

浅析“乒乓球贴地”实验中浮力的成因和启示

张立平 张童语 冯杰 胡古今 方伟

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2020-10-29)

摘要:浮力是初中物理的重要内容,为适应新课改后浮力教学要求的变化,有相当部分的经典教学案例利用乒乓球和矿泉水瓶来说明不同情况下物体是否受到浮力的问题.为正确表达案例中乒乓球受到的浮力情况,将采用实验与理论相结合的方法,建立准确而清晰的物理模型,最后基于“乒乓球贴地”实验中浮力成因的分析,对自制教具的研制和使用提出相关建议.

关键词:浮力 产生条件 自制教具 物理解析

1 关于浮力的几点说明

1.1 浮力的定义

人民教育出版社出版的初中《物理》教材是这样定义浮力的^[1]:浸在液体中的物体受到液体对它向上托的力,这个力叫做浮力.上海科技出版社出版的《初中物理》教材对浮力的定义有一定的扩展^[2],即液体和气体对浸在其中的物体有竖直向上托的力,这个托力叫做浮力.尽管二者在定义的表达上有所差异,但本质上都是指物体受到的流体(液体和气体)对物体向上托的力,浮力的方向一定竖直向上,这是本文讨论的重点,后面将做具体的描述.

1.2 浮力产生的原因

人教版的初中《物理》教材对浮力产生的原因也进行了初步说明.考虑一个如图1所示的浸没在水中的正方体所受的浮力.根据液体内部压强的性质可知,液体内部向各个方向都有压强,且压强的大小与液体的密度和深度成正比,浸没在水中的正方体的每个表面都将受到水的压力作用.前后两个表面上——对应的位置在水中所处的深度相同,受到的压力大小相等、方向相反,合力为零.左右两个表面的受力情况与前后两个表面的受力情形类似,水平方向上正方体受到的合压力为零.由于正方体上下两个表面在水中所处深度的不同,受到的压强不

同,受到的压力也不同.设正方体下表面所处深度为 h_1 ,上表面所处深度为 h_2 ,此时下表面和上表面的压强分别为

$$p_1 = \rho g h_1 \quad p_2 = \rho g h_2$$

由于 $h_1 > h_2$,所以 $p_1 > p_2$ ($F_1 > F_2$).上表面压力方向向下,下表面压力方向向上,由此上下表面存在一个向上的压力差,这个压力差就是浮力.也就是说,浸在流体中的物体上下表面存在向上压力差,这是浮力产生的根本原因.

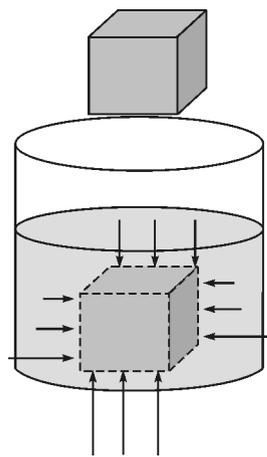


图1 浸没在水中的正方体所受浮力

2 问题简述

在初中物理教学中,下述的“贴地”浮力实验常被用来说明处于液体中的物体是否受到浮力作用的

问题^[8]. 将一个乒乓球放置在装有一定量水、倒立的剪掉瓶底但瓶口盖紧的矿泉水瓶中,如图2所示,此时乒乓球处于漂浮状态,物体所受浮力和重力是一对平衡力,大小相等,方向相反,即 $F_{\text{浮}} = G_{\text{物}}$,即表明乒乓球受到一个竖直向上的浮力作用.

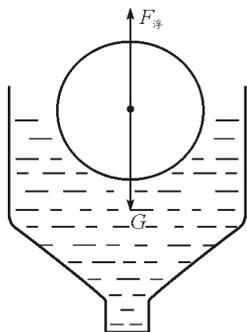


图2 漂浮状态时乒乓球受力示意图

如图3所示,将水倒净并去掉瓶盖后,重新把乒乓球放入矿泉水瓶中,其中 F_1 和 F_2 分别表示矿泉水瓶两壁对乒乓球的支持力.此时再往矿泉水瓶中注水,如图4所示,观察到乒乓球卡在矿泉水瓶瓶口的位置,并没有上浮,说明乒乓球并没有受到水对它的浮力作用.

