

垂直面太阳散射辐射计算方法研究

董 宏^{1,2}, 王 怡¹, 刘加平¹

(1. 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院, 西安 710055; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 建筑设计必须考虑太阳辐射在建筑立面上的热作用,但气象台站仅观测水平面辐射数据,垂直面上的太阳辐射资料稀缺。为提出一种依据水平面辐射观测数据来计算垂直面散射辐射的方法,该文研究并建立辐射观测站,并进行长期辐射观测,积累了一定量的辐射数据。通过对垂直面上散射辐射主要影响因素的分析,提出基于晴空指数 K_t 和直射辐射与垂直面法线方向夹角 φ 的垂直面散射辐射计算方法。利用观测数据确定公式中的计算系数,并将该文研究提出的计算方法与国内外的5种太阳散射辐射计算模型进行比较分析。结果表明:1)该文提出的计算方法所需计算参数仅依据国内常规辐射观测数据即可。2)该方法能够实现对不同朝向垂直面散射辐射的计算。3)与国内外常用计算模型相比,该方法在不同天空晴朗度、不同朝向上整体精度更高。研究认为该文方法与国内气象部门的辐射观测数据相匹配,所需计算参数少、精度高、简单易用,可为建筑能耗计算和热环境分析提供新的垂直面散射辐射计算方法。

关键词: 散射辐射; 能耗模拟; 热环境分析; 垂直面; 模型

中图分类号: TU119

文献标志码: A

0 引 言

研究太阳辐射对建筑的作用,必须确定投射到建筑立面(一般是垂直面)上的太阳辐射量。中国气象台站的常规观测数据中并不采集垂直面上的太阳辐射数据。因此,垂直面上的太阳辐射只能通过计算得到。其中,投射到垂直面上的直射辐射可通过几何光学的方法计算,投射到垂直面上的散射辐射需要通过散射辐射模型得到。由于散射辐射在天空中的分布状况较复杂,因此垂直面太阳辐射计算的核心是垂直面上散射辐射的计算。

国外在垂直或倾斜面散射辐射的计算方面已有不少研究成果。从较早基于等灰度天空假设的 Liu & Jordan 模型^[1],到后来以散射辐射各向异性为假设,国外学者提出了多种计算模型,比较有代表性的如 Klucher^[2]模型,修正了太阳高度角的影响和接近水平时的辉光效应。Hay^[3]模型将来自天空的散射分成环日散射和穹顶散射分别计算。Reindl^[4]模型在 Hay 模型的基础上增加了一个水平面亮度散射项。Perez 模型^[5]除了分别计算环日辐射和穹顶辐射外还将辉光效应也单独计算且 Perez 模型是目前接受度较高的散射辐射模型。

在国内,李占清等^[6]给出经过坡向修订的瞬时和日均坡面散射辐射计算公式。王浩^[7]通过分解影响散射辐射的地形和天空因子,提出基于2个不受地形影响参数的辐射模型。姚万祥等^[8]提出基于环日辐射、穹顶辐射、辉光辐射和正交辐射的散射辐射计算模型。吴贞龙等^[9]提出将非各项同性部分的散射辐射作为类直射辐射进行计算,并提出2种辐射计算模型。

上述研究多从倾斜或垂直面上散射辐射的形成机理进行理论分析,提出不同的假设,构建了相应的模型,并利用实测资料进行了验证和比较。但是,一方面上述模型所需计算参数多、计算复杂。另一方面,由于天空中云的类型和分布的随机性,造成散射辐射在半球天空的分布非常复杂,理论公式难以准确、全面地描述。对于建筑科学研究与应用而言,有必要建立一种仅依据气象台站水平面辐射的观测数据来计算垂直面散射辐射的方法,以满足太阳辐射对建筑热作用模拟计算的需求。

