

太阳能热机的有限时间热力学优化准则

陈林根 孙丰瑞 陈文振

(海军工程学院)

〔摘要〕 本文导出两种太阳能收集器损失关系情况下太阳能驱动热机参数选择的有限时间热力学优化准则, 所得结果包含了前人工作的一些结论。

关键词 现代热力学 太阳能热机 最优设计 设计准则

1 引言

太阳能热机系统总效率 η 为太阳能收集器效率 η_c 和与其热力耦合的热机循环效率 η_p 之积。经典热力学追求高效率, 用卡诺效率 $\eta_c = 1 - T_L/T_H$ 作为 η_p 导出了最佳工作温度^[1-5], 但此时输出功率为零。有限时间热力学^[6,7]强调效率、功率间的协调, 用CA效率^[8,9] $\eta_{CA} = 1 - (T_L/T_H)^{0.5}$ 作为 η_p 导出了最大功率时的最佳工作温度^[10,11]。本文沿用两源热机的全息谱^[12]和有限时间热力学准则^[13], 导出太阳能热机热力参数选择的优化准则, 所得结果包含了最大效率和最大功率两种特殊情况。

2 优化准则

定义特征参数 ν 、 θ ^[12]

$$(T_L/T_H)^\nu = T_{WL}/T_{WH}, \quad 0 \leq \nu \leq 1 \quad (1)$$

$$\theta = (T_{WH} - T_H^\nu T_L^{1-\nu}) / (T_H - T_H^\nu T_L^{1-\nu}), \quad 0 \leq \theta \leq 1 \quad (2)$$

则工作于 T_H 、 T_L 热源间的热机参数优化准则为^[13]

$$0.5 \leq \nu < 1, \quad \theta = \theta_s = \delta / (1 + \delta) \quad (3)$$

以上各式中, T_{WH} 、 T_{WL} 为热机循环中工质的吸、放热温度, $\delta = (\alpha/\beta)^{0.5}$, α 、 β 分别为工质与 T_H 、 T_L 热源间的传热系数。

太阳能收集器效率与其损失模型有关。当收集器温度 T_s 较低时, 其损失项以传导和对流损失为主, 收集器热损正比于 $(T_s - T_H)$, 其效率为

$$\eta_{s1} = (U/I)(T_s - T_H) \quad (4)$$

式中, U 为线性化的热损系数, I 为入射的太阳能辐射, 当 T_s 很高时, 收集器的热损以辐射损失为主, 有

$$\eta_{s4} = (\epsilon\sigma/I)(T_s^4 - T_H^4) \quad (5)$$

式中, ϵ 为收集器有效辐射率, σ 为Stefan-Boltzmann常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{k}^4)$ 。

显然, 随着 T_H 的增加, η_s 下降, 而 $\eta_p = 1 - T_{WL}/T_{WH} = 1 - (T_L/T_H)^\nu$ 增加, 故存在一 T_H 最佳值 $T_{H,s}$, 使太阳能热机总效率 $\eta = \eta_s \cdot \eta_p$ 最大。因此先求出两种太阳能收集器损失关系下的 $T_{H,s}$, 籍此可得出有限时间热力学优化准则。

2.1 收集器线性损失模型时的最佳 T_H

由式(1)、(4)可得此时的总效率为

$$\eta = (U/I)(T_S - T_H)(1 - (T_L/T_H)^\nu) \quad (6)$$

由 $d\eta/dT_H = 0$ 可得一定的 ν 时使总效率最大的最佳工作温度 T_{H_a} 应满足的方程为

$$T_{H_a}^{\nu+1} - (1-\nu)T_L^\nu T_{H_a} - \nu T_S T_L^\nu = 0 \quad (7)$$

式(7)具有普遍性。当 $\nu = 1$, 即追求高效率时, 由式(7)可有

$$T_{H_a} = \sqrt{T_S T_L} \quad (8)$$

式(8)即为经典热力学分析结果[1-5]。当 $\nu = 0.5$, 即追求最大功率时, 最佳效率时的最佳工作温度应满足的方程为

$$2T_{H_a}^{3/2} - \sqrt{T_L} T_{H_a} - T_S \sqrt{T_L} = 0 \quad (9)$$

$$2T_{H_a}^2 \sqrt{[T_{H_a} - (T_{H_a} - T_O)\varphi_1/\varphi_2][T_L - (T_L - T_O)\varphi_1/\varphi_2]} - T_{H_a}^2 T_L (1 - \varphi_1/\varphi_2) - T_{H_a} T_S T_L (1 - \varphi_1/\varphi_2) - 2T_S T_L T_O \varphi_1/\varphi_2 = 0 \quad (11)$$

