

# 首都住宅建筑燃料电池热电联供系统 建模与能量供需分析

彭黎菊<sup>1</sup>, 李爽<sup>2\*</sup>, 史翊翔<sup>2</sup>, 蔡宁生<sup>2</sup>, 王随林<sup>1</sup>

(1. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京市 西城区 100044;  
2. 清华大学能源与动力工程系, 北京市 海淀区 100084)

## Simulation Study of Fuel Cell CHP System and Energy Demands Analysis for Residential Buildings in Beijing

PENG Liju<sup>1</sup>, LI Shuang<sup>2\*</sup>, SHI Yixiang<sup>2</sup>, CAI Ningsheng<sup>2</sup>, WANG Suilin<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture,  
Xicheng District, Beijing 100044, China; 2. Department of Energy and Power Engineering,  
Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** As a new technology of building energy supply, a combined heat and power (CHP) system based on proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) can effectively reduce the energy consumption of building and promote the green and low-carbon transformation of energy. The residential buildings in northern China have the characteristics of large demand for energy, outstanding contradiction between heat and electricity; and the load fluctuates greatly throughout the year. Therefore, taking Beijing as a representative of a cold region, the DeST software is used to accurately analyze the load of residential buildings and a suitable simulation platform is set up for fuel cell CHP systems. The effects of different parameters on the system performance are studied. Based on the analysis results of load characteristics and parameters, energy management strategies are analyzed in residential buildings in Beijing at different seasons. The "following the thermal load" strategy is adopted in winter; the "following the electric load" strategy is adopted in other seasons. Compared with the baseline system, the gas consumption of the PEMFC-CHP system in different seasons drops by 39.16%, 31.63%, 36.01% and 14.04%, respectively. It has reference significance for the use of FC-CHP system in future building energy supply.

**KEY WORDS:** combined heat and power; fuel cell; energy

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4202201); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022ZJH04)。

National Key R&D Program of China (2022YFB4202201); Project Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022ZJH04).

consumption analysis; simulation; energy management strategies

**摘要:** 质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)热电联供(combined heat and power, CHP)系统作为一种建筑供能新手段,可有效降低建筑运行能耗、推动能源绿色低碳转型。针对北方地区住宅建筑电热需求大且热电矛盾突出,全年负荷波动大等特点,以北京市为代表,利用 DeST 软件对住宅建筑进行负荷分析并搭建燃料电池热电联供系统模拟平台,研究不同参数对联供系统性能的影响;以负荷特性和参数分析结果为依据,设计一年不同时段下北京住宅建筑管理策略:冬季采用“以热定电”,其余季节均采用“以电定热”;与基线系统相比,在春、夏、秋、冬4个典型日中联供系统天然气耗气量分别减少了39.16%、31.63%、36.01%和14.04%,对热电联供系统用于未来建筑供能具有一定借鉴意义。

**关键词:** 热电联供; 燃料电池; 能耗分析; 模拟; 能量管理策略

## 0 引言

目前,全球能源危机与环境污染问题日益严峻,能源发展面临着一系列难题与挑战。2020年,建筑运行能耗占全国能源消费总量的21.3%;建筑运行阶段碳排放占全国碳排放总量的21.7%<sup>[1]</sup>。一方面,居住建筑是人员生活学习的重要场所;另一方面,城镇居住建筑体量较大且增长速度快,因此搭建绿色高效的居住建筑供能系统成为重中之重。氢作为清洁能源的代表具有热值高、燃烧性能好等特点可用于替代建筑运行阶段的常规能源。以

氢作为载体的质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)除具有燃料电池的避免燃烧、几乎近零排放和运行安静等特点外,还具有在室温快速启动、水易排出、寿命长、比功率和比能量高等特点<sup>[2]</sup>,适用于住宅建筑。基于 PEMFC 的热电联供(combined heat and power, CHP)系统结合能源梯级利用,其综合效率可达 85%~90%<sup>[2]</sup>,为住宅建筑提供一种供能新方式。然而 PEMFC 存在寿命短、价格昂贵和非标准化等发展瓶颈,需进一步实现有竞争力的生命周期成本<sup>[3]</sup>。

相比于以内燃机(或燃气轮机)为动力系统,燃料电池热电联供系统的效率更高<sup>[2]</sup>。Ren 等<sup>[4]</sup>对比了燃气发动机和燃料电池的热电联供系统,得出燃料电池 CHP 系统在经济和环境方面均优于燃气轮机联供系统。Gu 等<sup>[5]</sup>以某高层住宅建筑为例,综合评估了在不同能量管理策略下 4 种 CHP 技术(以原动机不同分类),燃料电池 CHP 系统是最佳选择。

国外发达地区对于 PEMFC-CHP 系统的应用研究相对较早,技术相对更成熟。其中,欧美与日本地区在全球范围内处于领先地位。Nalbant 等<sup>[6]</sup>开发了基于高温质子交换膜燃料电池(high temperature proton exchange membrane fuel cell, HT-PEMFC)的天然气供能综合能源系统的数学模型,研究了水碳比、HT-PEMFC 工作温度和阳极化学计量比对系统性能的影响,阳极化学计量比对集成系统性能影响最大,从 1.2 增至 2.0 时,电效率、系统综合效率和焓效率分别下降 42.04%、33.15%和 37.39%; Romdhane 等<sup>[7]</sup>分析了 PEMFC 进口压力、相对湿度和电流密度等不同参数对微型 PEMFC-CHP 系统性能的影响,并采用动态仿真对联供机组可行性进行研究; Arsalis 等<sup>[8]</sup>将微型 HT-PEMFC-CHP 系统与蒸汽压缩热泵结合,提高了燃料电池堆的运行;国内对 kW 级家用 PEMFC-CHP 系统展开了广泛的探索。大连理工大学李灿<sup>[9]</sup>搭建了 2.1kW 的家用 PEMFC-CHP 系统并分析 2~12 月的系统效率,其中焓效率最高为 29.58%,提出了提高系统效率的改进措施;华南理工大学王子良<sup>[10]</sup>搭建了千瓦级微型 PEMFC-CHP 系统并进行能量和焓分析,在典型操作条件下系统能量效率为 68.4%,焓效率为 30.7%;在模型优化工作中, Sun 等<sup>[11]</sup>通过搭建一个 5kW 的 PEMFC 冷热电联供(combined cooling heating and power, CCHP)系统,引入基于改进的生物启发式优化算法从环境、热力学和经济性方面改善了制

冷、供热和电力组合系统的性能; Chang 等<sup>[12]</sup>以华北典型家庭为例搭建微型 PEMFC-CHP 系统并提出以锂电池作为储能系统进行调峰,其系统总效率达 81.24%,提升了 11.02%;山东大学黄念之<sup>[13]</sup>搭建了基于天然气重整的 PEMFC-CHP 系统稳态模型并根据用户用能需求设计运行策略并优化。

对于楼宇级燃料电池 CHP 系统的研究与应用,国内相对较少。2010 年华南理工大学自主设计建造的 300kW 天然气重整-质子交换膜燃料电池热电联供系统在广州大学城示范运行,综合能源效率达到 90%;卡塔尔大学的 Sleiti 等<sup>[14]</sup>针对癌症护理医院大楼建立了 750kW 的固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)冷热电联供系统并做了能量、经济和环境分析,系统最大综合效率为 80%、发电效率为 52%,与基线系统相比,碳排放量减少 89%;华中科技大学 Cai 等<sup>[15]</sup>选择上海的一栋 288 m<sup>2</sup>住宅建筑设计了 PEMFC-CCHP 系统并研究其负荷调节方法,该系统能量和焓效率在冬夏季分别为 88.77%、52.44%和 60.62%、31.74%,在有负荷调节时,其系统效率可以更高; Fan 等<sup>[16]</sup>开发了具有非线性动态模型的 MW 机组 PEMFC-CHP 系统,耦合中国北方生态社区的动态负荷情景并制定相应管理策略。多数关于建筑的 PEMFC-CHP 系统研究中楼宇负荷模拟分析较为简单,使用单位面积指标确定负荷,具有建筑总负荷过高及逐时变化模拟不准确等缺陷;利用能耗模拟软件可达到较高计算精度,同时考虑了负荷逐时变化。本文采用 DeST 能耗模拟软件利用城市典型气象数据,综合考虑人员设备等热扰因素,对全年逐时能耗进行模拟分析。

