

太阳能热电新风机系统容量匹配*

张泠[†], 谢磊, 刘忠兵, 孟方芳, 罗勇强
(湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:提出了一种太阳能热电新风机,为适应逐时变化的新风负荷需求,拟通过调节热电新风机的输入电压满足新风负荷要求.在此基础上分析了光伏组件、热电新风机、蓄电池三者之间的容量匹配关系,并建立了3个系统之间的容量匹配计算数学模型.以北京某新风量为 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 的办公室为例,模拟了7月21日至8月21日和1月1日至1月31日每天8:00至18:00热电新风机的使用工况.结果表明:所选光伏组件7月21日至8月21日发电量为 94.24 kW ,热电新风机的总耗电量为 64.35 kW ,连续阴雨天气时蓄电池的最大放电量为 1.19 kW ,热电新风机的平均制冷系数达到 2.50 ;光伏组件1月1日至1月31日发电量为 50.29 kW ,热电新风机的总耗电量为 40.54 kW ,连续阴雨天气时蓄电池的最大放电量为 1.51 kW ,热电新风机的平均制热系数达到 3.02 .

关键词:光伏组件;热电新风机;蓄电池;容量匹配;制冷系数(COP)

中图分类号:TU832

文献标志码:A

Capacity Match of Solar-driven Thermoelectric Ventilator System

ZHANG Ling[†], XIE Lei, LIU Zhongbing, MENG Fangfang, LUO Yongqiang
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A solar-driven thermoelectric ventilator was designed, by adjusting the input voltage of the thermoelectric ventilator to adapt the requirement of fresh air load varied with times. The capacity matching relationships among PV modules, thermoelectric ventilator and battery were analyzed, and the corresponding numerical model was also developed. The working condition of thermoelectric ventilator for an office with a fresh air of $90\text{ m}^3/\text{h}$ at 8:00 to 18:00 in Beijing from July 21st to August 21st and from January 1st to 31st was simulated. The simulation results show that during the simulation period, the total output of PV modules was 94.24 kW , and the total electricity consumption of thermoelectric ventilator was 64.35 kW , the maximum power consumption of continuous rainy weather was 1.19 kW , and the system's average cooling COP can reach 2.50 from July 21st to August 21st. The total output of PV modules was 50.29 kW , and the total electricity consumption of thermoelectric ventilator was 40.54 kW , the maximum power consumption of continuous rainy weather was 1.51 kW , and the system average heating COP can reach 3.02 from January 1st to 31st.

Key words: PV modules; thermoelectric ventilator; battery; capacity match; coefficient of performance (COP)

* 收稿日期:2016-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178170), National Natural Science Foundation of China(51178170); 国家科技支撑计划项目(2011BAJ03B07), National Key Technology Support Program(2011BAJ03B07)

作者简介:张泠(1969—),女,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: lingzhang@hnu.edu.cn

随着生活水平的提高及环保意识的增强,人们对室内环境的要求越来越高,对办公室的空气品质也愈加重视.对没有新风处理设备的办公室而言,主要依靠开窗通风满足新风需求,这种方式难以有效通风换气,同时对室内人体热舒适性和空调能耗有较大影响,因此解决办公建筑新风换气问题对人体健康和建筑节能有着重要的意义.处理室外新风需要较大的空调能耗,目前利用各种换热器回收室内排风能量预冷(热)新风在工程运行中具有广泛的应用,但这种方式对新风的处理能力有限,不能实现主动制冷和制热^[1].

热电制冷技术依靠空穴和电子在运动中直接传递热量,结构紧凑,体积小,维护简单,安全性好,可分散供电,改变电流方向即可实现反向加热,易于恒温控制,与压缩制冷相比,没有机械转动部件,无需制冷剂,无噪声,无污染,可靠性高,寿命长^[2-3].随着太阳能驱动的热电产品逐步出现,太阳能热电技术逐渐成熟,如太阳能热电冰箱^[4]、太阳能热电墙体^[5]、太阳能热电制冷制热系统^[6]等.本文在热电热泵热力学分析的基础上,设计了一种由光伏组件、蓄电池、热电新风机等组成的太阳能热电新风机.热电新风机的输入功率、光伏组件的发电功率、蓄电池的容量匹配是决定系统供电保障以及系统经济性的重要因素.太阳能热电新风机在各系统容量匹配合理的条件下,光伏组件发电即发即用,对室内排风余热进行回收,实现对新风的主动制热和制冷,不仅解决了办公室新风换气问题,而且有效地降低了建筑能耗.同时,提出了各系统的功率计算数学模型,并对各系统进行容量匹配.模拟了北京某办公室 7 月 21 日至 8 月 21 日和 1 月 1 日至 1 月 31 日 8:00 至 18:00 太阳能热电新风机的使用工况.

