

实际闭式中冷回热燃气轮机循环的效率优化

王文华, 陈林根, 孙丰瑞

(海军工程大学, 湖北省 武汉市 430033)

Efficiency Optimization of a Real Closed Intercooled Regenerated Gas Turbine Cycle

WANG Wen-hua, CHEN Lin-gen, SUN Feng-ru

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Since finite-time thermodynamic theory came into being, its application in physics and engineering has been achieved great advancements. Using the theory, analysis and optimization for thermodynamic processes and cycles with variable objectives were performed by internal and external scholars. In this paper, finite-time thermodynamics is applied to optimize the intercooling pressure ratio and the heat conductance distribution of hot- and cold-side heat exchangers, intercooler and regenerator of a real closed intercooled regenerated Brayton cycle. Double-maximum efficiency is obtained by further optimizing the total pressure ratio. The effects of some important parameters on the optimal results are analyzed by detailed numerical examples. The numerical example shows this method is valid and effective by optimizing the design parameters of a real power plant.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Finite time thermodynamics; Gas turbine; Efficiency; Optimization

摘要: 自有限时间热力学理论产生以来, 在物理和工程领域的应用已取得了很大的进展。利用该理论, 国内外许多学者以不同的目标对热力过程和循环性能进行了分析或优化, 并得到了很多有意义的结果。该文应用有限时间热力学方法研究了实际闭式燃气轮机循环热效率最大时高低温侧换热器、回热器和中冷器的热导率最佳分配和最佳中间压比分配; 进一步对总压比优化可得到双重最大效率; 分析了循环的一些重要参数对性能的影响。通过对实际装置的设计参数进行数值优化, 证明了该方法的有效性。

关键词: 热能动力工程; 有限时间热力学; 燃气轮机; 效率; 优化

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-04-1001); 全国优秀博士学位论文作者专项资金项目 (200136)。

1 引言

自有限时间热力学理论产生以来, 它在物理和工程领域的应用已取得了很大的进展^[1-3]。利用此理论, 国内外许多学者以不同的目标, 如功率、效率、熵产率、生态学函数以及功率密度等, 对闭式燃气轮机简单循环^[4]、回热循环^[5]、中冷循环^[6]、中冷回热^[7-8]以及开式燃气轮机回热^[9]、中冷^[10]循环性能进行了分析或优化, 并得到了很多有意义的结果。本文在推导出实际闭式中冷回热燃气轮机循环效率解析式的基础上, 对最大效率时各换热器热导率、中间压比分配以及总压比的选择进行了优化, 并分析了循环热源进口温比、总热导率及工质热容率等重要性能参数对优化结果的影响。

2 循环模型和效率解析式

中冷回热燃气轮机循环如图 1 所示。流动过程中, 高压部分与低压部分的压力损失分别以压力恢复系数 D_1 与 D_2 表示, 即

$$D_1 = p_5 / p_4, \quad D_2 = p_1 / p_6 \quad (1)$$

低压压气机、高压压气机和透平的效率分别用 h_{c1} 、 h_{c2} 和 h_t 表示, 即

$$h_{c1} = (T_{2s} - T_1) / (T_2 - T_1), \quad h_{c2} = (T_{4s} - T_3) / (T_4 - T_3), \\ h_t = (T_5 - T_6) / (T_5 - T_{6s}) \quad (2)$$

式中 p 、 T 分别为各工作点的温度和压力; 下标数字表示工作点。

设理想气体工质的热容率 (质量流率与定压比热之积) 为 C_{wf} ; 热源加热流体、冷源冷却流体和中间冷却流体的热容率分别为 C_H 、 C_L 和 C_1 ; 高低

温侧换热器、回热器和中冷器均为逆流式，其热导率分别为 U_H 、 U_L 、 U_R 和 U_I 。由工质性质和换热器理论可得循环的吸、放热率、回热流率和中冷换热量率，分别为

$$Q_H = C_{wf}(T_5 - T_7) = C_{Hmin}E_{H1}(T_{Hin} - T_7) \quad (3)$$

$$Q_L = C_{wf}(T_8 - T_1) = C_{Lmin}E_{L1}(T_8 - T_{Lin}) \quad (4)$$

$$Q_R = C_{wf}(T_7 - T_4) = C_{wf}(T_6 - T_8) = C_{wf}E_R(T_6 - T_4) \quad (5)$$

$$Q_I = C_{wf}(T_2 - T_3) = C_{Imin}E_{I1}(T_2 - T_{Lin}) \quad (6)$$

式中 E_{i1} ($i=H,L,I$) 分别为两侧流体均为变温时高、低温侧换热器和中冷器的有效度； E_R 为回热器的有效度，且有

$$E_{i1} = \frac{1 - \exp[-N_{i1}(1 - C_{imin}/C_{imax})]}{1 - (C_{imin}/C_{imax})\exp[-N_{i1}(1 - C_{imin}/C_{imax})]}, \quad (7)$$

