

基于建筑立面铺设的多面体结构 光伏系统产能模拟分析

冯国会,赵天宇,黄凯良,程昱茜

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 高效利用建筑立面空间资源,提高建筑立面太阳能发电潜力,降低自身能源消耗以提升建筑整体节能效果。方法 设计一种应用于建筑立面的多面体结构光伏系统,并以某近零能耗建筑为例,利用 PVsyst 软件建立模型,分别模拟其在严寒地区气候条件下东、南、西、北四种朝向的产能情况,与相同条件下平铺结构光伏系统产能进行对比,计算两种不同结构光伏系统在该建筑中的能源贡献率。结果 多面体结构光伏系统在四种朝向下的年发电量较之平铺结构光伏系统均有所提升,北向提升幅度最大,东、西向相近,较北向次之,南向最小;多面体结构光伏系统年总产能占建筑能耗总量 56.76%,相较于平铺结构光伏系统提高了 3.76%。结论 通过对建筑立面进行合理光伏系统设计,可以有效提升建筑立面太阳能发电潜力,实现能量的自发自用,满足建筑部分用能需求,进而降低建筑能耗。

关键词 建筑立面;多面体结构;光伏系统;发电量;能耗

中图分类号 TU201.5

文献标志码 A

引用格式:冯国会,赵天宇,黄凯良,等.基于建筑立面铺设的多面体结构光伏系统产能模拟分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):913-920.(FENG Guohui, ZHAO Tianyu, HUANG Kailiang, et al. Simulation and analysis of production capacity of polyhedral photovoltaic system based on building facade [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(5): 913-920.)

Simulation and Analysis of Production Capacity of Polyhedral Photovoltaic System Based on Building Facade

FENG Guohui, ZHAO Tianyu, HUANG Kailiang, CHENG Yuqian

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The aim is to efficiently utilize the spatial resources of the building facade, to increase the solar power generation potential of the building facade, and to reduce its own energy

收稿日期:2023-11-12

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U23A20657)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事建筑节能技术、可再生能源综合利用技术等方面研究。

consumption in order to improve the overall energy performance of the building. A polyhedral structural PV system is designed to be applied to a building facade, and the system is modeled using PVsyst software, which simulates the system capacity of four orientations, east, south, west and north, respectively, under the climatic conditions of the cold region, and compares with the capacity of the flat structural PV system under the same conditions, and calculates the yearly energy consumption of the building by taking a near-zero-energy building as an example of a building that has been applied with two different structural PV systems on the the facade of this building and compare the energy contribution of the two PV systems in this building. The conclusion is that the annual power generation of polyhedral structure PV system in the four orientations is improved compared with that of flat structure PV system, with the biggest improvement in the north orientation, similar in the east and west orientations, slightly smaller in the north orientation, and the smallest in the south orientation, and the solar power generation potential of the building facade can be effectively improved through the reasonable design of PV system, which can satisfy the part of the building's energy consumption demand, and achieve the self-generation and self-consumption of energy to reduce the building's energy consumption.

Key words: building facade; polyhedral structure; photovoltaic system; power generation; energy consumption

随着全球能源危机和环境污染的日益加剧,推动建筑行业绿色转型对实现“碳达峰、碳中和”目标具有重大意义^[1-2]。为建筑寻找替代传统化石燃料的清洁、可再生能源变得愈加重要。太阳能作为一种无污染、可再生的能源,在全球范围内逐渐受到广泛关注并得到应用。在众多太阳能利用途径中,光伏发电是目前应用较为广泛的方式之一^[3],合理利用光伏发电可以起到减少碳排放和降低建筑能耗的积极作用^[4-6]。

光伏发电在建筑中的主要应用形式是覆盖屋顶和立面等表面上^[7],其中屋顶面积相对有限,且通常需要用于安装水箱、中央空调、通风设备、通信信号基站等设备,可用于铺设光伏系统的面积相对较少,与之相比,建筑立面的可用空间则更为广阔。R. Zimmerman 等^[8]分析了立面光伏在美国的潜在市场,发现在建筑节能领域,立面光伏具有显著的优势;同时研究了不同方向的立面光伏发电量。A. Nagaoka 等^[9]对比了宫崎大学安装在建筑立面和屋顶安装的光伏系统在不同季节的电气性能,发现由于日本太阳纬度较低,立面光伏更适宜于冬季使用。Z. Liu 等^[10]评估了在太

