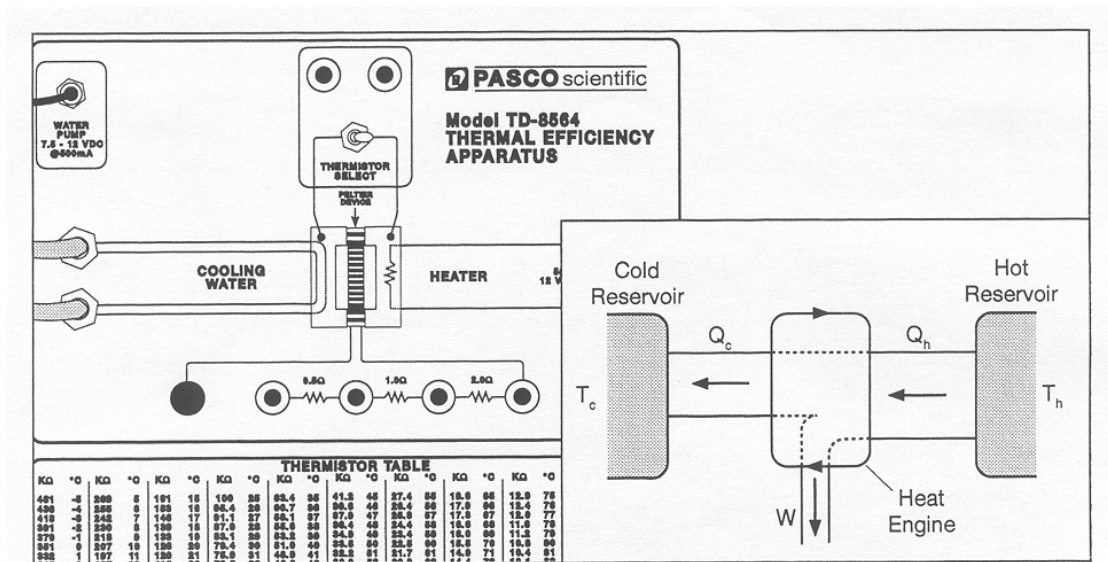


热效率组合实验

乔卫平编译



上海交通大学物理实验中心

热效率组合实验

这台热效率仪既可用作热机，又可用作热泵。当用作热机时，以热源取出的热量被用来形成电流，通过一个负载电阻做功。热机效率的实验值可与理论值做比较。

此仪器的核心是一个热电转换器，叫做 Peltier 仪。为了获得无限热源与冷源，一端必须接在冰水中，另一端用一个发热电阻供热。

辅助仪器：一个 DC 电源 (2.5A, 12V, SF-9584)，一个欧姆表，一个电流表 (3A)，2 个电压表，若干导线及 3kg 冰及一桶冰水。

核心原理：温差效应是当两种不同金属连结，又将两端放入不同温度时产生电动势。而此仪器利用了温差效应。当如图 1 所示两种不同半导体两端浸入不同温度时，在半导体中产生电流，通过负载电阻做功。

