“探究向心力大小的表达式”实验教学释疑

疏信志，王　鹏
（池州市第八中学，安徽池州 247000）

摘　要：梳理并归纳向心力实验教学中的三类典型问题：学生对轻杆与接口的结构原理认知模糊、挡光杆定位及砝码转动半径的测量依据不明确、控制变量法在分析结论中的应用不够严谨。通过测量对比与结构剖析，阐明实验仪器的设计逻辑；结合理论推理，明确挡光杆位置与转动半径的测量规范；从“前提条件界定—变量分离—组合变量分析”的维度，揭示控制变量法的实质，并基于真实实验数据拟合得出比例系数。上述举措有效解决了教学问题，并提炼出可迁移的教学启示。

关键词：向心力；表达式；实验教学；控制变量法；力传感器；释疑
DOI：10.19935/j.cnki.1004-2326.2026.10.027
引用格式：疏信志，王鹏.“探究向心力大小的表达式”实验教学释疑[J].实验教学与仪器，2026，43(10)：105-108.

“探究向心力大小的表达式”是《普通高中物理课程标准（2017年版2020年修订）》新增加的学生必做实验。人教版高中物理必修第2册第6章第2节“向心力”中介绍了J2130向心力演示器[1]。但该仪器仅能进行半定量探究，无法获得向心力大小的定量表达式。

笔者所在学校实验室配备了如图1所示的数字化实验装置，该装置目前应用较为广泛。在实验过程中，学生对仪器结构与原理普遍存在认识不清、实验操作不当、实验方法理解不透等问题。因此，有必要对存在的问题进行系统剖析与释疑，在帮助学生科学开展实验活动的同时，提升其科学思维、科学探究能力。

1　实验教学的问题

问题既是实验教学的起点[2]，也是学生思维活动的直观反映，能够有效调动学生的探究欲望。教师只要把握住学生在实验过程中的问题，就把握住了实验教学的“脉搏”。在本实验中，学生的问题主要集中在仪器结构、实践操作和原理方法等3个部分。

1.1　仪器结构上的问题

在装置组装过程中，学生普遍感到困惑的是图1中杆a、b、c分别起什么作用？3根杆交接处的塑料接口为何要设计成类似梯形结构？这些问题是实验教学面临的首要问题，也是解决后续问题的基础。解决这些问题的过程，既是学生将物理知识与实践结合的过程，更是知识的应用和能力提升的过程，因此是教师实施教育的良好契机。

1.2　实践操作上的问题

学生在实践操作中，不清楚挡光杆放置的具体位置，许多学生甚至在改变砝码半径时同步改变挡光杆位置。



图1　向心力实验器件

在测量砝码做圆周运动的半径时，虽然水平槽上有刻度，但学生不清楚应记录砝码何处所对应的刻度。这两个问题反映的是学生在操作仪器、分析处理能力上的问题。

1.3　方法使用上的问题

理解方法是解决科学问题的通用思维工具。在本实验中，学生通过控制变量法，可以得出3个结论：砝码的转动半径r与角速度ω一定时，向心力的大小F与质量m的关系为$F \propto m$；在砝码的质量m和转动半径r一定时，向心力的大小F与角速度ω的关系为$F \propto \omega^2$；在砝码的质量m与角速度ω一定时，向心力的大小F与转动半径r的关系为$F \propto r$。综合以上结论，学生如何逻辑清晰地得出$F \propto m\omega^2 r$的结论？若是写成等式，应该写成$F = km\omega^2 r$，则k的值应该如何确定呢？

2 针对问题的释疑

针对上述3个方面的问题，教师有必要带领学生拆解仪器结构，剖析其背后原理，梳理思想方法，以期达到用思想指导实践、用实践解决问题的效果。

2.1 揭示结构蕴含的原理

本实验需要利用力传感器测定砝码所受向心力的大小F。由于砝码在做圆周运动，力传感器不方便直接测量，因此本实验采用了等效转换的方法，砝码所受向心力的大小等于砝码对水平连杆b的摩擦力，若砝码对杆b的摩擦力大小等于传感器对垂直连杆a的拉力大小，则力传感器的示数就等于砝码向心力的大小。设计连接处的平面图如图2所示，它其实是以连接轴为支点的杠杆，传感器对垂直连杆a的拉力竖直向上，测量力臂长$l_2 = 1.15\ \text{cm}$，砝码对水平连杆b的摩擦力水平向右，测量力臂长$l_1 = 1.15\ \text{cm}$，发现两力臂长度相等，是等臂杠杆。因此，砝码所受的向心力大小就等于传感器对杆a的拉力大小，也即等于力传感器的示数。值得注意的是，在连接装置时，a杆要保持竖直，b杆要保持水平；否则，等臂杠杆的设计就会被破坏，必然给实验带来较大的误差。

