



太阳能热利用实用技术丛书

# 太阳能 供热采暖技术

朱 宁 李继民 王新红 武赏磊 编著

TAIYANGNENG  
GONGRE CAINUAN JISHU



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



太阳能热利用实用技术丛书

# 太阳能 供热采暖技术

朱 宁 李继民 王新红 武赏磊 编著

TAIYANGNENG  
GONGRE CAINUAN JISHU



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是《太阳能热利用实用技术丛书 太阳能供热采暖技术》分册，本书汇集了太阳能供热采暖领域的最新研究成果和国内外先进技术与案例分析，尤其是讲解了太阳能与其他新能源之间的结合以及季节蓄热太阳能采暖系统的相关理论知识。本书主要内容包括：太阳能供热采暖基础知识、主动式太阳能供热采暖系统设计及施工安装、太阳能液体集热器供热采暖系统的类型及特点、季节蓄热太阳能供热采暖系统、采暖系统末端、太阳能空气集热器供热采暖系统以及被动式太阳能采暖。

本书适合太阳能生产企业、设计单位、工程公司的工程设计人员以及研发人员阅读参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能供热采暖技术 / 朱宁等编著. —北京: 中国电力出版社, 2017. 5

(太阳能热利用实用技术丛书)

ISBN 978-7-5198-0103-8

I. ①太… II. ①朱… III. ①太阳能—供热②太阳能采暖 IV. ①TK511 ②TU832.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 296033 号

---

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 孙 芳

责任校对: 太兴华

装帧设计: 王英磊 张 娟

责任印制: 蔺义舟

---

印 刷: 北京市同江印刷厂

版 次: 2017 年 5 月第一版

印 次: 2017 年 5 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 22

字 数: 540 千字

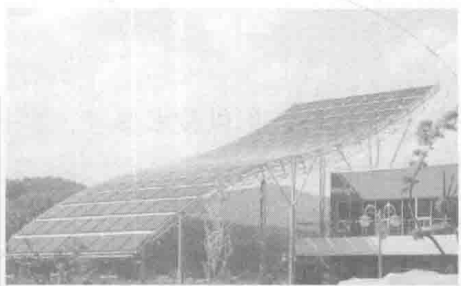
印 数: 0001—1500 册

定 价: 88.00 元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换



## 前言

随着国民经济的持续发展，人们对居住舒适性的要求越来越高。在我国，冬季采暖已经跨越了以前的地理分界线，进入了除极温暖地区（例如海南）以外所有省份。据统计，目前建筑能耗已经占到了我国全社会能源消费量的30%以上，而在建筑能耗中，供热采暖用能约占45%，可以说供热采暖已经成为节能减排的重点。另一方面，基于“创新、协调、绿色、开放、共享”理念下的全国冬季采暖大面积取消燃煤的行动，又向我们提出新的挑战：如何更好地采用新能源、可再生能源解决冬季采暖问题。

太阳能作为取之不尽的清洁能源，是人类赖以生存的重要能源形式之一。利用太阳能部分满足建筑冬季采暖的需求，可以获得巨大的节能和环保效应。太阳能供热采暖的利用方式是多种多样的，我国从20世纪70年代就开展了相关研究。其中，甘肃自然能源研究所从1977年开始，在甘肃民勤建立了我国第一栋实验性太阳房，开始从事被动式太阳房的研究；主动式太阳能采暖系统的研究起步稍晚，21世纪初曾在北京掀起了一个研发高潮，一些企业和科研院所相继在平谷挂甲峪、将军关、玻璃台、南宅、太平庄做了大量的样板工程，积累了丰富的经验也遇到了不少难题。这些项目的实施为太阳能在供热采暖领域的研发起到了很好的推动作用。

国外从20世纪80年代就开始了太阳能采暖的系统研究，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（Task26），组织多个国家开展太阳能采暖系统关键技术研究 and 交流，最终总结形成了23个典型案例，并出版了相关论著。近几年，丹麦在季节蓄热太阳能供热采暖系统方面的研究和实际投入，及其所带来的经济和社会效益，最终使丹麦政府将其上升到国家能源战略层面，这一突破又为大家提供了太阳能供热采暖更广的思路。

太阳能资源因为其固有的不稳定性、分散性、季节性等特点，影响了太阳能在采暖领域的实际使用，研究太阳能采暖要比研究太阳能热水，其难度更大。如何将太阳能与其他能源形式结合，尤其是与其他清洁能源结合，是太阳能采暖研发的关键。

本书作者结合自身多年从事太阳能研发的实践经验和教训，同时参考国内外最新研究成果，完成该书。期待能为读者提供一种系统的、新的解决问题的方法，也期待我们的思考和实践能够推动我国太阳能采暖事业的发展。

