

基于遥感核AI图像的建筑物顶光伏资源潜在容量估计

马永, 王俊, 张子健, 周明, 徐敏

(国网安徽省电力有限公司信息通信分公司, 安徽 合肥 230041)

摘要: 提出遥感核AI图像的建筑物顶光伏资源潜在容量估计方法。以建筑遥感核AI图像为基础, 依据属性滤波理论提取遥感核AI图像内建筑物斑块, 利用最小二乘模板匹配方法获取建筑物层顶外轮廓拐角点并连接, 识别到建筑物层顶外轮廓; 同时设置层顶光伏潜在容量估计指标与划分指标等级后, 依据建筑物层顶外轮廓计算建筑物层顶总面积、太阳能光伏面积, 并对光伏潜在容量实施量化与细化后, 与层顶光伏潜在容量估计指标作对照, 得到层顶光伏潜在容量估计结果。实验表明: 方法具备较为准确的建筑物层顶识别能力, 并可有效估计层顶光伏潜在容量的丰度、可利用度等, 应用效果显著。

关键词: 高分卫星; AI图像; 潜在容量估计

中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)02-0140-05

Potential Capacity Estimation of Photovoltaic Resources on Buildings Roof Based on Remote Sensing Nuclear AI Images

MA Yong, WANG Jun, ZHANG Zi-jian, ZHOU Ming, XU Min

(State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Information & Telecommunication Branch, Hefei 230041 China)

Abstract: A method for estimating the potential capacity of PV resources on the roof of buildings based on remote sensing nuclear AI images is proposed. Based on the building remote sensing core AI image, the building patches in the remote sensing core AI image are extracted according to the attribute filtering theory, and the corner points of the outer contour of the building top are obtained and connected using the least square template matching method, and the outer contour of the building top is recognized. At the same time, after setting the estimation index of rooftop photovoltaic potential capacity and dividing the index grade, the total rooftop area and solar photovoltaic area of the building are calculated according to the outer contour of the building's rooftop, and the photovoltaic potential capacity is quantified and refined, and compared with the estimation index of rooftop photovoltaic potential capacity, the estimated result of rooftop photovoltaic potential capacity is obtained. The experiment shows that the method has relatively accurate identification ability of building roof, and can effectively estimate the abundance and availability of the potential photovoltaic capacity on the roof, and the application effect is significant.

Keywords: high resolution satellite; AI image; potential capacity estimation

0 引言

“绿色能源”理念的普及,使各个国家均专注于开发风能、水能、太阳能等可再生资源,其中太阳能资源在全世界范围内最为丰富^[1-2],其不受地域、位置等影响,加以合理利用可持续为用户带来充足的电能。但不同区域的太阳能光伏资源也存在一定差异,在利用光伏资源发电时,需充分考虑地区的光伏资源潜在容量情况^[3]。因此很多学者提出了光伏潜在容量估计方法,如袁建刚等人提出的太阳能资源信息评估方法^[4],该方法以ArcGIS平台为基础,通过计算区域建筑物屋顶日照时间长度、太阳光辐射量和光伏发电量实现屋顶光伏资源潜在容量估计。但该方法受区域建筑物分布形态影响,导致其估计结果

不够准确,因此应用效果不佳。王光辉等人提出分布式光伏建设潜力分析方法^[5],该方法提取利用高分卫星拍摄的地面遥感图像为基础,通过提取建筑群特征后,计算建筑群的屋顶面积,并计算其光伏资源潜在容量。但该方法计算建筑群面积时受遥感图像内存在的干扰噪声影响,获取的建筑群屋顶面积存在误差,估计光伏资源潜在容量存在偏差。

自本世纪初,我国先后发射多颗高分遥感卫星,遥感技术成熟度逐渐提升,也获得了较多的地域遥感核AI图像。遥感核AI图像内具备较大的信息量,其可应用在交通、勘测、军事等多个领域^[6]。针对当前屋顶光伏资源潜在容量估计存在的问题,本文以高分卫星遥感核AI图像作为区域建筑屋顶信息来源,提出高分卫星遥感核AI图像识别的层顶光伏潜在容量估计方法,为未来光伏资源的利用提供有效的指导。