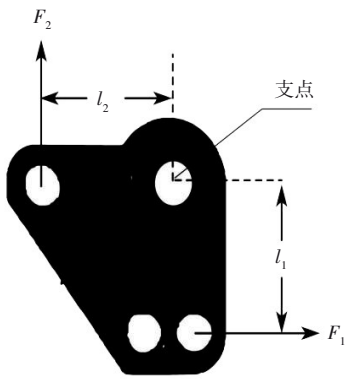


图2 等臂杠杆

针对水平杆c功能的教学设计，笔者采用以下思路：先移除杆c，也不在杆b上安装砝码，这样装置旋转起来时，理论上力传感器的示数应为零。学生改变电机的旋转角速度，记录数据，绘制$F-\omega^2$的图像。随着角速度的增加，F也在不断增大。结合图像，学生恍然大悟，F表示的是杆b在做圆周运动时自身所需向心力的大小。如果不想办法消除，必会在测量砝码向心力时产生系统误差。因此，在对称侧安装杆c，重复上述实验步骤并绘制图像（图3）。可见，加上杆c后，两边杆转动时所需的向心力被抵消，力传感器的示数几乎为零。通过这一实践对比，学生对杆c的功能有了深刻而持久的理解。

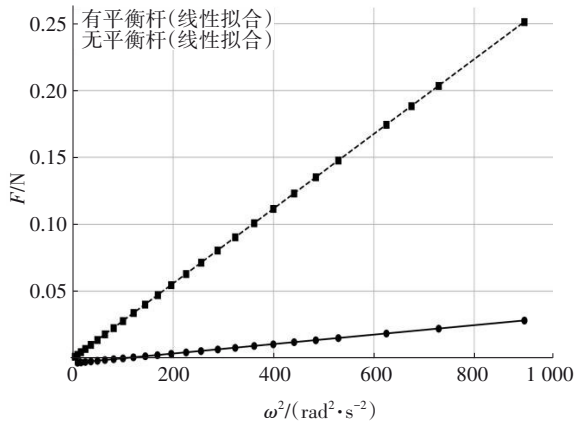


图3 $F-\omega^2$图像（有无平衡杆对比）

2.2 厘清操作背后的依据

本实验利用光电门传感器测定挡光杆的挡光时间Δt，再测量得出挡光杆的直径D和转动半径r，由此计算出砝码做圆周运动的角速度ω。挡光杆究竟应放在何处呢？针对问题，教师在教学中引导学生回顾瞬时速度和线速度的定义，$\bar{v} = \dfrac{D}{\Delta t}$，当$\Delta t \to 0$时，$\bar{v} \approx v$，而$\omega = \dfrac{v}{r}$，因此得出：$v$的测量误差越小，$\omega$的测量误差越小。学生很快明白挡光杆的挡光时间$\Delta t$越短，即其做圆周运动的线速度$v$越快，$\omega$的测量误差越小。因此，在实际操作中，应将挡光杆固定在杆c上远离圆心的位置，且每次实验时，不需要改变挡光杆的位置。

实验中使用的砝码如图4所示，砝码中心处有红色标记A。在测量砝码做圆周运动的半径时，究竟该测量砝码何处到圆心的距离？部分学生猜测应该测量砝码红色标记处A到圆心的距离。可本装置中砝码并不能被看成质点，那么砝码正中心的位置究竟代表什么？此时，若教师忽略学生的疑问，则是对学生质疑探索精神的漠视和伤害，不利于学生核心素养的发展。对此，教师可以引导学生回顾微元法的思想精髓：将砝码分解成无数个微元，则每一个微元都可以看成质点，砝码就是由无数个质点组成的质点系。存在这样一个点C，其运动规律等价于砝码全部质量集中于该点、全部外力亦作用于该点时的运动状态，该点即为砝码的质心。

向学生介绍质心运动定理$\sum F_i = ma_c$，并作简要说明：不管物体的质量如何分布，也不管外力作用点位于何处，质心的运动等价于将物体全部质量集中于该点、所有外力也作用于该点的一个质点的运动[3]。此时，大部分学生都想到砝码红色标记处A应该就是砝码质心的位置。

