



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Environmental Protection—Article

冷热电联产系统中气冷式微型透平机的发电耗水、空气污染物排放及成本影响：亚特兰大地区案例研究

Jean-Ann James^{a,b,*}, Valerie M. Thomas^{c,d}, Arka Pandit^{a,b}, Duo Li^e, John C. Crittenden^{a,b}

^a Brook Byers Institute for Sustainable Systems, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA

^b School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA

^c H. Milton Stewart School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA

^d School of Public Policy, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA

^e Crittenden and Associates, Beijing 100102, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 March 2016

Revised 5 August 2016

Accepted 16 August 2016

Available online 16 December 2016

关键词

冷热电联产 (CCHP)

气冷式微型透平机

分布式能源发电

发电耗水

净计量

摘要

城市化进程的加快意味着城市和国际组织需要去寻找各种能够提高能源效率和减少空气中污染物排放的方法。冷热电联产 (CCHP) 系统可以同时供暖、制冷和发电, 具有提高城市或城市区域能源发电效率的潜力。本研究的目的是在满足建筑热需求 (供热和制冷) 的各种运行条件下, 对亚特兰大大都市区内的五种常见建筑类型在采用 CCHP 系统时的发电耗水、CO₂ 和 NO_x 排放, 及其经济性进行评价。对于大多数采用或不采用净计量策略的建筑类型来说, 以满足每小时热需求去运行 CCHP 系统均可减少 CO₂ 的排放量。该系统能否对这些建筑类型产生经济效益, 主要取决于天然气的价格、净计量策略的采用和假定的 CCHP 系统的成本结构。当建筑物采用净计量策略并且 CCHP 系统是以满足建筑物每年的最大热需求而运行时, CCHP 系统的发电耗水量和 NO_x 的排放量均有最大限度的减少, 尽管此时该运行情景会增加温室气体排放和发电成本。CCHP 系统对中型办公楼、大型办公楼和多户型住宅建筑更经济、实用。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

城市是全球经济活动和能源利用的中心, 消耗了全球 70 % 以上的能源, 约占据全球温室气体排放的 50 % [1]。此外, 据世界银行估计, 城市占全球国内生产总值 (GDP) 的 80 % 以上 [2]。到 2050 年, 全球 2/3 的人口将会成为城市居民, 这一转变将会促使城市政府去寻找各种能够减少资源利用和降低环境影响的方法 [3]。人口的持续增长使城市主要面临三个挑战: ① 减少能源需求; ② 减少水资源需求; ③ 降低污染物排放。城市公共事业

设备供应的一个关键问题是能量-水的联结。水被用于生产能量, 能量又被用于处理和运输水。传统能源发电系统通常具有较高的水足迹。CCHP 系统具有提高能源效率, 改变燃料配比, 以及减少一次能源使用、发电耗水和污染物排放的潜力。

CCHP 系统比传统能源发电系统具有更高的能源效率。CCHP 系统利用能源在燃烧过程中所产生的热量去部分地 (或完全地) 满足建筑物的供热和制冷要求, 而不是将其浪费掉 [4]。建筑物的传统能源系统 (图 1) 包括来自中央电网的电力和来自炉子或锅炉的热量 [5,6]。

* Corresponding author.

E-mail address: jajames@gatech.edu

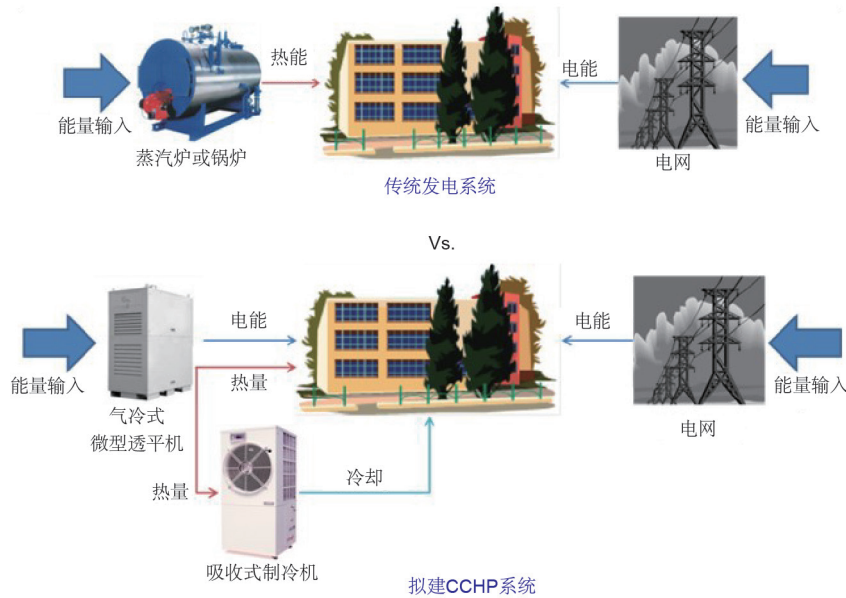


图1. 传统的建筑物能源发电系统与CCHP系统的比较。

典型的CCHP系统是由一个微型透平机和一个吸收式制冷机所组成(图1)。微型透平机是系统用以产生电和热的发电机组(PGU), 而吸收式制冷机能够转换由PGU提供的热量, 以便其在必要时能冷却建筑物。热回收单元(HRU)获取由PGU提供的废热并将其用于水加热和空间加热。能源效率的提高意味着 CO_2 、 NO_x 排放的降低和“发电耗水”的减少(从这一点来看, “发电耗水”是指用于满足发电需求所蒸发掉的水)。因此, 鉴于能源效率的提高、发电耗水的降低、排放物的减少以及空气质量的改善, CCHP系统的应用可在城市范围内产生巨大的影响。

CCHP系统的实施对当前或可能很快面临缺水问题的城市或城市区域尤为重要 [7]。亚特兰大就是这样一个城市区域。位于佐治亚州的亚特兰大大都市区是美国发展最快的大都市区之一 [8]。佐治亚州位于美国东南部, 主要是副热带湿润气候, 类似于中国东南部城市, 如深圳。在佐治亚州, 约49%的用水量被用于热力发电 [9]。据估计, 全州55%的人口生活在亚特兰大大都市区, 所以很大一部分的发电用水可归因于此 [9, 10]。亚特兰大城市的持续扩张, 以及传统能源发电系统的低效和损耗, 都将继续增加人们对能源和水的需求, 以及与能源相关的污染物的排放 [11]。CCHP系统的应用可以提高能源发电系统的效率, 从而减少该地区的发电耗水及 CO_2 和 NO_x 的排放。分散式供能系统还增加了城市区域供能系统内的冗余, 从而增加了该系统的弹性。

有关CCHP系统的优点、降低成本最有效的方法, 以及一次能源消耗和碳排放的研究有很多 [12, 13]。人

们设计CCHP系统的目的是为了减少一次能源的消耗 [14–17]、降低成本 [15]和能源利用的碳足迹 [12, 18–20], 或以上几种情况的组合。在模拟CCHP系统运行时被广泛使用的两种策略是: “满足电负荷”(FEL) [21]和“满足热负荷”(FTL)。大多数关于CCHP系统使用的研究已经调查了上述各负荷条件下如何最佳地优化系统以降低成本、一次能源消耗和碳排放。先前的研究已经总结出在FTL和FEL之间切换的“电热混合”法(HET)与FTL是减少多余热量和电能的最佳策略 [22]。在某些情况下, 增加热量储存可以将成本降低几个百分点 [23]。Han等 [24]进一步使用多目标优化模型修改了HET法。Knizley等 [25]将透平机的运行分为两部分: 一部分用来满足基本负荷, 另一部分用来满足FEL或FTL。

Cho等 [26]探讨了CCHP系统在不同气候条件下的运行情况以及成本和碳减排之间的权衡。各种建筑类型的电热比(即电能与热能之间的比)还决定了热电联产(CHP)系统在降低能源消耗、能源成本和污染物排放方面的优化效率 [23]。能源管理的效果还会影响整个系统的效率, 进而影响所需成本和发电机组数量 [27]。本文的目的是评估亚特兰大地区五种常见建筑类型在采用CCHP系统时的效果, 从而了解发电耗水、 NO_x 和 CO_2 排放, 以及成本是如何受到各种FTL选项(如每小时、每日、每月和每年)影响的。

