

参赛队员姓名： 罗昊 吴雨泽 汪婧含

中学： 江苏省海安高级中学

省份： 江苏省

国家/地区： 中国

指导教师姓名： 苏俊 王维国

指导教师单位： 江苏省海安高级中学

论文题目： 轻功水上漂的原理研究

轻功水上漂的原理研究

摘要

生活中常见到水龟和蛇怪蜥蜴在水面上行走，我国自古以来也有许多关于轻功水上漂的传说，网上还能看到能在水面上行驶的玩具汽车。本研究首先讨论了影视剧中的轻功水上漂，分析发现在不借助工具的情况下是不可能实现的。其次分析了中央电视台《走进科学》栏目“少年寺武僧水上漂”的原理，从实验和理论进行了研究，发现了实现水上漂的原理主要源于木板导致的踩踏速度的大幅度衰减和人的平衡，与蛇怪蜥蜴水上奔跑原理完全不同。最后探究了水上漂玩具汽车的原理，通过对实验研究，发现前后轮物理机制并不相同，主动轮的原理类似于蛇怪蜥蜴在水面奔跑，通过特制轮子拍打水面获得升力与动力；而前轮出现周期性跳跃现象，本研究用打水漂理论进行了解释。前后轮的理论模型与实验基本符合。本研究的创新之处在于定量分析了常见的水上漂现象的物理原理。

关键词：蛇怪蜥蜴，轻功水上漂，水上飞车，动力学

目录

摘要.....	2
一、研究背景.....	4
二、水鼃和蛇怪蜥蜴水上行走的原理	
2.1 水鼃水上行走的原理.....	4
2.2 蛇怪蜥蜴水上行走的原理.....	5
三、人类轻功水上漂能否实现.....	6
四、轻功水上漂的原理实验.....	7
4.1.实验.....	7
4.1.1 实验方案.....	7
4.1.2 重物下落实验.....	8
4.1.3 人踩木板实验.....	10
4.2 理论分析.....	11
五、水上飞车的原理.....	14
5.1 主动轮的动力学原理.....	16
5.2 从动轮的动力学原理.....	192
六、总结与展望.....	24
参考文献.....	25
附录.....	26
致谢.....	28

一、研究背景

水上漂自古以来就常出现我国的民间故事中，如《水浒传》中的“浪里白条”张顺“水底下伏得七日七夜，水里行一似一根白条”，金庸武侠小说中的“铁掌水上漂”裘千仞；独竹漂传承人杨柳借助一根长长的竹竿，在水面上如履平地，翩翩起舞；各大公司开发和民间改装的水上漂汽车应接不暇。而在自然界，也有动物掌握了这项技能：我们看到水面上行走的水黾，水的表面张力提供了支持力，如图 1-1。

我们也在动物世界类的电视节目中看到了一种能够水上奔跑的蜥蜴-蛇怪蜥蜴（basilisk lizards），如图 1-2，这种蜥蜴长着巨大的脚掌，在水面上快速行走，脚掌拍打水面，水面的作用力给蜥蜴提供了支持力。



图 1-1：水黾（图片来自网络）



图 1-2：蛇怪蜥蜴（图片来自网络）

中国传说中的轻功水上漂是否真实存在？水上漂汽车是什么原理？我们希望在本文中探究这些问题。我们查阅了相关资料，发现人们之前对水黾和蛇怪蜥蜴水上行走的原理已经有比较详细的研究[1]，但是对轻功水上漂和水上飞车的原理并没有细致的研究，本研究对以上两种水上漂现象进行深入的探究。

二、水黾和蛇怪蜥蜴水上行走的原理

2.1 水黾水上行走的原理

水黾得浮以在水面上而不下沉，是利用了水的表面张力。经过查阅资料，我们可以建立简化的模型：

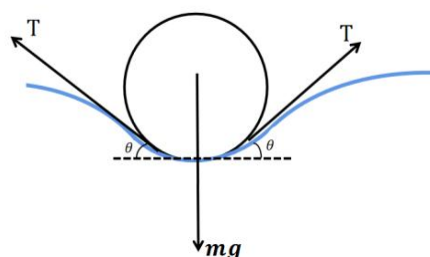


图 2-1 水黾与水面接触简化图

如图 2-1 所示为水黾的腿与水面接触的截面。记 T 为水提供的表面张力，方向沿水面切线方向，与水平面的夹角为 θ ，水黾有三对足，则水黾在水面上静止，大致满足 $mg = 6 \times 2T\cos\theta = 12T\cos\theta$ 。由于水黾的体重很轻，且腿上有许多疏水的微刚毛，可以阻止水湿润其身体，所以水黾得以在水上漂行[1]。但是表面张力只能支撑较轻的物体，不足以支撑大质量的物体。

2.2 蛇怪蜥蜴水上行走的原理

我们查阅相关资料，之前的研究表明蛇怪蜥蜴在水面上奔跑，相继经历了三个阶段（如图 2-2）[2]：

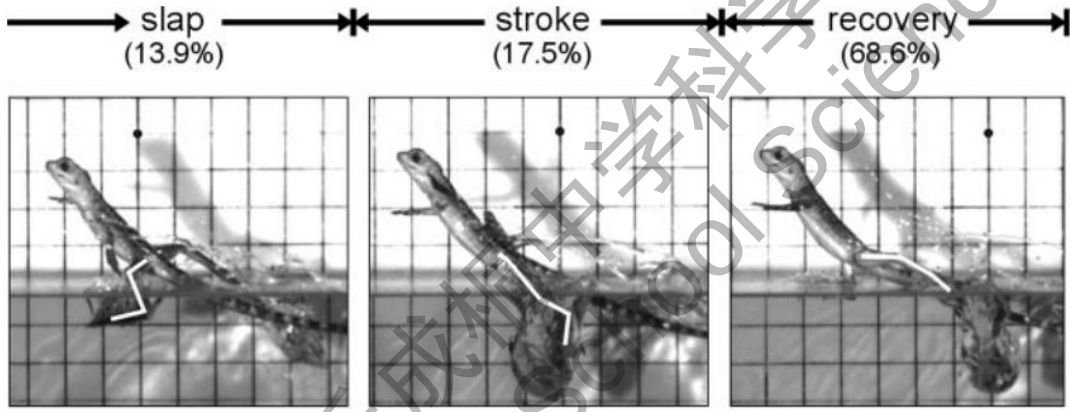


图 2-2：图片引用自 PNAS [2]

1. 拍打（slap）阶段

脚掌快速拍击水面，这个过程脚掌部分动量转移给了脚掌下方的水，这个阶段脚掌受到的最大冲量为：

$$I_{max} = \frac{4}{3} \rho R_{eff}^3 v_{max} \quad (1)$$

其中 ρ 为水的密度， R_{eff} 为脚掌的有效半径（由实验确定）， v_{max} 为脚掌拍打水面的最大速度。为了保持蜥蜴不下沉，这个冲量必须近似等于蜥蜴重力的冲量。前人的实验表明[3]，质量越大的蜥蜴这个效应越微弱，人的质量远大于蜥蜴，这意味着对人来说这个效应可以忽略不计，因此在接下来的研究中不考虑该效应。

2. 划水（stroke）阶段

这个阶段水给脚掌的作用力由两部分构成，水的惯性力和静压力，记作：

$$F(t) = C_D \left(\frac{1}{2} S \rho v^2 + S \rho g y \right), \quad (2)$$

其中拖曳系数 $C_D \approx 0.703$ ，面积 $S = \pi R_{eff}^2$ ， v 为瞬时速度， g 为重力加速度， y 为脚掌下沉的深度。为了不下沉，水产生的这个力 $F(t)$ 必须近似等于重力。

