文章编号:1674-2869(2024)05-0543-21

能量利用系统的构形热力学优化理论
——研究进展与太阳能驱动热电冷氢联产系统优化应用初探

陈林根*[1,3,4,5],冯辉君[1,3,4,5],谢志辉[2],夏少军[2],戈延林[1,3,4,5], 刘 鹏[1,3,4,5], 章先涛[1,3,4,5]

1. 武汉工程大学化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室,湖北 武汉 430205;
2. 海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉 430033;
3. 武汉工程大学湖北省绿色化工装备工程技术研究中心,湖北 武汉 430205;
4. 武汉工程大学热科学与动力工程研究所, 湖北 武汉 430205;
5. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205

摘 要:首先介绍了有限时间热力学、构形设计和构形热力学优化等热学优化新理论的起源和最新研究进展;其次介绍了这些新理论在热力循环和部件性能优化中的应用研究进展;然后基于能量的高效梯级利用,提出了基于太阳能和燃料补能的能源供给方式,集成燃气轮机循环、超临界二氧化碳布雷顿循环、有机朗肯循环、吸收式制冷循环和制氢过程,建立太阳能驱动热电冷氢联产系统新构型;最后对此联产系统新构型的构形热力学优化作了初步探讨。核心是围绕联产系统的“热-电-冷-氢”协同优化机理及调控机制、热力部件“流-结构-性能”的耦合演化规律与传热和热功转换强化机理、联产系统的能量高效梯级利用与多参数构形热力学优化三个关键科学问题,考虑子循环串/并/混联三种模式,综合运用理论解析、数值计算和实验验证的方法,开展联产系统的有限时间热力学优化、热力部件的构形设计、联产系统的构形热力学优化、三种联产系统优化结果的综合比较,实现联产系统热力部件与热力循环性能的一体化全局优化,促进形成一种多联产总能系统能量梯级利用优化理论的思路与框架,服务“双碳”战略。

关键词:构形设计; 有限时间热力学; 构形热力学优化; 太阳能; 多联产系统

中图分类号:TK121 **文献识别码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202405018

Constructal thermodynamic optimization theory for energy utilization systems: its research progress and preliminary exploration for application in solar-driven polygeneration systems combining heating, power, cooling and hydrogen production

CHEN Lingen[*1,3,4,5], *FENG Huijun*[1,3,4,5], *XIE Zhihui*[2], *XIA Shaojun*[2], *GE Yanlin*[1,3,4,5], *LIU Peng*[1,3,4,5], *ZHANG Xiantao*[1,3,4,5]

1. Hubei Provincial Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Cihna;
2. School of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Cihna;
3. Hubei Provincial Engineering Technology Research Centre of Green Chemical Equipment, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Cihna;
4. Institute of Thermal Science and Power Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Cihna;
5. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Cihna

收稿日期:2024-05-30

基金项目:国家自然科学基金(52171317、51779262)

作者简介:陈林根,博士,教授。Email: lingenchen@hotmail.com; 2506715339@qq.com

引文格式:陈林根,冯辉君,谢志辉,等. 能量利用系统的构形热力学优化理论——研究进展与太阳能驱动热电冷氢联产系统优化应用初探[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(5):543-563.

Abstract: Firstly, this paper introduces the origin and recent research progress of new thermal optimization theories such as finite time thermodynamics, constructal design and constructal thermodynamic optimization. Secondly, the applications and research progress of these new theories in performance optimizations for thermodynamic cycles and thermal components are introduced. Then, based on the efficient cascade utilization of energy, this paper proposes an energy supply method based on solar energy and fuel replenishment, integrates gas turbine cycle, supercritical carbon dioxide Brayton cycle, organic Rankine cycle, absorption refrigeration cycle and hydrogen production process, and establishes a new configuration of solar-driven polygeneration system combining heating, power, cooling and hydrogen production. Finally, constructal thermodynamic optimization for the new configuration of polygeneration system is discussed preliminarily. The core is to focus on three key scientific issues, including the "heating-power-cooling-hydrogen production" coordinative optimization mechanism and regulation mechanism of polygeneration system, the coupling evolution law of "flow-structure-performance" and the enhancement mechanism of heat transfer and thermal and work conversion of thermal components, as well as the efficient cascade utilization of energy and multi-parameter constructal thermodynamic optimizations for the polygeneration systems. Considering the series/parallel/series-parallel coupling modes of sub-cycles, finite time thermodynamic optimizations for the polygeneration systems, the constructal designs for thermal components, the constructal thermodynamic optimizations for the polygeneration systems, and the comprehensive comparisons of the optimization results for the three polygeneration systems will be carried out by means of theoretical analyses, numerical calculations and experimental verification. The integrated global performance optimizations of thermal components and thermodynamic cycles for the polygeneration systems will be achieved. The formation of the idea and framework of energy cascade utilization optimization theory for polygeneration total energy systems will be promoted to serve the "double carbon" strategy.

Keywords: constructal design; finite time thermodynamics; constructal thermodynamic optimization; solar energy; polygeneration system

作为一种可再生能源,太阳能具有丰富且清洁无污染、分布广泛的特点。太阳能高效开发利用对减少化石能源消耗、降低碳排放和助力我国实现“双碳”战略目标具有重要意义。以太阳能为主要能量来源,建立多联产系统,是一种关键且具有重大应用前景的技术途径[1-2]。

但目前的多联产系统,在全天候适应性、温域宽广度、余热余能利用深度等方面,尚有不足;在实现总能系统能量梯级利用全局优化上,尚有改进空间。采用太阳能、工业余热、燃料补能等多种能源供给模式,建立适应全天候、宽温域、高能效的多联产系统[3-6],是实现太阳能高效利用的必然趋势。虽然国内外学者在多联产系统研究方面做出了大量有益的探索,包括热电联产、热电冷三联产、热电冷氢联产等多种类型,但是构建新型的适应全天候、宽温域、高能效的多联产系统,探索并应用热学新理论,深入开展热力学分析与优化,实现热力部件与热力循环性能的一体化全局优化,依然是推进多联产系统研究的必由之路。

本文综合分析能流特征和多种能量的传递与转化方式,提出以太阳能利用为主、燃料补燃为辅的能源供给方式,集成燃气轮机循环、超临界二氧化碳布雷顿循环、有机朗肯循环(organic Rankine cycle,ORC)、吸收式制冷循环和制氢过程,考虑不同循环串、并联模式,构建太阳能驱动的热电冷氢联产系统,主要包括三种类型:基于太阳能和燃料补燃的串联、并联(如图1所示)和混联热电冷氢联产系统,建立热力学模型,实现构形热力学优化,为工程实践提供理论指导。

本文将在经典热力学和传热学分析的基础上,结合有限时间热力学(finite time thermodynamics,FTT)理论和构形理论,进一步发展本文作者提出的构形热力学优化理论,开展太阳能总能系统热力部件与热力循环性能的一体化全局优化。

基于经典热力学的分析和优化,并没有时间因素,也没有考虑温差传热等各种传递过程的不可逆性,均没有能量传递与转化“速率”的概念,而只有“数量”的概念。即经典热力学实质是“热静力学”,而非“热动力学”,所获得的热效率、输出功率等最高性能界限需要经历无限长时间或者具备

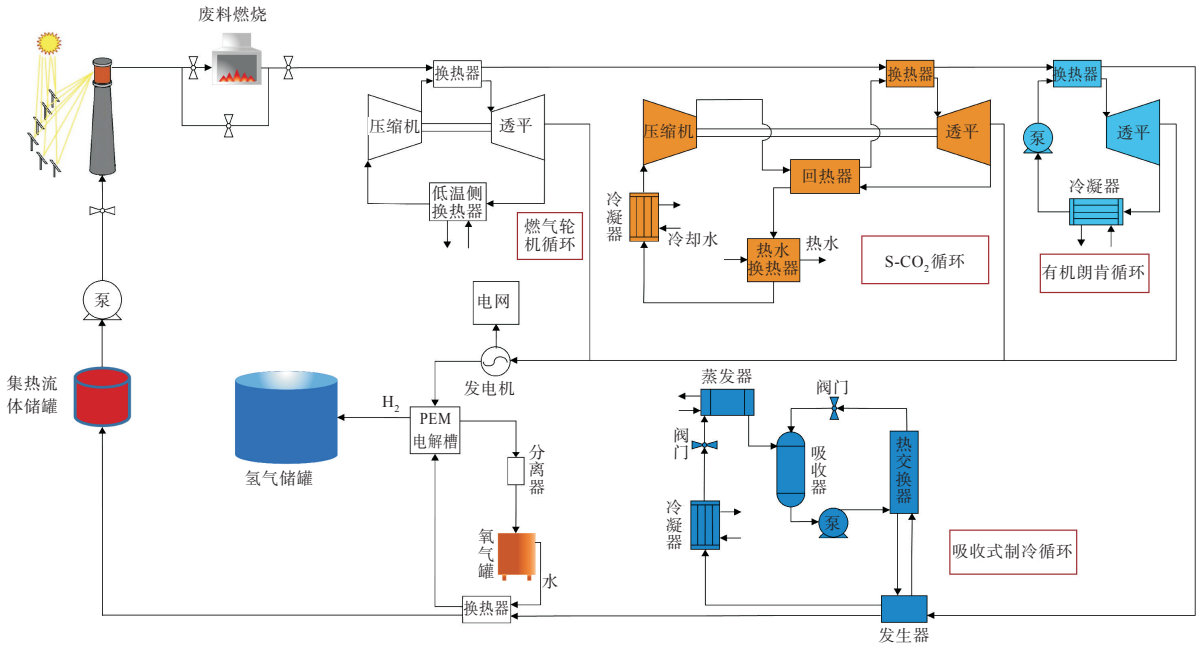

图1　基于太阳能和燃料补燃的并联热电冷氢联产系统

Fig. 1　Parallel coupling polygeneration system combined heating, power, cooling and hydrogen production based on solar energy and fuel supplemental combustion

无限大传热面积才能达到，因而，实际上并不成立，对工程实际的指导作用具有一定的局限性。

FTT[7-11]是真正意义的“热动力学”，为解释与热相关的实际过程和系统设计优化提供了全新的诠释，被广泛应用于各种实际热力、化学、化工等过程及系统的设计中。本文将提出引入FTT，分析和优化太阳能驱动的热电冷氢联产系统的热力学性能。

但在热力学理论中起支柱作用的热力学第一定律和热力学第二定律均没有涉及流动构型（flow configuration）问题，即并没有给出在实际的有限势差和有限体积条件下，实际“流”（如热流、质流、电流等）的演化规律及其路径。1996年，Bejan发现了构形定律（constructal law）[12]，在此基础上Bejan和Lorente建立了构形理论[12-14]，给出了有机世界和无机世界中流动结构生成机制统一的、确定的、与“时间之矢”方向一致的物理阐述，即“事物结构源自性能达到最优”[13]。本文作者最早将该理论引入国内并以“构形理论”命名，在这一领域开展了一系列的研究工作[15-17]。本文将提出引入构形设计理论，开展联产系统关键热力部件的演化设计研究。

FTT优化解决的是实际不可逆过程与循环的热力学性能优化问题，构形设计解决的是热力部件的结构优化问题，但是总能系统的能量梯级高效利用客观上需要实现热力部件与热力循环性能的一体化全局优化。本文作者将热力循环的FTT与热力部件的构形设计紧密结合，建立了构形热力学优化这一新的研究理论和方法，研究热力部件与热力循环的一体化最优化，开创了新的学术方向，已成功应用于船海用蒸汽动力装置的优化研究[18]，拓展了学科前沿。本文将提出进一步发展构形热力学优化理论，以实现太阳能驱动的热电冷氢联产系统的热力部件与热力循环性能的一体化全局优化，促进总能系统能量梯级利用优化理论的发展。

本文将首先概述相关领域的研究进展，然后将探索太阳能总能系统热力部件与热力循环性能的一体化全局优化基本思路。

1　热学优化新理论的起源和研究进展

1.1　FTT

Moutier[19]最早考虑热机有限速率热交换，导出了工作于温度为T_H的高温热源和T_L的低温热源间热机效率为$1-(T_L/T_H)^{1/2}$，这是不同于卡诺效率的新的性能界限。后来Reitlinger（1929）[20]、Novikov（1957）[21]、Chambadal（1957）[22]考虑不同条件，得到了相同结果。1975年，Curzon等[7]考虑到卡诺热机热效率最大时输出功率为零，系统研究了仅存在有限速率传热（不可逆热阻损失，服从牛顿定律）的卡诺热机性能，得到了最大功率输出时的效率界限为$\eta_{CA}=1-(T_L/T_H)^{1/2}$，标志着FTT

