

## 附录 C 遗传算法排布太阳能表皮案例

在建筑表面排覆光伏面板阵列发电是一种很有前景的可持续发展生能源技术，具有清洁环保、不额外占用土地、无需远距离输电等优势。但同时应该注意的是，目前光伏面板发电的设备成本相对较高，所以如何通过光伏阵列的排布设计使单位面积的光伏面板接受更高的年辐射量以提高光伏设备的效率是一个值得建筑师研究的问题——这主要涉及到阵列中光伏板单元的俯仰角度、朝向角度以及光伏板面积与建筑表皮面积的比例。传统上光伏板的尺寸及排布方式通过冬至日太阳方位及光伏板之间的阴影遮挡关系进行计算，难以取得全年总辐射量的最优解；并且传统方法根据阴影遮挡关系可以计算的光伏板面积比例有一个上限，不能根据建筑表皮的需要灵活调整光伏板与建筑表皮的面积比例。本研究提出一种新的参数化优化方法：首先通过历史观测逐小时阳光辐射数据生成辐射天空模型；然后通过辐射天空模型即可快速计算任一面板的累计受辐射量；最后通过遗传算法等机器学习方法对建筑表面的光伏阵列排布进行参数化优化，使光伏面板累计所受辐射量最大化。以水平面的方阵排布为例，本节所提出的方法使光伏面板累计受辐射量较传统方法有了明显提高，在低密度排布下几乎达到了无遮挡理论最大值，并且扩大了可计算范围。

### C.1 介绍

现在人类所面临的能源危机有两方面。一方面，随着工业化和城市化的发展，人们对能源的需求不断增加，能源供给的稳定一直是经济发展的一个隐患。另一方面，传统能源如石油、煤炭等，在使用的过程中有大量污染物排放，导致空气质量下降、全球气候变化等问题，对人们的生存环境产生了重大危害。而我国作为发展迅速的发展中国家，城市快速扩张，产业不断升级，面临的能源危机尤其严峻。

加大对可再生能源的开发是解决能源危机的一条重要途径。可再生能源中，太阳能受地理条件限制最小，只要有光照就能加以利用，是目前发展迅速的一种可再生能源。赵东、王炳忠等学者的研究<sup>[1][2]</sup>表明我国太阳能资源丰富，即使在较湿润的东部地区资源量也很大，而在青藏高原和西北部地区，太阳能资源更加丰富。太阳能利用方式主要有光伏和光热两种<sup>[3]</sup>，分别将太阳能转化为电能和热能。由于城市中空地较少，将太阳能设备与建筑相结合是一种行之有效的方案。光伏发电由于设备尺寸灵活、布置位置灵活、易于安装等特点，容

易与建筑相结合。国外对于光伏发电与建筑结合的研究开始于上世纪 70 年代,从屋顶安装光伏阵列到与建筑集成化应用,进而发展到将光伏组件作为一种新型建筑材料<sup>[4]</sup>。在我国,分布式屋顶光伏事业的发展得到了多项国家政策的支持<sup>[5]</sup>。同时,也有很多学者在进行光伏与建筑一体化 (Building Integrated Photovoltaic, BIPV) 的研究。李思萌<sup>[6]</sup>分别探讨了光伏板与建筑屋顶和建筑立面结合的设计策略,提出由于光伏与建筑屋顶相结合的能源回收期时间小于与立面结合的时间,所有应优先考虑与建筑屋顶相结合的设计。李明亮等<sup>[7]</sup>从美学角度探讨了光伏组件在平面构成、色彩构成、立体构成中的词汇,并提出了 BIPV 的设计建议。王朝红等<sup>[8]</sup>的研究中认为我国的建筑光伏一体化尚处于起步阶段,大多还局限于传统的光伏屋顶阶段,但也有建筑师开始在积极的探索新的表皮形式。

