

# 基于区域能源网络的微型热电联产系统性能分析



崔文智<sup>1,\*</sup>, 苏畅<sup>1</sup>, 宗琛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆大学能源与动力工程学院, 重庆 400030

<sup>2</sup>重庆市特种设备检测研究院, 重庆 401121

**摘要:** 为了解决微型热电联产系统 (micro-Combined Heat and Power, m-CHP) 与用户负荷之间供需不平衡的问题, 基于内燃机驱动的 m-CHP 构建了能源共享的区域能源网络。以哈尔滨地区住宅典型周的电、热负荷为例, 评估了“以热定电”和“以电定热”两种运行方式下 m-CHP 系统的能源和经济性能。结果表明, 相比于“以电定热”, 采用“以热定电”的运行方式, 购买能源的支出降低了 10%, 而出售能源得到的收益为前者的 2.7 倍, 运行费用低于前者。与传统的热电分产供能方式相比, “以电定热”和“以热定电”两种运行方式下 m-CHP 系统的净支出节约率分别为 13.68% 和 38.83%。基于能源网络运行的 m-CHP 相较传统热电分产系统具有经济优势。

**关键词:** 微型热电联产; 以电定热; 以热定电; 区域能源网络; 建筑负荷

**DOI:** 10.57237/j.jest.2023.01.004

## Performance of Residential Micro-CHP Operating in a District Energy Network

Cui Wen-zhi<sup>1,\*</sup>, Su Chang<sup>1</sup>, Zong Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

<sup>2</sup>Chongqing Special Equipment Testing Research Institute, Chongqing 401121, China

**Abstract:** To resolve the problem of the imbalance between micro-Combined Heat and Power (m-CHP) supply and demand, a district energy network has been established based on residential m-CHP units powered by natural gas-fueled internal combustion engine. The electric and thermal loads of a Harbin residential building in a typical winter heating week are calculated. The performance of the m-CHP systems operating in two operation strategies, i.e., Following the Electric Load (FEL) and Following the Thermal Load (FTL), are analyzed and evaluated from both energy and economic aspects. The result shows that the energy cost of the m-CHP is reduced by 10% when operating in FTL mode, and the income from selling excess energy is 2.7 times more than that in FEL mode, indicating lower operation costs in FEL mode. Moreover, compared with the traditional separate production of electricity and heat, the net cost reduction rate of the system in FEL and FTL mode is 13.68% and 38.83%, respectively. Micro-CHP operating in a district energy network is more profitable than traditional separate electricity and heat production.

**Keywords:** m-CHP; Following the Electric Load; Following the Thermal Load; District Energy Network; Building Loads

\*通信作者: 崔文智, wzcui@cqu.edu.cn

## 1 引言

住宅用微型热电联产系统（micro-Combined Heat and Power, m-CHP）相对于大型热电联产系统减少了热电输配过程中的能量损失，能源利用率提高。研究者针对不同原动机技术[1-2]、不同运行参数变化[3]、应用于不同气候类型[3-4]、应用于不同住宅建筑类型[2]、应用于不同家庭结构住宅[5]的 m-CHP 系统的经济性、热力性能、环境友好性等进行了广泛研究。由于人员作息、气候和建筑类型等因素影响，住宅的电、

热负荷波动范围大、时空分布不均。不同原动机类型（如内燃机、外燃机、燃料电池等）的 m-CHP 的热电比产出亦不同。这两方面的因素都导致 m-CHP 的输出与住宅的需求在时间上往往不相匹配。为此，有研究者将 m-CHP 与电网、锅炉、光伏组件[6]、储热装置[7]、电动汽车充电桩[8]等结合，共同调节能量供给与消费。