理论的诞生。

FTT理论以传热学、热力学和流体力学相结合促使热力学发展为基本特征，在有限时间和有限尺寸约束条件下，以减少系统不可逆性为主要目标，优化存在传质、传热和流体流动不可逆性的实际系统性能，已成为工程学和物理学等领域研究热相关系统的重要理论工具[7-11, 23-32]。基于这一理论，大量文献对各种热相关过程和系统进行了优化，研究对象涉及各类热机、制冷机、热泵、化学反应的过程、循环和系统等，得到了一大批具有重要应用价值的理论成果。其中，燃气轮机循环及其联产系统、超临界二氧化碳循环、ORC、吸收式制冷循环、碘化氢反应器等研究工作是FTT理论研究中与本项目密切相关的重要内容。建立新的热力模型、实现循环和过程最优构型、引入多目标优化方法和人工神经网络性能预测方法，是当前的研究热点。

1.2 构形设计

构形定律表述为："对于一个沿时间箭头方向(或为适应生存环境)进行结构演化的有限尺寸流动系统来讲，为流过其内部的'流'提供越来越容易通过的路径是决定其结构形成的根本原因。"[12]也可更简洁地表述为：事物结构源自性能达到最优[13]。许多文献基于构形定律对各种工程过程和系统的内部结构与外部形状进行了几何优化，形成了构形设计的基本思路和框架，促进了构形理论的发展。

构形设计是在限定总约束(如体积和质量)的条件下，赋予设计对象以自由度(设计变量)，按照事物内在的物理机制和寻优演化的方向，探明几何参数与性能的基本关系，获得最优构形，达成给定条件下的性能最优化。研究对象已涉及热学、流体力学、机械工程、电磁学、化学、生命科学等诸多学科，得到了一大批具有重要应用价值的理论成果。其中，换热器、透平机械、太阳能集热器、压缩机、燃料电池、电子器件热沉等[12-17, 33-36]研究工作是构形设计理论研究中与本文提出的太阳能驱动热电冷氢联产系统新构型性能优化密切相关的重要内容。针对实际工程问题，建立构形优化模型，开展多目标、多尺度、多学科构形优化，实现部件的最优设计，是当前发展的前沿和趋势。

1.3 构形热力学优化

本文作者将热力部件的构形设计与热力循环的FTT紧密结合，建立了构形热力学优化这一新的研究理论和方法，研究热力部件与热力循环的一体化最优化，开创了新的学术方向[18]。构形热力学优化[18]是在有限尺寸约束条件下，通过寻求最佳结构参数和热力学参数，对存在传热、流体流动、传质、热功转换不可逆性的各种传统和类热力过程、系统性能进行的优化，得到部件的最优构形和系统的最优性能。

本文作者对海洋温差发电系统进行了优化[18, 37-39]。以系统净输出功率为优化目标，以冷凝器和高低温蒸发器传热板有效长度、高压透平体积比、高温蒸发器和冷凝器传热面积占比等6个结构参数为设计变量对单压系统进行了构形热力学优化，得到了系统整体的最优性能和部件的最佳结构，发现六次优化后的系统净输出功率提高了14.95%[37]。而对双压系统进行的构形热力学优化，发现四次优化后的系统净输出功率提高了8.84%[38]。本文作者建立了双压卡琳娜循环和ORC的联合系统模型，以其净输出功率为目标进行了优化，发现该系统在四次构形热力学优化后的净输出功率提高了16.17%[39]。

2 热力循环和部件性能优化研究进展

本文提出的太阳能驱动热电冷氢联产系统新构型，其流程依次涉及太阳能集热系统、燃气轮机循环、超临界二氧化碳布雷顿循环、ORC、制氢过程和吸收式制冷循环；各循环又都涉及各种换热器和透平机械部件。因此，将依次介绍流程中各循环的FTT研究现状和各部件的构形设计研究现状，最后介绍联产系统的经典热力学和FTT研究现状。

2.1 太阳能集热系统的构形设计

太阳能集热系统是太阳能光热利用技术的核心部件之一，为提升集热器的传热性能和集热效率，一些文献将构形理论和多目标优化方法引入到太阳能集热器的性能优化研究中，并取得了一系列创造性的研究成果[40-44]。聚光型太阳能集热系统广泛应用于太阳能发电等高温热利用领域，主要包括塔式、抛物面槽式、碟式和线性菲涅尔式四种形式[45]，其中，塔式太阳能集热系统具有聚光比和集热温度高等优点，在峰值循环温度达480~550 ℃的第二代太阳能光热电站中表现出更低的平均度电成本，且在未来面向峰值温度>700 ℃的第三代太阳能光热电站中相较于其他集热系统具有更好的成本效益潜力，同时在太阳能多联产领域具有巨大的应用前景[46]。然而，集热系统中集热器承受不均匀的聚光太阳能热流，随着循环峰

值温度的提升,集热器面临材料相容性和效率降低等问题。对集热器开展结构设计成为解决该问题的有效途径,国内外研究学者对塔式太阳能集热器设计和优化开展了大量研究,取得了很多创造性发展[43, 47-50]。Wang等[48]提出了一种翅片状的熔盐集热器,并对其开展了光学和热学性能分析,发现该集热器相较于传统圆柱形集热器效率提升了3.8%,且峰值太阳能热流减小38.6%。

本文作者对不同太阳能集热器开展了构形优化设计[42]和多目标优化[44]。对太阳能平板换热器开展构形设计后,海水出口温度降低了8.9%,集热器复合函数和总泵耗功率分别比初始设计点对应值降低了5.56%和66.89%[42]。针对槽式聚光太阳能集热器,开展了肋片集热管多目标优化设计研究,优化结果相较于传统集热管效率提升2.3%[44]。

2.2 燃气轮机循环的FTT

燃气轮机循环可以利用高品位热源的热量,因此在各种多联产系统中得到了广泛的应用,通常可以作为多联产系统的顶循环,其中太阳能驱动燃气轮机循环发电系统是具有代表性的联合循环之一[51]。对燃气轮机循环性能进行经典热力学研究[52-55],主要是对其输出功、功率和热效率性能进行分析和优化。基于经典热力学的燃气轮机循环性能研究已经取得了大量的有益成果,但依然存在一些需要解决的问题。

探明实际燃气轮机动力装置各个部件的不可逆性对系统性能的影响,更加精确地优化设计燃气轮机循环,值得深入研究。大量文献显示,运用FTT理论,以不同的目标优化燃气轮机循环性能,取得了大量成果,所研究对象包含了闭式简单、中冷、回热、再热、中冷回热及其他复杂燃气轮机循环和开式简单、回热及中冷等燃气轮机循环[56-65]。在运用FTT研究闭式燃气轮机循环的过程中,优化原理是选择各换热器最佳的热导率分配;在研究开式燃气轮机循环的过程中,优化原理是选择最佳的压气机进口相对压降(等价于选择质量流率)。

2.3 超临界二氧化碳布雷顿循环的FTT

国内外大量学者采用经典热力学理论研究了回热型超临界二氧化碳布雷顿循环的性能[66-68],但均未详细考虑实际工程循环中工质与热源间有限温差传热(FTT理论研究考虑的核心因素)等不可逆因素对循环性能的影响,未能得到在有限尺寸约束下循环的最优性能。Na等[69]运用FTT理论,研究了回收燃气轮机余热的预热型超临界二氧化碳布雷顿循环,发现了工质质量流率、透平进口温度对循环功率和效率的影响规律,并对功率进行优化,但并未进一步释放质量流率、压比与分流系数,得到净功率、热效率的最佳设计参数。

本文作者通过对回热型[70-72]、预热型[73]、再压缩型[74]超临界二氧化碳布雷顿循环进行了性能分析,并以分流系数、质量流率和各个换热器热导率分配比为变量,实现了三类不同循环的性能优化,并进一步构建了超临界二氧化碳布雷顿普适循环[75],进行了FTT性能分析与优化,明晰了三类循环的优缺点。

2.4 ORC的FTT

一大批学者基于经典热力学对ORC的性能进行了研究,并取得了大量成果[76-79],但未考虑热源与工质间的传热温差(热阻)对循环性能的影响。为此,一些学者应用FTT理论对各种ORC系统进行了研究。Lee等[80]将联合循环中的底循环简化为内可逆简单ORC模型,导出了最大输出功率对应的热效率表达式。本文作者[81]在给定总换热面积的条件下,以输出功率和热效率为优化目标,对简单ORC蒸发器面积分配、工质质量流率和过热度进行了分析和优化,发现变温热源条件下的简单ORC性能均劣于恒温热源条件下的性能;并对变温热源回热ORC进行了分析和优化,发现3次优化后的循环输出功率和热效率分别提高了25.22%和12.16%[82]。Liu等[83]比较了混合工质下的饱和、过热和超临界ORC性能。本文作者[84]建立了变温热源条件下的简单超临界ORC模型,发现3次优化后的循环输出功率和热效率分别增加了39.45%和7.13%。Zhi等[85]建立了变温热源的双压ORC模型,以循环输出功率、比能耗和电力生产成本为目标,实现了多目标优化。Feng等[86]比较了3种工质的简单和回热ORC系统的性能。

2.5 制氢过程的FTT

在工业制氢中,电解水技术是关键手段[87-88]。其中,质子交换膜电解水技术因其快速响应、高电流密度和高纯度产品等优势而受到广泛关注。质子交换膜电解池(proton exchange membrane electrolytic cell, PEMEC)能提供高效、稳定且无污染的氢能源。Ni等[89]建立了考虑PEMEC详细电化学特性的热力学模型,通过能量分析和㶲分析,研究了该系统的产氢性能。Nieminen等[90]研究发现,影响PEMEC电解槽能量和㶲效率的主要因素是温度、过电位之和、外加电压。

张后程[91]应用FTT理论建立了PEMEC系统的热力学-电化学模型,推导了相应的效率。结果

表明，在整个电流密度范围内，PEMEC内部不可逆性产生的焦耳热大于水分解过程所需的焦耳热，给出了效率随电流密度的变化曲线，对不同配置的效率进行了比较，确定了电流密度的最佳工作范围，并详细分析了一些重要参数对PEMEC系统性能的影响。García-Valverde等[92]提出了一个PEMEC模型，该模型允许以满足工程应用的精度模拟电化学、热量和产氢特性。Abdollahipour等[93]建立了质子交换膜燃料电池和PEMEC集成系统模型，从输出功率、效率和电力成本的角度评估了集成系统的性能，并基于输出功率和效率目标对其进行了多目标优化。

2.6 吸收式制冷循环的FTT

吸收式制冷的工质对环境无害，能以蒸汽、燃气、燃油、热水等低品位余热驱动，被公认为未来制冷机发展的重要技术方向之一[94-96]。采用经典热力学理论对吸收式制冷循环进行分析时，通常将吸收式循环简化为完全可逆的三热源或者四热源循环，此时循环虽然制冷系数最高，但是制冷率却为零，因此经典热力学分析给出的性能界限并不能很好地指导实际吸收式制冷装置的设计。

大量文献建立了恒温和变温热源的内可逆和不可逆三热源、四热源吸收式制冷循环FTT模型，创立了联合循环性能分析优化方法，研究了制冷率、制冷系数、生态学函数等优化目标，传热损失、内不可逆性损失、旁通热漏等损失模型，恒温和变温热源模型等因素对循环性能的影响，进一步将研究方法扩展到了吸收式热泵、热变换器的性能研究，并且将宏观循环模型拓展到量子、热布朗、能量选择性电子机、低耗散等微纳米循环模型，获得了对工程设计和优化更具有实际指导意义的新结论[97-107]。

