

前沿领域综述

正、反向两源热力循环有限时间热力学性能优化的研究进展*

李俊 陈林根[†] 戈延林 孙丰瑞

(海军工程大学, 热科学与动力工程研究室, 武汉 430033)

(海军工程大学, 舰船动力工程军队重点实验室, 武汉 430033)

(海军工程大学, 动力工程学院, 武汉 430033)

(2013年2月14日收到; 2013年3月9日收到修改稿)

有限时间热力学所得结果具有普适性, 其研究结果已成为热物理学的一个重要基础. 许多学者利用有限时间热力学方法对单级和多级正、反向两热源热力循环最优性能和最优构型进行了大量研究, 获得了一些比经典热力学对于工程设计和优化更具有实际指导意义的新结论. 综述了利用有限时间热力学理论对不同传热规律下单级和多级正、反向两热源热力循环最优性能和最优构型研究的最新进展, 包括不同传热规律下内可逆和不可逆卡诺热机、制冷机和热泵循环的最优性能研究进展, 两热源热机、制冷和热泵循环最优构型及多级复杂热力系统最优构型研究进展.

关键词: 正反向卡诺循环, 最优性能, 最优构型, 有限时间热力学

PACS: 05.70.-a, 05.70.Ln

DOI: 10.7498/aps.62.130501

1 引言

经典热力学以可逆界限作为能量过程的评价指标, 但此时热力学输出“率”为零, 因而不能很好地表征循环的品质. 因此, 经典热力学理论已不能满足现代热机以及热力工程技术发展的需要. 热力工程的技术进步越来越需要考虑不可逆过程影响的新理论来指导. 有限时间热力学最初所研究的主要内容就是对经典热力学进行改进和革新, 求出存在系统与环境间有限速率热交换的有限时间过程和有限尺寸装置的热力学性能界限.

有限时间热力学^[1-7]是现代热力学理论的一个新分支, 它利用热力学、传热学和流体力学相结合的方法, 在有限时间和有限尺寸约束条件下, 以减少系统不可逆性为主要目标, 优化存在传热传质和流体流动不可逆性的实际热力系统, 对提高循环的性能起到了重要作用. 有限时间热力学以交叉、移植和类比的研究方法为主, 追求普适的规律, 所

得结果更具有普适性, 其研究结果已成为热物理学的一个重要基础.

利用有限时间热力学对正、反向两热源热力循环的研究可分为两类: 一类是求给定的热力系统对应的目标函数极值及目标函数间的相互关系(最优性能); 一类是求给定最优目标函数对应的最优热力过程(最优构型). 20世纪70年代中期以来, 一大批国内外物理学家和工程学家使用函数极值理论、变分法和最优控制理论等研究方法, 对单级和多级正、反向两热源热力循环最优性能和最优构型进行了大量研究, 获得了一些比经典热力学对于工程设计和优化更具有实际指导意义的新结论.

2 卡诺热机循环最优性能研究

2.1 牛顿传热规律下恒温热源热机循环

有限时间热力学研究的基本热力模型是“内可逆模型”, 即只考虑有限速率传热不可逆性. Curzon

* 国家自然科学基金(批准号: 10905093)和海军工程大学自然科学基金引导项目(批准号: HGDYDJ10011)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: lingchen@hotmail.com, lgchenna@yahoo.com

和 Ahlborn^[8] 导出了牛顿传热规律 ($Q \propto \Delta T$) 下内可逆卡诺循环的最大输出功率及对应的热效率. 严子浚^[9] 导出了牛顿传热规律下内可逆卡诺热机热效率与输出功率之间的最优关系, 即牛顿传热规律下内可逆卡诺热机的基本优化关系. 孙丰瑞等^[10,11] 得到了热机“全息”功率、热效率谱, 形成了牛顿传热规律下内可逆卡诺热机参数选择的有限时间热力学准则. 孙丰瑞等^[12] 首先注意到了定常流热机与往复式热机在热力学机理上的区别, 用有限面积代替有限时间约束, 以比功率——对总传热面积平均的功率输出为目标对内可逆热机进行性能优化, 并得到了最小传热面积原理和面积特性关系^[13].

然而, 实际热机除热阻损失外, 还具有热漏、内部耗散等不可逆性. 一些文献以热阻加热漏热机模型^[14-17] 和热阻加内不可逆损失热机模型^[18] 为对象, 研究了热漏和内不可逆损失对热机输出功率与热效率最优关系的影响, 在此基础上, 陈林根等^[5,19-21] 建立了一个较完备的, 包括热阻、热漏和其他不可逆损失的广义不可逆卡诺热机模型, 并导出了牛顿传热规律下广义不可逆卡诺热机最大输出功率界限和最大热效率界限以及输出功率与热效率的最优关系, 所得结果与实际热机特性一致. 近年来, 一些学者还研究了量子热机的最优性能和优化准则^[22-24].

以不同目标分析、优化循环的性能, 已经成为有限时间热力学领域一项十分活跃的研究工作. 除了功率、热效率目标外, 1991年, Angulo-Brown^[25] 以 $E' = P - T_L \sigma$ 为目标讨论了热机的性能优化 (式中 T_L 为低温热源温度, P 为热机输出功率, σ 为热机熵产率), 由于该目标在一定意义上与生态学期目标有相似性, 故称其为“生态学”最优性能. 严子浚^[26] 认为 Angulo-Brown 没有注意到能量 (热量) 与功的本质区别, 将输出功率 (焓) 与非焓损失放在一起作比较是不完备的, 并提出以目标 $E'' = P - T_0 \sigma$ 代替 E' (式中 T_0 为环境温度). 陈林根等^[27] 基于焓分析的观点, 建立了各种循环统一的焓分析生态学目标函数 $E = A/\tau - T_0 \Delta S/\tau = A/\tau - T_0 \sigma$ (式中 A 为循环输出焓, ΔS 为循环熵产, τ 为循环周期), 生态学目标函数反映了焓输出率和熵产率之间的最佳折衷. 此后, 不少文献讨论了牛顿传热规律下内可逆和不可逆卡诺热机的生态学最优性能^[28-32], 还有一些学者研究了 Brayton^[33,34]、Stirling 和 Ericsson^[35] 热机的生态学最优性能.

上世纪 80 年代初, Salamon 和 Nitzan^[36] 分别研究了焓效率、焓损失和利润率优化目标下内可

逆卡诺热机的最优性能. 陈林根等人在 20 世纪 90 年代初提出将有限时间热力学与热经济学^[37-40] 相结合, 建立了有限时间焓经济分析法^[41-44], 该方法定义利润率为热力循环的输出功 (焓) 的收益率与热力循环的输入焓 (功) 的成本率之差, 输出 (输入) 焓等价于相同条件下热力循环的可逆功. 在此基础上, 陈林根等^[42-45] 导出了内可逆卡诺热机的有限时间焓经济性能界限、优化关系和参数优化准则. Ibrahim 等^[46]、De Vos^[47,48] 和 Bejan^[49] 也提出了类似的思想.

郑兆平等^[50-52] 研究了牛顿传热规律和普适模型下内可逆热机的有限时间焓经济最优性能, 导出了循环利润率与工质温比和热效率与工质温比的关系式, 以及利润率与热效率的特性关系, 所得结果包含了内可逆 Diesel, Otto, Atkinson 和 Brayton 循环的有限时间焓经济最优性能. 陈林根等^[53] 则导出了存在热阻、热漏和内不可逆损失时广义不可逆卡诺热机最优利润率的解析式和最大利润率及相应的热效率界限, 即牛顿传热规律下广义不可逆卡诺热机的有限时间焓经济性能界限. Sahin 等^[54,55] 以总费用平均的输出功率最大为目标研究了内可逆和不可逆热机的性能, 得到了相应的热力学经济性能界限.

2.2 牛顿传热规律下变温热源热机循环

在实际热力过程中经常是从有限热容 (变温) 热源, 而不是从无限热容 (恒温) 热源吸热产生功. Ondrechen 等^[56] 研究了有限热容热源序接卡诺循环的最大输出功率问题, 结果表明, 即使在可逆热力学范围内, 实际热机的热效率也受到有限热容热源的影响. 严子浚^[57] 研究了给定吸热量时高温热源为变温热源、低温热源为恒温热源的卡诺热机循环输出功率最大时的热效率. Grazzini^[58] 研究了吸热量可以优化时高温热源为变温热源、低温热源为恒温热源的卡诺热机最大输出功率以及相应的热效率. 还有一些学者研究了吸热量可以优化时变温热源朗肯循环^[59] 和 Brayton 循环^[60] 的最优性能.