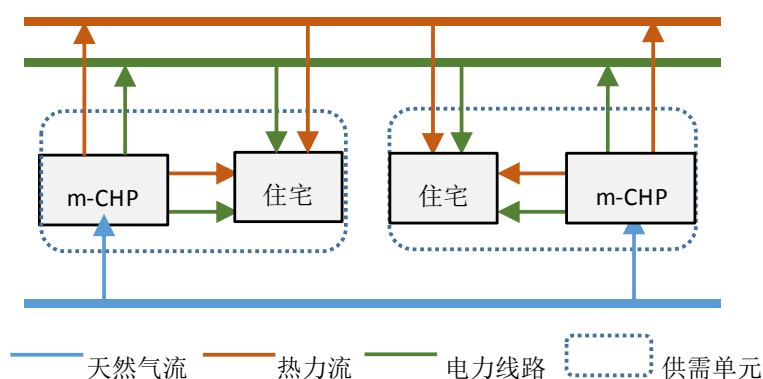


图 1 区域能源网络中的能量交互

Figure 1 Energy interaction in a district energy network

“区域能源网络”是一种实现供需之间能量双向流动的能源网络，为解决 m-CHP 系统供需不匹配的问题提供了新的思路。m-CHP 机组的接入，使能源网络中的一次能源、电力和热力等不同能源形式协同作用，增加了均衡各能源供需波动的灵活性[9]。如图 1 所示，多个以天然气为燃料的内燃机驱动 m-CHP 机组组合，连接起区域内的天然气、电力和热力能源系统以及用户，从而构建起“区域能源网络”，为能源流通创造了互联互通的新环境。网络中，一个“供需单元”内部包含一台 m-CHP 机组和一户或多户住宅。各供需单元之间电、热互联互通，每个供需单元既是消费者亦是生产者，当供需单元能源供需不匹配时，通过区域能源网络向其他供需单元出售或购入能源。本文将以单个供需单元作为研究对象，分别对基于“以热定电”和“以电定热”两种运行方式的 m-CHP 机组在区域能源网络中的性能进行模拟分析，探寻将 m-CHP 系统应用于住宅的能源解决方案。

## 2 住宅电、热负荷计算

以黑龙江省哈尔滨市 3 户各 100 平方米的房间为研究对象，选取 2 月的某一周为热负荷计算典型周，使用 DeST 软件计算了该建筑的逐时热负荷和电负荷。设定室内最高温度 26℃，室内最低温度 18℃。计算房间层高 2.8 m，南向，窗户无窗外遮阳，通风次数取 0.5 次/h。参考黑龙江省居住建筑节能设计标准[10]，设定了房间围护结构参数。考虑到人员热扰、灯光热扰和设备热扰对热负荷产生的影响，设定星期一至星期五为工作日，工作时段为 8 时-18 时，星期六和星期日为休息日，确定了人员、照明和其他用电设备的作息表，从而对热扰的大小进行了逐时定义。用电设备被分为两类，一类是短暂使用的电设备，此类设备作息与人员作息相关；另一类是长期使用的电设备，如电冰箱等，此类设备默认为全天运行[11]。

