

# 热阻和回热损失对埃里克森循环性能的影响

(泉州师专物理系) 林比宏

(厦门大学物理系) 陈金灿

**摘要:** 建立受热阻和回热损失影响的埃里克森循环模型, 以输出功率为目标函数, 导出循环的基本优化关系式。由此获得循环的特性曲线, 并对特殊的工况点作了较详细的讨论, 从而得到一些新的结论。

**关键词:** 埃里克森循环; 热阻; 回热损失; 基本优化关系; 特性曲线

中图分类号: TK12

## 1 引言

埃里克森循环是热机的一种重要循环模型。按经典热力学理论, 以理想气体为工质的埃里克森循环可通过使用可逆的回热器来实现理想回热, 获得卡诺效率。但要获得卡诺效率, 所有过程必须是可逆的, 循环必须无限缓慢地进行, 因而输出功率等于零。

近年来许多学者应用有限时间热力学理论研究各种主要不可逆性对循环性能的影响, 取得了一系列有意义的结果<sup>[1~3]</sup>。本文将讨论热阻和回热损失对埃里克森循环性能的影响, 得到的新结论不仅可揭示循环的固有特性, 而且可在某些极限条件下导出文献[4, 5]中的主要结果。

## 2 埃里克森循环模型

考虑以理想气体为工质的埃里克森循环, 是由两个等温和两个等压过程所组成, 其 TS图如图 1 所示。图 1 中  $T_H$  和  $T_L$  分别是高低温热源的温度,  $Q_1$  和  $Q_2$  分别是工质在两个等温过程从高温热源吸收的和放给低温热源的热量,  $T_1$  和  $T_2$  是工质在两个等温过程的温度。由于热阻的存在,  $T_1$  和  $T_2$  一般不同于  $T_H$  和  $T_L$ 。因为工质为理想气体, 故可将  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别表示为

$$Q_1 = nRT_1 \ln P_1 / P_2 \quad (1)$$

$$Q_2 = nRT_2 \ln P_1 / P_2 \quad (2)$$

其中  $R$  是普适气体常数,  $n$  为工质的摩尔数,  $P_1$  和  $P_2$  分别是工质在两个等压过程的压强。当工质与热源间的热交换满足牛顿传热定律时<sup>[6]</sup>, 即有

$$Q_1 = K_1(T_H - T_1)t_1 \quad (3)$$

$$Q_2 = K_2(T_2 - T_1)t_2 \quad (4)$$

其中  $K_1$ 、 $K_2$  分别为工质与高、低温热源间的传热系数, 而  $t_1$ 、 $t_2$  分别是温度为  $T_1$  和  $T_2$  的两个等温过程进行的时间。

实际循环不仅受到热阻的影响, 而且循环过程在有限时间内完成。因此, 即使是以理想气体为工质的埃里克森循环, 也不可能实现理想回热。通常可设每循环的回热损失量为<sup>[7]</sup>

$$\Delta Q = nC(1 - Z_r)(T_1 - T_2) \quad (5)$$

式中  $C$  是定压过程中工质的摩尔热容,  $Z_r \leq 1$  是回热器的效率。当  $Z_r = 1$  时, 回热过程实现理想回热。

考虑到回热损失的影响, 工质每循环从高温热源吸收的和放给低温热源的热量  $Q_H$  和  $Q_L$  分别为

$$Q_H = Q_1 + \Delta Q \quad (6)$$

$$Q_L = Q_2 + \Delta Q \quad (7)$$

在埃里克森循环中, 不仅等温过程而且回热过程都受到热阻的影响。这不同于由两个等温和两个绝热过程组成的卡诺循环。对于卡诺循环中的绝热过程进行的时间与等温过程进行的时间相比, 通常可忽略不计, 因为绝热过程中的工质没有与外界进行热量交换, 不受热阻影响。由于热阻的影响, 回热过程所需的时间与等温过程所需的时间相比, 通常不可忽略。为了考虑回热过程所需时间的影响, 可假设工质的温度  $T$  与时间  $t$  之间的关系由下式确定<sup>[4]</sup>。

$$\frac{dT}{dt} = \pm U \quad (8)$$

收稿日期: 1998-09-28; 修订日期: 1999-02-01

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (E96002)

