

多种能量转换系统的性能优化与参数设计的研究

林国星*, 陈金灿

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 节能、提高能效、开发新能源(包括可再生清洁能源)是今后能源发展的重点,而能量转换系统的性能优化与参数设计是高效利用能源的一个关键科学问题.结合国内外的研究现状和本研究组近年来的研究工作,介绍在磁制冷、半导体热电器件、太阳能热利用、化学机与化学泵、燃料电池及其耦合系统、电解水制氢系统、布朗马达及量子热力学循环等能量转换系统的性能优化与参数设计方面所取得的一些重要成果.

关键词: 能源; 能量转换系统; 循环性能; 优化理论; 参数设计

中图分类号: O 414

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2011)02-0227-12

当前,人类正面临着经济和社会可持续发展的严峻挑战.能源是经济和社会发展的基本动力,随着人们生活水平的不断提高和科学技术的飞速发展,对能源的需求与日俱增.然而,传统的矿物能源不断被开采,其生产和利用又常造成环境污染.因此,在有限资源和环保要求的制约下,如何高效利用现有能源和开发新能源,如何节约能源及低碳甚至无碳排放,是实现可持续发展战略的关键.应该指出,对能源开发和转换系统进行整体性能优化分析和主要性能参数优化设计是很有必要的,这对高效利用能源及节能大有裨益.而以研究能量转换基本规律为主要内容、以提高能量利用效率和经济性为主要目标的现代热力学循环理论研究是能量转换系统及设备节能优化的关键科学问题之一.

多年来,现代热力学循环优化理论有了长足的进展,研究内容已深入到许多新技术领域,涉及磁制冷、半导体热电器件、热离子器件、太阳能热力系统、化学反应、流体系统、热声装置、地球风能系统、热能存储装置、光驱动热机、量子热机和制冷机、生命过程、计算机逻辑运算、模拟退火、能量转换器以及经济应用等.

本文主要介绍本研究组在“磁制冷、半导体热电器件、太阳能热力循环、化学机与化学泵、燃料电池及

其耦合、电解水制氢、布朗马达、量子热力学循环”等系统中的性能优化和参数优化设计的研究进展.

1 磁制冷循环系统

众所周知,提高传统气体压缩制冷机效率的空间已越来越小,而另一严重问题是其制冷剂对环境的破坏.相比之下,磁制冷工质为固体、无毒、不破坏臭氧层、无温室效应,磁制冷是一种重要的新型绿色环保制冷技术,倍受学术、工程界乃至许多国家政府的青睐.另一方面,不像气体压缩制冷机,需要能耗较大的压缩机,磁制冷是基于“磁热效应”的一种制冷方式,通过励磁、退磁实现制冷,这种制冷方式原则上只需外磁场提供能量,节能效果十分显著.再则,由于磁工质的熵密度比空气大等因素,致使磁制冷机更为紧凑、运动部件少、机械振动及噪音很小、可靠性强.此外,磁制冷机的效率高,可达理想卡诺循环的 60%.因此,开展磁制冷理论和技术的研究,应用前景十分广阔,在大规模空调、超市制冷系统、化学处理、气体液化、溶液蒸馏、糖的提炼和谷物干燥等领域都将有广泛应用.

室温磁制冷机前景诱人,然而目前所研制的室温磁制冷试验机必须在强磁场下工作才能获得较大的制冷功率,成本高、温跨小等因素都是商业化的主要障碍.在加快商业化的进程中,室温磁制冷理论与实验仍有不少亟待解决的问题.进一步的研究主要集中在两大方面:一是继续探索新的室温磁制冷材料,特别大力开发居里温度合适并具有巨磁热效应的磁制冷材料是当今磁制冷理论与应用开发的一大主流.二是磁制冷机的优化设计和性能改善.在这方面,开发高效节能又

收稿日期: 2010-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51076134, 50776074, 59976033, 10575084); 教育部博士学科点专项科研基金项目(20090121110026); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(G20000263)子课题; 福建省科技重点项目(2004-33)等

* 通信作者: gxl@xmu.edu.cn

能大范围商业应用的室温磁制冷机是重中之重。目前,对前者的研究相对集中,成果较多;而对后者的研究或研制较薄弱。几个突出问题是:在室温区,磁制冷材料的晶格熵较大,而磁工质与其环境(如换热流体等)间的换热效率是磁制冷应用的一个关键问题。另一方面,磁制冷材料在脉冲磁场中的磁涡流损失和运动部件的摩擦导热、管路与外界的热交换和磁工质与填料床壁面间的漏热、在回热循环中的不平衡回热及回热效率等都是影响磁制冷功率的重要因素。然而,在室温磁制冷材料的探索中,这些基本问题很少从理论和技术层面进行深入系统地研究。事实上,这些问题是室温磁制冷循环优化理论不可忽视的重要科学理论问题。研究这些不可逆因素对磁制冷机循环性能的影响很有必要,这将有助于磁制冷机的优化设计和循环性能的改善,并能为提高制冷功率、温跨以及性能系数等指明改进途径。

磁制冷材料实验数据与热力学理论分析相结合是一项重要的有益工作。Zhuang 等^[1]从 3 种重要室温磁制冷材料 Gd、Gd₅Si₂Ge₂ 及 MnFeP_{0.45}As_{0.55} 的磁热性质及等磁场热容随温度变化的实验特性出发,模拟计算获得相应的熵-温特性曲线,并以这 3 种磁性材料为工质及相应的熵-温特性曲线,建立室温回热磁 Ericsson 制冷循环,如图 1 所示。进一步运用数值计算技术,分析了不平衡回热对循环主要性能参数的影响,获得不同温跨下循环的不平衡回热量、净制冷量、性能系数等。研究表明,当温跨相同时,循环为回热剩余时的净制冷量及性能系数都大于循环为回热不足的情况。因此,在设计室温磁 Ericsson 制冷循环时,选择低

温温度靠近 T_0 (磁熵变最大时所对应的温度) 的右侧温区,将使循环的净制冷量和性能系数处于优化区域。这些研究结果有助于室温磁制冷循环相关参数的优化设计。

另一方面,研究多种不可逆因素对磁制冷循环性能的影响也是很有必要的,其研究结果将更接近于实际磁制冷机系统。在这方面,Xia 等^[2]建立了考虑传热不可逆性和绝热过程不可逆的磁 Brayton 制冷循环,探索两个等磁场过程的磁场比和多种不可逆因素对制冷循环性能的影响,获得了磁 Brayton 制冷循环的制冷负载和性能系数的关系(见图 2),磁循环工质的相关温度被优化,获得磁 Brayton 制冷循环的其他优化性能特性(如优化制冷负载与磁场比的关系等),进一步讨论了制冷负载、性能系数和工质相关状态点的温度的优化工作界限和范围。研究表明,在绝热不可逆性不可忽略时,两个等磁场过程的磁场比存在一优化值,使得制冷负载或性能系数达极大值。

为了提高磁制冷温跨和减少功输入,Zhang 等^[3]建立了等场中冷不可逆磁 Brayton 制冷循环新模型,研究有限速率热传导、绝热过程不可逆因子 η 等磁场过程的场强比 β_H 、两热源间的漏热等对等场中冷磁 Brayton 制冷循环性能的影响,通过数值计算获得制冷负载和性能系数的最大值,并获得在最大制冷负载或最大性能系数下的其它性能参数的优化选择和匹配。研究表明:循环中加入一个等磁场中冷过程,能明显提高循环的最大制冷率和性能系数,特别当磁场比大于一定值时,有无加入中冷过程,性能系数差距明显,如图 3 所示。

