

DOI:10.11918/202407080

# V2B 场景下 BIPV 公共建筑最优配置及调度策略

贺宁<sup>1</sup>, 蒋德润<sup>1</sup>, 李若夏<sup>2,3</sup>, 闫琦<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 机电工程学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055)

**摘要:** 利用电动汽车(EV)的移动储能特性参与建筑能源系统调度, 已逐渐成为推动建筑领域迈向绿色低碳发展的重要举措之一, 能够有效提升建筑的能源利用效率, 同时降低建筑的运行成本。针对大型光伏建筑一体化(BIPV)公共建筑, 提出一种考虑EV接入的BIPV建筑能源系统双层优化配置及调度方法。首先, 利用高斯混合分布模型对电动汽车的日常出行行为进行拟合, 构建基于公共建筑的EV出行规律模型。其次, 为同时求解出系统的配置和调度结果, 建立双层优化模型, 在上层中以系统年规划成本最小为优化目标得到配置结果, 在下层中以系统日运行成本最小为优化目标得到电力负荷调度结果。最后, 给出双层优化模型求解方法, 选取某大学校园内办公建筑采暖季的典型日天气负荷数据进行算例分析。结果表明: 按照求解结果对建筑能源系统进行配置与调度能够有效提高光伏利用率, 延长储能设备使用寿命。并且在系统中通过对比使用不同配置形式的储能方案发现, 仅利用EV储能在长短期经济性上更具优势, 能够实现良好的系统运行性能。

**关键词:** 光伏建筑一体化(BIPV); 电动汽车; 双层优化; 系统参数配置; 电力负荷调度

中图分类号: TM73; TK01

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)08-0143-11

## Optimal configuration and scheduling strategy of BIPV public building in V2B scenario

HE Ning<sup>1</sup>, JIANG Derun<sup>1</sup>, LI Ruoxia<sup>2,3</sup>, YAN Qi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
2. College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
3. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The integration of mobile energy storage capabilities of electric vehicles (EVs) into building energy system scheduling has gradually become a significant measure for advancing the green and low-carbon development of the construction sector, which can effectively enhance the energy efficiency of buildings while reducing operational costs. For large-scale building integrated photovoltaic (BIPV) public buildings, a two-level optimization configuration and scheduling method for BIPV building energy systems, considering EV integration, is proposed. First, a Gaussian mixture distribution model is used to fit the daily travel behavior of EVs, establishing an EV travel pattern model based on public buildings. Next, to simultaneously determine the configuration and scheduling results of the system, a two-level optimization model is established: the upper level aims to minimize the annual planning cost of the system to obtain configuration results, while the lower level aims to minimize the daily operational cost of the system to obtain power load scheduling results. Finally, a solution method for the two-level optimization model is provided, and a case study is conducted using typical daily weather load data from the heating season of an office building on a university campus. The results indicate that configuring and scheduling the building energy system according to the solution results can effectively improve photovoltaic utilization and extend the service life of energy storage equipment. Furthermore, by comparing different energy storage schemes in the system, it is found that utilizing only EV energy storage is more advantageous in both long-term and short-term economics, and achieve good system operational performance.

**Keywords:** building integrated photovoltaic (BIPV); electric vehicle; two-level optimization; system parameter configuration; power load scheduling

收稿日期: 2024-07-28; 录用日期: 2024-08-24; 网络首发日期: 2025-07-03

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250703.1035.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802702)

作者简介: 贺宁(1989—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李若夏, rli@xauat.edu.cn

2020年9月,中国在第75届联合国大会上明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标<sup>[1]</sup>,绿色低碳已成为建筑领域发展的重要方向<sup>[2]</sup>,光伏建筑一体化(built-in photovoltaic, BIPV)能源系统将光伏发电技术与建筑相结合,即能满足自身用电需求,又可获得能源收益,是推动中国建筑行业绿色发展的重要途径<sup>[3]</sup>。由于光伏发电的波动性,在光伏富余的情况下,大多数建筑选择直接弃光,或者配置大容量储能系统,导致严重的能源浪费与较低的经济性。电动汽车(electric vehicle, EV)具有灵活的充放电能力,将其接入建筑内作为储能、供电单元,不仅能够提高光伏利用率,还可以降低固定储能容量提升系统运行经济性<sup>[4-5]</sup>。据研究表明,EV一天内大多数时段都停放在商业、办公、住宅等建筑附近且为静止状态<sup>[6]</sup>。因此对于光伏发电计划与EV充电时间重叠的公共建筑来说,调控EV资源提升光伏利用率是行之有效的方法<sup>[7]</sup>。

调控EV的技术可主要分为车连网(vehicle to grid, V2G)与车连建筑(vehicle to build, V2B)。V2G适用于调控电动汽车集群参与电网调度<sup>[8]</sup>。而为了利用建筑能源系统中的EV资源,基于EV在建筑附近长时间驻留的特点,V2G进一步发展成为V2B<sup>[9]</sup>。V2B注重EV与建筑间的能量互动,使得EV不仅可以为建筑提供电力支持,还能在电力需求高峰期缓解电网的能源压力。Luo等<sup>[10]</sup>研究了EV接入的BIPV建筑能源系统运行的可行性。Borge-diez等<sup>[11]</sup>利用V2B技术实现降低高峰需求,节约能源成本。

据统计,2030年,中国EV数量将会达到6000万辆<sup>[12]</sup>。若建筑物盲目地接入大量EV充电,将严重影响建筑能源安全运行,因此应在满足建筑设计要求、配网设备容量、供电可靠性的条件下建立优化配置模型,以获得最佳的EV数量与其他能源设备配置参数。目前针对接入EV能源系统的优化配置的研究中,大多数通过给定数量的EV参与电网调度作为储备电源以优化固定储能容量<sup>[13-16]</sup>,未考虑接入电网中EV数量的合理性,以及由此可能对电网造成的巨大冲击和V2G实现的复杂性。He等<sup>[17]</sup>通过对比不同EV数量对商业建筑电费的影响,研究在商业建筑内接入最佳的EV数量以实现建筑能源系统管理成本的降低。Barone等<sup>[18]</sup>在建筑能源系统调度中研究EV的接入对系统整体的影

响,结果表明,EV的移动储能特性能够有效减少电网供电并提升系统经济性。Ahsan等<sup>[19]</sup>通过提出一个多目标经济优化框架,实现了建筑物与EV调度的经济性最优。上述文献注重V2B中调度短期经济性研究,未将短期经济性与系统投资长期经济性结合起来考虑。

针对BIPV建筑能源系统,本文将接入建筑的EV规模纳入建筑能源系统的设计参数,从接入EV数量的合理性、提升光伏利用率和优化储能容量的角度出发,提出一种基于V2B模式下的能源系统双层优化框架的最优配置及调度策略。首先,建立BIPV建筑能源系统模型,并通过真实出行数据构建基于公共建筑的EV行驶特性概率密度函数模型。其次,采用上、下两层相互传递参数多次迭代求解的思路建立双层优化模型,在上层模型中设置系统年规划成本最小为优化目标求解出建筑的配置参数,下层模型中设置系统日运行成本最小为优化目标求解出电能调度结果。最后,在某大学校园内的办公建筑中应用所提策略验证有效性,并且对EV接入建筑能源系统的长、短期经济性进行了分析。

