

一般传热规律下广义不可逆卡诺热机的构形优化

张晓晖, 杨 茉

(上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 在广义不可逆卡诺热机模型基础上, 结合一般传热规律, 得到了在有限结构材料条件下的热机构形优化特性, 即最佳热导率的定量分配新的关系式。分析了内不可逆性和传热规律等因素对热机构形优化特性的影响, 发现已有文献的结论是本文所得关系式的特例, 所得结论可为热机优化设计提供理论指导。

关 键 词: 热机; 一般传热规律; 优化; 热导率分配

中图分类号: TK123 文献标识码: A

符号表

- A — 传热面积;
- C_H — 高温侧换热器热导率;
- C_L — 低温侧换热器热导率;
- C_i — 热漏热导率;
- q — 单位时间高低温热源间热漏损失;
- Q_{HC} — 高温侧单位时间传热量;
- Q_{LC} — 低温侧单位时间传热量;
- T_H — 高温热源温度;
- T_{HC} — 系统循环工质放热温度;
- T_L — 低温热源温度;
- T_{LC} — 系统循环工质吸热温度;
- U — 传热系数;
- W — 功率;
- x — 热导率分配比;
- φ — 内不可逆系数;
- τ — 热源与冷源温度比率;
- τ_C — 热机高温与低温侧温度比率;

角 标

- | | |
|-----------|-----------|
| H— 高, 或热源 | L— 低, 或冷源 |
| i— 内部 | max— 最大 |
| opt— 最优 | n— 传热指数 |

1 引 言

在实际工程应用领域, 经济性是主要目标之一,

即要考虑材料的合理布置, 又要考虑实际热机总是在有限温差和有限的传热面积下运作, 特别是对于航天、舰船及分散式发电装置中的热机来讲, 其要求之一是体积小重量轻且具有较高功率密度。在这种情况下热机构形的优化就显得很重要。热机的构形优化是在总传热面积一定条件下优化传热面积分配或在总热导率一定条件下优化热导率分配而使得热机输出功率最大。热机的构形优化对受热面的合理布置设计和投资具有实际指导意义。

Bejan 在热机构形优化方面做了大量工作, 并得出许多有意义的结论^[1~4], 其局限在于假设线性传热规律, 即传热与传热温差成正比, 并以简化了的便于分析的内可逆热机模型作为研究对象。Chen 依据有限时间热力学理论对热机和联合热机性能进行了分析^[3~7], 其模型考虑了各种不可逆特性, 但也仅限于牛顿传热规律。

在一般意义上, 传热不都是与温差成正比的线性规律, 如辐射换热等, 一些作者已经论述了不同的传热规律对热机功率效率特性的影响^[8~11], 但在综合考虑了热阻、热漏和内不可逆性热机模型基础上, 基于一般传热规律($Q \propto \Delta(T)^n$)下热机构形优化以及各不可逆性对结构优化布置影响还未见论述。本文在广义热机模型基础上, 结合一般传热规律, 推得一般意义上热机的构形优化关系式, 探讨了不同传热规律对高低温侧热导率最佳分配影响和内不可逆性对高低温侧热导率最佳分配影响。结果表明, 已有文献的结论是本文通用关系式通过简化后的特例。

