

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.03.008

太阳光入射矢量动态特性分析

戴贵龙, 张慈枝, 叶靖, 侯根富

(福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118)

摘要: 根据太阳运动轨迹, 结合集热器盖板的辐射传输理论, 在地平坐标系内建立太阳光动态入射矢量与半透明介质的一体化光束传输模型。研究表明, 夏季建筑南墙整日太阳照射强度弱, 而西墙下午太阳照射强且时间长; 集热器月阶段性最佳倾角约为当地纬度与该月太阳赤纬之差, 年均最佳倾角约为当地纬度值(福州 26°)。

关键词: 集热器; 太阳光矢量; 动态特性; 系统优化

中图分类号: TU831.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2016)03-0244-05

Dynamic characteristics analysis of sunlight incidence vector

Dai Guilong, Zhang Cizhi, Ye Jing, Hou Genfu

(College of Eco-Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To explore the dynamic performance of sunlight incidence, an integrated sun ray transmission model consisting of sunlight dynamic incidence vector and semi-transparent medium was constructed in the horizontal coordinate system considering the sun movement track. The results indicate that in summer the solar irradiation against the south wall is quite little while the solar irradiation against the west wall is somewhat intense in the afternoon. The best incline angle of the solar collector approximates the difference between the location latitude and the solar declination of the day. The best period incline angle of the year of the solar energy collector is equal to the difference between the local latitude and the monthly solar declination with the annual best inclination being about the local latitude (of 26° in Fuzhou).

Keywords: solar energy collector; sunlight vector; dynamic characteristic (performance); system optimization

掌握太阳光动态入射矢量特性对太阳能高效利用、建筑节能和室内采光具有重要的意义^[1-2]。太阳能集热器(真空管或平板式)一般固定安装, 利用太阳光倾斜入射的余弦效应和集热器半透明材料穿透率对太阳光入射角度的敏感性, 能够使集热器有效地收集太阳能和热效率发生动态变化。集热器太阳光入射矢量动态特性对集热器施工安装、系统结构优化以及太阳能材料技术发展具有较大的影响。目前, 太阳光入射矢量动态分析已成为建筑节能分析软件(building information model, BIM 等)的重要部分^[3-4]。近年来, 太阳光动态矢量特性研究已成为一个热点内容^[5-7]。根据研究特点大致可分为两类: 一类是采用太阳直射模型、天空散热辐射分布模型和地面反射辐射模型, 计算分析基于年收集太阳总辐射能最大的集热器最佳倾角, 如杨金焕等^[5]、Gop-inathan 等^[6]。

收稿日期: 2016-05-04
基金项目: 福建工程学院科研发展基金项目(GY-Z15103)
第一作者简介: 戴贵龙(1983-), 男, 江西崇仁人, 讲师, 博士, 研究方向: 太阳能高效热利用。

另一类是根据季节性用热需求,如采暖,生活热水随季节、生活习惯和当地气候特点,计算分析与用热负荷动态变化匹配的太阳能集热器最佳倾斜角,如刘志云等^[7]。

从上述文献研究结果可看出,已有报道中太阳光入射方向分析比较单一,无法为太阳能高效利用、建筑节能和室内采光提供综合参考。此外,集热器太阳得热评估没有考虑集热器半透明盖板的穿透效率影响,实际上半透明盖板的穿透效率对太阳光入射角度十分敏感。考虑到太阳能近似各向同性,建立斜面直射入射太阳光矢量传输模型,结合集热器半透明盖板的太阳光穿透特性,以福州地区为例,计算分析入射太阳光三维动态矢量特性,以期太阳光高效利用与绿色发展提供理论支持。

1 物理数学模型

建立地平坐标系 $o-xyz$, x 轴指向正南, y 轴指向正东, z 轴竖直向上。斜面的入射太阳光矢量特性如图 1 所示。其中,斜面与水平面的交角为 β ,斜面法向水平面投影与 x 轴夹角为 γ_n ,即斜面方位角,偏西为正,偏东为负值。太阳光矢量与水平面夹角为 α_s ,即太阳高度角。太阳光矢量水平面投影与 x 轴夹角为 γ_s ,即太阳方位角,正负的度量与斜面方位角类似。太阳光矢量与斜面法向夹角为 θ_γ 。

