

文章编号: 0253-4339(2012)02-0001-06

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.02.001

基于状态空间的空调用表面式换热器动态建模

戴善其 莫锦秋 姚 晔

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 在合理简化复杂物理模型的基础上,建立了表面式换热器的动态换热状态空间模型,推导出了表面式换热器出口参数与各进口参数间的动态关系式;动态模拟仿真得到出口参数随各进口参数扰动而发生的变化;并基于实验对空气和水的传热系数以及传质系数进行了修正。通过实验进行了验证,新建模型能较好的反映表面式换热器出口参数对各扰量的动态响应特性,可以满足系统分析需求,为设计出优良的控制系統,保证空调系統稳定运行奠定理论基础。

关键词 工程热物理;表面式换热器;状态空间模型;空调;动态仿真

中图分类号: TK172; TQ051.5

文献标识码: A

Dynamic Modeling for Surface Heat-exchanger Based on State-space

Dai Shanqi Mo Jinqiu Yao Ye

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Based on the reasonably simplified physical model, a dynamic model for surface heat-exchanger is developed by using the state-space method. The dynamic relationship between the outlet and the inlet parameters of heat-exchanger is deduced during the model development. The coefficients of heat and mass transfer in the model are adjusted as well by using the experimental data. The dynamic model is validated by experiments, which manifests that the state-space model established in this paper works well in the dynamic simulation of surface heat-exchanger.

Keywords Engineering thermophysics; Surface heat exchanger; State-space model; Air-conditioning; Dynamic simulation

表面式换热器由于具有传热效率高、结构紧凑、经济性好等优点,得到越来越广泛的应用,相应的设计优化和性能优化研究也越来越多。表面式换热器为用户提供的热量受到许多外界因素的干扰,主要包括冷冻水的进水温度和流量、通过换热器的空气流速以及空气状态参数^[1]。研究这些干扰因素对表面式换热器换热特性的影响,不仅有利于提高换热器的换热效率和整体系统性能,而且对改进翅片换热器的设计形式,推出更加节能、节材的紧凑式换热器有着重要的指导意义^[2]。在此以表面式换热器为对象,建立动态换热模型,通过仿真研究表面式换热器的动态换热规律。

外径,管排数2~3排,肋片为0.15~0.20mm厚的铝板,肋片间距2.0~3.0mm^[3]。流经盘管换热器空气的方向与冷冻水流动方向垂直且朝向相反,如图1所示。

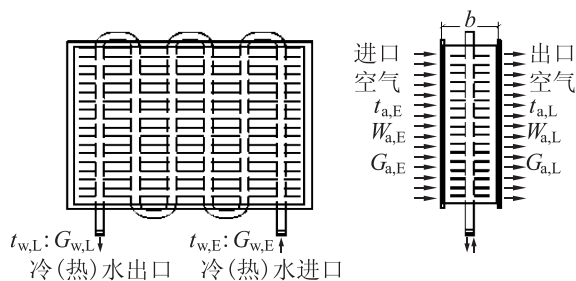


图1 表面式换热器结构示意图

Fig.1 Schematic model for the surface heat exchanger

1 表面式换热器模型的建立

1.1 物理模型描述

表面式换热器均采用铜管套铝箔结构。管外径10~16mm,管壁厚0.5~1.0mm,管根数10~24根,管排列方式为叉排,管中心距为2~2.5倍管

1.2 物理模型简化及其数学模型

动态建模前,做以下几点假设^[4-7]:

1) 忽略温度、压力对空气和水的物性参数的影响;

基金项目: 国家自然科学基金(51076100)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51076100).)

收稿日期: 2011年9月16日

2) 控制体中冷(热)水参数(温度 t_w)和空气参数(温度 t_a 和湿度 w_a)平均值近似为空气(或水)进、出口参数的算术平均值;

3) 翅片的导热热阻考虑了管壁的热阻, 管壁温度 t_g 与翅片表面温度 t_m 均按集中参数法处理;

4) 当发生湿冷过程时, 在表面式换热器外表面形成均匀的水膜, 同时将冷凝水膜形成的额外热阻折算到空气侧对流换热热阻当中;

5) 翅片外表面换热系数中不考虑翅片与外界的热辐射热;

根据上述假设, 利用质量平衡和能量平衡原理建立如下方程:

冷(热)水进、出口质量平衡方程

$$G_{w,E} = G_{w,L} = G_w \quad (1)$$

空气进、出口质量平衡方程

$$G_{a,E} = G_{a,L} = G_a \quad (2)$$

冷(热)水能量平衡方程

$$\frac{1}{2} \rho_w c_w A_w l \frac{d(t_{w,L} + t_{w,E})}{d\tau} = G_{w,E} c_w (t_{w,E} - t_{w,L}) + a_{gw} A_i \left(t_g - \frac{t_{w,E} + t_{w,L}}{2} \right) \quad (3)$$

