

一种气体定律演示方法的设计及应用*

张泓筠 欧满琳 孟波

(凯里学院大数据工程学院 贵州 凯里 556011)

(收稿日期:2022-09-18)

摘要:为优化气体状态实验教学,作者设计了简易多功能、具有放大现象变化功能的气体定律演示器,解决了气球初始充气测量难题,克服了传统气体定律演示器因摩擦带来的气压误差,改进了实验操作.基于设计本身拓展了其在教学中的可能应用.

关键词:状态方程;浮力;等压变化;等容变化;气球

1 基于气体状态变化规律实验教学分析

实际气体在压强不太大(和大气压相比)温度不太低(和室温相比)条件下,其性质可近似为理想气体.

教学用的某些气体定律演示器或结构复杂,或参数测定不透明、不直观,或参数调控不方便^[1-3];有些会产生比较大的误差^[4].相关实验存在的弊端主要表现在漏气、摩擦过大、状态量的变化太小不直观、使用水银等,为此产生了系列改进方法^[5-11].我们认为,实验教学在演示原理准确、生动、直观前提下,应尽可能简化结构及步骤,突出实验现象.麦克斯韦也曾有更为精辟的论述,教育仪器的教育价值往往与仪器的复杂程度成反比,在能够直观展示物理原理、方便理解情况下,教学用自制的仪器进行研究学习比现成的仪器、仔细调整好的仪器要学到更多的东西.因而教学演示需要简化装置结构、简化测试过程,据此我们设计了一套简易方法可直观演示气体等温变化、等容变化、等压变化规律,甚至可验证克拉珀龙方程.在一定范围内可任意获取气体的状态参数,能做到实时性、动态性,具有放大现象变化效果.

2 教学设计

2.1 设计依据

(1) 浮力是接触力,弹性力,气球静止于水下不

同深度的地方,压强不同,受水的压力亦不同.在给定的容器-水-浮体系统,气球随着深度增加,受水的压力增大,体积变小,所受浮力减少,水面下降.

(2) 调节气球在水中的深度可以控制球内气体的压强和体积^[12];水浴加热可以改变气球的温度、体积和压强,因而本方法中,深度和温度的控制可随意改变气体的状态,体积量管可使体积变化现象更直观.

2.2 器材和装置图

2.2.1 器材

500 mL量筒(玻璃或塑料制,直径 $\phi = 50$ mm),250 mL量筒,100 mL量筒,12号橡胶塞(上、下直径分别为62 mm,51 mm),玻璃管2根(5 mm \times 7 mm,长度分别为200~300 mm,大于1000 mm),彩色小气球若干,钩码,细线,酒精温度计(量程0~60 $^{\circ}\text{C}$,用透明胶粘于筒内壁),充气装置[三通管或T形管、塑料注射器(100 mL或60 mL)、U型管、钩形管(长度大于1 m)],圆筒形水槽(直径 $\phi = 10 \sim 15$ cm,高于盛水量筒2 cm,用于水浴恒温加热),乳胶管(5 mm \times 7 mm),长直滴管,米尺,铁架台2个,酒精喷灯,草木灰.

2.2.2 装置图

装置图如图1所示.

2.2.3 简易充气测压装置制作及使用

制作方法:

* 贵州省教育厅课题“固-液界面性能及应用研究”,课题批准号:黔教合KY字[2019]079;黔东南科合基础[2022]08号课题研究成果.
作者简介:张泓筠(1970-),男,博士,教授,主要研究方向为材料表面与界面、传感器设计、实验教学与仪器.