3. 空穴恢复 (recovery) 阶段

脚掌拍击水形成空穴，为了能够保持行走，水在填满这个空穴前脚必须要离开空穴，水填充空穴所需的时间为：

$$T_w = 2.285 \sqrt{\frac{R_{eff}}{g}}, \quad (3)$$

并且实验发现这个时间与速度无关，脚掌为了不被水淹没，脚掌拍击水面的频率至少为 $f_{min} = \frac{1}{2T_w}$ 。

综上所述，水龟借助了表面张力实现了水上漂，而蛇怪蜥蜴借助以上三段复杂过程，同样自由行走于水面。虽然前者的原理更为简单，但我们认为后者对我们的研究更有参考价值。

三、人类轻功水上漂能否实现？

我们经常看到影视节目中的侠客可以像蛇怪蜥蜴一样进行水上漂，如图 3-1，这种轻功水上漂能否真实发生？根据作用力 $F(t) = \frac{1}{2} C_D S \rho v^2$ ，我们可以尝试估算人类实现水上漂所需要的最低条件。假设奔跑者的质量为 50kg，已知人类能奔跑的极限速度是飞人博尔特创造的记录，100m 用时 9.58s，速度约 10.44m/s，可以估算得到脚掌面积大概要达到 12.79m²，穿着这么大号鞋的人是无法完成奔跑的（实际上脚落地速度小于奔跑平动速度）；如果以人类脚的大致面积估算（44 码对应面积大约 300cm²），奔跑速度至少达到 219m/s，这远超过了人类的奔跑速度极限。因此，我们认为武侠片中的水上漂不借助其他工具是无法实现的。



图 3-1：图片引用自电影《卧虎藏龙》剧照

2009 年中央电视台走近科学节目曾报道少林寺武僧释理亮“水上漂”的绝技[4]，表演者用了多块 60cm×90cm 的木板，用绳子将这些木板拴在一起，将栓接在一起的木板铺设在水面，如图 3-2。人张开双臂，保持左右平衡，以一定初速度冲上木板奔跑，“水上漂”的距离达到约 130m。表演者是怎样做到“水上漂”的？与我们之前的估算是否矛盾？接下来从实验和理论上研究释理亮水上漂的原理。

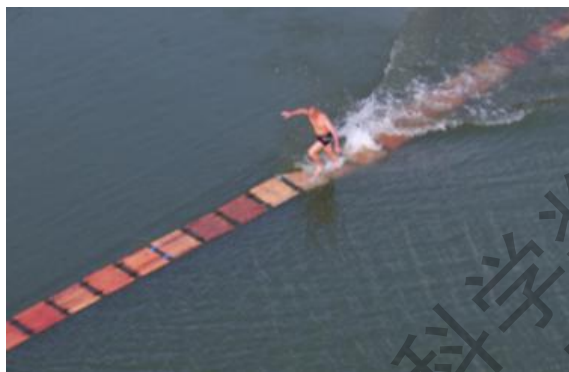


图 3-2：图片引用自 CCTV 节目[3]

四、轻功水上漂的研究

4.1 实验

首先我们用一个圆形铁盘从高处下落撞击水面上的木板，用高速相机拍摄铁盘的下落过程，模拟人踩水面的过程，运用 Tracker 分析铁块的速度变化过程[5]；然后我们在学校游泳馆进行踩木板的实验，并开展了分析。

4.1.1 实验方案

以下是本实验使用的器材：660g 圆形金属盘及示踪用的橡胶小球；20cm×30cm 薄木板；激光测距仪；装满水的水箱；高帧率相机（1000fps），如图 4-1 和 4-2。



图 4-1



图 4-2

绿色的小球是为了方便利用 Tracker 的自动跟踪系统而绑在杆上的，操作时

将物体抛下，用 Tracker 追踪目标物体，从而分析在撞击水面前后的速度变化，以进一步分析其动力学过程。

4.1.2 重物下落实验

实验 1：金属盘由静止释放，撞击水面上的自由木板

金属盘由静止释放，撞击水面上的自由木板，如图 4-3，并计算速度衰减比例 e_1 。用高帧相机拍摄物体从下落到撞击水面的过程，通过 Tracker 软件对视频进行分析，得出位移-时间图像，然后用直线拟合得出图像的斜率，我们通过斜率分析出金属盘撞击木板前的瞬时速度 v_0 ，再分析出撞击之后的速度 v ，如图 4-4。我们定义速度衰减比：

$$e_1 = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (4)$$

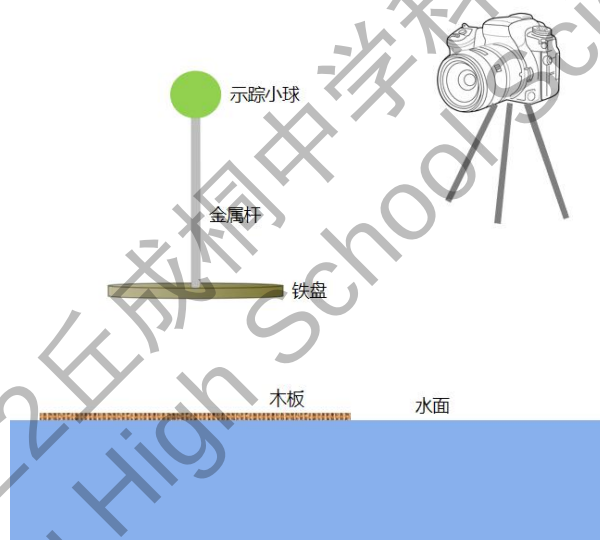


图 4-3

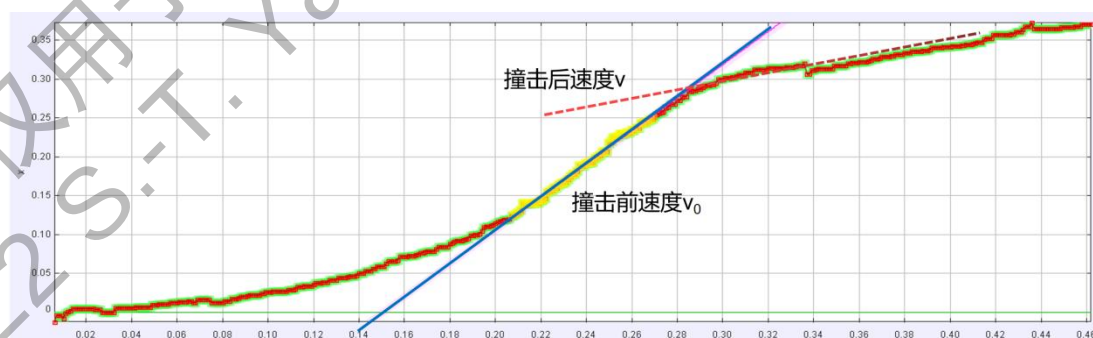


图 4-4

具体过程如下图（图 4-5）所示：

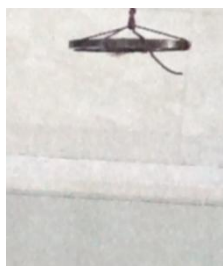


图 4-5-a



图 4-5-b

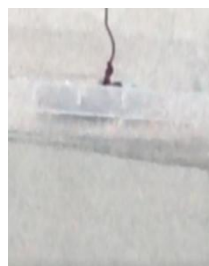


图 4-5-c

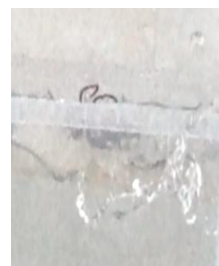


图 4-5-d

铁块的初速度不同，与模板撞击后的速度也不同。通过 Tracker 分析实验视频，得到了入水前速度和入水后速度关系如图 4-8 蓝色点，横坐标表示的是初速度 v_0 ，纵坐标表示入水后速度 v ，单位 m/s。我们用一次函数进行拟合，给出：