太阳能光伏板的成本相对较高,所以在设计排布的时候应该尽可能的提高单位面积光伏板接受太阳辐射量。在基地位置确定的建筑上,可以通过调节太阳能光伏板的朝向来优化其受辐射量。彭麟等<sup>[9]</sup>在汉能清洁能源展示中心 BIPV 项目中就提出了使用参数化的方法调整建筑光伏幕墙表皮 1416 块光伏组件单元的角度。从光伏板开始得到较为广泛的应用以来,一直有学者在做关于太阳能光伏板最佳倾角和朝向角的研究。目前的研究主要可以分为三类。第一类是经验性的给定一个常用角度范围或者推荐值。例如辻高辉等<sup>[10]</sup>认为倾角应该等于当地的纬度。这类方法应用方便,但是通常离最佳倾角差距较大。第二类是根据当地经纬度与太阳高度角的关系进行计算。如朱超群等<sup>[11]</sup>提出用太阳高度角结合当地太阳辐射资料,给出了一个计算公式。这类方法应用最为广泛,我国的《光伏发电站设计规范》(GB50797-2012)<sup>[12]</sup>中提到的设计方法也是使用太阳高度角得出光伏板最佳倾角的解析公式,同时根据冬至日的遮挡关系粗略给出了光伏阵列的间距计算公式。但是这类方法单纯从地理角度考虑太阳高度角,很难兼顾当地气象情况对太阳辐射的影响。第三类方法是实验性的进行实验测量。如常泽辉<sup>[13]</sup>等在呼和浩特地区进行了实地实验,得到了 5 到 8 月中光伏板不同倾角受太阳能辐射的情况。这类方法最为准确,但是由于每一个地点的实验需要持续数月甚至数年时间,所以很难大范围应用。

以上三类光伏板排布的设计方法很难直接应用到建筑上。原因主要有三个。第一,关于确定太阳能光伏板最佳倾角的方法主要是针对光伏电站,而太阳能发电站一般来说土地面积较为宽松,光伏阵列的间距较大,所以很少考虑优化光伏板之间的遮挡优化问题,只需将单块光伏板的倾角最优化。但是建筑表皮的光伏板排列非常紧凑,所以在计算最佳倾角的同时必须考虑面板之间的遮挡关系。第二,目前的研究方法主要是针对平面地形或者略带坡度地形的。对于建筑的坡屋顶和立面没有现成可用的设计方法。第三,由于建筑光伏发电优先考虑就地使

用而非并网，应当考虑用电高峰段，或者其他特殊时段发电量最大化问题，这种时间区间内的最优化目前研究还较为局限。

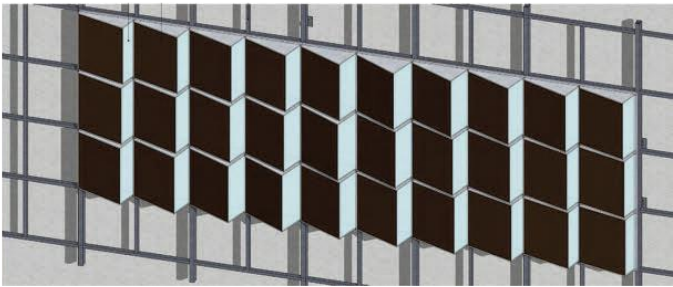


图 C.1 汉能清洁能源展示中心 BIPV 项目中使用参数化方法调整光伏板朝向（图片引自[9]）

本研究提出一种新的参数化优化方法：首先通过历史观测逐小时阳光辐射数据生成累积辐射天空模型；然后通过累积辐射天空模型即可快速计算任一面板的累计受辐射量；最后通过遗传算法等机器学习方法对建筑表面的光伏阵列排布进行参数化优化，使光伏面板所受辐射量最大化。相较传统方法有三个主要优势。第一，可以充分考虑并优化相邻的光伏板之间的遮挡关系。第二，利用实测的逐小时数据进行计算，可以充分考虑当地的天气情况。并且可以依据实际需求，选择具体时段进行优化。第三，利用参数化方法，可以灵活地设定控制光伏板的参数如形状、面积等，也可以设置墙面/屋顶的朝向、坡度等。第四，相比传统方法，用本节提出的方法所得的优化结果有一定提升。

