

地球某时某地无大气简化模型以及大气晴朗天空模型下的地表太阳辐照度 GHI 的计算

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要: 太阳辐照度是测量到的电磁辐射功率, 单位为瓦特每平方米。根据测量方式的不同, 太阳辐照度分为不同的类型, 如直接法向辐照度和散射辐照度等。本文介绍了使用 python 进行程序设计对地表太阳辐照度 GHI 进行计算的方法, 并对不考虑大气衰减和晴朗天空模型两种情况进行了分类讨论。

关键词 太阳辐照度; 程序设计; 晴朗天空模型

中图分类号: TL929

文献标识码: A

The calculation of the surface solar irradiance GHI under the clear atmospheric sky model at some time

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Solar irradiance is the measured electromagnetic radiation power, the unit is watt per square meter. According to the different measurement methods, the solar irradiance is divided into different types, such as direct normal irradiance and scattering irradiance. This paper introduces the method of calculating surface solar irradiance GHI using python, and discusses two cases without considering atmospheric attenuation and clear sky model.

keyword: solar irradiance; programming; Clear sky model;

Middle figure classification number: TL929

Reference code: A

1 无大气模型下太阳辐照度公式推导

1.1 综述

太阳辐照度是在测量仪器的波长范围内测量到的以电磁辐射形式从太阳接收的单位面积功率, 单位表示为瓦特每平方米。太阳辐照度通常在给定时间段内进行积分, 计算出该时间段内排放到周围环境中的辐射能(焦耳/平方米)。根据辐照度在大气吸收和散射后在空间或地球表面的测量方式, 可以分为空间辐照度和地表辐照度, 空间辐照度是距离太阳、太阳周期和交叉周期变化的函数, 而地表辐照度则取决于测量表面的倾斜度、太阳离地高度及大气条件等。

太阳辐照度根据测量方式的不同分成不同的类型。直接法向辐照度(Direct Normal Irradiance, DNI)是指在给定位置的地球表面, 垂直于太阳辐射方向的平面测量到的太阳辐照度, 是大气上方的地外辐照度在除去到达地面时吸收和散射掉部分辐照度后的剩余, 而这个损失取决于一天中的时间(光通过大气层的路径长度取决于太阳仰角)、云量、含水量等。值得注意的是因为到太阳的距离不同, 大气上方的辐照度也随着时间的变化而变化。散射辐照度(Diffuse Horizontal Irradiance, DHI)是指在水平面上测量得到的大气散射光在地球表面的辐射, 来自于天空中所有的点。其值与太阳高度和大气透明度有关。若大气透明度非常好, 则几乎没有 DHI。

1.2 相关物理量

1.2.1 赤纬 (Declination)

符号表示为 δ ，是天文学中赤道坐标系中的两个坐标数据之一，与地球上的纬度相似，是纬度在天球上的投影。赤纬的单位是度，天赤道为 0 度，北半球赤纬度数为正数，南半球赤纬度数为负数。由于天体运动和地轴变化，赤纬随着时间的变化而变化。太阳的赤纬表示太阳入射光与地球赤道的角度，由于地球自转轴与公转平面之间的角度基本不变，因此太阳赤纬随季节不同而有周期性变化，变化的周期等于地球的公转周期。忽略一天中不同时刻对太阳赤纬角影响，太阳赤纬可如此计算

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(2\pi \times \frac{284 + N}{365}\right) \quad (1)$$

其中， N 表示一年中第几天，余弦中的单位表示弧度。

1.2.2 太阳高度角

太阳高度角也称太阳高度，指某地太阳光线与当地地平面所交的最小线面角，当太阳高度角为 90 度时，辐照强度最大。在夜间太阳高度角为负值，日出和日落时，太阳高度角为 0，上午太阳高度角逐渐增大达到最大时又逐渐减小。

太阳高度角计算公式如式所示：

$$\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2)$$

其中， h 表示当地太阳时间的小时角， δ 表示太阳赤纬， ϕ 表示当地的纬度

1.2.3 太阳常数 G_0

太阳常数是测量单位面积平均太阳电磁辐射(总太阳辐照度)的通量密度，也即距离太阳一个天文单位处(约为地球离日平均距离，单位面积受到垂直入射的平均太阳辐射强度，取 $1368W/m^2$ 。