空气能量平衡方程

$$\frac{1}{2} \varepsilon_a \rho_a b A_a \frac{d(h_{a,L} + h_{a,E})}{d\tau} = G_{a,E} (h_{a,E} - h_{a,L}) + a_{ga} A_o \left(t_m - \frac{t_{a,E} + t_{a,L}}{2} \right) + q_r A_o \lambda_m \left(W_{gb} - \frac{W_{a,E} + W_{a,L}}{2} \right) \quad (4)$$

空气湿度平衡方程

$$\frac{1}{2} \varepsilon_a \rho_a b A_a \frac{d(W_{a,L} + W_{a,E})}{d\tau} = G_{a,E} (W_{a,E} - W_{a,L}) + \lambda_m A_o \left(W_{gb} - \frac{W_{a,E} + W_{a,L}}{2} \right) \quad (5)$$

翅片管壁能量平衡方程

$$M_g c_g \frac{dt_g}{d\tau} = a_{gw} A_i \left(\frac{t_{w,E} + t_{w,L}}{2} - t_g \right) + a_{ga} A_o \left(\frac{t_{a,E} + t_{a,L}}{2} - t_m \right) + q_r A_o \lambda_m \left(\frac{W_{w,E} + W_{w,L}}{2} - W_{gb} \right) \quad (6)$$

现对系统方程(1)~(6)进行线性化处理。将基本变量 t_w 、 t_a 、 W_a 、 G_w 、 G_a 写成稳态初始值和微小增量之和, 即:

$$\begin{aligned} t_{w,E} &= (t_{w,E})_o + \Delta t_{w,E}; & t_{w,L} &= (t_{w,L})_o + \Delta t_{w,L}; \\ t_{a,E} &= (t_{a,E})_o + \Delta t_{a,E}; & t_{a,L} &= (t_{a,L})_o + \Delta t_{a,L}; \\ W_{a,E} &= (W_{a,E})_o + \Delta W_{a,E}; & W_{a,L} &= (W_{a,L})_o + \Delta W_{a,L}; \\ G_{a,E} &= (G_{a,E})_o + \Delta G_{a,E}; & G_{a,L} &= (G_{a,L})_o + \Delta G_{a,L}; \end{aligned}$$

$$G_{w,E} = (G_{w,E})_o + \Delta G_{w,E}; \quad G_{w,L} = (G_{w,L})_o + \Delta G_{w,L};$$

同时, 考虑模型为一阶线性模型, 方程中的对流换热系数 a_{gw} 、 a_{ga} 和对流传质系数 λ_m 均按一阶泰勒公式进行线性化:

$$a_{gw} = (a_{gw})_o + \left(\frac{\partial a_{gw}}{\partial G_{w,E}} \right)_o \cdot \Delta G_{w,E}$$

$$a_{ga} = (a_{ga})_o + \left(\frac{\partial a_{ga}}{\partial G_{a,E}} \right)_o \cdot \Delta G_{a,E}$$

$$\lambda_m = (\lambda_m)_o + \left(\frac{\partial \lambda_m}{\partial G_{a,E}} \right)_o \cdot \Delta G_{a,E}$$

式中, 下标“o”表示各参量的稳态初始值, 符号“ Δ ”表示各参量的增量值。

将以上线性形式代入方程(1)~(6)中, 舍去高阶项(含两个“ Δ ”乘积的项), 得到由变量 t_w 、 t_a 、 W_a 、 G_w 、 G_a 进、出口增量线性关系的表达形式:

$$T_w \frac{d\Delta t_{w,L}}{d\tau} = X_1 \Delta t_{w,L} + X_2 \Delta t_g + X_3 \Delta t_{w,E} + X_4 \Delta G_{w,E} + \xi_{\Delta t_{w,L}} \quad (7)$$

$$T_a \frac{d\Delta t_{a,L}}{d\tau} = Y_1 \Delta t_{a,L} + Y_2 \Delta W_{a,L} + Y_3 \Delta t_g + Y_4 \Delta t_{a,E} + Y_5 \Delta G_{a,E} + Y_6 \Delta W_{a,E} + \xi_{\Delta t_{a,L}} \quad (8)$$