1 研究用辐射数据

截至本研究开始时,国内为进行垂直面散射辐射模型研究和验证而开展的辐射观测非常有限,且观测持续的时间短、数据量小^[6-9],能够用于中国垂直面散射辐射

收稿日期: 2017-07-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578521); 国家自然科学基金重点项目(51238010)

通信作者: 董 宏(1975—), 男, 博士研究生、研究员, 主要从事建筑热工与节能等方面的研究。dh_ong@126.com

模型研究的实测资料稀缺。为解决这一问题,本研究自行开发了辐射观测装置,并进行观测记录。

辐射观测装置主要功能是对水平面太阳总辐射、散射辐射及 4 个主要朝向垂直面总辐射值进行定时观测与记录。装置的基本构成如图 1 所示。

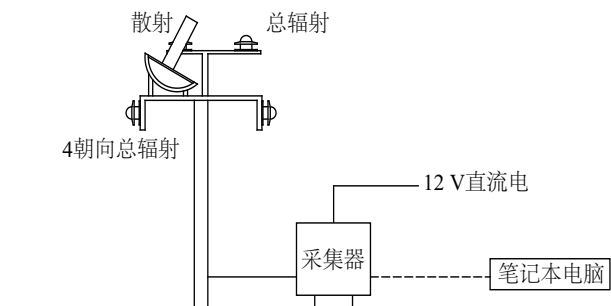


图1 辐射观测装置

Fig. 1 Solar observing facility

辐射站安装在中国建筑科学研究院办公大楼的屋顶,周边 5°视角范围内无遮挡。装置中的辐射仪、数据采集器的主要技术指标如表 1、表 2 所示。为保证辐射观测的准确性,仪器使用前均送交中国计量科学研究院进行校准。

表1 辐射仪和数据采集仪主要技术指标

Table 1 Technical indexes of solar meter and data logger

仪器	技术指标	指标要求
辐射仪	光谱范围/nm	280~3000
	测试范围/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	0~2000
	精度/%	<5
	分辨率	1 W/m^2 , 0.01 MJ/m^2
数据采集仪	工作环境	温度: -40~70 $^{\circ}\text{C}$ 相对湿度: <90%
	精度	<0.5%
	分辨率	1 W/m^2
	输入范围	$\pm 25 \text{ mV}$
	测试周期	< 30 ms

辐射观测站于 2009 年 4 月建成后,持续进行观测工作,积累了大量实测辐射数据。本研究选用 2010~2011 年的逐半时辐射观测数据用于分析计算。从原始记录中剔除少量异常数据,有效数据共 56520 条。

2 垂直面上散射辐射的主要影响因素

2.1 晴空指数

散射辐射是太阳辐射穿过大气层时,经过多次折

射、反射、扩散形成的。垂直面上的散射辐射与半球天空中分布的散射辐射密切相关。可用晴空指数 K_t (式(1))来表征大气对辐射的吸收、扩散作用。

$$K_t = \frac{I_H}{I_0 \cdot \sin h} \quad (1)$$

式中, K_t ——晴空指数; I_H ——水平面总辐照度, W/m^2 ; I_0 ——太阳常数,可近似取 $1367 \text{ W}/\text{m}^2$; h ——太阳高度角, ($^{\circ}$)。

研究将垂直面上的散射辐照度与水平面上的散射辐照度的比值 $K_{d,v}$ (见式(2))作为分析垂直面上散射辐射与天空散射辐射间相关关系的指标。

$$K_{d,v} = \frac{I_{d,v}}{I_d} \quad (2)$$

式中, $K_{d,v}$ ——垂直面散射辐射与水平面散射辐射的比值; $I_{d,v}$ ——垂直面散射辐射, W/m^2 ; I_d ——水平面散射辐射, W/m^2 。

从 $I_{d,v}$ 、 $K_{d,v}$ 与 K_t 的关系(图 2)中可看出,虽然垂直面的散射辐射 $I_{d,v}$ 随 K_t 的增大呈现出先增大后减小的特点,但垂直面散射辐射占水平面散射辐射的比例 $K_{d,v}$ 随 K_t 的增大持续增大,呈显著正比关系。