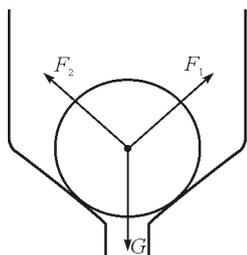


图3 无水时乒乓球受力示意图

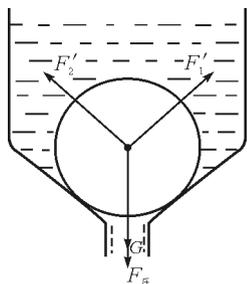


图4 “贴地”时乒乓球受力示意图

但是简单直观地根据乒乓球没有浮起的现象就判断乒乓球并未受到浮力的结论真的可靠吗?下面,我们将通过实验验证和数学推理相结合的方法对该结论进行证伪.

3 DIS 实验

3.1 实验方法

在测量乒乓球所受浮力大小的方式上,我们选取了初中阶段常用的称重法,先有力的传感器测出乒乓球在空气中受到的重力,记录数据为 F_1 ,再将乒乓球浸入水中,力的传感器示数稳定后记录数据 F_2 ,根据物体的平衡条件,两次示数的差值即为乒乓球所受浮力,公式为 $F_{\text{浮}} = F_1 - F_2$.考虑到力的传感器的示数会随着水沿乒乓球与瓶壁的缝隙流出而变化,实验中将以 $F-t$ 图像的方式记录力的变化,以便进一步的分析.

3.2 实验方案

具体的实验方案如下:

- (1) 将力传感器接入数据采集器.
- (2) 将力传感器固定在铁架台上,使其测钩竖直向下.
- (3) 对力传感器调零,并将乒乓球用细绳固定并悬挂在力传感器的挂钩上,测量出乒乓球在空气中的重力为 0.04 N ,如图5所示.



图5 乒乓球在空气中的重力

- (4) 将旋紧瓶盖、剪掉瓶底的矿泉水瓶倒置在铁架台上,向瓶内注入适量清水.
- (5) 将乒乓球放入矿泉水瓶中,观察到乒乓球漂浮在水面上,待读数稳定后,记录数据为零,如图6所示.



图6 乒乓球漂浮时力的传感器示数

- (6) 将矿泉水瓶中的清水倒净,去掉瓶盖,再将乒乓球放进矿泉水瓶,调整细绳的长度,使乒乓球与瓶口刚好接触但无挤压,计算机显示数据为 0.04 N .
- (7) 向矿泉水瓶中注入适量清水,观察到在水

逐渐浸没乒乓球的过程中,乒乓球始终处于瓶口位置,并未浮起,且计算机显示数据随着水位的上升从0.04 N不断升高.

(8) 当计算机显示数据升至0.7 N左右时停止注水,观察到水顺着乒乓球与瓶口的缝隙不断流出的过

程中,乒乓球仍未浮起,计算机显示数据随着水位下降从0.7 N逐渐降至0.06 N,示数变化如图7所示.

(9) 改变小球的半径和瓶子的口径,重复上述(6)~(8)步骤,示数变化如图8所示.

