

遮阳式光伏新风系统性能模拟与优化

张冷^{1,2†}, 张烨琳¹, 刘忠兵¹, 罗勇强¹, 吴征鸿¹, 何细华¹

(1.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2.湖南省建筑节能与环境控制关键技术协同创新中心, 湖南 株洲 412007)

摘要:对一种新型遮阳式光伏新风系统进行研究,该系统在夏季利用光伏板发电的同时为建筑遮阳,在冬季则可以利用光伏板余热加热新风.采用类区域方法建立了遮阳式光伏新风系统的光电光热转换模型,并采用实验数据对系统模型进行验证,在此基础上对遮阳式光伏新风系统进行优化.研究表明:随着新风量增大,光伏板发电效率、新风得热量与集热效率增大,新风温升与送风温度减小;系统发电效率和集热效率随太阳辐照强度的增大而增大.本文研究的遮阳式光伏新风系统能够有效实现太阳能发电、建筑遮阳和新风加热功能,为建筑节能提供一种新方法.

关键词:太阳能;新风系统;发电效率;集热效率;分析优化

中图分类号:TU831.3

文献标志码:A

Performance Simulation and Optimization Analysis of A Fresh Air System Integrated with Shading Photovoltaics

ZHANG Ling^{1,2†}, ZHANG Yelin¹, LIU Zhongbing¹, LUO Yongqiang¹, WU Zhenghong¹, HE Xihua¹

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.Collaborative Innovation Center of Building Energy Conservation and Environmental Control, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: A type of fresh air system integrated with shading photovoltaic is researched. In summer, photovoltaic panel is used for shading and electricity generation. In winter, this system can generate power and heat fresh air by extra thermal energy of PV panel. By using class region method, a photovoltaic and photo-thermal conversion model is established to simulate the performance of the fresh air system, and the system model is validated by experimental data. On this basis, the fresh air volume of the fresh air system integrated with shading photovoltaic is optimized. The results show that the photovoltaic power generation efficiency, the heat gain of the fresh air and the heating efficiency increase, while temperature rise of fresh air and outlet temperature of fresh air reduce with the increase of the fresh air volume, and the power generation efficiency and heat collection efficiency grow with the increase of solar radiation intensity. In this paper, the fresh air system integrated with shading photovoltaic has functions of electricity generation, shading and fresh air heating, and provides a new method for

* 收稿日期:2017-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578221,51708194), National Natural Science Foundation of China(51578221,51708194);湖南省建筑节能与环境控制关键技术协同创新中心资助项目, Collaborative Innovation Center of Building Energy Conservation and Environmental Control

作者简介:张 冷(1969—),女,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

† 通讯联系人, Email: lingzhang@hnu.edu.cn

building energy saving.

Keywords: solar energy; fresh air system; power generation efficiency; collector efficiency; optimization analysis

能源危机的加剧和建筑能耗的不断增长使建筑节能成为各国政府关注的焦点问题.减少建筑能耗、提高能源利用效率和在建筑中使用可再生能源是建筑节能的有效措施.BIPV/T将光伏发电技术和建筑有机结合,在利用光伏电池发电的同时回收光伏底板的余热,体现了完美的可持续发展理念,受到世界各国的广泛关注.目前各国学者对BIPV/T技术进行了广泛的研究,针对建筑不同需求,设计出不同的BIPV/T系统.如Vats等^[1]、Gaur等^[2]以及Tiwari等^[3]分别针对印度寒冷地区的气候条件,设计出了适用于该地区的BIPV/T系统,并通过优化系统参数使发电与集热效率最大化.Agrawal等^[4]研究了光电光热空气收集器与有效面积为65 m²的建筑物屋顶的一体化,该BIPV/T系统每年能够生产16 209 kW·h和1 531 kW·h的电能和热能,系统的总体热效率为53.7%.Lu和Yang^[5]通过比较22 kW的屋顶BIPV系统的能源回收时间和温室气体回收时间,研究了光伏系统的可持续性.Liu等^[6-8]对光伏热电一体化墙体系统进行了系统研究,利用光伏发电驱动热电辐射板,实现对墙体温度的主动控制,在消除传统墙体负荷的同时为室内提供一定的制冷量和制热量.Song等^[9]研究了不同角度与朝向光伏组件的发电功率,结果表明南向安装的光伏组件在功率输出方面优于东向光伏组件,安装在30°的光伏组件的年输出功率约为垂直光伏组件的2.5倍.

