



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

丁泽民, 陈林根*, 王文华, 孙丰瑞

海军工程大学热科学与动力工程研究室, 舰船动力工程军队重点实验室, 动力工程学院, 武汉 430033

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

收稿日期: 2014-11-26; 接受日期: 2015-01-16

国家自然科学基金(批准号: 51306206)资助项目

摘要 随着分子生物技术、纳米技术和微电子技术的发展, 微型能量转换系统日益受到人们的重视. 微型能量系统中能量转换的机理和效率研究是涉及热力学、统计力学、物理学等多学科交叉融合的新课题, 而能量系统的性能优化是揭示微型系统能量转换机理、提升能源利用效率的一个关键问题. 本文在概述有限时间热力学理论产生和发展的基础上, 结合国内外的研究现状, 阐明性能优化对微型能量转换系统的意义, 综述利用有限时间热力学理论对热驱动布朗马达、能量选择性电子机和热离子装置这三类典型微型能量转换系统进行热力学分析和优化研究的最新进展, 并提出进一步的研究展望.

关键词

微型能量转换系统
热驱动布朗马达
能量选择性电子机
热离子装置
性能优化
有限时间热力学

1 引言

与宏观的热机、制冷机等热力系统类似, 在微观层次内也存在着能实现马达功能并进行能量转换的微型系统, 典型的系统包括布朗马达 (Brownian motor)、电子机 (electron engine) 和热离子装置等. 随着分子生物技术、纳米技术和微电子技术的发展, 人们越来越重视此类微型能量转换系统的性能研究.

布朗马达也称分子马达, 是一类典型的微型能量转换系统. 分子马达主要包括生物分子马达和人工分子马达两类. 生物分子马达也叫马达蛋白, 它们是生物体内能够将化学能直接转换为机械能的酶蛋白大分子的总称, 如肌球蛋白、驱动蛋白等^[1~8]. 马达蛋白广泛地存在于肌肉纤维和细胞组织内部, 参与肌肉收缩、物质运输、细胞分裂和 DNA 复制等

大量重要的生命过程. 人工分子马达主要包括实验室人工制备的类似齿轮、开关、转栅等简单装置的分子马达器件, 此类装置对于实现微观层次的能源利用具有重要意义^[9~11]. 电子机系统是另一类典型的微型能量系统. 在一定的条件下, 电子系统可以作为热机或者制冷机工作. 目前, 具有代表性的电子机理论模型包括能量选择性电子热机、制冷机和热泵^[12~14]. 实际的电子机系统包括半导体热电发电机、制冷机和热泵等, 它们在航空、医疗等领域具有广阔的应用前景.

热离子发电机和制冷机藉由电子的发射来获得电能与热能的直接转换. 与传统的热机装置相比, 热离子装置具有无机械转动部件、无有害制冷剂、可靠性高、稳定性好等优点, 它是一种绿色的能量转换器件, 不会对环境造成污染^[15~20]. 更重要的是, 热

引用格式: 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
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, doi: 10.1360/N092014-00417

离子装置几乎可以设计成为任何需要的尺寸,特别是微型的装置。微型的热离子能量转换装置对微电子技术的发展具有重要意义。随着微电子技术、现代医疗技术等精密技术的发展,电子器件向着高集成度、大功率、微型化趋势发展,热流密度急剧升高,微型器件的散热问题日益突出。微型的热离子制冷器以其独特的性能可用以解决计算机微处理器等微型器件的散热问题。

由于布朗马达、电子机、热离子装置等微型能量转换系统对纳米技术、分子生物技术的发展以及微小能量转换装置的设计和制造所具有的重要现实意义,相关研究已经成为细胞生物学、化学、统计物理学、非线性科学和微电子学共同的前沿性课题。

在能量系统的研究中,系统的热力学性能,即其能量转换的机理和效率一直是人们关注的核心问题之一。目前,关于布朗马达、电子机系统和热离子装置热力学性能的大部分研究都是基于经典热力学理论进行的。经典的热力学理论以平衡和可逆作为其基本假设。卡诺效率是经典可逆热力学的代表性结论,它给出了相同温限时所有热力循环的效率界限。可逆条件下,整个热力循环中系统保持内平衡,系统和环境总熵不变,此时要求过程进行的时间为无限长,因此功率输出为零。对任何实际热机,功率输出必须大于0,此时系统和环境之间的热交换速率不为无限小,系统不能保持内平衡,且过程时间有限,因此所有的实际热力过程都是不可逆的,经典的可逆热力学界限太高,限制了其在实际能量系统中的应用。

有限时间热力学^[21~34]是研究在有限时间内发生的带有热现象的过程的最优效果,在有限时间内运行的带有热现象的装置和系统的最优性能的一门科学。自诞生以来,它在能量系统中的应用得到了长足的发展并取得了一系列的研究成果^[35~53]。与经典热力学相比,有限时间热力学由于考虑了传递过程的损失并进行性能优化,所得的研究结果更加接近实际。有限时间热力学的研究对象包含所有在有限时间过程内完成的带有热现象的装置和过程;而经典的热力学理论由于未考虑时间因素,它在研究此类包含时间因素的热力系统时并不适用。有限时间热力学与经典热力学的显著差别可以从系统性能优化的目标函数及结果上看出。经典热力学中所有的优化目标在可逆的条件下同时达到最优,不同优化目

标所描述的过程和达到的效果是相同的,也就是说经典热力学所有最优问题的解就是可逆热力过程,因此基于经典热力学的性能优化对于提升实际热力过程性能的指导意义不够明显。而在有限时间热力学理论中,情况并非如此。系统的最优运行状态与所选用的优化目标函数,如功率、效率、熵产等密切相关;不同目标函数,优化后对应于不同的最优过程和运行状态。因此,对宏观和微型能量转换系统而言,采用基于有限时间热力学理论的优化方法研究系统的性能特性更具实际意义。

早期的有限时间热力学研究对象主要集中于常规宏观的能量转换装置。实际上,有限时间热力学理论中所考虑的性能优化、有限速率传热和其他传输损失等思想在微型能量转换系统的研究中同样适用。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。因此,应用有限时间热力学理论全面、系统地研究布朗马达、能量选择性电子机和热离子装置等微型能量系统的最优性能,不仅能够揭示微观能量转换装置的本质特性,为实际微观领域的能源利用提供理论指导,而且拓展了有限时间热力学理论的应用范围,进一步显示出该理论的勃勃生机与无穷魅力。本文将综述布朗马达、能量选择性电子机和热离子装置这三类典型微型能量转换系统有限时间热力学性能优化研究的最新进展,并提出未来研究展望。

2 有限时间热力学的产生和发展

人类的生产实践和探索未知事物的欲望是科学技术发展的动力。18世纪欧洲工业革命的兴起对机械动力产生了巨大的需求,同时也使热学的发展得到积极的推动。蒸汽机的发明正是热学发展的一个典型成果,它的规模化应用也刺激、推动了热学方面的理论研究,促成了经典热力学的建立与发展。1824年,法国学者 Carnot^[54]提出了卡诺定理和卡诺循环,指出工作于不同温度 T_H 和 T_L 热源之间的一切热机所能达到的效率极限为 $\eta_C=1-T_L/T_H$,此即著名的卡诺效率。卡诺效率^[54]的提出是近代科学发展史上一个重要的开创性突破,并由此开创了一个新的科学领域:经典热力学。经典热力学在物理学和工程学领域得到了广泛的应用,极大地促进了实际热动力装置的改进和发展。

经典热力学应用宏观的方法进行研究, 因此也称为宏观热力学. 它以热力学三个定律为基础, 利用热力学数据, 研究平衡系统各宏观性质之间的相互关系, 揭示变化过程的方向和限度. 由于热力学基本定律的可靠性及普适性, 所以应用宏观研究方法和经典热力学理论可以得到可靠的结果. 但是, 由于它不考虑物质分子和原子的微观结构, 也不考虑微粒的运动规律, 所以由之建立的热力学宏观唯象理论并不能说明热现象的本质及内在原因, 也不能给出微观性质与宏观性质之间的联系.

与经典热力学对应的是微观热力学, 也称统计热力学, 它应用微观的方法进行研究. 统计热力学从粒子的微观性质及结构数据出发, 以粒子遵循的力学定律为理论基础, 应用统计方法推求出大量粒子运动的统计平均结果, 以得出平衡系统宏观特性, 导出热力学基本规律, 因而能阐明热现象的本质, 解释“涨落”现象. 在实际的研究过程中, 通常都是综合应用经典热力学和统计热力学的理论来研究能量转换装置和系统的性能.

在经典的研究方法中, 卡诺热机的效率界限即为卡诺效率, 热机的效率要达到卡诺效率, 循环过程必须是可逆的, 即整个热力过程中系统和环境总熵保持不变. 要保持过程可逆, 热机做功过程必须由准平衡态过程也即一系列很相近的平衡态组成, 而且在进行中的每一步都是平衡态. 在这样的要求下, 过程进行的时间必须无限长, 而此时的输出功率为 0. 实际热机总是存在各种不可逆效应, 进行的时间也不可能无限长, 因此经典热力学的效率界限太高, 在现实中无法实现, 需要进一步的完善.

对经典热力学进行改造和革新, 求出存在系统与环境间有限速率热交换的有限时间过程和有限尺寸装置的热力学性能界限, 就是有限时间热力学最初所要研究的主要内容. 前苏联学者 Novikov^[55], 法国学者 Chambadal^[56], 加拿大学者 Curzon 和 Ahlborn^[57]等最早分别注意到了这一问题. 他们以考虑了有限速率传热的 Carnot 热机为研究对象, 导出了工质与温度为 T_H 和 T_L 的高低温热源间传热服从牛顿传热定律时 Carnot 热机输出功率最大时的效率为 $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{T_L/T_H}$. 这就是著名的 CA 效率. CA 效率是在有限速率和有限周期条件下得到的热机的性能界限, 因此, 无论从表达式形式还是意义上讲, CA 效

率都不同于经典热力学中 Carnot 效率. CA 效率与实际热机的最佳观测性能相当接近, 因此, 在应用方面 CA 效率比 Carnot 效率更具优势. 这个由工程专家和理论物理学家共同得到的新的效率界限, 不仅为具有有限速率和有限周期特征的热机提供了新的分析方法, 而且标志了热力学一个新的学科分支的诞生. 1977 年 Andresen 等人^[58]首次把这类以寻求更实际、更有用的性能界限, 以寻找循环的最优性能及实现目标的最优途径的科学称为“有限时间热力学”. 之后的三十多年, 国内外的很多学者都对该领域进行了深入的研究, 进一步获得了许多更合乎实际的性能界限, 逐步把经典热力学理论延伸, 使之包含各种现实的不可逆效应. 新获得的研究成果极大地丰富了热力学理论, 扩大了其应用范围, 故而有限时间热力学已经成为现代热力学理论的一个新的分支.

自有限时间热力学理论建立以来, 国内外大批学者对这一新学科分支进行了大量研究, 研究对象涉及到热机、制冷机、热泵等传统的热力装置, 以及量子热力系统、直接能量转换装置、流体流动过程、传热过程、换热器、传质过程、化学反应过程、绝热系统、热能存储系统及其他与时间和速率相关的过程, 得到了一大批既具有理论意义又具有实际热力工程应用价值的研究结果, 发现了许多新现象和规律. 到 2014 年 11 月已有 7800 余篇相关文献发表, 包括专著、博士学位论文和不同时期的专题综述.

在过去相当长的时间内, 人们非常关注宏观能量转换系统有限时间热力学性能的相关研究. 近年来, 微观能量转换系统的热力学性能也受到越来越多的重视. 对于宏观热力系统, 由于它即不考虑物质分子和原子的微观结构, 也不考虑微粒的运动规律, 在研究的过程中, 人们通常应用经典的热力学理论对其系统的能量传输和转换过程进行描述, 进而研究平衡系统各宏观性质之间的相互关系, 揭示能量转换和状态变化过程的方向和限度. 在传统的宏观热力学经典理论中, 一旦知道系统的始态和终态能量以及连接两态的路径, 便可确定系统对外作的功. 事实上, 初终两态的能量及系统与环境在路径上的交换热均有 $k_B T$ 涨落, 只是在玻耳兹曼统计中, 这个量级的热涨落被忽略了. 对于尺寸很小的微型能量系统, 情况则完全不同. 如果系统的尺度接近分子大小, 这样的热涨落则不能被忽略, 它会对系统的性能产生极大的影响. 对于这类微型系统, 在描述其内部

的物质输运过程以及热量的传递和转换过程时,经典的热力学理论和方程已经不再适合,而通常是采用统计热力学的方法和公式进行描述,这是微型能量转换系统性能研究的独特之处。

对于宏观或微观的能量系统,其能量转换的机理和效率,一直是人们关注的核心问题。采用宏观热力学理论对能量系统进行性能分析和优化,目前已经形成了比较完善的方法和理论体系,有限时间热力学理论即是相关方法体系的一个典型代表,并且已经在微型能量系统中获得了应用。已有学者应用有限时间热力学理论研究了布朗马达^[59~61]、分子马达^[62~65]、电子机^[13,66~68]、量子点棘轮^[69~72]、纳米机器^[73,74]、热离子装置^[75~79]等微型系统的最优性能,得到了许多有意义的新结论。正如有限时间热力学理论的创始人之一、丹麦哥本哈根大学的 Andresen^[31]教授所言:尽管微型系统在运行状态和热量转换过程方面与宏观能量系统存在较大的差异,但是宏观热力学理论的研究思路和方法在微型能量系统的研究中同样适用;他同时指出,有限时间热力学理论的潜在适用对象涵盖了包括微型能量转换系统在内的任何在有限时间的限制内完成的热力过程。Andresen^[31]预测,从界观尺度到纳米尺度的微型能量转换系统的性能优化,将会是未来有限时间热力学理论最有发展潜力、最有可能取得突破性研究进展的领域之一。

3 热驱动布朗马达性能优化的研究进展

统计物理学构建了微观粒子运动与宏观系统热力学特性之间的联系,它主要包括用系综法描述系统平衡态性质的平衡态统计物理和用分布函数描述系统随时间演化的非平衡态统计物理两大方向。19世纪下半叶,统计物理作为一门新兴的学科进入了物理学。Boltzmann, Maxwell 等人将概率的语言引入被决定性理论统治的物理学,是物理学发展史上的一场革命。20世纪初, Gibbs 把 Boltzmann 和 Maxwell 所创立的统计理论推广和发展成为系综理论,这标志着平衡态统计物理理论的成熟。而爱因斯坦对布朗运动的开创性研究^[80]以及 Langevin 方程^[81]和 Fokker-Planck 方程的建立,则开启了统计物理探索非平衡系统的动力学行为的重要阶段。统计物理学是根据对物质微观结构及微观粒子相互作用的认识,

用概率统计的方法,对由大量粒子(原子、分子等)组成的宏观物体的物理性质及宏观规律做出微观解释的理论物理学分支。它的目标是从宏观系统的物质结构出发,依据经典微观粒子所遵循的力学规律,得出系统的宏观性质及其变化规律。统计物理是由微观到宏观的桥梁,它为各种宏观理论提供依据,已经成为气体、液体、固体和等离子体理论的基础,并在化学和生物学的研究中发挥重要作用。

把随机性作为一个专门的对象,研究随机力的性质以及它对各类宏观系统的影响,成为非平衡态统计物理学的一大分支^[82]。而非线性科学的发展则大为扩展了统计物理学的研究范围。非平衡统计物理研究中最经典和最重要的内容之一是布朗运动。布朗运动理论的建立使得人们能够精确处理受随机环境影响的体系的运动规律。目前,对周期结构系统中布朗粒子在热涨落(噪声)驱动下的运动成为非平衡态统计物理理论的前沿课题,所取得的主要理论成果为非平衡涨落诱导输运理论^[83~90]。近年来将这一理论用于细胞生物学中的马达蛋白的传输过程,取得了巨大的成功,成为统计物理学、非线性科学和细胞生物学共同的前沿性课题^[91~96]。生物体中的马达蛋白,也称分子马达(molecular motors),是由生物大分子构成,可高效地将储藏在三磷酸腺苷(ATP)分子中的化学能转变为机械能,是一种具有很大噪声但尺寸很小的纳米机器。由于目前对分子马达的研究多基于布朗运动动力学理论,因此分子马达也被称为布朗马达。

经典理论在解释分子马达的定向运动以及定向运动方向的改变等方面是成功的,许多理论与实验结果定性符合,在分子马达能量转化效率的问题上也作了一些有益的尝试和探索,但是还是有一定的局限性。对分子马达的热力学和动力学的研究是一个涉及生物、化学、物理等多学科的复杂课题。分子马达的运动规律和能量转换机理,热力学性能与随机分析方法间的关系都需要人们不断地探索。本节将综述热驱动布朗马达热力学性能优化的研究现状。

3.1 热驱动布朗马达简介

像宏观世界的马达一样,微观层次内也存在着许多具有马达功能的微观“马达”,它们同样能实现机械意义上的马达功能,即能够将其他形式的能量转化为机械能。这些微观的马达通常被称为分子马

达. 现在对分子马达模型的研究集中于两类实际的马达, 一类来源于实验室人工制备的各种分子马达, 如类似齿轮、开关、转栅等简单装置的分子马达器件^[2,3]; 另一类来自于生物体内广泛存在的生物分子马达, 如肌球蛋白马达(myosin)^[6,97,98]、驱动蛋白(kinesin)^[7,99~101]和动力蛋白(dynein)^[102~105]马达、ATP合成酶^[106]等.

为了解释分子马达的运动机制, 人们提出了布朗马达模型, 将生物马达蛋白把化学能转变为机械能产生协调定向运动的现象, 看作是非平衡涨落驱动布朗粒子运动的结果. 人们将分子马达的这类基于布朗运动动力学理论的物理模型概括为布朗马达, 并用布朗马达来模拟分子马达的定向运动机制. 各式各样的布朗马达, 虽然在形状和功能上各不相同, 但就其动力学而言, 都有共同的特点, 都具有显著的布朗运动特性, 这种共同的动力学机制决定着布朗马达的物理行为. 分子马达的布朗运动理论最近几年取得了长足的进展.

