

# 被动式太阳能建筑物设计的 简单方法(一)

[美] C·B·温

[提要] 目前被动式太阳能加热或冷却系统设计者所采用的设计方法,包括详细的模拟计算程序和基于经典的频率特性法,给出的结果几乎与详细的计算模拟所获得的一样。这种方法在本文中作了介绍,并介绍了具有贮热墙和贮热地板以及装有非最大负载控制装置的斜坡板式建筑的计算结果。

关键词: 太阳能加热 设计方法

## 前 言

被动式太阳室的设计者们需要一些既精确又简单的设计方法。近几年来,许多设计方法问世,其范围从详细的计算机模拟程序到相关方程式和由计算机模拟得到的结果制定的计算图表。详细模拟程序中包括的几种计算程序是 *SUNCAT*[1]、*FREHAT*[2]、*PASOLE*[3], 在有限的范围内是 *TRNSYS*[4]和 *DOE 2*[5], 这些程序需要主体计算机来完成计算,并且使用起来很昂贵。如果设计者希望改变系统的参数并确定对参数变化的敏感程度,则花费特别大。这些详尽程序得出的结果大体上与[6]相一致,并完成了一些验证的研究[7、8]。其中部分程序已经用来提供一些结果,对于这些结果导出了太阳能特性和无因次参数之间的关系。这些关系已被编制程序用于可编程器的手动计算器和小型计算机。

这些关系对被动式太阳能系统的设计者是很有用的,因为它可提供特定的设计来节省太阳能,但是它不能提供内部温度在给定的气象条件下相对于时间变化的数据。后者常常比太阳能的节省更重要。可编程序的手动计算器和小型计算机都有可以利用的程序,可用它们来确定给定的环境温度和太阳照射条件下被动式太阳室每日的温度随时间的变化。这一程序的不足是完成计算需要相当长的时间,并且需要异常多的时间来完成许多对于变化的气象条件的敏感程度的研究。一种最简单的设计方法是计算图表,不需要使用计算机或计算器。把计算机模拟所获得结果画成计算图表。例如,在参考文献[9]中介绍了被动式太阳能圆柱形水墙系统设计的计算图表。计算图表仍有一定的局限性,往往不能给系统的设计者提供足够的资料。

何静芳译自“*Transaction of the ASME, J. of Solar Energy Engineering*”  
1982年8月 Vol. 104, 216~222. 吉桂明校。

本文介绍的方法既能提供建筑物加热所需要的太阳能数量，又能提供建筑物温度随时间的变化情况。应用该方法既简单又方便，并给系统设计提供了很大的灵活性。对于具有负荷控制能力的间接增益被动式太阳能加热系统的应用介绍了该方法。这种建筑与美国新墨西哥州 Santa Fe 的 La Vereda 地区现有的住宅相似。这一建筑是由新墨西哥州公用事业公司，Los Alamos 国家研究所和 Santa Fe 承包商联合投资兴建的。

频率特性方法应用于建筑物温度性能的分析早已在英国得到广泛应用。在参考文献 [11] 中也已作了讨论。本文对这种方法进行了补充，使之包括可应用于具有负荷控制的被动式太阳能系统的辅助的能量输入。

### 系统的模型

考虑如图 1 所示的装有被动式太阳能加热系统的建筑。假定该建筑有贮热墙和控制

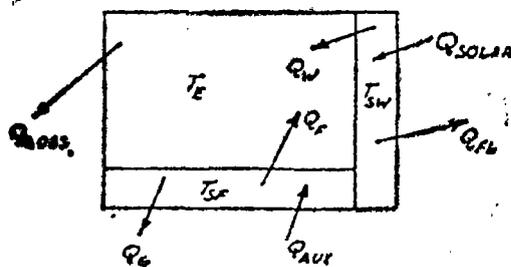


图 1 建筑物示意图

负荷的贮热地板。地板（或在地板下面）装有电阻加热器，该加热器可在太阳能非最大供能时工作，以便提供辅助的加热。

能量平衡方程：系统的能量平衡方程示于图 1，可写作：

$$C_E dT_E/dt = Q_W + Q_R - Q_{LOSS} \quad (1)$$

$$C_{SW} dT_{SW}/dt = Q_{SOLAR} - Q_W - Q_{FL} \quad (2)$$

$$C_{SF} dT_{SF}/dt = Q_{AUX} - Q_I - Q_G \quad (3)$$

式中：

$Q_{FL}$  = 从收集器到环境的热损失速率

$Q_{AUX}$  = 辅助能

$C_E$  = 围墙的热容量；千焦耳/°C（英制热量单位/°F）

$C_{SW}$  = 贮热墙的热容量

$C_{SF}$  = 贮热地板的热容量

$T_E$  = 围墙温度 °C (°F)

