

适合分布式冷热电联供系统的中小型发电装置

薛晓东¹, 韩巍², 王晓东¹, 隋军²

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100190)

Small and Medium-scale Power Generation Devices Suiting for Distributed Combined Cooling, Heating and Power System

XUE Xiaodong¹, HAN Wei², WANG Xiaodong¹, SUI Jun²

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China)

摘要: 分布式冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统是一种小型、临近用户的新型供能方式, 可避免能量长距离传输过程损失, 同时具有灵活、高效、环保特点, 成为大规模、集中式供能方式的重要补充。中小型发电装置是分布式冷热电联供系统的核心, 制冷和制热也都围绕发电装置余热展开。对适合分布式冷热电联供系统的 2 类中小型发电装置的基本工作原理、热力性能和相关研究进展进行综述。一类是以化石燃料为能源输入的中小型发电装置, 包括微型燃气轮机、燃气内燃机、小型燃气轮机和燃料电池; 另一类是以发电装置余热或太阳能集热等其他热源为能源输入的中小型发电装置, 包括有机朗肯循环、正逆耦合循环、热声发电机等。最后, 对 2 类中小型发电装置的优缺点进行对比分析, 为分布式供能系统的发电装置选型、系统方案设计等提供参考。

关键词: 分布式供能系统; 化石燃料; 太阳能集热; 冷热电联供(CCHP); 中小型发电装置

ABSTRACT: Combined cooling, heating and power (CCHP) system is a new type of distributed energy supply technology, which is small scale and close to users. It can avoid the energy loss during long-distance energy transmission process, and has the characteristics of flexibility, high efficiency and environmental protection. It is an important supplement to large-scale and centralized energy supply. Small and medium-scale power generation devices are the core of CCHP system, and both refrigeration

and heating are carried out around the surplus heat of power generation devices. The basic working principle, thermal performance and related research progress of two types of small and medium-scale power generation devices for CCHP system were reviewed. One type is those using fossil fuels as energy input, including micro-turbines, internal combustion engines, small gas turbines and fuel cells. The other type is those using surplus heat from power generation devices or other heat sources such as concentrated solar heat, including organic Rankine cycles (ORC), power/cooling cogeneration cycles and thermoacoustic generators. Finally, the advantages and disadvantages of the two types of small and medium-scale power generation devices were compared and analyzed, which provided a reference for the selection of small and medium-scale power generation devices and system design of CCHP system.

KEY WORDS: distributed energy supply system; fossil fuels; concentrated solar heat; combined cooling, heating and power (CCHP); small and medium-scale power generation devices

0 引言

能源行业与社会在向低碳转型的过程中, 面临着严峻的挑战。根据 2019 年《BP 世界能源统计年鉴》统计数据, 2018 年全球能源需求增长了 2.9%, 碳排放增长了 2.0%, 自 2011 年以来增幅最大^[1]。根据能源行业现状, 世界各国纷纷提倡大力发展高效、环保、可靠的新能源技术, 缓解能源危机和全球变暖带来的巨大压力, 因此分布

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905101)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFB0905101).

式供能系统引起了国内外学者的广泛关注^[2-10]。分布式供能系统是一种中小型装机容量的能源转换利用系统,临近能源用户布置,生产的能量以供给附近用户为主,解决了常规集中式供能方式中能量传输损失大的难题。

目前,国内外分布式供能系统多种多样,按照能源输入的形式,可分为三大类:一是以化石燃料为能源输入的分布式供能系统,如以微型燃气轮机、燃气内燃机、小型燃气轮机和燃料电池(fuel cell, FC)为核心的冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统;二是以可再生能源为能源输入的分布式供能系统,如分布式光伏、分布式风电等;三是多种能源互补的分布式供能系统,如化石燃料与可再生能源互补的分布式供能系统和多种可再生能源互补利用的分布式供能系统。其中,以化石燃料为能源输入的分布式冷热电联供系统是技术最成熟、应用潜力最大的分布式供能系统。这类供能系统以中小型发电装置为核心,将天然气等化石燃料高效、清洁地转换为功和各种温度的发电装置余热,再通过吸收式制冷、换热装置生产冷、热产品,与电一起供给用户。

本文对适用于分布式冷热电联供系统的2类中小型发电装置的工作原理、热力性能和研究进展进行简要介绍,一类是以天然气等化石燃料为能源输入的中小型发电装置,另一类是以发电装置余热或太阳能集热等其他热源为能源输入的中小型发电装置。通过对2类中小型发电装置的优缺点进行对比分析,为分布式供能系统的发电装置选型、系统方案设计等提供参考。