研究表明在夏季通过窗户进入室内的空调负荷主要来自太阳辐射,建筑物在设置有外遮阳设施时可以减少太阳辐射热量的70%~90%^[10].可以看出,建筑外遮阳在夏季可以有效减少建筑得热.然而在冬季,建筑外遮阳对太阳辐射形成遮挡,不利于室内采暖.本文针对传统遮阳系统的缺点,对一种遮阳式新风系统进行了研究,在夏季对建筑遮阳的同时,利用太阳能发电,在冬季利用光伏板发电的同时利用光伏板余热加热新风,实现对太阳能光电光热的综合利用,提高了能源利用率,克服了建筑外遮阳的不足.本文建立了遮阳式光伏新风系统的光电光热转换模型,并采用实验数据对模型进行了验证,在此基础上对遮阳式光伏新风系统性能进行分析优化.

1 系统原理及传热模型

1.1 系统原理

如图1所示,遮阳式光伏新风系统包括光伏电池板层、空气通道层和保温板层.光伏板作为建筑外窗的遮阳板使用,设置在外窗上面,其与地面的倾角为30°.在夏季,利用光伏板发电并遮阳,空气通道出口处密闭阀门关闭,以减小太阳辐射直接进入室内;在冬季,室外空气在风机的作用下,从新风入口进入空气通道,经光伏板预热后温度升高,再送入室内,为建筑提供新风.

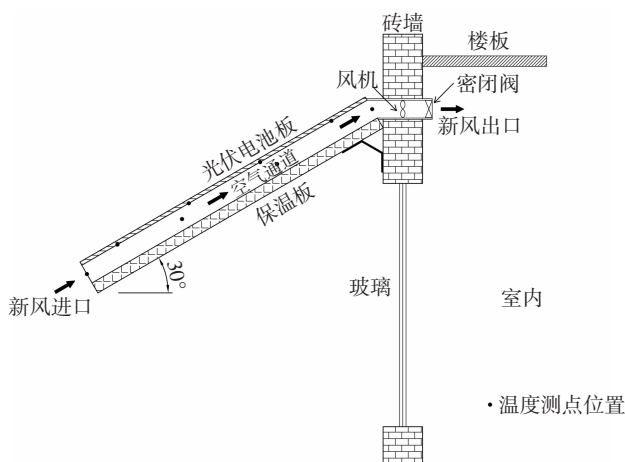


图1 遮阳式新风系统结构示意图

Fig.1 Structure of the fresh air system integrated with shading photovoltaic

1.2 光伏新风系统传热模型的建立

遮阳式光伏新风系统的冬季热工网络模型如图2所示.具体的传热过程:光伏板接收太阳辐射,一小部分转化为电能输出为负载供电,另一大部分转化为热能使自身温度升高,再通过对流换热与长波辐射换热的方式与室外环境、空气通道内的空气以及保温板进行热量交换;空气通道内的空气在风机的作用下与光伏板和保温板进行强制对流换热,带走部分热量;保温板内侧与光伏板辐射换热,与空气强制对流,并通过导热传热将热量传递给保温板外侧;保温板外侧与室外环境通过对流与长波辐射换热.