国内对住宅用 PEMFC-CHP 系统的研究主要集中于家用微型系统,对于住宅楼宇的 PEMFC-CHP 系统研究不足。相较于家用微型系统,住宅楼宇电热需求大、体量较大且全年供能需求随季节性、人员活动变化更明显,使得该类建筑存在电需求以天为周期波动变化大的特点。同时,北方地区存在夏季用电集中而冬季供暖需求大的季节变化特点。因此,需要对燃料电池热电联供系统设计及调峰方案进行选择优化,从仿真模拟角度可以更为方便直观的对住宅建筑 PEMFC-CHP 系统进行研究。

本文基于适用于住宅建筑的分布式能源需求,建立质子交换膜燃料电池-热电联供系统,选取北京市为北方地区典型城市,对影响系统性能的参数进

行分析并通过对北京市某住宅建筑的能耗分析，确定相应的能量管理策略，为设计建筑供能新方案提供有价值的资料，并对燃料电池热电联供系统用于未来建筑供能具有一定借鉴意义。

## 1 北京住宅建筑负荷

### 1.1 北京住宅建筑模型

北京市属暖温带，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥，春、秋短促。供暖季为 11 月至次年 3 月，空调季为 6~8 月。对于住宅建筑，用户的负荷随气象条件和作息规律逐时变化，分布式能源系统需随负荷变化及时调整运行方式，因此此类建筑对设备变工况运行的性能要求更高。本文选取某 6 层住宅建筑进行研究，研究对象基本情况如下：

如图 1 所示，选择北京市某住宅建筑作为 PEMFC-CHP 系统的用户端，该建筑占地面积 442.458 m<sup>2</sup>，总建筑面积 2 654.748 m<sup>2</sup>，总建筑高度 17.4 m。一层有 6 户，该住宅建筑共 6 层，即 36 户。



图 1 北京市某住宅建筑模型

Fig. 1 Model of a residential building in Beijing

### 1.2 住宅建筑能耗模拟设置参数

本文利用清华大学开发的 DeST 能耗模拟软件对该住宅建筑进行全年能耗模拟分析。在进行建筑动态冷热电负荷模拟前，需在 DeST 中进行参数设定。参数设定分为 3 类：外墙、窗户等围护结构；人员、灯光和设备等热扰以及各房间室内温湿度。其中，热扰也是影响电负荷模拟计算的主要因素。

基于《JGJ26-2018》、《DB11/891-2020》、《DB11/T 1665-2019》等标准，住宅建筑围护结构热工参数详见表 1，外窗均采用内张膜中空玻璃，其传热系数  $K=1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，太阳能得热系数为 0.35；室温上下限设定为 20~26 °C，湿度上下限为 30%~60%，三室一厅设定最多人数为 3，两室一厅为 2；各房间照明

功率密度为 5 W/m<sup>2</sup>，设备功率密度为 3.8 W/m<sup>2</sup>。得到该住宅建筑全年冷热电负荷。

表 1 围护结构热工参数

Table 1 Thermal parameters of envelope structure

| 部位   | 传热系数 W/(m <sup>2</sup> ·K) | 部位   | 传热系数 W/(m <sup>2</sup> ·K) |
|------|----------------------------|------|----------------------------|
| 保温外墙 | 0.225                      | 屋面   | 0.150                      |
| 分户楼板 | 1.105                      | 外挑楼板 | 0.248                      |
| 分户墙  | 1.427                      | 内墙   | 1.515                      |

## 2 燃料电池热电联供系统建模

### 2.1 系统模型流程

该系统主要由 PEMFC 电堆、直流交流转换器、换热器、水泵、压缩机等组成，系统原理如图 2 所示。空气和氢气分别通入电堆的阴、阳极发生电化学反应，产生电能和热量。电能供给建筑；电堆在运行过程中产生大量的热，通过电堆的冷却水循环带走这部分热量并用于建筑供暖和生活热水。

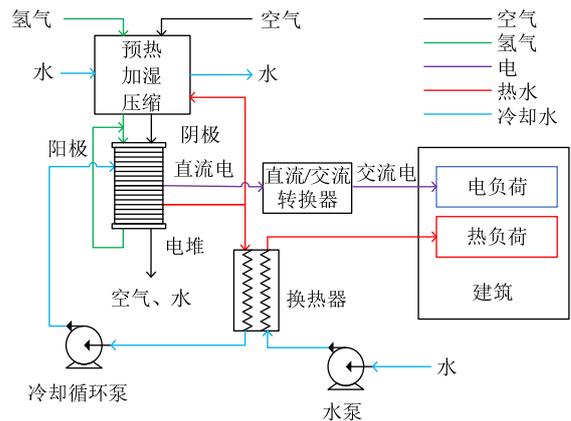


图 2 建筑燃料电池热电联供系统

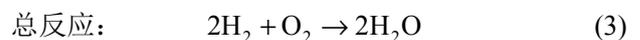
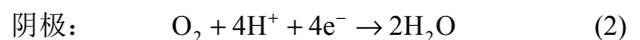
Fig. 2 Layout of PEMFC-CHP system for building

### 2.2 质子交换膜燃料电池电堆模型

PEMFC 电堆是整个系统的动力设备，是一个复杂的电化学和热力学系统，为简化模型做出如下假设：

- 1) PEMFC 相关参数与电堆空间结构无关；
- 2) 入口气体视为理想气体；
- 3) 忽略对环境的热损失。

PEMFC 工作原理为：



在燃料电池中，H<sub>2</sub> 的燃烧反应可分解成两个半电化学反应：在电池阳极，H<sub>2</sub> 发生式(1)的氧化反应；

在电池阴极发生式(2)的还原反应,电子通过外电路从阳极流向阴极(构成电流)并对外供电,  $H^+$ 通过质子交换膜流向阴极与氧结合生成水。

单池电压可以由式(4)计算:

$$U_{\text{cell}} = E - U_{\text{act}} - U_{\text{ohm}} - U_{\text{con}} \quad (4)$$

式中:  $E$  为在任意工况下的单池可逆电压;  $V_{\text{act}}$ 、 $V_{\text{ohm}}$  和  $V_{\text{con}}$  分别为活化损失、欧姆损失和浓差损失。

非标准状态下的可逆电压由 Nernst 方程<sup>[17]</sup>计算得到, 具体如式(5)所示。

$$E = E^0 + \frac{\Delta S}{nF}(T - T_0) - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}} \quad (5)$$

式中:  $E^0$  为标况下的可逆电压;  $\Delta S$  为反应熵变;  $n$  为单位  $H_2$  反应转移的电子数;  $F$  为法拉第常数;  $R$  为通用气体常数;  $T$  为电池工作温度;  $p_{H_2}$  和  $p_{O_2}$  分别为  $H_2$  与  $O_2$  的气体分压。

活化损失电压<sup>[18]</sup>可由式(6)计算得到:

$$V_{\text{act}} = -[\beta_1 + \beta_2 \times T + \beta_3 \times T \times \ln(C_{O_2}) + \beta_4 \times T \times \ln(I + j_n \times A)] \quad (6)$$

式中:  $C_{O_2}$  为阴极  $O_2$  浓度;  $A$  为单池面积;  $I$  为电池工作电流; 半经验系数  $\beta_1$ — $\beta_4$  见表 2。

表 2 半经验系数取值<sup>[18]</sup>

Table 2 Semi-empirical coefficients

| 半经验系数     | 数值  |
|-----------|---|
| $\beta_1$ | -0.948  |
| $\beta_2$ | $\beta_2 = 0.00286 + 0.0002 \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln(C_{H_2})$ |
| $\beta_3$ | $7.6 \times 10^{-5}$  |
| $\beta_4$ | $-1.93 \times 10^{-4}$  |

