

# 基于建筑信息模型的光伏设备自动优化铺设研究

桂 宁,董彦松,蒋米敏,李俊男

(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

**摘 要:**随着分布式光伏技术的发展,现有的光伏系统在有着复杂环境的建筑系统中部署越来越多。由于光伏系统的发电能力严重受到周围环境和建筑本身等众多因素影响,在没有相关计算机工具的支持下,传统的基于专家经验的光伏建筑设计,设计过程复杂,成本高昂且光伏设备很难有最优的使用效率。文章提出构建基于建筑信息模型(building information model, BIM)的光伏设备自动铺设工具,利用 BIM 信息进行准确的阴影辐射分析;根据单位成本收益最大为目标优化函数,设计一种确定最优阵列间距和布局的铺设算法,并在建筑信息模型中自动进行光伏板的铺设部署。该设计在一个具体屋顶光伏铺设的案例得到应用,结果表明:相对于人工铺设的光伏设计,该设计效率提高 500%,辐射量提高 10.4%,光伏系统投资回收期减少 0.91%。

**关键词:**建筑信息模型;BIM;分布式光伏;辐射分析;自动铺设

**中图分类号:** TP319      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-3851 (2016) 03-0403-06      **引用页码:** 050602

## 0 引 言

分布式光伏发电特指采用光伏组件,将太阳能直接转换为电能的分布式发电系统。目前分布式光伏系统主要应用于城市建筑物屋顶的光伏发电项目。分布式屋顶光伏发电通过将建筑与光伏相结合,使建筑从过去单纯的用电体变成发用电综合体<sup>[1]</sup>。随着分布式光伏的应用被大规模推广,其应用的建筑屋顶上屋顶的朝向、外形、屋顶障碍物以及周边环境也日趋复杂,尤其是在建筑比较密集的区域。同时,光伏系统的造型也日益复杂,包含有平面、垂面和斜面等不同的光伏面,有可能无法保证光伏设备全天不被遮挡,从而产生光伏阵列的阴影问题<sup>[2]</sup>。其他因素包括光伏设备的朝向、安装角度以及板间阴影也会影响光伏设备的转换效率。因此,分布式光伏设计人员必须充分考虑到建筑的方位、外形和周边环境的多种因素的协同影响。而在缺乏合适的计算机辅助设计工具的情况下,光伏设计人员很难综合考虑这些因素。

随着建筑信息模型(building information model, BIM)在建筑产业中的迅速发展,各种基于 BIM 的建筑软件应运而生<sup>[3-4]</sup>,BIM 越来越多地被应用在整个建筑生命周期的各个阶段。理论上,光伏系统和建筑都须在 BIM 软件中设计完成。目前的分布式光伏设计的专业软件,如 PVsyst、Retscreen,提供了大量光伏相关的分析功能。但是由于其并不支持 BIM,其阴影辐射分析功能很难准确地反映建筑复杂的外形及环境;同时,其只能提供对给定的设计的仿真报告,不能针对具体的待铺设区域自动进行优化铺设。为了支持光伏系统的优化铺设,研究人员讨论了绿色建筑中光伏与建筑一体化设计的基本原则<sup>[5]</sup>,并给出了间距计算的的经验性公式,但是并没有考虑周围环境的影响。部分文献<sup>[6-7]</sup>分析了阴影对于光伏阵列的影响,并给出了一般化的优化设计方法。文献<sup>[8]</sup>并进一步的讨论了倾角和间距的综合优化方法。这些研究为优化设计的算法上提供了支持。然而,尚未综合考虑到建筑的阴影,未提供计算机辅

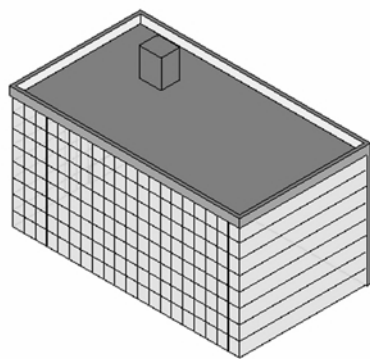
收稿日期:2015-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(61202050);浙江省重大技术专项研究项目(2013C01039);教育部一欧特克公司专业综合改革项目(数字媒体技术)(j0201401)

