

# 全国暖通空调制冷 2014年学术年会

。 *COLLECTION* **论文集**



中国建筑学会暖通空调分会  
中国制冷学会空调热泵专业委员会  
2014年10月

# 普通窗玻璃对太阳辐射吸收、反射和透过的模拟计算以及乌鲁木齐地区太阳集热器的安装倾角的确定

北京市住宅建筑设计研究院有限公司 过旻<sup>☆</sup> 李庆平 崔学海 王国建

邵晨晖 陈辰 胡颐蘅

**摘要:** 对于建筑的热环境来说太阳辐射是一个十分重要的外扰,特别是透过玻璃窗直接射入室内的辐射热,对房间的温度状况有着特殊的影响。冬季太阳辐射提供了免费的热源,而在夏季,太阳辐射则增加了冷负荷,因此,研究普通窗玻璃对太阳光辐射的吸收、反射和透过,对合理利用或控制太阳辐射有着重要的作用。本文用 MATLAB 编程可方便的求解玻璃的透过率、反射率以及吸收率,可用计算机方便的求解。太阳热水器是太阳能热利用中技术最成熟的领域,而太阳集热器是太阳热水器的最重要组成部分,一天之中倾斜面上的太阳总辐射辐照度是倾斜面倾角的单值函数,其安装倾角对系统的优劣起着决定性作用。本文用 excel 表格编程计算了乌鲁木齐地区全年的各月的最佳的倾角,以期为太阳能集热器的安装提供参考。

**关键词:** 太阳辐射 吸收率 透过率 反射率 模拟计算

## 1 一般性概念

辐射热量  $Q$  投射到物体表面上时,其中一部分  $Q_{\rho}$  被物体表面反射,一部分  $Q_{\alpha}$  在进入表面以后被物体吸收;其余部分  $Q_{\tau}$  则透过物体。根据能量守恒定律:

$$Q = Q_{\rho} + Q_{\alpha} + Q_{\tau} \quad (1)$$

即: 
$$\frac{Q_{\rho}}{Q} + \frac{Q_{\alpha}}{Q} + \frac{Q_{\tau}}{Q} = 1 \quad (2)$$

$\rho = \frac{Q_{\rho}}{Q}$  称为反射率,  $\alpha = \frac{Q_{\alpha}}{Q}$  称为吸收率,  $\tau = \frac{Q_{\tau}}{Q}$  称为透过率。对于玻璃,其对太阳射线

的中短波辐射是个半透明体,而对长波辐射则几乎是不透明体。如下图所示:

## 2 窗玻璃对太阳辐射的反射百分比

如下图所示: AB 为两种不同介质的分界面,当波长为  $\lambda$  的射线  $I_{\lambda}$ ,以入射角  $i_1$  投射到分界面时,一部分被反射,其强度为  $I_{\rho\lambda}$ ,另一部分则透入,其强度为  $I_{\lambda'}$ ,根据菲涅尔定律得知,分界面对波长为  $\lambda$  的射线,其反射百分比  $r_{\lambda}$  与入射角  $i_1$  和折射角  $i_2$  有关,可用以下公式计算:

项目基金: 北京建筑大学“绿色建筑与节能技术”北京市重点实验室开发研究基金资助项目

☆ 过旻,男,1989.06.27,硕士

地址: 北京市东城区东总布胡同5号

邮编: 100005

联系电话: 13911254282

E-mail: soft0627@sina.com

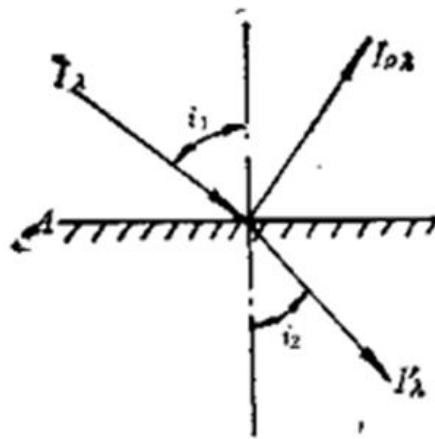


图 1 射线的入射、反射与折射

$$r_{\lambda} = \frac{I_{0\lambda}}{I_{\lambda}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(i_2 - i_1)}{\sin^2(i_2 + i_1)} + \frac{\tan^2(i_2 - i_1)}{\tan^2(i_2 + i_1)} \right] \quad (3)$$

