船海用蒸汽动力装置构形优化理论研究进展

陈林根^{1,2,3*}, 冯辉君^{1,2,3*}, 吴志祥⁴, 唐威⁴, 谢卓君⁴, 戈延林^{1,2,3}

1. 武汉工程大学热科学与动力工程研究所, 武汉 430205;

2. 湖北省绿色化工装备工程技术研究中心, 武汉 430205;

3. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205;

4. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033

* E-mail: lgchenna@yahoo.com, lingenchen@hotmail.com; huijunfeng@139.com

收稿日期: 2020-09-20; 接受日期: 2021-01-25; 网络版发表日期: 2021-10-27

国家自然科学基金(批准号: 51779262)资助项目

摘要 本文从船舶蒸汽动力装置和海洋热能转换装置两个方面介绍了船海用蒸汽动力装置构形优化理论研究进展. 首先回顾了包括蒸发器、过热器、经济器、锅炉整体和冷凝器在内的船舶蒸汽动力装置主要换热部件模型和包括蒸发器、冷凝器、双压透平和整体系统在内的海洋热能转换装置主要换热和能量转换部件和系统模型, 然后介绍了基于熵产生最小化理论、有限时间热力学理论、焓理论和构形理论等现代热力学理论的两种装置主要部件的构形优化和海洋热能转换系统的构形热力学优化工作, 重点比较了优化前后、不同优化目标和不同系统结构下优化结果的异同. 最后, 对构形热力学优化应用于一般动力系统能量传递和转换过程优化设计和节能降耗的理论研究做出了展望.

关键词 船舶蒸汽动力装置, 海洋热能转换装置, 构形理论, 有限时间热力学, 焓理论, 构形热力学优化

1 引言

蒸汽动力技术发展历史悠久, 在我国军事和民用领域蒸汽动力装置占有十分重要的地位^[1~7]. 在军事领域, 蒸汽动力在大型常规和核动力船艇等中有重要应用; 在民用领域, 蒸汽动力在火力发电厂中占有主导地位. 此外, 我国海洋热能、地热、工业余热等中低温热能资源均较为丰富^[8], 前两者已成为未来能源战略的重要选择, 基于各种工质的朗肯循环在对这些热能资源的利用中也发挥了重要作用. 在陆用大型电站中, 由于空间较大且热源温度较高, 超超临界压力蒸

汽动力循环的热效率接近55%, 因此火力发电蒸汽动力技术较为成熟. 而在船舶有限空间条件或中低温热能资源条件下, 蒸汽动力装置的热效率始终较低, 在这两种条件下对蒸汽动力装置开展性能优化对国民经济和国防军事各领域船艇用常规和核动力装置、电站和深潜用海洋热能转换装置以及一般有机朗肯循环装置等动力装置的性能提升具有重要意义.

在对蒸汽动力装置性能优化的研究中, 蒸发温度、工质流量和换热面积分配是影响朗肯循环性能的重要参数, 对这几个参数开展优化有助于提高其性能. 锅炉和冷凝器是朗肯循环重要的两个换热设备, 已有

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 727–754

Chen L G, Feng H J, Wu Z X, et al. Progress in theoretical study on constructal optimization of marine steam power plants (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 727–754, doi: 10.1360/SST-2020-0393

的研究表明冷凝器是朗肯循环能量损失最大的部位, 锅炉是朗肯循环损失最大的部位^[9]。换热设备的结构是影响其换热性能的重要因素, 因此对朗肯循环各换热设备进行结构优化设计也有助于提高其性能。如图1所示, 对蒸汽动力装置性能优化的传统研究主要集中在换热设备性能优化和朗肯循环性能优化的单独优化研究, 将两方面优化结合起来的蒸汽动力装置性能优化研究工作是其发展的新方向。在有限空间和经济条件下, 蒸汽动力装置的体积、成本、输出功和热效率是设计中需要考虑的重要指标, 这要求蒸汽动力装置的性能优化需要进行多目标优化设计。伴随着蒸汽动力技术的深度发展和实际应用需求, 将换热设备结构优化和循环参数优化结合起来的多目标优化也成为蒸汽动力装置性能优化的重点关注方向之一(图1)。

由于空间和热源品位的限制, 船舶蒸汽动力朗肯循环和海洋热能驱动的朗肯循环性能有待进一步提升, 迫切需要引入新的方法和理论对其开展综合优化。基于以上考虑, 本文作者以船舶蒸汽动力朗肯循环和海洋热能驱动的朗肯循环为研究对象, 基于构形理论、熵产生最小化理论、焓理论和有限时间热力学理论等现代热学优化基础理论, 开展了船海用蒸汽动力装置多目标构形优化研究, 探明了蒸汽动力装置整体性能与设备几何结构之间的关系, 得到了不同需求下

的蒸汽动力装置最优结构设计方案, 在降低热功转换过程和设备换热过程不可逆性的同时使得各热功转换和换热过程综合协调, 实现了蒸汽动力装置性能的较大提升, 并尝试探索蒸汽动力装置结构设计的一般方法和推广应用到一般动力系统的性能优化中。本文将以上船海用蒸汽动力装置的构形研究工作进行介绍, 阐明这些工作的重要理论价值和广阔应用前景。

2 船海用蒸汽动力装置热学优化理论

在现代热学优化基础理论中, 构形理论^[10~15]、熵产生最小化理论^[16~18]、场协同理论^[19~21]、焓理论^[19,22~29]、有限时间热力学理论^[30~35]和广义热力学优化理论^[31,32,36~40]是6个具有代表性的理论。下面将简要叙述本文所涉及的构形理论、熵产生最小化理论、焓理论和有限时间热力学理论。

2.1 构形理论和构形热力学优化

1996年, 美国杜克大学Bejan教授^[11]在对街道网络的形成和发展进行建模和数学分析后提出了构形理论。构形理论的精髓为构形定律, 它可表述为^[10]: “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

图1 (网络版彩图)蒸汽动力装置性能优化研究发展的新方向

Figure 1 (Color online) New direction of performance optimization research of steam power plant.

因。”或可更简单地表述为:事物结构源自于性能达到最优。Bejan在拉丁词“Construere(构建)”的基础上创造了“Constructal”一词指代“构形”之意,表达了与分形(Fractal)时间之矢相反的含义。“构形”中文译名最早由陈林根等人于1998年提出,既暗含事物的内部结构与外部形状之意,又表达了与分形(Fractal)相对、从小到大的构造过程,与“Constructal”一词原意吻合。构形理论的研究内容包罗万象,可以描述和解释各种自然现象,也可以用于各种工程问题设计,多学科、多目标、多尺度构形优化是其发展的前沿和趋势。构形理论可用来阐明各种系统形成的“几何哲学”,为其性能的提升提供了理论指导,研究对象涉及工程界中的热^[10-13,15,41-44]、机械^[10,45]、流体流动^[10-13,46]、电^[11]、磁^[11]、化学^[12,13]等学科,以及自然界中的生命系统和非生命系统^[10,14,47]等,其中肋片传热传质^[42]、钢板力学性能^[45]、树状网络非稳态流^[46]、人类进化^[47]等研究工作是构形理论的最新研究进展。构形热力学优化^[17,48-50]是基于构形定律将热力学优化与工程设计和自然演化相结合,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各种传统和类热力过程和系统性能进行的优化。构形热力学优化这一命名主要是为了与传统热力学优化和构形优化区别开来。

构形优化方法一般在材料和系统体积约束条件下采用由小到大的组装方法优化系统外部形状和内部传输路径结构(如长度、宽度、厚度、半径、角度、数目、位置等)以寻求其最优性能。但随着构形理论研究对象的拓展,对于不便逐级构造的对象在构形优化中也不具有由小到大组装的特点,此时需要注意构形优化的其他特征。例如,Boichot等人^[51]、Song和Guo^[52]研究了方形产热体的散热优化问题,将研究对象划分成了许多微小的单元格,采用元胞自动机、仿生优化和模拟退火等算法判断是否需要某一单元格中布置高导热材料,最终实现了高导热材料在产热体内的分布优化,但这些工作不属于构形优化,没有体现构形理论中典型的优化高导热通道长度和宽度的特征。Hajmohammadi等人^[53]虽然没有采用由小到大的组装方法对产热体散热问题进行研究,但优化了高导热通道的长度、宽度和位置,这是除材料和系统体积约束条件外,由优化变量所体现的构形优化的重要特征。在早期的一些构形优化研究中,整体空间的尺寸是由推导结果决定的^[54],而不是事先给定的,这与工程应

用显然是不太一致的。后来许多学者在给定空间条件下基于构形理论优化了各种传输过程和系统,在这些优化中采用了给定传输路径的布置方式来优化传输路径的几何结构。由于传输路径的布置存在一定的主观性,因此给定传输路径下的最优设计方案并不一定比其他方法得到的方案优,一些学者采用其他算法^[51,52]得到了更优的导热性能。针对这一问题,Hajmohammadi等人^[53]采用构形理论对矩形产热体内非直角多分支高导热材料分布进行了优化,所得高导热材料最佳分布的导热性能比传统直角单分支传输路径下的导热性能显著提高,这是对给定传输路径布置方法改进的一次有益的探索。此外,在构形优化中,采用上一级最优方法得到的并不一定是全局最优解^[55]。综上所述,构形理论在研究一些问题时还存在不足,尚需通过理论的自身完善予以弥补,从而需要进一步的研究工作,这是许多学者正在努力的方向。

对于本文将要综述的船海用蒸汽动力装置部件构形优化,主要是在给定部件体积或换热面积条件下建立部件性能与结构之间的关系,然后通过一定的优化算法在多种结构中寻求部件的最优性能和对应的最佳结构。对于本文将要综述的船海用蒸汽动力装置系统构形热力学优化,主要是将部件的构形优化与循环的有限时间热力学优化相结合,建立系统性能与部件结构和循环参数之间的关系,然后通过一定的优化算法在多种结构和参数中寻求系统的最优性能和对应的最佳结构和参数,实现部件与系统的一体化热力学优化。

2.2 熵产生最小化理论

对于工程界广泛存在的传热、流动过程和热力循环系统,Bejan教授提出以熵产生最小作为统一的优化目标,在一定的约束条件下,导出了一系列适用于不同热力过程和系统的熵产生表达式^[16],进而对工程界各类过程、装置和系统进行了优化,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^[17]。熵产生最小化理论自提出之后,许多学者基于该理论对导热^[56]、对流传热^[16,17,57,58]、换热器^[16,59]、储热系统^[16,17]、化学反应过程^[18,60,61]和热力循环系统^[17,62-64]等各种传热传质过程和系统进行了分析和优化,其中通道复合传热^[58]、连续非平衡精馏塔^[60]、聚合物电解质膜燃料电池^[61]等研究工作是熵产生最小化理论的最新研究进展。但在熵产生最小化理论的应

用过程中也发现了一些不足,如逆流式换热器的熵产生随着有效度的增加先增大后减少,存在“熵产悖论”^[59]。针对这一问题,大量学者进行了详细的讨论,并进一步提出了各种熵产生的修正目标试图解决这一悖论。

2.3 ㊦理论

针对现有传热学理论中存在的不足,过增元院士等人^[22]基于热量传递现象的本质定义了描述物体所具有的热量传递总能力的新物理量——㊦,将热量传递过程中传递能力的损失称为㊦耗散,并提出了㊦耗散极值原理。㊦理论的提出,为传热优化开辟了新的方向,解决了传统热阻和熵产评价传热性能优劣的局限性和不准确性。许多学者基于㊦理论对导热^[22~25,27,65,66]、对流传热^[23~25,27,28,57,66~73]、换热器^[23~25,27,29]、传质^[23,27]、化学反应系统^[26]、热力循环系统^[25,62~64,74,75]等各种传热和热力过程和系统进行了分析和优化,其中正六边形热沉^[68]、潜热储热器^[69]、纳米流体^[70]、黏性热的作用^[72]等研究工作是㊦理论的最新研究进展。基于㊦理论和熵产生最小化理论的比较研究^[57,62~64]是当前热科学领域研究的热点问题之一,同时这两个理论之间存在一些争议^[76,77]。㊦理论也存在不足,如它并不适应于绝热自由扩散过程而更适应于传热过程,熵产生最小化理论更适应于热功转换过程。

2.4 有限时间热力学理论

考虑到卡诺热机热效率最大时输出功率为零,Reitlinger^[78]、Novikov^[79]、Chambadal^[80]、Curzon和Ahlborn^[81]等人先后将有限速率传热引入可逆卡诺循环的研究中,导出了内可逆卡诺热机最大输出功率时的效率。这一效率被称为Curzon-Ahlborn效率或CA效率,它的导出是有限时间热力学理论诞生的重要标志。有限时间热力学理论以热力学、传热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,优化存在传热、传质和流体流动不可逆性的实际热力系统的性能,已成为物理学和工程学等领域研究热力系统的重要工具。基于这一理论,大量学者对各种过程和循环进行了优化,研究对象涉及卡诺热机^[30,31,33]、内燃机^[31,32,35]、燃气轮机^[31]、制冷机^[31]、热泵^[31]、有机工质循环系统^[82,83]、化学循环系统^[84,85]、化学反应

过程和系统^[86~88]、微型能量转换系统^[89~92]、经济系统^[34]、热电装置^[93~95]、广义流传递过程^[96]、钢铁生产流程^[97]等,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成果,其中有有机朗肯循环^[82]、卡琳娜循环^[83]、有限势库化学泵^[84]、内可逆广义机^[85]、碘化氢反应器^[87]、热离子制冷机^[92]等研究工作是有限时间热力学理论的最新研究进展。

将构形理论引入到船海用蒸汽动力装置的结构设计研究中,通过结构优化有利于提升蒸汽动力装置的性能;将熵产生最小化理论和㊦理论引入到性能优化研究中,有助于降低循环热功转换过程和设备换热过程的不可逆性;将有限时间热力学理论引入到蒸汽动力装置的性能优化研究中,有助于建立更为接近实际的动力循环模型和描述各种不可逆性;将构形热力学引入到蒸汽动力装置的结构设计和参数优化研究中,有助于同时从装置结构和非结构参数两个方面深度提升蒸汽动力装置性能。这些理论的引入同时也有助于丰富各种热学优化理论的内涵,具有重要的科学意义和学术价值。

3 船舶蒸汽动力装置构形优化

船舶蒸汽动力装置示意图如图2所示。本节将介绍其主要换热部件模型,包括增压锅炉蒸发器、过热器、经济器和冷凝器等,基于构形理论、熵产生最小化理论和㊦理论等相关理论开展船舶蒸汽动力装置主要换热部件的结构优化设计和性能优化,得到各主要换热部件的最优构形和最优性能,并给出各种参数对构形优化结果的影响规律。

3.1 增压锅炉蒸发器构形优化

锅炉蒸发器是增压锅炉的重要组成部分,它将由经济器预热的水转变为饱和水,并进一步加热蒸发使其转变为饱和蒸汽。蒸发器是锅炉炉膛中与高温火焰和烟气的热交换最为强烈的部件,对其进行性能分析与结构优化具有重要意义。

基于经典热力学和传热学,一些学者对锅炉蒸发器进行了详尽的性能分析与优化。赵嘉明等人^[98]运用不同方法对锅炉炉膛出口烟气温度进行了计算与比较,指出船用“KB76”方法最适合计算炉膛出口烟气温度。不同于常压锅炉,增压锅炉炉膛中同时存在着辐射

图 2 (网络版彩图)船舶蒸汽动力装置示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of ship steam power plant.

