

反弹胶囊的实验研究和理论分析

韩己宁, 魏蔚*, 马晓栋

(新疆师范大学 物理与电子工程学院 新疆发光矿物与光功能材料研究重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 反弹胶囊(Rebounding Capsule)这一题目源于第34届国际青年物理学家锦标赛(International Young Physicists' Tournament, IYPT),也是2021年中国大学生物理学术竞赛(China Undergraduate Physics Tournament, CUPT)的题目之一。根据能量守恒定律,受到空气阻力的影响,球状物体做自由落体运动时,反弹高度永远无法超过初始高度。而胶囊状物体由于具有旋转初速度,反弹之后有可能超过初始高度。文章针对这一现象展开分析:第一,文章对“反弹胶囊”这一生活问题进行了数学简化和物理建模。第二,根据物理模型进行了多次重复实验并对实验现象进行分析后得出,反弹胶囊反弹之后的最大高度之所以超过初始高度是由于转动能和平动能之间的相互转化。第三,对上述实验现象展开理论分析,对反弹胶囊反弹之后上升的最大高度进行了定量计算。第四,利用计算机编程模拟验证了计算结果。最后对误差进行分析,对本研究进行了总结。

关键词: 能量守恒;转动动能;反弹高度;角动量定理

中图分类号: O469 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9659(2025)02-0036-09

中国大学生物理学术竞赛(China Undergraduate Physics Tournament, CUPT)是中国借鉴国际青年物理学家锦标赛(International Young Physicists' Tournament, IYPT)模式创办的一项全国性赛事^[1]。IYPT中问题的价值得到了各国物理教育学家的广泛认可,因此该赛事问题也被推广至各国大学生的物理竞赛。反弹胶囊(Rebounding Capsule)问题是第34届IYPT第十五题,也是2021年全国大学生物理学术竞赛地区赛的题目之一。题目内容为:落在坚硬表面上的圆球即便具有初始的旋转速度,其反弹后上升所能达到的最大高度不会超过释放时的初始高度;胶囊状物体(例如Tic Tac薄荷糖)却可能在反弹后超过初始高度^[2]。

胶囊状物体在反弹过程中出现这一现象的原因是胶囊状物体的转动能量向平动能的转化。胶囊与地面发生碰撞后,部分或全部转动能转化为平动能,则其反弹后上升的最大高度值比释放时的初始高度值还要大。如果胶囊与地面碰撞后平动能转化为转动能,则反弹后上升的最大高度会小于释放时的初始高度。文章根据胶囊状物体反弹后上升高度有所不同的实验现象,先从定性的角度对胶囊状物体反弹高度随时间的变化规律、反弹最大高度大于或小于释放高度的主要因素进行分析;再对运动过程进行数学简化和模型构建,利用质心运动定理、能量守恒定律和角动量定理,定量计算胶囊状物体每次碰撞前后的运动状态,以不同角速度或不同方位下落时对反弹后上升最大高度的影响。文章对以上问题进行理论分析和实验探究,使学生了解物理知识联系生活的价值,学会在制定研究方案的基础上阐述观点,对同一个问题从不同的角度去探索,加强自身对物理现象与理论的理解,提高物理专业学生的核心素养,并对物理专业学生的教学实践起到积极作用。

1 实验探究

实验对象是两个物体,分别是椭圆形Tic Tac胶囊状薄荷糖和圆形小球状薄荷糖。Tic Tac椭圆形胶囊的

[收稿日期]2024-03-03

[修回日期]2024-04-03

[基金项目]新疆师范大学本科教学质量工程建设教学研究与改革项目(SDJG2023-17);教育部高等学校大学物理教指委西北地区教学研究项目(XBJY202304)。

[作者简介]韩己宁(1998-),男,硕士研究生,主要从事凝聚态物理方面研究,E-mail:1757329126@qq.com.

*[通讯作者]魏蔚(1978-),女,副教授,主要从事凝聚态物理方面研究,E-mail:weiw@xjnu.edu.cn.

球形部分,半径为0.010 m、总长为0.025 m,质量为8.299 g,如图1(a)所示。圆形小球状薄荷糖(无糖型凝胶糖果),半径为0.003 m,质量为1.030 g,如图1(b)所示。



图1 反弹胶囊材料:常见的Tic Tac薄荷糖(a)和圆球状单个薄荷糖(b)