为了端正学生严谨的科学态度，此处教师可以带领学生一起推导质心的位置坐标：以旋转中心为坐标原点，水平杆b所在的直线为x轴，建立直线坐标系，λ为砝码单位长度的质量，则有：

$$x_c=\frac{\int x\mathrm{d}m}{m}=\frac{\int x\lambda\mathrm{d}x}{m}=\frac{\lambda}{m}\int_{x_1}^{x_2}x\mathrm{d}x=\frac{\lambda}{m}\left(\frac{1}{2}{x_2}^2-\frac{1}{2}{x_1}^2\right)=\frac{x_1+x_2}{2}。\quad①$$

该坐标表示砝码的中点坐标，也恰好是滑块红色位置的标记处A。至此，学生自然明白本实验中的半径就应该是从质心到圆心的距离。

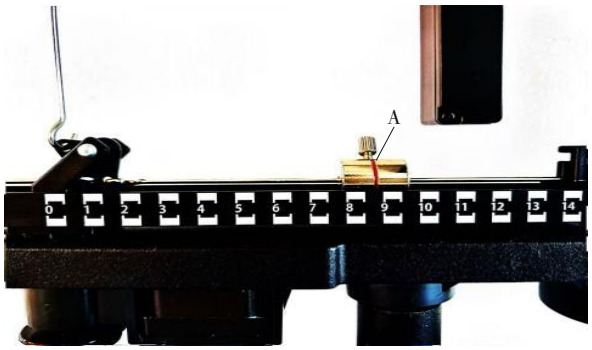


图4　砝码及刻度

2.3　认清控制变量法的实质

控制变量的方法是指在探究和解决问题的过程中，对影响事物变化规律的独立因素加以人为控制，使其中只有一个因素按照特定的要求发生变化，而其他因素保持不变，以利于寻找事物发展变化规律的方法[4]。控制变量是揭示单一因果、建立定量关系的唯一可靠途径，是物理学乃至所有实验科学探索未知的基石性思维。学生在高中阶段多次接触控制变量法，但如果没能认清控制变量法的实质，浅尝辄止，那么会给后续的学习和探究带来不小的障碍。

控制变量法的前提是各个变量之间彼此独立，即每个变量变化时不会引起除因变量外其他变量的变化。本实验中的砝码质量m、角速度ω、转动半径r都是独立变量。而分离变量，即将因变量与多个变量之间的复杂关系转化为因变量与单个变量之间的简单关系。在本实验中，控制r和ω一定时，$F\propto m$；在控制m和r一定时，$F\propto\omega^2$；在控制m和ω一定时，$F\propto r$。依次探究每一个变量的变化规律后，要将几个单变量的函数组合为一个多变量函数，此过程称为“多变量的组合”[5]。

由ω、r不变时，$F\propto m$，可得：$\frac{F_1}{m_1}=\frac{F'}{m_2}$；　②

由m、r不变时，$F\propto\omega^2$，可得：$\frac{F'}{{\omega_1}^2}=\frac{F''}{{\omega_2}^2}$；　③

由m、ω不变时，$F\propto r$，可得：$\frac{F''}{r_1}=\frac{F_2}{r_2}$；　④

将②③④两边分别相乘得$\frac{F_1}{m_1{\omega_1}^2r_1}=\frac{F_2}{m_2{\omega_2}^2r_2}$，即$F\propto m\omega^2r$，写成等式$F=km\omega^2r$。在每一组实验数据中增加一列表格计算$k$的值，如表1～3所示。在误差允许的范围内，$k=1$。获得向心力的定量表达式为$F=m\omega^2r$。

表1　探究F与ω的关系（$m=0.03$ kg，$r=0.1$ m）

角速度ω/(rad·s^{-1})	向心力F/N	k
10.07	0.30	0.986
15.08	0.69	1.011
20.07	1.20	0.993
23.10	1.57	0.981
25.09	1.84	0.974
30.08	2.66	0.980

表2　探究F与m的关系（$\omega=20.03$ rad/s，$r=0.1$ m）

质量m/kg	向心力F/N	k
0.01	0.41	1.022
0.02	0.82	1.022
0.03	1.25	1.039
0.04	1.62	1.009
0.05	1.98	0.987
0.06	2.39	0.993

表3　探究F与r的关系（$\omega=15.03$ rad/s，$m=0.03$ kg）

半径r/m	向心力F/N	k
0.04	0.27	0.996
0.06	0.40	0.984
0.08	0.53	0.978
0.10	0.67	0.989
0.12	0.79	0.971
0.135	0.89	0.973

3　实验教学启示

3.1　聚焦仪器，庖丁解牛

引导学生像“庖丁解牛”一样，拆解实验仪器，深入剖析仪器构造，从物理学视角分析并理解仪器的测量原理，从中感受仪器设计的精妙和物理知识的实用性。只有充分了解仪器的构造和测量原理，学生在实验时才能不被仪器所惑，甚至激发出超越仪器本身的创造性思考。