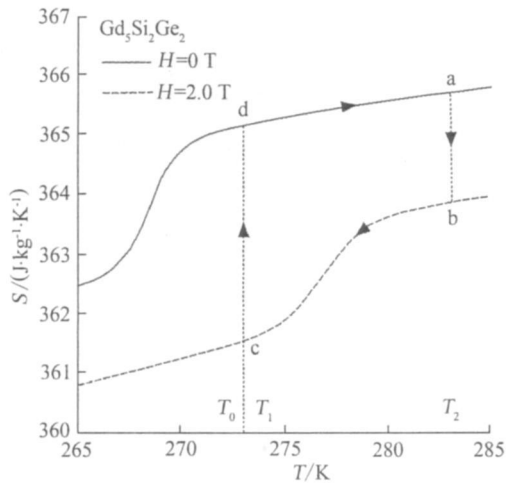
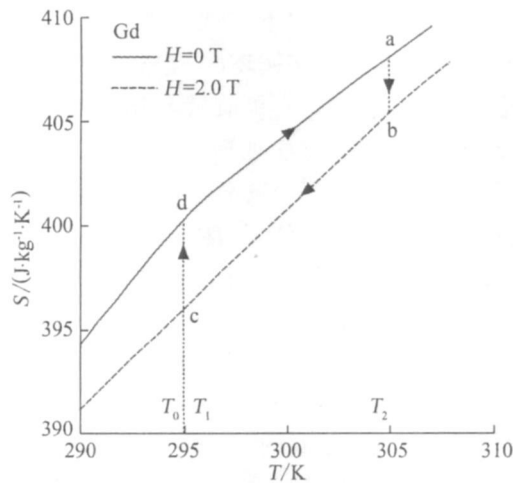


图 1 以 Gd、Gd₅Si₂Ge₂ 为工质的室温磁 Ericsson 制冷循环

Fig. 1 Room-temperature magnetic Ericsson refrigeration cycles using Gd, Gd₅Si₂Ge₂ as the working substance

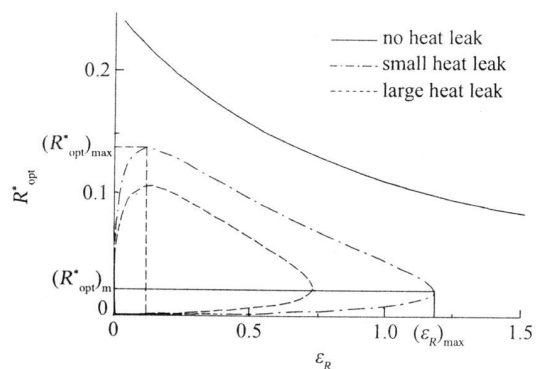


图 2 热漏对磁 Brayton 制冷机制冷率与性能系数关系的影响

Fig. 2 The effect of heat leak on the cooling rate versus coefficient of performance curves for the magnetic Brayton refrigerator

此外, Lin 等^[4-5]从铁磁材料磁化强度的一般表示式出发, 分析铁磁、一般顺磁及满足居里定律顺磁材料的主要热力学性质, 在考虑工质与热源之间的热阻、回热器的回热损失以及热源之间的热漏等多种不可逆因素后, 研究了磁 Stirling、磁 Ericsson 等制冷循环的性能特性, 对循环的制冷率、制冷系数和输入功率等性能参量进行了优化分析, 确定了制冷率、制冷系数和输入功率的优化取值范围. Ye 等^[6-7]进一步探讨了有限热容量热源对铁磁 Stirling 制冷循环和磁 Ericsson 制冷循环性能的影响, 导出循环的制冷率、输入功率、工质温度与制冷系数之间的基本优化关系. 所得结论为磁制冷材料在不同温区和不同制冷循环的优化选择, 为磁制冷机的性能改善和优化设计提供技术储备和理论指导.

随着室温磁制冷机的研究进展, 磁热泵已显示其实用价值. 最近, 有学者研究利用反铁磁材料的相变实现磁泵热, 尽管其泵热功率小, 然而这表明进一步深入开展磁热泵的研究显得更加必要和有意义. 众所周知, 磁制冷循环亦可作为磁泵热循环. 因此, 以上有关室温磁制冷机面临的科学和技术层面的问题同样也是磁热泵所必须解决的迫切问题. 除此之外, 磁热泵还有一些新的问题必须加以解决. 例如, 磁制冷机的优化循环运行参量是否也适合磁热泵? 换句话说, 使制冷功率最优的制冷机工况也是磁热泵的最优工况吗? 这两者显然是不同的. 为此, Wei 等^[8-9]探索了磁 Stirling、磁 Ericsson 热泵循环优化性能特性, 获得了磁工质与热源间传热不可逆性、热源间漏热、回热效率及磁涡流等引起的工质内不可逆性等对磁热泵泵热功率、性能系数等的定量影响特性.

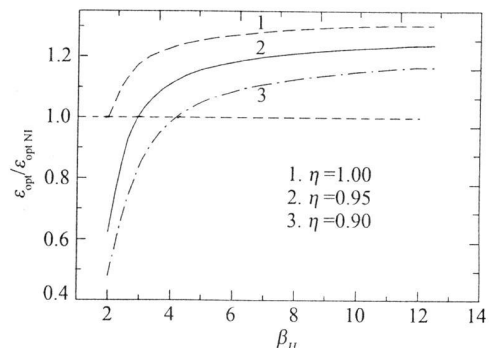


图 3 有/无中冷性能系数比随磁场强度比的变化

Fig. 3 The curves of the ratio of coefficient of performances with and without intercooling varying with the ratio of the magnetic fields

最近, Zhang 等^[10]提出以铁磁材料为工质的不可逆 Stirling 制冷机的热经济函数, 研究有限速率热传导、回热效率、工质内部不可逆性、漏热以及热经济参量等对优化热经济函数及其相应的制冷率、性能系数、功率输入等的影响, 获得在热经济目标函数下制冷机的性能参数界限和优化工作区间. 研究结果对于降低投资、能耗和设备维护等成本, 提高磁制冷设备的循环性能有一定的参考价值.

2 半导体热电器件

半导体热电器件具有体积小、质量轻、集成度高, 工质是在半导体柱中传导的电子, 无泄漏, 无噪声, 容易控温, 实用中免维护等优点, 是应用前景很大的小型化无污染设备. Chen 等应用有限时间热力学和非平衡态热力学理论, 系统分析和定量评估了半导体热电转换系统中传热不可逆性、热漏和焦耳热等多种不可逆因素及珀尔帖、傅里叶、焦尔和汤姆逊等多种效应对半导体热电转换系统性能的影响^[11-13], 优化设计了半导体热电转化系统的主要工作参数, 建立了包括半导体温差发电机、半导体热电制冷器和热泵等热电转换系统的新优化理论. Chen 等^[13-14]还进一步构建、设计了太阳能驱动的半导体温差发电机新系统, 建立了该系统的新优化理论. 这种新系统能显著节约能源和燃料运输的费用, 可望成为未来空间动力的一种理想装置. 半导体热电器件的研究成果对半导体新材料的选择、器件结构优化、负载的最佳匹配、微型制冷器的开发利用、提高能源利用率、减少对环境的污染等都具有理论指导意义. 这方面的研究内容主要包括: 1) 基于实际

