

空气热机测试实验

作者：杨博涵 PB20000328

摘要：本文先基于卡诺热机理论探讨了空气热机的工作原理，提出了热功转换效率的理论公式。后根据设计的实验方案，采用微机测试仪器测量在不同加热电压以及负载情况下的输出数据，通过计算、分析、拟合验证了卡诺定理，并得出了不同冷热端温度时的热机输出功率随负载及转速的变化关系。

关键词：空气热机；大学物理实验；卡诺定理；热机效率

1 引言

1.1 实验背景

热机是将热能转换为机械能的机器。历史上对热机循环过程及热机效率的研究，曾为热力学第 2 定律的确立起了奠基性的作用。

以蒸汽机的使用为标志的第一次工业革命开始以后，人们以蒸汽机代替了手工劳动，但蒸汽机的效率始终非常低，直到 1824 年，法国工程师卡诺提出了著名的卡诺循环，设计了一种在恒定高温热源和恒定低温热源之间工作的理想热机，从而在理论上界定了热机的最高效率。

斯特林 1816 年发明的空气热机，以空气作为工作介质，是最古老的热机之一。虽然现在已发展了内燃机、燃气轮机等新型热机，但由于空气热机结构简单，便于帮助理解热机原理与卡诺循环等热力学中的重要内容，故本次实验采用空气热机来进行对卡诺定理的探究。

1.2 实验原理

如图 1 是空气热机的结构。可以看到，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。

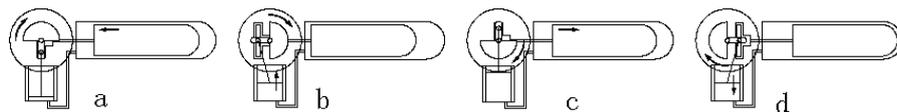


图 1 空气热机工作原理

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。工作活塞使汽缸内气体封闭，并在气体的推动下对外做功，这便是热机的热功转换过程。在图 1 中可以看到整个循环。

由热力学知识可以得到，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。且根据卡诺定理，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。

然而，实际的热机都不可能是理想热机，由热力学第 2 定律可以证明，循环过程是不可逆的。所以对于实际热机，其效率不可能高于理想热机，即

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

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，应尽可能的提高冷热源的温度差。

由热传导定律可以得到，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，所以 $\eta \propto \frac{nA}{\Delta T}$ 。所以，为了验证卡诺定理，我们可以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，如果确实是正比，那么则验证了卡诺定理。

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，并绘制相应曲线。

2 实验内容

2.1 实验仪器

实验仪器包括空气热机、电加热器电源、空气热机测试仪、微机、串口转换器、负载等。

实际的空气热机结构如图 2。

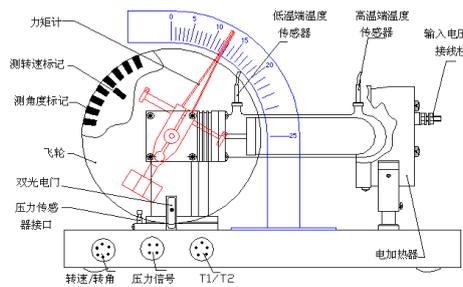


图 2 实际空气热机结构

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。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。

热机实验仪采集光电门信号，压力信号和温度信号，经微处理器处理后，在电脑上显示窗口显示热机转速和高低温区的温度，做出P-V图并计算相应数据。因此，我们只要将读出的数据记录并处理便可以验证卡诺定理。

