

华中科技大学

本科生毕业设计[论文]

小型建筑热平衡模型建立及节能温控方案研究

院 系 土木工程与力学学院

专业班级 工程力学 1101

姓 名 舒伟增

学 号 U201115562

指导教师 周新平

2015 年 5 月 20 日

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包括任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保障、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关学位论文管理部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权省级优秀学士论文评选机构将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于 1、保密□，在 年解密后适用本授权书

2、不保密□。

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名：年 月 日

导师签名：年 月 日

摘要

全球大约1/3的能源消耗于建筑。在能源紧张的今天, 如何减少建筑的能源浪费是一个值得研究的课题。

本文在综合国内外建筑能耗模拟方法的基础上, 采用热平衡法, 针对一小型建筑建立了热特性仿真模型, 选用武汉地区的气象数据, 对建筑在夏季的空调热湿负荷进行了计算分析, 并与单房间建筑的计算结果进行了对比。以单房间建筑为例, 计算了墙体外表面太阳辐射、综合温度以及墙体反应系数, 计算结果与相关文献结果吻合。文章最后, 研究了某些参数对建筑能耗的影响, 并以此提出了相关的节能温控方案。

本文分别对围护结构外表面、墙体、围护结构内表面和室内空气建立了相应的热平衡数学模型, 并用 matlab 完成了对相应模型的编程计算。

关键词: 小型建筑; 热平衡; 节能温控; matlab

Abstract

About one-third of global energy consumption in buildings, in today's energy crisis, how to reduce building's energy waste is a subject worthy of study.

This paper use the heat balance method established a small building's thermal environment simulated model based on the domestic and international methods of building's energy simulation. Use the weather data of Wuhan, simulated and analyzed Sensible heat load and latent heat load of the air-conditioning building in summer, and compared with the single-room building's calculated results. Take a single-room building as an example, the solar radiation of the outer surface of wall and sol-air temperature and the reaction coefficient for wall were calculated and the results were in good agreement with the relevant literature. In the end, this paper studied the effect of some parameters on the building energy consumption and then launched a research on energy saving and temperature control.

In this paper, the heat balance method were used established four mathematical model, such as the outside heat balance model of exterior wall, heat transfer model, the inside heat balance model of exterior wall, the air heat balance model in the room. After that, the matlab were used to programming and calculated.

Key Words: small building; heat balance; energy saving and temperature control; matlab

目录

摘要	I
Abstract	II
1 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 国外研究现状	1
1.2.2 国内研究现状	3
1.2.3 国内外研究现状的不足	4
1.3 研究内容	4
2 围护结构外表面热平衡子模型	6
2.1 模型假设	6
2.2 围护结构外表面热平衡方程	6
2.3 太阳辐射	7
2.3.1 太阳辐射参数确定分析	7
2.3.2 表面太阳辐射计算	10
2.4 对流换热密度	11
2.5 长波辐射换热密度	12
2.6 模型的简化	12
2.7 matlab 建模计算与结果分析	13
2.7.1 构建求解太阳辐射函数 so	13
2.7.2 构建求解综合温度函数 satp	14
2.7.3 结果分析	15
2.7.4 计算结果与文献[4]的对比	20
3 围护结构传热子模型	22
3.1 模型假设	22
3.2 反应系数	22

3.2.1 墙体传热的数学模型	22
3.2.2 传递矩阵	23
3.2.3 反应系数的确定	24
3.2.4 围护结构传热量	25
3.3 matlab 建模计算与结果分析	25
3.3.1 构建求解反应系数函数 re	25
3.3.2 结果分析	27
4 围护结构内表面热平衡子模型	32
4.1 模型假设	32
4.2 围护结构内表面热平衡方程	32
4.3 围护结构传热量	33
4.3.1 有热惰性的板壁围护结构	33
4.3.2 门窗围护结构	33
4.4 各围护结构内表面之间的互辐射	33
4.5 对流换热	35
4.6 其它辐射得热	36
4.6.1 人员散热	36
4.6.2 照明设备散热	37
4.6.3 由窗户传入室内的太阳辐射得热	38
4.6.4 围护结构内表面接收的辐射得热	38
4.7 围护结构内表面热平衡方程的整理	39
5 室内空气热平衡子模型	41
5.1 模型假设	41
5.2 室内空气热平衡方程	41
5.3 空气渗透通风量	42
5.4 室内空气的湿平衡	43
6 小型建筑能耗计算与分析	44
6.1 小型建筑模型	44
6.2 空调房间热湿负荷	45
6.2.1 空调房间的显热负荷	45

6.2.2 空调房间的湿负荷	48
6.2.3 空调房间的总热负荷	48
6.3 空调房间负荷的计算与分析	48
6.3.1 程序结构框图	48
6.3.2 程序输入参数确定	50
6.3.3 单房间建筑计算结果与分析	51
6.3.4 小型建筑计算结果与分析	56
7 节能温控方案	64
7.1 室内温度对建筑能耗的影响	64
7.2 室内湿度对建筑能耗的影响	65
7.3 通风对建筑能耗的影响	66
7.4 内抹灰对建筑能耗的影响	68
7.4.1 内抹灰导热系数对建筑能耗的影响	68
7.4.2 内抹灰比热对建筑能耗的影响	69
7.4.3 内抹灰密度对建筑能耗的影响	71
7.4.4 内抹灰厚度对建筑能耗的影响	73
7.5 房间位置对建筑能耗的影响	73
7.6 节能温控方案	74
8 结论	75
致谢	77
参考文献	78
附录	80

1 绪论

1.1 研究背景和意义

随着人类社会的发展,人类对能源的需求也越来越大,如果没有能源的保障,很难想象社会会产生什么严重的后果。如今,能源的紧缺越来越严重,但人们对能源的使用上却还存在大量的浪费情况,因此,节约能源、提高能源使用效率以及开发新能源将是人类需要做出的努力。

在能源消耗方面,建筑能耗占有相当大的比例,因此,研究建筑物的热状况并评估其能源消耗将具有很强的现实意义,通过对建筑物的热特性及能耗研究,可以找到很好的节能温控方案。

建筑物的能耗很大一部分来源于空调,对建筑物的热状况进行研究,可以较为准确地得到空调冷负荷或热负荷,这有助于人们对空调的选取和使用等方面提供帮助。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

求解建筑物能耗相当于求解建筑物空调冷热负荷,国外的建筑物空调冷热负荷的计算方法发展大概经历了三个历史时期^[1-2]:

(1) 定常计算法时期

在第二次世界大战以前,空调技术还处于初级发展阶段,这时人们对冷热负荷认知浅显,建筑材料还有些笨重,一般楼层不高,计算工具不怎么丰富。由于以上原因,世界各国的计算方法大多选用定常计算方法,只需要知道建筑各围护结构的表面积、传热系数以及室内外设计温度就可求得得热量。此外,在定常计算法时期人们把建筑物的得热量当作空调系统的冷负荷,没有考虑建筑物衰减、延迟等的影响。

(2) 周期作用下的不定常算法时期

两个美国人 Mackey 和 Wright 于 1946 年发表了一篇名为《周期热流——组合的墙或屋顶》的文章, 该文提出了一种拟定常传热算法, 当量温差 (ETD) 法就起源于此。该方法将周期变化的外扰 (室外气温和太阳辐射等) 作用下的围护结构的传热简化成稳定传热的计算形式。该研究成果被美国的 ASHRAE 所承认, 之后 20 年美国冷热负荷计算方法都是以此为基础, 并在 ASHRAE 手册中得到采用, 并且影响了世界上很多的国家。目前为止, 我国还是有一些以此为基础的计算方法。

20 世纪四五十年代, 前苏联的弗拉索夫等热工学者在长期研究的基础上提出了一种谐波法。该方法就是将以余弦函数形式表示的周期作用的外扰 (室外气温和太阳辐射等), 由一维傅立叶方程出发, 建立定解问题, 用调和和分析的方法, 由傅立叶级数表示, 以求出各个不同时刻墙体的得热量。谐波法的简化计算方法就是当量温差法。日本的前田敏男在 1944 年用二阶偏微方程研究求解墙体导热问题时也提出了类似的计算概念。

以上这些计算方法都只是考虑了围护结构本身的不稳定传热以及墙体热传递过程中的衰减和时间上的延迟, 却并没有考虑整体房间的不稳定热作用过程, 具体来说就是没有区别房间得热量、冷负荷和除热量这 3 个不同的概念, 把房间的瞬时得热视为瞬时负荷, 会导致空调系统设备设计容量偏大。

(3) 动态负荷计算时期

随着科学技术的发展, 具体就是电子计算机的普及、建筑材料的进步以及建筑能耗的增加, 各种新的空调负荷计算方法产生了。

首先, 美国的 Carrier 公司在多年研究的基础上, 于 20 世纪 60 年代初提出了蓄热负荷系数 (SLF) 法。此法考虑了由窗进入室内的太阳辐射被围护结构内表面及家具等吸收后再重新放出的影响, 以蓄热负荷系数的方式给了出来。设计使用上比较方便。此法的影响很大, 被欧洲以及日本等国给予重视, 于 1972 年传入到了我国。该时期, 日本和前苏联的相关学者也提出了类似的方法。

之后, 加拿大的 Stephenson 和 Mitalas 在 1967 年时, 运用从工程控制论转移而来的扰量和响应的离散化处理的思想提出了反应系数法。该法的发表表面动态负荷计算时代的正式来临。该方法发表之后, 在世界上引起了很大的反响, 并得到了美国采暖制冷空调工程师学会 (ASHRAE) 的肯定。

Stephenson 和 Mitalas 继反应系数法后又在 1971 年提出了 Z 传递系数法 (TFM)。

此方法一提出就被美国学会所接受,并列入了 1972 年的 ASHRAE 基础手册中。此后,Rudoy 和 Duran 于 1975 年提出了一种用冷负荷系数法的新的简化计算方法,该法在 1981 年列入了 ASHRAE 手册。在这段时间内,美国的一些大学和研究单位对反应系数、传递函数以及负荷计算中有关的其他一些基本数据参数,如对流放热系数、窗玻璃的太阳光学性能、窗户的各种内外遮阳系数、各种围护结构的导热系数等,逐个展开了深入的研究,这为动态负荷计算方法的发展和普及做出了重要贡献。该时期,日本、英国、德国等世界其他国家也开展了类似的研究工作。

1997 年,Spitler 等提出了辐射时间序列法——Radiant Time Series method。简称 RTS^[3],该方法将墙体、屋顶、窗等的得热量和冷负荷区别开来,引入辐射系数,并给出了该方面定量的计算方法。该方法是对之前所述的当量温差法、传递函数法、冷负荷系数法的有效发展,适用于计算机计算。Spitler、Fisher、Ipseng 等对于该方法的周期性响应系数以及计算方法等都有较为深刻的研究。

国外在能耗计算发展过程中,开发出了大量的应用软件,例如:TRACE、ECUBE、MEDSI、BLAST、DOE 等。目前为止,BLAST 和 DOE 是最被广泛使用的大型能耗分析程序,而 EnergyPlus 值是公认的最为优秀的分析软件。

1.2.2 国内研究现状

国内空调负荷计算方法同样经历了三个时期^[1],在定常计算法时期,主要依靠学习前苏联的经验,计算方法简单,但与实际情况出入比较大。

在五六十年代,前苏联的什克洛维尔、福金等人的著作传入了我国,由此带来了谐波计算法。之后,中国工业出版社出版的《采暖通风设计技术措施》与四机部第十设计院编写的《空气调节与制冷设计手册》中都提出了与谐波法类似的计算方法,这比第一时期 50 年代所用的前进了一大步。但依然存在着一些严重的问题,如没有区分开得热和负荷这两个不同的概念,计算由窗户进入的太阳辐射热时没有仔细考虑蓄热之后逐时加权放出的问题。

70 年代后,我国把国外提出的反应系数法、传递函数法和蓄热系数法等运用到了国内工程中,发现得到的结果与之前所用算法误差较大,由此发现了不少问题,之后我国便开始了探讨空调工程负荷的动态计算方法。在此过程中,提出了适用于我国的冷负荷系数法和谐波反应法。90 年代,清华大学建筑技术科学系环境与设备研究所开始了相关软件的开发,最终在 2000 年完成了 DeST1.0 版本并通过鉴定。

1.2.3 国内外研究现状的不足

目前国内外关于建筑物空调冷负荷的计算方法通常是用于模拟建筑热过程的热平衡法中,热平衡法是目前建筑热过程模拟计算的最可靠方法。热平衡法虽然计算准确,但其需要考虑的因素(参数)非常多,计算过程复杂繁琐,以热平衡法为基础的建筑能耗模拟软件操作上也比较复杂,常人运用起来比较很困难。另外,国内外目前关于建筑热平衡法体系的研究以及建筑节能的研究有很多,但关于在热平衡法体系下所展开的建筑节能的研究还比较少。

1.3 研究内容

- 1、利用热平衡法建立 2 层楼上下各两房的小型建筑的能耗仿真模型,该模型由四个子模型组成,分别为围护结构外表面热平衡子模型、围护结构传热子模型、围护结构内表面热平衡子模型和室内空气热平衡子模型;
- 2、根据各子模型的特点确定计算所需参数,重点包括:太阳辐射、综合温度、墙体反应系数、辐射角系数、换热系数、空气渗透与通风、人体散热、灯光散热等;
- 3、运用 matlab 软件编程计算,得到各个方向的围护结构外表面的太阳辐射以及综合温度,之后对计算结果进行分析并与相关文献结果作对比;
- 4、运用 matlab 软件编程计算,得到某一墙体的反应系数,之后对相关结果进行分析并与相关文献作对比;
- 5、运用 matlab 软件编写建筑的整体热平衡计算程序,分别计算单房间建筑和小型建筑的夏季空调热湿负荷,并展开对比分析;
- 6、研究不同参数对建筑能耗的影响,并根据结果找出夏季武汉地区最佳的建筑节能温控方案。

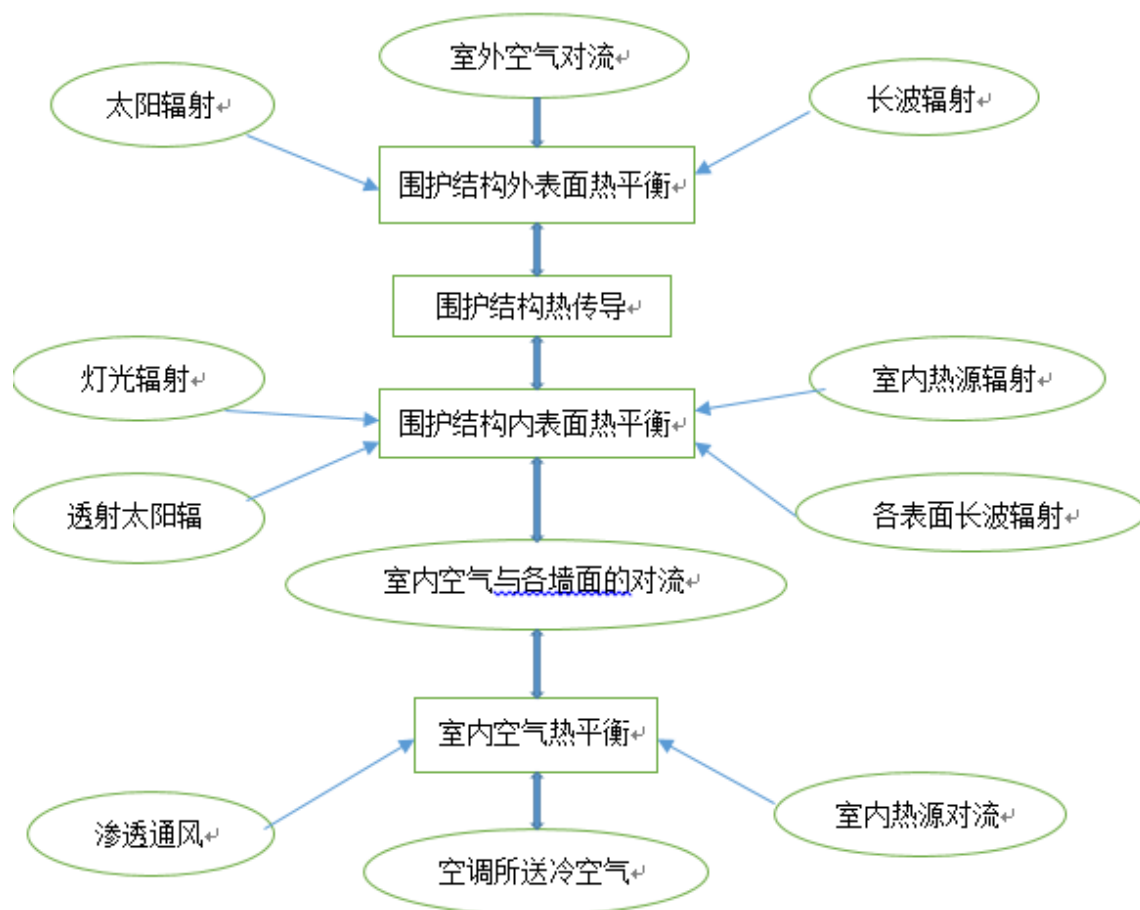


图 1-1 研究体系示意图

2 围护结构外表面热平衡子模型

2.1 模型假设

为方便建模与计算，对围护结构外表面作出如下假设：

- 1、围护结构外表面所获得的辐射由短波辐射和长波辐射组成；
- 2、同一围护结构外表面具有相同物性，如温度、辐射、对流换热系数等；
- 3、同一围护结构外表面的热物理过程在局部与整体是一致统一的。

2.2 围护结构外表面热平衡方程

建立围护结构外表面热平衡模型时将外墙作为研究对象，其表面的热物理过程如图 2-1 所示。

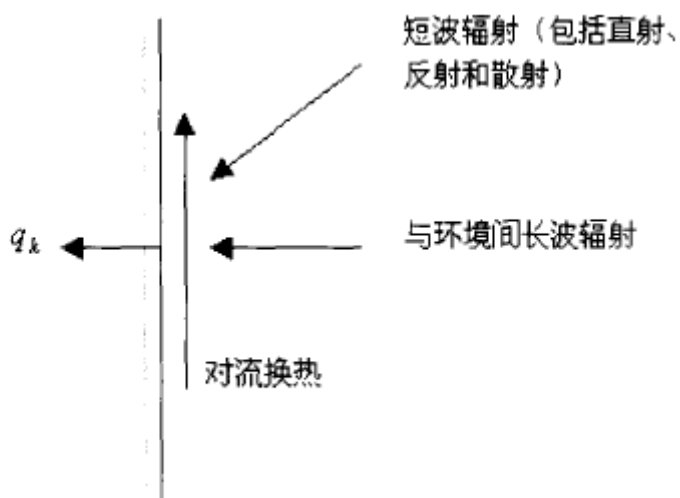


图 2-1 围护结构外表面热平衡^[14]

对图 2-1 所示热物理过程建立的相应热平衡方程为^[4]：

$$q''_{ko} = q''_{asol} + q''_{conv} + q''_{LWR} \quad (2-1)$$

式中， q''_{ko} ——围护结构外表面导热热流密度， W/m^2 ；

q''_{asol} ——围护结构外表面吸收的直射和散射太阳辐射密度， W/m^2 ；

q''_{conv} ——围护结构外表面与室外空气的对流换热密度, W/m^2 ;

q''_{LWR} ——围护结构外表面与室外环境的长波辐射换热密度, W/m^2 。

2.3 太阳辐射

围护结构外表面吸收的直射和散射太阳辐射密度可由下式进行计算^[4]:

$$q''_{sol} = aI_t \quad (2-2)$$

式中, a ——围护结构外表面对太阳短波辐射的吸收率;

I_t ——围护结构外表面总的太阳短波辐射, W/m^2 。

2.3.1 太阳辐射参数确定分析

由式(2-2)可知, 求解太阳辐射是关键, 而求取太阳辐射需要已知以下参数和信息^[5]:

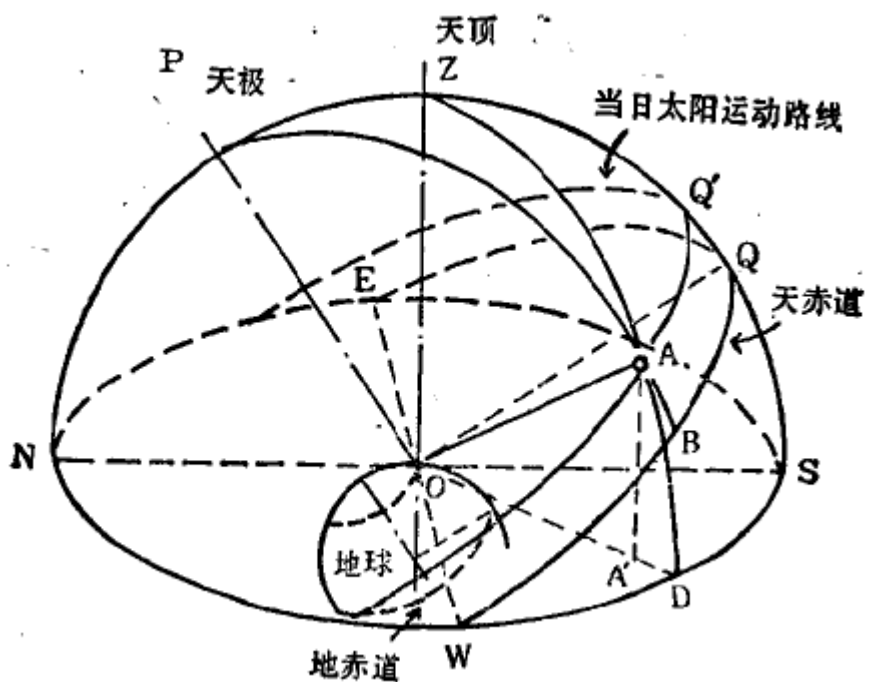


图 2-2 天球和太阳视运动

(1) 太阳高度角 h

它是太阳光线与 O 点地平面的夹角。图 2-2 中的 ZAD 大圆面经过太阳 A 与地平面垂直, 所以 $\angle AOA'$ 即为此时此地的太阳高度角 h , 或

$$\widehat{AD} = h$$

(2) 太阳方位角 α

它是太阳光线在地平面上的投影与正南向(OS)的夹角,上午太阳偏东, α 为负;下午太阳偏西, α 为正。图 2-2 太阳光线的投影为 OA', 所以 $\angle A'OS$ 为此地此地的太阳方位角 α , 或

$$\widehat{DS} = \alpha$$

(3) 太阳倾角(赤纬) δ

它是太阳光线与地球赤道平面的夹角。在图 2-2 中 $\angle AOB$ 即为 δ , 或

$$\widehat{AB} = \delta$$

赤纬 δ 的值可由下式计算^[6]:

$$\delta = 23.45^\circ \cos\left(2\pi \frac{n+10}{365}\right), \quad n \in [1, 365] \quad (2-3)$$

(4) 地球上某地的纬度 φ

它是该地和地心的连线与赤道平面的夹角,如图 2-2 中的 $\angle ZOQ$, 或

$$\widehat{ZQ} = \varphi$$

(5) 太阳时角 ω

它表示当天某各时刻太阳在其运动轨道上离开中天的位置,也就是 PAB 面与子午面的夹角;当地正午时它为零,上午太阳偏东时它为负,下午太阳偏西时它为正。每小时 ω 在赤道面上变化 15° 。在图 2-2 上,大圆面 PAB 与天子午线面的交角以赤道的弧 QB 表示,即

$$\widehat{QB} = \omega$$

太阳时角的计算公式为:

$$\omega = (t_s \pm \frac{l-l_s}{15} + \frac{e}{60} - 12) \times 15 \quad (\text{度}) \quad (2-4)$$

式中, t_s ——当地钟表示值;

l ——当地经度;

l_s ——当地标准时所对应的经度;

e ——时差,单位为分钟。

对于式(2-4)中的 \pm 号,东半球地区取为正号,西半球地区取为负号。

时差 e 的计算公式为^[7]:

$$e = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (2-5)$$

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

根据图 2-2 中的几何关系, 可得太阳高度角的计算公式为:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2-6)$$

同样根据图 2-2 中的几何关系, 可得太阳方位角的计算公式为:

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (2-7)$$

当采用上式计算出的 $\sin \alpha$ 大于 1, 或 $\sin \alpha$ 的绝对值较小时, 应改用下式计算^[7]

$$\cos \alpha = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \varphi \cos h} \quad (2-8)$$

当采用式 (2-8) 计算时, 需要根据时角 ω 来确定太阳方位角 α 的正负。

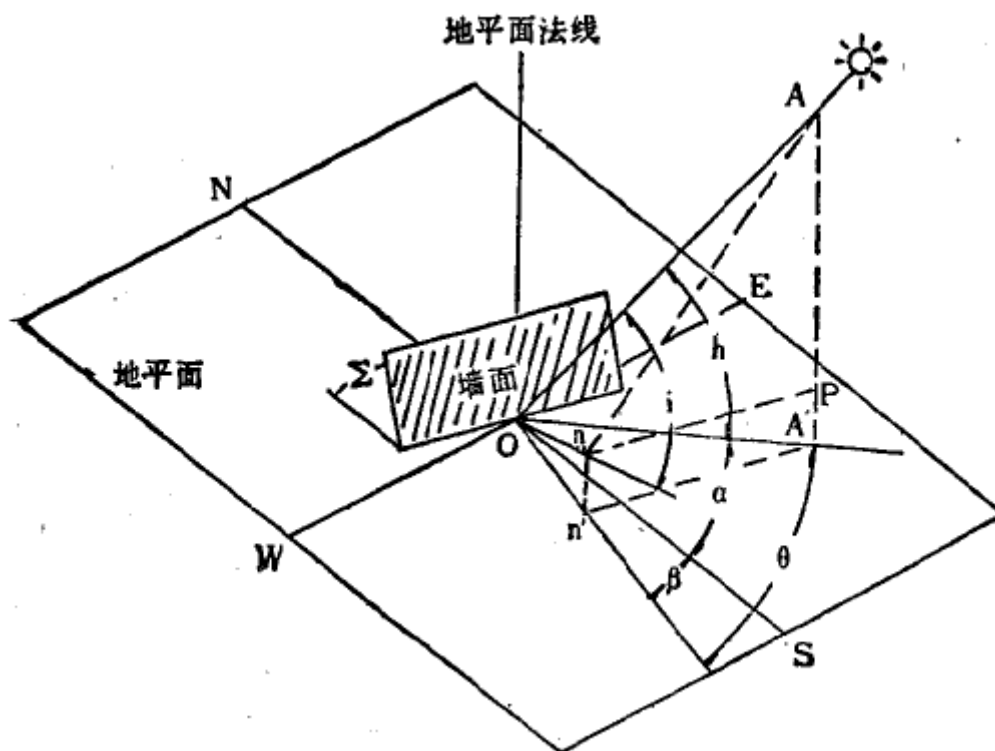


图 2-3 日墙关系

(6) 太阳光线入射角 i

它是太阳光线与墙面法线 n 的夹角, 即图 2-3 中的 $\angle AOn$ 。

(7) 墙面方位角 β

它是墙面法线 On 在地面上的投影 On' 与正南向 OS 的夹角 $\angle SOn'$, 定义它偏东时为负, 偏西时为正。

(8) 日墙方位角 θ

它是太阳光线与墙面法线 On 两者在水平面上投影间的夹角, 即图 2-3 中的 $\angle A'On'$, 且有

$$\theta = |\alpha - \beta| \quad (2-9)$$

(9) 墙面倾角 Σ

它是墙表面与水平面之间的夹角。

根据图 2-3 的几何关系, 可得太阳光线入射角 i 的计算式为:

$$\cos i = \sinh \cos \Sigma + \cosh \sin \Sigma \cos \theta \quad (2-10)$$

当墙面垂直时, 即 $\Sigma = \frac{\pi}{2}$, 式 (2-10) 便为

$$\cos i = \cosh \cos \theta \quad (2-11)$$

对水平面, 即 $\Sigma=0$, 有

$$\cos \Sigma = \sinh \quad (2-12)$$

2.3.2 表面太阳辐射计算

世界上对于太阳短波辐射的计算有多种方法, 本次研究选用较为简单的 ASHRAE 太阳模型, 该模型的表面太阳短波辐射可表示为^[4]:

$$I_t = I_D + I_{ds} + I_{dg} \quad (2-13)$$

式中, I_D ——表面太阳直射辐射强度, W/m^2 ;

I_{ds} ——表面天空散射辐射强度, W/m^2 ;

I_{dg} ——表面地面反射辐射强度, W/m^2 ;

(1) 表面太阳直射辐射强度

对于表面接收到的太阳直射辐射强度, 可由下式求出^[4,5]:

$$I_D = I_{DN} \cos i \quad (2-14)$$

上式中 I_{DN} 为太阳法向直射辐射强度, 这里利用 ASHRAE 推荐的一个公式计算其值:

$$I_{DN} = A(CN) \exp(-B/\sinh) \quad (2-15)$$

式中, CN ——大气透明度系数, 武汉地区 7 月取 0.678;

A 、 B ——拟合系数, 每月都不同, 7 月: $A=1.085$ (KW/m^2), $B=0.207$ 。

(2) 表面天空散射辐射强度

对于表面接收到的天空散射辐射强度, 可由下式求出^[4,5]:

$$I_{ds} = cF_s I_{DN} \quad (2-16)$$

式中, c ——为一系数, 7月: $c=0.136$;

F_s ——表面与天空之间的角系数。

F_s 可用下式计算:

$$F_s = 0.5(1 + \cos\Sigma) \quad (2-17)$$

(3) 表面地面反射辐射强度

对于表面接收到的地面反射辐射强度, 可由下式求出^[5]:

$$I_{dg} = \rho_g I_{DN}(c + \sinh)F_g \quad (2-18)$$

式中, ρ_g ——地面反射率;

F_g ——表面与地面之间的角系数, $F_s + F_g = 1$ 。

2.4 对流换热密度

式(2-1)中的对流换热密度可由下式计算^[4]:

$$q''_{conv} = h_c(T_o - T_{so}) \quad (2-19)$$

式中, h_c ——表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

T_o ——室外空气温度, $^\circ C$;