$$E_R = N_R / (N_R + 1)$$

式中 C_{imin} 和 C_{imax} 为 C_i 和 C_{wf} 中的较小和较大者， N_{i1} 是基于最小热容率定义的传热单元数， N_R 为回热器的传热单元数，且有

$$C_{imin} = \min\{C_i, C_{wf}\}, \quad C_{imax} = \max\{C_i, C_{wf}\}, \quad (8)$$

$$N_{i1} = U_i / C_{imin}, \quad N_R = U_R / C_{wf}$$

定义低压压气机的等熵温比为 x ，压气机总等熵温比为 y ，则

$$x = T_{2s}/T_1 = p_1^m, \quad y = T_{4s}/T_1 = p^m \quad (9)$$

式中 $m = (k-1)/k$ ， k 为绝热指数， $k=1.4$ 。

由总压恢复系数的定义式(1)可得涡轮机的等熵温比为

$$T_5/T_{6s} = (p_5/p_6)^m = yD^{-1}, \quad D = (D_1D_2)^{-m} \quad (10)$$

内可逆循环六个温度间的关系为

$$T_1T_3T_5 = T_2sT_4sT_{6s} \quad (11)$$

循环的热效率为

$$h = (Q_H - Q_L - Q_I) / Q_H \quad (12)$$

联立式(1)~(12)可得循环热效率为

$$h = 1 - \frac{x}{r} \quad (13)$$

式中

$$x = [a_2E_{L1} + A(1 - a_2E_{L1})a_3E_{I1}]C(1 - E_R)a_1E_{H1}t_1 + \{[1 - C(1 - a_1E_{H1})E_R][Aa_3E_{I1} - 1] + [E_R + C(1 - a_1E_{H1})(1 - 2E_R)]AB(1 - a_3E_{I1})\}a_2E_{L1} + \{Ba_2E_{L1}[E_R + AC(1 - a_1E_{H1})(1 - 2E_R)]\}[a_2E_{L1} + A(1 - a_2E_{L1})] + C(1 - a_1E_{H1})E_R - 1\}a_3E_{I1}t_2$$

$$r = \{[1 - AB(1 - a_2E_{L1})(1 - a_3E_{I1})][E_R + (1 - 2E_R)C] - CE_R\}t_1 - AB(1 - a_3E_{I1}) \cdot (1 - E_R)a_2E_{L1} - B(1 - E_R)a_3E_{I1}t_2\}a_1E_{H1}$$

式中 $a_1 = C_{Hmin}/C_{wf}$ ， $a_2 = C_{Lmin}/C_{wf}$ ， $a_3 = C_{Imin}/C_{wf}$ ， $A = 1 - h_{cl}^{-1} + xh_{cl}^{-1}$ ， $B = 1 - h_{c2}^{-1} + x^{-1}yh_{c2}^{-1}$ ， $C = 1 - h_t + y^{-1}Dh_t$ ， $t_1 = T_{Hin}/T_{Lin}$ 为循环热源进口温比， $t_2 = T_{In}/T_{Lin}$ 为中冷源与低温热源进口温比。

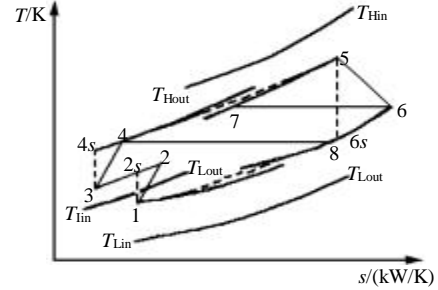


图 1 $T-s$ 图

Fig. 1 Temperature-entropy diagram

3 效率优化

由解析式(13)可知，循环效率可由 4 个换热器的热导率和中间压比的分配来优化，同时与循环热源进口温比、压气机和透平效率、压力损失系数、工质热容率以及总压比等循环性能参数的选取有关。在给定所有换热器热导率总量 $U_T (=U_H + U_L + U_I + U_R)$ 的情况下，功率的优化将通过寻求各换热器热导率和中间压比的最优分配以及总压比的合理选择得以实现。优化过程分 3 步：首先在给定总压比的情况下，同时优化中间压比分配和 4 个换热器的热导率分配，可得到最大效率 h_{max} ；然后对总压比优化，得到循环的双重最大效率 $h_{max,2}$ ；最后对工质与热源热容率匹配的优化得到循环的三重最大效率 $h_{max,3}$ ；通过数值计算来分析各参数对效率的影响。

