

**ZKY-RJ**  
**空气热机实验仪**  
**(电加热综合型)**  
**实验指导及操作说明书**

**成都世纪中科仪器有限公司**

地址：成都市人民南路四段九号中科院成都分院 邮编：610041

电话：(028) 85247006 85243932 传真：(028) 85247006

网址：WWW.ZKY.CN

E-mail: ZKY@ZKY.CN

2013-06-08

# 空气热机实验说明书

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。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，是很好的热学实验教学仪器。

## 【实验目的】

1. 理解热机原理及循环过程
2. 测量不同冷热端温度时的热功转换值，验证卡诺定理
3. 测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

## 【实验仪器】

空气热机实验仪，空气热机测试仪，电加热器及电源，计算机（或双踪示波器）

## 【实验原理】

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。

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。

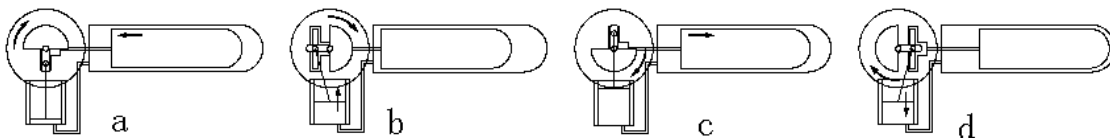


图1 空气热机工作原理

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。

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：

$$\eta = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = (T_1 - T_2) / T_1 = \Delta T / T_1$$

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2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：

$$\eta \leq \Delta T / T_1$$

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。

热机每一循环从热源吸收的热量 $Q_1$ 正比于 $\Delta T/n$ ， $n$ 为热机转速， $\eta$ 正比于 $nA/\Delta T$ 。 $n$ ， $A$ ， $T_1$ 及 $\Delta T$ 均可测量，测量不同冷热端温度时的 $nA/\Delta T$ ，观察它与 $\Delta T / T_1$ 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。

## 【仪器介绍】

仪器主要包括空气热机实验仪（实验装置部分）和空气热机测试仪两部分。

### I. 空气热机实验仪

1. 电加热型热机实验仪如图 2 所示

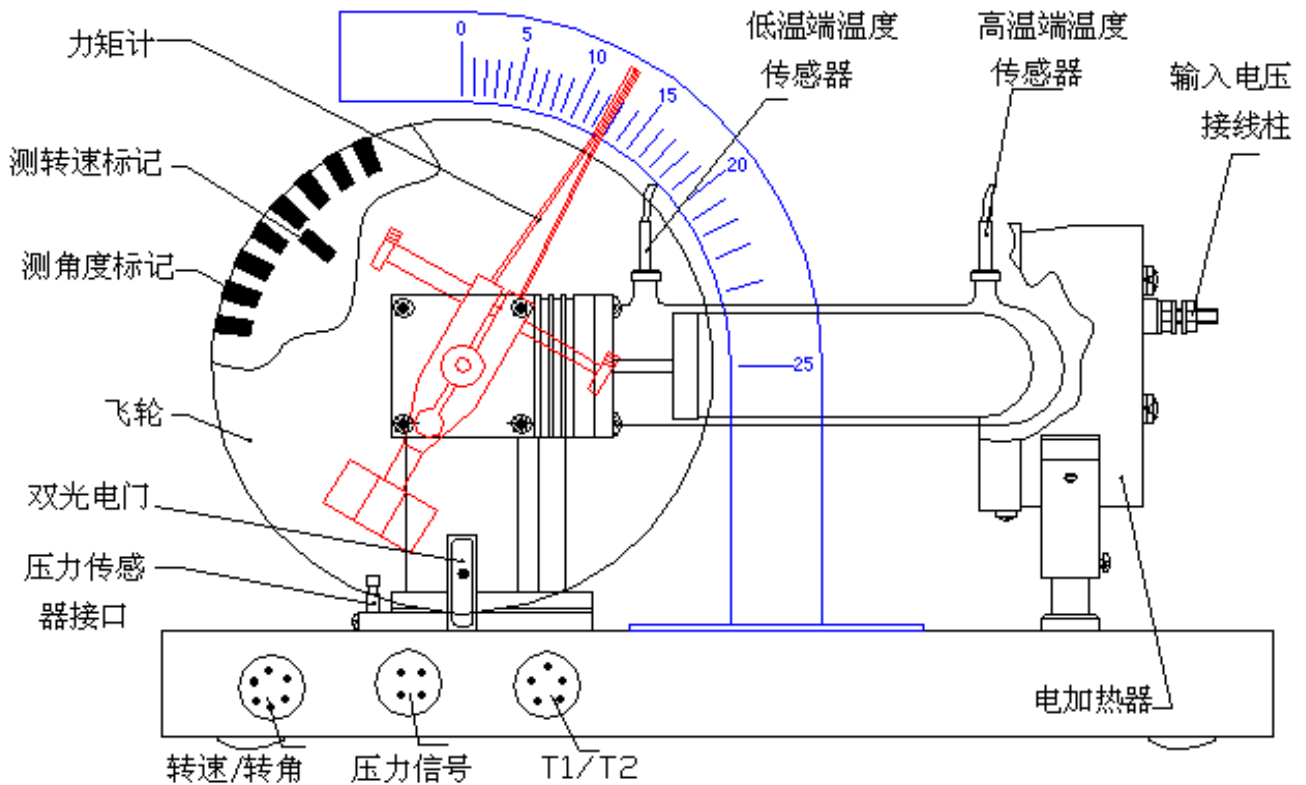


图 2 电加热型热机实验装置图

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、压力信号和高低温温度信号，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，经微处理器处理后，在仪器显示窗口显示热机转速和高低温区的温度。在仪器前面板上提供压力和体积的模拟信号，供连接示波器显示 P-V 图。所有信号均可经仪器前面板上的串行接口连接到计算机。

