

固定式光伏最佳水平倾角及朝向的模拟分析

——以宁夏银川地区为例

魏子东^{1,2}, 霍小平³, 贺生云¹, 尹 宁¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 3. 长安大学建筑学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:光伏组件在与建筑一体化系统中往往只能以固定形式存在, 因此需要考虑在固定状态下的最佳水平倾角及朝向, 使光伏在全年周期内的总发电量最大化. 本文首先分析了光伏接受太阳辐射的特点, 明确了影响光伏发电量的辐射因素. 其次通过气候分析软件 Weather Tool 分析了宁夏银川地区太阳高度角及方位角在全年周期内的规律, 并用建筑物理环境模拟分析软件 Autodesk Ecotect Analysis 模拟分析了银川地区不同水平倾角及朝向的光电板全年发电量情况, 得出了银川地区光伏最佳水平倾角区间及朝向的结论.

关键词:光伏一体化建筑; 直接辐射; 散射辐射; 太阳高度角; 太阳方位角; 固定式光伏组件; 最佳水平倾角及朝向

中图分类号: TU-201.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)05-0700-07

1 光伏接受太阳辐射的特点

光伏发电是利用“光生伏打效应”将光能转化为电能. 根据能量守恒的原则, 排除电池转化效率及其他损耗因素, 光电板上接收的光辐射量越多, 其转化的电能就越多. 光伏发电的全部能量来源于太阳, 而太阳辐射量的多少与地理纬度、海拔高度、太阳高度、日照时间、大气质量、大气透明度等因素有关^[1]. 就具体情况而言, 地球表面获得的太阳辐射主要包括两部分: 一部分是直接辐射(Direct Radiation), 即不改变方向的太阳直达辐射; 另一部分是间接辐射(Indirect Radiation), 包括大气层散射辐射(Diffuse Radiation)及地表物体反射辐射(Reflective Radiation). 在晴天时, 地表某一接收面上获得辐射主要来自直接辐射; 而在多云天或全云天的情况下, 间接辐射占了表面所接收辐射量的部分或大部分. 一般情况下在设置光伏组件及阵列时, 主要应考虑太阳直接辐射的影响, 间接辐射中的散射辐射对光伏发电量会产生一定的影响, 而地表物体的反射辐射对光伏发电量的影响则微乎其微^[2]. 辐射相对于接收面的入射角度对接收面获得辐射能量的效果影响很大. 当辐射垂直于接收面时, 单位面积获得辐射能量为最大; 当辐射以非垂直角度投射到接收面时, 单位面积获得辐射能量小于垂直入射时的能量, 投射方向越接近于垂直, 接收能量效果越显著.

2 关于银川地区太阳高度角及方位角的规律分析

光伏组件所处地区的太阳高度角 h_s 及方位角 A_s 的特征及变化的规律直接影响着光电板受直接日照的方向和时数. 因此在设计光伏组件布置方式时, 根据所在地区太阳高度角 h_s (太阳光线与地平面间的夹角) 及方位角 A_s (太阳光线在地平面上的投影线与地平面正南向的夹角) 的特点及变化规律来确定光伏接收面的水平面倾角及朝向是十分关键的问题, 这直接影响着接收面所能获得辐射量的多寡. 太阳高度角 h_s 及方位角 A_s 是随三种因素变化的变量, 这三种因素分别为: 赤纬角 δ 、时角 Ω 、地理纬度 φ ^[3]. 赤纬角 δ (太阳光线与地球赤道面所夹的圆心角) 表征着季节 (即日期) 的变化; 时角 Ω 表征着时间 (时刻)

收稿日期: 2012-01-18 修改稿日期: 2012-10-08

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (SQ2012BAJY3723-01)

作者简介: 魏子东 (1981-), 男, 山东临清人, 硕士, 讲师, 主要从事建筑及规划设计、可持续建筑技术研究.