半导体热电转换系统模型及其数学描述, 导出在热阻、热漏和焦耳热等不可逆因素影响下的半导体温差发电器的输出功率和效率, 对系统参数进行理论设计, 优化半导体热电器件的几何构形和内部结构, 确定发电器的最佳工作电流和合理工作区域. 研究结果表明, 当温差发电机工作时, 器件传热界面不可避免地受到传热不可逆性的影响, 传统的负载匹配条件已不成立, 研究结果给出了新的匹配条件. 这种研究方法同时被用来优化半导体热电制冷器和热泵^[15-16]的性能, 也取得了一系列重要的新结果. 2) 利用非平衡态热力学理论建立受珀尔帖、傅里叶、焦耳和汤姆逊等多种效应综合影响的半导体热电转化系统的一般微分方程, 研究焦耳热、热漏和汤姆逊热等对系统性能的影响, 优化设计半导体热电转化系统的主要工作参数, 确定系统的合理工作区域和最佳匹配条件. 3) 综合分析半导体热电器件内部的焦耳热、傅里叶热流和器件外部的不可逆传热以及太阳能集热器中的热损失对系统性能的影响, 探讨器件的最佳构型, 确定系统的最佳运行条件和主要性能界限, 包括半导体发电器的最大功率输出、最大效率、工作电流、太阳能集热器的最佳工作温度, 等等. 同时计算了负载设置与半导体材料和器件性能参数的依赖关系, 从而获得最佳的匹配条件. 研究结果可为半导体新材料的选择, 器件结构的优化设置, 系统性能参数的精确计算, 太阳能驱动温差发电器系统中集热器与温差发电器相关参数的最佳配置等提供新的理论依据.

3 太阳能热力循环系统

目前, 常规使用的矿物燃料贮量有限, 而矿物燃料的燃烧又是产生温室气体和碳排放的主要祸首. 因此, 开发利用可再生能源, 寻找替代能源势在必行. 太阳能是最重要的可再生清洁能源之一, 而转换、利用太阳能的热力循环设备以低品位的热代替高品位的功作为驱动源, 是一类节能环保设备.

太阳能的利用从能量转换方式来分, 有 3 种方式: 即光热转换、光电转换和光化学转换. 其中光热转换技术是将太阳辐射能转换成热能加以利用的技术. 吸热体吸收太阳能辐射后温度升高, 再将所得热能通过传热工质传递到热设备并加以利用. 太阳能热力系统由光热转换装置和热能利用设备两部分组成, 前者为各种形式的太阳能集热器, 后者是根据不同使用要求而设计的各种热转换设备. 光热利用按其使用温度的高低划分为低温(200℃以下)、中温(200~500℃)和高

温(500℃以上)三大类. 目前以 200℃以下的低温利用发展最快, 应用面最广, 取得了显著节能和环保效益, 并已不断开发而形成了一定规模产业. 如供应热水及采暖用的各式太阳能热水器、游泳池或鱼池越冬等用的太阳能加温、太阳能温室、太阳能干燥海水及苦咸水淡化、污水净化用的太阳能蒸馏、箱式太阳灶、太阳能开水器、太阳能消毒器、太阳能热泵等. 中温热利用技术, 如聚光太阳灶、中温太阳能热力发电、太阳能制冷等. 高温热利用技术, 如高温太阳灶、高温太阳能发电、冶炼等. 中高温应用由于集热技术较复杂, 材料和加工要求高及经济效益较小等, 目前大多处于研究和试点阶段.

太阳能驱动热机系统是太阳能热利用的一个重要方面, 它可将太阳能转化为动力输出. 太阳能热机系统主要由太阳能集热器和热机两部分组成, 前者主要将太阳辐射转变为热能而作为热机的驱动热源, 后者从前者获得热量并将其中一部分热转变为功. 由于太阳能热机的寿命长, 性能可靠, 无需经常性维护, 已具备实用化条件, 是新能源的一项重要技术.

太阳能驱动热机系统主要包括太阳能 Carnot, Stirling, Ericsson, Braysson, Brayton 和 Rankin 等热机系统. 而确定太阳能集热器的最佳工作温度是太阳能热设备优化设计的一个重要内容, 关系到能否有效利用太阳能的关键. 在这方面, Chen 等^[17]研究了不可逆太阳能 Carnot 热机, 应用集热器的线性热损模型, 获得了太阳能热机系统的总效率, 进而导出集热器的最佳工作温度. 林比宏等^[18]研究了有限速率热传导和工质内不可逆性对太阳能空间动力循环系统的定量影响. 近年来, 一些学者^[19-23]将辐射或辐射对流传热应用到太阳能 Carnot 或类 Carnot 热机循环中, 他们以功率、功率密度、效率、热经济等不同目标函数对其进行优化分析, 揭示了不同传热律和不同目标函数对热机循环性能的影响, 但没有考虑太阳能集热器效应. 随着研究的深入, Zheng 等^[24]首先提出了太阳能 Braysson 热机系统, 获得系统最大效率及太阳能集热器的最佳工作温度和其它优化设计参数. 进一步地, Wu 等^[25-28]考虑了集热器辐射对流热损对高温太阳能热机系统的影响, 并将循环工质热容量随温度的变化特性(体现在参数 k_1) 引入到不可逆太阳能 Braysson 热机系统优化循环性能的研究中, 研究结果可包括太阳能 Carnot 热机($k_1 = \infty$)和工质热容量为常数($k_1 = 0$)的太阳能 Braysson 热机. 表 1 为 k_1 和工质内不可逆参量 I 对一类太阳能热机系统最大总效率 $\eta_{\max}$ 及集热器最佳工作温度 $T_{h, \text{opt}}$ 、循环工质相关工作点优化设计温度和最佳

表 1 不同热容参数 k_1 和工质内不可逆参数 I 时太阳能 Braysson 热机系统相关优化参数值

Tab. 1 The optimal parameter values of the solar-driven Braysson heat engine system with different k_1 and I

k_1	I	$\eta_{\max}$	$T_{h, \text{opt}} / \text{K}$	$T_{1, \text{opt}} / \text{K}$	$T_{2, \text{opt}} / \text{K}$	$T_{3, \text{opt}} / \text{K}$	$(A_1 / A_2)_{\text{opt}}$
0	1. 00	0. 2952	986. 40	750. 96	895. 81	368. 60	0. 4790
	1. 05	0. 2808	998. 40	767. 01	908. 33	368. 21	0. 4731
	1. 10	0. 2669	1010. 00	782. 78	920. 56	367. 69	0. 4675
0. 003844	1. 00	0. 2961	985. 40	759. 55	890. 43	368. 90	0. 4809
	1. 05	0. 2816	997. 40	775. 46	902. 94	368. 53	0. 4750
	1. 10	0. 2678	1008. 80	790. 80	914. 96	368. 10	0. 4694
0. 005844	1. 00	0. 2965	984. 80	762. 93	887. 58	369. 07	0. 4817
	1. 05	0. 2820	996. 80	778. 79	900. 12	368. 72	0. 4758
	1. 10	0. 2681	1008. 40	794. 35	912. 38	368. 23	0. 4702
0. 009844	1. 00	0. 2971	983. 80	768. 81	882. 61	369. 38	0. 4830
	1. 05	0. 2826	996. 00	784. 78	895. 37	368. 96	0. 4770
	1. 10	0. 2687	1006. 20	798. 13	905. 98	368. 93	0. 4714
∞	1. 00	0. 3001	979. 00	828. 46	828. 46	370. 66	0. 4882
	1. 05	0. 2854	991. 40	842. 72	842. 72	370. 28	0. 4822
	1. 10	0. 2714	1003. 40	856. 73	856. 73	369. 75	0. 4766

传热面积比 $(A_1 / A_2)_{\text{opt}}$ 等数值的影响. 另一方面, Zhang 等^[29-31] 研究了多种不可逆性对太阳能 Brayton 热机优化性能的影响, 确定了集热器的最佳工作温度, 并优化了相关性能参数. Zhang 等还提出了太阳能热机的广义循环系统模型, 研究结论具有普遍意义. 此外, Liu 等^[32] 进一步研究了不可逆高温 Stirling 太阳能热机的性能特性, 揭示了集热器辐射对流热损等对太阳能 Stirling 热机性能特性的影响.