$$v_0 = -0.03 + 0.19 v \quad (5)$$

拟合结果如图 4-8 蓝色虚线，得到速度衰减比例：

$$e_1 = \frac{v_0 - v}{v_0} \approx 0.81 \quad (6)$$

实验 2：金属盘与木板粘在一起，由静止释放撞击水面

作为与实验 1 的对比，我们将金属盘与木板粘在一起，由静止释放撞击水面，分析其差别，如图 4-6，用类似的方法，计算出速度衰减比：

$$e_2 = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (7)$$

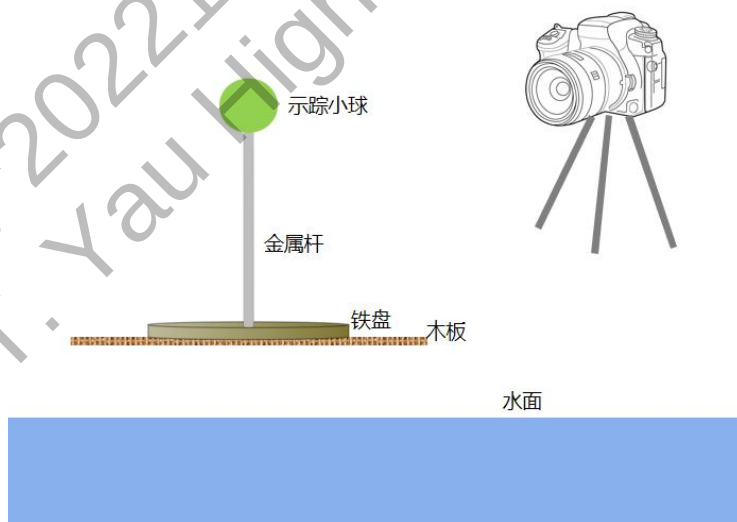


图 4-6

具体过程如下图 4-7 所示：



图 4-7

实验数据如图 4-8 红色方块，同样近似成正比，用一次函数拟合得

$$v_0 = -0.27 + 0.30v \quad (8)$$

拟合为红色实线，同样估算得到一个速度衰减系数：

$$e_2 = \frac{v_0 - v}{v_0} \approx 0.70 \quad (9)$$

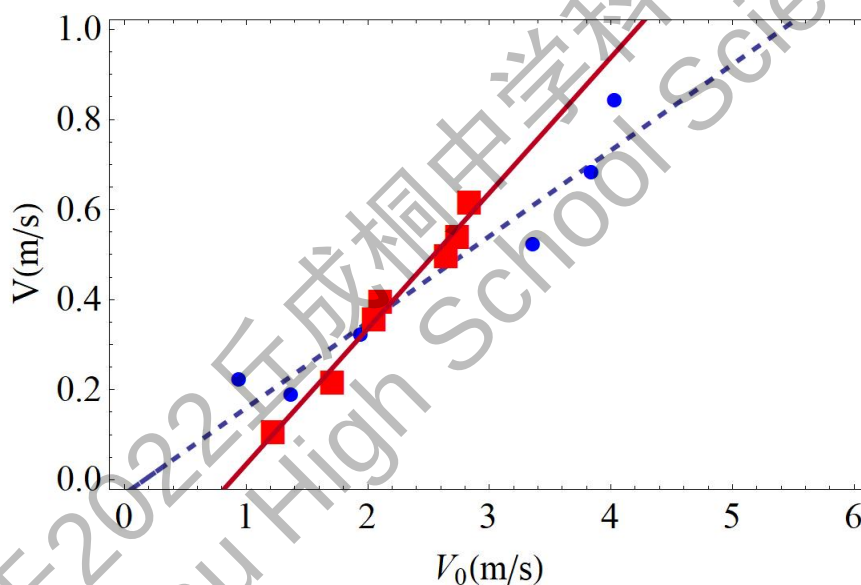


图 4-8

e_2 的值略小于 e_1 ，这是由于铁块和木板碰撞时损失了一部分机械能。无论哪种撞击方式，机械能的损失都是十分明显的。

4.1.3 人踩木板实验

我们在学校游泳馆开展了人踩木板的实验。木板放置于水面，人用脚去踩木板（木板尺寸 40cm×50cm），在脚踝上系上红丝带，拍摄视频，用 tracker 分析红丝带的运动，从而分析踩上去前后的速度衰减比，如图 4-9。



图 4-9-a



图 4-9-b



图 4-9-c



图 4-9-d

下图 4-10 是用 Tracker 软件分析人脚踩木板的 $x-t$ 图像，其中 v_1 是脚接触木板前的速度， v_2 是脚接触木板时的速度，速度衰减比 $e_3 = 74.6\%$ ，这和用金属盘撞击木板的实验结果大致相同。

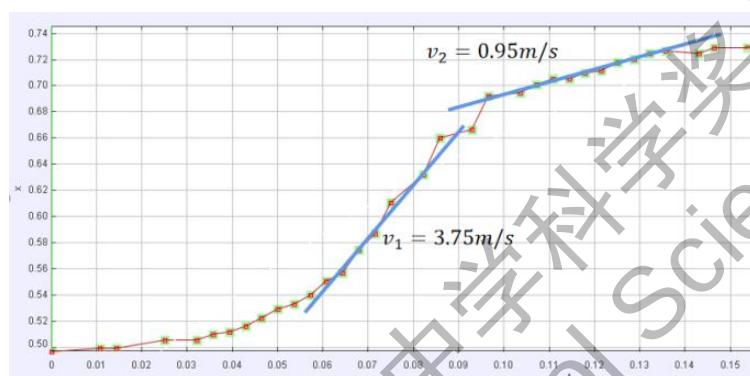


图 4-10

4.2 理论分析

参考前人对蛇怪蜥蜴的研究工作[3]，认为木板的下方存在一部分虚拟的水，质量为 m_w 。铁块、木板和这一部分水组成的系统在碰撞的过程中动量守恒。这里忽略木板质量，根据动量守恒定律可得：

$$m_1 v_0 = (m_1 + m_w) v \quad (10)$$

在第一组实验中 m_1 指的是金属盘的质量， v_0 指的是入水前速度， v 指的是入水后速度。 v_0 与 v 成正比，与实验现象基本一致。写成关于 m_w 的表达式：

