DOI:10.19666/j.rlfd.202602006

基于复合相变材料冷却的太阳能传输照明-光伏系统性能分析

陈辛格，胡楚东，臧建彬

同济大学汽车与能源学院，上海 201800

［摘　　要］【目的】针对高层建筑照明能耗高及太阳能全光谱利用中红外波段致热问题，为提升系统综合利用效率、降低建筑照明能耗，提出一种基于复合相变材料冷却的集成太阳能传输照明光伏（ITIPV）系统。【方法】系统利用菲涅耳透镜聚光、分光片将太阳光谱分离为可见光与近红外光，分别用于光纤导光照明和光伏发电；采用纳米石墨/石蜡复合相变材料耦合冷却翅片对光伏电池进行热管理。通过几何光学分析确定三透镜单元最佳排布及组件相对位置，建立可见光与近红外光传输模型，并通过室内多光源模拟实验验证系统在不同辐照强度下的光电性能与控温特性。【结果】在 800 W/m²辐照下，系统平均导光效率为 18.9%，平均发电效率为 9.5%；复合相变冷却使光伏电池稳定温度降至 43.5 ℃，较自然对流空气冷却降低约 25 ℃，且在 200~1000 W/m²辐照范围内电池温度始终低于 50 ℃，有效抑制了温升，保障了稳定的电力输出。【结论】该系统通过光谱分频和复合相变材料冷却的协同设计，在实现高效太阳光照明与光伏发电的同时，维持了光伏电池的低温高效运行，为地下车库等建筑提供了一种新型节能解决方案，性能稳定且应用场景广泛。

［关　键　词］太阳能传输照明；光谱分频；光伏电池；复合相变材料

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电，年，卷(期): 起始页码-终止页码.　作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation，年，卷(期): 起始页码-终止页码.

Performance Analysis of Solar Transmission Lighting and Photovoltaic System Based on Composite Phase Change Material Cooling

CHEN Xinge, HU Chudong, ZANG Jianbin

College of Automotive and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 201800 China

Abstract:【Objective】To address the high lighting energy consumption of high-rise buildings and the thermal problem caused by the infrared spectral band during full-spectrum solar energy utilization, this study proposes an integrated transmission illumination photovoltaic system, namely the ITIPV system, cooled by composite phase change materials. The proposed system aims to improve the comprehensive utilization efficiency of solar energy, reduce building lighting energy consumption, and enhance the thermal stability and power generation performance of photovoltaic cells.【Methods】In the proposed system, a Fresnel lens is used to concentrate incident solar radiation,

收 稿 日 期：XXXX-XX-XX　修 回 日 期：XXXX-XX-XX　接 受 日 期：XXXX-XX-XX　网络首发日期：XXXX-XX-XX
第一作者简介：陈辛格（1998），男，博士研究生，研究方向为芯片相变传热强化与界面调控，gtthiscxg@tongji.edu.cn。
通信作者简介：臧建彬（1973），男，博士，教授，研究方向为载运工具环境控制与热管理，98798@tongji.edu.cn。

and a beam splitter is employed to divide the solar spectrum into visible light and near-infrared light. The visible-light component is transmitted through optical fibers for indoor lighting, while the near-infrared component is utilized for photovoltaic power generation. To control the temperature rise of the photovoltaic cells under concentrated solar irradiation, a nanographite/paraffin composite phase change material combined with cooling fins is adopted for thermal management. The addition of nanographite improves the thermal conductivity of the paraffin-based phase change material, while the cooling fins enhance heat dissipation and temperature uniformity. Geometrical optical analysis is carried out to determine the optimal arrangement of the three-lens unit and the relative positions of the optical components. Based on this analysis, visible-light and near-infrared-light transmission models are established. In addition, an indoor multi-light-source simulation experiment is conducted to evaluate and verify the photoelectric performance and temperature control characteristics of the system under different irradiation intensities.【Results】The results show that, under an irradiation intensity of 800 W/m², the average light transmission efficiency of the system reaches 18.9%, and the average photovoltaic power generation efficiency reaches 9.5%. With the composite phase change material cooling strategy, the stable temperature of the photovoltaic cells is reduced to 43.5 ℃, which is approximately 25 ℃ lower than that under natural convective air cooling. Moreover, within the irradiation intensity range of 200–1000 W/m², the photovoltaic cell temperature remains below 50 ℃. This indicates that the proposed cooling method can effectively suppress temperature rise, reduce heat accumulation, and ensure stable electrical output of the photovoltaic cells during operation.【Conclusion】Through the synergistic design of spectral splitting and composite phase change material cooling, the proposed ITIPV system realizes the efficient utilization of different solar spectral bands. Visible light is used for indoor illumination, while near-infrared light is converted into electricity by photovoltaic cells. Meanwhile, the nanographite/paraffin composite phase change material coupled with cooling fins effectively maintains the photovoltaic cells at a relatively low operating temperature, thereby supporting efficient and stable power generation. Therefore, the proposed system provides a promising energy-saving solution for buildings such as underground garages and other spaces with high lighting demand. The system exhibits stable performance, broad application potential, and practical significance for improving solar energy utilization efficiency in buildings.

Keywords: Solar transmission illuminating; Spectral splitting; Photovoltaic cell; Composite phase change material

目前，为了应对全球环境恶化和资源紧缺等问题，开发可再生的清洁绿色能源迫在眉睫。随着中国双碳战略的提出，太阳能作为绿色可再生能源的最佳来源，其综合利用受到了广泛关注[1-3]。目前，建筑能耗约占全球总能耗的 36%，其中照明能耗占比较高。随着城市化建设的推进，高层建筑的数量日益增加，地下车库作为城市建筑的重要组成部分，需 24 小时不间断提供照明需求，照明能耗占车库总能耗的 40%[4]，采用电能进行照明会对资源产生较大浪费，因此导入太阳能进行照明能有效减少建筑照明能耗。而太阳能传输照明被认为是太阳能建筑最直接、最有效的方式之一，此方式能够节约大量的照明成本[5]。太阳能传输照明技术即使用用光纤或者导光管技术直接将太阳光导入室内进行照明。其中光纤技术以其灵活的性能和远距离传输能力被广泛应用[6]。其原理主要是利用聚光太阳能集热器，如菲涅耳透镜，捕捉高强度太阳光，并通过光纤将其传输到室内环境[7]。但太阳光谱不仅包含可以提供照明功能的可见光波段（380-780nm），还存在可以产生热量的红外波段（780-3000nm），其中红外波段中的能量大部分集中在近红外波段（780-1100nm），这些红外波对地下车库的照明并未起到作用，甚至在高温季节会导致室内温度升高，增加空调的能耗。另外，由于光纤的材质主要分为

石英和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)两种[8, 9]，其对于高温的承受能力有限，近红外光不经衰减的直接耦合进光纤，产生的过高温度可能会降低光纤性能，甚至熔毁光纤。因此，将近红外光从射入光纤的太阳光谱中分离或者加以利用，是当前急需解决的技术问题。

基于以上问题，本文设计了一种基于复合相变材料冷却的地下车库集成太阳能传输照明光伏(ITIPV,Integrated Solar Transmission Illuminating and Photovoltaic)系统。将太阳光中可见光分出供地下车库的照明，近红外光用于光伏电池的发电，同时本文将纳米石墨/石蜡复合相变材料与翅片结合，高效应用于集成照明-光伏系统中，实现了被动式高效热管理，简化了系统结构，提升了整体能效。

