

学校编号： 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号： 200124002

UDC\_\_\_\_\_

## 硕士学位论文

# 一类不可逆三源化学泵优化性能的研究

## Investigation on the optimum performance of a class of irreversible three-source chemical pumps

吴素枝

指导教师姓名：林国星 教授

申请学位级别：硕 士

专业名称：理 论 物 理

论文提交日期：2004 年 4 月

论文答辩时间：2004 年 月

学位授予单位：厦 门 大 学

学位授予日期：2004 年 月

答辩委员会主席：\_\_\_\_\_

评 阅 人：\_\_\_\_\_

2004 年 5 月

# 摘 要

根据驱动能流的不同,人们将热力学机分为热机、化学机和其它类型机。对于热流驱动的热力循环设备已经有了大量的研究,特别是有限时间热力学的应用,使这一领域的研究更加活跃。近十几年来,应用有限时间热力学方法研究热力循环已经拓展到化学反应、化学机和化学泵等循环设备。类似于可由太阳能,地热能,工业废热等热流驱动的热源热泵,三源化学泵是以质量流而不是以高品位的功来驱动循环的新型化学循环系统,它工作在三个化学势不同的物质库(称之为驱动库、泵质库和环境库)之间,应用这类循环设备对于节约能源和减少环境污染等具有重要意义,符合可持续发展的战略目标。本文建立受传质不可逆性、工质内部不可逆性和质量漏等多种不可逆因素影响的一类三源化学泵新循环模型,应用有限时间热力学方法导出一类不可逆三源化学泵性能系数和泵能率的数学表达式。在此基础上,应用最优控制论进一步分别探索不可逆化学势变换器和不可逆三源化学泵循环的优化性能,详细分析传质不可逆性、工质内部不可逆性和质量漏对循环性能的本质影响,讨论循环工质在等化学势过程的最佳化学势和三个质量交换过程的最佳传质时间及其匹配,确定了化学泵的最佳工作区域和一些重要性能参数界限。同时,文中表明了只要存在质量漏,三源化学泵的性能系数总有一个极大值,并对应一个非零的泵能率。这明显不同于只受传质不可逆性和工质内部不可逆性影响的三源化学泵的循环性能。本文所得的结论不仅具有更大的普遍性,可推出相关文献中的许多重要结论,而且能为实际化学循环设备,如质量交换器,与质量传递相关的电化学、光化学及固态设备等的开发和优化设计提供新理论指导。

关键词: 三源化学泵; 不可逆性; 优化分析

## Abstract

According to the difference of energy currents which are used to operate the engines, it is possible to distinguish thermodynamic engines into thermal, chemical and other engines. A lot of the research work has been done in thermodynamic cycle devices driven by heat currents. Especially, the application of the finite time thermodynamics has made the investigation in this field more active. In recent decade, the thermodynamic cycles investigated by using the method of the finite-time thermodynamics have been extended to the cyclic equipments such as chemical reactions, chemical engines and chemical pumps. Like a three-source heat pump driven by solar energy, geothermal energy, industrial waste heat, and so on, a three-source chemical pump is a new chemical cycle system which can be driven by mass current rather than by "high-grade" work and is operated among three different chemical potential reservoirs namely the driving, pumped-mass and circumstance reservoirs. The application of this cyclic device has a great significance for saving energy and reducing environmental pollution and accords with the strategic target of sustainable development. In this paper, a new cyclic model of a class of three-source chemical pumps is established, in which the multi-irreversibilities, e.g., finite-rate mass transfer, internal irreversibility of the cyclic working fluid and mass leak, are taken into account. By using the method of finite time thermodynamics, the mathematical expressions of the coefficient of performance and the rate of energy pumping for a class of irreversible three-source chemical pumps are derived. Based on these expressions and the optimal control theory, the optimal performance of an irreversible chemical potential transformer and an irreversible three-source chemical pump are further explored and the essential influences of the finite-rate mass transfer, internal irreversibility of the cyclic working fluid and mass leak on the cyclic performance of the chemical pumps are analyzed in detail. The optimal chemical potentials of the cyclic working fluid in the iso-chemical-potential processes and the optimal mass-exchange times in the three mass-exchange processes and their optimal

distributions are discussed. Moreover, the optimally operating region and some important performance bounds of the chemical pumps are determined. In this paper, it is also showed that there always are a maximum coefficient of performance and a corresponding non-zero rate of energy pumping as long as there exists mass leak in the chemical pumps, which is obviously different from the cyclic performance of a three-source chemical pump only affected by the irreversibilities of the finite-rate mass transfer and the internal irreversibility of the cyclic working fluid. The conclusions obtained here are of great universality. They can not only be used to derive many important conclusions in some literatures but also provide some new theoretical guidance for the exploitation and the optimal design of real chemical cyclic devices, e.g., mass exchangers; electrochemical, photochemical and solid state devices related to mass transfer process.