将圆形小球从一定高度释放,历经数次反弹、落地、再反弹过程,在这个过程中,每次反弹的高度随时间的变化规律如图2所示。可以看出,随着时间的推移,反弹的高度越来越低。

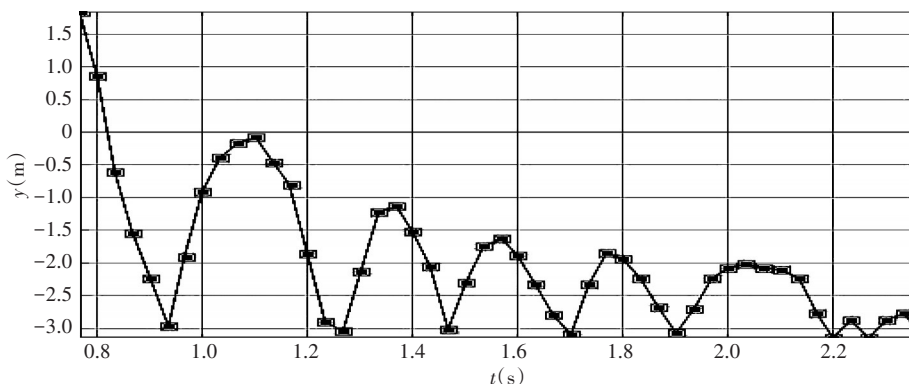


图2 圆形小球落地后反弹高度随时间的变化规律

将Tic Tac胶囊状薄荷糖从一定的高度释放,历经数次反弹、落地、再反弹过程,在此过程中,反弹的高度随时间的变化规律如图3所示。可以看出多次落地后和反弹后的高度有时较大,有时较小,且能够出现某次的反弹高度比上一次更高的情况。出现这种现象的原因是胶囊在与地面接触点所受到的碰撞冲力,其方向沿着接触面的垂直方向,通常并不通过胶囊的质心(转轴),故会产生力矩(冲量矩)。根据角动量定理 $\sum Mdt = d(I\omega)$ 可知,该力矩会引起胶囊的角速度增大或减小。所以其转动能和平动能可以相互转化。

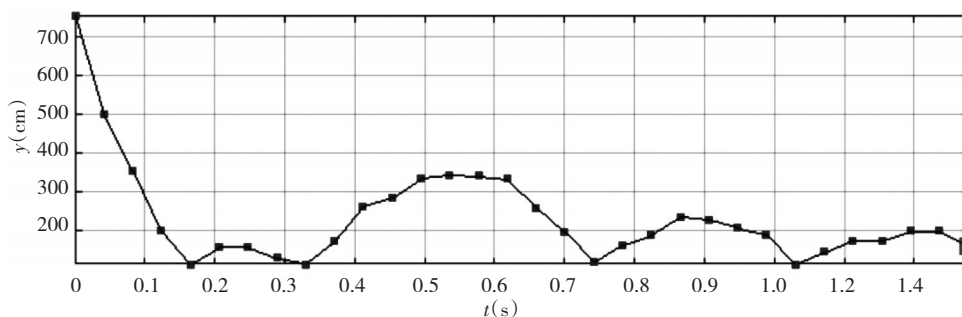


图3 Tic Tac胶囊状薄荷糖落地后反弹高度随时间的变化规律

2 理论分析

根据上节对胶囊落地后反弹实验现象的展示,能预估该问题的复杂性。为厘清造成该现象的内在原因及影响因素,先做简单的定性分析,再做详细的理论推导和定量计算。

2.1 定性讨论分析

众所周知,在物体做自由落体运动时,即使在理想情况下(即忽略空气阻力,且物体落地时与地面发生完全弹性碰撞,重力势能可完全转换成弹性势能再转化为反弹时的动能),其反弹后的最大高度也只能达到释放时的初始高度。在实际操作中,通常并不满足理想条件的条件,故物体自由落体运动后反弹的最大高度必然会小于释放时的初始高度,且由于能量损失,每次反弹的最大高度值都比前次更小。然而胶囊状物体自由落体后,其运动状态则会呈现出与上述情况不同的现象。胶囊反弹后的最大高度有可能超过初始高度,根本原因是胶囊的转动能在与地面的碰撞过程中转化为平动能,继而在反弹上升的过程中又全部转化为重力势能,故上升高度大于初始高度。当胶囊落地与地面发生碰撞,竖直向上且不过质心的冲力会对胶囊产生力矩(冲量矩)的作用,产生角加速度,从而改变转动角速度,故可以使转动能转化为平动能,所以反弹高度会出现大于上一次的情况。

在地面光滑且坚硬(无弹性形变)的情况下,质地均匀的胶囊以初始平动能0,具有一定的旋转速度下落。根据胶囊状物体落地时的受力状态,可以将碰撞分为两类。第一类,如图4(a)、图4(b)所示,无论下落过程中平动速度或者转动速度如何变化,只要其落地与地面发生碰撞,其所受到的地面冲击力竖直向上且过质心,则冲击力对胶囊不产生力矩(冲量矩),这种冲击力的作用线过质心的碰撞称为正碰。在发生正碰时,由于冲击力不产生力矩(冲量矩),因此对胶囊的转动状态不会产生影响,即没有角加速度,胶囊转动状态不变,转动动能不变,胶囊平动运动状态的变化规律与质点的自由落体运动过程中运动状态的变化规律一致,即反弹高度总小于释放高度,且随多次反弹其反弹高度逐渐降低。第二类,如图4(c)、图4(d)所示,无论下落过程中平动速度或转动速度如何变化,只要其落地与地面发生碰撞,所受到地面的冲击力竖直向上且不过质心(转轴),则冲击力会对胶囊产生力矩(冲量矩),这种冲击力的作用线不通过质心的碰撞称为斜碰。在发生斜碰时,由于冲击力对胶囊产生力矩(冲量矩),因此对胶囊的转动状态产生影响,此冲量矩使胶囊产生角加速度,使得胶囊的转动状态发生变化,使转动能和平动能之间相互转化,故导致反弹高度可能大于释放高度。

