

热机有限时间热力学： 理论和应用

陈林根 孙丰瑞 陈文振 (海军工程学院)

〔提要〕 本文从以下几个方面介绍了热机有限时间热力学的研究现状：牛顿定律系统的研究，热阻和其它不可逆损失模型的影响，有限热容热源的影响，外部加热速率的影响，以及热机设计和评估中的应用。

主题词 现代热力学 卡诺循环 内可逆循环 热机 最优设计

一、引言

对于以下一些问题，经典热力学没有予以回答，传统的不可逆热力学因偏重于用微分方程局部研究也不能回答这些全局性问题，如：在时间 τ 内热机产生给定的功所需最少能量为多少？给定输入能量下在 τ 内给定的热机能产生的最大功 W_{max} 是多少？有限时间内运行给定的热力过程的最有效方法（最佳通道）是什么？等等。Curzon和Ahlborn^[1]首先注意到了这一问题：卡诺效率 $\eta_{Carnot} = 1 - T_L/T_H$ 并非工作在 T_H 、 T_L 的热源内实际热机所能达到的效率界限，提出了著名的CA效率：最大功率下卡诺热机的效率 $\eta_{CA} = 1 - (T_L/T_H)^{1/2}$ ，为具有有限速率和有限周期特征的热机提供了新的效率界限。Andresen, Berry, Nitzan和Salamon^[2]首次把这类热力过程极值问题的研究称为有限时间热力学。据Orlov和Rudenko^[3]统计，从1975~1983年共有50多篇有关文献发表，近年又有30多篇发表。这些工作涉及到不少热力过程，本文主要介绍在热机理论和应用研究中的方法和成果。

二、无限热源牛顿定律系统的研究方法

在所有工作时间内工质保持内平衡的循环称为内可逆循环^[4]，相应的卡诺循环称为内可逆卡诺循环^[5]。由内可逆循环组成，除了热阻外忽略所有其余不可逆影响的热力系统称为牛顿定律系统^[6]。在一般的研究中还认为工质与热源间符合线性传热定律，即从热源 T_R 进入工质 T_W 的热流率为 $q = \alpha(T_R - T_W)$ 。根据所求的不同问题，这类研究又可分为两类：求给定的热力过程下对应的目标函数极值和求最佳目标函数对应的最佳热力过程（热力变量的时间通道）。所讨论的目标包括功率、功、效率、焓效率、熵产和利润等。

1. 给定热力过程时目标极值的研究方法

给定热力过程后可以求出最佳工质吸放热温度 T_{HW} 、 T_{LW} 和时间 t_H 、 t_L ($t_H + t_L = \xi\tau$) 得到相应的目标极值，同时也可以得到效率功率的关系。

Curzon 和 Ahlborn^[1] 取内可逆卡诺循环的 T_{HW} 、 T_{LW} 、 t_H 和 t_L 为控制变量, 结合工质熵产和 τ 的约束, 用偏导求极值法得到了最大功率 $P_{CA} = \xi K [T_H^{1/2} - T_L^{1/2}]^2$ 及其对应的效率 $\eta_{CA} = 1 - (T_L/T_H)^{1/2}$, $K = \alpha_H \alpha_L / (\alpha_H^{1/2} + \alpha_L^{1/2})^2$ 。

Andresen, Berry, Nitzan 和 Salamon^[2] 定义了类似卡诺循环的分级卡诺循环, 并以功、热效率和熵效率为目标进行分析。

Krusin, Procaccia 和 Ross^[7] 在体积不等约束下导出[1]模型的 P_{max} 及对应的 η 与压比有关, 并且证明 η_{CA} 只是无限压比时的效率界限。Pubin^[4] 得到了与[1]一致的 P_{CA} 及 η_{CA} , 而给定输入能 Q_1 时的最大效率 $\eta_{max} = 1 - T_L / [T_H(1 - Q_1/Q_1^0)]$, $Q_1 \rightarrow 0$, 则 $\eta_{max} \rightarrow \eta_{Carnot}$ 。Spence 和 Harrison^[8] 给出了任意热机循环的效率、功率与循环运行频率的关系。