阳辐射较高地区安装 BIPV 系统的可行性,指出立面光伏朝南安装时发电性能最佳。I. Theodoridou 等^[11]应用地理信息系统对希腊某多层建筑立面光伏系统进行可行性分析,发现建筑立面可铺面积与建筑结构可用性存在矛盾,其主要是因为建筑密度大、建筑高宽比大造成的。C. Hachem 等^[12]研究了双层外立面的几何设计对多层办公楼节能效果的影响,发现尽管偏离基本平面会导致热负荷增加,但会被冷负荷的减少所抵消,并且表面集成光伏系统发电潜力也会显著增加。

为发掘建筑立面光伏发电潜力和提升光伏系统发电性能的双重目标,笔者拟从增大光伏系统采光面接收太阳总辐射量这一角度为切入点,设计了一种应用于建筑立面的多面体结构光伏系统。该系统将多面体结构各部分光伏板按照一定倾角和方位角布置在建筑立面上,从而最大程度地提升采光面上的太阳总辐射量,进一步提高光伏系统的能量捕获效率;分别模拟多面体结构光伏系统在严寒地区东、南、西、北四种朝向下的发电性能,并将其应用于某严寒地区近零能耗建筑,研究多面体结构光伏系统对于该建筑的能源

贡献率,从而提升建筑立面太阳能发电潜力,降低建筑能耗。

1 建筑模型

1.1 建筑概况

研究对象为沈阳地区某近零能耗建筑,地处北纬 $41^{\circ}46'$,东经 $123^{\circ}25'$ 。该建筑是一座示范性近零能耗建筑,位于严寒地区。建筑共有两层,无地下室,一层层高 3.3 m ,二层层高 3.7 m ,长 18 m ,宽 9 m ,总建筑面积为 324 m^2 。内部包括办公室、会议室、开敞办公区、展厅、卫生间等功能区域,主要用于科研和日常办公,是一座典型的办公建筑。建筑主体结构采用钢框架+现浇聚苯颗粒泡沫混凝土墙体,外围护结构采用保温性能良好的相变储能技术^[13-15]。

1.2 建筑能耗计算

该近零能耗建筑在全年运营阶段的基本能耗主要包括空调系统、照明系统以及其他形式的能源消耗,其中空调系统占比较大,直接关系到建筑的能源消耗水平^[16-18]。该建筑的空调系统采用空气源热泵机组,末端为风机盘管,以此满足全年的制冷与供暖需求。制冷季为6月1日至8月31日,供暖季为当年11月1日至次年3月31日,室内温度设置为夏季 25°C ,冬季 23°C ,空调的启停时段为 $9:00-17:00$ ^[19-21]。

使用 DeST 软件并采用状态空间法对房间的热过程进行动态模拟,计算得出该建筑全年累计冷负荷为 $11\,906.92\text{ kW}\cdot\text{h}$,全年累计热负荷为 $9\,393.87\text{ kW}\cdot\text{h}$ ^[22]。按照《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)规定,热风型空气源热泵机组为供暖热源时的能效系数 COP 为 2.0,制冷工况下的 COP 为 3.4。据此计算,建筑空调系统全年能耗为 $8\,198.7\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。此外,其他能源消耗设备包括照明系统、笔记本电脑或台式机、打印机等。计算得出,其他设备的能耗为 $4\,861.8\text{ kW}\cdot\text{h}$,因此,该近零能耗建筑在全年运营阶段的总能耗

