

高等学校试用教材

建筑热过程

彦启森 赵庆珠 合编

陈在康 主审

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

建筑热过程

彦启森 赵庆珠 合编

陈在康 主审

中国建筑工业出版社

本书全面地讲述了内外扰量对房间的热作用过程（即全面考虑了房间围护结构和物体的蓄热与放热），建筑物能耗计算的数学模型以及空调房间设计冷热负荷的计算。全书以变换求解法为基本数学手段，导出计算公式，并分析了当前使用的各种计算方法之间的内在联系以及简化计算的途径，读者可获得较全面和系统的认识。

为了便于本科学生和在职技术人员学习与使用，附录中简要介绍了矩阵、复数和傅立叶展开以及拉氏变换和线性系统的基本知识。故本书可供大学本科生或研究生选修及参考用，也可供在职技术人员自学用。

高等学校试用教材
建筑热过程
彦启森 赵庆珠 合编
陈在康 主审

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷（北京阜外南礼士路）

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12 字数：292 千字
1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷
印数：1—6,100册 定价：1.65元
统一书号：15040·5105

目 录

第一章 概述	1
§ 1-1 影响房间热湿状况的因素	1
§ 1-2 内外扰作用下房间的热传递过程	1
§ 1-3 名词定义	4
第二章 太阳辐射	6
§ 2-1 地球的运动与太阳	6
§ 2-2 地球表面上的太阳辐射强度	12
§ 2-3 太阳辐射的透过、吸收和反射	20
§ 2-4 室外空气综合温度	26
§ 2-5 透过玻璃窗的太阳辐射热量	30
第三章 板壁的不稳定传热	37
§ 3-1 有限差分法求解板壁不稳定传热	37
§ 3-2 变换法求解板壁的不稳定传热	44
§ 3-3 谐波反应计算法	59
§ 3-4 反应系数计算法	76
§ 3-5 Z传递函数法	95
第四章 房间的内扰与空气渗透	99
§ 4-1 房间内部产热量和产湿量计算	99
§ 4-2 房间围护结构的传湿	104
§ 4-3 空气渗透	107
第五章 房间空气热状况计算	115
§ 5-1 房间热平衡	115
§ 5-2 房间热平衡法的应用	119
第六章 空气调节冷热负荷的设计计算	130
§ 6-1 室外气象条件的确定	130
§ 6-2 房间空调冷负荷简化计算	132
附 录	147
§ 1 矩阵及其运算	147
§ 2 傅氏变换(傅立叶变换)	153
§ 3 拉氏变换	163
§ 4 线性系统	173
§ 5 房屋围护结构内表面间的辐射角系数	181
§ 6 常用围护结构材料的热湿特性	182
参考文献	188

第一章 概 述

房间采暖与空气调节的目的是在室内造成一定的热湿环境和空气条件,如空气的温度、湿度、清洁度、流速与压力,以及围护结构的内表面温度等。而且还经常要求这些条件不会因室外气象条件(如室外空气的温度、湿度和太阳辐射等)和室内各种条件(如灯光、设备和人员的活动情况)的变化而变化,或者应使之维持在一定允许波动的范围内变动。

为了经济合理地达到上述目的,一方面应选择合理的建筑布局和围护结构,另一方面则应正确地确定采暖、空气调节系统的运行方案,并且恰当地配置采暖与空调设备。这样才能既满足建筑物对冷、热量的需求,又能经济、合理地使用能源,节约投资和运行费用。欲做到这两点,必需熟悉建筑围护结构的热工特性,掌握室内外各种因素如何影响房间空气的热湿状况,从而正确地考虑和计算各种影响因素,求得比较合理的房间冷、热负荷。这就是本书预期达到的目的。

§ 1-1 影响房间热湿状况的因素

影响建筑物内热湿状况和空气环境的因素有室外气象条件,室内发热和产湿量,以及采暖和空调系统的运行方式。如果不考虑运行方式(即连续运行还是间歇运行),房间热力系统的扰量可归纳为外扰和内扰两大类。

一、外扰

外扰系指室外空气的温度、湿度,太阳辐射强度,风速和风向,以及邻室的空气温湿度。它们可以通过两种形式影响房间的热湿状态。

1. 通过热交换

周围空气温度以及太阳辐射,都会通过不透明的板壁围护结构和半透明的门、窗玻璃等,向房间进行的传热量交换,以及太阳辐射透过半透明玻璃向房间射入的辐射热等均属此种热交换。

2. 通过空气交换

通过门窗缝隙,室内外空气将有一定数量的交换,即所谓空气渗透,以及通过空调通风系统也会人为地向房间送入或从房间排出一定数量的空气,它们均属于空气交换。伴随室内外的空气交换,外界的热量或湿量将直接影响房间空气的热湿状况。

二、内扰

内扰系指照明装置,设备和人体的散热、散湿。它们也都将以对流和辐射两种形式向房间进行热湿交换。

§ 1-2 内外扰作用下房间的热传递过程

内外扰量如何影响着房间的温度状况,或者说内外扰量如何与房间进行热交换,也就是

说在内外扰量作用下房间热传递过程是如何进行的呢？可以用一种热流的网络图来表示。请看图1-1和图1-2，前者是一个典型房间的平剖面图，后者则表示各种内外扰量，如何通过该典型房间的各个围护结构表面向房间的传递过程，以及各内表面之间又相互辐射的换热过程。

