

学校编码: 10384

密级\_\_\_\_\_

学号: 32420131152290

# 厦 门 大 学

## 硕 士 学 位 论 文

### 固体氧化物燃料电池-燃气轮机-有机朗肯循环三重复合动力系统流程模拟与性能优化

The systematic modeling and performance optimization of the integrated solid oxide fuel cell-gas turbine and organic Rankine cycle combined power system

刘浩仑

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: 2016年4月

论文答辩日期: 2016年5月

2016年5月

固体氧化物燃料电池 | 燃气轮机 | 有机朗肯循环三重复合动力系统流程模拟与性能优化

刘浩仑

指导教师

赵英汝

副教授

厦门大学

## 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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

中国是世界最大的能源消费国，占全球消费总量的 23%，但能源综合利用效率普遍较低。据统计，美国的能源效率高达 60%，欧洲超过 60%，其它发达国家的平均水平为 50%，而中国仅为 33% [1]。另一方面，中国单位 GDP 的能耗是世界平均水平的 3.2 倍，其中 50% 以上的工业能耗以热能的形式耗散，温度在 350℃ 以下的低品位余热在工业过程中普遍存在。如何实现能源系统向清洁、低碳、高效的方向转型成为中国当前面临的重大问题之一。

近年来，随着集中式供能弊端的逐渐显露，以燃料电池、有机朗肯循环、热电联产为代表的一系列新兴分布式能源技术逐渐成为国内外关注的焦点。其中，固体氧化物燃料电池-燃气轮机（SOFC-GT）混合动力循环因其高效、清洁、燃料多样、发电规模灵活等特点备受青睐。而有机朗肯循环（ORC）作为回收低品位热能的一种重要方式，也在工业余热发电及太阳能、地热、生物质能等低温发电领域得到了广泛应用。将 SOFC-GT 混合发电与 ORC 进行耦合形成一体化的 SOFC-GT-ORC 三重复合动力系统，通过系统集成和流程改进实现能量的综合梯级转换与高效清洁利用，与常规发电技术相比具有效率高、排放低、发电规模灵活、适合联产联供等诸多优势。

SOFC-GT-ORC 是一个多控制变量的复杂能量转化系统，由多个具有不同技术特性的子系统和单元设备耦合而成，系统的结构、部件的参数设置、部件之间的相互耦合以及整体循环的一体化控制与调节都需要进行详细的研究和设计。本论文以此为背景，对 SOFC-GT-ORC 三重复合动力循环进行一体化的系统集成分析。依托 gPROMS 模拟仿真平台，对 SOFC-GT 与 ORC 的耦合方案及系统构形设计进行研究，并通过详细的流程模拟开展全工况的仿真计算与性能分析，透彻了解系统的运行机理，分析各种参量对系统性能的影响，研究其关键的工程特性，并由此探讨其最优设计和运行方案。主要内容及安排如下：

第一章对工业余热利用技术和有机朗肯循环的研究背景及发展现状进行介绍。

第二章对燃料电池与燃气轮机耦合而成的 SOFC-GT 混合系统进行分析与讨

论。

第三章对有机朗肯循环进行数学建模,并对亚临界与超临界两种工况下有机朗肯循环的系统性能进行分析与对比。

第四章结合 gPROMS 过程模拟软件对 SOFC-GT-ORC 三重复合动力循环进行构型设计。

第五章基于 gPROMS 一体化模型对 SOFC-GT-ORC 的性能特性进行研究,分析关键参数对系统电效率、输出功率等的影响,并进行参数优化分析。

第六章研究系统的余热回收方式,对不同系统构型下 SOFC-GT-ORC 的性能参数进行分析和对比。

第七章对适用于有机朗肯循环的不同类别余热回收换热工质进行讨论和对比分析。

第八章概括全文的主要结论和存在的不足,对下一步研究提出设想与展望。

本文完成了对 SOFC-GT 与超临界 ORC 的耦合方案设计及系统性能优化的研究,提出了几种新型的 SOFC-GT-ORC 系统构形,获得的一些新结果揭示了耦合系统的一般性能特性,给出了一些关键工作参数的优化判据,可为 SOFC-GT-ORC 及同类复合动力循环系统的优化设计与运行提供理论指导和参考依据。