本书各章节的作者分别是：第一章、第二章、第四章、第七章，朱宁；第三章，王新红；第五章，李威；第六章，李继民。

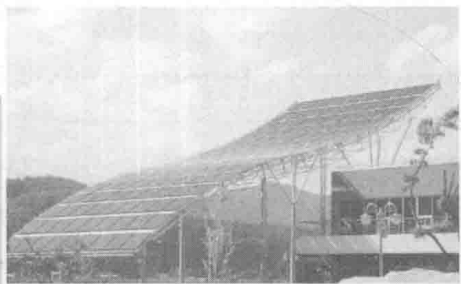
武赏磊先生对全书进行了校对、排版和部分制图、制表工作。

行业同仁为本书提供了大量的案例和数据。何梓年教授对本书进行了多次指导和审阅。

在此一并表示感谢。

希望本书对于我国太阳能供热采暖系统工程的设计、安装、验收能提供技术参考。本书编写过程中，编者尽管付出了努力，但疏漏之处在所难免。敬请读者批评指正。

编者



# 目 录

前言	
<b>第一章 太阳能供热采暖基础知识</b> .....	1
第一节 基本概念及一般规定.....	1
第二节 室内采暖系统的设计热负荷.....	2
第三节 室内采暖系统的末端装置.....	13
第四节 室内采暖系统的循环方式.....	17
第五节 太阳能供热采暖系统——组合式太阳能系统.....	25
<b>第二章 主动式太阳能供热采暖系统设计及施工安装</b> .....	38
第一节 概述.....	38
第二节 系统选型.....	39
第三节 太阳能集热系统的设计及施工.....	41
第四节 太阳能集热系统管网的设计及施工.....	60
第五节 采暖、热水负荷计算.....	79
第六节 蓄热系统设计.....	80
第七节 辅助能源设备选型.....	81
第八节 控制及计量系统设计.....	91
<b>第三章 太阳能液体集热器供热采暖系统的类型及特点</b> .....	93
第一节 概述.....	93
第二节 太阳能+常规能源采暖系统.....	93
第三节 太阳能+空气源热泵采暖系统.....	112
第四节 太阳能+水源—空气源热泵采暖—制冷—热水系统.....	124
<b>第四章 季节蓄热太阳能供热采暖系统</b> .....	149
第一节 概述.....	149
第二节 季节蓄热太阳能供热采暖系统类型.....	150
第三节 季节蓄热太阳能供热采暖系统组成部分.....	152
第四节 国内外季节蓄热太阳能供热采暖系统案例介绍.....	182
<b>第五章 采暖系统末端</b> .....	194
第一节 地暖.....	194
第二节 风机盘管.....	204
第三节 暖气片.....	214

第四节	毛细管网	225
第六章	太阳能空气集热器供热采暖系统	234
第一节	太阳能空气集热器供热采暖系统简介	234
第二节	太阳能空气集热器供热采暖系统的设计	244
第三节	太阳能空气集热器供热采暖系统部件的选用	251
第四节	太阳能空气集热器供热采暖系统案例	262
第七章	被动式太阳能采暖	273
第一节	概述	273
第二节	被动式太阳能采暖的分类及工作原理	274
第三节	被动式太阳房设计	283
第四节	被动式太阳房案例	298
附录		308
附录 A	我国北方一些城市等于或低于某一室外温度的平均延续小时数 (1951~1980 年)	309
附录 B	辅助建筑物及辅助用室的冬季室内计算温度 $t_i$ (最低值)	310
附录 C	一些建筑材料的热物理特性表	310
附录 D	常用围护结构的传热系数 $K$ 值	310
附录 E	渗透空气量的朝向修正系数 $n$ 值	311
附录 F	严寒和寒冷地区主要城市的居住建筑物耗热量指标	311
附录 G	热水用水定额	317
附录 H	冷水计算温度	319
附录 I	热工性能参数限值	319
附录 J	水在各种温度下的密度 $\rho$ (压力为 100kPa 时)	324
附录 K	主要代表城市太阳能气象参数	324
附录 L	混凝土填充式热水辐射供暖地面单位面积散热量	326
附录 M	通风管道单位长度摩擦阻力线算图	343
参考文献		344

## 第一章

## 太阳能供热采暖基础知识

## 第一节 基本概念及一般规定

对于太阳能的热利用,近 20 年主要集中在热水领域,如很多城市都出台了“新建民用建筑配套太阳能热水系统”等相关文件,大家的思维习惯和认识也就主要集中在热水方面。“太阳能供热采暖”是近几年太阳能热利用领域中得到蓬勃发展的新领域,它在很多方面与太阳能热水应用不同,同时又由于太阳能这种能源的不稳定性、热流密度低等特点决定了太阳能供热采暖与常规能源的供暖系统也不同。

本节将首先介绍常规供暖的基本概念,再介绍太阳能供热采暖系统与常规供暖系统不同的一些特殊概念。

供暖,是指用人工方法通过消耗一定能源向室内供给热量,使室内保持生活或工作所需温度的技术、装备、服务的总称。供暖系统由热媒设备(热源)、热媒输送和热媒利用(散热设备)三个主要部分组成。这三个主要组成部分在构造上都在一起的供暖系统,称为局部供暖系统(也可以称为分散供暖)。例如火炉、火炕、电热供暖、户式燃气壁挂炉、户式空气源热泵供暖等。其中热源和散热设备分别设置,用热媒管道相连接,由热源向多个热用户供给热量的供暖系统,称为集中供暖系统。

太阳能供热采暖系统(Solar Heating System),是指将太阳能转换成热能、供给建筑物冬季采暖和全年其他用热的系统,系统主要部件有太阳能集热器、换热蓄热装置、控制系统、其他能源辅助加热系统/换热装置、泵或风机、连接管道和采暖末端。太阳能供热采暖系统与常规能源供暖系统一个较大的区别在于常规系统往往在冬季采暖结束以后就不再发挥其他的作用,而太阳能供热采暖系统往往伴随着全年的其他形式的供热,例如全年生活热水供应。太阳能供热采暖系统与太阳能热水系统一个较大的区别在于前者在采暖季与非采暖季的负荷变化很大,即使在采暖季每天的负荷变化也很大,而热水系统的负荷是比较稳定而且有规律。所以我们不能简单地把太阳能供热采暖这种综合系统称为太阳能采暖系统,在本书中,只有太阳能供热采暖系统专指供暖而不考虑其他形式的能源供应时,我们才简称为“太阳能采暖系统”。

