

考虑热漏影响的热泵装置有限时间热力学性能

陈林根 孙丰瑞 陈文振

(海军工程学院)

[摘要] 本文研究热漏对热泵装置最优性能的影响, 导出存在热阻和热漏损失的定常态流不可逆卡诺热泵最佳供热系数与供热率关系, 所得结果与仅存在热阻损失时的内可逆卡诺热泵供热系数供热率特性关系有量和质的区别。

关键词 有限时间热力学 不可逆热泵 最优性能

分类号 TK 123

1 引言

自 EL-Wakil 和 Curzon-Ahlborn^(1,2) 导出仅存在热阻损失的卡诺热机最大功率输出时的效率界限 η_{CA} 以来, 有限时间热力学有了长足的发展⁽³⁻⁵⁾, 研究对象也由热机扩展到了制冷机和热泵⁽⁶⁻⁸⁾。有限时间热力学研究的基本模型为内可逆循环, 即仅考虑工质与热源间的传热不可逆性。实际热泵循环中, 除了热阻损失之外, 还有热漏、摩擦等不可逆损失。Bejan 提出了计入热阻和热漏不可逆性的定常态流热机⁽⁹⁾和制冷机⁽¹⁰⁾模型, 本文作者在此基础上的进一步研究表明^(11,12), 计入热漏影响后的热机与制冷机特性关系与内可逆条件下的特性有本质区别。因此, 本文基于文献[9-12]的工作, 提出一个考虑热阻和热漏损失的不可逆热泵模型, 导出其最佳供热系数与供热率间的特性关系, 所得结果与内可逆循环特性⁽⁶⁻⁸⁾有本质区别。本文结果从一个侧面反映了实际热泵装置特性与内可逆热泵循环的区别, 说明了建立不可逆热泵模

型的必要性和重要性。

2 仅存在热漏损失时的最优性能

考虑图1所示的定常态流热泵模型, 热源温度分别为 T_H 、 T_L , 装置中唯一的不可逆性为从 T_H 到 T_L 的热漏损失(热漏流率) \dot{Q}_l ,

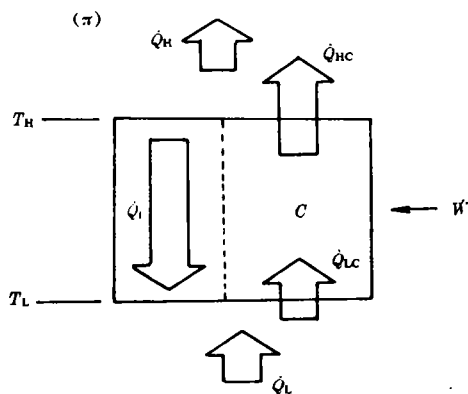


图1 仅存在热漏损失的定常态流热泵循环

收稿日期 1993 04 19

本文联系人 陈林根 男 30 副教授 430033 武汉 海军工程学院 306 教研室

且有

$$\dot{Q}_i = C_i(T_H - T_L) \quad (1)$$

式中, C_i 为热泵装置的热导率。式(1)的热漏模型是由 Bejan^[13] 首次提出的。

在图 1 所示的热泵模型中,除了 C_i 部分不可逆性外,其余部分(标以 C)为可逆的,故由热力学第二定律有

$$\dot{Q}_{HC}/T_H = \dot{Q}_{LC}/T_L \quad (2)$$

式中 \dot{Q}_{HC} 、 \dot{Q}_{LC} 为放、吸热流率(设可逆热交换),由于热漏的影响,有

$$\dot{Q}_{HC} = \dot{Q}_H + \dot{Q}_i = \pi + \dot{Q}_i \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{LC} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_i \quad (4)$$

式中 \dot{Q}_H 为扣除热漏影响的真实放热率,也即为供热率 π 。而由热力学第一定律可有热泵的输入功率为

$$\dot{W} = \dot{Q}_{HC} - \dot{Q}_{LC} \quad (5)$$

循环的供热系数为

$$\psi = \dot{Q}_H/\dot{W} = \pi/\dot{W} \quad (6)$$

由式(3) - (5)可知, $\dot{W} = \pi - \dot{Q}_L = \pi + \dot{Q}_i - \dot{Q}_{LC}$, 又由式(2)知, $\dot{Q}_{LC} = \dot{Q}_{HC}T_L/T_H = (\pi + \dot{Q}_i)T_L/T_H$, 注意到式(1), 则可将式(6)写成

