

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200242

# 含热泵和相变储能的多能互补微能源网运行优化方法研究

张彼德<sup>1</sup>, 陈颖倩<sup>1</sup>, 李孟洁<sup>2</sup>, 肖丰<sup>1</sup>, 洪锡文<sup>1</sup>

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 国网天府新区供电公司, 四川 成都 610094)

**摘要:** 在区域能源互联网大力推进、绿色低碳经济大力发展和多能流耦合度不断增高的背景下, 如何提高微能源网的经济稳定性, 实现其运行优化已成为研究热点。然而空调负荷的日渐增长给微能源网的经济运行带来了挑战。为此引入热泵和相变储能, 以缓解用能紧张, 提高能源利用效率和系统的灵活性。综合考虑热泵的出力特性和相变储能的储能特性, 提出了一种多能互补微能源网运行优化模型。为分析模型的经济节能性, 在分时电价和并网运行条件下, 以全寿命周期成本最低为目标函数, 采用混合整数规划法进行求解。仿真结果表明, 引入热泵和相变储能能够减少空调负荷耗能, 降低系统运行成本, 具有较好的灵活性和经济性。

**关键词:** 相变储能; 热泵; 多能互补; 混合整数规划; 微能源网; 全寿命周期成本

## Research on an operational optimization method of multi-energy complementary micro energy grid with heat pump and phase change energy storage

ZHANG Bide<sup>1</sup>, CHEN Yingqian<sup>1</sup>, LI Mengjie<sup>2</sup>, XIAO Feng<sup>1</sup>, HONG Xiwen<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. State Grid Tianfu New Area Power Supply Company, Chengdu 610094, China)

**Abstract:** With a background of the vigorous promotion of the regional energy internet, vigorous development of a green and low-carbon economy, and the increasing coupling of multiple energy flows, how to improve the economic stability of the micro-energy network and optimize its operation has become a hot research topic. However, the increasing load of air-conditioning has brought challenges to the economic operation of the micro-energy network. To this end, heat pumps and phase-change energy storage are introduced to alleviate energy shortages, improve energy efficiency and system flexibility. Considering the output characteristics of the heat pump and the energy storage characteristics of the phase change energy storage, an operational optimization model of a multi-energy complementary micro-energy network is proposed. To analyze the economic and energy-saving effect of the model, under the conditions of time-of-use electricity price and grid-connected operation, with the lowest life cycle cost as the objective function, the method of mixed integer programming is used to solve the model. Simulation results indicate that the introduction of heat pumps and phase change energy storage can reduce both air conditioning load energy consumption and system operating costs, and has better flexibility and economy.

This work is supported by Basic Research for Application of Sichuan Science and Technology Department (No. 2017JY0204).

**Key words:** phase change energy storage; heat pump; multi energy complementary; mixed integer programming; micro energy grid; life-cycle cost

## 0 引言

面对外界复杂的运行工况和内部多能量流耦合

等特征, 实现多能互补微能源网运行优化对于保证其在复杂环境下能够经济可靠运行具有重要现实意义。但随着社会经济快速发展和人民物质水平不断提高, 空调负荷大幅上涨<sup>[1-2]</sup>, 给多能互补微能源网的经济稳定运行带来了挑战。热泵作为一种新型的

基金项目: 四川省科技厅应用基础研究项目资助(2017JY0204)

空调系统, 不仅能在功能上代替常规空调而且更具有经济节能性<sup>[3-4]</sup>。相变储能具有能量转移特性和长时间大容量储能能力<sup>[5-6]</sup>。将热泵和相变储能引入多能互补微能源网能有效缓解用能紧张, 提高能源利用效率和增强系统调节的灵活性, 对实现多能互补微能源网的运行优化具有重要意义。

目前, 国内外对多能互补微能源网的运行优化进行了相关研究, 取得了一些成果。文献[7]提出了一种考虑碳排放成本的多能互补新能源微网优化运行模型, 通过建立碳排放成本计算模型, 在提高经济性的同时实现了绿色低碳。文献[8]基于飞蛾扑火优化算法建立了混合能源运营优化模型, 能有效降低系统的运行成本。文献[9]提出了一种考虑风电不确定性的综合能源系统鲁棒优化方法, 以获得不确定条件下的最优解决方案。文献[10]基于区间理论, 对多能互补系统进行耦合建模, 实现多目标优化。以上文献主要从风光负荷的不确定性、系统的经济运行优化、多目标优化和求解算法等方面进行阐述, 未涉及热泵和相变储能。文献[11-12]通过在微网中引入热泵, 用以调节热、电比例, 提高系统的经济灵活性, 但模型中未考虑储热装置或只是简单地采用储热水罐进行储热, 对储热装置的储能能力没有深入研究。文献[13-14]通过热泵将富余电能转化为热能储存在建筑相变墙体中, 能够实现长时间大容量储能, 具有工程上和经济上的可行性, 但未考虑到单一热泵运行造成的问题。

针对上述问题, 以一个含光伏、风机、空气-土壤源热泵、蓄电池和相变储能装置的系统为例进行分析, 提出一种含热泵和相变储能的多能互补微能源网运行优化模型。综合考虑各机组和储能的运行特性, 采用混合整数线性规划方法进行求解, 得出各机组的最优出力和总运行费用。仿真结果表明所提模型具有经济性与合理性。

## 1 多能互补微能源网各单元数学模型

本文构建了一个含风机、光伏、空气-土壤源热泵、相变储能、蓄电池、冷热空调负荷和电负荷并网运行的多能互补微能源网, 其系统结构及能量流动过程如图1所示。网内的电力负荷主要由风机、光伏和电网提供, 空调负荷由土壤源热泵和空气源热泵提供, 蓄电池和相变储能箱因其双向可控性, 作为一种调控手段, 能够增强系统调节的灵活性, 解决能量供需的不平衡。网内电压等级为0.38 kV, 通过公共连接点与配电网相连, 配电网电压等级为10 kV。