欧姆损失<sup>[18]</sup>可由式(7)计算得:

$$U_{\text{ohm}} = A(j + j_n)(R_m + R_c) \quad (7)$$

式中:  $j$  为工作电流密度;  $R_c$  为电子在电池内的传导电阻;  $R_m$  为离子穿过膜的等效电阻<sup>[18]</sup>, 可由式(8)计算得到:

$$R_m = \frac{\rho_m \times l}{A} \quad (8)$$

$$\rho_m = \frac{181.6 \times [1 + 0.03(j + j_n) + 0.062 \times (j + j_n)^{2.5} \left(\frac{T_{\text{cell}}}{303}\right)^2]}{(\lambda - 0.634 - 3(j + j_n)) \exp(4.18 \times \frac{T_{\text{cell}} - 303}{T_{\text{cell}}})} \quad (9)$$

式中:  $l$  为膜的厚度;  $\lambda$  为的是膜的含水量;  $\rho_m$  为质子交换膜电阻率。

浓差损失<sup>[11]</sup>可由式(10)计算得到:

$$U_{\text{cons}} = -\frac{RT}{nF} \times \ln\left(\frac{j_{\text{max}} - (j + j_n)}{j_{\text{max}}}\right) \quad (10)$$

式中  $j_{\text{max}}$  为极限电流密度。

PEMFC 电堆的输出电压可由单池输出电压计算得到:

$$U_{\text{stack}} = N \cdot V_{\text{cell}} \quad (11)$$

式中  $N$  为电堆单池数量。

此外, 电堆输出功率为

$$P_{\text{elec}} = I \cdot U_{\text{stack}} \quad (12)$$

### 2.3 辅助设备模型

气体进入电堆前还需经过加湿、预热、压缩等一系列处理过程, 以下为相应辅助设备模型。

气体加湿的热量为在进口气体温度下将  $25^\circ\text{C}$  水转化为饱和蒸汽所需的能量<sup>[19]</sup>, 计算如式(13)所示。

$$P_{\text{humid}} = \Delta h_{H_2O} (f_{H_2O_{\text{air}}} + f_{H_2O_{H_2}}) \quad (13)$$

式中:  $\Delta h_{H_2O}$  为进口气体温度下  $25^\circ\text{C}$  水与饱和蒸汽的焓差;  $f_{H_2O_{\text{air}}}$  和  $f_{H_2O_{H_2}}$  分别为加湿空气和氢气中蒸汽的流量。

气体预热所需的能量<sup>[12]</sup>计算如式(14)所示。

$$P_{\text{hg}} = (\dot{m}_{H_2} \times c_{H_2} + \dot{m}_{\text{Air}} \times c_{\text{Air}}) \times (T - T_{\text{inlet}}) \quad (14)$$

式中:  $\dot{m}_{H_2}$  和  $\dot{m}_{\text{Air}}$  分别为氢气和空气的质量流量;  $c_{H_2}$  和  $c_{\text{Air}}$  分别为氢气和空气的比热容;  $T$  为电堆的工作温度;  $T_{\text{inlet}}$  为气体入口温度。

气体进入电堆前需要进行压缩至工作压力, 压缩机耗功<sup>[20]</sup>计算如式(15)—(17)所示。

$$P_{\text{compress}} = c_p \cdot \Delta T_{\text{gas}} \cdot \dot{m} \quad (15)$$

$$\Delta T_{\text{gas}} = T_2 - T_1 = [(p_2 / p_1)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1] \quad (16)$$

$$\gamma = c_p / c_v \quad (17)$$

式中:  $c_p$  和  $c_v$  分别为入口气体的定压比热容和定容比热容;  $\Delta T_{\text{gas}}$  为压缩前后气体温度变化;  $p_1$  和  $p_2$  分别为气体压缩前后的压力。

循环水泵的功率<sup>[21]</sup>由冷却水流量决定, 计算如式(18)所示。

$$P_{\text{pump}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot \dot{m}_{\text{water}}}{\eta_{\text{pump}}} \quad (18)$$

式中:  $\dot{m}_{\text{water}}$  为冷却水的质量流量;  $\rho$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $H$  为水泵扬程;  $\eta_{\text{pump}}$  为水泵效率<sup>[22]</sup>, 取 90%。

### 2.4 质子交换膜燃料电池热模型

本文电堆采用水冷, 故 PEMFC 电堆能量平衡关系式<sup>[23]</sup>为

$$Q_{net} = Q_{ch} - P_{elec} - Q_{s,1} - P_{hg} - P_{humid} \quad (19)$$

式中  $Q_{net}$ 、 $Q_{ch}$  和  $Q_{s,1}$  分别为电堆冷却水带走的热量、电化学反应的反应热和显热。其中：

$$Q_{ch} = N \cdot \frac{I}{2F} \cdot \Delta H_{(HHV,H_2)} \quad (20)$$

式中  $\Delta H_{(HHV,H_2)}$  为氢气的高位热值，取值为  $1.43 \times 10^5$  kJ/kg。

$$Q_{s,1} = c_{H_2}(\dot{m}_{H_2,out} \cdot T_{pem} - \dot{m}_{H_2,in} \cdot T_{amb}) + c_{O_2}(\dot{m}_{O_2,out} \cdot T_{pem} - \dot{m}_{O_2,in} \cdot T_{amb}) + c_{N_2}(\dot{m}_{N_2,out} \cdot T_{pem} - \dot{m}_{N_2,in} \cdot T_{amb}) + \dot{m}_{Water,production} \cdot Cp_{H_2O} \cdot (T_{pem} - T_{amb}) \quad (21)$$

式中： $c_{H_2}$ 、 $c_{O_2}$ 、 $c_{N_2}$  分别为  $H_2$ 、 $O_2$  和  $N_2$  的比热容(kJ/(kg·°C))； $\dot{m}_{out}$  和  $\dot{m}_{in}$  分别为电堆工作温度和环境温度； $\dot{m}_{Water,production}$  为反应生成水的流量。

### 2.5 质子交换膜燃料电池电堆模型验证

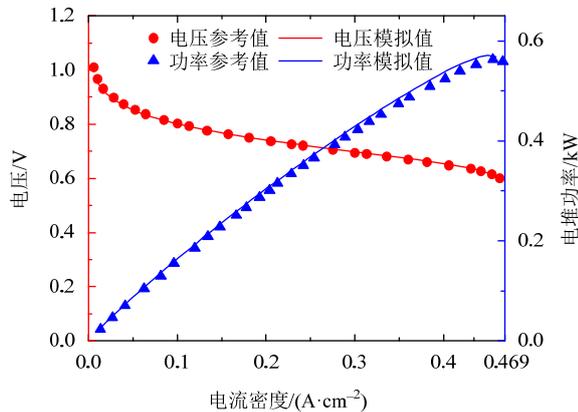
本文利用 EES 工程方程求解器对 PEMFC-CHP 系统进行建模并对该模型进行验证。PEMFC 电堆验证相关参数见表 3。

表 3 PEMFC 电堆验证参数

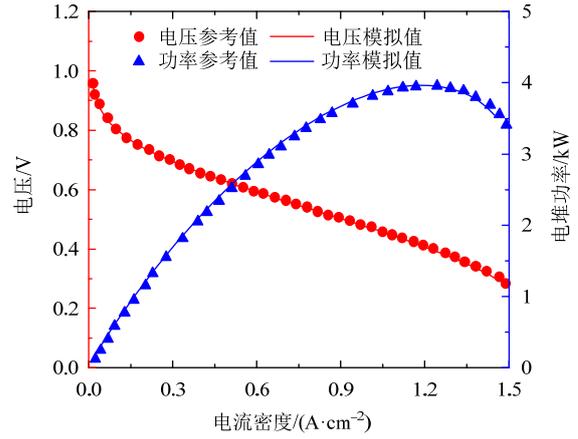
Table 3 PEMFC stack verification parameters

| 参数                 | BCS 500 W 堆栈 <sup>[24]</sup> | Ballard Mark V 堆栈 <sup>[25]</sup> |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| $A/cm^2$           | 64                           | 232                               |
| $N$                | 32                           | 35                                |
| $l/\mu m$          | 178                          | 178                               |
| $j_{max}/(A/cm^2)$ | 0.469                        | 1.5                               |
| $j_n/(A/cm^2)$     | 0.003                        | 0.001 2                           |
| $\lambda$          | 23                           | 23                                |
| $R_c/\Omega$       | 0.000 3                      | 0.000 3                           |
| $T/K$              | 353.15                       | 358.15                            |