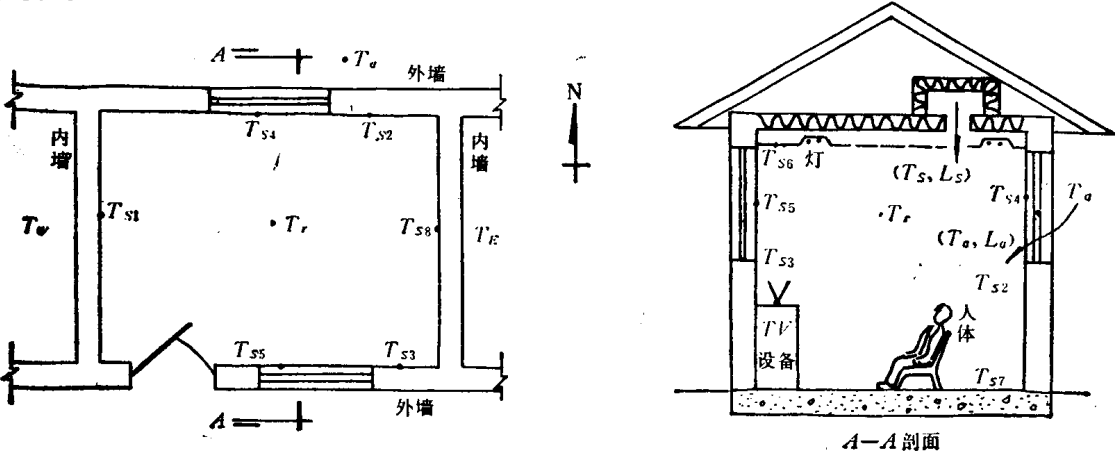


图 1-1 典型房间

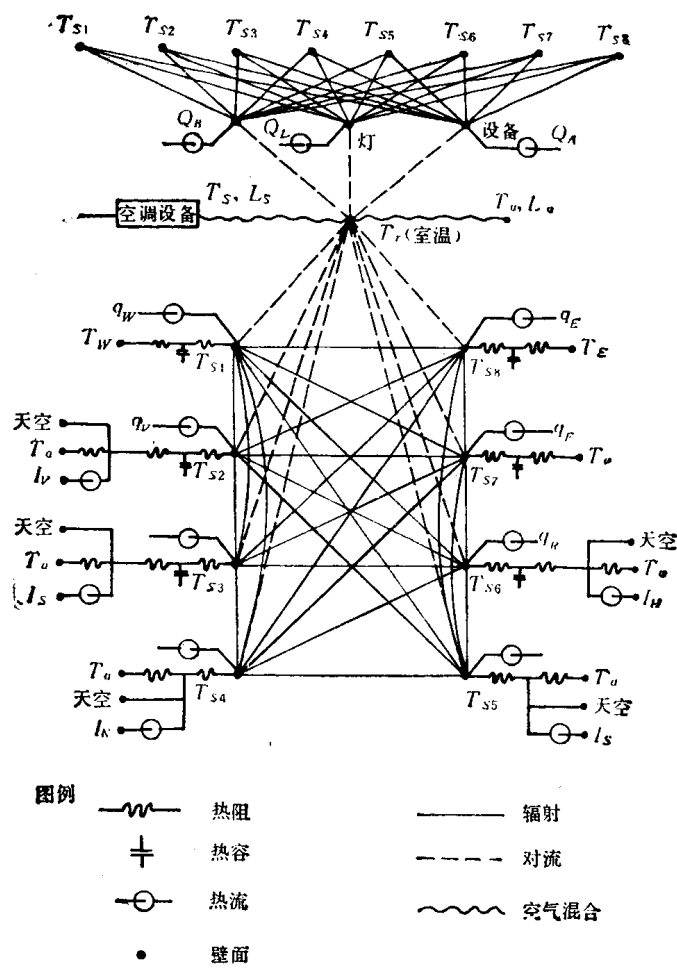


图 1-2 房间热交换过程的网络图

一、外扰通过板壁围护结构的热传递过程

外扰通过板壁围护结构的热传递过程有以下三种情况。

1. 外墙、屋顶等围护结构

这些围护结构对于我们国家目前情况来说，都是些有一定蓄热特性的、不透明的物体。如图中的外墙 2 和 3，屋顶在图中编号为 6。这些围护结构的外表面长期接受室外空气温度 t_a 、太阳辐射 I_s 、天空散射等扰量的作用。但是，室外空气温度要影响到壁面还要通过一个总换热热阻 $\frac{1}{\alpha_a}$ ；而太阳辐射还要通过壁面吸收（吸收率若为 ρ ）才能变成影响

到壁面温度的热流；天空辐射则是代表壁面与周围环境之间进行长波互辐射的总结果。由于墙体都具有各自的热阻和热容，所以，外扰的影响是逐步反应到内表面的。同时，各外壁的内表面还可能会受到透过玻璃窗直接照射到该表面的太阳照射 q 的影响。

2. 地面、内隔墙等围护结构

地面（见图中表面 7）、内墙（图中表面 1、8）等围护结构与外墙一样，也具有热阻和热容，但其外侧壁面温度可以认为是已知值。地面外表温度可近似用室外空气温度 t_a 表示，内隔墙另一侧的表面温度也可认为已知；但是，热量从另一侧到内表面，也是逐渐反应过来的。当然，这些表面同样也可能会受到透射进来的阳光直接照射，即接受直接热量 q 。

