

基于燃气轮机的冷热电三联供系统  
优化模拟

**Optimized Simulation of System for  
Combined Cooling Heat and Power Based  
on Gas Turbine**

学科专业：工程热物理

研究生：安 吉 松

指导教师：李 汛 副教授

天津大学机械工程学院

二零零四年五月

获取更多资料 微信订阅号 蓝领星球

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：

签字日期：

年 月 日

二

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

年

月

日

签字日期：

年

月

日

## 中文摘要

随着天然气的广泛应用、电力垄断的逐步解体、以及环境保护要求的不断提高,具有能量—资源利用合理、环保性能优良、冷热电负荷分配灵活等优势冷热电三联产系统将成为中国城市一种不可缺少的能源供应模式。

冷热电联产(CCHP)是一种建立在能量梯级利用概念基础上,将制冷、余热(采暖和供热水)及发电过程一体化的多联产总能源系统,目的在于提高系统能源利用效率,减少CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等有害气体的排放。

本文分析了发电系统、供热系统、制冷系统等不同的能源供应方案和运行策略,包括设备的匹配、基础负荷及尖峰负荷的选择和上网并网策略,然后将它们联系起来,作为整个系统来综合考虑,并从初投资、年运行费用、燃经济系数、投资回收期这些方面进行分析以确定目标函数和约束条件,通过优化模拟,从而确定最佳的设计方案。

本文在分析了整个系统的各种运行方案并考察了市场价格的基础上,建立了燃气轮机、余热锅炉、溴化锂吸收式制冷机、余热式空调机等三联供系统主要设备的价格参数数据库,得到了优化模拟的数学模型。针对冷热电三联供节能性和经济性优化模拟属于多目标规划且是非线性的,所以本文采用了求解多目标混合最优化模型的方法——分目标乘除法。为了使优化模拟的方案具有实用性,作者还利用 FORTRAN90 编写了该系统的优化模拟程序的内核,而且利用 VB6.0 编写了整个优化模拟软件的用户界面,使该软件具有较高的计算效率和友好的界面。

文章随后还用软件模拟了建筑面积为 50,000 平米天津某家大型医院的冷热电三联供系统方案的设计,用实例分析的方法具体解释了优化算法的使用。结果表明:在满足制冷冷热电负荷的情况下,优化模拟后得到的设计方案较单纯以经验确定之最佳的设计方案有更高的 NPV 值,更短的投资回收期,且前者较后者有更优的能源利用率,优化模拟对基于燃气轮机的三联供系统设计有很好的普适性。定性和定量分析的一致表明了本文提出的优化模拟方法的可行性及正确性,在实际应用中能提供有价值的参考。

**关键词:** 冷热电三联供、燃气轮机、优化模拟、多目标规划

## ABSTRACT

With the wide application of natural gas, with the stepwise disaggregation of electric power monopoly, and with the constant requirement for environmental protection, combined cooling heat and power (CCHP) that is provided with advantages of utilization of energy and resources rationality, perfect environmental performance, flexibility of cooling, heat and power load assignment, will become an indispensably mode of energy supplies to city of China.

In order to enhance the efficiency of energy utilization and reduce  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , and  $\text{NO}_x$  emissions, CCHP that established the concept of energy cascade utilization is a polygeneration total energy system integrating generating electricity, cooling and heating.

This paper analyzed different supplied options and operation scheme about power system, heating system and cooling system, which involve equipment matching, the choice between the basic load and the peak load, the policy of on-grid power and parallel power. Then they will be connected with each other and considered compositively as the whole system. Also the paper designed the objective functions and the constraints by analyzing the initial investment, the running costs, the life circle cost and the investment recovery period. As a result, optimizing and simulating obtain the optimal design scheme.

This paper set up CCHP's database of price parameter about gas turbine, waster heat boiler, LiBr absorption chiller, air conditioning driven by exhaust, and plan mathematical model for optimizing and simulating. Because optimize belongs to the category of multi-purpose programming and no-linear problem, multi-objective multiplication is adopted, which is arithmetic of solving multiple goal hybrid-programming models. In order to make the method more practical, the author program the kernel of software by FORTRAN90, and design the interface by VB6.0, and let the software compute efficiently and have friendly interface

Then, this paper simulates a CCHP's design about hospital with 50,000 square meters construction area; using application examples analyse explains the use of software. The result shows, the optimized design hold shorter investment recovery period, larger NPV value and higher energy utility than the design that is planned only by experience, under sufficing the same cooling, heating and power load, this method

is all-purpose for design of system for combined heat, cooling and power based on gas turbine. The consistent of qualitative and quantitative analyses shows the feasibility and validity of this method, and it provides references to practice application.

**KEY WORDS:** CCHP, Gas turbine, Optimized simulation, Multi-objective goal programming

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

# 目 录

第 一 章 绪 论.....	1
1.1 课题背景.....	1
1.1.1 前言.....	1
1.1.2 冷热电三联产系统概述.....	1
1.1.3 课题提出的背景和意义.....	2
1.1.4 发展基于小型燃气轮机冷热电联产的优势.....	5
1.2 国内外的发展现状.....	7
1.2.1 国外冷热电二联供的应用状况.....	7
1.2.2 国内冷热电三联供的应用状况.....	8
1.3 研究内容和目的.....	9
1.3.1 本文研究的内容.....	10
1.3.2 目的和意义.....	11
第 二 章 现行三联供的几种方案和焓经济系数的提出.....	12
2.1 焓经济系数.....	12
2.2 现行三联供方案的原理及其特点.....	13
2.2.1 蒸汽轮机+溴化锂制冷机.....	14
2.2.2 内燃发电机+余热利用型冷温水机.....	14
2.2.3 燃料电池+余热利用型冷温水机.....	15
2.2.4 燃气轮机前置循环+溴化锂制冷机.....	15
2.2.5 燃气-蒸汽轮机联合循环+吸收式制冷机组.....	16
2.2.6 燃气轮机+排气回收型冷温水机.....	17
2.2.7 微型燃气轮发电机+余热利用型冷温水机.....	17
2.3 三联供系统的几个关键部件.....	19
2.3.1 燃气轮机.....	20
2.3.2 溴化锂吸收式制冷机.....	23
2.3.3 余热直燃机.....	24
第 三 章 基于燃气轮机的三联供优化模拟系统模型.....	26
3.1 模型的建立.....	28
3.1.1 固定成本价格方程.....	29
3.1.2 运行收益方程.....	32

---

3.1.3 运行费用方程.....	33
3.2 约束方程.....	33
3.3 三联供系统优化模型方程.....	35
第四章 三联供系统优化模型的算法选择.....	37
4.1 多目标规划模型及其解的概念.....	37
4.2 多目标规划的几种解法.....	40
4.2.1 目标排序法.....	40
4.2.2 线形加权和法.....	41
4.2.3 极大极小法.....	43
4.2.4 目标规划法.....	44
4.3 分目标乘除法.....	46
第五章 对比性分析.....	48
5.1 方案的需求分析.....	48
5.1.1 设计负荷要求.....	48
5.1.2 该地区的冷价、热价、电价的确立.....	49
5.2 优化设计的方程.....	51
5.3 计算结果与常规方案的比较.....	53
第六章 结论.....	61
参考文献.....	63
发表论文和科研情况说明.....	66
致    谢.....	67

获取更多资料

微信搜索 蓝领星球

## 第一章 绪 论

### 1.1 课题背景

#### 1.1.1 前言

能源是人类生存的基本条件和人类社会发展的原动力，随着人类文明的进步，能源问题成为人们日益关注的焦点问题。目前全世界都在推动与传统能源系统不同的新型能源系统的建设，积极进行立法准备，抓紧开发相关设备。当前研究的新型能源系统具有六个方面的主要特征：一是燃料的多元化；二是设备的小型、微型化；三是冷热电联产化；四是网络化；五是智能化控制和信息化管理；六是高标准环保水平。<sup>[1]</sup>而其中燃料的多元化，设备的小型、微型化，冷热电联产化和环保要求则代表着能源技术发展的几个重要方向：可再生能源的开发利用、分布式供电技术的兴起与冷热电三联产系统的发展。而现今，微型燃气轮机、燃料电池、燃气外燃机、各种循环流化床锅炉等先进设备的陆续投产与应用，以及小型燃气轮机、燃气内燃机等设备的不间断改进和冷热电联产化，为新的能源体系的建立，奠定了坚实的基础。一个由特网和智能化计算机指挥调度的，由无数小型、微型冷热电系统组成的自下而上的能源系统，将在未来日子里对传统的自大型火电厂、高压输电线路和多层电网网络系统构成的，以及各种供热采暖锅炉厂组成的城市传统能源体系有一定的冲击作用。<sup>[2]</sup>

#### 1.1.2 冷热电三联产系统概述

传统动力系统的技术开发以及商业化的努力主要着眼于单独的设备，例如，集中供热、发电设备及直燃式中央空调。这些设备的共同问题在于单一目标下的低效率，在忽视环境影响和不合理的能源价格情况下，具有一定的经济效益。但是，从科学技术角度出发，这些设备都尚未达到对有限能源的高效和综合利用。冷热电联产（Combined Cooling Heat and Power—CCHP又称分布式能源系统 Distributed Power System）是一种建立在能源梯级利用基础上，将制冷、供热（采暖和供热水）及发电一体化的总能源系统，目的在于提高能源利用效率，减少二氧化碳及有害气体的排放。与集中式发电-远程输电比较，CCHP 可以大大提高能源利用效率：大型发电厂的发电效率一般为 35%-55%，扣除厂用电和线损率，终端的利用效率只能达到 30%-47%，而 CCHP 的能源利用率可达到 90%，没有



输电损耗；另外，CCHP 在降低碳和污染空气的排放量方面具有很大的潜力；据有关专家估算，在美国如果从 2000 年起每年有 4%的现有建筑的供电、供暖和制冷采用CCHP，从 2005 年起 25%的新建建筑及从 2010 年起 50%的新建建筑均采用CCHP 的话，到 2020 年的二氧化碳的排放量将减少 19%。如果将现有建筑实施CCHP 的比例从 4%提高到 8%，到 2020 年二氧化碳的排放量将减少 30%。<sup>[3]</sup>

### 1.1.3 课题提出的背景和意义

#### 1. 小型电站是 21 世纪的新电源，很具经济潜力

用高科技武装起来的小型电站、CHP(Combined Heat and Power)以及 CCHP，耗能低、可靠性高、效率高、低排污，具有很大的优越性，是提高能源利用效率、降低冷热电成本和保护环境的重要措施。美国把小型电站工作是有利于美国在 21 世纪保持全球竞争力的优势，我国应当重视大电网与众多小型分布式电站相结合的研究。

#### 2. 建筑物采暖应当因地制宜采用多种方式解决

世界上对于建筑物(包括商用建筑、写字楼、公寓和住宅小区)采暖供热有两种模式，一种模式是采用分散式的采暖设施，现在正向小型冷热电联供(CCHP)的方向发展。另一种模式是采用大型热电厂、大中型锅炉房和大型热网，这种模式在大多数地方是一种非常好的供热模式，但现在看来在任何地区，修建大型热电厂、大中型锅炉房和大型热网，专门供使用的商业、写字楼、公寓和住宅小区供热，而舍弃就近利用其附近丰富的蒸气资源是不经济的。今后大型热电厂主要应用于有稳定热负荷的工业企业。建筑物采暖应当因地制宜采用多种方式解决。

#### 3. 加快发展天然气、煤层气，积极引进液化天然气和管道天然气

我国长期以来能源供应以煤炭为主，煤炭消费量已达到 14 亿吨，1998 年三下降到 12.5 亿吨，现在基本保持在这一水平，而其他能源利用在逐步增加，因此总的看来煤炭消费量占全部能源供应的比重越来越低，这个变化说明能源消费优化不可避免。然而，中国天然气资源丰富，但勘探程度低，而且未来仍将保持较快的增长速度。2000—2002 年中国天然气(探明储量已连续三年超过  $3500 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中 2003 年新增天然气探明储量仍超过  $3500 \times 10^8 \text{m}^3$ 。由于中国天然气管道的大规模建设及市场的不断拓展，将刺激天然气勘探的持续发展，储量增长仍会保持较快的增长速度。据有关专家利用翁氏回归法、荣珀兹法、历史趋势法等预测 2004—2020 年中国天然气探明储量仍将高速增长，预计 2004—2010 年平均年新增探明储量  $(2500-3000) \times 10^8 \text{m}^3$  的可能性较大，2011—2020 年平均年新增探明储量  $(1500-2500) \times 10^8 \text{m}^3$  的可能性较大。也就是说，2004—2020 年

可新增天然气探明储量 $(3.25-4.6) \times 10^{12} \text{m}^3$ ，到 2020 年中国累计探明天然气地质储量为 $(6-7.4) \times 10^{12} \text{m}^3$ 。但是，由于我国的开采技术水平还相对落后，故天然气的生产能力与国外相比仍然较低，目前只具备有年产  $316 \times 10^8 \text{m}^3$  的年生产能力，远低于年新增天然气探明储量；但随着技术的不断提高，燃气用户的不断增加，我国会加速天然气的开采生产的。据专家测算，预计中国天然气产量 2005 年达到  $(500-550) \times 10^8 \text{m}^3$  基础牢靠，2010 年达到  $(800-900) \times 10^8 \text{m}^3$  资源基本落实，2015 达到  $(1000-1200) \times 10^8 \text{m}^3$ 、2020 年达到  $(1300-1500) \times 10^8 \text{m}^3$  是可能的。

由此可见，我国应该有节奏的、稳步的发展天然气使用项目，增加燃气用户，以促进天然气的开采，加速天然气的生产，减少因为天然气由于开采量大于使用量必须建造的储气工程。北京，天津地区附近的燃气资源相当丰富，就天津一个地区而言，用于北京和天津地区调峰作用的地下储存气就有  $7.12 \text{m}^3$ ；而现今由于燃气价格相对较高，天然气主要用于生活采暖、居民生活和工业生产。下图是北京市 2000 年天然气使用量。

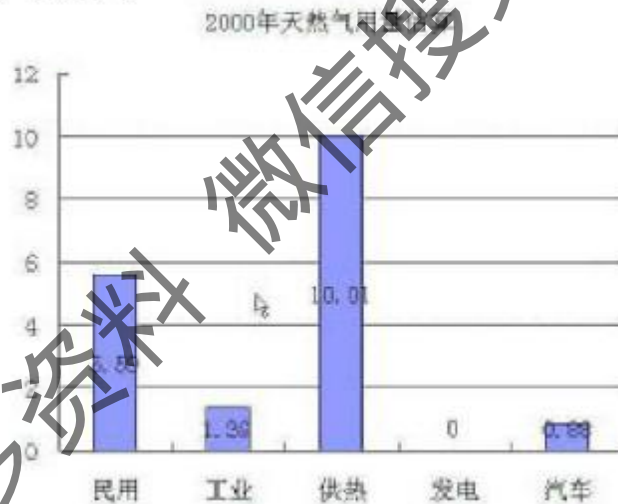


图 1-1 2000 年北京市天然气用量图

从图中可以看出，如果天然气单纯用来发电，发电成本就会很高，所以一般不采用这种使用方式，而主要用于城市供热，但这样做是否就经济呢？来看看下面一个例子。北京地区某建筑物 1 平米设计需要 50W 的电力负荷和 100W 的采暖负荷，当地电价为 0.5 元/kWh，天然气价格为 1.9 元/m<sup>3</sup>，采暖周期为 3144 小时；固定用电费用，如果采用热电分产，即买电+燃气锅炉供热，这时采暖折合费用为 72.5 元/m<sup>2</sup>；如果采用热电联产，这时采暖折合费用变为 29.5 元/m<sup>2</sup>，因此天然气如果单独用于发电是很不经济的，但是把天然气用于热电联项目上却具有一定的经济优势。所以说，利用天然气作为三联供系统的能源供应，不但可以大大降低污染排放，缓解当前的用电紧张，而且还使单位平米采暖成本大为减小，

故相对天然气直接用于生活采暖、居民生活和工业生产的利用方式有很大的优势,不但可以解决生活采暖和工业生产的问题,还可以缓解用电紧张的窘况。更重要的是,国家为了促进冷热电三联供系统的应用,给予了三联供用户一定的优惠政策。见表 1-1。

表 1-1 北京市天然气价格

用户	民用燃气用户	公共服务用户	工业生产用户	采暖用户	制冷用户	燃气汽车用户	热电联产用户
天然气价格	1.90 元	2.40 元	1.80 元	1.80 元	1.70 元	1.45 元	1.40 元

下图是专家们对北京市 2007 年天然气用量进行的估算,从图中我们可以看出,随着冷热电三联供项目的不断推广,把天然气用于发电和供热占总用气量的比例将越来越高。

2007年天然气用量估算



图 1-1 2007 年北京天然气用量估算图

从上面的分析和图表中可以看出,有充足的燃气供应是发展分布式小型 CHP、CCHP 的前提条件,在有天然气供应的地方应当优先用于发展 CHP 和 CCHP。但是也必须看到,中国各地情况复杂、CHP、CCHP 不可能包打天下,有便利电力供应的地方,可以及时利用低谷电的地方,可以发展蓄冰空调、蓄热式电热锅炉;有的地方可以发展电力空调、电采暖器和电热水器。总之,要从节能、经济、环境保护的原则出发,因地制宜,慎重研究,认真决策。

#### 4. 加强冷热电联产(CCHP)的研究和推广工作

现在看来冷热电三联产能适应我国大部分地区的需要,特别是我国过去采暖仅限制在黄河、秦岭山脉以北的“三北”地区,现在黄河与长江之间的中间地带,为提高舒适度,也开始搞采暖工程。<sup>[11][4]</sup>我国如要发展小型 CHP、CCHP 应组织联合攻关,政府扶持。而且我国在冷热电联产方面具有一定优势,现在我国自行开发设计的余热制冷空调机就可以解决建筑物的制冷、采暖和卫生热水联供,而且我国已研究出将燃气涡轮机与余热式空调机相配套,形成高效的冷热电联产系

统,如果抓紧CCHP的研究和应用,我国在冷热电联产系统的发展中有可能达到美国,步入世界前列水平,成为我国 21 世纪全球竞争中的优势产业之一。

#### 1.1.4 发展基于小型燃气轮机冷热电联产的优势

1、小型燃气冷热电三联产可以更加有效配置资源,稳定、持续地利用天然气、煤层气等资源,减少燃气的调峰,降低因燃气调峰导致的储采比下降,地下储气库损失等不必要的资源浪费,减少燃气管网的建设投资,提高设备运行效率,从而达到降低燃气利用成本,提高燃气企业的竞争能力。

2、小型冷热电三联产将采暖、热水、电、冷、燃气、水资源合理利用和环境污染治理统筹考虑,以最小的资金、资源和环境代价,换取最高的投资效益,能源转换效率和能源设备效能。而且小型冷热电三联产可以减少因运输造成的能源损耗;因为环境等多方面因素影响,冷、热、电的供应半径各不相同,电的供应半径为 100~500 公里左右,热的供应半径却只有 10 公里左右,冷的供应半径更小

只有 100 米左右,如果电力、热力、燃气各自独立,势必导致供应距离与各自的供应半径不一致,为了减少损耗,需要建设各自的能源中转站,因此造成了能源设施的重复投资建设,如果采用小型冷热电三联供系统,就可以把整个能源供应建设在用户周围,使冷、热、电的供应都在其自己的供应半径以内,达到一致,因而减少了远距离输送的电网及配变电、热力管网及热交换站、燃气管网及调峰系统、制冷设备,热水供应设施和环境污染治理等多项投资。

3、燃气冷热电联产将燃气能源利用效率提高到 85%,并将其中一部分能量转换为高价值的电能,有效节约了资源。同时小型的燃气热电装置,可以将冷、热、电在输送中的损耗降至最低,减少了能源的浪费。见表 1-2

表 1-2 各类燃气热电联产设备效率比较

方式	微型燃气轮机	小型燃气轮机	大型机	燃料电池	燃气锅炉
发电效率	26%~30%	25%~41%	40%~45%	40%~65%	0
热电联产	77%~86%	77%~85%	75%	80%~95%	85%

4、小型燃气冷热电联产体系可以实现一种能源设施的互联网,它通过峰谷时的小型、微型供能设施的互相连接,提高了城市的供能可靠性。此外,各厂家的设备都设计了自动调频并网系统,可以保证电网的运行安全。

5、下图是 2000 年北京天然气用量和某小区一年的电力负荷变换图,从中可以看出夏季由于制冷需要,因电空调用电所增加的电力负荷占很大比例,比电负荷处于高峰期,而这时的天然气的使用量却很少,用气量处于低谷期;到了冬天,自

于供暖需要,天然气的用量达到了峰值,而用电量却仅处于基荷电力负荷大小,两个的负荷变化关系正好是相反的。但是,如果城市里部分地区使用燃用天然气的小型燃气轮机的冷热电三联产系统,而这套系统是采用余热来提供夏季用户所需要的冷负荷和冬季用户所需的热负荷,这样就可以大幅度削减因电空调造成的高峰负荷,优化用电结构,较少了发电机组设备超负荷运行时间,保证电网的安全运行,起到了削电峰填气谷的作用。