当 $\varphi_1/\varphi_2 \rightarrow 1$ 时, 式(11)化为式(8); 当 $\varphi_1/\varphi_2 \rightarrow 0$ 时, 式(11)化为式(9)。因一般情况下 $0.5 < \nu_m < 1$, 故式(11)也是式(7)的一种特例。

2.2 收集器辐射损失模型时的最佳 T_H

由式(1)、(5)可有总效率为

$$\eta = (\epsilon\sigma/F)(T_S^4 - T_H^4)[1 - (T_L/T_H)^\nu] \quad (12)$$

当 $\varphi_1/\varphi_2 \rightarrow 1$ 和 $\varphi_1/\varphi_2 \rightarrow 0$ 时, 式(16)分别成为式(14)和(15)。一般情况下式(16)介于式(14)、(15)之间, 是式(13)的一种特例。

2.3 太阳能热机的参数优化准则

对给定 T_S 、 T_L 的太阳能热机系统, 其工作温度应介于最大效率和最大功率两种状态之间。因 $\nu = 1$ 时, 输出功率为零; $\nu = 0.5$ 时, 有最大功率; 当 $\nu > 0.5$ 时, 功率减小, 但效率增加; 当 $\nu < 0.5$ 时, 不但功率减小, 而且效率也小; 当 $T_H = T_{H_a}$, $\theta = \theta_a$ 时, 效率达到最佳值。因此从效率、功率协调的观点

式(9)即为[10, 11]的结果。

而按照有限时间炯经济分析[14-17]观点, 应有 $\nu_m \leq \nu < 1$ [14]

$$\nu_m = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \ln \left[\left(1 - \left(1 - \frac{T_O}{T_L} \right) \varphi_1/\varphi_2 \right) / \left(1 - \left(1 - \frac{T_O}{T_L} \right) \varphi_1/\varphi_2 \right) \right] / \ln(T_L/T_H) \right\} \quad (10)$$

式中, T_O 为工作环境温度, φ_1 、 φ_2 为热机的输入炯和输出功价格, φ_1/φ_2 也可看作热经济分析中的热经济效益率[18]。将 ν_m 代入式(7), 可有

由 $d\eta/dT_H = 0$ 可得一定 ν 下的 T_{H_a} 方程为

$$4T_{H_a}^{4+\nu} - (4-\nu)T_L^\nu T_{H_a}^4 - \nu T_S^4 T_L^\nu = 0 \quad (13)$$

当 $\nu = 1$ 和 $\nu = 0.5$ 时, 式(13)分别成为

$$4T_{H_a}^5 - 3T_L T_{H_a}^4 - T_S^4 T_L = 0 \quad (14)$$

$$8T_{H_a}^{9/2} - 7\sqrt{T_L} T_{H_a}^4 - T_S^4 \sqrt{T_L} = 0 \quad (15)$$

式(14)、(15)即为文献[1-5]和[10, 11]的结果。当 $\nu = \nu_m$ 时, 式(13)化为

$$8T_{H_a}^4 \sqrt{[T_{H_a} - (T_{H_a} - T_O)\varphi_1/\varphi_2][T_L - (T_L - T_O)\varphi_1/\varphi_2]} - 7T_{H_a}^4 T_L (1 - \varphi_1/\varphi_2) - 6T_{H_a}^4 T_L T_O \varphi_1/\varphi_2 - T_{H_a} T_S^4 T_L (1 - \varphi_1/\varphi_2) - 2T_S^4 T_L T_O \varphi_1/\varphi_2 = 0 \quad (16)$$

出发, 参数优化准则为

$$0.5 \leq \nu < 1, \theta = \theta_a, T_H = T_{H_a} \quad (17)$$

当 T_S 较小时, T_{H_a} 为式(7); 当 T_S 很高时, T_{H_a} 为式(13)。式(17)称为太阳能热机的有限时间热力学优化准则。而从效率、利润率(能源利用率、经济性指标)协调的观点出发, 应有

$$\nu_m \leq \nu < 1, \theta = \theta_a, T_H = T_{H_a} \quad (18)$$

式(18)称为太阳能热机的有限时间炯经济优化准则。当 $\varphi_1/\varphi_2 \rightarrow 0$ 时, 式(18)化为式(17)。

3 讨 论

1. 在给定的 T_s 、 T_L 下，可由本文的准则选择太阳能热机系统的工作参数，以确保效率、功率（或利润率）间的协调。对现有太阳能热机，可分析其 v 、 θ 和 T_H 对准则的偏离程度，找出原因，使各值尽可能趋于最佳值。与文献[19]类似可建立评估方法和程序评定、优化现有装置的性能。