1 以化石燃料为能源输入的中小型发电装置

1.1 微型燃气轮机发电机组

微型燃气轮机源于分布式发电,是一类小型热力发电机,其单机功率范围为30~300 kW^[11],基本技术特征是采用径流式叶轮机(向心式透平和离心式压气机)以及回热循环。微型燃气轮机分布式冷热电联供系统具有极高的能源利用效率,经济效益明显^[12]。

微型燃气轮机示意图如图1所示,主要包括向心式透平、燃烧室、回热器、离心式压气机以及发电机,燃烧室中采用天然气。图2为微型燃气轮机回热 $T-s$ 图。

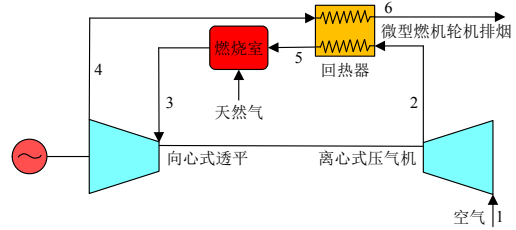


图1 微型燃气轮机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-turbine

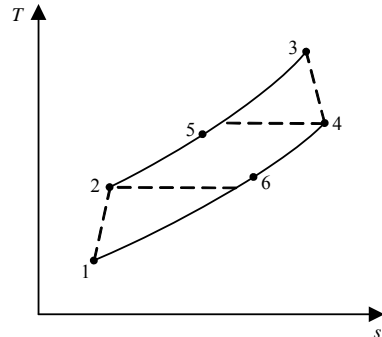


图2 微型燃气轮机回热 $T-s$ 图

Fig. 2 $T-s$ diagram of micro-turbine regeneration

从状态点1开始,空气经过离心式压气机被非等熵压缩(1→2过程)后,流经回热器吸收微型燃气轮机排出的热量使其升温(2→5过程),然后到达燃烧室与天然气混合,燃料在空气的助燃下进行燃烧,将其化学能转换为热能(5→3过程),并且形成高温燃气,高温燃气带动向心式透平进行非等熵膨胀做功(3→4过程),带动发电机发电,微型燃气轮机排烟到达回热器与压气机出来的空气换热(4→6过程)后排出,完成实际布雷顿循环。在实际工作过程中,离心式压气机的压缩过程和向心式透平的膨胀过程都是典型的非等熵过程,由于不可逆性而导致部分能量损失。压缩机出口高压空气的熵值(s_2)要高于压缩机入口空气的熵值(s_1),同理,透平出口烟气的熵值(s_4)高于透平入口烟气的熵值(s_3)。除了压缩和膨胀过程,换热过程也存在不可逆损失,主要表现在回热器的高温烟气入口温度(t_4)高于回热器空气出口温度(t_5),回热器的烟气出口温度(t_6)高于回热器空气入口温度(t_2)。

微型燃气轮机的透平不采用气膜冷却技术，受到透平叶片材料耐热性能的限制，透平入口温度在 900 °C 左右，远低于小型和大型燃气轮机，虽然采用了回热循环形式，但是发电效率仍然不高(约 30%左右)，排烟温度较低，约为 300 °C。较低温度的排烟不利于排烟余热的高效利用，仅能驱动单效吸收式制冷机组(性能系数为 0.7)，低温烟气排放的余热比例偏高。因此，微型燃气轮机用于分布式冷热电联供系统时存在一次能源利用效率偏低的问题，特别需要关注低温余热的深度利用。目前，国内还没有成熟的微型燃气轮机产品，市场上的产品都是进口产品，发电机组投资很高。

与常规的小型燃气轮机相比，微型燃气轮机具有变工况适应性强的优点，主要原因为微型燃气轮机是变转速运行的，当发电功率降低时，微型燃气轮机转速也降低，减少了微型燃气轮机中的工质流量，透平入口温度基本保持不变，变工况对微型燃气轮机的影响远小于小型燃气轮机。

1.2 小型燃气轮机发电机组

小型燃气轮机是以连续流动的气体为工质带动叶轮高速旋转，将燃料的能量转换为电的内燃式热力发电装置，额定发电功率一般在 20 MW 以下，主要由压气机、燃烧室、透平、发电机等组成。与微型燃气轮机不同，小型燃气轮机的压气机和透平均为轴流式。压气机从外界大气环境吸入空气，并经过轴流式压气机逐级压缩增压；压缩空气被送到燃烧室与喷入的天然气混合燃烧，生成高温高压烟气，然后再进入透平膨胀做功，同时透平带动压气机和发电机一起高速旋转，实现了燃料化学能部分转化为电能的目的。小型燃气轮机的 $T-s$ 图与微型燃气轮机相似(图 2)，不同的是其取消了微型燃气轮机的回热过程。