验证时，将电流密度从 0 改变至极限电流密度，得到电池伏安特性曲线和输出功率随电流密度变化的规律并与参考值进行对比。图 3 中曲线为模拟



(a) BCS堆栈验证



(b) BMV堆栈验证

图 3 PEMFC 模型模拟值与文献报道值对比

Fig. 3 Comparison of PEMFC model simulation values with reference values

值，离散点为参考值，可以看到，模拟曲线与离散点吻合较好，认为模型可信。

### 2.6 模型参数设置

本文基于北京市住宅建筑负荷设定了 PEMFC 电堆的单电池数量、面积等参数，该电堆主要参数<sup>[22]</sup>如表 4 所示。本文模拟过程基于如下假设：电堆阴极进口空气组分为 21%  $O_2$  和 79%  $N_2$ ；电堆工作温度为 80 °C，阴阳极压力皆为 2.5 bar，入口温度为 25 °C；阴阳极进气相对湿度为 100%；阳极化学计量比为 1.2；图 4 为该电堆燃料电池输出特性曲线。

表 4 PEMFC 电堆参数表

Table 4 Parameter of PEMFC stack

| 参数                 | 数值    | 参数             | 数值        |
|--------------------|-------|----------------|-----------|
| $A/cm^2$           | 943.8 | $j_n/(A/cm^2)$ | 0.001 2   |
| $N$                | 75    | $\lambda$      | 22        |
| $l/\mu m$          | 20    | $R_c/\Omega$   | $10^{-4}$ |
| $j_{max}/(A/cm^2)$ | 1.5   | $T/K$          | 353.15    |

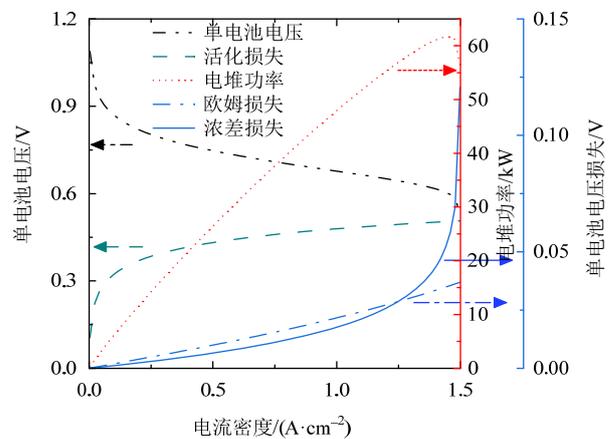


图 4 PEMFC 电堆特性曲线

Fig. 4 PEMFC stack characteristic curve

### 3 结果与讨论

#### 3.1 系统稳态性能评价指标

PEMFC-CHP 系统稳态性能评价指标主要包括电效率、热效率和系统总效率,上述3项指标可以通过式(22)—(25)计算:

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{(P_{\text{elec}} - P_0) \times \eta_{\text{R,DC-AC}}}{\Delta H_{(\text{HHV}, \text{H}_2)}} \quad (22)$$

$$P_0 = P_{\text{compress}} + P_{\text{pump}} \quad (23)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{net}} \times \eta_{\text{TM}}}{\Delta H_{(\text{HHV}, \text{H}_2)}} \quad (24)$$

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{elec}} + \eta_{\text{th}} \quad (25)$$

式中:  $\eta_{\text{R,DC-AC}}$  为直流-交流转换器的效率<sup>[26]</sup>,取96%;  $P_0$  为辅助系统消耗功率;  $\eta_{\text{TM}}$  为换热器的效率<sup>[27]</sup>,取95%,  $\Delta H_{(\text{HHV}, \text{H}_2)}$  为输入系统中  $\text{H}_2$  的高位热值。

#### 3.2 北京市住宅建筑能耗分析

分别选取北京市某典型年中不同季节的典型日做能耗分析。图5、6为北京市某住宅建筑全年和典型日逐时冷热电负荷模拟情况。

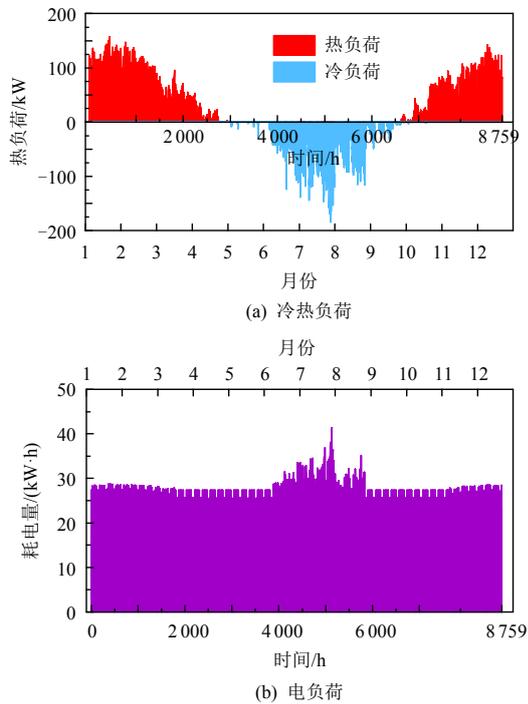
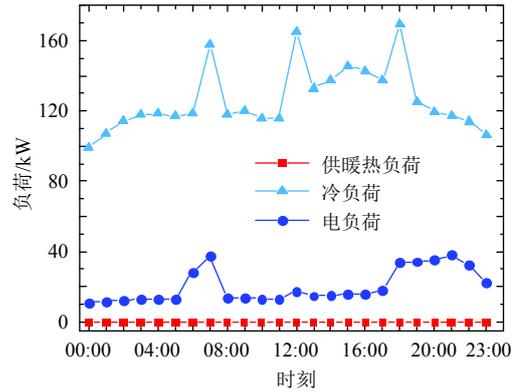


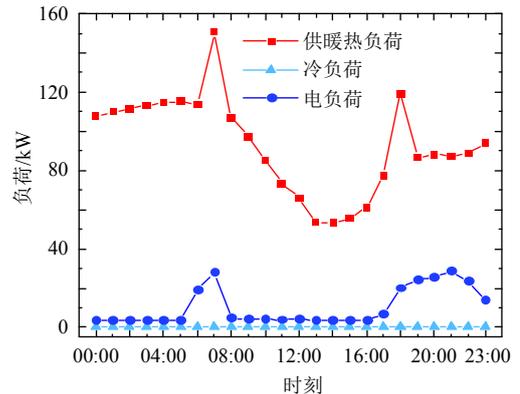
图5 北京市全年逐时负荷

Fig. 5 Hourly energy demands in Beijing throughout the year

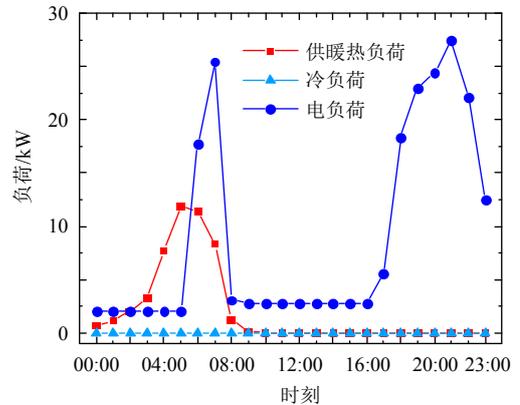
由图5(a)可知,北京市供暖季最大热负荷为167.85 kW,其中供暖热负荷为157.45 kW;空调季最大冷负荷为184.4 kW;北京市全年最冷月为1月,最热月为7月;



