

发电技术

# 冷热电三联供系统建模方法综述

国旭涛, 韩高岩, 吕洪坤

(国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

**摘要:** 冷热电三联供系统采用了能源梯级利用原理, 在节能减排和能源安全方面较现有常规发电系统更具优势。为了更好地发挥冷热电三联供系统节能高效和经济低碳的优势, 需要进行最佳的规划设计和运行方法优化。围绕冷热电三联供系统的系统设计问题, 介绍了单目标优化与多目标优化, 并根据求解算法和规划目标等指标, 对国内外学者的相关研究成果进行了论述与梳理。基于目前研究中的要点, 从优化目标、能源种类和系统输出 3 个角度对相关文献进行分析与总结。

**关键词:** 三联供系统; 建模; 算法; 优化模型

文章编号: 1007-1881(2020)04-0083-11

DOI: 10.19585/j.zjdl.202004014

中图分类号: TU996

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Review of Modeling Methods of Combined Cooling, Heating and Power System

GUO Xutao, HAN Gaoyan, LYU Hongkun

(State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Combined cooling, heating and power (CCHP) system is superior to traditional power generation systems in energy saving, emission reduction and energy security due to the energy cascade utilization principle. To better utilize the advantages of energy-saving, high efficiency and low carbon in the CCHP system, it is necessary to optimize the planning and operation methods. Focusing on the design of the CCHP system, single target optimization and multi-objective optimization are introduced. The relevant research results of domestic and foreign scholars are discussed and sorted by the algorithms, planning targets and other indicators. According to the optimization objectives, energy mix and output of the system, the relevant documents are analyzed and summarized.

**Keywords:** CCHP; modeling; algorithm; optimization model

## 0 引言

当前,我国能源体系仍以煤炭为主要燃料<sup>[1]</sup>,但煤炭能源利用效率偏低<sup>[2]</sup>、碳排放量较高<sup>[3-4]</sup>。同时,由于我国能源“双控”工作面临巨大的压力,因此,需要加快我国能源结构由煤炭向天然气与可再生能源的转变<sup>[5-7]</sup>,其中,高效、清洁、靠近用户侧的CCHP(冷热电三联供)能源利用方式得到了广泛关注<sup>[8]</sup>。系统分布在用户侧,以能源梯级

利用为导向,拥有能源综合利用率高(一次能源利用率可达75%~80%)、经济环保、削峰填谷易进行电力调峰的优势。同时,CCHP系统兼容多种供能方式,可以实现天然气等化石能源与太阳能、生物质能、地热能、余压余热余气以及燃料电池等多种能源形式耦合互补。尤其在建筑中采用制冷、供暖和发电相结合的三联供系统通常成本较低,适合燃油价格较高的地区及国家<sup>[9]</sup>。

2005—2015年,我国天然气消费量年均增长146.3亿m<sup>3</sup>,年均增长16%<sup>[10]</sup>。天然气占一次能源消费结构中的比重逐步提高,从2005年的2.4%增至5.9%,因此,天然气在一次能源消费结

构中的比例始终处于上升态势。而天然气 CCHP 系统是一种目前广泛流行的分布式能源利用方式,其采用“多源输入,综合互补;品位对口,梯级利用;多元输出,分配得当”的原则。一般地,CCHP 系统主要由动力设备(发电机组)、余热利用系统(如吸收式制冷机组)、通风系统、供配电系统、天然气供应系统、消防系统等组成。常见的动力设备主要有燃气轮机、微燃机、内燃机和燃料电池等。典型的 CCHP 系统如图 1 所示。发电机组利用天然气等能源进行燃烧发电,并输送至电网,机组发电过程中所产生的散热以及余热通过制冷或制热机组进行余热利用,为用户提供所需的冷负荷和热负荷。当发电机组所产生电能不能满足用户所需电负荷时,欠缺部分将通过电网进行补充;当发电机组所产生电能超过用户所需电负荷时,多余部分输送至电网,采用“余电上网”的模式<sup>[11]</sup>。

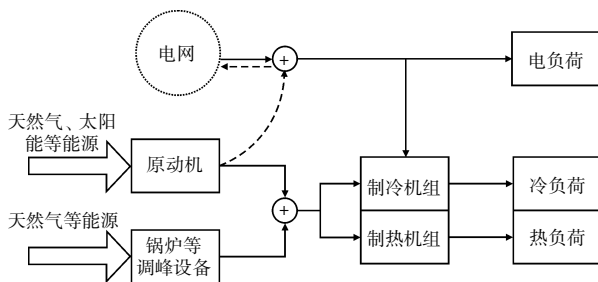


图 1 典型的冷热电三联供系统

Chicco G 和 Mancarella<sup>[12]</sup>总结了三联供系统的特点,提出了一种综合性的分布式三联供系统框架。Al-Sulaiman 等人<sup>[13]</sup>对三联供系统的优点、发展、挑战等方面进行了综述,指出原动机是三联供系统差异的最主要区别,并对不同的原动机类型进行了详细的比较。刘小军<sup>[14]</sup>对不同类型的 CCHP 系统的建模方法进行了归纳,重点分析了基于全局的系统运行模型,总结了典型的建模过程。Cho 等人<sup>[15]</sup>对 CCHP 系统的研究现状进行了综述,从能量平衡和焓平衡 2 个角度对已进行的研究进行总结,认为系统建模是三联供系统规划和能源管理的核心。Gu 等人<sup>[16]</sup>对 CCHP 系统建模方法进行了综述,讨论了系统优化控制、降低排放等系统能源管理策略。Jradi 和 Riffat<sup>[17]</sup>针对最新的三联供系统性能优化运行策略进行了讨论,

详细比较了原动机类型和制冷方式的差异。

由上可知,CCHP 系统是具有多种能量输出形式的复杂系统,涉及多种能源与多种输出负荷的匹配优化,为了实现系统整体设计和运行方式的优化,可以采用建模的方法进行分析比较。因此,所使用的设计算法和运行优化策略是保证系统安全、高效、清洁运行的关键<sup>[18-20]</sup>。