## 1 BIPV 建筑能源系统结构

本文所构建的BIPV建筑能源系统主要由EV集群、光伏系统、储能系统、空气源热泵和热储能系统组成,系统内能量流动见图1。图1中系统主要电能由光伏系统与电网供应,蓄电池存储富余电能,EV作为移动储能,帮助蓄电池存储超过其储能能力上限的电能,热能由空气源热泵和蓄热水罐提供。

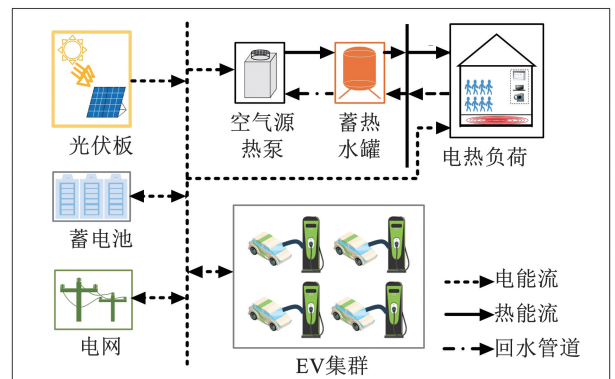


图1 系统能量流动示意

Fig. 1 Schematic diagram of system energy flow

## 2 BIPV 建筑能源系统模型

### 2.1 EV 模型

EV的行驶里程与充电行为主要受到车主的日

常出行规律影响,其出行规律可近似认为与传统燃油汽车相同。因此,根据美国国家公路交通安全管理局(national highway traffic safety administration, NHTSA)<sup>[20]</sup>对全美家用车的调查统计数据结果,利用高斯混合分布模型对 EV 抵达办公地点时刻和离开办公地点时刻进行拟合,以获取其概率密度函数。

### 2.1.1 抵达办公地点时刻

抵达办公地点时刻为

$$f_A(x) = \alpha_1 \frac{1}{\sigma_{A1} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_{A1})^2}{2\sigma_{A1}^2}\right] + \alpha_2 \frac{1}{\sigma_{A2} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_{A2})^2}{2\sigma_{A2}^2}\right] \quad (1)$$

式中: $x$  为当日到达办公地点时刻, $\sigma_{A1}$ 、 $\sigma_{A2}$  为标准差,分别取值为 1.39、14.89; $\mu_{A1}$ 、 $\mu_{A2}$  为期望值,分别取值为 7.71、13.20; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为相应高斯分布的权重,分别取值为 0.74、0.26。EV 抵达办公地点时刻的概率分布见图 2。

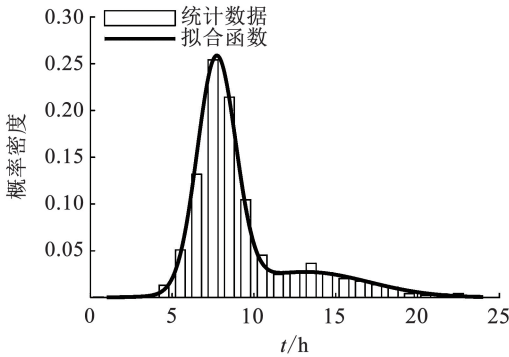


图 2 抵达办公地点时刻概率分布

Fig. 2 Probability distribution of arrival time at the office

### 2.1.2 离开办公地点时刻

离开办公地点时刻为

$$f_L(x) = \beta_1 \frac{1}{\sigma_{L1} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_{L1})^2}{2\sigma_{L1}^2}\right] + \beta_2 \frac{1}{\sigma_{L2} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_{L2})^2}{2\sigma_{L2}^2}\right] \quad (2)$$

式中: $x$  为当日离开办公地点时刻, $\sigma_{L1}$ 、 $\sigma_{L2}$  为标准差,分别取值为 1.16、26.25; $\mu_{L1}$ 、 $\mu_{L2}$  为期望值,分别取值为 16.86、15.51; $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为相应高斯分布的权重,分别取值为 0.53、0.47。EV 离开办公地点时刻的概率分布见图 3。

### 2.1.3 日行驶距离

考虑到 EV 日行驶距离与每百公里耗电量,根据文献[21]分析可得,EV 到达办公地点的初始荷电状态这一随机变量近似服从参数为  $U(0.3, 0.8)$  的均匀分布。

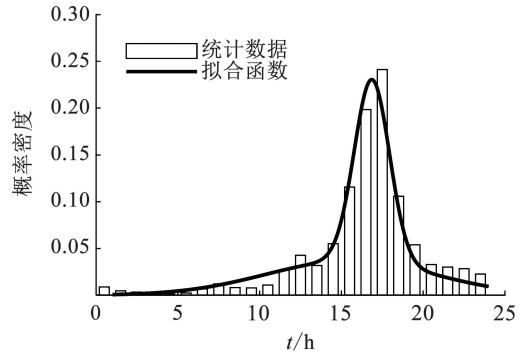


图 3 离开办公地点时刻概率分布

Fig. 3 Probability distribution of departure time

## 2.2 空气源热泵模型

空气源热泵通过消耗电能能够实现制热的效果,其输出功率受室外温度和热泵额定功率的影响,设备模型可由下式给出的数学模型表示为<sup>[22]</sup>

$$\begin{cases} Q_{HP}(t) = C_H(t) \cdot P_{HP}(t) \cdot (1 - \kappa) \\ C_H(t) = 1.189 \times 10^{-4} \cdot T_{AIR}(t)^2 + 0.0546 \cdot T_{AIR}(t) + 3.41 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Q_{HP}(t)$  为  $t$  时刻空气源热泵的输出功率, $C_H(t)$  为  $t$  时刻空气源热泵的性能指数, $P_{HP}(t)$  为  $t$  时刻空气源热泵的耗电量, $\kappa$  为空气源热泵结霜除霜损失系数, $T_{AIR}(t)$  为  $t$  时刻室外空气温度。

## 2.3 光伏发电模型

光伏组件由串联的光伏电池组成,多个光伏组件串并联形成光伏板,整个光伏板  $t$  时刻的输出功率模型为

$$P_S(t) = N_S N_{SS} N_{PP} V_{CELL}(t) I_{CELL}(t) \quad (4)$$

式中: $P_S(t)$  为  $t$  时刻光伏板的实际输出功率, $N_S$  为一个光伏组件中光伏电池串联的数量, $N_{SS}$  为光伏组件串联的数量, $N_{PP}$  为光伏组件串并联的数量, $I_{CELL}(t)$  为光伏电池  $t$  时刻的输出电流, $V_{CELL}(t)$  为光伏电池  $t$  时刻的输出电压。

上述式中的参数取决于太阳辐射照度、光伏电池材料、环境温度和光学空气质量,在文献[23]中能够获得这些参数的详细数据。

## 2.4 储能系统模型

在 BIPV 建筑能源系统中蓄电池的使用能够实现削峰填谷的作用,在负荷低谷时段充电、高峰时段放电,其充、放电时的荷电状态为

$$\begin{cases} S_{bat}(t+1) = (1-v)S_{bat}(t) + \frac{P_B^c(t)\eta_c \cdot \tau}{E_B}, & P_B^c(t) \geq 0 \\ S_{bat}(t+1) = (1-v)S_{bat}(t) + \frac{P_B^d(t) \cdot \tau}{E_B \eta_d}, & P_B^d(t) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $S_{\text{bat}}(t+1)$ 、 $S_{\text{bat}}(t)$  分别为  $t+1$  和  $t$  时刻蓄电池的荷电状态,  $v$  为蓄电池的自放电效率,  $P_{\text{B}}^{\text{c}}$ 、 $P_{\text{B}}^{\text{d}}$  分别为  $t$  时刻蓄电池的充、放电功率,  $\eta_{\text{c}}$  为蓄电池充电效率,  $\eta_{\text{d}}$  为蓄电池放电效率,  $E_{\text{B}}$  为蓄电池额定容量。

