

# 百叶外遮阳太阳散射辐射计算模型及程序实现

张磊, 孟庆林

(华南理工大学建筑学院亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

**摘要:**窗户外部的遮阳系统可以减少进入室内的太阳辐射得热量。目前,在计算遮阳系统对太阳辐射的遮挡作用时,仅仅从几何角度上考虑遮阳构件对直射辐射的减少作用,没有考虑对散射辐射的影响,但在实际中,遮阳构件的存在,对散射辐射的影响不能忽略,特别是对于百叶类型的遮阳构造,由于其布置较为紧密,对直射辐射遮挡较多,进入室内的太阳辐射主要为散射辐射,因此建立详细的散射辐射计算模型,可以正确反映和评估其遮阳效果,并为计算遮阳构件对建筑能耗的影响提供基础。通过分析散射辐射入射到百叶遮阳板上的光学特性,建立用于计算太阳散射辐射透过和反射的数学模型,并根据该模型得到用于计算机编程的算法。该模型和算法可以应用于不同的百叶遮阳系统,为建筑能耗模拟中考虑百叶遮阳板对空调能耗的影响提供理论基础。

**关键词:**百叶外遮阳;太阳辐射;太阳散射辐射;数学模型;计算机编程

**中图分类号:**TK511.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)05-0092-04

## Calculating Model of Solar Diffuse Radiation Transporting Through External Blinds and It's Program Realization

ZHANG Lei, MENG Qing-lin

(School of Architecture, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** External shading system of windows can reduce the indoor solar heating gain. Previous studies did not take the change of diffuse radiation into account. However, in fact, the change of diffuse radiation should not be neglected because of the existing of shading devices. Especially to those blinds, most direct radiation can be shaded while most diffuse radiation can reach the indoor space. Thus, a detail calculation model was established for diffuse radiation. With the analysis of the thermal characteristics of direct solar incidence on the blinds, a mathematic model was developed to calculate the transmittance and reflectance of the solar diffuse radiation. Based on this model, the relevant algorithm was developed.

**Key words:** blinds shading; solar radiation; solar diffuse radiation; arithmetic model; computer programming

建筑遮阳是一项节能效果显著的可持续技术<sup>[1-2]</sup>,长期以来深受国内外建筑科学领域的重视。在基础理论研究和应用研究方面均取得了显著的成果<sup>[3-7]</sup>。

目前,对于遮阳系统的计算,主要以透光系数为

指标,考虑遮阳构件对太阳直射辐射的遮挡作用,对于散射辐射,一般近似认为采取遮阳措施前后,散射辐射不发生变化<sup>[8-9]</sup>。对于简单的外遮阳系统,例如单片的水平遮阳板和双片的垂直遮阳板等,这种近似处理的误差较小,但对于多片的百叶遮阳板来说,

收稿日期:2009-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(50808083)

作者简介:张磊(1978-),男,博士,主要从事城市热环境方面的研究,(E-mail)arzhanglei@163.com。

由于其布置较为紧密,对直射辐射遮挡较多,进入室内的太阳辐射主要为散射辐射,如果不考虑散射辐射的变化,计算结果与实际情况的误差较大,因此,需要对这种遮阳类型建立详细的散射辐射计算模型<sup>[10-13]</sup>。

### 1 理论基础

可以把外百叶系统看成是一层特殊的玻璃,它对太阳辐射有吸收、反射和透过的特性。外百叶系统的太阳辐射透过率可采用(1)式计算:

$$\tau_{total} = \frac{I_{dir} \cdot \tau_{dir} + I_{dif} \cdot \tau_{dif}}{I_{dir} + I_{dif}} \quad (1)$$

式中:  $\tau_{total}$  为外百叶系统对总太阳辐射的透过率;  $\tau_{dir}$  为外百叶系统对太阳直射辐射的透过率;  $\tau_{dif}$  为外百叶系统对太阳散射辐射的透过率;  $I_{dir}$  为入射到百叶系统的太阳直射辐射强度,  $W/m^2$ ;  $I_{dif}$  为入射到百叶系统的太阳散射辐射强度,  $W/m^2$ 。

