不可逆过程广义热力学动态优化研究进展

陈林根^{1,2*}, 夏少军³

1. 武汉工程大学热科学与动力工程研究所, 武汉 430205;

2. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205;

3. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033

* E-mail: lingenchen@hotmail.com; lgchenna@yahoo.com

收稿日期: 2018-07-01; 接受日期: 2018-09-19; 网络版发表日期: 2019-06-28

国家自然科学基金(批准号: 51576207, 51606218)、湖北省自然科学基金(批准号: 2018CFB708)和海军工程大学自主立项科研项目(编号: 20161504)资助

摘要 广义热力学优化理论是热科学与技术领域的研究热点之一. 本文首先回顾了有限时间热力学、熵产生最小化理论、焓理论、广义热力学优化理论的产生与发展, 深入剖析了上述热学优化理论的物理内涵及其相互间异同点, 然后从传热过程、传质过程、电容器充电电路和经济贸易过程等不可逆过程动态优化研究方面介绍了广义热力学优化理论的研究进展, 重点比较了熵产生最小化理论和焓理论在传热传质过程优化中的异同点, 最后指出除在研究对象范围和研究内容方面进一步拓展与细化外, 追求物理模型的统一性、优化方法的通用性和优化结果的普适性是广义热力学优化理论的另一重要发展趋势.

关键词 有限时间热力学, 熵产生最小化理论, 焓理论, 广义热力学优化理论, 最优控制

1 引言

20世纪70年代, 在第一次中东石油危机所引发的世界性能源短缺的工程背景下, 强化传热^[1~3](heat transfer augmentation, HTA)受到世界各国科技界和工业界的普遍关注, 迅速发展成为热科学与技术领域一个非常重要的学科分支. 与此同时, 以寻求热力过程性能界限、实现热力学优化为目标的这类研究工作在物理学和工程学领域也均取得了重要进展——在物理学领域, 以芝加哥学派的美国Berry、丹麦Andresen、美国Salamon、波兰Sieniutycz和俄罗斯Tsirlin等人

代表, 将此类研究称为“有限时间热力学(finite time thermodynamics, FTT)”^[4~6]; 而在工程学领域, 以美国Duke大学Bejan为代表, 根据Gouy-Stodola公式——焓损失等于环境温度与熵产生的乘积, 认为熵产生最小时系统的焓损失最小, 即系统的热力学性能最优, 称其为“热力学优化(thermodynamic optimization)”或“熵产生最小化(entropy generation minimization, EGM)”^[7~10]. Bejan^[7~10]还针对工程中普遍存在的对流传热过程, 导出了包含有限温差传热和有限压差流动不可逆性的统一熵产生表达式, 在经过简单的定性分析后指出, 传热强化和热绝缘(thermal insulation)两大

引用格式: 陈林根, 夏少军. 不可逆过程广义热力学动态优化研究进展. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 981–1022

Chen L G, Xia S J. Progresses in generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible processes (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 981–1022, doi: [10.1360/N092018-00220](https://doi.org/10.1360/N092018-00220)

类传热设计问题均可以归结为追求熵产生最小化。1998年, 陈林根等人^[11-13]提出把对传热过程和热机的有限时间热力学分析方法和思路拓广到自然界和工程界中各种存在广义势差和广义位移的过程、装置和系统, 广泛采用“内可逆模型(endoreversible model)”^[14]以突出分析主要不可逆性, 建立起设计和优化理论, 即“广义热力学优化(generalized thermodynamic optimization, GTO)”理论^[15-17]。

在热量传递和热功转换过程中, 换热器是各行业应用最广泛的设备, 扮演着重要的角色, 因此也一直是热科学和技术研究领域所关注的重点对象之一。1996年, 清华大学过增元等人^[18-20]通过观察不同流动布置形式换热器的冷、热流体温度场, 唯象地提出了换热器优化的“温差场均匀性原则”, 即温差场越均匀, 换热器效能越大。随着研究的深入, 1998年, 过增元等人^[21,22]从能量方程出发重新审视了对流换热的物理机制, 提出可以通过改变速度场与温度场的协同关系来达到控制对流换热的强弱即“场协同理论(field synergy theory)”。2006年, 过增元等人^[23-25]进一步从导热过程与导电过程的比拟出发, 提出了表征物体传热能力的新物理量“焵”(在2003年曾称为热量传递势容^[26]), 并指出: 在传热过程中, 虽然热量是守恒的, 但由于存在热阻, 焵并不守恒且存在一定耗散, 焵耗散代表了传热过程的不可逆程度。过增元等人^[23-25]还建立了用于传热优化的“焵耗散极值原理”与“最小当量热阻原理”。陈群等人^[27-31]基于热量传递、质量传递和动量传递之间的类比性, 将热量焵的概念推广到质量传递和动量传递过程, 提出了质量积(文献^[27]称为质量传递势容)与质量积耗散极值原理以及动量积与动量积耗散极值原理。程雪涛等人^[32,33]则提出了广义流动中的积原理和孤立系统的广义积减原理, 通过引入“焵损失”的概念^[34,35], 将焵理论拓展用于热力循环优化。

有限时间热力学、熵产生最小化、广义热力学优化理论和焵理论均是近40年来产生和发展起来的现代热学优化理论, 促进了热力学、传热学和流体力学等各学科分支及其交叉研究的发展。综合应用热力学、传热传质学、流体力学以及其他传输科学的基础理论, 采用交叉、移植、类比的研究思路, 将有限时间热力学与熵产生最小化、焵理论相结合, 实现各种形式能量传递过程和转换循环与系统的广义热力学优化, 符合多学科交叉融合研究的发展趋势, 是一个具有重

要理论价值和广阔应用前景的研究方向。

2 有限时间热力学的产生、内涵和研究内容

2.1 有限时间热力学的产生与发展

19世纪初期, 蒸汽机的发明和大规模使用开启了人类历史上的第一次工业革命, 而热力学的建立正是起源于同时期人们对热机最大效率的理论探索。1824年, 法国工程师Carnot在其论文“关于热的动力的思考”^[36]中写道: “热的驱动力(意指热功转换能力)是有限的还是无限的? 是否存在以自然界中的任何方式都无法超越的改进边界? (Is the driving force of heat finite or infinite, and does a boundary of improvement exist which nature cannot surpass by any means?)”。他通过研究表明这种“边界”确实存在, 对实际蒸汽机进行抽象简化建立了卡诺热机循环模型, 并提出了卡诺定理, 指出工作于高温热源 T_1 和低温热源 T_2 之间的任何热机, 其热效率都不可能超过

$$\eta_c = 1 - T_2 / T_1. \quad (1)$$

此即著名的Carnot效率, 式中 T_1 和 T_2 分别为可逆卡诺热机高温与低温热源的温度。以现代观点来看, Carnot的工作实质上是建立了热机的简化物理模型, 提出并解决了其最大热效率目标下的极值优化问题, 即热机输出的净机械功与其从高温热源吸收的热量之间比值的最大化问题。式(1)给出了相同温限热源条件下热功转换效率的极限。在Carnot所做工作的基础上, 1850~1851年间德国物理学家Clausius和英国物理学家Kelvin先后独立地从热量传递和热功转换的角度提出了热力学第二定律的定性描述。热力学第一定律反映的是能量传递与转换时应该遵循的数量守恒关系, 由它引进了系统的状态函数——热力学能; 热力学第二定律指明了热过程进行的方向性, 由它引进了系统的状态函数——熵。此后, 为了在各种不同条件下讨论系统状态的热力学特性, 又引进了一些辅助的状态函数, 如焓、亥姆霍兹函数(自由能)、吉布斯函数(自由焓)等。通过这些概念, 使用数学和逻辑的方法得到了庞大的、建立在基本定律之上的经典热力学体系。后来(1906年)又产生的热力学第三定律和更晚一些时间的热力学第零定律, 则分别定义了熵参数计算的基准态和基本状态参数——温度, 令经典热力学理论更趋完善。

一方面, 经典热力学理论以平衡和可逆为其基本假设, 回答了过程进行的可能性, 而可能的过程又分为“可逆”和“不可逆”, 在经典热力学中仅处理“由一系列无限接近平衡态组成且无耗散效应的可逆过程”, 然而自然界和工程界中发生的各种传热、传质、流动、化学反应等实际过程均是非平衡、不可逆的, 因而经典热力学理论不能解释和处理这些与时间因素相关的不可逆过程进行与演化的物理机理. 另一方面, 上述这些不可逆过程的动力学机理在传统上是由传热传质学、流体力学、化学反应动力学等相对独立的学科分支各自单独加以研究的, 每种不可逆现象都是用个别的实验方法处理的, 看不到一个一般性的观点, 尤其是无法解释和处理存在诸如杜伏效应、塞贝克效应等交叉效应的不可逆过程. 1931年, 美国物理化学家Onsager^[37,38]从各类不可逆过程的普遍特性出发, 唯象地提出了著名的Onsager倒易关系(reciprocal relation). 他认为一切不可逆过程都是在某种热力学力驱动下产生相应热力学流的结果, 流与力的点积即是该不可逆过程的熵产生. 在近似的情况下, 热力学流和力之间可近似地用线性唯象定律来描写. 当存在多种不可逆因素时, 原则上每种流均为系统中存在的各种力所驱动. 按这样的原理所得到的线性唯象定律关系式中唯象系数矩阵存在着某种对称关系, 称为Onsager倒易关系. Onsager理论第一次真正从动力学角度出发揭示了不可逆过程的共同特征, 从而奠定了非平衡态热力学或不可逆过程热力学的基础. Onsager理论是建立在线性唯象定律基础上的, 它只适用于偏离平衡态不远的所谓“近平衡区”, 因而被称为线性非平衡热力学, 或称线性不可逆热力学(linear irreversible thermodynamics, LIT). 线性不可逆热力学的另一个重要结论是比利时学者Prigogine于1945年应用李雅普诺夫稳定性理论(Lyaounov stability theory, 1892年)确立的最小熵产生原理(minimum entropy generation principle), 它的主要内容是: 在非平衡线性区, 一个开放系统内的不可逆过程总是向熵产生减小的方向进行, 当熵产生减小至最小值时, 系统的状态不再随时间变化, 此时, 系统处于与外界约束条件相适应的非平衡定态. 最小熵产生原理保证了非平衡定态的稳定性, 一旦系统达到非平衡定态, 在没有外界的影响下它将不会再自发地离开这个定态. 研究远离平衡态系统行为的热力学称为非线性非平衡热力学, 或称非线性不可逆热力学. Prigo-

gine正是在研究开口系统非平衡态行为的基础上提出了著名的“耗散结构理论”, 使非平衡态热力学理论向前迈出了新的一步.

在经典热力学中, 以各类正反向热力循环性能研究为例, 通常是以热效率、制冷系数或泵热系数等热力学性能指标为目标, 优化问题对应的解为可逆热力过程, 即在过程中系统与外界始终保持热力平衡, 且过程进行的时间为无限长或装置尺寸为无限大, 而此时装置的单位时间/单位面积的输出率为零. 由可逆过程得到的性能界限太高, 并且所有实际过程都永远不可能达到这一界限. 而传统的不可逆过程热力学(包括线性非平衡热力学和非线性非平衡热力学)是与非平衡系统中的状态和过程相联系的宏观唯象学理论, 该理论主要是对连续介质中传递现象的唯象定律、恒定状态及不可逆动力学过程作出统一的研究和处理. 同时它也涉及系统稳定性研究, 包括稳定性条件、失稳后的行为、达到稳定的途径以及系统在达到平衡态的过程中发生的驰豫现象等特殊问题^[39]. 虽然也考虑过程的不可逆效应, 包括时间参量, 然而它主要侧重于寻求对已有不可逆热现象的物理解释和非平衡能量系统的定态分析, 了解系统的状态参量随时空变化的规律, 缺少“优化”的概念, 因而一些过程相关函数(如功、热量、熵产生等)在特定过程中变化净效应不易由这种传统不可逆热力学得出结论.

1957年, 苏联核动力工程专家Novikov^[40]研究了核动力燃气轮机装置性能, 在考虑了工质高温侧有限温差传热损失后导出了其最大功率输出时的效率为

$$\eta_{CA} = 1 - (T_2 / T_1)^{1/2}. \quad (2)$$

与此同时, 法国学者Chambadal^[41]考虑了流动高温工质与热机间的传热, 导出了热机最大功率输出时的效率也为式(2)所示的 η_{CA} . 在工程界, 式(2)所示效率已进入多种动力工程和工程热力学教材^[42-44]. 1975年, 加拿大物理学家Curzon和Ahlborn^[45]考虑了工作在两恒温热源间存在有限速率传热(不可逆热阻损失)的卡诺热机, 导出了牛顿传热规律 $[q \propto (\Delta T)]$ 下内可逆热机最大功率输出的效率与式(2)一样. Bejan^[46,47]建议将式(2)所示CA效率 η_{CA} 称为NCCA效率 η_{NCCA} , 以此共同纪念Novikov, Chambadal, Curzon和Ahlborn等人作出的贡献. 近期, Moreau等人^[48]和Vaudrey等人^[49]的研究表明CA效率公式(式(2))的起源还可更早地分别追溯

到1955年Yvon^[50]和1929年Reitlinger^[51]的研究工作. 1979年, Rubin^[14]首次将循环内工质经历的是准静态过程, 且循环中的唯一不可逆损失是热源与工质间的热阻损失的热力循环定名为“内可逆循环(endoreversible cycle)”. 借用“内可逆”这一概念, CA热机^[45]可称为内可逆卡诺热机. 通过比较式(2)和Carnot效率公式(1)可见: 一方面, CA效率与Carnot效率公式极为相似, 两者均具有简洁、美观的数学表达形式, 且均仅与高温热源温度 T_1 和低温热源温度 T_2 有关, 而与描述热机本身的特性参数无关; 另一方面, 与可逆卡诺热机有最大效率 η_C 而功率输出为零不同, 内可逆卡诺热机不仅有功率输出, 而且可以有最大功率输出及相应的效率 η_{CA} . η_{CA} 的重要意义在于它为具有有限速率和有限周期特征的热机提供了不同于Carnot效率 η_C 的新的性能界限, 但也不能简单理解为“热机最大功率时的效率界限”, 因为 η_{CA} 的导出有其特定的研究对象、优化方法和优化目标等为前提条件, 因此 η_{CA} 也类同于 η_C 可以提供理论指导, 同时只有进一步进行具体深入研究, 才能用于指导实际系统的热设计与优化. Curzon和Ahlborn^[45]的研究工作激励了一大批物理学家和工程学家对各种热力系统开展深入的热力学优化研究, 标志着一个新的现代热力学分支——“有限时间热力学”的诞生.

有限时间热力学最初研究主要内容是对经典热力学进行改造和革新, 即在有限时间和有限尺寸约束下, 以系统与环境间存在有限速率传热不可逆性的热力过程和装置为研究对象, 导出其热力学性能界限. Andresen等人^[4]首次将此类研究称为“有限时间热力学”, de Vos^[52]则称之为“内可逆热力学(endoreversible thermodynamics)”, Petrescu和Costea^[53]重点研究了一类往复活塞型热力装置的性能, 故称之为“有限速率热力学(finite speed thermodynamics)”. 当人们把研究对象从往复式装置(以有限时间为特征)拓广到定常态流装置(以有限尺寸为特征)时, 认识到问题的实质是在过程和循环的热力学分析中引入了传热学, 有限温差传热是其物理本质, 因此Grazzini^[54]建议称之为“有限温差热力学(finite temperature difference thermodynamics)”, Lu^[55]则建议称为“有限面积热力学(finite surface thermodynamics)”, 为了便于称呼, 本文统一称之为“有限时间热力学”. 随后, 有限时间热力学在研究方法和内容上不断深化, 其研究对象范围也在不断扩大. 从有限

时间热力学建立至现在的40多年中, 在30多个国家的研究基金资助下, 国内外大批学者对有限时间热力学开展了大量研究, 得到了一大批既具有理论意义又具有实际工程应用价值的研究结果, 发现了许多新现象和新规律. 据不完全统计, 截止到2018年8月, 已有11000余篇相关文献发表, 包括275篇硕士学位论文、169篇博士学位论文以及160篇不同时期的专著^[52,53,56-80]和专题综述^[81-113].

2.2 有限时间热力学的物理内涵

通过分析上述CA效率公式(2)的来源可知, Curzon和Ahlborn^[45]是在经典的卡诺热机循环模型基础上, 考虑循环中两个等温传热分支与外界恒温热源间有限速率传热, 求解了以热机最大输出功率为目标的性能优化问题, 其研究本质是实现了热力学和传热学之间的有机结合. 因此, 为了解有限时间热力学的物理内涵, 需首先对经典热力学、传热学、流体力学等传统基础学科的物理内涵进行分析.

为了撇开时间变化的因素, 并能用少数几个参数描写物系的状态, 经典热力学以宏观、平衡为研究的前提, 是一门关于“平衡”的科学. 经典热力学的理论基础是热力学第一和第二定律, 热力学第一定律的实质是能量守恒和转换定律在热现象中的应用, 揭示了能量转换时在数量上所遵循的客观规律, 可简单表述为第一类永动机(即不消耗能量的永动机)是不可能实现的; 热力学第二定律的实质是自然过程具有方向性, 揭示了能量转换时在品质上所遵循的客观规律, 可简单表述为第二类永动机(只从一个热源吸热的永动机)是不可能实现的, 因此经典热力学重点关注过程的“可能性”. 在经典热力学中, 有“效率”的概念, 如循环热效率、物质转化效率等, 注重热力系统的“效率”与“产功/耗功”优化, 确定提高热力系统“效率”、节能系统耗功的方向和途径, 如通过改变循环的特性参数与合理安排热力过程(如回热)的方法可提高热力循环的热效率, 采用多级压缩级间冷却的方法可节省压气机耗功等, 但由于没有考虑时间变化因素的影响, 因而也就没有“速率”的概念, 因此由经典热力学导出的效率和功等性能界限太高, 优化问题对应的最优解为“可逆过程”, 与实际工程过程的非平衡特性相差太远.

传热学、流体力学与热力学既具有相同之处, 就是其研究对象也同样遵循热力学两大基本定律, 如传

热和流动过程中能量是守恒的, 热量总是从高温处自发传到低温处, 流体也总是从高压处自发流向低压处, 但它们与热力学也具有不同之处, 就是传热学和流体力学均考虑了时间变化因素的影响, 有传热和流动“速率”的概念, 传热和流动过程除遵循热力学中的基本定律外, 还各自遵循学科内部特有的规律, 如傅里叶导热定律、牛顿冷却定律、斯蒂芬-波尔兹曼黑体辐射定律和牛顿黏性定律等, 因而传热学和流体力学均属于一类关于“速率”的科学. 与热力学重点关注过程“可能性”不同, 传热学和流体力学重点关注过程的“可行性”, 注重“强化/弱化”过程速率或控制温度、压力等参数, 但由于没有或较少涉及“效率”、“耗功”等概念, 未考虑“效率/耗功”优化, 如传热强化是否一定节能^[114]? 换热器热设计的主要目的是为了追求更佳的换热器性能, 而当论及换热性能更佳时, 自然会产生疑问: “性能更佳”究竟意味着什么? 如果在相同的温度条件下, 通过热设计在强化传热同时也降低了流阻, 这种情形确实表明换热器性能更佳了. 然而, 现有的大量实验测量结果表明, 换热器在强化传热的同时往往会增加流阻和功耗, 而单纯地降低流阻和功耗往往又会对强化传热产生不利影响^[115].

实际过程、循环和装置均是在有限时间或有限面积条件下进行的, 是与外界间存在有限速率不可逆物质与能量交换的非孤立系统, 所以从过程“机理”角度研究这一类实际系统功率、效率等性能目标优化问题, 必然需要将热力学、传热学、流体力学等多学科交叉融合、综合应用加以研究, 这就是有限时间热力学研究思路的出发点. 这种典型的多学科交叉特性使得有限时间热力学不同于前述任一单独的基础学科, 足以构成一个相对独立的研究领域. 因此, 有限时间热力学的物理内涵就是在可能性和可行性的基础上, 探讨各类过程与装置的多目标优化. 其研究思路一般为: 对实际热力过程作一定假设, 依据热力学基本定律和传输科学的基本原理得到其物理模型, 给定一系列约束定义可能的过程时间路径, 然后依据待求优化问题的数学性质选择相应的优化方法, 求解给定热力过程的目标极值或所取目标为极值时的最优热力过程路径, 进一步求出过程进行的最佳时间(或尺寸), 得到所定义的热力过程的最佳性能指标. 所取优化目标不仅局限于装置的技术或经济性能, 可以是一切有研究价值或意义的函数, 具体见下文分析.

2.3 有限时间热力学的研究内容

“有限时间热力学”也称“热力学优化理论”, 因此其研究内容必然与最优化理论密切相关, 如图1所示. 动态优化问题用到的主要数学方法包括古典变分法^[116,117]、极小值原理^[117,118]、Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB)方程和动态规划^[117,119]、平均最优控制理论^[59-63,69,75]. 总体而言, 最优化问题分为静态优化和动态优化两大类问题, 相应地, 有限时间热力学中也主要存在两类基本问题: 一类是确定给定热力过程的目标极值及其相互之间关系, 简称最优性能(optimal performance)问题; 另一类是求给定最优目标时与其最佳值对应的最优热力过程(最优路径), 简称最优构型(optimal configuration)问题.

2.3.1 最优性能问题(静态优化问题)

这是求给定热力系统下对应的目标函数极值及目标函数间的相互关系, 即求出有限时间热力学性能界限、基本优化关系和性能优化准则. 最优性能问题属于静态优化问题, 用到的主要数学方法是函数直接求导法、建立拉格朗日函数求极值和数学规划理论, 求解也相对较为简单, 便于得到具有普适意义的最优特性基本关系式. 经过40多年的发展, 国内外大批学者对各类热力系统的最优性能问题开展了深入而广泛的研究, 得到了大量具有工程实际应用价值的结果.

