

冷热电联供系统的研究热点概述*

李胜 吴静怡 王如竹

(上海交通大学)

摘要 就冷热电联供系统研究中的设备选型、系统能量管理、评价准则和分析方法以及新技术在冷热电联供系统中的应用这4个方面的研究热点进行概述。设备选型和系统能量管理是影响联供系统经济性和可行性的决定因素,是冷热电联供系统研究的重点问题;各种评价准则和分析方法具有各自不同的适用场合,发展出一套统一的评价分析体系是今后的研究趋势;随着各种新技术在冷热电联供系统中的应用,诞生了许多新型的冷热电联供系统,这将是今后冷热电联供系统研究的方向。

关键词 冷热电联供 设备选型 能量管理 评价准则

Summary of research hotspots on the combined cooling, heating and power (CCHP) system

Li Sheng Wu Jingyi Wang Ruzhu

(Shanghai Jiao Tong University)

ABSTRACT Presents a summary of research hotspots on the combined cooling, heating and power (CCHP) system, including the equipment selection, the system energy management, the evaluation criterion and analysis method as well as the new technologies applied in CCHP system. The equipment selection and system energy management are the main determinants on the economy and feasibility of the CCHP, which are key issues on the CCHP research. Different evaluation criteria and analysis methods are applicable for different situations, thus it is a future research trend to develop a unified evaluation and analysis system. With the application of various new technologies, many novel CCHP systems have being developed, which will be the future research direction of CCHP system.

KEY WORDS CCHP; equipment selection; energy management; evaluation criterion

随着能源危机的日益严重以及世界各国对环保问题的日益关注,“节能和环保”已成为当今世界能源技术发展的主题。作为一种有效的节能技术,同时也是世界第二代能源技术发展的重要方向之一,冷热电联供(CCHP)在世界范围内受到了广泛的重视^[1]。

冷热电联供(CCHP)由热电联供(CHP)衍生而来,后者已有100多年的历史,技术发展已相当成熟^[2]。热电联供系统是将发电循环的余热直接回收用于供热以提高能源的使用效率。热电联供在20世纪初已经进入实际应用阶段,当时世界上

主要的发电手段是燃煤锅炉驱动蒸汽透平发电装置,当时的美国已经有58%的电厂将透平乏汽的热量回收利用。由于机组的热电负荷相互牵制,特别在夏季,机组负荷处于高峰而热负荷却偏低,这给机组的运行调节带来困难,同时也降低了系统的经济性。为了解决此问题,研究者在热电联供的基础上增加余热制冷系统,发展冷热电联供。冷热电联供系统同时提供冷、热、电3种能量,将能源利用效率从普通热电效率的40%提高到70%~90%,同时具有节能减排、能量梯级利用、缓解电网压力等多方面优点^[3-4]。

*教育部科学技术研究重大项目(306004)。

收稿日期:2008-04-16

通讯作者:吴静怡,Email:jywu@sjtu.edu.cn

目前,世界范围内有关冷热电联供的研究与应用,美国、日本和欧洲等都起步较早且发展非常迅速,而我国的冷热电联供的研究才刚刚起步^[5]。国内外有关冷热电联供的研究工作,主要集中在设备选型、系统能量管理、评价和分析方法以及新技术在冷热电联供中的应用这 4 个方面。

1 冷热电联供系统设备选型研究

对于不同的应用场合,冷热电联供系统的部件选择和各部件的配置方式有很大不同,主要取决于具体场合的能量需求结构。然而,无论哪种系统配置模式,都包括发电、制冷及供热等主要装置,如图 1 所示。在冷热电联供系统的各组成部件中,发电机组和制冷设备占系统初投资的份额最大,是决定系统经济性的主要因素。不同的发电设备将决定联供系统的发电效率、余热品位与系统的连接方式。不同的制冷设备将决定联供系统的热能消耗与冷量输出规律。在对冷热电联供系统进行配置时,如何根据用户的冷、热、电需求选择合适的发电与制冷设备,对于满足联供系统的经济性和环境保护的要求非常重要,也是决定联供系统成功与否的关键。设备选型不佳将直接导致联供系统经济性下降,甚至出现经济性为负的情况。比较典型的例子有,上海黄浦区中心医院冷热电联供系统^[3,6-7],由于对实际应用场合的负荷情况没有很好地评估,致使设备选型容量过大,

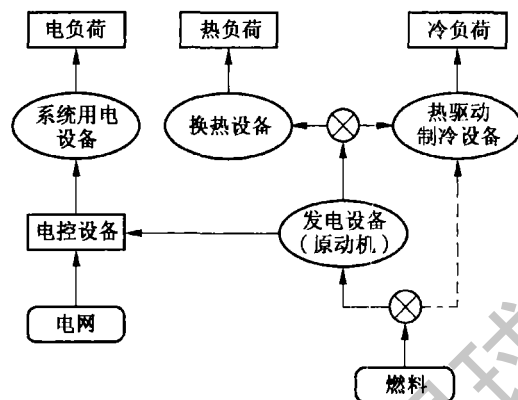


图 1 典型冷热电联供系统配置示意图

系统长期处于 40% 负荷的运行状态,最高用电负荷也仅为额定发电量的 53%,系统运行费用巨大,现在已经处于停用整改状态。因此,设备选型对于系统的经济性和可行性至关重要,是冷热电联供研究的一个热点。