C.2 方法

本研究提出的方法主要流程如下图所示。一方面，对收集或者下载的辐射量纪录文件进行预处理，然后根据处理结果建立辐射天空模型。利用天空模型，可以快速的计算建筑表皮各个部件的受辐射量。另一方面，根据设计设置所需要的优化的建筑表皮光伏板的参数，然后进行参数化建模。结合辐射天空模型和参数化模型可以快速的计算光伏板所受的累计辐射量。然后使用遗传算法进行所选参数的优化，优化目标为光伏板受辐射量最大化。

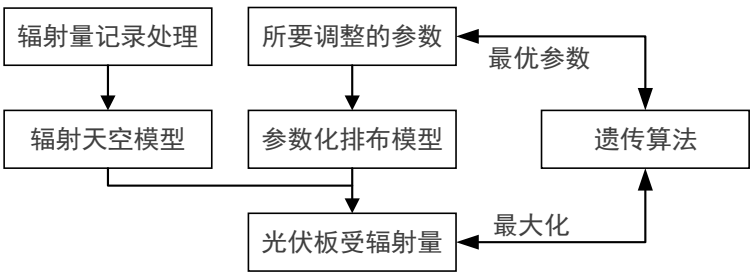


图 C.2 本文方法的主要流程图（图片自绘）

本研究的实验利用 Rhino 平台中的插件 grasshopper、ladybug 以及 python 编程进行实现。

### C.2.1 建立天空模型

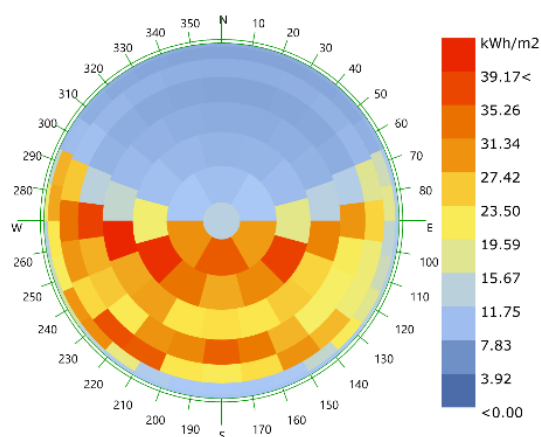


图 C.3 上海地区累积辐射天空模型（图片自绘）

使用准备好的逐时太阳辐射记录文件，可以生成逐时累积辐射天空模型。如上图所示。利用累计辐射天空模型计算建筑表面受辐射量的好处是每次只进行一次累积计算即可，而不需要如传统方法每次计算都要逐时累加受辐射量。这样每次调整模型参数都可以快速的得出结果，使需要大量、多次计算的遗传算法得以可能。

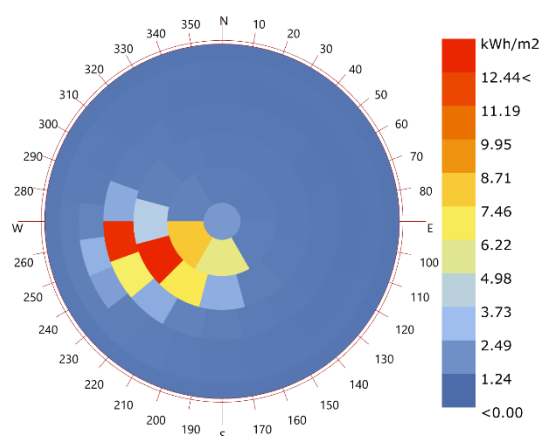


图 C.4 上海地区 7-8 月份 13-15 时累积辐射天空模型（图片自绘）

太阳辐射文件是逐时记录的，所以可以将特殊时段单独提取出来计算时段累积辐射天空模型。例如，叶剑等的研究<sup>[14]</sup>显示上海地区用电高峰月份为 7 月和 8