如果系统的尺寸很小, 其运动特性必然会受到无规则随机涨落的影响. 怎样从无规则的随机涨落中获取有用功、怎样把无序的能量转化为有用的能量是近年来人们孜孜以求的梦想. Smoluchowski^[107]于1912年提出了一个假想实验来探讨用一个棘轮装置将热能转化为功的可能性. Smoluchowski提出的模型中, 棘齿、棘爪与叶片处于同一温度环境中, 在这一条件下, 热力学第二定律禁止单热源热机将热量转换为功. Feynman等人^[108]在此基础上提出了一个改进的棘齿模型, 模型的棘齿和棘爪部分与叶片部分分别处于温度不同的热源之中, 如图1所示. 实际上, 当棘齿与棘轮处于不同温度的热源时, 系统已处于非平衡状态, 因此观察到棘齿的定向转动是可能的. Feynman棘轮模型是最早的布朗马达模型, 它的提出掀起了分子马达和布朗马达研究的热潮. 大量学者对Feynman棘轮开展了更加深入的研究^[109~117]. 与此同时, 受Feynman棘轮模型启发, 人们提出了大量的分子马达^[4,5,9,118]和布朗马达模型^[11,119~121].

布朗马达是周期性的空间不对称结构, 其中布朗粒子的传输由一些非平衡过程来驱动. 布朗马达系统中, 受非平衡过程所驱动的布朗粒子可看作是系统的工质. 根据所受非平衡驱动力的不同类型, 布朗马达主要可分为三类^[122]: 受力棘轮(马达)、化学马达(由化学势差驱动偏离平衡态)和热驱动马达(由

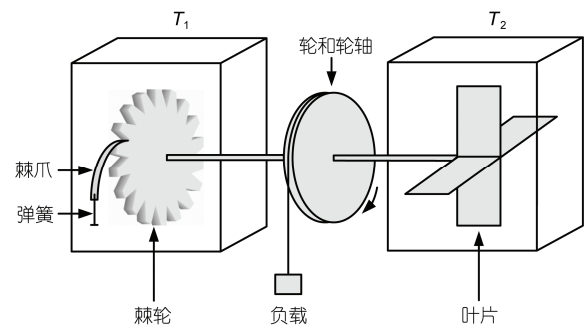


图1 Feynman 棘轮示意图^[108]

温差驱动偏离平衡态). 热驱动布朗马达是当前最普遍、研究最多的布朗马达模型之一. 20世纪80年代末, Büttiker^[123], van Kampen^[124]和 Landauer^[125]最早研究了由非均匀的温度场驱动的热布朗马达模型. 这种马达模型也被一些学者称为 Büttiker-Landauer (B-L) 型布朗马达^[126]. 之后, 大量学者研究了热驱动布朗热机的性能并得到了许多有意义的结果^[121,127,128].

目前, 关于布朗马达的相关研究主要集中于两方面, 一是系统中布朗粒子的运动特性^[93,129~132], 另一方面就是它的热力学特性^[127,133], 即整个系统实现能量转换的效率问题. 研究装置的热力学性能对揭示布朗马达系统能量转换的机理具有重要意义. 效率是评价系统做功有效性的一个重要指标. 根据传统的定义, 效率为系统所做有用功与消耗总能量之比, 即布朗马达需要克服外力负载作有用功. 但是, 当没有外力作用在马达系统上时, 传统效率的结果将为零, 这显然不符合实际情况. 鉴于此, 1999年, 美国学者 Derényi 等人^[134]针对微型热机提出了一种新的不依赖于外力负载的效率的定义. 这种广义效率被定义为系统最小能量需求与总输入能之比, 它很好地解决了传统效率在无外力负载时出现的偏差. 广义效率的提出是一项开创性的工作, 现已广泛应用于布朗马达、纳米机器等微型能量转换系统的研究之中^[135,136]. 在广义效率定义的基础上, Asfaw 和 Bekele^[137]提出了热驱动布朗制冷机的广义制冷系数的定义, 丁泽民等人^[138]提出了热驱动布朗热泵广义供热系数的定义.

布朗粒子动能变化造成的不可逆热流对热驱动布朗马达热力学性能有重要影响. 一些学者的研究表明^[133,137,139,140], 在准静态条件下, 布朗热机的效率能达到卡诺效率. 实际上他们的结果忽略了布朗粒子二次穿越热源边界时动能变化造成的不可逆热

流^[135,141]. 大量的研究表明, 考虑这种不可逆的热流时, 即使在准静态条件下, 布朗热机的效率和布朗制冷机或热泵的性能系数也都达不到卡诺效率和卡诺性能系数^[61,126,138,142~144].

不考虑布朗粒子动能变化造成的热流时, 布朗马达系统中粒子流和热流的传递过程仍然是不可逆的. 这种只考虑粒子流和热流传递过程不可逆性的布朗马达可称为内可逆布朗马达, 它与只考虑系统与热源之间有限速率传热不可逆性的宏观内可逆热机^[145~149]相类似.

3.2 热驱动布朗热机最优性能

西班牙学者 Parrondo 和 de Cisneros^[122]指出, 有限时间热力学理论发展的思想和方法在布朗马达的研究中同样适用. 建立考虑传输损失在内的包含各种损失的装置模型以及对系统进行性能优化以获得更接近实际的性能界限是有限时间热力学两个主要的目标. 除粒子动能变化造成的热流之外, 与常规宏观热机系统高低温热源之间的热漏^[150,151]相似, 热驱动布朗马达系统中也存在热漏这种不可逆热流, 它对系统的性能也有重要影响. 目前, 热漏和布朗粒子动能变化造成的不可逆热流是布朗马达系统中已被证实的两种主要的损失因素, 因此在系统性能分析和优化的相关研究中必须考虑它们的影响.

Feynman 棘轮也是一种热驱动的布朗马达, 它是研究受涨落驱动系统性能的理想模型之一. Parrondo 和 Español^[109]最早研究了 Feynman 棘轮系统中的热漏问题. 他们的研究表明棘轮系统两热源间的机械连接会产生热量的传递, 这种经由热涨落的热量传递即为两热源之间的热漏. 由于热漏的存在, 棘轮不可能运行于可逆状态, 因此其效率始终小于卡诺效率^[109]. Velasco 等人^[59]应用有限时间热力学理论研究了考虑热漏的 Feynman 棘轮(马达)的最优性能, 他们分别以功率和效率作为优化目标, 研究了马达分别在功率和效率最优时的性能特性, 结果发现马达的功率效率特性与实际宏观热机相类似都呈扭叶型. Velasco 等^[59]的研究还表明, Feynman 棘轮模型可以分别作为冷棘轮和热棘轮工作. Tu^[60]通过同时优化内部参数和外加负载研究了考虑热漏时 Feynman 棘轮在功率最大时的效率特性, 导出了理想棘轮(无热漏)最大功率效率的解析表达式并分析了棘轮间的热导率对最大功率效率的影响, 并发现该

效率大于宏观热机的 CA 效率^[55~57]和随机热机系统的最大功率效率^[63]. Chen 等人^[152]基于考虑热漏的不可逆 Feynman 棘轮模型, 详细分析了系统作为冷棘轮和热棘轮工作时的最优性能, 同时优化内部和外部参数, 导出了热棘轮最大功效时效率的解析表达式, 并与文献[60]所得冷棘轮的最大功率效率进行了比较. 结果表明, 尽管 Feynman 马达可作为冷棘轮和热棘轮工作, 但是它具有统一的最优性能, 由于冷棘轮的有效运行区域比热棘轮要宽(图 2), 因此 Feynman 马达作为一个冷棘轮工作时性能更优.

对于热驱动的布朗热机, 在不考虑粒子动能引起的热流时, Asfaw 和 Bekele^[133,137,140]研究了温差驱动布朗热机功率和效率最优性能. Ai 等人^[143,153]研究了考虑动能引起的热流时热驱动的布朗马达作为热机运行时的热流特性和功率、效率最优性能. Zhang 等人^[144]和 Zhang 和 He^[154]研究了考虑粒子动能引起热流时不可逆布朗微热机的功率和效率性能特性,

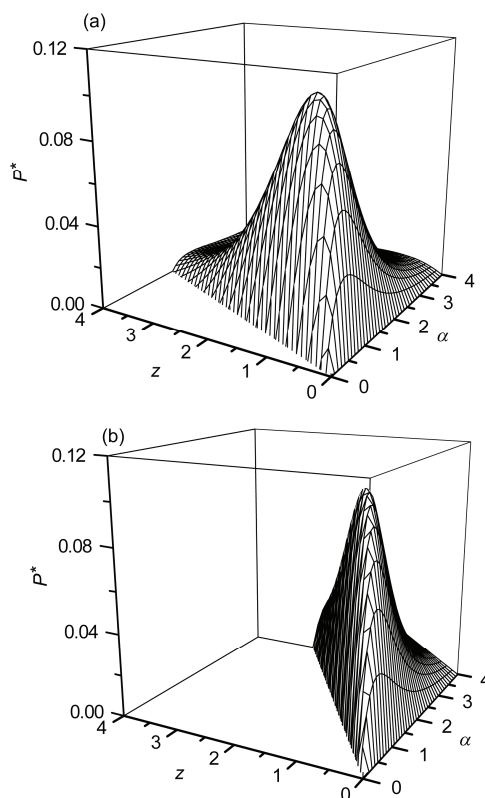


图2 冷热棘轮无因次输出功率的对比^[152]

(a) 冷棘轮无因次输出功率 P^* 关于内部参数 α 和外部参数 z 的三维特性关系; (b) 热棘轮无因次输出功率 P^* 关于内部参数 α 和外部参数 z 的三维特性关系

并分析了设计参数对系统最优性能的影响. Asfaw^[155]详细分析了考虑粒子动能引起热流时分别在有、无外力情况下锯齿势场的分割对热驱动布朗热机最优性能的影响. Zhang 等人^[156]研究了由在一维栅格中跳动的布朗粒子组成的热驱动布朗微热机的功率与效率最优性能, 并讨论了动能引起的热流及其他设计参数对热机性能的影响. 在文献[133,155]的基础上, Asfaw^[157]分析了热源温度特性变化对布朗马达的效率以及作为制冷机运行时制冷系数特性的影响, 研究发现热源温度线性变化时布朗马达的性能要优于分段恒定热源温度的马达. 在文献[158]中, Asfaw 进一步研究了时间因素对考虑粒子动能引起热流的布朗马达性能的影响, 依据运行时间确定了马达的热机、制冷机和不做功三种不同运行模式.

一些学者综合考虑各种不可逆因素, 建立了更为完备的布朗马达模型. Gao 等人^[136]和 Gao 和 Chen^[159]建立了同时考虑动能变化引起热流和热漏的热驱动布朗热机模型, 并应用非平衡热力学理论研究了系统的效率特性. Ding 等人^[61]基于同时考虑布朗粒子动能和势能变化引起热流的热驱动布朗热机模型, 导出了功率和效率关于各主要运行参数的表达式, 研究了热机功率和效率最优性能, 采用数值计算方法详细分析了外力、势垒高度、势场不对称度以及热源温比等运行参数对热机性能的影响, 通过分析热机的稳态流特性, 确定了外力和势垒高度的有效区间. 程海涛等人^[160]研究了周期性双势垒锯齿势中, 布朗粒子在外力作用下沿空间坐标方向交替地和高、低温热库接触构成的布朗热机的热力学性能, 考虑布朗粒子动能的变化以及高、低温库之间热漏的存在, 通过数值计算分析了势垒高度、势比、外力等参数对布朗热机效率的影响. 肖宇玲等人^[161]分析了势垒边界与温库边界的不对称性对不可逆布朗热机功率和效率特性的影响; 研究表明, 势垒边界与温库边界重合时, 热机的功率达到最大值; 通过改变温库边界的位置, 可以在一定范围内提高热机的效率, 但同时减小了热机的输出功率.

3.3 热驱动布朗制冷机最优性能

最近的研究表明, 与宏观的马达系统类似, 布朗马达系统在一定条件下可以作为制冷机工作^[133,162~164], 典型的热驱动布朗制冷机如图 3 所示. 在 Derényi 等人^[134]提出的广义效率定义的基础上, Asfaw 和

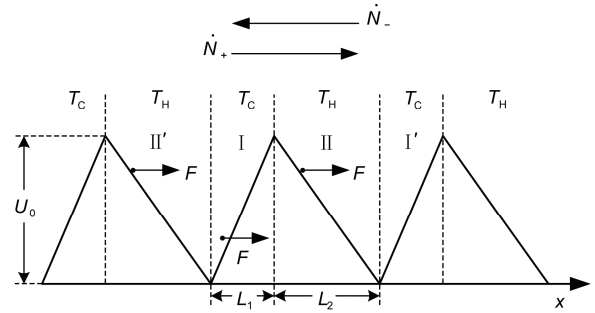


图 3 热驱动布朗制冷机示意图^[137]

Bekele^[137]提出了热驱动布朗制冷机的普适制冷系数的定义并研究了制冷机的性能特性. 在不考虑粒子动能引起的热流时, Asfaw 和 Bekele^[133,137,140]研究了温差驱动的布朗热机和制冷机的效率和制冷系数最优性能. Ai 等人^[143,153]研究了考虑动能引起的热流时热驱动的布朗马达作为制冷机运行时的热流特性和制冷系数最优性能.

布朗粒子动能变化造成的不可逆热流同样会影响制冷机的性能特性. Asfaw^[155]详细分析了考虑粒子动能引起热流时分别在有、无外力情况下锯齿势场的分割对热驱动布朗制冷机最优性能的影响. Lin 和 Chen^[165]研究了空间周期温度场中考虑粒子动能引起热流时布朗微制冷机的制冷率与制冷系数最优性能, 并分析了设计参数对系统性能的影响. Zhang 等人^[166]研究了由在一维栅格中跳动的布朗粒子组成的热驱动布朗微制冷机的制冷率与制冷系数最优性能, 并讨论了动能引起的热流及其他设计参数的影响. Chen 等人^[167]建立了考虑热源之间热漏以及布朗粒子动能变化和势能变化引起热流的广义不可逆热驱动布朗制冷机模型(其热力学示意图如图 4 所示), 导出了布朗制冷机的制冷率、制冷系数和输入功率等重要性能参数, 应用有限时间热力学理论研究了系统的制冷率与制冷系数最优性能, 通过数值计算详细分析了热漏、外力、势垒高度、势场不对称度及热源温比对布朗制冷机性能的影响, 得到了布朗马达系统能作为一个制冷机运行时外力和势垒高度的有效区域.

除了制冷率和制冷系数等之外, 一些新的优化目标也应用到了布朗制冷机的研究之中. 文献[168]将制冷率和制冷系数的乘积作为优化目标, 分别讨论了内可逆和不可逆布朗制冷机在该目标最优时的制冷率和制冷系数特性. 研究发现, 内可逆制冷机在

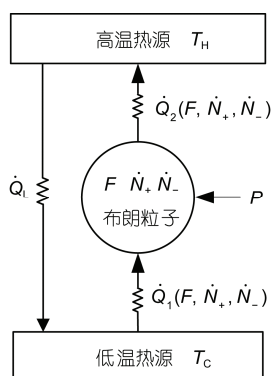


图4 广义不可逆热驱动布朗制冷机的热力学示意图^[167]

该目标最优时的制冷系数要大于 CA 制冷系数。而考虑粒子动能变化引起的热流时, 优化后的制冷系数要小于 CA 制冷系数, 当布朗粒子从低温源运动到高温源时, 外力对其做负功。

线性不可逆过程热力学 (linear irreversible thermodynamics, LIT) 理论是研究热扩散、热电和热磁等耦合效应的有效工具^[169,170], 它在物理、化学、生物、医学等领域的非平衡结构及不可逆过程中得到了广泛的应用。线性不可逆热力学理论很长时间内一直局限于等温能量转换系统性能的研究。2005 年, 比利时学者 Van den Broeck^[171]开创性地将 LIT 理论用于非等温的常规多级热机系统的研究。此后, 由于其在揭示能量系统性能特性上的特殊意义, LIT 理论在常规热机系统中的应用获得较快发展^[172~175], 并且拓展到了布朗马达等微型能量转换系统的研究之中。Van den Broeck 和 Kawai^[162]最早用 LIT 理论研究了一个布朗微制冷机解析模型的热流特性并将所得的结果与分子动力学模拟的结果进行了比较。随后, Gomez-Marín 和 Sancho^[176]研究了热驱动布朗热机的紧密耦合特性, 他们计算了马达的 Onsager 系数并导出了满足 Onsager 倒易关系和 Onsager 矩阵行列式为零值时需要的条件。文献^[162,176]的模型都是简单的布朗马达模型, 没有考虑布朗粒子动能变化引起热流和热漏等不可逆损失因素的影响。Gao 等人^[136]进一步计算了一个考虑热漏和布朗粒子动能变化引起热流的热驱动布朗热机的 Onsager 系数和广义效率, 并讨论了主要参数对系统性能的影响。Gao 和 Chen^[159]随后导出了一个广义不可逆热驱动布朗马达的 Onsager 系数和最大功率效率的表达式。Izumida 和 Okuda^[177]分析了在线性响应模式下布朗卡诺循环

的热力学流和力, 计算了在布朗粒子的限制势场发生改变时系统的 Onsager 倒易系数。Ding 等人^[178]基于广义不可逆热驱动布朗制冷机模型, 应用 LIT 理论导出了制冷机的 Onsager 系数、最大制冷系数及最大制冷率时制冷系数的解析表达式, 比较了系统的线性不可逆热力学性能与有限时间热力学性能, 分析了两者的内在联系与差异。

