

自然通风建筑室内热状况预测模型

汪 帆

(建筑系)

摘要 本文在改进和发展 Mathews 的自然通风建筑室内温度预测模型的基础上,建立了自然通风建筑室内热状况预测模型。它更全面地考虑了各种影响室内热舒适性的因素,且输出结果更丰富,因而成为考察气候、建筑与室内热环境三方相互关系的工具,可为设计人员所用。

关键词 自然通风,室内热环境,热舒适指标,预测模型

0 引言

建筑中的自然通风是利用自然界再生性资源的一种形式,它对炎热地区夏季建筑防热有着极为重要的作用。不少论著都定性或片面定量地研究了自然通风与室内热舒适性的关系^[1-2]。近几年来人们在空调建筑的研究中发现间歇空调中利用自然通风对减少空调建筑的运行负荷有着十分可观的节能效益^[3-4]。在福建、广东等沿海地区,风力资源丰富,充分利用自然通风改善包括空调建筑在内的室内热环境,在节能方面有着重要的意义。

基于自然通风问题的复杂性,研究成果或为定性的结论、或为适用范围局限的半经验半理论方法^[5]。一些综合性的计算方法和程序都十分冗长、繁琐、难于推广,更不便为设计人员使用。然而不论空调设计还是建筑设计,预先了解尚未建成的建筑室内热状况对指导设计是十分重要的,至少也是大有裨益的。

综合分析了目前的几种研究建筑热特性的方法、在此选择 Mathews 的方法为基础,进行了较大的改进,更加全面地考察了室外气候,建筑本身与室内热状况三者之间的关系。计算室外综合温度与室外作用温度都更合理更精确,与模型相应的程序中选择了收敛性快的数值方法。模型中还增加了围护结构内表面温度及室内热舒适性的计算,使该预测模型更加完善。本程序运算速度快,占内存空间小,甚至可以在 PC-1500 这类简易电脑上运行,与其它方法相比本模型待定参数少,对使用者的专业知识要求较低,故便于设计人员使用。

1 理论模型

建筑室内热环境可视为房间热力系统对室内、外热扰量的响应,室外温湿度、太阳辐射、云量、风速风向、以及邻室的温度等为室外热作用,照明、设备与人体散热散温为内扰,两种扰动都通过建筑围护结构而影响室内热环境。

本文1990-01-11收到。

1.1 室外热作用

室外热作用在此分为室外综合温度与窗子得热两项。由开敞的窗子进行的空气对流换热则用通风热阻而包括在房间热力系统中。

1.1.1 室内综合温度

图1为外墙或室面与室外环境的热交换示意图。引入室外综合温度

$$t_{sa} = t_e + \frac{q_s + q_R}{a_e} - \frac{q_e}{a_e}, \quad (1)$$

则墙体得热可写

$$q_0 = a_e (t_{sa} - \theta_e), \quad (2)$$

在综合温度中考虑了太阳辐射 q_s 与反射辐射 q_R 的影响,同时还考虑长波辐射 q_e 的影响。

1.1.2 太阳辐射

参照空调设计手册对太阳辐射的算法,编制了可计算任一平面的太阳直射量与散射量。程序中特别考虑了本地晴天大气透射率 p 的取值。根据我系建筑物理实验室的实测值,本地十月份的晴天大气透射率为

$$p = 0.600 + 0.004t^2, \quad (3)$$

其中 t 为偏离太阳正午的时差。

因本模型用于预测夏季室内热舒适性,对室外气候应以最不利的条件来考虑,故本模型只选择了晴天为室外条件,从而省去了全云天时云量的估计。

1.1.3 窗子得热

由窗子进入室内的太阳辐射热可由下式决定

$$Q_{wi} = R_{wi} F_{wi} [I_{Dwi} \cos(\gamma - \alpha) \sin h_s + I_{dwi} + I_{rwi}], \quad (4)$$