2.7 换热器的构形设计

换热器直接决定了热力系统的换热能力，通过优化换热器结构提高热力系统性能是一项重要的任务。许多学者应用构形理论对各种换热器的结构和性能进行了优化[108]。DA Silva等[109]对换热器管径比服从Murry定律的逆流式H形多尺度换热器进行了构形设计，得到了换热器泵耗功率和热阻的单调递减函数关系。Zimparov等[110]对逆流式和顺流式多尺度树形换热器性能进行了比较，发现逆流式树形换热器性能优于顺流式树形换热器性能。本文作者[111]以火积耗散有效性最大为目标，对H形多尺度换热器进行了构形优化，得到了兼顾换热器流动和传热性能的最优构形。Bejan等[112]和Nejad等[113]分别对顺流和叉流式换热器进行了构形优化，得到了最佳的换热器性能。本文作者[114-117]以耗功率和换热率、耗功率和火积耗散率组成的复合函数为优化目标，优化了有机工质、氨水管壳式蒸发器、板式冷凝器和增压锅炉的换热管结构，得到了复合函数最小时的最佳工质、最佳换热管外径和热源质量流率。本文作者[118]提出了一种新型双层非对称错位花格折流板设计结构，分析了相邻折流板错位角和单块折流板非对称体积比对管壳式换热器对流换热性能的影响。Yao等[119]开展了W形换热器的数值和实验研究，发现其温差比两种传统换热器的温差低10.4 K。Faizan等[120]建立了不同截面的六边形通道换热器模型，发现三角形通道的换热器性能更优。Mustafa等[121]建立了带偏心圆形翅片的换热器模型，优化了换热器的横向间距、翼展间距和偏心度。Yu等[122]建立了带有波纹结构的正弦波纹回热器模型，发现该回热器使斯特林机的输出功率和热效率分别提高了210%和39%。

2.8 透平机械的构形设计

透平机械直接决定了热力系统的热功转换能力，优化其结构提高系统性能是一项重要的任务。一些学者对各种透平的性能和结构进行了研究[123]。Du等[124]研究和比较了单个向心透平和并联双压高低压向心透平的功率和效率特性。Sun等[125]研究了高低压透平、高压透平进口温度和工质种类对补气式布置的双压ORC㶲效率和总投资成本的影响。Al Jubori等[126]考虑轴流透平级数的影响，对比了在相同条件下一级和二级轴流透平的输出功率和效率特性。Jeong等[127]给出了一级轴流透平在不同叶顶间隙和叶栅高度下的气动数据，发现气动损失始终在叶栅高度与跨距比为1.88%时达到最小。

构形理论也被应用到透平的优化设计中。Kim等[128]在透平总质量一定的条件下以输出功率为目标得到了串联两级和串联多级透平的最佳质量分配比。Beyene等[129]优化了低速透平叶片的结构，发现透平输出功率对后缘角存在最大值。Stanescu等[130]研究了“级间喷水”和“雾冷却”两种冷却进气方式对透平性能的影响，降低了燃油消耗率、提高了功率、减少了氮氧化物排放。本文作者[131]以总输出功率最大为目标，在透平总体积固定的条件下得到了双压向心透平的最佳轮径比、最佳体积比和最佳动叶出口相对流动角，使得其总输出功率提高了2.02%。本文作者[132]建立了

中低温ORC双压轴流透平模型,在透平总体积一定的条件下,以总输出功率最大为目标优化了高压透平的体积比和低压透平的进口压力,使得透平总输出功率提高了1.69%。

2.9 多联产系统的热力学

多联产系统是一种有效提升能源利用效率、缓解能源短缺问题的高效能源系统,该类系统可以提供热、电、冷等多种形式的能量,可以实现对能源的高效、梯级利用。

Wang等[133]构建了由固体氧化物燃料电池、内燃机循环、超临界二氧化碳布雷顿循环和蒸汽发生器组成的热电联产系统,从能量、㶲、㶲经济性和环境影响等方面对系统进行了分析。Mehrabian等[134]提出了由生物质锅炉、超临界二氧化碳布雷顿循环、ORC、吸附脱盐装置和固体氧化物燃料电池组成的联产系统,从能量、㶲、能量经济和环境影响等方面对系统进行了分析和多目标优化。Yousef等[135]构建了利用核能,由超临界二氧化碳布雷顿循环、增压喷射式和吸收式制冷循环组成的联产系统,分析了决策变量对能量、㶲和总成本率的影响。Mubashir等[136]构建了超临界二氧化碳布雷顿循环加吸收式制冷循环、超临界二氧化碳布雷顿循环加ORC以及超临界二氧化碳布雷顿循环加ORC和吸收式制冷循环等三类联产系统,并对系统进行了能量、㶲和经济性分析。Yousef和Santana[137]提出了超临界二氧化碳布雷顿循环和吸收式制冷循环组成的热电冷联产系统,并对系统进行了能量和㶲分析。Bishal等[138]构建由燃气轮机循环、超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环、ORC和吸收式制冷循环组成的联产系统。Zeng等[139]构建了由固体氧化物燃料电池、燃气轮机循环、超临界二氧化碳布雷顿循环、ORC、吸收式制冷循环和供暖系统组成的新型能量利用系统,并对系统性能进行了能量、㶲和灵敏度分析。Cheng等[140]构建了由超临界二氧化碳布雷顿循环与五种热电发电机结合的联产系统,比较了五种联产系统的发电效率。Tao等[141]构建了由ORC、卡琳娜循环、质子交换膜电解槽、燃料电池和热电发电机组成联产系统,并对系统进行了㶲和㶲经济性分析及多目标优化。Amiri等[142]构建了由燃料电池与超临界二氧化碳再热布雷顿循环或双压ORC组成的联合循环,对循环进行了能量和㶲分析。Irani等[143]构建了由燃气轮机循环、卡琳娜循环和PEMEC组成的联合系统,并对其进行了能量和㶲经济性分析及多目标优化。

部分学者构建了利用太阳能的多联产系统。Li等[144]构建了由太阳集热器、燃气轮机循环和水蒸气朗肯循环组成的联合系统,并对系统进行了能量分析,研究了太阳能输入系统的方式和位置对系统的整体效率的影响。Liu等[145]构建了两种太阳能-生物质混合联合循环发电系统,并对系统在设计和非设计状态下的热力学性能进行了研究。Linares等[146]构建了由太阳能集热器、回热式燃气轮机循环、超临界二氧化碳布雷顿循环和ORC组成的联产系统,并对系统进行了能量分析。Sheykhlou等[147]提出由太阳能集热器、储能装置、朗肯循环和吸收式制冷循环组成三联产系统,并对系统进行了能量、㶲和经济性分析。Karthikeyan等[148]构建了由太阳能集热器、生物质锅炉、ORC、蒸汽压缩制冷循环和PEMEC组成的三联产系统,建立了能量、㶲、经济性和环境指标并对系统进行了多目标优化。

以上分析可以看出,目前针对多联产系统的研究大多是基于经典热力学理论进行的。本文作者[149-156]将FTT理论引入到联产循环的性能分析和优化中,建立了多种基于燃气轮机循环的热电联产、热电冷联产循环模型,以可用能率(useful energy rate)、第一定律效率、㶲输出率、㶲效率和利润率为目标优化了循环的性能。

3 太阳能驱动热电冷氢联产系统构形热力学优化初探

3.1 研究展望

以太阳能利用为中心,综合考虑能流特性和各子系统的热学特征,构建热电冷氢联产系统,融合经典热力学与传热学、FTT、构形设计、构形热力学优化等热学理论与方法,引入人工神经网络与优化算法,开展联产系统多层级多目标的分析与优化,解析主要参数、关键设备与联产系统的特征和规律,探明系统效能深度提升的内在机理,形成一种多联产总能系统能量梯级利用优化理论的思路与框架,为实际复杂热力系统的工程设计提供理论指导。图2为从提出任务、凝练科学问题、布局研究内容到达成预期研究构思逻辑框图。

拟构建三种热电冷氢联产系统,包括基于太阳能和燃料补燃的并联(图1)、串联(图3)和混联(图4)热电冷氢联产系统。

3.1.1 联产系统的FTT分析与优化 针对三种联产系统,考虑热源与循环工质之间和回热器中高、

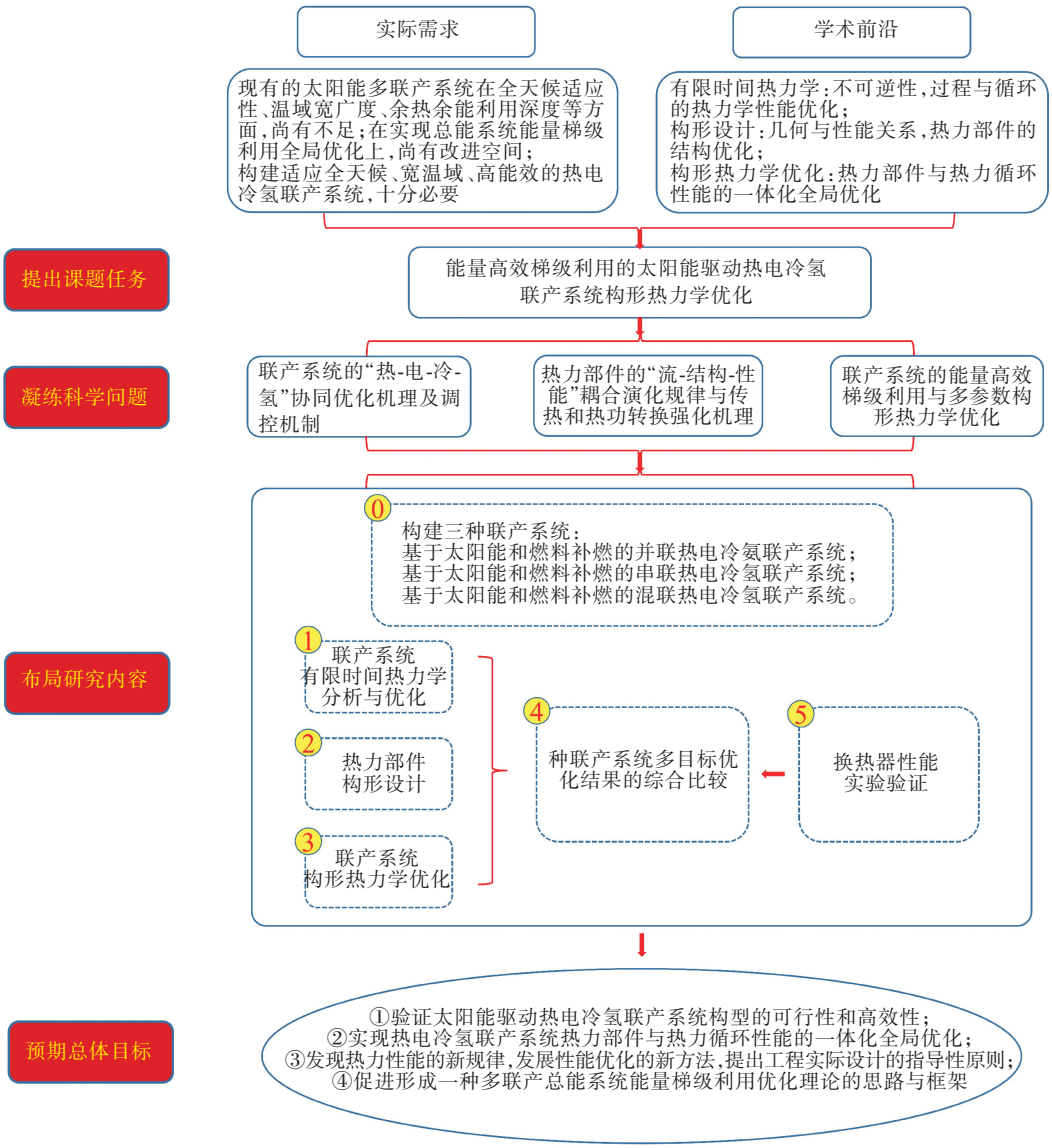

图2 研究任务构思逻辑框图

Fig. 2 Logical block diagram of research task conception

低温工质间的有限温差传热、不可逆膨胀、不可逆压缩、电解制氢装置中各种不同类型的过电位损失(包括活化、浓差、欧姆等)等不可逆性因素对联产系统性能的影响，应用FTT建立模型，以第一定律效率、可用能率、㶲效率、㶲输出率、㶲经济性能为目标进行系统设计参数分析，并在换热器总热导率一定的条件下进行热导率分配、压比(包括中间压比、再热压比和总压比)和工质与热源间热容率匹配的优化。综合考虑可用能率、第一定律效率、㶲输出率、㶲效率、㶲经济性能等不同优化目标，应用改进的遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)对联产系统进行多目标性能协调优化，得到其Pareto前沿，并应用三种决策方法(TOPSIS、LINMAP和Shannon Entropy)从Pareto前沿中选择较为合适的最优解。