3.4 热驱动布朗热泵最优性能

类似于常规的宏观制冷机, 热驱动布朗制冷机在消耗系统输入功的同时从低温热源向高温热源泵送热量。因此, 从某种意义上讲, 布朗制冷机本身也是一个热泵^[138,142]。在布朗热泵系统中, 也存在热漏和粒子动能变化造成的热流这两种不可逆的热流。目前关于布朗马达热力学性能的研究主要集中于研究系统作为热机和制冷机运行时的性能特性, 包括内可逆(不考虑热漏或动能变化引起热流损失)热驱动布朗热机^[133,137,140]和制冷机^[133,137,140]、不可逆(考虑热漏或动能变化引起热流损失)热驱动布朗热机^[59,60,143,144,152~154]和制冷机^[61,143,153,155,165]、广义不可逆(同时考虑热漏和动能变化引起热流损失)热驱动布朗热机^[136,159,160]和制冷机^[167]。研究热驱动布朗热泵的最优性能和参数对于全面了解布朗马达系统的热力学性能具有重要意义。丁泽民等人^[138,142]基于同时考虑布朗粒子动能和势能变化引起热流的不可逆热驱动布朗热泵模型^[138]以及考虑热源之间热漏以及布朗粒子动能变化和势能变化引起热流的广义不可逆热驱动布朗热泵模型^[142], 导出了布朗热泵的供热率、供热系数和输入功率等性能参数, 应用有限时间热力学理论研究了系统的供热率与供热系数最优性能, 通过数值计算详细分析了设计参数对广义不可逆布朗热泵性能的影响, 导出了布朗马达系统能作为热泵运行时外力和势垒高度的有效区域。

3.5 热驱动布朗马达性能优化的研究展望

本节综述了热驱动布朗马达分别作为热机、制冷机和热泵运行时最优性能的相关研究进展。表 1 进一步从模型种类、运行方式、优化目标函数、研究内容等方面对布朗马达性能优化相关研究进行了分类。由表 1 可以看出, 基于不可逆因素的种类, 相关研究工作中所建立的热力学分析和优化模型逐步完善, 包括内可逆、不可逆和广义不可逆模型; 同时, 在优

表 1 热驱动布朗马达系统性能优化的研究概况

系统类型	运行方式	不可逆因素	优化目标函数	性能优化的研究内容	代表性文献
Feynman 棘轮	热机	内可逆	功率、效率、EMP	明确内可逆 Feynman 棘轮系统的功率效率特性和运行特点	[108~117]
		不可逆	功率、效率、EMP	分析功率与效率最优性能以及 EMP 特性; 明确不可逆热漏损失、棘轮设计参数对系统最优性能的影响特点	[59,60,109,152]
热驱动 布朗马 达系统	布朗 热机	内可逆	功率、效率、LIT 特性	定义了微型能量系统广义效率	[133,137,140,176]
		不可逆	功率、效率	明确了动能变化引起的不可逆热流的影响; 分析功率与效率的最优性能; 得到设计参数的影响特点	[144,154~158]
		广义不可逆	功率、效率、EMP、LIT 特性	明确了热漏以及动能变化引起的不可逆热流的影响; 分析功率与效率的最优性能及; 得到设计参数的影响特点	[61,136,159~161,177]
	布朗 制冷机	内可逆	制冷率、制冷系数、LIT 特性	提出热驱动布朗制冷机的普适制冷系数的定义; 分析内可逆系统的 LIT 特性	[133,137,140,162]
		不可逆	制冷率、制冷系数、品质因素	明确了动能变化引起的不可逆热流的影响; 得到制冷率与制冷系数的最优性能	[143,153,155,165,166,168]
		广义不可逆	制冷率、制冷系数、LIT 特性	明确了热漏以及动能变化引起的不可逆热流的影响; 得到制冷率与制冷系数的最优性能; 分析了系统的 LIT 特性	[167,178]
	布朗 热泵	不可逆	供热率、供热系数	分析布朗马达供热率与供热系数的最优性能; 得到不可逆因素和结构参数对系统性能的影响特点	[138]
		广义不可逆	供热率、供热系数		[142]

化目标方面,除了常规的功率、效率等基本输出率和性能系数外,最大功率时的效率(EMP)特性和品质因素等优化目标也应用到了系统的研究之中.研究模型的细化和优化目标的完善为优化工作的开展和揭示布朗马达系统的运行机理和性能特性奠定了基础.采用更为细致的描述方法、建立更为完善的模型和有效的优化目标,同时探讨布朗马达与其他微型能量系统性能的统一描述问题,将是今后优化工作的一个重点方向之一.

稳定特性是表征热力系统自身性能特性的重要指标.关于宏观热机系统的有限时间热力学研究^[179,180]以及肌肉伸张反射过程的研究^[181]表明,系统的稳定特性和热力学性能(如功率、效率等)都依赖于相同的参数,系统的热力学最优性能和稳定性能之间存在一个折衷点,热力系统的设计在考虑最优性能的同时还必须兼顾其稳定性能.生物体细胞内存在许多酶参与的生化反应和分子运动过程,研究表明,这些过程可以用类似于布朗马达的系统来进行分析和模拟^[182,183].因此,研究布朗马达动态稳定性能,得到系统稳定性能最优和热力学性能最优时的参数特性及差异,对于了解细胞内的能量转换过程以及生物体如何适应一个不断改变的环境具有重要意义,相关研究也将是布朗马达性能优化的一个

热点方向.

需要指出的是,当前综述的关于布朗热机、制冷机和热泵最优性能相关研究所考虑都是布朗离子在过阻尼情况下布朗马达的性能特性.过阻尼的布朗马达模型具有模型简单、易得到解析结果等优点,但是分析过程中没有考虑布朗粒子质量引起的惯性的影响.如果考虑布朗粒子惯性的影响,则需分析欠阻尼情况下粒子的运动情况,但是此时系统中粒子运动过程的描述将变得非常复杂无法得到解析结果.当前,已有一些文献研究了考虑惯性影响的欠阻尼布朗马达的运动特性和热流特性^[184~189].在过阻尼布朗马达性能优化的基础上,进一步对欠阻尼布朗马达系统的热力学性能进行分析和优化,研究的难点在于系统内粒子运动过程的精确数学描述和求解,相关工作对于揭示分子马达的运动特性和能量转换的本质特征具有重要意义.

4 能量选择性电子机系统性能优化的研究进展

4.1 能量选择性电子机简介

在一定条件下,电子系统可以作为一个热机或

制冷机工作, 典型的装置包括常温运行(约 300 K)的热电发电机和制冷机^[190~192]、热离子发电机和制冷机^[16,17,193]以及低温(低于 1 K)运行的量子点制冷机^[194,195]和正常-绝缘-超导结制冷机(normal-insulating-superconductor junction, NIS)^[196~198]等固态能量转换装置. 随着半导体制备技术和纳米技术的发展, 人们研制了各种新的半导体材料并制造了各种各样新颖的半导体异质结, 如量子阱、量子点、量子锯齿和势垒以及纳米线结构等. 新材料和新结构的应用使装置的性能得到显著提升. 从能量转换的本质来看, 半导体能量转换装置有一个共同特征, 即装置中的热量传递都是由电子的输运过程引起的. 基于电子传输过程会伴随热量的传递这一特性, 人们还提出了多种以电子作为工质的新型微电子机模型^[199~205], 并且目前已有成功制造实际微电子制冷器的相关报道^[206~208].

2002 年, Humphrey 等人^[12]在一系列关于量子棘轮的实验^[209~212]和理论研究工作^[213~215]基础上提出了一种新颖的基于电子系统的量子布朗热机系统模型, 随后, Humphrey^[13]在其博士论文中将这种电子装置称为能量选择性电子(energy selective electron, ESE)热机. ESE 热机由 2 个无限大且温度和费米能量都不相同的电子源和 1 个“能量过滤器”构成, 如图 5 所示. ESE 热机系统利用两电子源之间的温差来驱动电子穿越一个电势场. 电子通过“能量过滤器”在两电子源之间传输, 该“能量过滤器”只允许某一特定能量范围内的电子自由通过, 同时阻止其他能量范围内的电子. 这样的能量过滤器可以通过量子点^[12,194]

或超晶格结构^[216,217]中电子的谐振隧穿效应来实现.

Humphrey 等人^[12]的研究表明, 如果穿过能量过滤器的电子的能量调节到 $E_0 = (T_H \mu_C - T_C \mu_H) / (T_H - T_C)$ (μ_H , μ_C 为高低温电子源的化学势, T_H , T_C 为高低温电子源的温度), ESE 热机的效率可以达到卡诺效率值. 在此特殊的能量点 E_0 处, 两电子源电子的费米分布相等, 此时两电子源尽管有不同的温度和化学势, 但是他们仍然保持一个准静态平衡, 两源之间的电子交换过程是可逆的, 系统的熵产为 0. 在特殊的能量点, 系统可以达到卡诺效率, 这是能量选择性电子机系统的独特性能, 正因为这一特性, ESE 系统的研究引起了一些学者的极大兴趣. 研究表明^[13], 如果能量过滤器存在有限的宽度, 此时电子的传输过程和相应的热量的传递是不可逆的, 系统的熵产不为零, ESE 热机达不到可逆运行状态. 这种只考虑能量过滤器内部热量传递不可逆性的 ESE 热机可称为内可逆 ESE 热机, 它与只考虑系统与热源之间有限速率传热不可逆性的宏观内可逆热机^[145~149]相类似.

Humphrey^[13]进一步的研究表明, 在不同的情况下, ESE 系统会表现出不同的特性. 对于传输电子的能量 E , 如果 $E > E_0$, 系统中的电子会自发从高温电子源向低温电子源运动, 此时 ESE 系统会作为一个热机工作; 如果 $\mu_C < E < E_0$, 电子会自发从低温电子源向高温电子源运动, 此时 ESE 系统作为一个制冷机工作; 如果 $E < \mu_C$, 电子传输到高温电子源时并不会从低温电子源带走能量. 在特殊能量点 E_0 处, ESE 热机、制冷机和热泵可以达到可逆运行状态, 这也称为能量选择性电子机系统的可逆运行模式. 研究表明^[13], 除可逆运行模式之外, ESE 系统还存在另外两种工作模式, 即最大输出功率(制冷率或供热率)模式和中间模式.

ESE 系统的运行模式和性能特性与过滤器中电子的透射概率函数的类型有密切联系. Humphrey^[13]的研究中采用了一个方形透射概率函数来描述电子在过滤器中的传输特性. 方形透射概率函数的特性是在一定的能量范围内(过滤器的能量宽度 ΔE), 电子通过过滤器传输的概率为 1, 而在其他范围, 透射概率为零. 在方形透射概率下, ESE 系统存在最大输出功率(制冷率或供热率)模式和中间模式这两种不同的运行方式. 实际上, 如果考虑方形透射概率函

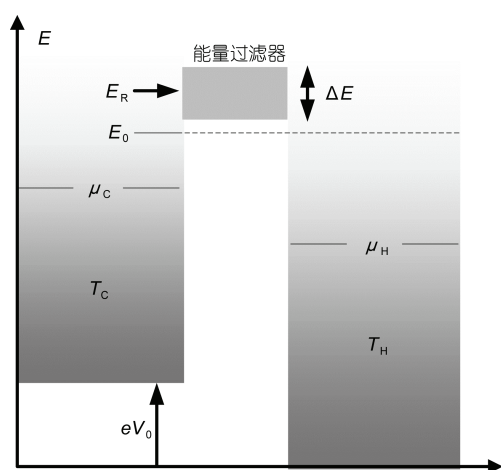


图 5 内可逆 ESE 热机示意图^[13]

数以外的其他透射概率函数, 系统在可逆运行模式之外仅存在一种普通的运行模式^[14,218].

研究 ESE 系统的特性对实际电子机系统性能提升具有重要的指导意义. 热电和热离子装置是典型的实际能量选择性电子机系统, 其中能量垒可作为能量过滤器来选择性地使高能级的电子在两电子源之间传输. 对热离子系统而言, 能量垒可以是真空装置中发射极的功函数, 也可以是固态热离子装置中能带间隙较宽的半导体材料. 文献[13,219]对 ESE 系统的研究发现, 在两电子源之间传输的电子的能量谱对热离子装置的性能有重要影响, 通过优化传输电子的能量谱, 热离子系统的性能可大幅提升. 目前, 关于 ESE 系统的研究结果已经应用到纳米材料热电装置^[220~223]、半导体固态热电和热离子装置^[224~226]、真空热离子制冷器^[19,227]以及热载流子光电池^[228]等系统的研究之中.

4.2 单谐振 ESE 装置最优性能

在能量系统的研究中, 其热力学性能一直是人们研究的重点之一. 目前已经有学者将 FTT 理论应用到能量选择性电子机系统的研究之中, 并得到了许多新的结论. Humphrey^[13]分析了 ESE 热机在最大功率模式和中间模式时功率和效率的最优性能以及 ESE 制冷机在最大制冷率模式和中间模式时制冷率和制冷系数的最优特性. 王小敏等人^[229]研究了球坐标下电子源的化学势和温度等参数对 ESE 热机和制冷机的效率和制冷系数最优性能的影响. Su 等人^[230]建立了一个考虑外加变化负载电阻的 ESE 热机模型, 分析了系统的功率与效率最优性能和相应的参数范围. Luo 等人^[231]研究了内可逆单通道 ESE 热机 EMP 特性, 通过数值计算得到了 EMP 的变化规律和上下取值界限.

除了功率和效率目标以外, 以不同目标分析和优化热力循环性能, 是短时间热力学领域一项十分活跃的研究工作. 生态学函数这一优化目标自提出以来在常规宏观热力系统的研究中已取得了长足的发展(包括传统工质的热机^[232~234]、制冷机^[235,236]和热泵^[237,238]循环以及量子工质的热机^[239~241]、制冷机^[242,243]和热泵^[244,245]循环). 生态学目标同样可用来优化能量选择性电子机系统的性能特性. Ding 等人^[68]系统分析了单谐振的 ESE 热机在最大功率模式和中间模式下的生态学最优性能, 并将所得的结果

与功率效率特性进行了比较. 生态学目标函数不仅反映了火用输出率和熵产率之间的最佳折衷, 而且反映了输出功率与热效率、制冷率与制冷系数、供热率与供热系数之间的最佳折衷, 它为能量系统工作参数的选择提供了一个准则, 提供了一个考虑长期目标的具有生态学优化意义的最优折衷备选方案. 系统地研究能量选择性电子机系统的生态学性能对实际能量选择性电子机系统的设计具有重要意义. Li 等人^[246]将常规制冷机的品质因素(figure of merit) 指标引入到内可逆 ESE 制冷机的性能优化之中, 研究了品质因素最佳时 ESE 制冷机的制冷率和制冷系数特性, 并讨论了能量宽度对制冷机性能的影响.

热漏损失是有限时间热力学理论中考虑的一个重要的不可逆因素. 与常规宏观能量转换系统中的热漏损失^[150,151]类似, 在能量选择性电子机系统中, 两电子源之间也存在由声子的传播造成的热漏损失. He 等人^[66]研究了考虑热漏的 ESE 制冷机在中间模式运行时制冷率和制冷系数最优性能, 并讨论了热漏对 ESE 制冷机最优性能的影响. Ding 等人^[247~249]建立了考虑热漏的不可逆 ESE 热机^[247]、制冷机^[248]和热泵^[249]模型, 详细分析了在最大功率(制冷率或供热率)模式和中间模式下系统的功率与效率(制冷率与制冷系数或供热率与供热系数)最优性能及热漏和设计参数对系统最优性能的影响.

以上关于 ESE 系统的研究^[13,66,68,229,230,247~249]中考虑的是方形透射概率函数, 一些学者进一步研究了同时考虑热漏和其他类型透射概率函数时系统的性能特性. Humphrey 等人^[12]在电子热机和制冷机模型中应用了一个单 Lorentz 型的谐振通道, 并采用了能更为真实地反映实际电子机系统电子传输过程的 Lorentz 型透射函数来研究能量过滤器中的电子传输过程. 何济洲和贺兵香^[250]研究了考虑 Lorentz 型透射概率和辐射热漏时 ESE 热泵的供热率和供热系数最优性能, 分析了热漏、共振中心能级位置和能级宽度等参数对系统性能的影响. Wang 等人^[67]研究了考虑 Lorentz 型透射概率和辐射热漏时 ESE 制冷机在制冷率最大时的性能特性, 通过数值计算得到了系统的制冷率、制冷系数等性能参数值. Ding 等人^[218]建立了考虑 Lorentz 型透射概率和线性热漏的不可逆能量选择性电子机模型(图 6), 研究了系统分别作为 ESE 热机和制冷机工作时的功率与效率、制冷率与制冷系数最优性能, 通过数值计算分析了热漏、中心能量位

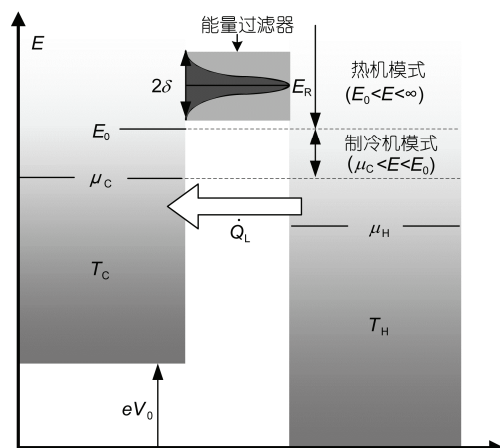


图6 考虑热漏和透射概率的不可逆能量选择性电子机模型^[218]

置和能量宽度对电子机最优性能的影响,并进一步将考虑 Lorentz 型透射概率的电子机性能与考虑方形透射概率的电子机性能进行了比较,明确了热漏和透射概率函数对电子机系统性能的影响特点。

4.3 双谐振 ESE 装置最优性能

在早期关于能量选择性电子机系统的研究中,两个电子源之间都由一个单通道的能量过滤器连接^[12,13,66~68,218,229,230,247~250]。在 ESE 系统的实际应用中,两电子源之间往往会由多个能量过滤器连接,双势垒纳米线、双通道量子棘轮、双势垒和多势垒的固态热离子制冷器等都是典型的实际多势垒电子机系统。双谐振通道,即双通道的能量过滤器在理论上也可用于能量选择性电子机模型中。考虑双势垒结构以后,系统的性能会有较大的变化。

