

学校编码: 10384

密级_____

学号: 32420141152259

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

两类新型动力循环的流程模拟与性能优化
研究

Investigation on the Process Simulation and Performance
Optimization of Two Classes of Novel Power Cycles

指导教师姓名: 赵英汝 副教授

专业名称: 能效工程

论文提交日期: 2017 年 4 月

论文答辩日期: 2017 年 5 月

2017 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

以超临界二氧化碳为工质的 Allam 循环是一种颠覆性的发电技术，有望突破现有火力发电循环趋于效率极限的技术瓶颈，并从本质上解决火力发电的排放问题。有机朗肯循环作为一种可利用低温热源进行发电的余热回收技术，被广泛应用于工业废热回收、太阳热能发电、地热发电、生物质能燃烧发电等领域。针对这两种极具潜力的发电技术，本文在 gPROMS 平台下开展系统的热力学分析、流程模拟和性能优化，围绕系统的核心设备和关键传热问题进行深入研究。

首先，对 Allam 循环建立详细的流程模型，对透平的入口温度、入口压力、循环压比、冷却器出口温度等系统关键设计和运行参数进行敏感性分析，并研究该循环与其他系统的耦合方式。

其次，对利用低温热水进行发电的亚临界有机朗肯循环系统进行流程模拟，在固定窄点温差和固定余热回收总量两种模式下，研究循环的蒸发温度、冷凝温度和冷凝器的冷却水入口温度等关键参数变化对系统性能的影响。在此基础上针对不同的系统性能评价指标，对系统进行参数优化。同时，研究蒸发器和冷凝器的窄点温差及热源温度对系统最优运行参数的影响，并针对优化工况开展蒸发器和冷凝器设计，重点研究换热器的尺寸参数——板间距、板长、板宽对换热器性能的影响。

此外，在对亚临界有机朗肯循环进行模拟分析的基础上，针对同样的热源条件选取合适的工质开展超临界有机朗肯循环系统的研究，重点分析流体的超临界特性带来的窄点温差问题，并对超临界循环的透平入口温度和压力进行参数敏感性分析。在此基础上进一步探讨超临界循环的蒸发器设计，并探索工质在临界点附近的物性变化对换热过程的影响。

本文建立的一体化流程模型可实现系统级的性能仿真与分析计算，有助于揭示 Allam 循环和有机朗肯循环的一般性能特性，给出的一些关键参数的优化判据可为同类动力循环的优化设计与控制运行提供理论指导和参考依据。

关键词：Allam 循环 有机朗肯循环 参数优化 窄点温差 换热器设计

Abstract

Allam cycle using supercritical CO₂ as working fluid is a disruptive power generation technology which is expected to overcome the bottleneck of the existing thermal power cycle effectively and solve the problems of emissions from thermal power generation. Organic Rankine cycle is a low temperature waste heat recovery technology which can be widely used in the recovery of industrial waste heat, solar power, geothermal sources, biomass combustion and other fields. In view of these two kinds of power generation technology with great potential. Thermodynamic analysis, process simulation and performance optimization of the two technologies with huge potential are performed on the gPROMS platform and studies of core equipment and the key problem of heat transfer process are presented in this paper.

Firstly, a detailed process model of Allam cycle has been developed and comprehensive parametric sensitivity analysis of vital design and operating parameters has been conducted, including the turbine inlet temperature, inlet pressure, pressure ratio and outlet temperature of coolers and so on. The possible coupling configurations with other cycles have been studied as well.

Secondly, a thermodynamic model of organic Rankine cycle driven by low-temperature hot water has been also developed and the influence of some vital parameters on the system performance has been examined under two conditions of fixed heat exchanger pinch point temperature and fixed total heat absorption of system. On this basis, parametric optimization has been conducted considering different system performance evaluation indexes. Besides, the influence of the pinch point temperature difference of heat exchangers and the heat source temperature on the optimal operation parameters of the system have been explored as well. The design of evaporator and condenser under optimal conditions has been conducted, moreover, the influence of the heat exchanger size parameters including plate spacing, plate length, plate width on the performance of heat exchangers are also presented.

In addition, based on the modeling and analysis of subcritical organic Rankine cycle, supercritical organic Rankine cycle system driven by the same heat source with suitable working fluid has also been modelled and studied. It is of great importance to evaluate pinch point temperature difference caused by the unique properties of supercritical fluids, furthermore, the effects of turbine inlet temperature and pressure on the system performance has been examined as well. Evaporator design of the supercritical organic Rankine cycle has been conducted and the effect of thermodynamic properties of working fluid near critical point on the heat transfer process has also been explored.