加热器电源为加热电阻提供能量，输出电压从 24V~36V 连续可调，可以根据实验的实际需要调

节加热电压。

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。经简单推导可得热机输出功率  $P=2\pi nM$ ，式中  $n$  为热机每秒的转速，即输出功率为单位时间内的角位移与力矩的乘积。

## 2. 电加热器电源

### ①. 加热器电源前面板简介（见图 3）

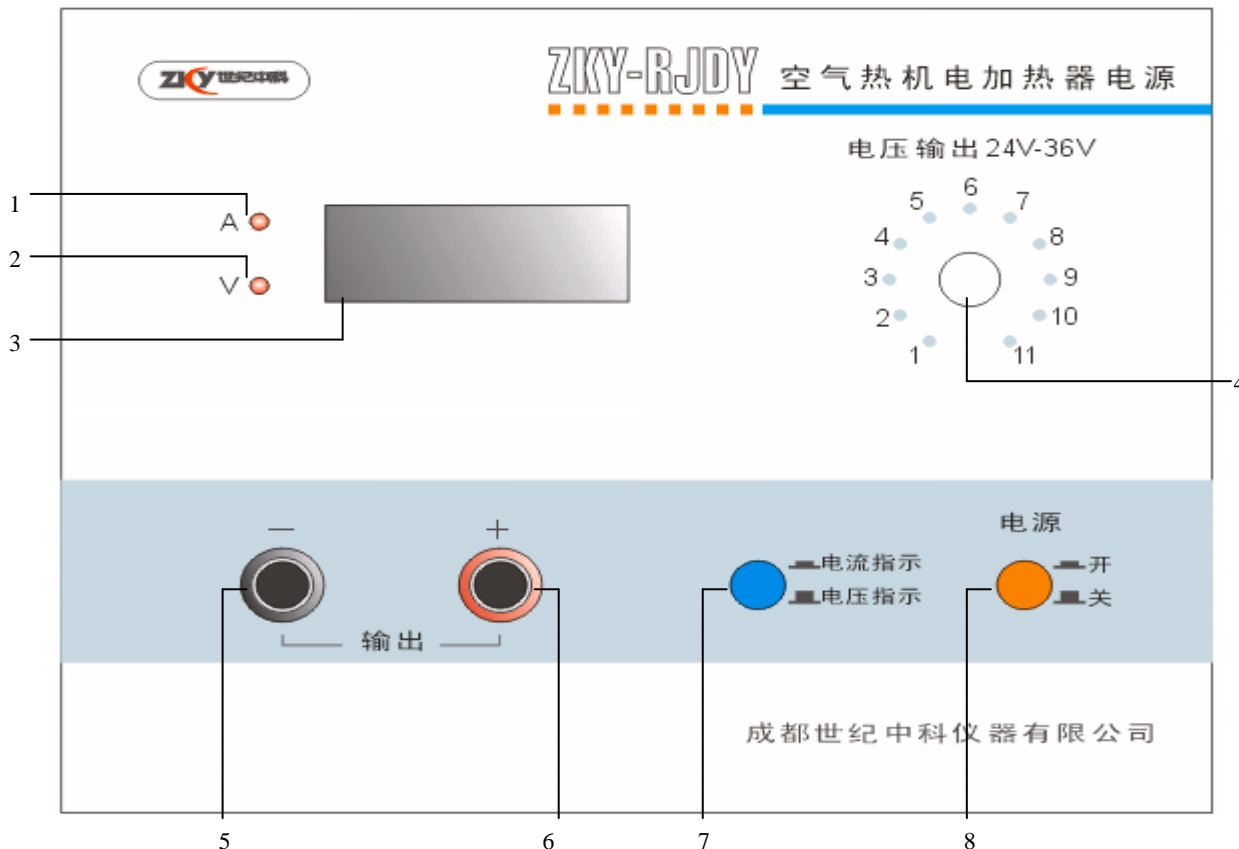


图 3 加热器电源前面板示意图

1—电流输出指示灯：当显示表显示电流输出时，该指示灯亮；

2—电压输出指示灯：当显示表显示电压输出时，该指示灯亮；

3—电流电压输出显示表：可以按切换方式显示加热器的电流或电压；

4—电压输出旋钮：可以根据加热需要调节电源的输出电压，调节范围为“24V~36V”，共分做 11 档；

5—电压输出“—”接线柱：加热器的加热电压的负端接口；

6—电压输出“+”接线柱：加热器的加热电压的正端接口；

7—电流电压切换按键：按下显示表显示电流，弹出显示表显示电压；

8—电源开关按键：打开和关闭仪器。

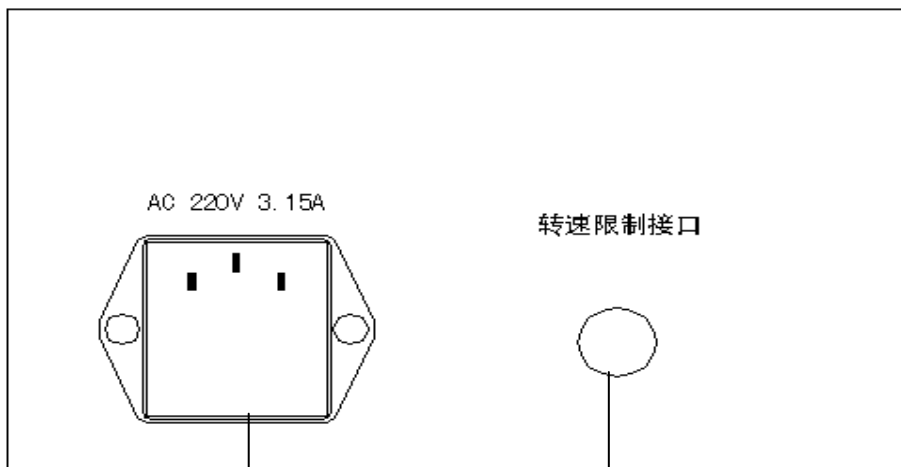


图 4 加热器后面板示意

②. 加热器电源后面板简介（见图 4）