本文通过综述国内外 CCHP 系统建模优化方面的研究,对主要的建模方法进行分类讨论,并从系统设计和运行策略 2 个方面对三联供系统的优化进行分析,最后对三联供系统的建模方法进行总结。

## 1 三联供系统

不同于热电联产技术,CCHP 技术可以对机组运行过程中损失的热量进行捕捉,用以驱动热泵或吸收式机组进行供热/供冷。因此,CCHP 系统比传统的发电厂或热电联产机组具有更高的能源利用效率<sup>[9]</sup>。

CCHP 系统如图 1 所示,燃料和多余的空气混合并燃烧以驱动原动机,所产生的电能供使用,有多余时连接至电网,不足时由电网补充。来自原动机的高温废气的能量主要通过制冷机组或制热机组回收。此外,余热锅炉等调峰设备可能会投入运行以补充热量。三联供系统和分供系统的对比情况如图 2 所示。当负荷相同时,三联供系统的燃料消耗量更少,能源利用效率更高。燃气热电联供(三联供系统的供热工况)、燃气热电分供和燃煤热电分供的能源利用率、CO<sub>2</sub> 排放量对比如表 1 所示,由于通常燃气热电分供中热电比例接近于 1:1,因此表 1 中的数据折算至用户使用 1 度电及 1 度热时的情况。三联供系统对建筑、公用社区等供能具有以下优点:

(1)降低燃料成本(占总能源成本的 30%~50%),从而节省大量运维成本,缩短投资回收期。

(2)通过出售多余的电力、蒸汽和热能,以及冷能增加项目收入。

(3)由于使用多种能源形式,且能源生产靠近用户侧,大大提高了用能可靠性,为用户提供优质的能源备用。

(4)能源运输具有更好的灵活性,减少了对大型输电线路等基础设施的依赖性。

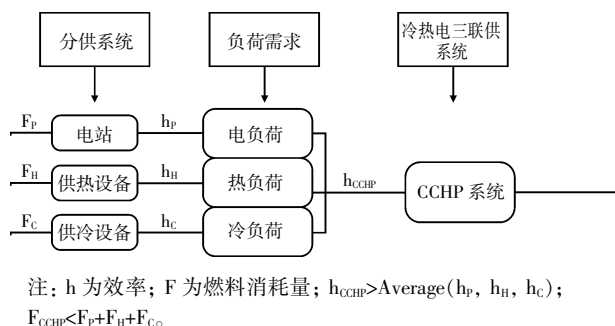


图2 三联供系统和分供系统对比

表1 用户侧能源综合利用率和CO<sub>2</sub>排放情况

项目	燃气分布式	燃气热电	燃煤热电
	热电联供	分供	分供
用户侧能源利用率/%	≈78	≈66	≈51
CO <sub>2</sub> 排放/g	≈456	≈541	≈1241

注: 燃气分布式热电联供取厂用电率2.5%; 根据《浙江省发电厂2016年度节能技术监督工作总结》取燃煤机组平均供电煤耗为300.52 g/kWh, 燃气机组平均供电煤耗为226.66 g/kWh; 根据《浙江省2016年度电力行业节能环保报告》取浙江省平均输电网损失率为4.19%; 假设燃煤工业锅炉、燃气工业锅炉的净供热效率分别为75%和90%。

(5)减少CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>、颗粒物和其他温室气体的排放, 符合日益严格的能源标准的相关要求。据统计, 2007年全球三联供系统减少了1476万t CO<sub>2</sub>的排放<sup>[3,9]</sup>。

## 2 优化目标

虽然三联供系统具有能源利用率高、经济环保等诸多优点, 但是其涉及多种能源和多种负荷的优化匹配, 系统的能量调控与运行管理十分复杂, 而这部分对系统综合效益的实现影响较大。因此, 通过建模对三联供系统进行仿真计算既可以了解系统在能源利用和经济等方面的情况, 又能节省计算的人力和时间。其中, 系统的经济性、节能性和环保性是最重要的3个建模指标<sup>[21]</sup>。文献[21]提出了一个全面评价三联供系统的方案, 评价指标主要为: 一次能源节省量、二氧化碳减排量以及全年费用节省量。文献[22]使用一次能源消耗量、二氧化碳减排量、运行费用来衡量系统的状况。与此类似, 大部分关于三联供系统的研究都采用技术、环境、经济3个方面相关的参数指标对系统进行评价, 其中, 技术指标指的是对于三联供系统运行所消耗的一次能源, 或者是满足同等冷、热、电负荷需求下三联供系统与常规

系统比较所减少的一次能源消耗量; 环境指标主要是指三联供系统与常规系统比较所减少的二氧化碳等污染物的排放量; 经济指标指的是三联供系统运行、设备等方面的费用, 涉及系统配置、运行策略等。一般不同的研究所使用的评价指标形式存在一定差异, 但究其根本, 优化目标都是属于经济、环境、技术中的某个或是某几个。

结合三联供系统的优化目标, 提出系统模型构建的流程, 如图3所示。系统模型优化主要包含设计优化和运行优化两部分。设计优化通过能源需求和负荷分析, 为工艺选择、设备配置提供指导; 运行优化则是通过合理的控制策略, 实现系统运行过程中最优的能源利用效率、经济性、污染物排放量目标。设计阶段, 在调研得到用户冷、热、电负荷数据的基础上, 结合实际情况针对性的分析多种系统配置的可行性, 如三联供系统结合可再生能源、热泵或蓄能等技术, 利用数值模拟的方法对系统方案进行比较选择。对于系统的运行优化, 主要是通过三联供方式匹配用户需求, 若发电量不足, 则从电网进行补充; 若冷、热量不足, 则使用电制冷空调、燃气锅炉、天然气直燃等制冷制热设备进行补充, 从而实现冷、热的供需匹配。

