

导热规律服用 $q \propto (\Delta T)^n$ 广义不可逆卡诺热机的最优性能

周圣兵, 陈林根, 孙丰瑞

(海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北武汉 430033)

摘 要: 考虑工质与热源间热阻损失, 用一常数项表示热漏损失和常数项表示循环中除热阻和热漏外其余不可逆性, 建立不可逆卡诺热机模型。基于另一类较为普遍的导热规律 $Q \propto (\Delta T)^n$, 导出热机的功率和效率最佳特性关系, 由详细数值计算分析了热漏、内不可逆性和导热规律的影响特点。

关键词: 有限时间热力学; 热机; 性能优化

中图分类号: TK123 文献标识码: A

1 前言

用有限时间热力学方法^[1~4]研究的简单模型为仅考虑工质与热源间传热不可逆性的内可逆循环。在已发表的研究热机循环的文献中, 有热阻加热漏模型^[5]、热阻加内不可逆模型^[6]和将此三种损失综合考虑的较完备模型^[7~8]。文献[9]进一步考虑了一类较为普遍的导热规律 $Q \propto (\Delta T)^n$, 得出了不可逆热机的最优特性。本文将在文献^[7~8]的基础上, 考虑另一种较为普适的导热规律 $Q \propto (\Delta T)^n$ ^[10], 导出规律下不可逆热机功率与效率的最佳特性关系, 所得结果可讨论不同损失项对循环特性的影响特点。

2 不可逆卡诺热机模型^[7~8]

考虑图 1 所示不可逆卡诺热机模型, 其工作条件为:

- (1) 定常态连续流, 循环由两个等温过程和两个绝热过程组成且不可逆;
- (2) 工质的吸、放热温度 T_{HC} 、 T_{LC} 不同于高、低温热源温度 T_H 、 T_L , 且 $T_H > T_{HC} > T_{LC} > T_L$ 。换热器面积有限, 高、低温侧换热器面积之和为常数 F , 即 $F_1 + F_2 = F$;
- (3) 两热源间存在热漏率 q 。设工质通过高、低

温侧换热器交换的吸、放热流率为 Q_{HC} 、 Q_{LC} , 则实际高温热源的供热率 Q_H 和低温热源的吸热率 Q_L 分别 $Q_H = Q_{HC} + q$ 及 $Q_L = Q_{LC} + q$;

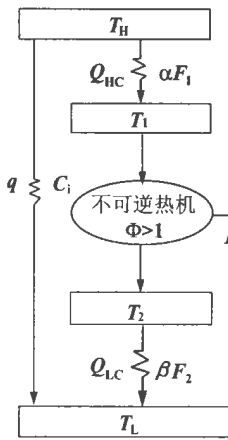


图 1 不可逆热机模型

(4) 除热阻、热漏外的其它不可逆性可引进一不可逆因子 Φ 表示: $\Phi = Q_{LC}/Q_{LC} \geq 1$, 其中, Q_{LC} 表示不可逆循环中工质的放热率, Q_{LC} 表示仅有热阻和热漏时的放热率。

该模型中, 若 $q = 0$, 且 $\Phi = 1$, 即为内可逆模型; 若 $q = 0$, 但 $\Phi > 1$, 即为热阻加内不可逆模型; 若 $\Phi = 1$, 但 $q > 0$, 即为热阻加热漏模型。

3 普遍的最优性能

3.1 最优特性关系

由热力学第二定律, 有 $Q_{HC}/T_{HC} = Q_{LC}/T_{LC}$ 及 Q_{LC}/Q_{HC} ; 由热力学第一定律可得循环功率与效率为 $P = Q_H - Q_L = Q_{HC} - Q_{LC}$ 及 $\eta = P/Q_H = P/(Q_{HC} + q)$ 。

又设导热服从一类较为普遍的规律 $q \propto (\Delta T)^n$, 故:

$$Q_{HC} = \alpha F_1 (T_H - T_{HC})^n, Q_{LC} = \beta F_2 (T_{LC} - T_L)^n \quad (1)$$

