

# 热力循环的生态品质因素

陈林根 孙丰瑞 陈文振

(海军工程学院)

〔摘要〕生态学目标的提出是热力循环性能分析的进步。生态学目标可基于能量的观点和焓的观点来建立,但二者不可混淆。生态学目标函数的最大值及其相应的性能界限可作为评价热力循环性能的品质因素。本文给出了各种热力循环的生态学目标函数及其品质因素的定义式。

关键词 有限时间热力学 品质因素 生态学优化准则

分类号 TK 123

## 1 引言

评价热力循环性能的品质因素有许多,如第一定律效率(热效率)、第二定律效率(焓效率)、最大功率原理(CA效率)<sup>[1]</sup>和最大利润率原理(有限时间焓经济性能界限)<sup>[2,3]</sup>等。有限时间热力学的发展使人们可以进一步改进评价热力循环性能的目标函数和品质因素。自Angulo-Brown<sup>[4]</sup>于1991年提出热机循环的生态学目标函数后,一些文献继续研究了制冷和热泵循环的生态学优化问题<sup>[5-13]</sup>,提高了热力循环分析的层次,藉此可得新的品质因素。

## 2 生态学目标函数:

### 能量分析与焓分析

Angulo-Brown<sup>[4]</sup>最早建立的热机循环的生态学目标函数为

$$E_{el} = P - T_L \sigma \quad (1)$$

式中, $T_L$ 为热机的低温热源温度, $\sigma$ 为循环熵产率, $P$ 为输出功率。建立式(1)的依据是:文献[4]经过数学推导证明内可逆卡诺热机的

实际功率输出为可逆功输出除以循环周期与 $T_L \sigma$ 之差。因为没有注意到能量(热量)与焓(功)的本质区别,式(1)隐含了矛盾,即将功率(焓)与非焓损失放在一起作了比较是不完备的。严子浚<sup>[5]</sup>对此已作了正确的讨论。

本文作者<sup>[6-10]</sup>基于能量分析的观点,对制冷机和热泵的研究表明,内可逆循环的输出能量流率(制冷率、供热率)为“可逆输出能量(制冷量、供热量)除以循环周期与由循环熵产引起的输出能量流率耗散“之差”,因此定义了制冷机和热泵循环的生态学目标函数

$$E_{r1} = R - \epsilon_c T_H \sigma \quad (2)$$

$$E_{p1} = \pi - \psi_c T_L \sigma \quad (3)$$

式中, $R$ 、 $\pi$ 分别为制冷率和供热率输出, $\epsilon_c$ 、 $\psi_c$ 分别为可逆制冷系数和供热系数, $T_H$ 、 $T_L$ 为高低温热源温度, $\epsilon_c T_H \sigma$ 、 $\psi_c T_L \sigma$ 分别为制冷率耗散和供热率耗散。式(2)、(3)的导出,在数学上是严密的,在物理概念上是清楚的,即以能量输出率与能量输出率损失间的协调优化为目标,避免了式(1)中的矛盾,因而是正确的。在此基础上,可以提高层次,进一步发展以可用能(焓)分析的观点来讨论循环的优

① 初稿收到日期 1993-11-01 修改稿收到日期 1994-02-22  
② 本文联系人 陈林根 男 29 副教授 430033 武汉 海军工程学院 306 教研室

化问题。

所谓焓分析的观点,即为强调热力循环的输出焓及其耗散间的协调,以输出焓流率及其耗散率之差为目标函数。可以建立统一的焓分析生态学目标函数为

$$E_2 = A/\tau - T_0\Delta S/\tau = A/\tau - T_0\sigma \quad (4)$$

式中,  $A$  为循环输出焓,  $T_0$  为环境温度,  $\Delta S$  为循环焓产,  $\sigma$  为熵产率,  $\tau$  为循环周期。

对热机循环,其输出焓为其输出功,因此其输出功率  $P$  即为焓流率  $A/\tau$ , 故有<sup>[5]</sup>

$$E_{e2} = P - T_0\sigma \quad (5)$$

对制冷循环,其输出焓不是其制冷量。制冷循环的输出冷量焓为

$$A_r = Q_2(T_0/T_L - 1) - Q_1(T_0/T_H - 1) \quad (6)$$

式中  $Q_2$  为吸热量(制冷量),  $Q_1$  为放热量。因为  $\varepsilon = Q_2/(Q_1 - Q_2)$ ,  $R = Q_2/\tau$ , 故有

$$E_{r2} = A_r/\tau - T_0\sigma = R[(T_0/T_L - 1) - (1 + \varepsilon^{-1}) \times (T_0/T_H - 1)] - T_0\sigma \quad (7)$$

