

热力循环的一对新品质因数

严子浚(厦门大学)

〔摘要〕鉴于现有热力循环品质因数的不完备性,且它们不能由有限时间经济品质因数所代替,本文提出一对新品质因数,称为生态学品质因数。这种品质因数的重要意义在于由它判断热力循环是否工作于功能率与功能率耗散最佳折衷的优化状态。

关键词 有限时间热力学 热力循环 品质因数 生态学优化准则

1 引言

有限时间热力学提出之后,Rubin^[1,2]曾基于 Curzon 和 Ahlborn 所导出的卡诺热机的最大输出功率 P_{\max} 及其相应的效率(CA效率) η_{CA} ^[3],提出一对品质因数

$$\varepsilon_p = P_{\text{actual}}/P_{\max} \quad (1)$$

$$\varepsilon_\eta = \eta_{\text{actual}}/\eta_{CA} \quad (2)$$

其意义是:标准循环应是循环的功率输出达最大值^[4]。这又称为最大功率原理。这种品质因数比经典热力学中基于第二定律分析所导出的,以可逆循环为标准的热力循环品质因数^[4,5],或称第二定律效率

$$\varepsilon_{\text{2nd law}} = \xi_{\text{actual}}/\xi_r \quad (3)$$

能更好地表征出热机循环的品质。因为实际热力循环都难免受到诸如传热等不可逆因素的影响,其实际性能系数 ξ_{actual} 要趋于可逆性能系数 ξ_r 时,循环的功能率 \mathcal{Q} (如热机的功率 P ,制冷机的制冷率 R ,热泵的泵热率 π 等)

必为零。然而,Rubin 所定义的品质因数难推广用于牛顿定律系统卡诺热泵和制冷循环,因为这两种循环的基本优化关系是单调递减型的,最大泵热率和最大制冷率时的性能系数分别为 1^[6,7]和 0^[8,9]。因此,有必要提出适合于各种热力循环的新品质因数。

文献[10]曾提出有限时间经济品质因数,其定义为

$$\varepsilon_{m,t} = \xi_{\text{actual}}/\xi_m \quad (4)$$

$$\varepsilon_{m,\pi} = \Pi_{\text{actual}}/\Pi_{\max} \quad (5)$$

其意义是:标准循环应是循环的利润率 Π 达最大值 Π_{\max} (ξ_m 为其相应的性能系数)。文献[10]称之为最大利润率原理。这种品质因数虽对各种热力学循环都适用,且对实际热力循环的设计和运行有一定的指导意义。但利润率毕竟是个经济性指标,致使这种品质因数仅适用于考虑热力循环经济性的场合^[11],而不能代替一般热力学分析中所需要的品质因数。所以有必要寻求以热力学量表征的且适用于各种热力循环的新品质因素。

收稿日期 1992-11-10

本文联系人 严子浚 男 60 教授 361005 福建厦门大学 800 信箱

2 生态学品质因数

Angulo-Brown 研究了有限时间热机的生态学优化准则⁽¹²⁾,认为工作于高温热源温度 T_H 和环境温度 T_0 间的卡诺热机,其最佳工作状态应是准则函数

$$E = P - T_0\sigma \quad (6)$$

达到最大值。式中 σ 为循环的熵产率。由式(6)可知, E 达最大意味着功率 P 与功率耗散 $T_0\sigma$ 达到最佳的折衷。这在一定的意义上与生态学的长期目标类似^(12,13),所以 Angulo-Brown 称此准则为生态学优化准则。Angulo-Brown 的研究结果还指出,卡诺热机工作在 E 最大时,一般说来功率可达最大功率的 80%,而熵产率却只有最大功率状态的 30%,因而以 E 为目标与以 P 为目标相比有其优越性。因此,生态学优化准则对有限时间热力循环的研究具有重要意义。

要使上述生态学优化准则也适用于其它热力循环,引进较为普遍的准则函数

$$E = \mathcal{R} - \lambda T_0\sigma \quad (7)$$

便可达到目的。式(7)中的 λ 可称为功率耗散系数,即循环的功能率耗散 $\lambda T_0\sigma$ 与可用性耗散率 $T_0\sigma$ 之比。这样,可引进一对由热力学量表征的,且对各种热力循环均有应用价值的新品质因数

$$\mathcal{E}_{E,\lambda} = \xi_{\text{actual}} / \xi_{\text{max},E} \quad (8)$$

$$\mathcal{E}_{E,R} = \mathcal{R}_{\text{actual}} / \mathcal{R}_{\text{max},E} \quad (9)$$

