

太阳能采暖 设计原理与技术

◎ 刘艳峰 王登甲 著

Design Principle and Technology of
Solar Heating

中国建材工业出版社

太阳能采暖设计原理与技术

刘艳峰 王登甲 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能采暖设计原理与技术/刘艳峰,王登甲著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2016.3

ISBN 978-7-112-18885-7

I. ①太… II. ①刘… ②王… III. ①太阳能采暖
IV. ①TU832.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 306665 号

本书是作者多年在太阳能建筑领域的研究成果积累而成, 针对以低温热利用为主的太阳能采暖技术, 基于对建筑和设备系统热过程的数学描述, 通过大量模拟计算和实测分析, 并侧重于以热量蓄调改善建筑热环境的稳定性, 建立技术原理、形成优化设计方法。内容包括两个方面, 一部分以建筑中的被动太阳能利用技术为主, 介绍太阳能在建筑构件上的光热转换过程、建筑外窗等集热构件的热过程、建筑构件的被动蓄热过程以及对应的优化设计方法; 另一部分以太阳能热水采暖技术为主, 分别介绍太阳能采暖集热系统、热水显热蓄热系统和室内采暖系统的热物理过程和设计运行方法。

本书可作为高等院校建筑技术、暖通空调和建筑设计等专业研究生教学参考用书, 也可供从事土木工程、建筑设计和太阳能利用等科学研究、工程技术人员参考。

责任编辑: 李玲洁 田启铭

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 张颖

太阳能采暖设计原理与技术

刘艳峰 王登甲 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京锋尚制版有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 5 $\frac{1}{8}$ 字数: 141 千字

2016 年 3 月第一版 2016 年 3 月第一次印刷

定价: 25.00 元

ISBN 978-7-112-18885-7

(28144)

版权所有 翻版必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

利用太阳能作为建筑采暖的热能来源，可大幅度节约建筑冬季采暖能耗。在建筑中利用太阳能采暖的方式包括被动式和主动式两种，前者是运用建筑设计手段，将建筑物自身作为太阳能收集、存储和室内热环境调节装置，而后者则是通过专用的光热转换、存储设备和输配系统为室内供给必要的热量，甚至可利用太阳能光伏设备为主动式输配系统提供必要的电能。显然，被动式手段的建造与运行成本低廉，但调节室内热环境效果稍差，而主动式的成本和调节效果则正好与被动式相反。两者互为补充，联合运行时，可解决我国西部气候寒冷、但太阳能富集地区的冬季采暖问题。

太阳能的优点众所周知，但其固有的能流密度低、能量供给的随机性和周期性等缺点，给太阳能采暖设计带来了极大的困难，何况建筑物的供热负荷本身就是一个依赖气象参数变化的随机量。因此，利用太阳能采暖，在原理和技术上均不是一件容易的事，必须综合运用建筑和建筑设备专门知识，才能提出综合解决方案，形成优化设计方法。而作者先后在暖通空调、建筑技术和建筑学等学科的求学，出版本专著当属必然。

刘艳峰教授从事太阳能建筑热环境领域的基础理论与工程应用研究工作已 20 载有余。20 世纪 90 年代中期，他曾与笔者一起，完成了国家自然科学基金项目“被动式与主动式太阳房组合优化研究”的研究工作；随后，又一起奔波于青藏高原，共同完成了国家自然科学基金重点项目“青藏高原节能居住建筑体系研究”，他起草了以太阳能采暖为技术特征的西藏自治区《民用建筑采暖设计标准》，主持申报并获准陕西省科学技术一等奖。20 多年间，他主持申报并获准数个相关内容的国家自然

科学基金项目，揭示了双周期性外扰作用下围护结构动态传热机理和太阳能得热动态蓄调过程，建立了太阳能采暖系统优化设计和运行调节原理与方法，他带领的“西北村镇太阳能光热综合利用创新团队”荣获陕西省重点科技创新团队。长期的理论研究与实践经历和取得的成果已为学界广泛认可，是我国本领域的知名青年学者。