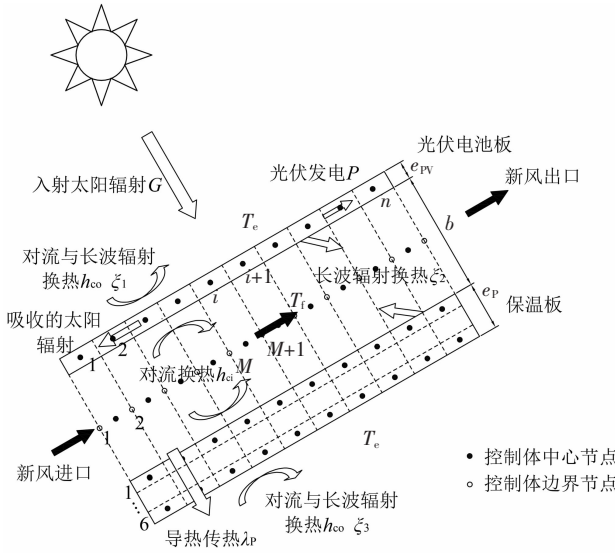


图2 新风系统传热原理图

Fig.2 Principle of heat transfer of the fresh air system

计算传热的物理模型采用周娟^[1]提出的类区域模型,沿空气流动方向将光伏新风系统的光伏电池板、空气层以及保温板等分成 n 个区域,取 $n = 10$;保温板沿厚度方向等分成 6 个区域计算传热,并忽略光伏板与空气通道厚度方向的温度梯度。在每个区域中心设置一个节点,如图 2 所示,假设该节点可以代表该区域的物理参数,并在空气通道设置边界节点用于输入边界条件便于计算。

根据质量与能量平衡原理建立了如下光伏新风系统传热方程式。对于空气腔的节点区域 i ,有:

$$(\rho VC)_f \frac{dT_{f,i}}{dt} = h_{ci1} A_i (T_{PV,i} - T_{f,i}) + h_{ci2} A_i (T_{P,i} - T_{f,i}) - m C_f (T_{f,M+1} - T_{f,M}) \quad (1)$$

式中, T 表示温度, K; ρ_f 表示空气的密度, kg/m^3 ; V_f 表示节点体积, $V_f = A_i \times b, \text{m}^3$; A_i 表示节点区域的换热面积, $A_i = w \times z, \text{m}^2$; z 表示节点区域的纵向长度, $z = ln, \text{m}$; w 表示节点区域的横向长度, m ; b 表示空气通道的厚度, 0.05 m ; C_f 表示空气的比热容, $1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; h_{ci1} 表示空气通道内空气与光伏板的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; h_{ci2} 表示空气通道内空气与保温板的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; m 表示空气通道内空气的质量流量, $m = Q \times \rho, \text{kg}/\text{s}$; $T_{f,i}$ 表示空气通道节点 i 的温度, 近似取为上下边界节点温度的平均值, $T_{f,i} = (T_{f,M} + T_{f,M+1})/2, \text{K}$; 下标 $M, M+1$ 分别表示空气通道节点区域 i 的下边界和上边界; 下标 f, PV, P 分别表示空气通道中的空气、光伏电

池板与保温板的物理参数。

同理,对于光伏电池板的节点区域 i ,有:

$$(\rho VC)_{PV} \frac{dT_{PV,i}}{dt} = (1 - \eta_{cell}) \alpha \tau A_i G - h_{ci1} A_i (T_{PV,i} - T_{f,i}) - h_{co} A_i (T_{PV,i} - T_e) - \xi_1 \sigma A_i (T_{PV,i}^4 - T_{P,i}^4) - \xi_2 \sigma A_i (T_{PV,i}^4 - T_e^4) - \frac{\lambda_{PV}}{z} e_{PV} w (T_{PV,i} - T_{PV,i+1}) - \frac{\lambda_{PV}}{z} e_{PV} w (T_{PV,i} - T_{PV,i-1}) \quad (2)$$