(1) 按图1(a)所示装置将T形管、注射器、U型管和钩形管(长度大于1 000 mm的长直玻璃管用酒精喷灯加工而成)用乳胶管连接起来。

(2) 将钩形管长直端悬挂于铁架台上,整个装置固定以便充气。

(3) 将注射器活塞拉至尾部,将小气球口用细线多圈环绕然后活结固定在T形管一端,用滴管注水入长直钩形管直到水面与左边U型管顶部平齐;推进注射器活塞充气入小气球,直至气球直径接近量筒直径(若长直管内水压不够继续用滴管加入适当的水,若有气泡残留可通以长直细铁丝除之)。钩形管左右两边水面高度差 h_0 加上大气压(折算为水柱高度 h_a)即为球内气体压强($p_0 = h_a + h_0$)。 h_0 不大,可通过注射器活塞或在长直管上加水控制大小,因而在一定范围内可定量获取任意气压,任意体积

的气体。由于气球本身处在大气环境中,内外大气压平衡, h_0 实际上相当于气球弹性壁所施加的压强,因而该充气方式直接可给出气球弹性壁产生的压强。

(4) 用另一根细线活结捆扎气球与T形管相接处(不是扎在T形管玻璃上,而是气球本身端口位置,与(3)捆扎处有一定距离),封闭气体,封闭瞬间对应的水柱差即为弹性膜所加压强。然后将(3)捆扎处细线解开,将气球从T形管上取下,并系上小钩码(其重量大于气球排开水的重量若干),则气球封闭的实际空气即为研究的近似理想气体,状态参数为(p_0, V_0, T_0),压强 p_0 和温度 T_0 现场可测,体积 V_0 可通过组合草木灰(或其它密度很少的粉末)用量筒直接测量^[13],然后与用等温过程关系式 $p_0 V_0 = p_1 V_1 = C$ 计算 V_0 对比。

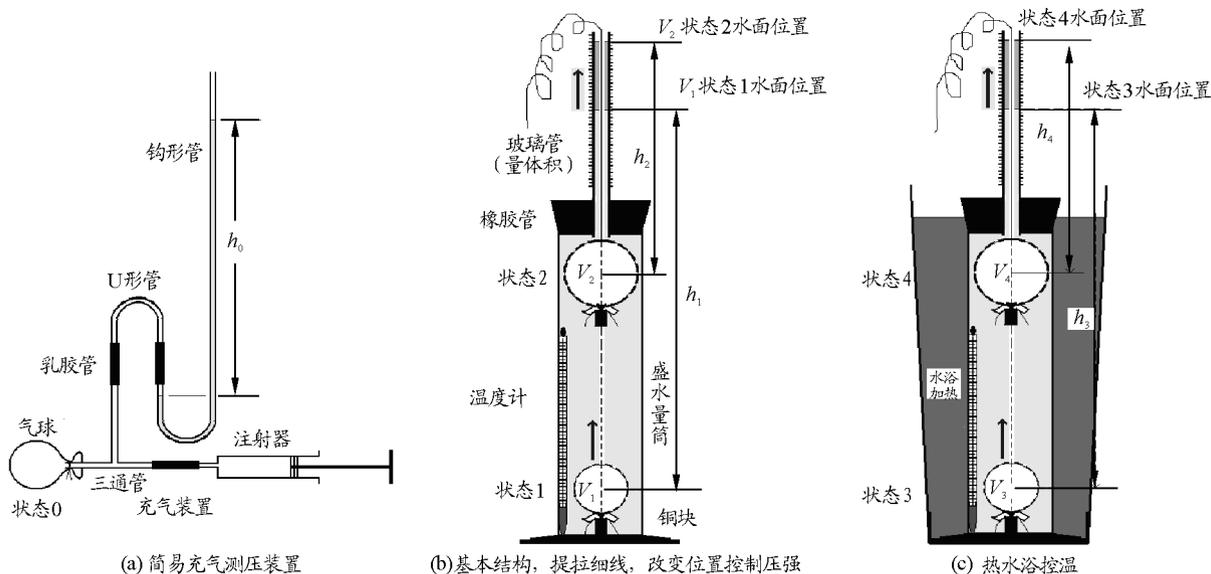


图1 气体定律演示器设计使用示意图

2.2.4 演示器简易制作

(1) 取12号橡胶塞(上、下直径分别为56 mm、46 mm)打孔,取长200~300 mm细玻璃管(5 mm×7 mm×250 mm),用酒精喷灯对玻璃管两端截口进行平滑加工,然后将玻璃管套入橡胶塞。