$T_{SW}$  = 贮热墙温度

$T_{SF}$  = 贮热地板温度

$Q_W$  = 贮热墙和围墙之间的传热率，千焦耳/小时

$Q_F$  = 贮热地板和围墙之间的传热率

$Q_{LOSS}$  = 周围环境和围墙之间的传热率

$Q_{SOLAR}$  = 由于太阳照射作用，进入贮热墙的传热率

$Q_G$  = 贮热地板和地面之间的传热率

物理关系式：上述传热项的物理关系式可写作：

$$Q_W = h_{WE} A_W (T_{SW} - T_E) \quad (4)$$

$$Q_F = h_{FE} A_F (T_{SF} - T_E) \quad (5)$$

$$Q_{LOSS} = U A (T_I - T_A) \quad (6)$$

$$Q_{SOLAR} = H_T (\tau \alpha) A_W \quad (7)$$

$$Q_G = h_{FG} A_F (T_{SI} - T_G) \quad (8)$$

$$Q_{FL} = h_{WL} A_W (T_{SW} - T_A)$$

式中:

$h_{WL}$  = 贮热墙和环境的传热系数

$h_{WE}$  = 贮热墙和围墙之间的传热系数, 千焦耳/小时·米<sup>2</sup>·°C (英制热量单位/小时, 英尺<sup>2</sup>·°F)

$h_{FE}$  = 贮热地板和围墙之间的传热系数

$h_{FG}$  = 贮热地板和地面之间的传热系数

$A_W$  = 贮热墙面积, 米<sup>2</sup> (英尺<sup>2</sup>)

$A_F$  = 贮热地板面积

$U A$  = 建筑物总面积热导率, 千焦耳/小时·°C (英制热量单位/小时·°F)

$T_A$  = 周围环境温度, °C (°F)

$T_G$  = 地面温度

$H_T$  = 太阳能墙上的太阳辐射, 千焦耳/小时·米<sup>2</sup> (英制热量单位/小时·英尺<sup>2</sup>)

$\tau \alpha$  = 太阳能墙的透射吸收率 (无因次的)

系统的方程式: 为了得到系统的方程式, 可以把物理关系式代入能量平衡方程。所得方程为:

$$C_E dT_E/dt = h_{WL} A_W (T_{SW} - T_L) + h_{FL} A_F (T_{SI} - T_E) - U A (T_E - T_A) \quad (9)$$

$$C_{SW} dT_{SW}/dt = H_T (\tau \alpha) A_W - h_{WL} A_W (T_{SW} - T_L) - h_{WA} A_W (T_{SW} - T_A) \quad (10)$$

$$C_{SF} dT_{SF}/dt = Q_{AUX} - h_{FE} A_F (T_{SF} - T_E) - h_{FG} A_F (T_{SF} - T_G) \quad (11)$$

注意: 这种简单模型可扩展到贮热设备的许多部位, 并可以把总面积热导率分解为一些分量。基本过程保持不变, 从而为了说明分类法, 我们将在本文的剩余部分保留这种简单的第三级模型。

模拟法: 就这一点, 人们可利用模拟计算程序, 如 *FREHEAT* 或 *SUNCAT*, 并且利用选定地点的气象资料, 模拟以一年为依据的系统的性能。根据模拟结果, 可以确定围墙的温度随时间的变化, 并确定供给加热负荷的太阳能的数量。因此可以改变系统的各个参数 (一次一个), 如贮热墙的热容量, 以便确定系统对变化的敏感程度。