太阳能供热采暖系统与常规供暖系统相比还有一个较大的差别在于,太阳能供热采暖系统中往往会有蓄热装置,这是由太阳辐照的时间性和波动性决定的。蓄热装置起到了平衡供给与消耗的波动的作用,其蓄热能力是根据系统的设计决定的。有的系统仅需储存当天白天用不了的热量或者少数几天的热量(例如周末),我们将仅仅可以蓄存数天获得的太阳能的系统称为短期蓄热太阳能供热采暖系统(Solar Heating System with Short-term Storage)。



太阳能供热采暖系统还存在一个问题，即在非采暖季，太阳能产生的大量的热量无法消耗，而且还往往会产生系统过热的问题，就有人提出来将非采暖季太阳能产生的大量的热储存起来供冬季使用的方案。这样我们将“设置的储热设备容量，可以储存非采暖期获得的太阳能量，用于冬季供热采暖的太阳能供热采暖系统”称为季节蓄热太阳能供热采暖系统（Solar Heating System with Seasonal Storage）。

太阳能供热采暖系统与常规供暖系统相比还有一个较大的差别在于，太阳能供热采暖系统中往往会有其他能源辅助加热/换热设备。也就是说在太阳能供热采暖系统中会有两套/多套热源。这也是因为仅凭太阳能无法做到连续稳定的供应。辅助设备原则上可以是工业废热、燃油/气锅炉、燃煤采暖炉（目前已经限制/禁止使用）、热泵等能源形式，但往往能比较方便得到燃气资源或工业废热资源的地方是不需要做太阳能供热采暖系统的。所以真正方便使用的辅助能源是电，但是电绝不可以直接加热使用，这是因为电是最高品味的能源形式，用电直接加热产生低温热水满足采暖的需要本身就是极大的浪费。那么如何利用电呢？利用热泵技术，所谓的热泵就是利用驱动（此处指电驱动）能使能量从低位热源流向高位热源的装置。其中空气源热泵就是以空气为低位热源的热泵，但空气源热泵其实在寒冷气候条件下也是无法做到连续、稳定的供热的，这是因为空气源热泵的低温热源是很不稳定的，也就直接影响了热量的输出，所以在太阳能结合空气源热泵的系统中要综合考虑如何才能发挥好整个系统的作用。水源热泵就是以水为低位热源的热泵，地源热泵就是以土壤或地下水为热源，水为载体在封闭环路中循环进行热交换的热泵。地源热泵通常有地下埋管、井水抽灌和地表水盘管等系统形式。还有双源热泵，它是由两种热泵耦合向外提供热量的设备，例如水源和空气源耦合的热泵。

太阳能供热采暖系统与常规采暖系统相比，还有一个较大的差别在于，它们的设计热负荷不同，这一点将在下一节介绍。

在太阳能供热采暖系统的组成中，太阳能集热器就是系统的主要热源，根据太阳能集热方式的不同将太阳能供热采暖系统分为液体工质集热器太阳能供热采暖系统和太阳能空气集热供热采暖系统，前者使用液体工质太阳能集热器，后者使用太阳能空气集热器。

判定太阳能供热采暖系统的经济性往往会用到“系统费效比”这一概念。系统费效比，指太阳能供热采暖系统的增投资（请注意，一定是增加的投资而不是全部投资）与系统在正常使用寿命期内的总节能量的比值（元/kWh），表示利用太阳能节省每千瓦小时常规能源热量的投资成本。这个数值越小应该说系统的经济性越好。

## 第二节 室内采暖系统的设计热负荷

供暖系统设计热负荷是供暖设计中最基本的数据。它直接影响到供暖系统方案的选择、蓄热装置容积的确定，连接管道管径、末端散热设备的确定和水泵的选型。关系到系统的使用效果和经济性。

在太阳能采暖系统设计中所用到的热负荷是建筑物耗热量，它是指在计算采暖期室外平均温度条件下，为保持室内设计计算温度，建筑物在单位时间内消耗的、需由室内供暖设备供给的热量。而以采暖期室外计算温度为条件计算出的需供给的热量叫采暖热负荷（也叫采暖设计热指标）。同一栋建筑的“采暖热负荷”往往要明显高于“建筑物耗热量”。需要注意



的是在计算太阳能集热系统负担的采暖热负荷时是以“建筑物耗热量”为依据的，但在计算辅助加热/换热设备的负荷时以建筑物“采暖热负荷”为依据。之所以会有这个区别，笔者认为太阳能采暖系统在设计时一般太阳能保证率不大于 50%，这样太阳能提供的热量只需要满足白天就可以了，不太考虑白天多余的热可以储存起来满足全天（尤其是气温较低时间段的全天负荷），而采暖期室外计算温度取得是当地保障性很强的一个较低温度，所以不适合太阳能主要满足白天的设计初衷。