和对流两种换热方式。薛敏等人^[99]在综合考虑锅炉炉膛两种换热方式的基础上, 提出了炉膛的高温球形简化模型, 计算表明炉膛对流换热量占总换热量的 24.15%。岳彭等人^[100]进一步对增压锅炉的换热过程进行了定性分析及定量计算, 提出了合理的炉膛热力计算方法。杜晓建等人^[101]探究了增压锅炉炉膛热力参数随炉膛压力变化的规律, 研究表明炉膛黑度与炉膛压力呈正比关系, 而炉膛出口烟气温度则与之成反比关系。

应用构形理论, 一些学者对各类蒸汽发生器进行了性能优化与结构设计。Kim等人^[102]对某大型陆用电站蒸汽发生器进行了结构优化, 得到了蒸汽产率最大时的上升管和下降管最佳管径比和数量分配, 发现蒸汽发生器的最优构形与蒸汽压力密切相关。Xiao等人^[103]进一步对文献^[102]中的蒸汽发生器进行了构形优化, 研究发现相比于传热率最大的蒸汽发生器最优构形, 焓耗散率最大的最优构形对蒸汽发生器传热性能的提升效果更为显著。Norouzi等人^[104,105]分别以焓产率最小和成本最小为优化目标, 优化了某热回收蒸汽发生器的管束分布^[104]和蒸汽发生器总体积^[105]。Mehrgoo和Amidpour^[106]和Mehrgoo等人^[107]分别得到了热回收率最大^[106]和炯效率最大^[107]时热回收蒸汽发生器的最优构形, 同时发现与二重压力模型相比, 三重压力模型的综合性能更优。

图3为某锅炉蒸发器模型示意图, 锅炉蒸发器主要

由汽筒、水筒、水冷壁和对流蒸发管束四部分组成。燃油在炉膛中燃烧后生成高温火焰与烟气(理论温度为 T_{the}), 通过辐射和对流换热将热量传递给水冷壁和近炉膛对流蒸发管束。烟气从炉膛出来后进入对流烟道, 分别与对流蒸发管束进行对流换热, 进而加热管内水或气水混合物。汽筒中的水经过水冷壁后的下降管进入水筒, 然后以工质温差造成的密度差作为驱动力, 沿水冷壁和对流蒸发管束吸热后进入汽筒完成循环。本节在换热面积一定的约束条件下, 对增压锅炉蒸发器进行构形优化, 得到综合考虑换热率和烟气流动压降的最佳蒸发器结构。还以换热率和耗功率^[108,109]、焓产率和耗功率^[109,110]与炯耗散率和耗功率^[109]组成的复合函数为优化目标, 开展锅炉蒸发器的构形优化, 同时分析各种参数对优化结果的影响。

图4给出了保热系数 ϕ 对换热率和耗功率的复合函数 F_{QP} 、焓产率和耗功率的复合函数 F_{SP} 、炯耗散率和耗功率的复合函数 F_{EP} 与蒸发器无量纲管外径 $\tilde{d}_{3cet}$ 关系的影响。表1给出了三个优化目标下的锅炉蒸发器最优构形及相应的复合函数最小值。由图4和表1可以看出, 蒸发器复合函数 F_{EP} 存在二次最小值, 复合函数 F_{QP} 和 F_{SP} 均只存在一次最小值。不同优化目标下的蒸发器最优构形是不同的, 如一次优化中, 目标 F_{QP} , F_{SP} 和 F_{EP} 下的最佳无量纲管外径 $\tilde{d}_{3cet,opt}$ 分别为0.85, 0.91和1.04。当以 F_{EP} 为优化目标时, 一次优化到二次优化的复合函

图3 锅炉蒸发器模型示意图

Figure 3 Schematic diagram of the boiler evaporator.

数最小值由0.996减小至0.990, 最佳无量纲管外径由1.04变为0.97, 管排数也由初始值6变为最佳值9. 与初始设计点相比, 优化后蒸发器的复合函数分别降低了11.4%, 0.5%和1.0%. 锅炉蒸发器的换热率、耗功率、熵产率和焓耗散率分别表征了其传热特性、流动特性、传热不可逆性和传递热量的能力. 当以 F_{QP} 为优化目标进行锅炉蒸发器结构设计时, 应确定锅炉过余空气系数和燃油消耗率的常变范围, 进而进行相应范围内设计变量的最优选择, 所得优化结果体现了蒸发器换热能力性能和流动损耗性能的折中. 当以 F_{SP} 或 F_{EP} 为优化目标进行锅炉蒸发器结构设计时, 首先应保证蒸发器单位时间内蒸汽最低产量. 目标 F_{SP} 下所得优化结果体现了蒸发器降低传热不可逆性性能和流动损耗性能的折中, 目标 F_{EP} 下所得优化结果体现了蒸发器传

热能力性能和流动损耗性能的折中.

3.2 增压锅炉过热器构形优化

过热器在锅炉中扮演着重要的角色, 它将锅炉蒸发器引出来的饱和蒸汽加热形成过热蒸汽, 进而供蒸汽动力装置的后续设备使用. 为了提高锅炉过热器各方面性能, 大批学者对其进行了性能分析与结构优化研究. 张网等人^[111]探究了增压锅炉过热器强化传热机理, 讨论了适合于过热器的热力计算方法. Zhang等人^[112]依据锅炉过热器工作原理建立了过热器数学模型, 研究发现过热器第1流程的传热系数最大而第3流程的传热系数最小. 迟淼等人^[113]和Taler等人^[114]基于差分法建立了锅炉过热器离散仿真模型, 计算得到了过热器烟气、蒸汽和管壁温度分布, 并通过与实验值比较验证了模型的准确性. 张晓东和杨自春^[115]建立了增压锅炉过热器换热管束传热模型并对其热特性计算方法进行了修正, 得到了更为合理的烟气温度分布.

图5为某锅炉过热器模型示意图. 锅炉过热器主要由上筒、下筒和过热器管束三部分组成. 管束的管子布置形式为错列, 管外径、管排数、单排管数和设计长度分别为 d_{sht} , z_{sht} , n_{sht} 和 l_{sht} . 过热器管内蒸汽与管外烟气的换热方式可视为顺流换热, 换热过程共分为3个流程: 饱和蒸汽从汽筒出来后进入过热器第1流程管束加热, 然后进入过热器下筒, 接着进入第2流程管束加热, 到达上筒后, 再进入第3流程管束加热, 最终加热形成的过热蒸汽聚集在过热器下筒, 通过停汽阀被送往汽轮机做功. 参与第1、第2和第3流程的管子数目分别为 n_1 , n_2 和 n_3 . 本节以换热率和耗功率组成的复合函数^[116]为优化目标, 在换热面积一定的约束条件下, 对

图4 φ 对 F_{QP} 与 $\tilde{d}_{3cet}$ 、 F_{SP} 与 $\tilde{d}_{3cet}$ 、 F_{EP} 与 $\tilde{d}_{3cet}$ 关系的影响Figure 4 Effects of φ on the relationships of F_{QP} vs. $\tilde{d}_{3cet}$, F_{SP} vs. $\tilde{d}_{3cet}$, and F_{EP} vs. $\tilde{d}_{3cet}$.

表 1 三种优化目标下的锅炉蒸发器最优构形^{a)}**Table 1** Optimal constructs of the boiler evaporator under three optimization objectives

优化目标	一次优化		二次优化		
	$\tilde{d}_{3\text{cet,opt}}$	F_m	$\tilde{d}_{3\text{cet,oo}}$	$z_{3\text{cet,opt}}$	F_{mm}
F_{QP}	0.85	0.886	—	—	—
F_{SP}	0.91	0.995	—	—	—
F_{EP}	1.04	0.996	0.97	9	0.990

a) F_m 和 F_{mm} 分别表示复合函数一次和二次最小值 **图 5** (网络版彩图)锅炉过热器模型示意图**Figure 5** (Color online) Schematic diagram of the boiler superheater.

锅炉过热器进行构形优化. 进一步开展锅炉过热器在熵产率和耗功率^[109]与烟耗散率和耗功率^[109]组成的复合函数下的构形优化, 同时对不同复合函数下的构形优化结果进行综合分析比较.

图6给出了保热系数 ϕ 对换热率和耗功率的复合函数 F_{QP} 、熵产率和耗功率的复合函数 F_{SP} 、烟耗散率和耗功率的复合函数 F_{EP} 与过热器无量纲管外径 $\tilde{d}_{\text{sht}}$ 关系的影响. 表2给出了三个优化目标下的锅炉过热器最优构形及相应的复合函数最小值. 由图6和表2可以看出, 过热器的复合函数 F_{QP} 和 F_{EP} 均存在三次最小值, 复合函数 F_{SP} 存在二次最小值. 不同优化目标下的过热器最佳管外径和最佳单排管数是不同的, 但最佳管排数相同. 如三次优化中, 目标 F_{QP} 和 F_{EP} 下的三次最佳无量纲管外径 $\tilde{d}_{\text{sht,ooo}}$ 分别为1.24和1.26, 二次最佳管排数 $z_{\text{sht,oo}}$ 均为14, 一次最佳单排管数 $n_{\text{sht,opt}}$ 分别为63和61.

当以 F_{QP} 为优化目标时, 一次、二次和三次优化后的复合函数最小值分别为0.974, 0.969和0.962, 最佳无量纲管外径分别为1.15, 1.19和1.24, 最佳管排数分别为11, 10和14. 与初始设计点相比, 优化后过热器的复合函数分别降低了3.8%, 5.2%和7.5%. 本节所讨论的锅炉过热器综合性能不能同时实现最优, 每种最优性能下均有其特有的最优结构, 可提供不同需求下的锅炉过热器优化设计方案.

3.3 增压锅炉经济器构形优化

在锅炉系统中, 经济器的功用是利用烟气加热锅炉给水, 提高给水的进口焓, 从而提高整个锅炉的经济性; 或者说, 在经济性相同的前提下, 安装经济器可以减小锅炉的质量和外形尺寸, 从而大大提升船舶上的空间利用率.

基于经典传热学, 张丽剑等人^[117]基于非增压锅炉传热特性, 分析了压力升高对锅炉传热特性参数的影响, 得到了合理的增压锅炉经济器的热力计算方法, 结果表明计算数据与实际数据之间的误差小于5%. Liu等人^[118]对增加经济器后的热电联产锅炉进行了能量分析, 发现加装经济器后的锅炉燃料利用率大大提高. Lv等人^[119]给出了锅炉经济器管壁温度分布和管壁平均温度的计算方法, 得到了管壁温度和工质吸热速率间的关系. 刘祥源等人^[120]在体积和重量不变的情况下对船用锅炉经济器结构进行了改进, 发现经济器采用方形翅片管后, 锅炉蒸汽产率大大增加, 同时烟气流动阻力减小. Xiao等人^[121]对锅炉中传统经济器结构进行了优化, 发现采用新的经济器结构可使锅炉标准煤耗率降低1.1 g/(kW h), 且锅炉不同负载下的最佳节能效果不同.

图7为某锅炉经济器模型示意图. 经济器型式为蛇形光滑裸管, 主要由 n_{eco} 组并联成对的蛇形管和上下两个集箱组成. 管束的管子布置形式为顺列, 蛇形管外径、管排数和设计长度分别为 d_{eco} , z_{eco} 和 l_{eco} . 锅炉给水从下集箱(分配集箱)进入, 被分配到 n_{eco} 组平行的蛇形管中加热, 加热后的水进入上集箱(收集集箱), 经过连通管被送往汽筒中. 管内水与烟气的换热方式可视作顺流换热. 本节以换热率和耗功率组成的复合函数^[122]为优化目标, 在换热面积一定的约束条件下开展锅炉经济器的构形优化. 进一步以熵产率和耗功率^[109]

图 6 φ 对 F_{QP} 与 $\tilde{d}_{sht}$ 、 F_{SP} 与 $\tilde{d}_{sht}$ 、 F_{EP} 与 $\tilde{d}_{sht}$ 关系的影响
Figure 6 Effects of φ on the relationships of F_{QP} vs. $\tilde{d}_{sht}$, F_{SP} vs. $\tilde{d}_{sht}$, and F_{EP} vs. $\tilde{d}_{sht}$.

表 2 三种优化目标下的锅炉过热器最优构形^{a)}
Table 2 Optimal constructs of the boiler superheater with three optimization objectives

优化目标	一次优化		二次优化			三次优化			
	$\tilde{d}_{sht,opt}$	F_m	$\tilde{d}_{sht,oo}$	$z_{sht,opt}$	F_{mm}	$\tilde{d}_{sht,ooo}$	$z_{sht,oo}$	$n_{sht,opt}$	F_{mmm}
F_{QP}	1.15	0.974	1.19	10	0.969	1.24	14	63	0.962
F_{SP}	1.17	0.956	1.21	10	0.948	—	—	—	—
F_{EP}	1.21	0.937	1.26	10	0.929	1.26	14	61	0.925

a) F_m , F_{mm} 和 F_{mmm} 分别表示复合函数一次、二次和三次最小值

图 7 锅炉经济器模型示意图
Figure 7 Schematic diagram of the boiler economizer.