2. 材料与方法

我们采用的CCHP系统是由一个气冷式微型透平机

和一个气冷型吸收式制冷机所组成(图1),用以满足建筑物的供热和制冷负荷。为了便于比较,图1的上部表示传统能源发电系统。在CCHP系统中,建筑物的热负荷由空间供热、制冷和热水所需的能量总和组成。该CCHP系统被设计为FTL模型,这种类型的CCHP系统已被证明比同一建筑物的FEL模型具有更低的污染物排放和成本 [22, 28]。本研究共测试了五种运行情景,以确定哪种情景最能显著地降低CO₂和NO_x的排放、发电耗水和成本。每种运行情景都因微型透平机的运行目的(满足建筑物每小时最大、每日最大、每月最大和每年最大热需求)而不同。

凯普斯通气冷式微型透平机采用空气进行冷却而不是水,故本文采用该机型进行分析。美国凯普斯通公司目前生产了30 kW、65 kW和200 kW级的气冷式微型透平机。本文还对这些功率范围从95 kW到2 MW的透平机组进行了评估,这些组合由不同功率的透平机组成,例如,95 kW级透平机是由65 kW和30 kW级透平机组合而成。使用制造商提供的技术手册,可以确定不同负载量下运行的透平机的热输出 [29]。在使用多个透平机的情况下,假设先将组合中功率最大的透平机的负载量加载至最大,然后对后续添加的每个透平机重复该过程,直到满足热需求。给定的透平机的热输出对应于给定的电量输出和燃料输入需求。模拟透平机的运行时间表,以满足所考虑的五种建筑类型的每小时最大、每日最大、每月最大和每年最大热负荷(补充信息详见附录A)。

在每种情况下,透平机或透平机组合总是能够满足建筑物的热负荷。因此,对于给定的建筑类型,无论运行情景如何,透平机的功率仍保持不变。

2.1. 参考建筑和能源供应选择

该分析采用了五种建筑类型:三个商业建筑和两

个住宅建筑。三个商业建筑中,面积最小的为5500 ft² (1 ft² = 0.092 903 m²),最大的为500 000 ft²。两个住宅建筑分别是一个单户型住宅建筑和一个多户型住宅建筑。表1 [30,31]包含了建筑物的一些特性、规格,以及用于传统供热和制冷的设备。单户型住宅建筑的热负荷对于功率最小的透平机(30 kW)来说仍然太低。计算表明,功率为30 kW的单个透平机总能满足五个单户型住宅建筑的热需求,该数据是通过将透平机的每小时最大热输出除以给定建筑物的每小时最大热输出而得到的。之后本文中出现的的所有“单户型”指的是五个单户型住宅建筑。

亚特兰大的建筑能量负荷曲线是从开放能源信息(OpenEI)网站 [30]获得的。能源需求是利用美国能源部商业参考建筑模型的EnergyPlus模拟产生的,该模型使用了亚特兰大地区典型气象年TMY3的气象档案 [32]。典型气象年气象档案用于描述一年中各月最能代表近30年月平均值的一个典型气象年 [33]。

我们确定了建筑物对传统能源系统及为满足建筑能量需求而使用OpenEI数据集的CCHP系统的供暖、制冷和电力需求。使用传统能源发电系统和使用CCHP系统的小型办公楼的建筑能量需求和能量输入需求分别如图2所示。当使用传统能源发电系统时,建筑物的电力和热能需求分别由式(1)和式(2)计算。对于传统发电能源系统来说,建筑物的电力需求必须完全由电网来满足。使用传统能源发电系统的建筑物所需的年能量输入可分别用式(1)、式(2)中的电、热负荷除以相应的电网效率和加热设备效率来确定。将采用传统能源发电系统的建筑物的年度热能和电能输入加在一起,以确定建筑物所需的总能量输入。传统能源发电系统运行时的能量供应如图2(b)所示。

$$\text{Electrical demand}_{\text{conventional}} = E_{\text{plug load}} + E_{\text{space cooling}} \quad (1)$$

表1 参考建筑与传统能源系统的特性 [30]

建筑类型	面积(ft ²)	层数	供热设备 (费用 [31])	制冷设备 (费用 [31])	建筑物每年的电力需求(kW·h·a ⁻¹) ^a	建筑物每年的热力需求(kW·h·a ⁻¹)	透平机功率(kW)
大型办公楼	500 000	12	锅炉 (9.85美元·ft ⁻²)	多层水冷式冷却器 (9.85美元·ft ⁻²)	6 963 487	419 346	2 000
中型办公楼	53 628	3	锅炉 (17.45美元·ft ⁻²)	多层组合DX (17.45美元·ft ⁻²)	728 547	18 019	325
小型办公楼	5 500	1	炉子 (9.25美元·ft ⁻²)	单层组合DX (9.25美元·ft ⁻²)	68 171	7 447	30
多户型住宅建筑	33 740	4	炉子 (6.39美元·ft ⁻²)	分离系统 单层组合DX (6.39美元·ft ⁻²)	258 790	107 795	95
单户型住宅建筑	2 546	1	炉子 (6 975美元)	单组合 (6 975美元)	12 740	10 342	30 (5座建筑)

a 制冷+插头负载

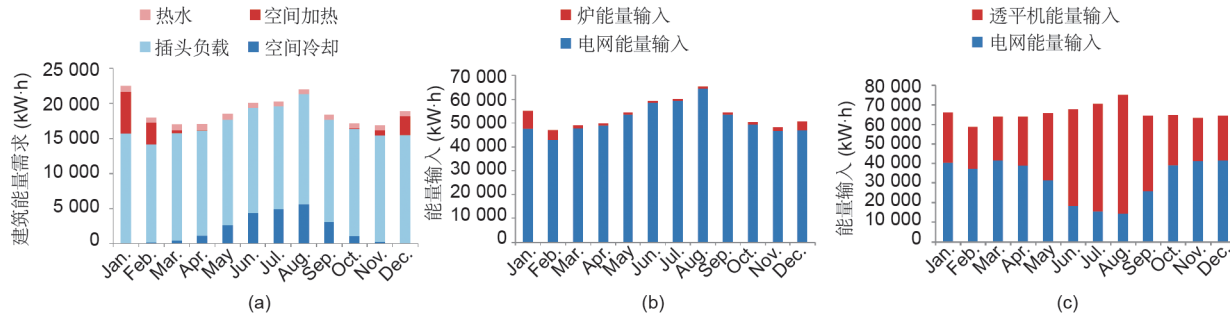


图2. 基于亚特兰大地区TMY3气象档案的小型办公楼的能量需求。(a)小型办公楼的能量需求；(b)使用传统发电和配电系统的小型办公楼的能量输入需求；(c)使用以满足每小时热需求而运行的CCHP系统的小型办公楼的能量输入需求。

$$\text{Thermal demand}_{\text{conventional}} = \text{Heating}_{\text{space}} + \text{Heating}_{\text{hot water}} \quad (2)$$

建筑物对CCHP系统的电力和热能需求由式(3)和式(4)确定。建筑物对CCHP系统的电力需求指的是插头负载[式(3)]。CCHP系统的热负荷是空间加热、热水以及吸收式制冷机用于空间冷却所需的热能的总和。吸收式制冷机能够将热能转换成冷能。吸收式制冷机所需的热能可通过空调与吸收式制冷机的性能系数(COP)的比值来确定。假定空调机组正在用电并且其COP为3.8, 这与比值为13的最小允许季节能效比相对应。我们假定商用单效吸收式制冷机的COP为0.68 [34]。我们还假定CCHP系统具有一个气冷型双效吸收式制冷机, 其COP为1.42, 与参考文献 [35–38]中所得数据类似。年能量输入是指电网所需的能量输入和CCHP系统所需的能量输入。CCHP系统需要输入的能量由制造商的技术文件确定, 该技术文件提供了在给定容量下运行的透平机的燃料要求。需要从电网获得的电能是通过用建筑物的电力需求减去由透平机产生的电能来确定的[式(5)]。需要从电网系统获得的能量输入是通过用来自电网的电力除以电网发电和配电系统的效率来确定的。小型办公楼CCHP系统运行所需的能量如图2(c)所示。

$$\text{Electrical demand}_{\text{CCHP}} = E_{\text{plug load}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Thermal demand}_{\text{CCHP}} = & \text{Heating}_{\text{space}} + \text{Heating}_{\text{hot water}} \\ & + (\text{COP}_{\text{air conditioner}} / \\ & \text{COP}_{\text{absorption chiller}}) \times E_{\text{space cooling}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Electrical grid demand}_{\text{CCHP}} = & \text{Electrical demand}_{\text{CCHP}} \\ & - \text{Turbine}_{\text{elec}} \end{aligned} \quad (5)$$