9—电源输入插座：输入 AC220V 电源，配 3.15A 保险丝；

10—转速限制接口：当热机转速超过 15 n/s 后，主机会输出信号将电加热器电源输出电压断开，停止加热。

II. 空气热机测试仪

空气热机测试仪分为微型型和智能型两种型号。微型型测试仪可以通过串口和计算机通讯，并配有热机软件，可以通过该软件在计算机上显示并读取 P-V 图面积等参数和观测热机波形；智能型测试仪不能和计算机通讯，只能用示波器观测热机波形。

①. 测试仪前面板简介（见图 5）

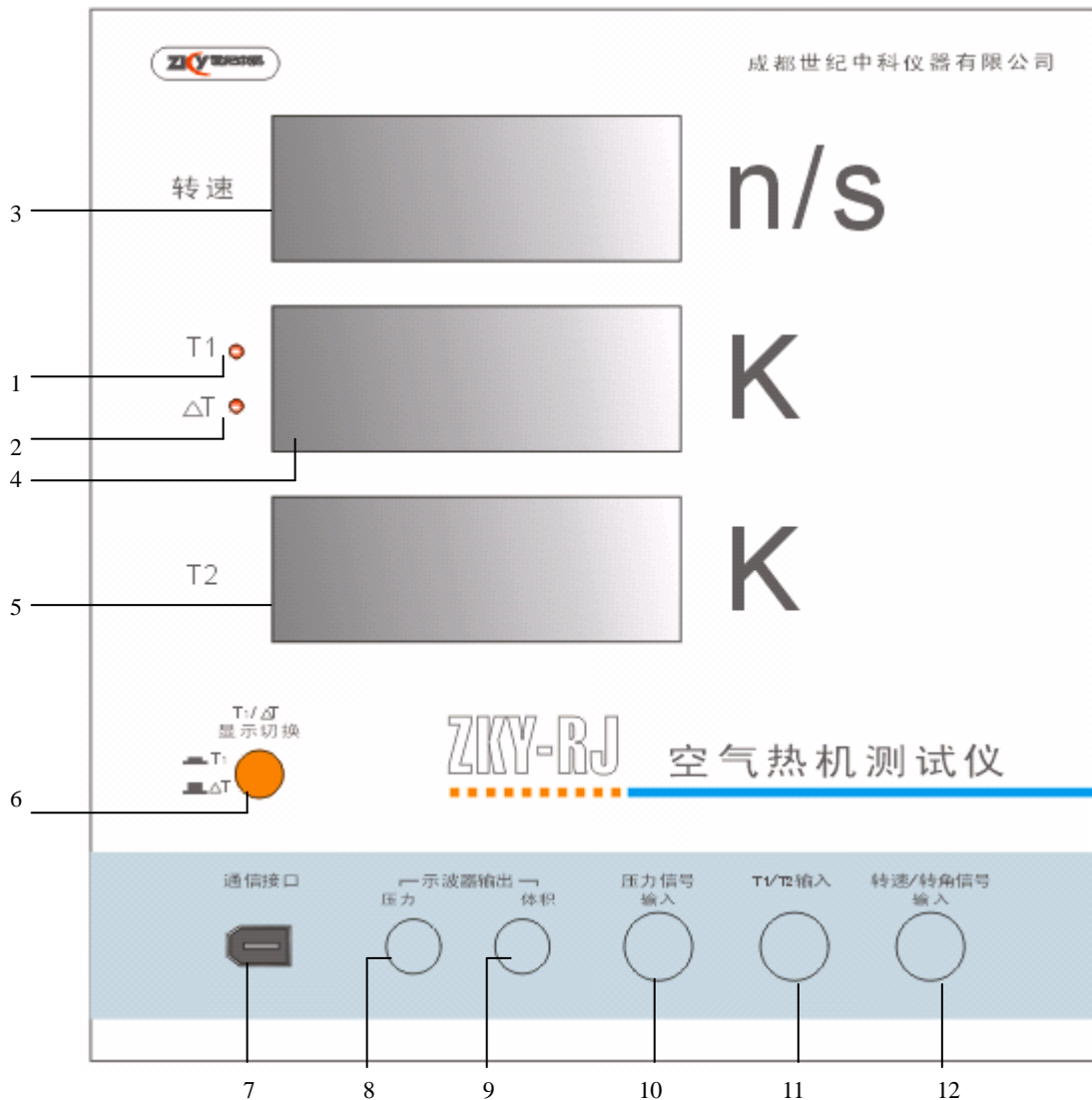


图 5 主机前面板示意图

- 1—T<sub>1</sub>指示灯：该灯亮表示当前的显示数值为热源端绝对温度；
- 2—ΔT 指示灯：该灯亮表示当前显示数值为热源端和冷源端绝对温度差；
- 3—转速显示：显示热机的实时转速，单位为“转/每秒 (n/s)”；
- 4—T<sub>1</sub> /ΔT 显示：可以根据需要显示热源端绝对温度或冷热两端绝对温度差，单位“开尔文 (K)”；
- 5—T<sub>2</sub> 显示：显示冷源端的绝对温度值，单位“开尔文 (K)”；
- 6—T<sub>1</sub> /ΔT 显示切换按键：按键通常为弹出状态，表示 4 中显示的数值为热源端绝对温度 T<sub>1</sub>，同时