2 广义不可逆热机模型

收稿日期: 2004-01-12; 修订日期: 2004-06-25

作者简介: 张晓晖(1969-)男, 河南南阳人, 上海理工大学博士研究生。

广义不可逆热机模型示意图如图 1 示。

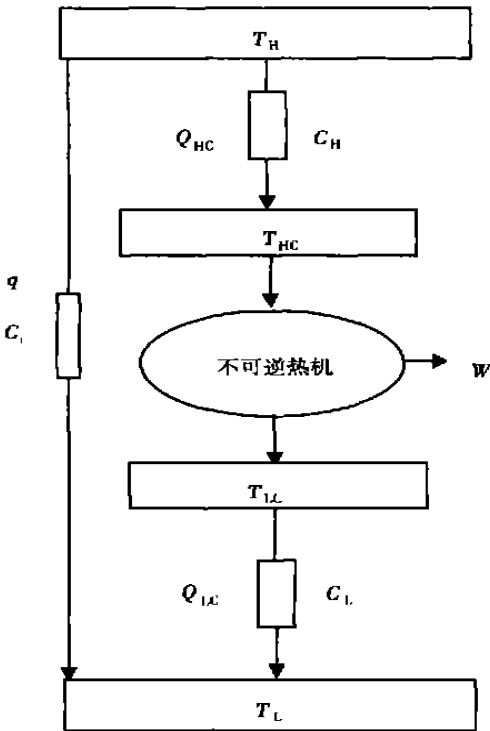


图 1 广义不逆卡诺热机模型

热源温度分别为 T_H 和 T_C , 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温差传热和装置中从 T_H 到 T_C 的热漏损失 q 以及其余所有不可逆性(如摩擦、紊流和非平衡作用等), 工质的放热、吸热温度分别为 T_{HC} 和 T_{LC} 。

对此模型满足以下条件:

- (a) 通过循环的工质为定常态连续流动。
- (b) 循环包括两个等温和两个绝热过程, 均为不可逆。
- (c) 传热是在有限温差下进行, 温度满足以下不等式:

$$T_H > T_{HC} > T_{LC} > T_L \quad (1)$$

高低温换热器的热导率^[3] C_H 和 C_L 满足以下约束:

$$C = C_H + C_L \quad (2)$$

热导率正比与传热面积, 即:

$$C_H = U_H A_H \text{ 和 } C_L = U_L A_L$$

引入高低温换热器热导率分配比 x 后:

$$C_H = xC \quad (3)$$

$$C_L = (1-x)C \quad (4)$$

(d) 存在恒定热漏损失 q , 因此有:

$$Q_H = Q_{HC} + q \quad (5)$$

$$Q_L = Q_{LC} + q \quad (6)$$

(e) 系统中存在不可逆性有: 工质与热源间的热阻; 热漏以及其他由于热机内摩擦和非平衡作用的不可逆性。因此, 不可逆热机输出功率小于内可逆热机输出功率, 也就是说, 冷工质排到冷源的热量 Q_{LC} 大于内可逆热机工质排到冷源热量 Q'_{LC} , 引入系数 φ 表征其它内不可逆性作用^[11]:

$$\varphi = Q_{LC} / Q'_{LC} \quad \varphi \geq 1 \quad (7)$$

上述模型是更为广义的热机模型: 如 $q = 0$ 且 $\varphi = 1$, 模型简化为内可逆热机; 如 $q \neq 0$ 且 $\varphi = 1$, 模型简化为具有热阻和热漏损失的不可逆热机; 如 $q = 0$ 且 $\varphi > 1$, 模型简化为具有热阻和内不可逆性的不可逆热机模型。

3 一般传热规律下热机构形优化特性

3.1 最优热导率的导出

在一般传热规律下有:

$$Q_{HC} = C_H (T_H^n - T_{HC}^n) \quad (8)$$

$$Q_{LC} = C_L (T_{LC}^n - T_L^n) \quad (9)$$

由热力学第二定律:

$$Q_{HC} / T_{HC} = Q'_{LC} / T_{LC} \quad (10)$$

结合式(7), 式(10) 改写为:

$$Q_{HC} / Q_{LC} = T_{HC} / \varphi T_{LC} \quad (11)$$

由热力学第一定律有:

$$W = Q_{HC} - Q_{LC} \quad (12)$$

定义温度比率 τ 和 τ_C 即:

$$T_{HC} / T_{LC} = \tau_C \quad (13)$$

$$T_H / T_L = \tau \quad (14)$$

由式(8)、(9)、(11)、(13) 得:

$$\frac{x(T_H^n - T_{HC}^n)}{(1-x)(T_{LC}^n - T_L^n)} = \varphi^{-1} \tau_C \quad (15)$$