对于保温板内侧的节点区域 i ,有:

$$(\rho VC)_P \frac{dT_{P,i}^j}{dt} = h_{ci2} A_i (T_{f,i} - T_{P,i}) + \xi_1 \sigma A_i (T_{PV,i}^4 - T_{P,i}^4) - \frac{\lambda_P}{z} \frac{e_P}{6} w (T_{P,i} - T_{P,i+1}) - \frac{\lambda_P}{z} \frac{e_P}{6} w (T_{P,i} - T_{P,i-1}) - \frac{\lambda_P}{e_P/6} A_i (T_{P,i}^j - T_{P,i+1}^j), (j = 1) \quad (3)$$

对于保温板中间 4 层的节点区域 i ,有:

$$(\rho VC)_P \frac{dT_{P,i}^j}{dt} = \frac{\lambda_P}{z} \frac{e_P}{6} w (T_{P,i+1} - T_{P,i}) - \frac{\lambda_P}{z} \frac{e_P}{6} w (T_{P,i} - T_{P,i-1}) - \frac{\lambda_P}{e_P/6} A_i (T_{P,i}^j - T_{P,i-1}^j) - \frac{\lambda_P}{e_P/6} A_i (T_{P,i}^j - T_{P,i+1}^j), (j = 2, 3, 4, 5) \quad (4)$$

对于保温板外侧的节点区域 i ,有:

$$(\rho VC)_P \frac{dT_{P,i}^j}{dt} = h_{co} A_i (T_e - T_{P,i}) + \xi_3 \sigma A_i (T_e^4 - T_{P,i}^4) - \frac{\lambda_P}{z} \frac{e_P}{6} w (T_{P,i} - T_{P,i+1}) - \frac{\lambda_P}{z} \frac{e_P}{6} w (T_{P,i} - T_{P,i-1}) - \frac{\lambda_P}{e_P/6} A_i (T_{P,i}^j - T_{P,i-1}^j), (j = 6) \quad (5)$$

式(2)~(5)中, α 表示光伏电池板的吸收率, 0.9 ; τ 表示光伏电池板外表面玻璃透射率, 0.94 ; σ 表示斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ρ_{PV} 表示光伏板的密度, $2515 \text{ kg}/\text{m}^3$; ρ_P 表示保温板的密度, $40 \text{ kg}/\text{m}^3$; e_P 表示保温板的厚度, 0.04 m ; e_{PV} 表示光伏板的厚度, 0.008 m ; η_{cell} 表示光伏电池板的发电效率; ξ_1, ξ_2, ξ_3 分别为光伏板与保温板之间、光伏板外侧以及保温板外侧的辐射换热因子; λ_{PV} 表示光伏板的导热系数, $0.76 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_P 表示保温板的导热系数, $0.028 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C_{PV} 表示光伏板的比热容, $810 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; C_P 表示保温板的比热容, $1500 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; G 表示入射到光伏电池板表面的太阳辐射强度, W/m^2 ; 上标 j 表示保温板厚度方向的节点区域。

其余参数定义同式(1).

采用有限差分法对公式(1)~(5)在时间和空间上进行离散求解^[12].假设初始时刻光伏板、保温板与空气腔各处温度均匀,均为室外温度.新风入口的边界条件取为室外逐时温度.

光伏板的发电效率 η_{cell} 可由下式^[12]计算:

$$\eta_{\text{cell}} = \frac{P}{wlG} = \frac{I^2 R}{wlG} \quad (6)$$

式中, P 表示光伏板的发电功率, W ; R 是负载的电阻值, 7.5Ω ; 电流 I 的计算公式为:

$$I = N_p I_{sc}' (1 - C_1' (e^{\frac{C_2' U}{N_s}} - 1)) \quad (7)$$

式中, N_s 、 N_p 分别表示光伏电池元的串并联个数; U 是光伏板电压, V ; I_{sc}' 表示实际的短路电流, A ; C_1' 与 C_2' 为无量纲参数便于计算.