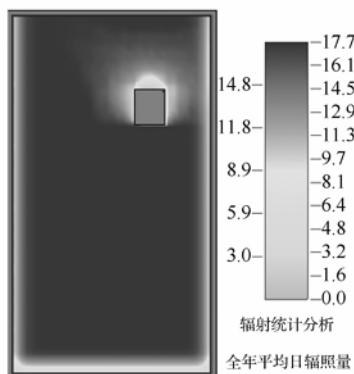
作者简介:桂 宁(1977—),男,湖北武汉人,副教授,主要从事基于 BIM 的新能源建筑仿真、光伏建筑一体化辅助设计平台等方面的研究。

助功能的支持,仍需要大量专家经验,设计周期长,成本高。

本文构建了一个基于 BIM 的光伏设备自动铺设工具,通过对待铺设区域进行阴影分析,自动确定光伏设备的可铺设区域。在阴影辐射分析的基础上,综合考虑区域约束、设备间距、屋顶费用因素,建立单位发电成本最小模型的优化函数,得到优化的光伏阵列间距,构建优化的光伏设备布局方案。该工具已经在 AutoDesk Revit 中实现,通过构建项目坐标系和待铺设区域的模型坐标系进行转换算法,实现了光伏组件的自动化铺设。据笔者查询相关文献资料,尚未发现一款可根据自动化的阴影辐射分析,确定可铺设区域,并实现光伏设备自动优化铺设的软件。



(a) 目标屋顶3D示意图



(b) 全年辐射分析结果

图1 待铺设区域进行阴影分析

同时,由于对于屋顶光伏发电而言,一般来说采用《光伏电站设计规范》根据阵列间距计算公式计算出最佳间距,然后决定铺设方案。这样的设计通常适用于大型光伏电站,因为土地建设成本通常较低。而对于屋顶光伏来说,租用屋顶的成本占据较大的投资比例,必须在充分综合考虑阵列全年时间阴影损耗的情况下,尽可能地提高光伏阵列面积与屋顶面积比,以降低单位发电量成本。此外,在现行的设计流程中,由于光伏设计工具通常与建筑设计工具模型不一,如何将优化的光伏阵列的设计方案集成到建筑模型中成为一个亟待解决的问题。将光伏阵列设计与建筑模型集成的关键问题是如何对基于平、斜和立面的二维坐标系的设计方案在三维的建筑系统模型中进行转换。

为了解决以上问题,本文设计了一套基于建筑信息模型的光伏设备自动优化铺设的软件平台,实现了对于阴影辐射的自动化分析,基于成本的优化

## 1 问题分析

对于光伏系统来说,多数光伏组件安装在建筑屋顶和墙面,时常会受到周围环境,如树木、落叶、光伏组件和周边建筑的遮挡,光伏阵列的输出特性受到很大影响。因此,光伏阵列在设计时必须充分考虑建筑周边环境对于光伏组件排列的影响。如对图 1(a)所示的一个简单的、形状规则的建筑上进行光伏阵列的铺设,必须充分考虑该建筑顶层沿边围墙和建筑顶部的楼梯间对于光伏阵列的影响。图 1(b)是根据前期软件进行阴影辐射分析获得的结果,图片深色区域为未遮挡区域,浅色的为严重遮挡区域。由全年的辐射分析结果可以看出可铺设区域的形状分布较为复杂,单纯人工的分析很难构建优化的解决方案。

方案生成和基于建筑信息模型的自动化的光伏系统构建。

## 2 系统设计

### 2.1 基于 BIM 模型信息光伏系统设计

对于分布式光伏系统来说,多数光伏组件安装在建筑屋顶和墙面,时常会受到周围的树木、落叶、光伏组件和建筑的遮挡。这些光伏阵列周围可被观察到的障碍物的影响一般通过构建合适的模型进行仿真分析。但由于建筑的规模和形状多样,精确的模型构建过程通常非常复杂。

目前的很多建筑使用 BIM 模型进行构建,BIM 模型中已经包含了建筑所有构件的物理信息,如形状、尺寸、位置、材质等,已直接用来指导施工,其也对周边的环境进行了精确建模。由于 BIM 模型的开放性,建筑系统所有的相关属性可以通过一定的编程接口从 BIM 模型中读取。这就为基于 BIM 模