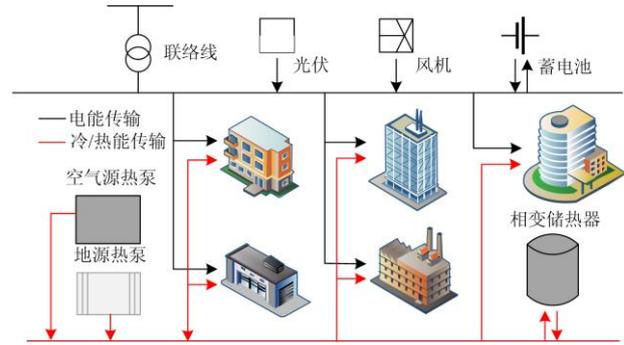


图1 多能互补微能源网结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of multi-energy complementary micro-grid system

### 1.1 空气-土壤源热泵数学模型

热泵是一种利用自然界中低品位的冷/热能, 通过输入少量电能, 来产生高品位冷/热能的装置。常用的热泵主要有空气源热泵和土壤源热泵等, 但由于自身条件的限制和外界环境因素会使单一热泵的经济节能效果不佳。如图2所示, 土壤源热泵在低负荷率运行状态下能效较低, 空气源热泵的能效比随温度升高而降低, 这些都会导致热泵独立运行经济性不佳。而土壤-空气源热泵不仅能有效缓解上述矛盾, 还能提高系统的经济节能性。

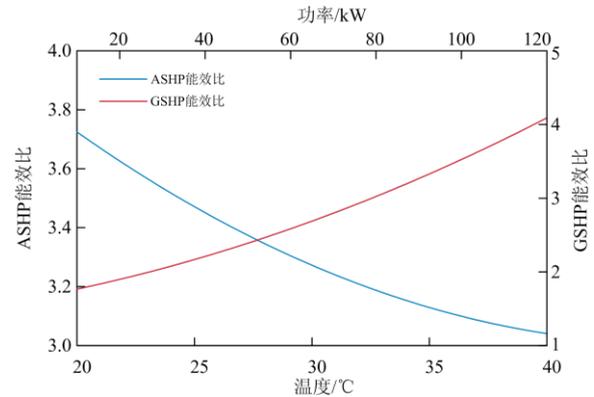


图2 空气源热泵和土壤源热泵能效比

Fig. 2 Energy efficiency ratio of air source heat pump and ground source heat pump

#### 1) 土壤源热泵模型

土壤源热泵通过埋在地下的封闭管道从土壤中吸收或释放能量, 以达到制冷和供暖的目的。土壤源热泵的能效比与机组的部分负荷率有关, 其出力的数学模型如式(1)、式(2)所示<sup>[15]</sup>。

$$COP_{gshp,t} = a_1^{gshp} + a_2^{gshp} \left( \frac{Q_{gshp,t}}{Q_{gshp,r}} \right) + a_3^{gshp} \left( \frac{Q_{gshp,t}}{Q_{gshp,r}} \right)^2 \quad (1)$$

$$Q_{\text{gshp},t} = \text{COP}_{\text{gshp},t} P_{\text{gshp},t} \quad (2)$$

式中： $a_1^{\text{gshp}} = 1.65$ 、 $a_2^{\text{gshp}} = 1.3$ 、 $a_3^{\text{gshp}} = 1.14$  分别为土壤源热泵的载荷系数； $\text{COP}_{\text{gshp},t}$ 、 $P_{\text{gshp},t}$ 、 $Q_{\text{gshp},t}$  分别为  $t$  时段土壤源热泵的能效系数，耗电功率和输出功率； $Q_{\text{gshp},r}$  为地源热泵的额定输出功率。

## 2) 空气源热泵模型

空气源热泵是以空气为冷/热源为室内制冷供暖的一种节能设备，其工作特性与外界环境温度密切相关。空气源热泵的能效系数与室外环境温度的函数关系式如式(3)、式(4)所示<sup>[16]</sup>。

$$\text{COP}_{\text{ashp},t} = a_1^{\text{ashp}} + a_2^{\text{ashp}} T_{\text{et},t} + a_3^{\text{ashp}} T_{\text{et},t}^2 \quad (3)$$

$$Q_{\text{ashp},t} = \text{COP}_{\text{ashp},t} P_{\text{ashp},t} \quad (4)$$

式中： $a_1^{\text{ashp}} = 5.2887$ 、 $a_2^{\text{ashp}} = -0.1002$ 、 $a_3^{\text{ashp}} = 0.0011$ ； $T_{\text{et},t}$  为  $t$  时段室外温度； $\text{COP}_{\text{ashp},t}$ 、 $P_{\text{ashp},t}$ 、 $Q_{\text{ashp},t}$  分别为空气源热泵  $t$  时段的能效系数、耗电功率和输出功率。

## 1.2 储能模型

### 1) 储电装置模型

蓄电池作为微能源网内平抑可再生能源波动和缓解用能紧张的关键设备<sup>[17]</sup>，其寿命的长短与充放电次数和充放电深度相关。由于储电装置自身特性，在使用过程中会存在一些能量损耗，其剩余容量公式为<sup>[18]</sup>

$$\text{SOC}_{\text{ees},t} = (1 - \delta_{\text{ees}}) \text{SOC}_{\text{ees},t-1} + \left( P_{\text{ees},t}^{\text{ch}} \eta_{\text{ees, ch}} - \frac{P_{\text{ees},t}^{\text{dis}}}{\eta_{\text{ees, dis}}} \right) \Delta t \quad (5)$$

式中： $\delta_{\text{ees}}$  为蓄电池自放电率； $\eta_{\text{ees, ch}}$ 、 $\eta_{\text{ees, dis}}$  为蓄电池充放电效率； $P_{\text{ees},t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{ees},t}^{\text{dis}}$ 、 $\text{SOC}_{\text{ees},t}$  分别为  $t$  时段蓄电池的输入输出功率、剩余储能容量。