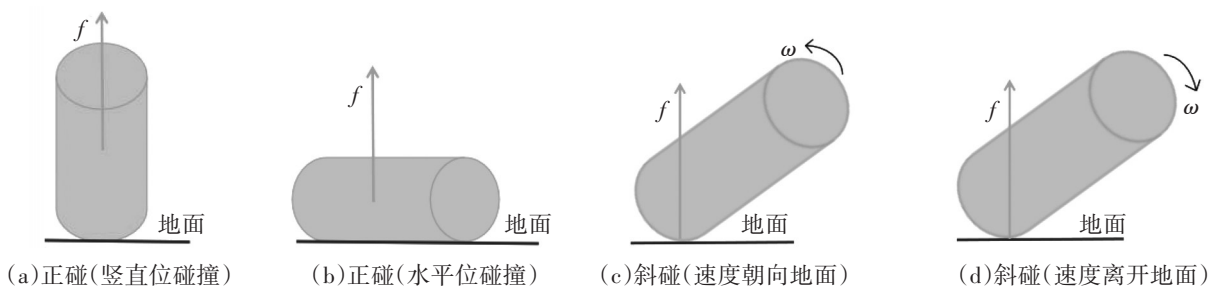


图4 胶囊以不同的情况下落时与光滑刚性地面碰撞情况

根据胶囊与地面的碰撞方式,可以将其分为三种不同的情况:第一种是胶囊与地面发生正碰,如图4(a)和图4(b)所示。第二种是胶囊与地面发生斜碰,且在碰撞时的旋转方向为接触点速度朝向地面,则碰撞后,转动能一部分转化为平动能,胶囊的转动能减小,质心的平动速率增大,导致反弹的最大高度超过初始释放高度,如图4(c)所示。第三种是胶囊与地面发生斜碰,且在碰撞时的旋转方向为接触点速度离开地面,则碰撞后,平动能一部分转化为转动动能,胶囊的转动动能增大,质心的平动速率减小,导致反弹的最大高度小于初始释放高度,如图4(d)所示。

要了解胶囊状物体落地之后的运动状态的变化细节,需要对该物体的运动过程抽象简化,并建立运动模型,利用运动规律计算碰撞前后和反弹后的运动状态以及决定其运动状态的关键因素。

2.2 定量讨论分析

胶囊状物体形状复杂,因此对其运动状态的影响因素较多,但是这些影响因素大多对运动状态无法起到决定性作用。为突出关键问题,将胶囊状物体简化为棒状模型,便于公式推导和对运动状态的计算,以下简称棒体。

棒体在整个落体运动中做平面平行运动。根据柯尼希定理^[3],平面平行运动可看作两部分简单运动的

合成,即质量集中于质心的平动和整体绕质心的转动,其中质量集中于质心平动的运动状态可用质心运动定理^[4-8]确定;整体绕质心转动的运动状态可用以质心为参考点的角动量定理^[5]确定。在棒体的整个运动过程中,假设忽略空气阻力,棒体与地面每次都是弹性碰撞,碰撞前后能量守恒(机械能守恒)。

棒体落到地面时,如果棒体方向与水平方向的夹角较大,那么整个反弹过程只会发生一次碰撞;如果棒体方向与水平方向的夹角较小,那么整个反弹过程会发生多次碰撞。在计算过程中发现实际上只出现一次碰撞或两次碰撞,两次以上的碰撞只在棒体落到地面时棒体方向与水平方向的夹角非常小的情况下发生,且发生的概率极小。所以,以下只针对一次碰撞和两次碰撞的反弹过程进行理论分析和公式推导。

2.2.1 第一次碰撞前后的运动状态

棒体从高度为 h_0 处释放,初始角速度为 ω_0 ,棒体与水平面的初始夹角是 θ_0 ,质心平动速度为0,如图5(a)所示。棒体下落过程中在竖直平面内做平面平行运动,直到与地面第一次碰撞前瞬间的角速度仍然为 ω_0 ,且此时棒体与水平面的夹角为 θ_1 ,质心速度为 v_1 ,如图5(b)所示。根据质点的自由落体运动规律