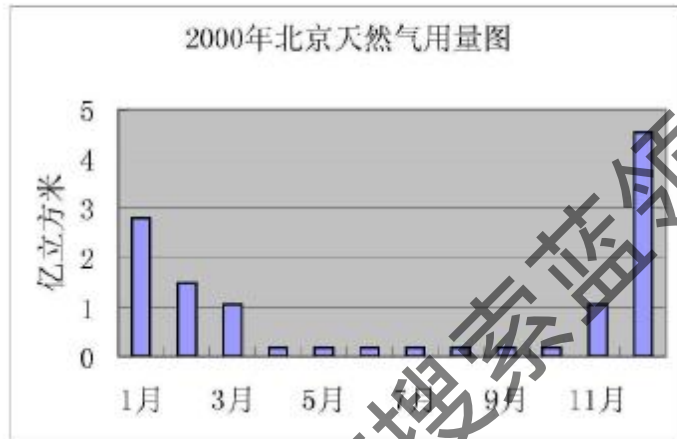


图 1-3 2000 年北京地区的天然气使用量

某小区的电负荷随季节变化图

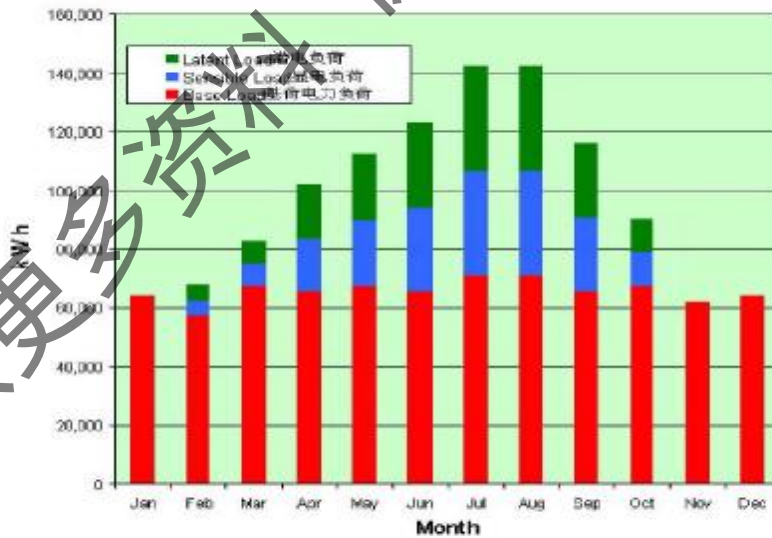


图 1-4 某小区电负荷随季节变化图

6、小型热电联产不仅自身污染小,对环境污染的治理效果也十分突出。由于用户端的能源利用效率高,真正减少二氧化碳等温室气体的排放;代取了大量电空调,可有效减少了臭氧层的破坏;一些小型热电设备氮氧化物排放极低,宝曼、

caplone 微型燃气轮机的排放值为 16ppm, 小型燃气轮机的排放 25ppm, 远低于燃气锅炉 200ppm-300ppm 的水平。<sup>[10]</sup>见表 1-3

表 1-3 各类燃气热电联产设备的氮氧化物排放比较

方式	微型燃气轮机	小型燃气轮机	内燃机	燃料自给	燃气锅炉
排放量	6ppm	25ppm	25ppm	0	>200ppm

7、小型燃气热电联产具有较好的综合经济效益,除了上述的各类能源项目的投资可以减少外,由于资源利用效率高,很少承担电力的线损和热力的行损,减少了若干个经营环节,加上自身的高自动化程度可以实现无人职守,极大地降低了设备的运行成本。<sup>[11][12]</sup>

## 1.2 国内外的发展现状

世界上一些发达国家,燃气轮机、吸收式制冷机等各项设备技术先进,组成三联供系统的各个设备部件的技术比较成熟。燃气轮机不管是从燃烧技术、污染排放控制还是从发电质量、上网技术上都已经达到了环境和市网所要求的水平;由于冷战的结束,为了充分利用现有资源,美国等发达国家淘汰了一大批飞机发动机,并把一些军用飞机发动机改成民用制成燃气轮机来发电,现今大多数燃气轮机都是飞机发动机改型而来的。自从“9.11”和 2003 年美国城市大面积电网崩溃事件以后,一些发达国家为了防止由于自然灾害或者人为因素造成的大面积的能源供应崩溃的情况,在分析研究了各种能源供应模式的特点后,极力提倡在部分适合地区采用分布式供电系统,以避免出现发电厂一出现事故就造成了整个城市能源供应停止的情况。这就是为什么基于燃气轮机的三联供系统首先在经济发展国家得到了应用的原因。

### 1.2.1 国外冷热电三联供的应用状况

美国关于 CCHP 作了许多研究,并本着开发和商业化的目的,在天然气、电力和暖通空调等行业的制造业进行了广泛深入的合作。工业界提出了“CCHP 创意”和“CCHP2020 年纲领”,以支持美国能源部的总体商用建筑冷热电联供规划。

规划中倡导增加综合利用多项技术,包括先进的燃气轮机、微型透平机、先进的内燃机、燃料电池、吸收式制冷机和热泵,干燥及能源回收系统、引擎驱动及电驱动蒸汽压缩系统,热储存和输送系统以及控制及系统集成技术,不仅满足

建筑物的热和电力负荷的需求，也从整体上提高了从矿物燃料到能源的转换效率。<sup>[2][11]</sup>

目前美国已经有 6000 多座分布式能源站，仅大学校园就有 200 多个采用了分布式能源站，其中已建成了几个冷热电三联供的示范基地，如麻省理工学院热电厂（MIT），普林斯顿大学热电厂（Pinceton），罗德格斯大学纽布朗斯维克校园热电厂（Rutgers），马里兰大学的冷热电联产等等。并且从中众多的分布式能源站中得到了一些统计数据：商用建筑采用热电冷三联产后节能效果达到 46% 以上。

英国只有 5000 多万人口，但是分布式能源站有 1000 多座。9.11 事件以后，他们加速了分布式能源站建设的步伐，以保证供电安全。比如英国首相的白金汉宫，首相的唐宁街官邸，就采用了基于燃气轮机的三联供系统。

日本由于本国的能源缺乏，因此对于能源的高效利用的方法非常重视，其中对于冷热电联产项目的开发投入了大量的资金和人力，同时也收到了很好的效果，80 年代建成的日本芝浦地区的东京瓦斯大楼的冷热电联产系统，至今还是此工程的设计典范。<sup>[9]</sup> 见下图 1-5

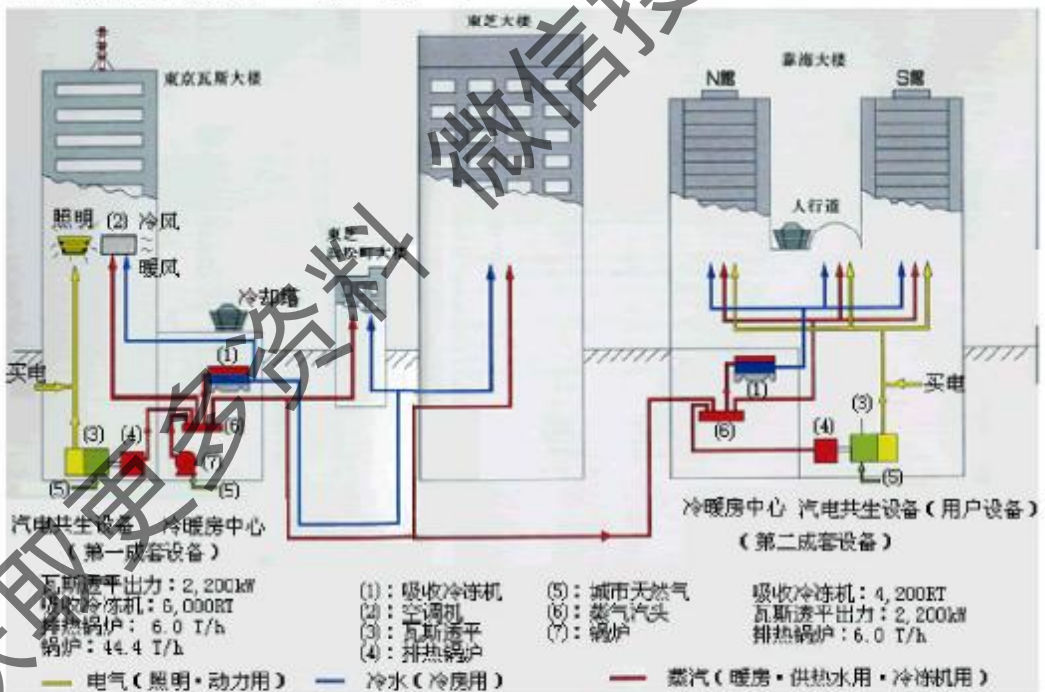


图 1-5 日本芝浦地区的冷热电三联产项目

### 1.2.2 国内冷热电三联供的应用状况

我国能源资源不足、利用效率低，急需发展高效率的三联产技术。2000 年由国家发展计划委员会、国家经济贸易委员会、建设部和国家环保总局联合下发

了《关于发展热电联产的规划》，这是贯彻《中华人民共和国节能法》，实施《可持续发展战略》，落实环保基本国策和提高资源综合利用效率的重要行政规章。《规划》再次明确了国家鼓励发展冷热电联产的政策，支持发展以天然气为燃料的燃气轮机冷热电联产项目，特别强调了国家积极支持发展燃气轮机联合循环热电联产和小型燃气冷热电联产。国家计委已在“十五”计划实施方案中确定在北京、上海积极抓好试点工程。

目前，北京、天津等地正在积极利用陕甘宁天然气资源，并计划建设第二条进京管线。上海、江苏和浙江等地也正在努力开拓“西气东输”工程实施后的天然气市场，这些都为发展小型燃气轮机及微型燃气轮机冷热电联产提供了良好的机遇。世界各国实践表明，发展能源梯级利用的小型冷热电联产产品合理，高效地利用天然气资源的较好手段，对于改善环境，降低因燃料调整带来的成本增加，也是非常好的解决方案之一。

为适应国家关于环境保护的要求，改善污染严重的大城市及周边地区的大气质量，开拓天然气合理、高效的用途，拟在北京等大城市发展分布式冷热电联产，建设一批以天然气为燃料的燃气冷热电联产系统，以替代和优化整合目前已管规的锅炉采暖，电力空调制冷组成的能源系统，提高城市电力供应的安全可靠性，缓解夏季制冷用电高峰，平衡天然气利用，降低天然气成本，扩大天然气市场。

我国已建成的基于燃气轮机的三联供系统的示范工程项目有：上海浦东国际机场和黄浦区中心医院，从能源角度和环境保护方面来看，三联供技术在其应用中收到了很好的效果。现今拟建设的项目有：北京燃气集团控制中心大楼、中国科技促进大厦，华北电力大学，北京中关村软件园和天津保坻区等等；按照这样的发展趋势，将会有更多的工程项目采用这种凝结着燃气、电力、暖通和制造业智慧结晶的三联供技术。<sup>[61][51]</sup>

### 1.3 研究内容和目的

热力学孤立系统熵增原理确定：在孤立系统中，能量转换和利用总是朝着有用能贬值方向进行的，一个过程的熵减必定伴随着熵增的过程给予补充，不可能只单单出现熵减过程。发电系统将矿物能源转化为电力，这是一个熵减过程，必定伴随着一个熵增过程，这一过程就是系统向低焓热源放热时存在着沿差传热，即排放的废气温度高于环境温度，然而温差传热是不可逆的，这样就会导致系统的熵增，并且在这一不可逆过程中，排放的废气余热中还有一部分高品质能白白地浪费了；而三联供系统制冷、制热设备回收了这部分高品质能其中一部



分可用能，实现了能源梯级利用，也是对高品质能量转换贬值部分的补偿，使转换代价减小，转换效率大幅提高，同时，能源得到合理分配和满足。<sup>[11]</sup>

### 1.3.1 本文研究的内容

本文是在考察了国内的能源利用情况以及北京天津等地区天然气的使用情况后，了解到国内能源缺乏的事实，掌握了天然气等能源利用系统的技术方法，并分析了现今天然气利用方式存在的问题，提出了在一些地区的医院、学校、工厂、住宅小区和军事基地项目，可以采用经济性、节能性、环保性和相对优势的基于燃气轮机的三联供系统作为自己的能源供应中心。随后，本文在分析研究了国内外三联供系统应用工程项目后，发现了在常规三联供系统的设计中存在若干种各种负荷设计难以确定，不同设计方案难以抉择，以及各种系统设备的功率难以选取等问题，并考察了国内外对这些问题的解决方法，从中发现了这些问题的解决是单纯从先前的一些三联供示范基地的经验进行类比，从而确定自己的设计方案；这种解决方法虽然有一定的正确性，但是是否能发挥出三联供系统的优势，还存在疑问。对此本文提出了一套自己的基于燃气轮机的三联供优化模拟系统，试图解决这些困扰三联供系统设计者，并且使得三联供用户的经济利益无法达到最大，整个系统的节能性不能充分发挥出来，限制三联供技术在中国推广的问题。

本文提出的三联供系统优化模拟是运用热力学第一定律、第二定律、技术经济学、数学建模以及最优化理论等有关知识，从整个系统节能角度出发，通过对一次能源利用率、初投资、运行费用等方面进行对比分析，实现节能性和经济性优化，最终实现整个系统的优化。如果选用基于燃气轮机的三联供系统，选用天然气作为动力能源，其燃气轮机采用先进的回热技术，这样就可以提高一次能源利用率，而且也大大减少了对环境污染的问题。本文从节能性和经济性这两个方面来考虑，利用定义和经济系数的方法把节能性和经济性整合在一起考虑，把经济效益和能源利用率合二为一，使所要优化模拟的系统就从一个复杂的难以优化各部分权重的多目标的规划问题，变为了简单的多目标规划问题；这不仅解决了在优化设计中，对于多目标规划中各个目标函数的权重难以把握的问题，而且大大简化了优化模型。目前亟待解决的问题是提供冷、热、电能源中心的经济半径问题和设计负荷问题。现在运行的三联供系统的经济半径都是按经验值选取的，设计负荷有的以电负荷为主，有的以采暖负荷为主，而有的以空调冷负荷为主。<sup>[12]</sup>本文介绍的优化设计方法以节能性和经济性为目标函数，从而确定其设计负荷这样的设计理念进行优化的；在整个设计过程中，既考虑了能源专家建议的，以基荷电力定容量，不足电力由市电网补充，不足热力补燃解决这样的指

导思想,同时又抛弃了以单纯的经验设计的概念,而以整个项目的节能性和经济性为所要优化的目标函数,来确定其能源供应。<sup>[12][13][14]</sup>随后,本文分析研究了多种多目标规划优化算法的各种的应用特点,选定较为适合的优化算法——分目标乘法,对本模型进行模拟计算。并且,本文在最后模拟了天津一家医院的三联供设计作为文章的算例,试图从一个具体的例子中体现了本文介绍的优化算法的可行性;从计算的结果可以看出,用本文介绍的优化模拟系统确定的设计负荷所研发的三联供系统,比单纯从数值经验上确定的三联供系统,有更低的初投资系数,有更高的NPV值,即节能性和经济性更优,因此达到了本文对三联供系统优化模拟的目的,对三联供系统设计中存在的问题提出了一个值得参考的解决方案。

### 1.3.2 目的和意义

本文研究的三联供系统优化方法是以项目的节能性和经济性为目标函数,从而确定其设计负荷的研究方法,而在分析投资回收期时,采用了较客观、实际的现金流分析方法,常规的三联供方案都是以投资回收期这样的静态评价指标,凭经验确定设计负荷来进行估算的,虽然这种方法计算简单、直观、使用方便,但是没有考虑资金的时间价值,因此只能用于不够精确的机会研究和初步可行性研究。本文优化模拟的目标函数是考虑初投资系数最小,投资成本最低,收益最高,并包括了资金的时间价值的动态评价指标,符合资金随时间的推移不断增值的实际情况。所以说本文所讨论的优化模拟方法对基于燃气轮机的三联供项目设计负荷确立、初步可行性研究,投资回收期核算给予了具体的分析和计算,为投资决策者提供了设计依据,帮助投资者合理地分配资源,使一定量的资源对目标的实现作出最大的贡献,因此对于三联供项目的设计具有一定的指导意义;而且本文讨论的方法考虑了不同环境、不同的政策给予、不同的设计依据等多种情况下不同三联供模式的设计,并且对于现在政策不给予支持,但是将来可能给予宽松的电力上网问题也提供了设计依据,所以本文讨论的方法有一定的前瞻性。特别是根据本文所讨论的优化设计方法所统的相关软件,用户界面友好、操作简单、经济数据综合而且用户可更新填充,对于一些具体的冷热电三联供项目的设计提供了简便、快捷、准确的方法。<sup>[15][16][16]</sup>

## 第二章 现行三联供的几种方案和热经济系数的提出

### 2.1 热经济系数

热、电、冷三联供系统是一种能同时产生电能和可用热(冷)能的能源系统。该系统使用燃气轮机,进而实现对一次能源(燃气)的合理的梯级利用,利用品位高的热能发电,利用低品位的热能采暖和制冷。在热、电、冷三联供系统中,能源被逐级利用,并可减少电厂的污染物排放。夏天其发电和热力制冷可减少电网电量的需求,削减电网夏季用电高峰,同时填补天然气的用量低谷,实现削电峰填气谷的作用;冬天燃气轮机高温烟气的余热利用,可减少冬季天然气的用量高峰,因此将对电网和燃气管网产生很好的削峰填谷的辅助作用。系统评价标准很多,如发电效率、能源消耗率、总热利用率、投资回收期、经济热效率,但这些评价指标一般均带有某些片面性,只能从单方面(能源利用率或经济性)对系统进行评价,而不能把能源利用率和经济性结合起来从两方面进行评价。本文提出利用热经济系数方法,把经济效率和能源利用率合二为一,综合地对热、电、冷三联供系统进行评价。

定义热经济系数为单位输出热的资金投入,即总资金投入与总输出热之比,它相当于输出热的成本。其表达式为:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{总}}}{P - Q_{\text{热}} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) + Q_{\text{冷}} \times \left(\frac{T_0}{T_2} - 1\right)}$$

式 (1)  $C_{\text{总}}$  —— 总的资金投入,即初投资、燃料费用,

运行管理费用、维修费等,元

$P$  —— 发电功率, kW

$Q_{\text{热}}$  —— 供热量, kW

$Q_{\text{冷}}$  —— 制冷量, kW

$T_0$  —— 环境温度, K

$T_1$  —— 热源温度, K (一般取 773K)

$T_2$  —— 冷源温度, K (一般为 278K)

由于天然气的价格有可能变动,故在此就天然气价格从 1.2 元/m<sup>3</sup>到 2.6 元/m<sup>3</sup>之间本文对热、电、冷三联供系统的总的热经济系数进行灵敏度分析。事实上,天然气价格对系统热经济系数的影响直接反映在系统的年燃料费用上,本

文模拟了一个三联供项目的热经济系数随天然气价格的灵敏度分析，如表 2-1

表 2-1 天然气价格灵敏度分析

天然气价格元/m <sup>3</sup>	年运行成本(万元)	热经济系数(元/kWh)
1.2	230	0.362
1.4	256	0.402
1.6	280	0.443
1.8	304	0.483
2.0	331	0.523
2.2	357	0.563
2.4	380	0.602
2.6	405	0.643

从以上的数据可以看出，在天然气价格较低的地方，如采用三联供技术，其热经济系数可以做到低于市电成本价，但随着天然气价格的提高，热经济系数也不断提高，其三联供系统的经济性就不十分明显了。

## 2.2 现行三联供方案的原理及其特点

典型冷热电三联产系统一般包括：动力系统(发电机(供电)、余热回收装置(供热)、制冷系统(供冷)等。针对不同的用户需求，冷热电联产系统方案的选择范围很大；与热、电生产技术有关的选择有蒸汽轮机驱动的外燃式或燃气轮机驱动的内燃式方案；与制冷方式有关的选择有压缩式、吸收式或其它热驱动的制冷方式。另外，供热、供冷热源还有直接和间接方式之分。

在外燃式的热电联产应用中，由于背压汽轮机常常受到区域供热负荷的限制不能按经济规格设置，多数是相当小的和低效率的；而对于内燃式方案，由于技术的不断进步，已经生产出了尺寸小、重量轻、污染排放低、燃料适应性广、机械效率较高的燃气轮机，同时燃气轮机的容量范围很宽：从几十到几千 KW 的微型燃气轮机到 300MW 以上的大型燃气轮机，它们用于热电联产时既有较高发电效率(30%-40%)，又有较高的热效率(40%-50%)，从而是总的能源利用率有很大提高。

压缩式制冷是消耗外功并通过旋转轴传递给压缩机进行制冷的，通过机械能的分配，可以调节电量和冷量的比例；而吸收式制冷是耗费低品位热能来制冷(根据热量和冷量的需求进行调节和优化)，把来自热电联产的一部分或全部热能用于驱动吸收式制冷系统，从而实现了冷热电三联产。

目前最为常见的吸收式制冷系统为溴化钾吸收式制冷系统和氨吸收式制冷

系统。由于氨吸收式制冷系统使用了有害工质氨，所以限制了其使用场所。现今的三联供系统普遍采用的还是溴化锂吸收式制冷系统。<sup>[19][20]</sup>

### 2.2.1 蒸汽轮机-溴化锂制冷机

工作原理:

锅炉燃烧产生的高温高压蒸汽进入蒸汽轮机推动涡轮旋转，带动发电机发电。发电后的乏汽或从蒸汽轮机中的抽汽进入蒸汽溴化锂制冷机制冷同时一部分进入热交换器采暖或提供卫生热水。

根据实际蒸汽品质（压力等），可以选择双效或单效蒸汽机。

系统流程:

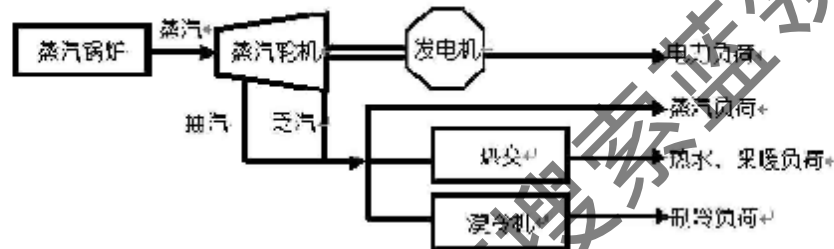


图 2-1 蒸汽轮机加溴化锂制冷机工作原理图

应用特点:

1. 根据对热电厂“以热定电”的要求，采用 CHP 可以大大提高热电厂的产热量，提高热电厂的负荷率，提高经济效益。
2. 如果汽轮机抽汽或乏汽不被用掉，则其发电量和发电效率都将下降，因此夏季使用蒸汽溴化锂制冷机可以显著提高综合效率；
3. 该模式适合于各个规模的火电厂或热电厂。

### 2.2.2 内燃发电机-余热利用型冷温水机

工作原理:

内燃机基于柴油发电机技术，燃料和空气进入气缸混合压缩燃烧并做功，推动活塞运动，通过取样机构，驱动发电机发电。排气、缸套冷却水的余热由余热利用型冷温水机产生制冷/采暖/卫生热水。

系统流程:

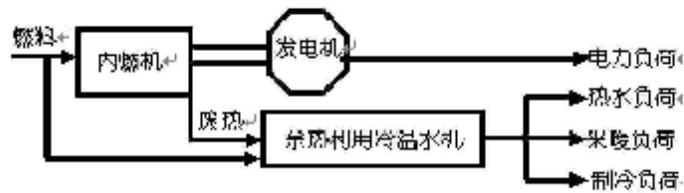


图 2-2 内燃机加余热利用冷温水机工作原理图

应用特点：

1. 余热中高温排气量较小且含氧量低，不能再燃利用；
2. 制冷/采暖/卫生热水、电力几种形式的负荷容量搭配比较灵活；
3. 系统组合简便，适合于现有内燃机电站的基础上进行改造。

### 2.2.3 燃料电池-余热利用型冷温水机

工作原理：

燃料电池利用燃料和空气的氧化化学反应供应电力，同时产生出蒸汽、废水、排气等，通过溴化锂制冷机回收这部分废热，提供制冷/采暖/卫生热水。

系统流程：



图 2-3 燃料电池加余热利用冷温水机工作原理图

应用特点：

1. 发电效率和能源综合利用率都较高；
2. 发电不是利用燃料燃烧，污染排放小，环保效益显著；
3. 制冷/采暖/热水和电力能量负荷容量配置灵活，可以用于各种场合；
4. 由于材料价格的关系，导致成本较高，燃料电池目前还未达到商业化生产。

### 2.2.4 燃气轮机前置循环-溴化锂制冷机

工作原理：燃气轮机发电后排出的高温烟气通过余热锅炉回收，其余热产生的蒸汽供蒸汽溴化锂吸收式制冷机制冷，其余通过热交换器提供采暖/卫生热水或供工业用户使用。

系统流程:

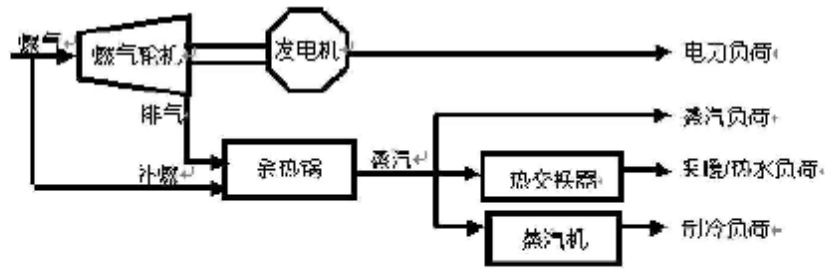


图 2-4 燃气轮机前置循环加溴冷机工作原理图

应用特点:

1. 夏季采暖/热水负荷最小的时候，溴化锂制冷机可以充分利用燃气轮机余热制冷，保证较高的系统综合能源利用效率。
2. 制冷效率高，COP 值可达到 1.30
3. 系统产生的冷量可用于建筑物的空调或燃气轮机本身的进气冷却或其他工艺冷却。
4. 制冷负荷调节范围广，最小制冷量可达 6000kCal/h，可满足各类建筑物的冷、热、电的要求。
5. 却适合于燃气轮机热电厂，更适应建筑物的能源供应

### 2.2.5 燃气—蒸汽轮机联合循环+吸收式制冷机组

工作原理:

燃气轮机排出的排气通过余热锅炉回收转换为蒸汽，注入蒸汽轮机发电，发电后的乏汽或抽汽供蒸汽制冷机制冷，其余部分可用于提供采暖或卫生热水。当然燃气轮机或余热锅炉的排气同样可以驱动排气直热型和排气可燃型制冷机。

系统流程:

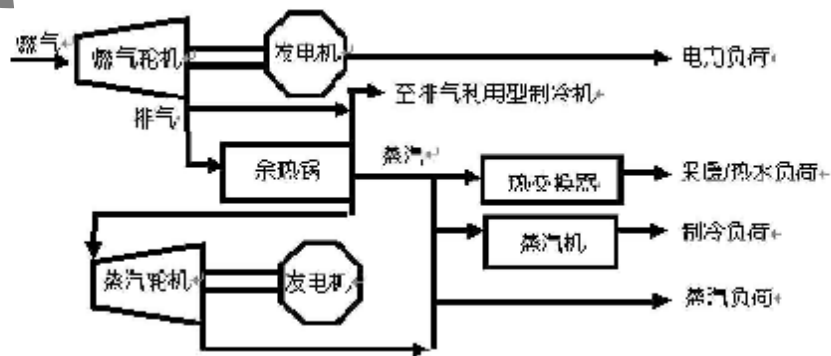


图 2-5 燃气-蒸汽联合循环加吸收式制冷机工作原理图

应用特点:

1. 比简单循环和前置循环发电具有更高的发电效率;
2. 与汽轮机发电中的应用类似,溴冷机可以有效提高夏季发电量和发电效率,并且减小用电峰谷差;
3. 适用于联合循环电厂(站)。

### 2.2.6 燃气轮机-排气回收型冷温水机

工作原理:燃气轮机中高温高压气体做功带动发电机发电后排出,这时排气有着相当的温度(一般在400℃以上),并具有较高的含氧量。溴化锂制冷机组可以直接回收排气余热进行制冷,也可以将排气作为助燃空气进行第二次燃烧,二次燃烧回收热效率更高,达95%以上。

系统流程:

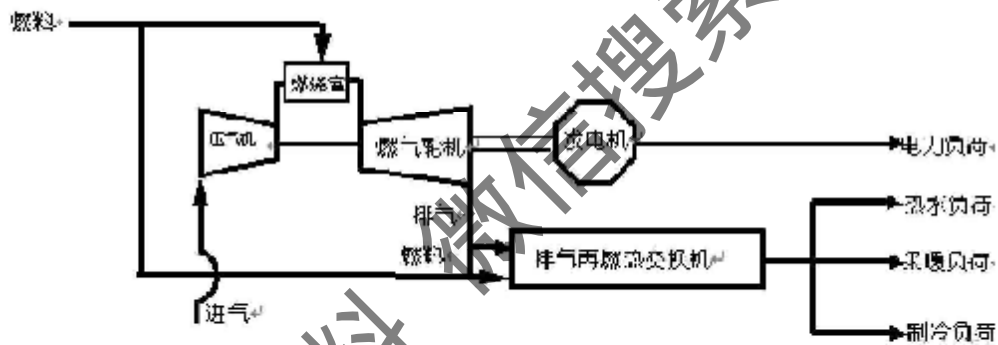


图 2-6 燃气轮机加排气回收型冷温水机

应用特点:

1. 尾气余热直接被溴化锂冷水机回收进行制冷、采暖并提供卫生热水,无须另加热交换器,系统流程简单,造价低。
2. 热效率高, COP 通常在 1.27 以上;
3. 适用建筑物:燃气轮机电厂或燃气轮机自备电站的改造,特别适合于简单循环的燃气轮机电厂(站),其经济性特别显著。

### 2.2.7 微型燃气轮发电机-余热利用型冷温水机

工作原理:

微型燃气轮发电机排气余热一部分被溴冷机的稀溶液回收,另一部分参与二次燃烧,对外提供制冷、采暖和卫生热水。

系统流程:



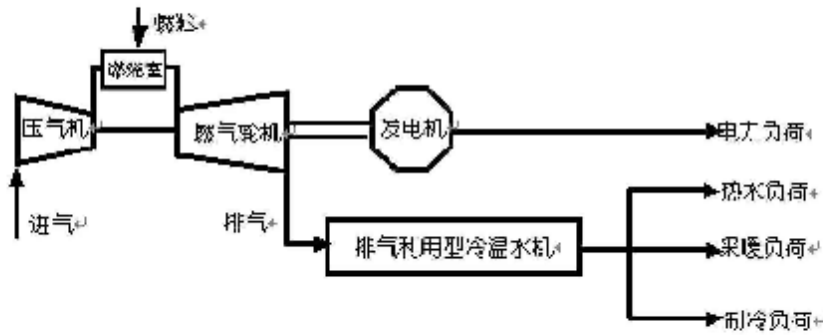


图 2-7 微型燃气轮机加冷温水机工作原理图

应用特点：

1. 发电后的排气余热得到充分利用，冷温水机能耗最大限度降低；
2. 电力、空调、采暖和卫生热水几种负荷容量控制灵活，可以满足不同场合的需要；

根据以上介绍的几种三联供系统设计方案，本文优化模型设计中采用的是现今较为常见的，也是广大用户喜欢采用为方案——小型微型燃气轮机+余热锅炉+吸收式制冷机这样一套系统，整个系统中各部件技术成熟，功率可选择范围较广，运行稳定，而且有很多以往的经验可以借鉴。故本文选择了我国已建成的基于燃气轮机的三联供系统工程项目的两张系统图，以供参考。

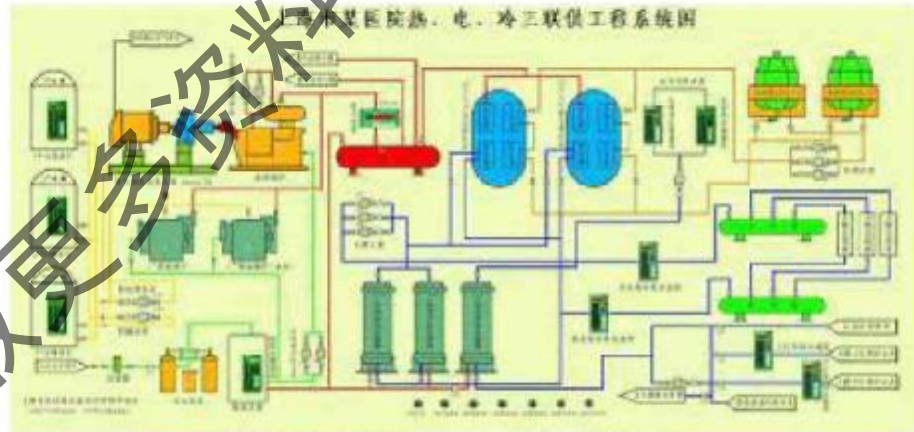


图 2-8 上海市某医院冷、热、电三联供工程系统图

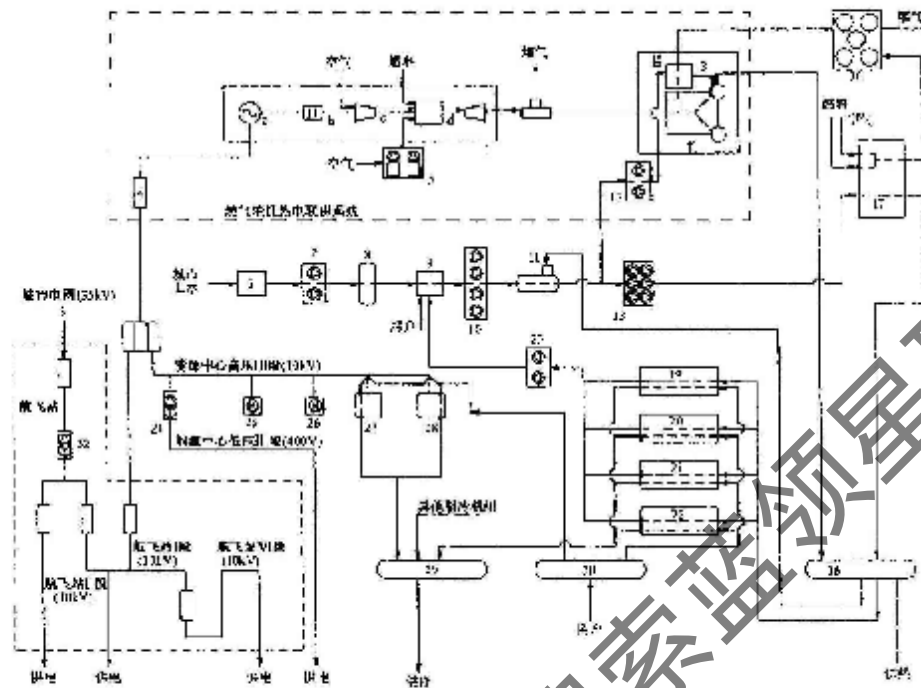


图 1 浦东国际机场能源中心冷、热、电三联供系统示意图

1. 燃气轮机发电机组 2. 余热锅炉 3. 余热锅炉本体 4. 省煤器 5. 发电机高压柜 6. 空气压缩机组(2台)
7. 原水箱 8. 原水泵机组(2台) 9. 软化水箱处理装置(2套) 10. 凝结水箱(2台) 11. 除氧器组(4台)
12. 除氧器组(3台) 13. 余热锅炉给水泵机组(2台) 14. 辅助燃气燃油锅炉给水泵机组(5台) 15. 辅助燃气燃油锅炉组(3台 30T/h,1台 20T/h)
16. 分汽缸 17~22. 汽轮机机组 23. 凝结水回收装置 24. 10kV 主变 25,26. 冷却水泵 27,28. 离心式制冷机组 29. 蒸发器 30. 集水器 31. 并网线路航空站侧开关 32. 35kV 主变

图 2-9 浦东国际机场能源中心冷、热、电三联供系统示意图

### 2.3 三联供系统的几个关键部件

由于蒸汽轮机、内燃发电机、燃料电池的三联供运行模式有着各自的缺点，如燃料电池三联供模式因为目前造价还是过高，最便宜的质子膜燃料电池如果成批生产，造价也需要 15000 元/kW，通常需要制氢设备，技术新，很多问题还需要解决；基于内燃发电机的三联供系统因为运行维护成本高、大修费用高，余热回收复杂，需要对烟气、汽缸冷却水、中冷器三段热量进行回收，供热量小，而且由于内燃机做功产生很大的震动，导致噪音很大，通常超过 100 分贝，故导致了在一些场合中限制了它的使用；如果采用蒸汽轮机就会造成系统过于庞大，由于水蒸气的临界点限制，为了获得较高的发电效率就必须提高吸热温度，因而必须提高工作压力，故使得设备的初投资和运行费用都相对比较大，系统布置、安装组合周期长，系统机组启动时间长，自动化程度不高，排放污染相对严重，能与经济性相对较远。

所以本文采用的三联供设计方案主要是基于中小型或者微型燃气轮机的三

联供系统，所用的燃料是天然气，因为小型燃气轮机和微型燃气轮机的发电质量好、燃料质量优、能源利用率高、功率调节相对灵活、污染物排放非常低、噪音较低、启动迅速、系统稳定、操作简单，得到很多用户的偏爱；而且许多三联供示范基地的动力设备都是采用的小型、微型燃气轮机（如马里兰大学）。本文推荐的制冷设备是溴化锂吸收式制冷机或者是余热利用型冷温水机，因为这两种设备的技术相对成熟，应用广泛，可选功率范围较大，其控制系统与燃气轮机控制系统的信号耦合处理技术成熟，能够很好的适应用户的需求。

由于在一般项目投资中属燃气轮机、溴化锂吸收式制冷机、余热机最为庞大，一般占整个投资额的 90%。而且其作为动力设备和制冷设备是三联供系统运转的核心部件，整个系统的关键设备。因此为了建立起三联供系统的优化模型，使系统模型的每个模块都准确的反映出设备的真实情况，必须对于这些设备结构、参数有全面的了解。因此以下本文将用一些图表的形式介绍一下这几个关键设备，是用户对这些设备能有一个更为直观、具体、数据化的印象。<sup>[1]</sup>

### 2.3.1 燃气轮机

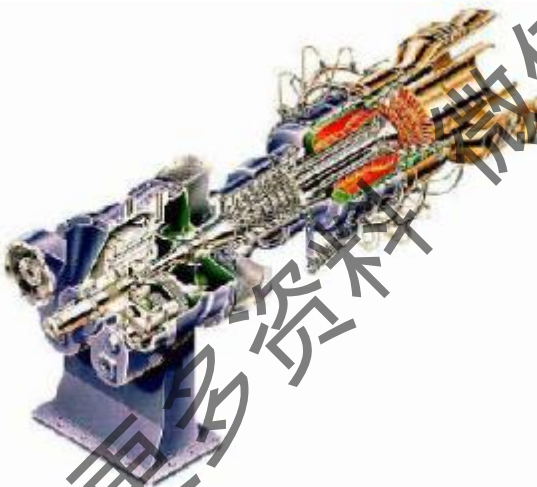


图 2-10 小型燃气轮机内部机构示意图

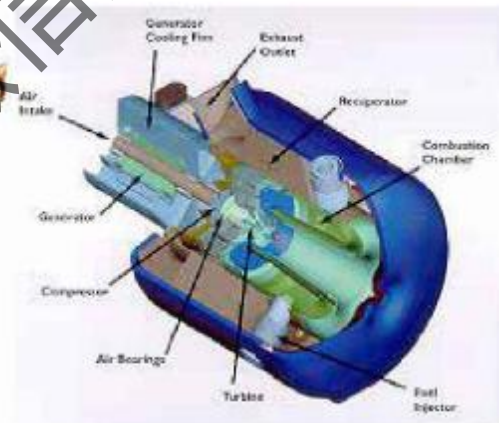


图 2-11 微型燃气轮机内部机构示意图

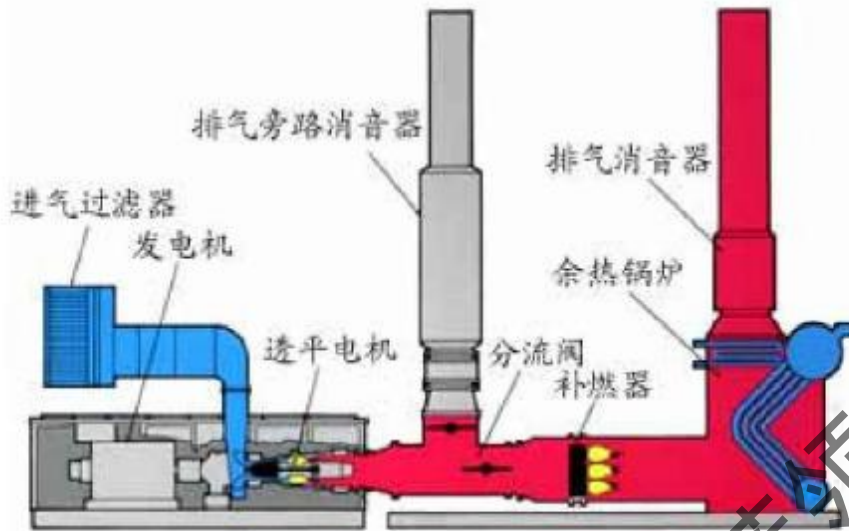


图 2-12 带有补燃器的小型燃气轮机系统图

表 2-2 Solar 小型燃气轮机热电联产功况比较

项目	单位	Saturn 20	Centaur 40	Centaur 50	Taurus 60	Taurus 70	Mars 90	Mars 100	Titan 130
燃机型号	-	土星 20	人马座 40	人马座 50	金牛座 60	金牛座 70	火星 90	火星 100	太阳神 130
燃机出力	kW	1181	3418	4254	5069	6728	9061	10439	12533
千瓦燃耗	kJ/kWh	14987	13160	12541	12093	11281	11555	11265	11115
燃耗量	GJ/h	17.7	43.0	53.1	61.3	75.9	104.7	117.6	139.3
天然气消耗量	m <sup>3</sup> /h	503	1280	1510	1743	2158	2977	3344	3961
燃机发电折热能	GJ/h	4.25	12.30	15.24	18.25	24.22	32.62	37.58	45.12
燃机效率	%	24.0	27.3	28.7	29.8	31.9	31.2	32.0	32.4
燃气轮机排烟温度	℃	512	443	502	496	482	468	491	482
余热锅炉烟气流量	t/h	22.7	65.8	67.2	77.7	95.9	138.20	147.3	176
余热锅炉直接供热(蒸汽压力 1034kPa,饱和)									
蒸汽量	t/h	3.7	8.3	10.6	12	14.1	19	22	25.8
蒸汽折净热能	GJ/h	9.03	20.25	25.86	29.28	34.40	46.36	66.00	77.40
供热效率	%	51.01	45.00	48.71	47.77	45.33	44.28	56.12	55.56
联合循环发电效率	%	75.03	72.35	77.41	77.53	77.24	75.43	88.08	87.95