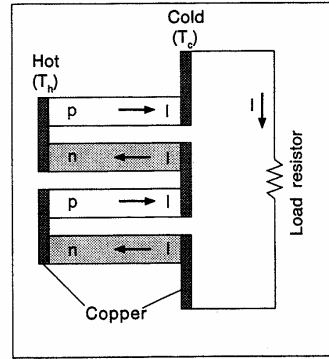


Figure 1: Arrangement of Thermocouples

实验原理

1.热机

在本实验中，负载电阻所做的功作为焦耳热散失。实际效率

$$\ell = \frac{W}{Q_H} = \frac{P_W}{P_H}$$

其中 $Q_H = W + Q_C$, $P_H = P_W + P_C$ 。

卡诺热机效率

$$\ell_{carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H}$$

卡诺热机是在忽略摩擦、热传导、热辐射和焦耳热散失情况下效率最高的热机。

调整效率：计入任何可能的能量损失，则实际效率会更接近卡诺效率，说明热机效率不可能为 100%。

2.热泵

热泵是利用外界做功，把热量从低温源送到高温热源。

实际致冷系数 $K = \text{COP} = \frac{P_C}{P_W}$

最大致冷系数: $K_{\max} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$

调整致冷系数：考虑热损失后，实际致冷系数趋于最大致冷系数。

实验测量

能直接测量的量有三个：温度，输入热源功率，负载功率。

1. 温度

如图 4 中，开关拨向左边读冷源温度，右边读热源温度。读出的是热敏电阻阻值，可对照表格查出温度。

2. 热源功率

$$P_H = I_H \cdot U_H$$

因内阻变化，必须测出 I 与 U，缺一不可。

3. 负载功率

$$P_w = \frac{U^2}{R}$$

负载电阻误差 1%，且不随温度改变。

当作热泵时，不用负载电阻，故输入功率为

$$P_w = I_w U_w$$

不能直接测量，但在调整中要用的量有内阻、散热与冷源被抽走的热量。

① 内阻

按图 6 接线，在有负载情况下得

$$V_s - \left(\frac{V_w}{R}\right)r - V_w = 0$$

其中 V_w 为负载两端电压，R 为所选负载电阻。

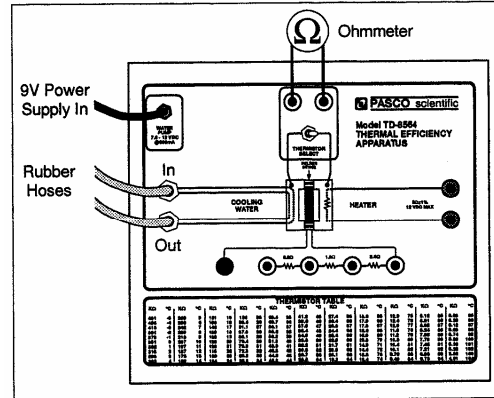


Figure 4: Thermal Efficiency Apparatus

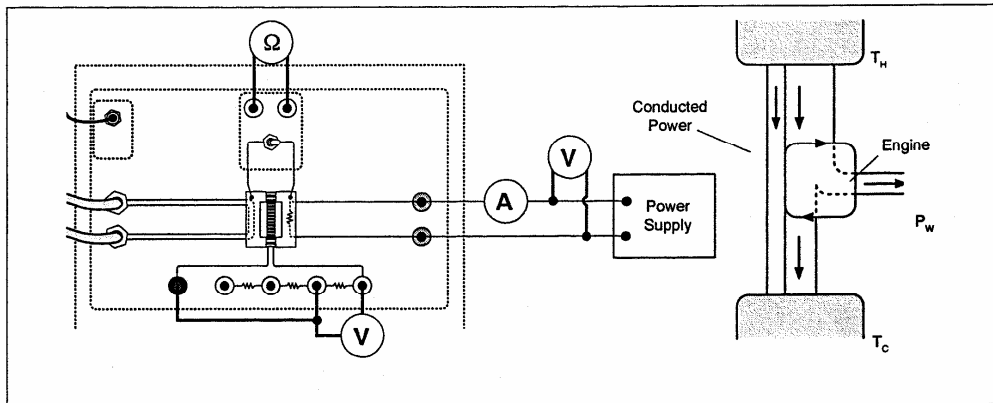


Figure 6: Heat Engine With A Load

同样条件下按图 7 接线，在无负载情况下，读出负两端电压为 V_s ，于是