$i_2$ 、 $i_1$  分别为折射角和入射角

入射角与折射角之间的关系，取决于两种介质的性质，可用下式表示：

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (4)$$

式中， $n$  为折射指数。空气的折射指数为 1；在太阳光谱的范围内，玻璃的平均折射指数为 1.256。带入上式即可求得折射角  $i_2$ ，进而求的反射百分比。当射线以法线方向入射时， $i_1 = i_2 = 0$ ，联立 (3)、(4) 式得到：

$$r_{\lambda(0)} = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (5)$$

$r_{\lambda(0)}$  为波长为  $\lambda$  的射线，法向入射时的反射百分比。

### 3 窗玻璃对太阳辐射的吸收百分比

窗玻璃对太阳辐射的吸收现象与大气层对太阳光辐射的吸收规律相同，即不同波长的射线按指数关系衰减，其表达式为：

$$dI_{\lambda} = -K_{\lambda} I_{\lambda} dx \quad (6)$$

对上式求解可得：

$$I_{\lambda\tau} = I_{0\lambda} \exp(-K_{\lambda} \cdot L) \quad (7)$$

式中  $I_{\lambda\tau}$ ：经过窗玻璃薄层以后，波长  $\lambda$  的太阳辐射强度

$I_{0\lambda}$ ：进入窗玻璃薄层时，波长为  $\lambda$  的太阳辐射强度

$L$ ：射线透过窗玻璃薄层时的路程长度

$d$ ：窗玻璃的厚度

$K_{\lambda}$ ：消光系数， $\text{mm}^{-1}$

辐射强度被吸收的百分比：

$$\alpha_{\lambda} = 1 - \frac{I_{\lambda\tau}}{I_{0\lambda}} = 1 - \exp(-K_{\lambda} \cdot L) \quad (8)$$

对于窗玻璃来说，太阳光的主要波长  $3\mu\text{m}$  以下几乎全部透过，但却能阻隔  $3\mu\text{m}$  以上的长波红外线辐射， $K_{\lambda}$  值很大。

### 4 窗玻璃的反射、吸收和透过

[键入文字]

阳光照射到两侧均为空气的窗玻璃时，射线要通过两个分界才能从一侧透射到另一侧。如图 2 所示，阳光首先从空气入射进入玻璃薄层(通过第一个分界层)，此时，由于反射作用，只有  $(1-r)$  的辐射能进入玻璃层；经玻璃的吸收作用，剩余的  $(1-r)(1-a)$  辐射能才可抵达第二个分界面（射线在这里要从玻璃再透射至另一侧空气的分界面）；由于第二界面的反射作用，只有  $(1-r)^2(1-a)$  的辐射能可以透过玻璃进入另一侧的空气，其余  $(1-r)(1-a)r$  的辐射能被反射回去，再经玻璃吸收，抵达第一界面；如此反复下去，详见图 2：