(2) 体积定标,将500 mL量筒套上橡胶塞(周边靠筒口一圈标上塞入量筒的位置),若量筒嘴处不能密封,可用长为30 mm左右的环形橡皮套(本实验取气球中段,剪掉端口和球顶)套上塞子与量筒连接处,外加橡皮筋固定加密,并检查气密性。然后

取下塞子装水,待水面接近筒口塞入塞子时的位置,记下水的体积,塞上塞子于同样位置,改用注射器通过玻璃管往量筒内定量装水(内部不能有气泡),量筒体积标记从大于量筒容积值(略高于橡胶塞上表面位置,可作为盛水初始体积)的某整数开始标记(如本文实验658 mL位置标记),采用纸带或标签纸做标记,用双面胶粘附于玻璃管上,刻度均匀,精度为0.1 mL(或直接测量液面至标记高度,然后通过每mm代表的体积进行换算,这样可避免设计体积尺度带)。

2.2.5 使用方法

(1) 用量筒测量钩码、气球膜(内填充水,排除空气)及所用细线的总体积 V_{02} 以及气球橡皮膜的体积 V_b .

(2) 室温下(15.6 °C) 气球充气后[对应图 1(a) $h_0 = 290.0 \text{ mm}$], 从充气装置取下. 用 500 mL 量筒测出能在量筒内完全淹没气球的草木灰的体积, 然后将气球置于量筒内用上述给定的草木灰淹没, 测出两者的混合体积, 再减去草木灰、细线和气球膜的体积即为气球置于空气中时球内空气的体积 $V_0 = 50.22 \text{ mL}$, 气球状态 0 参数完全确定.

(3) 组装气球、钩码与细线(要求钩码重量大于气球位于最高处时排开水的最大重量), 将气球放入量筒, 细线穿过玻璃管, 加入室温($T_0 = t_0 + 273.15 \text{ K}$) 水直至水面靠近量筒口, 套入橡胶塞至同样位置(要求玻璃管以下部分具有气密性). 改用注射器加水至体积刻度初始位置(为便于读数可

滴加 1~2 滴红墨水), 气球处于量筒底部位置时, 作为状态 1[图 2(b)], 记录此时水和气球的总体积为

$$V_1 = v_1 + V_{01} + V_{02} \quad (1)$$

其中水的体积为 V_{01} (上述两次所加水量和), 气球膜、钩码和细线的体积为 V_{02} , 球内气体的体积为 v_1 , 玻璃管中水面至气球中心高度为 h_1 (见文后附注证明).

(4) 将气球拉至盛水量筒顶部, 作为状态 2[图 2(c)], 记录此时水和气球的总体积为

$$V_2 = v_2 + V_{01} + V_{02} \quad (2)$$

球内气体的体积为 v_2 , 玻璃管中水面至气球中心高度为 h_2 .

(5) 将量筒置于圆筒形水槽中, 用稍高于室温的水(19.0 °C) 进行水浴加热, 依上述步骤(3) 和(4) 同样方法获得状态 3 和 4[参看图 1(c), 实物图略]. 将上述参数记入表 1, 计算并验证.