The integrated process model established in this paper can realize the performance simulation and analysis on system level, which can help to reveal general performance characteristics of organic Rankine cycle and Allam cycle and the optimization criterion of key parameters can provide theoretical guidance and reference for optimization design and control of similar power cycles.

Keywords: Allam cycle; organic Rankine cycle; parameter optimization; pinch point temperature difference; heat exchanger design

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 Allam 循环发电技术	2
1.2.1 Allam 循环原理和优势	2
1.2.2 Allam 循环的研究现状	5
1.3 有机朗肯循环发电技术	6
1.3.1 有机朗肯循环技术优势	6
1.3.2 有机朗肯循环的研究现状	6
1.4 本文主要的研究内容与创新点	8
第二章 Allam 循环模拟分析	10
2.1 Allam 循环流程模拟	10
2.2 Allam 循环性能模拟与参数敏感性分析	14
2.2.1 典型工况下运行结果	14
2.2.2 透平入口温度对系统性能的影响	15
2.2.3 透平入口压力对系统性能的影响	16
2.2.4 透平压比对系统性能的影响	18
2.2.5 冷却器 1 出口温度对系统性能的影响	19
2.2.6 冷却器 3 出口温度对系统性能的影响	20
2.2.7 冷却器 2 压力对系统性能的影响	21
2.3 Allam 循环的未来发展方向	23
第三章 有机朗肯循环模拟分析及优化	24
3.1 有机朗肯循环流程模拟	24
3.2 固定窄点温差模式下的参数分析及优化	30

3.2.1 参数敏感性分析	31
3.2.2 系统性能优化	35
3.3 固定热回收总量模式下的参数分析及优化	40
3.3.1 参数敏感性分析	40
3.3.2 系统性能优化	45
3.4 不同有机工质的对比分析	45
第四章 亚临界有机朗肯循环的换热器设计	48
4.1 蒸发器设计	48
4.2 冷凝器设计	54
4.3 换热器尺寸对换热器性能的影响分析	55
4.3.1 板间距对换热器性能的影响	55
4.3.2 板长对换热器性能的影响	57
4.3.3 板宽对换热器性能的影响	59
第五章 超临界有机朗肯循环的性能分析与换热器设计	61
5.1 超临界有机朗肯循环的窄点温差分析	61
5.2 超临界有机朗肯循环的参数敏感性分析	65
5.2.1 透平入口温度对系统性能的影响	66
5.2.2 透平入口压力对系统性能的影响	67
5.3 超临界有机朗肯循环的蒸发器设计	68
第六章 结论及展望	72
6.1 全文工作总结	72
6.1.1 Allam 循环主要结论	72
6.1.2 ORC 系统主要结论	73
6.2 未来工作展望	74
参 考 文 献	75
攻读硕士学位期间的科研成果	82
致 谢	83

Table of Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
Chapter1 Introduction	1
1.1 Background and significance of the subject	1
1.2 Allam cycle power generation technology	2
1.2.1 Principle and advantages of Allam cycle	2
1.2.2 Research status of Allam cycle.....	5
1.3 Organic Rankine cycle power generation technology	6
1.3.1 Advantages of organic Rankine cycle	6
1.3.2 Research status of organic Rankine cycle	6
1.4 Main research contents and innovation of this paper	8
Chapter2 Simulation analysis of Allam cycle	10
2.1 Process simulation of Allam cycle	10
2.2 Performance simulation and parameter sensitivity analysis	14
2.2.1 Simulation results under typical operating conditions.....	14
2.2.2 Effect of turbine inlet temperature on system performance	15
2.2.3 Effect of turbine inlet pressure on system performance	16
2.2.4 Effect of turbine pressure ratio on system performance.....	18
2.2.5 Effect of cooler1 outlet temperature on system performance.....	19
2.2.6 Effect of cooler3 outlet temperature on system performance.....	20
2.2.7 Effect of cooler2 pressure on system performance.....	21
2.3 Future development of Allam cycle	23
Chapter3 Simulation analysis and optimization of ORC	24
3.1 Process simulation of ORC	24
3.2 Parameter analysis and optimization under fixed pinch point temperature difference	30

