

几种散射辐射模型精度的对比

姚万祥¹, 李峥嵘¹, 赵 群², 胡玲周¹

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092)

摘要: 通过对既有散射辐射模型的分析, 结合上海地区太阳辐射实测数据, 建立了各向异性散射辐射新模型, 其后从天气类型、朝向、季节和倾角等方面对新模型及既有模型的精度进行了对比分析。对天气类型的研究表明, 阴天或多云天时, Klucher 模型、Hay 模型及 Skartveit 和 Olseth 模型与实测值较为吻合; 但晴天时, Perez 模型和新各向异性散射辐射(NADR)模型更佳。对朝向的研究表明, 对于东向和北向, Perez 模型和 NADR 模型较为准确; 而对于南向和西向, Liu 和 Jordan 模型, NADR 模型较为准确。对季节的研究表明, 夏秋季 Perez 模型和 NADR 模型较为准确; 秋冬季 Liu 和 Jordan 模型, NADR 模型较为准确。对于倾角的研究表明, Klucher 模型与实测值较为吻合, 各类散射辐射模型在计算倾角较小的倾斜面散射辐射精度优于倾角较大的情况。对天气、朝向、季节和倾角等多因素的综合考虑表明, Temps 和 Coulson 模型, Gueymard 模型准确性相对较低, 而 NADR 模型的准确性最高。

关键词: 散射辐射; 各向异性; 新模型; 精度

中图分类号: P422.3

文献标志码: A

the measured values, but for clear days, Perez model and new anisotropic diffuse radiation (NADR) model are better. Research on orientation shows that for the east and the north, Perez model and NADR model are more accurate, but for the south and the west, Liu & Jordan model and NADR model are better. Research on season shows that for summer and autumn, Perez model and NADR model are more accurate, but for autumn and winter, Liu & Jordan model and NADR model are better. Research on inclination shows that Klucher model is more consistent with the measured values. All kinds of diffuse radiation models in calculation diffuse radiation of small angle of inclination are better than the large angle of inclination. A comprehensive consideration of weather type, orientation, season, inclination and son on shows that the Temps & Coulson model and Gueymard model are of a lower accuracy, while NADR model is of the highest accuracy of all.

Key words: diffuse radiation; anisotropic; new model; accuracy

Comparative Study on Accuracy of Several Diffuse Radiation Models

YAO Wanxiang¹, LI Zhengrong¹, ZHAO Qun², HU Lingzhou¹

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on an analysis of the existing diffuse radiation models in combination with the measured solar radiation data in Shanghai, a new anisotropic diffuse radiation model was established. Then, its accuracy was compared with the existing models in terms of the weather type, orientation, season and inclination. Research on weather types shows that for cloudy and partially cloudy days, Klucher model, Hay model and Skartveit & Olseth model are more consistent with

太阳能热利用、光伏发电以及利用太阳能的被动式技术都需要以准确可靠的太阳辐射数据为基础^[1]。气象站及现场实测所能提供的水平面太阳辐射数据作用有限, 而倾斜面接收到的太阳辐射往往应用更为广泛, 这迫切需要通过散射辐射模型来合理地计算散射辐射。太阳散射辐射模型方面的研究可分为三个阶段: 第一阶段模型以各向同性散射辐射模型为主, 无法适用于多云天及晴天的天气状况, 以为 Liu 和 Jordan 模型^[2]为代表。第二阶段模型以在各向同性散射辐射模型基础上进行各种修正得到的各向异性散射辐射模型为主, 一般是在第一阶段各向同性模型的基础上作修正以适应多云天及晴天的天气状况, 其中较为典型的有 Temps 和 Coulson 模型^[3]、Klucher 模型^[4]、Hay 模型^[5]、Skartveit 和

收稿日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(51278349)

第一作者: 姚万祥(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为建筑节能与遮阳。E-mail: yaowanxiang@126.com

通讯作者: 李峥嵘(1969—), 女, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为建筑节能与遮阳。E-mail: lizhengrong@tongji.edu.cn

Olseth 模型^[6]、Reindl 模型^[7]. 这一阶段模型虽然形式相对简单,具有一定的实用价值,但由于只是在各向同性模型基础上进行修正,其物理意义不明确,准确性相对较低. 第三阶段模型采用构建散射辐射微元后积分求解的方法,其中 Gueymard 模型^[8]、Muneer 模型^[9-10]都是在 Steven 和 Unsworth 模型^[11]基础上发展而来的,而 Steven 和 Unsworth 模型是通过 Moon 和 Spencer 模型^[12]进行积分求解得到的,其核心指标是亮度(辐射)分布指数对计算结果的准确性影响较大. Perez 模型^[13]则是按辐射强度及立体角定义构建的,将太阳散射辐射分解为环日散射辐射、天边散射辐射、天顶散射辐射三个区域,并假设各区域内是各向同性的,在此基础上对这三个区域分别进行积分求解,但该模型中的天顶散射辐射区域实际上并不是各向同性的,众多实测结果和研究^[14-15]表明与太阳所在位置呈 90° 夹角的区域存在明显的散射辐射削弱(该区域对应的散射辐射以下简称正交散射辐射).

