

太阳能供热设计

f-图法

太阳能供热设计

t-图法

W.A. 贝克曼

[美] S.A. 克莱因 著

J.A. 达菲

岑幻霞 译 王兆霖 校

中国建筑工业出版社

IR 13

本书为《太阳能-热能转换过程》一书的姐妹篇，书中介绍了一种确定最经济的太阳能供热系统的设计方法。全书共六章：第一章介绍了已建成的太阳能供热的概况；第二章叙述了平板集热器的热性能；第三章论述了集热器方位对供热系统总性能的影响；第四章叙述了估算供暖热负荷的度-日法；第五章提出了一种估算太阳能供热系统有用出力的方法，即f-图法；第六章根据上述估算热性能的方法，提出如何利用燃料和系统费用的资料来确定最经济的设计。

本书可供从事太阳能利用的设计和研究人员及热工、暖通专业人员参考。

**SOLAR HEATING DESIGN
BY THE f-CHART METHOD**

John Wiley & Sons, Inc. 1977

William A. Beckman

Sanford A. Klein

John A. Duffie

* * *

太阳能供热设计

f-图法

岑幻霞 译 王兆霖 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

河北省固安县印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：5⁵/₁₆。字数：119千字

1982年10月第一版 1982年10月第一次印刷

印数：1—7,400册 定价：0.59元

统一书号：15040·3982

序 言

本书的目的在于：叙述一个实际方法来确定太阳能供暖和热水系统的大小。这种系统能够按照建筑供暖和生活用热水的需要来收集太阳能、储存太阳能并加以分配。考虑了两类系统：一类是以液体为传热介质；而另一类则是用空气作为传热介质。它们是可能采用的两种普通系统形式。

这里所考虑的太阳能供热系统的主要部分是：加热液体或空气的太阳能集热器，可以是一个水箱或是一个卵石床的蓄热单元以及一个辅助加热炉或加热器；当收集的太阳能不足以满足我们称之为热负荷的整个需热量时，则由辅助热源按需要供应热量。

在技术上，建造一个可以供应全年热负荷，因而就不需要辅助加热器的太阳能供热系统是可能的。但是，根据在最冷月份能供应全部需热量而设计的太阳能供热系统在一年中的其他月份则必然是显得过大了（也就是说供热能力比需要的大得多）。我们知道过大的太阳能供热系统会造成很大的经济损失。几乎在所有的情况下，更经济的是设计一个担负部分年热负荷的太阳能供热系统，并且准备一个辅助热源（一般的加热炉、壁炉、烧木柴的炉子等等）按需要来担负其余的热量。正如我们将要看到的，太阳能供热系统的经济问题使得它们的设计比一般的系统（这种系统过大会导致少量的经济损失）更为重要。

太阳能供热系统是“利润率递减法则”的一个很好的例子。就一个具体的供热系统来说，最初的20米²（约200英

尺²)集热器面积,譬如说可以供给40%的全年热负荷。加另一个20米²可能只供给30%,而再加20米²则只能增加供给15%的年负荷。因此,用一个小系统时,每单位集热器面积供给的热量要比用一个大系统时更多些。因为太阳能集热器价钱很贵,所以设计的关键问题是选择合适的太阳能集热器尺寸(以及类型),以使它和辅助加热炉一起能用尽可能少的费用供给整个热负荷。本书提供了一个解决这个课题的方法。

本书讨论的是关于选定太阳能集热器、蓄热水箱以及配合的热交换器的最经济尺寸的问题。我们没有谈到设计者在建造太阳能房屋时将遇到的许多实际问题。我们不讨论为了降低噪声以及保证均匀的风量分配如何确定风道尺寸。我们也不讨论房屋的保温需要或与在屋顶上装集热器有联系的构造问题。许多这类问题在标准的工程教科书及制造厂家的资料中均有论述。

全书共六章,每一章论述了太阳能供热系统设计的一个专门方面。每一章几乎都可自成一体,包含有介绍性材料、适当的参考文献以及说明主要点的例题。头四章给出了估算各种量的方法,这些量在第五章中需要用来确定系统的热性能,而在第六章又要用来确定经济的设计。