2.2. CCHP 系统的运行

采用以下五种发电情景对建筑物进行评估：①非CCHP系统；②透平机以满足每小时热需求而运行；③透平机以满足每日最大热需求而运行；④透平机以满足每月最大热需求而运行；以及⑤透平机以满足全年度最大热需求而运行。采用CCHP系统的每小时的负荷

可通过修改OpenEI数据集来计算, 从而把用于空间冷却(通过吸收式制冷机)的热量包括在热需求[式(4)]中。情景③~⑤的输入数据是通过改变式(4)中建筑物每小时的热负荷得到的, 用以表示每日、每月、每年的最大热需求。建筑物每日的最大热需求可通过在每小时热数据集中寻找每天的最大热需求来确定, 并将其设置为建筑物当天的热需求。对于给定的月份和年份, 以类似的方式可确定该月和该年的最大热需求。附录A描述了相较于建筑物的热需求, 透平机的运行情况 and 运行计划, 对每种建筑类型和运行情景下的透平机的发电耗水、CO₂排放、NO_x排放和系统成本进行了估计。模拟透平机以提升或降低出力水平来满足具有CCHP系统的四种运行情景下的热需求。透平机的尺寸可通过以能够满足建筑物所需的最大热负荷的最小尺寸来选择。由于微型透平机就能满足所有热负荷, 因此如果使用了CCHP系统, 则不需要锅炉或炉子。所有运行情景所需的能量均来自电网, 但是所需的能量大小将取决于透平机的运行情况。每个建筑物的吸收式制冷机的尺寸是按照建筑物的制冷要求来设计的。

2.3. 发电耗水和排放

使用2012年和2013年的数据获得的亚特兰大组合发电的平均每千瓦时CO₂和NO_x的排放量见表2 [39–45]。随着新的发电厂逐步取代旧的、低效率的发电厂, CO₂和NO_x的排放量有望得到改善。Choi和Thomas [46]的计算表明, 佐治亚州的每千瓦时温室气体排放量将随着新核电厂的建成和燃煤发电厂的退役而逐渐减少。本研究比较了CCHP系统发电与当前亚特兰大组合发电所产生的污染物排放量。炉子和微型透平机所产生的排放量由制造商提供的数据计算所得 [39, 40, 47]。在电力生产中用于制冷的的水包括被抽出并随后返回到水箱中的水(如在直通式冷却系统中)和被蒸发的水(如在蒸发冷却中)。使用佐治亚州电网的平均发电耗水系数1.65 gal·(kW·h)⁻¹

可计算得到发电耗水量(蒸发损失)。采用二次分析对比了CCHP系统的运行情景和需要由联合循环天然气厂[平均发电耗水系数为 $0.2 \text{ gal} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]来满足对电网的能量需求的情景 [48], 这可能是更加典型的边际消费。式(6)和式(7)分别表示CCHP系统与非CCHP系统运行情景下的各类排放因子。

$$\text{Emissions}_{\text{conventional net}} = \text{Emissions}_{\text{grid}} + \text{Emissions}_{\text{furnace}} \quad (6)$$

$$\text{Emissions}_{\text{CCHP net}} = \text{Emissions}_{\text{grid}} + \text{Emissions}_{\text{turbine}} \quad (7)$$

2.4. 成本估算

由电网和炉子提供所需能量的非CCHP系统运行情景的成本是使用佐治亚州电力价格[49]及佐治亚州住宅和商业客户的天然气价格计算所得的(表3) [42, 50–52]。使用参考文献中给出的数据范围估算出CCHP系统的运行成本, 同时使用美国RSMMeans公司的数据集 [31, 53] 估计出炉子的成本及加热、通风和空调 (HVAC) 系统的成本。这里可能有一些安装成本超过了这些费用, 在进行单项工程评估时应该考虑这一点。CCHP系统设备的建设成本按年度成本摊销, 折现率为5%, 系统寿命为10年 [29](详见附录B的补充信息)。HVAC系统的年度成本是由类似的折现率和15年的系统寿命确定的(具体细节见附录B)。使用参考文献中提供的数据范围及预估的使用寿命估计出吸收式制冷机的建设成本 [52]。采用为微型透平机和吸收式制冷机提供的最小和最大成本范围分别计算CCHP系统的两种建设成本。将每个系统的

年度燃料成本和年度建设成本相加[式(8)和式(9)], 可估计出每种运行情景下每个建筑物每年的总成本。将公共事业设备的建设成本包含在按千瓦时计价的发电费用中。假定各运行情景下的建筑物是新的, 因此, 只对传统能源发电系统成本与CCHP系统成本进行了比较。在CCHP系统使用的天然气价格与公共事业设备所支付的价格相当的前提下, 二次成本分析还比较了此时各个CCHP系统的成本。

$$\text{Cost}_{\text{conventional net}} = (\text{Elec}_{\text{used}} \times P_{\text{elec}}) + (\text{Nat gas}_{\text{used}} \times P_{\text{nat gas}}) + P_{\text{AC yearly}} + P_{\text{furnace yearly}} \quad (8)$$

$$\text{Cost}_{\text{CCHP}} = (\text{Elec}_{\text{used}} \times P_{\text{elec}}) + (\text{Nat gas}_{\text{used}} \times P_{\text{nat gas}}) + P_{\text{turbine yearly}} + P_{\text{chiller yearly}} \quad (9)$$

2.5. 净计量

本文评估了在五个运行情景中采用净计量策略对系统的影响。净计量反映了向电网销售多余电力的能力。佐治亚州的净计量策略将住宅和非住宅部分的系统容量分别限制为10 kW和100 kW, 且当前没有把CHP系统当作一项合格的技术 [54]。本研究中, 我们假设佐治亚州的净计量策略与纽约的类似, 其包含了技术组合中最大系统容量为2 MW的CHP系统 [54]。对于采用净计量策略的运行情景来说, 用来回售给电网的电力是通过寻求CCHP系统产生的电力与建筑物的电力之间的差异来确定的。在任何给定的时间内, 每当透平机产生的电力超过建筑物所需电力时就会有剩余的电力产生。在CCHP

表2 CO₂和NO_x排放量以及发电耗水系数

	CO ₂ 排放量(kg·(kW·h) ⁻¹)	NO _x 排放量(g·(kW·h) ⁻¹)	发电耗水系数(gal·(kW·h) ⁻¹)
微型透平机	0.768 [39]	0.290 [39]	—
传统电网	0.570 [41]	0.408 [49]	1.65 [43]
炉	0.227	0.425 [40]	—
CCNG工厂	0.515	0.300 [44]	0.20 [45]

CCNG: 联合循环天然气。

表3 CCHP系统的组件和燃料成本

成本类型	成本描述	成本范围(美元)
微型透平机	建设(美元·kW ⁻¹)	700~1 100 [52]
	O&M(美元·(kW·h) ⁻¹)	0.005~0.016 [52]
吸收式制冷机	建设(美元·kW ⁻¹)	140~290 [51]
	O&M(美元·(kW·h) ⁻¹)	4.5~9 [51]
天然气	居民区(美元·(kW·h) ⁻¹)	0.049 815 [42]
	商业区(美元·(kW·h) ⁻¹)	0.032 [42]
	公用事业设备(美元·(kW·h) ⁻¹)	0.015 [42]
电网电力	居民区(美元·(kW·h) ⁻¹)	0.125 5 [50]
	商业区(美元·(kW·h) ⁻¹)	0.104 4 [50]

O&M: 运行和维护。

系统和传统能源发电系统中，发电耗水量可通过使用表2列出的估计值来计算。如前所述，微型透平机是经空气冷却的，因此它不会消耗水。当我们假设净计量策略时，电网发电耗水量就会因CCHP系统提供的一部分电力而减少。