表 1 气体等温变化

温度 $t_i/\text{°C}$	状态 S_i	体积 V/mL				压强 p_i/mmHg	压强体积乘 $p_i v_i / \text{mmHg} \cdot \text{mL}$	结论
		V_i/mL	V_{01}/mL	V_{02}/mL	v_i/mL			
15.6	状态 1	658.29 ± 0.02	599.0 ± 2	11.0 ± 1	48.29 ± 3.02	$10\,002.13 \pm 1$	$483\,002.86 \pm 30\,257.74$	各状态 $p_i V_i$ 基数值(不考虑测量误差时)差距较少
	状态 2	659.13 ± 0.02	599.0 ± 2	11.0 ± 1	49.13 ± 3.02	9830.13 ± 1	$482\,954.29 \pm 29\,739.14$	
	状态 0				50.22 ± 2	9677.13 ± 1	$485\,985.47 \pm 19\,406.48$	
19.0 (不考虑水的膨胀)	状态 3	659.51 ± 0.02	599.0 ± 2	11.0 ± 1	49.51 ± 3.02	$10\,072.13 \pm 1$	$498\,671.16 \pm 30\,470.36$	两状态 $p_i V_i$ 基数值稍有差异
	状态 4	660.21 ± 0.02	599.0 ± 2	11.0 ± 1	50.21 ± 3.02	$9\,873.63 \pm 1$	$495\,754.96 \pm 29\,871.59$	
19.0 (考虑水的膨胀 0.43 mL)	状态 3	659.51 ± 0.02	599.43 ± 2	11.0 ± 1	49.08 ± 3.02	$10\,072.13 \pm 1$	$494\,340.14 \pm 30\,469.93$	两状态 $p_i V_i$ 基数值差异缩小
	状态 4	660.21 ± 0.02	599.43 ± 2	11.0 ± 1	49.78 ± 3.02	$9\,873.63 \pm 1$	$491\,509.30 \pm 29\,871.16$	

注:(1) 上述实验过程(从低到高处调节气球深度) 不要搞反.

(2) V_i 的读数取自装置上部玻璃量管中液位高度折算, 首先在玻璃量管中位置稍高于塞子上表面某处[如实物图 2(b) 中标签纸上沿] 定位基准刻度, 如标记体积基数为 658.0 mL, 然后根据玻璃管中液位高于基准刻度长度值换算为叠加的体积, 玻璃管管腔每 mm 长度对应体积为 $\frac{1}{43} \text{ mL}$, 约 0.02 mL, 故用最小刻度为 mm 的刻度尺测量时, 误差大小为 $\pm 0.02 \text{ mL}$; V_{01} 为 250 mL 量筒所测, 误差为 $\pm 2 \text{ mL}$; V_{02} 为 100 mL 量筒所测, 误差为 $\pm 1 \text{ mL}$; 压强 $p_i = h_a + h_i + h_0$ 为大气压折合成的水柱高度加上气球从充气装置隔离取下瞬间所受 $h_0 = 290.0 \text{ mm}$ 水柱及气球中心至玻璃量管中液面高度(刻度尺最小刻度为 mm), 误差为 $\pm 1 \text{ mm}$. 压强体积乘积的误差为上述各次测量误差依

运算关系顺延.所列误差仅仅是读数带来的可能误差,实际测定数据以基数值为准.

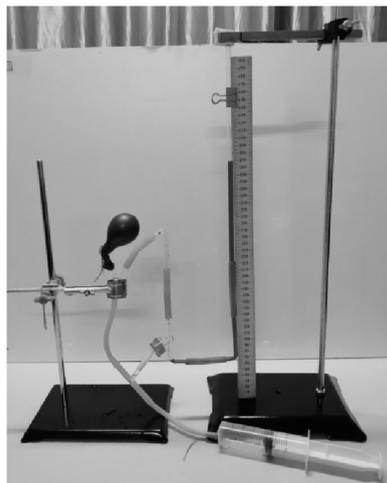
(3)2022年12月13日凯里天气晴,室温 $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (开小太阳),湿度 52% ,气压 920 hPa ,合 $h_a = 9\ 387.13\text{ mm}$ 水柱.

(4)各物理量没有规范的采用国际单位制,而是直接采用第一手测量单位.