辐射换热因子 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 可由下式求得^[13]:

$$\frac{1}{\xi_1} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{PV}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{P}}} - 1 \quad (8)$$

$$\frac{1}{\xi_2} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{PV}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{e}}} - 1 \quad (9)$$

$$\frac{1}{\xi_3} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{P}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{e}}} - 1 \quad (10)$$

式中, ε_{PV} 为光伏板的灰体发射率, 0.94 ; ε_{P} 为保温板的灰体发射率, 0.8 ; ε_{e} 为建筑墙体外侧的灰体发射率, 0.8 .

光伏板和保温板与室外空气的对流换热系数 h_{co} ^[14]:

$$h_{\text{co}} = 2.8 + 3.0v_{\text{a}} \quad (11)$$

式中, v_{a} 为冬季室外平均风速, 取为 2.34 m/s ^[15].

光伏板和保温板与空气腔内空气的对流换热系数 h_{ci} :

$$h_{\text{ci}} = \frac{Nu\lambda_{\text{f}}}{X} \quad (12)$$

式中: X 为空气通道的特征长度, $X = 2wb/(w+b)$, m .

Nusselt 系数的计算公式有很多, 本文选用 Can-danedo 等^[16]提出的经验计算式, 光伏板与保温板的 Nusselt 系数分别求解.

对于光伏板表面, 当 $250 \leq Re \leq 7500$ 时,

$$Nu_{\text{top}} = 0.052Re^{0.78}Pr^{0.4} \quad (13)$$

对于保温板表面, 当 $800 \leq Re \leq 7100$ 时,

$$Nu_{\text{bottom}} = 1.017Re^{0.471}Pr^{0.4} \quad (14)$$

式中, Pr 为普朗特数; Re 为雷诺数, 由公式^[12] $Re = v \times De/\nu$ 计算.

2 实验数值模拟与结果分析

实验的主要测量参数为: 室内外温度、空气通道内和光伏背板温度、发电电压与电流、风量以及太阳辐照强度等. 光伏板与空气通道内的温度测点分布如图 1 所示, 遮阳式光伏新风系统主要参数如表 1 所示. 实验时间为 2016 年 12 月 8 日, 地点位于湖南省长沙市, 选取太阳辐射强度较好的工作时段, 从上午 10:00 到下午 14:30 进行数据采集, 数据采集系统每隔 5 min 读取并记录一次数据. 系统的新风量 Q 为 $93 \text{ m}^3/\text{h}$.

表 1 太阳能电池板参数表

Tab.1 The performance parameters of photovoltaic panel

参数	数值
型号	SYE270M6-60
额定功率(P)	270 W
开路电压(U_{oc})	38.7 V
短路电流(I_{sc})	9.34 A
最大电压(U_m)	31.4 V
最大电流(I_m)	8.6 A
尺寸($l \times w \times h$)	1 640 mm \times 990 mm \times 35 mm
测试条件	AM1.5, 1 000 W/m ² , 25 °C

空气密度 ρ_{f} 、空气的导热系数 λ_{f} 以及普朗特数 Pr 采用大气压 ($P = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) 下干空气的热物性参数^[13], 用插值法通过程序计算得出.

光伏新风系统的新风得热量 Q_{h} 的计算公式为:

$$Q_{\text{h}} = \rho_{\text{f}} V_{\text{f}} C_{\text{f}} (T_{\text{f},n+1} - T_{\text{e}}) \quad (15)$$

式中, T_{e} 表示室外空气的温度, K ; $T_{\text{f},n+1}$ 表示空气通道出口的空气温度, K .

光伏新风系统的集热效率 η_{h} 的计算公式如下:

$$\eta_{\text{h}} = \frac{Q_{\text{h}}}{l \times w \times G} \quad (16)$$

2.1 模拟结果与实验数据对比

图 3 表示光伏电池发电功率随太阳辐射强度变化的实验值与模拟值对比, 光伏电池发电功率随着太阳辐照的增加而增大. 通过比较模拟值与实验值, 它们的均方根误差与平均相对误差分别为 2.85% 与 2.41%. 图 4 表示光伏电池板上中央节点温度的实验值与模拟值对比, 由于太阳辐射是光伏板热量的主要来源, 所以光伏板温度也是先增大后减小的趋势. 通过比较模拟值与实验值, 它们的均方根误差与平均相对误差分别为 3.26% 与 2.86%.

