

绝热膨胀法测量空气比热容比实验教学方法探讨

毕会英

(北京科技大学天津学院物理实验室 天津 301830)

(收稿日期:2016-09-13)

摘要:针对空气比热容比测量过程中由于不确定因素导致的误差较大的问题,采取在设定相对误差最大允许值的前提下,由理论值推导出测量参考值取值范围,制定出个性化的实验教学方案,以此来指导实验过程的教学方法,增加了实验的可控性,有效减小了实验误差.

关键词:空气比热容比实验 实验教学方法 实验误差 测量值范围

采用绝热膨胀法测量空气比热容比是大学物理实验常用的测量方法.在教学过程中,采取在设定相对误差最大允许值的前提下,由理论值推导出测量参考值取值范围,制定出个性化的实验教学方案,以此来指导实验过程的教学方法,增加了实验过程的可控性,有效减小了实验误差,达到了预期的实验效果.

1 实验过程

本实验采用某公司生产的FD-NCD-II型空气比热容比测定仪,如图1所示.在此需要说明:本实验使用的FD-NCD-II型空气比热容比测定仪中压力传感器对应的气体压强灵敏度为20 mV/kPa,即气体压强每改变1 kPa时,对应的空气比热容比仪器显示的电压值改变20 mV.为直观读取数据和叙述方便,本文直接采用仪器数显的电压示值大小表示压强的大小.在课堂上指导学生做实验时,正常教学过程是:教师先讲完原理和仪器使用方法,之后学生按照以下操作步骤开始实验.

(1) 构建热力学研究系统:缓慢向储气瓶中充入一定量的空气,待瓶内气体达到稳定状态 I (p_1, V_1, T_0) 时,瓶内气体压强为 $p_1 = p_0 + p'_1$, p'_1 为充气后瓶内气体增加的压强值.

(2) 绝热膨胀过程:迅速打开放气阀,使瓶内气体与大气相通,将有体积为 ΔV 的气体从贮气瓶喷出.当瓶内压强降至 p_0 时,立刻关闭放气阀,由于放

气过程较快,可以近似认为是一个绝热膨胀的过程.此时瓶内气体状态为 II (p_0, V_2, T_1).

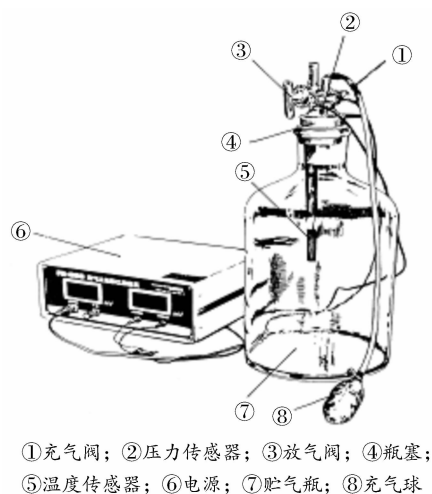


图1 空气比热容比测定仪

(3) 等容吸热过程:绝热膨胀后,瓶内气体从外界吸热,经历一个等容吸热过程直至瓶内气体达到室温 T_0 为止,此时瓶内气体压强也随之由 p_0 增大为 $p_2 = p_0 + p'_2$, p'_2 为等容吸热后增加的压强,则气体稳定后的状态为 III (p_2, V_2, T_0).

由 I \rightarrow II 是绝热膨胀过程,由绝热方程: $p^{\gamma-1} T^{-\gamma} = \text{常量}$,可以得到

$$p_1^{\gamma-1} T_0^{-\gamma} = p_0^{\gamma-1} T_1^{-\gamma} \quad (1)$$

由 II \rightarrow III 为等容吸热过程,由等容过程方程得

$$\frac{p_2}{T_0} = \frac{p_0}{T_1} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得出

$$\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\gamma} \quad (3)$$

本实验中, p_1 和 p_2 为

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 + p_1' \\ p_2 &= p_0 + p_2' \end{aligned}$$

将 p_1, p_2 代入式(3)中得到

$$\left(1 + \frac{p_1'}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{p_2'}{p_0}\right)^{\gamma}$$

考虑到 $p_1' \ll p_0, p_2' \ll p_0$, 将上式进行数学近似运算得到

$$\begin{aligned} 1 + (\gamma - 1) \frac{p_1'}{p_0} &= 1 + \gamma \frac{p_2'}{p_0} \\ \gamma &= \frac{p_1'}{p_1' - p_2'} \end{aligned} \quad (4)$$

按照式(4), 学生只要测出充气后瓶内气体增加的压强 p_1' 以及放气后增加的压强 p_2' , 即可求出空气比热容比^[1].