小型燃气轮机常用于分布式冷热电联供系统，可以采用气膜冷却技术，透平入口温度比微型燃气轮机有大幅提高，简单布雷顿循环的发电效率达到 33%左右，如果采用回热循环，发电效率能够达到 38%以上；小型燃气轮机的发电余热温度较高，一般在 500~600 °C，有利于发电余热的高效利用。温度较高的排烟余热可以驱动双效

吸收式制冷机组，制冷机组性能系数可达到 1.3 以上，与微型燃气轮机相比，余热的利用效率大幅提高。小型燃气轮机可以采用低氮燃烧技术，氮氧化物的排放量远小于往复式燃气内燃机，氮氧化物含量仅百万分之几十。小型燃气轮机噪声以高频为主，更容易降低噪声污染。

小型燃气轮机发电机组变工况调控手段单一，仅有改变燃料供给方式这一种手段，随着发电功率的降低，发电机组的发电效率和排烟温度明显降低。主要原因是小型燃气轮机是定转速运行的，当发电机组功率降低时，减少了燃料量的供给，使得透平入口温度降低，导致发电效率和排烟温度明显降低，天然气的利用效率也随之降低。因此，小型燃气轮机用于分布式冷热电联供系统时，变工况性能比微型燃气轮机差一些，以小型燃气轮机为核心的分布式冷热电联供系统特别需要关注系统在变工况下的调控方法。与微型燃气轮机相似，目前我国缺少成熟的小型燃气轮机产品，以进口产品为主，因此也存在发电机组投资高的问题。

1.3 往复式燃气内燃发电机组

往复式燃气内燃发电机组是以天然气为燃料，天然气与空气混合，在其气缸内燃烧，燃烧产生的高温高压燃气膨胀，推动活塞做功，再通过曲轴连杆机构将机械功输出给发电机，转换成电能的热力发电装置。其主要组成部分包括：曲柄连杆机构、机体和汽缸盖、配气机构、供气系统、润滑系统、冷却系统、发电机等。

适用于分布式供能的往复式燃气内燃机一般为四冲程发电机组，它的工作循环由进气、压缩、做功和排气 4 个行程组成。从进气行程开始，经过过滤的空气和天然气预混，进入气缸；压缩行程中，气缸内气体被压缩，压力和温度升高；进入做功行程后，在压缩上止点附近点火，使混合气体燃烧，然后气缸内的高温高压燃气推动活塞做功；最后进入排气行程，做功后的燃气排出气缸。

往复式燃气内燃机是最成熟的燃气发电装置，用于分布式供能系统时具有以下优势：1) 发电效率高，带有涡轮增压的燃气内燃机的发电

效率在40%左右；2) 功率范围广，适应性能好，从几十千瓦到几千千瓦的发电功率都有现成产品供选择；3) 在操作方面，启动快，一般几秒钟就可启动，并能在短时间内达到全负荷运转。

往复式活塞式燃气内燃机发电余热种类多，主要分为2部分：一部分为高温排烟中的高温余热(400~600℃)，大约占总余热的一半；另一部分为缸套水中的低温余热(70~90℃)。分布式供能系统集成时应特别重视这2部分余热的互补利用，尤其是低温余热的深度利用。然而，往复式活塞式燃气内燃机也有以下不足：其燃烧过程属于爆燃方式，火焰温度高，因此燃烧过程产生的污染物(NO_x)较多(质量比为 $250 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$)，造成的环境污染不可忽略，需加装污染物处理装置；另外，其噪声较大，低频噪声比例高，给减噪带来困难。

图3为典型往复式活塞式燃气内燃机分布式冷热电联供系统示意图。天然气在内燃机中燃烧，高温高压的燃气带动发电机旋转发电；从内燃机出来的部分烟气驱动余热锅炉/溴化锂机组，进行供热/供冷；此外，根据用户供热需求，部分烟气与换热器进行换热，从而为用户提供生活热水，实现冷热电三联供。

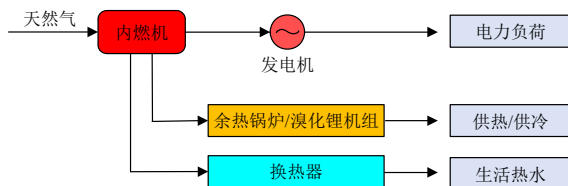


图3 典型往复式活塞式燃气内燃机分布式冷热电联供系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CCHP system for a typical reciprocating piston internal combustion engine