3. 外窗或外门

外窗或外门（见图中表面 4、5）与墙面不同，虽具有一定热阻，但由于本身很薄，蓄热量很少，故常近似认为它没有热容。因此，外扰通过门窗的作用基本上会立刻影响到室内。但是，通过外窗的传递热量又可分为两部分，一部分是外窗的外表面接受室外空气温度和天空辐射等作用，以导热形式通过门窗向室内侧传递的热量；另一部分则是太阳辐射透过窗玻璃，直接照射到房间其他围护结构内表面上的阳光，它们同样会给房间带来热量，而且这部分扰量相对而言又往往占有很大的比例。

从上述三种情况可以看出，外扰通过板壁围护结构的热传递过程，不论是以导热形式还是以辐射形式进行，不论是逐渐影响到室内还是立即影响到室内，都是首先作用到各个围护结构的内表面，使其温度发生变化，然后再以对流形式与室内空气发生热交换；同时，还以辐射形式在各个围护结构的内表面和家具之间进行互辐射。如此一直进行下去。

二、内扰的热传递过程

内扰对房间的热作用，包括潜热和显热两方面。人体和设备的散湿就伴随有潜热散热，它们会直接作用到室内空气，立刻影响到室内空气的焓值。关于房间围护结构的散湿和吸湿问题，则是按照稳定状态处理，就是，既不吸收室内空气中的湿量，也不向室内空气放出任何湿量。而照明，人体和设备的显热散热，则同样是以两种形式在室内进行其热量的传递，一种是以对流形式直接传给室内空气；另一种则以辐射形式向周围各个表面进行热量的传递，然后再通过各表面和室内空气之间的对流换热，逐渐传给室内空气。

三、室外空气渗透与空调送风

室外空气的渗入和来自空调系统的送风，都是直接与室内空气相混合，所以它们带有的热量和湿量，会立刻影响到室内空气的状态，从而改变室内空气的温度和湿度。

总之，房间在外扰和内扰作用下，所接受的潜热量，将直接、全部、立即影响到室内

空气状态。而所接受的显热量则不同，其中只有通过与外部空气的混合而带来的显热量是直接、立刻影响室内空气状态；而其它内扰和外扰传递给室内的热量中，则只有以对流形式出现的换热部分是即刻影响室内空气温度的扰量，其余所有以辐射形式的换热，都要待作用于壁体（包括室内家具）表面从而使其温度发生变化以后，才能再逐渐通过对流方式影响到室内空气温度。

§ 1-3 名 词 定 义

图1-3为负荷计算用名词的简化示意图。该图反映了空调系统克服内外扰量，对房间热湿状况的影响过程及其相互关系。

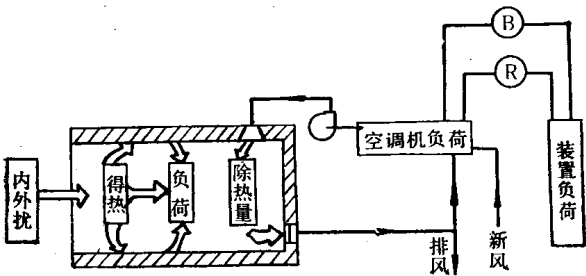


图 1-3 空气调节过程

热湿状况的影响过程及其相互关系。

一、得热 (Heat Gain)

得热的定义为：当室内空气连续保持一定基准（设计条件）的温湿度时，在内外扰作用下，某 n 时刻进入房间的总热量，以符号 $HG(n)$ 表示之。所谓进入房间的总热量系指所获得的全部热量，即在内外扰量作用下，以空气交换、对流换热和辐射换热形式传给房间内的全部热量。得热量为负值时，意味着是房间损失的热量，也就是房间需供热量。

二、冷负荷 (Cooling Load)

为了连续保持室内空气为一定基准（设计条件）温湿度需要的冷量，定义为冷负荷。 n 时刻的冷负荷用符号 $CL(n)$ 表示之。某时刻的房间得热量并不能在该时刻立即、全部传给室内空气，其中只有通过空气交换传递的热量，板壁围护结构内表面与空气之间的对流换热量，和各种内扰的对流部分以及潜热得热量，才能立即传给室内空气，原封不动地形成该时刻的冷负荷，故又称之为瞬态负荷。而围护结构内表面吸收的辐射热量和在各表面之间以辐射形式传递的热量，则要经过一定的时间延迟，才能逐渐传给室内空气，形成房间的冷负荷。在它们未传递给室内空气之前，只是作为房间得热量的一部分，蓄存在房间内各部位物体材料之中。因此，冷负荷不等于得热，有时会大于得热，有时还可能小于得热，如图 1-4 所示。当冷负荷为负值时，则是指房间空气所需补充的热量。

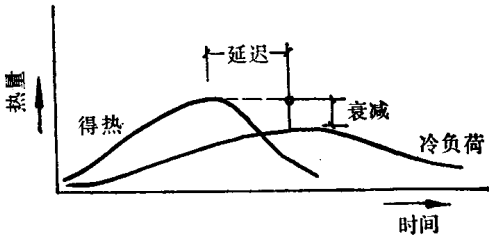


图 1-4 得热与冷负荷

三、除热量 (Heat Extraction)

房间空调系统送风，或房间冷排管实际除去的热量，定义为除热量， n 时刻的房间除热量以符号 $HE(n)$ 表示。除热量为负值时，则称为加热量或供热量。除热量可以等于冷负荷，也可以不等于冷负荷，这与空调系统的运行制度有关，而且与房间的供热、降温等设备形式有关。