$$m_w = \frac{m_1 v_0}{v} - m_1 \quad (11)$$

将 e 带入，得

$$m_w = \frac{e}{1-e} m_1 \quad (12)$$

可以得知虚拟水的质量 m_w 和金属盘的质量 m_1 有关。

以上是有关一块木板在水上漂过程中的研究，而少林寺武僧释理亮实现“轻功水上漂”用到了很多连接在一起的木板，我们将该场景简化成图 4-11。

木板数量的增多不仅意味着降低了人偶因不慎而导致人翻落水中的可能性，

还提供了一个更大的衰减系数 e ,我们接下来具体讨论 e 和木板数量 n 之间的关系。

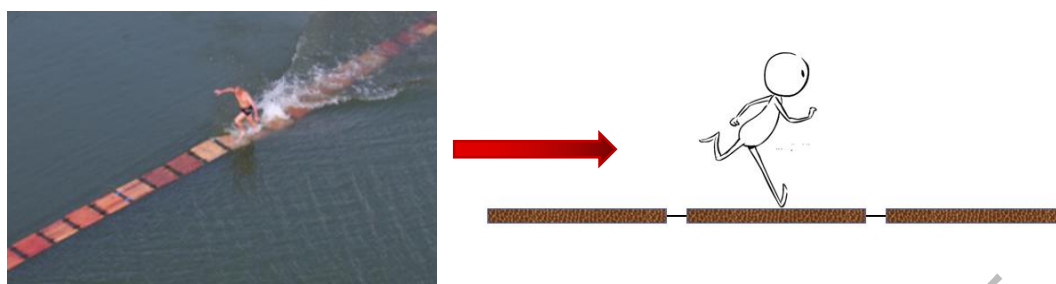


图 4-11

如图 4-12, 设每一块板的质量为 m , 人的质量为 m_p , 当人以一定的速度冲上木板时, 记竖直方向上的速度为 v , 一瞬间速度将衰减为 $(1-e)v$, 和木板一起下沉会使绳子绷直, 两边木板向中间方向收拢, 如图 4-13。



图 4-12

如图 4-13, 对其进行受力分析, 记水对板的力为 F_1 , 板受到的重力为 G , 人对板的压力为 N , 两边绳的作用力为 T_1 和 T_2 , 板与绳间的夹角为 θ (两板的夹角并没有太大的区别, 所以统一设为 θ)。

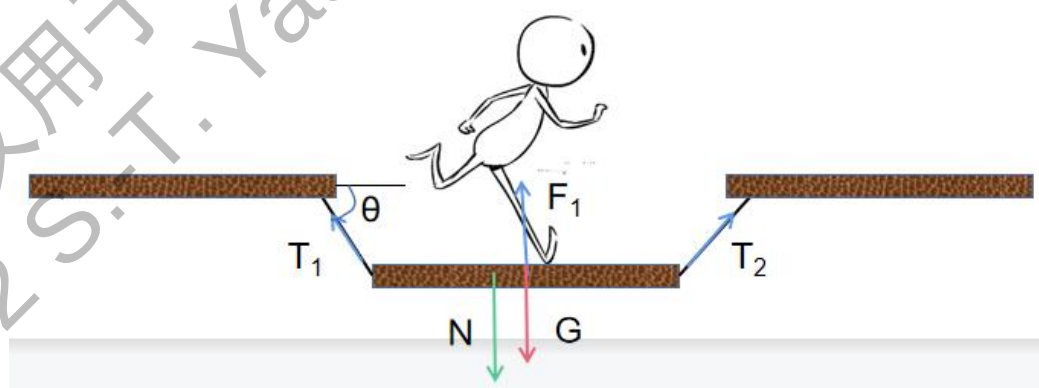


图 4-13

F_1 的来源有两个, 一个是水对板的浮力, 和 G 大小近似相等, 另一个是水对板的阻力, 和板的实际速度的平方近似成正比, 和板的面积 S 成正比, 所以有

$$F_1 - G = kS[(1-e)v]^2 \quad (12)$$

其中 k 为比例系数。

设整体还有一个向下的加速度为 a ，所以有

$$N - F_1 + G - (T_1 + T_2)\cos\theta = ma \quad (13)$$

带入后化为

$$N - (T_1 + T_2)\cos\theta = ma + kS[(1-e)v]^2 \quad (14)$$

实际上还存在水对相邻板的水平阻力，但水的粘滞阻力小，这里忽略不计。

而延绳方向的加速度始终相等，设相邻两板水平方向加速度为 a_1 ，竖直方向上的加速度忽略不计，所以

$$a_1 \cos\theta = a \sin\theta \quad (15)$$

可以推知

$$a_1 = a \tan\theta \quad (16)$$

进一步对其中一块相邻木板进行受力分析，设左侧模板的数量为 n_1 ，且足够大，

$$T_1 \cos\theta = n_1 m a_1 \quad (17)$$

对人受力分析后易得

$$N = m_p (g - a) \quad (18)$$

m_p 是人的质量，将上述各式带入后化得

$$m_p g - (n_1 + n_2) m a \tan\theta - m_p a = ma + kS[(1-e)v]^2 \quad (19)$$

化简结果为

$$m_p g = \{[1 + (n_1 + n_2) \tan\theta] m + m_p\} a + kS[(1-e)v]^2 \quad (20)$$

在这里我们借用一个更简单的模型来讨论，如下图 4-14，设左右两个物块的质量为 m_1 ，中间物块的质量为 m_2 ，中间物块的加速度为 a ，重力加速度记为 g 。

同样对其进行受力分析，设绳间力为 T ，不计摩擦。

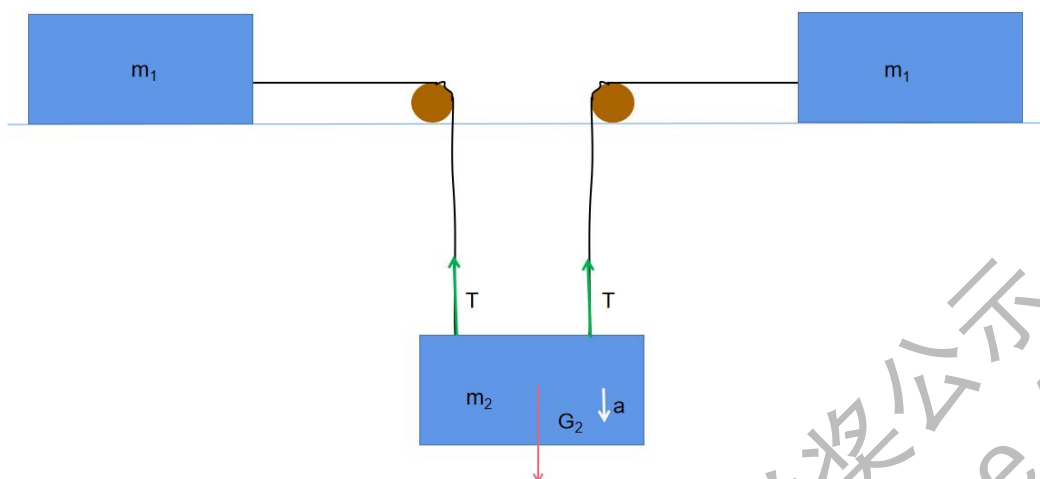


图 4-14

可以得到

$$T = m_1 a \quad (21)$$

$$m_2 g - 2T = m_2 a \quad (22)$$

两式联立得

$$a = \frac{m_2}{2m_1 + m_2} g \quad (23)$$

当 m_2 一定时， a 随着 m_1 的增大而减小。同理，当 $n_1 + n_2$ 的值越大，即左右木板质量之和越大时，向下的加速度 a 就越小，陷入水中的速度也就越慢，人就越有可能及时地转移到下一块木板上。

我们发现，武僧水上漂与蛇怪蜥蜴水上奔跑的原理完全不同。蛇怪蜥蜴通过脚拍打水面获得升力。然而，人踩木板后人和木板在竖直方向的速度迅速衰减，木板越多，踩踏之后木板的速度越小，只要人能保持好平衡，人就可以在木板上奔跑。

