

有限时间热力学中不可逆卡诺热机

严子浚(厦门大学)

〔摘要〕对几种不可逆卡诺热机模型作了述评,并提出一种新的不可逆卡诺热机模型。此外,还强调了有限时间热力学中研究不可逆热机时,必须考虑不可逆性对功率的影响。

关键词 有限时间热力学 卡诺循环 不可逆性

分类号 TK123

1 引言

有关卡诺热机,在经典热力学中主要研究可逆的。卡诺定理指出,可逆卡诺热机的效率

$$\eta_c = 1 - T_L/T_H \quad (1)$$

是工作于 T_H 和 T_L 两个温度热源间一切热机效率的最高界限,而不可逆卡诺热机的效率总是低于 η_c 。但经典热力学未能对不可逆卡诺热机的性能作出定量的描述。三十年代开始建立的非平衡态热力学,虽然成功地描述了许多不可逆现象,得出相应的关系式,但对不可逆卡诺热机仍然未能很好地作出定量的描述。以致时至今日,在工程热力学教科书中计算实际热机的效率时,仍然采用传统的方法,以可逆热机效率为基础,再考虑由各种不可逆因素所导致的效率下降,引进诸如定熵效率、等温效率……等加以修正^{〔1〕}。这样就难以对热机的效率—功率特性作出较完善的描述。因此,有必要建立不可逆热机理论。

内可逆卡诺热机模型的提出,为建立这种理论奠定了基础。人们应用它导出一些比卡诺效率公式对实际热机更有指导意义的关系式^{〔2-6〕},诸如表示循环效率—功率特性的基本优化关系(最佳功率 P 与效率 η 间的关

系)

$$P = \frac{\alpha\beta}{r(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2} \eta \left(T_H + \frac{T_L}{1-\eta} \right) \quad (2)$$

最大输出功率时的效率,即著名的 CA 效率

$$\eta_{CA} = 1 - \sqrt{T_L/T_H} \quad (3)$$

以及最大输出功率

$$P_{max} = \frac{\alpha\beta}{r(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2} T_H \eta_{CA}^2 \quad (4)$$

等等。式中 α, β 分别为工质与高、低温热源间的热传递系数, r 为循环周期与循环中两个等温过程总时间的比值。

内可逆卡诺热机与可逆卡诺热机的根本区别,在于它对有限时间中传热的不可逆性作出了定量的描述,由它可分析传热的不可逆性对热机各种优化性能所带来的根本性影响,探讨循环的效率—功率特性。这为研究有限时间中各种不可逆因素对热力过程性能的影响以及建立不可逆热机理论指明了方向,从而导致了有限时间热力学的诞生。

然而,在内可逆卡诺热机模型中,仅考虑传热的不可逆性,所以由它所导出的结果还不能对实际热机的优化性能作出较精确的描述。为使理论更进一步接近于实际,已有不少学者在内可逆卡诺热机模型的基础上,考虑传热以外的其它不可逆性,建立各种不可逆

① 收稿日期 1994-03-01

② 本文联系人 严子浚 男 60 教授 361005 厦门

卡诺热机模型,获得一些较为精确的结果。本文将对这些模型进行分析和讨论,并在此基础上提出一种新的不可逆卡诺热机模型,导出一些更有指导意义的新结论。

2 对几种不可逆卡诺热机模型的述评

自有限时间热力学提出以来,除了研究内可逆卡诺热机外,最早研究不可逆卡诺热机的是 Andresen 等人^[7],他们用三循环黑箱模型研究了有摩擦、热阻和热漏的卡诺热机的最大功率和最大效率,获得一些有意义的结果,但未深入分析热漏的影响。Bejan 于 1988 年研究了只有热阻和热漏的卡诺热机^[8],对热漏作了较仔细的分析。笔者则在内可逆卡诺热机模型的基础上,引入不可逆程度 I 来描述传热以外的其它不可逆性,研究不可逆卡诺热机的效率—功率特性,导出反映这种特性的基本优化关系^[9,10]

$$P = \frac{\alpha\beta/I}{r(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta/I})^2} \eta(T_H - \frac{IT_L}{1-\eta}) \tag{5}$$