作者简介: 林比宏 (1960-), 男, 福建南安县人, 副教授, 主要从事现代热力学理论方面的研究工作。通讯处: 362000 泉州顶埔泉州师专物理系

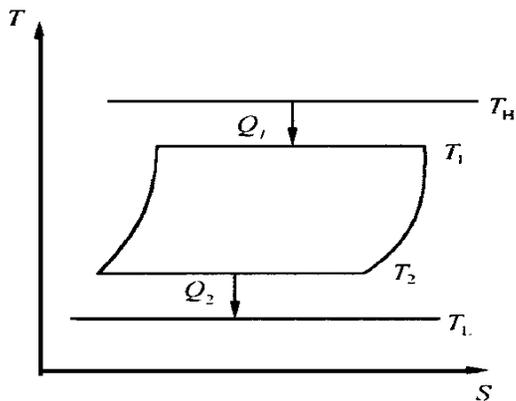


图 1 埃里克森循环的 TS 图

其中  $U$  是比例常数,它与温度无关,式(8)中的“+”、“-”号分别对应等压加热和等压放热两个过程.利用式(8),可得两个等压过程的时间为:

$$t_3 = t_4 = \frac{T_1 - T_2}{U} \quad (9)$$

因而,埃里克森循环周期可从式(1)~(4)和式(9)求出:

$$t = t_1 + t_2 + 2t_3 = \frac{nRT_1 \ln P_1/P_2}{K_1(T_H - T_1)} + \frac{nRT_2 \ln P_1/P_2}{K_2(T_2 - T_L)} + 2 \frac{T_1 - T_2}{U} \quad (10)$$

上述模型仍然是一个理想化的循环模型,但它比有关文献中所采用的模型更为实际.因为它不仅包括了工质和热源之间的传热不可逆性,而且还包括了循环中的回热损失.基于上述模型可求出更为一般和有用的结果.

### 3 基本优化关系式

效率和输出功率是热机的两个重要参数.应用式(1)~(4)、(6)、(7)和(10),可得埃里克森循环的输出功率为

$$P = \frac{T_1 - T_2}{\frac{T_1}{K_1(T_H - T_1)} + \frac{T_2}{K_2(T_2 - T_L)} + a_1(T_1 - T_2)} \quad (11)$$

效率为

$$Z = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + a(T_1 - T_2)} \quad (12)$$

其中  $a_1 = \frac{2}{nRU \ln \frac{P_1}{P_2}}$  和  $a = \frac{C_p(1 - Z_r)}{R \ln \frac{P_1}{P_2}}$

为了方便起见,令  $X = T_1/T_2$   $Y = T_2$ ,则式(11)和(12)可写为

$$P = \frac{X}{K_1(T_H - XY)(X - 1) + a_1} +$$

$$\frac{1}{K_2(Y - T_L)(X - 1) + a_1} \quad (13)$$

$$Z = \frac{X - 1}{X + a(X - 1)} \quad (14)$$

将式(14)代入(13)消去  $X$ ,可得

$$P = \frac{(1 - aZ)(1 - (a + 1)Z)}{K_1Z[T_H(1 - (a + 1)Z) - Y(1 - aZ)] + \frac{1 - (a + 1)Z}{K_2Z(Y - T_L) + a_1}} \quad (15)$$

由式(15)和极值条件  $(\frac{1}{LY})^\eta = 0$  可得:

$$Y = \frac{K_1 T_H(1 - (a + 1)Z) + K_2 T_L(1 - aZ)}{(K_1 + K_2)(1 - aZ)} \quad (16)$$