式中, α 、 β 分别为工质与高低温热源间换热器的总传热系数, $n > 0$ 。定义面积比 $f = F_1/F_2$ 和工质温比 $x = T_{LC}/T_{HC}$, 由约定条件及式(1)可得:

$$\frac{Q_{LC}}{Q_{HC}} = \frac{\Phi T_{LC}}{T_{HC}} = \Phi_x = \frac{\beta F_2 (T_{LC} - T_L)^n}{\alpha F_1 (T_H - T_{HC})^n} \quad (2)$$

收稿日期: 2001-01-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G2000026301)

作者简介: 周圣兵(1977-)男, 湖北汉川人, 海军工程大学硕士研究生

进一步可得:

$$T_{LC} = \frac{(\Phi_x \alpha f / \beta)^{1/n} T_H + T_L}{(\Phi_x \alpha f / \beta)^{1/n} / x + 1} = \frac{(\Phi_x \alpha f)^{1/n} T_H + T_L}{(\Phi_x \alpha f)^{1/n} / x + 1} \quad (r = \alpha / \beta) \quad (3)$$

又因为 $P = Q_{HC} - Q_{LC} = Q_{LC} [(\Phi_x)^{-1} - 1]$ (4)

故结合式(1)、(3)、(4) 可得到:

$$P = \frac{\alpha F f (1 - \Phi_x) (T_H - T_L / x)^n}{(1 + f) [(\Phi_x \alpha f)^{1/n} / x + 1]^n} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\alpha F f (1 - \Phi_x) (T_H - T_L / x)^n}{\alpha F f (T_H - T_L / x)^n + q (1 + f) [(\Phi_x \alpha f)^{1/n} / x + 1]^n} \quad (6)$$

式(5)、(6) 中 P 、 η 均为 f 的函数, 令 $dP/df = 0$, $d\eta/df = 0$, 均可求得当 $f = f_a$ 时功率与效率的最佳值, 其中: $f_a = (1/\Phi_r)^{1/(n+1)} x^{(n-1)/(n+1)}$ (7)

将式(7) 代入式(5)、(6) 即得:

$$P = \frac{\alpha F (1 - \Phi_x) (T_H - T_L / x)^n}{[(\Phi_r)^{1/(n+1)} x^{(1-n)/(1+n)} + 1]^{n+1}} \quad (8)$$

$$\Phi - \frac{(1 - \Phi_{x_p}) n T_L}{x_p^2 (T_H - T_L / x_p)} + \frac{(1 - n)(1 - \Phi_{x_p}) (\Phi_r)^{1/(n+1)} x_p^{(1-n)/(1+n)}}{x_p [1 + (\Phi_r)^{1/(1+n)} x_p^{(1-n)/(1+n)}]} = 0 \quad (11)$$

$$\Phi - \frac{(1 - \Phi_{x_\eta}) n T_L}{x_\eta^2 (T_H - T_L / x_\eta)} +$$

$$\frac{(1 - \Phi_{x_\eta}) \{ n \alpha F T_L (T_H - T_L / x_\eta)^{n-1} / x_\eta^2 + q [(1 - n) (1 + (\Phi_r)^{1/(n+1)} x_\eta^{(1-n)/(1+n)})^n (\Phi_r)^{1/(n+1)} x_\eta^{(1-n)/(1+n)} / x_\eta] \}}{\alpha F (T_H - T_L / x_\eta)^n + q [1 + (\Phi_r)^{1/(1+n)} x_\eta^{(1-n)/(1+n)}]^{n+1}} = 0 \quad (12)$$