与焓耗散率和耗功率^[109]组成的复合函数为优化目标对锅炉经济器进行构形优化。

图8给出了保热系数 φ 对换热率和耗功率的复合函数 F_{QP} 、熵产率和耗功率的复合函数 F_{SP} 、焓耗散率和耗功率的复合函数 F_{EP} 与经济器无量纲管外径 $\tilde{d}_{eco}$ 关系的影响。表3给出了三个优化目标下的锅炉经济器最优

构形及相应的复合函数最小值。由图8和表3可以看出,经济器的复合函数 F_{QP} , F_{SP} 和 F_{EP} 均存在二次最小值。不同优化目标下的经济器最优构形是不同的,如一次优化中,目标 F_{QP} , F_{SP} 和 F_{EP} 下的最佳无量纲管外径 $\tilde{d}_{eco,opt}$ 分别为0.92, 0.90和1.04。同时,随着优化自由度的增加,经济器综合性能得到提升,且经济器最优构形发生变化。如当以 F_{QP} 为优化目标时,一次和二次优化后的复合函数最小值分别为0.939和0.936,最佳无量纲管外径分别为0.92和0.84,最佳管排数分别为10和13。与初始设计点相比,优化后经济器的复合函数分别降低了6.4%, 0.7%和0.4%。本节所讨论的锅炉经济器综合性能不能同时实现最优,每种最优性能下均有其特有的最优结构,可提供不同需求下的锅炉经济器优化设计方案。

3.4 增压锅炉整体构形优化

与鼓风机送风锅炉相比,增压锅炉采用涡轮增压机组进行送风,具有送风密度大、燃烧效率高等特点,有助于在有限空间内提高锅炉装置的效率。但由于增

图 8 ϕ 对 F_{QP} 与 $\tilde{d}_{eco}$ 、 F_{SP} 与 $\tilde{d}_{eco}$ 、 F_{EP} 与 $\tilde{d}_{eco}$ 关系的影响

Figure 8 Effects of ϕ on the relationships of F_{QP} vs. $\tilde{d}_{eco}$, F_{SP} vs. $\tilde{d}_{eco}$, and F_{EP} vs. $\tilde{d}_{eco}$.

表 3 三种优化目标下的锅炉经济器最优构形^{a)}

Table 3 Optimal constructs of the boiler economizer with three optimization objectives

优化目标	一次优化		二次优化		
	$\tilde{d}_{eco,opt}$	F_m	$\tilde{d}_{eco,oo}$	$z_{eco,opt}$	F_{mm}
F_{QP}	0.92	0.939	0.84	13	0.936
F_{SP}	0.90	0.995	0.83	13	0.993
F_{EP}	1.04	0.997	1.02	10	0.996

a) F_m 和 F_{mm} 分别表示复合函数一次和二次最小值

压锅炉结构相对复杂、制造成本相对高, 目前主要应用于大型船舶动力装置中, 具有一定的特殊性。

一些学者从锅炉传热特性和流动特性入手, 对整体锅炉进行了性能分析与优化。姜任秋等人^[123]对增压锅炉各部件的烟风阻力计算方法进行了深入研究。薛敏^[124]通过对增压锅炉在高低负荷下的热力校核计算得出了锅炉主要性能参数随负荷的变化规律, 阐释了增压锅炉的传热强化机理。张国磊^[125]对增压锅炉烟气侧和水汽侧的工作过程进行了详尽的分析, 同时开展了锅炉在典型工况下的稳态和动态计算。雷雨等人^[126]研究了增压对烟气导热与对流换热的影响机理, 分析了对流受热面烟气流速、密度等参数与增压比的关系。

在基于构形理论的锅炉优化设计中, Gulotta 等人^[127]基于整体性能系数法优化了生物质锅炉换热管的管数目和管分布, 并分析了不同结构对锅炉输出功率和压降的影响。Gulotta 等人^[128]进一步结合构形理论和生命周期评估法对该锅炉进行了结构优化, 结果表

明优化后锅炉的整体能耗减小了 0.33%。

图 9 给出了整体锅炉模型示意图。燃油在炉膛燃烧后产生高温烟气, 然后烟气依次与蒸发器、过热器和经济器进行热交换, 最后废气被排出炉外进入涡轮增压机组。锅炉给水依次进入经济器、蒸发器和过热器进行热交换, 先后经历由未饱和水到饱和水, 饱和水到饱和蒸汽及饱和蒸汽到过热蒸汽的转变过程。整个过程中烟气和工质的换热方式可视为顺流换热。图 10 给出了整体锅炉换热过程的 T - s 图。本节在整合锅炉各传热部件(蒸发器、过热器和经济器)模型的基础上建立整体锅炉模型^[109], 在总换热面积一定的约束条件下, 开展整体锅炉的结构设计与性能优化, 同时对整体锅炉进行多目标优化, 得到其基于不同目标函数的 Pareto 前沿, 为实际锅炉设计提供更为广泛的选择方案。计算表明, 相同条件下本节锅炉模型和实际增压锅炉的过热蒸汽产量误差为 0.06%^[109], 因此本节锅炉模型的正确性在一定程度上得到了实际工程应用验证。

图 11~13 分别给出了换热率和耗功率的复合函数 F_{QP} 、熵产率和耗功率的复合函数 F_{SP} 、焓耗散率和耗功率的复合函数 F_{EP} 的一次、二次和三次优化结果。表 4 给出了三个优化目标下的整体锅炉最优构形及相应的复合函数最小值。由图 11~13 和表 4 可以看出, 各优化目标下整体锅炉的最佳过热器管外径不同, 最佳对流蒸发管束外径和最佳经济器管外径均相同。这是由于对流蒸发管束外径和经济器管外径均在所讨论范围内的最大边界处取得最佳值。与初始设计点相比, 优化后整体锅炉的复合函数 F_{QP} , F_{SP} 和 F_{EP} 最大分别降低了

图 9 (网络版彩图)整体锅炉模型示意图

Figure 9 (Color online) Schematic diagram of the overall boiler.

图 10 整体锅炉换热过程T-s图

Figure 10 T-s diagram of the heat transfer process in the overall boiler.

26.2%, 25.9%和26.3%, 其综合性能大大提升, 且在各复合函数中的两个性能指标均得到改善. 整体锅炉的综合性能随优化自由度的增加而不断提高, 且其不同复合函数下的最优性能形成机理均不会随优化自由度的增加而改变. 在实际中, 可根据所选择的优化目标和优化变量进行相应的整体锅炉结构设计.

进一步进行了传热和流动性能的多目标优化. 图 14给出了同时考虑无量纲焓耗散率 $\tilde{E}_{\phi, sb}$ 和无量纲耗功率 $\tilde{P}_{sb}$ 目标的Pareto前沿, Pareto前沿的每个点均为锅炉

图 11 ϕ 对 F_{QP} 与 $\tilde{d}_{sht}$ 关系的影响

Figure 11 Effect of ϕ on the relationship of F_{QP} vs. $\tilde{d}_{sht}$.

图 12 $F_{SP,m}$ 和 $\tilde{d}_{sht,opt}$ 与 $\tilde{d}_{3cet}$ 的关系

Figure 12 Relationships of $F_{SP,m}$ and $\tilde{d}_{sht,opt}$ vs. $\tilde{d}_{3cet}$.

图 13 $\tilde{Q}_{sb}$ 对 $F_{EP,mmm}$, $\tilde{d}_{sht,ooo}$, $\tilde{d}_{3cet,ooo}$ 和 $\tilde{d}_{eco,opt}$ 的影响

Figure 13 Effects of $\tilde{Q}_{sb}$ on $F_{EP,mmm}$, $\tilde{d}_{sht,ooo}$, $\tilde{d}_{3cet,ooo}$ and $\tilde{d}_{eco,opt}$.

在特定优化目标下的锅炉性能最优解集. 图中的理想点和非理想点均不能实现, 且Pareto前沿包含了两个单目标优化最优解和两个目标线性加权的最优解(点C). Pareto最优解集所对应的锅炉最优构形中, 最佳对

表 4 三种优化目标下的整体锅炉最优构形^{a)}

Table 4 Optimal constructs of the overall boiler with three optimization objectives

优化目标	$\tilde{d}_{\text{sht},000}$	$\tilde{d}_{\text{3cet},00}$	$\tilde{d}_{\text{eco,opt}}$	F_{mmm}
F_{QP}	1.1	1.2	1.1	0.738
F_{SP}	1.12	1.2	1.1	0.741
F_{EP}	1.3	1.2	1.1	0.737

a) F_{mmm} 表示复合函数的三次最小值

图 14 (网络版彩图) 锅炉多目标优化Pareto前沿

Figure 14 (Color online) Pareto frontier of the boiler with multi-objective optimization.

流蒸发管束外径和最佳经济器管外径始终保持不变,这也印证了表4中整体锅炉基于线性加权法的三次构形优化结果。

3.5 船用冷凝器构形优化

冷凝器是船舶蒸汽动力装置的重要组成设备之一。由于管壳式换热器具有成本低、方便清洗、处理能力大和工作稳定可靠的优点,船用冷凝器一般采用管壳式,一些学者对管壳式冷凝器进行了深入研究。Johnson等人^[129]对船用冷凝器进行了耗功率最小化研究,通过优化换热管外径和长度等参数使得耗功率降低了35%。胡德明和陈林根^[130]以冷凝器带水总重最小为目标,在排汽参数一定条件下得到了铜管和钛管两种材料的冷凝器最优设计方案,并分析了冷却水入口温度和冷却水流量等参数对最优设计方案的影响。郑静等人^[131]以冷凝器重量最小为目标,采用改进的遗传算法对冷凝器进行了优化,得到了最佳冷却管外径、

冷却管节距、冷却水流速和冷凝器压力,优化的冷凝器重量与母型重量相比减少了25.9%。曾子威^[132]将多孔介质模型引入到船用凝汽器中,分析了管束对流动阻力和冷凝性能的影响。

构形理论也被引入到管壳式冷凝器的性能优化研究中。Kim^[133]以冷凝率最大为目标对叉流式冷凝器管长和管数量进行了优化,发现选择合理的管长、管数量和流速时采用多列平行管有助于提高冷凝率。Bejan等人^[134]以冷凝率最大为目标对蒸汽冷凝器管束的布置方式进行了构形优化,得到了冷凝性能最优时的最佳管束布置方式。冯辉君等人^[135,136]和蔡存光等人^[137]分别对基于R245fa和氨水工质的管壳式冷凝器管径进行了优化,优化后冷凝器综合性能得到有效提升。

如图15为船用管壳式冷凝器示意图。蒸汽工质从入口1进入,流经换热管外侧与管内冷却水进行凝结换热,凝结水在4处积聚在底部热井内,最后被水泵抽走。冷却水从入口5流入冷凝器的换热管,吸收蒸汽热量后从出口6排出。管内冷却水质量流率为 $\dot{m}_c$,进口温度为 $T_{c,in}$,蒸汽工质质量流率为 $\dot{m}_{wf}$,冷凝温度为 T_s ,换热管外径为 $d_{c,out}$,管数为 n_c 。本节在总传热率和传热面积一定的条件下,以总耗功率最小为目标对冷凝器进行构形优化^[138],得到最佳换热管外径,并分析总传热面积等参数对构形优化结果的影响。

图16给出了不同冷却水入口温度 $T_{c,in}$ 下冷凝器所需的无量纲耗功率 $\tilde{W}_c$ 与无量纲管外径 $\tilde{d}_{c,out}$ 之间的关系。由图可知,随着无量纲管外径 $\tilde{d}_{c,out}$ 增大,冷凝器所需的

图 15 船用管壳式冷凝器示意图

Figure 15 Schematic diagram of a marine shell-and-tube condenser.

图 16 $T_{c,in}$ 对 $\tilde{W}_c$ 与 $\tilde{d}_{c,out}$ 关系的影响

Figure 16 Effect of $T_{c,in}$ on the relationship of $\tilde{W}_c$ vs. $\tilde{d}_{c,out}$.

无量纲耗功率 $\tilde{W}_c$ 先急剧减小后缓慢增大。 $\tilde{W}_c$ - $\tilde{d}_{c,out}$ 曲线存在一个最小值点,即存在最佳的 $\tilde{d}_{c,out}$ ($\tilde{d}_{c,out,opt}=1.44$)使得 $\tilde{W}_c$ 达到最小值($\tilde{W}_{c,m}=0.57$)。与初始设计点相比,构形优化后的冷凝器总耗功率减小了43%,由此可见选择合适的换热管外径可使得冷凝器的流动性能大大改善。此外,随着冷却水入口温度 $T_{c,in}$ 升高,相同 $\tilde{d}_{c,out}$ 下对应的 $\tilde{W}_c$ 逐渐增大。

图17分别给出了无量纲总传热面积 $\tilde{A}_c$ 对冷凝器所需的最小无量纲耗功率 $\tilde{W}_{c,m}$ 、最佳无量纲管外径 $\tilde{d}_{c,out,opt}$ 以及最优构形下的冷凝器无量纲冷凝温度 $\tilde{T}_s$ 、无量纲冷却水出口温度 $\tilde{T}_{c,out}$ 和无量纲冷却水质量流率 $\tilde{m}_c$ 的影响。由图可知,最小无量纲耗功率 $\tilde{W}_{c,m}$ 随着 $\tilde{A}_c$ 的增大而减小,最佳无量纲管外径 $\tilde{d}_{c,out,opt}$ 随 $\tilde{A}_c$ 的增大基本不变,表明增大传热面积有利于降低冷凝器所需的耗功率。最优构形下的无量纲冷凝温度 $\tilde{T}_s$ 受 $\tilde{A}_c$ 影响较小,无量纲冷却水出口温度 $\tilde{T}_{c,out}$ 随 $\tilde{A}_c$ 的增大而增大,无量纲冷却水质量流率 $\tilde{m}_c$ 随 $\tilde{A}_c$ 的增大而减小。这是由于在热负荷一定条件下,增大总传热面积意味着蒸汽和冷却水平均温差减小,当冷凝温度变化不大时冷却水出口温度将增大,最终导致冷却水质量流率和耗功率均减小。

4 海洋热能转换装置构形优化

本节将介绍海洋热能转换装置蒸发器、冷凝器、双压透平和整体系统模型,和基于构形理论、熵产生

图 17 $\tilde{A}_c$ 对 $\tilde{W}_{c,m}$ 和 $\tilde{d}_{c,out,opt}$ (a), $\tilde{T}_s$, $\tilde{T}_{c,out}$ 和 $\tilde{m}_c$ (b) 的影响

Figure 17 Effects of $\tilde{A}_c$ on $\tilde{W}_{c,m}$ and $\tilde{d}_{c,out,opt}$ (a), $\tilde{T}_s$, $\tilde{T}_{c,out}$ and $\tilde{m}_c$ (b).