月，而这两个月中用电最高峰时段为 13 点到 15 点。假如我们需要针对这两个时段的辐射特征进行特别的优化，使光伏板在用电高峰期产生更多的电能，可以单独计算这个时段的累积辐射天空模型，如上图所示。将特殊时段累积天空模型和全时段累积天空模型按权重联合使用，即可对特殊时段进行特殊的优化。

C.2.2 建筑表皮参数化建模

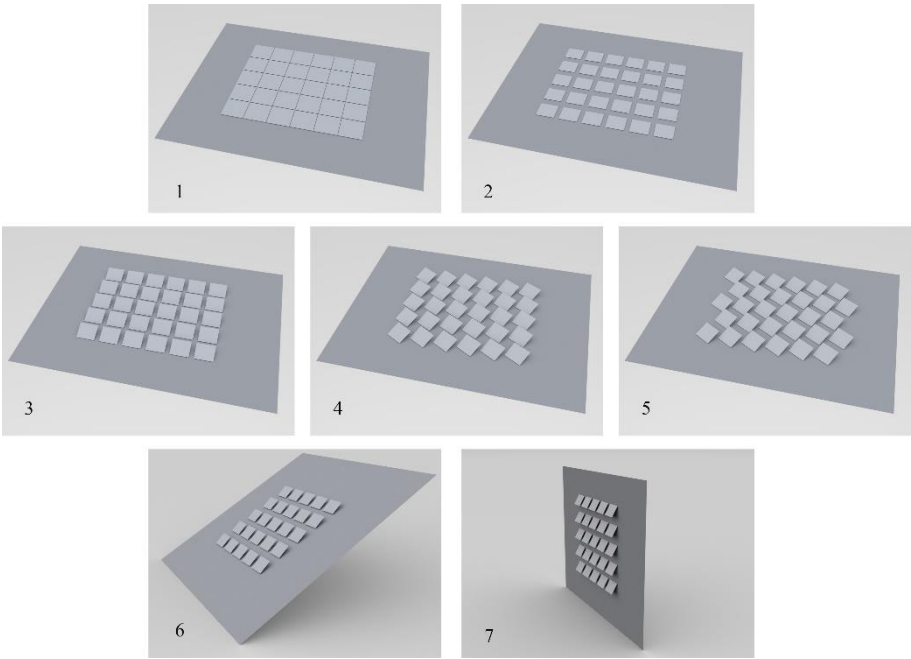


图 C.5 光伏板的各种参数设置（图片自绘）

建筑物表皮所选参数可以根据设计需要而定，如上图所示。不失一般性地，本研究将建筑表皮划分为  $1 \times 1$  单位的网格（图 C.5-1 示，如有需要，也可设计成其他形状），每一个网格对应一块光伏板单元，可选参数有光伏板单元面积或者长宽（图 C.5-2 示，如有需要，光伏板也可以设计为其他形状）、光伏板俯仰角（光伏板与水平面的夹角，如图 C.5-3 示）、光伏板朝向角（光伏板与正南方向顺时针夹角，如图 C.5-4 示）、光伏板错位（前排与后排/左列与右列之间的错位距离，如图 C.5-5 示），以及建筑表面整体的俯仰角与朝向角（如图 C.5-6、图 C.5-7 示）。当然，如果有设计上的需要，也可以引入其他参数。

C.2.3 遗传算法参数优化

遗传算法（Genetic Algorithm, GA）是一种行为主义机器学习算法，最早

由 John Holland 提出。遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学激励的生物进化过程的计算模型<sup>[15]</sup>。遗传算法相比于其他优化算法，应用于太阳能面板参数的优化有如下两个优势。第一，遗传算法可以减少陷入局部最优解的概率，因为其采用群体搜索策略，具有比较好的全局搜索能力；第二，遗传算法仅采用适应度数值来评估个体，并在此基础上进行遗传操作，如此一来可以不受连续可微分的约束，其参数的定义域也可以任意设定。

