

用等效原理解析“异常”物理实验现象

吴 静 罗 红

“异常”的实验现象

如图 1 所示的一个封闭小车, 左边车壁固定一杆, 杆上用细绳(质量不计)系一个乒乓球(质量为 m_1), 右边车壁固定一杆, 杆上用细绳(质量不计)系一小铅球(质量为 m_2)。在小车中加满水, 且使小车产生水平向左的恒定加速度 a 。实验现象显示: 小球 m_1 从原来细绳竖直向上的状态向左运动, 小球 m_2 从原来细绳竖直向下的状态向右运动; 当 m_1 与 m_2 最终分别相对于小车静止时, 所在位置如图 1 所示。

有人将其解释为:“与同体积的水相比, 铅球的质量大、惯性大、运动状态难改变, 即速度变化慢, 而和小车一起加速运动, 所以铅球相对于小车向后运动, 同理可知乒乓球相对于小车向前运动。”

我们认为以上定性解释不够详尽和透彻, 不能全面反映此实验现象中所蕴藏的物理学原理。以下是我们就此实验现象所作的定性、定量分析, 仅供读者参考。

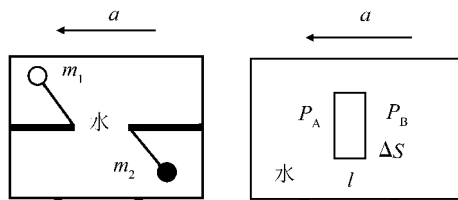


图 1 实验现象

定性分析

“异常”所在 这里所说的“异常”是对乒乓球而言的。首先, 乒乓球在加速向前的小车里向前运动似乎与我们的日常经验相悖; 另外, 通过一般的受力分析也难以解释。两小球在竖直方向上所受的力总是可以平衡的。现在来看水平方向, 小车可作为一非惯性系, 两小球均受到水平方向向右的惯性力。铅球所受绳子的水平方向分力向左、惯性力向右, 似乎可以理解为这两个力的合力维持铅球在非惯性系小车里的平衡; 而乒乓球在水平方向上受绳子的水平向右分力和同样向右的惯性力, 其合力必定也向右, 因此乒乓球似乎不会相对于小车保持平衡状态, 但实验显示乒乓球确实在图示位置与小车保持相对静止, 这里似乎就出现了“异常”。要想很好地解释,

水平方向上就要应该存在一个向左的“神秘”的力。我们通过下文分析会发现, 这个力确实存在。

浮力的实质 要找出这个“神秘”的力, 就必须理解浮力的实质。浮力对于大多数学生而言, 只是记忆中的一个公式, 而且浮力的方向总是向上。其实, 处于引力场的静止液体内部才会产生压强差, 才会对其中的物体产生浮力。若没有引力场, 静止液体内部也无所谓压强差, 浮力就不会存在。静止液体内部存在压强差, 是由于引力场中静止液体分子的密度符合玻尔兹曼密度分布。即液体分子在引力场的作用下向下挤压, 导致下部分液体分子密度要大于上部分液体分子密度, 则下部分液体分子之间的距离要小于上部分液体分子间的距离, 分子距离越小、相互斥力越大。当物体处于液体内部时, 物体表面将附着液体分子, 这些液体分子又受到周围液体分子的斥力, 这些分子斥力的合力因为上、下部分液体分子密度的差异而向上, 与引力的方向相反, 这个合力便是作用在物体上的浮力。

等效原理解释 那么在水平方向上存在加速度的液体又会发生什么变化呢? 根据广义相对论的弱等效原理 $m_{\text{惯}} = m_{\text{引}}$ (即加速度与引力场等效的原理), 做加速运动的液体会与引力场中的液体产生相同的效应。加速向前的小车等效于静止小车处于水平引力场中。因此结合上文有关浮力的讨论可知, 对于上述实验小车里的液体, 水平方向的加速度将使其在水平方向上产生分子密度差异, 从而产生水平方向的压强差, 且右边液体压强大于左边液体压强, 则两小球在水平方向就会受到一个向左的“浮力”(我们暂且如此称呼), 这个“浮力”即我们要找的那个“神秘”的力。简而言之, 乒乓球(铅球)在加速运动中的水里向前(向后), 与乒乓球(铅球)在处于引力场中的水里向上(向下)的道理是等效的。

定量分析

找到了水平方向的“浮力”, 我们就可以通过一些定量计算较为圆满地解释上述“异常”现象。

水平“浮力” 如图 2 所示, 在液体中取一液体元, 厚度为 l 、截面积为 ΔS , 对此液体元则有 $P_B \Delta S - P_A \Delta S = \Delta m a = \rho_{\text{水}} \Delta S l a$ 。由上式可知, 与重力场

图 2 水平“浮力”