最小化理论和有限时间热力学理论等相关理论,开展海洋热能转换装置主要换热和能量转换部件的结构优化设计和性能优化以及整体系统的构形热力学优化结果,给出各主要部件和整体系统的最优构形和最优性能,和各种参数对构形优化结果的影响规律。

4.1 海洋热能转换装置蒸发器构形优化

蒸发器是海洋热能转换(OTEC)装置重要的部件,其常用的结构形式为板式,优化蒸发器对改善OTEC装置的性能具有重要作用。一些学者采用经典传热优化方法对板式蒸发器性能进行了分析和优化。Uehara等人^[139]研究了OTEC系统蒸发器在三种不同板式结构时的传热性能,比较了以氨和R22为工质时蒸发器的传热系数。Nakaoka和Uehara^[140,141]对OTEC系统蒸发器进行了性能研究,计算得到了蒸发器的总传热系数和传热率。Imran等人^[142]研究了R245fa在不同波纹角下板式蒸发器的传热系数和压降性能,分析了结构参数和流动参数对性能的影响。

一些学者也应用构形理论对各种低温蒸发器进行

了研究. Nejad等人^[143]对超临界有机朗肯循环中逆流式蒸发器进行了构形优化, 与原结构相比, 优化后的蒸发器换热性能提高了17%且总成本降低了14%. Feng等人^[144,145]分别以换热率和耗功率、焓耗散率和耗功率组成的复合函数为优化目标优化了低温热源驱动的有机工质管壳式蒸发器, 得到了蒸发器最佳管外径和最佳管数目. Cai等人^[146]对基于氨水工质的管壳式蒸发器进行了构形设计, 得到了换热率和耗功率组成的复合函数最小时的最佳蒸发器换热管外径、最佳氨水质量流率和最佳热水质量流率.

图18为OTEC系统蒸发器的工作示意图, 由图可知蒸发器采用的板式换热器为“U”形流程组合. 蒸发器采用单流程, 两种流体采用纯逆流形式进行换热, 且氨工质由下向上使蒸汽从蒸发器上部流出, 海水由上向下从蒸发器下部流出. 图19所示为板式蒸发器内工质蒸发过程的 T - s 图. 温海水在蒸发器内为单相液态, 向工质放热, 在进口、中间和出口位置的温

图 18 (网络版彩图) OTEC系统板式蒸发器工作示意图
Figure 18 (Color online) Schematic sketch of the plate evaporator in OTEC system.

图 19 板式蒸发器内蒸发过程 T - s 图
Figure 19 T - s diagram of the evaporation process in the plate evaporator.

$T_{h,in}$, $T_{h,mid}$ 和 $T_{h,out}$. 由于工质在蒸发器内存在单相态和两相态, 可将定压吸热过程1→2→3分为预热段1→2(单相区)和蒸发段2→3(两相区), 工质在进口、中间和出口位置的温分别为 T_1 , T_2 和 T_3 . 本节以蒸发器所需的总耗功率为优化目标, 在蒸发器有效体积和换热率一定的约束条件下, 对蒸发器传热板宽度进行优化^[147], 同时分析蒸发器传热板有效长度、有效数量和波纹角等结构参数对构形优化结果的影响, 并对比蒸发器在不同工质条件下优化结果的异同.

图20给出了蒸发器所需无量纲耗功率 $\tilde{P}_{sum}$ 与传热板宽度 w 的关系. 由图可知, $\tilde{P}_{sum}$ 随 w 的增大先减小后增大, 存在最佳的传热板宽度 $w_{opt}=1.2$ m使得所需无量纲耗功率 $\tilde{P}_{sum}$ 达到最小值 $\tilde{P}_{sum,m}=0.525$; 与初始设计点相比, 构形优化后的无量纲耗功率减小了47.5%. 这是由于当蒸发器有效体积 V_{eff} 一定时, 随着 w 增大, 换热器的板间距 b 减小, 导致蒸发器的水力直径 d_h 和摩擦因子 $f_{wf,pre}$, $f_{wf,eva,i}$ 和 f_h 均减小; 而蒸发器内流体流动压降 $\Delta p_{wf,pre}$, $\Delta p_{wf,eva,i}$ 和 Δp_h 随着 d_h 的减小而增大、随着 $f_{wf,pre}$, $f_{wf,eva,i}$ 和 f_h 的减小而减小, 由于两者的综合影响使得 $\tilde{P}_{sum}$ 达到最小值 $\tilde{P}_{sum,m}$.

图21对比分析了8种工质(氨、R22、R152a、R32、R134a、R245fa、R236fa和R1234yf)特性对OTEC系统蒸发器所需最小无量纲耗功率 $\tilde{P}_{sum,m}$ 和对应的最佳传热板宽度 w_{opt} 的影响. 由图可知, 工质为R22、R32、R134a、R245fa、R236fa和R1234yf时, OTEC系统蒸发器所需的最小无量纲耗功率 $\tilde{P}_{sum,m}$ 相近, 且均较小,

图 20 $\tilde{P}_{sum}$ 与 w 的关系
Figure 20 Relationship of $\tilde{P}_{sum}$ vs. w .

图 21 工质对 $\tilde{P}_{\text{sum,m}}$ 和 w_{opt} 的影响

Figure 21 Effects of working fluids on $\tilde{P}_{\text{sum,m}}$ and w_{opt}

对应的最佳传热板宽度 w_{opt} 均达到取值范围的最大值; 工质为氨时, $\tilde{P}_{\text{sum,m}}$ 最大, 而 w_{opt} 最小; 工质为 R152a 时, $\tilde{P}_{\text{sum,m}}$ 和 w_{opt} 分别介于两者对应的最大值和最小值之间。由于氨具有较好的热力学性能和环保性能, 因此可采用氨作为 OTEC 系统蒸发器的工质。

4.2 海洋热能转换装置冷凝器构形优化

冷凝器是 OTEC 系统的关键部件之一。与蒸发器相同, 冷凝器也采用板式换热器, 分析和优化板式冷凝器的性能和结构是一项重要工作。采用经典传热优化方法, Nakaoka 和 Uehara^[148] 研究 OTEC 系统板壳式冷凝器的传热和压降特性, 提出了计算水侧和冷凝侧传热系数和摩擦因子的经验公式。Yan 等人^[149] 通过实验测得了 R134a 在板式冷凝器内的传热系数和流动压降, 并分析了系统压力、制冷剂质量流率和蒸汽质量等参数对其性能的影响。García-Cascales 等人^[150] 分析了不同板式冷凝器传热系数的计算公式, 并将计算结果与实验结果进行了对比, 发现两者能很好的吻合。Eldeeb 等人^[151] 详细总结了不同工质下板式冷凝器传热系数和流动压降的计算公式, 指出氨具有更高的传热性能。Shon 等人^[152] 提出了预测制冷剂 R-1233zd(E) 在板式冷凝器内传热系数和流动压降的经验公式。

一些学者也将构形理论引入到板式换热器的结构优化设计中。Vargas 和 Bejan^[153] 对叉流式板式换热器板间距和长度进行了优化, 使得换热器的熵产率有效降低。Bejan 等人^[154,155] 进一步建立了多级板式换热器和梳形板式换热器模型, 发现增加内部复杂度有助于提

高板式换热器传热和流动性能。Sotoodeh 等人^[156] 在体积和面积一定的约束条件下优化了板翅式换热器结构, 构形优化后的板翅式换热器比传统板翅式换热器具有更高的热回收率。

图 22 所示为 OTEC 系统板式冷凝器工作示意图。以冷海水为低温热源, 选择氨作为工质。图 23 所示为板式冷凝器内冷凝过程 T - s 图, 图中实线 4→5 为工质的等温冷凝过程。冷海水在冷凝器内为单相液态, 从氨中吸热, 在冷凝器进出口的温度分别为 $T_{\text{c,in}}$ 和 $T_{\text{c,out}}$ 。氨在冷凝器内为两相态, 向冷海水等温放热, 冷凝温度为 T_{cond} 。本节在冷凝器有效体积和总传热率一定的条件下, 以同时考虑所需的耗功率和传热过程熵产率的复合函数为优化目标^[157], 优化传热板的有效长度和宽度, 分析传热板有效数量等参数对构形优化结果的影响。

图 24 给出了复合函数 F_{SP} 与传热板有效长度 L_{eff} 和传热板宽度 w 的三维关系, 图中存在一组最佳的 L_{eff} ($L_{\text{eff,oo}}=1.15 \text{ m}$) 和最佳的 w ($w_{\text{opt}}=1.55 \text{ m}$) 使得 F_{SP} 达到二次最小值 ($F_{\text{SP,mm}}=0.901$)。与单独优化 L_{eff} 相比, 板式冷凝器的 F_{SP} 在同时优化 L_{eff} 和 w 后减小了 2.1%; 其中冷凝器所需的总耗功率 P_{sum} 减小了 19.82%, 而传热过程的熵产率 $\dot{S}_{\text{g}}$ 增大了 3.77%, 因此 P_{sum} 的减小是 F_{SP} 减小的主要原因。

图 25 给出了二次最小复合函数 $F_{\text{SP,mm}}$ 、二次最佳传热板有效长度 $L_{\text{eff,oo}}$ 和一次最佳传热板宽度 w_{opt} 与传热板有效数量 N_{eff} 的关系。由图可知, 随着 N_{eff} 的增大, $L_{\text{eff,oo}}$ 先急剧减小后保持不变, 而 w_{opt} 单调减小, 且 w_{opt} 的变化范围较大。虽然 $F_{\text{SP,mm}}$ 随 N_{eff} 的增大先急剧减小后缓慢减小, 但 $F_{\text{SP,mm}}$ 的变化范围较小。计算表明, 在优化 L_{eff} 和 w 的基础上继续优化 N_{eff} 并不能显著提高板式冷凝器的综合性能。当 $N_{\text{eff}}=135$ 时, $F_{\text{SP,mm}}=0.900$; 当 $N_{\text{eff}}=180$ 时, $F_{\text{SP,mm}}=0.899$ 。当 N_{eff} 较大时 $F_{\text{SP,mm}}$ 变化很小, 因此当 $N_{\text{eff}}>135$ 时继续增加传热板有效数量并不能显著提高板式冷凝器的综合性能。

4.3 海洋热能转换装置透平构形优化

透平是 OTEC 系统的重要组成部分, 不同于传统高温蒸汽透平^[158-163], OTEC 系统中低沸点工质膨胀过程从饱和蒸气态附近开始, 一些学者对这一过程进行了深入研究。Kostors 和 Vincent^[164] 研究了 OTEC 系统以氨为工质时透平的性能, 发现在相同条件下双流轴向

图 22 (网络版彩图)OTEC系统板式冷凝器工作示意图

Figure 22 (Color online) Schematic sketch of the plate condenser in OTEC system.

图 23 板式冷凝器内冷凝过程T-s图

Figure 23 T-s diagram of the condensation process in the plate condenser.

图 24 F_{SP} 与 L_{eff} 和 w 的关系

Figure 24 Relationships of F_{SP} vs. L_{eff} and w .

透平比单流轴向和径向透平具有更优的性能。Nithesh和Chatterjee^[165]通过数值计算研究了OTEC系统以R22和R134a为工质时向心透平的性能和结构,得到了向心透平的最优性能和最佳尺寸。Nithesh和Samad^[166]通过CFD仿真优化了OTEC系统向心透平的喷嘴数量、

图 25 $F_{SP,mm}$, $L_{eff,oo}$ 和 w_{opt} 与 N_{eff} 的关系

Figure 25 Relationships of $F_{SP,mm}$, $L_{eff,oo}$ and w_{opt} vs. N_{eff} .

转子数量和喷嘴安装角,设计后的向心透平具有更优的性能。Kim等人^[167]以OTEC系统的透平效率为目标,通过CFD仿真得到了向心透平的最佳流动系数和最佳载荷系数。

透平也可以应用构形理论进行优化设计。Kim等人^[168]最先将构形理论引入到透平的结构设计中,在透平总质量一定的条件下,优化了串联两级和多级透平在输出功率最大时的质量分配比。Beyene和Peffley^[169]将构形理论应用到低速透平的设计中,发现存在最佳的后缘角使得透平输出功率最大。Stanescu等人^[170]基于构形理论建立了透平模型,并通过数值计算比较了“喷雾冷却”和“间断喷水”两种冷却进气方式对透平性能的影响。

图26为OTEC系统双压透平采用补气式布置时的示意图。图27为OTEC系统双压透平做功过程T-s图。OTEC系统的工质被分成两部分分别在高温蒸发器中吸热,在高温蒸发器中吸热后的饱和蒸汽工质进入高压透平(进口压力为 p_H)中膨胀做功(过程1→2),然后与在低温蒸发器中吸热后的低温饱和蒸汽工质混合(过程2→4和3→4),混合后的工质进入低压透平(进口压力为 p_L)中膨胀做功(过程4→5)。低压透平出口的压力近似视为冷凝器的冷凝压力(p_{cond})。本节以透平总输出功率为优化目标,在透平总体积一定的条件下,应用构形理论对高低压透平体积占比、轮径比和动叶轮出口相对流动角进行优化^[171],得到高低压透平的最优性能和最优构形,并分析低压透平进口压力、工质质量流率和透平总体积对构形优化结果的影响。计算表明,相同条件下本节透平模型和已有文献模型的透平效率误差为2.02%^[171],因此本节透平模型的正确性得到了

图 26 (网络版彩图) OTEC 系统双压透平布置示意图
Figure 26 (Color online) Schematic sketch of the dual-pressure turbine in OTEC system.