严子浚^[9,10], 方光耀^[11], 孙丰瑞和赖锡棉^[12] 用不同的方法导出了内可逆卡诺热机在工质最佳吸放热温度下最大效率随输出功率的变化关系 $P = K \eta_{max} [T_H - T_L / (1 - \eta_{max})]$, 在给定的输出功率下可以得到实际热机所达到的效率界限, $P = 0$ 时, 有 $\eta_{max} = \eta_{Carnot}$, $P = P_{max}$ 时, 有 $\eta_{max} = \eta_{CA}$ 。严子浚^[13] 还以 $\eta^\lambda P$ ($\lambda = 1$ 最佳) 为目标分析 η 和 P , 以弥补单目标分析的局限性。孙丰瑞^[14] 以 $\eta = 1 - T_{LW}/T_{HW} = 1 - (T_L/T_H)^\nu$, ($0 \leq \nu \leq 1$) 表示内可逆卡诺循环的一切可能的效率, 结合前述的 $P_\nu = P_\nu[\eta(r)]$ (每一 ν 值有极值 $P_{\nu m}$, 而 $P_{max} = P_{r,m}(\nu = 0.5)$) 关系, 得到概括了两源间内可逆卡诺热机的一切最佳情况。为了在工质吸放热温度偏离最佳值时对实际热机的功率 P' 进行评定, 孙丰瑞和赖锡棉^[15] 定义了功率弱化系数 $\pi = P'/P = \pi(\Theta)$, 与 $P_r[\eta(r)]$ 一起建立了全息热效率——功率谱。该谱能概括一切可能的热机循环。孙丰瑞, 陈林根和陈文振^[16] 还进一步建立了定常态能量转换热机的全息谱, 导出了最小面积原理。

2. 给定最优目标时最优热力通道的研究方法

这类研究与如下问题有关: 控制变量及其取值极限; 调节系统时间关系的方程; 系统约束; 最优目标以及过程时间固定与否等^[17]。

Krusin, Procaccia 和 Ross^[7] 证明了所有可接受的循环中内可逆卡诺循环在大压比时产生的功最大。Rubin^[18] 在[4]的基础上定义 $\beta = (K - 1) \ln V/V_0$, $C = \dot{\beta}$, 取 C 、 α 、 T_R 为控制变量, 用 Pontryagin 最大原理建立 Hamilton 算子, 对任意内可逆循环在给定 τ 内求最大功率循环, 证明其最优通道包括两个等温分支而无绝热分支。Rubin^[19] 进一步考虑 α 为常量的固定压比情况, 证明在 τ 内最大平均功率的循环有八个分支, 包括等温、等容各两个和四个被称为“最大功率”的分支, 且当压比 $\rightarrow \infty$ 时, $P_{max} \rightarrow P_{CA}$ 。

Salamon, Nitzan, Andresen 和 Berry^[20] 以给定时间内热机的熵产 (与熵损失等价) 最小为目标, 用拉格朗日乘数法导出最佳的循环是每个分支的熵产速率为常数, 用所得最小熵产给出了最大功的新界限。Salamon 和 Nitzan^[6] 分别以功率、效率、熵效率、熵损失 (熵产) 和利润为目标对牛顿定律系统的研究表明, 所有的最优工况都在工质和热源间热交换速率为常数时发生, 并均经过一个瞬时的绝热过程。作者以 t_H 、 t_L 和半循环熵产为座标建立了表征最优循环热机所有工况集的三维卡诺空间。研究表明最大利润工况在最大功率工况和最小熵损失之间, 其最优通道与输出功率及输入熵的成本函数有关, 利润指标的引入将有助于将有限时间热力学应用到工厂运行管理中, 具有特殊意义。

3. 联合循环的研究方法

经典理论指出工作在 T_H 、 T_L 热源间的可逆联合循环可达到 $\eta_{\text{carnot}} = 1 - T_L/T_H$ 。Rubin 和 Andresen^[21] 对受有限时间影响的、带有中间热源的两个内可逆卡诺热机组成的联合循环最大功率的研究证明, 当各循环中的传热系数相同时, 最大输出功率仅有相同 T_H 、 T_L 下单一循环 P_{CA} 的一半, 而相应的 η 仍为 η_{CA} 。作者还对固定输入热量下的最大效率、最大焓效率和最小熵产问题作了研究。陈金灿和严子浚^[22] 研究了无中间热源联合循环在 τ 和输入热量 Q_1 一定时最大功 W 的问题, 得出对应各内可逆循环与热源进行等温热交换, 而两循环之间的热交换只需要两工质温度比为常数, 因而各子循环不一定需要内可逆卡诺循环。但就其总效应而言仍为内可逆卡诺循环作者还证明有无中间热源对最大功率下的 η 无影响, 均为 η_{CA} , 而两者的 P_{max} 差别较大。