将式(16)代入(15)可得埃里克森循环在给定效率下的最佳输出功率

$$P = \frac{(1 - aZ)[1 - (a + 1)Z]}{K_1[T_H(1 - (a + 1)Z) - T_L(1 - aZ)] + a_1} \quad (17)$$

其中  $K = \frac{K_1 K_2}{(K_1 + K_2)^2}$ . 式(17)是埃里克森循环

的基本优化关系式.利用这个基本优化关系式,可方便求出埃里克森循环的其它基本优化关系式.例如,由式(17)和循环的熵产率

$$e = \frac{\Delta S}{f} + \frac{Q_L/T_L - Q_H/T_H}{f} = \frac{P}{ZT_L}(Z_c - Z) \quad (18)$$

可求得熵产率  $e$  与  $Z$  间的关系为

$$e = (Z_c - Z) \left[ \frac{(1 - aZ)(1 - (a + 1)Z)T_L}{K[T_H(1 - (a + 1)Z) - T_L(1 - aZ)] + a_1 T_L Z} \right]^{-1} \quad (19)$$

再应用式(19),求得可用性损失率  $A$  与  $Z$  之间的关系

$$A = T_0 e (Z_c - Z) \left[ \frac{(1 - aZ)(1 - (a + 1)Z)}{K[T_H(1 - (a + 1)Z) - T_L(1 - aZ)] + a_1 Z} \right]^{-1} \frac{T_0}{T_L} \quad (20)$$

和生态学目标函数  $E^{[8]}$  与  $Z$  之间的关系

$$E = P - T_0 e = P \left[ 1 - \frac{T_0}{T_L} \left( \frac{Z_c}{Z} - 1 \right) \right] = \left[ 1 - \frac{T_0}{T_L} \left( \frac{Z_c}{Z} - 1 \right) \right] \left[ \frac{(1 - aZ)(1 - (a + 1)Z)}{K_1[T_H(1 - (a + 1)Z) - T_L(1 - aZ)] + a_1} \right]^{-1} \quad (21)$$

其中  $T_0$  为环境温度,在一般情况下,可设  $T_L = T_0$

### 4 其它参数的优化

从式 (16) 不难看出,埃里克森循环两个等温过程中工质的温度高低直接依赖于效率。由式 (14) 和 (16) 得  $T_1$  和  $T_2$  与效率间的关系分别为

$$T_1 = \frac{\overline{K_1(1 - (a + 1)Z) T_{H+}}}{(K_1 + K_2)(1 - (a + 1)Z)} \quad (22)$$

$$T_2 = \frac{\overline{K_1(1 - (a + 1)Z) T_{H+}}}{(K_1 + K_2)(1 - aZ)} \quad (23)$$

同样埃里克森循环四个过程所需的时间长短也与效率有关。应用式 (1)~ (4), (10), (22) 和 (23) 可得

$$t_1 = \frac{nR \left[ \frac{\overline{K_1}}{K_2} (1 - (a + 1)Z) T_{H+} + (1 - aZ) T_L \right] \ln \frac{P_1}{P_2}}{K_1 \left[ (1 - (a + 1)Z) T_{H-} + (1 - aZ) T_L \right]} \quad (24)$$

$$t_2 = \frac{nR \left[ \frac{\overline{K_1}}{K_2} (1 - (a + 1)Z) T_{H+} + (1 - aZ) T_L \right] \ln \frac{P_1}{P_2}}{K_1 K_2 [(1 - (a + 1)Z) T_{H-} + (1 - aZ) T_L]} \quad (25)$$

$$t_3 = t_4 = \frac{\left[ \frac{\overline{K_1}}{K_2} (1 - (a + 1)Z) T_{H+} + (1 - aZ) T_L \right] Z}{\left( 1 + \frac{\overline{K_1}}{K_2} \right) U (1 - (a + 1)Z) (1 - aZ)} \quad (26)$$