1.1 发电设备(原动机)的选择

应用于冷热电联供的发电设备(原动机)主要有蒸汽透平、燃气轮机、内燃机、斯特林机(燃气轮机、外燃机)和燃料电池等。D. W. Wu 等^[2]对有关以上几种原动机的大量文献进行了综述性研究,并概括叙述了各种原动机的特点。表 1 在所述及文献的基础上对以上几种原动机在联供系统中的适用范围、优缺点和技术的发展趋势等进行了归纳总结。

表 1 各种发电设备(原动机)的特点

适用范围	优点	缺点	发展趋势	备注
蒸汽透平 大型集中式电站,工业用热电联供	理论上可采用任何燃料;技术成熟,使用寿命长,可靠性强	发电效率低,启动速度慢,部分负荷性能差	小型的“即插即用”型蒸汽透平	包括背压式和抽凝式 2 种
燃气轮机 大型热电联供系统(1 MW 以上)	可靠性高,功率范围大,可与蒸汽透平组成联合循环发电,具有有效的 NO _x 排放控制技术	需要优质燃料,机组价格昂贵,在高海拔或环境温度较高时,性能会大幅下降	微型燃气轮机(已部分商业化)	
内燃机 1 MW 以下的发电场合	启动速度快,部分负荷性能好,技术成熟,具有多种型号可供选择,初投资低	振动严重,噪声大,运动部件多,维护周期短,维修费用高,NO _x 排量高	具有更低排放的内燃机	包括点燃式和压燃式 2 种
斯特林机 小型热电联供,尤其适用于家用	几乎可采用任何燃料,排放低,效率高,噪声低	技术不成熟,成本高,回收余热的品位低	降低成本,采用太阳能驱动	
燃料电池 家用或小型联供系统	发电效率高,污染物排放少,部分负荷性能好	技术不成熟,成本高,商业化程度低,工程风险高	降低成本,解决电解质腐蚀、燃料要求高等问题	包括 PEMFC, AFC, PAFC, MCFC 和 SOFC 5 类

由表 1 可以看出,对于 1 MW 以上的大型冷热电联供系统,在发电设备的选择上以燃气轮机较为合适;对于 1 MW 以下的小型冷热电联供系统,选择内燃机较为合适;而对于家用微型冷热电联供系统(20 kW 以下),则可以选择斯特林机和燃料电池。事实上,小型内燃机也可作为家用微型冷

热电联供系统的发电设备,且更为合适。Dentice 等^[8]在研究报告中指出,内燃机、燃料电池和斯特林机都可以作为微型冷热电联供系统的发电设备,但是,由于目前燃料电池和斯特林机的价格相对较高,因而不利于微型联供系统的推广与普及。而内燃发电机组技术成熟,价格低廉,发电效率

高,是国家鼓励发展的动力机械^[9]。孔祥强^[3]比较了燃气轮机和燃气内燃机2种发电设备的适用范围,指出,燃料价格和电价对经济性影响较大;在目前燃料价格和电价条件下,内燃机在发电功率较小的场合(小于3 500 kW),经济性较好;而燃气轮机在发电功率较大的场合(大于4 500 kW),经济性较好。在设备容量的选择上,Cardona等^[10]提出了一种用于联供系统设备选型的方法:在CCHP系统的原动机选型上,其最佳容量应为用户热需求峰值的48%。

1.2 热驱动制冷设备的选择

热驱动制冷设备不如原动机种类繁多,主要是吸收式制冷机和吸附式制冷机2种,且两者的适用范围区分明显。吸收式制冷机已形成产业化,并具有较大规模。吸收式制冷机由于本身的容量限制(一般在100 kW以上),且其体积难以小型化,因此一般适用于大中型冷热电联供系统,且驱动热源温度较高。吸收式制冷机按工作介质不同分为溴化锂吸收式制冷机和氨水吸收式制冷机2种,前者与后者相比,具有热效率高、工作压力低、不需要精馏、结构紧凑等优点。目前大型联供系统采用溴化锂吸收式制冷机作为余热利用机组。吸附式制冷机适用于小型或微型冷热电联供系统,可采用低品位余热驱动(驱动温度低至60℃),如太阳能、内燃机缸套水等,并且是一种环境友好型制冷方式。然而,吸附式制冷机现在大多还处于实验室阶段,尽管已开始商业化,但只有少量供应商可以提供产品。

在容量选择上,王明辉^[11]提出采用最佳冷化系数对建筑楼宇冷热电联供系统进行设备选型,指出该方法可使目前CCHP中制冷机组选型普遍偏大的问题得到改善,并结合实例给出了论证。Cardona等^[10]指出,热驱动制冷设备的最佳容量应为用户冷需求峰值的70%。

2 冷热电联供系统能量管理研究

冷热电联供系统作为一种多联供总能系统,主要是将发电过程中产生的余热加以回收和利用。冷热电联供系统的能量管理直接以发电过程中热能利用的最大化为目标,以发电机组发电过程中产生的余热为热源,以不同类型的实际热用户作为系统的热汇,因此又把冷热电联供系统的能量管理称为热管理。冷热电联供系统主要应用于建筑能源领域,而建筑能源需求中的冷、热、电3