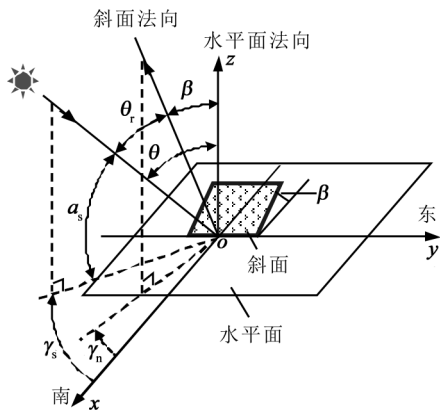


图1 倾斜表面的入射太阳光矢量特性模型

Fig.1 Sunlight incidence vector of incline surface

根据太阳运动轨迹特性及其日地几何关系,经过推导的太阳的高度角 α_s 计算式为:

$$\alpha_s = \arcsin(\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega) \quad (1)$$

式中, φ 为当地纬度; δ 为太阳赤纬; ω 为时角。

太阳与水平面法向的夹角为太阳天顶角 θ , 该角与 α_s 互余,有

$$\theta = 90^\circ - \alpha_s \quad (2)$$

太阳方位角的计算式有反余弦和反正弦两种,为方便处理角度关系,采用反余弦计算式为^[6]:

$$\gamma_s = \arccos\left(\frac{\cos\alpha_s \cdot \sin\varphi - \sin\delta}{\cos\alpha_s \cos\varphi}\right) \quad (3)$$

倾斜面上太阳光余弦效率计算式为^[6]:

$$\begin{aligned} \cos\theta_r = & (\cos\beta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\beta \cdot \cos\varphi \cdot \\ & \cos\delta \cdot \cos\omega) + \sin\beta \cdot \sin\gamma_n \cos\delta \cdot \sin\omega + \\ & \sin\beta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \cdot \cos\gamma_n - \\ & \sin\beta \cdot \cos\gamma_n \cdot \sin\delta \cdot \cos\delta) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, β 为斜面倾斜角; γ_n 为斜面方位角。

已知太阳天顶角和方位角,根据坐标转换理论,则在斜面坐标系 $o'-x'y'z'$ (斜面法向为 z' 轴,斜面上方位角所指方向为 x' 轴, y' 轴根据右手定则确定) 中,入射太阳光方向矢量 (m_1, m_2, m_3) 计算式为:

$$\begin{cases} m_1 = -\cos\theta_r \cdot \cos\psi \\ m_2 = -\cos\theta_r \cdot \sin\psi \\ m_3 = -\sin\psi \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\psi = \gamma_n - \gamma_s$, 是太阳光矢量在斜面上的投影与斜面坐标系 x' 轴的夹角。由于入射太阳光矢量朝下,指向 z' 轴负方向,所以式(5)中前面加有负号。

射向半透明盖板的太阳光束,在半透明盖板界面和内部发生复杂的反射、吸收和穿透传输效应。根据光束在半透明介质内的传输过程,通过级数求和,得半透明盖板对入射太阳光束的穿透效率计算式为:

$$\begin{aligned} T(\theta_r) = & \tau (1 - \rho)^2 [1 + \rho^2 \tau^2 + \rho^4 \tau^4 + \dots] = \\ & \frac{\tau (1 - \rho)^2}{1 - \rho^2 \tau^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, ρ 和 τ 分别是对应方向入射角的界面反射率和介质透过率。

