

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2014 年 12 月 4 日 (04.12.2014)



(10) 国际公布号
WO 2014/190651 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06Q 10/04 (2012.01) *G06Q 50/06* (2012.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2013/084700
- (22) 国际申请日: 2013 年 9 月 30 日 (30.09.2013)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201310215543.0 2013 年 5 月 31 日 (31.05.2013) CN
- (71) 申请人: 国家电网公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。 中国电力科学研究院 (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。
- (72) 发明人: 陈志宝 (CHEN, Zhibao); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 程序 (CHENG, Xu); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 周海 (ZHOU, Hai); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 丁杰 (DING, Jie); 中国北京市海淀区清河

小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 朱想 (ZHU, Xiang); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 王知嘉 (WANG, Zhijia); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 彭佩佩 (PENG, Peipei); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 江星星 (JIANG, Xingxing); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 何洁琼 (HE, Jieqiong); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 孙檬檬 (SUN, Mengmeng); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。

(74) 代理人: 北京安博达知识产权代理有限公司 (AMBOYNA INTELLECTUAL PROPERTY AGENT CO.,LTD.); 中国北京市海淀区大钟寺 13 号院 1 号楼华杰大厦 B215 号, Beijing 100098 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA,

[见续页]

(54) Title: PHOTOVOLTAIC POWER PREDICATION METHOD BASED ON GROUND-BASED NEPHOGRAM

(54) 发明名称: 一种基于地基云图的光伏功率预测方法

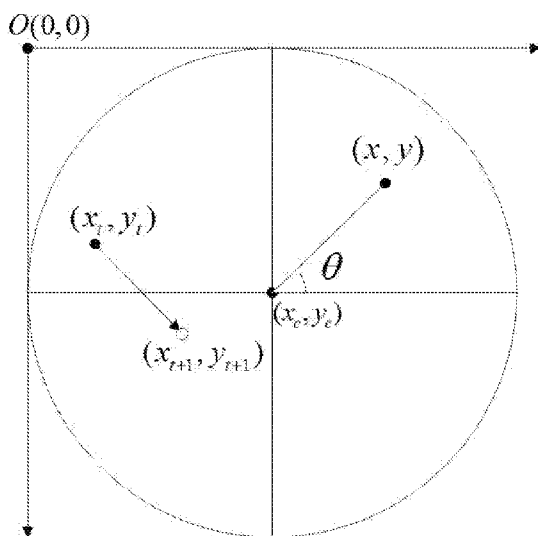


图 7 / FIG. 7

(57) Abstract: Provided is a photovoltaic power predication method based on a ground-based nephogram, comprising the following steps: step 1, estimating the movement of a cloud cluster; step 2, predicating ground irradiance; step 3, establishing a comprehensive photoelectric conversion model; step 4, predicating photovoltaic power. The present invention comprehensively utilizes a variety of digital image processing technologies, highlights the demands of problems, has strong relevance and practicality, and, in combination with a conventional statistical approach, provides effective technical support and methodological reference for refined predication of photovoltaic power. In addition, the present invention establishes a model in multiple steps by considering a plurality of factors, and the description of the method covers all key aspects of the field of photovoltaic predication, thus having good universality and robustness. The present invention reserves adjustment parameters for some aspects for specific application scenarios and application objects in use, thus facilitating operation and ensuring predication effect.

(57) 摘要: 本发明提供一种基于地基云图的光伏功率预测方法, 包括以下步骤: 步骤 1: 云团运动预估; 步骤 2: 对地面辐照度进行预测; 步骤 3: 建立综合光电转换模型; 步骤 4: 进行光伏功率预测。本发明综合运用多种数字图像处理技术, 突出问题需求, 有很强的针对性和实用性, 与传统的统计方法

结合为光伏功率精细化预测提供了有效的技术支撑和方法参考。且本发明综合多因素多步建模, 方法的描述已涵盖光伏预测领域所有关键环节, 有较强的普适性和鲁棒性。本发明为了在使用中结合使用的具体场景和应用对象, 有些环节预留了调节参数, 操作方便并保证预测效果。



RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST,
SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, ZA, ZM, ZW。

IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG,
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD,
TG)。

- (84) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种基于地基云图的光伏功率预测方法

技术领域

本发明属于新能源光伏发电技术领域，具体涉及一种基于地基云图的光伏功率预测方法。

背景技术

近年来，大规模光伏电站接入电网，由于光伏发电输出功率具有随机性和波动性，对电网安全稳定和经济运行造成影响。对光伏电站的输出功率进行准确预测，为电力调度提供重要的决策支持，统筹安排常规电源和光伏发电的协调配合，不仅降低电力系统运行成本，而且有利于充分利用光伏资源，获得更大的经济效益和社会效益。

地面辐照度作为光伏电站输出功率的主要影响因素之一，它的不确定性直接导致输出功率的随机性和波动性。而云作为影响太阳地面辐照量的主要气象要素，其生消和移动变化是地面辐照度变化不确定性的主要原因。目前，光伏功率预测方法主要有统计分析或机器学习方法，它们基于历史气象要素数据和光伏电站输出功率数据进行预测，但均未涉及云图数据，对云的遮挡导致的功率突变很难学习导致预测效果欠佳。国外有学者根据气象卫星云图预估云层移动情况进行太阳辐照度预测，但其时空分辨率相对较低，为了满足区域内光伏电站超短期 0-4 小时内分钟级功率预测的要求，需要局地高时空分辨率的云图像数据。

近年来，随着电荷耦合器件 CCD 等硬件技术的发展和数字图像处理技术的不断完善，很多地基遥感测云仪器研制成功，比如全天空成像仪 (total sky imager, TSI)，该仪器能实现对全天空云的自动化观测和实时采集，最小时间分辨率可达 30 秒，能很好地实现光伏电站上空云图的实时监测和采集。

发明内容

为了克服上述现有技术的不足，本发明提供一种基于地基云图的光伏功率预测方法，利用数字图像处理技术对地基云图进行处理和分析，对未来时刻云团运动和太阳遮挡状况进行预测，相当于将云这一主要气象要素从众多影响辐照度的随机因素中单独分离出来进行建模。同时结合衡量太阳通过大气层时衰减情况的辐射清晰度指数实现未来时刻地面辐照度的预测，最后通过光电转换模型实现光伏功率超短期 1 小时内分钟级光伏功率精细化预测。

为了实现上述发明目的，本发明采取如下技术方案：

提供一种基于地基云图的光伏功率预测方法，所述方法包括以下步骤：

步骤 1：云团运动预估；

步骤 2：对地面辐照度进行预测；

步骤 3：建立综合光电转换模型；

步骤 4：进行光伏功率预测。

所述步骤 1 包括以下步骤：

步骤 1-1：确定图像上太阳位置；

所述步骤 1-1 中，用天顶角和方位角来确定图像上太阳位置；

假设观测地的纬度为 φ ，赤纬角为 δ ，时角为 ω ，天顶角和方位角分别用 θ_z 和 γ_s 表示为：

$$\begin{cases} \theta_z = \arccos(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega) \\ \gamma_s = \arcsin\left(\frac{\cos\delta\sin\omega}{\sin\theta_z}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中：

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin[2\pi \times \frac{284 + dayth}{365}] \quad (2)$$

$$\omega = (t - 12) \times 15^\circ \quad (3)$$

其中, $dayth$ 表示一年中的日期序号, t 为时间;

天顶角为和方位角分别为 θ_z 和 γ_s 时, 距离图像中心点的距离为 R , 于是即可确定某一时刻图像上太阳位置; 距离图像中心点的距离 R 表示为:

$$R = -17.59\theta_z^2 + 118.135\theta_z \quad (4)。$$

步骤1-2: 对地基云图原始图像进行预处理;

所述步骤 1-2 包括以下步骤:

步骤 1-2-1: 对地基云图原始图像进行图像复原;