种能量的需求通常都随季节、气象条件和时间的变化而变化,因此大多数情况下冷热电联供系统处于变工况运行状态。研究表明,冷热电联供系统在降负荷运行时,各子系统性能均有所下降;联供系统的性能随负荷的降低不断下降,而且下降速度不断增加;当负荷降低到一定程度后,联供系统性能已不如参照系统。由于工况的变化对联供系统的性能影响很大,甚至在较差的运行工况和负荷条件下,联供系统不但不能节能,反而更加耗能。因此,对冷热电联供系统在各种运行工况下的最优化运行研究是十分必要的,即研究冷热电联供系统的变工况能量管理策略,这已成为一个十分重要的研究热点。

国内外关于冷热电联供系统能量管理的研究很多,主要分为数学模型优化分析法和热力学分析法2种。对于数学模型优化分析法,目前联供系统最优化模型基本上是采用线性规划或混合整数线性规划对联供系统进行建模。Maifredi等^[12]认为采用线性最优化模型对热电联供系统的热管理进行指导是可行的,模型主要集中于能源管理,但模型中设备效率设为定值。Lee等^[13]针对冷热电联供系统的优化运行,提出了“能量流”的概念,将优化系统的运行归结为对“能量流”的优化,并基于燃气轮机的冷热电联供系统,采用模糊算法指导系统的能量管理。Benonysson^[14]对区域热电联供系统采用混合整数线性最优化模型进行分析,模型是以能量运行成本最低为优化目标函数,对影响系统热管理的经济性因子进行灵敏度分析。在国内,江亿等^[15]对带有蓄能装置的冷热电联供系统进行了热管理研究,给出了该系统优化运行的数学模型和相应的动态规划解法。张万坤^[16]建立了基于燃气轮机和余热吸收式制冷机的冷热电联供系统的通用数学模型,并结合实际建筑物负荷需求变化给出了联供系统在此应用场合的最优能量管理策略。任禾盛^[17]对具有余热锅炉的微型燃气轮机热电联供系统,采用二次规划数学方法,对系统进行热力优化。

对于热力学分析法,Hubert等^[18]对基于质子交换膜燃料电池(PEMFC)冷热电联供系统的热管理系统进行了探讨。Colella^[19]针对基于燃料电池的冷热电联供系统,首次提出了通过构建热管理子系统的方法对整个联供系统的热能进行综合管理。在国内,刘凤强^[20]基于燃气轮机和余热锅炉

的楼宇冷热电联供系统,充分考虑换热器的换热面积、效率及其经济性,并结合系统的变工况特性,对系统能量调配方面给出了指导性的建议。张颖颖^[21]对基于 60 kW 质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 热电联供系统的热管理进行了分析,分析系统中各股流体的流量、温度以及相互连接形式对系统控制以及能耗的影响。蒋毅^[22]从技术经济的层面应用会计模式热经济学理论,综合应用工程经济学、系统工程学及最优化学,对系统中的热流、烟流和现金流等进行了优化分析。

3 冷热电联供系统评价和分析方法的研究

为了确定不同系统的优劣,指导和优化系统的设计及选择,需要对系统进行评价。国内外关于冷热电联供系统的研究文献中,大部分都是关于系统的构建和对已有系统进行评价和分析,这是 CCHP 研究中的一个热点。

Silveira 等^[23]对基于熔融碳酸盐燃料电池的联供系统进行了能量分析和经济性分析,能量分析采用总能效率和烟效率,指出系统总能效率和烟效率分别为 86% 和 42%,经济性分析采用年收益和投资回报期的分析方法,指出初投资为 1 000~1 500 美元/千瓦在经济上是可行的。Gorsek 等^[24]采用净现值、投资回收期及年耗费等分析方法对基于蒸汽轮机的联供系统进行了分析,指出联供系统相对于传统单产系统具有明显的经济优势。Biezma 等^[25]对 15 种评价联供系统经济性的准则进行了评估,指出各种项目评价方法的局限性。另外,还指出,尽管可用的评价方法很多,但实际上决定一个项目可行与否就只需净现值 (NPV)、内部回收速率 (IRR) 和投资回收期 (PP) 3 种。吕静等^[26]对燃料消耗量、发电效率、总能利用效率、系统效率、经济效率等常用的联供系统经济性评价指标进行了评述,认为以燃料消耗量、系统效率和经济效率 3 个标准来综合评价比较适宜,三者的结合可以较完善地反映冷热电联供的能量利用和经济性问题。冯志兵等^[27]对能量利用系数、烟效率、折合发电效率、节能率、经济烟效率等几种常用的评价准则进行比较,分析认为,能量利用系数将冷、热、电等各股能量等价看待,烟效率过分看重能量的作功能力,折合发电效率过分关注冷、热能的输出,均不适于冷热电联供系统的评价;节能率反映的是输入能量的使用情况,经济烟效率在某种程度上是经济性

的表现,比较适于冷热电联供系统的评价。贾明生等^[28]分析了一次能源消耗率、发电煤耗、燃料节约量、当量热力系数、烟效率等主要评价模型,指出每一个评价模型都有其局限性,对一个具体项目,采用一次能源消耗率、发电煤耗和烟效率 3 种指标进行评价比较全面。皇甫艺等^[29]提出了一种考虑工程多方面属性的综合评价方法,称为“混合灰色关联多层次综合评价法”。该方法综合了几种常用评价方法的优点,建立评价冷热电联供系统的综合评价模型。