2 存在的问题

实际教学过程中, 教师一般要求学生充气压强在 110 mV ~ 140 mV 之间, 放气后压强稳定在 35 mV 左右, 学生测量 10 次, 教师检查数据时, 只要数据的离散程度不太大即可认为数据合格了.

但在实验过程中, 由于每个人的习惯不同, 充气的多少以及关闭放气阀的时刻都是凭感觉进行, 不同学生充气 and 放气后增加的压强值 p_1' 和 p_2' 不尽相同, 即使同一个学生进行重复测量时, 充气 and 放气后增加的压强值 p_1' 和 p_2' 也会有不同. 因此, 实验操作的随意性带来了 p_1' 和 p_2' 值的忽高忽低, 忽大忽小. 表 1 和表 2 分别是个性化实验教学指导方案实施前, 两类不同习惯的学生上课时实际测得的实验数据. 从表 1 可以看出: 这类学生放气后的 p_2' 值均习惯性偏低 ($31.8 \text{ mV} \leq p_2' \leq 33.4 \text{ mV}$), 但充气后的 p_1' 均偏高 ($136.6 \text{ mV} \leq p_1' \leq 140.2 \text{ mV}$), 学生每次测量的 γ 值均偏小, 相对误差达到 6.8%. 从表 2 可以看出: 这类学生放气后的 p_2' 值均习惯性偏高

($37.8 \text{ mV} \leq p_2' \leq 40.8 \text{ mV}$), 但充气后的 p_1' 均偏低 ($110.8 \text{ mV} \leq p_1' \leq 120.5 \text{ mV}$), 学生每次测量的 γ 值均偏大, 误差达到 7.2%. 这说明: 两类学生的放气习惯不同, 导致放气后的 p_2' 值不同, 有些学生测得的值偏低, 有些学生偏高; 但两类学生的充气增加压强 p_1' 的值又不受任何控制, 是学生个人随意取值, 可能低, 也可能高; 每个学生都按照自己的习惯, 随意充、放气, 实验时的随意性较大, 导致误差较大. 可见, 没有理论指导的实验是盲目的实验, 这种盲目性和随意性导致了实验的误差较大.

表 1 个性化实验教学指导方案实施前的实验数据 (p_1' 偏高, p_2' 偏低)

测量次数	p_1'/mV	p_2'/mV	γ	$\bar{\gamma}$	$E_r/\%$
1	137.3	32.5	1.310	1.306	6.8
2	139.6	31.9	1.296		
3	139.0	33.4	1.316		
4	139.4	31.8	1.296		
5	138.8	32.6	1.307		
6	136.6	31.8	1.303		
7	137.2	32.7	1.313		
8	137.8	33.0	1.315		
9	138.1	32.6	1.309		
10	140.2	32.0	1.296		

表 2 个性化实验教学指导方案实施前的实验数据 (p_1' 偏低, p_2' 偏高)

测量次数	p_1'/mV	p_2'/mV	γ	$\bar{\gamma}$	$E_r/\%$
1	120.2	38.3	1.468	1.503	7.2
2	119.1	38.6	1.480		
3	115.4	38.1	1.493		
4	120.0	38.5	1.472		
5	113.9	37.8	1.497		
6	118.2	40.0	1.512		
7	120.5	39.7	1.491		
8	115.7	38.8	1.505		
9	110.8	39.1	1.545		
10	112.3	40.8	1.571		

因此, 在教学过程中, 考虑个人因素给实验带来的不确定性, 充、放气后气体压强取值范围成为该

实验是否成功的关键.

3 实验教学指导方案

为减小个人不确定因素带来的实验误差,采取先设定相对误差最大允许值,再由理论公式推导出测量参考值取值范围,形成个性化的实验指导方案,以此来指导实验过程的教学方法,增加了实验的可控性,减小了测量误差.

(1) 首先设定实验允许的最大相对误差为3%.由误差理论公式,推导出空气比热容比的测量值范围.

$$E = \frac{|\bar{\gamma} - 1.402|}{1.402} = 3\%$$

$$\bar{\gamma} - 1.402 = \pm (3\% \times 1.402)$$

得

$$\bar{\gamma}_1 = 1.360$$

或

$$\bar{\gamma}_2 = 1.444$$

即 $\bar{\gamma} = (1.360 \sim 1.444)$,可控制实验的相对误差在3%之内.