$$h_0 - \frac{l}{2} \sin \theta_1 = \frac{1}{2} g t_1^2 \quad (1)$$

$$v_1 = g t_1 \quad (2)$$

及刚体的转动规律

$$(\theta_1 - \theta_0) = \omega_0 t_1 \quad (3)$$

可求出第一次碰撞前瞬间的夹角 θ_1 和质心速度 v_1 以及棒体从释放到第一次碰撞前瞬间的时长 t_1 。

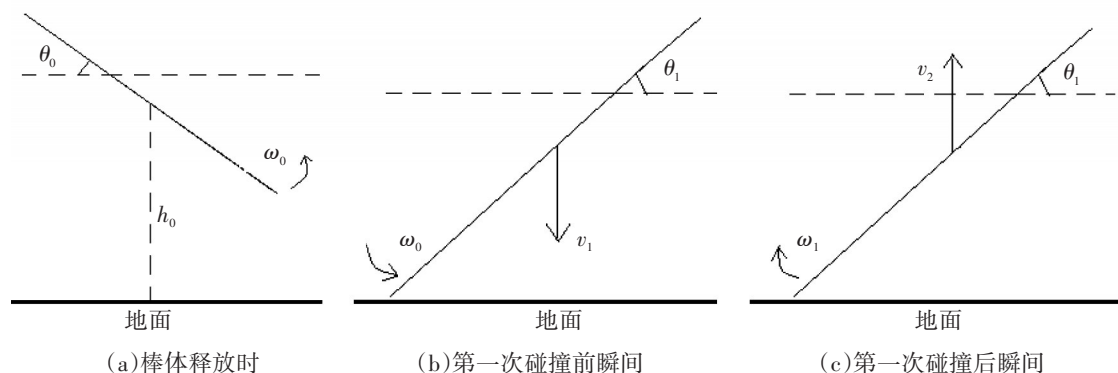


图5 棒体释放时(a),第一次碰撞前瞬间(b)以及第一次碰撞后瞬间(c)

设棒体第一次碰撞后瞬间的角速度是 ω_1 ,质心速度是 v_2 ,如图5(c)所示。设 m 是棒的质量, l 是棒长, f 是碰撞冲力。根据刚体的能量守恒定律

$$\frac{1}{2} m v_1^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{12} m l^2 \omega_0^2 = \frac{1}{2} m v_2^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{12} m l^2 \omega_1^2 \quad (4)$$

根据动量定理

$$\int f dt = m v_2 - m v_1 \quad (5)$$

根据角动量定理

$$\int f \frac{l}{2} \cos \theta_1 dt = \frac{1}{12} m l^2 \omega_1 - \frac{1}{12} m l^2 \omega_0 \quad (6)$$

可以求出第一次碰撞后的质心速度 v_2 和角速度 ω_1 。

2.2.2 第二次碰撞前后的运动状态

假设发生了第二次碰撞,图6(a)是第二次碰撞前瞬间。设第二次碰撞前夹角为 θ_2 ,质心速度为 v_3 ,设第一次碰撞后到第二次碰撞前的时长为 t_2 。

根据角位移的公式可得

$$\theta_1 + \theta_2 = \omega_1 t_2 \quad (7)$$

在第一次碰撞后质心做竖直上抛运动,只受重力,质心速度和位移分别为

$$v_3 = v_2 - g t_2 \quad (8)$$

$$\frac{l}{2} \sin \theta_2 - \frac{l}{2} \sin \theta_1 = v_2 t_2 - \frac{1}{2} g t_2^2 \quad (9)$$

根据式(7)、(8)、(9),可以求出第二次碰撞前瞬间的质心速度 v_3 和夹角 θ_2 .

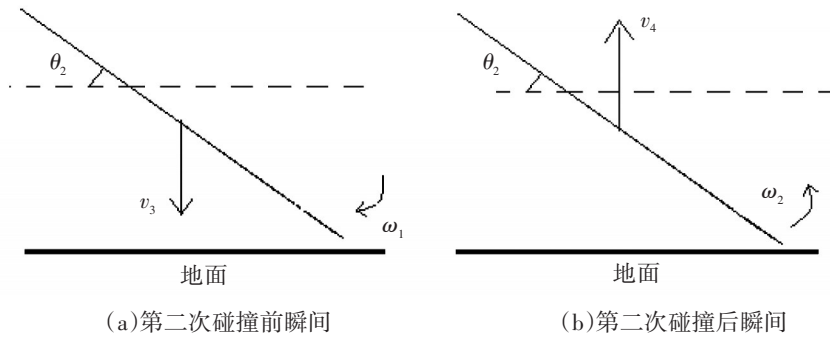


图6 第二次碰撞前瞬间(a)和第二次碰撞后瞬间(b)

设第二次碰撞后的情况如图6(b)所示,角速度为 ω_2 ,质心速度为 v_4 .根据能量守恒定律

$$\frac{1}{2} m v_3^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{12} m l^2 \omega_1^2 = \frac{1}{2} m v_4^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{12} m l^2 \omega_2^2 \quad (10)$$

根据动量定理,有

$$\int f dt = m v_4 - m v_3 \quad (11)$$

根据角动量定理,有

$$\int f \frac{l}{2} \cos \theta_1 dt = \frac{1}{12} m l^2 \omega_2 - \frac{1}{12} m l^2 \omega_1 \quad (12)$$

可以求出第二次碰撞后的质心速度 v_4 和第二次碰撞后的角速度 ω_2 .

