

# 太阳能驱动的冷热电联供系统研究进展

戴雨辰<sup>1,2</sup>, 陈飞<sup>1</sup>, 李宏顺<sup>1</sup>, 王寒栋<sup>2\*</sup>

1. 武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430205;

2. 深圳职业技术学院机电工程学院, 广东 深圳 518000

**摘 要:** 太阳能冷热电联供作为一种由多个子系统集成的复杂系统, 目前仍存在系统运行不稳定、子系统之间相互耦合匹配复杂、评价指标多元化等问题。在国内外太阳能冷热电联供文献研究的基础上, 从系统类型、采用工质的特点及适用范围、系统运行模式与策略、系统评价指标等角度分析了现有太阳能冷热电联供研究的现状与进展。提出太阳能冷热电联供各子系统的工质应根据应用特点进行针对性选择; 冷热电联供的运行模式应根据用户具体需求及系统最佳运行策略而定, 且系统最佳运行策略受系统运行工况及优化目标的影响较大; 系统的评价应针对联供系统的热力学性能、经济性能和环境友好性能三个方面得出的一套统一的综合评价指标。

**关键词:** 太阳能; 冷热电联供; 吸收式制冷; 耦合; 评价准则

**中图分类号:** TK519

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2015.09.012

## 0 引言

能源是经济社会发展的基础, 同时也是影响经济社会发展的重要因素。随着国家经济的飞速发展和现代化进程的不断深入, 国家对能源的需求也在日益增加, 当前我国能源形势十分严峻, 而能源供求矛盾将长期存在。现阶段, 国家不断发布政策, 鼓励加大发展对风能、太阳能、水能、海洋能等可再生能源的利用。

根据我国多年的太阳辐射数据资料分析, 全国太阳年辐射总值约为  $1\ 050 \sim 2\ 450\ \text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 而年辐射值大于  $1\ 050\ \text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的地区占国土面积的 96% 以上。我们平均每年受到的太阳辐照能量相当于燃烧 17 000 亿吨的标准煤所释放的能量, 且对于人类生命来说, 太阳能是“取之不尽、用之不竭”的。

冷热电联供(CCHP)是在热电联供(CHP)的基础上加入了余热驱动式制冷设备, 以达到可以同时向用户提供电量、冷量及热量, 是对能量的梯级利用, 具有节能减排、缓解电网压力等优点。Wu 和 Wang<sup>[1]</sup>对冷热电联供技术进行了全面的综述, 详细介绍了冷热电联供系统的定义、优点、技术特点

以及应用和发展状况。岳建华等<sup>[2]</sup>介绍了冷热电三联产分布式供能系统在国内外的应用情况, 对其分类、原理和特点进行了归纳, 并对该技术在我国的发展前景进行了展望。

为了高效利用资源丰富的太阳能, 同时满足用户的多样化能源需求, 可以利用太阳能实现冷热电联供, 因此大力开展太阳能冷热电联供系统的研究, 对提高能源利用效率、改善能源消费结构、减小环境污染和雾霾天气的发生、发展低碳经济具有重要的科学意义。本文通过对现有的联供系统研究进行总结, 对系统中集热与发电所采用工质的特点及适用范围进行了分析对比, 介绍了冷热电联供系统的运行模式, 讨论了系统的评价指标, 并提出了未来的一些研究方向, 对确定太阳能冷热电联供研究方向提供一定的参考价值, 并有助于促进太阳能的高效梯级利用及社会的节能减排。

## 1 太阳能冷热电联供系统的类型

文献分析表明, 目前关于太阳能冷热电联供系统的研究主要可分为两类: 使用太阳能作为主要热源驱动的系统 and 太阳能作为辅助热源驱动的系统, 本文也将从这两方面来展开讨论。

**收稿日期:** 2015-05-18

**基金项目:** 深圳市科创委战略新兴产业专项资金(No.JCYJ20130331150226792); 深圳职业技术学院重点项目(No.2213K3020001)

**作者简介:** 戴雨辰(1991-), 男, 湖北天门人, 硕士研究生。研究方向: 太阳能热利用。\* 通信联系人。

### 1.1 太阳能作为主要热源驱动的冷热电联供系统

常见的太阳能作为主要热源驱动的冷热电联供系统基本流程如图1所示。首先,由集热器收集太阳能加热集热器中的工质,之后工质进入热机做功(一般中间会有蓄热系统及辅助加热器系统以供太阳能不足时使用),再利用热机排出的中低温工质的余热来进行制冷及供热。

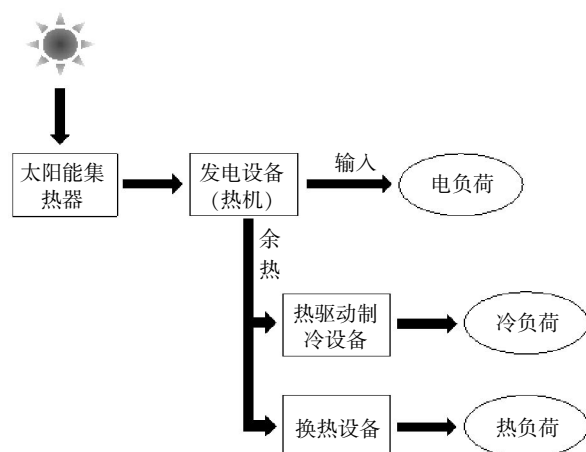


图1 常见太阳能冷热电联供系统基本流程图

Fig.1 Flow chart of the common solar-driven CCHP system

在领域的研究中,Wang<sup>[3]</sup>提出了一种由太阳能作为主要热源驱动的冷热电联供系统,该系统采用槽式集热器收集太阳能,螺杆膨胀机进行发电,余热用于热驱动式制冷及供热,通过对太阳能发电系统的能量及火用分析比较,该新型冷热电联供系统可以减少51.92%的能量损失及31.98%的火用损失。苏亚欣等<sup>[4]</sup>以太阳能作为唯一热源加热气体工质进行闭式布雷顿循环发电,余热用以制冷及供热,闭式布雷顿循环利用发电机同轴带动压缩机,具有可靠性高、性能优良等特点,系统流程如图2所示,其燃气轮机排出的废气余热高达450 K,具有很高的利用价值,但是该系统为了保证在阴雨天气和夜间的正常运行而配备了蓄电池系统,导致了系统初投资过高。