为 $13\,060.5\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

1.3 多面体结构光伏系统设计

多面体结构光伏系统由四个模块组成,包括一块位于结构上部的等腰梯形光伏组件、两块位于结构两侧的三角形光伏组件,以及一块位于结构下部的透明钢化玻璃。上部等腰梯形的上底为 9 m 、下底为 7 m ,高为 5 m ,与竖直方向夹角为 30° ,这一模块的尺寸确定后,其余三个模块的尺寸也随之确定,整体结构如图 1 所示。系统中,将多面体结构下部设计为透明钢化玻璃而非光伏组件是因为结构本身存在遮挡情况,下部表面受到上部遮挡,无法直接接收来自太阳的直射辐射,只能接收到由周围物体反射的微弱太阳辐射,从而导致发电效果不佳。同时,该结构的背部设计为空腔结构,没有设置封闭底面,允许空气自然流通,有利于光伏组件的散热,从而在一定程度上提高系统的整体发电性能。此外,上述结构可以根据实际安装的位置进行光伏组件材料的选择,若安装于无窗立面,可选单晶硅、多晶硅等不透明光伏材料作为光伏组件,若安装于有窗立面,考虑到建筑室内自然采光需求,可选取透光薄膜类光伏材料作为光伏组件。

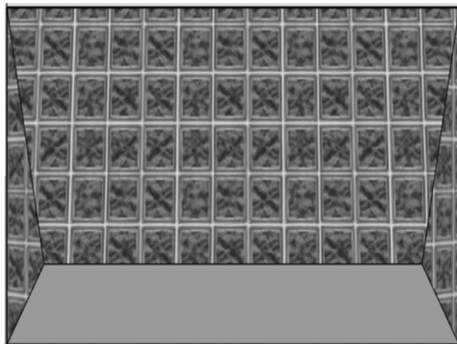


图1 多面体结构光伏系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photovoltaic system with polyhedral structure

1.4 建立模型

笔者利用 PVsyst 软件分别建立多面体结构光伏系统和传统的平铺结构光伏系统数值模型,模拟两种系统在占据相同立面面积

时东、南、西、北四种朝向下的产能情况。

多面体结构光伏系统和平铺结构光伏系统均采用由 Eastech Solar 公司生产的多晶硅光伏组件。详细的参数如表 1 所示。两种光

伏系统所占据立面均为 9 m×7 m,四种朝向的多面体结构光伏系统的装机容量均设计为 6.7 kW,四种朝向的平铺结构光伏系统的装机容量均为 6.2 kW。

表 1 光伏组件参数设置

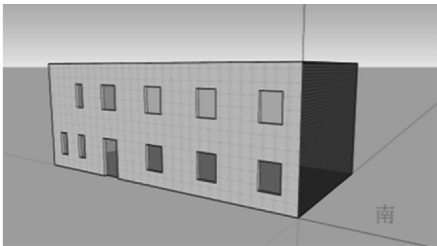
Table 1 PV module parameters setting

材质	规格/mm	质量/kg	峰值功率 (P_{\max})/W	最大电压 (V_{mpp})/V	最大电流 (I_{mpp})/A	开路电压 (V_{oc})/V	短路电流 (I_{sc})/A
多晶硅	251×186×17	0.47	5	18.1	0.276	22.6	0.29

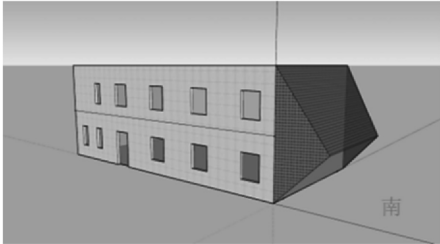
此外,为研究两种光伏系统对该近零能耗建筑的能源贡献情况,在所选取建筑的南立面分别安装上述两种光伏系统,安装后的建筑整体结构如图 2 所示。

1.5 模型的验证

为证明模拟的可靠性,笔者选取位于所述近零能耗建筑附近的光伏试验台进行对比验证^[23]。试验台中光伏板朝向为正南方向,共 16 块光伏组件,组件参数如表 2 所示,采用 PVsyst 软件对试验台光伏系统进行建模,模拟其年发电情况,并与实测数据进行对比,如图 3 所示,二者年发电情况如图 4 所示。验证得出二者逐月发电量误差均在 7% 以内,从而证明模拟方法具有可靠性。