由式(14)、式(15) 得:

$$\left(\frac{T_{LC}}{T_L} \right)^n = \frac{(\tau^n - \varphi^{-1} \tau_C)x + \varphi^{-1} \tau_C}{(\tau_C^n - \varphi^{-1} \tau_C)x + \varphi^{-1} \tau_C} \quad (16)$$

由式(11)、式(12) 得:

$$W = Q_{LC} \left(\frac{T_{HC}}{\varphi T_{LC}} - 1 \right) \quad (17)$$

由式(16)、式(17) 得:

$$W = \frac{Cx(1-x)T_L^n(\tau^n - \tau_C^n)(\varphi^{-1} \tau_C - 1)}{x(\tau_C^n - \varphi^{-1} \tau_C) + \varphi^{-1} \tau_C} \quad (18)$$

式(18)中,输出功率 W 是热导率分配比 x 的函数,求解 $\partial W / \partial x = 0$ 得:

$$\begin{aligned} & [(1-x)CT_L^n(\tau_c^n - \tau_c^n)(\varphi^{-1}\tau_c - 1) + xCT_L^n(\tau_c^n - \tau_c^n)(\varphi^{-1}\tau_c - 1)] [x(\tau_c^n - \varphi^{-1}\tau_c) + \varphi^{-1}\tau_c] \sqrt{x \times} \\ & (\tau_c^n - \varphi^{-1}\tau_c) + \varphi^{-1}\tau_c]^2 + \\ & [Cx(1-x)T_L^n(\tau_c^n - \tau_c^n)(\varphi^{-1}\tau_c - 1)] (\tau_c^n - \varphi^{-1}\tau_c) \\ & [x(\tau_c^n - \varphi^{-1}\tau_c) + \varphi^{-1}\tau_c]^2 \\ = & 0 \end{aligned} \tag{19}$$

为简化期间在式(19)中,令:

$$A = \tau_c^n - \varphi^{-1}\tau_c$$

$$B = \varphi^{-1}\tau_c$$

则式(19)化简为:

$$Ax^2 + 2Bx - B = 0$$

当 $A = 0$ 时 $\varphi = \tau_c^{1/n}$ 情况下 $x_{opt} = 1/2$ (20)

$$\text{当 } A \neq 0 \text{ 时, 解得 } x_{opt} = \frac{\sqrt{\frac{\tau_c^{n-1}\varphi^{-1} - \varphi^{-1}}{\tau_c^{n-1} - \varphi^{-1}}}}{\tau_c^{n-1} - \varphi^{-1}} \tag{21}$$

式(20)、式(21)即广义热机构形优化关系式。

一般传热规律式(8)和式(9)中 n 为传热指数,通常有三种特殊传热规律,即 $n = 1, -1$ 或 4 分别对应牛顿传热定律,线性唯象传热定律和辐射传热定律。具体地:

$$\begin{aligned} (1) \text{ 当 } A = 0 \text{ 时 } \varphi &= \tau_c^{1/n} \\ n = 1, \varphi = 1 \text{ 解得 } &x_{opt} = 1/2 \end{aligned} \tag{22}$$

也即 $C_H = C_L$

$$W_{max} = \frac{1}{4}CT_L(\frac{\tau}{\tau_c} - 1)(\tau_c - 1) \tag{23}$$

$$n = -1, \varphi = \tau_c^2 \text{ 解得 } x_{opt} = 1/2 \tag{24}$$

也即 $C_H = C_L$

$$W_{max} = \frac{1}{4}CT_L^{-1}(\frac{\tau_c}{\tau} - 1)(\tau_c^{-1} - 1) \tag{25}$$

$n = 4, \varphi < 1$ 不满足式(7)(舍去)