其中 $\mathcal{R}_{\text{max},E}$ 和 $\xi_{\text{max},E}$ 分别表示 E 最大时循环的功能率和性能系数。式(8)和(9)的意义是:标准循环应是循环的准则函数 E 达到最大值。与最大功率原理和最大利润率原理相对应,这可称为最大 E 函数原理。

功率耗散 $\lambda T_0\sigma$ 的物理意义是很明显的,它表示了由循环可用性的耗散率所导致的功能率耗散。换句话说, $T_0\sigma$ 这份可用性若没有耗散,则从理论上说,可用它产生 $\lambda T_0\sigma$ 的功能率。所以 λ 的数值由循环的功能率 \mathcal{R} 的性质而定。例如,当 \mathcal{R} 表示热机的功率时, $\lambda = 1$,式(7)就转化为式(6);当 \mathcal{R} 表示卡诺制冷机的制冷率时, $\lambda = \epsilon_c$ (卡诺制冷系数)⁽¹³⁾等等。

由于以函数 E 为目标的优化准则称为生态学优化准则,故由式(8)和(9)所定义的热力循环新品质因数可相应地称为生态学品质因数。生态学品质因数的重要意义在于可用它来判断热力循环是否工作于功率与功率耗散的最佳折衷的优化状态。同时它是一种纯由热力学量表征的适用性又较广泛的性能指标,对实际热力循环的分析和评价都有指导意义和参考价值。

3 内可逆卡诺热机、热泵和制冷机的生态学品质因数

现在讨论内可逆卡诺热机、热泵和制冷机的生态学品质因数,并求出其相应的 $\xi_{\text{max},E}$ 和 $\mathcal{R}_{\text{max},E}$,以示生态学品质因数的简单计算和应用。为此,设内可逆卡诺热机和热泵工作于高温热源温度 T_H 和环境温度 T_0 之间,而制冷机工作在环境温度 T_0 和低温热源温度 T_L 之间,并设循环中工质与高低温热源间的传热遵从牛顿定律,传热系数分别为 α 和 β 。

3.1 内可逆卡诺热机

对于内可逆卡诺热机, $\lambda = 1$,式(7)等价于式(6), ξ 和 \mathcal{R} 分别为循环的效率 η 和功率 P ,而生态学品质因数式(8)和(9)可表为

$$\mathcal{E}_{E,\eta} = \eta_{\text{actual}} / \eta_{\text{max},E} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{E,P} = P_{\text{actual}}/P_{\text{max-E}} \quad (11)$$

为求出 $\eta_{\text{max-E}}$ 和 $P_{\text{max-E}}$ 将内可逆卡诺热机的基本优化关系⁽¹⁴⁾

$$P = K\eta[T_H - T_0/(1-\eta)] \quad (12)$$

和熵产率

$$\sigma = K[T_H - T_0/(1-\eta)] \cdot [(1-\eta)/T_0 - 1/T_H] \quad (13)$$

代入式(6),求得准则函数

$$E = K[T_H - T_0/(1-\eta)] \cdot [2\eta - 1 + T_0/T_H] \quad (14)$$

然后再由极值条件 $dE/d\eta = 0$, 便可求得最大 E 时的效率

$$\eta_{\text{max-E}} = 1 - (T_0/T_H) \cdot \sqrt{(T_0 + T_H)/(2T_0)} \quad (15)$$

再将式(15)代入式(12),即得最大 E 时的功率

$$P_{\text{max-E}} = KT_H[1 - T_0/T_H \cdot \sqrt{(T_0 + T_H)/2T_0}] \cdot [1 - \sqrt{2T_0/(T_0 + T_H)}] \quad (16)$$

其中

$$K = \alpha\beta/(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2.$$

3.2 内可逆卡诺制冷机

对于内可逆卡诺制冷机, ξ 和 R 分别为循环的制冷系数 ε 和制冷率 $R, \lambda = \varepsilon_c = T_L/(T_0 - T_L)$, 而式(7)、(8)和(9)可分别写成

$$E = R - \varepsilon_c T_0 \sigma \quad (17)$$

$$\varepsilon_{E,\sigma} = \varepsilon_{\text{actual}}/\varepsilon_{\text{max-E}} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{E,R} = R_{\text{actual}}/R_{\text{max-E}} \quad (19)$$