3.2.1 Parameter sensitivity analysis.....	31
3.2.2 Optimization of system performance	35
3.3 Parameter analysis and optimization under fixed heat recovery	40
3.3.1 Parameter sensitivity analysis.....	40
3.3.2 Optimization of system performance	45
3.4 Comparative analysis of different organic working fluids.....	45
Chapter 4 Design of heat exchangers in subcritical ORC	48
4.1 Design of evaporator.....	48
4.2 Design of condenser	54
4.3 Influence of heat exchanger size on performance.....	55
4.3.1 Effect of plate spacing on heat exchanger performance.....	55
4.3.2 Effect of plate length on heat exchanger performance.....	57
4.3.3 Effect of plate width on heat exchanger performance.....	59
Chapter 5 Performance analysis and heat exchanger design of supercritical ORC	61
5.1 Analysis of pinch point temperature difference.....	61
5.2 Parameter sensitivity analysis of SORC	65
5.2.1 Effect of turbine inlet temperature on system performance	66
5.2.2 Effect of turbine inlet pressure on system performance	67
5.3 The evaporator design of SORC.....	68
Chapter 6 Conclusions and Prospect	72
6.1 Summary of this thesis	72
6.1.1 Main conclusions of the Allam cycle	72
6.1.2 Main conclusions of the ORC system	73
6.2 Prospect of the future research.....	74
Reference	75
List of Publications	82
Acknowledgement	83

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

国际能源署在《世界能源展望》中预测全球的一次能源使用量会呈现日益增长的趋势^[1]，并且从 1990 年到 2040 年，石油所占的相对份额会逐渐减小，煤和天然气所占的份额会增大，因而煤和天然气未来仍然是用于发电的两种最主要的化石能源。与此同时，利用化石能源进行发电所带来的环境污染问题已成为全世界关注的焦点。政府、公众和企业对于传统化石能源使用对环境和气候变化造成的负面影响已经形成共识，开始大规模投入对其控制、缓解和修复，尤其在节能和清洁技术领域出现了大量的政策、补贴、减税、投资、技术和商业创新。能够高效使用现有燃料和热源，扩大清洁燃气和可再生能源等应用的技术和产品将有巨大的市场和发展空间。

中国当前着重产业结构调整和优化，虽然经济增速有所减缓，但是能源消耗总量仍然居高不下。根据 BP 的统计数据，2015 年中国的能源消耗总量位居全球之首，占全球能源消费总量的 23%^[2]。中国面临极为严峻的能源形势，一方面人均能源资源占有量低，石油和天然气的人均剩余采储量仅为全球平均水平的 7%，人均煤炭剩余采储量也仅为世界平均水平的 58.6%。另一方面中国的能源利用效率较低，以煤炭为主以及高能耗带来的能源短缺和环境问题已经成为国家亟待解决的难题。因此，中国必需大力发展高效低碳的发电技术和节能技术，才能维持经济的可持续发展，建设资源节约型、环境友好性社会。

目前，利用可再生能源经济高效地进行发电和并网仍然存在一些困难，而使用化石燃料的传统火力发电装置，如蒸汽朗肯循环、燃气轮机联合系统（CCGT）等在运行过程中存在实际的效率上限，并且加装碳捕集系统会增加能源系统的投资和建造成本。随着传统火力发电技术不断成熟、发电效率不断趋于技术极限，技术研究的热点开始转向新型动力循环系统以替代现有技术^[3]。

作为一种新型的发电技术，以超临界二氧化碳为工质的 Allam 动力循环被认为具有诸多潜在优势，有望突破现有动力循环技术发展的瓶颈。Allam 循环系统

简单、结构紧凑、效率高，可与采用化石燃料燃烧方式的热源结合，形成一种零排放的先进火力发电系统，有望从本质上提高系统效率且解决传统火力发电的排放问题，因而成为全球研究的热点^[4-7]。

除了从动力循环本身寻找替代技术，另一个解决途径就是发展余热回收利用技术。有机朗肯循环作为一种可利用低温热源进行发电的循环技术，被广泛应用于工业废热回收、太阳热能发电、地热发电、生物质能燃烧发电等领域。同时，该循环可以作为底层循环有效与其他发电系统进行耦合以提高整个系统的能源利用效率，减少能量损失，因而在联合循环发电领域大有作为。针对以上两种极具潜力的发电技术，本文开展了系统的热力学分析、流程模拟和性能优化，针对系统的核心设备和关键传热问题进行了详细的详细研究。文中建立的一体化流程模型可实现系统级的性能仿真与分析计算，有助于揭示系统的一般性能特性，给出的一些关键参数的优化判据可为同类动力循环的优化设计与控制运行提供理论指导和参考依据。