第一章一开始介绍了已建成的太阳能供热的建筑。这些系统大多数类似于本书所考虑的液体或空气供热系统。本章描述了液体和空气供热系统的部件和运行情况。

第二章涉及到太阳能平板集热器的热性能,用简略的形式给出了使集热器性能和它的结构以及运行条件相联系的理论。这个问题更完整的论述可在达菲和贝克曼(1974)所著的《太阳能-热能转换过程》(Solar Energy Thermal Processes)[葛新石、龚堡、陆维德译,科学出版社,1980]

一书中找到（书中参考文献按书末的编号来指明；参考文献的全部细目在本书末尾的参考文献目录中给出）。这里所给的论述使读者对集热器试验方法以及设计太阳能供热系统所需要的试验结果有适当的了解。

第三章叙述了集热器方位对太阳能供热系统总性能的影响。集热器方位从两个方面影响太阳能供热系统的性能。它既影响射在集热器表面的总太阳辐射量，又影响透过透明罩的以及最后在集热器表面上吸收的这个辐射量的份额。还给出了估算照在集热器上的月太阳辐射量以及月平均的透射系数和吸收系数乘积的方法。

太阳能供热系统的性能很大程度取决于热负荷（也就是需热量）的大小。不考虑热负荷就不可能精细地估计太阳能供热系统的长期性能。第四章叙述了估算供暖热负荷的度-日法以及一种估算生活用热水负荷的方法。

在第五章介绍了一种估算太阳能供热系统有用出力的方法。这个方法利用集热器试验结果、热负荷计算以及气象数据去对一个具体的系统估算其太阳能担负的每月热负荷的份额。这里给出的称为“f-图”法的设计方法是S.A. 克莱因在威斯康星大学的博士论文中提出的。这个设计方法的不同部分在其他的刊物^{[19]、[20]、[21]、[4]}上已经发表了，读者如希望进一步了解该方法的依据和说明可参阅上述文献。

应用第五章所述估算热性能的方法，在第六章我们表明了如何利用燃料和系统费用的资料来确定太阳能供热系统的最经济的设计。太阳能供热系统的费用主要是初投资，也就是说为了将来节省运行费进行的实质性投资。用第五章介绍的方法能够估算由于应用太阳能而节省的燃料量。由于安装了太阳能供热系统，房主节省的钱是他所节省的燃料费（加

上任何净的税金节省)减去为了购置太阳能设备需向抵押公司支付额外贷款的本金和利息(加上增加的任何维修、保险等费用)。第六章介绍了进行这些计算的方法,其中考虑到燃料费和其它费用的预计的涨价率。

全书有许多为了确定热性能和经济设计所需的各种计算例题。这些例题合在一起给出了设计经济的太阳能供热系统所需的所有计算。读者可以发现,第一次读了这本书之后,再全面研究全套例题以便从头至尾更好地了解这些计算是有益的。

设计了几个系统的工程师或设计师将会发现许多计算是重复的,并且一旦做了,它们将适用于某一地点的不同装置。最初看来很麻烦的计算,随着读者有了经验会大大地简化。所有的计算可以用任何能计算指数函数的廉价电子计算器来完成。

许多人不熟悉本书用来表示太阳能供热系统中热交换器性能的效率概念。附录1解释了这个概念并且介绍了一种利用厂家给出的性能数据确定热交换器效率的简单方法。在附录2列出了北美一些地方为了估算太阳能供热系统长期性能所需要的月平均气象资料。

单位是一个问题。在太阳能领域的大量最新的研究和发展均采用了国际单位制(即公制的现代形式)。然而,建筑师、工程师和施工人员主要用英制。考虑到公制是方向,我们采用国际单位制进行计算,但是对重要的结果同时也用英制来表示。有两个近似换算使得许多量很容易从一套单位换算为另一套单位:1米²约等于10英尺²以及1千焦耳(kJ)约等于1英热单位。附录3中列出了详细的单位换算表。

