

通风屋面下房间热环境计算机模拟

汪 帆

(建筑系)

摘要 本文以热电模拟为基础,建立了模拟通风屋面下房间的室内热状况的数理模型,它不仅解决了多年来对通风屋面热性能的研究多处于实测而难以预测与定量分析的问题,也为建立一套完整的自然通风建筑热工设计软件包奠定了基础。模型用5种实际屋面的传热模拟得以验证;文章还给出了用该模型对福建省三种典型屋面的传热模拟与结果分析,它显示了架空层中气流通畅程度对室内热舒适性的影响。

关键词 通风架空屋面,热电模拟,数值模型,室内热环境

0 引言

我国南方沿海地区冬暖夏热,建筑热工设计均以夏季防热为重点。该地域的夏季炎热;气温高、辐射强,但风速大;降雨量大但历时短等特点^[1,2]。此气候特征导致了以屋面防热为主的建筑热工设计之种种措施与方法的产生,其中广泛应用的即为带架空层的通风隔热屋面。然而大量的实地调查发现^[3],多数这类屋面的隔热效果不佳,热工研究人员也对此进行了大量全面的研究分析。由于架空屋面的复杂性与随机性,大多数工作都局限于实测分析比较,理论计算或数值方法的发展缓慢。但是传热数理模型的建立以及相应的计算机软件,不论对建筑热工设计还是对空调负荷计算都是十分重要的,尤其在那些用来替代费时费力费财的实测的数值仿真系统,以及可以进行热工预测的建筑热工或节能辅助设计系统中,数理模型更是必不可少的,它是这类计算机系统的核心之一。如微机辅助的建筑方案设计的热能分析系统^[4]、建筑节能设计分析及管理系统^[5]等等。

文献^[6,7]各提出了一种方便快捷的自然通风建筑室内温度预测模型,但两种模型都是针对实体屋面的,对含封闭空气间层的屋面也是以静态的薄空气层来处理,因而对此要讨论的架空通风屋面显然是不合适的。文献^[8]提出了计算带通风间层的围护结构的不稳定传热计算,其中间层内辐射及对流换热系数 α_c 与 α_R 的计算可以借鉴,但传热计算中却以假定间层中空气

● 本文1991-12-13收到。

温度为前提.

鉴于上述诸因,建立通风屋面下房间室内热状况的数理模型,对模拟考查夏季此种屋面下的室内热过程及隔热效果、进行空调负荷计算与设计及完善自然通风建筑热工分析系统都有着重要的意义.

本文以文献[7]的模型为基础,利用热电等效模拟原理,建立了改进的 NVBTCP,该模型可以模拟通风屋面的传热过程,进而预测其下房间的热状况.经多组实测数据的验证表明,该模型是可靠的,它保持了原模型高速及占内存少的特点,可做为热工辅助设计系统中的核心模型^[9].文章还给出了用该模型对三种福建省常见屋面形式进行模拟分析的结果.结果显示了架空层中气流畅通程度对室内热状况的显著影响,屋面的隔热效果极大地取决于气流的通畅程度.

1 传热分析与模型改进

1.1 房间在实体与通风屋面下的传热模型差异

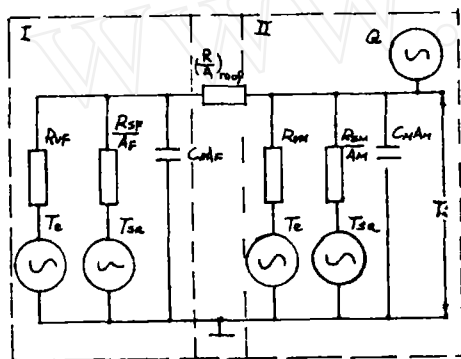


图1 通风屋面下房间的热电模拟电路

房间在实体屋面下,室内热环境被视为受两方面因素的影响,室外综合温度作用于房间的外围护结构及室外空气温度通过通风对流而作用室内.若用热电回路表示则有如图1 I 框中所示之情形,此时,外围护结构总热阻—— R_{SM} ;单位外露面积之房间有效热容—— C_M ;房间外露面积—— A_M 均应将实体屋面计算在内,分别记为 R_s 、 C 和 A .引入室外作用温度 T_{ff} 后,上述两种热作用综合为

$$T_{ff} = \frac{R_s T_{sa} + (R_s/A) T_e}{R_s + R_s/A}, \quad (1)$$

写成 n_T 级谐波形式

$$T_{ff} = \bar{T}_{ff} + \sum_{k=1}^{n_T} A_{T_k} \sin(k\omega\tau + \varphi_{T_k}), \quad (2)$$