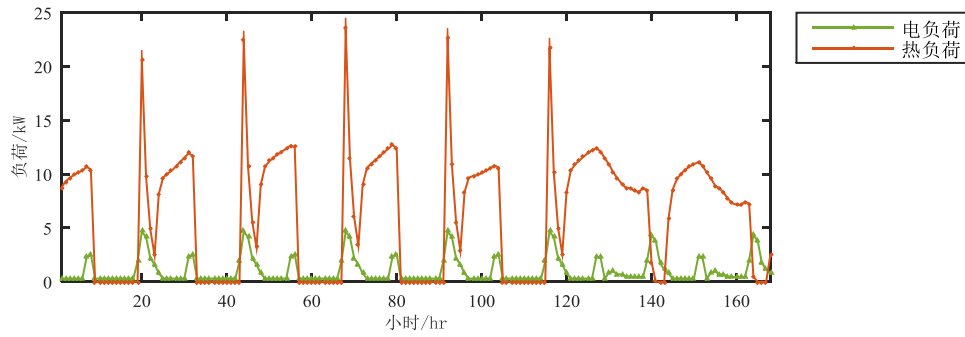


图2 典型周逐时电、热负荷

Figure 2 Hourly electric and thermal loads of a typical week

图2为典型周的电、热负荷逐时分布。在典型周内，电负荷总量为176.65 kWh，热负荷总量为1063.57 kWh。

### 3 微型热电联产系统及其运行方式

以内燃机为原动机的微型热电联产系统主要设备包括内燃机、发电机、排气换热器以及用户侧换热器。系统运行时，空气和天然气进入内燃机燃烧，燃烧所产生的高温烟气推动发电机运转输出电能。系统运行过程中产生的热量通过冷却水回收，冷却水依次流经用户侧换热器、发电机、油冷却器、排气换热器和发动机缸套，水温逐渐升高，再重新返回用户侧换热器，完成热量的回收与利用。本文选用 Marathon Ecopower unit 微型内燃机热电联产系统，其额定功率为4.0 kW，电功率输出范围为1.61 kW~3.99 kW，热功率输出范围为5.65 kW~12.75 kW [12]。利用 TRNSYS 软件建立了该系统的动态特性分析模型。热电联产系统最常见的两种运行方式是“以热定电”和“以电定热”，具体运行方案如下：

“以电定热”（Following the Electric Load, FEL）是指微型热电联产系统以满足用户的电负荷为目标运行。本例中，当用户电负荷低于系统最小发电量（即1.61 kW）时，m-CHP 机组系统不运行。此时用户所需电能、热能均由区域电网、热网提供。

当电负荷处于系统发电量范围内（即1.61 kW~3.99 kW）时，机组输出电量即为用户的电负荷，不需要其他供电方式补充电能。同时根据机组产热量和用户热负荷的相对大小决定向区域能源网络售出或购入热量。当电负荷超出系统额定电功率（即3.99 kW）时，机组满负荷运行，电负荷与系统额定电功率之间的差异通过区域电网补足。

“以热定电”（Following the Thermal Load, FTL）则是

指微型热电联产系统以满足用户的热负荷为目标运行。当用户热负荷低于 m-CHP 机组的最小供热量（即5.65 kW）时，系统不运行，用户需求热量、电量全部由区域热网、电网提供。而当热负荷处于系统输出热量范围内（即5.65 kW~12.75 kW）时，系统输出热量即为用户的热负荷，同时根据系统产电量和用户电负荷的相对大小决定向区域能源网络售出或购入电量。当用户热负荷超出机组的额定热功率（即12.75 kW）时，m-CHP 系统在满负荷下运行，热负荷与额定热功率之间的差异通过区域热网补充。

### 4 两种运行方式性能评估与分析

能源性能评估

图3和图4所示为“以电定热”和“以热定电”两种运行方式下典型周内逐时电热平衡情况。“以电定热”运行时，系统输出电量基本满足短暂用电设备所带来的高峰电量负荷，不存在出售电能的情况。由于热负荷大，“以电定热”运行时，需要购入热量来满足用户热负荷。而采用“以热定电”运行时，系统输出热量基本匹配用户热负荷，但需要购入电量来保证电量供需平衡。同时，在“以热定电”运行方式下，存在着大量出售电能的时段，将带来额外收益。

定义 m-CHP 系统的能源利用率为[13]：

$$\eta_{CHP} = \frac{\sum (E_{CHP} + Q_{thermal})_i}{\sum Q_{fuel,i}} \quad (1)$$

$$= \eta_{elec} + \eta_{thermal}$$

式中， $\eta_{CHP}$  是 m-CHP 系统能源利用率； $E_{CHP, i}$  是 m-CHP 系统逐时输出电量，kWh； $Q_{thermal, i}$  是 m-CHP 系统逐时输出热量，kWh； $Q_{fuel, i}$  是 m-CHP 系统逐时燃料消耗量，kWh； $\eta_{thermal}$  是 m-CHP 系统的热效率； $\eta_{elec}$