太阳光是非偏振自然光,将入射太阳光等分成平行于入射面和垂直于入射面的两个分量,得界面反射率计算式为:

$$\begin{aligned} \rho(\theta_r) = & \frac{[\tan(\theta_r - \varphi) / \tan(\theta_r + \varphi)]^2}{2} + \\ & \frac{[\sin(\theta_r - \varphi) / \sin(\theta_r + \varphi)]^2}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, φ 是对应入射角 θ_r 的折射角,有

$$\varphi = \arcsin(\sin\theta_r/n_{cp}) \quad (8)$$

式中, n_{cp} 是半透明盖板的折射率。

根据布格尔定律,介质透过率计算式为:

$$\tau(\varphi) = \exp(-kd_w/\cos\varphi) \quad (9)$$

式中, k 和 d_w 分别是半透明盖板的吸收系数 (m^{-1}) 和几何厚度 (m)。

上述计算过程相对简洁、直观。采用角度和时间步进法,由式(4)计算任意地区、任意时刻、任意集热器斜面上的入射太阳光余弦效率,由式(5)计算集热器斜面的太阳光入射方向矢量,利用式(6)计算集热器半透明盖板的太阳光穿透效率。具体计算流程如图 2 所示。

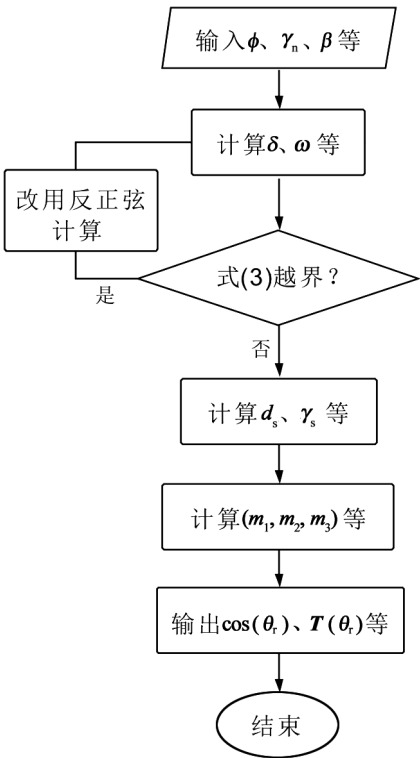


图 2 入射太阳光矢量特性计算流程

Fig.2 Calculation flowchart of incidence sunlight vector

2 计算结果分析

文中以福州地区为例(东经 119.5°, 北纬 26°)进行计算分析,时间以北京时间为准。同时假设斜面处于水平高度,四周没有阳光遮挡物。若不特殊说明,上述计算条件保持不变。

2.1 太阳运动轨迹特性分析

在地平坐标系中,太阳早晨从东边升起、中午到达天空最高点,下午向西下落。冬至日(12 月

22 日)、春分日(3 月 21 日)和夏至日(6 月 22 日)三个典型日期太阳运动轨迹如图 3 所示。

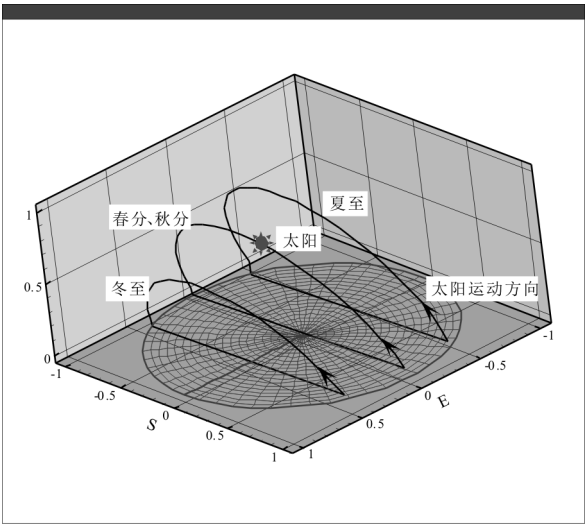


图 3 典型日太阳运动轨迹线

Fig.3 Movement projection (Trochoid) of the sun during typical daytime

从图 3 可看出,在冬至日,太阳轨迹偏南,观察地(福州)的太阳高度角比较小。随着日期推移,太阳轨迹逐渐偏北,太阳高度角越来越大。在春分日,太阳从正东升起、正西下落。到夏至日,太阳高度角达到最大值,该日正午 12 时,太阳高度最大,其值约 87°。随后,太阳轨迹又向南回归,在秋分日(9 月 23 日),太阳轨迹与春分日几乎重合,为方便视图,图 3 中没有给出秋分日太阳轨迹线。其他日期的太阳轨迹线介于四个典型日之间,所有的太阳运动轨迹近似平行。太阳每日运动轨迹东西对称,中午 12 时太阳高度角最大。