1 ITIPV 系统的结构与材料属性

1.1 ITIPV 系统工作原理

ITIPV 单元由菲涅尔透镜、相变材料、冷却翅片、分光片、光伏电池和导光光纤组成。现有的太阳能导光系统由跟踪器和若干个太阳能导光光伏单元组成。可将现有阵列排布的太阳能导光光伏单元，划分为每三个一组，共同组成一个新的 ITIPV 单元，具体结构如图 1 所示。在 ITIPV 单元工作时，由 AM1.5 所过滤得到的全光谱太阳光束经过菲涅尔透镜汇聚，在分光片下的光纤入口处，形成焦点。经菲涅尔透镜汇聚的光束，被分光片分离后，适合光伏电池发电的非可见光被反射至光伏电池上，被光伏电池转换为电能。热能会被光伏电池的背面进一步传递给相变材料和散热翅片。相变材料可以使光伏电池温度保持在一个比较低的水平，具有稳定光伏电池发电效率的作用。散热翅片则可以使相变材料的热量尽快向外界空气散失，进一步降低材料自身的温度，使融化的相变材料快速变为固态。可见光、紫外光和部分近红外光则透过分光片，耦合进光纤中，被光纤传导至室内，为地下车库提供照明。

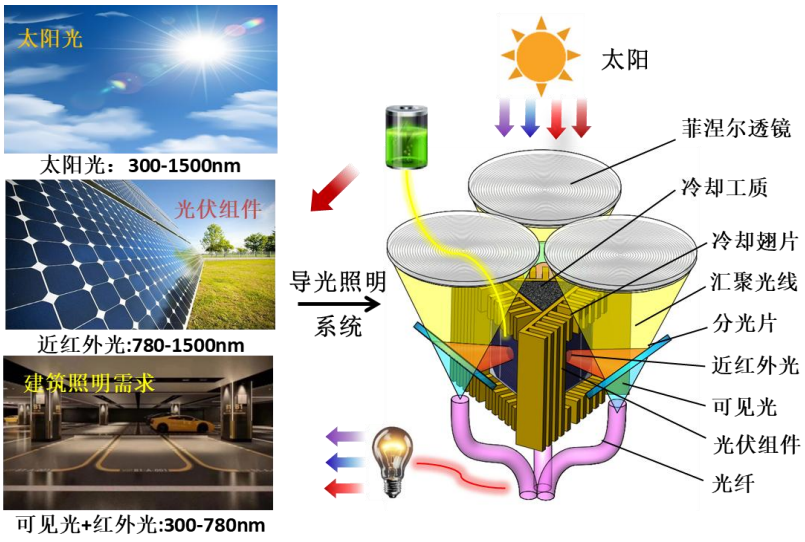


图 1 导光照明系统示意图

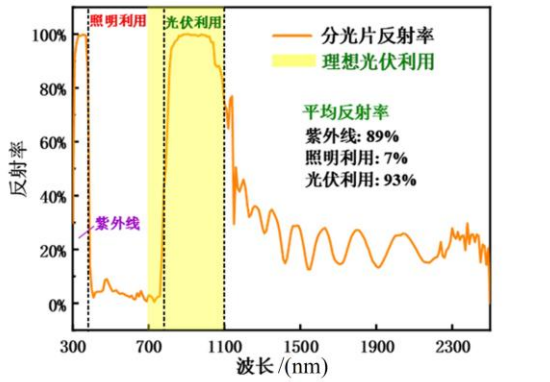
Fig. 1 Schematic diagram of the light-guiding illumination system

1.2 分光片与光伏电池的光谱特性

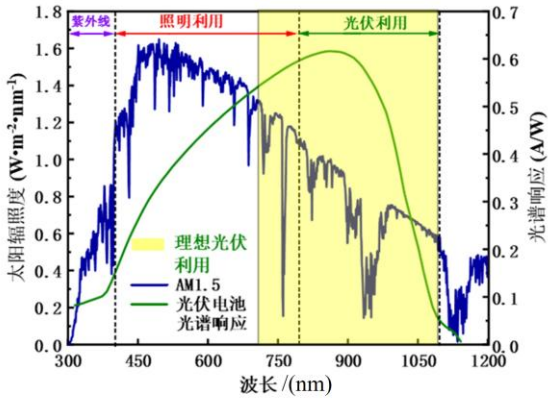
在 ITIPV 系统中，对太阳光分频利用的关键是分光片的分频特性。如图 2(a)所示，分光片与光线夹角为 45°时，其对于波长为 380-780nm 的可见光反射率很低，在 480nm 处的反射率达到最大值，也仅有 8.9%。其对于波长为 820-1040nm 的近红外光反射率均在 90%以上，在波长大于 1040nm 的近红外光的反射率较小，且在 25%上下左右。该现象是

由于分光片上，多层重叠的膜层对不同光谱干涉作用造成的。

对于单晶硅光伏电池，其光谱响应曲线如图 2(b)所示。理想的光伏电池的曲线在 700-1100nm 范围[10]，即图中的黄色填充部分。这与分光片在 820-1040nm 范围的反射率在 90%以上，有较好的光谱重合度，故我们将该范围定义为光伏利用区间。采用这种分光片，可以较为理想的把太阳光分离成照明光谱和发电光谱，最终实现太阳多光谱的最佳分频利用。



a) 分光片反射光谱与电池光谱响应的匹配(45°)



b) 电池光谱响应曲线

图 2. 分光片与电池的光谱特性(a) 分光片反射光谱与电池光谱响应的匹配(45°); (b) 电池光谱响应曲线

Fig. 2 Spectral characteristics of the beam splitter and photovoltaic cell. (a) Matching between the reflected spectrum of the beam splitter and the spectral response of the photovoltaic cell (45°); (b) Spectral response of the photovoltaic cell

光伏电池的发电效率除与入射光的光谱相关外，还与入射光的强弱造成温度分布有关。搭建了聚光测试平台对电池性能进行了测量，图 3 为固定辐照度时，单晶硅电池发电效率随温度的变化。不难发现，随着电池温度的升高，电池的发电效率呈平缓下降趋势，最低发电效率出现在 50℃时，为 10%。因此在使用单晶硅电池作为接收器时，聚光系统应尽可能保持一个较低的聚光比，并且在电池壁面做好散热，以保证电池处于一个较为适合的发电温度。同时由于聚光光伏导致光伏电池尺寸较小，限制了相变材料的使用体积。这会导致相变材料的吸热能力降低，故通过散热翅片冷却相变材料，更好地稳定电池的温度。

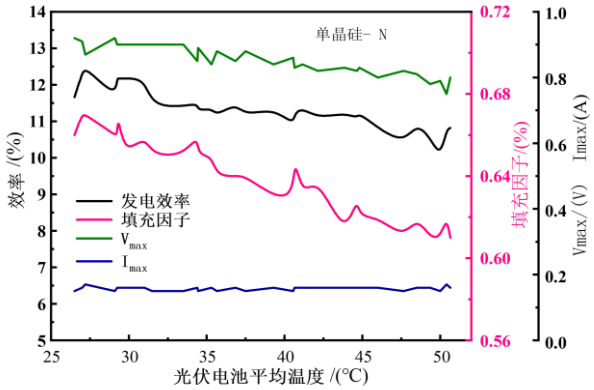


图 3 800W/m² 辐照强度下不同温度电池性能变化

Fig. 3 Variation of photovoltaic cell performance at different temperatures under 800 W/m² irradiance

