

不可逆太阳能热机系统集热器的最佳工作温度

陈金灿

(厦门大学)

【摘要】 借助于不可逆卡诺热机模型和太阳能集热器的线性热损失模型获得太阳能热机系统的总效率。由此导出太阳能热机系统在最大效率时集热器的最佳工作温度。并对太阳能热机系统的优化性能作了一些讨论。所得结果对实际系统的优化设计更有指导意义。

关键词 太阳能热机 集热器 最佳工作温度 现代热力学 优化设计

分类号 TK513

1 引言

难源短缺和污染问题的日益突出,加速了太阳能热机的开发和利用,同时也促进了相应理论研究的发展。近年来,一些学者应用内可逆卡诺热机模型^[1-3]和太阳能集热器的线性热损失模型^[4-6],探讨了传热不可逆性对太阳能热机系统性能的影响[7-8]。所得结果比应用可逆卡诺热机模型时所得的结果^[4,5]更接近于实际。

本文借助于不可逆卡诺热机模型,进一步探讨传热及其它不可逆性对太阳能热机系统性能的影响。并作一些有意义的讨论。

2 太阳能热机系统的总效率

太阳能热机系统通常是,由太阳能集热

器和热机所组成,其效率 η 等于集热器的效率 η_c 和热机的效率 η_h 之积,即

$$\eta = \eta_c \eta_h \quad (1)$$

由于集热器的热损失随着集热器的工作温度 T_h 升高而增大,因而 T_h 越高,集热器的效率 η_c 就越小。另一方面,热机的效率随着高温热源的温度升高而增大,因而 T_h 越高,热机的效率 η_h 就越大。这表明当 T_h 过高时, η_c 很小使系统的总效率变成很小,而当 T_h 过低时, η_h 很小也使系统的总效率变成很小。因此,集热器必然存在一个最佳工作温度使得系统的总效率为最大,

确定集热器的最佳工作温度,首先必须给出 η_c 和 η_h 的表示式。当太阳能集热器的工作温度 T_h 较低时,对流与传导损失是主要的,辐射损失可忽略,热损失可表示为

$$q_l = K_1 A_{\text{oss}} (T_h - T_0) \quad (2)$$

收稿日期 1993-03-08

本文联系人 陈金灿 男 39 讲师 361005 厦门大学 800 号信箱

式中 T_0 为环境温度, K_1 为对流与传导损失系数, A_{abs} 为集热器的吸收面积。根据式(2), 若设太阳能集热器的开口面积为 A_s , 太阳能入射流为 I_c , 光学效率为 η_0 , 则集热器输给热机的有用能流 q_u 可表示为

$$q_u = \eta_0 I_c A_s - q_l = \eta_0 I_c A_s - K_1 A_{abs} (T_h - T_0) \quad (3)$$

再由式(3), 可得集热器的效率^[4,6]

$$\eta_h = q_u / (I_c A_s) = \eta_0 (1 + M - MT_h / T_0) \quad (4)$$

式中 $M = K_1 T_0 A_{abs} / (\eta_0 I_c A_s)$ 。另一方面, 根据有限时间热力学理论, 在给定的供热率 q_u 下, 工作于温度 T_h 和 T_0 之间的不可逆卡诺热机^[9,10] 的最佳效率 η_h 为

$$\eta_h = 1 - IT_0 / [T_h - \tau(1 + \sqrt{I\alpha/\beta} q_u / \alpha)] \quad (5)$$

式中 α 和 β 分别为热机的工质与高温和低温热源的热传导系数, τ 为热机的循环周期与其中与其中两个等温过程的总时间之比值, I 表示除了传热之外热机中的其它不可逆性^[9,10]。当只有传热的不可逆性, 而没有其它不可逆效应时, $I = 1$, 不可逆卡诺热机就转化为内可逆卡诺热机。在一般情况下, $I > 1$, 所以应用不可逆卡诺热机模型时所得到的结论不仅比应用可逆卡诺热机模型时所得到的结论^[4,5] 更为有用, 而且也比应用内可逆卡诺热机模型时所得到的结论^[7,8] 对实际更有指导意义。

应用式(4)和(5), 可得太阳能热机系统的总效率为

$$\eta = \eta_0 (1 + M - MT_h / T_0) \times [1 - \frac{IT_0}{T_h - B(1 + M - MT_h / T_0)}] \quad (6)$$