2.2.3 经一次碰撞达到最高点的高度和角度

假设棒体与地面只发生一次碰撞即达到最高点,一次碰撞后的瞬间和到达最高点的情况如图5(c)和图7(a)所示。其中,设到达最高点时质心高度为 h_1 ,棒体与水平面夹角为 θ_3 .根据自由落体运动规律和转动规律

$$v_2 = g t_3 \quad (13)$$

$$h_1 = \frac{l}{2} \sin \theta_1 + v_2 t_3 - \frac{1}{2} g t_3^2 \quad (14)$$

$$\theta_3 - \theta_1 = \omega_1 t_3 \quad (15)$$

可以求出从第一次碰撞至达到最高点时的时长 t_3 、高度 h_1 及棒体与水平方向的夹角 θ_3 .

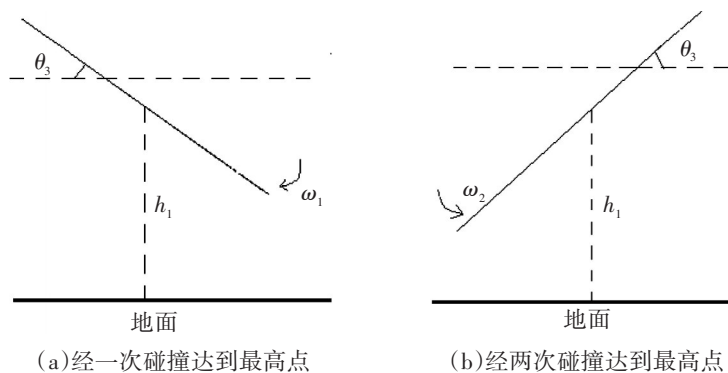


图7 棒体到达最高点

2.2.4 经两次碰撞达到最高点的高度和角度

假设出现了两次碰撞,棒体经第二次碰撞后到达最高点,二次碰撞后的瞬间和到达最高点的情况如图6(b)和图7(b)所示。设最高点的高度为 h_1 、夹角为 θ_3 .根据上抛运动规律

$$v_4 = gt_3 \tag{16}$$

可以求出从第二次碰撞至到达最高点时的时长 t_3 . 再根据

$$h_1 = \frac{l}{2} \sin \theta_2 + v_4 t_3 - \frac{1}{2} g t_3^2 \tag{17}$$

可以求出最高点的高度 h_1 . 根据

$$\theta_3 - \theta_2 = \omega_2 t_3 \tag{18}$$

可以求出最高点的夹角 θ_3 .

无论是经一次碰撞即达到最高点,还是经两次碰撞后达到最高点,统一设最高点时的高度为 h_1 、棒体与水平方向的夹角为 θ_3 ,这两个参量即为棒体下一次反弹的初始高度和初始夹角;若经一次碰撞达到最高点,则 ω_1 为下一次反弹的初始角速度;若经两次碰撞达到最高点,则 ω_2 为下一次反弹的初始角速度。

反复循环应用上述式(1)至式(18),可以通过定量计算求出反弹胶囊各次碰撞前及碰撞后的运动状态。

2.3 编程计算(定量计算)

本部分采用控制变量法,利用上节的理论公式和 Mathematica 软件进行编程计算,计算随着不同初始角速度变化的胶囊反弹高度。取相同的释放高度为 $h = 0.5 \text{ m}$,当初始角速度分别为 $\omega = 20 \text{ rad/s}$ 、 $\omega = 80 \text{ rad/s}$ 、 $\omega = 140 \text{ rad/s}$,初始角度分别是 $\pi/8, \pi/4, 3\pi/8$ 时,计算出对应的多次反弹高度。

表1 释放高度为 $h=0.5 \text{ m}$,初始角速度为 $\omega = 20 \text{ rad/s}$

初始角度	反弹次数					
	1	2	3	4	5	6
$\frac{\pi}{8}$	0.1854	0.1072	0.2150	0.1324	0.7674	0.5115
$\frac{\pi}{4}$	0.1150	0.1248	0.0836	0.2616	0.1725	0.2338
$\frac{3\pi}{8}$	0.0427	0.2853	0.2939	0.3284	0.2477	0.4237

表2 释放高度为 $h=0.5 \text{ m}$,初始角速度为 $\omega = 80 \text{ rad/s}$

初始角度	反弹次数					
	1	2	3	4	5	6
$\frac{\pi}{8}$	0.6173	0.1166	0.3771	0.6916	0.3795	0.2745
$\frac{\pi}{4}$	0.2858	0.2144	0.3296	0.3542	0.0070	0.05112
$\frac{3\pi}{8}$	0.0981	0.2932	0.3158	0.3120	0.3143	0.3148