这一过程需要多次模拟和相当长的计算机时间 (和代价), 并不能向设计者提供有用的设计关系。另一种方法是利用如下所述的光谱分析。

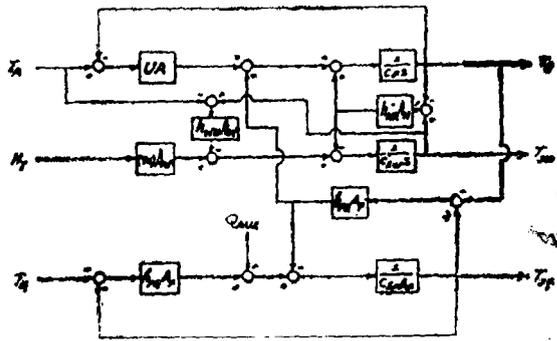


图2 系统方块图

### 典型的频率特性

图2示出上述系统的方块图。该系统的输入参数是环境温度和地面温度、辐射到贮热墙上的太阳能和输入的辅助能量。系统的输出参数是围墙、贮热墙和贮热地板的温度，通过图示的变换函数，使输出参数与输入参数相关。通过对系统的每个方程应用拉普拉斯变换，则可在频率的范围中，解析地表示这一系统。以矩阵的形式，其结果为：

$$\begin{pmatrix} C_{FS}s + h_{WE}A + h_{FL}A_L + UA & -h_{WJ}A_W & -h_{FE}A_F \\ -h_{WE}A_W & C_{SW}s + h_{WL}A_W + h_{WA}A_W & 0 \\ -h_{FL}A_F & 0 & C_{FF}s + (h_{FE} + h_{FG})A_F \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix} T_L[S] \\ T_{SW}[S] \\ T_{SF}[S] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} UA T_A[S] \\ (\tau\alpha)A_W H_T[S] + h_{WA}A_W T_G[S] \\ Q_{AUX}[S] + h_{FG}A_F T_G[S] \end{pmatrix} \quad (12)$$

用Cramer's规则，可解出任何一种“情况”。例如：在变换域内，围墙温度可给为：

$$\begin{aligned}
 T_L[S] &= \frac{UA(C_{SW}s + h_{WE}A_W + h_{WA}A_W)[C_{FF}s + (h_{FE} + h_{FG})A_F] +}{a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4} \\
 &+ \frac{h_{WE}A_W h_{WJ}A_W(C_{SF}s + h_{FE}A_F + h_{FG}A_F)}{a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4} T_G[S] + \\
 &+ \frac{(h_{FE}A_F)(h_{FG}A_F)(C_{SW}s + h_{WL}A_W + h_{WA}A_W)}{a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4} T_G[S] + \\
 &+ \frac{(h_{WE}A_W)(\tau\alpha)A_W[C_{SF}s + (h_{FE} + h_{FG})A_F]}{a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4} H_T[S] + \\
 &+ \frac{(h_{FE}A_F)(C_{SW}s + h_{WE}A_W + h_{WA}A_W)}{a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4} Q_{AUX}[S] \quad (13)
 \end{aligned}$$

式中:

$$a_1 = C_L C_{SW} C_{SF} \tag{14}$$

$$a_2 = C_F C_{SW} (h_{LE} + h_{FG}) A_F + C_E C_{SF} (h_{WE} A_W + h_{WA} A_W) + C_{SW} C_{SF} (h_{WE} A_W + h_{FL} A_L + U A) \tag{15}$$

$$a_3 = C_E (h_{WE} A_W + h_{WA} A_W) (h_{FE} + h_{FG}) A_F + C_{SF} \{ (h_{WE} A_W) (h_{FE} A_F) + (h_{WE} A_W) (h_{WA} A_W) + (h_{FE} A_F) (h_{WA} A_W) \} + U A [(h_{WE} A_W) + (h_{WA} A_W)] + C_{SW} [(h_{WF} A_W) (h_{FL} + h_{FG}) A_F + (h_{FE} A_F) (h_{FG} A_F) + U A (h_{FE} + h_{FG}) A_F] \tag{16}$$

$$a_4 = (h_{WE} A_W) [(h_{FE} A_F) (h_{FG} A_F) + (U A + h_{WA} A_W) (h_{FL} + h_{FG}) A_F] + (h_{WA} A_W) [(h_{FL} A_F) (h_{FG} A_F) + U A (h_{FE} + h_{FG}) A_F] \tag{17}$$

上述围墙温度的表达式可写为:

$$T_F[s] = G_{TA}[s] T_A[s] + G_{HT}[s] H_T[s] + G_{QAUX}[s] Q_{AUX}[s] + G_{TC}[s] T_C[s] \tag{18}$$