A.Al-Sulaiman等<sup>[5]</sup>对一种采用复合抛物面集热器集热、有机工质透平进行发电、吸收式制冷机进行制冷的太阳能冷热电联供系统的热力性能进行了研究,结果表明,有机工质透平进口压力的变化对系统性能的影响较小,所以在该系统中使用低压运行的有机工质以节约运行成本。系统

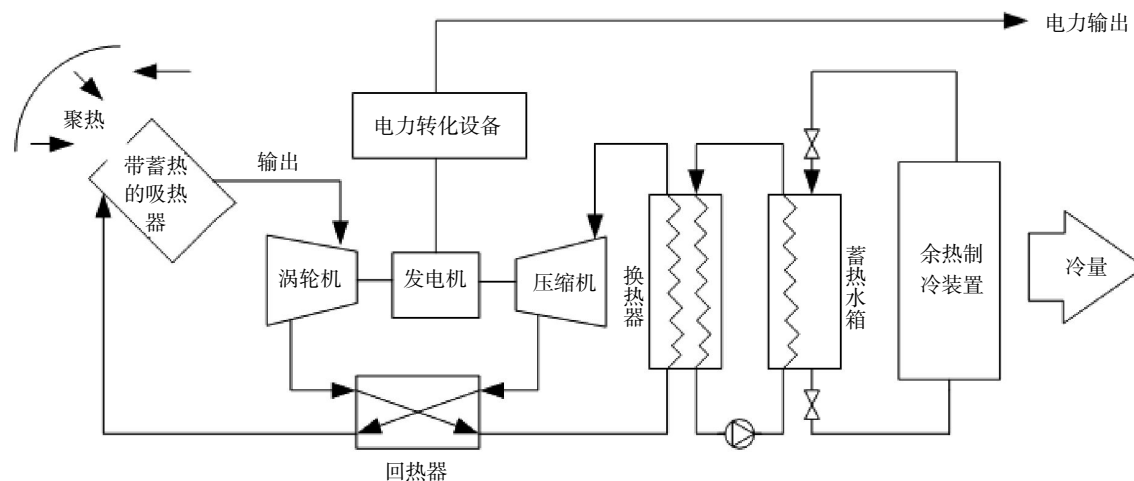


图2 闭式布雷顿循环太阳能冷热电联供系统流程图

Fig.2 Flow chart of the solar-driven CCHP system with clothed Brayton cycle

流程如图3所示,该系统由于加入了储热装置,所以在集热与发电循环采用了两种不同的工质,这种系统的特点是在太阳能不足的情况下也能运行,但是系统在控制上相对复杂,很多参数难以匹配和协调。Perdichizzi等<sup>[6]</sup>通过比较太阳能冷热电联供系统与传统化石燃料冷热电联供系统的发电效率和燃料节省率后得出,以太阳能为主要热源驱动的冷热电联供系统明显减少了夏季和冬季用电高峰时段的化石燃料消耗,同时一天中能够提供更高的整体效率。Wang等<sup>[7]</sup>使用非支配排序遗传算法

对一个采用平板集热器、有机工质透平、喷射式制冷装置的太阳能冷热电联供系统的热力学参数进行了多目标优化,结果表明,联供系统不同需求时的最佳性能可以通过多目标优化来实现。Wang等<sup>[8]</sup>采用复合抛物面集热器、有机工质透平、喷射式制冷装置构成一个太阳能冷热电联供系统,作者对系统中太阳能复合抛物面集热器的倾斜角及太阳时角对系统性能的影响进行了分析,并使用系统火用效率作为目标函数对这两个参数进行了优化。另外,该作者还将一个超临界CO<sub>2</sub>应用在了太



共同驱动的冷热电三联供系统,分析了该系统的5种运行工况,研究指出,系统的各种热力学指标随太阳能的波动而变化,并得出冷、热、电的分配权重参数,用户在使用时可根据负荷需求的变化参考不同时刻的能量分配权重参数,通过改变相应的参数以达到使用目的。

## 1.2 太阳能作为辅助热源的冷热电联供系统

太阳能作为主要驱动热源时具有波动大、经常处于变工况运行等缺点,所以一些学者提出了采用其他形式的能源为主要热源,太阳能为辅助热源驱动的冷热电联供系统。

Tora 等<sup>[19]</sup>采用化石燃料为主要热源,太阳能为辅助热源共同驱动一个冷热电联供系统,该系统热机采用抽汽式汽轮机,汽轮机排出的余热用以供热,太阳能与化石燃料驱动吸收式制冷机制冷,作者以最小年成本为目标函数,采用非线性规划方法对该系统进行了优化。R. Buck 等<sup>[20]</sup>提出了一种以燃料燃烧为主要热源,太阳能作为辅助热源加热空气进行布雷顿循环的冷热电联供系统,作者通过对三种不同的系统配置——燃气轮机排出的废气余热仅用于供热、余热用于单效吸收式制冷及供热和余热用于双效吸收式制冷及供热进行了比较,结果表明,采用双效吸收式制冷配置下的冷热电联供系统具有较高的热力学性能和较低的总成本。白鹤<sup>[21]</sup>提出了一种以天然气为主要热源,太阳能为辅助热源的楼宇级冷热电联供系统,该系统将太阳能光伏发电机组与太阳能集热器及内燃机结合起来实现了冷热电联供,通过与传统内燃机冷热电联供系统比较后得出,该系统在生命周期内的经济效益要明显优于内燃机联供系统,但是其缺点是初投资较高。吴一梅<sup>[22]</sup>在一个 30 MW 燃煤电站的基础上提出一种由太阳能辅助加热和溴化锂吸收式制冷机制冷的冷热电联供系统,作者根据集热场流量约束条件提出了针对不同太阳辐照强度时应采用不同的运行工况,结果表明,在无光照工况下,系统发电量随着吸收式制冷机组抽取蒸汽量的增加而降低,但是一次能源利用率及化石能源节约率均升高;在光照不充分的工况下,系统的一次能源利用率及化石能源节约率均随着光照的增强而上升;在光照充分的工况下,系统的发电量随光照的增强而增加,且当太阳直射辐射为  $0.9 \text{ kW/m}^2$  时,系统发电量可增大 8.2 MW。Wang 等<sup>[23]</sup>以天然气为主要热源,太阳能为辅助热源驱动一个冷热电联供系统,该系统的发电途径有天然气燃烧发电装置、光热发电装置和光伏发电三种;供热主要由发电装