式中 $B = \eta_0 I_c A_s \tau (1 + \sqrt{I\alpha/\beta})^2 / \alpha$ 。

3 集热器的最佳工作温度

应用式(6)和极值条件

$$\partial \eta / \partial T_h = 0 \quad (7)$$

可证明, 当太阳能热机系统的总效率为最大时集热器的最佳工作温度 $T_{h,opt}$ 为

$$T_{h,opt} = T_0 [C(1 + 1/M) + \sqrt{I(1 + 1/M)}] / (1 + C) \quad (8)$$

式中 $C = BM/T_0 = K_1 A_{abs} \tau (1 + \sqrt{I\alpha/\beta})^2 / \alpha$ 。

将式(8)代入式(6), 可得太阳能热机系统的最大效率为

$$\eta_{max} = \eta_0 (\sqrt{1 + M} - \sqrt{IM})^2 / (1 + C) \quad (9)$$

再由太阳能热机系统的输出功率

$$p = q_u \eta_h = I_c A_s \eta_h \eta_h = I_c A_s \eta \quad (10)$$

可知, 在给定和 I_c 和 A_s 下, 太阳能热机系统的效率最大时, 其输出功率也最大, 即

$$p_{max} = I_c A_s \eta_{max} = \eta_0 I_c A_s (\sqrt{1 + M} - \sqrt{IM})^2 / (1 + C) \quad (11)$$

4 讨论

1. 当 $I = 1$, 即除传热外热机中的其它不可逆性影响可忽略时, 式(8), (9)和(11)可分别表示为

$$T_{h,opt} = T_0 [C_1(1 + 1/M) + \sqrt{1 + 1/M}] / (1 + C_1) \quad (12)$$

$$\eta_{max} = \eta_0 (\sqrt{1 + M} - \sqrt{M})^2 / (1 + C_2) \quad (13)$$

$$p_{max} = \eta_0 I_c A_s (\sqrt{1 + M} - \sqrt{M}) / (1 + C_1) \quad (14)$$

式中 $C_1 = K_1 A_{abs} \tau (1 + \sqrt{\alpha/\beta})^2 / \alpha$, 式(12) - (14)正是应用内可逆卡诺热机模型时所得到的结论。

当仅考虑传热不可逆性的影响时, 由于热机循环中的绝对过程不受热阻的影响, 常设它进行得很快, 与等温过程进行的时间相

比可忽略^[11-12],则有 $\tau=1$,故式(12)可写成

$$T_{h,opt} = T_0 [K_1 A_{abs} (1 + M_1) + K \times \sqrt{1 + M_1}] / (K_1 A_{abs} + K) \quad (15)$$

式中 $M_1 = 1/M$, $K = \alpha\beta / (\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2$. 式(15)正是文献[7]中的一个重要结论。

2. 当 $K \rightarrow \infty$, 即热机中的不可逆传热影响可忽略, 而其它不可逆性仍然存在时, 式(8)、(9)和(11)可分别表示为

$$T_{h,opt} = T_0 \sqrt{I(1 + (1/M))} \quad (16)$$

$$\eta_{max} = \eta_0 (\sqrt{1 + M} - \sqrt{IM})/2 \quad (17)$$

$$P_{max} = \eta_0 I_c A_a (\sqrt{1 + M} - \sqrt{IM})^2 \quad (18)$$

3. 当 $I=1$ 且 $K \rightarrow \infty$ 热机中的各种不可逆性影响均可忽略时, 式(8)、(9)和(11)可分别表示为^[4]

$$T_{h,opt} = T_0 \sqrt{1 + 1/M} \quad (19)$$

$$\eta_{max} = \eta_0 (\sqrt{1 + M} - \sqrt{M})^2 \quad (20)$$

$$P_{max} = \eta_0 I_c A_a (\sqrt{1 + M} - \sqrt{M})^2 \quad (21)$$

这正是应用可逆卡诺热机模型时所得到的结论。

4. 在实际太阳能热机系统中, 存在各种不可逆性, $I > 1$ 且 K 是有限的。因此 $T_0 \sqrt{1 + 1/M}$ 是太阳能热机系统集热器最佳工作温度的低限, $\eta_0 (\sqrt{1 + M} - \sqrt{M})^2$ 和 $\eta_0 I_c A_a (\sqrt{1 + M} - \sqrt{M})^2$ 分别是太阳能热机系统的效率和输出功率的高限。在一般情况下, 太阳能热机系统集热器的工作温度应选择高于 $T_0 \sqrt{1 + 1/M}$, 其最佳值可根据实际系统所给定的有关参量由式(8)确定。这为太阳能热机系统集热器的优化设计提供了新的理论依据。