从研究对象上看, 最优性能问题研究涉及换热器、无限热容热源热机、有限容热源热机、存在各种损失(热阻、热漏和工质内部耗散等)的理论热机、联

图1 最优化理论中的两类基本优化问题

合热机、各种内燃机动力循环、蒸汽和燃气动力循环、Stirling发动机、热电发电机、制冷机、热泵、热变换器、热电联产装置、化学机、化学泵、化学势变换器、燃料电池等。除了传统工质的热力循环外, 最优性能问题研究还涉及谐振子系统、1/2自旋系统、理想量子气体以及势阱中微观粒子等量子工质热力循环。近年来, 最优性能问题研究还扩展到了布朗马达、分子马达、电子机、量子点棘轮、热离子装置等微型能量转换系统之中。

除了研究对象范围的不断扩大, 选取不同优化目标对热力系统进行优化也是最优性能问题研究的一个重要方面。以热机性能优化研究为例, 所取目标包括功、功率、效率、焓效率、熵产生率、利润率、比功率(对总传热面积平均的输出功率)、功率密度(对最大比容平均的功率输出)、总费用平均的输出功率、兼顾功率与熵产率的“生态学”目标和兼顾功率与效率的“有效功率”目标等。

2.3.2 最优构型问题(动态优化问题)

这是解决在给定的一些外部条件下如何控制热力系统运行规律从而获得其最佳性能泛函的问题, 此时需要明确系统的控制变量及其容许控制域, 建立系统的状态运动方程, 找出约束条件, 选定优化目标和优化方法。最优构型问题属于动态优化问题, 用到的主要数学方法是变分法和最优控制理论, 求解过程较为复杂。由于该问题最终将归结为求解微分方程组的两点边界值问题或求解HJB偏微分方程, 因此仅对于极少数问题存在解析解, 对于大多数问题需要应用数值方法进行求解, 同时最优路径一旦求出, 所有其他热力学量都可以从中导出。由此可见, 最优构型问题研究比最优性能问题研究需要更大的计算工作量, 不仅能回答优化目标的物理极限是多少, 而且还能指出为了实现预定的最优目标系统将以何种规律或准则去运行, 因此在理论研究和实际工程应用上的研究意义也就更为重要。

从研究对象上看, 最优构型问题研究涉及传热过程^[120~150]、传质过程^[151~159]、恒温与变温热源理论正反向热力循环(热机、制冷机和热泵)^[13,14,160~190]、非均匀工质热机^[191~196]、活塞式气缸^[190,197~216]、理想内燃机^[217~237]、光驱动发动机^[216,238~241]、正反向化学循环(化学机和化学泵)^[242~249]、有限时间热力学

焓^[160,250~254]、多级正反向热力循环系统^[65,75,88,255~282]、多级正反向化学循环系统^[65,283~294]、化学反应过程^[190,295~297]、燃料电池^[298~301]、分离和蒸馏过程^[121,122,302~313]、干燥过程^[65,75,314,315]、化学反应器^[121,122,302~304,316~328]、有限时间热力学新概念^[160,329~346](包括有限时间热力学势、热力学长度、熵产生均分原则、驱动力均分原则、热力学速度等)、量子热力循环^[347~350]和量子状态转换过程^[351~353]等。

3 熵产生最小化理论的产生与物理内涵

3.1 熵产生最小化理论的产生与发展

Carnot效率指出了热功转换效率的极限, 这是自然界任何热力系统不可能逾越的性能界限。1865年, Clausius^[354]在卡诺循环性能分析的基础上引入了热力学的核心概念——熵, 这一物理量被普遍认为是分析耗散过程(即功热转化)的重要物理量。1889年, 法国物理学家Gouy^[355]从理论上证明系统的焓损失与其熵产生成正比, 即 $W_L = T_0 S_g$, T_0 为环境温度。1905年, 瑞士工程学家Stodola^[356]应用这一结论设计蒸汽轮机, 并进行了有关实验验证。后人为了纪念Gouy和Stodola的贡献, 将 $W_L = T_0 S_g$ 称为Gouy-Stodola公式。20世纪70年代中后期, Bejan^[9]较为系统地研究了Gouy-Stodola公式的适用条件, 结果表明, 焓损失的大小始终与熵产生成正比, 但两者间的比例系数取值与参考热源的选取有关, Gouy-Stodola公式 $W_L = T_0 S_g$ (即比例系数为环境温度 T_0)仅在选择以大气环境作为参考热源时才适用, 同时参考热源的选取必须保证系统与该热源间的传热为系统与外界所有热相互作用的唯一自由度, 而系统的熵产生与焓损失不同, 其大小与参考热源的选择无关, 仅取决于系统自身经历过程的不可逆性程度, 因此为了使工程系统及其部件以焓损失最小的方式运行, 在对这类系统及部件设计时必须优先考虑其熵产生最小化。在此基础上, Bejan^[9]提出以熵产生最小作为统一的目标函数, 在有限尺寸、形状、材料、速度、运行周期等不同约束下, 导出了一系列适用于不同热力过程的熵产生计算式, 进而对能源动力和传热工程领域的各类过程、装置和系统进行优化, 总结和归纳了开展研究的一般方法与步骤, 由此创立了“熵产生最小化”理论, 最具标志性的事件是1982年专著*Entropy*

Generation Through Heat and Fluid Flow^[9]的出版.

对于能源动力领域广泛使用的定常态流热机装置, Bejan^[9]根据热力学第一和第二定律导出热机装置的实际输出功率 $\dot{W}$ 为

$$\dot{W} = \dot{W}_{\text{rev,eng}} - \dot{W}_L = \dot{W}_{\text{rev,eng}} - T_0 \dot{S}_g, \quad (3)$$

式中, $\dot{W}_{\text{rev,eng}}$ 为与实际热机装置相对应的理想可逆热机循环的输出功率. 由式(3)可见, 当可逆输出功率 $\dot{W}_{\text{rev,pump}}$ 一定时, 热机的最大输出功率优化等价于其熵产生率最小化. 对于定常流制冷或热泵装置, 类似可得出装置的实际耗功率 $\dot{W}$ 为

$$\dot{W} = \dot{W}_{\text{rev,pump}} + \dot{W}_L = \dot{W}_{\text{rev,pump}} + T_0 \dot{S}_g, \quad (4)$$

式中, $\dot{W}_{\text{rev,pump}}$ 为与实际制冷机或热泵装置相对应的理想可逆循环装置的耗功率. 由式(4)可见, 当可逆耗功率 $\dot{W}_{\text{rev,pump}}$ 一定时, 制冷装置或热泵装置的最小耗功率优化也等价于其熵产生率最小化. 综上可见, 不管是追求热机装置的输出功率最大化还是追求制冷机或热泵装置的耗功率最小化, 最后都可以归结为追求装置的熵产生率最小化.

对于传热工程领域广泛使用的换热器装置, Bejan^[9]将其传热设计问题分为传热强化和热绝缘两类. 在温度分别为 T_1 和 T_2 的两表面间的传热流率可表达为

$$Q = \bar{h}A(T_1 - T_2) = \bar{h}A\Delta T. \quad (5)$$

传热过程的熵产生率为

$$S_g = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} = \frac{Q(T_1 - T_2)}{T_1 T_2} \approx \frac{Q\Delta T}{T_1^2}. \quad (6)$$

所谓传热强化, 其主要目的就是增大系统的当量热导率 $\bar{h}A$. 由于在传热强化问题中, 传热率 Q 通常是在系统设计时已给定的, 由式(5)可见, 提高系统的当量热导率 $\bar{h}A$ 意味着降低传热温差 $(T_1 - T_2)$, 此时由式(6)可知过程的熵产生 S_g 也相应减少. 所谓热绝缘, 其主要目的就是减小系统的当量热导率 $\bar{h}A$. 由于在热绝缘问题中, 两个温度 T_1 和 T_2 通常是固定的, 因此降低系统的当量热导率 $\bar{h}A$ 也就意味着降低传热率 Q , 此时由式(6)可知过程的熵产生 S_g 也相应减少. 上述分析结果如表1所示. 由此可见, 对于传热强化和热绝缘这两个看似矛盾的热设计问题均可以统一在追求熵产生最小化的统一框架内.

表1 传热学研究的两大类问题^[9]

问题类型	温差 ΔT	传热率 Q	熵产生 S_g
传热强化	待减小	固定	减小
热绝缘	固定	待减小	减小

在此基础上, Bejan^[357]还导出了各种不同几何与物理边界条件下传热、流动、混合、传质过程的熵产生表达式. 以工程领域普遍存在的对流传热为例, 其微元体积内熵产生表达式如下:

$$s_g = s_{g,\text{heat transfer}} + s_{g,\text{fluid friction}} = \frac{\lambda(\nabla T)^2}{T^2} + \frac{\mu}{T}\Phi, \quad (7)$$

式中, λ 为流体的热导率, μ 为黏性系数, Φ 为黏性耗散函数. 式(7)等号右边第一项和第二项分别表示有限温差传热和有限压差流动对过程熵产生的贡献. 流动造成的熵产生与传热造成的熵产生之比定义为不可逆性分配比(irreversibility distribution ratio)^[9]:

$$\phi = s_{g,\text{fluid friction}} / s_{g,\text{heat transfer}}. \quad (8)$$

当 $\phi \rightarrow 0$ 时, 表明传热过程的熵产生居主导地位; 当 $\phi \rightarrow \infty$ 时, 表明流动过程的熵产生居主导地位; 当 $\phi = 1$ 时, 表明传热与流动过程两者熵产生相等. 为了评价实际过程的性能, 定义了熵产生数(entropy generation number) N_s 为实际过程的熵产生与其最小熵产生之比^[10]:

$$N_s = S_g / S_{g,\min}. \quad (9)$$

实际过程的 N_s 总是大于1的, 当 $N_s=1$ 时, 实际过程处于熵产生最小时的最优态. 在换热器性能分析与优化研究中, 熵产生数 N_s 通常还被定义为^[10]

$$N_s = \dot{S}_g / C_{\min}. \quad (10)$$

之后, 熵产生最小化理论受到了大量学者的重视, 其研究范围的广度和研究对象的深度均取得了长足的进步和发展, 如图2所示. 1996年, Bejan^[10]将熵产生最小化的相关研究成果及介绍进一步汇集在其专著*Entropy Generation Minimization*. 有关熵产生最小化的当前研究进展, 可参见与此相关的综述^[47,358~364].

3.2 熵产生最小化理论的物理内涵

通过上述熵产生最小化理论的产生与发展可知, 熵产生最小化理论似乎是一个完美、统一的理论, 因

图2 熵产生最小化研究领域的二维结构^[10,47]

为能源动力领域热机装置的最大功率优化、制冷机或热泵装置的最小耗功率优化和传热领域的强化传热和热绝缘等问题均可等价追求对应过程或装置的熵产生最小化。然而,熵产生最小化理论真的能够完全、严格地包含上述不同类型的优化目标、工程问题吗?或者这些优化目标、工程问题与熵产生最小化之间等价性仅仅在一些特定的前提条件下成立或者是某一范围的近似?如果上述优化目标、工程问题与熵产生最小化在物理本质上是不等价的,那么熵产生最小化自身的物理内涵是什么?

在能源动力工程领域,关于热机最大功率优化与其最小熵产生优化问题, Berry, Andresen, Salamon等人^[163,165]与Bejan之间有过较为详细的讨论。Salamon等人^[163,165]研究了有限循环周期约束下内可逆热机的最小熵产生优化,结果表明,熵产生最小化与熵损失最小化是等价的,但与功率或效率最大化是不等价的,这是因为熵产生最小化在计算不同温度水平下的热量是不等价的,而功率或者热效率在计算不同温度下的热量是不等价的。Bejan^[365,366]基于Chambadal热机^[41]和Novikov热机^[40]模型,讨论了其功率输出最大化和熵产生率最小化之间的等价性问题,指出Salamon等人在计算热机熵产生时仅考虑了热源与热机间传热的内部不可逆性(internal irreversibility),而未考虑热源与外界环境间传热的外部不可逆性(external irreversibility),由此

导致功率输出最大化和熵产生最小化间的不等价,而考虑工程实际,在计算熵产生时应综合考虑内部和外部不可逆性,此时输出功率最大化与熵产生率最小化两者是等价的。Salamon等人^[367]较为系统地研究了最大功率与最小熵产生两种不同目标下的等价性问题,结果表明,针对同一热力系统,过程优化的最优解是多样化的,不仅取决于优化目标本身,而且取决于定义优化问题的约束条件,功率输出最大化与熵产生最小化两者在一般意义上是不等价的,两者等价仅在特定的约束条件成立,即除去功源和大气环境外,将其他所有与热机间有能量交换的系统的初态和末态均给定,此时热机的可逆输出功 $W_{rev,eng}$ 一定,由式(3)可知功率输出最大化与熵产生最小化是等价的,除此外释放优化问题的任一约束条件,两者间均不等价。由上可见,对于热机而言,功率输出最大化与熵产生最小化有其各自不同的物理内涵,功率输出最大化反映了人们追求热机功率这一技术性能最佳的短期目标,而熵产生最小化则反映了节约使用能源的长期目标,在实际热机装置优化时可将这两种目标综合考虑,如在热机的FTT性能优化研究中,墨西哥学者Augulo-Brown^[368]提出了兼顾功率和熵产率的“生态学”目标函数 $E = \dot{P} - T_L \dot{S}_g$,式中 T_L 为低温热源温度,厦门大学严子浚^[369]进一步提出了修正的“生态学”目标函数 $E' = \dot{P} - T_0 \dot{S}_g$, T_0 为环境温度。

在传热工程领域,1980年Bejan^[8,370]针对平衡流逆流式换热器,在给定热、冷流体的进口温度且忽略流体流动过程熵产生的条件($\dot{S}_{g,fluid\ friction} \gg \dot{S}_{g,heat\ transfer}$)下,研究换热器熵产生随其有效度的变化规律,结果表明,换热器的熵产生随着有效度的增加先增大后减少,在有效度等于0.5时,熵产生取极大值;当有效度在(0.5, 1)的区间内单调增加时,换热器的熵产生单调减少;而当有效度在(0, 0.5)的区间内单调增加时,换热器的熵产生单调增加,如图3所示。Bejan指出这一现象与人们的直观认识“随着传热面积或传热单元数的增加,换热器的不可逆性应单调减少”相矛盾,故称之为“熵产悖论”。对于上述平衡流逆流换热器,在给定热、冷流体进口温度条件下,不难证明其流体间温度之差沿程保持为常数,当有效度等于0时,流体间温差达到最大值即等于流体进口温度之差,但由于传热面积等于零,故传热量等于零,由此导致换热器熵产生为零,这

图3 平衡流逆流式换热熵产生随有效度的变化规律^[8]

对应于换热器内“什么过程也没发生”或者换热器“消失了”;当有效度等于1时,总传热面积趋于无限大,热流体的出口温度等于冷流体的进口温度,换热器传热量达到最大可能的换热量,但此时流体间温差为零,由此导致换热器熵产生为零,这对应于换热器内热、冷流体间等温传热即传热过程是“可逆”的。基于这一分析,Shah和Skiepko^[371]认为“熵产悖论”是由热力学第二定律决定的,反映了温差传热的本征不可逆性。然而,上述解释仅解决了熵产生为零的极端问题。在工程上,人们更多注意的是,熵产生与有效度(或传热量)的变化趋势。对于图3所示逆流平衡换热器,在有效度(0,0.5)之间,任取一个区段,如(0.2,0.4)等,均可发现熵产生越大,有效度越大,而不是熵产生最小化预言的,熵产生越小换热器性能越好。最近,Bejan^[372]明确指出“The effectiveness (ϵ) is not a relevant measure of the thermodynamic performance of a heat exchanger”。显然,如果认为有效度 ϵ 是描述换热器传热性能的参数,而熵产生可描述热力学性能,一般不能描述换热器传热性能。此外,本文作者分析认为追究“熵产悖论”的成因,人们的直观认识“随着传热面积或传热单元数的增加,换热器的不可逆性应单调减少”这一结论要严格成立必须具备一定的条件,即换热器的实际传热量必须始终保持恒定,而在上述平衡流逆流式换热器熵产生性能分析中给定的是热、冷流体的进口温度,若其中一种流体的热容流率也已知,热、冷流体进口温度给定仅仅意味着给定了换热器的“最大可能传热量”,而并非是换热器的“实际传热量”,不满足前述人

们直观认识成立的前提条件。换热器的第一定律指标——换热量和第二定律指标——熵产生必须予以区别对待。换热器的熵产生最小优化应该在换热器能完成其预期设计的工程任务(如传热量给定)的前提下进行,否则就失去了“优化”的实际意义,同时也会得出“什么过程也不发生”时过程熵产生最小的结论。

针对换热器“熵产悖论”的产生,Witte和Shamsundar^[373],London和Shah^[374]引入了与环境温度 T_0 相关的修正熵产生数 $N_s^I = T_0 \dot{S}_g / Q$,它表示换热器传递单位热量所导致的熵损失;Xu等人^[375]引入了与换热器热、冷流体进口温度差相关的修正熵产生数 $N_s'' = (T_{h,i} - T_{c,i}) \dot{S}_g / Q$;Hesselgreaves^[376]引入了与换热器冷流体进口温度 $T_{c,i}$ 相关的修正熵产生数 $N_s''' = T_{c,i} \dot{S}_g / Q$ 。上述指标均是单位换热量条件下换热器熵产生的度量,均可在一定条件下避免“熵产悖论”现象的出现,但对于可能出现的情形,并不是总能完全避免。Cheng等人^[377,378]研究表明,将这些修正的熵产生数应用于两股流换热器和两股流换热器网络性能分析时,在传热率与热容量流之比一定时,降低修正的熵产数并不会使换热器传热率增大。Osigo^[379]为求回避“熵产悖论”,引入了一个修正的熵产生数 $N_s^{IV} = \dot{S}_g / (UA)$,式中 U 为总传热系数, A 为总传热面积。Cheng和Liang^[380]研究表明对于不同冷热流体流动布置形式的换热器,该修正熵产生数 N_s^{IV} 的最小值与换热器有效度最大并不完全对应,并且当热流体进口温度增加时,换热器有效度保持不变,而修正熵产生数 N_s^{IV} 却增加。之所以这些熵产生有关的参数均不能解决熵产生与传热性能之间的“不单调变化”或这些参数减小不一定使得传热性能提升的问题,关键是因为熵产生描述的是换热器的热力学性能,而有效度描述的是换热器的传热性能,两者间不存在严格必然的对应关系。在工程上应用换热器时,给定入口参数以求传热量最大,是非常常见的目标。反过来,给定传热量的工程实际,其实相对还是少数,熵产生最小化一般不适用于给定入口参数约束的换热器优化。如此一来,熵产生最小化在换热器领域的应用,实际上十分的狭窄了。

由上述研究工作可见,熵产生最小化理论和有限时间热力学在传热过程和热力循环优化中研究思路出发点是一致的,均是将热力学、传热学和流体力学相

结合, 优化在有限时间或有限尺寸约束内过程、循环与装置的最优性能。但在以熵产生最小为目标优化时, 需要额外予以注意的是: (1) 热机装置的功率、效率以及换热器的传热量是与热装置直接相关的技术性能指标, 而熵产生是与热机装置和换热器内部具体物理过程相关的纯热力学量评价指标, 两者评价装置的角度不同, 因而所得优化结果既无必要也不一定相同; (2) 熵产生最小优化问题本身除需要给定前述的有限时间或有限面积约束外, 一般还需要给定系统的总输入热量或换热器传热量等额外约束条件, 否则问题最优解会是“工质与热源间无温差传热的可逆循环”或“什么过程也没有发生”的结论, 系统的熵产生取最小值, 等于零; (3) 熵产生最小不等于能耗最小, 因为根据热力学第一定律, 能量在传递和转化过程中是守恒的, 在数量上不存在损耗, 而熵产生是与传热、流动等具体过程有关的物理量, 是从热力学第二定律的角度评价实际反应过程和装置的性能, 表示由于过程的不可逆性所导致的熵损失或功损失大小的度量, 简而言之, 熵产生最小表示维持一定的、有经济效益的速率所付出的“能量品质损耗”代价最小; (4) 熵产生最小化仅是有限时间热力学研究中多个备选优化目标中的一个。

4 焓理论的产生、内涵和研究内容

4.1 焓理论的产生与发展

傅里叶导热定律、牛顿冷却定律和斯蒂芬-波尔兹曼黑体辐射定律等均只给出了传热速率, 由于在传热过程中热量在数量上是守恒的, 而肋效率和换热器的有效度均反映了过程与系统的实际传热量与最大可能传热量之比, 不是严格的产出和付出的比值, 所以也不是真正意义上的效率, 因此传热学中只有传热“速率”而没有传热“效率”的概念^[381]。正因为缺少“效率”, 所以在现有传热学理论中只能进行传热强化而不能进行传热优化。2003年, 过增元等人^[26]基于热量传递现象的本质, 从传热学的角度定义了热量传递势容和热量传递势容耗散函数, 并指出它们的物理意义分别为热量传递能力的总量和热量传递能力的耗散。2006年, 过增元等人^[23-25]通过热电比拟的方法, 进一步明确了热量传递势容是一个与电势能相对应的、描述物体所具有的热量传递总能力的新物理量, 并将其命名为“焓”, 热量传递过程中传递能力损失称为焓耗散, 提出

了焓耗散极值原理。焓和焓耗散极值原理的提出, 为传热优化开辟了新的方向, 解决了以传统的热阻和熵产生评价传热性能优劣的局限性和不准确性。通过与力学、电学的比拟, 过增元^[25]在热学中进一步引入了热量的势、势能、速度、动能等新物理量, 建立了描述热量运动的守恒方程组, 进一步完善了传热学的理论体系。

过增元等人^[23,24]通过热电比拟的方法, 定义了与电容器中电势能唯象对应的新物理量——焓 E_h :

$$E_h = \frac{1}{2}Q_h T = \frac{1}{2}\rho V c_V T^2, \quad (11)$$

式中, 下标“ h ”表示热量焓, Q_h 是物体的热力学能, 温度 T 为强度量, 系数“ $1/2$ ”表明了物体的热力学能与温度的线性相关, 比热容为常数, 当两者为非线性相关或比热容为温度函数时, 式(11)中系数应为其他常数。过增元等人^[382]研究表明焓的物理本质就是热质所具有的能量, 即热质势能, 但与热质势能相比, 焓的表达式(11)更为简单。熵 S 的命名来自于热量 Q_h 与温度 T 之商, 英文名称为“Entropy”, 蕴含“转换”之意; 类似地, 物理量 E_h 被称为焓或热量焓, 英文名称为“Entransy”, 蕴含“传递”之意。对于无内热源的稳态导热过程, 其热量守恒方程为

$$\rho c_V \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q}, \quad (12)$$

式中, $\mathbf{q}$ 为热流密度矢量。将式(12)等号两边同乘以温度 T 得

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho c_V T^2 \right) = -\nabla \cdot (\mathbf{q}T) + \mathbf{q} \cdot \nabla T, \quad (13)$$

式中, ∇T 是温度梯度。式(13)的左边项是微元体中焓随时间的变化, 右边第一项是进入微元体的焓流, 而右边第二项是微元体的焓耗散率。由式(13)得整个体积的焓耗散率 $\dot{E}_{h,\text{dis}}$ 为

$$\dot{E}_{h,\text{dis}} = \int_V (\mathbf{q} \cdot \nabla T) dV. \quad (14)$$

基于焓和焓耗散的概念, 对于稳态传热过程, 可以定义热量的传递效率(焓传递效率) η_E 为^[23-25]

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_{h,\text{out}}}{\dot{E}_{h,\text{inl}}} = \frac{\dot{E}_{h,\text{inl}} - \dot{E}_{h,\text{dis}}}{\dot{E}_{h,\text{inl}}} = \frac{\dot{E}_{h,\text{out}}}{\dot{E}_{h,\text{out}} + \dot{E}_{h,\text{dis}}}. \quad (15)$$

由式(15)可见, 在给定输入焓流 $\dot{E}_{h,\text{in}}$ 或输出焓

流 $\dot{E}_{h,out}$ 条件下, 热量传递过程焓耗散率 $\dot{E}_{h,dis}$ 越小, 焓传递效率 η_E 越高. 文献[23~25]还提出了用于传热优化的焓耗散极值原理——“对于具有一定的约束条件并给定热流边界条件, 当焓耗散最小时, 导热过程最优(温差最小); 给定温度边界条件, 当焓耗散最大时, 导热过程最优(热流最大)”. 基于焓耗散定义的多维复杂导热过程当量热阻 R_E 为^[23~25]

$$R_E = \frac{\dot{E}_{h,dis}}{\dot{Q}_h} = \frac{(\Delta T)^2}{\dot{E}_{h,dis}}, \quad (16)$$

式中, $\dot{Q}_h$ 是通过控制体边界的热流率, ΔT 是平均温差. 焓耗散极值原理可归结为最小热阻原理^[23~25], 表述为: “对于具有一定约束条件(如基材中加入一定数量的高导热材料)的导热问题, 如果物体的当量热阻最小, 则物体的导热性能最好(给定温差时, 热流最大, 或给定热流时, 温差最小)”.

对于质量传递过程, 混合物某组分的浓度 c 为强度量, 组分的总质量 ρVc 为广延量. 根据质量传递与热量传递过程之间的类比性, 陈群等人^[27~30]定义描述混合物中的某组分向周围介质扩散能力的质量积 E_m 为

$$E_m = \frac{1}{2}mc = \frac{1}{2}\rho Vc^2, \quad (17)$$

式中, $m=\rho Vc$ 为混合物中该组分的总质量. 陈群等人^[27~30]建立了用于传质过程优化的质量积耗散极值原理, 即: “对于具有一定的约束条件并给定质量流边界条件, 当质量积耗散最小时, 传质过程最优(浓度差最小); 给定浓度边界条件, 当质量积耗散最大时, 传质过程最优(质量流最大)”. 采用类似的思路, 陈群等人^[31]针对动量传递过程定义了动量积, 并进一步建立了动量积耗散极值原理. 程雪涛等人^[32]得到了描述孤立系统广延量传递过程不可逆性的广义积减原理, 进一步发展了孤立系统和封闭系统的势平衡判据. 程雪涛等人^[33]还将传热过程的焓理论推广到广义流动过程, 定义了广义积, 并进一步建立了广义积耗散极值原理. 广义积耗散极值原理可表述为^[33]: “给定边界广义流时寻求最小广义传递势差, 等价于寻求系统广义积耗散最小; 给定系统当量广义传递势差时寻求系统最大广义流传递量, 等价于寻求系统广义积耗散最大”. 同时, 以上两种寻求广义积耗散极值的过程, 都是寻求系统广义流阻最小的过程.

