

有限时间内不可逆卡诺热机的最少循环时间和熵产的关系

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001) 刘仕强 杨玉顺

摘 要: 对有限时间热力学时间问题进行了探讨, 推导出了有限时间内不可逆卡诺热机的内不可逆熵产与最少循环时间成单调递减关系, 并指出熵不仅能标示时间之矢, 而且能够计算时间之量。

关 键 词: 有限时间热力学; 时间; 熵产

中图分类号: TK123 文献标识码: A

1 研究时间问题的重要意义

1822 年, 法国学者傅立叶以严格的数学形式表述了热传导定理。热传导取决于温度梯度, 热只能从高温传向低温; 热传导是不可逆的, 这是自然界研究时间箭头的开始。1824 年, 卡诺发表题为“关于热动力学以及热动力机制的看法”的经典论文。指出了功和热的转变是不对称的, 这中间就包含了时间箭头。1850 年, Clausius 在他的著名论文“热的唯动说”中提出了熵的概念, 使热力学第二定律从定性形式发展为定量形式, 并把热力学第二定律表述为熵增加原理。1927 年, 著名物理学家 A. S. Eddington 在爱丁堡大学首先提出“时间之箭”的说法, 并且指出: “至今物理学所说的时间之箭, 仅仅只是熵的性质。”本世纪 60 年代至 70 年代, 比利时的 Prigoging 等人提出耗散结构理论, 指出: “进化论所说的生物体内部复杂趋势与开放系统的熵减少是一致的。”时间箭头问题进一步扩展到理论物理学、天体物理学和信息论, 并被列为本世纪没有解决的四大物理学难题之一^[1~3]。对于热动装置而言, 在军事上、民用上也常常需要在一定的时间内达到某种目的如在指定时间内输出多少功或指定某个时间到达指定某一点。要减小循环时间, 就需要增大功率的输出, 但同时是否会必然导致不可逆损失的增加, 时间和不可逆损失是否有必然的联系, 这就需要弄清循环时间和不可逆损失之间的定量关系式。因此, 本文对于内不可逆卡诺热机的最少循环时间的熵产关系式

的探讨不仅具有理论意义, 而且具有一定的实际价值。

2 有限时间热力学时间问题研究的现状

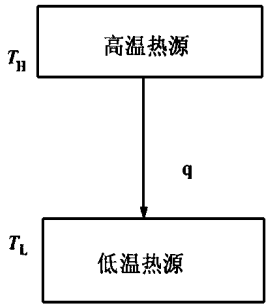
1993 年, 海军工程学院的陈林根、孙丰瑞、陈文振在《热能动力工程》杂志上发表的《关于 CA 效率、不可逆热机和有限时间热力学发展》一文中, 指出开创热力学的标志是卡诺效率, 达到卡诺效率的条件是热机可逆运行即在过程中系统保持内平衡, 系统和环境的总熵不变, 且过程进行的时间为无限长, 而此时的功率输出为零。然而, 所有的实际过程永远不可能达到这一界限, 由于系统和环境之间的交换速率不为无限小, 系统不能保持内平衡, 过程时间是有限的。于是, 为了研究有限时间内完成的热力过程的性能特点, 热力学派生出了一个新分支——有限时间热力学^[4]。

但是, 陈林根等人指出的这句话: “达到卡诺效率的条件是热机可逆运行即在过程中系统保持内平衡, 系统和环境的总熵不变, 且过程进行的时间为无限长”引起了笔者的思考, 熵能够标示时间之矢, 是否也能够计算时间之量呢? 是否存在着计算公式能够揭示熵和时间的定量关系? 直到 1998 年 12 月, 陈林根等人在《物理学进展》杂志上发表的《有限时间热力学理论和应用的发展现状》一文中^[5], 仍未见有限时间热力学对时间问题的深入探讨。

笔者对此进行了研究和思考, 在美国圣迭哥大学数学系的 James D. Nulton, Peter Salamon 和 Raj K. Pathria 于 1993 年推导出两热源传热时间的熵表达式的基础上^[6], 结合有限时间热力学的内不可逆卡诺热机的理论, 推导出了有限时间内不可逆卡诺热机系统循环时间与内不可逆熵产之间的关系式。

3 有限时间内不可逆卡诺热机运行时间与熵产的关系式

首先, 确立高温热源 T_H 向低温热源 T_L 传热的模型:



从此模型可得^[4]:

$$q = q_H = q_L \quad (1)$$

$$\Delta S_1 = - \int_0^\tau \frac{q_H}{T_H(t)} dt \quad (2)$$

$$\Delta S_2 = \int_0^\tau \frac{q_L}{T_L(t)} dt \quad (3)$$

认为热源是恒温的,

则 $T_H(t) = \text{const}, T_L(t) = \text{const}$; 可得:

$$- \Delta S_1 T_H = \Delta S_2 T_L$$

$$= q\tau = K(T_H - T_L)\tau \quad (4)$$

式中: t 和 τ 表示的是时间, 量纲为 S; K 表示的单位时间的总换热系数, 其量纲为 $J/K \cdot S$; q 表示单位时间的热流量, 其量纲为 J/S ; ΔS 表示的是热熵流, 其量纲为 J/K .

$$\tau = \frac{-\Delta S_1 T_H}{q} = - \frac{\Delta S_1 T_H}{K(T_H - T_L)} \quad (5)$$

因为, $T_L = - \Delta S_1 T_H$

ΔS_2 , 代入上式:

$$\tau = - \frac{\Delta S_1 T_H}{K \left[T_H - \left(\frac{-\Delta S_1 T_H}{\Delta S_2} \right) \right]} = - \frac{\Delta S_1 \Delta S_2}{K(\Delta S_1 + \Delta S_2)} \quad (6)$$

式中的 $\Delta S_1 < 0$, 还可从上式中看出, 当环境和系统所构成的孤立系的总熵即熵产 $\Delta S_{\text{irr}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 \rightarrow 0$, 则 $\tau \rightarrow \infty$; 也就是指当不考虑传热温差产生的不可逆损失时, 此理想化的传热过程的时间为无限长。

Tames D. Nulton 等人, 运用积分的一条性质巧妙地证明了上式为两热源传热的最少循环时间的熵产表达式^[4]:

由上已知:

$$q = q_H = q_L \quad (7)$$

$$K(T_H - T_L) = q \quad (8)$$

$$- \Delta S_1 T_H = q_H \quad (9)$$

$$\Delta S_2 T_L = q_L \quad (10)$$

式中, ΔS 表示的是单位时间的热熵流, 其量纲为 $J/(K \cdot S)$ 。消除 q , 得:

$$\Delta S_1 + K = K \frac{T_L}{T_H} \quad (11)$$

$$\Delta S_2 + K = K \frac{T_H}{T_L} \quad (12)$$

两式相乘得:

$$(\Delta S_1 + K) \cdot (\Delta S_2 + K) = K^2 \quad (13)$$

两式相除得:

$$\frac{\Delta S_1 + K}{\Delta S_2 + K} = \left(\frac{T_L}{T_H} \right)^2 \quad (14)$$

设:

$$f(t) = \sqrt{\Delta S_1(t) + K} \quad (15)$$

$$g(t) = \sqrt{\Delta S_2(t) + K} \quad (16)$$

则:

$$f(t) \cdot g(t) = K, \quad \frac{f(t)}{g(t)} = \frac{T_L}{T_H} \quad (17)$$

由积分的性质可得:

$$\left(\int_0^\tau f(t) g(t)^2 dt \right) \leq \left(\int_0^\tau f(t)^2 dt \right) \left(\int_0^\tau g(t)^2 dt \right) \\ K^2 \tau^2 \leq (\Delta S_1 + K\tau) (\Delta S_2 + K\tau) \quad (18) \\ \tau \geq \frac{-\Delta S_1 \Delta S_2}{K(\Delta S_1 + \Delta S_2)}$$

此式 $\tau_{\text{min}} = \frac{-\Delta S_1 \Delta S_2}{K(\Delta S_1 + \Delta S_2)}$ 为两热源传热过程所需的最少循环时间。

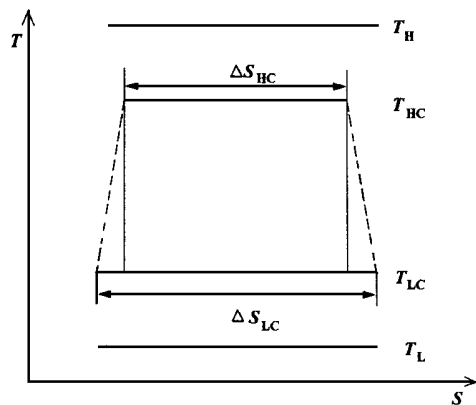


图 2 恒温热源有限时间内不可逆卡诺热机分析模型

本文作者在此基础上推导出了有限时间内不可逆卡诺热机的循环时间与熵产的关系式。恒温热源有限时间内不可逆

卡诺热机分析模型如图 2:

由图 2, 根据热力学第一、二定律, 可得:

$$Q_H = K_H(T_H - T_{HC}) \tau_H \quad (19)$$

$$Q_L = K_L(T_{LC} - T_L) \tau_L \quad (20)$$

$$W = Q_H - Q_L \quad (21)$$

$$\frac{Q_H}{T_{HC}} = \phi \frac{Q_L}{T_{LC}} \quad (22)$$

上式中, ϕ 为表述主要由耗散因素造成的内不可逆损失的不可逆因子, 则内不可逆熵产为:

$$\Delta S_P = \frac{Q_L}{T_{LC}} - \frac{Q_H}{T_{HC}} = (1 - \phi) \frac{Q_L}{T_{LC}} \quad (23)$$

高温热源和热机热端工质的传热时间为:

$$\tau_H = - \frac{\Delta S_H \cdot \Delta S_{HC}}{K_H (\Delta S_H + \Delta S_{HC})} \quad (24)$$

式中, $\Delta S_H = - \frac{Q_H}{T_H}$, $\Delta S_{HC} = \frac{Q_H}{T_{HC}}$

同理, 低温热源和热机冷端工质的传热时间为:

$$\tau_L = - \frac{\Delta S_{LC} \cdot \Delta S_L}{K_L (\Delta S_{LC} + \Delta S_L)} \quad (25)$$

式中, $\Delta S_{LC} = - Q_L / T_{LC}$, $\Delta S_L = Q_L / T_L$

由于有限时间内不可逆卡诺热机的循环过程是由两个等温过程和两个绝热过程组成, 绝热过程相对于等温过程, 其时间可以近似忽略,

$$\tau = (\tau_H + \tau_L) \quad (26)$$

由此,

$$\begin{aligned} \tau &= (\tau_H + \tau_L) \\ &= - \left[\frac{\Delta S_H \cdot \Delta S_{HC}}{K_H (\Delta S_H + \Delta S_{HC})} + \frac{\Delta S_L \cdot \Delta S_{LC}}{K_L (\Delta S_L + \Delta S_{LC})} \right] \\ &= - \left[\frac{\Delta S_H}{K_H (1 + \Delta S_H / \Delta S_{HC})} + \frac{\Delta S_L}{K_L (1 + \Delta S_L / \Delta S_{LC})} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

由内不可逆熵产:

$$\Delta S_P = - (1 - \phi) \Delta S_{LC} \quad (28)$$

$$\Delta S_{HC} = - \phi \Delta S_{LC} \quad (29)$$

可得, $\Delta S_{LC} = - \frac{\Delta S_P}{1 - \phi}$, $\Delta S_{HC} = - \frac{\phi \Delta S_P}{1 - \phi}$, 代入式:

$$\tau = - \left[\frac{\Delta S_H}{K_H (1 + \frac{(1 - \phi) \Delta S_H}{\phi \Delta S_P})} + \frac{\Delta S_L}{K_L (1 + \frac{(1 - \phi) \Delta S_L}{\phi \Delta S_P})} \right] \quad (30)$$

式中, $\Delta S_H < 0$, $\Delta S_L > 0$, 改写为:

$$\tau = - \left[\frac{- |\Delta S_H|}{K_H (1 + \frac{(1 - \phi) |\Delta S_H|}{\phi \Delta S_P})} + \frac{\Delta S_L}{K_L (1 - \frac{(1 - \phi) \Delta S_L}{\Delta S_P})} \right] \quad (31)$$

设 $|\Delta S_H| = a$, $K_H = b$, $\frac{(1 - \phi) |\Delta S_H|}{\phi} = c$,

$$\Delta S_L = d, K_L = e, (1 - \phi) \Delta S_L = f$$

则 τ 简化为:

$$\tau = \left[\frac{a}{b (1 - \frac{c}{\Delta S_P})} - \frac{d}{e (1 - \frac{f}{\Delta S_P})} \right] \quad (32)$$

对 ΔS_P 求偏导, 得:

$$\frac{\partial \tau}{\partial \Delta S_P} = - \left[\frac{abc e^2 (\Delta S_P + f)^2 + def b^2 (\Delta S_P - c)^2}{b^2 (\Delta S_P - c)^2 e^2 (\Delta S_P + f)^2} \right] < 0 \quad (33)$$

从式(33)可知括号内的值恒正, 可见有限时间内不可逆卡诺热机的最少循环时间 τ 与内不可逆熵产 ΔS_P 成单调递减关系。当内不可逆熵产 ΔS_P 增大时, 其最少循环时间减小; 当内不可逆熵产 ΔS_P 减小时, 其最少循环时间增大。其机理是: 推动过程做功的势差增大时, 做功的速度必然也增大, 则运行时间减小, 而势差增大同时也导致了不可逆损失的增加。