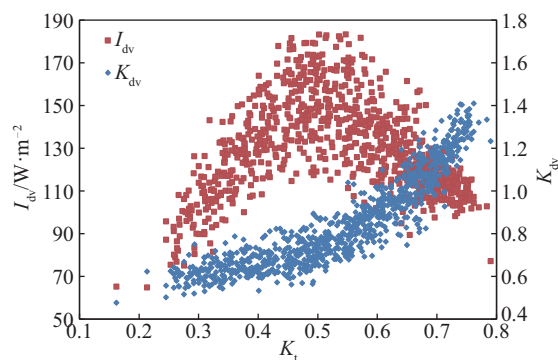


图2 $I_{d,v}$ 、 $K_{d,v}$ 与 K_t 的关系

Fig. 2 Relationship between $I_{d,v}$, $K_{d,v}$ and K_t

2.2 太阳的相对位置

与水平面不同(太阳一定位于水平面所对的半球天空中),垂直面上散射辐射的分布状况与太阳之间的相对位置关系密切。研究用太阳直射辐射的法线与垂直面法线方向间的夹角 φ 来描述太阳和垂直面间的相对位置关系。

任意垂直面与太阳直射辐射间的夹角 φ 可通过式(3)计算:

$$\cos \varphi = (\cos A_0 \cdot \cos A + \sin A_0 \cdot \sin A) \cosh \quad (3)$$

式中, A ——太阳的方位角, ($^{\circ}$); A_0 ——垂直面的方位角, ($^{\circ}$)。

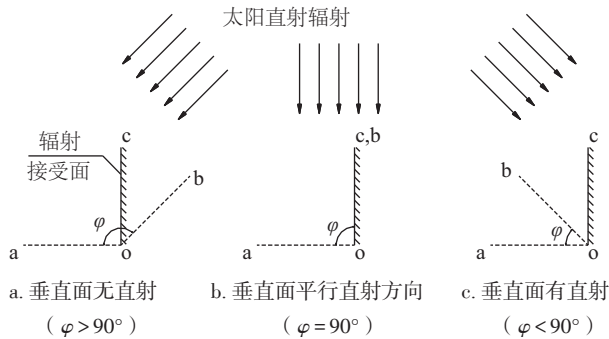
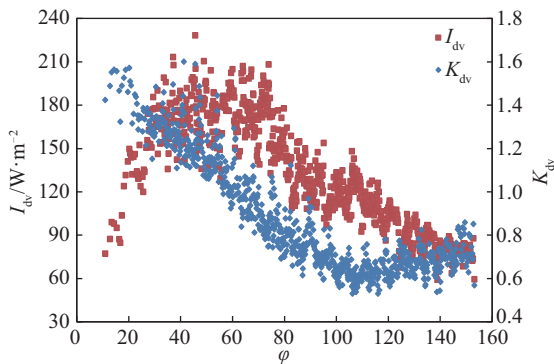
图3 垂直面与太阳直射辐射间夹角 φ 关系示意

Fig. 3 Relationship between vertical surface and direct solar radiation

$I_{d,v}$ 、 $K_{d,v}$ 随 φ 变化的散点图如图 4 所示,可看出虽然垂直面上的散射辐射 $I_{d,v}$ 随夹角 φ 也呈现出先增大再逐渐减小的现象,但当 $\varphi \leq 90^\circ$ (垂直面有直射)时,垂直面散射辐射占水平面散射辐射的比例 $K_{d,v}$ 随 φ 的增大而减小,呈显著反比关系。当 $\varphi > 90^\circ$ (垂直面无直射)时, $K_{d,v}$ 随 φ 略有波动,但波动幅度远小于垂直面有直射的状况。

图4 $I_{d,v}$ 、 $K_{d,v}$ 与 φ 的关系Fig. 4 Relationship between $I_{d,v}$ 、 $K_{d,v}$ and φ