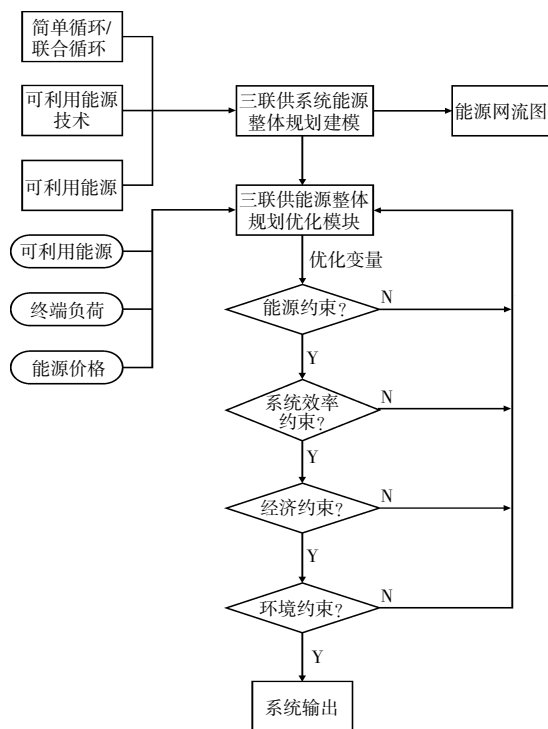


图3 三联供系统模型构建流程

在三联供系统建模优化过程中,采用的目标函数是单个或者多个<sup>[23]</sup>,优化目标的数量会影响方程算法的选择:

(1)单目标。一般这种情况,三联供系统的设备组合已经确定,主要是优化运行方案,常以年运行费用为目标函数。

(2)拟合多目标。优化目标包含技术、经济和环境,通过加权、赋值系数等方法将多目标值拟合为1个目标。由于3个目标性质的差异,如果无法准确衡量技术、环境的经济性,则所得到的目标函数不能全面反映系统的情况。同时,由于环境的差异性,此方法可能不具有普适性。

(3)多目标。通过独立优化环境、经济和技术目标,得到各个目标之间的关系,从而准确地反映三联供系统的性能。

相关文献的优化目标统计如表2所示。

### 3 模型求解方法

在三联供系统建模时,目标函数的个数、变量形式、模型是否线性等都求解算法的选择有较大的影响,所以可以采用求解算法对系统建模的相关研究进行分类。求解算法大致包括:LP(线性规划)、MILP(混合整数线性规划)、NLP(非线性规划)、MINLP(混合整数非线性规划)、PSO(粒子群算法)、GA(遗传算法)等。相关文献总结如表3所示。

#### 3.1 线性规划和混合整数线性规划

线性规划算法是三联供系统建模中常用的一种方法。一般而言,枚举法、单纯形法是线性规划算法常见的求解方法。Arosio等人<sup>[31]</sup>使用能量和经济2个目标函数分别从简化和完整2个层面

对三联供系统进行了分析。Cho等人<sup>[32]</sup>基于网络模型对三联供系统的建模进行了研究,采用运行费用、一次能源消耗量和二氧化碳减排量,使用最优能量调度的计算方法分析了不同气候条件下的三联供系统,认为3个目标函数之间不存在相同的变化趋势,即变化一个参数,可能导致另外2个参数增加或者是减少。Hu和Cho<sup>[33]</sup>在文献<sup>[32]</sup>的基础上将确定性模型拓展为多目标随机模型,增加了优化运行策略可靠性的概率约束。Cardona等人<sup>[34]</sup>对Malpensa 2000 CHCP(热电联产)发电厂的重新发电和运行策略进行了分析,通过对能源流和净现金流的分析,他们认为单纯以利润为导向的管理方式虽然可以显著减少能量节省,但是却对年度一次能源消耗量和污染物排放量影响较低。Kong等人<sup>[35]</sup>提出了一个基础的线性规划模型对三联供系统的最佳能源形式组合进行选择,将机组的负荷比例与余热比例作为变量,在所设定的电、冷、热负荷条件下,计算购买能源成本的最小值,结果显示,三联供系统最佳的运行方式取决于系统对冷、热、电负荷的满足情况。线性规划算法是决策系统的静态最优化数学规划方法之一,但由于其对数据的准确性要求高,且只能对线性问题进行规划约束,因此该算法运算效率低、计算量较大,近些年在三联供系统建模中的应用有所减少。

一些学者使用MILP算法对三联供系统的优化进行了研究。Canova等人<sup>[36]</sup>将系统全部产品的成本最小化作为目标,从而提出了一种对三联供系统能源管理进行优化的MILP模型。对7个不同规模的系统进行了投资经济分析,使用现金流量分析每个系统的投资回收期。Arcuri等人<sup>[37]</sup>介

表2 优化目标统计

文献 编号	优化目标			目标参数形式
	技术	经济	环境	
[24]	■		■	烟效率、二氧化碳减排量、一次能源消耗量
[25]	■	■		烟效率、运行费用
[26]	■	■		年折算费用、年净收益、投资收益率,拟合多目标
[27]		■	■	输出功率折算费用、二氧化碳排放量
[28]	■	■	■	年运行费用、二氧化碳减排量
[29]	■	■	■	全寿命周期内的总成本、污染物排放、负荷容量缺失率,非多目标,而是两两优化
[21]		■		系统净收益,单目标
[30]	■	■	■	系统经济性、环境性和一次能源节约率