并应用它探讨了不可逆程度 I 对热机效率—功率特性的影响。指出 I 对效率的影响,相当于低温热源的温度提高了 I 倍;而 I 对功率的影响则有两方面:一方面相当于低温热源的温度提高了 I 倍;另一方面相当于工质与低温热源之间的热传递系数减小了 I 倍^[9,10]。这就清楚地表明了传热以外的其它不可逆性,对热机效率—功率特性的影响还不仅表现在低温热源等效温度的提高,而且对热传递系数也产生了影响(从而对循环的时间分配产生了影响)。除了热机外,笔者还引进类似的不可逆程度 I 研究了不可逆制冷机,也得到了相应的结果^[11]。

Ibrahim 等人于 1991 年也采用与 I 相同的不可逆程度(只不过他们用符号 ϕ 取代 I , $\phi = 1/I$) 研究了连续流不可逆卡诺热机的

最大功率及其相应的效率,结果也表明 ϕ 对功率的影响有上述两个方面^[12]。孙丰瑞、陈林根等人于 1991 年也采用这种不可逆程度(用符号 a 表示, $a = I$) 研究了热传递规律对不可逆正、反向卡诺循环性能的影响,也得到了与上述相类似的结论^[13]。这些都清楚地表明了,在有限时间热力学中研究不可逆热机时,不应仅考虑效率,而应全面考虑效率和功率。研究制冷机时,则应全面考虑制冷系数和制冷率。

Howe 于 1982 年所提出的,用一个小于 1 的常系数 ψ 与内可逆卡诺热机效率相乘表示不可逆卡诺热机效率

$$\eta = \psi(1 - T_2/T_1) \tag{6}$$

的模型(式中 T_1 和 T_2 分别为工质在高、低两等温过程中的温度)^[14,15],与用 I 描述的模型是不同的。这从 ψ 和 I 的关系

$$\psi = (1 - IT_2/T_1)/(1 - T_2/T_1) \tag{7}$$

可清楚地看到。因为 ψ 与 I 在这两种模型中分别被视为常量。从而在各自优化过程中保持不变,而 T_2 和 T_1 是需要优化的参量,在优化过程中应视为变量。因此,用 ψ 描述和用 I 描述的两种模型的优化结果一般是不同的,两者并不等价。此外, ψ 对循环功率的影响 Howe 并未作出深入分析。总之,不能把这两种模型混为一谈。El - Wakil 于 1962 年所提出的一种不可逆卡诺热机模型^[16,12],与用 I 描述的模型也有根本的区别。它是由内不可逆循环放热时的熵变率 $\Delta S'_L$ 与内可逆循环放热时的熵变率 ΔS_L 之比

$$\Delta S'_L/\Delta S_L = 1 + i \tag{8}$$

未定义内不可逆性引起的不可用能分量 i ^[12],这意味着内不可逆与内可逆两种循环吸热时的熵变率 $\Delta S'_H$ 与 ΔS_H 是相同的。而 I 是在不可逆和内可逆两种循环的吸热量 Q'_H 与 Q_H 相同的情况下定义的不可逆程度^[9]。由于在内不可逆循环中有 $\Delta S'_H \geq Q'_H/T_1$,而在内可逆循环中有 $\Delta S_H = Q_H/T_1$ 。所以不能认为 I 与 $1 + i$ 是等价的。尤其应注意的是,要从式(8)推出内不可逆卡诺循环的效率

$$\eta = 1 - Q'_L/Q'_H = 1 - (i+1)T_2/T_1 \quad (9)$$

时, 必须有 $\Delta S'_H = Q'_H/T_1$ 和 $\Delta S'_L = Q'_L/T_2$ 。所以式(9)仅当内不可逆循环中两个等温过程只有传热的不可逆性时才适用。可见, 由式(9)所描述的不可逆卡诺热机, 与文献[17]所讨论的不可逆卡诺热机相类似, 并不能对热机中所有的不可逆性作出完全的描述。而它所能描述的内不可逆性仅是循环中两个绝热过程的不可逆性, 并不包括两个等温过程中传热以外的其它不可逆性^[9]。因此, 尽管式(9)式与用 I 描述的不可逆卡诺热机的效率表达式