的变化;地理纬度 φ 表征着地方的差异.

$$\text{太阳高度角 } h_s \text{ 可以表示为: } \sin h_s = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \Omega \quad (1)$$

$$\text{太阳方位角 } A_s \text{ 可以表示为: } \cos A_s = \frac{\sin h_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h_s \cdot \cos \varphi} \quad (2)$$

计算太阳高度角及方位角需要以可靠的气象数据为依据,目前可以通过计算机气候分析软件对某个地区的标准气象数据进行分析,明确其太阳高度角及方位角的特征及变化规律.在本课题的研究中,应用 Weather Tool 作为气候分析及数据转换的软件,分析选用的气象数据资料来自美国能源部(DOE)能效与可再生能源(EERE)网站的中国标准气象数据(CSWD)^[4].分析的地区为中国宁夏回族自治区银川市,用 Weather Tool 打开银川地区的气象数据文件 Ningxia Hui Yinchuan 536140 (CSWD),文件格式为 EPW,并将文件转存为 Weather Data File 格式.选择日轨分析,并设定日期为 6 月 22 日(夏至),时间为 13:00(正午时刻),得到银川地区夏至日的全天太阳轨迹及正午时刻的太阳位置,如图 1 所示,从图中可以看出,银川地区夏至日正午时刻的太阳高度角(虚线同心圆)在 75° 度左右,这是银川地区全年中太阳高度角的最大值.

修改设定日期为 12 月 22 日(冬至),时间为 13:00(正午时刻),得到银川地区冬至日正午时刻的太阳位置如图 2 所示,从图中可知银川地区冬至日正午时刻的太阳高度角为 28° 左右.以同样的设定方法得到银川地区春分(3 月 21 日)、秋分(9 月 23 日)正午时刻太阳位置的高度角均为 52° 左右.由此可以明确银川地区全年的太阳高度角在 0°~28°、0°~52° 及 0°~75° 区间随时间而变化.

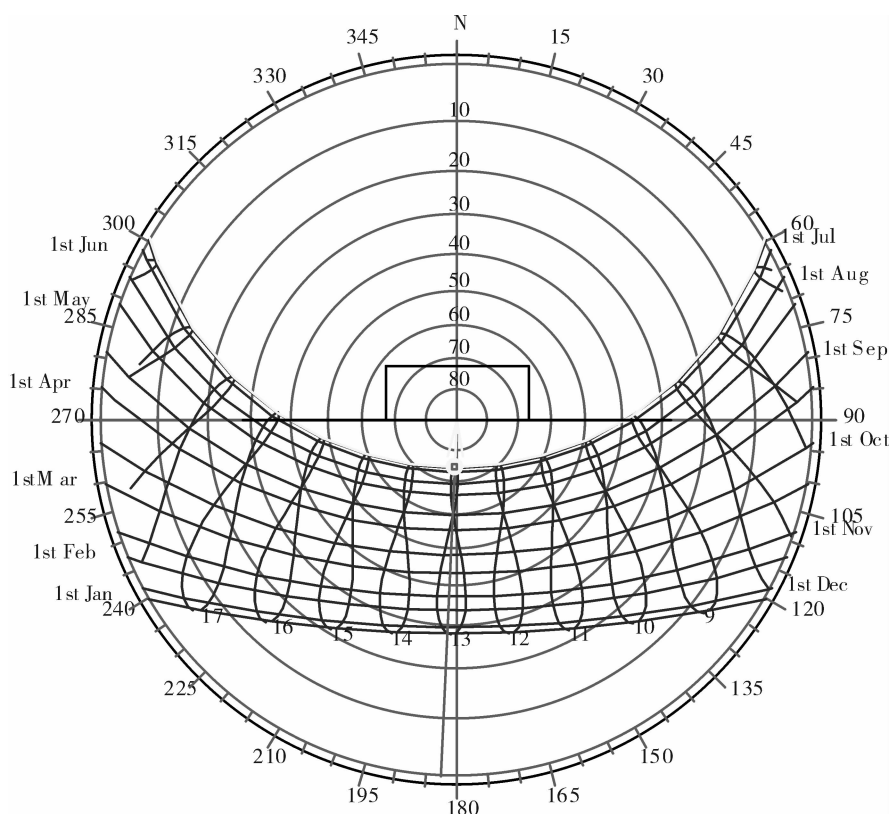


图 1 银川地区日轨分析图(夏至日正午太阳位置)