三、损失模型的研究方法

实际热机工作时并非都遵循线性传热定律; 除热阻外, 热漏、内部耗散、机械摩擦、工质质量及活塞式热机中活塞惯性等对热机性能也有影响。

1. 热阻模型的研究

不同的热阻模型对求解问题有较大影响。除了大量的线性传热研究外, Krusin, Proccacia 和 Ross^[7] 研究了传热流率为 $q = \alpha(T_R - T_W)^n$ 时 (n 为奇数) 最大功率下的效率界限, 并有 $\eta(n) \leq \eta_{CA}$; 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\eta \rightarrow 0$ 。Orlov^[23] 指出, 当 $q = \alpha(1/T_W - 1/T_R)$ 时, 内可逆卡诺热机最大功率下的效率为 $\eta = 1 - (1 + 3T_L/T_H)/(3 + T_L/T_H)$ 。当 $q = \alpha(1/T_W - 1/T_R) + \beta(1/T_W - 1/T_R)^0$ 时, 在给定 Q_1 下最大效率对应的热机循环包括等温和绝热分支各三个; 而给定初终态下输出最大功的过程包括三个绝热和二一个等温分支。

2. 其它不可逆性模型的研究

Andresen, Salamon 和 Berry^[24] 提出了三角形循环的概念, 用几何方法将一个循环内的可逆和不可逆项分解为一个矢量的两个分量, 并借此分析了有热阻、摩擦、热漏时热机的最大功率和最大效率。Richter 和 Ross^[25] 应用线性响应理论研究了谐波式运行热机, 在存在摩擦、惯性和远离平衡态时的运行性能和运行频率、驱动力幅值的关系, 并得到了相应的极值。

Fairen 和 Ross^[26] 考虑了惯性影响, 由于引入了动量守恒方程, 改变了控制变量。研究证明此时最大功率的最优循环包含有加速和减速分支之间的等温分支。作者^[27] 也研究了有惯性影响时热机循环的功、效率与外谐波扰动频率关系, 并证明所求目标对此频率有局部最优值。

Mozurkewich 和 Berry^[28] 考虑了内燃机的各项不可逆因素, 如以与速度为线性关系的摩擦力计入摩擦, 进出口压降损失也归入摩擦项, 并以线性传热定律计入通过缸壁的热漏损失。鉴于热机的内效率 η_i 表示不可逆影响方便而准确, 孙丰瑞和陈文振^[29] 用 η_i 修订^[15、16] 得到的一整套公式, 得到了内外均不可逆热机的全息 $\eta-P$ 谱。

四、热源模型的研究方法

除了无限热容热源外, 还存在有限热容热源和外部加热泵入能热源, 这些热源对分析结

果有影响, 必须加以考虑。

1. 有限热源影响的研究方法

即使在可逆热力学范围内实际热机的效率也受到有限热源的影响^[30]。Ondrechen, Rubin 和 Band^[31]进一步考虑了有限时间内有限热源的影响。作者导出了热源和工质温度的微分关系式, 籍此得到的最大功率下最优循环中工质温度 $T_w(t)$ 是时间的指数函数, 在热源无限时相应的效率趋近于 η_{CA} 。严子浚^[32]给定一个循环后高温热源温度降低 ΔT , 而冷源为无限热容, 导出内可逆卡诺循环最大功率对应的效率为 $\eta = 1 - (T_L/T_H)^{1/2}(1 + \Delta T/\Delta T_H)$ 。严子浚、陈金灿^[33]还用^[31]给出的温度变化关系对有限热源热机进行了详细的讨论。