### 2) 储热装置模型

储热在缓解热能供需不平衡，实现新能源消纳的同时还具有削峰填谷的作用<sup>[19-20]</sup>。相变储能箱作为一种储热装置，具有价格低廉、储能容量大、寿命长等特点，相比与其他储能，具有较高的技术经济性，适用于微能源网。参考文献<sup>[21]</sup>选用 3 台理论储热量为 90 kWh 的相变储能箱，外壳采用 304 不锈钢壳体，并作保温夹层处理，储能箱内部采用波纹管翅换热结构，相变储能箱结构示意图如图 3 所示。相变储能箱储能密度的大小主要取决于相变材料，加入复合相变材料后，对于同样体积的蓄能水箱，其储热密度是传统蓄能水箱的 2.6 倍<sup>[22]</sup>。

相变储热箱内部储放热过程较为复杂，为简化计算，将该过程类似于一般储热装置的储放热过程

进行分析，其数学模型为

$$\text{SOC}_{\text{pcm},t} = (1 - \delta_{\text{pcm}}) \text{SOC}_{\text{pcm},t-1} + \left( Q_{\text{pcm},t}^{\text{ch}} \eta_{\text{ees, ch}} - \frac{Q_{\text{pcm},t}^{\text{dis}}}{\eta_{\text{ees, dis}}} \right) \Delta t \quad (6)$$

式中： $\text{SOC}_{\text{pcm},t}$  为  $t$  时刻相变储能装置内所储存的冷/热量； $\delta_{\text{pcm}}$  为相变储能的自放能率； $\eta_{\text{ees, ch}}$ 、 $\eta_{\text{ees, dis}}$  为相变储能的储放能效率； $Q_{\text{pcm},t}^{\text{ch}}$ 、 $Q_{\text{pcm},t}^{\text{dis}}$  为  $t$  时段储放能功率。

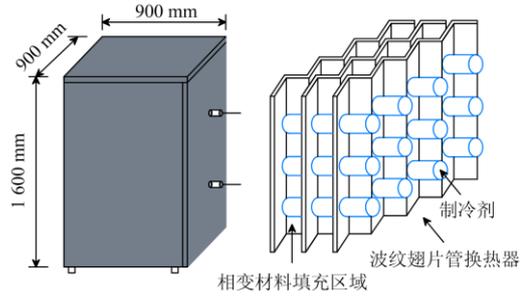


图 3 相变储能箱结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of phase change energy storage tank

## 2 全寿命周期运行优化模型

### 2.1 全寿命周期成本模型

全寿命周期成本<sup>[23]</sup>模型是从微能源网的综合经济效益出发，考虑微能源网从建设到报废整个过程所产生的费用，主要包括初始投资成本、维护成本、运行成本和交易成本等。

初始投资费用一般包括网内的风机、光伏、能源转换装置和储能装置等设备的购置费用。由于在考虑微能源网全寿命周期设备成本时需考虑其使用年限，因此将初始投资成本摊销至单位时刻进行计算。初始投资成本为

$$F_{i,t} = \sum_{i=1}^I \frac{C_{\text{in},i}^{\text{CG}}}{8760} \cdot \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} \cdot P_{i,t}^{\text{CG}} + \sum_{j=1}^J \frac{C_{\text{in},j}^{\text{REG}}}{8760} \cdot \frac{r(1+r)^{n_j}}{(1+r)^{n_j} - 1} \cdot P_{j,t}^{\text{REG}} + \sum_{k=1}^K \frac{C_{\text{in},k}^{\text{ES}}}{8760} \cdot \frac{r(1+r)^{n_k}}{(1+r)^{n_k} - 1} \cdot P_{k,t}^{\text{ES}} \quad (7)$$

式中： $C_{\text{in},i}^{\text{CG}}$ 、 $C_{\text{in},j}^{\text{REG}}$ 、 $C_{\text{in},k}^{\text{ES}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{CG}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{REG}}$ 、 $P_{k,t}^{\text{ES}}$ ； $n_i$ 、 $n_j$ 、 $n_k$  分别为第  $i$  台可控机组、第  $j$  台可再生能源机组、第  $k$  台储能装置的单位容量投资成本、额定容量和寿命周期； $r$  为基准折现率。

维护成本是微网运行过程中设备维护所产生的费用，与诸多因素相关，采用简化公式进行计算。则维护成本可表示为<sup>[20]</sup>

$$F_{2,t} = \sum_{i=1}^I C_{om,i}^{CG} P_{i,t}^{CG} + \sum_{j=1}^J C_{om,j}^{REG} P_{j,t}^{REG} + \sum_{k=1}^K C_{om,k}^{ES} P_{k,t}^{ES} \quad (8)$$

式中:  $C_{om,i}^{CG}$ 、 $C_{om,j}^{REG}$ 、 $C_{om,k}^{ES}$  分别为第  $i$  台可控机组、第  $j$  台可再生能源机组、第  $k$  台储能装置的单位容量维护成本。