Key words: Three-source chemical pump; irreversibility; optimal analysis

# 目 录

摘要

英文摘要

## 第一章 引言

§ 1.1 有限时间热力学及其一些进展.....	1
§ 1.2 本文的研究内容.....	4
参考文献.....	5

## 第二章 一类不可逆三源化学泵的统一描述

§ 2.1 一类不可逆三源化学泵的统一循环模型.....	10
§ 2.2 数学表述.....	12
参考文献.....	13

## 第三章 不可逆化学势变换器的优化性能分析

§ 3.1 不可逆化学势变换器循环模型.....	15
§ 3.2 性能系数与泵能率间的优化关系.....	16
§ 3.3 最大泵能率及最大性能系数.....	19
§ 3.4 最佳传质时间及其匹配.....	22
§ 3.5 讨论.....	23
§ 3.6 另一种传质律.....	28
§ 3.7 小结.....	30
参考文献.....	30

## 第四章 传质、质量漏及内不可逆性对三源化学泵性能的影响

§ 4.1 不可逆三源化学泵循环模型.....	32
§ 4.2 基本优化关系.....	33
§ 4.3 重要的性能界限及其优化分析.....	35
§ 4.4 传质时间优化.....	38

§ 4.5 特例.....	40
§ 4.6 传质规律为扩散律时的情况.....	42
§ 4.7 小结.....	44
参考文献.....	44

## 第五章 结束语

厦门大学博硕士论文摘要库

# Contents

## Abstract

## English abstract

## Chapter 1 Introduction

1.1 Finite time thermodynamics and some of its developments .....	1
1.2 Outline of this thesis.....	4
References.....	5

## Chapter 2 The unified description of a class of irreversible three-source chemical pumps

2.1 The unified cycle model of a class of irreversible three-source chemical pumps.....	10
2.2 Mathematical expressions.....	12
References.....	13

## Chapter 3 Analysis on the optimum performance of an irreversible chemical potential transformer

3.1 The cyclic model of an irreversible chemical potential transformer.....	15
3.2 The optimal relationship between the coefficient of performance and the rate of energy pumping.....	16
3.3 The maximum rate of energy pumping and maximum coefficient of performance.....	19
3.4 Optimum mass-transfer times and their distribution.....	22
3.5 Discussion.....	23
3.6 Another of mass-transfer law.....	28
3.7 Conclusions.....	30
References.....	30

## **Chapter 4 Influences of finite-rate mass transfer, mass leak and internal irreversibility on the performance of a three-source chemical pump**

4. 1 The cyclic model of an irreversible three-source chemical pump.....	32
4. 2 A fundamental optimal relation.....	33
4. 3 Important performance bounds and their optimal analysis.....	35
4. 4 Optimization on mass transfer time.....	38
4. 5 Special cases.....	40
4. 6 Diffusive mass transfer law.....	42
4. 7 Conclusions.....	44
References.....	44

## **Chapter 5 Summary**



# 第一章 引言

## § 1.1 有限时间热力学及其一些进展

有限时间热力学应用热力学、流体力学、传热学和其他传输过程基本理论，在有限时间和有限尺寸约束下，研究非平衡态热力系统在有限时间中能流和熵流的演化规律。有限时间热力学应用最优控制理论探索热力系统的最小熵产生、最小可用能损失和最佳运行轨迹，它的一个主要目标是要分析多种不可逆因素对热力循环系统性能的影响，确定在这些不可逆因素影响下系统的各种优化性能。

有限时间热力学是在经典热力学基础上发展起来的。而经典热力学关于平衡态和可逆过程的描述和许多优化判据为有限时间热力学的发展奠定了基础。事实上，经典热力学是关于平衡态和过程变量由一个平衡态变换到另一个平衡态的一种极限理论，它所研究的热力学系统是由一系列平衡态或准静态的连续变化所形成的可逆过程所组成，这就使得过程进行的时间趋于无穷大。对热机而言，这时虽有一定的功输出，但输出功率为零。尽管这样，在经典热力学中，可逆卡诺热机模型的建立仍起了极其重要的作用，它奠定了热机理论的基础。事实上，卡诺效率  $\eta_c = 1 - T_L / T_H$  确定了工作在温度为  $T_H$  和  $T_L$  的两个热源间的一切热机效率的最高界限。而实际热机总是存在一些不可逆因素，如热阻、摩擦、热漏等。因而以可逆过程为基础的卡诺效率，对实际热机来说是可望不可及的。实际热机的效率总是低于卡诺效率  $\eta_c$ 。