在参考文献[14、15]中讨论了直射辐射透过率的计算方法。该文主要讨论外百叶系统散射辐射透过率的计算方法。

一般来说,对于波长为  $\lambda_j$  的散射辐射,认为散射辐射在百叶板间进行反射、透过和吸收后,一部分散射辐射通过百叶遮阳系统到达玻璃外表面,其比例为  $\tau_{dif}(\lambda_j)$ ; 一部分散射辐射被百叶板反射到外部,其比例为  $\rho_{dif}(\lambda_j)$ , 剩下的散射辐射被百叶板所吸收,其比例为  $\alpha_{dif}(\lambda_j)$ , 这 3 部分有以下关系式:

$$\tau_{dif}(\lambda_j) + \rho_{dif}(\lambda_j) + \alpha_{dif}(\lambda_j) = 1 \quad (2)$$

式中:  $\tau_{dif}(\lambda_j)$  为外百叶系统对波长为  $\lambda_j$  的散射辐射的透过率;  $\rho_{dif}(\lambda_j)$  为外百叶系统对波长为  $\lambda_j$  的散射辐射的反射率;  $\alpha_{dif}(\lambda_j)$  为外百叶系统对波长为  $\lambda_j$  的散射辐射的吸收率。

在实际的过程中,取相邻 2 片百叶板为研究对象,计算其散射辐射透过率,则整个百叶系统的散射辐射透过率为每对相邻百叶板透过率与百叶板间距的加权平均。

对于相邻的 2 片百叶板,百叶板每个微小部分接收到的散射辐射是不同的,若把百叶板等分成  $k$  段,如图 1 所示,则第  $i(1 \leq i \leq k)$  段接收到的散射辐射为:

$$E_{f,i}(\lambda_j) = E_{f,0}(\lambda_j) \cdot F_{0 \rightarrow f,i} + \sum_{n=1}^k [E_{f,n}(\lambda_j) \cdot \tau_{b,n} + E_{b,n}(\lambda_j) \cdot \rho_{b,n}] \cdot F_{b,n \rightarrow f,i} \quad (3)$$

$$E_{b,i} = E_{f,0}(\lambda_j) \cdot F_{0 \rightarrow b,i} +$$

$$\sum_{n=1}^k [E_{f,n}(\lambda_j) \cdot \rho_{f,n} + E_{b,n}(\lambda_j) \cdot \tau_{f,n}] \cdot F_{f,n \rightarrow b,i} \quad (4)$$

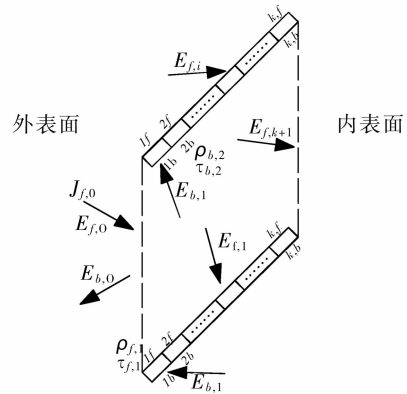


图 1 百叶板示意图

玻璃外表面接收的散射辐射用式(5)来计算:

$$E_{f,k+1}(\lambda_j) = E_{f,0}(\lambda_j) \cdot F_{0 \rightarrow f,n+1} + \sum_{n=1}^k [E_{f,n}(\lambda_j) \cdot \rho_{f,n} + E_{b,n}(\lambda_j) \cdot \tau_{f,n}] \cdot F_{f,n \rightarrow f,n+1} + \sum_{n=1}^k [E_{b,n}(\lambda_j) \cdot \rho_{b,n} + E_{f,n}(\lambda_j) \cdot \tau_{b,n}] \cdot F_{b,n \rightarrow f,n+1} \quad (5)$$

通过百叶板反射到外部的散射辐射如式(6)所示:

$$E_{b,0}(\lambda_j) = \sum_{n=1}^k [E_{b,n}(\lambda_j) \cdot \rho_{b,n} + E_{f,n}(\lambda_j) \cdot \tau_{b,n}] \cdot F_{b,n \rightarrow b,0} + \sum_{n=1}^k [E_{f,n}(\lambda_j) \cdot \rho_{f,n} + E_{b,n}(\lambda_j) \cdot \tau_{f,n}] \cdot F_{f,n \rightarrow b,0} \quad (6)$$