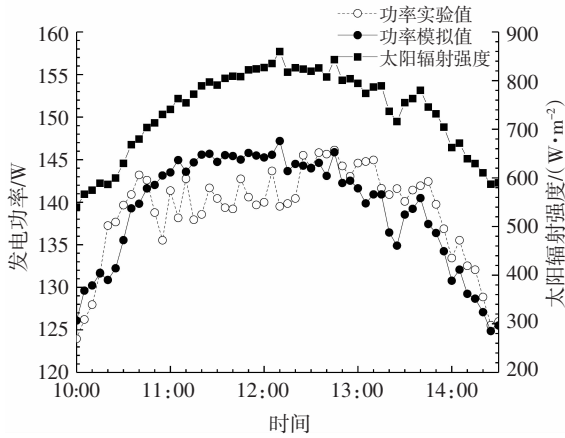


图 3 发电功率随太阳辐射强度变化的模拟值与实验值对比
Fig.3 Comparison of simulated and measured generation power

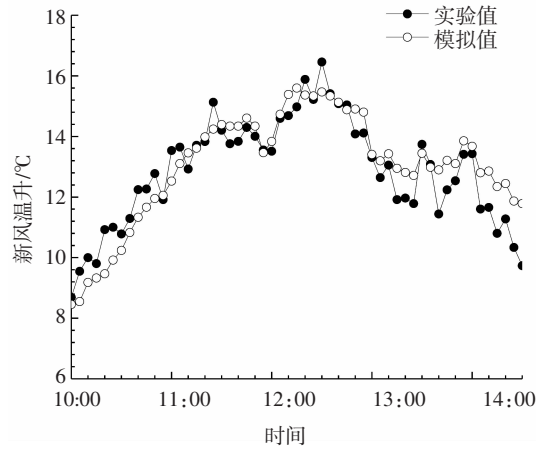


图 5 新风温升的模拟值与实验值对比
Fig.5 Comparison of simulated and measured temperature rise of fresh air

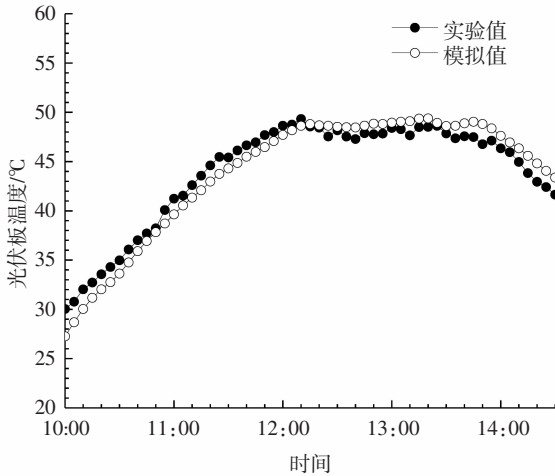


图 4 光伏板温度的模拟值与实验值对比
Fig.4 Comparison of simulated and measured photovoltaic panel temperature

图 5 表示新风温升的实验值与模拟值对比,由于光伏板加热是新风温升的主要原因,所以新风温升与光伏板温度变化的趋势相同.温升最大值出现在 12:30 左右,可达到 15 °C 以上,此时太阳辐照最大.通过比较模拟值与实验值,它们的均方根误差与平均相对误差分别为 6.92% 与 5.39%.从图 3 ~ 图 5 可以得出,遮阳式光伏新风系统各参数的模拟值与实验值误差较小,证明本文建立的遮阳式光伏新风系统光电光热转换模型具有较高的精度,可以用来模拟分析和优化遮阳式光伏新风系统的性能.