4.2 焓理论的物理内涵

热力学第一和第二定律是热力学的两大理论支柱. 在这两个定律中, 尤以热力学第二定律对热力学更为重要, 它是热力学所独有的定律. 由于与热现象相关过程的多样性, 所以热力学第二定律的表述也多种多样, 其中最为经典的两种表述是Kelvin表述和Clausius表述. 1850年, Clausius从热量传递方向性的角度将热力学第二定律表述为: 热不可能自发地、不付代价地从低温物体传至高温物体. 1851年左右, Kelvin则从热功转换方向性的角度将热力学第二定律表述为: 不可能制造出从单一热源吸热, 使之全部转化为功而不留下其他任何变化的热力发动机. 上述两种不同的第二定律表述是看问题的角度不同, 但不难证明是在数学上完全等价的. 1865年, Clausius^[354]通过进一步对可逆Carnot热机(以热功转换为目的)循环进行理论分析, 给出了微元可逆过程熵变的表达式 $dS = \delta Q_{rev} / T$, 式中 Q_{rev} 和 T 分别为过程传热量和系统温度, 由此定义了热力学理论的核心物理量——熵, 进而借助于“熵”的概念量化了热力学第二定律, 即著名的孤立系统熵增原理. 程雪涛等人^[383]基于焓的概念也量化了热力学第二定律, 得到了孤立系统焓减原理. 通过上述熵和焓的由来可知, 熵和焓观察热的视角不同, 熵是基于以热功转换为目的的热力循环提出的, 是从功(有序能)的角度审视“热”(无序能)的转换性, 而焓是基于以热量传递为目的纯传热过程提出的, 是从热自身角度审视“热”的传递性, 但两者都是与热有关的物理量, 且均与热力学第二定律直接关联, 焓耗散和熵产生均可以用来定量描述传热过程的不可逆性, 但焓理论为传热过程优化提供了不同于熵产生最小化理论的新视角.

现代稳定性理论中的李雅普诺夫(Lyapunov)函数可用于表征不可逆性, 熵产率通常用于表征各种传输不可逆性的李雅普诺夫函数. 最近, Hua等人^[384]研究表明: 除熵产率外, 焓耗散率也可作为李雅普诺夫函数反映热传导过程不可逆性, 因此对于不涉及热功转换的热传导问题, 李雅普诺夫函数并非是唯一的; 焓耗散率是热传导过程的作用量, 由其可导出傅里叶热传导定律, 并可用于传热过程的优化^[385]; 对于孤立系统从非平衡状态变为平衡态或者非平衡系统从非稳态变为稳态的热功转换过程, 其李雅普诺夫函数是熵, 而不是焓.

4.3 焓理论的研究内容

焓理论自提出以来, 引起了国内外学者的广泛关注. 一些学者从电热模拟实验^[386]、固体与气体传热^[387]、传热过程效率^[388]、微观^[389,390]与宏观^[391]表述、热力学定律的定性表述^[392]、一般热力过程^[35,393,394]与系统^[383,395,396]分析等方面阐述焓的物理意义; 已将其用于热传导^[397~400]、热对流^[401~406]、热辐射^[407~409]、耦合传热过程^[410]、单个换热器^[380,411~418]、换热器网络^[419~425]、变物性的热过程^[426]、相变储热^[427~430]、湿空气热湿转换^[431~436]、异丙醇-丙酮-氢气化学热泵^[437,438]、热化学储能^[439]、对流传质^[29,440]、流动减阻^[31]等过程、装置与系统的参数优化设计中. 基于场协同理论和焓耗散极值原理的对流传热过程优化比较研究表明^[441], 在给定温度边界条件下, 基于焓耗散极值原理得到的流体最优速度场和温度场与基于场协同理论得到的优化结果相一致, 两者均能增强过程的传热流率; 而对于给定热流边界情形, 基于焓耗散极值原理得到的流体最优速度场和温度场可降低过程的传热温差, 而场协同理论不适用于给定热流边界条件下的对流传热过程优化, 显然, 焓耗散极值原理比场协同理论的适用范围更广、更具优越性. 基于焓和焓耗散函数定义了换热器焓耗散数^[416]和当量热阻^[412]等新物理量, 并建立了其与换热器有效度之间的函数关系, 可用于评价换热器性能和指导换热器参数优化设计; 基于换热器的焓耗散热阻构建了换热器网络的等效热阻网络图^[442], 并根据电路原理, 获得了系统中各参数间的整体约束关系. 结合拉格朗日函数和条件极值原理, 获得了系统优化设计所需满足的控制方程, 可实现系统的总换热面积最小、总质量流率最小等多目标优化.

近年来, 一些学者们对焓理论的合理性和必要性提出了质疑和批判^[443~455], 特别是认为焓理论抄袭了熵产生最小化理论. 关于这些质疑和批判, 过增元团队和相应学者均在相应学术刊物上一一进行了回复和反驳^[424,456~464]. 陈群等人^[465]综述了焓理论在纯传热过程优化中的研究进展, 并从传热目的、优化目标、优化原理和优化准则等方面对焓理论和熵产生最小化进行了比较, 结果表明, 焓理论适用于以加热或冷却为目的的传热过程优化, 而熵产生最小化适用于以热功转换为目的的传热过程优化; 焓理论的优化目标为传热

性能最大化, 而熵产生最小化的目的是热功转换效率最大化; 焓理论的优化原理为基于焓耗散的当量热阻最小化, 与熵产生最小化是显著不同的; 基于焓理论对导热、对流和辐射传热过程进行优化, 可分别导出导热过程温度梯度均匀性原则、对流传热的场协同原理和辐射传热的热势均匀性原则, 而以熵产生最小化对导热过程优化结果为温度倒数之差均匀性原则, 对对流传热过程和辐射传热过程的优化结果与基于焓理论的结果也是不同的. 在换热器性能分析与优化方面, 前已述及, 对于给定流体入口参数的换热器性能分析与优化结果表明, 熵产生最小化在很多情形下存在“熵产悖论”, 即换热器熵产生减小与其有效度增大两者在各种可能情形下未能保持严格一致, 而基于焓耗散的换热器当量热阻减小与其有效度增大间却能始终保持严格一致^[377,378,380,412,466~468]. 此外, 对于换热器网络优化, 采用拉格朗日乘法结合焓平衡方程约束可实现对换热器网络系统的整体性能优化^[424], 相比以熵平衡方程约束进行优化更为简单和方便, 由此显示出焓理论相比熵产生最小化在换热器传热性能分析与优化方面的优越性.

焓理论为有限时间热力学对于各种有限势差传热传质过程的优化研究提供了不同于熵产生最小化的新的目标函数, 将焓理论和有限时间热力学相结合进行换热器传热^[138,141,150,469,470]、平板液-固相变传热^[471]、传质^[155,156,472]、节流^[473]、结晶^[474]、Carnot热机^[475~483]、气体动力循环(包括Diesel^[484,485]、Otto^[485,486]、Akison^[487]、Stirling^[488,489]、Brayton^[485,490,491]、喷气式发动机循环^[492])、传统蒸汽^[493,494]和有机朗肯^[495~497]动力循环、压缩空气制冷循环^[498]、压缩蒸气制冷循环^[499]、热泵循环^[500~503]、联合循环^[504~506]等过程与循环优化, 可得到一系列不同于以熵产生最小为目标优化的新规律和新结论; 将焓理论与构形理论^[507~510]相结合对体点导热^[511,512]、空腔^[513]、伸展体^[514]、高炉壁^[515]、轧钢加热炉壁^[516]、燃气涡轮叶片^[517]、对流传热^[518]、换热器^[519]、电磁体^[520]、气固反应器^[521]等过程和部件进行设计优化, 有助于降低其当量热阻和平均势差, 提高其整体热量和质量传输性能^[522~525]. 此外, 基于焓理论的 $T-Q$ 图也分别应用于传热过程^[526,527]和热力学循环^[492,527,528]性能分析与优化中. 广义积的概念也拓展应用到了商品流通领域中^[529].

据不完全统计,截止2018年8月,已有600多篇相关文献发表,包括专著^[381,530-532]、文集^[533]和博士论文.关于焓理论及其最新相关研究进展,可参见最近发表的综述^[465,534-544].

5 广义热力学优化理论的产生和研究内容

5.1 广义热力学优化理论的产生与发展

运动是物质的属性,能量是物质运动的度量,物质的每一种运动形式是能量的一种表现形式.虽然物质运动的形式多种多样,能量的表现形式也是千差万别,但它们具有共同的本质,各种形式的能量可以直接相加.由热力学第一定律可知,热力学的微元广义功 δW 的表达式为

$$\delta W = pdV - TdS - \mu dG - U dQ_e - \dots - FdL - \dots, \quad (18)$$

式中, p , T , μ , U 和 F 分别为相对于基准点为0的压强、温度、化学势、电势和机械力, V , S , G , Q_e 和 L 分别为体积、熵、质量、电量和位移.从式(18)可看出,“有限时间热力学”或“熵产生最小化”理论的研究对象实质上主要是以温度 T 为驱动力、熵 S 为位移和以化学势 μ 为驱动力、质量 G 为位移的传统热力学系统. Radcenco^[545]的广义热力学理论研究表明:自然界存在守恒和耗散作用的物理系统均可以用基于能量变换的广义多变过程来统一描述,即 $FL^n = \text{常数}$ 或 $F = \text{常数} \cdot L^n$,式中 $n \in (0, \infty)$,为表征相互作用强度的广义多变指数, F 为广义力, L 为广义位移.广义力 F 包括:机械作用力、物体重量、机械动量、线性加速度(含重力加速度)、角加速度、线速度和角速度、线性和切向应力、压力、表面张力、容积势、静电场强度、磁场强度、化学势和绝对温度.广义位移 L 包括:线性和角位移、线性冲量、运动学动量、线性伸长率、周向变形率、比容、电荷、静电感应、极化矢量、磁感应、磁化矢量、质量和熵.因此,机械、电、磁、化学、气动等过程和装置均可与传统的热过程采取统一处理思想和方法进行分析和优化.1998年,陈林根等人^[11-13]提出将传统热机的有限时间热力学理论拓广到上述广义热力学系统,广泛采用内可逆模型以突出主要不可逆性,建立起设计和运行优化理论,即“广义热力学优化理论”.广义热力学优化理论的提出,为有限时间热力学的进一步深化和发展提供了具有建设性意义的新思想.

5.2 广义热力学优化理论的研究内容

单从“广义热力学优化理论”这一名词的表面含义来看,它所覆盖的领域是相当广泛的.凡是涉及物理量传递与转换的过程和系统均是广义热力学优化理论的研究对象.已有学者将传统热力过程与循环的有限时间热力学研究思路拓广到流体流动做功过程^[10,12,546,547]、电容器充电过程^[548-558]、电池作功电路^[559-564]、经济贸易过程和系统^[60-63,69,565-583]等一系列非传统热力过程和循环的最优性能和最优构型研究.然而上述研究均仅限于具体的研究对象,没有系统地讨论这些研究对象和传统热力研究对象之间的区别与联系,也就无法从个别的研究结论中获得具有一般意义上普适性的研究成果.以热力学、传热传质学、电学和经济学中各种广义流传递过程和广义能量转换系统为例,表2和3是夏少军和陈林根^[584]在对相关研究领域国内外文献的研究内容进行总结与归纳的基础上得到的,从中可看出不同学科不可逆广义流传递过程和广义能量转换循环间的相似关系是显著存在的,这为建立统一的广义热力学物理模型并寻求其统一的优化方法^[584]提供了前提条件.

总体而言,用以描述热力学体系的基本状态量分为两大类:广延量和强度量.与物质的量相关,且具有加和性质的物理量称为广延量,如热量、动量、质量和电荷量等,任何形式的广义流传递都可表现为广延量的流动过程;与物质的量无关,不具有加和性质的物理量称为强度量,例如温度、速度、化学势和电势等.此外,在经济学中也有类似的物理量,如强度量有商品的价格,广延量有劳动力、资本、货币和效用函数等^[585,586].任何不可逆传递过程的进行都需要力的驱动,驱动热力学过程的力均为基本强度量的梯度(矢量情形)或基本强度量之差(标量情形).由于强度量与强度量的数学组合依然是强度量,所以驱动热力学过程的力也可作为强度量函数的梯度或强度量函数之差,如辐射传热规律中温度的四次方之差 $\Delta(T^4)$ 和线性不可逆热力学中传质过程驱动力 $\Delta(\mu/T)$.此外,由基本广延量与基本强度量函数两者之积导出的物理量依然为广延量,将此称为泛化广延量,所以过程的广义流也可作为广延量与基本强度量函数两者之积,如熵、焓、焔、电能、资本等.然而这类广义流在有限势差广义流传递过程中存在耗散,如熵产生、焓耗散、焔损

表 2 各种流动过程间物理量一一对比关系(标量情形)

广义热力学理论	热力学和传热传质学		电学	经济学
广义流动过程	传热过程	等温传质过程	电容器充电过程	经济贸易过程
广义势: X	温度: T	化学势: μ ; 浓度: c ; 压力: p	电势: U	价格: P
广义力: $F=\Delta(X)$	温度差: ΔT ; 温度的四次方之差: $\Delta(T^4)$; 温度的倒数之差: $\Delta(T^{-1})$	化学势差: $\Delta(\mu)$; 浓度差: Δc ; 压力差: Δp	电压: $V=U_1-U_2$	价格差: ΔP
广义流: Q	传热量: Q_h	传质量: G	导电量: Q_e	商品数量: N
广义流率: $J=dQ/dt$	热流率: $q=dQ_h/dt$	质流率: $g=dG/dt$	电流率: $I=dQ_e/dt$	商品流率: $n=dN/dt$
广义泛化流: D	熵流: $S=Q/T$; 焓流: $E=QT$; 焓流: $Ex=Q(1-T_0/T)$	熵流: $S=G\mu/T$; 积流: $E=Gc$ 或 $E=Gp$	电功流: $E=UI$	资本流: $S=NP$
广义流阻: $R=F/J$	热阻: $R=\Delta T/q$; $R=\Delta(T^{-1})/q$; $R=\Delta(T^4)/q$	质阻: $R=\Delta(\mu/T)/g$; $R=(\Delta c)/g$; $R=(\Delta p)/g$	电阻: $R=V/I$	商品流阻: $R=(\Delta P)/n$
广义势导率 $k=1/R$	热导率 k	质导率 k	电导率 $\rho=1/R$	商品传输系数 α
广义势容: $C_X=dQ/dX$	热容: $C_T=dQ_h/dT$	化学势容: $C_\mu=dG/d\mu$	电容: $C_e=dQ/dU$	经济容量: $C_P=dN/dP$
广义传输规律: $J(X_1, X_2)$	Fourier热传导定律: $q=-\lambda\Delta T$; 牛顿对流规律: $q=k\Delta T$; 线性唯象传热规律: $q=k\Delta(T^{-1})$; Dulong-Petit传热规律: $q=k(\Delta T)^{5/4}$; 辐射传热规律: $q=k\Delta(T^4)$; 广义对流传热规律: $q=k(\Delta T)^m$; 广义辐射传热规律: $q=k\Delta(T^m)$; 普适传热规律: $q=k\Delta(T^m)^m$; 复合传热规律: $q=k_1(\Delta T)^m+k_2\Delta(T^4)$	线性传质规律: $g=h\Delta(\mu/T)$; 菲克扩散传质规律: $g=h\Delta(c)$ 或 $g=h\Delta[\exp(\mu/RT)]$; Darcy渗透传质规律: $g=h\Delta(p)$; 基于伯努利方程的平方根节流 传质规律: $g=h(\Delta p)^{1/2}$; 广义节流传质规律: $g=h(\Delta p)^m$	欧姆定律: $I=V/R$; “差函数”形式电流传输规 律: $I=y(U_1-U_2)$; “函数差”形式电流传输规 律: $I=y(U_1)-y(U_2)$	线性传输规律: $n=\alpha$ (P_1-P_2); 考虑供需价格弹性的 普适传输规律: $n=\alpha(P_1^m-P_2^m)$
广义耗散: $\Delta D=\int_0^t J \cdot f(X_1, X_2)dt$	熵产生: $\Delta S=\int_0^t [q \cdot \Delta(1/T)]dt$; 焓损失: $Ex_t=\int_0^t T \cdot [q \cdot \Delta(1/T)]dt$; 焓耗散: $\Delta E_h=\int_0^t [q \cdot (\Delta T)]dt$	熵产生: $\Delta S=\int_0^t [g \cdot \Delta(\mu/T)]dt$; 积耗散: $\Delta E_m=\int_0^t [g \cdot y(c_1, c_2)]dt$	焦耳热耗散: $E_R=\int_0^t I^2 R dt$	资本耗散: $\Delta S=\int_0^t [n \cdot \Delta(P)]dt$

失、焦耳热耗散和资本耗散等, 为与前述广延量相区分, 本文将传递过程中存在耗散的广义流称为广义泛化流, 而将传递过程中守恒的广义流称为基本广义流, 简称广义流. 在广义热力学理论框架里, 为了建立统一的热力学过程与循环物理模型, 可以定义广义热力学单元系统和基本物理量, 具体如下^[584].

广义势库: 能不断存储和释放广义流的广义热力学单元系统称为广义势库, 如热源、化学势库、电容器、经济库等. 其中, 在广义流输入或输出的过程中

其广义势保持不变的广义势库称为无限广义势容广义库, 简称无限广义势库; 在广义流输入或输出的过程中其广义势变化的广义势库称为有限广义势容广义势库, 简称有限广义势库.

广义势 X : 广义热力学中的基本强度量 X 或基本强度量的复合函数 $\phi(X)$.

广义力 F : 对于矢量情形(多维问题), 其为基本强度量或广义势的梯度 ∇X , 或广义势函数 $\phi(X)$ 的梯度 $\nabla[\phi(X)]$; 对于标量情形(一维问题), 其为基本强度

表 3 各种能量转换系统间一一对比关系(标量情形)

广义热力学理论	热力学和传热传质学		电学	经济学
可逆广义机	可逆热机	等温可逆化学机	可逆电机	可逆商业机
广义势 X	温度 T	化学势 μ	电势 U	价格 P
高势侧 $X_{1'}$	工质高温侧 $T_{1'}$	工质高势侧 $\mu_{1'}$	阳极电势 $U_{1'}$	高价侧 $P_{1'}$
低势侧 $X_{2'}$	工质低温侧 $T_{2'}$	工质低势侧 $\mu_{2'}$	阴极电势 $U_{2'}$	低价侧 $P_{2'}$
广义位移 L	熵 S	质量 G	电荷量 Q_e	商品数量 N
广义位移守恒 $L_{1'} = L_{2'}$	熵流守恒 $S_{1'} = S_{2'}$	质量守恒 $G_{1'} = G_{2'}$	电荷守恒 $Q_{e1'} = Q_{e2'}$	商品流守恒 $N_{1'} = N_{2'}$
广义输出 $W = L_{1'}X_{1'} - L_{2'}X_{2'}$	输出功 $W = T_{1'}S_{1'} - T_{2'}S_{2'}$	输出功 $W = \mu_{1'}G_{1'} - \mu_{2'}G_{2'}$	输出功 $W = U_{1'}Q_{e1'} - U_{2'}Q_{e2'}$	利润输出 $\Pi = P_{1'}N_{1'} - P_{2'}N_{2'}$

量或广义势之差 ΔX .

广义流 Q : 广义热力学中, 在广义流传递过程中守恒的基本广延量.

广义流率 J : 单位时间内通过控制体的基本广延量, 即 $J=dQ/dt$.

广义泛化流 D : 在广义流传递过程中存在耗散的广延量, 它一般可表示为基本广延量与强度量函数两者之积. 如熵、焓、焓、焦耳热、资本等.

广义流阻 R : 反映阻止广义流传递能力的综合参量, 定义为广义力与广义流的比值即 $R=F/J$.

广义势导率 k : 反映系统广义流传递能力的综合参量, 定义为广义流阻的倒数, 即 $k=1/R$.

广义传输规律 $J(X_1, X_2)$: 表征广义流传递形式的数学表达式.

广义势容 C_X : 表征系统容纳广义流量本领的物理量, 定义为系统单位广义势的增加量所需要吸收的广义流量, 即 $C_X=dQ/dX$.

广义耗散 ΔD : 在有限势差广义流传递过程中广义泛化流的变化量.

可逆广义机: 能实现各种广义流的广义能量转换功能并获得净广义能量输出的广义热力学单元系统称为广义机. 同时当完成该转换过程后, 如果有可能使广义机沿相同的路径逆行而回复到原来状态, 并使相互作用所涉及的外界亦回复到了原来的状态而不留下任何改变, 则该广义机称为可逆广义机.

广义位移 L : 在可逆广义机广义能量转换过程前后守恒的广延量.

广义速率 J' : 单位时间内广义位移的变化量 $J'=dL/dt$.

广义输出 W : 广义机广义流的能量转换过程所得到的净广义能量称为广义输出.

基于上述定义的物理量, 夏少军和陈林根^[584]进一步建立了统一的广义热力学物理模型进行优化. 可见, 广义热力学优化理论是有限时间热力学的深化和发展, 把对传热过程和热机等传统热力过程和系统的研究对象拓广到存在广义势差和广义位移的广义流传递过程和广义机循环等各种非传统广义热力过程和系统, 强调热力学、传热学、流体力学和力学、电、磁、化学反应动力学、生物学、经济学等各专门领域知识的类比、交叉研究, 侧重于建立统一的广义热力学物理模型, 寻求统一的优化方法, 探索新现象, 发现新结论, 实现基于广义热力学优化理论的研究成果集成.