(2) $A \neq 0$, 由通用式(21), 当

$$n = 1, \text{ 解得 } x_{opt} = \frac{\sqrt{\varphi^{-1} - \varphi^{-1}}}{1 - \varphi^{-1}} \tag{26}$$

$$n = -1, \text{ 解得 } x_{opt} = \frac{\sqrt{\tau_c^2\varphi^{-1} - \varphi^{-1}}}{\tau_c^2 - \varphi^{-1}} \tag{27}$$

$$n = 4, \text{ 解得 } x_{opt} = \frac{\sqrt{\tau_c^3\varphi^{-1} - \varphi^{-1}}}{\tau_c^3 - \varphi^{-1}} \tag{28}$$

3.2 热机构形优化特性讨论

对一般分配关系式作各种简化后便可得到各种如下具体结果。

3.2.1 线性传热规律

若内可逆,由式(22)热导率均分,这便是文献[1~4]的结论。

实际热机总存在着内不可逆因素。如摩擦、紊流和非平衡等因素的作用,考虑内不可逆因素影响后的高低端热导率的最佳分配具有实际意义,即:

内不可逆时,由式(26)表明最佳热导率分配比 x_{opt} 仅与内不可逆性有关,热导率不再均分,若干点的计算结果见表1,内不可逆性对最佳热导率分配比 x_{opt} 分布影响见图2(a) $n = 1$ 的曲线。

表1 不可逆系数 φ 与最佳热导率分配比 x_{opt} 若干点计算结果

φ	1.05	1.1	1.15	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	2	2.2
x_{opt}	0.494	0.488	0.482	0.477	0.467	0.458	0.449	0.441	0.427	0.414	0.403

由表1和图2(a) $n = 1$ 的曲线可见,随着内不可逆系数 φ 的增大,即内不可逆性越大,高温端热导率的份额减少,相应低温端热导率增加。内不可逆系数 φ 越小,即内部损失越小,高、低温端热导率分配率趋近于0.5,但不均分。可见,内不可逆的大小影响最佳高、低温端热导率的分配。

3.2.2 非线性传热规律

当 $n = -1$ 且满足 $\varphi = \tau_c^2$ 时,由式(24)可得热导率均分;若内不可逆系数 φ 不满足 $\varphi = \tau_c^2$ 时,热导率的最佳分配由式(27)决定, x_{opt} 与 φ 及 τ_c 有关。当 $n = 4$ 时,热导率的最佳分配由式(28)决定, x_{opt} 与 φ 及 τ_c 有关。

在温度比率 τ_c 相同条件下,内不可逆系数 φ 对热导率的最佳分配影响曲线见图2(a),随着内不可逆系数 φ 的增加, $n = -1$ 时的最佳热导率的分配 x_{opt} 从0.714 ($\tau_c = 2.5$ 对应值)逐步递减, $n = 4$ 时的最佳热导率的分配 x_{opt} 从0.202 ($\tau_c = 2.5$ 对应值)逐步递减, $n = 1$ 时,最佳热导率的分配 x_{opt} 从0.5(与 τ_c 无关)逐步递减。表明在温度比率 τ_c 相同条件下,内不可逆系数 φ 对不同传热规律下热机的最佳热导率的分配 x_{opt} 影响趋势相同。

在相同内不可逆系数 φ 下,不同温度比率 τ_c 对热导率的最佳分配影响曲线见图2(b), $n = -1$ 时的最佳热导率分配比 x_{opt} 随着温度比率 τ_c 的增加而增大,相反地, $n = 4$ 时的最佳热导率分配比 x_{opt} 随着温度比率 τ_c 的增加而减小,而 $n = 1$ 时 x_{opt} 与 τ_c 无关。

