

CICLO RANKIE

Ciclo de Carnot en Vapor

Hemos mencionado repetidamente que el ciclo de Carnot es el ciclo más eficiente que opera entre dos límites de temperatura especificados. Por lo tanto, es natural considerar el ciclo de Carnot primero como un ciclo ideal prospectivo para las plantas de energía de vapor. Si pudiéramos, ciertamente lo adoptaríamos como el ciclo ideal. Sin embargo, como se explicará, el ciclo de Carnot no es un modelo adecuado para ciclos de potencia. A lo largo de las discusiones, asumimos que el vapor es el fluido de trabajo, ya que es el fluido de trabajo que se usa predominantemente en los ciclos de potencia de vapor. Considere un ciclo de Carnot de flujo constante ejecutado dentro de la cúpula de saturación de una sustancia pura, como se muestra en la Figura 1. El fluido se calienta de manera reversible e isotérmica en una caldera (proceso 1-2), se expande isentrópicamente en una turbina (proceso 2-3), se condensa reversiblemente e isotérmicamente en un condensador (proceso 3-4), y se comprime isentrópicamente por un compresor al estado inicial (proceso 4-1). Varias impracticabilidades están asociadas con este ciclo:

1. La transferencia de calor isotérmica hacia o desde un sistema de dos fases no es difícil de lograr en la práctica, ya que mantener una presión constante en el dispositivo fija automáticamente la temperatura en el valor de saturación. Por tanto, los procesos 1-2 y 3-4 se pueden abordar de cerca en calderas y condensadores reales. Sin embargo, limitar los procesos de transferencia de calor a sistemas de dos fases

limita severamente la temperatura máxima que se puede usar en el ciclo (debe permanecer por debajo del valor del punto crítico, que es 374°C para el agua). Limitar la temperatura máxima en el ciclo también limita la eficiencia térmica. Cualquier intento de elevar la temperatura máxima en el ciclo implica la transferencia de calor al fluido de trabajo en una sola fase, lo que no es fácil de lograr de forma isotérmica.

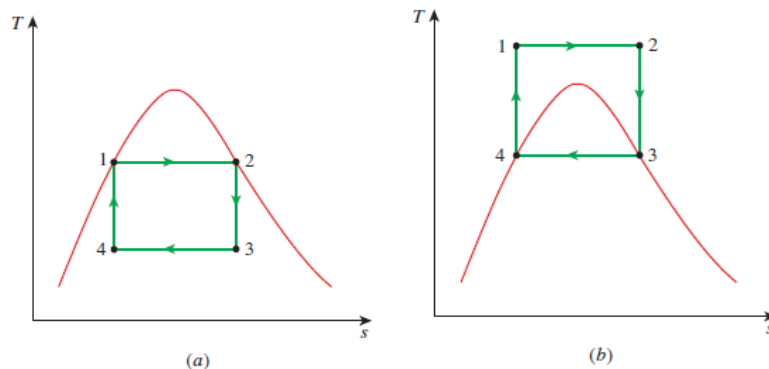


Figura 1. Diagrama T-s de dos ciclos de vapor de Carnot.

2. El proceso de expansión isentrópica (proceso 2-3) puede aproximarse de cerca mediante una turbina bien diseñada. Sin embargo, la calidad del vapor disminuye durante este proceso, como se muestra en el diagrama T-s de la Figura 1. Por lo tanto, la turbina debe manejar vapor de baja calidad, es decir, vapor con alto contenido de humedad. El impacto de las gotas de líquido en las palas de la turbina causa erosión y es una fuente importante de desgaste. Por tanto, no se puede tolerar vapor con cualidades inferiores al 90 por ciento en el funcionamiento de las centrales eléctricas. Este problema podría eliminarse utilizando un fluido de trabajo con una línea de vapor saturada muy empinada.

