

被动式太阳能建筑物设计的 简单方法(二)

[美] C·B·温

举一个例子来说明, 假定前面介绍的建筑物的参数如下:

$$\begin{aligned}
 UA &= 950 \text{ kJ/Hr} \cdot ^\circ\text{C} && (500 \text{ Btu/Hr} \cdot ^\circ\text{F}) \\
 A_w &= 18.6 \text{ m}^2 && (200 \text{ Ft}^2) \\
 A_f &= 139.5 \text{ m}^2 && (1500 \text{ Ft}^2) \\
 \tau\alpha &= 0.8 \\
 h_{FE} &= 30.63 \text{ kJ/hr} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} && (1.5 \text{ Btu/Hr} \cdot \text{Ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}) \\
 h_{FG} &= 2.04 \text{ kJ/Hr} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} && (0.1 \text{ Btu/Hr} \cdot \text{Ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}) \\
 h_{WE} &= 20.42 \text{ kJ/Hr} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} && (1 \text{ Btu/Hr} \cdot \text{Ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}) \\
 C_E &= 18990 \text{ kJ/}^\circ\text{C} && (10000 \text{ Btu/}^\circ\text{F}) \\
 C_{SW} &= 9495 \text{ kJ/}^\circ\text{C} && (5000 \text{ Btu/}^\circ\text{F}) \\
 C_{SF} &= 37980 \text{ kJ/}^\circ\text{C} && (20000 \text{ Btu/}^\circ\text{F}) \\
 h_{WA} &= 0
 \end{aligned}$$

首先确定稳态温度 ($\omega = 0$); 假定我们不计到地面的损失。因此:

$$|G_{TA}[\omega = 0]| = 1, \quad \Phi_{TA}[\omega = 0] = 0 \quad (31)$$

如果没有太阳能的增益, 并且没有辅助加热, 则围墙的平均温度等于平均的环境温度。

其次

$$|G_{HT}[\omega = 0]| = \frac{(\tau\alpha)A_w}{UA}, \quad \Phi_{HT}[\omega = 0] = 0 \quad (32)$$

$$|G_{O_{AUX}}[\omega = 0]| = \frac{1}{UA}, \quad \Phi_{O_{AUX}}[\omega = 0] = 0 \quad (33)$$

所以平均的围墙温度是:

$$\bar{T}_E = 1 \cdot \bar{T}_A = \frac{(\tau\alpha)A_w}{UA} \bar{H}_T + \frac{1}{UA} \bar{Q}_{AUX} \quad (34)$$

式中字母上的横杠表示平均值。

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。

本例引用新墨西哥州Albuquerque典型年度的气象资料。从记录磁带中判读数据,辐射数据被换算到南面垂直的太阳能墙上的数值,然后通过离散的傅里叶变换过程对这些数据进行加工处理。由此我们得到了外部输入参数的平均值:

$$\bar{T}_A = 3.4^\circ\text{C} (38.1^\circ\text{F}), \bar{H}_T = 562 \text{kJ}/\text{Hr}\cdot\text{m}^2 (49.5 \text{Btu}/\text{Hr}\cdot\text{Ft}^2)$$

如果我们忽略不计 Q_{AUX} , 则2月份围墙内的平均温度为:

$$\begin{aligned} \bar{T}_E &= \bar{T}_A + \frac{(\tau\alpha)A_w}{UA} \bar{H}_T \\ &= 3.4 + \frac{(0.8)(18.6)}{(950)} (562) \\ &= 12.2^\circ\text{C} (54^\circ\text{F}) \end{aligned} \quad (35)$$

现在,我们来求 Q_{AUX} 。建筑物内的平均温度是 $20^\circ\text{C} (68^\circ\text{F})$, 则从上述 \bar{T}_E 方程可以得到:

$$20 = 12.2 + \frac{\bar{Q}_{AUX}}{950} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{AUX} &= (20 - 12.2)950 = 7410 \text{kJ}/\text{hr} \\ &= 2.06 \text{kW} \end{aligned}$$