(2) 将空气比热容比理论值1.402,1.360和1.444分别代入空气比热容比理论公式(4)中,推导出充、放气后增加压强的取值范围.

$$1.402 = \frac{p_1'}{p_1' - p_2'}$$

则有

$$1.402(p_1' - p_2') = p_1'$$

$$p_1' = \frac{1.402}{0.402} p_2'$$

$$\frac{p_1'}{p_2'} = 3.488$$

同样, $\bar{\gamma} = 1.360$ 和 $\bar{\gamma} = 1.444$ 时, $\frac{p_1'}{p_2'}$ 的值分别为3.778和3.252.

根据以上推导结果,只要 p_1' 的取值近似等于 p_2' 的3.5倍,测量结果就接近理论值1.402,即充放气后 $\frac{p_1'}{p_2'}$ 的值在3.252~3.778范围内,即可将相对误

差控制在3%之内.

(3) 由于 p_2' 是等容吸热后瓶内气体增加的压强,它的取值受当时实验室环境温度的影响.根据文献[2]的结论:温度越高,空气比热容比越低,本文假定实验室温度在整个实验过程中保持不变.在相同的温度下,由于是等容吸热,在每次实验的过程中,放气后瓶内气体压强的增加值应基本相同.实验时,由于充气后增加的压强值 p_1' 较放气后增加的压强值 p_2' 更容易控制,因此,考虑学生个人因素,首先设定 p_2' 的电压取值范围一般为30 mV~40 mV,根据前述的 $\frac{p_1'}{p_2'}$ 的取值范围,确定出 p_1' 的电压取值范围应为104 mV~140 mV.表3是根据上述方法得到的 p_1' 和 p_2' 的取值范围.

表3 p_1' 与 p_2' 比值为3.448(3.252~3.778)时, p_1' 和 p_2' 的取值

p_1'/mV	p_2'/mV	$\bar{\gamma}$	$E_r/\%$
104.6(97.6~113.3)	30.0	1.402 (1.444~1.360)	≤ 3
108.1(100.8~117.1)	31.0		
111.6(104.1~120.9)	32.0		
115.1(107.3~124.6)	33.0		
118.6(110.6~128.4)	34.0		
122.1(113.8~132.2)	35.0		
125.6(117.1~136.0)	36.0		
129.1(120.3~139.8)	37.0		
132.5(123.6~143.6)	38.0		
136(126.8~147.3)	39.0		
139.5(130~151)	40.0		

从表3可以看出:在设定的误差范围内,随着充气压强的增大,放气压强也随着增大.因此,学生在正式测量前,可根据个人的习惯反复充、放气,先确定个人放气后 p_2' 值的大致范围,再由 p_2' 的值确定个人充气后增加的压强 p_1' 值的取值范围,制定出符合个人习惯的个性化实验方案,来指导整个实验过程.也就是说,由于学生操作习惯不同,放气后的压强 p_2' 各不相同,但学生根据个人习惯得到的 p_2' 取值范围基本稳定;因此,正式测量前,学生可先进行

反复充、放气,确定放气后的个人 p_2' 值范围. 一些放气后 p_2' 值偏高的学生,充气后的 p_1' 值应控制在较高的范围;一些放气后 p_2' 值偏低的学生,充气后的 p_1' 值要控制在较低的范围;因此实验时只要按照确定好的个性化 p_1' 的取值范围进行充气(表3),便可减小实验时 p_1' 取值的随意性和盲目性带来的误差.

4 实验操作步骤及测量数据

(1) 实验者先向储气瓶内反复充、放气几次以了解个人的充、放气习惯,确定放气后 p_2' 的个性化数值范围.

(2) 根据表3列出的指导数据,确定充气后 p_1' 的取值范围.

(3) 根据已确定的 p_1' 取值范围向瓶内缓慢充气,稳定后记录 p_1' 的值.

(4) 迅速放气进行绝热膨胀,气体稳定后记录 p_2' 的值.

(5) 将 p_1' 和 p_2' 值分别代入式(4),计算得到空气比热容比的值.

表4是学生按照个性化实验教学指导方案进行测量获得的实验数据.

