

The Reverse Carnot Cycle Is a Pumping Heat Machine

Huagu Zhang

College of Petroleum and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian
Email: 365411313@qq.com

Received: Sep. 6th, 2019; accepted: Sep. 22nd, 2019; published: Sep. 29th, 2019

Abstract

The reverse Carnot cycle is another kind of cycle with different properties from the Carnot cycle. The reverse Carnot cycle is an ideal pumping heat machine. There are three pumping heat modes: heat pump, cold pump and cold pump-heat pump. The thermal efficiency of the Carnot pumping heat cycle is closely related to the working medium. The thermal efficiency of the Carnot pumping heat machine will be greater than 1, because the temperature effect of the gas establishes a temperature difference in the reverse Carnot cycle, resulting in a large amount of heat input and output.

Keywords

Reverse Carnot Cycle, Pumping Heat Machine, Heat Pump, Cold Pump, Thermal Efficiency, Temperature Difference

逆卡诺循环就是泵热机

张华谷

福州大学石油化工学院, 福建 福州
Email: 365411313@qq.com

收稿日期: 2019年9月6日; 录用日期: 2019年9月22日; 发布日期: 2019年9月29日

摘要

逆卡诺循环是与卡诺循环性质不同的另一类循环。逆卡诺循环是理想的泵热机, 有三种泵热方式: 热泵、冷泵和冷泵-热泵联供。卡诺泵热循环的热效率与循环工质密切相关。卡诺泵热机的热效率会大于1, 是因气体的温度效应在逆卡诺循环里二次建立温差, 而造成大量热量的输入和输出。

关键词

逆卡诺循环, 泵热机, 热泵, 冷泵, 热效率, 温差

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

英国雷伊和麦克米查尔[1]指出：“能够对节能做出重大贡献的一种装置就是热泵”，“热泵总是带有热力学的神秘色彩……”，引起了我们的兴趣。

2. 卡诺循环和逆卡诺循环

瓦特发明的蒸汽机，在卡诺[2]生活的年代，可望达到的最高效率只有 5~7%。法国青年工程师卡诺想了解这种效率究竟能提高多少。在他 28 岁发表的唯一著作中，提出了卡诺循环概念，在卡诺去世后大约 15 年才被开尔文阐述清楚。1848 年才引起科学界的注意。

2.1. 卡诺热机循环及其热效率

卡诺循环是热量转换为机械能的理想热机。工作在温度 T_1 和 T_2 的二个热源之间的卡诺循环，由两个可逆定温过程和两个可逆绝热过程组成。工质为理想气体时，卡诺循环的 T-s 图，如图 1 所示。

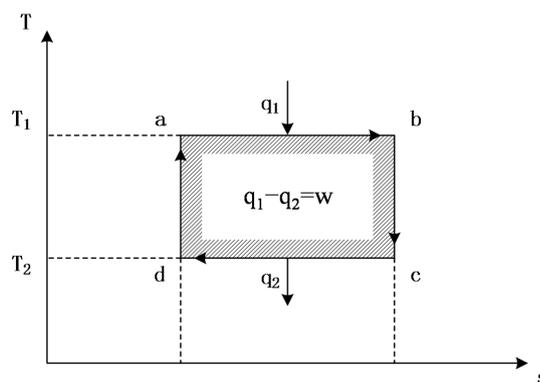


Figure 1. The Carnot cycle

图 1. 卡诺循环

d-a: 绝热压缩;

a-b: 定温吸热;

b-c: 绝热膨胀;

c-d: 定温放热。

按照循环经济性指标的原则性定义[3]:

$$\text{热机经济性指标 } \eta_c = \text{得到的收益 } w / \text{花费的代价 } q_1$$

卡诺热机的热效率 η_c :

$$\eta_c = w/q_1 = 1 - (T_2/T_1) < 1 \quad (1)$$

η_c 只能小于 1。这就是说，在循环发动机中，不可能将热能全部转化为机械能。即：输入热能 < 输出机械能。

卡诺循环及其热效率公式奠定了热力学第二定律的理论基础，它为提高各种热动力机热效率指出了方向，卡诺循环是实际热机的最高理想，它在热力学的发展史上竖立起了一座丰碑。

2.2. 卡诺热泵循环及其供热系数

按卡诺循环相同的路线而反方向进行的循环即逆卡诺循环，如图 2 中 a-d-c-b-a，它按逆时针方向进行。由于循环中的四个过程都是可逆的，逆卡诺循环是存在的、是可以运行的，制冷机的发明，就是明证。