设太阳能照射的非峰值时间持续10小时, 则:

$$Q_{AUX} = 2.06 \text{kW} \left(\frac{24}{10} \right) = 4.9 \text{kW}$$

如果在照射的非峰值期间, 用约5千瓦辅助热能来加热板坯, 与间接增益的太阳能墙相配合, 就会使室内的平均温度达到 20°C 。

假定我们把从板坯到地面的损失计算在内。

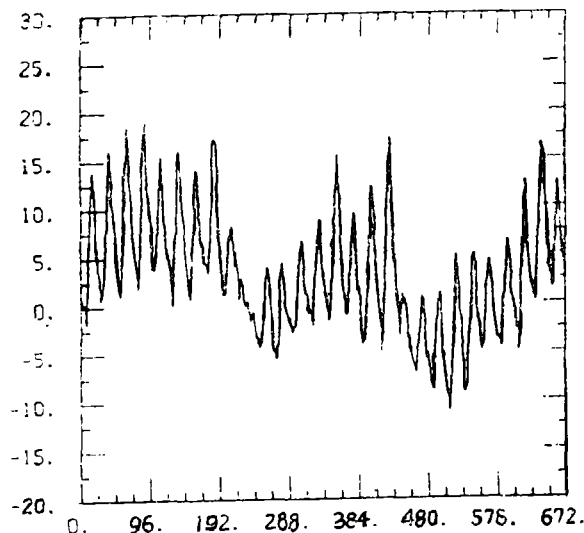


图3 NM、Albuquerque地区2月份的环境温度

则:

$$\begin{aligned} \bar{T}_i &= |G_{T_A}[\omega=0]| \bar{T}_A + |G_{T_G}[\omega=0]| \bar{T}_G + |G_{H_T}[\omega=0]| \bar{H}_T \\ &\quad + |G_{Q_{AUX}}[\omega=0]| \bar{Q}_{AUX} \\ &= (0.78) \bar{T}_A + (0.22) \bar{T}_G + (0.012) \bar{H}_T + (7.69 \times 10^{-4}) \bar{Q}_{AUX} \end{aligned} \quad (37)$$

忽略不计 Q_{AUX} , 则建筑物内部的平均温度是:

$$\begin{aligned} \bar{T}_E &= (0.78)(3.4) + (0.22)(10) + (0.012)(562) \\ &= 2.65 + 2.20 + 6.74 \\ &= 11.6^\circ\text{C} (53^\circ\text{F}) \end{aligned}$$

如果同样把 Q_{AUX} 计算在内, 则平均温度是:

$$\begin{aligned} \bar{T} &= 11.6^\circ\text{C} + (7.69 \times 10^{-4})(7410) \\ &= 17.3^\circ\text{C} (63^\circ\text{F}) \end{aligned}$$

