



# 基于自发熵增的静态物体系的 超重失重分析与判断

张泓筠, 孟 波, 尹海峰

(凯里学院 大数据工程学院, 凯里 556011)

**摘要:** 该文由一个简单实验导出了有趣的物理现象, 物体系外观“静止”状态下可产生超重和失重。实验设计的简易物体系(盛水容器+水+气球), 浮体重量和浮体与水的相互作用力不等。借助浮力和水压变化引起气球或气体热力学状态改变, 进而反过来引起浮力变化, 导致物体系对支撑物(台秤)的压力改变, 从而产生超重和失重现象。针对浮体上下运动, 从非平衡态到平衡态的自发状态改变, 将熵变拓展应用到宏观物体运动。孤立系统宏观熵变增加意味着状态变化的自发性, 以及运动物体和水的相互作用力大小与运动物体本身重量大小不等, 由此可判断超重和失重。同时, 详细分析物体受力状态的变化对于如何分析复杂物体系状态变化和受力起到示范作用。

**关键词:** 浮体; 物体系; 宏观熵变; 应变片; 温度计

中图分类号: G482

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20230320](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20230320)

## Analysis and Judgment for Overweight and Weightlessness of the Object System in Static State Based on the Increase of Entropy

ZHANG Hongyun, MENG Bo, YIN Haifeng

(School of Big Data Engineering, Kaili University, Kaili 556011, China)

**Abstract:** A simple experiment shows an interesting phenomenon of an object system in apparently static state exhibiting overweight and weightlessness. Such a complicated object system includes container, water, and balloon, among which the weight of the floating body is unequal to the interplay force with water once the equilibrium state is broken. Because of change in the thermodynamic state of the balloon, the buoyancy force and hydraulic pressure also change with it, directly resulting in that the platform balance shows overweight and weightlessness. The floating body spontaneously changes its movement in upright direction from the non-equilibrium to equilibrium states accompanied by an increase in entropy. Based on it, the concept of macro-entropy change due to mechanical work done by gravity is proposed. Furthermore, the increases in the macro-entropy change mean the spontaneity of change in state, and the existence of difference between the self-weight of moving object and the interplay with water, by which we can judge the overweight and weightlessness. Meanwhile, we also give a demonstration on how to analyze the changes in mechanical state and forces for complicated object system.

**Key words:** floating body; object system; micro-entropy change; strain gauge; thermometer

### 1 表观静态物体系状态变化问题

超重与失重是物体运动在垂直方向上的特殊状态, 物体在竖直方向上对与之接触的物体的压力或拉力大于或小于物体本身的重量。“挑战杯”赛指导实验设计中偶然意识到一个与超重和

失重相关的有趣问题, 按图 1 所示组装盛水圆筒(管腔横截面为  $s_{01}$ )、钩子、塞子、体积膨胀量管(管腔横截面为  $s_{02}$ )、钢丝架及台秤。气球通过细线置于底部时(断线前, 气球体积为  $V_0$ )盛水圆筒中的水刚好触及塞子底部。关于断线后气球运动状态变化对容器底部压力的影响, 台秤示数如何

收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2023-10-06

基金项目: 基于新工科 CDIO 理念的传感器实验课程同构异课教学方法设计(SJG2023340); 黔东南州科技计划项目(黔东南科合基础〔2022〕08)。

作者简介: 张泓筠(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事材料表面与界面及传感器等物理器件的实验应用研究。

E-mail: [zhang681225@163.com](mailto:zhang681225@163.com)

变化的, 学生们答案不一。结合运动的连续性, 本文采用隔离法具体分析盛水圆筒和台秤的作用关系, 并从宏观上讨论物体系从非平衡态到平衡态的变化, 自发熵增以及运动物体重力与水的相互作用力合力做功。

## 2 超重状态分析

通过物体系内部不同物体间的相互作用和受力分析, 我们可具体化物理状态变化过程。

现象描述: 剪断细线, 气球脱离铁钩后, 台秤示数立即增大, 随着气球不断上浮, 台秤的示数不断增大, 直至气球达到最高处与塞子接触后, 台秤示数又回到细线断裂前的值, 如图 1 所示。