$$\eta = 1 - IT_2/T_1 \quad (10)$$

形式上相类似, 但两者是有根本的区别。这样也就不可能由 i 导出象式(5)那样可概括描述包含了各种不可逆性的不可逆卡诺热机的基本优化关系。可见, 在有限时间热力学研究中, 要比较两种热机模型的异同, 仅比较循环的效率是不够的, 还必须对功率和不可逆性程度的含义进行深入分析。文献[15]仅根据式(7)、(9)和(10)就断言用 I 、 i 和 ψ 描述的三种不可逆卡诺热机模型是等同的显然是不正确的。所谓 El - Wakil 和 Howe 的不可逆热机模型, 均未深入全面分析各种不可逆性对热传递系数(从而对功率)所应有的影响, 也未导出能完整地描述热机效率—功率特性的基本优化关系。因此, 严格说来, 这两种模型都不是有限时间热力学中所研究的包含了各种不可逆性的不可逆卡诺热机模型, 特别 El - Wakil 的模型未能包括循环的两个等温过程中传热以外的其它不可逆性。所以, 不能认为 El - Wakil 最早建立了象用 I 描述那样较为普遍和清晰的不可逆卡诺热机模型。在经典热力学中, 不可逆热机的概念早就有了, 远非 60 年代或 70 年代的产物, 只不过以往未曾应用有限时间热力学方法进行研究, 故不属于有限时间热力学中所指的不可逆热机。

3 一种新的不可逆卡诺热机模型

由上述可知, 用 I 描述的和仅考虑热阻加热漏的两种不可逆卡诺热机模型都有一定的意义和用处。前者既能反映出 I 对热机效率—功率特性存在两方面的影响, 又能在实际应用区域中获得较为满意的结果; 而后者可对热阻和热漏的影响作出较精确的描述。但这两种模型都有不足之处。前者由于把 I 视为常数而未能对热漏的影响作出较精确的描述; 而后者由于忽略了热阻和热漏以外的其它不可逆性, 致使结果未能很好地与实际相一致。因此, 这两种模型都有必要改进。

本文将吸取这两种模型各自的优点, 改进其不足之处, 构作一种新的不可逆卡诺热机模型。它仍然以内可逆卡诺热机模型为基础, 再考虑其它不可逆性。只不过把二热源间的热漏从 I 中分离出来, 按每循环的热漏率

$$Q_i = \frac{Q_i}{\tau} = C_i(T_H - T_L) \quad (11)$$

进行计算, 而把热阻和热漏以外的其它不可逆性用 I_0 代替 I 来描述。式中 τ 为循环周期, Q_i 为每循环的热漏量, C_i 为热漏系数, 是个常数。

这样, 高温热源每循环提供的热量

$$Q_H = Q_{HC} + Q_i \quad (12)$$

而每循环放给低温热源的热量

$$Q_L = Q_{LC} + Q_i \quad (13)$$

其中 Q_{HC} 和 Q_{LC} 分别为热机每循环的吸热量和放热量。

另一方面, 当 $Q_i = 0$ 时, $I = I_0$ 。因此, 当 $Q_i = 0$ 时, 该热机的最佳效率 η_0 与供热率 Q_{HC}/τ 间的关系与文献[10]中所讨论的不可逆卡诺热机的最佳效率与供热率间的关系相同, 即有

$$\eta_0 = 1 - I_0 T_L / (T_H - Q_{HC}/K\tau) \quad (14)$$

其中 $K = \alpha / [r(1 + \sqrt{I_0 \alpha / \beta})^2]$ 。而由式(12)可知, 存在热漏 Q_i 时, 该热机的效率 η 与不计热漏时的效率 η_0 间的关系为

$$\eta = \frac{Q_{HC}}{Q_{HC} + Q_i} \eta_0 \quad (15)$$

将式(14)代入式(15),可得

$$\eta = \frac{Q_{HC}}{Q_{HC} + Q_i} \left(1 - \frac{I_0 T_L}{T_H - Q_{HC}/K\tau}\right) \quad (16)$$