太阳能虽是一种取之不尽的清洁能源, 但低密度和不连续性是其弱点. 然而, 利用太阳热进行制冷时, 这一缺陷却能得到较好弥补. 因为太阳辐射最强时, 也是人们或者空间最需要用太阳热来制冷的时候. 目前, 应用蒸气、燃料、余热作为驱动热源的吸收式、吸附式和喷射式制冷机已有广泛应用, 但太阳能驱动的制冷机还需要普及. 原因之一为太阳能制冷设备相对较为复杂, 成本较高而效率又较低. 这有系统的设计和设备的制造问题, 也有循环性能的优化问题. 因此, 开展太阳能制冷系统参数设计和设备制造以及系统循环性能的优化研究很值得深入开展. 在优化循环性能方面, Lin 等^[33] 基于现代热力学理论, 应用集热器线性热损模型及吸收式制冷机最佳性能系数和供热率间的关系, 研究了不可逆太阳能吸收式制冷机系统的总性能

系数与集热器工作温度间的优化关系, 确定了太阳能集热器最佳工作温度表式. Wu 等^[34] 进一步考虑了太阳能集热器存在辐射热损、有限温差传热及工质内不可逆性等对高温太阳能三热源制冷机性能特性的影响.

采用热泵与太阳集热器、蓄热设备连接的系统方式, 不仅能有效克服太阳能本身所具有的稀薄性和间歇性, 且可达到节约高品位能和减少环境污染的目的, 具有很大开发和应用潜力. 太阳能热泵技术利用低品位的太阳能作为驱动能源, 从低温热源(通常为大气环境)吸取热能, 并将其传输到高温热源. 这不仅实现泵热目的, 且将能质系数低的能源转化为能质系数高的能源, 从而提高能源的利用值或做功本领. 林国星等^[35] 考虑热阻及由于摩擦、涡流、传质等引起的工质内部不可逆性等因素对太阳能三热源热泵循环优化性能的影响; Zhang 等^[36] 考虑集热器辐射或辐射对流热损等多种不可逆因素, 建立不可逆三热源太阳能热泵系统新模型, 导出系统总性能系数与集热器工作温度关系的解析表式, 揭示集热器的辐射对流热损、有限速率热传导和工质内部不可逆性等对系统性能特性的影响, 分析和讨论了在最大总性能系数下太阳能热泵系统的优化设计参量, 所得结论为实际太阳能热泵优化设计及

性能改善提供参数设计参考。

4 化学机与化学泵

关于有限时间热力学的研究大多集中在传热过程及各种循环理论,而对传质过程及其循环理论相对研究较少。化学反应、化学循环系统和生化系统等是有限时间热力学在传质过程及相关循环的新应用领域,在这些应用领域中,许多研究仍局限于内可逆循环。例如,De Vos 建立了化学反应与内可逆热力学间的联系,定义了内可逆化学机模型^[37],并与内可逆热机相比较。随后,Gordon 等^[38]研究了内可逆等温化学机,导出了化学机的最大输出功率,并有所涉及有限源的情况;Chen 等^[39]进一步研究了质量漏对等温化学机性能的影响。

实际传质过程或设备是多种多样的,仅考虑传质不可逆性的内可逆理论显然与实际情况尚有距离。因此,更全面地探索其它传质循环,揭示多种不可逆性对化学循环设备的影响显得十分必要。Lin 等^[40-43]首次建立了二源化学泵,不可逆三源化学泵及不可逆化学机循环新模型,揭示了质量流阻、工质内不可逆性、质量漏等对不可逆化学泵和不可逆化学机循环性能特性的影响。所建立的两类不同三源化学泵循环新模型,其一称为不可逆三源化学泵,其二称为不可逆化学势变换器,根据熵流和能流方程定义新的内不可逆因子,基于新循环模型获得工质在三个传质过程的优化化学势表式,进而求得不可逆三源化学泵的最佳性能系数与泵能率间的优化关系,并讨论了最大泵能率及其相应的性能系数以及分析了它们存在的条件。同时指出了三源化学泵与三热源热泵的不同之处。此外, Lin 等^[44-45]基于图 4 所示的三源化学泵进一步讨论了最佳传质时间、最小熵产率等,并阐明了三源化学泵与二源化学泵或化学机之间的联系,也证明了以上所述的两类三源化学泵都有其等效的化学机驱动二源化学泵的联合循环系统。

以上所建立的化学机和化学泵循环模型及其相关结论能应用到诸如“质量交换器、电化学、光化学和固态设备以及太阳能转换系统中的燃料泵”等系统中。

5 燃料电池及其耦合系统

氢能是一种绿色新能源,它有广泛的应用。燃料电池是氢能利用的一个重要设备,是一种将持续供给的氢燃料和氧化剂中的化学能不断转化为电能的发电装

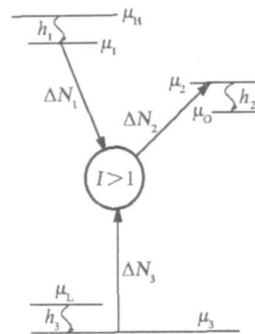


图 4 不可逆三源化学泵循环示意图

Fig. 4 The schematic diagram of an irreversible three-source chemical pump

置。之所以倍受青睐,是因为它具有其它能量转换装置不可比拟的优越性。主要体现在高效率、安全性、可靠性、清洁性、良好的操作性能、灵活性及未来发展潜力等方面。它能产生满足生态环境要求的清洁、高效的电力,是一种倍受时代推崇的无碳能量转换装置^[46-47]。然而,对燃料电池的电化学、非平衡态热力学机理有待深入地探讨,以便进一步提高该设备的运行性能和制造成本。可见,开展对燃料电池系统性能特性的研究对新能源开发和应用具有重要的意义。

根据电解质材料的不同,燃料电池可分为五大类:

1) 碱性燃料电池; 2) 质子交换膜燃料电池; 3) 磷酸型燃料电池; 4) 熔融碳酸盐燃料电池; 5) 固体氧化物燃料电池。固体氧化物燃料电池可与煤的汽化构成联合循环,特别适合于建造大、中型电站。熔融碳酸盐燃料电池可采用净化煤气或天然气作燃料,适用于建造区域性分散电站。质子交换膜燃料电池可在室温下快速启动,并可按照负载的要求快速改变输出功率,是电动车、不依赖空气推动的潜艇动力源和各种可移动电源的最佳候选者。以甲醇为燃料的直接甲醇型燃料电池是为移动电话、笔记本电脑等供电的优选小型便携式电源。目前,几十千瓦以上的大型燃料电池在电动汽车、固定电站等领域进行了成功的示范。事实上,为了适应各种新型电子产品对高能量密度电池的要求,从 20 世纪 90 年代中期开始,欧美等发达国家的许多公司和科研机构已纷纷斥巨资从事燃料电池技术的研究与开发,不断努力发展小功率燃料电池,期望将其应用于便携式电源、手提电脑电源、数码相机和移动电话电源等小型电子设备电源。

近年来,我国对燃料电池系统的研发也极为重视,目前已有多家科研机构和高校对其进行研究。到 20 世纪 90 年代中期,在国家科技部与中科院将燃料电池技术列入“九五”科技攻关计划的推动下,中国进入了燃

料电池研究的第 2 个高潮. 我国科学工作者在燃料电池基础研究和单项技术方面取得了很大进展, 积累了一定经验, 取得了一些研究成果. 本研究组也对燃料电池及其联合系统的优化性能作了一些理论探索, 取得如下成果:

1) 通过对燃料电池进行理论建模, 应用电化学和非平衡态热力学理论, 分析并数学描述由系统的电化学反应、内阻、热传导和负载电阻引起的不可逆性, 进而得到燃料电池的一般性能特性以及主要性能参量的优化判据, 其中包括质子交换膜燃料电池负载电阻的最优匹配值, 由此确定了燃料电池的最优工作区间. 所得结果可为实际固体氧化物燃料电池和质子交换膜燃料电池的运行和优化设计提供一些理论参考^[48-50].