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\pi T_H}{\pi(T_H - T_L) + C_i(T_H - T_L)^2} \\ &= \frac{\pi \psi_c}{\pi + C_i(T_H - T_L)} \end{aligned} \quad (7)$$

或

$$\pi = \frac{C_i(T_H - T_L)^2 \psi}{T_H - (T_H - T_L)\psi} = \frac{C_i(T_H - T_L)\psi}{\psi_c - \psi} \quad (8)$$

可见,在仅存在热漏损失时,供热率 π 与供热系数 ψ 呈单调递增关系,当 $\psi = 1$ 时, $\pi = C_i(T_H - T_L)/(\psi_c - 1)$; 当 $\psi = \psi_c$ 时 $\pi \rightarrow \infty$ 。式中 ψ_c 为 T_H 、 T_L 热源间工作的可逆热泵供热系数, $\psi_c = T_H/(T_H - T_L)$ 。若 $C_i = 0$, 即热泵循环为可逆时,有 $\psi = \psi_c$ 。即热漏的存在,改变了 π - ψ 关系。

3 存在热阻和热漏时的最优性能

考虑图 2 所示的定常态流热泵模型,装置中的不可逆性包括工质与热源间经由换热器的不可逆传热和装置的热漏。由于换热器的有限面积特性,工质相应于 T_H 、 T_L 热源的工作温度分别为 T_{HC} 、 T_{LC} , 且 $T_{HC} > T_H > T_L > T_{LC}$, 设传热服从牛顿定律,则通过换热器传递的热流率分别为

$$\dot{Q}_{HC} = \alpha F_1(T_{HC} - T_H) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{LC} = \beta F_2(T_L - T_{LC}) \quad (10)$$

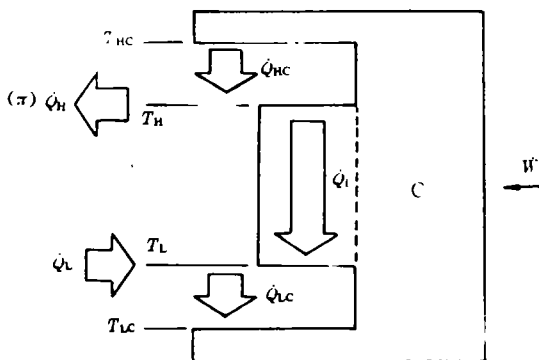


图 2 存在热阻和热漏的定常态流不可逆热泵循环

式中, α 、 β 分别为工质与高、低温热源间的总传热系数, F_1 、 F_2 分别为传热面积, 且有

$$F_1 + F_2 = F \quad (11)$$

F 为工质与高、低温热源间换热器的总传热面积。

在图 2 所示的热泵模型中,除了 αF_1 、 βF_2 和 C_i 外,其余部分(标以 C)为可逆的,故由热力学第二定律有

$$\dot{Q}_{HC}/T_{HC} = \dot{Q}_{LC}/T_{LC} \quad (12)$$

定义面积比

$$f = F_1/F_2 \quad (13)$$

由式(9)、(10)、(12)和(13)可有

$$\frac{\dot{Q}_{HC}}{\dot{Q}_{LC}} = \frac{T_{HC}}{T_{LC}} = \frac{T_{HC} - T_H}{T_L - T_{LC}} f \alpha / \beta \quad (14)$$

由上式可得

$$\frac{T_{LC}}{T_{HC}} = \frac{T_L}{(1 + f\alpha/\beta)T_{HC} - T_H f\alpha/\beta} \quad (15)$$

而由式(3)、(10)、(11)和(13)可有

$$T_{HC} = T_H + [\pi + C_i(T_H - T_L)] / (1 + f) / (\alpha F) \quad (16)$$

又由式(3) - (5)和(12)有

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{Q}_{HC}(1 - T_{LC}/T_{HC}) \\ &= (\pi + \dot{Q}_i)(1 - T_{LC}/T_{HC}) \end{aligned} \quad (17)$$