首先, 通过遮光带覆盖像素点范围和镜头支臂的像素点范围确定遮光带和镜头支臂的掩模图像; 根据已确定的图像上太阳位置, 标定出复原图像对应时刻太阳在图像中的太阳位置点, 然后由中心点到太阳位置点至到圆周边沿点确定一条直线, 然后根据图像形态学膨胀运算扩展至遮光带宽度, 从而确定遮光带覆盖像素点范围; 同时由中心点垂直向上至到圆周边沿点确定另一条直线, 然后根据图像形态学膨胀运算把该直线扩展至宽度为镜头支臂宽度, 从而确定镜头支臂的像素点范围。

然后在地基云图原始图像上, 与掩模图像对于遮光带覆盖范围的像素点和镜头支臂范围的像素点的周边像素点进行线性插值, 最终生成复原图像 I ;

步骤 1-2-2: 对所述复原图像 I 进行中值滤波, 得到中值滤波图像;

$$M(i, j) = Med\{I(i+r, j+s)\} \quad (5)$$

其中, $M(i, j)$ 表示中值滤波图像在 (i, j) 点的灰度值, $I(i+r, j+s)$ 表示复原图像 I 在 $(i+r, j+s)$ 点的灰度值; 滤波窗口为 5×5 领域时, $r, s \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$; 滤波窗口为 3×3 领域时, $r, s \in \{-1, 0, 1\}$; $Med\{I(i+r, j+s)\}$ 表示随着 r, s 取不同值而得到的25个序列或9个序列的中值;

步骤 1-2-3: 对中值滤波图像进行锐化;

对中值滤波图像进行锐化后的锐化图像假定为 $g(x, y)$, 则有:

$$g(x, y) = M(x, y) - \nabla^2 M(x, y) \quad (6)$$

其中, $M(x, y)$ 表示中值滤波图像, 且有

$$\nabla^2 M(x, y) = \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \quad (7)。$$

步骤1-3: 对预处理后的锐化图像 $g(x, y)$ 进行二值化处理, 并提取云团质心;

所述步骤 1-3 包括以下步骤:

步骤 1-3-1: 对预处理最终得到的锐化图像 $g(x, y)$ 进行二值化处理;

由下式得到 (i, j) 点的二值图像 $Binary$:

$$Binary(i, j) = \begin{cases} 1; & R(i, j) / B(i, j) > \gamma \\ 0; & R(i, j) / B(i, j) \leq \gamma \end{cases} \quad (8)$$

其中, $Binary(i, j)$ 表示二值图像 $Binary$ 在 (i, j) 点的像素值, $R(i, j)$, $B(i, j)$ 分别表示锐化图像 $g(x, y)$ 红通道分量和蓝通道分量在 (i, j) 点的灰度值; γ 表示锐化图像 $g(x, y)$ 红蓝通道分量比的阈值, 由如下公式计算:

$$\gamma = \max\_level(RBR\_hist) + TH \quad (9)$$

其中, RBR_hist 表示红蓝分量比图像 RBR 的灰度直方图, $\max\_level$ 表示灰度直方图中频度最大的灰度值, TH 表示阈值微调量;

步骤 1-3-2: 进行云团检测和标注;

二值图像 $Binary$ 中, 若像素值为 1 且坐标为 (i, j) 的像素点为 P , 则搜索 P 的 8 连接点,

8 连接点的坐标集为: $\{(i-1, j-1), (i-1, j), (i-1, j+1), (i, j-1), (i, j), (i, j+1), (i+1, j-1), (i+1, j), (i+1, j+1)\}$;

对 P 点的 8 连接点的坐标集对应的像素点中选择像素值为 1 的点, 并分别对其再次展开 8 连接点搜索, 如此反复, 并且每个像素点不能重复被搜索, 直至所有连接点的 8 连接点均为已搜索的点或者像素值为 0 的点, 则结束搜索并标注云团;

云团的标注按照检索的顺序, 第一次检索到的团块标记为 1, 第二次检索到的团块标记为 2, 以此类推;

步骤 1-3-3: 云团质心提取;

设 $A1_1$, $A1_2$ 为顶点的矩形框经过云团 $A1$ 最小外接矩形的左上角和右下角像素点, 若 $A1_1$ 点坐标为 $(A1x_1, A1y_1)$, $A1_2$ 点坐标为 $(A1x_2, A1y_2)$, 云团 $A1$ 的质心坐标为 $(A1x, A1y)$, 则有:

$$\begin{cases} A1x = \frac{A1x_1 + A1x_2}{2} \\ A1y = \frac{A1y_1 + A1y_2}{2} \end{cases} \quad (10)$$

按照上述云团 $A1$ 质心提取的方法, 依次提取云团 $A1, A2, \dots$ 和 A_m 共 m 个云团的质心。

步骤 1-4: 云团运动预估;

所述步骤 1-4 包括以下步骤:

步骤 1-4-1: 定义云团运动方向和速度;

建立以球面图像中心为坐标原点的极坐标系, 球面图像中心的坐标为 (x_c, y_c) , 像素点 P

的原始坐标为 (x, y) ，其中 $x \neq x_c$ ；则像素点 P 在极坐标下的极径 ρ 和极角 θ 分别表示为：

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \\ \theta = \arctan(-\frac{y - y_c}{x - x_c}) \end{cases} \quad (11)$$

(x_t, y_t) 和 (x_{t+1}, y_{t+1}) 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻某云团的质心坐标；则 t 时刻该云团移动速度 v 表示为：

$$v = \sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2} / \Delta t \quad (12)$$

其中 Δt 为 t 时刻和 $t+1$ 时刻之间的采样时间间隔；
云团移动方向定义如下：

- (1) 如果 $x_{t+1} > x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \arctan(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|})$ ；
- (2) 如果 $x_{t+1} = x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \pi/2$ ；
- (3) 如果 $x_{t+1} < x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \pi/2 + \arctan(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|})$ ；
- (4) 如果 $x_{t+1} < x_t$ ，且 $y_{t+1} \geq y_t$ ，则有 $\theta = \pi + \arctan(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|})$ ；
- (5) 如果 $x_{t+1} = x_t$ ，且 $y_{t+1} \geq y_t$ ，则有 $\theta = 3\pi/2$ ；
- (6) 如果 $x_{t+1} > x_t$ ，且 $y_{t+1} \geq y_t$ ，则有 $\theta = 3\pi/2 + \arctan(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|})$ ；

步骤 1-4-2：进行云团运动预估；

假设二值图像 *Binary* 有 n 张，每张二值图像 *Binary* 中云团个数有 m 个，第 j 个云团根据第 i 张二值图像 *Binary* 中的质心位置和第 $i+1$ 张二值图像 *Binary* 中的质心位置所得到的速度和角度分别为 v_{ji} 和 θ_{ji} ，其中： $j=1,2,\dots,m$ ； $i=1,2,\dots,n-1$ ；

假设云团在相对较短时间内的运动为刚体运动，位于全天空成像仪视野范围内的云团近似匀速直线运动，通过求取 v_{ji} 和 θ_{ji} 平均值预估未来第 j 个云团的移动速度 v_j 和移动方向 θ_j ，具体表示为：

$$\begin{cases} v_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} v_{ji}}{n-1} \\ \theta_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \theta_{ji}}{n-1} \end{cases} \quad (13)。$$

所述步骤2包括以下步骤:

步骤2-1: 计算学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数;

t 时刻天顶辐射 $H_0(t)$ 和大气质量 $AM(t)$ 分别表示为:

$$H_0(t) = I_{sc} (1 + 0.033 \cos(2\pi \cdot dayth / 365)) \cos \theta_z \quad (14)$$

$$AM(t) = \sqrt{1229 + (614 \cos \theta_z)^2 - 614 \cos \theta_z} \quad (15)$$

其中, $I_{sc} = 1367 \pm 5 \text{ W/m}^2$;

