

梭形遮阳翻板太阳散射辐射传输计算模型及程序实现

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 福建省能源清洁利用与开发重点实验室 福建 厦门 361021)

摘要: 取相邻 2 块遮阳翻板为研究对象, 建立了梭形翻板散射辐射传输的计算模型. 在模型分析基础上, 用 MATLAB 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散射辐射传输计算程序, 验证了程序的正确性, 并进行了翻板划分段数的敏感性分析. 认为翻板散射辐射透过率的相对误差随翻板划分段数增加而减小, 划分段数超过 8 时, 计算结果基本不再发生变化. 最后, 分析了传统计算方法和程序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”计算梭形翻板有一定的误差, 误差值随着翻板倾角增加而增大.

关键词: 梭形翻板; 散射辐射传输; 计算模型; 程序验证; 敏感性分析

中图分类号: TK511.3

文献标志码: A

Calculation Model of Solar Diffuse Radiation Transportation Through Shuttle Louvers and Program Realization

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

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fujian Province Key Laboratory of Energy Cleaning Utilization and Development, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Two adjacent shuttle louvers were first taken as the research object, the calculation model of solar diffuse radiation transportation through shuttle louvers was established. Based on the model analysis, the calculation program of solar diffuse radiation was developed with the MATLAB to describe the shape, size, tilt angle, and surface optical properties of shuttle louvers. Then, the correctness of the calculation program was verified, and the sensitivity analysis was carried out on the partition number of shuttle louvers. Analysis results show that the relative error rate decreases with the segments, but changes no more if the

partition number is over 8. Finally, a comparative study of the error by the proposed method and that by traditional methods with flat hypothesis model shows there exist the error increases with the tilt angle.

Key words: shuttle louvers; solar diffuse radiation transportation; calculation model; programming verification; sensitivity analysis

太阳辐射是影响室内环境的重要因素之一. 太阳辐射的热量进入室内, 增加空调能耗, 太阳辐射还密切地影响着室内的照明能耗. 遮阳是对太阳光的一种合理利用. 一方面, 遮阳阻挡阳光直射辐射和漫辐射得热, 控制热量进入室内, 降低室温、改善室内热环境; 另一方面, 调节适量的阳光进入室内, 有利于人体视觉功效的高效发挥和生理机能的正常运行, 让人感到舒适、愉悦^[1]. 建筑遮阳种类很多, 其中外遮阳普遍使用遮阳翻板, 近年来梭形遮阳翻板的使用越来越受欢迎, 其主要优点有: 叶片呈梭形, 双弧面, 造型优美, 具有高科技感, 叶片截面大且为中空结构, 强度高, 符合外墙翻板刚度及延展性要求, 适合大跨度使用; 叶片呈轻微的弧形, 闭合时候减少正向风压, 遮阳控制不受风力影响, 叶片转角可调, 达到遮阳调光的最佳效果.

建筑外表面接受的太阳辐射包括: 太阳直射辐射、天空散射辐射、地面反射散射辐射、周围建筑反射散射辐射、长波辐射等^[2-3]. 由于遮阳翻板已经阻挡了大部分的直射辐射, 而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.

国内外对遮阳构件的太阳散射传输计算模型展开了一定研究. 1952 年, ASHVE 实验室的 Parmelee

收稿日期: 2014-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51278349); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JA13185; FB2013004)