这里:  $E_{f,0}(\lambda_j)$  为入射到百叶系统的散射辐射,  $W/m^2$ ;  $E_{b,0}(\lambda_j)$  为从百叶系统反射出来的散射辐射,  $W/m^2$ ;  $E_{f,i}(\lambda_j)$  为百叶板第  $i$  段上表面接收到的散射辐射,  $W/m^2$ ;  $E_{b,i}(\lambda_j)$  为百叶板第  $i$  段下表面接收到的散射辐射,  $W/m^2$ ;  $E_{f,k+1}(\lambda_j)$  为通过百叶遮阳系统后照射到玻璃外表面的散射辐射,  $W/m^2$ ;  $F_{p \rightarrow q}$  为表面  $p$  到表面  $q$  的角系数;  $\rho_{f,i}$ 、 $\rho_{b,i}$  为百叶板表面  $i$  的反射率,与百叶板材料特性有关;  $\tau_{f,i}$ 、 $\tau_{b,i}$  为百叶板表面  $i$  的透过率,与百叶板材料特性有关。

边界条件为:

$$E_{f,0}(\lambda_j) = J_0(\lambda_j)$$

$$E_{b,k+1}(\lambda_j) = J_n(\lambda_j) = 0$$

$J_0(\lambda_j)$  为入射的波长为  $\lambda_j$  的散射辐射,  $W/m^2$ ;  $J_n(\lambda_j)$  为内部环境对外部环境的散射辐射,  $W/m^2$ 。

这里认为内部环境对外部环境没有散射辐射,

因此,  $J_n(\lambda_j) = 0$ 。

通过解上述方程, 可以用到达内部环境的散射辐射  $E_{f,k+1}(\lambda_j)$  与入射的散射辐射  $J_0(\lambda_j)$  的比来表示散射辐射的透过率:

$$\tau_{\text{dif}}(\lambda_j) = \frac{E_{f,k+1}(\lambda_j)}{J_0}(\lambda_j) \quad (7)$$

同样的, 对波长为  $\lambda_j$  的散射辐射的反射率可以按式(8)计算:

$$\rho_{\text{dif}}(\lambda_j) = \frac{E_{b,0}(\lambda_j)}{J_0}(\lambda_j) \quad (8)$$

对于太阳散射辐射来说, 则透过率和反射率采用式(9)–(10)计算:

$$\tau_{\text{dif}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{f,k+1}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{E_{f,k+1}}{J_0} \quad (9)$$

$$\rho_{\text{dif}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b,0}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{E_{b,0}}{J_0} \quad (10)$$

式中:  $E_{f,k+1}$  为入射到玻璃外表面的太阳散射辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $E_{b,0}$  为从百叶系统反射出来的太阳散射辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\lambda_1, \lambda_2$  为太阳辐射光谱范围,  $\lambda_1 = 280 \text{ nm}, \lambda_2 = 2\ 500 \text{ nm}$  [14]。

## 2 计算机算法

在参考文献[11]中将百叶板划分为 5 块, 对于实际应用中的百叶遮阳板计算, 将百叶板划分为 2 块, 如图 2 所示, 已经可以满足精度需要, 其与文献[11]中的误差可以控制在 3% 以内,

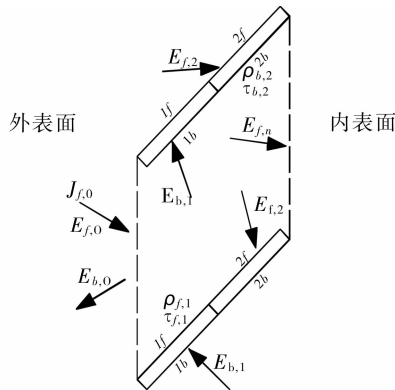


图 2 用于计算机算法的百叶遮阳板示意图

根据公式(3)–(4), 以及  $i=1$  和  $2$ , 可以得到以下公式:

$$\begin{aligned} E_{f,1} &= E_{f,1} \cdot \tau_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow f,1} + \\ E_{f,2} \cdot \tau_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow f,1} &+ E_{b,1} \cdot \rho_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow f,1} + \\ E_{b,2} \cdot \rho_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow f,1} &+ E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow f,1} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} E_{f,2} &= E_{f,1} \cdot \tau_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow f,2} + \\ E_{f,2} \cdot \tau_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow f,2} &+ E_{b,1} \cdot \rho_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow f,2} + \\ E_{b,2} \cdot \rho_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow f,2} &+ E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow f,2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} E_{b,1} &= E_{f,1} \cdot \rho_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow b,1} + \\ E_{f,2} \cdot \rho_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow b,1} &+ E_{b,1} \cdot \tau_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow b,1} + \\ E_{b,2} \cdot \tau_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow b,1} &+ E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow b,1} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} E_{b,2} &= E_{f,1} \cdot \rho_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow b,2} + \\ E_{f,2} \cdot \rho_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow b,2} &+ E_{b,1} \cdot \tau_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow b,2} + \\ E_{b,2} \cdot \tau_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow b,2} &+ E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow b,2} \end{aligned} \quad (14)$$

这是一个线性方程组, 未知数为  $E_{f,1}$ 、 $E_{f,2}$ 、 $E_{b,1}$  和  $E_{b,2}$ , 其他角系数和百叶板透过率、反射率等参数也可以根据遮阳板材料特性得到, 因此上述方程组可以简化为下式表示:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (15)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - \tau_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow f,1} & -\tau_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow f,1} & -\rho_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow f,1} & -\rho_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow f,1} \\ -\tau_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow f,2} & 1 - \tau_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow f,2} & -\rho_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow f,2} & -\rho_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow f,2} \\ -\rho_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow b,1} & -\rho_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow b,1} & 1 - \tau_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow b,1} & -\tau_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow b,1} \\ -\rho_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow b,2} & -\rho_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow b,2} & -\tau_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow b,2} & 1 - \tau_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow b,2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} E_{f,1} \\ E_{f,2} \\ E_{b,1} \\ E_{b,2} \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow f,1} \\ E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow f,2} \\ E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow b,1} \\ E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow b,2} \end{bmatrix}$$

采用 Gauss-Seidel 迭代法, 可以得到上述方程组的数值解。将数值解代入到公式(5)–(6)中, 得到透过百叶遮阳系统的太阳散射辐射和反射到百叶系统外部的散射辐射, 如方程(16)和(17)所示:

$$\begin{aligned} E_{f,n} &= E_{f,1} \cdot \rho_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow n} + \\ E_{f,1} \cdot \tau_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow n} &+ E_{f,2} \cdot \rho_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow n} + \\ E_{f,2} \cdot \tau_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow n} &+ E_{b,1} \cdot \tau_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow n} + \\ E_{b,1} \cdot \rho_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow n} &+ E_{b,2} \cdot \tau_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow n} + \\ E_{b,2} \cdot \rho_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow n} &+ E_{f,0} \cdot F_{0 \rightarrow n} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E_{b,0} &= E_{f,1} \cdot \rho_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow 0} + \\ E_{f,1} \cdot \tau_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow 0} &+ E_{f,2} \cdot \rho_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow 0} + \\ E_{f,2} \cdot \tau_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow 0} &+ E_{b,1} \cdot \tau_{f,1} \cdot F_{f,1 \rightarrow 0} + \\ E_{b,1} \cdot \rho_{b,1} \cdot F_{b,1 \rightarrow 0} &+ E_{b,2} \cdot \tau_{f,2} \cdot F_{f,2 \rightarrow 0} + \\ E_{b,2} \cdot \rho_{b,2} \cdot F_{b,2 \rightarrow 0} & \end{aligned} \quad (17)$$

根据方程式(9)–(10), 结合入射太阳散射辐射参数, 可以得到该遮阳系统太阳散射辐射的透过率和反射率以及吸收率。

根据上述简化数学模型, 利用 VISUAL BASIC 语言编制计算机程序计算百叶外遮阳的太阳散射辐射透过率和反射率。为了验证简化模型和计算机程序的准确性, 使用该程序计算文献[11]附录中的百叶板模型, 如图 3 所示, 将计算结果与文献[11]提供的数据进行比较, 如表 1 所示。