$T_1$ 指示灯亮。当按键按下后显示为冷热端绝对温度差 $\Delta T$ ，同时 $\Delta T$ 指示灯亮；

7—通信接口：使用 1394 线热机通信器相连，再用 USB 线将通信器和计算机 USB 接口相连。如此可以通过热机软件观测热机运转参数和热机波形（仅适用于微机型）；

8—示波器压力接口：通过 Q9 线和示波器 Y 通道连接，可以观测压力信号波形；

9—示波器体积接口：通过 Q9 线和示波器 X 通道连接，可以观测体积信号波形；

10—压力信号输入口（四芯）：用四芯连接线和热机相应的接口相连，输入压力信号；

11— $T_1$  /  $T_2$ 输入口（五芯）：用六芯连接线和热机相应的接口相连，输入 $T_1$  /  $T_2$ 温度信号；

12—转速/转角信号输入口（五芯）：用五芯连接线和热机相应的接口相连，输入转速/转角信号；

## ②. 测试仪后面板简介（见图 6）

13—转速限制接口：加热源为电加热器时使用的限制热机最高转速的接口；当热机转速超过 15 n/s（会伴随发出间断蜂鸣声）后，热机测试仪会自动将电加热器电源输出断开，停止加热；

14—电源输入插座：输入 AC220V 电源，配 1.25A 保险丝；

15—电源开关：打开和关闭仪器。

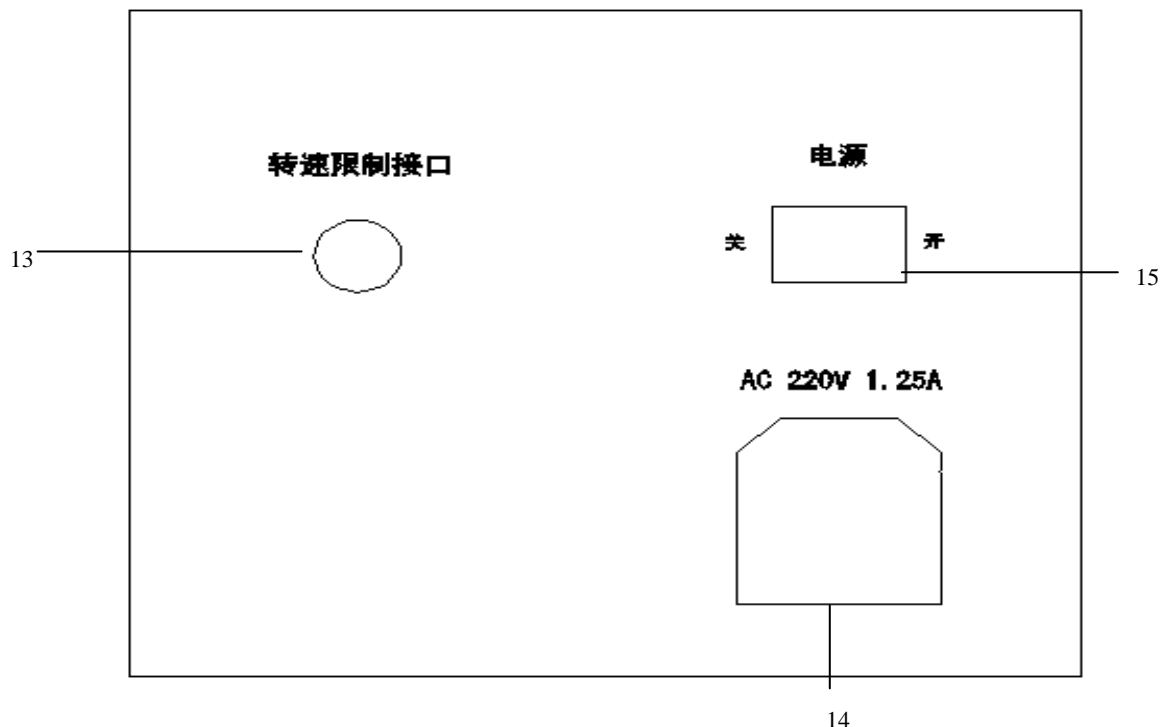


图 6 主机后面板示意图

## III. 空气热机通信器

仅适用于微机型空气热机测试仪（详见《空气热机通信器安装和使用说明》）。

### 【微机型热机软件介绍】

仅适用于微机型空气热机测试仪（详见软件说明书）。

### 【各部分仪器的连接方法】

将各部分仪器安装摆放好后，根据实验仪上的标识使用配套的连接线将各部分仪器装置连接起来。其连接方法为：

用适当的连接线将测试仪的“压力信号输入”、“ $T_1$  /  $T_2$ 输入”和“转速/转角信号输入”三个接口与热机底座上对应的三个接口连接起来；

用一根 Q9 线将主机测试仪的压力信号和双踪示波器的 Y 通道连接，再用另一根 Q9 线将主机测试仪的体积信号和双踪示波器的 X 通道连接；（智能型热机测试仪）

用 1394 线将主机测试仪的通信接口和热机通信器相连，再用 USB 线和计算机 USB 接口连接；热机测试仪配有计算机软件，将热机与计算机相连，可在计算机上显示压力与体积的实时波形，显示 P-V 图，并显示温度，转速，P-V 图面积等参数（微机型热机测试仪）。