5. 当太阳能集热器的工作温度 T_h 较高时, 辐射损失是主要的, 则集热器的效率可表

示为

$$\eta_s = \eta_0 - K_2 A_{abs} (T_h^4 - T_0^4) / (I_c A_a) \quad (22)$$

式中 K_2 为辐射损失系数。对于这一种情况, 可用式(22)代替式(4)作类似的讨论, 不再赘述。

参 考 文 献

- 1 Curzon F L and Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am. J. Phys.* 1975, 43(1), 22-24
- 2 Rubin M H. Optimal configuration of a Class of irreversible heat engines I. *Phys. Rev. A*, 1979, 19(3), 1272-1276
- 3 严子浚. 卡诺热机的最佳效率与功率间的关系. *工程热物理学报*, 1985, 6(1): 1-5
- 4 Kandpal T C, et al. Optimum power from a solar thermal power plant using solar concentrators. *Energy Convers. Mgmt.*, 1983, 23(2), 103-106
- 5 Gordon J M. On optimized solar-driven heat engines. *Sol Energy*, 1988, 40(5), 457-461
- 6 陈金灿, 严子浚. 线性唯象律下太阳能制冷系统集热器工作温度的优化分析. *真空与低温*, 1993, 12(1), 43-45
- 7 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), 207-210
- 8 严子浚. 关于太阳能热机的有限时间热力学优化准则. *热能动力工程*, 1992, 7(5), 276-278
- 9 严子浚. 不可逆卡诺热机的最佳效率与供热率间的关系. *厦门大学学报*, 1991, 30(1), 25-28
- 10 严子浚. $\eta^2 P$ 最大时不可逆卡诺热机的 η 和 P . *热能动力工程*, 1989, 4(6): 1-6
- 11 Salamon P and Nitzan A. Finite time optimizations of a Newton's law Carnot cycle. *J. Chem. Phys.*, 1981, 74(6), 3546-3560
- 12 Chen L and Yan Z. The effect of heat-transfer law on performance of a two-heat-source endoreversible cycle. *J. Chem. Phys.*, 1989, 90(7), 3740-3743

- (37) **An Analysis of the Oscillation Failure Mechanism of a Small-Sized Gas Turbine Controlled by a PG-PL Speed Governor** Yu Daren, Xu Jiyu (*Harbin Institute of Technology*)
This paper deals with the mathematical model of a PG-PL speed governor under a failure condition with the characteristics of various oscillation failures being analysed by way of simulation. The abovementioned model can serve as a helpful tool in conducting failure diagnostics. **Key words:** *small-sized gas turbine, PG-PL speed governor, oscillation failure*
- (42) **Self-regulating Conditions for the Control System of a Reheat Extraction Steam Turbine** Xu Jiyu, Yu Daren (*Harbin Polytechnical University*) Zhang Hongguang, Wu Guoxian (*Harbin Turbine Works*)
The authors have worked out the static and dynamic self-regulating conditions for the control system of a reheat extraction steam turbine. It has been shown that the dynamic self-regulating conditions of a reheat extraction steam turbine are different from those of a condensing extraction steam turbine. Such a conclusion may be advantageously used in guiding the design of the turbine control system. **Key words:** *reheat extraction steam turbine, control system, self-regulation*
- (50) **The Application of a Single Chip Microcomputer in a Metro Blower Electric Control System** Yang Chengyi (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)
A metro blower blade regulation and control system with a 8031 single chip microcomputer serving as its core has been created, which can change the regulation program of rotor and stator blades, depending on the requirements of various ventilation environments. In addition, it can also be connected to a computation center control station. **key words:** *single chip microcomputer, metro blower, blade regulation*
- (54) **A Study on the Strength of Spherical Gears** Chang Shan, et al (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)
This paper presents the formulas for calculating the contact stress and bending stress of spherical gear transmission and the results of a study on gear cam columns by use of a finite element method. A comprehensive analysis of the bending stress distribution variation relationship of spherical gear cam columns has been performed along with their experimental stress analysis. The test results are in full agreement with those of a theoretical analysis. **Key words:** *spherical gear transmission, finite element method, stress analysis*
- (59) **The Optimum Operating Temperature of Solar Collectors for an Irreversible Solar Energy Heat Engine System** Chen Jincan (*Xiamen University*)
With the help of the model of an irreversible Carnot heat engine and the linear heat loss model of solar collectors the overall efficiency of a solar energy heat engine system has been determined.