$$T_m \frac{d\Delta W_{a,L}}{d\tau} = N_1 \Delta t_{a,L} + N_2 \Delta W_{a,L} + N_3 \Delta t_g + N_4 \Delta t_{a,E} + N_5 \Delta G_{a,E} + N_6 \Delta W_{a,E} + \xi_{\Delta W_{a,L}} \quad (9)$$

$$T_g \frac{d\Delta t_g}{d\tau} = Z_1 \Delta t_{w,L} + Z_2 \Delta t_{a,L} + Z_4 \Delta t_g + Z_5 \Delta t_{a,E} + Z_6 \Delta t_{w,E} + Z_7 \Delta G_{w,E} + Z_8 \Delta G_{a,E} + Z_9 \Delta W_{a,E} \quad (10)$$

$$\Delta G_{w,L} = \Delta G_{w,E} \quad (11)$$

$$\Delta G_{a,L} = \Delta G_{a,E} \quad (12)$$

式(7)~(12)中:

$$T_w = \frac{1}{2} \rho_w c_w A_w l; \quad T_a = \frac{1}{2} \varepsilon_a \rho_a c_a A_a b;$$

$$T_m = \frac{1}{2} \varepsilon_a \rho_a A_a b; \quad T_g = c_g M_g;$$

$$X_1 = -c_w (G_{w,E})_o - \frac{A_i}{2} (a_{gw})_o;$$

$$X_2 = A_i (a_{gw})_o; \quad X_3 = c_w (G_{w,E})_o - \frac{A_i}{2} (a_{gw})_o;$$

$$X_4 = c_w (t_{w,E} - t_{w,L})_o + A_i \left(\frac{\partial a_{gw}}{\partial G_{w,E}} \right)_o \left(t_g - \frac{t_{w,L} + t_{w,E}}{2} \right)_o;$$

$$Y_1 = -c_a (G_{a,E})_o - \frac{A_o}{2} [(a_{ga})_o \eta_s + \beta_1 (q_r - \beta_2) (1 - \eta_s) (\lambda_m)_o];$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 = Y_6 &= \frac{A_o(\beta_2 - q_r)}{2}(\lambda_m)_o; \\
 Y_3 &= A_o \eta_s (a_{ga})_o + (q_r - \beta_2) A_o \beta_1 \eta_s (\lambda_m)_o; \\
 Y_4 &= c_a (G_{a,E})_o - \frac{A_o}{2} [(a_{ga})_o \eta_s + \\
 &\quad \beta_1 (q_r - \beta_2) (1 - \eta_s) (\lambda_m)_o]; \\
 Y_5 &= c_a (t_{a,E} - t_{a,L})_o - \frac{A_o(\beta_2 - q_r)}{2} \left(\frac{\partial \lambda_m}{\partial G_{a,E}} \right)_o \\
 &\quad (W_{a,E} + W_{a,L})_o + A_o (t_g)_o \left[\left(\frac{\partial a_{ga}}{\partial G_{a,E}} \right)_o \eta_s + \right. \\
 &\quad \left. \beta_1 (q_r - \beta_2) \eta_s \left(\frac{\partial \lambda_m}{\partial G_{a,E}} \right)_o \right] - \frac{A_o}{2} \left[\left(\frac{\partial a_{ga}}{\partial G_{a,E}} \right)_o \eta_s + \right. \\
 &\quad \left. \beta_1 (q_r - \beta_2) (1 - \eta_s) \left(\frac{\partial \lambda_m}{\partial G_{a,E}} \right)_o \right] (t_{a,E} + t_{a,L})_o; \\
 N_1 = N_4 &= -\frac{\beta_1 (1 - \eta_s) A_o}{2} (\lambda_m)_o; \\
 N_2 &= -(G_{a,E})_o - \frac{A_o}{2} (\lambda_m)_o; \\
 N_3 &= \beta_1 \eta_s A_o (\lambda_m)_o; \quad N_6 = (G_{a,E})_o - \frac{A_o}{2} (\lambda_m)_o; \\
 N_5 &= \left[\beta_1 \eta_s A_o (t_g)_o - \frac{\beta_1 A_o (1 - \eta_s)}{2} (t_{a,E} + t_{a,L})_o \right] \\
 &\quad \left(\frac{\partial \lambda_m}{\partial G_{a,E}} \right)_o - \frac{A_o}{2} (W_{a,E} + W_{a,L})_o \left(\frac{\partial \lambda_m}{\partial G_{a,E}} \right)_o + \\
 &\quad (W_{a,E} - W_{a,L})_o; \\
 Z_1 = Z_6 &= \frac{A_i}{2} (a_{gw})_o; \\
 Z_7 &= \frac{A_i}{2} \left(\frac{\partial a_{gw}}{\partial G_{w,E}} \right)_o (t_{w,L} + t_{w,E} - 2t_g)_o; \\
 Z_2 = Z_5 &= \frac{A_o \eta_s}{2} (a_{ga})_o + \frac{1}{2} \beta_1 (1 - \eta_s) q_r A_o (\lambda_m)_o; \\
 Z_3 = Z_9 &= \frac{A_o q_r}{2} (\lambda_m)_o; \\
 Z_4 &= -A_1 (a_{gw})_o - A_o \eta_s (a_{ga})_o - q_r \beta_1 \eta_s A_o (\lambda_m)_o; \\
 Z_8 &= \eta_s A_o \left(\frac{\partial a_{ga}}{\partial G_{a,E}} \right)_o \left[\frac{1}{2} (t_{a,L} + t_{a,E})_o - (t_g)_o \right] + \\
 &\quad A_o q_r \left(\frac{\partial \lambda_m}{\partial G_{a,E}} \right)_o \left[\frac{1}{2} \beta_1 (1 - \eta_s) (t_{a,E} + t_{a,L})_o \right] - \\
 &\quad \beta_1 \eta_s (t_g)_o + \frac{1}{2} (W_{a,E} + W_{a,L})_o;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \xi_{\Delta t_{w,L}} &= -\frac{1}{2} \varepsilon_a \rho_w c_w A_w \frac{\partial \Delta t_{w,E}}{\partial \tau}; \\
 \xi_{\Delta W_{a,L}} &= -\frac{1}{2} \varepsilon_a \rho_a b A_a \frac{\partial \Delta W_{a,E}}{\partial \tau}; \\
 \xi_{\Delta t_{a,L}} &= -\frac{1}{2} \varepsilon_a \rho_a b A_a c_a \frac{\partial \Delta t_{a,E}}{\partial \tau};
 \end{aligned}$$