最近, Wang 等人^[251]提出了一种包含双谐振通道能量过滤器的 ESE 制冷机模型并分析了系统的制冷率与制冷系数最优性能。由于双谐振的 ESE 系统在结构上更接近双势垒电子机系统,因此其性能研究对实际能量选择性电子机的设计和运行具有重要意义。Ding 等人^[252]建立了考虑双谐振通道能量过滤器的 ESE 热机模型,研究了系统的功率与效率最优性能,分析了能量宽度、能量间距等设计参数对系统最优性能的影响。Ding 等人^[253]建立了考虑双谐振通道能量过滤器的 ESE 热泵模型,研究了系统的供热率与供热系数最优性能,分析了能量宽度、能量间距等设计参数对系统最优性能的影响。在考虑电子源间

热漏的基础上,丁泽民等人^[252,254,255]建立了不可逆双谐振通道 ESE 热泵^[252]、热机^[254]和制冷机^[255]模型,联合统计力学和有限时间热力学理论,对热机系统的生态学性能及制冷机和热泵的基本输出率和性能系数特性进行了分析和优化,得到了功率、效率、生态学函数、制冷率、制冷系数和供热系数等特性参数的最优区间和相互关系;获得了热漏、中心能量位置等设计参数对系统最优性能的影响特点。

4.4 总动量过滤的 ESE 装置最优性能

在研究实际电子装置性能时, O'Dwyer 等人^[224]和 Humphrey 等人^[225]着重比较了两类电子传输方式不同的热离子装置的性能,并发现了一些新的结论。其中一类装置中,电子在两源之间的传递由电子运动方向的动量大小所决定,这种装置被称为“ k_x 过滤(按照运动方向动量过滤)”装置;另外一类装置中,电子的传递由电子各个方向的总动量大小所决定,这种装置被称为“ k_r 过滤(按照总动量过滤)”装置,如图 7 所示。他们的研究表明,如果采用依据电子的总动量来实现电子选择性通过的能量垒,热离子装置的功率在理论上可以增大一倍;总动量过滤热离子装置的效率可达到卡诺效率,而传统装置的效率远低于这个值。热离子系统中的电子传递过程与 ESE 系统完全相似,因此,依据电子的总动量进行过滤的这种电子传输机制理论上也可应用到能量选择性电子机系统中,且系统的性能预期会有很大提升。

对于单谐振通道的 ESE 系统,王小敏等人^[229]研究了总动量过滤模式下能量选择性电子机分别作为热机和制冷机运行时的性能特性,分析了电子源的化学势和温度对系统性能的影响。Chen 等人^[14]建立

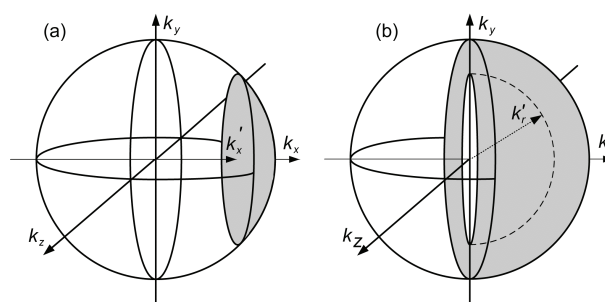


图7 动量空间中 k_x 过滤和 k_r 过滤装置电子传输的示意图^[225]

(a) k_x 过滤装置; (b) k_r 过滤装置

了一个考虑线性热漏的总动量过滤的单谐振通道 ESE 热泵模型, 导出了 k_r 过滤和 k_x 过滤热泵供热率和供热系数的一般表达式, 研究了系统的最优性能, 得到了 k_r 过滤热泵供热系数和供热率的最优区间, 比较了 k_r 过滤热泵和 k_x 过滤热泵的性能差异, 讨论了热漏、能量宽度、高温电子源温度和化学势对 k_r 过滤热泵性能的影响. Luo 等人^[256]进一步建立了包含二维电子源的热电子机模型, 讨论了系统在 k_x , k_y 和 k_r 三种不同过滤模式下分别作为热机和制冷机运行时的性能特性, 结果表明 k_r 过滤模式下系统的性能优于 k_x 和 k_y 模式下的性能.

对于双谐振通道的 ESE 系统, Luo 和 He^[257]对一个总动量过滤的双谐振通道热电子制冷机的制冷率和制冷系数性能进行了优化, 并将总动量过滤模式时的优化结果与常规过滤模式时的结果进行了比较. Ding 等人^[252,258]建立了按照电子总动量过滤的双谐振通道 ESE 热泵^[252]和热机^[258]模型, 分析了系统的供热率与供热系数及功率与效率最优性能, 讨论了主要的设计参数对系统最优性能的影响, 对比分析了双谐振通道与单谐振通道以及总动量过滤模式与常规过滤模式时装置的性能特性. 结果表明, 总动量过滤装置的性能要优于常规过滤装置, 如图 8 所示; 双谐振通道装置的功率(或供热率)要优于单谐振通道装置如图 9 所示, 但其效率(供热系数)要低于单谐振通道装置.

4.5 电子机系统性能优化的研究展望

本节综述了能量选择性电子机系统最优性能优

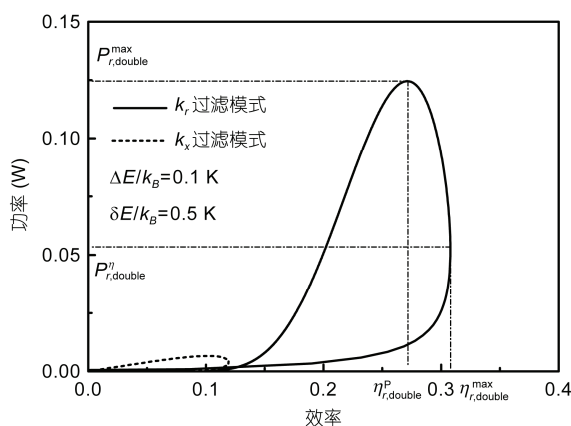


图 8 k_r 过滤和 k_x 过滤双谐振 ESE 热机功率与效率特性的对比^[258]

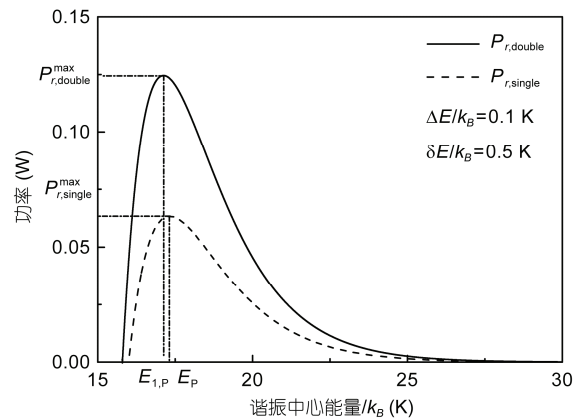


图 9 k_r 过滤的单谐振和双谐振 ESE 热机功率特性的比较^[258]

化的相关工作. 表 2 进一步从模型种类、通道结构、运行方式、过滤模式、优化目标函数、研究内容等方面对能量选择性电子机性能优化相关研究工作进行了分类. 由表 2 可以看出, 在考虑了电子机的通道结构、运行方式、过滤模式以及不可逆因素之后, 相关研究中所建立的分析和优化模型不断得到完善; 在通道结构上, 系统主要分为单谐振通道和双谐振通道两类; 从运行方式上看, 系统在不同的条件下可分别作为热机、制冷机或热泵运行; 过滤模式方面主要分为常规过滤(k_x)模式和总动量过滤(k_r)模式两类. 在系统的损失因素方面, 主要考虑的是两电子源之间由于声子传输过程造成的热漏损失. 在后续的研究过程中, 以现有的模型中的传输机制为基础, 探索复杂结构(特别是可实现过滤器功能的实际结构)中电子输运过程和传热模式, 研究新型电子机系统的能量转换特征和热力学最优性能, 将会具有较大的发展潜力, 并取得新的结论.

以不同的目标对电子机的热力学性能进行分析和优化, 能够有效地揭示系统的能量转换机理和性能界限, 相关工作对于实际电子机系统的优化设计和最优运行具有重要意义. 当前的优化工作主要是基于基本输出率和性能系数为目标开展的; 生态学函数这一目标也得到了较为系统的应用. 基于不同的分析模型和优化目标, 现有的研究工作较为系统地分析了能量选择性电子机系统的热力学最优性能, 得到了电子机系统在不同状态下的性能界限; 揭示了通道数量、过滤模式、不可逆因素以及设计参数对系统最优性能的影响特点. 在此基础上, 拓展关于

表 2 能量选择性电子机系统性能优化的研究概况

通道结构	运行方式	过滤模式	不可逆因素	优化目标函数	性能优化的研究内容	代表性文献
单谐振通道	ESE 热机	k_x	内可逆	功率、效率、EMP、生态学函数、功率与效率之积	分析不同工作模式下功率、效率与生态学最优性能以及 EMP 特性; 得到电子机的设计参数对热机系统性能的影响特点;	[12,13,68, 229~231]
			不可逆	功率、效率	分析不可逆系统功率与效率最优性能; 明确热漏、透射概率函数、结构参数对热机系统最优性能和运行模式的影响特点;	[218,247]
		k_r	内可逆	功率、效率	总动量过滤时热机系统的性能特性; 不同过滤模式时热机系统性能的对比;	[224,225, 229,256]
	ESE 制冷机	k_x	内可逆	制冷率、制冷系数、品质因素、生态学函数	分析制冷率、制冷系数最优性能以及品质因素最大时的制冷系数特性; 得到电子机的设计参数对制冷机系统性能的影响特点;	[12,13, 229,246]
			不可逆	制冷率、制冷系数	分析不可逆系统制冷率与制冷系数最优性能; 明确热漏、透射概率函数、结构参数对制冷机系统最优性能和运行模式的影响特点;	[66,67, 218,248]
		k_r	内可逆	制冷率、制冷系数	总动量过滤时系统的性能特性; 不同过滤模式时制冷机系统性能的对比;	[229,256]
	ESE 热泵	k_x	内可逆	供热率、供热系数、生态学函数	分析不同工作模式下供热率与供热系数最优性能; 得到电子机的设计参数对热泵系统性能的影响特点;	[252]
			不可逆	供热率、供热系数	分析不可逆系供热率与供热系数性能; 明确热漏、透射概率函数、结构参数对系统最优性能和运行模式的影响特点;	[249,250]
		k_r	不可逆	供热率、供热系数	总动量过滤时不可逆热泵系统的性能特性; 不同过滤模式时热泵性能的对比;	[14]
双谐振通道	ESE 热机	k_x	内可逆	功率、效率	分析内可逆双谐振系统功率与效率最优性能; 明确能量间距、能量宽度等参数的影响特点;	[252]
			不可逆	功率、效率、生态学函数	单双谐振通道装置性能对比; 明确热漏以及设计参数的影响;	[254]
		k_r	内可逆	功率、效率	总动量过滤时热机系统的最优性能特性; 不同过滤模式及通道数量时热机性能的对比;	[258]
	ESE 制冷机	k_x	内可逆	制冷率、制冷系数	分析双谐振系统制冷率与制冷系数最优性能; 明确能量间距、能量宽度等参数的影响特点;	[251]
			不可逆	制冷率、制冷系数	单双谐振通道装置性能对比; 明确热漏以及设计参数的影响;	[255]
		k_r	内可逆	制冷率、制冷系数	总动量过滤时制冷机系统的最优性能特性; 不同过滤模式及通道数量时制冷机性能的对比;	[257]
	ESE 热泵	k_x	内可逆	供热率、供热系数	分析双谐振系统供热率与供热系数最优性能; 明确能量间距、能量宽度等参数的影响特点;	[253]
			不可逆	供热率、供热系数	单双谐振通道装置性能对比; 明确热漏以及设计参数的影响;	[252]
		k_r	内可逆	供热率、供热系数	总动量过滤时热泵系统的最优性能特性; 不同过滤模式及通道数量时热泵性能的对比;	[252]

纳米线热电子制冷器等实际能量选择性电子机系统性能优化的研究, 将是今后相关工作的新方向. 与此同时, 探讨电子机与宏观及其他微型能量系统最优性能的统一描述问题可能会成为最具挑战性和创新意义的研究内容之一.

5 热离子能量转换装置性能优化的研究进展

5.1 热离子发电和制冷装置简介

5.1.1 热离子发电装置简介

简单的热离子装置由 2 个电极组成, 电极之间通

常是真空的间距或由半导体材料或铯金属阳离子气体隔离开来, 如图 10 所示. 受到热激发的电子可能会从一个电极上发射出来并弹道式(即电子无碰撞)传输到另一电极, 当这些热离子离开材料的表面时, 它们会以动能的形式带走热量, 因此电子传输的过程会产生热量的传递. 如果电流经外接负载从高温电极流向低温电极, 系统作为一个发电机工作. 20 世纪五六十年代, 热离子发电的理论基础趋于成熟^[193,259~264]. 热离子装置的电极之间是真空或者由气体隔开. 实际装置中, 通常采用减小电极间距或者在电极间充注阳离子气体等方法来减小或消除空间电荷的影响.

热离子发电装置的电极通常是具有金属铯涂层的高熔点金属或者附有较高电子发射能力的金属材料. 发射极的工作温度通常为 1400~2200 K, 集电极为 500~1200 K. 独立热离子装置的输出电压较低, 一般为 0.3~1.2 V. 实际热离子系统中通常将独立的热离子装置串联以获得更高的功率密度. 装置的电极需要较高的温度才能够发射出电子, 工作温度较高这一特性使得热离子装置对热源也有特别的要求, 目前可用于热离子装置的热源包括太阳能^[265~267]、放射性同位素的衰变热^[15,268]、核能^[269~271]以及化石燃料的燃烧放热等^[272~274]. 随着制造技术的发展, 科学家们最近提出了性能更加优越的热离子装置, 如纳米间距的真空热离子发电装置^[18,20,275,276]、半导体固态热离子发电装置^[277,278]、热离子能量转换-碱金属热电转换串联装置^[279~281]、联合热离子-热电发电装置^[282]等.

5.1.2 热离子制冷装置简介

热离子装置中电子被发射出去的同时会从电极

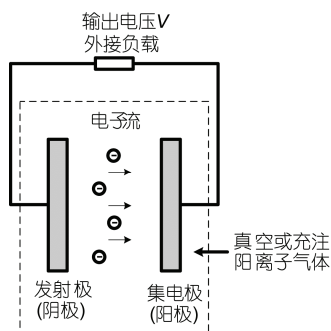


图 10 简单的热离子能量转换装置示意图

上吸收热量, 这意味着它们会冷却其相应的电极, 这即是用热离子发射来实现制冷的理论基础. 美国学者 Mahan^[16]于 1994 年首次提出了基于热离子发射的真空热离子制冷理论. Mahan^[16]指出, 由于受空间电荷的影响以及缺乏功函数足够小(低于 0.34 V)的电极材料, 真空热离子制冷机很难应用于常温制冷. 为了克服真空热离子制冷机不能够应用于常温的限制性, Shakouri 和 Bowers^[17]于 1997 年提出了在热离子装置中用半导体异质结势垒代替金属间势函数差的半导体热离子制冷新方法, 这使得热离子制冷方案更加具有可行性. 此类装置中, 两电极之间填充半导体材料, 空间电荷的影响可以得到较大抑制, 而且通过两种不同材料传导带的偏移和受控掺杂, 可使金属-半导体界面的功函数大为降低, 因此装置的性能能够得到很大提升.

近年来, 随着加工工艺、纳米技术和半导体材料学的发展, 热离子制冷器的性能及其室温应用都取得了突破^[283]. 目前, 关于热离子制冷器的研究主要集中于真空和半导体固态这两类装置. 最具代表性和应用前景的装置包括真空热离子制冷器^[18,19,276,284~287]、半导体固态热离子制冷器^[17,226,277,288~297]、超晶格热离子制冷器^[217,398~307]、光辐射-热离子制冷器^[308~313]、联合热离子-热电制冷器^[314]等. 与此同时, 国内外学者将热力学优化理论应用于热离子装置的研究之中, 也取得了较大的进展, 所得结果为实际热离子发电和制冷装置的优化设计和运行管理提供了重要的理论参考和指导.

5.2 热离子发电和制冷装置最优性能

传统的关于真空和固态热离子发电^[259,261,263,281,282,315~318]和制冷^[226,286,290~294,314,319]装置性能的相关研究都是基于经典的热力学理论, 这其中没有考虑装置本身与外部热源之间的传热过程. 在这些分析中, 通常都假定电极与热源处于理想接触状态并且温度保持恒定不变. 实际上, 热离子装置的外部 and 内部同时存在着热量的传递. 其中, 热离子装置的电极与外部热源之间的传热是系统中必不可少的一个环节. 装置与外部传热源的传热总是不可逆的. 研究表明^[320], 热离子装置与高低温热源之间的接触热阻会对其性能产生很大影响. 因此, 在综合考虑传热过程影响的情况下对热离子系统进行性能分析和优化, 所得结果对于实际装置的优化设计和

性能提升更具有指导意义. 有限速率传热不可逆性是有限时间热力学所考虑的最重要的因素之一. 目前, 关于热离子装置的有限时间热力学性能研究正处于蓬勃发展的阶段.

5.2.1 热离子发电装置性能优化

对于热离子发电装置, 由于其较高的工作温度, 工作电极与热源之间的有限速率传热过程不可避免. Wu^[75]最早研究了一个考虑外部传热的太阳能驱动热离子发电装置的有限时间热力学性能, 并分析了装置在最大输出功率状态时的性能特性. Erbay 和 Yavuz^[76]研究了考虑外部传热的真空热离子发电装置的输出功率与效率性能特性, 并分析了最大功率状态下装置的设计参数. 文献[75,76]的研究都假定热离子发电机的内部是可逆的, 因而装置的热离子部分被看作是一个内可逆的热机. Bhattacharyya^[321,322]在给定的热源和电极材料的情况下, 以最大输出功率为目标优化了考虑外部传热的热离子发电装置电极的工作温度. 但是, 文献[321,322]的研究中仅以一个不可逆系数取代了装置内部的全部不可逆性. 实际上, 热离子装置内部的电子发射和随之产生的热效应是不可逆的, 这些过程有其独特的性能, 不能简单地以内可逆的卡诺热机来做近似或仅以一个不可逆的参数代替内部的不可逆性.

