

梭形翻板太阳直射辐射传输计算模型及实现

陶求华^{1,2}, 李峥嵘¹, 郑健雯²

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 集美大学 机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 首先,取相邻 2 块遮阳翻板为研究对象,采用解析法建立直射辐射直接透过部分的计算模型,采用光线追踪法得到的反射次数和方向建立直射镜面反射部分的计算模型,采用净辐射法建立直射漫反射部分的计算模型;其次,在模型分析基础上,用 MATLAB 软件编制了能描述翻板形状、尺寸、倾角、表面光学特性的梭形翻板直射辐射传输计算程序;最后,分析了传统计算方法对梭形翻板进行平板假设所带来的误差,认为用“平板假设”模型的计算结果偏大,特别是在翻板开口朝向正对太阳光线入射方向时误差值最大,其余情况相对误差都在 5% 以上。

关键词: 梭形翻板; 直射辐射传输; 计算模型; 程序

中图分类号: TK511.3

文献标志码: A

Calculating Model of Solar Direct Radiation Transporting Through Shuttle Louvers and Realization

TAO Qiuhua^{1,2}, LI Zhengrong¹, ZHENG Jianwen²

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Firstly, two adjacent shuttle louvers were taken as the research object, the new model employed analytical method to analysis the fraction of beam radiation passing directly through the louvers, specular reflection fraction of beam radiation using the number and direction of reflection based on ray-tracing method, and net-radiation method was used to analysis diffuse reflection fraction. Secondly, based on the model analysis, the calculating program of solar direct radiation was developed with the MATLAB software to describe the shape, size, tilt angle and surface optical properties of shuttle louvers. Finally, the errors of the traditional calculation methods were analyzed, and found that “flat hypothesis” model would overvalued results of solar

transmission, especially when the opening is directly facing the incident beam radiation. And the relative error is 5% or more for the rest situation.

Key words: shuttle louvers; solar direct radiation transporting; calculating model; program

我国夏热冬暖地区和夏热冬冷地区的夏季太阳辐射带来的建筑得热量占围护结构得热的比例较高^[1],使用合适的遮阳设施能有效阻挡太阳辐射侵入、减小太阳辐射得热,进而降低空调制冷能耗。

建筑遮阳种类很多,近年来,梭形遮阳翻板的使用越来越受欢迎,梭形翻板因外形如织布的梭子而得名,采用铝合金材质整体挤压成型,内含数条加强筋,流线型外观,有减风压、外观美观、自身强度高、叶片转角可调等优点。

文献[2]对梭形翻板的散射辐射传输计算模型进行了分析,本文将讨论梭形翻板的直射辐射传输计算模型。Simmler 等^[3]建立了基于漫反射假设的直射辐射传输计算模型,Goulding 开发了 WIS 软件包,两者的主要假设都为“百叶是直板百叶、百叶表面是漫反射”^[4-5];ISO 15099^[6]、《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》^[7]以及 Energy-plus 软件^[8]中都是采用 WIS(Windows Information System)的计算核心;Rosenfeld 改进了 WIS 的算法,支持表面既有镜面反射又有漫反射的情形^[9],但只能计算平直百叶。

由于梭形翻板的形状较为复杂,上述模型只能把梭形翻板简化为平板进行计算,容易带来一定的计算误差。本文旨在建立能客观描述梭形翻板形状、尺寸、倾角、表面光学参数的梭形翻板直射辐射传输计算程序。

收稿日期: 2016-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(51508225);福建省自然科学基金(2016J01244);福建省教育厅资助项目(B16162,JB13137);黄慧贞集美大学学科建设基金(ZC2013016)

第一作者: 陶求华(1981—),男,副教授,博士生,主要研究方向为暖通空调、建筑节能、建筑热环境。E-mail: ttaojiangshui@163.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。E-mail: lizhengrong@tongji.edu.cn