3 计算模型

3.1 基于 K_l 和 φ 的计算模型

垂直面除了接受来自天空的散射辐射外,还接受来自地面的反射辐射,两部分共同构成垂直面上的散射辐射。

前述分析表明, $K_{d,v}$ 与 K_l 和 φ 之间在一定的区间内都呈现出单调的函数关系,可将 $K_{d,v}$ 表示成 K_l 和 φ 的函数。来自地面的反射辐射主要与水平面总辐射 I_H 相关,式(1)表明 I_H 是 K_l 的单调函数,可以认为地面反射辐射与 K_l 间也存在单调函数关系。

根据上述分析,本文提出基于晴空指数和太阳辐射

与垂直面夹角的垂直面散射辐射计算方法如式(4)所示:

$$I_{d,v} = (C_1 \cdot K_l \cdot \cos \varphi + 0.5) I_d + C_2 \cdot K_l \quad (4)$$

式中, C_1 、 C_2 ——系数。

式(4)的第 1 项为来自垂直面所对的 1/4 球天空的散射辐射, C_1 是与 K_l 、 φ 相关的系数;第 2 项为来自地面的反射辐射, C_2 是与地面反射率相关的系数。

3.2 系数的确定

利用北京地区 2010 年的实测辐射数据对式(4)中垂直面散射辐射模型的 2 个系数进行回归计算,结果如表 2 所示。

表2 散射辐射的计算系数

Table 2 Coefficients of radiation calculation

φ	C_1	C_2	R^2
$< 90^\circ$	0.897	71.073	0.846
$> 90^\circ$	0.665	70.338	0.844

回归结果表明,本研究所提出的垂直面散射辐射计算模型对向阳面 ($\varphi < 90^\circ$) 和背阳面 ($\varphi > 90^\circ$) 这 2 种不同情况拟合的相关系数都超过了 0.84,模型的相关性显著。 C_1 的拟合结果在 2 种情况下有一定差异,与地面反射率相关的系数 C_2 在 2 种情况下非常接近,系数的拟合结果与前述分析一致。

3.3 模型的适用性

太阳是否处于垂直面所对的 1/4 球天空对于垂直面接收到的散射辐射的影响较大,因此式(4)中的 C_1 必须按照太阳是否直射垂直面分别确定(如 3.2 节)。而当太阳位于辐射接收面的切线方向时(图 3b),垂直面平行太阳辐射直射方向 ($\varphi = 90^\circ$),垂直面接收到的太阳散射辐射量应为该点太阳辐射法线面散射辐射量的一半,与式(4)的表述一致。

此外,式(4)中的系数通过大量数据的回归确定,用于回归的数据值域范围和分布频数直接影响系数的计算结果。因此,天空晴朗度和纬度差异较大地区需要采用不同的 C_1 ,地面状况不同的地方需要采用不同的 C_2 。

4 验证与比较分析

4.1 模型验证

采用表 3 中的计算系数,用式(4)计算北京地区 2011 年垂直面上的散射辐射,并将计算结果与 2011 年的观测值进行比较分析。表 3 中列出了计算值和观测

值在 4 个主要朝向和 3 种不同天空晴朗度下相关系数的计算结果。

表3 计算值与观测值的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between calculated and observed values		
朝向	$\varphi < 90^\circ$	$\varphi > 90^\circ$
南	0.898	0.964
北	0.875	0.899
东	0.829	0.937
西	0.916	0.938
阴	0.761	0.975
多云	0.873	0.967
晴	0.830	0.851

注:阴, $K_t \leq 0.3$; 多云, $0.3 < K_t \leq 0.55$; 晴, $K_t > 0.55$ 。

由表 3 的相关系数计算结果可看出:当垂直面向阳($\varphi < 90^\circ$)时,模型在 4 个不同朝向上的计算结果与观测值间均具有良好的相关性。在 3 种不同天气状况下,仅阴天时的相关性较差。当垂直面背阳($\varphi > 90^\circ$)时,模型在不同朝向和天气状况下都具有良好的相关性,且背阳时的相关性全面优于向阳状况。