受力分析: 细线断裂前, 盛水圆筒、水、气球构成固有整体(物体系), 各部分均静止, 体系

处于初始平衡状态, 台秤受压, 称量的是物体系的整体重量, 物体系处于低能状态。细线断裂后气球受浮力驱动, 物体系处于高能态。随后状态改变, 通过浮力与水、盛水圆筒发生联系, 物体系进入非平衡状态。气球在水压和浮力作用下自发改变力学和热学状态, 向新的平衡态转换, 台秤受压状态随之改变。气球运动过程中, 其重力并不直接作用于台秤, 而是通过浮力作用、排水增加深度、增大水压间接作用于台秤, 若两部分不等就会产生超重和失重现象, 即便整个系统外观仍处于“静止状态”, 这是本实验超重与失重状态设计关键。这种特殊状态, 物体系外观静止, 但其内由于部分物体产生竖直方向加速度, 系统内部结构变化、质量重新分布, 导致物体系短时内超重或失重。

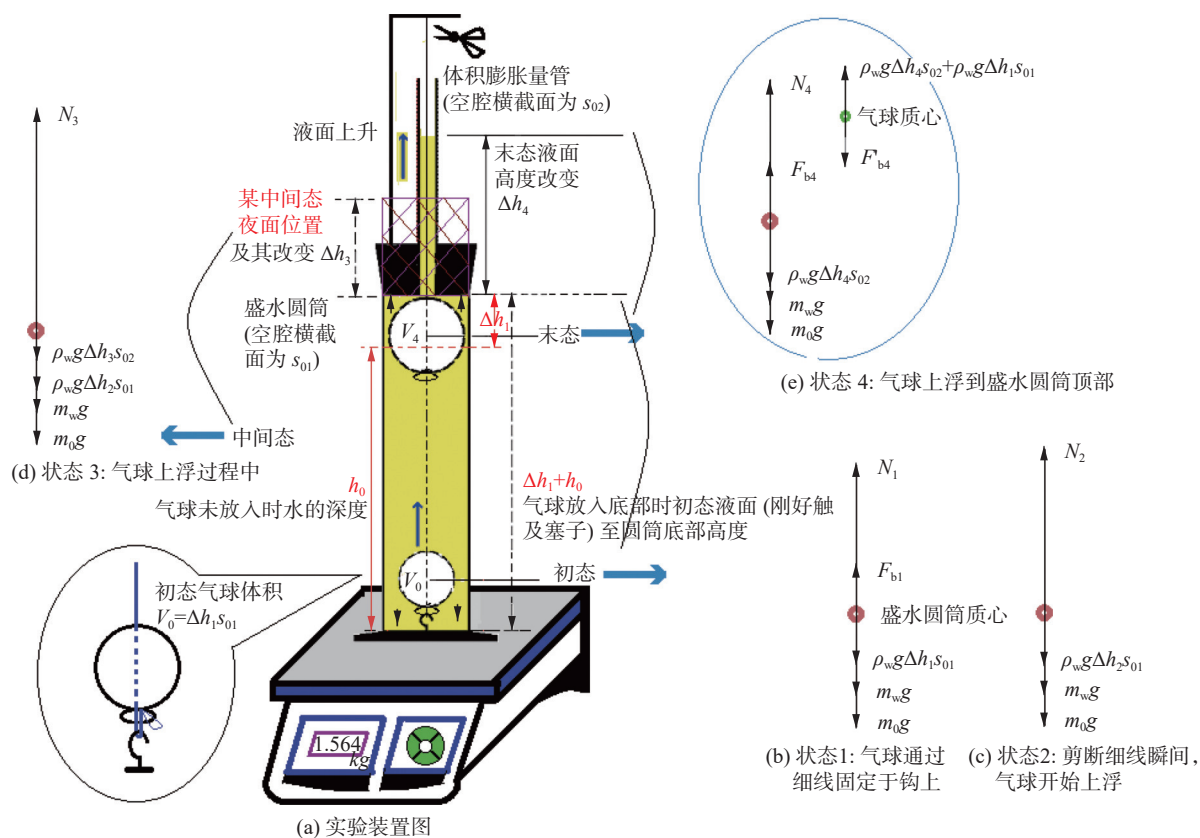


图 1 气球上浮状态变化及盛水圆筒底部受力示意图

1) 状态 1: 初态, 细线未断时(受力分析如图 1(b)所示)