(a)平铺结构



(b)多面体结构

图 2 建筑立面光伏系统结构示意图

Fig.2 Building facade photovoltaic system structure diagram

表 2 光伏组件参数设置

Table 2 PV module parameters setting

材质	规格/mm	质量/kg	峰值功率 (P_{\max})/W	最大电压 (V_{mpp})/V	最大电流 (I_{mpp})/A	开路电压 (V_{oc})/V	短路电流 (I_{sc})/A
单晶硅	1 480×670×35	10.80	185	20.59	8.98	24.15	9.65

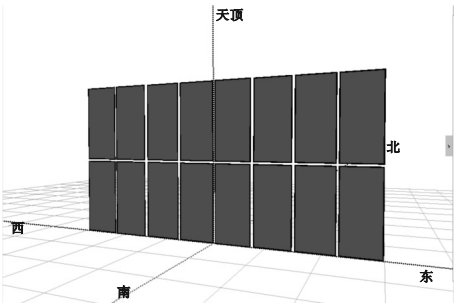


图 3 试验台光伏系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the photovoltaic system on the test bench

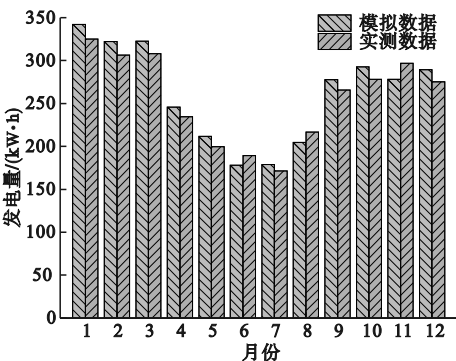


图 4 光伏试验台年发电情况对比

Fig.4 Comparison of annual power generation of photovoltaic test bench

2 模拟结果与分析

2.1 两种结构光伏系统逐月发电量

两种结构光伏系统在四种不同朝向下的逐月发电量如图 5 所示。平铺结构光伏系统全年输出的有效能量分别为东向 4 747 kW·h、南向 6 923 kW·h、西向 4 810 kW·h、北向 2 568 kW·h。多面体结构光伏系统全年输出的有效能量分别为东向 5 401 kW·h、南向 7 413 kW·h、西向

5 437 kW·h、北向 3 222 kW·h,与平铺结构光伏系统相比,发电量分别提升了 13. 78%、7. 08%、13. 04%、25. 47%。这是由于多面体结构上部具有一定的倾斜角度,相较于竖直的采光面,能够接收更多来自太阳的照射辐射量。此外,增加的两个具有一定方位角的侧面相较于竖直的采光面,可以更大程度地适应一天内太阳方位角的变化,更多地接收来自太阳的照射辐射量。