表3 释放高度为 $h=0.5 \text{ m}$,初始角速度为 $\omega = 140 \text{ rad/s}$

初始角度	反弹次数					
	1	2	3	4	5	6
$\frac{\pi}{8}$	0.8057	0.6865	0.8491	0.3076	0.2939	0.9278
$\frac{\pi}{4}$	0.5366	0.2917	0.2250	0.0424	0.04535	0.7578
$\frac{3\pi}{8}$	0.6987	1.1525	0.0289	1.0875	0.5329	0.8056

根据表1、表2、表3的数据可以看出,总体趋势是初始角速度越大,反弹高度值越大。这是因为初始角速度越大,与地面碰撞后,会有越多的转动能转化为平动能,从而使胶囊达到更高的反弹高度。在相同的角速度时,不同的初始角度对反弹高度也有一定的影响。在角速度为 $\omega = 20 \text{ rad/s}$ 时,仅初始角度为 $\pi/8$ 的第5次反弹高度超过了初始高度,其他初始角度的各次反弹均未达到初始高度。在角速度为 $\omega = 80 \text{ rad/s}$ 时,仅

初始角度为 $\pi/8$ 的第1次和第4次反弹高度超过了初始高度,而在角速度为 $\omega = 140 \text{ rad/s}$ 时,各种初始角度下均出现了反弹高度超过初始高度的情况,且在 $3\pi/8$ 时,反弹高度甚至超过了初始高度的2倍。这是因为在相同的初始角速度下,不同的初始角度对应胶囊与地面碰撞前不同的夹角。冲击力作用线的方向始终竖直向上,如果碰撞前夹角较小,冲击力的力矩更大,更多的转动能转化为平动能,故反弹高度值更大。

为了直观地表示 Tic Tac 薄荷糖反弹高度的随机变化,利用表1~表3中的数据作折线图,分别如图8(a)、图8(b)、图8(c)所示,对应的初始角速度分别是 $\omega = 20 \text{ rad/s}$, $\omega = 80 \text{ rad/s}$, $\omega = 140 \text{ rad/s}$ 。