2.2.6 实验测试及数据分析

用简易充气测压装置填充气球,对应水柱高度

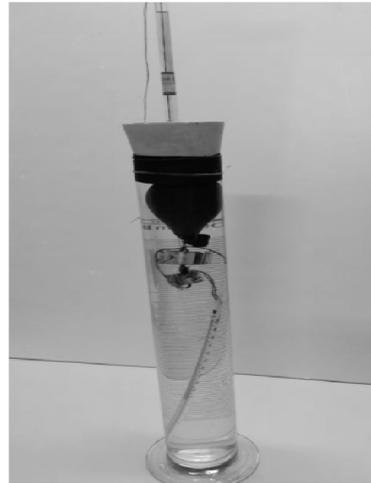
为 $290\text{ mm}(h_0)$,对应空气体积为 V_0 ,取该气球用于等温实验[见图2(a)].



(a) 气球位于充气装置上, U形管左右两侧水柱高度差加上大气压为气球内气体受压,状态0



(b) 气球装置处于盛满水的量筒底部, 状态1



(c) 气球装置处于盛满水的量筒顶部, 状态2

图2 室温 $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时气体等温变化实验

(1) 等温过程分析

表1所示,以气球所封闭的空气为研究对象,室温 $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下测定状态1、2、0的体积和气压参数时,各状态对应的气压、体积乘积基数值非常接近, $48.57\text{ mmH}_2\text{O} \cdot \text{mL}$ 差距相对48万以上的基数(占基数值 $\frac{48.57}{482\ 954.29} = 0.01\%$),可以忽略不计,较好地反映了等温变化规律.

然而当使用加热过的水做同样的实验,当温度基本稳定为 $19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,状态3、4对应的气压、体积乘积基数值稍有差异($498\ 671.16 - 495\ 754.96 = 2\ 916.2\text{ mmH}_2\text{O} \cdot \text{mL}$,仅占基数值 $\frac{2\ 916.2}{495\ 754.96} =$

0.59%),若考虑误差可能,差不多可以接受.其差距原因主要来自加热后水和固体物质(气球膜,钩码及细线)的膨胀,由于固体膨胀系数远少于气体,且温度变化不大,固体本身的体积又较少,体积增大微乎其微,略升温后固体部分体积 V_{02} 当作常数是允许的.但是水的体积比较大,膨胀后体积增大,计算时

仍把水的体积 V_{01} 当作常数就会带来可观的误差.如果从气体体积中再减去水的膨胀,差距应该会缩小.水的体积为 $V_{01} = 599.0\text{ mL}$,参照 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水的膨胀系数 $\alpha = 2.1 \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$,水的体积增量为

$$\Delta V_{01} = \alpha V_{01} \Delta t = 2.1 \times 10^{-4} \times 599.0 \times (19 - 15.6) = 0.43\text{ mL} \quad (3)$$

此为考虑水膨胀时,气体体积的减少量(见表1).状态3、4对应的气压、体积乘积基数值差为

$$494\ 340.14 - 491\ 509.30 = 2\ 830.84\text{ mmH}_2\text{O} \cdot \text{mL}$$

些许减少,说明测量误差占了大头,如气球在本实验中并非理想球体,状态变化时,气压中心的确定会带来测量误差.

对比室温下等温实验和升温后等温实验,升温后等温实验误差增大,鉴于上述分析,建议升高温度做等温实验时,所用水最好取自恒温箱较长时间保温的水,避免水温升高导致水缓慢膨胀.