Fig. 1 Gnomonic analysis chart of Yinchuan(position of the sun at noon in summer solstice)

3 不同水平倾角及不同朝向的光电板全年发电量模拟分析实验

目前的光伏组件安装方式有三类:固定式,单轴跟踪式,双轴跟踪式.单轴跟踪式是以固定水平倾角跟踪太阳方位,而双轴跟踪式的光电板始终垂直太阳光线^[2].然而,光伏一体化建筑的光伏组件由于与外围护结构集成为一体,所以往往只能以固定的形式存在.因此在研究光伏一体化建筑光伏接收面的设计布局时应按固定式考虑,以全年为周期考虑太阳高度角及方位角的逐日逐时变化,计算确定光伏接收面的有利水平倾角及朝向,保证在建筑设计初期阶段能够有效考虑光伏布置朝向及倾角优化问题.本课题以研究位于银川地区的光伏接收面在全年内的最佳朝向及水平倾角为目的,采用目前比较典型的建筑物理环境模拟分析软件 Autodesk Ecotect Analysis(生态分析大师),通过模拟银川地区不同朝向、不同水平倾角的光伏接收面在全年各月份的逐日发电量,并分析所得数据以确定布置光伏接收面的有利水平倾角及朝向. Eco-

tect Analysis 主要用于建筑物理环境模拟分析,其分析范围涵盖热环境、光环境、声环境、日照、风环境、经济性、环境影响与可视度等7个方面^[5].

本课题模拟选用的银川地区气象数据仍然来自美国能源部(DOE)能效与可再生能源(EERE)网站的中国标准气象数据(CSWD),模拟分析内容包括:1、光电板在相同朝向(正南向)的条件下,采用不同水平倾角时(分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 共七个水平倾角)的全年各月份发电量;2、光电板在相同水平倾角(45°)的条件下,采用不同朝向时(分别为正西、南偏西 60° 、南偏西 30° 、正南、南偏东 30° 、南偏东 60° 、正东共7个朝向)的全年各月份发电量. 以下是模拟分析实验的具体情况:

3.1 相同朝向但不同水平倾角时的模拟分析

建立如图3所示的 $10\text{ m} \times 3\text{ m}$ 平面区域模型,朝向为正南. 将其材质设定为太阳能收集器(Solar collector),并设置太阳能收集器参数如图4所示. 参数中光伏材料为晶体,光电转化效率为12%,这与实际中的大多数情况一致. 在朝向不变得条件下,以南侧板边线为轴,分别将光电板模型旋转成与水平面倾角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° ,并在每一个水平倾角的状态下模拟计算模型光电板的全年(1月1日至12月31日)逐日负荷匹配,得出在不同水平倾角条件下的全年各月份发电量数据(表1),在Excel中将所得数据绘制成折线统计图(图5).

从表中数据可以看出,以全年为周期的情况下, 30° 水平倾角的全年总发电量为 $5\,337\,709\text{ Wh}$,是所有角度中的最大值. 45° 水平倾角的全年总发电量为 $5\,321\,370\text{ Wh}$,是第二高值且与 30° 很接近. 15° 水平倾角的全年总发电量为 $5\,191\,198\text{ Wh}$,是第三高值. 由此可以推断出全年周期内的最佳水平倾角应在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 之间, 30° 与最佳角度应该非常接近. 90° 倾角时的全年总发电量为所有角度中的最低值. 从折线图中可以看出, 45° 及以下角度在线性变化上比较类似,夏季(五月至七月)均达到全年峰值,冬季(十二月至一月间)为全年最低值. 45° 以上角度在线性变化上相类似,三月和十月存在峰值,夏季六月发电量全年最低. 这样的规律证明了本研究前文第一部分的论述,即与接收面垂直入射的辐射能效