为了使理论更好地指导实际，近二十几年来，人们致力于寻找比经典热力学更接近于实际的性能界限，解决经典热力学和非平衡态热力学所未解决的一大类问题。早在上世纪七十年代，国内外一些学者以热力学基本定律为基础，结合有限时间过程中系统所遵循的不可逆规律，应用变分原理，最优控制论及其它一些数学工具，初步建立了有限时间热力学理论。它是现代热力学理论的一个重要新分支，也是平衡态热力学在有限时间系统的延伸。

在有限时间热力学理论中，目前应用相当普遍的一种理论模型是内可逆循环模型，内可逆热机就是这种模型的典型代表。内可逆热机把传热不可逆性归结为循环工质外部，即循环工质与热源之间，而循环内部是可逆的。从内可逆热机模型出发，应

用经典热力学理论、最优控制论及其它数学工具可揭示传热不可逆性对热机循环优化性能所带来的根本性影响，揭示循环的功率效率特性。1957年，法国科学家 Chambadal<sup>[1]</sup>对实际的热力装置的效率进行了研究。同年，前苏联科学家 Novikov<sup>[2]</sup>最先导出卡诺热机在最大输出功率时的效率等于 $1 - \sqrt{T_L/T_H}$ 。后来，Curzon 和 Ahlborn<sup>[3]</sup>在1975年从理论上研究了热源与工质间的有限速率热传递对卡诺热机最大输出功率的影响，也导出了卡诺热机在最大输出功率时的效率等于 $1 - \sqrt{T_L/T_H}$ ，人们后来称之为 CA 效率，即 $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{T_L/T_H}$ 。CA 效率的导出为有限时间热力学理论的建立和发展起了推动作用。应该指出，由于在内可逆循环模型中仅考虑传热不可逆性，所以由它所导出的结果还不能对实际热机的优化性能作出较精确的描述。为使理论更进一步接近于实际热机运行的情况，已有不少学者在内可逆热机模型的基础上，考虑除了传热不可逆以外的其他不可逆效应，如热漏、摩擦、涡流，惯性等。例如，Andresen<sup>[4]</sup>等人提出了用三循环黑箱模型研究了内不可逆热机的最大功率和最大效率，获得了一些有意义的结果，但未分析热漏的影响。Bejan<sup>[5]</sup>于1988年研究了只有热阻和热漏影响的卡诺热机，对热漏作了较仔细的分析。Yan 和 Chen<sup>[6-10]</sup>等引入不可逆程度  $I$  来描述工质内部不可逆性，并研究内不可逆热机的循环特性，获得了有意义的结论，使有限时间热力学的研究进入了一个新的阶段。

在不可逆热机模型的基础上，一些学者还研究了二热源制冷机<sup>[11,12]</sup>、二热源热泵<sup>[13,14]</sup>、三热源制冷机<sup>[15,16]</sup>、三热源热泵<sup>[17-19]</sup>，多级不可逆制冷循环<sup>[20-23]</sup>，有限热源热力循环<sup>[24-29]</sup>等的优化性能，获得了循环的基本优化关系，并应用这些基本优化关系进一步讨论了传热不可逆性、工质内部不可逆性和热漏等不可逆因素对循环性能的影响，同时确定了相关性能界限，如最小熵产生、最小可用能损失等等。这些研究结果丰富了有限时间热力学理论。

近几年来，有限时间热力学的研究领域被拓展到化学反应、化学机和化学泵等设备。而化学循环系统的有限时间热力学研究有两类：一类是利用化学反应所释放出来的热驱动热机的研究<sup>[30-33]</sup>；另一类是对利用其它能量转换形式获得输出功的化学机的研究<sup>[34-38]</sup>。在化学机中化学势和质量传递的地位类似于在热机中温度和熵的地位。De Vos<sup>[34,35]</sup>建立了内可逆化学机循环模型，同时还提出了广义内可逆化学机模型，并