(2) 气体状态方程验证

因为空气量给定,从状态1到状态3应该满足

$$\frac{p_i V_i}{T_i} = C \quad (4)$$

对状态 1

$$C_1 = \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{10\,002.13 \times 48.29}{273.15 + 15.6} = 1\,672.74 \text{ mmHg} \cdot \text{mL} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5)$$

对状态 3(不考虑水膨胀)

$$C_3 = \frac{p_3 V_3}{T_3} = \frac{10\,072.13 \times 49.51}{273.15 + 19.0} = 1\,706.90 \text{ mmHg} \cdot \text{mL} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6)$$

两者有 33.96 差距。

若考虑水膨胀

$$C_3 = \frac{p_3 V_3}{T_3} = \frac{10\,072.13 \times 49.08}{273.15 + 19.0} = 1\,692.08 \text{ mmHg} \cdot \text{mL} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7)$$

两者差距 19.34, 明显缩小, 说明水的膨胀是应该要考虑的。

(3) 气球在空气中时其内气体体积的计算

取气球状态 0 和状态 1, 两者等温变化, 符合

$$p_0 V_0 = p_1 V_1$$

$$V_0 = \frac{p_1 V_1}{p_0}$$

$$\frac{10\,002.13 \times 48.29}{9\,387.13 + 290} = 49.91 \text{ mL} \quad (8)$$

与 2.2.5(2) 测量结果 $V_0 = 50.22 \text{ mL}$ 非常接近, 说明实验设计是成功的。

3 教学应用

(1) 应用于等压、等容变化及气体状态方程实验证实

类似地, 通过水浴加热并调整气球在量筒中的位置可获得等压过程、等容过程状态, 或任意状态下的体积、压强和温度[图 1(c), 如底部为状态 3, 顶部为状态 4]。另外, 据方程 $p_i V_i = \frac{m}{\mu} RT_i$ 知道, 只要测出一定量空气任意状态参量 p_i, V_i, T_i , 就可准确算出气体质量 $m = \frac{\mu p_i V_i}{RT_i}$ 以及空气密度。

(2) 应用于浮力分析, 参考设计依据可用于分析浮力产生的根源。

(3) 可用于测量空气的膨胀系数。在图 1(b) 基础上取气球状态 1, 状态参数为 (p_1, V_1, T_1) 。然后在

图 1(c) 基础上, 经水浴加热后取状态 3(考虑水的膨胀), 状态参数为 (p_3, V_3, T_3) 。然后参照膨胀系数的定义计算即可(具体从略)。

4 设计说明

(1) 作为玻璃制测量仪器, 量筒不允许直接加热使用。但此处量筒仅作为普通容器使用, 方便取材, 并非利用其测量功能。且水浴加热控温 50°C 以下, 量筒膨胀极为有限。

(2) 量筒 - 橡胶塞 - 玻璃管组合的测试系统避免使用活塞类构件, 不存在因漏气和摩擦带来的实验误差; 同时也避免使用水银, 不存在水银泄漏和挥发的危险。

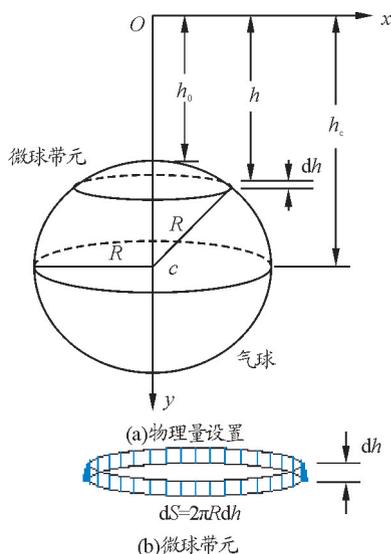
(3) 调整取气装置状态时要宜缓, 特别是操作气球和注射器时, 内部连通腔体不能受阻, 否则, 如腔体突然加压, 会导致玻璃管中红墨水冲出。

(4) 初次实验需要做好准备工作, 消耗一定时间, 装置做好后, 操作是方便的。设计结构简单, 取材方便, 状态可控性强, 现象直观, 参数测定准确, 误差小, 实现用简单仪器、简易操作定量展示物理原理, 低成本设计实验。可用于指导学生自制, 进行研究性学习, 适合于“控制变量法”本身的实验教学。

附录: 证明水面下气球内气体所受水压等于水面至球心深度处产生的压强

$$\bar{p}(h_c) = \rho g h_c$$

证明 1: 定性分析(见附图 1)