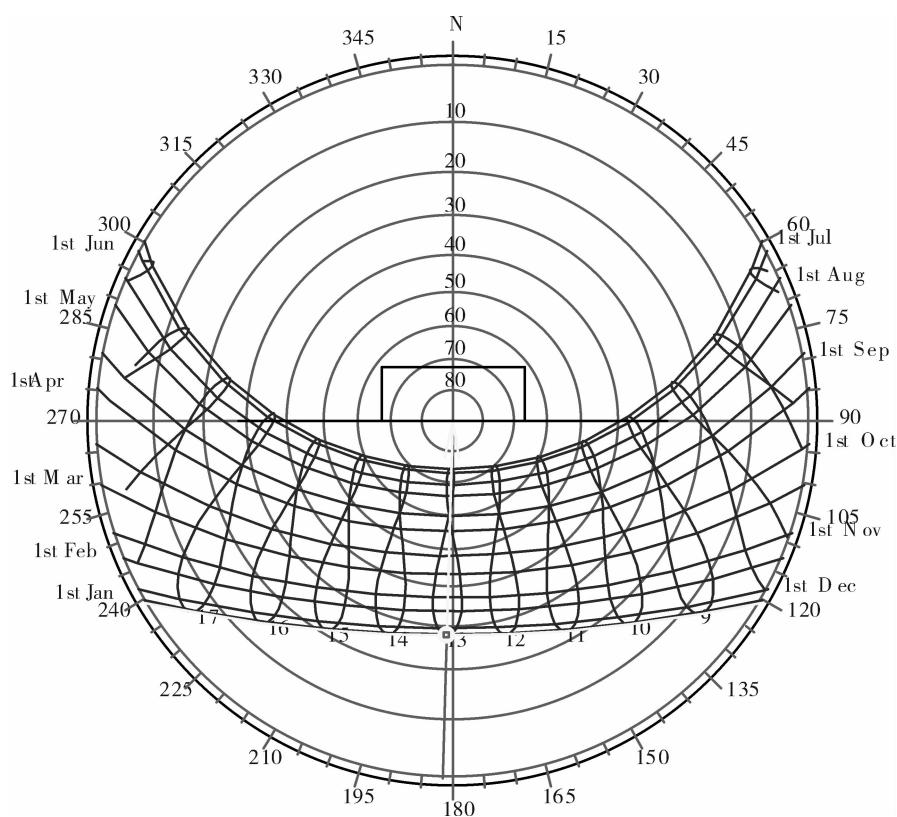


图2 银川地区日轨分析图(冬至日正午太阳位置)

Fig. 2 Gnomonic analysis chart of Yinchuan(position of the sun at noon in winter solstice)

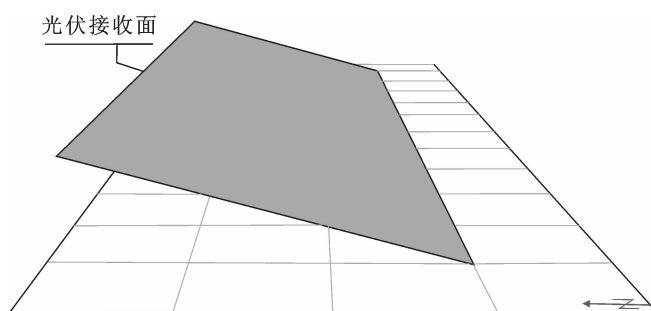


图3 相同朝向、不同水平倾角的光电板模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of photovoltaic panel model in the same aspect and different horizontal dip angle

最为明显. 银川地区全年内的天气状况是晴天数所占的比例很高,该地区夏季太阳辐射受天气影响较小,强度最大. 夏季直接太阳辐射是影响光伏全年发电量的主导因素. 根据前文给出的日轨分析图,银川地区夏季太阳高度角最大,在接近 75° 的区间内变化,所以 45° 以下的水平倾角与入射光线接近垂直,发电效果较为明显. 由于能够有效利用夏季太阳辐射,因此对全年总发电量的贡献率很大. 而 45° 以上的倾角在夏季基本与直接太阳辐射方向平行,因此不能够有效利用夏季太阳直接辐射,从而影响到全年发电量的总体水平. 所以 45° 以下的水平倾角全年发电量高于 45° 以上的情况.