3. 结果与讨论

不管运行策略如何，具有单效吸收式制冷机的CCHP系统都不能减少主能量输入。双效吸收式制冷机在工业生产中较为常见，其COP为1.42 [35–38]；但它们不是气冷系统。生产厂家认为，空气制冷型双效吸收式制冷机是有可能实现的，但是目前基于客户需求来说其成本过高。因此，我们考虑了采用双效吸收式制冷机(最小COP为1.42)对CCHP系统能量输入的影响。在这种情况下，以满足每小时热负荷而运行的CCHP系统(具有双效吸收式制冷机)将多户型住宅、中型办公楼和大型办公楼建筑所需输入的能量分别减少3%、12%和20%，具体可从图3(b)所示的每种建筑类型的前两组条形图的比较中看出。此外，当使用CCHP时，在能量输入需求方面存在权衡：每单位能量输入就需要产生更多的电力，同时建筑物从电网获得的电力就更少。这种权衡如图3(b)中所示的中型办公建筑和大型办公建筑的能量输入情况。

然而，对于较小的建筑物来说，即使CCHP系统具有双效吸收式制冷机，该系统也会增加对输入能量的使用。对于小型办公楼来说，当使用双效吸收式制冷机时，其峰值热能需求约为透平机最大热能输出的35%。因此，为了使效益最大化，我们假设CCHP系统使用了双效吸收式制冷机，同时，两个小型办公楼建筑能够在

一个CCHP系统上运行。在这种情况下，具有CCHP系统的小型办公楼的总能量消耗增加了53%，该CCHP系统具有以满足每小时热需求而运行的双效吸收式制冷机，如图3(b)所示。所有其他运行策略也进一步增加了对输入能量的使用。同样，当使用具有双效吸收式制冷机的CCHP系统来满足每小时热需求时，单户型综合建筑的输入能量将增加20%。在这些情况下，即使CCHP系统以其最低容量运行，但是它仍然会产生比建筑物所需的更多的热能。如图4所示，即使在最低容量下运行透平机，CCHP系统也能产生比两个小型办公楼建筑所需的更多的热能。相比之下，当使用单效或双效吸收式制冷机(附录A，图A1)时，中型办公楼的多余热能要少得多。CCHP系统所提高的效益不足以抵消当系统过度产热时所需额外输入的能量。

3.1. 节能与降低发电耗水

在所有运行情景下，所有建筑类型从电网获取的电力相较于集中式系统来说均显著减少。在这些情景下，透平机需要不断地运行去产生更多的电力，从而减少建筑物对电网的依赖性。这是因为透平机能够满足大多数或全部建筑的电力需求，而且过剩的电力可以出售给电网。

图5显示了在采用和不采用净计量策略的所有运行情景(FTL，遵循热负荷)下中型办公楼的发电耗水情况，此时假定：①佐治亚州的平均发电用水需求，以及②采用联合循环天然气工厂满足所有电网能源需求。发电耗水在以满足每月最大热需求和每年最大热需求的运行情景下降为零。这个结果与预期的结果一致，因为CCHP系统在产生更多电力的同时也产生了多余的热量，这样就不需要再从电网获取能量。没有电网电力的消耗，意

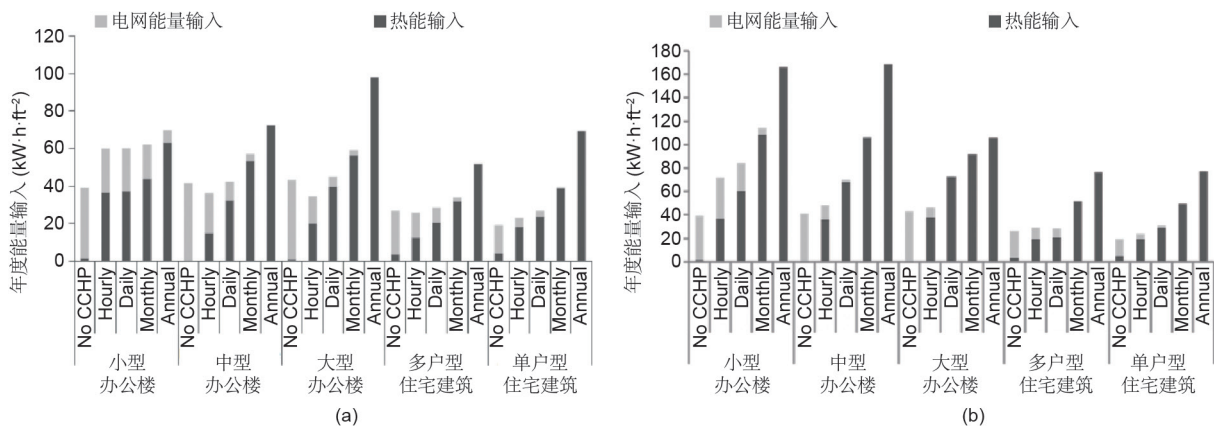


图3. 所有运行情景下各类建筑的能量输入。(a)当使用COP为0.68的单效吸收式制冷机时所需输入的能量；(b)当使用COP为1.42的双效吸收式制冷机时所需输入的能量。

意味着没有发电耗水。所有其他建筑物的发电耗水都相似(表4)。在具有CCHP系统的情景下,所有建筑物的发电耗水量均少于中央电网情景下的发电耗水量,并且当CCHP系统以满足每月最大或每年最大热需求运行时,建筑物的发电耗水量为零[详见补充信息,附录C,图C1(a)和(b)]。

3.2. 减排量

当使用具有单效吸收式制冷机的CCHP系统来满足建筑物的每小时热需求时,中型办公楼的CO₂排放量最大缩减3%(表4)。如图6(a)所示,所有其他运行情景的CO₂排放量均高于非CCHP系统运行情景下的CO₂排放

量。如果CCHP系统是以满足每小时的热需求而运行(表4;并参见补充信息,附录D,图D1),那么单户型住宅建筑、多户型住宅建筑和小型办公楼的CO₂排放量都会减少;而大型办公楼的CO₂排放量却增加了13%(表4)。

负排放量是由电网发电抵消的排放量,因其在一年中产生了更少的电量。

然而,如果CCHP系统具有双效吸收式制冷机,则当其以满足每小时热需求运行时,中型办公楼的CO₂排放量可以减少20%。对于中型办公楼来说,该系统可以以每日热需求来运行,并且仍然比非CCHP系统运行情景下的CO₂排放量要低。然而,如果系统是以满足每月最大热需求或每年最大热需求而运行,则CCHP系统的

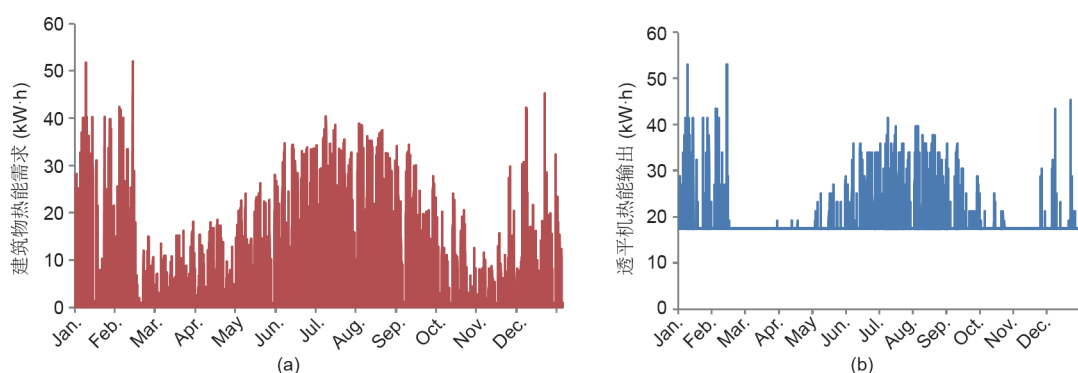


图4. 当使用具有双效吸收式制冷机的CCHP系统时,两个小型办公楼的热需求以及CCHP系统中的微型透平机的热输出。(a)小型办公楼的每小时热需求;(b)以满足小型办公楼每小时热输出而运行的30 kW透平机的热输出。