2.3 不同传热规律下恒、变温热源热机循环

实际热机工作时工质与热源间的传热并非都服从牛顿定律. Gutowicz-Krusion 等^[61] 最早导出了广义对流传热规律 ($Q \propto (\Delta T)^n$) 下内可逆卡诺热机的最大输出功率界限和最大热效率界限. 一些学者研究了线性唯象传热规律 ($Q \propto \Delta(T^{-1})$) 和辐射传热规律 ($Q \propto \Delta(T^4)$) 对内可逆卡诺热机输出功

率与热效率最优关系的影响^[62-66]. Angulo-Brown 和 Paez-Hernandez^[67], Huleihil 和 Andresen^[68] 导出了广义对流传热规律下内可逆卡诺热机输出功率与热效率的最优关系. 陈林根等^[69] 则以热阻加内不可逆损失热机模型为对象, 分别导出了线性唯象和广义对流传热规律下热机输出功率与热效率的最优关系以及输出功率最大时相应的热效率界限. De Vos^[70,71] 最早导出了广义辐射传热规律 ($Q \propto (\Delta T^n)$) 下高温热源与工质间存在热阻的卡诺热机输出功率与热效率的最优关系, 陈丽璇和严子浚^[72] 与 Gordon^[73] 进一步得到了此时内可逆卡诺热机输出功率与热效率的最优关系. 陈林根等^[74] 研究了广义辐射传热规律和热阻加热漏损失条件下不可逆热机输出功率与热效率的最优关系, 并进一步导出了广义对流传热规律和混合热阻条件下内可逆卡诺热机输出功率与热效率的最优关系^[75,76] 以及广义辐射传热规律下广义不可逆卡诺热机输出功率与热效率的最优关系, 并分析了传热规律、热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺热机输出功率与热效率最优关系的影响^[77]. 周圣兵等^[78] 则进一步导出了广义对流传热规律下广义不可逆卡诺热机输出功率与热效率的最优关系, 分析了传热规律、热漏和内不可逆损失对此时热机输出功率与热效率最优关系的影响. 在此基础上, 李俊等^[79-82] 基于一类更为普适的传热规律 $Q \propto [\Delta(T^n)]^m$ (包括牛顿传热规律、线性唯象传热规律、辐射传热规律、Dulong-Petit 传热规律、广义对流传热规律和广义辐射传热规律), 导出了内可逆和广义不可逆卡诺热机的最大输出功率界限和最大热效率界限以及输出功率与热效率的最优关系, 分析了传热规律对内可逆和广义不可逆卡诺热机以及热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺热机输出功率与热效率最优关系的影响, 所得结果具有普适性, 包含大量文献的结果.

陈林根等^[83,84] 研究了线性唯象传热规律对内可逆和广义不可逆卡诺热机生态学最优性能的影响, 导出了生态学目标值最大时热机的热效率界限和相应的输出功率. Sogut 等^[85] 研究了太阳能驱动热机的生态学最优性能, 所得结果表明, 在考虑所有分布参数的值和热源温比实际范围条件下, 热机最大生态学目标值时对应的热效率大于最大输出功率和最大输出功率密度时对应的热效率. 朱小芹等^[86-88] 则导出了广义不可逆卡诺热机分别服从广义对流和广义辐射传热规律时的生态学最优性能, 分析了传热规律、热漏和内不可逆损失对此时热机生态学目标函数、熵产率和输出功率等与热效率最优关系的影响. 在此基础上, 李俊

等^[82,89,90] 进一步研究了普适传热规律 $Q \propto [\Delta(T^n)]^m$ 下内可逆和广义不可逆卡诺热机的生态学最优性能, 分析了传热规律对内可逆和广义不可逆卡诺热机以及热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺热机生态学目标函数、熵产率和输出功率等与热效率最优关系的影响, 所得结果包含大量文献的结果, 具有一定的普适性.

以文献 [47] 为基础, 陈林根等^[91] 研究了线性唯象传热规律对内可逆卡诺热机有限时间炯经济性能的影响, 导出了此时热机利润率、最大利润率和相应热效率的解析式. Wu 等^[92] 研究了广义辐射传热规律下内可逆卡诺热机的有限时间炯经济性能, 分析了传热规律对此时热机利润率与热效率最优关系的影响. 朱小芹等^[93] 则得到了广义对流传热规律下内可逆卡诺热机的有限时间炯经济性能界限, 分析了热机最大利润率、最优热效率与燃料费用、热源温度的关系. 郑兆平^[52] 导出了广义对流和广义辐射传热规律下广义不可逆卡诺热机的最大利润率及相应的热效率界限, 即广义对流和广义辐射传热规律下广义不可逆卡诺热机的有限时间炯经济性能界限, 并分析了传热规律、热漏、内不可逆损失和价格比对广义不可逆卡诺热机利润率和有限时间炯经济性能界限以及利润率与热效率最优关系的影响. 李俊等^[82,94] 则进一步研究了普适传热规律 $Q \propto [\Delta(T^n)]^m$ 下内可逆和广义不可逆卡诺热机的有限时间炯经济性能, 分析了传热规律和价格比对内可逆和广义不可逆卡诺热机以及热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺热机利润率和有限时间炯经济性能界限以及利润率与热效率最优关系的影响, 所得结果具有一定的普适性和包容性.

3 卡诺制冷循环最优性能研究

3.1 牛顿传热规律下恒温热源制冷循环

Leff 和 Teeter^[95] 最早将 Curzon-Ahlborn^[8] 的研究方法引入制冷循环研究, 由于牛顿传热规律下内可逆卡诺制冷机制冷率最大时的制冷系数为零, Leff 和 Teeter 没有进一步深入研究. Rozonoer 和 Tsirlin^[96] 最早导出牛顿传热规律下给定输入功率时内可逆卡诺制冷机的最大制冷系数界限. 严子浚^[97] 和 Feidt 等^[98-101] 分别导出了牛顿传热规律下的内可逆卡诺制冷机一定制冷率下的最优制冷系数, 即牛顿传热规律下内可逆卡诺制冷机的基本优化关系. 孙丰瑞和陈文振等^[102,103] 将热机的特征参数拓展到制冷机, 强调定常流循环的面积比优

化和制冷率与制冷系数间的协调优化,得到了两热源制冷机的优化准则. Klein^[104]和 Wu^[105]研究了内可逆卡诺制冷机的比制冷率优化,导出了比制冷率与制冷系数界限以及制冷率与制冷系数的最优关系.

同热机一样,实际制冷机除热阻损失外,也具有热漏、内部耗散等不可逆性.一些文献以热阻加热漏制冷机模型^[106-110]和热阻加内不可逆损失制冷机模型^[111-113]为对象,研究了热漏和内不可逆损失对制冷机制冷率与制冷系数最优关系的影响.陈林根等^[5,19,114-116]建立了一个较完备的,包括热阻、热漏和其他不可逆损失的广义不可逆卡诺制冷机模型,导出了牛顿传热规律下广义不可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数的最优关系,并分析了热阻、热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数最优关系的影响.伍歆等^[117]还研究了不可逆量子制冷循环的最优性能.

陈林根等^[118]将生态学目标函数引入制冷循环,导出了生态学目标函数与制冷系数的最优关系、最大生态学目标值所对应的制冷系数界限以及相应的制冷率和熵产率,建立了内可逆卡诺制冷机的生态学优化准则.屠友明等^[119,120]则将生态学目标函数引入到对空气制冷循环的性能研究中来,得到了空气制冷机的生态学最优性能.在文献^[114-116]的基础上,陈林根等^[121]导出了牛顿传热规律下广义不可逆卡诺制冷机的生态学最优性能,并分析了热漏和内不可逆损失对此时制冷机生态学目标函数、焓损率、焓输出率和制冷率等与制冷系数最优关系的影响.

陈林根等^[122]导出了牛顿传热规律下内可逆卡诺制冷机利润率与制冷系数的一般关系和最优关系以及最大制冷率时相应的制冷系数,得到了此时制冷机的有限时间焓经济性能界限和优化准则,并进一步导出了牛顿传热规律下广义不可逆卡诺制冷机的最优利润率解析式以及相应的制冷系数界限,分析了热漏、内不可逆损失和价格比对广义不可逆卡诺制冷机利润率和有限时间焓经济性能界限以及利润率与制冷系数最优关系的影响^[123].马康等^[124]则研究了存在热阻、热漏和内不可逆损失的广义不可逆联合卡诺制冷循环有限时间焓经济性能,导出了牛顿传热规律下循环最优利润率与最优制冷系数的解析式以及二者之间的最优关系,并分析了热漏、内不可逆损失和价格比对利润率和有限时间焓经济性能界限的影响. Sahin 等^[125-127]以总费用平均的制冷率最大为目标,研究了内可逆和不可逆制冷、联合制冷循环的

性能,得到了相应的热力学经济性能界限和优化准则.