1.2.4 日地距离修正系数 k

地球公转轨道为椭圆，由于日地距离随着时间变化，故在计算太阳常数时需要乘以一个与时间相关的系数

若忽略一天中不同时刻对日地距离的影响，日地距离修正系数可如此计算，式中

$$k = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0.034 \left[\cos\left(\frac{2\pi}{365} N\right) \right] \quad (3)$$

其中 r_0 表示日地平均距离， r 表示日地距离， N 表示一年中的第几天

1.2.5 太阳时角 ω

在计算某地太阳辐射时采用的是当地的真太阳时，所以需要根据当地的区时和经度来求取对应的真太阳时和太阳时角，此求取过程分步完成：①根据当地经度对已知的当地区时

进行修正得到当地的地方时；②根据真太阳时和平太阳时之间的时差对该地方时进行修正得到当地的真太阳时；③根据当地的真太阳时计算得到当地区时对应的太阳时角。

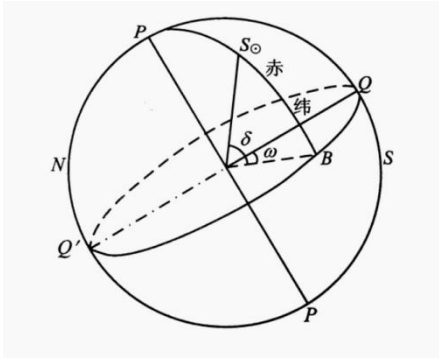


图 1 赤纬角示意图

Fig 1.Schematic diagram of red latitude Angle

当以赤道坐标系确定太阳 S_0 位置时，引入 2 个坐标，见图 1。第 1 个坐标是圆弧 QB ，称为时角，以 ω 表示.时角指从天子午圈上的 Q 点算起，即从太阳时的正午起算，按顺时针方向计量为正，逆时针方向计量为负，即上午为负，下午为正，数值等于离正午的时间乘以 15° ，即

$$\omega = (\tau_e - 12) \times 15^\circ \tag{4}$$

式中 ω 为真太阳时， τ_e 为当地地方时。

1.3 计算公式

全局水平辐照度(Global Horizontal Irradiance, GHI)是太阳在地球表面上的总辐照度，与直接法向辐照度和散射辐照度有直接的关系。由图 2 可知，太阳光斜入射时，辐照度将变为正入射时的太阳辐照度乘以太阳高度角的正弦。

计算如式

$$GHI = DHI + DNI \times \sin(h)$$

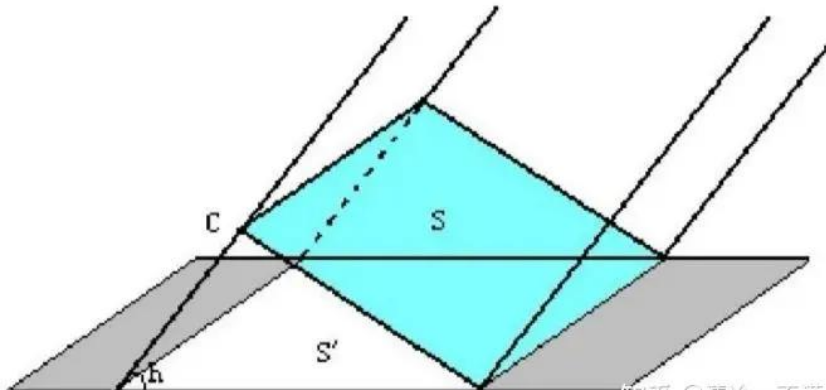


图 2 太阳斜射示意图

Fig 2.A Schematic diagram of the solar oblique radiation

在不计大气衰减以及散射时，地表接收到的太阳辐照度就是在 DHI 为 0 时的 GHI 。此时

DNI 如此计算

$$DNI = kG_0 \quad (5)$$

则太阳辐照度为

$$GHI = DNI \times \sin(h) \quad (6)$$

2 晴朗天空模型下的太阳辐照度

2.1 综述

Ineichen 经过拟合得出了在无云的晴朗天空模型下, 计算了大气衰减以及大气吸收、大气散射的太阳辐照度。晴空模型是根据太阳仰角、场地高度、气溶胶浓度、水汽与各种大气条件, 估算出无云天空下地面全局水平辐照度(Global Horizontal Irradiance, GHI)。简单的晴空辐照度模型由 DNI 和 DHI 确定。