### 2.5 热储能系统模型

蓄热槽用于存储空气源热泵产生的热能, 在用户能耗需求高峰时段释放能量, 蓄热与放热的数学模型为

$$\begin{cases} Q_{\text{XR}}(t+1) = (1 - \sigma_{\text{XR}})Q_{\text{XR}}(t) + P_{\text{XR,IN}}(t)f_{\text{XR,IN}} \cdot \tau, & P_{\text{XR,IN}}(t) \geq 0 \\ Q_{\text{XR}}(t+1) = (1 - \sigma_{\text{XR}})Q_{\text{XR}}(t) + \frac{P_{\text{XR,OUT}}(t) \cdot \tau}{f_{\text{XR,OUT}}}, & P_{\text{XR,OUT}}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Q_{\text{XR}}(t+1)$ 、 $Q_{\text{XR}}(t)$  分别为  $t+1$  和  $t$  时刻的蓄热量,  $\sigma_{\text{XR}}$  为热损失系数,  $P_{\text{XR,IN}}(t)$  为  $t$  时刻的蓄热功率,  $P_{\text{XR,OUT}}(t)$  为  $t$  时刻放热功率,  $f_{\text{XR,IN}}$  为蓄热效率,  $f_{\text{XR,OUT}}$  为放热效率。

## 3 双层优化模型及其求解方法

### 3.1 双层优化模型

为同时求解出 BIPV 建筑能源系统的配置参数与调度策略, 设计了一种双层优化模型。在上层模型中根据建筑自身配电容量与各设备运行的约束条件, 以年规划成本经济性最佳为优化目标确定光伏组件数量、蓄电池容量和 EV 数量; 下层模型根据系统内部能量平衡等约束条件, 以日运行成本最小为优化目标得到系统内各设备的调度策略。选择典型日的天气负荷数据作为双层优化模型的输入量, 上层模型求解出的配置参数作为下层模型的输入量, 下层模型求解出的日运行成本作为上层模型的输入量, 上、下两层模型通过传递求解变量以得到系统配置与调度策略的最优解, 双层优化模型的运行框架及具体描述见图 4。

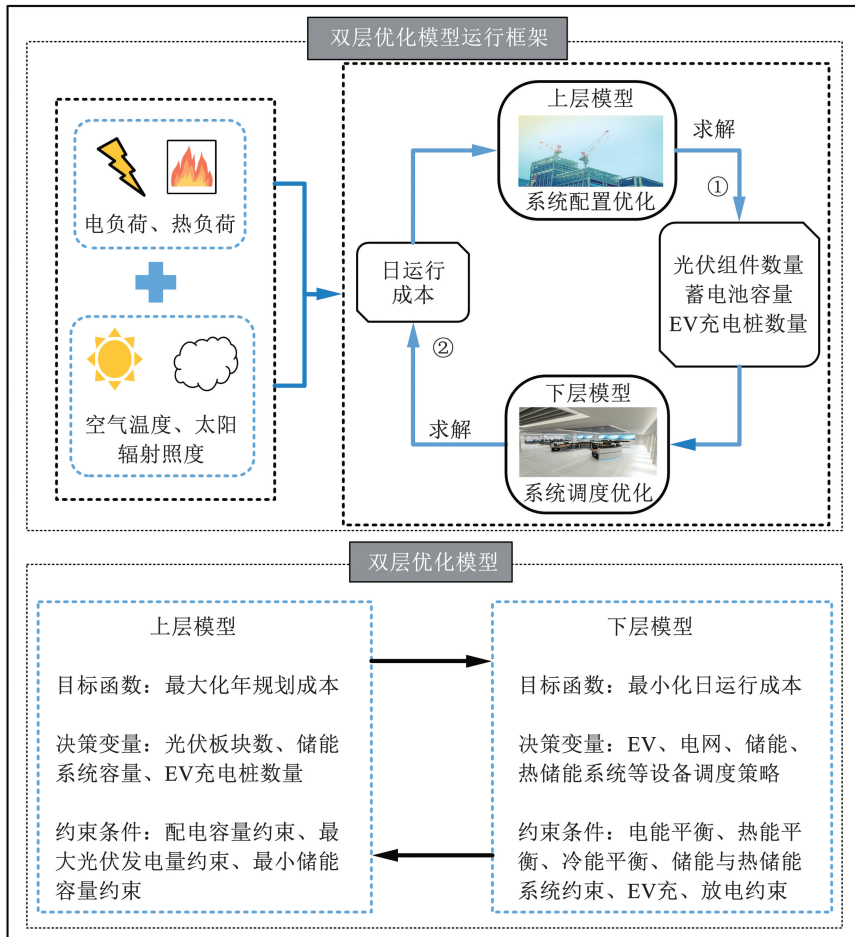


图 4 双层优化模型运行框架及具体描述

Fig. 4 Two-level optimization model operation framework and specific description

#### 3.1.1 上层目标函数

为获得系统内光伏、蓄电池和 EV 充电站接口数量设定的最优配置方案, 以系统年规划成本最小为目标函数, 表达式如下:

$$\begin{aligned} \max F_{\text{CO}} = & 365n_{\text{EV}} \left( \sum_{i=1}^{n_{\text{EV}}} \sum_{t=1}^T P_{\text{Ec}}(i,t)c_{\text{EV}} - \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^{n_{\text{EV}}} \sum_{t=1}^T P_{\text{Ed}}(i,t)d_{\text{EV}} \right) - \\ & F_{\text{PV}} - F_{\text{EV}} - F_{\text{BA}} - 365F_{\text{OP}} \quad (7) \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} F_{PV} &= CRF_{PV} \cdot c_{PV} \cdot n_{PV} \\ F_{EV} &= W_{EV} \cdot n_{EV} \\ F_{BA} &= CRF_{BA} \cdot c_{BA} \cdot P_{BA}^{rated} \\ CRF &= \frac{(1+i)^l i}{(1+i)^l - 1} \end{aligned}$$

式中:  $F_{PV}$ 、 $F_{EV}$ 、 $F_{BA}$ 、 $F_{OP}$  分别为系统内光伏发电年投资成本、EV 充电桩年投资成本、蓄电池年投资成本和系统日运行成本,  $P_{Ec}(i, t)$ 、 $P_{Ed}(i, t)$  分别为  $t$  时刻第  $i$  辆 EV 的充、放电功率,  $c_{EV}$ 、 $d_{EV}$  分别为单位时间 EV 充电支出和放电收益,  $n_{EV}$  为 EV 数量, CRF 为系统设备资本回收系数<sup>[24]</sup>,  $i$  为利率,  $l$  为设备的使用寿命,  $CRF_{PV}$  为光伏发电资本回收系数,  $c_{PV}$  为光伏发电资本支出,  $n_{PV}$  为光伏板发电所需块数,  $CRF_{BA}$  为蓄电池资本回收系数,  $c_{BA}$  为蓄电池资本支出,  $P_{BA}^{rated}$  为蓄电池额定容量,  $W_{EV}$  为单位 EV 充电接口建设资本支出。

