

文章编号:1005-4642(2023)10-0035-05

专  
题



## 基于气体多方过程的数字化实验仪

孔维怡,付 聪,钟文龙,田 宇,高 宸,  
林友辉,苏国珍,苏山河

(厦门大学 物理科学与技术学院 物理学系,福建 厦门 361005)

**摘 要:**设计并搭建基于多方过程的数字化实验仪,以空气为工质,通过控制步进电机推进过程,压缩气缸内气体,实现多种热力学过程. 测量典型的多方过程的状态变化,获得气体物质的量、体积和压强及系统的散热系数,从而验证该实验仪可实现指定指数的多方过程.

**关键词:**多方过程;气体;压强;体积;数字化

**中图分类号:**O414.12

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.10.004

应用热力学基本定律和气体的状态方程,理论上可获得热力学过程中状态参量之间的关系. 实验上以气体为工质的热力学过程,常见的包括:在恒温水浴中,缓慢改变气体系统的体积实现接近可逆的等温过程<sup>[1]</sup>;利用实际气体导热系数较小的特点,使气体的体积快速膨胀或压缩近似实现绝热过程<sup>[2-3]</sup>. 然而,在实验教学中,如何实现不同指数对应的多方过程,并没有明确的方法. 为了在大学物理实验中较为简便地实现多方过程,同时让学生对该过程有直观、准确且深入的认识,开展有关多方过程的实验教学显得尤为必要<sup>[4-5]</sup>. 因此,如何提供自动化、数字化、可视化的

综合实验仪以实现指定  $n$  指数的多方过程成为亟待解决的问题. 本文搭建了性价比高、可视化的多方过程数字化实验仪,利用控制器和步进电机机械化、精准地控制活塞的行进速度及行程,通过采集模块自动化采集数据,再由计算机程序进行数据处理与分析. 该数字化实验仪集成化程度高、测量结果准确、可观性强、自动化程度高,可实现多种气体的热力学过程.

### 1 实验装置

数字化综合实验仪如图 1 所示,主要由控制模块、气体模块、测量模块和采集模块组成.



图 1 基于气体多方过程的数字化实验仪实物图

**收稿日期:**2022-12-29; **修改日期:**2023-05-28

**基金项目:**国家级一流本科课程“热力学统计物理”建设项目(2020);中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 20720210024)

**作者简介:**孔维怡(2001-),女,天津人,厦门大学物理科学与技术学院 2020 级本科生. E-mail:3194040078@qq.com

**通信作者:**苏山河(1987-),男,福建泉州人,厦门大学物理科学与技术学院副教授,博士,研究方向为热力学统计物理. E-mail:sushanhe@xmu.edu.cn

### 1.1 控制模块

控制模块主要包括控制器、步进电机和丝杆滑台。控制器与驱动器接线相连,驱动器与步进电机接线相连。控制器可控制步进电机转速、行程。步进电机连接丝杆滑台,步进电机转动,滑台随之向前行进,通过滑台与气缸活塞连接推动活塞行进。控制模块控制活塞的行进速度及行程,从而实现调控气体体积和压强的功能。

### 1.2 气体模块

气体模块主要由气缸和气容组成。二者通过软管连接,使用快速接头可在保证气密性的同时,迅速地拔出或插入软管。用堵头密封其余气孔,气孔螺纹接口处均用生料带做密封处理。为保证实验过程中有效散热系数为常量,要求气体散热面积恒定。因此,使用隔热胶带和铝箔保温隔热膜对气缸外壁做绝热处理。气体模块起到储存实验工质的作用,同时也是进行热力学过程的场所。

### 1.3 测量模块

测量模块主要包括位移传感器和压强传感器。位移传感器为拉绳式,可将位移信号转换为电压信号(0~5 V),其起始端固定在滑台上,活塞位移为拉绳位移。压强传感器可将气体压强信号转换为电流信号(4~20 mA),安装在形状不规则的气容上,气孔螺纹接口处用生料带做气密处理。测量模块起到测量气体压强和体积的作用。