热电比	%	212.34	164.59	169.68	160.45	142.04	142.12	175.62	171.55
余热锅炉补燃至 927 <sup>o</sup> C 直接供热( 蒸汽压力 1034kPa,饱和)									
补燃消耗量	GJ/h	11.20	37.90	34.20	40.00	50.90	74.90	76.10	93.50
天然气消耗量	m <sup>3</sup> /h	318	1078	972	1137	1447	2130	2164	2659
蒸汽量	t/h	8.4	24.7	25.2	29.1	35.9	51.3	54.7	65.0
蒸汽折净热能	GJ/h	20.50	60.27	61.49	71.00	87.60	125.17	133.47	161.04
供热效率	%	70.92	72.70	70.43	70.09	69.08	69.69	68.90	69.18
联合循环发电效率	%	85.63	87.54	87.89	88.11	88.18	87.86	88.31	88.56
热电比	%	482.08	489.79	403.40	389.10	361.66	383.73	355.15	356.92
余热锅炉补燃至 1593 <sup>o</sup> C 直接供热( 蒸汽压力 1034kPa,饱和)									
补燃消耗量	GJ/h	29.7	92.5	89.6	104.0	130.2	188.1	196.4	238.8
天然气消耗量	m <sup>3</sup> /h	844	2630	2548	2954	3702	5348	5584	6790
蒸汽量	t/h	16.50	48.20	49.20	56.90	70.30	101.30	106.80	128.90
蒸汽折净热能	GJ/h	40.26	117.61	120.05	138.84	171.53	247.17	260.59	314.52
供热效率	%	84.94	85.53	84.13	83.99	83.23	84.42	82.99	83.18
联合循环发电效率	%	93.91	94.48	94.81	95.03	94.98	95.56	94.96	95.12
热电比	%	946.94	952.79	787.59	760.81	708.20	757.74	693.43	697.08

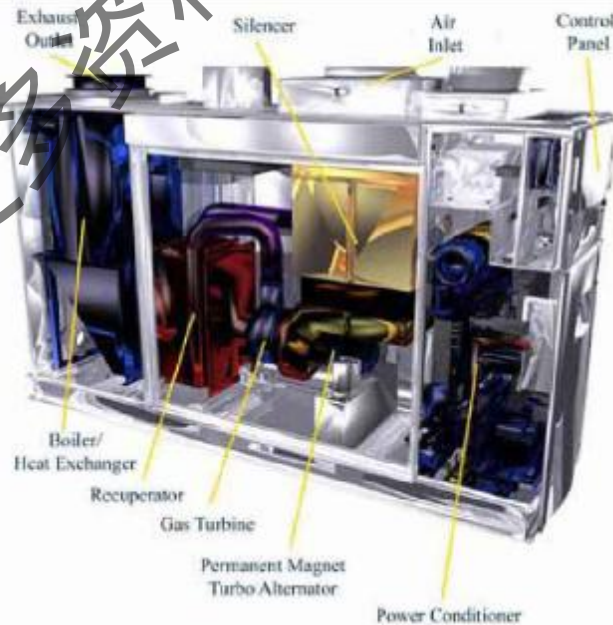


图 2-13 小型燃气轮机的剖面图

### 2.3.2 溴化锂吸收式制冷机

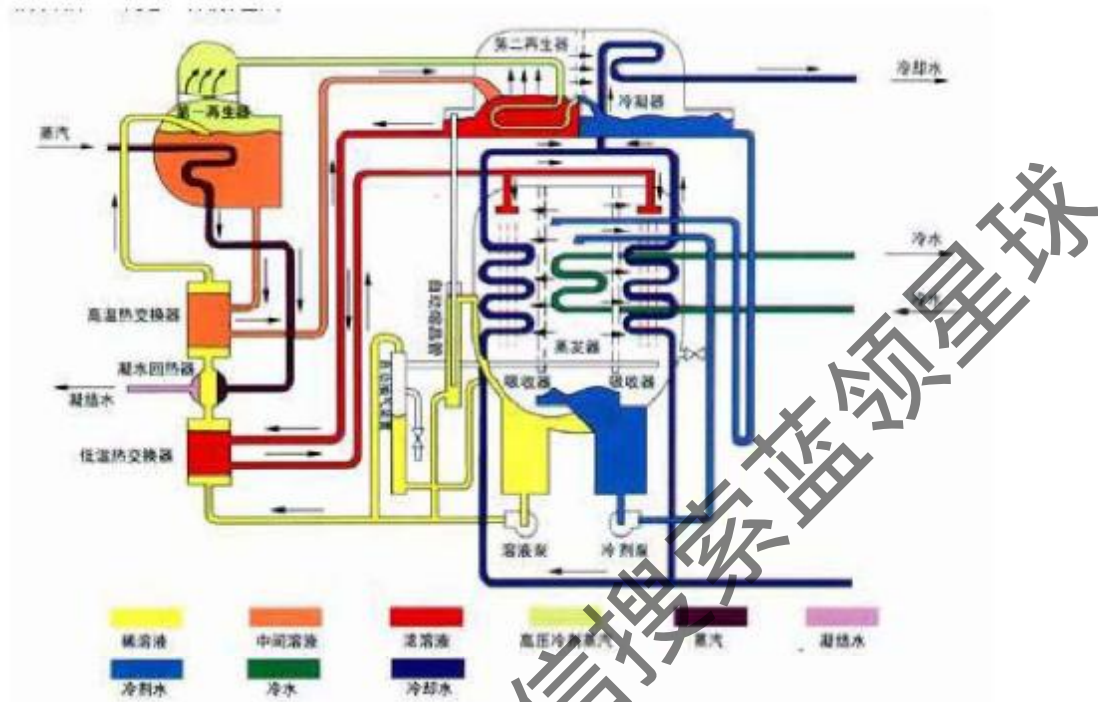


图 2-14 溴化锂吸收式制冷机原理图

表 2-3 75 万大卡级余热溴化锂吸收式空调机基本数据 (参考远大 VII 型)

项目	单位	数据
COP 值		1.3
制冷量	kW	875
	kCal/h	750000
冷水流量	t/h	150
供热量	kW	675
	kCal/h	578800
温水流量	t/h	72.3
生活热水量	t/h	36.2
长	mm	4890
宽	mm	1950
高	mm	2240
溶液量	t	2.1
运转重量	t	11

### 2.3.3 余热直燃机

表 2-3 余热直燃机组介绍

项目	单效蒸汽机	双效非气直燃型	单效非气直燃型	非气直燃型	非气直燃热交换型
功能	制冷	制冷	制冷	制冷、采暖、卫生热水	制冷、采暖、卫生热水
冷热量	10~1000 万大卡/时	6~1000 万大卡/时	6~1000 万大卡/时	100~1000 万大卡/时	10~1000 万大卡/时
热源种类	蒸汽	高温烟气	高温烟气	高温烟气	高温烟气
热源特性	0.04~0.3MPa	≥400℃	200~450℃	≥200℃(含液量≥15%)	≥200℃(含液量≥15%)
设计寿命	20	15	15	20	20
循环原理	见图 2-15	见图 2-16	见图 2-17	见图 2-18	见图 2-19
COP	0.78	1.3	0.8	1.47*	≥1.47*
三联供系统应用特点	能产生低压蒸汽的发电系统,如热电厂、联合循环燃气轮机发电厂、燃料电池,其冷量用于空调、燃气轮机进气冷却或工业冷却	用于燃气轮机发电、微型燃气发电机、内燃发电机组或外燃发电机组。	用于燃气轮机发电、微型燃气发电机、内燃发电机组或外燃发电机组。	特别适合于已采用直燃机的用户,仅需进行简单改造,也可用于燃气轮机发电厂、微型燃气轮机、内燃发电机组。	适合于已采用直燃机的用户,改造较为简单,也可用于燃气轮机发电厂、微型燃气轮机、内燃发电机组。

注: \*表示余热没有计入。(数据主要以某家大型空调企业的余热机组为主)

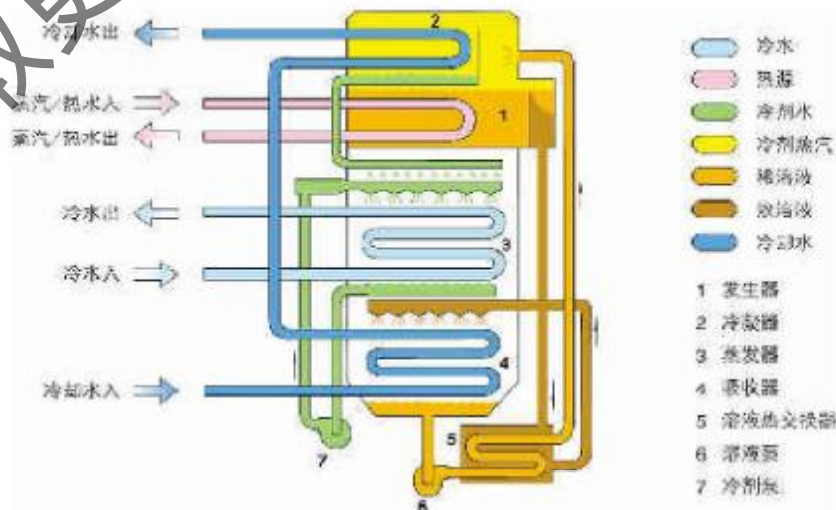


图 2-15 单效蒸汽机/单效热水机循环原理图

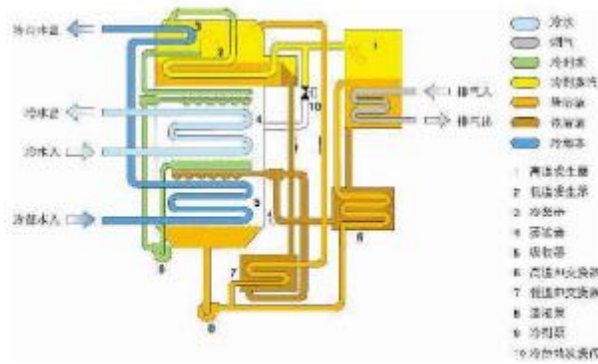


图 2-16 双效排气直热机循环原理图

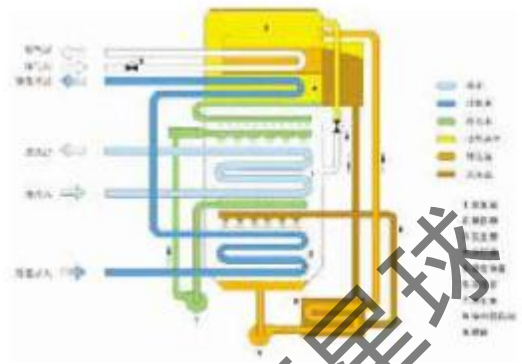


图 2-17 单效排气直热机循环原理图



图 2-18 排气再燃机循环原理图

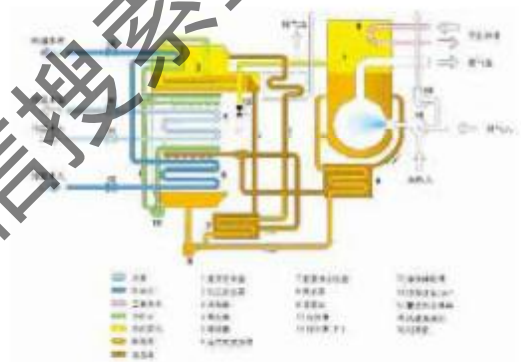


图 2-19 排气再燃与热交换并联机循环原理图

获取更多资料

微信搜索 蓝领星球



### 第三章 基于燃气轮机的三联供优化模拟系统模型

本文在建立三联供的设计模型中,针对不同的项目背景、地方政府给予的电力接入政策、以及用户的设计要求,拟定了三种不同设计模型以适应不同的情况。每个模型都考虑了各自的设计要求和特点,并能较好地反映具体真实的情况。

第一种模型——独立发电系统模型,这是最简单的设计模块,由于该种二联供项目要求采用的独立于市网的三联供系统(例如一些对于稳定性要求较高的军事基地、数据控制中心和一些还没有铺设电网的偏远地区等等),整个系统没有引入市电进行调节,没有其他电力进行补充,因此设计的燃气轮机发电机组应该大于额定电负荷( $P_{\text{设计}} > P_{\text{额定}}$ ),如果在设计电负荷的燃气轮机所产生的热负荷不能满足工程的额定热负荷( $Q_{\text{设计}} < Q_{\text{额定}}$ ) (由于本文采用的是溴化式制冷系统,故冷负荷也可折算成热负荷),可以采用燃气锅炉或者燃气锅炉进行补燃( $Q_{\text{设计}} - Q_{\text{燃气}} + Q_{\text{锅炉}}$ );如果余热负荷大于额定热负荷,可以采取向周围地区供热或者直接排放,但是直接排放导致余热没有利用,这就要考虑发电成本的问题。采用这种三联供模型的用户一般注重设计系统的稳定性、安全性、可靠性以及可调节性,因此在此模型中适宜以阵列化的微型燃气轮机作为电力设备,最大峰值电力负荷即为系统的设计电力负荷,而对于热负荷和冷负荷的设计可以从节能性和经济性优化中确定;而且由于系统独立于市网系统,所以必须配备系统的启动电机,这也是在模型设计中考虑到了。<sup>[22]</sup>

第二种模型——并网带市网系统模型,这是最为典型的模型,现今大多数二联供项目都属于这种模型(例如:医院、学校、住宅小区、写字楼、工厂等等),这种三联供系统中的发电模块可以与市电控制系统进行并网,即当所发电不能满足用户需求时可以从网上购市电以进行补充,但是由于电力政策的考虑,当所发电超负荷时不能上网售电;所以这种三联供系统模型的燃气轮机发电功率应该大于整个用户所需要的额定电力( $P_{\text{设计}} > P_{\text{额定}}$ ),一般额定电力为尖峰负荷 50%,小于或者等于所需要的额定电力负荷( $P_{\text{设计}} \leq P_{\text{额定}}$ ),不足电力可以从市网中补充,不足冷热负荷可以用燃气锅炉或者燃油锅炉补燃解决。运用这种模型的用户最为关心的是其经济性问题,因此如何设计三联供系统的负荷,使它既能满足用户对冷热电的需求,有较好的节能性,而且又能有较好的经济效益,即使其投资回收期大大缩短,这是本文研究的优化模拟系统的重点内容;传统上这种模式的三联供系统负荷的确立是以国内外一些三联供示范基地的经验数据作为依据的,

但是这样的数据非常少,不能全面的适用于各种用户需求,而且有的时候以这种方法确定的负荷,虽然能基本满足用户的需求并有一定的经济性,但是是否能达到节能性和经济性都较优,就难以确定了。所以,本文试图建立一种三联供系统的优化模型,把三联供的各个主要设备的价格表示成以功率负荷函数关系式的形式,在用户的负荷要求下,以采用三联供项目后所节省的购冷、热、电费用为项目的收益,建立起以最小的经济系数 $\varepsilon$ 、投资成本最低( $\min(C_{\text{inv}}$ ),收益最大( $\max(C_{\text{inv}} - C_{\text{inv}})$ )作为目标函数的优化方程。这种三联供模型是以——其负荷为一定容量,不是电力由电网补充,不是热力补燃解决这样的指导思想建立起来的,在此模型中,决策变量设计的电力负荷必须大于基荷电力,由于不能上网售电导致它也必须小于额定电力,冷、热负荷在不足的情况下可以补燃解决,在剩余的情况下可以向其他地区售热,也可以开发其他的余热利用项目。

第三种模型——并网加上网系统模型,这种模型的出现出于西安电力政策的给以用户自己所发的电可以上网售电的权利,而现今这种给法是不允许的,所以本文的对这种模型的研究是带有前瞻性的。这种模型与上一种模型之间只有在设计电力负荷取值范围的确定上有所不同,其他部分都可以使用同一模块进行建立,此种模型的电力负荷可以设计得比额定负荷大,因为发出的多于电力可以进行上网售电,这样即可以让设备达到满负荷运转,而且可以获得一部分收益,但是这要考虑成本问题,如发电出的电的单位成本价格比市电价格要高,三联供系统发出的剩余电力如果进行上网售电,不但没有收益而且还要花费更多的燃料费用,这是极不经济的。一般来说,市电价格有峰谷之分,当市电电量处于低谷时(如春、秋季的夜晚),市电价格相对较低,上网售电是极不适合的;当市电电量处于高峰时(如夏、冬季的工作日),市电价格相对较高,可以考虑上网售电;而且如果要进行上网售电,必然要解决在电力接入控制系统上的问题,国内三联供项目中的燃气轮机一般采用的是国外的产品,其一些产品的控制系统没有上网售电模块,因此要和国内的市电信号达到一致同步还需引几其他设备,这必然需要更多的资金投入,因此上网售电要适时适度。本文的优化系统在这一模型的设计中考虑了设计电力负荷可以大于项目额定电力负荷( $P_{\text{des}} > P_{\text{rated}}$ ),而且考虑了国家规定的热电比必须达到一定比率的控制( $P_{\text{des}} < Q_{\text{th}} : \gamma_{\text{th}}$ ),以节能性和经济性最优确定其设计电力负荷,使用户得到最大的收益。<sup>[23][24][25]</sup>

本文根据以上三种模型建立的设计思想,开发出了一套自己的、适用广泛的,可以作为工程项目参考的,基于燃气轮机三联供系统的优化软件,这套软件即包括了对于一个具体工程项目各种负荷的确定,而且给出了整个工程的几种可行性方案,系统流程图以及各个设备的厂家型号,最后给出了项目投资回收期的核算。比较件的界面友好、操作简单、数据全面准确,有很好的应用前景。

### 3.1 模型的建立

以下优化系统模型的建立过程是以最为典型的——并网上网系统模型为设计依据的。第一种模型的设计比较简单, 本文就不再介绍了。第三种模型的设计可以完全按照第二种模型进行套用, 只是在约束条件中设计的电力负荷可以大于项目额定电力负荷需求, 即购电负荷  $P_e$  可以小于一零为负值。因此下文主要是对第二种模型的建立进行阐述。

假设工程项目不采用基于燃气轮机的三联供系统, 而采用市电购电的方式来满足所需要的电、热、冷负荷, 本套系统把此每年的运行成本作为工程项目的经济基准点, 则工程项目采用基于燃气轮机的三联供系统后, 每年节省的购电费、购热费以及购冷费用即为工程项目的收益。一般的三联供工程项目的经济可行性预算都采用静态评价指标来估算, 在这里本文采用折现现金流这个动态分析的方法来考虑其经济性, 也就是常说的NPV。模型的建立首先考虑整个系统所需要的设备的价格方程(主要是最能影响价格的因素, 如随功率和效率的价率曲线), 然后考虑设备的折旧年限和建设周期, 并把银行的利率作为最低收益率, 列出以折经济系数  $\varepsilon$  最小、成本最低和收益最高为目标函数的多目标规划方程, 最后选择适合的优化算法解出所需要的燃气负荷、购电量以及补偿负荷。<sup>[36][27]</sup>

折现金流及折经济系数分析目标函数

$$\begin{cases} \min \leftarrow C_{inv} \\ \max \leftarrow (C_{inv} - C_{ann}) \times (P/A, i_c, N_{dep} - N_{inv}) \times (P/F, i_c, N_{inv}) \\ \min \leftarrow \varepsilon = \frac{C_{inv} + C_{ann}}{P + Q \times \left( \frac{P}{T} \right) + Q_c \times \left( \frac{P}{T} - 1 \right)} \end{cases} \quad (3-1)$$

$$NPV = C_{inv} + (C_{inv} - C_{ann}) \times (P/A, i_c, N_{dep} - N_{inv}) \times (P/F, i_c, N_{inv})$$

$C_{inv}$ : 固定资产投资成本,

$C_{ann}$ : 工程项目建设后每年的平均收益,

$C_{ann}$ : 工程项目建设后每年所需要的运行费用,

$N_{dep}$ : 工程项目的经济寿命即主要设备的折旧年限,

$N_{inv}$ : 整个工程项目所需要的建设周期,

$i_c$ : 行业的基准收益率或设定的折现率, 这里指银行利率;

$(P/A, i_c, N_{dep} - N_{inv})$ : 等额序列现值系数;