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

和 Aubele 基于分析法开发了遮阳翻板的太阳辐射传输的数学分析模型,可以用来计算翻板对单色入射太阳辐射的吸收、反射和透过特性^[4]. 1995 年,英国的 Pfrommer 基于分析法开发了百叶的太阳辐射传输计算模型^[5-6],关于散射辐射传输的计算方法与文献^[4]类似. 1996 年,Simmler 等开发了 Simmler 模型,能分析翻板遮阳的有效光学特性与翻板的尺寸和面板材料的反射率的关系^[7],其主要假设为“翻板是直板”. 散射入射计算时把翻板 2 等分,与左右两边的界面组成一个 6 面腔体,采用净辐射法解得翻板的透过、反射、吸收特性. 1996 年,爱尔兰都柏林大学的 Van Dijk, Gouling 开发了 WIS (Advanced Windows Information System) 软件包,其中的重要组件就是遮阳模型^[8-9],其假设也是“翻板是直板”. 此模型在 1952 年 Parmelee 和 Aubele 的分析模型基础上做改进,把原来的翻板离散为 2 部分改进分为 5 部分,把原来的光线追踪法改为净辐射法. 这一方法被 ISO 15099 所采纳^[10],而我国的《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程 JGJ/T 151—2008》也是采用 ISO 15099 的方法^[11]. 国内华南理工大学的张磊对比分析了简化模型(百叶 2 等分)与文献^[10]的相对误差^[12]. 总的来说,目前国内、外关于遮阳翻板的太阳散射辐射传输计算存在的主要问题是:只能计算形状简单的平板,无法准确计算常用的梭形翻板、机翼翻板等.

本文分析梭形翻板的散射辐射传输过程,建立梭形翻板太阳散射传输计算模型,编制能准确反映梭形遮阳翻板形状、尺寸、倾角及表面光学特性的散射辐射透过率、反射率、吸收率的计算程序,并与文献^[10]结果对比验证;进行翻板划分段数的敏感性分析.

1 散射辐射传输计算模型

波长为 λ_j 的散射辐射经过翻板,一部分辐射量透过翻板进入内环境,占总辐射量的 $\tau_{\text{dif}}(\lambda_j)$;一部分辐射量被翻板反射回外界,占总辐射量的 $\rho_{\text{dif}}(\lambda_j)$,余下部分辐射量被翻板吸收,占总辐射量的 $\alpha_{\text{dif}}(\lambda_j)$,这 3 部分的关系式为^[13]

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

式中: $\tau_{\text{dif}}(\lambda_j)$ 为翻板对波长为 λ_j 的散射辐射的透过率; λ_j 为辐射波长; $\rho_{\text{dif}}(\lambda_j)$ 为翻板对波长为 λ_j 的散射辐射的反射率; $\alpha_{\text{dif}}(\lambda_j)$ 为翻板对波长为 λ_j 的散射辐射的吸收率.

图 1 中, J 为入射的散射辐射; E 为接收的散射辐射; f 为翻板上表面; b 为翻板下表面; ρ 为翻板表面反射率; τ 为翻板表面透射率.

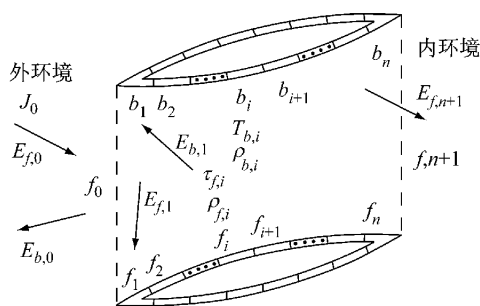


图 1 相邻两块遮阳翻板间散射辐射传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solar diffuse radiation transportation through two adjacent louvers

取相邻 2 片遮阳翻板组成的空腔为研究对象,每块翻板分成 n 份,如图 1 所示,则每部分接收到的散射辐射量不同,上、下表面第 i ($1 \leq i \leq n$) 段接收到的散射辐射为

$$E_{f,i}(\lambda_j) = J_0(\lambda_j) \cdot F_{0 \rightarrow f,i} + \sum_{k=1}^n [E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{b,k} + E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{b,k}] \cdot F_{b,k \rightarrow f,i} \quad (2)$$

$$E_{b,i}(\lambda_j) = J_0(\lambda_j) \cdot F_{0 \rightarrow b,i} + \sum_{k=1}^n [E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{f,k} + E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{f,k}] \cdot F_{f,k \rightarrow b,i} \quad (3)$$