选择 $\Delta t_{w,E}$ 、 $\Delta G_{w,E}$ 、 $\Delta t_{a,E}$ 、 $\Delta W_{a,E}$ 、 $\Delta G_{a,E}$ 为系统模型的输入变量，选择 $\Delta t_{w,L}$ 、 $\Delta G_{w,L}$ 、 $\Delta t_{a,L}$ 、 $\Delta W_{a,L}$ 、 $\Delta G_{a,L}$ 为系统模型的输出变量，选择 $\Delta t_{w,L}$ 、 $\Delta t_{a,L}$ 、 $\Delta W_{a,L}$ 、 Δt_g 作为状态变量。则式 (7)~(12) 可分别写成用矩阵表示的表面式换热器的状态空间形式：

$$\dot{\bar{x}} = A \cdot \bar{x} + B \cdot \bar{u} + \bar{\xi} \quad (13)$$

输出方程：

$$\bar{y} = C \cdot \bar{x} + D \cdot \bar{u} \quad (14)$$

其中：

$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= [\Delta t_{w,L}, \Delta t_{a,L}, \Delta W_{a,L}, \Delta t_g]^T; \\
 \bar{y} &= [\Delta t_{w,L}, \Delta G_{w,L}, \Delta t_{a,L}, \Delta W_{a,L}, \Delta G_{a,L}]^T; \\
 \bar{u} &= [\Delta t_{w,E}, \Delta G_{w,E}, \Delta t_{a,E}, \Delta W_{a,E}, \Delta G_{a,E}]^T; \\
 \bar{\xi} &= [\xi_{\Delta t_{w,L}}, \xi_{\Delta t_{a,L}}, \xi_{\Delta t_g}, 0]^T; \\
 A &= \begin{bmatrix} \frac{X_1}{T_w} & 0 & 0 & \frac{X_2}{T_w} \\ 0 & \frac{Y_1}{T_a} & \frac{Y_2}{T_a} & \frac{Y_3}{T_a} \\ 0 & \frac{N_1}{T_m} & \frac{N_2}{T_m} & \frac{N_3}{T_m} \\ \frac{Z_1}{T_g} & \frac{Z_2}{T_g} & \frac{Z_3}{T_g} & \frac{Z_4}{T_g} \end{bmatrix}; \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{X_3}{T_w} & \frac{X_4}{T_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Y_4}{T_a} & \frac{Y_6}{T_a} & \frac{Y_5}{T_a} \\ 0 & 0 & \frac{N_4}{T_m} & \frac{N_6}{T_m} & \frac{N_5}{T_m} \\ \frac{Z_6}{T_g} & \frac{Z_7}{T_g} & \frac{Z_5}{T_g} & \frac{Z_9}{T_g} & \frac{Z_8}{T_g} \end{bmatrix};
 \end{aligned}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