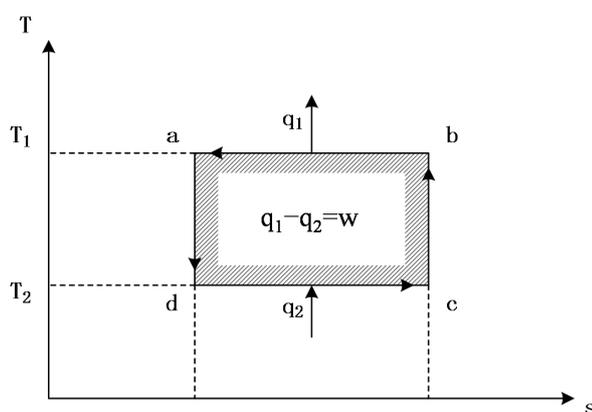


Figure 2. The reverse Carnot cycle
图 2. 逆卡诺循环

逆卡诺循环处于从大气温度 T_0 (即低温热源 T_2) 取热，向房间空气温度 T_R (即高温热源 T_1) 供热的工作状态，是理想热泵循环[4]。

同样按循环经济性指标的原则：

$$\text{热泵经济性指标 } \varepsilon_H = \text{得到的收益 } q_1 / \text{花费的代价 } w$$

卡诺热泵的供热系数 ε_H ：

$$\varepsilon_H = q_1/w = T_1/(T_1 - T_2) > 1 \quad (2)$$

供热系数 ε_H 总是大于 1。即：输出热能 > 输入机械能。

显然，在实际的热泵设备中，压缩过程所达到的温度 T_1 和膨胀过程所达到的温度 T_2 与工质的性质密切相关[5]。

1852 年汤姆森(1866 年被授予爵士位，1892 年被晋封开尔文男爵)的论文[6]，奠定了开尔文是热泵发明者的地位。汤姆森声称，只用直接采暖法 3% 的能量，他的热泵就可以产生出同样的热量来。

“热泵”这个易记而又恰当的名称的广泛采用[7]约在一百年前，遗憾的是不能确定谁最早使用了该名称。德国大概是弗吕格在 1920 年率先使用这个名称，克劳斯于次年在美国作了有关热泵的报导。

但是，有人将“热泵的工作过程与水泵相类比”，认为“水泵是消耗少量电能或燃料能 w ，将大量水从低位处泵送到所需的高位处，热泵也是消耗少量电能或燃料能 w ，将环境中蕴含的大量免费热能……变为满足用户要求的高温热能 Q_i ”，显然是错误的。水泵遵循伯努利定理，输送的水量严格按能量守恒

计算,不可能“消耗少量电能”而泵送“大量水”。水泵与“热泵的工作过程”是性质完全不同的过程,不可类比。

3. 性能系数 COP > 1 的困惑

供热系数 ε_H 的表示方法很多[8]。工业上常用的是性能系数 COP (coefficient of performance), 还有供热系数(coefficient of heating)、热互换效率(reciprocal thermal efficiency)、操作比(performance ratio)、操作能能量比(performance energy ratio)等等。COP 表示方法的多样性,说明有众多研究者在进行探索。美国切盖尔和博尔斯[9]对采用 COP 的解释是,为了避免出现热效率会 > 1 的怪异现象(oddity)。

性能系数 COP > 1, 说明对热泵输入 1 kw 的机械能热泵可以输出大于 1 kw 的热量。难道热泵可以“多产出”热量来? 热力学定律的建立,宣告二类永动机的不存在,难道还会有“会产热”的热泵存在吗? 这一困惑,也正是将热泵罩上热力学的神秘色彩。

有的书上解释说热泵是由于消耗了高质量能量(电能),“依靠这种能质下降的补偿作用”而使热泵多输出热量。也有人称热泵是能源采掘机[10]。

这些说法都是套用卡诺的想法,将热泵看成由机械能转换为热能的逆向能量转换装置,而造成的。我们是否可以不郁于“能量转换”的思路,解脱困惑,寻找其他解释?