作为作者的硕士、博士指导教师和博士后合作导师，值《太阳能采暖设计原理与技术》专著出版之际，谨表祝贺，以为序。



2015年9月28日，于西安

前 言

目前我国社会总能耗的 1/4 消耗在建筑用能上，其中北方地区的冬季采暖为建筑能耗的主要组成部分，每年消耗约 1.5 亿 t 标准煤以上。随着农村城镇化进程，北方地区的采暖能耗将急剧上升。而北方建筑采暖面临的主要问题是：降低既有城镇采暖系统的能耗水平，探寻适宜于广大农村的新型采暖技术和替代能源。我国西北和青藏高原等地区太阳能资源丰富，以太阳能替代或部分替代常规能源是降低这些地区采暖能耗的有效技术途径。

在现有太阳能采暖方式中，被动太阳能技术成本低廉、简便易行，但热调节困难，难以保证室内热环境需求；主动太阳能采暖调节灵活，但成本较高。就目前技术现状而言，单独采用主动或被动技术均难以获得理想的效果，而将主被动技术结合是行之有效的手段。当两者结合时，建筑热工、被动技术和太阳能采暖系统的热过程和优化原则均区别于各自独立作用情况。建筑热工过程受室外气温和太阳能辐射波动、室内供热动态变化影响；采暖系统需要在被动太阳房背景热环境基础上，承担负荷动态与太阳能集热冲突问题。

因此，太阳能采暖技术首先要降低建筑热负荷水平，以适应太阳能能流密度低的条件；其次要在建筑及周边有限收集条件下，尽可能多地收集太阳能用于采暖；并建立合理的热量蓄调系统，解决太阳能波动与室内热环境稳定之间的矛盾。根据以上技术思路和太阳能热利用基本原理，本书重点介绍主被动太阳能结合条件下的热量蓄调以及适宜的采暖系统设计。

感谢我的导师刘加平院士为本书作序，是他带我进入建筑节能领域，在太阳能采暖研究方面给予我多次点拨和鼓励，才

使我能真正享受到科学探索和为人师表的乐趣。本书大量的分析计算和现场测试内容都是作者指导的历届研究生们的辛勤付出而成，是他们与作者在太阳能采暖建筑领域的多年共同坚持，才能形成这本专著。感谢西安工程大学狄育慧教授、西安建筑科技大学王智伟教授在百忙之中审阅本书，并提出宝贵意见。感谢在本书写作过程中，博士生马超、蒋婧、李涛、周晓骏、宋聪、陈迎亚、陈耀文等在文字和图表处理方面的帮助。

本书是作者负责的国家自然科学基金项目“周期性双波动村镇太阳能采暖建筑热过程及其热环境调节研究(50778144)”、“波动双外扰与间歇采暖下太阳能建筑热过程及设计优化研究(51078302)”，国家“十二五”科技支撑计划合作课题“西北传统民居节能技术研究(011BAJ082B01-03)”，国家博士后基金“主-被动太阳能联合采暖建筑热工体系研究(20070411122)”等项目研究成果基础上整理而成，并得到陕西省重点科技创新团队“西北村镇太阳能光热综合利用创新团队(2014KCT-01)”的资助。在此一并表示感谢！

限于著者的学识和水平，本书难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

1	太阳能采暖基础知识	1
1.1	太阳辐射	1
1.1.1	大气层外的太阳辐射	1
1.1.2	到达地球表面的太阳辐射	1
1.2	太阳能资源	3
1.2.1	太阳能资源特点	3
1.2.2	我国太阳能资源分布	3
1.3	太阳能采暖方式	4
1.3.1	被动式太阳能采暖	5
1.3.2	主动式太阳能采暖	7
2	建筑外表面太阳能热作用	9
2.1	建筑外表面的太阳能光热转化	9
2.1.1	太阳辐射的吸收、反射和透射	9
2.1.2	透明结构表面光热转化	10
2.1.3	非透明结构表面光热转化	11
2.2	围护结构朝向传热差异	12
2.2.1	室外空气综合温度	12
2.2.2	采暖负荷朝向修正率	18
2.2.3	各向异性围护结构保温	21
3	太阳能建筑集热构件	25
3.1	集热构件热过程	25
3.1.1	物理模型	25
3.1.2	数学模型	26
3.2	集热构件面积	29
3.2.1	室内自然采光要求	29
3.2.2	室内热环境要求	30