*基金项目:安徽省科学技术研究项目(202063585)

收稿日期:2023-08-03

1 层顶光伏潜在容量估计方法

1.1 建筑物层顶识别方法

利用我国高分二号卫星遥感核AI图像为基础,经过图像处理技术与计算层顶面积等方式实现层顶光伏潜在容量估计。迄今为止我国共发射6颗高分遥感卫星,其中高分二号卫星属于空间分辨率高于1 m的民用光学遥感卫星。该卫星搭载两台高分辨率、多光谱相机,用于拍摄地面遥感核AI图像^[7-8]。目前高分二号遥感卫星为民用陆地观测、国土资源等多个部门提供示范性应用服务。

1.1.1 基于属性滤波的遥感核AI图像建筑物斑块提取

利用高分二号卫星拍摄到地面图像后,依据属性滤波理论提取地面图像内的建筑物层顶斑块,详细过程如下:

I 表示地面遥感核AI图像, d 为该图像上的任意像素点, D 表示像素点 d 的连通域。对像素点 d 位置实施开变换处理,计算式如下:

$$\Gamma_d(I) = \begin{cases} D, & d \in D \\ \emptyset, & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\Gamma_d(I)$ 表示像素点 d 联通开变换符号。

对式(1)添加属性属性约束,则得到连通域的属性开变换,表达式如下:

$$\Gamma_r(D) = \begin{cases} D, & T(D) > \lambda \\ \emptyset, & T(D) \leq \lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中, T 表示属性约束; λ 表示属性门限值; $T(D)$ 表示连通域 D 的任意属性。

依据式(1)、式(2)结果,对地面遥感核AI图像实施属性开变换,表达式如下:

$$\Gamma^T(I) = \bigcup_{d \in I} \Gamma_r[\Gamma_d(I)] \quad (3)$$

式中, $\Gamma^T(I)$ 表示地面遥感核AI图像属性开变换结果。

利用阈值分解理论将式(3)结果的属性转换成灰度,即对地面遥感核AI图像进行阈值化,得到其二值图像,其表达式如下:

$$(Th_d(I))(d) = \begin{cases} 1, & I(d) > k \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $Th_d(I)$ 表示地面遥感核AI图像的二值图像; k 表示像素点总数。

对该式结果内灰度最大的地面遥感核AI图像 I 进行属性开变换 $Y^T(I)$,表达式如下:

$$(Y^T(I))(d) = \max \{k : d \in \Gamma^T[Th_k(I)]\} \quad (5)$$

由式(5)可知,对内灰度最大的地面遥感核AI图像 I 进行属性开变换就是为该图像上的每一个像素点添加一

个最大的门限值,依据该门限值,可判断像素点是否属于前景联通量以及该像素点是否属于某个连通域属性^[9-10]。同理,按照地面遥感核AI图像内像素点连通域的互补性^[11-12],也可对灰度最大的地面遥感核AI图像 I 进行属性闭变换,表达式如下:

$$(\varphi^T(I))(d) = \max \{k : d \in \Psi^T[Th_k(I)]\} \quad (6)$$

式中, $\varphi^T(I)$ 表示灰度最大的地面遥感核AI图像 I 进行属性闭变换结果; Ψ^T 表示地面遥感核AI图像的二值图像属性闭变换。

令表示地面遥感核AI图像 I 内任意像素点 d 的属性门限值 T_λ ,以式(5)、式(6)结果作为基础,对地面遥感核AI图像 I 内任意像素点 d 的属性实施开变换和闭变换后,得到该像素点 d 的开剖面和闭剖面,表达式如下:

$$\prod(Y^T(I))(d) = \left\{ \prod Y^{T_\lambda} \right\} \quad (7)$$

$$\prod(\Psi^T(I))(d) = \left\{ \prod \Psi^{T_\lambda} \right\} \quad (8)$$

式中, $\prod(Y^T(I))(d)$ 、 $\prod(\Psi^T(I))(d)$ 分别表示像素点的开剖面和闭剖面。

将式(7)、式(8)结果的相邻项做差分处理,即可得到像素点 d 的差分属性剖面,计算式如下:

$$\Delta I(d) = \Delta_i I(d) : \left\{ \begin{array}{l} \prod(\Psi^{T_\lambda}(I))(D) - \prod(\Psi^{T_{\lambda-1}}(I))(D), \\ \lambda = (n-i+1) \\ \prod(Y^{T_{\lambda-1}}(I))(D) - \prod(Y^{T_\lambda}(I))(D), \\ \lambda = (i-n) \end{array} \right. \quad (9)$$

式中, $\Delta I(d)$ 表示像素点 d 的差分属性剖面。

以式(9)结果作为基础,以建筑层顶面积、对角线与转动惯量作为主要属性,对地面遥感核AI图像实施滤波处理后,即可得到遥感核AI图像内建筑物斑块。

1.1.2 建筑物层顶外轮廓提取

以得到的遥感核AI图像内建筑物斑块为基础,结合最小二乘模板匹配算法提取建筑物屋顶外轮廓,其详细过程如下:

(1) 获取遥感核AI图像内建筑物斑块的拐角点。建筑物斑块的拐角点是层顶存在的直接证据^[13],依据该拐角点可充分描述建筑物层顶大小以及分布形状。在此利用Harris算子检测方式提取遥感核AI图像内建筑物斑块内所有角点。

(2) 利用最小二乘模板匹配方式剔除遥感核AI图像内建筑物斑块内所有角点内的非拐角点。

(x, y) 表示最小二乘模板点坐标, Δx 、 Δy 分别表示拐角点在 X 、 Y 两个方向上的移动距离, (X, Y) 表示遥感核AI图像内建筑物斑块内角点的窗口点,其计算式如下:

$$\begin{cases} X = \Delta x + x \cos w - y \sin w \\ Y = \Delta y + x \sin w - y \cos w \end{cases} \quad (10)$$

式中, w 表示最小二乘模板和遥感核 AI 图像之间的旋转角度。

$U(x, y)$ 表示遥感核 AI 图像窗口, $f(x, y)$ 表示最小二乘模板, 对式(10)进行线性化处理, 则有:

$$f(x, y) - e(x, y) = U^0(x, y) + U_x \Delta x + U_y \Delta y + [U_y(x \cos w - y \sin w) - U_x(x \cos w + y \sin w)] \quad (11)$$

式中, $e(x, y)$ 表示拐角点误差; $U^0(x, y)$ 表示与模板相对应的遥感核 AI 图像窗口内像素的光谱数值; U_x 、 U_y 分别表示各自方向上的梯度值。

以矩阵的形式描述式(11), 如下:

$$\begin{cases} -e = Z\hat{x} - l \\ P = I \end{cases} \quad (12)$$

式中, P 表示权值矩阵, 默认为单位矩阵 I ; \hat{x} 表示改正值矩阵; $-e$ 表示拐角点误差矩阵; Z 表示梯度矩阵; l 表示遥感核 AI 图像内建筑斑块的光谱矩阵。

令 α 、 $\alpha+90$ 均表示最小二乘模板匹配时遥感核 AI 图像内建筑斑块的主方向, 设置拐角点移动距离的初始值如下:

$$\begin{cases} \Delta x = X_i - x \\ \Delta y = Y_i - y \end{cases} \quad (13)$$

ρ 表示最小二乘模板 g 与遥感核 AI 图像局部建筑斑块 f 的相关系数, 其计算式如下:

$$\rho = \frac{\sum fU - \sum f \sum U / \zeta^2}{\sqrt{\sum UU - \sum U \sum U / \zeta^2} * \sqrt{\sum ff - \sum f \sum f / \zeta^2}} \quad (14)$$