6 传热过程动态优化

6.1 牛顿传热规律下相关研究

Linetskii和Tsirlin^[123], Andresen和Gordon^[124]研究表明牛顿传热规律 $[q \propto \Delta(T)]$ 下对应于换热器熵产生最小时传热过程最优路径为热、冷流体温度均随时间(位移)呈指数变化且两者之比为常数, 逆流式换热器在各类换热器中熵产生最小. 若以大气环境(温度恒定)作为参考环境, 那么以焓损失最小为目标和以熵产生最小为目标优化的结果是等同的. Badescu^[133]在文献^[124]的基础上选择热流体温度为参考环境温度, 研究表明牛顿传热规律下对应于过程焓损失最小时焓损失率为常数, 逆流式换热器在各类换热器中的焓损失最小. Amelkin等人^[127,128]以熵产生最小为目标, 研究

了牛顿传热规律下不同水动力模型的单管流换热器的极值性能。Tsirlin和Kazakov^[130]得到了牛顿传热规律下给定传热量条件时换热器热力学可行域。

柳雄斌等人^[411]首先定义了基于焓耗散的换热器热阻和换热器热阻因子。宋伟明等人^[587]应用焓耗散极值原理从理论上证明了温差场均匀性原则^[18~20]的正确性。柳雄斌等人^[490]还研究表明, 对于参与热功转换的换热器, 换热器参数优化应取熵产生极值较好, 而对于只参与热量传递的换热器, 换热器参数优化应取焓耗散极值更合适。柳雄斌和过增元^[588]、过增元等人^[412]通过焓耗散定义的换热器当量热阻建立了传热不可逆性与有效度的联系, 提出了换热器性能分析的有效度——热阻法。夏少军等人^[138]在总传热量一定条件下, 以焓耗散最小为目标对图4所示换热器传热过程进行了优化, 结果表明牛顿传热规律下热、冷流体温度差为常数, 与温差场均匀性原则^[18~20]相一致, 逆流式换热器在3种流动换热器中性能最优; 在传热量较小时, 焓耗散最小和熵产生最小两种优化目标下的传热策略较为接近, 两者间的差别随着传热量的增大而增大。郭江峰等人^[416]基于焓耗散定义了换热器的焓耗散数, 分析了焓耗散数随换热器有效度的变化规律, 发现焓耗散数避免了熵产数用于换热器分析所导致的“熵产悖论”^[8]。郭江峰等人^[589,590]还应用最优控制理论以焓耗散最小为目标对给定传热量条件下传热过程进行了优化, 得到了换热器优化的“焓耗散均匀性原则”^[589], 并将其与“热流密度均匀分布”和“温差均匀分布”^[18~20]等优化原则进行了比较^[590]。

对于换热器传热过程的研究思路还可以拓广到其

图4 三类简单两股流换热器模型

他换热装置。Bejan^[9]首先以冷却流体的消耗量最小为优化目标对一类牛顿传热规律下强迫冷却过程进行了研究。在此基础上, Badescu^[144]进一步以熵产生最小和两类焓损失最小为目标对强迫冷却过程进行了优化。马康等人^[146]指出了文献^[9,144]中强迫冷却过程模型存在的问题, 给出了精确的模型, 由于精确模型下优化问题求解困难, 进一步给出一个近似的模型, 并研究了其冷却流体的消耗量最小优化。Gordon等人^[142]以熵产生最小为目标研究了液-固相变传热过程的外界热源温度随时间的最优变化规律。Santoro等人^[145]导出了对应于气-液相变过程最小耗功时外界压力随时间变化的最优路径。毕月红等人^[147]以熵产生最小为目标优化了牛顿传热规律下气体水合物结晶和分解过程, 得到了传热阶段温度的最优构型和相变阶段相变速率的最优构型。在文献^[142]的基础上, 夏少军等人^[143]进一步以焓耗散最小为目标优化了图5所示的一维液-固相变传热过程, 在过程总时间一定的条件下, 导出了外界热源温度随时间变化的最优规律, 结果表明, 相变过程最小焓耗散为恒温传热策略下的焓耗散的8/9, 且与系统其他参数无关; 在焓耗散最小最优换热策略下, 凝固过程的相变边界移动速度随相变位置的变化规律和相变边界随时间的变化规律与熔化过程相应的变化规律是相同的, 而在熵产生最小最优换热策略下, 凝固过程与熔化过程相应的变化规律则是不同的; 两个不同优化目标下得到的外界热源温度随时间的最优变化规律也不同, 并且两者之间的差别随着参数 t_0/τ 值的增大而增大, 其中 t_0 为热源温度 $T_s(t)$ 处于绝对零度时平板的凝固时间, τ 为过程时间, 如图6所示。由于液-固相变传热过程不涉及热功转换, 因此优化目标应取为焓耗散最小较合适。

6.2 传热规律的影响

实际传热规律不总是服从牛顿传热规律的, 传热

图5 简单一维液-固相变过程模型

图 6 各种相变传热策略下无量纲外界温度随无量纲时间的变化规律. (a) $t_0/\tau=0.05$; (b) $t_0/\tau=0.5$

规律不仅影响给定热力过程的性能^[591~597], 而且影响给定优化目标时的最优热力过程. 一些学者基于不可逆热力学理论研究了换热器的传热过程熵产生最小化, 特别在线性不可逆热力学^[37~39]中传热过程一般选温度倒数之差 $[\Delta(T^{-1})]$ 为热流的驱动力, 即传热过程服从线性唯象传热规律 $[q \propto \Delta(T^{-1})]$. Nummedal和Kjelstrup^[129]以熵产生最小为目标优化了传热过程, 研究结果不仅表明逆流式换热器在各类换热器中的熵产生最小, 而且还表明当热力学力与热力学流取不同物理量, 对应于过程熵产生最小时的热力学驱动力均为常数, 即与驱动力均分原则(equipartition of force, EoF)相一致^[337~341, 343~345]. 在文献^[129]的基础上, Johannessen等人^[131]进一步研究表明对应于过程熵产生最小时的局部熵产率为常数, 即与熵产生均分原则(equipartition of entropy production, EoEP)相一致^[336], 并且研究还表明局部熵产率为常数的传热策略下过程熵产生小于温度倒数之差为常数的传热策略下过程熵产生, 即熵产生均分原则要略优于驱动力均分原则. 在经典的傅里叶传热定律中, 热流是以温度差为驱动力即传热过程服从牛顿传热规律. Balkan^[132, 135]研究表明牛顿传热规律下传热过程熵产生均分原则与热、冷流体温度比为常数的传热策略相一致^[132], 进一步将熵产生均分原则应用于一类变传热系数条件下换热器优化^[135].

Andresen和Gordon^[125]研究了广义辐射传热规律 $[q \propto \Delta(T^n)]$ ^[592, 595, 598]下传热过程, 导出对应于熵产生最小的热、冷流体温度最优构型, 结果表明牛顿和线性唯象传热规律下对应于过程熵产生最小时的局部熵产率均为常数. Chen等人^[139]基于一类包括广义对流传热规律 $[q \propto \Delta(T^n)]$ ^[591, 596]和广义辐射传热规律的普适传热规律 $[q \propto (\Delta(T^n))^m]$ ^[597, 599~603], 研究了传热过程的熵产

生最小化, 结果表明普适传热规律下传热过程熵产生最小时热、冷流体温度的 n 次幂之差与热流体温度的 $(n+1)/(m+1)$ 次幂之比为常数; 对应于熵产生最小时的局部熵产率为常数不仅在牛顿和线性唯象传热规律下成立, 而且在一类 $[q \propto (\Delta(T^n))^m]$ 传热规律下均成立. Badescu^[134]研究了广义辐射传热规律下传热过程熵损失最小化, 结果表明牛顿传热规律下对应于熵损失最小时的熵损失率为常数. Xia等人^[140]以最小熵损失为目标对普适传热规律 $[q \propto (\Delta(T^n))^m]$ 下传热过程进行了优化, 结果表明广义对流传热规律下对应于过程熵损失最小时的局部熵损失率均为常数. Xia等人^[141, 604]还研究了广义辐射传热规律^[141]和普适传热规律 $[q \propto (\Delta(T^n))^m]$ ^[604]下传热过程熵耗散最小化, 结果表明牛顿传热规律下热、冷流体温度差为常数, 线性唯象传热规律下热、冷流体温度比为常数, 普适传热规律下传热过程熵耗散最小时热、冷流体温度的 n 次幂之差与热流体的 $(n-1)/(m+1)$ 次幂之比为常数. 以上对于换热器传热过程的研究均没有考虑热漏的影响, 夏少军等人^[469, 605]以热流体在内侧流动、冷流体在外侧流动的两股流圆管换热器为例, 建立了冷流体与外界环境间存在热漏 q_3 的传热过程模型, 如图7和8所示, 在冷流体净传热量一定的条件下, 应用最优控制理论分别导出对应于过程熵产生最小^[605]和熵耗散最小^[469]时热、冷流体温度最优构型, 并与热流率一定、热流体温度一定的传热策略进行比较, 结果表明存在热漏时传热过程熵产生最小时热、冷流体温度间最佳关系式如下:

$$\frac{q_1^2}{T_1^2} / \frac{\partial q_1}{\partial T_1} + q_3 \left(\frac{q_1}{T_1^2} / \frac{\partial q_1}{\partial T_1} + \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1} \right) = \text{const.} \quad (19)$$

图 7 存在热漏的两股流换热器. (a) 顺流式; (b) 逆流式

图 8 存在热漏的传热过程模型

存在热漏时传热过程熵耗散最小时热、冷流体温度间最佳关系式如下:

$$q_1^2 / \frac{\partial q_1}{\partial T_1} + q_3 \left(q_1 / \frac{\partial q_1}{\partial T_1} + T_1 - T_3 \right) = \text{const.} \quad (20)$$

当无热漏时, 式(19)和(20)分别变为

$$\frac{q_1^2}{T_1^2} / \frac{\partial q_1}{\partial T_1} = \text{const.}, \quad (21)$$

$$q_1^2 / \frac{\partial q_1}{\partial T_1} = \text{const.} \quad (22)$$

对比式(19)和(21)、式(20)和(22)可见, 有热漏和无热漏时两种不同目标下的热、冷流体间最佳关系式是显著不同的; 无论是以熵产生最小还是以焓耗散最小为优化目标, 热流率一定的传热策略均优于热流体温度一定的传热策略; 传热规律对传热过程的最小熵产生和最小焓耗散及相应的热、冷流体温度间的最优关系有显著影响, 如图9和10所示。

上述优化问题均是在已知具体传热规律条件下寻求传热过程特定优化目标下的热、冷流体最优温度分布规律, 反过来, 若已知传热过程的流体温度分布规律, 能否寻求最优解为该温度分布规律时传热规律所具有的普适特征呢? Kolin'ko和Tsirlin^[148], Tsirlin等人^[149]研究了对应于传热过程最小熵产生的温度差为常数的传热规律所具有的普适特征。Xie等人^[150]进一步以焓耗散最小为目标对传热过程进行研究, 并寻求各种特定温度分布规律下传热规律所应具有的普适特征。结果表明, 对应于传热过程熵耗散最小时温度差为常数在广义对流传热规律和 $\{q \propto [(\Delta T) + (\Delta T)^m]\}$ 传热

 图 9 不同传热规律下熵产生最小时热流体温度最优变化规律. (a) $k_3/k_1=0.5$, $\Delta T_2=100$ K; (b) $k_3/k_1=0.05$, $\Delta T_2=600$ K

图 10 不同传热规律下传热过程焓耗散最小时热流体温度最优变化规律. (a) $k_3/k_1=0.5$, $\Delta T_2=100$ K; (b) $k_3/k_1=0.05$, $\Delta T_2=600$ K

规律下均成立; 若传热过程焓耗散最小时热流率为常数, 那么其热、冷流体温度差也为常数.

7 传质过程动态优化

质量和热量传递是具有很多相似规律的两现象, 傅里叶导热规律和菲克扩散传质规律都是反映扩散过程的规律, 即在热量和质量传递过程中, 广延量的传递量都与相应的强度量的梯度成正比关系. 这就意味着质量和热量传递这两种现象之间具有类比性. 因此, 对于传热过程动态优化的研究思路和方法也可推广到传质过程动态优化研究.

Tsirlin 等人^[60-63,151,152,154]、Mironova 等人^[69,153]和 Berry 等人^[75]研究了不同传质规律下等温节流、单向等温传质、双向等温传质过程的熵产生最小化问题, 结果表明线性传质规律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ (式中 $\Delta(\mu)$ 为化学势差)下单向等温传质过程熵产生最小时高、低浓度侧关键组分的化学势差为常数. 此研究结果还被进一步拓展应用到热驱动分离和机械分离^[306-308]、多元混合物分离最优次序的确定^[309]以及二元蒸馏分离过程等优化研究中. Mironova^[153]和毕月红等人^[159]研究了线性传质规律下气体水合物结晶过程熵产生最小时组分浓度随时间的最优变化规律. Teodoros 和 Andre-sen^[157,158]以熵产生最小为目标优化了加热和增湿非等温传质过程熵产生最小化. 本文作者研究了图 11 所示一类普适传质规律下存在质漏的单向等温传质过程熵产生最小化, 结果表明存在质漏时单向等温传质过程熵产生最小时高、低浓度侧关键组分浓度间最佳关系为

$$g_1^2 / \frac{\partial g_1}{\partial \mu_1} + g_3 \left(g_1 / \frac{\partial g_1}{\partial \mu_1} + \mu_1 - \mu_3 \right) = \text{const.} \quad (23)$$

当无质漏时即 $g_3=0$, 式(23)变为

$$g_1^2 / \frac{\partial g_1}{\partial \mu_1} = \text{const.} \quad (24)$$

对比式(23)和(24)可见, 有质漏和无质漏时两种不同目标下的热、冷流体间最佳关系式是显著不同的; 传质规律对单向等温传质过程熵产生最小时关键组分浓度最优构型有显著影响, 如图 12 所示.

Chen 等人^[606]研究了普适传质规律下等温结晶过程熵产生最小化, 结果表明过程熵产生最小时浓度 c_1 和结晶量 M_1 间最优关系式如下:

$$\frac{g^2(M^{2/3}, c_1, c_{eq})}{c_1} = \frac{\lambda}{R} \frac{\partial g}{\partial c_1}. \quad (25)$$

线性传质规律下初期浓度 $c_1(0)$ 要高于扩散传质规律 $[g \propto \Delta(c)]$ (式中 $\Delta(c)$ 为浓度差)下的初期浓度 $c_1(0)$, 且两者的差值随着时间的增加而减少, 两种不同传质规律下熵产生最小时浓度 c_1 随时间 t 的最优变化规律明显不同, 如图 13 所示; 两种不同传质规律下结晶量 M 随时间 t 均呈非线性规律变化, 扩散传质规律下结晶量 M 高于线性传质规律下结晶量 M , 如图 14 所示; 传质规

图 11 存在质漏的单向等温传质过程模型

图 12 不同传质规律下过程熵产生最小时关键组分浓度 c_1 最优构型($\Delta c_2=0.2$). (a) $h_{3\mu}/h_{1\mu}=h_{3c}/h_{1c}=0.01$; (b) $h_{3\mu}/h_{1\mu}=h_{3c}/h_{1c}=0.05$

图 13 不同传质规律下浓度 c_1 随时间 t 的最优变化规律

图 14 不同传质规律下结晶量 M 随时间 t 的最优变化规律

律影响结晶过程的最小熵产生及对应的浓度最优构型。

基于质量传递与热量传递现象之间的类比性, 陈

群等人^[27-30]、李志信和过增元^[381]定义了质量积, 并提出了传质优化的质量积耗散极值原理和最小质阻原理, 对空间站通风排污^[27,30,381]、光催化氧化反应器^[29,381]以及蒸发冷却^[431,432]等传质过程进行了优化. 柳雄斌^[607]和柳雄斌等人^[608]则以积耗散最小为目标对流体分配通道网络进行了优化. 陈林等人^[609]提出了溶液除湿性能分析与优化的湿阻法. 袁芳和陈群^[610]建立了间接蒸发冷却系统传热传质性能的优化准则.

夏少军等人^[155]将有限时间热力学和质量积耗散极值原理^[27-31]相结合, 在传质量一定的条件下以积耗散最小为目标优化了扩散传质规律 $[g \propto \Delta(c)]$ (式中 $\Delta(c)$ 为浓度差)下单向等温传质过程, 结果表明对应于积耗散最小时的最优传质策略为高、低浓度侧关键组分浓度差的平方与高浓度侧惰性成分浓度的乘积为常数, 而对应于熵产生最小时高、低浓度侧关键组分的浓度差的平方与高浓度侧关键组分浓度之比为常数; 当传质过程不涉及能量转换时, 优化目标应选择积耗散最小较合适, 浓度差为常数的传质策略优于浓度比为常数的传质策略. 此外, 本文作者还进一步研究了传质规律^[156]和质漏对单向等温传质过程积耗散最小化的影响, 并以积耗散最小为目标对等温节流^[473]、双向等温传质^[472]、等温结晶^[474]等传质过程进行了优化.

8 电容器充电过程动态优化

文献^[548-551,553]在不同时期分别研究了常电阻常电容条件下简单RC电路的电容器充电问题, 结果表明电路焦耳热耗散最小时电源电压最优时间路径由3

段组成, 包括初态瞬时增加段、中间线性增加段以及末态瞬时降低段. Desoete和de Vos^[552]用一个MOS三极管代替RC电路中的常电阻器, 研究了电路的焦耳热耗散最小优化问题, 限于问题的复杂性不存在解析解, 采用HSpice软件对电路进行了仿真研究. De Vos和Desoete^[554]进一步考虑电阻器的非线性特性, 研究了“差函数”和“函数差”两种非线性电流传输规律下RC电路中常电容器充电过程焦耳热耗散最小化. De Vos和Desoete^[556]进一步研究了两个电容器和两个电阻器下串联型和并联型复杂电路, 以焦耳热耗散最小为目标对电容器充电过程进行了优化. Paul等人^[555]考虑大规模集成电路(VLSI)中电容器的非线性特性, 分别以充电时间最短和焦耳热耗散最小为目标优化了简单RC电路中非线性电容器充电过程. Paul等人^[555]和陈金灿^[557]研究了包含一个旁通电阻器 R_1 的RC电路中常电容器充电过程, 得到了对应于电路焦耳热耗散最小时电源电压最优时间路径. Branoga^[558]在文献^[555,557]的基础上, 进一步考虑在电路中串联一个电感器 L , 研究了该LRC电路中常电容器充电过程焦耳热耗散最小化.

在文献^[548~558]的基础上, Xia和Chen^[611]首先同时考虑电阻器和电容器的非线性特性, 研究了图15(a) RC电路中非线性电容器充电过程, 分别以充电时间最短和电路焦耳热耗散最小为目标进行了优化; 然后考虑电容器的非线性特性, 研究了图15(b)中存在旁通电阻器的RC电路和图15(c)中存在旁通电阻器的LRC电路中电容器充电过程, 以电路焦耳热耗散最小为目标进行了优化, 得到的主要结论如下.

(1) 非线性阻容RC电路电容器充电时间最短时电源电压最优时间路径包含初态和末态的瞬时变化段和中间的恒电压段, 该路径与电阻器和电容器的非线性特性均无关, 过程的充电效率也仅与电容器的非线性有关.

(2) 当电路时间常数与充电过程时间比值较小时, 线性电压充电策略优于恒电压充电策略, 反之, 当电路时间常数与充电过程时间比值较大时, 恒电压充电策略优于线性电压充电策略; 恒电压充电策略下的充电效率不可能超过50%, 而线性充电策略和焦耳热耗散最小的充电策略下充电过程效率在时间常数与充电时间比值较小可以接近于1.

(3) 当电阻为常数或电流传输规律为“差函数”形式时, RC电路焦耳热耗散最小时电源电压和电容器电

图 15 各种形式的电容器充电电路

压之差为常数, 此性质与电容器特性无关, 此时电容器电压随时间的最优变化规律与电阻器特性也无关.

(4) 电容器的非线性特性和旁通电阻器等均对电路的工作特性曲线和参数的最优选择有显著影响, 因此研究电容器的非线性特性和旁通电阻器等对电路焦耳热耗散最小时的优化结果影响是十分有必要的; 存在旁通电阻器的LRC电路和存在旁通电阻器的RC电路两者焦耳热耗散最小时的电容器电压随时间变化规律相同, 与电感器无关; 电容器充电电路中串联电感增加了电路焦耳热耗散, 降低了充电效率.

9 贸易过程动态优化

温度差 ΔT 驱动热流 q , 价格差 ΔP 驱动商品流 n , 热力学中描述热力系统所处状态的物理量包括广延量(如质量、体积、内能、熵等)和强度量(如温度、压力、化学势等), 同样经济学中描述经济系统所处状态的物理量也包括广延量(如劳动力、资本、商品数量)和强度量(如价格), 经济学和热力学的相似性和类比研究受到了大量学者的关注.

Rozonoer^[565~567]全面地研究了可逆热力学和经济学的相似性, 并建议将热力学方法应用于经济系统的研究称为“资源经济学”. Saslow^[569]基于经济学与热力学的类比关系, 导出了经济学中的“自由能”、“麦克斯韦关系式”和“吉布斯-杜亥姆方程式”. Martínás^[570]研究了不可逆热力学和不可逆经济学之间的异同点. Tsirlin等人^[571~573]、Amel'kin等人^[575]和Tsirlin^[582]建立了微观经济学和不可逆热力学类比关系, 定义了经济学中度量商品交换过程不可逆性的物理量——资本耗散, 它类似于热力学中的物理量熵产. Tsirlin^[60~63,568]和Mironova等人^[69]首先将有限时间热力学的研究思路和方法应用于经济学, 考虑有限速率商品流, 研究了线性传输规律 $[n \propto \Delta(P)]$ 下贸易过程资本耗散最小化. Xia

等人^[583,612]进一步对图16所示一类简单贸易过程进行了研究, 引入供需价格弹性的影响, 考虑两经济系统间资源交换服从 $[n \propto \Delta(P^m)]$ 传输规律^[579~581], 应用最优控制理论导出对应贸易过程资本耗散最小时的最优交易策略, 并研究了图17所示存在商品流漏的贸易过程资本耗散最小化问题, 结果表明, $[n \propto \Delta(P^m)]$ 传输规律下贸易过程资本耗散最小时商品流率与企业商品价格的 $(m-1)/2$ 次幂之比为常数; 相比企业价格一定的交易策略, 商品流率一定的交易策略较为接近资本耗散最小时的最优策略; 传输规律和商品流漏均显著影响贸易过程资本耗散最小时生产商和企业中商品价格最优构型, 因此研究传输规律和商品流漏对贸易过程资本耗散最小化是十分有必要的。

10 结论

综上所述, 有限时间热力学和熵产生最小化理论经过40余年的发展已较为成熟, 焓理论的建立为传热传质过程优化提供了不同于熵产生最小化的新视角, 广义热力学优化理论的发展方兴未艾。一方面, 广义热力学优化理论是有限时间热力学理论的进一步深化和发展, 可采用交叉、类比、移植的方法, 将研究对象和研究内容从传统的传热传质过程的有限时间热力学进

图 16 一类简单贸易过程模型

图 17 存在商品流漏的贸易过程模型

一步拓展到化学过程^[613~620]、电容器充电电路、经济贸易过程和钢铁生产流程^[621,622]等非传统研究对象的广义热力学优化, 进行深入、细化研究, 从而建立各类过程和系统的设计和优化准则。另一方面, 通过本文的分析可看出, 各类传输过程和能量转换系统间的相似性是显著存在的, 从而可基于广义热力学优化的研究思想, 注重多学科交叉融合研究, 追求物理模型的一致性, 优化方法的通用型和优化结果的普适性^[584], 从而有利于指导现有热力学优化各分支方向开展深入、系统的研究, 同时对于热力学优化理论研究对象的进一步拓广具有非常重要的基础性作用, 促进热力学优化理论成体系地向前发展和完善。

致谢 两位审稿人对本文提出了细心、无私和充满建设性的意见, 在此致以诚挚的谢意!