当房间空气温湿度经常保持在基准值时，对于全空气系统的空气调节系统，某时刻所

除去的热量应该等于该时刻的冷负荷。但是，如果房间直接采用冷盘管除热，或用散热器采暖时，由于它们与房间的热量交换中既有对流成分也有辐射成分，而其中辐射热部分同样也不能立即影响到房间的温度，所以，这种情况下除热量也不应等于该时刻的冷负荷。

再者，如果房间空气温湿度允许在一定的范围内上下波动，或空气调节系统为间歇运行制度，各时刻的室内空气参数并不能保持恒定。因此，各时刻的除热量均不会等于相应时刻的冷负荷。

四、空调设备负荷

空气调节装置中空气冷却器和空气加热器所需要的冷量和热量，称为空调设备负荷。空调设备负荷中除了空调系统的除热（或冷）量以外，还包括处理室外新鲜空气、送风机的温升、空气的再热以及风道系统的冷热损失等方面所需要向空气多提供的冷量和热量。

五、装置负荷

装置负荷是指服务于采暖和空调系统的制冷机和锅炉应供给的冷量和热量。装置负荷除了应包括空调设备负荷外，还应包括管网冷热损失、管网的漏损等因素所导致增加的冷热量，而且还应考虑制冷机与锅炉设备的性能，以及所服务对象同时需要冷热量的情况。

第二章 太阳辐射

对于建筑物的热环境来说，太阳辐射是一项十分重要的外扰，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。在寒冷季节，太阳辐射为人们提供了免费的热源，而在气温较高的季节，人们又不得不花费一定的代价，以抵消其对房间温度的干扰。因此，掌握太阳辐射的特性，对合理利用或控制太阳辐射的作用颇为重要。

§ 2-1 地球的运动与太阳

一、地球的运动

1. 地球的自转与公转

太阳的直径约为 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ，地球的直径约 $1.27 \times 10^4 \text{ km}$ ，两者之间的平均距离约为 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ，它们之间的几何关系如图2-1所示。从图中可以看出，在太阳与地球的中心连线上，地球表面某点至太阳的张角仅为32分，因此，可近似地将太阳投射到地球上的光线视为一组平行光束。

地球绕太阳逆时针旋转，其运行轨道接近椭圆形，而太阳所居位置有所偏心，因此，太阳与地球之间的距离逐日在变化。

1月1日两者的距离最近，约为 $1.47 \times 10^8 \text{ km}$ ，7月1日两者的距离最远，约为 $1.53 \times 10^8 \text{ km}$ ，如图2-2a所示。除公转以外，地球还在绕其极轴（地轴）自转，地轴与地球绕太阳运行的轨道平面（黄道平面）的法线呈固定倾角，其值为 $23^\circ 27'$ 。因地球自转而形成昼夜，因地球公转而形成四季。

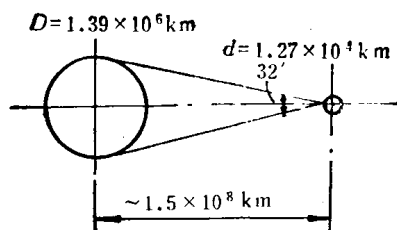


图 2-1 太阳与地球间的几何关系

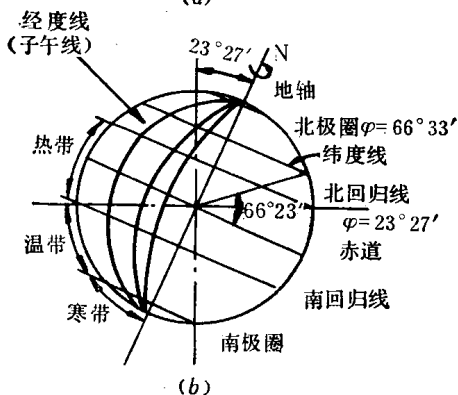
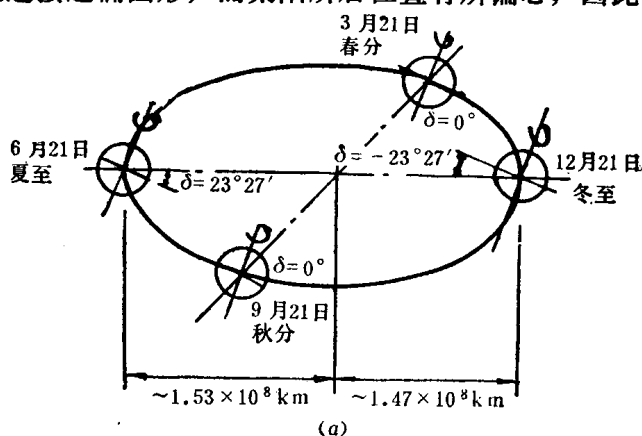


图 2-2 地球的自转与公转

地球中心与太阳中心的连线与地球赤道平面的夹角称为赤纬（或赤纬角），用符号 δ 表示。由于地轴的倾斜角永远保持不变，致使赤纬随时都在变化。可采用下面简化公式算出逐日的赤纬角大小

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2-1)$$

式中 n ——计算日在一年中的日期序号。

赤纬角的精确计算式则为

$$\begin{aligned} \delta = & 0.3622133 - 23.24763 \cos(W + 0.1532310) \\ & - 0.3368908 \cos(2W + 0.2070988) \\ & - 0.1852646 \cos(3W + 0.6201293) \end{aligned} \quad (2-1A)$$