除投资成本和维护成本外, 在微能源网的运行过程中会产生其他成本, 包括购能成本、能耗成本、机组启停成本和污染物治理成本等。如式(9)一式(12)所示。

$$F_{3,t} = C_{grid,t} (P_{line,pur,t} - P_{line,sell,t}) \quad (9)$$

$$F_{4,t} = \sum_{k=1}^K C_{k,t} \left( \delta_k SOC_{k,t} + \left| P_{k,t}^{cha} \right| \frac{1 - \eta_k^{cha}}{\eta_k^{cha}} + \left| P_{k,t}^{dis} \right| \frac{1 - \eta_k^{dis}}{\eta_k^{dis}} \right) \quad (10)$$

$$F_{5,t} = \sum_{i=1}^I \left[ \max\{0, U_{i,t} - U_{i,t-1}\} C_{on,i} + \max\{0, U_{i,t-1} - U_{i,t}\} C_{off,i} \right] \quad (11)$$

$$F_{6,t} = \sum_{i=1}^T \alpha_{co_2} C_{co_2} P_{line,t} \quad (12)$$

式中:  $C_{grid,t}$  为分时电价;  $P_{line,pur,t}$ 、 $P_{line,sell,t}$  分别为系统向上级电网的购售电功率;  $C_{k,t}$  为第  $k$  种储能装置的耗能成本;  $U_{i,t}$  为可控机组  $i$  在  $t$  时段的启停状态;  $C_{on,i}$ 、 $C_{off,i}$  分别为可控机组  $i$  的启动和停止成本;  $\alpha_{co_2}$  为等效碳排放系数;  $C_{co_2}$  为二氧化碳治理费用。

## 2.2 目标函数及约束条件

微能源网的建设不仅要绿色低碳更要具有经济性<sup>[24]</sup>, 本文综合考虑经济、环境等方面的因素, 在满足功率平衡及各项约束条件的基础上, 以全寿命周期成本为目标函数, 建立多能互补微能源网运行优化模型。目标函数为

$$\min F = \sum_{t=1}^T [F_{1,t} + F_{2,t} + F_{3,t} + F_{4,t} + F_{5,t} + F_{6,t}] \Delta t \quad (13)$$

式中:  $F$  为系统的全寿命周期成本;  $T$  为调度总时间;  $F_{1,t}$ 、 $F_{2,t}$ 、 $F_{3,t}$ 、 $F_{4,t}$ 、 $F_{5,t}$ 、 $F_{6,t}$  分别为  $t$  时段的初始投资成本、维护成本、电能交互成本、储能装置能耗成本、机组启停成本和污染物治理成本。

为保证微能源网的经济安全运行, 除了需要考虑功率平衡约束之外, 还需要考虑储能约束和机组约束, 而机组的正常运行与其爬坡速率、启停状态和出力范围相关。

### 1) 电热功率平衡

$$P_{line,t} + P_{pv,t} + P_{wt,t} + P_{ees,t} = P_{load,t} + P_{gshp,t} + P_{ashp,t} \quad (14)$$

$$Q_{gshp,t} + Q_{ashp,t} + Q_{pcm,t} = Q_{load,t} \quad (15)$$

式中:  $P_{ees,t}$ 、 $Q_{pcm,t}$  分别为  $t$  时段电储能和热储能的出力;  $P_{load,t}$ 、 $Q_{load,t}$  分别表示  $t$  时段的非空调电负荷和空调负荷的值。

### 2) 机组约束

$$P_{i,min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,max} \quad (16)$$

式中:  $P_{i,t}$  为  $t$  时刻第  $i$  台机组的出力;  $P_{i,max}$ 、 $P_{i,min}$  分别为第  $i$  台机组的出力上下限。

### 3) 联络线功率约束

$$P_{line,min} \leq P_{line,t} \leq P_{line,max} \quad (17)$$

式中:  $P_{line,t}$  为电能交互功率;  $P_{line,min}$ 、 $P_{line,max}$  分别为电能传输功率的最小最大值。

### 4) 储能装置约束

$$\begin{cases} \gamma_{ch,t} P_{ch,min} \leq P_{k,t}^{ch} \leq \gamma_{ch,t} P_{ch,max} \\ \gamma_{dis,t} P_{dis,min} \leq P_{k,t}^{dis} \leq \gamma_{dis,t} P_{dis,max} \end{cases} \quad (18)$$

$$0 \leq \gamma_{ch,t} + \gamma_{dis,t} \leq 1 \quad (19)$$

$$SOC_{k,min} \leq SOC_{k,t} \leq SOC_{k,max} \quad (20)$$

$$SOC_{k,0} = SOC_{k,T} \quad (21)$$

式中:  $P_{k,t}^{ch}$ 、 $P_{k,t}^{dis}$ 、 $SOC_{k,t}$  分别为第  $k$  种储能装置  $t$  时段的输入输出功率和剩余储能容量;  $\gamma_{ch,t}$ 、 $\gamma_{dis,t}$  分别为充放电状态变量;  $P_{ch,max}$ 、 $P_{ch,min}$ 、 $P_{dis,max}$ 、 $P_{dis,min}$  分别为最大/小充放电功率;  $SOC_{k,max}$ 、 $SOC_{k,min}$  分别为最大/小剩余容量;  $SOC_{k,0}$ 、 $SOC_{k,T}$  分别为储能装置在调度周期内的初始容量和结束容量。

## 2.3 求解方法

本文所建立的含热泵和相变储能的微能源网运行优化模型属于混合整数非线性优化问题<sup>[25]</sup>, 其优化求解模型可描述为

$$\begin{cases} \min F(x, u) \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_m(x, u) = 0, m = 1, 2, \dots, M \\ h_n(x, u) = 0, n = 1, 2, \dots, N \\ x_{min} \leq x \leq x_{max} \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $x$  为优化变量, 包括电网交互功率、机组及储能装置的出力;  $u$  为 0-1 状态变量, 分别代表向电网购电状态、机组的启停状态和储能装置的充放电状态;  $g_m(x, u) = 0$  为等式约束, 表示系统中电热功率平衡和储能始末状态平衡;  $h_n(x, u) = 0$  为不等式约束, 表示联络线功率约束、机组和储能装置的运行约束。

针对上述问题, 参考文献<sup>[26]</sup>, 将优化模型中的非线性变量做线性化处理, 此时问题就转化成线性优化问题。在 Matlab2014b 上使用 YALMIP 进行