绍了用于优化医院综合大楼的能量管理程序, 该程序依据每小时负荷图, 通过寻优算法得到三联供系统的设计和运行条件, 该文献证明使用 MILP 算法可以极大地改善能量管理, 实现经济、能量和环境效益的增加。Buoro 等人<sup>[38]</sup>提出了一个 MILP 模型用以解决给区域供暖/冷的三联供系统的配置和运行优化, 将全年成本费用作为目标函数, 引入能量平衡作为约束条件, 然后利用商业软件 X-Press 进行计算, 所使用的决策变量有: 微型燃气轮机和吸收式制冷/制热机组的数量; 区域热网/冷网中管道的数量、容量大小和相关长度; 已安装设备的每小时运行情况; 每小时的能量流动情况; 每小时向电网出售或者是购买的电能。Carvalho 等人<sup>[39]</sup>使用 2 个环境参数和 1 个经济参

数建立目标函数, 该模型由容量、负荷和能量平衡的约束, 最后使用 LINGO 软件进行求解。在此基础上, Carvalho 等人<sup>[40]</sup>提出了一种 MILP 模型对三联供系统的设备配置和运行方式进行了优化。接着, Carvalho<sup>[41]</sup>对一个给医院供能的三联供系统进行了研究, 同时考虑了环境和经济方面的指标, 从而提出了一种可以表征经济和环境之间最佳平衡值的方法, 并利用  $\varepsilon$  约束方法取得 Pareto 参数集。Henggeler<sup>[42]</sup>将能量系统优化的若干变量的约束分为以下 6 类: 能量平衡; 机组容量和负荷匹配性; 所在区域的能量系统平衡; 所在区域的能量系统容量限制; 运行部分负荷限制; 政策限制。

另一方面, 整数变量的数量对 MILP 问题会

表 3 文献总结

文献编号	目标数量		方法	结果
	单目标	多目标		
[31]		■	LP	运行操作限制较少对节能效果影响较低
[32]		■	LP	只考虑节能和减排, CCHP 具有优势
[33]		■	LP	概率约束的可靠性水平越高, 运营成本就越高
[34]	■		LP	以利润为目标的管理方式优化, 对减排影响低
[35]	■		LP	系统的最佳运行方式主要取决于所需要满足的负荷情况
[36]	■		MILP	重点关注不同规模三联供系统的经济性
[37]	■		MILP	对三联供系统运行方式的优化进行管理
[38]	■		MILP	单目标优化, 以年运行费用作为目标
[39]	■		MILP	考虑系统容量、负荷和能量平衡的约束
[40]	■		MILP	优化设备配置和运行方式
[41]		■	MILP	通过不同的 $\varepsilon$ 取值, 计算得到 Pareto 参数集
[43]		■	MILP	采用二进制开关量简化整数变量
[44]	■		MILP	以利润为单目标
[45]	■		NLP	在 GAMS 22.8 取值下搭建模型
[46]	■		NLP	将每小时能源成本最小化作为运行优化的目标
[47]	■		NLP	耦合太阳能, 运行策略复杂化
[48]	■		NLP	结合动态规划算法和优先次序法
[50]	■		MINLP	EDA 比 BARON 和原始分解算法都收敛的快
[52]	■		MINLP	—
[53]	■		MINLP	—
[60]		■	GA	年度成本最小化和焓效率最大化
[61]		■	GA	综合考虑经济、环境和能量指标
[62]		■	GA	拟合一次能源节省量、年运行成本和二氧化碳减排量
[63]		■	GA	基于能源效率和经济性指标
[65]	■		PSO	比较了“以电定热”、“以热定电”等方式的差异性
[66]	■		PSO	—
[67]	■		PSO	传统的计算方法通常基于密封算法, 需要进行拆分
[68]	■		PSO	—
[69]	■		PSO	拟合目标参数, 简化计算

产生较大的影响。Piacentino<sup>[43]</sup>通过采用“8760模型”对开/关状态进行二进制变量的假设,对整数变量进行简化处理并减少其数量,为三联供系统的MILP优化处理提供了一种新的计算途径。接着,Piacentino等人<sup>[44]</sup>使用以利润为目标的MILP算法对三联供系统进行设计优化,涉及所有设备的配置、容量选择等因素。相比较线性规划算法,引入整数决策变量的MILP算法可以更好地表示设备机组的开启情况(如0-1型整数线性规划),有利于目标函数和约束条件的优化,并且对于三联供系统优化运行的模型,可以求解得到更加符合实际的组合方案。但是,由于MILP算法既要处理离散变量又要处理连续变量,其计算量比线性规划算法更大,因此,需要优化算法以提高计算精度、减少计算量。

线性规划和MILP算法的使用思路非常清晰,易于理解,同时该优化模型的求解过程一般遍历了所有可能的组合情况,结果非常可靠。但正由于此,该算法占用计算机内容较大,计算耗时长,可能会造成计算精度的降低。

### 3.2 非线性规划和混合整数非线性规划

文献[45]研究了以液体燃料(柴油和石油)、煤与生物质作为原料的三联供系统,提出以NPV(净现值)最大化为目标的优化函数。该函数包括659个变量和652个约束,同时使用了NLP和LP求解方法。Chicco<sup>[46]</sup>为三联供系统运行优化问题提出了一种矩阵方法,搭建了切实有效的框架决策,将每小时能源成本最小化作为运行优化的目标,利用顺序编程方法进行计算得到了结果。Tora等人<sup>[47]</sup>设计了一种可用于太阳能结合三联供系统的计算方法,该算法采用非线性规划方法,可以对最优的电、冷、热负荷进行匹配,并对运行过程中化石能源和太阳能的比例进行优化,以得到最佳运行策略。Vallianou等人<sup>[48]</sup>选择成本费用最小化作为目标函数,使用多阶段矢量参数化方法和SNOPT软件进行规划。罗必雄<sup>[49]</sup>对一个实际能源站进行运行优化分析,将系统的运行模式分为5种,分别为:经济性最优模式、能源综合利用效率最优模式、以冷定电模式、电负荷跟踪模式及扩展模式,并结合负荷预测技术分别建立函数模型。有约束问题和无约束问题是非线性规划的两大类。在三联供系统的建模中,大多数是