再由式 (24) 和 (25) 不难看出两个等温过程的时间比为<sup>(9)</sup>

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\overline{K_2}}{K_1} \quad (27)$$

这个结论正好与内可逆卡诺热机的完全相同

### 5 优化特性曲线

应用式 (17), (19)~ (21), 并选取  $T_H = 1000$  K,  $T_L = 300$  K,  $B = K T_{H01}$ , 可画出  $P^* - Z$  曲线,  $\overset{\circ}{e} - Z$  曲线,  $E^* - Z$  曲线, 分别如图 2~ 4 所示。图中  $P^* = P / K T_H$ ,  $\overset{\circ}{e} = e / K$ ,  $E^* = E / K T_H$  分别为无量纲的输出功率、熵产率和生态学目标函数, 曲线 I 和 II 分别对应于  $a = 0, B = 0$  和  $a = 0.1, B = 0.1$  两种情况。

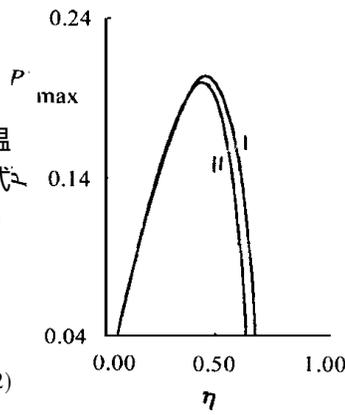


图 2  $P^* - Z$  曲线

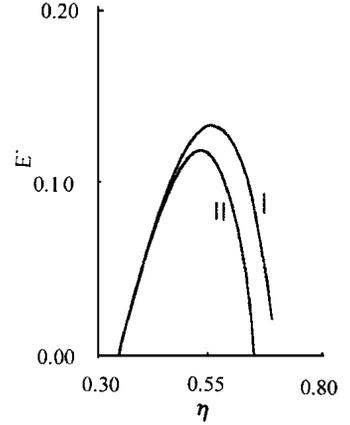


图 3  $E^* - Z$  曲线

从图 2~ 4 看出,  $\overset{\circ}{e}$  是  $Z$  的单减函数, 而  $P^*$  和  $E^*$  不是  $Z$  的单减函数, 存在极值。这些极值可分别从上述的优化关系求出。例如, 由式 (17) 和极值条件  $\frac{dP^*}{dZ} = 0$ , 可求出当效率

$$Z_m = \frac{1 - \frac{\overline{T_L}}{T_H}}{1 + a \left[ 1 - \frac{\overline{T_L}}{T_H} \right]} = \frac{Z_{CA}}{1 + a Z_{CA}} \quad (28)$$

时, 输出功率达到最大值, 即

$$P_{max} = \frac{K (\overline{T_H} - \overline{T_L})^2}{1 + a_1 K (\overline{T_H} - \overline{T_L})^2} \quad (29)$$

这时相应的熵产率为

$$e_m = \frac{K (\overline{T_H} - \overline{T_L})^2 \left[ \frac{\overline{T_L}}{T_H} + a \left( 1 - \frac{\overline{T_L}}{T_H} \right) \right]}{[1 + a_1 K (\overline{T_H} - \overline{T_L})^2] T_L} \quad (30)$$

从式 (29) 可知, 埃里克森循环的最大输出功率依赖于回热过程的时间, 但与回热损失无关。而由式 (28) 可知, 受回热损失影响的埃里克森循环在最大输出功率时的效率  $Z_m$  总是小于内可逆卡诺循环的最大功率效率  $Z_{CA}$ , 而且回热损失越大,  $Z_m$  越小。

### 6 讨论

(1) 从图 2 清楚看到, 当  $P < P_{max}$  时, 对于一个

给定的输出功率  $P$ , 对应于两个不同的效率, 其中一个大于  $Z_m$ , 另一个小于  $Z_m$ . 在相同的输出功率下人们总是期望热机获得较大的效率. 因此, 效率的合理范围应为

$$Z_m \leq Z < Z_R \quad (31)$$

其中  $Z_R = \frac{1 - T_L/T_H}{1 + a(1 + T_L/T_H)}$ , 是埃里克森循环仅受回热损失影响时的效率. 可见  $Z_m$  是埃里克森循环的一个重要参数, 因为它确定了这类循环的最佳效

率的低限.