2 动态模拟仿真与实验验证

2.1 实验平台简介

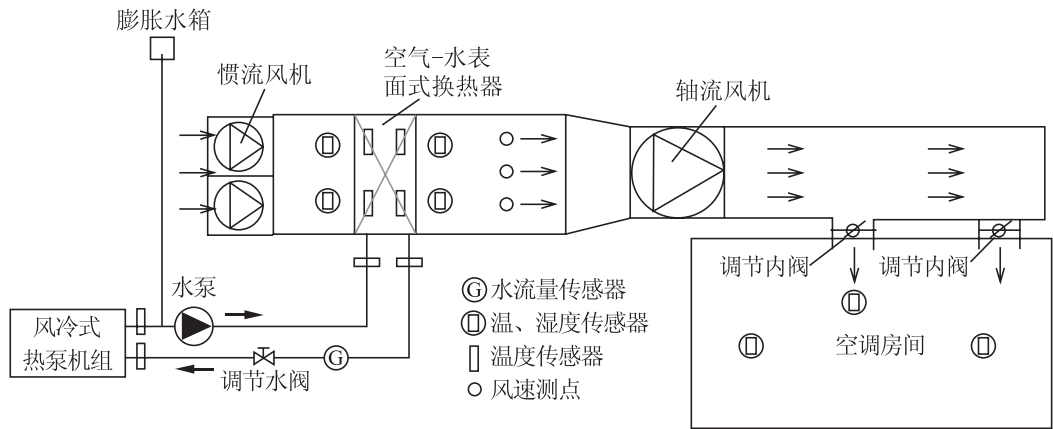


图2 集中空调系统实验平台示意图
Fig.2 Schematic diagram of experimental platform for central air conditioning system

图2为集中空调系统实验台示意图，主要测试仪器包括：高精度温湿度传感器(温度精度： $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度精度： $\pm 0.8\%$)；风速测试仪(精度： $\pm 0.1\text{m/s}+5\%$ 测量值)，水流量传感器(精度：0.5级)。采用双风机，引风机是贯流式风机(风量分级可调，额定高风量为 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，额定中风量为 $800\text{m}^3/\text{h}$ ，额定低风量为 $600\text{m}^3/\text{h}$)，送风机是轴流风机(额定风量为 $2000\text{m}^3/\text{h}$)。

2.2 表面式换热器结构参数

表1为表面式换热器的主要结构参数。

表1 表面式换热器基本结构参数汇总
Tab.1 The basic structure parameters of the surface heat-exchanger

盘管长度 l/m	21	迎风面面积 A_a/m^2	0.175
翅片管道内半径 r_i/m	0.004	翅片管的翅片间距 e/m	0.0024
翅片管内表面面积 A_i/m^2	0.5287	翅片厚度 δ_c/m	0.0002
翅片管外表面面积 A_o/m^2	8.8065	表面式换热器质量 M_g/kg	7.52
沿空气流方向上的尺寸 b/m	0.66	表面式换热器质量比热 $c_g/(\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}))$	475

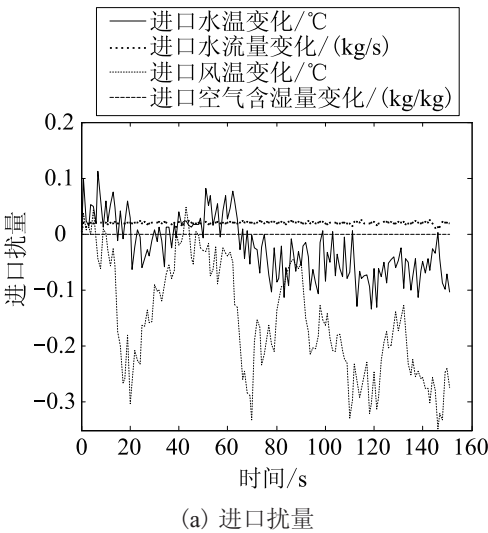
2.3 实验初始条件

表面式换热器的初始条件指在受控参数发生变化时的进、出风状态(进、出风温、湿度及风量)，进、出水状态(进、出水温度和流量)以及翅片和盘管外表面温度。表2为表面式换热器实验时的初始条件。

表2 表面式换热器实验及模型仿真的初始条件
Tab.2 The initial conditions for experiments and model simulation of the surface heat-exchanger