2) 建立燃料电池与热机耦合的复合系统, 应用能、熵分析法对多种不可逆损失进行数学描述, 结合电化学和非平衡态热力学理论, 讨论各种主要不可逆损失对如图 5 所示的一类燃料电池热机耦合系统优化性能的影响, 探索子系统间的最佳耦合方式, 确定系统中重要性能参数的优化区域. 所设计的复合系统能充分利用余热, 对节能优化及实际燃料电池耦合系统的设计和运行都有理论指导意义^[51-53].

这些研究对于开发新能源、发展新技术、高效利用能源、改善生态环境、开拓交叉学科等具有重要意义.

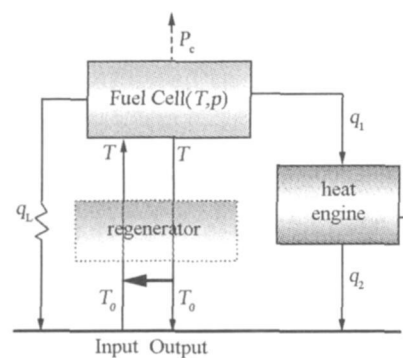


图 5 燃料电池-热机耦合系统示意图

Fig. 5 The schematic diagram of a fuel cell-heat engine hybrid system

6 电解水制氢系统

氢能不仅是燃料电池的主要能源, 而且在航天等动力系统中也有重要应用. 到 21 世纪中叶, 氢能有可能成为被广泛使用的燃料之一. 因此, 如何更高效获得更多的氢能是新能源和清洁能源研究的一大方向.

制取氢气的方法主要有: 化石燃料制氢、电解水制氢、热化学制氢及光催化制氢等等. 而由于水资源较丰富, 只要合理使用电能, 电解水制氢是倍受青睐的制氢途径. 若利用太阳能、核能、风能及地热能等清洁能源作为电解水制氢的动力源, 电解水制氢则是大规模制氢的有效途径.

制氢过程实际上是将不易控制的、分散的低品位能量转化成易控制的、可存储的高品位能源. 深入了解电解水分离氢和氧反应机理及伴随的电化学、热力学过程, 对于提高电解水制氢系统的性能具有重要理论指导意义. 然而, 在讨论电解水制氢系统的性能时, 如何定义系统的产氢效率存在着一些理论分歧^[54-55]. 如 Ni 等^[54] 在讨论高温电解水制氢系统性能时忽视了热能与电能有着本质区别; Martinez-Frias 等^[55] 在讨论天然气水蒸气重整制氢系统性能时虽然注意到热能与电能的区别, 但同时又包含了一个与系统性能无关的随机量. 为了解决这些问题, Zhang 等^[56] 分析、比较了现有文献在讨论电解水制氢系统性能中的不同观点, 合理地给出了系统产氢效率的新定义, 由此深入讨论了电解水制氢系统的优化性能, 更好地揭示了系统的一般性能特性. 此外, 水分解反应是一个需要外界供能的过程, 该过程的热力学和电化学分析表明, 水分解反应过程中存在不可逆性, 必定产生大量的焦耳热, 如何有效地利用这些焦耳热, 是电解水制氢系统性能研究中的另一个重要问题. 因此, Zhang 等^[56] 根据在不同条件下产生焦耳热的情况, 提出了不同的电解水制氢系统的新构型. 新的构型充分利用了电化学反应中所产生的焦耳热, 同时还回收利用氢、氧产品所携带的热量, 因而新的构型对于提高电解水制氢系统的性能, 具有可行、简单及经济的显著特点. 进一步深入探讨电解水制氢系统的各操作参数(如温度、压强、水流率、回热效率等)对系统性能的影响, 也已经取得一些重要新结论, 这些研究结果对于实际电解水制氢系统的优化设计和提高产氢效率和降低成本具有实际指导意义.

7 布朗马达

近年来, 理论和实验都已揭示, 当体系远离热平衡态且其时空对称性发生破缺时, 空间周期系统会出现分子马达的定向输运现象. 这种系统被称为棘齿(ratchet)系统, 或称布朗马达(Brownian motor). 在众多的布朗马达模型中, 闪烁棘齿模型是一种被研究最为广泛的物理模型, 它可以用来解释分子马达或蛋白质马达的运动. 建立闪烁棘齿模型的动机来源于马

和微管间复杂的相互作用以及自由扩散态是一种理想的状态. 因此, 必须建立一种新的由两个不对称势垒构成的两态闪烁棘齿模型, 且有必要研究势垒结构对定向流性能的影响. 通常研究的两态闪烁棘齿模型, 主要关注一个势垒和一个自由扩散态的情形. 而 Lattanzi 等^[57-58] 工作拓展, 分析了由两个不对称势构成的两态闪烁棘齿模型, 其所建立的模型可更进一步分析两个不对称势垒结构对定向流的影响. 本研究组^[59] 基于 Lattanzi 等两态闪烁棘齿模型, 建立了一个更为普遍、且可以产生布朗马达定向运动的两态闪烁棘齿模型, 采用幂级数展开的方法, 求解了两个耦合的 Fokker-Planck 方程, 获得布朗粒子几率流的解析表达式, 并分析了几率流随外参数变化的一些有趣的对称和反对称的行为. 研究表明, 在某些情况下, 不仅不对称参数可以导致流反转, 而且势垒高度同样会产生几率流的反向. 这些结论明显不同于由一个标准棘齿势和一个自由扩散态所组成的两态闪烁棘齿模型所得到的结论.

布朗马达包括各种不同类型的棘轮, 主要关注粒子的定向运动, 且由于其所在系统的尺度非常小, 以至热噪声的影响不能忽略. 由于种种很有趣的现象, 不仅热力学和统计力学的研究者, 而且试图解释真实马达蛋白运动原理的研究者, 以及试图发明纳米机器的研究者都已采用了不同的布朗马达模型来开展研究.

评价一个系统做功的有效性时, 效率是一个重要的参量. 这个量的严格热力学定义隐含着马达要克服外力负载做有用功. 传统的效率定义是所作的有用功和总耗能之比值. 为了确定传统效率取最大值的必要条件, 这一效率定义已被广泛应用在各种闪烁和摇摆力模型中. 对于这种效率的定义, 负载外力是不能避免的, 特别当没有外力作用在系统上时, 这种效率的结果将出现零值. 由于这一问题, Derenyi 等^[60] 提出了一个新的不用借助于外负载的效率定义, 即最小的能量需求和总输入的能量之比值. 这是普适的效率定义, 是一项开创性的工作. 随后, 纳米机器的普适效率已引起众多研究者的兴趣, 同时对于各种布朗马达模型做出了系统的分析和比较. 例如, Zhang 等^[61-62] 基于 Derenyi 等所提出的普适效率, 扩展了 Asfaw, Sakaguchi, Verhas 等工作, 建立了一个更为普遍的布朗马达模型. 该模型用来计算存在主要不可逆因素的实际系统中的 Onsager 系数和布朗马达的普适效率. 基于该模型, Zhang 等详细讨论了系统中的热漏、不对称外势、势垒高度、两个热源的温比、粘滞阻力、由于粒子运动而引起的动能改变以及外力等对布朗马达普适效率的影响,

获得了一些有意义的新结论, 这些结论可直接讨论文献中的许多不同类型布朗马达的性能, 具有较大的普适性.