置排出的废气和太阳能集热器提供;制冷由吸收式制冷持续工作以保证基本的冷负荷,电制冷仅用于补充高峰期的冷负荷,作者通过分析得出,该系统的平均生命周期能效为 51.66%,年度太阳能利用率约 38.35%。

上述两类系统中,相比较而言,太阳能作为主要热源时的系统具有更加环保、资源无限等优点,但同时也具有波动较大、系统会常常处于变工况运行等缺点,且为了保证连续的供能,需要加入蓄热系统或储能系统以保证没有太阳条件下的能量供应;以太阳能作为辅助热源时系统较为稳定,控制简单,但在使用多种形式的能源时往往会导致能源的利用率降低,且成本较高。对于以太阳能作为主要热源的联供系统,在今后的研究工作中,关键问题是解决太阳能的储存以及系统运行的稳定性。

## 2 太阳能冷热电联供系统的相关工质研究

按照太阳能冷热电联供系统的流程,系统工质可分为太阳能集热循环工质、发电循环工质及制冷循环工质。

### 2.1 太阳能集热循环工质

目前关于太阳能冷热电联供系统中集热循环的研究工作主要采用的工质有水、导热油、空气等。在采用空气作为集热工质的研究上,王忠会等<sup>[24]</sup>利用一种新型太阳能发电技术实现了太阳能冷热电联供,并进行了案例分析,证明了系统的可行性。几种集热工质的特点如表 1 所示。

由表 1 可以看出,不同集热工质的集热范围也不同,一般来说,集热温度越高,系统热效率也越高,但是对于设备的要求也会增高。所以根据不同的应用要求,可以选用不同的工质。

### 2.2 发电循环工质

对于太阳能冷热电联供系统中的发电循环,现阶段相关研究中所采用的工质普遍有水、有机工质、 $\text{CO}_2$ 、氨水等。

a. 水。作为传统朗肯循环的工质,水具有成本低、焓降大、易凝结、无毒无污染等优点。文献[3]在太阳能冷热电联供系统中采用了水作为发电循环的工质,由于该系统在集热部分使用的是槽式导热油系统,使得换热后热机进口温度可达到  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ ,热机出口的余热温度  $111.35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这也相应提高了热驱动式制冷的制冷性能。但是水作为动力循环工质在集热系统温度低时不能使用,且在汽轮机中使

表 1 太阳能冷热电联供系统中不同集热工质的特点

Table1 Different characteristics of the solar-collector working fluids in solar-driven CCHP system

集热工质	优点	缺点	系统特点	集热温度范围/℃	相关文献
水	价格低、热导率高、无毒无腐蚀性	集热温度较低	一般与有机朗肯循环连用	80~150	[7,8]
导热油	常压下可获得较高的温度上限、凝固点较低、传热效率高	需防止其氧化、结焦、与明火相遇时发生燃烧等问题,且当操作温度高于300℃时,将会有积炭产生	普遍在槽式集热器中使用	160~400	[3,5]
空气	凝固点极低、工作温度范围大、稳定性较高	比热容较小、传热能力较差、技术不成熟	一般用于碟式集热器中,需额外消耗电功对空气进行加压加速以强化传热	400~1 000	[24]

用时需要解决水的干度问题.

**b.** 有机工质.在有机朗肯循环的研究中,普遍采用的工质有 R245fa、R236fa、R600、R600a、R601 等,韩中合等<sup>[25]</sup>对 9 种有机工质的蒸发压力、热效率、功比和不可逆损失等进行了比较后得出,在使用太阳能低温热发电的朗肯循环系统中,R245fa 具有比较高的热效率和火用效率,其次,R236fa 和 R236ea 作为系统循环工质也具有较为良好的性能.文献[7]在太阳能冷热电联供系统中采用了 R245fa 作为发电循环工质,文献[8,26]由于在太阳能冷热电联供系统中采用了喷射式制冷,发电循环与制冷循环采用了同一种工质,所以作者均选用了无毒、无腐蚀性、不可燃的低压制冷剂 R123 作为冷热电循环的工质.有机工质的优点是不会出现两相流问题,凝结压力高,不需要抽真空系统;缺点是相对成本较高,焓降小,部分有一定毒性,且可燃可爆,泄漏问题较大.

**c.** CO<sub>2</sub>.CO<sub>2</sub> 具有相对成本低、易获取、少量泄漏、危害性不大等优点,但是凝结困难.文献[9]利用太阳能作为热源加热超临界 CO<sub>2</sub> 进行布雷顿循环发电,透平排气进入换热器以供热,之后在气体

冷却器中冷却,然后进入喷射器进行喷射式制冷.作者对该系统的几个关键热力学参数进行了研究,结果表明,提高透平进口压力和喷射器进口温度会降低系统效率,而提高透平背压和透平进口温度会提高系统效率,此外,提高喷射器背压会降低系统的热效率,但会提高系统的火用效率.

**d.** 氨水. 由氨水作为工质的动力循环由 Alexander Kalina 提出,该循环也称 Kalina 循环.由于氨水在作为发电工质时具有相变非等温过程及过程中浓度改变的特点,使得循环在整体上与热源和冷源有较好的换热匹配关系.周然等<sup>[27]</sup>提出了一种太阳能 Kalina 循环的冷热电联供系统,并对该系统进行了热力学分析,结果表明,系统的循环热效率和火用效率均随汽轮机入口压力的升高而上升.氨水作为动力工质的不足之处是系统设备较多,需要精馏,且精馏后用于做功和制冷的浓氨仅占总工质量的一小部分,使得做功量受到限制,而做工后汽轮机排出的氨主要为气体,导致该循环只能利用排出的氨的显热制冷,而不是相变蒸发制冷,所以制冷量较小,制冷温度也受到限制.