室内得热 Q 之 n_Q 级谐波为

$$Q = \bar{Q} + \sum_{k=1}^{n_Q} A_{Q_k} \sin(k\omega\tau + \varphi_{Q_k}), \quad (3)$$

因此,室内空气温度 T_i 有

$$T_i = \bar{T}_{ff} + \frac{0.091}{A} \bar{Q} + \sum_{k=1}^{n_T} \frac{CS}{k\omega C} A_{T_k} \sin(k\omega\tau + \varphi_{T_k} - \arctg \frac{k\omega C}{CS}) \\ + \sum_{k=1}^{n_Q} \frac{3.57}{k\omega C \cdot A} A_{Q_k} \sin(k\omega\tau + \varphi_{Q_k} - \arctg \frac{k\omega C}{CS}), \quad (4)$$

式中, \bar{Q} 、 \bar{T}_{ff} 分别为房间室内得热 Q 及体用温度 T_{ff} 的日均值; A_{T_k} 、 Q_{T_k} 分别为作用温度 T_{ff} 第 k 级谐波之振幅及位相; A_{Q_k} 、 φ_{Q_k} 分别为室内得热 Q 的第 k 级谐波的振幅及位相;且

$$CS = \frac{R_i/A + R_o}{R_i \cdot R_o}$$

对于通风屋面下的房间,室内空气温度等热环境因素同样是室内、外热作用的综合结果.与前述不同的是作用屋面这一外围护结构的不仅有室外综合温度,还有室外空气温度,如图1所示,1框中即包括了屋面的面层、架空通风间层与底层即结构屋面,相当于一受室外综合温度及室外空气温度共同作用的四面开敞的自然通风小室,室外热作用由此小室经结构屋面影响下面的房间.图中 R_{SF} 、 R_{VF} 、 A_F 、 C_F 分别为架空屋面的面层热阻、通风间层的通风阻,外露面积以及单位外露面积的有效热容; R_{roof} 、 A_{roof} 则为屋面下层结构屋面热阻与面积.

1.2 在通风屋面下室内空气温度计算

图1 1框所代表的小室所受室外作用温度 T_{jff} .

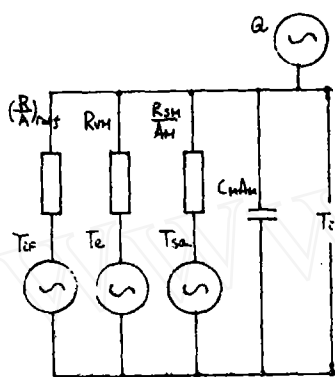


图2 引入室外作用温度后热电路

其中

$$T_{jff} = \frac{R_{VF}T_a + (R_{SF}/A_F)T_e}{R_{VF} + R_{SF}/A_F}, \quad (5)$$

其谐波形式为

$$T_{jff} = \bar{T}_{jff} + \sum_{k=1}^{n_{TF}} A_{TFk} \sin(k\omega\tau + \varphi_{TFk}), \quad (6)$$

间层内的空气温度 T_{if} 则为

$$T_{if} = \bar{T}_{if} + \sum_{k=1}^{n_{TF}} \frac{CS_F}{k\omega C_F} A_{TFk} \cdot \sin(k\omega\tau + \varphi_{TFk} - \arctan \frac{k\omega C_F}{CS_F}), \quad (7)$$

$$CS_F = \frac{R_{SF}/A_F + R_{VF}}{R_{SF} \cdot R_{VF}}.$$

因此对屋面下的房间而言, T_{if} 即成了除 T_a 、 T_e 以外,通过结构屋面 $(R/A)_{mf}$ 而影响至内的第三项外扰(见图2).