从以上研究情况可以看出,对于冷热电联供的评价指标和分析方法众多,有些评价指标甚至相互矛盾,不同的研究者所倡导的评价指标和分析方法往往不尽相同。因此,制定出一套统一的评价分析体系将是今后的研究趋势。

4 新技术在冷热电联供系统中的应用

4.1 可再生能源技术在冷热电联供系统中的应用

目前,环保问题在世界范围内受到了前所未有的重视。采用传统能源供应的冷热电联供系统,虽然可以起到节能减排的作用,但只能减轻对环境的污染,还是不能从根本上实现零排放。因此,在此基础上,研究者们又提出了以可再生能源如太阳能、生物质能、氢能为基础的冷热电联供系统,这也成为当前和今后的研究热点和趋势。

苏亚欣等^[30]介绍了一种典型的太阳能热动力冷热电联供系统,如图 2 所示。系统利用太阳能集热器驱动闭式 Brayton 循环,完成发电之后废热温度高达 450 K。利用一个气-气换热器加热送风系统的空气,可以直接作为热源。在寒冷季节通过管路和散热器进行供热,或者利用气-水换热器加热供水,进行热水供暖或者供热水。在炎热季节,则可以利用这部分余热驱动制冷系统供冷。另一种基于太阳能的冷热电联供是以太阳能电池为原动设备,产生的电能驱动传统压缩式制冷或热泵可以完成冷、热与发电的联供循环。然而,由于太阳能间歇性的特点,为了保证系统在阴雨天和夜间仍能够正常使用,必须配备蓄电池系统,这大大增加了成本。因此此种形式的太阳能冷热电联供系统的实用价值有限,只在一些理论分析中有所涉及。目前太阳能驱动冷热电联供仍属于探索阶段。成本、系统稳定性及效率等诸多问题限制了该系统的实际应用。

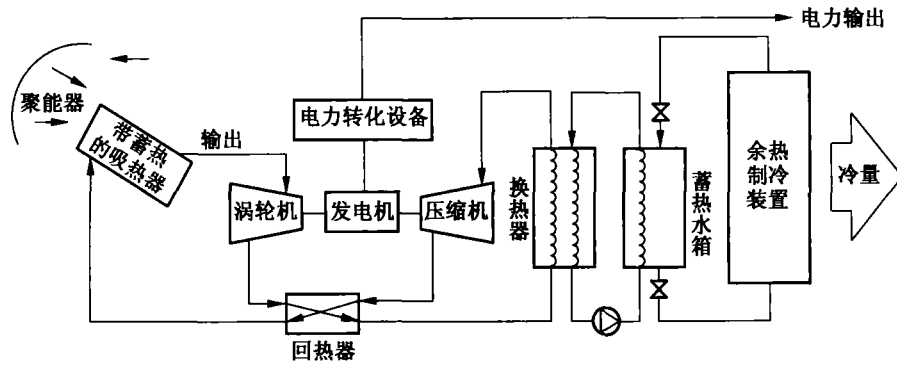


图 2 太阳能热动力冷热电联供系统^[30]

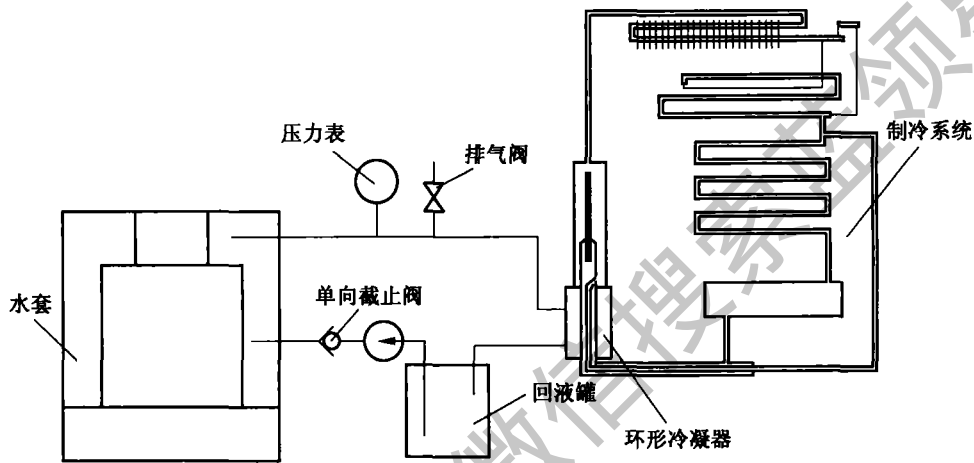


图 3 生物质能吸收式制冷系统^[33]

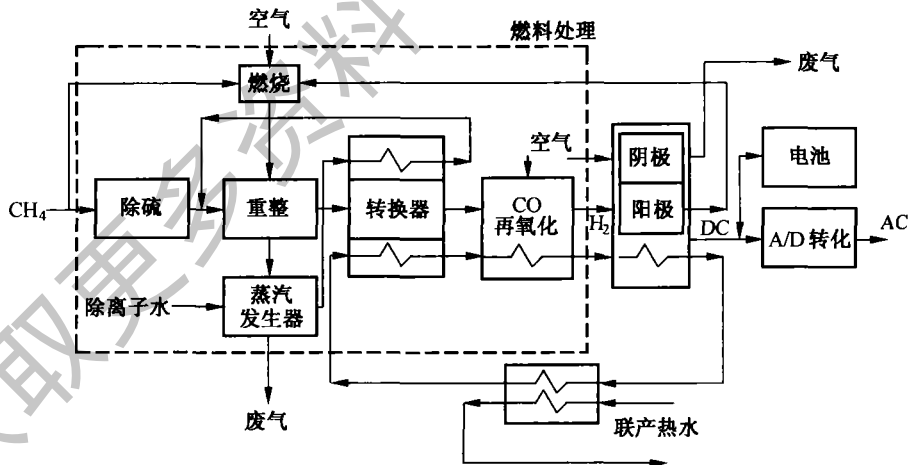


图 4 基于质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 的热电联供系统^[34]