内环境接收的散射辐射为

$$E_{f,n+1}(\lambda_j) = J_0(\lambda_j) \cdot F_{0 \rightarrow f,n+1} + \sum_{k=1}^n [E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{f,k} + E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{f,k}] \cdot F_{f,k \rightarrow f,n+1} + \sum_{k=1}^n [E_{b,k}(\lambda_j) \cdot \rho_{b,k} + E_{f,k}(\lambda_j) \cdot \tau_{b,k}] \cdot F_{b,k \rightarrow f,n+1} \quad (4)$$

经过翻板反射回外界的散射辐射为

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

边界条件为 $E_{f,0}(\lambda_j) = J_0(\lambda_j)$; $E_{b,n+1}(\lambda_j) = J_{n+1}(\lambda_j) = 0$. 式中: $E_{f,0}(\lambda_j)$ 为波长为 λ_j 的从外环境入射的散射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{b,0}(\lambda_j)$ 为波长为 λ_j 的反射回外环境的散射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{f,n+1}(\lambda_j)$ 为到达内环境的散射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{f,i}(\lambda_j)$ 为翻板第 i 份上表面接收到的波长为 λ_j 的散射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $E_{b,i}(\lambda_j)$ 为翻板第 i 份下表面接收到的波长为 λ_j 的散射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $F_{p \rightarrow q}$ 为表面 p 到表面 q 的角系数; $\rho_{f,k}$, $\rho_{b,k}$ 为翻板第 k 份上、下表面的反射率, 与翻板材料特性有关; $\tau_{f,k}$, $\tau_{b,k}$ 为翻板第 k 份上、下表面的透过率, 与翻板材料特性有关; $J_0(\lambda_j)$ 为波长为 λ_j 的从外环境入射的散射辐射, $W \cdot m^{-2}$; $J_{n+1}(\lambda_j)$ 为波长为 λ_j 的从内环境入射的散射辐射, $W \cdot m^{-2}$, 这里认为内环境对外环境没有散射辐射, 因此, $J_{n+1}(\lambda_j) = 0$. 易得, 对波长为 λ_j 的散射辐射的透过率为

$$\tau_{dif}(\lambda_j) = E_{f,n+1}(\lambda_j) / J_0(\lambda_j) \quad (6)$$

对波长为 λ_j 的散射辐射的反射率为

$$\rho_{dif}(\lambda_j) = E_{b,0}(\lambda_j) / J_0(\lambda_j) \quad (7)$$

2 散射辐射传输的 MATLAB 编程算法

将编制以遮阳翻板尺寸、表面光学特性、倾角、翻板划分段数 n 为输入参数, 计算出遮阳翻板的散射辐射透过率、吸收率和反射率的 MATLAB 程序. 程序的编制步骤如下:

(1) 输入、输出变量说明. 输入变量: 如图 2 所示, d 是弦弧高; h 是水平状态下上下板最小间距, l 是弦长; β 为旋转角, 逆时针为正, 最小值为 0° , 最大值由 h, d 决定, 最大值不大于 90° ; n 为翻板均匀划分段数; 波长为 λ_j 的从外环境入射的散射辐射 $J_0(\lambda_j)$; $\rho_{f,k}$, $\rho_{b,k}$ 为翻板表面 k 的反射率.

输出变量: 到达内部环境的散射辐射 $E_{f,n+1}(\lambda_j)$, 从翻板系统反射出来的散射辐射 $E_{b,0}(\lambda_j)$, 散射辐射透过率 $\tau_{dif}(\lambda_j)$, 散射辐射反射率 $\rho_{dif}(\lambda_j)$.