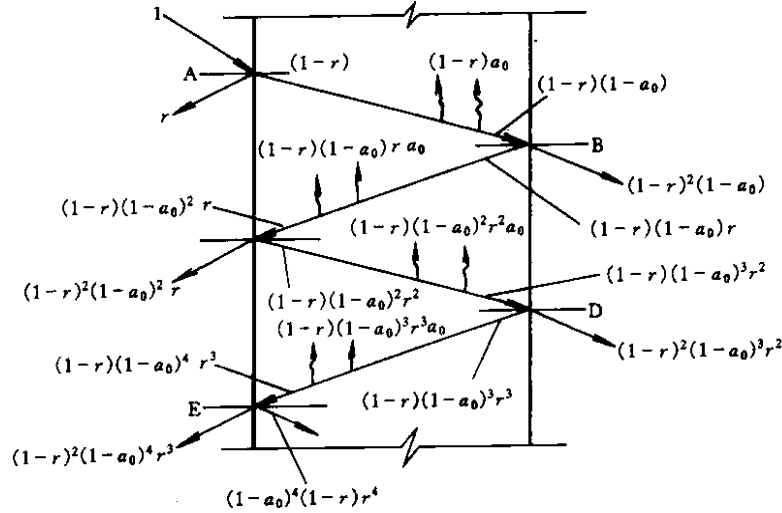


图 2 单层窗玻璃薄层

阳光照射到窗玻璃时，窗玻璃对于太阳辐射的总反射率、吸收率和透过率，则是阳光在玻璃薄层内反复进行反射、吸收和透过的各个组成部分的无穷多项之和，故：

吸收率为：

$$a = a(1-r)[1 + r(1-a) + r^2(1-a)^2 + \dots] = \frac{a(1-r)}{1-r(1-a)} \quad (9)$$

反射率为：

$$\rho = r[1 + (1-r)(1-a)^2\{1 + (1-a)^2r^2 + \dots\}] = r[1 + \frac{(1-a)^2(1-r)^2}{1-r^2(1-a)^2}] \quad (10)$$

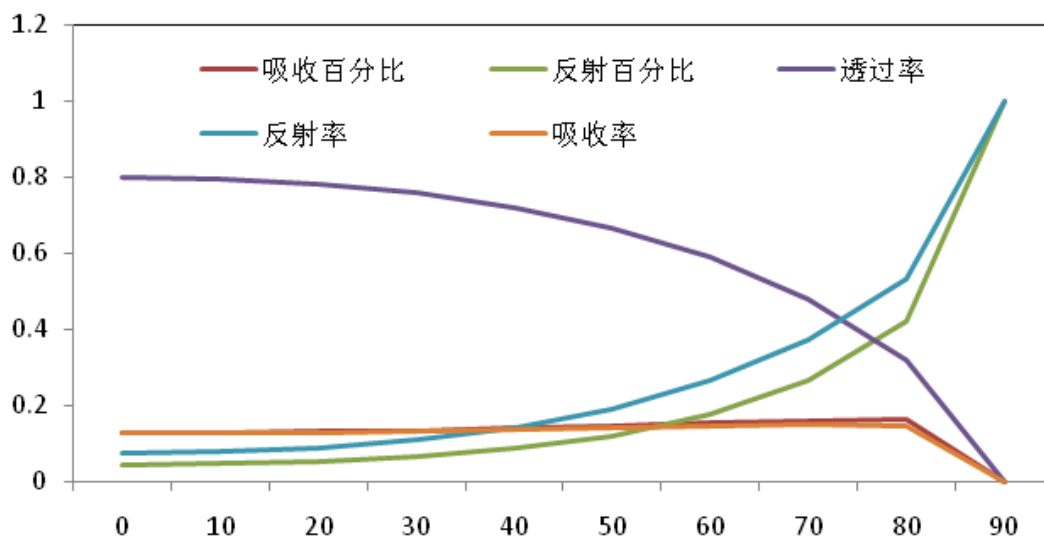
透过率为：

$$\tau = (1-a)(1-r)^2[1 + r^2(1-a)^2 + \dots] = \frac{(1-a)(1-r)^2}{1-r^2(1-a)^2} \quad (11)$$

## 5. matlab 模拟结果

窗玻璃的透过率、反射率和吸收率，可用计算机方便求解。本文以 matlab 计算 3mm 厚普通窗玻璃对于阳光的反射率、吸收率和透过率与入射角的关系，玻璃的消光系数  $0.045\text{mm}^{-1}$ ，玻璃的折射指数为 1.526。计算结果如下表：

图 3 各个参数随入射角的变化



由上图可以看出，阳光入射角的大小直接影响玻璃对太阳的透过率、反射率以及吸收率，当入射角大于 50~60deg 时，透过率急剧减小，而反射率急剧增大，故在冬季阳光的入射角越小越好，因为太阳辐射可以以较大的透射率透过玻璃进入室内减少冬季热负荷；而在夏季入射角尽量小，因为可以减小太阳辐射引起的室内冷负荷的增加。反射率和透射率呈现此消彼长的趋势。对于吸收率，在 0~85deg 的范围内变化不大，而在 85~90deg 吸收率急剧减小。