其中, R_{wi} 为第 i 扇窗子开敞修正系数; F_{wi} 为第 i 扇窗子面积(m^2); I_{Dwi} , I_{dwi} 和 I_{rwi} 分别为单位面积上接受的直射辐射、散射与地面或相邻建筑的反射辐射加上长波辐射(Wm^{-2})。

1.2 室内温度计算

1.2.1 电路模拟

室内外热环境对房间热力系统的影响可由图2来描述,相应的RC模拟电路则如图3所示

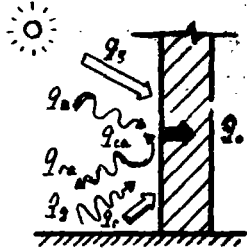


图1 围护结构表面热平衡

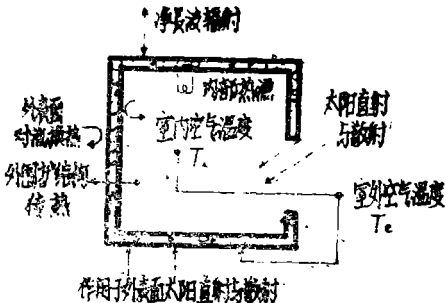


图2 建筑传热路径示意图(平面)

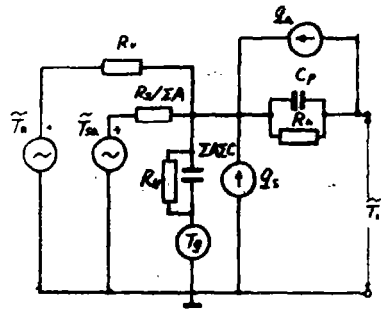


图3 热力系统网络图

示,由图可见房间热特性即可归结为:通风热阻 R_v ,它取决于进入室内的通风量;外围护结构单位外露面积的热阻 $R_s/\sum A$;有效热容 $\sum C$,它包括三部分:围护结构中参与蓄热的那部分热容量、室内家具与空气的热容量。对其一特定的建筑有效热容量可分为基础热容 $\sum C_b$ 与通风热容 $\sum C_v$,通风量越大, $\sum C_v$ 也就越大。网络中的 R_N 系非理想电容漏电而引入的电阻,因在热力系统中, R_N 在绝大多数场合中都远大于 R_v 与 $R_s/\sum A$,故可忽略。三种热力系统的参数可由程序中计算得出。

在节点 p 处引入室外作用温度 T_{ff} 为

$$T_{ff} = \frac{R_v T_{sa} + (R_s/\sum A) T_e}{R_v + R_s/\sum A}, \quad (5)$$

因而室外热环境对室内的影响就化为单一的外扰。式(5)还表明:通风量愈大, T_e 对室内的影响就愈显著;反之,围护结构的热阻愈小,外露面愈大, T_{sa} 对室内的影响就愈大。Mathews则取 $T_{ff} = 0.5(T_{sa} + T_e)$ 以回避难定通风量的问题,这样在计算中的误差是较大的^[7]。对我省的气候及建筑特点这种简化所导致的误差则更大,经验算绝对误差达 3°C 。本模型中通风量由数据文件中的气象参数计算得出,可以逐时计算 R_v 进而提高了 T_{ff} 的可靠性。

进入室内的太阳辐射在网络图中计入 q_a 与 q_s ,相当于一电流源。在预测房间的热舒适性时室内得热可仅考虑太阳辐射。

室内空气温度即可写成对作用温度的响应 $(T_i)_{T_{ff}}$ 与对室内得热响应 $(T_i)_Q$ 之和

$$T_i = (T_i)_{T_{ff}} + (T_i)_Q, \quad (6)$$

而 T_{ff} 与 Q 均可由 n 级正弦函数来逼近,逼近精度与运算时间与 n 的取值有关,本模型可以自动确定 n 值,精度控制取相对误差 10^{-3} ,则有

$$T_{ff} = \sum_{k=1}^n A_{T_k} \sin(k\omega t + \varphi_{T_k}), \quad (7)$$

$$Q = \sum_{k=1}^n A_{Q_k} \sin(k\omega t + \varphi_{Q_k}), \quad (8)$$

1.2.2 周期谐量的室温响应

对应于第 k 级作用温度谐波的室温响应可写成

$$(\tilde{T}_i)_{T_k} = |(T_i)_{T_k}| \sin(k\omega t + \varphi_{T_k} - \varphi_{iT_k}), \quad (9)$$