马琴等^[13]分别研究了小型燃气轮机分布式供能系统与燃气内燃机分布式供能系统，分别如图4、5所示。小型燃气轮机分布式供能系统主要由燃气轮机、双压余热锅炉、汽轮机、燃气热水锅炉和发电机组成，形成燃气-蒸汽联合循环发电，汽轮机或余热锅炉抽汽用于供热或驱动吸收式机组制冷。燃气内燃机分布式供能系统主要由燃气内燃机、热水型余热锅炉、换热器、燃气热水锅炉和发电机组成。以能源利用效率、节能减

排率和投资回收期为评价指标，对这2种系统进行经济性分析，结果发现：1) 燃气内燃机在用户负荷热电比小的场合更加适用，作为冷热电联供系统的动力机更具优势，并且具有较高的项目抗风险能力，此外，燃气内燃机系统的节能率和减排率较高，满足能源利用效率和节能减排的要求；2) 当天然气价格低于2.5元/ m^3 时，燃气轮机系统的投资回收期明显短于燃气内燃机系统，具有较好的经济性，而当天然气价格超过2.5元/ m^3 时，燃气内燃机系统表现出较好的经济性^[4]。

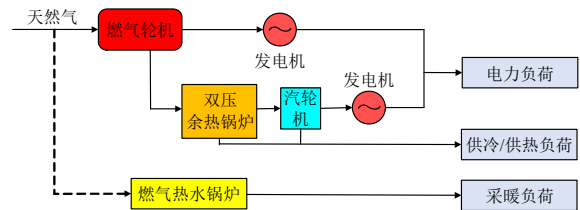


图4 小型燃气轮机分布式供能系统

Fig. 4 Distributed energy supply system for small gas turbine

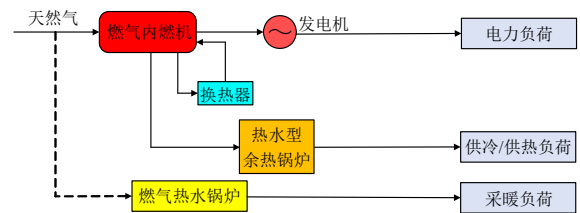


图5 燃气内燃机分布式供能系统

Fig. 5 Distributed energy supply system for internal combustion engine

1.4 燃料电池

燃料电池是通过电化学反应直接将燃料的化学能转化为电能的发电装置^[14-15]，是一种可用于分布式冷热电联供的中小型发电技术。按照电解质类型，燃料电池可分为固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cells, SOFC)、熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cells, MCFC)、质子交换膜燃料电池(polymer electrolyte fuel cells, PEFC)、磷酸燃料电池(phosphoric acid fuel cells, PAEC)和碱性燃料电池(alkaline fuel cells, AFC)五大类^[16]，参照国旭涛等^[17]对分布式能源技术的研究结果，不同类燃料电池的优缺点如表1所示。

其中，SOFC和MCFC的工作温度高，对纯发电而言没有优势，但用于分布式冷热电联供系统时，优势明显，具有大幅提高能源利用效率的

潜力。目前，高温燃料电池技术仍不成熟，发电规模较小，设备投资较高，还没有实际应用的分布式冷热电联供系统案例。

表 1 不同类燃料电池的优缺点

Tab. 1 Advantages and disadvantages of different types of fuel cells

| 燃料电池 | 优点 | 缺点 |
|------|-----------------------|---------------------------------|
| SOFC | 燃料适用范围广， 无腐蚀、无污染 | 工作温度高 |
| MCFC | 可用空气作氧化剂 | 工作温度高 |
| PEFC | 工作温度低， 启动时间短 | 对 CO 敏感， 反应物需要加湿 |
| PAEC | 对 CO ₂ 不敏感 | 工作温度较高， 对 CO 敏感 |
| AFC | 启动快， 成本低 | 对 CO ₂ 敏感， 氧化剂为纯氧 |

基于燃料电池的分布式冷热电联供系统现仍处于研发阶段，主要还是以理论分析为主。姚利森^[18]对 SOFC 在分布式能源中的应用模式进行了分析，基于 SOFC 的冷热电多联供系统如图 6 所示，该系统在发电的基础上增加了烟气换热器和吸收式制冷系统，用于供热、供冷，具有较高的综合能源利用效率，适用于写字楼、办公楼等商用场所。