2.2 新风量的优化

新风量在 60 ~ 120 m³/h 间,每隔 10 m³/h 选取一个共 7 种工况进行数值模拟.图 6 与图 7 分别表示其中 3 种新风量下光伏板发电效率 η_{cell} 、集热效

率 η_h 、新风温升 ΔT 与新风得热量 Q_h 随时间的变化情况.从图中可知,光伏板发电效率、新风得热量与集热效率随着新风量的增加而增大,而新风温升减小,是由于新风量增大导致新风风速增大,强化了对流换热,使光伏板温度下降,从而增大了光伏板的发电功率和发电效率.新风量的增大会使单位体积的新风得热减小,从而新风温升减小,但由于 Q 的增大,由式(15)综合得出新风得热量 Q_h 增大,进而得到集热效率 η_h 增大.

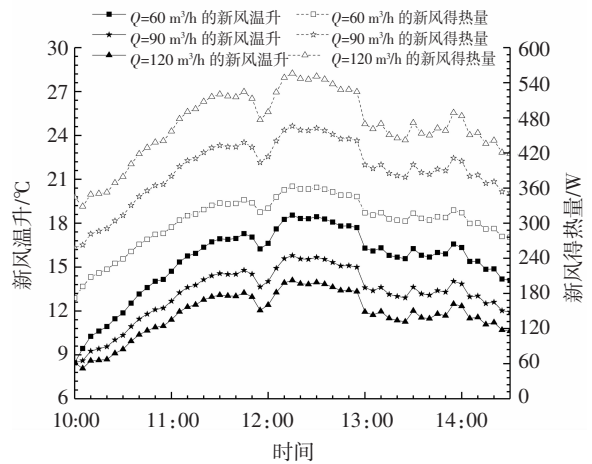


图 6 不同新风量下的新风温升与得热量逐时变化值
Fig.6 The hourly variation of temperature rise of fresh air and heat gain with different fresh air volume

12:00 时,流量为 90 m³/h 的发电效率比流量为 60 m³/h 时增加了 1.32%,新风得热量和集热效率增加了 27.15%,新风温升减小了 15.64%,送风温度减小了 7.43%;流量为 120 m³/h 的发电效率比流量为 90 m³/h 时增加了 1.00%,新风得热量和集热效率增加了 18.39%,新风温升减小了 11.47%,送风温度减

小了4.96%。

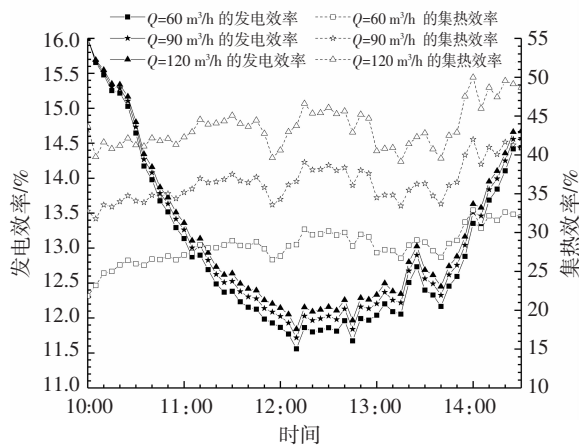


图7 不同新风量下的发电效率、集热效率逐时变化值

Fig.7 The hourly variation of power generation efficiency and collector efficiency with different fresh air volume

3 结论

本文提出一种遮阳式光伏新风系统,在夏季利用光伏板遮阳和发电,冬季利用光伏发电的同时预热新风.建立了一个遮阳式光伏新风系统的传热模型,并对传热模型进行了实验验证.进一步研究了不同新风量对发电功率与新风得热量的影响,得出了以下结论:

1)光伏电池板发电功率、中间节点温度、新风温升的实验值与模拟值的平均相对误差分别为2.41%、2.86%和5.39%,结果表明实验与模拟数据吻合良好,说明该模型对光伏新风系统模拟具有较高的准确性.