房间的室外作用温度 T_{jfm} 即成为

$$T_{jfm} = \frac{R_{VM} \cdot (R_{SM}/A_M) \cdot T_{jff} + (R_{SM}/A_M) \cdot (R/A)_{roof} \cdot T_e + (R/A)_{roof} \cdot R_{VM} \cdot T_a}{R_{VM} \cdot (R_{SM}/A_M) + (R_{SM}/A_M) \cdot (R/A)_{roof} + (R/A)_{roof} \cdot R_{VM}}, \quad (8)$$

用 T_{jff} 、 T_e 、 T_a 的24h逐时值代入,得 T_{jfm} 逐时离散值,并将其转化为谐波形式

$$T_{jfm} = \bar{T}_{jfm} + \sum_{k=1}^{n_{TM}} A_{TMk} \sin(k\omega\tau + \varphi_{TMk}),$$

最终的房间空气温度 T_{im} 为

$$T_{im} = \bar{T}_{jfm} + \frac{0.091}{A} Q + \sum_{k=1}^{n_{TM}} \frac{CS_M}{k\omega C_M} A_{TMk} \sin(k\omega\tau + \varphi_{TMk} - \arctan \frac{k\omega C_M}{CS_M}) + \sum_{k=1}^{n_Q} \frac{3.5T}{k\omega C_M A_M} A_{Qk} \sin(k\omega\tau + \varphi_{Qk} - \arctan \frac{k\omega C_M}{CS_M}), \quad (9)$$

$$CS_M = \frac{(R_{SM}/A_M) \cdot R_{VM} + R_{VM} \cdot (R/A)_{roof} + (R/A)_{roof} \cdot (R_{SM}/A_M)}{R_{SM} \cdot R_{VM} \cdot R_{roof}}$$

1.3 房间在通风屋面下的顶棚表面温度

通风屋面隔热效果的优劣的另一考查指标就是顶棚的内表面温度,即结构屋面的内表面温度。

用数值差分法可得架空屋面顶屋内表面温度 θ_1 ,对结构层外表面温度令 θ_2 ,因此该表面热流密度 q 为

$$q = \alpha_c(t_{if} - \theta_2) + \alpha_R(\theta_1 - \theta_2), \tag{10}$$

其中 α 与 α_R 分别为对流换热系数与辐射换热系数,其计算参见文献[8]。

对于结构层再用差分,外侧采用第二类边条件;内侧为第三类边条件即可求得内表面温度,即房间顶棚表面温度。

2 改进后模型检验

2.1 模拟实测实例

依第1节中所建立的改进后的室温以及顶棚内表面温度计算数型,加上原 NVBTCP 中的平均辐射温度与 PMV 计算就构成了一完整的室内热环境预测程序。

模型及相应程序的验法采用5组实测数据,数据来自华南工学院亚热带建筑研究所,其中房间朝向及室内开窗状况等记录不全,故设为该地域最普遍的情形。室外空气温度做了适当修正,使得通风屋面外表面温度变化与实测数据一致,以突出屋面结构的传热与计算之差别。

检验着重考查了:(1)结构屋面内表面(房间顶棚表面)温度;(2)室内空气温度;(3)通风层中气流温度。结果见表1。

2.2 结果讨论

表1 架空屋面实测值与改进后的 NVBTCP 计算值的比较

屋面构造 间层高度	$H(mm)$	160	260	320	90	150
面层外表面温度						
实测最大值	T_{max}	58.0	60.4	58.8	54.0	52.0
实测平均值	T_{av}	35.9	36.2	36.0	34.1	32.4
架空层空气温度						
实测最大值	T_{max}	39.8	37.1	35.9	/	/
计算最大值	T_{max}	38.9	36.8	36.2	41.2	36.5
实测平均值	T_{av}	31.4	30.3	29.8	/	/
计算平均值	T_{av}	30.2	29.1	29.9	32.1	29.8
内表面温度						
实测最大值	T_{max}	35.7	35.1	34.1	36.4	30.0
计算最大值	T_{max}	34.5	35.8	33.7	34.8	31.3
实测平均值	T_{av}	30.3	30.1	29.9	29.5	27.8
计算平均值	T_{av}	29.4	30.7	29.1	29.1	28.9
室内空气温度						
实测最大值	T_{max}	32.5	32.5	32.5	/	/
计算最大值	T_{max}	32.0	31.8	31.2	30.8	30.3