五、水上飞车的原理

上面我们研究了轻功水上漂，下面我们继续研究水上飞车的原理。我们从 Bilibili 网站上看到一些 up 主上传的有关水上飞车的视频，当车速很快的时候，汽车可以在水上漂移。我们从网上购买了水上漂玩具汽车（如图 5-1 所示），我们在学校游泳馆用 iPhone13 慢动作 240 帧的相机拍摄了小车在水上行驶的视频，经过多次尝试后，最终证明其确实能够在水上漂行（如图 5-2-1、5-2-2、5-2-3、5-2-4）。

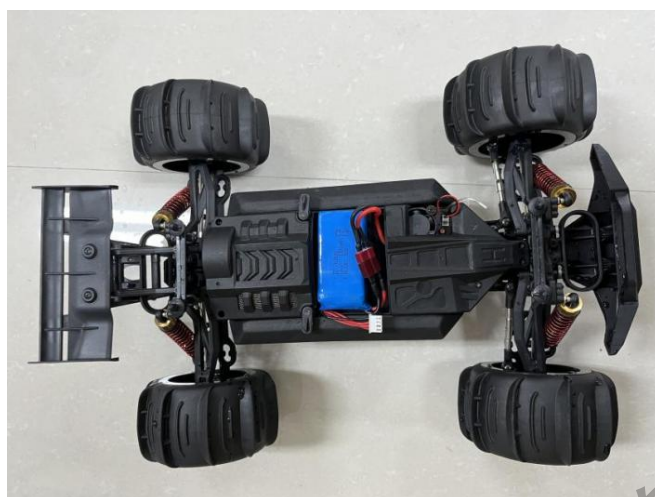


图 5-1

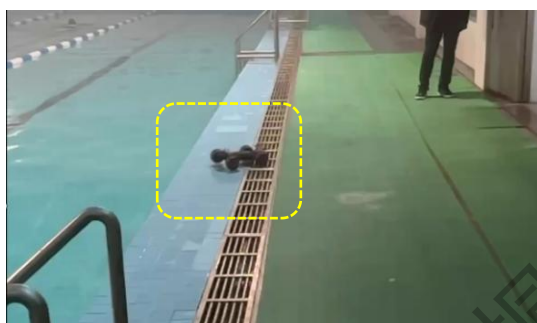


图 5-2-1



图 5-2-2



图 5-2-3

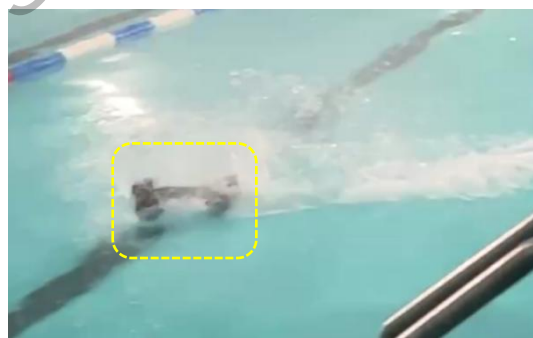


图 5-2-4

经观察，本玩具汽车和普通玩具汽车最明显的区别在于，其轮子边缘有许多齿轮样突起，后续的实验证明，这些齿对汽车的水上漂行起到了极其重要的作用。装有如图 5-3-1 所示车轮的汽车可以进行水上漂，而装有如图 5-3-2 所示车轮的汽车不能进行水上漂。



图 5-3-1



图 5-3-2

接下来，我们分别对主动轮（后轮）和从动轮（前轮）进行研究。

5.1 主动轮的动力学原理



图 5-4-1



图 5-4-2

图 5-4-1 为后轮侧视图，记车轮转速为 ω ，半径为 r ，车轮边缘速度为 v ，汽车重力为 G 。图 5-4-2 为后轮的俯视图，将突起的“齿”近似为矩形，宽为 d_1 ，长为 d_2 ，面积为 S ，且 $v = \omega r$ ， $S = d_1 d_2$ 。经测量， $r = 0.05\text{m}$ ， $G = 16.8\text{N}$ ， $d_1 = 0.7\text{cm}$ ， $d_2 = 5.3\text{cm}$ 。



图 5-5

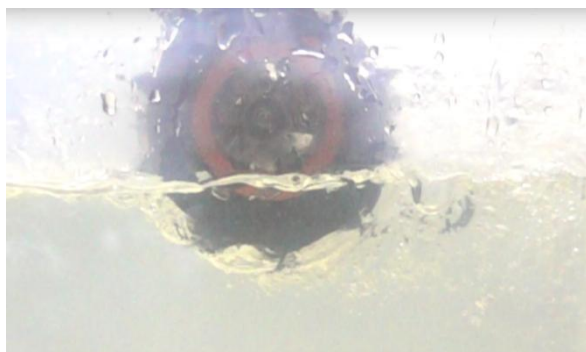


图 5-6

在实际拍摄中我们发现，当车轮转速达到足够大时，后轮在水下的部分会几乎全部形成空气泡（如图 5-6 所示），只有刚与水面接触的一个齿会起到拍打水

面提供升力的主要作用。很大的转速既是为了增大打水的频率，提供更大的升力，也是为了避免水填补齿轮处的空气泡而起到相反的作用。一开始，我们小组猜想是因为车轮转速不够快，导致无法在水上漂行，但当车轮转速达到足够大时再由静止释放，车仍然会下沉。于是我们认为，很可能是初速度不够大的原因导致的。当初速度小于某一临界值时，后轮在水面以下的部分来不及形成空气泡，齿划水产生了一个向下的推力，阻力极大，阻碍其前进。当初速度大于临界值时，最后一个齿离开水面时，空气泡还未来得及被水填补，这样就使得阻力大大减小，使水上漂行成为可能。

首先讨论升力的情况。记每次拍击的力为 F ，从实验上看出车轮入水深度较小，可以不计水的静压。参考前人对蛇怪蜥蜴的研究后，我们将公式(2)简化成

$$F(t) = 0.5C_D\rho Sv^2 \quad (24)$$

其中 ρ 为水的密度， C_D 为拖曳系数（其实验值约为0.7）。若要汽车在水中不下沉，则要满足两后轮提供的拍击力不小于汽车自重，即

$$2F(t) \geq G \quad (25)$$

根据这个公式，带入参数，我们得到了一个能维持其正常行驶的最小速度 $v_{min}=8.1\text{m/s}$ 。

据此我们开展了实验，来测定小车运行时各阶段的速度，其运动状态如下图5-7所示。



图 5-7-a



图 5-7-b



图 5-7-c



图 5-7-d

分析视频过程中，我们借助 Tracker 在小车上取点分析后得到了如下的结果，如图 5-8。

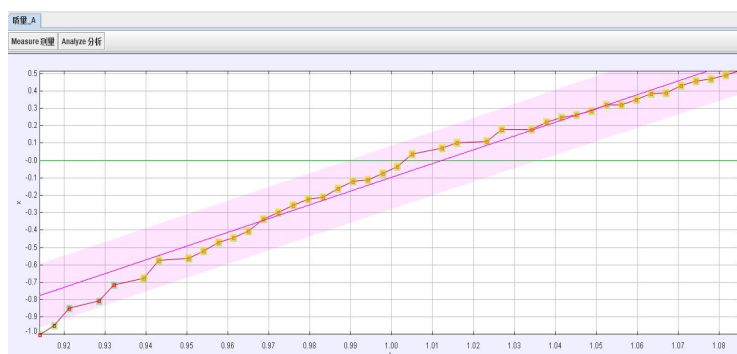


图 5-8

这是一个质点的 $x-t$ 图像，图中斜率反映的是小车的速度。经过分析后我们得出这个速度大概是 7.9m/s ，根据之前的有关 $F(t)$ 的公式，可以算出这个升力的大小是 16.2N ，与汽车的重力近似相等，足以托起小车。从另一个方面来说，刚开始的时候速度比较大，约合 9.6m/s ，大于最低要求速度，（图 5-9-1）所以可以维持水上漂的状态；而后来的速度由于水的阻力等原因，速度降至约 5.7m/s ，如图（5-9-2）不足以维持升力，破坏了最基本的平衡，所以开远了之后就会沉到水中。