2)遮阳式光伏新风系统发电效率和集热效率随太阳辐照强度的增大而增大,在新风量为60~120 m³/h时,系统最大发电效率为16.00%,最大集热效率为49.98%,最大新风温升为18.55℃,送风温度达到37.04℃,最大新风得热量为556 W.

3)遮阳式光伏新风系统发电效率、发电效率、新风得热量与集热效率随着新风量的增加而增大,但新风温升逐渐减小,导致送风温度也随着减小.

参考文献

[1] VATS K, TOMAR V, TIWARI G N. Effect of packing factor on the performance of a building integrated semitransparent photovoltaic thermal (BISPVT) system with air duct[J]. Energy & Buildings, 2012,53(10):159—165.

[2] GAUR A, TIWARI G N, MÉNÉZO C, et al. Numerical and experimental studies on a building integrated semi-transparent photovoltaic thermal (BiSPVT) system: model validation with a

prototype test setup[J]. Energy Conversion & Management, 2016, 12(9):329—343.

- [3] TIWARI G N, SAINI H, TIWARI A, et al. Periodic theory of building integrated photovoltaic thermal (BiPVT) system[J]. Solar Energy, 2016, 125:373—380.
- [4] AGRAWAL B, TIWARI G N. Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions[J]. Applied Energy, 2010, 87(2):417—426.
- [5] LU L, YANG H X. Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong[J]. Applied Energy, 2010, 87(12):3625—3631.
- [6] LIU Z, ZHANG L, GONG G, et al. Evaluation of a prototype active solar thermoelectric radiant wall system in winter conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89:36—43.
- [7] LIU Z B, ZHANG L, GONG G C, et al. Experimental evaluation of an active solar thermoelectric radiant wall system[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 94:253—260.
- [8] LUO Y, ZHANG L, LIU Z, et al. Thermal performance evaluation of an active building integrated photovoltaic thermoelectric wall system[J]. Applied Energy, 2016, 177:25—39.
- [9] SONG J H, AN Y S, KIM S G, et al. Power output analysis of transparent thin-film module in building integrated photovoltaic system (BIPV)[J]. Energy & Buildings, 2008, 40(11):2067—2075.
- [10] 谢晓平, 施少伟, 金津. 长沙地区气候特征与建筑外遮阳[J]. 中外建筑, 2009(12):59—62.
- XIE X P, SHI S W, JIN J. Climate characteristics in changsha area and building external solar shading[J]. Chinese and Overseas Architecture, 2009(12):59—62. (In Chinese)
- [11] 周娟. 建筑围护结构动态传热模拟方法的研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2012:64—74.
- ZHOU J. Simulation methods research on transient heat transfer through building envelope [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2012:64—74. (In Chinese)
- [12] 孟方芳. 光伏热新风机的性能研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2016:12—29.
- MENG F F. The performance research of the photovoltaic thermoelectric fresh air ventilator[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2016:12—29. (In Chinese)
- [13] 英克鲁佩勒. 传热和传质基本原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007:518—572.
- INCROPERA F P. Fundamentals of heat and mass transfer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:518—572. (In Chinese)
- [14] WATMUFF J H, CHARTERS W W S, PROCTOR D. Solar and wind induced external coefficients - solar collectors [J]. Beijing: Cooperation Mediterranee Pour Lenergie Solaire, 1977, 1:56.
- [15] 张晴原. 中国建筑用标准气象数据库 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004:70—71.
- ZHANG Q Y. Architecture standard meteorological database [M]. Beijing: China Machine Press, 2004:70—71. (In Chinese)
- [16] CANDANEDO L M, ATHIENITIS A, PARK K W. Convective heat transfer coefficients in a building-integrated photovoltaic/thermal system [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2011, 133(2): 021002.