用两芯的连接线将主机测试仪后面板上的“转速限制接口”和电加热器电源后面板上的“转速限制接口”连接起来；

**用鱼叉线将电加热器电源的输出接线柱和电加热器的“输入电压接线柱”连接起来，黑色线对黑色接线柱，黄色线对红色接线柱，而在电加热器上的两个接线柱不需要区分颜色，可以任意连接。**

### 【实验内容及步骤】

用手顺时针拨动飞轮，结合图 1 仔细观察热机循环过程中工作活塞与位移活塞的运动情况，切实理解空气热机的工作原理。

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 11 档（36 伏左右）。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，热机即可运转（若运转不起来，可看看热机测试仪显示的温度，冷热端温度差在 100 度以上时易于起动）。

减小加热电压至第 1 档（24 伏左右），调节示波器，观察压力和容积信号，以及压力和容积信号之间的相位关系等，并把 P-V 图调节到最适合观察的位置。等待约 10 分钟，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，从双踪示波器显示的 P-V 图估算（或计算机上读取）P-V 图面积，记入表 1 中。

逐步加大加热功率，等待约 10 分钟，温度和转速平衡后，重复以上测量 4 次以上，将数据记入表 1。

以  $\Delta T / T_1$  为横坐标， $nA / \Delta T$  为纵坐标，在坐标纸上作  $nA / \Delta T$  与  $\Delta T / T_1$  的关系图，验证卡诺定理。

表 1 测量不同冷热端温度时的热功转换值

加热电压 V	热端温度 $T_1$	温度差 $\Delta T$	$\Delta T / T_1$	A(P-V 图面积)	热机转速 n	$nA / \Delta T$

在最大加热功率下，用手轻触飞轮让热机停止运转，然后将力矩计装在飞轮轴上，拨动飞轮，让热机继续运转。调节力矩计的摩擦力（不要停机），待输出力矩，转速，温度稳定后，读取并纪录各项参数于表 2 中。

保持输入功率不变，逐步增大输出力矩，重复以上测量 5 次以上。

以 n 为横坐标， $P_o$  为纵坐标，在坐标纸上作  $P_o$  与 n 的关系图，表示同一输入功率下，输出偶合不同时输出功率或效率随偶合的变化关系。

表 2 测量热机输出功率随负载及转速的变化关系

输入功率  $P_i = VI =$

热端温度 $T_1$	温度差 $\Delta T$	输出力矩 M	热机转速 n	输出功率 $P_o = 2\pi nM$	输出效率 $\eta_{oi} = P_o / P_i$


表 1, 表 2 中的热端温度 $T_1$ 、温差 $\Delta T$ 、转速 $n$ 、加热电压 $V$ 、加热电流 $I$ 、输出力矩 $M$ 可以直接从仪器上读出来, P-V图面积 $A$ 可以根据示波器上的图形估算得到, 也可以从计算机软件直接读出(仅适用于微机型热机测试仪), 其单位为焦耳; 其他的数值可以根据前面的读数计算得到。

示波器 P-V 图面积的估算方法如下。根据仪器介绍和说明, 用 Q9 线将仪器上的示波器输出信号和双踪示波器的 X、Y 通道相连。将 X 通道的调幅旋钮旋到“0.1V”档, 将 Y 通道的调幅旋钮旋到“0.2V”档, 然后将两个通道都打到交流档位, 并在“X-Y”档观测 P-V 图, 再调节左右和上下移动旋钮, 可以观测到比较理想的 P-V 图。再根据示波器上的刻度, 在坐标纸上描绘出 P-V 图, 如图 7 所示。以图中椭圆所围部分每个小格为单位, 采用割补法、近似法(如近似三角形、近似梯形、近似平行四边形等)等方法估算出每小格的面积, 再将所有小格的面积加起来, 得到 P-V 图的近似面积, 单位为“ $V^2$ ”。根据容积  $V$ , 压强  $P$  与输出电压的关系, 可以换算为焦耳。