于是: t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$ 表示为:

$$I_{theory}(t) = H_0(t) / AM^c(t) \quad (16)$$

在晴空状况下, 令 t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$ 等于地面实测辐射值 $I_{obs}(t)$ 根据式 (16)

计算出 C , 进而确定 t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$;

学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数用来衡量太阳通过大气层时云团对辐照度的衰减情况, 其表示为:

$$KT(t) = \frac{I_{obs}(t)}{I_{theory}(t)} \quad (17)$$

其中, $KT(t)$ 为学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数;

步骤2-2: 进行太阳遮挡预测;

通过判断二值图像 $Binary$ 上太阳位置处像素点是否为二值图像 $Binary$ 中云团的像素点, 进而判断此刻太阳是否被云团遮挡, 具体表示为:

$$sign(t) = \begin{cases} 0, & \text{如果}(x_s(t)+ex, y_s(t)+ex) \text{ 点像素值为0} \\ 1, & \text{如果}(x_s(t)+ex, y_s(t)+ex) \text{ 点像素值为1} \end{cases} \quad (18)$$

其中 $sign(t)$ 表示 t 时刻太阳的遮挡信息, $sign(t)=0$ 表示太阳未被云团遮挡, $sign(t)=1$ 表示太阳被云团遮挡; $(x_s(t), y_s(t))$ 表示 t 时刻太阳在图像中的位置, ex 的取值为 $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$;

步骤2-3: 对地面辐照度进行预测;

假设预测阶段的辐射清晰度指数为 pKT ，其由学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的所有辐射清晰度指数的加权平均确定，表示为：

$$pKT = \sum_{i=1}^N \lambda_i KT(t_i) \quad (19)$$

其中， N 为学习阶段太阳被云团遮挡的时刻； i 表示太阳被云团遮挡时刻时的排序， $i=1,2,\dots,N-1$ ； λ_i 为学习样本中第 i 个辐射清晰度指数加权平均的权重系数，且满足 $\lambda_i < \lambda_{i+1}$ ； $KT(t_i)$ 为学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的第 i 个辐射清晰度指数；

于是，预测阶段 t 时刻的地面理论辐照度表示为：

$$pI(t) = \begin{cases} pKT \cdot I_{theory}(t) & sign(t) = 1 \\ I_{theory}(t) & sign(t) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

其中， $pI(t)$ 表示预测阶段 t 时刻的地面理论辐照度。

所述步骤 3 包括以下步骤：

步骤3-1：建立基础光电转换模型；

通过所读取的历史功率数据和辐射数据绘制散点图，若 $P_0(t)$ 、 $I(t)$ 分别为 t 时刻的实测有功功率和实测地面辐照度，并根据散点图确定曲线类型和曲线拟合方程式中的阶数 q ，所述曲线拟合方程式为：

$$P_0(t) = a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 \quad (21)$$

其中 $a_q, a_{q-1}, \dots$ 和 a_0 均为曲线拟合方程式的系数；

根据上述曲线拟合方程式建立目标函数：

$$\min_{a_1 \dots a_q} \sum_{i=1}^n (a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 - P_0(t))^2 \quad (22)$$

通过最小二乘法确定 $a_q, a_{q-1}, \dots$ 和 a_0 ，从而确定 t 时刻的实测有功功率 $P_0(t)$ ，表示为：

$$P_0(t) = f(I(t)) = a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 \quad (23)$$

$f(I(t))$ 为 t 时刻的实测有功功率 $P_0(t)$ 关于 t 时刻的实测地面辐照度 $I(t)$ 的函数；

步骤3-2：结合基础光电转换模型建立综合光电转换模型；

设 t 时刻的组建温度分别为 $T(t)$ ，由温度导致的 t 时刻的转换效率 $\eta(t)$ 表示为：

$$\eta(t) = 1 + 0.0035(T(t) - T(t-1)) \quad (24)$$

由此可得预测阶段 t 时刻的实测有功功率，具体表示为：

$$P(t) = \eta(t) f(I(t)) \quad (25)$$

其中, $P(t)$ 表示预测阶段 t 时刻的实测有功功率。

所述步骤 4 中, 通过建立光伏功率预测模型进行光伏功率预测;
所述光伏功率预测模型为:

$$P(t) = \begin{cases} \eta(t)f(pKT \cdot I_{theory}(t)) & sign(t) = 1 \\ \eta(t)f(I_{theory}(t)) & sign(t) = 0 \end{cases} \quad (26)。$$

与现有技术相比, 本发明的有益效果在于:

(1) 本发明综合运用多种数字图像处理技术, 突出问题需求, 有很强的针对性, 与传统的统计方法结合为光伏功率精细化预测提供了有效的技术支撑和方法参考。

(2) 本发明综合多因素多步建模, 方法的描述已涵盖光伏预测领域所有关键环节, 有较强的普适性和鲁棒性。

(2) 本发明采用必要且合理的假设, 实现对问题简化的同时又能最大限度地准确描述问题。

(3) 本发明为了在使用中结合使用的具体场景和应用对象, 有些环节预留了调节参数, 操作方便并保证预测效果。

(4) 流程化的处理, 详尽的算法描述和形式化表达, 为工程实现提供了方便, 具有很好的工程实用性。

附图说明

图 1 是本发明实施例中某一时刻图像上太阳的位置示意图;

图 2 是图像形态学膨胀运算原理示意图;

图 3 是本发明实施例中掩模图像示意图;

图 4 是本发明实施例中对地基云图原始图像进行图像复原示意图;

图 5 是本发明实施例中 8 连接点的连接方式示意图;

图 6 是本发明实施例中云团质心提取示意图;

图 7 是本发明实施例中建立以球面图像中心为坐标原点的极坐标系中云团运动预估示意图。

具体实施方式

下面结合附图对本发明作进一步详细说明。

提供一种基于地基云图的光伏功率预测方法, 所述方法包括以下步骤:

步骤 1: 云团运动预估;

步骤 2: 对地面辐照度进行预测;

步骤 3: 建立综合光电转换模型;

步骤 4: 进行光伏功率预测。

所述步骤 1 包括以下步骤:

步骤 1-1: 确定图像上太阳位置;

所述步骤 1-1 中, 用天顶角和方位角来确定图像上太阳位置;

假设观测地的纬度为 φ , 赤纬角为 δ , 时角为 ω , 天顶角和方位角分别用 θ_z 和 γ_s 表示为:

$$\begin{cases} \theta_z = \arccos(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega) \\ \gamma_s = \arcsin\left(\frac{\cos\delta\sin\omega}{\sin\theta_z}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin[2\pi \times \frac{284 + \text{dayth}}{365}] \quad (2)$$

$$\omega = (t - 12) \times 15^\circ \quad (3)$$

其中, dayth 表示一年中的日期序号, t 为时间;

天顶角为和方位角分别为 θ_z 和 γ_s 时, 距离图像中心点的距离为 R , 于是即可确定某一时刻图像上太阳位置; 由于天顶角在与图像半径有相关性, 根据式 (4) 可将距离图像中心点的距离 R 表示为:

$$R = -17.59\theta_z^2 + 118.1.35\theta_z \quad (4)。$$

如图1, Center点为图像中心点, 这样就可以标定出某一时刻图像上太阳的位置。

步骤1-2: 对地基云图原始图像进行预处理;

所述步骤 1-2 包括以下步骤:

步骤 1-2-1: 对地基云图原始图像进行图像复原;

首先, 通过遮光带覆盖像素点范围和镜头支臂的像素点范围确定遮光带和镜头支臂的掩模图像; 根据已确定的图像上太阳位置, 标定出复原图像对应时刻太阳在图像中的太阳位置点, 然后由中心点到太阳位置点至到圆周边沿点确定一条直线, 然后根据图像形态学膨胀运算扩展至遮光带宽度, 从而确定遮光带覆盖像素点范围; 同时由中心点垂直向上至到圆周边沿点确定另一条直线, 然后根据图像形态学膨胀运算把该直线扩展至宽度为镜头支臂宽度, 从而确定镜头支臂的像素点范围。