T_{so} ——围护结构表面温度, $^\circ C$ 。

夏季室外空气温度可由下式进行计算^[8]:

$$T_o = t_{wp} + b\Delta t_r \quad (2-20)$$

$$\Delta t_r = (t_{wg} - t_{wp})/0.52 \quad (2-21)$$

式中, t_{wp} ——夏季室外计算日平均温度 ($^\circ C$);

b ——室外温度的逐时变化系数;

Δt_r ——夏季室外计算平均日较差 ($^\circ C$);

t_{wg} ——夏季室外干球温度 ($^\circ C$)。

表 2-1 室外温度逐时变化系数^[8]

时刻/h	1	2	3	4	5	6
b	-0.35	-0.38	-0.42	-0.45	-0.47	-0.41

时刻/h	7	8	9	10	11	12
b	-0.28	-0.12	0.03	0.16	0.29	0.40
时刻/h	13	14	15	16	17	18
b	0.48	0.52	0.51	0.43	0.39	0.28
时刻/h	19	20	21	22	23	24
b	0.14	0.00	-0.10	-0.17	-0.23	-0.26

2.5 长波辐射换热密度

式(2-1)中的表面长波辐射换热密度可由下式进行计算^[4]:

$$q_{LWR}'' = \varepsilon \sigma [F_a (T_o^4 - T_{so}^4) + F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{so}^4) + F_g (T_g^4 - T_{so}^4)] \quad (2-22)$$

式中, ε ——表面长波发射率;

σ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$;

F_a ——围护结构表面与空气温度间的角系数;

F_{sky} ——围护结构表面与天空温度间的角系数;

T_{sky} ——天空温度, $^{\circ}C$;

F_g ——墙表面与地面的角系数;

T_g ——地面温度, $^{\circ}C$ 。

2.6 模型的简化

将式(2-2)、(2-19)和(2-22)代入到式(2-1)可得:

$$q_{ko}'' = aI_t + h_c (T_o - T_{so}) + \varepsilon \sigma [F_a (T_o^4 - T_{so}^4) + F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{so}^4) + F_g (T_g^4 - T_{so}^4)] \quad (2-23)$$

该式经过一系列变换可得^[4]:

$$q_{ko}'' = aI_t + (h_c + h_r) (T_o - T_{so}) + \varepsilon \sigma [F_{sky} (T_{sky}^4 - T_o^4) + F_g (T_g^4 - T_o^4)] \quad (2-24)$$

式中, h_r ——空气温度的辐射换热系数, $= \varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{so}^4)/(T_o - T_{so})$ 。

为进一步简化上面的式子, 这里引入一个综合温度, 其定义是指在综合考虑围护结构外表面的太阳辐射、与天空和其它室外环境的长波辐射以及与室外空气的对流换热等因素后的室外空气温度, 在这样的定义下, 围护结构外表面的热平

衡方程可写成^[4]:

$$q_{ko}'' = h_o(T_e - T_{so}) \quad (2-25)$$

式中 T_e 就是综合温度。结合式(2-24)与式(2-25), 可得:

$$T_e = T_o + \frac{al_t}{h_o} + \frac{\varepsilon\sigma}{h_o} [F_{sky}(T_{sky}^4 - T_o^4) + F_g(T_g^4 - T_o^4)] \quad (2-26)$$

式中, h_o ——综合换热系数, $= h_c + h_r$, 即等于对流换热系数与辐射换热系数两者之和(为了计算方便, 以后计算时将围护结构外表面综合换热系数取为定值)。

令 $\Delta R = -\sigma[F_{sky}(T_{sky}^4 - T_o^4) + F_g(T_g^4 - T_o^4)]$, 则式(2-26)变为:

$$T_e = T_o + al_t/h_o - \varepsilon\Delta R/h_o \quad (2-27)$$

由于计算 ΔR 十分困难, 所以一般采用如下近似处理^[9]:

1. 对垂直表面, 采用 $\Delta R = 0$;
2. 对水平表面, 采用 $\varepsilon\Delta R/h_o = 3.5 \sim 4^\circ\text{C}$ 。

2.7 matlab 建模计算与结果分析

围护结构外表面模型的计算式与参数在上文中都已详细介绍给出, 运用这些计算式和参数在 matlab 软件下很容易编程计算, 下面将给出具体程序设计框图, 一些计算结果也将被展示并分析。

本文研究对象所用气候参数为 7 月 21 日的武汉地区。

2.7.1 构建求解太阳辐射函数 so

已知参数: 系数 A 、 B 、 c , 大气透明度系数 CN , 地面反射率 ρ_g , 时差 e , 太阳赤纬 δ , 当地经度 l 与当地标准时对应经度 l_s , 当地纬度 φ 。

函数自变量: 当地钟表示值 t_s , 墙面方位角 β , 墙面倾角 Σ 。

求解因变量: 总辐射强度 I_t 。

以下为具体程序框图:

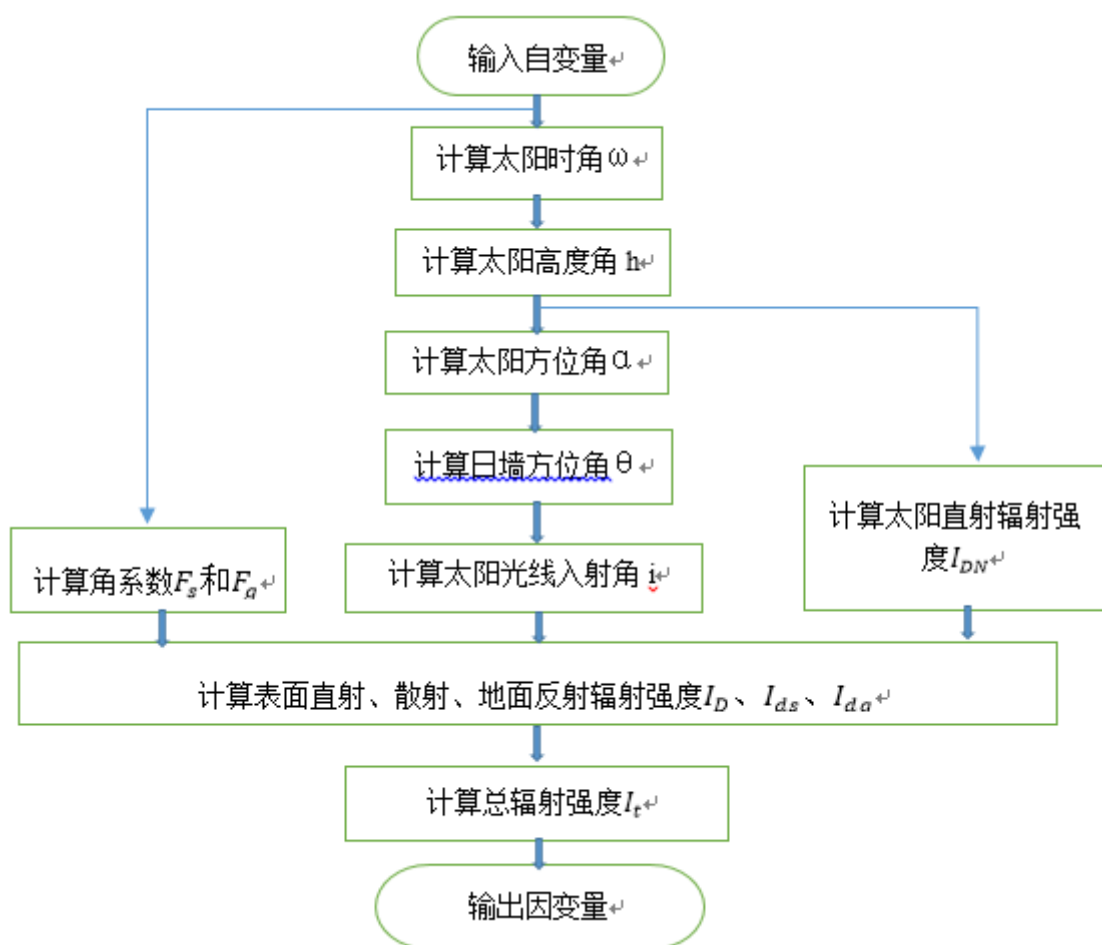


图 2-4 求解太阳辐射函数的运行步骤程序框图

2.7.2 构建求解综合温度函数 satp

已知参数：夏季室外计算日平均温度 t_{wp} ，室外温度的逐时变化系数 b ，夏季室外计算平均日较差 Δt_r ，夏季室外干球温度 t_{wg} ，表面总换热系数 h_o 。

函数自变量：当地钟表示值 t_s ，墙面倾角 Σ ，表面太阳辐射吸收率 a ，表面总辐射强度 I_t （由函数 so 求得）。

求解因变量：综合温度 T_e 。

以下为具体程序框图：

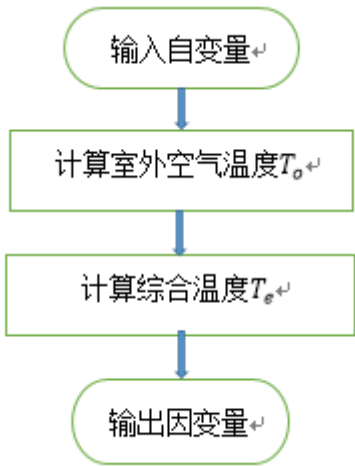


图 2-5 求解综合温度函数的运行步骤程序框图

2.7.3 结果分析

函数 so 与函数 satp 所采用的基本参数取值如表 2-2 所示，两函数计算所得结果在图 2-6——图 2-12 中描述出来了。

表 2-2 基本参数取值

地区	武汉	大气透明度系数 CN	0.678	当地经度 l	东经 114°20'
日期	7 月 21 日	地面反射率 ρ_g	0.32	当地纬度 φ	北纬 30°37'
系数 A	1085W/m ²	时差 e	-6 分钟	夏季室外计算日 平均温度 t_{wp}	32℃
系数 B	0.207	太阳赤纬 δ	20.6°	夏季室外干球温 度 t_{wg}	35.2℃
系数 c	0.136	当地标准时对应 经度 l_s	东经 120°	表面总换热系数 h_o	22 W/ (m ² · °C)
表面太阳辐射吸收率 a			0.73		

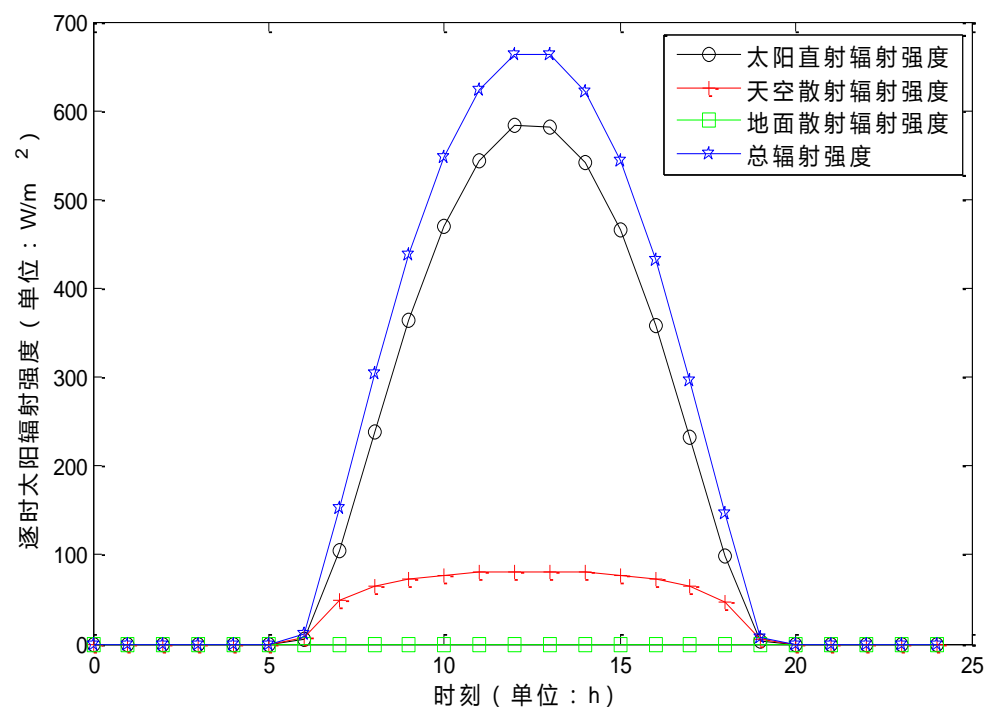


图 2-6 屋顶全天各时刻的太阳辐射

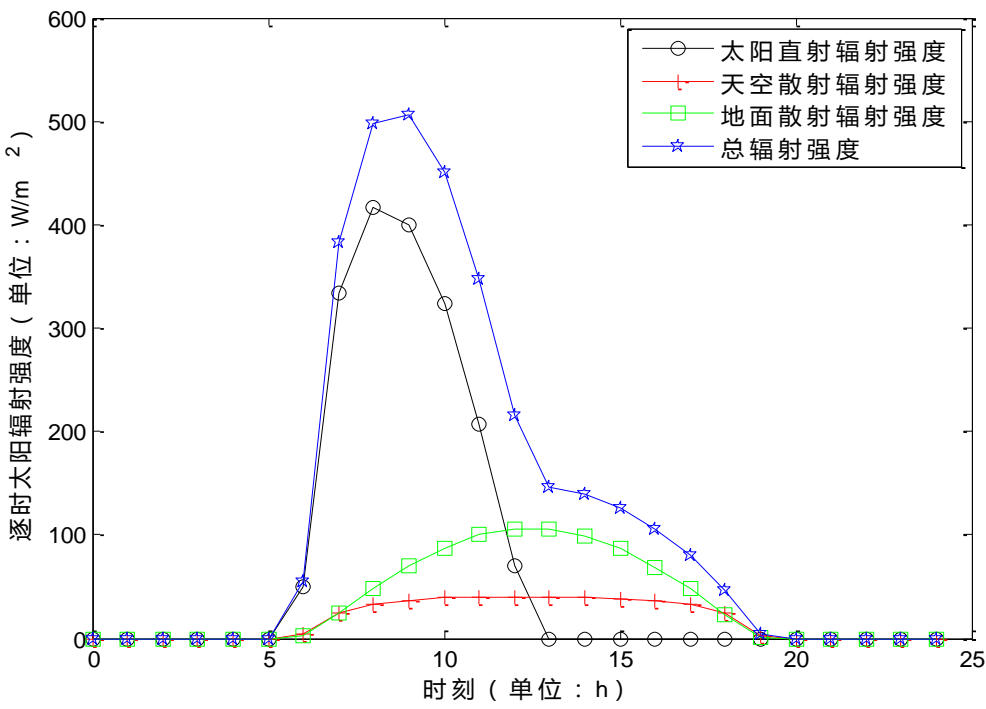


图 2-7 东墙全天各时刻的太阳辐射

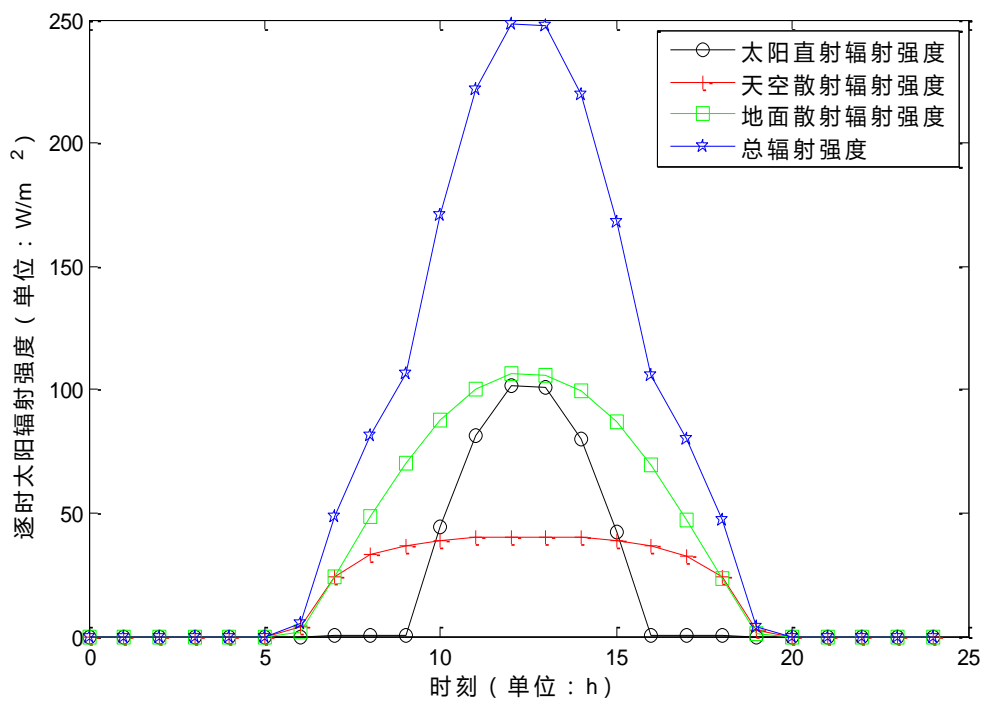


图 2-8 南墙全天各时刻的太阳辐射

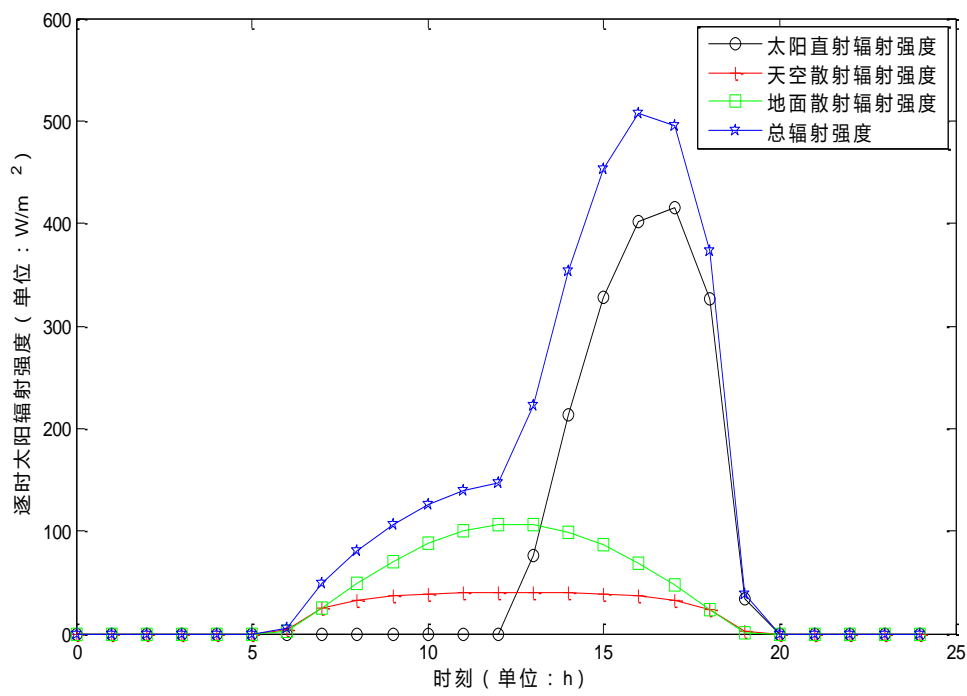


图 2-9 西墙全天各时刻的太阳辐射

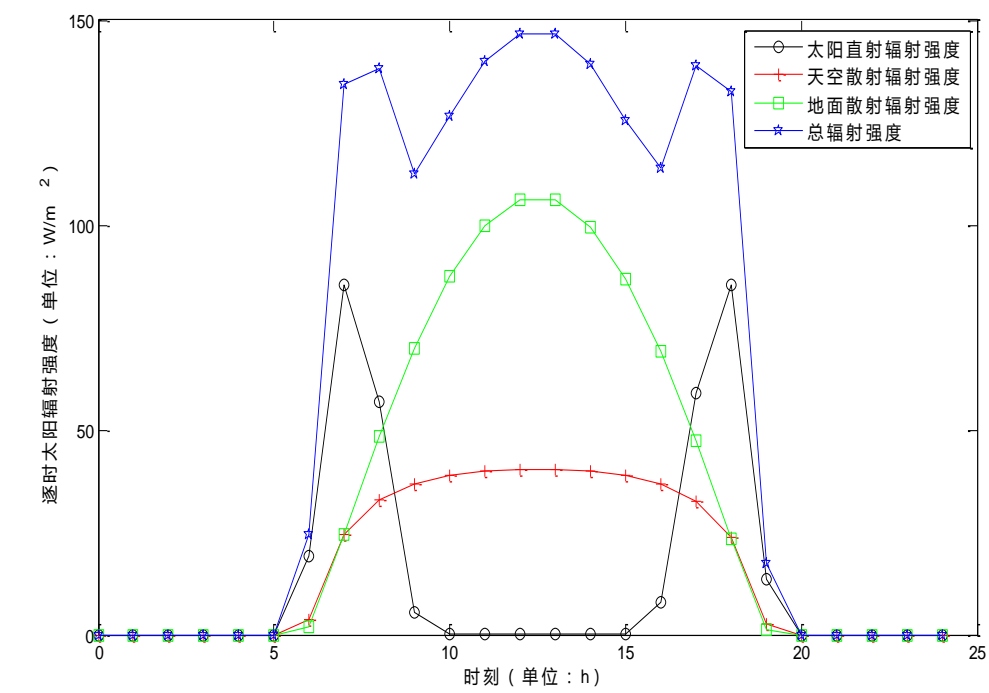


图 2-10 北墙全天各时刻的太阳辐射

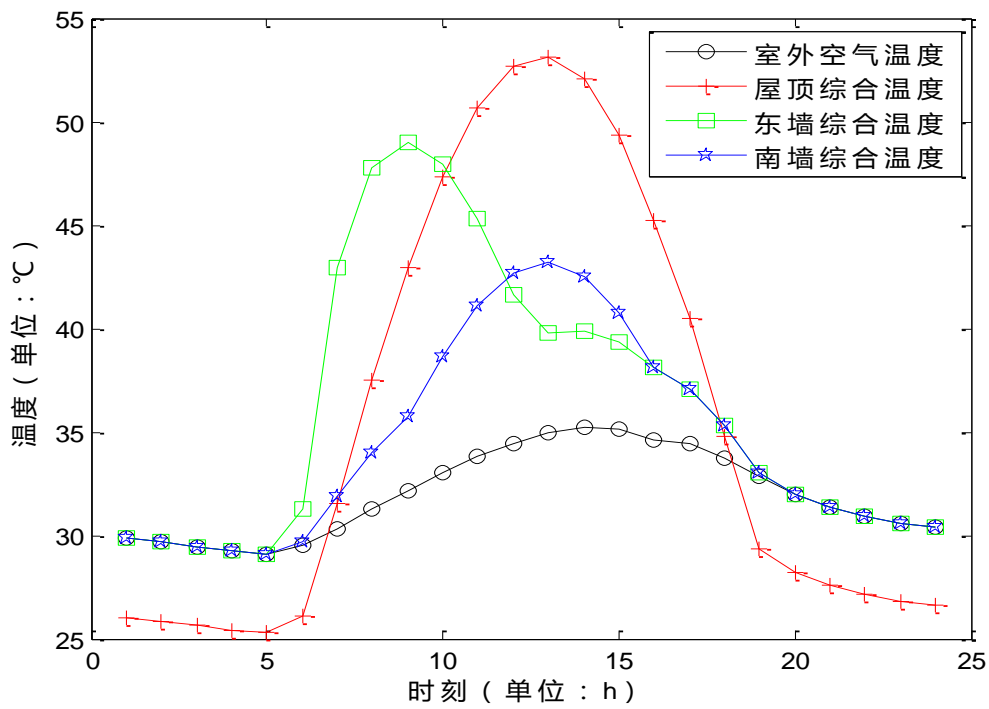


图 2-11 综合温度 (屋顶、东墙、南墙)

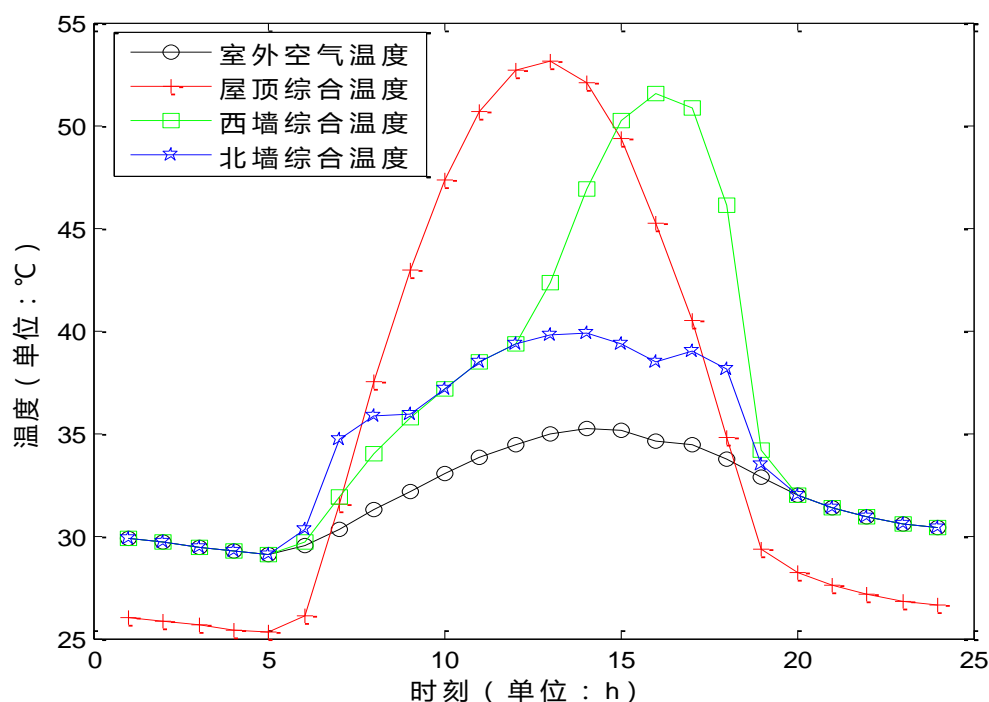


图 2-12 综合温度（屋顶、西墙、北墙）

由以上这些图中可以看出，总体上屋顶的太阳辐射最强，北墙最弱，南墙辐射强度不及东墙与西墙，东墙与西墙的辐射高峰分别出现在上午和下午。这些展示出来的结论与生活中的体验大致相同，造成这种现象的原因可作如下解释：

- 1、屋顶在太阳出现时段的太阳光线入射角一直小于 90° ，太阳直射辐射最强；
- 2、武汉夏季太阳偏南，所以北墙的太阳光线入射角大部分时间大于 90° ，太阳直射辐射最弱；
- 3、由于方位原因，南墙的太阳光线入射角很大，远大于东墙与西墙在有太阳直射时的太阳光线入射角。因此，南墙虽长时间有太阳直射辐射，但其辐射强度很小，而东西墙虽各有半个白天有太阳直射辐射，但其辐射强度很大；
- 4、上午太阳偏东，所以东墙上午辐射最强，下午太阳偏西，所以西墙下午辐射最强。

除南北墙外，其它围护结构表面都是太阳直射占主要，这与太阳光线入射角的大小相关。此外，天空散射和地面散射的变化都较为平缓，而太阳直射变化剧烈，所以围护结构表面辐射的变化趋势主要取决于太阳直射。

从图 2-11 与图 2-12 中可以看出，综合温度的值在白天比室外空气温度大得多，而在晚上就是一样大，但屋顶的却不同，这是因为屋顶是水平表面，根据前

文内容可知其 ΔR 不为零, 所以屋顶温度在晚上时要低于室外空气温度。由于综合温度与总辐射相关, 所以各围护结构的综合温度的特点同总辐射特点基本一致。

2.7.4 计算结果与文献[4]的对比

文献[4]在处理围护结构外表面热平衡时, 考虑的因素较本文更多, 所构建的数学模型也更为复杂, 但大体上, 与本文所构建模型还是相同的。文献[4]的相关计算结果如图 2-13 和图 2-14 所示。

