

• 问题讨论 •

由翻转水瓶实验理解角动量守恒与碰撞过程

吴亚东 程建荣

(西北工业大学理学院 陕西 西安 710072)

摘 要: 翻水瓶挑战在 2017 年风靡了美国,挑战者需将装有一定量液体的水瓶抛出,并使其稳稳地立在平面上。通过对水瓶的运动状态分析,从定性角度出发,得到决定挑战成功的影响因素:水瓶重心、水瓶形状、出手方式等。再进行一定的定量分析后,通过一系列实验,发现一系列规律并给出可行的建议。并通过此实验,引导学生理解角动量守恒与物理碰撞过程,同时展示了其在跳水等运动的相似之处。

关键词: 翻水瓶实验;碰撞过程;角动量守恒;稳定性;重心

2017 年在美国掀起了一场翻水瓶挑战(Flipping Bottle Challenge),规则很简单,用手向空中扔一个装有适当液体(例如水)的水瓶,使其在空中进行翻转,最终竖直稳定地立在平面上(桌子或者地板)。

由于规则对于水瓶的材质、瓶内液体的性质(粘度、密度)、液体高度以及平面的材质没有特殊规定。因此,有了足够的空间去发挥。比如,有人使用可口可乐的水瓶,有人用类似农夫山泉的水瓶,还有人使用饮水机的水桶。在课桌、地板、滑板、篮球甚至路边的广告牌上都有稳稳立住的水瓶。

虽然翻水瓶游戏看似简单,但是若要直接进行数学分析,建立模型的话,则会发现,其中涉及到的物理知识较多,如质点运动学、刚体力学、流体力学等,因此,笔者采取从定性到定量化的分析方法逐步解决问题,并通过实验理解角动量守恒与碰撞过程^[1-2]。

1 定性理解

对于翻水瓶至稳定状态这一物理过程可以分为如图 1 所示的三个步骤:出手、空中翻转、碰撞至稳定。

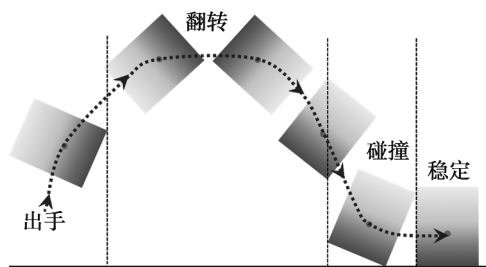


图1 运动过程

因此,影响水瓶翻转成功的因素包括:水瓶的选择(形状、密度、硬度等)、瓶内液体体积以及液体的性

质,出手的角度以及力度和平台的性质等。

1.1 水瓶的选择

在市场上所有能看到的水瓶可以归为两类:可与地面完全贴合圆形底(如农夫山泉、饮水机饮水桶等)以及非完全贴合的形状(如塑料可口可乐瓶子),如图 2 所示。



图2 水瓶类型

将这两种瓶子拿在手里或放在桌子上我们可以明显地发现两者的不同,农夫山泉的水瓶可以严密地贴合在桌面上,而可口可乐的水瓶仅有几个“支柱”与桌面接触,并且农夫山泉的水瓶较为柔软容易变形,但可口可乐的瓶底很坚硬不易变形(如图 3)。

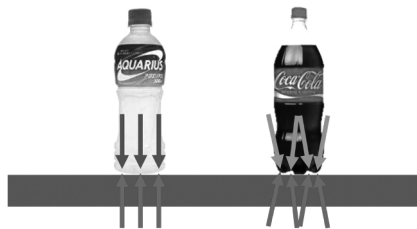


图3 着陆方式

因此,在碰撞阶段两者的差别就很明显,因为农夫山泉水瓶易通过变形而将动能消耗,更容易静止直

作者简介: 吴亚东(1997-)男,北京密云人,本科在读,研究方向:数学建模、物理实验竞赛;

程建荣(1961-)男,陕西人,高级实验师,研究方向:物理演示与教学。

立在平面上,从而有更大的几率达到成功的翻转.但是对于可口可乐水瓶的碰撞过程,由于瓶体难以发生形变,也就导致其需要较长时间才能将动能消耗,所以相对于农夫山泉水瓶不易完成翻转.

在选择水瓶方面,应当选择有较为柔软、易变形的,与平面可以紧密贴合的瓶底的水瓶(如图4).



图4 不同水瓶翻转难度

1.2 瓶中液体高度

瓶中液体的高度会影响到总体水瓶系统的重心,若暂时将瓶中液体“冻结”,也就是说,水瓶系统的重心是不变的也就可以看做是刚体.

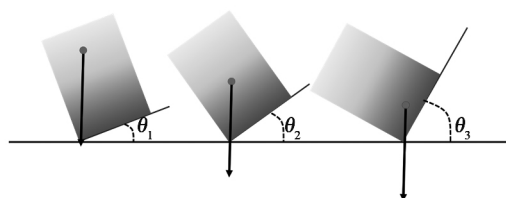


图5 重心影响

如图5所示,可以清楚地看出:物体能立在平面上的临界状态的角度满足 $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$. 也就表明了当刚体的重心越低就有更大概率稳定在平面上,就更可能完成水瓶翻转,即系统具有更强的稳定性.

