



Technical Handbook for  
Solar Heat Supply &  
Space Heating



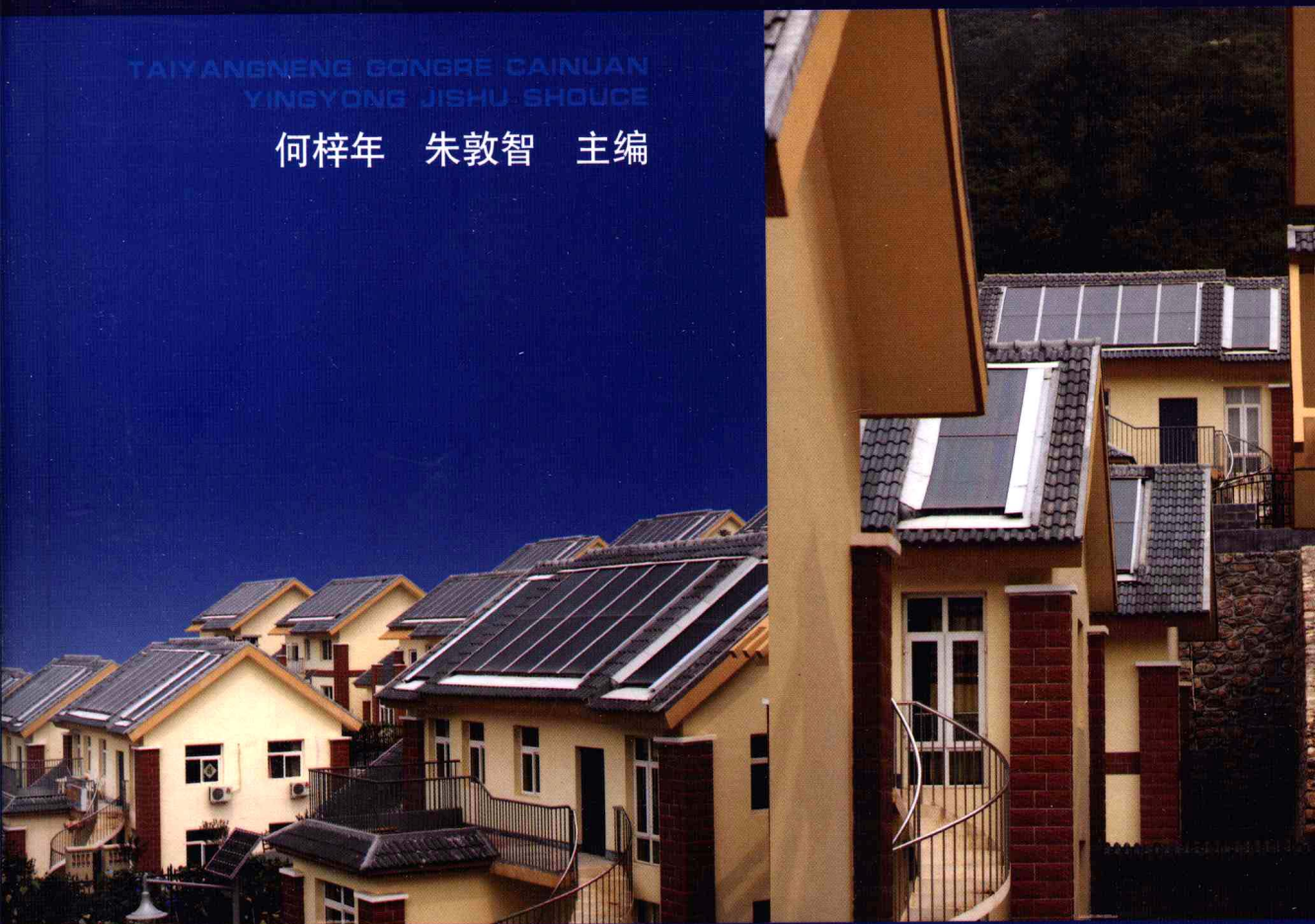
中国终端能效项目

CHINA END USE ENERGY EFFICIENCY PROJECT

# 太阳能供热采暖 应用技术手册

TAIYANGNENG GONGRE CAIJUAN  
YINGYONG JISHU SHOUCHE

何梓年 朱敦智 主编



化学工业出版社

# 太阳能供热采暖 应用技术手册

何梓年 朱敦智 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

# 《太阳能供热采暖应用技术手册》

## 组织单位和编写人员

**组织单位：**北京市建筑材料管理办公室

**资助单位：**国家发展和改革委员会/联合国开发计划署/全球环境基金  
中国终端能源效率项目办公室

**主 编：**何梓年 朱敦智

**编写人员：**何梓年 朱敦智 刘肖群 王俊清 徐晨辉 田桂清 郑学忠  
金惠荣 牛寅平 杨德山 朱培世 罗 鸣

# 序

我国有丰富的太阳能资源，全国三分之二国土面积的年日照时数在 2200 小时以上，年太阳辐照量超过 5000 兆焦每平方米。开发利用太阳能，对于我国节约常规能源、保护环境、促进经济发展、改善人民生活，都具有十分重要的意义。

二十多年来，我国的太阳能热水器产业飞速发展。目前，我国太阳能热水器的年产量和总保有量都居世界首位，成为太阳能热水器的生产和应用大国，为我国节能和环保事业做出了积极的贡献。