太阳光的运动轨迹特性也可从水平面入射太阳光余弦分布看出来。图 4 为水平面入射太阳光的余弦特性结果(横坐标为月份、纵坐标为小时时间)。从图 4 可看出,在 4 月份至 8 月份,从上午 9 点到下午 15 点,水平面上入射太阳光余弦大,太阳光照射强度大。由于福州地区位于纬度 26°,太阳最大赤纬 23°27',因此余弦峰值小于 1.0,约 0.98。图 4 中示数为零的蓝色区域表示在夜间,地平面没有太阳光照射。

2.2 建筑墙体的入射太阳光余弦效率分析

假设墙体与水平面垂直,四周没有太阳光遮挡物,则建筑墙体的入射太阳光余弦效应如图 5 所示。从图 5 可看出,不同墙体的入射太阳光余

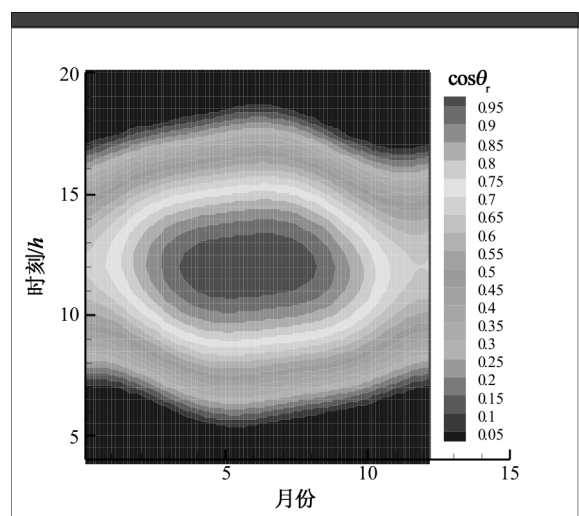


图 4 水平太阳光入射余弦特性

Fig.4 Cosine characteristic of sunlight incidence upon horizon surface

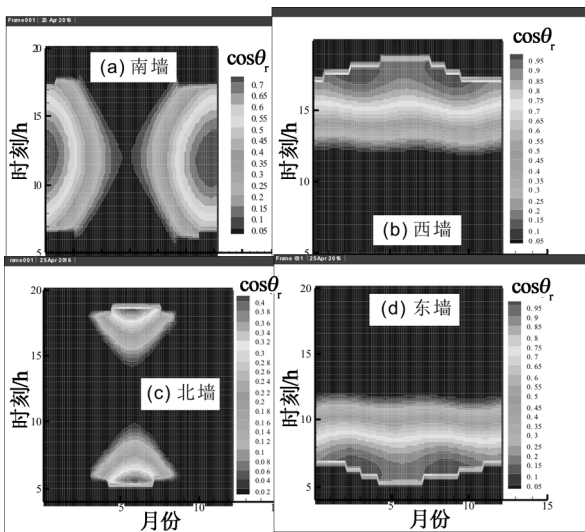


图 5 建筑墙体的入射太阳光余弦效率

Fig.5 Cosine efficiency of sunlight incidence for the building wall

弦效应有较大差别。

对南墙(图 5(a)),在早上 9 点至下午 15 点,春冬季节入射太阳光余弦效率较大,夏季入射太阳光余弦较小。这主要是因为夏季太阳高度角大,入射太阳光与南墙法向的夹角大,导致余弦效率小。而春冬季节,太阳高度角小,入射太阳光与南墙法向的夹角反而小,入射太阳光余弦效率反而大。对西墙(图 5(b)),下午时刻,太阳下落,入射太阳光与西墙法线交角小,余弦效率大,即下午尤其是太阳快落山时刻,西墙的太阳光资源丰