上述推导思想可推广应用到制冷循环的构形优化上。

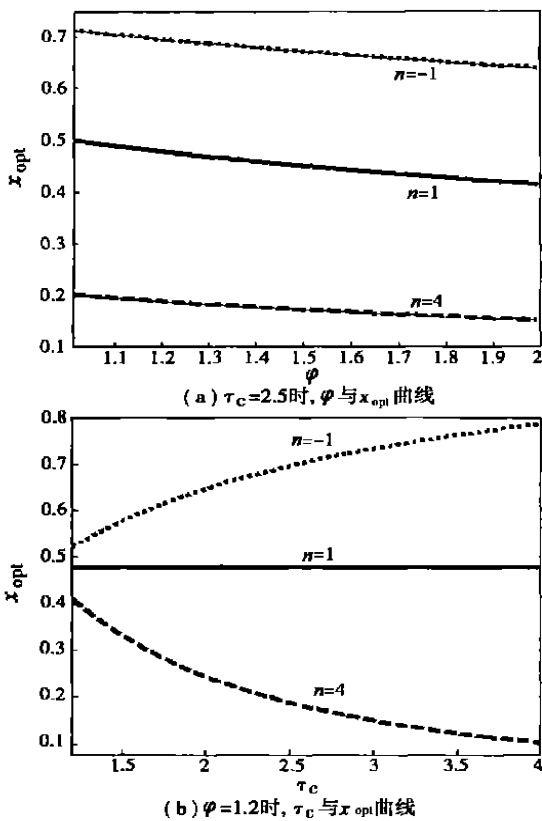


图2 不同传热规律下最佳热导率分布曲线

4 结论

通过对导出的一般意义上的热机构形优化关系的分析可得出:

(1) 线性内可逆热机的最佳热导率服从均分关系; 线性内不可逆热机的最佳热导率由内不可逆性大小决定, 内不可逆性越大, 低温端热导率增加, 相应高温端热导率的份额减少。

(2) 非线性传热规律下热机的最佳热导率分配一般与内不可逆性 φ 及温度比率 τ_c 有关, 不再服从简单均分关系。

参考文献:

- [1] BEJAN A. Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization and generation of flow architecture[J]. *Int J Energy Res* 2002, 26: 545—565.
- [2] BEJAN A. Theory of heat transfer-irreversible power plants[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1988, 6: 1211—1219.
- [3] BEJAN A. Theory of heat transfer-irreversible power plants II, the optimal allocation of heat exchange equipment[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1995, 3: 433—444.
- [4] BEJAN A. Thermodynamic optimization alternatives: minimization of physical size subject to fixed power[J]. *Int J Energy Res*, 1999, 23: 1111—1121.
- [5] CHEN LINGEN, WU CHIH, SUN FENGRUI. Finite time thermodynamic optimization or entropy generation minimization of energy systems [J]. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1999, 24(4): 327—359.
- [6] 陈林根, 孙丰瑞. 一类较为完善的不可逆热机模型及其性能优化[J]. *电站系统工程*, 1995, 11(4): 4—12.
- [7] 陈林根, 孙丰瑞, 倪宁. 具有热阻、热漏和内不可逆性的联合热机性能[J]. *热能动力工程*, 1999, 14(7): 7—9.
- [8] CHEN L, SUN F, WU C. Influence of heat transfer law on the performance of a Carnot engine[J]. *Appl Thermal Eng*, 1997, 17(3): 227—282.
- [9] ÖZKAYNAK S, GOKTUN S, YAVUZ H. Finite time thermodynamic analysis of radiative heat engine with internal irreversibility[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1994, 27(6): 1139—1143.
- [10] WU C, CHEN L, SUN F. Effect of the heat transfer law on the finite-time exergoeconomic performance of heat engine[J]. *Energy Int J*, 1996, 21(12): 1127—1134.
- [11] CHEN L, SUN F. Effect of the heat transfer law on the performance of a generalized irreversible Carnot heat engine[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1999, 32(2): 99—105.