3.3	外窗内置窗帘附加热阻	40
3.3.1	外窗内置窗帘物理模型	40
3.3.2	窗帘附加热阻计算方法	42
3.3.3	典型窗帘热阻分析	45
4	太阳能建筑蓄热构件	51
4.1	建筑构件蓄热过程	51
4.1.1	物理模型	51
4.1.2	数学模型	53
4.2	集热蓄热墙优化设计	58
4.2.1	墙体厚度与材料	58
4.2.2	墙体保温层	62
4.2.3	空气夹层	68
4.3	集热蓄热屋顶优化设计	76
4.3.1	屋顶厚度与材料	76
4.3.2	屋顶保温层	77
4.3.3	空气夹层	79
5	太阳能采暖集热系统	87
5.1	太阳能集热系统	87
5.1.1	系统形式	87
5.1.2	集热器面积计算	88
5.1.3	实例计算分析	91
5.2	太阳能采暖保证率	94
5.2.1	保证率计算	94
5.2.2	影响因素分析	95
5.2.3	实例计算分析	96
6	太阳能采暖蓄热系统设计	103
6.1	蓄热系统形式	103
6.2	蓄热系统动态热平衡	104
6.2.1	蓄热量	104
6.2.2	蓄热温度	106
6.2.3	辅助加热设计	107
6.3	蓄热系统设计参数	108

6.3.1	蓄热水箱容积确定	108
6.3.2	蓄热水箱热分层	113
7	太阳能采暖末端	120
7.1	太阳能采暖负荷计算方法	120
7.1.1	传递函数法	120
7.1.2	热负荷系数法	122
7.1.3	采暖末端形式选择	126
7.2	辐射供暖地面传热数学模型	127
7.2.1	导热微分方程	127
7.2.2	平面肋片模型	131
7.2.3	地板当量热阻模型	134
7.3	辐射供暖地面散热特性	137
7.3.1	连续运行模式	137
7.3.2	间歇运行模式	139
7.4	地面辐射采暖运行设计	146
7.4.1	太阳房热负荷特性	146
7.4.2	间歇供热量与房间负荷匹配	148
7.4.3	变室温对地板散热量影响	150

1 太阳能采暖基础知识

太阳能采暖是指利用太阳能来提升建筑室内温度，以达到采暖目的的技术，可分为被动式和主动式两种。确定太阳辐射强度的量值是利用主被动太阳能采暖技术需解决的基本问题，因此，掌握到达地球表面太阳辐射强度计算方法是太阳能采光面收集热量计算的基础。了解太阳能资源特点及其在我国分布情况，确定利用太阳能采暖的可行性及优势，为我国利用太阳能采暖提供必要的基础知识。

1.1 太阳辐射

1.1.1 大气层外的太阳辐射

到达大气层外的太阳辐射量与太阳相对地球的位置有关，受地球绕太阳公转轨道为椭圆形的影响，各月大气层外边界处太阳辐射强度不同，见表 1-1。

各月大气层外边界处太阳辐射强度 (W/m^2)

表 1-1

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
太阳辐射强度	1419	1407	1391	1367	1347	1329	1321	1328	1343	1363	1385	1406

可见，严格意义上大气层外太阳辐射强度并不是常数，但考虑到其值差别不大，为了方便分析计算，取各月的平均值 $1367\text{W}/\text{m}^2$ （亦有取 $1353\text{W}/\text{m}^2$ ）为太阳常数。

1.1.2 到达地球表面的太阳辐射

(1) 水平面太阳辐射强度

地球上某处所接收到太阳辐射量是太阳能利用的基础，通

常采用赤道坐标系计算到达地面的太阳辐射强度，如图 1-1 所示。太阳光线在地球表面直射点与地球中心的连线与连线在赤道平面上的投影之间的夹角称为赤纬角 δ 。地球自转而引起的日地相对位置的变化用时角 ω 描述。