Rubin 和 Andresen^[21]在研讨联合循环的极值问题时把有限热源模型引入两个循环间的中间热源。

2. 外部加热(泵入热流)影响的研究方法。

适用有加热速率 $f(t)$ 的热力学第一定律为 $\dot{E}(t) = f(t) - \dot{W} - \alpha(T_w(t) - T_R)$ 。Band, Kafri 和 Salamon^[34-38]用这一模型进行了研究。^[34]求出了给定 $f(t)$ 下活塞热机最大功率的活塞最佳运动(体积变化规律) $V(t)$, 作者将其称为欧拉-拉格朗日(E-L)弧。^[35]证明具有任意给定的 $V(t)$ 和总的泵入能 E_p 下最大功率的最优加热速率是脉冲式的, $f(t) = E_p \delta(t - t_*)$, t_* 为最佳加热时刻, 对 $\delta(x)$, $x = 0$, $\delta = 1$; $x \neq 0$, $\delta = 0$ 。^[36]以 $V(t)$ 和 $E(t)$ 为控制变量, 计入 V 、 E 的不同约束和摩擦、惯性等九种情况进一步验证了 E-L 弧。作者还分析了 V 、 E 周期性变化的外燃机模型的 E-L 弧^[37], 并以 $T_w(t)$ 为控制变量在给定的 ΔE 下得到了 E-L 弧^[38]。Aizenbud 和 Band^[39]讨论了作为加热速率的函数的最大功率及其对应的最优时间, 以及给定功率下的最大输出功, ^[40]中还用 E-L 弧研究了考虑外压影响的内燃机模型的最大效率问题, 得到了最优工况的最佳压比和排放能。

五、热机和热过程中的应用研究

1. 热机设计和评估中的应用

有限时间热力学在热机研究中有很多功能, 如用来演示时间通道的最优化; 明了如何定量分析、减少热机损失; 以及验证现行热机性能改进可以达到的量度。

Mozurkewich 和 Berry^[41,28]将活塞沿汽缸轴线的坐标作为控制变量, 研究给定的 τ 内给定的活塞加速度范围里对应于最大输出功的单缸四冲程奥托机最佳通道, 所得效率比传统方案约高10%。Hoffman, Watowich 和 Berry^[42]将最优控制理论应用到了考虑各主要不可逆因素的狄塞尔热机模型, 求出活塞加速度约束范围内获得最大功率的最优通道, 功和效率均增加约10%。

孙丰瑞^[14]证明用克劳修斯导出熵的方法可将内可逆卡诺循环的全息谱^[15,29]推广到任意实际热机循环, 只要 $(1-\gamma)$ 为有限值^[12]。孙丰瑞, 陈林根 和 陈文振^[43]将克氏分割引入了蒸汽动力装置的分析, 提出了借助克氏微循环的一整套评估方法, 调整后的热机性能与用常规的动力装置优化设计方案几乎完全一致。

2. 化学热机的应用

Ondrechen, Berry Andresen^[44,45]进行了这类工作。作者借助于三角形循环, 分析

了从管道反应器内放热化学反应吸热驱动热机的模型^[44],并进一步将时间相关化学反应速率引入模型作了研究^[45]。Mozurkewich 和 Berry^[46]讨论耗散过程工作热机,求出了通用耗散热机的最优通道,并将其应用到了光驱动和化学反应供热热机,所得最优通道包括两个绝热和两个“等功率”分支。

3. 一般热力过程的应用

Salamon, Andresen 和 Berry^[47]用有限时间热力势的概念方便地得到给定起始点内热力过程的最大功。Kafri 和 Levine^[48]将速率方程引入热力过程,得到了一般热力过程的组合第一、二定律: $\dot{W} \leq \dot{Q} - T\dot{S} - [\dot{E} - T\Delta\dot{S}(t)]$ 。Brown, Snow, Andresen 和 Salamon^[49]分析了气体多孔塞的扩压问题,得到在两个位置间移动多孔塞所需的最小功。

4. 逆热机循环及其他应用

有限时间热力学还在热泵^[50-52]、制冷循环^[53-60]、空调器^[61]、激光器^[62]、太阳能热水器^[63]和光电蓄电池^[64]等热力设备的分析中得到应用。对非热机循环,作者将在今后进一步作详细讨论。