是 m-CHP 系统的电效率。

定义电匹配度和热匹配度两个指标，用以评估供需之间能量匹配程度，即

$$M_{elec} = \frac{\sum (E_{user} - E_{buy})_i}{\sum E_{user,i}} \quad (2)$$

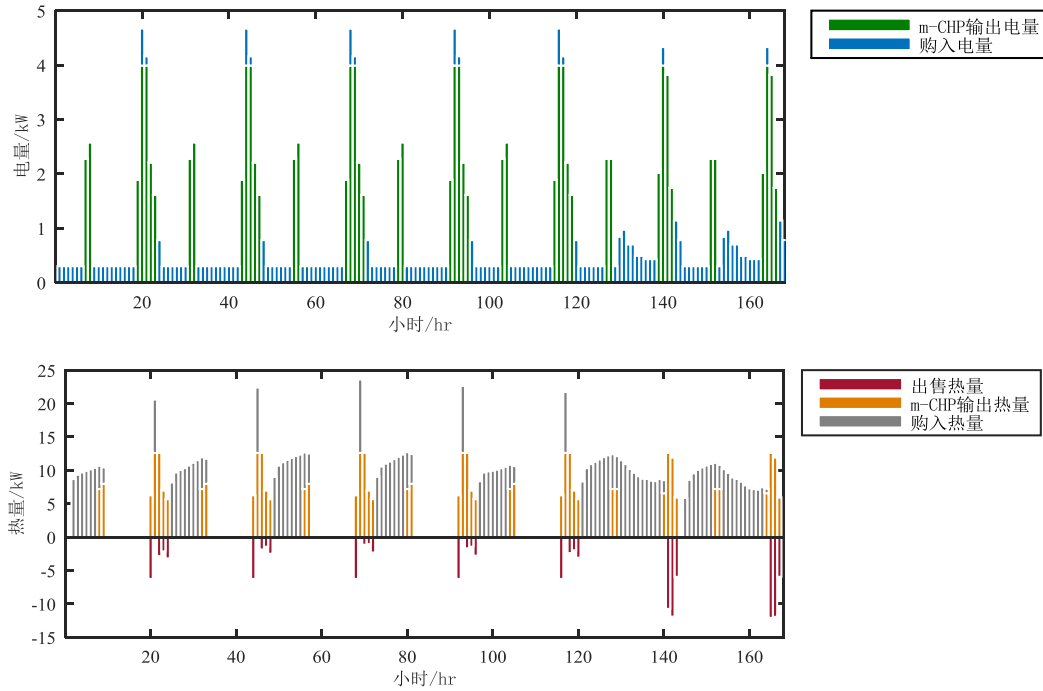


图 1 “以电定热”的逐时电、热平衡

Figure 1 Hourly electric and thermal balances in FEL mode

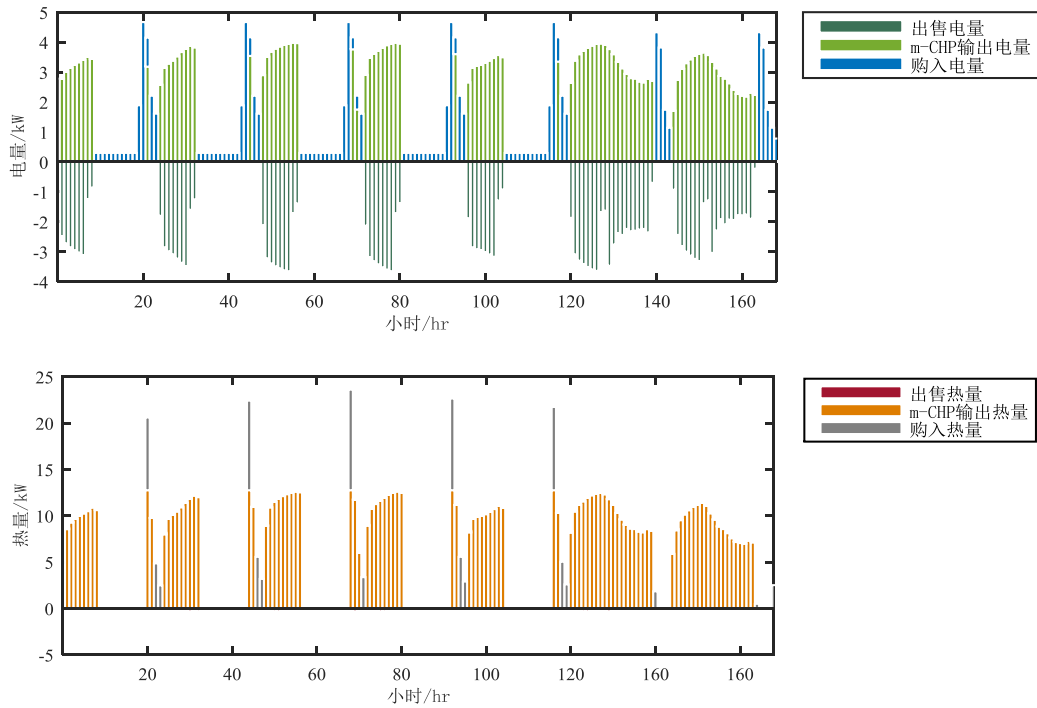


图 4 “以热定电”的逐时电、热平衡

Figure 4 Hourly electric and thermal balances in FTL mode

$$M_{thermal} = \frac{\sum (Q_{user} - Q_{buy})_i}{\sum Q_{user,i}} \quad (3)$$

式中,  $M_{elec}$  是电匹配度;  $M_{thermal}$  是热匹配度;  $E_{user,i}$  是用户逐时电负荷, kWh;  $E_{buy,i}$  是用户从电网购买的电量, kWh;  $Q_{user,i}$  是用户逐时热负荷, kWh;  $Q_{buy,i}$  是用户从热网购买的热量, kWh。

表 1 FEL 与 FTL 的能源性能比较

Table 1 Energy performance comparison between FEL and FTL modes

参数	以电定热	以热定电
电效率/%	20.42	19.89
热效率/%	65.31	66.11
能源利用率/%	85.80	86.00
燃料消耗量/kWh	611.99	1487.5
单位电能燃料消耗量/(kWh/kWh <sub>el</sub> )	4.90	5.03
单位热能燃料消耗量/(kWh/kWh <sub>th</sub> )	1.53	1.51
电匹配度/%	70.73	48.34
热匹配度/%	26.10	91.44