为求出 $\varepsilon_{\text{max-E}}$ 和 $R_{\text{max-E}}$, 将内可逆卡诺制冷机的基本优化关系^(8,9)

$$R = K[T_L - T_0/(1 + \varepsilon^{-1})] \quad (20)$$

和熵产率

$$\sigma = R[(1 + \varepsilon^{-1})/T_0 - 1/T_L] \quad (21)$$

代入式(17),求得

$$E = K[T_L - T_0/(1 + \varepsilon^{-1})][1 - (T_L(1 + \varepsilon^{-1})/(T_0 - T_L)) + T_0/(T_0 - T_L)] \quad (22)$$

然后再应用极值条件由式(20)即可求得最大 E 时的制冷系数

$$\varepsilon_{\text{max-E}} = (T_0/T_L \sqrt{2 - T_L/T_0} - 1)^{-1} \quad (23)$$

而将(23)代入式(20),即得最大 E 时的制冷率

$$R_{\text{max-E}} = KT_L(1 - \sqrt{T_0/(2T_0 - T_L)}) \quad (24)$$

3.3 内可逆卡诺热泵

对于内可逆卡诺热泵, ξ 和 \mathcal{R} 分别为循环的性能系数 ψ 和泵热率 $\pi, \lambda = \psi_c = T_H/(T_H - T_0)$, 而式(7)、(8)和(9)可分别写成

$$E = \pi - \psi_c T_0 \sigma \quad (25)$$

$$\varepsilon_{E,\psi} = \psi_{\text{actual}}/\psi_{\text{max-E}} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{E,\pi} = \pi_{\text{actual}}/\pi_{\text{max-E}} \quad (27)$$

同样,再根据内可逆卡诺热泵的基本优化关系和熵产生率^(6,7)

$$\pi = K[T_0/(1 - \psi^{-1}) - T_H] \quad (28)$$

$$\sigma = \pi[1/T_H - (1 - \psi^{-1}/T_0)] \quad (29)$$

即可求出最大 E 时的性能系数 $\psi_{\text{max-E}}$ 和泵热率 $\pi_{\text{max-E}}$ 分别为

$$\psi_{\text{max-E}} = (1 - T_0/T_H \sqrt{2 - T_H/T_0})^{-1} \quad (30)$$

$$\pi_{\text{max-E}} = KT_H[(2 - T_H/T_0)^{-1/2} - 1] \quad (31)$$

式(30)和(31)表明,当 $T_H/T_0 \geq 2$ 时生态学优化准则失去意义,这时生态学品质因数也相应地失去意义。换句话说,牛顿定律系统卡诺热泵的生态学优化准则和生态学品质因数都仅在 $T_H/T_0 < 2$ 时才有意义。不过,实际的压缩式热泵大多用于 $T_H/T_0 < 2$ 的场合⁽¹⁵⁾。因而对热泵,生态学品质因数仍不失其固有的应用价值,仍然具有较普遍的意义。总之,生态学品质因数是一种值得重视的新品质因数,可为实际热力循环的热力学分析提供新的理论根据。

参 考 文 献

- 1 Rubin M H. Figures of merit for energy conversion processes. Am. J. Phys., 1978, 46(6), 637-639
- 2 Rubin M H. Optimal configuration of a class of irreversible heat engines, I. Phys. Rev. A, 1979, 19(3), 1272-1276
- 3 Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. Am. J. Phys., 1975, 43(1), 22-24
- 4 Ross M H. Efficient use of energy. New York: AIP, 1975
- 5 赵冠春, 钱立伦. 煤分析及其应用. 北京: 高等教育出版社, 1984
- 6 严子浚. 内可逆卡诺热泵的最优性能. 厦门大学学报(自然科学版), 1984, 23(4), 414-419
- 7 严子浚. 热阻对热泵性能的影响. 新能源, 1987, 9(6), 42-46
- 8 严子浚. 卡诺制冷机的最佳制冷系数与制冷率间的关系. 物理, 1984, 13(2), 768-770
- 9 Yan Z and Chen J. A class of irreversible Carnot refrigeration cycles with a general heat transfer law. J. Phys. D: Appl. Phys., 1990, 23(2), 136-141
- 10 陈林根等. 热力循环的有限时间非经济品质因数. 热能动力工程, 1992, 7(3), 159-162
- 11 严子浚. 关于三热源制冷机的有限时间非经济优化性能. 低温与超导, 1992, 20(2), 1-5
- 12 Angulo-Brown F. An ecological optimization criterion for finite-time heat engines. J. Appl. Phys., 1991, 69(11), 7465-7469
- 13 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
- 14 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
- 15 吕灿仁. 热泵与节能. 新能源, 1981, 3(3), 80-86