### 1.4 采集模块

采集模块主要由数据采集卡、转换器和数据采集软件组成。数据采集卡收集传感器的模拟信号,通过 USB 转 485 转换器与笔记本电脑连接,再通过数据采集软件将模拟信号采集至 Excel,最后通过编程进行数据处理。采集模块起到实时采集气体压强和体积数据的作用,为分析各类热力学过程提供数据基础。

在搭建热学仪器实现多方过程时,有以下创新点:

1) 优化设计,针对多方过程的特点,增加气容,扩大气体体积,改变气容形状,以提高实验效率和数据准确性。

2) 数据处理,针对多方过程产生的大量数据,采用新的数据处理方法(如机器学习算法),以提高数据分析的效率和准确性。

3) 环境控制,针对多方过程对环境要求高的特点,增加环境控制模块,如压力控制,以提高实

验的可重复性和数据准确性。

4) 多功能化,针对多方过程的多样性,增加多种功能,如多种实验模式、多种测量手段等,以满足不同实验需求。

5) 自动化,针对多方过程实验的复杂性和耗时性,增加自动化模块,如自动控制、自动记录、自动分析等,以提高实验效率和数据准确性。

## 2 基于气体多方过程的热力学量测量

理论上将满足  $pV^n = C$  的过程称为多方过程<sup>[6-8]</sup>,其中  $p$  和  $V$  分别为简单系统的压强和体积, $n$  为多方指数, $C$  为常量。多方过程是一般的热力学过程,包括等容过程、等压过程、等温过程和绝热过程,这些特殊的热力学过程对应  $n$  的取值分别为  $\infty$ , 0, 1 和  $\gamma$ , 其中  $\gamma$  为比热。基于图 1 搭建的数字化综合实验仪,所开展的实验包括:利用等温过程获得气体的热力学参量,通过等容过程测量系统有效散热系数  $\bar{\kappa}$ , 采用分步推进法实现指定  $n$  指数的多方过程。

### 2.1 利用等温过程测量气体的热力学参量

在进行多方过程前,首先需要确定环境气压  $p_0$ 、气缸和气容内气体的初始体积  $V_0$  和物质的量  $\mu$ 。

#### 2.1.1 实验原理

在温度不太低、压强不太高时,可将干燥空气视为理想气体。实验过程中,让活塞以非常缓慢的速度压缩气缸内的气体,保证气体随时恢复至与环境平衡,该过程可以近似为理想气体的等温过程。

从与环境热平衡的初始状态出发,在等温过程中,气体任意平衡态的压强  $p$  和体积  $V$  均满足  $pV = p_0V_0$ 。步进电机以 0.25 mm/s 匀速推进,气体体积  $V$  与活塞被推进距离  $l$  成线性关系  $V = V_0 - S_0l$ , 其中  $S_0 = 0.196 \text{ dm}^2$  为气缸底面积,可得  $p$  随  $l$  的变化关系为

$$\frac{1}{p} = -\frac{S_0}{p_0V_0}l + \frac{1}{p_0}. \quad (1)$$

实验中用压强传感器测量气体压强  $p$ , 位移传感器测量推进距离  $l$ 。对  $p^{-1}$  和  $l$  做用直线拟合,得到斜率  $-\frac{S_0}{p_0V_0}$  和截距  $\frac{1}{p_0}$ 。

#### 2.1.2 数据分析

图 2 给出了实验过程中压强倒数  $p^{-1}$  随活塞

被推进距离  $l$  的变化曲线. 根据图 2 的拟合结果, 拟合直线的斜率为  $-0.001\ 170\ \text{kPa}^{-1} \cdot \text{dm}^{-1}$ , 截距为  $0.009\ 869\ \text{kPa}^{-1}$ . 即可计算环境压强  $p_0 = 101.3\ \text{kPa}$ , 气体初始体积  $V_0 = 1.657\ \text{L}$ . 已知常温常压下气体摩尔体积  $V_m = 24.45\ \text{L/mol}$ , 则气体总物质的量  $\mu = 0.067\ 77\ \text{mol}$ .

