

学校编码: 10384

密级 \_\_\_\_\_

学号: 20121152129

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

生物质气化燃料电池-燃气轮机与地源热泵  
联合循环的系统仿真与性能分析

The systematic simulation and performance analysis of  
biomass gasification fuel cell-gas turbine and ground source  
heat pump combined cycle

徐仁超

指导教师姓名: 赵英汝 副教授

专业名称: 核科学与工程

论文提交日期: 2015年7月

论文答辩日期: 2015年9月

2015年7月

生物质气化燃料电池燃气轮机与地源热泵联合循环的系统仿真与性能分析

徐仁超

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

生物质气化、地源热泵、燃料电池与燃气轮机联合循环等技术以其清洁、高效、环保等特性，近年来得到国内外众多学者和研究机构的广泛关注。目前针对这几类单项技术的研究已经取得了较多成果，但将这些单项技术进行集成耦合后形成联合循环对其进行系统分析的研究还处于起步阶段，系统的结构、循环的设计、不同单元的规模匹配、部件之间的相互耦合等尚未形成完整的理论体系，需要进行详细的分析和论证。

本文由此提出生物质气化燃料电池-燃气轮机与地源热泵（BGFC-GT-GSHP）的一体化联合循环系统，基于 gPROMS 软件对系统的关键部件及过程进行了建模，包括生物质气化单元、燃料电池单元、燃气轮机单元、热泵单元、地埋管单元、部件接口单元等，完成了系统原料、产物及单元部件之间的物料接口类型定义和模拟，实现了单元部件之间模型的精细连接与系统级的流程模拟功能。在此基础上对 BGFC-GT 系统与地源热泵的组合方案设计及其联合循环的构形布局进行了研究，并完成了全系统一体化模型的模拟调试和动态仿真运行。

文中针对联合循环尤其是地源热泵的关键部件（压缩机、蒸发器、膨胀阀、冷凝器）、过程及接口（包括地埋管与热泵之间、热泵与负载之间的接口）进行了重点模拟。针对地源热泵的地埋管单元，研究了地下水平埋管的换热机理，采用领先的三维换热机理模型，以埋管长度、半径、相角三个维度建立温度场，同时考虑季节变换因素，开发了地下埋管的动态换热模型。此外，研究了系统对变量的离散方法，结合 gPROMS 向前差分、向后差分、中心差分的不同适用条件，在地埋管的计算中分别选择向前差分与向后差分，提高了计算的精确性。在上述工作的基础上，将单元模型通过电/热耦合进行连接，实现了联合循环的一体化全系统流程模拟及系统性能的仿真计算。

**关键词：**生物质气化 燃料电池 燃气轮机 地源热泵 联合循环 系统模拟仿真  
gPROMS

厦门大学博硕士学位论文摘要库



## Abstract

The technologies of biomass gasification, ground source heat pump, fuel cell and gas turbine combined cycle have received much attention in recent years from scholars and research institutions for their clean, energy efficient and environmentally friendly features. There have been a few studies on these technologies, however the research on the combined system with these technologies integrated together are in its infancy, a lot of problems and challenges still remain. The design of system structure, as well as the integration and coupling of different units and components need further in-depth analysis and investigation.

Therefore the combined cycle of biomass gasification fuel cell - gas turbine and ground source heat pump (BGFC - GT - GSHP) has been proposed as an integrated system in this thesis. The key components and processes of the system, including the biomass gasification unit, fuel cell, gas turbine, heat pump, buried pipe unit, interface unit, etc., have been modeled in gPROMS. The system feedstock, products and material interfaces of various units have been defined and modeled, based on which different unit components have been connected and integrated to simulate the processes on a system level. Furthermore, the combination strategies of the BGFC-GT and ground source heat pump system as well as the schematic design of this combined cycle have been investigated. And the operation modeling and dynamic simulation of the integrated system model has been finished.

In the present thesis, the combined cycle, especially the key components of the ground source heat pump, which include compressor, evaporator, expansion valve and condenser, as well as its processes and interfaces such as the interface between the buried pipes and heat pump, the interface between the heat pump and loads, have been modeled specifically. In the buried pipe unit of the ground source heat pump, the heat transfer mechanism of the horizontal buried pipe has been studied by using advanced three-dimensional heat transfer model. The temperature field with three dimensions, i.e., the length, radius and phase angle of buried pipes, has been established. The dynamic heat transfer model of the buried pipes have been developed, taking into account the effect of seasonal changes. Moreover, the discrete method of the system against variables has been examined. Considering the different applicable conditions

of the forward-difference, backward-difference and central-difference schemes, the forward difference and backward difference have been used in the calculation of the buried pipes respectively to improve the accuracy of calculation. On the basis of the above work, the unit models have been connected through electrical/thermal coupling, which enables us to achieve the integrated whole-system process modeling and systematic performance simulation of the combined cycle.