在对既有模型和太阳辐射观测数据分析的基础上,本文提出了各向异性散射辐射新模型,并以实测数据从天气类型、朝向、季节和倾角等方面对这些模型的精度和适用性进行了对比分析.

1 各向异性散射辐射新模型的构建

1.1 区域划分及积分解

根据太阳散射辐射在空间的分布特性将太阳散射辐射分为 4 个部分:环日散射辐射、正交散射辐射、天边散射辐射和天顶散射辐射,并假设各区域内部是各向同性的,而区域之间各向异性.

(1) 水平面总散射辐射

基于辐射强度及立体角的定义,对水平面环日散射辐射、正交散射辐射、天边散射辐射和天顶散射辐射分别进行积分求解,并将这 4 个区域的散射辐射叠加得到水平面总散射辐射如式(1)所示:

$$I_{h,d} = \pi I_s \left[1 + 2(1 - \cos \alpha) \chi_h(\theta_z)(F_1 - 1) + 2(1 - \cos \zeta) \chi_h\left(\frac{\pi}{2} - \theta_z\right)(F_2 - 1) + \frac{1}{2}(F_3 - 1)(1 - \cos(2\xi)) \right] \quad (1)$$

式中: $I_{h,d}$ 为水平面总散射辐射, $W \cdot m^{-2}$; I_s 为天顶散射辐射照度, $W \cdot m^{-2}$; α 为环日球冠顶角的 1/2, ($^\circ$); θ_z 为天顶角, ($^\circ$); ζ 为正交球冠顶角的 1/2, ($^\circ$); ξ 为天边辐射增强区域对应的角度, ($^\circ$); F_1 为环日辐射增强系数; F_2 为正交辐射削弱系数; F_3 为天边辐射增强系数; $\chi_h(\theta_z)$ 为水平面可以看到的环日散射辐射区域比例; $\chi_h\left(\frac{\pi}{2} - \theta_z\right)$ 为水平面可以看到的正交散射辐射区域比例.

(2) 倾斜面总散射辐射

按同样的方法,对倾斜面(倾角为 β) 环日散射辐射、正交散射辐射、天边散射辐射和天顶散射辐射分别进行积分求解,并将这 4 个区域的散射辐射叠加得到倾斜面总散射辐射如式(2)和式(3)所示:

当 $\beta \leq \xi$ 时,

$$I_{t,d} = \pi I_s \left[0.5(1 + \cos \beta) + 2(1 - \cos \alpha) \chi_c(\theta)(F_1 - 1) + 2(1 - \cos \zeta) \chi_c\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)(F_2 - 1) + 0.5(F_3 - 1)(\cos \beta - \cos(2\xi)) \right] \quad (2)$$

式中: β 为倾斜面的倾角, ($^\circ$); $I_{t,d}$ 为倾斜面总散射辐射, $W \cdot m^{-2}$; θ 为倾斜面的太阳光线入射角, ($^\circ$); $\chi_c(\theta)$ 为倾斜面可以看到的环日散射辐射区域比例; $\chi_c\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$ 为倾斜面可以看到的正交散射辐射区域比例.

当 $\beta > \xi$ 时,

$$I_{t,d} = \pi I_s \left\{ 0.5(1 + \cos \beta) + 2(1 - \cos \alpha) \chi_c(\theta)(F_1 - 1) + 2(1 - \cos \zeta) \chi_c\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)(F_2 - 1) + \left[-\frac{\cos(2\xi)}{2} + \frac{1}{2\pi}(1 + \cos(2\xi)) \arccos(\tan \xi \cot \beta) + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin \xi \csc \beta) \cos \beta \right] (F_3 - 1) \right\} \quad (3)$$