1.3 复合相变材料属性

在电池的热管理中，本文采用的是 15%质量分数的纳米石墨和 85%的石蜡的复合相变材料。首先将石蜡加热至 60℃，使其完全融化，再将纳米石墨加入液体石蜡中，并在 60℃的恒温条件下使用磁力搅拌器混合。之后在 30℃ 的温度下进行 0.5 小时的超声波处理，以尽量减少纳米碳团聚的可能性[11]。然后将纳米石墨&石蜡在 30℃ 的恒温水浴中静置 48 小时，以消除沉淀的影响。最后，提取纳米石墨&石蜡的上层物质。加热使其完全融化，并填充至容器中。

纳米石墨&石蜡的差示扫描量热法(DSC)曲线如图 4 所示，可以发现，升温时纳米石墨&石蜡的起始融化温度为 32.1℃，融化终止温度为 44.5℃，相变潜热为 199.1 J/g，这意味着纳米石墨&石蜡的

定温作用在 32.1℃时开始生效。在降温时，凝固起始温度为 34.9℃，凝固终止温度为 24.6℃，且放热焓值和吸热焓值大致相等。这表明在室温或者光伏电池不工作的夜间时，纳米石墨&石蜡能够完全释放储存的热量，并重新恢复冷却的能力。

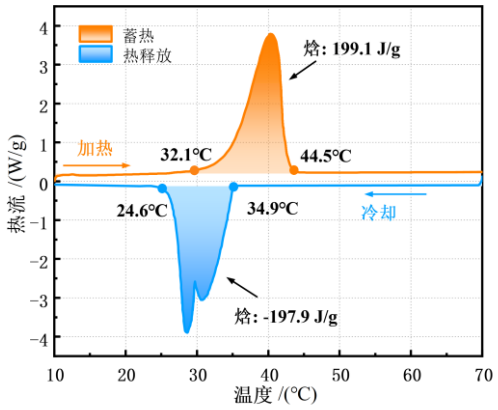


图 4 纳米石墨&石蜡的 DSC 曲线

Fig. 4 DSC curve of the nano-graphite & paraffin composite

纯石蜡和制成的纳米石墨&石蜡的参数对比如表 1 所示，其中纳米石墨的掺杂主要对其潜热和热导率两项性能产生较大影响，潜热从 234 J/g 下降到了 198.9 J/g，热导率从 0.2 W/(m·K)上升到了 2.1 W/(m·K)，纳米石墨的掺杂，在保证其具备足够储热能力的同时，显著提升了石蜡的热导率，使光伏电池冷却能力提高。

表 1 纯石蜡和纳米石墨&石蜡的参数对比表

Table 1 Parameters of pure paraffin and nano-graphite/paraffin composite

参数名称	纳米石墨&石蜡	纯石蜡
相变温度	35℃	35℃
潜热	234J/g	198.9J/g
热导率	0.2W/(m·K)	2.1W/(m·K)
沸点	340℃	341℃
比热容	2 kJ/kg·K	1.9 kJ/kg·K

2 ITIPV 系统的理论模型

2.1 ITIPV 系统的几何照明模型

考虑到导光的集成性和有效性，ITIPV 系统的前端聚光装置通常包括多个菲涅尔透镜单元为一组。选用三个一组的透镜排布方式。

在建立几何模型前，做如下定义：光伏电池为正方形，厚度忽略不计。如图 5(a)中，光伏电池均垂直于三个菲涅尔透镜。三个光伏电池共同组成了一个以等边三角形为底边的三棱柱。菲涅尔透镜两两间距为 105 mm，透镜焦距 120 mm。入射到菲涅尔透镜表面的太阳能流密度为 G，W/m^2；能量聚光比为 R，光伏电池上的能流密度为 G_{pv}，W/m^2。x 为光伏电池到透镜中心的距离，mm。如图 5(a)所示，根据透镜与光伏电池的几何关系，可以推导出光伏电池宽度 w（mm）随中心距 x（mm）的变化关系如式(1)所示，注意，此时菲涅尔透镜的相对位置已经固定，所以中心距 x 的改变是光伏电池的移动所引起的。

$$w = 2\left(52.5/\cos\alpha - x\right)/\tan\beta \quad (0 < x < 52.5/cos\alpha) \tag{1}$$

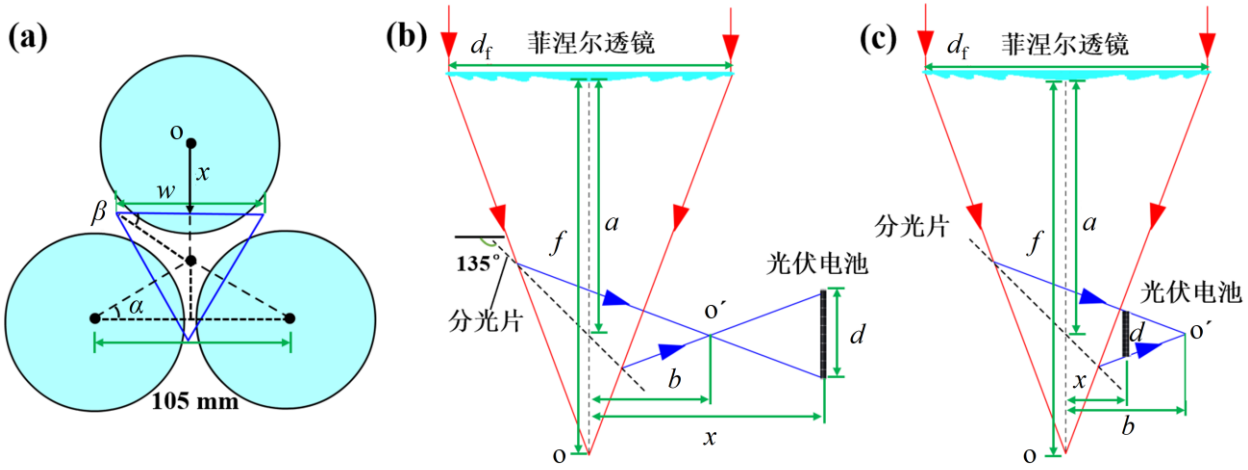


图 5. 几何模型(a) 光伏电池宽度 w 与中心距 x 的关系 (0< x< b); (b) 反射光斑直径 d 与透镜分光片距 a、两焦点距离 b 的关系 (b< x< 52.5/cosα) (c) 反射光斑直径 d 与透镜分光片距 a、两焦点距离 b 的关系 (0< x< b)

Fig. 5 Geometric model. (a) Relationship between PV cell width w and center distance x (0 < x < b); (b) Relationship between reflected spot diameter d and distance between lens and beam splitter a, and focal distance b (b < x < 52.5 / cos α); (c) Relationship between reflected spot diameter ddd and distance between lens and beam splitter aaa, and focal distance b (0 < x < b)