1 太阳能热电新风机工作原理及系统构成

太阳能热电新风机利用半导体的热电效应,并将由太阳能光电转换装置所提供的直流电供给热电堆,从而达到制冷、供热的目的.如图 1 所示,该系统由光伏组件、蓄电池、热电新风机、充放电控制器等构成.正常日照下光伏组件通过光电转换效应将太阳能转变为电能,输出直流电,一部分可以直接供给热电芯片,另一部分由蓄电池储存,维持阴雨天气系统正常使用.在直流电流的作用下,热电新风机产生一边冷一边热的热泵效果.夏季,热电新风机冷端对新风供冷;冬季,只需改变输入电流的

方向,对新风制热;充放电控制器使整个系统的能量供给始终处于匹配状态.

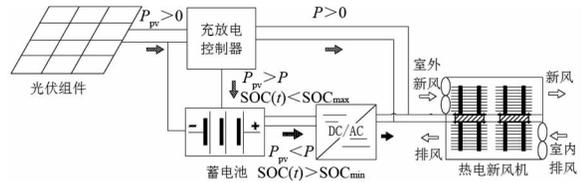


图 1 太阳能热电新风机原理图

Fig.1 Schematic diagram of the solar-powered thermoelectric ventilator

2 太阳能热电新风机系统容量匹配数学模型

2.1 热电新风机的容量匹配数学模型

根据能量平衡和热电制冷(制热)热力学基本理论,得该系统基本方程^[7-8],热电新风机模型如图 2 所示.

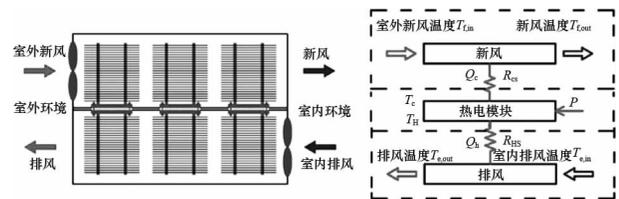


图 2 热电新风机模型图

Fig.2 Model diagram of the thermoelectric ventilator

夏季冷端空气吸收的冷量 Q_c 为:

$$Q_c = \rho G (h_{out} - h_{in}). \tag{1}$$

冬季热端空气吸收的热量 Q_h 为:

$$Q_h = C_p \rho G (T_h - T_{hs}). \tag{2}$$

式中: h_{out} 为室外空气焓值, kJ/kg ; h_{in} 为室内空气焓值, kJ/kg ; T_h 为热端温度, T_{hs} 为新风侧空气温度, $T_{hs} = \frac{T_{f,in} + T_{f,out}}{2}$, K ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; C_p 为空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; G 为空气流量, m^3/h .

热电新风机的制冷量 Q_c 和制热量 Q_h 为:

$$Q_c = N \left[\alpha I (T_c + 273.15) - \frac{1}{2} I^2 R - K (T_h - T_c) \right], \tag{3}$$

$$Q_h = N \left[\alpha I (T_h + 273.15) + \frac{1}{2} I^2 R - K (T_h - T_c) \right]. \tag{4}$$

热电新风机的工作电压为:

$$U = N [\alpha (T_h - T_c) + IR]. \tag{5}$$

热电新风机的输入功率为

$$P = N [\alpha I (T_h - T_c) + I^2 R]. \tag{6}$$

式中: α 为热电热泵的热电系数(塞贝克系数),为

0.052 V/K; R 为电阻, 为 2.45 Ω ; K 为热传导率, $W/(m \cdot K)$; I 为电热热泵的工作电流; T_h 为电热热泵热端温度, K; T_c 为电热热泵冷端温度, K; $(T_h - T_c)$ 为冷热端温差, K; N 为热电芯片个数.