3.1.2 三类关键热力部件的构形设计 以联产系统中的太阳能集热器、换热器和透平机械三类关键热力部件为研究对象，在给定几何约束条件下建立三类热力部件的数学物理模型，建立性能指标及复合性能函数为优化目标，分别以主要结构参数为优化变量，开展构形设计，并分析联产系统中不同串并联方式对热力部件性能的影响，综合比较不同工况条件下的优化设计结果，探明热力部件的“流-结构-性能”耦合演化规律与传热和热功转换强化机理，为工程实际设计提供指导。

(1)针对塔式太阳能集热器，分别以集热器效率、均温性和流阻为优化目标，考虑不同集热管结构(肋片和内插扰流)以及不同工质(高温导热油和熔融盐)，优化集热管长和管径，得到集热器最优构形设计方案，分析不同肋片结构和工质对构

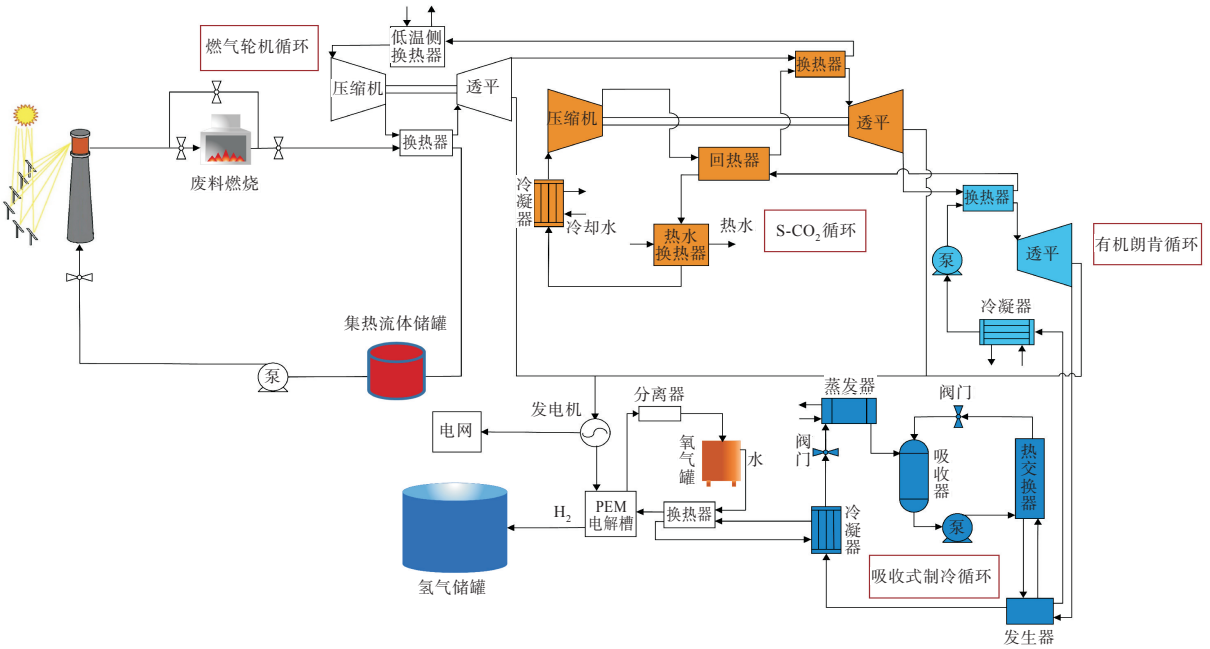

图 3　基于太阳能和燃料补燃的串联热电冷氢联产系统

Fig. 3　Series coupling polygeneration system combined heating, power, cooling and hydrogen production based on solar energy and fuel supplemental combustion

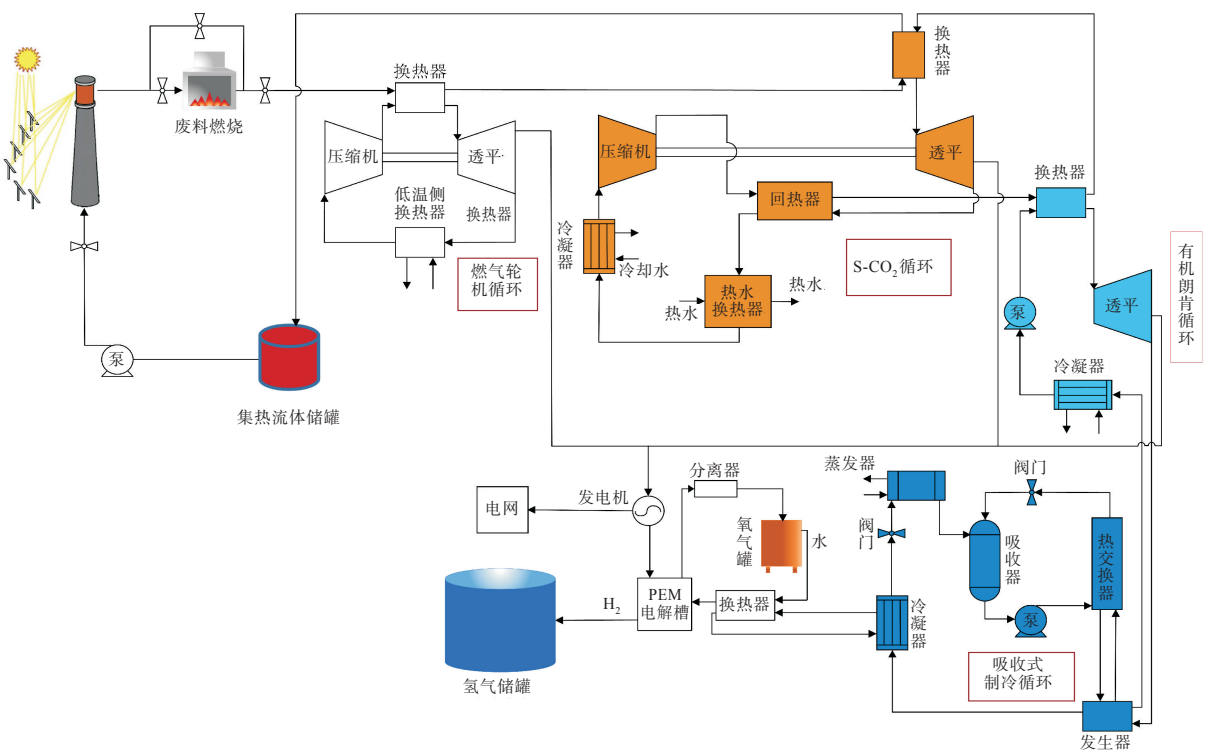

图 4　基于太阳能和燃料补燃的混联热电冷氢联产系统

Fig. 4　Series-parallel coupling polygeneration system combined heating, power, cooling and hydrogen production based on solar energy and fuel supplemental combustion

形优化结果的影响规律。

（2）针对各种换热器，分别以传热率、熵产率、火积耗散率和泵耗功率为优化目标，考虑不同换热器型式（管壳式、板式等）以及不同工质（空气、R245fa、溴化锂、水、导热油和熔融盐），在换热器总体积或总换热面积一定的条件下优化换热器管长、管径、板长和板间距，得到各换热器最优构形设计方案，分析不同扰流结构和工质对构形优化结果的影响规律。

（3）针对透平机械，分别以输出功率（或耗功率）和等熵效率为优化目标，考虑不同透平机械型式（向心、离心和轴流式）以及不同工质（空气、二

氧化碳、R245fa)，优化透平机械体积比和轮径比，得到其最优构形设计方案，分析不同进气参数和工质对构形优化结果的影响规律。

3.1.3 三种联产系统的构形热力学优化 以图(1,3,4)所示的三种热电冷氢联产系统为研究对象，基于人工神经网络算法建立融合部件结构和循环参数的系统模型，结合构形理论和FTT理论，分别以可用能率、第一定律效率、㶲输出率和㶲效率最大为目标，在温度边界给定的条件下，以太阳能集热器、超临界二氧化碳布雷顿循环加热器、燃气轮机高温侧换热器、吸收式制冷循环发生器、ORC蒸发器、电解水预热器和透平机械等关键部件的结构参数(换热器长度和透平机械轮径比等)以及质量流率、工质压比和换热器面积比等主要循环参数为优化变量，对三种联产系统进行构形热力学优化，综合协调部件热功转换过程、换热和电解过程，探明其中的强化传热、热功转换和物质转化物理机理，比较不同优化目标下三种联产系统的最优构形，分析热源温度、热源换热器面积分配、工质物性、不可逆性因子等参数对最优构形和最优性能的影响规律，探索三种联产系统能量高效梯级利用的一般规律，统筹研究三种联产系统传热、热功转换和物质转化的强化方法，建立系统部件结构和循环参数优化设计原则；分别以可用能率和第一定律效率、㶲输出率和㶲效率为优化目标、以主要影响参数为设计变量，使用NSGA-II对三种联产系统进行多目标优化，运用TOPSIS、LINMAP、Shannon Entropy决策方法从得到的Pareto前沿中选择出联产系统的最优设计方案。

3.1.4 三种联产系统的综合比较和最佳构型探索 针对串、并和混联的三种联产系统，综合比较不同串并联模式下联产系统中各换热器和透平机械最佳结构、循环最佳参数的异同以及联产系统性能的优劣，研究混联模式下的协同增效机制，在串并联方式的演化中探索循环最佳构型。分析不同太阳能和补燃热源强度和比例下三种联产系统的最优性能，综合比较不同热源条件下三种联产系统中各换热器和透平机械最佳结构、循环最佳参数的异同以及联产系统性能的优劣，探索运行参数和天气条件等对三种联产系统最优性能影响最小的优化设计原则。

3.2 实现途径展望

验证太阳能驱动热电冷氢联产系统构型的可行性和高效性；实现热电冷氢联产系统热力部件与热力循环性能的一体化全局优化；发现热力性能的新规律，发展性能优化的新方法，提出工程实际设计的指导性原则；促进形成一种多联产总能系统能量梯级利用优化理论的思路与框架。

(1) 建立三类联产系统的FTT新模型，以可用能率、第一定律效率、㶲输出率、㶲效率、㶲经济性能为优化目标，得出优化后的最佳设计参数。综合考虑可用能率、第一定律效率、㶲输出率、㶲效率、㶲经济性能等不同优化目标，应用NSGA-II得到联产系统多目标性能协调优化的Pareto前沿，并应用TOPSIS、LINMAP和Shannon Entropy决策方法从Pareto前沿中确定较为合适的最优解。

(2) 建成联产系统中塔式聚光太阳能集热器、换热器和透平机械三类典型设备的构形设计数理模型，探明在给定几何约束条件下三种设备与部件的关键几何参数与设备性能的基本关系，厘清不同工况条件下的主要影响因素及规律，结合人工神经网络与优化算法发展构形设计方法，获得以多种性能指标和复合性能指标为优化目标的单目标和多目标优化结果，提出新的结构设计原型，给出适应工程实际多样化设计需求的指导性原则。

(3) 建立融合部件结构和循环参数的三类联产系统模型，明晰联产系统可用能率、第一定律效率、㶲输出率和㶲效率与部件结构和循环参数的基本关系，实现热功转换过程、换热和电解过程在联产系统中的综合协调，完成联产系统的多目标构形热力学优化并得到Pareto前沿最优解集，基于TOPSIS、LINMAP和Shannon Entropy决策方法得到不同串并联模式下联产系统的最优构形设计方案，探明热源温度、热源换热器面积分配、工质物性、不可逆性因子等参数以及串并联模式对联产系统最优构形和最优性能的影响规律以及三类联产系统能量高效梯级利用的一般规律，获得联产系统部件结构和循环参数优化设计原则，促进形成一种联产总能系统能量梯级利用优化理论的思路与框架。

(4) 完成不同串并联模式下联产系统中各换热器和透平机械最佳结构、循环最佳参数的异同以及联产系统性能优劣的综合比较，阐明混联模式下的协同增效机制，得到联产系统的循环最佳构型，探明不同太阳能和补燃热源强度和比例对三种联产系统最优性能的影响规律。