参考文献

- 1 Bergles A E. Application of Heat Transfer Augmentation. New York: McGraw-Hill, 1981
- 2 Webb R L. Principle of Enhanced Heat Transfer. New York: John Wiley & Sons, 1994
- 3 Bergles A E. Heat transfer enhancement—The encouragement and accommodation of high heat fluxes. *J Heat Transfer*, 1997, 119: 8
- 4 Andresen B, Berry R S, Nitzan A, et al. Thermodynamics in finite time. I. The step-Carnot cycle. *Phys Rev A*, 1977, 15: 2086–2093
- 5 Salamon P, Andresen B, Berry R S. Thermodynamics in finite time. II. Potentials for finite-time processes. *Phys Rev A*, 1977, 15: 2094–2102
- 6 Andresen B, Salamon P, Berry R S. Thermodynamics in finite time: Extremals for imperfect heat engines. *J Chem Phys*, 1977, 66: 1571–1577
- 7 Bejan A. The concept of irreversibility in heat exchanger design: Counterflow heat exchangers for gas-to-gas applications. *J Heat Transfer*, 1977, 99: 374–380
- 8 Bejan A. Second law analysis in heat transfer. *Energy*, 1980, 5: 720–732
- 9 Bejan A. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. New York: Wiley, 1982
- 10 Bejan A. Entropy Generation Minimization. Boca Raton FL: CRC Press, 1996
- 11 陈林根, 孙丰瑞, Wu C. 有限时间热力学理论和应用的发展现状. *物理学进展*, 1998, 18: 395–422
- 12 Chen L G, Bi Y H, Wu C. The influence of nonlinear flow resistance relations on the power and efficiency from fluid flow. *J Phys D-Appl Phys*,

- 1999, 32: 1346–1349
- 13 陈林根. 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析. 博士学位论文. 武汉: 海军工程学院, 1998
 - 14 Rubin M H. Optimal configuration of a class of irreversible heat engines. I. *Phys Rev A*, 1979, 19: 1272–1276
 - 15 陈林根, 夏少军. 不可逆过程的广义热力学动态优化. 北京: 科学出版社, 2017
 - 16 陈林根, 夏少军. 不可逆循环的广义热力学动态优化——热力与化学理论循环. 北京: 科学出版社, 2017
 - 17 陈林根, 夏少军. 不可逆循环的广义热力学动态优化——工程热力装置与广义机循环. 北京: 科学出版社, 2018
 - 18 过增元, 李志信, 周森泉. 换热器中的温差场均匀性原则. 中国科学E辑: 技术科学, 1996, 26: 25–31
 - 19 Guo Z Y, Zhou S Q, Li Z X, et al. Theoretical analysis and experimental confirmation of the uniformity principle of temperature difference field in heat exchanger. *Int J Heat Mass Transfer*, 2002, 45: 2119–2127
 - 20 过增元, 魏澍, 程新广. 换热器强化的场协同原则. 科学通报, 2003, 48: 2324–2327
 - 21 Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement. *Int J Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 2221–2225
 - 22 过增元. 对流换热的物理机制及其控制: 速度场与热流场的协同. 科学通报, 2000, 45: 2118–2122
 - 23 过增元, 梁新刚, 朱宏晖. 焔——描述物体传递热量能力的物理量. 自然科学进展, 2006, 16: 1288–1296
 - 24 Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entransy—A physical quantity describing heat transfer ability. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007, 50: 2545–2556
 - 25 过增元. 热学中的新物理量. 工程热物理学报, 2008, 29: 112–114
 - 26 过增元, 程新广, 夏再忠. 最小热量传递势容耗散原理及其在导热优化中的应用. 科学通报, 2003, 48: 21–25
 - 27 陈群, 任建勋. 传质势容耗散极值原理及通风排污过程的优化. 工程热物理学报, 2007, 28: 505–507
 - 28 Chen Q, Ren J X, Guo Z Y. Field synergy analysis and optimization of decontamination ventilation designs. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51: 873–881
 - 29 Chen Q, Meng J A. Field synergy analysis and optimization of the convective mass transfer in photocatalytic oxidation reactors. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51: 2863–2870
 - 30 陈群, 任建勋, 过增元. 质量积耗散极值原理及其在空间站通风排污过程优化中的应用. 科学通报, 2009, 54: 1606–1612
 - 31 陈群, 任建勋, 过增元. 流体流动场协同原理及其在减阻中的应用. 科学通报, 2008, 53: 489–492
 - 32 程雪涛, 董源, 梁新刚. 积与积减原理. 物理学报, 2011, 60: 114402
 - 33 程雪涛, 徐向华, 梁新刚. 广义流动中的积原理. 物理学报, 2011, 60: 118103
 - 34 Cheng X T, Wang W H, Liang X G. Entransy analysis of open thermodynamic systems. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2934–2940
 - 35 Cheng X T, Liang X G. Entransy loss in thermodynamic processes and its application. *Energy*, 2012, 44: 964–972
 - 36 Carnot S. Reflections on the Motive Power of Heat. Paris: Bachelier, 1824
 - 37 Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. I. *Phys Rev*, 1931, 37: 405–426
 - 38 Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. II. *Phys Rev*, 1931, 38: 2265–2279
 - 39 曾丹苓. 工程非平衡热力学. 北京: 科学出版社, 1991
 - 40 Novikov I I. The efficiency of atomic power stations (A review). *J Nucl Energy (1954)*, 1958, 7: 125–128
 - 41 Chambadal P. Les Centrales Nucleases. Paris: Armand Colin, 1957. 41–58
 - 42 El-Wakil M W. Nuclear Power Engineering. New York: McGraw-Hill, 1962
 - 43 Chambadal P. Envolution et Applications du Concept d' Entropie. Paris: Dunod, 1963
 - 44 Vukalovich M P, Novikov I. Thermodynamics. Moscow: Mashinostroenie, 1972
 - 45 Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am J Phys*, 1975, 43: 22–24
 - 46 Bejan A. Engineering advances on finite-time thermodynamics. *Am J Phys*, 1994, 62: 11–12
 - 47 Bejan A. Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes. *J Appl Phys*, 1996, 79: 1191–1218
 - 48 Moreau M, Gaveau B, Schulman L S. Stochastic dynamics, efficiency and sustainable power production. *Eur Phys J D*, 2011, 62: 67–71
 - 49 Vaudrey A, Lanzetta F, Feidt M. H. B. Reitlinger and the origins of the efficiency at maximum power formula for heat engines. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2014, 39: 199–204
 - 50 Yvon Y. The Scalay reactor: Two years experience on heat transfer by means of compressed gas. In: Proceedings of the International conference on peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, 1955. 387
 - 51 Reitlinger H B. Sur l'utilisation de la Chaleur Dans Les Machines a Feu. Liege: Vaillant-Carmanne, 1929

- 52 de Vos A. Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion. Oxford: Oxford University, 1992
- 53 Petrescu S, Costea M. Development of Thermodynamics with Finite Speed and Direct Method. Bucuresti: Editura AGIR, 2012
- 54 Grazzini G. Work from irreversible heat engines. *Energy*, 1991, 16: 747–755
- 55 Lu P C. Thermodynamics with finite heat-transfer area or finite surface thermodynamics. Thermodynamics and the design, analysis, and improvement of energy systems. ASME Adv Energy Syst Div Pub AES, 1995, 35: 51–60
- 56 吴锋, 陈林根, 孙丰瑞, 等. 斯特林机的有限时间热力学优化. 北京: 化学工业出版社, 2008
- 57 陈林根. 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, 2005
- 58 Wu C, Chen L G, Chen J C. Recent Advances in Finite Time Thermodynamics. New York: Nova Science Publishers, 1999. 1–35
- 59 Tsirlin A M. Optimal Cycles and Cycle Regimes. Moscow: Energomizdat, 1985
- 60 Tsirlin A M. Methods of Averaging Optimization and Their Application. Moscow: Physical and Mathematical Literature Publishing Company, 1997
- 61 Tsirlin A M. Optimization Methods in Thermodynamics and Microeconomics. Moscow: Nauka, 2002
- 62 Tsirlin A M. Irreversible Estimates of Limiting Possibilities of Thermodynamic and Microeconomic Systems. Moscow: Nauka, 2003
- 63 Tsirlin A M. Optimization for Thermodynamic and Economic Systems. Moscow: Nauka, 2011
- 64 Sieniutycz S, Salamon P. Advances in Thermodynamics. Volume 4: Finite Time Thermodynamics and Thermoeconomics. New York: Taylor & Francis, 1990
- 65 Sieniutycz S, Jezowski J. Energy Optimization in Process Systems. Oxford: Elsevier, 2009
- 66 Sieniutycz S, Farkas H. Variational and Extremum Principles in Macroscopic Systems. London: Elsevier Science Publishers, 2005
- 67 Sieniutycz S, de Vos A. Thermodynamics of Energy Conversion and Transport. New York: Springer-Verlag, 2000
- 68 Senft J R. Mechanical Efficiency of Heat Engines. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 69 Mironova V A, Amelkin S A, Tsirlin A M. Mathematical Methods of Finite Time Thermodynamics. Moscow: Khimia, 2000
- 70 Gordon J M, Ng K C. Cool Thermodynamics. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd., 2000
- 71 Feidt M. Thermodynamique et Procédés. Paris: Technique et Documentation, Lavoisier, 1987
- 72 Feidt M. Thermodynamique et Optimisation Energetique des Systems et Procédés. Paris: Technique et Documentation, Lavoisier, 1996
- 73 de Vos A. Thermodynamics of Solar Energy Conversion. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2008
- 74 Chen L G, Sun F R. Advances in Finite Time Thermodynamics: Analysis and Optimization. New York: Nova Science Publishers, 2004
- 75 Berry R S, Kazakov V A, Sieniutycz S, et al. Thermodynamic Optimization of Finite Time Processes. Chichester: Wiley, 1999
- 76 Andresen B. Finite-Time Thermodynamics. Copenhagen: Physics Laboratory II, University of Copenhagen, 1983
- 77 Sieniutycz S, Jezowski J. Energy Optimization in Process Systems and Fuel Cells. Oxford, UK: Elsevier, 2013
- 78 Medina A, Curto-Risso P L, Calvo-Hernández A, et al. Quasi-Dimensional Simulation of Spark Ignition Engines. From Thermodynamic Optimization to Cyclic Variability. London: Springer, 2014
- 79 Dincer I, Zamfirescu C. Advanced Power Generation Systems. London: Elsevier, 2014
- 80 Winterbone D E, Ali Turan A. Advanced Thermodynamics for Engineers. 2nd ed. London: Elsevier, 2015
- 81 Andresen B, Salamon P, Berry R S. Thermodynamics in finite time. *Phys Today*, 1984, 37: 62–70
- 82 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 能量系统有限时间热力学的现状和展望. *力学进展*, 1992, 22: 479–488
- 83 Wu C, Kiang R L, Lopardo V J, et al. Finite-time thermodynamics and endoreversible heat engines. *Int J Mech Eng Educat*, 1993, 21: 337–346
- 84 Petrescu S, Harman C. The connection between the first law and second law of thermodynamics for processes with finite speed—A direct method for approaching and optimization of irreversible processes. *J Heat Transfer Soc Japan*, 1994, 33: 60–67
- 85 Andresen B. Finite-time thermodynamics and thermodynamic length. *Rev Gen Therm*, 1996, 35: 647–650
- 86 Hoffmann K H, Burzler J M, Schubert S. Endoreversible thermodynamics. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1997, 22: 311–355
- 87 Chen L G, Wu C, Sun F R. Finite time thermodynamic optimization or entropy generation minimization of energy systems. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1999, 24: 327–359
- 88 Sieniutycz S. Hamilton-Jacobi-Bellman framework for optimal control in multistage energy systems. *Phys Rep*, 2000, 326: 165–258
- 89 Salamon P, Nulton J D, Siragusa G, et al. Principles of control thermodynamics. *Energy*, 2001, 26: 307–319
- 90 陈林根, 孙丰瑞. 有限时间热力学研究的一些进展. *海军工程大学学报*, 2001, 13: 41–46, 62
- 91 Hoffmann K H, Burzler J, Fischer A, et al. Optimal process paths for endoreversible systems. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2003, 28: 233–268

- 92 Muschik W, Hoffmann K H. Endoreversible thermodynamics: A tool for simulating and comparing processes of discrete systems. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2006, 31: 293–317
- 93 Feidt M L. Optimal use of energy systems and processes. *Int J Exergy*, 2008, 5: 500–531
- 94 Hoffman K H. An introduction to endoreversible thermodynamics. In: Atti dell'Accademia Peloritana dei Pericolanti Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, vol LXXXVI. Messina, 2008. C1S0801011-1–18
- 95 Tsirlin A M. Problems and methods of averaged optimization. *Proc Steklov Inst Math*, 2008, 261: 270–286
- 96 Schön J C. Finite-time thermodynamics and the optimal control of chemical syntheses. *Z Anorg Allg Chem*, 2009, 635: 1794–1806
- 97 Feidt M. Thermodynamics applied to reverse cycle machines, a review. *Int J Refrig*, 2010, 33: 1327–1342
- 98 Andresen B. Current trends in finite-time thermodynamics. *Angew Chem Int Ed*, 2011, 50: 2690–2704
- 99 林国星, 陈金灿. 多种能量转换系统的性能优化与参数设计的研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50: 227–238
- 100 Feidt M. Thermodynamics of energy systems and processes: A review and perspectives. *J Appl Fluid Mech*, 2012, 5: 85–98
- 101 Tu Z C. Recent advance on the efficiency at maximum power of heat engines. *Chin Phys B*, 2012, 21: 020513
- 102 王文华, 陈林根, 戈延林, 等. 燃气轮机循环有限时间热力学研究新进展. 热力透平, 2012, 41: 171–178, 208
- 103 吴锋, 李青, 郭方中, 等. 热声理论的研究进展. 武汉工程大学学报, 2012, 34: 1–6
- 104 张万里, 陈林根, 韩文玉, 等. 正反向布雷顿循环有限时间热力学分析与优化研究进展. 燃气轮机技术, 2012, 25: 1–11
- 105 Feidt M. Evolution of thermodynamic modelling for three and four heat reservoirs reverse cycle machines: A review and new trends. *Int J Refrig*, 2013, 36: 8–23
- 106 Qin X Y, Chen L G, Ge X Y, et al. Finite time thermodynamic studies on absorption thermodynamic cycles: A state-of-the-art review. *Arab J Sci Eng*, 2013, 38: 405–419
- 107 Tsirlin A M, Grigorevsky I N. Minimum dissipation conditions of the mass transfer and optimal separation sequence selection for multicomponent mixtures. In: Nakajima H, ed. Mass Transfer. Rijeka, Croatia: InTech-Open Access Publisher, 2013
- 108 李俊, 陈林根, 戈延林, 等. 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. 物理学报, 2013, 62: 130501
- 109 Hoffmann K H, Andresen B, Salamon P. Finite-time thermodynamics tools to analyze dissipative processes. In: Dinner A R, Rice S A, eds. Proceedings of The 240 Conference: Science's Great Challenges, Advances in Chemical Physics, Volume 157. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015. 57–67
- 110 丁泽民, 陈林根, 王文华, 等. 三类型能量转换系统有限时间热力学性能优化的研究进展. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 889–918
- 111 Chen L G, Meng F K, Sun F R. Thermodynamic analyses and optimization for thermoelectric devices: The state of the arts. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 442–455
- 112 Ge Y L, Chen L G, Sun F R. Progress in finite time thermodynamic studies for internal combustion engine cycles. *Entropy*, 2016, 18: 139
- 113 Goold J, Huber M, Riera A, et al. The role of quantum information in thermodynamics—A topical review. *J Phys A-Math Theor*, 2016, 49: 143001
- 114 王晶. 强化传热技术是否真正节能? 科学通报, 2015, 60: 1748
- 115 Wenterodt T, Redecker C, Herwig H. Second law analysis for sustainable heat and energy transfer: The entropic potential concept. *Appl Energy*, 2015, 139: 376–383
- 116 老大中. 变分法基础. 北京: 国防工业出版社, 2007
- 117 胡寿松, 王执铨, 胡维礼. 最优控制理论与系统. 北京: 科学出版社, 2005
- 118 Pontryagin L S, Boltyanski V A, Gamkrelidze R V, et al. The Mathematical Theory of the Optimal Process. New York: Wiley, 1962
- 119 Bellman R E. Adaptive Control Process: A Guided Tour. New York: Princeton University Press, 1961
- 120 陈文振. 相变材料接触熔化的研究. 博士学位论文. 武汉: 华中理工大学, 1994
- 121 Nummedal L. Entropy production minimization of chemical reactors and heat exchangers. Dissertation for Doctoral Degree. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2001
- 122 Johannessen E. The state of minimizing entropy production in an optimally controlled systems. Dissertation for Doctoral Degree. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2004
- 123 Linetskii S B, Tsirlin A M. Evaluating thermodynamic efficiency and optimizing heat exchangers. *Thermal Eng*, 1988, 35: 593–597
- 124 Andresen B, Gordon J M. Optimal heating and cooling strategies for heat exchanger design. *J Appl Phys*, 1992, 71: 76–79
- 125 Andresen B, Gordon J M. Optimal paths for minimizing entropy generation in a common class of finite-time heating and cooling processes. *Int J*

- Heat Fluid Flow, 1992, 13: 294–299
- 126 徐志明, 扬善让, 陈钟顺. 换热器最优参数的变分解法. 化工学报, 1995, 46: 75–80
- 127 Amel'kin S A, Hoffmann K H, Sicre B, et al. Extreme performance of heat exchangers of various hydrodynamic models of flows. Period Polytech Ser Chem Eng, 2000, 44: 3–16
- 128 Amel'kin S A, Tsirlin A M. Ultimate capabilities of heat exchangers with different flow models of the media. Thermal Eng, 2001, 48: 410–414
- 129 Nummedal L, Kjelstrup S. Equipartition of forces as a lower bound on the entropy production in heat exchange. Int J Heat Mass Transfer, 2001, 44: 2827–2833
- 130 Tsirlin A M, Kazakov V. Realizability areas for thermodynamic systems with given productivity. J Non-Equilib Thermodyn, 2002, 27: 91–103
- 131 Johannessen E, Nummedal L, Kjelstrup S. Minimizing the entropy production in heat exchange. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45: 2649–2654
- 132 Balkan F. Comparison of entropy minimization principles in heat exchange and a short-cut principle: EoTD. Int J Energy Res, 2003, 27: 1003–1014
- 133 Badescu V. Optimal strategies for steady state heat exchanger operation. J Phys D-Appl Phys, 2004, 37: 2298–2304
- 134 Badescu V. Optimal paths for minimizing lost available work during usual finite-time heat transfer processes. J Non-Equilib Thermodyn, 2004, 29: 53–73
- 135 Balkan F. Application of EoEP principle with variable heat transfer coefficient in minimizing entropy production in heat exchangers. Energy Convers Manage, 2005, 46: 2134–2144
- 136 Tsirlin A M, Akhremenkov A A, Grigorevskii I N. Minimal irreversibility and optimal distributions of heat transfer surface area and heat load in heat transfer systems. Theor Found Chem Eng, 2008, 42: 203–210
- 137 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. $q \propto (\Delta(T^n))^m$ 传热规律下换热过程最小熵产生优化. 热科学与技术, 2008, 7: 226–230
- 138 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 换热器焓耗散最小优化. 科学通报, 2009, 54: 2240–2246
- 139 Chen L G, Xia S J, Sun F R. Optimal paths for minimizing entropy generation during heat transfer processes with a generalized heat transfer law. J Appl Phys, 2009, 105: 044907
- 140 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Optimal paths for minimizing lost available work during heat transfer processes with a generalized heat transfer law. Braz J Phys, 2009, 39: 99–106
- 141 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Optimal paths for minimizing entransy dissipation during heat transfer processes with generalized radiative heat transfer law. Appl Math Model, 2010, 34: 2242–2255
- 142 Gordon J M, Rubinstein I, Zarmi Y. On optimal heating and cooling strategies for melting and freezing. J Appl Phys, 1990, 67: 81–84
- 143 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 液-固相变过程焓耗散最小化. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 1521–1529
- 144 Badescu V. Optimal control of forced cool-down processes. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48: 741–748
- 145 Santoro M, Schön J C, Jansen M. Finite-time thermodynamics and the gas-liquid phase transition. Phys Rev E, 2007, 76: 61120
- 146 马康, 陈林根, 孙丰瑞. 强迫冷却过程冷却流体质量最小化新析. 工程热物理学报, 2010, 31: 1089–1092
- 147 Bi Y H, Guo T, Zhang L, et al. Entropy generation minimization for charging and discharging processes in a gas-hydrate cool storage system. Appl Energy, 2010, 87: 1149–1157
- 148 Kolin'ko N A, Tsirlin A M. An inverse optimal control problem for a class of controlled systems. Autom Remote Control, 2002, 63: 1343–1350
- 149 Tsirlin A M, Kazakov V, Kolin'ko N A. A minimal dissipation type-based classification in irreversible thermodynamics and microeconomics. Eur Phys J B-Condensed Matter, 2003, 35: 565–570
- 150 Xie Z H, Xia S J, Chen L G, et al. An inverse optimization for minimizing entransy dissipation during heat transfer processes. In: 2017 American Society of Thermal and Fluids Engineers (ASTFE) Conference and 4th International Workshop on Heat Transfer (IWHT). Las Vegas, NV, 2017. TFEC-IWHT2017-18312
- 151 Tsirlin A M. Optimum control of irreversible thermal and mass-transfer processes. Sov J Comput System Sci, 1992, 30: 23–31
- 152 Tsirlin A M, Kazakov V A, Berry R S. Finite-time thermodynamics: Limiting performance of rectification and minimal entropy production in mass transfer. J Phys Chem, 1994, 98: 3330–3336
- 153 Mironova V A. Thermodynamic optimization of a crystallization process. Russ Chem Ind, 1994, 26: 77–81
- 154 Tsirlin A M, Mironova V A, Amelkin S A, et al. Finite-time thermodynamics: Conditions of minimal dissipation for thermodynamic process with given rate. Phys Rev E, 1998, 58: 215–223
- 155 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 一类单向等温传质过程熵耗散最小化. 中国科学: 技术科学, 2011, 41: 515–524

- 156 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Entropy dissipation minimization for one-way isothermal mass transfer processes with a generalized mass transfer law. *Sci Iran Trans C-Chem Eng*, 2012, 19: 1616–1625
- 157 Teodoros L, Andresen B. Optimal control configuration of heating and humidification processes. Part I. *UPB Sci Bull Ser D*, 2011, 73: 3–16
- 158 Teodoros L, Andresen B. Optimal control configuration of heating and humidification processes. Part II. *UPB Sci Bull Ser D*, 2011, 73: 79–88
- 159 Bi Y H, Chen L G, Sun F R. Thermodynamic optimization for crystallization process of gas hydrate. *Int J Energy Res*, 2012, 36: 269–276
- 160 Andresen B. Finite-Time Thermodynamics. Dissertation for Doctoral Degree. Denmark: University of Copenhagen, 1983
- 161 李俊. 传热规律对正、反向热力循环最优性能和最优构型的影响. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2010
- 162 Gutkowicz-Krusin D, Procaccia I, Ross J. On the efficiency of rate processes. Power and efficiency of heat engines. *J Chem Phys*, 1978, 69: 3898–3906
- 163 Salamon P, Nitzan A. Finite time optimizations of a Newton's law Carnot cycle. *J Chem Phys*, 1981, 74: 3546–3560
- 164 Rubin M H. Optimal configuration of an irreversible heat engine with fixed compression ratio. *Phys Rev A*, 1980, 22: 1741–1752
- 165 Salamon P, Nitzan A, Andresen B, et al. Minimum entropy production and the optimization of heat engines. *Phys Rev A*, 1980, 21: 2115–2129
- 166 Song H J, Chen L G, Li J, et al. Optimal configuration of a class of endoreversible heat engines with linear phenomenological heat transfer law [$q \propto \Delta(T^{-1})$]. *J Appl Phys*, 2006, 100: 124907
- 167 Song H J, Chen L G, Sun F R. Endoreversible heat-engines for maximum power-output with fixed duration and radiative heat-transfer law. *Appl Energy*, 2007, 84: 374–388
- 168 Li J, Chen L G, Sun F R. Optimal configuration of a class of endoreversible heat-engines for maximum power-output with linear phenomenological heat-transfer law. *Appl Energy*, 2007, 84: 944–957
- 169 宋汉江, 陈林根, 孙丰瑞. 辐射传热条件下一类内可逆热机最大效率时的最优构型. 中国科学G辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1083–1096
- 170 Song H J, Chen L G, Sun F R, et al. Configuration of heat engines for maximum power output with fixed compression ratio and generalized radiative heat transfer law. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2008, 33: 275–295
- 171 Chen L G, Song H J, Sun F R, et al. Optimal configuration of heat engines for maximum power output with generalised radiative heat transfer law. *Int J Ambient Energy*, 2009, 30: 137–160
- 172 Chen L G, Song H J, Sun F R, et al. Optimal configuration of heat engines for maximum efficiency with generalized radiative heat transfer law. *Rev Mex Fis*, 2009, 55: 55–67
- 173 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*, 1983, 78: 4721–4727
- 174 Orlov V N. Optimum irreversible Carnot cycle containing three isotherms. *Sov Phys Dokl*, 1985, 30: 506–508
- 175 熊国华, 陈金灿, 严子浚. 热传递规律对广义卡诺循环性能的影响. 厦门大学学报, 1989, 28: 489–493
- 176 Yan Z, Chen J. Optimal performance of a generalized Carnot cycle for another linear heat transfer law. *J Chem Phys*, 1990, 92: 1994–1998
- 177 陈林根, 陈少堂, 孙丰瑞, 等. 一类与传热定律无关的内可逆热机最优构型. 燃气轮机技术, 1993, 6: 20–23
- 178 de Parga G A, Angulo-Brown F, Navarrete-González T D. A variational optimization of a finite-time thermal cycle with a nonlinear heat transfer law. *Energy*, 1999, 24: 997–1008
- 179 Angulo-Brown F, de Parga G A, Arias-Hernández L A. A variational approach to ecological-type optimization criteria for finite-time thermal engine models. *J Phys D-Appl Phys*, 2002, 35: 1089–1093
- 180 Chen L G, Zhou S B, Sun F R, et al. Optimal configuration and performance of heat engines with heat leak and finite heat capacity. *Open Syst Inf Dyn*, 2002, 09: 85–96
- 181 Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, et al. Optimal configuration and performance for a generalized Carnot cycle assuming the heat-transfer law $Q \propto (\Delta T)^m$. *Appl Energy*, 2004, 78: 305–313
- 182 Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, et al. Effect of mixed heat-resistances on the optimal configuration and performance of a heat-engine cycle. *Appl Energy*, 2006, 83: 537–544
- 183 Chen L G, Sun F R, Wu C. Optimal configuration of a two-heat-reservoir heat-engine with heat-leak and finite thermal-capacity. *Appl Energy*, 2006, 83: 71–81
- 184 李俊, 陈林根, 孙丰瑞. 复杂传热规律下有限高温热源热机循环的最优构型. 中国科学G辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39: 255–259
- 185 Rubin M H, Andresen B. Optimal staging of endoreversible heat engines. *J Appl Phys*, 1982, 53: 1–7