新接触太阳能领域的读者在本书中将会遇到一些新的术

语。这些新的术语第一次在书中出现的地方，我们尽量对它们给出定义。此外，附录4列出了专用名词表。

确定太阳能供热系统大小所需的计算都编制成计算表格。这些计算表格用于全书的例题来计算集热器表面上的太阳辐射量、热负荷、系统热性能以及使用周期的经济性。一旦读者熟悉了这些计算表格的用法，确定太阳能供热系统大小的过程就会大大地简化。

本书所介绍的概念已经编入称为 FCHART 的交互式计算程序中。从麦迪逊地方的威斯康星大学太阳能实验室可以得到这程序。这程序的简短叙述包括在附录5中。

我们试图在本书中包括读者用来确定太阳能供热系统大小所需的一切东西(加在他的工程能力上)。同时,这本书也可看成是《太阳能-热能转换过程》一书的姐妹篇。除了少数例外,我们应用了同样的符号和计算方法。本书第一章和第二章略述的理论是《太阳能-热能转换过程》一书中主要章节的压缩形式。为了更全面地了解全部基础资料,我们推荐读者参阅该书。本书的实质, f-图设计法是从1974年开始提出的。

本书中许多论述所依据的研究工作是在国家科学基金会(NSF)和能源研究和发展管理局(ERDA)的支持下完成的。威斯康星大学以及威斯康星校友研究基金会通过大学的研究学院对这个计划也给予了很多支持。

W.A. 贝 克 曼

S.A. 克 莱 因

J.A. 达 菲

1977年6月

麦迪逊, 威斯康星

符 号

| | |
|---------------|---|
| A : | 集热器面积 (米 ² ; 英尺 ²) |
| C_F : | 燃料的价格 (美元/千兆焦耳; 美元/百万英热单位) |
| C_{min} : | 热交换器中最小的热容量流率 (瓦/°C; 英热单位/°F) |
| c_p : | 比热 (焦耳/公斤·°C; 英热单位/磅·°F) |
| d : | 贴现折扣率 |
| DD : | 每月的度-日数 (°C-日; °F-日) |
| E : | 总辅助能量 (焦耳; 英热单位) |
| f : | 太阳能担负的月负荷份量数 |
| F : | 太阳能担负的年负荷份量数 |
| F_R : | 集热器移热效率系数 |
| F'_R : | 集热器加热交换器的效率系数 |
| G : | 单位集热器面积的集热器质量流率 (公斤/秒; 磅/时) |
| H_F : | 燃料热值 (焦耳/单位) |
| \bar{H} : | 水平表面单位面积上日总辐射量的月平均值 ^① (焦耳/日·米 ² ; 英热单位/日·英尺 ²) |
| \bar{H}_J : | 水平表面单位面积上日散射辐射量的月平均值 ^① (焦耳/日·米 ² ; 英热单位/日·英尺 ²) |
| \bar{H}_T : | 倾斜表面单位面积上日总辐射量的月平均值 ^① (焦耳/日·米 ² ; 英热单位/日·英尺 ²) |
| i : | 涨价率 (%/100) |
| I_T : | 倾斜表面单位面积上太阳辐射率 (瓦/米 ² ; 英热单位/时·英尺 ²) |