式中 $W = 2n\pi/360$;

n ——日期序号。

赤纬角度的逐日变化是导致地球表面上太阳辐射分布变化，昼夜时间长短变化以及任何给定地区冬夏各季太阳辐射强度有很大变化的主要原因。

2. 四季的形成

太阳的视动（假想地球不动，似乎太阳在绕地球旋转）对于地球赤道是对称的。因而，北半球发生的变化，半年后将在南半球重复出现。下面以北半球为例说明问题。参看图2-2b。

6、7、8月份地球距太阳最远，但赤纬角大，太阳对地面的直射辐射量大，所以形成炎热的夏季。每年6月21日或6月22日赤纬角最大，为 $23^\circ 27'$ ，定名为夏至，该日中午12时太阳正好位于北纬 $23^\circ 27'$ 纬度线的正上空（天顶），是北半球上太阳照射时间最长的一至，即夏至那天白昼最长。过了该日，赤纬角又开始减小，相应的中午12时太阳可以正好处于天顶的纬度线开始往回移，故 $23^\circ 27'$ 的纬度线又称为回归线；北半球者为北回归线，南半球者为南回归线。

12、1、2月份，虽然地球距离太阳最近，但赤纬角为负值，阳光斜射北半球，日照时间短，所以形成昼短夜长的冬季。冬至是12月21日或22日，为全年白昼最短的一天，该日中午12时，太阳正好位于南回归线的正上空。

3月21日或22日为春分，9月21日或22日为秋分，地球正好位于公转轨道上的两个中间点，该日地球自转的地轴与阳光射线相垂直，中午12时太阳位于赤道线的正上空，赤纬角等于零。这两日全球各地的昼夜时间均相等，故称春分和秋分。

3. 时差

钟表指示的时间是均匀的，又称平均太阳时。真太阳时是以当地太阳位于正南向的瞬间为正午，地球自转15度为1小时。但由于太阳与地球之间的距离和相对位置随时间在变化，以及地球赤道与其绕太阳运行轨道所处平面的不一致，致使真太阳时有时快一些，有时慢一些。因此，真太阳时与平均太阳时之间就会有所差异，将它们的差值称为时差。真太阳时 H 可按下式计算：

$$H = H_s \pm \frac{L - L_s}{15} + \frac{e}{60} \quad (2-2)$$

式中 H_s ——该地区标准时间，h；

L 、 L_s ——分别为当地的经度和地区标准时间位置的经度；对于东半球，式中“ $\pm$ ”

号取正号，对于西半球则取负号；
 e ——时差，单位为min，其值可参见下表。非表中指定日期时，可以近似用内插法。

各月21日的赤纬角和时差 表 2-1

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
日期序号 n	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
赤纬(deg)	-19.9	-10.6	0	+11.9	+20.3	+23.45	+20.5	+12.1	0	-10.7	-19.9	-23.45
时差(min)	-11.2	-13.9	-7.5	+1.1	+3.3	-1.4	-6.4	-2.4	+7.5	+15.4	+13.8	+1.6

全年各日的时差可用下式近似计算 (2-2A)

$$e = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B$$

$$B = \frac{360(n - 81)}{364} \quad 1 < n < 365$$

而时差的精确计算式则为

$$e = -0.0002786409 + 0.1227715 \cos(W + 1.498311) - 0.1654575 \cos(2W - 1.261546) - 0.005353830 \cos(3W - 1.157100)$$

$$W = \frac{2n\pi}{360}$$
(2-2B)

式中 n ——日期序号。
 若将真太阳时用角度表示时，又称当地太阳时角，其计算公式为：

$$\omega = \left(H_s \pm \frac{L - L_s}{15} + \frac{e}{60} - 12 \right) \times 15$$
(2-3)

式中 ω ——太阳时角，deg。

二、太阳在空间的位置

对于地球表面上某点来说，太阳的空间位置可用太阳高度角和太阳方位角确定，如图2-3所示。

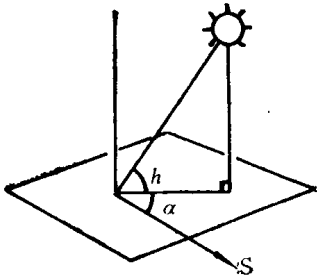


图 2-3 太阳高度角与方位角

1. 太阳高度角

太阳高度角 h 是地球表面上某点和太阳的连线与地平面之间的交角，可用下式计算：

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$$
(2-4)

式中 φ ——当地纬度；
 δ ——赤纬角；
 ω ——太阳时角。

从公式可以看出，太阳高度角随地区，季节和每日时刻的不同而改变。

2. 太阳方位角

太阳方位角 α 是太阳至地面上某给定点连线在地面上的投影与南向（当地子午线）的夹角。太阳偏东时为负，偏西时为正。太阳方位角的计算式为：

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (2-5)$$

当采用此式计算出的 $\sin \alpha$ 大于 1，或 $\sin \alpha$ 的绝对值较小时，应改用下式计算

$$\cos \alpha = \frac{\sin h \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cdot \cos \varphi} \quad (2-6)$$

当采用此式计算时，太阳方位角 α 的正负，要根据时角 ω 来确定。

三、日影与光斑

1. 几个角度的关系

为了清楚地描述日影与光斑，需要将太阳和任意壁面之间的相对关系加以分析，图2-4 绘出表示壁面和太阳之间相对关系的几个角度。对所有方位角 (ε 、 γ 、 α) 均是偏东为负，偏西为正，正南为零。