图 27 (网络版彩图) OTEC 系统双压透平膨胀过程 T - S 图
Figure 27 (Color online) T - S diagram for expansion process of the dual-pressure turbine in OTEC system.

文献验证。

图 28 给出了透平总输出功率 ($P_{t,sum}$) 与体积占比 (x_V) 的关系。由图可知, $P_{t,sum}$ 随 x_V 的增大先增大后减小, $P_{t,sum}$ 增大的幅度大于其减小的幅度, 存在最佳的体积占比 ($x_{V,opt}=0.246$) 使得透平总输出功率 ($P_{t,sum}$) 达到一次最大值 ($P_{t,sum,m} = 49.72 \text{ kW}$)。体积占比的变化范围为 $0.11 \sim 0.32$ 的原因在于流过高压透平的工质质量流率小于流过低压透平的工质质量流率 (高压透平中的工质仅是循环工质的一部分, 而低压透平中的工质等于循环的总工质), 工质的质量流率越大, 透平的体积越大。曲线 $P_{t,sum}$ - x_V 最左侧点的横坐标 $x_V=0.11$ 是该条件下的

最小体积占比, 与该点相比, 一次构形优化后的透平总输出功率增大了 21.38% , 体积占比增大了 123.64% ; 而与初始设计点相比, 一次构形优化后的透平总输出功率增大了 0.69% , 体积占比增大了 23.0% 。结果表明, 优化体积占比能在一定程度上提高透平的总输出功率。这是因为当其他参数固定时, 透平的体积决定了速比, 存在最佳的速比使得透平的等熵效率达到最大, 在透平的理想比焓降一定时其输出功率也将达到最大。

图 29 给出了透平的总体积 ($V_{t,sum}$) 对透平三次最大总输出功率 ($P_{t,sum,mmm}$)、三次最佳体积占比 ($x_{V,ooo}$)、二次最佳轮径比 ($\bar{D}_{oo}$) 和一次最佳动叶轮出口相对流动角 ($\beta_{2,opt}$) 的影响。由图可知, 随着 $V_{t,sum}$ 的增大, $P_{t,sum,mmm}$ 逐渐增大, $x_{V,ooo}$ 基本保持不变, $\bar{D}_{oo}$ 逐渐减小, 而 $\beta_{2,opt}$ 变化不稳定。当 $V_{t,sum}$ 从 $4.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 增大至 $8.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 时,

图 28 $P_{t,sum}$ 与 x_V 的关系
Figure 28 Relationship of $P_{t,sum}$ vs. x_V .

图 29 $V_{t,sum}$ 对 $P_{t,sum,mmm}$, $x_{V,ooo}$, $\bar{D}_{oo}$ 和 $\beta_{2,opt}$ 的影响
Figure 29 Effects of $V_{t,sum}$ on $P_{t,sum,mmm}$, $x_{V,ooo}$, $\bar{D}_{oo}$ and $\beta_{2,opt}$.

$P_{t, \text{sum}, \text{mm}}$ 增大了 3.64%, D_{oo} 减小了 17.14%, 而 $\beta_{2, \text{opt}}$ 变化了 19.21%。结果表明, 增大透平的总体积能在一定程度上提高透平的总输出功率。这是因为高低压透平的等熵效率会随着其体积的增大稍有增大, 导致透平的总输出功率增大。增大透平的总体积虽然不会改变体积占比, 但会改变轮径比和动叶轮出口相对流动角。在透平总体积增大的条件下, 即使体积占比不发生变化, 高压透平和低压透平的体积也将增大。

4.4 海洋热能转换装置整体系统构形热力学优化

基于单压透平的性能优化是当前 OTEC 系统研究的热点^[172~174]。为了进一步提高能量转换系统的性能, 一些学者采用双压透平对低温热源驱动的有机朗肯循环性能进行了优化。Kang^[175]设计了一种由高低压透平组成的双压向心透平装置, 通过实验研究发现采用双压向心透平的有机朗肯循环性能得到了改善。Du 等人^[176]以透平效率最大为目标优化了并联双压有机朗肯循环高低压透平的几何尺寸, 并分析了热源质量流率比、热源进口温度和冷凝温度等参数对透平性能的影响。Li 等人^[177]比较了高低压透平两种布置形式对双压有机朗肯循环性能的影响, 发现双压透平采用补气式布置比采用并联式布置具有更高的输出功率和更低的投资成本。Sun 等人^[178]建立了补气式布置的双压有

机朗肯循环模型, 分析了高低压透平进口压力对系统焓效率和总投资成本的影响。

构形理论也被引入到低温热源驱动的有机朗肯循环^[82,179]和卡琳娜循环^[83,180]的优化设计。Feng 等人^[181]建立了双压透平的有机朗肯循环模型, 以系统输出功率最大为目标对其进行了构形热力学优化, 优化后系统输出功率提高了 8.84%。蔡存光^[182]建立了同时考虑高低压蒸发器、冷凝器和双压透平部件结构和性能参数的卡琳娜循环模型, 在循环总换热面积和透平总体积一定的条件下, 分别以系统输出功率、系统效率、循环熵产率和生态学函数为优化目标对双压透平卡琳娜循环系统进行了构形热力学优化。研究表明, 优化后双压透平卡琳娜循环比单压的系统输出功率增加了 5.83%, 系统效率提高了 47.80%, 循环熵产率减少了 27.04%, 生态学函数也有较大的提高, 这说明采用双压透平设计能够较好地提升卡琳娜循环的性能。陈林根等人^[183]建立了双压透平的卡琳娜-有机朗肯联合循环模型, 以系统输出功率最大为目标对其进行了构形热力学优化, 发现联合循环性能比单循环性能大大提升。

图 30 所示为基于双压透平的 OTEC 系统示意图, 其主要由高低温板式蒸发器、高低压向心透平、冷凝器、高低压工质泵和温、冷海水泵等部件组成。温海

图 30 (网络版彩图) 基于双压透平的 OTEC 系统示意图

Figure 30 (Color online) Schematic sketch of an OTEC system with dual-pressure turbine.

水被压入高低温蒸发器中, 向蒸发器内的工质放热, 温度逐渐降低; 冷海水被压入冷凝器中, 从冷凝器内的工质吸热, 温度逐渐升高; 而工质被分成两部分分别进入高低温蒸发器, 在高温蒸发器中吸热后的工质进入高压透平膨胀做功, 高压透平出口的工质与在低温蒸发器中吸热后的工质混合进入低压透平膨胀做功, 低压透平出口的工质进入冷凝器释放热量。图31所示为双压有机朗肯循环 T - s 图, 点1~10为工质的状态点, 工质在状态点2被分成两部分, 而两部分工质在状态点9混合。过程5→7、2→4和10→1分别表示高温蒸发器、低温蒸发器和冷凝器的传热过程, 过程1→2和2→5分别表示低高压工质泵的绝热压缩过程, 而过程7→8和9→10分别表示高低压透平的绝热膨胀过程。 $T_{h,in}$ 和 $T_{h,out}$ 为温海水的进出口温度, $T_{h,2}$ 为温海水在高温蒸发器出口的温度, $T_{h,1}$ 和 $T_{h,3}$ 分别为工质在高低温蒸发器中发生相变时对应的温海水温度, $T_{c,in}$ 和 $T_{c,out}$ 分别为冷海水的进出口温度。本节以净输出功率最大为目标, 应用构形理论和有限时间热力学理论对包含蒸发器、冷凝器和双压透平的OTEC系统进行构形热力学优化^[184], 优化变量包含高低温蒸发器和冷凝器传热板有效长度、高压透平体积占比、冷凝器和高温蒸发器传热面积占比等结构参数。分析工质的总质量流率、工质质量流率比、温海水和冷海水的进口温度、透平的轮径比等参数对OTEC系统构形优化结果的影响。在相同条件下比较OTEC系统分别采用双压透平和单压透平时的最优性能。

图31 (网络版彩图)基于双压透平的OTEC循环 T - s 图
Figure 31 (Color online) T - s diagram of an OTEC cycle with dual-pressure turbine.

图32给出了五次最大净输出功率($P_{sys,5m}$)、五次最佳高温蒸发器传热板有效长度($L_{eff,hte,5o}$)、四次最佳低温蒸发器传热板有效长度($L_{eff,lte,4o}$)、三次最佳冷凝器传热板有效长度($L_{eff,cond,3o}$)、二次最佳高压透平体积占比($x_{V,oo}$)和一次最佳冷凝器传热面积占比($f_{A,cond,opt}$)与高温蒸发器传热面积占比($f_{A,hte}$)的关系。由图可知, 随着 $f_{A,hte}$ 的增大, $P_{sys,5m}$ 先增大后减小, $L_{eff,hte,5o}$ 逐渐增大, $L_{eff,lte,4o}$ 基本不变, 而 $L_{eff,cond,3o}$, $x_{V,oo}$ 和 $f_{A,cond,opt}$ 逐渐减小, 其中 $L_{eff,cond,3o}$ 和 $x_{V,oo}$ 的减小幅度较小, $f_{A,cond,opt}$ 的减小幅度较大。存在一个最佳的高温蒸发器传热面积占比($f_{A,hte,opt} = 0.27$)使得 $P_{sys,5m}$ 达到六次最大值($P_{sys,6m} = 78.78$ kW), 对应的六次最佳高温蒸发器传热板有效长度($L_{eff,hte,6o}$)、五次最佳低温蒸发器传热板有效长度($L_{eff,lte,5o}$)、四次最佳冷凝器传热板有效长度($L_{eff,cond,4o}$)、三次最佳高压透平体积占比($x_{V,3o}$)和二次最佳冷凝器传热面积占比($f_{A,cond,oo}$)分别为0.71 m, 0.58 m, 1.29 m, 0.34和0.51。与三次构形优化相比, 六次构形优化后的OTEC系统净输出功率提高了5.0%, 高低温蒸发器和冷凝器传热板有效长度、高压透平体积占比、冷凝器和高温蒸发器传热面积占比分别变化了1.43%, 23.4%, 7.19%, 16.44%, 15%和3.57%。结果表明, 在优化高低温蒸发器和冷凝器传热板有效长度的基础上继续优化高压透平体积占比、冷凝器和高温蒸发器传热面积占比能较大地提高系统的净输出

图32 (网络版彩图) $P_{sys,5m}$, $L_{eff,hte,5o}$, $L_{eff,lte,4o}$, $L_{eff,cond,3o}$, $x_{V,oo}$ 和 $f_{A,cond,opt}$ 与 $f_{A,hte}$ 的关系
Figure 32 (Color online) Relationships of $P_{sys,5m}$, $L_{eff,hte,5o}$, $L_{eff,lte,4o}$, $L_{eff,cond,3o}$, $x_{V,oo}$ and $f_{A,cond,opt}$ vs. $f_{A,hte}$.

功率.

图33给出了透平的轮径比($\bar{D}$)对六次最大净输出功率($P_{\text{sys},6\text{m}}$)、六次最佳高温蒸发器传热板有效长度($L_{\text{eff},\text{hte},60}$)、五次最佳低温蒸发器传热板有效长度($L_{\text{eff},\text{lte},50}$)、四次最佳冷凝器传热板有效长度($L_{\text{eff},\text{cond},40}$)、三次最佳高压透平体积占比($x_{V,30}$)、二次最佳冷凝器传热面积占比($f_{A,\text{cond},00}$)和一次最佳高温蒸发器传热面积占比($f_{A,\text{hte},\text{opt}}$)的影响. 由图可知, $P_{\text{sys},6\text{m}}$ 随 $\bar{D}$ 的增大而增大, 但其增大幅度逐渐趋近于平缓. 随着 $\bar{D}$ 增大, $L_{\text{eff},\text{hte},60}$ 和 $f_{A,\text{hte},\text{opt}}$ 小幅度减小, $L_{\text{eff},\text{lte},50}$ 基本不变, $L_{\text{eff},\text{cond},40}$ 和 $f_{A,\text{cond},00}$ 存在微小波动, 而 $x_{V,30}$ 先稍有增大后稍有减小. 当 $\bar{D}$ 从0.35变化至0.44时, $P_{\text{sys},6\text{m}}$ 增大了7.29%. 这表明增大透平的轮径比对提高系统的净输出功率有积极的作用, 且对系统最优构形的影响较小. 这是因为随着 $\bar{D}$ 增大, 透平的总输出功率增大, 但其增大幅度逐渐趋近于平缓, 同时系统的总耗功率逐渐减小, 从而使得系统的净输出功率增大, 但其增大幅度逐渐减小.

在换热器总传热面积、工质总质量流率、温海水质量流率和进口温度、冷海水质量流率和进口温度, 以及透平结构等参数相同的条件下, 运用遗传算法优化OTEC系统分别采用双压透平和单压透平时的净输出功率和净热效率性能, 结果如表5所示. 当以净输出功率(P_{sys})为优化目标时, 基于双压透平的OTEC系统最大净输出功率为78.79%, 而基于单压透平的OTEC系统最大净输出功率为77.72 kW, 前者比后者高1.38%. 当以净热效率(η_{sys})为优化目标时, 基于双压透

图 33 (网络版彩图) $P_{\text{sys},6\text{m}}$, $L_{\text{eff},\text{hte},60}$, $L_{\text{eff},\text{lte},50}$, $L_{\text{eff},\text{cond},40}$, $x_{V,30}$, $f_{A,\text{cond},00}$ 和 $f_{A,\text{hte},\text{opt}}$ 与 $\bar{D}$ 的关系

Figure 33 (Color online) Relationships of $P_{\text{sys},6\text{m}}$, $L_{\text{eff},\text{hte},60}$, $L_{\text{eff},\text{lte},50}$, $L_{\text{eff},\text{cond},40}$, $x_{V,30}$, $f_{A,\text{cond},00}$ and $f_{A,\text{hte},\text{opt}}$ vs. $\bar{D}$.