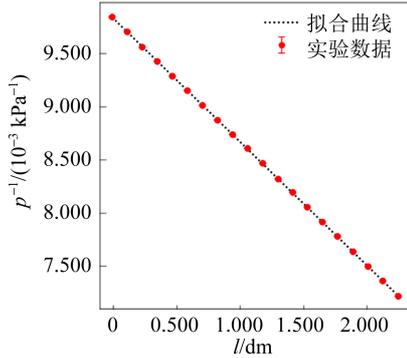


图 2 等温过程中气体压强倒数  $p^{-1}$  随活塞被推进距离  $l$  变化

## 2.2 利用等容过程测量系统的有效散热系数 $\bar{\kappa}$

实验中容器与环境温差不太大, 故认为容器与环境的热传导服从牛顿传热定律, 即单位时间通过器壁的热量与容器和环境的温度差成正比. 用  $\bar{\kappa}$  表示系统的有效散热系数, 其具体值可利用气体的等容散热过程测得.

### 2.2.1 实验原理

首先让活塞压缩气体的体积至  $V_1$ ,  $p_1$  和  $T_1$  为气体平衡后的压强和温度, 满足理想气体物态方程

$$p_1 V_1 = \mu R T_1, \quad (2)$$

其中,  $R$  为摩尔气体常量. 保持活塞位置不变, 让气体进行等容散热. 对此微小过程, 由热力学第一定律可知, 时间  $dt$  内气体内能的增量  $dU$  等于气体从环境吸收的热量  $dQ$  加上外界对气体所做的功  $dW$ <sup>[9]</sup>, 即

$$dU = dQ + dW, \quad (3)$$

其中等容过程外界不做功, 所以  $dW = 0$ , 根据牛顿传热公式<sup>[10-11]</sup>,

$$dQ = -\bar{\kappa}(T - T_0)dt, \quad (4)$$

其中,  $T_0$  为环境温度. 气体内能增量

$$dU = \mu C_V dT, \quad (5)$$

其中,  $C_V$  为气体的摩尔热容量. 式(3)~(5)中,  $p, V$  和  $T$  分别是  $t$  时刻气体的压强、体积和温度. 将式(2), (4)和(5)代入到式(3), 可得气体压

强随时间的变化关系

$$p = \left( p_1 - \frac{\mu R T_0}{V_1} \right) \exp \left( -\frac{2\bar{\kappa}}{5\mu R} t \right) + \frac{\mu R T_0}{V_1}. \quad (6)$$

等容散热过程中, 气体压强将随时间指数减小, 并最终趋于恒定值.

### 2.2.2 实验操作与数据分析

将步进电机速度设置为  $5\ \text{cm/s}$ , 行程设置为  $5\ \text{cm}$ , 数据采集间隔设置为  $200\ \text{ms}$ . 启动步进电机, 让活塞压缩缸内空气. 压缩结束后保持气体体积不变, 令其自由散热, 期间可观察到气体压强不断降低并最终趋于稳定. 压强稳定后, 停止采集数据.

当初始条件的参量为  $p_1 = 107.5\ \text{kPa}$ ,  $V_1 = 1.598\ \text{L}$ ,  $T_0 = 298.1\ \text{K}$ ,  $\mu = 0.067\ 77\ \text{mol}$  时, 图 3 给出了实验中气体压强  $p$  随时间  $t$  变化的曲线. 可以看到, 随着时间的推移, 气体压强不断减小, 最终趋于稳定. 说明气缸内气体不断散热, 最终达到与环境热平衡的状态, 且图中实验曲线与从式(6)理论计算得到的拟合曲线基本相符. 由式(6)和实验曲线拟合可得系统有效散热系数  $\bar{\kappa} = 0.457\ 2\ \text{W/K}$ .

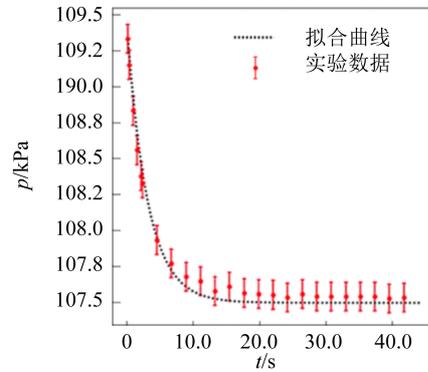


图 3 等容过程气体压强  $p$  随时间  $t$  的变化曲线

## 2.3 分步推进法实现指定 $n$ 指数的多方过程

以 2.1 和 2.2 获得的气体初始体积  $V_0$  和物质的量  $\mu$  及系统的有效散热系数  $\bar{\kappa}$  为基础, 阐述实现指定  $n$  指数的多方过程的方法.