对热泵循环,其输出焓不是其供热量。热泵循环的输出热量焓为

$$A_p = Q_1(1 - T_0/T_H) - Q_2(1 - T_0/T_L) \quad (8)$$

因为  $\psi = Q_1/(Q_1 - Q_2)$ ,  $\pi = Q_1/\tau$ , 故有

$$E_{p2} = A_p/\tau - T_0\sigma = \pi[(1 - T_0/T_H) - (1 - \psi^{-1}) \times (1 - T_0/T_L)] - T_0\sigma \quad (9)$$

由以上两种生态学准则目标式(2)、(3)、(5)、(7)和(9),根据有限时间热力学导出的热机、制冷机和热泵循环的基本优化关系,即可导出生态学目标的最大值  $E_{\max}$  及相应的性能系数界限  $\xi_e$ , 讨论循环的优化问题。在两类生态学目标中,  $E_2$  更有意义,因为焓分析的观点是现代热力学的观点,更符合用能过程的本质特点。

### 3 热力循环的生态品质因素

经典热力学分析以第一定律效率作为评价循环的品质因素的准则。焓分析的发展提出了第二定律效率分析,使热力循环分析上了一个台阶。有限时间热力学提出以后, Rubin<sup>[1]</sup> 得到了最大功率原理,以热机的最大功率及其效率界限(CA 效率)作为评价准则,本文作者<sup>[2,3]</sup> 进一步得到了最大利润率原理,提出以最大利润率及其相应的性能界限作为评价准则。而生态学目标的提出和建立,可使我们对热力循环的评价准则作进一步的探索,即以生态学目标最大值  $E_{\max}$  及其相应的性能界限  $\xi_e$  作为评价热力循环的准则,建立品质因素

$$\eta_1 = E/E_{\max} \quad (10)$$

$$\eta_2 = \xi/\xi_e \quad (11)$$

称式(10)、(11)为热力循环的生态品质因素。需要指出的是,  $E$  目标的建立,不能混淆能与焓两种不同内涵的物理量,否则就不可能得到正确的生态学目标和生态品质因素;而在两种生态学目标定义中,基于焓及其耗散的  $E_2$  目标(式(5)、(7)、(9))应属优选目标。

### 4 讨论

一些文献在讨论制冷机和热泵循环的生态学优化问题时,建立了如下的目标函数<sup>[11-13]</sup>

$$E_{r3} = R - \varepsilon_e T_0\sigma \quad (12)$$

$$E_{p3} = \pi - \psi_e T_0\sigma \quad (13)$$

式(12)、(13)既不同于基于能量分析的目标  $E_{r1}$ 、 $E_{p1}$ , 也不同于基于焓分析的目标  $E_{r2}$ 、 $E_{p2}$ 。与式(1)所示  $E_{e1}$ <sup>[4]</sup> 一样,此二式在能与焓的定义上有含糊之处,是不完备的<sup>[5]</sup>;而基于此定义的生态品质因素<sup>[13]</sup> 也就不能够评判制冷机和热泵循环的完善程度。

### 参 考 文 献

1 Rubin M H. Figures of merit for energy conversion processes. *Am. J. Phys.*, 1978, 46(6):637-639

2 陈林根等. 热力循环最大利润率原理. *自然杂志*, 1991, 14(12):948-949

3 陈林根等. 热力循环的有限时间火用经济品质因素. *热能动力工程*, 1992, 7(3):159-162

4 Angulo-Brown F. An ecological optimization criterion for finite-time heat engines. *J. Appl. Phys.*, 1991, 69(11):7465-7469.

5 Yan Z. Comment on "ecological optimization criterion for finite-time heat engines". *J. Appl. Phys.*, 1993, 73(7):3583.

6 陈林根等. 卡诺制冷机的生态学优化准则. *自然杂志*, 1992, 15(8):633

7 陈林根等. 传热规律对卡诺制冷机生态学优化准则的影响. *低温与超导*, 1992, 20(1):5-10

8 陈文振等. 有限时间热机和热泵的生态学优化性能. *全国高校热物理第四届学术会议论文集*, 浙江大学出版社, 1992:37-40

9 孙丰瑞等. 内可逆卡诺热泵生态学优化性能. *海军工程学院学报*, 1993(4):22-26

10 陈林根等. 三热源制冷机的生态学最优性能. *低温工程*, 1993(3):38-40

11 严子浚. 评“传热规律对卡诺制冷机生态学优化准则的影响”. *低温与超导*, 1993, 21(2):8-10

12 严子浚等. 关于热力循环生态学准则的一点注记. *工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议论文集*, 1993, No. 931017.