型的阴影辐射计算提供了数据基础。在前期工作<sup>[9-10]</sup>中,已构建了基于BIM的光伏建筑一体化设计分析平台,可直接从BIM中获取几何信息和电气信息。在图1的例子中,可直接通过BIM模型获得建筑外部的精确几何形状,以及任意待铺设表面的几何形状、位置和倾角等信息,这些信息为光伏设计中阴影辐射分析的精确性提供了准确和完整的数据保障。同时,在BIM模型下,已经构建了常用的光伏设备库,该光伏设备库提供了常见的光伏设备的外形、转换效率、倾角等信息。前期工作已经构建了光伏设备库,这使得设计人员可在现有的BIM编辑工具中直接进行光伏系统的设计,也为光伏组件的自动化铺设提供了模型基础。

## 2.2 阴影辐射分析

在准确获得了建筑的三维信息后,可以对任意指定表面接受到的太阳辐射进行精确分析。首先,根据太阳路径构建太阳运动模型,准确计算出任意时刻太阳在三维空间的位置。通常用3个变量可以准确描述太阳的运动模型:赤纬角、太阳高度角和方位角。赤纬角是地球赤道平面与太阳和地球中心的连线之间的夹角。由于地球绕太阳运行造成的现象,它随时间而变,以年为周期,在6月22日达到最大值 $23.45^\circ$ ,12月22日达到最小值 $-23.45^\circ$ 。太阳高度角是指某地太阳光线与通过该地与地心相连的地表切线的夹角。太阳方位角指太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角。其公式表示可参见文献<sup>[11]</sup>。

另外,太阳辐射分为直射光、散射光和漫射光三类。在晴朗的天气下,当光伏组件被遮挡时,只能接收到散射光和漫射光。因此,阴影辐射的分析必须分为有阴影问题 and 无阴影分别讨论。在前期工作中,已经构建了相关的太阳模型,可对指定的任意区域进行阴影辐射分析。这就意味着可精确计算建筑中所有光伏组件在任意时刻的阴影辐射情况<sup>[7]</sup>。

## 2.3 光伏组件的排列设计

根据待铺设表面的阴影辐射情况,提出一种综合考虑阵列受建筑影响的阴影损耗、阵列阴影损耗、屋顶租用成本、光伏阵列可装机容量和总发电量,确定组件的最优的间距和排列,以使得单位电能的静态投资最小。确定计算公式为:

$$C = [PV(\rho) + R] / \{P(\rho, \alpha) * [1 - S(\rho, \alpha)]\} \quad (1)$$

式(1)中: $C$ 为单位电能的静态投资,表示光伏间距;

$PV(\rho)$ 表示在光伏间距为 $\rho$ 下的光伏系统投资; $R$ 代表场地租金; $P(\rho, \alpha)$ 代表在前后排间距为 $\rho$ 、安装倾角为 $\alpha$ 下的年光伏发电量; $S(\rho, \alpha)$ 表示阴影遮挡率。

通过查询《中华人民共和国国家标准:光伏发电站设计规范(GB 50797—2012)》得到所在地相关最优光伏设备安装倾角,选定的杭州地区,纬度为 $30.23^\circ$ ,推荐安装倾角为 $26.23^\circ \sim 33.23^\circ$ 。根据PVsyst分析校验,选定 $30^\circ$ 做为最佳安装倾角。已有的工程实践已经证明,在最佳安装倾角初值附近,倾角的变化对于发电量的影响远小于间距的同等比例变化对于发电量的影响<sup>[8]</sup>。因此,在光伏组件初始分析时使用最优安装倾角作为光伏组件的铺设倾角。由于可铺设面积有限,阵列前后排间距也与单位建设成本有着密切的关系,决定了光伏装机容量、发电量和阴影辐射影响。因此,必须对光伏阵列间距进行调整以优化铺设方案。