具体来讲，以上两个参数的唯一区别就在于选取的室外参照温度的不同，一个是采暖期室外平均稳定，一个是采暖期室外计算温度。在建筑物“采暖热负荷”中的室外计算温度  $t'_{w}$ ，应采用历年平均不保证 5 天的日平均温度。对大多数城市来说，是指 1951~1980 年共 30 年的气象统计资料里，不得有多于 150 天的实际日平均温度低于所选定的室外计算温度值。例如在 1951~1980 年间，北京市室外日平均温度低于和等于  $-9.1^{\circ}\text{C}$  共有 134 天，日平均温度低于和等于  $-8.1^{\circ}\text{C}$  共有 233 天。取整数值后，确定北京市的供暖室外计算温度是采暖期室外平均温度  $t'_{w}$  为  $-9^{\circ}\text{C}$ 。可见采暖期室外计算温度明显低于采暖期室外平均温度。例如北京的采暖期室外平均温度为  $-1.6^{\circ}\text{C}$ 。我国北方主要城市的采暖期室外计算温度和室外平均温度请见附录 A。

采暖系统的设计热负荷不论是采用基于采暖期室外平均温度的“建筑物耗热量”，还是采用基于采暖期室外计算温度的“采暖热负荷”，其计算原则、方法和公式都是一样的。在太阳能供热采暖系统中，主要考虑以下两项建筑物的失热量：一个是通过围护结构的传热耗热量  $Q_{HT}$ ，另一个是空气渗透耗热量  $Q_{INF}$ 。

当然还有冷风侵入耗热量、水分蒸发的耗热量、加热由外部运入的冷物料和运输工具的耗热量以及通风系统将空气从室内排到室外所带走的热量，这些热量通常所占的比例很小，在此就忽略不计了。

建筑物的主要得热量是建筑物内部得热量  $Q_{IH}$ 。

得热量还有热物料的散热量、其他非供暖系统热表面的散热量、太阳辐照进入室内的热量，同样这些热量所占的比例很小或者不宜确定，在此就忽略不计了。

由此可以得出建筑物耗热量可以按下式计算

$$Q_H = Q_{HT} + Q_{INF} - Q_{IH} \quad (1-1)$$

式中  $Q_H$ ——建筑物耗热量，W；

$Q_{HT}$ ——通过围护结构的传热耗热量，W；

$Q_{INF}$ ——空气渗透耗热量，W；

$Q_{IH}$ ——建筑物内部得热量（包括照明，电器，炊事和人体散热等），W。

下面就具体分析一下这些热量：

### 一、通过围护结构的传热耗热量

在工程设计中，通过围护结构的传热耗热量是按一维稳态传热过程进行计算的，即假设在计算时间内，室内、外空气的温度和其他传热过程参数都不随时间变化。

通过围护结构的传热耗热量可以按下式计算

$$Q_{HT} = (t_i - t_e) \left( \sum \epsilon KF \right) \quad (1-2)$$

式中  $Q_{HT}$ ——通过围护结构的传热耗热量，W；

$t_i$ ——室内空气计算温度，按照《采暖通风与空气调节设计规范》GB 50019 中规定

范围的低限选取,℃;

$t_e$ ——采暖期室外平均温度,℃;

$\epsilon$ ——各个围护结构传热系数的修正系数,参照相关的建筑节能设计行业标准选取;

$K$ ——各个围护结构的传热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$F$ ——各个围护结构的面积,  $m^2$ 。

下面对上式中各项分别讨论。

### 1. 室内计算温度 $t_i$

室内计算温度是指距地面 2m 以内人们活动地区的平均室内温度,对于一般民用建筑可以用其房间无冷热源影响的几何中心处的温度代表。许多国家所规定的冬季室内温度标准大致在 16~22℃ 范围内。据国内外有关卫生部门的研究结果表明:当人体衣着适宜,保暖量充分且处于安静状态时,室内温度 20℃ 比较舒适,18℃ 无冷感,15℃ 是产生明显冷感的温度界限。我们现行 GB/T 18883《室内空气质量标准》和 GB 50019—2003《采暖通风与空气调节设计规范》(简称《暖通规范》,下同)都有详细的规定。民用建筑的主要房间宜采用 16~24℃,我们一般取 16℃ 作为计算的基础。其他功能用房的室内计算温度请见附录 B。

### 2. 采暖期室外平均温度 $t_e$

采暖期室外平均温度根据一定历史时期的气象统计资料求算数平均数就可以得到。典型城市的采暖期室外平均温度参看附录 A。

### 3. 围护结构传热系数的修正系数 $\epsilon$

对供暖房间某围护结构外侧不是与室外空气直接接触的,而是中间隔着不供暖的空间时如图 1-1 所示,通过该围护结构的传热量应为  $Q_{HT} = KF(t_i - t_h)$ , 其中的  $t_h$  是不供暖房间的温度,而不再是室外空气的温度。为了统一计算公式,引进了围护结构传热系数的修正系数  $\epsilon$ , 即

$$\epsilon = \frac{t_i - t_h}{t_i - t_w} \quad (1-3)$$

式中  $t_i$ ——采暖期室内计算温度;

$t_h$ ——不供暖房间或空间的空气温度,℃;

$t_w$ ——采暖期室外计算温度,℃。

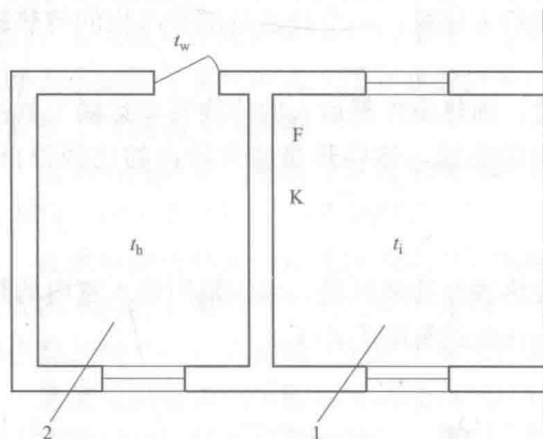


图 1-1 计算温差修正系数的示意图

1—供暖房间; 2—非供暖房间

围护结构传热系数的修正系数  $\epsilon$  值的大小,取决于不供暖空间的保温情况和透气状况。各种不同情况的围护结构传热系数的修正系数  $\epsilon$  值可见表 1-1。

