

建筑围护结构传热得热量 计算方法的比较^{*}

长沙理工大学 顾小松[☆] 傅俊萍 赵李铁

摘要 比较了围护结构传热得热量的两种计算方法:周期性反应系数法和传递函数法。与传递函数法相比,周期性反应系数法简化了计算,而且周期性反应系数能反映围护结构对周期性扰量的热响应,可作为评价围护结构热稳定性的指标。推导了传递函数系数与周期性反应系数间的关系式,可根据 ASHRAE 的数据库 RP-626 建立典型围护结构周期性反应系数的数据库,从而减少周期性反应系数法的计算量。

关键词 围护结构 传热得热量 传递函数 周期性反应系数 热稳定性

Comparison of calculation methods for heat gain by heat transfer of building envelopes

By Gu Xiaosong[★], Fu Junping and Zhao Litie

Abstract Compares the periodic response factor method and the transfer function method. Compared with the transfer function factor method, the periodic response factor method simplifies the calculation procedure, and the periodic response factor can reflect thermal response of building envelopes to a periodic pulse and be taken as thermal stability indicator of building envelopes. Deduces the relation expression between the transfer function factor and the periodic response factor, by which a data base of the periodic response factor for typical building envelopes based on the existed data base RP-626 of ASHRAE can be built so as to simplify calculation by the periodic response factor method.

Keywords building envelope, heat gain by heat transfer, transfer function, periodic response factor, thermal stability

★ Changsha University of Science & Technology, Changsha, China

①

0 引言

计算围护结构传热得热量最常用的方法是传递函数法,它使用围护结构传递函数系数来计算通过建筑屋顶和墙壁的传热得热量。ASHRAE 的研究项目 RP-472^[1]已经给出了 41 种具有代表性的屋顶和墙体的传递函数系数,并且建立了相应的数据库 RP-626^[2]。

为简化计算,ASHRAE 提出了一种计算设计日空调负荷的新方法——辐射时间序列系数法^[3],它在计算围护结构的传热得热量时,采用了周期性

反应系数法。

1 两种计算方法的比较

1.1 计算式比较

利用周期性反应系数计算通过围护结构传热得热量的计算式为

①[☆] 顾小松,男,1978 年 3 月生,在读博士研究生,讲师
410076 长沙市赤岭路 9 号长沙理工大学能源与动力工程学
院建环教研室
(0) 13873175668
E-mail: gu_xiao_song@163.com
收稿日期:2005-11-22
一次修回:2006-02-13
二次修回:2006-09-07

$$q_{\theta} = \sum_{j=0}^{23} Y_{pj}(t_{s,\theta-j\Delta\tau} - t_r) \quad (1)$$

式中 q_{θ} —— θ 时刻围护结构逐时传热得热量, W/m^2 ;

Y_{pj} ——第 j 个周期性反应系数(以 24 h 为周期), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

$\Delta\tau$ ——时间间隔, 一般取 $\Delta\tau=1 \text{ h}$;

$t_{s,\theta-j\Delta\tau}$ —— θ 时刻前 $j\Delta\tau$ 的室外空气综合温度, $^\circ\text{C}$;

t_r ——室内空气设计温度, $^\circ\text{C}$ 。

在传递函数法中, 传热得热量的计算式为

$$q_{\theta} = \sum_{n=0}^6 b_n t_{s,\theta-n\Delta\tau} - \sum_{n=1}^6 d_n q_{\theta-n\Delta\tau} - t_r \sum_{n=0}^6 c_n \quad (2)$$

式中 b_n, c_n, d_n ——传递函数系数, b_n 和 c_n 的单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

$t_{s,\theta-n\Delta\tau}$ —— θ 时刻前 $n\Delta\tau$ 的室外空气综合温度, $^\circ\text{C}$;