2.2 相关物理量

2.2.1 大气林克浑浊度系数 (L_T)

$$L_T = 3.91e^{0.689\frac{p_0}{p}} aod_{550} + 0.376 \ln(w) + 2 + 0.54 \frac{p_0}{p} - 0.5 \left(\frac{p_0}{p} \right)^2 + 0.16 \left(\frac{p_0}{p} \right)^3 \quad (7)$$

式中 aod_{550} 表示 550 纳米大气气溶胶光学厚度, w 表示大气可降水水汽总量, p_0 表示海平面气压, p 表示某地气压

2.2.2 晴朗大气光学厚度 δ_{cda}

$$\delta_{cda} = 0.128 - 0.054 \log(AM) \quad (8)$$

式中大气质量系数 $AM = 2$

2.2.3 DNI 修正公式

$$DNI = kG_0 e^{-\delta_{cda} L_T AM} \quad (9)$$

2.2.4 DHI 修正公式

$$DHI = kG_0 e^{-\frac{\tau_d}{\sin h}} \quad (10)$$

式中 τ_d 代表大气总光学厚度, 是一个取值范围 0~1 的系数

2.3 计算公式

$$GHI = DHI + DNI \times \sin(h) \quad (11)$$

3 软件设计

本软件使用 python 语言进行编写。

3.1 无大气衰减时太阳辐照度

Pysolar 是一个由电气工程师 Brandon Stafford 编写的 Python 库的集合，用于模拟太阳对地球上任何点的照射。它包括用于极其精确的星历计算的代码等等。

Datetime 是 Python 的标准库，可以将日期字符串转换为标准日期格式，也可以实现 UTC 时间与地方时的转换。

我采用 datetime.strptime（）方法将字符串转换为标准日期格式，并使用 datetime.timedelta（）方法将地方时转换为 UTC 时间。利用 get_altitude（）函数计算太阳高度角，最后利用公式（5）计算太阳辐照度。

```
def calculate_irradiance(self, time_str, latitude, longitude, utctime):
    """从 datetime 类型的时间计算当前大气外理论辐照度"""
    cur_time = datetime.datetime.strptime(time_str, '%Y-%m-%d %H:%M:%S')
    print(cur_time)
    day_year = int(datetime.datetime.strptime(cur_time, '%j'))    # j 是积日
    utc = datetime.datetime(cur_time.year, cur_time.month, cur_time.day, cur_time.hour,
cur_time.minute, 1, 130320, tzinfo=datetime.timezone(datetime.timedelta(hours=utctime)))
    print(utc)
    return self.calculate_irradiance_base(day_year, latitude, longitude, utc)
    def calculate_irradiance_base(self, day_year, latitude, longitude, utc):
        """
        北纬为正，东经为正
        latitude:所在纬度
        longitude:所在经度
        longitude_time:电站所采用时区的中心经度
        """
        G_0 = 1368    # 取太阳常数为 1368（W/m2）
        k = 1 + 0.034 * (math.cos(2 * math.pi / 365 * day_year))    # 计算日地距离修正系数
        altitude = get_altitude(latitude, longitude, utc)
        print(altitude)
        G = k * G_0 * math.sin(altitude/180*math.pi)
        if G < 0:
            G = 0
        self.printf(f'{G}')
```

