

# 各种天气状况下太阳辐射照度与太阳光照度关系

姚万祥, 李峥嵘, 李 翠, 艾正涛

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 以同济大学自建的小型气象台站测得的 2009—2011 年气象数据为基础, 采用回归分析的方法分析了晴空指数、太阳高度角对太阳辐射照度与光照度关系的影响, 发现它们对太阳辐射照度的影响整体上呈现非线性, 且影响规律在各分区间内略微不同。因此, 采用分段线性拟合的方法将晴空指数和太阳高度角分为 9 个区间, 分别建立对应的太阳辐射照度与太阳光照度之间的线性拟合关系, 并通过实测数据证明这种处理方式具有较高精度。结论适用于纬度和天气条件与上海相似的地区。

**关键词:** 太阳辐射照度; 太阳光照度; 晴空指数; 太阳高度角

**中图分类号:** P422.1<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

## Relationship Between Bolar Radiance and Solar Illuminance Under All Sky Types

YAO Wanxiang, LI Zhengrong, LI Cui, AI Zhengtao

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on the meteorological data measured at a small meteorological station set up in Tongji University from 2009 to 2011, an analysis was made of the effects clearness index and solar altitude on the relationship between solar radiance and illuminance. It is found that the effects were nonlinear on the whole interval, and there was a slight difference at different intervals. Therefore, the piecewise linear fitting method was employed. The clearness index and solar altitude angle were divided into 9 intervals, and the linear fitting relationship between solar radiation and solar illuminance was established correspondingly. The measured data show that the method is of a higher accuracy, which is suitable for areas which have similar latitude and weather condition as Shanghai.

**Key words:** solar radiance; solar illuminance; clearness index; solar altitude

太阳辐射得热的控制对节能建筑的被动设计和分析的作用举足轻重<sup>[1]</sup>, 而自然采光是潜力很大的一种节能技术<sup>[2]</sup>。有效地控制太阳辐射得热和自然采光不仅可以减少照明能耗, 而且可以减少建筑采暖空调能耗<sup>[3]</sup>。但是这项技术的成功应用需要根据当地的自然条件因地制宜, 并以大量太阳辐射照度和太阳光照度数据为基础才能进行量化分析与评价。由于记录逐时辐射数据的站点还比较少, 一定程度上影响了太阳能技术应用的合理普及与推广, 而太阳光照度测试相对比较简单, 测试设备普及率高。因此, 如何建立两者之间的关系, 即借助自然条件下照度的测试数据推算当地太阳辐射照度的大小对太阳能利用技术的应用具有非常重要的意义和价值。

国外学者在这方面的研究主要集中在不同天气状况下各垂直面太阳辐射照度和太阳光照度之间的关系<sup>[4-5]</sup>。国内学者在该方面的研究包括两方面: 人工光源辐射强度与光照度之间的关系<sup>[6]</sup>、太阳辐射照度和太阳光照度之间的关系。对于后者, 毛军需<sup>[7]</sup>最早建立了根据太阳光照度观测值推算太阳辐射照度的线性关系式, 张艳玲<sup>[8]</sup>针对南京(118°47'E, 32°57'N)地区研究了太阳辐射照度和太阳光照度之间的关系, 指出晴天、多云天、阴天状况下两者之间均存在线性关系, 但其测试时间仅 3 d, 结论说服力不强。而鞠喜林<sup>[9]</sup>的研究认为太阳总辐射照度、散射辐射强度与太阳光照度存在着非线性关系, 与以上结论相反。因此, 复杂天气状况下两者之间的定量关系还需进一步研究。

本文以同济大学自建的 2 个小型气象站(121°13'E, 31°17'N)2009 年 1 月至 2011 年 6 月的实测气象数据为依据, 尝试建立具有较高精度的太阳辐射照度与太阳光照度的关系式, 以便于没有太阳辐射

收稿日期: 2012-04-23

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, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑节能与遮阳。E-mail: lizhengrong@tongji.edu.cn

照度测试数据的地区根据太阳光照度推算辐射照度值。

### 1 多项式关系式的建立与相关性分析

根据文献[2,3,10-12]的研究结果,影响太阳辐射照度与太阳光照度之间关系的主要因素有晴空指数、太阳高度角、大气质量等。其中,大气质量的影响可以通过晴空指数、太阳高度角反映,因此,太阳辐射照度与太阳光照度之间的拟合关系式可以简单用式(1)表示,但是其中的系数必然随纬度和天气条件的不同而不同。因此本文试图建立上海地区适用的多项式关系式。

$$E = f(k_t, h, I) \tag{1}$$

式中: $E$  为水平面太阳光照度, lux;  $k_t$  为晴空指数, 是水平面的太阳辐射照度与大气层外的太阳辐射照度的比值, 可以作为衡量天气状况的指标<sup>[13-15]</sup>, 量纲一化;  $h$  为太阳高度角, ( $^\circ$ );  $I$  为水平面太阳辐射照度,  $W \cdot m^{-2}$ 。