3.3 主攻科学问题

3.3.1 联产系统的“热-电-冷-氢”协同优化机理及调控机制 一方面，对于本文建议研究的联产系统，产品输出有热、电、冷、氢四类，工质有集热

流体、燃气工质、超临界二氧化碳、有机工质、溴化锂溶液、纯水、氢气和氧气等流体,能量传递与转换子系统有集热流体传热回路、燃气轮机循环、超临界二氧化碳布雷顿循环、ORC、吸收式制冷循环、电解水制氢装置;三种联产系统是由这些能量传递与转换子系统通过串/并联拓扑结构关系耦合的结果,各种不同类型的产品输出、工质、能量传递与转换子系统及其耦合关系反映了联产系统优化问题内部蕴含的差异性。另一方面,对于联产系统的优化问题的约束条件和性能目标,如总热导率一定、可用能率、第一定律效率、㶲输出率、㶲效率、㶲经济性能等等,反映了联产系统优化问题蕴含的统一性。因此,如何综合协调上述联产系统优化问题的差异性和统一性,探索联产系统的"热-电-冷-氢"协同优化机理及调控机制是需要解决的第一个关键科学问题。

3.3.2 *热力部件的"流–结构–性能"耦合演化规律与传热和热功转换强化机理* 构形定律的思想核心是事物结构遵循为其"流"提供越来越便捷的通道而寻优演化,"构形设计(constructal design)"本身也已发展为"演化设计(evolution design)"。在热电冷氢联产系统中,塔式太阳能集热器、换热器、透平机械是该联产系统的主要设备,太阳能光热转换的能流、换热器中冷/热流体交换的热流、透平机械中热功转换的能流等均属于"流"的范畴,这些"流"与设备结构紧密关联、相互影响,共同决定设备的性能状态;而表征设备的性能有多种指标及其复合函数,不同性能指标各有侧重,其对应的最优结构不尽相同。因此,"流"与结构和性能之间,在物理上存在强耦合作用。为适应多样化的工程需求,实现热力部件的最优结构设计,开展主动设计,必须从物理机理层面探明"流-结构-性能"的耦合演化规律,从适应热量传递和能流转换最大化的工程需求角度,明晰其中的传热和热功转换强化机理。综上,热力部件"流-结构-性能"耦合演化规律与传热和热功转换强化机理是需要解决的第二个关键科学问题。

3.3.3 *联产系统的能量高效梯级利用与多参数构形热力学优化* 目前联产系统的研究多集中在循环参数优化方面,而换热器和透平机械等部件的结构对循环子系统性能有显著影响,进而影响联产系统的性能以及能量梯级利用的效率,此时联产系统没有实现真正的能量高效梯级利用。同时融合部件结构和循环参数的联产系统综合优化研究尚未见报道,其原因在于这种优化将使得联产系统的模型复杂化,需要优化的变量数目呈指数增加,使得整个联产系统性能优化比较困难。建立融合部件结构和循环参数的联产系统模型并对其开展构形热力学优化,解决热力学本质上深度提升联产系统性能和真正实现能量高效梯级利用,成为第三个关键科学问题。

3.4 研究方法分析

联产系统的传统工程优化大多是基于经验和统计数据进行的,以数值优化为主。本项目以构建能源高效深度利用的联产系统为研究背景,将从构形定律出发,围绕换热设备结构和循环参数综合优化这一科学问题,基于FTT、构形设计、构形热力学优化理论,建立关键部件和装置性能与结构之间的基本解析关系,综合运用数学解析、数值计算和实验研究相结合的研究方法,从物理本质上对其进行优化。

总体上采用数学解析、数值计算和实验研究相结合的方法进行研究。按照从简单到复杂的原则,总体上采取明确对象、数学建模、数学求解、数值优化、比较分析、实验验证和总结推广等方式开展联产系统的构形热力学优化研究。

3.5 研究路线建议

总体上按照确立优化问题、求解优化问题、分析比较结果、进一步考虑不同尺度和串接方式的影响、开展实验研究和总结形成理论方法的技术路线实施,如图5所示。

3.5.1 *联产系统FTT研究* 图6给出了联产系统FTT研究的技术路线。由浅入深,首先建立太阳能集热器、各循环和制氢子系统的FTT模型,明确各子系统的设计参数和优化变量,通过数值计算分析和优化其可用能率、第一定律效率、㶲输出率、㶲效率、㶲经济性能以及综合不同目标组合的多目标协调性能,然后分别建立三类热电冷氢联产系统模型,明确各子系统间的物质流与能量流拓扑关系,通过非线性规划方法、人工神经网络预测和多目标优化与决策方法进行数值计算,分析和优化其可用能率、第一定律效率、㶲输出率、㶲效率、㶲经济性能以及综合不同目标组合的多目标协调性能,分析不同特性参数对联产系统优化结果的定性与定量影响规律,确定联产系统在不同优化目标下的最优设计工况点。

3.5.2 *热力部件构形设计* 图7给出了热力部件构形设计的技术路线。首先,确定联产系统中的一型塔式聚光太阳能集热器、换热器、透平机械作为构形演化设计对象("流动"系统)。其次,明确

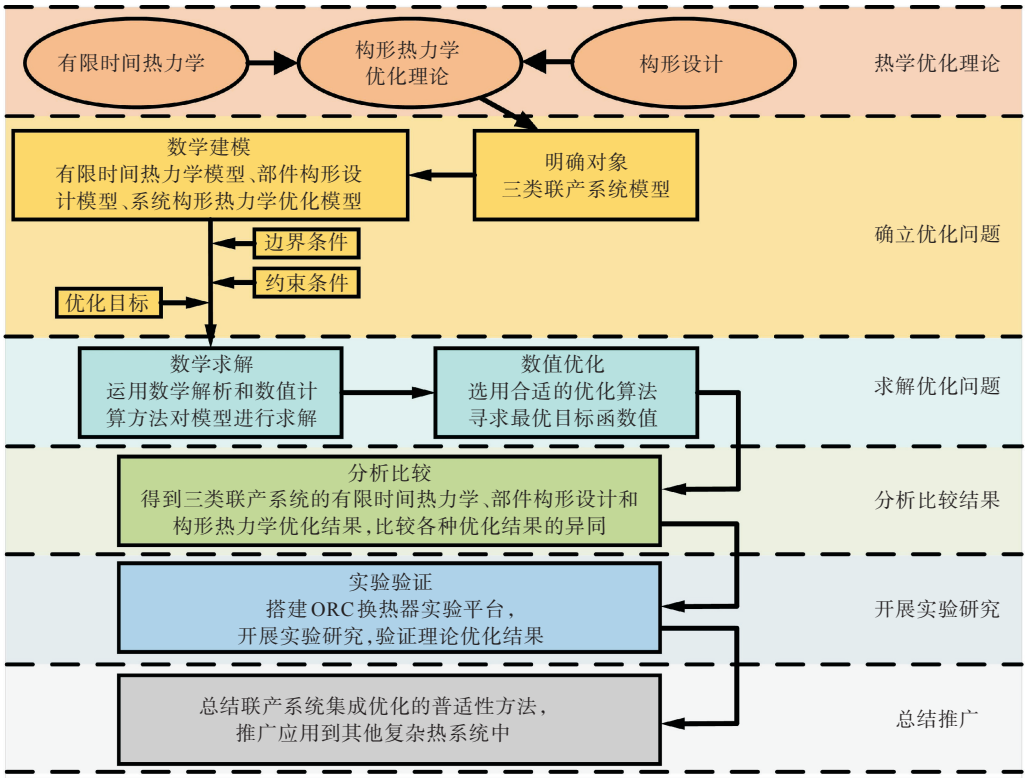

图5 技术路线总图

Fig. 5 General technical route

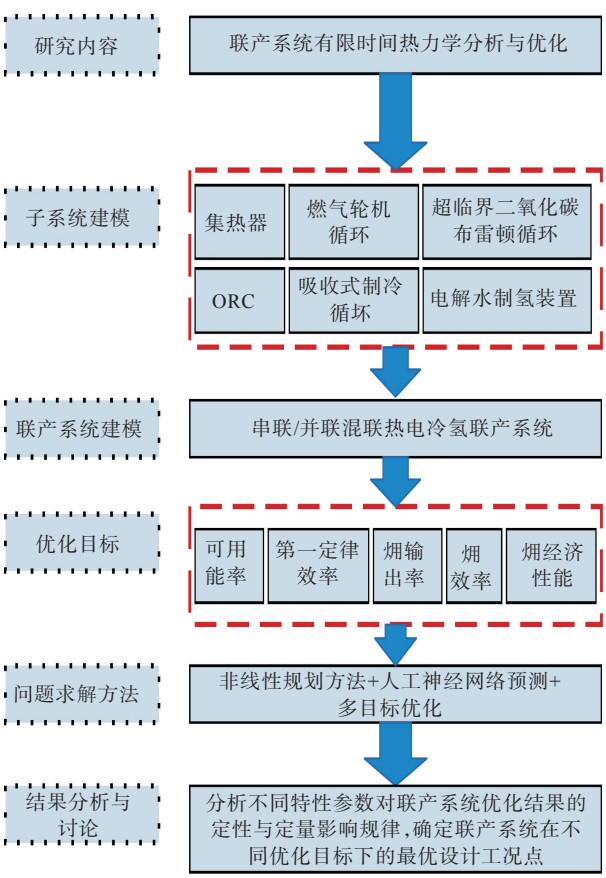

图6 联产系统FTT研究的技术路线

Fig. 6 Technical route of FTT study for polygeneration system

系统中要研究的“流”，如流体流、热流、能流等，选择构形演化设计目标，包括单目标、多目标、复合目标等。再次，确定设计对象的约束条件，考虑设计对象特性确定自由度的种类、个数和取值范围，构建设计对象的参数化模型，得到约束条件下设计自由度与其他非独立参数间的函数关系，生成对应自由度数值下的设计对象构形。由解析解法或数值解法建立并求解设计对象构形的数理模型，得到目标函数值。最终，对设计对象实施构形演化设计和机理分析，借助智能优化算法，以目标函数最大或最小进行优化计算，并通过分析优化过程中设计对象构形的变化规律，获得构形演化路径，揭示系统内部的“流”越来越容易通过的机理。

3.5.3 联产系统构形热力学优化 图8给出了联产系统构形热力学优化的技术路线。首先，建立融合部件结构和循环参数的三种联产系统模型。联产系统包含7个子系统，含有太阳能集热器、燃气轮机循环高温侧换热器、超临界二氧化碳布雷顿循环加热器、ORC蒸发器、吸收式制冷循环发生器、电解水制氢装置预热器和透平机械等多个关键部件，建立结构参数与质量流率、换热器面积比、不可逆性因子、工质压力、温度和压比等多个

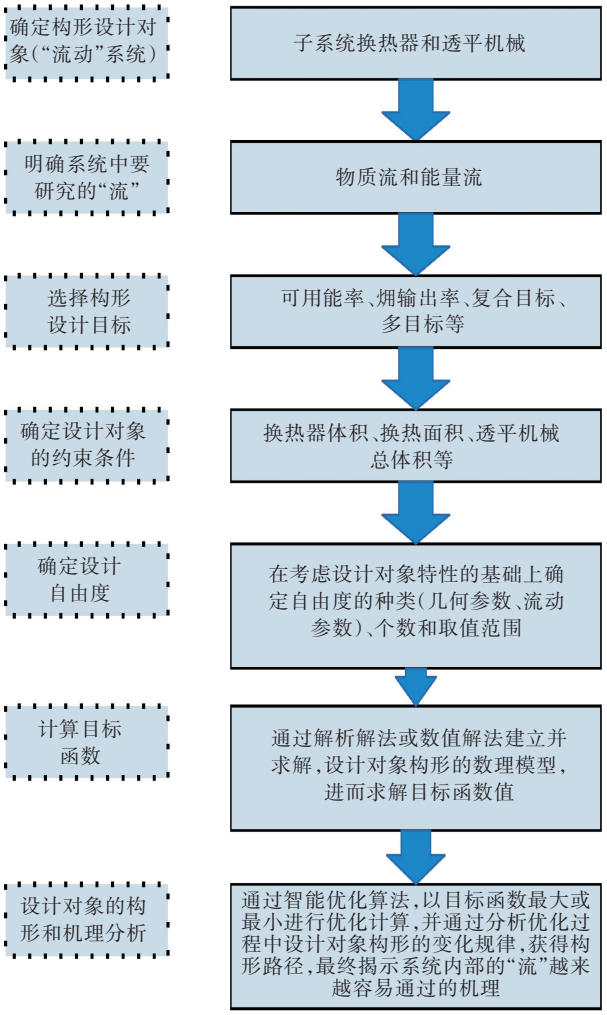

图7　热力部件构形设计的技术路线

Fig. 7　Technical route of constructal designs for thermal components

子系统循环参数的关系。其次，建立联产系统第一定律效率、可用能率、㶲输出率和㶲效率与部件结构和循环参数的基本关系，在一定的几何约束条件下借助智能优化算法完成联产系统的单目标和多目标构形热力学优化，综合协调部件热功转换过程、换热和电解过程，探明其中的强化传热、热功转换和物质转化物理机理，分析热源温度、换热器面积分配、工质物性、不可逆性因子等参数对最优构形和最优性能的影响规律。再次，针对不同天气条件的串、并和混联联产系统，比较不同循环串并联模式和天气条件下联产系统最优构形的异同。最后，探索三种联产系统能量高效梯级利用的一般规律，建立系统部件结构和循环参数优化设计原则，总结联产系统集成优化的普适性方法。