3.2 晴朗天空模型下的太阳辐照度

Pvlib 是美国桑迪斯国家实验室编写的 python 库，用于利用现有模型对太阳辐照度进行模拟。pvlib-python 的核心使命是提供光伏系统模型的开放、可靠、可互操作和基准实现。有多少光伏系统建模者就有多少关于如何建模光伏系统的观点，因此 pvlib-python 提供了多种建模范例。

Pvlib 中定义的 location 类可以根据经纬度以及时间信息在库内查阅某地大气总光学厚度、大气气溶胶光学厚度、大气可降水水汽总量以及大气压。类的 get_clearsky() 可以通过公式 (11) 计算 GHI。

```
def clearsky(self, site_location, time_str):
    cur_time = datetime.datetime.strptime(time_str, '%Y-%m-%d %H:%M:%S')
    times = pd.date_range(start='2008-06-25 14:35', freq='1min', periods=20, tz=site_location.tz)
    # 使用默认的内部模型生成晴天数据
    start=f'{cur_time.year}-{cur_time.month}-{cur_time.day} {cur_time.hour}:{cur_time.minute}'
    # get_clearsky 方法返回具有 GHI、DNI 和 DHI 值的数据表
    clearsky = site_location.get_clearsky(times)
    irradiance = pd.DataFrame({'GHI': clearsky['ghi'], 'DNI': clearsky['dni'], 'DHI': clearsky['dhi']})
    irradiance.index = irradiance.index.strftime("%H:%M")
    output = str(irradiance['GHI'].iloc[0])
    self.printf(output)
```

3.3 日期选择组件

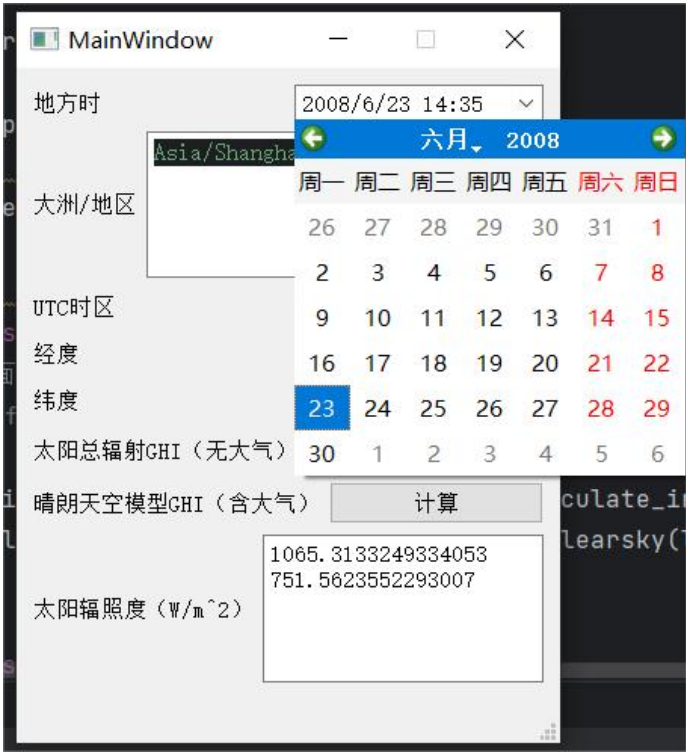


图 3 日期选择界面

Fig 3. Date selection interface

如图 3 所示，利用日期选择控件可以较为方便地选择时间。同时时区和经纬度的输入框采用了 spinbox 设计，避免用户输入除数字以外的其他字符。大洲/地区采用选择框，人性

化设计。太阳辐照度的输出框采用 textbrowser 组件，在输出时可以模拟 printf 格式化输出语句，更加符合用户的习惯。

4 计算结果示例

如图 4 所示，若不考虑大气，对 2008 年 6 月 23 日下午 14: 35 分，经度 122 度，纬度 30 度上海市地表所接收的 GHI 太阳辐照度进行计算，所得结果为 $1065W/m^2$ 。

在考虑大气各种效应时，如图 5 所示，计算 2008 年 6 月 23 日下午 14: 55 分上海某地的太阳辐照度为 $751W/m^2$ 。



图 4 无大气衰减下太阳辐照度计算结果

Fig 4. Calculation results of solar irradiance without atmospheric attenuation



图 5 考虑大气晴朗天空模型下太阳辐照度计算结果

Fig 5. The results of the solar irradiance calculation under the clear atmospheric sky model are considered