1.2 Allam 循环发电技术

1.2.1 Allam 循环原理和优势

Allam 循环是一种以超临界二氧化碳为工质的高压、低压比的布雷顿循环。图 1.1 和图 1.2 分别为以天然气为燃料的 Allam 循环流程图和 $p-h$ 图。其工作原理如下：循环中的核心部件是高压的富氧燃烧型燃烧室，燃料与来自空分装置的纯氧在其中燃烧，生成二氧化碳和水的高压混合物，继而进入透平膨胀做功。从透平排出的气体还有较高的温度，因此循环中设置了回热器，流出回热器的流体被冷却，其中的水蒸气冷凝为液体，经由水分离器排出系统。二氧化碳流体经过压缩过程再进入回热器，压缩过程采用压缩机与泵相结合的方式，压缩机为两级压缩中间冷却器式，可进一步降低压缩过程消耗的能量。经泵压缩的二氧化碳流体一部分被排出系统，以维持整个系统的质量平衡，另一部分进入回热器进行回热，并再次进入燃烧室，与燃烧生成的二氧化碳/水混合物一起进入透平，参与下一个循环。

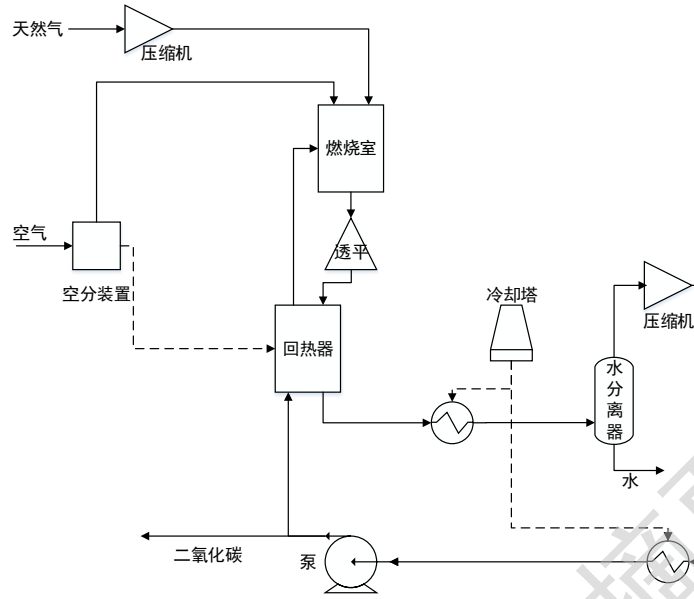


图 1.1 以天然气为燃料的 Allam 循环

Fig. 1.1 Allam cycle fueled by natural gas

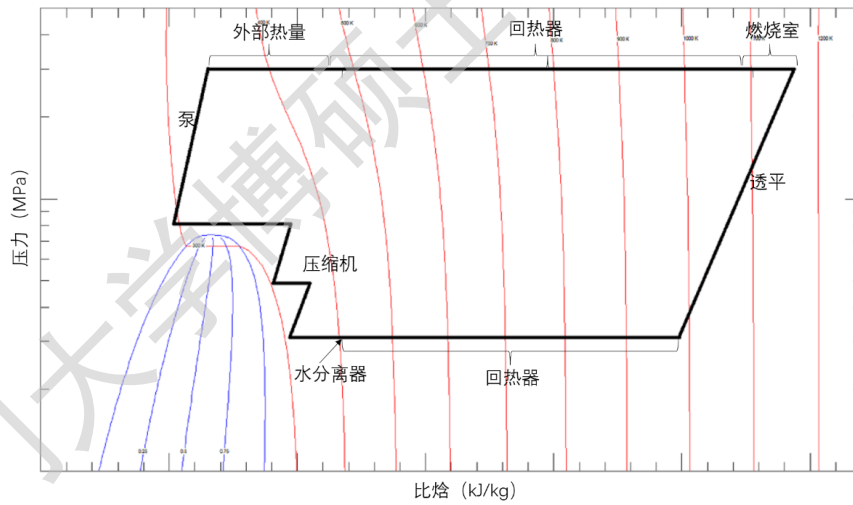


图 1.2 以天然气为燃料的 Allam 循环的压焓图

Fig. 1.2 Pressure-enthalpy diagram for natural gas Allam cycle

除了以天然气为燃料，Allam 循环也可以煤为燃料。以燃煤为燃料的 Allam 发电循环流程如图 1.3 所示。煤气化生产的合成气中存在大量衍生的杂质和水蒸气，其温度范围为 250 °C 到 300 °C，经水淬灭、洗涤和细颗粒过滤过程除去炉渣和无机杂质，过滤后的流体再将部分热量传递给系统内部回收的高压二氧化碳。从燃烧室出来的混合气体进入透平膨胀做功，经过内部回热器进行换热，并经进