表 1 程序计算结果与文献[11]中散射辐射特性的比较

散射辐射特性		百叶板材料特性					
		透过率		反射率		透过率	
		0	0.7	0	0.55	0.4	0.5
文献[11]计算结果	散射辐射透过率	0.332		0.294		0.495	
	散射辐射反射率	0.345		0.260		0.380	
程序计算结果	散射辐射透过率	0.339		0.299		0.503	
	散射辐射反射率	0.336		0.253		0.373	
相对误差/%	散射辐射透过率	2.1		1.7		1.6	
	散射辐射反射率	-2.6		2.7		1.8	

注:表中“百叶板材料特性”栏中的透过率和反射率均指百叶板材料自身对太阳散射辐射的透过和反射特性。

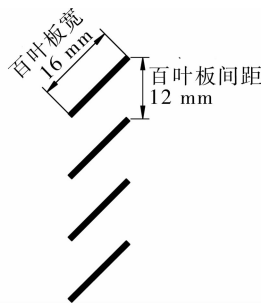


图 3 百叶板构造尺寸

可以看出,使用简化模型的计算机程序计算结果与文献[11]中的数据比较接近,最大相对误差为 2.7%。

为了比较考虑散射辐射与不考虑散射辐射对总太阳辐射透过率的影响,该文计算了广州地区北向水平百叶遮阳的总太阳辐射透过率随遮阳板尺寸变化的曲线,如图 4 所示。当百叶板挑出长度增加时,一方面遮挡直射辐射,另一方面也会减少散射辐射的透过。对于北向外窗,由于接收到的直射辐射相对较少,主要以散射辐射为主,因此,随百叶板挑出长度的增加,总太阳辐射透过率的变化应如曲线 1 所示,如果在太阳辐射透过率计算中不考虑散射辐射的变化,将体现不出此种变化趋势,如曲线 2 所示。两者最大相对误差达到 129.7%,可见散射辐射对总太阳辐射透过率的影响不能忽略。

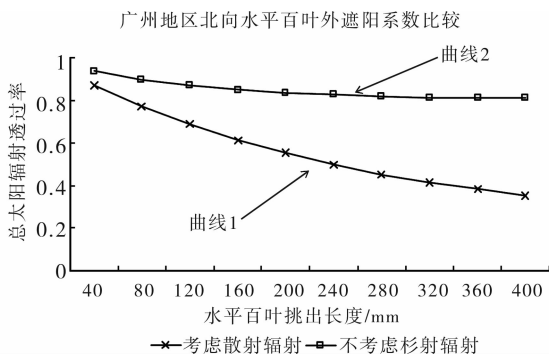


图 4 广州地区北向水平百叶外遮阳系数比较

### 4 结 论

通过百叶遮阳系统的太阳散射辐射简化计算模型考虑了散射辐射在百叶板间的反射和透射情况,使用这个模型编制的计算机程序可以得到与文献[11]中相同计算对象相近的结果,相对误差小于 3%。该简化计算模型和程序可以计算水平和垂直百叶外遮阳构件的太阳散射辐射透过率和反射率,通过对该模型和计算机程序的继续深化可以得到百叶遮阳构件对全年太阳辐射得热量的影响进而计算对建筑能耗的影响。

### 参考文献:

[1] 华南理工大学. 建筑物理[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2002.

[2] 黄国亮. 国内外建筑遮阳体系的探讨研究[J]. 上海建材, 2007(5): 7-8.  
HUANG GUO-LIANG. Shading system research of domestic and international [J]. Shanghai Building Materials, 2007(5): 7-8.

[3] SOMSAK CHAIYAPINUNT, BUNYARIT PHUE-AKPHONGSURIYA, KHEMMACHART MONGKOMSAKSIT, et al. Performance rating of glass windows and glass windows with films in aspect of thermal comfort and heat transmission[J]. Energy and Buildings, 2005, 37: 725-738.

[4] HIDAYAT SHAHID, DAVID NAYLOR. Energy performance assessment of a window with a horizontal Venetian blind[J]. Energy and Buildings, 2005, 37: 836-843.

[5] 籍存德,郝瑞珍,常民. 夏热冬暖地区建筑遮阳设计探讨[J]. 工业建筑, 2007, 37(2): 44-49.  
JI CUN-DE, HAO RUI-ZHEN, CHANG MIN. Research on sun-shading design of building in regions of being hot in summer and warm in winter[J]. Industrial Construction, 2007, 37(2): 44-49.

(下转 101 页)