李新禹等^[31]通过对生物质技术和冷热电联供两者工作原理进行对比,分析了生物质作为一次能源用于冷热电联供系统的可行性和存在的问题。孟薇^[32]分析了黑龙江省生物质能热电综合利用的前景,指出了存在的问题。赵廷林等^[33]提出了一种生物质能吸收式制冷系统,并通过实验研

究验证了其可行性,系统示意图如图 3 所示。工作时生物质成型燃料炉具产生的蒸汽经管道传输到制冷系统的发生器,通过包裹在发生器外面的冷凝器,冷凝放热将热量传给制冷系统。目前,生物质能开发利用的规模还不大,科学技术水平还不高,能源转换效率低,产业化薄弱,商品化的程度

也很低。不少国家还没有把生物质能的开发利用放在应有的地位,没有纳入国家的能源建设计划,投入不足,缺乏一整套鼓励、扶持、推广的政策法规,这些都是有待解决的问题。

意大利的 Gigliucci 等^[34]建立了世界上首例基于质子交换膜燃料电池(PEMFC)的热电联供系统,如图 4 所示。该系统的建立,旨在验证 PEM-FC 热电联供系统的可行性,对系统的测试表明,系统符合“概念性样机”的预期要求。Colella^[19]研究了采用燃料电池的热电联供系统,并建立了发电量为 4 kW 的实验样机。目前已有的几种燃料电池中,磷酸燃料电池(PAFC)是目前技术最成熟、商业化程度最高的民用燃料电池,熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)和质子交换膜燃料电池(PEMFC)是最有希望的商业化的燃料电池。然而,如表 1 所述,燃料电池

目前整体上还存在技术不成熟、成本高、商业化程度低、工程风险高等缺点,其在冷热电联供系统中的广泛应用有待于技术的突破和成本的降低。

4.2 冷热电联供的微型化研究

近年来 CCHP 系统逐渐朝小型化、微型化、民用化方向发展^[3],诞生了微型冷热电联供系统(Micro CCHP)。Frost & Sullivan 公司的报告“Opportunities in European Micro Combined Heat and Power (CHP) Markets”^[35]指出,应将微型联供系统定义为发电容量低于 20 kW 的联供系统,微型联供系统应已满足家用作为参照。Peacock 等^[36]的报告指出,微型热电联供系统引入英国家庭,每年可减少 9%~16%的 CO₂ 排放量。在欧洲,微型联供系统已逐渐走入市场,显示出了较强的商业潜力。图 5 给出了微型联供系统在欧洲各国的市场潜力^[36],德国、英国和荷兰位列前 3 位。

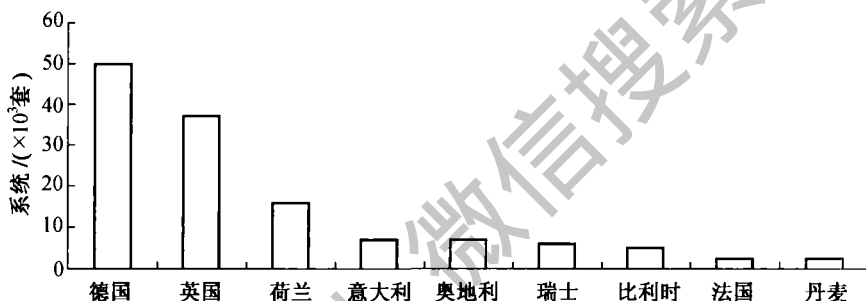


图 5 微型联供系统 2006 年在欧洲各国的销售情况^[8]

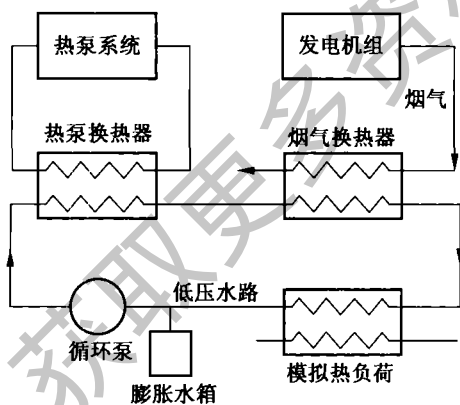


图 6 Smith 等建立的家用微型冷热电联供系统与热泵联合运行的概念性样机流程图^[37]

近来,对于微型联供系统的研究,在全球范围内都比较活跃,但研究大多仅处于验证性阶段。Smith 等^[37]建立了家用规模的微型冷热电联供系统与热泵联合运行的概念性样机,流程如图 6 所示,他们指出,未来研究工作之一就是确定系统变