### 3.1.2 上层约束条件

#### 3.1.2.1 光伏发电所需组件数量约束

光伏发电所需组件数量约束为

$$\underline{D}_{PS} \leq \frac{D_{PS} \cdot n_{PV}}{A_{PROOF}} \leq \overline{D}_{PS} \quad (8)$$

式中:  $\underline{D}_{PS}$ 、 $\overline{D}_{PS}$  和  $D_{PS}$  分别为不同典型日天气条件下单位光伏组件发电功率的最小值、最大值和平均值,  $A_{PROOF}$  为屋顶建筑面积。

#### 3.1.2.2 蓄电池额定容量约束

蓄电池作为系统的备用电能供应源, 其额定容量应满足在外部能源供应中断等极端条件下的用电需求。为保证系统的安全运行, 蓄电池额定容量约束表达式为:

$$E_{LOAD}(t) = P_B^d(t) \quad (9)$$

$$P_B^d(t) \leq P_{BA}^{rated} \quad (10)$$

式中  $E_{LOAD}(t)$  为  $t$  时刻的负荷需求。

#### 3.1.2.3 EV 数量约束

为避免由于 EV 充电负荷与基本用电负荷叠加造成电力系统容量过载, EV 充电接口数量应满足如下约束表达式:

$$\begin{aligned} 0 \leq n_{EV} \left( \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{EV}} P_{Ec}(t, i) - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{EV}} P_{Ed}(t, i) \right) + \\ E_{LOAD}(t) \leq \overline{E}_S \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $\overline{E}_S$  为电力系统容量最大值。

### 3.1.3 下层目标函数

上层配置问题与下层调度问题间通过系统日运行成本相互耦合。下层模型在考虑到分时电价与 EV 充电需求的情况下, 依据上层模型确定的光伏组件数量、蓄电池容量和 EV 充电桩数量, 以日运行成本最小为目标函数制定系统内设备出力调度计划, 表达式如下:

$$\min F_{OP} = F_{ECO} + \sum_{i=1}^n F_{OPE,i} + F_{ENV} \quad (12)$$

其中:

$$F_{ECO} = c_P^d(t) P_{GRID}^d(t) + c_P^u(t) P_{GRID}^u(t)$$

$$F_{OPE,i} = \sum_{t=1}^T c_{OPE,i} P_{GL,i}(t)$$

$$\begin{aligned} F_{ENV} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\lambda_j + \mu_j) \cdot \\ [R_{ji} P_i(t) + R_{jC} (P_{GRID}^d(t) + P_{GRID}^u(t))] \end{aligned}$$

式中:  $F_{ECO}$ 、 $F_{OPE,i}$ 、 $F_{ENV}$  分别为系统运行的经济成本、维护成本和环境惩罚成本,  $n$  为系统中设备数量,  $c_P^d(t)$  为  $t$  时刻购电价格,  $c_P^u(t)$  为  $t$  时刻售电价格,  $P_{GRID}^d(t)$  为  $t$  时刻电网向系统负荷输出电能,  $P_{GRID}^u(t)$  为  $t$  时刻系统向电网回馈电能,  $c_{OPE,i}$  为第  $i$  个设备单位维护成本,  $P_{GL,i}(t)$  为第  $i$  个设备  $t$  时刻的输出电能,  $i$  为系统中设备编号,  $j$  为污染物 ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ) 种类,  $\lambda_j$  为设备污染物环境价值,  $\mu_j$  为设备排放污染物所受惩罚费用,  $P_i(t)$  为  $t$  时刻各个设备出力功率,  $R_{ji}$  为设备污染物排放参数,  $R_{jC}$  为电网污染物排放参数。在本文研究中, 污染物排放来源主要由电网运行消耗的化石能源产生。

### 3.1.4 下层约束条件

#### 3.1.4.1 系统功率平衡约束

为维持系统内部各设备间电能和热能的实时平衡, 系统电、热功率平衡约束如下。

①电功率平衡:

$$P_{GRID}^d(t) + P_{GRID}^u(t) + P_S(t) + P_B^d(t) + \sum_{i=1}^{n_{EV}} P_{EV}^d(i, t) =$$

$$E_{LOAD}(t) + P_B^c(t) + P_{HP}(t) + \sum_{i=1}^{n_{EV}} P_{EV}^c(i, t) \quad (13)$$

②热功率平衡:

$$Q_{HP}(t) + P_{XR,OUT}(t) = Q_{LOAD}(t) + P_{XR,IN}(t) \quad (14)$$

#### 3.1.4.2 系统设备运行约束

①蓄电池储能约束:

$$z_B^c(t) + z_B^d(t) \leq 1 \quad (15)$$

$$\underline{P}_B \cdot z_B^d(t) \leq P_B^d(t) \leq \overline{P}_B \cdot z_B^d(t) \quad (16)$$

$$\frac{P_B^c \cdot z_B^c(t)}{S_{bat}(t)} \leq P_B^c(t) \leq \frac{P_B^c \cdot z_B^c(t)}{S_{bat}(t)} \quad (17)$$

$$S_{bat}(t+1) = (1-v)S_{bat}(t) + \frac{P_B^c(t)\eta_c \cdot \tau - P_B^d(t)/\eta_d \cdot \tau}{E_B} \quad (18)$$

$$S_{bat} \leq S_{bat}(t) \leq 1 \quad (19)$$

$$S_{bat}(0) = 0.2 \quad (20)$$

式中： $z_B^c(t)$  是一个布尔变量，“1”表示  $t$  时刻蓄电池充电，否则为静置状态； $z_B^d(t)$  是一个布尔变量，“1”表示  $t$  时刻蓄电池放电，否则为静置状态； $P_B^c$ 、 $P_B^d$  分别为蓄电池充、放电功率的最大值， $\underline{P}_B^c$ 、 $\underline{P}_B^d$  分别为蓄电池充、放电功率的最小值， $S_{bat}$  为蓄电池荷电状态的最小值， $S_{bat}(0)$  为蓄电池初始荷电状态。

②空气源热泵约束条件为式(3)所示。

③蓄热槽储热约束：

$$u_H^c(t) + u_H^d(t) \leq 1 \quad (21)$$

$$\frac{P_{XR,OUT} \cdot u_H^d(t)}{Q_{XR}(t)} \leq P_{XR,OUT}(t) \leq \frac{P_{XR,OUT} \cdot u_H^d(t)}{Q_{XR}(t)} \quad (22)$$

$$\frac{P_{XR,IN} \cdot u_H^c(t)}{Q_{XR}(t)} \leq P_{XR,IN}(t) \leq \frac{P_{XR,IN} \cdot u_H^c(t)}{Q_{XR}(t)} \quad (23)$$

$$Q_{XR}(t+1) = Q_{XR}(t) \cdot (1 - \sigma_{XR}) + \frac{P_{XR,IN}(t) \cdot f_{XR,IN} \cdot \tau - \frac{P_{XR,OUT}(t) \cdot \tau}{f_{XR,OUT}}}{Q_{XR}(t)} \quad (24)$$

$$Q_{XR} \leq Q_{XR}(t) \leq \overline{Q_{XR}} \quad (25)$$

式中： $u_H^c(t)$  为一个布尔变量，“1”表示  $t$  时刻蓄热槽蓄热，否则为静置状态； $u_H^d(t)$  为一个布尔变量，“1”表示  $t$  时刻蓄热槽放热，否则为静置状态； $\overline{P_{XR,IN}}$ 、 $\overline{P_{XR,OUT}}$  分别为蓄热槽蓄热、放热功率的最大值， $\underline{P_{XR,IN}}$ 、 $\underline{P_{XR,OUT}}$  分别为蓄热槽蓄热、放热功率的最小值， $\overline{Q_{XR}}$ 、 $\underline{Q_{XR}}$  分别为蓄热槽容量的最大值、最小值。