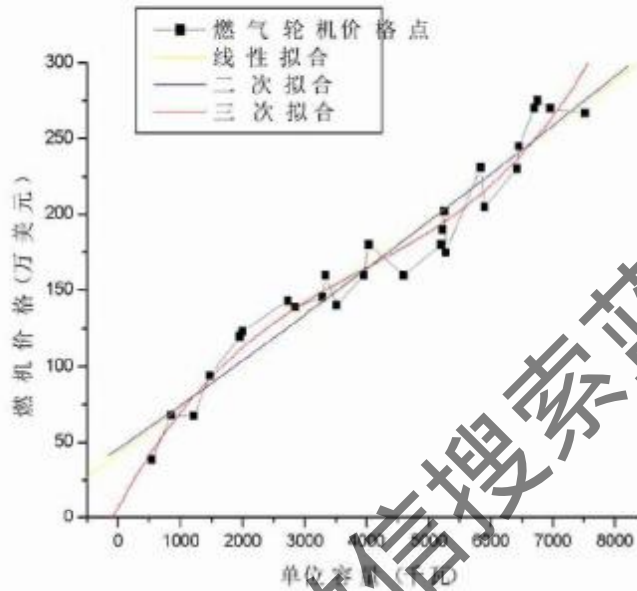
$(P/F, i_c, N_{inv})$ : 一次支付现值系数。<sup>[36][27]</sup>

### 3.1.1 固定成本价格方程

$$C_{inv} = n_{tur} \times C_{tur} + C_{ass} + C_{reg} + C_{exg} + C_{tax} + (C_{dt} + C_{opp} + C_{dmm}) \quad (3-2)$$

$C_{tur}$ : 燃气轮机 (gas turbine) 价格, 包括进口税率,

$$\text{进口关税 (人民币)} = \text{燃气轮机售价 (美元)} \times 2.49 \quad (3-3)$$



$$C_{tur} = (i + 2.49) \times (68766 + 759 \times P_{se} + 0.138 \times P_{se}^2 + 1.17 \times 10^{-5} \times P_{se}^3) \quad (3-4)$$

图 3-1 燃气轮机价格拟合曲线图

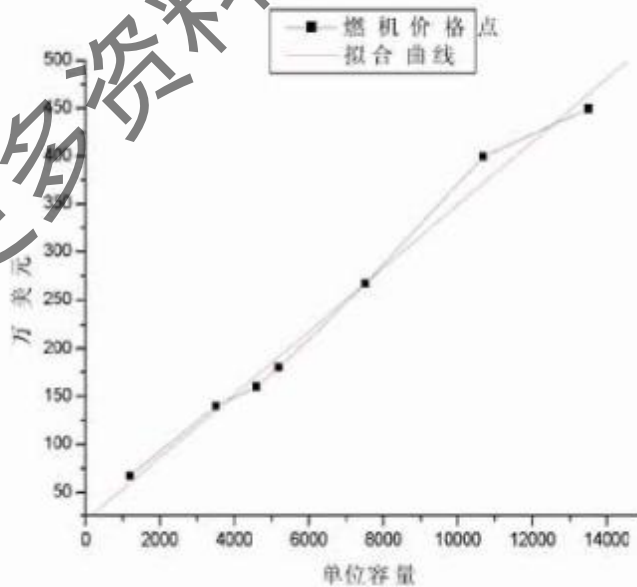


图 3-2 solar 燃气轮机价格拟合曲线图

$$\text{SOLAR 小型燃气轮机: } C_{\text{gas}} = (i + 2.49) \times (20.42 + 0.033P_{\text{gas}}) \quad (3.5)$$

$$\text{微型燃气轮机: } C_{\text{gas}} = (i + 2.49) \times 8.3 \times P_{\text{gas}} \quad (3.6)$$

$i$ : 美元与人民币的兑换利率, 现今大约在 8.3 左右

$P_{\text{gas}}$ : 单位燃气轮机的容量

$n_{\text{gas}}$ : 燃气轮机的台数

考虑到如果燃气轮机的余热得不到利用会导致发电成本急剧升高, 而且一年中又有春秋季节这样的过渡期中热利用非常少, 所以本文采用了把燃气轮机分成适当的模块组的方案, 在夏冬季满负荷运转, 在春秋季节可以适当的停用部分机组, 而缺省的负荷由市电进行补充。具体做法如下: 如果用户采用的是微型燃气轮机, 这里的  $C_{\text{gas}}$  可以用具体的微型燃气轮机的价格方程, 而  $n_{\text{gas}}$  却是需要求解的变量; 如果用户不采用微型燃气轮机, 而是采用与自己的电力负荷匹配的小型燃气轮机, 则这里的  $n_{\text{gas}}$  是定值, 而  $C_{\text{gas}}$  是函数的形式,  $n_{\text{gas}}$  可以根据用户的需求进行确定, 也可以根据项目过渡期(春秋季节)的热负荷按照以热定电的原则进行确定, 这样既能缩短回收年限, 而且不至于采用单一容量的燃气轮机, 当在变工况情况下运行时导致各种不良反应, 即耗资能源, 又影响设备使用寿命。

$C_{\text{reg}}$ : 吸收式空调机组价格,

因为溴化锂吸收式制冷技术我国已经掌握, 而且其控制技术也已经到达相当的水平, 可以做到和国外的燃气轮机的控制系统相匹配, 所以本文的模型采用国产的溴化锂吸收式制冷机组, 这里的数据采用的是一家具有典型性、大型企业的溴化锂吸收式制冷机组的数据, 所以基本满足设计需要。图形如下

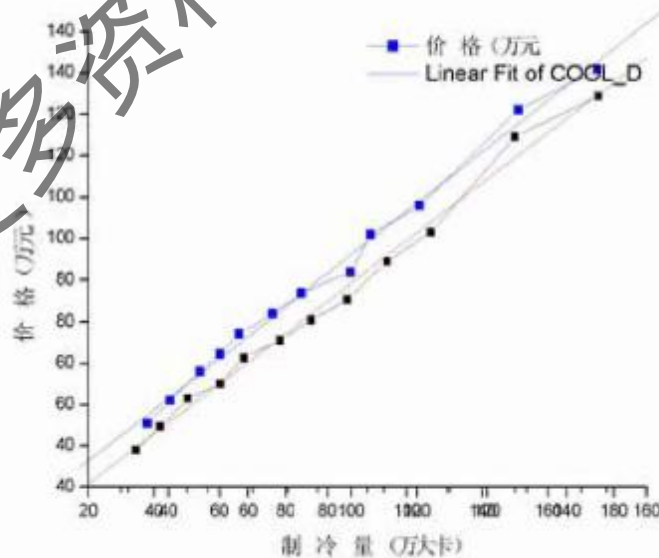


图 3-3 溴化锂吸收式制冷机组价格拟合曲线图

$$0.4\text{VPa} \quad C_{\text{reg}} = 26.11 - 0.735 \times Q_{\text{reg}} \quad (3-7)$$

$$0.6\text{VPa} \quad C_{\text{reg}} = 23.58 - 0.622 \times Q_{\text{reg}} \quad (3-8)$$

$$0.8\text{VPa} \quad C_{\text{reg}} = 25.12 - 0.533 \times Q_{\text{reg}} \quad (3-9)$$

$C_{\text{aux}}$ : 辅助设备包括余热锅炉和补燃器的价格,

$$C_{\text{aux}} = 0.098 \times P_e \quad (\text{万元/kW}) \quad (3-10)$$

$C_{\text{dca}}$ :  $C_{\text{reg}} + C_{\text{aux}}$  余热直燃机组 (Direct-Fired Absorption Chiller/Heaters) 价格,

余热直燃机组 (包括辅助燃烧系统、控制系统) 每制冷工大卡按一元计算,

$$C_{\text{dca}} = Q_c \quad (\text{元/kW}) \quad (3-11)$$

$C_{\text{ex}}$ : 板式换热器价格,

$$C_{\text{ex}} = 0.0023 \times Q_c \quad (\text{万元/kW}) \quad (3-12)$$

$C_{\text{tr}}$ : 运输及安装费用,

$$C_{\text{tr}} = 0.155 \times P_e \quad (\text{万元/kW}) \quad (3-13)$$

$C_{\text{ct}}$ : 冷却塔及水泵费用, (可选)

$$C_{\text{ct}} = 0.03 \times P_e \quad (\text{万元/kW}) \quad (3-14)$$

$C_{\text{sup}}$ : 进行补燃的燃气锅炉价格, (可选)

$$C_{\text{sup}} = 0.1 \times Q_c \quad (\text{万元/kW}) \quad (3-15)$$

$C_{\text{dhu}}$ : 除湿机的价格; (可选)

除湿机本文主要参考的是日本川井系列产品

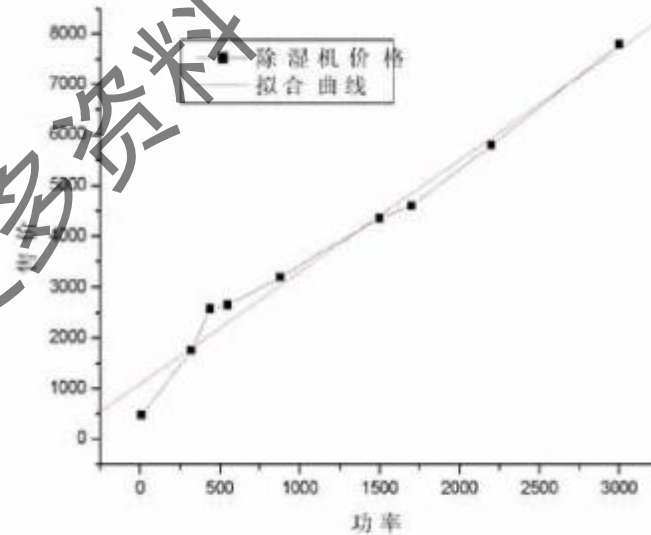


图 3-4 除湿机价格拟合曲线图

$$C_{\text{dhu}} = (1096 + 2.2Q_{\text{dhu}}) + 1000 \quad (\text{元/kW}) \quad (3-16)$$

### 3.1.2 运行收益方程

$$C_{inc} = c_e \times P_e \times t_e - c_r \times Q_r \times t_r - c_c \times Q_c \times t_c + C_s + C_{oth} \quad (3-17)$$

$$C_s = (c_g - c_g \times M^{sup_g}) \times Q_g^r \times t_g^r + (c_c - c_g \times M^{sup_c}) \times Q_c^r \times t_c^r \quad (3-18)$$

- $c_e$ : 当地的单位平均电价,
- $P_e$ : CHP 工程项目中燃气轮机所提供的电力负荷,
- $t_e$ : CHP 工程项目中燃气轮机每年的利用时间,
- $c_r$ : 当地的单位平均供热价格,
- $Q_r$ : 由余热锅炉转换燃气轮机尾气余热的热量,
- $t_r$ : CHP 工程项目中每年的供热时间数,
- $c_c$ : 如果用电制冷所需要的费用折合成的单位热负荷价格,
- $Q_c$ : 由制冷机组转换燃气轮机余热的冷量,
- $t_c$ : CHP 工程项目中吸收式制冷机组每年的使用时间数,
- $C_s$ : 补燃所带来的收益,
- $c_g$ : CHP 工程项目中利用的天然气的单价,
- $M^{sup_g}$ : 利用燃气锅炉进行补燃的天然气的单位消耗,
- $t_g^r$ : 补燃锅炉每年的供热时间数, (一般为日工作小时数乘以利用天数)
- $t_c^r$ : 补燃锅炉供给吸收式制冷机组热量每年的使用时间数, (同上)
- $Q_g^r$ : 补燃锅炉提供的热负荷,
- $Q_c^r$ : 补燃锅炉供给吸收式制冷机组的热量,
- $C_{oth}$ : 采用 CHP 工程项目每年带来的其他收益;

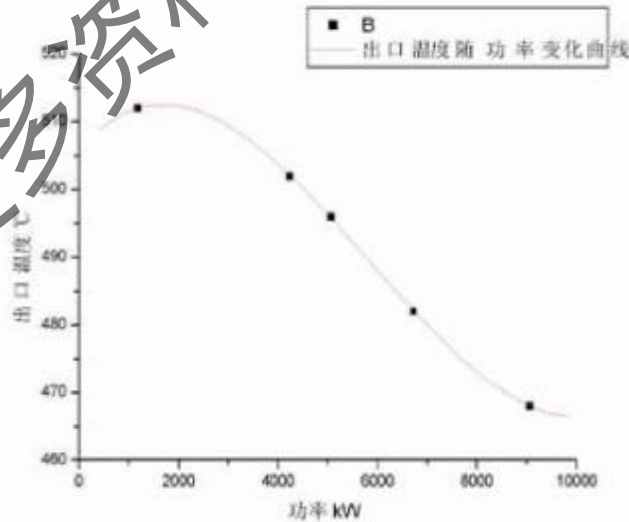


图 3-5 出口温度拟合曲线

$$T_r = 506 + 0.008P - 2.85P^2 + 1.63P^3 \quad (3-19)$$

### 3.1.3 运行费用方程

$$C_{\text{fuel}} = c_g \times M_g \times P_g \times t_g + c_g' \times M_g' \times P_g' \times t_g' + C_m + C_s \quad (3-20)$$

$M_g$ : CHP 工程项中的天然气的单位燃耗,

$$M_g = 3600 / \eta_{\text{fuel}} \times r \quad (3-21)$$

$$M_g^{\text{CHP}} = 3500 / \eta_{\text{fuel,CHP}} \times r \quad (3-22)$$

$$\text{solar: } \eta_{\text{fuel}} = 0.2166 - 2.20906 \times 10^{-7} \times P_{\text{gas}} - 1.02049 \times 10^{-6} \times P_{\text{gas}}^2 \quad (P_{\text{gas}} \geq 1100) \quad (3-23)$$

其他燃气轮机的效率值和曲线可以类比 solar 的效率曲线

$r$ : 天然气热价,

$t_g$ : CHP 工程项目中供热和制冷期天然气供应小时数,

$t_g'$ : CHP 工程项目中春秋两季供热和制冷期天然气供应小时数,

$C_m$ : 整个系统运行每年所需要的管理费用,

$C_s$ : 整个系统各个设备折合每年的维护费用,

$$C_s = 0.06 \times (P_g \times t_g + P_g' \times t_g') \quad (3-24)$$

### 3.2 约束方程

$$P_{\text{gas}} = P_{\text{gas}} + P_{\text{gas}}' \quad (3-25)$$

$P_{\text{gas}}$ : 工程项目所需要的额定电力负荷,

$P_{\text{gas}}'$ : 夏冬季向市网进行购买的电力负荷;

$$P_{\text{gas}} = P_{\text{gas}} + P_{\text{gas}}' \quad (3-26)$$

$P_{\text{gas}}'$ : 春秋两季采暖制冷期三联供系统所提供的电力负荷,

$P_{\text{gas}}''$ : 春秋两季采暖制冷期向市网进行购买的电力负荷;

$$P_{\text{gas}}' = \eta_{\text{fuel}} \times P_{\text{gas}} \quad (3-27)$$

如果工程项目是独立系统, 则  $P_{\text{gas}} = 0$ , 如果工程项目能够与市电进行并网, 也就是说能够从市网进行购电, 则可  $P_{\text{gas}} > 0$ , 如果在将来的政策扶持下, 工程项目所发出的电力负荷能够上网售电, 则可  $P_{\text{gas}} < 0$ .

$$P_{\text{gas}}' \geq P_{\text{gas}} \quad (3-28)$$

因为如未单机容量比春秋两季采暖制冷期三联供系统所提供的电力负荷要大, 这时即便只采用一台燃气轮机作为动力供应, 整个系统也不能够满负荷运转, 这样势必会造成效率降低, 能源利用率下降, 导致运行费用升高, 这是不希望看到的, 所以本文加了这样的约束条件, 不过可以适当的放宽。

$$Q_{\text{gas}} = Q_{\text{gas}} + Q_{\text{gas}}' \quad (3-29)$$



$Q_{\text{e}}$ : CHP 工程项目中额定需要的供热负荷,

$Q_{\text{e}}'$ : 余热锅炉转换燃气轮机尾气余热的热量,

$Q_{\text{e}}''$ : 夏季自补燃锅炉提供的热量:

$$Q_{\text{e}} = (Q_{\text{e}}' + Q_{\text{e}}'') \times \text{cop} \quad (3-30)$$

$Q_{\text{c}}$ : CHP 工程项目中额定需要的冷负荷,

$Q_{\text{c}}''$ : 冬季由补燃锅炉提供的热量:

$$Q_{\text{c}} = P_{\text{e}} \times \gamma \quad (3-31)$$

$\gamma$ : 燃气轮机的热电比;

热电比  $\gamma$  的影响因素很多, 如回热度、发电效率、排气温度、环境温度、烟气流速以及余热锅炉的效率等等很多因素有关, 但是可以近似的认为燃气轮机的联合热电效率是一定的一般都在 75%~80%, 然而燃气轮机的发电效率是随着单机容量的增大而增大的, 因此导致了其供热效率随着单机容量的增大而减小了, 故热电比的变化也近似的如下图所示。

solar 微型燃气轮机的热电比:

$$\gamma = 2.35 - 2.25 \times 10^{-4} \times P_{\text{e}} + 1.35 \times 10^{-8} \times P_{\text{e}}^2 \quad (3-32)$$

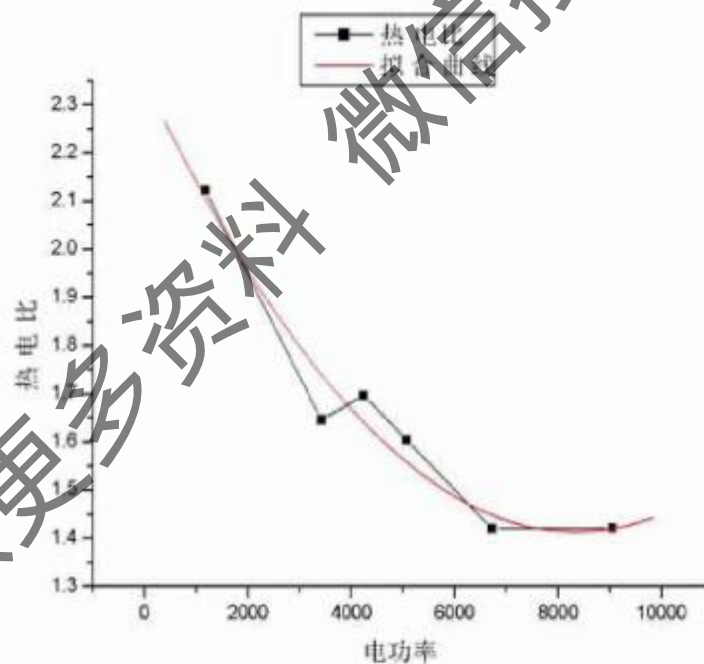


图 3-6 热电比拟合曲线图

### 3.3 三联供系统优化模型方程

从以上的分析中可以得出，整个三联供优化系统的多目标规划模型的决策变量为  $X = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5]$ ，它表示一个方案，而由能量关系式和用户需求组成的约束条件式表示决策变量必须满足的条件，由的价格曲线模拟得出的目标函数——项目成本和收益组成的 NPV 方程表示决策变量优劣的数量指标，这三组关系式和表达式联立在一起就组成了整个三联供优化系统中最为典型的数学模型。此规划模型结构简单，目标函数之间的权重能很好的把握，可以把多目标规划问题能够通过变换，转换为单目标非线性问题，使多目标规划问题的解法变得相对简单；而二方程中可选变量较多，用户输入的参数较多，使整个优化模型方程的可塑性强，适合不同要求、不同背景、不同条件下的一联供设计，对此更贴近用户需求；然而由于模型建立初期，设备价格数据库建立得不够全面，价格曲线方程的拟合不是非常精确，并且由于本文在模型建立时为了使模型方程变得简单，把价格影响因素主要考虑成与能量负荷有关，而抛弃了一些次要因素（例如燃气轮机回热度、出口温度、环境温度等等），这样做虽然在初期是可行的，而且能够得到满意的结果，但是随着三联供优化系统设计的不断成熟，可以进一步细化工作，使优化模型交待更为精确。

整个优化系统的规划模型：

决策变量

$$X = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5]$$

目标函数：

$$\begin{cases} \min \leftarrow C_{inv} \\ \max \leftarrow (C_{inv} + C_{oper}) \times (PI/A, I_2, N_{sup} - N_{base}) \times (PI/F, I_2, N_{base}) \\ \min \leftarrow C_{inv} - C_{oper} \\ \min \leftarrow c_1 \times P + Q_1 \times (1 - \frac{T_2}{T_1}) - Q_2 \times (\frac{T_1}{T_2} - 1) \\ NPV = -C_{inv} + (C_{inv} - C_{oper}) \times (PI/A, I_2, N_{sup} - N_{base}) \times (PI/F, I_2, N_{base}) \\ C_{oper} = n_{inv} \times C_{inv} - C_{inv} - C_{roy} + C_{mg} + C_{mt} + (C_{dr} + C_{sup} + C_{dim}) \\ C_{inv} = c_6 \times P_2 \times t_2 + c_7 \times Q_2 \times t_1 + c_8 \times Q_2 \times t_2 + C_9 - C_{ch} \\ C_9 = (c_1 - c_2 \times M^{0.25}) \times Q_1^2 \times t_1^2 + (c_1 - c_2 \times M^{0.25}) \times Q_2^2 \times t_2^2 \\ C_{inv} = c_2 \times M_2 \times P_2 \times t_2 + C_{in} + C_1 \end{cases}$$