其中

$$|(T_i)_{T_k}| = A_{T_k} \left[\left(\frac{R_v R_s}{R_s/\sum A + R_v} \right)^2 (k\omega \sum C)^2 + 1 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

$$\varphi_{iT_k} = \arctg \left[k\omega \sum C / \left(\frac{R_s/\sum A + R_v}{R_v R_s} \right) \right],$$

令

$$CS = \frac{R_s/\sum A + R_v}{R_s R_v}, \text{ 且因 } (k\omega \sum C/CS)^2 \gg 1$$

故上式成

$$|(T_i)_{T_k}| = A_{T_k} \frac{CS}{k\omega \sum C}, \quad (10)$$

$$\varphi_{iT_k} = \arctg(k\omega \sum C/CS). \quad (11)$$

经验算,只要CS的相对误差小于0.3,室温的相对误差就都小于 10^{-2} 。故CS可做为程序的内部常数存在程序中。对应于第k级室内得热谐波的室温响应为

$$(\bar{T}_i)_{qk} = A_{qk} \frac{3.57}{k\omega \sum C \sum A} \sin(k\omega t + \varphi_{qk} - \arctg \frac{k\omega \sum C}{CS}). \quad (12)$$

1.2.3 恒定扰量的室温响应

同理,由图3可得 $(\bar{T}_i)_T = \bar{T}_{ff} [1 + (R_v // R_s / \sum A) / (\bar{T}_e / q + R_N)]^{-1}$ 。其中 p 为通过并联的 R_v 与 $R_s / \sum A$ 的热流,因 $R_N \gg R_v$ 及 $R_N \gg R_s / \sum A$,故

$$(\bar{T}_i)_T \doteq \bar{T}_{ff}, \quad (13)$$

$$(\bar{T}_i)_q = (R_v // R_s / \sum A) \bar{Q},$$

由验算取 $R_v // R_s = 0.091$,则对大多数问题都有较高的精度,

$$(\bar{T}_i)_q = (0.091 / \sum A) \bar{Q}. \quad (14)$$

1.2.4 室内空气温度

综上所述,可得室内温度计算公式

$$\begin{aligned} T_i &= (0.091 / \sum A) \bar{Q} + \bar{T}_{ff} \\ &+ \sum_{k=1}^n \frac{CS}{k\omega \sum C} A_{Tk} \sin[k\omega t + \varphi_{Tk} - \arctg(\frac{k\omega \sum C}{CS})] \\ &+ \sum_{k=1}^q \frac{3.57}{k\omega \sum C \sum A} A_{qk} \sin[k\omega t + \varphi_{qk} - \arctg(\frac{k\omega \sum C}{CS})]. \end{aligned} \quad (15)$$

1.3 围护结构传热模型与内表面温度计算

外围护结构内表面温度是影响室内热舒适性重要因素之一,它可由外围护结构的传热模型来求得。在此选择的差分法在数值方法中具有原理简单,推导便捷,程序可读性强、收敛速度快特点。

1.3.1 差分方程

在时、空离散后,壁体的传热微分方程即可转化为Crank-Nicolson's隐格式差分方程

$$p\theta_{k-1}^m - (2p+1)\theta_k^m + p\theta_{k+1}^m = -\theta_k^{m-1}, \quad (16)$$

其中 θ_k^m 为m时刻第k层墙体中心温度,

$$p = \frac{\lambda \Delta t}{C\rho \Delta x^2} \quad \text{或} \quad p = \frac{a \Delta t}{\Delta x^2}.$$

在两层不同材料的分界面两侧应写成

$$p\theta_{k-1}^m - (3p+1)\theta_k^m + 2p'\theta_{k+1}^m = -\theta_k^{m-1}, \quad (17)$$