基于热驱布朗马达, Lin 和 Zhang 等^[63-64] 进一步地研究了布朗微热机和微制冷机的性能特性及其优化性能, 获得了一些有意义的结论; 还研究了闪烁布朗马达, 分析了振荡的时间结构对粒子定向输运的影响. 研究结果表明, 方形波的振荡结构并不总是最利于粒子的定向输运.

此外, 基于空间温度梯度和棘轮势构成的布朗热机模型, Gao 等^[65] 建立了一个更为普遍的布朗马达模型, 获得了受主要不可逆因素影响的布朗马达昂色格系数和最大输出功率下的效率. 所得结论可用来讨论系统的热漏、由于粒子运动而产生的动能改变等对昂色格系数以及其它一些系统重要参数的影响. 再则, Gao 等^[66] 建立了双阱棘齿势中布朗马达模型, 研究反馈控制下势垒结构对布朗粒子流的影响和时间延迟对反馈控制策略影响的有效性. 结果表明, 双阱棘齿势中布朗粒子流的反向可以通过改变系统的粒子数来实现, 通过改变势垒的结构可以增加粒子的定向流动.

8 量子热力学循环

量子热力学循环是物理学、工程热物理学和能源利用等多学科交叉领域前沿的一个研究热点, 是现代热力学理论与应用的一个重要新分支. 量子热力学循环的概念性模型最早由美国贝尔电话实验室的 Scovil 和 Dubois 提出. 他们首先提出了三能级微波激射器 (Maser) 可视为热机的概念^[67], 建立了三能级 Maser 热机模型, 论证了它的极限效率等于卡诺效率, 而它的逆循环为制冷循环. 随后, Geusic 等^[68] 建立了更为普遍的三能级量子热力学循环模型, 导出了量子热机效率和热泵的性能系数. 此外, 在量子热机中的一些相关概念可应用于光学微波激射器参数的计算. 近年来, 量子热力学及其循环的研究取得了长足的进展. 例如, 量子布朗热机性能的研究; 利用量子后燃烧室提高理想热机效率、通过增加量子卡诺循环改善奥托发动机效率、利用量子热力学循环提高激光系统的效率以及量子四冲程热机性能的研究; 等温激励的单模或多模辐射场驱动的光子卡诺热机性能的研究; 激光制冷及其应用机理的研究; 量子热力学循环在纳米机械振子冷却中的应用, 使得用纳米机械振子作为量子计算的数据总线 and 纳米传感器成为可能. 另外, 由量子热力学循环所发展起来的量子热力学理论对物理学, 特别是对统计

物理和量子力学一些基本问题的理解有更深刻的意义。量子热力学研究也为“量子纠缠、熵与黑洞的信息丢失之谜、麦克斯韦妖佯谬和热力学第二定律的普适性”等物理学中的一些基本问题提供了一个全新的视角, 并带来新的理解和启迪。

Chen 等在量子循环领域开展的主要研究包括^[69-87]: 1) 研究理想玻色气体在玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 温度附近不同热力学过程的特性, 量子简并和固有回热损失对以玻色气体为工质的 Ericsson、Stirling 和 Brayton 制冷循环性能的影响。2) 研究以理想费米气体为工质的 Ericsson 和 Brayton 制冷循环的性能特性及不可逆回热式 Brayton 制冷循环的优化性能, 获得了循环的重要性能参数的优化范围。3) 研究以玻色气体或费米气体为工质的不可逆 Stirling 和 Ericsson 制冷循环的优化性能, 导出极低温下不可逆 Stirling 制冷机的最佳制冷率与性能系数间的优化关系, 确定了循环的最佳运行区域。4) 建立以自旋-1/2 粒子系统为工质的 Brayton 动力和制冷循环以及 Ericsson 动力和泵热四种循环, 基于自旋理论和量子主方程, 导出自旋量子热力学循环的重要性能参数的表达式, 优化分析了循环的性能特性。5) 建立了以谐振子为工质的 Ericsson 制冷和动力循环及 Brayton 制冷和动力循环, 导出了这四种量子热力学循环的效率、性能系数、输出功率、制冷率、功率输入、熵产率和循环周期等重要性能参数的表达式, 获得相关性能参数的优化判据, 确定了循环性能参数的最佳设计与运行条件。研究结论能为低温量子制冷机的研制和参数设计提供理论指导。

9 结束语

随着科学技术的飞速发展和经济、社会的不断进步, 人类对能源的需求和用能对环境的影响也越来越大, 以“低能耗、低污染、低排放”为基础的“低碳经济”已越来越被世界各国所重视。2009 年 11 月 25 日, 国务院常务会议决定, 到 2020 年我国单位国内生产总值 CO₂ 排放要比 2005 年下降 40%~45%, 非化石能源占一次能源消费的比例要达到 15% 左右。毋庸置疑, 能源利用正在经历一场大转型, 许多国家不管是决策、管理层还是科技界都在为探寻、研制能大幅度节约资源、大幅度减排或具有能源技术的“新能源”而努力。

参考文献:

[1] Zhuang X L, Chen J C, Lin G X. Investigation on the per-

formance characteristics of ericsson refrigeration cycles based on $Gd_5Si_2Ge_2$, Gd and $MnFeP_{0.45}As_{0.55}$ [C]//9th International Conference on Sustainable Energy Technologies. Shanghai: [s. n.], 2010.

- [2] Xia Z R, Zhang Y, Chen J C, et al. Performance analysis and parametric optimum criteria of an irreversible magnetic Brayton refrigerator[J]. Applied Energy, 2008, 85 (2/3): 159-170.
- [3] Zhang X, Chen J, Lin G, et al. Influence of irreversible losses on the performance of a two-stage magnetic Brayton refrigeration cycle[J]. Physica B, 2010, 405: 1632-1637.
- [4] Lin G, Tegus O, Zhang L, et al. General performance characteristics of an irreversible ferromagnetic Stirling refrigeration cycle[J]. Physica B, 2004, 344(1/2/3/4): 147-156.
- [5] 庄小玲, 林国星. 铁磁回热 Ericsson 制冷循环性能特性优化[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(3): 375-377.
- [6] Ye X M, Wu L M, Lin G X, et al. Performance optimization of an irreversible ferromagnetic Stirling refrigerator with finite thermal sources [C]//Proc ECOS 2006. Greece: [s. n.], 2006: 1303-1310.
- [7] Ye X, Lin G, Chen J, et al. Parametric optimization of an irreversible magnetic Ericsson refrigerator with finite heat reservoirs[J]. Physica B, 2007, 391(2): 350-356.
- [8] Wei F, Wang R Z, Lin G X. Performance optimization of irreversible ferromagnetic Stirling heat pumps[C]//Proc ECOS 2008. Poland: [s. n.], 2008: 409-415.
- [9] Wei F, Lin G X, Chen J C, et al. Performance characteristic and parametric optimization of an irreversible magnetic Ericsson heat pump[J]. Physica B, 2011, 406(3): 633-639.
- [10] Zhang H C, Lin G X. Optimum thermal-economic performance characteristic of a class of irreversible ferromagnetic Stirling refrigerators[C]//Proc ECOS 2010, Switzerland: [s. n.], 2010: 861-867.
- [11] Chen J, Lin B, Wang H, et al. Optimal design of a multi-couple thermoelectric generator[J]. Semicond Sci Technol, 2000, 15: 184-188.
- [12] 王宏杰, 陈金灿. 耦合半导体制冷系统性能特性的优化分析[J]. 半导体学报, 2001, 22: 938-943.
- [13] Chen X H, Lin B H, Chen J C. General performance characteristics of semiconductor thermoelectric generators and their optimal matching loads[M]//Chapter 11 in semiconductor research trends, edited by Kenneth G Sachs. New York: Nova Sci Publishers Inc. 2007: 313-347.
- [14] 林比宏, 陈晓航, 陈金灿. 太阳能驱动半导体温差发电器性能参数的优化设计[J]. 太阳能学报, 2006, 27: 1021-

1026.