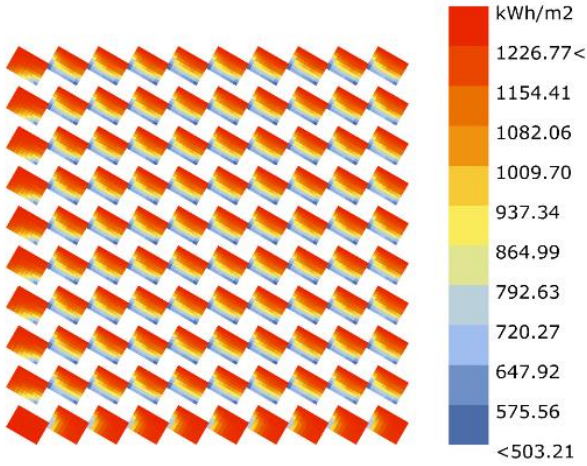


图 C.6 计算光伏板的累积太阳辐射量（图片自绘）

选定参数建模，并且根据建筑所在地区的太阳辐射记录计算得到累积辐射天空模型，可以计算出建筑表皮光伏板上的累积辐射量，如上图所示。本研究中，使用表皮中间光伏板的累积辐射量均值作为遗传算法的适应度数值。本研究中遗传算法的种群数量设置为 50，优化目标为适应度最大化，如果连续 20 代结果没有更新，则停止计算。将上图中的光伏板的俯仰角和方位角设为待优化参数计算可以得到如下图的结果。

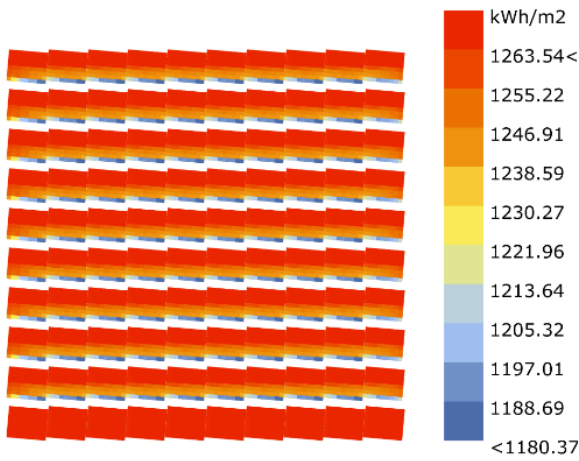


图 C.7 遗传算法优化后的光伏板累积太阳辐射量（图片自绘）



C.3 实验及结果

本研究以上海地区为例，太阳辐射记录文件从 EpwMap 下载，记录显示上海水平地面所受太阳年累积辐射量为 1206.4Kw/m<sup>2</sup>。

优化计算得单块无遮挡光伏板的最优朝向角为 20.4°，俯仰角为 24.1°，此时平均累积辐射量为 1297.5Kw/m<sup>2</sup>。

C.3.1 水平屋顶

本实验计算水平屋顶光伏板排布情况。控制变量为光伏板面积，待优化参数选择为光伏板的高宽比、朝向角和俯仰角。计算结果如下表所示。下图为光伏板面积为 0.5 时的优化排布结果图。

表 C.1 水平屋顶计算结果

光伏板单元面积	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
高宽比	0.275	0.274	0.493	0.619	0.651	0.602	0.701	0.805	0.9
俯仰角(°)	24	24	21	21	18	16	15	10	6
朝向角(°)	20	19	18	11	8	1	2	5	2
累积太阳辐射量(Kw/m <sup>2</sup> )	1297.5	1295.9	1287.1	1279.3	1274.8	1266.4	1257.5	1245.1	1230.1