经计算, 两种运行方式的 m-CHP 能源性能列于表 1 中。由于运行目标的差异, “以电定热”在电效率、单位电能燃料消耗量以及电量匹配度三个指标方面, 其性能表现优于“以热定电”。而“以热定电”的热效率、单位热能燃料消耗和热量匹配度的数据优于“以电定热”。

#### 经济性能评估

用户的能源支出包括燃料成本和购买电、热作为补充能量的支出, 则能源成本为[14]:

$$Cost_{op} = \sum (C_{gas} V_{gas})_i + \sum (C_{thermal} Q_{buy})_i + \sum (C_{elec} E_{buy})_i \quad (4)$$

式中,  $Cost$  是能源支出费用, 元;  $C_{gas}$  是天然气价格, 元/m<sup>3</sup>;  $C_{thermal}$  是从热网购买热能的购热价格, 元/kWh;  $C_{elec}$  是从电网购买电能的购电价格, 元/kWh;  $V_{gas,i}$  是天然气消耗量, m<sup>3</sup>;  $Q_{buy,i}$  是从热网购买的热量, kWh;  $E_{buy,i}$  是从电网购买的电量, kWh。

参考哈尔滨市居民阶梯燃气价[15]和电价[16],  $C_{gas}$  取为 2.94 元/m<sup>3</sup>,  $C_{elec}$  取为 0.51 元/kWh。参考哈尔滨供热价格[17], 换算得到单位热量价格为 0.45 元/kWh, 以此作为区域能源网络中的购热价格  $C_{thermal}$ 。

能源收益来自于供需单元向其他供需单元出售电能和热能所得收入, 其计算式为:

$$Inc = \sum (I_{elec} E_{sell})_i + \sum (I_{thermal} Q_{sell})_i \quad (5)$$

式中,  $Inc$  是出售能源的收入, 元;  $I_{elec}$  是出售至电网的电价, 元/kWh;  $I_{thermal}$  是出售至热网的热价, 元/kWh;  $E_{sell,i}$  是 m-CHP 出售至电网的电量, kWh;  $Q_{sell,i}$  是 m-CHP 出售至热网的热量, kWh。