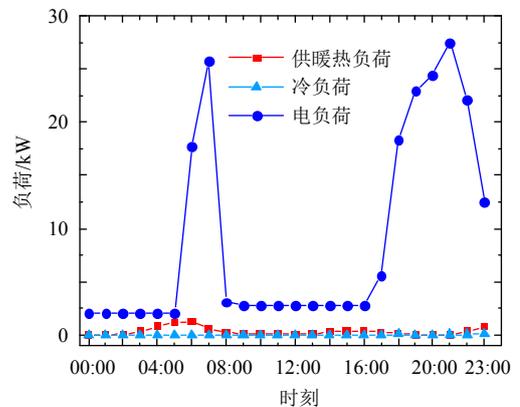
(a) 夏季



(b) 冬季



(c) 过渡季(春)



(d) 过渡季(秋)

图6 北京市典型日逐时负荷

Fig. 6 Hourly energy demands of representative days

由图 5(b)可知，北京市全年逐时电负荷峰值为 41.4kW，空调季(6 月 31 日—8 月 31 日)用电负荷高于全年其他时段，这是由于该时段处于夏季，室外温度较高使居家人员需空调制冷，因此空调电耗较高。电负荷峰谷值是由居家人员活动强度、室外温度和人员在室率等因素决定。全年逐时电负荷在除 6—8 月期间，均呈规律性波动，在除夏季外，其他季节电负荷几乎没有差异。

在图 6 中，各典型日电负荷一天内均有两个峰值，分别为 06:00—08:00 和 18:00—21:00；由于在居住建筑中，这两个时段人员居家活动频繁。此外晚间 18:00—20:00 是一天内的用电高峰时段，00:00—06:00 处于居家人员睡眠时间，几乎无人员活动，为一天中用电低谷，可在这两段时间设计“削峰填谷”调峰储能方案。

夏季典型日的冷负荷峰值分别为 07:00、12:00—13:00 和 18:00 左右；冬季典型日的热负荷峰值在 06:00 和 18:00 左右，主要受室外温度和人员活动影响；过渡季(春)典型日无冷负荷，受凌晨室外温度较低的影响，03:00—07:00 有供热负荷需求，但需求较小；过渡季(秋)典型日的能耗需求主要为电需求和生活热水。

### 3.3 电池工作条件对效率的影响

#### 3.3.1 阳极化学计量比对系统效率的影响

化学计量比的定义为电堆入口的实际反应物流量与产生所需电流所需的最小理论流量之间的比值。由图 7 可知，随着阳极化学计量比从 1.2 增加至 2.0，电效率、热效率和系统总效率分别下降了 0.68%、0.42%和 1.1%；阳极化学计量比增大，使压缩机的耗功增加，电效率下降；入口和出口的 H<sub>2</sub> 质量流量均增加， $Q_{s,i}$ 、 $P_{hg}$ 、 $P_{humid}$  增大，故  $Q_{net}$  减小，系统热效率下降，故系统总效率下降。选取合适的阳极化学计量比可以提高氢气利用率，在实际工程中也需要过量的氢气吹扫防止水淹，但阳极

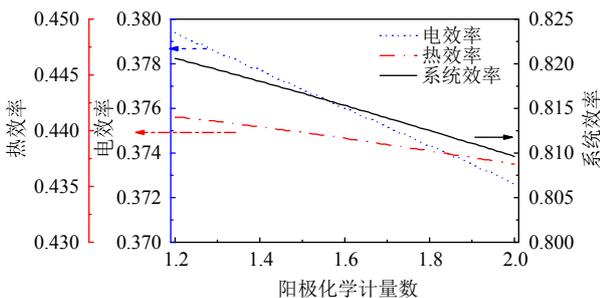


图 7 阳极化学计量比对系统效率的影响

Fig. 7 Effect of anode stoichiometry on system efficiency

化学计量比过大亦会使系统效率下降。

#### 3.3.2 入口温度对系统效率的影响

维持其他参数不变，将入口温度从 25 升高至 65℃。由图 8 可知，随着入口温度的升高，电效率由 37.94%降至 37.19%，下降 0.75%；热效率从 44.12%增至 57.34%，增大 13.22%；系统效率从 82.06%增至 94.53%，增大 12.47%。入口温度的升高增加了电堆入口气体的总焓值，由式(19)—(21)可知，随入口温度升高， $Q_{ch}$  和  $P_{elec}$  不变， $Q_{s,i}$  减小，气体预热所需能量减小，故  $Q_{net}$  增大，热效率升高；辅助系统消耗功率增大使电效率下降，但幅度较小；提高入口温度可以使热效率升高，因此需要选择合适的入口温度。

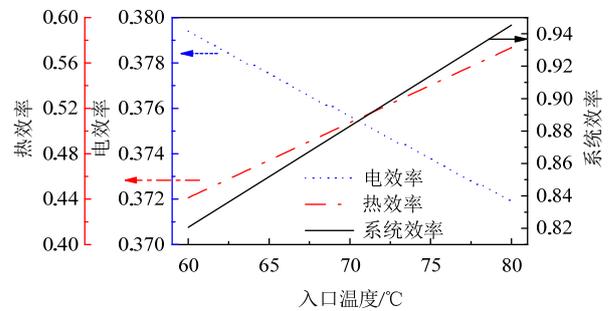


图 8 入口温度对系统性能的影响

Fig. 8 Effect of inlet temperature on system performance

#### 3.3.3 电池工作温度对系统效率的影响

维持其他参数不变，将电池工作温度从 60 升高至 80℃。由图 9 可知，随着工作温度的升高，系统总效率从 84.67%降至 82.06%，下降 2.61%；电效率从 37.71%升至 37.94%，上升 0.23%；热效率从 46.96%降至 44.12%，下降 2.84%，这是由于工作温度的升高，燃料电池内部反应速率加快，电导率增强使其输出功率增大，同时极化损失减小，因此电效率增大；电堆入口总焓值不变，电功率增加，则电堆产生的热功率随之下降，但电、热效率变化幅度均较小。故通过提高工作温度来提升系统效率并不可行。

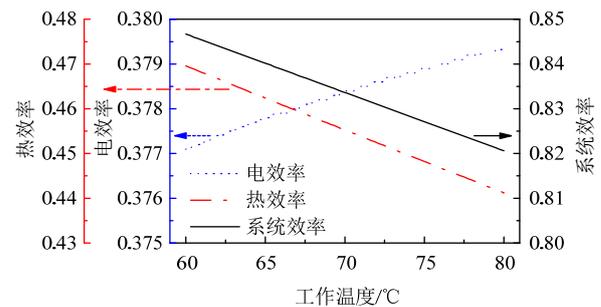


图 9 工作温度对系统性能的影响

Fig. 9 Effect of operating temperature on system performance

### 3.3.4 电池阳极压力对系统效率的影响

维持其他参数不变,将电堆阳极压力从 1 bar 增至 6 bar,由图 10 可知,随着阳极压力的升高,系统综合效率下降 2.22%;电效率由 37.47% 升至 38.26%,升高 0.79%;热效率由 45.58% 降至 42.57%,下降 3.01%。原因是阳极压力升高,输出电压增大,电功率增大,但提高工作压力,压缩机的电力支出也随之升高,最后表现为电效率提升,热效率下降。当系统采用“以热定电”运行策略时,可以选择阳极压力较小的工作条件以输出更多的热来满足用户更多的热需求;反之,当系统采用“以电定热”运行策略则可选择阳极压力较大的工作条件输出更多的功率。