图 5(b)和图 5(c)分别展示了光伏电池位于焦点 o 前后不同时的几何关系，反射光斑直径 d 与透镜分光片距 a、两焦点间距 b 和能量聚光比 R 的关系可由式(2)-(6)求得。其中 f 为菲涅尔透镜焦距，120 mm。

$$a+b=f=120\text{mm} \tag{2}$$

$$\frac{d}{(f-a-x)}=\frac{d_f}{f}=\frac{100}{120}\quad(0<x<b) \tag{3}$$

$$\frac{d}{(x-b)}=\frac{d_f}{f}=\frac{100}{120}\quad(b<x<\frac{52.5}{\cos\alpha}) \tag{4}$$

$$G_{PV}=G(\frac{d_f}{d})^2\cdot 0.34 \tag{5}$$

$$R=G_{PV}/G \tag{6}$$

其中 d_f 为菲涅尔透镜直径，100 mm；G 和 G_{pv} 分别为入射在菲涅尔透镜和光伏电池上的辐照强度，W/m^2。a 为分光片中心点 o 和透镜的间距，mm。x 为光伏电池和分光片中心点 o 的间距，mm。b 为焦点距离分光片的距离，mm（$a+b=f$）。0.34 为分光片在 AM1.5 下的光谱能量反射比。

根据上述关系式的计算，可以得出在 a 确定的条件下，w、d 和 G_{pv}，随中心距 x 的变化情况。如图 6 所示，可以看出，随着 a 不断的增加，所需 w 值（d），先降低后增加，在 a=60mm 时，w 值达到最小为 2.16mm。随着 a 的增加，x 先增大，也在 a=60mm 时，达到最大值为 60mm，然后逐渐下降。然而所 D_f 随着 a 的增加，在不断减小，这有利于减少分光片的成本。

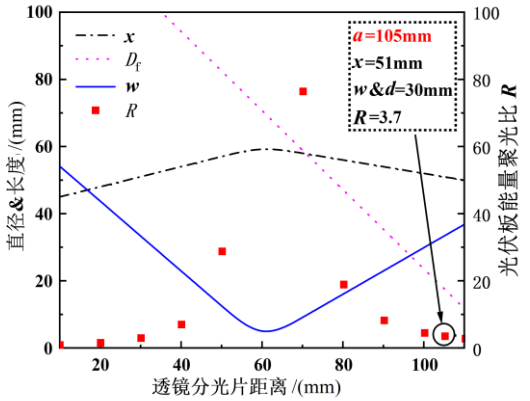


图 6 不同 a 的条件下，w=d 时所对应的光伏电池宽度 w、中

心距 x、聚光比 R 和分光片直径 D_f 的变化情况

Fig. 6 Variations of PV cell width w, center distance x, concentration ratio R, and beam splitter diameter D_f when w=d under different a values

由于使用非聚光光伏电池，适用于聚光比较低的使用条件。从 1.2 节结果可以发现，光伏电池的效率，随聚光比的增加在降低。因此简单来说，图中靠近右下的点的几何设置具备较好的经济性。因此本文选取最佳 a 值为 105mm。此时，D_f 为 17.7 mm。此时，x=51 mm，w=30 mm，d=30 mm，R=3.7。

2.2 系统能量的计算模型

ITIPV 系统中的分光片虽然能够通过高反射率将太阳光谱分为可见光和近红外光两部分，但分离率并未达到 100%，在分离可见光时仍有少部分近红外光混合进来，反之也如此。为了方便描述系统的光谱传输，分别建立了可见光和近红外光的传输模型[12]。

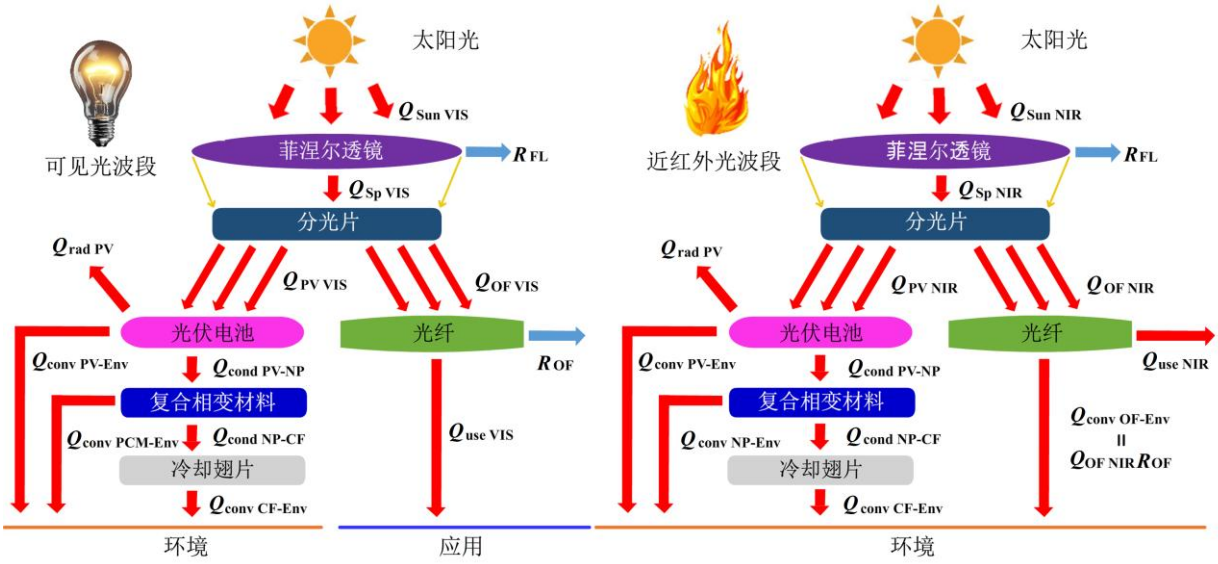


图 7. ITIPV 系统传输模型

Fig. 7 Transmission model of the ITIPV system

如图 7 所示，太阳光谱中的可见光通过菲涅尔透镜的汇聚，照射在分光片上，大部分的可见光被分光片反射进光纤，通过光纤的传导最终进入应用场合提供照明。光在非垂直入射的情况下，会在两种介质的接触面发生反射，造成菲涅耳反射损失，菲涅尔透镜的菲涅尔反射 R_{FL} 可由式(7)表示[13]：

$$R_{FL}=1/\theta_{max}\cdot\int_0^{\theta_{max}}\left(\frac{\sin^2(\theta_i-\theta_r)}{\sin^2(\theta_i+\theta_r)}+\frac{\tan^2(\theta_i-\theta_r)}{\tan^2(\theta_i+\theta_r)}\right)d\theta_i \quad (7)$$