几种发电工质的热力学特性如表 2 所示.

表 2 太阳能冷热电联供系统中不同发电工质的热力学特性

Table 2 Thermodynamic characteristics of the different power working fluids in solar-driven CCHP

发电工质	循环方式	热机进口温度/℃	热机出口温度/℃	系统火用效率	相关文献
水	朗肯循环	150~160	105~111	38%~55%	[3,6,16]
有机工质	有机朗肯循环	75~275	33~136	6.47%~60.33%	[5,7,8]
CO <sub>2</sub>	布雷顿循环	220	36	28.8%	[9]
氨水	卡琳娜循环	200	—	40%	[27]

### 2.3 制冷循环工质

现阶段属于热驱动的制冷方式主要是吸收式制冷和吸附式制冷,两者又可按工作介质的不同进一步区分.

常见的吸收式制冷工质对有氨-水吸收式制

冷和水-溴化锂吸收式制冷.在氨-水吸收式制冷中氨作为制冷剂,水作为吸收剂,氨-水吸收式制冷可以制取 0℃以下的冷量,但是由于其中作为吸收剂的水和作为制冷剂的氨的沸点较为接近,这就使得发生器出口的蒸汽需要精馏,这影响了

系统的性能且使得系统需要较高的初投资。此外,氨作为制冷剂对常用的换热器材料铜有一定的腐蚀性,而且发生器温度较高的时候氨还会面临分解的问题,因此该工质对的使用仍然有一定的局限性。徐士鸣等<sup>[28]</sup>通过对影响氨水吸收式制冷循环因素的定性和定量分析得出,完全回收制冷循环中的精馏热可显著提高循环的制冷系数。在水-溴化锂吸收式制冷中水作为制冷剂,溴化锂溶液作为吸收剂,采用该工质对不需要精馏,相比使用氨-水作为工质对的系统初投资较低,且具有较高的性能。然而水-溴化锂吸收式制冷不能制取 0℃以下的冷量,且当发生器温度较高时,溶液具有较大的腐蚀性,另外系统还存在结晶问题。目前,对于吸收式制冷的改进工作主要是寻找新的工质对及改进原有工质对的性能<sup>[29]</sup>。

扩散吸收式制冷是在吸收式制冷的基础上利用制冷剂向平衡气体中扩散来代替节流过程以获得制冷能力,并利用热虹吸原理使得系统可以在无机械运作的情况下循环工作。王寒栋等<sup>[30]</sup>在扩散吸收式制冷中采用氨-硫氰化钠工质对进行了研究,由于氨与硫氰化钠的沸点相差较大,可免去精馏装置,结果表明,氨-硫氰化钠溶液具有较高的热导率和溶解度以及较低的蒸汽压、粘度和比热,且对钢材没有腐蚀性,是一种较为理想的吸收式制冷工质对。陆蕾颖等<sup>[31]</sup>研究了氨-水-氢扩散吸收式制冷系统中提升管结构、热源加热温度、氨水浓度、充气压力对制冷装置的影响。结果表明,浓度的提高可获得较大的冷量,适当的增加系统压力可降低蒸发温度,系统的冷量随加热功率的增加而提高,选择较小的提升管管径及较大的浸没高度可获得较好的制冷效果。扩散吸收式制冷的缺点是对器件的高位差有较高的要求,且不能在出现震动、倾颠或旋转等场合应用。针对这一问题,Wang<sup>[32]</sup>提出了一种新型扩散吸收式制冷系统,该系统采用  $\text{LiNO}_3\text{-NH}_3\text{-He}$  为工质,利用绝热喷雾吸收器实现传热与传质的分离强化,系统中设置了溶液循环泵,由于循环泵只需要克服工质流动阻力,不需要循环泵提升工质的压力势能,因此循环泵的能耗很小,可把电力消耗降至最低,该作者还将这种新型扩散吸收式制冷系统应用在了一种新型太阳能冷热电联供系统中<sup>[3]</sup>。但是  $\text{LiNO}_3$  溶液在寒冷天气地区极易结晶,这会大大影响系统的性能,所以使用该工质对时需采用防结晶措施。

对于吸附式制冷,滕毅等<sup>[33]</sup>介绍了它的发展历程。缪宝龙等<sup>[34]</sup>对吸附式制冷的原理及几种典型

工质对的选择进行了阐述,介绍了太阳能吸附式制冷系统和利用烟气余热的吸附式制冷机,并在其应用方面列举了几个案例,指出了吸附式制冷在太阳能冷热电联供系统中具有良好的应用前景。Zhai等<sup>[35]</sup>提出一种混合式太阳能驱动的冷热电联供系统,系统中槽式太阳能集热器用来收集太阳能,螺杆膨胀机用来发电,发电采用朗肯循环,硅胶-水吸附式制冷用来提供冷量,城市气象数据采用甘肃省敦煌市的气象数据。系统分析表明,系统最大的能量及火用损失发生在槽式集热器,其次发生在吸附式制冷机组。通过与朗肯循环的太阳能发电系统比较得出,能量利用率和火用效率明显增加。然而,硅胶-水吸附式冷水机组在实际运行中仍然存在系统总体运行效率低、工况变化适应性差、难以实施控制等问题。在其他形式能源驱动的冷热电联供系统中,孔祥强等<sup>[36]</sup>设计并建成了一套小型燃气内燃机和吸附制冷机相结合的微型冷热电联供实验系统,并研究了该系统在不同工况下的特性,结果表明联供系统中热电模式运行节能性明显优于冷电模式运行,且一次能源节约率均在 70% 以上。

总的来讲,热驱动式制冷中,吸收式制冷技术较为成熟,不少技术已经实现了商业化生产,如水-溴化锂、氨-水吸收式制冷机等,因此现阶段的冷热电联供系统仍普遍采用吸收式制冷。相对而言,吸附式制冷具有制冷量较小、性能不稳定等缺点,但是它的热源温区范围大,不需要溶液泵等装置,也不存在制冷剂污染、结晶、腐蚀等问题。在冷热电联供系统趋于小型化、微型化的背景下,吸附式制冷的应用将具有良好的发展前景。