(2) 坐标旋转转换. 如图 2 所示, 翻板倾角为 β ,

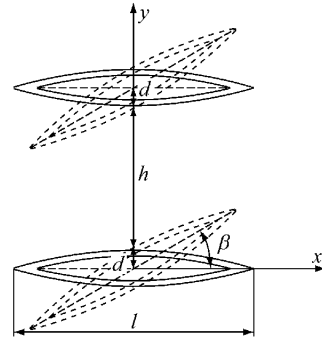


图 2 相邻两块遮阳翻板尺寸及坐标系

Fig. 2 Geometries and coordinate system between two adjacent louvers

由输入变量求出翻板弧段对应圆的半径以及圆心角, 上下板的弦中点的间距. 以下板弧段对应弦的中点为原点, 下板弧段对应的弦中点指向上板弧段对应的弦中点为 y 轴, 建立平面直角坐标系. 上下翻板对应的弧段分别绕各自的弦中点逆时针旋转, 旋转角为 β .

(3) 计算角系数. 计算角系数采用代数法, 分别求出翻板分段后的各点的坐标, 并计算各点间的直线距离或者弧线段长度, 角系数的计算方法参考文献[14-15]. 某一倾角下用代数法计算角系数如图 3 所示.

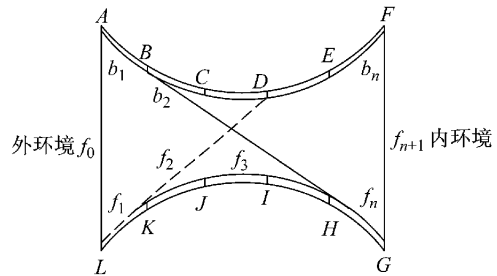


图 3 代数法计算角系数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of algebraic method to calculate configuration factors

外界与翻板, 翻板与翻板、内、外界之间的角系数计算式为

$$F_{f0 \rightarrow b1} = \frac{\widehat{AL} + \widehat{AB} - \widehat{BL}}{2 \widehat{AL}}$$

$$F_{f0 \rightarrow b2} = F_{f0 \rightarrow (b1+b2)} - F_{f0 \rightarrow b1} = \frac{\widehat{AL} + \widehat{AC} - \widehat{CL}}{2 \widehat{AL}} - \frac{\widehat{AL} + \widehat{AB} - \widehat{BL}}{2 \widehat{AL}} = \frac{\widehat{BC} + \widehat{BL} - \widehat{CL}}{2 \widehat{AL}}$$

$$F_{f0 \rightarrow b3} = F_{f0 \rightarrow (b1+b2+b3)} - F_{f0 \rightarrow (b1+b2)} = \frac{\widehat{AL} + \widehat{AD} - \widehat{DL}}{2 \widehat{AL}} - \frac{\widehat{AL} + \widehat{AC} - \widehat{CL}}{2 \widehat{AL}} = \frac{\widehat{CD} + \widehat{CL} - \widehat{DL}}{2 \widehat{AL}}$$

$$F_{b2 \rightarrow f3} = \frac{\widehat{BI} + \widehat{CJ} - \widehat{BJ} - \widehat{IC}}{2 \widehat{BC}}$$

$$F_{f0 \rightarrow fn+1} = \frac{\widehat{AG} + \widehat{FL} - \widehat{AF} - \widehat{LG}}{2 \widehat{AL}}$$

式中: \overline{AL} 为A点与L点间直线段长度; \widehat{AB} 为A点与B点间弧线段长度; \overline{AG} 为A点与G点间混合线段长度,包括首尾两段弧线段及与板相切的线段,如图3中的实线部分; \overline{DL} 为D点与L点间混合线段长度,包括一段弧线段及一段与板相切的线段,如图3中的虚线部分。

(4) 列出线性方程组并解方程组得到结果。线性方程组见式(1)~式(5),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 $E_{f,n+1}(\lambda_j)$ 和反射回外界 $E_{f,0}(\lambda_j)$;通过式(6)~式(7)可计算梭形翻板对太阳散射辐射的透过率 $\tau_{\text{dif}}(\lambda_j)$ 和反射率 $\rho_{\text{dif}}(\lambda_j)$ 。