表 1-1 围护结构传热系数的修正系数  $\epsilon$

围护结构特征	$\epsilon$
外墙、屋顶、地面以及与室外相通的楼板等	1.00
闷顶和与室外空气相通的非供暖地下室上面的楼板等	0.90
非供暖地下室上面的楼板,外墙有窗时	0.75
非供暖地下室上面的楼板。外墙上无窗且位于室外地坪以上时	0.60

续表

围护结构特征	$\epsilon$
非供暖地下室上面的楼板。外墙上无窗且位于室外地坪以上时	0.40
与有外门窗的不供暖楼梯间相邻的隔墙 (1~6 层建筑)	0.60
与有外门窗的不供暖楼梯间相邻的隔墙 (7~30 层建筑)	0.50
与有外门窗的非供暖房间相邻的隔墙	0.70
与无外门窗的非供暖房间相邻的隔墙	0.40
伸缩缝墙、沉降缝墙	0.30
防震缝墙	0.70

注 此外, 如果两个房间的温差大于或等于  $5^{\circ}\text{C}$  时, 应单独计算其传热量。

#### 4. 各个围护结构的传热系数 $K$

此处的传热系数既不是传热学意义上热传导部分的导热系数也不是对流换热的换热系数, 它是从内表面的对流和辐射再到墙壁的热传导再到外表面的对流和辐射换热的复合的一个综合系数  $K$ 。辐射换热占的比例比较小, 忽略不计, 主要考虑对流换热和热传导。这个系数是一个综合系数, 不是可以考测量得到的, 它是利用热阻的概念推导得出的。工程计算中常用的换热系数和换热热阻可见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 内表面换热系数  $\alpha_n$  与热阻  $R_n$

围护结构内表面特征	$\alpha_n [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$	$R_n [\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}]$
墙、地面、表面平整或有肋状突出物的顶棚, 当 $h/s \leq 0.3$ 时	8.7	0.115
有肋状突出物的顶棚, 当 $h/s > 0.3$ 时	7.6	0.132

注  $h$  为肋高 (m);  $s$  为肋间净距 (m)。

表 1-3 外表面换热系数  $\alpha_w$  与热阻  $R_w$

围护结构外表面特征	$\alpha_w [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$	$R_w [\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}]$
外墙与屋顶	23	0.04
与室外空气相通的非采暖地下室上面的楼板	17	0.06
闷顶和外墙上有窗的非采暖地下室上面的楼板	12	0.08
外墙上无窗的非采暖地下室上面的楼板	6	0.17

匀质多层材料 (平壁) 的传热系数  $K$  值一般可以用式 (1-4) 计算, 其传热过程如图 1-2 所示。

$$K = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_w}} = \frac{1}{R_n + R_j + R_w} \quad (1-4)$$

式中  $R_0$ ——围护结构的传热阻,  $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;

$\alpha_n$ 、 $\alpha_w$ ——围护结构内表面、外表面的换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$R_n$ 、 $R_w$ ——围护结构内表面、外表面的传热阻,  $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;

$\delta_i$ ——围护结构各层的厚度, m;

$\lambda_i$ ——围护结构各层材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$R_j$ ——由单层或多层材料组成的围护结构各材料层的热阻,  $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

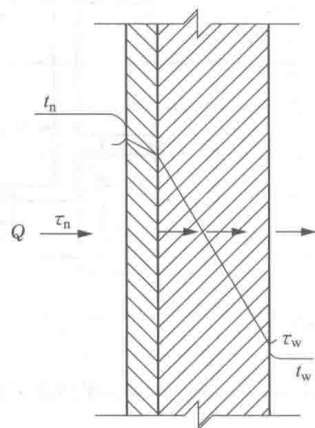


图 1-2 通过围护结构的传热过程

一些常用建筑材料的导热系数  $\lambda$  值，可见附录 C；一些常用围护结构的传热系数  $K$  值，可见附录 D。

由于传统的实心砖墙的传热系数  $K$  值较高，从节能的角度出发，采用各种形式的空心砌块或填充保温材料的墙体等日益增多。这种由两种以上材料组成的、两向非匀质围护结构的传热系数  $K$  值的计算比较复杂，属于二维传热过程，通常采用近似计算方法或实验数据。读者可以查阅相关方法，本书就不做赘述。

在现在的节能建筑中，围护结构也开始采用空气间层以减少传热量，例如双层玻璃、空气屋面板等。间层中的空气的导热系数要远远小于围护结构其他材料的值，从而增加了围护结构的传热热阻。空气间层传热过程同样是辐射和对流换热的综合的复杂的过程，空气间层的热阻很难理论计算，在工程设计中，可按表 1-4 的数值计算。

表 1-4 空气间层热阻  $R'$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ )

位置、热流状况	间层厚度 $\delta(\text{cm})$						
	0.5	1	2	3	4	5	6 以上
热流向下 (水平、倾斜)	0.103	0.138	0.172	0.181	0.189	0.198	0.198
热流向上 (水平、倾斜)	0.103	0.138	0.155	0.163	0.172	0.172	0.172
垂直空气间层	0.103	0.138	0.163	0.172	0.181	0.181	0.181

