

## 空调房间温湿度耦合模型

秦镜洪 张吉礼 \*

大连理工大学建设工程学部

**摘 要** 本文提出了基于 RC 网络建立的单个空调房间负荷模型。动态模型建立在建筑围护结构、室内空气温度和室内空气湿度之间的耦合关系的基础上。建立了房间模型的动态耦合方程,并将单房间模型扩展到包括整个建筑物的多区域模型,获得了整个建筑系统的温湿度耦合方程。基于单房间动态模型进行模拟得到结果。模拟结果表明了室内空气温度和湿度的动态变化行为,该模型很好地预测了不同时间的空气温度和湿度的动态响应。

**关键词** RC 模型 建筑热工模型 模拟 温度 湿度

## A Coupling Room Model for Temperature and Humidity

QIN Jing-hong, ZHANG Ji-li\*

Department of Construction Engineering, Dalian University of Technology

**Abstract:** In this paper, a room model was proposed to predict the cooling load based on RC network. The dynamic model was set up based on the coupling relationship between the building envelope, the indoor air temperature and the indoor air humidity. The dynamic coupling equations of the room model was established. Next, the single room model was extended to a multi zone model including the whole building. The temperature and humidity coupling equations of the whole building system were obtained. Therefore, based on the dynamic model, the dynamic behavior of indoor air temperature and humidity was simulated. The simulation results are show that the model can predict the dynamic thermal response of air temperature and humidity at different time.

**Keywords:** RC model, thermal model, simulation, temperature and humidity

### 0 引言

HVAC 系统是现代建筑中使用的关键系统之一,占一般建筑物总能耗的 60%<sup>[1]</sup>。如何提高 HVAC 系统的能效,对建筑节能意义重大。空调系统能耗仿真模型是利用计算机技术,仿真计算制冷机组、空调系统的能耗等,是空调系统调节进行节能优化控制研究的基础。因此,建立一个研究室内空气的温度和湿度房间模型是必要的。

在本文中,提出了一种基于一个 RC 网络单个空调房间负荷模型。这个动态房间模型,考虑了建筑围护结构,室内空气温度和湿度之间的耦合关系。接下

来,将单房间模型扩展到包括整个建筑物的多区域模型。建立了用于整个建筑物的室内空气温度和湿度的动态模型。基于单房间动力学模型,模拟研究了室内空气温度和湿度的动态行为。动态模型很好地预测了不同时间空气温度湿度的动态响应。

### 1 RC 网络模拟方法

基于 RC 网络的方法,假设墙壁分为两层。天花板和地板相似,也可用这种方法来划分为两层。图 1 箭头所示为节点温度,圆圈表示墙或空气节点,方框表示空气或墙热阻热容。

收稿日期 2016-12-12

通讯作者 张吉礼(1969~)男,博士,教授,辽宁省大连市大连理工大学建设工程学部 3 号楼 417 房间(116024) 0411-84707753;

E-mail: zjldlut@dlut.edu.cn

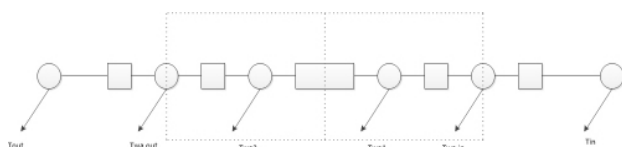


图 1 RC 网络模拟方法

## 2 模型的数学描述

图 2 是将建立动态耦合模型的室内房间模型。房间长 5 m, 宽 4 m, 高 3 m。窗户面积是 2 m<sup>2</sup>。

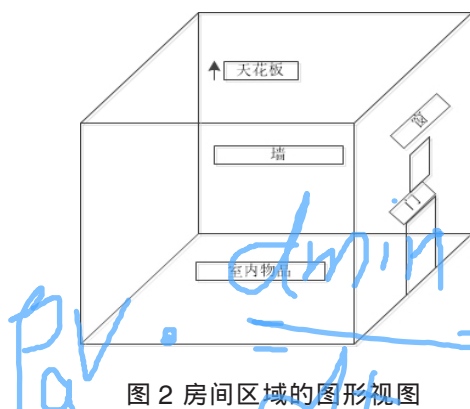


图 2 房间区域的图形视图

在建立室内热动力学模型之前,进行以下假设:

