

理想气体定律实验

(理解理想气体状态方程以及测量比热容的方法)

一、课前预习

(一) 预习要点

1. 理想气体定律的公式和实验原理
2. 理解热力学过程中状态变化及基本物理规律;
3. 如何调节球的振动测量周期
4. 读取状态量操作要点

(二) 预习资源

1. 中心网站 《大学物理实验》慕课
2. 智慧树 《大学物理实验》慕课

二、背景及应用介绍

概念: 气体的定压比热 C_p 与定容比热 C_v 之比为 $\gamma = C_p / C_v$, 其中系数 γ 称为气体的比热容比, 又称为气体的绝热系数。由气体运动论可以知道, γ 值与气体分子的自由度数有关。对单原子气体(例氩)只有三个平均自由度, 双原子气体(例氮)除上述三个平均自由度外, 还有两个转动自由度, 对多原子气体, 则只有三个转动自由度。比热容比与自由度 f 得关系为: $\gamma = (f + 2) / f$ 。

应用: 比热容比是一个常用的物理量, 在热力学理论及工程技术的应用等方面起着重要的作用。计算热机的效率时也涉及到比热容比。在火箭技术中, 表征能量效率的特征速度和推力系数都直接与比热容比的大小有关。对发动机进行热力计算或气动计算时, 经常要用到煤油燃烧产物的比热容比。气体比热容比的确定, 在压缩机设计与试验中也有着极为重要的意义。

从 2016 年至 2020 年 9 月 27 日, 我国共实施 140 次宇航发射任务, 2018 年和 2019 年航天发射次数连续居于世界首位。近年来, 中国航天在重大工程推进、技术创新迭代、运营模式探索等多方面取得显著进展, 成绩斐然。重大工程迈入新阶段 2020 年 5 月 5 日 18 时整, 长征五号 B 运载火箭搭载新一代载人飞船试验船等载荷从中国文昌航天发射场点火升空。随着空间站阶段任务拉开大幕, 中国载人航天工程踏上了新征程。按计划, 我国自 2021 年起将先后发射天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱, 进行空间站基本构型的在轨组装建造, 于 2022

年前后完成空间站建造。2020年6月23日，第55颗北斗导航卫星成功发射。7月31日我国向全世界宣告，中国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统全面建成。



我国在航空事业的发展

三、实验目的

1. 在知识方面：

- (1) 理解热力学过程中状态变化及基本物理规律；
- (2) 学会用振动法测定空气的比热容比；
- (3) 验证理想气体状态方程；
- (4) 作图求解斜率计算摩尔数。

2. 在能力方面：

- (1) 培养学生的力学实验能力；
- (2) 培养学生动手操作、发现问题、分析问题和解决问题能力；
- (3) 培养学生分析处理实验数据和误差分析的能力。

3. 在素养方面：

- (1) 培养学生的科学实验素养；

- (2) 培养学生正确的价值观；
- (3) 主动探究的创新精神。

四、教学中的重点与难点

重点

1. 实验原理：理性气体的状态与状态方程；理性气体的热力学过程方程；
2. 实验方法：学会用振动法测定空气的比热容比；
3. 实验操作：热力学温度和压强的测量。

难点

变温过程准确的测量压强和温度是本实验的难点。

五、实验原理

在精密玻璃管B的中央开设有一个小孔。当振动物体A处于小孔下方的半个振动周期时，注入气体使容器内压力增大，引起物体A上下振动，而当物体A处于小孔上方的半个周期时，容器内的气体将通过小孔流出，使物体下沉，以后重复上述过程。只要适当控制注入气体的流量，物体A能在玻璃管B的小孔上下作简谐振动。设钢球A的质量为 m ，半径为 r （直径为 d ），当瓶子内压力 P 足下面条件时，刚球A处于力平衡状态，

$$p = p_l + \frac{mg}{\pi r^2}$$

(1)

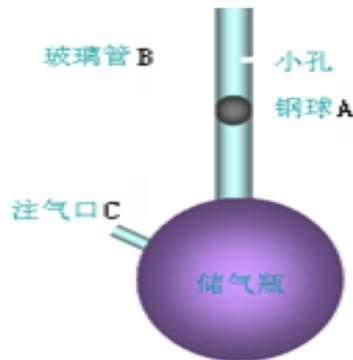


图1 实验原理图

小球的运动方程为：

$$m \frac{dx^2}{dt^2} = \pi r^2 dp \tag{2}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\pi^2 r^4 p \gamma}{mV} \cdot x = 0 \tag{3}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\pi^2 r^4 p \gamma}{mV}} = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