建模，并调用 CPLEX 求解器对模型进行求解。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真数据

本文以南方某并网运行的办公园区为例进行仿真分析，网内用能需求为电负荷和冬夏两季空调负荷，算例系统结构示意图如图 1 所示，其中风机 50 kW、光伏 50 kW、土壤源热泵 120 kW、空气源热泵 120 kW、蓄电池 150 kWh、相变储热箱 270 kWh、电空调 250 kW、储热水箱 103.8 kWh。选取夏季不同典型天气场景进行分析，其中非空调负荷为基荷，不受天气影响，因不同天气场景下的负荷需求具有很大的不确定性，难以对其空调负荷进行准确估计，本文做近似保守处理<sup>[13]</sup>。夏季各种典型天气场景下的空调负荷与非空调负荷 24 h 出力曲线如图 4 所示。调度总周期  $T=24$  h，单位调度时间=1 h。

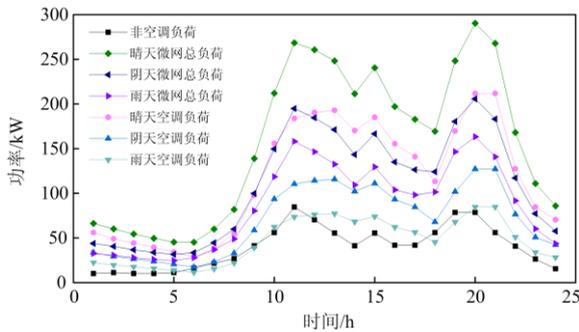


图 4 夏季典型天气场景 24 h 负荷曲线

Fig. 4 Load curve of typical summer weather scene for 24 hours

微能源网的储能参数、设备运行参数如表 1、2 所示<sup>[11,27-28]</sup>。基准折现率取  $r=5\%$ <sup>[27]</sup>。土壤-空气源热泵的一次启停成本为 1.32 元<sup>[11]</sup>。储电装置的自耗率为 0.001，储热装置的自耗率为 0.01<sup>[28]</sup>。等效碳排放系数取 0.889 kg/kWh，二氧化碳治理费用为 0.21 元/kg<sup>[29]</sup>。系统向上级电网购电采用峰谷分时电价，其时段划分如下<sup>[25]</sup>：峰时段为 0.83 元/kWh (11:00—15:00, 19:00—21:00)，平时段为 0.49 元/kWh (08:00—10:00, 16:00—18:00, 22:00—23:00)，谷时段为 0.17 元/kWh(00:00—07:00, 24:00)。

表 1 储能参数

Table 1 Energy storage parameters

储能装置	最大充放功率/kW	最小储能容量/kWh	最大储能容量/kWh	初始容量/kWh
蓄电池	37.5	30	120	30
水蓄能	20	10	90	10
相变蓄能	30	20	250	20

表 2 设备运行参数

Table 2 Operating parameters of equipment

设备	功率下限/kW	功率上限/kW	单位投资成本/(元/kW)	维护成本/(元/kW)	寿命	效率
GSHP	10	120	2 200	0.011 4	20	3~5
ASHP	10	120	1 778	0.005 7	15	3~4
空调	0	250	1 132	0.005 7	10	2.5
风机	0	50	6 200	0.029	20	—
光伏	0	50	8 796	0.025	20	—
电网	-100	100	—	—	—	—
蓄电池	—	—	600	0.001 8	3	0.9
水蓄能	—	—	86	0.001 6	20	0.9
相变储能	—	—	34	0.001 8	20	0.9

#### 3.2 场景设置

为分析空气-土壤源热泵和相变储能对微能源网运行的影响，设置不同运行场景进行对比分析，如表 3 所示，其中场景 3 为本文所提模型。

表 3 场景设置

Table 3 Scenarios setting

场景	空气-土壤源热泵	相变储能	电空调	储热水箱
1	×	×	√	√
2	×	√	√	×
3	√	×	×	√
4	√	√	×	×

考虑天气影响，对不同天气状况下的 4 种场景进行仿真分析，采用夏季气象数据作为外部条件，不同天气场景下的光照、风速和温度曲线如图 5。

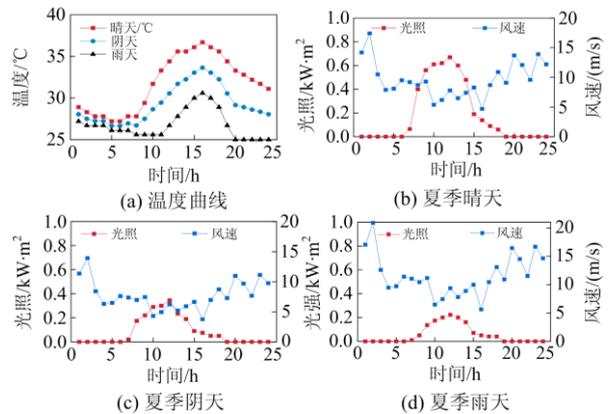


图 5 光强、风速及温度曲线

Fig. 5 Sunlight intensity, wind speed and temperature curve

### 3.3 优化结果分析

#### 3.3.1 热泵和相变储能经济性分析

不同天气情况下各场景全寿命周期成本优化结果如表 4 所示。对比分析 4 种场景下的优化结果可知，热泵和相变储能的引入可以提高能源利用效率，减少碳排放和购电成本，降低系统的全寿命周期成

本, 具体分析过程如下:

### 1) 相变储能对微能源网运行的影响

如表 4, 对比场景 1 和场景 2 可知, 引入相变储能增大了系统的投资、维护和储能装置能耗成本, 但购电成本和全寿命周期成本明显降低。同时注意到, 虽然系统购电成本降低, 但二氧化碳治理费用并无明显变化(网内的碳排放主要由购电产生), 说明相变储能的削峰填谷能力优于储热水箱。对比场景 3 和场景 4 发现, 在已有空气-土壤源热泵的作用下, 配置相变储能, 能够增强系统调节的灵活性, 减少购电成本。