表1 本文程序与ISO 15099的计算结果对比

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

计算方法		A45(倾角 45°)		B45(倾角 45°)		C45(倾角 45°)		C80(倾角 80°)	
		ρ_f	ρ_b	ρ_f	ρ_b	ρ_f	ρ_b	ρ_f	ρ_b
		0.70	0.70	0.55	0.55	0.70	0.40	0.70	0.40
ISO 15099	τ_{dif}	0.332		0.294		0.291		0.038	
	ρ_{dif}	0.345		0.260		0.323		0.604	
本文程序	τ_{dif}	0.332		0.294		0.291		0.038	
	ρ_{dif}	0.345		0.260		0.323		0.604	
相对误差/ %	τ_{dif}	0		0		0		0	
	ρ_{dif}	0		0		0		0	

由表1可知,本文编制的计算程序在近似直板条件下,结果与文献无偏差。

3.2 翻板划分段数的敏感性分析

在参考文献[10]中将翻板划分为5块,文献[12]认为“将翻板划分为2块已经可以满足精度需要,误差可以控制在3%以内”。采用较少的划分段数可以换来更快的计算速度和更短的计算时间,本文所开发的计算程序在不同划分段数下的计算时间见表2。

为了选择合适的翻板划分段数,使得计算结果满足一定精度要求而又不会耗费较多计算时间,进

3 结果及讨论

3.1 程序验证

之前研究及现有计算程序在进行散射辐射计算时,均把遮阳板近似为直板,文献[10]给出了部分直板的散射透过率和反射率的值。本文验证了所编程序在梭形翻板的弦高 d 非常小(接近直板)条件下的正确性,即弦高 d 与弦长 l 之比 d/l 接近于零,如 $d=0.001$,翻板之间最小间距 $h=11.998$ mm,弦长 $l=16$ mm;结果与文献[10]($h=12$ mm, $l=16$ mm)的计算结果对比,翻板划分段数 $n=5$,见表1。

行了翻板划分段数的敏感性分析。

表2 翻板划分段数对计算时间的影响

Tab.2 Effects of segments on computation time

分段数量	1	2	3	4	5	6	7	8
计算时间/s	0.66	0.88	1.28	1.39	1.89	2.10	2.76	2.87

以上海某品牌的某款梭形翻板为例,翻板弦长 $l=400$ mm,弦高 $d=30$ mm,叶片之间最小间距 $h=270$ mm;翻板前向反射系数 $\rho_f=0.7$,后向反射系数 $\rho_b=0.7$;考察在不同倾角下翻板划分段数对透过率 $\tau_{\text{dif}}(\%)$ 的影响,见表3。

表3 不同倾角下梭形翻板划分段数对透过率 τ_{dif} 的影响

Tab.3 Effects of segments on transmittance τ_{dif} at different shuttle louvers angles

%

分段数量	$\tau_{\text{dif}}/\%$					
	15°	30°	45°	60°	70°	80°
1	50.8	45.9	37.9	26.1	11.8	7.1
2	46.0	40.9	32.6	21.9	10.5	7.1
3	45.2	40.0	31.7	20.8	8.5	5.0
4	44.9	39.7	31.4	20.4	7.8	3.9
5	44.7	39.6	31.3	20.2	7.6	3.6
6	44.6	39.5	31.2	20.1	7.5	3.5
7	44.6	39.5	31.1	20.1	7.4	3.4
8	44.6	39.4	31.1	20.0	7.3	3.3

用相同的方法分析某款平板翻板($h=12$ mm, $l=16$ mm);翻板前向反射系数 $\rho_f=0.7$,后向反射

系数 $\rho_b=0.7$;考察在不同倾角下翻板划分段数对透过率 τ_{dif} 的影响,见表4。

表4 不同倾角下平板划分段数对透过率 τ_{dif} 的影响Tab.4 Effects of segments on transmittance τ_{dif} at different flat louvers angles