### 2.3.1 实验原理

多方过程中,  $1\ \text{mol}$  气体的热容量与定容摩尔热容量  $C_V$  的关系为<sup>[6]</sup>

$$C_n = C_V \frac{n - \gamma}{n - 1}, \quad (7)$$

其中空气的比热参考值为  $\gamma = 1.4$ <sup>[6]</sup>. 设无限小的多方过程, 温度增量为  $dT$ , 气体从环境吸收的热

量可表示为

$$dQ = C_n dT. \quad (8)$$

$dQ$  也可用式(4)的牛顿传热公式计算. 所以, 由式(4)和式(8)可知

$$\frac{dT}{T - T_0} = -\frac{\bar{\kappa}}{C_n} dt. \quad (9)$$

式(9)等号两边积分, 可得多方过程中气体温度与时间的关系

$$T = \exp\left(-\frac{\bar{\kappa}}{C_n} t\right)(T_1 - T_0) + T_0, \quad (10)$$

其中,  $T_1$  为初始温度.

多方过程中, 气体的温度与体积的  $n-1$  次方相乘是恒定值<sup>[6]</sup>, 即

$$TV^{n-1} = T_1 V_1^{n-1}. \quad (11)$$

由式(4)和式(11), 可得多方过程中气体体积与时间的关系

$$V = V_1 \left[ \frac{\exp\left(-\frac{\bar{\kappa}}{C_n} t\right)(T_1 - T_0) + T_0}{T_1} \right]^{-\frac{1}{n-1}}. \quad (12)$$

结合体积  $V$  与活塞推进距离  $l$  的关系

$$V = V_0 - S_0 l, \quad (13)$$

可获得活塞推进速度与时间的关系为

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{V_1 (T_1 - T_0) \bar{\kappa} \exp\left(-\frac{\bar{\kappa}}{C_n} t\right)}{(1-n) S_0 T_1 C_n} \cdot \left[ \frac{\exp\left(-\frac{\bar{\kappa}}{C_n} t\right)(T_1 - T_0) + T_0}{T_1} \right]^{-\frac{n}{n-1}}. \quad (14)$$

### 2.3.2 实验操作与数据分析

取多方指数  $n=1.200$ , 气体的初始压强  $p_1=109.7$  kPa, 初始体积  $V_1=1.556$  L, 代入式(12)~(14)得到活塞推进速度  $v$  与时间  $t$  的关系曲线, 如图4所示. 实验中可根据计算结果对步进电机进行编程, 实现多方过程. 在实际实验中, 步进电机的速度不能连续变化, 可将连续变化的速度分割成许多较小的区间, 在每个区间内步进电机匀速推动活塞, 如图4中的直方图所示. 理论上区间间隔越小, 实验曲线越接近理论曲线.

根据式(12)~(14)和图4, 设置相应的速度序列, 控制步进电机分步推进活塞, 让活塞压缩缸内气体, 压缩过程中可观察信号变化, 获得气体压强和体积的数值变化.

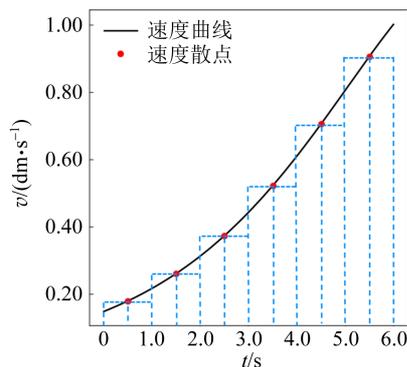


图4 活塞推进速度  $v$  与时间  $t$  的关系

以  $n=1.050, 1.150, 1.250$  的多方过程为例, 图5给出了气体压强  $p$  随体积  $V$  的变化曲线, 可以看到实验曲线与理论曲线符合较好. 由实验曲线拟合的多方指数  $n$  分别为 1.053, 1.133 和 1.239, 与理论值的相对偏差较小.