3.2 牛顿传热规律下变温热源制冷循环

陈金灿和严子浚^[128]以工作在有限热容低温热源和无限热容高温热源间的内可逆制冷机为对象,研究了牛顿传热规律下内可逆制冷机的制冷率与制冷系数的最优关系.陈林根等^[129]和 Wu 等^[130]导出了牛顿传热规律和有限热容热源条件下,定常流卡诺和 Brayton 制冷循环的优化关系,并在相同的热源和换热器热导率条件下对二者进行了比较,分析了工质、热源热容率和内不可逆性对循环性能的影响,讨论了工质与热源间的最优匹配问题.

3.3 不同传热规律下恒、变温热源制冷循环

实际制冷机工作时工质与热源间的传热并非都服从牛顿定律,陈林根等^[131]最早导出了广义对流传热规律下内可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数的最优关系, Wu 等^[132], 陈文振等^[133]和 Feidt^[134]也分别研究了该传热规律对内可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数最优关系的影响.陈文振等^[135]最早导出了广义辐射传热规律下内可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数之间的最优关系,严子浚等^[136], 陈林根等^[137]和 Feidt^[134]也分别研究了该传热规律对内可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数最优关系的影响.陈林根等^[74]研究了广义辐射传热规律对热阻加热漏损失条件下不可逆制冷机制冷率与制冷系数最优关系的影响.孙丰瑞等^[138]导出了广义辐射传热规律和热阻加内不可逆损失条件下制冷机最优制冷系数与制冷率的关系. Assad^[139]则导出了广义对流传热规律下仅具有热阻和内不可逆损失的不可逆制冷机制冷率与制冷系数的最优关系.陈林根等^[140]进一步研究了该传热规律下广义不可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数的最优关系,分析了传热规律、热漏和内不可逆损失对此时制冷机制冷率与制冷系数最优关系的影响.李俊等^[82,141,142]导出了普适传热规律下内可逆和广义不可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数的最优关系,并分析了传热规律对内可逆和广义不可逆卡诺制冷机以及热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺制冷机制冷率与制冷系数最优关系的影响,所得结果包含大量已有文献的结果,具有一定的普适性.

陈林根等^[118,143]导出了线性唯象传热规律和广义辐射传热规律下内可逆卡诺制冷机的生态学优化准则,得到了生态学目标函数与制冷系数的最优关系、最大生态学目标值所对应的制冷系数界限以及相应的制冷率和熵产率.朱小芹^[87]和陈林根等^[144,145]分别研究了广义辐射和广义对流传热规律下,热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺制冷机生态学目标函数、熵产率、焓输出率和制冷率等与制冷系数最优关系的影响,在此基础上,李俊^[82]和李俊等^[146,147]研究了普适传热规律下内可逆和广义不可逆卡诺制冷机的生态学最优性能,分析了传热规律对内可逆和广义不可逆卡诺制冷机以及热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺制冷机生态学目标函数、熵产率、焓输出率和制冷率等与制冷系数最优关系的影响,所得结果具有一定的普适性.

陈林根等^[148]研究了广义辐射传热规律下内可逆卡诺制冷机的焓经济最优性能,导出了此时制冷机利润率与制冷系数的最优关系,并得到了利润率最大时的制冷系数,即广义辐射传热规律下内可逆卡诺制冷机的有限时间焓经济性能界限.郑兆平^[52]则研究了广义辐射和广义对流传热规律下广义不可逆卡诺制冷机的有限时间焓经济性能,导出了制冷机利润率最大时的制冷系数以及利润率与制冷系数的最优关系,分析了传热规律、热漏、内不可逆损失和价格比对其利润率和有限时间焓经济性能界限以及利润率与制冷系数最优关系的影响.李俊^[82]和陈林根等^[149]则进一步研究了普适传热规律下内可逆和广义不可逆卡诺制冷机的有限时间焓经济性能,分析了传热规律和价格比对内可逆和广义不可逆卡诺制冷机以及热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺制冷机利润率和有限时间焓经济性能界限以及利润率与制冷系数最优关系的影响.

4 卡诺热泵循环最优性能研究

4.1 牛顿传热规律下恒、变温热源热泵循环

Blanchard^[150]最早将 Curzon-Ahlborn^[8]的研究方法引入热泵循环研究,导出了牛顿传热规律下内可逆卡诺热泵给定供热率时的供热系数界限. Feidt 等^[98-101]则导出了牛顿传热规律下内可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系,即牛顿传热规律下内可逆卡诺热泵的基本优化关系.孙丰瑞等^[102]建立了内可逆卡诺热泵的性能全息谱,得到了两热

源热泵参数选择的有限时间热力学优化准则^[103]. Wu^[151]和陈林根等^[152]则研究了内可逆卡诺热泵的比供热率优化问题,导出了比供热率和供热系数的界限以及它们之间的最优关系. Wu 等^[153]进一步导出了牛顿传热规律和有限热容热源条件下,定常流卡诺和 Brayton 热泵循环的优化关系,并在相同的边界条件下对二者进行了比较,分析了工质、热源热容率和内不可逆性对循环性能的影响,讨论了工质与热源间的最优匹配问题.孙丰瑞等^[154]研究了内可逆卡诺热泵的生态学最优性能,导出了牛顿传热规律下生态学目标值最大时热泵的供热系数界限以及相应的供热率和熵产率.

除热阻损失外,实际热泵还具有热漏、内部耗散等不可逆性.一些文献研究了热阻加热漏热泵模型^[155-157]和热阻加内不可逆损失热泵模型^[103]的供热率与供热系数最优关系,在此基础上, Cheng 和 Chen^[158]、陈林根等^[5,19,159]建立了一个较完备的,包括热阻、热漏和其他不可逆损失的广义不可逆卡诺热泵模型,并导出了牛顿传热规律下热泵供热率与供热系数的最优关系.陈林根等^[160]进一步以生态学优化准则为目标,研究了牛顿传热规律下广义不可逆卡诺热泵的最优性能,分析了热漏和内不可逆损失对生态学目标函数、熵产率、焓输出率和供热率等与供热系数最优关系的影响. Tyagi 等^[161]则研究了不可逆 Stirling 和 Ericsson 热泵的生态学最优性能.陈林根等^[162,163]则研究了内可逆和广义不可逆卡诺热泵的焓经济最优性能,导出了利润率与供热系数的最优关系,并得到了利润率最大时的供热系数,即牛顿传热规律下内可逆和广义不可逆卡诺热泵的有限时间焓经济性能界限. Sahin 等^[125,126]和 Kodal 等^[164,165]以总费用平均的供热率最大为目标,研究了内可逆和不可逆热泵以及联合热泵循环的性能,得到了相应的热力经济性能界限.

4.2 不同传热规律下恒、变温热源热泵循环

陈林根等^[166]最早导出线性唯象传热规律下内可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系,朱小芹等^[167]则研究了混合热阻条件下内可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系.孙丰瑞等^[168]最先导出广义辐射传热规律下内可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系,并给出了实际热泵的供热率和供热系数界限.陈林根等^[74]研究了广义辐射传热规律下具有热阻和热漏损失的不可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系,倪宁等^[169]

进一步研究了广义辐射传热规律下广义不可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系,并分析了传热规律、热漏和内不可逆损失对热泵供热率与供热系数最优关系的影响.陈文振等^[133]则最先导出广义对流传热规律下内可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系.Kodal^[170]研究了广义对流传热规律下具有热阻和内不可逆损失的不可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系,朱小芹等^[171]进一步导出了广义对流传热规律下广义不可逆卡诺热泵供热率与供热系数的最优关系,并分析了传热规律、热漏和内不可逆损失对其供热率与供热系数最优关系的影响.

孙丰瑞等^[154]研究了内可逆卡诺热泵的生态学最优性能,导出了线性唯象传热规律下生态学目标值最大时热泵的供热系数界限以及相应的供热率和熵产率.朱小芹等^[87,172,173]研究了广义辐射和广义对流传热规律下广义不可逆卡诺热泵的生态学最优性能,分析了传热规律、热漏和内不可逆损失对生态学目标函数、熵产率、焓输出率和供热率等与供热系数最优关系的影响.Wu等^[174]研究了广义辐射传热规律下内可逆卡诺热泵的有限时间焓经济性能,导出了利润率与供热系数的最优关系和有限时间焓经济性能界限.郑兆平^[52]则研究了广义辐射和广义对流传热规律下广义不可逆卡诺热泵的有限时间焓经济性能,导出了此时热泵利润率与供热系数的最优关系,分析了传热规律、热漏、内不可逆损失和价格比对其利润率、有限时间焓经济性能界限以及利润率与供热系数最优关系的影响.李俊等^[82,175-179]则进一步研究了普适传热规律下内可逆和广义不可逆卡诺热泵供热率与供热系数之间的最优关系、生态学最优性能和有限时间焓经济性能,并分析了传热规律对内可逆和广义不可逆卡诺热泵以及热漏和内不可逆损失对广义不可逆卡诺热泵生态学目标函数、熵产率、焓输出率和供热率等与供热系数最优关系以及利润率和有限时间焓经济性能界限的影响,所得结果包含大量已有文献的结果.