1) 基于集中参数的简化原理,室内空气看成是一个质点,热量集中在质点上和所有热扰动对室内空气的影响直接反映在质点上。

2) 墙可以分为几层栅栏结构,每层的热容量热阻对应每层的质点上的热容热阻。因此,在每个质点的温度下建立了能量平衡方程。

3) 假设墙分为两层,建立墙(地板)热阻以及热容方程。

### 2.1 墙体能量平衡方程

墙壁和地板节点热容热阻模型的数学描述如图 1 所示。由四个能量平衡方程组成,式(1)描述了内壁表面上的能量平衡方程。式(2)描述了第一个壁节点上的能量平衡方程。式(3)描述了第二个墙节点上的能量平衡方程。式(4)描述了外壁表面上的能量平衡方程。具体如下:

$$4A_w K_{wa} (T_{wa2} - T_{wa,out}) + A_w K_{wa,out} (T_{out} - T_{wa,out}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} \rho_w \delta_w A_w C_w \frac{dT_{wa2}}{dt} = 2A_{w2} K_{wa} (T_{wa1} - T_{wa2}) + 4A_{w2} K_{wa} (T_{wa,out} - T_{wa2}) \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} \rho_w \delta_w A_w C_w \frac{dT_{wa1}}{dt} = 4A_{w1} K_{wa} (T_{wa,in} - T_{wa1}) + 2A_{w1} K_{wa} (T_{wa2} - T_{wa1}) \quad (3)$$

$$4A_w K_{wa} (T_{wa1} - T_{wa,in}) + A_w K_{wa,in} (T_{in} - T_{wa,in}) = 0 \quad (4)$$

### 2.2 天花板的能量平衡方程

天花板的热容热阻能量平衡方程为:

$$4A_f K_{ff} (T_{f2} - T_{f,out}) + A_f K_{f,out} (T_{out} - T_{f,out}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} \rho_f \delta_f A_f C_f \frac{dT_{f2}}{dt} = 4A_{f2} K_{ff} (T_{f1} - T_{f2}) + 4A_{f2} K_{ff} (T_{f,out} - T_{f2}) \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} \rho_f \delta_f A_{wa} C_f \frac{dT_{f1}}{dt} = 4A_{f1} K_{ff} (T_{f,in} - T_{f1}) + 2A_{f1} K_{ff} (T_{f2} - T_{f1}) \quad (7)$$

$$4A_f K_{ff} (T_{f1} - T_{f,in}) + A_f K_{f,in} (T_{in} - T_{f,in}) = 0 \quad (8)$$

### 2.3 室内空气的平衡方程

室内空气的能量方程如下:

$$\rho_a V C_a + C_f \frac{dT_{in}}{dt} = 4K_{wa,in} A_{wa} (T_{wa,in} - T_{in}) + K_{win} A_{win} (T_{out} - T_{in}) + 2K_{fa} A_f (T_{f,in} - T_{in}) + G_{sa} C_a (T_{sa} - T_{in}) + Q_{la} \quad (9)$$

室内空气焓平衡方程:

$$\rho_a V \frac{dh_{in}}{dt} = G_{sa} (h_{sa} - h_{in}) \quad (10)$$

房间空气的湿度方程:

$$V \rho_a \frac{dM_{in}}{dt} = G_{sa} M_{sa} - G_{sa} M_{in} \quad (11)$$

空气的焓值  $h_{in}$  在式(10)中是室内温度  $t_{in}$  和室内湿度  $M_{in}$  的函数,方程表达式如下:

$$h_{in} = C_a t_{in} + (2.5 \times 10^6 + C_{aw} t_{in}) M_{in} \quad (12)$$

因  $C_a = 1005 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$ ,  $C_{aw} = 1840 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$ , 则有  $C_{aw} t_{in} < 2.5 \times 10^6$ , 于是空气焓值  $h_{in}$  可以表示为室内温度  $t_{in}$  和室内湿度  $M_{in}$  的函数,方程表达式如下:

$$h_{in} = c_a t_{in} + \beta_2 M_{in} \quad (13)$$

式中  $\beta_2$  为常数,约等于  $2.5 \times 10^6$ 。

### 2.4 求解方程

化简删除  $T_{wa,out}$ ,  $T_{wa,in}$  和  $T_{f,out}$ ,  $T_{f,in}$  得到如下方程:

$$\frac{1}{2} \rho_w \delta_w A_w C_w \frac{dT_{wa1}}{dt} = \left[ \frac{4A_{wa} K_{wa} - 6K_{wa}}{1 + \frac{K_{wa,in}}{4K_{wa}}} \right] T_{wa1} + 2A_{wa} K_{wa} T_{wa2} + \frac{4A_{wa} K_{wa} T_{in}}{1 + 4 \frac{K_{wa}}{K_{wa,in}}} \quad (14)$$