通过对实测数据和回归计算结果的进一步分析,出现上述模型验证结果的主要原因是:

1)与背阳面相比,向阳面所对辐射来向天空的散射辐射状况受云层状态(形态、厚度、高度、分布等)的影响更剧烈,情况多样且复杂。本研究为了计算简便,所提出的计算方法仅考虑 2 个最重要、也是最易获得的变量,因此模型对向阳面散射辐射模拟的精度较背阳面差。

2)阴天时,散射辐射在天空中的分布更接近等灰度天空。这种天空状况下,向阳面所对天空的散射辐射状况更接近于背阳面,而与晴天(或多云天)状况差异较大。因此,阴天向阳面的模拟结果是各种情况中最差的。

4.2 模型精度比较

为进一步了解模型的精度,本研究选取国内外 5 种倾斜面散射辐射模型^[2-5,8]进行比较分析。分别采用各种模型对北京地区 2011 年 4 个主要朝向垂直面散射辐射量进行计算,以均方根差 *RMSE* 和平均偏差 *MBE* 作为评价指标。模拟结果在不同天空晴朗程度、不同朝向和全年数据时的比较结果如表 4~表 6 所示。

从表 4 不同天气晴朗度模拟结果 *RMSE* 值的比较可看出:各模型均是多云天的精度最高;Hay、Reindl 模型在阴天的精度高于晴天,其他模型晴天时的计算精度较阴天高。通过模型间 *RMSE* 的比较可看出:除 W1

表4 不同天气模拟结果的 *RMSE* 和 *MBE*

Table 4 *RMSE* and *MBE* of different weather simulation results

指标	模型	阴	多云	晴
<i>RMSE</i>	Klucher	80.431	40.019	75.676
	Hay	80.942	59.029	98.279
	Reindl	81.570	47.085	112.374
	Perez	77.695	38.195	69.023
	W1	210.907	115.275	129.180
<i>MBE</i>	本文	75.319	34.931	51.655
	Klucher	-13.836	0.227	-12.288
	Hay	-24.432	-33.950	-70.571
	Reindl	-14.509	-13.153	-64.924
	Perez	-24.736	68.855	-46.239
	W1	118.962	-21.215	34.776
	本文	9.576	12.154	8.934

表5 不同朝向模拟结果的 *RMSE* 和 *MBE*

Table 5 *RMSE* and *MBE* of different direction simulation results

指标	模型	南	北	东	西
<i>RMSE</i>	Klucher	40.626	41.291	47.171	43.092
	Hay	51.344	60.188	56.498	57.778
	Reindl	65.515	59.726	63.564	63.708
	Perez	38.082	25.172	39.988	38.250
	W1	64.374	41.614	92.591	80.771
<i>MBE</i>	本文	28.209	25.166	38.614	23.582
	Klucher	-23.333	13.928	-0.577	-10.363
	Hay	-40.306	-41.984	-36.493	-42.877
	Reindl	-45.495	-25.759	-33.339	-39.935
	Perez	-25.337	0.181	-20.531	-28.447
	W1	20.392	-32.601	37.444	22.684
	本文	7.618	0.173	11.697	0.122

表6 全年模拟结果的 *RMSE* 和 *MBE*

Table 6 *RMSE* & *MBE* of annual simulation results

模型	<i>RMSE</i>	<i>MBE</i>
Klucher	43.341	-7.038
Hay	56.286	-40.417
Reindl	64.359	-37.183
Perez	39.530	-26.482
W1	73.984	19.917
本文	29.584	5.117

模型外,其他模型在阴天时的 *RMSE* 值相差不大,只有 6.251%;多云天时模型间 *RMSE* 的差值增大到 24.098%;晴天时 W1 模型的 *RMSE* 值与其他模型差距缩小,但模型间 *RMSE* 的差值进一步扩大到了 77.525%。