例如, 方程中  $G_{TA}$  表示环境  $T_A$  和围墙温度  $T_F$  之间的变换函数。这一方程表明, 围墙温度对受控的输入参数 ( $Q_{AUX}$ ), 外部输入参数 ( $T_A$ ,  $T_C$ , 和  $H_T$ ), 以及对由变换函数表示的系统特性的依赖关系。

$T_F$  对输入参数的时间响应可以通过对  $T_L[S]$  表达式中的每一项取其拉普拉斯逆变换来得到。然而这是相当麻烦的, 而且为了得到设计的关系式也没有必要这样做。如下所述, 通过对 *Bode* 图的分析, 可以知道相当多的系统对各个输入参数的响应特性。

众所周知, 如果把正弦制函数应用于逗留线性系统, 则系统的输出参数将是正弦函数, 其波幅和相位均取决于系统的变换函数, 也就是说, 如果  $X$  和  $Y$  分别表示线性系统  $G[S]$  的输入参数和输出参数, 并且如果:

$$x(t) = X \cos \omega t$$

于是:

$$y(t) = Y \cos(\omega t + \phi)$$

式中:

$$Y/X = |G[j\omega]|$$

并且:

$$\phi = \arg G[j\omega]$$

$G[j\omega]$  的值就是在  $s = j\omega$  处计算的变换函数  $G[s]$  实数部分和虚数部分平方和的平方根。 $G[j\omega]$  的辐角是  $G[j\omega]$  的虚数部分和实数部分之比的反正切。

通过把  $G[j\omega]$  的绝对值和辐角  $G[j\omega]$  画为  $\omega$  的函数, 我们就可以确定系统对正弦输入参数响应的特性。由于我们可用傅里叶级数来逼近任一输入参数, 从而我们就能确定系统对输入函数的傅里叶级数表达式中每一项的响应。然后可以应用叠加原理来确定系统总的响应特性。

*Bode* 图为完成这项任务提供了一种极为方便的途径。假定以下列形式表示每一个变换函数:

$$G[j\omega] = \frac{K(1+j\omega\tau_a)(1+j\omega\tau_b)\dots}{(j\omega)^n(1+j\omega\tau_1)(1+j\omega\tau_2)\dots} \quad (19)$$

于是, 由下列方程可获得  $G[j\omega]$  的数值,

$$\begin{aligned} \log|G[j\omega]| = & \log K + \log|1+j\omega\tau_a| + \log|1+j\omega\tau_b| + \dots \\ & - n\log|j\omega| - \log|1+j\omega\tau_1| - \dots \end{aligned} \quad (20)$$

并由下列方程给出  $G[j\omega]$  的辐角:

$$\begin{aligned} \arg G[j\omega] = & \arg K + \arg(1+j\omega\tau_a) + \arg(1+j\omega\tau_b) + \dots \\ & - n\arg(j\omega) - \arg(1+j\omega\tau_1) - \dots \\ = & \tan^{-1}(\omega\tau_a) + \tan^{-1}(\omega\tau_b) + \dots \\ & - n\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\omega\tau_1) - \tan^{-1}(\omega\tau_2) - \dots \end{aligned} \quad (21)$$

*Bode* 图是这二个函数的图形。它可通过使用几个线性系统分析程序中的任何一个程序自动地得到; 实例请参阅参考文献[10]所叙述的程序。

在得到用于系统变换函数的 *Bode'* 图以后, 紧接着的下一步是把快速傅里叶变换过程应用于输入函数。输入函数可用下式表示:

$$Q_{AUX}(t) = \sum_{k=0}^N Q_{AUX}[k] \cos[\omega_k t + \phi_{Q_{AUX}}/t_0] \quad (22)$$

$$H_T(t) = \sum_{k=0}^N H_T[k] \cos[\omega_k t + \phi_{H_T}/t_0] \quad (23)$$

$$T_A(t) = \sum_{k=0}^N \bar{T}_A[k] \cos[\omega_k t + \phi_{T_A}/t_0] \quad (24)$$

$$T_G(t) = \sum_{k=0}^N \bar{T}_G[k] \cos[\omega_k t + \phi_{T_G}/t_0] \quad (25)$$

式中:

$$\omega_k = 2\pi k/N \quad (26)$$

象  $\bar{H}_T[K]$  那样的项表示与  $K$  有关的频率处输入量的大小。相对于以给定频率每次输入的时间  $t_0$  的相角是由  $\phi_{INPUT}/t_0$  给出。每个输入的数值和相角可用输入函数的傅里叶变换式来确定。