初始条件	修正传热传质系数实验	验证实验
$(t_{a,E})_o/^{\circ}\text{C}$	28.2	28.4
$(t_{a,L})_o/^{\circ}\text{C}$	21.2	19.9
$(W_{a,E})_o/(\text{g}/\text{kg干空气})$	18.9	13.7
$(W_{a,L})_o/(\text{g}/\text{kg干空气})$	17.3	12.7
$(G_a)_o/(\text{kg}/\text{s})$	0.2002	0.2002
$(t_{w,E})_o/^{\circ}\text{C}$	16.9	16.9
$(t_{w,L})_o/^{\circ}\text{C}$	19.4	17.0
$(G_w)_o/(\text{kg}/\text{s})$	0.2587	0.2521
$(t_g)_o/^{\circ}\text{C}$	19.6	18.7

2.4 修正传热传质系数实验



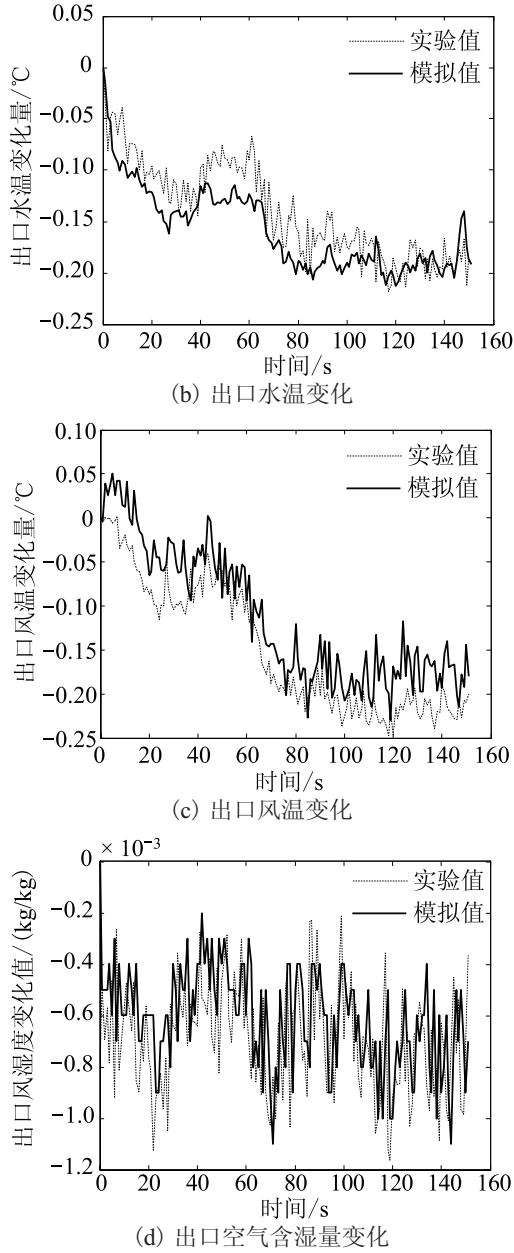


图3 修正传热传质系数实验图

Fig.3 The experiment of adjust coefficient of heat and mass transfer

对系统输入扰量，将仿真结果与实验所测得数据进行比较，得到修正后的空气和水的传热传质系数，实验和仿真的数据如图3所示，参考文献[8-9]中换热、换质系数模型，修正空气和水的传热传质系数，修正后系数如下：

水侧对流换热系数 a_{gw}

$$Nu_w = 0.023 Re_w^{0.8} Pr_w^{0.4}$$

$$\text{式中: } Nu_w = \frac{2a_{gw}r_i}{\lambda_w}; Re_w = \frac{2u_w r_i}{\nu_w} = \frac{2G_w r_i}{\nu_w \rho_w A_w}$$

风侧对流换热系数 a_{ga}

$$Nu_a = 0.032 Re_a^{0.65} Pr_a^{0.78}$$

$$\text{式中: } Nu_a = \frac{2a_{ga}r_d}{\lambda_a}; Re_a = \frac{2u_a r_d}{\nu_a} = \frac{2G_a r_d}{\nu_a \rho_a A_a};$$