自《中华人民共和国可再生能源法》颁布实施以来，包括太阳能在内的可再生能源开发利用事业进入了新的历史发展时期，取得了举世瞩目的巨大成绩。《中华人民共和国可再生能源法》中明确规定：“国家鼓励单位和个人安装和使用太阳能热水系统、太阳能供热采暖和制冷系统、太阳能光伏发电系统等太阳能利用系统”。这为我国太阳能利用事业的进一步发展指明了方向，即在继续推广利用太阳能热水系统的同时，还应加强太阳能供热采暖系统的开发应用。

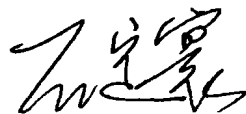
我国大部分国土面积属于寒冷和严寒地区，建筑供热采暖是为保证生存的基本条件；随着生活水平和居住环境的改善，目前长江流域等夏热冬冷地区也呈现出冬季采暖的需求；另外，我国太阳能资源最为丰富的地区大多是气候寒冷、常规能源比较缺乏的偏远地区，这些地区既有实际的采暖需求，又有充足的太阳能资源，是应用太阳能供热采暖条件最为优越的地区。因此，太阳能供热采暖将是继太阳能热水之后，最具发展潜力的太阳能热利用技术，有着广阔的应用前景。

然而，我国在太阳能供热采暖方面的应用尚处于起步阶段，与发达国家相比还有较大的差距，许多工程技术人员还不了解太阳能供热采暖系统与太阳能热水系统的相同和不同之处，更不掌握太阳能供热采暖系统的设计、安装和验收方法。

为了满足广大工程技术人员了解和掌握太阳能供热采暖技术的需要，我国多年从事太阳能热利用技术研究开发和推广应用的科技人员，在借鉴国外先进技术及总结我国工程实践经验的基础上，编写了这本《太阳能供热采暖应用技术手册》。本书在概述了太阳能基础知识之后，介绍了欧洲多种典型的太阳能热水和采暖组合系统，详细阐述了太阳能热水和供热采暖系统的设计、安装和验收，并简要介绍了北京在新农村建设中规模化运用的案例。

本书内容丰富，资料翔实，是从事太阳能供热采暖系统设计安装工程技术人员有用的工具书。相信本书的出版，将对在建筑中推广利用太阳能供热采暖，提高我国太阳能供热采暖技术水平，起到积极的推动作用。

国务院参事  
中国可再生能源学会理事长



2009 年 2 月 5 日

# 前 言

建筑耗能已与工业耗能、交通耗能并列，成为我国能源消耗的三大“耗能大户”。尤其是建筑耗能伴随着建筑总量的不断攀升和居住舒适度的提升，呈急剧上扬趋势。随着城市发展，建筑将超越工业、交通等其他行业而最终居于社会能源消耗的首位。目前，建筑能耗约占全国能源消费总量的30%，其中北方城镇采暖能耗成为建筑能源消耗的最大组成部分，占全国城镇建筑总能耗的36%。

我国2/3以上的国土面积属严寒和寒冷地区，建筑供暖是保证生存的基本条件。随着生活水平和居住环境的改善，长江流域等夏热冬冷地区也呈现出冬季采暖的需求。我国人口众多，能源结构以煤炭为主，建筑用能带来城市冬季严重的环境污染和温室气体排放。因此，加强清洁能源技术的开发，推广太阳能供热采暖技术对实现城市建设的可持续发展有着非常重要的意义。因此，太阳能供热采暖是继太阳能热水之后，需要在建筑中推广应用的又一项太阳能热利用技术。

太阳能供热采暖的建筑称为太阳房。太阳能采暖系统可分为两大类，一类为主动式，称为主动式太阳房；另一类为被动式，称为被动式太阳房。主动式太阳能采暖系统是以一种能控制的方式，通过太阳能集热器、储热器、管道、风机和循环泵等设备来收集、储存和输配太阳能转换而得的热量，系统中的各部分均可控制而达到建筑物所需要的室温。早在20世纪80年代中期，法国科学家就着手研究太阳能组合系统，并推出一种称为“直接太阳能地板”的系统。进入90年代，奥地利、丹麦、芬兰、德国、瑞典、瑞士、荷兰等国家相继设计出各种形式的太阳能组合系统。1998年，国际能源署（IEA）太阳能加热和制冷项目（SHC）专门成立了“太阳能组合系统”任务组（Task 26），组织多国专家和企业立项开展太阳能采暖系统的关键技术研究，交流各国太阳能采暖的经验和工程案例，并在太阳能采暖系统的关键技术研究方面获得很多成果，促进该项技术规模推广。

由于主动式太阳能采暖系统复杂、初投资和维持费用高，该项技术在我国一直发展比较缓慢。近几年，部分太阳能企业和研究机构开展了主动式太阳能供热采暖系统的研究和示范。2004年，北京市平谷区在新农村建设中，启动了平谷区新农村新民居建设项目，确定选用主动式太阳能供热采暖技术，分别在将军关、玻璃台、挂甲峪、南宅、太平庄等试点村进行了规模化应用示范，取得了较好示范效果。平谷新农村的太阳能供热采暖示范项目，促进了太阳能供热采暖技术的提升，带动了北京其他区县以及其他省份的示范推广，为我国太阳能供热采暖技术推广起到了积极作用。