负荷工作特性以及各个模式切换过程中系统的热力非稳态特性。Miguez 等^[38-39]研究了基于燃气内燃机的微型家用热电联供和热泵复合系统(图 7),为了适应全年工况变化,该系统设置了备用模式(SB)、发电模式(EG)、联供模式(CG)、夏季热泵模式(HPS)、冬季热泵模式(HPW)5 种运行模式,系统变工况特性通过蓄热、蓄电实现。研究指出,未来要降低成本,需要对蓄能设备进行优化,减小其容量。Dentice 等^[8]针对微型冷热电联供系统中发动/发电机的选择、系统的经济性等方面作了详细的探讨,并建立了面向家庭和小商业用途的微型热电联供系统(图 8)。皇甫艺等^[9]建立了基于燃气内燃机和吸附式制冷机的可移动式微型冷热电联供系统(图 9)。该系统可以提供最大 16 kW 发电量,35 kW 供热量和 10 kW 供冷量。系统中引入了一个新型换热设备——热管理器,该设备的引入解决了内燃机缸套水温度随负荷变化而剧烈波动的问题。

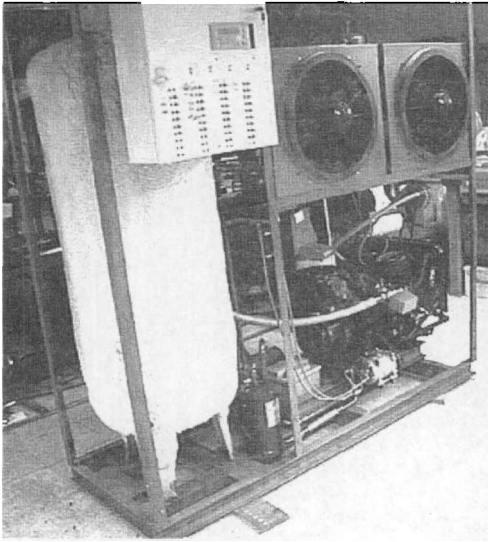


图7 Miguez等研究的基于燃气内燃机驱动热泵的微型冷热电联供系统^[38]

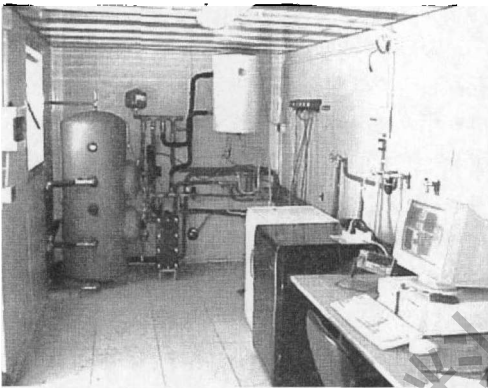


图8 Dentice等建立的面向家庭和小型商业用途的微型热热电联供系统^[6]

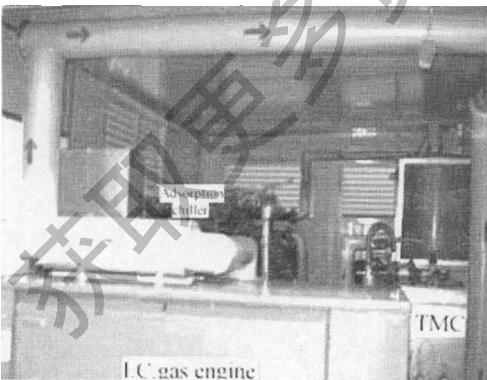


图9 皇甫艺等建立的基于燃气内燃机和吸附式制冷机的微型可移动式冷热电系统^[9]

4.3 热管技术在冷热电联供系统中的应用

热管是一种依据相变传热原理工作的高效传热元件,其种类和形式很多,已经得到了广泛的应

用。近年来,热管技术不断地被应用到冷热电联供系统中。

Lamfon等^[40]将热管换热器用于基于燃气轮机的冷热电联供系统,回收烟气余热,并用于加热燃气轮机进口空气,使得燃气轮机的发电效率得到提高。Panopoulos^[41]对基于固体氧化物燃料电池(SOFC)的热电联供系统,设计了热管式生物气化重整炉,实现向SOFC提供燃料反应气体和电池堆冷却的作用,并将系统的体积大大缩小。Riffat等^[42]提出了集成式太阳能热电联供系统的概念,并采用热管技术实现对余热的回收。在国内,黄显飞^[43]将热管换热器用于燃气发动机驱动的冷热电联供系统,用于回收发动机烟气的余热,经热管换热器后的烟气温度为110℃。李旭^[44]对热电联供系统的烟气进行余热回收,用于加热水。系统中采用分离热管技术,在保证高效传热的前提下,使得热源的热量可以远距离向热汇输送。