$q_{\theta-n\Delta\tau}$ —— θ 时刻前 $n\Delta\tau$ 的传热得热量, W/m^2 。

式(1)和式(2)虽然形式不同, 但计算结果基本相等^[4](误差是由计算精度不同引起的), 因为从本质上无论是传递函数系数还是周期性反应系数都

来自于对墙体一维导热微分方程的求解。与式(1)相比, 式(2)计算某时刻墙体传热得热量时需要知道此时刻之前 6 h 的得热量。将式(2)展开成线性方程组, 对此方程组需选用合适的迭代矩阵才能确保收敛(例如高斯-赛德尔矩阵)。由此可知采用式(2)的计算量要大于式(1)。

1.2 周期性反应系数与传递函数系数的关系

式(1)除了周期性反应系数 Y_{pj} 以外, 其他都是已知量。计算周期性反应系数的传统方法是直接寻根法, 在计算过程中存在 3 个问题: 1) 由各层传导矩阵相乘导出复杂的双曲型 S 传递函数相当烦琐费时, 特别是对于两层以上的墙体; 2) 用迭代法求双曲型特征方程的根时可能会出现丢根, 从而导致计算错误^[4-6]; 3) 对复杂的双曲型特征函数求导非常困难。这些问题不仅会使 S 传递函数计算不准确, 而且要花费大量的时间。考虑到已经存在典型围护结构传递函数系数数据库(ASHRAE RP-626), 如果能得出两者间的计算关系式, 建立典型围护结构周期性反应系数的数据库, 则能大大减少式(1)的计算量。下面推导传递函数系数与周期性反应系数之间的关系式。

式(2)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & d_3 & d_2 & d_1 \\ d_1 & 1 & 0 & \cdots & d_4 & d_3 & d_2 \\ d_2 & d_1 & 1 & \cdots & d_5 & d_4 & d_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & d_2 & d_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 & 0 & 0 & \cdots & b_3 & b_2 & b_1 \\ b_1 & b_0 & 0 & \cdots & b_4 & b_3 & b_2 \\ b_2 & b_1 & b_0 & \cdots & b_5 & b_4 & b_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & b_2 & b_1 & b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{s,1} \\ t_{s,2} \\ t_{s,3} \\ \vdots \\ t_{s,24} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_r \sum c_n \\ t_r \sum c_n \\ t_r \sum c_n \\ \vdots \\ t_r \sum c_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

令

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & d_3 & d_2 & d_1 \\ d_1 & 1 & 0 & \cdots & d_4 & d_3 & d_2 \\ d_2 & d_1 & 1 & \cdots & d_5 & d_4 & d_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & d_2 & d_1 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{D}$$

$$\begin{bmatrix} b_0 & 0 & 0 & \cdots & b_3 & b_2 & b_1 \\ b_1 & b_0 & 0 & \cdots & b_4 & b_3 & b_2 \\ b_2 & b_1 & b_0 & \cdots & b_5 & b_4 & b_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & b_2 & b_1 & b_0 \end{bmatrix} = \mathbf{B}$$

由于 $\sum c_n = \sum b_n$ ^[4], 式(3)可简化为

$$\mathbf{Q} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{T}_s - \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{T}_r = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_r) \quad (4)$$

式中 $\mathbf{Q}$ ——包含逐时传热得热量的列向量;

$\mathbf{T}_s$ ——包含逐时室外空气综合温度的列向量;

$\mathbf{T}_r$ ——包含逐时室内空气设计温度的列向量。

式(1)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{p0} & Y_{p23} & Y_{p22} & \cdots & Y_{p3} & Y_{p2} & Y_{p1} \\ Y_{p1} & Y_{p0} & Y_{p23} & \cdots & Y_{p4} & Y_{p3} & Y_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{p23} & Y_{p22} & Y_{p21} & \cdots & Y_{p2} & Y_{p1} & Y_{p0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_{s,1} \\ t_{s,2} \\ \vdots \\ t_{s,24} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_r \sum Y_{pj} \\ t_r \sum Y_{pj} \\ \vdots \\ t_r \sum Y_{pj} \end{bmatrix} \quad (5)$$

令

$$\begin{bmatrix} Y_{p0} & Y_{p23} & Y_{p22} & \cdots & Y_{p3} & Y_{p2} & Y_{p1} \\ Y_{p1} & Y_{p0} & Y_{p23} & \cdots & Y_{p4} & Y_{p3} & Y_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{p23} & Y_{p22} & Y_{p21} & \cdots & Y_{p2} & Y_{p1} & Y_{p0} \end{bmatrix} = Y$$