约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{sc} = P_c + P_g \\ P_{sc} = P_c + P_g' \\ P_c = \eta_{tw} \times P_{sc} \\ P_g' > P_{sc} \\ Q_{sc} = Q_c + Q_g' \\ Q_{sc} = (Q_c + Q_g') \times cop \\ Q_g = P_g \times \gamma \\ M_{sc} = 3600 + \eta_{tw} \times r \end{array} \right.$$

作者在现有的价格数据资料基础上编写了可以扩展的数据库系统,并根据以上的数学模型方程,在 FORTRAN90 平台编写了优化系统模型建立——设计模块和下面要介绍的优化算法——计算模块的内核,而且利用 VB6.0 开发了优化软件的用户参数输入模块、设备选型模块、设计结果分析模块以及系统流程模拟模块的界面,使开发设计的三联供系统优化软件具有较高的计算效率和友好的界面。

## 第四章 三联供系统优化模拟的算法选择

多目标规划又称为多目标最优化，其思想萌芽于 1776 年经济学中的效用理论。1896 年，法国经济学家 V.Pareto（帕累托）首先在经济理论的研究中提出了多目标最优化问题。1951 年，美国数理经济学家 T.C.Koopmans 从生产和分配的活动分析中考虑了多目标决策问题，并首次提出了多目标最优化问题解的概念，将其命名为“Pareto 解”（即有效解）。同年，H.W.Kuhn 和 A.W.Tucker 从数学规划论角度首次提出向量极值问题及有关概念。进入 20 世纪 70 年代，随着第一次国际多目标决策研讨会的召开及这方面专著的问世，多目标决策问题的研究工作迅速、蓬勃地开展起来了，到目前为止，已取得若干有价值的研究成果。<sup>[50]</sup>

### 4.1 多目标规划模型及其解的概念

多目标决策问题不同于单目标问题。在单目标决策中，评价一个方案优劣的目标只有一个，而在多目标决策中，对方案 $d_j$ 的评价需从 $p$ 个目标上考虑，即在这 $p$ 个目标上的评价构成的向量去评价原有方案，即有

$$\begin{array}{l} \text{单目标问题} \quad \text{方案 } d_j \longleftarrow \text{评价值 } f(d_j) \\ \text{多目标问题} \quad \text{方案 } d_j \longleftarrow \text{评价值 } [f_1(d_j), f_2(d_j), \dots, f_p(d_j)] \end{array}$$

对于单目标问题，只要根据方案间的目标评价值，总能分出孰优孰劣，因此是完全有序的。而多目标决策问题则不同，多目标决策问题的决策目标有多个，对方案的评价是基于一个向量，而向量一般是无法直接比较大小的，是非有序的。有鉴于此，将单目标问题最优解的概念平移到多目标问题中是不适宜的，这就有必要首先阐明多目标规划问题各种解的概念及其相互关系。

多目标最优化模型与单目标最优化模型的区别主要是目标多于 1 个。在这些目标中，有的追求极大化，有的追求极小化，而极大化问题经过适当变换可化为极小化问题。因此，可以给出多目标最优化模型的一般形式如下：

$$\begin{array}{ll} \text{决策变量} & x_1, x_2, \dots, x_n \\ \text{目标函数} & \min f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \min f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \dots\dots\dots \\ & \min f_p(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array}$$

$$\text{约束条件} \begin{cases} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \\ \dots\dots\dots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \end{cases}$$

若记  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ,  $F(X) = [f_1(X), \dots, f_p(X)]^T$ ,  $R = \{X | g(X) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$  表示约束集,  $V = \min F(X)$  表示对向量  $F(X)$  中的各目标函数  $f_1(X), \dots, f_p(X)$  同等地进行极小化, 则模型的一般形式为

$$\text{(VMP)} \begin{cases} V = \min(f_1(X), \dots, f_p(X)) \\ g_i(X) \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \end{cases}$$

简记为

$$\text{(VMP)} \begin{cases} V = \min f(X) \\ X \in R \quad R = \{X | g_i(X) \geq 0, (i = 1, 2, \dots, m)\} \end{cases}$$

求解如上的多目标最优化问题, 即是在可行域  $R$  上寻找一个“最优解”  $X^*$ 。如前所述, 多目标问题中最优解的含义和单目标问题中最优解的含义是不相同的, 对于(VMP)问题中任意两个可行解  $X, X' \in R$ , 根据其评价向量难以区分出优劣, 因此, 这里的“最优解”  $X^*$  很多情况下只是基于某种准则下的满意解。

下面就给出多目标问题各种解的概念, 为了比较向量函数的“大”“小”, 首先需要引进向量空间中向量之间的比较关系, 即序的关系。

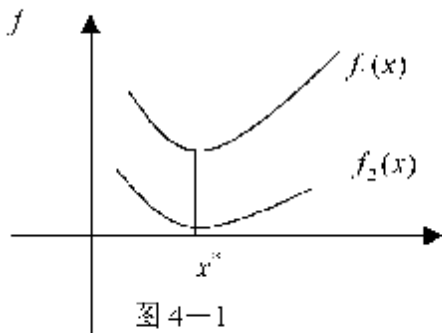
若记  $F^1 = [f^1_1, \dots, f^1_p]$ ,  $F^2 = [f^2_1, \dots, f^2_p]$ , 则

1.  $F^1 < F^2$  意味着向量  $F^1$  的每个分量都要严格地小于向量  $F^2$  对应的分量, 即对于  $i = 1, 2, \dots, p$ , 均有  $f^1_i < f^2_i$ ;
2.  $F^1 = F^2$  意味着向量  $F^1$  的每个分量都要等于相应  $F^2$  的每个分量, 即对于  $i = 1, 2, \dots, p$ , 均有  $f^1_i = f^2_i$ ;
3.  $F^1 \leq F^2$  意味着向量  $F^1$  的每个分量都要小于或等于向量  $F^2$  对应的分量, 即对于  $i = 1, 2, \dots, p$ , 均有  $f^1_i \leq f^2_i$ ;
4.  $F^1 < F^2$  意味着向量  $F^1$  的每个分量都要小于或等于向量  $F^2$  对应的分量, 并且至少存在  $F^1$  的某一个分量要严格地小于向量  $F^2$  对应的分量, 即对于  $i = 1, 2, \dots, p$ , 均有  $f^1_i \leq f^2_i$ ; 并且至少存在某个  $i_0 (1 \leq i_0 \leq p)$ , 有  $f^1_{i_0} < f^2_{i_0}$ ;

由上述定义所给定的向量之间的序, 称做向量的自然序。

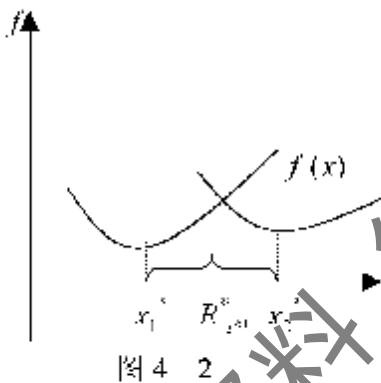
下面给出一般多目标极小化模型(VMP)各种解的概念

设  $X^* \in R$ , 若对任意  $X \in R$ , 均有  $T(X^*) \leq T(X)$ , 则称  $X^*$  为问题(VMP)的绝对最优解。其全体记为  $R^*_\Delta$ 。下图给出了两个目标、一维变量绝对最优解的例子。



左图中的  $x^*$  既是  $f_1(x)$  的极小值, 又是  $f_2(x)$  的极小点, 因而是该问题的绝对最优解。但是大多数多目标最优化问题中, 这样的绝对最优解往往是不存在的。

设  $X \in R$ , 若不存在  $X' \in R$ , 使  $F(X') \leq F(X)$ , 则称  $X$  为问题的非劣解, 又称有效解或 Pareto 解, 其全体记为  $R_{\text{non}}^*$ 。显然, 对任意的  $X \in R$ , 若它不是劣解就是有效解, 并且有效解仅仅是 (VMP) 问题的一个“不坏”的解, 或说可接受解。设若  $\bar{x}$  是 (VMP) 的有效解, 意味着在约束集  $R$  中找不到一个  $X'$ , 使对应的  $F(X') = [f_1(X') \dots f_p(X')]^T$  中的每一个分目标值都不比  $F(\bar{x}) = [f_1(\bar{x}) \dots f_p(\bar{x})]^T$  中的相应值更大, 并且  $F(X')$  中至少有一个目标值要比  $F(\bar{x})$  中的相应值为小。



右图给出了两个目标、一维变量时有有效解集的例子。图中有  $x_1^*$  与  $x_2^*$  之间的点均为有效解 ( $x_1^*$  与  $x_2^*$  之间的点不可比较), 因为找不到另一个可行解  $X(X')$ , 使  $F(X) \leq F(X')$  成立。

设  $V \subset R$ , 若不存在  $V' \subset R$ , 使  $F(V') < F(V)$ , 则称  $V$  为问题 (VMP) 的弱有效解, 弱有效解的全体记为  $R_{\text{weak}}^*$ 。上述定义表明, 若  $\bar{x}$  是 (VMP) 的弱有效解, 则在约束集  $R$  中找不到一个  $X'$ , 使得  $f_1(X') \dots f_p(X')$  中每一个目标值都比  $f_1(\bar{x}) \dots f_p(\bar{x})$  中相应的值更小。

在引进了“非劣”概念之后, 就可以对多目标规划作更确切的描述。准确地说, 多目标规划应该是从可行解中先选出有效解或弱有效解, 再根据某种准则, 从有效解中选择某种意义下的“最优解”, 或说满意解或“好”的有效解。因为, 从一般意义上说, 现实问题中不存在这样一种方案, 其实施结果按所有的判别标准各目标同时到达最佳。当然, 能够找到这样的绝对最优解 (方案) 更好。<sup>[31]</sup>

## 4.2 多目标规划的几种解法

### 4.2.1 目标排序法

目标排序法的思想是把目标按重要性排序。设给定的重要性序列为  $f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)$ ，然后按这种排序逐步进行一系列单目标优化，最后求得满意解。

#### 1. 序列最优化法

首先对第一个目标求最优，并找出所有最优解的集合，记为  $R_1$ ，然后在  $R_1$  内求第二个目标的最优解，记这时的最优解集合为  $R_2$ ，如此等等，一直求到第  $p$  个目标的“最优解”  $X_p$ 。基本步骤如下：

$$\begin{aligned} \min_{X \in S} f_1(X) &= f_1^*(X_1) && \text{得最优解集 } R_1 \\ \min_{X \in R_1} f_2(X) &= f_2^*(X_2) && \text{得最优解集 } R_2 \\ &\vdots && \vdots \\ \min_{X \in R_{p-1}} f_p(X) &= f_p^*(X_p) && \text{得最优解集 } R_p \end{aligned}$$

使用序列最优化方法求得的解  $X_p$  是原多目标规划的非劣解，是分层序列意义下的最优解，然而这种方法可能由于某一步上最优解是唯一时，以后的目标优化就不能进行下去了。

#### 2. 宽容意义下的序列优化方法

为了避免  $R_i$  为空集或某一步上最优解是唯一时不可继续进行的困难，可采用放宽条件下进行分层序列优化，即预先给定  $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0, \dots, \varepsilon_{p-1} > 0$  作为宽容值。这些  $\varepsilon_i$  是根据各目标不同要求预先给出，它是相对于这目标最优值之允许偏差。每一分层单目标优化是在相对最优解有宽容量  $\varepsilon_i$  的约束集合上进行的。基本步骤如下：

$$\begin{aligned} \min_{X \in S} f_1(X) &= f_1^* \\ \min_{X \in R_1} f_2(X) &= f_2^*, \quad R_1 = \{X \mid f_1(X) < f_1^* + \varepsilon_1, X \in S\} \\ \min_{X \in R_2} f_3(X) &= f_3^*, \quad R_2 = \{X \mid f_2(X) < f_2^* - \varepsilon_2, X \in R_1\} \\ &\vdots \\ \min_{X \in R_{p-1}} f_p(X) &= f_p^*(X_p), \quad R_{p-1} = \{X \mid f_{p-1}(X) < f_{p-1}^* - \varepsilon_{p-1}, X \in R_{p-2}\} \end{aligned}$$

则  $X_p$  为多目标问题最优解。

## 4.2.2 线性加权法和法

1. 线性加权法和法

线性加权法和法就是取评价函数为各目标函数的线性加权积, 即  $U(F) = \lambda_1 f_1 + \dots + \lambda_p f_p$ , 其中  $\lambda_1, \dots, \lambda_p$  为相应目标的权系数, 其大小代表相应目标  $f_j$  在模型 (VMP) 中的重要程度。

线性加权法和法的具体步骤如下:

1: 给出权系数, 按各目标的重要性给出一组权系数  $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ , 其中

$$\lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^p \lambda_i = 1;$$

2: 极小化线性加权函数, 通过前述的线性加权和评价函数, 将多目标问题转化为单目标问题

$$(P_\lambda) \min_{X \in R} \sum_{i=1}^p \lambda_i f_i(X)$$

求解  $(P_\lambda)$  得最优解  $X^*$ ;

3: 可以证明,  $X^*$  是 (VMP) 的弱有效解, 即  $X^* \in R_{wv}^*$ , 进一步, 若所有  $\lambda_i > 0$ , 则  $X^* \in R_{ev}^*$ 。

显然, 线性加权法和法的关键在于确定权系数。实际中, 确定权系数的方法很多, 如老手法、层次分析法、 $\alpha$  法等。老手法及层次分析法将在本书后续内容中介绍。

$\alpha$  方法是确定刻画各目标重要程度的权系数的一种方法, 它主要是根据  $p$  个目标的极小点信息, 借助于引进一个辅助参数  $\alpha$  的思想, 通过求解一个  $p+1$  阶线性方程组确定各目标的权系数。

先以两个目标为例, 设两目标  $f_1(X)$  及  $f_2(X)$  皆为线性函数, 都要求达到极小为最优, 且约束集  $R$  为线性约束, 根据评价函数法的基本思想, 建立评价函数

$$U[F(X)] = \alpha_1 f_1(X) + \alpha_2 f_2(X)$$

问题归结为如何确定  $\alpha_1$  及  $\alpha_2$  的值。

这种方法的具体步骤如下。

1: 求解单目标优化问题

$$\text{(问题一)} \quad \min_{X \in R} f_1(X) = f_1(X^1) \text{ 记 } f_1^* = f_1(X^1), f_2^* = f_2(X^1)$$

$$\text{(问题二)} \quad \min_{X \in R} f_2(X) = f_2(X^2) \text{ 记 } f_1^2 = f_1(X^2), f_2^2 = f_2(X^2)$$

2: 由  $U[F(X^1)] = U[F(X^2)]$  及  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  得下述方程组

$$\alpha_1 f_1^* + \alpha_2 f_2^1 = \alpha_1 f_1^2 + \alpha_2 f_2^2$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

解上述方程组得



$$\alpha_1 = \frac{f_2^2 - f_2^1}{f_1^2 - f_1^1 + f_1^1 - f_1^2}$$

$$\alpha_2 = \frac{f_1^1 - f_1^2}{f_2^2 - f_2^1 - f_1^1 - f_1^2}$$

且

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{f_2^2 - f_2^1}{f_1^1 - f_1^2}$$

3: 求解  $\min_{X \in R} U[F(X)] = \min_{X \in R} [\alpha_1 f_1(X) + \alpha_2 f_2(X)]$  得  $X^*$ 。

以下对  $\alpha$  方法进行几何解释。

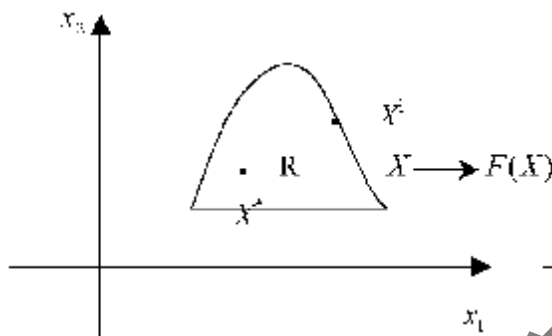


图 4-3

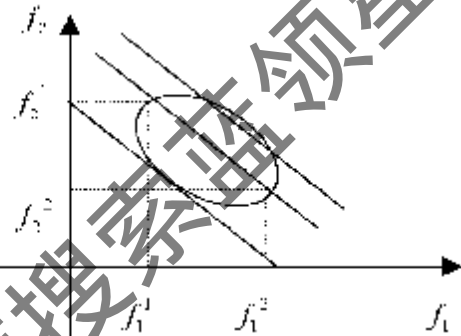


图 4-4

如图 4-3 及 4-4 所示, 可行域  $R$  中点  $X^1$  及  $X^2$  经过映射在目标值空间  $(f_1, f_2)$  中分别对应 A 点及 B 点, 即有

$$X^1 \rightarrow (f_1^1, f_2^1) \text{ A 点}$$

$$X^2 \rightarrow (f_1^2, f_2^2) \text{ B 点}$$

而且, 在三目标值空间,  $U[F(X)] = \alpha_1 f_1(X) + \alpha_2 f_2(X)$  取不同数值时, 相当于一族平行线, 其斜率  $k = \alpha_1 / \alpha_2$ , 不妨记直线簇为  $\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 = c$  ( $c$  为常数), 而连接 A、B 的直线斜率也为  $k = \alpha_1 / \alpha_2$ , 则直线 AB 是该直线簇中的一条直线。显然, 在同一条直线上,  $X^1$  与  $X^2$  有相同的评价值, 即有  $U[F(X^1)] = U[F(X^2)]$ 。进一步, 要寻找评价值最小的  $X$ , 可在目标值空间中进行移动直线。当直线与 C 点相切时, 对应于 C 点的  $X^*$  之评价值为最优。

事实上, 该方法可推至  $p$  个目标的情况。首先建立评价函数

$$U[F(X)] = \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(X)$$

然后求解一系列单目标问题

$$\min_{X \in R} f_j(X) = f_j(X^j) \quad (j=1, 2, \dots, p)$$

其中  $f_j^j$  的含义与二维情况相似 ( $i, j=1, 2, \dots, p$ )。由于  $X^1, X^2, \dots, X^j, \dots, X^p$  有相同的评价值, 于是可建立下述方程组

$$\begin{aligned} \alpha_1 f_1 - \alpha_2 f_2 + \dots + \alpha_p f_p &= c \\ \alpha_1 \hat{f}_1 + \alpha_2 \hat{f}_2 + \dots - \alpha_p \hat{f}_p &= c \\ \dots \\ \alpha_1 f_1^0 + \alpha_2 f_2^0 + \dots + \alpha_p f_p^0 &= c \end{aligned}$$

$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_p = 1$   
 求解上述方程组得  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ ，最后解  
 $\min_{X \in M} U[F(X)] = \min_{X \in M} [\alpha_1 f_1(X) + \dots + \alpha_p f_p(X)]$  得  $X^*$ 。

### 4.2.3 极大极小法

这种方法的基本出发点是考虑在对各个目标来说是最不利的情形下找出最有利的解。具体地说，对于多目标最优化模型(VMP)，可以以各个目标  $f_i (i=1, \dots, p)$  中的最大值作为评价函数的函数值，即取

$$U[F(X)] = \max_{1 \leq i \leq p} \{f_i(X)\}$$

为评价函数，通过上式把求解(VMP)归结为求解下述极小化问题：

$$\min_{X \in M} U[F(X)] = \min_{X \in M} \max_{1 \leq i \leq p} \{f_i(X)\}$$

并把它的最优解作为模型(VMP)的解。显然，这种方法是先对各目标函数作极大值选择之后，再在可行域上进行极小化，故称之为极大极小法。

图 4-5 给出两个目标、一维问题的极大极小法所得解  $X^*$  的图示。其中的实线为两个函数  $f_1(X)$  和  $f_2(X)$  中的最大值。

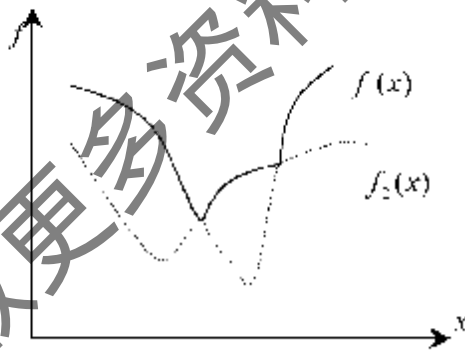


图 4-5

为了在评价函数中反映各目标的重要程度，一般考虑比上述极大极小模型更一般的带权系数的情况。设对应于目标  $f_i$  的权系数为  $\lambda_i (i=1, \dots, p)$  则求解(VMP)相应地可归结为求解下述问题：

$$(P_2) \min_{X \in M} \max_{1 \leq i \leq p} \{\lambda_i f_i(X)\}$$

可以证明，当  $\lambda_i > 0 (i=1, \dots, p)$  时，求解  $(P_2)$  所得的最优解为模型(VMP)的弱有效解。很明显，问题  $(P_2)$  在实际求解时是不方便的。为此，引进一个变量。令

$$\lambda = \max_{1 \leq i \leq p} \{\lambda_i f_i(X)\}$$

这样，问题  $(P_2)$  成为  $\min_{X \in M} \lambda$ ，且有

$$\lambda_i f_i(X) \leq \lambda \quad (i=1, 2, \dots, p)$$

自此，问题 $(P_0)$ 便转化为如下的增加一个变量 $\lambda$ 和 $p$ 个约束条件的优化问题：

$$\min z$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} X \in R \\ \lambda_i f_i(X) \leq \lambda \quad (i=1,2,\dots,p) \end{cases}$$