① 原书把单位误为 (焦耳/月·米²; 英热单位/月·英尺²)。——译注

| | |
|------------------|---|
| k : | 用公式(2-5)确定的系数 |
| \bar{k}_r : | 实际的月平均太阳辐射量与大气层外的比值 |
| L : | 月总供暖和(或)热水负荷(焦耳/月; 英热单位/月) |
| L_S : | 月供暖负荷(焦耳/月; 英热单位/月) |
| L_w : | 月热水负荷(焦耳/月; 英热单位/月) |
| m : | 单位集热器面积上的集热器的空气流率(升/秒·米 ² ; 英尺 ³ /分·英尺 ²) |
| M : | 每米 ² 集热器面积配备的蓄热器容量(升/米 ² ; 加仑/英尺 ²) |
| n : | 一年中各天的序号, 1月1日=1, 12月31日=365 |
| N : | 一个月中的天数或是年数 |
| N_F : | 燃料的单位 |
| Q_T : | 一个月期间收集的总能量(焦耳; 英热单位) |
| Q_u : | 集热器有用能量的收集率(瓦; 英热单位/时) |
| \bar{R} : | 倾斜表面与水平表面日总辐射量月平均值之比 |
| \bar{R}_D : | 倾斜表面与水平表面日直射辐射量月平均值之比 |
| s : | 集热器板与水平面之间的夹角(度) |
| T_{at} : | 周围空气温度(°C; °F) |
| \bar{T}_{at} : | 周围空气温度月平均值(°C; °F) |
| T_{amb} : | 集热器流体平均温度(°C; °F) |
| T_{ci} : | 热交换器冷流体进口温度(°C; °F) |
| T_{hi} : | 热交换器热流体进口温度(°C; °F) |
| T_{fi} : | 太阳能集热器流体进口温度(°C; °F) |
| T_{mi} : | 自来水温度(°C; °F) |
| T_{oi} : | 太阳能集热器流体出口温度(°C; °F) |
| T_{ref} : | 基准温度(100°C; 212°F) |
| T_{ws} : | 生活用热水容许的温度(°C; °F) |
| UA : | 建筑总热损失系数和面积的乘积(瓦/°C; 英热单位/ |

| | |
|-----------------------------|---|
| U_L : | 集热器总热损失系数 (瓦/°C·米 ² ; 英热单位/时·°F·英尺 ²) ● |
| V : | 单位集热器面积配备的蓄热床体积 (米 ³ /米 ² ; 英尺 ³ /英尺 ²) 一个月的生活热水体积用量 (升/月) ● |
| X : | 用公式 (5-3) 确定的无量纲量 |
| X_{c1} : | X 的修正值 |
| Y : | 用公式 (5-4) 确定的无量纲量 |
| Y_{c1} : | Y 的修正值 |
| α : | 集热器板表面的吸收系数 |
| α_{n1} : | 垂直照射下的吸收系数 |
| δ : | 太阳的赤纬 (度) |
| Δt : | 一个月中的秒数 (秒) |
| ΔU : | 一个月中蓄热器内部能量的变化 (焦耳, 英热单位) |
| ε : | 热交换器效率 |
| ε_{c1} : | 集热器加水箱热交换器的效率 |
| ε_{L1} : | 负载热交换器效率 |
| η : | 集热器效率 |
| η_F : | 加热炉效率 |
| $\bar{\theta}_b$: | 直射辐射平均入射角 (度) |
| ρ : | 地面反射系数 |
| τ : | 集热器罩板系数的透射系数 |
| τ_{n1} : | 垂直照射下的透射系数 |
| $(\tau\alpha)_{n1}$: | 垂直照射下透射系数和吸收系数的乘积 |
| $(\bar{\tau}\alpha)_s$: | 透射系数和吸收系数乘积的月平均值 |
| $(\bar{\tau}\alpha)_{b1}$: | 直射辐射的透射系数和吸收系数乘积的月平均值 |
| $(\bar{\tau}\alpha)_{d1}$: | 散射辐射的透射系数和吸收系数乘积的月平均值 |

