



# 大学物理现代技术实验——空气热机

刘元彻 PB21020505 21 级物理学院 1 班

2023 年 5 月 29 日

**摘要：**本实验的主要目的是理解和掌握热机的原理及循环过程，熟悉本实验中使用的空气热机的工作原理、特点和使用方法。测量不同冷热段温度时的热功转换值并以此验证卡诺定理。此外，在掌握测量热机输出功率与负载的关系的基础上，通过施加不同负载测量量热机输出功率随负载及转速的变化关系，计算热机实际效率。

**关键词：**空气热机，效率，卡诺定理；

## 1 实验原理 [1, 2]

### 1.1 空气热机的结构

空气热机的结构及工作原理可用图 1 说明。热机主机由高温区，低温区，工作活塞及汽缸，位移活塞及汽缸，飞轮，连杆热源等部分组成。热机中部为飞轮与连杆机构，工作活塞与位移活塞通过连杆与飞轮连接。飞轮的下方为工作活塞与工作汽缸，飞轮的右方为位移活塞与位移汽缸，工作汽缸与位移汽缸之间用通气管连接。位移汽缸的右边是高温区，可用电热方式或酒精灯加热，位移汽缸左边有散热片，构成低温区。

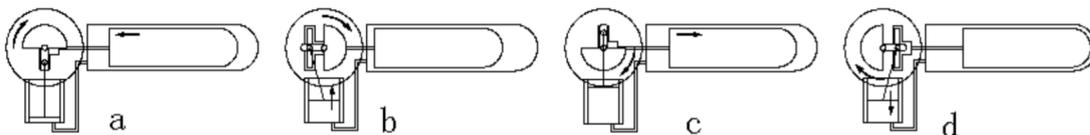


图 1: 空气热机工作原理

### 1.2 空气热机工作原理

工作活塞使汽缸内气体封闭，并在气体的推动下对外做功。位移活塞是非封闭的占位活塞，其作用是在循环过程中使气体在高温区与低温区间不断交换，气体可通过位移活塞与位移汽缸间的间隙流动。工作活塞与位移活塞的运动是不同步的，当某一活塞处于位置极值时，它本身的速度最小，而另一个活塞的速度最大。

当工作活塞处于最底端时，位移活塞迅速左移，使汽缸内气体向高温区流动，如图 1a 所示；进入高温区的气体温度升高，使汽缸内压强增大并推动工作活塞向上运动，如图 1b 所示，在此过程中热能转换为飞轮转动的机械能；工作活塞在最顶端时，位移活塞迅速右移，使汽缸内气体向低温区流动，如图 1c 所示；进入低温区的气体温度降低，使汽缸内压强减小，同时工作活塞在飞轮惯性力的作用下向下运动，完成循环，如图 1d 所示。在一次循环过程中气体对外所作净功等于  $P - V$  图所围的面积。

### 1.3 卡诺定理 [3]

根据卡诺对热机效率的研究而得出的卡诺定理，对于循环过程可逆的理想热机，热功转换效率为：

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1} = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1}$$

式中  $A$  为每一循环中热机做的功,  $Q_1$  为热机每一循环从热源吸收的热量,  $Q_2$  为热机每一循环向冷源放出的热量,  $T_1$  为热源的绝对温度,  $T_2$  为冷源的绝对温度。实际的热机都不可能是理想热机, 由热力学第二定律可以证明, 循环过程不可逆的实际热机, 其效率不可能高于理想热机, 此时热机效率:

$$\eta \leq \frac{\Delta T}{T_1}$$

卡诺定理指出了提高热机效率的途径, 就过程而言, 应当使实际的不可逆机尽量接近可逆机。就温度而言, 应尽量提高冷热源的温度差。热机每一循环从热源吸收的热量  $Q_1$  正比于  $\frac{\Delta T}{n}$ ,  $n$  为热机转速,  $\eta$  正比于  $\frac{nA}{\Delta T}$ 。  $n, A, T_1$  及  $\Delta T$  均可测量, 测量不同冷热端温度时的  $\frac{nA}{\Delta T}$ , 观察它与  $\frac{\Delta T}{T_1}$  的关系, 可验证卡诺定理。

当热机带负载时, 热机向负载输出的功率可由力矩计测量计算而得, 且热机实际输出功率的大小随负载的变化而变化。在这种情况下, 可测量计算出不同负载大小时的热机实际效率。

## 2 实验仪器 [1]

本实验采取的空气热机飞轮下部装有双光电门, 上边的一个用以定位工作活塞的最低位置, 下边一个用以测量飞轮转动角度。热机测试仪以光电门信号为采样触发信号。汽缸的体积随工作活塞的位移而变化, 而工作活塞的位移与飞轮的位置有对应关系, 在飞轮边缘均匀排列 45 个挡光片, 采用光电门信号上下沿均触发方式, 飞轮每转 4 度给出一个触发信号, 由光电门信号可确定飞轮位置, 进而计算汽缸体积。压力传感器通过管道在工作汽缸底部与汽缸连通, 测量汽缸内的压力。在高温和低温区都装有温度传感器, 测量高低温区的温度。底座上的三个插座分别输出转速/转角信号、压力信号和高低端温度信号, 使用专门的线和实验测试仪相连, 传送实时的测量信号。电加热器上的输入电压接线柱分别使用黄、黑两种线连接到电加热器电源的电压输出正负极上。热机实验仪采集光电门信号, 压力信号和温度信号, 经计算机处理后, 在仪器显示窗口显示热机转速和高低温区的温度。