- [15] Chen J, Zhou Y, Wang H, et al. Comparison of the optimal performance of single and two-stage thermoelectric refrigeration systems[J]. *Applied Energy*, 2002, 73: 285-298.
- [16] Lai H, Pan Y, Chen J. The performance analysis of a two-stage combined semiconductor thermoelectric heat pump[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2004, 19: 17-22.
- [17] Chen J. Optimization of a solar-driven heat engine [J]. *J Appl Phys*, 1992, 72: 3778-3780.
- [18] 林比宏, 林国星, 陈金灿. 多种不可逆性对太阳能空间动力系统性能的影响[J]. *太阳能学报*, 2001, 22(2): 226-229.
- [19] Koyun A. Performance analysis of a solar-driven heat engine with external irreversibilities under maximum power and power density condition [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45: 1941-1947.
- [20] Sogut O, Durmayaz A. Performance optimization of a solar driven heat engine with finite-rate heat transfer[J]. *Renewable Energy*, 2005, 30: 1329-1344.
- [21] Sahin B, Ust Y, Yilmaz T, et al. Thermoeconomic analysis of a solar driven heat engine[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(7): 1033-1042.
- [22] Yilmaz T, Ust Y, Erdil A. Optimum operating conditions of irreversible solar driven heat engines[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31: 1333-1342.
- [23] Ust Y. Effects of combined heat transfer on the thermoeconomic performance of irreversible solar-driven heat engines [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32: 2085-2095.
- [24] Zheng S Y, Chen J C, Lin G X. Performance characteristics of an irreversible solar-driven Braysson heat engine at maximum efficiency[J]. *Renewable Energy*, 2005, 30(4): 601-610.
- [25] Wu L M, Lin G X. Investigation on the optimal performance and design parameters of an irreversible solar driven Braysson heat engine[J]. *Int J Sustainable Energy*, 2009, 28(4): 157-170.
- [26] Wu L M, Lin G X, Chen J C. Parametric optimization of a solar-driven Braysson heat engine with variable heat capacity of the working fluid and radiation-convection heat losses[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(1): 95-100.
- [27] Wu L M, Lin G X. Investigation on the performance characteristic of a solar-driven Braysson heat engine with multi-irreversibilities[C]//ASME 3rd International Conference on Energy Sustainability. San Francisco: [s. n.], 2009: 799-804.
- [28] 吴兰梅, 林国星, 陈金灿. 太阳能 Braysson 热机性能优化及参数设计[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(9): 1180-1184.
- [29] Zhang Y, Lin B H, Chen J C. Optimum performance characteristics of an irreversible solar-driven Brayton heat engine at the maximum overall efficiency [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32: 856-867.
- [30] Zhang Y, Chen J. The thermodynamic performance analysis of an irreversible space solar dynamic power Brayton cycle[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2006, 128: 409-413.
- [31] Zhang Y, Lin B H, Chen J C. The unified cycle model of a class of solar-driven heat engines and their optimum performance characteristics [J]. *J Appl Phys*, 2005, 97: 084905.
- [32] Liu R J, Zhang H C, Chen J C, et al. Parametric optimization of an irreversible solar-driven Stirling heat engine with radiation-convection heat losses [C]//Proc ECOS 2010. Switzerland: [s. n.], 2010: 1760-1765.
- [33] Lin G X, Yan Z J. Optimal operating temperature of the collector of an irreversible solar-driven refrigerator[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1999, 32(2): 94-98.
- [34] Wu L M, Lin G X. Performance characteristic of an irreversible solar-driven absorption refrigerator with radiation heat loss [C]//World Renewable Energy Congress. Scotland: [s. n.], 2008: 1690-1697.
- [35] 林国星, 严子浚. 不可逆太阳能热泵系统集热器的最佳工作温度[J]. *太阳能学报*, 1996, 17(4): 371-375.
- [36] Zhang H C, Wu L M, Lin G X. Performance optimization and parametric design of an irreversible solar-driven three source heat pump [C]//ASME 3rd International Conference on Energy Sustainability. San Francisco: [s. n.], 2009: 793-798.
- [37] De Vos A. Endoreversible thermodynamics and chemical reactions[J]. *J Phys Chem*, 1991, 95(18): 4534-4540.
- [38] Gordon J, Orlov V. Performance characteristics of endoreversible chemical engines[J]. *J Appl Phys*, 1993, 74(9): 5303-5309.
- [39] Chen L, Sun F, Wu C. Performance of chemical engines with mass leak[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1998, 31(13): 1595-1600.
- [40] Lin G X, Chen J C. Optimal analysis on the cyclic performance of a class of chemical pumps[J]. *Appl Energy*, 2001, 70(1): 35-47.
- [41] Lin G X, Chen J C, Hua B. Optimal analysis on the performance of a chemical engine-driven chemical pump[J]. *Appl Energy*, 2002, 72(1): 359-370.
- [42] Lin G X, Chen J C, Hua B. General performance characteristics of an irreversible three source chemical pump [J]. *Energy Convers Mgmt*, 2003, 44(10): 1719-1731.
- [43] Lin G X, Chen J C, Brck E. Irreversible chemical en-