六、结 束 语

从以上的讨论可以看出,有限时间热力学研究的一般思路是:对实际过程作一定的假设,得到热力模型,给定一系列约束以定义可能的过程时间通道,然后找出给定行程下的目标极值或所取目标为极值时的行程,并求出与时间或其它变量有关的目标值,进一步求出最佳的时间(过程周期),得到所定义循环的最佳性能指标。这类研究工作不能简单地归类于传统热力学,也不是最优控制理论的简单应用,而是一很有希望的新学科,它的一些研究结果已经引入了教材^[65,66]。今后的发展方向是在继续进行各种热力过程的理论分析、构作学科的完整系统框架的同时,积极推进其在工程中的应用,以期在热能动力工程的发展中起到更积极的作用。

参 考 文 献

- [1] Curzon F. L, Ahlborn B: Efficiency of a Carnot Engine at maximum power output, *Am. J. Phys.*, 43, 1975; 22-24.
- [2] Andresen B, Berry R S, Nitzan A, Salamon P: Thermodynamics in finite time I, the Step-Carnot cycle, *Phys. Rev. A*, 15(5) 1977; 2086-2093.
- [3] Orlov V N, Rudenko A V: Optimal control in problem of external of irreversible thermodynamic processes, *Avtomatica i Telemekhanika*, (5)1985; 7-41.
- [4] Rubin M H: Optimal configuration of a class of irreversible heat engines I, *Phys. Rev. A*, 19(3)1979; 1272-1276.
- [5] 严子浚, 陈丽璇: 内可逆卡诺循环, *大学物理*, (7)1985; 22-24.
- [6] Salamon P, Nitzan A: Finite time optimizations of a Newton's law Carnot cycle, *J. Chem. Phys.*, 74(6)1981; 3546-3560
- [7] Gutowicz-Krusin D, Procaccia I, Ross J: On the efficiency of rate processes, Power and efficiency of heat engines, *J. Chem. Phys.*, 69(9)1978; 3898-3906
- [8] Spence R, D, Hrrision M. J: Speed dependence of the efficiency of heat engines, *Am. J. Phys.*, 53(9)1985; 890-893