5 两热源热机循环最优构型研究

5.1 牛顿传热规律下恒温热源热机循环最优构型

文献[61]证明所有可接受的循环中内可逆卡诺循环在大压比时产生的输出功率最大,即此时的最优构型为CA循环^[7].Rubin^[180,181]研究了牛顿传热规律下考虑不同约束时内可逆热机的最优

构型,得出给定循环周期和输出功率最大时的最优构型及给定输入能和热效率最大时的最优构型分别为六分支循环和八分支循环,并把这个结果扩展到给定压比的一类热机,得出输出功率最大时的最优构型为八分支循环.Salamon等^[182]以给定时间内热机的最小熵产为目标,导出了热机最大输出功的界限,并得出此时最优循环过程中每个分支的熵产率都为常数.Salamon和Niztan^[36]以及Sieniutycz和Salamon等^[37]则证明牛顿传热规律下无论以何种目标对热机进行优化,所有的最优工况都在工质与热源间的热交换速率为常数时发生,并均经过一个瞬时绝热过程.Rozonoer和Tsirlin^[96]、Kuznetsov等^[183]和Orlov^[184]利用最优控制理论导出了牛顿传热规律时内可逆热机不同约束条件下的最优热力学构型和循环区域.Lampinen等^[185]则引入了数学热力学中热积累函数的概念对热机循环构型进行优化.

5.2 牛顿传热规律下变温热源热机循环最优构型

Ondrechen等^[186]最早导出了牛顿传热规律下两有限热容热源间内可逆往复热机输出功最大时的最优构型为热源与工质温度均随时间呈指数规律变化的广义内可逆卡诺热机^[187].陈林根等^[188]研究了牛顿传热规律下给定循环周期和输出功率最大时热漏对有限热容高温热源和无限热容低温热源间内可逆热机最优构型的影响,结果表明,有限热容高温热源和无限热容低温热源间内可逆热机有热漏时的最优构型与无热漏时的最优构型有很大差异.Augulo-Brown等^[189]利用变分法以修正的生态学函数为目标研究了牛顿传热规律下有限热容热源热机循环的最优构型.

5.3 不同传热规律下恒、变温热源热机循环最优构型

传热规律不仅影响给定热力过程的最优性能,而且影响给定优化目标时的最优热力过程.Orlov^[190]研究了线性唯象传热规律下输出功率最大时内可逆热机的热效率界限,并研究了复合传热规律($Q \propto \Delta(T^{-1}) + \Delta(T^{-1})^9$)下,给定输入能和热效率最大时内可逆热机的最优构型以及输出功最大时内可逆热机的最优构型,结果表明给定输入能和热效率最大时内可逆热机的最优构型包括三个等温分支和三个绝热分支,而输出功最大时的最优构型包括三个绝热分支和两个等温分支.李俊

等^[82,191]导出了线性唯象传热规律下给定周期的输出功率最大时内可逆热机的最优构型为六分支循环,包括两个等温分支和四个最大功率分支,整个构型中没有绝热分支.宋汉江等^[192,193]则导出了线性唯象传热规律下给定输入能的热效率最大时内可逆热机的最优构型为八分支循环,包括两个等温分支、两个绝热分支和四个最大热效率分支.宋汉江等^[193-195]还导出了辐射传热规律下给定周期的输出功率最大时内可逆热机的最优构型^[193,194]和给定输入能条件下热效率最大时内可逆热机的最优构型^[193,195],结果表明输出功率最大时的最优构型包括两个等温分支和四个最大功率分支,整个构型中没有绝热分支,而热效率最大时的最优构型包括两个等温分支、两个绝热分支和四个最大热效率分支.宋汉江等^[193,196]进一步研究了广义辐射传热规律下给定压比和输出功率最大时内可逆热机的最优构型,结果表明此时最优构型为八分支循环,包括两个等温分支、四个最大功率分支和两个等容分支,整个构型中没有绝热分支.陈林根和宋汉江等^[193,197,198]还导出了广义辐射传热规律下给定周期的输出功率最大时内可逆热机的最优构型^[193,197]和热效率最大时内可逆热机的最优构型^[193,198],结果表明输出功率最大时的最优构型包括两个等温分支和四个最大功率分支,整个构型中没有绝热分支,而热效率最大时的最优构型包括两个等温分支、两个绝热分支和四个最大热效率分支.陈林根等^[199]用最优控制理论严格证明了当热源与工质间的传热规律为热源温度的单调函数时,在两恒温热源间工作的内可逆热机循环最优构型为内可逆卡诺循环且与传热规律无关.

严子浚等^[200]研究了线性唯象传热规律下有限热容高温热源和无限热容低温热源间往复热机输出功最大时的最优构型,结果表明其最优构型为低温侧工质温度为常数,高温热源与工质两者温度倒数之差也为常数.陈林根等^[201]以两热源往复热机为对象,研究了线性唯象传热规律下,给定周期的输出功最大时热机的最优构型,分析了热漏和热源模型对热机最优构型的影响,结果表明恒温热源间有热漏和无热漏的热机最优构型与变温热源间有热漏和无热漏的最优构型有很大差异.熊国华等^[202]得到了广义辐射传热规律下有限热容高温热源和无限热容低温热源间往复热机输出功最大时的最优构型,陈林根等^[75]则得到了广义对流传热规律下有限热容高温热源和无限热容低温热源间往复热机输出功最大时的最优构型,并进一步研究了混合热阻条件下广义卡诺循环的最优构型^[76].李俊等^[82,203]进一步研究了普适传热规

律下有限热容高温热源和无限热容低温热源间往复热机输出功最大时的最优构型,并研究了热漏对此时热机最优构型的影响,所得结果具有一定的普适性和包容性.

6 两热源制冷和热泵循环最优构型研究

陈天择^[204]讨论了一类仅有热阻损失的恒温热源内可逆制冷机最优构型问题,以制冷系数最大为目标,证明牛顿传热规律下内可逆卡诺制冷机是这类内可逆制冷机的最优构型.陈林根等^[205]研究了牛顿传热规律下,热漏对工作在有限热容低温热源和无限热容高温热源间的往复式制冷机最优构型的影响,并将结果分别与恒温热源间有热漏和无热漏的往复式制冷机最优构型及变温热源间无热漏的往复式制冷机最优构型进行了比较,结果表明热漏对往复式制冷机最优构型有很大影响.陈林根等^[206]还将线性唯象传热规律下内可逆循环的最优构型进行了统一的描述.李俊等^[82]进一步研究了普适传热规律下有限热容低温热源和无限热容高温热源间往复式制冷机最小输入功时的最优构型,并研究了热漏对此时制冷机最优构型的影响,所得结果具有一定的普适性和包容性.

7 多级复杂热力系统最优构型研究

Amelkin等^[207,208]分析了恒温热源下多热源热机的最大输出功率过程,发现为获得系统的最优性能一些热源必须不参与与工质的热交换,并进一步发现不管热源数量多少,工质仅经历两个等温过程和两个绝热过程.Tsirlin等^[209]以包含若干不同温度的热源、有限热容子系统和能量变换器的复杂系统为对象,研究了该复杂系统服从牛顿传热规律时的最优温度和最大输出功率问题.在文献^[209]的基础上,李俊^[82]和陈林根等^[210]考虑系统内部传热服从线性唯象传热规律,求出了该复杂系统的最优工作温度和最大输出功率.