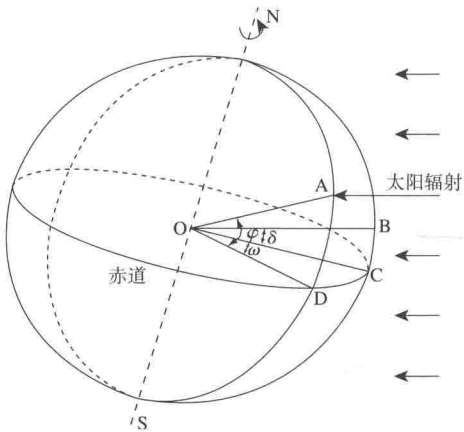


图 1-1 地球与太阳间各种角度

在晴空条件下，垂直于入射阳光的平面上直射辐射强度 I_m 一般由下式表示：

$$I_m = I_0 P_m^m \tag{1-1}$$

式中 I_0 ——垂直于大气层外边界处的太阳辐射强度， W/m^2 ；
 P_m ——大气透明系数；
 m ——大气质量。

到达水平面的太阳直射辐射强度 $H_{b,h}$ 为：

$$H_{b,h} = I_m \sinh \tag{1-2}$$

式中 h ——太阳高度角， $^\circ$ ，与地球相对太阳位置有关。

到达水平面上的太阳散射辐射强度 $H_{d,h}$ 为：

$$H_{d,h} = \frac{1}{2} I_0 \sinh \frac{1 - P_m^m}{1 - 1.4 \ln P_m} \tag{1-3}$$

(2) 倾斜面太阳辐射强度

太阳能收集面通常倾斜设置, 倾斜面上的总太阳辐射强度是直射辐射、散射辐射及地表漫反射分量的累积, 计算式如下:

$$H_{T,h} = H_{b,h} R_{b,h} + H_{d,h} \frac{1 + \cos\beta}{2} + (H_{b,h} + H_{d,h}) \rho_d \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (1-4)$$

式中 $H_{T,h}$ ——倾斜面上总太阳辐射强度, W/m^2 ;
 $R_{b,h}$ ——倾斜面与水平面上的直接辐射之比;
 β ——倾斜面与水平面之间的夹角, $^\circ$;
 ρ_d ——地面的反射率。

1.2 太阳能资源

1.2.1 太阳能资源特点

太阳能与常规能源储量如图 1-2 所示。可见太阳能资源储量巨大, 其可利用年限远远大于常规能源。众所周知, 地球上的风能、海洋能和生物质能等均间接来源于太阳能。太阳能是取之不尽、用之不竭的清洁能源。因此, 利用太阳能采暖是一项符合可持续发展战略的技术。但是, 太阳能在地球表面的能源密度低, 且季节、昼夜差别大, 同时还受阴晴云雨等随机因素影响, 限制了太阳能的利用。因此, 对太阳能资源的高效收集、热量蓄存调节等是太阳能采暖需解决的关键问题。

1.2.2 我国太阳能资源分布

按照年日照时数和太阳辐射量可将我国太阳能资源分为五类地区, 如表 1-2 所示。我国太阳能资源丰富, 超过三分之二地区年日照量时数大于 2000h, 年辐射量大于 $5020 MJ/m^2$ 。结合我国采暖划分区域可知, 大部分太阳能丰富地区属于采暖区。因此, 在我国利用太阳能采暖技术具有一定的先决条件。