- [9] 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, 6(1)1985:1-6。
- [10] 严子浚: 二热源间的输出功率与热效率间的关系, 内燃机学报, 5(1)1987:34-41。
- [11] 方光耀: 二源热机的输出功率与热效率, 内燃机学报, 3(3)1985:193-198。
- [12] 孙丰瑞, 赖锡棉: 工质与低温热源工作温度的有限时间热力学分析, 全国高校热物理第二届学术会议论文集, 科学出版社 1988年
- [13] 严子浚: η^*P 最大时卡诺热机的 η 和 P , 厦门大学学报, 25(3)1986: 279-286
- [14] 孙丰瑞: 任意两个以上热源的热机循环工作温度合理性的有限时间热力学分析, 工程热物理学会第五届年会论文, 851060(1985), 湖北工程热物理学会论文集 I, 武汉工业大学出版社 1988年。
- [15] 孙丰瑞, 赖锡棉: 热源间热机的“全息”热效率—功率谱, 热能动力工程, 3(3)1988. 1-9。
- [16] 孙丰瑞, 陈林根, 陈文振: 热源间定常态能量转换热机热动力学: 最小传热面积原理, 湖北工程热物理学会论文集 I, 武汉工业大学出版社 (1988)。
- [17] Andresen B, Salamon P, Berry R. S: Thermodynamics in finite time, *Phys. Today*, Sept. 1984; 62-70.
- [18] Rubin M. H: Optimal configuration of a class of irreversible heat engines I, *Phys. Rev. A*, 19(3) 1979; 1277—1289
- [19] Rubin M. H: Optimal configuration of an irreversible heat engine with fixed compression ratio, *Phys. Rev. A*, 22(4)1980; 1741-1752
- [20] Salamon P, Nitzan A, Andresen B, Berry R. S: Minimum entropy production and the optimization of heat engines, *Phys. Rev. A*, 21(6)1980; 2115-2129.
- [21] Rubin M. H, Andresen B: Optimal staging of endoreversible heat engines, *J. Appl. Phys.*, 53,(1) 1982,1—7
- [22] 陈金灿, 严子浚: 联合动力循环的有限时间热力学分析, 厦门大学学报, 27, 3 (1988), 289—293。
- [23] Orlov V. N: Optimum irreversible Carnot cycle containing three isotherms, *Sov. Phys. Dokl.*, 30 (6) 1985; 506—508
- [24] Andresen B, Salamon P, Berry R. S, Thermodynamics in finite time: extremals for imperfect heat engines, *J. Chem. Phys.*, 66 (4) 1977; 1571—1577
- [25] Richter P. H, Ross J: The efficiency of engines operating around a steady state at finite frequencies, *J. Chem. Phys.*, 69 (12) 1978; 5521—5531
- [26] Fairen V, Ross J: On the efficiency of thermal engines with power output: consideration of inertial effects, *J. Chem. Phys.*, 75 (11) 1981; 5485—5489
- [27] Fairen V, Ross J.: On the efficiency of thermal engines with power output: harmonically driven engines, *J. Chem. Phys.*, 75 (11) 1981,5490—5496
- [28] Mozurkevich M, Berry R. S: Optimal paths for thermodynamic system; the ideal otto cycle, *J. Appl. Phys.*, 53 (1) 1982; 34—42
- [29] 孙丰瑞, 陈文振: 内效率方法在热源间热机 η_0-P 谱分析中的应用, 工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议论文, 871088 (1987)。
- [30] Ondrechen M. J, Andresen B, Mozurkevich M, Berry R. S: Maximum work from a finite reservoir by sequential Carnot cycles, *Am. J. phys.*, 49, (7) 1981; 681—685
- [31] Ondrechen M. J, Rubin M. H, Band Y. B: The generalized. Carnot cycle, a working fluid operating in finite time between finite heat sources and sinks, *J. chem. phys.*, 78 (7) 1983; 4721—4727
- [32] 严子浚: 从有限热源获得最大功率输出时循环的效率, 工程热物理学报 5 (2) 1984; 125—131。
- [33] 严子浚, 陈金灿: 有限热源内可逆循环的最优特性, 厦门大学学报 26 (6) 1987; 672—677
- [34] Band Y. B, Kafri O, Salamon P, Maximum work production from a heated gas in a cylinder with piston, *Chem. Phys. Lett.*, 72 (1) 1980; 127—130
- [35] Band Y. B, Kafri O, Salamon P: Optimal heating of the working fluid in a cylinder equipped with a moving piston, *J. Appl. Phys.*, 52 (6) 1981; 3745—3749