新风机冷端热管散热器和热端热管散热器传热方程为:

$$T_c = T_{cs} - Q_c \cdot R_{cs}, \quad (7)$$

$$T_h = T_{hs} + Q_h \cdot R_{hs}. \quad (8)$$

式中: T_{cs} 为与冷端热管散热器进行热交换的空气计算温度, $T_{cs} = \frac{T_{f,in} + T_{f,out}}{2}$, K; R_{cs} 为冷端热管散热器的热阻, 为 0.25 K/W; T_{hs} 为热端热管散热器进行热交换的空气计算温度; $T_{hs} = \frac{T_{e,in} + T_{e,out}}{2}$, K.

制冷系数:

$$COP = \frac{Q_c}{P + P_f}. \quad (9)$$

式中: P_f 为风机功率.

2.2 光伏发电量计算匹配模型

根据电子学理论, 光伏电池等效电路如图 3 所示.^[9-10]

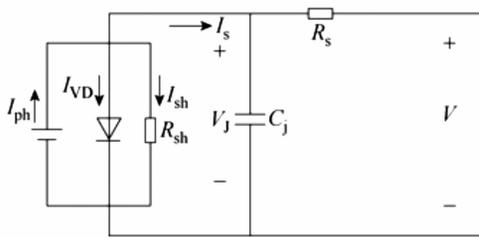


图 3 光伏电池等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of the solar cell

根据图 3, 忽略结电容 C_j , 可以得到光伏电池的 I - V 特性曲线方程为

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} \frac{V + IR_s}{R_{sh}}. \quad (10)$$

式中: I_L 为光电流, A; I_0 为反向饱和电流, A; q

为电子电荷, 1.6×10^{19} C; K 为玻尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K; T 为绝对温度, K; A 为二极管因子; R_s 为串联电阻, Ω ; R_{sh} 为并联电阻, Ω . 在式 (10) 的基础上, 对电路模型简化处理, 得出:

$$\begin{cases} I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left\{ \frac{V}{C_2 V_{oc}} \right\} - 1 \right] \right\}, \\ C_1 = \left[1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right] \exp \left[- \frac{V_m}{C_2 V_{oc}} \right], \\ C_2 = \frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \left[\ln \left[1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right] \right]^{-1}. \end{cases} \quad (11)$$

该模型只需要提供 4 个重要的技术参数 I_{sc} , V_{oc} , I_m 和 V_m , 可以在一定的精度下复现太阳能电池的特性. 任意光照 S 和温度 T 条件下:

$$\begin{cases} I_{sc} = I_{sref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a(T - T_{ref})), \\ V_{oc} = V_{ocref} \ln [e + b(S - S_{ref})(1 - c(T - T_{ref}))], \\ I_m = I_{mref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a(T - T_{ref})), \\ V_m = V_{mref} \ln [e + b(S - S_{ref})(1 - c(T - T_{ref}))]. \end{cases} \quad (12)$$

任意条件下的太阳能电池温度为

$$T = T_{air} + KS. \quad (13)$$

式中: S 为太阳辐射强度, W/m^2 ; $S_{ref} = 1000$ W/m^2 , 为参考太阳辐射强度; $T_{ref} = 25^\circ C$, 为参考电池温度; e 为自然对数底数; 补偿系数 $a = 0.0025/^\circ C$, $b = 0.0005/(W/m^2)$, $c = 0.00288/^\circ C$; K 取 0.03.

光伏组件的输出电能 $P_{pv}(t)$ 与负载功率 $P(t)$ 应满足:

$$P_{pv}(t) > P(t). \quad (14)$$

本文采用的光伏组件参数见表 1.

2.3 蓄电池的容量匹配模型

蓄电池的容量设计应能满足在一定的日太阳辐射变化量下储存保证电热新风机用电所需的电能. 其目标为在一定负荷条件下保证系统能量的平衡, 且光伏系统的能量利用率较高. 蓄电池在蓄/放电的过程中, 用荷电状态参数 $SOC(t)$ 反映蓄电池剩余能量的大小, 其取值范围为 $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$, 其中 SOC_{max} 和 SOC_{min} 分别为蓄电池的允许荷电状态上限和下限^[11].