太阳能供热采暖是继太阳能热水之后，最具发展潜力的太阳能热利用技术，是今后应大力推广的技术。我国太阳能资源最为丰富的地区，都是气候寒冷、常规能源比较缺乏的偏远地区，如西藏、新疆、内蒙古等，既有实际的采暖需求，又有充足的资源条件，是应用太阳能供热采暖条件最为优越的地区。随着国家加大推进可再生能源应用力度，以及出台相应的优惠政策，太阳能供热采暖技术有着广泛应用前景。

太阳能供热采暖技术与国内广泛应用太阳能热水器相比，既有其共性技术，也存在较大

技术差异性，不能简单地将太阳能热水系统设计理念应用到太阳能供热采暖系统中。为提高我国太阳能供热采暖系统的设计水平，加快该项技术在建筑中的应用推广，本手册较为系统地介绍了国际能源署（IEA）SHC“太阳能组合系统”任务组在太阳能供热采暖领域的经验和工程案例及相关的研究成果。手册内容涵盖了太阳能基础知识，欧洲典型太阳能组合系统介绍，太阳能热水及供热采暖系统的设计、安装和验收，以及北京在新农村建设中规模化运用案例。

“中国终端能效项目”是由国家发展和改革委员会/联合国开发计划署/全球环境基金会共同发起的项目。“中国终端能效项目”子合同 B14——《北京低能耗建筑示范工程》由北京市建筑材料管理办公室负责实施，本手册是该项目成果之一。

手册主编单位是北京市建筑材料管理办公室，中国终端能效项目管理办公室对手册的编写出版给予了大力支持和指导。参编单位包括国家新能源工程技术研究中心、北京市太阳能研究所有限公司、北京九阳实业公司、昆明新元阳光科技有限公司、北京天鸣阳光太阳能科技有限公司、北京建筑技术发展有限责任公司。

这里要特别感谢国家发展和改革委员会、联合国开发计划署、全球环境基金会共同发起的“中国终端能效项目”，感谢项目办公室李玉琦先生、Flora Kan 女士、潘支明先生和马金津女士在《北京低能耗建筑示范工程》项目实施中给予的支持和帮助。

由于编写时间仓促、编者水平所限，书中疏漏之处难免，敬请读者批评指正，并提出宝贵意见，以便今后补充、修订。

何梓年 朱敦智  
2009 年 1 月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 太阳能基础知识 .....	1
1.1.1 地球的自转与公转 .....	1
1.1.2 天球及天球坐标系 .....	2
1.1.3 太阳角的计算 .....	4
1.1.4 倾斜面上的太阳射线 .....	4
1.1.5 太阳的周日视运动 .....	5
1.1.6 太阳时与时差 .....	6
1.1.7 地球大气层外的太阳辐射 .....	8
1.1.8 地球表面的太阳辐射 .....	9
1.1.9 中国的太阳能资源.....	12
1.2 太阳能集热器.....	13
1.2.1 太阳能集热器的分类.....	13
1.2.2 平板太阳能集热器.....	14
1.2.3 真空管太阳能集热器.....	18
1.2.4 空气太阳能集热器.....	24
1.3 太阳能利用概况.....	28
1.3.1 太阳能制冷空调系统.....	28
1.3.2 太阳能干燥系统.....	34
1.3.3 被动式太阳房.....	40
1.3.4 太阳能海水淡化系统.....	45
1.3.5 太阳能工业加热系统.....	50
1.3.6 太阳能热发电系统.....	52
<b>第 2 章 太阳能热水系统</b> .....	58
2.1 概述.....	58
2.2 太阳能热水系统的分类.....	58
2.2.1 按系统的特征进行分类.....	59
2.2.2 其他分类方法.....	60
2.3 系统的结构特点与系统分析.....	60
2.3.1 自然循环太阳能热水系统.....	60
2.3.2 强制循环太阳能热水系统.....	65
2.3.3 直流式太阳能热水系统.....	69
2.3.4 整体式太阳能热水系统.....	70
2.4 系统的热储存.....	72

2.4.1	利用水作为蓄热介质的优缺点	72
2.4.2	储热水箱	72
2.4.3	其他液体蓄热介质	75
2.5	常用太阳能热水系统简介	75
2.6	太阳能热水系统在民用建筑中的应用	84
2.6.1	建筑中太阳能热水系统的分类	84
2.6.2	太阳能热水系统与建筑结合的基本含义	86
2.6.3	建筑中太阳能热水系统的一般规定	86
2.6.4	建筑中太阳能热水系统的技术要求	87
2.6.5	太阳能集热器在建筑中的设置	87
2.6.6	太阳能热水系统的防冻	88
<b>第3章</b>	<b>太阳能采暖系统</b>	<b>90</b>
3.1	概述	90
3.2	太阳能采暖系统的特点	91
3.3	液体太阳能采暖系统	91
3.3.1	工作原理及基本结构	91
3.3.2	集热器的设置	92
3.3.3	储热器和辅助热源	94
3.3.4	散热系统	94
3.3.5	控制系统	95
3.4	空气太阳能采暖系统	96
3.4.1	工作原理及基本结构	96
3.4.2	空气集热器的性能和设计步骤	97
3.4.3	各参数对空气集热器性能的影响	101
3.4.4	岩石堆积床的性能分析	105
3.4.5	应用实例	106
3.5	太阳能热泵采暖系统	107
3.5.1	热泵的基本原理	107
3.5.2	直接膨胀式太阳能热泵采暖系统	111
3.5.3	非直接膨胀式太阳能热泵采暖系统	112
3.6	太阳能地板辐射采暖系统	113
3.6.1	主要优点	113
3.6.2	基本结构	114
3.6.3	地板辐射采暖的性能分析	115
3.6.4	具有相变蓄热材料的地板辐射采暖	118
<b>第4章</b>	<b>太阳能热水和采暖组合系统</b>	<b>122</b>
4.1	概述	122
4.2	太阳能组合系统的特征	122
4.2.1	采暖负荷和生活热水负荷的比较	122
4.2.2	贮水箱的温度分层	123