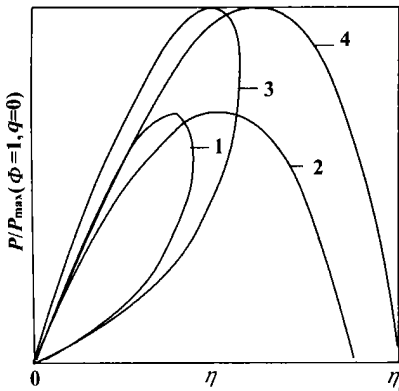


图 2 各种特定损失下的功率效率特性曲线图

$x = x_p$ 时, $P = P_{max}$, $\eta = \eta_p$; $x = x_\eta$ 时, $\eta = \eta_{max}$, $P = P_\eta$. 综合考虑各项损失时, $P-\eta$ 关系为回原点的扭叶形, 如图 2 曲线 1 所示。

3.3 各种特定损失下的特性关系

3.3.1 $q = 0$ 情形

式(10) 变为

$$P = \frac{\alpha F \eta [T_H - \Phi T_L / (1 - \eta)]^n}{\{1 + (\Phi_r)^{1/(1+n)} [(1 - \eta) / \Phi_r]^{(1-n)/(1+n)}\}^{n+1}}$$

当 $\eta = 0$, 或 $\eta = 1 - \Phi T_L / T_H$ 时, $P = 0$, 存在对

$$\eta = \frac{\alpha F (1 - \Phi_x) (T_H - T_L / x)^n}{\alpha F (T_H - T_L / x)^n + q [(\Phi_r)^{1/(n+1)} x^{(1-n)/(1+n)} + 1]^{n+1}} \quad (9)$$

由上两式消去 x 即得 p 与 η 的最优关系式

$$\frac{P \eta^{-1} - q}{\alpha F} \{1 + (\Phi_r)^{1/(n+1)} [\frac{P(\eta^{-1} - 1) - q}{\Phi(P \eta^{-1} - q)}]^{(1-n)/(1+n)}\}^{n+1} = [T_H - T_L \cdot \frac{\Phi(P \eta^{-1} - q)}{P(\eta^{-1} - 1) - q}]^n \quad (10)$$

式(8)、(9) 为最佳功率效率基本表达式, 式(10) 为隐式功率效率最佳关系。

3.2 最大功率与效率极限

由式(8)、(9) 可知: $x = \Phi^{-1}$ 及 $x = T_L / T_H$ 时 $P = 0$, $\eta = 0$; 因此分别存在最大功率点和最大效率点, 再由 $dP/dx = 0$ 和 $d\eta/dx = 0$, 可得最大功率时的工质最佳温比 x_p 、最大效率时的最佳温比 x_η 应分别满足式(11) 和(12):

应于最大功率 P_{max} 输出时的 η_p , 相应的特性关系为抛物线形, 如图 2 曲线 2 所示。

3.3.2 $\Phi = 1$ 情形

此时式(10) 变为:

$$\frac{P \eta^{-1} - q}{\alpha F} \{1 + r^{1/(n+1)} [\frac{P(\eta^{-1} - 1) - q}{P \eta^{-1} - q}]^{1/n}\}^{n+1} = [T_H - T_L \cdot \frac{P \eta^{-1} - q}{P(\eta^{-1} - 1) - q}]^n \quad (13)$$

此时, $P-\eta$ 关系为回原点的扭叶形, 如图 2 曲线 3。

3.3.3 $q = 0, \Phi = 1$ 情形

式(10) 变为 $P = \alpha F \eta [T_H - T_L / (1 - \eta)]^n / [1 + r^{1/(n+1)} (1 - \eta)^{(1-n)/(1+n)}]^{n+1}$ (14)

此时, $P-\eta$ 关系抛物线形, 如图 2 曲线 4。式(4) 即为文献 [10] 主要结果。

3.3.4 $F \rightarrow \infty$ 情形

$$P = q / [\eta^{-1} - (1 - \Phi T_L / T_H)^{-1}] \quad (15)$$

式(15)与 $Q \propto (T^n)$ 时 $F \rightarrow \infty$ 下的结果^[9] 相同, 此时, 换热面积无穷大, 热阻为零, 功率输出导热规律无关, 不属于有限时间热力学范畴。