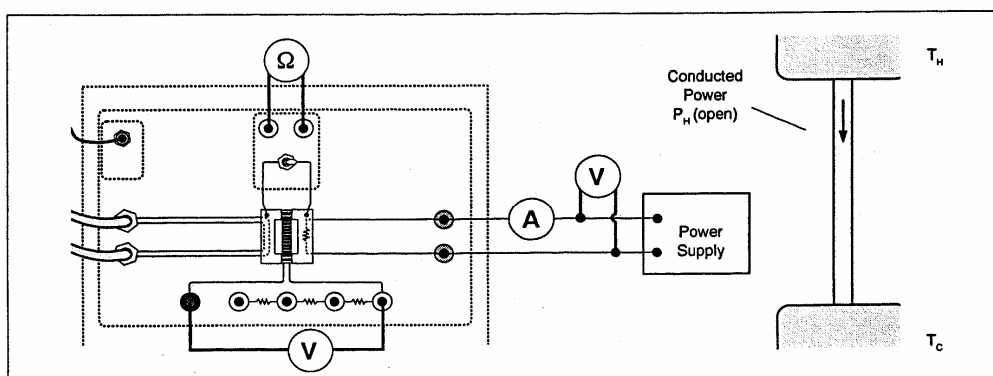


Figure 7: No Load

$$\gamma = \left(\frac{V_S - V_W}{V_W} \right) R$$

② 散热

假设热辐射与热传导在工作与不工作时一样，则散热即为高温热源不工作时向低温热源提供的能量，即 $P_{H(开路)}$ 。

③ 冷源被抽走的热量

可以用热源吸收的数量减去做功求得。

热源在不同温差时向冷源传热可以自己测量后制成一张表。由于保持热源恒温时能量守恒，可以通过测量无负载时的热源输入功率求得此温差下的散热。

实验 1. 热机与温差

实验仪器

实验目的

确定热机的实际效率和卡诺效率是运行温度的函数。

实验准备

1. 准备好冰水浴，将两根管子插入冰水浴中。
2. 将变压器连上电线插入水泵电源，这时水泵启动。
3. 将欧姆表插入上方的热敏电阻插孔。
4. 在右端红接线柱上接上电源、电流表及电压表，并将电压调至约 11V。（注意：不应在超过 80°C 时连续运行 5 分钟以上，温度一旦达到 93°C，内部电路将自动切断。）
5. 任选下方一个负载电阻，用导线跨接如图 1.1。

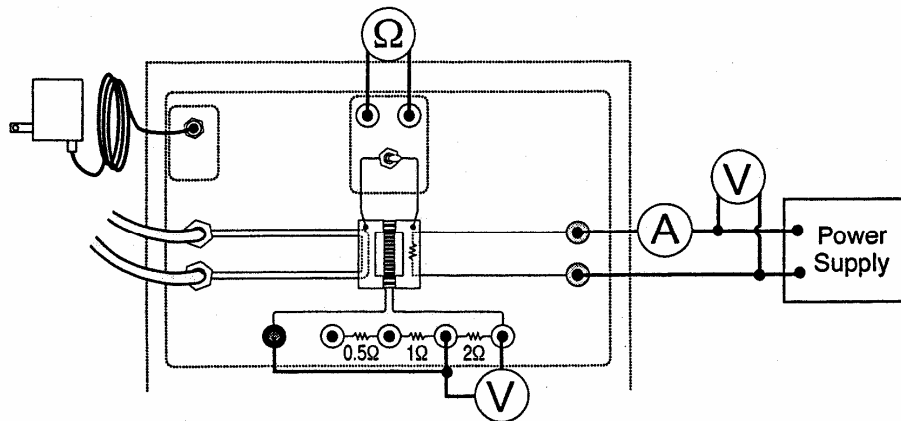


Figure 1.1

实验步骤

1. 等待冷端与热端平衡（约 5 至 10 分钟）。若想加速这一过程，可以先逐步增大电压，等热端升温后再调回原值。
2. 测量热，冷端温度（电阻）。
3. 测量 V_H , I_H , V_W 。
4. 工作电压调低 2V。
5. 重复 1 至 4，记录下共 5 组数据。

表 1.1 热机数据

	$T_H(\text{k}\Omega)$	$T_C(\text{k}\Omega)$	$T_H(^{\circ}\text{C})$	$T_C(^{\circ}\text{C})$	V_H	I_H	V_W
1							
2							
3							
4							
5							

计算 (表 1.2)

1. 计算 P_H 与 P_W 。
2. 计算温差 $\Delta T = T_H - T_C$ 。
3. 计算实际效率 $\ell_a = \frac{P_W}{P_H}$ ，与卡诺效率 $\ell_c = \frac{T_H - T_C}{T_H}$ 。

表 1.2 计算值

	P_H	P_W	$T_H(\text{k})$	$T_C(\text{k})$	$\Delta T(\text{k})$	e_{actual}	e_{Carnot}
1							
2							
3							
4							
5							