其中 $p = (\lambda \Delta t / C\rho \Delta x^2)$ 为第k层材料定, $p' = (\lambda' \Delta t) / (C'\rho' \Delta x^2)$ 由第(k+1)层材料定。定解条件为初值置零与第三类边界条件:

$$\left(\frac{2\lambda_1}{\Delta x} + \alpha_e\right)\theta_0^m + \frac{2\lambda_1}{\Delta x}\theta_1^m = \alpha_e T_e^m, \quad (18)$$

$$-\frac{2\lambda_i}{\Delta x}\theta_n^m + \left(\frac{2\lambda_i}{\Delta x} + \alpha_i\right)\theta_{n+1}^m = \alpha_i T_i^m. \quad (19)$$

1.3.2 一维隐格式差分方程求解

将式(16)~(19)四式联立可组成一关于 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{n+1}$ 的(n+2)阶线性方程

组, 写成矩阵形式

$$A\theta^m = B \quad (20)$$

系数矩阵 A 及向量 B 的元素由上述公式由计算机自动生成。带状线性方程组式(20)可由追赶法求解、其收敛性很好^[7]。

1.4 PMV 热舒适模型

PMV热舒适指标是刻划室内热状况的较全面、较成熟的指标, 其基础是Fanger模型。考虑了室内温湿度、平均辐射温度、气流速度、人的运动量与衣着等六个因素的影响。

1.4.1 室内平均辐射温度

室内平均辐射温度 T_{MRT} 由室内各表面的温度、辐射本领及测点位置来决定。如图4所示, 测点 $p(a, b, c)$ 具有代表性, 对室内六个表面的角系数

$$F_1 = F_2 = \arctg \frac{ac}{b\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}},$$

$$F_3 = F_4 = \arctg \frac{ab}{c\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}},$$

$$F_5 = F_6 = \arctg \frac{bc}{a\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}.$$

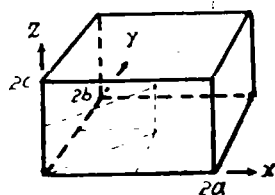


图4 平均辐射温度测点

在不考虑其它辐射面时, 有

$$T_{MRT} = 100 \left[\frac{1}{5.67} \sum_{n=1}^6 C_n F_n \left(\frac{\theta_{in} + 273}{100} \right)^4 \right]^{1/4} - 273, \quad (21)$$

C_n 与 θ_{in} 分别为第 n 面壁内表面的辐射系数与温度。

1.4.2 人体的热负荷与 PMV 指标

Fanger模型中人的热负荷可写成

$$L = H - E_{is} - E_{sw} - E_{res} - C_{res} - R - C, \quad (22)$$

PMV指标则反应了人的热感觉

$$PMV = [0.303 \exp(-0.36M) + 0.0275] \times L, \quad (23)$$

式中 M 为人体新陈代谢率。PMV的值分别为-3、-2、-1、0、1、2、3时应于“冷”、“稍冷”、“凉”、“舒适”、“暖”、“稍热”、“热”七种感觉^[8]。

2 模型程序

室内热状况预测程序NVBTCP (Naturally Ventilated Building Thermal Comfort Prediction) 分数据输入段、主程序段与结果输出段。执行时可由人机对话进行数据操作, 输出结果分别装入几个不同的数据文件, 可依提示选择打印。因此使用者可以视主程序段为“黑箱”。