**Keywords:** biomass gasification; fuel cell; gas turbine; ground source heat pump; combined cycle; system modeling and simulation; gPROMS

厦门大学博硕士学位论文摘要

# 目 录

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
目 录 .....	IV
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 研究背景及意义 .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
<b>1.2 国内外研究进展 .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 国内研究进展 .....	3
1.2.2 国外研究进展 .....	5
1.2.3 本文的工作重点 .....	6
1.2.4 本文的结构 .....	7
<b>第二章 生物质气化单元 .....</b>	<b>9</b>
2.1 生物质气化原理 .....	9
2.2 生物质气化模型 .....	10
2.3 生物质气化模型验证 .....	16
<b>第三章 地源热泵单元 .....</b>	<b>18</b>
3.1 地源热泵原理 .....	18
3.2 地埋管模型 .....	19
3.2.1 本文模型 .....	19
3.3 热泵机组模型 .....	23
3.3.1 热泵 .....	23
3.3.2 压缩机模型 .....	25
3.3.3 膨胀阀模型 .....	27
3.3.4 蒸发器、冷凝器模型 .....	28
3.4 热泵机组模型检验 .....	28
<b>第四章 燃料电池单元 .....</b>	<b>31</b>
4.1 燃料电池 .....	31
4.2 燃料电池-燃气轮机模型 .....	33

4.2.1 质量平衡 .....	34
4.2.2 电化学描述 .....	36
4.2.3 鼓风机 .....	38
4.2.4 燃烧室 .....	38
4.2.5 能量平衡 .....	39
4.2.6 燃气轮机模型 .....	40
<b>4.3 燃料电池-燃气轮机系统检验 .....</b>	<b>41</b>
<b>第五章 过程动态模拟仿真软件 .....</b>	<b>43</b>
5.1 gPROMS 介绍 .....	43
5.2 gPROMS 调试 .....	45
<b>第六章 系统性能分析 .....</b>	<b>46</b>
6.1 联合系统结构 .....	46
6.2 地源热泵系统性能分析 .....	47
6.2.1 压缩机出口压力对各参数的影响 .....	47
6.2.2 压缩机吸气温度对各参数的影响 .....	50
6.3 燃料电池系统性能分析 .....	52
6.3.1 效率、功率随电流密度的变化 .....	52
6.3.2 效率、功率随操作温度的变化 .....	53
6.4 联合系统性能分析 .....	56
6.4.1 联合系统功率分析 .....	56
6.4.2 联合系统效率分析 .....	60
<b>第七章 结论与展望 .....</b>	<b>64</b>
7.1 主要结论 .....	64
7.2 进一步的研究方向 .....	64
7.3 展望 .....	65
<b>附录 A .....</b>	<b>66</b>
<b>附录 B .....</b>	<b>68</b>
<b>附录 C .....</b>	<b>70</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>71</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>73</b>

## Table of Contents

<b>Abstract in Chinese</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>11</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Research background and significance</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Research background .....	1
1.1.2 Research significance .....	2
<b>1.2 Research status</b> .....	<b>3</b>
1.2.1 Domestic research status .....	3
1.2.2 Foreign research status.....	5
1.2.3 The focus of this thesis .....	6
1.2.4 The structure of this thesis.....	7
<b>Chapter 2 Biomass Gasification</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Principle of biomass gasification</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2 Biomass gasification model</b> .....	<b>10</b>
<b>2.3 Model validation of biomass gasification</b> .....	<b>16</b>
<b>Chapter 3 Ground source heat pump</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1 Principle of ground source heat pump</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2 Baried pipe model</b> .....	<b>19</b>
3.2.1 Model in the present thesis .....	19
<b>3.3 Heat pump model</b> .....	<b>23</b>
3.3.1 Heat pump.....	23
3.3.2 Compressor model .....	25
3.3.3 Valve model .....	27
3.3.4 Models of evaporator and condensor.....	28
<b>3.4 Model validation of heat pump</b> .....	<b>28</b>
<b>Chapter 4 Fuel cell-gas turbine</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1 Fuel cell</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2 Model of fuel cell-gas turbine</b> .....	<b>33</b>
4.2.1 Mass balance .....	34
4.2.2 Electrochemical descriptions .....	36

4.2.3 Air blower .....	38
4.2.4 After burner .....	38
4.2.5 Energy balance .....	39
4.2.6 Gas turbine model .....	40
<b>4.3 System validation of fuel cell-gas turbine combined cycle .....</b>	<b>41</b>
<b>Chapter 5 Process dynamic simulation software .....</b>	<b>43</b>
5.1 Introduction of gPROMS .....	43
5.2 Program debugging.....	45
<b>Chapter 6 Performance analysis.....</b>	<b>46</b>
6.1 Schematic configuration of the combined system .....	46
6.2 Performance analysis of GSHP.....	47
6.2.1 Effect of compressor outlet pressure.....	47
6.2.2 Effect of compressor suction temperature .....	50
6.3 Performance analysis of fuel cell .....	52
6.3.1 Effect of current density on the efficiency and power .....	52
6.3.2 Effect of operation temperature on the efficiency and power .....	53
6.4 Analysis of combined system.....	56
6.4.1 System power.....	56
6.4.2 System efficiency.....	60
<b>Chapter 7 Conclusion .....</b>	<b>64</b>
7.1 Main conclusions .....	64
7.2 Further research.....	64
7.3 Prospect.....	65
<b>Appendices A .....</b>	<b>66</b>
<b>Appendices B .....</b>	<b>68</b>
<b>Appendices C .....</b>	<b>70</b>
<b>Reference.....</b>	<b>71</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>73</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