富,而且夏季的太阳照射强度比其他季节大,照射时间也比其他季节长(太阳落山时间晚)。对北墙(图 5(c)),由于太阳一直在南侧运动,因此北墙属阴面,太阳光资源很小,可忽略不计。对东墙(图 5(d)),太阳照射特性类似西墙,只是照射时间主要在早上太阳从东边升起时间段。

因此,在冬暖夏热的福州地区,从夏季空调节能的角度考虑,需要重点降低西侧墙体的得热量,具体措施包括在墙体贴高反射太阳光的瓷砖,喷高反射太阳光的白漆,或种植遮阳树木植被等。

2.3 太阳能集热器最佳倾角特性分析

由于太阳运动轨迹近似东西方向对称,一般来说集热器朝南布置,即集热器的方位角为零,热效率最大。但是集热器的倾斜角与当地纬度和用热负荷特性有关。

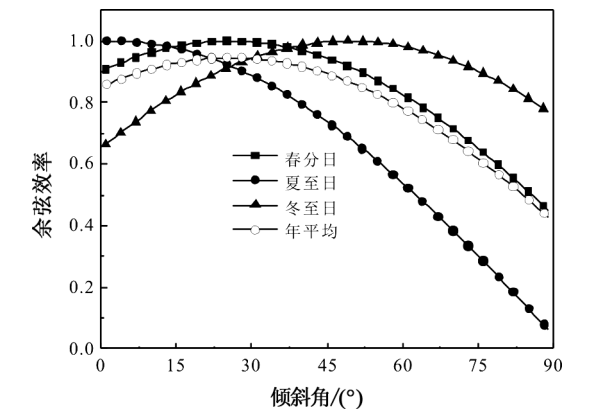


图 6 中午 12 时倾斜表面入射太阳光余弦效率特征曲线

Fig.6 Cosine efficiency characteristics (curve) of sunlight incidence for the incline surface (at 12) at noon

三个典型日中午 12 时集热器斜面的太阳余弦效应与倾斜角的特征曲线如图 6 所示。从图 6 中可看出,在春分日,入射太阳光余弦效率随倾斜角 β 增加先增加后减少,在 $\beta = 26^\circ$ 时,入射太阳光余弦效率达到最大值。在夏至日,随着 β 增加,入射太阳光余弦效率单调下降。在冬至日,随着 β 增加,入射太阳光余弦效率先增大后减少,峰值出现在 $\beta = 49^\circ$ 处。年平均处的太阳光余弦效率曲线趋势与春分日类似,也在 $\beta = 26^\circ$ 处达到最大值。

也就是说,要保证全年或春秋季节太阳光资源利用效率最大,集热器倾角应 26° 布置。若要保证夏季太阳光利用效率最大,则集热器倾角应

水平($\beta = 0^\circ$) 布置。若要保证冬季太阳光利用效率最高,则集热器倾角应 49° 布置。计算结果表明,对阶段性月份使用的集热器,最佳倾角约为当地纬度减去该月中间日的太阳赤尾。

2.4 太阳能集热器实际得热量特性分析

入射到集热器的太阳光束,需要穿过集热器半透明盖板才能被吸热表面吸收利用。因此太阳能集热器的实际得热量效率是入射太阳光余弦效率和半透明盖板太阳光穿透率的乘积。倾斜角 $\beta = 26^\circ$ 时(年平均效率最大)太阳能集热器斜面的余弦效率和实际得热效率特性如图 7 所示。从图 7(a) 可看出,在一天时段内,早上 9 点至下午 15 点,集热器余弦效率大,该时间段太阳光照强度大,资源充足。在一年时段内,春、秋季季节的余弦效率较夏季大。这主要是因为春、秋季节,太阳高度角较低,正好可以直射 $\beta = 26^\circ$ 的集热器,余