式中, r 表示像素像元。

依据式(13)的拐角点移动距离初始值, 用式(10)对其进行几何畸变修正处理, 再利用式(11)计算下一次图像匹配窗口后, 用式(14)计算图像匹配后的相关系数, 同时设置相关系数阈值为 0.75, 当式(14)数值高于 0.75 时, 将该图像匹配窗口内的拐点看作建筑物层顶轮廓上的角点, 反之则删除该角点。经过上述步骤得到建筑物层顶轮廓上的角点, 并将其连接后, 识别到完整的高分卫星遥感核 AI 图像内建筑物层顶轮廓。

1.2 层顶光伏潜在容量估计过程

以高分卫星遥感核 AI 图像内建筑物层顶轮廓信息为基础, 评估建筑物层顶光伏潜在容量。在评估之初需设置层顶光伏潜在容量估计指标标准。

(1) 估计指标标准设置。以光伏潜在容量的丰度、稳定度与可利用度作为估计指标, 依据阈值划分其等级, 如表 1 所示。

(2) 计算层顶总面积。依据遥感核 AI 图像内建筑物层顶轮廓, 计算建筑物层顶的占地面积。 Q_t 表示建筑占地面积

和层顶面积的比值关系, 则建筑物层顶总面积计算式如下:

$$B_{roof} = Q_t * \rho_{BD} * B_{land} \quad (15)$$

表 1 建筑物层顶光伏潜在容量估计指标与等级划分

估计指标	等级	表示符号	划分标准
丰度	一般	I	太阳总辐射量大于 1 800
	丰富	II	太阳总辐射量位于 1 000-1 800 之间
	非常丰富	III	太阳总辐射量大于 1 000
稳定度	不稳定	I	稳定程度系数大于 3.8
	较稳定	II	稳定程度系数位于 1.8-3.8 之间
	非常稳定	III	稳定程度系数低于 1.8
可利用度	直接辐射较多	I	光照直射比位于 0.5-0.6 之间
	散射辐射较多	II	光照直射比位于 0.3-0.5 之间

式中, B_{roof} 表示遥感核 AI 图像内建筑物层顶总面积; ρ_{BD} 表示遥感核 AI 图像内建筑物层顶密度; B_{land} 表示实际建筑占地面积, 通常建筑占地面积与建筑物层顶面积呈 1:1 关系。

(3) 计算太阳能光伏面积。 η 表示阳光照射下建筑阴影比例, 依据式(15)结果, 太阳能光伏面积计算式如下:

$$B_{pv} = B_{roof_h} - \eta * \sin \alpha * B_{roof_l} \quad (16)$$

式中, B_{pv} 表示太阳能光伏面积; α 表示太阳高度角; B_{roof_h} 、 B_{roof_l} 分别表示高层与低层建筑屋顶总面积。

(4) 光伏潜在容量估计细化与量化。层顶光伏潜在容量相关参数计算是针对太阳辐射强度得到的, 太阳辐射强度又被划分为直接辐射与散射辐射。 R_0 表示日天文辐射, R_b 表示光伏潜在容量的直接辐射量, 其计算式如下:

$$R_b = a_s R_0 + b_s \frac{nR_0}{N} \quad (17)$$

式中, a_s 表示大气状况参数; b_s 表示太阳赤纬变换参数; $\frac{n}{N}$ 表示日照百分率。

在晴天状况下, 光伏潜在容量弥散辐射计算式如下:

$$R_d = Q_{diffuse} * R_b \quad (18)$$

式中, R_d 表示光伏潜在容量弥散辐射量; $Q_{diffuse}$ 表示弥散辐射比例。

当阳光位于极点时, 建筑物层顶光伏潜在容量的总量计算式如下:

$$R_{tot} = R_d + R_b \quad (19)$$

将式(17)、式(18)结果代入到式(19)内, 即可得到在已知太阳日照时间和建筑物层顶光伏面积情况下, 其层顶接收的太阳能总量, 将该数值与层顶光伏潜在容量指标等级作对比后, 得到层顶光伏潜在容量估计结果。