对比一下这两个数学表达式:

$$\eta_c = w/q_1 = 1 - (T_2/T_1) < 1 \quad (1)$$

$$\varepsilon_H = q_1/w = T_1/(T_1 - T_2) > 1 \quad (2)$$

从 T-s 图来看,热机和热泵只是循环的走向相逆;从式子上看,式 1 和式 2 只是分子与分母的参数互调。热机公式里的分母的热能 q_1 是直接转换成分子的机械能 w 的,热泵输入的机械能 w ,不是也应该直接转换为热能 q_1 的吗? 其实不然。

从上述两式子可看出:首先,式 1 的计算结果 η_c 是一组小于 1 的百分数的数组;而式 2 的计算结果 ε_H 是一组大于 1 的倍增数组;其次,从代数式来看,式 1 是收敛的,而式 2 是发散的,性质完全不同。

据此可说,热泵并不是简单的逆向的机械能转换为热能的装置。用“能量转换”的观点来说明热泵的工作原理不合适。

雷伊他们[1]介绍说,一百六十多年前,开尔文那时就认为“热泵是热量倍增器”。这一说法是有别于“能量转换”的。我们顺此思路,寻求新的解释。

4. 热量倍增的原理: 建立温差

4.1. 气体在压力变化时的温度效应

热量为什么会倍增? 可用气体状态方程式: $pv = nRT$ 来解释。这是气体在压缩或膨胀时产生的温度效应造成的结果。

气体有一个基本特性: 气体的压力与它的温度成正比

$$p \propto T$$

当我们对一定体积的气体进行压缩时,气缸内气体的压力 p 升高了,气体的温度 T 也会同时升高;同理,若我们使气缸内气体的压力 p 降低,气体的温度 T 也会随之降低。

这是气体的一种基本特性。自行车的打气筒,是大家都熟悉的生动例子。

4.2. 输入的机械能建立了温差

对热泵所“花费的代价 w ”,即输入的机械能 w ,不是直接转换为热量,而是建立了温差,在换热

器两边建立温差。温差就是推动力，热量就可以自动地从高温流向低温。按照温差传热的观点，就可以得到解释。

就像花机械能去建筑堤坝那样，水库里的储水所具有的能量，与建筑堤坝所花费机械能的多少没有直接的联系，储水的能量只与堤坝的高度有关。

工质气体在压缩机的气缸里，受到活塞的压缩，气体的压力提高，气体的温度也随之提高，达到 T_1 。冷凝器温度达到 T_1 与房间空气温度 T_R 之间建立了温差(属温度范围较高的温差)，热量 q_1 自动流出冷凝器，向房间空气放热，实现“热泵”效果；在膨胀阀里，工质气体的压力能由于节流膨胀而降低，使气体的温度降低至 T_2 ，在蒸发器温度 T_2 与冷库温度 T_L 之间建立温差(属温度范围较低的温差)，热量 q_2 自动流进蒸发器，使蒸发器可吸收冷库的热量，实现“制冷”效果。整个逆卡诺循环就是一台由工质气体循环造成的热量倍增器。

对比卡诺循环还可以看出，在卡诺循环里气体膨胀推动活塞移动时，气体温度也在下降，这个温度效应对活塞的移动不产生影响。只有在逆卡诺循环时，产生温差，推动了热量流动，影响很大。

4.3. 逆卡诺循环的泵热性能

现在我们可以这样解释热泵的工作过程，它实际上是气体的温度特性在逆卡诺循环里的一种表现，是气体特性在逆卡诺循环里的完美结合。它可以使输入的小量机械能 w ，经过压缩和膨胀过程，二次在换热器两边建立了温差：一次高温温差，一次低温温差。这二次温差让二股热量 q_1 和 q_2 在冷凝器和蒸发器里自动流动，推动了大量的热量，从系统外输入和输出。这是多么神奇的“泵热(pumping heat)”现象。所以也可以将逆卡诺循环称为“理想泵热循环”或者称为“理想泵热机”。大道至简。它的节能原理，自然天成，不再神秘。不必要用能量的质量高低来解释它了。

逆卡诺循环的热效率，就是理想泵热机的泵热性能。如果采用泵热性能 PHP (pumping heat performance) 这样的参数来表述，它的物理意义就更明确了。