式(5)可表示为

$$Q = Y(T_s - T_r) \tag{6}$$

联立式(4)和(6),可得

$$Y = D^{-1}B \tag{7}$$

式(7)揭示了传递函数系数与周期性反应系数的关系,笔者在 Visual Fortran6.0 环境下编写了计算程序,算法如下:

- 1) 读入围护结构的传递函数系数;
- 2) 构造矩阵 D 和 B ;
- 3) 计算 $D^{-1}B$;
- 4) 从矩阵 $D^{-1}B$ 中提取周期性反应系数(矩阵的第一列即为系列周期性反应系数);
- 5) 输出计算结果。

1.3 周期性反应系数的物理意义

传递函数系数与墙体对外扰(室外空气综合温度)的热响应没有明显的关系^[2]。本文以 ASHRAE RP-626 数据库中 20 号墙体(300 mm 厚高密度混凝土+15 mm 厚绝热层)为例来计算周期性反应系数。混凝土的热物性参数为:导热系数 $\lambda=1.731 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,密度 $\rho=2\,243 \text{ kg}/\text{m}^3$,比定压热容 $c_p=0.84 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;绝热层的热物性参数为: $\lambda=0.043 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\rho=91 \text{ kg}/\text{m}^3$, $c_p=0.84 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。20 号墙体的传递函数系数如表 1 所示。

表 1 20 号墙体的传递函数系数

n	$b_n/(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$	$d_n/(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$
0	0.000 00	1.000 00
1	0.000 70	1.860 30
2	0.006 77	1.059 30
3	0.008 73	0.195 08
4	0.002 18	0.010 02
5	0.000 11	0.000 16
6	0.000 00	0.000 00

注:计算中不需要用到传递函数系数 c_n ,故本表未列出其值。

将以上数据作为计算程序的输入参数,所得的周期性反应系数见表 2 和图 1。

表 2 20 号墙体的周期性反应系数

Y_{p0}	0.035 357	Y_{p12}	0.064 911
Y_{p1}	0.034 277	Y_{p13}	0.061 909
Y_{p2}	0.039 959	Y_{p14}	0.058 959
Y_{p3}	0.053 287	Y_{p15}	0.056 094
Y_{p4}	0.065 319	Y_{p16}	0.053 335
Y_{p5}	0.072 634	Y_{p17}	0.050 690
Y_{p6}	0.075 929	Y_{p18}	0.048 163
Y_{p7}	0.076 524	Y_{p19}	0.045 753
Y_{p8}	0.075 450	Y_{p20}	0.043 459
Y_{p9}	0.073 392	Y_{p21}	0.041 277
Y_{p10}	0.070 786	Y_{p22}	0.039 202
Y_{p11}	0.067 904	Y_{p23}	0.037 230

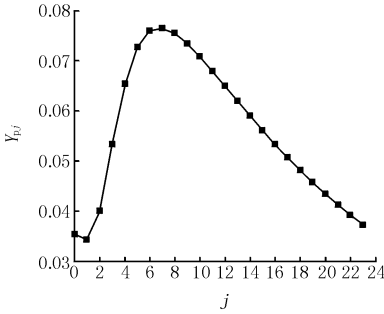


图 1 20 号墙体周期性反应系数的变化

根据自动控制原理中有关离散控制系统的介绍,结合式(1),可将建筑围护结构看作一个离散系统,各时刻室外空气综合温度作为输入量,输出量为各时刻传热得热量,而周期性反应系数为此离散系统的单位阶跃响应^[7]。响应曲线能反映离散系统的动态性能指标,从图 1 可知,响应曲线的峰值时间(出现峰值所需时间)为 7 h,说明墙体对外扰的响应时间长,因此可以推断此墙体热稳定性好,为厚重型墙体。为了说明这一问题,再以 RP-626 数据库中 3 号墙体(100 mm 厚混凝土块+25 mm 厚绝热层)为例进行计算。其传递函数系数如表 3 所示,计算出的周期性反应系数如表 4 和图 2 所示。