如图 2, 图像形态学膨胀运算相当于用 B 的中心在 A 的边界走一圈, B 的边界扫过的区域加上 A 本身的区域就是 A 膨胀 B 的结果。

然后在地基云图原始图像上, 与掩模图像对于遮光带覆盖范围的像素点和镜头支臂范围的像素点的周边像素点进行线性插值, 最终生成复原图像 I ;

步骤 1-2-2: 对所述复原图像 I 进行中值滤波, 得到中值滤波图像;

$$M(i, j) = \text{Med}\{I(i+r, j+s)\} \quad (5)$$

其中, $M(i, j)$ 表示中值滤波图像在 (i, j) 点的灰度值, $I(i+r, j+s)$ 表示复原图像 I 在 $(i+r, j+s)$ 点的灰度值; 滤波窗口为 5×5 领域时, $r, s \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$; 滤波窗口为 3×3 领域时, $r, s \in \{-1, 0, 1\}$; $\text{Med}\{I(i+r, j+s)\}$ 表示随着 r, s 取不同值而得到的25个序列或9个序列的中值;

步骤 1-2-3: 对中值滤波图像进行锐化;

对中值滤波图像进行锐化后的锐化图像假定为 $g(x, y)$, 则有:

$$g(x, y) = M(x, y) - \nabla^2 M(x, y) \quad (6)$$

其中, $M(x, y)$ 表示中值滤波图像, 且有

$$\nabla^2 M(x, y) = \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \quad (7)。$$

步骤1-3: 对预处理后的锐化图像 $g(x, y)$ 进行二值化处理, 并提取云团质心;

所述步骤 1-3 包括以下步骤:

步骤 1-3-1: 对预处理最终得到的锐化图像 $g(x, y)$ 进行二值化处理;

由下式得到 (i, j) 点的二值图像 $Binary$:

$$Binary(i, j) = \begin{cases} 1; & R(i, j) / B(i, j) > \gamma \\ 0; & R(i, j) / B(i, j) \leq \gamma \end{cases} \quad (8)$$

其中, $Binary(i, j)$ 表示二值图像 $Binary$ 在 (i, j) 点的像素值, $R(i, j)$, $B(i, j)$ 分别表示锐化图像 $g(x, y)$ 红通道分量和蓝通道分量在 (i, j) 点的灰度值; γ 表示锐化图像 $g(x, y)$ 红蓝通道分量比的阈值, 由如下公式计算:

$$\gamma = \max\_level(RBR\_hist) + TH \quad (9)$$

其中, RBR_hist 表示红蓝分量比图像 RBR 的灰度直方图, $\max\_level$ 表示灰度直方图中频度最大的灰度值, TH 表示阈值微调量;

步骤 1-3-2: 进行云团检测和标注;

二值图像 $Binary$ 中, 若像素值为 1 且坐标为 (i, j) 的像素点为 P , 则搜索 P 的 8 连接点, 其中 8 连接点连接方式如图 5 所示;

8 连接点的坐标集为: $\{(i-1, j-1), (i-1, j), (i-1, j+1), (i, j-1), (i, j+1), (i+1, j-1), (i+1, j), (i+1, j+1)\}$;

对 P 点的 8 连接点的坐标集对应的像素点中选择像素值为 1 的点, 并分别对其再次展开 8 连接点搜索, 如此反复, 并且每个像素点不能重复被搜索, 直至所有连接点的 8 连接点均为已搜索的点或者像素值为 0 的点, 则结束搜索并标注云团;

云团的标注按照检索的顺序, 第一次检索到的团块标记为 1, 第二次检索到的团块标记为 2, 以此类推;

步骤 1-3-3: 云团质心提取;

如图 6, 设 Al_1 , Al_2 为顶点的矩形框经过云团 Al 最小外接矩形的左上角和右下角像素点, 若 Al_1 点坐标为 (Alx_1, Aly_1) , Al_2 点坐标为 (Alx_2, Aly_2) , 云团 Al 的质心坐标为 (Alx, Aly) , 则有:

$$\begin{cases} Alx = \frac{Alx_1 + Alx_2}{2} \\ Aly = \frac{Aly_1 + Aly_2}{2} \end{cases} \quad (10)$$

按照上述云团 A1 质心提取的方法，依次提取云团 A1, A2, … 和 A_m 共 m 个云团的质心。

步骤 1-4：云团运动预估：

所述步骤 1-4 包括以下步骤：

步骤 1-4-1：定义云团运动方向和速度；

如图 7，建立以球面图像中心为坐标原点的极坐标系，球面图像中心的坐标为 (x_c, y_c) ，

像素点 P 的原始坐标为 (x, y) ，其中 $x \neq x_c$ ；则像素点 P 在极坐标下的极径 ρ 和极角 θ 分别表示为：

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \\ \theta = \arctan(-\frac{y - y_c}{x - x_c}) \end{cases} \quad (11)$$

(x_t, y_t) 和 (x_{t+1}, y_{t+1}) 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻某云团的质心坐标；则 t 时刻该云团移动速度 v 表示为：

$$v = \sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2} / \Delta t \quad (12)$$

其中 Δt 为 t 时刻和 $t+1$ 时刻之间的采样时间间隔；

云团移动方向定义如下：

- (1) 如果 $x_{t+1} > x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \arctan(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|})$ ；
- (2) 如果 $x_{t+1} = x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \pi/2$ ；
- (3) 如果 $x_{t+1} < x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \pi/2 + \arctan(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|})$ ；
- (4) 如果 $x_{t+1} < x_t$ ，且 $y_{t+1} \geq y_t$ ，则有 $\theta = \pi + \arctan(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|})$ ；
- (5) 如果 $x_{t+1} = x_t$ ，且 $y_{t+1} \geq y_t$ ，则有 $\theta = 3\pi/2$ ；
- (6) 如果 $x_{t+1} > x_t$ ，且 $y_{t+1} \geq y_t$ ，则有 $\theta = 3\pi/2 + \arctan(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|})$ ；

步骤 1-4-2：进行云团运动预估；

假设二值图像 *Binary* 有 n 张，每张二值图像 *Binary* 中云团个数有 m 个，第 j 个云团根据第 i 张二值图像 *Binary* 中的质心位置和第 $i+1$ 张二值图像 *Binary* 中的质心位置所得到的速度和角度分别为 v_{ji} 和 θ_{ji} ，其中： $j=1, 2, \dots, m$ ； $i=1, 2, \dots, n-1$ ；

假设云团在相对较短时间内的运动为刚体运动，位于全天空成像仪视野范围内的云团近似匀速直线运动，通过求取 v_{ji} 和 θ_{ji} 平均值预估未来第 j 个云团的移动速度 v_j 和移动方向 θ_j ，具体表示为：

$$\left\{ \begin{array}{l} v_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} v_{ji}}{n-1} \\ \theta_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \theta_{ji}}{n-1} \end{array} \right. \quad (13)。$$

所述步骤 2 包括以下步骤：

步骤 2-1：计算学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数；

t 时刻天顶辐射 $H_0(t)$ 和大气质量 $AM(t)$ 分别表示为：

$$H_0(t) = I_{sc} (1 + 0.033 \cos(2\pi \cdot \text{dayth} / 365)) \cos \theta_z \quad (14)$$

$$AM(t) = \sqrt{1229 + (614 \cos \theta_z)^2 - 614 \cos \theta_z} \quad (15)$$

其中， $I_{sc} = 1367 \pm 5 \text{ W/m}^2$ ；

于是： t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$ 表示为：

$$I_{theory}(t) = H_0(t) / AM^c(t) \quad (16)$$

在晴空状况下，令 t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$ 等于地面实测辐射值 $I_{obs}(t)$ 根据式 (16)