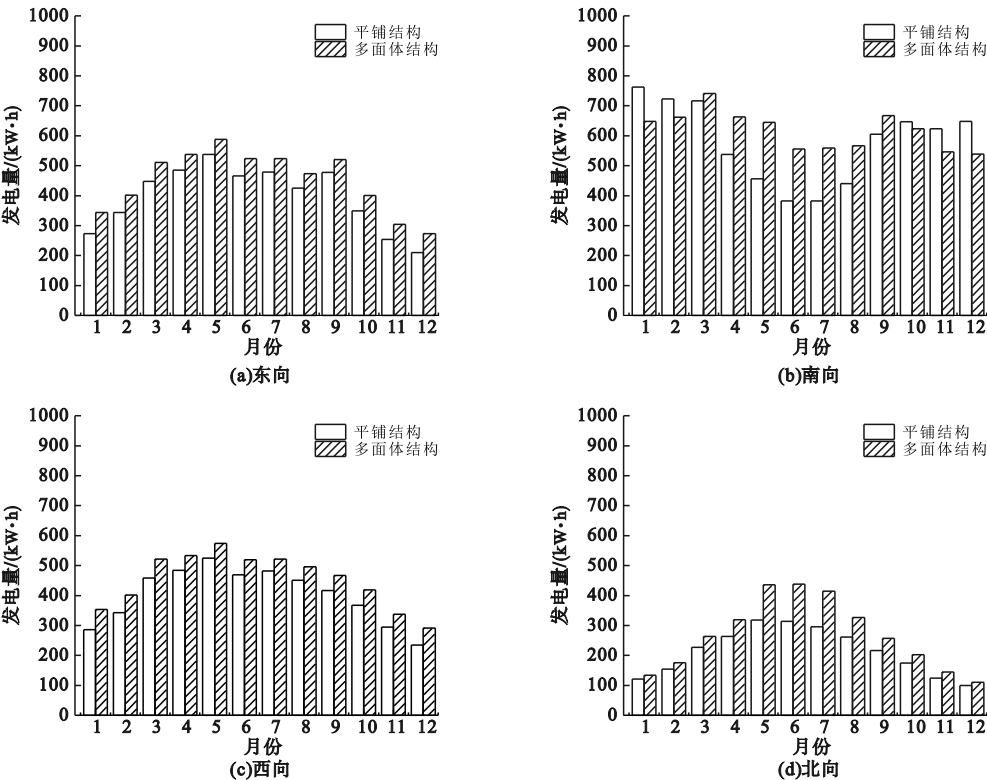


图5 四种朝向两种结构光伏系统逐月发电量

Fig. 5 Monthly power generation of two structures of PV systems in four directions

由图 5 可知,两种结构光伏系统均为南向发电量最高,东、西向发电量相近,较南向次之,北向最低。这是因为四种朝向在一天中的光照条件不同所造成的。太阳在一天中的轨迹变化为“东升西落”,太阳方位角的变化导致东、西两种朝向分别只有在上午和下午时分能接收到来自太阳的直射辐射,其余时间段内接收到太阳辐射均来自于周围物体的反射辐射,以至于两种朝向的太阳辐射强

度和有效日照时长较小,从而导致光伏系统年发电量相对较低。相比之下,南向光伏系统在一天中接收太阳直射辐射的时间较长,太阳辐射强度和有效日照时长较大,因此系统年发电量最高,而北向光伏系统只有在清晨和傍晚少数时间段内才能接收到来自太阳的直射辐射,其余大部分时间接收到的太阳辐射均来自于周围物体的反射辐射,因此系统年发电量最低。

此外,从图5中还可看出,南向平铺结构光伏系统的逐月发电情况和其余三种朝向的平铺结构光伏系统呈现相反趋势。南向光伏系统在夏季发电量较低,在冬季发电量较高,而其余三种朝向的光伏系统则是夏季发电量较高,冬季发电量较低。这是因为冬季太阳高度角较低,太阳垂直照射在南向系统的辐射量较大,而夏季太阳高度角较高,太阳垂直照射在南向系统的辐射量较小。同时,光伏系统的产能对于太阳辐射量有一定要求,当太阳辐射量达到一定程度后光伏系统才会有能量输出,在弱光条件下,光伏系统产能则会迅速下降。由于夏季降雨频繁,导致系统夏季接收到的辐射量小于冬季^[24]。基于以上两种原因,导致南向系统的冬季发电量大于夏季。而其余三种朝向的系统发电量受太阳方位角影响较大,受太阳高度角影响较小,此

时系统发电量的大小主要取决于日照时长,该地区夏季日照时长大于冬季,因此三种朝向的光伏系统夏季发电量较高,冬季发电量较低。相较于平铺结构光伏系统,南向多面体结构光伏系统夏季发电量提升了39.45%,冬季发电量降低了13.38%。这是由于多面体结构相较于平铺结构具有一定的倾斜角度,在太阳高度角相同的情况下,多面体结构光伏系统在夏季接收到的太阳垂直照射辐射量多于平铺结构系统,导致系统夏季产能有所提升,而冬季接收到的太阳垂直照射辐射量变少,导致系统产能有所下降,由于提升量大于下降量,因此发电量总体依旧有所提升。