表 3 3 号墙体的传递函数系数

n	$b_n/(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$	$d_n/(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$
0	0.023 32	1.000 00
1	0.183 44	-0.769 63
2	0.083 72	0.040 14
3	0.002 64	-0.000 42
4	0.000 00	0.000 00
5	0.000 00	0.000 00
6	0.000 00	0.000 00

注:计算中不需要用到传递函数系数 c_n ,故本表未列出其值。

从图 2 可以看出,响应曲线的峰值时间为 2 h,说明 3 号墙体热稳定性差,为轻型墙体,这与实际情况相符。综上所述,周期性反应系数可作为评价建筑围护结构热稳定性的指标。

表 4 3 号墙体的周期性反应系数

Y_{p0}	0. 023 469	Y_{p12}	0. 008 620
Y_{p1}	0. 201 480	Y_{p13}	0. 006 157
Y_{p2}	0. 237 838	Y_{p14}	0. 004 397
Y_{p3}	0. 177 612	Y_{p15}	0. 003 141
Y_{p4}	0. 127 235	Y_{p16}	0. 002 243
Y_{p5}	0. 090 894	Y_{p17}	0. 001 602
Y_{p6}	0. 064 922	Y_{p18}	0. 001 144
Y_{p7}	0. 046 370	Y_{p19}	0. 000 817
Y_{p8}	0. 033 120	Y_{p20}	0. 000 584
Y_{p9}	0. 023 656	Y_{p21}	0. 000 417
Y_{p10}	0. 016 896	Y_{p22}	0. 000 298
Y_{p11}	0. 012 068	Y_{p23}	0. 000 213

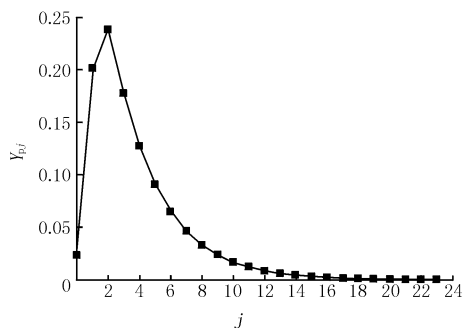


图 2 3号墙体周期性反应系数的变化

2 结论

2.1 由于需要知道计算时刻前 $n\Delta t$ 的传热量,传递函数法需要对线性方程组进行反复迭代,需要考虑迭代方程的收敛性和稳定性(不合适的迭代方程得不到收敛解),一般需要编写计算程序完成计算。而利用推导出的传递函数系数与周期性反应系数

 (上接第 113 页)
 budget for lawn-planting^[1]. J Archit Plan Environ

3) 风洞内平均风速取广州夏季室外平均风速 $1.5 \sim 1.8 \text{ m/s}$ 时, 测试中种植屋面当量热阻值为 $0.41 \sim 0.63 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$, 与《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》中给出的种植屋面当量热阻值 $0.5 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ 基本吻合^[10]。

通过热气候风洞模拟真实典型气候环境,对种植屋面材料热过程进行仿真测试与分析,解决了现场测试中植被蒸发热量无法精确测量的实际困难,并对现有空调负荷计算和能耗计算中材料热工性能参数的量化提出一种新的测试方法,为今后同类建筑材料的测试研究和广州地区建筑屋顶节能设计提供参考依据。

参考文献

- [1] Zhou Nan, Gao Weijun. Field study on the thermal environment of passive cooling system in RC building [J]. Energy and Buildings, 2004,36:1265-1272
- [2] Takeshi Horiguchi. Experimental study on water

间的关系式(7),根据 ASHRAE 的数据库 RP-626 建立了典型墙体周期性反应系数的数据库后,通过手算即可计算出围护结构的传热得热量。

2.2 传递函数系数与墙体对周期性外扰的热响应没有明显的关系,而周期性反应系数能够很好地反映围护结构对周期性扰量的热响应,可以作为评价建筑围护结构热稳定性的指标。

参考文献

- [illegible]