- 186 Amelkin S A, Andresen B, Burzler J M, et al. Maximum power processes for multi-source endoreversible heat engines. *J Phys D-Appl Phys*, 2004, 37: 1400–1404
- 187 Amelkin S A, Andresen B, Burzler J M, et al. Thermo-mechanical systems with several heat reservoirs: Maximum power processes. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2005, 30: 67–80
- 188 Tsirlin A M, Kazakov V, Ahremenkov A A, et al. Thermodynamic constraints on temperature distribution in a stationary system with heat engine or refrigerator. *J Phys D-Appl Phys*, 2006, 39: 4269–4277
- 189 Chen L G, Li J, Sun F R. Optimal temperatures and maximum power output of a complex system with linear phenomenological heat transfer law. *Therm Sci*, 2009, 13: 33–40
- 190 宋汉江. 一类热力和化学过程与系统的最优构型. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2008
- 191 Orlov V N, Berry R S. Power output from an irreversible heat engine with a nonuniform working fluid. *Phys Rev A*, 1990, 42: 7230–7235
- 192 Orlov V N, Berry R S. Analytical and numerical estimates of efficiency for an irreversible heat engine with distributed working fluid. *Phys Rev A*, 1992, 45: 7202–7206
- 193 Orlov V N, Berry R S. Power and efficiency limits for internal combustion engines via methods of finite-time thermodynamics. *J Appl Phys*, 1993, 74: 4317–4322
- 194 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热定律下具有非均匀工质的一类非回热不可逆热机最大功率输出. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1081–1089
- 195 Chen L G, Xia S J, Sun F R. Maximum efficiency of an irreversible heat engine with a distributed working fluid and linear phenomenological heat transfer law. *Rev Mex Fis*, 2010, 56: 231–238
- 196 Chen L G, Xia S J, Sun F R. Performance limits for a class of irreversible internal combustion engines. *Energy Fuels*, 2010, 24: 295–301
- 197 Band Y B, Kafri O, Salamon P. Maximum work production from a heated gas in a cylinder with piston. *Chem Phys Lett*, 1980, 72: 127–130
- 198 Aizenbud B M, Band Y B. Power considerations in the operation of a piston fitted inside a cylinder containing a dynamically heated working fluid. *J Appl Phys*, 1981, 52: 3742–3744
- 199 Band Y B, Kafri O, Salamon P. Finite time thermodynamics: Optimal expansion of a heated working fluid. *J Appl Phys*, 1982, 53: 8–28
- 200 Band Y B, Kafri O, Salamon P. Optimization of a model external combustion engine. *J Appl Phys*, 1982, 53: 29–33
- 201 Salamon P, Band Y B, Kafri O. Maximum power from a cycling working fluid. *J Appl Phys*, 1982, 53: 197–202
- 202 Aizenbud B M, Band Y B, Kafri O. Optimization of a model internal combustion engine. *J Appl Phys*, 1982, 53: 1277–1282
- 203 Gordon J M, Huleihil M. On optimizing maximum-power heat engines. *J Appl Phys*, 1991, 69: 1–7
- 204 Chen L G, Sun F R, Wu C. Optimal expansion of a heated working fluid with phenomenological heat transfer. *Energy Convers Manage*, 1998, 39: 149–156
- 205 Huleihil M, Andresen B. Optimal piston trajectories for adiabatic processes in the presence of friction. *J Appl Phys*, 2006, 100: 114914
- 206 Song H J, Chen L G, Sun F R. Optimal expansion of a heated working fluid for maximum work output with generalized radiative heat transfer law. *J Appl Phys*, 2007, 102: 094901
- 207 Song H J, Chen L G, Sun F R. Optimisation of a model external combustion engine with linear phenomenological heat transfer law. *J Energy Inst*, 2009, 82: 180–183
- 208 马康, 陈林根, 孙丰瑞. Dulong-Petit传热规律时加热气体的最优膨胀. *热能动力工程*, 2009, 24: 447–451
- 209 Chen L G, Song H J, Sun F R, et al. Optimisation of a model internal combustion engine with linear phenomenological heat transfer law. *Int J Ambient Energy*, 2010, 31: 13–22
- 210 Chen L G, Song H J, Sun F R, et al. Optimal expansion of a heated working fluid with convective-radiative heat transfer law. *Int J Ambient Energy*, 2010, 31: 81–90
- 211 马康, 陈林根, 孙丰瑞. 广义辐射传热定律时加热气体最优膨胀的一种新解法. *机械工程学报*, 2010, 46: 149–157
- 212 马康, 陈林根, 孙丰瑞. 辐射传热定律下活塞式外燃机最大输出功优化. *热能动力工程*, 2011, 26: 531–537
- 213 Chen L G, Ma K, Sun F R. Optimal expansion of a heated working fluid for maximum work output with time-dependent heat conductance and generalized radiative heat transfer law. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2011, 36: 99–122
- 214 Ma K, Chen L G, Sun F R. Optimization of a model external combustion engine for maximum work output with generalized radiative heat transfer law. *Int J Energy Environ*, 2011, 2: 723–738
- 215 Ma K, Chen L G, Sun F R. Optimisations of a model external combustion engine for maximum work output with generalised convective heat

- transfer law. *J Energy Ins*, 2011, 84: 227–235
- 216 马康. 发动机活塞运动与强迫冷却过程最优构型. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2010
- 217 Burzler J M. Performance optima for endoreversible systems. Dissertation for Doctoral Degree. Chemnitz: University of Chemnitz, 2002
- 218 Teh K Y. Thermodynamics of efficient, simple-cycle combustion engines. Dissertation for Doctoral Degree. Stanford: Stanford University, 2007
- 219 Miller S L. Theory and implementation of low-irreversibility chemical engines. Dissertation for Doctoral Degree. Stanford: Stanford University, 2009
- 220 戈延林. 不可逆内燃机循环性能有限时间热力学分析与优化. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2011
- 221 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热定律下Otto循环热机活塞运动的最优路径. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 698–708
- 222 Chen L G, Xia S J, Sun F R. Optimizing piston velocity profile for maximum work output from a generalized radiative law Diesel engine. *Math Comput Model*, 2011, 54: 2051–2063
- 223 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Engine performance improved by controlling piston motion: Linear phenomenological law system Diesel cycle. *Int J Thermal Sci*, 2012, 51: 163–174
- 224 Mozurkewich M, Berry R S. Finite-time thermodynamics: Engine performance improved by optimized piston motion. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1981, 78: 1986–1988
- 225 Mozurkewich M, Berry R S. Optimal paths for thermodynamic systems: The ideal Otto cycle. *J Appl Phys*, 1982, 53: 34–42
- 226 Hoffmann K H, Watowich S J, Berry R S. Optimal paths for thermodynamic systems: The ideal Diesel cycle. *J Appl Phys*, 1985, 58: 2125–2134
- 227 Blaudeck P, Hoffman K H. Optimization of the power output for the compression and power stroke of the Diesel engine. In: *Efficiency, Costs, Optimization and Environmental Impact of Energy Systems*. Istanbul, Turkey, 1995
- 228 Burzler J M, Hoffman K H. *Optimal Piston Paths for Diesel Engines*. New York: Springer, 2000
- 229 Teh K Y, Edwards C F. An optimal control approach to minimizing entropy generation in an adiabatic IC engine with fixed compression ratio. In: *Proceedings of IMECE2006, IMECE2006-13581, 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Chicago, 2006
- 230 Teh K Y, Edwards C F. Optimizing piston velocity profile for maximum work output from an IC engine. In: *Proceedings of IMECE2006, IMECE2006-13622, 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Chicago, 2006
- 231 Teh K Y, Edwards C F. An optimal control approach to minimizing entropy generation in an adiabatic internal combustion engine. In: *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*. San Diego, 2006. 6648–6653
- 232 Teh K Y, Miller S L, Edwards C F. Thermodynamic requirements for maximum internal combustion engine cycle efficiency. Part 2: Work extraction and reactant preparation strategies. *Int J Engine Res*, 2008, 9: 467–481
- 233 Teh K Y, Miller S L, Edwards C F. Thermodynamic requirements for maximum internal combustion engine cycle efficiency. Part 1: Optimal combustion strategy. *Int J Engine Res*, 2008, 9: 449–465
- 234 Teh K Y, Edwards C F. An optimal control approach to minimizing entropy generation in an adiabatic internal combustion engine. *J Dyn Sys Meas Control*, 2008, 130: 041008
- 235 Miller S L, Svrcek M N, Teh K Y, et al. Requirements for designing chemical engines with reversible reactions. *Energy*, 2011, 36: 99–110
- 236 戈延林, 陈林根, 孙丰瑞. 熵产生最小时不可逆Otto循环热机活塞运动最优路径. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, 40: 1115–1129
- 237 Ge Y L, Chen L G, Sun F R. Optimal paths of piston motion of irreversible Diesel cycle for minimum entropy generation. *Therm Sci*, 2011, 15: 975–993
- 238 Mozurkewich M, Berry R S. Optimization of a heat engine based on a dissipative system. *J Appl Phys*, 1983, 54: 3651–3661
- 239 Watowich S J, Hoffmann K H, Berry R S. Intrinsically irreversible light-driven engine. *J Appl Phys*, 1985, 58: 2893–2901
- 240 Watowich S J, Hoffmann K H, Berry R S. Optimal paths for a bimolecular, light-driven engine. *Nuov Cim B*, 1989, 104: 131–147
- 241 马康, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热定律下光驱动发动机的最优路径. *中国科学: 化学*, 2010, 40: 1035–1045
- 242 林国星. 传热、传质对三源热力循环性能影响的研究. 博士学位论文. 厦门: 厦门大学, 2003
- 243 夏丹. 有限速率传质正、反向等温化学循环最优特性. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2010
- 244 Gordon J M, Orlov V N. Performance characteristics of endoreversible chemical engines. *J Appl Phys*, 1993, 74: 5303–5309
- 245 Lin G, Chen J. Optimal analysis on the cyclic performance of a class of chemical pumps. *Appl Energy*, 2001, 70: 35–47
- 246 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Maximum power configuration for multireservoir chemical engines. *J Appl Phys*, 2009, 105: 124905
- 247 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Optimal configuration of a finite mass reservoir isothermal chemical engine for maximum work output with linear

- mass transfer law. *Rev Mex Fis*, 2009, 55: 399–408
- 248 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 有限势库化学机最大输出功时循环最优构型. *中国科学: 化学*, 2010, 40: 492–500
- 249 Xia D, Chen L G, Sun F R. Unified description of isothermal endoreversible chemical cycles with linear mass transfer law. *Int J Chem Reactor Eng*, 2011, 9: A106
- 250 Andresen B, Rubin M H, Berry R S. Availability for finite-time processes. General theory and a model. *J Phys Chem*, 1983, 87: 2704–2713
- 251 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Finite-time exergy with a finite heat reservoir and generalized radiative heat transfer law. *Rev Mex Fis*, 2010, 56: 287–296
- 252 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Effects of mass transfer laws on finite time exergy. *J Energy Inst*, 2010, 83: 210–216
- 253 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Finite time exergy with generalised heat transfer law. *J Energy Inst*, 2012, 85: 70–77
- 254 Tsirlin A M, Kazakov V. Maximal work problem in finite-time thermodynamics. *Phys Rev E*, 2000, 62: 307–316
- 255 Kubiak M. Thermodynamic limits for production and consumption of mechanical energy in theory of heat pumps and heat engines. Dissertation for Doctoral Degree. Poland: Warsaw University of Technology, 2005
- 256 Kuran P. Nonlinear models of production of mechanical energy in non-ideal generators driven by thermal or solar energy. Dissertation for Doctoral Degree. Poland: Warsaw University of Technology, 2006
- 257 Sieniutycz S. Thermodynamic limits on production or consumption of mechanical energy in practical and industrial systems. *Prog Energy Combust Sci*, 2003, 29: 193–246
- 258 Sieniutycz S. Hamilton-Jacobi-Bellman theory of dissipative thermal availability. *Phys Rev E*, 1997, 56: 5051–5064
- 259 Sieniutycz S. Irreversible carnot problem of maximum work in finite time via Hamilton-Jacobi-Bellman theory. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1997, 22: 260–284
- 260 Sieniutycz S, von Spakovsky M R. Finite time generalization of thermal exergy. *Energy Convers Manage*, 1998, 39: 1423–1447
- 261 Sieniutycz S. Generalized Carnot problem of maximum work in finite time via Hamilton-Jacobi-Bellman theory. *Energy Convers Manage*, 1998, 39: 1735–1743
- 262 Sieniutycz S. Hamilton-Jacobi-Bellman analysis of irreversible thermal exergy. *Int J Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 183–195
- 263 Szwast Z, Sieniutycz S. Optimization of multi-stage thermal machines by Pontryagin's like discrete maximum principle. In: Wu C, Chen L G, Chen J C, eds. *Recent Advances in Finite Time Thermodynamics*. New York: Nova Science Publishers, 1999. 221–237
- 264 Sieniutycz S. Thermodynamic framework for discrete optimal control in multiphase flow systems. *Phys Rev E*, 1999, 60: 1520–1534
- 265 Sieniutycz S. Endoreversible modeling and optimization of multi-stage thermal machines by dynamic programming. In: Wu C, Chen L G, Chen J C, eds. *Recent Advances in Finite Time Thermodynamics*. New York: Nova Science Publishers, 1999. 189–219
- 266 Li J, Chen L G, Sun F R. Extremal work of an endoreversible system with two finite thermal capacity reservoirs. *J Energy Inst*, 2009, 82: 53–56
- 267 Sieniutycz S, Szwast Z. Work limits in imperfect sequential systems with heat and fluid flow. *J Non-Equilib ThermoDyn*, 2003, 28: 85–114
- 268 Sieniutycz S. Limiting power in imperfect systems with fluid flow. *Arch Thermodyn*, 2004, 25: 69–80
- 269 Sieniutycz S. Development of generalized (rate dependent) availability. *Int J Heat Mass Transfer*, 2006, 49: 789–795
- 270 Li J, Chen L G, Sun F R. Optimum work in real systems with a class of finite thermal capacity reservoirs. *Math Comput Model*, 2009, 49: 542–547
- 271 Sieniutycz S, Kuran P. Nonlinear models for mechanical energy production in imperfect generators driven by thermal or solar energy. *Int J Heat Mass Transfer*, 2005, 48: 719–730
- 272 Sieniutycz S, Kuran P. Modeling thermal behavior and work flux in finite-rate systems with radiation. *Int J Heat Mass Transfer*, 2006, 49: 3264–3283
- 273 Sieniutycz S. Thermodynamic limits in applications of energy of solar radiation. *Drying Tech*, 2006, 24: 1139–1146
- 274 Sieniutycz S. Hamilton-Jacobi-Bellman equations and dynamic programming for power-maximizing relaxation of radiation. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007, 50: 2714–2732
- 275 Sieniutycz S. Dynamical converters with power-producing relaxation of solar radiation. *Int J Thermal Sci*, 2008, 47: 495–505
- 276 Sieniutycz S. Dynamic programming and Lagrange multipliers for active relaxation of resources in nonlinear non-equilibrium systems. *Appl Math Model*, 2009, 33: 1457–1478
- 277 Sieniutycz S. Dynamic bounds for power and efficiency of non-ideal energy converters under nonlinear transfer laws. *Energy*, 2009, 34: 334–340

- 278 Li J, Chen L G, Sun F R. Maximum work output of multistage continuous Carnot heat engine system with finite reservoirs of thermal capacity and radiation between heat source and working fluid. *Thermal Sci*, 2010, 13: 33–40
- 279 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Hamilton-Jacobi-Bellman equations and dynamic programming for power-optimization of radiative law multistage heat engine system. *Int J Energy Environ*, 2012, 3: 359–382
- 280 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 广义对流传热定律下多级热机系统功率优化的Hamilton-Jacobi-Bellman方程和动态规划法. *科学通报*, 2010, 55: 2874–2884
- 281 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Power-optimization of non-ideal energy converters under generalized convective heat transfer law via Hamilton-Jacobi-Bellman theory. *Energy*, 2011, 36: 633–646
- 282 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Endoreversible modeling and optimization of a multistage heat engine system with a generalized heat transfer law via Hamilton-Jacobi-Bellman equations and dynamic programming. *Acta Phys Pol A*, 2011, 119: 747–760
- 283 Sieniutycz S, Kubiak M. Dynamical energy limits in traditional and work-driven operations II. Systems with heat and mass transfer. *Int J Heat Mass Transfer*, 2002, 45: 5221–5238
- 284 Sieniutycz S. A simple chemical engine in steady and dynamic situations. *Arch Thermodyn*, 2007, 28: 57–84
- 285 Sieniutycz S. Thermodynamics of chemical power generators. *Chem Proc Eng*, 2008, 39: 321–335
- 286 Sieniutycz S. Analysis of power and entropy generation in a chemical engine. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51: 5859–5871
- 287 Sieniutycz S. Thermodynamics of simultaneous drying and power production. *Drying Tech*, 2009, 27: 322–335
- 288 Sieniutycz S. Complex chemical systems with power production driven by heat and mass transfer. *Int J Heat Mass Transfer*, 2009, 52: 2453–2465
- 289 Sieniutycz S. Maximization of power yield in thermal and chemical systems. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II. WCE 2009*. London, 2009
- 290 Sieniutycz S. Finite-rate thermodynamics of power production in thermal, chemical and electrochemical systems. *Int J Heat Mass Transfer*, 2010, 53: 2864–2876
- 291 Sieniutycz S. Identification and selection of unconstrained controls in power systems propelled by heat and mass transfer. *Int J Heat Mass Transfer*, 2011, 54: 938–948
- 292 Sieniutycz S. Maximizing power yield in energy systems—A thermodynamic synthesis. *Appl Math Model*, 2012, 36: 2197–2212
- 293 Sieniutycz S. Optimal control framework for multistage endoreversible engines with heat and mass transfer. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1999, 24: 40–74
- 294 Chen L G, Xia S J, Sun F R. Maximum power output of multistage continuous and discrete isothermal endoreversible chemical engine system with linear mass transfer law. *Int J Chem Reactor Eng*, 2011, 9: A10
- 295 Schon J C, Andresen B. Finite-time optimization of chemical reactions: $nA \rightleftharpoons mB$. *J Phys Chem*, 1996, 100: 8843–8853
- 296 Bak T A, Salamon P, Andresen B. Optimal behavior of consecutive chemical reactions $A \rightleftharpoons B \rightleftharpoons C$. *J Phys Chem A*, 2002, 106: 10961–10964
- 297 Chen L G, Song H J, Sun F R. Optimal path of consecutive chemical reactions $xA \rightleftharpoons yB \rightleftharpoons zC$. *Phys Scr*, 2009, 79: 55802
- 298 Watowich S J, Berry R S. Optimal current paths for model electrochemical systems. *J Phys Chem*, 1986, 90: 4624–4631
- 299 Sieniutycz S. Thermodynamics of power production in fuel cells. *Chem Proc Eng*, 2010, 31: 81–105
- 300 Sieniutycz S. Thermodynamic aspects of power generation in imperfect fuel cells: Part I. *Int J Ambient Energy*, 2010, 31: 195–202
- 301 Sieniutycz S. Thermodynamic aspects of power generation in imperfect fuel cells: part II. *Int J Ambient Energy*, 2011, 32: 46–56
- 302 de Koeijer G. Energy efficient operation of distillation columns and a reactor applying irreversible thermodynamics. Dissertation for Doctoral Degree. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2002
- 303 Røsørde A. Minimization of entropy production in separate and connected process units. Dissertation for Doctoral Degree. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2004
- 304 Zvolinschi A. On exergy analysis and entropy production minimisation in industrial ecology. Dissertation for Doctoral Degree. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2006
- 305 舒礼伟. 分离过程的有限时间热力学研究. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2009
- 306 Tsirlin A M, Kazakov V, Zubov D V. Finite-time thermodynamics: Limiting possibilities of irreversible separation processes. *J Phys Chem A*, 2002, 106: 10926–10936
- 307 Tsirlin A M, Kazakov V. Irreversible work of separation and heat-driven separation. *J Phys Chem B*, 2004, 108: 6035–6042

- 308 Tsirlin A M, Leskov E E, Kazakov V. Finite time thermodynamics: Limiting performance of diffusion engines and membrane systems. *J Phys Chem A*, 2005, 109: 9997–10003
- 309 Tsirlin A M, Kazakov V, Romanova T S. Optimal separation sequence for three-component mixtures. *J Phys Chem B*, 2007, 111: 3178–3182
- 310 舒礼伟, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热规律下热驱动二元分离过程的最小平均耗热量. *中国科学B辑: 化学*, 2009, 39: 183–192
- 311 Tsirlin A M, Grigorevsky I N. Thermodynamical estimation of the limit potentialities of irreversible binary distillation. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2010, 35: 213–233
- 312 Pinto F S, Zemp R, Jobson M, et al. Thermodynamic optimisation of distillation columns. *Chem Eng Sci*, 2011, 66: 2920–2934
- 313 Schaller M. Numerically optimized diabatic distillation columns. Dissertation for Doctoral Degree. Chemnitz: University of Chemnitz, 2007
- 314 Szwast Z, Sieniutycz S. Optimal temperature profiles for parallel-consecutive reactions with deactivating catalyst. *Catal Today*, 2001, 66: 461–466
- 315 Poświata A, Szwast Z. Optimization of fine solid drying in bubble fluidized bed. *Transp Porous Media*, 2007, 66: 219–231
- 316 Månsson B, Andresen B. Optimal temperature profile for an ammonia reactor. *Ind Eng Chem Proc Des Dev*, 1986, 25: 59–65
- 317 Johannessen E. Minimum entropy production rate in plug flow reactors: An optimal control problem solved for SO₂ oxidation. *Energy*, 2004, 29: 2403–2423
- 318 de Koeijer G, Johannessen E, Kjelstrup S. The second law optimal path of a four-bed SO₂ converter with five heat exchangers. *Energy*, 2004, 29: 525–546
- 319 Nummedal L, Røsjorde A, Johannessen E, et al. Second law optimization of a tubular steam reformer. *Chem Eng Processing-Process Intensification*, 2005, 44: 429–440
- 320 Johannessen E, Kjelstrup S. Numerical evidence for a “highway in state space” for reactors with minimum entropy production. *Chem Eng Sci*, 2005, 60: 1491–1495
- 321 Johannessen E, Kjelstrup S. A highway in state space for reactors with minimum entropy production. *Chem Eng Sci*, 2005, 60: 3347–3361
- 322 Johannessen E, Kjelstrup S. Nonlinear flux-force relations and equipartition theorems for the state of minimum entropy production. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2005, 30: 129–136
- 323 Wilhelmsen Ø, Johannessen E, Kjelstrup S. Energy efficient reactor design simplified by second law analysis. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35: 13219–13231
- 324 Kjelstrup S, Johannessen E, Rosjorde A, et al. Minimizing the entropy production for the methanol producing reaction in a methanol reactor. *Int J Appl Thermodyn*, 2000, 3: 147–153
- 325 Leites I L, Sama D A, Lior N. The theory and practice of energy saving in the chemical industry: Some methods for reducing thermodynamic irreversibility in chemical technology processes. *Energy*, 2003, 28: 55–97
- 326 Nummedal L, Kjelstrup S, Costea M. Minimizing the entropy production rate of an exothermic reactor with a constant heat-transfer coefficient: The ammonia reaction. *Ind Eng Chem Res*, 2003, 42: 1044–1056
- 327 Zvolinschi A, Kjelstrup S. An indicator to evaluate the thermodynamic maturity of industrial process units in industrial ecology. *J Industrial Ecol*, 2008, 12: 159–172
- 328 van der Ham L V, Gross J, Verkooijen A, et al. Efficient conversion of thermal energy into hydrogen: Comparing two methods to reduce exergy losses in a sulfuric acid decomposition reactor. *Ind Eng Chem Res*, 2009, 48: 8500–8507
- 329 Sala-Mon P, Berry R S. Thermodynamic length and dissipated availability. *Phys Rev Lett*, 1983, 51: 1127–1130
- 330 Hoffmann K H, Andresen B, Salamon P. Measures of dissipation. *Phys Rev A*, 1989, 39: 3618–3621
- 331 Andresen B, Gordon J M. Constant thermodynamic speed for minimizing entropy production in thermodynamic processes and simulated annealing. *Phys Rev E*, 1994, 50: 4346–4351
- 332 Spirkel W, Ries H. Optimal finite-time endoreversible processes. *Phys Rev E*, 1995, 52: 3485–3489
- 333 Diósi L, Kulacsy K, Lukács B, et al. Thermodynamic length, time, speed, and optimum path to minimize entropy production. *J Chem Phys*, 1996, 105: 11220–11225
- 334 Feldmann T, Andresen B, Qi A, et al. Thermodynamic lengths and intrinsic time scales in molecular relaxation. *J Chem Phys*, 1985, 83: 5849–5853
- 335 Salamon P, Nulton J, Ihrig E. On the relation between entropy and energy versions of thermodynamic length. *J Chem Phys*, 1984, 80: 436–437
- 336 Tondeur D, Kvaalen E. Equipartition of entropy production. An optimality criterion for transfer and separation processes. *Ind Eng Chem Res*,