① 原文误写为瓦/°C; 英热单位/时·°F。——译注

② 原书为“一日的热水用量”, 译者按正文4-4节的定义更正。

——译注

目 录

符号

| | |
|--------------------------------|----|
| 第一章 太阳能供热系统 | 1 |
| 1-1 关于一些太阳能供热实验的概述 | 1 |
| 1-2 液体的太阳能供暖和热水系统 | 2 |
| 1-3 太阳能热风系统 | 5 |
| 1-4 太阳能供热系统的控制 | 7 |
| 1-5 小结 | 8 |
| 第二章 平板式太阳能集热器 | 9 |
| 2-1 概述 | 9 |
| 2-2 集热器理论 | 11 |
| 2-2-1 集热器板吸收的太阳能 | 12 |
| 2-2-2 集热器热损失 | 13 |
| 2-2-3 集热器效率系数 | 14 |
| 2-3 集热器试验和数据 | 14 |
| 2-4 集热器加热交换器的效率系数 | 20 |
| 2-5 小结 | 22 |
| 第三章 集热器方位的影响 | 23 |
| 3-1 瞬时的和长期的性能 | 23 |
| 3-2 倾斜表面辐射量计算 | 23 |
| 3-3 \bar{R} 表 | 29 |
| 3-4 方位对透射系数和吸收系数的影响——简化法 | 40 |
| 3-5 方位对透射系数和吸收系数的影响——详细法 | 40 |
| 3-6 集热器最佳方位 | 45 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 3-7 小结 | 46 |
| 第四章 热负荷 | 48 |
| 4-1 热负荷计算 | 48 |
| 4-2 度-日法 | 49 |
| 4-3 生活用水的加热 | 52 |
| 4-4 公共机构用热水 | 53 |
| 4-5 小结 | 53 |
| 第五章 太阳能供热系统的长期性能 | 55 |
| 5-1 f-图法 | 55 |
| 5-2 系统的无量纲变量的确定 | 56 |
| 5-3 液体的太阳能供暖系统 | 58 |
| 5-3-1 集热器液体的流率 | 63 |
| 5-3-2 蓄热器容量 | 64 |
| 5-3-3 负载热交换器的大小 | 66 |
| 5-4 太阳能热风系统 | 69 |
| 5-4-1 集热器空气流率 | 72 |
| 5-4-2 卵石床的蓄热容量 | 76 |
| 5-5 液体系统和空气系统的比较 | 79 |
| 5-6 生活用热水系统 | 80 |
| 5-7 小结 | 85 |
| 第六章 太阳能供热的经济问题 | 87 |
| 6-1 前言 | 87 |
| 6-2 一般程序 | 89 |
| 6-3 有规则变化的费用 | 92 |
| 6-4 每年的节省 | 112 |
| 6-5 作为燃料费用的函数的节省 | 114 |
| 6-6 特殊征税优待的考虑 | 116 |
| 6-7 投资的还本利率 | 117 |
| 6-8 次要的设计变量 | 118 |

| | | |
|------|----------------------|-----|
| 6-9 | 不规则变化的费用 | 119 |
| 6-10 | 小结 | 121 |
| 附录 1 | 热交换器效率 | 123 |
| 附录 2 | 北美地区气象资料 | 125 |
| 附录 3 | 单位换算表 | 146 |
| 附录 4 | 术语表 | 148 |
| 附录 5 | FCHART 交互式计算程序 | 153 |
| 参考文献 | | 161 |

第一章 太阳能供热系统

1-1 关于一些太阳能供热实验的概述

在本书中,我们关心的是“主动式”太阳能供热系统,也就是以一种有控制的方式用设备来收集、储存、输配太阳能热量的系统。我们所讨论的系统是把太阳能集热器当作流体加热器来用的系统;然后,用泵或风机输送流体以便把能量从集热器送至蓄热器,以及由蓄热器送至房屋。其他的系统采用可移动的保温器而不用流体。

“太阳房”这个名词也可用于这样的建筑,其中用建筑设计来在冬季获得太阳热(以及在夏季减少太阳热)从而减少热(或冷)负荷。这些“被动式”太阳能供热系统没有包括在本书中。我们考虑的不是去代替节能的建筑设计,在本书中我们关心的是任何出色的建筑设计也不能消除掉的供暖(以及供热水)需热量如何得到满足的各种方法。

太阳能供热不是一个新的概念。家庭太阳能热水器已经广泛地应用了许多年。在澳大利亚、以色列、日本、美国以及其他地方有一些企业制造太阳能热水器。

太阳能用于供暖的第一次的大规模的研究是1939年在麻省理工学院开始的。从1939年至1960年相继建成了四幢小型建筑,每幢都是部分地由太阳能供热的^{[11][11][10]}。最后一个是在麻省列克星敦地方的麻省理工学院IV号太阳房;该设计能提供全年供暖和热水负荷的三分之二左右。整整两个供