弦效率大。而在夏季,太阳高度角大,直射水平面,集热器($\beta = 26^\circ$)受到太阳光直射程度反而有所下降。

由于集热器半透明盖板的太阳光穿透效率与太阳光入射角成正比,因此集热器实际得热效率特性云图与集热器余弦效率云图类似,如图 7(b) 所示(半透明盖板计算参数: $n_{cp} = 1.5, \kappa = 2.0 \text{ m}^{-1}, d_w = 0.8 \text{ cm}$)。但是由于穿透效率约为 0.9,集热器的余弦效率数值和实际得热效率有很大不同(实际得热效率约为余弦效率的 0.9 倍),在集热器的得热性能计算分析和工程设计时应注意。

3 结论

建立了太阳光动态入射矢量与集热器半透明盖板穿透特性一体化光束传输模型,通过计算分析,得到以下主要结论:

1) 从冬到夏,太阳运动轨迹由南向北偏移,福州地区夏至日中午 12 时太阳高度角最大。从夏到冬,太阳运动轨迹由北向南偏移,春分日和秋分日太阳运动轨迹几乎重合。

2) 对冬暖夏热的福州地区,应在西侧墙面贴白瓷板、涂白漆等措施高反射太阳光、或种植树木植被实现遮阳,降低夏季空调能耗。

3) 由于太阳每日的运动轨迹东西对称,集热器应尽量朝南布置,年平均用热最佳倾角约等于当地纬度角,而夏季用热和冬季阶段性用热最佳倾角分别为 0° 和 50° 左右(福州地区)。

4) 受半透明盖板太阳光透过率影响,集热器的实际太阳得热量为理论得热量的 90% 左右。

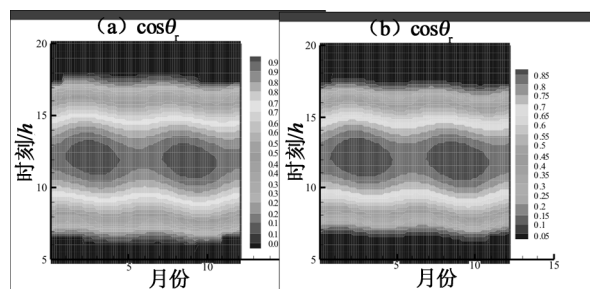


图 7 倾斜表面($\beta = 26^\circ$)入射太阳光余弦效率与实际得热效率

Fig.7 Cosine efficiency of sunlight incidence and the solar energy efficiency for the incline surface at $\beta = 26^\circ$

参考文献:

- [1] Wang F Q, Shuai Y, Wang Z Q, et al. Thermal and chemical reaction performance analyses of steam methane reforming in porous media solar thermochemical reactor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014(39): 718-726.
- [2] Wang Pingyang, Li Shuangfei, Liu Zhenhua. Collecting performance of an evacuated tubular solar high-temperature air heater with concentric tube heat exchanger[J]. Energy Conversion and Management, 2015(106): 1166-1173.
- [3] 曾旭东,赵昂.基于 BIM 技术的建筑节能设计应用研究[J].重庆建筑大学学报,2006,28(2): 33-35.
- [4] 邱相武,赵志安,邱勇云.基于 BIM 技术的建筑节能设计软件开发研究[J].建筑科学,2012,28(6): 24-27.
- [5] 杨金焕,毛家俊,陈中华.不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算[J].上海交通大学学报,2002,36(7): 1032-1036.
- [6] Gopinathan K K, Maliehe N B, Mpholo M I. A study on the intercepted insolation as a function of slope and azimuth of the surface[J]. Energy, 2007(32): 213-220.
- [7] 刘志云,卢军,黄光勤,等.拉萨地区供暖期太阳能集热器最佳倾角模拟[J].煤气与热力,2013,33(9): A08-A12.