冰刀下的物理

张怀华



溜冰是一种古老的体育运动,起源于约 2000 年前北欧斯堪的纳维亚半岛的冰冻河川或湖泊。当地人把动物骨骼磨平,用皮带把其中较小的绑在脚上滑行,较大的则做成雪橇用于滑雪。现在流行的溜冰鞋是美国花式溜冰名家海恩斯于 1870 年发明的。这种不锈钢冰刀使溜冰者更能随心所欲地展现越来越复杂的花式溜冰技巧,溜冰俱乐部也如雨后春笋般出现在世界各地。

冰是一种与众不同的固体,在冰面上可以自由、快速地滑行。而穿着溜冰鞋在钢板、木板、玻璃、水泥地面等固体表面上滑行时,随着一阵刺耳的噪音,必然是狼狈不堪地摔倒在地。这是为什么呢?物理教科书中指出:冰的光滑性源自水的特性,冰块在受到挤压时熔点会降低。冰刀在冰上滑行时,冰面受到的压强很大;按照热力学原理,冰的熔点随压强的增大而降低,冰刀下冰的熔点将低于环境温度,高压

下的冰从周围环境中吸收热量而熔化,使冰刀和冰面间形成薄薄的水

层,从而起到润滑作用,大大减少了冰刀与冰面间的摩擦系数,使运动员可以在冰面上轻松地高速滑行;冰刀滑过后,它又再次冻结。

事实真是这样吗?下面就来计算一下冰刀对冰面的压强所引起的熔点变化。已知标准大气压强为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、冰的密度为 $0.917 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、水的密度为 $1.000 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、摩尔质量为 0.01802 kg/mol 、冰的熔化热为 $6.008 \times 10^3 \text{ J/mol}$ 、标准状况下的熔点为 273.15 K ;设滑冰运动员质量 $m = 60 \text{ kg}$ 、冰刀宽度 $d = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$ 、冰刀与冰面的有效接触长度 $l = 0.1 \text{ m}$ 。可知两只冰刀与冰面接触面积的和为 $S = 2ld$,冰刀对冰面的压强为 $p = F/S = mg/2ld$,代入数据可得 $p = 1.5 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。由克拉伯龙方程,

中静止液体相似,物体在加速液体中受到的“浮力” $F'_{\text{浮}} = \rho_{\text{水}} V_{\text{排}} a$ 。

竖直方向上的受力分析 图 1 中的两小球处于杆的上方还是下方,取决于其自身的密度。竖直方向上有 $F'_{\text{浮}} + mg + T \sin \theta = 0$, θ 表示球与小车达到相对静止时绳子与杆的夹角。对乒乓球有 $(4/3) \pi R^3 \rho_{\text{水}} g - (4/3) \pi R^3 \rho_{\text{球}} g = T_1 \sin \theta_1$ 。由于 $\rho_{\text{球}} < \rho_{\text{水}}$,则 $T_1 \sin \theta_1 > 0$,此球必在杆的上方,绳子的竖直方向分力向下。对铅球作同样分析,由于铅球密度 $\rho_{\text{球}} > \rho_{\text{水}}$,则此球必在杆的下方,绳子的竖直方向分力向上。

水平方向上的受力分析 绳子拉力在水平方向上的分力等于水平液体的“浮力”和惯性力的合力,所以水平方向上有 $F'_{\text{浮}} + ma + T \cos \theta = 0$ 。对乒乓球有 $(4/3) \pi R^3 \rho_{\text{水}} a + T_1 \cos \theta_1 = (4/3) \pi R^3 \rho_{\text{球}} a$ 。由于 $\rho_{\text{球}} < \rho_{\text{水}}$,则 $T_1 \cos \theta_1 < 0$,即绳子拉力在水平方向上的分力向右,至此可判断:当乒乓球相对小车静止时,正是处在图 1 所示的位置。同理可以正确理解铅球的情况,铅球在水平方向上应是三力平衡,而不是最初认为的二力平衡。

讨论

通过上述定性、定量分析可得以下结论(参考图 1):首先,小球所受的力有向下的重力、向后的惯性力、细绳的拉力、向上的浮力、向前的“浮力”。另外,与液体密度不同的小球在此实验条件下只有上述两种可能的运动状态:要么如图 1 中的乒乓球,要么如铅球。通过上述计算还可得出,当小球相对小车静止时,两种情况下绳子与杆的夹角相等 ($\theta_1 = \theta_2$, $\tan \theta_1 = \tan \theta_2 = g/a$),即夹角完全由重力加速度 g 和运动加速度 a 决定,与小球无关。那么,到底小球会处于哪种运动状态呢?这完全由小球密度与液体密度的关系决定。当小球密度小于液体密度时,其运动如图 1 中的 m_1 ;当小球密度大于液体密度时,其运动如图 1 中的 m_2 。同样,若小车内不是水而是空气,两小球换成氢气球和一般气球,也会发生与上述实验完全相同的现象。

至此就比较清楚了——本文最初提出的所谓“异常”现象,其实并非异常,而是引力场加速系统中的一种普遍现象。

(湖北省十堰市郧阳医学院数理教研室 442000)