通过对自建气象台全年数据的反复拟合及分析,发现采用一个多项式进行拟合时,三次方多项式是最佳的(见式(2)),其准确性评价见表 1。

$$E = 0.000 3I^3 - 0.338 1I^2 + 212.94I - 768.01$$
$$0 \leq k_t \leq 1, 0^\circ \leq h \leq 90^\circ \tag{2}$$

表 1 方程(2)太阳辐射照度与太阳光照度之间多项拟合关系式相关性评价

Tab. 1 The relevance of polynomial fit relationship between solar radiation and solar illuminance for Eq. (2)

相关系数	复相关系数	调整复相关系数	显著性水平 F 值	显著性水平 P 值
0.941 6	0.883 9	0.883 8	0	0

由表 1 可知,太阳辐射照度与太阳光照度之间存在较为显著的相关关系,但后期的实测数据却显示其精度并不高,因此使用一个多项式反映太阳辐射照度与太阳光照度之间关系存在一定缺陷。下面从晴空指数、太阳高度角对太阳辐射照度的影响入手,建立更为精确的关系式。

### 2 晴空指数和太阳高度角的影响

#### 2.1 晴空指数的影响

晴空指数反映了太阳辐射进入大气层后被削减的比例,这一比例与天气的阴晴状态直接相关<sup>[13-15]</sup>。本文基于对实测数据的分析得到不同天气状态下晴

空指数的分布,如图 1。由图 1 可知,晴空指数在阴天时的值多低于 0.3(其发生概率为 79.09%),多云天多低于 0.6(其发生概率为 88.81%)。因此可以根据晴空指数将天气分为 3 类:阴天,  $0 \leq k_t \leq 0.3$ ;多云天,  $0.3 < k_t \leq 0.6$ ;晴天,  $0.6 < k_t \leq 1.0$ 。

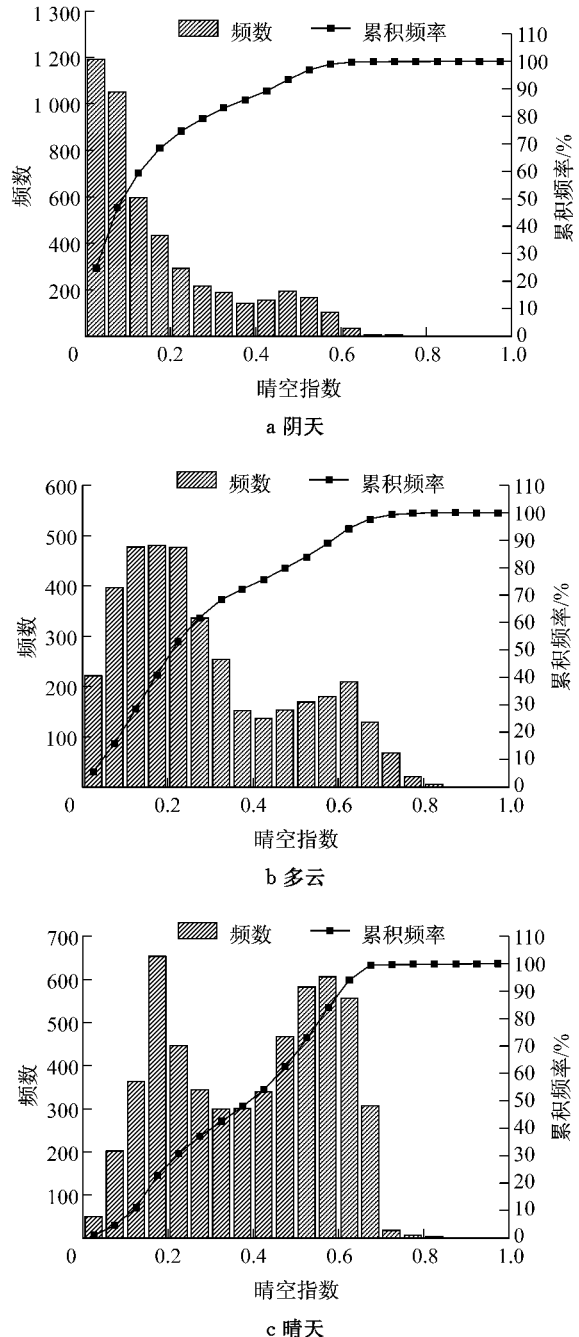


图 1 晴空指数的频数分布

Fig. 1 Clearness index frequency distribution

在全年监测到的晴空指数范围内,太阳辐射照度与晴空指数之间的关系可以用拟合式(3)表示,图 2 直观地反映了两者之间关系。显然,随着晴空指数的增加,太阳辐射照度逐渐增加,但是其增加速度随