计算出 C ，进而确定 t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$ ；

学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数用来衡量太阳通过大气层时云团对辐照度的衰减情况，其表示为：

$$KT(t) = \frac{I_{obs}(t)}{I_{theory}(t)} \quad (17)$$

其中， $KT(t)$ 为学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数；

步骤 2-2：进行太阳遮挡预测；

通过判断二值图像 *Binary* 上太阳位置处像素点是否为二值图像 *Binary* 中云团的像素点，进而判断此刻太阳是否被云团遮挡，具体表示为：

$$\text{sign}(t) = \begin{cases} 0, & \text{如果}(x_s(t)+ex, y_s(t)+ex) \text{ 点像素值为} 0 \\ 1, & \text{如果}(x_s(t)+ex, y_s(t)+ex) \text{ 点像素值为} 1 \end{cases} \quad (18)$$

其中 $sign(t)$ 表示 t 时刻太阳的遮挡信息, $sign(t)=0$ 表示太阳未被云团遮挡, $sign(t)=1$ 表示太阳被云团遮挡; $(x_s(t), y_s(t))$ 表示 t 时刻太阳在图像中的位置, ex 的取值为 $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$;

步骤 2-3: 对地面辐照度进行预测;

假设预测阶段的辐射清晰度指数为 pKT , 其由学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的所有辐射清晰度指数的加权平均确定, 表示为:

$$pKT = \sum_{i=1}^N \lambda_i KT(t_i) \quad (19)$$

其中, N 为学习阶段太阳被云团遮挡的时刻; i 表示太阳被云团遮挡时刻时的排序, $i=1, 2, \dots, N-1$; λ_i 为学习样本中第 i 个辐射清晰度指数加权平均的权重系数, 且满足 $\lambda_i < \lambda_{i+1}$; $KT(t_i)$ 为学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的第 i 个辐射清晰度指数;

于是, 预测阶段 t 时刻的地面理论辐照度表示为:

$$pI(t) = \begin{cases} pKT \cdot I_{theory}(t) & sign(t) = 1 \\ I_{theory}(t) & sign(t) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $pI(t)$ 表示预测阶段 t 时刻的地面理论辐照度。

所述步骤 3 包括以下步骤:

步骤3-1: 建立基础光电转换模型;

通过所读取的历史功率数据和辐射数据绘制散点图, 若 $P_0(t)$ 、 $I(t)$ 分别为 t 时刻的实测有功功率和实测地面辐照度, 并根据散点图确定曲线类型和曲线拟合方程式中的阶数 q , 所述曲线拟合方程式为:

$$P_0(t) = a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 \quad (21)$$

其中 $a_q, a_{q-1}, \dots$ 和 a_0 均为曲线拟合方程式的系数;

根据上述曲线拟合方程式建立目标函数:

$$\min_{a_1 \dots a_q} \sum_{i=1}^n (a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 - P_0(t))^2 \quad (22)$$

通过最小二乘法确定 $a_q, a_{q-1}, \dots$ 和 a_0 , 从而确定 t 时刻的实测有功功率 $P_0(t)$, 表示为:

$$P_0(t) = f(I(t)) = a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 \quad (23)$$

$f(I(t))$ 为 t 时刻的实测有功功率 $P_0(t)$ 关于 t 时刻的实测地面辐照度 $I(t)$ 的函数;

步骤3-2: 结合基础光电转换模型建立综合光电转换模型;

设 t 时刻的组建温度分别为 $T(t)$, 由温度导致的 t 时刻的转换效率 $\eta(t)$ 表示为:

$$\eta(t) = 1 + 0.0035(T(t) - T(t-1)) \quad (24)$$

由此可得预测阶段 t 时刻的实测有功功率，具体表示为：

$$P(t) = \eta(t)f(I(t)) \quad (25)$$

其中， $P(t)$ 表示预测阶段 t 时刻的实测有功功率。

所述步骤4中，通过建立光伏功率预测模型进行光伏功率预测；
所述光伏功率预测模型为：

$$P(t) = \begin{cases} \eta(t)f(pKT \cdot I_{theory}(t)) & sign(t) = 1 \\ \eta(t)f(I_{theory}(t)) & sign(t) = 0 \end{cases} \quad (26)。$$

最后应当说明的是：以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制，尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明，所属领域的普通技术人员应当理解：依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换，而未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

权 利 要 求

1. 一种基于地基云图的光伏功率预测方法，其特征在于：所述方法包括以下步骤：

步骤 1：云团运动预估；

步骤 2：对地面辐照度进行预测；

步骤 3：建立综合光电转换模型；

步骤 4：进行光伏功率预测。

2. 根据权利要求 1 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法，其特征在于：所述步骤 1 包括以下步骤：

步骤1-1：确定图像上太阳位置；

步骤1-2：对地基云图原始图像进行预处理；

步骤1-3：对预处理后的锐化图像 $g(x, y)$ 进行二值化处理，并提取云团质心；

步骤1-4：云团运动预估。

3. 根据权利要求 2 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法，其特征在于：所述步骤 1-1 中，用天顶角和方位角来确定图像上太阳位置；

假设观测地的纬度为 φ ，赤纬角为 δ ，时角为 ω ，天顶角和方位角分别用 θ_z 和 γ_s 表示为：

$$\begin{cases} \theta_z = \arccos(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega) \\ \gamma_s = \arcsin\left(\frac{\cos\delta\sin\omega}{\sin\theta_z}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中：

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin\left[2\pi \times \frac{284 + \text{dayth}}{365}\right] \quad (2)$$

$$\omega = (t - 12) \times 15^\circ \quad (3)$$

其中， dayth 表示一年中的日期序号， t 为时间；

天顶角为和方位角分别为 θ_z 和 γ_s 时，距离图像中心点的距离为 R ，于是即可确定某一时刻图像上太阳位置；距离图像中心点的距离 R 表示为：

$$R = -17.59\theta_z^2 + 118.1.35\theta_z \quad (4)。$$

4. 根据权利要求 2 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法，其特征在于：所述步骤 1-2 包括以下步骤：

步骤 1-2-1：对地基云图原始图像进行图像复原；

首先，通过遮光带覆盖像素点范围和镜头支臂的像素点范围确定遮光带和镜头支臂的掩模图像；然后在地基云图原始图像上，与掩模图像对于遮光带覆盖范围的像素点和镜头支臂范围的像素点的周边像素点进行线性插值，最终生成复原图像 I ；

步骤 1-2-2：对所述复原图像 I 进行中值滤波，得到中值滤波图像；

$$M(i, j) = \text{Med}\{I(i+r, j+s)\} \quad (5)$$

其中， $M(i, j)$ 表示中值滤波图像在 (i, j) 点的灰度值， $I(i+r, j+s)$ 表示复原图像 I 在

$(i+r, j+s)$ 点的灰度值；滤波窗口为 5×5 领域时， $r, s \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ ；滤波窗口为 3×3 领域时， $r, s \in \{-1, 0, 1\}$ ； $Med\{I(i+r, j+s)\}$ 表示随着 r, s 取不同值而得到的 25 个序列或 9 个序列的中值；

步骤 1-2-3：对中值滤波图像进行锐化；

对中值滤波图像进行锐化后的锐化图像假定为 $g(x, y)$ ，则有：

$$g(x, y) = M(x, y) - \nabla^2 M(x, y) \quad (6)$$

其中， $M(x, y)$ 表示中值滤波图像，且有

$$\nabla^2 M(x, y) = \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \quad (7)。$$

5. 根据权利要求 4 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法，其特征在于：根据已确定的图像上太阳位置，标定出复原图像对应时刻太阳在图像中的太阳位置点，然后由中心点到太阳位置点至到圆周边沿点确定一条直线，然后根据图像形态学膨胀运算扩展至遮光带宽度，从而确定遮光带覆盖像素点范围；