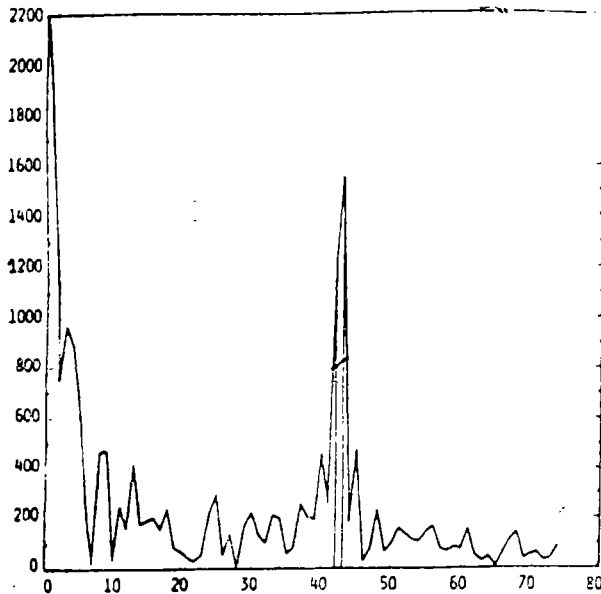
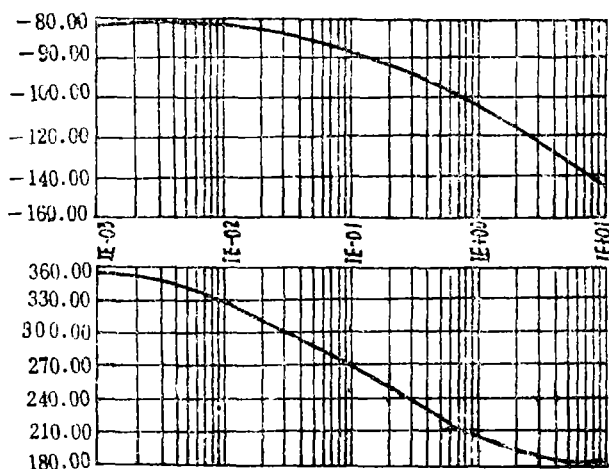


图 4 环境温度的离散型傅里叶变换

用 *SUNCAT* 模拟程序来模拟这一系统, 在没有 Q_{AUX} 情况下, 所得的月平均温度是:

$$\bar{T}_E = 13.1^\circ\text{C} (55.7^\circ\text{F})$$

详细的模拟结果和简单的解析结果之间相吻合的程度令人十分满意。但是仅确定平均温度是不够的, 还应当考虑温度的波动。这可用上述方法计算。根据典型年度气象资料记录磁带确定的 *Albuquerque* 地区 2 月份的平均温度的变化情况示于图 3。2 月份环境温度的离散型傅里叶变换式的图形示于图 4。从图 4 中, 我们可以看到, 环境温度中有

图5 辅助能量变换函数 $G_{Q_{AUX}}$ 的Bode图

一个强的周日分量,并且可以确定该分量的数值。相角也可以从离散型傅里叶变换程序(本文未包括)的输出得到。每天分量($\omega = 2\pi k/N = 0.26h^{-1}$)的振幅和相位角之值:

$$|T_A[\omega_k]| \approx 1277/672 = 1.9C, \Phi_{T_A/\tau_0} \approx -147^\circ (k=42)$$

同理,对于太阳能辐射项:

$$|H_T[\omega_k]| \approx 336kJ/Hr \cdot m^2, \Phi_{H_T/\tau_0} \approx -99^\circ (k=42)$$

也包括对应于 $k=43$ 的邻近频率,在该频率下我们可得出:

$$|T_A[\omega_k]| \approx 1545/672 = 2.3C, \Phi_{T_A/\tau_0} \approx 90^\circ$$

$$|H_T[\omega_k]| \approx 433kJ/Hr \cdot m^2, \Phi_{H_T/\tau_0} \approx 152^\circ$$

然后,根据Bode图或表确定变换函数的数值和相位。所关心的值示于表2。现在,又不计 Q_{AUX} 。从表2中可见:

$$|G_{T_A}[\omega_k]| \approx 0.11, \Phi_{T_A}[\omega_k] \approx 308^\circ$$

$$|G_{H_T}[\omega_k]| \approx 2.8 \times 10^{-4}, \Phi_{H_T}[\omega_k] \approx 225^\circ$$

将上述值代入方程(27),就得到对应于每个输入量的围墙的温度变化。由于 $k=42$,我们则得:

$$\begin{aligned} T_{E_k} &= (0.11)(1.9)\cos[0.26t + (308 - 147)] \\ &\quad + (2.8 \times 10^{-4})(336)\cos[0.26t + (225 - 99)] \\ &= 0.21\cos[0.26t + 161] + 0.04\cos[0.26t + 126] \end{aligned}$$

上述 T_{E_k} 表达式的公式是:

$$T_{E_k} = A_1 \cos(\omega t + \psi_1) + A_2 \cos(\omega t + \psi_2) \quad (39)$$