当循环工作在上述的最佳区域中时, 输出功率是效率的单减函数, 两者要注意兼顾. 当  $E$  最大时, 循环恰好位于最佳区域. 这时, 效率比  $Z_m$  有明显的增大,  $e_E^*$  比  $e_m$  有明显的减小, 而  $P_E^*$  比  $P_{max}^*$  小, 但不是很显著 (见表 1). 这意味着  $E$  最大时的工作点可作为这类循环优化设计和最佳运行的一个主要参考点.

表 1  $Z, P, e$  在  $P$  和  $E$  最大时的值

	$Z_m$	$Z_E$	$Z_E/Z_m$	$P_{max}^*$	$P_E^*$	$P_E/P_{max}$	$e_m^*$	$e_E^*$	$e_E^*/e_m^*$
a = 0 B = 0	0.45	0.56	124%	0.2045	0.1782	87.1%	0.379	0.148	39%
a = 0.1 B = 0.1	0.43	0.53	123%	0.2004	0.1752	87.4%	0.419	0.187	45%

(2) 如果象文献 [4-5] 那样, 只考虑回热时间的影响, 而不考虑回热损失, 即  $Z \rightarrow 1$ , 式 (17) 可简化成

$$P = \frac{1}{Kz [T_H(1 - Z) - T_L]^+ a_1} \quad (32)$$

应用式 (32), 不仅容易推出文献 [4-5] 中的主要结果, 而且可讨论埃里克森循环的其它优化性能.

值得指出的是, 如果卡诺循环绝热过程中工质的温度变化规律也满足式 (8), 那么, 从内可逆卡诺循环模型出发, 也可导出式 (32). 这表明, 式 (32) 又可用于讨论卡诺循环的优化特性.

从以上结果不难看出, 在埃里克森循环性能的研究中, 如果没有考虑循环的回热损失, 只能得到类似于卡诺循环的结果, 而不可能揭示埃里克森循环的固有特性.

(3) 从上述结果不难看出, 埃里克森循环的优化性能与回热过程的时间有关. 当回热过程中工质的温度随时间的变化满足不同规律时, 将会导出不同的优化结果. 例如, 当回热过程的时间正比于两个等温过程的时间时, 即<sup>[10]</sup>

$$2t_3 = V(t_1 + t_2) \quad (33)$$

可以证明循环的最大输出功率与效率间的关系为

$$P = \frac{K_V T_H \left\{ [1 - (a + 1)Z] - \frac{T_L}{T_H} (1 - aZ) \right\}}{(1 + V) [1 - (a + 1)Z] (1 - aZ)} \quad (34)$$

总之, 由本文建立的循环模型, 可讨论传热不可逆性和回热损失对埃里克森循环性能的影响, 导出循环的各种基本优化关系式, 揭示埃里克森循环与卡诺循环之间的本质差别, 为实际系统的优化设计提供更为精确的理论依据.

### 参考文献

- [1] Bejan A. *J. Appl. Phys.* 1996, 79: 1191.
- [2] Chen J and Yan Z. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1996, 29: 987.
- [3] De Vos A, Chen J and Andresen B. *Open systems & Information Dynamics* 1997, 4: 13.
- [4] Brown F A and Madrigal G R. *Revista Mexicana de fisica* 1990, 36: 363.
- [5] Blank D V and Wu C. *Energy Convers. Mgmt* 1996, 37: 59.
- [6] Bejan A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley, New York, 1988.
- [7] Howell J R and Bannerot R B. *Sol. Energy* 1977, 19: 149.
- [8] Yan Z. *J. Appl. Phys.* 1993, 73: 3583.
- [9] Curzon F L and Ahlborn B. *Am. J. Phys.* 1975, 43: 22.
- [10] Chen J. *Int. J. Ambient Energy*, 1997, 18: 107.