**关键词:** 燃料电池; 燃气轮机; 超临界有机朗肯循环; 三重复合动力循环



## Abstract

China is the biggest energy consuming country in the world, accounting for 23% of global energy consumption, but energy utilization efficiency is generally low. According to statistics, energy efficiency is up to 60% in Europe, the average level of other developed countries is 50%, while China is only 33% [1]. On the other hand, China's energy consumption per unit GDP is 3.2 times larger than the world average level, in which more than 50% of industrial energy is consumed in the form of heat dissipation. Low temperature waste heat below 350°C exists in most of the industrial processes. How to transform the energy system into a clean, low-carbon and efficient one is the biggest problem currently facing China.

In recent years, concerning the disadvantage of centralized energy supply systems, the fuel cell, organic Rankine cycle and other distributed energy technologies have become the focus of attention worldwide. Especially the solid oxide fuel cell - gas turbine (SOFC-GT) hybrid power system has been characterized as one of the most promising technologies because of its high efficiency, cleanness, fuel diversity and flexibility of power generation. At the same time, the organic Rankine cycle (ORC) has been widely applied as an important way of recovering low-grade heat in industrial power generation and cogeneration with low temperature solar energy, geothermal energy, biomass energy, etc. Through system integration and process improvement, an integrated SOFC-GT-ORC combined system can be established via the coupling of SOFC-GT hybrid with ORC. This combined power system can achieve higher energy efficiency, with cascaded and low emission utilization of energy, compared with the conventional power generation technologies.

SOFC-GT-ORC is a multi-variable complex energy conversion system, which consists of a large number of sub-units and equipments with different technical characteristics. The setting of parameters, the system configuration as well as the coupling and control strategies of various units require through and detailed

investigation. Therefore, this thesis intends to perform an integrated holistic analysis of the SOFC-GT-ORC combined system. Based on the advanced modeling and optimization platform gPROMS, the coupling strategies of the SOFC-GT hybrid with ORC as well as the optimal system configuration will be explored. System performance over the entire operation regions will be determined and analyzed through detailed process simulation, which will enable us to deeply reveal the combined systems' characteristics, unveil the coupling principles and operation mechanism of the system, identify the optimal strategies for coupling and operation, determine the effective waste heat recovery, improve the energy conversion efficiency, and promote the implementations of such integrated systems in new fields. The main contents are organized as follows :

The first chapter provides a brief introduction of the current situation of industrial waste heat, waste heat utilization and technology R&Ds.

The second chapter conducts a brief analysis and discussion about the SOFC-GT hybrid system.

Chapter 3 establishes a mathematical model of the organic Rankine cycle, with a comparison analysis of the system performance characteristics under subcritical and supercritical working conditions.

Chapter 4 conducts a systematic configuration design of the integrated SOFC-GT-ORC combined power cycle based on the gPROMS platform.

Chapter 5 investigates the performance characteristics of the SOFC-GT-ORC system based on its integrated gPROMS model. Effects of some major parameters on the system electrical efficiency and work output are determined with parametric optimization analysis.

Chapter 6 explores the heat recovery strategies of the combined system, with comparison analysis of the performance parameters under different system configurations.

In Chapter 7, different types of working fluids for the organic Rankine cycle are compared and analyzed.

The final chapter summarizes the main conclusions of the thesis, and provides some ideas of further research directions.

In summary, the research of coupling strategies and performance optimization for the SOFC-GT hybrid with supercritical ORC system are conducted in the present thesis. Several novel system configurations for the SOFC-GT-ORC combined cycle are proposed. The results obtained unveil the coupling principles and operation mechanism of the combined system. The optimization criterions of some key operating parameters are given, which can provide some theoretical guidance and reference for optimal design and operation of the integrated SOFC-GT-ORC and other similar combined systems.