3. El proceso de compresión isentrópica (proceso 4-1) implica la compresión de una mezcla de líquido-vapor a un líquido saturado. Hay dos dificultades asociadas con este proceso. Primero, no es fácil controlar el proceso de condensación con tanta precisión como para terminar con la calidad deseada en el estado 4. Segundo, no es práctico diseñar un compresor que maneje dos fases. Algunos de estos problemas podrían eliminarse ejecutando el ciclo de Carnot de una manera diferente, como se muestra en la Figura 1. Este ciclo, sin embargo, presenta otros problemas como la compresión isentrópica a presiones extremadamente altas y la transferencia de calor isotérmica a presiones variables. Por lo tanto, llegamos a la conclusión de que el ciclo de Carnot no se puede aproximar en dispositivos reales y no es un modelo realista para los ciclos de potencia de vapor.

Ciclo Rankine

Muchas de las impracticabilidades asociadas con el ciclo de Carnot pueden eliminarse sobrecalentando el vapor en la caldera y condensándolo completamente en el condensador, como se muestra esquemáticamente en un diagrama Ts en la Figura 2. El ciclo resultante es el ciclo Rankine, que es el ciclo ideal para plantas de energía de vapor. El ciclo ideal de Rankine no implica ninguna irreversibilidad interna y consta de los siguientes cuatro procesos:

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba.
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera.
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina.
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

El agua entra en la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se comprime isentrópicamente a la presión de funcionamiento de la caldera. La temperatura del agua aumenta algo durante este proceso de compresión isentrópica debido a una ligera disminución en el volumen específico de agua. La distancia vertical entre los estados 1 y 2 en el diagrama T-s está muy exagerada para mayor claridad (Si el agua fuera realmente incompresible, ¿habría algún cambio de temperatura durante este proceso?). El agua entra a la caldera como un líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera es básicamente un intercambiador de calor grande donde el calor procedente de gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes se transfiere al agua esencialmente a presión constante.

La caldera, junto con la sección donde se sobrecalienta el vapor (el supercalentador), a menudo se denomina generador de vapor. El vapor sobrecalentado en el estado 3 ingresa a la turbina, donde se expande isentrópicamente y produce trabajo al girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor caen durante este proceso a los valores en el estado 4, donde el vapor ingresa al condensador. En este estado, el vapor suele ser una mezcla de líquido-vapor saturado de alta calidad. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, que es básicamente un gran intercambiador de calor, rechazando el calor a un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmósfera.

El vapor sale del condensador como líquido saturado y entra en la bomba, completando el ciclo. En áreas donde el agua es preciosa, las plantas de energía se enfrían con aire en lugar de agua. Este método de enfriamiento, que también se utiliza en los motores de los automóviles, se denomina enfriamiento en seco. Varias plantas de energía en el mundo, incluidas algunas en los Estados Unidos, usan

enfriamiento seco para conservar agua. Recordando que el área bajo la curva de proceso en un diagrama Ts representa la transferencia de calor para procesos internamente reversibles, vemos que el área bajo la curva de proceso 2-3 representa el calor transferido al agua en la caldera y el área bajo la curva de proceso 4-1 representa el calor rechazado en el condensador. La diferencia entre estos dos (el área encerrada por la curva del ciclo) es el trabajo neto producido durante el ciclo.

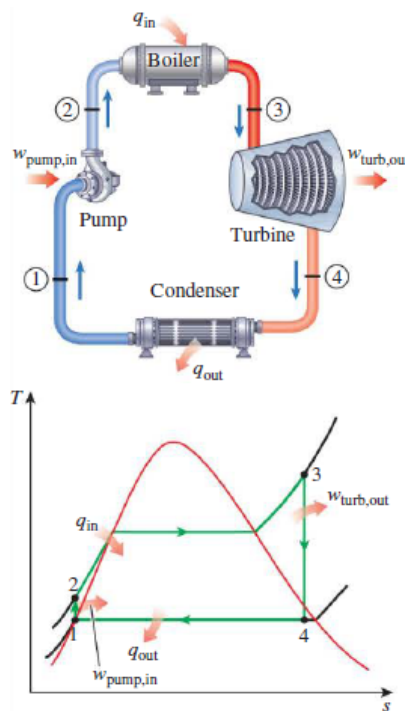


Figura 2. Diagrama T-s de dos ciclos de vapor de Carnot.

Referencia:

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica* (M. Á. T. Castellanos (ed.); Sexta). McGraw-Hill.