### 2.3.1 光伏设备的排间距计算

在阴影分析的结果下,计算光伏阵列的安装间距,一般的确定原则是:冬至日09:00—15:00的时间段内,光伏阵列不应被遮挡。经典排间距可由下列公式计算:

$$\begin{cases} \delta(n) = 23.45 * \sin\left(360 * \frac{n-81}{365}\right) \\ \alpha_{(nt)} = \sin^{-1}(\sin\delta(n)\sin\varphi + \cos\delta(n)\cos\varphi\cos\tau(t)) \\ \mu_{(nt)} = \cos^{-1}(-\sin\varphi\sin\alpha_{(nt)} - \sin\delta(n)/\cos\varphi\cos\alpha_{(nt)}) \\ \rho^0 = H / \tan(\alpha_{(nt)}) * \cos(\mu_{(nt)}) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $n$ 为当年冬至日年积日; $\varphi$ 为建筑信息模型所在的地理纬度;若取冬至日9时 $t$ 为9; $\tau(t)$ 为冬至日9时太阳时角; $\alpha_{(nt)}$ 为冬至日9时太阳高度角;取15时 $t$ 为15, $\tau(t)$ 为冬至日9时太阳时角; $\alpha_{(nt)}$ 为冬至日9时太阳高度角; $\delta(n)$ 为赤纬角; $\mu_{(nt)}$ 为太阳方位角; $H$ 为垂直待铺设区域前排光伏设备或其他遮挡物最高点与后排组件最低位置的高度差。如果光伏设备平放在待铺设区域,前排光伏设备高度为零,则排间距 $\rho$ 为零。

式(2)是在考虑光照情况下的光伏阵列经验间距计算方法<sup>[12]</sup>。由于屋顶光伏中,屋顶投资在项目总投资中占据重要的比例。在设计的时候应该根据屋顶具体情况进行调整。这里设调整系数为 $\theta$ ,调整后光伏阵列间距为 $\rho = L_s * \theta$ 。图2显示了图1所示的屋顶,间距比例与铺设单位面积辐照量和光伏装机容量关系。由图2看出,随着间距比例变小,装机

容量随之逐步上升,但是并不规律,这是由于不规则屋顶对于光伏阵列的影响造成。同时,间距的减小使得单位面积的光伏板的年发电量逐步下降,但也并

不规律。屋顶租金固定,为了使单位电能的静态投资最优,必须选择最优的阵列间距使得单位发电量和装机容量达到最优的组合。

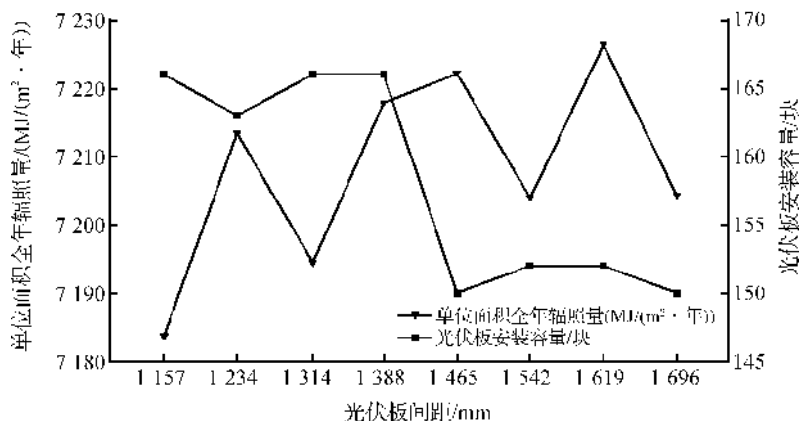


图2 实例屋顶光伏间距与单位面积辐照量和安装容量关系

### 2.3.2 铺设算法设计

铺设算法在设计时原则围绕着以下两大约束和一大目标进行构建:

约束 I: 铺设范围界定约束: 基于对墙体边界条件的分析, 铺设光伏电池组件不应超出辐射分析的有效铺设范围, 即铺设区域的辐照度必须超过一给定阈值;