2. 实际太阳能装置工作于最大效率和最大功率工况之间。因此本文的结果比只考虑效率的优化^[1-5]和只考虑功率的优化^[10,11]更具普遍性，且包含了两种极限工况的最优化结果。

3. 通过特征参数 v ，把效率、功率、利润率、热经济效益率等参数联系起来，可把经典可逆热力学分析、有限时间热力学分析和热经济分析组合起来，形成一个有力的分析工具，有利于热力系统的分析、优化。

4. 本文导出的两种太阳能损失模型下的太阳能热机系统优化准则，可望为实际系统的参数选择提供理论依据，具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Castans M. Bases fisicas del aprovechamiento de la energia solar. Rev. Geofis, 1976, 35(1), 227—229
- 2 Jeter S M. Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation. Sol. Energy, 1981, 26(3), 231
- 3 Vos A D. Efficiency of some heat engines at maximum power conditions. Am. J. Phys., 1985, 53(6), 570—573.
- 4 Kandpal T C, Singhal A K, Mathur S S. Optimum power from a solar thermal power plant using solar concentrators. Energy Con-

- vers. Mgmt., 1983, 23(2), 103—106
- 5 Bhowmik N C, Mathur S S, Kandpal T C. Operating temperatures of linear solar concentrators for optimum power output. Energy Convers. Mgmt., 1985, 25(2), 175—177
- 6 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 热机有限时间热力学理论和应用. 热能动力工程, 1989, 4(2), 7—14
- 7 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 能量系统有限时间热力学: 现状和发展. 力学进展, 待发表.
- 8 Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. Am. J. Phys., 1975, 43(1), 22—24
- 9 Gordon J M. Maximum power point characteristics of heat engines as a general thermodynamics problem. Am. J. Phys., 1989, 57(12), 1136—1142
- 10 Gordon J M. On optimized solar-driven heat engines. Sol. Energy, 1988, 40(5), 457—461
- 11 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 太阳能动力装置集热器最佳工作温度. 太阳能学报, 1991, 12(2), 191—195
- 12 孙丰瑞, 赖锡棉. 热源间热机的全息热效率、功率谱. 热能动力工程, 1988, 3(3), 1—9
- 13 陈文振, 孙丰瑞, 陈林根. 热源间热机工作参数选择的有限时间热力学准则. 科学通报, 1990, 35(3), 237—240
- 14 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 两源热机有限时间烟经济性能界限和优化准则. 科学通报, 1991, 36(3), 165—167
- 15 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 两源间制冷机有限时间烟经济性能界限和优化准则. 科学通报, 1991, 36(2), 130—131
- 16 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 卡诺制冷机的最佳制冷系数、利润率关系. 真空与低温, 1990(3), 20—24
- 17 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 传热规律对卡诺制冷机有限时间烟经济最优性能的影响. 低温工程, 1990(3), 39—43
- 18 朱明善, 王补宣, 肖云汉. 热经济学的现状与发展. 化工进展, 1989(5), 1—8
- 19 孙丰瑞, 陈林根, 陈文振. 热源间定常态能量转换热机有限时间热力学分析和评估. 热能动力工程, 1989, 4(2), 1—6

Finite Time Thermodynamics Optimization Criteria for Solar Energy Heat Engines

Chen Lingen, Sun Fengrui, Chen Wenzhen

(Naval Engineering Academy)

Abstract

Based on the loss relationships between two kinds of solar collectors, the authors have derived the finite time thermodynamics optimum criteria for parameter selection of heat engines powered by solar energy. The results obtained also include some conclusions drawn by earlier research workers.

Key words: *modern thermodynamics, solar heat engine, optimum design, design criteria*

简 讯

开发海上石油的前景工作

据“Gas Turbine World”1991年1—2月号报道, Amoco Orient石油公司和中国国家海上石油公司(CNOOC)已经签订了一些补充协议, 加强合作以便开发中国南海珠江口盆地的柳华(Liuhua) 11—1油田。该油田位于香港以南约241公里, 在海底305米深度处。Amoco在1987年初发现该油田,

为评估该油田已钻出了一系列试验油井。

最新的协议要求为开发该油田着手进行工程研究。该油井的深度必将增加开发费用。预计1995年初该油田的日产量将达到50 000桶。

(吉桂明 供稿)