将式(15) - (17)代入式(6)可得 ψ 、 π 间的一般关系为

$$\begin{aligned} \psi &= \pi / [(\pi + \dot{Q}_i)(1 - T_{LC}/T_{HC})] = \pi / [\pi + C_i(T_H - T_L)] \\ &\times \left\{ 1 - \frac{T_L}{T_H + [\pi + C_i(T_H - T_L)](1 + f)(1 + f\alpha/\beta)/(\alpha F)} \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (18)$$

在一定的 π 、 T_H 、 T_L 、 C_i 、 α 和 β 下, ψ 是 f 的函数,由 $d\psi/df = 0$ 可得 $f = f_*$

$$f_* = (\beta/\alpha)^{0.5} \quad (19)$$

时,有 ψ 的最佳值,也即得 π 、 ψ 间最佳关系为

$$\psi = \frac{B\pi^2 + [T_H + BC_i(T_H - T_L)]\pi}{B\pi^2 + (1 + 2BC_i)(T_H - T_L)\pi + C_i(1 + BC_i)(T_H - T_L)^2} \quad (20)$$

式中,

$$B = (\alpha^{0.5} + \beta^{0.5})^2 / (\alpha\beta F) \quad (21)$$

从式(20)可知,存在一个值 π_m 使 ψ 取极大值.由 $d\psi/d\pi = 0$ 得

$$\begin{aligned} &B[T_L - BC_i(T_H - T_L)]\pi^2 - 2BC_i(1 + BC_i)(T_H - T_L)^2\pi \\ &- [T_H + BC_i(T_H - T_L)]C_i(1 + BC_i)(T_H - T_L)^2 = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

解式(22)(舍去不合题意的根)得,当 $\pi = \pi_m$ 时,

$$\pi_m = \frac{BC_i(1 + BC_i)(T_H - T_L)^2 + (T_H - T_L)[BC_i(1 + BC_i)T_H T_L]^{0.5}}{B[T_L - BC_i(T_H - T_L)]} \quad (23)$$

有最大供热系数

$$\begin{aligned} \psi_{\max} &= \frac{\{BC_i(1 + BC_i)(T_H - T_L) + [BC_i(1 + BC_i)T_H T_L]^{0.5}\}}{2BC_i(1 + BC_i)T_H T_L + [BC_i T_H + (1 + BC_i)T_L][BC_i(1 + BC_i)T_H T_L]^{0.5}} \\ &\times \{T_H T_L / (T_H - T_L) + [BC_i(1 + BC_i)T_H T_L]^{0.5}\} \end{aligned} \quad (24)$$

为了使 π_m 、 ψ_{\max} 有意义,应有 $\pi_m > 0$,故由式(23)可知 ψ 存在极值的条件为

$$BC_i < T_L / (T_H - T_L) \quad (25)$$

由 Bejan 对热机的讨论可知^[9], $C_i / (\alpha F_1 + \beta F_2) \approx 0.04$,当 $f = f_*$ 时, $B = 4 / (\alpha F_1 + \beta F_2)$,所以有 $BC_i \approx 0.16$,而对较低环境温度 $T_L = 273 \text{ K}$, $T_L / (T_H - T_L) > 0.16$ 即为 $T_H < 1980 \text{ K}$,这对热泵而言温差范围是足够的了,因此 π_m 、 ψ_{\max} 是普遍存在的。

又对热泵而言,须有 $\psi > 1$,故由式(20)可得

$$\pi > \pi_{\min} = \frac{C_i(1 + BC_i)(T_H - T_L)^2}{(1 + BC_i)T_L - BC_i T_H} \quad (26)$$