(何静芳 编辑)

the quantitative effect on machine unit economic performance of exhaust steam pressure variation by employing the theory of equivalent enthalpy drop. Calculation results of specific examples show that the method features simplicity of use as well as high precision and practicality. Its calculation error is lower than that of other currently available engineering methods. **Key words** exhaust pressure, quantitative method, economy, equivalent enthalpy drop

PFBC-CC燃气轮机系统动态特性实时混合仿真研究 = **A Real-time Hybrid Simulation Study of the Dynamic Characteristics of a PFBC-CC Gas Turbine System** [刊,中]/Xiang Wenguo, Cai Ningsheng (Thermal Engineering Institute under the Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 356~ 358

Described in this paper is a real-time hybrid simulation and control study system based on two digital computers and an analog computer. Discussed are the theory of system realization and the process structure of its interface software. A simulation study has been conducted of the gas turbine system dynamic characteristics of a coal-fired supercharged fluidized bed gas-steam turbine combined cycle. The results of the study indicate that the system under discussion enjoys ease of use and high real-time quality. **Key words** real time, hybrid simulation, control, PFBC

热阻和回热损失对埃里克森循环性能的影响 = **The Effect of Thermal Resistance and Regeneration Loss on Ericsson Cycle Performance** [刊,中]/Lin Bihong, et al (Physics Department of Quanzhou Normal Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 359~ 362

An Ericsson cycle model under the influence of thermal resistance and regeneration loss is established and a basic optimization relation of the cycle deduced, using output power as a target function. Characteristic curves of the cycle are thus obtained. A fairly detailed discussion is conducted of a series of special operating conditions with some new conclusions being obtained. **Key words** Ericsson cycle, thermal resistance, regeneration loss, basic optimization relation, characteristics curves

内旋流流化床燃烧系统设计研究 = **Design and Study of an Internal Circulating Fluidized Bed Combustion System** [刊,中]/Tian Wendong, Wei Xiaolin, Sheng Hongzhi (Institute of Mechanics under the Chinese Academy of Sciences) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 363~ 366

Based on the calorific value of municipal solid waste, its physical composition analysis and the cold-state test results of fluidized bed air distribution the authors have conducted the study of an internal circulating fluidized bed (ICFB) combustion system. A hot-state test plant for the ICFB combustion system was designed and a combustion test of municipal solid waste successfully carried out. **Key words** fluidized bed, internal circulating fluidized bed, combustion, municipal solid waste, heat transfer

结构参数对煤粉浓缩能力影响的试验研究 = **Experimental Study of the Effect of Structural Parameters on the Concentrating Ability of Pulverized-coal Concentrators** [刊,中]/Shi Liming, et al (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 367~ 368,402

The concentrating ability of two types (i. e., brent and shutter) of pulverized-coal concentrators was investigated and tested. The test results show that it is feasible to shorten the length of guide plate in a primary air pipe duct. To achieve a bias concentration ratio satisfying the requirements of stable combustion under a proper bias air ratio, the authors have specified the variation range of the following 1. the guide plate height for the brent and shutter; 2. the distance between the concentrator and the guide plate. **Key words** pulverized-coal concentrator, brent, shutter, structural parameters

标准椭球形封头螺纹烟管 DZL系列锅炉设计 = **Design of Threaded Flue Tube DZL Series Boilers with Standard Elliptical Heads** [刊,中]/Chen Ming, et al (Harbin No. 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 369~ 370

Given in this paper are the basic construction form and conspicuous advantages of threaded flue tube DZL