定义热导率分配 $u_H = U_H/U_T$ ， $u_I = U_I/U_T$ ， $u_L = U_L/U_T$ ， $u_R = 1 - u_H - u_I - u_L$ ，在实际情况下还有下列约束： $0 < u_H + u_I < 1$ ， $0 < u_H + u_L < 1$ ， $0 < u_I + u_L < 1$ ， $0 < u_H + u_I + u_L < 1$ ， $1 < p_1 < p$ 。由于目标函数 h 为有约束的多变量隐式函数，难以计算其导数，故采取文献[11]中提到的复形法进行直接寻优，计算中给定 $p_2 = 1$ ， $C_H = C_L = C_I = 1.2 \text{ kW/K}$ 。

图 2 给出了循环最大效率 h_{max} 及相应功率 $\bar{P}_{h_{max}}$ 与总压比的关系特性，为了比较方便，循环最大功率 \bar{P}_{max} 及相应效率 $h_{\bar{P}_{max}}$ 也表示在图上。由图可发现存在最佳的总压比 p_{opt} 可使 h_{max} 得到最大值，即双重最大效率 $h_{max,2}$ 。循环最大功率 \bar{P}_{max} 通过相同方法优化得到，与双重最大功率相应的最佳总压比相比，双重最大效率时的总压比 p_{opt} (约 5.5) 显然偏小，

而此时的功率 $\bar{P}_{h_{\max,2}}$ 也偏小。在进行燃气轮机设计时,若过于追求热机的高效率,则要牺牲很大部分功率,可以根据需要,在高功率和高效率之间作选择,或者两者兼顾。

图3给出的是循环最大效率 h_{\max} 与其相应的最佳中间压比 $(p_1)_{h_{\max}}$ 、高温侧热导率分配 $(u_h)_{h_{\max}}$ 、低温侧热导率 $(u_l)_{h_{\max}}$ 和中冷器侧热导率 $(u_i)_{h_{\max}}$ 的关系特性。随着 $(p_1)_{h_{\max}}$ 、 $(u_h)_{h_{\max}}$ 、 $(u_l)_{h_{\max}}$ 和 $(u_i)_{h_{\max}}$ 的增加, h_{\max} 急剧增加到峰值以后开始逐渐下降,由于热导率总量已定,则回热器热导率是先减小后增加。计算表明,只要各换热器热导率最优分配,在低总压比范围内,回热循环比简单循环效率小,甚至小于中冷循环,计算表明提高中冷器侧热导率,循环效率可以不断提高,换言之,提高中冷度可以提高循环效率;由于低总压比时的输出功率偏低,在高总压比范围内,回热循环效率高于简单循环,在热导率最佳分配条件下,中冷回热循环的效率更高,而且在输出功率方面更占优势。

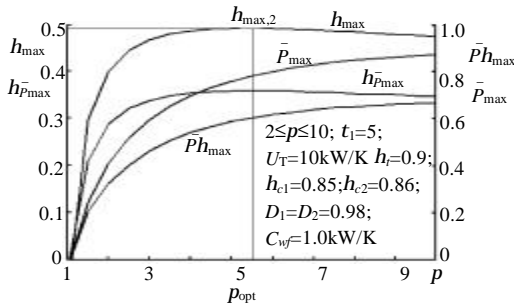


图2 最大效率及相应功率与总压比的关系

Fig. 2 The characteristics of the maximum efficiency and the corresponding power versus total pressure ratio

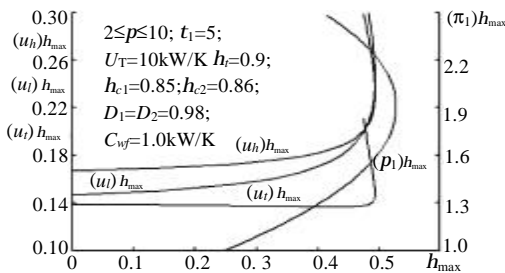


图3 中间压比和4个换热器热导率与最大效率的关系

Fig. 3 The characteristics of the maximum efficiency versus the corresponding intercooling pressure ratio and the heat conductances of four