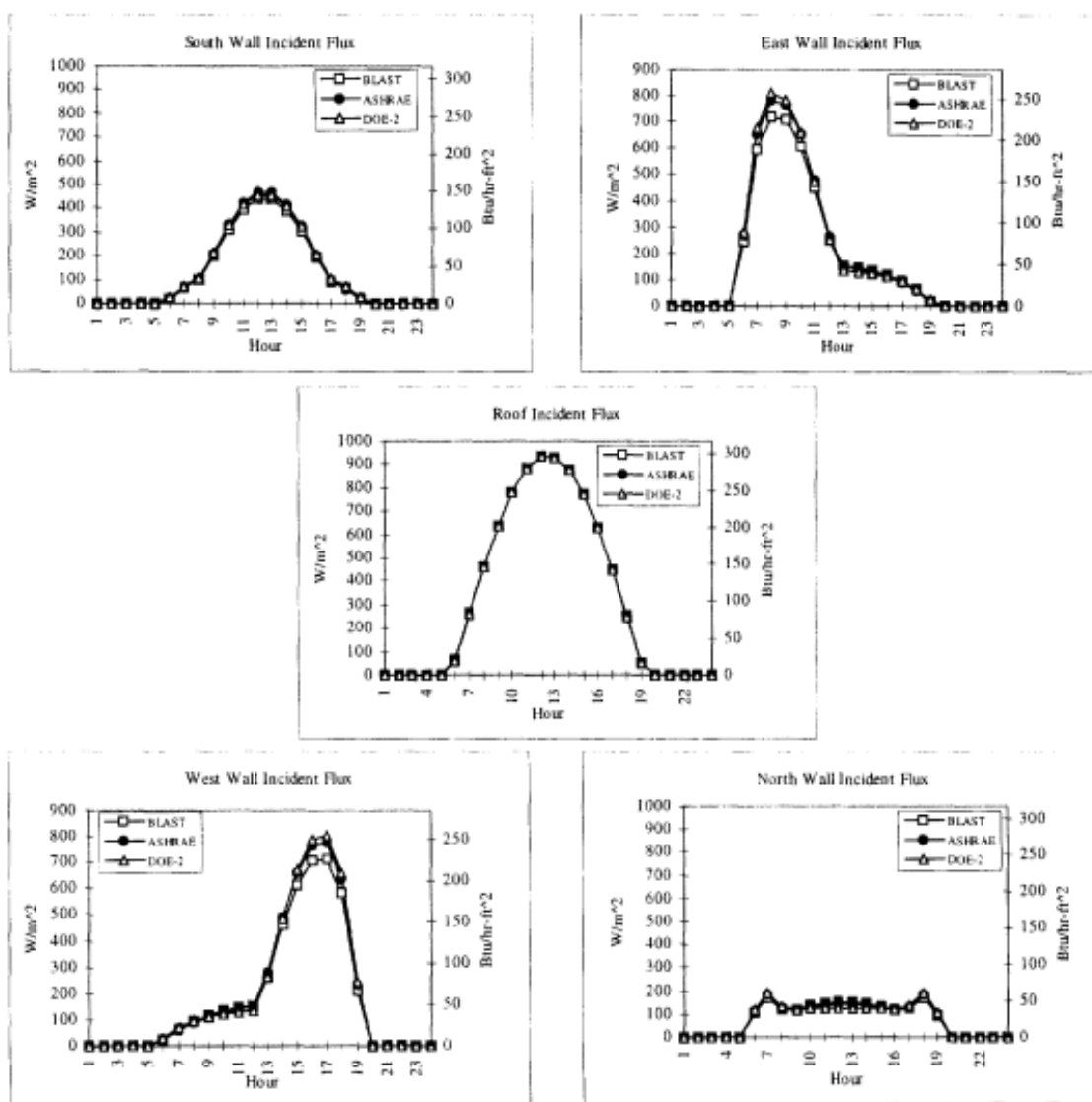


图 2-13 文献[4]各墙面全天总辐射强度图

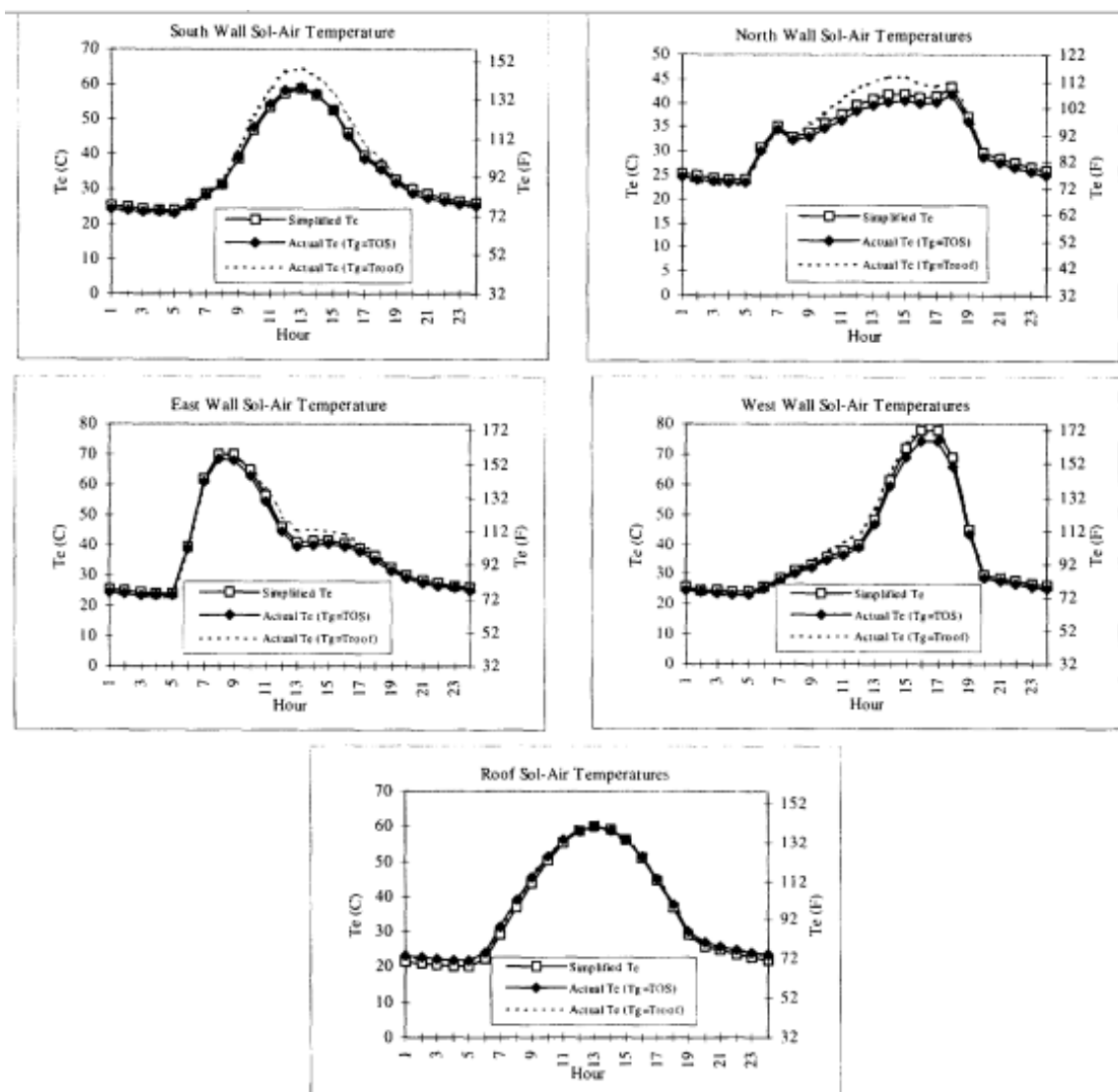


图 2-14 文献[4]各墙面全天综合温度图

由于本文同文献[4]基本参数数值的取值不同, 因此计算结果数值上不会相同, 但比较图 2-13 和图 2-14 同本文计算所得图像可以发现, 本文与文献[4]图像上各墙面的太阳辐射与综合温度变化曲线的特点与规律是相同的。由此, 可以得知, 本文的计算结果总体上应该是准确地, 也许细节上有些误差。

3 围护结构传热子模型

3.1 模型假设

为方便建模与计算，对围护结构作出如下假设：

- 1、将围护结构传热视为一维导热问题来处理；
- 2、同一层围护结构物质是均匀的，其热物理性质也是相同；
- 3、同一围护结构的热物理过程在局部与整体是一致统一的。

3.2 反应系数

反应系数法是 20 世纪六七十年代由加拿大的 Stephenson 和 Mitalas 提出的，该法引入了现代控制论，并利用拉普拉斯变换和反变换，将围护结构（墙体）作为一个热力系统，将任意的随时间变化的温度边界条件分解成一系列的三角脉冲，从而可以预先求出作为热力系统反应系数的单位三角温度波外扰所引起的热流变化。反应系数法认为各脉冲都是线性无关的，热力系统本身就是线性系统。利用叠加原理，将每一脉冲引起的热流变化按照卷积原则进行叠加，就可以求出整个系统的热反应^[10]。

3.2.1 墙体传热的数学模型

由传热学的知识可知，求解如图 3-1 所示的单层均质墙体的不稳定传热，就是要求解以下所示的偏微分方程^[10,11]：

$$\begin{cases} \partial \tau(x, \tau) / \partial \tau = a \cdot \partial^2 \tau(x, \tau) / \partial x^2 & (0 < x < l, \tau > 0) \\ q(x, \tau) = -\lambda \cdot \partial t(x, \tau) / \partial x & (0 < x < l, \tau > 0) \\ t(x, 0) = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

式中， a ——壁体材料的导温系数（也称热扩散系数），等于 $\lambda / c\rho(m^2/h)$ ；

λ ——壁体材料的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ；

c ——壁体材料的比热， $kJ/kg \cdot K$ ；

ρ ——壁体材料的密度， kg/m^3 ；

x ——壁体计算断面坐标， m ；

τ ——时间变量， h ；

l ——墙体厚度, m。

对式(3-1)利用拉普拉斯变换法可以得到墙体的温度分布和热流为^[10,11]:

$$\begin{cases} T(x, s) = ch(\sqrt{s/a} \cdot x) T(0, s) - sh(\sqrt{s/a} \cdot x) Q(0, s) / (\lambda \sqrt{s/a}) \\ Q(x, s) = -\lambda \sqrt{s/a} \cdot sh(\sqrt{s/a} \cdot x) T(0, s) + ch(\sqrt{s/a} \cdot x) Q(0, s) \end{cases} \quad (3-2)$$

式中, $T(x, s)$ ——墙体在 x 处温度对时间的拉普拉斯变换;

$Q(x, s)$ —— x 断面上热流对时间的拉普拉斯变换;

s ——时间 τ 的拉普拉斯变换。

由以上的式子可以看出, 只要知道了边界条件 $t(0, \tau)$ 和 $q(0, \tau)$, 就可以通过拉普拉斯变换求得墙体任意部位的温度以及热流响应, 之后再对 $T(x, s)$ 和 $Q(x, s)$ 进行拉普拉斯逆变换, 就可以得到最终解了。

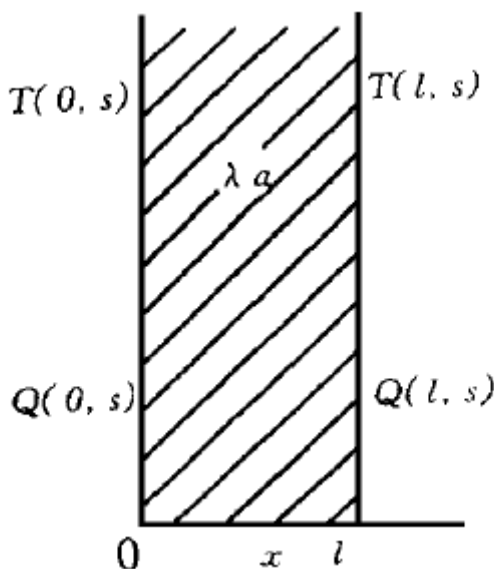


图 3-1 单层均质墙体

3.2.2 传递矩阵

式(3-2)中, 令 $x=l$, 并且化为矩阵的形式, 可得^[10,11]:

$$\begin{bmatrix} T(l, s) \\ Q(l, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(0, s) \\ Q(0, s) \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

式中, $A(s) = ch(\sqrt{s/a} \cdot l)$;

$B(s) = sh(\sqrt{s/a} \cdot l) / (\lambda \sqrt{s/a})$;

$C(s) = \lambda \sqrt{s/a} \cdot sh(\sqrt{s/a} \cdot l)$;

$D(s) = A(s)$ 。

式(3-3)的右侧方阵称为墙体系统的传递矩阵, 用 $[G]$ 来表示, 它表征着墙体系统的热特性, 而与输入或者输出无关, 也就是与墙体两侧的温度以及热流无

关, 其表达式为^[10,11]:

$$[G] = \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

对于大多数的建筑物, 墙体一般为多层围护结构。对于包括内外表面空气层的多层板壁围护结构系统, 如图 3-2 所示, 此时式 (3-4) 应写为^[10,11]:

$$[G] = [G_1][G_2][G_3] \cdots [G_{n+1}] \quad (3-5)$$

式中, $[G_1] = \begin{bmatrix} 1 & -1/\alpha_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为内表面的空气边界层传递矩阵, 方阵中 α_r 为墙体内表面的放热系数; $[G_2] \cdots [G_n]$ 为各层墙体的传递矩阵, 按输出至输入的顺序排列; $[G_{n+1}] = \begin{bmatrix} 1 & -1/\alpha_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为外表面的空气边界层传递矩阵, 方阵中 α_a 为墙体外表面的放热系数。

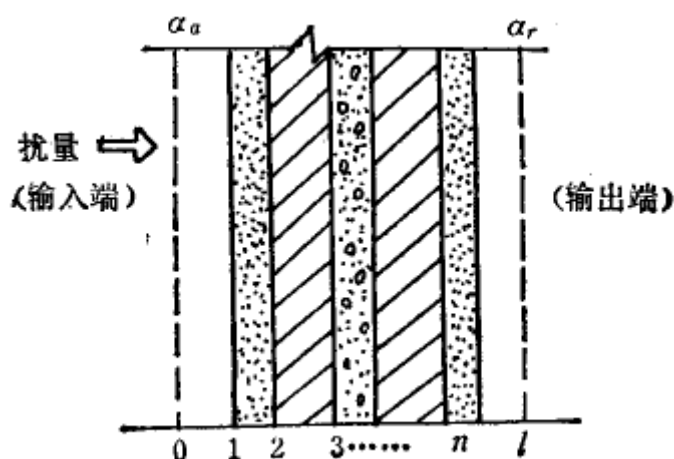


图 3-2 多层板壁围护结构

3.2.3 反应系数的确定

在求解反应系数时, 首先要求取传递矩阵中 $B(s) = 0$ 这个方程的根值 α_i , 之后反应系数便可按下式^[6,11]:

$$\begin{cases} X(0) = K + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{A_i}{\Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_i \Delta \tau}) \right] & (j=0) \\ X(j) = -\sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{A_i}{\Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_i \Delta \tau})^2 e^{-(j-1)\alpha_i \Delta \tau} \right] & (j \geq 1) \end{cases} \quad (3-6)$$

$$\begin{cases} Y(0) = K + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{B_i}{\Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_i \Delta \tau}) \right] & (j=0) \\ Y(j) = -\sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{B_i}{\Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_i \Delta \tau})^2 e^{-(j-1)\alpha_i \Delta \tau} \right] & (j \geq 1) \end{cases} \quad (3-7)$$

$$\begin{cases} Z(0) = K + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{C_i}{\Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_i \Delta \tau}) \right] & (j=0) \\ Z(j) = - \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{C_i}{\Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_i \Delta \tau})^2 e^{-(j-1)\alpha_i \Delta \tau} \right] & (j \geq 1) \end{cases} \quad (3-8)$$

式中, K ——墙体的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

α_i ——方程 $B(s) = 0$ 的第 i 个实数根;

A_i 、 B_i 、 C_i ——系数, 分别为:

$$A_i = -\frac{A(-\alpha_i)}{\alpha_i^2 B'(-\alpha_i)}; \quad B_i = -\frac{1}{\alpha_i^2 B'(-\alpha_i)}; \quad C_i = -\frac{D(-\alpha_i)}{\alpha_i^2 B'(-\alpha_i)}。$$

$B'(-\alpha_i)$ —— $B(s)$ 在 $-\alpha_i$ 的导数值;

$X(0)$ 、 $X(j)$ ——第 0 和第 j 时刻, 围护结构外表面的吸热反应系数;

$Z(0)$ 、 $Z(j)$ ——第 0 和第 j 时刻, 围护结构内表面的吸热反应系数;

$Y(0)$ 、 $Y(j)$ ——第 0 和第 j 时刻, 围护结构的传热反应系数。

3.2.4 围护结构传热量

由反应系数的性质可得围护结构第 n 时刻的传热量为^[7]:

$$q(n) = \sum_{j=0}^{N_s} Y(j) t_o(n-j) - \sum_{j=0}^{N_s} Z(j) t(n-j) \quad (3-9)$$

式中, t_o ——该围护结构外表面温度, $^\circ C$;

t ——该围护结构内表面温度, $^\circ C$;

N_s ——取用的反应系数的项数。

3.3 matlab 建模计算与结果分析

根据之前本章所述, 可以用 matlab 编写计算反应系数的计算程序, 下面将给出计算框图并对结果进行一定分析。

3.3.1 构建求解反应系数函数 re

从各种反应系数的文献中可以看出, $B(s) = 0$ 的根 α_i 的范围确定在 $\alpha_i \leq 100$ 时, 精确度已经很高, 所以本次编程计算时根值范围定为 $\alpha_i \leq 100$ 。同样地为保证基本精度, 本次编程计算所采用的反应系数的项数定为 100 项^[12]。

已知参数: 初始 $x=0$;

函数自变量: 围护结构各层墙体材料的热物理参数: 空气层的放热系数 (室

外为 α_a ，室内为 α_r ），材料的导热系数 λ ，材料的比热 C ，材料的密度 ρ ，材料层的厚度 l ，组成围护结构的材料层数 N （包括内外表面空气边界层）。

求解因变量：反应系数 $X(0)$ 、 $X(j)$ 、 $Y(0)$ 、 $Y(j)$ 、 $Z(0)$ 、 $Z(j)$ 按顺序组成的一维数组 FG 。

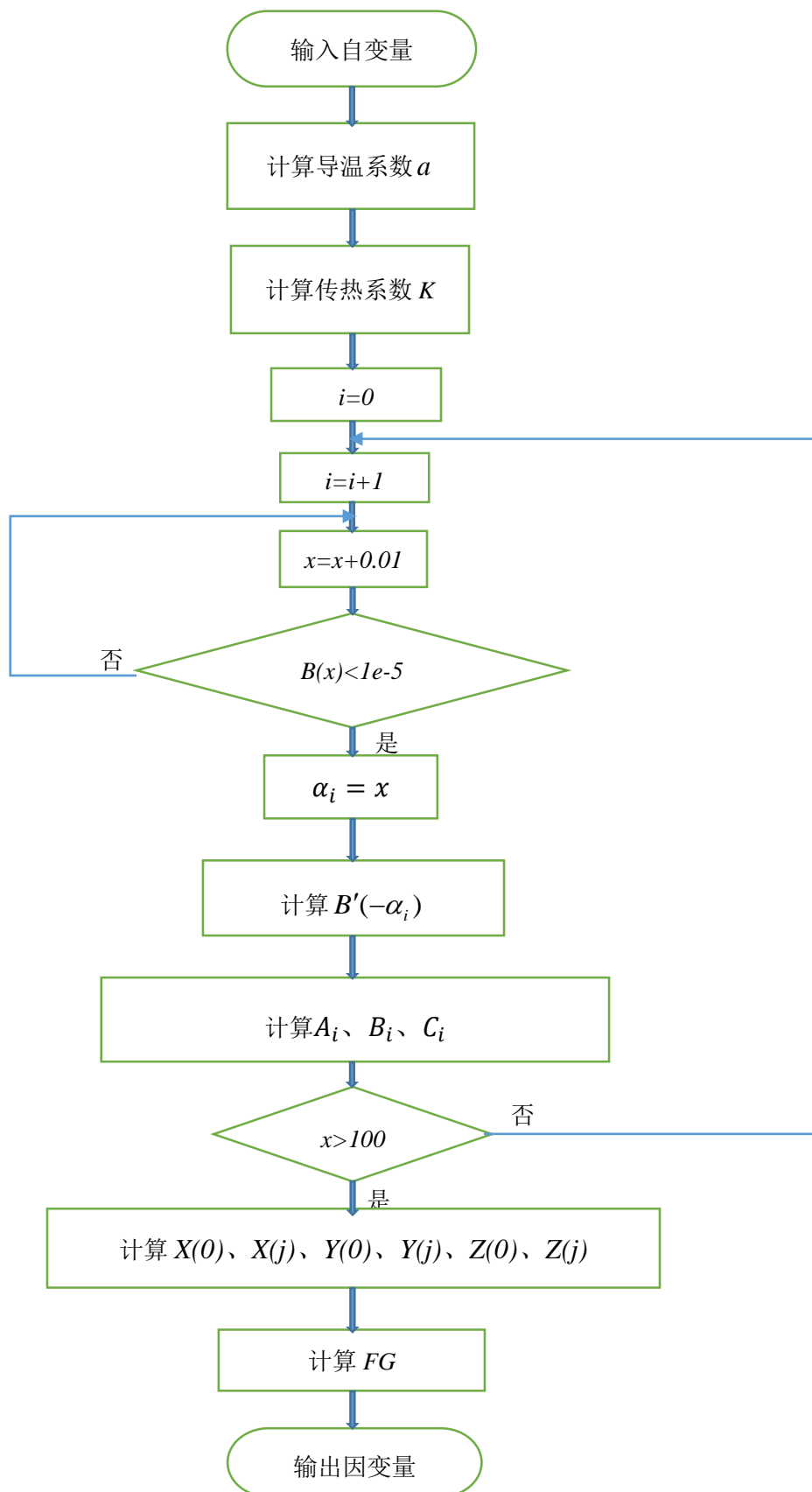


图 3-3 求解反应系数函数框图

框图说明:框图中所展现的求解 $B(s) = 0$ 的根的方法为二分法(也可用三分法),实际过程非框图所表现那么简单,其他进程也是一样,这里只作简单表述。

3.3.2 结果分析

以带有外表面空气层的三层围护结构为例,其具体材料参数为:

$\alpha_a = 22W/m^2K$, $\lambda_1 = 1.74W/mK$, $C_1 = 0.92KJ/kgK$, $\rho_1 = 2500kg/m^3$; $l_1 = 0.37m$; $\lambda_2 = 0.7W/mK$, $C_2 = 0.88KJ/kgK$, $\rho_2 = 1600kg/m^3$; $l_2 = 0.02m$ 。

表 3-1 方程 $B(s) = 0$ 的根

i	α_i	i	α_i	i	α_i
1	0.1112	9	12.6931	17	46.9763
2	0.4737	10	15.9082	18	52.5454
3	1.1396	11	19.4787	19	58.5681
4	2.1499	12	23.3860	20	65.0628
5	3.5136	13	27.6084	21	72.0110
6	5.2503	14	32.1077	22	79.3875
7	7.3597	15	36.8385	23	87.1723
8	9.8392	16	41.7784	24	95.3485

通过运行所编程序,求得 $B(s) = 0$ 的根在 $\alpha_i \leq 100$ 的所有根值如表 3-1 所示,传热系数 $K=3.488335763382629$ 。

围护结构外表面吸热反应系数 $X(j)$ 、围护结构传热反应系数 $Y(j)$ 和围护结构内表面吸热反应系数 $Z(j)$ 的前 100 项的数值变化如图 3-4、图 3-5 和图 3-6 所示。

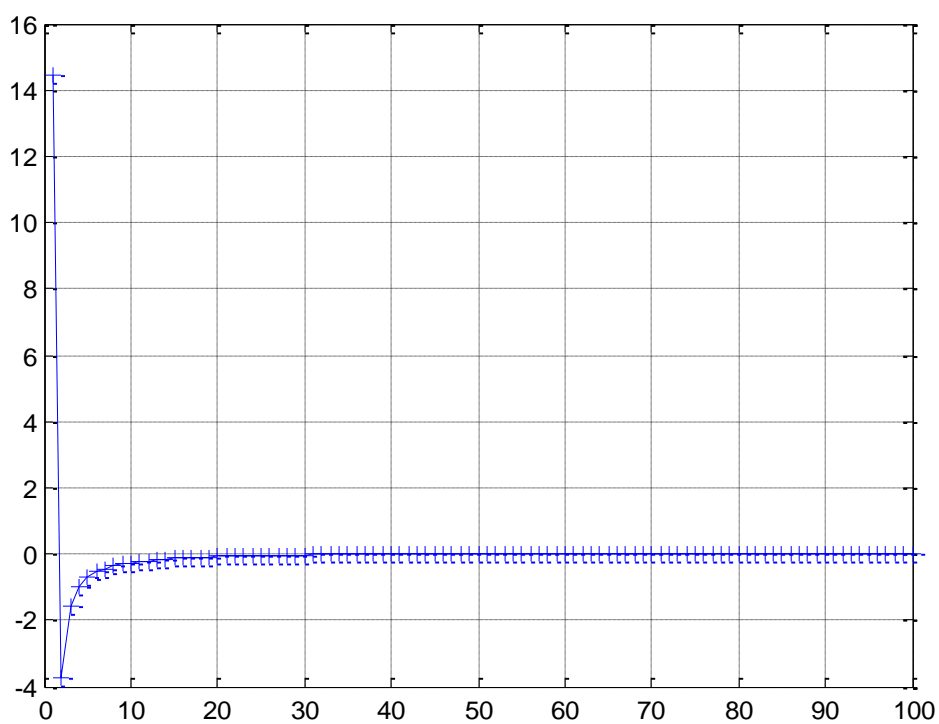


图 3-4 围护结构吸热反应系数 X 的数值变化

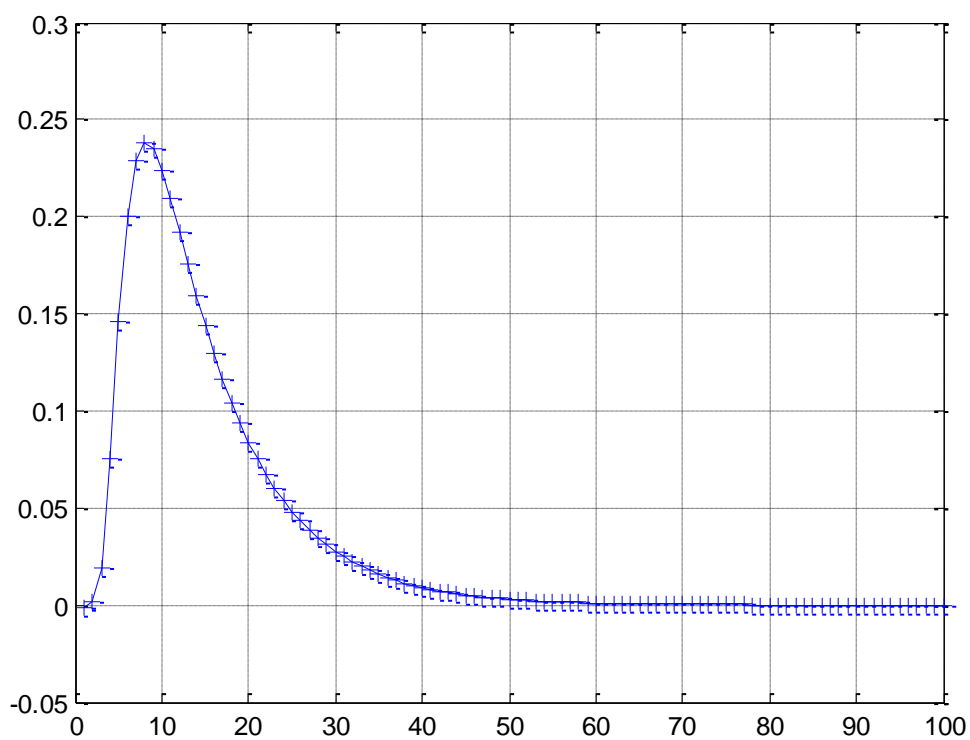


图 3-5 围护结构传热反应系数 Y 的数值变化

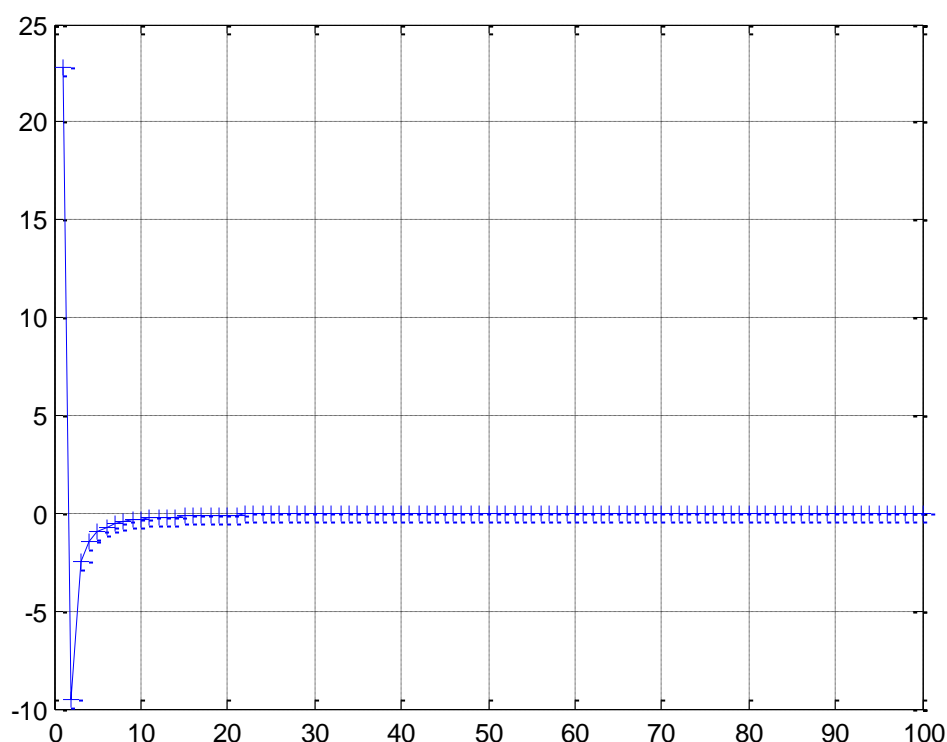


图 3-6 围护结构吸热反应系数 Z 的数值变化

由反应系数的数值变化图可以看出，反应系数的数值在 100 项左右时趋近于零，变化曲线的斜率也趋近于零。对于吸热反应系数 X 和 Z 来说，项数在 30 以后变化就很小了，而传热反应系数 Y 在 80 项之后变化才趋于平缓。

由反应系数法的性质可知^[11]：

$$K = \sum_{j=0}^{\infty} X(j) \quad (3-9)$$

$$K = \sum_{j=0}^{\infty} Y(j) \quad (3-10)$$

$$K = \sum_{j=0}^{\infty} Z(j) \quad (3-11)$$

通过程序计算得到如下结果：

表 3-2 反应系数误差

	各项数之和 S	$(S-K)/K$ (%)
X	3.488426740296485	0.0026
Y	3.488237467351665	-0.0028
Z	3.488441961464473	0.0030

从表 3-2 可以看出, 式 (3-9)、式 (3-10) 与式 (3-11) 的性质与计算结果吻合, 其结果误差非常之小。

综上所述, 此次计算结果非常理想, 与文献[12]计算结果相似, 由于该文献计算的结果包含了内表面空气层, 所以数值不同, 但从图 3-7、图 3-8 与图 3-9 可以看出反应系数曲线的特点与变化规律是相同的。