4.3	太阳能组合系统的分类 .....	124
4.3.1	按太阳能集热器提供采暖热量的储存方式分类 .....	124
4.3.2	按辅助加热器提供热量的管理方式分类 .....	124
4.3.3	其他可供选择的特征 .....	125
4.4	典型太阳能组合系统简述 .....	125
4.4.1	基本的直接太阳能地板 (1号系统) .....	126
4.4.2	集热回路与采暖回路之间用换热器沟通 (2号系统) .....	126
4.4.3	改进的直接太阳能地板 (3a号系统) .....	128
4.4.4	生活热水贮水箱用作采暖蓄热装置 (4号系统) .....	129
4.4.5	生活热水贮水箱用作具有回流能力的采暖蓄热装置 (5号系统) .....	130
4.4.6	生活热水贮水箱和集热器回流箱的蓄热 (6号系统) .....	130
4.4.7	采暖贮水箱和生活热水单负载换热器 (7号系统) .....	131
4.4.8	采暖贮水箱和生活热水双负载换热器 (8号系统) .....	132
4.4.9	小生活热水贮水箱在采暖贮水箱内 (9a号系统) .....	133
4.4.10	小生活热水贮水箱在采暖贮水箱内 (9b号系统) .....	134
4.4.11	改进的小生活热水贮水箱在采暖贮水箱内 (10号系统) .....	135
4.4.12	采暖贮水箱以及生活热水有负载换热器和外部辅助锅炉 (11号系统) .....	136
4.4.13	采暖贮水箱以及生活热水有负载换热器和外部辅助锅炉——改型 (12号系统) .....	137
4.4.14	采暖和生活热水用两个贮水箱——串联 (13号系统) .....	138
4.4.15	采暖和生活热水用两个贮水箱——并联 (14a号系统) .....	139
4.4.16	采暖和生活热水用两个贮水箱——并联 (14b号系统) .....	140
4.4.17	采暖贮水箱有两个温度分层器及生活热水有外部负载换热器 (15号系统) .....	141
4.4.18	采暖贮水箱有锥形温度分层器及生活热水有负载换热器 (16号系统) .....	142
4.4.19	有三个内置换热器的开放式贮水箱 (17号系统) .....	144
4.4.20	温度分层器内有生活热水的翼-管式负载换热器 (18号系统) .....	145
4.4.21	集中集热、分散供热、温度分层的贮水箱 (19号系统) .....	146
4.4.22	生活热水贮水箱在季节性蓄热的大采暖贮水箱内 (20号系统) .....	147
4.4.23	季节性蓄热及空气加热系统的大型温度分层贮水箱 (21号系统) .....	148
4.5	太阳能组合系统的热性能 .....	149
4.5.1	参考条件 .....	149
4.5.2	目标函数和补偿函数 .....	153
4.5.3	组合系统的特征化 .....	157
4.6	太阳能组合系统的过热保护 .....	161
4.6.1	太阳能组合系统的闷晒特性 .....	161
4.6.2	带有膨胀罐的承压集热回路的闷晒特性 .....	162
4.6.3	回流技术 .....	166

4.7	太阳能组合系统实例 .....	167
4.7.1	独户住宅(奥地利, 维尔顿) .....	167
4.7.2	带有办公室的多户住宅(德国, 法兰克福) .....	169
4.7.3	Klosterenga 生态住宅(挪威, 奥斯陆) .....	171
<b>第5章</b>	<b>太阳能供热系统设计</b> .....	<b>174</b>
5.1	概述 .....	174
5.1.1	概论 .....	174
5.1.2	一般要求 .....	174
5.1.3	系统设计流程 .....	175
5.2	供热负荷计算 .....	175
5.2.1	热水负荷计算 .....	175
5.2.2	采暖负荷计算 .....	176
5.3	太阳能集热系统 .....	176
5.3.1	系统选型 .....	177
5.3.2	太阳能集热面积的确定 .....	178
5.3.3	集热器的定位 .....	180
5.3.4	集热器的连接 .....	184
5.3.5	系统流量的确定和水泵的选型 .....	185
5.4	贮水箱 .....	187
5.4.1	水箱容积的确定 .....	187
5.4.2	生活热水系统 .....	188
5.4.3	间接式系统 .....	189
5.4.4	供热采暖系统 .....	190
5.5	辅助热源 .....	191
5.5.1	辅助加热量的计算 .....	191
5.5.2	辅助热源介绍 .....	192
5.5.3	辅助热源比较 .....	193
5.6	管路 .....	194
5.6.1	一般要求 .....	194
5.6.2	管路直径的确定 .....	194
5.6.3	管道阻力的计算 .....	196
5.6.4	膨胀罐容积的确定 .....	197
5.6.5	管路保温 .....	198
5.7	供热末端 .....	199
5.7.1	热水供应系统 .....	199
5.7.2	供暖系统 .....	202
5.8	系统控制 .....	204
5.8.1	运行控制 .....	204
5.8.2	防冻控制 .....	208
5.8.3	防过热控制 .....	211