力矩计悬挂在飞轮轴上，调节螺钉可调节力矩计与轮轴之间的摩擦力，由力矩计可读出摩擦力矩 M ，并进而算出摩擦力和热机克服摩擦力所做的功。

2.2 实验数据

我们可以在电脑上读取 P-V 图面积等参数并观测热机波形，如图 3。

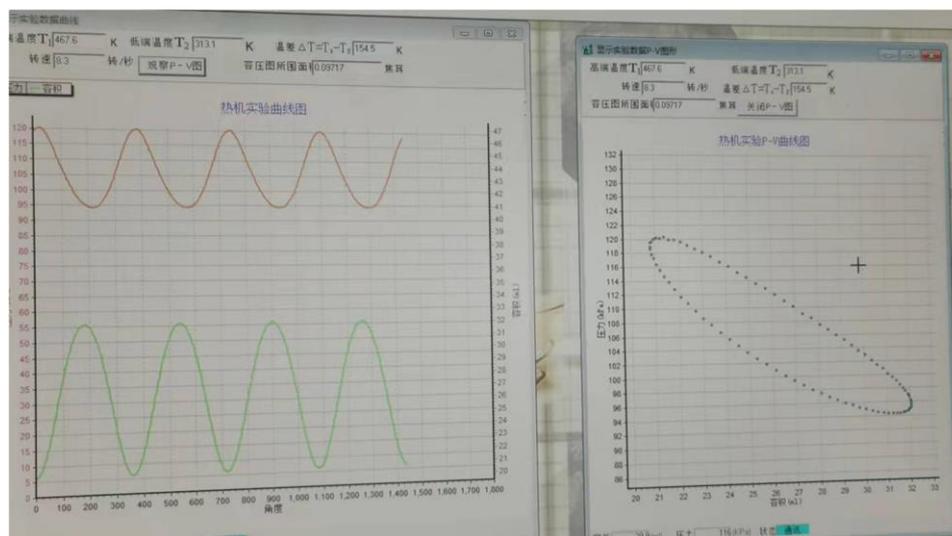


图 3 微机界面

1. 测量不同冷热端温度的热功转换值

序号	加热电压 V/V	热端温度 T_1/K	温度差 $\Delta T/K$	$\frac{\Delta T}{T_1}$	A/J	热机转速 n/s^{-1}	$\frac{nA}{\Delta T}$ $/J * s^{-1} * K^{-1}$
1	24	427.6	117.5	0.2748	0.087	5.9	4.369×10^{-3}
2	26	444.1	133.4	0.3004	0.090	6.6	4.453×10^{-3}
3	28	458.7	148.0	0.3227	0.096	8.0	5.189×10^{-3}
4	29	476.3	160.9	0.3378	0.092	10.2	5.832×10^{-3}
5	31	489.7	172.4	0.3521	0.090	12.0	6.264×10^{-3}

表 1

2. 测量热机输出功率随负载及转速的变化关系

加热器: $V = 31.0V$ $I = 4.63A$ $P_{in} = 143.53W$

序号	热端温度 T_1/K	温度差 $\Delta T/K$	输出力矩 $M/10^{-3}N \cdot m$	热机转速 n/s^{-1}	输出功率 P_0/W	输出效率 η
1	498.0	179.6	1.5	10.2	0.0961	0.67×10^{-3}
2	502.7	185.4	3.0	8.3	0.1565	1.09×10^{-3}
3	503.6	185.8	4.0	7.3	0.1835	1.28×10^{-3}
4	504.5	186.5	5.5	6.5	0.2246	1.56×10^{-3}
5	507.9	190.0	7.0	5.5	0.2419	1.69×10^{-3}

表 2

3 实验结果讨论与思考

1. 验证卡诺定理

由实验原理可知，卡诺定理可导出

$$\frac{\Delta T}{T_1} \propto \frac{nA}{\Delta T}$$

所以我们通过数据验证上式的正确性就可以验证卡诺定理。

以 $\frac{\Delta T}{T_1}$ 为横轴， $\frac{nA}{\Delta T}$ 为纵坐标，使用 origin 线性拟合，得到图 4。

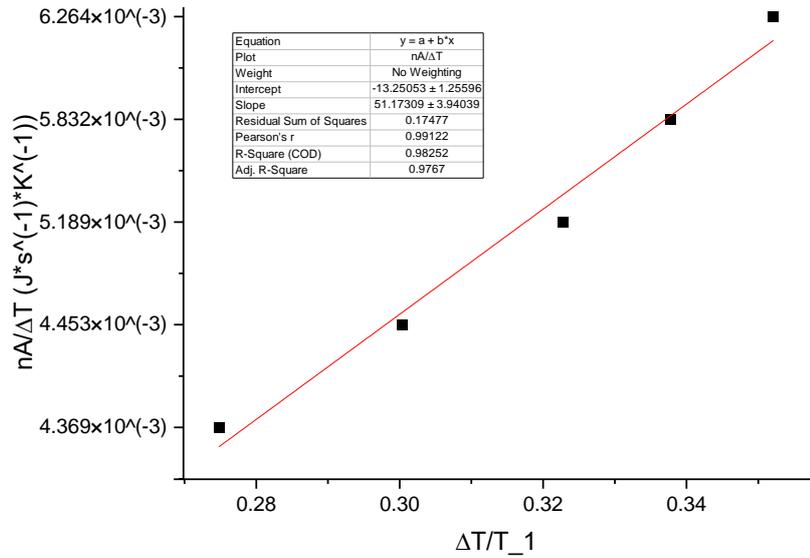


图 4 卡诺定理拟合曲线

从表 1 可以看到，在无负载情况下，随加热电压增大，热端温度升高，温度差加大， $\frac{\Delta T}{T_1}$ 变大，热机转速变大，做功 A 整体在 0.90 附近震荡，最终使 $\frac{nA}{\Delta T}$ 增加。从拟合曲线可以看到，拟合曲线的皮尔逊相关系数 $r = 0.99122$ ， $R^2 = 0.98252$ ，十分接近于 1，可以认为原式的线性正相关性成立，即验证了卡诺定理的正确性。