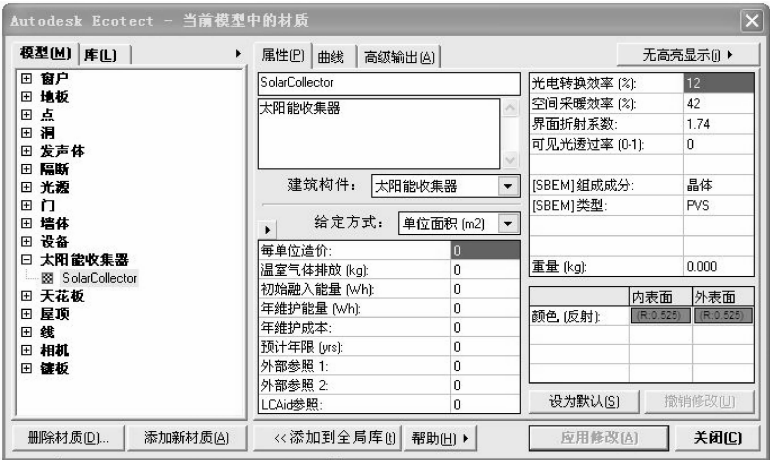


图 4 太阳能收集器参数设置

Fig. 4 Solar collector parameter setting

表 1 相同朝向、不同水平倾角光电板模型全年各月份发电量数据

Resource Usage—逐日负荷匹配							
Collector Area:30.000 m ² , [1 Object(s)]							
水平面倾角 (the horizontal inclination), SOLAR COLLECTION: (Wh)							
Month	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Jan	212 122	286 797	339 756	352 831	375 671	359 146	320 804
Feb	252 029	305 945	338 942	346 152	343 930	316 453	270 993
Mar	401 271	457 044	481 844	483 975	445 256	386 774	304 104
Apr	488 165	514 736	508 430	500 526	414 667	332 792	234 800
May	569 490	576 053	547 730	531 626	405 371	304 132	192 993
Jun	565 335	559 219	523 956	505 222	380 291	284 482	189 350
Jul	566 205	562 673	529 388	511 069	383 472	285 477	184 070
Aug	502 961	520 390	504 672	493 354	394 214	305 973	205 128
Sep	405 681	447 317	459 157	457 724	402 238	335 563	249 764
Oct	333 559	395 081	429 222	435 386	419 141	377 626	313 402
Nov	225 422	300 785	353 123	366 648	386 438	366 296	323 681
Dec	189 186	265 158	321 489	336 857	366 360	354 963	322 638
Total	4 711 426	5 191 198	5 337 709	5 321 370	4 717 049	4 009 677	3 111 727

3.2 相同水平倾角(45°)但不同朝向时的模拟分析:

建立如图 6 所示的房间模型,平面为 10 m×6 m,墙身高 3 m,屋顶为 45° 双坡屋顶. 将屋顶南向单侧坡面设定为太阳能收集器的材质,参数设置与模拟实验 1 中一致. 将模型以平面几何中心为轴,分别向正西、南偏西 60° 、南偏西 30° 、正南、南偏东 30° 、南偏东 60° 、正东七个朝向旋转,并在各朝向状态下模拟计算 45° 光电板单坡面的全年(1 月 1 日至 12 月 31 日)逐日

