

不可逆太阳能热泵系统集热器的最佳工作温度

林国星 严子浚

(厦门大学物理系, 厦门 361005)

文 摘: 基于有限时间热力学理论和集热器的线性热损模型, 研究了热阻及工质内部不可逆性对太阳能热泵系统优化性能的影响, 导出了系统的总性能系数及集热器的最佳工作温度。所得结论可为实际太阳能热泵系统的优化设计提供新的理论依据。

关键词: 太阳能热泵, 不可逆性, 集热器, 最佳工作温度

0 引 言

太阳能热泵是一种有效的节能装置。它是利用太阳能集热器作为驱动热源的吸收式热泵或化学热泵等一类三热源热泵。近年来, 一些学者曾应用有限时间热力学理论探讨传热不可逆性对其性能的影响, 确定集热器的最佳工作温度^[1-7]。实际太阳能热泵除了传热不可逆性外, 还存在其它不可逆因素。因此, 有必要进一步研究多种不可逆因素影响下太阳能热泵系统的优化性能。本文将应用有限时间热力学理论研究热阻及工质内部由于摩擦、涡流等所引起的不可逆性对太阳能热泵系统优化性能的影响, 并在集热器的线性热损模型下导出系统的总性能系数和集热器的最佳工作温度。所得结论可为实际太阳能热泵系统的优化设计提供一些新的理论依据。

1 不可逆太阳能热泵系统

不可逆太阳能热泵系统是由太阳能集热器和以集热器为高温热源的不可逆三热源热泵组成的。设集热器的工作温度为 T_h , 环境和泵热空间的温度分别为 T_c 和 T_p ; 并考虑热阻的影响, 传热在有限温差下进行。于是, 工质在三个等温过程中的温度与其交换热量的热源温度 T_h 、 T_p 、 T_c 不同, 分别为 T_1 、 T_2 和 T_3 。再考虑工质内部由于摩擦、涡流等不可逆因素的影响, 使得工质内部所进行的循环为不可逆三热源热泵循环。

由于循环内部的熵产表示循环内部的不可逆性, 故可引进不可逆程度

$$I = \Delta S_{in} / \Delta S_{\lambda} \quad (1)$$

来描述工质内部的不可逆性, 其中 ΔS_{λ} 和 ΔS_{in} 分别表示每循环流入和流出工质的熵流量。当工质在 T_3 等温过程中放出热量时, $\Delta S_{\lambda} = \Delta S_h$, $\Delta S_{in} = \Delta S_p + \Delta S_c$, 其中 ΔS_h 为 T_1 等温过程中流入工质的熵流量, ΔS_p 和 ΔS_c 分别为工质在 T_2 和 T_3 等温过程中流出的熵流量; 当工质在

* 本文 1995-11-20 收到

T_3 等温过程中吸入热量时, $\Delta S_\lambda = \Delta S_h + \Delta S_o$, $\Delta S_{出} = \Delta S_p$, 其中 ΔS_h 和 ΔS_o 分别为 T_1 和 T_3 等温过程中流入工质的熵流量, ΔS_p 为工质在 T_2 等温过程中流出的熵流量。当工质内部存在不可逆性时, 据热力学第二定律有 $\Delta S_{出} > \Delta S_\lambda$, 因而这时 $I > 1$; 而当工质内部的不可逆性可忽略时, 即为内可逆循环时, $\Delta S_{出} = \Delta S_\lambda$, $I = 1$ 。由此可见, 内可逆循环可视为不可逆循环的一个特例, 而不可逆循环模型更为普遍和有用。

组成不可逆太阳能热泵系统的太阳能集热器, 其效率

$$\eta_s = q_h / (I_s A_c) \quad (2)$$

与集热器的热损模型有关, 其中 q_h 为集热器输出的有用能流, 即供给热泵的供热率, A_c 为集集热器的开口面积, 而 I_s 为太阳能入射流。当集热器的工作温度 T_h 为中、低温的情况时, 对流和传导损失是主要的, 辐射损失可忽略, 这时集热器效率 η_s 可表示为^[2]

$$\eta_s = U (T_s - T_h) / I_s \quad (3)$$

式中 U 为集热器的热损失系数, 而 T_s 为集热器的滞止温度, 即集热器提供的热流趋于零时的温度。

2 系统的总性能系数

不可逆太阳能热泵系统的总性能系数 ψ 为太阳能集热器的效率 η_s 与不可逆三热源热泵的性能系数 ψ_t 的乘积, 即

$$\psi = \eta_s \psi_t \quad (4)$$

由此可见, 有了式 (2) 和 (3), 只要再求出 ψ_t 的表达式, 即可求得系统的总性能系数 ψ 。

而根据有限时间热力学理论, 可求得在给定供热率 q_h 下, 工作于温度分别为 T_h 、 T_p 和 T_o 三个热源间, 存在传热及工质内部不可逆性的三热源热泵的最佳性能系数为