2. 输出功率与输出耦合 (n) 的变化关系

以 n 为横轴， P_0 为纵坐标，使用 origin 三次多项式拟合，得到同一输入功率下，输出耦合不同时输出功率随耦合的变化关系，如图 5。

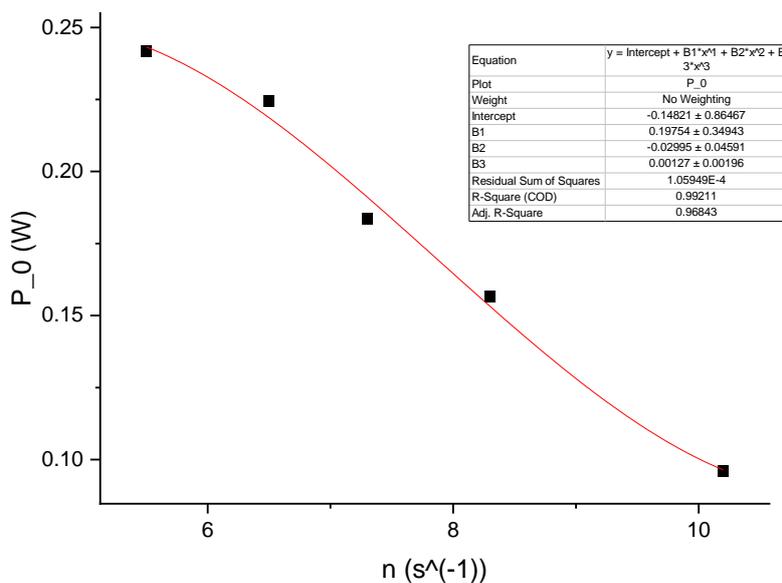


图 5 输出耦合拟合曲线

从表 2 可以看到，在同一加热功率下，随摩擦力矩加大，转速降低，热端温度升高，温度差加大，输出效率加大。从拟合曲线可以看到，曲线的二次导数小于零，可以预见在转速小于 6 时有最值点（最大输出功率）的存在。三次多项式拟合的 $R^2 = 0.99211$ ，十分接近于 1，说明拟合的可靠性。

由参考文献[2]知，实际曲线应当是随转速非单调的变化，且会有最大输出功率点出现。单增部分在转速小于 6 左右时发生，而本实验测量时由于热机动力不足、 ΔT 没有充分大以及负载无法细调整等原因，在转速小于 6 时已经十分不稳定，增加负载后经常会直接减速到停转，5.5 已经是稳定测量的极限，所以没有进一步增加负载。目前已经可以拟合出二阶导数小于 0 的趋势，在后续实验中做出改进，可以继续测量剩下的部分。

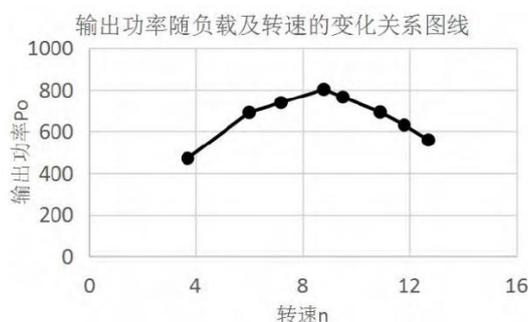


图 6 实际输出曲线

3. 思考题

问：为什么 P-V 图的面积即等于热机在一次循环中将热能转换为机械能的数值？

答：由微元法知，系统体积每变化微元 dV 时，对外做功为 $dW = Fdx = pSdx = pdV$ 。

而在 P-V 图单值曲线下方，我们可以取如图 7 的矩形来近似曲线下方的面积。矩形的面积为长 (p) 乘以宽 (dV)，即 $dA \approx pdV$ 。故 $dW \approx dA$ 。两边求和取极限，由微积分理论该式严格相等，所以最终 $A = W$ ，又因为热机对外做功完全用于机械做功，故 P-V 图单值曲线下方的面积等于热机对外做功的数值。

该结论可以推广到多值函数，比如顺时针有向闭合曲线（热机系统曲线），此时系统对外做功应为上方曲线下围的面积减去下方曲线下围的面积，即整个闭合曲线所围面积，所以原命题成立，即 P-V 图的面积即等于热机在一次循环中将热能转换为机械能的数值。

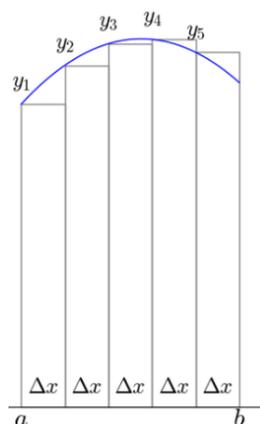


图 7 微元法示例

4 总结

本实验中笔者详细阐述了空气热机实验的实验原理，探索了热机循环过程，并通过测量和数据分析验证了卡诺定理，最后测定了该热机在负载情况下的输出性质。

通过本次实验，笔者锻炼了文献调查的能力，增进了对卡诺热机的理解，也有助于热力学知识的巩固。笔者谨慎调节，锻炼了在此恰当时机抓取数据的能力。最后拟合曲线，得到了与实验原理相符的结果，激发了笔者对热学学习的兴趣。

5 致谢

感谢马学长给笔者技术上的指导和耐心的答疑解释，也感谢物理教学实验中心提供的宝贵实验机会。

6 参考文献：

- [1] 空气热机测试实验讲义
- [2] 由存, 戎张泽, 刘真, 师搏, 张文锐, 石浩辰. 基于空气热机的热机效率分析及在教学中的应用[J]. 内燃机与配件. 2018
- [3] 朱晓东. 热学[M]. 第2版. 中国科学技术大学出版社, 2020