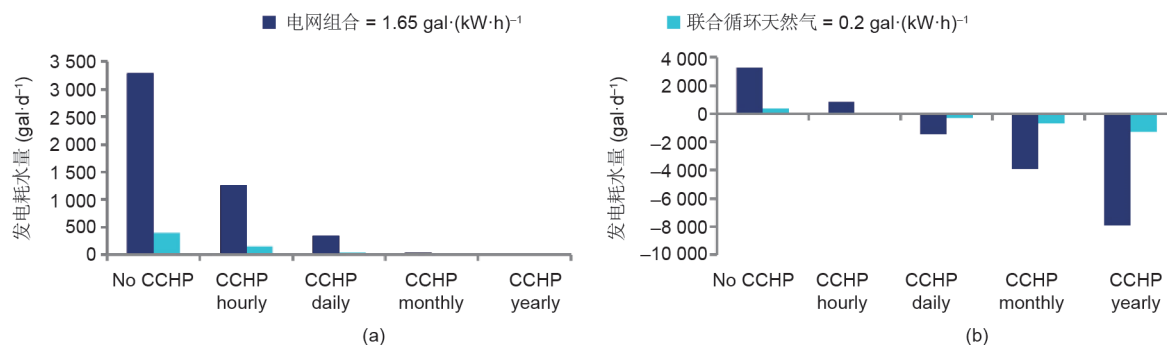


图5. 比较佐治亚州电网与联合循环天然气电厂两种发电耗水系数下的中型办公楼的发电耗水量。(a)具有CCHP系统但不采用净计量策略的中型办公楼的发电耗水量;(b)具有CCHP系统和采用净计量策略的中型办公楼的发电耗水量。负发电耗水量是由电网发电抵消的耗水量,因为其产生了更少的电力。(注:图中“hourly”一词是指满足每小时热需求,“daily”“monthly”和“yearly”分别是指满足每日、每月或每年最大热需求。下同。)

表4 当使用单效吸收式制冷机时,与非CCHP系统运行情景相比,所有建筑物和所有运行情景下的发电耗水量、CO₂排放量和NO_x排放量的变化

建筑类型	发电耗水量变化 (%)				CO ₂ 排放量变化 (%)				NO _x 排放量变化 (%)			
	每小时	每天	每月	每年	每小时	每天	每月	每年	每小时	每天	每月	每年
小型办公楼	-62	-90	-99	-100	-3	+53	+134	+278	-54	-68	-63	-42
中型办公楼	-45	-56	-77	-100	-3	+12	+55	+165	-45	-51	-62	-65
大型办公楼	-80	-99	-100	-100	+13	+82	+129	+160	-68	-73	-67	-63
多户型住宅	-57	-78	-98	-100	-9	+34	+95	+95	-63	-70	-74	-62
单户型住宅	-72	-86	-100	-100	-26	+25	+149	+149	-65	-49	-6	+60

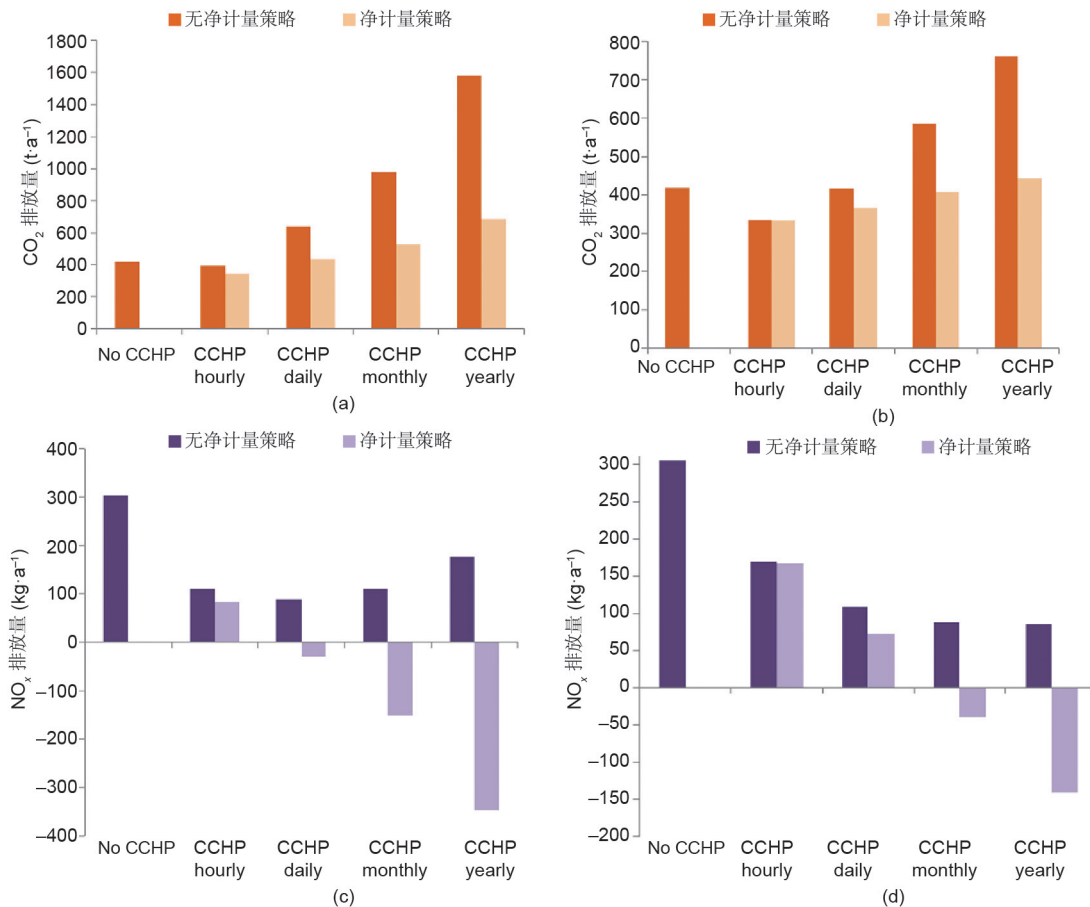


图6. 不同的CCHP系统运行情景下的中型办公楼的年度排放量。(a)使用单效吸收式制冷机时中型办公楼的CO₂排放量(COP为0.68); (b)使用双效吸收式制冷机时中型办公楼的CO₂排放量(COP为1.42); (c)使用单效吸收式制冷机时中型办公楼的NO_x排放量(COP为0.68); (d)使用双效吸收式制冷机时中型办公楼的NO_x排放量(COP为1.42)。

CO₂排放量将高于传统能源发电系统的CO₂排放量,原因是CCHP系统浪费了太多的热量。当系统以满足每小时热需求运行时,所有建筑物的CO₂排放量均达到最低值[详见附录D,图D2(a)]。单户型住宅建筑CO₂排放量减少得最多,为38%,而小型办公室、大型办公楼和多户型住宅建筑的CO₂排放量分别减少了12%、28%和29%。

对中型办公楼而言,使用单效吸收式制冷机的CCHP系统在所有运行情景下的NO_x排放量都会减少。然而,当系统以满足最大日需求运行时,NO_x排放量减少最多,为68%,如图6(c)所示。类似地,尽管使用CCHP系统能使所有建筑物的NO_x排放量减少,但NO_x减排的最佳情形取决于建筑物类型和系统运行情况(表4)。与中型办公楼相比,如果系统是以满足每月和每日热需求而运行,那么多户型住宅建筑和大型办公楼均具有较高的NO_x减排潜力,其NO_x排放量分别减少74%和73%。如果系统是以满足每日热需求而运行,那么小型办公楼则具有最大的NO_x减排量,其NO_x排放量减少68%。当CCHP系统以满足每小时热需求运行时,单户

型住宅建筑具有最大的NO_x减排量,其NO_x排放量减少65%;当系统以满足每年最大热需求运行时,单户型住宅建筑又是唯一一类NO_x排放量高于非CCHP系统运行情景下的建筑物类型。不同建筑物在可实现的最大NO_x减排量方面的差异归因于浪费的热能和减少的电网能量需求之间的权衡。

对中型办公楼而言,在所有运行策略下,双效吸收式制冷机将会降低所有NO_x的排放。当系统以满足建筑物每年的最大热需求运行时,NO_x减排量最大。但是,当使用双效吸收式制冷机时,NO_x减排潜力不如单效吸收式制冷机,如图6(c)和(d)所示。这一结果归因于如下事实:当使用单效吸收式制冷机时,每小时的热需求比使用双效吸收式制冷机时要高。热需求的增加意味着需要容量更大的透平机——单效吸收式制冷机和双效吸收式制冷机分别需要功率为325 kW和130 kW的透平机。更大的微型透平机和更高的热需求会导致产生更多的电力,从而减少了对电网的电力需求。对电网电力需求的减少有助于降低NO_x的总排放。