表 1 光伏组件参数

Tab.1 PV module parameters

型号	类型	电池数量/片	尺寸/mm	工作电压/V	最大功率/W	工作电流/A	开路电压/V	短路电流/A
CT-150	层压太阳能电池板/组件	36	1482×666×35	18	150	8.33	21.6	9.08

蓄电池的容量 C_B 满足^[12]:

$$C_B = \frac{E}{\theta_m(1 - \xi)\gamma\eta_{BA}}. \quad (15)$$

式中: E 为连续阴雨天气热电新风机最大消耗的功率, W ; θ_m 为蓄电池的最大放电深度, 一般取 0.8; ξ 为线路损失系数, 取 0.05; γ 为温度系数, 取 0.9; η_{BA} 为蓄电池的安时效率, 取 1.2.

3 太阳能热电新风机算例结果与分析

本文模拟办公室的计算参数: 新风量为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$; 夏季室外空气相对湿度为 60%, 室内空气温度为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度为 55%; 冬季室内空气温度为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$. 热电芯片型号为 TEC1-12706; 最大工作电压、最大电流分别为 15.4 V, 6 A, 共计 36 片; 光伏板数量为 4 件; 风机功率为 18 W, 额定流量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.1 夏季数据分析

图 4 所示为夏季光伏组件发电量 P_{pv} 与室外空气温度 T 和太阳辐射量 S 的关系; 新风负荷 Q , 热电新风机的输入功率 P 和制冷量 Q_c 以及 COP, 蓄电池的蓄(放)电量与室外空气温度 T 的关系.

如图 4 所示, 室外空气温度 T 和太阳辐射量 S 均对光伏板的发电量有影响, 但太阳辐射量 S 为主要因素, 光伏组件发电量 P_{pv} 与太阳辐射量 S 呈正比; 热电新风机的输入功率 P 和制冷量 Q_c 与室外空气温度 T 呈正比; 而 COP 与冷热端空气温差和输入电压有关, 室外温度低于 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 热电新风机 COP 与温度呈正比, 室外空气温度高于 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 热电新风机 COP 与温度呈反比, 且热电新风机平均 COP 达到 2.50; 根据新风负荷匹配热电新风机、光伏组件及蓄电池的容量, 在确定热电新风机和光伏组件的容量后, 通过蓄电池维持热电新风机和光伏组件的能量平衡, 蓄电池蓄(放)电量为光伏组件发电量 P_{pv} 与热电新风机输入功率 P 的差值, 当光伏组件的发电功率大于热电新风机的输入功率, 且 $\text{SOC}(t) < \text{SOC}_{\text{max}}$ 时, 蓄电池蓄电; 当出现连续阴雨天气时, 蓄电池放电维持热电新风机正常运行. 在夏季模拟周期内, 蓄电池在连续阴雨天气最大的放电量为 1.19 kW.

3.2 冬季数据分析

图 5 为冬季光伏组件发电量 P_{pv} 与室外空气温度 T 和太阳辐射量 S 的关系; 新风负荷 Q , 热电新风机的输入功率 P 和制热量 Q_h 以及 COP, 蓄电池的蓄(放)电量与室外空气温度 T 的关系.

如图 5 所示, 室外空气温度 T 和太阳辐射量 S 均对光伏板的发电量有影响, 但太阳辐射量 S 为主要因素, 光伏组件发电量 P_{pv} 与太阳辐射量 S 成正