%

分段数量	$\tau_{\text{dif}}/\%$					
	15°	30°	45°	60°	70°	80°
1	49.6	44.8	36.9	26.6	15.6	12.5
2	47.6	42.4	33.9	22.8	11.0	7.7
3	47.2	41.9	33.4	22.1	9.5	5.6
4	47.0	41.8	33.2	21.9	9.1	5.1
5	47.0	41.7	33.2	21.8	8.9	4.9
6	46.9	41.7	33.1	21.7	8.8	4.8
7	46.9	41.6	33.1	21.7	8.8	4.7
8	46.9	41.6	33.1	21.7	8.8	4.7

从表3和表4可以看出,随着翻板划分段数增加,散射辐射有效透过率减小,若干次后趋于稳定。

图4和图5为平板、梭形翻板透过率的相对误差随翻板划分段数的变化,可以看出,透过率的相对误差随翻板划分段数增加而减小,一般情况下,划分段

数超过8时,基本不再发生变化;平板翻板分为5段即可达到较高的精度($<5\%$),而梭形翻板只有在倾角较小时(45°),分为5段才可达到较高的精度($<3\%$),倾角较大($>75^\circ$)时应采用8段进行计算。

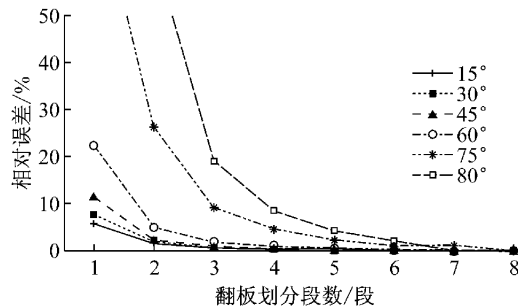


图4 平板翻板透过率的相对误差随翻板划分段数的变化

Fig.4 Effects of segments on relative error of transmittance at different flat louvers angles

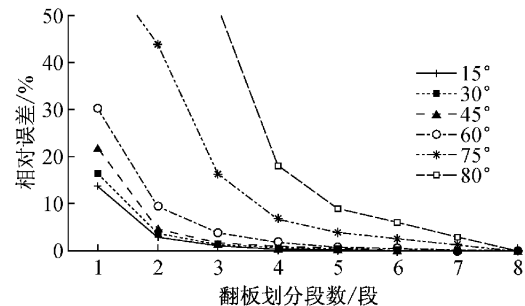


图5 梭形翻板透过率的相对误差随翻板划分段数的变化

Fig.5 Effects of segments on relative error of transmittance at different shuttle louvers angles

3.3 平板假设的误差分析

为考察平板假设计算梭形翻板散射辐射传输时所带来的误差,对比了翻板的以下两种情形,D1(近似平板):翻板中心间距 $h=12\text{ mm}$,弦长 $l=16\text{ mm}$,弦高 $d=0.001\text{ mm}$,翻板划分段数 $n=8$;D2(梭形翻板):翻板中心间距 $h=12\text{ mm}$,弦长 $l=16\text{ mm}$,弦高

$d=0.6\text{ mm}$,翻板划分段数 $n=8$ 。结果见表5。

从表5可以看出,典型梭形翻板具有一定的弧度,用平板假设模型计算梭形翻板有一定的误差,在倾角相对较小时($<45^\circ$),相对误差都在10%以下,但误差值随着翻板倾角增加而增大。

表5 平板假设模型的误差分析

Tab.5 Error analysis of flat hypothesis model

倾角	15°	30°	45°	60°	75°	80°
$d=0.001$ 的散射辐射透过率/%	46.90	41.60	33.10	21.70	8.73	4.67
$d=0.6$ 的散射辐射透过率/%	44.60	39.30	30.82	19.55	6.96	3.18
反射率差值/%	2.30	2.30	2.28	2.15	1.77	1.49
相对误差/%	5.16	5.85	7.40	11.00	25.43	46.86