1 直射辐射传输计算模型

1.1 定义梭形遮阳翻板的关键要素

梭形遮阳组件由 2 块连续的翻板组成,遮阳翻板空腔由上、下 2 块相邻的翻板以及内环境、外环境的虚拟面组成,见图 1. 图 1 展示了遮阳翻板空腔、投影角和坐标系, A, B, C, D 四点为翻板的端点. 太阳直射来自左侧,这样,左边的虚拟面代表室外环境,右边的虚拟面代表内环境. 图 1 中 R 为翻板圆弧的半径, S 为翻板间距, L 为翻板宽度,即翻板两端间的直线距离, d 为翻板圆弧的弧高, h 为水平状态下上下板最小间距, β 为翻板倾角,即连接翻板 2 个对角的直线与水平面的夹角, i 为翻板圆弧所对应的圆心角的一半, φ 为投影角,通常用投影角来表征翻板的朝向与太阳位置的相对关系,其定义为遮阳组件的法平面与太阳入射面的夹角^[10]. 投影角取决于遮阳组件的方位朝向角度、遮阳翻板的组合形式(水平、竖直)、太阳位置. 对于安装于倾角为 ξ 的倾斜表面上水平翻板,其投影角 Φ_{ξ,h} 计算公式为

$$\Phi_{\xi,h} = \arctan\left[\frac{\tan \kappa}{\cos(\omega - \psi)}\right] + \xi - 90^\circ \quad (1)$$

式中: κ 为太阳高度角; ω 为太阳方位角; ψ 代表遮阳组件朝向,即方位角; ξ 为倾斜表面的倾角.

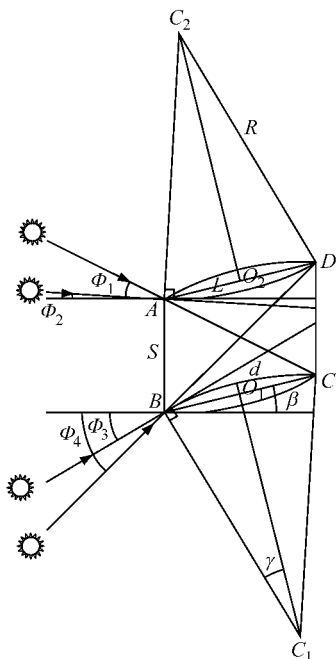


图 1 梭形翻板关键要素

Fig.1 Key elements of shuttle louvers

如果水平翻板安装于竖直表面上,则投影角 Φ_{v,h} 为

$$\Phi_{v,h} = \arctan\left[\frac{\tan \kappa}{\cos(\omega - \psi)}\right] \quad (2)$$

梭形翻板辐射传输计算的关键要素有: R, S, L, d, h, β, γ, Φ_{v,h}. 上述要素间有如下关系:

$$S = h + 2d \quad (3)$$

$$R = \frac{d}{2} + \frac{L^2}{8d} \quad (4)$$

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{L}{2R}\right) = \arcsin\left(\frac{4dL}{4d^2 + L^2}\right) \quad (5)$$

各点坐标值如下: A: (-0.5L cos β, S - 0.5L sin β), B: (-0.5L cos β, -0.5L sin β), C: (0.5L cos β, 0.5L sin β), D: (0.5L cos β, S + 0.5L sin β), C₁: ((R-d) sin β, -(R-d) cos β), C₂: ((h-d) sin β, S - (R-d) cos β).

这样,遮阳翻板空腔的 2 条对角线段 AC, BD 长度 l_{AC}, l_{BD} 分别为

$$l_{AC} = \sqrt{(S - L \sin \beta)^2 + L^2 \cos^2 \beta} \quad (6)$$

$$l_{BD} = \sqrt{(S + L \sin \beta)^2 + L^2 \cos^2 \beta} \quad (7)$$

1.2 投影角分界值

不同时刻有着不同的太阳高度角和方位角,照射到翻板上的直射辐射有着不一样的传输规律,根据这个特点列出如下 5 种直射照射情况,见图 2.

(1) Φ₁ < Φ < 90°, 没有直接透过的直射辐射,边板和下板被照亮,太阳直射只能通过反射进入内环境,见图 2a.

(2) Φ₂ < Φ < Φ₁, 有直接透过的直射辐射,下板被完全照亮,太阳直射可以直接透射,也可以通过反射进入内环境,见图 2b.

(3) Φ₃ < Φ < Φ₂, 有直接透过的直射辐射,上板、下板均有一部分被照亮,太阳直射可以直接透射,也可以通过反射进入内环境,见图 2c、图 2d.

(4) Φ₄ < Φ < Φ₃, 有直接透过的直射辐射,上板被完全照亮,太阳直射可以直接透射,也可以通过反射进入内环境,见图 2e.