1.2 新模型的建立

根据式(1)~(3)得到通过水平面散射辐射求解倾斜面散射辐射的各向异性散射辐射新模型(new anisotropic diffuse radiation model, NADR 模型)如式(4)所示:

$$I_{t,d} = I_{h,d} \left\{ \frac{0.5(1 + \cos \beta) + a(\theta)(F_1 - 1) + b(\beta)(F_2 - 1) + c(\beta)(F_3 - 1)}{1 + d(\theta_z)(F_1 - 1) + e(\theta_z)(F_2 - 1) + f(F_3 - 1)} \right\} \quad (4)$$

式中: $a(\theta)$ 为倾斜面环日散射辐射的立体角, $a(\theta) = 2(1 - \cos \alpha) \chi_c(\theta)$, 球面度(sr); $b(\beta)$ 为倾斜面正交散

射辐射的立体角, $b(\beta) = 2(1 - \cos \zeta) \chi_c(\frac{\pi}{2} - \theta)$, 球面度(sr); $c(\beta)$ 为倾斜面天边散射辐射的立体角, 球面度(sr); $d(\theta_z)$ 为水平面环日散射辐射的立体角, $d(\theta_z) = 2(1 - \cos \alpha) \chi_h(\theta_z)$, 球面度(sr); $e(\theta_z)$ 为水平面正交散射辐射的立体角, $e(\theta_z) = 2(1 - \cos \zeta) \chi_h(\frac{\pi}{2} - \theta_z)$, 球面度(sr); f 为水平面天边散射辐射的立体角, $f = 0.5(1 - \cos 2\xi)$, 球面度(sr). $c(\beta)$ 的表达式如下:

$$c(\beta) = \begin{cases} 0.5(\cos \beta - \cos 2\xi), & \beta \leq \xi \\ -\frac{1}{2}\cos 2\xi + \frac{1}{2\pi}(1 + \cos 2\xi) \cdot \\ \quad \arccos(\tan \xi \cot \beta) + \\ \quad \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin \xi \csc \beta) \cos \beta, & \beta > \xi \end{cases}$$

2 散射辐射数据采集及分析方法

2.1 散射辐射数据的采集

由于需要求解辐射增强(削弱)系数 $F_1 \sim F_3$ 及对散射辐射模型进行验证, 因此需要采集水平面及不同朝向不同倾角倾斜面的散射辐射数据. 笔者采用法国凯茂仪器公司(KIMO)的太阳辐射计 SL100 及 SL200 在同济大学彰武路校区(121.51°E, 31.28°N)某楼顶测得以下参数: 水平面太阳总辐射照度、直射辐射照度和地面反射辐射照度、各朝向 30°、45°、60°和 90°(即立面)倾斜面上的太阳总辐射照度及地面反射辐射. 测试时间为 2012 年 7 月~2012 年 12 月, 测试间隔为每 30 min 记录一次.

2.2 分析方法

2.2.1 统计学分析

由于统计学参数较多, 限于篇幅, 本文采用文献[16]中的综合性指标 Nash-Sutcliffe 方程值(以下简称 NSE, 以 N_{SE} 表示), 作为散射辐射模型精度的评价指标, 表达式如下:

$$N_{SE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - c_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - m_a)^2} \quad (5)$$

式中: m_i 为散射辐射实测值, $W \cdot m^{-2}$, 视测试变量而定; c_i 为散射辐射计算值, $W \cdot m^{-2}$, 视测试变量而定; m_a 为散射辐射实测值的平均值, $W \cdot m^{-2}$, 视测试变量而定. N_{SE} 的取值区间为 $(-\infty, 1]$, 它表征了计算值与实测值的吻合程度, N_{SE} 越接近于 1, 计算值与实测值的误差越小, 模型越准确; 反之误差越

大, 模型越不准确.

2.2.2 典型情境分析

根据不同的影响因素, 分别选择典型天气、朝向、季节和倾角, 对实测值与模型计算值进行对比分析.

3 几种散射辐射模型的精度分析

根据对实测数据和既有模型的分析可知, 散射辐射主要受以下因素影响: 天气类型、朝向、季节和倾角.

3.1 天气对模型精度的影响

3.1.1 天气类型的划分

天气类型一般是按照晴空指数 k_t 来划分, 根据相关文献[17]并结合上海地区的实测数据对天气类型的划分如下: 阴天: $0 < k_t \leq 0.3$; 多云天: $0.3 < k_t \leq 0.6$; 晴天: $0.6 < k_t < 1$.

3.1.2 不同天气类型下散射模型的精度分析

通过 2012 年 7 月~12 月在同济大学彰武路校区(121.51°E, 31.28°N)实测所得的水平面及各朝向倾角为 30°、45°、60°、90°, 每 30 min 记录一次的瞬时太阳散射辐射数据, 分析天气类型对 NADR 模型及文献中^[2-10, 13]典型模型精度的影响见表 1.