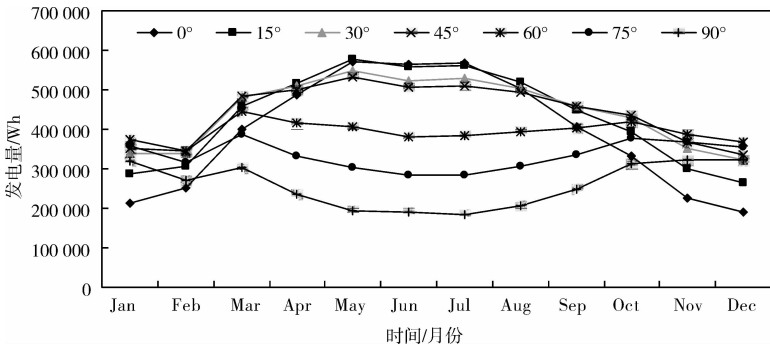


图 5 相同朝向、不同水平倾角光电板模型全年各月份发电量折线图

Fig. 5 Monthly electricity quantity statistical chart of photovoltaic panel model in the same aspect and different horizontal dip angle

负荷匹配,得出在不同朝向条件下的全年各月份发电量数据(表 2),并将各组数据汇总在 Excel 中绘制为折线分析图(图 7)。

由表 2 中数据可以看出,正南朝向的全年总发电量为 7 525 555 Wh,高于其他朝向,其次为南偏西 30°,全年总发电量为 7 385 766 Wh。从折线分析图中可以看出,正南朝向的各月份发电量分布较其他朝向稳定,而且大多数情况下都高于其他朝向。由此可知正南朝向为银川地区光伏发电最为有利的朝向。其次,偏西朝向明显好于偏东朝向,正东朝向的各月份及全年总发电量均为最低,说明偏东朝向为银川地区光伏布置的不利朝向。

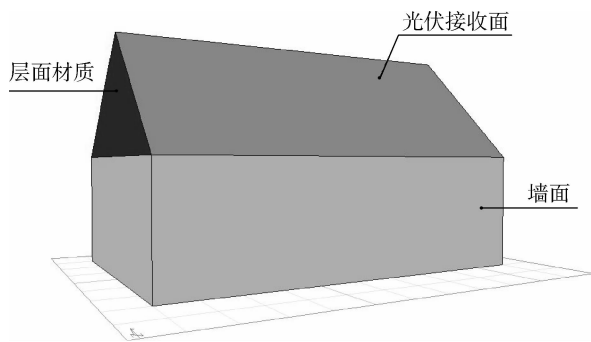


图 6 相同水平倾角、不同朝向光伏接收面的模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of photovoltaic receiving surface model in Same horizontal inclination and different orientation

表 2 相同水平倾角、不同朝向光电板模型全年各月份发电量数据

Tab. 2 Annual monthly electricity quantity data of photovoltaic receiving surface model in the same horizontal dip angle and different aspect

Resource Usage—逐日负荷匹配							
Collector Area:42.426 m ² ,[1 Object(s)]							
朝向(Orientation),SOLAR COLLECTION:(Wh)							
Month	正西	南偏西 60°	南偏西 30°	正南	南偏东 30°	南偏东 60°	正东
Jan	297 901	417 782	508 860	498 979	454 080	328 152	204 839
Feb	347 248	427 825	492 010	489 533	439 195	346 014	255 818
Mar	550 001	622 357	685 308	684 445	600 196	496 800	390 371
Apr	651 877	672 869	694 761	707 851	617 270	556 926	490 727
May	727 443	704 862	709 751	751 832	671 478	644 195	602 749
Jun	723 783	681 455	669 544	714 492	640 977	627 889	604 481
Jul	745 314	708 882	691 099	722 761	637 023	614 156	583 493
Aug	673 153	675 834	682 582	697 707	603 950	553 332	497 682
Sep	528 930	579 644	629 606	647 320	575 297	500 447	412 535
Oct	453 348	541 038	612 842	615 729	550 572	448 926	341 657
Nov	308 136	422 470	518 586	518 519	477 253	357 430	234 356
Dec	272 401	398 761	490 817	476 387	432 028	305 356	177 700
Total	6 279 535	6 853 779	7 385 766	7 525 555	6 699 319	5 779 623	4 796 408