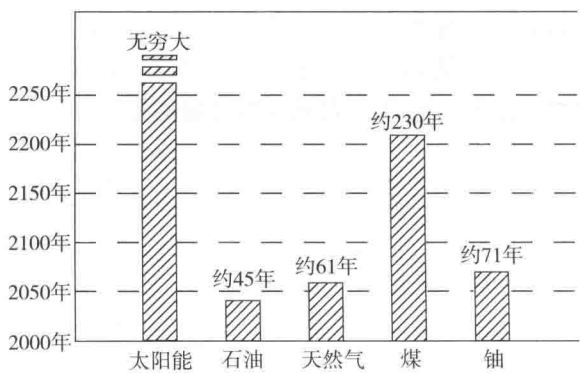


图 1-2 太阳能与常规能源储量对比图

太阳能资源日照时数等级分布表

表 1-2

分区	年日照时数 (h/a)	年辐射量 [MJ/(m ² · a)]	包括的主要地区
太阳能资源 最丰富地区	3200 ~ 3300	6680 ~ 8400	宁夏北部,甘肃北部,新疆南部,青海西部,西藏西部
太阳能资源 较丰富地区	3000 ~ 3200	5852 ~ 6680	河北西北部,山西北部,内蒙古南部,宁夏南部,甘肃中部,青海东部,西藏东南部,新疆南部
太阳能资源 在中等地区	2200 ~ 3000	5016 ~ 5852	山东,河南,河北东南部,山西南部,新疆北部,吉林,辽宁,云南,陕西北部,甘肃东南部,广东南部
太阳能资源 较差地区	1400 ~ 2000	4180 ~ 5016	湖南,广西,江西,浙江,湖北,福建北部,广东北部,陕西南部,安徽南部
太阳能资源 最差地区	1000 ~ 1400	3344 ~ 4180	四川大部分地区,贵州

1.3 太阳能采暖方式

太阳能采暖可分为主动和被动两种形式。被动式太阳能采暖是通过建筑朝向和周围环境的合理布置、内部空间结构和外部形体的巧妙处理以及围护结构和建筑材料的合理选择，使其

在冬季集热、蓄热和分配太阳能的采暖技术，利用被动太阳能采暖技术的建筑称为“被动太阳房”，其构造简单，造价低廉，维护管理方便。主动太阳能采暖是需依靠机械动力，通过太阳能集热器、蓄热装置和机械输送设备等来收集、蓄存、进而输送至建筑室内的技术，可调节性强，但其初投资高、系统复杂。

1.3.1 被动式太阳能采暖

被动式太阳房可分为直接受益窗式、集热蓄热墙式和附加阳光间式。

(1) 直接受益窗式

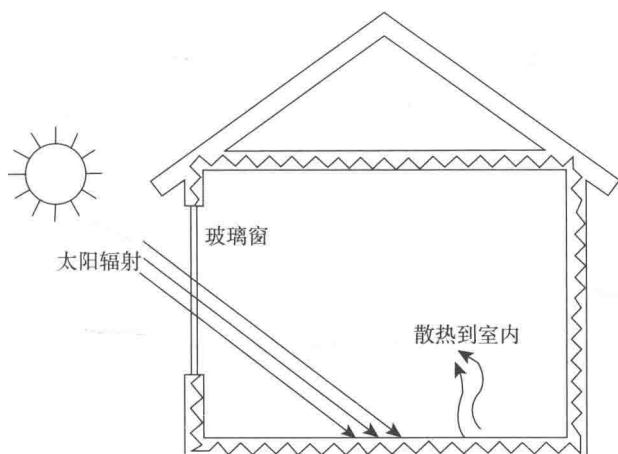


图 1-3 直接受益窗式太阳房示意图

在冬季，太阳辐射透过南向透明玻璃构件，直接投射到室内，通过光热转化被具有吸热特性的地板、墙体及家具等蓄热体吸收。被吸收热量的一部分以对流方式传入室内空气，另一部分通过辐射作用将热量储存于蓄热体内，并逐渐释放出，维持一定的室内温度，如图 1-3 所示。室内的地板、墙体等多采用重质材料。南向外窗除具有高透射率外，应具有良好的保温