2.2 两种结构光伏系统典型日发电量

图6展示了两种结构光伏系统在四种不同朝向下的典型日发电量。

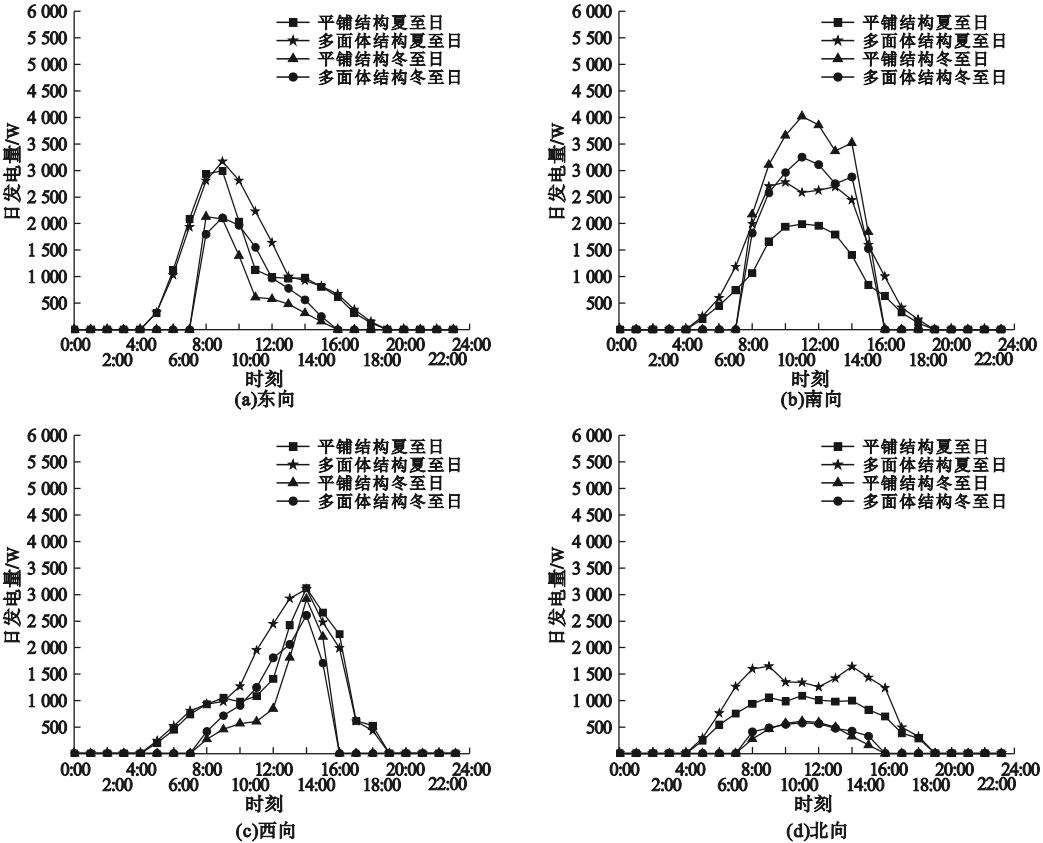


图6 四种朝向两种结构光伏系统典型日发电量

Fig. 6 Typical daily power generation of two structures of PV systems in four orientations

典型日为夏至日(6月21日)和冬至日(12月22日)。平铺结构光伏系统发电峰值时段和峰值大小规律如下:东向系统的发电峰值均在上午时分,夏至日峰值高于冬至日;南向系统的发电峰值为正午时分,夏至日峰值低于冬至日;西向系统的发电峰值在下午时分,夏至日峰值高于冬至日;北向系统的发电峰值在正午时分,夏至日峰值高于冬至日。相比于平铺结构光伏系统,多面体结构光伏系统除南向夏至日和北向夏至日的发电峰值变为双峰外,其余情况下发电峰值时段均无明显变化,但峰值大小或多或少的存在一定变化,尤其是在南向和北向的夏至日时分,多面体结构光伏系统的发电峰值要明显高于平铺结构,分析可知,这是由于多面体结构增加了两侧三角形光伏组件导致的结果。

2.3 两种系统能源贡献率对比

两种光伏系统对所选建筑的能源贡献率如图7所示。平铺结构光伏系统年总产能占建筑能耗总量53%,多面体结构光伏系统年总产能占建筑能耗总量56.76%,相较于平铺结构光伏系统提高了3.76%。