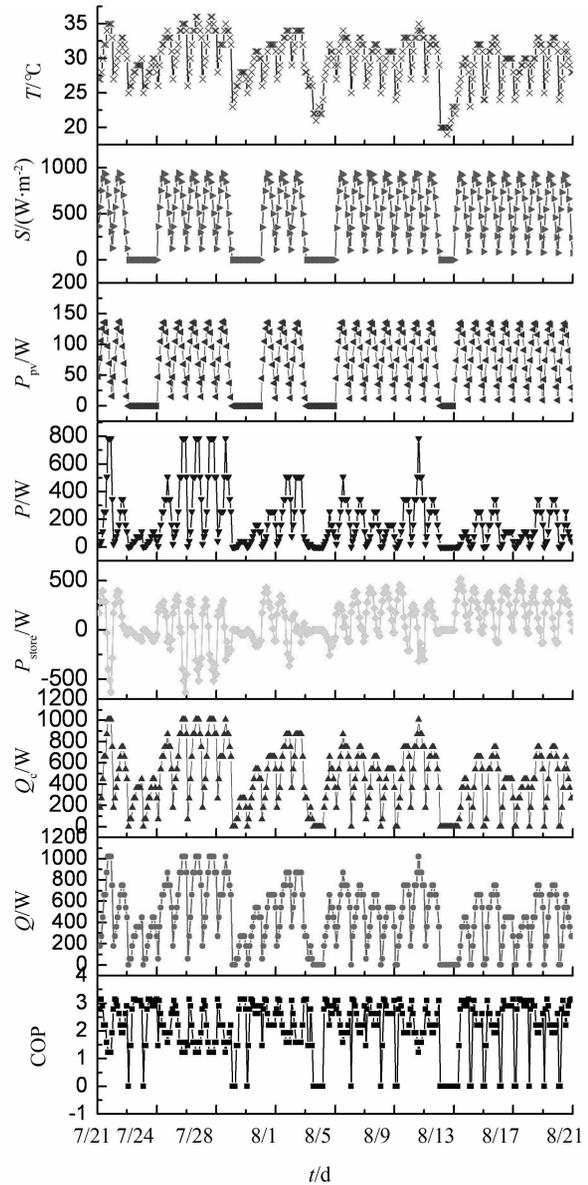


图 4 夏季数据分析曲线图

Fig.4 Data analysis diagram in summer

比; 热电新风机的输入功率 P 和制冷量 Q_c 与室外空气温度 T 呈正比; 而 COP 与冷热端空气温差和输入电压有关, 由于热电新风机为热回收, 室内外空气温差为影响 COP 的主要因素, 冬季 COP 与室外空气温度呈反比, 且热电新风机平均 COP 达到 3.02. 出现连续阴雨天气时, 蓄电池放电维持热电新风机正常运行. 在模拟周期内, 蓄电池在连续阴雨天气最大的放电量为 1.51 kW.

3.3 蓄电池选型

根据模拟数据, 冬季连续阴雨天气热电新风机的最大消耗功率 E 为 1.51 kW, 由式(15)可得蓄电池容量, 所采用的蓄电池参数见表 2.

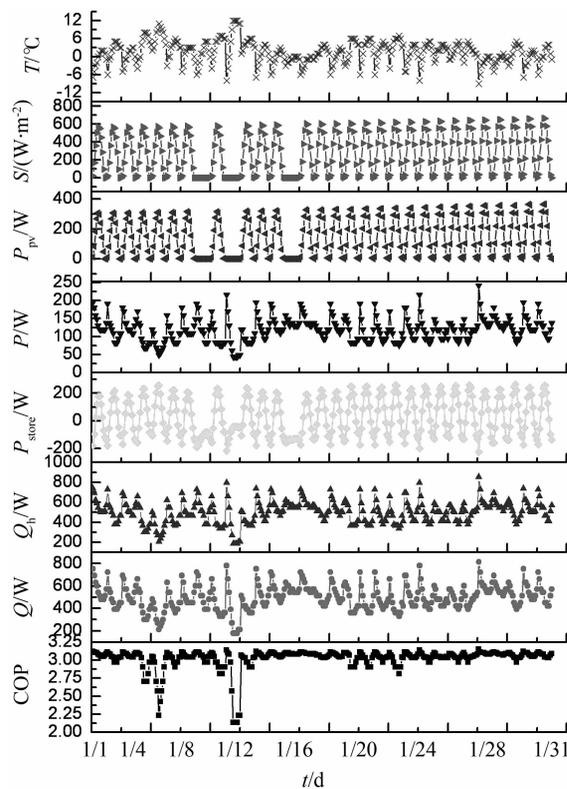


图5 冬季数据分析曲线图

Fig.5 Data analysis diagram in winter

表2 蓄电池参数

Tab.2 Storage battery parameters

电压/V	容量/(A·h)	L×W×H/mm	质量/kg
12	250	520×268×245	70

3.4 系统成本分析

以本文所采用的新风量为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 的太阳能热电新风机系统为例,根据市场价格进行投资费用分析.4片尺寸为 $1482 \text{ mm} \times 666 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 的光伏组件价格为2400元,蓄电池价格为1500元,36片热电芯片价格为360元,热管、翅片和风机总计250元,控制器价格100元,系统总价4610元,其中蓄电池占32.5%,光伏组件占52%,其他占15.5%.