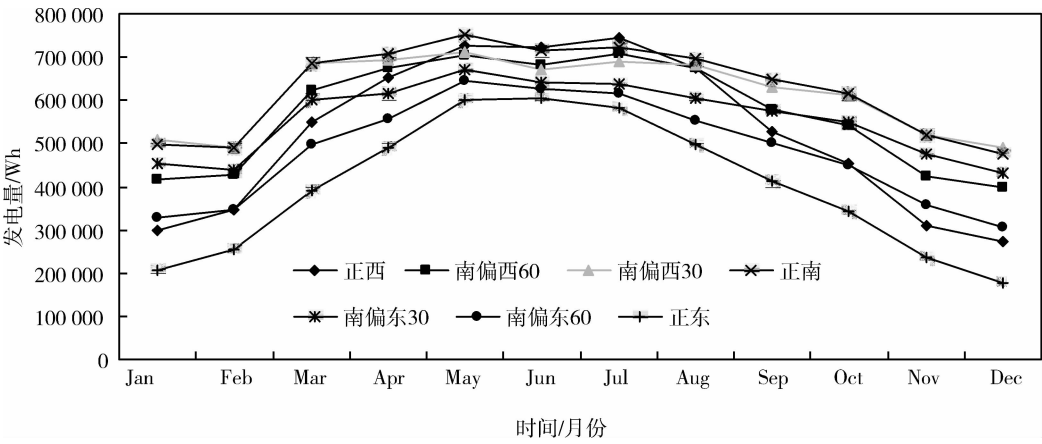


图 7 相同水平倾角、不同朝向光电板模型全年各月份发电量折线图
Fig. 7 Monthly electricity quantity statistical chart of photovoltaic receiving surface model in the same horizontal dip angle and different aspect

4 结 论

根据以上不同水平倾角及不同朝向的光电板模型全年发电量模拟分析实验的结果,在不考虑温度、雨雪覆盖及耐久对发电效率影响的前提下,可以得出如下结论:

4.1 水平倾角方面:

15°~45°区间为最佳倾角区间,其中最佳水平倾角应位于30°左右;45°以上为不利水平倾角的区间,其中90°水平倾角(即垂直接收面)是最不利的布置角度.这也间接表明,在银川地区光伏屋面的发电效果较垂直布置的光伏墙体及幕墙有利.

4.2 朝向方面:

正南朝向为银川地区光伏发电最有利朝向,全年发电量在所有朝向中最大,各月份发电量大多数时间都多于其他朝向;其次,南偏西朝向较南偏东朝向更为有利.

此外须要对本研究的结论补充说明两点:①本文模拟实验所选用的气象数据资料是来自ASHRAE(美国采暖、制冷与空调工程师学会)国际能源计算气象数据资料(IWEC)的EnergyPlus气象数据文件,具有较高的可靠性,从而保证了模拟实验结果在一定程度上的可靠性.通过与文献[2]中银川地区全年最佳水平倾角为32°的结论相对照,进一步验证了模拟实验结论的正确性.②本研究使用的模拟分析软件其计算程序依据的公式对实际发电的修正系数仅考虑为0.88(由本文作者经实验发现),该系数仅能够修正由温度变化引起的电池转化效率下降,而不能修正由其他诸多因素引起的能量损耗,因此其模拟得出的发电量数据结果与实际中存在一定的误差.