暖季仔细地测量并报导了供暖系统的性能。这个房屋的建筑面积为 135米^2 ，系统采用了 60米^2 的热水集热器。在不使用时放空集热器以防止在其中冻结。蓄热是用一个 5670 升（ 1500 加仑）的蓄水箱来实现的。进行了几年实验和研究后，这个太阳能供热系统已从建筑内拆除了。

洛夫1958年设计和建造的丹佛太阳房，所采用的太阳能供热系统与麻省理工学院的IV号太阳房的不同点是它用空气而不是用液体来传送热量。已经报导了丹佛太阳房第一年运行^[26]和1974~1975年供暖季的运行性能^[34]。这个系统中面积为 50米^2 的集热器，对建筑面积约有 300米^2 （ 3200 英尺²）的房屋提供了全年热负荷的25%左右。这个系统现在仍在运行，除了一般供热系统所需要的维护以外，它所需要专门的维护很少。

从这些早期的努力开始，已经兴建了许多太阳能供热的建筑。Shurcliff已编写了最近工作情况的调查^[31]。可惜，它们当中只有很少的几个有性能测量资料。虽然调查表明可能有各式各样的太阳能供热系统设计，但是大多数的系统在很多方面是类似的。实际上几乎所有的太阳能供热系统都使用平板式太阳能集热器（参见第二章），容量约够冬季一天供暖的蓄热器以及一个烧一般燃料的辅助热源。这些现有的系统，大多数类似于以下各章节描述的标准液体的或是空气的供热系统。

1-2 液体的太阳能供暖和热水系统

图1-1为典型的液体太阳能供热系统示意图。这个系统用液体（通常是水或一种防冻液）作为热媒并且用水作为蓄

热介质。平板式集热器用来将射入的太阳辐射能转换为热能，这个能量以显热的方式储存在一个液体蓄热箱内，并按需要用来满足供暖和热水负荷。假如在夜间和在多云天气不放空集热器，则通常用一种防冻液在集热器中循环以防冻结。此时，在集热器和水箱之间使用一个液体-液体式热交换器，因为这比采用防冻液作为蓄热介质的方案经济些。

必须采用一个水-空气式热交换器(称为负载热交换器)将热量由蓄热水箱传至建筑物。采用另外一个液体-液体热交换器将热量由主蓄热水箱传至生活用热水系统。生活用热水系统包括一个预热水箱，它把用太阳能加热的水送至一般的水加热器。一个普通的炉子(即辅助加热器)，当蓄热水箱的热量用尽时，用来为供暖负荷供应热量。调节器、安全阀、泵以及管路组成其余的设备。

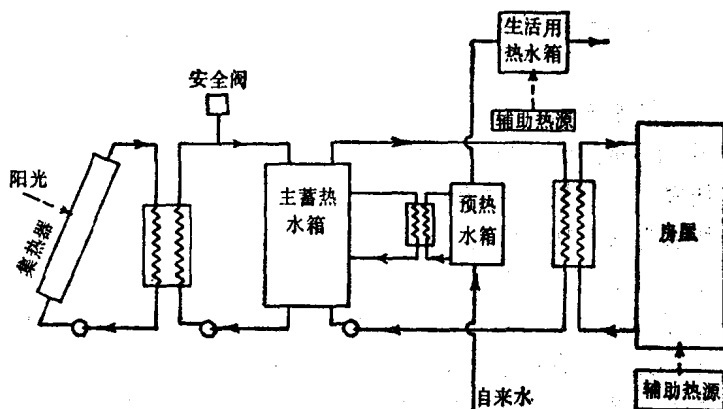


图 1-1 液体太阳能供热系统示意图

通过许多人在这个领域的许多计算机模拟、实验以及多年的实践经验之后，已经得出了如表 1-1 所指出的许多这类太阳能供热系统的设计推荐值。这些推荐值仅供一般的指导