- [36] Band Y. B, Kafri O, Salamon P: Finite time thermodynamics: optimal expansion of a heated working fluid, *J. Appl. Phys.*, 53 (1) 1982: 8—28
- [37] Band Y. B, Kafri O, Salamon P: Optimization of a model external combustion engine, *J. Appl. Phys.*, 53 (1) 1982: 29—33
- [38] Salamon P, Band B. Y, Kafri O: Maximum power from a cycling working fluid, *J. Appl. Phys.*, 53 (1) 1982: 197—202
- [39] Aizenbud B. M, Band Y. B: Power considerations in the operation of a piston of a piston fitted inside a cylinder containing a dynamically heated working fluid, *J. Appl. Phys.*, 52 (6) 1981: 3742—3744
- [40] Aizenbud B. M, Band Y. B, Kafri O: Optimization of a model internal combustion engine, *J. Appl. Phys.*, 53 (3) 1982: 1277—1282
- [41] Mozurkevich M, Berry R. S: Finite time thermodynamics: engine performance improvement by optimized piston motion, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 78 (4) 1981: 1986—1988
- [42] Hoffman K. H, Watowich S. J, Berry R. S: Optimal paths for thermodynamic systems: the ideal Diesel cycle, *J. Appl. Phys.*, 58 (6) 1985: 2125—2134
- [43] 孙丰瑞, 陈林根, 陈文振: 热源间定常态能量转换热机有限时间热力学分析和评估, *热能动力工程* 4(1)1989: 1
- [44] Ondrechen M. J, Berry R. S, Andresen B: Thermodynamics in finite time: A chemically driven engine, *J. Chem. Phys.*, 72 (9) 1980: 5118—5124
- [45] Ondrechen M. J, Andresen B, Berry R. S: Thermodynamics in finite time: processes with temperature-dependent chemical reactions, *J. Chem. Phys.*, 73 (11) 1982: 5838—5843
- [46] Mozurkevich M, Berry R. S: Optimization of a heat engine based on a dissipative system, *J. Appl. Phys.*, 54 (7) 1983: 3651—3661
- [47] Salamon P, Andresen B, Berry R. S: Thermodynamics in finite time II: Potentials for finite-time Processes, *Phys. Rev. A*, 15 (5) 1977: 2086—2093
- [48] Kafri O, Levine R. D: Thermodynamics of power and dissipation, *Isr. J. Chem.*, 16, 1977: 342—344
- [49] Brown G. R, Snow S, Andresen B, Salamon P: Finite-time thermodynamics of a porous plug, *Phys. Rev. A*, 34, (5) 1986: 4370—4379
- [50] Blanchard C. H: Coefficient of performance for finite speed heat pump, *J. Appl. Phys.*, 51 (5) 1980: 2471—2472
- [51] 严子浚: 内可逆卡诺热泵的最优性能, *厦门大学学报*, 23 (4) 1984: 414—419
- [52] 严子浚: 热阻对热泵性能的影响, *新能源*, (7) 1987: 42—46
- [53] 严子浚: εR 最大时卡诺制冷机的 ε 和 R , *自然杂志*, 7 (1) 1984: 73—77
- [54] 严子浚: 卡诺制冷机的最佳制冷系数与制冷率的关系, *物理*, 13 (12) 1984
- [55] 陈天择: 一类内可逆制冷机的最优构形, *厦门大学学报*, 24 (1) 1985: 442—447
- [56] 陈丽璇: 有限时间热力学: 逆向阶梯卡诺循环的最优化, *厦门大学学报*, 25 (1) 1986: 34—42
- [57] 陈丽璇: 焓变和周期固定时二热源制冷循环的最优化, *厦门大学学报*, 26 (1) 1987: 58—64
- [58] 李俊达: 两级串联的内可逆制冷机的最优构形, *厦门大学学报*, 27, (1) 1988: 53—58.
- [59] 杨立, 孙丰瑞: 有限热源逆卡诺循环的最优制冷率与制冷系数的关系, *湖北工程热物理学会第一届学术会议论文* 1987年.
- [60] 孙丰瑞, 陈文振, 陈林根: 二源间反向内可逆卡诺循环全谱分析及最佳参数的选择(待发表), *工程热物理学会第六届年会论文* 1988年
- [61] Leff H. S, Teeter W. D: Optimization and 2nd law efficiency for airconditioners, *Am. Phys.* 46 (1) 1987: 19—22
- [62] Keren E, Kafri O, Band Y. B: Optimization of the energy output in pulsed lasers, *J. Appl. Phys.*, 53 (3) 1982: 1373—1380
- [63] Adler C. G, Byrd J. W, Coulter B. L: The 2nd law efficiency of solar heating, *Solar*

Energy, (6) 1981, 553

[64] Dung M. H, Kozak J. J: Efficiency of light energy conversion in photogalvanic cells and water cleavage systems, *J. Chem. Phys.*, 77 (6) 1982, 3246-3257

[65] Callen H: Thermodynamics and an introduction thermostatics, Wiley, New York (1985).

[66] 孙丰瑞: 高等工程热力学, 海军工程学院 1987.

新产品新技术信息

№R88—37 新型菱镁玻纤瓦 新型菱镁玻纤瓦是以无机材料为基材的新型建筑材料。该产品具有强度高、重量轻、防火、防水、保温、隔热、耐寒耐腐蚀、不老化、经久耐用等特点。

该产品横向抗折 $\geq 200\text{kg}$ (石棉瓦为 120kg)、纵向抗折 $\geq 100\text{kg}$ (石棉瓦为 70kg)；表面吸水率 $< 1.5\%$ ；冰融试验：在 $-40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 情况下冻 120 分钟，再在 $< 10^\circ\text{C}$ 的江水中浸泡 30 分钟为一个循环，共测定 25 个循环，无起层、无裂纹。干湿试验：在 60°C 下烘干 120 分钟，再浸泡水中 60 分钟为一个循环，共测定 25 个循环，无起层和开裂现象。规格为 $1800 \times 720 \times 5^{+1}\text{mm}$ ，重： $14 \pm 1\text{kg}/\text{片}$ 。