5. 逆卡诺冷泵循环和冷泵 - 热泵循环

逆卡诺循环有三种泵热循环方式，除了热泵的方式之外还有冷泵和冷泵 - 热泵联供的两种方式。

5.1. 卡诺冷泵循环及其供冷系数

逆卡诺循环处于从冷库温度 T_L (即低温热源 T_2) 吸热，向大气温度 T_0 (即高温热源 T_1) 排热的工作方式，是理想冷泵循环。“冷泵”一词采用法国若利和莫尔 - 谢瓦利埃[11]的说法，使用起来更顺口、贴切。

同样按循环经济性指标的原则：

冷泵经济性指标 $\varepsilon_L =$ 得到的收益 q_2 /花费的代价 w

卡诺冷泵的供冷系数 ε_L ：

$$\varepsilon_L = q_2/w = T_2/(T_1 - T_2) \quad (3)$$

供冷系数可以大于、等于、小于 1。

通过 $\varepsilon_L = 1$ 的关系，我们可以推导：

$$\begin{aligned} \because \varepsilon_L = T_2/(T_1 - T_2) = 1 \\ \therefore T_1 = 2T_2 \end{aligned}$$

说明当 $T_2 = T/2$ 时， $\varepsilon_L = 1$ 。即冷库温度 T_2 与大气温度 T_1 有关。假设：夏天大气温度 $t_1 = 30^\circ\text{C}$ ，即 T_1 为 303.15 K 时，那么 $T_2 = 0.5(30 + 273.15) = 151.575 \text{ K}$ 。

即 $\varepsilon_L = 1$ 时， $t_2 = -121.575^\circ\text{C}$ 。

根据以上的计算,得出的结论是:夏天大气温度 $t_1 = 30^\circ\text{C}$ (T_1 为 303.15 K)时,要区分二种温度范围:

温度范围 -121.575°C 到 30°C 时, $\varepsilon_L > 1$

温度为 -121.575°C 时, $\varepsilon_L = 1$

温度范围低于 -121.575°C 时, $\varepsilon_L < 1$

所以说,低温条件下还要分二个温度范围进行分析。

在大气温度为 30°C , 冷库操作在温度范围 -121.575°C 到 30°C 时

$$\varepsilon_L = q_2/w = T_2/(T_1 - T_2) > 1 \quad (3)$$

表明工作在低温范围的普冷制冷机与热泵一样,输入 1 kw 的机械能可以输出大于 1 kw 的冷量。同样也可以用输入的机械能 w 建立了温差,使冷库里的热量被“泵送”至大气中,热泵的说法来解释。

制冷机的发明早于逆卡诺循环的发现。人类对低温条件的刚性需求,促使低温与空调行业的大发展。热泵的发展却要与其它供热方式相比较。二十世纪七十年代的能源危机,才促使热泵行业得到了发展。

5.2. 卡诺热泵 - 热泵循环及其热效率

从图 2 可以看出,逆卡诺循环里的热泵与热泵是共生的,是孪生兄弟。热泵与热泵的同时工作,是逆卡诺循环的基本循环。

卡诺热泵 - 热泵循环的供冷 - 供热系数 ε_{LH} :

$$\varepsilon_{LH} = \varepsilon_L + \varepsilon_H = (q_1 + q_2)/w = (T_1 + T_2)/(T_1 - T_2) \quad (4)$$

卡诺热泵 - 热泵循环工作时,输入的机械能 w 只有一个,而输入与输出的热量有二个:冷凝器(热泵)进行放热 q_1 ,同时蒸发器(热泵)进行吸热 q_2 。它们的供冷系数值和供热系数值可以叠加,此时的倍增性能的效果最大。

热泵干燥就是最典型的一种应用实例[12],见图 3。在热泵干燥器里,热泵的热量用于加热被干燥的物料;而热泵提供的冷量则用于冷凝物料干燥时蒸发出来的湿气,然后将冷凝水排出干燥器。卡诺热泵 - 热泵循环是理想的热泵干燥器。