表 1 不同天气类型下散射辐射模型的精度

Tab.1 Accuracy of diffuse radiation model under different weather types

模型	N_{SE}		
	阴天	多云	晴天
Liu 和 Jordan 模型	0.533	0.384	0.411
Temps 和 Coulson 模型	0.586	0.355	0.219
Klucher 模型	0.821	0.690	0.405
Hay 模型	0.788	0.563	0.103
Skartveit 和 Olseth 模型	0.788	0.563	0.103
Reindl 模型	0.769	0.524	0.054
Gueymard 模型	0.261	0.223	-0.021
Muneer 模型	0.476	0.403	0.057
Perez 模型	0.546	0.425	0.433
NADR 模型	0.515	0.478	0.535

由表 1 可知, 阴天或多云时, Klucher 模型、Hay 模型及 Skartveit 和 Olseth 模型与实测值较为吻合, 这是由于这三个模型在各向同性散射辐射模型基础上的修正, 而多云天的不确定性又削弱了各向异性; 晴天时, Perez 模型和 NADR 模型的计算值与实测值更接近, 因为晴天时环日区域及与其呈正交的区域较为明显, 辐射增强(削弱)效果较为明显, 这更符合这两个积分模型各向异性的假设前提.

以典型天气状况下南向 90°立面全天散射辐射

实测值为例,与模型计算值对比如图 1—3 所示。

由图 1 可知,阴天时全天不同时刻的散射辐射都较小,除 Temps 和 Coulson 模型的计算值略大于实测值外,其余模型的计算值与实测值基本吻合,全天波动不大,且都与各向同性的 Liu 和 Jordan 模型计算值较为接近,这是由于阴天时,太阳总辐射被削弱,直射辐射被遮挡,各向同性增强。

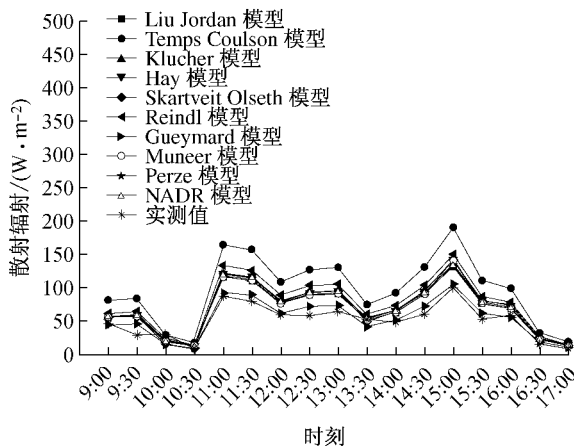


图 1 南向 90°立面阴天散射辐射模型计算值与实测值

Fig.1 The calculated values by diffuse radiation models and the measured values on the south facade on a cloudy day

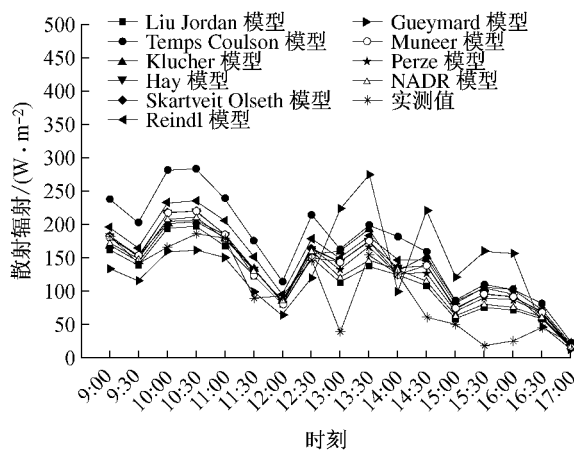


图 2 南向 90°立面多云天散射辐射模型计算值与实测值

Fig.2 The calculated values by diffuse radiation models and the measured values on the south facade on a partially cloudy day

由图 2 可知,由于云的影响(云量、云层高度、云相对于太阳的位置),散射辐射的实测值波动较大,且随机性较强;除 Temps 和 Coulson 模型部分时段的计算值(9:00~12:00)大于实测值,Gueymard 模型的计算值波动较大,且与实测值存在较大误差外,大部分模型计算值接近,与实测值偏差较小。

由图 3 可知,晴天时各模型的计算值整体趋势

与实测值一致,但差距明显,其中 Gueymard 模型的计算值大部分时间(9:00~13:30)明显偏大, Temps 和 Coulson 模型、Klucher 模型和 Reindl 模型的计算值略大于实测值,其余模型的计算值与实测值较为接近。