3.3. 成本

当CCHP系统以满足建筑物每小时热需求运行时, 中型办公楼是最经济的; 这类型建筑物的年成本降低了14% (图7)。对于其他所有的运行策略来说, CCHP系统的运行成本均高于非CCHP系统。如果所收取的天然气价格与公共事业设备价格相当, 那么CCHP系统运行的成本将低于非CCHP系统。如果CCHP系统是以满足每小时热需求而运行, 那么成本约减少50%, 此时的成本减少量最大(图7)。当把与公共事业设备价格相当的天然气价格考虑在内, 以满足每小时热需求而运行的这一策略将会使除小型办公楼之外的所有建筑物均具有最小的成本, 如图8(a)和(b)所示。

图8和图E1(附录E, 补充信息)在假定CCHP系统的最大和最小发电成本的情况下, 显示了所有建筑类型和运行情景下的成本削减。如果我们假定了系统的最大发电成本, 则当系统以满足每小时热需求运行时, 中型办公楼、大型办公楼和多户型住宅建筑的发电成本均降低

(分别降低了14%、6%和9%) (附录E, 图E1)。对小型办公楼和单户型住宅建筑这两种建筑类型来说, 不论系统如何运行, CCHP系统总会比非CCHP系统的发电成本要高。如果我们假定了系统的最低发电成本, 如表3

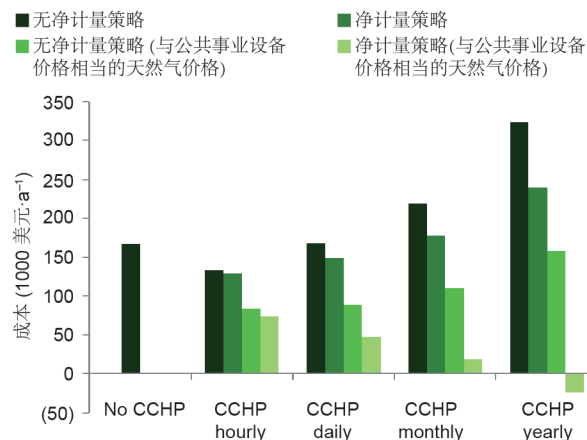


图7. 采用和不采用净计量策略下的各种容量的CCHP系统的运行成本, 并将住宅和商业天然气的定价利率与中型办公楼的公共事业设备的定价利率进行比较。

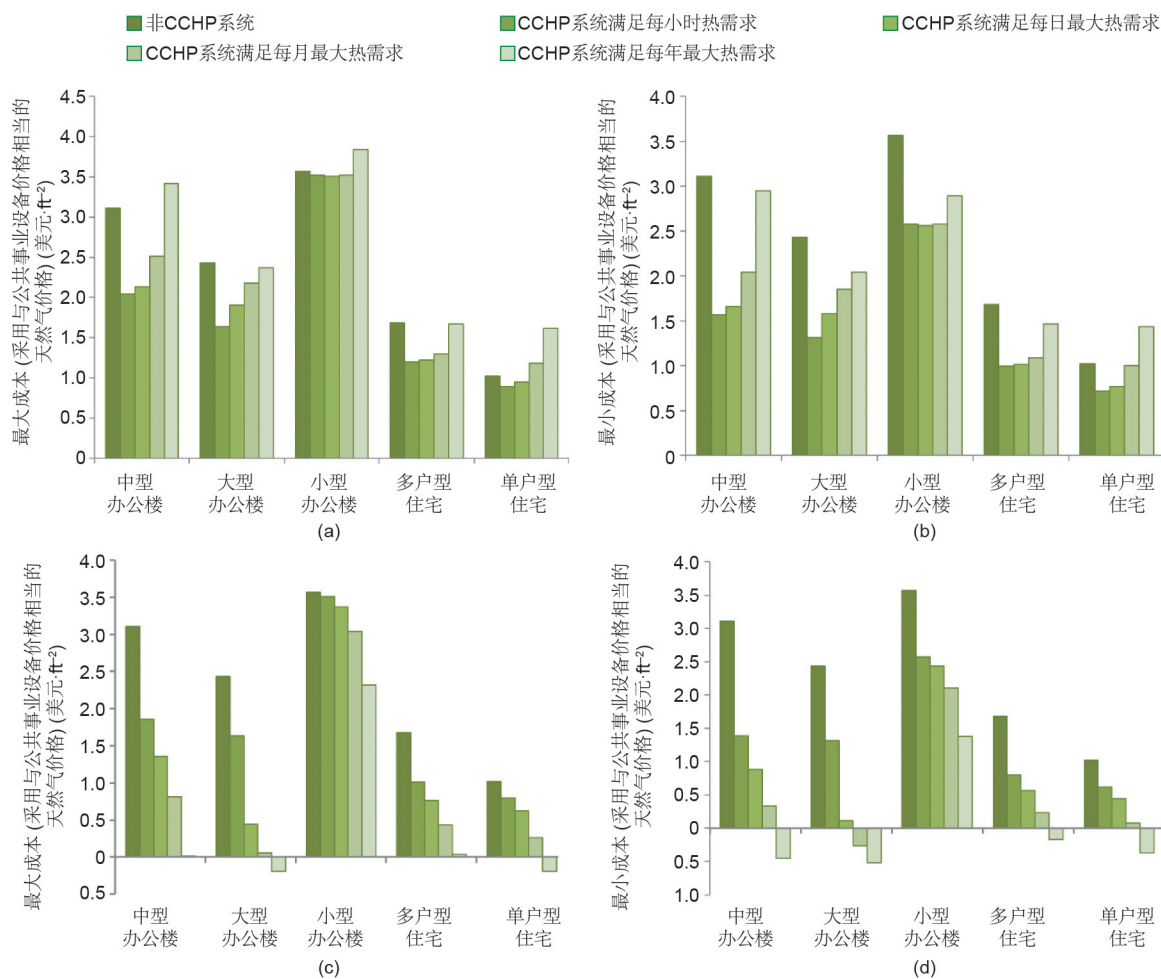


图8. 与非CCHP系统运行情景下的能源成本相比, 所有五种建筑类型的CCHP系统的每平方米尺成本估算。(a)不采用净计量策略的CCHP系统的最大成本估算; (b)采用净计量策略的CCHP系统的最小成本估算; (c)假定天然气价格等于公共事业设备价格时, 无净计量策略的CCHP系统的最大成本估算; (d)假定天然气价格等于公共事业设备价格时, 有净计量策略的CCHP系统的最小成本估算。

所示, 中型办公楼、大型办公楼和多户型住宅建筑的发电成本均会有较大程度的降低: 分别为29 %、20 %和22 %。

假设我们使用的天然气价格与公共事业设备价格相当, 则在假定系统发电成本最小时, 系统以满足每小时热需求运行下的所有建筑物的发电成本均低于非CCHP系统运行情景下的发电成本(图8)。当假定系统发电成本最大时, 除了小型办公楼以外的所有建筑物的发电成本也将较低。燃料成本是决定CCHP系统是否经济实惠的主要因素。例如, 就中型办公楼(图7)而言, 当天然气价格和公用事业设备价格相当时, 所有运行情景下的发电成本均可降低23 %~45 %。这一发现还意味着, 天然气成本会在很大程度上影响CCHP系统的发电成本, 较低的天然气价格使得CCHP系统在所有运行情景下都更经济和可行。

3.4. 净计量策略的影响

净计量策略可显著降低发电耗水量、CO₂的排放量和NO_x的排放量, 以及所有采用CCHP系统及各种运行情景下的建筑物的发电成本。在净计量策略下, 运行CCHP系统是为了满足每年的热需求, 从而使中型办公楼的发电耗水量和NO_x排放量降到最低, 如图5(b)和图6(c)所示。减少CO₂排放量的最佳运行策略仍然是以满足中型办公楼每小时的热需求来运行CCHP系统, 这种策略可使CO₂排放量减少15 %(表5)。然而, 当中型办公楼的CCHP系统以满足每年最大热需求运行时, 其产生的CO₂排放量仍然比非CCHP系统少1 %。系统以满足每小时的热需求而运行是所有建筑物类型降低CO₂排放量的最佳运行策略(表5)。与不采用净计量策略的情况不同, 其他运行策略也会降低CO₂排放量。当CCHP系统以满足每小时的热需求运行时, 单户型住宅建筑、多户型住宅建筑、大型办公楼和小型办公楼的CO₂排放量也有最大限度的减少(分别减少了36 %、21 %、21 %和