可写作:

$$T_{E_k} = \overline{A} \cos(\omega t + \overline{\psi}) \quad (40)$$

式中:

$$\overline{A} = \{(A_1 s \psi_1 + A_2 s \psi_2)^2 + (A_1 c \psi_1 + A_2 c \psi_2)^2\}^{1/2} \quad (41)$$

$$\overline{\psi} = \tan^{-1} [A_1 s \psi_1 + A_2 s \psi_2 / (A_1 c \psi_1 + A_2 c \psi_2)] \quad (42)$$

此处:

$$s = \sin, \quad c = \cos。$$

于是我们得到:

$$T_{E_k} = 0.49 \cos(0.26t + 156) \quad (43)$$

同样, 若 $k = 43$, $\omega_k = 0.26$, 则得:

$$\begin{aligned} T_{E_k} &= (0.11)(2.3) \cos[0.26t + (308 + 90)] \\ &\quad + (2.8 \times 10^{-4})(433) \cos[0.26t + (225 + 152)] \\ &= 0.50 \cos[0.26t + 38] + 0.24 \cos[0.26t + 17] \\ &= 0.73 \cos[0.26t + 31] \end{aligned} \quad (44)$$

由于在 $k = 42$ 和 $k = 43$ 处的这两项基本上具有相同的频率, 所以, 对于每天的波动来说, 可用上述 \overline{A} 和 $\overline{\psi}$ 的方程, 将这二项进行合并。

$$T_E(t) = 0.60 \cos(0.26t + 73) \quad (45)$$

由于每天地面温度的某些变化所引起的温度变化显然可以忽略不计。于是与时间有关的围墙温度的变化可以由下式表示:

$$T_E(t) = \overline{T}_E = \sum_k T_{E_k} = 11.6 + 0.60 \cos(0.26t + 73) \quad (46)$$

如果将输入的辅助能量计算在内, 则我们完全以同样的方式进行计算。用于 Q_{AUX} 和 T_E 之间变换函数的 *Bode* 图示于图 5。该图给出下列数据:

$$|G_{Q_{AUX}}[\omega = .26]| = 5.01 \times 10^{-5} \text{ hC/kJ}$$

$$\arg G_{Q_{AUX}}[\omega = .26] = 242^\circ \text{C}$$

在太阳能照射的非峰值时间内(假定是晚10点和早6点之间), 需要给系统输入辅助能量。因此, 这是一个已知的周期函数, 并且可以得到其傅里叶变换式。事实上, 辅助能量输入是时间非线性函数, 计算中并不会出现任何困难。然而, 随时间变化的系统或系统本身的非线性, 如由于使用稳动式绝缘物或恒温控制引起的变化或非线性, 不易用这种方法处理。辅助的能量输入示于图 6。根据示于图 7 的 Q_{AUX} 离散型傅里叶变换, 我们得到:

$$\overline{Q}_{AUX}[\omega = .26] = 0.96 \text{ kW}$$

$$\Phi_{Q_{AUX}/I_0}[\omega = .26] = -81^\circ \text{C}$$

因此, 围墙温度将按照下式变化:

$$\begin{aligned}
 T_E(t) &= 17.3 + 0.60\cos(0.26t + 73) \\
 &+ (5.01 \times 10^{-5})(0.96)(3600)\cos(0.26t + 242 - 81) \\
 &\approx 17.3 + 0.63\cos(0.26t + 89)
 \end{aligned}
 \tag{47}$$