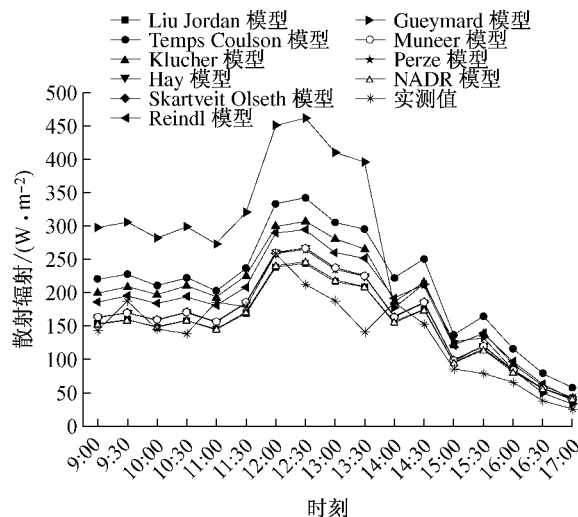


图 3 南向 90°立面晴天散射辐射模型计算值与实测值

Fig.3 The calculated values by diffuse radiation models and the measured values on the south facade on a clear day

3.2 朝向对模型精度的影响

以不同朝向的散射辐射数据对比分析朝向对 NADR 模型及文献中^[2-10,13]典型模型精度的影响见表 2。

表 2 不同朝向散射辐射模型的精度

Tab.2 Accuracy of diffuse radiation models with different orientations

模型	N_{SE}			
	东向	南向	西向	北向
Liu 和 Jordan 模型	0.258	0.658	-0.244	-3.884
Temps 和 Coulson 模型	-1.701	-0.428	-2.697	-17.674
Klucher 模型	-0.392	0.276	-0.968	-9.742
Hay 模型	0.020	-0.608	-2.978	-1.920
Skartveit 和 Olseth 模型	0.019	-0.607	-2.978	-1.923
Reindl 模型	0.064	-0.900	-3.189	-1.715
Gueymard 模型	-0.720	-2.040	-3.206	-7.040
Muneer 模型	0.028	-0.583	-2.912	-1.984
Perez 模型	0.514	-0.091	-0.314	0.178
NADR 模型	0.622	0.492	0.323	-0.060

由表 2 可知,对于东向和北向,Perez 模型和 NADR 模型较为准确,这是由于这两个模型中的天边辐射较好地解释了北向散射辐射的各向异性;对于南向和西向,Liu 和 Jordan 模型和 NADR 模型较为准确,这是由于南向和西向的直射辐射较为强烈,持续时间较长,其散射辐射相对较弱,更趋向于各向

同性的 Liu 和 Jordan 模型,而 NADR 模型中的正交散射辐射一定程度上削弱了环日散射辐射的效果,因而也与实测值较为吻合。

典型晴天各朝向 90° 立面散射辐射实测值与模型计算值对比如图 4—5 所示,其中南向见图 3,晴天西向 90° 立面散射辐射的变化趋势大致与东向呈对称分布。

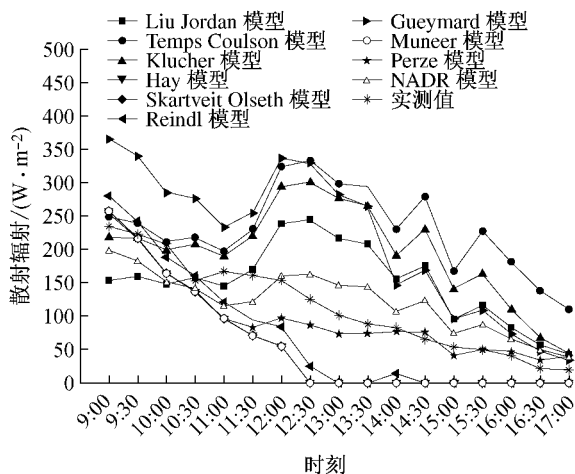


图 4 晴天东向 90° 立面散射辐射模型计算值与实测值

Fig.4 The calculated values by diffuse radiation models and the measured values on the east facade on a clear day