分析及问题

为比较实际效率与卡诺效率，可采用作图法。在同一张图上作出 $\ell_a - \Delta T$ 图与 $\ell_c - \Delta T$ 图，并比较。

注意：我们在此假定 T_c 为定值或近似不变。

1. 卡诺效率是实际热机在给定温差下工作时的最大效率，图上的实际效率是否低于卡诺效率呢？
2. 温差增加时，卡诺效率与实际效率是增加还是减少？
3. 实际效率占理想效率一定比例，所以实际效率综合反映了可用能量与使用可用能量的本领。你能算出本热机使用可用能量的本领吗？
4. 本机效率低下，但这类低效率机仍被广泛使用，其原因是什么？

实验 2. 热机效率研究

实验仪器

实验目的

确定热机的实际效率和卡诺效率，

实验准备

1. 准备好冰水浴，将两根管子插入冰水浴中。
2. 将变压器连上电线插入水泵电源，这时水泵启动。
3. 将欧姆表插入上方的热敏电阻插孔。

实验步骤

两种工作状态：闭路态（热机工作）与开路态（热机不工作）。闭路态为正常工作状态，开路态用来测量热源的热散失。

1. 闭路态：同前一实验 1-3 步
2. 开路态：
 - A. 断开工作电阻的导线。
 - B. 降低热源电压，使其在原温度平衡，记录 T_H (K Ω)， T_C (K Ω)。
 - C. 记录 V_H ， I_H ， V_P （即开路电压 V_S ）。

表 2.1 数据

状态	T_H (k Ω)	T_C (k Ω)	T_H ($^{\circ}$ C)	T_C ($^{\circ}$ C)	V_H	I_H	V_w	V_S
热机								
开路								

计算（表 2.2 与 2.3）

1. 实际效率： $\ell = \frac{P_w}{P_H}$, $P_w = \frac{V_w^2}{R}$, $P_H = I_H V_H$

表 2.2 计算数据

内阻= $r =$ _____

状态	T_H (k)	T_C (k)	P_H	P_w	I_w
热机 (2 Ω 负载)					
开路					

表 2.3 结果

	实际	调整	最大(卡诺)	%
效率				

2. 最高效率: $\ell_C = \frac{T_H - T_C}{T_H}$

3. 调整效率:

A. 实际做功为 $P_W^1 = p_w + I_w^2 r = \frac{V_W^2}{R} + \left(\frac{V_W}{R}\right)^2 r$, 而原来 $P_W = \frac{V_W^2}{R}$ 只是有用功。

B. 实际高温热源提供热量为 $P_H^1 = P_H - P_{H(\text{开路})}$, 因为 $P_{H(\text{开路})}$ 为热散失在任何情况下均存在。

C. 调整效率 $\ell_{\text{调整}} = \frac{P_W^1}{P_H^1} = \frac{P_W + I_W^2 R}{P_H - P_{H(\text{开路})}}$, 其中 $r = \left(\frac{V_P - V_W}{V_W}\right) R$ 。

D. 调整后百分误差 $D\% = \frac{\ell_{\text{max}} - \ell_{\text{调整}}}{\ell_{\text{max}}} \times 100\%$ 。

问题

1. 温差减小, 三种效率变化如何?

2. 为何大量使用这样低效率的热机?

3. 计算熵变, 对每一热源 $\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta Q / \Delta t}{T} = \frac{P}{T}$, 计算总熵变为正还是负? 为什么?

实验 3. 热泵致冷效率

实验仪器

注意：做本实验前，必须先完成实验 2，以获得内阻。

实验准备

1. 连接器材
2. 输入功率恒定，工作至冷，热源均平衡
3. 测出输入功率 V_w ， I_w ， P_w 及热，冷源温度 T_H ， T_C
4. 根据温差查散失热量表