5.8.4	控制设备技术要求 .....	214
5.9	太阳能系统设计的计算机软件介绍 .....	216
5.9.1	F-chart 法 .....	216
5.9.2	RETScreen 软件 .....	217
5.9.3	Polysun 软件 .....	219
5.9.4	太阳能供热系统软件比较 .....	220
<b>第 6 章</b>	<b>太阳能供热系统施工</b> .....	<b>221</b>
6.1	概述 .....	221
6.1.1	一般要求 .....	221
6.1.2	系统安装施工工艺流程图 .....	221
6.1.3	系统安装应具备的条件 .....	221
6.2	太阳能集热器安装 .....	222
6.2.1	不同建筑部位集热器设置 .....	222
6.2.2	土建构造和预埋件施工 .....	229
6.2.3	系统管道施工 .....	235
6.3	贮水箱安装 .....	236
6.3.1	一般要求 .....	236
6.3.2	水箱的制作、安装 .....	237
6.3.3	水箱的保温 .....	238
6.4	管道及其他设备安装 .....	241
6.4.1	基本要求 .....	241
6.4.2	水泵安装 .....	241
6.4.3	管路和其他附件安装 .....	243
6.4.4	控制设备安装 .....	244
6.4.5	管路保温与防腐 .....	250
6.5	太阳能系统的工程调试和验收 .....	253
6.5.1	一般规定 .....	253
6.5.2	系统调试 .....	254
6.5.3	系统验收 .....	255
<b>第 7 章</b>	<b>北京地区典型太阳能供热采暖工程示例</b> .....	<b>268</b>
7.1	挂甲峪村太阳能供热采暖系统 .....	268
7.1.1	项目概况 .....	268
7.1.2	工程概况 .....	269
7.1.3	系统节能效益分析 .....	274
7.1.4	系统运行和测试 .....	275
7.2	太平庄村太阳能供热采暖系统 .....	276
7.2.1	项目概况 .....	276
7.2.2	工程概况 .....	277
7.2.3	系统运行和监测 .....	280
7.3	樱桃沟村民居太阳能热水采暖项目 .....	280

7.3.1	项目概况 .....	280
7.3.2	工程概况 .....	281
7.4	将军关村太阳能供热采暖系统 .....	284
7.4.1	项目概况 .....	284
7.4.2	工程概况 .....	284
7.5	玻璃台村太阳能供热采暖系统 .....	286
7.5.1	项目概况 .....	286
7.5.2	工程概况 .....	286
附录 1	我国主要城市年平均和 12 月份设计用气象参数 .....	289
附录 2	北京地区不同朝向和安装倾角平面上平均太阳辐照量 .....	291
附录 3	热水用水定额 .....	296
附录 4	卫生器具一次和小时热水用水定额及水温 .....	297
附录 5	不同条件下热水温度及计算用冷水温度 .....	298
附录 6	卫生器具给水额定流量、公称管径和最低工作压力 .....	299
附录 7	采暖季太阳能保证率与建筑能耗和系统规模的关系 .....	300
参考文献	.....	301

# 第 1 章 概 论

## 1.1 太阳能基础知识

在太阳能供热采暖应用中，首先必须了解太阳辐射能，而到达地球表面的太阳辐射能直接受到天文、地理、几何、物理等多个因素的影响。

天文因素，譬如：日地距离、太阳赤纬、时角等；

地理因素，譬如：经度、纬度、海拔高度等；

几何因素，譬如：太阳高度、接收辐射面的倾角、方位角等；

物理因素，譬如：太阳光谱、太阳辐照度、大气的吸收与散射等。

因此，要了解到达太阳能采暖供热系统的太阳辐射能，掌握不同时间、不同日期、不同月份日照变化的规律，就必须了解地球与太阳的运动规律，了解太阳辐射在大气中的衰减情况，为设计太阳能采暖供热系统提供必要的基础知识<sup>[1~3]</sup>。

### 1.1.1 地球的自转与公转

地球上，一天中有昼夜之分，一年中又有春夏秋冬四季之分。这些自然现象，都是地球自转以及地球绕太阳公转而引起的。

地球每天由西向东绕着通过它自身的南极和北极的一根假想轴自转一周。这根假想轴，被称为“地轴”。地球自转一周  $360^\circ$ ，形成一个昼夜，每昼夜分为 24 小时，所以地球每小时自转  $15^\circ$ 。

地球除了自转以外，还绕太阳循着偏心率很小的椭圆形轨道运行，称为“公转”，其周期为一年。地球的自转轴与公转轴之间有  $23^\circ 27'$  夹角。在地球公转时，自转轴的方向始终不变，这就使得阳光有时直射赤道的位置，有时偏北，有时偏南，从而形成地球上春夏秋冬季节的变化。