$$\psi_t = \begin{cases} \left(1 - \frac{IT_o}{T_h - q_h D}\right) \frac{T_p}{T_p - T_o} & (q_h D \geq T_h - IT_p) \end{cases} \quad (5a)$$

$$\psi_t = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[x + \sqrt{x^2 + \frac{4IT_p}{q_h D} \left(1 - \frac{T_o}{T_h}\right)} \right] & (q_h D \leq T_h - IT_p) \end{cases} \quad (5b)$$

其中, $x = 1 - T_o/T_h - (IT_p - T_o) / (q_h D)$, $D = (1 + \sqrt{I})^2 / (Ak)$, 而 A 和 k 分别为三热源热泵的总传热面积及工质与热源间的传热系数。

应用式 (2) — (5), 可求得系统的总性能系数:

$$\psi = \begin{cases} \frac{U}{I_s} (T_s - T_h) \left[1 - \frac{IT_o}{T_h - B (T_s - T_h)}\right] \frac{T_p}{T_p - T_o} & (B \geq \frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h}) \end{cases} \quad (6a)$$

$$\psi = \begin{cases} \frac{U}{2I_s} (T_s - T_h) \left[x + \sqrt{x^2 + \frac{4IT_p}{B} \left(1 - \frac{T_o}{T_h}\right)} \right] & (B \leq \frac{T_h - IT_p}{T_s + T_h}) \end{cases} \quad (6b)$$

式中 $B = UA_c D$ 。

3 集热器的最佳工作温度

由于 η_s 随集热器工作温度 T_h 的升高而减小, 而 ψ_t 又随 T_h 的升高而增大, 因而存在一个最佳的工作温度 $T_{h,opt}$, 使系统的总性能系数 ψ 达最大值。如何确定太阳能集热器的最佳工作温度 $T_{h,opt}$ 是研究太阳能热泵的一个重要内容。

应用式 (6a) 和极值条件:

$$d\psi/dT_h=0 \quad (7)$$

可求得太阳能集热器在 $B > (T_h - IT_p) / (T_s - T_h)$ 时的最佳工作温度:

$$T_{h,opt} = (\sqrt{IT_s T_o} + BT_s) / (1+B) \quad (8)$$

应用式 (6b) 和式 (7), 可求得太阳能集热器在 $B < (T_h - IT_p) / (T_s - T_h)$ 时的最佳工作温度:

$$T_{h,opt} = \sqrt{T_o T_s} \quad (9)$$

可见, 当 $B > (T_h - IT_p) / (T_s - T_h)$ 时, 集热器的最佳工作温度 $T_{h,opt}$ 不仅与环境温度 T_o 、总传热面积 A 及集热器自身的参数有关, 而且还与工质与热源间的传热系数 k 及工质内部的不可逆程度 I 有关, 且 $T_{h,opt}$ 随 I 的增大和 k 的减小 (即热阻增大) 而增大。但 I 的最大界限为 T_s/T_o , 因为 $T_{h,opt}$ 不能超过 T_s 。而当 $B < (T_h - IT_p) / (T_s - T_h)$ 时, $T_{h,opt}$ 则与 k 和 I 无关, 其物理意义是很明确的。因为当 $B > (T_h - IT_p) / (T_s - T_h)$ 时, $T_h - IT_p$ 较小, I 大时则更小, 甚至可为负值, 从而热泵的性能系数 ϕ_i 较小, 这时提高集热器的工作温度 T_h 有利于克服 I 的损失而提高系统的总性能系数。同样, 该情况下 k 小时 ϕ_i 也小, 提高 T_h 也较有利。而当 $B < (T_h - IT_p) / (T_s - T_h)$ 时, k 相对较大, 且 $T_h - IT_p$ 必为正值且也较大, 因而热泵的性能系数 ϕ_i 较大, 降低 T_h 有利于减小集热器的热损, 提高集热器的效率 η_c , 从而集热器的最佳工作温度为低限值, 与经典热力学的结果一样, 不受 I 和 k 的影响。但需注意的是, 只要 k 有限或 $I > 1$, 即热泵中存在热阻或工质内部存在不可逆性, 系统的总性能系数就比经典热力学的结果小, 其它性能也将相应地变差, 两者是有根本区别的。