4 结 论

通过对有限时间内不可逆卡诺热机的最小循环时间 τ 与 ΔS_P 关系的推导指出了有限时间内不可逆卡诺热机的内不可逆熵产与时间成单调递减关系, 熵不仅能标示时间之矢, 而且能够计算时间之量。

同时, 进一步揭示有限时间热力学与经典热力学在时间问题上的差别, 即由于系统和环境之间的实际交换速率不是无限小, 所有的实际热力过程是不可逆的, 存在着熵产则过程时间就是有限的, 经典热力学的热力学界限过于理想, 需要进一步完善。

参 考 文 献

- [1] 王身立. 时间之箭知几许. 现代物理知识, 1994, 6(1): 31~21.
- [2] 王身立. 时间之箭知几许. 现代物理知识, 1994, 6(2): 8~10.
- [3] 苏汝坚, 倪光炯. 物理学中的时间箭头. 自然杂志, 1981, 4(7): 506~512.
- [4] 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 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.
- [5] 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 有限时间热力学理论和应用的发展现状. 物理学进展, 1998, 18(4): 395~495.
- [6] Nulton James D, Sakamon Peter, Pathria Raj. Camot-like processes in finite time. I. Theoretical limits. Am. J. Phys 1993, 60(10): 911~915.

(复 编辑)

Ate, Feng Xiao (Department of Chemical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710049), Sui Xinha, Gao Wuxia (Shandong Provincial Dongying Shenli Petroleum Management Bureau, Dongying, Shandong, China) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. —2000, 15(3). —226~228

A constant change of situations in a factory demands that a steam power system should lend itself to be readily regulated within certain limits. With general composite curves serving as a tool this paper makes an analytical comparison of the steam power systems using respectively a back-pressure steam turbine unit and an extraction condensing steam turbine unit. Furthermore, a specific example is used to explain how to design a steam power system featuring a good regulation possibility with the help of the general composite curves. **Key words:** steam power system, regulation possibility, general composite curves, steam turbine

湿化器的传热传质机理和性能分析 = **Heat and Mass Transfer Mechanism and Performance Analysis of a Humidifier** [刊, 汉] / Shang Demin, Wang Yongqing, Chen Anbin, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. —2000, 15(3). —229~231, 209

Proceeding from the basic principles of heat transfer and mass transfer, the authors have set up a mathematical model for a humidifier, a major component of a humid air turbine (HAT) cycle. The humidifier performance is studied with the irrationality of some current treatment methods being identified. **Key words:** humid air turbine cycle, humidifier, heat transfer and mass transfer, work performance

有限时间内不可逆卡诺热机的最少循环时间和熵产的关系 = **The Relation Between the Minimum Cycle Time and Entropy Generation of a Finite-time Endo-irreversible Carnot Engine** [刊, 汉] / Liu Shiqiang, Yang Yushun (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. —2000, 15(3). —232~234

An exploratory study is conducted of the issue of finite-time thermodynamics time. Deduced in this paper is a simple decreasing relationship between the minimum cycle time and the irreversible entropy generation of a finite-time endo-irreversible Carnot engine. It is noted that the entropy can not only mark the time arrow but also calculate the quantity of time. **Key words:** finite time thermodynamics, time, entropy generation

三种催化剂对半焦燃烧特性的影响 = **The Effect of Three Kinds of Catalyst on Semicoke Combustion Properties** [刊, 汉] / Zhu Tingyu, Wang Yang (Shanxi Provincial Institute of Coal Chemistry under the Chinese Academy of Sciences, Taiyuan, Shanxi, China, Post Code 030001) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. —2000, 15(3). —235~238

The combustion properties of four types of semicoke were studied with the help of a thermobalance. The results of the study show that the semicoke prepared with the addition of a catalyst possesses a relatively small MI value and a fairly good reaction activity with a small oxygen absorption quantity needed prior to a coal combustion reaction. By way of combustion dynamics calculation it is found that the semicoke prepared with calcium oxide added has the highest combustion activation. In conclusion, the conception of an average activation energy is proposed to represent an index of the semicoke combustion activity, which is compared with other combustible comprehensive index S put forward by other researchers. **Key words:** thermobalance, semicoke, combustion kinetics, average activation energy

叶片弯曲对跨音速涡轮叶栅流场的影响 = **The Effect of Turbine Blade Positive Curving on the Flow Field of a Turbine Transonic Cascade** [刊, 汉] / Wang Songtao, Wu Meng, Feng Guotai, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. —2000, 15(3). —239~242

A numerical simulation was conducted on the flow field of a straight cascade composed of uniformly loaded blades and a bowed cascade composed of blades of different curved angles. A study was performed of the change under the curved blade action of the blade profile pressure distribution, Mach number contour lines and blade surface pressure distribution.