或用开路电路调至前一热源温度，测出散失热量 P_H

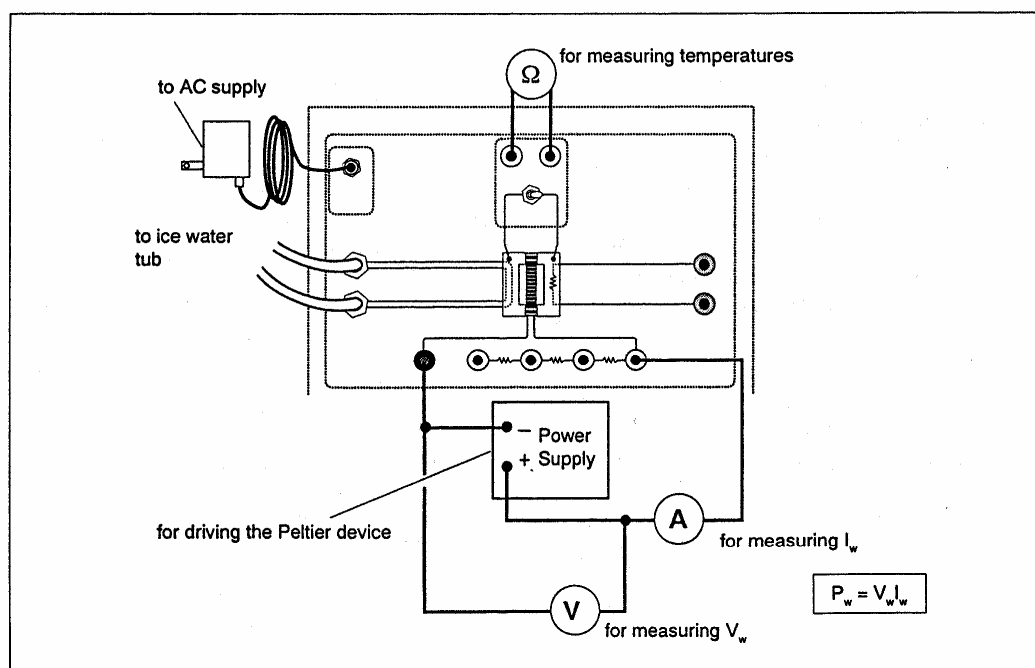


Figure 3.1 Heat Pump Mode

实验步骤

计算

1. $P_W = I_W V_W$, P_H , $P_C = P_H - P_W$

2. 实际制冷系数 $COP_{\text{actual}} = \frac{P_C}{P_W} = \frac{P_H - P_W}{P_W} = \frac{P_H - I_W V_W}{I_W V_W}$

最大制冷系数 $COP_{\text{actual}} = \frac{T_C}{T_A - T_C}$

3. 调整制冷系数

$$P_W^1 = V_W I_W - I_W^2 r \text{ 有用功}$$

$$P_C^1 = P_H - P_W^1$$

$$COP_{\text{(调整)}} = \frac{P_C^1 - I_W V_W}{I_W V_W - I_W^2 r}$$

4. 百分误差 $D\% = \frac{COP_{\text{max}} - COP_{\text{adj}}}{COP_{\text{max}}} \times 100\%$

表 3.1 热泵数据和结果

$T_H(\text{k}\Omega)$	$T_C(\text{k}\Omega)$	$T_H(\text{k})$	$T_C(\text{k})$	V_W	I_W	P_W	COP actual	COP max	COP adj	% diff

问题

1. 温差减小时, COP_{max} 增大还是减小?

2. 计算总熵变 (对任一热冷源), $\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta Q / \Delta t}{T} = \frac{P}{T}$, 总熵变为正还是负?

实验 4. 热传导率

实验原理

传导热量与厚度 X 成反比，与截面积 A 成正比，与温差成正比，比例系数 K 称为热传导率。

$$P = \frac{d\theta}{dt} = k \frac{A(\Delta T)}{X}$$

这台仪器由 71 对半导体（碲化铋）组成，共 142 根。每根半导体的 $\frac{X}{A} = \frac{X}{nA_0} = \frac{8.460\text{cm}^{-1}}{142} = \frac{846.0}{142} \text{m}^{-1}$ ，由开路热传导，得 $K = \frac{P_{H(\text{开路})}(X/A)}{\Delta T}$