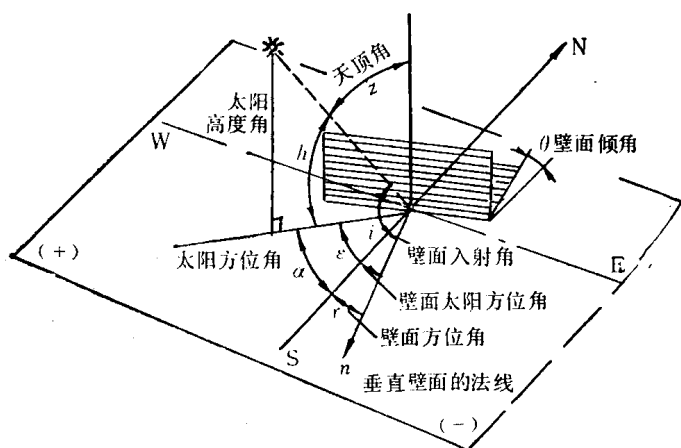


图 2-4 几个角度关系

(1) 壁面倾角 θ ：系指壁面与水平面之间的夹角。垂直壁面 $\theta = 90^\circ$ ，水平板壁 $\theta = 0^\circ$ 。

(2) 壁面方位角 γ ：壁面法线在水平面上的投影与正南向的交角，称为壁面方位角。壁面朝向偏东为负，偏西为正，正南为零。

(3) 壁面太阳方位角 ε ：壁面上某点和太阳之间的连线在水平面上的投影，与壁面法线在水平面上的投影线之间的夹角，称为壁面太阳方位角。壁面太阳方位角 $\varepsilon = \alpha - \gamma$ ，只有朝向正南的壁面，由于 $\gamma = 0$ ，所以，壁面太阳方位角等于太阳方位角，即 $\varepsilon = \alpha$ 。

(4) 太阳入射角 i ：太阳入射角的定义是，太阳射线与壁面法线之间的夹角，也就是壁面上某点至太阳的连线与壁面法线之夹角。太阳入射角可用下式计算。

$$\cos i = \cos \theta \cdot \sin h + \sin \theta \cdot \cos h \cdot \cos \varepsilon \quad (2-7)$$

对于水平面 $\theta = 0^\circ$ ，故 $\cos i = \sin h$

对于垂直壁面 $\theta = 90^\circ$ ，故 $\cos i = \cos h \cdot \cos \varepsilon$

(5) 天顶角 z ：水平面的法线与太阳射线之间的夹角称为天顶角。显然， $z = 90^\circ - h$ 。

2. 垂直面上的日影

物体或遮阳板在阳光照射下形成的阴影称为日影，阴影中接受不到太阳光的直接照

射。

在近似认为照射到地球表面的太阳光线是一束平行光的前提下，确定日影区和光照区极为简单。因为，一般物体或部件大都由各种有规律的平行直线构成，它们在任意平面上的投影所形成的日影和光斑，也必然由各种平行四边形组成。这样，只要找到物体上几个拐角点的投影位置，就能方便地用连直线的方法，得出日影区和光照区的大小和位置。

如图2-5，当太阳光线照射某朝向玻璃窗时，只要找到水平遮阳板的拐角点 A 和侧边垂直遮阳板的拐点 B 在玻璃窗上的投影以后，连接投影点 ab ，并通过 a 点做水平线，再过 b 点做垂直线，即可找到玻璃窗上的日照区。

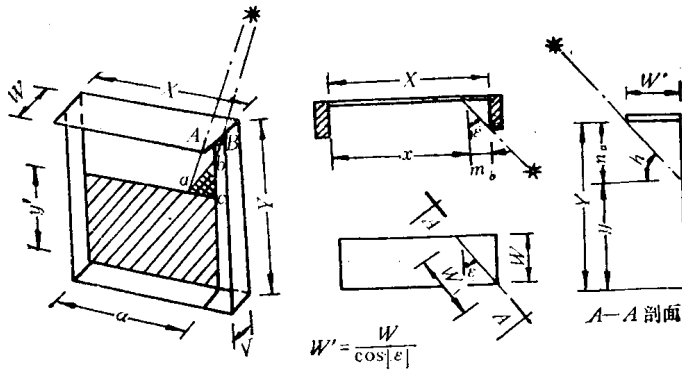


图 2-5 某朝向玻璃窗上的日照区

由上图可以看出， B 点在窗面上的投影点 b 至窗右侧的距离为 m_b ，可用下式计算之

$$m_b = V \cdot \operatorname{tg} |\varepsilon|$$

式中 V ——侧向垂直遮阳板的宽度；

ε ——该窗所在壁面的壁面太阳方位角。

A 点在窗面上的投影点 a 至窗上边缘的距离为 n_a ，可用下式计算

$$n_a = W \cdot \frac{\operatorname{tgh}}{\cos |\varepsilon|}$$

式中 W ——水平遮阳板的宽度；

h ——该时刻的太阳高度角。

在一般情况下，完全可能 $W \neq V$ ，即如上图所示 A 、 B 两点并不重合。因而在所形成的光照区中会出现一个三角区 abc 。如果 W 与 V 相差甚大，此三角区也必需计算在内；当 W 与 V 相差不大时，则可忽略之，此时，玻璃窗上受到太阳直接照射的面积应为 $x \cdot y$ 。

$$x = X - m_b = X - V \cdot \operatorname{tg} |\varepsilon| \quad (2-8)$$

$$y = Y - n_a = Y - W \cdot \frac{\operatorname{tgh}}{\cos |\varepsilon|} \quad (2-9)$$