天气状态由阴到晴不断增大,这种影响规律随 3 种天空状态的不同而略微不同.

$$I = 17.98873 + 111.87767k_t + 1227.67481k_t^2 \quad (3)$$

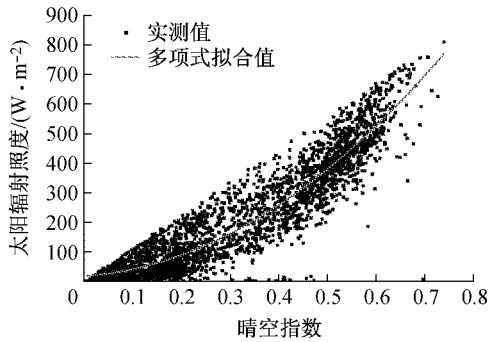


图 2 方程(3)对应的晴空指数与太阳辐射照度的关系

Fig. 2 Relationship between clearness index and solar radiation for Eq. (3)

### 2.2 太阳高度角的影响

同样利用既有数据可以得到太阳高度角与太阳辐射照度之间的关系(式(4)和图 3):

$$I = 0.69243h + 0.41526h^2 - 0.00511h^3 \quad (4)$$

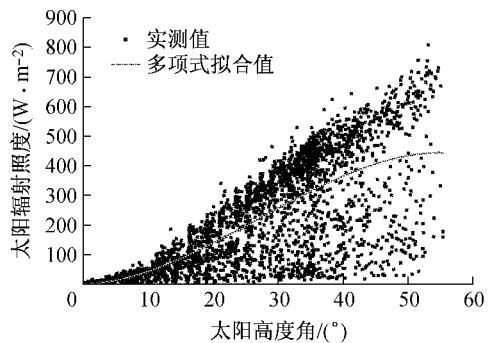


图 3 方程(4)对应的太阳高度角与太阳辐射照度的关系

Fig. 3 Relationship between solar altitude and solar radiation for Eq. (4)

由式(4)和图 3 可知,随着太阳高度角的增加太阳辐射照度逐渐增加,但是增加速度呈现中间大(15°~45°)、两头小的趋势. 这表明太阳辐射照度与太阳光照度在太阳高度角 0°~90°范围内是非线性的,但在太阳高度角 0°~30°,30°~60°,60~90°的区间范围内却存在着正线性关系,而且太阳高度角越大,这种线性关系越显著.

由于晴空指数和太阳高度角对太阳辐射照度与光照度关系的影响存在明显的区间性,本文尝试分区间建立太阳辐射照度与光照度之间的拟合关系式.

## 3 分段线性关系式的建立及其准确性验证

### 3.1 分段线性关系式

根据分析将  $(k_t, h)$  的影响分为 9 个区间,拟合得到式(5):

$$E = \begin{cases} 171.680I + 80.33 & 0 \leq k_t \leq 0.3, 0^\circ \leq h \leq 30^\circ \\ 174.620I - 1789.30 & 0 \leq k_t \leq 0.3, 30^\circ < h \leq 60^\circ \\ 141.960I + 5415.20 & 0 \leq k_t \leq 0.3, 60^\circ < h \leq 90^\circ \\ 126.130I + 3954.60 & 0.3 < k_t \leq 0.6, 0^\circ \leq h \leq 30^\circ \\ 88.364I + 14027.00 & 0.3 < k_t \leq 0.6, 30^\circ < h \leq 60^\circ \\ 19.172I + 46304.00 & 0.3 < k_t \leq 0.6, 60^\circ < h \leq 90^\circ \\ 109.820I - 111.53 & 0.6 < k_t \leq 1.0, 0^\circ \leq h \leq 30^\circ \\ 70.667I + 25579.00 & 0.6 < k_t \leq 1.0, 30^\circ < h \leq 60^\circ \\ 56.998I + 19422.00 & 0.6 < k_t \leq 1.0, 60^\circ < h \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

### 3.2 准确性验证

采用 2011 年 7 月至 12 月间的实测气象数据对本文提出的多项式、分段拟合式及参考文献中的拟合式进行对比,结果如表 2 所示.

表 2 拟合方程的误差分析

Tab. 2 Error analysis of different fitting equations

方程	相关系数	平均误差分数	平均绝对误差分数	Nash-Sutcliffe 方程	t 统计量
文献【9】拟合方程	0.857	-23.963	35.690	0.661	24.687
文献【7】拟合方程	0.862	-22.426	33.255	0.656	34.237
本文多项式拟合方程(2)	0.864	16.431	37.451	0.663	11.058
文献【8】分段线性拟合方程	0.880	-19.126	31.753	0.679	37.685
本文分段线性拟合方程(5)~(13)	0.905	19.282	35.426	0.814	5.449

显然,本文提出的分段线性拟合方程(5)~(13)的相关系数、Nash-Sutcliffe 方程值最高,t 统计量最

低,其计算结果与实测值最吻合,具有最好的准确性.