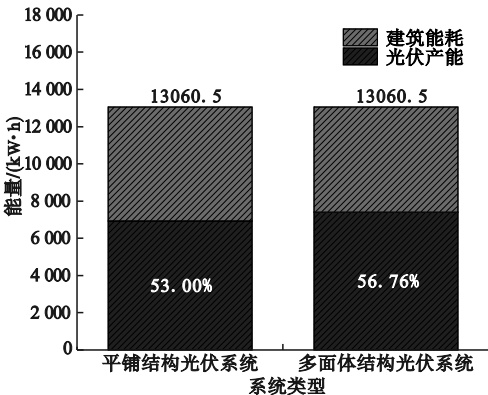


图7 两种光伏系统能源贡献率

Fig.7 Energy contribution rate of two photovoltaic system

3 结 论

(1)在占据面积相同时,四种朝向的多面体结构光伏系统的装机容量均小于平铺结构光伏系统,而年发电量均高于平铺结构光伏系统;

不同朝向下的年发电量提升幅度也不相同,北向提升幅度最大,东、西向次之,南向最小。

(2)通过对近零能耗建筑案例的能耗计算,发现将两种结构光伏系统安装在建筑南立面时,两者的能源贡献率分别为53%和56.76%,由此可知,通过对建筑立面进行合理地光伏系统设计,实现能量的自发自用,可以满足建筑部分用能需求,从而有效降低建筑能耗。

参考文献

[1] GONZALO A P, MARUGÁ N A P, MÁRQUEZ F P G. A review of the application performances of concentrated solar power systems [J]. Applied energy, 2019, 255: 113893.

[2] PENG C, HUANG Y, WU Z. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China [J]. Energy and buildings, 2011, 43(12): 3592-3598.

[3] 路绍琰, 吴丹, 马来波, 等. 中国太阳能利用技术发展概况及趋势[J]. 科技导报, 2021, 39(19): 66-73.

(LU Shaoyan, WU Dan, MA Laibo, et al. Overview of the development and trend of solar energy utilization technology in China [J]. Science and technology herald, 2021, 39(19): 66-73.)

[4] 褚英男, 宋晔皓, 孙菁芬, 等. 近零能耗导向的光伏建筑一体化设计路径初探[J]. 建筑学报, 2019(增刊2): 35-39.

(CHU Yingnan, SONG Yehao, SUN Jingfen, et al. Approach to integrated design of photovoltaic buildings with near-zero energy consumption [J]. Journal of architecture, 2019(S2): 35-39.)

[5] 程昱茜, 吕雪, 冯国会, 等. 近零能耗建筑光伏幕墙系统换热优化研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(2): 314-322.

(CHENG Yuyuan, LYU Xue, FENG Guohui, et al. Research on heat transfer optimization of photovoltaic curtain wall system in near-zero energy building [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(2): 314-322.)

[6] 张时聪, 吕燕捷, 徐伟. 64 栋超低能耗建筑最佳案例控制指标和技术路径研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(6): 7-13.

(ZHANG Shicong, LYU Yanjie, XU Wei. Study on optimal case control index and technical path of 64 ultra-low energy consumption buildings [J]. Building science, 2020, 36(6): 7-13.)

[7] 王君, 余本东, 王鑫垚, 等. 太阳能光伏光热建筑一体化(BIPV/T)研究新进展[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 72-78.