其中 θ_i 为入射角，°；θ_r 为反射角，°；θ_{max} 为入射角的最大值，°。光纤端面的菲涅尔损失也可根据此式进行计算，由于系统尺度较小，为简化计算，忽略光线在空气中的能量传输损失。据此，可见光的能量平衡方程可由式(8)，式(9)表示：

$$Q_{OF\ VIS}=Q_{SP\ VIS}-Q_{PV\ VIS} \quad (8)$$

$$Q_{SP\ VIS}=(1-R_{FL})Q_{sun\ VIS} \quad (9)$$

其中 $Q_{OF\ VIS}$ 为经分光片投射后被光纤接收的可见光能量，W；$Q_{SP\ VIS}$ 为菲涅尔透镜汇聚向分光片的可见光能量，W；$Q_{PV\ VIS}$ 为经分光片反射后被光伏电池接收的可见光能量，W；Q_{sun} 为太阳光谱中的可见光能量，W。光纤的反射损失包括光纤入口和出口处的菲涅尔反射以及光纤中的传输损失，所以经传输后输出的可见光能量可由式（10）表示[14]。

$$Q_{use\ VIS}=(1-R_{OF2})(1-s)(1-R_{OF1})\times10^{-\frac{L_{OF}\cdot N(\lambda)}{10}}\cdot Q_{OF\ VIS} \quad (10)$$

其中 $Q_{use\ VIS}$ 为经光纤输出的可见光能量，W；

R_{OF1} 和 R_{OF2} 分别为光纤入口处和出口处的菲涅尔损失，%；L_{OF} 为光纤长度，mm。N（λ）为太阳光谱在光纤中的衰减系数，db/m；s 为角度衰减因子，根据光纤入射角度取为 35%。根据以上公式，最终可求得 ITIPV 系统的可见光传输效率如式（11）。

$$\eta_{\text{light}}=\frac{Q_{\text{use VIS}}}{Q_{\text{sun VIS}}} \tag{11}$$

近红外光的传输模型如图 7 所示，太阳光中的近红外光能量经菲涅尔透镜汇聚后，大部分能量被分光片反射给光伏电池，小部分汇聚到光纤端面，经过光纤的传输损失后，剩余的近红外光能量传输给应用场景内的空气。被分给光伏电池的近红外光能量，被转化成电能和热能，热能通过导热、对流、辐射的方式散给环境。总能量平衡方程如式（12）、（13）所示。

$$Q_{\text{use NIR}}\cdot(1-R_{\text{FL}})=Q_{\text{sp NIR}} \tag{12}$$

$$Q_{\text{sp NIR}}=Q_{\text{PV NIR}}+Q_{\text{OF NIR}} \tag{13}$$

其中 $Q_{\text{sun NIR}}$ 和 $Q_{\text{sp NIR}}$ 分别为太阳光谱和经菲涅尔透镜汇聚的近红外光能量，W；$Q_{\text{PV NIR}}$ 和 $Q_{\text{OF NIR}}$ 分别为分光片分给光伏电池和光纤的近红外光能量，W。光纤的能量平衡方程如式（14）-（17）所示[15]。

$$Q_{\text{use NIR}}+Q_{\text{conv OF-Env}}=Q_{\text{OF NIR}} \tag{14}$$

$$Q_{\text{conv OF-Env}}=\frac{T_{\text{OF}}-T_{\text{Env}}}{R_{\text{conv OF-Env}}} \tag{15}$$

$$R_{\text{conv OF-Env}}=\frac{1}{\pi D_{\text{OF}}L_{\text{OF}}h_{\text{OF-Env}}} \tag{16}$$

$$h_{\text{OF-Env}}=3.8V_{\text{wind}}+5.7 \tag{17}$$

其中 $Q_{\text{use NIR}}$ 为光纤输出的近红外光能量，W；$Q_{\text{conv OF-Env}}$ 为光纤与环境之间的对流换热，W；T_{OF}、T_{Env} 为光纤和环境温度，℃；$R_{\text{conv OF-Env}}$ 为两者之间对流热阻；D_{OF}、L_{OF} 为光纤的直径和长度，mm；$h_{\text{OF-Env}}$ 为两者之间对流换热系数，W/m²·K；V_{wind} 为环境风速，m/s。下述对流换热热阻公式与此相同，不再赘述。光伏电池侧的能量平衡方程组如式（18）-（20）所示[16]。

$$Q_{\text{PV NIR}}=\frac{T_{\text{pv}}-T_{\text{Env}}}{R_{\text{conv PV-Env}}}+Q_{\text{RL}}+\frac{T_{\text{pv}}-T_{\text{NP}}}{R_{\text{cond PV-NP}}}+H_{\text{NP}}\Delta m_{\text{NP}} \tag{18}$$

$$H_{\text{NP}}\Delta m_{\text{NP}}+\frac{T_{\text{pv}}-T_{\text{NP}}}{R_{\text{cond PV-NP}}}=\frac{T_{\text{NP}}-T_{\text{Env}}}{R_{\text{conv NP-Env}}}+\frac{T_{\text{NP}}-T_{\text{CF}}}{R_{\text{cond NP-CF}}} \tag{19}$$

$$\frac{T_{\text{NP}}-T_{\text{CF}}}{R_{\text{cond NP-CF}}}=\frac{T_{\text{CF}}-T_{\text{Env}}}{R_{\text{conv CF-Env}}} \tag{20}$$

其中下标 cond 为导热，PV、NP、CF 为光伏电池、复合相变材料和冷却翅片。H 为相变热焓，kJ/kg；m 为质量，kg。光伏电池换热热阻如式（21）、（22）所示。

$$R_{\text{cond PV-NP}}=\frac{\delta_{\text{PV}}}{A_{\text{PV}}k_{\text{PV}}} \tag{21}$$

$$R_{\text{conv PV-Env}}=\frac{1}{A_{\text{PV}}h_{\text{PV-Env}}} \tag{22}$$

其中 δ_{PV} 为光伏电池的厚度，m；A_{PV} 为光伏电池面积，m²；k_{PV} 为光伏电池导热系数，W/m·K。其余组件换热热阻公式相同，不再赘述。由于光伏电池为探究的重要组件，故其余组件的辐射换热忽略不计。光伏电池的辐射换热 $Q_{\text{rad PV}}$ 如式（23）所示[17]。需注意，根据图 2(b)，这里的近红外光只代表 700nm-1100nm 波段的红外光，这是由于超过 1100nm 波段时光伏电池的响应非常低。

$$Q_{\text{rad PV}}=A_{\text{PV}}\left(\frac{2\pi}{c^2h_{\text{p}}{}^3}\right)\int_{E_{700}}^{E_{1100}}\frac{E^3}{\exp\left(\frac{E-eV_{\text{PV}}}{k_{\text{b}}T_{\text{PV}}}-1\right)}\,\mathrm{d}E \tag{23}$$

其中 c 为光速，3.0×10^{8} m/s；h_{p} 为普朗克常数，6.626×10^{-34} J·s；E 为，与光谱的波长有关；e 为单位正电荷，1.6002×10^{-19} C；k_{b} 为玻尔兹曼常数，1.381×10^{-23} J/K；T_{PV} 和 V_{PV} 分别为光伏电池的温度（℃）和输出电压（V）。光伏电池的电流密度如式（24）所示[18]。

$$J_{\text{PV}}=\frac{eA_{\text{FL}}}{A_{\text{PV}}}\int_{E_{700}}^{E_{1100}}\frac{DNI}{E}\,\mathrm{d}E-\left(\frac{2e\pi}{h_{\text{p}}{}^3c^2}\right)\int_{E_{700}}^{E_{1100}}\frac{E^2}{\exp\left(\frac{E-eV_{\text{PV}}}{k_{\text{b}}T_{\text{PV}}}\right)-1}\,\mathrm{d}E \tag{24}$$