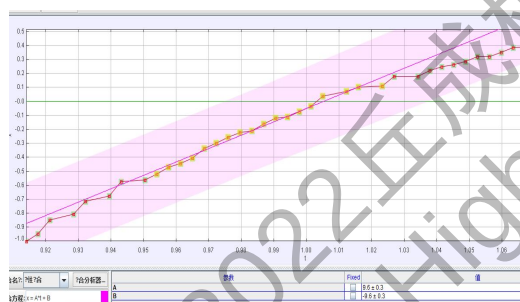


图 5-9-1

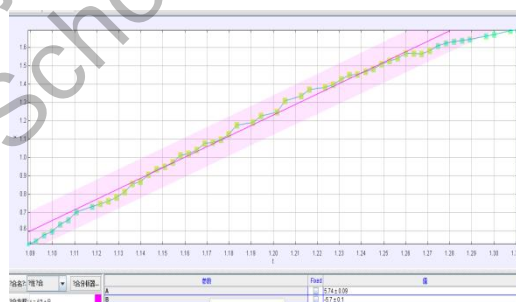


图 5-9-2

同时，此升力与拍打水面的频率有关，记拍打频率为 f ，每个车轮上一共 10 个齿，则 $f = \frac{5\omega}{\pi}$ （单位：Hz）， $T_1 = \frac{1}{f}$ ，当在水面上正常行驶时我们可以认为 $\omega = \frac{v}{r}$ ，代入数据后（取 $v = 7.9\text{m/s}$ ）得到 $T_1 = 3.97 \times 10^{-3}\text{s}$ 。

接下来讨论空穴问题。如果小车不能在水包裹住车轮之前移出空穴，那么就会沉没，这里相当于蛇怪蜥蜴的奔跑第三阶段（空穴恢复阶段）。在前人对蛇怪蜥蜴的研究中，水填补蜥蜴脚踩出空穴的时间的经验公式为 $T_w = 2.285 \sqrt{\frac{R_{eff}}{g}}$ ，其中有效半径取 $R_{eff} = \sqrt{d_1 d_2}$ ，我们将数据代入该公式，得到 $T_2 = 1.41 \times 10^{-2}\text{s}$ 。

相比之下 T_2 比 T_1 大了一个数量级，所以不会出现因为水包裹住了车轮而使车沉入

水中的现象。

另外，有关 T_w 的公式可以帮助我们解释另一个现象。如果提前将轮速提升到最大然后松手会发生什么？我们看到小车会直接沉入水中！这看似与之前有关最小速度的结论矛盾。当我们抱住车身，放入水中的那一瞬间，小车的速度 v 可以认为等于0，虽然此时的 ω 任然很大，维持竖直方向的平衡是没有问题的，但没有了初速度的小车自然是无法移出空穴的，最终会因为速度衰减到 8.1m/s 以下而沉入水中。所以说，如果想要让汽车能够成功地实现水上漂，必须要有一个足够大的入水初速度。

5.2 从动轮的动力学原理

刚才我们分析了小车主动轮的动力学原理，接下来我们分析从动轮的动力学原理，其中从动轮为前轮。

图 5-10-1 和图 5-10-2，小车入水。如图 5-10-3 和图 5-10-4，小车前轮在水上弹跳。



图 5-10-1



图 5-10-2

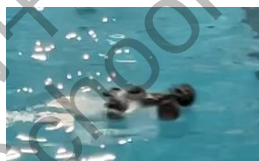


图 5-10-3



图 5-10-4

经过分析，我们发现小车从动轮的运动与打水漂的物理原理类似[6]，在用小车做实验时发现小车在水面上运动的时候，前轮部分会时不时地在水面上弹跳。

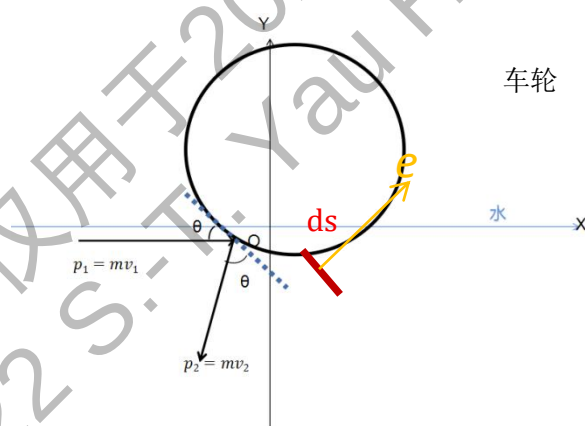


图 5-11



图 5-12

如图 5-11，取车轮（圆）的靠近水面的一个微元 ds ，其与水面的夹角为 θ 。现在假设这一微元相对于水有一速度，水在 x 轴方向上（ y 轴忽略不计）撞击 ds

的速度为 v_1 ，撞击后以一速度 v_2 反弹。计算时假设 $v_1 = v_2$ 。

$$\mathbf{v}_1 = -v \cdot \mathbf{x} \quad (26)$$

$$\mathbf{v}_2 = -v(\cos 2\theta \cdot \mathbf{x} + \sin 2\theta \cdot \mathbf{y}) \quad (27)$$

$\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 是 x 轴和 y 轴上的单位向量。 ρ 为水的密度， d 为车轮宽度，时间间隔为 Δt 。

根据动量定理， Δs 受到水的力为

$$\mathbf{F}_{\text{水}} = -F = \rho d \cdot ds \cdot v^2 [\sin 2\theta \cdot \mathbf{y} - (1 - \cos 2\theta) \cdot \mathbf{x}] \quad (28)$$

$\mathbf{a}$ 为垂直于 Δs 向上的单位向量， $\mathbf{F}_{\text{水}}$ 还可以表示为

$$\mathbf{F}_{\text{水}} = \rho d \cdot ds \cdot v^2 \sqrt{(\cos 2\theta - 1)^2 + \sin^2 2\theta} \cdot \mathbf{a} \quad (29)$$

$\mathbf{F}_{\text{水}}$ 的水平分量阻碍轮子运动，其竖直分量为小车提供向上的力。

现在假设轮子半径为 R ，轮子入水深度为 l 。考虑 ds 对应的 θ 处的角度的微元 $d\theta$

$ds = R \sin \theta d\theta$ ，将 $\mathbf{F}_{\text{水}}$ 代入

$$\mathbf{F}_{\text{水}} = \rho d R \sin \theta \cdot d\theta \cdot v^2 [\sin 2\theta \cdot \mathbf{y} - (1 - \cos 2\theta) \cdot \mathbf{x}] \quad (30)$$

对 $\mathbf{F}_{\text{水}}$ 积分

$$\mathbf{F} = \int_0^{\cos^{-1} \frac{R-l}{R}} \rho d R \sin \theta v^2 [\sin 2\theta \cdot \mathbf{y} - (1 - \cos 2\theta) \cdot \mathbf{x}] \cdot d\theta \quad (31)$$