4 %)(表5)。

当CCHP系统以满足每年最大热需求运行时, 所有建筑物的发电耗水量和NO_x排放量都有最大限度的降低[见补充信息, 附录C, 图C1(c)、(d)和附录F, 图F1(b)]。在某些运行情景下, 发电耗水量和NO_x排放量减少的百分比大于100 %, 这是因为在全年中, CCHP系统产生了比建筑物所需的更多的电力(表5)。当采用净计量策略时, 这些多余的电力被回售给电网, 抵消了部分电网电力。被抵消掉了的电网电力降低了发电耗水量和NO_x的排放量, 减少的部分完全是为了满足建筑物的热需求。与单效吸收式制冷机相比, 双效吸收式制冷机的发电耗水量和NO_x排放量的减少潜力更大, 因为CCHP系统产生了更多电力。该系统之所以产生了更多的电力, 是因为其必须产生更多的热能以满足建筑物的热需求。

当采用净计量策略时(附录E, 图E1), 所有建筑类型(单户型住宅建筑物除外)和所有运行情景下的CCHP系统的成本均会降低。这意味着CCHP系统能以更高容量运行, 同时仍然具有比非CCHP系统情景更低的年度成本。对单户型住宅建筑而言, 如果系统是以满足每小时热需求而运行, 则CCHP系统的使用将使成本增加47 %。增加系统的运行容量进一步增加了成本——相当于非CCHP系统运行情景下的四倍。当采用CCHP系统的最大成本且系统运行是用来满足每小时热需求时, 中型办公楼、大型办公楼和多户型住宅建筑的年成本可分别降低19 %、6 %和12 %(附录E, 图E1)。当采用系统最低年成本并且系统运行是用来满足每小时热需求时, 中型办公楼、大型办公楼、小型办公楼和多户型住宅建筑物的成本分别降低了34 %、20 %、9 %和25 %。对这些建筑物而言, 当CCHP系统以满足建筑物的每小时热需求运行(附录E, 图E1)时可最大限度地降低成本。小型办公楼的经济可行性的程度取决于假定的成本结构。如果建筑物使用的天然气成本与公用事业设备的成本相同, 则与非CCHP系统相比, 采用CCHP系统的建筑

表5 当有净计量策略并使用单效吸收式制冷机时, 与非CCHP系统运行情景相比, 所有建筑物和所有运行情景下的发电耗水量、CO₂排放量和NO_x排放量的变化

建筑类型	发电耗水量变化(%)				CO ₂ 排放量变化(%)				NO _x 排放量变化(%)			
	每小时	每天	每月	每年	每小时	每天	每月	每年	每小时	每天	每月	每年
小型办公楼	-46	-66	-115	-217	-4	+3	+19	+53	-45	-60	-96	-170
中型办公楼	-74	-144	-219	-340	-15	-1	+15	+40	-66	-121	-180	-276
大型办公楼	-115	-199	-246	-276	-21	-16	-13	-12	-101	-168	-205	-229
多户型住宅	-72	-130	-205	-304	-21	-11	+3	+21	-73	-107	-149	-205
单户型住宅	-84	-146	-278	-450	-36	-20	+15	+60	-72	-81	-102	-129

物的年度成本可减少18%~50%。对中型办公楼和单户型住宅建筑而言,采用净计量策略和采用与公用事业设备所支付价格相当的天然气价格会使系统成本出现负增加,如图8(c)和(d)所示。这意味着该系统不但可以让业主不花钱而且还能赚钱。

4. 结论

CCHP系统可以非常有效地减少亚特兰大地区的发电耗水量、NO_x和CO₂排放量,以及发电成本,具体取决于:①系统的运行策略;②是否采用净计量策略;③天然气的价格。对于单户型住宅建筑、多户型住宅建筑、中型办公楼和小型办公楼这类建筑物而言,当CCHP系统以满足每小时热需求运行时,CO₂排放量较低。如果有净计量策略,所有建筑物的CO₂排放量都会降低,最低排放量归因于以满足每小时热需求而运行的这一策略。采用净计量策略意味着,与非CCHP系统运行情景相比,CCHP系统还可以在其他运行策略下运行,同时仍可以减少CO₂的排放量。当CCHP系统在较高容量下运行时,所有建筑类型的发电耗水量都会减少。这是因为由CCHP系统产生的多余能量被传送到电网,使得电网产生较少的电力,从而避免了所有建筑物的发电耗水。因此,增加透平机的运行容量可以不断地减少发电耗水。当使用CCHP系统时,NO_x的排放量也会减少,但是最佳运行策略会随着建筑物类型的不同而不同。当采用净计量策略时,CCHP系统在以满足每年最大热需求而运行时的NO_x排放量总是最低的,因为该系统产生了比建筑物所需的更多的电力,从而减少了电网的NO_x的排放量。从成本角度来看,最佳运行策略取决于所使用的成本结构、净计量策略和天然气价格。随着天然气价格的下降,这些系统将变得更加经济和实用。

致谢

本工作得到了布鲁克·拜尔斯可持续发展系统研究所、佐治亚州研究联盟高塔讲席的部分支持,获得了美国国家科学基金会研究与创新前沿办公室(EFRI)的拨款(083604,1441208)。

Compliance with ethics guidelines

Jean-Ann James, Valerie M. Thomas, Arka Pandit,

Duo Li, and John C. Crittenden declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

缩写

CCHP 冷热电联产

CHP 热电联产

COP 性能系数

Cost_{CCHP net} 电网所需的年度电力成本、微型透平机运行的燃料成本和CCHP系统债务清偿业务成本的总和

Cost_{conventional net} 电网所需的年度电力成本,锅炉/炉子的燃料成本和加热冷却系统的债务清偿业务成本的总和

$E_{\text{plug load}}$ 插头负载所需的电力

$E_{\text{space cooling}}$ 空间冷却所需的电力

Emissions_{CCHP net} CCHP系统的净排放

Emissions_{conventional net} 传统能源发电系统的净排放

Emissions_{furnace} 锅炉/炉子产热时的排放

Emissions_{grid} 电网电力生产时的排放

Emissions_{turbine} 微型透平机电力生产时的排放

FEL 满足电负荷

FTL 满足热负荷

Heating_{hot water} 热水所需的热能

Heating_{space} 空间加热所需的热能

HET 混合电热

HRU 热回收装置

HVAC 供热、通风及空调系统

OpenEI 开放能源信息

PGU 发电机组

TMY 典型气象年

补充信息

<http://engineering.org.cn/EN/10.1016/J.ENG.2016.04.008>

附录A-F

References

- [1] United Nations Environment Programme. District energy in cities: unlocking the full potential of energy efficiency and renewable energy. Paris: United Nations Environment Programme; 2014.
- [2] United Nations Environment Programme. Global initiative for resource efficient cities. Paris: United Nations Environment Programme; 2012.
- [3] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World urbanization prospects: the 2014 revision, highlights. New York: United Nations; 2014.
- [4] Darrow K, Tidball R, Wang J, Hampson A. Catalog of CHP technologies. Wash-