(5) -90° < Φ < Φ₄, 没直接透过的直射辐射,上板部分被照亮,太阳直射只能通过反射进入内环境,见图 2f.

各个投影角限值(Φ₁ ~ Φ₄)可根据图 1 中的几何关系确定,Φ₁, Φ₂, Φ₃, Φ₄ 的计算公式为

$$\sin \Phi_1 = \frac{S^2 + l_{AC}^2 - L^2}{2S \times l_{AC}} \quad (8)$$

$$\Phi_2 = \gamma - \beta \quad (9)$$

$$\Phi_3 = \gamma + \beta \quad (10)$$

$$\sin \Phi_4 = \frac{S^2 + l_{BD}^2 - L^2}{2S \times l_{BD}} \quad (11)$$

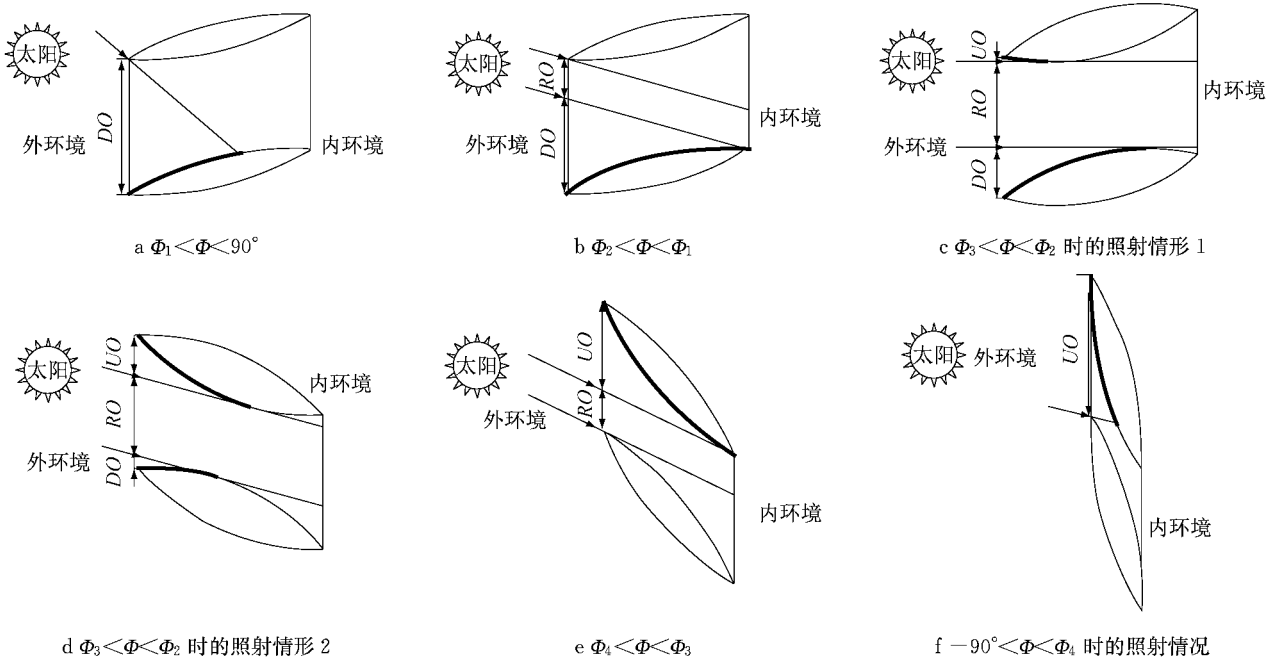


图 2 不同投影角的直射照射情况

Fig.2 Illuminating of solar direct radiation under different profile angles

式中: l_{AC} 为遮阳翻板空腔对角线 AC 的线段长; l_{BD} 为遮阳翻板空腔对角线 BD 的线段长。

从式(8)~(11)可以看出, 投影角限值($\Phi_1 \sim \Phi_4$)是遮阳翻板倾角 β 的函数。

1.3 直接透过部分的计算

根据图 2, 有 5 种照射情形, RO 代表不受阻挡直接进入的直射部分, DO 代表受下板阻挡的部分, UO 代表受上板阻挡的部分。根据翻板尺寸、翻板倾角 β 、相关点的坐标与点间距等, 可以计算出投影角分界值 $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ 。对比太阳投影角 Φ 选择相应的计算模式和解析式, 可以计算得到 RO 的长度 l_{RO} , 不同情形下的 l_{RO} 的计算公式如下:

- (1) 图 2a, $l_{RO} = 0$ 。
- (2) 图 2b, $l_{RO} = S - L(\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \Phi)$ 。
- (3) 图 2c、图 2d, $l_{RO} = \frac{R[1 - \cos(\gamma - \beta - \Phi)]}{\cos \Phi}$ 。
- (4) 图 2e, $l_{RO} = -L(\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \Phi)$ 。
- (5) 图 2f, $l_{RO} = 0$ 。

这样直射辐射直接入射率的计算式为

$$\tau_{B, \text{dir}} = \frac{l_{RO}}{S} \quad (12)$$

1.4 反射进入部分的计算

翻板表面对太阳辐射既有镜面反射, 又有漫反射, 其太阳辐射传输特点不同, 将分别讨论。

1.4.1 镜面反射部分

将入射直射 $J_{B,0}$ 离散为 m 束入射辐射 $J_{B,1}, \dots,$

$J_{B,i}, \dots, J_{B,m}$, 用光线追踪法计算得到每束直射辐射经过翻板的反射次数以及出射方向; 每束入射辐射经过遮阳翻板反射次数 $n(i)$ 不尽相同, 最后有可能入射到内环境, 如图 3, 此时 $R(i) = 1$; 也可能射到外环境, 如图 4, 此时 $R(i) = 0$ 。

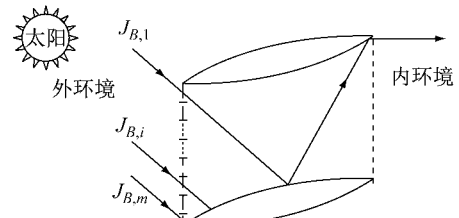


图 3 反射入射到内环境

Fig.3 Reflect toward the internal environment

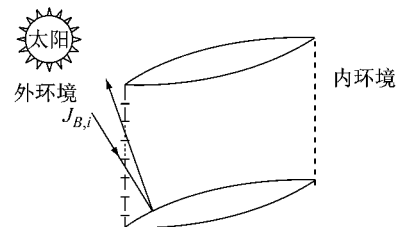


图 4 反射射出至外环境

Fig.4 Reflect toward the external environment

入射直射经过 $n(i)$ 次反射后进入的有效太阳辐射的比例, 即直射辐射镜面反射透过率为

$$\tau_{B, \text{dir-dir}} = \frac{\sum_{i=1}^m \rho_{\text{spe}}^{n(i)} \cdot R(i)}{m}, \quad n(i) > 0 \quad (13)$$

式中: ρ_{spe} 为翻板表面镜面反射率; m 为入射直射的离散份数。

具体计算步骤为:①输入 $\Phi, d, h, L, \beta, \rho_{\text{spe}}, m$,参与直射能量 $J_{B,0}$;②建立平面直角坐标系,得出上、下弧对应圆的方程、所有入射光线的方程、相关点的坐标与点间距;③求出每束入射的直射辐射在板间的反射次数 $n(i)$,记录反射出射方向 $R(i)$;④根据式(13)求出直射辐射镜面反射透过率。

1.4.2 漫反射部分

图 5 显示了在某一入射角度下翻板被直射辐射照亮的情形。有些情形,翻板全部照亮,而有些情形部分翻板被照亮。对于部分照亮的情形,用光线追踪法找到分割照亮和遮蔽部分的分界,图 5 的“T”点为翻板的分割点, b_1, b_2, \dots, b_n 为翻板下表面的计算分段, f_1, f_2, \dots, f_n 为翻板上表面的计算分段, $J_{B,0}$ 为从外环境入射的直射辐射, $E_{f,n+1}$ 为到达内环境的直射辐射。在太阳直射辐射的漫反射计算模型中,将翻板被太阳直射辐射照亮部分作为漫反射光源,在漫反射假设下采用净辐射法计算漫反射进入内环境和漫反射退出至外环境的直射辐射。