3. 射入室内的太阳光斑

太阳光透过建筑物的门窗玻璃后，将直接照射到房间围护结构的某些内表面上，这些被照射到的地方称为光斑。

寻找射入室内的光斑，与求玻璃窗表面上的日影区或日照区的方法基本相同。但是，由于房间是由六个或六个以上的表面围成的空间，而不是一个平整的表面，所以，同一时

刻透过一面玻璃的太阳光线，一般会在两个甚至三个壁体的内表面上形成不同形状的光斑。这样，玻璃窗的每个直线边的投影线，都可能同时投影在不同表面上而形成一个折线，尽管如此，它们仍应符合平行线作图法。

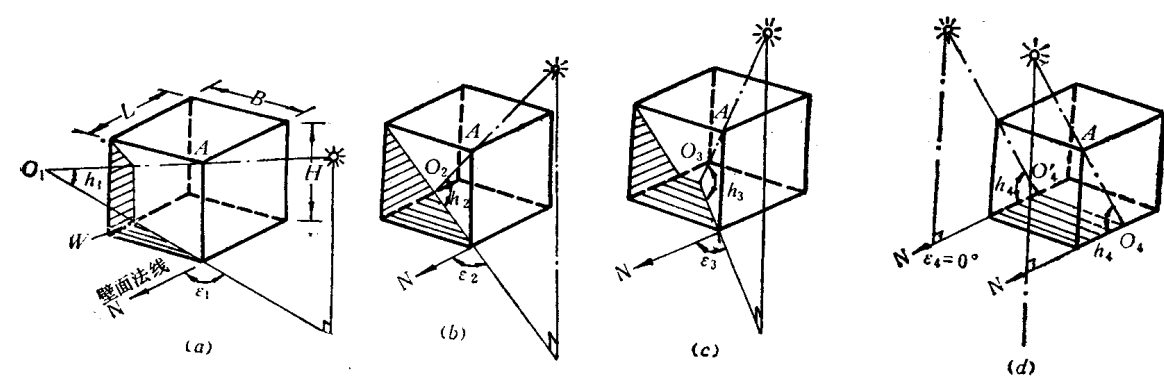


图 2-6 太阳透射在房间形成的光斑

图2-6绘出当房间一整块壁面均为玻璃窗时，不同时刻在室内各内表面上形成光斑的情况。从图中可以看出

(1) A点的投影点在侧墙上

对于装有玻璃窗的壁面来说，当壁面太阳方位角的绝对值较大时，窗侧边顶点A的投影点将落在侧墙上，如图2-6 a。这时，窗侧边线的投影呈折线状，在地面上形成三角形的光斑，在侧墙上的光斑呈梯形。

三角形光斑的底边等于窗的宽度B，三角形的高度等于 $B \operatorname{ctg} |\epsilon_1|$ 。

梯形光斑的高度与地面上三角形光斑的高度相等，梯形的两个底边分别等于窗的高度H和 $H - B \frac{\operatorname{tg} h}{\sin |\epsilon_1|}$ 。

(2) A点的投影点落在侧墙与地面的交界线上。

随着太阳的升起，壁面太阳方位角逐渐减小，A点的投影点可以正好落在侧墙和地面的交线上，如图2-6 b。这时，地面和侧墙上的光斑均为三角形。其高等于 $B \operatorname{ctg} |\epsilon_2|$ 。

(3) A点的投影点在地面上

当壁面太阳方位角再进一步减小，则A点的投影点将落在地面上，如图2-6 c。这时，地面上的光斑呈梯形，而侧墙上的光斑为三角形，窗上边缘的投影线呈折线状。三角形和梯形光斑的高度等于 $H \frac{\cos |\epsilon_3|}{\operatorname{tg} h}$ ，而梯形的两个底边分别等于窗的宽度B和 $B - H \times \frac{\sin |\epsilon_3|}{\operatorname{tg} h}$ 。

(4) 侧墙上的光斑消失

对于南向窗来说，在正午， $\epsilon_4 = 0$ ，地面上的光斑从梯形变成矩形，侧墙上的光斑消失，如图2-6 d。此时，地面矩形光斑的高度等于 $\frac{H}{\operatorname{tg} h}$ ，矩形的宽度等于窗宽B。

以上仅是一个示例，太阳照射在不同房间内表面上的光斑并非恰好如此，不过，通过示例可以看出，只要知道某地区逐时的太阳高度角h和壁面太阳方位角e，就可以简单的几何关系，求得逐时太阳投入室内的光斑。

§ 2-2 地球表面上的太阳辐射强度

一、太阳常数和光谱

1. 太阳常数

太阳是一个炽热的气体球，它以电磁波辐射形式向地球不断发送能量，其波长从 $0.1\mu\text{m}$ 的X射线，到波长达 100m 的无线电波。由于太阳本身的这一特点，以及太阳与地球之间的几何关系，使得在地球大气层外与太阳光线垂直面上的太阳辐射强度几乎是定值，太阳常数就是由此得来。

太阳常数是指太阳与地球之间为年平均距离时，地球大气层上边界处，垂直于阳光射线的表面上，单位面积单位时间内来自太阳的辐射能量，以符号 I_0 表示。根据Thekaekara通过飞机、火箭和人造卫星的观测得出，太阳常数为 $1353\text{W}/\text{m}^2$ ($1164\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$)。但是，由于太阳与地球之间的距离逐日在变化，地球大气层上边界处垂直于阳光射线表面上的太阳辐射强度也会随之变化，1月1日最大，7月1日最小，相差约7%，参见表2-2。计算太阳辐射时，按月份采取不同的数值，其精度完全可以满足要求。