整理得到比热容比

$$\gamma = \frac{64mV}{T^2 p d^4} \quad (5)$$

理想气体定律

理想气体分子是没有形状大小，没有相互作用的理想模型。

罗伯特·玻意耳（Robert Boyle, 1627-1691）定律：温度保持不变，一定质量的气体压强 P 和 V 的乘积是一个恒量。即

$$PV = C \quad (6)$$

盖·吕萨克（Gay-Lussac, 1778-1850）定律：压强不变时，一定质量气体的体积 V 跟热力学温度 T 成正比。即

$$V_1/T_1 = V_2/T_2 = \dots = C \quad (7)$$

查理（Jacques Charles, 1746-1823）定律：体积不变时，一定质量气体的压力 P 跟热力学温度 T 成正比。即

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \dots = C \quad (8)$$

由上述三个定律归纳得到理想气压的压强（ P ）、体积（ V ）、温度（ T ）和摩尔数（ n ）之间的关系如下：

$$PV = nRT \quad (9)$$

上式称为理想气体状态方程， $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 是普适气体常数。

六、实验内容

测定空气的比热容比测量过程

1. 用螺旋测微器测量备用小球（不可取出管内小球，以免损坏仪器）直径 6 次；
2. 测量大气压强（实验开始前，结束各测一次，取平均值）；
3. 用物理天平测量备用小球的质量；
4. 利用小气泵作为气源，测定空气的比热容比（可近似为双原子气体），振动次数选 50 次，重复测 6 次。

理想气体实验准备工作：

1. 打开泄气阀，推进针管柱塞到底，记录此时针管上的体积读数。应约 30 毫升；
2. 将针管柱塞置于体积为 40cc。关闭泄气阀，并确定温度插孔已插上；
3. 快速推进针管柱塞到底，完全压住柱塞，保持该位置，直到温度和压强不再发生变化。温度恢复到室温的时间应不少于 30 秒；
4. 松开柱塞，让柱塞自由膨胀到原来的位置（它可能不会回到 40cc），直至温度和压强不再发生变化，记录最终针管的容积。

按要求测量如下内容

- (1) 等温过程
- (2) 变温过程
- (3) 由理想气体定律计算气体的摩尔数

七、实验报告要求：

1. 画出 $T/P-V$ 特性曲线
2. 计算初始体积，用图解法求 kI 、
3. 计算摩尔数由 $n = \text{斜率} / R$ ，分别针管内气体的摩尔数。

八、实验结果与分析

1. 空气的比热容比

设计数据表格，记录实验数据，计算 γ 值以及与实际值的百分差 E_r 。

表 1 小球周期测量

次数	1	2	3	4	5	平均值
周期 (s)	0.59	0.60	0.61	0.59	0.58	0.595

$$m=11.1\text{g}; d=14.00\text{mm}; V=6250\text{ml}.$$

计算压强：

$$p = p_o + \frac{mg}{\pi(d/2)^2} = 101.3 \times 10^5 \text{ kPa}$$

$$\text{计算比热容比及相对误差: } \gamma = \frac{64mV}{T^2 pd^4} = 1.357$$

$$E_r = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma} \times 100\% = 3.2\% \text{ 测量结果的准确度较高。}$$

2. 理想气体实验

- (1) 等温过程

表 2 等温过程

	体积 (cc)	压强 (kPa)
1	40.0	105.5
2	20.0	183.7

利用 $\frac{V_1 + V_0}{V_2 + V_0} = \frac{p_2}{p_1}$ 计算 $V_0 = 6.99\text{ml}$

(2) 变温过程

表 3 变温过程

	体积 (cc)	压强 (kPa)	温度 (K)
1	$40 + V_0$	105.2	294.55
2	$20 + V_0$	194.5	303.55

用测量的数据计算 $C_1 = \frac{P_1 V_1}{T_1}$ 和 $C_2 = \frac{P_2 V_2}{T_2}$ 的值, 比较它们的值, 是否相等?