而当 $\pi \rightarrow \infty = \pi_{\max}$ 时又有 $\psi = 1$ 。

对仅存在热阻损失的内可逆循环, $C_i = 0$,则式(20)所示的最佳供热率、供热系数关系化为

$$\psi = \frac{B\pi + T_H}{B\pi + T_H - T_L} \quad (27)$$

或

$$\pi = \frac{1}{B} \left(\frac{T_L}{1 - \psi^{-1}} - T_H \right) \quad (28)$$

即为文献[6 - 8]的结果,此时 π 、 ψ 呈单调递

减关系,当 $\psi = \psi_c$ 时 $\pi = 0$, 当 $\psi = 1$ 时 $\pi \rightarrow \infty$ 。显然,热漏是否存在对热泵的供热率供热系数特性关系有质和量的影响。只要有热漏存在,不管其影响有多大,总是存在两个 $\psi = 1$ 点和一个 $\pi = \pi_{min}$ 点;而不存在热漏时,仅存在一个 $\psi = 1$ 点和一个 $\pi = 0$ 点。这在 $\pi-\psi$ 曲线关系上是有很大区别的。

对仅存在热漏的循环,即具有无限面积特性的循环, $F \rightarrow \infty$, 故 $B \rightarrow 0$, 则式(20)所示的最佳供热率、供热系数关系化为上节导出的式(7)。可见,热阻的存在与否对热泵的供热系数供热率特性关系也有量和质的区别。

4 数值算例

取 $T_H = 300\text{ K}$, $T_L = 273\text{ K}$, $B = 1$ 为例进行计算。此时 $\psi_c = T_H / (T_H - T_L) = 11.11$ 。根据 Bejan 的分析⁽⁹⁾, 取 $BC_i = 0.16$, 即 $C_i = 0.16$ 。则当 $\pi = \pi_{min} = 0.504\text{ W}$ 时, $\psi = 1$; 当 $\pi \rightarrow \infty$ 时, $\psi \rightarrow 1$; 当 $\pi_m = 12.89\text{ W}$ 时, 有 $\psi_{max} = 5.37$ 。 $\pi \sim \psi$ 关系见图 3 中曲线 3。

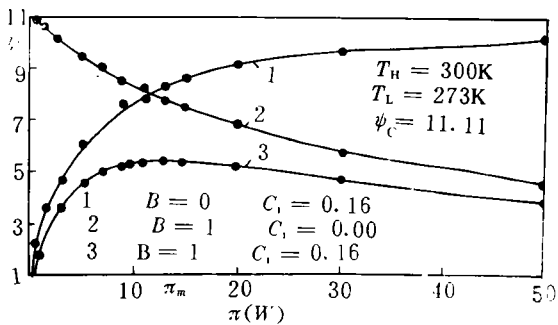


图 3 供热率、供热系数特性关系

内可逆循环,即 $C_i = 0, B = 1$ 时的 $\pi - \psi$ 关系见图 3 中曲线 2, 当 $\pi = 0$ 时有 $\psi = \psi_c = 11.11$, 当 $\pi \rightarrow \infty$ 时有 $\psi = 1$ 。

仅有热漏损失存在,而传热面积无限时的 $\pi-\psi$ 关系见图 3 中曲线 1, 当 $\pi = \pi_{min} = 0.427\text{ W}$ 时 $\psi = 1$, 当 $\pi \rightarrow \infty$ 时有 $\psi \rightarrow \psi_c = 11.11$ 。

曲线 1、2、3 代表了三种热泵循环模型。可见这三种模型有量与质的区别。曲线 3 代表了存在热阻和热漏损失的不可逆热泵特性关系,它比曲线 2 代表的内可逆热泵特性曲线更接近实际不可逆热泵特性关系。

5 结论

1 存在热阻和热漏不可逆性时,定常态流热泵的供热率供热系数关系与仅存在热阻不可逆性的内可逆循环和仅存在热漏损失的循环的特性关系不仅有量的区别,而且有质的区别。

2 实际热泵存在热阻、热漏等很多不可逆因素,其内部机制远比本文讨论的模型复杂。因此实际不可逆热泵的特性关系可能比本文所得结果更复杂。在建立完善的“不可逆热泵”理论模型时,应充分注意到热漏损失对特性关系的影响特点。

3 本文结果虽然是基于连续流热泵模型得到的,但对活塞式热泵也定性适用,只要用活塞式热泵的有限时间特性代替有限面积特性,用求最佳时间分配比代替本文的最佳面积比即可。