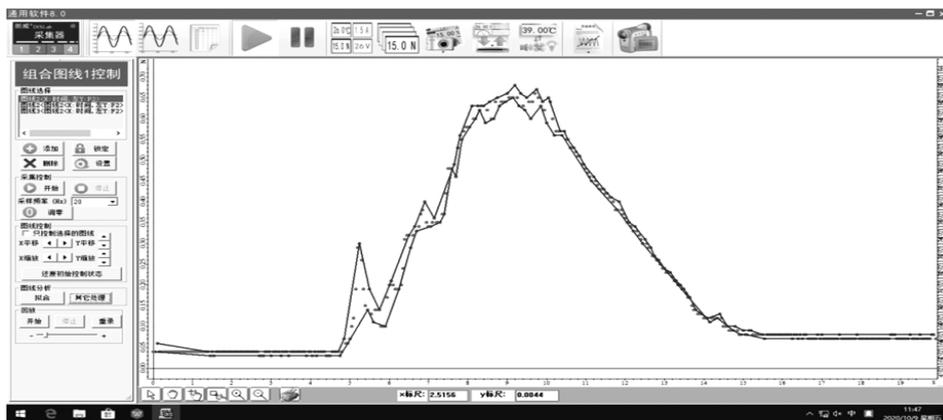


图7 第一次实验 $F-t$ 图

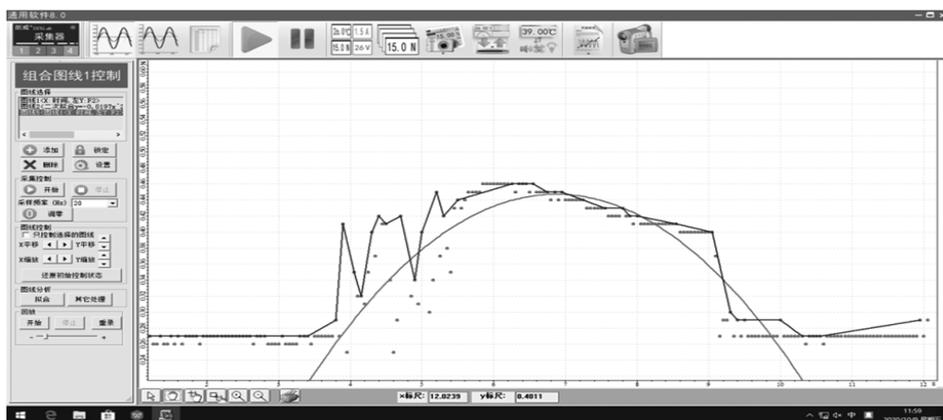


图8 第二次实验 $F-t$ 图

通过实验数据分析可以得出:在误差允许的范围內乒乓球在倒置的去掉瓶盖、剪掉瓶底矿泉水瓶中,无论是注水还是停止注水等待水流净的过程中,受到水的压力方向均是向下的,同时随着矿泉水瓶中的水不断增加,这个压力不断增大,反之随着瓶中的水不断流出,压力又不断减小,直到水流尽,压力减小为零.

那么隐藏在实验现象背后的本质原因又是如何呢?改变小球的半径和瓶子的口径会对乒乓球的受力情况产生影响吗?考虑到实际装置的半径无法线性改变,实验验证受到了一定的限制,下面将对所建立的物理模型进行深入的理论分析.

4 理论分析

4.1 计算方法

当浸在流体中的物体与容器底部不密切接触时,由于液体内部的压强随深度的增加而增加,所以物体下表面受到的向上的压力大于物体上表面受到的向下的压力,上下两表面的压力差即为物体所受的浮力.计算公式为

$$F_{\text{浮}} = F_{\text{下}} - F_{\text{上}}$$

其中 $F_{\text{下}}$ 为物体下表面所受的压力, $F_{\text{上}}$ 为物体上表面所受的压力,另外对于上下表面面积相同的物体,计算公式可化为

$$F_{\text{浮}} = F_{\text{下}} - F_{\text{上}} = \rho g S (h_{\text{下}} - h_{\text{上}})$$

其中 $h_{\text{下}}$ 为物体下表面所处深度, $h_{\text{上}}$ 为物体上表面所处深度.

在该问题中,考虑到乒乓球的表面是球面,我们可以先利用微积分的方法分别计算出乒乓球上下表面受到的水的压力,再具体分析当乒乓球的半径和瓶子的口径满足什么条件时,其上下表面压力差的方向向上,即乒乓球受到浮力作用.

4.2 乒乓球受到的浮力分析

4.2.1 模型 1

针对“乒乓球贴地”实验中乒乓球是否会受到浮力的问题,我们首先考虑了一种理想状况,当乒乓球半径与矿泉水瓶口径刚好合适时的情况,此时瓶中的水没有明显的流动,可用流体静力学进行分析和公式推导^[4].