在冬季，室内热量通过靠近外墙的地面传到室外的路径较短，热阻较小，而通过远离外墙地面传到室外的路程较长，热阻较大。在工程设计中，一般也是采取近似方法计算，可详见有关供暖通风设计手册。

### 5. 围护结构传热面积的丈量

不同围护结构传热面积的丈量方法按图 1-3 的规定计算。

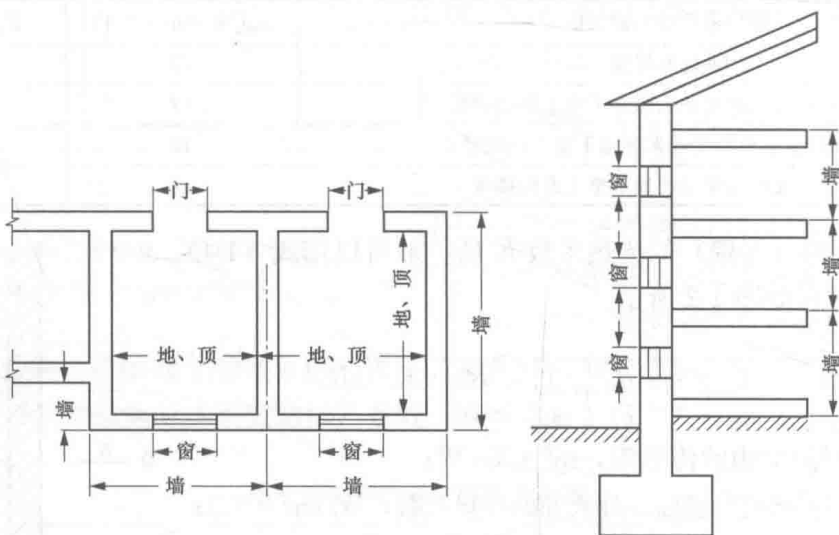


图 1-3 围护结构传热面积的尺寸丈量方法

注：平屋顶，顶棚面积按建筑物外廓尺寸计算。

外墙面积的丈量，高度从本层地面算到上层的地面（底层除外，见图 1-3）。对平屋顶的建筑物，最顶层的丈量是从最顶层的地面到平屋顶的外表面的高度；而对有闷顶的斜屋面，



算到闷顶内的保温层表面。外墙的平面尺寸,应按建筑物外廓尺寸计算。两相邻房间以内墙中线为分界线。门、窗的面积按外墙外面的净空尺寸计算。其他更详细的丈量方法可详见有关供暖通风设计手册。

#### 6. 围护结构的修正耗热量

按照以上方法计算出的建筑物耗热量是稳定、理想条件下的耗热量,它还受到诸多因素的影响,例如朝向、风力以及高度等。这些耗热量的修正计算可详见有关供暖通风设计手册。

### 二、建筑物内部得热量

建筑物内部得热量主要是人体散热量、炊事和照明散热量以及太阳辐射进入室内的热量,对于前三项一般散热量不大且不稳定,往往忽略不计。太阳辐射的得热量将在本书第七章被动式太阳房中详述。

### 三、空气渗透耗热量

在风力和热压造成的室内外压差作用下,室外的冷空气通过门、窗等缝隙渗入室内,被加热后逸出。这部分冷空气从室外温度加热到室内温度所消耗的热量,被称为空气渗透耗热量,并按下式计算。

$$Q_{\text{INF}} = (t_i - t_e)(c_p \rho N V) \quad (1-5)$$

式中  $Q_{\text{INF}}$ ——空气渗透耗热量, W;

$c_p$ ——空气比热容,取  $0.28 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$\rho$ ——空气密度,取  $t_e$  条件下的值,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$N$ ——换气次数,次/h;

$V$ ——换气体积,  $\text{m}^3/\text{次}$ 。

其中换气体积  $V$  按照下式计算

$$V = L l n m^2 / h \quad (1-6)$$

式中  $L$ ——每米门、窗缝隙渗入室内的空气量,按当地冬季室外平均风速,采用表 1-5 的数据,  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ ;

$l$ ——门、窗缝隙的计算长度, m;

$n$ ——渗透空气量的朝向修正系数。

《暖通规范》给出了我国 104 个城市的  $n$  值。可见附录 E。

表 1-5 每米门、窗缝隙渗入的空气量  $L$  [ $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ ]

门窗类型	冬季室外平均风速 (m/s)					
	1	2	3	4	5	6
单层木窗	1	2	3.1	4.3	5.5	6.7
双层木窗	0.7	1.4	2.2	3	3.9	4.7
单层钢窗	0.6	1.5	2.6	3.9	5.2	6.7
双层钢窗	0.4	1.1	1.8	2.7	3.6	4.7
推拉铝窗	0.2	0.5	1	1.6	2.3	2.9
平开铝窗	0	0.1	0.3	0.4	0.6	0.8