由此我们看到，在辅助能量输入值较小时，每天平均温度变化值受其影响不大。辅助能量输入约一小时改变一次相位。

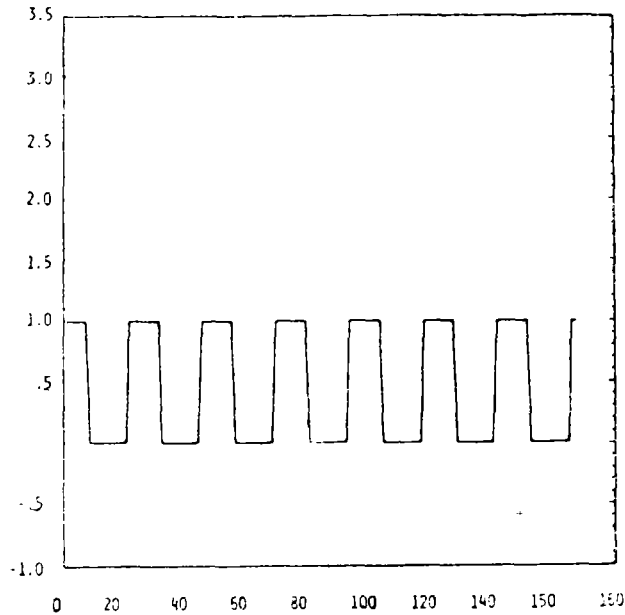


图 6 Q_{AUX} 辅助能量输入

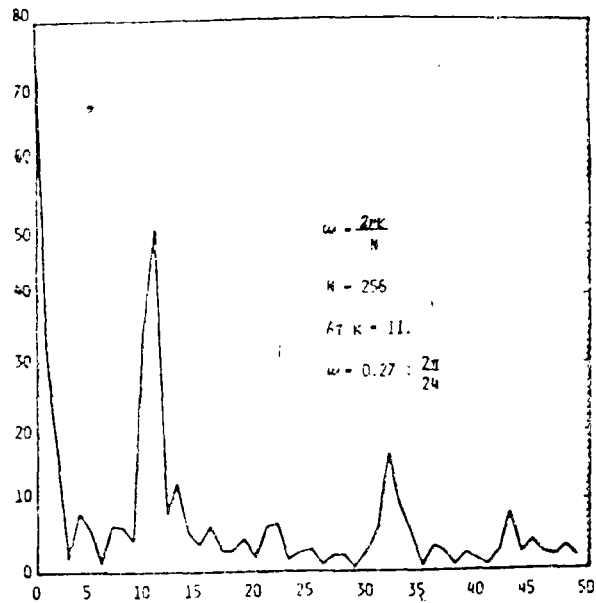


图 7 Q_{AUX} 的离散傅里叶变换式

围墙温度近似的解析解已与使用六结点的数值模拟程序(SUNCAT)计算所得到的结果进行了比较。业已表明,由解析解确定的平均围墙温度和围墙温度每天变化的平均值与全年所有月份的数值模拟计算结果相当吻合,偏差在10%以内。认为这种吻合程度对于设计用途来说是很满意的。借助于在解析模型中包括更多的结点,就可以得到解析模型和数值模拟解之间更好的吻合度。

设计方法的发展

光谱分析方法可用来制定下列一种简单的设计方法:

第一步,用辐射能处理装置来确定太阳能集热器上的辐射能。

第二步,采用傅里叶变换程序,处理辐射和环境温度的数据,以使用六位数字表示任何给定地点的气候特征:

$$\overline{H_T}[\omega = 0], \overline{T_A}[\omega = 0], \overline{H_T}[\omega = .26], \Phi_{H_T/T_0}, \overline{T_A}[\omega = .26], \Phi_{T_A/T_0}$$

一个例子示于表1。

第三步,利用Bode图或表格,通过下列数字来表示系统的特征:

$$\begin{aligned} &|G_{T_A}[\omega = 0]|, |G_{H_T}[\omega = 0]|, |G_{T_G}[\omega = 0]|, \\ &|G_{Q_{TUX}}[\omega = 0]| |G_{T_A}[\omega = .26]|, |G_{H_T}[\omega = .26]|, \\ &|G_{Q_{AUX}}[\omega = .26]|, \Phi_{T_A}[\omega = .26] \Phi_{H_T}[\omega = .26], \\ &\Phi_{Q_{AUX}}[\omega = .26] \end{aligned}$$