一步冷却，将冷凝水排出系统。二氧化碳经加压后一部分排出系统，另一部分经过滤后重新进入燃烧室，参与下一个循环。

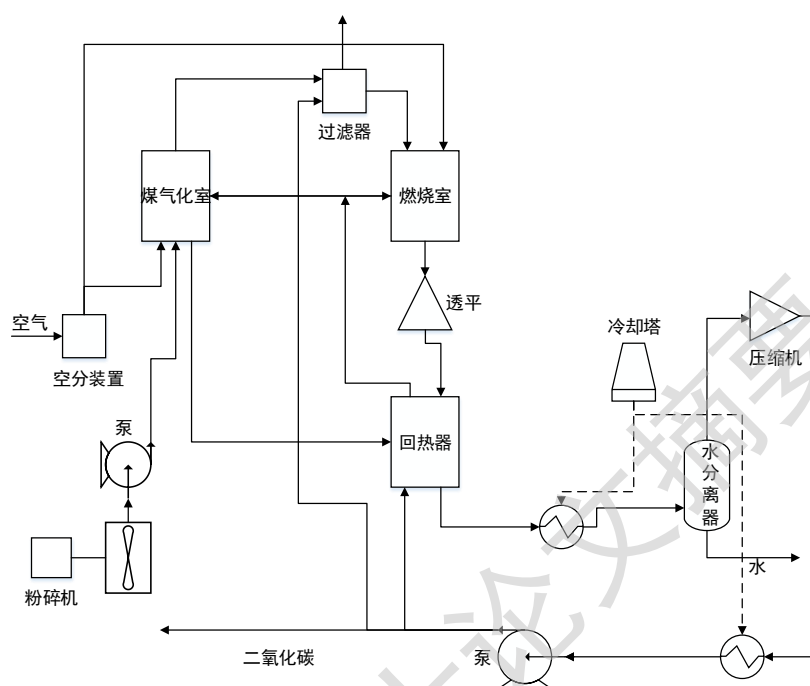


图 1.3 以煤为燃料的 Allam 循环

Fig. 1.3 Allam cycle fueled by coal

传统火电厂采用蒸汽朗肯循环为动力循环进行发电，依靠空气与燃料的燃烧产生热量，在锅炉中将水加热生成高温高压的水蒸气，水蒸气在透平中膨胀并推动透平做功。蒸汽循环中以水为工质，然而水蒸气是能量密度较低的工作流体，做功过程中能量损失达 50%~60%，并且其使用的化石燃料在燃烧时会产生一氧化氮、二氧化碳、二氧化硫和粉尘等大量有害气体，对人类健康和环境有着极大的危害。发电厂可使用捕集或净化装置以减少污染物排放，然而这些装置较为昂贵，建设成本高且设计复杂，会降低电厂的经济性和可靠性。

以超临界二氧化碳为工作流体的 Allam 循环可与采用化石燃料燃烧方式的热源结合，形成高效的发电系统。Allam 循环中通过燃烧生成的二氧化碳可经过内部循环再次进入燃烧室，其工作流体几乎是纯的高压二氧化碳。与朗肯循环不同，Allam 循环可以避免由于相变而导致的效率低下，并且通过回热器的使用提高了循环的能量利用率，在同样的工作温度下消耗的燃料减少。二氧化碳化学性质稳定、密度高、无毒性、低成本，循环系统简单，结构更为紧凑。此外，由于

Allam 循环使用几乎纯净的二氧化碳流体作为工质，更易进行碳捕集，可有效降低系统的复杂程度和投资成本。

Allam 循环的另一特点在于其富氧燃烧过程，使用的是纯氧而非空气。空气中接近百分之八十的气体组分是氮气，燃烧时会产生一氧化氮污染环境，而富氧燃烧几乎可以完全避免一氧化氮的生成。Allam 循环系统中利用空气分离装置（ASU）将空气中的氧气进行分离，ASU 目前已是成熟技术。以 Allam 循环替换蒸汽朗肯循环进行发电，不仅可以有效提升能量转换效率，还可将节省下来的投资用于 ASU，各方面均有优势。