首先,利用微元法(图5)计算乒乓球上表面所受水的压力

$$F_{\text{上}} = \int_0^R p dS \quad (1)$$

$$p = \rho g (H - \sqrt{R^2 - r^2}) \quad (2)$$

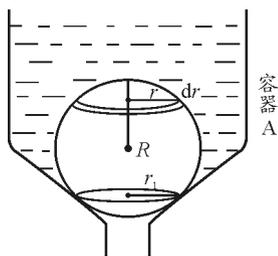


图9 乒乓球“贴地”实验微元图

联立式(1)、(2)可得

$$F_{\text{上}} = \int_0^R \rho g (H - \sqrt{R^2 - r^2}) dS =$$

$$\pi \rho g \int_0^R (H - \sqrt{R^2 - r^2}) dr^2 =$$

$$\pi \rho g \left[\int_0^R H dr^2 + \int_0^R \sqrt{R^2 - r^2} d(R^2 - r^2) \right] =$$

$$\rho g \pi R^2 \left(H - \frac{2}{3} R \right)$$

其次,用同样方法计算乒乓球下表面所受的压力,此时假设乒乓球下底面与瓶口相切的截面半径为 r_1 ,此时下表面受水的压力为

$$F_{\text{下}} = \int_{r_1}^R p dS \quad (r_1 < R) \quad (3)$$

$$p = \rho g (H + \sqrt{R^2 - r^2}) \quad (4)$$

联立式(3)、(4)可得

$$F_{\text{下}} = \int_{r_1}^R \rho g (H + \sqrt{R^2 - r^2}) dS =$$

$$\pi \rho g \int_{r_1}^R (H + \sqrt{R^2 - r^2}) dr^2 =$$

$$\pi \rho g \left[\int_{r_1}^R H dr^2 - \int_{r_1}^R \sqrt{R^2 - r^2} d(R^2 - r^2) \right] =$$

$$\pi \rho g \left[H (R^2 - r_1^2) + \frac{2}{3} (R^2 - r_1^2)^{\frac{3}{2}} \right]$$

若此时乒乓球受到浮力,则 $F_{\text{下}} > F_{\text{上}}$,即

$$F_{\text{浮}} = F_{\text{下}} - F_{\text{上}} =$$

$$\rho g \pi \left[H (R^2 - r_1^2) + \frac{2}{3} (R^2 - r_1^2)^{\frac{3}{2}} \right] -$$

$$\rho g \pi R^2 \left(H - \frac{2}{3} R \right) =$$

$$\rho g \pi \left[\frac{2}{3} R^3 - H r_1^2 + \frac{2}{3} (R^2 - r_1^2)^{\frac{3}{2}} \right]$$

根据上式可以得知,若矿泉水瓶中水没有明显的流动,此时适当改变水的高度、球的半径 R 和球下底面与瓶口相切的截面半径 r_1 ,乒乓球是有可能受到浮力的,例如当 $R=0.02\text{ m}$, $r_1=0.01\text{ m}$, $H < \frac{11}{150}\text{ m}$ 时,乒乓球就会受到浮力.

4.2.2 模型 2

考虑了理想状况后,我们进一步分析了水发生明显流动时的情况,乒乓球放置在倒立的、剪掉瓶底并去掉瓶盖的矿泉水瓶中,注入清水,水将沿着瓶壁与乒乓球的缝隙流出,流体静力学不再适用于这一问题,但可以利用伯努利方程进一步分析^[5].

不同版本的初中物理教材也对伯努利方程进行了简单的定性描述,如人教版八年级第二学期物理教材中提及在气体和液体中,流速越大的位置,压强越小.但是考虑到初中学生的实际认知和理解能力,教材没有再进一步讲解不同高度上流速和压强的关系以及伯努利方程的定量表达式.