- 1987, 26: 50–56
- 337 Ratkje S K, Sauar E, Hansen E M, et al. Analysis of entropy production rates for design of distillation columns. *Ind Eng Chem Res*, 1995, 34: 3001–3007
- 338 Sauar E, Ratkje S K, Lien K M. Equipartition of forces: A new principle for process design and optimization. *Ind Eng Chem Res*, 1996, 35: 4147–4153
- 339 Xu J. Comments on “Equipartition of forces: A new principle for process design and optimization”. *Ind Eng Chem Res*, 1997, 36: 5040–5044
- 340 Sauar E, Kjelstrup S, Lien K M. Rebuttal to comments on “Equipartition of forces: A new principle for process design and optimization”. *Ind Eng Chem Res*, 1997, 36: 5045–5046
- 341 Sauar E, Kjelstrup S, Lien K M. Equipartition of forces—Extension to chemical reactors. *Comput Chem Eng*, 1997, 21: S29–S34
- 342 Salamon P, Nulton J D. The geometry of separation processes: A horse-carrot theorem for steady flow systems. *Europhys Lett*, 1998, 42: 571–576
- 343 Bedeaux D, Standaert F, Hemmes K, et al. Optimization of processes by equipartition. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1999, 24: 242–259
- 344 Haug-Warberg T. Comments on “Equipartition of forces: A new principle for process design and optimization”. *Ind Eng Chem Res*, 2000, 39: 4431–4433
- 345 Kjelstrup S, Bedeaux D, Sauar E. Minimum entropy production by equipartition of forces in irreversible thermodynamics. *Ind Eng Chem Res*, 2000, 39: 4434–4436
- 346 Salamon P, Nulton J D, Siragusa G, et al. A simple example of control to minimize entropy production. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2002, 27: 45–55
- 347 Esposito M, Kawai R, Lindenberg K, et al. Finite-time thermodynamics for a single-level quantum dot. *Europhys Lett*, 2010, 89: 20003
- 348 Esposito M, Kawai R, Lindenberg K, et al. Quantum-dot Carnot engine at maximum power. *Phys Rev E*, 2010, 81: 41106
- 349 Geva E, Kosloff R. A quantum-mechanical heat engine operating in finite time. A model consisting of spin-1/2 systems as the working fluid. *J Chem Phys*, 1992, 96: 3054–3067
- 350 Geva E, Kosloff R. On the classical limit of quantum thermodynamics in finite time. *J Chem Phys*, 1992, 97: 4398–4412
- 351 Salamon P, Hoffmann K H, Rezek Y, et al. Maximum work in minimum time from a conservative quantum system. *Phys Chem Chem Phys*, 2009, 11: 1027–1032
- 352 Andresen B, Hoffmann K H, Nulton J, et al. Optimal control of the parametric oscillator. *Eur J Phys*, 2011, 32: 827–843
- 353 Tsirlin A M, Salamon P, Hoffman K H. Change of state variables in the problems of parametric control of oscillators. *Autom Remote Control*, 2011, 72: 1627–1638
- 354 Clausius R. *Mechanical Theory of Heat: With its Application to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies*. London: John van Voorst, 1865
- 355 Gouy G. Sur les Transformation et l’équilibre en Thermodynamique. *CR Acad Sci Paris*, 1889, 108: 507–509
- 356 Stodola A. *Steam Turbine*. New York: Van Nostrand, 1905
- 357 Bejan A. A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer. *J Heat Transfer*, 1979, 101: 718–725
- 358 Bejan A, Heperkan H, Kesgin U. Thermodynamic optimization and constructal design. *Int J Energy Res*, 2005, 29: 557–558
- 359 Mistry K H, McGovern R K, Thiel G P, et al. Entropy generation analysis of desalination technologies. *Entropy*, 2011, 13: 1829–1864
- 360 Oztop H F, Al-Salem K. A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems. *Renew Sustain Energy Rev*, 2012, 16: 911–920
- 361 Bejan A. Entropy generation minimization, exergy analysis, and the constructal law. *Arab J Sci Eng*, 2013, 38: 329–340
- 362 Demirel Y. Thermodynamic analysis. *Arab J Sci Eng*, 2013, 38: 221–249
- 363 Awad M M. A review of entropy generation in microchannels. *Adv Mech Eng*, 2015, 7: 168781401559029
- 364 Sciacovelli A, Verda V, Sciubba E. Entropy generation analysis as a design tool—A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 43: 1167–1181
- 365 Bejan A. Models of power plants that generate minimum entropy while operating at maximum power. *Am J Phys*, 1996, 64: 1054–1059
- 366 Bejan A. The equivalence of maximum power and minimum entropy generation rate in the optimization of power plants. *J Energy Resour Technol*, 1996, 118: 98–101
- 367 Salamon P, Hoffmann K H, Schubert S, et al. What conditions make minimum entropy production equivalent to maximum power production? *J Non-Equilib Thermodyn*, 2001, 26: 73–83

- 368 Angulo-Brown F. An ecological optimization criterion for finite-time heat engines. *J Appl Phys*, 1991, 69: 7465–7469
- 369 Yan Z J. Comment on “An ecological optimization criterion for finite-time heat engines” [J. Appl. Phys. 69, 7465 (1991)]. *J Appl Phys*, 1993, 73: 3583
- 370 Bejan A. Second law analysis in heat transfer and thermal design. *Adv Heat Transfer*, 1982, 15: 1–58
- 371 Shah R K, Skiepko T. Entropy generation extrema and their relationship with heat exchanger effectiveness—Number of transfer unit behavior for complex flow arrangements. *J Heat Transfer*, 2004, 126: 994–1002
- 372 Bejan A. Letter to the editor of renewable and sustainable energy reviews. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 53: 1636–1637
- 373 Witte L C, Shamsundar N. A thermodynamic efficiency concept for heat exchange devices. *J Eng Power*, 1983, 105: 199–203
- 374 London A L, Shah R K. Costs of irreversibilities in heat exchanger design. *Heat Transfer Eng*, 1983, 4: 59–73
- 375 Xu Z M, Yang S R, Chen Z Q. A modified entropy generation number for heat exchangers. *J Thermal Sci*, 1996, 5: 257–263
- 376 Hesselgreaves J E. Rationalisation of second law analysis of heat exchangers. *Int J Heat Mass Transfer*, 2000, 43: 4189–4204
- 377 Cheng X T, Liang X G. Optimization principles for two-stream heat exchangers and two-stream heat exchanger networks. *Energy*, 2012, 46: 386–392
- 378 Cheng X T, Liang X G. Computation of effectiveness of two-stream heat exchanger networks based on concepts of entropy generation, entransy dissipation and entransy-dissipation-based thermal resistance. *Energy Convers Manage*, 2012, 58: 163–170
- 379 Ogiso K. Duality of heat exchanger performance in balanced counter-flow systems. *J Heat Transfer*, 2003, 125: 530–532
- 380 Cheng X T, Liang X G. A comparison between the entropy generation in terms of thermal conductance and generalized thermal resistance in heat exchanger analyses. *Int J Heat Mass Transfer*, 2014, 76: 263–267
- 381 李志信, 过增元. 对流传热优化的场协同理论. 北京: 科学出版社, 2010
- 382 过增元, 曹炳阳, 朱宏晔. 声子气的状态方程和声子气运动的守恒方程. *物理学报*, 2007, 56: 3306–3312
- 383 程雪涛, 梁新刚, 过增元. 孤立系统内传热过程的焓减原理. *科学通报*, 2011, 56: 222–230
- 384 Hua Y C, Zhao T, Guo Z Y. Irreversibility and action of the heat conduction process. *Entropy*, 2018, 20: 206
- 385 Hua Y C, Guo Z Y. The least action principle for heat conduction and its optimization application. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 105: 697–703
- 386 朱宏晔, 陈泽敬, 过增元. 焓耗散极值原理的电热模拟实验研究. *自然科学进展*, 2007, 17: 1692–1698
- 387 胡帼杰, 过增元. 系统的焓与可用焓. *科学通报*, 2011, 56: 1575–1577
- 388 胡帼杰, 过增元. 传热过程的效率. *工程热物理学报*, 2011, 32: 1005–1008
- 389 程雪涛, 梁新刚, 徐向华. 焓的微观表述. *物理学报*, 2011, 60: 60512
- 390 Wang X J, He Y L, Wang Z D, et al. Microscopic expression of entransy in ideal gas system for diatomic molecules. *Int J Heat Mass Transfer*, 2018, 127: 1347–1350
- 391 赵甜, 陈群. 焓的宏观物理意义及其应用. *物理学报*, 2013, 62: 234401
- 392 Cheng X T, Liang X G. Discussion on the entransy expressions of the thermodynamic laws and their applications. *Energy*, 2013, 56: 46–51
- 393 程雪涛, 梁新刚. 焓理论在热功转换过程中的应用探讨. *物理学报*, 2014, 63: 190501
- 394 Cheng X T, Liang X G. Work entransy and its applications. *Sci China Tech Sci*, 2015, 58: 2097–2103
- 395 程雪涛, 王文华, 梁新刚. 开口热力学系统的焓分析. *科学通报*, 2012, 57: 1489–1495
- 396 程雪涛, 梁新刚. 闭口系统的间接做功能力及其度量. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43: 943–947
- 397 程新广, 孟继安, 过增元. 导热优化中的最小传递势容耗散与最小熵产. *工程热物理学报*, 2005, 26: 1034–1036
- 398 韩光泽, 过增元. 不同目的热优化目标函数: 热量传递势容损耗与熵产. *工程热物理学报*, 2006, 27: 811–813
- 399 王焕光, 吴迪, 饶中浩. 孤立系内热传导过程焓耗散的解析解. *物理学报*, 2015, 64: 244401
- 400 Hao J H, Chen Q, Hu K. Porosity distribution optimization of insulation materials by the variational method. *Int J Heat Mass Transfer*, 2016, 92: 1–7
- 401 吴晶, 程新广, 孟继安, 等. 层流对流换热中的势容耗散极值与最小熵产. *工程热物理学报*, 2006, 27: 100–102
- 402 陈群, 任建勋. 对流换热过程的广义热阻及其与焓耗散的关系. *科学通报*, 2008, 53: 1730–1736
- 403 Chen Q, Wang M R, Pan N, et al. Optimization principles for convective heat transfer. *Energy*, 2009, 34: 1199–1206
- 404 王松平, 陈清林, 张剑冰, 等. 强化单相对流换热的一般理论指导原则. *中国科学E辑: 技术科学*, 2009, 39: 1949–1957
- 405 He Y L, Tao W Q. Numerical studies on the inherent interrelationship between field synergy principle and entransy dissipation extreme principle for enhancing convective heat transfer. *Int J Heat Mass Transfer*, 2012, 74: 196–205

- 406 Jia H, Liu Z C, Liu W, et al. Convective heat transfer optimization based on minimum entransy dissipation in the circular tube. *Int J Heat Mass Transfer*, 2014, 73: 124–129
- 407 吴晶, 梁新刚. 焓耗散极值原理在辐射换热优化中的应用. *中国科学E辑: 技术科学*, 2009, 30: 272–277
- 408 Wu J, Cheng X T. Generalized thermal resistance and its application to thermal radiation based on entransy theory. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 58: 374–381
- 409 Zhou B, Cheng X T, Liang X G. A comparison of different entransy flow definitions and entropy generation in thermal radiation optimization. *Chin Phys B*, 2013, 22: 084401
- 410 Cheng X T, Liang X G. Analyses of coupled steady heat transfer processes with entropy generation minimization and entransy theory. *Int J Heat Mass Transfer*, 2018, 127: 1092–1098
- 411 柳雄斌, 过增元, 孟继安. 换热器中的焓耗散与热阻分析. *自然科学进展*, 2008, 18: 1186–1190
- 412 Guo Z Y, Liu X B, Tao W Q, et al. Effectiveness-thermal resistance method for heat exchanger design and analysis. *Int J Heat Mass Transfer*, 2010, 53: 2877–2884
- 413 Qian X, Li Z. Analysis of entransy dissipation in heat exchangers. *Int J Thermal Sci*, 2011, 50: 608–614
- 414 Puranik S, Maheshwari G. Application of entransy dissipation number as performance parameter for heat exchanger. *Int J Eng Trends Tech*, 2014, 12: 282–285
- 415 Wu J, Guo Z Y. Application of entransy analysis in self-heat recuperation technology. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53: 1274–1285
- 416 郭江峰, 程林, 许明田. 焓耗散数及其应用. *科学通报*, 2009, 54: 2998–3002
- 417 许明田, 程林, 郭江峰. 焓耗散理论在换热器设计中的应用. *工程热物理学报*, 2009, 30: 2090–2092
- 418 Guo J F. Design analysis of supercritical carbon dioxide recuperator. *Appl Energy*, 2016, 164: 21–27
- 419 程雪涛, 徐向华, 梁新刚. 焓在航天器热控流体并联回路优化中的应用. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41: 507–514
- 420 Xu Y C, Chen Q. An entransy dissipation-based method for global optimization of district heating networks. *Energy Build*, 2012, 48: 50–60
- 421 Wang W H, Cheng X T, Liang X G. Entransy dissipation, entransy-dissipation-based thermal resistance and optimization of one-stream hybrid thermal network. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 529–536
- 422 Qian X D, Li Z, Li Z X. A thermal environmental analysis method for data centers. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 62: 579–585
- 423 Zhou B, Cheng X T, Liang X G. Conditional extremum optimization analyses and calculation of the active thermal control system mass of manned spacecraft. *Appl Thermal Eng*, 2013, 59: 639–647
- 424 Xu Y C, Chen Q, Guo Z Y. Entransy dissipation-based constraint for optimization of heat exchanger networks in thermal systems. *Energy*, 2015, 86: 696–708
- 425 Chen Q, Wang Y F, Xu Y C. A thermal resistance-based method for the optimal design of central variable water/air volume chiller systems. *Appl Energy*, 2015, 139: 119–130
- 426 Zhou B, Cheng X T, Wang W H, et al. Entransy analyses of thermal processes with variable thermophysical properties. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 90: 1244–1254
- 427 Tao Y B, He Y L, Liu Y K, et al. Performance optimization of two-stage latent heat storage unit based on entransy theory. *Int J Heat Mass Transfer*, 2014, 77: 695–703
- 428 王慧儒, 吴慧英. 最小热阻原理在组合式相变材料蓄热过程优化中的应用. *科学通报*, 2015, 60: 3377–3385
- 429 Zhao T, Chen Q. A new perspective of analysis and optimization for absorption thermal energy storage system based on entransy theory. *Energy Procedia*, 2015, 75: 2074–2079
- 430 Xu H J, Zhao C Y. Thermodynamic analysis and optimization of cascaded latent heat storage system for energy efficient utilization. *Energy*, 2015, 90: 1662–1673
- 431 Chen Q, Yang K, Wang M R, et al. A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I: Theory. *Energy*, 2010, 35: 2448–2454
- 432 Chen Q, Pan N, Guo Z Y. A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system II: Applications. *Energy*, 2011, 36: 2890–2898
- 433 Yuan F, Chen Q. A global optimization method for evaporative cooling systems based on the entransy theory. *Energy*, 2012, 42: 181–191
- 434 Zhang L, Liu X H, Jiang Y. Application of entransy in the analysis of HVAC systems in buildings. *Energy*, 2013, 53: 332–342
- 435 Meng J A, Zeng H, Li Z X. Analysis of condenser venting rates based on the air mass entransy increases. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3283–3291

- 436 Zhang L, Liu X H, Zhao K, et al. Entransy analysis and application of a novel indoor cooling system in a large space building. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 85: 228–238
- 437 Guo J F, Huai X L. Optimization design of recuperator in a chemical heat pump system based on entransy dissipation theory. *Energy*, 2012, 41: 335–343
- 438 Guo J F, Huai X L. The application of entransy theory in optimization design of Isopropanol-Acetone-Hydrogen chemical heat pump. *Energy*, 2012, 43: 355–360
- 439 Zheng Z J, He Y, He Y L. Optimization for a thermochemical energy storage-reactor based on entransy dissipation minimization. *Energy Procedia*, 2015, 75: 1791–1796
- 440 Chen Q, Ren J X, Guo Z Y. The extremum principle of mass entransy dissipation and its application to decontamination ventilation designs in space station cabins. *Sci Bull*, 2009, 54: 2862–2870
- 441 Yuan F, Chen Q. Two energy conservation principles in convective heat transfer optimization. *Energy*, 2011, 36: 5476–5485
- 442 Chen Q, Fu R H, Xu Y C. Electrical circuit analogy for heat transfer analysis and optimization in heat exchanger networks. *Appl Energy*, 2015, 139: 81–92
- 443 Lucia U. Stationary open systems: A brief review on contemporary theories on irreversibility. *Physica A*, 2013, 392: 1051–1062
- 444 Grazzini G, Borchellini R, Lucia U. Entropy versus entransy. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2013, 38: 259–271
- 445 Herwig H. Do we really need “Entransy”? A critical assessment of a new quantity in heat transfer analysis. *J Heat Transfer*, 2014, 136: 045501
- 446 Bejan A. “Entransy,” and its lack of content in physics. *J Heat Transfer*, 2014, 136: 055501
- 447 Awad M M. Discussion: “Entransy is now clear”. *J Heat Transfer*, 2014, 136: 095502
- 448 Awad M M. Entransy unmasked. *Energy Convers Manage*, 2014, 88: 1070–1071
- 449 Manjunath K, Kaushik S C. Second law thermodynamic study of heat exchangers: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 2014, 40: 348–374
- 450 Bejan A. Comment on “Application of entransy analysis in self-heat recuperation technology”. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53: 18352–18353
- 451 Awad M M. Reply to comments on “Second law thermodynamic study of heat exchangers: A review” (Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 44: 608–610). *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 51: 1792–1793
- 452 Sekulic D P, Sciubba E, Moran M J. Entransy: A misleading concept for the analysis and optimization of thermal systems. *Energy*, 2015, 80: 251–253
- 453 del Rio Oliveira S, Milanez L F. Equivalence between the application of entransy and entropy generation. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 79: 518–525
- 454 Awad M M. Comments on “Temperature-heat diagram analysis method for heat recovery physical adsorption refrigeration cycle—Taking multi-stage cycle as an example”. *Int J Refrig*, 2017, 82: 541–542
- 455 Bejan A. Letter to the editor on “Temperature-heat diagram analysis method for heat recovery physical adsorption refrigeration cycle—Taking multi stage cycle as an example” by S. Z. Xu et al., vol. 74, 2017, pp. 254–268. *Int J Refrig*, 2018, 90: 277–279
- 456 Guo Z Y, Chen Q, Liang X G. Closure to “Discussion of ‘Do we really need “entransy”?’”. *J Heat Transfer*, 2014, 136: 046001
- 457 Guo Z Y. Closure to “Discussion of ‘“Entransy,” and Its Lack of Content in Physics’ ” (2014, ASME J. Heat Transfer, 136(5), p. 055501). *J Heat Transfer*, 2014, 136: 056001
- 458 Chen Q, Guo Z Y, Liang X G. Closure to “Discussion of ‘Entransy is Now Clear’” (2014, ASME J. Heat Transfer, 136(9), p. 095502). *J Heat Transfer*, 2014, 136: 096001
- 459 Cheng X T, Liang X G. Reply to “Entransy unmasked” by Awad. *Energy Convers Manage*, 2014, 88: 1072–1073
- 460 Wu J, Guo Z Y. Reply to “Comment on ‘Application of entransy analysis in self-heat recuperation technology’”. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53: 18354–18356
- 461 Cheng X T, Chen Q, Liang X G. Comments on “Second law thermodynamic study of heat exchangers: A review” (Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 40: 348–374). *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 44: 608–610
- 462 Wu J, Guo Z Y. Comments on “Equivalence between the application of entransy and entropy generation” [Int. J. Heat Mass Transfer 79 (2015): 518–525]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 101: 824
- 463 Xu S Z, Wang R Z, Wang L W. Reply and closure to comments on “Temperature-heat diagram analysis method for heat recovery physical adsorption refrigeration cycle—Taking multi-stage cycle as an example” by M.M. Awad. *Int J Refrig*, 2017, 82: 543–547
- 464 Xu S Z, Wang R Z, Wang L W. Reply to “Letter to the editor on ‘Temperature-heat diagram analysis method for heat recovery physical