综上，Allam 循环的主要优势归纳为以下几点：

（1）发电效率高，成本低。电力系统的效率是其经济竞争力的关键，常规发电技术经过几十年的优化，循环本身已经达到效率极限。而 Allam 循环的发电效率可达 58.9%，该效率值已经考虑了空分装置等辅助设备消耗的功率，与目前最佳的天然气联合循环电厂相比亦有很大的竞争力。

（2）结构简单，设备紧凑。循环的高效率意味着更高的功率密度，Allam 循环电厂与传统的天然气和燃煤电厂相比设备体积更小、结构更紧凑，占地面积大幅减小。

（3）零排放，利于二氧化碳捕集，选址灵活。Allam 循环是半封闭回路，可以对排放物进行精确控制。循环过程唯一的副产品是清洁的液态水和高压高纯度的二氧化碳，没有氮氧化物、硫化物、汞或其他颗粒物排放到大气。由于使用富氧燃烧，过程中不产生氮氧化物，因而不需要净化设备，电厂可以建在环保要求较为苛刻的城市地区。与传统的碳捕集技术不同，Allam 系统不需要额外的设备来消除碳排放，且能够捕获接近 100%纯度的二氧化碳。捕集后的二氧化碳可直接封存或用于强化采油过程（EOR）。此外，由于 Allam 循环可采用空气冷却，发电过程中不需要水蒸气，减少了对水的使用，因而电厂选址不受地理环境影响，可以建在缺水的地区。

1.2.2 Allam 循环的研究现状

近年来，Allam 循环的相关技术成为国际上的研究热点，在学术及企业界均引起广泛关注。目前正式发表的相关文献资料比较少，国内尚无相关研究。Allam 等^[5]详细描述了 Allam 动力循环的构型方式及特点并研究该循环能获取高效率的

根本原因，重点介绍了该系统的透平和燃烧室的研究进展，在此基础上对 Allam 循环进行了系统性能优化，结果表明以甲烷为燃料的该循环系统的电效率为 59%，并提出对基础构型进一步改进后的低压再热回路^[6]；日本东芝的 Nomoto 等^[7]重点关注 Allam 循环系统的透平和燃烧室的开发，对透平进行了材料筛选和冷却回路设计，对燃烧室进行了设计、制造和测试；意大利学者 Scaccabarozzi 等^[8]对 Allam 循环进行了热力学分析和数值优化，根据其研究结果，系统的最大电效率为 54.80%，低于文献^[5,7]中的目标值。

1.3 有机朗肯循环发电技术

1.3.1 有机朗肯循环技术优势

温度低于 350 °C 的余热资源普遍存在于钢铁、化工、石油、冶金等行业，若能实现其回收利用则可以有效地提高能源利用效率。可利用低温余热进行发电的现有技术包括有机朗肯循环（ORC）、以氨水为工质的卡琳娜（Kalina）循环以及半导体热电材料发电技术等。卡琳娜循环的理论效率比较高，但是系统结构比较复杂，且对密封性有极高的要求，其实际应用的工程经验较为缺乏。半导体热电材料发电技术价格昂贵且效率不高，经济性低。相比之下，有机朗肯循环系统结构简单，工质物性可借鉴制冷领域的制冷剂，循环回路及设备可参考蒸汽朗肯循环，可以利用工业余热、地热水、太阳能、生物质能等^[9-17]多种余热资源进行发电，因此是低温余热回收发电领域的研究热点。

1.3.2 有机朗肯循环的研究现状

有机朗肯循环由于可实现低温余热的回收利用，在全球范围内得到了广泛的研究和关注。目前，主要的研究围绕有机工质筛选、系统关键设备设计优化、耦合系统设计以及实验测试分析等方向展开。

研究人员在有机工质筛选以及工质物性分析方面做了大量工作^[18-24]。其中，德克萨斯 A&M 大学的研究人员针对工质性质对 ORC 系统的经济性和热力学性能的影响进行了研究，研究结果表明工质的热容、分子量、压缩因子和饱和液体状态的摩尔比体积对 ORC 系统的热效率有重要影响^[25]；Rayegan 等人以 Refprop8.0 数据库中的 117 种有机工质为研究对象，分析对比其用于太阳能有机

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 for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库