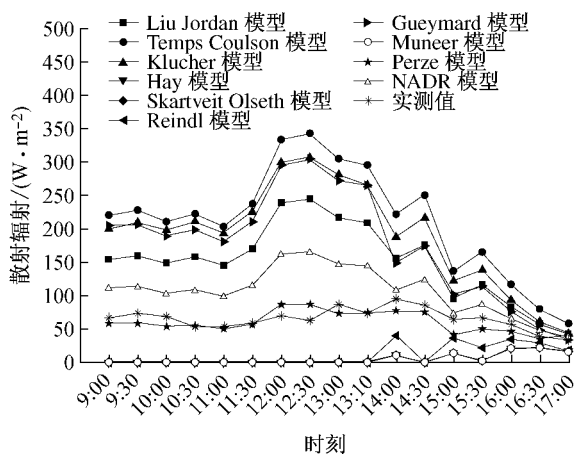


图 5 晴天北向 90° 立面散射辐射模型计算值与实测值

Fig.5 The calculated values by diffuse radiation models and the measured values on the north facade on a clear day

由图 4—5 可知,晴天各朝向 90° 立面散射辐射实测值的全天变化主要受太阳直射点移动及太阳高度角变化的影响。各模型的计算值相差较大,其中各向同性的 Liu 和 Jordan 模型以及基于各向同性模型修正的 Temps 和 Coulson 模型、Klucher 模型和 Gueymard 模型的计算值一般均大于实测值(如东向

下午、西向上午,北向全天),因为这两类模型一般仅考虑天气、太阳方位角及高度角对散射辐射的影响,而未考虑朝向;Hay 模型、Skartveit 和 Olseth 模型、Reindl 模型和 Muneer 模型在无直射的情况下(如东向下午、西向上午,北向全天),其计算值趋近于 0 或等于 0,与实测值存在明显偏差,这是由于其对于朝向的考虑主要基于环日散射辐射,而忽视了天空的其他部分(正交散射辐射、天边散射辐射、天顶散射辐射);而 Perez 模型和 NADR 模型的计算值与实测值误差最小,因为其综合考虑了天气、太阳高度角、朝向对散射辐射的影响。

3.3 季节对模型精度的影响

由于太阳辐射受直射点的影响较大,而直射点的变动反映了不同的季节,因此根据天文学上“二至二分”(即春分日、夏至日、秋分日、冬至日)将 2012 年 7 月~12 月的散射辐射数据分为夏秋季(7 月 22 日~9 月 22 日)和秋冬季(9 月 23 日~12 月 22 日),对比分析季节对 NADR 模型及文献中^[2-10,13]典型模型精度的影响见表 3。

表 3 不同季节散射辐射模型的精度(NSE)

Tab.3 Accuracy of diffuse radiation models in different seasons

模型	NSE	
	夏秋季	秋冬季
Liu 和 Jordan 模型	-0.253	0.225
Temps 和 Coulson 模型	-2.831	-2.169
Klucher 模型	-1.094	-0.699
Hay 模型	-0.375	-1.245
Skartveit 和 Olseth 模型	-0.376	-1.245
Reindl 模型	-0.390	-1.435
Gueymard 模型	-2.153	-2.052
Muneer 模型	-0.392	-1.202
Perez 模型	0.237	0.045
NADR 模型	0.288	0.383

由表 3 可知,夏秋季时,Perez 模型和 NADR 模型较为准确,这是因为夏季太阳辐射较为强烈,环日散射辐射较大,这两个模型中的环日散射辐射起主导作用;秋冬季时,Liu 和 Jordan 模型,NADR 模型较为准确,这是由于此时太阳辐射相对较弱,环日散射辐射较小,其相对趋向于各向同性,而 NADR 模型中正交散射辐射的削弱作用得以发挥,也与实测值较为吻合。

3.4 倾角对模型精度的影响

以不同倾角倾斜面接收到的散射辐射实测数据对比分析倾角对 NADR 模型及文献中^[2-10,13]典型模型精度的影响见表 4。

由表 4 可知,对于不同倾角,Klucher 模型都能

与实测值较为吻合,这是由于该模型在各向同性模型基础上增加了与散射比有关的调整系数和与倾角有关的调整系数,前者可以适应不同的天气状况,后者可以适应不同的倾角;此外,对于 30°倾角, Hay 模型, Skartveit 和 Olseth 模型与实测值较为吻合;对于 45°倾角, Temps 和 Coulson 模型与实测值较为吻合;对于 60°和 90°倾角, NADR 模型与实测值也较为吻合. 此外,倾角越大,模型的 N_{SE} 值越小,这表明各类散射辐射模型在计算倾角较小的倾斜面散射辐射精度优于倾角较大的情况.