3.6　关键技术的分析与展望

3.6.1　*多能量转换系统多输出耦合条件下的复杂多联产系统的热力学建模与优化*　从能量转换系统类型上看，联产系统包含有燃气轮机循环、超临界二氧化碳布雷顿循环、ORC、吸收式制冷循环和电解水制氢装置等三类热力系统；从联产系统产品输出上看，包含有热、功、冷、氢等能量流和物质流输出。如何综合协调和定量描述以上不同能量转换系统和产品输出的物质流、能量流的关系，实现多能量转换系统多输出耦合条件下的复杂联产系统的热力学建模与优化是亟待解决的关键技术之一。

3.6.2　*具有工质复杂物性特征的热力部件多目标构形设计的高自由度建模与高效求解*　由于涉及有机工质和超临界二氧化碳等具有复杂物性特征的工质，要深度提升设备的性能，必须耦合工质的复杂物性特征开展设计计算，且必须是高自由度的优化设计，才能探明热力部件结构与性能的基本关系，但这必然带来巨量的迭代计算。限于以往的计算机算力和搜索方式，难以大规模并行计算，难以规划高效的搜索路径，在给定约束的全局设计空间内无法进行快速搜索从而获得多目标优化的最佳结果。为适应工程设计的多样化需求，获得具有广泛意义的性能规律和优化设计结果，必须针对研究对象及其应用场景，提出并构建合理的性能指标体系。因此，针对具体的热力部件，发展构形设计方法，开展耦合工质复杂物性特征的热力部件结构多目标构形设计的高自由度建模与高效求解，是亟待解决的关键技术之一。

3.6.3　*融合热力部件结构和循环参数的联产系统建模与快速优化*　已有联产系统的优化工作为循环参数优化研究。本文提出的联产系统包含7个子系统，含有太阳能集热器、燃气轮机循环高温侧换热器、超临界二氧化碳布雷顿循环加热器、ORC蒸发器、吸收式制冷循环发生器、电解水制氢装置预热器和透平机械等多个关键部件。循环子系统参数包括质量流率、换热器面积比、工质压力、温度和压比等多个关键循环参数。考虑以上关键热力部件结构和循环参数，同时根据能量梯级利用原则并结合各个部件的温度、压力和流量特点，建立同时融合热力部件结构和循环参数的联产系统模型是一项复杂而繁琐的工作。其中各个关键热力部件实际的物理约束和几何约束不同，考虑多个热力部件和循环参数后同时需要优化的变量数目呈指数增加，在巨量几何约束条件下实现高效而快速的优化算法进行全局优化尤为关键。因此，融合热力部件结构和循环参数的联产系统建模与快速优化是亟待解决的关键技术之一。

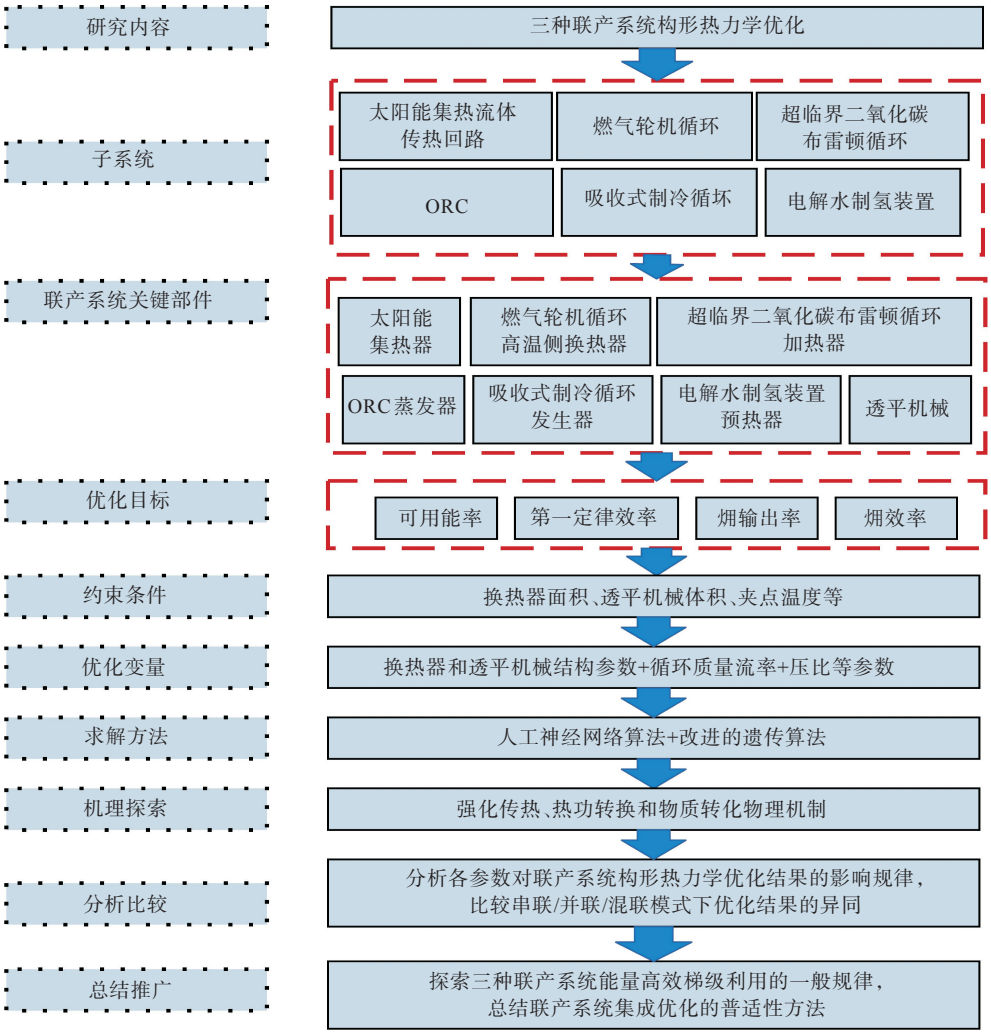

图8 联产系统构形热力学优化的技术路线

Fig. 8 Technical route of constructal thermodynamic optimizations for the polygeneration systems

4 结 论

在介绍热学优化新理论及其应用研究进展和综合分析能流特征和现有循环和多联产系统研究进展的基础上，本文提出以太阳能利用为中心，集成燃气轮机循环-ORC-超临界二氧化碳布雷顿循环-吸收式制冷循环-制氢过程，构建太阳能驱动的热电冷氢联产系统，为推进能源的深度利用和高效转化提供了新的可行路径，值得深入研究。

FTT和构形设计在考虑工程实际的热量传递、热功转化与热力循环问题中，具有经典热力学、传热学与其他结构设计理论所未涵盖的新优势，能够反映“有限时间”的过程特征，体现出实际过程与循环的不可逆特征，特别适合“有限尺寸（空间）”对象的优化设计，符合工程设备紧凑化、轻量化的设计需求。

本文作者将FTT与构形设计紧密结合，开创了新的学术方向——构形热力学优化。本文提出新的太阳能驱动热电冷氢联产系统，并对其开展热力部件与热力循环的一体化最优化，有助于促进形成一种联产总能系统能量梯级利用优化理论的思路与框架，学术新意突出，具引领性，属于学科前沿研究[157]。

综上，本文提出积极适应国家“双碳”战略重大需求，开展太阳能驱动热电冷氢联产系统的构建与构形热力学优化研究，新颖独特，顺应了工程实际需求和理论发展趋势，十分必要[1, 157]。

致谢

编辑和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] 金红光，宣益民，何雅玲，等. 工程热物理学科与能源可持续发展[J]. 中国科学：技术科学，2020，50

(10): 1245-1251.

[2] COLAKOGLU M, DURMAYAZ A. Energy, exergy and environmental-based design and multiobjective optimization of a novel solar-driven multi-generation system [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 227: 113603.

[3] CAO Y, HABIBI H, ZOGHI M, et al. Waste heat recovery of a combined regenerative gas turbine - recompression supercritical CO_2 Brayton cycle driven by a hybrid solar-biomass heat source for multi-generation purpose: 4E analysis and parametric study [J]. Energy, 2021, 236: 121432.

[4] ALROBAIAN A A. Energy, exergy, economy, and environmental (4E) analysis of a multi-generation system composed of solar-assisted Brayton cycle, Kalina cycle, and absorption chiller [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 204: 117988.

[5] KHANMOHAMMADI S, KIZILKAN O, MUSHARAVATI F. Comparative analyses of a novel solar tower assisted multi-generation system with re-compression CO_2 power cycle, thermoelectric generator, and hydrogen production unit [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47 (62): 25984-25999.

[6] KHANMOHAMMADI S, RAZI S, DELPISHEH M, et al. Thermodynamic modeling and multi-objective optimization of a solar-driven multi-generation system producing power and water [J]. Desalination, 2023, 545: 116158.

[7] CURZON F L, AHLBORN B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output [J]. American Journal of Physics, 1975, 43(1): 22-24.

[8] CHEN L G, WU C, SUN F R. Finite time thermodynamic optimization or entropy generation minimization of energy systems [J]. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 1999, 24(4):327-359.

[9] 陈林根. 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[10] ANDRESEN B. Current trends in finite-time thermodynamics [J]. Angewandte Chemie (International Edition), 2011, 50(12): 2690-2704.

[11] ANDRESEN B, SALAMON P. Future perspectives of finite-time thermodynamics [J]. Entropy, 2022, 24(5): 690.

[12] BEJAN A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(4): 799-816.

[13] 陈林根. 构形理论及其应用的研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(5): 505-524.

[14] BEJAN A. The principle underlying all evolution, biological, geophysical, social and technological [J]. Philosophical Transactions of the Royal Socity A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2023, 381(2252): 20220288.

[15] CHEN L G, FENG H J, XIE Z H, et al. Progress of constructal theory in China over the past decade [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 393-419.

[16] CHEN L G, YANG A B, FENG H J, et al. Constructal design progress for eight types of heat sinks [J]. Science China: Technological Sciences, 2020, 63(6) 879-911.

[17] CHEN L G, WU W J, FENG H J. Constructal Design for Heat Conduction [M]. London: Book Publisher International, 2021.

[18] 陈林根, 冯辉君, 吴志祥, 等. 船海用蒸汽动力装置构形优化理论研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(5): 727-754.

[19] MOUTIER J. ÉLÉMents de thermodynamique [M]. Gauthier-Villars: Paris, France, 1872.

[20] REITLINGER H B. Sur l'utilisation de la chaleur dans les machines a feu [M]. Liege: Vaillant-Carmanne: 1929.

[21] NOVIKOV II. The efficiency of atomic power stations (a review) [J]. Atommaya Energiya, 1957, 3: 409-412.

[22] CHAMBADAL P. Les Centrales Nuclearies[M]. Paris: Armand Colin, 1957.

[23] BEJAN A. Entropy generation minimization: the new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(3): 1191-1218.

[24] DURMAYAZ A, SOGUT O S, SAHIN B, et al. Optimization of thermal systems based on finite-time thermodynamics and thermoeconomics [J]. Progress Energy & Combustion Science, 2004, 30(2): 175-217.

[25] SIENIUTYCZ S. Complexity and complex chemo-electric systems [M]. Amsterdam: Elsevier, 2021.

[26] CHEN L G, GE Y L. Finite time thermodynamic optimization for air standard thermal power cycles [M]. London: Book Publisher International, 2023.