附图 1 水面下气球内气体所受水压的计算, c 为气球球心, 半径为 R

假定气球处于水面下 h_0 深度处,球半径为 R . 球面上任意一点所受水的压强只跟深度有关,与球面形状无关,故球面上各点压强从 ρgh_0 到 $\rho g(h_0 + 2R)$ 不等,考虑到球形或近似球形的对称性,球面上所受压强平均值可表示为

$$\bar{p} = \rho g(h_0 + R)$$

证明 2: 定量计算

如附图 1 所示建立坐标系,在球面上取微球带,高度为 dh ,距离水面深度为 h ,微球带面积可表示为

$$dS = 2\pi R dh$$

其上受力为

$$dF = \rho gh dS = \rho gh \times 2\pi R dh$$

则球面上所受水的压力大小可表示为

$$F = 2\pi \rho g R \int_{h_0}^{h_0+2R} h dh = \pi \rho g R (4Rh_0 + 4R^2)$$

于是,气球表面所受平均压强可表示为

$$\bar{p} = \frac{F}{S} = \frac{\pi \rho g R (4Rh_0 + 4R^2)}{4\pi R^2} = \rho g(h_0 + R) = \rho gh_c$$

即为式(1).

以上分析考虑的仅仅是水对气球施加的压强,但不能认为气球内气压等于该气压,实际上由于气球膜本身弹力作用,球内气压要稍高于水压.

参考文献

[1] 何圣静,王兴乃. 物理实验词典[M]. 北京:科学普及出

版社,1991: 96.

[2] 段吉辉,徐从兰,孟昭敏,等. 物理学演示实验手册[M]. 济南:山东教育出版社,1987:216-218.

[3] 张瑞琨. 中学教学全书·物理卷[M]. 上海:上海教育出版社,1996:523-526.

[4] 汪维澄. 气体定律的实验[J]. 教学仪器与实验, 2009(8):6-9.

[5] 朱宗惠. 对气体定律实验器的改进[J]. 物理教师, 1993(4):25-25.

[6] 吴安. 对气体定律实验器和气体性质定律仪的再改进[J]. 教育与装备研究, 2002, 18(11):32-33.

[7] 张勇,刘茂军,朱金铭,等. 利用 PASCO 传感器探究气体等温变化规律[J]. 物理实验, 2018,38(10):59-61.

[8] 李富恩,王晓梅,何彦雨. 利用 DIS 实验探究气体的等温变化规律[J]. 中国现代教育装备,2019(18):51-54.

[9] 柏会. 让数字化探究实验教学变得更加完美——“气体的等温变化探究实验设计”教学案例[J]. 物理通报, 2016(7):86-88.

[10] 张平柯. 基于智能手机外温和压强传感器的气体定律演示仪[J]. 中国科技教育, 2021(7):32-33.

[11] 万宝玮. “会发声”的燃烧——有关气体定律的演示实验[J]. 教学仪器与实验, 2015(6):38-39.

[12] 张泓筠. 一种演示浮力是弹性力的简单方法[J]. 物理教学,2006(1): 61-63.

[13] 张泓筠,邓生平,孟波,等. 水溶物密度测量新方法[J]. 物理教学探讨, 2016(1): 58-60.

Design and Apply on a Demonstrating Method of Gas Law

ZHANG Hongyun OU Manlin MENG Bo

(School of Big Data Engineer, Kaili University, Kaili, Guizhou 556011)

Abstract: To optimize experimental teaching for gas state, authors designed a simple and multifunctional gas law demonstrator having function of amplification in volume change phenomena, solving the problem of quantifying the initial air pressure of the balloon, overcoming the pressure errors from friction for the traditional gas law demonstrator, improving the operation, and developing the its potential applications in teaching.

Key words: state equation; buoyancy; isobaric change; isochoric change; balloon