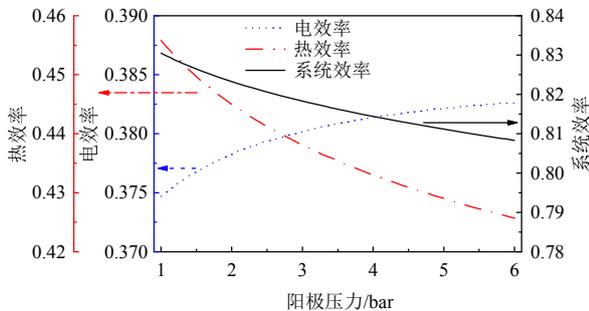


图 10 阳极压力对系统性能的影响

Fig. 10 Effect of anode pressure on system performance

### 3.3.5 电池阴极压力对系统效率影响

维持其他参数不变,将电堆阴极压力从 1 bar 增加至 6 bar,由图 11 可知,随着阴极压力升高,电效率由 40.81% 降至 34.11%,下降 6.7%;热效率由 45.77% 降至 42.38%,下降 3.39%;系统综合效率下降 10.1%;电堆的输出功率  $P_{elec}$  随着阴极压力升高而增大,但空气压缩机的功耗较大使得系统功率下降,表现为电效率下降。

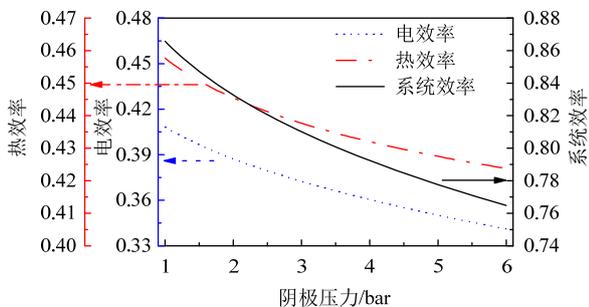


图 11 阴极压力对系统性能的影响

Fig. 11 Effect of cathode pressure on system performance

在实际运行中,阴极侧与阳极侧的供气压力需相匹配,若阴阳极压差过大,有可能会损坏膜而对整个系统造成不可逆的伤害。

## 3.4 北京住宅建筑 PEMFC-CHP 管理策略

“以电定热”和“以热定电”是两种常见的用于热电联供系统的运行策略。“以电定热”(following the electric load, FEL)是指系统的燃料电池输出功率优先满足用户的电力需求,热电联供系统产生的热量供给用户的热需求。在该运行策略下,当系统供热量大于用户所需时,可将多余的热量以热水形式储存在储热设备中,待系统供热不足时,可优先使用存储的热量,若供热量仍小于用户热负荷时则需其他制热设备来满足用户热需求。

“以热定电”(following the thermal load, FTL)指在发电设备容量范围内,优先满足用户的热负荷需求,根据系统逐时提供热量的多少来确定发电量。在该运行策略下,当发电量超过用户所需电负荷时,余电上网;反之,不足的部分可从电网购得。

根据 3.3 节中关于电池工作参数对系统性能的影响,可分别选定“以电定热”和“以热定电”运行策略下工作条件,并针对北京市不同季节下的用户需求制定相应的热电联供系统运行策略,通过调节电流密度实现对变负荷情况下对系统的调控。

### 3.4.1 夏季 PEMFC-CHP 策略

北京市夏季热需求主要为生活热水,电需求主要为空调及其他用电设备,采用“以电定热”能量管理策略。根据 2.6 节中的电堆特性可知,在电堆工作温度为  $80^{\circ}\text{C}$ ,阴阳极进口压力均为 2.5 bar 的情况下,该住宅建筑所配的电堆最大输出功率约为  $50.72\text{ kW}$ ,在  $j=1\text{ A/cm}^2$  时,输出电功率约为  $40.34\text{ kW}$ ;夏季住宅建筑最大电负荷为  $41.4\text{ kW}$ ,可完全满足夏季用电需求。

$$D_{\text{DHW}} = K_h q_v n_p \rho c_p (T_{\text{hw}} - T_{\text{cw}}) \quad (26)$$

式中:  $D_{\text{DHW}}$  为小时生活热水负荷;  $K_h$  为时均系数,具体取值详见图 12;  $q_v$  为热水用水定额;  $n_p$  为该建筑中总人数;  $\rho$  和  $c_p$  为水的密度和比热容;  $T_{\text{hw}}$  为生活热水温度;  $T_c$  为冷水温度。

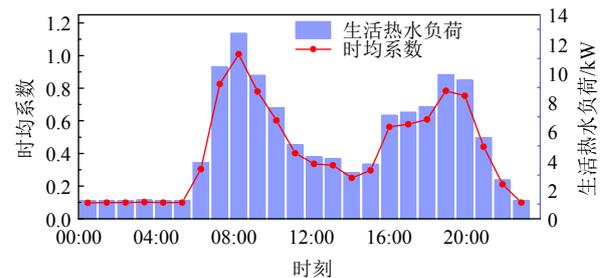


图 12 生活热水时均系数

Fig. 12 Average coefficient of domestic hot water

由式(26)可知, 夏季一天内生活热水所需供热量约为 121.82 kW·h, 以夏季典型日为例, 采用“以电定热”策略下的供热量约为 276.78 kW·h, 故在该策略下的供热量可完全满足夏季生活热水的需求。

### 3.4.2 冬季燃料电池热电联供策略

北京市冬季热需求为生活热水和供热, 电需求主要为照明和设备用电。根据 3.2 节中北京住宅建筑能耗分析可知, 冬季总热负荷峰值为 167.85 kW, 其中供热负荷为 157.45 kW。采用“以热定电”能量管理策略, 根据 3.3 节中电堆相关参数分析选定合适电堆的工作参数以增加供热量, 在工作温度 80 °C, 入口温度为 65 °C, 阴阳极进口压力为 1.2 bar 的情况下, 最大输出热功率为 109.6 kW。以 24 h 为一周期, 利用储热水箱对一天内的供热量进行储能调峰。以冬季典型日为例, 该天所需热量一共为 2 386.2 kW·h, 该电堆一天的最大供热量为 2 630.4 kW·h, 可满足冬季最冷日的热负荷需求。同时, 冬季对供热要求增加, 在必要时刻需用燃料电池的电制热或其他手段来满足极端冬季条件下的热需求。

在电流密度为 1 A/cm<sup>2</sup> 时, 输出电功率约为 42.33 kW, 而北京市冬季住宅最大电负荷为 28.77 kW, 即在“以热定电”策略下亦可满足住宅电需求, 同时余电上网, 可进一步提高能源利用率。

### 3.4.3 过渡季燃料电池热电联供策略

1) 北京市春季热需求主要为生活热水, 在初春时可能会有供热需求但需求较小。采用“以电定热”策略, 以过渡季(春)典型日为例, 该日总热需

求为 170.95 kW·h, 电负荷峰值为 27.43 kW; 在电堆工作温度为 80 °C, 阴阳极进口压力均为 2.5 bar 的情况下, 采用“以电定热”策略下输出该日供热量为 185.85 kW·h; 可满足住户的热电需求。

2) 北京市秋季能耗需求主要为生活热水和电需求。采用“以电定热”策略, 以过渡季(秋)典型日为例, 该日总热需求为 130.76 kW·h, 电负荷峰值为 27.43 kW; 在电堆工作温度为 80 °C, 阴阳极进口压力均为 2.5 bar 的情况下, 电堆一天的供热量为 186.66 kW·h, 可满足住户的热电需求。

3) 根据 3.2 节中关于北京市住宅建筑的能耗分析, 其电负荷范围为 2.1~41.4 kW, 可在原有系统的基础上增加储能电池, 这既可在缩小 PEMFC 电池规模的情况下增大系统负载的上下限, 也可减少负荷波动对系统的影响。针对一天中的不同时段, 在用电低谷时 PEMFC 电堆可对储能电池充电, 而在用电高峰时段, 储能电池可与 PEMFC 一起供电, 实现储能调峰的功能。