鉴于此, 丁泽民等人^[323]建立了一种考虑外部有限速率传热的不可逆真空热离子发电机模型, 通过数值计算详细分析了该热离子装置的功率与效率最优性能, 讨论了有限速率传热及高温热源温度和功函数等参数对系统最优性能的影响. 结果发现, 由于存在有限速率传热的不可逆性, 两电极的工作温度不再与热源温度相等, 且发电机的输出功率、效率

及电极间的发射电流密度都会降低. Wang 等人^[79]建立了一个外部和内部均存在传热不可逆损失的真空热离子发电模型(图 11), 由阴极和阳极的能量平衡方程确定极板的工作温度, 导出了发电机输出功率和效率的一般表达式; 在不同的工作条件下, 对输出功率和效率进行了优化, 并讨论了极板功函数和输出电压对系统性能的影响, 获得了系统的主要参数的优化选择判据.

5.2.2 热离子制冷装置性能优化

由于没有考虑传热损失, 文献[226,286,290~294,314,319]中考虑的热离子制冷装置模型可视为内可逆模型. 对于热离子制冷装置, 不管是高温应用还是室温或常温应用的制冷器件, 装置内外部的不可逆传热过程对系统性能的影响非常明显. 对于真空热离子制冷装置, 潘玉灼和林比宏^[77]最早考虑了制冷器与外部热源之间的有限速率传热过程的不可逆性, 建立了考虑外部传热的不可逆真空热离子制冷器模型, 并分析了系统的制冷率和制冷系数特性. Chen 等人^[78]建立了一种考虑外部传热的真空热离子制冷器模型, 联合有限时间热力学和非平衡热力学理论, 分析了系统的制冷率与制冷系数最优性能, 研究表明不可逆制冷器的制冷率与制冷系数特性关系呈回原点扭叶型, 制冷率和制冷系数存在最优的运行区间; 由于有限速率传热的不可逆性, 真空制冷器的发射电流密度、制冷率和制冷系数都低于不考虑传热损失时的相应值, 且热离子电极温差比不考虑外部传热时的温差要高. 所得结果对于实际装置的优化设计和性能提升更具有指导意义.

固态热离子装置方面, Lough^[297]对内可逆的单层半导体固态热离子制冷器进行了建模, 并详细分析了装置的制冷率和制冷系数特性. Ding 等人^[324]在此基础上建立了考虑外部传热的单层半导体固态热离子制冷器模型(图 12), 联合有限时间热力学和非平衡热力学理论, 导出了系统的制冷率和制冷系数等性能参数, 分析了系统的最优性能, 得到了制冷率和制冷系数的最优区间, 详细讨论了外部传热和设计参数对装置性能的影响; 在总换热面积一定的条件下, 优化了高、低温侧换热器的面积分配以获得最佳的制冷率和制冷系数特性. 在文献[324]的基础上, 丁泽民等人^[325]进一步考虑内部和外部的不可逆性, 对单层固态热离子制冷器的性能进行了分析和优化, 分

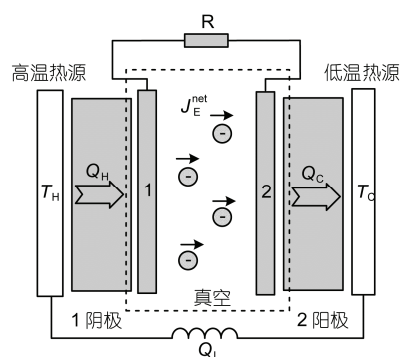


图 11 不可逆真空热离子发电器的示意图^[79]

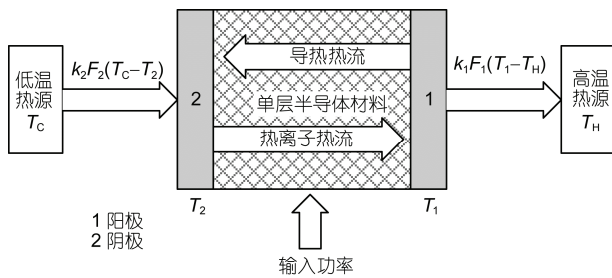


图 12 考虑外部传热的单层固态热离子制冷器热力学模型^[324]

析了不可逆性和设计参数对系统性能的影响, 结果表明, 由于存在内部和外部的不可逆性, 热离子装置的发射电流密度及制冷系数都会明显降低; 不可逆半导体固态热离子制冷器的制冷率与制冷系数特性呈扭叶型; 合理地选取外加电压、势垒等参数, 可以使制冷器设计于最大制冷率或最大制冷系数的状态. 实际的固态热离子装置一般设计为多层势垒的结构以减小内部导热和空间电荷的影响^[277,278,289,301,326]. 在多层固态装置中, 不可逆传热过程的影响同样存在. 因此, 热离子装置性能进行分析和优化相关的研究可以扩展至多层固态热离子系统, 所做工作对于实际固态制冷装置的设计和运行具有重要意义.

5.2.3 热离子联合能量转换装置性能优化

与热离子装置相似, 热电装置也可以作为热机或制冷机运行^[191,327-330]. 本质上, 热离子装置和热电装置中热量的传递都是由电子的传输引起的. 电子在热离子装置中是弹道式传输而在热电装置中是扩散式传输. 考虑到两类装置的相似性, 一些学者对比了热离子和热电装置性的异同^[319,331], 并尝试将热离子装置和热电装置结合起来构成一种联合能量转换装置. 在文献[319]所研究的无源导体真空热离子制冷装置的基础上, Xuan^[314]最早提出了一种新型的联合热离子-热电制冷装置模型, 在联合制冷装置中, 一个 P 型的热电单元取代了金属无源导体, 由于半导体热电单元的 Peltier 效应, 系统可以获得额外的制冷效果. 研究发现, 联合装置的性能优于单独的热离子或热电制冷装置的性能.

热离子发电装置的电极需要较高的温度才能产生有效的电子流, 其装置的工作温度通常都比较高, 阳极的温度一般为 500~1200 K. 在正常工作的情况下, 热离子阳极释放的热量非常可观, 但这些热量通

常直接释放到与之连接的低温热源而浪费掉了. 与热离子装置不同, 实际半导体温差热电能量转换装置的工作温度要低得多. 基于这两种装置的特性, Xuan 和 Li^[282]提出了一种联合热离子-热电发电装置模型, 在联合发电装置中, 热离子装置阳极释放的能量被一个半导体的热电发电装置利用并转换为电能. 研究表明, 这两种类型的联合热离子装置的输出功率和效率同样优于单独的热离子发电装置.

文献[282,314]关于联合热离子-热电发电和制冷装置性能的研究都是基于非平衡热力学理论, 这其中忽略了系统与外部热源之间的有限速率传热过程. 研究表明, 系统与热源之间的有限速率传热对单独热离子^[77,78]或热电装置^[332-334]的性能都有很大的影响. 对联合热离子-热电发电机和制冷机而言, 传热过程必定影响装置的整体性能. 因此, 在综合考虑有限速率传热过程影响的情况下研究联合热离子-热电制冷和发电装置的最优性能对于实际联合装置的优化设计具有重要意义. 在文献[314]的基础上, Ding 等人^[335]建立了考虑有限速率传热的不可逆联合热离子-热电制冷机模型(图 13), 研究了系统的制冷率与制冷系数最优性能, 分析了有限速率传热以及设计参数对系统性能的影响. 研究表明, 由于存在传热的不可逆性, 联合装置的制冷率和制冷系数都会降低, 热离子电极的温差不再是一个恒定值; 联合制冷装置的制冷率和制冷系数远高于单独的热离子制冷装置, 优化换热面积的分配可以得到联合制冷系统的最大制冷率和最大制冷系数.

而对于联合热离子-热电发电装置, 廖天军等人^[336]建立了不可逆热离子-半导体温差热电混合发电模块的循环模型, 详细分析了混合发电模块的性能特性,

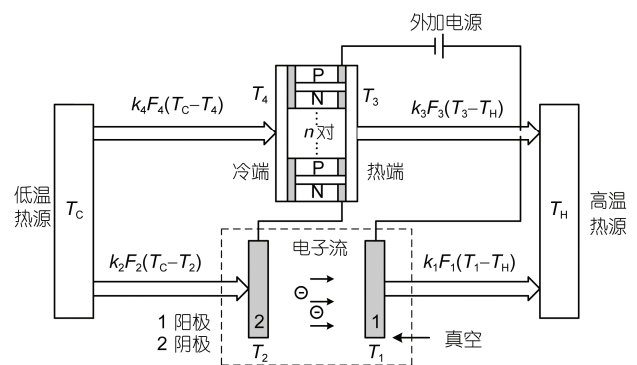


图 13 不可逆联合热离子-热电制冷机模型^[335]

并从热力学的角度对其进行了优化, 结果表明, 对于给定的热量, 应用混合发电模块, 可提高发电性能, 实现能源的梯级利用. Ding 等人^[337]建立了考虑有限速率传热的不可逆联合热离子-热电发电机模型, 导出了联合装置的功率、效率等主要性能参数, 对系统的功率、效率特性进行了分析和优化, 通过数值计算详细分析了有限速率传热以及热电回路工作电流、热电单元数、低温热源温度等参数对系统最优性能的影响.

燃料电池作为新型高效的新能源技术之一, 近年来在世界范围内引起了普遍的关注. 高温固体氧化物燃料电池因电流密度大、能量转换效率高、结构简单和寿命长等优点近年来得到快速发展和广泛应用^[338-340]. 由于高温燃料电池的排气温度高, 其高品位的废热有很大的利用价值. 近年来, 高温固体氧化物燃料电池与其他能量转换装置组成的新型混合动力系统的研究引起了人们的极大兴趣^[341-345].

基于固体氧化物燃料电池与热离子装置同相似的高温运行特性, 热离子装置在理论上也可以与燃料电池联合构成混合动力装置. 杨智敏等人^[346]在现有的固体氧化物燃料电池和热离子发电装置模型的基础上, 建立了燃料电池-真空热离子混合发电系统模型, 如图 14 所示. 混合系统模型考虑了物燃料电池的电化学反应、等效内阻和热漏, 以及回热器的非理想回热和热离子发电装置的有限速率传热产生的不可逆损失. 导出了混合系统的输出功率与效率的表达式. 通过数值模拟, 对混合发电系统的性能特性进行了分析和优化, 揭示了混合功率系统的性能特征, 确定了系统一些重要性能参数的优化判据. 结果表明, 该混合发电系统的整体性能有了较大的改善,

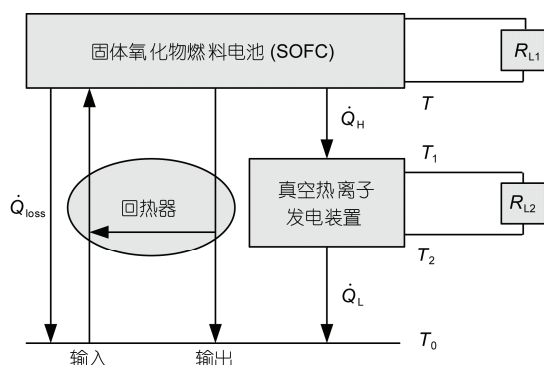


图 14 固体氧化物燃料电池-真空热离子混合发电系统示意图^[346]

实现了能源的梯次利用. 研究结论可为燃料电池-热离子的混合发电系统研制和参数设计提供理论指导.

5.3 热离子装置性能优化的研究展望

本节在对热离子能量转换装置的工作原理进行简要介绍后, 着重总结了热离子发电和制冷装置最优性能的相关研究进展. 表 3 进一步从运行方式、原理特征、模型的不可逆因素等方面对热离子装置性能优化相关研究进行了分类. 由表 3 可以看出, 当前的研究工作以真空、半导体固态热离子以及联合热离子发电和制冷装置为对象, 以功率与效率(制冷率与制冷系数)为对象, 着重研究了不同系统的热力学最优性能. 热离子系统的不可逆性主要包括内部和外部的传热过程的损失, 以上损失项在不可逆热离子装置模型中都得到了较好的体现. 在理论建模和性能优化的基础上, 相关研究进一步确定了装置内外部的不可逆因素和设计参数的对系统最优性能的影响特点.

鉴于实际热离子装置运行环境的多样性和工作条件的复杂性, 建立完善的热力学模型是对系统进行性能分析和优化的基础. 当前的理论模型在损失因素的种类、损失过程的描述等方面还存在诸多的不完备之处. 基于现有工作, 建立更为完善的热力学模型, 更为精确地描述系统中各部位能量的产生和转化过程, 相关工作将会在近几年获得突破性的发展. 与此同时, 随着超晶格结构热离子装置、光辐射热离子、微型热电子隧穿制冷装置等新型热离子装置模型的快速涌现, 热力学优化理论将会在以上系统中显示出更大的应用潜力和活力.

本节综述的研究工作主要是以真空、固态热离子发电和制冷装置的理论模型作为研究对象. 随着制造技术和材料技术的进步和发展, 独立或联合热离子装置的性能将会取得突破性的发展, 实际的热离子供电和制冷装置的也将会得到进一步的扩展应用, 而有限时间热力学理论所包含的性能分析和优化的思想将会在实际热离子装置的研究中获得更加广泛的发展应用, 并为实际装置的优化设计提供理论指导.

6 结论

人类在近几十年来加快了探索微观世界的步伐,

表 3 热离子能量转换装置性能优化的研究概况

运行方式	原理特征	不可逆因素	优化目标函数	性能优化的研究内容	代表性文献
发电装置	真空热离子	内可逆	功率、效率	明确真空热离子发电装置的工作原理, 分析基本的功率与效率特性;	[18,20,193, 259~264,275, 276]
		不可逆	功率、效率	确定内外部的不可逆因素及系统设计参数对功率与效率最优性能的影响;	[75,76,79, 321~323]
	半导体固态热离子	内可逆	功率、效率	半导体固态发电装置的工作原理以及功率与效率特性;	[277,278]
制冷装置	真空热离子	内可逆	制冷率、制冷系数	明确真空热离子制冷装置的工作原理, 分析基本的制冷率与制冷系数特性;	[16,18,19,276, 284~287]
		不可逆	制冷率、制冷系数	确定内外部的不可逆因素对系统制冷率与制冷系数最优性能的影响;	[77,78]
	半导体固态热离子	内可逆	制冷率、制冷系数	半导体固态制冷装置的工作原理以及制冷率与制冷系数特性;	[17,226,277, 288~297]
		不可逆	制冷率、制冷系数	确定内外部的不可逆因素对系统功率与效率最优性能的影响;	[324,325]
联合热离子装置	发电	内可逆	功率、效率	联合热离子-热电发电装置的工作原理及功率与效率特性;	[282]
		不可逆	功率、效率	不可逆热离子-热电发电装置、燃料电池-真空热离子混合系统的功率与效率性能分析与优化; 确定内外部的不可逆因素及设计参数的影响特点;	[336,337,346]
	制冷	内可逆	制冷率、制冷系数	联合热离子-热电制冷装置的工作原理及制冷率与制冷系数特性;	[314]
		不可逆	制冷率、制冷系数	不可逆联合热离子-热电制冷装置的制冷率与制冷系数性能分析与优化; 确定内外部的不可逆因素及设计参数的影响特点;	[335]

最具代表性的成果就是分子生物技术、纳米技术和微电子技术的飞速发展; 与此同时, 人们对于微型能量转换系统的研究和认识有了新的突破, 并对实际微型能量转换装置产生了迫切的需求. 研究能量系统的热力学性能对深入了解其能量转换的机理和效率有重要意义.

能量转换系统的性能优化与参数设计是高效利用能源的关键科学问题, 对微型能量转换系统也是如此. 近年来, 应用有限时间热力学研究布朗马达、电子机、热离子装置等微型能量转换系统的性能吸引了众多学者的关注, 得到了许多不同于经典热力学研究的新结论. 本文综述了近年来热驱动布朗马达、能量选择性电子机和热离子装置这三类典型微型能量转换热力学性能分析和优化方面的研究进展和取得的一些重要成果. 通过分析三类微型能量转换系统性能优化的研究情况, 可以发现当前微型能量转换系统热力学性能优化的成果和意义主要体现在以下几个方面: 一是揭示了微型系统在现有模式下的最优性能, 明确了设计参数和不可逆因素对系统最优性能的影响特点, 为微观领域的能源利用和

实际微型能量转换装置的参数选择和优化设计提供理论指导; 二是通过分析和优化系统的性能特性, 研究微型系统内在的工作机制, 揭示了微型系统实现能量转换的机理和转换效率, 探讨了微观系统与宏观能量转换系统的热力学特性上的联系和差异; 三是形成了较为系统的性能优化的研究成果, 为现有微型系统运行方式的变革和工作模式扩展奠定了理论基础.

在取得一系列新的研究成果的同时, 人们在微型能量系统性能优化研究的过程中发现了一些共性问题, 积累了一些有效的思路、方法和经验. 随着相关研究的不断深入, 未来关于微型能量转换系统性能分析和优化的研究可能在以下方面取得进展: 一是针对微型能量系统的运行特性, 建立更加完善的热力学模型; 二是在性能分析和优化的过程中采用更为全面、有效的优化目标; 三是进一步揭示微型系统能量转换的本质机理, 分析微观和宏观能量转换的异同, 探讨实现宏观和微观能量系统热力学性能的统一描述; 四是将有限时间热力学分析和优化的思路扩展应用至其他新的微型能量系统的研究之中.