而功率

$$P = \eta Q_H/\tau = \eta Q_{HC}/\tau + \eta Q_i \quad (17)$$

由式(11)、(15)、(17) 可得不可逆卡诺热机的效率 η 与功率 P 间的优化关系

$$\begin{aligned} & (1 - \eta)P^2 - [K(T_H - I_0 T_L) \\ & + C_i(2 - \eta)(T_H - T_L) - K\eta T_H]\eta P \\ & + C_i(T_H - T_L)[K(T_H - I_0 T_L) + C_i(T_H \\ & - T_L)]\eta^2 = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

4 讨 论

4.1 当 $I_0 = 1$ 时,式(18)可简化为

$$\begin{aligned} & (1 - \eta)P^2 - \{(T_H - T_L)[K + C_i \\ & \times (2 - \eta)] - K\eta T_H\}\eta P + C_i \\ & \times (K + C_i)(T_H - T_L)^2\eta^2 = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)正是仅考虑热阻加热漏的不可逆卡诺热机的效率 η 与功率 P 间的优化关系^[18]。可见,式(18)比式(19)更为普遍和有用,既可描述仅有热阻和热漏的热机的效率—功率特性,又可描述包含有各种不可逆性的热机的效率—功率特性。在实际应用中,只要对 I_0 作出恰当的估算,将可获得相当精确的结果。

4.2 由式(18)或(19)表示的功率—效率特性曲线是一根通过零点的闭合曲线。显然,只有这曲线的负斜率部分才是热机的合理工作区域,亦即只是从这曲线的最大效率点到最大功率点这一段区域才是实际可选用的范围,因为当热机的效率小于最大功率点的效率时,效率和功率都将减小,而当功率小于最大效率点的功率时,功率和效率也将减小,因而这样的区域都是不合理的工作区域,都不能为实际所选用。文献[15]对此有所误解,误认为“从零效率和零功率点到最大功率点附近这一区域才是实际选用的范围。”

4.3 由式(19)可得仅考虑热阻加热漏的不可逆卡诺热机在最大输出功率时的效率为

$$\eta_m = \eta_{CA}/(1 + \frac{C_L}{K} \frac{\eta_C}{\eta_{CA}}) \quad (20)$$

其中 $K = \alpha/[r(1 + \sqrt{\alpha/\beta})^2]$ 。而由式(18)可得考虑了各种不可逆效应的不可逆卡诺热机在最大输出功率时的效率为

$$\eta_{m_0} = \frac{(1 - \sqrt{\frac{I_0 T_L}{T_H}})}{(1 + \frac{C_i}{K} \cdot \frac{\eta_e}{\sqrt{1 - I_0 T_L/T_H}})} \quad (21)$$

其中 $K = \alpha/[r(1 + \sqrt{I_0 \alpha/\beta})^2]$ 。比较式(20)和(21),容易看出当 $I_0 > 1$ 时,

$$\eta_{m_0} < \eta_m \quad (22)$$

而实际热机除了热阻加热漏外还存在其它不可逆性,因而文献[15]图中的曲线3和文献[18]图中的曲线3(两者一样),并非象其作者所说的“为实际观测到的不可逆热机特性”,而是仅考虑热阻的热漏的结果。于是根据式(22),其最佳特性部分(曲线的负斜率部分)所示的效率就不可能比综合考虑了各种不可逆效应,用 I_0 或 I 描述的不可逆热机相应的效率小。文献[15]和[18]图中的曲线2和3违背了这个事实,有必要更正。在功率—效率特性曲线的实际可选用范围内,综合考虑了各种不可逆效应的结果自然比仅考虑热阻加热漏的结果更接近于实际。