4 讨 论

(1) 由太阳能集热器的最佳工作温度可求得不可逆太阳能热泵系统的其它优化性能。例如, 将式 (8) 和 (9) 分别代入式 (6a) 和 (6b), 可得系统的最大总性能系数:

$$\phi_{max} = \begin{cases} \frac{U (\sqrt{T_s} - \sqrt{IT_o})^2}{I_s (1+B)} \frac{T_p}{T_p - T_o} & (B \geq \frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h}) \end{cases} \quad (10a)$$

$$\left\{ \frac{U}{2I} \eta_{os} T_s \left\{ \eta_{os} - \frac{IT_p - T_o}{B\eta_{os} T_s} + \sqrt{[\eta_{os} - (IT_p - T_o) / (B\eta_{os} T_s)]^2 + \frac{4IT_p}{BT_s}} \right\} \right. \quad (B \leq \frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h}) \quad (10b)$$

其中 $\eta_{os} = 1 - \sqrt{T_o/T_s}$ 。再如, 由热泵的泵热率

$$q_p = I_s A_c \phi \quad (11)$$

可知, 在给定的 $I_s A_c$ 下, 总性能系数最大时泵热率也最大。因此, 只要将式 (10) 代入式 (11), 便可得不可逆太阳能热泵系统的最大泵热率:

$$q_{p,max} = \begin{cases} \frac{A_c U (\sqrt{T_s} - \sqrt{IT_o})^2}{1+B} \frac{T_p}{T_p - T_o} & (B \geq \frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h}) \end{cases} \quad (12a)$$

$$\left\{ \frac{A_c U}{2} \eta_{os} T_s \left\{ \eta_{os} - \frac{IT_p - T_o}{B\eta_{os} T_s} + \sqrt{[\eta_{os} - \frac{IT_p - T_o}{B\eta_{os} T_s}]^2 + \frac{4IT_p}{BT_s}} \right\} \right. \quad (B \leq \frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h}) \quad (12b)$$

(2) 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $D \rightarrow 0$, $B \rightarrow 0$ 。这时式 (10) 和 (12) 分别为

$$\psi_{\max} = \begin{cases} \frac{U}{I_s} (\sqrt{T_s} - \sqrt{IT_o})^2 \frac{T_p}{T_p - T_o} & (\frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h} \leq 0) \\ \frac{U}{I_s} \eta_{os}^2 T_s \frac{IT_p}{IT_p - T_o} & (\frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h} \geq 0) \end{cases} \quad (13a)$$

$$\psi_{\max} = \begin{cases} \frac{U}{I_s} \eta_{os}^2 T_s \frac{IT_p}{IT_p - T_o} & (\frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h} \geq 0) \end{cases} \quad (13b)$$

$$q_{p,\max} = \begin{cases} A_c U (\sqrt{T_s} - \sqrt{IT_o})^2 \frac{T_p}{T_p - T_o} & (\frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h} \leq 0) \\ A_c U \eta_{os}^2 T_s \frac{IT_p}{IT_p - T_o} & (\frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h} \geq 0) \end{cases} \quad (14a)$$

$$q_{p,\max} = \begin{cases} A_c U \eta_{os}^2 T_s \frac{IT_p}{IT_p - T_o} & (\frac{T_h - IT_p}{T_s - T_h} \geq 0) \end{cases} \quad (14b)$$

由于 I 一般大于 1, 因而以上结果与经典热力学的结果有所不同, 它们反映了工质内部不可逆性对太阳能热泵系统优化性能的根本性影响。由式 (13) 和 (14) 可知, 系统的最大总性能系数和最大泵热率随工质内部不可逆性的增大而减小。而当 $I=1$ 时, 式 (13) 和 (14) 与经典热力学的相应结果一致。实际太阳能热泵的 k 是有限的, 且 I 总是大于 1, 因而由式 (10) 和 (12) 所确定的 ψ_{\max} 和 $q_{p,\max}$ 比经典热力学理论的结果对实际更有指导意义和参考价值。