4 结语

取相邻2片遮阳翻板为研究对象,分析了梭形翻板散射辐射传输的计算模型,在此基础上,用MATLAB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散射辐射传输计算程序;在近似平板的情况下验证了程序的正确性,并进行了翻板划分段数的敏感性分析,翻板散射辐射透过率的相对误差随翻板划分段数增加而减小,一般情况下,划分段数超过8时,基本不再发生变化;平板翻板分为5段即可达到较高的精度($<5\%$),而梭形翻板只

有在倾角较小时(45°),分为5段才可达到较高的精度($<3\%$),倾角较大($>75^\circ$)时宜分8段进行计算;最后,分析了传统计算方法和程序对梭形翻板进行平板假设所带来的误差,用平板假设模型计算梭形翻板有一定的误差,在倾角相对较小时($<45^\circ$),相对误差都在10%以下,但误差值随着翻板倾角增加而增大。

参考文献:

- [1] 李峥嵘,陶求华,蒋福建,等.建筑外百叶最佳固定倾角与动态百叶节能潜力[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2012,44(6):767.
LI Zhengrong, TAO Qiuhua, JIANG Fujian, *et al.* Optimum fixed slat angle and energy-saving potential of dynamic external louvers[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2012, 44(6): 767.
- [2] 陶求华,李峥嵘,蒋福建,等.北外窗遮阳的必要性及遮阳设施的优化选择[J].重庆大学学报:自然科学版,2013,36(9):154.
TAO Qiuhua, LI Zhengrong, JIANG Fujian, *et al.* Necessity of shading on north facade and optimal selection of shading device [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2013, 36(9): 154.
- [3] TAO Qiuhua, LI Zhengrong, JIANG Fujian, *et al.* An improved method for generating typical meteorological years used in building energy simulating in China [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 21(1): 21.
- [4] Parmelee G V, Aubele W W. The shading of sunlit glass: an analysis of the effect of uniform spaced flat opaque slats [J]. ASHVE Transaction, 1952, 58: 377.
- [5] Pfrommer P, Lomas K J, Kupke C H R. Solar radiation transport through slat-type blinds: a new model and its application for thermal simulation of buildings [J]. Solar Energy, 1996, 57(2): 77.
- [6] Pfrommer P. Thermal modeling of highly glazed spaces [D]. Leicester: De Montfort University, 1995.
- [7] Simmler H, Fischer U, Winkelmann F C. Solar-thermal window blind model for DOE-2 [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1996.
- [8] Van Dijk Dick, Paul Kenny, Goulding John. WIS advanced windows information system, WIS reference manual [M]. Dublin: TNO Building and Construction Research Department of Sustainable Energy and Buildings, 1996.
- [9] Van Dijk Dick, Oversloot H. WIS, the European tool to calculate thermal and solar properties of windows and window components [C]//Proceedings of Building Simulation. Eindhoven: TNO Building and Construction Research, 2003: 259-266.
- [10] International Standards Organization. ISO 15099: 2003 Thermal performance of windows, doors, and shading devices - detailed calculations [S]. Geneva: International Standards Organization, 2003.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 151—2008 建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程[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. JGJ/T 151—2008 Calculation specification for thermal performance of windows, doors and glass curtain-walls[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [12] 张磊,孟庆林.百叶外遮阳太阳散射辐射计算模型及程序实现[J].土木建筑与环境工程,2009,31(6):92.
ZHANG Lei, MENG Qinglin. Calculating model of solar diffuse radiation transporting through external blinds and its program realization[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2009, 31(6): 92.
- [13] Lawrence Berkeley National Laboratory. Energy plus engineering reference 2010 [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [14] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].第4版.北京:高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [15] Siegel R, Howell J R. Thermal radiation heat transfer [M]. Washington D C: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.