欢迎订阅 2005 年《机电设备》杂志

《机电设备》杂志是经国家新闻出版署批准的国内外公开发行的科技类期刊, 创办于 1962 年, 为双月刊, 大 16 开, 48 页。其国内标准刊号为 CN31—1420/TM, 国际标准刊号为 ISSN 1005—8354, 邮发代号为 4—701。每期定价 10 元, 全年订价 60 元。

《机电设备》杂志为《中文科技期刊数据库》、《万方数据—数字化期刊群》、《CNKI 中国期刊全文数据库》、《全国报刊索引自然科学技术版》和《中国机械工程文摘》录用期刊。

《机电设备》的专业范围涉及工业设备(石油化工机械、冶金机械、印刷机械、食品机械、电线电缆及电力设备)、电气自动化、液压与气动、制冷与空调、环保机械、起重机械、减速变通机、柴油机、泵、阀、风机、压缩机、船舶机电设备等。

读者对象: 从事于机电设备研究、开发、应用、维修管理, 以及机电产品营销、采购人员、工程技术人员和理工专业的大专院校师生。

地址: 上海市衡山路 10 号编辑出版室

邮编: 200031

电话: 021—64718118 * 5209 021—64395733

传真: 021—34010398 021—64395733

E-mail: bzhh@maee-epo.com

联系人: 张秀华

ty, Chongqing, China, Post Code: 400044), CAO Hong (Huaneng Chongqing Gas Turbine Power Plant, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 617 ~ 619, 637.

By adopting a method combining theoretical analysis with historical operating data an off-design performance calculation was conducted of a combined cycle power plant. Through an evaluation of calculation results one can ascertain whether there is a lowering in performance of any one system. Moreover, on the basis of a graded fault classification to utilize BP algorithm-based sensitivity analytical method, it is possible to perform an on-line diagnosis of the causes triggering a performance deterioration, thus accumulating the experience of combined cycle plant operation and enhancing management level. **Key words:** combined cycle, off-design operation, BP algorithm

一般传热规律下广义不可逆卡诺热机的构形优化 = **Configuration Optimization of a Generalized Irreversible Carnot heat Engine under a General Heat Transfer Law** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-hui, YANG Mo (College of Power Engineering under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 620 ~ 623.

On the basis of a generalized irreversible Carnot heat engine model and in conjunction with a general heat transfer law the characteristics of heat engine configuration optimization under the condition of finite construction materials were obtained, namely, a new relation of quantitative allocation of optimum heat conductivity. An analysis was conducted of the impact of such factors as the internal irreversibility and heat transfer laws, etc on the characteristics of heat engine configuration optimization. It has been found that the conclusions given in some now available literature pertain to a special case of the relation obtained by the authors. The conclusion reached herein can serve as a theoretical guide for the optimized design of heat engines. **Key words:** heat engine, general heat transfer law, optimization, allocation of thermal conductivity

催化裂化余热锅炉的技术特点 = **Technical Features of Waste Heat Boilers Used in a Fluid Catalytic Cracking Unit** [刊, 汉] / SUN Kai-hong (SINOPEC Engineering Construction Corp., Beijing, China, Post Code: 100011), WANG Heng (Thermal Energy Engineering Department, Beijing University of Science & Technology, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 624 ~ 627.

In comparison with conventional boilers waste heat boilers destined for catalytic cracking units have some specific features, such as a wide range of superheated steam temperature regulation and operating conditions subject to changes in step with the working conditions of a fluid catalytic cracking unit. In light of the different conditions of catalytic cracking regeneration technology and flue gases the authors have focused on such problems as the avoidance of superheater overheating and low-temperature corrosion of economizers, as well as the alleviation of ash deposits. Some measures are proposed for ensuring the stable control of feedwater regulating valves. Furthermore, in connection with the production of high-parameter steam by high-temperature waste heat from a large-sized oil refinery unit, it is recommended to realize the utilization of steam on a graded basis. **Key words:** oil refinery, catalytic cracking unit, waste heat boiler, technical features

基于 Symphony 的风粉在线监测系统的实现和应用 = **Realization and Application of a Symphony-based On-line Air and Pulverized Coal Monitoring System** [刊, 汉] / SHENG Sai-bin, LI Guo-qiang (Automation Department, Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 628 ~ 630.

An on-line air and pulverized coal monitoring system based on Symphony distributed control system is described. As compared with an independently developed monitoring system, the recommended system enjoys a marked edge in terms of safety, cost effectiveness and the visualization of operation effect. Proceeding from the system functions a concise analysis