math> 的原因在于：实际实验时测量的温度并非同一个量筒中的蓖麻油，实际实验用蓖麻油的温度可能有所不同。且实验中蓖麻油的温度可能有所变化，测量温度也有不确定度，因此可能造成查得得值与计算得到的值有所偏离。文献[6]给出了黏滞系数与温度关系的经验公式为</p> $\eta = (5.53 \text{ Pa} \cdot \text{m}) e^{-(0.085^\circ\text{C}^{-1})\theta}$ <p>取微分有</p> $d\eta = -(0.85 \times 5.53 \text{ Pa} \cdot \text{m}) e^{-(0.085^\circ\text{C}^{-1})\theta} d\theta$ <p>其中 <math>\theta</math> 是油温，取 <math>^\circ\text{C}</math> 为单位。该文献的修正方法与本实验不同，仅用此量级估算：在 <math>22.4^\circ\text{C}</math> 时，要使 <math>\eta</math> 出现 0.1% 量级的不同，需要温度相差 0.001<math>^\circ\text{C}</math> 量级，在实验中出现是合理的。</p>
---	---

图 3 学生实验报告中定量分析误差原因

整体来说，通过《物理实验（上）》的学习，学生已经初步学会在实验中观察并发现问题，能够根据参考资料完成问题分析，并有意识的应用到实践中。

## 2) 2021 年春季学期《物理实验（下）》教学成效分析

物理实验（下）是物理实验（上）的后续课程，主要面向大二下学期的学生，学生组成与物理实验（上）基本一致。课程以小课题为主要形式，要求学生以三周为单位对课题进行深入的探究。这一形式给了学生更加充分的时间去修正模型，并设计实验加以验证，同时也对学生的创新能力提出了更高的要求。

授课结束后，我们对修读的学生进行了问卷调查。回收的有效问卷数为 98 人，调查结果如图 4 所示。可以看出，近 80% 的学生主观上非常认可教学效果，能够有意识的关注实验模型和模型的适用范围。同时，87% 以上的同学能够仔细观察实验现象，并详实记录不符合预期的现象。

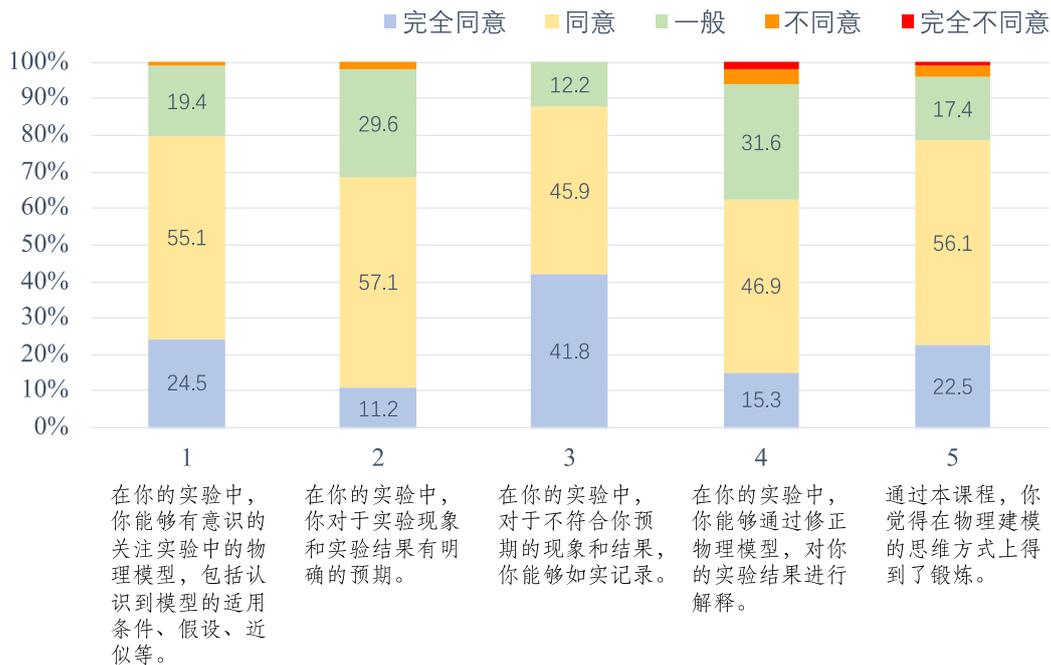


图 4 2021 年春季《物理实验（下）》学生问卷调查结果

而另一方面，在通过修正模型对解释实验现象方面，学生对自己的主观评价稍有下降，为 60%左右。这说明，尽管学生已经能够发现和分析问题，但通过自己的努力完成模型修正、从而解决问题仍具有较大难度。这也与我们的预期相符：在实验中遇到的问题，有的已有前人讨论过，学生可以通过查阅文献，或者与教师讨论，获取提示或解决方法。但有些实验现象可能依旧存在争论，或者没有现成的理论可以借鉴。对于这些问题的解释，需要学生发挥自己能力做出原创的成果，这对于大二学生的要求是很高的。这也提示我们，在教学中需要教师提供更多的帮助，通过讨论，对不同的学生提供个性化的方案指导，帮助学生理清思路，鼓励学生通过假设、求证，得到创新性的成果。

#### 四、总结与展望

从 2021 年春季学期到 2022 年秋季学期，笔者及教学团队成员在任教的大二物理实验课上探索并实践了培养学生创新能力的方法，总的来说，基本达到了以下效果：

- 1) 学生能够认识并理解实验所用模型的成立条件，并进行有意识的实验设计，从而化“被动完成实验操作”为“主动设计实验方案”；
- 2) 学生在实验中能够有意识的观察实验现象，并和预期进行比较、分析和讨论，学会了科学分析的方法，提高了学生思考的主动性和积极性；

- 3) 学生能够通过仿真、计算、查找资料等多种方式对实验数据进行分析，修正其理论模型并进行进一步的实验验证，培养了较强的创新能力和研究能力；
- 4) 优秀学生甚至能够做出值得发表的原创性成果：例如，2022年初，我们指导本科学生发表了一篇教学论文（王可欣，周诗韵\*。基于高斯声束模型解释水中声速测量异常现象。大学物理，41(4)：97-102(2022)。）该论文就是学生以《物理实验（下）》中的一个实验项目为基础，提出修正模型并解释实验现象为主要内容的。

总的来说，通过项目的实施，课程在培养学生创新能力方面取得了一定成果。而在项目实施的过程中也还存在一些问题，例如：由于疫情影响，2022年春季实验课程转为线上后对学生的培养力度减弱，如何融合已有的经验推进线上教学仍有待摸索。另外，如何在教学中尽可能调动学生学习积极性，并持续提高教师自身的研究能力，仍需要在后续的教学坚持不懈的思考和探索。