(WANG Jun, YU Bendong, WANG Chuyao,

- et al. New progress in the research of building integrated photovoltaic solar thermal(BIPV/T) [J]. Journal of solar energy, 2022, 43 (6): 72-78.)
- [8] ZIMMERMAN R, PANDA A, BULOVIĆ V. Techno-economic assessment and deployment strategies for vertically-mounted photovoltaic panels [J]. Applied energy, 2020, 276: 115149.
- [9] NAGAOKA A, OTA Y, SAKAI K, et al. Performance evaluation and spectrum-based analysis of a wall-mounted photovoltaic system for zero-energy building [J]. Renewable energy, 2021, 174: 147-156.
- [10] LIU Z, ZHANG Y, YUAN X, et al. A comprehensive study of feasibility and applicability of building integrated photovoltaic (BIPV) systems in regions with high solar irradiance [J]. Journal of cleaner production, 2021, 307: 127240.
- [11] THEODORIDOU I, KARTERIS M, MALLINIS G, et al. Assessment of retrofitting measures and solar systems' potential in urban areas using Geographical Information Systems: application to a Mediterranean city [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2012, 16(8): 6239-6261.
- [12] HACHEM C, ELSAYED M. Patterns of facade system design for enhanced energy performance of multistory buildings [J]. Energy and buildings, 2016, 130: 366-377.
- [13] 冯国会, 王茜如, 黄凯良, 等. 近零能耗建筑地面辐射供暖末端设计参数优化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 512-519.
(FENG Guohui, WANG Xiru, HUANG Kailiang, et al. Design parameter optimization of floor radiant heating terminal in near-zero energy building [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2022, 38(3): 512-519.)
- [14] 李晓旭, 黄凯良, 冯国会, 等. 严寒地区超低能耗建筑夜间通风节能潜力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 520-527.
(LI Xiaoxu, HUANG Kailiang, FENG Guohui, et al. Analysis of night ventilation energy saving potential for ultra-low energy consumption buildings in severe cold area [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(3): 520-527.)
- [15] 冯国会, 张磊, 常莎莎, 等. 可再生能源耦合供热系统在严寒地区的适宜性分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(7): 881-889.
(FENG Guohui, ZHANG Lei, CHANG Shasha, et al. Suitability analysis of renewable energy coupled heating system in severe cold region [J]. Renewable energy resources, 2022, 40(7): 881-889.)
- [16] 周文倩. 辽宁省近零能耗建筑能耗及气密性指标的确定[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
(ZHOU Wenqian. Determination of energy consumption and air tightness index of nearly zero energy building of Liaoning province [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2019.)
- [17] 邓杰, 王瑛, 王成琳, 等. 太阳能低温地板辐射采暖的 TRNSYS 模拟研究[J]. 制冷与空调(四川), 2013, 27(5): 499-503.
(DENG Jie, WANG Ying, WANG Chenglin, et al. Research of solar assisted low temperature floor heating simulation by TRNSYS [J]. Refrigeration and air conditioning (Sichuan), 2013, 27(5): 499-503.)
- [18] 张时聪, 徐伟, 姜益强, 等. 国际典型“零能耗建筑”示范工程技术路线研究[J]. 暖通空调, 2014, 44(1): 52-59.
(ZHANG Shicong, XU Wei, JIANG Yiqiang, et al. Research on demonstration project technology roadmap of zero energy buildings abroad [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2014, 44(1): 52-59.)
- [19] MARSZAL A J, HEISELBERG P, BOURRELLE J S, et al. Zero energy building a review of definitions and calculation methodologies [J]. Energy and buildings, 2011, 43(4): 971-979.
- [20] 任晓芬. 地板辐射供暖方式热舒适性与节能性分析研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.
(REN Xiaofen. Thermal comfort and energy conservation study of radiant floor heating [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2008.)
- [21] 徐刚, 安启启, 杨杰, 等. 考虑个体差异性的 PMV-PPD 人体热舒适性评估模型及应用[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(1): 55-61.
(XU Gang, AN Qiqi, YANG Jie, et al. Evaluation and its application of an improved PMV-PPD model based on individual differences [J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 2021, 41(1): 55-61.)
- [22] 冯国会, 崔航, 黄凯良, 等. 严寒地区超低能耗建筑负荷特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(4): 724-729.
(FENG Guohui, CUI Hang, HUANG Kiliang, et al. Research on load characteristics of ultra-low energy buildings in cold regions [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(4): 724-729.)
- [23] 常莎莎, 冯国会, 黄凯良, 等. 光伏幕墙辅助双源热泵系统在不同地区的多目标优化配置[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 297-305.
(CHANG Shasha, FENG Guohui, HUANG Kiliang, et al. Multi-objective optimization of photovoltaic curtain wall assisted dual-source heat pump system in different regions [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(5): 297-305.)
- [24] 刘常平. 中国零能耗居住建筑与光伏系统能源匹配特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
(LIU Changping, . Research on energy matching characteristics between zero-energy residential buildings and photovoltaic systems in China [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)