约束 II: 光伏组件分离约束: 当铺设多块光伏组件时, 各个太阳能电池板需要保证相互独立摆放, 即板与板之间互不交叠。

目标: 构建单位发电量成本最小的光伏阵列的设计方案, 生成算法见图 3。

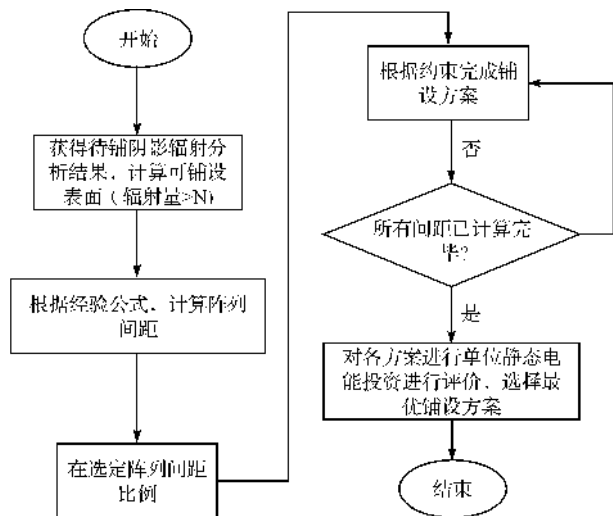


图3 光伏阵列最优铺设方案生成算法

在图 3 中, 对待铺设区域进行阴影辐射分析以确定可铺设区域。在目前的算法中, 阈值被人为确定为  $14.5 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在具体铺设时, 对光伏设备的 4 个角落和长边中间点 (共 6 个点) 进行判断。只有

当这 6 点的辐照度均大于这个阈值时, 光伏板才能在这个区域铺设。否则选择下一可以铺设区域, 在选择的过程中按照光伏典型的横排的策略进行寻找。在所有给定的光伏间距比例下的铺设方案生成后, 对各个方案的单位静态投资进行测算, 包括对铺设的光伏板进行阴影辐射分析, 获得其装机容量、年辐照度和年发电情况。通过综合屋顶租金, 计算各个铺设方案下的单位电能的静态投资, 然后选择最优的间距比例和铺设方案。

### 2.4 自动铺设

在光伏建筑中, 通常一个系统对于所有的元件用统一的 XYZ 三维笛卡尔坐标系来进行描述。然而, 在光伏设备的铺设过程中如果仅仅根据项目坐标系 XYZ 很难直接判断该光伏设备当前位置是否位于待铺设区域边界内, 也很难计算面上光伏设备间相对的间距。为了实现光伏阵列方案的自动铺设, 采用了基于铺设表面的 UVW 坐标系对待铺设元件进行边缘检测, 铺设表面辐射量检测和重叠检测计算。在具体铺设时, 通过将光伏设备在 UVW 坐标系中的坐标  $(u, v, w)$  转化为项目 XYZ 坐标系中的坐标  $(x, y, z)$ , 实现自动铺设。

将 UVW 坐标系转换为 XYZ 坐标系, 利用如下公式将坐标  $(u, v, w)$  转换为坐标  $(x, y, z)$ :

$$R(\epsilon_U) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon_U & \sin \epsilon_U \\ 0 & -\sin \epsilon_U & \cos \epsilon_U \end{bmatrix},$$

$$R(\epsilon_V) = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_V & 0 & -\sin \epsilon_V \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \epsilon_V & 0 & \cos \epsilon_V \end{bmatrix},$$

$$R(\epsilon_W) = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_W & \sin \epsilon_W & 0 \\ \cos \epsilon_W & \sin \epsilon_W & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R(\epsilon) = R(\epsilon_W) * R(\epsilon_V) * R(\epsilon_U),$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + (1+m) * R(\epsilon) * \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}.$$

其中:UVW坐标系原点 $O_2$ 在XYZ坐标系的坐标为; $\epsilon$ 为UVW坐标系转换为XYZ坐标系的三个旋转参数,分别为在转换过程中绕U轴、V轴、W轴旋转得到的欧勒角。图4显示了一个坐标转化的实例。其中A、B两块光伏板在斜面上进行铺设。

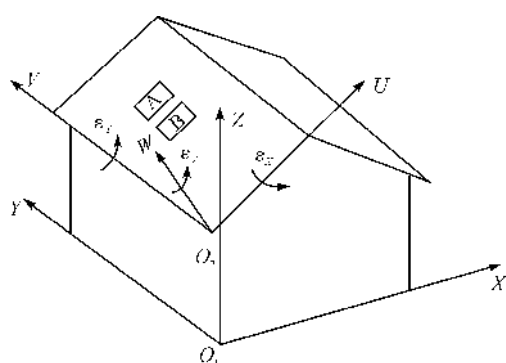


图4 基于UVW坐标系的坐标计算及XYZ坐标系转换

图4中一个坐标转化的实例。图4中, $O_1$ 为XYZ坐标系原点(0,0,0); $O_2$ 为UVW坐标系原点,在XYZ坐标系的坐标为(-500,-500,4000);该实例屋顶角度为 $45^\circ$ ;其中有A、B两块光伏板在斜面上进行铺设。在坐标系转换过程中,可得。A点(u,v,w)坐标为(1200,3492,0),经过公式转换为(x,y,z)坐标(348.52,2992,4848.52);如需在离A光伏板300mm的位置铺设B光伏板,由于光伏板的宽度为992mm,可由A点坐标简单计算出B点(u,v,w)坐标为(1200,1700,0),将其坐标转换为(x,y,z)坐标(348.52,1700,4848.52),在此点进行光伏板B的铺设。