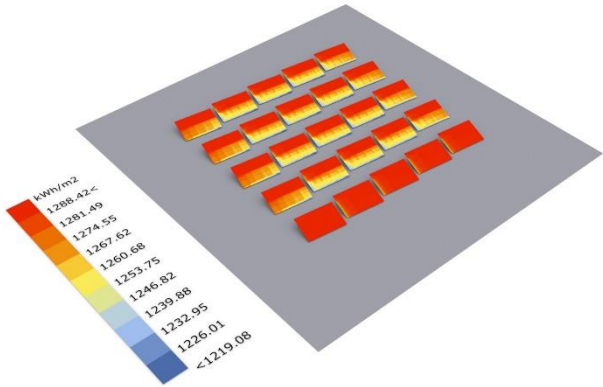


图 C.8 光伏板面积 0.5 时的平屋顶排布优化结果（图片自绘）

按照《光伏电站设计规范》（GB50797-2012）<sup>[12]</sup>的传统方法计算所得结果作为对照，如下图所示，由结果可以看出，本研究提出的方法，不仅适用范围更广，优化所得结果也明显优于传统方法。

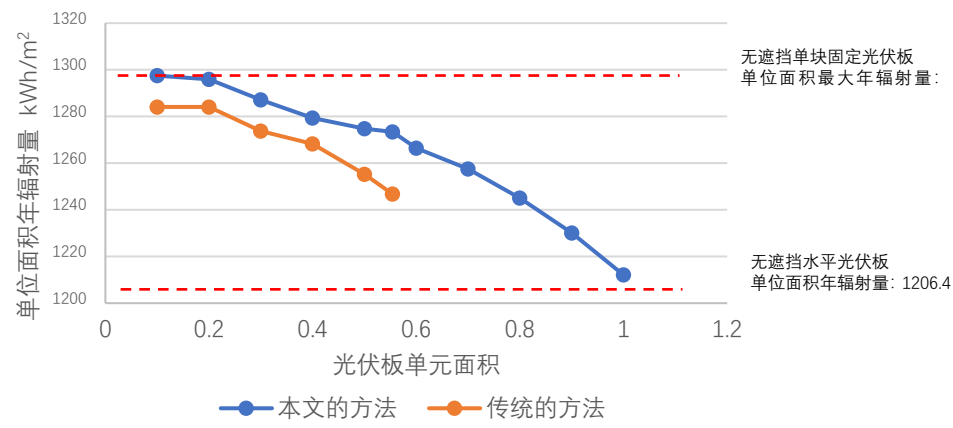


图 C.9 光伏板单位面积平均年辐射量（图片自绘）

C.3.2 坡屋顶

本实验计算正南朝向坡屋顶光伏板排布情况。屋顶坡面与水平面的夹角为屋面俯仰角，屋脊南侧屋面为正值，屋脊北面为负值。控制参数为屋面俯仰角，光伏板单元面积定为 0.5，待优化参数为光伏板高宽比、俯仰角及朝向角。计算结果图下表示，如图 C.10 为坡屋顶俯仰角为 45° 时的优化排布结果。对比坡屋顶所受累积辐射量如图 C.11 所示，可以看出，相比直接将光伏板平铺在坡屋顶上，经本文方法优化的光伏板效率最高可提高达 25%以上。

表 C.2 坡屋顶计算结果

整体俯仰角(°)	45	30	15	0	-15	-30	-45
光伏板高宽比	0.79	1.31	1.15	0.63	0.55	0.5	0.5
光伏板俯仰角(°)	30.3	26.2	24.1	17.9	11.2	-4.3	-12
光伏板朝向角(°)	8.1	13.5	13.7	7.2	6.8	-7.3	-3.5
累积太阳辐射量(Kw/m²)	1269.9	1291.7	1295.2	1273.9	1196.4	1055	882