## 4 结论

(1) 根据晴空指数对2009—2011年的天气状况进行了分类处理,确定了适合上海地区分类的依据为:阴天, $0 \leq k_t \leq 0.3$ ;多云天, $0.3 < k_t \leq 0.6$ ;晴天, $0.6 < k_t \leq 1.0$ 。

(2) 太阳辐射照度随着晴空指数的增加逐渐增加,但是其增加速度随天气状态由阴到晴不断增大。

(3) 太阳辐射照度随着太阳高度角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内增加而逐渐增加,但是增加速度呈现中间大( $15^\circ \sim 45^\circ$ )、两头小的趋势。

(4) 根据晴空指数及太阳高度角对太阳辐射照度的影响规律将晴空指数和太阳高度角分为9个区间,分别建立了对应区间内的太阳辐射照度与太阳光照度之间的关系式,经过实测数据验证,具有较高的精度。

此外,由以上分析可知,影响太阳辐射照度与太阳光照度之间关系的主要影响因素是晴空指数和太阳高度角。对比图2和图3可知,晴空指数的影响更为显著。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<sup>[16]</sup>。

感谢:本文的气象数据得到了同济大学机械与能源工程学院王晓东老师及中德学院潘毅群老师和李玉明老师的支持和帮助,在此深表谢意!

### 参考文献:

- [1] Lam J C, Yang L, Liu J. Development of passive design zones in China using bioclimatic approach[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(6): 746.
- [2] Pattanasethanon S, Lertsatitthanakorn C, Atthajariyakul S, et al. All sky modeling daylight availability and illuminance/irradiance on horizontal plane for Mahasarakham, Thailand[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(5): 1601.
- [3] Li D H W, Lam J C. Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications[J]. *Renewable Energy*, 2000, 20(4): 389.
- [4] De Rosa A, Ferraro V, Kaliakatsos D, et al. Calculating diffuse illuminance on vertical surfaces in different sky conditions[J]. *Energy*, 2008, 33(11): 1703.
- [5] Robledo L, Soler A. Modeling the luminous efficacy of diffuse solar radiation on inclined surfaces for all sky conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(1): 177.
- [6] 宋贤杰,胡荣生. 光照度和辐照度的转换[J]. *光源与照明*, 1997(1): 20.  
SONG Xianjie, HU Rongsheng. The conversion of illuminance and irradiance[J]. *Lamps and Lighting*, 1997(1): 20.
- [7] 毛军需. 太阳辐射度与光照度换算浅析[J]. *河南农业科学*, 1995(1): 11.  
MAO Junxu. Analysis of solar radiation and illumination conversion[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 1995(1): 11.
- [8] 张艳玲. 南方气候条件下光照度和辐照度的关系[J]. *江西农业学报*, 2008, 20(4): 72.  
ZHANG Yanling. Relation between illuminance and irradiance under south climatic conditions[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2008, 20(4): 72.
- [9] 鞠喜林. 晴空条件下光照度和辐射照度的关系[J]. *太阳能学报*, 1999, 20(2): 190.  
JU Xilin. Relations between irradiance and illuminance under cloudless sky[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1999, 20(2): 190.
- [10] Muneer T, Kinghorn D. Solar irradiance & daylight illuminance data for the United Kingdom and Japan [J]. *Renewable Energy*, 1998, 15(1/4): 318.
- [11] Darula S, Kittler R, Gueymard C A. Reference luminous solar constant and solar luminance for illuminance calculations[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(5): 559.
- [12] Chirarattananon S, Rukkwansuk P, Chaiwiwatworakul P, et al. Evaluation of vertical illuminance and irradiance models against data from north Bangkok [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(11): 3894.
- [13] Newland F J. A study of solar radiation models for the coastal region of South China[J]. *Solar Energy*, 1989, 43(4): 227.
- [14] Lam J C, Li D H W. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components [J]. *Building and Environment*, 1996, 31(6): 527.
- [15] de Miguel A, Bilbao J, Aguiar R, et al. Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt area[J]. *Solar Energy*, 2001, 70(2): 143.
- [16] 刘大龙,刘加平,杨柳. 以晴空指数为主要依据的太阳辐射分区[J]. *建筑科学*, 2007(6): 9.  
LIU Dalong, LIU Jiaping, YANG Liu. Clearness index based solar radiation distribution[J]. *Building Science*, 2007(6): 9.