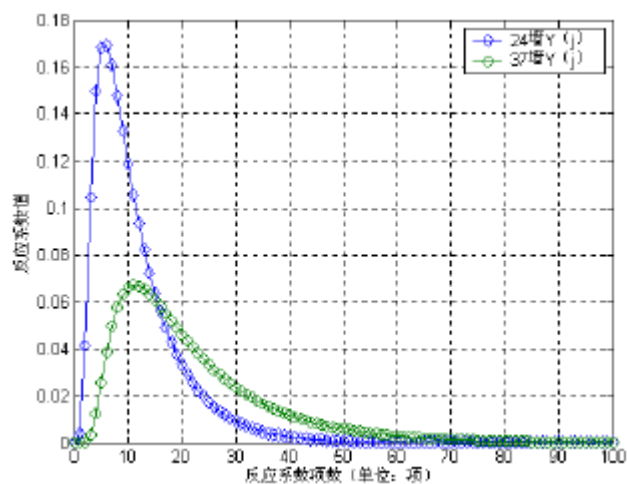


图 3-7 文献[12]围护结构传热反应系数变化图

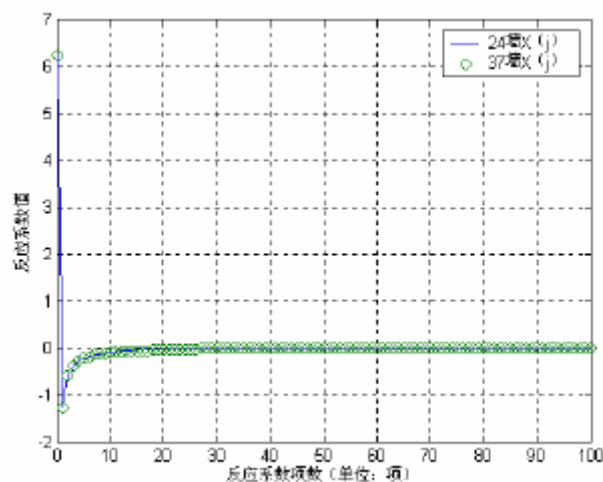


图 3-8 文献[12]围护结构外表面吸热反应系数变化图

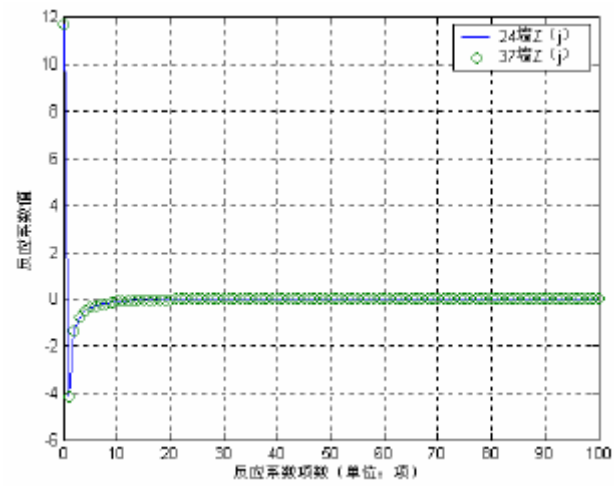


图 3-9 文献[12]围护结构内表面吸热反应系数变化图

4 围护结构内表面热平衡子模型

4.1 模型假设

为方便建模与计算，对围护结构内表面作出如下假设：

- 1、同一围护结构内表面具有相同的热物性；
- 2、同一围护结构内表面的热物理过程在局部与整体是一致统一的。

4.2 围护结构内表面热平衡方程

建立围护结构内表面的热平衡模型时将内墙作为研究对象，其表面的热物理过程如图 4-1 所示。

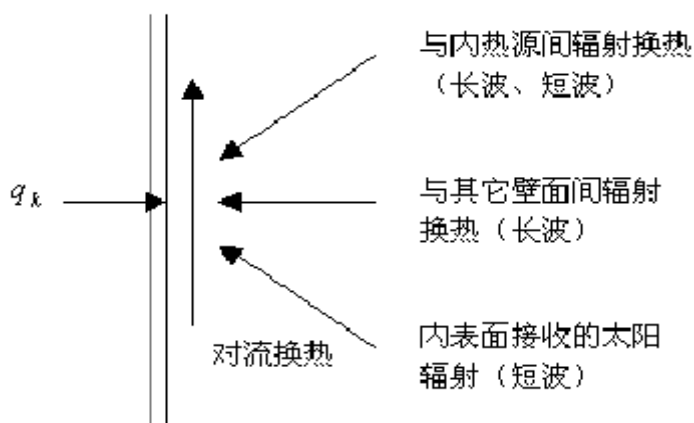


图 4-1 围护结构内表面热平衡^[14]

对图 4-1 所示的热过程而建立的热平衡方程为^[13]：

$$q_k'' + q_{sw}'' + q_{sol}'' + q_{LWX}'' + q_{LWS}'' + q_{conv}'' = 0 \quad (4-1)$$

式中， q_k'' ——通过围护结构由室外传入到室内的热流密度， W/m^2 ；

q_{sw}'' ——灯光等内热源的短波辐射， W/m^2 ；

q_{sol}'' ——从窗户传入室内的太阳短波辐射， W/m^2 ；

q_{LWX}'' ——各个围护结构内表面之间的互辐射， W/m^2 ；

q''_{LWS} ——设备和人的辐射, W/m^2 ;

q''_{conv} ——与室内空气的对流换热, W/m^2 。

4.3 围护结构传热量

对于围护结构, 可以分为有热惰性的板壁围护结构和门窗等几乎无蓄热性的围护结构两种, 因此计算求解围护结构的传热量时, 要分开考虑。

4.3.1 有热惰性的板壁围护结构

对于具有热惰性的板壁围护结构, 其传热量可按式(4-2)进行计算^[7]:

$$q''_k(n) = \sum_{j=0}^{N_s} Y(j)t_o(n-j) - \sum_{j=0}^{N_s} Z(j)t(n-j) \quad (4-2)$$

式中, t_o ——该板壁围护结构外表面温度, $^{\circ}C$;

t ——该板壁围护结构内表面温度, $^{\circ}C$;

N_s ——取用的反应系数的项数。

n ——第 n 时刻。

$Y(j)$ 、 $Z(j)$ ——该板壁围护结构的传热反应系数和内表面的吸热反应系数, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$; 因为围护结构内表面的辐射和对流换热需要分别计算, 所以该反应系数中不包括内表面空气边界层的作用。

4.3.2 门窗围护结构

对于门窗等围护结构, 其蓄热性可以忽略, 为了计算的简化, 可以将传热得热量按稳定传热考虑, 即^[7]:

$$q''_k = \frac{1}{\frac{1}{K} - \frac{1}{\alpha}} [t_o(n) - t(n)] = \frac{K\alpha}{\alpha - K} t_o(n) - \frac{K\alpha}{\alpha - K} t(n) \quad (4-3)$$

式中, K ——门窗的传热系数, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$;

α ——门窗等围护结构内表面的总换热系数, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ 。

4.4 各围护结构内表面之间的互辐射

各围护结构内表面之间 n 时刻的互辐射可按式(4-4)计算^[7]:

$$q''_{LWX} = \sum_{k=1}^{N_t} \alpha''_{ik} [t_k(n) - t_i(n)] \quad (4-4)$$

式中, N_t ——围护结构内表面的总数;

t_k 、 t_i ——第 k 面、第 i 面围护结构内表面的温度, $^{\circ}\text{C}$;

α_{ik}^r ——围护结构内表面 i 和 k 之间的辐射换热系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, 其等于:

$$\alpha_{ik}^r = 4\sigma\varepsilon_{ik}\varphi_{ik}[T_m(n)]^3 \quad (4-5)$$

式中, σ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

ε_{ik} ——围护结构内表面 i 与 k 之间的系统黑度, 其值约为围护结构内表面 i 和 k 两者自身黑度的乘积, 即 $\varepsilon_{ik} = \varepsilon_i \varepsilon_k$;

$T_m(n)$ ——围护结构内表面 i 和 k 之间的平均表面温度, 计算时可近似等于 n 时刻的室温;

φ_{ik} ——围护结构内表面 i 对 k 的辐射角系数。

关于辐射角系数的求解, 具体可以分为以下的两种情况^[7]:

1. 两个平行表面之间的辐射角系数

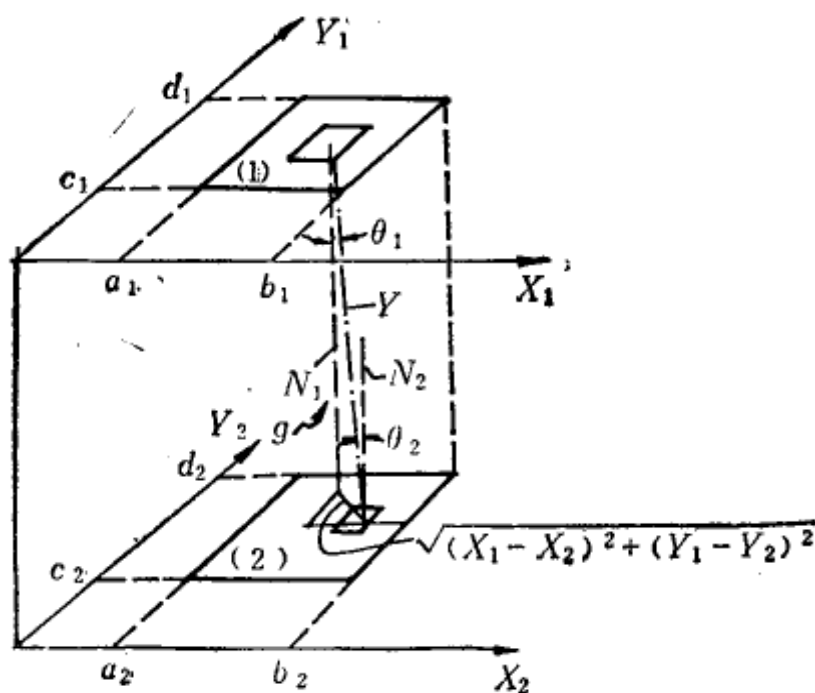


图 4-2 平行表面

如图 4-2 所示, 表面 (1) 与表面 (2) 是两个相距为 g 的平行表面, 表面 (1) 对表面 (2) 的辐射角系数 φ_{12} , 可用下式进行计算:

$$\begin{aligned} 2\pi(b_1 - a_1)(d_1 - c_1)\varphi_{12} = & [P(b_2 - b_1) + P(a_2 - a_1)][Q(c_2 - c_1) + \\ & Q(d_2 - d_1) - Q(c_2 - d_1) - Q(d_2 - c_1)] + [P(b_2 - a_1) + P(a_2 - b_1)][Q(c_2 - d_1) + \\ & Q(d_2 - c_1) - Q(c_2 - c_1) - Q(d_2 - d_1)] \end{aligned} \quad (4-6)$$

式中, $P(Z_1)Q(Z_2) =$

$$Z_1 W \tan^{-1}(Z_1/W) + Z_2 V \tan^{-1}(Z_2/V) - 0.5g^2 \ln((W^2 + Z_1^2)/W^2); \quad (4-7)$$

式中, $V^2 = g^2 + Z_1^2$;

$$W^2 = g^2 + Z_2^2。$$

2. 两个垂直表面之间的辐射角系数

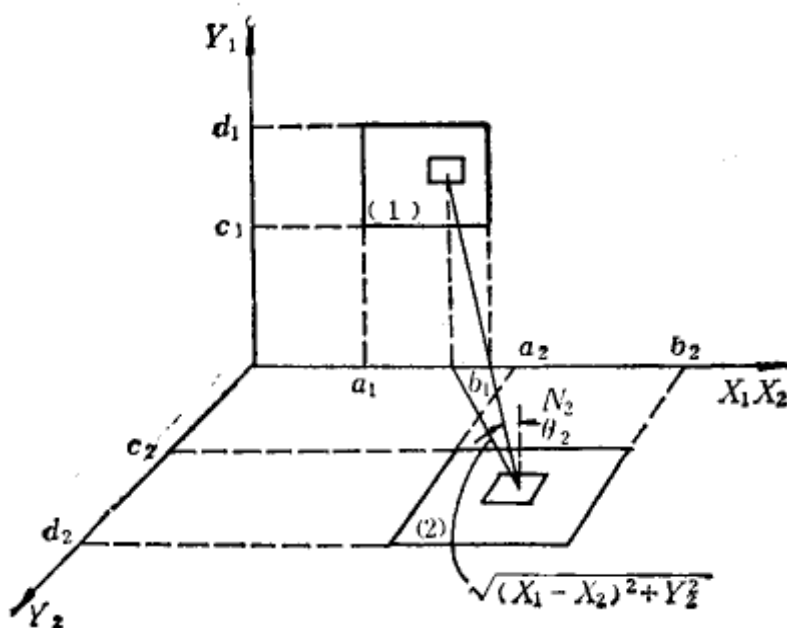


图 4-3 垂直表面

如图 4-3 所示, 表面 (1) 与表面 (2) 两者之间相互垂直, 则表面 (1) 对表面 (2) 的辐射角系数 ϕ_{12} 可用下式进行计算:

$$\begin{aligned} 2\pi(b_1 - a_1)(d_1 - c_1)\phi_{12} = & [R(b_2 - b_1) + R(a_2 - a_1)][S(c_2 + c_1) + \\ & S(d_2 + d_1) - S(c_2 + d_1) - S(d_2 + c_1)] + [R(b_2 - a_1) + R(a_2 - b_1)][S(c_2 + d_1) + \\ & S(d_2 + c_1) - S(c_2 + c_1) - S(d_2 + d_1)] \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\text{式中, } R(Z)S(Y_2 + Y_1) = TZ_1 \tan^{-1}(Z_1/T) + 0.25(Z_1^2 - T^2) \ln(T^2 + Z_1^2) \quad (4-9)$$

式中, $T^2 = Y_2^2 + Y_1^2$ 。

4.5 对流换热

围护结构内表面与室内空气之间的对流换热可由下式进行计算^[9]:

$$q''_{conv} = \alpha_c(t - t_r) \quad (4-10)$$

式中, t ——围护结构内表面温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_r ——室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$;

α_c ——围护结构内表面的对流传热系数, W/m^2K 。

在有关的传热学的书籍中对于对流换热系数的计算公式都有详细的介绍, 下面给出一些实用的公式^[9]:

1. 自由对流

1) 垂直平板

$$\text{层流运动} \quad G_r P_r < 10^9 \quad \alpha_c = 1.42(\Delta t/L)^{0.25} \quad (4-11)$$

$$\text{紊流运动} \quad G_r P_r > 10^9 \quad \alpha_c = 1.31(\Delta t)^{0.33} \quad (4-12)$$

2) 水平正方形平板

$$\text{热流向上, 层流运动} \quad G_r P_r < 2 \times 10^7 \quad \alpha_c = 2.64(\Delta t/L)^{0.25} \quad (4-13)$$

$$\text{热流向上, 紊流运动} \quad G_r P_r > 2 \times 10^7 \quad \alpha_c = 0.966(\Delta t)^{0.33} \quad (4-14)$$

$$\text{热流向下} \quad \alpha_c = 1.31(\Delta t/L)^{0.25} \quad (4-15)$$

2. 强迫对流

$$1) \text{ 层流运动} \quad R_e < 5 \times 10^5 \quad \alpha_c = 3.86\sqrt{v/L} \quad (4-16)$$

$$2) \text{ 紊流运动} \quad R_e > 5 \times 10^5 \quad \alpha_c = 5.94v^{0.6}L^{-0.2} \quad (4-17)$$

在以上诸式中, L ——定型尺寸, m。对于垂直板, L 指板的高度; 对于水平板, L 指板的长度;

v ——空气流速, m/s;

R_e 、 G_r 和 P_r 分别为雷诺、格拉晓夫和普朗特准则。

4.6 其它辐射得热

式(4-1)中的人员散热、照明散热以及从窗户传入室内的太阳辐射等没有确定, 以下内容将对此一一确定。

4.6.1 人员散热

人体向周围环境的显热散热主要通过表面的对流和辐射作用以及呼吸作用。另外, 人体通过其皮肤表面的蒸发、扩散以及呼吸作用向周围的环境散发水蒸汽, 这些水蒸汽(也称湿量)使周围的环境增加了热量, 这个现象被称为人体的潜热散热。在同样的劳动条件下, 人体的总散热量几乎就是不变的, 但随着环境温度的改变, 显热散热和潜热散热的比例会有所变化。不同环境温度和劳动条件下, 人体的总散热量 HG_b 可参见表 4-1。而人体的显热散热量 HG_{bs} 则可用下式计算^[7]:

$$HG_{bs} = HG_{bso} + (24 - t_r)m \quad (4-18)$$

式中, HG_{bso} ——环境温度为 24°C 时, 不同劳动条件下人体的显热散热量, 称为标准显热散热量, W/人 , 具体参见表 4-1;

m ——环境温度变化所造成的人体显热散热量变化的系数, $\text{W/人}^\circ\text{C}$, 具体参见表 4-1;

t_r ——室温, $^\circ\text{C}$ 。

人体的潜热散热量 HG_{bl} 等于:

$$HG_{bl} = HG_b - HG_{bs} \quad \text{W/人} \quad (4-19)$$

表 4-1 人体散热量

序号	适用条件	人体总散热量 HG_b	标准显热散热量 HG_{bso}	系数 m
1	会堂	79	50	3.00
2	学校	91	53	3.11
3	办公室, 旅馆	102	53	3.40
4	银行	113	53	3.61
5	餐厅	126	59	3.80
6	工厂(轻劳动)	170	65	5.61
7	舞厅	194	71	6.00
8	工厂(重劳动)	227	85	6.30
9	体育馆	329	117	5.40

4.6.2 照明设备散热

照明设备基本上把所消耗的电能都转化成了热能并散出。照明设备除去夜间使用以外, 往往在白天也要使用, 共散热量 HG_l 可按下列公式计算^[7]:

对于白炽灯

$$HG_l = n_1 N (W) \quad (4-20)$$

对于荧光灯(日光灯)

$$HG_l = n_1 (N + N_1) (W) \quad (4-21)$$

式中, N ——白炽灯或者荧光灯(日光灯)的装置功率, W ;

N_1 ——镇流器所消耗的功率, W , 一般情况下可认为 $N_1 = 0.2N$;

n_1 ——同时使用系数。

4.6.3 由窗户传入室内的太阳辐射得热

由相关文献可知，从窗户传入到室内的太阳辐射得热（也称日射得热）可由下式进行计算^[5]：

$$SHG = SC_{out} \cdot SC_{in} \cdot SC \cdot SHGF \cdot f \quad (4-22)$$

式中， SHG ——窗户的日射得热， W ；

SC_{out} ——窗户的外遮阳系数；

SC_{in} ——窗户的内遮阳系数；

f ——窗户面积， m^2 ；

$SHGF$ ——日射得热因素， W/m^2 ；

SC ——玻璃的遮阳系数，对于普通的 3mm 厚平板玻璃，可用下式计算：

$$SC = 0.949 + 0.159N \quad (4-23)$$

式中， $N = \alpha_{in} / (\alpha_{in} + \alpha_{out})$ ， α_{in} 为室内放热系数， W/m^2K ， α_{out} 为室外放热系数， W/m^2K 。

夏季 7 月份武汉地区的日射得热因素 $SHGF$ 如表 4-2 所示^[1]。

表 4-2 7 月武汉日射得热因素 $SHGF$ (W/m^2)

方位	时刻												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
S	14	40	63	85	121	155	167	155	127	85	63	40	14
SE	129	257	343	368	333	242	140	105	97	83	63	40	14
E	292	464	531	500	381	211	108	105	97	83	63	40	14
NE	273	395	407	331	207	113	108	105	97	83	63	40	14
N	78	80	70	83	97	105	108	105	97	83	70	80	78
NW	14	40	63	83	97	105	108	113	207	331	407	395	273
W	14	40	63	83	97	105	108	211	381	500	531	464	292
SW	14	40	63	83	97	105	140	242	333	368	343	257	129
H	43	193	385	561	697	783	813	783	697	561	385	193	43

4.6.4 围护结构内表面接收的辐射得热

假设照明和人体等的辐射得热以及由窗户传入到室内的太阳辐射量都均匀地

分布在房间各个围护结构的内表面, 则 n 时刻各个围护结构内表面接收到的辐射得热量可由下式进行计算^[7]:

$$q_r(n) = (SHG(n)(1 - C_a) + HG_l(n)(1 - C_l) + HG_{bs}(n)(1 - C_b)) / \sum_{k=1}^{N_i} S_k \quad (4-24)$$

式中, $q_r(n)$ ——围护结构内表面的辐射得热量, $= q''_{sw} + q''_{sol} + q''_{LWS}$, W/m^2 ;

C_a 、 C_l 、 C_b ——日射得热、照明和人体显热等得热量中对流部分所占百分比, 具体可按表 4-3 近似取用;

S_k ——围护结构的内表面 k 的面积, m^2 ;

N_i ——围护结构内表面总数;

表 4-3 各种得热对流辐射所占比

序号	得热种类	辐射百分比	对流百分比	备注
1	太阳辐射 (无遮阳)	95	5	
2	太阳辐射 (有遮阳)	58	42	
3	日光灯	50	50	
4	白炽灯	80	20	
5	人体	40	60	
6	设备	20-80	80-20	表面温度高, 辐射强
7	空气渗透	0	100	
8	围护结构传热	60	40	

4.7 围护结构内表面热平衡方程的整理

根据本章之前所述, 对式 (4-1) 所列围护结构内表面热平衡方程进行整理可得一计算式, 利用该计算式可进行 matlab 编程计算。

通过对 (4-1) 式所列热平衡方程进行整理变换可得^[7]:

$$q_i(n) + \alpha_i^c [t_r(n) - t_i(n)] + \sum_{k=1}^{N_i} \alpha_{ik}^r [t_k(n) - t_i(n)] + q_i^r(n) = 0 \quad (4-25)$$

式中, $t_r(n)$ —— n 时刻的室温, $^{\circ}C$;

$t_i(n)$ 、 $t_k(n)$ ——第 i 和第 k 围护结构 n 时刻的内表面温度, $^{\circ}C$;

α_i^c ——围护结构内表面 i 的对流换热系数, W/m^2K ;

α_{ik}^r ——第 i 和第 k 围护结构内表面之间的辐射换热系数, W/m^2K ;

$q_i(n)$ ——第 i 围护结构内表面所获得的传热得热量, W/m^2 ;

$q_i^r(n)$ ——第 i 围护结构内表面获得的太阳辐射得热和其他内扰（照明、人体等）的辐射热量之和， W/m^2 。

由板壁围护结构与门窗围护结构的传热得热量表达式将式（4-25）进一步整理变换得^[7]：

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^{N_s} Y_i(j)t_{oi}(n-j) - \sum_{j=0}^{N_s} Z_i(j)t_i(n-j) + \alpha_i^c [t_r(n) - t_i(n)] + \\ \sum_{k=1}^{N_i} \alpha_{ik}^r [t_k(n) - t_i(n)] + q_i^r(n) = 0; \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ \frac{K_i \alpha_i}{\alpha_i - K_i} [t_{oi}(n) - t_i(n)] + \alpha_i^c [t_r(n) - t_i(n)] + \\ \sum_{k=1}^{N_i} \alpha_{ik}^r [t_k(n) - t_i(n)] + q_i^r(n) = 0; \quad (i = m+1, \dots, N_i) \end{cases} \quad (4-26)$$

由于围护结构的传热反应系数 $Y(j)$ 、内表面吸热反应系数 $Z(j)$ 以及内扰和外扰的逐时变化都是已知值，各个围护结构 n 时刻以前的内表面温度也应该是已知值。各个围护结构的外表面温度或者综合温度 $t_{oi}(n)$ 以及室内空气温度 $t_r(n)$ ，可以是给定的值，也可以是由其它等式给出的未知值。所以，将式（4-26）的已知项和未知项分别放置在等式的两侧，则可以得到 n 时刻室内围护结构内表面 i 的热平衡方程式为^[7]：

$$\begin{cases} -[\alpha_i + Z_i(0)]t_i(n) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N_i} \alpha_{ik}^r t_k(n) + \alpha_i^c t_r(n) \\ = -\sum_{j=0}^{N_s} Y_i(j)t_{oi}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_i(j)t_i(n-j) - q_i^r(n) \\ (i = 1, 2, \dots, m) \\ -\left[\alpha_i + \frac{K_i \alpha_i}{\alpha_i - K_i}\right]t_i(n) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N_i} \alpha_{ik}^r t_k(n) + \alpha_i^c t_r(n) \\ = -\frac{K_i \alpha_i}{\alpha_i - K_i} t_{oi}(n) - q_i^r(n) \\ (i = m+1, m+2, \dots, N_i) \end{cases} \quad (4-27)$$

式中， $\alpha_i = \alpha_i^c + \sum_{k=1}^{N_i} \alpha_{ik}^r$ 。

5 室内空气热平衡子模型

5.1 模型假设

为方便建模与计算，对室内空气作出如下假设：

- 1、室内空气分别是均匀的，任何方位的空气热物性是相同的；
- 2、室内空气的热物理过程在局部与整体是一致统一的。

5.2 室内空气热平衡方程

室内空气的热平衡方程可由下式表示^[15]：

$$q_{conv} + q_{CE} + q_{IV} + q_{sys} = q_{add} \quad (5-1)$$

式中， q_{conv} ——室内空气与各围护结构内表面之间的对流换热，W；

q_{CE} ——室内其他的对流得热（人体、照明设备等），W；

q_{IV} ——渗透和通风气流的显热得热，W；

q_{sys} ——室内空调的显热除热量，W；

q_{add} ——单位时间内室内空气中显热量的增值，W。

(5-1) 式的具体计算式为^[7]：

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{N_i} S_k \alpha_k^c [t_k(n) - t_r(n)] + [q_1^c(n) - q_2^c(n)] + L_a(n)(c\rho)_a [t_a(n) - t_r(n)] / 3.6 \\ & - HE_s(n) = V(c\rho)_r \frac{t_r(n) - t_r(n-1)}{3.6 \times \Delta\tau} \end{aligned} \quad (5-2)$$

式中， S_k ——围护结构内表面 k 的面积， m^2 ；

α_k^c ——围护结构内表面 k 的对流换热系数， W/m^2K ；

$t_r(n)$ —— n 时刻的室温， $^{\circ}C$ ；

$t_i(n)$ 、 $t_k(n)$ ——围护结构内表面 i 和 k 在 n 时刻的温度， $^{\circ}C$ ；

$t_a(n)$ —— n 时刻的室外空气温度， $^{\circ}C$ ；

$q_1^c(n)$ ——照明和人体等在 n 时刻的对流散热量，W，等于：

$$q_1^c(n) = HG_l C_l + HG_{bs} C_b \quad (5-3)$$

$q_2^c(n)$ —— n 时刻由于吸收房间热量使水分蒸发而消耗的房间显热量, W ;

$L_a(n)$ —— n 时刻的空气渗透通风量, m^3/h ;

$(c\rho)_a$, $(c\rho)_r$ ——室外、室内的空气单位热容, $kJ/m^3 \cdot ^\circ C$;

V ——房间体积, m^3 ;

$HE_s(n)$ ——空调系统在 n 时刻的显热除热量, W ;

$\Delta\tau$ ——时间间隔, 通常取为 1 小时。

5.3 空气渗透通风量

渗风量非常难确定, 目前计算渗风量的公式非常复杂, 本文将不做相关介绍, 下面给出一夏季门窗的渗风量表格, 渗风量的确定将以此为准^[16]。

表 5-1 夏季门窗的渗风量表

一、双绞式窗户						
类 型	渗风量/ $[(m^3/min)/m^2_{\text{窗户面积}}]$					
	小型: 0.762m*1.829m			大型: 1.372m*2.438m		
	无挡风带	有挡风带	抗暴风窗框	无挡风带	有挡风带	抗暴风窗框
普通木质窗框	0.131	0.079	0.067	0.082	0.052	0.043
装配不良木质窗框	0.366	0.113	0.183	0.232	0.073	0.116
金属窗框	0.244	0.107	0.122	0.155	0.067	0.076
二、相邻墙壁上的门						
类 型	渗风量/ $[(m^3/min)/m^2_{\text{窗户面积}}]$					
	闲置	正常使用	敞开			
			无前厅	有前厅		
绕转门-正常使用	0.244	1.584	—	—		
敞开门板	—	—	365.554	274.166		
玻璃门-0.476cm 缝隙	1.371	3.046	213.240	152.314		
木门 (7.62cm*17.78)	0.305	1.980	213.240	152.314		

注: 1) 所有数据都是基于风直接吹向门窗而得到, 当门窗的风向不定时, 将以上的数值乘以

0.7, 并采用迎风侧门窗的总面积。

2) 基准风速: 3.353m/s, 对于计算风速不同于基准风速时, 将以上各数值乘以速度比。

- 3) 当门使用不频繁时, 门厅可减少大约 30%的渗风量; 当门使用频繁时, 门厅对渗风的降低作用很小。

5.4 室内空气的湿平衡

室内空气湿度的增减会造成热量的变化, 在空调负荷中, 湿度影响的是潜热负荷, 关于潜热负荷, 后文将展开研究计算, 如果忽略空气中水蒸汽的凝结以及围护结构的吸湿与散湿, 则 n 时刻室内空气的湿平衡可表示为^[7]:

内扰散湿量+空气渗透得湿量—空调送风除湿量=单位时间内房间空气中含湿量的增值

若用数学式表示, 则为:

$$W(n) + L_a(n)\rho_a[d_a(n) - d_r(n)] - DE(n) = V\rho_r \frac{d_r(n) - d_r(n-1)}{\Delta\tau} \quad (5-4)$$

式中, $W(n)$ ——室内在 n 时刻的内扰散湿量, kg/h ;

$d_a(n)$ ——室外空气在 n 时刻的含湿量, kg/kg 干空气;

$d_r(n)$ ——室内空气在 n 时刻的含湿量, kg/kg 干空气;

$DE(n)$ ——空调在 n 时刻送风所提供的除湿量, kg/h 。

房间内扰湿量中人体的散湿量计算公式较为简单, 其他的散湿量不好计算, 本次研究的小型建筑中也不考虑其他散湿量, 其中人体的散湿量计算公式为^[7]:

$$W_b \approx HG_{bl}/0.6 \quad (5-5)$$

式中, W_b ——人体的散湿量, $g/h \cdot \text{人}$;