参考文献

- 1 Thomas N, Thornhill R A. The physics of biological molecular motors. *J Phys D Appl Phys*, 1998, 31: 253–266
- 2 Kelly T R, De Silva H, Silva R A. Unidirectional rotary motion in a molecular system. *Nature*, 1999, 401: 150–152
- 3 Li J W, Tang W H. A single DNA molecular nanomotor. *Nano Lett*, 2002, 2: 315–318
- 4 Schliwa M, G W. Molecular motors. *Nature*, 2003, 422: 759–765
- 5 Schönborn J B, Herges R, Hartke B. Brownian molecular rotors: Theoretical design principles and predicted realizations. *J Chem Phys*, 2009, 130: 234906
- 6 Sweeney H L, Houdusse A. Structural and functional insights into the myosin motor mechanism. *Annu Rev Biophys*, 2010, 39: 539–557
- 7 Encalada S E, Szpankowski L, Xia C, et al. Stable kinesin and dynein assemblies drive the axonal transport of mammalian prion protein vesicles. *Cell*, 2011, 144: 551–565
- 8 Kon T, Oyama T, Shimo-Ko R, et al. The 2.8 Å crystal structure of the dynein motor domain. *Nature*, 2012, 484: 345–350
- 9 Kottas G S, Clarke L I, Horinek D, et al. Artificial molecular motors. *Chem Rev*, 2005, 105: 1281–1376
- 10 Balzani V, Credi A, Silvi S, et al. Artificial nanomachines based on interlocked molecular species: Recent advances. *Chem Soc Rev*, 2006, 35: 1135–1149
- 11 Hänggi P, Marchesoni F. Artificial Brownian motors: Controlling transport on the nanoscale. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 387–442
- 12 Humphrey T E, Newbury R, Taylor R P, et al. Reversible quantum Brownian heat engines for electrons. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 116801
- 13 Humphrey T E. Mesoscopic Quantum Ratchets and the Thermodynamics of Energy Selective Electron Heat Engines. Dissertation for the Doctoral Degree. Sydney: University of New South Wales, 2003
- 14 Chen L G, Ding Z M, Sun F R. Model of a total momentum filtered energy selective electron heat pump affected by heat leakage and its performance characteristics. *Energy*, 2011, 36: 4011–4018
- 15 Hatsopoulos G N, Gyftopoulos E P. *Thermionic Energy Conversion-Vol 1: Processes and Devices*. Cambridge: MIT Press, 1973
- 16 Mahan G D. Thermionic refrigeration. *J Appl Phys*, 1994, 76: 4362–4366
- 17 Shakouri A, Bowers J E. Heterostructure integrated thermionic coolers. *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 1234–1236
- 18 Hishinuma Y, Geballe T H, Moyzhes B Y, et al. Refrigeration by combined tunneling and thermionic emission in vacuum: Use of nanometer scale design. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 2572–2574
- 19 O'Dwyer M F, Humphrey T E, Lewis R A, et al. Efficiency in nanometer gap vacuum thermionic refrigerators. *J Phys D Appl Phys*, 2009, 42: 035417
- 20 Lee J I, Jeong Y H, No H C, et al. Size effect of nanometer vacuum gap thermionic power conversion device with CsI coated graphite electrodes. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 223107
- 21 Andresen B, Salamon P, Berry R S. Thermodynamics in finite time. *Phys Today*, 1984, 37: 62–70
- 22 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 不可逆热机的功率、效率特性: 以内热漏为例. *科学通报*, 1993, 38: 480
- 23 Sieniutycz S, Shiner J S. Thermodynamics of irreversible processes and its relation to chemical engineering: Second law analyses and finite time thermodynamics. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1994, 19: 303–348
- 24 Bejan A. Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes. *J Appl Phys*, 1996, 79: 1191–1218
- 25 Berry R S, Kazakov V A, Sieniutycz S, et al. *Thermodynamic Optimization of Finite Time Processes*. Chichester: Wiley, 1999
- 26 Chen L G, Wu C, Sun F R. Finite time thermodynamic optimization of entropy generation minimization of energy systems. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1999, 24: 327–359
- 27 Chen L G, Sun F R. *Advances in Finite Time Thermodynamics: Analysis and Optimization*. New York: Nova Science Publishers, 2004
- 28 Muschik W, Hoffmann K H. Endoreversible thermodynamics: A tool for simulating and comparing processes of discrete systems. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2006, 31: 293–317
- 29 Sieniutycz S, Jezowski J. *Energy Optimization in Process Systems and Fuel Cells*. Oxford: Elsevier, 2013
- 30 Esposito M, Lindenberg K, Van den Broeck C. Universality of efficiency at maximum power. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 130602
- 31 Andresen B. Current trends in finite-time thermodynamics. *Angew Chem Int Ed*, 2011, 50: 2690–2704
- 32 林国星, 陈金灿. 多种能量转换系统的性能优化与参数设计的研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2011, 50: 227–238
- 33 Tu Z C. Recent advance on the efficiency at maximum power of heat engines. *Chin Phys B*, 2012, 21: 020513
- 34 李俊, 陈林根, 戈延林, 等. 正反向两源热力循环有限时间热力学性能优化的研究进展. *物理学报*, 2013, 62: 130501
- 35 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 两源间制冷机有限时间火用经济性能界限和优化准则. *科学通报*, 1991, 36: 156–157
- 36 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 两源间热机有限时间火用经济性能界限和优化准则. *科学通报*, 1991, 36: 233–235

- 37 夏丹, 陈林根, 孙丰瑞. 广义不可逆四源等温化学势变换器的最优性能. 中国科学 B 辑: 化学, 2008, 38: 492–503
- 38 宋汉江, 陈林根, 孙丰瑞. 辐射传热条件下一类内可逆热机最大效率时的最优构型. 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学, 2008, 38: 1083–1096
- 39 舒礼伟, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热规律下热驱动二元分离过程的最小平均耗热量. 中国科学 B 辑: 化学, 2009, 39: 183–192
- 40 李俊, 陈林根, 孙丰瑞. 复杂导热规律下有限高温热源热机循环的最优构型. 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学, 2009, 39: 255–259
- 41 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热定律下 Otto 循环热机活塞运动的最优路径. 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学, 2009, 39: 698–708
- 42 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热定律下具有非均匀工质的一类非回热不可逆热机最大功率输出. 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学, 2009, 39: 1081–1089
- 43 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 广义对流传热定律下多级热机系统功率优化的 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程和动态规划法. 科学通报, 2010, 55: 2874–2884
- 44 戈延林, 陈林根, 孙丰瑞. 熵产生最小时不可逆 Otto 循环热机活塞运动最优路径. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2010, 40: 1115–1129
- 45 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 液-固相变过程火积耗散最小化. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 1521–1529
- 46 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 有限势库化学机最大输出功时循环最优构型. 中国科学: 化学, 2010, 40: 492–500
- 47 马康, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热定律下光驱动发动机的最优路径. 中国科学: 化学, 2010, 40: 1035–1045
- 48 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 一类单向等温传质过程积耗散最小化. 中国科学: 技术科学, 2011, 41: 515–524
- 49 陈林根. 焓理论及其应用的进展. 科学通报, 2012, 57: 2815–2835
- 50 He X, He J. Thermal entangled four-level quantum Otto heat engine. *Sci China Phys Mech Astron*, 2012, 55: 1751–1756
- 51 Ou C J, Huang Z F, Lin B H, et al. Performance of a two-state quantum engine improved by the superposition effect. *Sci China Phys Mech Astron*, 2013, 56: 1815–1821
- 52 Chen L G. Progress in optimization of mass transfer processes based on mass entransy dissipation extremum principle. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 2305–2327
- 53 Ou C J, Huang Z F, Lin B H, et al. A three-process quantum engine cycle consisting of a two-level system. *Sci China Phys Mech Astron*, 2014, 57: 1266–1273
- 54 Carnot S. *Reflections on the Motive Power of Fire*. Paris: Bachelier, 1824
- 55 Novikov I. The efficiency of atomic power stations (A review). *Atomnaya Energiya* 3, 1957, 11: 409
- 56 Chambadal P. *Les Centrales Nucleaires*. Paris: Armand Colin, 1957
- 57 Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am J Phys*, 1975, 43: 22–24
- 58 Andresen B, Berry R S, Nitzan A. Thermodynamics in finite time: The step-Carnot cycle. *Phys Rev A*, 1977, 15: 2086–2093
- 59 Velasco S, Roco J M M, Medina A, et al. Feynman's ratchet optimization: Maximum power and maximum efficiency regimes. *J Phys D Appl Phys*, 2001, 34: 1000–1006
- 60 Tu Z C. Efficiency at maximum power of Feynman's ratchet as a heat engine. *J Phys A Math Theor*, 2008, 41: 312003
- 61 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Power and efficiency performances of a micro thermal Brownian heat engine with and without external forces. *Braz J Phys*, 2010, 40: 141–149
- 62 Schmiedl T, Seifert U. Efficiency of molecular motors at maximum power. *Euro Phys Lett*, 2008, 83: 30005
- 63 Schmiedl T, Seifert U. Efficiency at maximum power: An analytically solvable model for stochastic heat engines. *Euro Phys Lett*, 2008, 81: 20003
- 64 Schmiedl T. *Optimal Processes in Stochastic Thermodynamics*. Dissertation for the Doctoral Degree. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2009
- 65 Van den Broeck C, Kumar N, Lindenberg K. Efficiency of isothermal molecular machines at maximum power. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 210602
- 66 He J Z, Wang X M, Liang H N. Optimum performance analysis of an energy selective electron refrigerator affected by heat leaks. *Phys Scr*, 2009, 80: 035701
- 67 Wang H, Wu G X, Lu H. Performance of an energy selective electron refrigerator at maximum cooling rate. *Phys Scr*, 2011, 83: 055801
- 68 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Ecological optimization of energy selective electron (ESE) heat engine. *Appl Math Model*, 2011, 35: 276–284
- 69 Esposito M, Lindenberg K, Van den Broeck C. Thermoelectric efficiency at maximum power in a quantum dot. *Euro Phys Lett*, 2009, 85: 60010

- 70 Esposito M, Kawai R, Lindenberg K, et al. Finite-time thermodynamics for a single-level quantum dot. *Euro Phys Lett*, 2010, 89: 20003
- 71 Esposito M, Kawai R, Lindenberg K, et al. Quantum-dot Carnot engine at maximum power. *Phys Rev E*, 2010, 81: 041106
- 72 Wang H, Wu G X, Fu Y M, et al. Performance analysis and parametric optimum criteria of the nanothermoelectric engine with a single-level quantum dot at maximum power. *J Appl Phys*, 2012, 111: 094318
- 73 Nakpathomkun N, Xu H Q, Linke H. Thermoelectric efficiency at maximum power in low-dimensional systems. *Phys Rev B*, 2010, 82: 235428
- 74 Seifert U. Efficiency of autonomous soft nanomachines at maximum power. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 020601
- 75 Wu C. Optimal power from a radiating solar-powered thermionic engine. *Energ Convers Manage*, 1992, 33: 279–282
- 76 Erbay L B, Yavuz H. Design parameters of a thermionic energy converter. *Proceedings of the International Conference on Thermodynamics Analysis and Improvement of Energy Systems*. Beijing, 1997
- 77 潘玉灼, 林比宏. 不可逆热离子制冷器的性能分析. *泉州师范学院学报(自然科学)*, 2008, 26: 41–43
- 78 Chen L G, Ding Z M, Sun F R. Performance analysis of a vacuum thermionic refrigerator with external heat transfer. *J Appl Phys*, 2010, 107: 104507
- 79 Wang Y, Su S H, Lin B H, et al. Parametric design criteria of an irreversible vacuum thermionic generator. *J Appl Phys*, 2013, 114: 053502
- 80 Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Ann Phys*, 1905, 322: 549–560
- 81 Langevin P. Sur la theorie du mouvement brownien. *Comptes Rendus*, 1908, 146: 530–533
- 82 Moss F, McClintock P V E. *Noise in Nonlinear Dynamical Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989
- 83 Doering C R, Horsthemke W, Riordan J. Nonequilibrium fluctuation-induced transport. *Phys Rev Lett*, 1994, 72: 2984–2987
- 84 Millonas M M. Self-consistent microscopic theory of fluctuation-induced transport. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 10–13
- 85 Cecchi G, Magnasco M O. Negative resistance and rectification in Brownian transport. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 1968–1971
- 86 Reimann P, Bartussek R, Haussler R, et al. Brownian motors driven by temperature oscillations. *Phys Lett A*, 1996, 215: 26–31
- 87 Bier M. Reversals of noise induced flow. *Phys Lett A*, 1996, 211: 12–18
- 88 Slater G W, Guo H L, Nixon G I. Bidirectional transport of polyelectrolytes using self-modulating entropic ratchets. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 1170–1173
- 89 Krishnan R, Puri S, Jayannavar A M. Reliability of fluctuation-induced transport in a Maxwell-demon-type engine. *Eur Phys J B*, 2010, 78: 193–199
- 90 Ghosh P, Shit A, Chattopadhyay S, et al. A microscopic model for noise induced transport: Heat -bath nonlinearly driven by external white noise. *Chaos*, 2011, 21: 013117
- 91 Astumian R D, Bier M. Fluctuation driven ratchets: Molecular motors. *Phys Rev Lett*, 1994, 72: 1766–1769
- 92 Maddox J. More models of muscle movement. *Nature*, 1994, 368: 287
- 93 Rousselet J, Salome L, Ajdari A, et al. Directional motion of Brownian particles induced by a periodic asymmetric potential. *Nature*, 1994, 370: 446–447
- 94 Doering C, Ermentrout B, Oster G. Rotary DNA motors. *Biophys J*, 1995, 69: 2256
- 95 Jung P, Kissner J G, Hänggi P. Regular and chaotic transport in asymmetric periodic potentials: Inertia ratchets. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 3436–3439
- 96 Ghosh P, Shit A, Chattopadhyay S, et al. Relization of a Brownian engine to study transport phenomena: A semiclassical approach. *Phys Rev E*, 2010, 81: 061112
- 97 Small J V. Myosin filaments on the move. *Nature*, 1988, 331: 568–569
- 98 Metha A D, Rock R S, Rief M, et al. Myosin-V is a processive actin-based motor. *Nature*, 1999, 400: 590–593
- 99 Coy D L, Hancock W O, Wagenbach M, et al. Kinesin's tail domain is an inhibitory regulator of the motor domain. *Nat Cell Biol*, 1999, 1: 288–292
- 100 Schliwa M. Kinesin: Walking or limping? *Nat Cell Biol*, 2003, 5: 1043–1044
- 101 Gennerich A, Vale R D. Walking the walk: How kinesin and dynein coordinate their steps. *Curr Opin Cell Biol*, 2009, 21: 59–67
- 102 Vallee R. Dynein and the kinetochore. *Nature*, 1990, 345: 206–207
- 103 Shingyoji C, Higuchi H, Yoshimura M, et al. Dynein arms are oscillating force generators. *Nature*, 1998, 393: 711–714
- 104 Hirokawa N. Kinesin and dynein superfamily proteins and the mechanism of organelle transport. *Science*, 1998, 279: 519–526
- 105 Carter A P, Cho C, Jin L, et al. Crystal structure of the dynein motor domain. *Science*, 2011, 331: 1159–1165
- 106 舒咬根, 欧阳钟灿. 转动分子马达: ATP 合成酶. *自然杂志*, 2007, 29: 249–254