2 仿真实验

以我国北方某一城市为实验对象, 该城市占地面积约为 3 023 平方公里, 其中市区面积约为 2 114 平方公里, 该城市历史悠久, 人口众多, 但城市内建筑年限相对较长, 且建筑物分布较为分散, 为光伏利用带来了一定难

度。为大力推动该城市光伏利用程度,使用高分二号卫星拍摄该城市建筑遥感核AI图像,使用本文方法估计该城市建筑层顶光伏潜在容量,分析本文方法应用效果,同时为该城市光伏能源利用提供科学依据。

2.1 遥感核AI图像建筑物斑块提取测试

以一组照度不足的该市某区域遥感核AI图像为实验对象,使用本文方法提取其建筑物斑块,并与文献[4]方法和文献[5]方法进行对比,不同方法的提取结果如图1所示。分析图1可知,使用本文方法提取该市某区域检出屋顶斑块与其实际建筑物集群分布形态相同,且位置也相同。使用两种文献方法提取该市某区域检出屋顶斑块与其实际建筑物集群分布形态相差较大,部分建筑物位置不相同。说明本文方法提取遥感核AI图像建筑物斑块能力较好,可为后续层顶光伏潜在容量估计打下良好的基础。

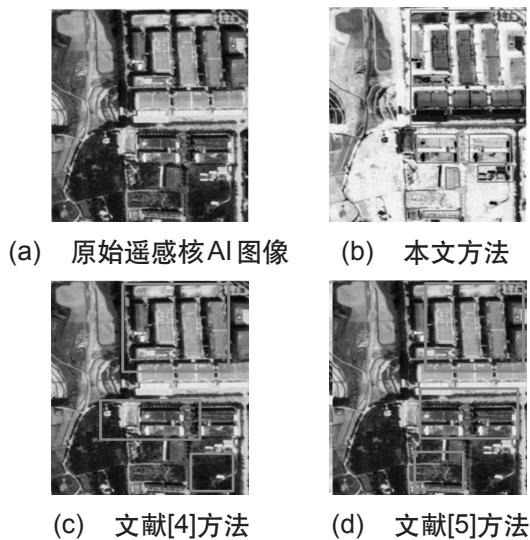


图1 遥感核AI图像建筑物斑块提取结果

2.2 建筑物层顶外轮廓提取测试

以提取建筑物层顶拐角点数量作为衡量指标,测试本文方法在遥感核AI图像内像素点数量不同情况下,提取建筑层顶拐角点个数,并与其实际个数进行对比分析,同时设置提取建筑物层顶拐角点精度阈值不得超过5%。测试结果如表2所示。分析表2可知,当遥感核AI图像内像素点数量越来越多时,本文方法提取建筑层顶拐角点

个数与实际拐角点个数之间的差值也越来越大。在像素点为4 000个之前时,本文提取建筑物层顶拐角点的精度为100%。当遥感核AI图像内像素点数量增加到20 000个时,本文方法提取的建筑物层顶拐角点精度为98.01%。该结果表明:本文方法提取建筑物层顶轮廓能力较强,也从侧面说明本文方法估计建筑物层顶潜在光伏效果较好。

表2 建筑物层顶拐角点数量提取结果

像素点/个	提取拐角点/个	实际拐角点/个
2 000	46	46
4 000	117	117
6 000	300	308
8 000	499	512
10 000	892	917
12 000	992	1 023
14 000	1 503	1 547
16 000	2 140	2 199
18 000	2 951	3 016
20 000	3 454	3 524