[27] 陈林根, 夏少军. 不可逆过程广义热力学动态优化研究进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(9): 981-1022.

[28] 陈林根, 夏少军, 冯辉君. 不可逆循环的广义热力学动态优化研究进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(11): 1223-1267.

[29] 陈林根, 李俊. 两热源循环热力学优化理论[M]. 北

京：科学出版社，2020.
[30] 刘存，殷勇，杨晗，等.不可逆量子斯特林热泵循环性能分析与优化[J].武汉工程大学学报，2021，43(2)：232-236.
[31] 魏轩宇，殷勇，汪浩，等.量子卡诺热机有效功率优化[J].武汉工程大学学报，2023，45(3)：312-318.
[32] BEJAN A. Street network theory of organization in nature [J]. Journal of Advanced Transportation，1996，30(2)：85-107.
[33] 陈林根，冯辉君.流动和传热传质过程的多目标构形优化[M].北京：科学出版社，2016.
[34] LORENTE S. Vascular systems for the thermal and hygric management [J]. Advances in Heat Transfer，2021，53：159-185.
[35] BEJAN A. Evolutionary design：heat and fluid flow together [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer，2022，132：105924.
[36] BEJAN A. Constructal design evolution versus topology optimization [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer，2023，141：106567.
[37] WU Z X，FENG H J，CHEN L G，et al. Constructal thermodynamic optimization for ocean thermal energy conversion system with dual-pressure organic Rankine cycle [J]. Energy Conversion and Management，2020，210：112727.
[38] FENG H J，WU Z X，CHEN L G，et al. Constructal thermodynamic optimization for dual-pressure organic Rankine cycle in waste heat utilization system [J]. Energy Conversion and Management，2021，227：113585.
[39] WU Z X，CHEN L G，FENG H J，et al. Constructal thermodynamic optimization for a novel Kalina-organic Rankine combined cycle to utilize waste heat [J]. Energy Reports，2021，7：6095-6106.
[40] GANJEHKAVIRI A，MOHD JAAFAR M N. Multi-objective particle swarm optimization of flat plate solar collector using constructal theory [J]. Energy，2020，194：116846.
[41] JATAU T，BELLO-OCHENDE T. Constructal design of flat plate solar collector [J]. Proceedings of the Romanian Academy Series A，2018，19：160-165.
[42] 石俊朝，冯辉君，陈林根，等.太阳能海洋热能转换系统中平板集热器构形设计[J].中国科学：技术科学，2022，52：403-414.
[43] GAO S，WANG Y J，LI Y，et al. Performance analysis of S-CO_2 tube with high non-uniform heat flux：thermal-fluid-structural evaluation and optimization [J]. Applied Thermal Engineering，2023，231：120849.
[44] LIU P，WU J F，CHEN L G，et al. Numerical analysis and multi-objective optimization design of parabolic trough receiver with ribbed absorber tube [J]. Energy Reports，2021，7：7488-7503.
[45] MERCHÁN R P，SANTOS M J，MEDINA A，et al. High temperature central tower plants for concentrated solar power：2021 overview [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2022，155：111828.
[46] HE Y L，QIU Y，WANG K，et al. Perspective of concentrating solar power [J]. Energy，2020，198：117373.
[47] YU Q，FU P，YANG Y H，et al. Modeling and parametric study of molten salt receiver of concentrating solar power tower plant [J]. Energy，2020，200：117505.
[48] WANG W Q，QIU Y，LI M J，et al. Coupled optical and thermal performance of a fin-like molten salt receiver for the next-generation solar power tower [J]. Applied Energy，2020，272：115079.
[49] MARTINEK J，JAPE S，TURCHI C S. Evaluation of external tubular configurations for a high-temperature chloride molten salt solar receiver operating above 700 °C [J]. Solar Energy，2021，222：115-128.
[50] GENTILE G，PICOTTI G，BINOTTI M，et al. A comprehensive methodology for the design of solar tower external receivers [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2024，193：114153.
[51] LE ROUX W G，BELLO-OCHENDE T，MEYER J P. A review on the thermodynamic optimisation and modelling of the solar thermal Brayton cycle [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2013，28：677-690.
[52] 佐藤豪.燃气轮机循环理论[M].北京：机械工业出版社，1983.
[53] GOODARZI M. Comparative energy analysis on a new regenerative Brayton cycle [J]. Energy Conversion and Management，2016，120：25-31.
[54] OLUMAYEGUN O，WANG M，KELSALL G. Thermodynamic analysis and preliminary design of closed Brayton cycle using nitrogen as working fluid and coupled to small modular Sodium-cooled fast reactor (SM-SFR) [J]. Applied Energy，2017，191：436-453.
[55] LIU H Q，CHI Z R，ZANG S S. Optimization of a closed Brayton cycle for space power systems [J]. Applied Thermal Engineering，2020，179：115611.
[56] CHEN L G，WANG W H，SUN F R，et al. Closed intercooled regenerator Brayton-cycle with constant-temperature heat reservoirs [J]. Applied Energy，

2004, 77(4): 429-446.

[57] 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[J]. 热力透平, 2012, 41(3): 171-178, 208.

[58] NASERIAN M M, FARAHAT S, SARHADDI F. Exergoeconomic multi objective optimization and sensitivity analysis of a regenerative Brayton cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117: 95-105.

[59] KAUSHIK S C, KUMAR R, ARORA R. Thermo-economic optimization and parametric study of an irreversible regenerative Brayton cycle [J]. Journal of Thermal Engineering, 2016, 2(4): 861-870.

[60] CHANDRAMOULI R, RAVI KIRAN SASTRY G, GUGULOTHU S K, et al. Multi-objective optimization of thermo-ecological criteria-based performance parameters of reheat and regenerative Braysson cycle [J]. Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology, 2021, 143(7): 072106.

[61] PRAJAPATI P, PATEL V, RAJA B D, et al. Thermal efficiency and specific work optimization of combined Brayton and inverse Brayton cycle: a multi-objective approach [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 37: 101624.

[62] ROMANO L F R, RIBEIRO G B. Optimization of a heat pipe-radiator assembly coupled to a recuperated closed Brayton cycle for compact space power plants [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 196: 117355.

[63] TANG C Q, CHEN L G, FENG H J, et al. Four-objective optimization for an improved irreversible closed modified simple Brayton cycle [J]. Entropy, 2021, 23(3): 282.

[64] QIU X F, CHEN L G, GE Y L, et al. Efficient power analysis and five-objective optimization of a simple endoreversible closed Brayton cycle [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 39: 102415.

[65] CHEN L G, FENG H J, GE Y L, et al. Power and efficiency optimizations for an open cycle two shaft gas turbine power plant [J]. Propulsion and Power Research, 2023, 12(4): 457-466.

[66] 廖吉香, 刘兴业, 郑群, 等. 超临界CO_2发电循环特性分析[J]. 热能动力工程, 2016, 31(5): 40-46.

[67] XIN T, XU C, YANG Y. Thermodynamic analysis of a novel supercritical carbon dioxide Brayton cycle based on the thermal cycle splitting analytical method [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113458.

[68] WANG S, WU C, LI J. Exergoeconomic analysis and optimization of single-pressure single-stage and multi-stage CO_2 transcritical power cycles for engine waste heat recovery: a comparative study [J]. Energy, 2018, 142: 559-577.

[69] NA S I, KIM M S, BAIK Y J, et al. Optimal allocation of heat exchangers in a supercritical carbon dioxide power cycle for waste heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 112002.

[70] 夏少军, 金晴龙, 吴志祥. 回热型超临界二氧化碳布雷顿循环㶲效率分析与优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 111-120.

[71] 金晴龙, 夏少军, 吴志祥. 回热型S-CO_2循环基本性能分析与优化[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 15-26.

[72] JIN Q L, XIA S J, LI P L, et al. Multi-objective performance optimization of regenerative S-CO_2 Brayton cycle based on neural network prediction [J]. Energy Conversion and Management: X, 2022, 14: 100203.

[73] 金晴龙, 夏少军, 王超. 预热型S-CO_2循环㶲性能分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 1072-1083.

[74] JIN Q L, XIA S J, XIE T C. Ecological function analysis and optimization of recompression S-CO_2 cycle for gas turbine waste heat recovery [J]. Entropy, 2022, 24(5): 723.

[75] JIN Q L, XIA S J, CHEN L G. A modified recompression S-CO_2 Brayton cycle and its thermodynamic optimization [J]. Energy, 2023, 263 (Part E): 126015.

[76] LI J, PENG X, YANG Z, et al. Design, improvements and applications of dual-pressure evaporation organic Rankine cycles: a review [J]. Applied Energy, 2022, 311: 118609.

[77] PING X, YANG F B, ZHANG H G, et al. Information theory-based dynamic feature capture and global multi-objective optimization approach for organic Rankine cycle (ORC) considering road environment [J]. Applied Energy, 2023, 348: 121569.

[78] ZHANG J, HU X D, WU D, et al. A comparative study on design and performance evaluation of organic Rankine cycle (ORC) under different two-phase heat transfer correlations [J]. Applied Energy, 2023, 350: 121724.

[79] MANA A A, KAITOUNI S I, KOUSKSOU T, et al. Enhancing sustainable energy conversion: comparative study of superheated and recuperative ORC systems for waste heat recovery and geothermal

applications, with focus on 4E performance [J]. Energy, 2023, 284: 128654.

[80] LEE W Y, KIM M, SOHN Y J, et al. Power optimization of a combined power system consisting of a high-temperature polymer electrolyte fuel cell and an organic Rankine cycle system [J]. Energy, 2016, 113: 1062-1070.

[81] CHEN W J, FENG H J, CHEN L G, et al. Optimal performance characteristics of subcritical simple irreversible organic Rankine cycle [J]. Journal of Thermal Sciences, 2018, 27(6): 555-562.

[82] FENG H J, CHEN W J, CHEN L G, et al. Power and efficiency optimizations of an irreversible regenerative organic Rankine cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 220: 113079.

[83] LIU Q, CHEN R, YANG X L, et al. Thermodynamic analyses of sub- and supercritical ORCs using R1234yf, R236ea and their mixtures as working fluids for geothermal power generation [J]. Energies, 2023, 16(15): 5676.

[84] YANG W H, FENG H J, CHEN L G, et al. Power and efficiency optimizations of a simple irreversible supercritical organic Rankine cycle [J]. Energy, 2023, 278: 127755.

[85] ZHI L H, HU P, CHEN L X. A novel optimization method for transcritical-subcritical parallel organic Rankine cycle under variable engine loads and cooling water temperature [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 51: 103675.

[86] FENG J S, CHENG X N, YAN Y R, et al. Thermodynamic and thermo-economic analysis, performance comparison and parameter optimization of basic and regenerative organic Rankine cycles for waste heat recovery [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 52: 103816.

[87] 马晓锋, 张舒涵, 何勇. PEM电解水制氢技术的研究现状与应用展望[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 420-427.

[88] 何泽兴, 史成香, 陈志超. 质子交换膜电解水制氢技术的发展现状及展望[J]. 化工进展, 2021, 40(9): 4762-4773.

[89] NI M, LEUNG M K H, LEUNG D Y C. Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10): 2748-2756.

[90] NIEMINEN J, DINCER I, NATERER G. Comparative performance analysis of PEM and solid oxide steam electrolysers [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(20): 10842-10850.

[91] 张后程. 电解水制氢和燃料电池系统的性能特性与参数优化设计[D]. 厦门: 厦门大学, 2012.

[92] GARCÍA-VALVERDE R, ESPINOSA N, URBINA A. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(2): 1927-1938.

[93] ABDOLLAHIPOUR A, SAYYAADI H. Optimal design of a hybrid power generation system based on integrating PEM fuel cell and PEM electrolyzer as a moderator for micro-renewable energy systems [J]. Energy, 2022, 260: 124944.

[94] FEIDT M. Evolution of thermodynamic modelling for three and four heat reservoirs reverse cycle machines: a review and new trends [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(1): 8-23.

[95] XU Z Y, WANG R Z. Absorption refrigeration cycles: categorized based on the cycle construction [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 62: 114-136.

[96] AHMADI M H, AHMADI M A. Multi objective optimization of performance of three-heat-source irreversible refrigerators based algorithm NSGA-II [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 784-794.

[97] FEIDT M. Thermodynamics applied to reverse cycle machines, a review [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(7): 1327-1342.