船机介绍

MFT8 船用燃气轮机

据“Gas Turbine World”1992年11-12月号报道,美国联合技术涡轮动力&船用公司和日本三菱重工公司正联合进行轻重量船用推进型 FT8—名叫 MFT8 的研制工作。

涡轮动力 & 船用公司研制的 FT8 燃气发生器配上三菱重工设计并制造的轻重量船用动力涡轮, MFT8 在 ISO 基本负荷条件下, 使用船用柴油做燃料, 最初的额定功率为 24.26MW。

得到日本政府支持, 早于 1989 年开始的 TSL (“技术超级货轮”) 计划的目标是生产高速货船, 以便作为日本列岛内陆路卡车运输的替代物, 从而减少空气污染、节省燃料消耗并减少对建造公路和桥梁的需求。

第一艘由 MFT8 驱动的原型 TSL 计划于 1994 年进行海上试验, 该船长约为 70m, 并将以气垫和半排水船形式工作, 将使用二台 MFT8 作为推进装置。

生产型 TSL 总长约为 135m, 最高航速将超过 50 节, 可装运货物 1000 吨, 航程可超过 804.5 公里, 每船将装用 4 台 24.26MW 的 MFT8 型燃气轮机。

(学奥供稿)

* * * * *

香港将建造联合循环电站

据“Turbomachinery International”1993年1-2月号报道: GEC Alsthom 公司和美国 GE 公司合伙被授予在香港建造 2400 MW Black Point 燃蒸联合循环电站主要设备的合同。合同总金额为 20 亿美元, 其中 GE 公司所占份额为 3 亿 5 千万美元。

(学奥供稿)

(154)Thermoeconomic Analysis of the Feasibility of a Home-made 3000 t/day MSF Seawater Desalination SystemHu Sangao, et al. (*Beijing Postgraduate Department under North China Power Engineering Institute*)

Employing a thermoeconomic analysis method and taking account of the specific conditions prevailing in China, the authors have made a relatively detailed thermoeconomic analysis of a 3000 t/day MSF seawater desalination system and come up with some useful conclusions, which can serve as a necessary basis for furthering the realization of the design of a home-made MSF seawater desalination system. **Key words:** *seawater desalination, thermoeconomic analysis*

(158)A Pair of New Quality Factors of a Thermodynamic Cycle.....Yan Zijun (*Xiamen University*)

In view of the defectiveness of current thermodynamic quality factors and the inability of replacing them with finite-time exergoeconomic quality factors, this paper proposes a pair of new quality factors called the ecological quality factors. The significance of such quality factors lies in the fact that they can determine whether a thermodynamic cycle is operating in the optimum condition based on a well-balanced compromise between the function rate and function rate dissipation. **Key words:** *finite-time thermodynamics, thermodynamic cycle, quality factor, ecological optimization criteria*

(162)On Curzon-Ahlborn Efficiency, Irreversible Heat Engines and the Development of Finite-Time Thermodynamics.....Chen Lingen, et al. (*Naval Academy of Engineering*)

The famous Curzon-Ahlborn efficiency η_{CA} was first deduced by El-Wakil in 1962. The irreversible heat engine model was also first set up by El-Wakil. The finite-time thermodynamics is currently undergoing a development from physics to engineering and may well bring about tremendous changes in engineering thermodynamics. **Key words:** *finite-time thermodynamics, overview*

Edited and Published by Editorial Staff of Journal of	Cable: 6511, Harbin, China
Engineering for Thermal Energy and power	Post Code Number 150036
Printer: Printing House of Harbin Institute of Technology	ISSN1001-2060
Address: P. O. Box 77, Harbin China	Periodical Registration: CN 23-1176/TK
	Distributed by China International Book Trading Corporation, P. O. Box 399, Beijing, China