有约束条件的非线性规划问题,计算求解过程比较困难、十分复杂。在求解过程中,通常采用将非线性规划化为近似的线性规划、约束问题变为一系列无约束极值问题等方法,这会导致计算结果精度一定程度的降低。

混合整数非线性规划算法也是三联供系统常用的方法之一。Chen等人<sup>[50]</sup>研究了柔性三联供系统的设计和运行优化,指出通过引入额外的信息来使用增强分解算法,增强分解算法比全局最优求解器可以更快地收敛。Tian X<sup>[51]</sup>研究了三联供系统中电力和供暖的解耦问题,提出弱解耦方法并将其与强解耦方法进行比较:强解耦方案应用于具有特定操作约束的单独系统或者是冷热电系统,主要侧重于三联供系统中单个子系统的建模仿真问题。弱解耦方法基于矩阵理论,可以更好地匹配解耦的需求。Liu等人<sup>[52]</sup>在GAMS软件中模拟了所提出的MINLP模型,其中包括15个二元变量,299个连续变量和293个方程(107个为非线性),以及20个不等式约束条件。Prihatin等人<sup>[53]</sup>乙二醇三联供系统的实际工程进行了研究,从中构建了一个非凸的MINLP模型,在GAMS中进行模型的建立,结合DICOPT++尝试进行求解。混合整数非线性规划算法集合了线性规划、混合整数线性规划和非线性规划3种算法的特点,具有极强的问题处理能力,但其包含线性和非线性规划方程,决策变量也有离散变量和连续变量,因此,模型求解对于已知参数的数量和准确性要求较高。

在三联供系统的模型求解上,有很多学者对模型多方面影响因素进行了研究<sup>[54-59]</sup>。Andreassi等人<sup>[54]</sup>认为系统效率、成本费用和污染物排放是对天然气三联供系统运行优化管理的主要指标。通过对不同的运行策略进行模拟(经济、能源效率和环境),比较总成本费用、电力成本费用、一次能源消耗量和二氧化碳排放量,模拟过程中需要考虑不同的时间间隔,从而比较时间参数在能源系统优化过程中的影响程度。陈强<sup>[55]</sup>对能源系统的子系统逐个进行了变工况与全工况条件下的运行特性分析,并比较了基于理论估计建模与基于实验数据建模的差异,最终指出,采用理论与实验相结合的方法可以搭建准确性强、适用性好的单元模块模型。理论上,通过大量数据的分析总

结出变化规律,得到相应的变化函数;继而通过每个子系统的实验数据拟合,对变化函数的进行修正,最终得到整个系统的模型。朱晗<sup>[56]</sup>通过引入经济效益指标与温室气体排放量指标的加权值,利用优化后的方法对天津某分布式能源系统在供冷季的运行情况进行分析,通过逐时冷负荷数据的采集、逐时电负荷模拟校准,最终得到逐时运行策略方案,同时,针对结果进行优化,提出现有运行模式的不足和具体解决方案:在电价低谷期通过电制冷设备为蓄能罐进行储能,白天冷负荷高峰期优先使用蓄能罐进行冷量提供。该软件的不足之处在于其只考虑并网运行,无法体现分布式能源系统孤岛运行时对可靠性的提高作用。李恩山等人<sup>[57]</sup>通过能源系统燃料价格、初期投资成本及供热和供冷的效益搭建了成本分析模型,指出当系统年负荷率超过30%时,系统热效率及燃料价格是主要的影响因素。Pooranian等<sup>[58]</sup>提出了一种每日能源总成本联合最小化的优化模型,针对智能住宅楼,解决了电力成本和二氧化碳排放量的共同最优问题。Calise等人<sup>[59]</sup>提出了一种包括太阳能集热器和固体氧化物燃烧电池的三联供系统,可以满足家用热水、电能以及其他热能,将该系统在TRNSYS(瞬时系统模拟程序)中进行动态模拟,采用经济参数进行优化系统。

### 3.3 其他算法

随机优化算法是一种随机搜索方法,可以生成并使用随机变量,并将其所产生的随机解进行比较,然后得到多个样本情况下的最佳解决方案。虽然无法保证所得到的解为全局最优值,但是当问题非常复杂时,这种方法十分有效。如模拟退火算法、遗传算法、粒子群算法等都是随机优化算法。其中,遗传算法和粒子群算法的相同点和不同点如表4所示。

Jabbari等人<sup>[60]</sup>使用Aspen Plus软件模拟三联供系统,并且使用遗传算法进行计算优化,系统优化主要有2个目标:年度成本最小化和烟效率最大化,通过遗传算法的模拟优化,减少了系统投资回收期。Kavvadias等人<sup>[61]</sup>提出了一种三联供系统多目标优化方法,并在一所医院的能源系统建设中进行了使用,该方法综合考虑经济、环境和能量指标,结合设备容量、设备成本和运行策略等变量,使用遗传算法求解此问题。Wangle等人<sup>[62]</sup>将一次能源节省量、年运行成本和二氧化碳减排量进行加权拟合作为目标函数,提出了一种基于经济、环境和技术3个层面的系统评估方法,对一个在某酒店使用的三联供系统进行容量配置的最优值求解。Ahmadi等人<sup>[63]</sup>提出了一种基于能源效率和经济性指标的三联供系统优化算法,结合几个特殊设计的参数,通过遗传算法最大化烟效率,同时使总成本最小。文献[64]利用遗传算法,结合MATLAB和TRNSYS软件对小型分布式能源系统的运行策略进行优化,得到了逐时最佳运行工况。

粒子群算法是另一种广泛应用在三联供系统优化计算中的方法。Li等人<sup>[65]</sup>利用粒子群算法求解一个应用太阳能与三联供能量系统的商业建筑的优化问题,建立了关于能量系统年运行费用、一次能源消耗量和二氧化碳排放量的模型,比较了“以电定热”“以热定电”“综合考虑电、热负荷”3种运行方式的差异性。结果表明,“以电定热”运行方式可以最大化增加系统经济和环境优势,“以热定电”运行方式则可以突出能量系统能源消耗方面的优点。Kyriakarakos等人<sup>[66]</sup>对基于太阳能和风能的三联供系统,使用TRNSYS 16软件进行模拟,该模型使用系统负荷、平均能耗和总供水量作为变量参数,结合GenOpt 2.0软件进行