皇甫艺和Li S等^[9,45]基于气控热管技术提出了热管理器的概念,构建了实验和工程样机,并运用到基于燃气内燃机的可移动式微型冷热电联供系统中。该热管理器在联供系统中起到热管理平台的作用,同时实现热源温度控制和系统热管理的功能,具有结构紧凑、接口灵活、控制简单、部件集成等优点。图10为热管理器的原理和结构示意图^[45]。当热量输入段从热源吸收热量后,工质液体沸腾蒸发,产生的蒸汽上升至热量输出段并在换热管上冷凝,冷凝液在重力作用下返回工质液池。工质蒸汽与不凝气之间的相互作用达到动态平衡,两者之间形成一个分界面,将热量输出段分成2个区域。在蒸汽覆盖区,工质蒸汽有效凝结换热;在不凝气阻隔区,凝结换热几乎被完全抑制。工况变化时,热管理器通过分界面的移动来改变热量输出段有效传热面积,使得热量输入输出相匹配。当贮气室容积足够大时,腔体内工作压力波动很小,饱和的工质液池温度几乎不变,从而控制热源温度。当热源负荷及用热对象用热状况发生变化时,将会造成交界面的移动,热管理器会自动调整向各个用热对象的热量输出。交界面起到的是“热开关”的作用。

5 结论

冷热电联供技术具有提高能源综合利用率、实现能源梯级利用的优点,是缓解当今世界能源危机和环保问题的一种有效途径,在世界范围内

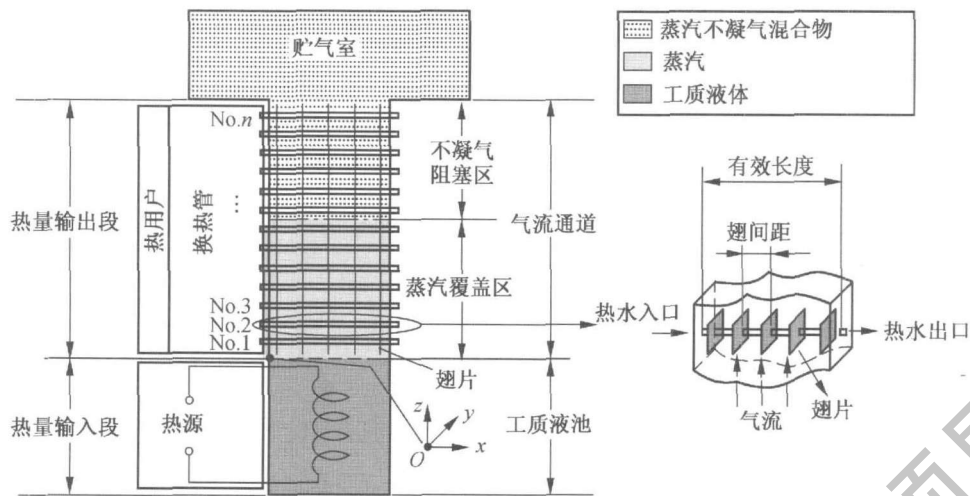


图 10 热管理器原理和结构示意图^[45]

受到了广泛的重视,成为能源类技术领域研究中的一个热点。根据侧重点的不同,对冷热电联供系统的研究也细化到各个不同的研究方面。笔者就冷热电联供研究中的设备选型、系统能量管理、评价和分析方法以及新技术在冷热电联供系统中的应用这 4 个方面的研究热点进行了概述,结论如下:

1) 冷热电联供系统的设备选型着重于系统构建的初始阶段,对于系统经济性和可行性起到至关重要的作用,现在可供选择的原动机和制冷设备均较多,各自具有一定的适用范围,在选型时应以能源价格情况作为参考。发展通用设备选型和优化匹配理论是当前的研究重点。

2) 冷热电联供系统的能量管理着重于系统的运行阶段,其目的是找到系统优化运行的最佳方案,以提高系统性能。基于能量管理的系统变工况控制研究,是冷热电联供系统研究的一个重要方向。

3) 冷热电联供系统评价和分析方法的研究是对已有的系统进行评价,以验证系统的可行性和经济性,并找到系统进一步改进的方法,各种评价指标和分析方法很多且都具有各自不同的适用场合,开发出一套统一的评价分析体系是今后的研究趋势。

4) 各种新技术在冷热电联供系统中的应用研究现在十分活跃,然而大多数还处于探索阶段,许多关键问题需要解决,是今后冷热电联供系统研究的方向。

参 考 文 献

[1] 徐建中. 分布式供电和冷热电联供的前景. 节能与环

保. 2002(3):10-14.

[2] Wu D W, Wang R Z. Combined cooling, heating and power: A review // Progress in Energy and Combustion Science. 2006, 32: 459-495.

[3] 孔祥强. 基于燃气内燃机和吸附制冷机的微型冷热电联供系统研究[D]. 上海:上海交通大学, 2005.

[4] 王如竹. 关于建筑物节能及复合能量系统的几点思考. 太阳能学报, 2002,3(23): 322-335.

[5] 孙建国,冯志兵. 冷热电联供系统的发展及前景. 燃气轮机技术, 2006, 19(2): 11-17.

[6] Cao J C, Liu F Q, Qin Z H, et al. Energy and Exergy Analysis and Thermoeconomic Performance of a BCHP System. Journal of Donghua University, 2004, 21(5): 36-42.

[7] 刘凤强,张时飞,潘卫国,等. 楼宇冷热电联供系统的变工况及热力学分析. 动力工程, 2002, 22(5): 2005-2010.

[8] Dentice M, Accadia D, Sasso M. Micro-combined heat and power in residential and light commercial applications. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 1247-1259.

[9] 皇甫艺. 燃气内燃机微型冷热电联供系统集成式热管理器的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.

[10] Cardona E, Piacentino A. A methodology for sizing a trigeneration plant. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 1665-1680.

[11] 王明辉. 引入最佳冷化系数优化设计建筑楼宇冷热电系统. 能源工程, 2006(5): 67-71.