5 结果讨论

计算 2008 年 6 月 23 日下午 14:55 分上海某地的太阳辐照度为 $1065 W/m^2$ 。相当于太阳常数乘上太阳高度角 55° 的正弦，接近于理论值 $1368 \sin 53^\circ 26' W/m^2$ 。

计算 2008 年 6 月 23 日下午 14:55 分上海某地的太阳辐照度为 $751 W/m^2$ 。如图 6 所示，计算结果与实际地表接收的辐照度较为接近。

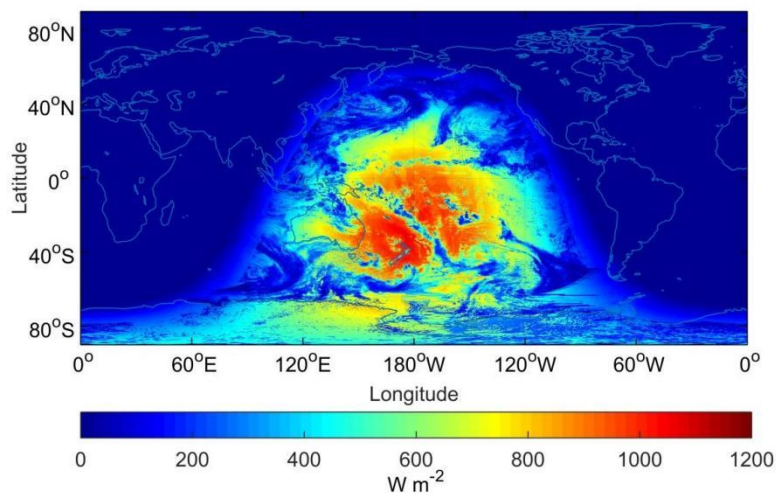


图 6. 2009 年 1 月 1 日 0 时（世界时）全球太阳辐射空间分布

Fig 6. Global spatial distribution of solar radiation at 0:00 on January 1, 2009
(WN)

参考文献

- [1] 丁莉君, 李宏燕. 应用于太阳辐照度的几类相关参数的计算 [J]. 宁夏工程技术, 2015, 14(01): 7-9+15.
Ding Lijun, Li Hongyan. Applied to the calculation of several classes of relevant parameters for solar irradiance [J]. Engineering Technology of Ningxia, 2015, 14(01): 7-9 + 15.
- [2] 于琼燕, 刘帅帅, 李海东等. 太阳高度角计算公式及光伏应用 [J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2017, 29(03): 77-80. DOI:10.16203/j.cnki.41-1397/n.2017.03.017.
Yu Qiongyan, Liu Shuaishuai, Li Haidong, etc. Solar height Angle calculation formula and photovoltaic application [J]. Journal of Henan Institute of Engineering (Natural Science edition), 2017, 29(03): 77-80. DOI:10.16203/j.cnki.41-1397/n. 2017.03. 017.
- [3] 马高红. 深度学习在太阳辐照度预测中的应用 [D]. 兰州交通大学, 2022. DOI:10.27205/d.cnki.gltec.2022.001220.
Ma Gaohong. Application of deep learning in solar irradiance prediction [D]. Lanzhou Jiaotong University, 2022. DOI:10.27205/d.cnki.gltec. 2022.001220.
- [4] Debayan Paul, Giuseppe De Michele, Behzad Najafi, Stefano Avesani, Benchmarking clear sky and transposition models for solar irradiance estimation on vertical planes to facilitate glazed facade design, Energy and Buildings, Volume 255, 2022, 111622, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111622>.
- [5] Tang W, Yang K, Qin J, et al. A 16-year dataset (2000 - 2015) of high-resolution (3 h, 10 km) global surface solar radiation [J]. Earth System Science Data, 2019, 11:1905-1915. DOI:10.5194/essd-11-1905-2019.