### 3.1.4.3 EV 充、放电约束

当 EV 参与系统运行调度时，不仅需要引导 EV 有序充、放电，还需要能够在调度时段内达到车主满意的电池荷电状态。因此，对于 EV 应从电池的充、放电状态和车主荷电状态满意度的角度设定相应的约束条件。

①荷电状态需求约束：

$$S_{EV,END} = S_{EV,ARR} + \frac{\sum_{t=T_{ARR}}^{T_{DEP}} (P_{Ec}(t)x_c(t)\eta_{EV}^c - P_{Ed}(t)x_d(t)/\eta_{EV}^d)}{Cap_{EV,BAT}} \quad (26)$$

$$S_{EV,DES} \leq S_{EV,END} \leq S_{EV,max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{Ec}(t) \leq P_{Ec}^{max} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{Ed}(t) \leq P_{Ed}^{max} \quad (29)$$

$$\Delta T = T_{DEP} - T_{ARR} \quad (30)$$

式中： $S_{EV,END}$  为 EV 在调度周期结束后的电池荷电状态， $S_{EV,ARR}$  为 EV 接入系统前电池的荷电状态， $x_c(t)$ 、 $x_d(t)$  分别为  $t$  时刻的充、放电状态标志位， $S_{EV,DES}$  为 EV 接入系统离开后车主期望最小荷电状态， $S_{EV,max}$  为 EV 电池荷电状态的最大值， $P_{Ec}^{max}$ 、 $P_{Ed}^{max}$  分别为 EV 充、放电功率的最大值， $Cap_{EV,BAT}$  为 EV 蓄电池额定电量， $\eta_{EV}^c$ 、 $\eta_{EV}^d$  分别为 EV 充、放电效率， $T_{ARR}$  为 EV 接入系统的时刻， $T_{DEP}$  为 EV 断开连接的时刻， $\Delta T$  为 EV 调度期间内所用时间。

②荷电状态约束。EV 在  $t$  时刻电池的荷电状态与前一时刻 EV 的充、放电功率和电池电量有关，为延长电池使用寿命，应在每一个时刻内对其荷电状态设置合理的范围，避免调度周期内出现过度充、放电的现象。

$$S_{EV}(t+1) = S_{EV}(t) + \frac{(P_{Ec}(t)x_c(t)\eta_{EV}^c - P_{Ed}(t)x_d(t)/\eta_{EV}^d)\tau}{Cap_{EV,BAT}} \quad (31)$$

$$S_{EV,min} \leq S_{EV}(t) \leq S_{EV,max} \quad (32)$$

式中： $S_{EV}(t+1)$ 、 $S_{EV}(t)$  分别为  $t+1$  和  $t$  时刻 EV 电池的荷电状态， $S_{EV,min}$  为 EV 电池荷电状态的最小值。

③充放电状态约束。当 EV 通过充电桩接入系统，在一个调度时间段内其不能同时进行充、放电行为，当 EV 与系统断开连接，其充、放电标志位必须全部为 0。

$$x_c(t) + x_d(t) \leq 1 \quad (33)$$

## 3.2 双层优化模型求解方法

BIPV 建筑能源系统双层优化模型的求解是考虑约束条件的混合整数线性规划问题，模型由于上、下两层模型间求解变量相互耦合，直接求解难度较大，并且模型中存在 0/1 变量，难以通过 KKT 条件将下层模型合并到上层模型中，因此本文采用文献[25]中的双层优化算法的思路求解该模型，并且设置多次迭代求解次数以避免求解结果可能出现的随机性。在 MATLAB 中对上述算例进行仿真，上、下两层模型均利用 Yalmip 工具和 CPLEX 求解器进行求解。模型求解流程见图 5。

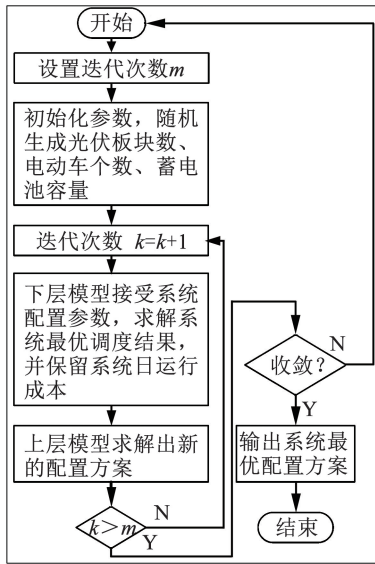


图 5 模型求解流程图

Fig. 5 Flowchart of model solving

双层优化问题求解步骤具体描述如下所述。

**Step1** 设置系统总迭代次数  $m$ 。

**Step2** 初始化系统参数,随机生成光伏板块数、EV 数量和蓄电池容量,将参数传递至下层模型。

**Step3** 更新迭代次数  $k = k + 1$ 。

**Step4** 下层模型接受系统配置参数,利用 CPLEX 求解器求解系统设备出力和与电网交互的功率以及 EV 的充、放电功率,记录系统日运行成本花费并将其返回至上层模型中。

**Step5** 上层模型接受系统日运行成本花费,利用 CPLEX 求解器求解生成新的一组系统配置方案。

**Step6** 判断迭代次数是否达到最大值,若达到最大迭代次数则检查结果是否收敛,否则返回 Step3 中,重新迭代求解。

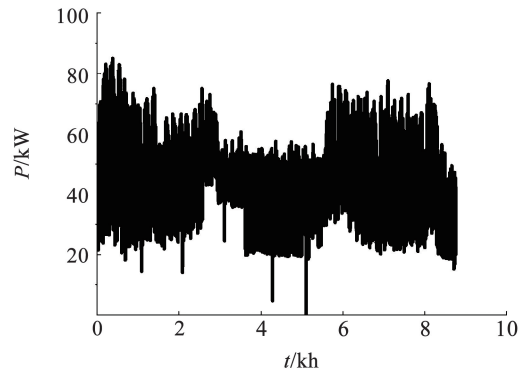
**Step7** 判断结果是否满足收敛条件,若满足条件则输出系统最优配置方案,否则返回 Step1 中,重新开始模型求解。