同时由中心点垂直向上至到圆周边沿点确定另一条直线，然后根据图像形态学膨胀运算将该直线扩展至宽度为镜头支臂宽度，从而确定镜头支臂的像素点范围。

6. 根据权利要求 2 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法，其特征在于：所述步骤 1-3 包括以下步骤：

步骤 1-3-1：对预处理最终得到的锐化图像 $g(x, y)$ 进行二值化处理；

由下式得到 (i, j) 点的二值图像 $Binary$ ：

$$Binary(i, j) = \begin{cases} 1 ; & R(i, j) / B(i, j) > \gamma \\ 0 ; & R(i, j) / B(i, j) \leq \gamma \end{cases} \quad (8)$$

其中， $Binary(i, j)$ 表示二值图像 $Binary$ 在 (i, j) 点的像素值， $R(i, j)$, $B(i, j)$ 分别表示锐化图像 $g(x, y)$ 红通道分量和蓝通道分量在 (i, j) 点的灰度值； γ 表示锐化图像 $g(x, y)$ 红蓝通道分量比的阈值，由如下公式计算：

$$\gamma = \max\_level(RBR\_hist) + TH \quad (9)$$

其中， RBR_hist 表示红蓝分量比图像 RBR 的灰度直方图， $\max\_level$ 表示灰度直方图中频度最大的灰度值， TH 表示阈值微调量；

步骤 1-3-2：进行云团检测和标注；

二值图像 $Binary$ 中，若像素值为 1 且坐标为 (i, j) 的像素点为 P ，则搜索 P 的 8 连接点，

8 连接点的坐标集为： $\{(i-1, j-1), (i-1, j), (i-1, j+1), (i, j-1), (i, j+1), (i+1, j-1), (i+1, j), (i+1, j+1)\}$ ；

对 P 点的 8 连接点的坐标集对应的像素点中选择像素值为 1 的点，并分别对其再次展开 8 连接点搜索，如此反复，并且每个像素点不能重复被搜索，直至所有连接点的 8 连接点均为已搜索的点或者像素值为 0 的点，则结束搜索并标注云团；

云团的标注按照检索的顺序，第一次检索到的团块标记为 1，第二次检索到的团块标记为 2，以此类推；

步骤 1-3-3：云团质心提取；

设 $A1_1$ ， $A1_2$ 为顶点的矩形框经过云团 $A1$ 最小外接矩形的左上角和右下角像素点，若 $A1_1$ 点坐标为 $(A1x_1, A1y_1)$ ， $A1_2$ 点坐标为 $(A1x_2, A1y_2)$ ，云团 $A1$ 的质心坐标为 $(A1x, A1y)$ ，则有：

$$\begin{cases} A1x = \frac{A1x_1 + A1x_2}{2} \\ A1y = \frac{A1y_1 + A1y_2}{2} \end{cases} \quad (10)$$

按照上述云团 $A1$ 质心提取的方法，依次提取云团 $A1, A2, \dots$ 和 A_m 共 m 个云团的质心。

7. 根据权利要求 2 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法，其特征在于：所述步骤 1-4 包括以下步骤：

步骤 1-4-1：定义云团运动方向和速度；

建立以球面图像中心为坐标原点的极坐标系，球面图像中心的坐标为 (x_c, y_c) ，像素点 P 的原始坐标为 (x, y) ，其中 $x \neq x_c$ ；则像素点 P 在极坐标下的极径 ρ 和极角 θ 分别表示为：

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \\ \theta = \arctan\left(-\frac{y - y_c}{x - x_c}\right) \end{cases} \quad (11)$$

(x_t, y_t) 和 (x_{t+1}, y_{t+1}) 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻某云团的质心坐标；则 t 时刻该云团移动速度 v 表示为：

$$v = \sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2} / \Delta t \quad (12)$$

其中 Δt 为 t 时刻和 $t+1$ 时刻之间的采样时间间隔；

云团移动方向定义如下：

- (1) 如果 $x_{t+1} > x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \arctan\left(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|}\right)$ ；
- (2) 如果 $x_{t+1} = x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \pi/2$ ；
- (3) 如果 $x_{t+1} < x_t$ ，且 $y_{t+1} \leq y_t$ ，则有 $\theta = \pi/2 + \arctan\left(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|}\right)$ ；
- (4) 如果 $x_{t+1} < x_t$ ，且 $y_{t+1} \geq y_t$ ，则有 $\theta = \pi + \arctan\left(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|}\right)$ ；

(5) 如果 $x_{t+1} = x_t$, 且 $y_{t+1} \geq y_t$, 则有 $\theta = 3\pi/2$;

(6) 如果 $x_{t+1} > x_t$, 且 $y_{t+1} \geq y_t$, 则有 $\theta = 3\pi/2 + \arctan\left(\frac{|y_{t+1} - y_t|}{|x_{t+1} - x_t|}\right)$;

步骤 1-4-2: 进行云团运动预估;

假设二值图像 *Binary* 有 n 张, 每张二值图像 *Binary* 中云团个数有 m 个, 第 j 个云团根据第 i 张二值图像 *Binary* 中的质心位置和第 $i+1$ 张二值图像 *Binary* 中的质心位置所得到的速度和角度分别为 v_{ji} 和 θ_{ji} , 其中: $j=1,2,\dots,m$; $i=1,2,\dots,n-1$;

假设云团在相对较短时间内的运动为刚体运动, 位于全天空成像仪视野范围内的云团近似匀速直线运动, 通过求取 v_{ji} 和 θ_{ji} 平均值预估未来第 j 个云团的移动速度 v_j 和移动方向 θ_j , 具体表示为:

$$\begin{cases} v_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} v_{ji}}{n-1} \\ \theta_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \theta_{ji}}{n-1} \end{cases} \quad (13)。$$

8. 根据权利要求 1 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法, 其特征在于: 所述步骤 2 包括以下步骤:

步骤 2-1: 计算学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数;

t 时刻天顶辐射 $H_0(t)$ 和大气质量 $AM(t)$ 分别表示为:

$$H_0(t) = I_{sc} (1 + 0.033 \cos(2\pi \cdot \text{dayth} / 365)) \cos\theta_z \quad (14)$$

$$AM(t) = \sqrt{1229 + (614 \cos\theta_z)^2 - 614 \cos\theta_z} \quad (15)$$

其中, $I_{sc} = 1367 \pm 5 \text{W/m}^2$;

于是: t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$ 表示为:

$$I_{theory}(t) = H_0(t) / AM^C(t) \quad (16)$$

在晴空状况下, 令 t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$ 等于地面实测辐射值 $I_{obs}(t)$ 根据式 (16)

计算出 C , 进而确定 t 时刻地面理论辐射值 $I_{theory}(t)$;

学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数用来衡量太阳通过大气层时云团对

辐照度的衰减情况，其表示为：

$$KT(t) = \frac{I_{obs}(t)}{I_{theory}(t)} \quad (17)$$

其中， $KT(t)$ 为学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的辐射清晰度指数；

步骤 2-2：进行太阳遮挡预测；

通过判断二值图像 *Binary* 上太阳位置处像素点是否为二值图像 *Binary* 中云团的像素点，进而判断此刻太阳是否被云团遮挡，具体表示为：

$$sign(t) = \begin{cases} 0, & \text{如果}(x_s(t)+ex, y_s(t)+ex) \text{ 点像素值为} 0 \\ 1, & \text{如果}(x_s(t)+ex, y_s(t)+ex) \text{ 点像素值为} 1 \end{cases} \quad (18)$$

其中 $sign(t)$ 表示 t 时刻太阳的遮挡信息， $sign(t)=0$ 表示太阳未被云团遮挡， $sign(t)=1$ 表示太阳被云团遮挡； $(x_s(t), y_s(t))$ 表示 t 时刻太阳在图像中的位置， ex 的取值为 $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$ ；