4 热阻损失和热漏损失的形式肯定对热泵的 $\pi-\psi$ 关系有重要影响。本文只导出了双重牛顿定律(热阻与热漏均服从牛顿定律)系统下的特性关系,还有必要同时研究导热规律对存在热阻和热漏损失的热泵性能的影响,作者将进一步展开研究工作。

参 考 文 献

- 1 El-Wakil M M. Nuclear Power Engineering. New York, McGraw Hill, 1962
- 2 Curzon F L, Ahlborn B. The efficiency of a Carnot engine at maximum power output. Am. J. Phys., 1975, 43(1): 22-24
- 3 Sieniutycz S, Salamon P. edited. Advances in Thermodynamics. Volume 4, Finite - Time Thermodynamics and Thermoeconomics. New York; Taylor & Francis, 1990
- 4 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 有限时间热力学研究新进展. 自然杂志, 1992, 15(4): 249-253
- 5 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 能量系统有限时间热力学的现状和展望. 力学进展, 1992, 22(4): 479-488
- 6 Blanchard C H. Coefficient of performance for finite speed heat pump. J. Appl. Phys., 1980, 51(5): 2471-2472
- 7 严子浚. 热阻对热泵性能的影响. 新能源, 1987(6): 42-46
- 8 孙丰瑞, 陈文振, 陈林根. 不可逆正反向卡诺循环的熵产率与最优性能. 工程热物理学报, 1991, 12(4): 357-360
- 9 Bejan A. Theory of heat transfer - irreversible power plants. Int. J. Heat Mass Transfer, 1988, 31(6): 1211-1219
- 10 Bejan A. Theory of heat transfer - irreversible refrigeration plants. Int. J. Heat Mass Transfer, 1989, 32(9): 1631-1639
- 11 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 不可逆热机的功率、效率特性: 以内热漏为例. 科学通报, 1993, 38(5): 480
- 12 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 热漏对制冷机制冷率制冷系数特性的影响. 低温与超导, 1992, 20(4): 7-12.
- 13 Bejan A. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. New York: Wiley, 1982

节能技术

电站辅机用的可变速 驱动装置

据“火力原子力发电”1993年4月号报导,日本关西电力公司和三菱电气公司已研制成新型供电站辅机用的可变速驱动装置。在考虑环境影响时,能源的节省和保护、增加运行效率是所有电力生产公司关注的主要问题。可以实现的一个有效的改进是对电站辅机采用可变速驱动装置。很遗憾,由于它们的尺寸,安装可变速驱动装置常常成为一个问题。现在三菱电气公司已研制了一种极为紧凑的闸门电路断开可控硅(GTO)可变速驱动装置。该装置可安装在空间受限制的场所。

目前,这种GTO可变速驱动装置已提供给日本GOBOU电站三号机组,用于烟气再循环风扇,室外安装,空间位置受严格限制。GTO可变速驱动装置需要的空间是类似额定功率可控硅可变速驱动装置所需要空间的三分之一,从而节省下来的空间为电站许多其它辅机配备可变速驱动装置提供了可能性。这样一来,进一步改进了电站的运行效率并提高了能源的利用效率。

(学牛 供稿)

cessed were the heat transfer data of the high-pressure two-phase steam/water flow in $\Phi 32 \times 3$ mm slightly inclined tubes and satisfactory results have been obtained. **Key words:** *temperature field, source item, two-phase flow, heat release factor, boundary conditions, model*

- (98) **Numerical Simulation of Water Film Flow on a Rotating Plate** Li Xuelai (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

A numerical simulation is conducted of water film flows on a steam flow-swept rotating plate. The speed distribution of such water film flows has been determined along with the water film thickness distribution variation relationship. **Key words:** *rotating plate, water film, steam turbine, wetness removal*

- (104) **An Investigation of Built-up Laminated Sheet Characteristics under the Condition of Transverse Displacements** Wang Xinfeng, Fang Honghui (*Nanjing Aeronautical Institute*)

By the use of Hellinger-Reissner variation functional the authors present a hybrid single-element model of multi-layer thin sheets and have made an analytical computation of the characteristics of built-up laminated sheets based on the use of hybrid single elements in the presence of transverse displacements. The correctness of the computation method has been corroborated by experiments. **Key words:** *built-up laminated sheet, hybrid single element, stress, calculation*