图 1-1 是以春分、夏至、秋分、冬至四个典型季节日代表地球公转的运行图。春分日，

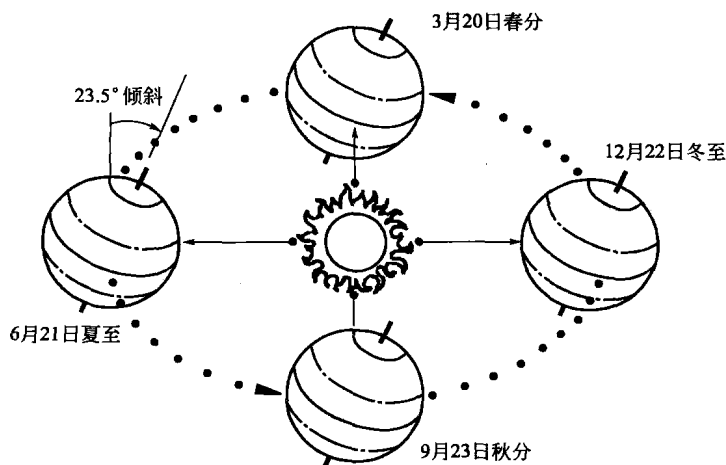


图 1-1 地球绕太阳运行示意图

阳光垂直照射在地球的赤道位置上，地面上昼夜相等；夏至日，阳光垂直照射在北纬 $23^{\circ}27'$ 的地表上，在南极圈（南纬 $66^{\circ}33'$ ）内整天见不到太阳，北极圈内则整天太阳不落；秋分日，阳光又垂直照射在地球的赤道位置上，地面上昼夜相等；冬至日，阳光垂直照射在南纬 $23^{\circ}27'$ 的地表上，北极圈（北纬 $66^{\circ}33'$ ）内整天不见阳光，南极圈内则整天太阳不落。

地球绕太阳运行一周，历时一年，计365天5小时48分46秒，这一周期在天文学上称为一个“回归年”。在实际日历中，规定一年365天，称为“平年”；每四年增加一天至366天，称为“闰年”。

由于地球绕太阳运行轨道是一个椭圆，所以地球和太阳之间的距离在一年之内是变化的。如表1-1所示，1月初地球过近日点，那时它离开太阳比日地平均距离小1.7%；7月初地球过远日点，那时它离开太阳比日地平均距离大1.7%；4月初和10月初，地球和太阳的距离等于日地平均距离。

表 1-1 日地距离的变化

日 期	距离/km	日 期	距离/km
1月初	147096000(最小)	7月初	152105000(最大)
4月初	149601000	10月初	149601000

所谓“日地平均距离”是指地球公转的长半径，它等于 $1.496 \times 10^8$  km，天文学常用它作为计量天体距离的单位，称为一个“天文单位”。由表1-1可以看出，一年中的日地距离变动大约5000000km。

由于到达地球表面太阳辐照度与距离的平方成反比，它所引起太阳辐射能量的变化为年平均值的 $\pm 3.5\%$ 之内。因此严格地说，不同日期测到的日射数值是不能相互比较的。为了克服这一点，规定以日地平均距离所对应的日射数值为标准值，其他任何时间测定的日射数值都修正到日地平均距离情况下去进行比较。根据平方反比定律，可以有以下公式：

$$S_{R_0} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 S_R \quad (1-1)$$

式中， $S_{R_0}$ 为日地平均距离所对应的日射数值； $S_R$ 为任何时间测定的日射数值； $R_0$ 为日地平均距离； $R$ 为任何时间的日地距离。

## 1.1.2 天球及天球坐标系

所谓“天球”，就是人们站在地球表面上，仰望天空，平视四周时看到的这个假想球面。根据相对运动的原理，太阳就好像在这个球面上周而复始地运动一样。

要确定太阳在天球上的位置，最方便的方法是采用“天球坐标系”。常用的天球坐标系有两种：赤道坐标系和地平坐标系。这两种天球坐标系既有区别，又有联系。

### 1.1.2.1 赤道坐标系

“赤道坐标系”如图1-2所示。

在赤道坐标系中，太阳 $S_0$ 的位置是由下列两个坐标决定的：

第一个坐标是圆弧 $QB$ ，称为“时角”，以 $\omega$ 表示。时角是从天子午圈上的 $Q$ 点起算的，即从太阳时的正午起算，按顺时针方向计量为正，反时针方向计量为负，也就是上午为负，

下午为正。它的数值等于离正午的时间（小时）乘以  $15^\circ$ 。

第二个坐标是圆弧  $BS_0$ ，称为“赤纬”，以  $\delta$  表示。赤纬  $\delta$  自天赤道起算。对于太阳来说，向北天极由两分日的  $0^\circ$  变化到夏至日的  $+23^\circ 27'$ ，向南天极则由两分日的  $0^\circ$  变化到冬至日的  $-23^\circ 27'$ 。

太阳赤纬  $\delta$  值无时无刻不在变化着。但在一天之内， $\delta$  的最大变化不超过  $0.5^\circ$ 。因此，在假设每一天的太阳赤纬  $\delta$  为一个恒定不变的数值时，所引入的误差  $< 0.5^\circ$ 。