初始平衡状态, 气球被细线牵拉固定于盛水圆筒底部, 水面刚触及塞子下表面, 未进入体积量管, 气球体积为  $V_0$ (即排水体积), 质量为  $m_s$

(其重力相对浮力可忽略不计)。假设  $m_0$ 、 $h_0$ 、 $\Delta h_1$  分别表示盛水圆筒(包括圆筒、塞子和体积量管)质量、未浸入气球时水固有深度(产生压强为  $\rho_w g h_0$ , 因而对盛水圆筒底部压力为  $\rho_w g h_0 s_{01}$ , 与水的重量  $m_w g$  相等)、气球浸入水中排水增

加的水深(气球体积  $V_0 = \Delta h_1 s_{01}$ , 增加的压强为  $\rho_w g \Delta h_1$ , 对盛水圆筒底部增加的水压为  $\rho_w g \Delta h_1 s_{01}$ , 与浮力大小相等)。  $F_b$ 、 $N_1$  分别表示气球对铁钩拉力(大小等于气球所受浮力)、台秤对盛水圆筒的支持力(台秤示数)。气球质量太小可忽略不计, 以盛水圆筒为研究对象, 据其受力图可得平衡方程为:

$$m_0 g + \rho_w g h_0 s_{01} + \rho_w g \Delta h_1 s_{01} = N_1 + F_{b1} \quad (1)$$

$$\rho_w g \Delta h_1 s_{01} = F_{b1} \quad (2)$$

$$N_1 = m_0 g + \rho_w g h_0 s_{01} \quad (3)$$

由式(3)可见, 静态时台秤受压取决于盛水圆筒和水的重量, 跟浮力无关, 浮力属于盛水圆筒-水-气球静态系统内力, 不影响整个系统的质量或重量。

2) 状态 2: 细线断裂后瞬间(受力分析如图 1(c)所示)

断裂瞬间, 气球即将上浮但还未动, 气球体积没有改变。因浮力而产生的拉力  $F_{b1}$  立即消失, 式(1)中其他力存在, 为了与等式左侧三力平衡, 台秤对盛水圆筒的支持力瞬间提升为  $N_2$ , 提升量为  $F_{b1}$ , 支持力明显大于盛水圆筒和水的总重量, 体系处于超重状态, 即:

$$N_2 = m_0 g + \rho_w g h_0 s_{01} + \rho_w g \Delta h_1 s_{01} \quad (4)$$

$$\Delta h_2 = \Delta h_1 \quad (5)$$

3) 状态 3: 中间态, 气球上升阶段(受力分析如图 1(d)所示)

气球上升过程中, 由于水压降低, 气球膨胀, 体积增大, 排水量随之增大, 膨胀部分排水进入体积量管, 气球排水导致水深在状态 2 基础上增加  $\Delta h_3$ , 故台秤受压随之继续增大, 超重程度加剧。尽管体积膨胀量管中上升的水柱对盛水圆筒产生的水压等效于图中网线标注的圆柱形水柱(同盛水圆筒底面  $s_{01}$ , 高为  $\Delta h_3$ )产生的压力, 但塞子下表面管心周边同样会给塞子提供向上的力, 两者相消,  $\Delta h_3$  水柱对盛水圆筒底部产生的水压等于  $\rho_w g \Delta h_3 s_{02}$ , 体系处于超重状态, 即:

$$N_3 = m_0 g + \rho_w g h_0 s_{01} + \rho_w g \Delta h_1 s_{01} + \rho_w g \Delta h_3 s_{02} \quad (6)$$

超重量取决于水对气球的浮力, 压力改变量为:

$$\Delta N_3 = \rho_w g \Delta h_1 s_{01} + \rho_w g \Delta h_3 s_{02} \quad (7)$$

物体本身的重量是固定的, 增大浮力可增强超重效果。装置和物体给定条件下通过增大气球体积(初态时增大气球和水的体积比), 增大液体密度, 可增强超重效果。

4) 状态 4: 末态, 气球上升到顶部静止(受力分析如图 1(e)所示)。

水深在状态 2 基础上增加量为  $\Delta h_4$ 。气球对塞子下表面施加向上的力, 盛水圆筒底部受力平衡, 有:

$$m_0 g + \rho_w g h_0 s_{01} + \rho_w g \Delta h_2 s_{01} + \rho_w g \Delta h_4 s_{02} = N_4 + F_{b4} \quad (8)$$

$$\rho_w g \Delta h_2 s_{01} + \rho_w g \Delta h_4 s_{02} = F_{b4} \quad (9)$$

$$N_4 = m_0 g + \rho_w g h_0 s_{01} \quad (10)$$

气球受力平衡有:

$$\rho_w g \Delta h_2 s_{01} + \rho_w g \Delta h_4 s_{02} = F'_{b4} \quad (11)$$

式中:  $F'_{b4}$  为塞子下表面对气球的压力, 竖直向下, 与浮力平衡,  $F_{b4}$  和  $F'_{b4}$  为作用力和反作用力。

气球到达顶部后, 膨胀到最大, 排水量达到最大, 浮力达到最大值, 气球排水增加的水压与浮力的增量均达到最大, 二者大小相等。但同时气球在顶部会给塞子(连同盛水筒)施加向上的力, 其大小等于浮力, 与气球本身排水对盛水圆筒底部施加的水压相消, 台秤受压恢复到初始状态, 超重现象消失, 物体体系进入新的平衡状态。

综上, 从细线断裂到气球上升至顶部, 盛水圆筒一直处于不断强化的超重状态。尽管物体体系外观静止, 由于其内部物体(气球往上加速)运动, 不断改变体系质量的垂直分布, 从而产生超重效果。宏观物体体系(盛水圆筒、水、气球)处于恒温状态, 热量的变化可视为零, 与外界没有物质交换, 可当作孤立体系。超重过程中, 物体体系从非平衡态到新的平衡态自发转换, 浮力和重力做功, 非外力作用下不可逆。考虑到热与功可相互转换, 对宏观物体体系来讲, 可用功的变化模拟取代热量变化, 由此定义宏观物体自发机械运动状态变化对应的熵变, 该熵变定义为宏观熵变。气球从底部加速运动到顶部, 对物体体系而言, 只有浮力和重力合力(方向竖直向上)对气球做正功, 合力的反作用力作用于水, 方向竖直向下。水的阻力对气球做负功、气球膨胀对外做正功分别与阻力对水做正功、水对气球做负功抵消(物体体系内力做功)。因此从初始非平衡态到末平衡态,

气球上升任意高度( $h_i$ )处对应的宏观熵变可表示为:

$$\Delta S = S_t - S_0 = \frac{\Delta Q}{T_0} = \frac{W}{T_0} = \frac{(F_b - m_s g) h_i}{T_0} \approx \frac{(\Delta h_1 s_{01} + \Delta h_1 s_{02}) \rho_w g h_i}{T_0} > 0 \quad (12)$$

式中:  $\Delta h_i$  表示体积量管中水柱高度, 与气球从圆筒底部上升的任意距离  $h_i$  对应。显然, 正是因为浮力作用才导致气球自发往上运动, 改变了物体系的宏观状态, 伴随的宏观熵变增加, 说明运动物体对系统内其他物体的作用力(其大小等于气球上升过程中所受浮力和阻力之差)大于运动物体本身的重量, 方向向下, 超过了气球本身重力的作用效果, 导致超重。随着气球上升、膨胀、排水

进入体积量管, 物体系的重心也随之提升, 等效于物体系产生向上的加速度, 因而宏观静止物体处于超重状态。

### 3 失重状态分析

如上设计能够通过静态的方式体现超重, 那么失重可否用同样方式实现? 图 2 设计实现了这一构想。气球连同钩码(质量为  $m_1$ )悬挂于钢丝支架上, 其重量大于排水重量。调整水量, 使气球到达底部时, 水面下降刚好触及塞子下表面, 此时假定气球及钩码体积为  $V_0$ (对应气球在盛水圆筒中排水深度为  $\Delta h_1$ ), 则对应细线未剪断时, 气球(加钩码)所处最高处的体积为  $(V_0 + s_{02} \Delta h_5)$ ; 剪断细线, 气球连同钩码将下沉, 台秤示数随之变小。