- (111) **An Exploratory Investigation of the Computer-Based Control of Utility Coal-Fired Boiler Furnace Combustion** Zhou Huaichun, Han Caiyuan (*Key National Laboratory for Coal Combustion Research at Central China Polytechnical University*)

In this paper is discussed the problem concerning the coal-firing system computer-based control for utility coal-fired boilers through the use of conventional control techniques. The authors focus on the following aspects: simulation research approaches, proper PID parameter setting method, the compensation of measurable internal perturbation by the fuel control loop, the treatment of nonlinear fan regulation valve in the air flow rate control loop. Some new understanding as regards a new type of combustion control mode is also presented. **Key words:** *boiler, combustion control, computer applications*

- (117) **Rapid Determination of Coal's Proximate Analysis with the Help of a Thermogravimetric Method** Zhu Qunyi, Zhao Guangbo, Huang Yimin, Chen Chongsu, Yu Hongbin (*Harbin Institute of Technology*)

The authors explore the possibility of determining coal's proximate analysis with the aid of thermogravimetric method and present the test conditions and results. It is found that the results of proximate analysis based on the TG method are in good agreement with those obtained with a standard method. **Key words:** *thermal balance, thermogravimetric method, coal's proximate analysis*

- (121) **The Finite-Time Thermodynamic Performance of Heat Pump Plants with the Heat Leak Effect being Taken into Account** Chen Lingen, Sun Fengrui, Chen Wenzhen (*Wuhan Naval Academy of Engineering*)

一体化除氧器

哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所引进、消化国外先进技术,先后于1992年和1993年研制出力为100 t/h、175 t/h和420 t/h一体化高、低压除氧器。

一体化除氧器是目前世界上先进的除氧设备,它已在欧洲发达国家广泛应用。这种除氧器是把全部除氧机构设置在存水箱内,取消了常规除氧器中的除氧头,从而大大减少除氧器的空间尺寸(特别是高度尺寸)和金属耗量,具有结构紧凑、重量轻、除氧效果好等优点。

一体化除氧器是利用特殊自调式喷水装置将进入除氧器的给水雾化并喷入水箱内进行一次除氧,然后给水在水箱内用蒸汽加热和鼓泡的方法进行二次除氧。系统中各种高参数的汽水进口管系可接入存水箱不同的温度区间内进行混合加热利用。这种除氧器可保证各种不同负荷下给水出口含氧量均不超过规定的要求。

该研究所可设计或承包供货出力从50 t/h至500 t/h的各种规格系列化除氧器产品(含特殊自调式喷水装置)。

一体化除氧器用户统计表

时间	用 户	台 数	出 力 (t/h)	设计压力 (MPa)	除氧水含氧量 (mg/l)
1992年	巴基斯坦费萨拉巴德联合循环电站	1	175	0.7	≤0.005
1992年	巴基斯坦柯特里联合循环电站	1	175	0.7	≤0.005
1993年	大庆石化总厂自备热电厂	1	420	0.05	≤0.007

服务方式:产品设计、制造、供货、现场调试 联系地址:哈尔滨市香坊区公滨路452号

通讯处:150036 哈尔滨77信箱3分箱肖福田 电 话:(0451)5662882转三室

电 传:87157 HMBTR CN 电 挂:6511 传 真:5662885

The influence of heat leak on heat pump optimal performance was studied. Also obtained was the relationship between the optimal heat supply factor and the coefficient of performance (COP) for a steady-state irreversible heat pump with irreversibilities of heat resistance and heat leak. The heat supply rate versus COP characteristics thus obtained was quantitatively and qualitatively different from that for an endoreversible Carnot heat pump. **Key words:** *finite time thermodynamics, irreversible heat pump, optimal performance*

Edited and Published by Harbin Marine
Boiler & Turbine Research In-
stitute and Editorial Staff of
this Journal

Printer: Printing House of Harbin Institute
of Technology

Address: P. O. Box 77, Harbin China

Cable: 6511, Harbin, China

Post Code Number 150036

Periodical Registration: ISSN1001-2060
CN23-1176/TK

Distributed by China International

Book Trading Corporation,

P. O. Box 399, Beijing, China