平的OTEC系统最大净热效率为2.45%, 而基于单压透平的OTEC系统最大净热效率为2.42%, 前者比后者高1.24%. 结果表明, OTEC系统采用双压透平比采用单压透平在取得较大的净输出功率和净热效率两个方面均存在优势.

5 结论

本文综述了基于熵产生最小化理论、有限时间热力学理论、焓理论和构形理论等现代热学理论的船海用蒸汽动力装置构形优化研究的主要进展. 回顾了所建立的包括蒸发器、过热器、经济器、锅炉整体和冷凝器在内的船舶蒸汽动力装置主要换热部件模型和包括蒸发器、冷凝器、双压透平和整体系统在内的海洋

表 5 OTEC系统采用两种循环时的优化结果

Table 5 Optimization results of the OTEC systems with two kinds of cycles

OTEC系统	P_{sys}		η_{sys}	
	最优性能	最优构形	最优性能	最优构形
双压有机朗肯循环	78.79 kW	$L_{\text{eff},\text{hte}}=0.71$ m $L_{\text{eff},\text{lte}}=0.58$ m $L_{\text{eff},\text{cond}}=1.30$ m $x_V=0.34$ $f_{A,\text{cond}}=0.52$ $f_{A,\text{hte}}=0.27$	2.45%	$L_{\text{eff},\text{hte}}=0.71$ m $L_{\text{eff},\text{lte}}=0.58$ m $L_{\text{eff},\text{cond}}=1.28$ m $x_V=0.34$ $f_{A,\text{cond}}=0.51$ $f_{A,\text{hte}}=0.27$
单压有机朗肯循环	77.72 kW	$L_{\text{eff},\text{eva}}=1.23$ m $L_{\text{eff},\text{cond}}=1.31$ m $f_{A,\text{cond}}=0.54$	2.42%	$L_{\text{eff},\text{eva}}=1.23$ m $L_{\text{eff},\text{cond}}=1.30$ m $f_{A,\text{cond}}=0.53$

热能转换装置主要换热和能量转换部件和系统模型,介绍了两种装置的主要部件的结构优化设计和性能优化以及海洋热能转换系统的构形热力学优化,在不同条件下比较了各主要部件和系统的最优构形和最优性能,并分析了各种参数对构形优化结果的影响规律.研究工作的主要结果如下.

(1) 对于船舶蒸汽动力装置,对增压锅炉蒸发器、过热器、经济器和整体锅炉进行构形优化后,反映传热和流动性能的复合函数得到有效降低,体现了换热率、熵产率、焓耗散率与耗功率的性能折中.整体锅炉的多目标优化解集为锅炉设计提供了更为广泛的选择方案.对船用冷凝器进行构形优化后,其总耗功率减小了43%,可见选择合适的换热管外径可使得冷凝器的流动性能大大改善.

(2) 对于海洋热能转换装置换热和能量转换部件,存在最佳传热板宽度使得蒸发器耗功率达到最小值,构形优化后其耗功率减小了47.5%,在所讨论的8种工质中由于氨具有较小的耗功率和较好的热力学和环保性能,被选为蒸发器的工质;存在最佳的传热板有效长度和宽度使得冷凝器复合函数达到二次最小值,构形优化后其复合函数降低了9.9%,适当减小传热板有效数量有助于进一步提高冷凝器的综合性能;存在最佳透平体积占比、轮径比和动叶轮出口相对流动角使得透平总输出功率取得三次最大值,构形优化后其总输出功率增大了2.02%.

(3) 对于海洋热能转换装置整体系统,存在最佳的

高温蒸发器传热板有效长度、低温蒸发器传热板有效长度、冷凝器传热板有效长度、高压透平体积占比、冷凝器传热面积占比和高温蒸发器传热面积占比使得OTEC系统净输出功率取得6次最大值,构形优化后其净输出功率提高了5.0%,这是综合协调热功转换过程和设备换热过程、降低其不可逆性后构形热力学的优化的结果.双压透平OTEC系统与单压透平OTEC系统相比,构形优化后前者净输出功率和净热效率分别提高了1.38%和1.24%,可见前者在基本性能方面比后者存在优势.

本文所述工作是基于构形理论开展的,在一定的系统约束条件下寻求系统最佳结构使得其性能达到最优,所得的新优化结果能够用于指导工程设计.特别是提出的动力系统构形热力学优化,为船舶蒸汽动力装置和海洋热能转换装置的性能深度优化和一般动力系统能量传递和转换过程的优化设计和节能降耗提供了一定的理论指导.该优化方法已拓展应用到有机朗肯循环^[181]、卡琳娜循环^[182]及两者联合循环^[183]的性能优化中,可进一步拓展应用到其他航空、陆用和船海用动力装置部件与系统的一体化优化设计中,并可进一步拓展应用到化学反应器网络,如海基合成燃油系统^[86]等.在船舶蒸汽动力装置的优化中,本文仅考虑了包含主要换热部件的增压锅炉本体和冷凝器优化,在下一步工作中可进一步考虑增压锅炉中的涡轮增压机组优化以及船舶蒸汽动力系统优化,以进一步提高船舶蒸汽动力系统的综合性能.

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 Luo X L, Hua B. A review on design and optimization of steam power system (in Chinese). CIESC J, 2009, 60: 2411–2419 [罗向龙, 华贲. 蒸汽动力系统设计及综合优化研究综述. 化工学报, 2009, 60: 2411–2419]
- 2 Morsy El-Gohary M. Overview of past, present and future marine power plants. J Mar Sci Appl, 2013, 12: 219–227
- 3 Li N, Zhang X. The revelation from the development of foreign marine steam turbine power plants (in Chinese). Chin J Ship Res, 2016, 11: 89–96 [黎南, 张欣. 国外舰船蒸汽动力技术发展的启示. 中国舰船研究, 2016, 11: 89–96]
- 4 Li D S, Chen R Q, Zhang L. Research progress of thermodynamic cycle of ocean thermal energy conversion (in Chinese). Ind Heating, 2016, 4: 6–9, 13 [李大树, 陈荣旗, 张理. 海洋温差能发电热力循环技术进展. 工业加热, 2016, 4: 6–9, 13]
- 5 Yanagishita H, Kitamoto D, Nakane T. Separation of alcohol aqueous solution by pervaporation using asymmetric polyimide membrane. High Performance Polym, 1995, 7: 275–281
- 6 Mondejar M E, Andreasen J G, Pierobon L, et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renew

- [Sustain Energy Rev](#), 2018, 91: 126–151
- 7 Zhang J, Qin K, Li D, et al. Potential of organic Rankine cycles for unmanned underwater vehicles. [Energy](#), 2020, 192: 116559
 - 8 Jin H G, Xuan Y M, He Y L, et al. Engineering thermophysics and sustainable energy development (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2020, 50: 1245–1251 [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. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1245–1251]
 - 9 Shen W D, Jiang Z M, Tong J G, et al. Engineering Thermodynamics (3rd ed) (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2000 [沈维道, 蒋智敏, 童钧耕, 等. 工程热力学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2000]
 - 10 Bejan A. Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
 - 11 Chen L G. Progress in study on constructal theory and its applications. [Sci China Tech Sci](#), 2012, 55: 802–820
 - 12 Chen L G, Feng H J. Multi-objective Constructal Optimizations for Fluid Flow, Heat and Mass Transfer Processes (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [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, 2017]
 - 13 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
 - 14 Bejan A. Freedom and Evolution: Hierarchy in Nature, Society and Science. Berlin: Springer, 2020
 - 15 Chen L G, Yang A B, Feng H J, et al. Constructal design progress for eight types of heat sinks. [Sci China Tech Sci](#), 2020, 63: 879–911
 - 16 Bejan A. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. New York: Wiley, 1982
 - 17 Bejan A. Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes. [J Appl Phys](#), 1996, 79: 1191–1218
 - 18 Li P L, Chen L G, Xia S J, et al. Entropy generation rate minimization for steam methane reforming reactor heated by molten salt. [Energy Rep](#), 2020, 6: 685–697
 - 19 Li Z X, Guo Z Y. Field Synergy Principle of Heat Convection Optimization (in Chinese). Beijing: Science Press, 2010 [李志信, 过增元. 对流换热优化的场协同理论. 北京: 科学出版社, 2010]
 - 20 Tao W Q, He Y L, Chen L. A comprehensive review and comparison on heatline concept and field synergy principle. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2019, 135: 436–459
 - 21 Li Y, Wang Z, Yang J, et al. Thermal and hydraulic characteristics of microchannel heat sinks with cavities and fins based on field synergy and thermodynamic analysis. [Appl Thermal Eng](#), 2020, 175: 115348
 - 22 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
 - 23 Chen L G. Progress in entransy theory and its applications. [Chin Sci Bull](#), 2012, 57: 4404–4426
 - 24 Chen Q, Liang X G, Guo Z Y. Entransy theory for the optimization of heat transfer—A review and update. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2013, 63: 65–81
 - 25 Cheng X T, Liang X G. Entransy: Its physical basis, applications and limitations. [Chin Sci Bull](#), 2014, 59: 5309–5323
 - 26 Guo J F. Design analysis of supercritical carbon dioxide recuperator. [Appl Energy](#), 2016, 164: 21–27
 - 27 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
 - 28 Feng H J, Chen L G, Xie Z H. Constructal entransy dissipation rate minimization for X-shaped vascular networks. [Sci China Tech Sci](#), 2019, 62: 2195–2203
 - 29 Li K, Wen J, Liu Y, et al. Application of entransy theory on structure optimization of serrated fin in plate-fin heat exchanger. [Appl Thermal Eng](#), 2020, 173: 114809
 - 30 Andresen B. Finite-Time Thermodynamics. Copenhagen: Physics Laboratory II, University of Copenhagen, 1983
 - 31 Chen L G, Wu C, Sun F R. Finite time thermodynamic optimization or entropy generation minimization of energy systems. [J Non-Equilibrium ThermoDyn](#), 1999, 24: 327–359
 - 32 Chen L G, Xia S J. Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization for Irreversible Cycles—Thermodynamic and Chemical Theoretical Cycles (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [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, 2018]
 - 33 Feidt M, Costea M. Progress in carnot and chambadal modeling of thermomechanical engine by considering entropy production and heat transfer entropy. [Entropy](#), 2019, 21: 1232
 - 34 Sieniutycz S. Complexity and Complex Thermo-Economic Systems. Amsterdam: Elsevier, 2020
 - 35 Chen L G, Ge Y L. Thermodynamic Optimization Theory for Internal Combustion Engine Cycles (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [陈

- 林根, 戈延林. 内燃机循环热力学优化理论. 北京: 科学出版社, 2021]
- 36 Radcenco V. Generalized Thermodynamics. Bucharest: Editura Tehnica, 1994
- 37 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
- 38 Chen L G, Feng H J, Xie Z H. Generalized thermodynamic optimization for iron and steel production processes: Theoretical exploration and application cases. *Entropy*, 2016, 18: 353
- 39 Chen L G, Xia S J, Feng H J. Progress in generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible cycles (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 9: 1223–1267 [陈林根, 夏少军, 冯辉君. 不可逆循环广义热力学动态优化研究进展. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1223–1267]
- 40 Chen L G, Xia S J. Progresses in generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible processes (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 981–1022 [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]
- 41 Chen L G, Liu X, Feng H J, et al. Molten steel yield optimization of a converter based on constructal theory. *Sci China Tech Sci*, 2018, 61: 496–505
- 42 Hazarika S A, Bhanja D, Nath S. Fork-shaped constructal fin array design a better alternative for heat and mass transfer augmentation under dry, partially wet and fully wet conditions. *Int J Thermal Sci*, 2020, 152: 106329
- 43 Shi J C, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal design for a flat plate collector in solar ocean thermal energy conversion system (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2022, 52: 403–414 [石俊朝, 冯辉君, 陈林根, 等. 太阳能海洋热能转换系统中平板太阳能集热器构形设计. 中国科学: 技术科学, 2021, 2022, 52: 403–414]
- 44 Chen C, You J, Feng H J, et al. A multi-objective study on the constructal design of non-uniform heat generating disc cooled by radial- and dendritic-pattern cooling channels. *Sci China Tech Sci*, 2021, 64: 729–744
- 45 Junior M C B P, Pinto V T, Rocha L A O, et al. Aanalysis through constructal design of the influence of spacing between stiffeners in the deflection of plates. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, 2020, 5: 275
- 46 Soni B, Miguel A F, Nayak A K. A mathematical analysis for constructal design of tree flow networks under unsteady flow. *Proc Royal Society A*, 2020, 476: 20200377
- 47 Bejan A. Human evolution is biological & technological evolution. *Biosystems*, 2020, 195: 104156
- 48 Bejan A, Lorente S. Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. *J Appl Phys*, 2013, 113: 151301
- 49 Bejan A. Constructal thermodynamics. *Int J Heat Tech*, 2016, 34: S1–S8
- 50 Bejan A. Thermodynamics of heating. *Proc R Soc A*, 2019, 475: 20180820
- 51 Boichot R, Luo L, Fan Y. Tree-network structure generation for heat conduction by cellular automaton. *Energy Convers Manage*, 2009, 50: 376–386
- 52 Song B, Guo Z. Robustness in the volume-to-point heat conduction optimization problem. *Int J Heat Mass Transfer*, 2011, 54: 4531–4539
- 53 Hajmohammadi M R, Parsa H, Najafian J. Proposing an optimal tree-like design of highly conductive material configuration with unequal branches for maximum cooling a heat generating piece. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 142: 118422
- 54 Gosselin L, Bejan A. Constructal heat trees at micro and nanoscales. *J Appl Phys*, 2004, 96: 5852–5859
- 55 Kuddusi L, Eğriçan N. A critical review of constructal theory. *Energy Convers Manage*, 2008, 49: 1283–1294
- 56 Tian X, Wang L. Heat conduction in cylinders: Entropy generation and mathematical inequalities. *Int J Heat Mass Transfer*, 2018, 121: 1137–1145
- 57 Chen X, Zhao T, Zhang M Q, et al. Entropy and entransy in convective heat transfer optimization: A review and perspective. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 137: 1191–1220
- 58 Sakly A, Ben Nejma F. Heat and mass transfer of combined forced convection and thermal radiation within a channel: Entropy generation analysis. *Appl Thermal Eng*, 2020, 171: 114903
- 59 Bejan A. Second law analysis in heat transfer. *Energy*, 1980, 5: 720–732
- 60 Kingston D, Wilhelmsen Ø, Kjelstrup S. Minimum entropy production in a distillation column for air separation described by a continuous non-equilibrium model. *Chem Eng Sci*, 2020, 218: 115539
- 61 Kizilova N, Sauermoser M, Kjelstrup S, et al. Fractal-like flow-fields with minimum entropy production for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Entropy*, 2020, 22: 176
- 62 Wang W H, Cheng X T, Liang X G. Entropy and entransy analyses and optimizations of the Rankine cycle. *Energy Convers Manage*, 2013, 68:

82–88

- 63 Wu Y Q, Cai L, Wu X L. Analyses of entropy generation and entransy for a Stirling cycle system based on generalized heat transfer law (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 627–640 [吴艳秋, 蔡黎, 伍习丽. 基于广义传热定律的斯特林循环熵产分析和㊦分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 627–640]
- 64 Wang S, Zhang W, Feng Y Q, et al. Entropy, entransy and exergy analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) using mixture working fluids for engine waste heat recovery. *Energies*, 2020, 13: 1301
- 65 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization of a rectangular body with nonuniform heat generation. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1352–1359
- 66 Cheng X T, Liang X G. Entransy functions for steady heat transfer. *Sci China Tech Sci*, 2019, 62: 1726–1734
- 67 Feng H J, Chen L G, Liu X, et al. Generalized constructal optimization of strip laminar cooling process based on entransy theory. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1687–1695
- 68 Wang L, Xie Z H, Sun F R, et al. Constructal studies on hexagonal microchannel heat sinks based on multi-physics field coupling calculations (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 741–752 [王亮, 谢志辉, 孙丰瑞, 等. 基于多物理场耦合计算的工质回流式微通道正六边形热沉的构形研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 741–752]
- 69 Li B, Zhai X, Cheng X. Thermal performance analysis and optimization of multiple stage latent heat storage unit based on entransy theory. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 135: 149–157
- 70 Alic F. Entransy dissipation analysis and new irreversibility dimension ratio of nanofluid flow through adaptive heating elements. *Energies*, 2020, 13: 114
- 71 Wei S H, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal equivalent thermal resistance minimization for Tau-shaped fin. *Entropy*, 2020, 22: 1206
- 72 Cheng X T, Wang X Y, Liang X G. Role of viscous heating in entransy analyses of convective heat transfer. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 2154–2162
- 73 Wang L, Xie Z H, Chen L G, et al. Equivalent thermal resistance minimization for a circular disc heat sink with reverting microchannels based on constructal theory and entransy theory. *Sci China Tech Sci*, 2021, 64: 111–121
- 74 Cheng X T, Liang X G. Entransy analyses of the thermodynamic cycle in a turbojet engine. *Sci China Tech Sci*, 2017, 60: 1160–1167
- 75 Guo Z Y, Zhao T, Xue T W. Entransy analysis of reversible thermodynamic cycles based on the conservation of entransy equation and its application (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1200–1210 [过增元, 赵甜, 薛提微. 基于㊦守恒方程的可逆热力循环㊦分析及其应用. 科学通报, 2019, 64: 1200–1210]
- 76 Bejan A. “Entransy,” and its lack of content in physics. *J Heat Transfer*, 2014, 136: 055501
- 77 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
- 78 Reitlinger H B. Sur L’utilisation de la Chaleur Dans les Machines à Feu. Liège: Vaillant-Carmanne, 1929
- 79 Novikov I I. The efficiency of atomic power stations (a review). *J Nucl Energy (1954)*, 1958, 7: 125–128
- 80 Chambadal P. Les Centrales Nucleaires. Paris: Armand Colin, 1957
- 81 Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am J Phys*, 1975, 43: 22–24
- 82 Feng H J, Chen W J, Chen L G, et al. Power and efficiency optimizations of an irreversible regenerative organic Rankine cycle. *Energy Convers Manage*, 2020, 220: 113079
- 83 Feng H J, Qin W X, Chen L G, et al. Power output, thermal efficiency and exergy-based ecological performance optimizations of an irreversible KCS-34 coupled to variable temperature heat reservoirs. *Energy Convers Manage*, 2020, 205: 112424
- 84 Chen L G, Feng H J, Ge Y L. Maximum energy output chemical pump configuration with an infinite-low- and a finite-high-chemical potential mass reservoirs. *Energy Convers Manage*, 2020, 223: 113261
- 85 Xia S J, Chen L G, Feng H J. Optimal configurations for maximizing generalized output of two-finite-potential-reservoir endoreversible generalized engine cycles (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 276–286 [夏少军, 陈林根, 冯辉君. 两有限势库内可逆广义机最大广义输出的最优构型. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 276–286]
- 86 Chen L G, Wang C, Zhang L, et al. Progress in thermodynamic analyses and optimizations for key component units in sea-based fuel synthesis systems (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 137–175 [陈林根, 王超, 张磊, 等. 海基合成燃油系统关键单元的热力学分析与优化研究进展. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 137–175]

- 87 Kong R, Chen L G, Xia S J, et al. Minimization of entropy production rate in hydrogen iodide decomposition reactor (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 565–579 [孔锐, 陈林根, 夏少军, 等. 碘化氢分解反应器熵产生率最小化. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 565–579]
- 88 Xia S J, Chen L G, Wang C. Optimal current paths for a class of generalized electrochemical reaction systems (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1025–1039 [夏少军, 陈林根, 王超. 一类普适电化学反应系统的最优电流路径. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1025–1039]
- 89 Ding Z M, Chen L G, Wang W H, et al. Progress in study on finite time thermodynamic performance optimization for three kinds of microscopic energy conversion systems (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 889–918 [丁泽民, 陈林根, 王文华, 等. 三类微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]
- 90 Liao T J, Lin B H. Investigation on the performance of a photon-enhanced thermionic emission solar cell (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 873–879 [廖天军, 林比宏. 光子增强热离子太阳能电池的性能研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 873–879]
- 91 Ding Z M, Chen L G, Ge Y L, et al. Optimal performance regions of an irreversible energy selective electron heat engine with double resonances. *Sci China Tech Sci*, 2019, 62: 397–405
- 92 Qiu S S, Ding Z M, Chen L G, et al. Performance optimization of thermionic refrigerators based on van der Waals heterostructures. *Sci China Tech Sci*, 2021, 64: 1007–1016
- 93 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
- 94 Feng Y L, Chen L G, Meng F K, et al. Influences of external heat transfer and Thomson effect on the performance of TEG-TEC combined thermoelectric device. *Sci China Tech Sci*, 2018, 61: 1600–1610
- 95 Chen L G, Meng F K, Ge Y L, et al. Performance optimization of a class of combined thermoelectric heating devices. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 2640–2648
- 96 Xia S J, Chen L G. Generalized dissipation minimization for generalized flow transfer processes (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 501–517 [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]
- 97 Chen L G, Feng H J, Xie Z H, et al. Interaction mechanism among material flows, energy flows and environment and generalized thermodynamic optimizations for iron and steel production processes (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 48: 111–135 [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]
- 98 Zhao J M, Jiang R Q, Li Y J. The calculation of outlet flue gas temperature of marine supercharged boiler furnace (in Chinese). *Energy Tech*, 2007, 28: 76–78 [赵嘉明, 姜任秋, 李彦军. 船用增压锅炉炉膛出口烟气温度的计算. 能源技术, 2007, 28: 76–78]
- 99 Xue M, Li Y J, Zhu Z L, et al. A calculation method for supercharged boiler furnace heating (in Chinese). *J Harbin Eng University*, 2013, 34: 709–714 [薛敏, 李彦军, 祝仲伦, 等. 一种小型增压锅炉炉膛热力计算方法. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34: 709–714]
- 100 Yue P, Wang J Q, Wang L, et al. The research on the Marine Boiler's pressurized combustion and heat transfer (in Chinese). *Boiler Manuf*, 2008, 2: 8–11 [岳彭, 王加庆, 王磊, 等. 船用锅炉增压燃烧与传热计算方法研究. 锅炉制造, 2008, 2: 8–11]
- 101 Du X J, Chen M, Liu L H, et al. Influences of the furnace pressure on the thermodynamic parameters of a supercharged boiler (in Chinese). *J Eng Thermal Energy Power*, 2010, 25: 635–638 [杜晓建, 陈明, 刘丽华, 等. 炉膛压力对增压锅炉热力参数的影响. 热能动力工程, 2010, 25: 635–638]
- 102 Kim Y S, Lorente S, Bejan A. Constructal steam generator architecture. *Int J Heat Mass Transfer*, 2009, 52: 2362–2369
- 103 Xiao Q H, Chen L G, Sun F R. Constructal design for a steam generator based on entransy dissipation extremum principle. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 1462–1468
- 104 Norouzi E, Amidpour M. Optimal thermodynamic and economic volume of a heat recovery steam generator by constructal design. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2012, 39: 1286–1292
- 105 Norouzi E, Amidpour M, Rezakazemi M. Heat recovery steam generator: Constructal thermoeconomic optimization. *Appl Thermal Eng*, 2019, 148: 747–753
- 106 Mehrgoo M, Amidpour M. Constructal design and optimization of a dual pressure heat recovery steam generator. *Energy*, 2017, 124: 87–99
- 107 Mehrgoo M, Karbasioun M, Amidpour M. Developing a design method for optimal geometric and operating parameters of triple pressure heat recovery steam generator using the constructal theory. *Modares Mech Eng*, 2017, 17: 335–345
- 108 Xie Z J, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal design for supercharged boiler evaporator. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 138: 571–579
- 109 Xie Z J. Multi-objective constructal optimization of a supercharged boiler (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Naval University of Engineering, 2019 [谢卓君. 增压锅炉的多目标构形优化. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2019]

- 110 Feng H J, Chen L G, Xie Z J, et al. Constructal design of a supercharged boiler evaporator based on entropy generation approach. In: Proceedings of the Constructal Law & Second Law Conference 2019. Porto Alegre, 2019. 118–121
- 111 Zhang W, Jiang R Q, Li Y J, et al. Multi-objective constructal optimization of a supercharged boiler (in Chinese). *Appl Sci Tech*, 2004, 31: 55–57 [张网, 姜任秋, 李彦军, 等. 增压锅炉过热器强化传热机理及热力计算方法研究. *应用科技*, 2004, 31: 55–57]
- 112 Zhang H Y, Xie H T, Jin X D. The simulation of heat transfer and flow performance for supercharged boiler superheater. *Adv Mater Res*, 2014, 936: 2103–2108
- 113 Chi M, Zhang H Y, Xie H T, et al. Study of the method for evaluating the performance of a small-sized supercharged boiler superheater (in Chinese). *J Eng Thermal Energy Power*, 2015, 30: 456–459 [迟淼, 张红岩, 谢海涛, 等. 小型增压锅炉过热器性能评估方法研究. *热能动力工程*, 2015, 30: 456–459]
- 114 Taler D, Trojan M, Dzierwa P, et al. Numerical simulation of convective superheaters in steam boilers. *Int J Thermal Sci*, 2018, 129: 320–333
- 115 Zhang X D, Yang Z C. Correction of algorithm for thermodynamic performance of superheater of certain turbocharged boiler (in Chinese). *J Naval University Eng*, 2004, 16: 73–76 [张晓东, 杨自春. 对某型增压锅炉过热器热特性计算方法的修正. *海军工程大学学报*, 2004, 16: 73–76]
- 116 Feng H J, Xie Z J, Chen L G, et al. Constructal design for supercharged boiler superheater. *Energy*, 2020, 191: 116484
- 117 Zhang L J, Jiang R Q, Li Y J, et al. Research on the structure and thermal calculation method of economizer in supercharged boiler (in Chinese). *J Harbin Eng University*, 2004, 25: 229–231 [张丽剑, 姜任秋, 李彦军, 等. 增压锅炉经济器结构与热力计算研究. *哈尔滨工程大学学报*, 2004, 25: 229–231]
- 118 Liu Y F, Li S P, Li X H. Energy-saving analysis of 215MW cogeneration boiler adding low temperature economizer. *Appl Mech Mater*, 2013, 448–453: 2777–2780
- 119 Lv W, Wang X H, Zhang D L, et al. The relationship between the wall temperature and the boiling rate of the biomass boiler economizer and calculation program design. *Adv Mater Res*, 2011, 354–355: 329–332
- 120 Liu X Y, Li Y H, Jiang X Y, et al. Experimental and applied research of the square finned-tube economizer of a marine boiler (in Chinese). *J Eng Thermal Energy Power*, 2004, 19: 299–301 [刘祥源, 李宇红, 姜晓燕, 等. 船用锅炉方形翅片管经济器的试验与应用. *热能动力工程*, 2004, 19: 299–301]
- 121 Xiao P, Zhang Y, Wang Y, et al. Analysis of an improved economizer system for active control of the coal-fired boiler flue gas temperature. *Energy*, 2019, 170: 185–198
- 122 Tang W, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal design for a boiler economizer. *Energy*, 2021, 223: 120013
- 123 Jiang R Q, Zhao X, Li Y J, et al. Calculation methods of gas resistance of supercharged boiler (in Chinese). *J Harbin Eng University*, 2004, 25: 566–568 [姜任秋, 赵鑫, 李彦军, 等. 船用增压锅炉烟风阻力计算方法研究. *哈尔滨工程大学学报*, 2004, 25: 566–568]
- 124 Xue M. Thermodynamic performance checking calculation and dynamic performance research of a supercharged boiler (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Engineering University, 2007 [薛敏. 增压锅炉热力性能校核计算及动态性能研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007]
- 125 Zhang G L. Steady state performance calculation and dynamic process simulation of a marine supercharged boiler (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Engineering University, 2008 [张国磊. 船用增压锅炉稳态性能计算及动态过程仿真. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008]
- 126 Lei Y, Sun B Z, Li Y J, et al. Mechanism and calculating methods of supercharged enhanced convective heat transfer of flue gas (in Chinese). *CIESC J*, 2011, 62: 140–145 [雷雨, 孙宝芝, 李彦军, 等. 增压强化烟气对流传热机理及其计算方法. *化工学报*, 2011, 62: 140–145]
- 127 Gulotta T, Guarino F, Cellura M, et al. Constructal law optimization of a boiler. *Int J Heat Tech*, 2017, 35: 297–305
- 128 Gulotta T M, Guarino F, Cellura M, et al. A constructal law optimization of a boiler inspired by life cycle thinking. *Thermal Sci Eng Prog*, 2018, 6: 380–387
- 129 Johnson C M, Vanderplaats G N, Marto P J. Marine condenser design using numerical optimization. *J Mech Des*, 1980, 102: 469–475
- 130 Hu D M, Chen L G. Reducing the weight and size of marine condenser (in Chinese). *J Naval Academy Eng*, 1987, 40: 20–25 [胡德明, 陈林根. 减小船用冷凝器的重量尺寸. *海军工程学院学报*, 1987, 40: 20–25]
- 131 Zheng J, Yan C Q, Wang J J. Optimal design of condenser weight (in Chinese). *Nuclear Power Eng*, 2011, 32: 134–138 [郑静, 阎昌琪, 王建军. 冷凝器重量优化设计. *核动力工程*, 2011, 32: 134–138]
- 132 Zeng Z W. Numerical simulation on shell side performance and optimization research on design of marine condenser (in Chinese). Dissertation