示波器观测的热机实验P-V曲线图

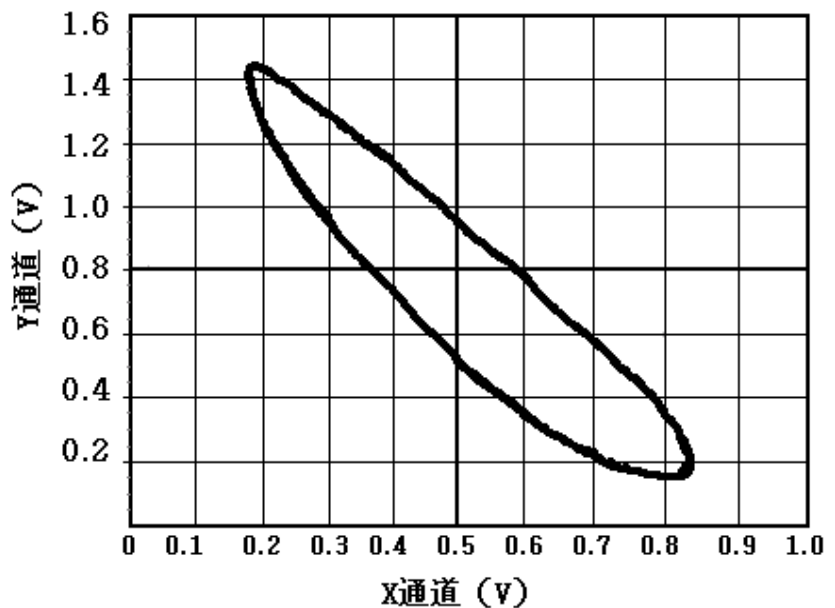


图 7 示波器观测的热机实验 P-V 曲线

容积 (X 通道):  $1V = 1.333 \times 10^{-5} m^3$

压力 (Y 通道):  $1V = 2.164 \times 10^4 Pa$

则:  $1V^2 = 0.288J$

**【注意事项】**

1. 加热端在工作时温度很高, 而且在停止加热后 1 小时内仍然会有很高温度, 请小心操作, 否则会被烫伤。
2. 热机在没有运转状态下, 严禁长时间大功率加热, 若热机运转过程中因各种原因停止转动, 必须用手拨动飞轮帮助其重新运转或立即关闭电源, 否则会损坏仪器。
3. 热机汽缸等部位为玻璃制造, 容易损坏, 请谨慎操作。
4. 记录测量数据前须保证已基本达到热平衡, 避免出现较大误差。等待热机稳定读数的时间一般在 10 分钟左右。



5. 在读力矩的时候，力矩计可能会摇摆。这时可以用手轻托力矩计底部，缓慢放手后可以稳定力矩计。如还有轻微摇摆，读取中间值。
6. 飞轮在运转时，应谨慎操作，避免被飞轮边沿割伤。
7. 热机实验仪上贴的标签不可撕毁，否则保修无效！

### 【思考题】

1. 为什么 P-V 图的面积即等于热机在一次循环过程中将热能转换为机械能的数值。

### 【空气热机实验仪的维护】

由于空气热机实验仪是运动的机械装置，所以需要时常维护，维护的主要方式是给仪器内玻管水平滑动轴加润滑油。每次加油的间隔约为一周，加油量为用加油勺加一小滴油到水平轴上。详细的加油方法如下：

如图 8 所示。在热机处于冷却状态的时候，将热机实验仪调整至图 8 所示位置，内部偏心轮也调整至图 8 所示位置。然后用擦干净的加油勺在配备的油瓶中蘸取一小滴润滑油，从后玻盖孔中间缓慢伸入，将润滑油涂抹在水平轴上。再用手拨动飞轮，让润滑油均匀的分布在水平轴上，起到充分的润滑作用。加完油后将油瓶盖好，加油勺需擦拭干净并妥善放置，以备下次使用。