### 3 冷热电联供系统的运行模式及系统耦合研究

冷热电联供系统是由多个模块集成在一起的系统,它能同时满足用户冷、热和电能的需求,它不是将各模块简单的叠加,其总体性能不仅与各模块的性能参数有关,而且与各模块间的热力参数匹配及耦合流程形式有关,而根据用户的具体需求不同,冷热电联供系统的运行模式也不尽相同。

文献[4]对一个太阳能冷热电联供系统进行了性能评估,作者按照太阳能供热、太阳能和储热装置联合供热、储热装置供热三种模式进行了比较,结果表明,太阳能供热模式下的能效最高。作者还通过研究得出了三种模式在系统仅输出电量的时候的最大效率分别为 15%、7%、6.5%,而在冷热

电联供的情况下,三种模式的最高效率明显增加,分别为 94%、47%、42%。

而在以其他稳定形式能源驱动的冷热电联供系统中(如天然气),运行模式研究主要集中在冷热电联供部分.康书硕等<sup>[37]</sup>从热电输出和燃料消耗量两个方面分析比较了天然气燃气轮机冷热电联供系统的两种运行模式“以热定电”和“以电定热”的性能差异,结果表明,当热电需求比(HPR)在  $1 \leq \text{HPR} < 1.75$  时,“以热定电”为最佳的系统运行方式,而当热电需求比在  $1.75 < \text{HPR} \leq 2.5$  时,“以电定热”为最佳的系统运行方式.孟金英等<sup>[38]</sup>根据不同运行工况及不同优化目标对一个微燃机冷热电联供系统进行了优化,结果表明,在冬季工况下,当选择以最小一次能源消耗量为优化目标时,系统宜采用“以电定热”的运行模式;当以一次能源消耗量、运行成本和二氧化碳排放的加权最小值为优化目标时,系统宜采用“以热定电”的运行模式;在夏季工况下,当以一次能源消耗量为优化目标时,宜采用分产系统的运行策略;而在以最低运行成本或最低二氧化碳排放量为优化目标时,宜采用“以电定热”的运行模式;而以三者加权最小值为优化目标时,系统宜采用“以热定电”的运行模式。

对于冷热电联供系统的耦合研究,蒋润花<sup>[39]</sup>根据总能系统,按照能的品位高低合理利用来处理热(冷)、功和热力学循环能等的匹配关系,作者强调系统优化耦合的核心问题是能的综合梯级利用,应遵循热力学第一定律、热力学第二定律,根据能量的品位与温度的高低进行梯级利用,做到“物尽其用”.林世平<sup>[40]</sup>以冷热电联供系统为对象,研究了冷热电联供系统与可再生能源系统和常规能源系统的耦合机理和特性,其中,与可再生能源的耦合包括太阳能、风能、地热能、生物质能以及其他低热值燃料;与常规能源系统的耦合包括蓄能系统、烟气余热回收系统等。

对于冷热电联供这种多机种、多台数、多工况的复杂系统,应该跟踪系统实时变化的冷负荷、热负荷及电负荷,针对不同的情况用不同的运行模式协调各机组的控制,以达到最佳的节能效应与经济效应.它耦合了可再生能源、发电、制冷、供热、环境、控制技术等,然而目前国内外对联供系统耦合的研究较少,缺乏相应的文献,这与系统控制策略的发展和实践不符,今后应重点研究各模块间耦合特性和协调控制,以提高系统运行的经济性和灵活性。

## 4 系统评价指标

一般来说,为了确定一个系统的优劣以及对系统进行优化设计等,需要采用一定的评价指标对系统作出评价.由于冷热电联供系统存在多种形式的能量输出,且各模块之间呈现出多种不同的属性,单从某一方面进行分析无法得出全面的评价结果,所以应从多个角度提出系统的评价标准。

目前从可获得的文献中尚未发现关于太阳能冷热电联供系统整体评价指标的研究内容,相关研究主要是针对其他类型的冷热电联供系统,但其研究思路与方法可供借鉴.如冯志兵等<sup>[41]</sup>通过对几种常用的评价准则进行比较,得出能量利用系数和火用效率均不适用于冷热电联供系统的评价,作者通过分析认为经济火用效率较适用于冷热电联供系统的评价.王志伟等<sup>[42]</sup>以微型燃气轮机和排烟再燃型溴化锂吸收式冷温水机组组成的冷热电联供系统为分析对象,对联供系统的几种评价指标进行了比较并总结出了三种适用的评价指标:一次能源节约率、火用效率及火用经济成本.荆有印等<sup>[43]</sup>以一次能源节约率、当量  $\text{CO}_2$  减排率和相对投资回报年限对一个联供系统进行了优化研究,作者还以一个综合办公楼为例进行了实例分析,结果表明太阳能联供系统的综合性能要优于分供系统.Chua 等<sup>[44]</sup>选用经济成本、能源消耗和环境影响对一个包含光伏-热,太阳能-热,燃料电池,微型透平和吸收式制冷机四个子系统的商业建筑的联供系统进行了多指标分析,结果表明,由 80%的微型燃气轮机、10%的太阳能光伏-热和 10%的燃料电池所构成的驱动系统是降低运营成本、提高节能及减少环境影响的最佳构成方式.许达等<sup>[45]</sup>采用系统热效率、系统当量效率及太阳能份额三个评价准则衡量了一个太阳能与甲醇热化学互补的冷热电联供系统的性能,结果表明,该系统的一次能源效率高达 89.36%,火用效率高达 47.10%.Wang 等<sup>[46]</sup>采用一次能源节约率、 $\text{CO}_2$  排放减少量及年度总节约成本三个指标对五个不同气候地区的模拟建筑进行了性能评价,结果表明,冷热电联供系统中的热需求模式在寒冷地区可以获得更大的利益,而电需求在气候温和的地区可以获得更大的利益.郭民臣等<sup>[47]</sup>采用一次能耗率、煤耗量以及制冷机的当量热耗系数比较了冷热电联供系统和分产系统的热经济性能,结果表明联供系统比分产系统更加节能.Wu 等<sup>[48]</sup>提出了一种基于功率能量级的分析方法来评估多种分布式冷源中的制冷及供热性