利用这套电加热型热机实验仪, 可以从其连接的计算机上直接进行数据读取。

## 3 实验步骤 [1]

### 3.1 测量热机的热功转换值

根据测试仪面板上的标识和仪器介绍中的说明, 将各部分仪器连接起来, 开始实验。取下力矩计, 将加热电压加到第 6 档 31V 左右。等待约 6 ~ 10 分钟, 加热电阻丝已发红后, 用手顺时针拨动飞轮, 热机即可。减小加热电压至第 1 档 (24V 左右), 等待约 10min, 温度和转速平衡后, 记录当前加热电压, 并从热机测试仪 (或计算机) 上读取温度和转速, 读取  $P - V$  图面积, 逐步加大加热功率, 等待约 10min。每次确认温度和转速平衡后, 读取数据并将数据记入表格, 重复以上测量 4 次以上。

### 3.2 测量热机输出功率随负载的变化关系

在最大加热功率下, 将力矩计装在飞轮轴上, 拨动飞轮, 让热机运转。调节力矩计的摩擦力, 待输出力矩, 转速, 温度稳定后, 读取并记录各项参数。

## 4 实验数据

### 4.1 热功转换和卡诺定理

测得实验数据如下<sup>1</sup>:

表 1: 热功转换测量

加热电压 $V(V)$	热端温度 $T_1(K)$	温度差 $\Delta T(K)$	$\Delta T/T_1$	做功 $A(J)$	转速 $n$	$nA/\Delta T(\times 10^{-3})$
24.0	459.2	149.2	0.325	0.08851	6.2	3.678
26.0	470.6	155.2	0.330	0.08180	8.0	5.680
28.0	484.4	166.9	0.344	0.08171	9.2	4.504
29.0	493.2	173.8	0.352	0.08433	9.7	4.707
30.0	509.3	187.6	0.368	0.08485	11.6	5.292

上面的数据绘制出的图像如下:

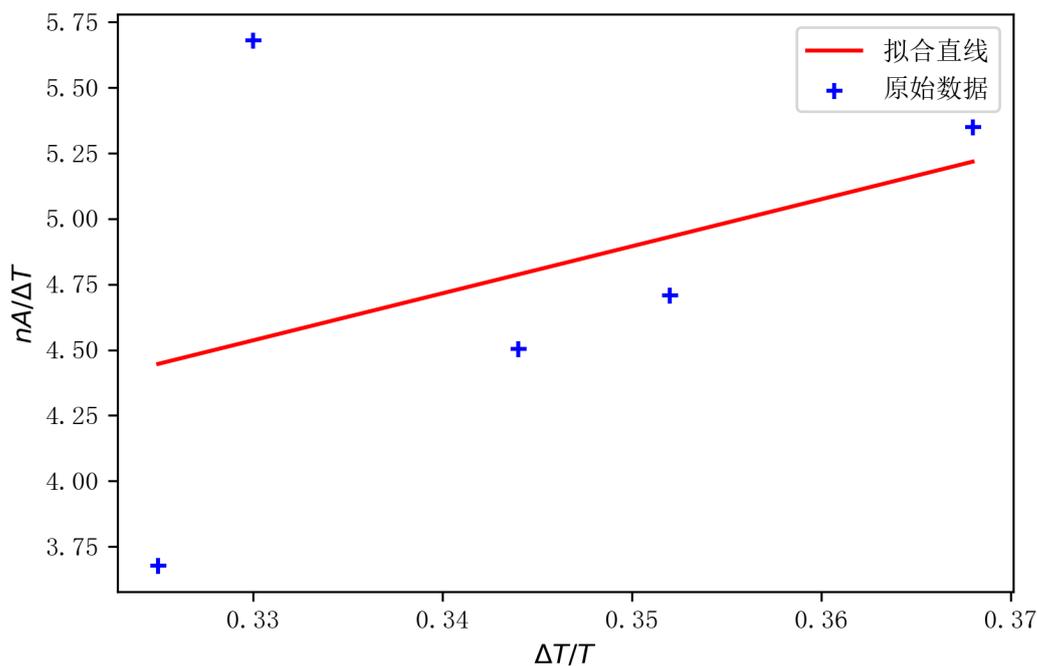


图 2:  $nA/\Delta T$  和  $\Delta T/T_1$  关系拟合图像

可以看出这个图像的线性程度很差,原因是第二个点干扰了拟合。在当天的实验中我们确实经历了这样的问题,在电压 26V 左右一直无法达到稳定状态,由此看来可能是这一工作点附近没有取得很好的平衡点导致的偏移。我们去掉这个点重新拟合:

<sup>1</sup>原始实验数据中,最后一组的转速  $n$  错将 11.6 记录为 10.6,在撰写实验报告时发现了这个问题,并在本文中进行了纠正

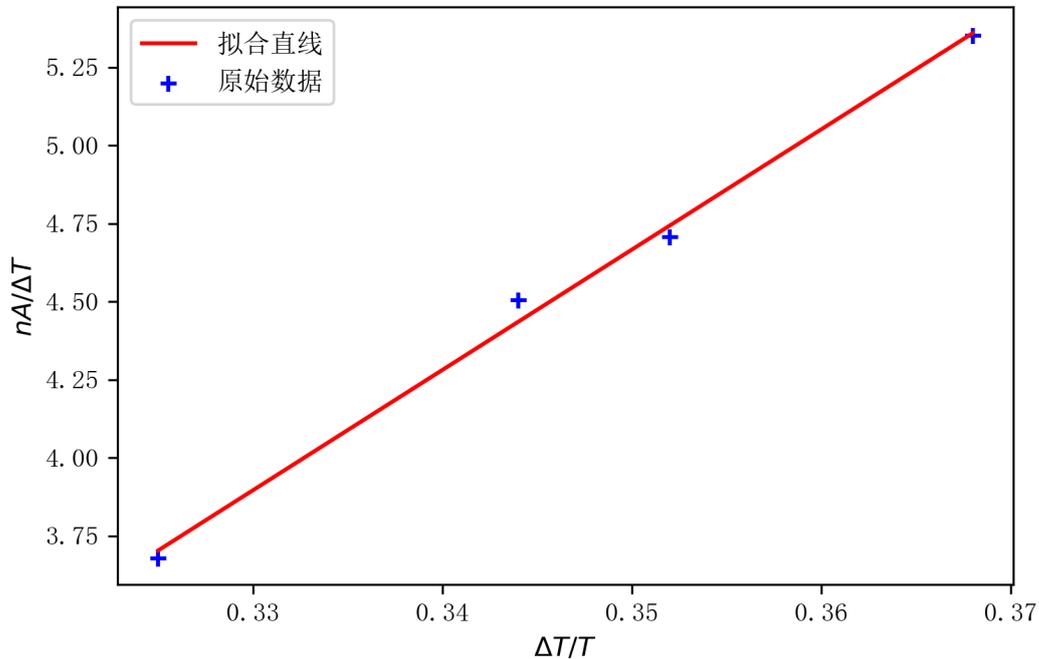


图 3: 修正后的  $nA/\Delta T$  和  $\Delta T/T_1$  关系拟合图像

这个图的线性相关程度就很好，相关系数  $r = 0.997627$ ，说明这几个点符合很好的线性关系，因此我们有理由认为我们验证了卡诺定理是成立的。

## 4.2 热机输出功率随负载的变化关系

本部分实验中，我们取工作电压  $V = 31V$ ，电流  $I = 4.23A$ ，从而输入功率即为  $P_i = VI = 131.13W$  实验数据记录如下：

表 2: 热机输出功率随负载的变化关系

$T_1(K)$	$\Delta T(K)$	$M(10^{-3}N \cdot m)$	$n$	$P_0 = 2\pi nM(W)$	$\eta_o = P_o/P_i$
536.6	216.0	6.5	10.0	0.408	0.31%
532.2	209.7	8.0	8.0	0.402	0.31%
533.2	214.8	10.0	6.6	0.414	0.32%
513.4	191.5	12.0	3.6	0.271	0.21%
525.4	206.1	14.0	2.1	0.184	0.14%

由上面可以看出，在我们的实验范围中，负载越大反而输出功率越小，从而导致效率降低。这和我们通常的认知略有不同，但考虑到实际的空气热机有活塞摩擦等其他能量损失，负载大可能导致转速下降更明显，因而输出功率不足，这也是合理的。



## 5 思考题

### 5.1 $P - V$ 图面积和做功关系

这个关系式可见于各种热学教科书上 [3]。事实上，考虑  $PV$  图上任意一小段曲线过程，其做功大小即为  $PdV$ 。当曲线闭合时，其下方围成的面积恰好会将闭合区域之内的部分保留，闭合区域以外的部分抵消，考虑到微积分的几何意义，正好就有：

$$W = \oint PdV = \oint dA = A$$

这就是我们要证明的关系。

## 参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 空气热机实验 (实验讲义). May 22, 2022. URL: <http://pems.ustc.edu.cn/uploads/project/20220413/94b3507faa8faaec69a5228ffed084f4.pdf> (visited on 04/13/2023).
- [2] 吴泳华, 霍剑青, 浦其荣. 大学物理实验. 2nd ed. Vol. 第二册. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [3] 张玉民. 热学. 第 2 版. 热学. 第 2 版, 2006.