步骤 2-3：对地面辐照度进行预测；

假设预测阶段的辐射清晰度指数为 pKT ，其由学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的所有辐射清晰度指数的加权平均确定，表示为：

$$pKT = \sum_{i=1}^N \lambda_i KT(t_i) \quad (19)$$

其中， N 为学习阶段太阳被云团遮挡的时刻； i 表示太阳被云团遮挡时刻时的排序， $i=1, 2, \dots, N-1$ ； λ_i 为学习样本中第 i 个辐射清晰度指数加权平均的权重系数，且满足 $\lambda_i < \lambda_{i+1}$ ；

$KT(t_i)$ 为学习阶段太阳被云团遮挡时刻对应的第 i 个辐射清晰度指数；

于是，预测阶段 t 时刻的地面理论辐照度表示为：

$$pI(t) = \begin{cases} pKT \cdot I_{theory}(t) & sign(t)=1 \\ I_{theory}(t) & sign(t)=0 \end{cases} \quad (20)$$

其中， $pI(t)$ 表示预测阶段 t 时刻的地面理论辐照度。

9. 根据权利要求 1 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法，其特征在于：所述步骤 3 包括以下步骤：

步骤 3-1：建立基础光电转换模型；

通过所读取的历史功率数据和辐射数据绘制散点图，若 $P_0(t)$ 、 $I(t)$ 分别为 t 时刻的实测有功功率和实测地面辐照度，并根据散点图确定曲线类型和曲线拟合方程式中的阶数 q ，所述曲线拟合方程式为：

$$P_0(t) = a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 \quad (21)$$

其中 $a_q, a_{q-1}, \dots$ 和 a_0 均为曲线拟合方程式的系数;

根据上述曲线拟合方程式建立目标函数:

$$\min_{a_1 \dots a_q} \sum_{i=1}^n (a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 - P_0(t))^2 \quad (22)$$

通过最小二乘法确定 $a_q, a_{q-1}, \dots$ 和 a_0 , 从而确定 t 时刻的实测有功功率 $P_0(t)$, 表示为:

$$P_0(t) = f(I(t)) = a_q I^q(t) + a_{q-1} I^{q-1}(t) + \dots + a_0 \quad (23)$$

$f(I(t))$ 为 t 时刻的实测有功功率 $P_0(t)$ 关于 t 时刻的实测地面辐照度 $I(t)$ 的函数;

步骤3-2: 结合基础光电转换模型建立综合光电转换模型;

设 t 时刻的组建温度分别为 $T(t)$, 由温度导致的 t 时刻的转换效率 $\eta(t)$ 表示为:

$$\eta(t) = 1 + 0.0035(T(t) - T(t-1)) \quad (24)$$

由此可得预测阶段 t 时刻的实测有功功率, 具体表示为:

$$P(t) = \eta(t) f(I(t)) \quad (25)$$

其中, $P(t)$ 表示预测阶段 t 时刻的实测有功功率。

10. 根据权利要求 1 所述的基于地基云图的光伏功率预测方法, 其特征在于: 所述步骤 4 中, 通过建立光伏功率预测模型进行光伏功率预测;

所述光伏功率预测模型为:

$$P(t) = \begin{cases} \eta(t) f(pKT \cdot I_{theory}(t)) & sign(t) = 1 \\ \eta(t) f(I_{theory}(t)) & sign(t) = 0 \end{cases} \quad (26)。$$