$$\frac{1}{2} \rho_w \delta_w A_w C_w \frac{dT_{wa2}}{dt} = 2A_{wa} K_{wa} T_{wa1} + \left[ \frac{4A_{wa} K_{wa} - 6K_{wa}}{1 + \frac{K_{wa,in}}{4K_{wa}}} \right] T_{wa2} + \frac{4A_{wa} K_{wa} T_{out}}{1 + 4 \frac{K_{wa}}{K_{wa,in}}} \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} \rho_f \delta_f A_f C_f \frac{dT_{f1}}{dt} = \left( \frac{4A_{f1}K_{f1}}{1 + \frac{K_{f1,in}}{4K_{f1}}} - 6K_{f1} \right) T_{f1} + 2A_{f1}K_{f1}T_{f2} + \frac{4A_{f1}K_{f1}}{1 + 4\frac{K_{f1}}{K_{f1,in}}} T_{in} \quad (16)$$

$$\frac{1}{2} \rho_f \delta_f A_f C_f \frac{dT_{f2}}{dt} = 2A_{f1}K_{f1}T_{f1} + \left( \frac{4A_{f2}K_{f2}}{1 + \frac{K_{f2,in}}{4K_{f2}}} - 6K_{f2} \right) T_{f2} + \frac{4A_{f2}K_{f2}}{1 + 4\frac{K_{f2}}{K_{f2,in}}} T_{out} \quad (17)$$

$$(\rho_a VC_a + C_f) \frac{dT_{in}}{dt} = -\frac{16K_{wa} \cdot K_{wa} A_{wa}}{4K_{wa} + K_{wa,in}} T_{in} + \frac{16K_{wa} \cdot K_{wa} A_{wa}}{4K_{wa} + K_{wa,in}} T_{wa1} + K_{win} A_{win} (T_{out} - T_{in}) - \frac{8K_{f1} \cdot K_{f1} A_{f1}}{4K_{f1} + K_{f1,in}} T_{in} + \frac{8K_{f1} \cdot K_{f1} A_{f1}}{4K_{f1} + K_{f1,in}} T_{f1} + \rho_a VC_a G_{sa} (T_{sa} - T_{in}) + Q_{la} \quad (18)$$

$$V \rho_a \frac{dM_{in}}{dt} = G_{sa} M_{sa} - G_{sa} M_{in} + M_{la} \quad (19)$$

化简方程为矩阵形式得：

$$CX' = AX + BU \quad (20)$$

系统变量向量为：

$$X = [T_{in}, T_{wa1}, T_{wa2}, T_{f1}, T_{f2}, M_{in}]^T \quad (21)$$

系统扰动向量为：

$$U = [T_{out}, T_{sa}, Q_{la}]^T \quad (22)$$

热容系数为：

$$A = \begin{bmatrix} A1 & \frac{16A_{wa}K_{wa}K_{wa}}{4K_{wa} + 4K_{wa,in}} & 0 & \frac{8A_{f1}K_{f1}K_{f1}}{4K_{f1} + 4K_{f1,in}} & 0 & 0 \\ \frac{4A_{wa}K_{wa}}{1 + 4\frac{K_{wa}}{K_{wa,in}}} & \frac{4A_{wa}K_{wa}}{1 + 4\frac{K_{wa}}{K_{wa,in}}} - 6K_{wa} & 2A_{wa}K_{wa} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2A_{wa}K_{wa} & \frac{4A_{wa}K_{wa}}{1 + 4\frac{K_{wa}}{K_{wa,in}}} - 6K_{wa} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{4A_{f1}K_{f1}}{1 + 4\frac{K_{f1}}{K_{f1,in}}} & 0 & 0 & \frac{4A_{f1}K_{f1}}{1 + 4\frac{K_{f1}}{K_{f1,in}}} - 6K_{f1} & 2A_{f1}K_{f1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4A_{f1}K_{f1}}{1 + 4\frac{K_{f1}}{K_{f1,in}}} & \frac{4A_{f1}K_{f1}}{1 + 4\frac{K_{f1}}{K_{f1,in}}} - 6K_{f1} & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中：

$$A1 = -\frac{16A_{wa}K_{wa}K_{wa}}{4K_{wa} + 4K_{wa,in}} - \frac{K_{win}A_{win}}{4K_{f1} + 4K_{f1,in}} - \rho_a VC_a G_{sa} \quad (24)$$