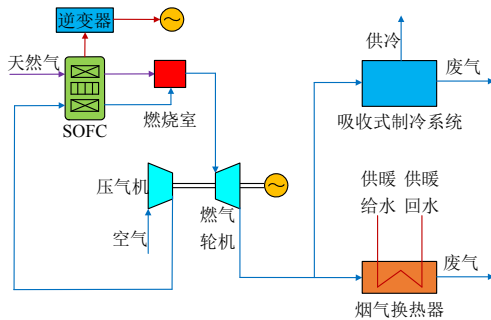


图 6 基于 SOFC 的冷热电多联供系统

Fig. 6 CCHP system based on SOFC

2 以发电余热或其他热源为能源输入的中小型发电装置

针对用户冷热需求较小或供冷、供暖期较短的应用场合，将动力余热高效转化为电能，是提高分布式供能系统能源利用效率的有效途径。传统以水为工质的朗肯循环发电适合高温大规模的工业余热，而一般的分布式供能系统发电机组的装机容量小，发电余热虽然温度处于中温水平，

但适合高温小规模余热资源的高效发电技术仍是技术空白，市场上还没有适合中高温小规模余热的发电技术。

2.1 热声发电技术

热声发电技术是一种全新的热功转换与发电技术，主要由热声发动机和直线发电机组成，先由热声发动机将高温发电余热转换为声压力波形式的机械能，然后由直线发电机将机械能换为电能^[19-20]。由于直线发电机技术较为成熟，因此热声发电技术很大程度上取决于热声发动机技术的发展。热声发动机是利用热声效应将热能转化为声能的装置，分为驻波热声发动机和行波热声发动机，后者基于可逆循环，理论上可达卡诺效率，因此被更加广泛地研究^[21]。

Luo 等^[22]研制了一台百瓦级行波热声发电系统，结构如图 7 所示。行波热声发电技术具有可靠性高、制造成本低、效率高和结构简单等优点，可将工业余热进行回收利用，是一种发展潜力较大的新型能源转换技术^[23]。在此基础上，该团队成功研制出一种声学共振型气体双作用热声发动机/发电机实验原理样机，该样机最大声功输出达到 10 kW，发电功率达到 7.2 kW，最高发电效率达到 20%，是迄今为止国际上研制成功的发电功率最大的热声发电系统(此前国际上热声发电系统最大发电功率仅为 1 kW)，也是国际上首台基于此新型热声发电技术研制的原理样机^[24]，如图 8 所示。

新型声学共振型气体双作用热声发电系统的突出优点是：1)潜在热功转换效率和功率密度高，

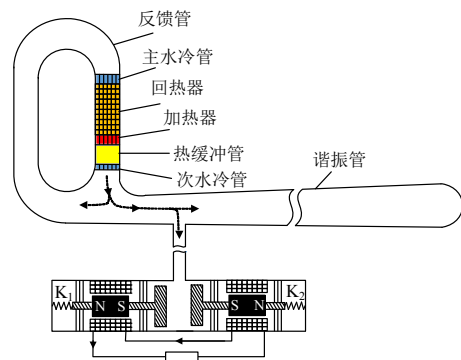


图 7 百瓦级行波热声发电系统

Fig. 7 100 W-class traveling-wave thermoacoustic electric generator



图 8 声学共振型气体双作用热声发电系统

Fig. 8 Acoustic resonance type gas double-acting thermoacoustic power generation system

采用多个高效行波热声发动机单元协同工作；
2) 超低振动和静音特性，新型热声发动机无机械运动部件，直线电机采用可调相超低振动对置直线发电机；3) 系统尺寸小、紧凑性高，采用高效行波传输，行波声导管、谐振管尺寸小。

2.2 正逆耦合循环

典型的分布式冷热电联供系统中，发电机组的高温排烟直接被烟气型双效溴化锂吸收式制冷机回收利用。分析表明，烟气型双效溴化锂吸收式制冷机的高压发生器需要的热量温度在 120 °C 左右，而烟气温度却在 400~600 °C，从能的梯级利用原理出发，能量释放侧和接收侧存在巨大温差，高温烟气余热的利用并不合理，具有大幅提高发电余热利用效率的潜力。正逆耦合循环将发电机组余热分为 200 °C 以上的高温余热和 200 °C 以下的低温余热 2 部分，其中：高温余热被动力子循环利用，用于发电；动力子循环排放的低温热量和发电机组的低温余热一起被制冷子循环利用，制取冷能，实现了发电余热的梯级利用^[25]。正逆耦合循环原理如图 9 所示，实现了发电余热的电冷联产。