3.4 数值算例

计算中取 $\alpha = \beta$ (即 $r = 1$), $\alpha F = 4$, $T_H/T_L = 2.5$, $\Phi = 1.0 \sim 1.2$, $q = C_i(T_H - T_L)^n$, C_i 为热导率, $C_i = 0.00 \sim 0.35$, 以分析热阻、热漏和其它不可逆性对热机性能的影响。此时热机的卡诺效率为 $\eta_c = 0.6$ 。图3给出了 $n = 1, 2, 3$ 时不同内可逆性和不同热漏损失下的功率效率曲线。其中纵坐标为实际功率与相同 n 值下内可逆热机 ($C_i = 0, \Phi = 1$) 最大功率之比。

由图3可知, 热漏不影响最大功率, 但使最大功

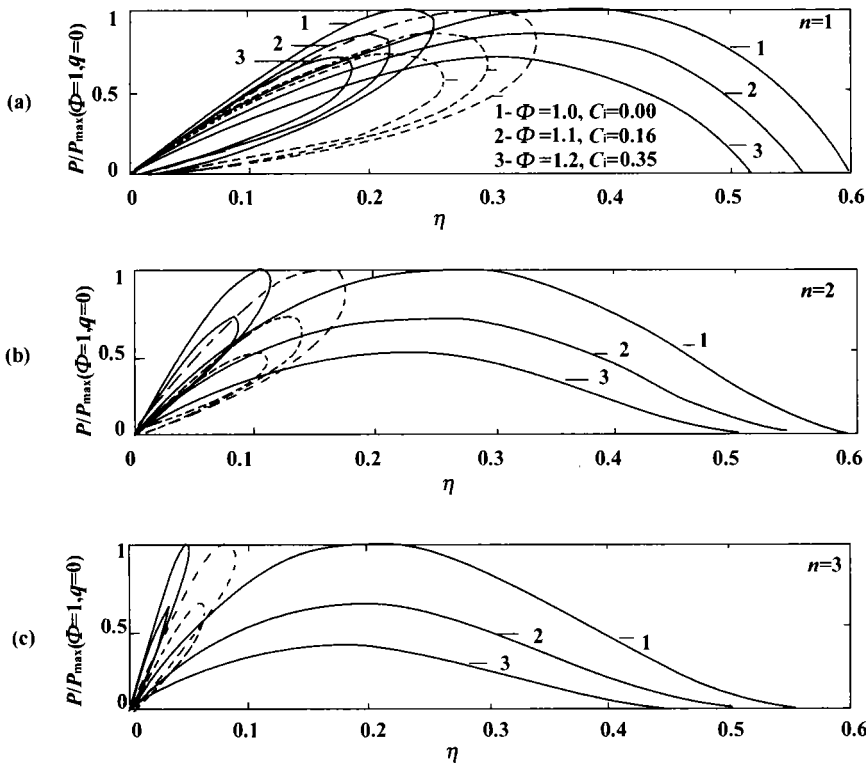


图3 不同 Φ, C_n 及 n 下的 $P-\eta$ 关系比较图

率输出时的效率和最大效率明显减小; 内不可逆性的增加使最大功率有明显减小, 同时也使最大功率时的效率有一定减小。热漏的存在使热机功率效率特性发生质的变化, 由内可逆时抛物线形成为回原点的扭叶形。这里本质性的区别在于, 根据内可逆循环理论, 热机在最大效率时为零功率, 属不可选取点。而不可逆循环理论说明, 与最大功率点一样, 最大效率点也为可选方案点, 最大功率点与最大效率

点较为接近, 这些与实际热机性能相符合^[5,7-13]。

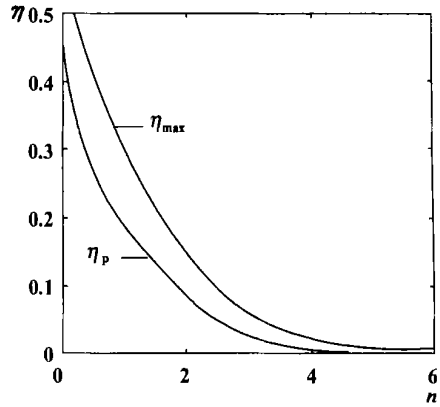


图4 η_{max}, η_p 与 n 关系图

比较图3(a)、(b)、(c)可知随着传热指数 n 的增加, 最大功率输出时的效率和最大效率有明显下降, 最大功率随内不可逆性的增加而减小程度也大大加强; 最大功率和最大效率也更为接近; 功率效率曲线呈现得更为陡峭, 即无因次功率相同时, 相应的效率随 n 增加有较明显的减小。图4给出了综合考虑 ($\Phi = 1.1, C_i = 0.16$)