扰动系数为：

$$B = \begin{bmatrix} K_{win}A_{win} & \rho_a VC_a G_{sa} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{4A_{wa}K_{wa}}{1 + 4\frac{K_{wa}}{K_{wa,in}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{4A_{f1}K_{f1}}{1 + 4\frac{K_{f1}}{K_{f1,in}}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$C = \begin{bmatrix} \rho_a VC_a + C_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \rho_{wa} \delta_{wa} A_{wa} C_{wa} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \rho_{wa} \delta_{wa} A_{wa} C_{wa} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \rho_{f1} \delta_{f1} A_{f1} C_{f1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \rho_{f2} \delta_{f2} A_{f2} C_{f2} & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

方程两边同除 C，有：

$$X' = C^{-1}AX + C^{-1}BU \quad (27)$$

解上述方程得：

$$X(t) = e^{C^{-1}AX} X(0) + e^{C^{-1}AX} \int_0^t e^{-C^{-1}A\tau} C^{-1}BU(\tau) d\tau \quad (28)$$

至此，离散方程变成：

$$X((k+1)T) = e^{C^{-1}AX} X(kT) + U(kT) \int_0^T e^{-C^{-1}A(T-\xi)} C^{-1}B d\xi \quad (29)$$

$$= A^* X(kT) + U(kT)B^* \quad (29)$$

### 3 多房间模型

多房间模型为：

$$\begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (30)$$

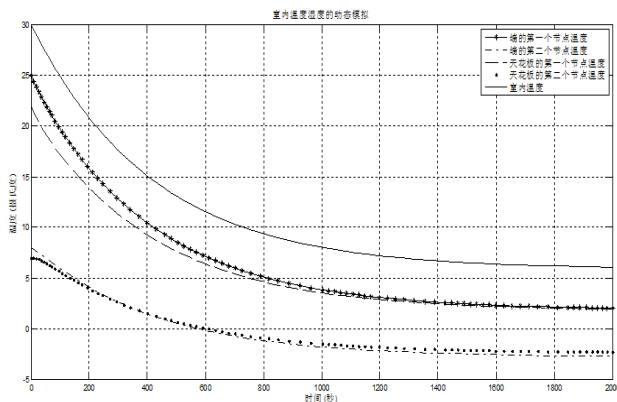
### 4 模型仿真

不同仿真工况的参数值如表 1 所示。

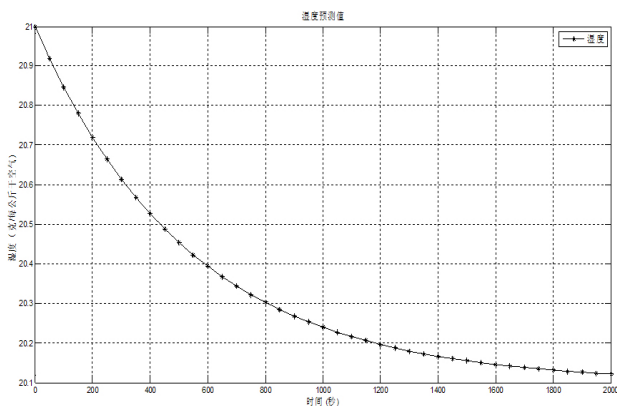
图 3(a)为工况一室内空气温度降低到达到稳定值的动态响应曲线，其初始值设为 30℃，经过 1800 s 仿真时间，室内温度维持在 6℃。图 3(a)中还给出了墙壁和地板的其他节点的温度响应曲线。在这种情况下，室内没有内部热源。图 3(b)中，湿度由最初的 21 g/(kg·干) 经过 2000 s 后变成了 20.1 g/(kg·干)。