能,结果表明冷热电联供系统在制冷和供热模式下均具有较高的节能效应.Mago等<sup>[49]</sup>选择能源消耗量、运行成本和CO<sub>2</sub>排放量作为一个建筑用冷热电联供系统的评价指标,并对指标进行优化,结果表明,对于所评估的城市,优化后的系统明显比没有优化的系统具有更好的性能.邓建等<sup>[50]</sup>基于热经济学结构理论对一个微型冷热电联供系统建立了热经济学数学模型,量化了系统模块间的相互关系,并利用火用成本分析法评价了系统在设计工况及变工况下的性能,结果表明,热经济学结构理论可以有效地评价复杂的联供系统.Abdollahi<sup>[51]</sup>采用主要能源消耗量、CO<sub>2</sub>排放减少量和年成本节约量来评估联供系统性能,作者还建立了一个目标函数来综合考虑能量、经济性和环境问题,使得冷热电联供系统的效益达到最大.

虽然对于联供系统的众多研究中所采用的评价指标都不尽相同,但基本都离不开热力学性能、经济性能和环境友好性能三个方面.其中,热力学性能普遍采用一次能源利用率和火用效率方法;经济性能普遍采用投资回收期、年度总节约成本、火用经济成本等多种方法;环境友好性能普遍采用CO<sub>2</sub>排放减少量作为评价指标.因此,可以选取每种性能中的一个单目标评价指标,根据三个不同性能的单目标评价指标,采用线性加权法构造一个多目标评价函数.虽然这种方法的研究工作较为复杂,但是在国内外关于联供系统的研究大热潮背景下,围绕热力学性能、经济性能和环境友好性能三个方面发展出一套统一的联供系统评价标准将会是一个必然的趋势.

## 5 结 语

太阳能冷热电联供系统作为可再生能源的利用和分布式能源系统的综合,开展相关的研究工作符合国家节能减排的政策和可持续发展的要求,具有重要的学术意义和应用前景.

**a.** 目前关于太阳能冷热电联供的研究分为以太阳能为主要热源驱动的冷热电联供系统和以太阳能作为辅助能源与其他形式的能源共同驱动冷热电联供系统.在今后的研究工作中,关键问题是解决太阳能的储存以及系统运行的稳定性.

**b.** 太阳能集热循环和发电循环的工质应根据不同的应用范围而选择.对于热驱动式制冷,现阶段冷热电联供系统中仍以吸收式制冷为主,为了满足制冷温区变化,可以选用不同的工质对.

**c.** 冷热电联供系统的运行模式根据用户的具

体需求及系统最佳运行策略而定,系统最佳运行策略受系统运行工况及优化目标的影响比较大.针对系统的耦合问题还缺乏系统性的研究和认知,针对各模块间具体耦合的研究工作是今后研究的重点.

**d.** 由于冷热电联供系统存在多种形式的能量输出,单从某一方面进行分析无法得出全面的评价结果.现有对联供系统的评价指标都是从热力学性能、经济性能和环境友好性能三个方面来进行,因此,得出一套统一的综合评价指标是今后的研究方向.

目前太阳能冷热电联供仍处于起步阶段,相关技术的发展面临巨大的机遇和挑战,成本、系统稳定性、运行经验有限等问题都限制了系统的实际运用,在当前国家节能减排和可持续发展的政策下,开展相关研究具有重要的学术意义和价值.

## 致 谢

感谢深圳市科创委及深圳职业技术学院对本研究的资助!

## 参考文献:

- [1] WU D W, WANG R Z. Combined cooling, heating and power: A review [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, 32: 459–495.
- [2] 岳建华, 李永兵. 国内外冷热电分布式供能系统的应用及展望 [J]. *内蒙古电力技术*, 2008, 26(5): 1–4.  
YUE Jian-hua, LI Yong-bing. Application and its forecast to combined-system of cooling, heating and power in home and foreign [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2008, 26(5): 1–4. (in Chinese)
- [3] WANG Han-dong. Performance evaluation of a small scale modular solar trigeneration system [J]. *International Journal of Photoenergy*, 2014(2014): 1–9.
- [4] 苏亚欣, 费正定, 杨翔翔. 太阳能冷热电联供分布式能源系统的研究 [J]. *能源工程*, 2004(5): 24–27.  
SU Ya-xin, FEI Zheng-ding, YANG Xiang-xiang. Investigation on the distributed energy system for cooling-heating-power combined cycle driven by solar energy [J]. *Energy Engineering*, 2004(5): 24–27. (in Chinese)
- [5] ALSULAIMAN FAHAD A, HAMDULLAHPUR Feridun, DINCER Ibrahim. Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production [J]. *Renewable Energy*, 2012, 48: 161–172.
- [6] PERDICHIZZI A, BARIGOZZI G, FRANCHINI G, et al. Peak shaving strategy through a solar combined cooling