所以,在灌入瓶中液体时,应当选择尽可能降低整个体系重心的液体和适当的高度(高度约 $1/3$ 或以下,使水瓶可以在 45° 的倾角下仍可恢复直立的状态即可),同时适当高度的液体还可以使水瓶在翻转过程中适当减速,更加有利于完美的着陆.

1.3 出手方式

在翻转水瓶的三种过程中,出手的方式(包括力度、角度等)是直接关系到翻转水瓶成败的决定性因素.

首先,应当尽量保持水瓶出手后在空中做竖直平面内的旋转,即出手的方向应当与水瓶的轴线在同一平面内.不然,水瓶将在三维空间里翻转,不易达到一个稳定的着陆姿势.

由于在空中翻转时,瓶内的液体与瓶壁摩擦较小,可以在重力作用下沿着瓶壁自由流动,保持液面

平稳.这就导致了液体在不同的时刻所处的相对位置与形态是不一样的.当出手时给予水平方向的初速度大,则水瓶运动的水平距离较远,但是碰撞过程中这部分能量难以抵消,会导致水瓶内液体向水瓶顶部运动,使其重心升高,也就更不易稳定直立.但是当所给予的垂直方向的速度较大,则水瓶向更高处运动,着陆时,水平方向速度较小,竖直方向速度较大,这种情况下水瓶更容易稳稳地立在平面上.较为合适的出手方式是使水瓶的轴线与平面平行(如图6).

总之,应当保持水瓶在竖直平面内做水平分速度较小的旋转运动,这样才更有机会完成水瓶翻转.

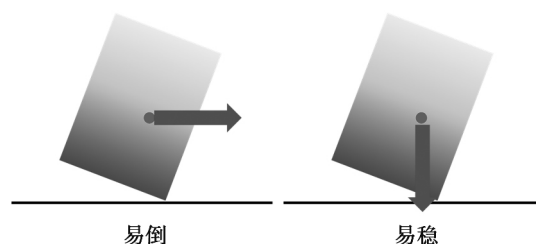


图6 水平分速度对稳定性影响

2 定量分析

水瓶整体的运动可以类比为运动员在空中的翻转,如跳水运动员从离开跳板到入水的过程.水瓶在空中翻转的过程中,其角动量守恒,但是体系的转动惯量是变化的,所以其角速度也是变化的.

2.1 空中运动时间

在讨论瓶子在空中运动时,可近似地可以将其按质点处理(图7),其过程满足以下公式:

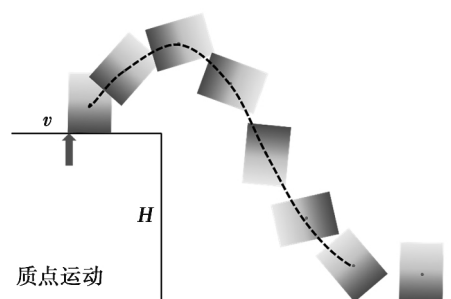


图7 整体运动时间

$$\begin{cases} t_1 = \frac{v}{g} \\ t_2 = \frac{v}{g} \\ H = vt_3 + \frac{1}{2}gt_3^2 \end{cases}$$

在给定的 H 和 v 下,可以求出瓶子在空中的运动

时间,可确定后一步在空中的翻转状态.

2.2 空中翻转

因为瓶中液体会在瓶中运动,导致转动惯量变化,但是这样难以进行数学处理,因此先讨论在定轴转动惯量(瓶中液体粘度大,难以运动)即角速度不变情况下的运动,再推广到角动量变化时的情况.

2.2.1 转动惯量不变时

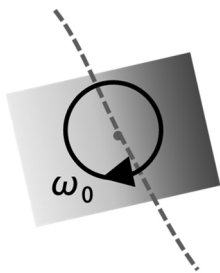


图8 翻转过程

$$\theta = \theta_0 + \omega t$$

可根据之前所求出的时间,确定水瓶着陆时的姿态(如图8).

2.2.2 转动惯量变化

由于水瓶中液体的运动,导致转动惯量发生变化,有下式关系成立:

$$L_0 = \sum_1^n \vec{r} \times \vec{v} m = \vec{r}_{\text{瓶}} \times \vec{v}_{\text{瓶}} m_{\text{瓶}} + \vec{r}_{\text{液}} \times \vec{v}_{\text{液}} m_{\text{液}}$$

可使之前的结果更加符合实际.

2.3 落地状态

要使水瓶成功落地,主要取决其落地时的姿态与速度(如图9).



图9 落地状态

$$\begin{cases} v_x = v \cos \theta_t \\ v_y = v \sin \theta_t \end{cases}$$

$$\theta = \theta_0 + \omega t$$

水瓶着地时的角度应小于图10中所示的临界角度.