利用最优控制理论中的Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程进行热力学理论研究,一直是有限时间热力学重要的研究领域.波兰学者Sieniutycz利用HJB方程得到了牛顿传热和连续热流条件下多级连续内可逆卡诺热机系统发出最大可用能的广义界限^[6,211],并进一步得到了牛顿传热规律下,工作在有限热容高温热源(驱动流体)和无限热容低温热源间的多级连续内可逆和不可逆卡诺热机、热泵系统的最大输出功、最小输入

功和高温热源最优温度曲线(最优构型)^[6,212-217]. Sieniutycz^[6,218,219]在对分离过程和化学反应器的研究中提出了与传统离散最优控制方法不同的、与 Pontryagin 最大值原理相似的离散最大值优化理论^[220,221],并将该理论应用于工作在有限热容高温热源和无限热容低温热源间的多级离散内可逆和不可逆卡诺热机、热泵系统中,得到了牛顿传热规律下系统的最大输出功、最小输入功和驱动流体的最优温度曲线^[6,212,214,216,217,222-225].近年来, Sieniutycz 和 Kuran^[6,226-229]利用最优控制理论,建立了辐射传热的“伪牛顿传热”模型,得到了高温热源为有限热容热源、工质与高温热源间辐射传热、低温热源为无限热容热源、工质与低温热源间牛顿传热的多级连续内可逆和不可逆卡诺热机、热泵系统的最大输出功、最小输入功和驱动流体最优温度曲线. Sieniutycz^[6,221,229-245]进一步给出了计算非线性传热时多级连续和离散内可逆及不可逆卡诺热机、热泵系统最大输出功、最小输入功的 HJB 方程和动态规划方法,并将该方法应用到传热传质^[6,231,233-235,246]、化学和电化学反应^[6,230,235,236,240,241,245]、多孔介质^[6,237,238]以及干燥^[6,232,244]等领域的研究中,得到了有重要意义的结果.在 Sieniutycz 等人的研究基础上,李俊等^[82,247-251]建立了高、低温热源均为有限热容热源的多级连续内可逆和不可逆卡诺热机、热泵系统模型,研究了牛顿传热规律下系统的最优构型,导出了其驱动流体最优温度曲线为温度随无量纲时间(与流体流速和累积接触时间有关)成指数变化,求出了其最大输出功和最小输入功^[247-249];进一步研究了工质与高温热源间服从辐射传热规律、

工质与低温热源间服从牛顿传热规律时系统的最佳构型,并求出了其最大输出功和最小输入功,结果表明其驱动流体最优温度曲线不再像牛顿传热时呈指数变化,而是随无量纲时间成单调变化关系^[250,251].夏少军^[252]等和夏少军^[253-256]利用最优控制理论导出了辐射传热规律^[252,253]、广义对流传热规律^[252,254]和普通传热规律^[252,255]下多级连续和离散内可逆及不可逆卡诺热机^[252-256]、热泵^[252]系统最大输出功、最小输入功的 HJB 方程,并利用动态规划方法得到了完整的数值解.陈林根等^[257]则研究了线性传质规律下多级连续和离散等温内可逆化学机系统,分别利用 HJB 方程和动态规划方法得到了系统的最大功率输出.

8 结论

利用有限时间热力学理论研究传热规律对单级和多级正、反向两热源热力循环的性能优化从 20 世纪 70 年代起就得到了越来越多的重视,一大批学者对这一领域进行了大量的研究工作,通过一些简化模型指出了大量的热力学优化机会,结合实际复杂模型得到了大量具有工程实际应用价值的结果,发现了不同于经典热力学的新现象和新规律,为实际的单级和多级正、反向两热源热力循环装置发展提供了重要的理论指导.

总结正、反向两热源热力循环有限时间热力学性能优化几十年来的研究进展,特别是归纳本文所引重点文献的内容特点,可以发现将不同学科、不同专业领域知识进行类比、交叉研究是该研究领域的前沿和趋势.

- [1] Andresen B *Finite-Time Thermodynamics* 1983 (University of Copenhagen: Physics Laboratory II) pp1-149
- [2] Chen L G, Wu C, Sun F R 1999 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **24** 327
- [3] Berry R S, Kazakov V A, Sieniutycz S, Szwasz Z, Tsirlin A M 1999 *Thermodynamic Optimization of Finite Time Processes* (Chichester: Wiley) pp1-490
- [4] Chen L G 2005 *Finite Time Thermodynamic Analysis of Irreversible Processes and Cycles* (Beijing: Higher Education Press) pp1-280 (in Chinese) [陈林根 2005 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析 (北京: 高等教育出版社) 第 1—280 页]
- [5] Sieniutycz S, Jezowski J 2009 *Energy Optimization in Process Systems* (Oxford: Elsevier) pp 1-751
- [6] Andresen B 2011 *Angew. Chem. Int. Ed.* **50** 2690
- [7] Tu Z C 2012 *Chin. Phys. B* **21** 020513
- [8] Curzon F L, Ahlborn B 1975 *Am. J. Phys.* **43** 22
- [9] Yan Z J 1985 *J. Engng. Thermophys.* **6** 1 (in Chinese) [严子浚 1985 工程热物理学报 **6** 1]
- [10] Sun F R, Lai X M 1988 *J. Eng. Therm. Energy Power* **3** 1 (in Chinese) [孙丰瑞, 赖锡棉 1988 热能动力工程 **3** 1]
- [11] Chen W Z, Sun F R, Chen L G 1990 *Chinese Sci. Bull.* **35** 1670 [陈文振, 孙丰瑞, 陈林根 1990 科学通报 **35** 237]
- [12] Sun F R, Chen L G, Chen W Z 1989 *J. Eng. Therm. Energy Power* **4** 1 (in Chinese) [孙丰瑞, 陈林根, 陈文振 1989 热能动力工程 **4** 1]
- [13] Chen W Z, Sun F R, Chen L G 1990 *J. Engng. Thermophys.* **11** 365 (in Chinese) [陈文振, 孙丰瑞, 陈林根 1990 工程热物理学报 **11** 365]
- [14] Bejan A 1988 *Advanced Engineering Thermodynamics* (New York: Wiley) p134
- [15] Bejan A 1988 *Int. J. Heat Mass Transfer* **31** 1211
- [16] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1993 *Chinese Sci. Bull.* **38** 480 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1993 科学通报 **38** 480]
- [17] Chen L G, Wu C, Sun F R 1997 *Energy Converse. Manage.* **38** 1501
- [18] Wu C, Kiang R L 1992 *Energy. The. Int. J.* **17** 1173
- [19] Chen L G 1998 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Naval University of Engineering) (in Chinese) [陈林根 1998 博士学位论文 (武汉: 海军工程大学)]
- [20] Chen L G, Sun F R 1995 *Power System. Engng.* **11** 4 (in Chinese) [陈