图4给出了循环双重最大效率 $h_{\max,2}$ 及相应功率 $\bar{P}_{h_{\max,2}}$ 与工质与低温侧热容率匹配 C_{wf}/C_L 、高低温侧热导率匹配 C_H/C_L 的关系,相应的最佳总压比 p_{opt} 如图5所示。计算表明存在最佳的热容率匹配

值 $(C_{wf}/C_L)_{opt}$,使 $h_{\max,2}$ 达到最大值 $h_{\max,3}$ 。 C_H/C_L 增大,则 $h_{\max,3}$ 、 $(C_{wf}/C_L)_{opt}$ 和 p_{opt} 也增大,当 C_H/C_L 增大到一定值以后, $h_{\max,3}$ 、 $(C_{wf}/C_L)_{opt}$ 和 p_{opt} 受其影响甚微。因此,对于闭式的燃气轮机循环,工质和循环热源热容率匹配如何合理选择也是应考虑的问题。 p_{opt} 始终偏小,与图2的分析结果吻合。计算还表明, $h_{\max,2}$ 和 $\bar{P}_{h_{\max,2}}$ 随着循环热源进口温比 t_1 、总热导率 U_T 、压气机和透平效率 (h_c, h_t) 以及压力恢复系数 (D_1, D_2) 的增加而增大。当 U_T 增大到一定程度后, $h_{\max,2}$ 和 $\bar{P}_{h_{\max,2}}$ 增长的幅度就越越来越小了。 p_{opt} 随 t_1 、 h_c 和 h_t 的增大而增大,随 U_T 、 D_1 和 D_2 的增大保持不变。

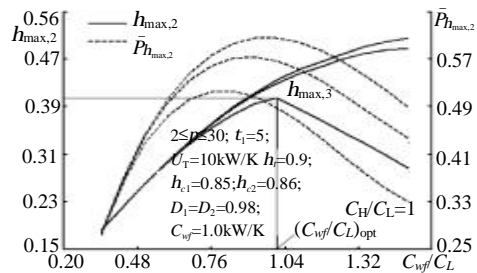


图4 双重最大效率和相应功率与工质和低温热源热容率匹配、热源热容率匹配的关系

Fig.4 The characteristics of the double-maximum efficiency and the corresponding power versus the thermal capacity rate matching between working fluid and cold-side heat reservoir (C_{wf}/C_L) and the thermal capacity rate matching between the hot- and cold-side heat reservoirs (C_H/C_L)

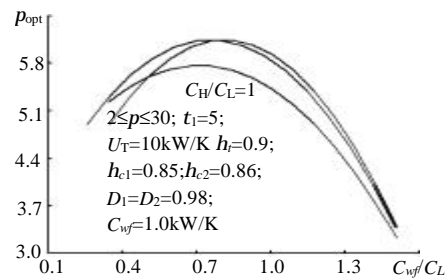


图5 最佳总压比与工质和低温热源热容率匹配、热源热容率匹配的关系

Fig. 5 The characteristics of the optimal total pressure ratio versus the thermal capacity rate matching between the working fluid and cold-side heat reservoir (C_{wf}/C_L) and the thermal capacity rate matching between the hot- and cold-side heat reservoirs (C_H/C_L)

4 应用实例

以文献[12]给出的排水量为 3500~4000t 的高速驱逐舰用的 80000hp(58824kW)的闭式氢涡轮推进装置概念设计方案为算例,进行优化分析。其给定

的设计参数见表 1。根据本文的优化方法，总压比不变，优化中冷压比分配、加热器、预冷器、中冷器和回热器的热导率分配得到循环最大效率，前后性能参数见表 2。可以看出优化热导率分配和中间压比后循环效率提高了 10.91%。

表 1 氦气各状态点的热工参数
Tab.1 Thermodynamic conditions of the helium at each state

状态点	温度/℃	压力/MPa
低压压气机进、出口	37.8/126.7	1.553/2.730
高压压气机进、出口	37.8/123.9	2.685/4.646
矿物燃料加热器进、出口	453.3/815.6	4.616/4.483
动力涡轮进、出口	640.0/490.0	2.748/1.67