其中 A_{FL} 为菲涅尔透镜的面积，m²；DNI 为直射辐射，W/m²。从而得到光伏电池的输出功率如式（25）所示。

$$\begin{cases} P_{PV} = Q_{sun\ NIR} - Q_{rad\ PV} - Q_{conv\ PV\text{-}Env} - Q_{cond\ PV\text{-}PCM} = J_{PV} V_{PV} A_{PV} \\ P_{PV} = A_{PV} \int_{E_{ino}}^{E_{cuo}} E\ \mathrm{d}E - A_{PV} \left(\frac{2\pi}{c^2 h_p^3}\right) \int_{E_{ino}}^{E_{cuo}} \frac{E^3}{\exp\left(\frac{E - eV_{PV}}{k_b T_{PV}}\right) - 1)} \mathrm{d}E - \frac{T_{pv} - T_{Env}}{R_{conv\ PV\text{-}Env}} - \frac{T_{pv} - T_{NP}}{R_{cond\ PV\text{-}NP}} \end{cases} \quad (25)$$

最终得到光伏电池的发电效率如式（26）所示。

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{Q_{PV\ NIR}} \quad (26)$$

3 ITIPV 的性能表现

3.1 相变材料的定温性能

为了测试 ITIPV 系统结构的优异性，本研究搭建了室内光学平台进行实验(3.2 节实验同样搭建了类似平台)。光学平台由三个模拟器作为光源，分别照射在三个菲涅尔透镜上，如图 8(a)所示。定温性能测试比较了三种不同结构对光伏电池的冷却性能，分别为自然对流空气冷却、翅片冷却以及翅片+纳米石墨&石蜡冷却，测试数据如图 8(c)所示，三种结构的具体模式及测点位置如图 8(b)所示，其中翅片温度为三个翅片的平均温度，环境温度为实验时的室内温度，不同工况时的室内温度保持基本一致。可以看出，在实验进行的 60 分钟之内，包括未采用任何额外冷却装置的纯光伏电池在内，三种结构的光伏电池温度最终均趋于稳定，这表明系统已经进入热平衡模式。可以明显看出，相比于其他两种结构，只采用空气冷却的光伏电池稳定温度较高，约为 68.8℃，而翅片冷却和翅片+纳米石墨&石蜡冷却的最终冷却温度分别为 43.6℃和 43.5℃，这表明两种结构均能够显著改善光伏电池的冷却性能，且在翅片+纳米石墨&石蜡冷却时，其温度增长速率在最初时要小于翅片冷却，这是由于此时纳米石墨&石蜡的相变吸收了部分热量，虽然最后稳定温度几乎相同，但两种模式在 60min 时环境温度的温差为 2.7℃，这说明翅片+纳米石墨&石蜡冷却模式的光伏电池稳定温度有继续降低的潜力。同时，采用翅片+纳米石墨&石蜡冷却方式的电池工作过程中，其开始工作时升温速率始终小于翅片冷却，这代表着其更强的热缓冲能力。需要注意的是，电池背后腔体温度趋势相同，这表明翅片+纳米石墨&石蜡的冷却增益完全是由于结构的不同而引起的。

但在系统实际应用时，入射的太阳辐射强度会根据纬度以及太阳时的不同而变化，为了验证 ITIPV 系统在室外实际运行时的性能，且尽可能覆盖大多数纬度的地区的需求[19, 20]。图 8(d) ITIPV 系统在 200-1000W/m^2 范围内的五种不同入射强度下，比较了光伏电池最终稳定温度。可以发现在环境温度基本相同时，随着入射强度的增强，光伏电池的稳定温度也大体上呈上升趋势，但在较低辐照度和较高辐照度时(200W/m^2、445W/m^2、1000W/m^2)，光伏电池的稳定温度随入射强度变化较为明显，而 650W/m^2 和 800W/m^2 时，稳定温度相差不大，分别为 42.2℃和 43.6℃，这是由于在此温度区间内，纳米石墨&石蜡的相变储热能力正稳定发挥作用，且即使在 1000 W/m^2 的高入射强度下，电池稳定温度仍然保持在 50℃以下，这表明了 ITIPV 系统在不同入射强度下纳米石墨&石蜡均具备足够的冷却能力，且应用场景可以覆盖全球的大部分地区。

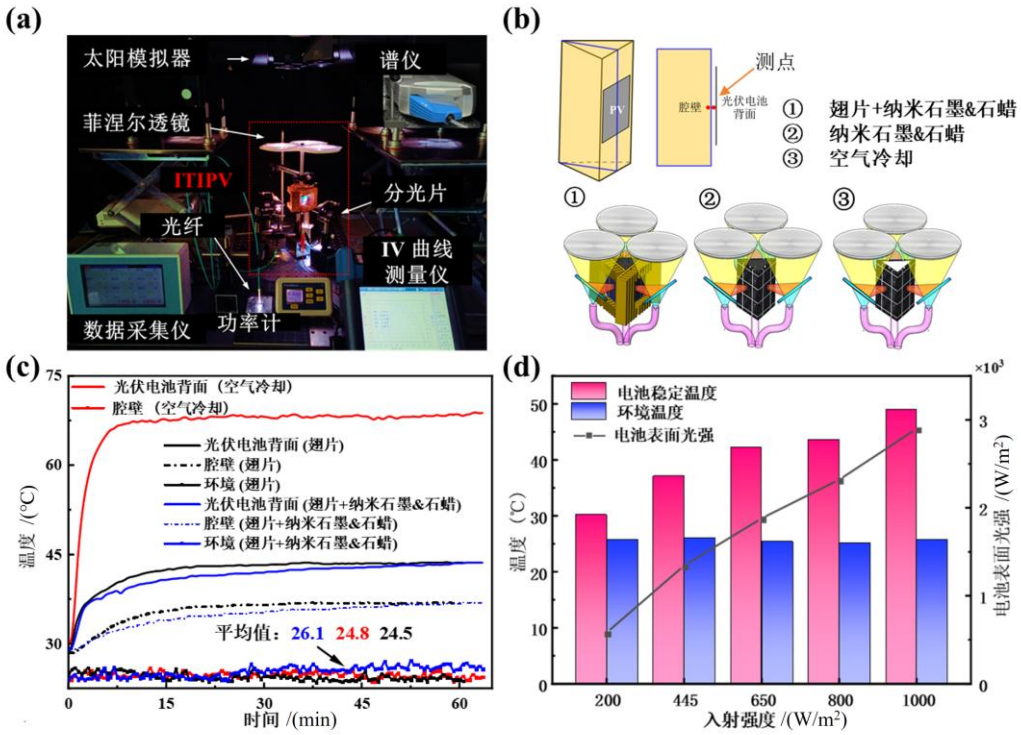


图 8 实验装置与测试结果（a）实验测试图（b）不同系统设置示意及系统内部的温度测点分布（c）800w/m2 条件下，自然对流空气冷却、翅片冷却以及翅片+纳米石墨&石蜡冷却三种系统设置下电池温度稳定情况（d）电池背板温度随入射功率的变化情况。

Fig. 8 Experimental setup and test results. (a) Photograph of the experimental test; (b) Schematic of different system configurations and distribution of temperature measuring points inside the system; (c) Stabilized PV cell temperature under three cooling configurations—natural air convection, fin cooling, and fin + nano-graphite & paraffin composite cooling—at 800 W/m²; (d) Variation of PV backplate temperature with incident power.