- 林根, 孙丰瑞 1995 电站系统工程 **11** 4]
- [21] Chen L G, Wu C, Sun F R 1996 *J. Institute Energy* **69** 214
- [22] Wu G X, Wang H 2012 *Chinese Phys. B* **21** 010505
- [23] Wang J H, Xiong S Q, He J Z, Liu J T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 080509 (in Chinese) [王建辉, 熊双泉, 何济洲, 刘江涛 2012 物理学报 **61** 080509]
- [24] He J Z, He X, Zheng J 2012 *Chinese Phys. B* **21** 050303
- [25] Angulo-Brown F 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 7465
- [26] Yan Z J 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 3583
- [27] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1994 *J. Eng. Therm. Energy Power* **9** 374 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1994 热能动力工程 **9** 374]
- [28] Cheng C Y, Chen C K 1997 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30** 1602
- [29] Chen L G, Zhou J P, Sun F R, Wu C 2004 *Appl. Energy* **77** 327
- [30] Xia D, Chen L G, Sun F R 2006 *Int. J. Ambient Energy* **27** 15
- [31] Chen L G, Zhang W L, Sun F R 2007 *Appl. Energy* **84** 512
- [32] Zhang W L, Chen L G, Sun F R, Wu C 2007 *Int. J. Ambient Energy* **28** 51
- [33] Cheng C Y, Chen C K 1998 *Energy Convers. Manage.* **39** 33
- [34] Khaliq A, Kumar R 2005 *Appl. Energy* **81** 73
- [35] Tyagi S K, Kaushik S C, Salhotra R 2002 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** 2668
- [36] Salamon P, Nitzon A 1981 *J. Chem. Phys.* **74** 3546
- [37] Sieniutycz S, Salamon P 1990 *Advances in Thermodynamics. Volume 4: Finite Time Thermodynamics and Thermoconomics* (New York: Taylor & Francis) pp1-308
- [38] Berry R S, Salamon P, Heal G 1978 *Resour. Energy* **1** 125
- [39] Clark J A 1986 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **11** 85
- [40] Tsatsaronis G 1993 *Prog. Energy Combust. Sci.* **19** 227
- [41] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1991 *Nature J.* **14** 948 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1991 自然杂志 **14** 948]
- [42] Sun F R, Chen L G, Chen W Z 1991 *Trans. CSICE* **9** 285 (in Chinese) [孙丰瑞, 陈林根, 陈文振 1991 内燃机学报 **9** 286]
- [43] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1991 *J. Eng. Therm. Energy Power* **6** 237 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1991 热能动力工程 **6** 237]
- [44] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1991 *Chinese Sci. Bull.* **36** 233 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1991 科学通报 **36** 233]
- [45] Chen L G, Sun F R, Wu C 1997 *Int. J. Ambient Energy* **18** 216
- [46] Ibrahim O M, Klein S A, Mitchell J W 1992 *ASME Trans. J. Sol. Energy Engng.* **114** 267
- [47] De Vos A 1995 *Energy Convers. Manage.* **36** 1
- [48] De Vos A 1997 *Energy Convers. Manage.* **38** 311
- [49] Bejan A 1993 *ASME Trans. J. Energy Resource Tech.* **115** 148
- [50] Zheng Z P, Chen L G, Sun F R, Wu C 2006 *Int. J. Ambient Energy* **27** 29
- [51] Zheng Z P, Chen L G, Sun F R 2006 *J. Thermal. Sci. Tech.* **5** 274 (in Chinese) [郑兆平, 陈林根, 孙丰瑞 2006 热科学与技术 **5** 274]
- [52] Zheng Z P 2007 *MS Thesis* (Wuhan: Naval University of Engineering) (in Chinese) [郑兆平 2007 硕士学位论文 (武汉: 海军工程大学)]
- [53] Chen L G, Sun F R, Wu C 2004 *Appl. Energy* **79** 15
- [54] Sahin B, Kodal A 2001 *Energy Convers. Manage.* **42** 1085
- [55] Kodal A, Sahin B 2003 *Int. J. Therm. Sci.* **42** 777
- [56] Ondrechen M J, Andresen B, Mozurkewich M, Berry R S 1981 *Am. J. Phys.* **49** 681
- [57] Yan Z J 1984 *J. Engng. Thermophys.* **5** 125 (in Chinese) [严子浚 1984 工程热物理学报 **5** 125]
- [58] Grazzini G 1991 *Energy, The Int. J.* **16** 747
- [59] Lee W Y, Kin S S 1991 *Int. J. Energy. Res.* **15** 149
- [60] Ibrahim O M, Klein S A, Mitchell J W 1991 *Trans. ASME, J. Engng. Gas-Turbine Power* **113** 514
- [61] Gutowicz-Krusin D, Procaccia J, Ross J 1978 *J. Chem. Phys.* **69** 3898
- [62] Wu C 1988 *Int. J. Ambient Energy* **9** 17
- [63] Yan Z J, Chen L X 1988 *Chinese Sci. Bull.* **33** 1543 (in Chinese) [严子浚, 陈丽璇 1988 科学通报 **33** 1543]
- [64] Wu C 1989 *Int. J. Ambient Energy* **10** 145
- [65] Wu C 1992 *Energy Convers. Manage.* **33** 279
- [66] Goktun S, Ozkaynak S, Yavuz H 1993 *Energy the Int. J.* **18** 651
- [67] Angulo-Brown F, Paez-Hernandez R 1993 *J. Appl. Phys.* **74** 2216
- [68] Huleihil M, Andresen B 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 014911.
- [69] Chen L G, Sun F R, Wu C 1997 *Appl. Therm. Engng.* **17** 277
- [70] De Vos A 1985 *Am. J. Phys.* **53** 570
- [71] De Vos A 1987 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **20** 232
- [72] Chen L X, Yan Z J 1989 *J. Chem. Phys.* **90** 3740
- [73] Gordon J M 1990 *Am. J. Phys.* **58** 370
- [74] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1995 *Bull. Sci. Tech.* **11** 126 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1995 科技通报 **11** 126]
- [75] Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, Wu C 2004 *Appl. Energy* **78** 305
- [76] Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, Wu C 2006 *Appl. Energy* **83** 537
- [77] Chen L G, Sun F R, Wu C 1999 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32** 99
- [78] Zhou S B, Chen L G, Sun F R 2005 *Appl. Energy* **81** 376
- [79] Li J, Chen L G, Sun F R, Wu C 2008 *Int. J. Ambient Energy* **29** 149
- [80] Chen L G, Li J, Sun F R 2008 *Appl. Energy* **85** 52
- [81] Li J, Chen L G, Sun F R 2009 *Acta Energetica Solaris Sinica* **30** 1173 (in Chinese) [李俊, 陈林根, 孙丰瑞 2009 太阳能学报 **30** 1173]
- [82] Li J 2010 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Naval University of Engineering) (in Chinese) [李俊 2010 博士学位论文 (武汉: 海军工程大学)]
- [83] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1995 *Gas Turbine Tech.* **8** 16 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1995 燃气轮机技术 **8** 16]
- [84] Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, Wu C 2006 *Appl. Energy* **83** 573
- [85] Sogut O, Durmayaz A 2006 *J. Energy Institute* **79** 246
- [86] Zhu X Q, Chen L G, Sun F R, Wu C 2003 *Int. J. Ambient Energy* **24** 189
- [87] Zhu X Q 2004 *MS Thesis* (Wuhan: Naval University of Engineering) (in Chinese) [朱小芹 2004 硕士学位论文 (武汉: 海军工程大学)]
- [88] Zhu X Q, Chen L G, Sun F R, Wu C 2005 *Open Sys. Inf. Dyn.* **12** 249
- [89] Li J, Chen L G, Sun F R 2011 *Int. J. Sustainable Energy* **30** 55
- [90] Li J, Chen L G, Sun F R 2011 *Int. J. Energy and Environment* **2** 57
- [91] Chen L G, Sun F R, Wu C 2005 *Appl. Energy* **81** 388
- [92] Wu C, Chen L G, Sun F R 1996 *Energy, The Int. J.* **21** 1127
- [93] Zhu X Q, Chen L G, Sun F R 2003 *J. Huaiyin Teacher's College* **2** 104 (in Chinese) [朱小芹, 陈林根, 孙丰瑞 2003 淮阴师范学院学报 (自然科学版) **2** 104]
- [94] Li J, Chen L G, Sun F R 2011 *Int. J. Energy and Environment* **2** 171
- [95] Leff H S, Teeter W D 1978 *Am. J. Phys.* **46** 19
- [96] Rozenoer L I, Tsirlin A M 1983 *Avtomat. Telemekh* **1** 70 2 88, 3 50
- [97] Yan Z J 1984 *Phys.* **13** 768 (in Chinese) [严子浚 1984 物理 **13** 768]
- [98] Goth Y, Feidt M 1986 *CR Acad. Sc. Paris* **303** 19
- [99] Feidt M 1988 *12th IMACS World Congress on Scientific Computation* Paris, July 18–22, 1988 p124
- [100] Philippi I, Feidt M 1991 *XVIII Int. Congress on Refrigeration* Canada, Montreal, august 10–17, 1991 p146
- [101] Feidt M 1997 *Entropie* **205** 53
- [102] Sun F R, Chen W Z, Chen L G 1990 *J. Naval Acad. Engng.* **2** 40 (in Chinese) [孙丰瑞, 陈文振, 陈林根 1990 海军工程学院学报 **2** 40]
- [103] Chen W Z, Sun F R, Chen L G 1991 *Chinese Sci. Bull.* **36** 763 [陈文振, 孙丰瑞, 陈林根 1990 科学通报 **35** 869]
- [104] Klein S A 1992 *Int. J. Refrig.* **15** 181
- [105] Wu C 1995 *Energy Convers. Manage.* **36** 7
- [106] Gordon J M, Ng K C 2000 *Cool Thermodynamics* (Cambridge: Cambridge Int. Science Publishers) p46