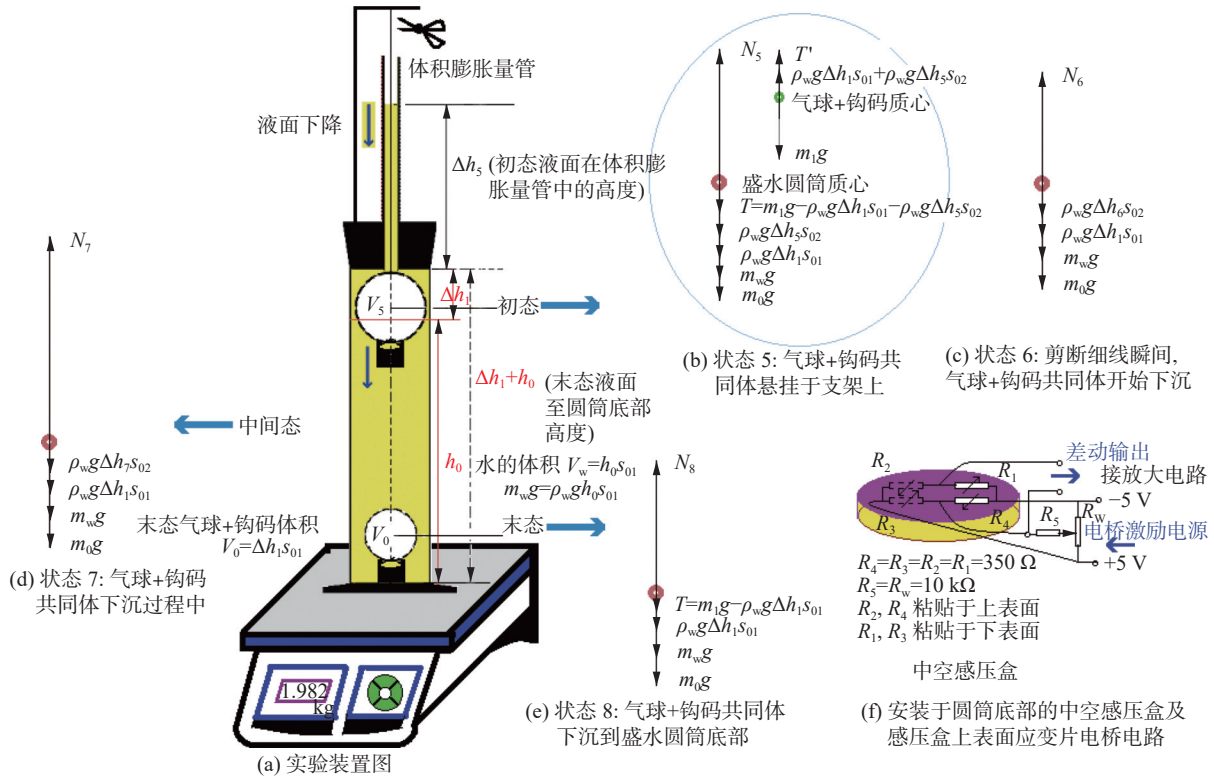


图 2 气球下沉状态变化及盛水圆筒底部受力示意图

5) 状态 5: 初态, 细线未剪断时(受力分析如图 2(b)所示)整个体系处于平衡状态, 则盛水圆筒竖直方向受力为:

$$N_5 = m_0 g + \rho_w g h_0 s_{01} + \rho_w g \Delta h_1 s_{01} + \rho_w g \Delta h_5 s_{02} + T \quad (13)$$

据气球+钩码受力平衡可得  $T$  的反作用力  $T'$  的大小为:

$$T' = m_1 g - \rho_w g \Delta h_1 s_{01} - \rho_w g \Delta h_5 s_{02} \quad (14)$$

代入式(13)可得:

$$N_5 = m_0 g + \rho_w g h_0 s_{01} + m_1 g \quad (15)$$

静置时, 台秤受压取决于盛水圆筒、水的固有质量和气球钩码共同体的总重量, 跟浮力、拉力无关, 二者属于盛水圆筒+水+气球+钩码静态系统内力, 不影响整个系统的质量或重量。

6) 状态 6: 细线剪断后瞬间(受力分析如图 2(c)所示)



拉力  $T$  消失, 气球连同钩码将从静止状态开始下沉, 静止瞬间, 盛水圆筒竖直方向受力为:

$$N_6 = m_0g + \rho_w g h_0 s_{01} + \rho_w g \Delta h_1 s_{01} + \rho_w g \Delta h_6 s_{02} \quad (16)$$

$$\rho_w g \Delta h_1 s_{01} + \rho_w g \Delta h_6 s_{02} < m_1 g (\Delta h_6 = \Delta h_5) \quad (17)$$

显然气球+钩码共同体的排水重量(=浮力)小于自身重量, 因而台秤所受压力(或盛水圆筒所受支持力)小于盛水圆筒、水和气球钩码总重量, 物体体系处于失重状态。

7) 状态 7: 气球下沉(受力分析如图 2(d) 所示)