从表 4 不同天气晴朗度模拟结果 *MBE* 值的比较可看出: Klucher 模型在多云天的精度远远高于阴天和晴天; Hay、Reindl 模型在阴天和多云天的精度相差不大,都比各自模型在晴天时的精度高; W1 模型则在多云天和晴天的精度较接近,明显高于阴天; Perez 模型的精度变化较均匀,从阴天、晴天到多云天精度逐次降低; 本文所提模型的精度在 3 种不同天气条件下较均匀,相差不大。通过模型间 *MBE* 的比较可看出: 阴天时本文模型、Klucher 模型和 Reindl 模型精度差别不大, Hay 和 Perez 模型精度略差, W1 模型精度与其他模型间的差别很大,除 W1 模型外,其他模型在阴天时的 *MBE* 值相差 34.312%; 多云天时 Klucher 模型精度远优于其他模型,模型间 *MBE* 的差值增大到 102.805%; 晴天时,各模型间 *MBE* 值的分布比较均匀, *MBE* 的差值为 105.347%。

在 3 种不同天气状况下,以 *RMSE* 作为评价指标时,本文所提模型的精度最好, Perez 模型次之; 以 *MBE* 作为评价指标时,阴天和晴天本文所提模型的精度均最好, Klucher 模型次之,多云天则是 Klucher 模型精度最好,本文所提模型次之。

从表 5 不同朝向模拟结果 *RMSE* 值的比较可看出: Klucher、Hay、Reindl 模型在不同朝向上的精度差别不大; Perez 模型在北向的精度优于其他朝向; 本文提出的模型在东向的精度较其他朝向略差; W1 模型在北向精度最好,南向次之,东西向较差。通过模型间 *RMSE* 的比较可看出: 南北向不同模型间 *RMSE* 的差值分别是 37.306% 和 35.022%, 较东西向差值 53.977% 和 55.189% 略小。

从表 5 不同朝向模拟结果 *MBE* 值的比较可看出: Klucher 模型在东向的精度最高、南向的精度较低; Hay 模型东向精度较其他朝向略高; Reindl 模型在北向精度较高、南向精度较低; Perez 模型北向精度远高于其他朝向; W1 模型南、西向精度较北、东向略高; 本文模型则在北、西向精度远高于南、东向。通过模型间 *MBE* 的比较可看出: 本文模型在南向的精度最好, W1、Klucher 和 Perez 模型的精度基本相当,且优于 Hay、Reindl 模型; 北向结果中,本文模型和 Perez 模型精度明显优于其他模型,其他模型的精度存在显著差异; 东向结果 Klucher 模型最优, Reindl、Hay 和 W1 模型基本相当,精

度较差; 本文模型在西向的精度明显优于其他模型, Klucher 模型次之, Hay 和 Reindl 模型较差。

在 4 种不同朝向,以 *RMSE* 作为评价指标时,本文所提模型的精度最好, Perez 模型次之; 以 *MBE* 作为评价指标时,除东向外,本文模型均为最好,南向 W1 模型、北向 Perez 模型、西向 Klucher 模型次之。东向 Klucher 模型最优,本文模型次之。

从表 6 全年模拟结果的比较看,不同模型的精度差异明显,按 *RMSE* 结果由小到大排序依次为: 本文模型、Perez 模型、Klucher 模型、Hay 模型、Reindl 模型、W1 模型; 按 *MBE* 结果有小到大排序依次为: 本文模型、Klucher 模型、W1 模型、Perez 模型、Reindl 模型、Hay 模型。2 种评价指标下,本文模型均为最优。

5 结 论

本研究通过对垂直面辐射观测数据的分析,提出基于晴空指数和垂直面与太阳相对位置关系的垂直面散射辐射计算方法。并采用北京地区实测辐射数据对计算方法进行验证和比对分析。结果表明:

1) 本研究提出的基于晴空指数 K_t 和太阳直射方向与待计算平面法线方向间夹角 φ 的计算方法所需计算参数少,且各参数依据常规气象观测数据即可获得,便于模型的应用。

2) 通过与北京地区实测数据的比较分析表明,本文提出的计算方法能够实现对不同朝向垂直面散射辐射的计算。

3) 采用北京地区的实测数据,通过对国内外常用模型计算结果的比较分析表明,本研究提出的计算方法在整体上较其他 5 种模型精度更高。

本文提出的垂直面散射辐射计算方法参数少、精度高、简单易用,可为建筑能耗计算和热环境分析提供新的垂直面散射辐射计算方法。

[参考文献]

- [1] LIU B H Y, JORDAN C R. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation[J]. Solar energy, 1960, 4(3): 1-19.
- [2] KLUCHER T M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces[J]. Solar energy, 1979, 23(2): 111-114.
- [3] HAY J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces [J]. Solar energy, 1979, 23(4): 301-307.
- [4] REINDL D T, BECKMAN W A, DUFFIE J A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models [J].

- Solar energy, 1990, 45(1): 9-17.
- [5] PEREZ R, INEICHEN P, SEALS R, et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance[J]. Solar energy, 1990, 44(5): 271-289.
- [6] 李占清, 翁笃鸣. 坡面散射辐射的分布特征及其计算模式[J]. 气象学报, 1988, 46(3): 349-356.
- LI Z Q, WENG D M. Distribution characteristics and calculation model of diffuse solar radiation on slopes[J]. Acta meteorologica sinica, 1998, 46(3): 349-356
- [7] 王浩. 复杂地形下非各向同性散射辐射问题的研究[J]. 地理学报, 1989, 44(1): 105-110.
- WANG H. A Study of anisotropic diffuse radiation on complex terrains[J]. Acta geographica sinica, 1989, 44(1): 105-110.
- [8] 姚万祥, 李峥嵘, 赵群, 等. 几种散射辐射模型精度的比对[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 937-943.
- YAO W X, LI Z R, ZHAO Q, et al. Comparative study on accuracy of several diffuse radiation models[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2014, 42(6): 937-943.
- [9] 吴贞龙, 徐政, 胡晓燕, 等. 倾斜面太阳辐照度实用计算模型的研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 787-793.
- WU Z L, XU Z, HU X Y, et al. Study on practical calculation models of irradiance intensity on tilted surfaces[J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(3): 787-793.

RESEARCH OF CALCULATION METHOD FOR DIFFUSE SOLAR RADIATION ON VERTICAL SURFACE

Dong Hong^{1,2}, Wang Yi¹, Liu Jiaping¹

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The thermal effect of solar radiation on the facade must be taken into account in building design. However, meteorological stations only observe the solar radiation data on the horizontal surface without on the vertical surface. In order to put forward a method of calculating vertical diffuse solar radiation based on observation data of horizontal, a radiation observation station was built and long-term radiation observation was carried out, and a certain amount of radiation data was accumulated. Based on the analysis of the main influencing factors of diffuse solar radiation on vertical surface, the calculation method of diffuse solar radiation on vertical surface based on the clearness index (K_t) and the angle between the direct normal solar radiation and the normal direction of the building surface (φ) is put forward. The coefficients in the formula are determined by observation data, and the calculation methods proposed by this study are compared with other 5 models both at home and abroad. The results show that: 1) The calculation method proposed in this study only depends on the conventional radiation observation data. 2) The method can be used to calculate the diffuse solar radiation on different vertical surfaces. 3) Compared with the other models, the proposed method has higher overall accuracy in different sky brightness and different orientations. The research results show that the new method matches the radiation observation data of the domestic meteorological stations, and requires less calculation parameters, high precision and easy to use. It can provide a new method to calculate diffuse solar radiation on vertical surface for building energy simulation and thermal environment analysis.

Keywords: diffuse solar radiation; energy simulation; thermal environment analysis; vertical surface; model