太阳赤纬  $\delta$  值可由下式概算：

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

式中， $n$  为一年中的天数，如春分  $n=81$ ，则  $\delta=0$ 。

太阳赤纬  $\delta$  值随季节的变化如图 1-3 所示。

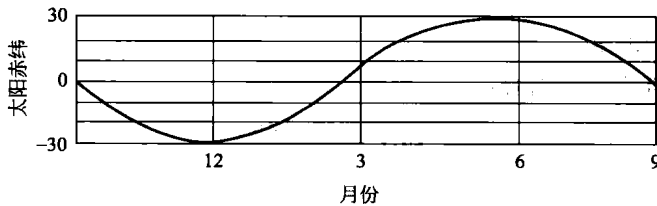


图 1-3 太阳赤纬的年变化

### 1.1.2.2 地平坐标系

“地平坐标系”如图 1-4 所示。

在地平坐标系中，太阳  $S_0$  的位置是由下面两个坐标确定的：

第一个坐标是圆弧  $ZS_0$ ，称为“天顶角”，以  $\theta_z$  表示；也可用圆弧  $S_0M$ ，称为“太阳高度角”，以  $\alpha_s$  表示。天顶角  $\theta_z$  和太阳高度角  $\alpha_s$  有下列关系：

$$\theta_z + \alpha_s = 90^\circ \quad (1-3)$$

第二个坐标是圆弧  $SM$ ，称为“方位角”，以  $\gamma_s$  表示，并取南点  $S$  为起点，向西（顺时针方向）计算为正，向东（逆时针方向）计算为负。

从以上介绍的两种天球坐标系可见，赤道坐标系是以“赤纬”和“时角”为坐标所组成的天球坐标系，地平坐标系是以“太阳高度角”和“方位角”为坐标所组成的天球坐

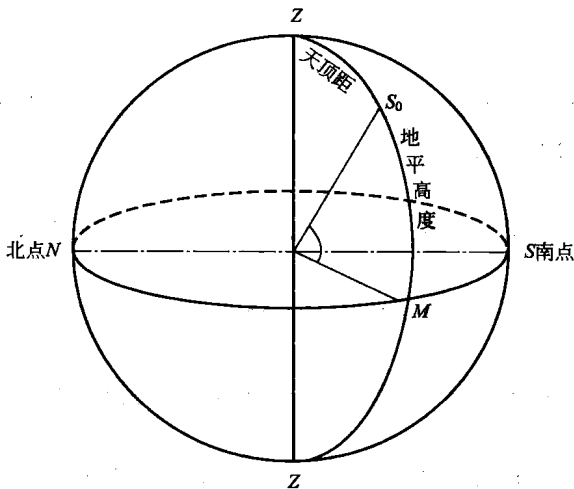


图 1-4 地平坐标系

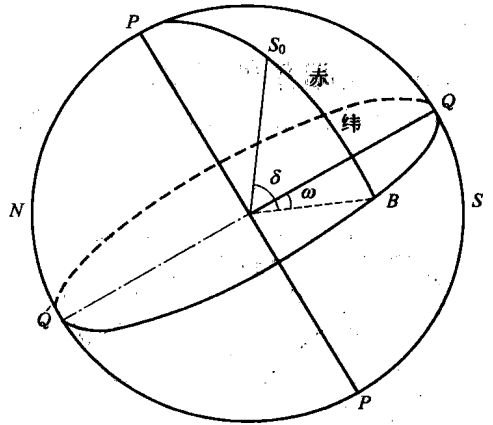


图 1-2 赤道坐标系

标系。

### 1.1.3 太阳角的计算

太阳能供热采暖系统的设计必然要涉及太阳高度角、方位角、日照时间等计算问题。在图 1-5 中, 根据球面三角形的有关定理, 可以推导出太阳高度角和方位角的计算式。

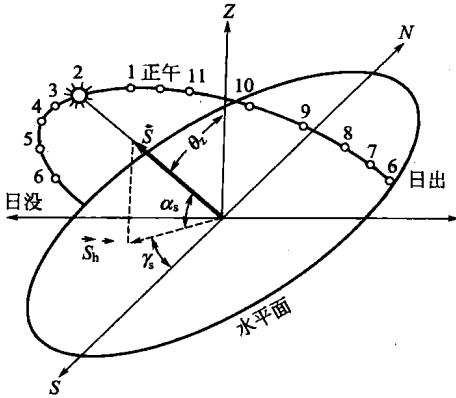


图 1-5 太阳高度角及方位角示意图

#### 1.1.3.1 太阳高度角

计算太阳高度角的表达式为:

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (1-4)$$

式中,  $\alpha_s$  为太阳高度角;  $\phi$  为地理纬度;  $\delta$  为太阳赤纬;  $\omega$  为时角。

当太阳正午时,  $\omega=0$ , 式(1-4)可简化为:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_s &= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \\ &= \cos(\phi - \delta) = \sin[90^\circ \pm (\phi - \delta)] \end{aligned} \quad (1-5)$$

当正午太阳正对天顶, 即  $\phi = \delta$  时, 则

$$\alpha_s = 90^\circ \quad (1-6)$$

#### 1.1.3.2 太阳方位角

计算太阳方位角的表达式为:

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad (1-7)$$

或

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \alpha_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \phi} \quad (1-8)$$