根据伯努利方程 $\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh + p = \text{常量}$ (此时 h 表示高度, v 代表流速, p 为流体中某点的压强),

乒乓球上下表面的压强差可以表示为

$$p_{\text{下}} - p_{\text{上}} = \frac{1}{2}\rho(v_{\text{下}}^2 - v_{\text{上}}^2) + \rho g(h_{\text{下}} - h_{\text{上}})$$

在去掉瓶盖和瓶底且倒置的矿泉水瓶中注水后,由于瓶身与乒乓球间的缝隙大小不同,乒乓球上表面所接触的水比乒乓球下表面接触的水流速小,但是乒乓球上表面所处的高度要比下表面所在高度高,通过上述分析可以得知

$$\frac{1}{2}\rho(v_{\text{下}}^2 - v_{\text{上}}^2) > 0 \quad \rho g(h_{\text{下}} - h_{\text{上}}) < 0$$

如果上下表面高度差对压强的影响足够克服流速差对压强的影响,同时满足上述理想情况时需要满足的条件,那么乒乓球就会受到向上的浮力作用。但根据实验现象可以看出,正常的乒乓球显然并不能满足上述条件。

5 结束语

总之,一个与容器底部密切接触的物体是否受到浮力应该根据具体情况分析,根据我们的研究结果表示,球体与容器底部密切接触时,其是否受到浮力作用与球体半径、瓶子口径、水的高度和流速均有关系。

(上接第140页)

没有空气开关等安全设备,一旦电源短路,将会有巨大的安全隐患!因此,本题没有正确答案。

修改建议:为了符合实际情况,建议将原题中的电路图改为图6中的电路图,并且将第(1)问的答案改为B,如此题目和答案就都没有错误了。

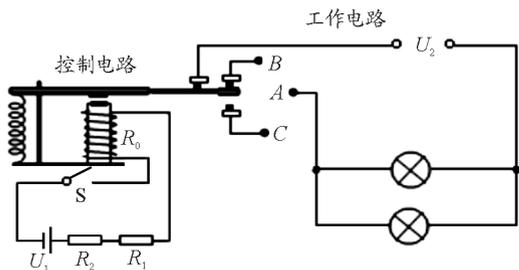


图6 修改后的电路图

物理学是一门严谨的自然科学,中考题也一般会被广大师生广泛传播和研究,若试题出现不严谨,不仅有可能会影响考试的公平性,还将误导广大师

通过对“乒乓球贴地”实验中浮力成因的探讨,我们对自制教具的研制和使用也进行了深层次的思考,自制教具通常取材于生活中常见的物品,制作简单,但是自制教具所涉及的科学原理常常不是单一的,要想做到知其然,知其所以然,必须始终以科学性为主线^[6],依据相关的科学知识制作教具,并经过实践检验。

参考文献

- 1 邹芳,周新雅,刘尧,等.五种版本教材“阿基米德原理”分析及教学建议[J].实验教学与仪器,2018,35(4):17~20
- 2 李哲君,陈玫.浮力原因演示器的制作及其教育功能[J].物理教学,2017,39(1):41~42,40
- 3 胡欣.浮力与阿基米德原理整合式探究教学设计[D].桂林:广西师范大学,2017
- 4 李云雄.从浮力产生原因谈球体浮力[J].中学物理教学参考,2019,48(11):32~34
- 5 李凤佳,白雪.突破浮力计算的方法——例题分析[J].中学物理教学参考,2016,45(20):78~79
- 6 赵锦荣.物理教具自制毋忘科学性是灵魂——关于“光的反射折射演示方法”的若干质疑、商榷与感想[J].教育科学论坛,2009(12):46~47

生导致学生思维错乱,不利于培养学生良好的物理学科核心素养.中考作为一个特殊的育人环节,各地中考命题务必慎之又慎,对于相关现象和问题的描述,务必准确严谨,切不可出现错误,只有这样才能彰显物理学科的严谨性,学生物理学科核心素养才能得到真正提升^[5].

参考文献

- 1 王心.探索放风筝的力学原理[J].湖北中小学实验室,1996(5):47~48
- 2 常生,赵娟芝.我国医用口罩标准对比解读[J].针织工业,2020(3):14~17
- 3 李刚.高效水雾降尘技术的实验研究及工程应用[D].湘潭:湖南科技大学,2009
- 4 南京市教育局.【关于中考物理参考答案的说明】[EB/OL].
https://weibo.com/3927471126/JcHNIkkmf?type=comment#_rnd1600438700862,2020-07-24
- 5 任少铎.2019年中考物理试题中的几种典型错误分析[J].物理教师,2020,41(2):47~49