## 4 算例分析

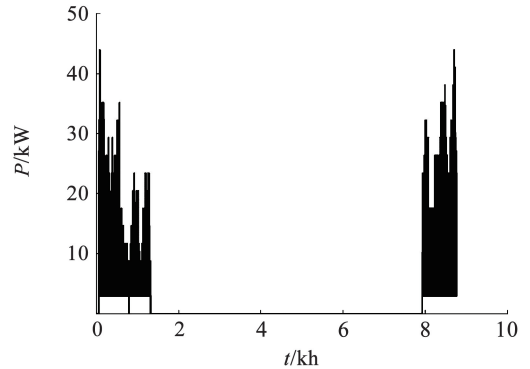
### 4.1 算例参数

本文以某地大学校园内一栋办公建筑采暖季的典型日负荷数据和天气数据为例,使用图 1 所示的 BIPV 建筑能源系统结构作为算例的研究场景。在 MATLAB 平台上进行求解验证,设置系统调度周期为 24 h、步长为 1 h 的仿真算例。为避免求解过程中可能会陷入局部最优,本文设置程序运行 200 次,采用场景消减方法将全年的负荷和天气数据缩减为 30 个典型日场景,选取典型日场景运行成本的平均值作为评估系统长期经济性的参数,每次求解时间大约 15 min,图 6 为全年天气负荷数据曲线。建筑

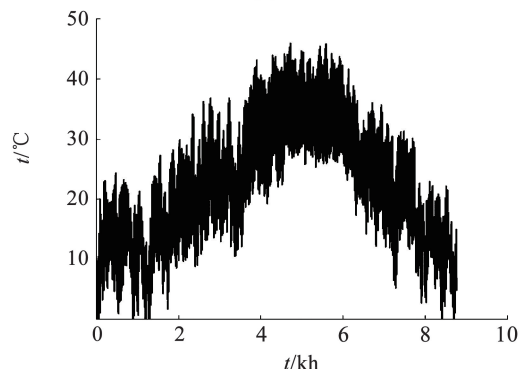
能源系统的部分设备参数见表 1,设备运行维护成本<sup>[26]</sup>见表 2,设备污染物排放参数、污染物环境价值标准和罚款数量级<sup>[27]</sup>见表 3、4,电网分时电价<sup>[28]</sup>见表 5。



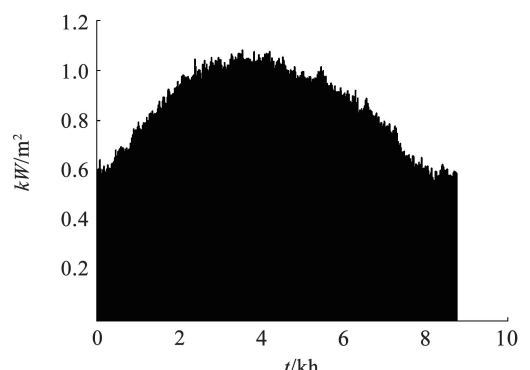
(a) 电负荷



(b) 热负荷



(c) 温度



(d) 太阳辐射照度

图 6 全年天气和负荷曲线

Fig. 6 Annual weather and load curve

表 1 设备参数

Tab. 1 Equipment parameters

设备参数	数值
光伏组件尺寸/mm	1 425 × 990 × 36
EV 充电设施价格/(元·根 <sup>-1</sup> )	2 540
蓄电池价格 <sup>[29]</sup> /(元·kWh <sup>-1</sup> )	1 946
EV 最大充电功率/kW	7
EV 电池容量/kWh	40
EV 充电设施使用年限/a	10
蓄电池循环寿命/a	5

表 2 设备运行维护成本

Tab. 2 Equipment operation and maintenance cost

设备	运行维护成本/(元·kWh <sup>-1</sup> )
蓄电池	0.024
光伏组件	0.023
空气源热泵	0.021
蓄热槽	0.020

表 3 设备污染物排放参数

Tab. 3 Pollutant emission parameters of equipment

设备类型	(g·kWh <sup>-1</sup> )		
	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
电网	889.0	2.35	0.420
微型燃气轮机	724.6	1.82	2.280
柴油发电机	1 142.9	3.74	8.790
燃料电池	20.4	0.01	0.003

表 4 污染物环境惩罚费用

Tab. 4 Environmental penalty costs of pollutants

污染物	(元·kg <sup>-1</sup> )	
	环境价值标准	罚款数量级
CO <sub>2</sub>	0.025	0.01
NO <sub>x</sub>	8.000	2.00
SO <sub>2</sub>	5.040	1.00

表 5 电网分时电价

Tab. 5 Power grid time-of-use price

时段	电价/(元·kWh <sup>-1</sup> )
01:00 - 06:00/23:00 - 24:00	0.33
07:00 - 10:00/19:00 - 22:00	0.83
11:00 - 18:00	0.49

### 4.2 结果对比分析

经过上、下两层模型多次迭代求解后,检验求解结果数值的稳定性。EV 数量、光伏组件数量和蓄电池容量迭代结果见图 7。从图 7 中可以得到光伏组件数量的迭代结果为 933 块,储能容量的迭代结果为 61 kWh。EV 数量由于其充电行为的不确定性导致迭代结果出现波动,但数值整体波动在 14 附近。

因此假设 EV 的迭代结果数值为 14,经过计算验证得到误差的平均值为 0.222 7,小于 1 满足误差范围,系统最优配置方案见表 6。

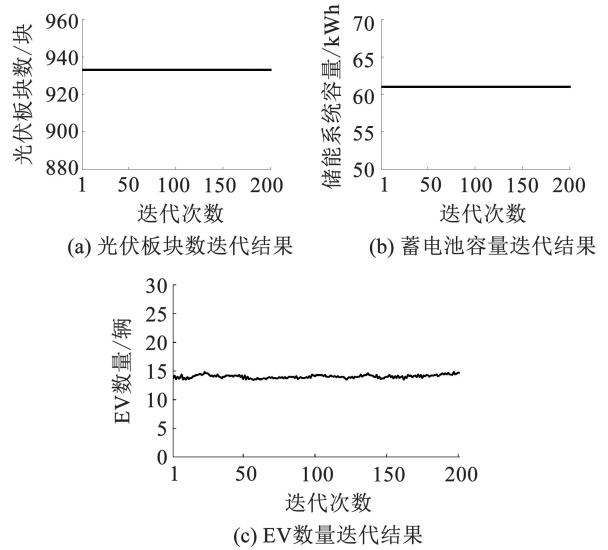


图 7 建筑能源系统设备参数优化结果

Fig. 7 Optimization results of building energy system equipment parameters

表 6 系统最优配置方案

Tab. 6 Optimal system configuration scheme

优化对象	EV/辆	光伏组件/块	蓄电池/kWh
优化结果	14	933	61

在系统最优配置方案并且其他设备参数不变的情况下,为评估 EV 对系统日运行调度的影响,本文首先设置两种配置场景进行对比分析。场景 1 为不考虑 EV 参与系统调度,场景 2 为考虑 EV 参与系统调度,其系统日运行调度分别见图 8、9。场景 1、2 下蓄电池的日充电次数和光伏利用率见表 7。经过对比分析得出,EV 参与建筑能源系统调度,不仅提高了光伏发电的利用率,还减少了蓄电池的充放电次数。由于蓄电池的使用寿命是固定的,接入 EV 的配置策略有助于延长蓄电池的使用寿命。