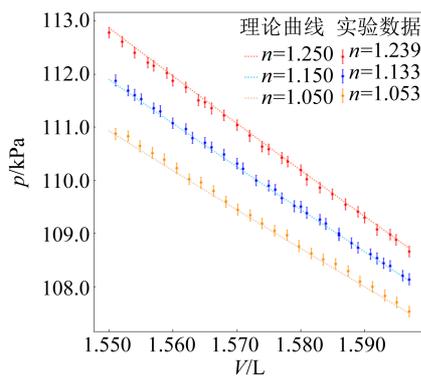


图5 多方过程中气体压强  $P$  随体积  $V$  变化

## 3 结束语

利用步进电机精准地控制活塞的行进速度及行程, 可高效地实现多种气体的热力学过程, 利用分步推进法实现了指定  $n$  指数的多方过程. 同时, 利用采集模块自动化记录实验数据, 由计算机程序进行数据处理与分析, 从而达到测量多种热力学参量的目的. 本实验装置具有精准可控、操作便捷、集成化程度高等优点, 避免了以往实验装置由人工操作引起的偶然误差大、操作复杂、效率低等缺点. 该装置可视化程度高、操作较为简单便捷、成本低廉, 可用于大学物理实验教学中. 利用该套装置开展教学实践, 可以清晰直观地展示多

种气体的热力学过程,加深学生对气体状态和热力学定律的理解.

### 参考文献:

- [1] Ma Y, Zhai R, Chen J, et al. Experimental test of the  $1/\tau$ -scaling entropy generation in finite-time thermodynamics [J]. *Physical Review Letters*, 2020,125(21):210601.
- [2] Krause D E, Keeley W J. Determining the heat capacity ratio of air from “almost adiabatic” compressions [J]. *Physics Teacher*, 2004,42(8):481-483.
- [3] Zhai R X, Cui F M, Ma Y H, et al. Experimental test of power-efficiency trade-off in a finite-time Carnot cycle [J]. *Physical Review E*, 2023, 107(4):2101.
- [4] 刘晓杰,于永江. 山东部分高校大学物理实验教学内容现状调查研究[J]. *物理实验*, 2018, 38(S1): 75-80.
- [5] 陈汉忠,李忠遇,王哲涛,等. 基于排水法的自动化弹性模量测量实验[J]. *物理实验*, 2022, 42(12): 35-39.
- [6] 汪志城. 热力学·统计物理[M]. 6版. 北京:高等教育出版社, 2019:20-22.
- [7] 高崇伊,朱琴. 多方过程的定义及其和准静态过程的关系[J]. *大学物理*, 2006, 25(2):13-15.
- [8] 严子浚. 多方过程的基本特征[J]. *大学物理*, 1995, 14(12):5-7.
- [9] 江耀基,肖春燕,蓝斗高. 做功改变内能实验演示仪[J]. *物理实验*, 2019, 39(12):54-55.
- [10] Ma Y. Simple realization of the polytropic process with a finite-sized reservoir [J]. *American Journal of Physics*, 2023, 91(7):555.
- [11] 马宇翰,董辉,孙昌璞. 能造出功率和效率都高的热机吗? ——有限时间热力学的发展与展望[J]. *物理*, 2021, 50(1):1-9.

## Digital experimental instrument based on polytropic processes of gas

KONG Weiyi, FU Cong, ZHONG Wenlong, TIAN Yu,  
GAO Chen, LIN Youhui, SU Guozhen, SU Shanhe

(Department of Physics, College of Physical Science and Technology,  
Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The digital experimental instrument based on polytropic processes was designed and built. By using air as the working medium and compressing the gas in the cylinder through controlling the propulsion process of the stepper motor, the variety of thermodynamic processes were realized. The changes of states of several typical polytropic processes were measured to obtain thermodynamic quantities, including the number of moles, volume, and pressure of the gas and the heat dissipation coefficient of the system. It was verified that the polytropic process with a specified polytropic index could be achieved by the experimental instrument.

**Key words:** polytropic processes; gas; pressure; volume; digital

[编辑:郭伟]