2.3 层顶光伏潜在容量估计测试

以选取指标贡献度作为衡量本文方法估计层顶光伏潜在容量能力,测试本文方法选取的建筑物层顶光伏潜在容量估计指标的贡献度,结果如图2所示。分析图2可知,两种文献方法选取的估计层顶光伏潜在容量指标的贡献度数值位于0.89–0.92之间,而本文方法选取的估计层顶光伏潜在容量指标的贡献度数值位于0.94–0.97之间,该数值说明本文方法选取估计层顶光伏潜在容量指标的效度较强,每个指标均可作为独立比较规则用来衡量层顶光伏潜在容量。该结果也表明本文方法估计的层顶光伏潜在容量结果较为准确。

以该市某一区域建筑为实验对象,使用本文方法估计其潜在光伏资源的丰度、稳定度和可利用度,结果如图3所示。分析图3可知,本文方法估计的该区域建筑层顶丰度等级为III,其光伏潜在容量非常丰富,该区域建筑层顶潜在可利用度为直接辐射较多,其原因在于该市位于北方,北方气候较为干燥晴朗天气较多,因此该区域建筑层顶接收到的太阳光照射时间长,在无遮挡情况下建筑层顶阳光属于直接照射情况,其潜在光伏容量较为丰

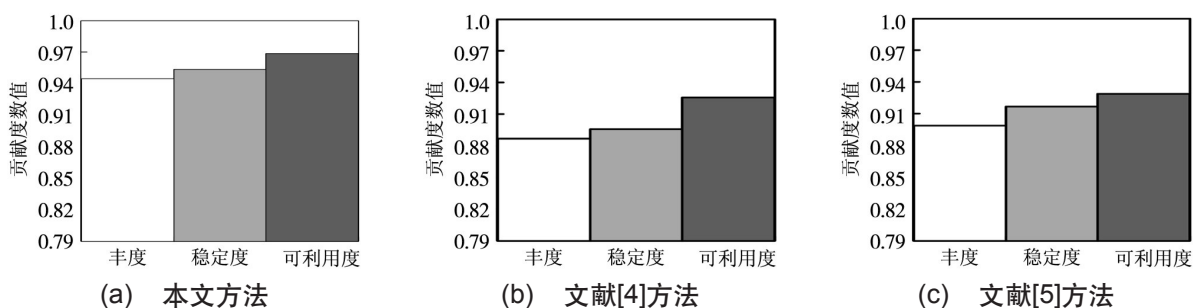


图2 层顶光伏潜在容量估计指标选取测试结果

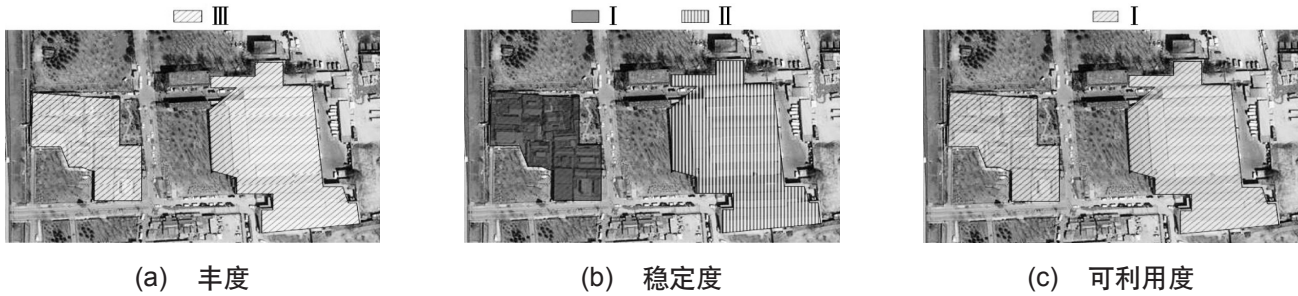


图3 建筑层顶光伏潜在容量估计结果

富。而该区域潜在光伏资源的稳定度在A区域与B区域存在差别,其中B区域的层顶光伏潜在容量稳定性高于A区域,因为B区域层顶占地面积较大,其接收阳光辐射的面积也较大,因此该区域层顶光伏潜在容量稳定性较好。综上结果:本文方法可有效估计建筑层顶潜在光伏容量的稳定性、丰度以及可利用度,应用效果较好。