HG_{bl} ——人体的潜热散热量, $W/\text{人}$ 。

6 小型建筑能耗计算与分析

6.1 小型建筑模型

本次研究的小型建筑是一栋两层楼高、上下各两个房间的建筑，其简单模型示意图如图 6-1 所示。

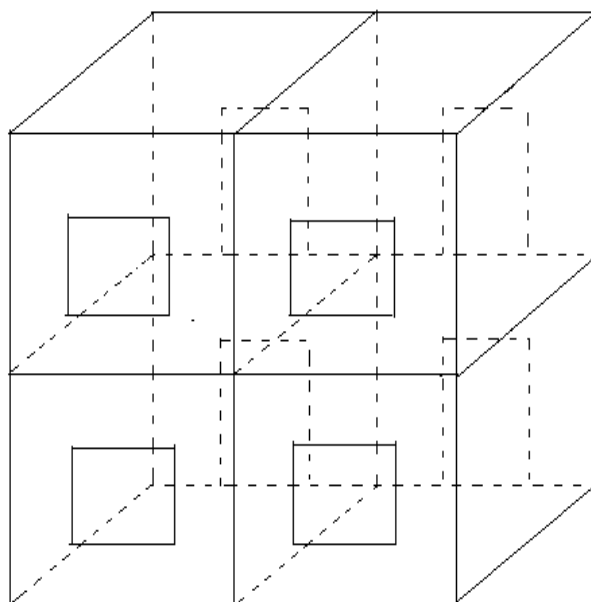


图 6-1 小型建筑模型示意图

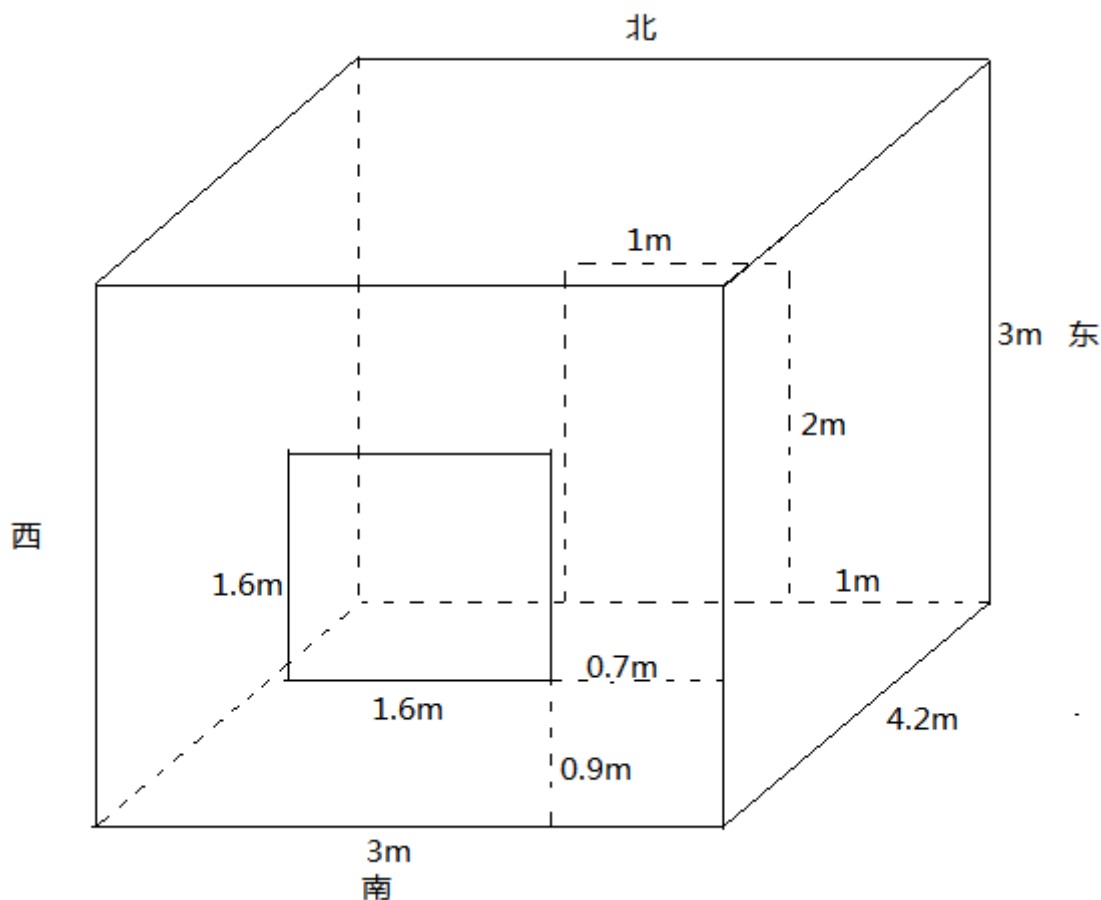


图 6-2 单个房间的模型示意图

图 6-2 给出了单个房间的模型尺寸和方位，该尺寸对小型建筑的每个房间都适用，为方便计算，给房间各个围护结构按照东墙、南墙、西墙、北墙、天花板、地板、窗户和门的顺序依次编为 1 到 8 号。

6.2 空调房间热湿负荷

在建筑能耗中，主要就是房间的热负荷与湿负荷，根据前面几章所述，可以求解空调房间的热湿负荷。

6.2.1 空调房间的显热负荷

由于空调房间的冷热负荷是使室内空气温度和湿度保持在某个基准值条件下，房间空气所需要的冷（或热）量，所以， $t_r(n)$ 为常数，并为已知值 t_r 。这样，参照第四章的公式（4-27）就可以构建图 6-2 所示房间的 8 个围护结构内表面的热平衡方程组^[7]：

$$\begin{aligned}
 & -[\alpha_1 + Z_1(0)]t_1(n) + \alpha_{1,2}^r t_2(n) + \alpha_{1,3}^r t_3(n) + \alpha_{1,4}^r t_4(n) + \alpha_{1,5}^r t_5(n) + \alpha_{1,6}^r t_6(n) + \alpha_{1,7}^r t_7(n) + \alpha_{1,8}^r t_8(n) \\
 & = -\sum_{j=0}^{N_s} Y_1(j)t_{o1}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_1(j)t_1(n-j) - q_1^r(n) - \alpha_1^c t_r
 \end{aligned} \tag{6-1}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{2,1}^r t_1(n) - [\alpha_2 + Z_2(0)]t_2(n) + \alpha_{2,3}^r t_3(n) + \alpha_{2,4}^r t_4(n) + \alpha_{2,5}^r t_5(n) + \alpha_{2,6}^r t_6(n) + \alpha_{2,7}^r t_7(n) + \alpha_{2,8}^r t_8(n) \\
 & = -\sum_{j=0}^{N_s} Y_2(j)t_{o2}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_2(j)t_2(n-j) - q_2^r(n) - \alpha_2^c t_r
 \end{aligned} \tag{6-2}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{3,1}^r t_1(n) + \alpha_{3,2}^r t_2(n) - [\alpha_3 + Z_3(0)]t_3(n) + \alpha_{3,4}^r t_4(n) + \alpha_{3,5}^r t_5(n) + \alpha_{3,6}^r t_6(n) + \alpha_{3,7}^r t_7(n) + \alpha_{3,8}^r t_8(n) \\
 & = -\sum_{j=0}^{N_s} Y_3(j)t_{o3}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_3(j)t_3(n-j) - q_3^r(n) - \alpha_3^c t_r
 \end{aligned} \tag{6-3}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{4,1}^r t_1(n) + \alpha_{4,2}^r t_2(n) + \alpha_{4,3}^r t_3(n) - [\alpha_4 + Z_4(0)]t_4(n) + \alpha_{4,5}^r t_5(n) + \alpha_{4,6}^r t_6(n) + \alpha_{4,7}^r t_7(n) + \alpha_{4,8}^r t_8(n) \\
 & = -\sum_{j=0}^{N_s} Y_4(j)t_{o4}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_4(j)t_4(n-j) - q_4^r(n) - \alpha_4^c t_r
 \end{aligned} \tag{6-4}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{5,1}^r t_1(n) + \alpha_{5,2}^r t_2(n) + \alpha_{5,3}^r t_3(n) + \alpha_{5,4}^r t_4(n) - [\alpha_5 + Z_5(0)]t_5(n) + \alpha_{5,6}^r t_6(n) + \alpha_{5,7}^r t_7(n) + \alpha_{5,8}^r t_8(n) \\
 & = -\sum_{j=0}^{N_s} Y_5(j)t_{o5}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_5(j)t_5(n-j) - q_5^r(n) - \alpha_5^c t_r
 \end{aligned} \tag{6-5}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{6,1}^r t_1(n) + \alpha_{6,2}^r t_2(n) + \alpha_{6,3}^r t_3(n) + \alpha_{6,4}^r t_4(n) + \alpha_{6,5}^r t_5(n) - [\alpha_6 + Z_6(0)]t_6(n) + \alpha_{6,7}^r t_7(n) + \alpha_{6,8}^r t_8(n) \\
 & = -\sum_{j=0}^{N_s} Y_6(j)t_{o6}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_6(j)t_6(n-j) - q_6^r(n) - \alpha_6^c t_r
 \end{aligned} \tag{6-6}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{7,1}^r t_1(n) + \alpha_{7,2}^r t_2(n) + \alpha_{7,3}^r t_3(n) + \alpha_{7,4}^r t_4(n) + \alpha_{7,5}^r t_5(n) + \alpha_{7,6}^r t_6(n) - \left[\alpha_7 + \frac{K_7 \alpha_7}{\alpha_7 - K_7} \right] t_7(n) + \alpha_{7,8}^r t_8(n) \\
 & = -\frac{K_7 \alpha_7}{\alpha_7 - K_7} t_{o7}(n) - q_7^r(n) - \alpha_7^c t_r
 \end{aligned} \tag{6-7}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{8,1}^r t_1(n) + \alpha_{8,2}^r t_2(n) + \alpha_{8,3}^r t_3(n) + \alpha_{8,4}^r t_4(n) + \alpha_{8,5}^r t_5(n) + \alpha_{8,6}^r t_6(n) + \alpha_{8,7}^r t_7(n) - \left[\alpha_8 + \frac{K_8 \alpha_8}{\alpha_8 - K_8} \right] t_8(n) \\
 & = -\frac{K_8 \alpha_8}{\alpha_8 - K_8} t_{o8}(n) - q_8^r(n) - \alpha_8^c t_r
 \end{aligned}$$

(6-8)

用矩阵的形式表示上面的 8 个方程组:

$$AT_i(n) = B \quad (6-9)$$

式中, $T_i(n)$ ——围护结构内表面在 n 时刻的温度向量;

$$T_i(n) = [t_1(n), t_2(n), t_3(n), t_4(n), t_5(n), t_6(n), t_7(n), t_8(n)]^T \quad (6-10)$$

A ——系数矩阵, 与围护结构传热及其表面换热系数有关;

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha_1^Z & \alpha_{1,2}^r & \alpha_{1,3}^r & \alpha_{1,4}^r & \alpha_{1,5}^r & \alpha_{1,6}^r & \alpha_{1,7}^r & \alpha_{1,8}^r \\ \alpha_{2,1}^r & -\alpha_2^Z & \alpha_{2,3}^r & \alpha_{2,4}^r & \alpha_{2,5}^r & \alpha_{2,6}^r & \alpha_{2,7}^r & \alpha_{2,8}^r \\ \alpha_{3,1}^r & \alpha_{3,2}^r & -\alpha_3^Z & \alpha_{3,4}^r & \alpha_{3,5}^r & \alpha_{3,6}^r & \alpha_{3,7}^r & \alpha_{3,8}^r \\ \alpha_{4,1}^r & \alpha_{4,2}^r & \alpha_{4,3}^r & -\alpha_4^Z & \alpha_{4,5}^r & \alpha_{4,6}^r & \alpha_{4,7}^r & \alpha_{4,8}^r \\ \alpha_{5,1}^r & \alpha_{5,2}^r & \alpha_{5,3}^r & \alpha_{5,4}^r & -\alpha_5^Z & \alpha_{5,6}^r & \alpha_{5,7}^r & \alpha_{5,8}^r \\ \alpha_{6,1}^r & \alpha_{6,2}^r & \alpha_{6,3}^r & \alpha_{6,4}^r & \alpha_{6,5}^r & -\alpha_6^Z & \alpha_{6,7}^r & \alpha_{6,8}^r \\ \alpha_{7,1}^r & \alpha_{7,2}^r & \alpha_{7,3}^r & \alpha_{7,4}^r & \alpha_{7,5}^r & \alpha_{7,6}^r & -\alpha_7^Z & \alpha_{7,8}^r \\ \alpha_{8,1}^r & \alpha_{8,2}^r & \alpha_{8,3}^r & \alpha_{8,4}^r & \alpha_{8,5}^r & \alpha_{8,6}^r & \alpha_{8,7}^r & -\alpha_8^Z \end{bmatrix} \quad (6-11)$$

矩阵中, 1 到 6 行中的 $\alpha_i^Z = \alpha_i + Z_i(0)$; 7 到 8 行中的 $\alpha_i^Z = \alpha_i + K_i\alpha_i/(\alpha_i - K_i)$; i 表示第 i 面围护结构。

B ——常数矩阵, 除了与围护结构的热特性有关之外, 还取决于 n 时刻围护结构的辐射得热量、室内空气温度、 n 时刻和 n 时刻以前围护结构的外表面温度 (或综合温度) 以及 n 时刻以前围护结构的内表面温度, 即决定于内外扰量。

$$B = \begin{bmatrix} -\sum_{j=0}^{N_s} Y_1(j)t_{o1}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_1(j)t_1(n-j) - q_1^r(n) - \alpha_1^c t_r \\ -\sum_{j=0}^{N_s} Y_2(j)t_{o2}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_2(j)t_2(n-j) - q_2^r(n) - \alpha_2^c t_r \\ -\sum_{j=0}^{N_s} Y_3(j)t_{o3}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_3(j)t_3(n-j) - q_3^r(n) - \alpha_3^c t_r \\ -\sum_{j=0}^{N_s} Y_4(j)t_{o4}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_4(j)t_4(n-j) - q_4^r(n) - \alpha_4^c t_r \\ -\sum_{j=0}^{N_s} Y_5(j)t_{o5}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_5(j)t_5(n-j) - q_5^r(n) - \alpha_5^c t_r \\ -\sum_{j=0}^{N_s} Y_6(j)t_{o6}(n-j) + \sum_{j=1}^{N_s} Z_6(j)t_6(n-j) - q_6^r(n) - \alpha_6^c t_r \\ -\frac{K_7\alpha_7}{\alpha_7 - K_7}t_{o7}(n) - q_7^r(n) - \alpha_7^c t_r \\ -\frac{K_8\alpha_8}{\alpha_8 - K_8}t_{o8}(n) - q_8^r(n) - \alpha_8^c t_r \end{bmatrix} \quad (6-12)$$

求解式 (6-9), 就可求得 n 时刻各个围护结构的内表面温度 $t_i(n)$

$$T_i(n) = A^{-1}B \quad (6-13)$$

这样, 利用第五章的室内空气热平衡方程式 (5-2), 就可以求出 n 时刻空调房间的显热负荷 $CL_s(n)$, 等于:

$$CL_s(n) = HE_s(n) = \sum_{k=1}^{N_i} S_k \alpha_k^c [t_k(n) - t_r] + q_1^c(n) - q_2^c(n) + \frac{L_a(n)(c\rho)_a}{3.6} [t_a(n) - t_r] \quad (6-14)$$

式中, N_i 在此的值为 8, 因为房间有 8 面围护结构。

6.2.2 空调房间的湿负荷

如果房间温度与湿度都保持不变, 则利用第五章的湿平衡方程 (5-4) 可以求得 n 时刻房间空调的湿负荷 $ML(n)$ 为^[7]:

$$ML(n) = DE(n) = W(n) + L_a(n)\rho_a[d_a(n) - d_r] \quad \text{kg/h} \quad (6-15)$$

求得湿负荷 $ML(n)$ 后利用下式就可得到 n 时刻空调房间的潜热负荷 $CL_l(n)$:

$$CL_l(n) = ML(n) \times h'' / 3.6 \quad \text{W} \quad (6-16)$$

式中, h'' —— 水蒸气的焓值, 约等于 2510kJ/kg 。

6.2.3 空调房间的总热负荷

显热负荷与潜热负荷相加得到的就是空调房间的总热负荷, 即:

$$CL(n) = CL_s(n) + CL_l(n) \quad \text{W} \quad (6-17)$$

6.3 空调房间负荷的计算与分析

在第二章的时候, 运用 matlab 编程计算求得了太阳辐射、综合温度等参数, 第三章同样利用 matlab 编程计算得到了反应系数, 利用二三章所得结合四、五、六章的数学模型便可以用 matlab 编写空调房间负荷的计算程序。

6.3.1 程序结构框图

由于每个房间的室温都是设定值 t_r , 所以在计算房间围护结构内表面温度和空调负荷时都可以对小型建筑的每个房间单独进行, 因此, 计算程序将以单个房间为例进行编写。下面的框图将展示计算程序的结构特性。

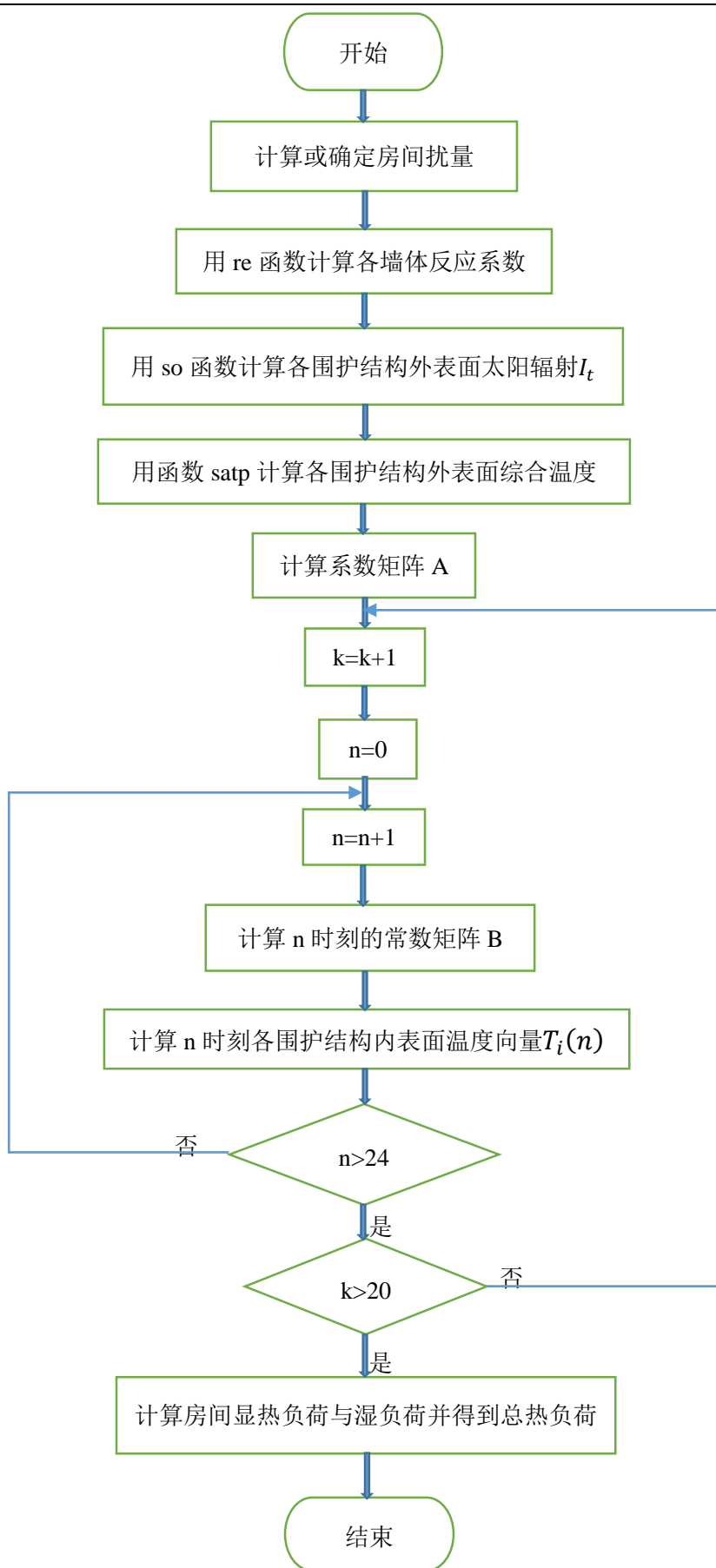


图 6-3 房间负荷计算程序结构框图

框图说明：由于围护结构内表面初始各时刻温度为零，而计算 n 时刻围护结构内表面温度时需要知道 n 时刻以前很长一段时间的溫度，因此，将一天 24 小时看成是一个循环，对一天的壁体温度重复计算多次，前一次计算的结果为后一次使用，这样最终计算结果会收敛于一个定值。框图中 k 的循环作用就是如此，20 次的循环次数已经足够精确了， k 初值为 0。

6.3.2 程序输入参数确定

计算房间热湿负荷，首先需要确定计算所需基本参数，本次计算的基本参数取值如下^[17]：

1) 地理位置及气象参数

建筑所在地：武汉；

经度：东经 114°20'；

纬度：北纬 30°37'；

时区：东八区，北京时间

日期：7 月 21 日；

建筑朝向：如图 6-2 所示；

室外计算日平均温度：32℃；

室外干球温度：35.2℃；

室外相对湿度：80%；

建筑几何尺寸：单房间尺寸如图 6-2 所示；

围护结构外表面的复合对流换热系数：22W/(m²*K)；

板壁围护结构外表面的太阳辐射吸收率：0.73；

窗户（玻璃）外表面的太阳辐射吸收率：0.131；

太阳辐射：用函数 so 计算，参考第二章计算结果。

2) 围护结构参数

墙体材料：钢筋混凝土（含内抹灰）；

墙体物理参数：密度 $\rho = 2500\text{kg/m}^3$ ，导热系数 $\lambda = 1.74\text{W/m} \cdot \text{K}$ ，比热 $C = 920\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ，厚度 $h=0.37\text{m}$ ；

内抹灰物理参数：密度 $\rho = 1600\text{kg/m}^3$ ，导热系数 $\lambda = 0.7\text{W/m} \cdot \text{K}$ ，比热 $C = 880\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ，厚度 $h=0.02\text{m}$ ；

窗户有效面积：85%；

玻璃特性：3mm 厚标准玻璃；

窗户遮阳系数：无内外遮阳，遮阳系数为 0.986；

各个围护结构内表面的对流换热系数：天花板与地板为 $2.3\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ，其它围护结构统一为 $1.8\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

3) 内部扰量

室温：26℃；

室内相对湿度：60%；

内扰散湿量：只考虑人员散湿，计算公式参见第五章式 (5-5)；

灯光：日光灯，功率 80W；

内部热源参数具体参见表 6-1；

表 6-1 内部热源 24 小时系数

时刻	灯光使用系数	人员数量	时刻	灯光使用系数	人员数量
1	0	1	13	0	0
2	0	1	14	0	0
3	0	1	15	0	0
4	0	1	16	0	0
5	0	1	17	0	1
6	0	1	18	0	1
7	0	1	19	1	1
8	0	0	20	1	1
9	0	0	21	1	1
10	0	0	22	1	1
11	0	0	23	0	1
12	0	0	24	0	1

渗透通风：为计算方便，设定 24 小时的渗风通风量均为 $10\text{m}^3/\text{h}$ 。

6.3.3 单房间建筑计算结果与分析

所谓单房间建筑即只有一个房间的建筑，单房间建筑所有围护结构都暴露在室外环境中。

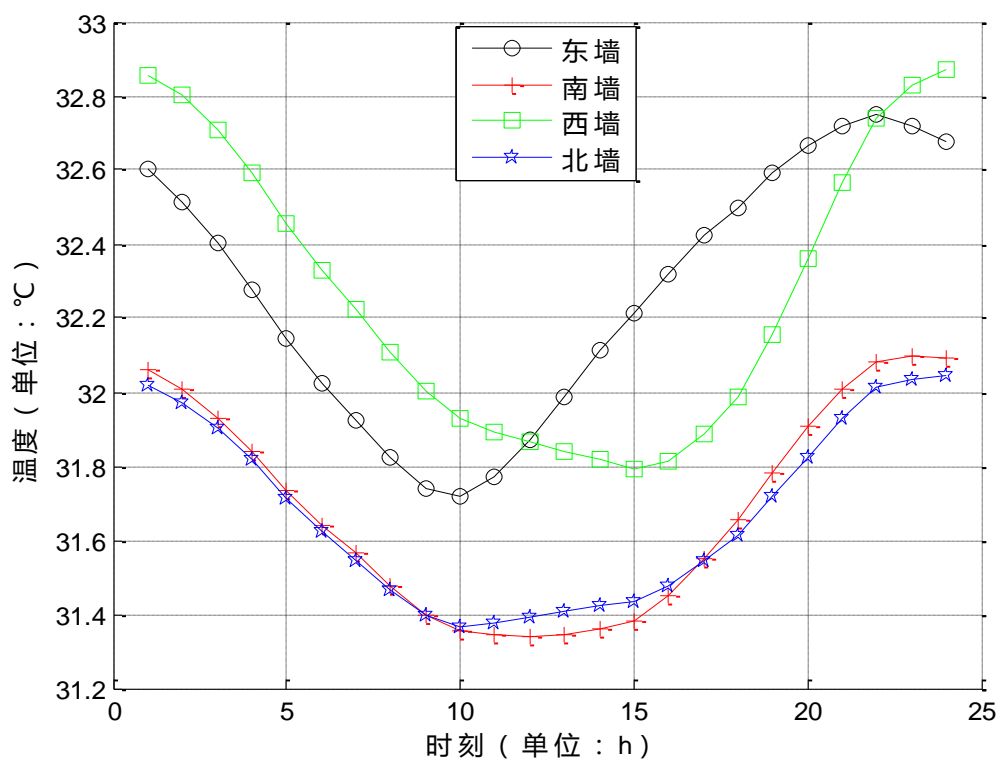


图 6-4 围护结构内表面温度（东西南北墙）

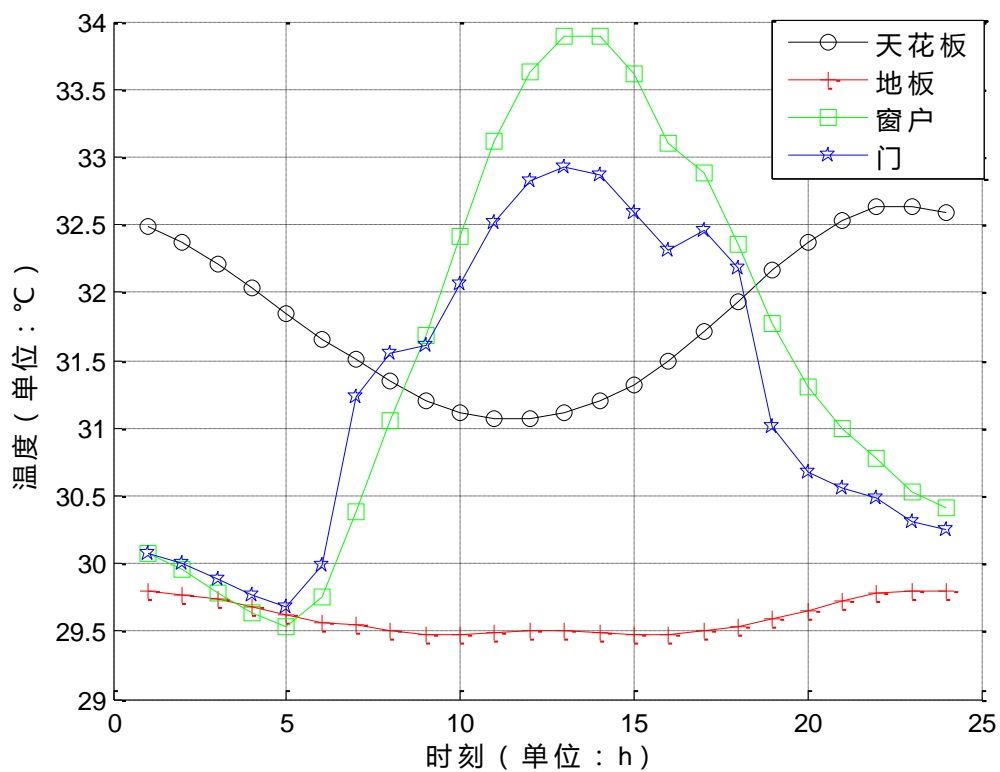


图 6-5 围护结构内表面温度（天花板、地板、窗、门）

图 6-4 与图 6-5 展示了单房间建筑围护结构内表面温度的计算结果，图中信息丰富，呈现出以下几个主要特点：

- 1、围护结构内表面的温度在 24 小时之内都比室温 26°C 要高；
- 2、东墙与西墙的温度总体上比南墙和北墙温度要高；
- 3、东墙与西墙温度变化曲线形状类似，但变化时间点不同，东墙最低温度出现在上午 10 点左右，而西墙最低温度出现在下午 15 点左右；
- 4、总体上，地板温度最低；
- 5、天花板温度曲线同南墙北墙温度曲线类似，但天花板温度曲线变化范围更大；
- 6、窗户与门的温度变化曲线与其他围护结构的温度变化曲线都不相同，而且数值变化范围更大，其与第二章图 2-11 中的室外温度变化曲线类似。

对于图 6-4 与图 6-5 呈现出来的以上几个特点，可以作出如下解释：

- 1、 26°C 的室温比任意时刻的室外空气温度都要低，而根据传热学知识，热量由温度高处传向温度低处，所以这是显而易见的，此外，围护结构在白天吸收到的大量的太阳辐射热会使得墙体内表面温度与室温的差值变大；
- 2、由第二章可以得知，东墙与西墙受到的太阳辐射要明显强于南墙和北墙，从而东墙与西墙吸收的热量就比南墙与北墙多，再者，由围护结构传热公式可知，综合温度是影响围护结构内表面温度的直接外扰，而东墙与西墙的综合温度总体上要比南墙与北墙要高；
- 3、由第二章的东墙与西墙太阳辐射变化图与综合温度变化图可以得知，东墙曲线数值最高点在上午，而西墙则出现在下午，因此两者内表面温度最低值的到达时刻会有所不同；
- 4、地板全天没有直接受到太阳辐射作用，因此，相比于其他围护结构，温度自然就低了；
- 5、天花板受到的太阳辐射是最强的，其综合温度变化幅度也是最大的；
- 6、本文在处理门窗传热时将门窗视为无蓄热性的围护结构，这导致门窗内表面温度变化与室外高度一致，而其他围护结构因为考虑了蓄热性，所以它们对外界环境变化的响应具有一定的延迟，而且减小了变化幅度。