随着气球下沉, 气球被压缩, 排水减少, 体积膨胀量管中水位下降。盛水圆筒始终处于静止状态, 竖直方向受力为:

$$N_7 = m_0g + \rho_w g h_0 s_{01} + \rho_w g \Delta h_1 s_{01} + \rho_w g \Delta h_7 s_{02} \quad (18)$$

因  $0 < \Delta h_7 < \Delta h_6$ , 台秤所受压力(或盛水圆筒所受支持力)进一步减小, 物体体系失重加深。失重量取决于水对气球+钩码共同体的浮力和气球+钩码共同体的重量不等, 二者差值为:

$$\Delta N_7 = m_1 g - (\rho_w g \Delta h_1 s_{01} + \rho_w g \Delta h_7 s_{02}) \quad (19)$$

物体本身的重量是固定的, 减少浮力可增强失重效果。装置和物体给定条件下唯一能调的只有液体的密度, 减少液体密度, 用酒精取代水, 失重效果增强。

8) 状态 8: 气球静止于底部(受力分析如图 2(e) 所示)

这是最终状态, 气球+钩码共同体静止于底部, 气球最大限度被压缩, 排水量降至最低, 水面下降至刚好接触塞子下表面, 此时气球+钩码体积为  $V_0$ , 给盛水圆筒底部施加压力  $T$ 。整个体系静止, 同样可得:

$$N_8 = m_0g + \rho_w g h_0 s_{01} + \rho_w g \Delta h_1 s_{01} + T \quad (20)$$

$$T = m_1 g - \rho_w g \Delta h_1 s_{01} \quad (21)$$

$$N_8 = m_0g + \rho_w g h_0 s_{01} + m_1 g \quad (22)$$

最终, 台秤示数增大到初始值, 失重现象消失。同样, 失重过程中, 物体体系从非平衡态到新的平衡态自发转换, 气球+钩码从顶部加速运动到底部, 只有气球+钩码重力和浮力的合力(方向竖直向下)对气球做正功。水的阻力对气球做负功、气球被压缩对外做负功分别与阻力对水做正功、

水对气球做正功抵消(物体体系内力做功)。因此从初始非平衡态到末平衡态, 类同于式(12)推导, 气球下落任意高度  $h_i$  处对应的宏观物体体系熵变可表示为,

$$\Delta S = S_t - S_0 = \frac{\Delta Q}{T_0} = \frac{W}{T_0} = \frac{(m_1 g - F_b) h_i}{T_0} > 0 \quad (23)$$

式中:  $h_i$  表示失重过程中气球+钩码重心下落高度。该宏观系统的宏观熵变仍是增加的。状态转换过程中, 运动物体对系统内其他物体的作用力(其大小等于气球+钩码下落过程中所受水的阻力加浮力)小于运动物体本身的重量, 方向向下, 降低了气球+钩码本身重力的作用效果, 导致失重。且气球+钩码本身的重心下降, 物体体系的重心也随之下降, 等效于物体体系产生向下的加速度, 因而宏观静止物体体系处于失重状态。

利用宏观物体体系熵变判断超重、失重方法总结: 无论物体体系内运动物体自发的向上加速还是向下加速, 体系从非平衡态(高能低熵态)到平衡态(低能高熵态)变化(外观“静态”宏观物体体系熵变始终增加  $\Delta S > 0$ ), 运动物体对系统内其他物体的作用力(浮力反作用力叠加水对运动物体阻力的反作用力)始终向下, 即与重力方向一致, 当该作用力大于物体本身重量时, 宏观静止体系处于超重状态, 反之, 系统处于失重状态。因此, 从物体体系内部某物体的自发运动开始到最终静止整个阶段, 若运动速度较小, 水的阻力远小于浮力, 可忽略, 超重失重的判断问题可归结为比较重力和浮力大小。当浮力大于重力时(气球上浮), 通过液体压强的传输, 受浮力作用物体作用于台秤的压力大于重力, 产生超重, 浮力重力差距越大, 超重则越明显; 反之则产生失重(气球下沉)。

## 4 超/失重状态的再讨论及应用

### 4.1 超重与失重属于视重

两种状态都是物体实际重量的非真实反映, 是一种特殊的运动状态, 通常与竖直方向的加速或减速有关, 因而人们常将其与竖直方向的加速度联系起来<sup>[1-2]</sup>。实验室模拟再现超重与失重现象常基于这种认识<sup>[3-11]</sup>。基于本实验分析, 我们认为超重与失重跟支持物直接接触的物体是否产生竖直方向的加速度并无必然联系<sup>[12-13]</sup>, 物体体系(盛水圆筒、水、气球)整体静止, 其内部分物体产生相对运动同样可导致视重和实际重量不等。宇航员