### 3.4.4 住宅 PEMFC-CHP 系统能源分析

设置基线供能系统, 由燃气锅炉、家用燃气壁挂炉和柴油发电机组组成; 燃气锅炉提供供暖负荷, 家用燃气壁挂炉提供生活热水负荷, 柴油发电机提供电负荷(输入柴油发电机的能量换算成等热值的天然气进行比较); 假设 PEMFC-CHP 系统的氢源由天然气重整提供, 根据式(27)~(29)分别计算 4 个典型日两系统<sup>[28]</sup>的耗气量并进行对比, 详如表 5 所示。

表 5 PEMFC-CHP 系统与基线系统耗气量对比

Table 5 Gas consumption comparison of PEMFC-CHP system and baseline system

| 典型日 | 策略       | 累计热负荷/(kW·h) | 累计电负荷/(kW·h) | 重整天然气耗气量/(Nm <sup>3</sup> ) | 基线系统耗气量/(Nm <sup>3</sup> ) | 耗气量对比/% |
|-----|----------|--------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|---------|
| 春   | 以电定热     | 170.95       | 214.25       | 59.51                       | 97.83                      | 39.16   |
| 夏   | 以电定热     | 121.82       | 309.68       | 86.02                       | 125.82                     | 31.63   |
| 秋   | 以电定热     | 130.76       | 214.54       | 59.59                       | 93.14                      | 36.02   |
| 冬   | 以热定电     | 2 386.2      | 246.15       | 323.49                      | 376.35                     | 14.04   |
|     | 以电定热(补热) | 2 386.2      | 246.15       | 325.29                      | 376.35                     | 13.57   |

$$V_{\text{gas-cov}} = \frac{3.6 \times \sum Q_{\text{load}}}{\eta_{\text{equ}} \times \Delta H_{(\text{LHV}_{\text{NG}})}} \quad (27)$$

式中:  $V_{\text{gas-cov}}$  为基线系统各设备天然气耗气量;  $\sum Q_{\text{load}}$  为累计热或电负荷;  $\eta_{\text{equ}}$  为设备(燃气锅炉、家用燃气壁挂炉和柴油发电机)效率;  $\Delta H_{(\text{LHV}_{\text{NG}})}$  为天然气低位热值。

$$V_{\text{H}_2\text{-usage}} = 3.6 \times 22.4 \cdot \frac{\sum P_{\text{sys}}}{2F \cdot V_{\text{cell}}} \quad (28)$$

$$V_{\text{gas\_PEM}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{-usage}}}{4 \cdot y_{\text{H}_2}} \quad (29)$$

式中:  $V_{\text{H}_2\text{-usage}}$  为 PEMFC-CHP 系统耗氢量;  $V_{\text{gas\_PEM}}$  为 PEMFC-CHP 系统天然气耗气量;  $\sum P_{\text{sys}}$  为累积电负荷;  $y_{\text{H}_2}$  为天然气重整制氢收率。

除冬季外, 其余季节均采用“以电定热”策略, 在春、夏、秋 3 个典型日中, PEMFC-CHP 系统耗气量相比基线系统分别减少 39.16%、31.63%和

36.01%，展现了燃料电池热电联供系统的优越性。在冬季典型日的耗气量对比中，若采用“以热定电”策略，PEMFC-CHP系统耗气量相比基线系统减少14.04%且在“以热定电”策略下余电可用于上网或者给周围小区用电设备供电；若冬季采用“以电定热”策略并辅以燃气锅炉补热，则需要燃气锅炉补热量为2103.1 kW·h，折合成天然气耗气量共需325.29 Nm<sup>3</sup>，相比基线系统耗气量减少13.57%。

## 4 结论

本文通过对北京市住宅建筑进行能耗模拟分析，选定合适的PEMFC电堆，针对该建筑搭建PEMFC-CHP系统以提供建筑所需的生活热水、供暖负荷及电负荷。并对影响系统效率的关键参数(阳极化学计量数、入口温度、工作温度及阴阳极压力)进行研究分析；根据系统模拟结果及参数分析对北京市住宅建筑在不同季节的策略进行讨论分析，结论如下：

1) 本文利用DeST能耗模拟软件，搭建接近于真实情况的北京市住宅建筑能耗模型，并分析全年逐时能耗情况，得到不同季节下北京市住宅建筑冷热电负荷特征。

2) 在北京市住宅建筑能耗分析的基础上，搭建PEMFC-CHP系统模型，满足建筑的供能需求；对影响系统效率的关键参数：阳极化学计量数、入口温度、工作温度和阴阳极压力进行研究分析，其中入口温度对系统效率的影响最大，由25增大至65℃时，热效率和系统总效率分别上升13.22%和12.47%，电效率下降0.75%；此外，工作压力提高增大了电堆输出功率，但压缩机功耗也随之增大。

3) 针对北京市不同季节的能耗特点，制定相应能量管理策略。冬季最大总热负荷为167.85 kW，电负荷峰值为28.77 kW；冬季采用“以热定电”策略并以24h为一周期配备储热水箱进行调峰储能，余电上网；夏季主要以电需求为主，电负荷峰值为41.4 kW，采用“以电定热”策略；过渡季均采用“以电定热”策略满足用户热电需求。该策略均能符合北京地区能源需求，为未来建筑供能方式的升级提供数据资料。

4) 设置基线供能系统，并与不同季节典型日的PEMFC-CHP系统对比耗气量，分别减少39.16%、31.63%、36.01%和14.04%；若冬季采用“以电定热”策略并辅以燃气锅炉补热，对比基线系统，天

然气耗气量减少13.57%。

5) 北京市属我国典型北方地区，其他寒冷地区住宅用户可以北京市为参考选定能量管理策略。与寒冷地区相比，严寒地区在冬季热需求更大而在夏天冷需求相对较低，故在严寒地区住宅建筑冬季在“以热定电”的基础上建议配置辅助供热设备。

结合可再生能源消纳，可提升PEMFC-CHP系统容量与燃料利用率。随着燃料电池成本降低，该技术有望成为未来高效低碳建筑供能主流方式之一，力促建筑行业在能源电力领域的低碳转型。

## 参考文献

- [1] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J]. 建筑, 2023(2): 57-69.  
China building energy consumption and carbon emissions research report(2022)[J]. Architecture, 2023(2): 57-69(in Chinese).
- [2] ELLAMLA H R, STAFFELL I, BUJLO P, et al. Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector[J]. Journal of Power Sources, 2015, 293: 312-328.
- [3] 侯绪凯, 孙荣峰, 耿文广, 等. 基于质子交换膜燃料电池的热电联产系统的研究进展[J]. 化学通报, 2023, 86(12): 1494-1504.  
HOU Xukai, SUN Rongfeng, GENG Wenguang, et al. Research progress in combined heat and power system based on proton exchange membrane fuel cell [J]. Chemistry, 2023, 86(12): 1494-1504(in Chinese).
- [4] REN Hongbo, GAO Weijun. Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(6): 853-861.
- [5] GU Qunying, REN Hongbo, GAO Weijun, et al. Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management options for residential buildings in Shanghai[J]. Energy and Buildings, 2012, 51: 143-152.
- [6] NALBANT Y, COLPAN C O, DEVRIM Y. Energy and exergy performance assessments of a high temperature-proton exchange membrane fuel cell based integrated cogeneration system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(5): 3584-3594.
- [7] ROMDHANE J, LOUAHLIA H, MARION M. Dynamic modeling of an eco-neighborhood integrated micro-CHP based on PEMFC: Performance and economic analyses [J]. Energy and Buildings, 2018, 166: 93-108.
- [8] ARSALIS A, KÆR S K, NIELSEN M P. Modeling and optimization of a heat-pump-assisted high temperature proton exchange membrane fuel cell micro-combined-heat-and-power system for residential applications[J]. Applied Energy, 2015, 147: 569-581.