### 2) 空气-土壤源热泵对微能源网运行的影响

对比场景 1 和场景 3 可知, 引入空气-土壤源热泵减少了碳排放成本和购电成本, 晴天购电成本由场景 1 的 666.4 元下降到 434.3 元, 阴天购电成本由场景 1 的 563.5 元下降到 438.6 元, 雨天购电成本由 243.7 元下降到 177.2 元, 分别下降了 34.8%、22.2%、27.3%。对比场景 2 和场景 4, 在已有相变储能的基础上引入空气-土壤源热泵能够提高能源利用效率, 减少环境污染, 增加系统的经济性, 对微能源网的运行优化起到积极作用。

### 3) 热泵和相变储能对微能源网运行的影响

从全寿命周期成本角度, 对比场景 1 与场景 4, 引入热泵和相变储能后, 晴天全寿命周期成本由场景 1 的 1 283.0 元下降到 995.7 元, 阴天全寿命周期成本由场景 1 的 1 146.4 元下降到 1 013.0 元, 雨天全寿命周期成本由 724.6 元下降到 636.0 元, 分别下降了 22.4%、11.6%、12.2%。原因在于热泵和相变储能能够提高能源利用效率, 增强系统调节的灵活性, 从而降低了系统的全寿命周期成本。

表 4 不同天气情况下各场景全寿命周期成本优化结果

Table 4 Optimization results of the life cycle cost in different scenarios under different weather conditions

天气	场景	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F
晴天	1	355.5	47.0	666.4	24.4	0	189.7	1 283.0
	2	356.3	47.5	629.9	29.8	0	189.7	1 253.2
	3	369.3	56.7	434.3	27.6	5.3	122.1	1 015.3
	4	370.2	57.0	409.4	29.7	7.9	121.5	995.7
阴天	1	355.5	31.3	563.5	27.1	0	169.0	1 146.4
	2	356.3	31.7	533.2	29.5	0	169.0	1 119.7
	3	369.3	37.5	438.6	27.4	10.6	126.7	1 010.1
	4	370.2	36.6	425.6	30.4	21.1	129.1	1 013.0
雨天	1	355.5	38.7	243.7	27.1	0	59.6	724.6
	2	356.3	39.2	213.4	29.5	0	59.6	698.0
	3	369.3	38.7	177.2	27.1	0	37.7	650.0
	4	370.2	39.7	154.0	29.5	5.3	37.3	636.0

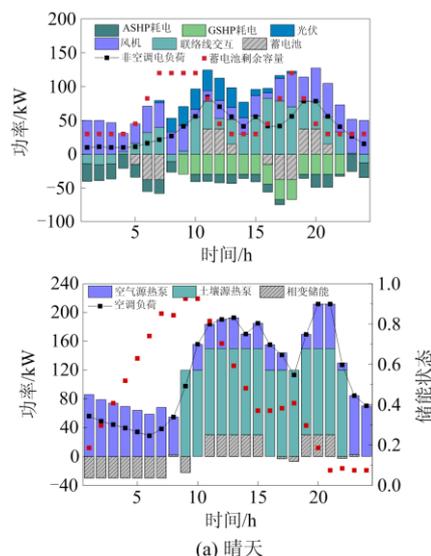
注: 表中 F1、F2、F3、F4、F5、F6、F 分别为初始投资成本、维护成本、电能交互成本、储能装置能耗成本、机组启停成本、污染物治理成本和全寿命周期成本。

从缓解用能紧张角度, 采用热泵和相变储能, 晴天购电量由 1 016.3 kWh 降为 650.7 kWh, 阴天购电量由 905.2 kWh 降为 691.6 kWh, 雨天购电量由 319 kWh 降为 199.9 kWh, 分别减少了 36%、23.4%、37.3%。晴天微能源网与上级电网交换功率的峰值由 100 kW 降为 82 kW, 减少了 18%, 阴天微能源网与上级电网交换功率的峰值由 97 kW 降为 73 kW, 减少了 24.7%, 雨天微能源网与上级电网交换功率的峰值由 74 kW 降为 68 kW, 减少了 8%。原因在于热泵能效较高, 相变储能装置具有长时间大容量储能能力, 将两者结合, 在用能低谷时期通过热泵转化成冷热能储存在相变储能装置中, 能有效缓解用能紧张, 提高能源利用效率。

从整个生命周期来看, 在微能源网中引入热泵和相变储能会增加投资、运行维护等相关成本, 但热泵和相变储能的寿命周期长, 在微能源网的整个生命周期中基本不会更换, 同时热泵效率高, 相变储能容量大。因此, 考虑热泵和相变储能的微能源网能提高能源利用效率, 降低环境污染, 具有较好的全寿命周期经济性。但新设备的引入会导致基础投资、运维等相关费用的增加, 要合理配置才能最大限度地提高微能源网的经济效益, 降低全寿命周期成本。

### 3.3.2 本文所提模型优化结果

不同天气情况下本文所提模型优化结果如图 6 所示。其中, 联络线交互功率为正表示购电, 为负表示售电, 储能装置功率为正表示放能, 为负表示吸能。夏季晴天天气炎热, 空调负荷需求量较高, 在负荷高峰时期以土壤源热泵出力为主, 不足时由空气源热泵补充, 用能低谷时期以空气源热泵出力为主。夏季阴天气温比晴天低, 光照强度一般, 但