表4 遗传算法和粒子群算法的比较

	遗传算法	粒子群算法
相同点	种群随机初始化 对种群内的每一个个体计算适应值。所计算的适应值与最优解的距离直接有关 种群根据适应值进行复制	
不同点	发明比较早 对高维问题收敛速度很慢甚至很难收敛 并行搜索	开始于1995年 收敛速度很快而且结果很精确,但容易陷入局部最优解 串行搜索

粒子群算法优化,最大限度地优化算法计算速度。结果显示,文献中所提出了三联供系统具有可观的利润回报情况。Piace 和 Cardona<sup>[67]</sup>对三联供系统的热力学经济性进行了研究,指出传统的计算方法通常基于密封算法,无法明确得到系统利润的提高,在优化算法中应该将实际过程进行拆分计算。Facci 等人<sup>[68]</sup>通过对三联供系统的热力学经济性分析优化了系统能源消耗和经济性情况。Facci 等人在文献[69]中提出了一种改良的三联供系统优化控制策略,使用目标参数加权拟合的方法简化动态模拟的困难。

通常,遗传算法适用于离散型变量,且可解决可解情况未知的问题。而粒子群算法对于离散型变量和连续性变量均适应,同时其对约束条件数量要求较低。针对不同情况的三联供系统模型,需要选择适宜的算法进行求解。

### 3.4 算法的比较

虽然各种算法有着各自的优点和缺点,但是如果针对不同的优化问题,分别采用适宜的优化计算方法,那么就能够尽量避免算法缺点的同时,发挥算法的优点。在上述几种算法中,近段时间,被学者广泛应用于三联供系统建模的方法

是混合整数非线性规划。该算法的变量可为任何实数值,目标函数通常既有非线性方程又有线性方程,计算难度大,求解复杂。为了更加准确地求解,采用2种以上优化算法结合的方法可以起到有效作用,将问题分成多个部分,每个部分针对性的选择优化算法,然后统一进行计算可能是三联供系统模型求解方法的发展方向之一。

上述各种算法在实际使用过程中的优缺点如表5所示。

## 4 建模方法的总结

三联供能源系统的研究分析根据优化目标、能源种类以及系统输出可进行以下分类:根据优化目标分为能耗(技术)、经济和环境3类;根据使用的能源种类分为常规化石能源和可再生能源2类;根据系统输出情况分为电力为主和多种供能。文献的分类情况如表6所示。结果显示:经济性一直是三联供系统发展的主要考虑因素,投资、建设与运维费用是建模分析过程中最受关注的目标函数之一;由于分布式光伏、分布式风电等可再生能源的负荷不确定性,三联供系统依然以天然气等常规化石能源为主要能源。因此在系

表5 算法优缺点比较

算法	优点	缺点
LP	使用思路非常清晰,易于理解;结果非常可靠	对数据的准确性要求高;只能对线性问题进行规划约束;占内存大,运算效率低
MILP	有利于目标函数和约束条件的优化	相比LP,计算量更大
NLP	模型更加贴近实际	计算精度受影响
MINLP	结果可以达到全局最优;稳定能力强	对约束条件完整性要求高
GA	适应值简单,无需知道导数或梯度,相对鲁棒并且易于并行化	计算量大;虽然对于求解问题的信息要求较少,但是编程困难
PSO	调整方便;易于实现;速度相对较快;在大多数情况下都能找到全局最优解	不确定是否严格收敛;本地搜索能力相对较弱;可能在多模问题中获得局部最优解

表6 文献分类情况

项目	参考文献编号
目标	
能耗(技术)	[31]—[33], [43], [54], [59]—[63], [65]—[68]
经济	[31]—[41], [43]—[48], [52], [53], [54], [60]—[63], [65], [66], [68], [69]
环境	[32], [33], [39], [40], [41], [54], [62], [65]
环境	
常规化石能源	[31]—[41], [43], [44], [46], [48], [52], [53], [54], [59]—[63], [69]
可再生能源	[45], [47], [50], [65], [66]
系统输出	
电力为主	[31]—[41], [43], [44], [46], [47], [48], [54], [60], [61], [62], [65], [67], [68], [69]
多种供能	[45], [50], [52], [53], [59], [63], [66]

统建模过程中需要更多地考虑到设备装置的开启状态问题。

线性规划对于确定约束条件的问题有良好的求解能力,结果也非常稳定可靠。但是由于三联供系统通常具有较多的非线性目标函数和不确定的约束条件,线性规划算法不能很好地进行求解。因此,混合整数非线性规划算法是目前三联供系统设计过程优化问题最常用的方法。随着研究的深入,三联供系统建模中的多目标问题也受到广泛重视。而多目标问题是不存在唯一的全局最优解,因此,系统优化问题无法使用原有的传统数学优化方法进行求解。随着优化方法的不断创新,从线性规划、混合整数线性规划,逐渐发展至混合整数非线性规划,以及粒子群算法、遗传算法等智能进化算法,而具有自搜索能力的遗传算法和粒子群算法等在三联供系统建模的应用,可以大大提高优化计算速度与精度。

## 5 结语

三联供能源系统作为一种新型供能模式,在经济、环保、社会等多方面具有突出的优势。但是系统内部包含设备类型较多、结构复杂、运行方式灵活多变,而且涉及气、光、风、化石能源等多种能源的合理配置,十分复杂。系统所面对的用户具有冷、热、电负荷不确定的特性,导致减少系统成本、降低污染物排放和提高能源利用效率成为一个复杂的多目标优化问题。因此,对三联供系统的建模方法进行分析尤为重要。