第四步,将上述数据代入方程(27)和(28),得出围墙温度的解。

表1 Denver地区平均的太阳能辐射和环境温度的数值和相位,以及日分量的太阳能辐射和环境温度的数值和相位。

MONTH	$H_T[\omega=0]$		$T_A[\omega=0]$		$\overline{H_T}[\omega=2\pi/24]$		Φ_{H_T/T_0}	$\overline{T_A}[\omega=2\pi/24]$		Φ_{T_A/T_0}
	(Btu/Hr -Ft ²)	(kJ/Hr -m ²)	(°F)	(°C)	(Btu/Hr -Ft ²)	(kJ/Hr -m ²)		(°F)	(°C)	
1	47.7	542	29.0	-1.7	20	227	187	1.9	1.1	178
2	40.8	463	30.9	-0.6	18	204	194	2.5	1.4	165
3	35.8	407	38.4	3.6	16	182	193	1.6	0.9	173
4	23.4	266	48.8	9.3	11	125	193	1.8	1.0	173
5	19.2	218	57.3	14.1	7	79	191	1.9	1.1	147
6	17.4	198	64.7	18.2	6	68	193	1.8	1.0	148
7	17.0	193	72.8	22.7	6	68	188	1.8	1.0	168
8	20.6	234	70.1	21.2	6	68	185	1.7	0.9	180
9	32.0	363	62.3	16.8	11	125	190	3.0	1.7	146
10	44.9	510	49.1	9.5	17	193	190	3.1	1.7	162
11	44.0	500	38.3	3.5	19	216	193	2.3	1.3	157
12	56.7	530	30.7	-0.7	16	182	167	1.3	0.7	150

表2 建筑物变换函数的数值和相位角

	环境温度		太阳辐射		地面温度		辅助能量	
	$ G_{T_A} $	Φ_{T_A} (DEG)	$ G_{H_T} $ ($m^2-h-C-kJ^{-1}$)	Φ_{H_T} (DEG)	$ G_{T_G} $	Φ_{T_G} (DEG)	$ G_{Aux} $ ($h-C-kJ^{-1}$)	Φ_{Aux} (DEG)
平均值	0.78	0	0.012	0	0.22	0	7.6×10^{-4}	0
每日量	0.11	308	2.8×10^{-4}	225	0	NA	0.49×10^{-4}	242

可以直接制出包括所要求的数据的图表。于是,对于给定地点的给定型式的系统,系统的设计者只需从表中就可以查阅数值,以确定建筑物中温度随时间的变化。气象表格中有一个例子示于表1中,该表格包含Colorado, Denver地区的辐射和温度资料经傅里叶变换得到的结果。建筑物变换函数的表格示于表2中。对于给定系统的变换函数来说,人们可以迅速确定,该系统在给定地点将会有什么样的性能。

这种计算方法还能使分析者确定气候中的序列效应。例如,在给定地点经常重复出现某些气象图谱,如五天晴天,而后一段时间是阴天,这一图谱就会出现在辐射的傅里叶变换式中。把该项列入求解围墙温度解法时产生的影响,可以简单地加以测定。

结 论

已经表明,经典的频率特性法已为被动式太阳能系统的设计应用提供了一个精确的方法。为获得一个简单而又定量的气象图,可利用离散型傅里叶变换对给定地点的气象资料进行加工处理。系统的变换函数可由易于得到的Bode图来表示。可使用气象的Bode图和离散型傅里叶变换表达式,为得到建筑物内部温度随时间变化的解析表达式,提供所需要的足够的资料。未利用辅助加热所取得的围墙温度的平均值提供了太阳能部分的量度,而围墙温度的解析表达式提供了日温度波动的幅度。借助于变换Bode图和重复进行分析,可以迅速地确定系统各个参数变化的影响。

(参考文献请参阅本刊1987年第3期第50页)