各项损失热机的最大效率 η_{max} 和最大功率时的效率 η_p 随 n 值变化的规律。

4 两种特定传热规律下的最优特性关系

4.1 $n = 1$, 即牛顿传热定律

在式(11)、(12)中令 $n = 1$ 可得文献[7~8]的主要结果; 进一步若令 $q = 0$, 可得文献[6]的主要结果; 若令 $\Phi = 1$, 可得文献[5]的主要结果; 若同时令 $q = 0, \Phi = 1$, 即是牛顿定律系统内可逆热机基本优化关系, 由此可导出著名的CA效率, 亦即: $\eta = 1 - (T_L/T_H)^{1/2}$ 时, $P = P_{max} = B_1(T_H^{1/2} - T_L^{1/2})^2$ 。

4.2 $n = 5/4$, 即 Dulong-Petit 传热定律

Dulong 和 Petit 于 1817 年对牛顿冷却定律研究

时发现, 传热系数正比于 $(\Delta T)^{1/4}$, 故有 $Q \propto (\Delta T)^{5/4}$ 。这一定律对于以自然对流为主的传热分析有不少应用^[3]。

此时, 由式(8)、(9) 可得显式的最佳功率效率关系式:

$$p = \alpha F (1 - \Phi_x) (T_H - T_L/x)^{5/4} / [1 + (\Phi_r)^{4/9} x^{-1/9}]^{9/4} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{(1 - \Phi_x) (T_H - T_L/x)^{5/4}}{(T_H - T_L/x)^{5/4} + (q/\alpha F) [1 + (\Phi_r)^{4/9} x^{-1/9}]^{9/4}} \quad (17)$$

由式(11) 可知, 此时最大功率输出时的最佳工质温比 x_p 满足:

$$\frac{5(1 - \Phi_{x_p}) T_L}{x_p^2 (T_H - T_L/x_p)} + \frac{(1 - \Phi_{x_p}) (\Phi_r)^{4/9}}{x_p^{10/9} [1 + (\Phi_r)^{4/9} x_p^{-1/9}]} - 4 = 0 \quad (18)$$

由式(10) 知, 隐式的功率及效率关系式为:

$$\left(\frac{P\eta^{-1} - q}{\alpha F}\right)^4 [1 + (\Phi_r)^{4/9} \left(\frac{P(\eta^{-1} - 1) - q}{\Phi(P\eta^{-1} - q)}\right)^{-1/9}] = [T_H - T_L \frac{\Phi(P\eta^{-1} - q)}{P(\eta^{-1} - 1) - q}]^5 \quad (19)$$

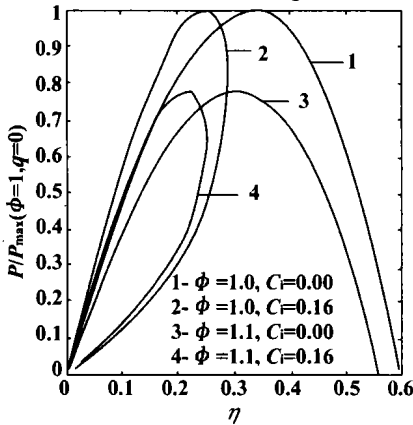


图 5 $n = 5/4$ 时功率效率关系图

取 3.4 节所选系数计算得综合的关系图 5。此时, 考虑各种损失热机的功率效率关系和最大功率 P_{max} 及其相应效率 η_p , 最大效率 η_{max} 及其相应功率 P_η 如图 5 曲线 4 所示。