实测平均值	T_{av}	25.8	25.8	25.8	/	/
计算平均值	T_{av}	25.3	25.0	24.8	24.7	24.1
屋面总衰减 V						
实测值	4.1	4.8	5.3	3.1	8.9	
计算值	4.3	4.7	4.9	3.5	8.2	
总延迟 φ						
实测值	/	/	/	1	2	
计算值	1	1	2	1	2	

总的温度误差都小于 2.0°C ;平均值差小于 1.5°C ,因实测只有最大值与平均值这种特征考查指标,如用24h逐时温度值,某些值的绝对误差可能稍大些.但若只注意有实际意义的顶棚表面温度和室内空气温度,可以发现无论是均值还是最大值误差都在 1.0°C 以内.可见模型的改进是成功的.同时还可以看到架空层的通风越小,误差则越小,这是因为相对气流通畅的屋面而言,通风不畅的屋面更接近实体屋面,架空层中诸多参数的偏差也就相应小了.

2.3 误差分析

误差的主要原因:一是一些热工参数以及层间换气量因资料记录不详,带入程序计算的均为“气候图集”局域统计值,因而可能与实际值有差距进而导致误差;二是资料中户外条件仅有平均值与最大值,由此拟合出的室外温度仅有一级谐波,因此模型中热作用都只取一级谐波,这一项也将导致较大误差.然而从这两项误差都是容易消除的,只需将气候条件参数丰富些加之热工参数的具体化即可解决.

另一误差来自通风量的计算偏差以及实际情况中风速的随机性,因模型中采用的是一日均值,必然导致逐时误差,然而结果看做内预测模型其误差已相当令人满意了,况且那些适用性广的模型必然要牺牲一点精度.

3 改进后模型的应用

用改进的 NVBT CP 对华东单身宿舍楼710室进行夏季室内热环境模拟分析,屋面分别取:(1)实际采用的带女儿墙的架空屋面;(2)假设的不带女儿墙的架空屋面;(3)假设的双层斗底砖屋面,见图3.

3.1 计算参数选取

气象参数中有风速风向、日照率、大气透射率、室外空气温度及湿度,数据分别来自文献[2]及当地气象站8月典型日实测数据;居住者参数中新陈代谢自由能 $M(\text{W}/\text{m}^2)$ 、衣着绝热值 $I_{cl}(\text{clo Units})$ 两项取值见图7所示,为夏季住户热特征值;房间参数主要有:建筑面积 8.9m^2 外廊式、南向开窗、西墙南墙外露、外露面积 28m^2 ,有效热容量 $428\text{kJ}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{M}^{-2}$,砖混结构.

3.2 计算结果及分析

模拟计算着重考查了架空层中空气温度、顶棚表面温度、室内平均辐射温度及室内空气温度.