正逆耦合循环的动力子循环主要将高温余热转换成电能，如混合工质朗肯循环^[26]等；制冷子循环逆循环是吸收式制冷循环，回收动力子循环排热和低温余热，制取冷能，如 H₂O/LiBr 吸收式制冷循环和 NH₃/H₂O 吸收式制冷循环等。

Wang 等^[27]研究了一个利用燃气轮机余热的

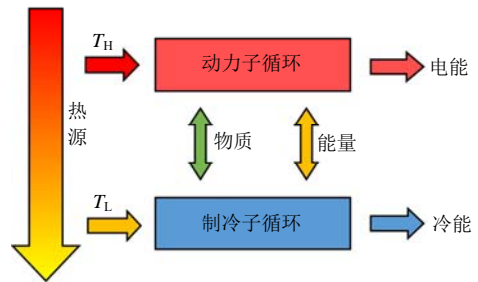


图 9 正逆耦合循环原理图

Fig. 9 Schematic diagram of positive and negative coupling cycle

正逆耦合循环系统，动力子循环以氨/水混合物为工质，制冷子循环为溴化锂吸收式制冷机，该循环系统回收小型燃气轮机高温排烟，实现了电和冷的联产。集成 NH₃/H₂O 朗肯循环的冷热电联供系统流程图如图 10 所示。研究表明：正逆耦合循环对燃气轮机排烟余热的利用更加高效，与常规的双效溴化锂制冷机相比，余热利用过程的不可逆损失降低了 45%，分布式供能系统的节能率提高了 5%，这主要得益于烟气余热在正逆耦合循环中的梯级利用。

目前，正逆耦合循环仍处于研发阶段，氨水

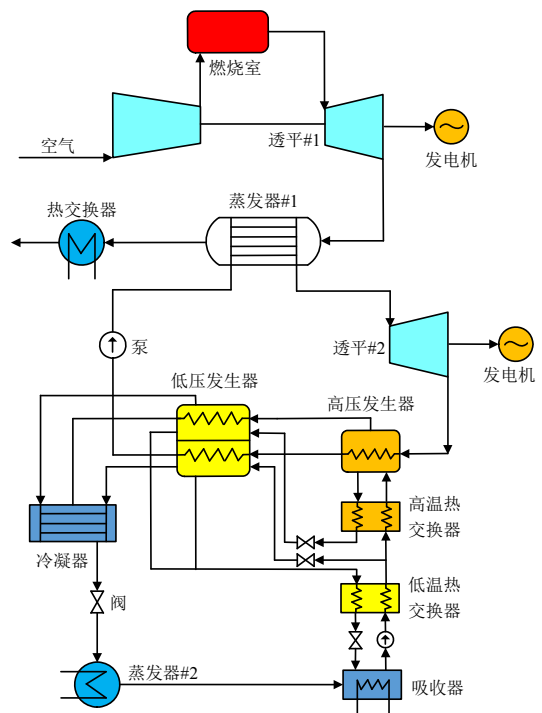


图 10 集成 NH₃/H₂O 朗肯循环的冷热电联供系统流程图

Fig. 10 Flow chart of a CCHP system integrated with NH₃/H₂O Rankine cycle

混合工质发电机是其技术瓶颈，主要原因是氨水混合工质透平工作压力高，装机容量小，导致发电机组转速高，给轴系设计和密封带来挑战。由于氨水溶液对铜管的腐蚀性较大，原来吸收式机组的换热器需要将铜管更换为不锈钢管，氨水溶液与氯化锂水溶液的高效换热也需要进一步实验验证。

2.3 有机朗肯循环

有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)可有效利用工业余热、太阳能等中低品位热源的热量，从而将热能转化为电能，具有投资小、效率高和环境友好的特点^[28-29]。典型有机朗肯循环如图 11 所示，主要包括蒸发器、冷凝器、工质泵和透平，通过定压放热、绝热压缩、定压吸热和绝热膨胀 4 个主要流程，将热能转化成电能^[28]。与传统的朗肯循环相比，有机朗肯循环采用有机工质，有机工质比水具有更低的沸点和更高的饱和蒸汽压力，提高了 ORC 的循环效率^[30]。