2.4 碰撞

由于瓶子在落地前有动能,只能通过碰撞使能量耗散.而这一过程却是最容易使水瓶倾倒的,同时也是最难分析的.因为碰撞中水瓶内的液体会突然受到碰撞,激起水花等,从而使瓶子重心提高而翻倒.

3 实验验证

由于水瓶及其内部的水的运动状态较为复杂,难

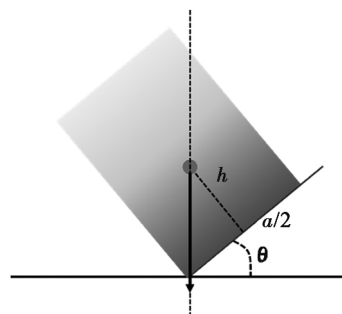


图10 临界范围

以推导出具体表达式,而且每次试验的微小差异,也会对水瓶的成功翻转产生较大影响.因此,要进行大量实验,尝试探索出可行的方式.分为用手抛水瓶和用机器抛射水瓶两种方式.使用机器抛射水瓶可以较为精确地控制每次的初始条件,从而得到了一定的规律.

3.1 机械投射不同抛水瓶

制造机械投射装置,以控制每次的投射初始参数,从而进行定量的实验(如图11、图12、图13).



图11 投射机器



图12 投射器俯视图



图13 投射器侧视图

注重原理分析 还原事实真相

——一道静电计的模考题引发的思考

李俊永¹ 王长江²

(1. 仁怀市周林高级中学 贵州 仁怀 564500; 2. 安徽师范大学物电学院 安徽 芜湖 241000)

摘要: 电势差静电计是定性判断两点间电势差变化的常见仪器, 常用于分析平行板电容器两极板间电势差的变化情况. 以一道令人费解的高考模拟题为切入点, 直击疑团, 经历了生疑—明理—释疑—例析—反思的研究过程, 通过对静电计的原理分析, 最终还原了事实的真相.

关键词: 静电计; 验电器; 电容器

静电计和验电器在外形上有着诸多相似的地方, 他们的工作原理却相去甚远. 目前, 很多中学物理教学参考书, 包括物理教科书并未对这两种仪器的工作原理进行深入的介绍, 导致学生乃至大部分中学物理教师对此不甚了解, 形成了分析的误区, 特别是静电计与平行板电容器相结合的问题, 表现更为突出, 本文借此模考题进行分析.

1 问题的提出

在平行板电容器的动态分析当中, 常见的类型有极板之间的电压 U 不变, 分析极板中聚集的电荷 Q , 和其间电场强度 E 等参量的变化情况, 另一种情况是极板间的总电荷量 Q 不变, 研究极板间电压 U 和电场强度 E 等参量的变化情况. 如果把平行板电容器和静电计连接起来问题将会变得更加丰富和复杂. 笔者所

作者简介: 李俊永(1987—), 男, 陕西商洛人, 硕士, 中学一级教师, 研究方向: 物理科学方法的显化、思维型课堂研究;

王长江(1972—), 宁夏石嘴山人, 副教授, 博士, 研究方向: 物理教育、教师教育研究.

3.2 手抛不同抛水瓶

手抛水瓶难以运用控制变量法试验, 笔者进行了多次试验, 成功概率较低. 只发现了存在一定角度和略向前移动等规律. 因此, 这里不作讨论.

4 总结与推广

4.1 概率较低

翻转水瓶实验中, 成功的实验次数较少, 概率较低. 需要进行一定次数的反复练习并掌握一定的技巧.

水瓶较容易发生前倾或侧翻状态, 而且即使当水瓶竖直着陆时, 也会发生水瓶倾倒, 原因可能是因为瓶内的液体发生运动, 使水瓶失去稳定.

4.2 翻转

翻转的原理与跳水运动类似, 从高处落下, 以近似竖直的方式落入水中. 故可以将本实验中的相关结果, 原理推广到类似的运动项目中, 指导运动员进行训练. 如在扔水瓶时, 应使其水平方向分速度较小, 近似竖直单向运动. 这与跳水运动员的 3 米跳板方式类似, 为了使入水的水花尽量小, 也应当使其在水平方

向分速度较小.

4.3 建议

总结实验, 可以发现, 当选择底部面积大, 与平面尽量贴合的水瓶, 密度较大的液体(使整体重心低), 粘度较大(在瓶中不易滑动), 出手时水平方向分速度较小时, 水瓶成功翻转的概率较大.

翻水瓶实验虽然过程看上去简单, 但却涉及多种物理知识, 如角动量守恒、碰撞过程^[3], 可以通过此试验加深学生对于物理知识的掌握, 并且可以引领学生主动运用所学知识发现、解决身边的物理问题, 对于学生的学习及日后发展有重要意义.

参考文献:

[1] 陈晓莉. 新课程中学物理实验技能训练[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.

[2] 张连祯. 中学物理教学实践探索[M]. 成都: 四川教育出版社, 2014.

[3] 龚承康. 高中物理碰撞问题研究[J]. 高中数理化, 2015(10): 29-29.