表 1 仿真工况参数值

参数	工况一	工况二
$\rho_{wa}/\text{kg}/\text{m}^3$	2800	2800
$\rho_f/\text{kg}/\text{m}^3$	2500	2500
$\rho_a/\text{kg}/\text{m}^3$	1.34	1.34
$\delta_{wa}/\text{m}$	0.3	0.3
$\delta_f/\text{m}$	0.3	0.2
$A_{wa}/\text{m}^2$	2	2
$A_{wf}/\text{m}^2$	11.5	11.5
$A_f/\text{m}^2$	20	20
$V/\text{m}^3$	60	60
$C_f/\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	10000	10000
$C_{wa}/\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	1000	1000
$C_a/\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	1000	1000
$C_f/\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	950	950
$T_{wa, out}/^\circ\text{C}$	-6	-6
$T_{f, out}/^\circ\text{C}$	-6	-6
$T_{da}/^\circ\text{C}$	30	38
$K_{wa}/\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	0.5	1.2
$K_{wa, out}/\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	12	12.5
$K_{wa, in}/\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	5	6.5
$K_{f, out}/\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	6	6.5
$K_{f, in}/\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	5	5
$K_f/\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	2	1.2
$K_{af}/\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	3	3.2
$M_a/\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{干})$	20.1	24.1
$M_f/\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{干})$	21	21
$CV_f/\text{mg}/\text{m}^3$	200	200
$CV_{wa}/\text{mg}/\text{m}^3$	100	100
$G_a/\text{kg}/\text{s}$	0.15	0.19
$C_{in}/\text{ppm}$	540	540
$C_{out}/\text{ppm}$	360	360



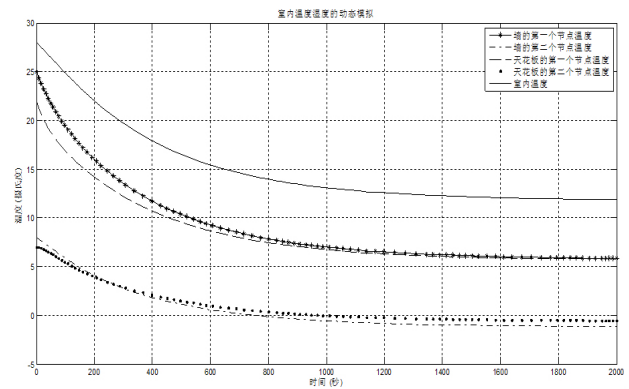
(a)室内温度的动态模拟



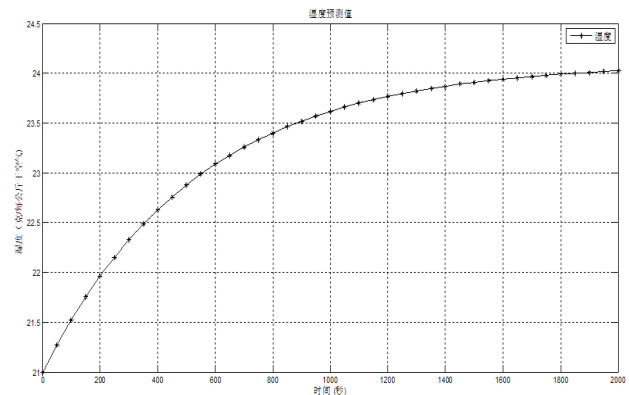
(b)室内湿度的动态模拟

图 3 工况一温度湿度响应曲线

图 4(a)为工况二室内空气温度降低到达稳定值的温度响应曲线,其初始值设为  $28^\circ\text{C}$ ,经过 1600 s 的仿真时间,室内温度维持在  $13^\circ\text{C}$ 。图 4(a)中还给出了墙壁和地板的其他节点的温度响应曲线。在这种情况下,室内没有内部热源。图 4(b)中,湿度开始为  $21 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{干})$ ,经过 2000 s 后,湿度变成  $24.1 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{干})$ 。与工况一相比,室内外传热系数和供给空气的初始温度的参数设置为不同的值。



(a)室内温度的动态模拟



(b)室内湿度的动态模拟

图 4 工况二下温度湿度响应曲线

## 5 结论

本文提出了一个预测温度和湿度响应的房间动态模型,并建立和研究模型方程。进一步把单房间模型推广到整栋建筑物的温湿度模型,得出了建筑系统的状态方程。对单房间模型进行了 2000 s 模拟,求出了房间室内空气温度和湿度的动态响应曲线。该模型具有快速的计算速度和高精度。

### 符号表

$A$ - 面积  $\text{m}^2$

$K$ - 对流换热系数  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$

$C$ - 热容  $\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$

$h$ - 焓  $J/kg$   
 $G$ - 空气质流率  $kg/s$   
 $\delta$ - 厚度  $\mu m$   
 $T$ - 温度  $^{\circ}C$   
 $V$ - 体积  $m^3$   
 $M$ - 湿度  $g/(kg \cdot 干)$   
 $Q$ - 能量  $J$   
 $s$ - 时间  $s$   
 $\rho$ - 密度  $kg/m^3$   
 $m$ - 质量  $kg$   
 下标  
 $wa$ - 墙  
 $fl$ - 地板  
 $a$ - 空气  
 $sa$ - 输入空气  
 $win$ - 窗  
 $la$ - 负荷  
 $h$ - 热源  
 $out$ - 室外  
 $in$ - 室内