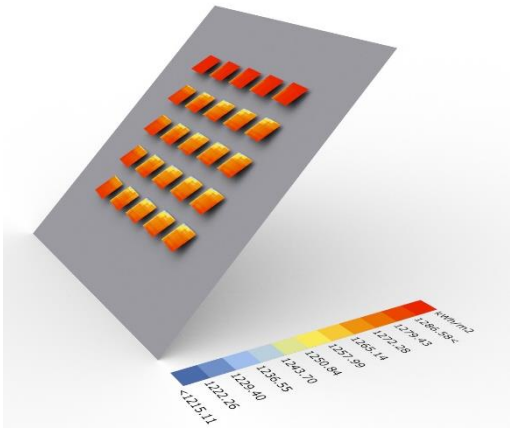


图 C.10 坡屋顶俯仰角为 45° 时的光伏板排布优化结果（图片自绘）



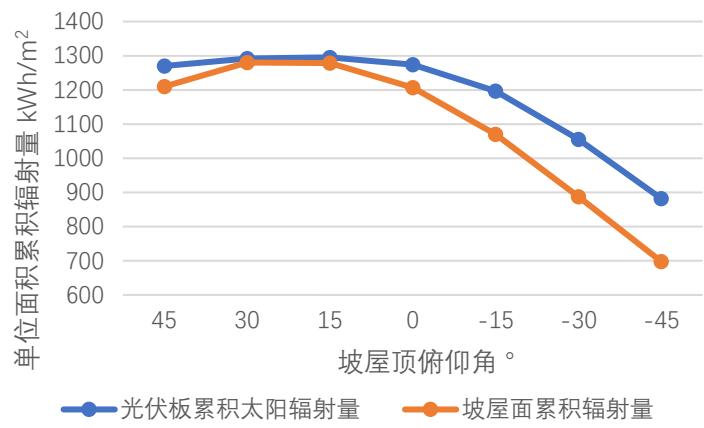


图 C.11 光伏板与坡屋顶累积辐射量对比（图片自绘）

C.3.3 立面

本实验计算垂直于地面的立面光伏板排布情况。立面朝向角为立面法线方向与正南方向的夹角，正南偏西为正值，偏东为负值。控制参数为立面朝向角，光伏板单元面积定为 0.5，待优化参数为光伏板高宽比、俯仰角及朝向角。计算结果如下表示，图 C.12 为立面朝向为 90° 时光伏板的排布结果。对比坡屋顶所受累积辐射量如图 C.13 所示，可以看出，相比于直接将光伏板平铺于立面上，使用本文方法优化过的光伏板效率最多可以提高 40%以上。

表 C.3 立面顶计算结果

整体朝向角(°)	-90	-60	-30	0	30	60	90
光伏板高宽比	0.66	0.53	0.63	0.51	0.5	0.5	0.76
光伏板俯仰角(°)	48.9	53.4	44.6	52.4	49.1	54	56.2
光伏板朝向角(°)	-78.6	-59.2	-24.7	0.1	32	59.9	74.8
累积太阳辐射量(Kw/m²)	660.2	789.5	878.2	953.1	982.2	945.3	822.8