- gines and their optimal performance analysis[J]. *Applied Energy*, 2004, 78(2): 123-136.
- [44] Lin G, Chen J, Wu C. The equivalent combined cycle of an irreversible chemical potential transformer and its optimal performance[J]. *Exergy*, 2002, 2(2): 119-124.
- [45] Lin G, Chen J, Wu C, Hua B. The equivalent combined cycle of an irreversible chemical pump and its performance analysis[J]. *Int J Ambient Energy*, 2002, 23(2): 97-102.
- [46] Sammes N. *Fuel cell technology*[M]. London: Springer-Verlag, 2006.
- [47] Ó Hayre R P, Cha S W, Colella W, et al. *Fuel cell fundamentals*[M]. New York: Wiley, 2006.
- [48] Lin T, Zhao Y, Chen J. Expressions for the entropy production rate of fuel cells[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2008, 27: 361-366.
- [49] Zhao Y, Ou C, Chen J. A new analytical approach to model and evaluate the performance of a class of irreversible fuel cells [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2008, 33: 4161-4170.
- [50] Zhang X, Guo J, Chen J. The parametric optimum analysis of a proton exchange membrane(PEM) fuel cell and its load matching[J]. *Energy*, 2010, 35: 5294-5299.
- [51] Zhao Y, Chen J. Modeling and optimization of a typical fuel cell-heat engine hybrid system and its parametric design criteria[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 186: 96-103.
- [52] Chen X, Lin B, Chen J. General performance characteristics and parametric optimum criteria of a Braysson-based fuel cell hybrid system[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23: 6079-6084.
- [53] Zhang X, Chen J. Performance analysis and parametric optimum criteria of a class of irreversible fuel cell/heat engine hybrid systems [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35: 284-293.
- [54] Ni M, Leung M K H, Leung D Y C. Energy and exergy analysis of hydrogen production by solid oxide steam electrolyzer plant[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2007, 32: 4648-4660.
- [55] Martinez-Frias J, Pham A Q, Aceves S M. A natural gas-assisted steam electrolyzer for high-efficiency production of hydrogen[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2003, 28: 483-490.
- [56] Zhang H C, Lin G X, Chen J C. Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35: 10851-10858.
- [57] Lattanzi G, Maritan A. Force dependence of the michaelis constant in a two-state ratchet model for molecular motors [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 1134-1137.
- [58] Moon H Y, Park Y. Modified Michaelis law in a two-state ratchet model for a molecular motor as a function of diffusion constant [J]. *Phys Rev E*, 2003, 67: 051918.
- [59] Gao T F, Zhang Y, Chen J C. The current characteristics of two-state flashing ratchets composed of two asymmetric potentials[J]. *Modern Physics Letters B*, 2008, 22: 2967-2978.
- [60] Derenyi I, Bier M, Astumian R D. Generalized efficiency and its application to microscopic engines[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 903-906.
- [61] Zhang Y, Lin B H, Chen J C. Performance characteristics of an irreversible thermally driven Brownian microscopic heat engine [J]. *Eur Phys J B*, 2006, 53: 481-485.
- [62] Gao T, Zhang Y, Chen J. The Onsager reciprocity relation and generalized efficiency of a thermal Brownian motor[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18: 3279-3286.
- [63] Lin B, Chen J. Performance characteristics and parametric optimum criteria of a Brownian micro-refrigerator in a spatially periodic temperature field [J]. *J Physics A*, 2009, 42: 075006 1-14.
- [64] Zhang Y, Chen J. Investigation on a temporal asymmetric oscillating temperature ratchet [J]. *Physica A*, 2008, 387: 3443-3448.
- [65] Gao T, Chen J. Non-equilibrium thermodynamic analysis on the performance of an irreversible thermally driven Brownian motor[J]. *Modern Physics Letters B*, 2010, 24, 325-333.
- [66] Gao T, Chen J. The current transport characteristics of a delayed feedback ratchet in a double-well potential [J]. *J Physics A*, 2009, 42: 065002 1-8.
- [67] Scovil H E D, Schulz-Dubois E O. Three-level Masers as heat engines[J]. *Phys Rev Lett*, 1959, 2: 262-263.
- [68] Geusic J E, Schulz-Dubois E O, Scovil H E D. Quantum equivalent of the Carnot cycle[J]. *Phys Rev*, 1967, 156: 343-351.
- [69] Chen J, He J, Hua B. The influence of regenerative losses on the performance of a Fermi-Ericsson refrigeration cycle [J]. *J Physics A*, 2002, 35: 7995-8004.
- [70] Chen J, Lin B. Low-temperature behavior of an ideal Bose gas and some forbidden thermodynamic cycles[J]. *J Physics A*, 2003, 36: 11385-11390.
- [71] Lin B, Zhang Y, Chen J. Influence of quantum degeneracy and regeneration on the Performance of Bose-Stirling refrigeration cycles operated in different temperature regions[J]. *Applied Energy*, 2006, 83: 513-535.
- [72] Yang Y, Lin B, Chen J. Influence of regeneration on the

- performance of a Brayton refrigeration cycle working with an ideal Bose-gas [J]. *Applied Energy*, 2006, 83: 99-112.
- [73] He J, Chen J, Hua B. Influence of quantum degeneracy on the performance of a stirling refrigerator working with an ideal Fermi gas[J]. *Applied Energy*, 2002, 72: 541-554.
- [74] Zhang Y, Lin B, Chen J. The influence of quantum degeneracy and irreversibility on the performance of a Fermi quantum refrigeration cycle[J]. *J Physics A*, 2004, 37: 7485-7497.
- [75] Zhang Y, Lin B, Chen J. The performance characteristics of an irreversible regenerative quantum refrigeration cycle[J]. *Physica Scripta*, 2006, 73: 48-53.
- [76] Liu J Y, Lin B H, Chen J C. Influence of multi-irreversibilities on the performance of a Brayton refrigeration cycle working with an ideal Bose or Fermi gas[J]. *Int J Thermal Science*, 2008, 47(10): 1374-1381.
- [77] Lin B, Chen J. Performance analysis of irreversible quantum Stirling cryogenic refrigeration cycles and their parametric optimum criteria[J]. *Physica Scripta*, 2006, 74: 251-258.
- [78] Lin B, Chen J. Optimum performance analysis of an irreversible quantum cryogenic refrigeration cycle working with an ideal Bose or Fermi gas [J]. *Physica Scripta*, 2008, 77: 055005-1-7.
- [79] He J, Chen J, Hua B. Quantum refrigeration cycles using spin-1/2 systems as the working substance[J]. *Phys Rev E*, 2002, 65: 036145-1-8.
- [80] Chen J, Lin B, Hua B. The performance of a quantum heat engine working with spin systems[J]. *J Physics D*, 2002, 35: 2051-2057.
- [81] Lin B, Chen J. The performance analysis of a quantum heat pump using spin systems as the working substance [J]. *Applied Energy*, 2004, 78: 77-95.
- [82] Lin B, Chen J. Optimal analysis of the performance of an irreversible quantum heat engine with spin systems [J]. *J Physics A*, 2005, 38: 69-79.
- [83] Lin B, Chen J, Hua B. The optimal performance of a quantum refrigeration cycle working with harmonic oscillators[J]. *J Physics D*, 2003, 36: 406-413.
- [84] Lin B, Chen J. Performance analysis of an irreversible quantum heat engine working with harmonic oscillators [J]. *Phys Rev E*, 2003, 67: 04105-1-8.
- [85] Lin B, Chen J. Optimization on the performance of a harmonic quantum Brayton heat engine [J]. *J Applied Physics*, 2003, 94: 6185-6191.
- [86] Lin B, Chen J. Optimal analysis on the performance of an irreversible harmonic quantum Brayton refrigeration cycle[J]. *Phys Rev E*, 2003, 68: 056117-1-9.
- [87] Lin B, Chen J. General performance characteristics of a quantum heat pump cycle using harmonic oscillator as the working substance[J]. *Physica Scripta*, 2005, 71: 12-19.

Investigation on the Optimum Performance and Parametric Design of a Variety of Energy Conversion Systems

LIN Guo-xing^{*}, CHEN Jin-can

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005 China)

Abstract: Saving energy, increasing efficiency of energy utilization and empowering new and renewable clean energy sources are emphases of developing energy source in the coming years. The performance optimization and parametric design of energy conversion systems is one of the key science problems in energy utilization with high efficiency. In the present paper, some important research results involving the optimum performance and parametric design of a variety of energy conversion systems, such as the magnetic refrigeration, semiconductor thermoelectric devices, thermal utilization of solar energy, chemical engines and chemical pumps, fuel cell hybrid systems, water electrolysis systems for hydrogen production, Brownian motors, quantum thermodynamic cycle systems, and so on, are introduced in combination with both the research status at home and abroad and the research work of our group in recent years.

Key words: energy source; energy conversion system; cyclic performance; optimum theory; parametric design