及密封性能。直接受益窗式太阳房造价低廉、施工简单，是较为常用的一种太阳房。

(2) 集热蓄热墙式

集热蓄热墙体昼间吸收穿过玻璃盖板的太阳辐射，一部分热量储存在墙体内，以导热方式逐渐传入室内；另一部分热量通过对流的方式通过通风孔进入室内，如图 1-4 所示。集热蓄热墙应选择具有较好蓄热性能的混凝土、砖、土坯等重质材料，外表面多设置吸收率较高的涂层，以便更多地吸收太阳辐射。集热蓄热墙体外设置一玻璃盖板，蓄热墙体上、下分别开有通风孔。由于集热蓄热墙式被动太阳房可营造较好的室内热环境，目前得到了较为广泛的使用。

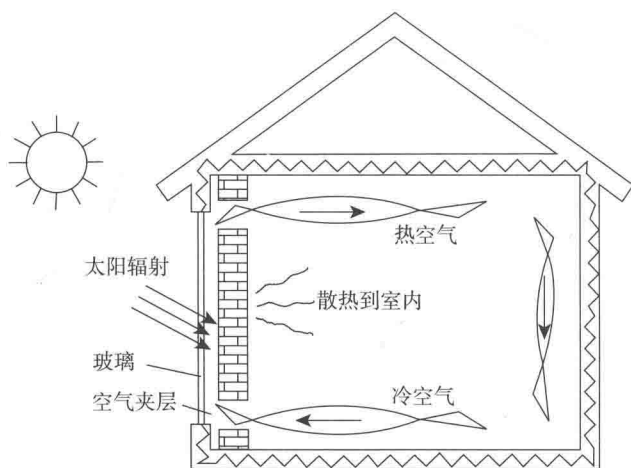


图 1-4 集热蓄热墙式太阳房示意图

(3) 附加阳光间式

附加阳光间式太阳房分阳光间和主体两部分。昼间透过阳光间玻璃的太阳辐射，一部分通过公共墙上的门窗开口，直接进入房间内被地面、墙体吸收；另一部分照射到公共墙上存储起来，以热传导和对流换热的方式将热量逐步传递到房间内，如图 1-5 所示。附加阳光间作为缓冲空间，对房间热量的散失

起到了一定的抑制作用。阳光间围护结构全部或部分由玻璃等透明结构构成,其地面及公共墙需具有一定的蓄热性,当阳光间得到太阳辐射热量时,形成温室效应,提升阳光间空气及蓄热体温度。

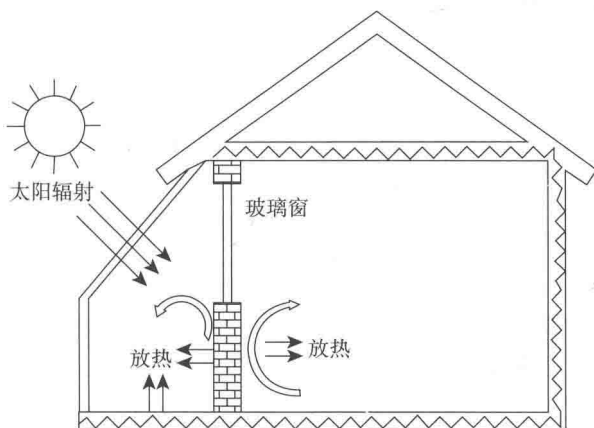


图 1-5 附加阳光间式太阳房示意图

1.3.2 主动式太阳能采暖

主动式太阳能采暖系统热媒介质主要有水和空气,目前,太阳能热水采暖系统应用更为普遍。主动式太阳能热水采暖系统主要包括集热、蓄热、辅助加热、散热和控制等子系统,如图 1-6 所示。

集热系统集热器通过光热转化将来自蓄热水箱的低温水加热,并通过循环泵将加热后的高温水输送至蓄热水箱。蓄热水箱接收来自集热系统的高温水,当集热系统集热量大于建筑热负荷时,将多余热量存储,当集热量不足时释放储存热,满足建筑采暖需求。在蓄热系统储热仍无法满足建筑热需求时,辅助加热系统运行。采暖系统通过分集水器将热量输送至各个房间,并利用采暖末端对室内进行采暖。太阳能采暖系统中多设置控制调节系统,用于调节各子系统,根据太阳能集热量、建