表 4 不同倾角散射辐射模型的精度
Tab.4 Accuracy of diffuse radiation models in different inclinations

模型	N_{SE}			
	30°	45°	60°	90°
Liu 和 Jordan 模型	0.502	0.451	0.358	0.358
Temps 和 Coulson 模型	0.644	0.604	0.373	0.373
Klucher 模型	0.733	0.708	0.581	0.581
Hay 模型	0.705	0.445	0.164	0.164
Skartveit 和 Olseth 模型	0.705	0.445	0.164	0.164
Reindl 模型	0.692	0.437	0.069	0.069
Gueymard 模型	0.274	0.313	0.246	0.246
Muneer 模型	0.535	0.278	0.084	0.084
Perez 模型	0.546	0.460	0.371	0.371
NADR 模型	0.563	0.511	0.450	0.387

典型晴天南向不同倾角散射辐射实测值与模型计算值的对比如图 6 所示.

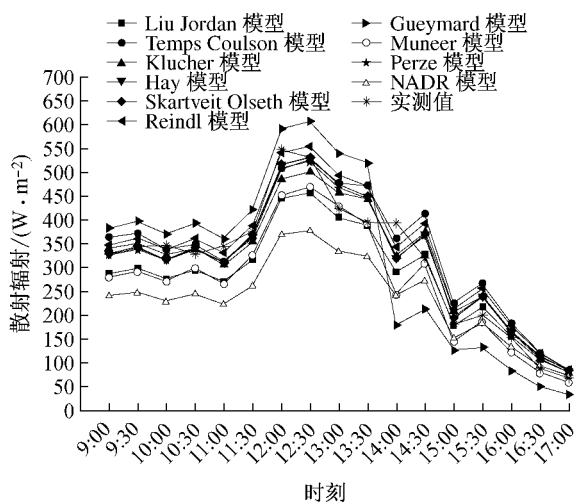


图 6 晴天南向 30°倾角散射辐射模型计算值与实测值对比
Fig.6 The calculated values by diffuse radiation models and the measured values of 30° inclination on a clear day

由图 6 可知,晴天南向 45°、60°和 30°倾角散射辐射的变化趋势基本一致,即受直射点及太阳高度角的影响,先增大后减小.除 Gueymard 模型在倾角

较大时误差较大外,其余模型的计算值与实测值相差不大,即各模型都考虑到了倾角的影响.

3.5 多因素对模型精度的综合影响

在实际计算或者模拟中经常是以建筑或者多表面为研究对象,而非特定朝向、倾角的表面,此时需要考虑多因素的综合影响.因此,笔者在对以上单影响因素的综合 N_{SE} 的计算基础上,进一步分析了多因素影响下散射辐射模型精度的 N_{SE} 值见表 5.

表 5 多因素影响下散射辐射模型的精度
Tab.5 Accuracy of diffuse radiation models under the influence of multiple factors

模型	N_{SE}				
	天气	朝向	季节	倾角	综合
Liu 和 Jordan 模型	0.443	-0.803	-0.014	0.417	0.069
Temps 和 Coulson 模型	0.387	-5.625	-2.500	0.498	-2.346
Klucher 模型	0.639	-2.706	-0.897	0.651	-0.808
Hay 模型	0.484	-1.372	-0.810	0.369	-0.894
Skartveit 和 Olseth 模型	0.484	-1.372	-0.810	0.369	-0.894
Reindl 模型	0.449	-1.435	-0.912	0.317	-1.018
Gueymard 模型	0.155	-3.252	-2.103	0.270	-2.032
Muneer 模型	0.312	-1.363	-0.797	0.245	-0.873
Perez 模型	0.468	0.072	0.141	0.437	0.131
NADR 模型	0.509	0.344	0.335	0.478	0.491

由表 5 可知,对三种天气状况综合考虑表明 Klucher 模型、Hay 模型、Skartveit 和 Olseth 模型、NADR 模型的 N_{SE} 值较大,模型准确性较高;对朝向的综合考虑表明,Perez 模型和 NADR 模型的 N_{SE} 值较大,与实测值的吻合程度相对较高;对季节的综合考虑表明 NADR 模型的 N_{SE} 值最高,Perez 模型次之;对倾角的综合考虑表明 Temps 和 Coulson 模型、Klucher 模型、NADR 模型的 N_{SE} 值较大,与实测值较为吻合.而对多因素的综合考虑表明 Temps 和 Coulson 模型、Gueymard 模型的 N_{SE} 值最小,其准确性相对较低,而 NADR 模型的 N_{SE} 值最大,其准确性最高.