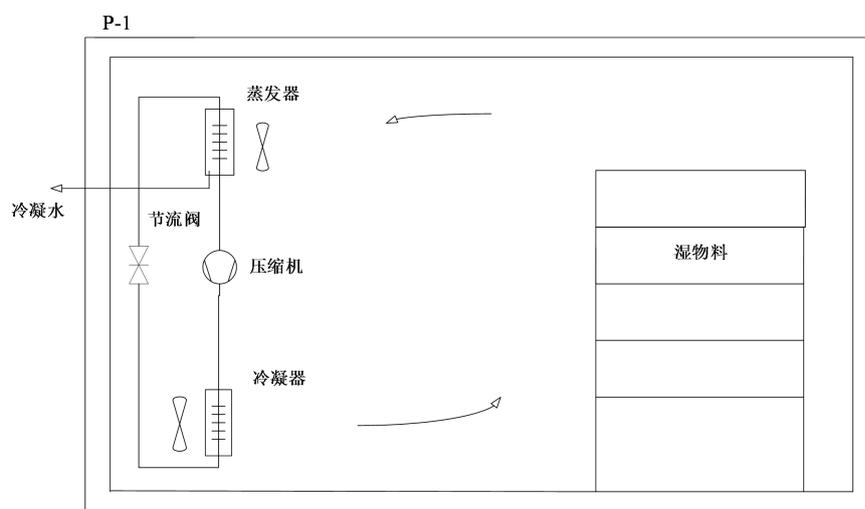


Figure 3. The heat pump dryer

图 3. 热泵干燥器

在目前所有介绍逆卡诺循环的物理学的热学和工程热力学的教科书中,都只是以制冷机或热泵为例

讲述逆卡诺循环，而没有对逆卡诺循环的热效率进行全面探讨。对泵热循环热效率的全面探讨，特别是对冷泵-热泵循环的探讨，并且用冷泵-热泵统一的观点来考察热过程，可以打开泵热循环研究的新局面，促进泵热循环的发展，开发出许多新产品来。

6. 结论

1) 与卡诺循环由热能转换为机械能的性质不同，逆卡诺循环不是逆向机械能直接转换为热能的循环，而是另一类泵热的循环；

2) 卡诺循环热效率的表达式是收敛的，而逆卡诺循环热效率的表达式是发散的，两个数学表达式的性质不同；

3) 卡诺热机的热效率与工质无关，而卡诺泵热机的热效率与循环工质密切相关；

4) 逆卡诺循环是理想的泵热机，它有三种泵热方式：热泵、冷泵和冷泵-热泵联供；

5) 卡诺泵热机的热效率会大于 1，这是气体的一种特性在逆卡诺循环里的完美结合而造成的神奇效果。自然天成的节能原理，并不神秘。

卡诺泵热机是自然界送给人类的一种节能设备，我们要好好利用它。

致 谢

感谢华东理工大学曾力丁老师鼓励发表以上观点，以此求教于关心逆卡诺循环的专家、学者。

参考文献

- [1] [英]雷伊 D.A., 麦克米查尔 D.B.A. 热泵的设计和应用[M]. 陈特鑫, 译. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [2] [美]阿西摩夫 I. 古令科技名人辞典[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] 沈维道, 童钧耕, 工程热力学[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [4] 戴晋同, 陈和立, 陈曦, 张华谷. 热泵自然干燥[J]. 化学工程与装备, 2011(7): 157-160.
- [5] 曹德胜, 史琳. 制冷剂使用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [6] Thomson, W. (1852) On the Economy of the Heating or Cooling of Buildings by Means of Currents of Air. *Proceedings of the Royal Philosophical Society*, **3**, 269-272.
- [7] [德]von 库伦 H.L., 斯泰姆莱 F. 热泵的理论与实践[M]. 王子介, 译. 北京: 建筑工业出版社, 1986.
- [8] [英]希普 R.D. 热泵[M]. 张在明, 译. 北京: 化学工业出版社, 1984.
- [9] [美]切盖尔 Y.A., 博尔斯 M.A. 工程热力学[M]. 第 7 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [10] 李成春, 韩伟. 热泵蒸发-高效节能技术[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1986.
- [11] [法]若利 P., 莫尔-谢瓦利埃 F. 木材干燥——理论、实践和经济[M]. 宋闯, 译. 北京: 林业出版社, 1985.
- [12] 张华谷. 开发“耦合热泵”添彩“美丽中国”[J]. 化学工程与装备, 2012(12): 168-170.