问题

1. 计算出的热传导率与铜的热传导率相比如何 0°C 时为 $401\text{W/m}\cdot\text{k}$ 。

实验 5. 最佳负载

实验仪器

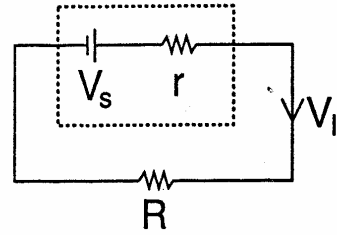


Figure 5.1 Peltier device connected to a load resistor

实验原理

热机时，输出功率为 $P=I^2R$ ，但实际电路满足 $V_s=I(r+R)$ 。

若温差不变， V_s 不变，此时输出功率将随负载电阻 R 而变化，有一极大值（对应 R_0 ）。

本实验目的为找出 P 最大时的 R 值

$$P = I^2 R = \left(\frac{V_s}{r + R} \right)^2 R$$

R_0 时

$$\frac{2R}{2R} = \frac{V_s^2 (r - R)}{(r + R)^3} = 0,$$

故 $R_0=r$ 。

实验步骤

1. 如图 5.2 接电路，将电源接入热源供电装置，调至约 11V。

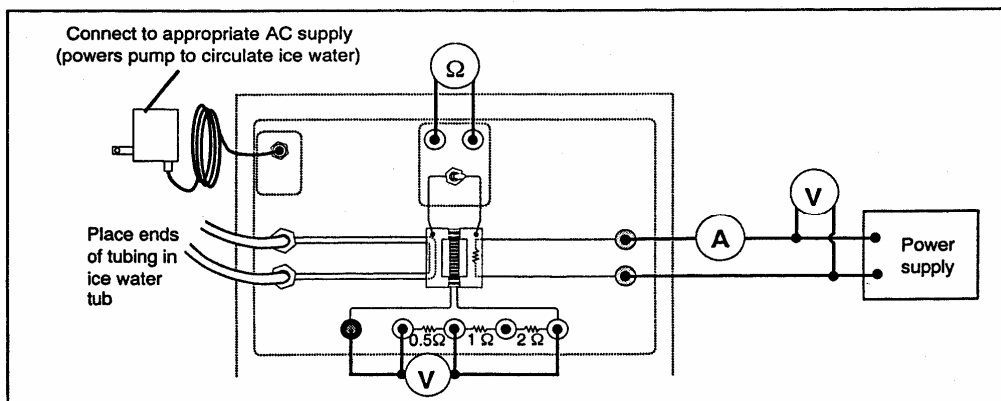


Figure 5.2 Connecting the 0.5Ω load resistor

2. 先接 0.5 Ω 电阻作负载，负载两端接电压表。
3. 等待热平衡。
4. 测量高低温度（热，冷源温度）。
5. 记录 V_H ， I_H ， V_W 。

6. 计算输入功率 $P_H=I_H V_H$ 及有用功率 $P_L = \frac{V_W^2}{R}$ ，计算效率 $\ell = \frac{P_L}{P_H}$ 。
7. 改变负载电阻为 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 Ω ，并改变输入功率的大小，使热、冷源保持温度不变，再做 1-6 步。
8. 比较 ℓ_{MAX} 时的 R 值

问题

1. 效率最高时 R 为多少？
2. R_0 实验值与内阻r相比如何？

Table 1: Resistance to Temperature Conversion Chart

kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C
461	-5	146	17	53.2	39	21.7	61	9.76	83
436	-4	139	18	51.0	40	20.9	62	9.43	84
413	-3	133	19	48.9	41	20.1	63	9.12	85
391	-2	126	20	46.8	42	19.3	64	8.81	86
370	-1	120	21	44.9	43	18.6	65	8.52	87
351	0	115	22	43.0	44	17.9	66	8.24	88
332	1	109	23	41.2	45	17.3	67	7.96	89
315	2	104	24	39.6	46	16.6	68	7.70	90
298	3	100	25	37.9	47	16.0	69	7.45	91
283	4	95.4	26	36.4	48	15.5	70	7.21	92
269	5	91.1	27	34.9	49	14.9	71	6.98	93
255	6	87.0	28	33.5	50	14.4	72	6.75	94
242	7	83.1	29	32.2	51	13.8	73	6.53	95
230	8	79.4	30	30.9	52	13.4	74	6.33	96
218	9	75.9	31	29.7	53	12.9	75	6.12	97
207	10	72.5	32	28.5	54	12.4	76	5.93	98
197	11	69.3	33	27.4	55	12.0	77	5.74	99
187	12	66.3	34	26.4	56	11.6	78	5.56	100
178	13	63.4	35	25.3	57	11.2	79	5.39	101
169	14	60.7	36	24.4	58	10.8	80	5.22	102
161	15	58.1	37	23.4	59	10.4	81	5.06	103
153	16	55.6	38	22.5	60	10.1	82	4.91	104