注 空气渗透耗热量,在建筑物耗热量中占有不小的份额。

### 四、计算例题

图 1-4 所示为北京市一民用建筑的平面图和剖面图,计算其建筑物耗热量和采暖热负荷。

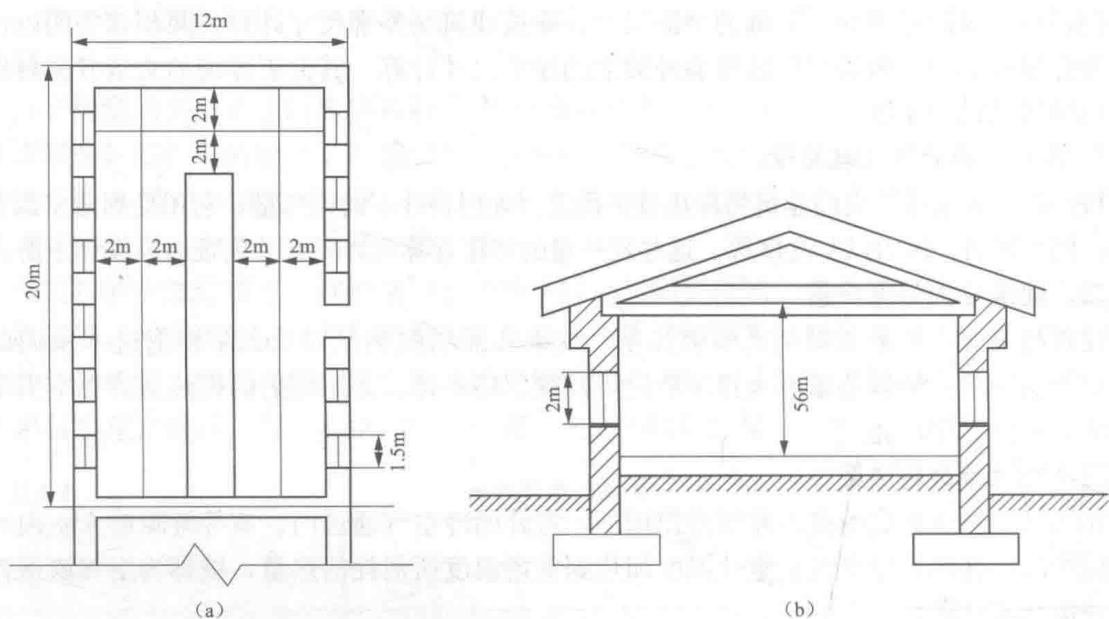


图 1-4 北京市一民用建筑的平面图和剖面图  
(a) 平面图; (b) 剖面图

(1) 已知围护结构条件:

外墙: 单层木框玻璃窗, 尺寸(宽×高)为 1.5m×2.0m。窗型为带上亮(高 0.5m), 三扇两开窗。可开启部分的缝隙总长为 13.0m。

外门: 单层木门。尺寸(宽×高)为 1.5m×2.0m。门型为无上亮的双扇门。开启部分的缝隙总长为 9.0m。

顶棚: 厚 25mm 的木屑板, 上铺 50mm 防腐木屑。 $K=0.93\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $D=1.53$ 。

地面: 不保温地面。 $K$  值按划分地带计算。

(2) 北京市室外气象资料:

供暖室外平均温度  $t_e = -1.6^\circ\text{C}$ ;

冬季室外平均风速  $v_{p,j} = 2.8\text{m/s}$ 。

(3) 房间供暖设计热负荷计算步骤:

1) 围护结构传热耗热量  $Q_{HT}$  的计算。

全部计算列于表 1-6 中。围护结构总传热耗热量  $Q_{HT} = 18779\text{W}$ 。

2) 冷风渗透耗热量  $Q_{INF}$  的计算。

根据附录 E, 北京市的冷风朝向修正系数: 东向  $n=0.15$ , 西向  $n=0.40$ 。对有相对两面外墙的房间, 按最不利的一面外墙(西向)计算冷风渗透量。

按表 1-5, 在冬季室外平均风速  $v_{p,j} = 2.8\text{m/s}$  下, 单层木窗的每米缝隙的冷风渗透量  $L = 2.88\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 。西向六个窗的缝隙总长度为  $6 \times 13 = 78\text{m}$ 。总的冷风渗透量  $V$  为

$$V = Ln = 2.88 \times 78 \times 0.4 = 89.96(\text{m}^3/\text{h})$$

冷风渗透耗热量  $Q_{INF}$  为

$$Q_{INF} = 0.278 \times N(t_i - t_e)c_p\rho V = 0.278 \times 1 \times [18 - (-1.6)] \times 1 \times 1.34 \times 89.96 = 656(\text{W})$$

房间供暖设计热负荷总计为

$$Q_H = Q_{HT} + Q_{INF} = 19435(\text{W})$$



表 1-6

房间耗热量计算表

房间编号	房间名称	围护结构			传热系数	室内计算温度	供暖室外计算温度	室内外计算温差	温差修正系数	基本耗热量	耗热量修正					维护结构耗热量	冷风渗透耗热量	房间总耗热量	
											朝向	风向		修正后耗热量	高度修度				
		名称及方向	面积计算	面积	K	$t_i$	$t_e$	$t_n < t_e$	$n$	$Q_d$	$x_{cn}$	$x_f$	$1+x_{cn}+x_f$	Q	$x_g$	$Q_{HT}$	$Q_{INF}$	Q	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20	
				m <sup>2</sup>	W/(m <sup>2</sup> ·℃)	℃	℃	℃		W	%	%	%	W	%	W	W	W	
101	会议室	北外墙	12×6	72	1.57	18	-1.8	19.6	1	2216	0	0	100	2216	4	18057 × 1.04	656		
		西外墙	21×6-6 ×1.5×2	108	1.57				1	3323	-5		95	3157					
		西外窗	6×1.5×2	18	5.82				1	2053	-5		95	1950					
		东外墙	21×6-6 ×1.5×2	108	1.57				1	3323	-5		95	3157					
		东外门	1.5×2	3	4.65				1	273	-5		95	259					
		东外窗	5×1.5×2	15	5.82				1	1711	-5		95	1625					
		顶棚	20.63×11.26	232.3	0.93				0.9	4234	0		100	4234					
		地面 I	2×2×20.63 +2×11.26	105	0.47				1	967	0		100	967					
		地面 II	2×2×18.63 +2×3.26	81	0.23				1	365	0		100	365					
		地面 III	3.26×16.63	54.2	0.12				1	127	0		100	127					
														18057	18779	656	19435		