3.2 定功率条件下系统的光电性能

最优散热结构确定之后，对 ITIPV 系统的光学性能进行了测试。在 800w/m² 的光强下，测量 ITIPV 系统的光效率、电效率和光伏电池温度随时间的变化情况，测量结果如图 9(a)所示。并将实际测试值与理论计算值进行了对比，可以发现，电池温度先迅速升高，然后逐渐趋于稳定，最终温度稳定在 38.8℃，发电效率趋势与之对应，试验值趋势和理论值基本相同，均为初始时较高，在 5min 后基本保持不变，且两数值拟合程度良好，在温度升高时理论值要逐渐高于试验值，这是由于材料的传热性能可能会随温度升高而发生轻微改变，平均试验发电效率为 9.5%。由于 ITIPV 系统运行时，分光片和其他光学部件的角度并未发生改变，故系统导光效率基本保持恒定，平均导光效率为 18.9%，理论导光效率始终为 19.0%，均高于试验导光效率，但均位于系统允许的误差范围内，这验证了所建理论模型的准确性。

为了测试 ITIPV 系统在实际室外条件下不同时刻的光电效率。在室内通过设置不同光源入射功率，在该条件下测试了系统的光电性能，测试结果如图 9(b)所示。可以发现，电池温度在 200W/m²、445 W/m²、1000 W/m² 入射功率下上升较快，而在 650 W/m² 和 800 W/m² 时温度相差不大，这是此温段对应了纳米石墨&石蜡的相变区间而导致的。但电池温度始终保持在 45℃以下。发电效率随着电池温度

的升高而逐渐下降，但 1000W/m² 时仍然为 8.8%，平均发电效率为 10.1%，导光效率基本保持不变，平均导光效率为 19.1%。

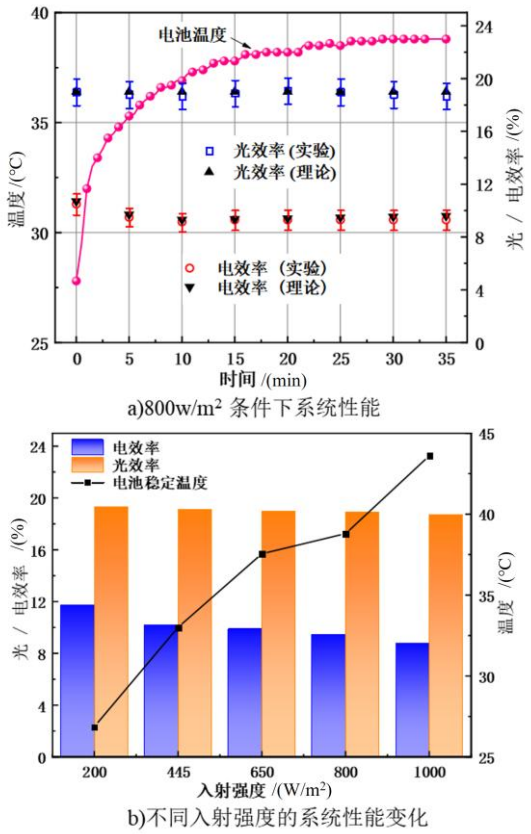


图 9 光电性能测试结果（a）800w/m2 条件下系统性能（b）不同入射功率的系统性能变化

Fig. 9 Photoelectric performance test results. (a) System performance at 800 W/m²; (b) Variation of system performance under different incident power levels.

以上结果均表明，ITIPV 系统在室外实际应用时，在保证电池较低温度和光纤正常工作的前提下，具备一定的导光效率和发电效率，且系统能够在全天的不同时刻，均具备良好的应用潜力。

4 系统性能对比

为了比较 ITIPV 系统的整体能量利用效率，将光纤输出的光通量转换为车库照明中常用的 LED 或荧光灯等效的电能。然后以与光伏电池输出电能相加计算总效率。将系统的光通量输出分别替换为荧光灯和 LED 灯，则所需的电功率可由式（29）、（30）计算[21]:

$$P_{\mathrm{LED}}=\frac{I_{\mathrm{OF}}A_{\mathrm{OF}}}{x_{\mathrm{LED}}} \tag{29}$$

$$P_{\mathrm{fl}}=\frac{I_{\mathrm{OF}}A_{\mathrm{OF}}}{x_{\mathrm{fl}}} \tag{30}$$

其中 P_{LED} 和 P_{fl} 为 LED 灯和荧光灯的等效电能，W。x_{LED} 和 x_{fl} 为 LED 灯和荧光灯的能量转化因子，82.5lm/W 和 100lm/W。I_{OF} 为光纤输出的照度，lm。A_{OF} 为光纤端口面积，m²。系统的整体能效可由式（31）、（32）计算：

$$\eta_{\mathrm{total\ LED}}=\frac{P_{\mathrm{LED}}+P_{\mathrm{PV}}}{DNI\cdot A_{\mathrm{FL}}} \tag{31}$$

$$\eta_{\mathrm{total\ fl}}=\frac{P_{\mathrm{fl}}+P_{\mathrm{PV}}}{DNI\cdot A_{\mathrm{FL}}} \tag{32}$$

其中 $\eta_{\mathrm{total\ LED}}$ 和 $\eta_{\mathrm{total\ fl}}$ 为考虑 LED 灯和荧光灯等效电能转化的等效整体效率，%。将计算结果与其它文献进行对比，如图 10 所示，文献[21]中的系统原理与本工作基本相同，但结构方面存在一定差异，并采用冷却水循环对光伏电池进行冷却。可以发现，本研究的 η_{PV}、$\eta_{\mathrm{total\ LED}}$ 和 $\eta_{\mathrm{total\ fl}}$ 均显著高于 Long YX 中的结果，差值分别为 3.4%、1.4%和 1.2%。这主要是由于采用了纳米石墨&石蜡对光伏电池进行了冷却，使其效率有所提升。本研究的 η_{light} 相比文献提升了 3.8%，这很大概率是由其实验中的太阳跟踪误差引起的。虽然实验设置和实验条件存在差异性，但也侧面说明 ITIPV 系统具备一定的应用潜力。但需要注意的是，ITIPV 系统在实际使用时，相比于直接 LED 照明的高层建筑系统，需要考虑太阳跟踪、屋顶或外立面安装空间、光纤传输距离、阴雨天气、维护成本等复杂问题，因此在此处给出系统的成本组成以便进行进一步的经济性与应用潜力分析。