于是, 每个频率的围场温度由下式给出:

$$\begin{aligned} T_{E_K}(t) = & |G_{T_A}[\omega_k]| \bar{T}_A[k] \cos[\omega_k t + \phi_{T_A}[\omega_k] + \phi_{T_A}/t_0] + \\ & + |G_{H_T}[\omega_k]| \bar{H}_T[k] \cos[\omega_k t + \phi_{H_T}[\omega_k] + \phi_{H_T}/t_0] + \\ & + |G_{Q_{AUX}}[\omega_k]| \bar{Q}_{AUX}[k] \cos[\omega_k t + \phi_{Q_{AUX}}[\omega_k] + \phi_{Q_{AUX}}/t_0] + \\ & + |G_{T_G}[\omega_k]| \bar{T}_G[k] \cos[\omega_k t + \phi_{T_G}[\omega_k] + \phi_{T_G}/t_0] \end{aligned} \quad (27)$$

用求和法可得到总的温度波动:

$$T_s(t) = \overline{T_s} + \sum_{k=1}^N T_{L_k}(t) \quad (28)$$

要指出的一点是,我们可以系统参数来表示 $|G|$ 和 $\arg G$ 。这给我们提供了封闭型的设计方程。例如:

$$|G_{r_s}[\omega]| = UA[(a^2 + \beta^2)/(a^2 + b^2)]^{1/2} \quad (29)$$

并且:

$$\arg G_{r_s}[\omega] = \tan^{-1}[(a\beta - ba)/(aa + b\beta)] \quad (30)$$

公式中 $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$ 和 $\beta$ 是频率和建筑物参数的函数。类似的关系存在于其余的变换函数。这给我们提供了解析的设计方程。

另一方面,我们可选择系统的参数值,然后构作用于变换函数的Bode图。从Bode图我们能够很快确定 $|G[\omega]|$ 和辐角 $G[\omega]$ ;从这些值并从输入参数的傅里叶变换,我们能够得到系统的响应特性。这一过程将在下文举例说明。

### 参 考 文 献

1. Wheeling, T., and Palmiter, L., "A Passive Solar Computer Simulation Model." *Proceedings of the 4th National Passive Solar Conference*, Vol.4, AS/ISES Publications Office, University of Delaware, Newark, Del., 1971, 1979.
2. Chapman, J., Burns, P., and Winn, B., "User's Guide for the FREHEAT Program—The Passive Solar Heating and Cooling Simulation program," Report No. COO-30122-20, Solar Energy Applications Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, Colo, 80523, Aug. 1980.
3. McFarland, R., "PASOLE: A General Simulation Program for Passive Solar Energy." Report No. LA-7433-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N.M., 1978.
4. Mosen, W., Klein, S., Beckman, W., and Utzinger, D., "The Resistive Network Design Method for Passive Solar Systems," *Proceedings of the 4th National Passive Solar Conference*, Vol.4, AS/ISES Publications Office, University of Delaware, Newark, Del. 1971, 1979.
5. Kennish, J., Moore, J., Schnurr, N., and Hann, B., "Passive-Solar Design Calculations with DOE-2 Computer Program," *Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference*, Vol.5.1, AS/ISES Publications Office, University of Delaware, Newark, Del., 1971, 1979.
6. Wray, W. "A Quantitative Comparison of Passive Solar Simulation Codes," *Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference*, Vol.5.1, AS/ISES Publications Office, University of Delaware, Newark, Del. 1971, 1979.
7. Arumi-Noe, F., "Field Validation of the DEROB-PASOLE System," *Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference*, Vol.3, AS/ISES Publications Office, University of Delaware, Newark, Del. 1971, 1979.
8. Baicomb, J., Hedstrom, J., and McFarland, R., "Passive Solar Heating of Buildings," Los Alamos Scientific Laboratory Report No. LA-UR-77-1162, June 1977.
9. Ven der Mersch, P., Burns, P., and Winn, B., "A Simplified Design Method of Cylindrical Water Walls for passive Solar Heating," 1981 Annual AS/ISES Meeting, Philadelphia, Pa., June 1981.
10. Linear Systems Analysis, Hewlett-Packard Desktop Computer Division, Fort Collins, Colo. 80525, 1980.
11. Alcone, J.M., and Kennish, W.J., "Analysis and Design of Integrated SHAC Systems via Classical Control Theory," AS-ISES 3-301-3, 1978.