- for Master's Degree. Harbin: Harbin Engineering University, 2017 [曾子威. 船用凝汽器设计与壳侧性能模拟及优化研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017]
- 133 Kim Y S. Design with constructal theory: Steam generators, turbines and heat exchangers. Dissertation for Doctoral Degree. Durham: Duke University, 2010
- 134 Bejan A, Lee J, Lorente S, et al. The evolutionary design of condensers. *J Appl Phys*, 2015, 117: 125101
- 135 Feng H J, Chen L G, Wu Z X, et al. Constructal optimization for an organic fluid shell-and-tube condenser based on entransy theory (in Chinese). *CIESC J*, 2020, 71: 98–103 [冯辉君, 陈林根, 吴志祥, 等. 基于熵理论的有机工质管壳式冷凝器构形优化. 化工学报, 2020, 71: 98–103]
- 136 Feng H J, Cai C G, Chen L G, et al. Constructal design of a shell-and-tube condenser with ammonia-water working fluid. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2020, 118: 104867
- 137 Cai C G, Zhao G C, Chen L G, et al. Multi-objective constructal optimization of a shell-and tube condenser with ammonia-water working fluid (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2020, 41: 2253–2258 [蔡存光, 赵光超, 陈林根, 等. 基于氨水工质的管壳式冷凝器多目标构形优化. 工程热物理学报, 2020, 41: 2253–2258]
- 138 Tang W, Feng H J, Chen L G, et al. Optimal design of a marine condenser based on constructal theory (in Chinese). In: Proceedings of Chinese Society of Engineering Thermophysics on Engineering Thermophysics and Energy Utilization. Guilin, 2019 [唐威, 冯辉君, 陈林根, 等. 基于最小总泵功率目标的船用冷凝器构形设计. 见: 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用年会论文集. 桂林, 2019]
- 139 Uehara H, Kusuda H, Monde M, et al. Shell-and-plate-type heat exchangers for OTEC plants. *J Sol Energy Eng*, 1984, 106: 286–290
- 140 Nakaoka T, Uehara H. Performance test of a shell-and-plate type evaporator for OTEC. *Exp Thermal Fluid Sci*, 1988, 1: 283–291
- 141 Nakaoka T, Uehara H. Performance analysis of a shell and plate type evaporator for OTEC. *Trans Japan Soc Refrig Air Cond Eng*, 2011, 3: 85–96
- 142 Imran M, Usman M, Yang Y, et al. Flow boiling of R245fa in the brazed plate heat exchanger: Thermal and hydraulic performance assessment. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 110: 657–670
- 143 Nejad A H, Ekici K, Sabau A S, et al. Counter cross-flow evaporator geometries for supercritical organic Rankine cycles. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 135: 425–435
- 144 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. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 131: 750–756
- 145 Feng H J, Chen L G, Wu Z X, et al. Constructal optimization for an organic fluid shell-and-tube heat exchanger based on entransy theory (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1577–1587 [冯辉君, 陈林根, 吴志祥, 等. 基于熵理论的有机工质管壳式换热器构形优化. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1577–1587]
- 146 Cai C G, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal design of a shell-and-tube evaporator with ammonia-water working fluid. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 135: 541–547
- 147 Wu Z X, Feng H J, Chen L G, et al. Pumping power minimization of an evaporator in ocean thermal energy conversion system based on constructal theory. *Energy*, 2019, 181: 974–984
- 148 Nakaoka T, Uehara H. Performance test of a shell-and-plate-type condenser for OTEC. *Exp Thermal Fluid Sci*, 1988, 1: 275–281
- 149 Yan Y Y, Lio H C, Lin T F. Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a plate heat exchanger. *Int J Heat Mass Transfer*, 1999, 42: 993–1006
- 150 García-Cascales J R, Vera-García F, Corberán-Salvador J M, et al. Assessment of boiling and condensation heat transfer correlations in the modelling of plate heat exchangers. *Int J Refrigeration*, 2007, 30: 1029–1041
- 151 Eldeeb R, Aute V, Radermacher R. A survey of correlations for heat transfer and pressure drop for evaporation and condensation in plate heat exchangers. *Int J Refrigeration*, 2016, 65: 12–26
- 152 Shon B H, Jung C W, Kwon O J, et al. Characteristics on condensation heat transfer and pressure drop for a low GWP refrigerant in brazed plate heat exchanger. *Int J Heat Mass Transfer*, 2018, 122: 1272–1282
- 153 Vargas J V C, Bejan A. Thermodynamic optimization of finned crossflow heat exchangers for aircraft environmental control systems. *Int J Heat Fluid Flow*, 2001, 22: 657–665
- 154 Bejan A. Dendritic constructal heat exchanger with small-scale crossflows and larger-scales counterflows. *Int J Heat Mass Transfer*, 2002, 45: 4607–4620

- 155 Bejan A, Alalaimi M, Sabau A S, et al. Entrance-length dendritic plate heat exchangers. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 114: 1350–1356
- 156 Sotoodeh A F, Amidpour M, Ghazi M. Developing of constructal theory concept for plate-fin heat exchanger modelling, design and optimisation. *Int J Exergy*, 2015, 18: 22–45
- 157 Wu Z X, Feng H J, Chen L G, et al. Performance optimization of a condenser in ocean thermal energy conversion (OTEC) system based on constructal theory and a multi-objective genetic algorithm. *Entropy*, 2020, 22: 641
- 158 Chen L G, Zhang J M. Press state and developing tendency of optimum blading design of axial turbomachines (in Chinese). *Power Eng*, 1989, 9: 27–32 [陈林根, 张俊迈. 轴流式透平机械通流部分优化设计的现状和发展. *动力工程*, 1989, 9: 27–32]
- 159 Chen L G, Zhang J M. Multiple objective programming decision and design of naval steam turbine flow path (in Chinese). *J Eng Thermal Energy Power*, 1986, 1: 22–32 [陈林根, 张俊迈. 多目标规划决策与舰用蒸汽透平通流部分设计. *热能动力工程*, 1986, 1: 22–32]
- 160 Chen L G, Zhu Z M, Cao Y Y, et al. Optimization of multistage steam turbines (in Chinese). *Power system Eng*, 1996, 12: 9–13 [陈林根, 朱志民, 曹跃云, 等. 多级蒸汽轮机级组的最优化. *电站系统工程*, 1996, 12: 9–13]
- 161 Chen L G, Zhang J M, Wu C, et al. Analysis of multi-objective decision-making for marine steam turbine stage. *Int J Power Energy Systems*, 1998, 18: 96–101
- 162 Qin X Y, Chen L G, Sun F R, et al. Optimization for a steam turbine stage efficiency using a genetic algorithm. *Appl Thermal Eng*, 2003, 23: 2307–2316
- 163 Liu C Y, Yan C Q, Wang J J. Study on the optimal design of ship steam turbine (in Chinese). *Ship Eng*, 2011, 33: 57–60 [刘成洋, 阎昌琪, 王建军. 船舶汽轮机优化设计研究. *船舶工程*, 2011, 33: 57–60]
- 164 Kostors C H, Vincent S P. Ammonia turbine design for ocean thermal energy conversion (OTEC) plants. *J Sol Energy Eng*, 1981, 103: 92–97
- 165 Nithesh K G, Chatterjee D. Numerical prediction of the performance of radial inflow turbine designed for ocean thermal energy conversion system. *Appl Energy*, 2016, 167: 1–16
- 166 Nithesh K G, Samad A. Integrated CFD-surrogate optimization to enhance efficiency of turbine designed for OTEC. In: *Proceedings of the 5th European Seminar on Computing*. Pilsen, 2016. 148
- 167 Kim D Y, Kim Y T. Preliminary design and performance analysis of a radial inflow turbine for ocean thermal energy conversion. *Renew Energy*, 2017, 106: 255–263
- 168 Kim Y S, Lorente S, Bejan A. Distribution of size in steam turbine power plants. *Int J Energy Res*, 2009, 33: 989–998
- 169 Beyene A, Peffley J. Constructal theory, adaptive motion, and their theoretical application to low-speed turbine design. *J Energy Eng*, 2009, 135: 112–118
- 170 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. *Proc Romanian Academy Ser A-Math Phys Tech Sci Inform Sci*, 2018, 18: 201–206
- 171 Wu Z X, Feng H J, Chen L G, et al. Optimal design of dual-pressure turbine in OTEC system based on constructal theory. *Energy Convers Manage*, 2019, 201: 112179
- 172 Ganic E N, Wu J. On the selection of working fluids for OTEC power plants. *Energy Convers Manage*, 1980, 20: 9–22
- 173 Uehara H, Ikegami Y. Optimization of a closed-cycle OTEC system. *J Sol Energy Eng*, 1990, 112: 247–256
- 174 Bernardoni C, Binotti M, Giostri A. Techno-economic analysis of closed OTEC cycles for power generation. *Renew Energy*, 2019, 132: 1018–1033
- 175 Kang S H. Design and preliminary tests of ORC (organic Rankine cycle) with two-stage radial turbine. *Energy*, 2016, 96: 142–154
- 176 Du Y, Yang Y, Hu D, et al. Off-design performance comparative analysis between basic and parallel dual-pressure organic Rankine cycles using radial inflow turbines. *Appl Thermal Eng*, 2018, 138: 18–34
- 177 Li J, Ge Z, Liu Q, et al. Thermo-economic performance analyses and comparison of two turbine layouts for organic Rankine cycles with dual-pressure evaporation. *Energy Convers Manage*, 2018, 164: 603–614
- 178 Sun Q, Wang Y, Cheng Z, et al. Thermodynamic and economic optimization of a double-pressure organic Rankine cycle driven by low-temperature heat source. *Renew Energy*, 2020, 147: 2822–2832
- 179 Chen W J. Finite time thermodynamic analyses and optimizations of the organic Rankine cycles (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Naval University of Engineering, 2018 [陈伟健. 有机朗肯循环的有限时间热力学分析与优化. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2018]
- 180 Qin W X. Finite time thermodynamic analysis and optimization for Kalina cycle systems 11 and 34 (in Chinese). Dissertation for Master's

- Degree. Wuhan: Naval University of Engineering, 2018 [秦宛旭. Kalina循环系统(KCS)11和34有限时间热力学分析与优化. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2018]
- 181 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. *Energy Convers Manage*, 2021, 227: 113585
- 182 Cai C G. Optimal design of kalina cycle based on constructal theory (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Naval University of Engineering, 2019 [蔡存光. 基于构形理论Kalina循环优化设计. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2019]
- 183 Chen L G, Wu Z X, Ge Y L. Constructal thermodynamic optimization for Kalina-organic Rankine combined cycle (in Chinese). In: Proceedings of Chinese Society of Engineering Thermophysics on Engineering Thermophysics and Energy Utilization. Shanghai, 2020 [陈林根, 吴志祥, 戈延林. 卡琳娜-有机朗肯联合循环构形热力学优化. 见: 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用年会论文集. 上海, 2020]
- 184 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. *Energy Convers Manage*, 2020, 210: 112727

Progress in theoretical study on constructal optimization of marine steam power plants

CHEN LinGen^{1,2,3}, FENG HuiJun^{1,2,3}, WU ZhiXiang⁴, TANG Wei⁴, XIE ZhuoJun⁴ & GE YanLin^{1,2,3}

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

² Hubei Provincial Engineering Technology Research Center of Green Chemical Equipment, Wuhan 430205, China;

³ School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

⁴ College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Theoretical research of the constructal optimization of marine steam power plants is introduced in this study from two aspects: ship steam power plants and ocean thermal energy conversion plants. First, reviews are conducted on the main heat exchange component models of ship steam power plants, including the evaporator, superheater, economizer, whole boiler and condenser, main heat exchange, and energy conversion components, and system models of ocean thermal energy conversion plants, including the evaporator, condenser, dual-pressure turbine, and whole system. Then, constructal optimization of the main components of the two power plants and constructal thermodynamic optimization of the ocean thermal energy conversion plant based on modern thermal theories such as entropy generation minimization theory, finite time thermodynamics theory, entransy theory, and constructal theory are introduced. The similarities and differences in the results obtained before and after optimization, as well as the different optimization objectives and system structures, are extensively compared. Finally, the application prospects of constructal thermodynamic optimization to the optimal designs of energy transfer and conversion processes are made considering theoretical research on reduced energy consumption of power plants.

ship steam power plant, ocean thermal energy conversion plant, constructal theory, finite time thermodynamics, entransy theory, constructal thermodynamic optimization

doi: [10.1360/SST-2020-0393](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0393)