[98] QIN X Y, CHEN L G, GE Y L, et al. Finite time thermodynamic studies on absorption thermodynamic cycles: a state of the arts review [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38(3): 405-419.

[99] MEDJO NOUADJE B A, NGOUATEU WOUAGFACK P A, TCHINDA R. Finite-time thermodynamics optimization of an irreversible parallel flow double-effect absorption refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 67: 433-444.

[100] QIN X Y, ZHANG K, CHEN L G, et al. Ecological and ECOP performances of an irreversible two-stage absorption refrigeration cycle [C]// Proceedings of 13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFA2017), Portoroz, Slovenia, July 17-19, 2017: 40-45.

[101] FOSSI NEMOGNE R L, NGOUATEU WOUAGFACK P A, MEDJO NOUADJE B A, et al. Multi-objective optimization and analysis of performance of a four-temperature-level multi-irreversible absorption heat pump [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 234: 113967.

[102] ZHAI C, WU W. Energetic, exergetic, economic, and environmental analysis of microchannel membrane-based absorption refrigeration system driven by various energy sources [J]. Energy, 2022, 239(Part B): 122193.

[103] CANBOLAT A S, BADEMLIOGLU A H, ARSLANOGLU N, et al. Performance optimization of absorption refrigeration systems using Taguchi, ANOVA and Grey Relational Analysis methods [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 874-885.

[104] FELLAH A, BOUKHCHANA Y, BRAHIM A B. Quasi-real performances of an irreversible solar absorption refrigeration cycle [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 100: 21-26.

[105] KEUNE G F, NGOUATEU WOUAGFACK P A, TCHINDA R. Local stability analysis of an irreversible absorption refrigerator powered by a wood boiler [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 115: 83-95.

[106] YE Z L, HOLUBEC V. Maximum efficiency of absorption refrigerators at arbitrary cooling power [J]. Physical Review E, 2021, 103(5): 052125.

[107] MOHANTA S, SARYAL S, AGARWALLA B K. Universal bounds on cooling power and cooling efficiency for autonomous absorption refrigerators [J]. Physical Review E, 2022, 105(3): 034127.

[108] ABBAS N Y, MUSTAFA A W, ASKERA M K A A. Constructal design of heat exchangers: a review [J]. International Journal of Advances in Engineering and Management, 2022, 3(12):27-40.

[109] DA SILVA A K, LORENTE S, BEJAN A. Constructal multi-scale tree-shaped heat exchanger [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(3): 1709-1718.

[110] ZIMPAROV V D, DA SILVA A K, BEJAN A. Constructal tree-shaped parallel flow heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(23/24): 4558-4566.

[111] 冯辉君, 陈林根, 谢志辉, 等. 基于火积理论的H型多尺度换热器构形优化[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(2): 169-177.

[112] BEJAN A, ALALAIMI M, SABAU A S, et al. Entrance-length dendritic plate heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 1350-1356.

[113] NEJAD A H, EKICI K, SABAU A S, et al. Counter cross-flow evaporator geometries for supercritical organic Rankine cycles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 425-435.

[114] FENG H J, CHEN L G, WU Z X, et al. Constructal design of a shell-and-tube heat exchanger for organic fluid evaporation process [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 131: 750-756.

[115] CAI C G, FENG H J, CHEN L G, et al. Constructal design of a shell-and-tube evaporator with ammonia-water working fluid [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 541-547.

[116] WU Z X, FENG H J, CHEN L G, et al. Performance optimization of a condenser in OTECS based on constructal theory and multi-objective genetic algorithm [J]. Entropy, 2020, 22: 641.

[117] 陈林根, 冯辉君, 谢卓君, 等. 基于火积理论的船用锅炉构形优化[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(10): 1208-1218.

[118] LIU H Y, XIE Z H, LU Z Q, et al. Constructal optimization of double-layer asymmetric flower baffles [J]. Energy, 2023, 280: 128254.

[119] YAO Y, LIU H, GUO X, et al. Numerical and experimental investigations of the heat transfer and fatigue life of a new W-type mini microchannel heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 212: 124293.

[120] FAIZAN M, ALMERBATI A. Evolutionary design of compact counterflow heat exchanger [J]. Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology, 2023, 145(3): 032102.

[121] MUSTAFA A W, SULAIMAN U A, AWAD M M. Constructal design of crossflow heat exchanger with concentric and eccentric circular fins [J]. Heat Transfer, 2024, doi: 10.1002/htj.22989.

[122] YU M J, XU L, CUI H C, et al. Characteristics and potential of a novel inclined-flow Stirling regenerator constructed by sinusoidal corrugated channels [J]. Energy, 2024, 288: 129686.

[123] WANG E H, PENG N J. A review on the preliminary design of axial and radial turbines for small-scale organic Rankine cycle [J]. Energies, 2023, 16(8): 3423.

[124] DU Y, YANG Y, HU D S, et al. Off-design performance comparative analysis between basic and parallel dual-pressure organic Rankine cycles using radial inflow turbines [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 138: 18-34.

[125] SUN Q X, WANG Y X, CHENG Z Y, et al. Thermodynamic and economic optimization of a double-pressure organic Rankine cycle driven by low-temperature heat source [J]. Renewable

Energy，2020，147：2822−2832.

[123] AL JUBORI A M，AL-DADAH R，MAHMOUD S. An innovative small-scale two-stage axial turbine for low-temperature organic Rankine cycle [J]. Energy Conversion and Management，2017，144：18−33.

[127] JEONG J S，LEE S W. Full aerodynamic loss data for efficient squealer tip design in an axial flow turbine [J]. Energy，2020，206：118170.

[128] KIM Y S，LORENTE S，BEJAN A. Distribution of size in steam turbine power plants [J]. International Journal of Energy Research，2009，33(11)：989−998.

[129] BEYENE A，PEFFLEY J. Constructal theory，adaptive motion，and their theoretical application to low-speed turbine design [J]. Journal of Energy Engineering，2009，135(4)：112−118.

[130] STANESCU G，BARBU E，VILAG V，et al. Constructal approach on the feasibility of compressed air temperature control by evaporative cooling in gas turbine power plants [J]. Proceedings of the Romanian Academy，Series A，Mathematics，Physics，Technical Science，Information Science，2018，18(Special issue)：201−206.

[131] WU Z X，FENG H J，CHEN L G，et al. Optimal design of dual-pressure turbine in OTEC system based on constructal theory [J]. Energy Conversion and Management，2019，201：112179.

[132] CHEN L G，WU Z X，FENG H J，et al. Constructal design for dual-pressure axial-flow turbine in organic Rankine cycle [J]. Energy Reports，2022，8：45−55.

[133] WANG Z，MA Y，CAO M L，et al. Energy，exergy，exergoeconomic，environmental (4E) evaluation and multi-objective optimization of a novel SOFC-ICE-SCO_2-HRSG hybrid system for power and heat generation [J]. Energy Conversion and Management，2023，291：117332.

[134] MEHRABIAN M J，MANESH M H K，JEONG D H. 4E and risk assessment of a novel integrated biomass driven polygeneration system based on integrated SCO_2-ORC-AD-SOFC- SOEC-PEMFC-PEMEC [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments，2023，58：103317.

[135] YOUSEF M S，SANTANA D. Thermodynamic and exergoeconomic optimization of a new combined cooling and power system based on supercritical CO_2 recompression Brayton cycle [J]. Energy Conversion and Management，2023，295：117592.

[136] MUBASHIR W，ADNAN M，ZAMAN M，et al. Thermo-economic evaluation of supercritical CO_2 Brayton cycle integrated with absorption refrigeration system and organic Rankine cycle for waste heat recovery [J]. Thermal Science and Engineering Progress，2023，44：102073.

[137] YOUSEF M S，SANTANA D. Energy and exergy analyses of a recompression supercritical CO_2 cycle combined with a double-effect parallel absorption refrigeration cycle [J]. Energy Reports，2023(9)：195−201.

[138] BISHAL S S，FAYSAL D F，EHSAN M M，et al. Performance evaluation of an integrated cooling and power system combining supercritical CO_2，gas turbine，absorption refrigeration，and organic rankine cycles for waste energy recuperating system [J]. Results in Engineering，2023，17：100943.

[139] ZENG R，GAN J J，GUO B X，et al. Thermodynamic performance analysis of solid oxide fuel cell-ombined cooling，heating and power system with integrated supercritical CO_2 power cycle -organic Rankine cycle and absorption refrigeration cycle [J]. Energy，2023，283：129133.

[140] CHENG K L，LI J H，YU J C，et al. Novel thermoelectric generator enhanced supercritical carbon dioxide closed-Brayton-cycle power generation systems：performance comparison and configuration optimization [J]. Energy，2023，284：129368.

[141] TAO H，MAMUN K A，ALI A，et al. Performance enhancement of integrated energy system using a PEM fuel cell and thermoelectric generator [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2024，51 (Part D)：1280−1292.

[142] AMIRI M B，YARI M，RANJBAR F，et al. Waste heat recovery from a flame-assisted fuel cell utilizing recompression supercritical CO_2 Brayton and dual-pressure organic Rankine cycles [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2024，51 (Part D)：1293−1310.

[143] IRANI A S，FATTAHI A. On the combined Brayton-Kalina cycle with PEM hydrogen production：an exergoeconomic analysis and multi-objective optimization with LINMAP decision maker [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2024，52 (Part A)：289−304.

[144] LI Y Y，YANG Y P. Thermodynamic analysis of a novel integrated solar combined cycle [J]. Applied Energy，2014，122：133−142.

[145] LIU Q B，BAI Z，WANG X H，et al. Investigation of thermodynamic performances for two solar-biomass hybrid combined cycle power generation

systems [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 122: 252-262.

[146] LINARES J I, ARENAS E, CANTIZANO A, et al. Innovative integrated solar combined cycle: enhancing dispatchability with a partial recuperative gas turbine and supercritical CO_2 bottoming cycle, coupled with an ORC[J]. Solar Energy, 2023, 264: 112075.

[147] SHEYKHLOU H, AGHDASH M M, JAFARMADAR S, et al. Multi-aspect prediction of the sensitivity of thermodynamic/thermoeconomic performance metrics of an innovative solar-driven trigeneration system utilizing thermal energy storage [J]. Energy, 2023, 284:128722.

[148] KARTHIKEYAN B, KUMAR G P. Thermoeconomic and optimization approaches for integrating cooling, power, and green hydrogen production in dairy plants with a novel solar-biomass cascade ORC system [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 295:117645.

[149] CHEN L G, FENG H J, SUN F R. Exergoeconomic performance optimization for a combined cooling, heating and power generation plant with an endoreversible closed Brayton cycle [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 54 (11/12): 2785-2801.

[150] FENG H J, CHEN L G, SUN F R. Exergoeconomic optimal performance of an irreversible closed Brayton cycle combined cooling, heating and power plant [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(9): 4661-4673.

[151] YANG B, CHEN L, GE Y L, et al. Exergy performance analyses of an irreversible two-stage intercooled regenerative reheated closed Brayton CHP plant [J]. International Journal of Exergy, 2014, 14(4): 459-483.

[152] YANG B, CHEN L, GE Y L, et al. Finite time exergoeconomic performance of a real intercooled regenerated gas turbine cogeneration plant. Part 2: heat conductance distribution and pressure ratio optimization [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2014, 9(4): 262-267.

[153] YANG B, CHEN L, GE Y L, et al. Finite time exergoeconomic performance of a real, intercooled, regenerated gas turbine cogeneration plant. Part 1: model description and parametric analyses [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2014, 9(1): 29-37.

[154] CHEN L G, FENG H J, SUN F R. Exergy optimization for irreversible closed Brayton cycle combined cooling, heating and power generation plant [J]. Journal of Energy Institute, 2013, 86(2): 97-106.

[155] YANG B, CHEN L G, SUN F R. Exergy performance optimization of an endoreversible variable-temperature heat reservoirs intercooled regenerated Brayton cogeneration plant [J]. Journal of Energy Institute, 2016, 89(1): 1-11.

[156] CHEN L G, YANG B, FENG H J, et al. Performance optimization of an open simple-cycle gas turbine combined cooling, heating and power plant driven by basic oxygen furnace gas in China's steelmaking plants [J]. Energy, 2020, 203: 117791.

[157] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 工程热物理与能源利用学科发展战略研究报告(2021—2030)[M]. 北京:科学出版社, 2023.

本文编辑:张 瑞