- 107 Smoluchowski M. Experimentell nachweisbare, der üblichen Thermodynamik widersprechende Molekularphänomene. *Physik Zeitschr*, 1912, 13: 1069
- 108 Feynman R P, Leighton R B, Sands M. *The Feynman Lectures on Physics*. Vol. I. New Jersey: Addison-Wesley, 1963
- 109 Parrondo J M R, Español P. Criticism of Feynman's analysis of the ratchet as an engine. *Am J Phys*, 1996, 64: 1125–1130
- 110 Sekimoto K. Kinetic characterization of heat bath and the energetics of thermal ratchet models. *J Phys Soc Jpn*, 1997, 66: 1234–1237
- 111 Hondou T, Takagi F. Irreversible operation in a stalled state of Feynman's ratchet. *J Phys Soc Jpn*, 1998, 67: 2974–2976
- 112 Magnasco M O, Stolovitzky G. Feynman's Ratchet and Pawl. *J Stat Phys*, 1998, 93: 615–632
- 113 Sakaguchi H. A Langevin simulation for the Feynman ratchet model. *J Phys Soc Jpn*, 1998, 67: 709–712
- 114 Jarzynski C, Mazonka O. Feynman's ratchet and pawl: An exactly solvable model. *Phys Rev E*, 1999, 59: 6448–6459
- 115 Sakaguchi H. Fluctuation theorem for a Langevin model of the Feynman ratchet. *J Phys Soc Jpn*, 2000, 69: 104–108
- 116 Gomez-Marín A, Sancho J M. Ratchet, pawl and spring Brownian motor. *Physica D*, 2006, 216: 214–219
- 117 Zheng J, Zheng X, Chen G. Computer simulation of Feynman's ratchet and pawl system. *Phys Rev E*, 2010, 81: 061104
- 118 Astumian R D. Design principles for Brownian molecular machines: How to swim in molasses and walk in a hurricane. *Phys Chem Chem Phys*, 2007, 9: 5067–5083
- 119 Reimann P. Brownian motors: Noisy transport far from equilibrium. *Phys Rep*, 2002, 361: 57–265
- 120 Astumian R D, Hänggi P. Brownian motors. *Phys Today*, 2002, 55: 33–39
- 121 Van den Broeck C, Kawai R, Meurs P. Microscopic analysis of a thermal Brownian motor. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 090601
- 122 Parrondo J M R, de Cisneros B J. Energetics of Brownian motors: A review. *Appl Phys A*, 2002, 75: 179–191
- 123 Büttiker M. Transport as a consequence of state-dependent diffusion. *Z Phys B: Condens Matter*, 1987, 68: 161–167
- 124 van Kampen N G. Relative stability in nonuniform temperature. *IBM J Res Dev*, 1988, 32: 107–111
- 125 Landauer R. Motion out of noisy states. *J Stat Phys*, 1988, 53: 233–248
- 126 Benjamin R, Kawai R. Inertial effects in Büttiker-Landauer motor and refrigerator at the overdamped limit. *Phys Rev E*, 2008, 77: 051132
- 127 Astumian R D. Thermodynamics and kinetics of a Brownian motor. *Science*, 1997, 276: 917–922
- 128 Meurs P, Van den Broeck C. Thermal Brownian motor. *J Phys Condens Matter*, 2005, 17: S3673–S3684
- 129 Kostur M, Luczka J. Multiple current reversal in Brownian ratchets. *Phys Rev E*, 2001, 63: 021101
- 130 Eichhorn R, Reimann P, Hänggi P. Absolute negative mobility and current reversals of a meandering Brownian particle. *Physica A*, 2003, 325: 101–109
- 131 Craig E M. *Models for Brownian and Biomolecular Motors*. Dissertation for the Doctoral Degree. Eugene: University of Oregon, 2008
- 132 Malgaretti P, Pagonabarraga I, Rubi J M. Confined Brownian ratchets. *J Chem Phys*, 2013, 138: 194906
- 133 Asfaw M, Bekele M. Exploring the operation of a tiny heat engine. *Physica A*, 2007, 384: 346–358
- 134 Derényi I, Bier M, Astumian R D. Generalized efficiency and its application to microscopic engines. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 903–906
- 135 Derényi I, Astumian R D. Efficiency of Brownian heat engines. *Phys Rev E*, 1999, 59: R6219–R6222
- 136 Gao T, Zhang Y, Chen J. The Onsager reciprocity relation and generalized efficiency of a thermal Brownian motor. *Chin Phys B*, 2009, 18: 3279–3286.
- 137 Asfaw M, Bekele M. Current, maximum power and optimized efficiency of a Brownian heat engine. *Eur Phys J B*, 2004, 38: 457–461
- 138 丁泽民, 陈林根, 孙丰瑞. 空间周期性温度场中布朗热泵的热力学特性. *中国科学: 物理学, 力学, 天文学*, 2010, 40: 16–25
- 139 Matsuo M, Sasa S. Stochastic energetics of non-Uniform temperature systems. *Physica A*, 2000, 276: 188–200
- 140 Asfaw M, Bekele M. Energetics of a simple microscopic heat engine. *Phys Rev E*, 2005, 72: 056109
- 141 Hondou T, Sekimoto K. Unattainability of Carnot efficiency in the Brownian heat engine. *Phys Rev E*, 2000, 62: 6021–6025
- 142 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Generalized model and optimum performance of an irreversible thermal Brownian microscopic heat pump. *Math Comput Model*, 2011, 53: 780–792
- 143 Ai B Q, Xie H Z, Wen D H, et al. Heat flow and efficiency in a microscopic engine. *Eur Phys J B*, 2005, 48: 101–106
- 144 Zhang Y, Lin B, Chen J. Performance characteristics of an irreversible thermally driven Brownian microscopic heat engine. *Eur Phys J B*, 2006, 53: 481–485
- 145 陈林根. 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析. 北京: 高等教育出版社, 2005
- 146 De Vos A. *Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion*. Oxford: Oxford University, 1992
- 147 Wu C, Kiang R L, Lopardo V J, et al. Finite-time thermodynamics and endoreversible heat engines. *Int J Mech Eng Educ*, 1993, 21: 337–346
- 148 Hoffmann K H, Burzler J M, Schubert S. Endoreversible thermodynamics. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1997, 22: 311–355

- 149 Chen L G, Bi Y H, Wu C. Unified description of endoreversible cycles for another linear heat transfer law. *Int J Energy, Environ Econ*, 1999, 9: 77–93
- 150 Bejan A. Theory of heat transfer-irreversible power plant. *Int J Heat Mass Transfer*, 1988, 31: 1211–1219
- 151 Bejan A. Theory of heat transfer-irreversible refrigeration plants. *Int J Heat Mass Transfer*, 1989, 32: 1631–1639
- 152 Chen L G, Ding Z M, Sun F R. Optimum performance analysis of Feynman's engine as cold and hot ratchets. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2011, 36: 155–177
- 153 Ai B Q, Wang L, Liu L G. Brownian micro-engines and refrigerators in a spatially periodic temperature field: Heat flow and performances. *Phys Lett A*, 2006, 352: 286–290
- 154 Zhang Y P, He J Z. Thermodynamic performance characteristics of an irreversible micro-Brownian heat engine driven by temperature difference. *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 090502
- 155 Asfaw M. Modeling an efficient Brownian heat engine. *Eur Phys J B*, 2008, 65: 109–116
- 156 Zhang Y P, He J Z, He X, et al. Thermodynamic performance characteristics of a Brownian microscopic heat engine driven by discrete and periodic temperature field. *Commun Theor Phys*, 2010, 54: 857–862
- 157 Asfaw M. Effect of thermal inhomogeneity on the performance of a Brownian heat engine. *Eur Phys J B*, 2013, 86: 189
- 158 Asfaw M. Thermodynamic feature of a Brownian heat engine operating between two heat baths. *Phys Rev E*, 2014, 89: 012143
- 159 Gao T F, Chen J C. Non-equilibrium thermodynamic analysis on the performance of an irreversible thermally driven Brownian motor. *Mod Phys Lett B*, 2010, 24: 325–333
- 160 程海涛, 何济洲, 肖宇玲. 周期性双势磊锯齿势中温差驱动的布朗热机. *物理学报*, 2012, 61: 010502
- 161 肖宇玲, 何济洲, 程海涛. 温库边界对布朗热机性能的影响. *物理学报*, 2014, 63: 200501
- 162 Van den Broeck C, Kawai R. Brownian refrigerator. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 210601
- 163 Nakagawa N, Komatsu T S. A heat pump at a molecular scale controlled by a mechanical force. *Euro Phys Lett*, 2006, 75: 22–28
- 164 van den Broek M, Van den Broeck C. Chiral Brownian heat pump. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 130601
- 165 Lin B H, Chen J C. Performance characteristics and parametric optimum criteria of a Brownian micro-refrigerator in a spatially periodic temperature field. *J Phys A: Math Theor*, 2009, 42: 075006
- 166 Zhang Y P, He J Z, Ouyang H, et al. Performance characteristics of a micro-Brownian refrigerator in a one-dimensional lattice. *Phys Scr*, 2010, 82: 055005
- 167 Chen L G, Ding Z M, Sun F R. A generalized model of an irreversible thermal Brownian refrigerator and its performance. *Appl Math Model*, 2011, 35: 2945–2958
- 168 Luo X G, Liu N, He J Z. Optimum analysis of a Brownian refrigerator. *Phys Rev E*, 2013, 87: 022139
- 169 De Groot S R, Mazur P. *Non-equilibrium Thermodynamics*. New York: Dover, 1984
- 170 Callen H B. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. 2nd Ed. New York: Wiley, 1985
- 171 Van den Broeck C. Thermodynamic efficiency at maximum power. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 190602
- 172 Jiménez de Cisneros B, Arias-Hernández L A, Calvo Hernández A. Linear irreversible thermodynamics and coefficient of performance. *Phys Rev E*, 2006, 73: 057103
- 173 Jiménez de Cisneros B, Calvo Hernández A. Collective working regimes for coupled heat engines. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 130602
- 174 Jiménez de Cisneros B, Calvo Hernández A. Coupled heat devices in linear irreversible thermodynamics. *Phys Rev E*, 2008, 77: 041127
- 175 Wang X. Irreversible cycle in linear irreversible thermodynamics. *J Phys A Math Theor*, 2010, 43: 425003
- 176 Gomez-Marin A, Sancho J M. Tight coupling in thermal Brownian motors. *Phys Rev E*, 2006, 74: 062102
- 177 Izumida Y, Okuda K. Onsager coefficient of a Brownian Carnot cycle. *Eur Phys J B*, 2010, 77: 499–504
- 178 Ding Z M, Chen L G, Ge Y L, Sun F R. Linear irreversible thermodynamic performance analyses for a generalized irreversible thermal Brownian refrigerator. *Int J Energy Environ*, 2015, 6: 143–152
- 179 Santillán M, Maya-Aranda G. Local stability analysis of an endoreversible Curzon-Ahborn-Nouikov engine working in maximum-power-like regime. *J Phys D Appl Phys*, 2001, 34: 2068–2072
- 180 Paez-Hernandez R, Angulo-Brown F, Santillán M. Dynamic robustness and thermodynamic optimization in a non-Endoreversible Curzon-Ahlborn engine. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2006, 31: 173–188
- 181 Paez-Hernandez R, Santillán M. Comparison of the energetic properties and the dynamical stability in a mathematical model of the stretch reflex. *Physica A*, 2008, 387: 3574–3582
- 182 Garcia-Viloca M, Gao J, Karplus M, et al. How enzymes work: Analysis by modern rate theory and computer simulations. *Science*, 2004, 303: 186–195

- 183 Min W, Xie X S, Bagchi B. Two-dimensional reaction free energy surfaces of catalytic reaction: Effects of protein conformational dynamics on enzyme catalysis. *J Phys Chem B*, 2008, 112: 454–466
- 184 Machura L, Kostur M, Talkner P, et al. Brownian motors: Current fluctuations and rectification efficiency. *Phys Rev E*, 2004, 70: 061105
- 185 Machura L, Kostur M, Marchesoni F, et al. Optimal strategy for controlling transport in inertial Brownian motors. *J Phys Condens Matter*, 2005, 17: S3741–S3752
- 186 Kostur M, Machura L, Hänggi P, et al. Forcing inertial Brownian motors: Efficiency and negative differential mobility. *Physica A*, 2006, 371: 20–24
- 187 Machura L, Kostur M, Marchesoni F, et al. Addendum and erratum: Optimal strategy for controlling transport in inertial Brownian motors. *J Phys Condens Matter*, 2006, 18: 4111–4112
- 188 Ai B Q, Liu L G. Facilitated movement of inertial Brownian motors driven by a load under an asymmetric potential. *Phys Rev E*, 2007, 76: 042103
- 189 Tu Z C. Stochastic heat engine with the consideration of inertial effects and shortcuts to adiabaticity. *Phys Rev E*, 2014, 89: 052148
- 190 Ioffe A F. Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling. London: Infosearch, 1957
- 191 DiSalvo F J. Thermoelectric cooling and power generation. *Science*, 1999, 285: 703–706
- 192 Horvat M, Prosen T, Casati G. Exactly solvable model of a highly efficient thermoelectric engine. *Phys Rev E*, 2009, 80: 010102(R)
- 193 Houston J M. Theoretical efficiency of the thermionic energy converter. *J Appl Phys*, 1959, 30: 481–487
- 194 Edward H L, Niu Q, de Lozanne A L. A quantum-dot refrigerator. *Appl Phys Lett*, 1993, 63: 1815–1817
- 195 Edward H L, Niu Q, Georgakis G A, et al. Cryogenic cooling using tunneling structures with sharp energy features. *Phys Rev B*, 1995, 52: 5714–5736
- 196 Leivo M M, Pekola J P, Averin D V. Efficient Peltier refrigeration by a pair of normal metal/insulator/superconductor junctions. *Appl Phys Lett*, 1996, 68: 1996–1998
- 197 Manninen A J, Leivo M M, Pekola J P. Refrigeration of a dielectric membrane by a superconductor/insulator/normalmetal/insulator/superconductor tunneling. *Appl Phys Lett*, 1997, 70: 1885–1887
- 198 Pekola J P, Kyynäräinen J M, Leivo M M, et al. NIS chip refrigeration. *Cryogenics*, 1999, 39: 653–657
- 199 Giazotto F, Heikkilä T T, Luukanen A, et al. Opportunities for mesoscopies in thermometry and refrigeration: Physics and applications. *Rev Mod Phys*, 2006, 78: 217–274
- 200 Arrachea L, Moskalets M, Martin-Moreno L. Heat production and energy balance in nanoengines driven by time-dependent fields. *Phys Rev B*, 2007, 75: 245420
- 201 Pekola J P, Giazotto F, Saira O-P. Radio-frequency single-electron refrigerator. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 037201
- 202 Rey M, Strass M, Kohler S, et al. Nonadiabatic electron heat pump. *Phys Rev B*, 2007, 76: 085337
- 203 Segal D. Single mode heat rectifier: Controlling energy flow between electronic conductors. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 105901
- 204 Galperin M, Saito K, Balatsky A V, et al. Cooling mechanisms in molecular conduction junctions. *Phys Rev B*, 2009, 80: 115427
- 205 Sols F. Aspects of quantum cooling in electron and atomsystems. *Physica E*, 2010, 42: 466–471
- 206 Clark A M, Williams A, Ruggiero S T, et al. Practical electron-tunneling refrigerator. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 625–627
- 207 Clark A M, Miller N A, Williams A, et al. Cooling of bulk material by electron-tunneling refrigerators. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 173508
- 208 Pekola J. Tunnelling into the chill. *Nature*, 2005, 435: 889–890
- 209 Linke H, Humphrey T E, Löfgren A, et al. Experimental tunneling ratchets. *Science*, 1999, 286: 2314–2317
- 210 Linke H, Sheng W, Löfgren A, et al. A quantum dot ratchet: Experiment and theory. *Euro Phys Lett*, 1998, 44: 341–347
- 211 Linke H, Sheng W, Löfgren A, et al. Erratum, a quantum dot ratchet: Experiment and theory. *Euro Phys Lett*, 1999, 45: 406
- 212 Linke H, Sheng W, Svensson A, et al. Asymmetric nonlinear conductance of quantum dots with broken inversion symmetry. *Phys Rev B*, 2000, 61: 15914–15926
- 213 Humphrey T E, Linke H, Newbury R. Pumping heat with quantum ratchets. *Physica E*, 2001, 11: 281–286
- 214 Linke H, Humphrey T E, Lindelof P E, et al. Quantum ratchets and quantum heat pumps. *Appl Phys A*, 2002, 75: 237–246
- 215 Linke H, Humphrey T E, Taylor R P, et al. Quantum ratchets act as heat pumps. *Physica B*, 2002, 314: 464–468
- 216 Vashaee D, Shakouri A. Electronic and thermoelectric transport in semiconductor and metallic superlattices. *J Appl Phys*, 2004, 95: 1233–1245
- 217 Vashaee D, Shakouri A. Improved thermoelectric power factor in metal-based superlattices. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 106103
- 218 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Modeling and performance analysis of energy selective electron (ESE) engine with heat leakage and transmission probability. *Sci China Phys Mech Astron*, 2011, 54: 1925–1936

- 219 O'Dwyer M F. Solid-state Refrigeration and Power Generation Using Semiconductor Nanostructures. Dissertation for the Doctoral Degree. Wollongong: University of Wollongong, 2007
- 220 Humphrey T E, Linke H. Reversible thermoelectric nanomaterials. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 096601
- 221 O'Dwyer M F, Humphrey T E, Linke H. Concept study for a high-efficiency nanowire based thermoelectric. *Nanotechnology*, 2006, 17: S338–S343
- 222 贺兵香, 何济洲. 双势垒 InAs/InP 纳米线异质结电子制冷机. *物理学报*, 2010, 59: 3846–3850
- 223 贺兵香, 何济洲, 缪贵玲. 纳米线异质结构对电子制冷机性能的影响. *物理学报*, 2011, 60: 040509
- 224 O'Dwyer M F, Lewis R A, Zhang C, et al. Electronic efficiency in nanostructured thermionic and thermoelectric devices. *Phys Rev B*, 2005, 72: 205330
- 225 Humphrey T E, O'Dwyer M F, Linke H. Power optimization in thermionic devices. *J Phys D Appl Phys*, 2005, 38: 2051–2054
- 226 Humphrey T E, O'Dwyer M F, Zhang C, et al. Solid-state thermionics and thermoelectrics in the ballistic transport regime. *J Appl Phys*, 2005, 98: 026108
- 227 O'Dwyer M F, Lewis R A, Zhang C. Thermionic refrigerators with non-Richardson current. *J Phys D Appl Phys*, 2007, 40: 1167–1174
- 228 O'Dwyer M F, Humphrey T E, Lewis R A, et al. Electronic and thermal transport in hot carrier solar cells with low-dimensional contacts. *Microelectron J*, 2008, 39: 656–659
- 229 王小敏, 何济洲, 王建辉. 能量选择性电子热机和制冷机的性能特征分析. *电子学报*, 2008, 36: 2178–2182
- 230 Su S H, Guo J C, Su G Z, et al. Performance optimum analysis and load matching of an energy selective electron heat engine. *Energy*, 2012, 44: 570–575
- 231 Luo X G, Li C, Liu N, et al. The impact of energy spectrum width in the energy selective electron low-temperature thermionic heat engine at maximum power. *Phys Lett A*, 2013, 377: 1566–1570
- 232 Chen L G, Zhang W L, Sun F R. Power, efficiency, entropy generation rate and ecological optimization for a class of generalized irreversible universal heat engine cycles. *Appl Energy*, 2007, 84: 512–525
- 233 Li J, Chen L G, Sun F R. Ecological performance of an endoreversible Carnot heat engine with complex heat transfer law. *Int J Sustainable Energy*, 2011, 30: 55–64
- 234 Xia D, Chen L G, Sun F R. Ecological optimisation of chemical engines with irreversible mass transfer and mass leakage. *J Energy Inst*, 2010, 83: 151–159
- 235 Chen L G, Zhu X Q, Sun F R, et al. Ecological optimization for generalized irreversible Carnot refrigerators. *J Phys D Appl Phys*, 2005, 38: 113–118
- 236 Ust Y, Sahin B. Performance optimization of irreversible refrigerators based on a new thermo-ecological criterion. *Int J Refrig*, 2007, 30: 527–534
- 237 Zhu X Q, Chen L G, Sun F R, et al. Effect of heat transfer law on the ecological optimization of a generalized irreversible Carnot heat pump. *Int J Exergy*, 2005, 2: 423–436
- 238 Bi Y H, Chen L G, Sun F R, et al. Exergy-based ecological optimisation for an endoreversible air heat pump cycle. *Int J Ambient Energy*, 2009, 30: 45–52
- 239 Chen T H. Ecological optimization of quantum spin-1/2 heat engine at the classical limit. *J Phys D Appl Phys*, 2006, 39: 1442–1450
- 240 刘晓威, 陈林根, 吴锋, 等. 不可逆谐振子卡诺热机生态学优化. *中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学*, 2009, 39: 1687–1698
- 241 Liu X W, Chen L G, Wu F, et al. Ecological optimization of an irreversible quantum Carnot heat engine with spin-1/2 systems. *Phys Scr*, 2010, 81: 025003
- 242 吴锋, 陈林根, 孙丰瑞. 量子卡诺制冷机制冷率与制冷系数协调优化性能. *低温工程*, 1996, 1: 1–5
- 243 Sanchez-Salas N, Calvo Hernandez A. Harmonic quantum heat devices: Optimum-performance regimes. *Phys Rev E*, 2004, 70: 046134
- 244 吴锋, 孙丰瑞, 陈林根. 谐振子量子卡诺热泵最优性能. *热能动力工程*, 1997, 12: 361–364
- 245 Wu F, Chen L G, Sun F R, et al. Optimum performance parameters for a quantum Carnot heat pump with spin-1/2. *Energy Convers Manage*, 1998, 39: 1161–1167
- 246 Li C, Li R W, Luo X G, et al. Performance characteristics and optimal analysis of an energy selective electron refrigerator. *Int J Thermodyn*, 2014, 17: 153–160
- 247 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Performance characteristic of energy selective electron (ESE) refrigerator with filter heat conduction. *Rev Mex Fis*, 2010, 56: 125–131
- 248 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Performance characteristic of energy selective electron (ESE) heat engine with filter heat conduction. *Int J Energy Environ*, 2011, 2: 627–640