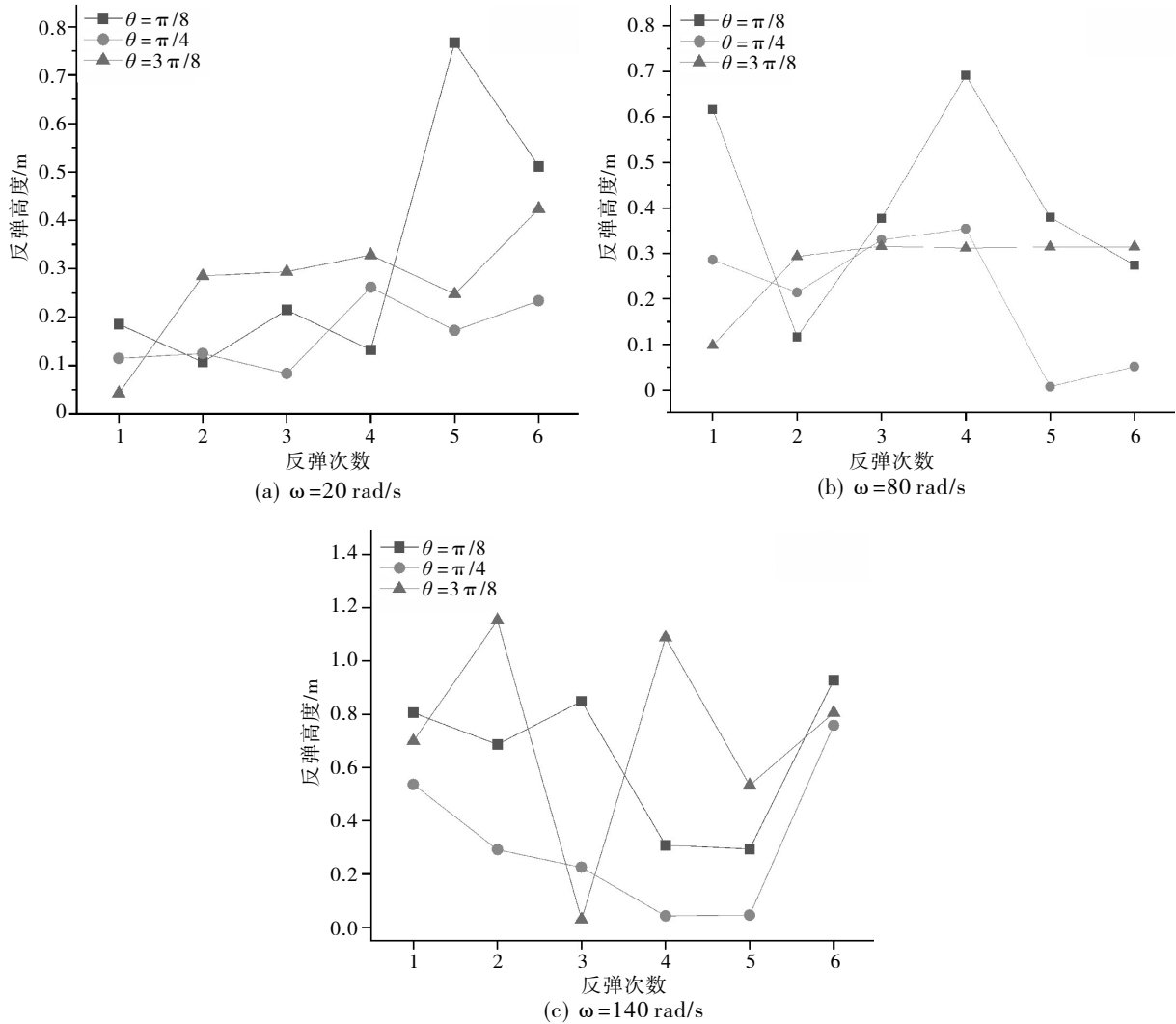


图8 胶囊在不同角速度时的反弹高度

Tic Tac 薄荷糖在不断反弹过程中,反弹高度、最高点与水平方向的夹角角度、最高点的角速度的变化情况如表4所示。释放高度为 $h = 0.5 \text{ m}$, 释放角速度为 $\omega = 140 \text{ rad/s}$, 释放角度 θ 为 $\pi/8$ 的情况。

表4 释放高度为 $h = 0.5 \text{ m}$, 初始角速度为 $\omega = 140 \text{ rad/s}$, 释放角度 θ 为 $\pi/8$

反弹次数	2	3	4	5	6
高度	0.2084	0.2791	0.2155	0.1886	0.9267
角度	-0.3623	-1.1259	0.8768	-0.0122	-0.4207
角速度	131.4320	124.9380	131.0110	133.1360	0.8163

为了更清晰地反映问题,文章不但计算了反弹高度的变化,还计算了Tic Tac 薄荷糖在不断反弹过程中,反弹高度、最高点与水平方向的夹角角度及最高点角速度的变化情况。由表4中的高度和最高点角速度的

数据可以看出,第6次的反弹高度远大于初始高度,其对应的角速度很小,这正是由于反弹时将较多转动能转化为平动能,角速度必然变小,而平动能在碰撞后大大增加,故反弹高度明显增高。

2.4 误差讨论

根据第34届国际青年物理学家锦标赛第十五题的内容,文章进行理论分析和实验探究。圆形小球在下落过程中,不会出现反弹高度超过初始高度的情况,但Tic Tac薄荷糖在下落过程中会出现一次明显的反弹高度超过初始高度的情况。在理论分析和实验探究中,将反弹胶囊从固定的高度释放,测量反弹高度超过原先高度的胶囊状物体(Tic Tac薄荷糖)在最高点的角速度,比较其在释放点和最高点角速度的不同。

利用Tracker软件对物体运动视频分析结果的相对误差会随定标物与物体运动平面的垂直距离增大而增大。其原因在于,Tracker是一种二维视频影像分析软件。物体实际所处的空间是三维的,而拍摄的视频画面是二维的影像,立体空间物体在二维的影像中会产生投影压缩效应。Tracker软件有以下两个特点:(1)Tracker对宏观、低速的物体运动视频分析效果较好,对于微观的、高速的物体运动,则不易跟踪分析;(2)对拍摄视频的相机镜头本身不宜运动、晃动,以免出现运动视频画面的跳跃、抖动、移动,不利于Tracker对视频画面中运动物体的追踪分析^[4-5]。

误差分析仅考虑了二维层面的运动行为。Tracker的手动打点会导致数据有微小的偏差;每次运动的非弹性碰撞系数在实际情况下会有微小的不同;空气阻力的影响并没有完全排除;Tic Tac薄荷糖沿着竖轴方向的运动量虽小,但并不能排除,导致数据上存在偏差。

由于Tic Tac薄荷糖的转动,碰撞时会产生一个与Tic Tac薄荷糖的转动方向相反的摩擦力。如果在发生碰撞时,Tic Tac薄荷糖与水平面的夹角较小,摩擦力也就比较小;如果碰撞时,Tic Tac薄荷糖与水平面的夹角较大,摩擦力也就比较大。文章仅计算了在碰撞点处在上下方向反弹的过程。实际上,在实验中除了上下反弹以外,还有左右的移动,这就是理论计算和实验观测之间会存在一个比较大差别的原因。另外,理论推导是按照题意在地面非常坚硬的情况下进行的,地面非常坚硬的时候,碰撞的时间是非常短的,在一般教材^[6-10]中,对于角度非常小的反弹,这种差别较小,可以忽略不计。