注意，加油的量不宜过多，否则会影响到其他地方。

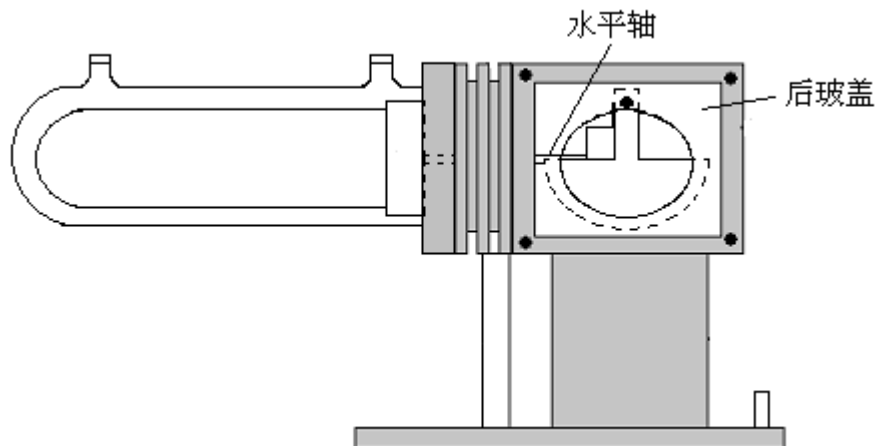
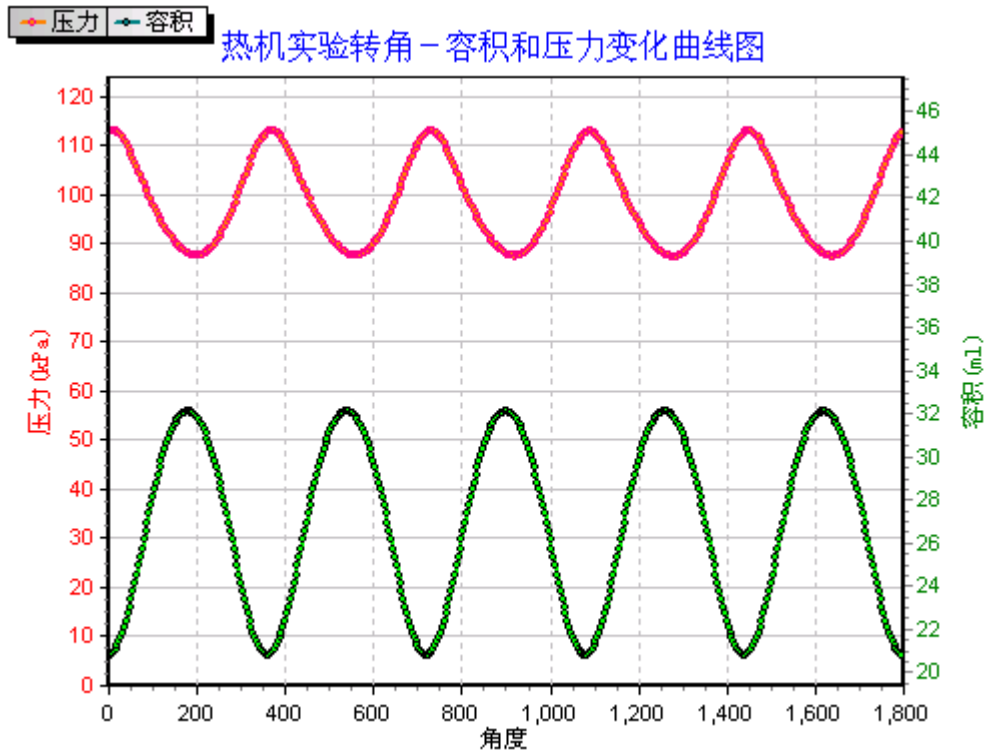
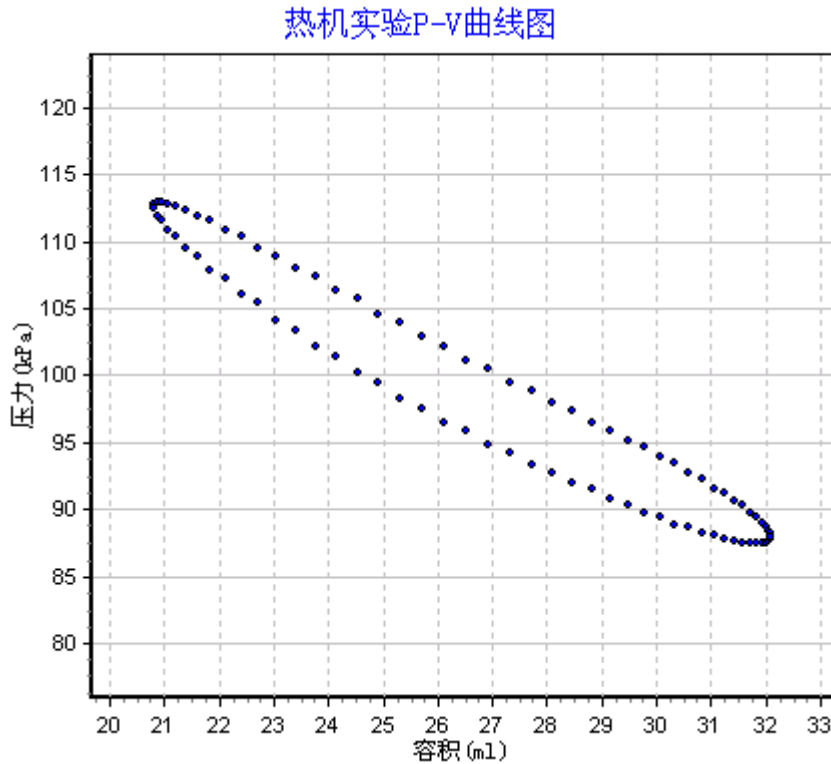


图 8 热机的局部后视图

附 1：计算机显示的热机容积，压力随转角变化和 P-V 图例子



附图 1 热机容积，压力随转角变化曲线



附图 2 热机 P-V 曲线

## 附录 2：热机测量数据及数据处理例子

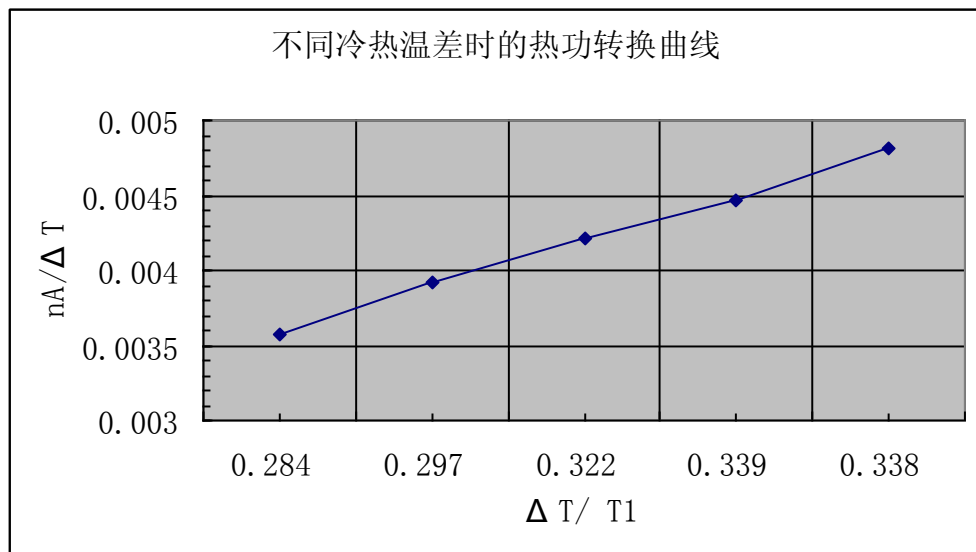
实验时间：2007 年 2 月 27 日

实验条件：室温 19℃

附表 1 测量不同冷热端温度时的热功转换

加热电压 V	热端温度 $T_1$	温度差 $\Delta T$	$\Delta T / T_1$	A(P-V 图面积)	热机转速 n	$nA/\Delta T$
23.6	435.2	123.8	0.284	0.05149	8.6	0.00358
25.8	449.7	133.4	0.297	0.04895	10.7	0.00393
27.7	470.5	151.4	0.322	0.05266	12.1	0.00421
28.6	489.8	165.8	0.339	0.05562	13.3	0.00446
29.7	492.8	166.8	0.338	0.05727	14	0.00481