4.2.1 $q = 0$, 此时的功率效率最佳关系为

$$P = \alpha F \eta [T_H - \Phi T_L (1 - \eta)] / \{1 + (\Phi_r)^{9/4} [(1 - \eta) / \Phi]^{-1/9}\}^{9/4} \quad (20)$$

$P - \eta$ 关系如图 5 曲线 3 所示。

4.2.2 $\Phi = 1$, 此时的功率效率最佳关系为

$$\left(\frac{P - q\eta}{\alpha F \eta}\right)^4 [1 + r^{4/9} \left(\frac{P(1 - \eta) - q\eta}{P - q\eta}\right)^{-1/9}]^9 = [T_H - T_L \cdot \frac{P - q\eta}{P(1 - q\eta)}]^5 \quad (21)$$

$P - \eta$ 关系如图 5 曲线 2 所示。

4.2.3 $q = 0, \Phi = 1$, 此时的功率效率最佳关系为

$$P = \alpha F \eta [T_H - T_L / (1 - \eta)]^{5/4} / [1 + r^{4/9} (1 -$$

$$\eta)^{-1/9}]^{9/4} \quad (23)$$

$P - \eta$ 关系如图 5 曲线 1 所示。

4.2.4 $n = 5/4$ 时 η 与温比的关系

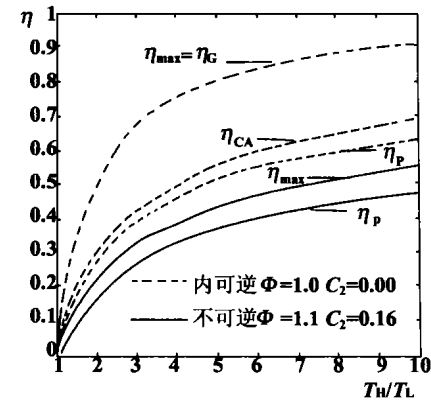


图 6 η 与温比的关系

图 6 给出了内可逆 ($\Phi = 1.0, C_1 = 0.00$) 与不可逆 ($\Phi = 1.1, C_1 = 0.16$) 条件下的最大效率 η_{max} 和最大功率时的效率 η_p , 同热源温比的关系。由图 6 可清楚知道, 随着温比

增加, 各效率均提高。

由图 6 还可知道, 内可逆时, η_{max} 与 n 无关, η_p 与 n 有关。 $n = 1$ 且内可逆时有 $\eta_p = \eta_{CA}$, $n = 5/4$ 时, $\eta_b < \eta_{CA}$; 不可逆时, 有关系式: $\eta_p(\text{不可逆}) < \eta_{max}(\text{不可逆}) < \eta_p(\text{内可逆}) < \eta_{CA}$ 。从图上曲线可以看出, 不仅内可逆模型的 η_{max} 、 η_{CA} 要较不可逆模型的相应效率高很多, 其 η_p 也要较不可逆模型 η_{max} 高一些。内可逆机的理论模型对实际热机并无指导意义。只有结合实际热机, 综合考虑各项损失来建立模型, 由此所得的结论才对实际热机有指导意义, 这正是本文所讨论问题的意义所在。

5 结论

本文在文献[7 ~ 9] 提出的不可逆热机模型基础上, 考虑了另一种较为普适的导热规律 $q \propto (\Delta T)^n$ 对该热机最优性能的影响, 得到了另一种普适的结论, 能包括已有文献的一些结论。给出的数值算例有助于更深入了解热阻、热漏、内不可逆性和导热规律对热机性能的影响规律。

参考文献:

[1] 陈林根, 孙丰瑞, WU CHIH. 有限时间热力学理论和应用的进展现状[J]. 物理学进展, 1998, 18(4): 62-89.
 [2] CHEN LINGEN, SU C, SUN FENG RUI. Finite time thermodynamic optimization of entropy generation minimization of energy systems[J]. J Non-Equilibrium Thermodynamics, 1999, 24(4): 327-359.