根据以上讨论，可得出极大极小的具体步骤如下：

1. 给出权系数，按各目标在(VMP)中的重要程度，确定相应的权系数 $\lambda$  ( $i=1,2,\dots,p$ )，且 $\lambda > 0$
2. 极小化辅助问题，即求解

$$\min z$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} X \in R \\ \lambda_i f_i(X) \leq \lambda \quad (i=1,2,\dots,p) \end{cases}$$

所求得最优解为 $[X^*, \bar{\lambda}]^T$ ，则 $X^*$ 即为模型(VMP)的弱有效解。

#### 4.2.4 目标规划法

目标规划法由 A. Charnes 和 W. Cooper 首先提出。它是一种古老广泛应用的特殊多目标最优化模型。这类模型并不是去考虑对各个目标进行极小化或极大化，而是希望在约束条件的限制下，每一个目标尽可能地接近于事先给定的 $F$ 的值，它是求解多目标规划的一种常用方法。

这种方法首先在每个目标 $f_i(X)$ 上预先确定一个希望达到的目的值 $f_i^0$ ，得目的向量 $F = [f_1^0, f_2^0, \dots, f_p^0]$ ，由此构造一个评价函数

$$\sum_{i=1}^p f_i(X) - f_i^0$$

然后把多目标决策问题转化为如下的单目标函数极值问题：

$$\min \sum_{i=1}^p f_i(X) - f_i^0$$

它的含义是在确定的约束条件下，要求所有目标值尽可能接近希望达到的目标值，即要求偏差绝对值之和尽量小。为此，引入两类偏差变量 $d_i^+, d_i^-$  ( $i=1,\dots,p$ )，

$$\text{有 } \begin{cases} \text{正偏差 } d_i^+ = \begin{cases} f_i(X) - f_i^0 & f_i(X) > f_i^0 \\ 0 & f_i(X) \leq f_i^0 \end{cases} \\ \text{负偏差 } d_i^- = \begin{cases} 0 & f_i(X) \geq f_i^0 \\ f_i^0 - f_i(X) & f_i(X) < f_i^0 \end{cases} \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,p)$$

$d_i^+$ 表示第 $i$ 个目标所达到值超过预期目的值的部分； $d_i^-$ 表示第 $i$ 个目标不足预期目的值的部分。则：

$$d_i^- = d_i^- = f_i(X) - f_i^u$$

$$d_i^- = d_i^- = f_i(X) - f_i^l$$

$$d_i^+ * d_i^- = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (\text{目标达到值不可能既超过上约值又未到目的值})$$

于是可以证明求解单目标决策问题

$$\min_X \sum_{i=1}^p |f_i(X) - f_i^u|$$

等价于求解

$$\min \sum_{i=1}^p (d_i^+ + d_i^-)$$

$$\begin{cases} f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = f_i^u \\ d_i^+ * d_i^- = 0 \\ X \in R, d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \end{cases} \quad (1)$$

上述模型中含有偏差变量相乘的约束条件, 这使得求解很不方便, 考虑去掉偏差变量相乘的约束条件, 得到模型

$$\min \sum_{i=1}^p (d_i^+ + d_i^-)$$

$$\begin{cases} f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = f_i^u \\ X \in R \\ d_i^+ \geq 0, d_i^- \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \end{cases} \quad (2)$$

可以证明, 模型式 (2) 的最优解也是模型式 (1) 的最优解, 因而可将模型式 (2) 作为目标规划模型的一般形式。在上述模型中, 约束集  $R$  称为绝对约束或硬约束, 其他可加入偏差变量的约束条件为目标约束或软约束, 它是目标规划所特有的约束。

实际问题中, 一个规划问题常常有若干个目标, 但决策者在要求达到这些目标时, 是有主次或轻重缓急的不同。凡要求首先达到的目标赋予优先因子  $P_1$ , 其次的目标赋予优先因子  $P_2$ , ..., 规定  $P_1 \gg P_2$  表示  $P_1$  比  $P_2$  有更大的优先权。即首先保证  $P_1$  级目标的实现, 这时可不考虑次级目标; 而  $P_2$  级目标是在实现  $P_1$  级目标的基础上考虑的, 依此类推。若要区别具有相同优先因子的两个目标的差别, 可分别赋予它们不同的权系数  $\omega_i$ 。这样, 在上述目标规划模型一般形式的基础上, 可建立如下的加权或分层目标规划模型

$$\min \sum_{i=1}^l P_i \left( \sum_{j=1}^k \omega_j^+ d_j^+ + \sum_{j=1}^p \omega_j^- d_j^- \right)$$

$$\begin{cases} f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = f_i^u \\ X \in R \\ d_i^+ \geq 0, d_i^- \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \end{cases} \quad (3)$$

最后考察目标规划额目标函数。由于在实际问题中，对各目标优先级设立的目标值的要求的不一样，这样的目标函数（评价函数）的形式也不一样，归纳起来，基本形式有三种：

1. 希望各目标值与预期目的值之间超过或不足的偏差尽量小，即要求恰好达到目的值，这时的评价函数形式为  $\sum_{i=1}^p (d_i^- + d_i^+)$ ；

2. 希望各目标值与预期目的值之间不足的偏差尽量小，而超过的偏差无限，这时的评价函数形式为  $\sum_{i=1}^p d_i^-$ ；

3. 希望各目标值与预期目的值之间超过的偏差尽量小，即允许达不到目的值，这时的评价函数形式为  $\sum_{i=1}^p d_i^+$ 。<sup>[32]</sup>

### 4.3 分目标乘除法

在  $p$  个目标  $f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)$  中，其中  $k$  个目标  $f_1(X), \dots, f_k(X)$  要求实现最小，其余的目标  $f_{k+1}(X), f_{k+2}(X), \dots, f_p(X)$  要求实现最大，这时的多目标最优化模型成为混合最优化模型，记为(VTIP)。分目标乘除法是求解多目标混合最优化模型的方法。

分目标乘除法的主要特点是将模型中的各分目标函数进行相乘和相除处理后，在可行域上求解。已经知道，为了使  $f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)$  极小化，可以考虑它们的乘积极小化，而要使  $f_{k+1}(X), f_{k+2}(X), \dots, f_p(X)$  极大化，又可以考虑让这些目标函数乘积的倒数极小化。因此，求解(VHP)问题便可以引为求解：  

$$\min_{X \in R} \frac{f_1(X) \cdots f_k(X)}{f_{k+1}(X) \cdots f_p(X)}$$

由上述极小化问题所得最优解，显然是使位于分子得各目标取尽可能小得值，而使位于分母得各目标取尽可能大的值的解。

以上所述方法实际上是对模型构造了下述评价函数：

$$[U(X)] = \frac{f_1(X) f_2(X) \cdots f_k(X)}{f_{k+1}(X) \cdots f_p(X)}$$

应指明的是，为使  $[U(X)]$  有意义，在使用分目标乘除法求解时，一般要求各目标函数在可行域  $R$  上均取正值。

分目标乘除法的具体步骤如下。

第一步：分目标正忙化。检查  $f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)$  在  $R$  上是否均取大于零的值，若是则进行下一步，否则，选取某实数  $M > 0$ ，使

$$f_i(X) - M > 0 \quad X \in R \quad (i=1, \dots, p)$$

并令  $f_i(X) = f_i(X) + M(i = 1, \dots, p)$ ，进行第二步。

第三步：极小化分目标乘除问题。求解

$$\min_{X \in R} \frac{f_1(X) \cdots f_r(X)}{f_{s+1}(X) \cdots f_p(X)}$$

设得最优解为  $\bar{X}$ ，则可以证明  $\bar{X}$  为(VHP)的有效解。

分目标乘除法有简单的经济学含义。以两目标的最优化模型(VHP)为例，设  $f_1(X)$  表示投资， $f_2(X)$  表示收益，则乘除法目标函数  $f_1(X)/f_2(X)$  表示单位收益的投资，其倒数表示单位投资的收益即投资利润率。就此，分目标乘除法的意义是：极小化单位收益的投资。

根据上文所建立的二联供优化系统数学模型和各种优化算法的特点，分目标乘除法应该是最适合这种模型的优化算法，而且通过此优化算法能够将本文建立的多目标规划模型，转化为单目标非线性规划问题，使得优化模型的计算变得相对简单，再在简化的基础上可以利用一些优化软件（如Lingo）对非线性问题进行计算，这样将会大大减少计算时间，从而缩短了优化模拟周期。因此，在开发三联供优化系统软件中也采用此算法作为软件的计算模块。<sup>[33][34]</sup>

获取更多资料 微信搜公众号 星岛

## 第五章 对比性分析

在中国的许多地区，拥有大量规模在 50,000 平方米左右的公用性和商业性建筑，研究制定这一规模的冷热电一体化综合技术方案，对于环境保护、提高电力供应安全和减缓电空调调峰压力，以及厂区的可持续发展具有深远意义。设计一种技术可靠、适用性强、经济性能良好，满足特别是医院、酒店、综合办公大楼等用户需求的综合技术方案，是发展这一容量及冷热电三联产的关键。天津涉外企业众多，电力完全依靠外部电网保障，虽然已建设多条输电线路，但一些企业还不得不建设自备发电机组，因此，提高供电可靠性是必要的，也有利于招商引资。天津还是我国对外开发的窗口，环境状况意义重大，应积极使用清洁燃料取代污染较大的煤。而且天津地区有丰富的燃气，即有天津油田供应的天然气管道，也有渤海石油气，还有陕甘宁天然气可供供应。所以本文选用的设计算例是以天津一面积为 50000 平米的公用性建筑（如医院或者宾馆）为一项目模型，利用本文讨论的优化设计方法对整个投资项目进行估算，确定项目所需要的设计负荷，从而确定其回本年限，最后再和常规的设计方案进行对比，分析出利用优化设计的方案和利用经验进行估算的方案之间有哪些优越性。而且此算例具有很好的代表性，对于其他设计负荷要求可以同样采用以上的设计方案进行解决。

根据世界的发展趋势和国际上的最新设计理念，本方案推荐采用小型燃气轮机技术，并结合采用余热锅炉-蒸汽溴化锂空调，直接提供电力、制冷冷水、采暖热水、蒸汽和生活用热水。

### 5.1 方案的需求分析

#### 5.1.1 设计负荷要求

表 5-1 项目设计负荷

项目	单位	指标
保证面积	m <sup>2</sup>	50,000
设计供电指标	W/m <sup>2</sup>	50
设计指标容量需求	kW	2500
采暖设计指标	W/m <sup>2</sup>	56.3

设计指标容量需求	kW	2815
制冷设计指标	W/m <sup>2</sup>	69.3
设计指标容量需求	kW	3165
采暖应用指标	W/m <sup>2</sup>	33.9
应用指标容量需求	kW	1695
24小时连续供暖需求	kW	40,680
制冷设计指标	W/m <sup>2</sup>	44
设计指标容量需求	kW	2,200
24小时连续制冷需求	kW	52,800
方案供暖指标	W/m <sup>2</sup>	45
方案供暖能力	kW	2,248
20小时连续供暖能力	kW	44,960
方案制冷指标	W/m <sup>2</sup>	57
方案制冷能力	kW	2871
20小时连续制冷能力	kW	57,420

春秋非采暖制冷所需要的热量（例如作热水） $Q_{\text{非}} = 957\text{kW}$

### 5.1.2 该地区的冷价、热价、电价的确立

北京商业和普通工业用电的价格构成比较复杂，一般采用“普通工业平均电价 0.58 元/kWh，高峰 0.92 元/kWh，平峰 0.56 元/kWh，低谷 0.26 元/kWh。

表 5-2 项目电价

时段	运行时间	电价
高峰期	8	0.92
平峰期	8	0.56
低谷期	8	0.26
平均	24	0.58

表 5-3 负荷供应

季节	单位	周期	天数	日利月小时	比例	实际利用时间
冬季采暖期	小时	10.20-4.10	172	20	39.37%	3440
夏季制冷期	小时	5.16-9.20	128	20	29.22%	2560
春秋非采暖制冷期	小时	4.10-5.15/9.21-10.20	65	16	11.87%	1040
全年	小时		365	24	100.00%	8760



实际利用时间	小时	365	19 29	80.37%	7040
--------	----	-----	-------	--------	------

热价应按照北京天然气集中供热费正进行核定，目前北京市执行的天然气集中供热价格为 30 元/m<sup>2</sup>/a。

表 5-4 热价

项目	单位	数值
标准热价	元/m <sup>2</sup> /a	30
采暖周期	days	121
	hrs	2,904
供暖标准	W/m <sup>2</sup>	40
	kCal/m <sup>2</sup>	34
热价	元/MW	258.3
	元/kW	0.258

冷价可以按照电制冷成本价和天然气制冷成本价格进行平衡，天然气制冷还需要电力和水冷等成本，所以以电力平均价格作为制冷成本价格是接近天然气制冷的实际成本，是比较合理的指标。

表 5-5 各种电价气价下的制冷成本

项目	单位	数值	制冷成本
高峰电价	元/kWh	0.92	0.3067
平峰电价	元/kWh	0.56	0.1867
低谷电价	元/kWh	0.26	0.0867
平均价	元/kWh	0.58	0.1933
高峰天然气气价	元/Nm <sup>3</sup>	1.80	0.1589
低谷天然气气价	元/Nm <sup>3</sup>	1.40	0.1314

天然气单价：非采暖季节 1.4 元/Nm<sup>3</sup> 采暖季节 1.8 元/Nm<sup>3</sup>

表 5-6 应用气价

冬季天然气气价	元/Nm <sup>3</sup>	1.8
执行周期	月	5
夏季天然气气价	元/Nm <sup>3</sup>	1.4

执行周期	月	7
平均气价	元/Nm <sup>3</sup>	1.57

电价: 0.58 元/kWh; 热价: 0.258 元/kWh;

冷价: 0.1933 元/kWh 气价: 1.57 元/Nm<sup>3</sup>

## 5.2 优化设计的方程

当地的单位平均电价  $c_e = 0.58$  元/kWh

当地的单位平均供热价格  $c_h = 0.258$  元/kWh

当地的单位平均冷价  $c_c = 0.1933$  元/kWh

CHPT 项目中利用的天然气的单价  $e_g = 1.57$  元/Nm<sup>3</sup>

固定成本:  $C_{inv} = n_{tur} \times C_{tur} + C_{con} + C_{exh} + C_{mg} + C_{ms} + C_{cp} + C_{sp}$  (3-2)

solar 燃气轮机:  $C_{tur} = 3560.7 \times P_t + 2263318$  元/kW

溴化锂制冷机:  $C_{con} = 251200 + 456.8 \times Q_c$  元/kW

余热锅炉和补热器:  $C_{ms} = 980 \times P_c$  元/kW

板式换热器价格:  $C_{exh} = 23 \times Q_c$  元/kW

运输及安装费用:  $C_{mg} = 1550 \times P_c$  元/kW

冷却塔及水泵费用:  $C_{cp} = 300 \times P_c$  元/kW

进行补热的燃气锅炉价格:  $C_{sp} = 1000 \times Q_c$  元/kW

$C_{inv} = 7390.7P_t + 2454518 + 5330 \times Q_c + 23 \times Q_c + 1000 \times Q_c$  (5-1)

运行收益:  $C_{inc} = e_g \times P_g \times t_g + e_c \times Q_c \times t_c + e_h \times Q_h \times t_h + C_v$  (3-7)

$C_v = (c_h - 1.57M^{sp_g}) \times Q_c^g \times t_c - (c_c - 1.57M^{sp_c}) \times Q_c^c \times t_c$  (5-2)

在非采暖期所需的热量(例如生活热水)都是发生在高峰期, 故其热价归入较高为 0.307 元/kWh

$C_{inv} = 3480 \times P_t + 603.2 \times P_c^g + 1887.52 \times Q_c^g + 593.8 \times Q_c^c + 319.28 \times Q_c^g + 246 \times Q_c^c$  (5-3)

运行费用:  $C_{inv} = c_g \times M_g \times P_g \times t_g - C_v$  (5-9)

北京地区天然气的热值  $r = 34888.6 \text{ kJ/Nm}^3$

$M_g = 0.10318 + (0.2166 - 2.20906 \times 10^{-3} \times P_g - 1.02049 \times 10^{-5} \times P_g^2)$

$M^{sp_g} = 0.1214$

$C_v = 0.06 \times (P_c^g \times t_c + P_c^c \times t_c)$

$C_{inv} = (1.57 \times M_g + 0.06) \times (P_c^g < 6000 + P_c^c < 1040)$  (5-4)

( $Q_c^g$ 、 $Q_c^c$  可以大于等于零, 不能小于零)

银行利率  $i_c = 10\%$

项目建设期：1年

设备经济寿命：30年

冬季环境温度取：270K

夏季环境温度取：303K

$$\text{目标方程: } \begin{cases} \min C_{inv}(P_c, Q_c, Q_c') \\ \max [C_{inv}(P_c, P_b, P_c', P_b', P_{se}, Q_c, Q_c', Q_s) - C_{inv}(P_c, P_c')] \\ \min E = \frac{C_{inv} + C_{ann}}{P + Q_c \times (\frac{T_0}{T_c} - \frac{Q_c'}{Q_c} \times (\frac{T_0}{T_c} - 1))} \\ NPV = -C_{inv} + (C_{inv} - C_{ann}) \times (P/A, i_c, N_{dep} - N_{inv}) \times (P/F, i_c, N_{inv}) \end{cases} \quad (3-2)$$

$$C_{inv} = 7390.7P_c + 2454518 + 5330 \times Q_{inv} - 23 \times Q_c + 1000 \times Q_c'$$

$$C_{ann} = 3480 \times P_c - 605.2 \times P_c' + 887.52 \times Q_c + 593.8 \times Q_c' + 319.28 \times (Q_c + 240) \times Q_c'$$

$$C_{ann} = (1.57 \times M_g + 0.06) \times (P_c < 6000 + P_c < 1040)$$

约束方程:

$$P_c + P_b = 2500 \quad (5-5)$$

$$P_c' + P_b' = 2500 \quad (5-6)$$

$$y = (2.35 - 2.25 \times 10^{-4} \times P_c + 1.35 \times 10^{-4} \times P_c') \quad (5-7)$$

$$M_g = 0.10318 + (0.2166 + 2.20906 \times 10^{-6} \times P_c - 1.02049 \times 10^{-6} \times P_c') \quad (5-8)$$

$$P_c = n_{se} \times P_{se} \quad (n_{se} \text{ 为整数}) \quad (5-9)$$

$$Q_c' = 957 \quad (5-10)$$

$$P_c < Q_c' \times y \quad (5-11)$$

$$Q_c + Q_c' = 2815 \quad (5-12)$$

$$(Q_c + Q_c') \times cop = 3455 \quad (5-13)$$

$$cop = 1.20 \quad (5-14)$$

$$Q_c = y \times P_c \quad (5-15)$$

$$i_c = 10\% \quad (5-16)$$

$$N_{dep} = 30 \quad (5-17)$$

$$N_{inv} = 1; \quad (5-18)$$

因为投资函数和收益函数都是大于零，而是此模型是多规划问题，适合用分目标乘除法进行求解，求解过程是在计算机中完成。

计算结果:

方案1:

$$P_{se} = 425; \quad n_{se} = 3; \quad P_c = 1275; \quad P_b = 2075; \quad P_b' = 1225$$

$$y = 2.257; \quad M_g = 0.457; \quad Q_c = 2877; \quad Q_c' = Q_c' = 0$$

$$(P/A, i_c, N_{dep} - N_{inv}) = 9.370; \quad (P/F, i_c, N_{inv}) = 0.909;$$

$$C_{inv} = 13592264.53 \text{ 元}$$

$$C_{inv} = 9261668.531 \text{ 元}$$

$$C_{inv} = 6291450 \text{ 元}$$

$$c = 0.453 \text{ 元/kWh}$$

$$NPV = -C_{inv} + (C_{inv} - C_{inv}) \times (P/A, I_e, N_{dep} - N_{inv}) \times (P/F, I_e, N_{inv}) \\ - 11708845.44 > 0$$

$NPV > 0$  说明方案是可行的

项目的投资回收期为：4.57 年

方案 2:

$$P_e = 425; P_{in} = 850; P_e = 1275; P_e = 2075; P_e = 1225$$

$$\gamma^1 = 2.257; \gamma^2 = 2.168; M_g = 0.74; Q_e = 2802; Q_e^* = Q_e^* = 0$$

$$C_{inv} = 13590000 \text{ 元}$$

$$C_{inv} = 9149600 \text{ 元}$$

$$C_{inv} = 6075473 \text{ 元}$$

$$c = 0.438 \text{ 元/kWh}$$

$$NPV = -C_{inv} + (C_{inv} - C_{inv}) \times (P/A, I_e, N_{dep} - N_{inv}) \times (P/F, I_e, N_{inv}) \\ - 12596234.58 > 0$$