[12] Maifredi C, Puzzi L, Beretta G P. Optimal power production scheduling in a complex cogeneration system with heat storage // 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, Collection of Tech-

- nical Papers, 2000, 2: 1004-1011.
- [13] Lee J B, Lyu S H, Kim J H. A daily operation scheduling on cogeneration system with thermal storage tank. *IEEE Trans*, 1994, 10:1295-1302.
- [14] Benonysson A. Operational optimization in a district heating system. *Energy conversion and management*, 1995, 36(5):297-314.
- [15] 江亿, 付林. 城市天然气采暖的新途径. *中国能源*, 2001, 6: 8-12.
- [16] 张万坤. 楼宇冷热电联供系统(BCHP)的配置及其最优运行分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [17] 任禾盛. 微型燃气轮机热电联供系统的热经济学最优化分析. *上海理工大学学报*, 2004, 26(5): 443-446.
- [18] Hubert C E, Achard P, Metkemeijer R. Study of a small heat and power PEM fuel cell system generator. *Journal of Power Sources*, 2006, 156(1): 64-70.
- [19] Colella W G. Modelling results for the thermal management sub-system of a combined heat and power (CHP) fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 2003, 118: 129-149.
- [20] 刘凤强. BCHP系统中余热锅炉结构参数的热经济学优化. *燃气轮机技术*, 2005, 18(2):52-56.
- [21] 张颖颖. Research on a simulated 60kW PEMFC cogeneration system for domestic application. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2006, 7(3):450-457.
- [22] 蒋毅. 微型燃气轮机冷热电联供系统的热经济性分析. *上海理工大学学报*, 2004, 26(5): 485-489.
- [23] Silveira J L, Leal E M, Ragonha Jr L F. Analysis of a molten carbonate fuel cell: cogeneration to produce electricity and cold water. *Energy*, 2001, 26: 891-904.
- [24] Gorsek A, Glavic P. Process integration of a steam turbine. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23: 1227-1234.
- [25] Biezma M V, San Cristobal J R. Investment criteria for the selection of cogeneration plants—a state of the art review. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26: 583-588.
- [26] 吕静, 王中铮. 热电冷三联供评价标准述评. *节能*, 1998, 7: 10-12.
- [27] 冯志兵, 金红光. 冷热电联供系统的评价准则. *工程热物理学报*, 2005, 26(5): 725-728.
- [28] 贾明生, 凌长明. 热电冷联供系统的几种主要评价模型分析. *制冷与空调*, 2004, 4(4): 34-38.
- [29] 皇甫艺, 吴静怡, 王如竹, 等. 冷热电联供 CCHP 综合评价模型的研究. *工程热物理学报*, 2005, 26 (Suppl.): 13-16.
- [30] 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. *能源工程*, 2004(5): 24-27.
- [31] 李新禹, 苏文. 生物质能用于热电冷三联供系统的可行性. *能源工程*, 2005(4): 14-16.
- [32] 孟薇. 浅析我省农业生物质能热电联供综合利用. *应用能源技术*, 2007 (3): 18-20.
- [33] 赵廷林, 曹冬辉, 陈夫进, 等. 生物质能吸收式制冷系统的研究. *农业环境与发展*, 2007 (3): 33-35, 38.
- [34] Gigliucci G, Petrucci L, Cerelli E, et al, Demonstration of a residential CHP system based on PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2004, 131: 62-68.
- [35] Frost & Sullivan. Opportunities in European Micro Combined Heat and Power (CHP) Markets. New York: Frost & Sullivan, 2006.
- [36] Peacock A D, Newborough M. Effect of heat-saving measures on the CO₂ savings attributable to micro-combined heat and power (μ CHP) systems in UK dwellings. *Energy*, 2008, 33(4): 601-612.
- [37] Smith M A, Few P C. Domestic-scale combined heat-and-power system incorporating a heat pump: analysis of a prototype plant. *Applied Energy*, 2001, 70:215-232
- [38] Miguez J L, Murillo S, Porteiro J, et al. Feasibility of a new domestic CHP trigeneration with heat pump: I. Design and Development. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(9): 1409-1419
- [39] Porteiro J, Miguez J L, Murillo S, Lopez L M. Feasibility of a new domestic CHP trigeneration with heat pump: II. Availability analysis. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(9): 1421-1429
- [40] Lamfon N J, Najjar Y S H, Akyurt M. Modeling and simulation of combined gas turbine engine and heat pipe system for waste heat recovery and utilization. *Energy conversion and management*, 1998, 39:81-86.
- [41] Panopoulos. High temperature solid oxide fuel cell integrated with novel allothermal biomass gasification Part II: Exergy analysis. *Journal of Power sources*, 2006, 159:586-594.
- [42] Riffat. A novel hybrid heat pipe solar collector/CHP system—Part I: System design and construction. *Renewable Energy*, 2004, 29:2217-2233.
- [43] 黄显飞. 天然气发动机驱动的复合空调系统. *能源技术*, 2003, 24(5):198-200.
- [44] 李旭. 热管式低压省煤器的特点与节能效果. *节能*, 2003(2): 34-34.
- [45] Li S, Wu J Y, Wang R Z, et al. Study of heat and mass transfer in integrated thermal management controller (IT-MC) employed in waste heat recovery application. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48: 3074-3083.