## 五、匡算

往往在方案设计初步阶段，太阳能集热系统负担的采暖热负荷-建筑物耗热量，也可以匡算的办法。匡算主要有体积热指标法和面积热指标法。

### 1. 体积热指标法

体积热指标法中，建筑物的供暖设计热负荷，可按式(1-7)进行计算

$$Q_H = q_v V_w (t_n - t_e) \quad (1-7)$$

式中  $Q_H$ ——建筑物耗热量，W；

$V_w$ ——建筑物的外围体积，m<sup>3</sup>；

$t_n$ ——供暖室内设计温度，℃；

$t_e$ ——供暖室外平均温度，℃；

$q_v$ ——建筑物的供暖体积热指标，W/(m<sup>3</sup>·℃)。它表示各类建筑物，在室内外温差1℃时，每1m<sup>3</sup>建筑外围体积的供暖热负荷；具体数值可以查阅相关设计手册或当地设计单位历年积累的资料数据。

### 2. 面积热指标法

面积热指标法中，建筑物的供暖设计热负荷，可按式(1-8)进行计算

$$Q_H = q_H \cdot A_b \quad (1-8)$$

式中  $Q_H$ ——建筑物耗热量，W；



$q_H$ ——设计标准中建筑物耗热量（各类建筑物的供暖热指标具体数值见表 1-7）， $W/m^2$ ；  
 $A_b$ ——建筑物的建筑面积， $m^2$ 。

但要注意表 1-7 中的数据是以供暖室外计算温度为基准得到的，在太阳能采暖负荷计算时是以采暖室外平均温度为基准的，要做适当的调整。严寒和寒冷地区主要城市的居住建筑物耗热量指标详见附录 F。

表 1-7 供暖热指标推荐值  $q_H$  ( $W/m^2$ )

建筑物类型	住宅	居住区综合	学校办公楼	医院托幼	旅馆	商店	食堂餐厅	影剧院展览馆	大礼堂体育馆
未采取节能措施	58~64	60~67	60~80	65~80	60~70	65~80	115~140	95~115	115~165
采取节能措施	40~45	45~55	50~70	55~60	50~60	55~70	100~130	80~105	100~150

注 1. 本表摘自《城市热力管网设计规范》(CJJ 34—2002)。  
 2. 表中数值适用于我国东北、华北、西北地区。  
 3. 热指标中已包括约 5% 的官网热损失在内。

## 六、计算软件

在采暖设计中，热负荷的计算是最基础的一步，但手工计算还是十分繁琐的，这是因为需要考虑的建筑材料因素、结构因素以及环境因素都太多了，所以最好借助专业的计算软件。

## 七、热水负荷

之所以叫“太阳能供热采暖系统”，而不是简单的“太阳能采暖系统”，就是因为这种系统是要同时满足供热和采暖两方面功能要求的。而这也恰恰是太阳能供热采暖系统有别于常规能源供暖系统的一个主要方面，因为即使在非采暖季，太阳能系统仍然可以产生大量的热量，这些“免费”的热量完全可以用来满足“生活热水”的需求。所以太阳能供热采暖系统中，总的热负荷就要包括两部分，其中的太阳能供热负荷主要是指生活热水负荷，太阳能采暖负荷当然是满足冬季建筑供暖需求的负荷了。

太阳能供热负荷主要是建筑中的生活热水负荷，因为生活热水每天的使用是不连续的且多集中在某一个时间段内，所以在一天当中供热负荷的波动是比较剧烈的，存在明显的波峰时期，如图 1-5 所示，即为当天各用水时段实际用水量与量大瞬时有用水量的电值关系。但是从全年来看，与只在冬季才需要的采暖负荷相比，生活热水负荷在一年当中又是相对稳定的，如图 1-6 所示。

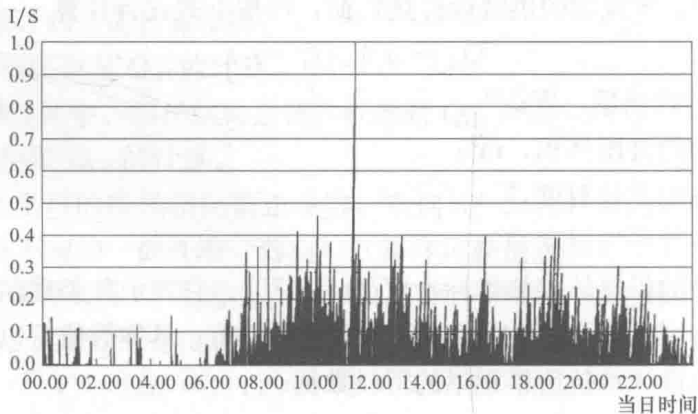


图 1-5 某公寓家庭日用热水量时时变化图

正是因为生活热水负荷的这种特性，我们在计算一天的供热负荷时选用日平均耗热量。这样一方面可以避免为满足用水高峰系统设计过大，在大部分时间段热水过剩造成浪费，同