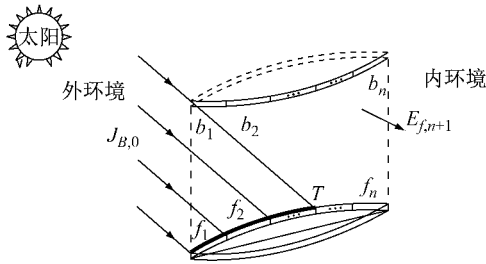


图 5 直射光束照亮情况

Fig.5 Illuminating of solar direct radiation

每块翻板上、下表面第 i ($1 \leq i \leq n$) 段接收到的直射辐射为

$$E_{f,i}(\lambda_j) = E_{f,i,d}(\lambda_j) + \sum_{k=1}^n \left[E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{b,k} + E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{b,k} \right] \cdot F_{b,k \rightarrow f,i} \quad (14)$$

$$E_{b,i}(\lambda_j) = E_{b,i,d}(\lambda_j) + \sum_{k=1}^n \left[E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{f,k} + E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{f,k} \right] \cdot F_{f,k \rightarrow b,i} \quad (15)$$

内环境接收的直射辐射为

$$E_{f,n+1}(\lambda_j) = \sum_{k=1}^n \left[E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{f,k} + E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{f,k} \right] \cdot F_{f,k \rightarrow f,n+1} + \sum_{k=1}^n \left[E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{b,k} + E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{b,k} \right] \cdot F_{b,k \rightarrow f,n+1} \quad (16)$$

$$F_{b,k \rightarrow f,n+1} \quad (16)$$

经过翻板反射回外界的直射辐射为

$$E_{b,0}(\lambda_j) = \sum_{k=1}^n \left[E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{b,k} + E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{b,k} \right] \cdot F_{b,k \rightarrow b,0} + \sum_{k=1}^n \left[E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{f,k} + E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{f,k} \right] \cdot F_{f,k \rightarrow b,0} \quad (17)$$

边界条件: $E_{f,0}(\lambda_j) = 0; E_{b,n+1}(\lambda_j) = 0$ 。式中: $E_{b,0}(\lambda_j)$ 波长为 λ_j 的反射回外环境的直射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{f,n+1}(\lambda_j)$ 为到达内环境的直射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{f,i,d}(\lambda_j)$ 为翻板第 i 份上表面被直射直接照亮时接收的波长为 λ_j 的直射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{b,i,d}(\lambda_j)$ 为翻板第 i 份下表面被直射直接照亮时接收的波长为 λ_j 的直射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{f,i}(\lambda_j)$ 为经过漫反射后,翻板第 i 份上表面接收到的波长为 λ_j 的直射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{b,i}(\lambda_j)$ 为经过漫反射后,翻板第 i 份下表面接收到的波长为 λ_j 的直射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $F_{p \rightarrow q}$ 为表面 p 到表面 q 的角系数; $\rho_{f,k}, \rho_{b,k}$ 分别为翻板第 k 份上、下表面的漫反射率,与翻板材料特性有关; $\tau_{f,k}, \tau_{b,k}$ 分别为翻板第 k 份上、下表面的透过率。

线性方程组见式(14)~(17),方程组有 $2n+2$ 个未知数, $2n+2$ 个方程,解方程组可得到进入内环境的 $E_{f,n+1}(\lambda_j)$ 、反射回外界的 $E_{b,0}(\lambda_j)$,则漫反射进入的直射辐射比例为

$$\tau_{B,dir-dif}(\lambda_j) = E_{f,n+1}(\lambda_j) / J_{B,0}(\lambda_j) \quad (18)$$

综上,太阳直射辐射部分总的直射透过率为

$$\tau_B(\lambda_j) = \tau_{B,dd}(\lambda_j) + \tau_{B,dir-dir}(\lambda_j) + \tau_{B,dir-dif}(\lambda_j) \quad (19)$$

2 直射辐射传输计算程序的实现

直射辐射照射至遮阳翻板可能分成 3 部分进入室内:直接进入、镜面反射进入和漫反射进入,具体计算流程图见图 6。

用 Matlab 软件编制的界面见图 7。

3 程序验证及讨论

3.1 模型对比验证

规范 ISO15099—2003 在进行遮阳板有效光学特性计算时均把遮阳板近似为直板^[6],文献[6]给出了部分直板的直射透过率和反射率的计算值。本文将所编程序在梭形翻板的弦高 d 非常小(接近直板)即弦高 d 与宽度 L 之比 d/L 接近于零的条件下进