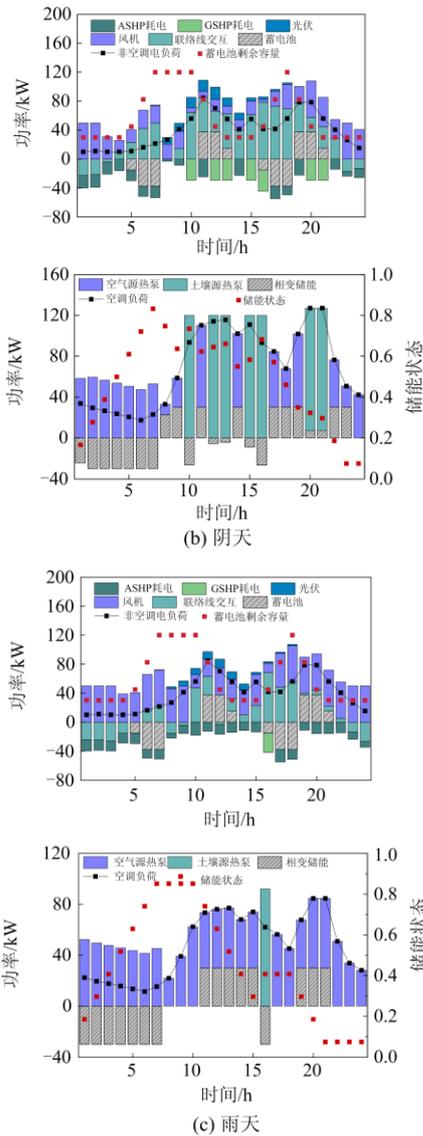


图 6 不同天气情况下场景 4 优化结果

Fig. 6 Optimization results in scenario 4 under different weather conditions

气候较为闷热，在室内仍会有炎热感，此时空调负荷需求相比于夏季晴天场景会有一定程度的降低，优化结果采用土壤-空气源热泵交替运行的方式。夏季雨天气温不高，气候适宜，基本可以采用自然通风的形式来达到室内温度适宜的状态，优化结果以空气源热泵出力为主。

### 3.3.3 空气-土壤源热泵运行效果分析

为进一步验证空气-土壤源热泵的经济节能性，在考虑相变储能的基础上依次选取 240 kW 空气源热泵、240 kW 土壤源热泵、120 kW 空气源热泵和 120 kW 土壤源热泵进行优化运行分析，优化结果如表 5 所示。

由表 5 可知，空气源热泵和土壤源热泵独立运行时系统的耗电量和购电成本明显比空气-土壤源热泵联合运行时要高，这是因为空气源热泵的能效比会随温度升高而降低，土壤源热泵在低负荷率运行状态下能效较低，这些都会导致热泵独立运行经济性不佳。土壤源热泵在满负荷状态下其能效可高达 4.09，但其在低负载情况下其能效仅有 1.8，这给土壤源热泵的经济运行带来了挑战。因此，采用空气-土壤源热泵联合运行，在用能高峰时期以土壤源热泵出力为主，用能低谷时期以空气源热泵出力为主，该种调度方式能有效解决热泵独立运行造成的一系列问题。

表 5 单一热泵和空气-土壤源热泵对比

Table 5 Comparison of single heat pump and air-ground source heat pump

运行模式	空气源热泵	土壤源热泵	空气-土壤源热泵	
晴	耗电量/kWh	878.1	924.3	756.6
天	购电成本/元	513.3	546.9	429.8
阴	耗电量/kWh	511.8	719.6	459.7
天	购电成本/元	280.4	394.2	258.7
雨	耗电量/kWh	330.9	526.6	329.7
天	购电成本/元	165.6	263.3	165.0

## 4 结论

本文提出了一种含热泵和相变储能的多能互补微能源网运行优化模型。该模型能够缓解用能紧张，提高能源利用效率和系统调节的灵活性，实现多能互补微能源网的优化运行，主要结论如下：

1) 土壤源热泵在低负荷率运行状态下能效较低，其长期运行还会导致土壤热堆积。采用空气-土壤源热泵能够优势互补，既能减少土壤源热泵单独运行带来的一系列问题，也能避免低温环境下空气源热泵能效过低，经济性不高。

2) 相变储能箱成本低廉，寿命长，具有能量转移特性和长时间大容量储能能力，将热泵和相变储能两者结合能有效缓解用能紧张，提高能源利用效率，使多能互补微能源网更具经济节能性。

3) 负荷低谷和新能源出力较大时段，通过热泵将电能转化成热能储存在相变储能箱中，并在用能高峰时期释放，能够增强系统调节的灵活性，实现各能量间的协同调度和转换。

本文将空气-土壤源热泵和相变储能引入多能互补微能源网中，用以提高能源利用效率和增强系统调节能力，在兼顾环境污染的同时实现了经济最优，为多能互补微能源网的优化运行提供了一定的参考。但风光负荷出力的不确定性和各机组与储能