2.1 输入参数与结果输出数据文件

室外气象参数、建筑热特性参数及热舒适参数分别存在三组数据文件中。运算后屏幕输出有温度与舒适度, 也可根据需要打印或存盘

2. 2 主程序段

NVBTCP 主程序段结构示意图可见图 5。

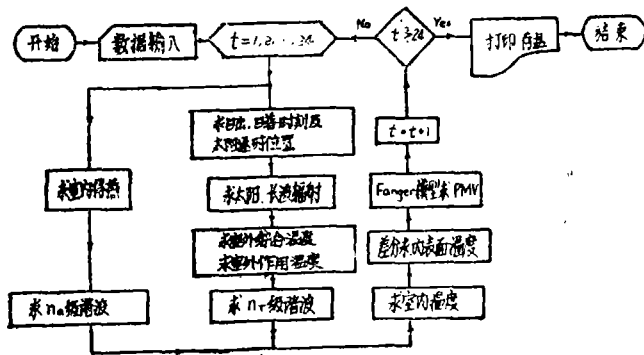


图 5 NVBTCP 主程序段结构示意图

3 模型验证

NVBTCP 的正确性由两种不同住宅的实测数据来检验。

3. 1 气候条件与建筑状况

气候条件为泉州地区10月2日—11月2日晴天的气象参数实测值。被测建筑为华大南区单身宿舍307室与510室。两室平面图如图 6 所示。510室的特点：通风量小、有直射阳光由南向窗子进入室内，西晒外墙。307室特点：外围护结构均不受直射太阳辐射影响、南北开窗、穿堂风大，室内空气温度主要由室外空气决定，窗地比达22%。

3. 2 结果分析

图 7—9 为10月份两房间室内外温度一日内的变化曲线。图 8 为中等通风量的情形，图

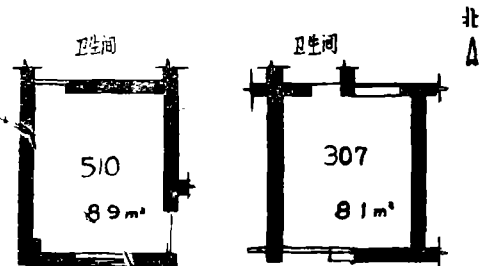


图 6 被测房间平面图 (1:100)

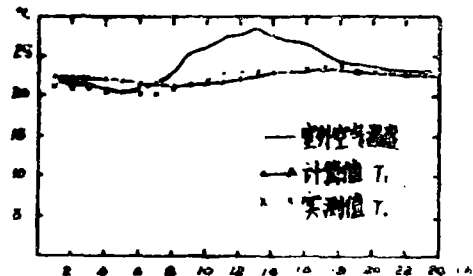


图 7 307室内外温度曲线 (开窗, 纬度24.9, 10月)

7 与图 9 则反映了307室开窗与半开窗条件下的区别。计算结果的精度在此考查了平均绝对

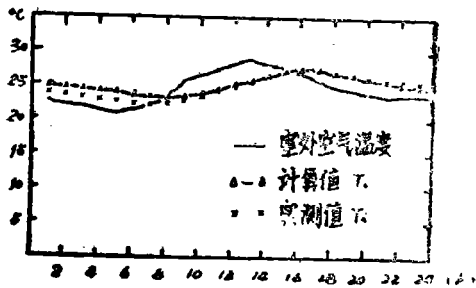


图8 510 室内外温度日变化曲线
(纬度24.9, 10月)

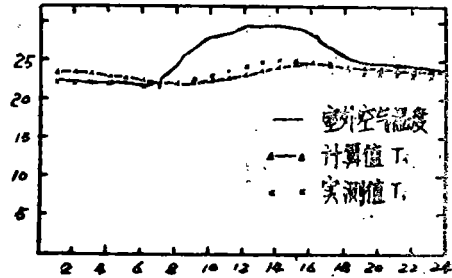


图9 307 室内外温度曲线
(半开窗, 纬度24.9, 10月)

误差

$$\Delta \bar{T} = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} |T_{irj} - T_{ij}|$$

其中 T_{irj} 与 T_{ij} 分别为第 j 时刻室内温度实测值与计算值。所有的 $\Delta \bar{T}$ 都小于 0.9°C 。所有时刻的绝对误差中50%小于 0.5°C , 70%小于 0.8°C , 80%小于 1.0°C , 90%小于 1.5°C , 100%小于 2.0°C 。