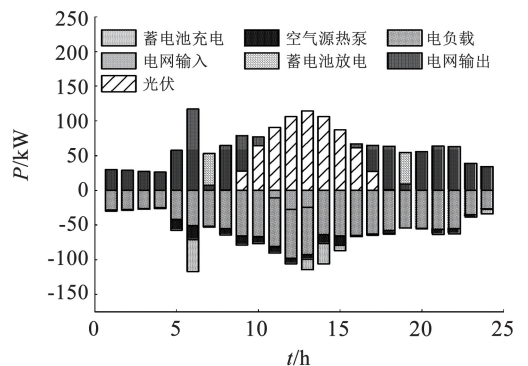


图 8 储能配置为蓄电池的日运行调度结果

Fig. 8 Daily operation scheduling results of battery energy storage configuration

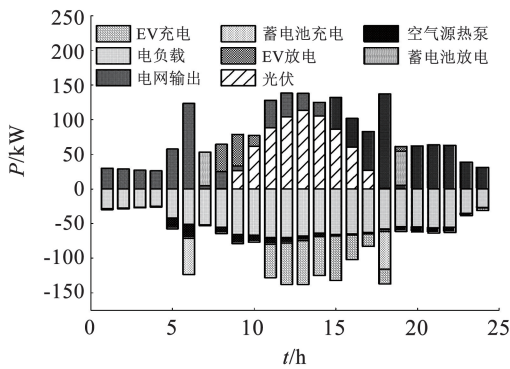


图 9 储能配置为 EV 和蓄电池的日运行调度结果

Fig. 9 Daily operation scheduling results of EV and battery energy storage configuration

表 7 EV 接入对建筑能源系统运行性能的影响

Tab. 7 Effect of EV access on the operational performance of building energy systems

场景	是否接入 EV	蓄电池日充电次数/次	光伏利用率/%
1	否	8	91
2	是	5	100

基于上述结论,为进一步分析 EV 接入建筑能源系统中带来的潜力,在系统中设置仅依靠 EV 储能的第 3 种场景,系统日运行调度见图 10。通过对比场景 1、场景 2 和场景 3 的调度结果,验证利用 EV 代替固定储能方案实施的可行性,表 8 详细展示了场景 1、场景 2、场景 3 下电能来源、年投资成本、日运行成本和年总成本的运行结果。在场景 2 中,由于系统中同时配置了固定储能与移动储能,导致电网电能消耗量高于场景 1 和场景 3,增加了系统对外部电能的依赖,不利于系统的安全稳定运行。EV 接入建筑能源系统中不仅可以充分消纳富余光

伏,还能够为建筑提供收益,因此随着建筑能源系统中 EV 承担储能能量的提升,系统的日运行成本将逐渐降低。场景 2 的日运行成本比场景 1 降低了 8.6%,而场景 3 的日运行成本比场景 1 降低了 16.7%。从系统长期经济性的角度分析,文中 61 kWh 蓄电池的年最低投资成本将达到 2.2 万元,14 根充电桩的年投资成本为 0.36 万元。相比于只配置成本高昂的蓄电池的场景 1,场景 2 的年总支出成本降低了 6.3%。而场景 3 的年总支出成本仅为 18.56 万元,比场景 1 降低了 22.8%。从场景 3 的运行结果可以看出,EV 作为移动储能设备,与建筑之间进行能源的双向互动,不仅能够满足 EV 自身的充电需求,还有效地帮助建筑降低了运行成本,实现了节能减排的目标。EV 接入建筑能源系统不仅在短期内具有明显的经济优势,而且在长期经济性上也表现出色,场景 3 的配置策略在经济效益上明显优于场景 1 和场景 2。

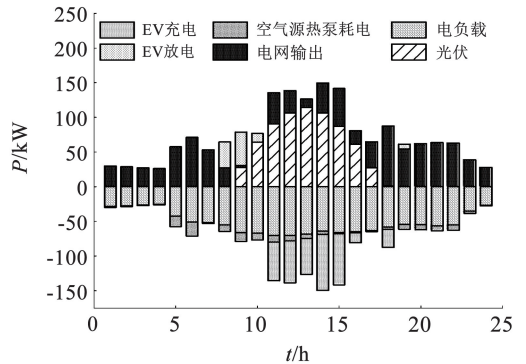


图 10 储能配置为 EV 的日运行调度结果

Fig. 10 Daily operation scheduling results of EV energy storage configuration

表 8 不同储能配置下建筑能源系统运行调度结果

Tab. 8 Operation scheduling results of building energy system under different energy storage configurations

场景	储能配置	电能来源/kWh			年投资成本/万元		日运行成本/元	年总成本/万元
		EV	蓄电池	电网	蓄电池	充电桩		
1	蓄电池	0	91.32	791.98	2.20	0	598.44	24.04
2	蓄电池 + EV	108.01	97.00	806.67	2.20	0.36	547.22	22.53
3	EV	105.70	0	751.08	0	0.36	498.60	18.56

在建筑能源系统中应用场景 3 的配置方案, EV 既能够缓解建筑用电高峰压力,又可以在电网负荷较低时进行充电,平衡电力供应。这种能源的双向互动,不仅提升了能源利用效率,还促进了可再生能源的消纳,有助于实现更环保的能源结构,因此考虑将 EV 接入建筑能源系统以取代传统蓄电池储能是一种前景广阔的策略。

## 5 结 论

本文在“双碳”背景下针对建筑能源系统中接入不合理 EV 数量造成的不良影响,提出一种考虑 EV 接入的 BIPV 建筑能源系统最优配置及调度的策略,建立了系统配置和调度的双层优化模型,通过仿真试验得到的主要结论如下:

1)为确定电动汽车接入 V2B 充电桩后可调度的时间段,采用高斯混合分布模型构建基于公共建筑的 EV 用户出行概率密度函数,经过仿真验证,所建立的 EV 模型符合出行行为模型构建的要求,从而提高了双层优化数学模型建立的合理性。

2)本文建立的双层优化模型采用上、下层模型传递求解变量并通过多次迭代求解的策略。经过反复迭代后,对运行结果进行稳定性验证,结果表明,在不同典型日的求解中,结果表现出高度一致性,未出现较大偏差或不稳定情况。这充分证明了所提出的双层优化模型的合理性及其求解方法的有效性。

3)本文通过对接入 EV 的 BIPV 建筑能源系统应用所提双层优化模型及求解方法,经过仿真证明,该策略不仅能够提升光伏发电的利用率,还能延长蓄电池使用寿命。同时相比于在建筑能源系统中仅依靠固定储能,或混合使用固定储能和移动储能的方案,单独利用 EV 储能在长短期经济性上展现出更为突出的优势,使得系统整体运行更加优化,实现更长的设备使用寿命和更高的经济效益。

4)随着电动汽车的广泛应用,本文所提的最优配置及调度双层优化模型将为投资成本高昂、可再生能源利用率低的 BIPV 建筑能源系统提供可行的解决方案,具有良好的应用价值与现实意义,为实现低碳经济和可持续发展提供有力支持。