$$r_d = \frac{(S - 2r_i)(e - \delta_c)}{(S - 2r_i) + (e - \delta_c)}$$

风侧质交换系数 λ_m

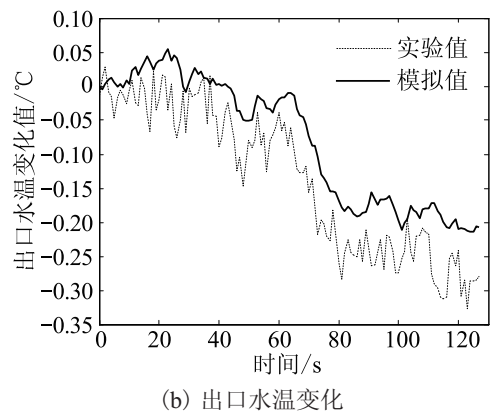
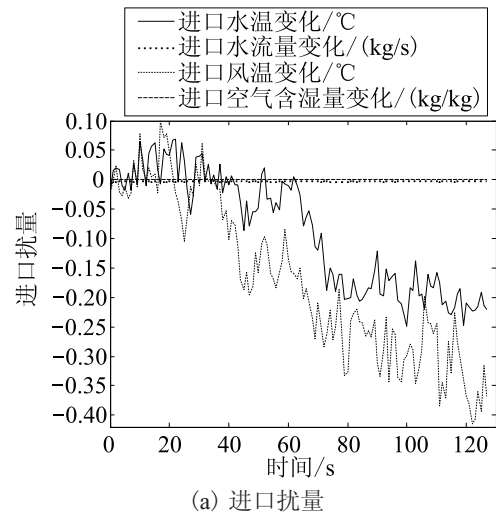
$$Sh_m = 0.21 Re_a^{0.6} Sc_j^{0.85}$$

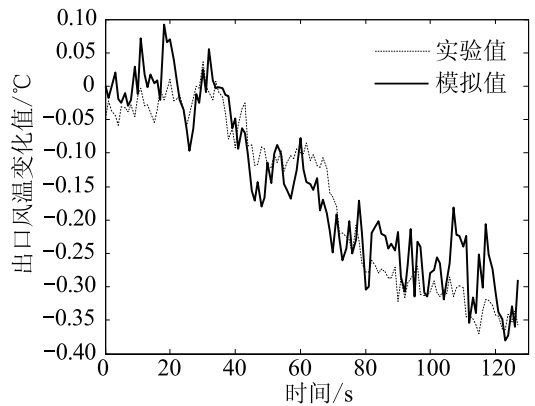
$$\text{式中: } Sh_m = \frac{2\lambda_m r_d}{\rho_a D_{w,a}}; Re_a = \frac{2u_a r_d}{\nu_a} = \frac{2G_a r_d}{\nu_a \rho_a A_a};$$

$$r_d = \frac{(S - 2r_i)(e - \delta_c)}{(S - 2r_i) + (e - \delta_c)}$$

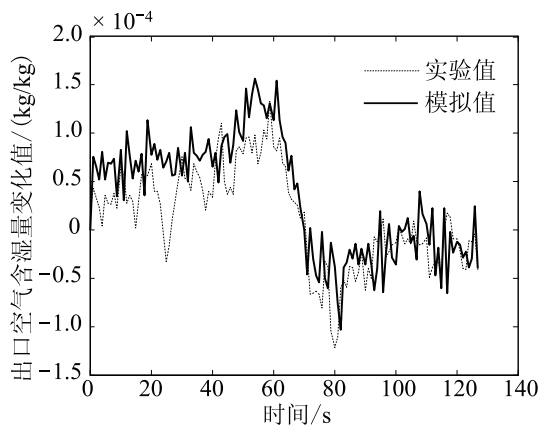
2.5 实验验证

通过实验对所建模型进行验证，如图4所示，图(a)为输入扰量，图(b)(c)(d)为表面式换热器动态模型的仿真结果与实验结果的对照情况。由于外扰因素的影响，测试曲线呈现一定的波动，有时波动幅度较大。但从图(b)可以看出，表面式换热器模型仿真曲线的变化趋势基本与实验曲线相吻合，说明建立的表面式换热器状态空间模型是正确的，只要根据实验结果对其进行简单地修正，就能真实反映表面式换热器的动态特性。





(c) 出口风温变化



(d) 出口空气含湿量变化

图4 实验验证图

Fig.4 Verification experiment figure

3 结论

实验结果表明, 基于状态空间方法建立的表面式换热器动态模型, 能很好地模拟部件和系统在任何情况下的动态特性, 满足系统分析需求, 为设计出优良的控制系統, 保证空调系統稳定运行奠定理论基础。

符号说明

变量

a	换热系数/(W/(m ² ·℃))	β_1	0.5301
A	面积/m ²	β_2	2500000
b	宽度/m	S	表面式换热器翅片管中心间距/m
c	质量比热容/(J/(kg·℃))	t	温度/℃
q	冷凝潜热/(J/kg)	W	含湿量/(kg/(kg干空气))
e	表面式换热器翅片间距/m	η_s	换热器翅片显热效率
G	空气或水流量/(kg/s)	λ_m	质交换系数/(kg/(m ² ·s))

h	焓/(J/kg)	ρ	密度/(kg/m ³)
l	换热器盘管或风(水)管长度/m	δ_c	表面式换热器翅片厚度/m
M	质量/kg	ε_a	表面式换热器空气侧空气率
r	半径/m		
下标			
a	空气或表面式换热器空气迎风截面	gw	水流与表面式换热器盘管内表面间
o	换热器翅片管外表面	i	换热器翅片管内表面
w	水	L	出口
E	进口	m	换热器翅片
g	表面式换热器壳管管壁	gw	水与表面式换热器翅片外表面间
ga	空气与表面式换热器翅片外表面间	gb	换热器湿工况翅片表面附近空气