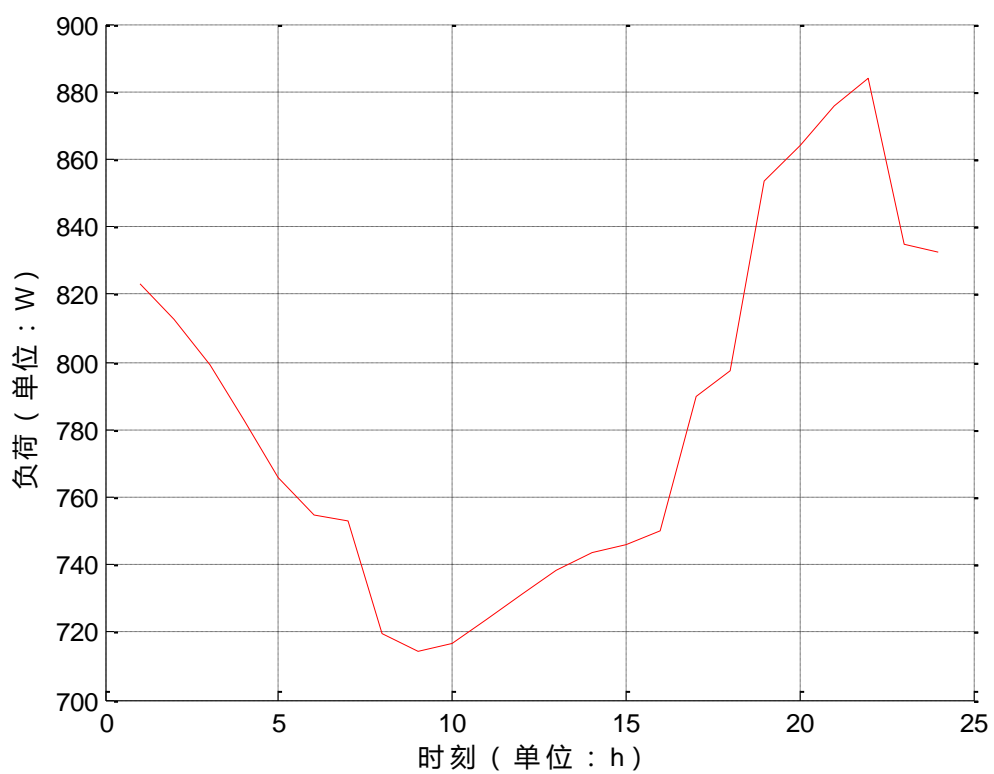


图 6-6 房间空调显热负荷

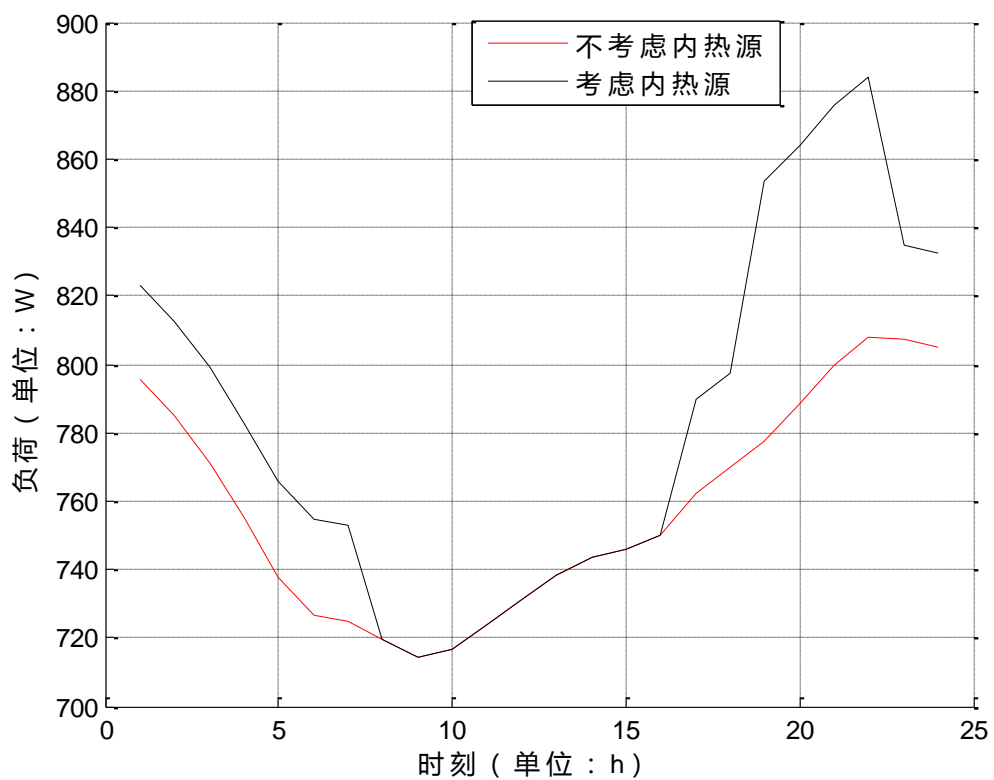


图 6-7 考虑内热源与否时的显热负荷

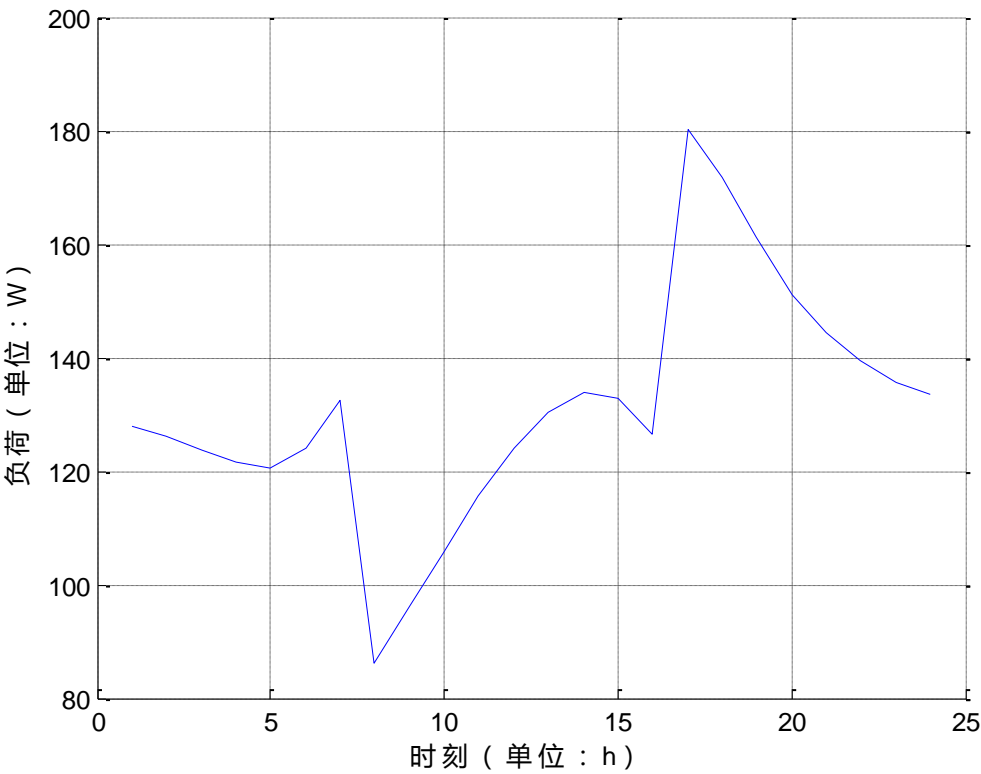


图 6-8 房间空调潜热负荷(湿负荷)

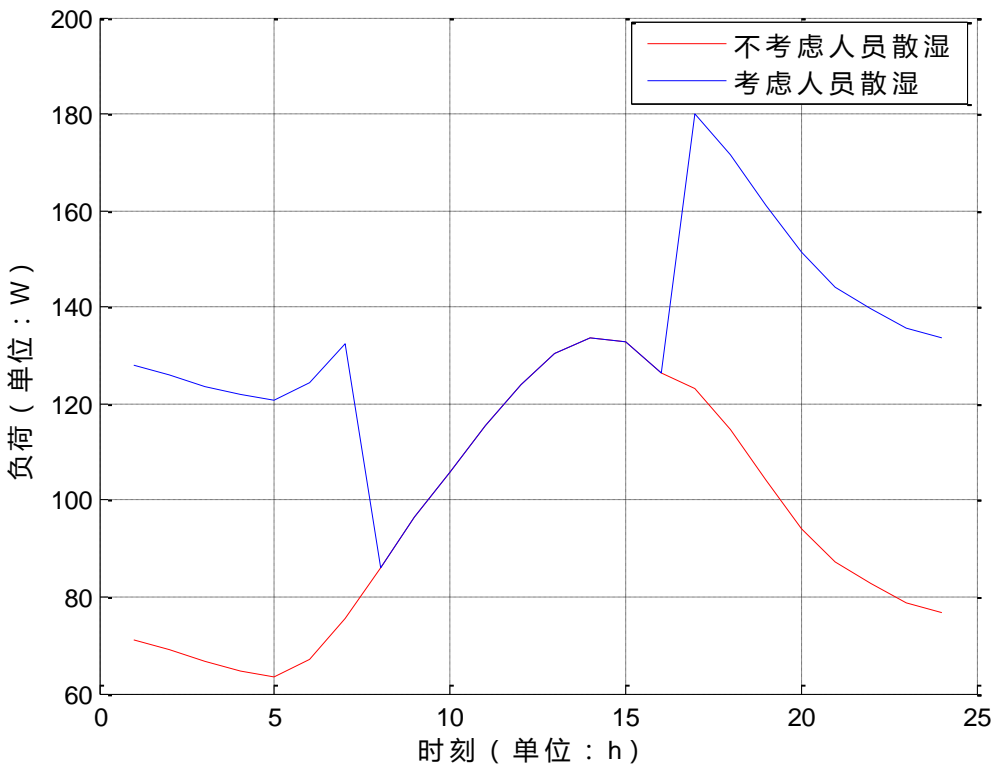


图 6-9 考虑人员散湿与否时的潜热负荷

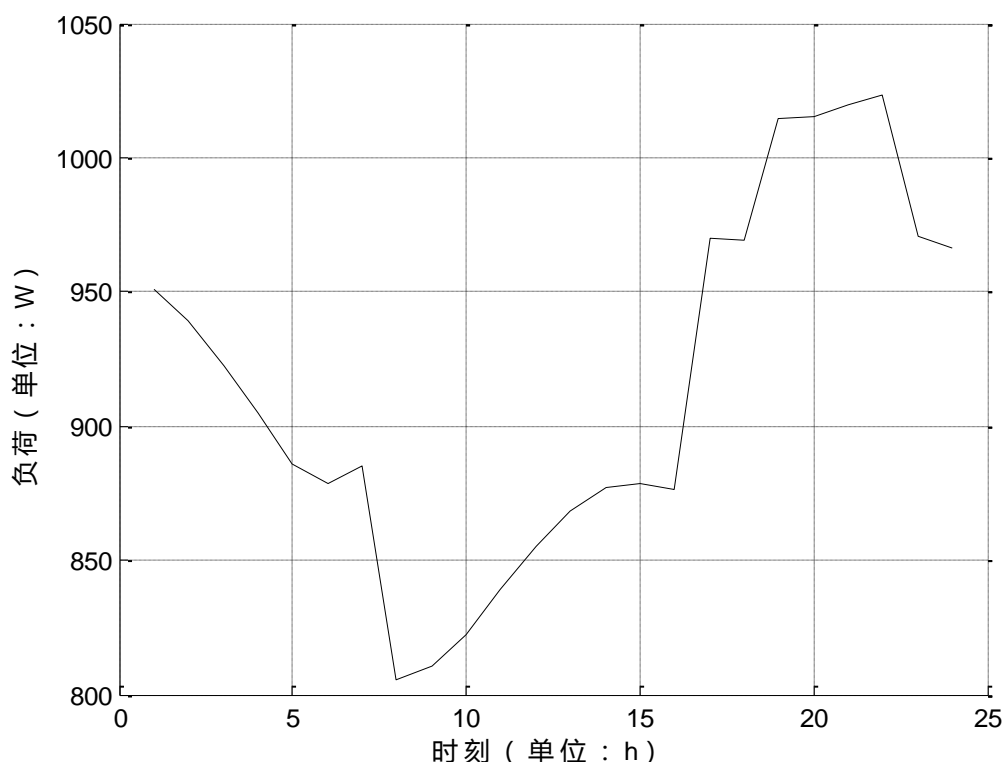


图 6-10 房间空调总热负荷

由房间显热负荷的计算公式(6-14)中可知,显热负荷的变化主要取决于围护结构内表面温度变化及内热源变化(渗透通风影响小),图6-6与图6-7所展示的结果与公式一致,在无内热源的情况下,显热负荷变化曲线基本符合墙体温度变化曲线;在有内热源后,由于内热源在时间上变化非均匀,从而显热负荷变化曲线在有内热源的时间段变化非均匀,曲线不在平滑。

同样,由房间潜热负荷(湿负荷)的计算公式(6-15)和(6-16)中可知,潜热负荷的变化主要取决于内扰散湿量与空气渗透通风得湿量,图6-8与图6-9所展示的结果与公式一致,在不考虑人员散湿的情况下,潜热负荷变化曲线光滑平稳,同室外空气温度曲线相似(由于室外空气含湿量同温度相关);在加入人员散湿后,由于房间内不是一直有人,从而在人离开房间和进入房间的时间段,潜热负荷变化曲线有个突变。