- [107] Bejan A 1989 *Int. J. Heat Mass Transfer* **32** 1631
- [108] Gordon J M, Ng K C 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 2769
- [109] Chen L G, Wu C, Sun F R 1996 *Appl. Therm. Engng.* **16** 989
- [110] Chen L G, Wu C, Sun F R 1998 *Energy Convers. Manage.* **39** 45
- [111] Grazzini G 1993 *Int. J. Refrig.* **16** 101
- [112] Chiou J S, Liu C J, Chen C K 1995 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **28** 1314
- [113] Ait-Ali M A 1996 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29** 975
- [114] Chen L G, Sun F R 1995 *J. Naval Acad. Engng.* **3** 19 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞 1995 海军工程学院学报 **3** 19]
- [115] Chen L G, Sun F R, Wu C, Kiang R L 1997 *Appl. Therm. Engng.* **17** 401
- [116] Chen L G, Sun F R, Wu C 2004 *Appl. Energy* **77** 339
- [117] Wu X, He J Z, Ouyang W P 2006 *Chinese Phys. B* **15** 53
- [118] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1992 *Nature J.* **15** 633 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1992 自然杂志 **15** 633]
- [119] Tu Y M, Chen L G, Sun F R 2005 *J. Thermal. Sci. Tech.* **4** 199 (in Chinese) [屠友明, 陈林根, 孙丰瑞 2005 热科学与技术 **4** 199]
- [120] Tu Y M, Chen L G, Sun F R, Wu C 2006 *Int. J. Exergy* **3** 191
- [121] Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, Wu C 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 113
- [122] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1991 *Chinese Sci. Bull.* **6** 156 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1991 科学通报 **36** 156]
- [123] Chen L G, Zheng Z P, Sun F R, Wu C 2008 *Int. J. Ambient Energy* **29** 197
- [124] Ma K, Chen L G, Sun F R 2009 *Sadhana, Acad. Proc. Eng. Sci.* **34** 851
- [125] Sahin B, Kodal A 1999 *Energy Convers. Manage.* **40** 951
- [126] Kodal A, Sahin B, Yilmaz T 2000 *Energy Convers. Manage.* **41** 607
- [127] Sahin B, Kodal A 2002 *Int. J. Refrig.* **25** 872
- [128] Chen J C, Yan Z J 1987 *Cryogenics* **4** 27 (in Chinese) [陈金灿, 严子浚 1987 低温工程 **4** 27]
- [129] Chen L G, Sun F R, Gong J Z, Chen W Z, Lai X M 1994 *J. Engng. Thermophys.* **15** 249 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 龚建政, 陈文振, 赖锡棉 1994 工程热物理学报 **15** 249]
- [130] Wu C, Chen L G, Sun F R 1996 *Int. J. Ambient Energy* **17** 199
- [131] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1989 *Cryogenics* **5** 29 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1989 低温工程 **5** 29]
- [132] Wu C, Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1996 *Appl. Therm. Engng.* **16** 299
- [133] Chen W Z, Sun F R, Cheng S, Chen L G 1995 *Int. J. Energy Res.* **19** 751
- [134] Feidt M 1999 *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems* (Dordrecht: Kluwer Academic Press) p385
- [135] Chen W Z, Sun F R, Chen L G 1990 *Chinese Sci. Bull.* **35** 1837 (in Chinese) [陈文振, 孙丰瑞, 陈林根 1990 科学通报 **35** 1837]
- [136] Yan Z J, Chen J C 1990 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **23** 136
- [137] Chen L G, Sun F R, Wu C 1996 *J. Institute Energy* **69** 96
- [138] Sun F R, Chen W Z, Chen L G 1991 *J. Engng. Thermophys.* **12** 357 (in Chinese) [孙丰瑞, 陈文振, 陈林根 1991 工程热物理学报 **12** 357]
- [139] Assad M E H 1999 *Recent Advances in Finite Time Thermodynamics* (New York: Nova Science Publishers) p181
- [140] Chen L G, Sun F R, Wu C 2001 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **26** 291
- [141] Li J, Chen L G, Sun F R 2008 *J. Energy Institute* **81** 168
- [142] Li J, Chen L G, Sun F R 2008 *Proc. IMechE, Part E: J. Proc. Mech. Eng.* **222** 55
- [143] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1992 *Cryogenics and Superconductivity* **21** 5 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1992 低温与超导 **21** 5]
- [144] Zhu X Q, Chen L G, Sun F R, Wu C 2006 *J. Energy Institute* **79** 42
- [145] Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, Wu C 2007 *Int. J. Ambient Energy* **28** 213
- [146] Li J, Chen L G, Sun F R, Wu C 2011 *Int. J. Ambient Energy* **32** 31
- [147] Chen L G, Li J, Sun F R 2012 *Int. J. Sustainable Energy* **31** 59
- [148] Chen L G, Wu C, Sun F R 2001 *Exergy, An Int. J.* **1** 295
- [149] Chen L G, Li J, Sun F R, Wu C 2011 *Int. J. Ambient Energy* **32** 25
- [150] Blanchard C H 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 2471
- [151] Wu C 1993 *Int. J. Ambient Energy* **14** 25
- [152] Chen L G, Wu C, Sun F R 1997 *Appl. Therm. Engng.* **17** 103
- [153] Wu C, Chen L G, Sun F R 1998 *Energy Convers. Manage.* **39** 445
- [154] Sun F R, Chen L G, Chen W Z 1993 *J. Naval Acad. Engng.* **65** 22 (in Chinese) [孙丰瑞, 陈林根, 陈文振 1993 海军工程学院学报 **65** 22]
- [155] Wu C, Schulden W 1994 *Energy Convers. Manage.* **35** 459
- [156] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1994 *J. Eng. Therm. Energy Power* **9** 121 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1994 热能动力工程 **9** 121]
- [157] Chen L G, Wu C, Sun F R 1997 *Int. J. Ambient Energy* **18** 129
- [158] Cheng C Y, Chen C K 1995 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **28** 2451
- [159] Chen L G, Sun F R 1997 *J. Engng. Thermophys.* **18** 25
- [160] Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, Wu C 2007 *Appl. Energy* **84** 78
- [161] Tyagi S K, Kaushik S C, Salohtra R 2002 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** 2058
- [162] Chen L G, Sun F R 1993 *Practice Energy* **3** 29 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞 1993 实用能源 **3** 29]
- [163] Chen L G, Zheng Z P, Sun F R 2008 *Termotecnica (Thermal Engineering)* **12** 22
- [164] Kodal A, Sahin B, Oktem A S 2000 *Energy Convers. Manage.* **41** 1989
- [165] Kodal A, Sahin B, Erdil A 2002 *Int. J. Exergy* **2** 159
- [166] Chen L G, Sun F R, Chen W Z 1990 *J. Eng. Therm. Energy Power* **5** 48 (in Chinese) [陈林根, 孙丰瑞, 陈文振 1990 热能动力工程 **5** 48]
- [167] Zhu X Q, Chen L G, Sun F R, Wu C 2002 *Open Sys. Inf. Dyn.* **9** 251
- [168] Sun F R, Chen W Z, Chen L G, Wu C 1997 *Energy Convers. Manage.* **38** 1439
- [169] Ni N, Chen L G, Sun F R, Wu C 1999 *J. Institute Energy* **72** 64
- [170] Kodal A 1999 *Recent Advances in Finite Time Thermodynamics* (New York: Nova Science Publishers) p299
- [171] Zhu X Q, Chen L G, Sun F R 2001 *Phys. Scr.* **64** 584
- [172] Zhu X Q, Chen L G, Sun F R, Wu C 2005 *Int. J. Exergy* **2** 423
- [173] Zhu X Q, Chen L G, Sun F R, Wu C 2005 *J. Energy Institute* **78** 5
- [174] Wu C, Chen L G, Sun F R 1998 *Energy Convers. Manage.* **39** 579
- [175] Li J, Chen L G, Sun F R 2008 *Appl. Energy* **85** 96
- [176] Li J, Chen L G, Sun F R 2010 *Pramana J. Phys.* **74** 219
- [177] Chen L G, Li J, Sun F R, Wu C 2009 *Int. J. Ambient Energy* **30** 102
- [178] Li J, Chen L G, Sun F R 2009 *Termotecnica Thermal Engineering* **13** 61
- [179] Li J, Chen L G, Sun F R 2011 *Int. J. Sustainable Energy* **30** 26
- [180] Rubin M H 1979 *Phys. Rev. A* **19** 1272
- [181] Rubin M H 1980 *Phys. Rev. A* **22** 1741
- [182] Salamon P, Nitzan A, Andresen B, Berry R S 1980 *Phys. Rev. A* **27** 2115
- [183] Kuznetsov A G, Rudenko A V, Tsirlin A M 1986 *Autom. Remote Control* **6** 693
- [184] Orlov V N 1989 *Autom. Remote Control* **4** 64
- [185] Lampinen M J, Vuorisulo J 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 597
- [186] Ondrechen M J, Rubin M H, Band Y B 1983 *J. Chem. Phys.* **78** 4721
- [187] Yan Z J, Chen L X 1997 *J. Phys. A: Math. Gen.* **30** 8119
- [188] Chen L G, Zhou S B, Sun F R, Wu C 2002 *Open Sys. Inf. Dyn.* **9** 85
- [189] Angulo-Brown F, Ares De Parga G, Arias-Hernandez L A 2002 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** 1089
- [190] Orlov V N 1985 *Sov. Phys. Dokl.* **30** 506
- [191] Li J, Chen L G, Sun F R 2007 *Appl. Energy* **84** 944
- [192] Song H J, Chen L G, Li J, Sun F R 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 124907