$NPV > 0$  说明方案是可行的

项目的投资回收期为：4.42 年

### 5.3 计算结果与常规方案的比较

常规方案中对于 50,000 平米级建筑分布式基于燃气轮机冷热电联产的技术解决方案是:

$$P_e = 1000; \eta = 24\%; \gamma = 2.1385; Q_e = 2802; Q_e^* = Q_e^* = 0; M_g = 0.43; \text{ 当}$$

$$P_e = 350; \eta = 14\%; \gamma = 2.73; M_g = 0.737;$$

$$C_{inv} = 11528714 \text{ 元}$$

$$C_{inv} = 7164473 \text{ 元}$$

$$C_{inv} = 4853621 \text{ 元}$$

$$c = 0.47 \text{ 元/kWh}$$

$$NPV = -C_{inv} + (C_{inv} - C_{inv}) \times (P/A, I_e, N_{dep} - N_{inv}) \times (P/F, I_e, N_{inv}) \\ - 8153575 > 0$$

项目的投资回收期为：5.01 年

为了使本文模拟分析基于燃气轮机三联供系统的设计方案，同其他的三联供系统有一个横向的比较，使优化模拟的设计方案更具有说服力，本文把优化的方案、常规的方案、基于内燃机的三联供系统方案和购电+电制冷+集中空调这几种设计进行了对比性分析，分析结果见下表 5—8。

在此项目方案中，针对基于内燃机的三联供系统，本文选用的是两台 1000kW 级发电设备。国内使用最多的燃气内燃机主要是卡特彼乐（Caterpillar）公司的产品，资料充分，所以燃气内燃机以 Caterpillar 生产的 G3516LE 燃气内燃机机组技术数据作为设计依据，设备参数见表 5—8，1000kW 内燃机价格为：292.6 万元，所需要 1700kW 补燃锅炉的价格是 171 万元，其他的设备与基于燃气轮机的设备可以相同。

表5—7 Caterpillar G3516LE 燃气内燃机

项目	单位	技术指标
发电出力	kW	975
燃料耗量	GJ	10.23
单位燃耗	kJ/kWh	10130
发电效率	%	35.54
排烟温度	℃	511
烟气流量	kg/hrs	6232
缸套冷却水温度	℃	99
中冷器却水温度	℃	54
余热回收量	kW	1103
热电综合效率	%	73.12
长	mm	5000
宽	mm	1900
高	mm	2100
重	kg	13000

表 5—8 三联供设计方案的经济性和节能性对比分析

项目	单位	小型燃机冷热电三联产		内燃机冷热电三联产	购电集中供热电空调
		优化方案	常规方案		
建筑面积	m <sup>2</sup>	50000	50000	50000	50000
夏冬季供电量	kW	1275	1000	1950	-1275

采暖制冷期 用电量	kW	425	350	975	-425
夏季发电量 小时	hrs	6000	6000	6000	6000
采暖制冷期 发电小时	hrs	1040	1040	1040	1040
年发电量	kWh	8092000	6364000	12714000	-8092000
平均电价	元/kWh	0.58	0.58	0.58	0.58
年发电收益	元/a	4693360	3691120	7374120	-4693360
冬季供暖功率	kW	2815	2815	2200	-2815
供热小时	hrs	3440	3440	3440	3440
采暖制冷期 总负荷需要量	kW	957	957	957	-957
供热小时	hrs	1040	1040	1040	1040
年总电量	kWh	10678880	10678880	8563280	-10678880
电价	元/kWh	0.258	0.258	0.258	0.258
供热收入	元/a	2755151	2755151	2209326	-2755151
夏季制冷功率	kW	3465	3100	2640	-3465
制冷小时	hrs	2560	2560	2560	2560
年制冷量	kWh	8870400	7936000	6758400	8870400
制冷价	元/kWh	0.1933	0.1933	0.1933	0.1933
制冷收入	元/a	1714648	1534029	1306398	-1714648
夏季天然气 总耗量	m <sup>3</sup> /hrs	3451279	2663405	3518688	0
采暖制冷期 天然气总耗量	m <sup>3</sup> /hrs	199407	253083	304953	0
年耗气量	Nm <sup>3</sup>	3650686	2916488	4260569	0
天然气价格	元/m <sup>3</sup>	1.57	1.57	1.57	1.57
年燃气成本	元/a	5731578	4578887	6689093	0
年运行费用	元/a	6075473	4855621	7358002	9233600
年节省收益	元/a	9149600	7164473	10889844	0
设备总投资	元	13590000	11528714	15805208	285350
单位经济系数	元/kWh	0.438	0.47	0.427	0.638

NPV值	元	12596234	8153575	14276655	-78930968
回收期/年	年	4.42	5.01	4.37	∞

从上面的分析数据可以看出,用本文介绍的模拟算法设计的三联供系统方案有最小的煤经济系数,内燃机-溴化钾吸收式制冷机供能方案的煤经济系数其次,而常规的以经验确定负荷的方案煤经济系数较大,购电+电制冷+集中供热的煤经济系数最大;可见从节能性和经济性两方面综合考虑,本文模拟的方案达到了优化的效果。但从NPV值来看,内燃机+溴化钾吸收式制冷机的三联供系统方案要比基于燃气轮机三联供系统NPV值要大,也即经济性更优;这是因为在此项目中,热负荷和电负荷之比仅略大于1,和内燃机的热电比接近,而燃气轮机的热电比大于2,在此项目中发挥不出优势来;所以由于热负荷的限制,基于内燃机的三联供系统设计的电负荷可以比基于燃气轮机的三联供系统设计的电负荷大,经济性就体现出来了;但是,如果项目中热负荷与电负荷之比大于2,这时基于燃气轮机的三联供系统就比基于内燃机的更占有优势,因为内燃机需要很大负荷的燃气锅炉进行补燃,以解决它的余热负荷小的不足;而且内燃机及其附属的余热回收系统都比燃气轮机系统庞大,因此占地面积更大,即初投资相应的也大了,所以说各种方案各有利弊,要针对不同的项目设计要求来选择最适合的模型方案,以发挥其特点和优势;但总的说来,本文提出的优化模拟算法,可以在节能性和经济性上对基于燃气轮机的三联供系统设计起到一定的指导作用。

在最后本文给出了开发的优化模拟软件的总体设计流程图和部分程序软件界面,以供大家参考。



图 6-1 基于燃气轮机三联供系统的优化模拟软件界面



图 6-2 用户参数输入模块界面





图 6-3 设备选择模块界面

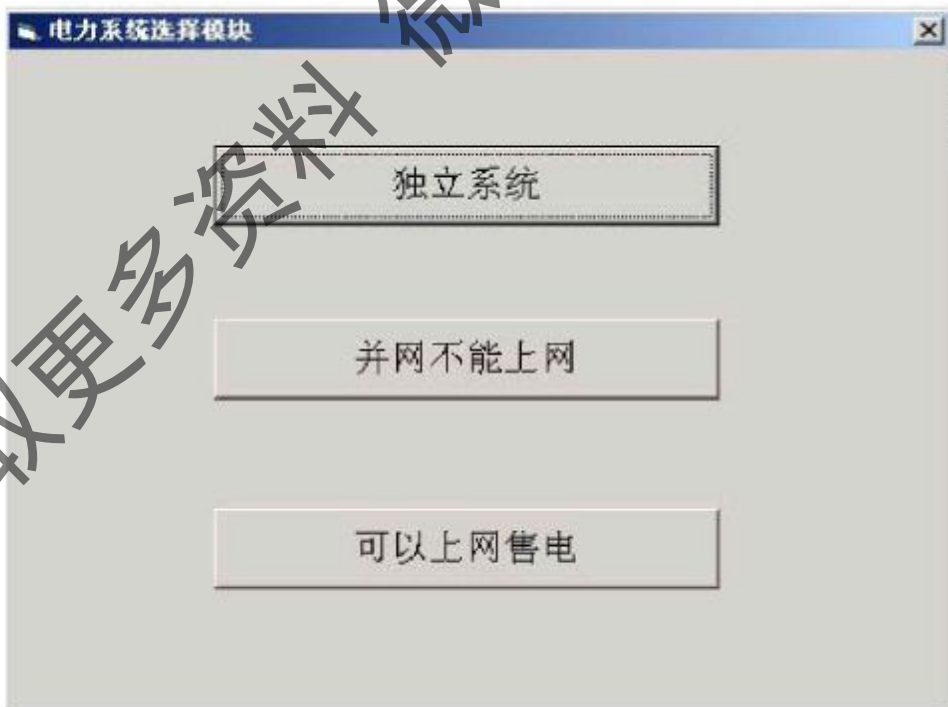


图 6-4 电力系统选择及计算模块界面

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球



图 6-5 优化模拟结果

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

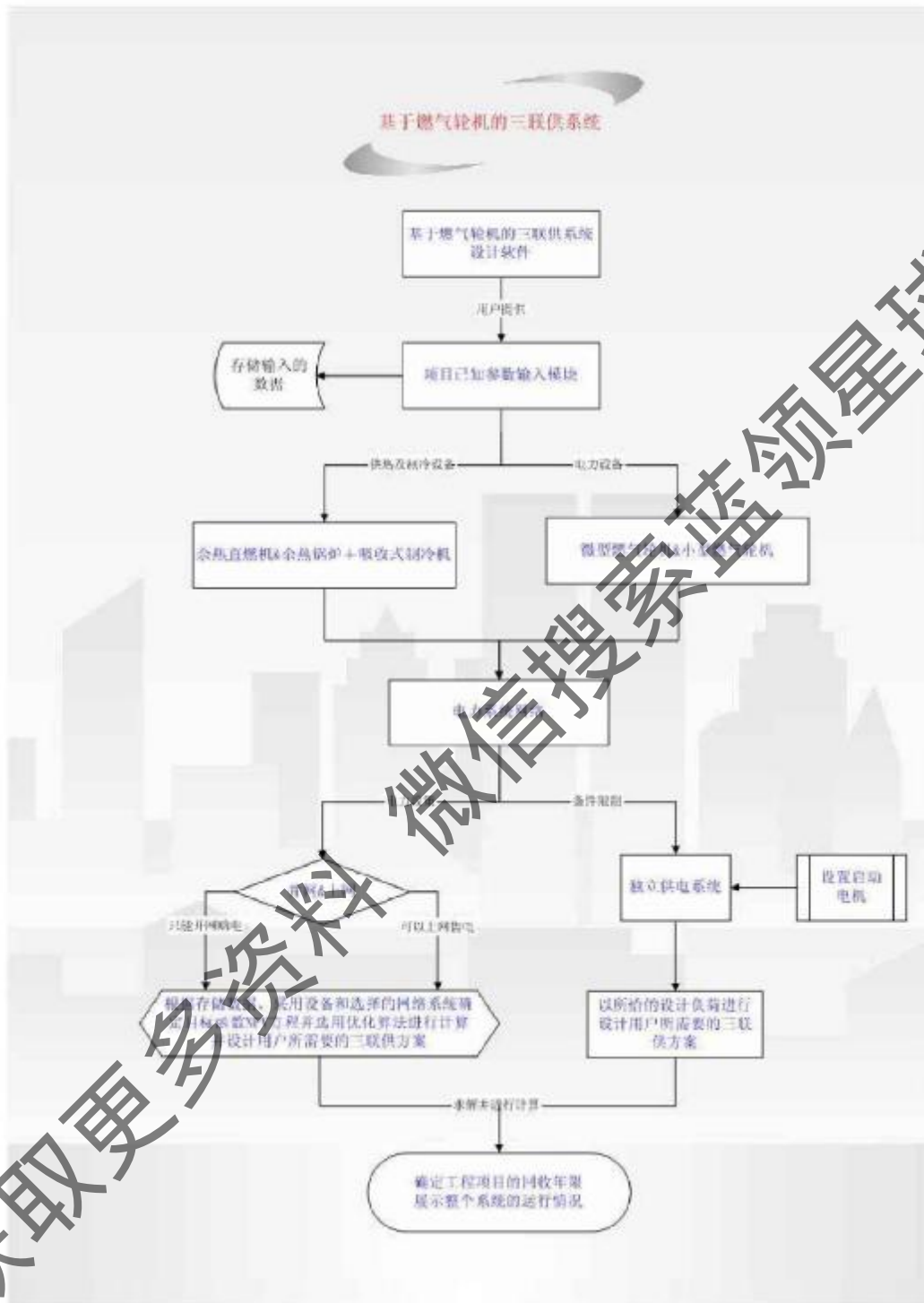


图 6—6 基于燃气轮机三联供系统优化模拟的流程图

## 第六章 结论

从上面的例子可以看出,利用本文三联供优化系统模拟确定的电力负荷、热负荷、冷负荷比常规利用经验确定的负荷要有更小的经济系数、更高的 NPV 值、更短的投资回收年限,表现为能源的总体利用率和经济效益都提高了,因此其节能性和经济性相比之下交得更优,达到了本文对三联供系统设计优化模拟的目的。本文提出的这套优化模拟系统希望能给用户,采用三联供系统作为自己的能源供应模式提供了经济依据,使用户能够方便、快捷、全面地确定所需要的各种负荷大小和整个体系的结构,了解所要采用的三联供系统的经济性、节能性,和低污染性,而且还给用户对整个系统的各个设备提供了选择依据,本文介绍的方法实现了对三联供系统设计的优化模拟,在设计背景和用户的负荷要求下使得三联供系统的节能性经济性达到了更优,加之三联供系统自身的低污染,调节灵活等特点,势必吸引更多的用户采用这种能源供应系统,并且能加速基于燃气轮机的三联供系统在中国的推广和应用,缓解现今能源紧张的趋势。

为了使本文研究的课题具有广泛的实用性,方便设计者针对具体的能源工程项目建设出适宜的,完善的,稳定的,经济性最优的三联供系统方案;作者根据自己掌握分析的各种数据资料,以及自己开发设计的优化系统模型,并且选定了适合的优化算法,在 FORTRAN90 和 PROLOG 设计平台上,研发出了一套基于燃气轮机三联供系统的优化设计软件。此软件包括用户参数输入模块,不同优化系统模型选择设计模块,优化系统计算模块,经济分析比较模块以及方案系统演示模块;这既体现了人性化的设计,能够适应各种不同条件,不同负荷要求的三联供系统的设计,又体现了前瞻性的开发,对将来可能出现的电力优惠政策给予下的三联供系统的设计提供了方法,而且此软件能够不断扩展,它内部的价格曲线函数和各种参数方程可以通过其联接的数据库的更新进行不断的修改,使软件本身在今后具有可开发性,不断完善性和广泛的适用性。

本文研究结论如下:

1. 在天然气供应丰富的地方,采用基于燃气轮机的冷热电三联供系统,可以对电网和燃气管网起到削峰填谷的作用。
2. 基于燃气轮机的三联供系统的总能源利用率相当高,可以达到 90%,而且其污染排放也非常低,如果天然气的价格适当的话,基于燃气轮机的三联供系统的供能方案比购电+集中供热+电空调系统等其他供能方案要好得多,因为它有很好的经济效益,有较短的投资回收期,使用户得到很大的收益。
3. 以经济系数最小、投资运行成本最低、运行收益最高为目标函数的优化模

拟模型所确定的设计负荷，比常规的以热定电、以冷定电单纯经验确定的设计负荷，更能发挥出三联供系统的节能性和经济性。

4. 因为基于燃气轮机的三联供系统的热电比要比基于内燃机的三联供系统的热电比大，这两种三联供方案针对不同的项目有着各自不同的节能和经济优势，因此要根据不同的负荷要求因地制宜的采用不同的方案。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 参考文献

- 【1】 朱成平, 从热电联产走向冷热电联产, 中国能源网, 2002
- 【2】 张洪伟、黄素逸、龙一研, 分布式能源系统与可持续发展战略, 节能, 2002, 4: 41~44
- 【3】 徐建中、江丽霞、金红亮, 分布式供电和冷热电联产的前景, 中国能源网, 2003
- 【4】 常健, 分布式供电和冷热电联产的技术方案和发展前景, 资源节约与环保, 2003, 2: 1~5
- 【5】 翁一武、翁史烈、苏一明, 以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统, 中国电方, 2003, 3: 1~2
- 【6】 李先瑞, 住宅区三联供系统的研究, 区域供热, 2000, 2: 3~9
- 【7】 王昭俊、魏兵, 城市集中三联供系统的应用与研究现状, 节能技术, 2001, 5: 25~27
- 【8】 忻奇峰, 燃气轮机在浦东国际机场能源中心“三联供”系统中的应用, 中国电方, 2002, 2: 8~11
- 【9】 P. A. Pilavachi, Power generation with gas turbine systems and combined heat and power, Applied Thermal Engineering 20(2000): 1421~1429
- 【10】 S. Larycy, C. Larcaseli, T. Bernthsson, Gas turbines in district heating combined heat and power systems: influence of performance on heating costs and emissions, Applied Thermal Engineering 20(2000): 1075~1103
- 【11】 H. Lund, E. Munster, Modelling of energy systems with a high percentage of CHP and wind power, Renewable Energy 28(2003): 2179~2193
- 【12】 Alexandre Salem Szklo, Jefferson Borghetti Soares, Mauricio Tiemo Tolmasquim, Energy consumption indicators and CHP technical potential in the Brazilian hospital sector, Energy Conversion and Management 45(2004): 2075~2091
- 【13】 Eriksen, Economic and environmental dispatch of power/CHP production systems, Electric Power Systems Research 57(2001): 33~39

- 【14】 Henrik Lund, Poul Alberg, Electric grid and heat planning scenarios with centralized and distributed sources of conventional CHP and wind generation, *Energy* 25(2000): 299~312
- 【15】 Thomas G. Bourgeois, Bruce Hedman, Fred Zareman, Creating markets for combined heat and power and clean distributed generation in New York State, *Environmental Pollution* 123(2003): 451~462
- 【16】 李彤、黄正元、孙云昌, 热电冷三联供新型能源模式优化与研究, *热电技术*, 1995, 1: 24~27
- 【17】 谢英柏、马一太、杨一昭, 燃气机热泵的热电冷三联供系统分析, *工程热物理论*, 2002, 5: 283~285
- 【18】 段洁仪、冯继德、梁永建, 楼宇式天然气热电冷三联供技术及应用, *煤气与热力*, 2003, 6: 337~341
- 【19】 G. G. Maidment, G. Prosser, The use of CHP and absorption cooling in cold storage, *Applied Thermal Engineering* 20(2000): 1059~1073
- 【20】 余南华、王岳人、秦永卓, 冷热电联产系统与微型燃气轮机, *可再生能源*, 2003, 5: 34~36
- 【21】 赵士杭, 新概念的微型燃气轮机的发展, *燃气轮机技术*, 2001, 3: 8~13
- 【22】 肖寅、郁志良, 燃气轮机热电冷三联供初探, *上海节能*, 2001, 1(2): 20~22
- 【23】 Risto Lauderma, Henri Hakonen, An efficient linear programming algorithm for combined heat and power production, *European Journal of Operational Research* 145(2003): 141~151
- 【24】 C. D. Mone, D. S. Chau, P. E. Phelan, Economic feasibility of combined heat and power and absorption refrigeration with commercially available gas turbines, *Energy Conversion and Management* 42(2001): 1569~1573
- 【25】 Ching-Fzong Su, Chao-Lung Chiang, An incorporated algorithm for combined heat and power economic dispatch, *Electric Power Systems Research* 69(2004): 187~195
- 【26】 Francois Marechal, Boris Kalitventzev, Targeting the integration of multi-period utility systems for site scale process integration, *Applied Thermal Engineering* 23(2003): 1763~1787

- 【27】 Jorgen Sjodin, Dag Henning, Calculating the marginal costs of district heating utility, *Applied Energy* 78(2004): 1~18
- 【28】 邵颖红、黄渝祥 《工程经济学概论》 电子工业出版社
- 【29】 成其谦 《投资项目评价》 中国人民大学出版社
- 【30】 吴自华、杜敏, 管理科学基础, 天津: 天津大学出版社, 2001, 87~109
- 【31】 苏伟, 关于非线性多目标规划问题非劣解解法的探讨, *运筹与管理*, 2003, 12(3): 32~37
- 【32】 颜红松、董品杰、祝国瑞, 求解多目标规划问题的 Pareto 多目标遗传算法, 2003, 21(5): 24~28
- 【33】 刘树人、杨和、王芳华, 投资组合有效选择的一种实用算法, *数学理论与应用*, 2003, 23(3): 73~76
- 【34】 罗罡辉、叶艳妹, 多目标规划的 LINDO 求解方法, *计算机应用与软件*, 21(2): 108~110

获取更多资料

微信搜索 蓝领星球



## 发表论文和科研情况说明

发表的论文:

- [1] 安行松、李 汛、李珍远, “超临界压力水在水平圆管中地变物性流动特性研究”, 《上海理工大学学报》, 2003 年 5 月, 第 25 卷 专增

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 致 谢

本论文的工作是在我的导师李汛副教授的悉心指导下完成的，在此衷心感谢三年来李汛老师对我的教诲。

马一太教授对于我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间，王席华、李俊松等同学对我论文中的研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

另外，也感谢我的家人，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球