参考北京天然气分布式能源系统上网电价[18],  $I_{elec}$  取 0.65 元/kWh。依据单位热能燃料消耗量及燃料价格计算得到 m-CHP 单位产热量的燃料成本为 0.41 元/kWh。据此, 将区域能源网络中售热价格  $I_{thermal}$  取为 0.43 元/kWh。

据以上能源价格设定, 计算得到表 2 中结果。“以热定电”运行的燃料成本是“以电定热”的 2.4 倍, 但是其购买能量的支出仅为后者的 23.0%, 且出售能量的收入是后者的 2.7 倍。综合来看, “以热定电”运行的总支出和净支出相比于“以电定热”方式分别降低了 10.0% 和 29.1%。

表 2 FEL 与 FTL 的经济性能比较

Table 2 Economic Performance comparison between FEL and FTL modes

参数	以电定热	以热定电
出售能量收入/元	52.49	141.46
购买能量支出/元	380.05	87.51
燃料成本/元	166.14	403.81
净支出/元	493.69	349.87

表 3 热电分产方式经济性能

Table 3 Economic Performance of Separate Production of Heat and Power

参数	热电分产
供暖费/(元/m <sup>2</sup> )	38.32
周供暖费用/元	481.89
购电费用/元	90.09
总支出/元	571.96

哈尔滨地区传统供暖方式为集中供暖, 计费方式为按面积计费, 供暖期取为 167 天[18]。传统供电方式为市网供电, 电价格参考哈尔滨市居民阶梯电价, 取为 0.51 元/kWh。经计算, 热电分产方式的经济性能参数列于表 3 中。采用传统供电、供热方式时, 总支出为 571.96 元, 高于 m-CHP 两种运行方式的总支出金额。相比于传统热电分产方式, 基于区域能源网络的 m-CHP 系统在“以电定热”和“以热定电”两种运行方式下的净支出节约率分别为 13.68% 和 38.83%。



## 5 结论

以微型热电联产系统（m-CHP）作为供热、供电设备，多个住宅作为能源需求端，构建了区域能源网络。在此基础上，以哈尔滨地区住宅电热负荷为例，评估了该系统“以热定电”和“以电定热”两种运行方式的经济性能。主要结论如下：

由于运行目标的差异，相比于“以热定电”，采用“以电定热”运行方式时系统与用户之间的电匹配度更高。而在“以热定电”运行方式下，系统的热匹配度高于“以电定热”运行方式。

哈尔滨地区气候寒冷，住宅热需求量大，需求热电比高。因此，两种运行方式中，“以热定电”的燃料消耗量更大，燃料成本更高。但是，“以热定电”出售能源获得的收益更多，住户从区域能源网络购买能源的支出更低，且用户净支出较低。相比于传统热电分产方式，两种运行方式的经济性均具有优势。

值得指出的是，论文的分析基于“典型周”的热、电负荷，而实际负荷的波动较大、周期较长，未来可针对全供暖期的负荷进行动态仿真，以获得更准确的结果。区域能源互联网中的每一个住户节点既是能源的消费者，也可以是能源的生产者，因此该网络的经济性对能源采购与售卖的价格十分敏感，引入基于区块链技术的定价机制有望创新能源互联网的运行模式，实现能源利用率的最优化。另外，完善的区域能源网络中还应包含储热、蓄电装置，以适应网络中各住户节点电、热生产和消纳的不平衡，这也值得进一步研究。