新型菱镁玻纤瓦是代替瓦楞铁、石棉瓦、粘土瓦等理想的新型建筑材料。瓦面光滑，呈乳白色，可制做成各种彩色花纹，美观实用，使用时不必再刷油漆或其它涂料。可按用户要求进行设计和加工。

№R88—38 RPJ型油—气燃烧器 RPJ型与 RPY 型互为姐妹型，同样可适用于重油、原油、渣油和天然气等燃料。目前有配 $2\text{t}/\text{h}$ 、 $4\text{t}/\text{h}$ 、 $6\text{t}/\text{h}$ 、 $10\text{t}/\text{h}$ 、 $20\text{t}/\text{h}$ 、 $30\text{t}/\text{h}$ ，的系列设计，调风器结构与 RPY 型相同，喷油器采用机械压力雾化或 Y 型蒸汽雾化。调节范围达到 1:3，炉膛出口空气过剩系数

~ 1.1 ，调风器阻力损失 $150\text{mmH}_2\text{O}$ 以下采用更换雾化片的方式，适于采暖、热水锅炉房。鉴定试验在 $6\text{t}/\text{h}$ 炉上进行时，锅炉额定负荷效率达 89.7% 。1988 年 4 月通过黑龙江省省级成果鉴定。已批量推广。承包设计安装，产品销售。

№R88—39 SZN型水管锅炉 为双锅筒（或双大集箱）纵置式双层炉排逆向燃烧的自然循环水管锅炉。现有 SZN0.1—0.9、SZN1—7、SZN6—4/95、SZN30—4/95、SZN60—4/95、SZN90—7/95 六种锅炉。本型锅炉具有传热好、效率高、钢耗省、结构简单、制造容易、工作可靠，炉内除尘好等一系列优点。锅炉效率为 $72 \sim 75\%$ ，钢耗量为 $1.73\text{吨}/\text{蒸吨}$ 。1986 年通过省级技术鉴定，获得《技术鉴定证书》，目前已有数以百计的锅炉在东北地区推广应用，经济效益显著，运行效果良好。服务方式：提供设计图纸。

№R88—40 SZL4—13水管锅炉 为双锅筒纵置式链条炉排自然循环水管锅炉。本锅炉结构上有两大特色：一是采用大块链条炉排片，二是采用炉排下双侧进风的送风方式。锅炉效率高（达 76.5% ）、工作安全可靠，是传统的普通快装链条锅炉无法比拟的。1986 年通过省级技术鉴定，获得《技术鉴定证书》，目前已在黑龙江省推广应用，运行效果良好。服务方式：提供设计图纸。

(如需以上技术或产品请与编辑部联系)

JOURNAL OF ENGINEERING THERMAL ENERGY AND POWER

NO.2 1989

CONTENTS

Finite Time Thermodynamics Analysis and Evaluation for a Heat Engine with Steady-state Energy Conversion between Heat Sources

.....Sun Fengrui, Chen Lingen
Chen Wenzhen (1)

Abstract

Presented in this paper is an analysis of the finite time thermodynamics for a heat engine with steady-state energy conversion between heat sources. With respect to the actual process existing in a steam power plant, a finite time thermodynamics method taking account of both the output power and heat efficiency has been put forward to select and evaluate an actual power plant. The results obtained are found to be in good agreement with those of the thermotechnical parameter optimization method.

Key words: Finite time thermodynamics, Carnot cycle, Steam power plant, Optimized design.

Finite Time Thermodynamics for Heat Engines:

Theory and Applications.....Chen Lingen,
Sun Fengrui, Chen Wenzhen (7)

Abstract

This paper presents a review of the finite time thermodynamics for heat engines in respect of the following aspects: the study of Newton law system, an analysis of thermal resistance and other irreversible loss models effects as well as finite reservoirs and source-type reservoirs effects, and finally, the application of heat engine design and its evaluation.

Key words: modern thermodynamics, Carnot cycle, endoreversible cycle, heat engine, optimal design.

The Structural Analysis of a Speed Governing System for a Marine prime Mover.....Li Feng (15)

Abstract

This paper gives a theoretical analysis of the speed governing system for a