6.3.4 小型建筑计算结果与分析

对单个房间建筑计算分析之后,再对图6-1所示小型建筑进行计算分析,并与单房间的结果对比,看看有何不同之处。四个房间参数同单个房间建筑的参数相同。

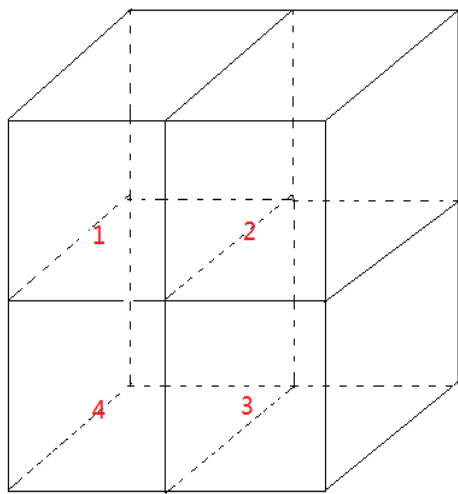


图 6-11 小型建筑房间编号

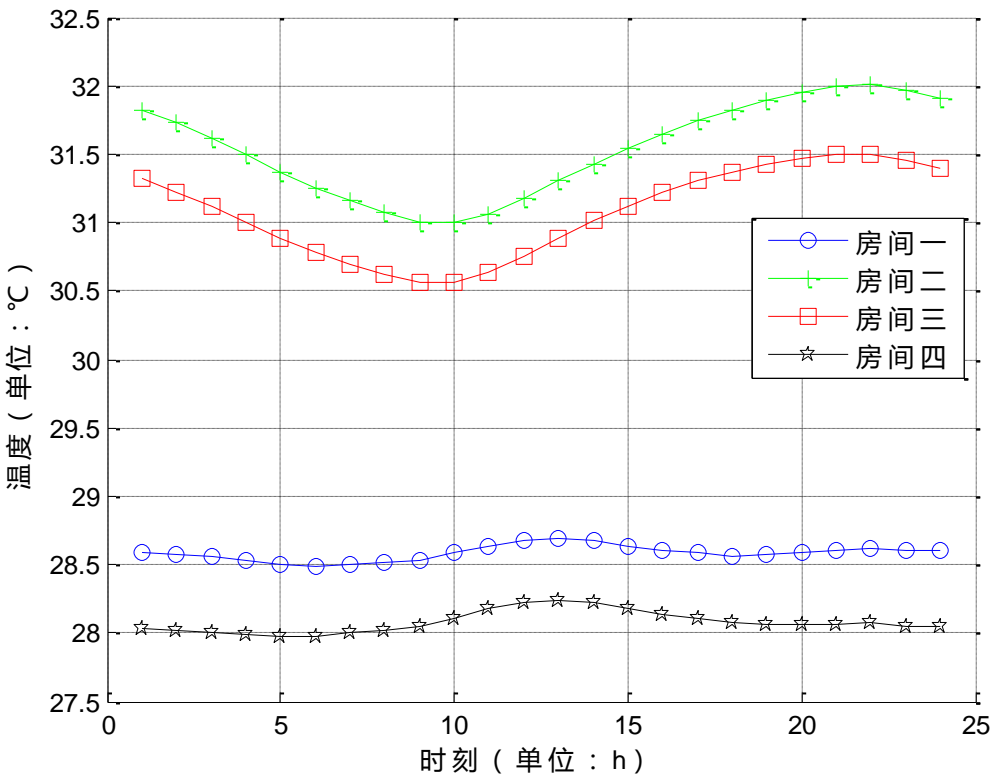


图 6-12 小型建筑各房间东墙的内表面温度

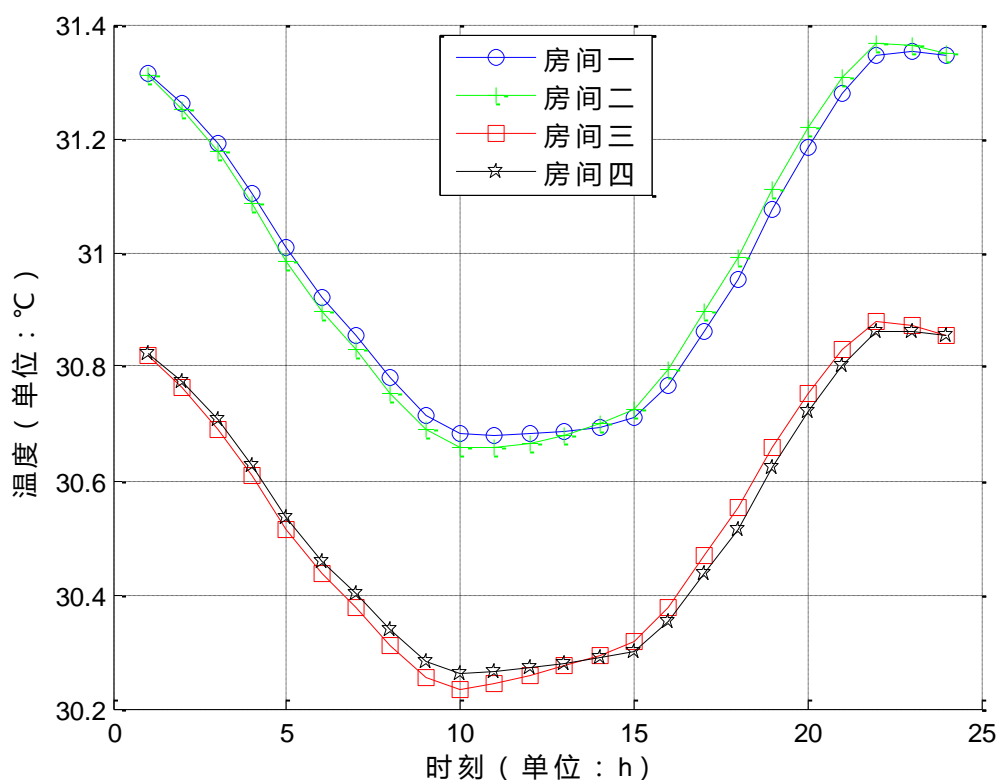


图 6-13 小型建筑各房间南墙的内表面温度

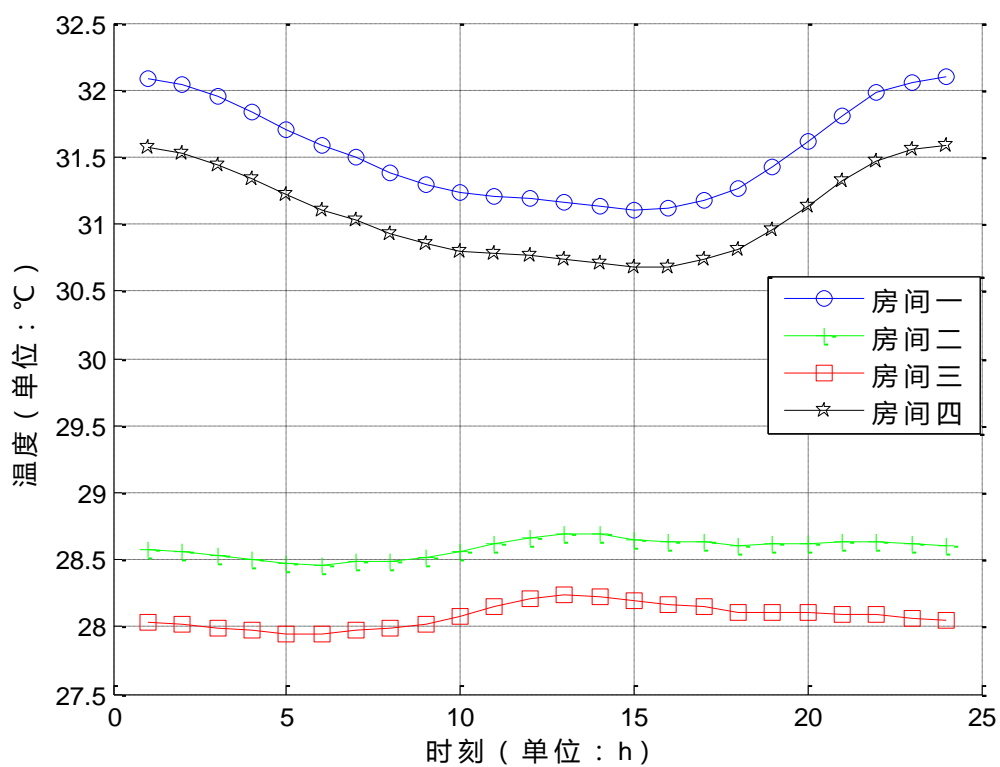


图 6-14 小型建筑各房间西墙的内表面温度

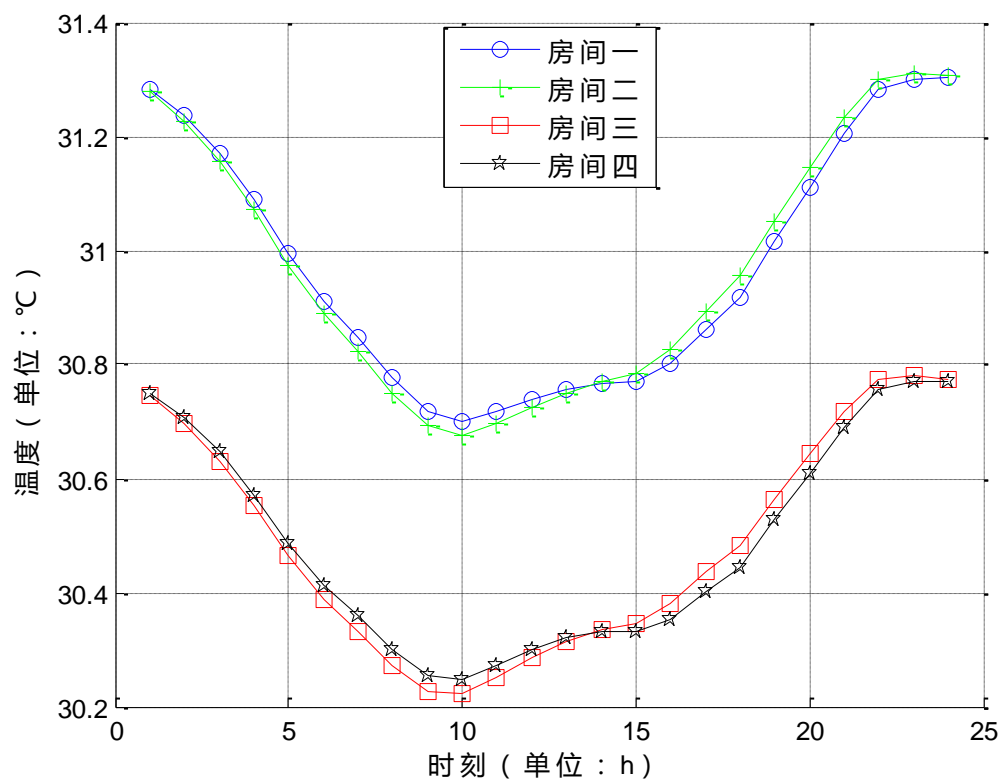


图 6-15 小型建筑各房间北墙的内表面温度

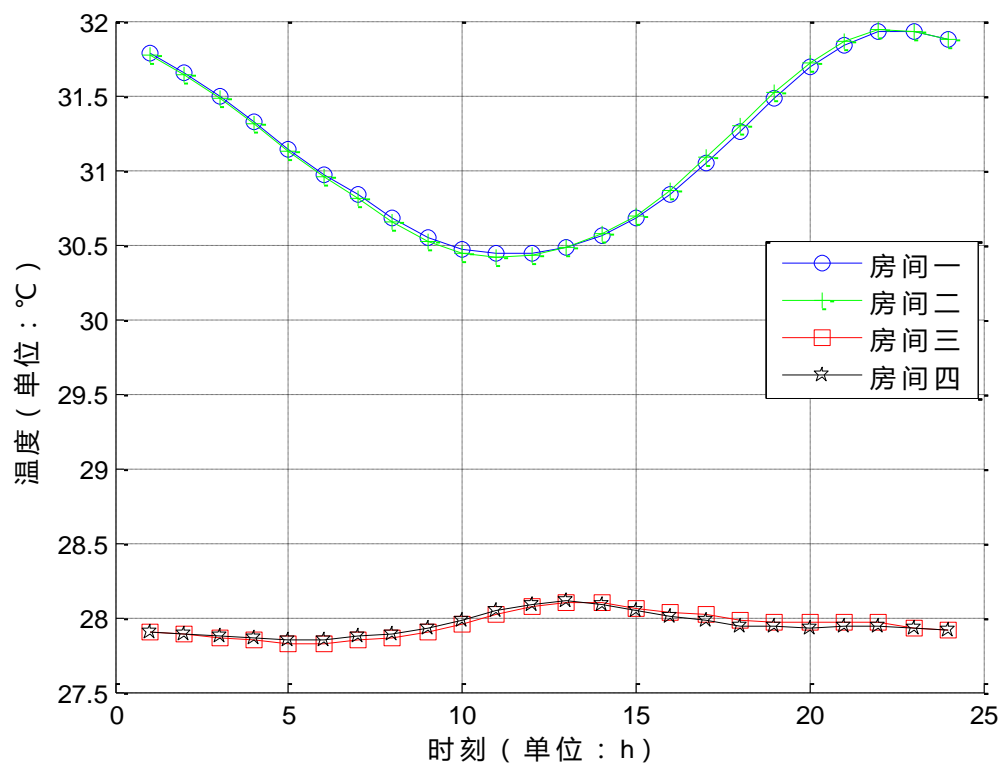


图 6-16 小型建筑各房间天花板的内表面温度

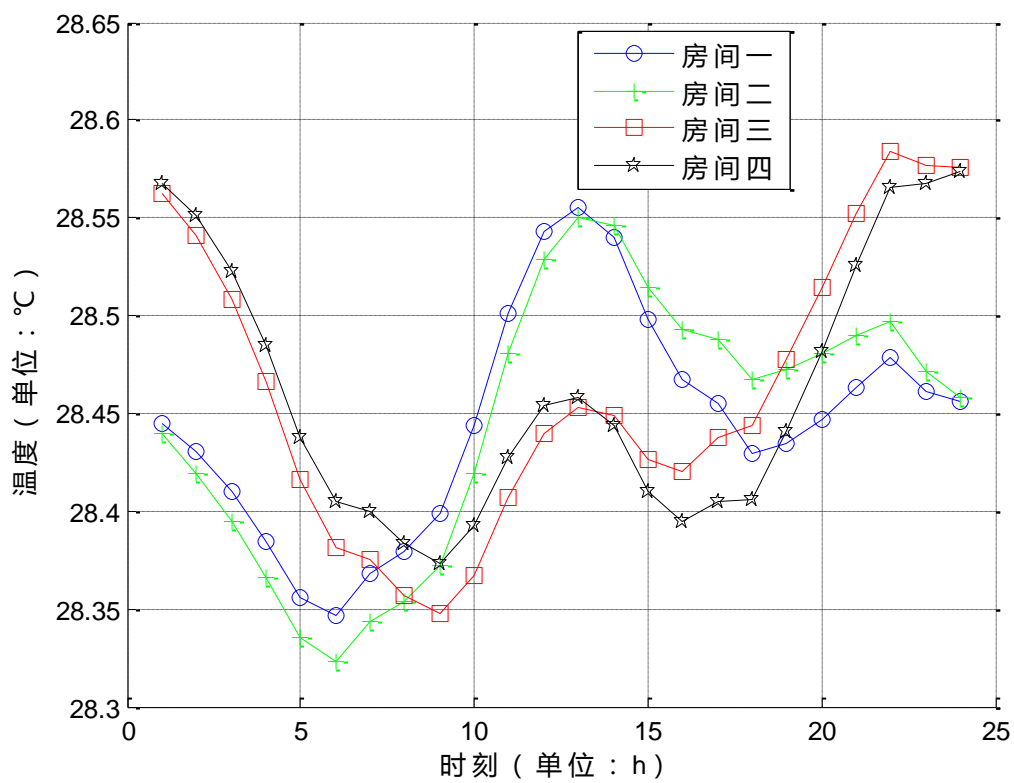


图 6-17 小型建筑各房间地板的内表面温度

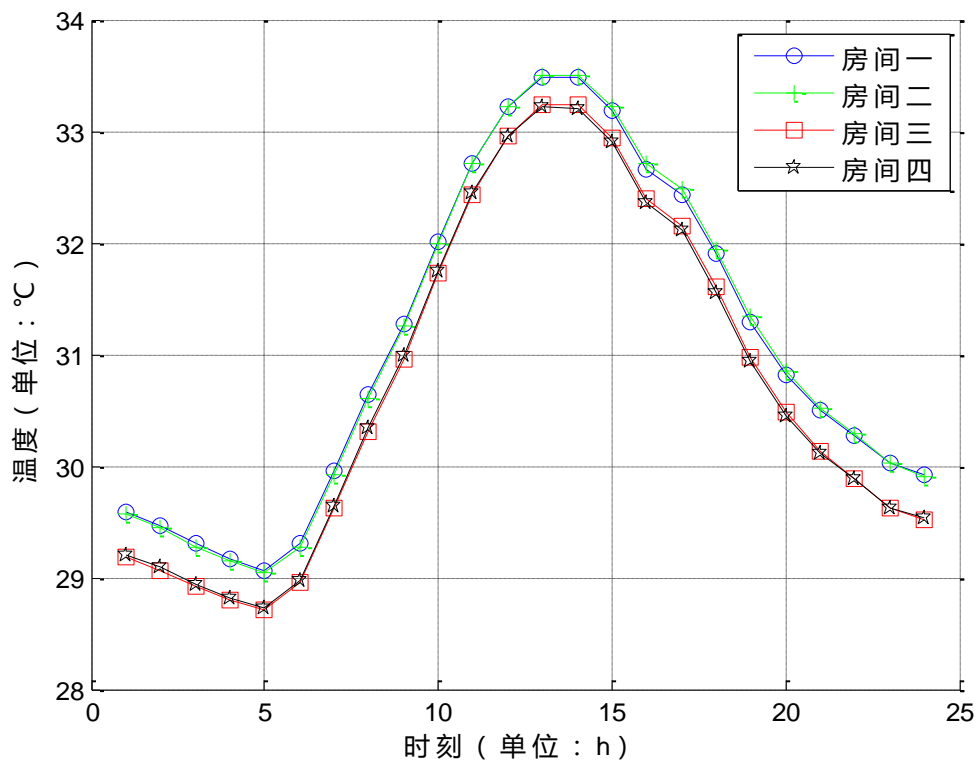


图 6-18 小型建筑各房间窗户的内表面温度

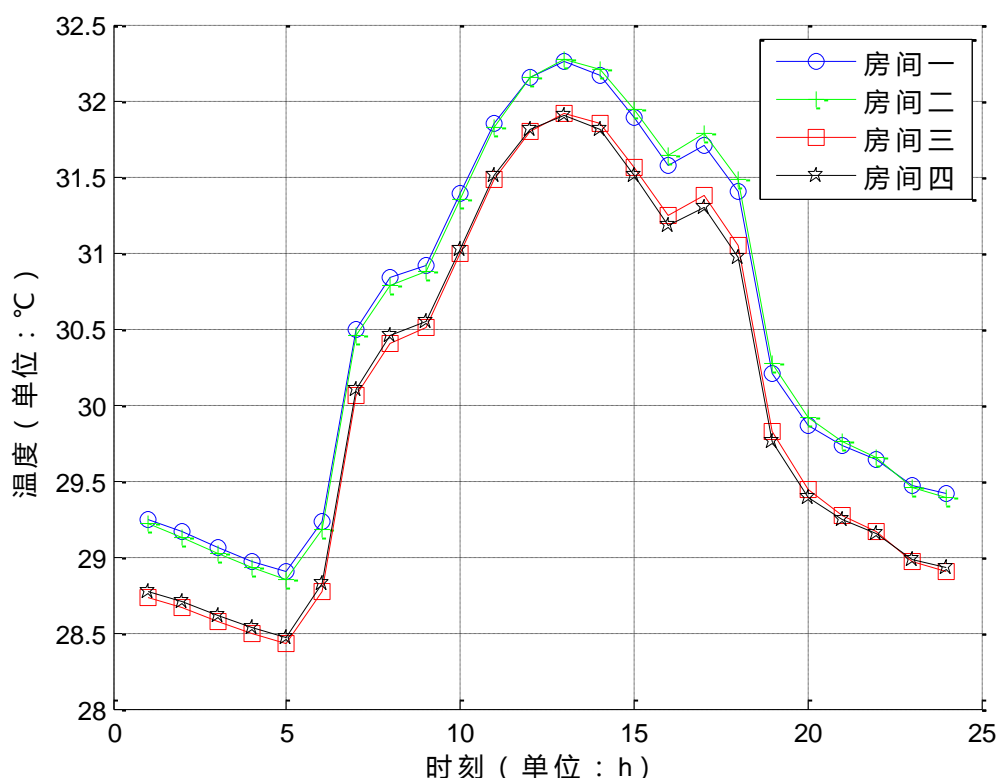


图 6-19 小型建筑各房间门的内表面温度

从图 6-12——图 6-19 中可以看出，与外界环境接触的墙体，其内表面温度变化与单房间建筑同一位置的墙体内表面温度变化曲线一致，只是整体温度值会低那么一些；与其他房间相连的墙体，其内表面温度变化较为平缓，数值上也很低，只比室温高 2℃多一点；处于同样方位的墙体，内表面温度在上下有区别，左右基本无区别，也就是说小型建筑二楼墙体内表面温度普遍比一楼墙体内表面温度高，而同一楼层无明显差别。

图 6-12 到 6-19 中所展现的特性，都可以用太阳辐射与综合温度来解释，具体解释在单房间建筑中已有类似表达，这里不在赘述，可以说，小型建筑所受太阳辐射的特点决定了其围护结构内表面的温度变化。

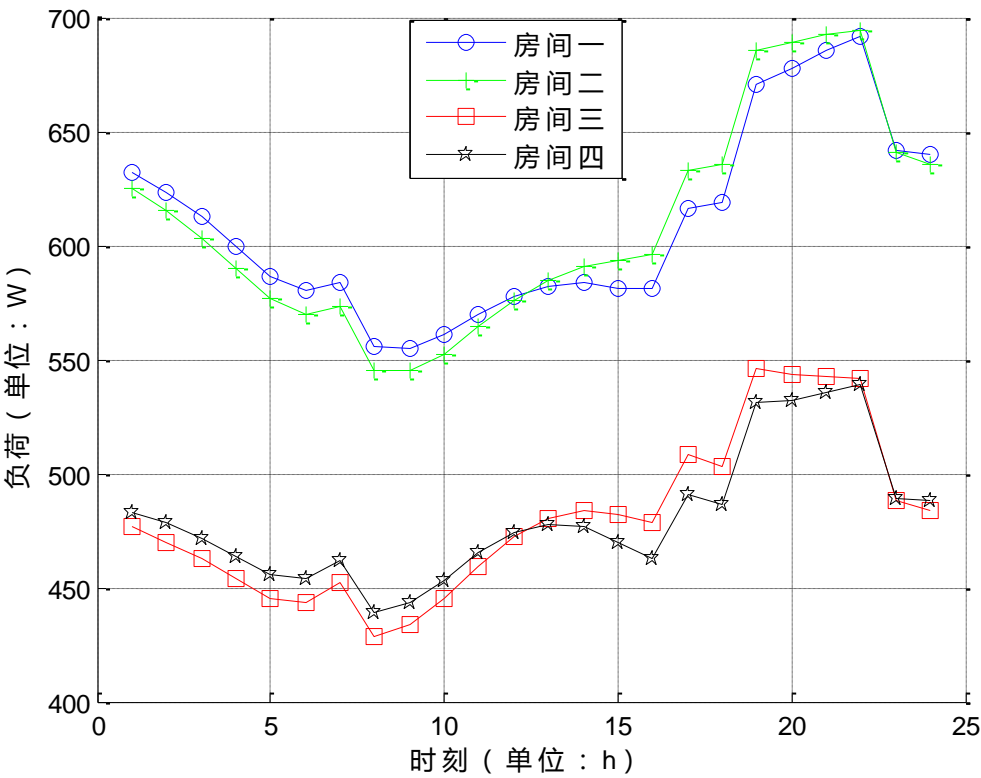


图 6-20 小型建筑四个房间的显热负荷

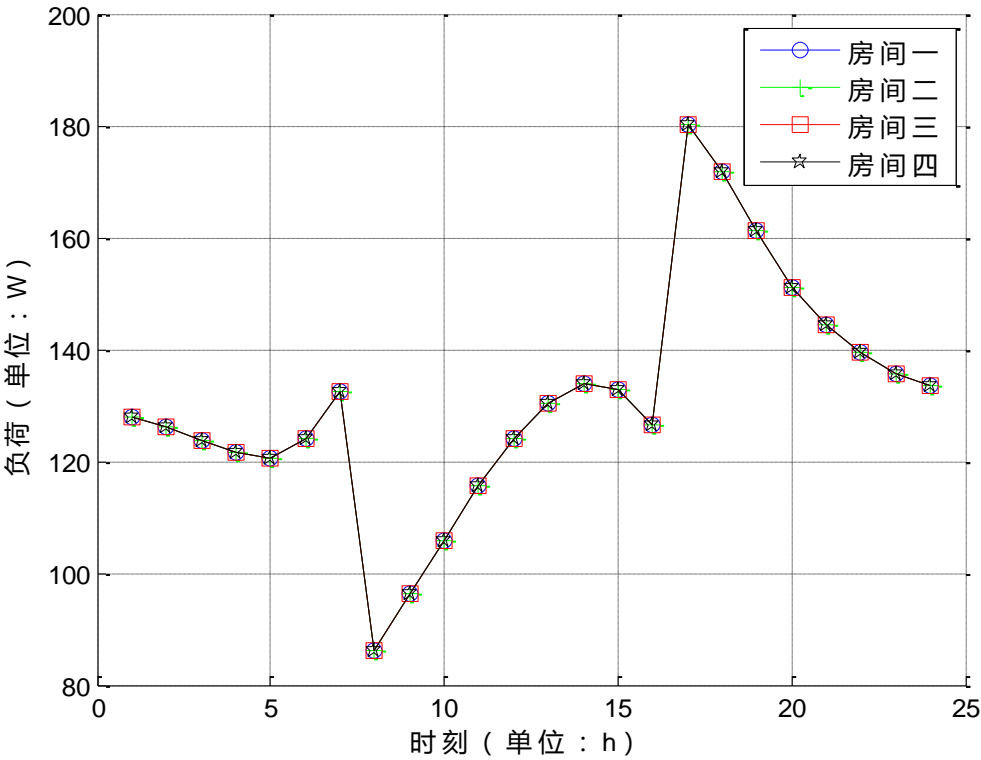


图 6-21 小型建筑四个房间潜热负荷

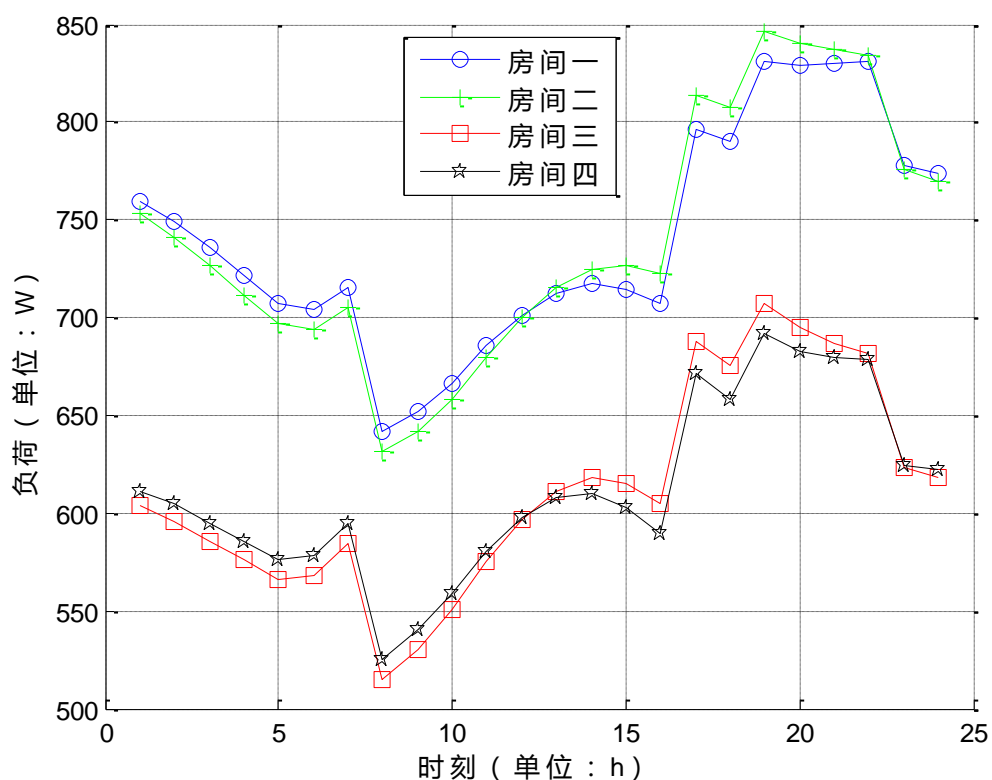


图 6-22 小型建筑四个房间总热负荷

从图 6-20、图 6-21 与图 6-22 可以看出, 小型建筑的四个房间显热负荷的变化曲线与单房间建筑都基本一致, 只是大小更小, 二楼房间的显热负荷比一楼房间的要大一些, 同一楼层无太大区别; 小型建筑的四个房间的潜热负荷同单房间的潜热负荷一模一样。

小型建筑热负荷的变化特性与围护结构温度变化相关, 上图展示的结果符合它的围护结构温度特性。

7 节能温控方案

在完成对小型建筑热平衡模型的建立以及相关的编程计算后,研究者将研究某些参数对建筑能耗的影响,据此,在满足生活需求及人体舒适的条件下,找出最佳的节能温控方案。

7.1 室内温度对建筑能耗的影响

夏季室内温度在 $22^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 时,人体舒适度可以满足^[18],因此本次研究温度对建筑能耗的影响将局限于此温度区间。

由于人在白天上班,晚上才会回到建筑房间内,所以在白天时不开空调,晚上才开空调,即晚上室温为定值,其具体信息为:8:00-17:00 的时间段,温度非定值,其余时刻为 t_r 。

为方便研究计算,以单房间建筑为例,其中除上述参数外,其余各参数与第六章计算参数一样。

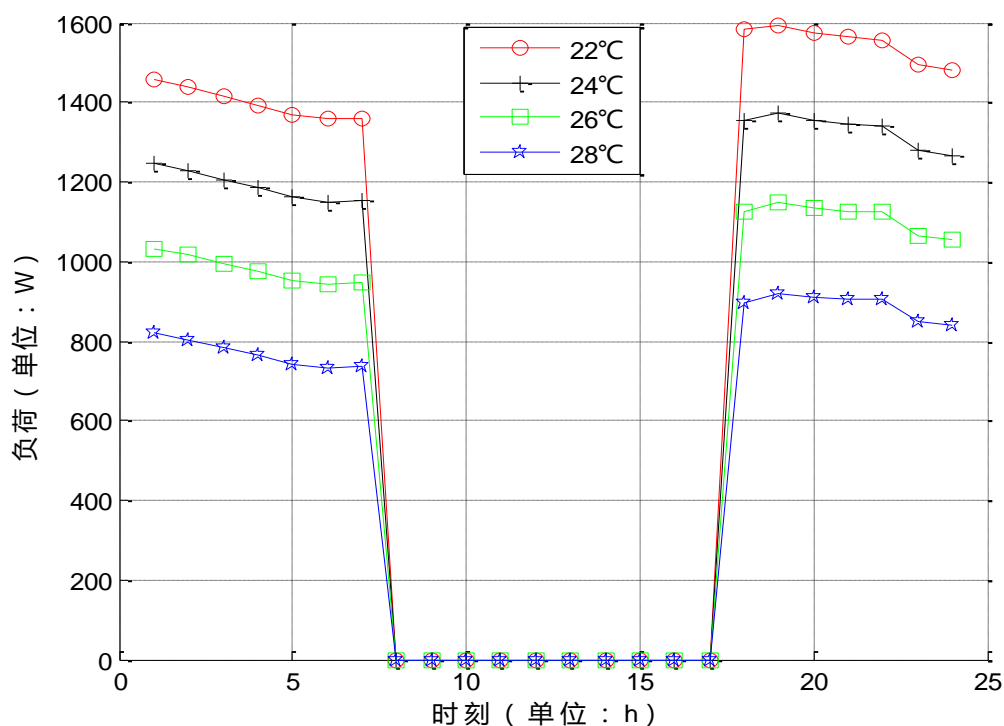


图 7-1 不同室温下空调总热负荷的变化

从图 7-1 可以明显看出,温度越高,空调总热负荷就越小,而且似乎存在某

种线性关系,室内空气温度每降低 2°C ,总热负荷就减少 200W 左右。

由此可以得出结论,室温越高,建筑能耗就越低。既然 28°C 就可以满足人体的热舒适要求,那么为何还需要更低的温度来白白浪费能源呢?当然,从下班回家到晚上睡觉这段时间会存在脑力劳动,而脑力劳动最佳温度为 25°C ^[19],所以在我看来,最佳方案为:下班回家到睡觉这段时间的室内温度应定为 25°C ,睡觉时则定为 28°C 。

7.2 室内湿度对建筑能耗的影响

影响人体舒适度的主要参数除了温度还有湿度,研究表明,夏季室内湿度在 $40\%\sim 70\%$ 时,满足人体舒适度^[8]。

同 7.1 一样,以单房间建筑为研究对象,室温定为 28°C ,其余参数同 7.1 一样。(武汉地区室外相对湿度为 80%)

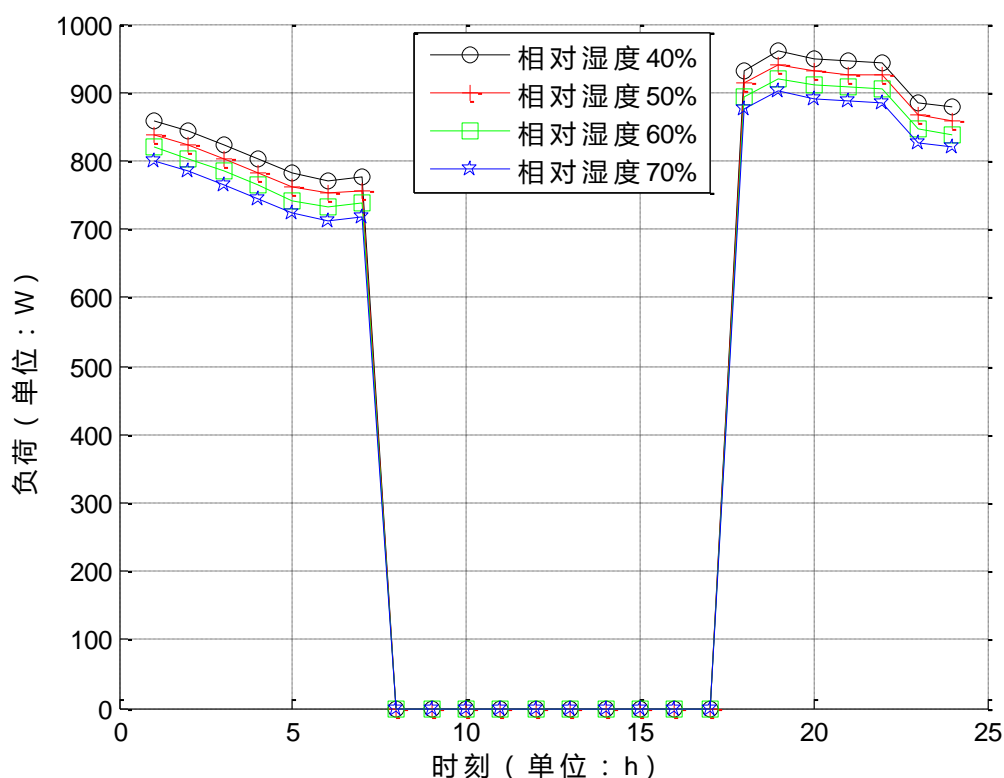


图 7-2 不同相对湿度下的空调总热负荷变化

同室温一样,也是相对湿度越大,房间空调总热负荷越低,即建筑能耗越低,只不过湿度影响没有温度影响那么大。所以在满足人体舒适度的情况下,武汉地区夏季房间设定相对湿度值应越大越节能。

7.3 通风对建筑能耗的影响

通风除了起到换气的作用，还能够影响建筑能耗。由于建筑白天与晚上使用空调情况不同，所以通风的影响可能不同，这里研究将分为白天通风与夜间通风。

研究对象与 7.1 和 7.2 相同，其他参数为第六章基准参数（室温为 28°C ，相对湿度 60%，基准通风为 $10\text{m}^3/\text{h}$ ）。

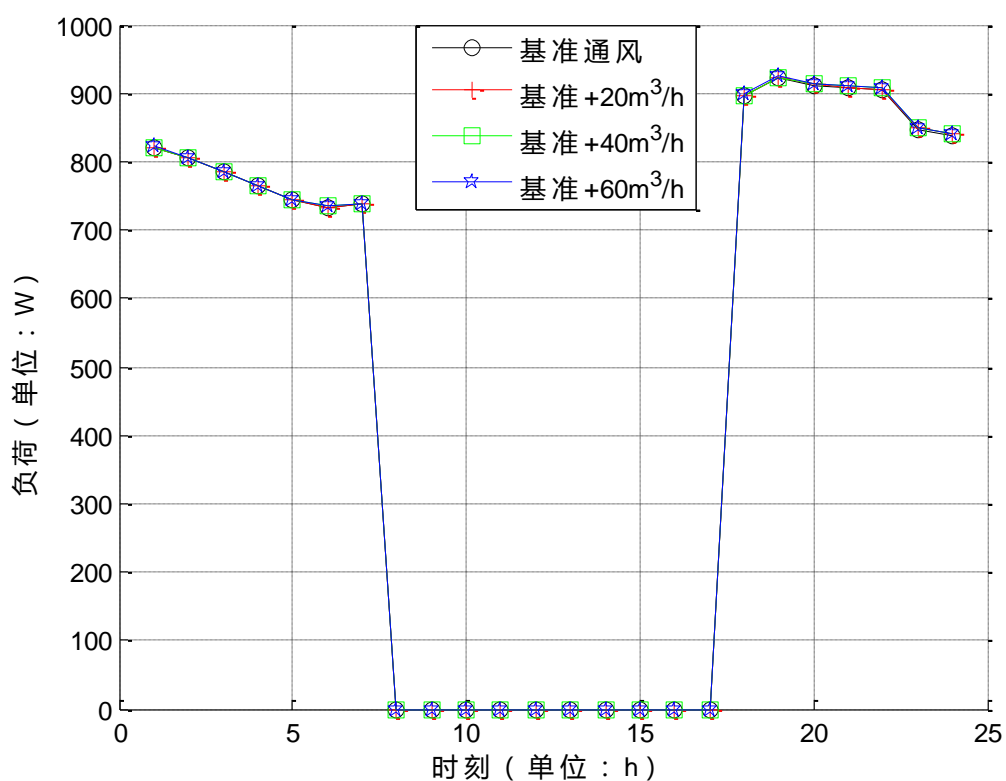


图 7-3 不同白天通风情况下空调总热负荷变化

从图 7-3 中看不到四种不同通风情况下的空调总热负荷变化，在此，对图 7-3 进行放大得图 7-4。由图 7-4 可以看出，白天通风量越大，房间空调总热负荷就越大，但其影响非常小。

按理说要节能的话，就应该控制白天的通风量，但由于白天通风对建筑能耗影响较小，为了让室内空气保持新鲜，白天通风量还是较大为好。

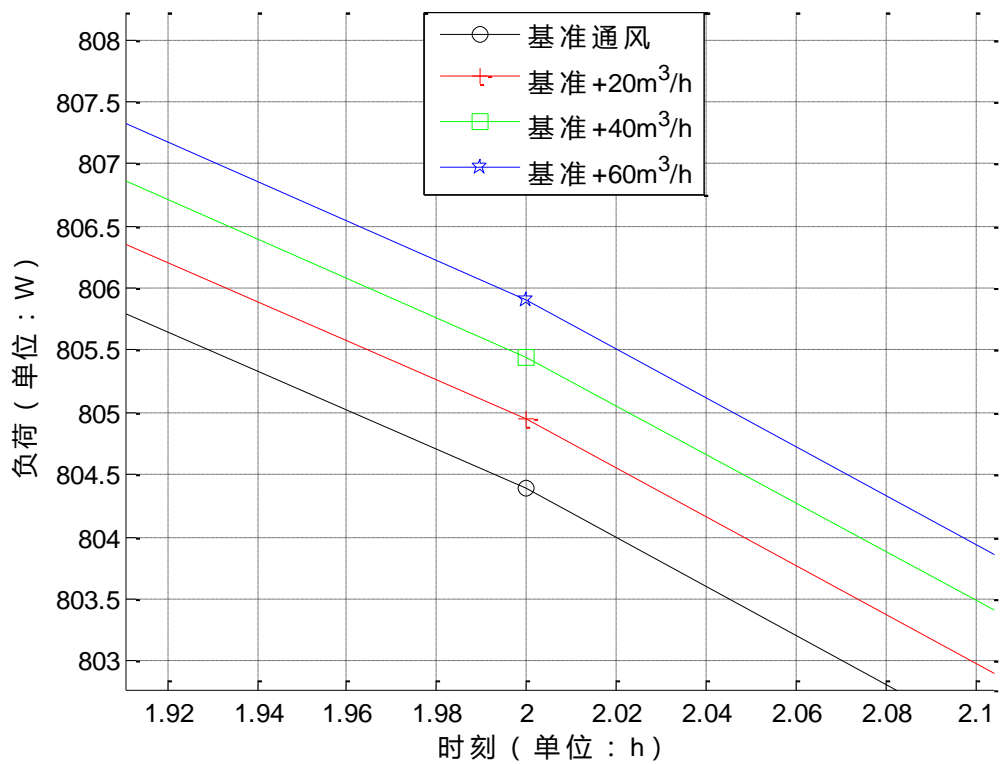


图 7-4 图 7-3 的局部放大

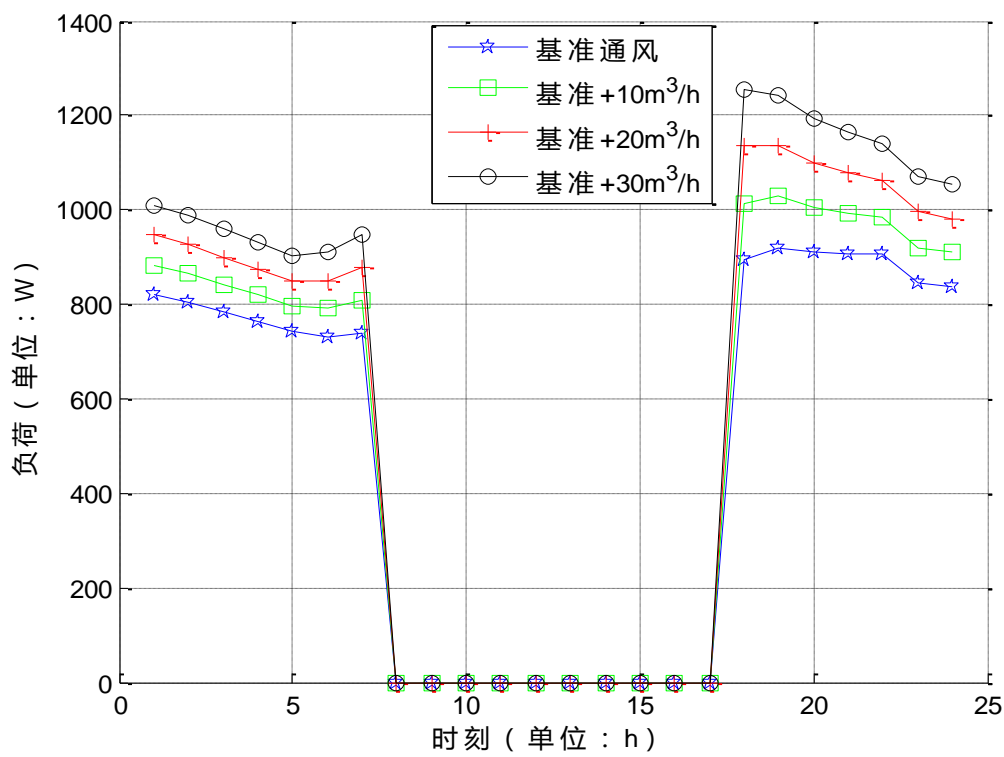


图 7-5 不同夜间通风情况下空调总热负荷变化

从图 7-5 可以看出, 夜间通风量越大, 空调总热负荷就越大, 这个影响比白天通风的影响要大得多。所以为了建筑节能, 夜间通风量应该尽量控制在最低水平, 也就是说夜间门窗之类的要尽量关紧。

7.4 内抹灰对建筑能耗的影响

在建筑围护结构内表面通常都有一层内抹灰, 不同物理性质的内抹灰, 对建筑能耗的影响可能不一样。对内抹灰的研究, 可以了解墙体粉刷材料对建筑能耗的影响, 据此可以知道如何改变粉刷材料来帮助建筑节能。

7.4.1 内抹灰导热系数对建筑能耗的影响

以单房间建筑为研究对象, 除内抹灰导热系数外, 其余参数均与第六章基准参数相同 (室温 28°C , 相对湿度 60%)。

图 7-6 展示了四种不同导热系数的内抹灰的建筑物房间逐时总热负荷变化情况, 从图中可以明显看出, 内抹灰导热系数越小, 建筑房间空调总热负荷就越小, 其中关系为非线性。因此, 可以通过选用导热系数较小的内抹灰来帮助建筑节能。