(下转第 179 页)

实验结果的比较来看, 各种变量在径向和轴向的变化趋势基本吻合, 证明模拟是成功的。由于双方程模型和壁面函数法在模拟湍流流动时都作了假设, 而缩口管的弯曲边界比缩放喷管中倾斜边界更接近于假设所需要的条件, 图 4 中缩口管收缩段的模拟值和实验几乎完全重合, 可以认为在通道界面剧烈变化区域, 湍流特性系数各向异性强烈, 壁面函数法的假设已不能成立, 通道喉部模拟计算值和实验数据存在偏差, 需要引入更为恰当模型, 低雷诺模型是可以考虑的一个替代手段。

图 5 是两例出入口带收敛弧段、喉部由圆弧过渡的缩放喷管内流动的数值模拟效果图。从中我们能够直观地看到流体在喷管中压力的变化, 从压力等势图可以看出, 由于壁面对流体的滞止作用, 流速在靠近壁面处陡然下降, 流体减速增压, 但由于摩擦引起的内能损失使流体很快过渡到总体的速度和压力同时下降。A 型喷管出口处的壁面压力曲线几乎封闭, 说明此时流体和壁面出现了分离, 增大了流动损失, 因此采用有较大收缩比的 B 型喷管可以降低湍流度、减薄边界层, 提高流动效率。

5 结论

(1) 椭圆型偏微分方程固有的光滑边界数据的特性使得生成的网格具有较好的正交性, 利于数值

计算的收敛, 利用边界节点疏密分布实现复杂边界内网格分布的疏密控制方法简便、通用性强, 易于网格的主动设计。

(2) 贴体坐标系统将流动问题从复杂的物理平面转移到简单而易于处理的计算平面也付出了一定的代价, 计算平面上控制方程的复杂化带来了计算量的增加, 但计算机性能的提高和高效解法的出现使得这一问题并不突出, 而有限差分算法的稳定性和差分格式的多样化十分有利于数值模拟的成功。

(3) $k-\epsilon$ 湍流模型和壁函数法构建的数学模型基本反映了弯曲边界通道内亚音速流动的实际情况, 在此基础上开发的程序具有实用性。

参考文献:

- [1] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [2] 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [3] 方丁酉. 两相流体动力学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1984.
- [4] KORBI K C, PATANDAR S V. Pressure based calculation procedure for viscous flows at all speed in arbitrary contiguation[J]. *AIAA*, 1989, 27(9): 1167—1174.
- [5] MELAAEN M C. Analysis of fluid flow in constricted tubes and ducts using body-fitted non-staggered grids[J]. *Int J Numer Methods Fluids*, 1991, 15(2): 895—923.
- [9] CHEN LINGEN, SUN FENGRUI, WU CHIH. Effect of heat transfer law on the performance of a generalized irreversible Camot engine[J]. *J Phys D App Phys*, 1999, 32(2): 99—105.
- [10] CHEN LINGEN, SUN FENGRUI, WU CHIH. Influence of heat transfer law on the performance of a Camot engine[J]. *App Thermal Engineering*, 1997, 17(3): 277—282.
- [11] GORDON JM, HULEIHIL M. General performance characteristics of real heat engines[J]. *J App Phys*, 1992, 72(2): 829—837.
- [12] CHEN LINGEN, SUN FENGRUI, WU CHIH. Performance analysis of an irreversible Brayton heat engine[J]. *J Intuit Energy*, 1997, 70(482): 2—8.
- [13] FEIDT F. Optimization of Brayton cycle engine in contact with fluid thermal capacities[J]. *Rev Gen Term*, 1996, 35(10): 662—666.
- [14] O SULLIVAN C T. Newton's law of cooling—A critical assessment [J]. *Am J Phys*, 1990, 58(10): 956—960.