参考文献

[1] 董其伍, 张焱. 换热器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[2] 刘建, 魏文建, 丁国良. 翅片管式换热器换热与压降特性的实验研究进展——实验研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(3): 25-30. (Liu Jian, Wei Wenjian, Ding Guoliang. Development of Study on Heat Transfer and Friction Characteristics of Fin-and-Tube Heat Exchanger-Experimental Study[J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(3): 25-30.)

[3] 姚晔, 连之伟, 周湘江. 风机盘管换热器动态换热模型及计算机仿真[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(2): 316-320. (Yao Ye, Lian Zhiwei, Zhou Xiangjiang. Dynamic Model and Simulation of Fan-Coil Heat Exchanger[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2004, 38(2): 316-320.)

[4] 杨强生. 对流传热与传质[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985, 216-253.

[5] Khan A Y. Heat and mass transfer performance analysis of cooling coils at part-load operating conditions[J]. ASHRAE Transactions, 1994, 100(1): 54-61.

[6] 姚平经, 郑轩荣. 换热器系统的模拟、优化与综合[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.

[7] Ye Yao, Zhiwei Lian, Zhijian Hou. Thermal analysis of cooling coils based on a dynamic model[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(7): 1037-1050.

[8] ARJ. ARJ Standard 410-87, Forced-circulation air-cooling and air-heating coils[S]. Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 1987.

[9] 章熙民. 传热学[M]. 第5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

(下转第17页)

for Fan Flow with Relation to Pressure[J]. Compressor Blower & Fan Technology, 2007, 01:25-27.)

作者简介

黄东, 男(1975-), 副教授/博士生导师, 西安市咸宁西路28号, 西安交通大学制冷与低温工程实验室, 710049, (029)82668388, E-mail: d_huang@mail.xjtu.edu.cn。研究方向: 空源热泵及普通制冷系统的优化研究, 地板辐射换热采暖系统的应用研究。现在进行的研究项目有: 国家自然科学基金项目(51006079): 多流路蒸发器中非平衡绝热混合行为和过热度控制失稳机理。

About the author

Huang Dong (1975-), male, Associate Professor / doctoral tutor, Department of Refrigeration and Cryogenics engineering, Xi'an Jiaotong University, 28#, Xianning west Street, Xi'an, China, 710049, (029)82668388, E-mail: d_huang@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: optimization of air source heat pump and refrigeration system, application of low temperature radiant heating system. The author takes on project supported by the Natural Science Foundation of China (No.51006079): Studies on behavior of non-equilibrium adiabatic mixing instability of superheat control on a multi-circuit evaporator.

(上接第6页)

作者简介

姚晔, 男(1976-), 博士, 副教授, 上海市东川路800号, 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 200240, 13641943577, E-mail: yeyao10000@sjtu.edu.cn。研究方向: 1) 空调系统动态仿真及优化节能控制; 2) 除湿剂再生新技术(超声波再生)及除湿设备开发。现在进行的研究项目主要有: 国家自然科学基金项目——基于状态空间的集中空调系统动态仿真模型研究, 国家自然科学基金项目——基于超声技术的空调用固体除湿剂再生机理研究, 日本大金工业株式会社项目——Research on the desiccant material's regeneration enhancement by ultrasonic radiation等。

About the author

Yao Ye (1976-), male, Ph. D./Associate professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University,

800#, Dongchuan Road, Shanghai, 200240, China, 13641943577, E-mail: yeyao10000@sjtu.edu.cn. Research fields: dynamic simulation & optimization control of HVAC system; application of power ultrasonic in the regeneration of desiccants and development of the desiccant air-conditioning system. The author are mainly taking on the following projects: the Natural Science Fund of China—Dynamic Modeling and Simulation of Central Air-conditioning System by Using the State-space Method, the Natural Science Fund of China—Mechanism Study of Desiccant Regeneration by Using Power Ultrasonic Technology, and the research project supported by the Daikin Industries, Ltd—Research on the Desiccant Material's Regeneration Enhancement by Ultrasonic Radiation.