以  $\Delta T / T_1$  为横坐标， $nA/\Delta T$  为纵坐标，得到  $nA/\Delta T$  与  $\Delta T / T_1$  的关系图附图 3，



附图 3 不同冷热温差时的热功转换关系图

结论：由附图 3 可分析，在外加负载不变的情况下，随加热功率增大， $nA/\Delta T$  与  $\Delta T / T_1$  基本具有线性关系，验证了卡诺定理。

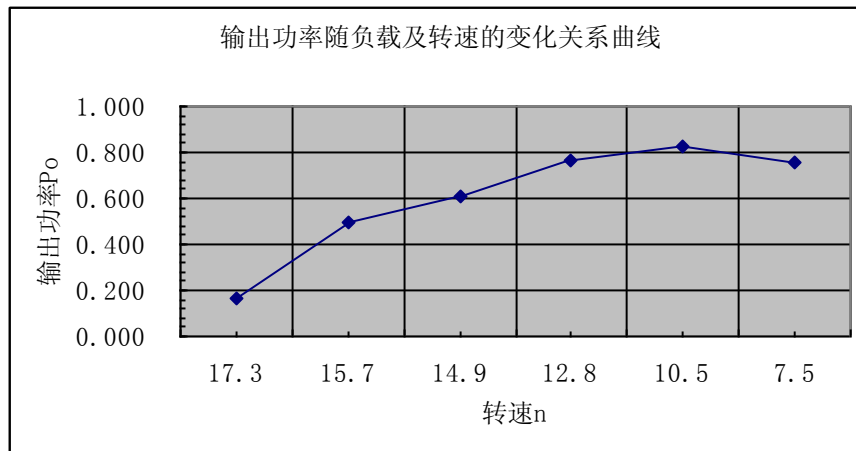
附表 2 测量热机输出功率随负载及转速的变化关系

输入功率

$$P_i = VI = 35.4 \times 5.6 = 198W$$

热端温度 $T_1$	温度差 $\Delta T$	输出力矩 M	热机转速 n	输出功率 $P_o = 2\pi nM$	输出效率 $\eta_{o/i} = P_o/P_i$
543.3	208	0.0015	17.3	0.163	0.08%
553.2	217.8	0.005	15.7	0.493	0.25%
567.2	232.1	0.0065	14.9	0.609	0.31%
583.9	248.2	0.0095	12.8	0.764	0.39%
593.8	259	0.0125	10.5	0.825	0.42%
600.2	261.2	0.016	7.5	0.754	0.38%

以 n 为横坐标， $P_o$  为纵坐标，得到  $P_o$  与 n 的关系图附图 4：



附图4 输出功率随负载及转速的变化曲线

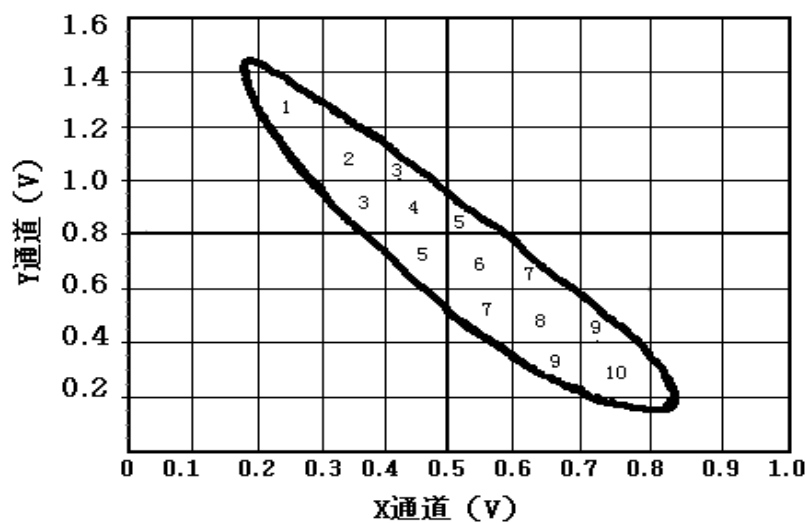
结论：由附图4可分析，在同一加热功率下，随摩擦力矩加大，转速降低，热端温度升高，温度差增加。输出效率先是随摩擦力矩的加大而增加，有一个最佳匹配点。过了该点后，由于转速下降较多，导致输出效率下降。

**用示波器估算PV图面积的方法：**

如附图5所示，将椭圆围成的部分通过割补法可以大致划分为约11个小方格（图中标的数字为小方格的个数，第11个格为未标识格的面积和），而每个小方格的面积为  $0.1 \times 0.2 = 0.02V^2$ ，则11个小方格面积为  $0.22V^2$ ，再根据电压转换为焦耳的换算公式可以得到：

$$0.22 \times 0.288 = 0.0635J.$$

**示波器观测的热机实验P-V曲线图**



附图5 坐标纸示波器观测的热机实验 P-V 曲线图