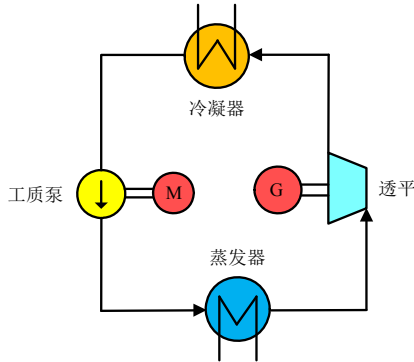


图 11 有机朗肯循环示意图

Fig. 11 Schematic diagram of ORC

ORC 可将工业余热进行有效利用，在分布式能源技术领域具有非常广阔的应用前景，与冷热电联供系统相结合，构成典型的分布式能源系统。液化空气储能(liquid air energy storage, LAES)是一种大规模储能技术^[31-32]，可在常规 LAES 系统中加入 ORC 来充分利用压缩热，耦合 ORC 的 LAES 系统如图 12 所示，主要包括空气压缩机、加热器、换热器、冷箱、储热器、储冷器、低温膨胀机、液态空气储罐、低温泵、气化换热器、膨胀机、热交换器、冷凝器和循环泵。整个系统包括储能过程、释能过程和 ORC 过程，其中：储能过程将电能转化成液态空气的冷能进行储

存；释能过程将液态空气的冷能转化为电能；ORC 过程主要将储能时的压缩热进行合理利用，带动发电机进行发电，从而提升该分布式能源系统的整体循环效率，实现冷热电三联供。

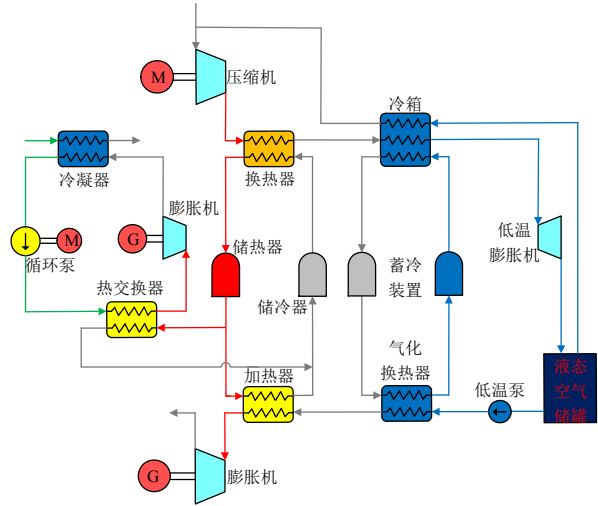


图 12 耦合 ORC 的 LAES 系统

Fig. 12 LAES system coupled with ORC

3 中小型发电装置优缺点分析

目前，适合分布式冷热电联供系统的中小型发电装置多种多样，各有其优缺点。综合分析以上 7 种典型中小型发电装置，其优缺点对比如表 2 所示。

表 2 中小型发电装置的优缺点对比

Tab. 2 Comparison of advantages and disadvantages of small and medium-scale power generation devices

| 中小型发电装置 | 优点 | 缺点 |
|----------------|-------------------------|------------------|
| 微型燃气轮机 | 低噪声、低振动， 变工况适应性强 | 投资高 |
| 小型燃气轮机 | 余热利用效率较高， 易降低噪声污染 | 投资高 |
| 往复活塞式 燃气内燃机 | 发电效率高， 功率范围广，启动快 | 噪声较大， 污染物排放较多 |
| 燃料电池 | 发电效率高， 可靠性高，噪声低 | 工作温度高 |
| 热声发电技术 | 可靠性高，制造成本低， 效率高，结构简单 | 热声转换效率低， 体积较大 |
| 正逆耦合循环 | 实现能的梯级利用， 能量利用率高 | 工作压力高， 装机容量小 |
| 有机朗肯循环 | 低温余热回收效率高， 设备简单，凝固点低 | 投资高， 回收期较长 |

4 结论

分布式供能系统面向能源用户,减少了能量在输配过程中的损失,可直接为用户提供冷热电,是能源行业发展的一个重要方向。中小型发电装置是分布式供能系统的核心,为此,分别对以化石燃料为能源输入和以发电装置余热或太阳能集热等其他热源为能源输入的两大类适合分布式冷热电联供系统的中小型发电装置进行了分析,并对7种典型中小型发电装置优缺点进行了对比,可为分布式供能系统的发电装置选型、系统方案设计等提供参考。