### 3 系统实现与案例分析

本系统已经在AutoDesk公司的BIM软件Revit下开发并实现。Revit是BIM软件中的主流应用,为第三方开发人员提供了SDK和基于插件的扩展支撑。阴影辐射分析是利用了笔者的前期工作成果。为了验证本系统,对图1所示的建筑表面形成了光伏设备的自动化铺设方案。同时,作为对比,邀请光伏设计人员根据经验完成人工设计方案。将两方案在设计速度、装机容量、光伏设备年辐射量、光伏系统总投资和单位发电量投资等方面进行了对比。这里屋顶光伏组件采用265W单晶光伏组件,规格为1650mm×992mm,转换效率为16.5%。辐射量与发电量的转换中取天气因数和设备及线路损耗因素为0.55。屋顶的租金设定为10万元/20年。

图5(a)显示了人工设计的方案,图5(b)显示了本工具自动生成的方案。可以看出,人工铺设的方案,其对电梯间的影响的估算略有偏差,导致其在一定时间被部分遮挡,其部分区域的辐射量在 $13.3 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。

另外,其间距采用了冬至日上午9时不遮挡进行计算,光伏间距通过工具计算得到为1542mm,这导致其铺设的光伏板数量较少。如图5(a)所示,其光伏板只能排列10排,光伏板数量为152块。年发电收益为66009元。根据图2显示辐射量与间距比例之间的关系,也显示了不同间距比例和装机容量的关系,优化算法选择了间距比例为0.9进行铺设,间距为1388mm。图5(b)显示了自动铺设的结果,可以看出安装块数为166,增加了10.6%,年发电收益72228元,比人工铺设的提升了10.4%。表1显示了其他各项数据的对比情况。可以看出设计的方案在单位发电量投资和静态收益率等方面都优于传统的人工设计的方式,其中单位发电量投资降低了1.80%,静态投资回收期降低了0.91%。尽管工具要进行大量的阴影辐射分析,在一台I5的电脑,内存8G的台式机上需要约20min分析时间,但是比较人工铺设的速度上也有着明显的优势。

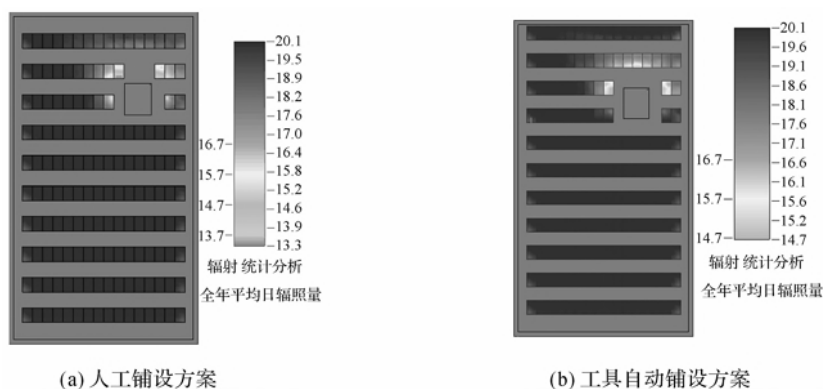


图5 人工铺设与自动铺设结果

表1 人工铺设和工具自动铺设对比

方案	设计时间 /min	间距/mm	装机容量 /块	总投资/元	年发电 收益/元	单位发电量投 资/(元/(kW·h))	静态投资回 报期/年
人工铺设	120	1542	152	502800	66009.14	0.556	6.60
工具自动铺设	20	1388	166	539900	72228.67	0.546	6.54