王亚平的太空实验“水珠中的气泡不能浮起来”，证明浮力本质上来自重力，可以认为是一种反重力，降低了重力的作用效果<sup>[14]</sup>。液体重力通过压强对浸于其中的物体上下表面产生压差，从而产生浮力，因而浮力是接触力，是弹力<sup>[15]</sup>。这样的弹力效果直接将物体往上托起，既然视重减少原因来自重力，这种状态被认为失重，理由充足、理解方便，符合失重的定义。

#### 4.2 常规意义上的超重与失重是物体的一种运动状态

教学上演示、观察并不方便，如何延长这种状态，既做到现象明显又随时可控可不是件容易的事。本实验设计实质上仍属于通过改变运动状态实现超重与失重，特殊的设计有其独到之处。

1) 构造物体体系通过其中气球的重量与浮力不等实现超重与失重，浮力与部分物体的重量差越大，超重或失重现象越明显。

2) 气球本身受压，深度变化，压力变化，浮力变化，体积亦随之变化。因而，气球因浮力作用上浮，受压减小，体积膨胀，体积增大部分排水进入体积膨胀量管，增大了压强，减缓了体积的膨胀和浮力的增大，上升速度减慢，延长了超重状态持续时间，以便观察；反之，下沉亦如此。增长盛水圆筒长度可进一步延长状态持续时间。

3) 气球运动过程中，所受浮力的改变量与盛水圆筒底部所受水压的改变量相等。

#### 4.3 熵

用于描述宏观物体运动，学者们有诸多争议<sup>[16-17]</sup>。为描述可逆卡诺热机物理过程的方向性，克劳修斯于 1854 年提出了“熵变”概念<sup>[18]</sup>。人们将其拓展到用于描述微观粒子状态的混乱程度，认为孤立微观体系内部微观粒子的运动始终朝这样的方向发展，或状态最混乱，或化学反应成键数最多，或生成物分子量最大，同类物结构越复杂等，形成的状态最稳定，受约束最小，可用能量最小，从初始状态到中间状态乃至终了状态，非外力不可逆转，因而“熵”始终是增加的。我们认为，拓展“熵”描述宏观物体体系，有其理论基础，结合热力学第一定律和第二定律可知准静态过程热量的变化可表示为：

$$dQ = dU + pdV \quad (24)$$

机械功可转化为热，对应“熵变”为：

$$dS = \frac{dU + pdV}{T} \quad (25)$$

“熵”的定义中本身有宏观物体间相互做功的部分，但不能简单地将宏观物体体系的状态改变同“熵变”联系起来。对孤立宏观物体体系而言，主要从状态稳定性、能量最小原则判断最终走向。因而本实验物体体系自发从非平衡到平衡状态变化，高能态转化到低能态，能量释放耗散在物体体系内部物体间的碰撞变形和粘滞中，有效能转化成非做功能力，导致能量贬值<sup>[19]</sup>，是不可逆的，熵是增加的(式(12)和式(23))。宏观熵判断方法同样适用于其他超重失重状态，如人在台秤上的下蹲(失重)和起立(超重)运动。

#### 4.4 利用本文装置可设计基于应力改变的温度计

如图 2 测量装置，在盛水圆筒底部安装封闭圆饼状感压盒，将 4 个电阻应变片分别粘附于感压盒上底面的内外表面上组成差动式电桥传感器(图 2(f))，使用单片机控制、树脂封装<sup>[4,20-21]</sup>。气体的热胀系数明显高于液体和固体，因而气球(可采用医用优质品)相当于信号采集前端敏感元件，实现温度到体积的转换，再经体积量管和盛水圆筒实现压力转换。由于体积量管具有“放大”压强的效果，盛水圆筒底部的应变片能够很容易感知压力的变化，最后实现压力到电信号的转换。因而这样的温度计涉及多种信号转换，即温度→体积→压力→电信号，实现由电信号跟踪温度变化。其优点在于体积膨胀量管中液位的升高有放大盛水圆筒底部压强和压力的效果，应变片容易感知。

#### 4.5 利用本文装置验证理想气体的等温变化过程

等温条件下，图 1 中取初态和末态，容易测量出气球所容纳的空气体积和气压(球心到水面距离加上大气压换算的水柱高度)，看压强-体积乘积是否相等。然后将装置置于水槽中水浴加热升温，可再次计算在不同温度下的压强-体积乘积。同时可进一步验证气体的状态方程，具体从略。