4 结论

1)本文提出了一种太阳能热电新风机,由光伏组件、热电新风机和蓄电池等组成.分析了光伏组件、热电新风机、蓄电池三者之间的容量匹配关系,并建立了3个系统之间的容量匹配计算数学模型.

2)针对该太阳能热电新风机,模拟了北京某办公室7月21日至8月21日和1月1日至1月31日每天8:00至18:00太阳能热电新风机系统的使

用工况,光伏组件发电供热电新风机使用,通过调节热电芯片的输入电压,改变热电新风机的制冷量和制热量来满足逐时变化的新风负荷要求;夏季和冬季连续阴雨天气蓄电池最大放电量分别为1.19 kW和1.51 kW;蓄电池蓄电量大于放电量,能满足热电新风机电用需求.

3)模拟周期内,系统能正常运行,夏季热电新风机平均制冷COP达到2.50,冬季热电新风机制热COP达到3.02.

参考文献

- [1] 张冷,刘忠兵,卢豪.热电管式住宅用新风换气机的实验研究[J].建筑热能通风空调,2012,31(6):37-39. ZHANG Ling, LIU Zhongbing, LU Hao. Experiment study on the performance of the thermoelectric fresh air ventilator integrated heat pipe for residence[J]. Building Energy & Environment, 2012, 31(6): 37-39. (In Chinese)
- [2] 徐德胜.半导体制冷与应用技术[M].上海:上海交通大学出版社,1992:7-12. XU Desheng. Thermoelectric refrigeration and application technology[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992: 7-12. (In Chinese)
- [3] ZHAO Dongliang, TAN Gang. A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1): 15-24.
- [4] DAI Y J, WANG R Z, NI L. Experimental investigation and analysis on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2003, 77(4): 377-391.
- [5] LIU Zhongbing, ZHANG Ling, GONG Guangcai, et al. Experimental evaluation of an active solar thermoelectric radiant wall system[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 94: 253-260.
- [6] HE Wei, ZHOU Jinzhi, HOU Jingxin, et al. Theoretical and experimental investigation on a thermoelectric cooling and heating system driven by solar[J]. Applied Energy, 2013, 107: 89-97.
- [7] HAN Tianhe, GONG Guangcai, LIU Zhongbing, et al. Optimum design and experimental study of a thermoelectric ventilator[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 67(1): 529-539.
- [8] LIU Zhongbing, ZHANG Ling, GONG Guangcai, et al. Experimental study and performance analysis of a solar thermoelectric air conditioner with hot water supply[J]. Energy and Buildings, 2015, 86: 619-625.
- [9] 傅望,周林,郭珂,等.光伏电池工程用数学模型研究[J].电工技术学报,2011,26(10):211-216. FU Wang, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 211-216. (In Chinese)
- [10] 苏建徽,余世杰,赵为,等.硅太阳能电池工程用数学模型[J].太阳能学报,2001,22(4):409-412. SU Jianhui, YU Shijie, ZHAO Wei, et al. Engineering mathematical model of silicon solar cell[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412. (In Chinese)
- [11] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等.独立光伏系统光储容量优化配置方法[J].电网技术,2014,38(5):1271-1276. WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Optimized capacity configuration of photovoltaic generation and energy storage device for stand-alone photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1271-1276. (In Chinese)
- [12] 刘群生.太阳能光伏直流冰箱的能量管理和系统匹配研究[D].上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2007:18-19. LIU Qunsheng. Study on the energy management and system matching of a solar photovoltaic DC refrigerator[D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, 2007: 18-19. (In Chinese)