式中,  $\gamma_s$  为太阳方位角。

利用式(1-7)或式(1-8), 再根据地理纬度、太阳赤纬及观测时间, 即可算出任何地区、任何季节、任何时刻的太阳方位角。

### 1.1.4 倾斜面上的太阳射线

#### 1.1.4.1 太阳射线入射角

在太阳能供热采暖系统中, 太阳能集热器通常都是倾斜放置的, 到达太阳能集热器吸热表面上的太阳辐射能量随着太阳射线入射角而变化。

图 1-6 示出了倾斜面上太阳射线的入射角。

利用一系列三角函数关系, 通过推导、演算、整理, 最后可得倾斜面上太阳射线入射角的表达式:

$$\begin{aligned} \cos \theta_T &= (\sin \phi \cos S - \cos \phi \sin S \cos \gamma_n) \sin \delta + (\cos \phi \cos S + \sin \phi \sin S \cos \gamma_n) \cos \delta \cos \omega \\ &\quad + \sin S \sin \gamma_n \cos \delta \sin \omega \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中,  $\theta_T$  为倾斜面上太阳射线的入射角;  $S$  为倾斜面的倾角;  $\gamma_n$  为倾斜面的方位角。

对于给定地区和固定的倾斜面来说, 表征地理位置的纬度  $\phi$ 、倾斜面的倾角  $S$  和方位角  $\gamma_n$  都是已知的常数, 于是式(1-9)中前两项括号内的数值和第三项中前两个三角函数也都



是常数。因此，我们可将式(1-9)改写成如下实用形式：

$$\cos\theta_T = A\sin\delta + B\cos\delta\cos\omega + C\cos\delta\sin\omega \quad (1-10)$$

其中，

$$A = \sin\phi\cos S - \cos\phi\sin S\cos\gamma_n$$

$$B = \cos\phi\cos S + \sin\phi\sin S\cos\gamma_n$$

$$C = \sin S\sin\gamma_n$$

从式(1-10)可见，某一地区固定的太阳能集热器的太阳射线入射角仅仅是太阳赤纬和时间的函数。利用这一公式，可以计算出任何地区、任何季节、任意倾斜面上的太阳光线入射角，从而对太阳能集热器的设计做出最佳的选择。

对于北半球，太阳能集热器通常是朝南放置的，对于这些面向赤道的集热器，其方位角 $\gamma_n=0$ 。这样，式(1-9)可简化为：

$$\cos\theta_T = (\sin\phi\cos S - \cos\phi\sin S)\sin\delta + (\cos\phi\cos S + \sin\phi\sin S)\cos\delta\cos\omega \quad (1-11)$$

式中， $\theta_T$ 为朝向正南倾斜面上太阳射线的入射角。

#### 1.1.4.2 日照起止时间

当太阳射线与倾斜面平行时，太阳射线的入射角 $\theta_T=90^\circ$ 。在这一瞬间，到达倾斜面上的太阳辐射能量为零，并以此表示倾斜面上日照开始时间或日照结束时间。由式(1-9)可得：

$$D\sin\omega_c + E\cos\omega_c + F = 0 \quad (1-12)$$

其中，

$$D = \sin S\sin\gamma_n\cos\delta$$

$$E = (\cos\phi\cos S + \sin\phi\sin S\cos\gamma_n)\cos\delta$$

$$F = (\sin\phi\cos S - \cos\phi\sin S\cos\gamma_n)\sin\delta$$

式中， $\omega_c$ 为倾斜面上日照起止时刻的时角。它是由倾斜面上零太阳辐射值转到正太阳辐射值，或由正太阳辐射值转到零太阳辐射值的临界时角。

#### 1.1.5 太阳的周日视运动

在地球上，我们每天都能够看到太阳东升西落的运动。如图1-7所示，太阳从东方的地平线上冉冉升起，一直到天空的最高位置，然后转向西方逐渐降落到地平线下，由于这种现象周而复始地出现，所以叫做“太阳的周日视运动”，它是地球每天自转的反映。

太阳的周日视运动，随观测地点和时令季节而异。太阳在天球上的行程，称为“太阳轨迹平面投影图”。图1-8示出了北纬 $40^\circ$ （北京地区）的太阳轨迹平面投影图。

从图1-8可清楚地看到：正午时，太阳高度达到最高位置，但太阳高度以及日出日没的方位

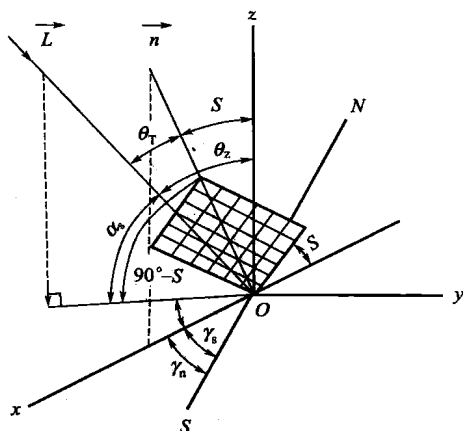


图 1-6 倾斜面上太阳射线的入射角

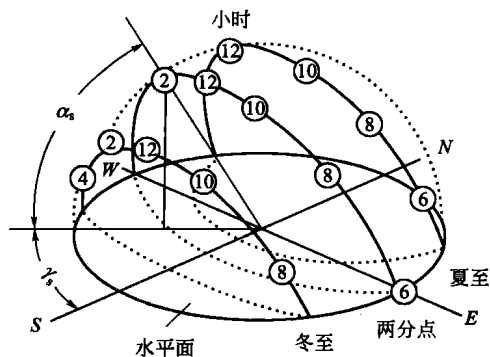


图 1-7 太阳的周日视运动