- [9] 李灿. 家用燃料电池热电联产系统的能量效率分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.  
LI Can. Energy efficiency analysis of fuel cell cogeneration system for residential application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017(in Chinese).
- [10] 王子良. 微型燃料电池热电联产系统模拟及制氢系统研发[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
WANG Ziliang. Modeling of a fuel cell based Micro-CHP system and the development of a H<sub>2</sub> generation unit [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012(in Chinese).
- [11] SUN Shouqiang, SU Yumei, YIN Chengbo, et al. Optimal parameters estimation of PEMFCs model using Converged Moth Search Algorithm[J]. Energy Reports, 2020, 6: 1501-1509.
- [12] CHANG Huawei, XU Xiangxiang, SHEN Jun, et al. Performance analysis of a micro-combined heating and power system with PEM fuel cell as a prime mover for a typical household in North China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(45): 24965-24976.
- [13] 黄念之. 燃料电池热电联产系统的建模分析及优化[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
HUANG Nianzhi. Modeling, analysis and optimization of fuel cell-based combined heat and power system [D]. Ji'nan: Shandong University, 2018(in Chinese).
- [14] SLEITI A K, AL-AMMARI W A, ARSHAD R, et al. Energetic, economic, and environmental analysis of solid oxide fuel cell-based combined cooling, heating, and power system for cancer care hospital[J]. Building Simulation, 2022, 15(8): 1437-1454.
- [15] CAI Shanshan, LI Xu, LI Song, et al. Flexible load regulation method for a residential energy supply system based on proton exchange membrane fuel cell[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 258: 115527.
- [16] FAN Lixin, TU Zhengkai, LUO Xiaobing, et al. MW cogenerated proton exchange membrane fuel cell combined heat and power system design for eco-neighborhoods in North China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(6): 4033-4046.
- [17] JIA J, LI Q, WANG Y, et al. Modeling and dynamic characteristic simulation of a proton exchange membrane fuel cell[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 283-291.
- [18] AUTHAYANUN S, AUNSUP P, PATCHARAVORACHOT Y, et al. Theoretical analysis of a biogas-fed PEMFC system with different hydrogen purifications: Conventional and membrane-based water gas shift processes[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 60-69.
- [19] CHEN Xi, GONG Guangcai, WAN Zhongmin, et al. Performance analysis of 5 kW PEMFC-based residential micro-CCHP with absorption chiller [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(33): 10647-10657.
- [20] SPIEGEL C. Designing and building fuel cells[M]. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [21] 符昊宇, 谢长君, 朱文超, 等. 70kW 燃料电池热电联产系统水热管理研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(5): 454-462.  
FU Haoyu, XIE Changjun, ZHU Wenchao, et al. Research on water and heat management of 70 kW fuel cell cogeneration system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(5): 454-462(in Chinese).
- [22] 吴磊. 百千瓦燃料电池热电联产系统模拟分析[D]. 北京: 清华大学, 2022.  
WU Lei. Simulation analysis of a 100 kW fuel cell combined heat and power system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022(in Chinese).
- [23] ZHAO Pan, WANG Jiangfeng, GAO Lin, et al. Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(4): 3382-3391.
- [24] DIAB A A Z, ALI H, ABDUL-GHAFFAR H I, et al. Accurate parameters extraction of PEMFC model based on metaheuristics algorithms[J]. Energy Reports, 2021, 7: 6854-6867.
- [25] FRANCESCONI J A, MUSSATI M C, AGUIRRE P A. Effects of PEMFC operating parameters on the performance of an integrated ethanol processor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(11): 5940-5946.
- [26] O'HAYRE R, 车硕源, COLELLA W, 等. 燃料电池基础[M]. 王晓红, 黄宏, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 245.  
O'Hayre R, Suk-won CHA, COLELLA W, et al. Fuel cell fundamentals[M]. WANG Xiaohong, HUANG Hong, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 245(in Chinese).
- [27] 上海市质量技术监督局. DB31/929—2015 板式换热器能源效率等级与评价方法[S]. 上海: 上海市地方标准文件出版社, 2015.  
Shanghai Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. DB31/929—2015 Energy efficiency grade and evaluation method for plate heat exchanger[S]. Shanghai: Publishing House of Shanghai Local Standard Document, 2015(in Chinese).
- [28] DICKS A L, RAND D A J. Fuel cell systems explained [M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2018.



彭黎菊

在线出版日期: 2024-02-28。

收稿日期: 2023-10-18。

作者简介:

彭黎菊(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为建筑燃料电池热电联供系统模拟分析, 2108140421018@bucea.edu.cn;

\*通信作者: 李爽(1989), 男, 助理研究员, 研究方向为氢能利用、气体净化等, shuangli@tsinghua.edu.cn。

(编辑 张文鑫)

# Simulation Study of Fuel Cell CHP System and Energy Demands Analysis for Residential Buildings in Beijing

PENG Liju<sup>1</sup>, LI Shuang<sup>2\*</sup>, SHI Yixiang<sup>2</sup>, CAI Ningsheng<sup>2</sup>, WANG Suilin<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University)

**KEY WORDS:** combined heat and power; fuel cell; energy consumption analysis; simulation; energy management strategies

In 2020, the energy consumption of buildings accounted for 21.3% of the total national energy consumption; the carbon emission in the construction operation stage accounted for 21.7% of the total carbon emission in China. On the one hand, residential buildings are important places for people to live in. On the other hand, the area of urban residential buildings is expanding rapidly. Therefore, the construction of green and efficient residential building energy supply system has become the top priority. The PEMFC-CHP (PEMFC, Proton exchange membrane fuel cell; CHP, Combined heat and power) system provides a new approach of energy supply for residential buildings with the characteristics of low carbon and high efficiency.

In this paper, a PEMFC-CHP system is established based on the simulation analysis of annual hourly energy consumption of a residential building in Beijing, capital city in northern China. The parameters affecting system performance are analyzed and energy management strategies of four seasons are optimized. The energy saving potential of PEMFC-CHP system is explored by comparing to the gas consumption of a conventional baseline energy supply system.

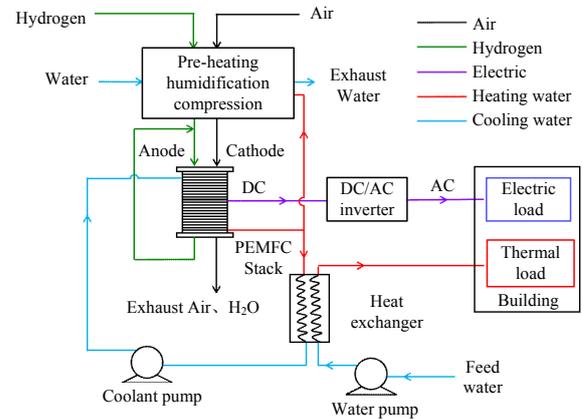
Based on the load simulation results of DeST software, the PEMFC-CHP system is established. The main model formula are :

$$U_{\text{cell}} = E - U_{\text{act}} - U_{\text{ohm}} - U_{\text{con}} \quad (1)$$

$$P_{\text{elec}} = N \cdot I \cdot U_{\text{cell}} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{(P_{\text{elec}} - P_0) \times \eta_{\text{R,DC-AC}} + Q_{\text{net}} \times \eta_{\text{TM}}}{\Delta H_{(\text{HHV}, \text{H}_2)}} \quad (3)$$

where  $U_{\text{cell}}$  is the cell voltage;  $U_{\text{act}}$ ,  $U_{\text{ohmic}}$ , and  $U_{\text{con}}$  are the activation overvoltage, ohmic overvoltage and concentration overvoltage, respectively;  $P_0$  is the auxiliary system consumes power. The schematic diagram is shown in Fig. 1.



**Fig. 1** Layout of PEMFC-CHP system for building

According to the analysis results of load characteristics and fuel cell working parameters, the energy management strategies under different seasons are developed. The "following the thermal load" strategy is adopted in winter and equipped with heat storage water tank for peak regulation; the "following the electric load" strategy is adopted in other seasons. The gas consumption of the PEMFC-CHP system in different seasons drop by more than 14% compared to the baseline system.

In summary, the results show preference in energy consumption and conversion rate for PEMFC-CHP system, which makes it a good possibility in building energy supply in the future.