4.4 用 I_0 描述的这种不可逆卡诺热机模型,虽然较好地反映出实际热机的观测性能,但它也仅是比只考虑热阻加热漏,或用 I 描述的不可逆热机模型前进了一步,仍然需要进一步改进和完善。主要应继续探索实际热机中各主要不可逆过程的演化规律,构作能反映这种演化规律的不可逆热机模型,建立更为完备的不可逆热机理论。这是有限时间热力学研究中的一个重要任务,很值得我们重视和继续探索。

参 考 文 献

1 沃克 K,马元等译.热力学(下册).北京:高等教育出版社,1982

2 Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am. J. Phys.*, 1975, 43 (1):22-24

3 Rubin M H. Optimal configuration of a class of irreversible heat engines, *I. Phys. Rev. A*, 1979, 19(3): 1272-1276

4 Salamon P, Nitzan A. Finite time optimizations of a Newton's law Carnot cycle. *J. Chem. Phys.*, 1981, 74 (6):3546-3560

5 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):1-6

6 严子浚, 二热源机的输出功率与效率间的关系. *内燃机学报*, 1987, 5(1):34-41

7 Andresen B, et al. Thermodynamics in finite time, extremals for imperfect heat engines. *J. Chem. Phys.*, 1977, 66(4):1571-1577

8 Bejan A. Theory of heat transfer-irreversible power plants. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1988, 31(6):1211-1219

9 严子浚. η_p 最大时不可逆卡诺热机的 η 和 p . *热能动力工程*, 1989, 4(6):1-6

10 严子浚. 不可逆卡诺热机的最佳效率与供热率间的关系. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1991, 30(1):25-28

11 严子浚. 不可逆卡诺制冷机的最优性能. *制冷学报*, 1990(3):11-15

12 Ibrahim O M, et al. Optimum heat power cycles for specified boundary conditions, *Trans. ASME J. Engng. Gas Turbine Pow.*, 1991, 113(4):514-521

13 孙丰瑞等. 不可逆正、反向卡诺循环的最优性能与焓生产率. *工程热物理学报*, 1991, 12(4):357-359

14 Howe J P. The maximum power, heat demand and efficiency of a heat engine operating in steady state at less than Carnot efficiency. *Energy*, 1982, 7(4):401-402

15 陈林根等. 关于 CA 效率、不可逆热机和有限时间热力学发展. *热能动力工程*, 1993, 8(3):162-164

16 El-Wakil M M. *Nuclear power engineering*. New York: McGraw-Hill, 1962

17 李继坤, 不可逆卡诺热机的最大功率, *物理*, 1989, 18(2):89-93

18 陈林根等. 不可逆热机的功率效率特性. *科学通报*, 1993, 38(5):480

俄罗斯涅瓦厂的燃气轮机

据《ТЯЖЕЛОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ》1994 №4 报导, 涅瓦工厂近年来生产了多型燃气轮机。该厂功率为 31MW 的 ГТЭ-32 为多轴燃气轮机, 它由高低压压气机、高低压涡轮和动力涡轮组成, ГТЭ-32 于 1992 年初进行了交付验收试验。该厂功率为 43.9MW 的 ГТЭ-45 的主要部件和涡轮压气机的通流部分采用 ГТЭ-32 的相应的构件, 但它是单轴结构。涅瓦工厂功率为 50MW 的 ГТЭ-60 采用冷却叶片, 其初温为 1100℃。下表列出上述三型燃气轮机在 ISO 条件下的基本情况。

名称	单位	ГТЭ-32	ГТЭ-45	ГТЭ-60	
功率	MW	31.0	43.9	57.0	
效率	%	27.2	31.3	32.5	
燃气温度	涡轮前	℃	925	950	1100
	涡轮后		433	428	512
空气流量	kg/s	189.5	221	220	
压缩比	—	13.1	14.1	14.8	
寿命	大修前	h	25 000	25 000	25 000
	全寿命		1 000 000	100 000	10000
生产日期		1991 年	1993 年	1994 年	
尺寸:长×宽×高	m	15.3×3.75×3.4	9.0×4.0×3.0	9.0×4.0×3.0	

(谈增祥 供稿)

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*