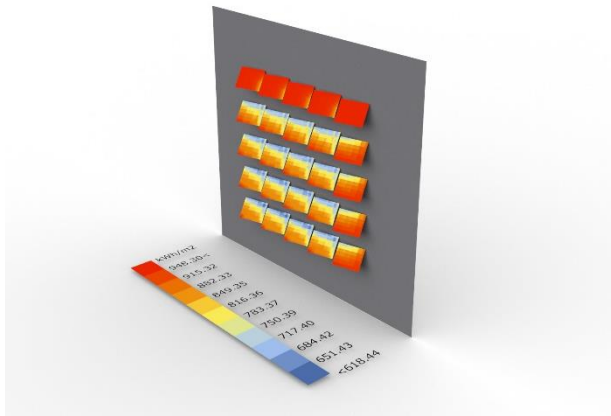


图 C.12 立面朝向角为  $90^\circ$  时的光伏板排布优化结果（图片自绘）

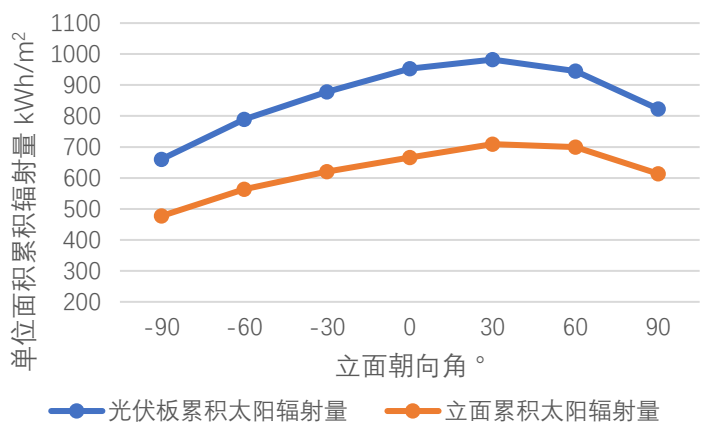


图 C.13 光伏板与立面累积辐射量对比（图片自绘）

#### C.4 案例总结与讨论

本研究案例从太阳能利用效率的角度，针对建筑表皮太阳能光伏板阵列的排布优化提出了一种基于参数化和遗传算法的方法。本研究的主要贡献如下：

- 在平屋顶和坡屋顶排布方面，比传统的公式方法的结果有明显提高，同时可计算范围扩大。
- 针对建筑表皮设计的特点，可以灵活选择参数，同时因为遗传算法的特点，可以自由设定所选择参数的定义域。
- 可以按照特殊时段进行优化，也可以根据所用光伏板自身功率曲线进行更加精确的折减计算。
- 目前建筑立面表皮光伏板基本都是直接平铺在立面上，经过本文提出的优化方法优化的光伏板效率最多可以提高 40% 以上；比平铺的坡屋顶光伏板，效率最多可以提高 25% 以上。

目前此的方法还面临一些需要解决的问题。首先，计算的结果受所选择的辐

射记录文件影响,要想更加优化计算结果,应该使用多年的记录并用统计学手段进行处理。其次,本节提出的优化方法目前只能应用于均质平面表皮的排布,对于像曲面等复杂曲面表皮光伏板的优化还有待研究。

## 参考文献

- [1] 赵东, 罗勇, 高歌,等. 我国近 50 年来太阳直接辐射资源基本特征及其变化[J]. 太阳能学报, 2009(07):96-102.
- [2] 王炳忠,张富国,李立贤.我国的太阳能资源及其计算.太阳能学报,1980(1): 1-9.
- [3] 高峰, 孙成权, 刘全根. 我国太阳能开发利用的现状与建议[J]. 能源工程, 2000(05):8-11.
- [4] 王晋. 光伏建筑一体化在城市住宅中应用潜力的研究[D]. 天津大学.
- [5] 《农村电气化》编辑部. 国家能源局印发《关于可再生能源发展 " 十三五 " 规划实施的指导总见》[J].中国电业,2017(16):4-4.
- [6] 李思萌.光伏与建筑表皮一体化设计策略探讨[J].建筑节能,2018,46(10):84-87+106.
- [7] 李明亮, 王崇杰. 光伏组件作为建筑表皮时的美学语言[J]. 新建筑, 2013, 000(004):41-45.
- [8] 王朝红, 高辉, 王建军. 现代建筑表皮的光伏一体化设计研究[J]. 新建筑, 2009(05):75-80.
- [9] 彭麟.数字化设计的光伏建筑一体化外立面改造浅析——汉能清洁能源展示中心 BIPV 项目设计[J].建筑技艺,2018(03):114-115.
- [10] 迁高辉.太阳能电池 [M] .北京: 机械工业出版社, 1989: 111.
- [11] 朱超群,任雪娟.太阳总辐射最佳倾角的时空分布[J].高原气象,1993(04):409-417.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50797-2012 光伏发电站设计规范[S].北京: 中国计划出版社, 2012.
- [13] 常泽辉,田瑞.固定式太阳电池方阵最佳倾角的实验研究[J].电源技术,2007(04):312-314+324.
- [14] 叶剑,曹琦琳,袁智强,储琳琳.上海电网用电负荷特性分析[J].电力与能源,2017,38(06):659-663.
- [15] 郑树泉,工业智能技术与应用[M].上海: 上海科学技术出版社, 2019: 250-251