架空层内的空气温度:这一温度以及架空层内上表面的温度极大地受气流通畅程度的影

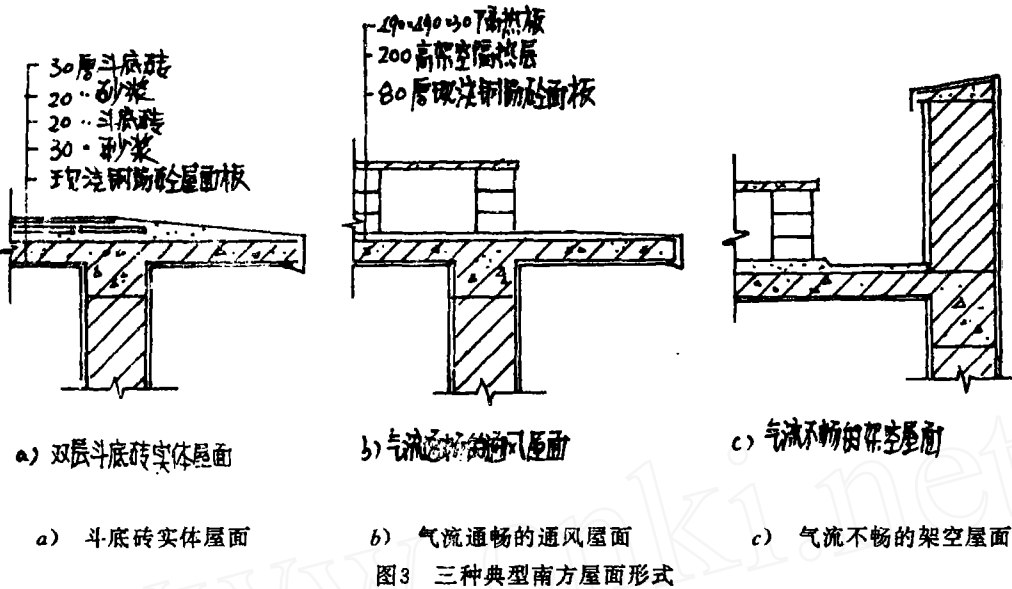


图3 三种典型南方屋面形式

响,表2所示层间通畅的气流有助于降低其中的空气温度及表面温度,进而大大减少了与下表面的辐射与对流换热。

表2 不同间层通风状况下的温度比较

时 刻		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
间层空	不通风	28.5	27.2	23.7	24.9	34.4	44.6	51.4	52.3	44.1	35.1	31.6	29.7
气温度	通风	31.9	30.9	28.2	27.8	32.5	38.3	42.9	44.6	41.2	36.5	34.3	32.9
Tair	$\Delta T(^{\circ}C)$	-3.4	-3.7	-4.5	-2.9	1.9	6.3	8.5	7.7	2.9	-1.4	-2.7	-3.2
间层下	不通风	26.5	26.0	25.6	35.0	47.5	54.9	54.7	47.0	34.4	29.3	27.8	27.1
表 面	通风	27.7	27.2	27.2	37.0	46.8	52.8	51.6	44.5	33.4	29.7	28.8	28.3
温 度	$\Delta T(^{\circ}C)$	-1.2	-1.2	-1.6	-1.0	0.7	2.1	3.1	2.5	1.0	-0.5	-1.0	-1.2

室内顶棚表面温度:此温度是考查屋面构造性能乃至整个建筑热特性的关键参数,图4显示了这三种不同的屋面构造条件下该温度值的差异.实体屋面在8时—16时,该温度大大高于架空屋面;16时后实体屋面则散热较快,因而顶棚表面温度也下降得较快些。

室内平均辐射温度与室内空气温度:这两项温度是直接影响住户热舒适感的重要因素,图5及图6显示了两温度在三种条件下的差异.可见自然通风建筑室内平均辐射温度较室内空气温度更易受屋面的影

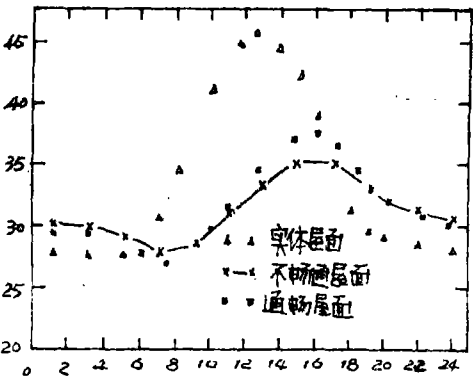


图4 三种不同屋面顶棚表面温度

响. 从 PMV 的计算将发现自然通风建筑室内过热的主要是因为平均辐射温度过高所引起的人体辐射散热不利, 尤其是在正午前后更为显著.