## 7 与太阳辐射有关的角度计算

集热器接受的太阳辐射量受很多因素影响，主要有以下几个方面：（1）天文。地理因素：日地距离变化，太阳赤纬，太阳时角，地理经纬度，海拔高度和气候等；（2）大气状况：云量，大气透明度，大气组成及污染程度(灰尘粒子密度，二氧化碳和氯氟烃等的含量)；（3）集热器的设计考虑：集热器的倾斜角和方位角，是否采用选择性涂层，采用平板型还是真空管型，安装场地周围的辐射能否受到大树或建筑遮挡等。由于影响因素多，随机性强，完全依靠理论计算难以取得精确的结果，通常利用实测的水平面直射辐射和散射辐射数据，再根据公式计算集热器在任意方位上接受到的太阳辐射量。

集热器吸收的热量

$$S = I_{s\theta} \cdot \eta \quad (12)$$

其中， $I_{s\theta}$  ——集热面上的太阳总辐射辐照度， $W/m^2$ ；

$\eta$  ——集热器瞬时效率，%。

倾斜面上太阳总辐射强度

$$I_{s\theta} = I_{D\theta} + I_{d\theta} + I_{R\theta} \quad (13)$$

在给出太阳总辐射强度的数据时，散射辐射一般只计算天空散射辐射一项，因此简化为：

$$I_{s\theta} = I_{D\theta} + I_{d\theta} \quad (14)$$

[键入文字]

$$I_{D\theta} = I_{DN} \cos i \tag{15}$$

$$I_{d\theta} = I_{dH} \cos^2 \frac{\theta}{2} \tag{16}$$

$$I_{dH} = \frac{1}{2} I_0 \sin h \frac{1 - p^m}{1 - 1.4 \ln p} \tag{17}$$

虽然存在函数关系式  $I_{s\theta} = f(\theta, \varphi, n)$ ，但由于地理纬度  $\varphi$  和计算日在一年中的日期序号  $n$  对于同一地点同一日期都是定值，因此一天之中倾斜面上的太阳总辐射辐照度是倾斜面倾角的单值函数，即  $I_{s\theta} = f(\theta)$ 。集热器倾角的大小是太阳能集热器倾斜面能够接受多少太阳辐射量的重要因素。

在没有实测条件的情况下，可以根据气象局提供的典型气象年的水平面上的太阳总辐射和散射辐射，利用上述公式计算得到不同方位的太阳辐射量。太阳集热器一般为按照当地最佳倾角进行安装，确定不同方位的集热器实际接受的太阳辐射量，对于太阳能热水系统中集热器面积的选择具有重要意义。

### 8 乌鲁木齐地区太阳能安装倾角的计算及结论

乌鲁木齐地区所在地理纬度为  $43.78^\circ$ ，经度  $87.65^\circ$ ，为了明确集热器安装倾角变化对太阳能系统有效能量输出的影响，以《中国建筑热环境分析专用气象数据集》乌鲁木齐设计典型年逐时气象参数作为计算条件，依据上述倾斜面太阳辐射辐射的计算方法用 EXCEL 编程计算，分别以  $0^\circ$  到  $90^\circ$  为倾角计算全玻璃真空管集光器不同角度倾斜面上所获的太阳辐射量，从而得到全年逐时的集热器朝向为正南时的有效能量产出，通过数据筛选，得到集热器各月的最佳倾角及最佳倾角下的月总太阳辐射值，如图 4 所示。