表 2 装置性能参数
Tab.2 The performance conditions of the plant

项 目	设计参数	优化结果
加热器/预冷器热导率分配%	16.17/18.24	25.02/25
中冷器/回热器热导率分配%	5.00/60.59	24.99/24.99
加热器/预冷器有效度	0.885/0.95	0.99/0.981
中冷器/回热器有效度	0.874/0.9	0.977/0.82
总压比/低压压气机压比	3.04/1.76	3.04/1.81
低压/高压压气机效率	89.5/87.5	
增压/动力涡轮效率	90.4/90.6	
效率/%	14.5	25.41

5 结论

(1) 总压比给定情况下，优化中间压比和 4 个换热器热导率分配可以获得中冷回热燃气轮机循环的最大效率。进一步对总压比优选，可以得到双重最大效率，最佳的总压比一般较低，相比循环双重最大功率时的最佳总压比要小得多。应根据需要选择合理的压比参数来设计高功率或高效率或两者兼顾的燃气轮机。

(2) 低压比时，回热循环效率较低。中冷器热导率提高可提高循环效率，但此时循环功率仍不高。高压比时，回热提高效率的效果则强于中冷过程。

(3) 工质和热源热容率匹配和热源热容率匹配均对循环效率有较大影响，存在一最佳的工质和热源热容率匹配使输出效率最佳。热源热容率匹配值、循环热源进口温比、总热导率、压气机和透平效率以及压力恢复系的增加均可使效率增大。

致 谢

本文承海军工程大学科学研究基金(HGDJJ03016)资助，特此致谢！

参考文献

- [1] Chen L, Sun F. Advances in finite time thermodynamics analysis and optimization [M]. New York: Nova. Science Publishers, 2004.
- [2] Durmayaz A, Sogut O S, Sahin B, et al. Optimization of thermal systems based on finite-time thermodynamics and thermo-economics[J]. Progress Energy & Combustion Science. 2004, 30(2): 175-217.
- [3] 陈林根. 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析[M]. 北京: 高等教育出版社. 2005.
- [4] Cheng C Y, Chen C K. Efficiency optimization of an irreversible Brayton heat engine[J]. Trans. ASME J. Energy Resources Technology. 1998, 120(2): 143-148.
- [5] Ust Y, Safa A, Sahin B. Ecological performance analysis of an endoreversible regenerative Brayton heat-engine[J]. Applied Energy, 2005, 80(3): 247-260.
- [6] Cheng C Y, Chen C K. Maximum power of an endoreversible intercooled Brayton cycle[J]. Int. J. Energy Res., 2000, 24(6): 485-494.
- [7] 王文华, 陈林根, 孙丰瑞. 实际闭式中冷回热布雷顿循环新析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 371-374.
Wang Wenhua, Chen Lingen, Sun Fengrui. New analysis of a real closed intercooled regenerated brayton cycle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(3): 371-374.
- [8] 王文华, 陈林根, 孙丰瑞. 实际闭式中冷回热燃气轮机循环的功率优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 149-154.
Wang Wenhua, Chen Lingen, Sun Fengrui. Power optimization of a real closed intercooled regenerated gas turbine cycle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 149-154.
- [9] 李晔, 陈林根, 孙丰瑞, 等. 具有压降不可逆性的回热式燃气轮机循环热力学优化[J]. 燃气轮机技术, 2002, 15(3): 49-55.
Li Ye, Chen Lingen, Sun Fengrui, et al. Thermodynamic optimization of a regenerative gas turbine power plant with pressure drop irreversibilities[J]. Gas Turbine Technology, 2002, 15(3): 49-55.
- [10] 王文华, 陈林根, 孙丰瑞. 具有压降不可逆性的开式燃气轮机中冷循环热力学优化[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 149-154.
Wang Wenhua, Chen Lingen, Sun Fengrui. Thermodynamic optimization of an intercooled gas turbine power plant with pressure drop irreversibilities[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10): 149-154.
- [11] 吴玉庭, 任建勋, 过增元, 等. 空间太阳能动力系统的全球优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 140-143.
Wu Yuting, Ren Jianxun, Guo Zengyuan, et al. The global optimization study of space solar dynamic power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 140-143.
- [12] 吴会泉. 舰用燃气轮机装置[M]. 武汉: 海军工程学院, 1992. 59-60.

收稿日期: 2005-09-30.

作者简介:

王文华 (1978-), 博士, 讲师, 从事现代热力学及动力装置的研究;

陈林根 (1964-), 男, 教授, 海军工程大学研究生院博士生导师, 主要从事现代热力学、叶轮机械最优设计、动力装置动态特性分析研究。

(编辑 贾瑞君)