#### 4.6 孤立物体体系内部平衡状态改变

实验所涉物体体系由于内部物体间平衡关系的打破导致不同物体间受力关系变化，通过非平衡状态的自发调整再次变为平衡状态。系统从平衡态→非平衡态→新平衡态变化过程中，物体体系内部不同物体受力连锁反应，动态变化，过程较为复杂，从气球受力平衡破坏，自发引起新的形

变,水深随之改变,从而导致圆筒受力改变。

## 5 结束语

设计的简易孤立物体系(盛水圆筒+水+气球)内部平衡状态改变时,浮体重量和浮体与水的相互作用力不等可获得物体系的超重与失重状态。该孤立系超重与失重状态中内部的能量耗散导致宏观熵增加,系统进入具有低能高熵的新平衡态;同时将热力学“熵”应用于宏观孤立体系的机械运动能引导学界思考。实验装置具有多重应用,可用于验证气体定律,可结合应变片构成的电桥设计结构型温度传感器。文中隔离法的受力分析方法对分析复杂物体系内部物体间相互作用力的动态变化具有指导意义。

## 参考文献

- [1] 王震,汪玉莹.自制模拟电梯演示仪,理解超重失重概念[J]. *物理教师*, 2017, 38(8): 45-47.
- [2] 冯庆义,李俊峰,王天舒.水下模拟失重动力学研究综述[J]. *力学与实践*, 2004(3): 10-15.
- [3] 孙永华.对超重和失重演示实验的改进[J]. *物理实验*, 2005, 25(4): 34-34.
- [4] 张泓筠,杨永亮,潘金福.简易超重和失重测量装置设计[J]. *实验技术与管理*, 2019, 36(4): 83-86.
- [5] WANG W. Improvement on the demonstration device of overweight and weightlessness[J]. *Physics Experimentation*, 2017, 37(3): 64-65.
- [6] 钟新跃.新型超重失重演示仪的设计与实现[J]. *湖南科技学院学报*, 2009, 30(8): 54-55.
- [7] MAIER V V, VARAKSINA E I, SARANIN V A. Lecture demonstrations of a drop's jump to weightlessness[J]. *Physics-Uspokhi*, 2016, 59(10): 108-113.
- [8] BALUKOVIC J J. Teaching and learning the concept of weightlessness: An additional look at physics textbooks[J]. *European Journal of Physics Education*, 2018, 9(1): 1-14.
- [9] 何凌燕.谈“超重与失重现象演示仪”的制作与使用[J]. *物理教师*, 2013, 34(6): 51-52.
- [10] KRUGLAK H. Demonstrations of weightlessness[J]. *American Journal of Physics*, 1962, 30(12): 929-930.
- [11] AN G. On the teaching design of overweight and weightlessness[J]. *The Science Education Article Collects*, 2013, 12: 165-166.
- [12] 张渊.超重与失重判断方法的疑问[J]. *物理教学探讨*, 2016, 34(1): 44.
- [13] 吕基昌.超重和失重现象的探讨[J]. *物理教学*, 2009, 31(7): 18-20.
- [14] 神十航天员王亚平太空授课完整视频高清版[EB/OL]. [2022-03-20]. <https://www.bilibili.com/video/av509995757/>.
- [15] 张泓筠.一种演示浮力是弹性力的简单方法[J]. *教学仪器与实验*, 2007(2): 14.
- [16] 刘桂玉,刘咸定.再论熵的宏观定义:与克劳修斯熵导出法的比较[J]. *西安交通大学学报*, 1989, 23(4): 121-125.
- [17] 凌洁.宏观克劳修斯熵与微观玻耳兹曼熵的统一:兼谈宏观克劳修斯熵公式的微观诠释及本质[J]. *华东冶金学院学报*, 1999, 16(3): 273-275.
- [18] 郭奕玲,沈慧君.物理学史[M].北京:清华大学出版社,1993.
- [19] ZEMANSKY M W. Heat and thermodynamics[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [20] 李森.粘贴电阻应变计的实践与探索[J]. *实验科学与技术*, 2009, 7(3): 148-151.
- [21] 刘晔,李国琴.传感器原理及应用技术[M].北京:北京理工大学出版社,2019.

编辑 张俊