- 249 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Performance analysis of an irreversible energy selective electron (ESE) heat pump with heat leakage. *J Energy Inst*, 2012, 85: 227–235
- 250 何济洲, 贺兵香. 考虑透射概率的能量选择性电子热泵. *物理学报*, 2010, 59: 2345–2349
- 251 Wang X M, He J Z, Tang W. Performance characteristics of an energy selective electron refrigerator with double resonances. *Chin Phys B*, 2009, 18: 984–991
- 252 丁泽民. 三类不可逆微型能量转换系统的热力学优化. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2011
- 253 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Heating load and COP optimization of a double resonance energy selective electron (ESE) heat pump. *Int J Low-Carbon Technol*, 2013, doi: 10.1093/ijlct/ctt079
- 254 丁泽民, 陈林根, 戈延林, 等. 不可逆双谐振通道电子热机生态学性能优化. *工程热物理学报*, 2014, 35: 1035–1039
- 255 丁泽民, 陈林根, 戈延林, 等. 不可逆双谐振通道能量选择性电子制冷机热力学性能优化. *热科学与技术*, 2013, 12: 368–376
- 256 Luo X G, Long K L, Wang J, et al. A theoretical study on the performances of thermoelectric heat engine and refrigerator with two-dimensional electron reservoirs. *J Appl Phys*, 2014, 115: 244306
- 257 Luo X G, He J Z. Performance optimization analysis of a thermoelectric refrigerator with two resonances. *Chin Phys B*, 2011, 20: 030509
- 258 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Performance optimization of a total momentum filtered energy selective electron (ESE) heat engine with double resonances. *Math Comput Model*, 2011, 54: 2064–2076
- 259 Hatsopoulos G N, Kaye J. Measured thermal efficiencies of a diode configuration of a thermo electron engine. *J Appl Phys*, 1958, 29: 1124–1125
- 260 Webster H F. Calculation of the performance of a high-vacuum thermionic energy converter. *J Appl Phys*, 1959, 30: 488–492
- 261 Rasor N S. Figure of merit for thermionic energy conversion. *J Appl Phys*, 1960, 31: 163–167
- 262 Cayless M A. Thermionic generation of electricity. *Br J Appl Phys*, 1961, 12: 433–442
- 263 Ingold J H. Calculation of the maximum efficiency of the thermionic converter. *J Appl Phys*, 1961, 32: 769–772
- 264 Wilson V C. A review of thermionic energy conversion. *Electron Devices Meeting*, 1965 International. London, 1965
- 265 Naito H, Kohsaka Y, Cooke D, et al. Development of a solar receiver for a high-efficiency thermionic/thermoelectric conversion system. *Sol Energy*, 1996, 58: 191–195
- 266 Adams S F. Solar thermionic space power technology testing: A historical perspective. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 813: 590–597
- 267 Clark P N, Desplat J L, Streckert H H, et al. Solar thermionic test in a thermal receiver. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 813: 598–606
- 268 Baksht F G, Dyvzhev G A, Martsinovskiy A M, et al. Thermionic converters and low-temperature plasma. Springfield, Va: Technical Information Center, U S Dept of Energy, 1978
- 269 Howard R C. A nuclear-thermionic convertor. *J Inst Electrical Engineers*, 1961, 7: 284–286
- 270 马宗诚. 新型空间电源-热离子核电源. *航天器工程*, 2003, 12: 74–82
- 271 Oman H. Deep space travel energy sources. *IEEE Aerosp Electron Syst Mag*, 2003, 18: 28–35
- 272 Martini W R, McKisson R L, Clark E V. Flame Heated Thermionic Converter Research. New Jersey: Fort Monmouth, 1962
- 273 Veltkamp W B, van Kemenade H P, Sampers W. Combustion heated thermionic systems. 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. San Diego, 1992
- 274 van Kemenade E. The design of a combustion heated thermionic energy converter. Dissertation for the Doctoral Degree. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1995
- 275 Wachutka G, Gerstenmaier Y C. Thermoelectric and thermionic microgenerators: Chances, challenges and limitations. *International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System*. Gdynia, Poland, 2006. 48–51
- 276 Gerstenmaier Y C, Wachutka G. Efficiency of thermionic and thermoelectric converters. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 890: 349–360
- 277 Mahan G D, Sofo J O, Bartkowiak M. Multilayer thermionic refrigerator and generator. *J Appl Phys*, 1998, 83: 4683–4689
- 278 Zeng T. Thermionic-tunneling multilayer nanostructures for power generation. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 153104
- 279 Lodhi M A K, Schuller M, Hausgen P. Mathematical modeling for a thermionic-AMTEC cascade system. *AIP Conference Proceedings*, 1996, 316: 1285–1290
- 280 Ender A Y, Kolyshkin I N, Kuznetsov V I, et al. Cascaded space solar power system with high temperature Cs–Ba thermionic converter and AMTEC. *AIP Conference Proceedings*, 1998, 420: 1565–1570
- 281 Lodhi M A K, Malka V R. Optimization of the TIEC/AMTEC cascade cell for high efficiency. *J Power Sources*, 2006, 156: 685–691
- 282 Xuan X C, Li D. Optimization of a combined thermionic-thermoelectric generator. *J Power Sources*, 2003, 115: 167–170
- 283 罗伊默, 田长青, 邵双全. 热离子制冷技术研究进展及分析. *流体机械*, 2010, 38: 54–59
- 284 Hishinuma Y, Moyzhes B Y, Geballe T H, et al. Vacuum thermionic refrigeration with a semiconductor heterojunction structure. *Appl*

- Phys Lett, 2002, 81: 4242–4244
- 285 Hishinuma Y, Geballe T H, Moyzhes B Y, et al. Measurement of cooling by room-temperature thermionic emission across a nanometer gap. J Appl Phys, 2003, 94: 4690–4696
- 286 Chua H T, Wang X, Gordon J M. Thermionic and tunneling cooling thermodynamics. Appl Phys Lett, 2004, 84: 3999–4001
- 287 Gerstenmaier Y C, Wachutka G. Thermoelectric and thermionic micro-converters. 36th European Solid-State Device Research Conference. Montreux, Switzerland, 2006
- 288 Shakouri A, Bowers J E. Heterostructure integrated thermionic refrigeration. 16th Annual Conference on Thermoelectrics. Dresden, Germany, 1997
- 289 Mahan G D, Woods L M. Multilayer thermionic refrigeration. Phys Rev Lett, 1998, 80: 4016–4019
- 290 Vining C B, Mahan G D. The b factor in multilayer thermionic cooling. J Appl Phys, 1999, 86: 6852–6853
- 291 Lough B C, Lee S P, Lewis R A, et al. Electronic thermal transport and thermionic cooling in semiconductor multi-quantum-well structures. Comput Phys Commun, 2001, 142: 274–280
- 292 Lough B C, Lee S P, Lewis R A, et al. Numerical calculation of thermionic cooling efficiency in a double-barrier semiconductor heterostructure. Physica E, 2001, 11: 287–291
- 293 Shakouri A. Nanoscale devices for solid state refrigeration and power generation. 20th IEEE Semi-Therm Symposium. San Jose, 2004
- 294 Bian Z, Shakouri A. Enhanced solid-state thermionic emission in nplanar heterostructures. Appl Phys Lett, 2006, 88: 012102
- 295 Shakouri A, LaBounty C, Piprek J, et al. Thermionic emission cooling in single barrier heterostructures. Appl Phys Lett, 1999, 74: 88–89
- 296 LaBounty C, Shakouri A, Abraham P, et al. Integrated cooling for optoelectronic devices. Proceedings of SPIE. San Jose, 2000
- 297 Lough B C. Investigations into Thermionic Cooling for Domestic Refrigeration. Dissertation for the Doctoral Degree. Wollongong: University of Wollongong, 2004
- 298 Shakouri A, LaBounty C, Abraham P, et al. Enhanced thermionic emission cooling in high barrier superlattice heterostructures. Mater Res Soc Proc, 1998, 545: 449–458
- 299 Shakouri A, LaBounty C, Abraham P, et al. InP-based thermionic coolers. International conference on Indium Phosphide and Related Materials. Davos, 1999
- 300 Shakouri A, LaBounty C. Material optimization for heterostructure integrated thermionic coolers. International Conference on Thermoelectrics. Baltimore, 1999
- 301 Mal'shukov A G, Ma Z, Antonyuk V B, et al. Multilayer thermionic transport in semiconductor superlattices. Solid State Commun, 2001, 119: 563–567
- 302 Fang X, Zeng G H, LaBounty C, et al. SiGeC/Si superlattice microcoolers. Appl Phys Lett, 2001, 78: 1580–1582
- 303 Zhang Y, Zeng G H, Piprek J, et al. Microrefrigerators fusion bonded with optoelectronic devices. IEEE Trans Compon Packag Technol, 2005, 28: 658–666
- 304 陈云飞. 基于微纳结构的制冷器. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36: 356–360
- 305 Shakouri A. Nanoscale thermal transport and microrefrigerators on a chip. Proc IEEE, 2006, 94: 1613–1638
- 306 阮雷, 吴云峰, 陈镇龙, 等. 半导体超晶格微制冷器的研究进展. 红外, 2007, 28: 1–5
- 307 Zhang Y, Zeng G H, Hoffman C, et al. Enhanced hot spot cooling using bonded superlattice microcoolers with a trench structure. IEEE Trans Compon Packag Technol, 2008, 31: 552–558
- 308 Mul'shukov A G, Chao K A. Opto-thermionic refrigeration in semiconductor heterostructures. Phys Rev Lett, 2001, 86: 5570–5573
- 309 韩鹏, 金奎娟, 周岳亮, 等. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs 半导体量子阱光辐射-热离子制冷. 物理学报, 2005, 54: 4345–4349
- 310 Han P, Jin K J, Zhou Y L, et al. Analysis of optothermionic refrigeration based on semiconductor heterojunction. J Appl Phys, 2006, 99: 074504
- 311 Han P, Jin K J, Ren S F, et al. Numerical analysis of optothermionic refrigeration in semiconductor triple-well structure. J Appl Phys, 2007, 102: 114501
- 312 Han P, Jin K J, Zhou Y L, et al. Numerical designing of semiconductor structure for optothermionic refrigeration. J Appl Phys, 2007, 101: 014506
- 313 Zhang L L, Han P, Jin K J, et al. A numerical design of opto-thermionic refrigeration with perovskite oxide heterostructures. J Phys D Appl Phys, 2009, 42: 125109
- 314 Xuan X C. Combined thermionic-thermoelectric refrigerator. J Appl Phys, 2002, 92: 4746–4750
- 315 Robinson L B, Beaty R C. An analysis of direct energy converters by the methods of irreversible thermodynamics. J Appl Phys, 1965, 36: 142–153

- 316 Wilkins D R. A unified theoretical description of thermionic converter performance characteristics. *J Appl Phys*, 1968, 39: 2452–2458
- 317 Robinson L B, Shimada K. Correlation between nonequilibrium thermodynamic theory and V-I curves of a thermionic converter. *J Appl Phys*, 1976, 47: 107–113
- 318 Moyzhes B Y, Fitzpatrick G O. Maximum thermionic energy conversion efficiency based on the thermodynamics of irreversible processes. *Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. Washington, DC, 1996
- 319 Nolas G S, Goldsmid H J. A comparison of projected thermoelectric and thermionic refrigerators. *J Appl Phys*, 1999, 85: 4066–4070
- 320 Chen G, Shakouri A. Heat transfer in nanostructures for solid-state energy conversion. *ASME J Heat Transfer*, 2002, 124: 242–252
- 321 Bhattacharyya S. Thermodynamic design of a power optimized irreversible thermionic generator. *Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Honolulu, 1997
- 322 Bhattacharyya S. Design of a thermodynamically power optimized irreversible thermionic generator. In: Wu C, Chen L G, Chen J C. *Recent Advances in Finite-Time Thermodynamics*. New York: Nova Science Publishers, 1999. 105–113
- 323 丁泽民, 陈林根, 孙丰瑞. 不可逆真空热离子发电机性能优化. 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议. 武汉, 2011
- 324 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Performance analysis and optimization of a single-barrier solid-state thermionic refrigerator with external heat transfer. *Heat Transfer Engng*, 2012, 33: 693–703
- 325 丁泽民, 陈林根, 孙丰瑞. 不可逆半导体固态热离子制冷器性能分析和优化. 高等学校工程热物理第二十届全国学术会议. 青岛, 2014
- 326 Zhou R, Dagel D, Lo Y H. Multilayer thermionic cooler with a varying current density. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 1767–1769
- 327 Angrist S W. *Direct Energy Conversion*. 4th ed. Boston: Allyn and Bacon Inc, 1992
- 328 Rowe D M. *CRC Handbook of Thermoelectrics*. Boca Raton FL: CRC Press, 1995
- 329 Ma X, Riffat S B. Thermoelectric: A review of present and potential applications. *Appl Therm Engng*, 2003, 23: 913–935
- 330 Bell L E. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, 2008, 321: 1457–1461
- 331 Ulrich M D, Barnes P A, Vining C B. Comparison of solid-state thermionic refrigeration with thermoelectric refrigeration. *J Appl Phys*, 2001, 90: 1625–1631
- 332 Luo J, Chen L G, Sun F R, et al. Optimum allocation of heat transfer surface area for cooling load and COP optimization of a thermoelectric refrigerator. *Energy Convers Manage*, 2003, 44: 3197–3206
- 333 Chen L G, Li J, Sun F R, et al. Effect of heat transfer on the performance of two-stage semiconductor thermoelectric refrigerators. *J Appl Phys*, 2005, 98: 034507
- 334 Meng F K, Chen L G, Sun F R. A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities. *Energy*, 2011, 26: 3513–3522
- 335 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Optimum performance analysis of a combined thermionic-thermoelectric refrigerator with external heat transfer. *J Energy Inst*, 2014, doi: 10.1016/j.joei.2014.06.004
- 336 廖天军, 杨智敏, 林比宏. 热离子-温差热电混合发电模块的优化性能研究. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2014, 44: 125–133
- 337 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Performance analysis for an irreversible combined thermionic-thermoelectric generator with finite rate heat transfer. *Environ Eng Manage J*, 2015, 14: 97–108
- 338 Singhal S C. Advances in solid oxide fuel cell technology. *Solid State Ionics*, 2000, 135: 305–313
- 339 衣宝廉. 燃料电池-原理、技术、应用. 北京: 化学工业出版社, 2003
- 340 毛宗强. 燃料电池. 北京: 化学工业出版社, 2005
- 341 Palsosn J, Selimovic A, Sjunnesson L. Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation. *J Power Sources*, 2000, 86: 442–448
- 342 Grillo O, Magistri L, Massardo A F. Hybrid systems for distributed power generation based on pressurization and heat recovering of an exiting 100 kW molten carbonate fuel cell. *J Power Sources*, 2003, 115: 252–267
- 343 Zhao Y, Chen J. Modeling and optimization of a typical fuel cell-heat engine hybrid system and its parametric design criteria. *J Power Sources*, 2009, 186: 96–103
- 344 廖天军, 杨智敏, 林比宏. 固体氧化物燃料电池-斯特林热机混合动力系统的性能优化. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 822–832
- 345 杨智敏, 廖天军, 林比宏. 固体氧化物燃料电池-温差热电混合系统的性能优化. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2014, 44: 569–580
- 346 杨智敏, 廖天军, 林比宏. 燃料电池-真空热离子混合系统的性能特性和优化分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1173–1184

Progress in study on finite time thermodynamic performance optimization for three kinds of microscopic energy conversion systems

DING ZeMin, CHEN LinGen, WANG WenHua & SUN FengRui

Institute of Thermal Science and Power Engineering; Military Key Laboratory for Naval Ship Power Engineering; College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

With the development of molecular biology technology, nanotechnology and micro electronic technology, more and more attentions have been paid to the microscopic energy conversion systems. The research on energy conversion mechanism and efficiency for micro-energy conversion system is a new subject concerning the interdisciplinary integration of thermodynamics, statistical mechanics, physics theory, etc. Performance optimization is one of the key science problems in revealing the mechanism of energy conversion and improving efficiency of energy utilization for micro-energy conversion system. On the basis of introducing the origin and development of the finite time thermodynamics theory, this paper reviews the recent advances of thermodynamic optimization for three kinds of typical microscopic energy conversion systems, i.e., the thermal Brownian motors, energy selective electron engines and the thermionic energy conversion devices, and proposes the future research prospects.

microscopic energy conversion systems, thermal Brownian motors, energy selective electron engines, thermionic devices, performance optimization, finite time thermodynamics

doi: 10.1360/N092014-00417