#### 4 结 语

为了解决复杂建筑表面的光伏阵列铺设优化问题,提供了基于建筑信息模型(BIM)的光伏设备自动铺设工具。基于阴影辐射分析,获得优化的光伏设备的可铺设区域,综合考虑区域约束、设备间距、屋顶费用因素,构建了相应优化铺设算法,获得单位发电成本最低的光伏阵列铺设方案,本工具已在现有的 BIM 工具中开发和部署完毕。对比实验结果表明本工具设计方案使光伏阵列在避免了阴影影响的同时,实现了太阳能光伏组件的科学化布置,降低了单位电能的静态投资和投资回报期。同时,计算机辅助设计的引入极大地降低了光伏设备方案设计工作量,提高了分布式光伏设计工程化水平,具有广泛的应用前景。

本工具中使用的光伏倾角是以捕获辐射量最优确定的倾角方案,目前正在综合考虑光伏阵列的倾角、间距、装机容量的优化算法<sup>[13]</sup>,以实现更低的单位发电量静态投资。同时,也在对光伏阵列受到部分阴影遮挡的情况下的光伏发电模型进行整理,以更准确地反映阴影遮挡对于发电量的影响,以利于以后的进一步优化设计。

#### 参考文献:

- [1] 张立文,张聚伟,田葳,等. 太阳能光伏发电技术及其应用[J]. 应用能源技术,2010(3):4-8.
- [2] 肖景良,徐政,林崇,等. 局部阴影条件下光伏阵列的优化设计[J]. 中国电机工程学报,2009(11):119-124.
- [3] EVINS R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,22:230-245.
- [4] CONNOLLY D, LUND H, MATHIESEN B V, et al. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems[J]. Applied Energy,2010,87(4):1059-1108.
- [5] 麦燕妹. 浅谈绿色建筑中光伏建筑一体化系统(BIPV)设计及应用[J]. 中国住宅设施,2014(3):92-95.
- [6] 周笛青,吴春华,李智华,等. 局部阴影下光伏组件建模及输出特性研究[J]. 太阳能学报,2014(11):2098-2105.
- [7] CELIK B, KARATEPE E, SILVESTRE S, et al. Analysis of spatial fixed PV arrays configurations to maximize energy harvesting in BIPV applications[J]. Renewable Energy,2015,75:534-540.
- [8] 叶任时,刘海波,李德,等. 光伏组件倾角和阵列间距的多因素综合计算方法[J]. 人民长江,2015(5):39-42.
- [9] 何侃,桂宁,裘智峰,等. 基于 BIM 的光伏建筑集成化设计与分析平台[J]. 建筑节能,2016(1):26-32.
- [10] 林奔,桂宁,董彦松,等. 基于 BIM 的接地网系统设计与电气仿真[J]. 浙江理工大学学报,2016,35(2):257-264.
- [11] Anon. Properties of sunlight[EB/OL]. [2014-12-19]. <http://pveducation.org/>.
- [12] 吴永忠,邹立珏. 光伏电站太阳能电池阵列间距的计算[J]. 能源工程,2011(1):39-40.
- [13] 李云,章毅,黄阳. 基于多目标混合整数规划模型的光伏发电系统优化设计[J]. 硅谷,2013(16):19-22.

## Research on Automatic Optimization and Laying of BIM-Based PV Equipment

GUI Ning<sup>1</sup>, DONG Yansong, JIANG Mimin, LI Junnan

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** With the fast development of distributed PV technology, more and more PV systems are deployed within building systems with complex environments. Since the power generation capacity of PV system is highly affected by surroundings, buildings and other numerous factors, without the support of relevant computer-aided tools, it results in complex design process, high cost and low PV system efficiency in traditional PV building design based on expert advices. This paper proposes an automatic laying tool for BIM-based PV equipment and correctly analyzed the shade and radiation by using the BIM information; then, a laying algorithm was designed to determine the best array pitch and layout base on the optimization function with the target of maximization of unit cost benefit; in addition, the laying and deployment of PV boards were automatically conducted in the BIM. This tool was applied to a practical roof PV laying case. Results show that, compared with the PV design of laying by men, th it increases by 500% of design efficiency, increases by 10.4% of radiation quantity and decreases by 0.91% in the period of investment return.

**Key words:** building information model; BIM; distributed PV; radiation analysis; automatic laying  
(责任编辑: 陈和榜)