表4 按照个性化实验指导方案进行实验测得的实验数据

测量次数	p_1'/mV	p_2'/mV	$\frac{p_1'}{p_2'}$	γ	$\bar{\gamma}$	$E_r/\%$
1	120.4	33.6	3.583	1.387	1.394	0.6
2	121.2	34.5	3.513	1.398		
3	118.6	34.8	3.408	1.415		
4	121.5	34.5	3.522	1.397		
5	119.1	33.1	3.598	1.384		
6	121.0	34.1	3.548	1.392		
7	120.6	34.6	3.486	1.402		
8	117.8	32.9	3.581	1.387		
9	122.1	34.1	3.581	1.388		
10	120.8	33.9	3.563	1.390		

由表4看出:学生 p_2' 的取值在 32 mV ~ 35 mV,依据指导方案给出的数据(表3), p_1' 的取值

范围在 110 mV ~ 130 mV,因此,学生充气时,应控制充气后的 p_1' 值保持在 110 mV ~ 130 mV, p_1' 与 p_2' 的比值在 3.252 ~ 3.778 范围内, $\bar{\gamma} = 1.394$,相对误差只有 0.6%.

5 结论

(1) 在排除理论公式、室内环境温度、仪器等因素对实验结果的影响后,学生根据充、放气习惯,确定个人放气后 p_2' 的个性化数值的大致范围,然后由 p_2' 的值,根据实验教学指导方案给出的数据(表3),确定充气后气体压强增加值 p_1' 的取值范围,按照确定好的 p_1' 的取值范围向储气瓶内进行充气,然后将 p_1' 和 p_2' 的实际测量值代入空气比热容比计算式(4)中,即可得到空气比热容比测量值.

(2) 按照个性化实验教学指导方案进行实验,增加了实验过程的可控性,减小了随意性和盲目性给实验结果带来的误差,相对误差可有效控制在预先设定的 3% 之内,实验达到了预期的效果.

(3) 本文只列出了 p_2' 的电压取值范围在 30 mV ~ 40 mV 对应的 p_1' 取值范围,若 p_2' 的电压取值低于 30 mV 和高于 40 mV,可按照相同办法推导出相应的 p_1' 的取值范围进行实验.有研究认为: p_1' 的取值不超过 180 mV 时,其实验结果都比较接近理论值^[3].但本文认为: p_2' 过高或过低是由于过早或过迟关闭放气阀引起的,属于非正常实验操作,再依据 p_2' 推导出的 p_1' 值进行实验毫无意义.

参考文献

- 1 毕会英. 大学物理实验. 北京:国防工业出版社,2013. 43 ~ 46
- 2 常相辉,冯先富,张永文,等. 不同温度下空气比热容比实验装置的研究. 物理实验,2011,31(4):21 ~ 23
- 3 张焕德. 空气比热容比 γ 测量值准确度的研究与分析. 大学物理实验,2010,23(4):15 ~ 17

利用 Tracker 软件分析验证牛顿第二定律

吴宏伟

(西北师范大学教育学院 甘肃 兰州 730070)

(收稿日期:2016-09-30)

摘要:利用 Tracker 软件分析了验证牛顿第二定律的实验视频,验证了物体加速度的大小与它所受到的作用力成正比,与它的质量成反比,加速度的方向与作用力的方向相同。

关键词:Tracker 软件 牛顿第二定律 视频

1 引言

牛顿第二定律是高中物理学科中的重要概念,也是学习物理的难点和重点. 牛顿第二定律在高中阶段物理知识的学习中起着承上启下的作用,牢固掌握牛顿第二定律的内涵,有利于学生学习受力分析,为解决力学综合问题奠定坚实基础. 验证牛顿第二定律常用的实验方法是利用打点计时器打点,通过纸带计算物体的加速度,虽然这种方法简单方便,但在实际教学过程中存在的问题主要是:需要花

费大量时间,实验所选器材远离学生的现实生活,不能反复呈现实验现象等. Tracker 软件是一种广泛使用的视频分析软件,通过分析物理实验视频,追踪研究对象的运动轨迹,以简洁、高效的数据分析手段揭示物理现象背后所隐藏的物理规律. 利用 Tracker 软件的自动追踪功能,有效地跟踪滑块的运动轨迹,同步描绘出滑块运动的加速度-时间图像,可精确测得滑块运动的加速度,从而验证牛顿第二定律.

Discussion on Experimental Teaching Method of Measurement of Air Specific Heat Capacity Ratio Using Adiabatic Expansion Method

Bi Huiying

(Tianjin College, University of Science and Technology Beijing, Tianjin 301830)

Abstract: Aiming at the problem of errors from air specific heat capacity ratio measurement, an experimental teaching method for decreasing errors was proposed. This method presupposed the relative error was less than 3%, and then the measurement reference values were deduced. The Personalized experimental program was established. It was used to guide students for fulfilling the experiment. As a result, the uncertainties, always occurred in the experiment, were controllable effectively and the experimental error were reduced. The expected results have been achieved.

Key words: air specific heat capacity ratio; experimental teaching method; experimental error, measurement range