- [193] Song H J 2008 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Naval University of Engineering) (in Chinese) [宋汉江 2008 博士学位论文 (武汉: 海军工程大学)]
- [194] Song H J, Chen L G, Sun F R 2007 *Appl. Energy* **84** 374
- [195] Song H J, Chen L G, Sun F R 2008 *Sci. China Ser. G: Phys. Mech. Astron.* **51** 1272 (in Chinese) [宋汉江, 陈林根, 孙丰瑞 2008 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学 **38** 1083]
- [196] Song H J, Chen L G, Sun F R, Wang S B 2008 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **33** 275
- [197] Chen L G, Song H J, Sun F R, Wang S B 2009 *Int. J. Ambient Energy* **30** 137
- [198] Chen L G, Song H J, Sun F R, Wang S B 2009 *Rev. Mex. Fis.* **55** 55
- [199] Chen L G, Chen S T, Sun F R, Chen W Z 1993 *Gas Turbine Tech.* **6** 20 (in Chinese) [陈林根, 陈少堂, 孙丰瑞, 陈文振 1993 燃气轮机技术 **6** 20]
- [200] Yan Z J, Chen L X 1990 *J. Chem. Phys.* **92** 1994
- [201] Chen L G, Sun F R, Wu C 2006 *Appl. Energy* **83** 71
- [202] Xiong G H, Chen J C, Yan Z J 1980 *J. Xiamen University* (Nature Science) **28** 489 (in Chinese) [熊国华, 陈金灿, 严子浚 1980 厦门大学学报 (自然科学版) **28** 489]
- [203] Li J, Chen L G, Sun F R 2009 *Sci. China Ser. G: Phys. Mech. Astron.* **52** 587 [李俊, 陈林根, 孙丰瑞 2009 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学 **39** 255]
- [204] Chen T Z 1985 *J. Xiamen University* **24** 442 (in Chinese) [陈天择 1985 厦门大学学报 **24** 442]
- [205] Chen L G, Sun F R, Ni N, Wu C 1998 *Energy Convers. Manage* **39** 767
- [206] Chen L G, Bi Y H, Wu C 1999 *Int. J. Energy, Environ. Econ.* **9** 77
- [207] Amelkin S A, Andresen B, Burzler J M, Hoffmann K H, Tsirlin A M 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 1400
- [208] Amelkin S A, Andresen B, Burzler J M, Hoffmann K H, Tsirlin A M 2005 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **30** 67
- [209] Tsirlin A M, Kazakov V, Ahremenkov A A, Alimova N A 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 4269
- [210] Chen L G, Li J, Sun F R 2009 *Therm. Sci.* **13** 33
- [211] Sieniutycz S 1997 *FLOWERS 97'* (Padova: SGE) p151
- [212] Sieniutycz S 2000 *Phys. Reports* **326** 165
- [213] Sieniutycz S, Von S M 1998 *Energy Convers. Manage.* **39** 1423
- [214] Sieniutycz S 1998 *Int. J. Engng. Sci.* **36** 577
- [215] Sieniutycz S 1999 *Physica A* **264** 234
- [216] Sieniutycz S, Szwaszt Z 2003 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **28** 85
- [217] Sieniutycz S 2004 *Arch. Thermodyn.* **25** 69
- [218] Sieniutycz S 1978 *Optimization in Process Engineering* (Warsaw: Wydawnictwa Naukowo Techniczne) p78
- [219] Sieniutycz S 1984 *Drying* **84** 62
- [220] Sieniutycz S 2003 *Rep. Math. Phys.* **51** 1
- [221] Sieniutycz S 2006 *Rep. Math. Phys.* **57** 289
- [222] Sieniutycz S 1997 *Phys. Rev.* **56** 5051
- [223] Sieniutycz S 1997 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **22** 260
- [224] Sieniutycz S 1999 *Recent Advances in Finite Time Thermodynamics* (New York: Nova Science Publishers) p189
- [225] Szwaszt Z, Sieniutycz S 1999 *Recent Advances in Finite Time Thermodynamics* (New York: Nova Science Publishers) p221
- [226] Kuran P 2006 *Ph.D. Dissertation* (Poland: Warsaw University of Technology)
- [227] Sieniutycz S, Kuran P 2005 *Int. J. Heat Mass Transfer* **48** 719
- [228] Sieniutycz S, Kuran P 2006 *Int. J. Heat Mass Transfer* **49** 3264
- [229] Sieniutycz S 2007 *Int. J. Heat Mass Transfer* **50** 2714
- [230] Sieniutycz S 1997 *Open Sys. Inf. Dyn.* **4** 185
- [231] Sieniutycz S 1999 *J. Non-equilib. Thermodyn.* **24** 40
- [232] Sieniutycz S 2000 *Energy Convers. Manage.* **41** 2009
- [233] Sieniutycz S 2002 *Int. J. Heat Mass Transfer* **45** 2995
- [234] Sieniutycz S 2003 *Int. J. Thermodyn.* **6** 59
- [235] Sieniutycz S 2004 *Int. J. Heat Mass Transfer* **47** 515
- [236] Sieniutycz S 2004 *Open Sys. Inf. Dyn.* **11** 185
- [237] Sieniutycz S 2007 *Transp. Porous Med.* **69** 239
- [238] Sieniutycz S 2007 *Int. J. Heat Mass Transfer* **50** 1278
- [239] Sieniutycz S 2008 *Int. J. Therm. Sci.* **47** 495
- [240] Sieniutycz S 2008 *Int. J. Heat Mass Transfer* **51** 5859
- [241] Sieniutycz S 2008 *Chem. Proc. Engng.* **29** 321
- [242] Sieniutycz S 2009 *Appl. Math. Modelling* **33** 1457
- [243] Sieniutycz S 2009 *Energy* **34** 334
- [244] Sieniutycz S 2009 *Drying Technolog* **27** 322
- [245] Sieniutycz S 2009 *Int. J. Heat Mass Transfer* **52** 245
- [246] Sieniutycz S 2008 *Int. J. Heat Mass Transfer* **51** 2665
- [247] Li J, Chen L G, Sun F R 2006 *J. Thermal. Sci. Tech.* **5** 335 (in Chinese) [李俊, 陈林根, 孙丰瑞 2006 热科学与技术 **5** 335]
- [248] Li J, Chen L G, Sun F R 2009 *J. Energy Institute* **82** 53
- [249] Li J, Chen L G, Sun F R 2009 *Math. Compu. Model.* **49** 542
- [250] Li J, Chen L G, Sun F R 2008 *J. Thermal. Sci. Tech.* **7** 41 (in Chinese) [李俊, 陈林根, 孙丰瑞 2008 热科学与技术 **7** 41]
- [251] Li J, Chen L G, Sun F R 2010 *Therm. Sci.* **14** 1
- [252] Xia S J 2012 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Naval University of Engineering) (in Chinese) [夏少军 2012 博士学位论文 (武汉: 海军工程大学)]
- [253] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2012 *Int. J. Energy and Environment* **3** 359
- [254] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2011 *Chinese Sci. Bull.* **56** 1147
- [255] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2011 *Acta Physica Polonica A* **119** 747
- [256] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2011 *Energy* **36** 633
- [257] Chen L G, Xia S J, Sun F R 2011 *Int. J. Chemical Reactor Eng.* **9** A10

Comprehensive Survey for the Frontier Disciplines

Progress in the study on finite time thermodynamic optimization for direct and reverse two-heat-reservoir thermodynamic cycles*

Li Jun Chen Lin-Gen[†] Ge Yan-Lin Sun Feng-Rui

(*Institute of Thermal Science and Power engineering, Naval University of engineering, Wuhan 430033, China*)

(*Military Key Laboratory for Naval Ship Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

(*College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

(Received 14 February 2013; revised manuscript received 9 March 2013)

Abstract

The results obtained by using finite time thermodynamics (FTT) are universal and have become one of important foundations of thermo-physics. A large number of researches have been carried out in the performance optimizations and optimal configurations of single-and multi-stage two-heat-reservoir direct and inverse thermodynamic cycles by using FTT. The obtained new results have more important practical significance for engineering design and optimization than those obtained by using classical thermodynamics. This paper reviews the new advances of the optimal performances and optimal configurations of single and multi-stage two-heat-reservoir direct and inverse thermodynamic cycles following different heat transfer laws, including the new advances of the optimal performances of endoreversible and irreversible Carnot heat engine, Carnot refrigerator and Carnot heat pump cycles under different heat transfer laws, and the new advances of the optimal configurations of two-heat-reservoir heat engine, refrigerator and heat pump cycles, as well as multi-stage complex thermodynamic cycles with different heat transfer laws.

Keywords: direct and reverse Carnot cycles, optimal performance, optimal configuration, finite time thermodynamics

PACS: 05.70.-a, 05.70.Ln

DOI: 10.7498/aps.62.130501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905093), and the Natural Science Foundation of Naval University of Engineering, China (Grant No. HGDYDJJ10011).

[†] Corresponding author. E-mail: lingenchen@hotmail.com, lgchenna@yahoo.com