参考文献

- [1] 程薇. BP公司在2019年世界能源统计年鉴中指出世界正走在一条不可持续的道路[J]. 石油炼制与化工, 2019, 50(9): 96.
- [2] Viral R, Khatod D K. Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: a review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 5146-5165.
- [3] Blarke M B. Towards an intermittency-friendly energy system: comparing electric boilers and heat pumps in distributed cogeneration[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 349-365.
- [4] 谢英柏, 薛晓东. 液化空气储能与发电一体化系统的性能分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 333-339.
- [5] 余莉. 浅析楼宇式天然气分布式供能系统的开发与设计[J]. 华电技术, 2018, 40(5): 73-74.
- [6] 张海燕, 姚峰, 常雪剑, 等. 新能源智能微电网规划[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(4): 70-73.
- [7] 程启明, 程尹曼, 黄山, 等. 微电网经济优化运行综述[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 1-9.
- [8] 姚帅, 顾伟, 陆帅, 等. 一种考虑建筑物蓄热特性的分布式冷热电联供系统运行优化方法[J]. 分布式能源, 2018, 3(4): 16-23.
- [9] 国旭涛, 韩高岩, 吕洪坤. 冷热电三联供系统建模方法综述[J]. 浙江电力, 2020, 39(4): 83-93.
- [10] 孙黎霞, 鞠平, 白景涛, 等. 计及蓄电池寿命的冷热电联供型微电网多目标经济优化运行[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 64-72.
- [11] 陈强, 韩巍, 张娜, 等. 新型微型燃气轮机分布式冷热电联供系统热力性能分析[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(7): 1253-1259.
- [12] 谢娜, 韩高岩, 吕洪坤, 等. 微型燃气轮机冷热电三联供系统建模及热力学分析[J]. 浙江电力, 2020, 39(4): 94-101.
- [13] 马琴, 郭鹏, 张梅有, 等. 燃气内燃机与燃气轮机分布式供能系统的对比分析[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 270-274.
- [14] 贾洋洋, 仲海涛, 张智晟. 含储氢装置的分布式能源系统的优化经济调度[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 38-44.
- [15] 曾洪瑜, 史翊翔, 蔡宁生. 燃料电池分布式供能技术发展现状与展望[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 165-170.
- [16] Al Moussawi H, Fardoun F, Louahlia H. Selection based on differences between cogeneration and trigeneration in various prime mover technologies [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 491-511.
- [17] 国旭涛, 蔡洁聪, 韩高岩, 等. 分布式能源技术与发展现状[J]. 分布式能源, 2019, 4(1): 52-59.
- [18] 姚利森. SOFC在天然气分布式应用中的经济性分析[J]. 上海节能, 2019(11): 947-952.
- [19] 李潜葛, 罗恩博, 吴张华, 等. 太阳能热声发电技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3242-3250.
- [20] 王祎. 利用低品位热源驱动的环路热声发电系统性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [21] 毕天骄, 张丽敏, 吴张华, 等. 四级环路行波热声发电机的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(5): 982-986.
- [22] Luo E C, Wu Z H, Dai W, et al. A 100 W-class travelingwave thermoacoustic electricity generator [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(9): 1453-1456.
- [23] 王凯. 行波热声发电系统热-声-电耦合及转换机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [24] Wu Z, Yu G, Zhang L, et al. Development of a 3 kW double-acting thermoacoustic stirling electric generator [J]. Applied Energy, 2014, 136: 866-872.
- [25] 陈宜. 中低温余热驱动的正逆耦合循环系统集成研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2017.
- [26] 舒丹, 孙恒. 混合工质回热朗肯循环回收天然气冷量的模拟[J]. 化学工程, 2011(6): 8-10.
- [27] Wang Z, Han W, Zhang N, et al. Proposal and assessment of a new CCHP system integrating gas turbine and heat-driven cooling/power cogeneration[J]. Energy Conversion & Management, 2017, 144: 1-9.
- [28] 薛晓东. 液化空气储能系统运行特性分析与参数匹配优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

- [29] 李子申, 李惟毅, 徐博睿, 等. 混合工质内置热泵有机朗肯循环冷热电联供系统性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4972-4980.
- [30] 王志奇. 有机朗肯循环低温烟气余热发电系统实验研究及动态特性仿真[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [31] She X, Peng X, Nie B, et al. Enhancement of round trip efficiency of liquid air energy storage through [J]. Applied Energy, 2017, 206: 1632-1642.
- [32] Xie Y B, Xue X D. Thermodynamic analysis on an integrated liquefied air energy storage and electricity generation system[J]. Energies, 2018, 11(10): 2540.

收稿日期: 2020-05-06。

作者简介:



薛晓东

薛晓东(1993), 男, 博士研究生, 主要从事分布式供能系统和可再生能源等方面的研究工作, xdxue88@163.com;



韩巍

韩巍(1976), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为分布式能源系统与关键技术, hanwei@iet.cn;



王晓东

王晓东(1973), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微纳尺度流动与传热, wangxd99@gmail.com;



隋军

隋军(1973), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为多能源互补的分布式能源系统, suijun@iet.cn。

(责任编辑 尚彩娟)