- adsorption refrigeration cycle—Taking multi-stage cycle as an example” by A. Bejan. *Int J Refrig*, 2018, 90: 280–286
- 465 Chen Q, Liang X G, Guo Z Y. Entropy theory for the optimization of heat transfer—A review and update. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 63: 65–81
- 466 Cheng X T, Zhang Q Z, Liang X G. Analyses of entransy dissipation, entropy generation and entransy-dissipation-based thermal resistance on heat exchanger optimization. *Appl Thermal Eng*, 2012, 38: 31–39
- 467 Qian X D, Li Z, Li Z X. Entropy-dissipation-based thermal resistance analysis of heat exchanger networks. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 3289–3295
- 468 Cheng X T, Liang X G. Application of entransy optimization to one-stream series-wound and parallel heat exchanger networks. *Heat Transfer Eng*, 2014, 35: 985–995
- 469 夏少军, 陈林根, 戈延林, 等. 热漏对换热过程熵耗散最小化的影响. *物理学报*, 2013, 63: 20505
- 470 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 普适传热规律下换热过程(焓)耗散最小化. 见: 中国工程热物理学会传热传质学术会议. 西安, 2014年10月31-11月3日. 论文编号: 143330
- 471 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Entropy dissipation minimization for liquid-solid phase change processes. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 960–968
- 472 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Optimization of equimolar reverse constant-temperature mass-diffusion process for minimum entropy dissipation. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1867–1873
- 473 夏少军, 陈林根, 戈延林, 等. 等温节流过程熵耗散最小化. *物理学报*, 2013, 62: 180202
- 474 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 扩散传质定律结晶过程熵耗散最小化. *机械工程学报*, 2013, 49: 175–182
- 475 陈群, 吴晶, 王沐然, 等. 换热器组传热性能的优化原理比较. *科学通报*, 2011, 56: 79–84
- 476 程雪涛, 王文华, 梁新刚. 基于广义传热定律的传热与热功转换优化. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42: 1179–1187
- 477 Zhou B, Cheng X T, Liang X G. Power and heat-work conversion efficiency analyses for the irreversible Carnot engines by entransy and entropy. *J Appl Phys*, 2013, 113: 124904
- 478 Açıkkalp E. Entropy analysis of irreversible Carnot-like heat engine and refrigeration cycles and the relationships among various thermodynamic parameters. *Energy Convers Manage*, 2014, 80: 535–542
- 479 Cheng X T, Liang X G. Entropy analyses of heat-work conversion systems with inner irreversible thermodynamic cycles. *Chin Phys B*, 2015, 24: 120503
- 480 Kim K H, Kim K. Comparative analyses of energy-exergy-entransy for the optimization of heat-work conversion in power generation systems. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 84: 80–90
- 481 Ahmadi M H, Ahmadi M A, Pourfayaz F. Entropy analysis and optimization of irreversible Carnot-like heat engine. *Mech Industry*, 2017, 18: 204
- 482 Han Y, Wang D, Zhang C, et al. The entropy degeneration and entropy loss equations for the generalized irreversible Carnot engine system. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 106: 895–907
- 483 Han C H, Kim K H. Entropy and exergy analyses for optimizations of heat-work conversion with Carnot cycle. *J Therm Sci*, 2016, 25: 242–249
- 484 Açıkkalp E. Entropy analysis of an irreversible Diesel cycle. *Glob J Energ Technol Res Updat*, 2014, 1: 19–24
- 485 Açıkkalp E, Yamik H. Entropy analysis for irreversible gas power cycles with temperature-dependent specific heat. *Int J Sustain Aviat*, 2015, 1: 245–268
- 486 Wu Y Q. Analyses of thermodynamic performance for the endoreversible Otto cycle with the concepts of entropy generation and entransy. *Sci China Tech Sci*, 2017, 60: 692–700
- 487 Maheshwari G. Entropy loss and its application to atkinson cycle performance evaluation. *IOSR-J Mech Civil Eng*, 2013, 6: 53–59
- 488 周兵, 程雪涛, 梁新刚. 斯特林循环输出功率优化分析. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43: 97–105
- 489 Ahmadi M H, Ahmadi M A, Mellit A, et al. Thermodynamic analysis and multi objective optimization of performance of solar dish Stirling engine by the centrality of entropy and entropy generation. *Int J Electrical Power Energy Syst*, 2016, 78: 88–95
- 490 柳雄斌, 孟继安, 过增元. 换热器参数优化中的熵产极值和熵耗散极值. *科学通报*, 2009, 53: 3026–3029
- 491 Guo J F, Huai X L, Li X F, et al. Multi-objective optimization of heat exchanger based on entropy dissipation theory in an irreversible Brayton cycle system. *Energy*, 2013, 63: 95–102
- 492 Cheng X T, Liang X G. Entropy analyses of the thermodynamic cycle in a turbojet engine. *Sci China Tech Sci*, 2017, 60: 1160–1167
- 493 Wang W H, Cheng X T, Liang X G. Entropy and entropy analyses and optimizations of the Rankine cycle. *Energy Convers Manage*, 2013, 68: 82–88

- 494 Zheng Z J, He Y L, Li Y S. An entransy dissipation-based optimization principle for solar power tower plants. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 773–783
- 495 Li T L, Fu W C, Zhu J L. An integrated optimization for organic Rankine cycle based on entransy theory and thermodynamics. *Energy*, 2014, 72: 561–573
- 496 Zhu Y, Hu Z, Zhou Y, et al. Applicability of entropy, entransy and exergy analyses to the optimization of the Organic Rankine Cycle. *Energy Convers Manage*, 2014, 88: 267–276
- 497 Li T L, Yuan Z H, Xu P, et al. Entransy dissipation/loss-based optimization of two-stage organic Rankine cycle (TSORC) with R245fa for geothermal power generation. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1524–1536
- 498 Chen Q, Xu Y C, Hao J H. An optimization method for gas refrigeration cycle based on the combination of both thermodynamics and entransy theory. *Appl Energy*, 2014, 113: 982–989
- 499 Xu Y C, Chen Q. A theoretical global optimization method for vapor-compression refrigeration systems based on entransy theory. *Energy*, 2013, 60: 464–473
- 500 Cheng X T, Liang X G. Entransy and entropy analyses of heat pump systems. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 4696–4702
- 501 Zhao Q, Wang C, Han F Y. Performance analysis of the absorption heat pump systems based on the entransy theory. *Appl Mech Mater*, 2014, 584-586: 2179–2183
- 502 Cheng X T, Liang X G. Discussion on the applicability of entropy generation minimization and entransy theory to the evaluation of thermodynamic performance for heat pump systems. *Energy Convers Manage*, 2014, 80: 238–242
- 503 Açikkalp E. Entransy analysis of irreversible heat pump using Newton and Dulong-Petit heat transfer laws and relations with its performance. *Energy Convers Manage*, 2014, 86: 792–800
- 504 Cheng X T, Liang X G. Analyses and optimizations of thermodynamic performance of an air conditioning system for room heating. *Energy Buildings*, 2013, 67: 387–391
- 505 Wu J. A new approach to determining the intermediate temperatures of endoreversible combined cycle power plant corresponding to maximum power. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 91: 150–161
- 506 Cheng X T, Liang X G. Optimization of combined endoreversible Carnot heat engines with different objectives. *Chin Phys B*, 2015, 24: 060510
- 507 Bejan A. From heat transfer principles to shape and structure in nature: Constructal theory. *J Heat Transfer*, 2000, 122: 430–449
- 508 Bejan A, Lorente S. Constructal theory of generation of configuration in nature and engineering. *J Appl Phys*, 2006, 100: 041301
- 509 Bejan A, Lorente S. Design with Constructal Theory. New Jersey: Wiley, 2008
- 510 Chen L G. Progress in study on constructal theory and its applications. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 802–820
- 511 Chen L G, Wei S, Sun F R. Constructal entransy dissipation minimization for ‘volume-point’ heat conduction. *J Phys D-Appl Phys*, 2008, 41: 195506
- 512 Feng H J, Chen L G, Xie Z, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for triangular heat trees at micro and nanoscales. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 84: 848–855
- 513 谢志辉, 陈林根, 孙丰瑞. 以焓耗散最小为目标的空腔几何构形优化. *中国科学E辑: 技术科学*, 2009, 39: 1949–1957
- 514 Chen L G, Xiao Q, Xie Z, et al. T-shaped assembly of fins with constructal entransy dissipation rate minimization. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2012, 39: 1556–1562
- 515 Liu X, Chen L G, Feng H J, et al. Constructal design for blast furnace wall based on the entransy theory. *Appl Thermal Eng*, 2016, 100: 798–804
- 516 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for variable cross-section insulation layer of the steel rolling reheating furnace wall. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2014, 52: 26–32
- 517 冯辉君, 陈林根, 谢志辉, 等. 基于焓耗散率最小的燃气涡轮叶片冷却构形优化. *机械工程学报*, 2014, 50: 142–149
- 518 肖庆华, 陈林根, 孙丰瑞. 强迫对流换热冷却的产热体焓耗散率最小构形优化. *科学通报*, 2011, 56: 2032–2039
- 519 Wei S H, Chen L G, Sun F R. Constructal entransy dissipation minimization of round tube heat exchanger cross-section. *Int J Thermal Sci*, 2011, 50: 1285–1292
- 520 Chen L G, Wei S H, Sun F R. Constructal entransy dissipation minimization of an electromagnet. *J Appl Phys*, 2009, 105: 094906
- 521 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for solid-gas reactors with heat and mass transfer in a disc-shaped body. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 89: 24–32
- 522 Feng H J, Chen L G, Xie Z H. Multi-disciplinary, multi-objective and multi-scale constructal optimizations for heat and mass transfer processes

- performed in Naval University of Engineering, a review. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 115: 86–98
- 523 Chen L G, Xiao Q H, Feng H J. Constructal optimizations for heat and mass transfers based on the entransy dissipation extremum principle, performed at the naval university of engineering: A review. *Entropy*, 2018, 20: 74
- 524 Wei S H, Chen L G, Xie Z H. Constructal heat conduction optimization: Progresses with entransy dissipation rate minimization. *Thermal Sci Eng Prog*, 2018, 7: 155–163
- 525 Chen L G, Feng H J, Xie Z H, et al. Progress of constructal theory in China over the past decade. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 130: 393–419
- 526 陈群, 许云超, 过增元. 传热学中的状态图及其应用. *科学通报*, 2012, 57: 2771–2777
- 527 Cheng X T, Liang X G. T - q diagram of heat transfer and heat-work conversion. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2014, 53: 9–13
- 528 Wang W H, Cheng X T, Liang X G. T - Q diagram analyses and entransy optimization of the organic flash cycle (OFC). *Sci China Tech Sci*, 2015, 58: 630–637
- 529 Cheng X T, Zhao J M, Liang X G. Discussion on the extensions of the entransy theory. *Sci China Tech Sci*, 2017, 60: 363–373
- 530 Gu J J, Gan Z X. *Entransy in Phase-Change Systems*. New York: Springer, 2014
- 531 Wang H D. *Theoretical and Experimental Studies on Non-Fourier Heat Conduction Based on Thermomass Theory*. New York: Springer, 2014
- 532 陈林根, 冯辉君. 流动和传热传质过程的多目标构形优化. 北京: 科学出版社, 2016
- 533 中国科协学会学术部. 热学新理论及其应用——新观点新学说学术沙龙文集(38). 北京: 中国科学技术出版社, 2010
- 534 Li Z X, Guo Z Y. Optimization principles for heat convection. In: Wang L, ed. *Advances in Transport Phenomena 2010*. *Advances in Transport Phenomena*, vol 2. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011
- 535 陈林根. 焓理论及其应用的进展. *科学通报*, 2012, 57: 2815–2835
- 536 Cheng X T, Liang X G. From thermomass to entransy. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 62: 174–177
- 537 Cheng X T, Liang X G. Entransy, entransy dissipation and entransy loss for analyses of heat transfer and heat-work conversion processes. *J Thermal Sci Technol*, 2013, 8: 337–352
- 538 Cheng X T, Liang X G. Entransy: Its physical basis, applications and limitations. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 5309–5323
- 539 纪军, 刘涛, 张兴, 等. 热质理论及其应用研究进展. *中国科学基金*, 2014, 6: 446–454
- 540 Guo Z Y, Chen Q, Liang X G. Entransy theory for the analysis and optimization of thermal systems. In: *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15*. Kyoto, 2014
- 541 Xu M T, Guo J F, Li X F. Thermodynamic analysis and optimization design of heat exchanger. In: Wang L Q, ed. *Advances in Transport Phenomena 2011*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 63–167
- 542 付荣桓, 许云超, 陈群. 制冷空调系统性能优化的焓耗散热阻法研究进展. *科学通报*, 2015, 60: 3367–3376
- 543 Chen L G. Progress in optimization of mass transfer processes based on mass entransy dissipation extremum principle. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 2305–2327
- 544 刘晓华, 张涛, 江亿. 空气除湿处理过程性能改善分析从理想到实际流程. *科学通报*, 2015, 60: 2631–2639
- 545 Radcenco V. *Generalized Thermodynamics*. Bucharest: Editura Tehnica, 1994
- 546 Bejan A. Maximum power from fluid flow. *Int J Heat Mass Transfer*, 1996, 39: 1175–1181
- 547 Hu W Q, Chen J. General performance characteristics and optimum criteria of an irreversible fluid flow system. *J Phys D-Appl Phys*, 2006, 39: 993–997
- 548 Athas W C, Svensson L J, Koller J G, et al. Low-power digital systems based on adiabatic-switching principles. *IEEE Trans VLSI Syst*, 1994, 2: 398–407
- 549 Enz C C, Krummenacher F, Vittoz E A. An analytical MOS transistor model valid in all regions of operation and dedicated to low-voltage and low-current applications. *Analog Integr Circ Sig Process*, 1995, 8: 83–114
- 550 Paul S, Fussell D. On efficient adiabatic design of MOS circuit. In: *Proceedings of the 4th Workshop on Physics and Computation*. Boston, 1996
- 551 Paul S. Optimal charging capacitor. In: *European Conference on Circuit Theory and Design*. Budapest, 1997
- 552 Desoete B, de Vos A. Optimal charging of capacitors. In: Trullemans A, Spars J, eds. *Proceeding of the 8-th International Workshop Patmos*. Lyngby, 1998
- 553 Mita K, Boufaïda M. Ideal capacitor circuits and energy conservation. *Am J Phys*, 1999, 67: 737–739
- 554 De Vos A, Desoete B. Optimal thermodynamic processes in finite time. In: Wu C, Chen L G, Chen J C. *Recent Advances in Finite Time Thermodynamics*. New York: Nova Science Publishers, 1999. 249–272

- 555 Paul S, Schlaffer A M, Nossek J A. Optimal charging of capacitors. *IEEE Trans Circuits Syst I*, 2000, 47: 1009–1016
- 556 De Vos A, Desoete B. Equipartition principles in finite-time thermodynamics. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2000, 25: 1–13
- 557 Chen J. Optimization on the charging process of a capacitor. *Int J Electron*, 2001, 88: 145–151
- 558 Branoga N. Optimization of the charging process of a capacitor. Dissertation for Master's Degree. Advisor: Mita K, 2002
- 559 Bejan A, Dan N. Maximum work from an electric battery model. *Energy*, 1997, 22: 93–102
- 560 施哲强, 陈金灿. 电池在最大输出功时的负载匹配和放电时间选择. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2001, 40: 868–872
- 561 Chen J C, Zhou Y. Minimum Joule heating dissipated in the charging process of a rechargeable battery. *Energy*, 2001, 26: 607–617
- 562 Yan Z. A note on maximum work from an electric battery model. *Energy*, 2002, 27: 197–201
- 563 Shi Z, Chen J C, Wu C. Maximum work output of an electric battery and its load matching. *Energy Convers Manage*, 2002, 43: 241–247
- 564 Chen J, Shi Z, Chen X. The maximum work output of an electric battery in a given time. *Renew Energy*, 2002, 27: 189–196
- 565 Rozonoer L I. A generalized thermodynamic approach to resource exchange and allocation. I. *Autom Remote Control*, 1973, 5: 781–795
- 566 Rozonoer L I. A generalized thermodynamic approach to resource exchange and allocation. II. *Autom Remote Control*, 1973, 6: 915–927
- 567 Rozonoer L I. A generalized thermodynamic approach to resource exchange and allocation. III. *Autom Remote Control*, 1973, 8: 1272–1290
- 568 Tsirlin A M. Optimal control of resource exchange in economic systems. *Autom Remote Control*, 1995, 56: 401–408
- 569 Saslow W M. An economic analogy to thermodynamics. *Am J Phys*, 1999, 67: 1239–1247
- 570 Martínás K. About irreversibility in economics. *Open Syst Inf Dyn*, 2000, 7: 349–364
- 571 Tsirlin A M, Kazakov V, Kolinko N A. Irreversibility and limiting possibilities of macrocontrolled systems I: Thermodynamics. *Open Syst Inf Dyn*, 2001, 8: 315–328
- 572 Tsirlin A M, Kazakov V, Kolinko N A. Irreversibility and limiting possibilities of macrocontrolled systems II: Microeconomics. *Open Syst Inf Dyn*, 2001, 8: 329–347
- 573 Tsirlin A M, Kazakov V A. Optimal processes in irreversible thermodynamics and microeconomics. *Interdiscipl Descrip Comp Syst*, 2004, 2: 29–42
- 574 Amelkin S A. Limiting possibilities of resource exchange process in complex open microeconomic system. *Interdiscipl Descrip Comp Syst*, 2004, 2: 43–52
- 575 Amel'kin S A, Martínás K, Tsirlin A M. Optimal control for irreversible processes in thermodynamics and microeconomics. *Automat Remote Control*, 2002, 63: 519–539
- 576 Tsirlin A M, Kazakov V. Optimal processes in irreversible microeconomics. *Interdiscipl Descrip Comp Syst*, 2006, 4: 102–123
- 577 Tsirlin A M. Irreversible microeconomics: Optimal processes and equilibrium in closed systems. *Autom Remote Control*, 2008, 69: 1201–1215
- 578 Chen Y R. Maximum profit configurations of commercial engines. *Entropy*, 2011, 13: 1137–1151
- 579 De Vos A. Endoreversible thermoeconomics. *Energy Convers Manage*, 1995, 36: 1–5
- 580 De Vos A. Endoreversible economics. *Energy Convers Manage*, 1997, 38: 311–317
- 581 De Vos A. Endoreversible thermodynamics versus economics. *Energy Convers Manage*, 1999, 40: 1009–1019
- 582 Tsirlin A M. Irreversible microeconomics: Optimal processes and control. *Automat Remote Control*, 2001, 62: 820–830
- 583 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Optimization for capital dissipation minimization in a common of resource exchange processes. *Math Comput Model*, 2011, 54: 632–648
- 584 夏少军, 陈林根. 广义流传递过程的广义耗散最小化. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49: 501–517
- 585 Pindyck R S, Rubinfeld D L. *Econometric Models and Economic Forecast*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1998
- 586 Pindyck R S, Rubinfeld D L. *Microeconomics*. 7th ed. New Jersey: Pearson Education Inc, 2009
- 587 宋伟明, 孟继安, 梁新刚, 等. 一维换热器中温差场均匀性原则的证明. *化工学报*, 2008, 59: 2460–2464
- 588 柳雄斌, 过增元. 换热器性能分析新方法. *物理学报*, 2009, 58: 4766–4771
- 589 郭江峰, 许明田, 程林. 换热器设计中的焓耗散均匀性原则. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40: 671–676
- 590 郭江峰, 许明田, 程林. 换热量和换热面积给定时的火积耗散最小原则. *科学通报*, 2010, 55: 3146–4141
- 591 Qin X Y, Chen L G, Sun F R. Performance of real absorption heat-transformer with a generalized heat transfer law. *App Thermal Eng*, 2008, 28: 767–776
- 592 De Vos A. Efficiency of some heat engines at maximum-power conditions. *Am J Phys*, 1985, 53: 570–573
- 593 严子浚, 陈丽璇. 导热规律为时 $q \propto \Delta(1/T)$ 的 η_m . *科学通报*, 1988, 33: 1543–1545

- 594 Angulo-Brown F, Páez-Hernández R. Endoreversible thermal cycle with a nonlinear heat transfer law. *J Appl Phys*, 1993, 74: 2216–2219
- 595 Chen L G, Sun F R, Wu C. Influence of heat transfer law on the performance of a Carnot engine. *Appl Thermal Eng*, 1997, 17: 277–282
- 596 Huleihil M, Andresen B. Convective heat transfer law for an endoreversible engine. *J Appl Phys*, 2006, 100: 014911
- 597 Li J, Chen L G, Sun F R, et al. Power versus efficiency characteristic of an endoreversible Carnot heat engine with heat transfer law $q \propto (\Delta T^n)^m$. *Int J Ambient Energy*, 2008, 29: 149–152
- 598 De Vos A. Reflections on the power delivered by endoreversible engines. *J Phys D-Appl Phys*, 1987, 20: 232–236
- 599 Chen L G, Li J, Sun F R. Generalized irreversible heat-engine experiencing a complex heat-transfer law. *Appl Energy*, 2008, 85: 52–60
- 600 Li J, Chen L G, Sun F R. Heating load vs. COP characteristic of an endoreversible Carnot heat-pump subjected to the heat-transfer law $q \propto (\Delta T^n)^m$. *Appl Energy*, 2008, 85: 96–100
- 601 Li J, Chen L G, Sun F R. Fundamental optimal relation of a generalized irreversible Carnot heat pump with complex heat transfer law. *Pramana*, 2010, 74: 219–230
- 602 Li J, Chen L G, Sun F R. Performance optimisation for endoreversible Carnot refrigerator with complex heat transfer law. *J Energy Institute*, 2008, 81: 168–170
- 603 Li J, Chen L G, Sun F R. Cooling load and co-efficient of performance optimizations for a generalized irreversible Carnot refrigerator with heat transfer law $q \propto (\Delta T^n)^m$. *Proc Instit Mech Eng Part E-J Process Mech Eng*, 2008, 222: 55–62
- 604 Xia S J, Chen L G, Xie Z H, et al. Entropy dissipation minimization for generalized heat exchange processes. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1507–1516
- 605 夏少军, 陈林根, 戈延林, 等. 存在热漏的换热过程熵产生最小化. *工程热物理学报*, 2013, 34: 1008–1011
- 606 Chen L G, Xia S J, Sun F R. Entropy generation minimization for isothermal crystallization processes with a generalized mass diffusion law. *Int J Heat Mass Transfer*, 2018, 116: 1–8
- 607 柳雄斌. 换热器及散热通道网络热性能的熵分析. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2009
- 608 Liu X B, Wang M, Meng J, et al. Minimum entransy dissipation principle for optimization of transport networks. *Int J Nonlinear Sci Numer Simul*, 2010, 11: 11
- 609 陈林, 陈群, 李震, 等. 溶液除湿性能分析和优化的湿阻法. *科学通报*, 2010, 55: 1174–1181
- 610 袁芳, 陈群. 间接蒸发冷却系统传热传质性能的优化准则. *科学通报*, 2012, 57: 88–94
- 611 Xia S J, Chen L G. Theoretical and experimental investigation of optimal capacitor charging process in RC circuit. *Eur Phys J Plus*, 2017, 132: 235
- 612 Xia S J, Chen L G. Capital dissipation minimization for a class of complex irreversible resource exchange processes. *Eur Phys J Plus*, 2017, 132: 201
- 613 Wang C, Chen L G, Xia S J, et al. Maximum production rate optimization for sulphuric acid decomposition process in tubular plug-flow reactor. *Energy*, 2016, 99: 152–158
- 614 Wang C, Chen L G, Xia S J, et al. Optimal concentration configuration of consecutive chemical reaction $A \rightleftharpoons B \rightleftharpoons C$ for minimum entropy generation. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2016, 41: 313–326
- 615 Chen L G, Shen X, Xia S J, et al. Thermodynamic analyses for recovering residual heat of high-temperature basic oxygen gas (BOG) by the methane reforming with carbon dioxide reaction. *Energy*, 2017, 118: 906–913
- 616 张磊, 陈林根, 夏少军, 等. CO_2 加氢合成低碳烯烃反应热力学分析. *工程热物理学报*, 2017, 38: 1135–1143
- 617 敖晨阳, 夏少军, 宋汉江, 等. 线性维象传热条件下甲烷蒸汽重整反应器熵产生最小化. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48: 25–38
- 618 Chen L G, Zhang L, Xia S J, et al. Entropy generation minimization for CO_2 hydrogenation to light olefins. *Energy*, 2018, 147: 187–196
- 619 Chen L G, Wang C, Xia S J, et al. Thermodynamic analyses and optimizations of extraction process of CO_2 from acidic seawater by using hollow fiber membrane contactor. *Int J Heat Mass Transfer*, 2018, 124: 1310–1320
- 620 Zhang L, Chen L G, Xia S J, et al. Entropy generation minimization for reverse water gas shift (RWGS) reactors. *Entropy*, 2018, 20: 415
- 621 Chen L G, Feng H, Xie Z. Generalized thermodynamic optimization for iron and steel production processes: Theoretical exploration and application cases. *Entropy*, 2017, 18: 353
- 622 陈林根, 冯辉君, 谢志辉, 等. 钢铁生产流程物流-能流-环境作用机理及广义热力学优化. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48: 111–135

Progresses in generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible processes

CHEN LinGen^{1,2} & XIA ShaoJun³

¹ *Institute of Thermal Science and Power Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;*

² *School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;*

³ *College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*

Generalized thermodynamic optimization theory is one of the research hotspots in the field of thermal science and technology. Firstly, the emergences and developments of finite time thermodynamics, entropy generation minimization, entransy theory and generalized thermodynamic optimization are reviewed in this paper, respectively. Besides, the physical connotations of the above thermal optimization theories are analyzed in detail, and their similarities and differences are also indicated. Secondly, the research progress of the generalized thermodynamic optimization theory is introduced from the aspects of dynamic optimizations of several irreversible processes including heat-transfer, mass-transfer process, capacitor charging circuit, and economical trade processes. The similarities and differences between the entropy generation minimization theory and the entransy theory in the optimization of heat and mass transfer processes are compared in detail. Finally, in addition to the expansion of the research subjects and the refinement of the research contents, the pursuit of the universal of the physical models, the unity of the optimization methods and the generalization of the optimization results is another important development trend of the generalized thermodynamic optimization theory.

finite time thermodynamics, entropy generation minimization, entransy theory, generalized thermodynamic optimization, optimal control

doi: [10.1360/N092018-00220](https://doi.org/10.1360/N092018-00220)