的容量配置也会对多能互补微能源网的运行优化产生影响, 在未来的研究中将重点考虑。

### 参考文献

- [1] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 14-23.  
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 14-23.
- [2] International Energy Agency: air conditioning use emerges as one of the key drivers of global electricity-demand growth[EB/OL]. [2018-08-13]. <http://suo.im/5qFQbP>.
- [3] HU B, WANG H, YAO S. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2017, 2(1): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.
- [4] 陈柏翰, 冯伟, 孙凯, 等. 冷热电联供系统多元储能及孤岛运行优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3231-3243.  
CHEN Bohan, FENG Wei, SUN Kai, et al. Multi-energy storage system and islanded optimal dispatch method of CCHP[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3231-3243.
- [5] 汪翔, 陈海生, 徐玉杰, 等. 储热技术研究进展与趋势[J]. 科学通报, 2017, 62(15): 1602-1610.  
WANG Xiang, CHEN Haisheng, XU Yujie, et al. Advances and prospects in thermal energy storage: a critical review[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(15): 1602-1610.
- [6] IEA-ETSAP and IRENA. Thermal energy storage[Z]. Technology Brief, 2013.
- [7] 朱晔, 兰贞波, 隗震, 等. 考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 127-133.  
ZHU Ye, LAN Zhenbo, WEI Zhen, et al. Research on optimal operation of wind-PV-ES complementary system considering carbon cost[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 127-133.
- [8] WANG Y H, WANG R R, WU Z G. Optimal utilization and benefit balance of clean environmental energy with multi-side energy storage synergy[J]. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2020, 42(7): 785-806.
- [9] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A robust optimization approach for the interdependency analysis of integrated energy systems considering wind power uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3964-3976.
- [10] 包伟涔, 韦钢, 刘佳, 等. 基于区间模型的多能互补系统优化运行[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 8-20.  
BAO Weicen, WEI Gang, LIU Jia, et al. Interval model based optimal operation of multi-energy complementary system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 8-20.
- [11] 杨志鹏, 张峰, 梁军, 等. 含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1735-1743.  
YANG Zhipeng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Economic generation scheduling of CCHP microgrid with heat pump and energy storage[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1735-1743.
- [12] 郭宇航, 胡博, 万凌云, 等. 含热泵的热电联产型微电网短期最优经济运行[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 16-22.  
GUO Yuhang, HU Bo, WAN Lingyun, et al. Optimal economic short-term scheduling of CHP microgrid incorporating heat pump[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 16-22.
- [13] 魏繁荣, 林湘宁, 陈乐, 等. 基于建筑相变材料储能微网综合能源消纳系统[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 792-804.  
WEI Fanrong, LIN Xiangning, CHEN Le, et al. Microgrid comprehensive energy consumption system based on phase change building materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 792-804.
- [14] 杜进桥, 徐诗鸿, 胡志豪, 等. 基于光伏出力区间预测的相变储能电-热联合调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 109-116.  
DU Jinqiao, XU Shihong, HU Zhihao, et al. Electric-thermal combined scheduling strategy by phase-change energy storage based on interval prediction of photovoltaic output[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 109-116.
- [15] 王鲁浩. 多能互补微网鲁棒多目标运行优化[D]. 济南: 山东大学, 2017.  
WANG Luhao. Multi-energy complementary microgrid robust multi-objective operation optimization[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [16] 潘丰, 张志刚, 魏旭春. 夏季工况空气-土壤源热泵系统能效分析[J]. 煤气与热力, 2014, 34(1): 30-32, 35.  
PAN Feng, ZHANG Zhigang, WEI Xuchun. Efficiency analysis of air-soil source heat pump system under summer condition[J]. Gas & Heat, 2014, 34(1): 30-32, 35.

- [17] 陈永进, 吴杰康, 翁兴航, 等. 水风储微电网电源容量的优化配置[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 137-146.  
CHEN Yongjin, WU Jiekang, WENG Xinghang, et al. Optimal sizing of microgrids with wind hydropower energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2019, 38(6): 137-146.
- [18] 杨柳, 张超, 蒋勃, 等. 考虑用户满意度的虚拟电厂热电联合低碳经济调度模型[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 40-45.  
YANG Liu, ZHANG Chao, JIANG Bo, et al. A combined low-carbon economic dispatching model for virtual power plant considering customer satisfaction index[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 40-45.
- [19] 车泉辉, 娄素华, 吴耀武, 等. 计及条件风险价值的含储热光热电站与风电电力系统经济调度[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2047-2055.  
CHE Quanhui, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Economic dispatching for power system of concentrated solar power plant with thermal energy storage and wind power considering conditional value-at-risk[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2047-2055.
- [20] 高春辉, 肖冰, 尹宏学, 等. 新能源背景下储能参与火电调峰及配置方式综述[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 38-43.  
GAO Chunhui, XIAO Bing, YIN Hongxue, et al. Energy storage participating in thermal power peaking and configuration in background of new energy: a review[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 38-43.
- [21] 何峰, 李廷贤, 姚金煜, 等. 基于相变储热的太阳能多模式采暖系统及应用[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(2): 311-318.  
HE Feng, LI Tingxian, YAO Jinyi, et al. Solar multi-mode heating system based on latent heat thermal energy storage and its application[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(2): 311-318.
- [22] 吴东灵, 李廷贤, 何峰, 等. 三水醋酸钠相变储能复合材料改性制备及储/放热特性[J]. 化工学报, 2018, 69(7): 2860-2868.  
WU Dongling, LI Tingxian, HE Feng, et al. Preparation and performance of modified sodium acetate trihydrate composite phase change material for thermal energy storage[J]. CIESC Journal, 2018, 69(7): 2860-2868.
- [23] 薛美东, 赵波, 张雪松, 等. 并网型微网的优化配置与评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 6-13.  
XUE Meidong, ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, et al. Integrated plan and evaluation of grid-connected microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 6-13.
- [24] 陈灵敏, 吴杰康, 唐惠玲, 等. 考虑可再生能源消纳的CCHP微能源网优化配置模型[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 121-129.  
CHEN Lingmin, WU Jiekang, TANG Huiling, et al. Optimal allocation model of the micro-energy grid with CCHP considering renewable energy consumption[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 121-129.
- [25] 谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹, 等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1038-1054.  
XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1038-1054.
- [26] 吴雄, 王秀丽, 王建学, 等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-9.  
WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mix integer programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-9.
- [27] 门向阳, 曹军, 王泽森, 等. 能源互联微网型多能互补系统的构建与储能模式分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5727-5737, 5929.  
MEN Xiangyang, CAO Jun, WANG Zesen, et al. The constructing of multi-energy complementary system of energy internet microgrid and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5727-5737, 5929.
- [28] MARNAY C, VENKATARAMANAN G, STADLER M, et al. Optimal technology selection and operation of commercial building microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 975-982.
- [29] FAN H, YUAN Q, CHENG H. Multi-objective stochastic optimal operation of a grid-connected microgrid considering an energy storage system[J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(12).

收稿日期: 2020-03-10; 修回日期: 2020-05-04

作者简介:

张彼德(1975—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为多能互补微网规划与运行、配电网优化与运行等; E-mail: 43357942@qq.com

陈颖倩(1996—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为多能互补微网规划与运行。E-mail: 897388900@qq.com

(编辑 葛艳娜)