## 参考文献

- [1] 陈帅, 黄娟. “双碳”目标赋能绿色生产生活方式的机理、路径及保障机制[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2024, 26(1): 129  
CHEN Shuai, HUANG Juan. Themechanism, path and guarantee mechanism of “double carbon” goal enabling green production and lifestyle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2024, 26(1): 129. DOI: 10.16822/j.cnki.hitskb.2024.01.012
- [2] 田一辛, 黄琼. 西安市办公建筑多目标优化设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(12): 185  
TIAN Yixin, HUANG Qiong. Multi-objective optimization design for office buildings in Xi'an[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(12): 185. DOI: 10.11918/201904207
- [3] 张马斌. 光伏建筑一体化技术应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2024(1): 103  
ZHANG Mabin. Research on the application of photovoltaic building integration technology[J]. Interior Architecture of China, 2024(1): 103. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2167.2024.01.015
- [4] LUO Jianing, YUAN Yanping, JOYBARI M M, et al. Development of a prediction-based scheduling control strategy with V2B mode for PV-building-EV integrated systems[J]. Renewable Energy, 2024, 224: 120237. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120237
- [5] ALI ABDALLA M A, WANG Min, WANG Bing, et al. Double-layer home energy management strategy for increasing PV self-consumption and cost reduction through appliances scheduling, EV, and storage[J]. Energy Reports, 2023, 10: 3494. DOI: 10.1016/j.ejyr.2023.10.019
- [6] 郝志方, 安佳坤, 侯若松, 等. 基于主从博弈的差异化建筑集群与微网协同优化调度方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(3): 1  
HAO Zhifang, AN Jiakun, HOU Ruosong, et al. Coordinated optimization scheduling method for heterogeneous building aggregations and microgrid based on stackelberg game[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(3): 1. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.001385
- [7] ZHOU Yuekuan, CAO Sunliang, HENSEN J L M, et al. Energy integration and interaction between buildings and vehicles: a state-of-the-art review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 114: 109337. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109337
- [8] 魏洪乾, 张幽彤, 蒋新柱, 等. 带有 V2G 并网的电动汽车用增程器控制策略[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(2): 135  
WEI Hongqian, ZHANG Youtong, JIANG Xinzhu, et al. Control strategy of the range-extender for electric vehicles with V2G[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(2): 135. DOI: 10.15918/j.thit1001-0645.2021.239
- [9] WEI Ziliang, GENG Yang, TANG Hao, et al. Cost-effective sizing method of Vehicle-to-Building chargers and energy storage systems during the planning stage of smart micro-grid[J]. eTransportation, 2024, 21: 100343. DOI: 10.1016/j.etrans.2024.100343
- [10] LUO Jianing, CAO Xiaoling, YUAN Yanping. Comprehensive techno-economic performance assessment of PV-building-EV integrated energy system concerning V2B impacts on both building energy consumers and EV owners[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 87: 109075. DOI: 10.1016/j.job.2024.109075
- [11] BORGE-DIEZ D, ICAZA D, AÇIKKALP E, et al. Combined vehicle to building (V2B) and vehicle to home (V2H) strategy to increase electric vehicle market share[J]. Energy, 2021, 237: 121608. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121608
- [12] 陈丽丹, 张尧, Antonio FIGUEIREDO. 电动汽车充放电负荷预测研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 177  
CHEN Lidan, ZHANG Yao, FIGUEIREDO A. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 177. DOI: 10.7500/AEPS20180814001
- [13] 陆燕娟, 潘庭龙, 杨朝辉. 计及电动汽车的社区微网储能容量配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 362  
LU Yanjuan, PAN Tinglong, YANG Chaohui. Energy storage capacity configuration in community microgrid considering electric vehicles[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(12): 362. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-1349
- [14] DONG Xiaojian, SHEN Jiani, LIU Chengwu, et al. Simultaneous capacity configuration and scheduling optimization of an integrated electrical vehicle charging station with photovoltaic and battery energy storage system[J]. Energy, 2024, 289: 129991. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129991
- [15] YANG Ao, WANG Honglei, LI Bin, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system for microgrid based on electric vehicles' orderly charging/discharging strategy[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 411: 137346. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137346

- [16] FACHRIZAL R, QIAN Kun, LINDBERG O, et al. Urban-scale energy matching optimization with smart EV charging and V2G in a net-zero energy city powered by wind and solar energy [J]. *eTransportation*, 2024, 20: 100314. DOI: 10.1016/j. etran. 2024. 100314
- [17] HE Zhanwei, KHAZAEI J, FREIHAUT J D. Optimal integration of Vehicle to Building (V2B) and Building to Vehicle (B2V) technologies for commercial buildings [J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2022, 32: 100921. DOI: 10.1016/j. segan. 2022. 100921
- [18] BARONE G, BUONOMANO A, FORZANO C, et al. Increasing self-consumption of renewable energy through the Building to Vehicle to Building approach applied to multiple users connected in a virtual micro-grid [J]. *Renewable Energy*, 2020, 159: 1165. DOI: 10.1016/j. renene. 2020. 05. 101
- [19] AHSAN S M, KHAN H A, NAVEED-UL-HASSAN A. Optimized power dispatch for smart building (s) and electric vehicles with V2X operation [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 10849. DOI: 10.1016/j. egyr. 2022. 08. 221
- [20] MCGUCKIN N, FUCCI A. Summary of Travel Trends: 2017 National Household Travel Survey; FHWA-PL - 18 - 019 [R]. Washington: Department of Transportation Federal Highway Administration, 2018
- [21] THOMAS D, DEBLECKER O, IOAKIMIDIS C S. Optimal operation of an energy management system for a grid-connected smart building considering photovoltaics' uncertainty and stochastic electric vehicles' driving schedule [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 1188. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2017. 07. 035
- [22] LIU Yanfeng, ZHOU Weihua, LUO Xi et al. Design and operation optimization of multi-source complementary heating system based on air source heat pump in Tibetan area of Western Sichuan, China [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 242: 110979. DOI: 10.1016/j. enbuild. 2021. 110979
- [23] VILLALVA M G, GAZOLI J R, FILHO E R. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays [C]//2009 Brazilian Power Electronics Conference. Bonito-Mato Grosso do Sul: IEEE, 2009: 1244. DOI: 10.1109/COBEP. 2009. 5347680
- [24] LIU Jinhui, XU Zhanbo, WU Jiang, et al. Optimal planning of distributed hydrogen-based multi-energy systems [J]. *Applied Energy*, 2021, 281: 116107. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2020. 116107
- [25] MA Mingtao, HUANG Huijun, SONG Xiaoling, et al. Optimal sizing and operations of shared energy storage systems in distribution networks: a bi-level programming approach [J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118170. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2021. 118170
- [26] GUO Jiacheng, LIU Zhijian, WU Xuan, et al. Two-layer co-optimization method for a distributed energy system combining multiple energy storages [J]. *Applied Energy*, 2022, 322: 119486. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2022. 119486
- [27] 赵珍珍, 王维庆, 樊小朝, 等. 基于 NSGA-II-PSO 算法的微电网多目标优化运行模式 [J]. *电源学报*, 2023, 21(1): 118  
ZHAO Zhenzhen, WANG Weiqing, FAN Xiaochao, et al. Multi-objective optimal operation mode of microgrid based on NSGA-II-PSO algorithm [J]. *Journal of Power Supply*, 2023, 21(1): 118. DOI: 10.13234/j. issn. 2095 - 2805. 2023. 1. 118
- [28] LIU Qingrong, LI Yunqi, XU Tingting, et al. Peak shaving potential and its economic feasibility analysis of V2B mode [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 90: 109271. DOI: 10.1016/j. jobe. 2024. 109271
- [29] SUN Chuyu, ZHAO Xiaoli, QI Binbin, et al. Economic and environmental analysis of coupled PV-energy storage-charging station considering location and scale [J]. *Applied Energy*, 2022, 328: 119680. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2022. 119680

(编辑 张 红)