#### 参考文献

- [1] Wu XT. Considerations in energy efficient design of HVAC systems[J]. HV&AC 2012, 42(7): 1-11.
- [2] Metha DP, Woods JE. An experimental validation of a rational model of dynamic responses of building[J]. ASHRAE Transactions, 1980, 86(1): 546-558.
- [3] Borresen BA. Thermal room models for control analysis[J]. ASHRAE Transactions, 1981, 87(2): 251-260.
- [4] Roberts AS, Oak MP. Nonlinear dynamics and control for thermal room models[J]. ASHRAE Transactions, 1991, 97(1): 722-728.
- [5] Ahmed O, Mitchel I JW, Klein SA. Experimental validation of thermal and pressure models in a laboratory simulator[J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(2): 983-996.
- [6] Yao Y, Yang K. A state-space model for dynamic response of indoor air temperature and humidity[J]. Building and Environment, 2013, 64: 26-37.
- [7] Wu XZ, Olesen Bjarne W, Fang L. A nodal model to predict vertical temperature distribution in a room with floor[J]. Building and Environment, 2013, 59: 626-634.
- [8] Paschkis V, Heisler MP. The accuracy of lumping in an electric circuit representing heat flow in cylindrical and spherical bodies[J]. J. Appl. Phys., 1946, 17: 246-254.
- [9] Nottage HB, Parmelee GV. Circuit analysis applied to load estimating[J]. ASHVE Trans., 1954, 60: 59-102.
- [10] Chow TT. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model[J]. Sol. Energy, 2003, 75:143-152.
- [11] Cristofari C, Notton G, Canaletti JL. Thermal behavior of a copolymer PV/Th solar system in low flow rate conditions[J]. Sol. Energy, 2009, 83: 1123-1138.
- [12] Fraisse G, Menezo C, Johannes K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of direct solar floor type[J]. Sol. Energy, 2007, 81:1426-1438.

(上接 77 页)

在不同厚度保冷层下,通过实现温湿度独立控制达到不同工况下表面结露特性。结论如下。

1)通过实测,该一体式保冷管道表面聚乙烯发泡材料导热系数  $0.053 W/(m \cdot K)$ ,满足工业设备及管道绝热工程设计规范中对保冷材料的相关规定。

2)一体式管道是冷热共用,既要保温又要保冷,查规范与计算可得,在测试保冷材料下,该管道经济层厚度为  $19 mm$ ,防表面结露厚度为  $25.0 mm$ 。当按照规范中防表面结露厚度的计算公式时,计算发现虽然忽略了 PERT 管道的导热系数和管内对流换热系数,对于导热过程影响不大,误差很小,因此对于规范中“保冷层计算时管道外表面温度取为介质的最低操作温度”是合理的。

3)在本实验的测试探究当中,理论计算可得管道防结露保冷层厚度为  $15.1 mm$ 。而且通过实际测得的保温材料表面温度和理论计算的温度对比,证实了理论计算模型的准确性,并且给出了在不同相对湿度下的防结露厚度随环境干球温度变化的曲线图样。

4)在实际工程工况,由于不同地区气象条件的差异,导致该一体式保温管经济厚度和防表面结露厚度会有很大差异,因此合理确认保温层厚度是工业化生产过程的重要步骤。此外,在选取保温层厚度时还需要考虑能量损失,保温材料投资、维修和折旧等问题。

#### 参考文献

- [1] 杨瑞,周翔,袁永莉. 预制保冷一体式水管防结露特性实验研究[J]. 建筑热能通风空调, 2014, (3): 21-24.
- [2] 孔祥雷,张小松,路诗奎. 辐射供冷空调结露问题的研究现状及其对策[J]. 建筑热能通风空调, 2008, (1): 20-23.
- [3] GB 50264-2013 工业设备及管道绝热工程设计规范[S]. 2013.
- [4] 国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012)编制组声明[J]. 暖通空调, 2012, (5): 99.
- [5] 章熙民,任泽霏,梅飞鸣. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [6] 贾晶. 供冷管道与设备保冷计算和分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [7] GB-T 8175-2008 设备及管道绝热设计导则[S]. 2008.