(3) 由于 $T_p \rightarrow \infty$ 的热源相当于一个功源, 因而 $B > (T_h - IT_p) / (T_s - T_h)$ 的不可逆太阳能热泵相当于一个不可逆太阳能热机, ψ 和 q_p 就分别变为太阳能热机的总效率 η 和输出功率 P 。并由式 (6a)、(10a) 和 (12a) 可得, 不可逆太阳能热机的总效率 η 、最大总效率 η_{\max} 和最大输出功率 P_{\max} 分别为

$$\eta = \frac{U}{I_s} (T_s - T_h) \left[1 - \frac{IT_o}{T_h - B(T_s - T_h)} \right] \quad (15)$$

$$\eta_{\max} = \frac{U (\sqrt{T_s} - \sqrt{IT_o})^2}{I_s (1+B)} \quad (16)$$

$$P_{\max} = \frac{A_c U (\sqrt{T_s} - \sqrt{IT_o})^2}{1+B} \quad (17)$$

这清楚地表明了本文的结果也适用于不可逆太阳能热机系统。

(4) 当 $I=1$ 时, 即工质内部的不可逆性可忽略时, 式 (6) 转化为内可逆太阳能热泵系统的总性能系数⁽⁷⁾:

$$\psi = \begin{cases} \frac{U}{I_s} (T_s - T_h) \left[1 - \frac{T_o}{T_h - B(T_s - T_h)} \right] \frac{T_p}{T_p - T_o} & (B \geq \frac{T_h - T_p}{T_s - T_h}) \end{cases} \quad (18a)$$

$$\psi = \begin{cases} \frac{U}{2I_s} (T_s - T_h) \left[x + \sqrt{x^2 + \frac{4T_p (1 - T_o/T_h)}{B(T_s - T_h)}} \right] & (B \leq \frac{T_h - T_p}{T_s - T_h}) \end{cases} \quad (18b)$$

相应地, 式 (15) - (17) 分别转化为内可逆太阳能热机系统的总性能系数、最大总性能系数和最大输出功率⁽⁴⁻⁶⁾。

若这时 $k \rightarrow \infty$, 即, $B \rightarrow 0$, 则式 (18) 又转化为

$$\psi = \frac{U}{I_s} (T_s - T_h) \left[1 - T_o/T_h \right] \frac{T_p}{T_p - T_o} \quad (19)$$

式 (19) 即为可逆太阳能热泵系统的总性能系数, 由它可讨论可逆太阳能热泵和热机系统的优化性能。

总之, 本文所提出的不可逆太阳能热泵系统模型是一种很普遍的太阳能热力循环模型, 既

可用它讨论不可逆太阳能热泵和热机系统的优化性能，又可用它讨论可逆、内可逆太阳能热泵和热机系统的优化性能，甚至还可用它讨论太阳能制冷系统的优化性能。所以它是一种很有用的模型，由它所导出的结果具有普遍的指导意义，可供太阳能热力循环系统的优化设计和性能改善等参考。

参 考 文 献

- 1 Kamiuto K. Determination of the optimum pond temperature for maximizing power production of a connecting solar pond thermal-energy conversion system. *Appl. Energy*, 1987, 28 : 47
- 2 Gordon J M. On optimized solar-driven heat engines. *Sol. Energy*, 1988, 40 (5) : 457
- 3 Lee W Y, et al. Maximum power-conversion efficiency for the utilization of solar energy. *Int. J. Energy Res.* 1991, 15 : 257
- 4 严子浚. 对“太阳能动力装置集热器最佳工作温度”一文的讨论. *太阳能学报*, 1992, 13 (2) : 207
- 5 Chen J. Optimization of a solar-driven heat engine. *J. Appl. Phys.*, 1992, 72 : 3778
- 6 严子浚, 陈金灿. 太阳能热机的最大效率和最大输出功率. *厦门大学学报 (自然科学报)*, 1993, 32 (增刊 2): 209
- 7 Yan Z, Chen J. The maximum overall coefficient of performance of a solar-driven heat pump system. *J. Appl. Phys.*, 1994, 76 (12): 8129

THE OPTIMAL OPERATING TEMPERATURE OF THE SOLAR COLLECTOR OF AN IRREVERSIBLE SOLAR-DRIVEN HEAT PUMP SYSTEM

Lin Guoxing Yan Zijun

(*Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005*)

Abstract: The effect of the irreversibility of thermal resistance and the irreversibilities within the working substance on the optimal performance of a solar-driven heat pump system is studied, based on the finite-time thermodynamic theory and the model of linear heat-loss of the solar collector. The total coefficient of performance and the optimal operating temperature of the solar collector of the system are derived. The results obtained here can provide some new theoretical bases for the optimal design of a practical solar heat pump system.

Key words: solar-driven heat pump, irreversibility, collector, optimal operating temperature