三联供系统的优化包括设计优化和运行优化,涉及系统的技术、经济和环境3个方面。优化层次从运行策略优化发展到设备配置和运行策略协同优化。采用的算法从简单的确定性算法发展至智能的试探性算法。总体而言,针对三联供系统的建模计算,国内外学者进行了大量研究工作,取得了许多具有创新性和实效性的成果。在诸多算法中,相比较线性规划和混合整数线性规划算法,非线性规划和混合整数非线性规划算法具有更好的求解正确性。目前,三联供系统优化问题多使用混合整数非线性规划算法,虽然非线性目标函数或约束条件的引入导致模型计算的复杂化,求解更加困难,但是采用2种以上优化算法结合的方法可以有效简化问题,提供计算精度。

## 参考文献:

- [1] 刘小军,李进,曲勇,等.冷热电三联供(CCHP)分布式能源系统建模综述[J].电网与清洁能源,2012,28(7):63-68.
- [2] 任丹丹,冯罗澍,陈颖.大型燃煤电厂脱硫废水烟气利用技术研究[J].浙江电力,2018,37(3):82-85.
- [3] BP Global Energy.BP statistical review of world energy-68th edition[R].BP Global Energy,2019(68):1-64.
- [4] 刘然,王旭明,岳高,等.“十三五”能源消耗总量和强度“双控”机制研究[J].能源与环境,2017(6):2-4.
- [5] 能源发展“十三五”规划[Z].北京:国家发展改革委,国家能源局.2016-12-26.
- [6] “十三五”节能减排综合工作方案[Z].北京:国务院,2016-12-20.
- [7] 省发展改革委关于印发《浙江省进一步加强能源“双控”推动高质量发展实施方案(2018—2020年)》的通知[Z].杭州:浙江省发展和改革委员会,2018-9-30.
- [8] 邱永罡.LNG冷能利用对联合循环机组性能的影响分析[J].浙江电力,2018,37(10):62-66.
- [9] AL MOUSSAWI H,FARDOUN F,LOUAHLIA-GUALOUS H.Review of tri-generation technologies:Design evaluation,optimization,decision-making, and selection approach [J].Energy Conversion and Management,2016(120):157-196.
- [10] 天然气分布式能源产业发展报告 2016[R].北京:中国城市燃气协会分布式能源专业委员会,2016.
- [11] 罗华峰,戚宣威,汪冬辉,等.分布式发电系统保护控制研究(二):电源侧保护控制方案研究[J].浙江电力,2018,37(10):10-16.
- [12] CHICCO G,MANCARELLA P.Distributed multi-generation:A comprehensive view[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(3):535-551.
- [13] AL-SULAIMAN FA,HAMDULLAHPUR F,DINCER I. Trigeneration:a comprehensive review based on prime movers[J].International Journal of Energy Research,2011(35):233-258.
- [14] 刘小军,李进,曲勇,等.冷热电三联供(CCHP)分布式能源系统建模综述[J].电网与清洁能源,2012,28(7):63-68.
- [15] CHO H,SMITH A D,MAGO P.Combined cooling,heating and power: A review of performance improvement and optimization[J].Applied Energy,2014(136):168-185.
- [16] GU W,WU Z,BO R,et al.Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling,heating and power microgrid: A review[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2014(54):26-37.
- [17] JRADI M,RIFFAT S.Tri-generation systems:Energy poli-

- cies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014(32):396-415.
- [18] 蔡洁聪, 韩高岩, 国旭涛, 等. 浙江省天然气分布式能源发展及建议[J]. *浙江电力*, 2019, 38(1):28-32.
- [19] 肖衍党, 贾林妮. 楼宇型分布式能源系统调峰设备的优化选择[J]. *节能*, 2017, 36(6):53-56.
- [20] 张庆福, 毕连文. 浅谈天然气分布式能源站设备的选择[J]. *中国设备工程*, 2018(14):149-151.
- [21] WANG J J, ZHANG C F, JING Y Y. Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4):1247-1259.
- [22] KONG X Q, WANG R Z, HUANG X H. Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(s 2-3):377-391.
- [23] GU W, WU Z, BO R, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014(54):26-37.
- [24] LI M, MU H L, LI H N. Analysis and assessments of combined cooling, heating and power systems in various operation modes for a building in china, dalian[J]. *Energies*, 2013(6):2446-2467.
- [25] AHMADI P, DINCER I, ROSEN M A. Exergo-environmental analysis of an integrated organic rankine cycle for trigeneration[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012(64):447-453.
- [26] 胡雪姣, 刘刚, 廖胜明. 燃气内燃机冷热电联产系统的技术经济性分析[J]. *可持续能源*, 2016, 6(1):1-11.
- [27] CHICCO G, MANCARELLA P. Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part I: Models and indicators[J]. *Energy*, 2008, 33(3):410-417.
- [28] PEACOCK A D, NEWBOROUGH M. Impact of micro-CHP systems on domestic sector CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(17-18):2653-2676.
- [29] 王成山, 洪博文, 郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J]. *电网技术*, 2013, 37(7):1775-1782.
- [30] LI L X, MU H L, GAO W J, et al. Optimization and analysis of CCHP system based on energy loads coupling of residential and office buildings[J]. *Applied Energy*, 2014(136):206-216.
- [31] AROSIO S, GUILIZZONI M, PRAVETTONI F. A model for micro-trigeneration systems based on linear optimization and the Italian tariff policy[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14-15):2292-2300.
- [32] CHO H, MAGO P J, LUCK R, et al. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(12):2540-2549.
- [33] HU M, CHO H. A probability constrained multi-objective optimization model for CCHP system operation decision support[J]. *Applied Energy*, 2014, 116(C):230-242.
- [34] CARDONA E, SANNINO P, PIACENTINO A, et al. Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(14-15):1437-1447.
- [35] KONG X Q, WANG R Z, HUANG X H. Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(2-3):377-391.
- [36] CANOVA A, CAVALLERO C, FRESCHI F, et al. Optimal energy management[J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2009, 15(2):62-65.
- [37] ARCURI P, FLORIO G, FRAGIACOMO P. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex[J]. *Energy*, 2007, 32(8):1430-1447.
- [38] BUORO D, CASISI M, PINAMONTI P, et al. Optimization of distributed trigeneration systems integrated with heating and cooling micro-grids[J]. *Cogeneration & Competitive Power Journal*, 2011, 26(2):7-34.
- [39] CARVALHO M, SERRA L M, LOZANO M A. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints[J]. *Energy*, 2011, 36(6):3779-3790.
- [40] CARVALHO M, SERRA L M, LOZANO M A. Geographic evaluation of trigeneration systems in the tertiary sector. Effect of climatic and electricity supply conditions[J]. *Energy*, 2011, 36(4):1931-1939.
- [41] CARVALHO M, LOZANO M A, SERRA L M. Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects[J]. *Applied Energy*, 2012, 91(1):245-254.
- [42] HENGGELER ANTUNES C, CHINESE D. Optimal size and layout planning for district heating and cooling networks with distributed generation options[J]. *International Journal of Energy Sector Management*, 2008, 2(3):385-419.
- [43] PIACENTINO A, CARDONA F. EABOT-Energetic analysis as a basis for robust optimization of trigeneration systems by linear programming[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(11):3006-3016.
- [44] PIACENTINO A, BARBARO C, CARDONA F. Promotion of polygeneration for buildings applications through sector- and user-oriented "high efficiency CHP" eligibility criteria[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(2):882