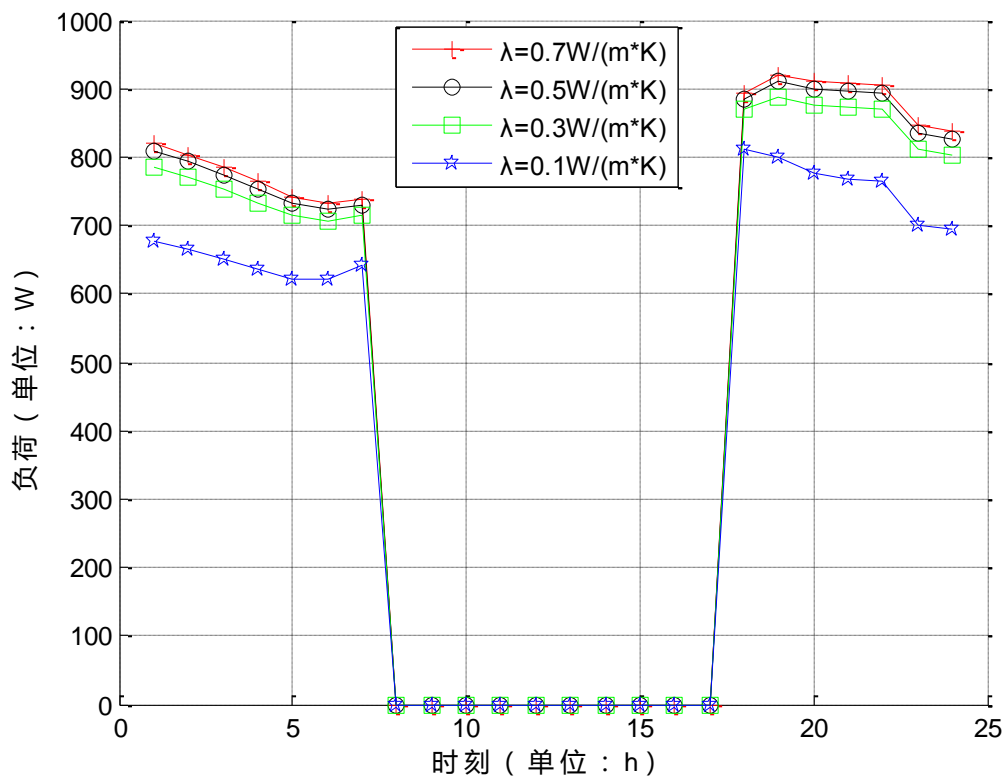


图 7-6 四种导热系数的内抹灰下的空调总热负荷变化

7.4.2 内抹灰比热对建筑能耗的影响

以单房间建筑为研究对象，除内抹灰比热外，其余参数均与第六章基准参数相同（室温 28°C ，相对湿度 60%）。

图 7-7 展示了四种不同比热的内抹灰的建筑物房间逐时总热负荷变化情况，从图中可以看出，四种比热下的房间逐时总负荷无明显差别，图 7-8 与图 7-9 为图 7-7 的左右两边局部放大图，由这两个放大图可以看出，虽然四种不同比热的内抹灰的房间空调总热负荷有细微区别，但比热大小与总热负荷的大小之间的关系在 24 小时内并不统一，其具体为：1:00-7:00 的时间段，比热越大，总热负荷越大；18:00-24:00 的时间段，比热越大，总热负荷越小。

因为内抹灰比热对建筑物能耗的影响较小且相关性在时间上不统一，所以在考虑建筑节能时，内抹灰比热的选取就没有什么要求了。

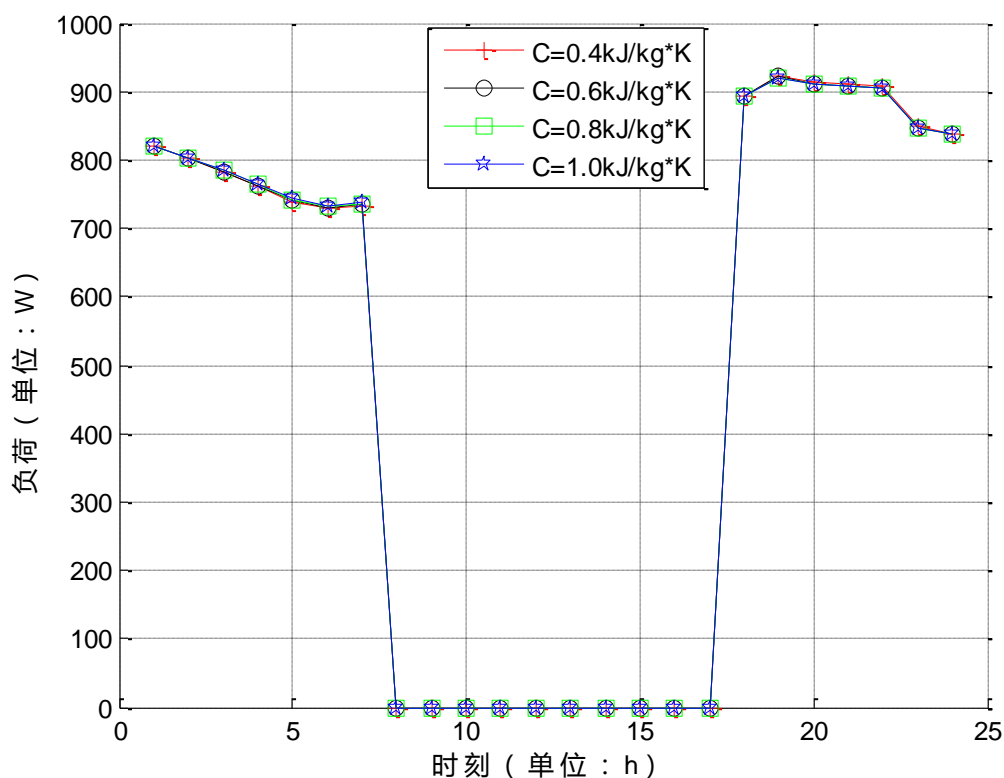


图 7-7 四种比热的内抹灰下的空调总热负荷变化

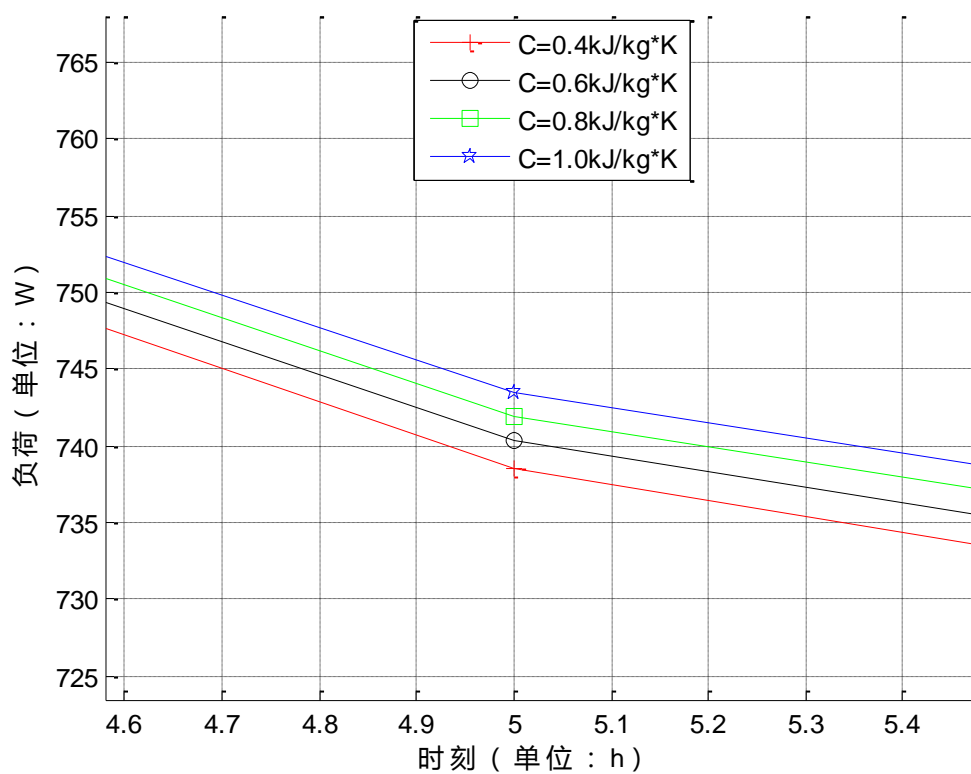


图 7-8 图 7-7 的左边局部放大图

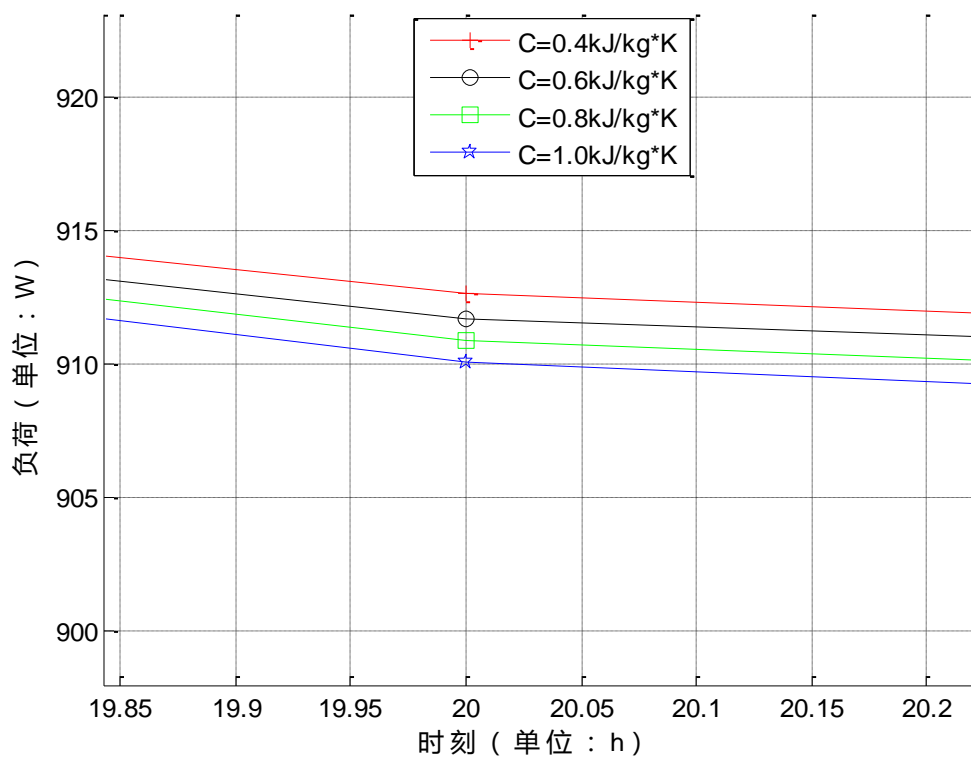


图 7-9 图 7-7 的右边局部放大图

7.4.3 内抹灰密度对建筑能耗的影响

以单房间建筑为研究对象，除内抹灰密度外，其余参数均与第六章基准参数相同（室温 28℃，相对湿度 60%）。

通过对图 7-10、图 7-11 与图 7-12 的观察可以发现，内抹灰密度对房间空调总热负荷的影响比较小，而且内抹灰密度大小同房间空调总热负荷的关系较为复杂，比内抹灰比热和房间空调总热负荷的关系更加难以归纳。

由此，可以知道，要想降低建筑能耗，通过改变内抹灰的密度的做法是不合理的。

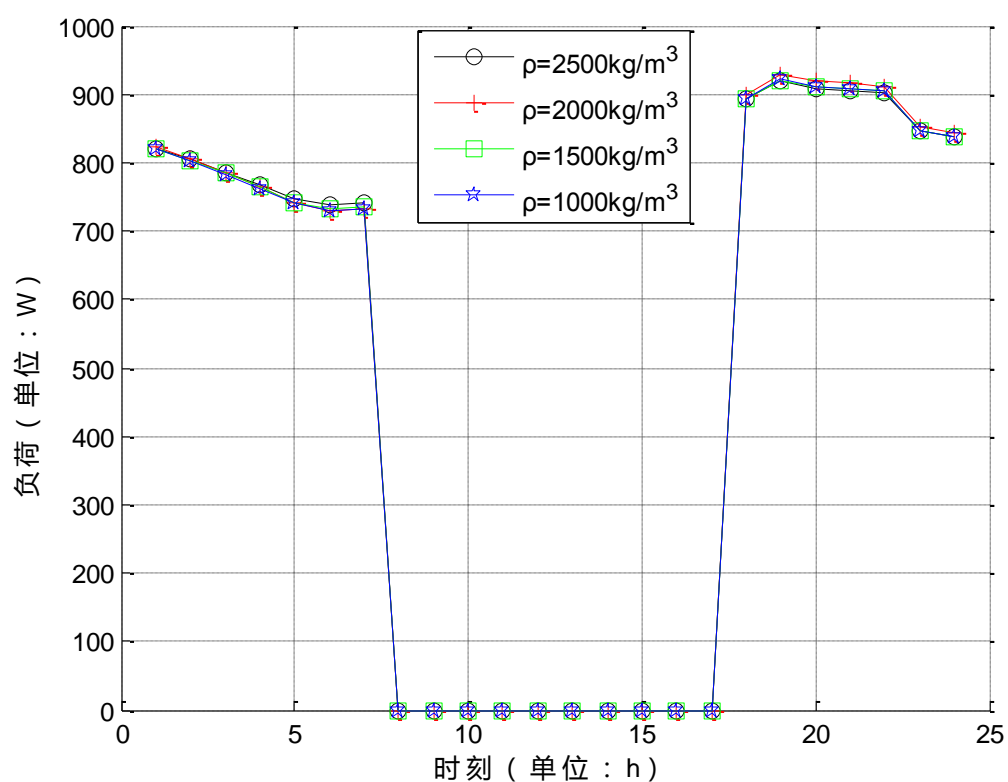


图 7-10 四种密度的内抹灰下的空调总热负荷变化

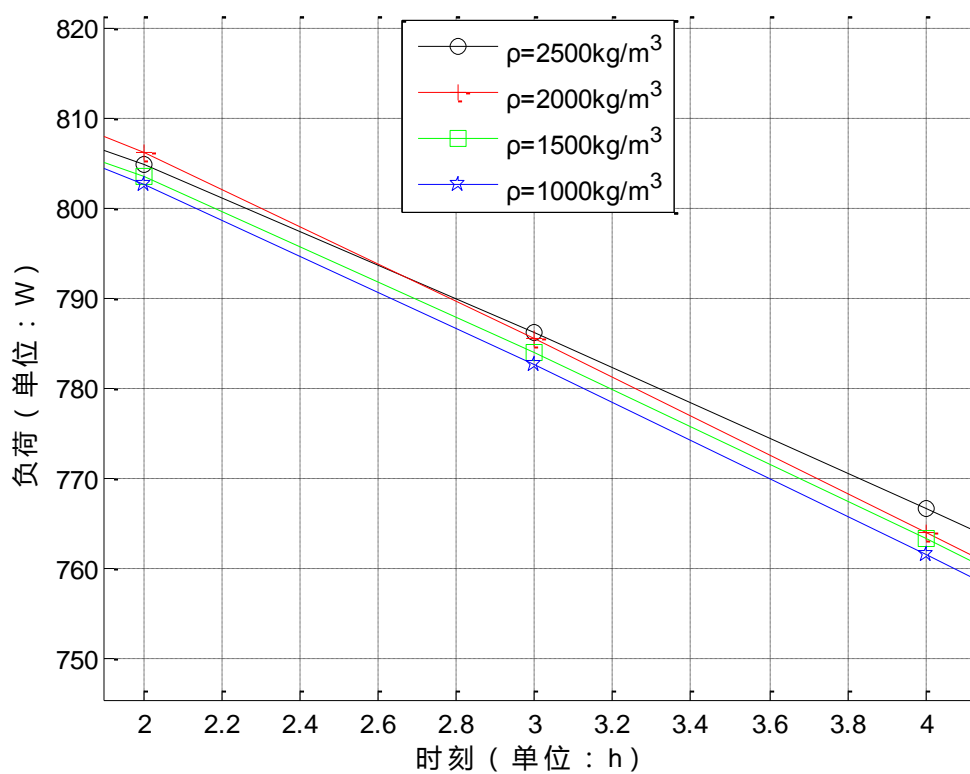


图 7-11 图 7-10 的左边局部放大图

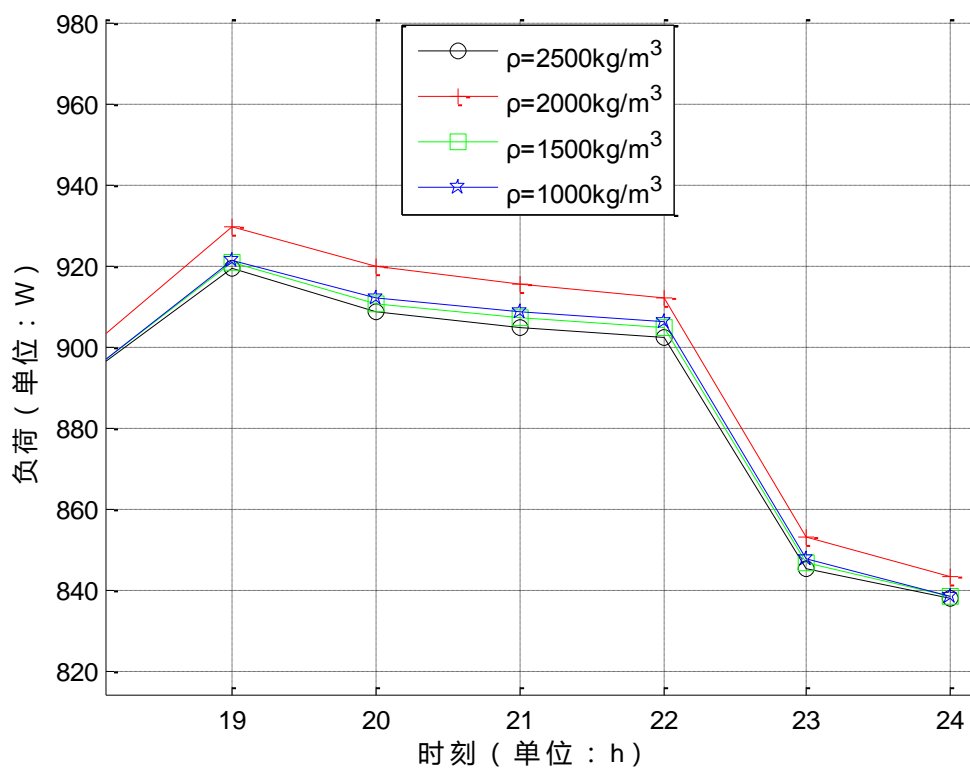


图 7-12 图 7-10 的右边局部放大图

7.4.4 内抹灰厚度对建筑能耗的影响

以单房间建筑为研究对象,除内抹灰厚度外,其余参数均与第六章基准参数相同(室温 28℃,相对湿度 60%)。

从图 7-13 中可以明显看出,内抹灰厚度对房间空调总热负荷有一定的影响,而且两者之间的关系也较为明朗,内抹灰厚度越大,则房间空调总热负荷就越小。

由此,建筑节能可以通过加厚内抹灰的厚度来实现。

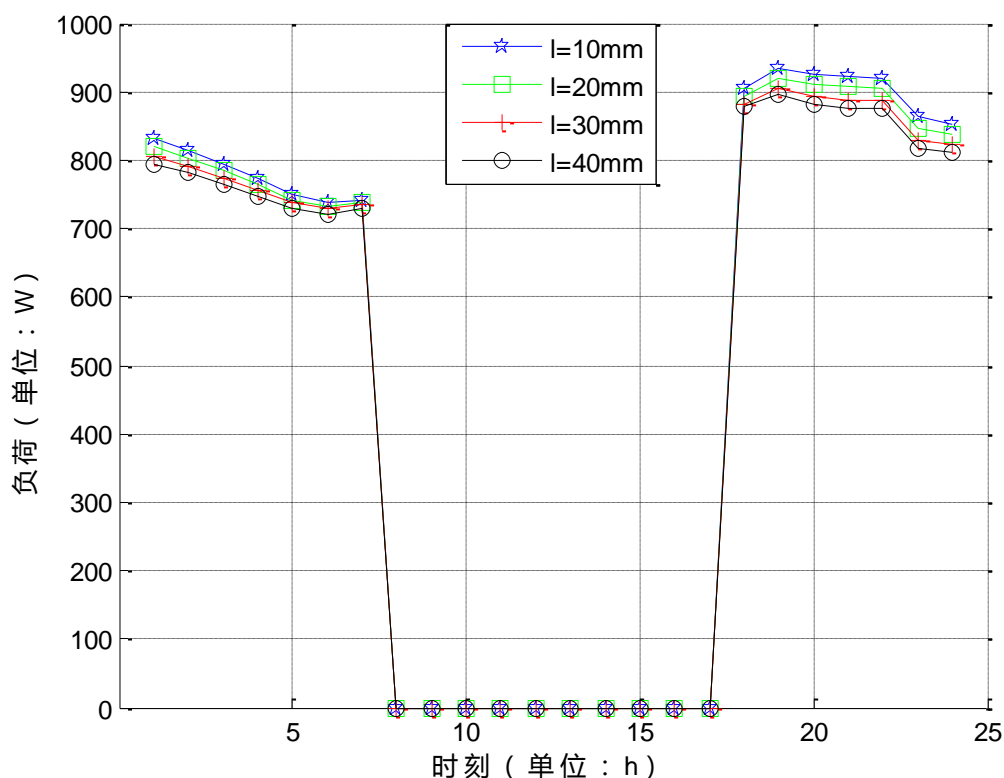


图 7-13 四种厚度的内抹灰下的空调总热负荷变化

7.5 房间位置对建筑能耗的影响

本次研究的小型建筑共有四个房间,每个房间的位置不一样,其建筑能耗可能也就不一样。实际生活中,建筑物的所有房间并非都被使用,因此,选择建筑能耗较低位置的房间使用可以帮助节能。

以小型建筑为研究对象,选定某个房间室温为定值,并计算该房间的空调总热负荷,其他房间不开空调,房间其他参数均与第六章基准参数一致(选定房间全天室温为 26℃,相对湿度 60%,房间编号按图 6-11)。

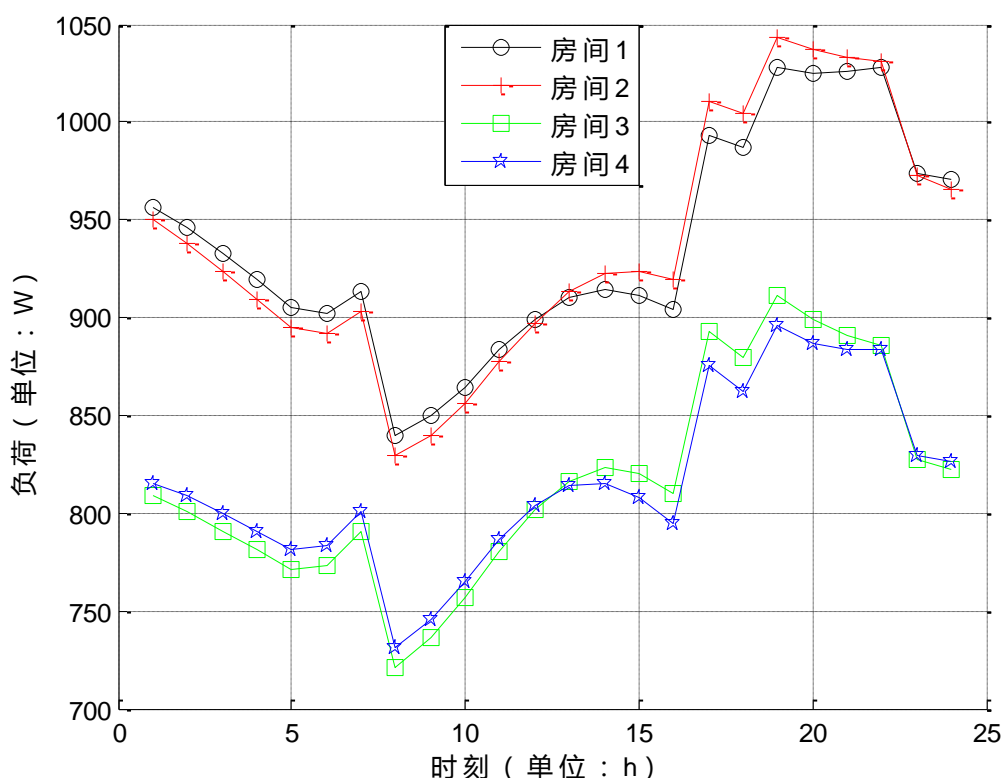


图 7-14 选定不同房间使用时该房间总热负荷变化

图 7-14 所示结果，同第六章图 6-22 相似，只是图 7-14 的图像数值更大，这是因为图 6-22 是在四个房间都开空调的情况下的结果，而图 7-14 只有选定房间开了空调。

由此，可以知道，使用一楼的房间比使用二楼的房间更节能，因此，卧室之类的经常使用的房间应该选定在一楼，而不常使用的房间应选定在二楼。

7.6 节能温控方案

通过对室内温度、室内湿度、通风、内抹灰以及房间位置对建筑能耗影响的研究，可以得到本次研究的一个最佳节能温控方案为：

- 1、室内设计温度越高越好，但不超过 28°C ；
- 2、室内设计相对湿度越高越好，但不超过 70%；
- 3、白天不用空调时多通风，夜间使用空调时尽量减少通风；
- 4、室内墙壁粉刷物（包含内抹灰）的厚度越厚越节能，选取材料的导热系数越小越好；
- 5、经常使用的房间，如卧室，选在一楼最好，最节能。

8 结论

基于《小型建筑热平衡模型建立及节能温控方案研究》这一课题，本文在综合国内外研究的基础上，做了以下工作：

1. 建立了小型建筑围护结构外表面热平衡的数学模型，并运用 matlab 软件编程计算了该模型的相关参数；
2. 用反应系数法建立了小型建筑围护结构传热数学模型，并运用 matlab 软件编程计算了围护结构的反应系数；
3. 建立了小型建筑围护结构内表面热平衡以及室内空气热平衡的数学模型；
4. 确定了小型建筑的气象参数、几何模型以及相关内外扰量，并运用所定参数结合小型建筑的热平衡数学模型构建了 matlab 计算程序；
5. 运用所编 matlab 计算程序分别计算了单房间建筑和小型建筑的空调热湿负荷，并对结果展开了分析；
6. 研究了某些较易改变的参数对建筑能耗的相关影响，并利用所得结果，提出了相关的节能温控方案。

通过以上研究工作，本文得出以下结论：

1. 建筑物所受辐射中，太阳直射辐射的总量最大，影响最大；
2. 通过对比文献[4]中的图例结论，本文太阳辐射及综合温度的计算是较为准确可靠的；
3. 通过计算分析，以及对比文献[12]的计算结果，本文的反应系数计算结果是相当准确可信的；
4. 通过计算可以得知，夏季空调房间的围护结构内表面温度是比室内温度要高的，而且往往要高不少；
5. 房间所有围护结构中地板内表面温度往往是最底的，门窗的内表面温度变化往往是最大的；
6. 内扰量（人员散热散湿、灯光散热等）对建筑房间空调热湿负荷的影响较为显著，无内扰量作用的热湿负荷曲线同有内扰量作用的热湿负荷曲线有着较大的差异；

7. 武汉夏季空调建筑节能可以通过以下方法实现：1) 提高室内使用空调时的温度，但不超过 28℃；2) 提高室内使用空调时的相对湿度，但不超过 70%；3) 选择导热系数小以及厚度大的内抹灰；4) 将经常使用的房间，如卧室，设置在小型建筑的一楼。

致谢

本文完成之后我的大学生涯也就结束了，从此我将走上与之前完全不一样的道路，开始工作生涯。真心感谢对本文完成有贡献的人以及曾经帮助过我的人。在这里首先要感谢的就是我的毕业设计指导老师周新平教授，感谢他这几个月来对我的指导，感谢他对我找工作的建议和关心。

同时感谢许洋洋博士学长，是他在周教授不在的时候对我进行相关指导，让我解开了心中的迷惑，给我指明了方向。

另外，还要感谢流体力学教研室的其他老师，是他们对我的开题报告的某些不足进行了批评指正，让我完善改正了毕业设计的某些问题。

最后感谢我的室友、班级以及父母亲人，他们在精神上的支持和生活上的关照是我完成的动力。

参考文献

- [1]单寄平. 空调负荷实用计算法[M]. 北京:中国建筑出版社, 1989.
- [2]郑慧凡, 阎秀英, 范晓伟, 李安桂. 建筑物空调负荷计算方法研究进展[J]. 中原工学院学报. 2007, 18(5):1-5.
- [3]Bruning, Steven. A New Way to Calculate Cooling Loads[J]. ASHRAE Journal, 2004, 46(1):20-24.
- [4]Todd M. McClellan, Curtis O. Pedersen. Investigation of Outside Heat Balance Models for Use in a Heat Balance Cooling Load Calculation Procedure[J]. ASHRAE Transactions. 1997, 103(1):469-484.
- [5]曹叔维. 房间热过程和空调负荷[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1991.
- [6]何立群, 丁力行. 太阳能建筑的热物理计算基础[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2011.
- [7]彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1986.
- [8]GB 50736-2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].
- [9]陈沛霖, 曹叔维, 郭建雄. 空调负荷计算理论与方法[M]. 上海:同济大学出版社, 1987.
- [10]何嘉鹏, 王东方. 对墙体不稳定传热-反应系数法的研究[J]. 工程热物理学报. 2000, 21(1):93-96.
- [11]刘金祥. 反应系数法求解墙体不稳定传热的分析讨论[J]. 广西工学院学报. 1999. 10(1):14-19.
- [12]郭卉, 彭梦珑, 刘广海. 墙体不稳定传热计算中反应系数项数的分析与确定[J]. 湖南理工学院学报. 2005. 18(4):69-72.
- [13]Richard J. Liesen, Curtis O. Pedersen. An evaluation of inside surface heat balance models for cooling load calculation[J]. ASHRAE Transactions. 1997, 103(1):485-502.
- [14]屈睿瑰. 建筑热平衡模型及南昌市建筑能耗初步分析[D]:[硕士学位论文].

南昌:华东交通大学, 2007.

- [15]Curtis O.Pedersen, Daniel E.Fisher, Richard J.Liesen. Development of a Heat Balance Procedure for Calculating Cooling Loads[J].ASHRAE Transactions. 1997, 103(1):459-468.
- [16]谷波. 建筑物空调负荷计算分析[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [17]王朋. 建筑空调动态负荷计算分析[D]:[硕士学位论文]. 上海:上海交通大学, 2007.
- [18]史小兵. 建筑室内环境及人体舒适研究[J]. 河北能源职业技术学院学报. 2008, 1:52-55.
- [19]徐小林, 李百战. 室内热环境对人体热舒适的影响[J]. 重庆大学学报. 2005, 28(4):102-105.

附录

Xinping Zhou, Weizeng Shu, Yangyang Xu. Building energy control in a moist climate zone in summer. in preparation, and plan to be submitted to Building and Environment.