- and power system in remote hot climate areas[J]. *Applied Energy*, 2015, 143: 154–163.
- [7] WANG Man, WANG Jiangfeng, ZHAO Pan, et al. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating and power system driven by solar energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89: 289–297.
- [8] WANG Jiangfeng, DAI Yiping, GAO Lin, et al. A new combined cooling, heating and power system driven by solar energy [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(12): 2780–2788.
- [9] WANG Jiangfeng, ZHAO Pan, NIU Xiaoqiang, et al. Parametric analysis of a new combined cooling, heating and power system with transcritical CO<sub>2</sub> driven by solar energy [J]. *Applied Energy*, 2012, 94: 58–64.
- [10] Francesco Calise, Massimo Dentice d'Accadia, Laura Vanoli. Design and dynamic simulation of a novel solar trigeneration system based on hybrid photovoltaic/thermal collectors (PVT) [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 60: 214–225.
- [11] Annamaria Buonomano, Francesco Calise, Massimo Dentice d'Accadia, et al. A novel solar trigeneration system based on concentrating photovoltaic/thermal collectors. Part 1: Design and simulation model [J]. *Energy*, 2013, 61: 59–71.
- [12] Francesco Calise, Massimo Dentice d'Accadia, Antonio Piacentino. A novel solar trigeneration system integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) desalination: Dynamic simulation and economic assessment [J]. *Energy*, 2014, 67: 129–148.
- [13] 郭栋, 隋军, 金红光. 基于太阳能甲醇分解的冷热电联产系统 [J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(10): 1621–1624.
- GUO Dong, SUI Jun, JIN Hong-guang. Combined cooling, heating and power based on methanol decomposition with solar energy [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(10): 1621–1624. (in Chinese)
- [14] 郭平生, 唐贤健, 李天华. 利用太阳能沼气的分布式冷热电供能系统研究 [J]. *鲁东大学学报: 自然科学版*, 2010, 26(1): 75–78.
- GUO Ping-sheng, TANG Xian-jian, LI Tian-hua. Study on the distributive energy supply system with CCHP using solar energy and biogas [J]. *Ludong University Journal: Natural Science Edition*, 2010, 26(1): 75–78. (in Chinese)
- [15] 贺凤娟, 洪慧, 韩涛, 等. 中温太阳能与化学链燃烧整合的冷热电系统 [J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(9): 1461–1464.
- HE Feng-juan, HONG Hui, HAN Tao, et al. Analysis of a solar-hybrid trigeneration system with chemical looping combustion [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(9): 1461–1464. (in Chinese)
- [16] MENG Xiangyu, YANG Fusheng, BAO Zewei, et al. Theoretical study of a novel solar trigeneration system based on metal hydrides [J]. *Applied Energy*, 2010, 87: 2050–2061.
- [17] Marc Medrano, Albert Castell, Gerard Fontanals, et al. Economics and climate change emissions analysis of a bioclimatic institutional building with trigeneration and solar support [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(17/18): 2227–2235.
- [18] 施晓丽, 舒水明. 基于太阳能、地热能的冷热电三联供热力循环特性研究 [C]//武汉市科学技术学会.“两区”同建与科学发展—武汉市第四届学术年会论文集. 武汉: 武汉大学出版社, 2010: 275–283.
- SHI Xiaoli, SHU Shuiming. Research on the thermodynamic characteristic of a combined cooling, heating and power system based on solar energy and geothermal energy [C]//Wuhan association for science and technology. “Two Areas” with the Construction and Scientific Development—Wuhan Fourth Annual Conference Proceedings. Wuhan: Wuhan University Press, 2010: 275–283. (in Chinese)
- [19] TORA Eman A, El-Halwagi Mahmoud M. Integrated conceptual design of solar-assisted trigeneration systems [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2011, 35(9): 1807–1814.
- [20] BUCK R, FRIEDMANN S. Solar-assisted small solar tower trigeneration systems [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2007, 129: 349–354.
- [21] 白鹤. 基于太阳能利用的分布式冷热电联供系统的优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- BAI He. Optimization analysis of distribute combined cooling heating and power system based on solar energy [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011. (in Chinese)
- [22] 吴一梅. 30MW 太阳能冷热电联供系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- WU Yi-mei. Study on a 30MW CCHP system assisted with solar energy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [23] WANG Jiangjiang, YANG Ying, MAO Tianzhi, et al. Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system [J]. *Applied Energy*, 2015, 146: 38–52.
- [24] 王忠会, 杨强, 刘燕. 利用太阳能实现热、电、冷三联产 [J]. *电力建设*, 2006, 27(5): 45–47.
- WANG Zhonghui, YANG Qiang, LIU Yan. Heat/cooling and electricity to apartment complex by solar energy [J]. *Electric Power Construction*, 2006, 27(5): 45–