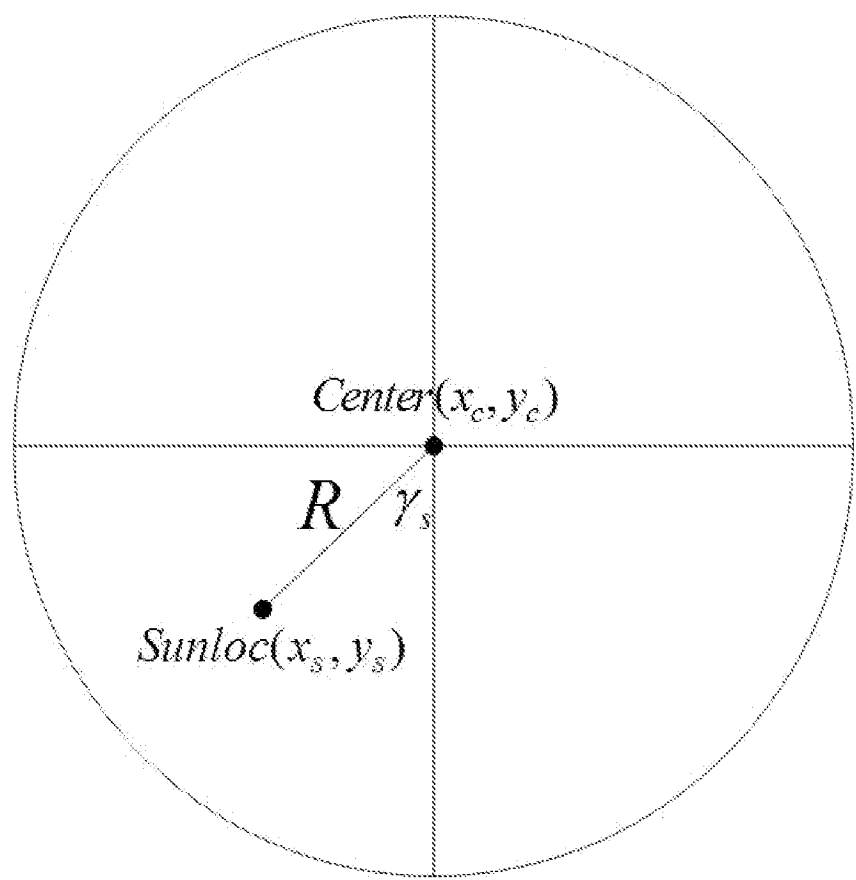


图 1

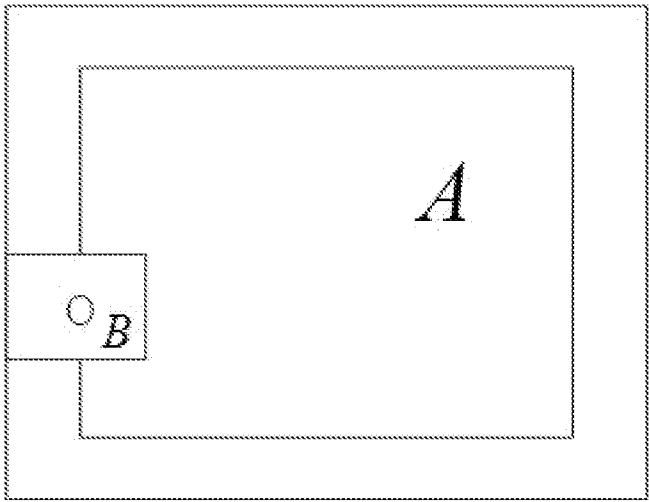


图 2

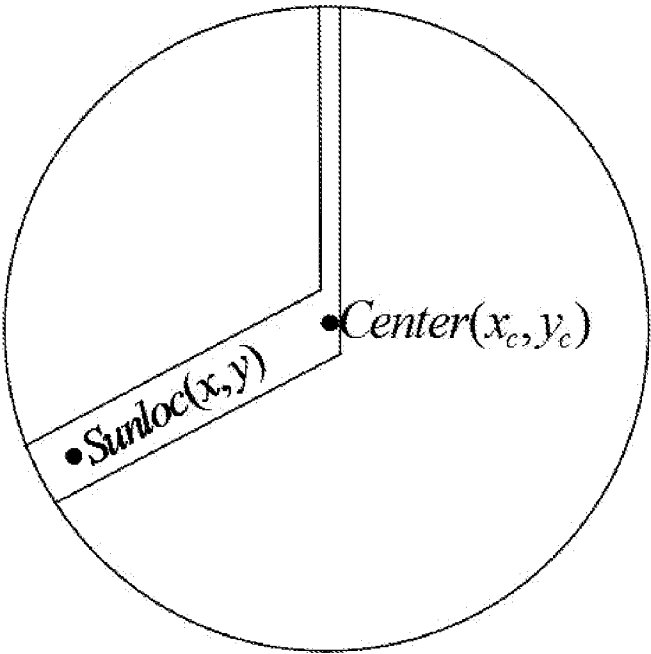


图 3

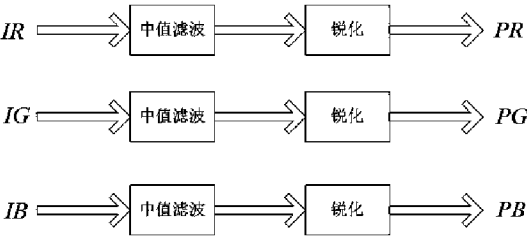


图 4

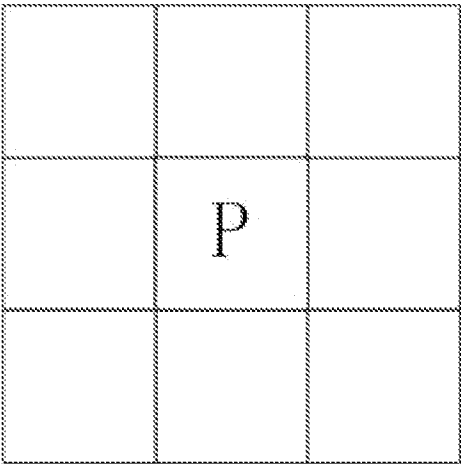


图 5

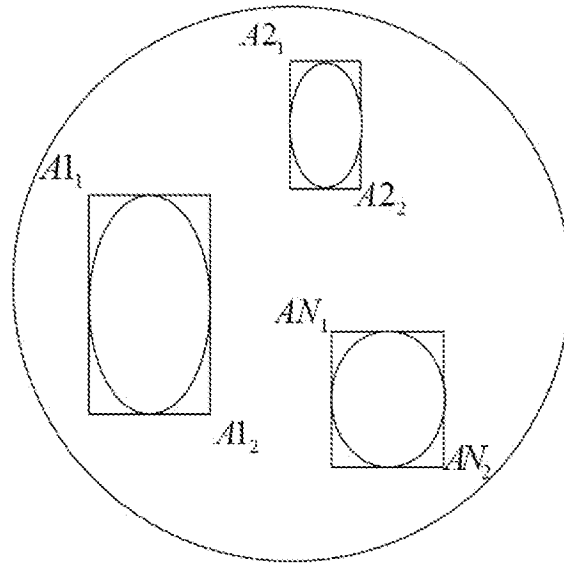


图 6

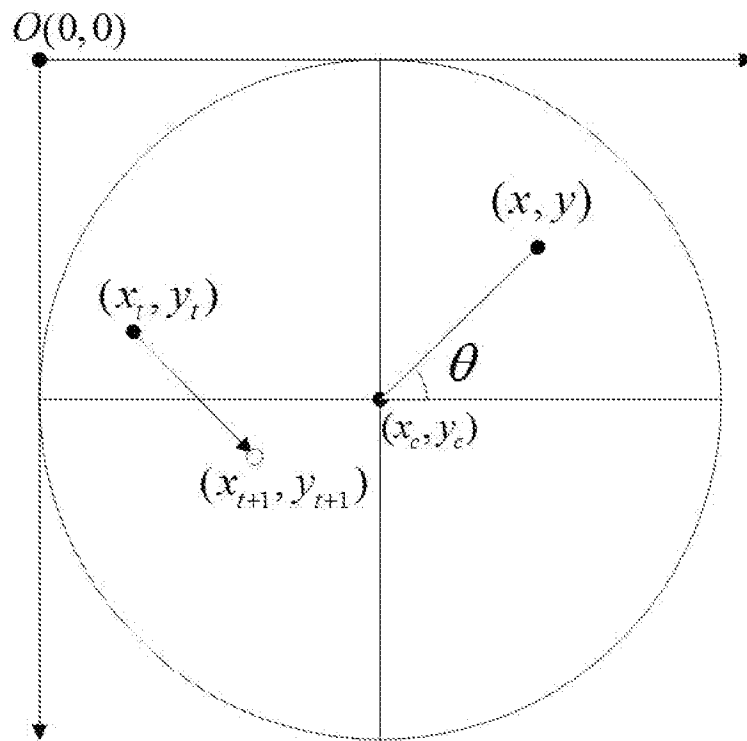


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2013/084700

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See the extra sheet

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G06Q 10/-, G06Q 50/-, F24J 2/-, G05D 3/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI: photovoltaic, nephogram, motion trail, pattern identification, PV, cloud, power forecasting, sun, position, location, motion, picture detection

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CAO, Xiao et al., Design of PV Power Forecasting System Based on Groud-Based Cloud Image Analysis, ELECTRIC POWER INFORMATION TECHNOLOGY, 15 March 2013, volume 11, number 3, pages 1-6, ISSN:1672-4844	1
Y		2
Y	CN 102915470 A (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE et al.), 06 February 2013 (06.02.2013), claims 1-2	2
A	CN 102902975 A (BEIJING INSTITUTE OF CONTROL ENGINEERING), 30 January 2013 (30.01.2013), the whole document	1-10
A	US 7906750 B2 (ESOLAR INC.), 15 March 2011 (15.03.2011), the whole document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 12 February 2014 (12.02.2014)	Date of mailing of the international search report 06 March 2014 (06.03.2014)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer HUANG, Shan Telephone No.: (86-10) 62412637

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2013/084700

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102915470 A	06.02.2013	None	
CN 102902975 A	30.01.2013	None	
US 7906750 B2	15.03.2011	US 2008236568 A1	02.10.2008
		CN 101680685 B	14.11.2012
		CN 101680685 A	24.03.2010
		WO 2008121335 A1	09.10.2008
		EP 2145137 A1	20.01.2010
		WO 2008121335 A8	20.11.2008
		US 2011155119 A1	30.06.2011
		US 8153945 B2	10.04.2012

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2013/084700

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06Q 10/04 (2012.01) i

G06Q 50/06 (2012.01) i

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2013/084700

A. 主题的分类

参见附加页

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: G06Q10 /-, G06Q50/-, F24J2/-, G05D3/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI 光伏, 云图, 云, 功率预测, 太阳, 日, 位置, 运动轨迹, 图形识别, PV, cloud, power forecasting, sun, position, location, motion, picture detection

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	曹潇等, 基于地基云图分析的光伏功率预测系统设计, 电力信息化, 15.3 月 2013, 第 11 卷, 第 3 期, 第 1-6 页, ISSN 1672-4844	1
Y		2
Y	CN 102915470 A (中国电力科学研究院等) 06.2 月 2013 (06.02.2013) 权利要求 1-2	2
A	CN 102902975 A (北京控制工程研究所) 30.1 月 2013 (30.01.2013) 全文	1-10
A	US 7906750 B2 (ESOLAR INC.) 15.3 月 2011 (15.03.2011) 全文	1-10

☐ 其余文件在 C 栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期
12.2 月 2014 (12.02.2014)

国际检索报告邮寄日期
06.3 月 2014 (06.03.2014)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:
中华人民共和国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088
传真号: (86-10)62019451

受权官员

黄珊
电话号码: (86-10) **62412637**

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2013/084700

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN 102915470 A	06.02.2013	无	
CN 102902975 A	30.01.2013	无	
US 7906750 B2	15.03.2011	US 2008236568 A1	02.10.2008
		CN 101680685 B	14.11.2012
		CN 101680685 A	24.03.2010
		WO 2008121335 A1	09.10.2008
		EP 2145137 A1	20.01.2010
		WO 2008121335A8	20.11.2008
		US 2011155119 A1	30.06.2011
		US 8153945 B2	10.04.2012

A. 主题的分类

G06Q 10/04 (2012.01) i

G06Q 50/06 (2012.01) i