13 严子浚. 热力循环的一对新品质因素. *热能动力工程*, 1993, 8(3):158-161



### 机泵转轴机械密封的技术进展

随着现代工业,特别是石油、化工、冶金等工业的发展,对各种旋转机械转轴密封的要求越来越高。国外最近提出的对于泄漏的易散逸出量控制(Fugitive Emission Control)的概念,即控制眼睛看不见的大气中易挥发物散逸出量的问题,已引起了工程密封界的重视。机泵能否正常运转,很大程度上也取决于密封结构的可靠性。机械密封具有密封性能可靠、泄漏量小、功耗省及维修工作量小等优点,能满足机器设备的连续化、自动化和高温、高压、易燃、易爆、腐蚀性介质等的密封要求,近年来,机械密封的结构又有了新的发展,进一步提高了其运行可靠性和延长了使用寿命,以下简介几种新发展的机械密封形式。

1. 组装式密封 国外大多数新型机械密封已采用此种结构。机械密封的静环、动环、轴套、弹簧、压盖等组件在安装前先组装在一起,用集装片固定在弹簧压缩的工作状态下,组装时便于检查和保证装配质量,简化了安装调整工作,还可经过试压后再正式套装在转轴密封箱内,把紧压盖螺栓,拆除集装片后,机械密封即安装完毕,不需再调整就可直接投入正常运行。

2. 监控式密封 此类密封采用附加的一系列转轴密封监控手段,来事先预测和监控机械密封运行中可能发生的故障。通常采用声发射技术进行早期密封失效监测,采用压电传感器监测摩擦副液膜厚度变化情况,采用电阻应变仪测试扭矩,监测运行工况参数与摩擦系数的关系。采用泄漏量监测方式来监控密封工作状态。有些关键设备的机械密封甚至采用了 Smart 智能监测系统,利用微机控制系统连续自动调节机构密封的各种参数,以达到最佳的运行条件。

3. 标准式密封 此类机械密封的所有零部件均属标准化元件,根据机泵在生产现场使用的不同要求,只要改变其布置及安装方式,就可以满足单端面、双端面和串级密封的要求,布置成内装或外装的密封形式,便于系列化,以适应不同机泵密封的多种要求及用途。

(四川化工总厂 汪家铭)

In this paper are discussed the real-time simulation model of a three-shaft gas turbine and some technical issued of full digital real-time emulation with the help of a MIRAGE real-time simulation workstation. To ensure the real-time simulation, the step length of the parallel digital computer must be related not only to the complexity of the object but also to the number of the bigital computers selected. The selection of a relatively small step length will necessitate the employment of more computers. **Key words:** *gas turbine, real-time simulation, parallel digital computer*

- (362) **STD Microcomputer Monitoring System for Use on Boilers**.....Wang Jingyi, Huang Qian, (Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Described in this paper is a STD standard bus computer for industrial control (designated as STD industrial control machine for short) used for monitoring the thermotechnical parameters of a 20t/h or 35t/h power station travelling-grate boiler. the related hardware, software and control principle as well as the system functions and software development process have also been dealt with briefly. **Key words:** *STD, boiler, microcomputer monitoring*

- (366) **A Study on the Solar Energy Heat-Collection Plates Made of Black-colored Stainless Steels**.....Liang Haidong, Huang Qinghai, et al (Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

This paper focuses on the manufacturing tichnology and properties of black-colored stainless steels as will as well as their sprcific features when used as solar energy heat-collection plates. **Key words:** *black-colored stainless steel, solar energy, heat-collection plate*

- (369) **Irreversible Carnot Heat Engines in Finite-time Thermodynamics**.....Yan Zijun (Xi'an University)

Several kinds of irreversible Carnot heat engine models are reviewed and a new irreversible Carnot heat engine model is proposed. In addition, the author emphasizes that during the study of irreversible heat engines within the framework of finite-time thermodynamics the effect of irreversibility on power output must be taken into account. **Key words:** *finite-time thermodynamics, Carnot cycle, irreversibility*

- (374) **The Ecological Quality Factor for Thermodynamic Cycles**.....Chen Lingen, Sun Fengrui, Chen Wenchen (Naval Academy of Engineering)

The putting forward of an ecological objective or target represents a sign of progress in the analysis of thermodynamic cycles. The ecological objective may be set up based on the viewpoints of energy or exergy, but the two viewpoints should not be confused in the analysis. The maximum value of the ecological objective function and its corresponding performance boundary may be taken as a defining relation for the evaluation of ecological objective function of thermodynamic cycles and their quality factor. **Key words:** *finite-time thermodynamics, quality factor, ecolgy, optimization criterion*