- ington, DC: US Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership, US Department of Energy; 2015.
- [5] Deng J, Wang RZ, Han GY. A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems. *Prog Energy Combust* 2011;37(2):172–203.
 - [6] Betz F. Combined cooling, heating, power, and ventilation (CCHP/V) systems integration [dissertation]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University; 2009.
 - [7] Morrison J, Morikawa M, Murphy M, Schulte P. Water Scarcity & climate change. Growing risks for business and investors. Oakland: Pacific Institute; 2009.
 - [8] Cidell J. Concentration and decentralization: the new geography of freight distribution in US metropolitan areas. *J Transp Geogr* 2010;18(3):363–71.
 - [9] Kenny JF, Barber NL, Hutson SS, Linsey KS, Lovelace JK, Maupin MA. Estimated use of water in the United States in 2005: US Geological Survey Circular 1344. Reston: US Geological Survey; 2009.
 - [10] QuickFacts Georgia 2010 census [Internet]. Washington, DC: US Census Bureau. [cited 2015 Jan]. Available from: <http://www.census.gov/quickfacts/>.
 - [11] Wilson B, Chakraborty A. The environmental impacts of sprawl: emergent themes from the past decade of planning research. *Sustainability* 2013;5(8):3302–27.
 - [12] Mancarella P, Chicco G. Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part II: analysis techniques and application cases. *Energy* 2008;33(3):418–30.
 - [13] Shipley A, Hampson A, Hedman B, Garland P, Bautista P. Combined heat and power: effective energy solutions for a sustainable future. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory; 2008 Dec. Report No.: ORNL/TM-2008/224. Contract No.: DE-AC05-00OR227. Sponsored by the US Department of Energy.
 - [14] Li H, Fu L, Geng K, Jiang Y. Energy utilization evaluation of CCHP systems. *Energy Buildings* 2006;38(3):253–7.
 - [15] Chicco G, Mancarella P. From cogeneration to trigeneration: profitable alternatives in a competitive market. *IEEE Trans Energy Convers* 2006;21(1):265–72.
 - [16] Sun ZG, Wang RZ, Sun WZ. Energetic efficiency of a gas-engine-driven cooling and heating system. *Appl Therm Eng* 2004;24(5–6):941–7.
 - [17] Moran A, Mago PJ, Chamra LM. Thermo-economic modeling of micro-CHP (micro-cooling, heating, and power) for small commercial applications. *Int J Energy Res* 2008;32(9):808–23.
 - [18] Mago PJ, Fumo N, Chamra LM. Methodology to perform a non-conventional evaluation of cooling, heating, and power systems. *P I Mech Eng A-J Pow* 2007;221(8):1075–87.
 - [19] Chicco G, Mancarella P. Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part I: models and indicators. *Energy* 2008;33(3):410–7.
 - [20] Chicco G, Mancarella P. Distributed multi-generation: a comprehensive view. *Renew Sust Energy Rev* 2009;13(3):535–51.
 - [21] Farret FA, Simões MG. Integration of alternative sources of energy. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2006.
 - [22] Mago PJ, Chamra LM. Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations. *Energy Buildings* 2009;41(10):1099–106.
 - [23] Smith AD, Mago PJ, Fumo N. Benefits of thermal energy storage option combined with CHP system for different commercial building types. *Sust Energ Technol Assess* 2013;1:3–12.
 - [24] Han G, You S, Ye T, Sun P, Zhang H. Analysis of combined cooling, heating, and power systems under a compromised electric-thermal load strategy. *Energy Buildings* 2014;84:586–94.
 - [25] Knizley AA, Mago PJ, Smith AD. Evaluation of the performance of combined cooling, heating, and power systems with dual power generation units. *Energy Policy* 2014;66:654–65.
 - [26] Cho H, Mago PJ, Luck R, Chamra LM. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme. *Appl Energy* 2009;86(12):2540–9.
 - [27] Ehyaei MA, Mozafari A. Energy, economic and environmental (3E) analysis of a micro gas turbine employed for on-site combined heat and power production. *Energy Buildings* 2010;42(2):259–64.
 - [28] Mago P, Fumo N, Chamra L. Performance analysis of CCHP and CHP systems operating following the thermal and electric load. *Int J Energy Res* 2009;33(9):852–864.
 - [29] Capstone Turbine Corporation. Product catalog [Internet]. 2010 [cited 2014 Jan]. Available from: <http://www.e-finity.com/downloads/Product-Catalog.pdf>.
 - [30] Openei.org [Internet]. Washington, DC: US Department of Energy; [cited 2014 Jan]. Available from: <http://en.openei.org/>.
 - [31] RSMMeans Engineering Department. RSMMeans Mechanical Cost Data 2014. 37th ed. Rockland: RSMMeans; 2014.
 - [32] Torcellini P, Deru M, Griffith B, Benne K, Halverson M, Winiarski D, et al. DOE commercial building benchmark models. In: Proceedings of 2008 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings; 2008 Aug 17–22; Pacific Grove, CA, USA; 2008. p. 4–305–16.
 - [33] Wilcox S, Marion W. Users manual for TMY3 data sets. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2008 May. Report No.: NREL/TP-581-43156. Contract No.: DE-AC36-99-GO10337. Sponsored by the US Department of Energy.
 - [34] General description [Internet]. Toledo: MultiChill Technologies, Inc.; c2015 [cited 2016 Feb]. Available from: <http://multichilltech.com/absorption-chiller-waste-heat-gas-fired/>.
 - [35] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Energy standard for buildings except low-rise residential buildings, ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2004. Atlanta: ASHRAE, Inc.; 2004.
 - [36] Deru M, Field K, Studer D, Benne K, Griffith B, Torcellini P, et al. US Department of Energy commercial reference building models of the national building stock. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2011 Feb. Report No.: NREL/TP-5500-46861. Contract No.: DE-AC36-08GO28308. Sponsored by the US Department of Energy.
 - [37] Hendron R, Engebrecht C. Building America house simulation protocols. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2010 Oct. Report No.: NREL/TP-550-49246.
 - [38] Kawasaki Thermal Engineering Co., Ltd. Waste heat energy application for absorption chillers [presentation]. In: 3rd International District Cooling Conference & Trade Show; 2008 Oct 19–21; Dubai, United Arab Emirates; 2008.
 - [39] Wisner JR, Schettler JW, Willis JL. Evaluation of combined heat and power technologies for wastewater facilities [Internet]. Atlanta: Brown and Caldwell; 2010. Available from: https://www.cwvga.org/documentlibrary/121_EvaluationCHPTechnologiespreliminary%5B1%5D.pdf.
 - [40] US Environmental Protection Agency. AP-42: compilation of air pollutant emission factors, volume 1: stationary point and area sources. 5th ed. Research Triangle Park: US Environmental Protection Agency; 1995.
 - [41] City of Atlanta Mayor's Office of Sustainability. City of Atlanta greenhouse gas emissions inventory 2013. Atlanta: Mayor's Office of Sustainability; 2014.
 - [42] US Energy Information Administration. Natural gas prices. Washington, DC: US Energy Information Administration; 2014.
 - [43] Electric Power Research Institute, Inc. Water and sustainability (volume 4): US electricity consumption for water supply and treatment—the next half century. Palo Alto: EPRI; 2002.
 - [44] Seebregts AJ. Gas-fired power, Energy Technology System Analysis Programme (IEA-ETSAP), Agency Energy Technology Network, IEA ETSAP-Technology Brief E. 2010 Apr.
 - [45] Cooperman A, Dieckmann J, Brodrick J. Water/electricity trade-offs in evaporative cooling, part 2: power plant water use. *ASHRAE J* 2012 Jan:65–8.
 - [46] Choi DG, Thomas VM. An electricity generation planning model incorporating demand response. *Energy Policy* 2012;42:429–41.
 - [47] US Environmental Protection Agency. Creating an energy efficiency and renewable energy set aside in the Nox budget trading program evaluation, measurement, and verification of electricity savings for determining emissions reductions from energy efficiency and renewable energy actions. US: BiblioGov; 2007. Report No.: EPA-430-B-07-001.
 - [48] Macknick J, Newmark R, Heath G, Hallett KC. Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. *Environ Res Lett* 2012;7(4):045802.
 - [49] US Energy Information Administration. State electricity profiles: Georgia electricity profile 2012. Washington, DC: US Energy Information Administration; 2012.
 - [50] Georgia Power Company. Georgia Power Company: 2013 yearly report. Atlanta: Georgia Power Company; 2014.
 - [51] Wu DW, Wang RZ. Combined cooling, heating and power: a review. *Prog Energy Combust* 2006;32(5–6):459–95.
 - [52] Capehart BL. Microturbines [Internet]. Washington, DC: National Institute of Building Sciences; c2016 [updated 2014 Apr 11; cited date: 2014 January]. Available from: <https://www.wbdg.org/resources/microturbines.php>.
 - [53] Sheikhi A, Ranjbar AM, Oraee H. Financial analysis and optimal size and operation for a multicarrier energy system. *Energy Buildings* 2012;48:71–8.
 - [54] Brown MA, Zhou S. Smart-grid policies: an international review. *WIRES Energy Environ* 2013;2(2):121–39.