计算其百分差 $E_r = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \times 100\%$ 。

$$C_1 = \frac{P_1 V_1}{T_1} = 16.86; \quad C_2 = \frac{P_2 V_2}{T_2} = 17.31$$

$$E_r = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \times 100\% = 2.7\%$$

(3) 由理想气体定律计算气体的摩尔数

表 4 初始体积为 60cc

V (cc)	P (kPa)	T (K)	T/P (K/kPa)
60	105.1	293.0	2.79
55	116.4	294.4	2.53
50	126.1	295.4	2.24
45	140.7	296.9	2.11
40	155.9	298.0	1.91
35	177.4	299.9	1.69

表 5 初始体积为 40cc

V (cc)	P (kPa)	T (K)	T/P (K/kPa)
40	103.6	293.6	2.83
35	116.7	295.2	2.53
30	132.1	296.4	2.24
25	154.7	297.2	1.92
20	190.6	301.6	1.58

表 6 初始体积为 80cc

V (cc)	P (kPa)	T (K)	T/P (K/kPa)
80	105.1	296.2	2.82
75	113.4	296.5	2.62
70	119.4	295.5	2.49

65	128.7	297.6	2.32
60	142.9	298.7	2.10
55	153.4	299.3	1.95
50	167.6	300.7	1.79
45	183.4	301.7	1.64

由测量数据拟合直线并求出直线的斜率，即 nR 。由斜率/ R 计算针管内气体的摩尔数 n

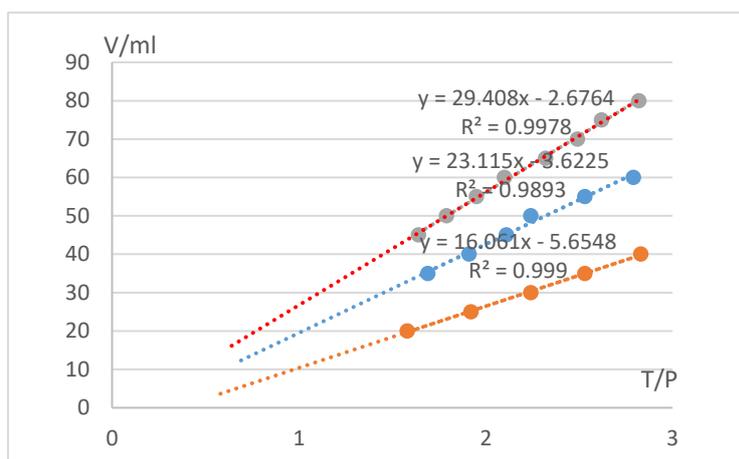


图 2 拟合直线

拟合直线如图 2，由三条线的相关系数可知，实验数据较为合理。

$$n_1 = \frac{k_1}{R} = 1.51 \times 10^{-3} \text{ mol}; \quad n_2 = \frac{k_2}{R} = 2.84 \times 10^{-3} \text{ mol}; \quad n_3 = \frac{k_3}{R} = 4.63 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

可见，测量结果的准确度很高。

九、问题讨论与实验拓展

(一) 问题讨论

1. 当针管的体积突然减少一半，压强为什么变化 2 倍多？它为什么瞬间达到 200kPa 以上？

答：由热力学第一定律，外界对气体做功，气体内能增加温度升高，故压强增加。

2. 如果压强增大，气体比热容比将发生什么变化？

答：对理想气体，在压强不太高时，气体比热容比为定值，只决定与气体是单原子，双原子还是多原子。

3. 如果振动物体的周期较长，公式还适用吗？为什么？

答：不适用，不能近似为绝热过程。

(二) 实验拓展

还有哪些测量比热容比的方法？

绝热膨胀法测量空气比热容比的方法和原理如图所示。



绝热膨胀法测量空气比热容比

测量时首先向封闭的瓶内打气，此时瓶内空气被压缩，压强增大，温度高。等待内部气体温度稳定，即达到与周围温度平衡，此时的气体处于状态I (p_1, V_1, T_0)。之后迅速打开放气阀，使瓶内气体与大气相通，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，可以认为瓶内保留的气体经历了绝热膨胀的过程，由状态I (p_1, V_1, T_0) 转变为状态II (p_0, V_2, T_1)。 V_2 为储气瓶体积， V_1 为保留在瓶中这部分气体在状态I时的体积。由绝热方程得出 $p_1 V_1^\gamma = p_0 V_2^\gamma$ 。由于瓶内气体温度 T_1 低于室温 T_0 ，所以瓶内气体慢慢从外界吸热，直至达到初始温度 T_0 ，此时瓶内气体压强也随之增大为 p_2 ，则稳定后为气体状态III (p_2, V_2, T_0)。从状态II到状态III的过程可以看作是等容吸热的过程。状态I和状态III的温度均为 T_0 ，由气体状态方程得 $p_1 V_1 = p_2 V_2$ ，整理消去 V_1 和 V_2 ，得空气的比热容比。

参考文献：

- [1] 毕会英. 绝热膨胀法测量空气比热容比实验教学方法探讨[J]. 物理通报, 2017, 36(4): 85-88.
- [2] 黄育红, 王璐. “空气比热容比”教学中的物理思想与测定的关键问题分析[J]. 大学物理实验, 2012, 25(6): 45-48.