4 结论

通过上海地区太阳辐射实测数据对既有散射辐射模型及 NADR 模型的对比如分析可得到如下主要结论:

(1) 阴天或多云时,Klucher 模型、Hay 模型、Skartveit 和 Olseth 模型与实测值较为吻合;晴天时,Perez 模型和 NADR 模型的计算值与实测值更接近.对典型天气的分析表明:阴天时除 Temps 和 Coulson 模型的计算值略大于实测值外,其余模型的计算值与实测值基本吻合,且都与各向同性的 Liu

和 Jordan 模型计算值较为接近。

(2) 对于东向和北向, Perez 模型和 NADR 模型较为准确;对于南向和西向, Liu 和 Jordan 模型、NADR 模型较为准确。对晴天典型朝向的分析表明 Liu 和 Jordan 模型、Temps 和 Coulson 模型、Klucher 模型和 Gueymard 模型的计算值一般均大于实测值; Hay 模型、Skartveit 和 Olseth 模型、Reindl 模型和 Muneer 模型在无直射的情况下,其计算值趋近于 0 或等于 0,与实测值存在明显偏差;而 Perez 模型和 NADR 模型的计算值与实测值误差最小。

(3) 夏秋季时, Perez 模型和 NADR 模型较为准确;秋冬季时, Liu 和 Jordan 模型、NADR 模型较为准确。

(4) 对于不同倾角, Klucher 模型都能与实测值较为吻合;对于 30° 倾角, Hay 模型、Skartveit 和 Olseth 模型与实测值较为吻合;对于 45° 倾角, Temps 和 Coulson 模型与实测值较为吻合;对于 60° 和 90° 倾角, NADR 模型与实测值也较为吻合。此外, 各类散射辐射模型在计算倾角较小的倾斜面散射辐射精度优于倾角较大的情况。对晴天南向不同倾角散射辐射的分析表明:除 Gueymard 模型在倾角较大时误差较大外,其余模型的计算值与实测值相差不大。

(5) 对天气、朝向、季节和倾角等多因素的综合考虑表明 Temps 和 Coulson 模型、Gueymard 模型准确性相对较低,而 NADR 模型的准确性最高。太阳散射辐射主要影响因素是晴空指数和太阳高度角,因此本文结论适用于晴空指数分布及地理纬度与上海相近的地区,如江苏南部(苏州、无锡等)、安徽、河南、湖北、浙江、江西北部、湖南北部。

参考文献:

- [1] El-Sebaili A A, Al-Hazmi F S, Al-Ghamdi A A, et al. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(2): 568.
- [2] Liu B Y H, Jordan R C. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors; with design data for the U S, its outlying possessions and Canada[J]. *Solar Energy*, 1963, 7(2): 53.
- [3] Temps R C, Coulson K L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations[J]. *Solar Energy*, 1977, 19(2): 179.
- [4] Klucher T M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces[J]. *Solar Energy*, 1979, 23(2): 111.
- [5] Hay J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces[J]. *Solar Energy*, 1979, 23(4): 301.
- [6] Skartveit A, Asle Olseth J. Modelling slope irradiance at high latitudes[J]. *Solar Energy*, 1986, 36(4): 333.
- [7] Reindl D T, Beckman W A, Duffie J A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models[J]. *Solar Energy*, 1990, 45(1): 9.
- [8] Gueymard C. An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms[J]. *Solar Energy*, 1987, 38(5): 367.
- [9] Muneer T, Kambezidis H. Solar radiation and daylight models for energy efficient design of buildings [M]. London: Architectural Press, 1997.
- [10] Muneer T, Gueymard C, Kambezidis H. Solar radiation and daylight models[M]. Edinburgh: Elsevier, 2004.
- [11] Steven M D, Unsworth M H. Standard distributions of clear sky radiance[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1977, 103(437): 457.
- [12] Moon P, Spencer D E. Illumination from a non-uniform sky [J]. *Transactions of the Illumination Engineering Society*, 1942, 37: 707.
- [13] Perez R, Stewart R, Arbogast C, et al. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation[J]. *Solar Energy*, 1986, 36(6): 481.
- [14] Justus C G, Paris M V. A model for solar spectral irradiance and radiance at the bottom and top of a cloudless atmosphere [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1985, 24(3): 193.
- [15] 毛夏. 晴空散射辐射结构模式[J]. *太阳能学报*, 1988(4): 413.
MAO Xia. A distribution model of diffuse solar radiation over the cloudless sky [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1988(4): 413.
- [16] Rensheng C, Shihua L, Ersi K, et al. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(7/8): 865.
- [17] Rensheng C, Ersi K, Jianping Y, et al. Estimation of horizontal diffuse solar radiation with measured daily data in China [J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(5): 717.