- 47.(in Chinese)
- [25] 韩中合,叶依林,刘赞.不同工质对太阳能有机朗肯循环系统性能的影响[J].动力工程学报,2012,32(3):230-234.
- HAN Zhong-he, YE Yi-lin, LIU Yun. Effect of working fluids on performance of solar organic rankine cycles [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(3): 230-234. (in Chinese)
- [26] Masood Ebrahimi, Ali Keshavarz, Arash Jamali. Energy and exergy analyses of a micro-steam CCHP cycle for a residential building [J]. Energy and Buildings, 2012, 45: 202-210.
- [27] 周然,韩吉田,于泽庭.基于太阳能卡琳娜循环的冷热电联供系统热力学分析[J].制冷技术,2013,33(3):13-15,20.
- ZHOU Ran, HAN Ji-tian, YU Ze-ting. Thermodynamic analysis for combined cooling heating and power system based on solar kalina cycle [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2013, 33(3): 13-15, 20. (in Chinese)
- [28] 徐士鸣,袁一.氨水吸收式制冷循环的分析与改进[J].大连理工大学学报,1996,36(4):445-450.
- XU Shiming, YUAN Yi. Analysing and improving of ammonia-water absorption refrigeration cycle [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(4): 445-450. (in Chinese)
- [29] 洪大良. 新型吸收式制冷循环构建理论及其应用研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- HONG Da-liang. Fundamentals and applications for creating novel absorption refrigeration cycles [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [30] 王寒栋,胡连方.氨-硫氰化钠扩散吸收制冷系统实验研究[J].制冷,1999,18(1):9-13.
- WANG Han-dong, HU Lian-fang. Experimental research on ammonia-sodium thiocyanate diffusion-absorption refrigeration system [J]. Refrigeration, 1999, 18(1): 9-13. (in Chinese)
- [31] 陆蕾颖,张华,刘占杰,等.一种扩散吸收式制冷系统的性能实验[J].低温与超导,2007,35(1):79-83.
- LU Leiyin, ZHANG Hua, LIU Zhanjie, et al. Experiment of diffusion-absorption refrigeration [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2007, 35(1): 79-83. (in Chinese)
- [32] WANG Handong. Experimental study on LiNO<sub>3</sub>-NH<sub>3</sub> Diffusion-absorption refrigeration system [J]. Key Engineering Materials, 2011, 474-476: 2335-2340.
- [33] 滕毅,王如竹.固体吸附式制冷技术的概况及进展[J].上海交通大学学报,1998,32(4):109-113.
- TENG Yi, WANG Ruzhu. Progress on adsorption refrigeration technology [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(4): 109-113. (in Chinese)
- [34] 缪宝龙,孙文哲,韩笑生,等.太阳能与烟气余热利用的吸附式制冷[J].制冷,2013,32(2):65-70.
- MIAO Baolong, SUN Wenzhe, HAN Xiaosheng, et al. Solar energy and flue gas heat in the use of adsorption refrigeration [J]. Refrigeration, 2013, 32(2): 65-70. (in Chinese)
- [35] ZHAI H, DAI Yanjun, WU J Y, et al. Energy and exergy analyses on a novel hybrid solar heating, cooling and power generation system for remote areas [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1395-1404.
- [36] 孔祥强,李瑛,王如竹,等.基于吸附制冷的微型冷热电联供系统实验研究[J].工程热物理学报,2006,27(增刊1):5-8.
- KONG Xiang-qiang, LI Ying, WANG Ru-zhu, et al. Experimental investigation of a micro-combined cooling, heating and power system with adsorption chiller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27 (Suppl.1): 5-8. (in Chinese)
- [37] 康书硕,李洪强,蔡博,等.冷热电联供系统中“以热定电”与“以电定热”的分析研究[J].建筑科学,2012,28(增刊2):255-259.
- KANG Shu-shuo, LI Hong-qiang, CAI Bo, et al. Research on the operation strategy “heat-power” and “power-heat” of a combined cooling, heating and power system [J]. Building Science, 2012, 28 (Suppl.2): 255-259. (in Chinese)
- [38] 孟金英,李惟毅,任慧琴,等.微燃机冷热电三联供系统运行策略优化分析[J].化工进展,2015,34(3):638-646.
- MENG Jinying, LI Weiyi, REN Huiqin, et al. Operation strategy optimization analysis of CCHP system based on micro gas turbine [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(3): 638-646. (in Chinese)
- [39] 蒋润花.冷热电联供系统集成机理研究及全工况性能优化[D].广州:华南理工大学,2014.
- JIANG Runhua. The CCHP system integration theory with enhancement on optimization analysis and its off-design performance [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [40] 林世平.分布式能源系统中能源与环境耦合特性及优化集成模型研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- LIN Shiping. Research on coupling characteristics and integrated optimization model of energy and environment Based on DES [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [41] 冯志兵,金红光.冷热电联产系统的评价准则[J].工程热物理学报,2005,26(5):725-728.
- FENG Zhibing, JIN Hongguang. Performance assessment of combined cooling, heating and power [J].

- Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(5): 725-728. (in Chinese)
- [42] 王志伟, 张泰岩, 云曦, 等. 微型燃气轮机冷热电联供系统的评价指标比较[J]. 电力科学与工程, 2006(3): 34-37.
- WANG Zhi-wei, ZHANG Tai-yan, YUN Xi, et al. Comparison of target assessment on micro-turbine CCHP system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2006(3): 34-37. (in Chinese)
- [43] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87.
- JING Youyin, BAI He, ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87. (in Chinese)
- [44] CHUA K J, YANG W M, WONG T Z, et al. Integrating renewable energy technologies to support building tri-generation-A multi-criteria analysis[J]. Renewable Energy, 2012, 41: 358-367.
- [45] 许达, 刘启斌, 隋军, 等. 太阳能与甲醇热化学互补的分布式能源系统研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(9): 1601-1605.
- XU Da, LIU Qi-bin, SUI Jun, et al. Research on distributed energy system with solar-methanol thermochemical hybridization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(9): 1601-1605. (in Chinese)
- [46] WANG Jiang-jiang, ZHANG Chun-Fa, JING You-Yin. Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1247-1259.
- [47] 郭民臣, 安广然, 纪执琴, 等. 冷热电联产与分产的热经济性比较[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(3): 231-233.
- GUO Min-chen, AN Guang-ran, JI Zhi-qin, et al. The comparison of thermal economy between CCHP and generation[J]. Turbine Technology, 2014, 56(3): 231-233. (in Chinese)
- [48] WU Bo, WANG Li. Comparable analysis methodology of CCHP based on distributed energy system[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 88: 863-871.
- [49] MAGO P J, CHAMRA L M. Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations[J]. Energy and Buildings, 2009, 41: 1099-1106.
- [50] 邓建, 吴静怡, 王如竹, 等. 基于热经济学结构理论的微型冷热电联供系统性能评价[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(5): 731-736.
- DENG Jian, WU Jing-yi, WANG Ru-zhu, et al. Performance evaluation of a micro-combined cooling, heating and power system based on structural theory of thermoeconomics[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(5): 731-736. (in Chinese)
- [51] Gholamhossein Abdollahi, Hoseyn Sayyaadi. Application of the multi-objective optimization and risk analysis for the sizing of a residential small-scale CCHP system[J]. Energy and Buildings, 2013, 60: 330-344.

## Review of combined cooling heating and power system driven by solar nergy

DAI Yu-chen<sup>1,2</sup>, CHEN Fei<sup>1</sup>, LI Hong-shun<sup>1</sup>, WANG Han-dong<sup>2</sup>

1. School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518000, China

**Abstract:** As a complex system integrated by multiple subsystems, the combined cooling heating and power (CCHP) system driven by solar energy has disadvantages of unstable system operation, coupling between subsystems, evaluation diversification. The status and the progress of CCHP systems were analyzed from the aspects of types, characteristics and scopes of working fluids, operation modes and strategies, evaluation criterion of the systems. We proposed that the working fluid in each subsystem should be chosen according to the specific application characteristics; the operating mode of the CCHP systems should be determined on the basis of the specific requirements of users and the optimal operation strategy which mainly depends on the working conditions and the optimal objects; a unified and comprehensive evaluation criterion of the CCHP systems should be given after evaluating the thermal properties and the performance of economic and environmental friendliness.

**Keywords:** solar energy; combined cooling heating and power; absorption refrigeration; coupling; evaluation criterion

本文编辑: 苗 变