2.4 建筑物的光谱特征测试

光谱特征是指目标源红外辐射在电磁频谱上的分布。不同的目标源由于辐射过程的不同而呈现的光谱分布也会不同。因此,利用本文方法以建筑遥感核AI图像为基础,依据属性滤波理论提取遥感核AI图像内建筑物斑块,判别其光谱特征,屋顶与其他物体的光谱值比较图如图4所示。由图4可知,横坐标表示为波段,纵坐标表示为光谱值,利用本文方法可有效提取遥感核AI图像建筑物斑块。

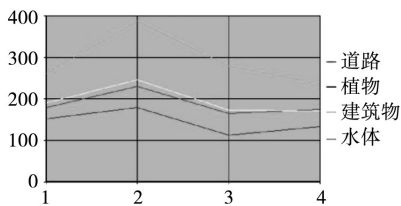


图4 屋顶与其他物体的光谱值比较图

3 结束语

本文提出高分卫星遥感核AI图像识别的层顶光伏潜在容量估计方法,并对本文方法进行了多角度验证。从验证结果得知本文方法具备较好的层顶光伏潜在容量估计效果。可将本文方法应用在城市光伏资源开发过程中,为城市绿色发展奠定一定基础。但本文研究也存在不足之处,如并未对高分卫星遥感核AI图像进行清晰化预处理,其对估计层顶光伏潜在容量存在一定影响,但在实际应用中,本文方法切实可行。

参考文献:

- [1] 路志英,周庆霞,李鑫,等.基于地基云图图像特征的光伏功率预测[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(8):70-76.
- [2] 邓景松,王英民,孙迪飞,等.基于配电网电流保护约束的分

布式光伏电源容量分析[J].电工技术学报,2019,34(S2):629-636.

[3] 潘军,吴红斌,许道强,等.光伏/电动汽车/负荷博弈的屋顶光伏容量优化[J].电力系统自动化,2019,43(1):186-193.

[4] 袁建刚,高旭娜,陈建,等.城市建筑利用太阳能资源信息评估系统设计[J].扬州大学学报(自然科学版),2020,23(4):37-41.

[5] 王光辉,唐新明,张涛,等.全国建筑物遥感监测与分布式光伏建设潜力分析[J].中国工程科学,2021,23(6):92-100.

[6] 胡亚男,李兴华,郝玉珠.内蒙古太阳能资源时空分布特征与评估研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(12):132-138.

[7] 吴茂刚,余亚梅,许瑞华,等.向量代数在固定和跟踪平面太阳能计算中的应用[J].光学学报,2021,41(15):62-74.

[8] 郝波,卢小平,李成名,等.高分二号卫星遥感影像控制点自动提取[J].测绘科学,2020,45(8):110-114.

[9] 范自柱,王松,张泓,等.基于W-Net的高分辨率遥感卫星图像分割[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(12):114-124.

[10] 王艳恒,高连如,陈正超,等.结合深度学习和超像元的高分遥感影像变化检测[J].中国图象图形学报,2020,25(6):1271-1282.

[11] 李建林,方知进,谭宇良,等.电化学储能系统在整县制屋顶光伏中应用前景分析[J].太阳能学报,2022,43(4):1-12.

[12] 孙英君,崔信国,元伟,等.激光雷达数据的建筑物光伏潜力评估[J].测绘科学,2019,44(7):147-151.

[13] 朱晓荣,刘亚维.基于模糊综合评判的光伏阵列状态评估[J].太阳能学报,2020,41(11):103-111.

作者简介:马永(1989-),男,硕士,高级工程师,研究方向:云平台技术运维。