求得水平方向的力为

$$F_x = \frac{2\rho d(3R-l)v^2 l^2}{3R^2} \quad (32)$$

方向与速度方向相反。竖直方向的力为

$$F_y = \frac{2\rho d(2lR-l^2)^{\frac{3}{2}} v^2}{3R^2} \quad (33)$$

方向竖直向上。由此可以看出，当 l 增大时， F_x 增大；当 l 增大时， F_y 增大。

若忽略竖直方向上的运动导致的水的作用力，对整个小车进行分析，如图 5-13 所示：

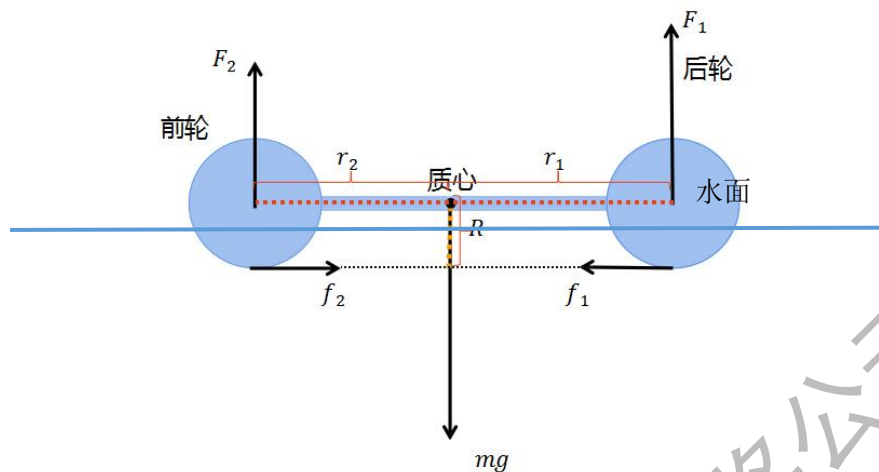


图 5-13

假设小车到达平稳状态后做匀速运动，即

$$f_1 R = f_2 R \quad (40)$$

$$f_1 = f_2 \quad (41)$$

其中 f_2 即是 F_x 。

$$|M_1| = F_1 r_1 \quad (42)$$

$$|M_2| = F_2 r_2 \quad (43)$$

1. 若 $|M_1| < |M_2|$ ，车轮就会上翻，如图 5-14。

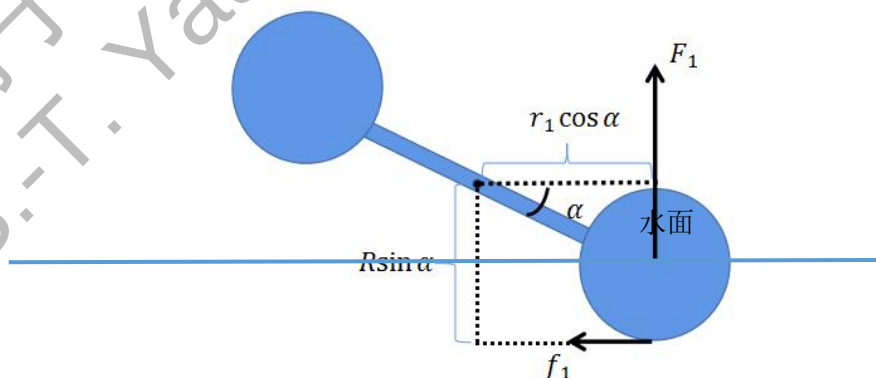


图 5-14

其中 $|M_a| = F_1 r_1 \cos \alpha$ ， $|M_b| = f_1 R \sin \alpha$ ，分为以下三种情况：

(1) $|M_a| > |M_b|$, 小车恢复原状, 也就是从图 5-2-2 所示状态恢复为图 5-2-1 所示状态。

(2) $|M_a| = |M_b|$, 小车在空中保持不动。

(3) $|M_a| < |M_b|$, 小车继续向上翻, 若一直持续, 那么小车很有可能翻过来。

2.若 $|M_1| > |M_2|$, 假设 F_1 和 f_1 不变。如图 5-15, 车身呈下倾状态。

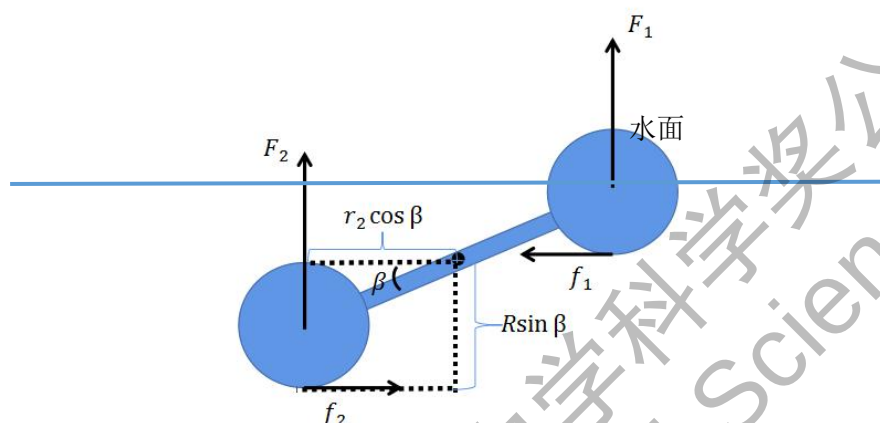


图 5-15

其中 $|M_c| = f_1(r_1 \sin \beta - R) + F_2 r_2 \cos \beta$, $|M_d| = F_1 r_1 \cos \beta + f_2 R \sin \beta$, 分为三种情况:

(1) $|M_c| > |M_d|$, 小车恢复原状, 前轮从水下回到水上。

(2) $|M_c| = |M_d|$, 小车保持不动。

(3) $|M_c| < |M_d|$, 小车继续向下翻, 这种状态持续下去也会导致翻车。

我们在学校游泳馆拍摄视频时, 小车翻倒过许多次, 有不少就可以用这个原因解释。如图 5-16-1 及 5-16-2, 小车从泳池边上入水时初速度较小, 导致其落水时车身呈图 5-16-1 所示的下倾状态。



图 5-16-1



图 5-16-2

此时 F_2 即水对小车前轮向上的力较大，后轮不接触水面所以不受到水的作用力， $|M_c| > |M_d|$ ，小车恢复原状，如图 5-17。



图 5-17

从之前的重物下落实验中我们能发现物体入水之后速度衰减较大，前轮的速度变小，而后轮没有怎么接触水面，其转速较大，致使水对齿的作用力 f_1 较大，此时 $|M_a| < |M_b|$ ，车身呈图 5-14 所示上翻状态，如图 5-18。



图 5-18

而这时车轮转速已经较慢了， f_2 无法再让小车继续行驶，于是车沉下去了，如图 5-19。



图 5-19

六、总结与展望

本研究首先回顾了自然界生物水龟和蛇怪蜥蜴的水上漂原理，分析了我国古代传说中的“水上漂”轻功并不可能，以及定量研究了少年寺武僧水上漂和水上漂玩具汽车的原理。

我们通过模拟金属盘撞击水面实验和人踩木板实验，得出了有木板时速度衰减比例更大，且木板越多，木板竖直方向衰减后的速度越小，只要人能保持好平衡就可以借助木板实现所谓水上漂行走，解释了少年寺武僧水上行走的原理。接着我们对水上飞车从实验上进行了研究，发现主动轮和从动轮物理机制完全不同，后轮是主动轮，类似于蛇怪蜥蜴拍打水面获得升力，主动轮主要通过轮子上特殊的构造为汽车提供前进的动力和升力；前轮是从动轮，其在水面上跳跃的原理和打水漂极为相似，其物理原理等同于打水漂。