以此来研究在有限化学势差中涉及传质过程的化学反应、太阳能转换及光合作用等过程的优化；Delgado<sup>[36]</sup>利用渗透现象对化学机的性能进行了深入的讨论；Gordon<sup>[37,38]</sup>等讨论了有限、无限化学势库及多级化学势库时的内可逆化学机的最大输出功率和最优循环构型；Chen 和 Lin 等<sup>[39-41]</sup>进一步讨论了内可逆化学机循环特性，导出了循环的基本优化关系，同时还讨论了质量漏对内可逆化学机性能的影响；Lin<sup>[42]</sup>等开拓了内可逆二源化学泵循环性能的研究，证明了在线性不可逆热力学中的传质律影响下二源化学泵循环的最优构型是由两个等化学势过程和两个等质量交换过程所组成的循环。在此循环模型的基础上，Lin 导出了循环的泵能率与性能系数间的优化关系，获得了化学泵有关性能界限。最近，Lin<sup>[43-45]</sup>等的进一步研究已拓展到三源化学泵。所研究的三源化学泵是以质量流而不是以高品位的功来驱动循环的一种新型热力循环设备，它在节能环保等方面类似于以低品位热能驱动的热源热泵，不仅能将低化学势的一些物质提升到更高化学势区域，而且还能回收、利用废物流，达到节约能源、减少环境之目的。Lin<sup>[43-45]</sup>等在建立内可逆三源化学泵循环模型的同时，还证明了内可逆三源化学泵可等效于一台内可逆化学机和一台内可逆二源化学泵组成的联合循环系统，并导出内可逆三源化学泵的性能系数与泵能率间的优化关系，分析了传质不可逆性对循环性能的本质影响，从而得到一系列有意义的新结论。进一步地，Lin<sup>[46]</sup>还探索了传质不可逆性及工质内部不可逆性对三源化学泵循环性能的影响，获得许多更符合实际的新特性和性能界限。此外，Lin<sup>[47]</sup>还研究了传质不可逆性、工质内部不可逆性及质量漏对化学机循环性能的综合影响，获得了一系列有意义的新结论，对实际化学机优化设计有重要的指导意义。这些表明综合考虑传质不可逆性、质量漏及工质内部不可逆性等对一类化学泵循环性能的影响是一项很有意义的新工作，开展这方面的研究很有必要。

## § 1.2 本文的研究内容

三源化学泵是以质量流而不是以高品位的功来驱动循环的化学循环系统，它工作在三个化学势不同的物质库（即驱动库、泵质库和环境库）之间。在内可逆三源化学泵循环模型的基础上，本文建立一个更接近于实际的不可逆三源化学泵循环模型，除了考虑有限速率质量传递和工质内部不可逆效应外，还考虑了驱动库与环境库之间

的质量漏。基于所建立的不可逆三源化学泵循环模型，探索多种不可逆性对化学泵循环优化性能的综合影响，获得不可逆三源化学泵的相关性能界限及优化工作区域，所得的结论可为实际三源化学泵设备的优化设计提供些理论指导。

第二章建立一类不可逆三源化学泵的统一循环模型，基于线性不可逆热力学中传质规律，导出一类不可逆三源化学泵性能系数和泵能率的普遍数学表达式。第三章和第四章分别讨论不可逆化学势变换器和另一种不可逆三源化学泵的循环优化性能，详细推导出各自的性能系数与泵能率间的优化关系，探讨传质不可逆性、工质内部不可逆和质量漏对循环性能所带来的根本性的影响，获得传质时间的最佳匹配及化学泵的最佳工作区间，同时确定一些重要性能参数的界限。本文所得的新结论不仅具有重要的学术理论价值，对实际化学泵设备具有指导意义，而且由它可推出相关文献的许多重要结论。这表明本文具有更普遍的意义。在第五章的结束语中，提出了进一步的研究方向。

#### 参考文献：

- [1] Chambadal P. Les Centrales Nuclearies[M]. Paris: Amand Colin, 1957,41-58.
- [2] Vovikov I I. The efficiency of atomic power stations (A review)[J]. Atommaya Energiya 3, 1957,11:409.
- [3] Curzon F and Ahlborn B. efficiency of a Carnot engine at maximum power output[J]. Am. J. Phys., 1975,43(1):22-24.
- [4] Andresen B.et al. Thermodynamics in finite time: extremals for imperfect heat engine.[J]. J. Chem. Phys., 1977,66(4):1571-1577.
- [5] Bejan A. Theory of heat transfer-irreversible power plants. Int. J. Heat Transfer[J], 1988,31(6):1211-1219.
- [6] 严子浚. 不可逆卡诺热机的最佳效率与供热率间的关系[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1991,30(1):25-28.
- [7] 严子浚. 有限时间热力学中不可逆卡诺热机[J]. 热能动力工程, 1994,9:369-373.
- [8] Chen J. The maximum power output and maximum efficiency of an heat irreversible Carnot heat engine [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1994,27:1144-1149.