参考文献 References

- [1] 住房和城乡建设部工程质量安全监管司,中国建筑标准设计研究院.全国民用建筑工程设计技术措施:规划·建筑·景观[M].北京:中国计划出版社,2009:302-314.
Department of Construction Engineering Quality & Safety Supervision Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the P. R. China, China institute of building standard design & research. National Technical Measures for Design of Civil Construction-Planning · Architecture · Landscape[M]. Beijing: China Plan Publishing Company, 2009:302-314.
- [2] 王丽娟,王吉生.不同安装方式太阳能电池板倾斜面上辐射量分析计算[J].太阳能,2010(6):20-21.
WANG Li-juan, WANG Ji-sheng. Analysis and calculation of radiation quantity on tilted solar cell panel of different installation mode[J]. Solar energy, 2010(6):20-21.
- [3] 刘加平.建筑物理[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,1986:117-126.
LIU Jia-ping. Architectural Physics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of China Building Industry, 1986: 117-126.
- [4] U. S. Department of Energy(DOE)-Energy Efficiency & Renewable Energy(EERE). EnergyPlus Energy Simulation Software—Weather Data: CHN-China [DB/OL]. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=2_asia_wmo_region_2/country=CHN/cname=China.
- [5] Autodesk, Inc. 绿色建筑分析应用[M].北京:电子工业出版社,2011:132-137.
Autodesk, Inc. Autodesk Ecotect Analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011:132-137.
- [6] U. S. Department of Energy (DOE). DOE Solar Energy Technologies Program Overview, 2006.
- [7] CHENG C L, JIMENEZ C S S, LEE M C. Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans[J]. Renewable Energy, 2009(34):1644-1650.
- [8] YOO S H, LEE J K. Efficiency characteristic of building integrated photovoltaics as a shading device[J]. Building and Environment, 2002(37):615.
- [9] 张牛牛.用分光光度方法研究测定建筑材料表面的太阳放射量[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(2):288-293.
ZHANG Niu-niu. Determination of the solar radiation amount on the surface of the building materials by means of spectrophotometry[J]. J. Xi'an Univ. of arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(2): 288-293.

Simulation and analysis on the optimum horizontal dip angle and aspect of a fixed PV

——Taking Yinchuan city of Ningxia as a case

WEI Zi-dong^{1,2}, HUO Xiao-ping³, HE Sheng-yun¹, YIN Ning¹

(1. School of Structural and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: As PV is usually fixed in building an integrated system, it is quite necessary to study the optimum horizontal dip angle and aspect of it to maximize the total electricity outputs in a full-year cycle. This paper firstly analyzed the characteristics of solar radiation on PV, makes clear the factor influencing the electricity outputs. Secondly it analyzed the annual regulation of solar elevation and azimuth in Ningxia Yinchuan by the weather tool software, simulated and analyzed the PV's annual electricity outputs under different horizontal dip angle and aspect in Yinchuan by the Autodesk Ecotect Analysis software. Finally, it finds out the optimum range of horizontal dip angle and the aspect of PV in Yinchuan.

Key words: *Photovoltaic integrated building; direct radiation; diffuse radiation; solar elevation; solar azimuth; fixed PV; optimum horizontal inclination angle and orientation.*

Biography: WEI Zi-dong, Lecturer, Master, Yinchuan 750021, P. R. China, Tel: 0086-13909517169, E-mail: woofbeat@163.com

(上接第 688 页)

Relationship between the structure and shape of sculptural architecture

HU Rong-rong^{1,2}, YANG Shu-qun³

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. Mingcheng Technological Development Company, Beijing 100049, China)

Abstract: With coming of the post-industrial era, the science transformation to information and digital technology give architects more powerful technique support to realize their space design ideas. Sculptural architectures with complex shapes of unlimited freedom or dynamic fluid attract more and more eyeballs. Based on the theory put forward by Angus J. MacDonald, "the relationship between structure and architectural form", this paper discusses the relationship between the structure and shape of sculptural architectures. The basement to realize sculptural architecture and the cosr to pay are also analyzed.

Key words: *sculptural architecture; structure; structural form*

Biography: HU Rong-rong, Ph. D., Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82205390, E-mail: hurongrong_xauat@yahoo.cn