当前，能源短缺与环境恶化成为全球面临的最大问题，尽可能以高效及可持续的方式使用能源成为当务之急。政府间气候变化专门委员会在其 2007 年的报告中指出，在考虑到的可以稳定大气层温室气体水平的所有环节中，“60-80%的减排目标应该在能源的供应和使用以及工业流程等领域中实现，而增效节能在其中许多环节具有关键作用”。在中国，持续高速的经济增长同时也引发了能源供应危机及环境保护的巨大压力。根据中国科学院的一项调查，我国单位 GDP 能耗远高于世界平均水平，为世界平均值的 4.7 倍，能源综合利用效率则仅为 32%，低于世界先进水平 10 个百分点，而能源系统总效率为 9.3%，只有发达国家的 50% 左右。

面对越来越紧迫的能源问题，加大能源结构调整力度，加快可再生能源技术研发势在必行。近年来，一系列新兴的能源技术，如燃料电池分布式供能、生物质气化制氢、热泵、热电联产等，因其具有降低能源输送环节损耗、扩大能源梯级利用范围、适应能源需求变化调节的特点，逐渐成为国内外关注的焦点。然而，这类技术目前只能作为常规能源系统的补充形式而存在。若将这类清洁技术进行耦合，形成能够满足用户对电、热等不同能源形式不同需求的系统级技术，这将极大地拓展清洁能源技术的发展和應用。

以生物质气化为基础、以燃料电池混合发电循环为核心、以地源热泵系统为辅助热源的生物质气化燃料电池-燃气轮机-地源热泵（Biomass Gasification Fuel Cell-Gas Turbine-Ground Source Heat Pump, BGFC-GT-GSHP）一体化联产技术被视为最高效、洁净的生物质能利用技术。生物质能作为一种可再生能源，因其原料丰富、分布广泛、碳排放低、污染小而备受青睐。通过气化处理将生物质转换为可燃气体，并通入燃料电池中进行发电，既能解决其难于燃用、分布分散的缺点，又可以充分发挥燃料电池紧凑、污染小等优点。将此系统进一步与地源热泵耦合，还可向用户终端供暖或制冷。BGFC-GT-GSHP 技术通过对生物质气化过

程和高效的燃料电池-燃气轮机联合发电技术以及地源热泵系统在能量利用过程的耦合,可同时进行电、热等产品的供应,既适用于分布式供能也可用于固定电站发电,在适应市场需求方面具有较强的灵活性。随着集中式能源系统的弊端逐渐显露, BGFC-GT-GSHP 一体化装置以其效率高、排放低、发电规模灵活等特点,在未来分布式发电中将占有重要地位,是一种能够有效实现资源、能源和环境有机结合的可持续发展技术。

BGFC-GT-GSHP 一体化是生物质能源技术与燃料电池混合发电、地源热泵供热制冷的深度融合,既代表着科学技术创新的方向,也代表着新能源产业发展的前沿方向。目前制约该技术发展的主要因素源自于系统本身的复杂性以及系统优化方法、评价准则等相关研究的滞后。BGFC-GT-GSHP 是一个多设计变量的复杂能量转化利用系统,由多个具有不同技术特性的子系统和单元设备整合而成,系统的结构、部件的设计、部件之间的相互耦合以及整个系统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,提出生物质气化燃料电池-燃气轮机与地源热泵(BGFC-GT-GSHP)联合循环系统,并对该系统进行一体化的系统集成分析,研究其关键的工程特性并探讨其有效的设计运行方案。

### 1.1.2 研究意义

本文基于过程模拟仿真软件 gPROMS 建立了生物质气化、燃料电池和燃气轮机耦合系统的模型,该系统将生物质气化、地源热泵、燃料电池、燃气轮机与地源热泵四个子系统进行耦合。通过系统的结构设计与不同单元的规模匹配,实现了该联合循环系统的自维持与净产能。通过改变系统的不同参数,能够满足不同类型用户的能源需求。

联合循环系统通过生物质气化与燃料电池的耦合,既解决了燃料电池的燃气供应问题,又高效利用了广大农村丰富的生物质原料。燃料电池与燃气轮机产生电力,一方面供给地源热泵用于向用户终端供暖制冷,另一方面,多余的电力可供给用户终端的其它用电设备,并通过连接电网,将剩余电力上网。燃气轮机的高温尾气一方面向耦合系统提供预热所需的能量,另一方面也可以作为供热水的热源。



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.