**Keywords:** fuel cell; gas turbine; supercritical ORC; combined system

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 目 录

摘 要 .....	I
Abstract .....	III
第一章 绪论 .....	1
1.1 余热资源分类 .....	1
1.2 余热利用技术 .....	1
1.3 有机朗肯循环技术的研究进展 .....	4
1.4 超临界流体技术的研究及应用 .....	4
1.5 燃料电池-燃气轮机混合发电技术的研究进展 .....	6
1.6 本文的研究意义和创新点 .....	7
第二章 固体氧化物燃料电池-燃气轮机混合系统 .....	9
2.1 固体氧化物燃料电池 (SOFC) .....	9
2.2 燃气轮机 (GT) .....	12
2.3 固体氧化物燃料电池-燃气轮机 (SOFC-GT) 混合系统 .....	14
第三章 有机朗肯循环 (ORC) .....	17
3.1 ORC 系统的数学模型 .....	17
3.2 亚临界有机朗肯循环蒸发器数学模型 .....	19
3.2.1 蒸发器预热段数学模型 .....	19
3.2.2 蒸发器蒸发段数学模型 .....	20
3.2.3 蒸发器过热段数学模型 .....	21
3.3 超临界有机朗肯循环加热器模型 .....	21
3.4 透平数学模型 .....	23
3.5 回热器数学模型 .....	24
3.6 冷凝器数学模型 .....	24
3.7 工质泵数学模型 .....	25
3.8 ORC 系统求解算法 .....	26

<b>第四章 SOFC-GT-ORC 联合循环的 gPROMS 流程模拟</b> .....	<b>27</b>
4.1 联合系统描述 .....	27
4.2 流程模拟仿真软件 gPROMS .....	28
4.3 SOFC-GT-ORC 联合循环的 gPROMS 模拟 .....	30
<b>第五章 联合系统性能分析</b> .....	<b>33</b>
<b>5.1 SOFC-GT 子系统性能分析</b> .....	<b>33</b>
5.1.1 燃料流率对 SOFC-GT 系统的影响 .....	33
5.1.2 空气流率对 SOFC-GT 系统的影响 .....	34
5.1.3 透平 1 膨胀比对 SOFC-GT 系统的影响 .....	35
5.1.4 燃料电池工作温度对 SOFC-GT 系统的影响 .....	35
<b>5.2 ORC 子系统性能分析</b> .....	<b>36</b>
5.2.1 燃料流率对 ORC 系统的影响 .....	37
5.2.2 空气流率对 ORC 系统的影响 .....	38
5.2.3 透平 1 膨胀比对 ORC 系统的影响 .....	38
5.2.4 透平 2 膨胀比对 ORC 系统的影响 .....	39
5.2.5 回热器 UA 值对 ORC 系统的影响 .....	40
5.2.6 分流器分流系数对 ORC 系统的影响 .....	41
5.2.7 燃料电池工作温度对 ORC 系统的影响 .....	43
<b>5.3 SOFC-GT-ORC 联合系统性能分析</b> .....	<b>43</b>
5.3.1 燃料流率对 SOFC-GT-ORC 系统的影响 .....	44
5.3.2 空气流率对 SOFC-GT-ORC 系统的影响 .....	44
5.3.3 透平 1 膨胀比对 SOFC-GT-ORC 系统的影响 .....	45
5.3.4 透平 2 膨胀比对 SOFC-GT-ORC 系统的影响 .....	46
5.3.5 回热器的 UA 值对 SOFC-GT-ORC 系统的影响 .....	47
5.3.6 分流器分流系数对 SOFC-GT-ORC 系统的影响 .....	48
5.3.7 燃料电池工作温度对 SOFC-GT-ORC 系统的影响 .....	49
<b>第六章 不同循环构型下联合系统的性能对比</b> .....	<b>51</b>
6.1 联合系统的构型布局 .....	51
6.2 联合系统 1 .....	51
6.3 联合系统 2 .....	53

第七章 有机工质性能对比分析.....	55
7.1 有机朗肯循环工质研究进展 .....	55
7.2 工质的分类 .....	56
7.3 理想有机朗肯循环工质的特性.....	56
7.4 有机工质的应用 .....	58
7.5 超临界有机朗肯循环工质选择.....	59
第八章 结论与展望 .....	63
8.1 主要结论 .....	63
8.2 下一步工作展望 .....	65
附录 .....	67
参 考 文 献 .....	71
攻读硕士学位期间的科研成果.....	76
致 谢 .....	77

厦门大学博硕士学位论文摘要库



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.