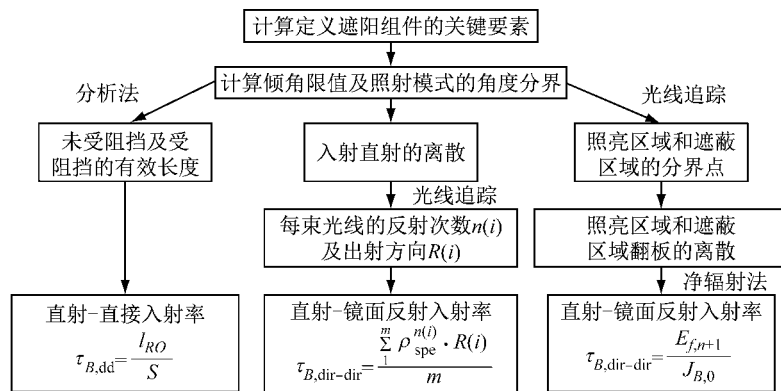


图 6 直射辐射传输计算流程

Fig.6 Flow chart of solar direct radiation transporting calculating

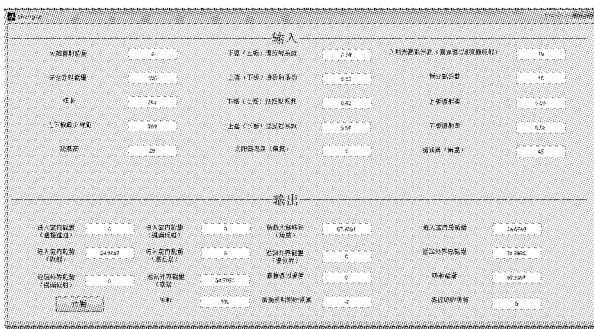


图 7 翻板辐射传输计算软件界面

Fig.7 Interface of software for radiation transportation calculating of louver

行计算,如 $d=0.001$,翻板之间最小间距 $h=12$ mm,翻板宽度 $L=16$ mm.计算结果与文献[6]($h=12$ mm, $L=16$ mm, $\rho_t=0.7$, $\rho_b=0.7$,翻板倾角 45°)的结果对比,翻板划分段数 $n=5$,见表 1,表 1 中 $\tau_{B,dd}$ 为直接入射的直射透过率, $\tau_{B,dir-dif}$ 为直射-散射透过率, $\rho_{B,dir}$ 为直射反射率.

表 1 本文程序与 ISO 15099 计算结果对比

Tab.1 Comparison of results between ISO 15099 and present program

投影角	模型	$\tau_{B,dd}$	$\tau_{B,dir-dif}$	$\rho_{B,dir}$
$\Phi=0^\circ$	ISO 15099	5.7	14.1	39.4
	本文模型	5.7	14.1	39.4
$\Phi=60^\circ$	ISO 15099	0	7.3	55.8
	本文模型	0	7.3	55.8

由表 1 可知,本文编制的计算程序在近似直板条件下结果与文献[6]无偏差.

3.2 平板假设模型的误差分析

文献[6]在进行遮阳板有效光学特性计算时,均把遮阳板近似为直板,若用文献[6]的平板假设模型计算梭形翻板的直射辐射传输,会带来一定的计算误差.当梭形翻板宽度 $L=300$ mm,间距 $h=260$

mm,弦高 $d=25$ mm,表面镜面反射率 $\rho_{spe}=0.05$,表面漫反射率 $\rho_{dif}=0.45$,投影角 $\Phi=30^\circ$ 时,本文研究模型和平板假设模型计算直射辐射透过率的结果对比见图 8.