3 结语

文章根据圆球和胶囊状物体自由下落后反弹高度不同的现象,通过多次重复实验探究胶囊与圆球的反弹情况,并用理论分析和定量计算得出多次反弹后上升的高度及反弹前后的速度等参量,得出以下结论:

首先,根据实验现象分析题目,球状物体因冲击力的作用线总是过质心,不产生力矩(冲量矩),冲击力不能改变转动的速度,弹性碰撞时间很短,摩擦力作用较小,摩擦力能产生力矩(冲量矩),能够改变平动和转动。而对于胶囊状物体,当发生正碰时,和球状物体情况一样,冲击力垂直,冲击力的作用线过质心,不产生力矩(冲量矩);当发生斜碰时,冲击力的作用线不过质心,会产生力矩(冲量矩),能够使平动能和转动能相互转化,发生反弹高度的变化。

接着,把Tic Tac薄荷糖看成是棒状物体,运用平动和转动的理论对整个反弹过程进行推导。棒体所做的运动是平面平行运动,包括质量集中于质心的平动和整个棒体绕质心的转动。理论推导包括对一次反弹和两次反弹前后的角速度及其与水平方向的夹角、质心的速度,两次反弹之间的质心速度和水平方向夹角的变化;还包括到达最高点的高度及其与水平方向的夹角。理论推导过程采用了能量守恒定律,质心运动的动量定理以及碰撞过程中棒体的角动量定理。

根据理论计算的数据,发现了几个现象。首先,胶囊下落时的初始角速度越大,则反弹高度值越大。这是因为初始角速度较大时,与地面碰撞后,有更多的转动能转化为平动能,从而使胶囊具有更高的反弹高度。其次,初始角度对反弹高度也有影响。这是因为在相同的初始角速度下,不同的初始角度对应胶囊与地面碰撞前不同的夹角,冲击力作用线的方向始终竖直向上。当胶囊下落后,如果碰撞前与地面夹角较小,则冲击力的力矩(冲量矩)会更大,此时会有更多的转动能转化为平动能,故获得更高的反弹高度。最后,反弹高度和最高点角速度具有直接关系,当某次的反弹高度较大时,该次反弹后在最高点角速度较小,反之,

则反弹后在最高点角速度较大。这正是由于该次反弹时将较多转动能转化为平动能,反弹高度就变得很高,碰撞后瞬间的角速度必然会变得很小,在不受外力矩的情况下,其到达最高点时角速度也仍然很小。

参考文献:

- [1] 李川勇,王慧田,宋峰,等.中国大学生物理学术竞赛及其对培养学生综合能力的作用[J].大学物理,2012,31(05):3-4.
- [2] IYPT青年物理学家.IYPT2021第34届国际青年物理学家竞赛中英文版赛题及图解、参考视频[EB/OL].<https://www.bilibili.com/read/cv6914438/2020-07-26/2024-01-20>.
- [3] 赵凯华,罗蔚茵.新概念物理教程力学[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [4] 王太军.用Tracker分析物体运动视频的误区与对策建议[J].物理教学探讨,2017,35(11):33-35.
- [5] 杜昆,李国良,苏显斌,等.利用Tracker进行真实情境下的能量守恒教学[J].中学物理,2023,(01):51-54.
- [6] 戴宗信.《中国大百科全书》74卷(第一版)力学[M].北京:中国大百科全书出版社,1987.
- [7] 周衍柏.理论力学教程[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [8] 吴洵,黄亦斌.参考点变更时的角动量定理[J].物理与工程,2020,30(06):75-78,83.
- [9] 漆安慎,杜婵英.普通物理学教程力学[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [10] 程守洵,江之永.普通物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

Experimental Study and Theoretical Analysis of Rebounding Capsule

HAN Ji-ning, WEI Wei*, MA Xiao-dong

(Xinjiang Key Laboratory for Luminescence Minerals and Optical Functional Materials,
School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830054, China)

Abstract: Rebounding Capsule, this topic comes from the 34th International Young Physicists' Tournament (IYPT), and it is also one of the topics of the 2021 China Undergraduate Physics Tournament (CUPT). According to the conservation of energy, due to the influence of air resistance, when a spherical object is in free fall, the height of rebound can never exceed the initial height. However, because of the initial rotation velocity of the capsule-shaped object, it is possible to exceed the initial height after rebound. This paper analyzed this phenomenon. First, this paper simplified the life problem of "rebounding capsules" in mathematics and physical modeling. Second, after repeated experiments and analysis of the experimental phenomenon according to the physical model, it is concluded that the maximum height of rebounding capsules after rebounding can exceed the initial height because of the mutual transformation between rotational energy and kinetic energy. Third, the maximum height of rebounding capsules after rebounding was quantitatively calculated. Fourth, the calculation results was verified by computer programming simulation. Finally, the error was analyzed and the study was summarized.

Keywords: Conservation of energy; Rotational kinetic energy; Rebound height; Angular momentum theorem