- [9] Yan Z and Chen L. The fundamental optimal relation and the bounds of power output and efficiency for an irreversible Carnot heat engine [J]. J. Phys., A: Math. Gen., 1995,28:5167-6175.
- [10] Chen J, Wu C and Kiang R L. Maximum special power output of an irreversible radiant heat engine [J]. Energy Convers. & Mgmt., 1996, 37:17-22.
- [11] Yan Z and Chen J. A class of irreversible Carnot refrigeration cycles with a general heat transfer law [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1990,23:136-141.
- [12] Chlou J, Liu C, Chen C. The performance of an irreversible Carnot refrigerator cycle [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1995,28:1314-1318.
- [13] Chen J. Optimal performance analysis of irreversible cycle used as heat pump and heat refrigerators [J]. Int. J. Ambient Energy, 1997,18:107-112.
- [14] Chen L. Optimization of specific rate of heat pumping in combined heat pump cycles [J]. Energy Convers. & Mgmt., 1998,39:113-116.
- [15] Lin G and Yan Z. An optimal performance of an irreversible absorption refrigerator [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1997, 30:2006-2011.
- [16] Yan Z and Lin G. An ecological optimization criterion for an irreversible three-heat-source refrigerator [J]. Appl. Energy, 2000,66:213-224.
- [17] Chen J , Yan Z . Equivalent combined systems of three heat-source heat pump [J]. J. Chem. Phys. 1989,90: 4951-4955
- [18] Chen J and Andresen Bjarne. Optimal analysis of primary performance parameters for an endoreversible absorption heat pump[J]. Heat Recovery & CHP, 1995,15:723-731.
- [19] Chen J . Optimal choice of the performance parameters of an absorption heat transformer [J]. Heat Recovery System & CHP. 1995, 15: 249-256.
- [20] Chen J and Wu C. A multi-stage endoreversible refrigerator for low temperature application [J]. Int. J. Ambient Energy, 1996, 17:49-54.
- [21] Chen J, Du J and Wu C. The equivalent cycles of an  $n$  – stage irreversible combined refrigeration system [J]. Int. J. Ambient Energy, 1997,18:197-204.
- [22] Chen J. The general performance of an  $n$  – stage combined refrigeration system

- affected by multi-irreversibilities [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, 40:1939-1948.
- [23] Chen J, Chen X. and Wu C. Optimization of the rate of exergy output of a multi-stage endoreversible combined refrigeration system[J]. *Exergy*, 2001, 1(2): 100-106.
- [24] 姚寿广, 周根明. 有限热源换热时热机的有限时间热力学分析[J]. *华东船舶工业学院学报*, 1994, 8:36-39.
- [25] 严子浚, 陈金灿. 关于两有限热源间热机工作参数选择的有限时间热力学准则[J], *应用科学学报*, 1994, 12:42-45.
- [26] 李大鹏, 孙丰瑞, 薛蒙, 陈林根. 有限热源的热机供热率与效率关系的有限时间热力学分析[J], *太阳能学报* 1995, 16:379-383.
- [27] 严子浚, 黄慧广. 两有限热源制冷循环的优化性能[J]. *应用科学学报* 1997,12:225-226.
- [28] 林国星, 严子浚.有限低温热源三热源制冷机的优化分析[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*,1999,38:35-39.
- [29] 郑彤, 孙丰瑞, 陈林根.另一类线性传热时热漏和有限热源对两热源热机最优构型的影响[J]. *海军工程大学学报* 2002,12:1-5.
- [30] Ondrechen M J, Berry R S. Thermodynamics in finite time: A chemical driven engine[J]. *J. Chem. Phys.*, 1980, 72(9): 5118-5124.
- [31] Ondrechen M J, Andresen B, Berry R S. Thermodynamics in finite time: Processes with temperature dependent chemical reactions[J]. *J. Chem. Phys.*, 1982, 73(11): 5838-5843.
- [32] Hjelfelt A, Harding R H, Ross J. Optimization of kinetic and thermodynamic properties in irreversible open chemical and thermal engine[J]. *J. Chem. Phys.*, 1989, 91(6): 3677-3684.
- [33] 陈林根, 孙丰瑞, 陈文振. 化学反应驱动热机的功率优化[J], *海军工程学院学报*, 1993(1): 51-54.
- [34] De Vos A. Endoreversible thermodynamics and chemical reactions[J]. *J. Phys. Chem.*, 1991,95: 4534-4540.
- [35] De Vos A. *Endoreversible thermodynamics and Solar Energy Conversion*[M]. Oxford:

Oxford University Press,1992.