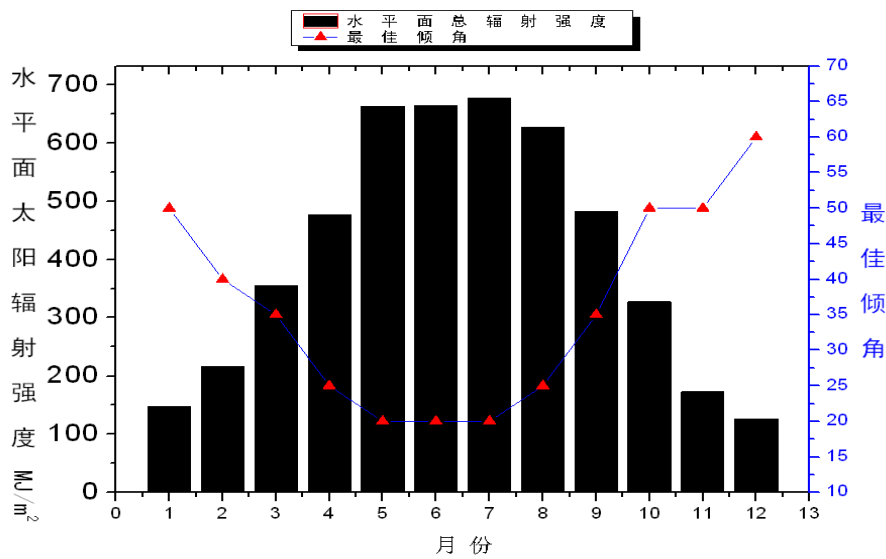


图 4 乌鲁木齐月最佳倾斜面上所获得的太阳辐射值

表 1 不同倾角在各月所获的太阳辐射值（单位  $\text{w/m}^2$ ）

日期	倾角	1 月总 和	2 月总 和	3 月总 和	4 月总 和	5 月总 和	6 月总 和	7 月总 和	8 月总 和	9 月总 和	10 月总 和	11 月总 和	12 月总 和	冬季采暖 期总和
倾 斜 面 太 阳 总 辐 射	0°	40658	59299	97963	131187	182605	183598	188217	173699	134029	90742	47916	35236	388401. 8
	5°	43159	62150	101574	134914	186907	187506	192404	178961	140906	98008	51026	38138	409542. 9
	10°	45628	64681	104631	137868	190220	191000	195874	183130	146836	104653	54045	40918	428856. 4
	15°	47914	66870	107105	140039	192609	193136	198266	186118	151781	110626	56783	43752	446142. 1
	20°	49946	68701	108980	141387	193733	193898	199267	187865	155753	115896	59210	46338	460927
	25°	51707	70161	110250	141864	193530	193278	198862	188332	158734	120422	61308	48656	473069. 9
	30°	53183	71237	110921	141456	192004	191283	197052	187517	160682	124175	63059	50689	482483. 9
	35°	54365	71957	110985	140165	189165	187927	193853	185425	161555	127138	64452	52421	489146. 4
	40°	55243	72299	110425	137992	185035	183236	189287	182074	161320	129285	65475	53840	492973. 9
	45°	55810	72241	109239	134953	179645	177246	183391	177487	159979	130573	66121	54934	493885. 7
	50°	56062	71785	107435	131072	173037	170001	176208	171700	157539	130993	66385	55694	491872. 9
	55°	55996	70933	105026	126378	165260	161557	167793	164758	154019	130540	66265	56116	486950. 6
	60°	55614	69693	102031	120906	156374	151979	158211	156712	149445	129219	65761	56196	479156. 1
	65°	54919	68073	98471	114699	146446	141339	147534	147624	143854	127040	64878	55934	468548. 7
	70°	53915	66086	94375	107803	135552	129717	135844	137563	137286	124018	63622	55331	455209. 1
	75°	52611	63747	89774	100271	123775	117203	123228	126605	129793	120178	62003	54391	439238. 7
	80°	51015	61074	84702	92160	111204	103892	109784	114835	121430	115547	60033	53123	420758. 9
	85°	49141	58087	79197	83532	97934	89884	95613	102341	112262	110163	57727	51536	399910. 2
	90°	47003	54809	73303	74452	84067	75286	80824	89218	102359	104064	55102	49641	376851. 1

由表 1 及图 4 可以看出集热器各月的最佳倾角相差很大，它与纬度和气候特征有关，在冬季供暖期（10.15-4.15）使用的条件下，太阳集热器倾角为 45° 时，倾斜面上所获得的太阳辐射量最大，供暖期所获得的太阳辐射总量为 493885.7  $\text{w/m}^2$ ，即 1778MJ/ $\text{m}^2$ 。

参考文献

[1] 彦启森、赵庆珠 合编，《建筑热过程》，中国建筑工业出版社，1986 年 12 月  
[2] 王建卫、曲中水、凌滨 主编，《MATLAB7.X 程序设计》，中国水利水电出版社，2007 年  
[3] 尚建磊,《太阳能——相变蓄热技术在冬季供暖新风系统中的实验研究》,[硕士学位论文].  
北京：北京工业大学，2008