各月大气层外边界处太阳辐射强度

表 2-2

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$	1208	1200	1185	1165	1148	1133	1126	1132	1145	1162	1181	1198
W/m^2	1405	1394	1378	1353	1334	1316	1308	1315	1330	1350	1372	1392

2. 太阳光谱

图2-7中曲线a为地球大气层外的太阳光谱，它接近于 6000K 的黑体辐射光谱。太阳常数与太阳辐射光谱的关系可用下式表示：

$$I_0 = \int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2-10)$$

式中 I_0 ——太阳常数， W/m^2 ；

λ ——辐射波长， μm ；

$E(\lambda)$ ——各种波长的太阳辐射强度， $\text{W}/\text{m}^2\cdot\mu\text{m}$ 。

现将各种波长的太阳辐射强度列于表2-3。从表中可以看出，全部波长辐射能量的总和为 $1353\text{W}/\text{m}^2$ ，其中99%的能量集中在波长为 $0.28\mu\text{m}$ 至 $5.0\mu\text{m}$ 这个波段之间。

以光谱形式发射出的太阳辐射能，通过厚厚的大气层，光谱分布发生了不少变化，见图2-7中的曲线c。太阳光谱中的X射线及其它一些超短波辐射线，通过电离层时，会被氧、氮及其它大气成分强烈地吸收；大部分紫外线（波长为 0.29 到 $0.38\mu\text{m}$ ）被臭氧所吸收；至于波长超过 $2.5\mu\text{m}$ 的射线，在大气层外的辐射强度本来就很低，再加上大气层中的二氧化碳和水蒸汽对它们有强烈吸收作用，所以能达到地面上的能量微乎其微；这样，只有波长为 0.38 至 $0.76\mu\text{m}$ 之间的可见光部分，才可能比较完整地达到地面。因此认为，地面

上所接受的太阳辐射属于中短波辐射。从地面上利用太阳能的观点来说，只考虑波长为0.28至2.5μm的射线就可以了。

太 阳 光 谱 标 准 值 表 2-3

λ	E_{λ}	$E_{0-\lambda}$	$D_{0-\lambda}$	λ	E_{λ}	$E_{0-\lambda}$	$D_{0-\lambda}$
0.12	0.9000	0.0048	0.0003	0.78	1159	735.314	54.346
0.14	0.030	0.0073	0.0005	0.80	1109	757.984	56.023
0.16	0.230	0.0093	0.0006	0.85	900	810.434	59.899
0.18	1.250	0.0230	0.0016	0.90	891	857.329	63.365
0.20	10.70	0.1098	0.0081	0.95	837	900.509	66.556
0.22	57.50	0.6798	0.0502	1.00	748	940.184	69.488
0.24	63.0	1.9356	0.1430	1.10	593	1007.109	74.435
0.26	130	3.6516	0.269	1.20	485	1060.809	78.404
0.28	222	7.6366	0.564	1.30	397	1104.159	81.652
0.30	514	16.3816	1.210	1.40	337	1141.009	84.331
0.32	830	30.0216	2.218	1.50	288	1172.234	86.639
0.34	1074	50.3566	3.721	1.60	245	1198.909	88.611
0.36	1064	71.9366	5.316	1.70	202	1221.234	90.621
0.38	1120	94.7566	7.003	1.80	159	1239.259	91.593
0.40	1429	110.0541	8.725	1.90	126	1253.484	92.644
0.42	1747	151.834	11.222	2.0	103	1264.909	93.489
0.44	1810	185.706	13.725	2.5	55	1302.809	96.2903
0.46	2066	225.321	16.653	3.0	31	1323.609	97.8277
0.48	2074	266.296	19.681	3.5	14.6	1334.329	98.6200
0.50	1942	305.766	22.599	4.0	9.5	1340.254	99.0579
0.52	1833	343.379	25.379	4.5	5.92	1344.0351	99.33740
0.54	1783	379.979	28.084	5.0	3.79	1346.3999	99.51219
0.56	1695	414.669	30.648	10	0.2410	1352.1774	99.93920
0.58	1715	448.874	33.176	15	0.0481	1352.7524	99.98170
0.60	1666	482.796	35.683	20	0.015200	1352.8920	99.99202
0.62	1620	515.469	38.098	30	0.002970	1352.9683	99.99765
0.64	1544	546.879	40.421	40	0.000942	1352.9860	99.99887
0.66	1486	577.159	42.657	50	0.000391	1352.9927	99.99946
0.68	1427	606.284	44.810	100	0.00002570	1352.9990	99.99993
0.70	1369	634.284	46.379	200	0.00000169	1352.9998	99.99999
0.72	1314	661.134	48.864	400	0.00000011	1352.9999	99.99999
0.74	1260	686.909	50.769	1000	0.00000000	1353.0000	100.00000
0.76	1211	711.614	52.595				

注：λ——波长，μm；
E_λ——在以λ为中心的一个窄光带上平均太阳辐射强度，W/m²·μm；
E_{0-λ}——0~λ波段内太阳辐射强度累积值，W/m²；
D_{0-λ}——0~λ波段内太阳辐射强度所占的百分比。

二、地球表面上的太阳辐射

1.大气透明度

阳光经过大气层时，其强度按指数规律衰减，也就是说，每经过dx距离的衰减梯度与本身辐射强度成正比，即：