- [36] Delgado E. Optimization of an endoreversible chemical engine based on osmosis[J]. *J. Appl. Phys.* 1999, 85:7467-7470.
- [37] Gordon J M. Maximum work from isothermal chemical engines [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993,73(1):8-11.
- [38] Gordon J M, Orlov V N. Performance characteristics of endoreversible chemical engines [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993,74: 5303-5308.
- [39] Chen L, Sun F, Wu C, Yu J. Performance characteristics of isothermal chemical engines [J]. *Energy Convers. Mgmt.*, 1997,38 (18): 1841-1846.
- [40] Chen L, Sun F, Wu C. Performance of chemical engines with a mass leak [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1998,31:1595-1600.
- [41] 林国星, 陈金灿. 质量传递不可逆时化学转换器的优化特性[J]. *南京大学学报*, 1997, 33: 216-218.
- [42] Lin G, Chen J., Optimal analysis on the cyclic performance of a class of chemical pumps [J]. *Appl. Energy* , 2001,70:35-47.
- [43] 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.
- [44] Lin G, Chen J, Hua B. Optimal analysis on the performance of a chemical engine-driven chemical pump [J]. *Appl. Energy*, 2002, 72: 359-370.
- [45] Lin G, Chen J, Hua B. General performance characteristics of an irreversible three source chemical pump [J]. *Energy Convers. Mgmt.* 2003, 44:1 719-1 731.
- [46] 林国星. 传热、传质对三源热力循环性能影响的研究[M]. 厦门大学博士学位论文. 2002,12.
- [47] Lin G, Chen J, Brück E. A class of irreversible chemical engines and its optimal performance analysis [J]. *Appl. Energy*, 2004, 78(2): 123-136.

## 第二章 一类不可逆三源化学泵的统一描述

三源化学泵是工作在三个不同化学势库间的化学循环系统，它是以质量流而不是以高品位的功来驱动循环的一种新型的热力学循环装置，在功能上类似于以低品位热能驱动循环的三热源热泵<sup>[1-8]</sup>，应用它不仅可使低化学势区域的一些物质提升到更高化学势区域，而且还能回收、利用废物流，达到节约能源和减少环境污染之目的。因此，研究三源化学泵符合当前能源开发和有效利用的宗旨和潮流，具有重要的现实意义。本章建立一类不可逆三源化学泵统一循环新模型，在模型中，不仅考虑了有限速率质量传递和工质内部不可逆性，而且还考虑了高低物质库间的质量漏。基于新循环模型，应用相关热力学理论，获得了一类不可逆三源化学泵的一般循环特性和数学表式。同时，为后面两章分别讨论化学势变换器和另一种三源化学泵的新循环特性和新性能界限奠定基础。

### § 2.1 一类不可逆三源化学泵统一循环模型

考虑图 2.1 所示的一类不可逆三源化学泵，其中  $\mu_H$ 、 $\mu_P$ 、 $\mu_L$  分别为三个物质库的化学势，均设为常数； $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3$  分别为工质与物质库  $\mu_H$ 、 $\mu_P$ 、 $\mu_L$  交换质量的三个等化学势过程的化学势。考虑实际传质过程是在有限速率下完成的，三个等化学势过程的化学势与相应物质库的化学势不等； $\Delta N_1$ 、 $\Delta N_2$ 、 $\Delta N_3$  分别为每循环工质在三个等化学势过程与对应物质库交换的质量。

除了工质与物质库间的传质不可逆性外，由于工质内部总存在摩擦、涡流等不可逆效应，故工质内部不可逆性是不可避免的。只要有内不可逆性的存在，工质内部循环的熵产总是大于零。根据熵的定义及热力学分析，有

$$(\Delta U_2 - \mu_2 \Delta N_2) - (\Delta U_1 - \mu_1 \Delta N_1) \pm (\Delta U_3 - \mu_3 \Delta N_3) > 0 \quad (2.1)$$



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库