3.2 规范操作，循理而行

实验操作不是死记硬背的步骤清单，而是每一步都有其物理原理和逻辑必然性的思维“链”条。只有带领学生探明操作背后的物理原理，理顺完成实验的合理步骤，学生才能在实验操作中做到循理而行、有理不惑。

3.3 透视方法，直指核心

引导学生超越具体操作和仪器，洞察实验设计所采用的科学方法。科学方法是实验从“动手”升华为“动脑”、从“现象”触及到“本质”的桥梁。教学中通过显性化、深度追问、体验对比和迁移升华，引导学生不仅“用方法”，更深刻地“懂方法”“悟方法”，最终内化为其科学探究的核心素养，这比获得具体结论更为深远。

总之，实验教学要构建“由器明理，循理精操，操中悟道”环环相扣的完整逻辑链条，在“真实验”中发展学生的“真能力”，提升学生的“真素养”。

基金项目：2024年安徽省教育信息技术立项课题“信息技术下学生自主创新实验助推跨学科实践的研究”，编号：AH2024214。

作者简介：疏信志（1987—），女，高级教师，研究方向：高中物理教材教法，E-mail：592147382@qq.com。

参考文献

[1] 人民教育出版社，课程教材研究所，物理课程教材研究开发中心．普通高中教科书物理必修第二册[M]．北京：人民教育出版社，2019.

[2] 徐将二．“探究向心力大小的表达式”实验教学的问题与解疑[J]．物理教师，2024，45(12)：54-57.

[3] 漆安慎，杜婵英．普通物理学教程·力学[M]．第4版．北京：高等教育出版社，2021.

[4] 人民教育出版社，课程教材研究所，物理课程教材研究开发中心．普通高中教科书物理必修第一册[M]．北京：人民教育出版社，2019.

[5] 杨介信，张大同．中学物理实验大全[M]．上海：上海教育出版社，1995.

（上接第50页）

4 结论与教学建议

4.1 结论

“流速大、压强小”中流速的参照物既不是地面，也不是被压物体，而是同一流线上的不同地方。因为伯努利原理有“苛刻”的限制条件，当不满足这些条件时，伯努利方程不成立。该现象常被错误归因为伯努利效应，实际上忽略了伯努利原理的适用前提。流体力学中“天女散花”现象是流体“转弯”内侧压强变小形成的“抽吸”效应。

4.2 教学建议

基于上述分析，在初中物理伯努利原理教学中，教师应把握以下几点。首先，强化适用条件的教学。讲授“流速大、压强小”时，必须明确指出这一结论仅适用于同一流线，不可随意跨流线套用。可通过“天女散花”等典型反例，引导学生辨析伯努利原理的适用边界，避免形成“只要流速大压强就一定小”的绝对化认知。其次，注重物理本质的揭示。教学中不宜仅停留在现象描述层面，而应从机械能守恒的角度阐释伯努利原理的物理实质——静压能与动能的相互转化。当流体受外力做功被加速时，其机械能总量增加，静压并不随之减小，这一点需特别强调。再次，培养学生科学严谨的思维习惯。面对复杂的流体现象，应引导学生先分析流场结构，判断是否满足伯努利方程的前提条件，再选择合适的物理规律进行解释，防止经验性套用。对于教材中的定性结论，要帮助学生理解其成立的前提与局限，培养审慎的科学态度。

作者简介：任少铎（1990—），男，一级教师，研究方向：中学物理教育教学，E-mail：972148765@qq.com。

参考文献

[1] 义务教育物理课程标准实验教科书编写组．义务教育教科书物理八年级全一册[M]．上海：上海科学技术出版社，2023.

[2] 任少铎．伯努利方程的本质及机翼升力的教学分析[J]．物理教师，2023，44(06)：63-65.

[3] 易文彬，孟庆昌，邓辉，等．伯努利方程教学设计中的若干问题[J]．力学与实践，2021，43(06)：967-972.

[4] 任少铎．“流速大压强小”中的流速是相对地面的速度吗？：对香蕉球现象的再分析[J]．物理教师，2021，42(04)：63-65.

[5] 武居昌宏．漫画流体力学[M]．高丕娟，译．北京：科学出版社，2010.

[6] 王洪伟．解析流动：画说流体力学[M]．北京：人民邮电出版社，2020.

[7] Mateo D，Álvaro S，Martín M，et al．When the Quarter Jumps into a Cup(and When It Does Not)[J]．The Physics Teacher，2022，60(02)：87-87.