我们对水上飞车的研究对于研发能够水上行走的机器人、水上飞车等方面都可能具有应用价值。

参考文献

- [1] John W.M. Bush and David L. Hu. Walking on Water: Biocomotion at the Interface[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006.
- [2] Hsieh S T, Lauder G V. Running on water: three-dimensional force generation by basilisk lizards[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(48): 16784-16788.
- [3] Glasheen J, McMahon T. Size-dependence of water-running ability in basilisk lizards (*Basiliscus basiliscus*)[J]. The Journal of Experimental Biology, 1996, 199(12): 2611-2618.
- [4] 水上漂报道, CCTV 走进科学栏目,
<https://tv.cctv.com/2009/12/01/VIDE1355515167597122.shtml>
- [5] Tracker 是一款通过分析视频中物体运动来提取相关物理信息的软件, 官网
<https://tracker.physlets.org>
- [6] Bocquet L. The physics of stone skipping[J]. American journal of physics, 2003, 71(2): 150-155.

附录

研究历程

2021.10

本小组经讨论，在老师指导下寻找研究方向，经过讨论，本小组开始研究有关水上漂汽车方面的问题，并购买了各类有关器材，开始了初步的研究。

2021.10-11

本小组开始着手于如何操纵水上漂汽车，却发现难以熟练操作，总是出现开不远就会翻车的问题，且前翻与后翻都会出现。

在之后的实践中，本小组又发现驾驶的汽车会逐渐因为进水而沉没。

2021.12

本小组发现汽车车轮在水中转动时会形成一个空气泡包裹在车轮旁，我们认为这是由于水未及时填充而形成的，且这一观点与经验公式和已有数据符合。本小组在水上漂汽车理论动力学问题上有了一定的突破，同时开始着手于有关武侠的轻功水上漂。

本小组决定先从人受到最大冲量的角度开始讨论，根据牛顿第二定律来探究。

2022.01

本小组在测量时一开始选用了不同的加速度测定工具，却发现不同仪器测出来的数据有着明显的不同，这个阶段以完全失败告终。

经过一段较长时间的研究，我们发现从这个角度讨论并不能解释已有的现象，或许蜥蜴的理论与人的理论存在较大的出入。

2022.03-05

本小组参考了已有的文献资料，发现了存在的理论错误，认为蜥蜴和人的模型不能一概而论，并参照已有文献开展了下一步的研究。

本小组决定根据人脚踩木板的过程逐步分析，第一步就是脚踩上去后速度的变化，这是一个有关冲量的问题，且基本和流体无关。

考虑到人必须在水淹没脚之前把脚撤出，所以按照常规思维板的末速度应该越小越好，但经验公式认为水的填充时间是与速度无关的。而人受到向上的冲量应该足够大，所以踩下去的速度要足够的大，综上所述，如果要想实现理想中的轻功水上漂，人踩上木板的速度应该足够的大。

需要补充一点，小车轮子方向难以控制，我们想了很多种方法，都没能测出小车直线行驶时的速度。

2022.07-08

我们原来准备从落水的物体所受到水的作用力与其速度的关系入手。速度通过高帧相机拍摄后用 **Tracker** 软件分析轨迹并得出速度图像，将力传感器绑在物体上同时进行测量得到加速度的图像。我们选择先测量加速度，手机上安装 **phyphox** 软件测加速度，然后将手机装到密封袋里，用胶带粘到金属板上从不同高度下落以获得不同的入水速度。然而密封袋容易进水，手机上测量的加速度也分为 x , y , z 轴，随手机的倾斜转动而变化，手机入水之后不会保持水平状态，因此测出的加速度很粗糙。为了测得更精确，我们换了不同的手机进行测量，然而不同手机测出的受力的图像趋势差不多，但数值却相差很大，于是我们不得不悲伤地换了方案。接下来我们用力传感器来测量水对物体的作用力，让物体从不同高度下落，结果让人十分失望，数据凌乱没有任何规律可言，误差很大，最后不得不放弃了这个方案。

我们在测量小车在水中的车轮转速时，准备用 1000 帧相机拍摄车轮转动的视频，通过数转过一定圈数再除以时间来求出 ω 。结果车轮转速太大，实验中我们小组同学被迫穿上雨衣。拍出来的视频还是不尽如人意，车轮转速还是太快很难看清楚，只能放弃此方案。并且在高帧相机拍摄过程中光线太暗，用 **Tracker** 软件难以准确分析。后来，我们想出了一个更加简单易行的操作，即把水上飞车在水面上稳定行走的过程用高帧相机记录通过计算速度得出车轮转速，最终得以较为准确地测定。

为了研究水上漂“轻功”与木板的数量是否有关，我们将木板按由多到少用轻绳连接，同样用高帧相机记录金属盘入水过程，**Tracker** 软件分析后发现木板数目越多，速度衰减得越大，金属盘的撞击越稳定，这证实了我们的猜想。

最后，我们小组成员亲自下水，用脚踩木板，最大限度模拟水上漂“轻功”过程，用高帧相机分析出的速度衰减率与用金属盘撞击木板相同，那么用金属盘做的实验结果是可靠的，可以应用于人。

致谢

本项目源自我们在 Bilibili 网站上看到的蜥蜴在水面上行走的视频，再联想到我国古代传说中的轻功水上漂。我们好奇这一有趣的现象背后是否有一些物理规律，查阅文献后发现，关于水上行走的蜥蜴在国外已有一些研究，但是关于人在水上行走和水上飞车方面的研究却有所欠缺，于是我们开始了有关“轻功水上漂”的研究。

在此论文完成之际，我们诚挚感谢自始至终给予我们悉心指导的苏俊老师，他对我们实验设计、理论推导以及论文的措辞修改提供了巨大帮助。非常感谢王维国老师为我们基础物理知识的学习提供帮助。感谢江苏省海安高级中学游泳馆工作人员提供实验场地。感谢家长的理解和支持。

我们三人在研究过程中团结协作，共同完成了论文的研究工作。罗昊参与了理论分析和实验，吴雨泽和汪婧含负责了实验和数据的分析。三人共同完成了论文的撰写。

姓名：罗昊 性别：男

学校：江苏省海安高级中学 年级：高二

简介：各科能平衡发展，对物理有较大的热情，求知欲很旺盛，有担当意识和团队意识，严格要求自我，在班级中担任团支书的职务，主动参与校内校外各项活动。

2021 年第 38 届全国中学生物理竞赛获江苏赛区二等奖

姓名：吴雨泽 性别：女

学校：江苏省海安高级中学 年级：高二

简介：各科目成绩优良，对物理有浓厚兴趣，担任物理课代表一职，各项学习活动均积极参加。有较强的语言表达能力和团队精神，能够配合各项任务的完成，具有积极上进、持之以恒的态度。

2021 年 高中数学建模（应用）能力展示活动江苏赛区二等奖

2022 年 “语文报杯·时代新人说”全国中学生征文大赛决赛一等奖

2022 年 全国中学生生物学联赛（江苏赛区）省一等奖

姓名：汪婧含 性别：女

学校：江苏省海安高级中学 年级：高二

简介：各门学科均衡发展，对物理和数学有较大兴趣。在班级内担任数学课代表，富有好奇心，课余时间经常研究一些问题，在团队内有较强的观察能力。