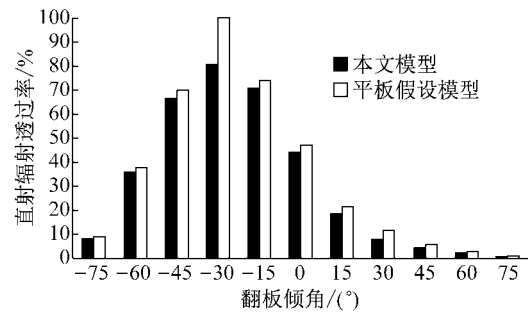


图 8 $\Phi=30^\circ$ 时直射辐射透过率的模型对比

Fig.8 Comparison of direct radiation transmittance model while $\Phi=30^\circ$

从图 8 可以看出,由于梭形翻板具有一定的弧度,采用平板假设模型计算梭形翻板的直射透过率时,由于平板假设模型无法体现圆弧部分对直射辐射的阻挡,也无法体现圆弧部分对反射次数和出射方向的影响,所以计算结果 τ_{flat} 偏大,特别是在翻板朝向 (-30°) 正对太阳光线入射方向 (30°) 时绝对误差值最大 (19.4%) ,其余情况误差值较小.在其他投影角下(如 $\Phi=45^\circ, \Phi=60^\circ$)有着类似的变化规律,在 3 种投影角($\Phi=30^\circ, \Phi=45^\circ, \Phi=60^\circ$)下 2 种计算模型的相对误差见表 2,相对误差 σ 由式(20)计算,式中 τ_{flat} 为平板假设模型计算值, $\tau_{shuttle}$ 为本文模型计算值.

$$\sigma = \frac{|\tau_{shuttle} - \tau_{flat}|}{\tau_{shuttle}} \times 100\% \quad (20)$$

从表 2 可以看出,平板假设模型与本文模型的相对误差都在 5% 以上;当翻板倾角为正值时,相对误差随着投影角增大而增大.

表2 平板假设模型与本文模型的相对误差

Tab.2 Relative error between flat hypothesis model and present model

/%

$\Phi /(^{\circ})$	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
30	14	5	6	24	5	7	13	39	27	26	17
45	8	7	33	6	11	29	31	51	61	81	57
60	7	52	10	31	53	54	76	91	125	190	75

4 结论

取相邻2块梭形遮阳翻板为研究对象,建立了梭形翻板直射辐射传输计算模型,模型采用解析法分析直射辐射直接透过部分,采用光线追踪法计算直射镜面反射部分,采用净辐射法分析直射漫反射部分;并用Matlab软件编制了能描述翻板形状、尺寸、倾角、表面光学特性的梭形翻板直射辐射传输计算程序;将所编程序在梭形翻板的弦高 d 非常小(接近直板)条件下与文献ISO 15099—2003进行对比,结果表明本文编制的计算程序在近似直板条件下,结果与ISO 15099—2003无偏差;另外分析了传统计算方法对梭形翻板进行平板假设所带来的误差,认为用平板假设模型的计算结果偏大,特别是在翻板朝向正对太阳光线入射方向时误差值最大,其余情况相对误差都在5%以上。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.公共建筑节能设计标准·条文说明:GB50189—2005[S].北京:中国建筑工业出版社,2005.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for energy efficiency of public buildings—explanation items: GB50189—2005[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [2] 陶求华,李峥嵘,郑健雯.梭形遮阳翻板太阳散射辐射传输计算模型及程序实现[J].同济大学学报(自然科学版),2015, 43(5):777.
TAO Qiuhua, LI Zhengrong, ZHENG Jianwen. Calculating model of solar diffuse radiation transporting through shuttle louvers and program realization [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(5):777.
- [3] Simmler H, Fischer U, Winkelmann F C. Solar-thermal window blind model for DOE-2 [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1996.
- [4] Dick V D, Kenny P, John G. WIS advanced windows information system [M]. Dublin: TNO Building and Construction Research Department of Sustainable Energy and Buildings, 1996.
- [5] Dick V D, Oversloot H. WIS, the European tool to calculate thermal and solar properties of windows and window components [C]//Proceedings of Building Simulation. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2003: 259-266.
- [6] ISO Technical Committee. Thermal performance of windows, doors, and shading devices - detailed calculations: ISO 15099: 2003 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程:JGJ/T 151—2008[S].北京:中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Calculation specification for thermal performance of windows, doors and glass curtain-walls: JGJ/T 151—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [8] U.S. Department of Energy. Energy-plus engineering reference 2010[M]. California: University of California, 2010.
- [9] ROSENFELD J L J, PLATZER W J, VAN DIJK H, et al. Modelling the optical and thermal properties of complex glazing: Overview of recent developments[J]. Solar Energy, 2001, 69(6):1.
- [10] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook: Fundamentals [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers Inc, 2005.