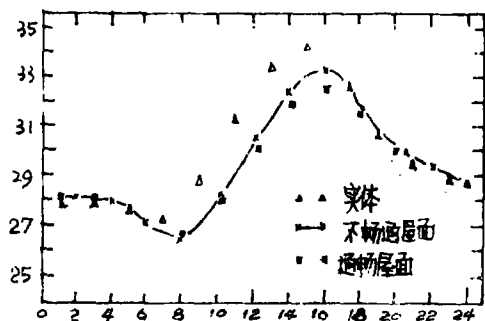


图5 室内平均辐射温度曲线

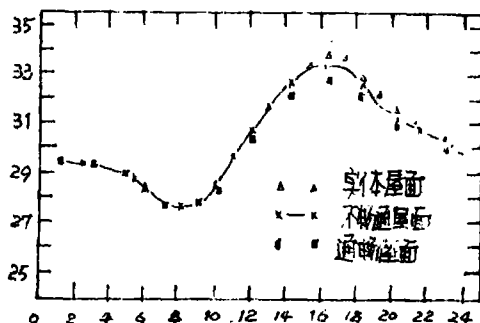


图6 室内气温度曲线

PMV 指标: 图7给出了依实际条件进行组合的各因素影响下的室内热舒适指标 PMV 的逐时值。“0”、“1”、“2”、“3”分别表示“舒适”、“暖”、“稍热”、“很热”。由图可见通风良好的架空屋面室内热舒适程度要此通风不畅的有很大的改善。

4 结论

上述尤其是图7的结果与笔者的实测与调查基本一致. 这也再次证明

$NVBTCP$ 模型是可靠的, 做为操作简单、占内存小、运算速度快并易为用户掌握的仿真预测程序, 它具有较高的精度且有较大的适用范围, 输出结果也较丰富, 它可运用于设计中预测建筑室内热环境, 也可用于仿真模拟实验进行热工研究. 另外, 屋面处理对防止室内过热至关重要. 对于架空屋面, 间层内气流通畅程度是决定构造隔热性能的关键因素, 尤其对平屋面, 设计时应考虑檐沟、女儿墙与通风屋脊等构造给予充分的考虑, 这不仅对大量的普通住宅防止过热、也对中央空调的办公楼等的建筑节能都是意义重大的, 这一点必将随着空调建筑大量涌现与能源短缺的加剧而更为明显.

符 号 说 明

R_s —外围护结构总热($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$); C —单位外露面积房间有效热容($kJ \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}$); A —房间外露面积(m^2); R_v —房间通风阻($^\circ C \cdot W^{-1}$); M —房间角标; F —屋面角标; “—”均值标志, A_k, ϕ_k 为第 k 级谐波振幅及相位.

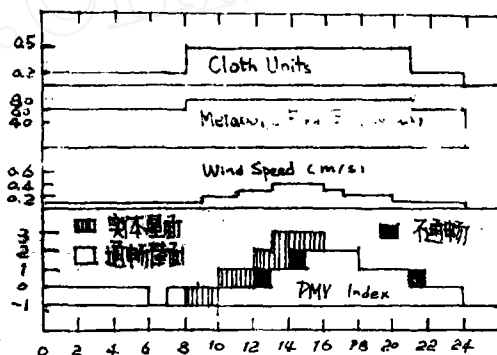


图7 三种不同屋面构造的室内热舒适指标与计算条件

参 考 文 献

- [1] 高国栋,中国物理气候图集,中国农业出版社,(1986).
- [2] 福建师大地理系,福建自然地理,福建人民出版社,(1987).
- [3] 傅肃科,轻型屋盖的热工评价“基准”问题的探索,华南土建,5(1979),35—43,
- [4] Szokolay S. V. Predictive Methods for the Energy Conserving Design of Buildings, *Pergamon Press*, (1983),17--36.
- [5] Norman, H. D. B. Energy Conservation in the Design of Multi-storey Buildings, *Pergamon Press*, (1984),73—85.
- [6] Mathews, E. H. *Energy & Building*,14(1989),61—80.
- [7] 汪 帆,自然通风建筑室内热状况预测模型,华侨大学学报(自然科学版),12,(1991),182—189.
- [8] 单寄平译,建筑热物理学,中国建筑工业出版社,(1988),281—289.

An Attempt on Computer Thermal Performance Simulation for the Rooms under Vdntilated Roof Structure

Wang Fan

(*Department of Architecture*)

Abstract Based on Thermoelectrical circle theory, a Predictive model for simulating thermal performance under Ventilated roof structure is established. Instead of the traditional method of measuring in situ, it solves the problems in a predictive and quantiative way. It also sets a foundation to the softwares of thermal design tool for natually ventilated building. the results of simulation for five kinds of practical roofs show that the model is successful. The simlation results of three typical kinds of roofs in Fujian show the degree of influence of ventilation state within the roofs structure to the comfortness of the room.

Key words ventilated roof structure, thermoeiectrical circle simulation, numerical model, indoor climate.