(渠 源 编辑)

(渠 源 编辑)

(上接第 175 页)

- [3] WU CHIH, CHEN LINGEN, CHEN JINCAN. Recent Advances in Finite-Time Thermodynamics[M]. New York: Nova Science Publishers, 1999.
- [4] BEJAN A. Entropy Generation Minimization[M]. Boca Raton: CRC Press, 1996.
- [5] CHEN LINGEN, WU CHIH, SUN FENGRUI. The influence of internal heat leak on the power versus efficiency characteristics of heat engines[J]. *Energy Converse*, 1997, 38(4): 1501—1507.
- [6] WU C, KIANG R L. Finite-time thermodynamic analysis of a Camot engine with internal irreversibility[J]. *Energy*, 1992, 17(12): 1173—1178.
- [7] 陈林根, 孙丰瑞. 不可逆卡诺热机的性能[J]. *科技通报*, 1995, 11(2): 128.
- [8] CHEN LINGEN, WU CHIH, SUN FENGRUI. A generalized model of real heat engines and its performance[J]. *J Insitute energy*, 1996, 69(481): 241—222.

burning test rig. The measuring and test results are presented. **Key words:** charge-coupled device, temperature measurement, genetic algorithm

基于火焰图像处理的炉膛辐射能信号的检测及分析= **Flame Image Processing-based Detection and Analysis of Furnace Radiation Energy Signals** [刊, 汉] / ZHANG Shi-shuai, ZHOU Huai-chun (Power Engineering Department, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), PENG Min, LIU Wu-lin (Central Testing Institute under the Hunan Provincial Electric Power Bureau, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 166 ~ 168, 182

An on-site detection test was conducted on a 300 MW coal-fired boiler of Xiangtan Power Plant by the use of a flame image processing-based detection system of furnace radiation-energy signals. In addition, an analysis has been performed on the relationship between the furnace radiation energy signals and the boiler main operating parameters. The results of the analysis indicate that the furnace radiation energy signals can to a certain extent not only forecast the actual output of the boiler, but also reflect the combustion conditions in the boiler. **Key words:** coal-fired boiler, flame image, furnace radiation energy, detection method

六角燃烧锅炉同心双切圆流场的数值模拟研究= **Numerical Simulation Study of the Concentric Double-tangential Circular Flow Field of a Hexagonal-fired Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Yu-xiao, LI Rui-yang, WANG Shi-jun, QIN Yu-kun (Energy Source College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LU Wei (Thermal Energy Engineering Department, Harbin University of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 169 ~ 171

By the use of a $k-\epsilon$ dual-equation turbulent flow model and a particle random trajectory model a numerical simulation is conducted of the burner-zone flow field of a boiler, which adopts wall-installed burners. The primary and secondary air jet flow of the upper layer burner has been arranged in the form of a concentric dual-tangential circle. Through an analysis of the variation of flow field characteristics the cause of slag formation on prototype heating surfaces is investigated and a method for resolving the issue sought out. **Key words:** $k-\epsilon$ dual equation turbulent flow model, particle random trajectory model, concentric dual-tangential circle

导热规律服从 $q \propto (\Delta T)^n$ 广义不可逆卡诺热机的最优性能= **Optimal Performance of a Generalized Irreversible Carnot Engine with Heat Conduction Law Subordinate to $Q^\mu(DT)^n$** [刊, 汉] / ZHOU Sheng-bing, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (No. 306 Teaching and Research Department under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 172 ~ 175, 179

Taking into account the thermal resistance losses between a working medium and heat source a constant term is used to express heat leakage loss and a constant factor term to express other irreversible items in a cycle plant with the exception of the heat resistance and heat leakage. As a result, set up is an irreversible Carnot engine model. On the basis of another kind of relatively universal heat conduction law, i. e., $Q^\mu(DT)^n$ derived is the optimal characteristic relationship between the heat engine power and efficiency. Through detailed numerical calculations an analysis is performed of the effect on the optimal performance of a generalized irreversible heat engine by the heat leakage, internal irreversibility and heat conduction law. **Key words:** finite-time thermodynamics, heat engine, performance optimization

贴体坐标系下求解复杂几何域内的单相流动= **The Solution of a Single-Phase Flow in a Complicated Geomet-**