可见计算值与实测值间有良好的-致性。这表明程序模型是可靠的。

3.3 简化

经分析,如稍放松精度要求。本模型可以大为简化,数据文件内容也可大为减少。引入系统常数: $CONS = \sum A \cdot CS / \omega$ 。在绝大多数场合中,取 $CONS = 150$,则省去了许多步骤,如在计算室温中只需热特性参数 $\sum C$ 即可。简化的另一手段为只取一级谐波近似。

简化后大大方便了设计人员的使用,用户只需对建筑热工有初浅的了解即可在微机的提示下进行操作,从而在设计阶段便对建筑的室内热状况有个确切的了解。简化后仍有令人满意的精度:50%的误差小于 1°C , 80%在 1.5°C 以内。

4 结论

经实测数据检验说明本预测模型及相应程序是成功的,它不仅可以作为模拟实验方便快捷地研究内外气候与建筑本身之间的关系,同时也可设计人员用于预计建筑室内的热状况,进而指导设计。

本文实测工作得到了建筑物理实验室杨若茵同志的大力协助;刘钦庆副教授也为文章提供了可贵的意见与建议,特此致谢。

符 号 说 明

α, λ, c, ρ ——分别为材料的导温系数、导热系数、比热容与容重; α_i, α_e ——壁体内、外表面热转移系数($\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$); θ_i, θ_e ——壁体内、外表面温度($^{\circ}\text{C}$); θ ——壁体温度

($^{\circ}\text{C}$); R_v ——房间自然通风阻 ($^{\circ}\text{C}\text{W}^{-1}$); R_s ——外围护结构总热阻 ($\text{m}^2\text{C}\text{W}^{-1}$); $\sum C$ ——单位外露面积房间有效热容 ($\text{kJ}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{m}^{-2}$); $\sum A$ ——房间总外露面积 (m^2); T_i 、 T_o ——室内、外空气温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_{fs} ——室外作用温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_{sa} ——室外综合温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_{MRT} ——室内平均辐射温度 ($^{\circ}\text{C}$); H ——人体体内产热 (Wm^{-2}); E_{ts} ——人体皮肤蒸发散热 (Wm^{-2}); E_{res} 、 C_{res} ——人体呼吸潜热与显热散 (Wm^{-2}); R ——人体与室内各表面辐射换热 (Wm^{-2}); C ——人体与室内空气对流换热 (Wm^{-2}); $-$ ——恒定分量上标; \sim ——谐波分量上标; $||$ ——谐波变量之振幅; $//$ ——并联阻抗。

参 考 文 献

- [1] 吉伯尼. 人、气候、建筑. 建筑工业出版社. (1982).
- [2] 魏润柏. 人与室内环境. 建筑工业出版社. (1985).
- [3] 高伟俊. 空调建筑热性能研究. 暖通空调. 4 (1989), 8.
- [4] Givoni, B., Convective Nocturnal Cooling Options & Application of Passive Cooling. *Energy & Bldg.*, 7, (1984) 229.
- [5] Mathews, E. H. & Joubert, P. H., A Thermal Analysis Program for Designer of Naturally Ventilated Bldg. *Bldg. Environ.*, 24, (1989), 163.
- [6] Mathews, E. H., The Prediction of Natural Ventilation in Bldg., *Bldg. Environ.*, 21, (1986), 35.
- [7] 易大义. 数值方法. 浙江科技出版社. (1984), 245.
- [8] McIntyre, D. A., *Indoor Climate*, Appl. Science Publ. Ltd., (1980), 393.

An Indoor Thermal Characteristics Prediction Model for the Use of Naturally Ventilated Building

Wang Fan

(Department of Architecture)

Abstract An indoor thermal characteristics prediction model for the use of naturally ventilated building is presented in this paper. As the development of Mathews' original model, this one is characterized by look all-sidedly at various factors influencing indoor comfortable environment and by richer output data. It may serve as a precise and complete mean for inspecting the mutual relation of climate, building and indoor thermal environment. It may serve the designers' need after a little simplification.

Key words thermal characteristics, prediction model, indoor comfortable index, naturally ventilaed building