- 894.
- [45] CHEN Y, ADAMS T A, BARTON P I. Optimal design and operation of flexible energy polygeneration systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(8): 4553-4566.
- [46] CHICCO G, MANCARELLA P. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization[J]. *Energy*, 2009(34):261-273.
- [47] TORA E A, EL-HALWAGI M M. Integrated conceptual design of solar-assisted trigeneration systems[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2011, 35(9):1807-1814.
- [48] VALLIANOU V, FRANGOPOULOS C. Dynamic operation optimization of a trigeneration system[J]. *International Journal of Thermodynamics*, 2012, 15(4):239-247.
- [49] 罗必雄. 分布式能源站的系统集成与优化运行[J]. *电力建设*, 2010, 31(5):1-6.
- [50] CHEN Y, LI X, II T A A, et al. Decomposition strategy for the global optimization of flexible energy polygeneration systems[J]. *AIChE Journal*, 2012, 58(10):3080-3095.
- [51] TIAN X, DENG S, KANG L G, et al. Study on heat and power decoupling for CCHP system: methodology and case study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018(142):597-609.
- [52] LIU P, PISTIKOPOULOS E N. Mixed-Integer optimization for poly-generation energy systems design[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009(33):759-768.
- [53] PRIHATIN T, MAHADZIR S, ABDUL MUTALIB MI. Modeling and optimization of water-based polygeneration system[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2012, 31:1427-1431.
- [54] ANDREASSI L, CIMINELLI M, FEOLA M, et al. Innovative method for energy management: modelling and optimal operation of energy systems[J]. *Energy and Buildings* 2009, 41:436-444.
- [55] 陈强. 分布式冷热电联供系统全工况特性与主动调控机理及方法[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2014.
- [56] 朱晗. 基于 DER-CAM 的开发与改进对分布式能源系统的运行策略优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [57] 李恩山, 田贯三. 天然气热电冷运行模式对发电成本影响的研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2009(5):454-459.
- [58] POORANIAN Z, CONTI M, ABAWAJY J. Scheduling distributed energy resource operation and daily power consumption for a smart building to optimize Economic and environmental parameters[J]. *Energies*, 2018, 6(11):1-17.
- [59] CALISE F. Design of a hybrid polygeneration system with solar collectors and a solid oxide fuel cell: dynamic simulation and economic assessment[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011(36):6128-6150.
- [60] JABBARI B, TAHOUNI N, ATAEI A, et al. Design and optimization of CCHP system incorporated into kraft process, using Pinch Analysis with pressure drop consideration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013(61):88-97.
- [61] KAVVADIAS K, MAROULIS Z. Multi-objective optimization of a trigeneration plant[J]. *Energy Policy*, 2010(38): 945-954.
- [62] WANG J J, JING Y Y, ZHANG C F. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm[J]. *Applied Energy*, 2010(87):1325-1335.
- [63] AHMADI P, ROSEN MA, DINCER I. Multi-objective exergy-based optimization of a poly-generation energy system using an evolutionary algorithm[J]. *Energy*, 2012(46): 21-31.
- [64] 魏大钧, 张承慧, 孙波. 计及变负荷特性的小型冷热电联供系统经济优化运行研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3240-3246.
- [65] LI Z, HUO Z, YIN H. Optimization and analysis of operation strategies for combined cooling, heating and power system[J]. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2011(2011):1-4.
- [66] KYRIAKARAKOS G, DOUNIS AI, ROZAKIS S, et al. Polygeneration microgrids: a viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel[J]. *Applied Energy*, 2011(88):4517-4526.
- [67] PIACENTINO A, CARDONA E. Scope oriented thermoeconomic analysis of energy systems. Part II: formation structure of optimality for robust design[J]. *Applied Energy*, 2010(87):957-970.
- [68] FACCI AL, ANDREASSI L, UBERTINI S, et al. Analysis of the influence of thermal energy storage on the optimal management of a trigeneration plant[J]. *Energy Procedia*, 2014(45):1295-1304.
- [69] FACCI AL, ANDREASSI L, UBERTINI S. Optimization of CHCP (combined heat power and cooling) systems operation strategy using dynamic programming[J]. *Energy*, 2014(66):387-400.

收稿日期: 2020-01-19

作者简介: 国旭涛(1993), 男, 助理工程师, 主要从事分布式能源相关研究。

(本文编辑: 徐 晗)