表 2 ITIPV 系统成本

Table 2 ITIPV system cost

系统组件	价格（元）
菲涅尔透镜	21

分光片	45
光伏电池	156.80
NP 材料	105
冷却翅片	25.11
导光光纤	15
太阳能跟踪器	390

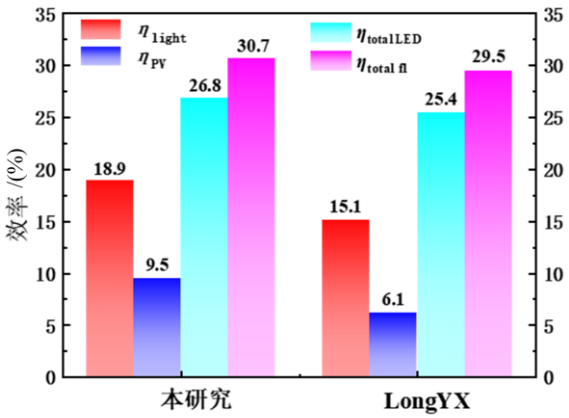


图 10 ITIPV 系统与类似系统效率比较

Fig. 10 Efficiency comparison between the ITIPV system and similar systems

5 结论

本研究将导光和分频发电技术相结合，针对需要冷却和无需过多热量的建筑室内，提出了一种新型的集成太阳能传输照明光伏 (ITIPV)系统，通过结构优化、理论计算和实验测试对系统进行分析，得到的主要结论如下：

（1）三个一组的透镜排布方式符合螺线发散角定律，相比于其他排布方式装置的面积利用率和菲涅尔透镜利用率较高，均为 0.72。分光片距离 a 为 105mm，中心距 x 为 51mm 时，电池宽度 w=反射光斑直径 d=30mm，此时分光片直径和聚光比较小，有利于装置的运行和经济性能。

（2）翅片+纳米石墨&石蜡冷却模式相比于自然对流空气冷却和翅片冷却，具备更好的冷却能力，能够使光伏电池稳定在 43.5℃。且该模式下 0-1000 W/m² 的辐照范围内，电池的稳定温度均保持在 50℃以下，ITIPV 系统在实际天气运行时纳米石墨&石蜡均具备足够的冷却能力，且应用场景可以覆盖全球的大部分地区。

（3）在 800w/m² 的光强下,ITIPV 系统平均试验发电效率为 9.5%，试验和理论发电效率趋势基本相同。系统导光效率基本保持恒定，平均导光效率为 18.9%，理论导光效率始终为 19%，均高于试验导光效率，所建理论模型较为精准。

［参 考 文 献］

[1] 庄贵阳. 我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J]. 人民论坛, 2021, (18): 50–53.
Zhuang G Y. The Challenges and Countermeasures China faces in achieving its "dual carbon" goals[J]. People's Tribune, 2021, (18): 50–53.

[2] Gao P, Yue S, Chen H. Carbon emission efficiency of China's industry sectors: From the perspective of embodied carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283.

[3] Huang W, Wang Q, Li H, et al. Review of recent progress of emission trading policy in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 349.

[4] 卢乾. 地下车库天然采光设计策略与应用研究[D], 山东:山东建筑大学，2018.
Lu Q. Design strategy and application of natural lighting in underground garage[D],Shandong: Science of Building Technology, 2018.

[5] Sedki L, Maaroufi M. Design of parabolic solar daylighting systems based on fiber optic wires: A new heat filtering device[J]. Energy and Buildings, 2017, 152: 434–441.

[6] 唐宪友, 张亚南, 李欣怡, 等. 熔盐塔式太阳能吸热器传热特性计算模型研究进展[J]. 热力发电, 2024, 53(7): 24-33.
Tang X Y, Zhang Y N, Li X Y, et al. Research progress on heat transfer characteristic calculation models for molten salt tower solar receivers[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(7): 24-33.

[7] 石天庆, 商永强, 刘媛媛, 等. 低倍聚光光伏/光热与地源热泵集成系统综合分析及优化[J]. 热力发电, 2024, 53(7): 45-52.
Shi T Q, Shang Y Q, Liu Y Y, et al. Comprehensive

analysis and optimization of low-concentration photovoltaic/thermal and ground source heat pump integrated system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(7): 45-52.

[8] 田海涛, 杨文婷. 太阳能光纤导光技术在地下车库照明中的应用与研究[J]. 中国科技纵横, 2021(1): 80-81.
Tian H T, Yang W T. Application and research of solar fiber optic lighting technology in underground garage illumination[J]. China Science and Technology Overview, 2021(1): 80-81.

[9] Lv Y, Xia L, Li M, et al. Techno-economic evaluation of an optical fiber based hybrid solar lighting system[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225.

[10] Zhang C, Shen C, Yang Q, et al. Blended Ag nanofluids with optimized optical properties to regulate the performance of PV/T systems[J]. Solar Energy, 2020, 208: 623–636.

[11] 罗子庚. 基于定型复合相变材料的光伏电池板热管理的研究[D], 广东:华南理工大学，2018.
Luo Z G. Investigation on thermal management of photovoltaic panels based on form-stable composite phase change materials[D],Guangdong: South China University of Technology,2018.

[12] 熊亚选, 尹心成, 药晨华, 等. 兰炭灰固碳对复合相变储热材料性能的影响[J]. 热力发电，2024, 53(7): 59-65.
Xiong Y X, Yin X C, Yao C H, et al. Effect of carbon sequestration by blue-coke ash on properties of composite phase change thermal storage materials[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(7): 59-65.

[13] 王刚, 张震, 林建清. 纳米流体分频折平板聚光CPVT系统设计与分析[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(8): 2239-2244.
Wang G, Zhang Z, Lin J Q. Design and analysis of a spectral splitting flat-plate concentrating CPVT system using nanofluid[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(8): 2239-2244.

[14] 刘炜, 郑睿, 陈文刚, 等. 液体分频介质的制备及其对光伏/热系统的影响分析[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(2): 21-26.
Liu W, Zheng R, Chen W G, et al. Preparation of liquid splitting media and their impact on the PV/T systems[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(2): 21-26.

[15] Xia E T, Chen F. Analyzing thermal properties of solar evacuated tube arrays coupled with mini-compound parabolic concentrator[J]. Renewable Energy, 2020, 153: 155–167.

[16] 齐耀, 刘子阳, 侯宇田, 等. 光谱分频型PV/T系统中纳米颗粒优化分析[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 699.
Qi Y, Liu Z Y, Hou Y T, et al. Optimization analysis of nanoparticles for spectral beam splitting hybrid PV/T system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 699.

[17] 刘仙萍, 田东, Taylor R A. 水基 Ag-SiO_2纳米流体分频光伏/光热集热器功能单元性能实验研究[J]. 新能源进展, 2024, 12(4): 425-430.
Liu X P, Tian D, Taylor R A. Experimental study on performance of spectrum-splitting photovoltaic/thermal hybrid unit using aqueous Ag-SiO_2 nanofluid as working fluid[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2024, 12(4): 425-430.

[18] 李和鑫. 光伏-相变耦合系统及其建筑应用研究进展[J]. 建筑科学, 2024, 40(4): 1-9.
Li H X. Research progress on photovoltaic-phase change coupled system and its building applications[J]. Building Science, 2024, 40(4): 1-9.

[19] Feng C Q, Chen X G, Wang R, et al. Study on Thermal Characteristics of a Novel Glass Curtain Wall System[J]. Journal of Thermal Science, 2022, 31(6): 1959–1969.

[20] Frederick J E, Tinsley B A, Zhou L. Relationships between the solar wind magnetic field and ground-level longwave irradiance at high northern

latitudes[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2019, 193.

[21] Xia L, Wei G, Wang G, et al. Research on combined solar fiber lighting and photovoltaic power generation system based on the spectral splitting technology[J]. Applied Energy, 2023, 333.