## 参考文献

- [1] BARBIERI E S, SPINA P R, VENTURINI M. Analysis of innovative micro-CHP systems to meet household energy demands [J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 723-733.
- [2] DE PAEPE M, D'HERDT P, MERTENS D. Micro-CHP systems for residential applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47 (18): 3435-3446.
- [3] VISHWANATHAN G, SCULLEY J P, FISCHER A, et al. Techno-economic analysis of high-efficiency natural-gas generators for residential combined heat and power [J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 1064-1075.
- [4] REY G, ULLOA C, MÍGUEZ J, et al. Suitability Assessment of an ICE-Based Micro-CCHP Unit in Different Spanish Climatic Zones: Application of an Experimental Model in Transient Simulation [J]. *Energies*, 2016, 9 (11): 969.
- [5] OZAWA A, KUDOH Y. Performance of residential fuel-cell-combined heat and power systems for various household types in Japan [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43 (32): 15412-15422.
- [6] SALMERÓN LISSÉN J M, ROMERO RODRÍGUEZ L, DURÁN PAREJO F, et al. An Economic, Energy, and Environmental Analysis of PV/Micro CHP Hybrid Systems: A Case Study of a Tertiary Building [J]. *Sustainability*, 2018, 10 (11): 4082.
- [7] BARBIERI E S, MELINO F, MORINI M. Influence of the thermal energy storage on the profitability of micro-CHP systems for residential building applications [J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 714-722.
- [8] RIBBERINK H, ENTCHÉV E. Exploring the potential synergy between micro-cogeneration and electric vehicle charging [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71 (2): 677-685.
- [9] LIU X, WU J, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1238-1250.
- [10] 哈尔滨工业大学. DB23/1270-2019 黑龙江省居住建筑节能设计标准 [S]. 哈尔滨: 黑龙江省住房和城乡建设厅, 2019.
- [11] JUNG Y, KIM J, LEE H. Multi-criteria evaluation of medium-sized residential building with micro-CHP system in South Korea [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 193: 201-215.
- [12] BUSH J. Modeling of a combined heat and power unit and evaluation of system performance in building applications [D]. Maryland: University of Maryland, 2010.
- [13] JALALZADEH-AZAR A A. A comparison of electrical- And thermal-load-following CHP systems [J]. *ASHRAE Transactions*, 2004, 110 (2): 85-94.
- [14] YANG L, ENTCHÉV E, GHORAB M, et al. Energy and cost analyses of a hybrid renewable microgeneration system serving multiple residential and small office buildings [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 65 (1): 477-486.
- [15] 哈尔滨市发展和改革委员会. 哈尔滨市发改委关于理顺城市居民管道天然气销售价格、建立管道天然气销售价格与综合购进价格联动机制及对听证会参加人主要意见采纳情况的公告 [EB/OL]. (2019-06-01) [2020-09-22]. [http://fgw.harbin.gov.cn/tzhgg/tzhgg\\_jggclcz/2019/05/11481.htm](http://fgw.harbin.gov.cn/tzhgg/tzhgg_jggclcz/2019/05/11481.htm).
- [16] 国家电网. 黑龙江省电网销售电价表 [EB/OL]. (2019-04-29) [2020-09-22]. [http://www.95598.cn/static/html/person/sas/es/PM06003001\\_2000.shtml](http://www.95598.cn/static/html/person/sas/es/PM06003001_2000.shtml).

- [17] 哈尔滨市人民政府. 哈尔滨市人民政府关于调整城市供热价格的通知（哈政发[2015]9 号）[EB/OL]. (2017-10-16) [2020-09-22].  
<http://fgw.harbin.gov.cn/wjgz/bmwj/2017/10/9608.htm>.
- [18] 北京市发展和改革委员会. 北京市发展和改革委员会关于疏导本市燃气电价矛盾的通知[EB/OL]. (2014-01-20) [2020-09-22].[http://fgw.beijing.gov.cn/fgwzgwkg/zcgk/bwqtwj/201912/t20191226\\_1506299.htm](http://fgw.beijing.gov.cn/fgwzgwkg/zcgk/bwqtwj/201912/t20191226_1506299.htm).

## 作者简介

### 崔文智

1973 年生, 教授, 博士. 研究方向为传热传质学.

E-mail: [wzcui@cqu.edu.cn](mailto:wzcui@cqu.edu.cn)