

# 基于 Simulink 的冰箱湿度控制系统的建模仿真

刘明<sup>1</sup> 王冬青<sup>2</sup> 薛宁<sup>1</sup>

(1. 澳柯玛股份有限公司, 266510; 2. 青岛大学自动化工程学院, 266071)

**摘要:** 本文结合机理分析和实验测试方法对冰箱保鲜抽屉湿度过程进行建模和控制, 利用 Matlab 中 Simulink 模块库进行湿度控制系统仿真分析。仿真效果表明, 进风以周期方波方式输入时, 系统达到很好的控制效果。

**关键词:** 建模仿真 湿度控制 Simulink

## Modeling and Simulation of Humidity Control System of Refrigerator Based on Simulink

Liu Ming<sup>1</sup>, Wang Dongqing<sup>2</sup>, Xue Ning<sup>3</sup>

(1. AUCMA Co. Ltd., 266510;

2. College of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071)

**Abstract:** This paper establishes the modeling of humidity control system of refrigerator combining with mechanism analysis and experimental test, simulates and analyses the control performance using Simulink in Matlab. Simulation results show that a better control performance can be realized by periodic input.

**Keyword:** Modeling and simulation, Humidity control, Simulink

### 1 引言

在冰箱的保鲜技术中, 温度和湿度是决定性因素, 能否保持一个稳定的温度和湿度环境已成为衡量冰箱性能的重要指标。目前, 风冷技术已经解决了冰箱温度稳定均匀的问题, 但却造成了湿度的降低。针对风冷冰箱湿度低的特点, 在产品上增加加湿装置是有效的解决方案。然而, 仅实现加湿功能是不够的, 稳定地控制湿度达到预定值才是最终目标。由于湿度控制系统响应速度慢, 单纯的反馈环节使系统动作延迟, 容易产生较大超调。本文结合机理分析和实验测试方法, 对冰箱湿度控制系统建模, 利用 Matlab 中 Simulink 模块库, 对湿度控制系统进行仿真分析, 通过对加

湿系统不同控制方法的仿真和比较, 选出能实现高性能控制效果的控制方式。

### 2 系统描述

图 1 为一款风冷冰箱的保鲜加湿抽屉剖面图, 主要由抽屉、进风口、出风口、风机、雾化器和湿度传感器等组成。风机将雾化器产生的水雾通过进风口吹入保鲜抽屉内, 抽屉整体处于冷藏室 5℃, 相对湿度 40% 的环境中, 目标定为使抽屉内部达到相对湿度 90%。

湿度传感器 hc 位于抽屉顶部一侧, 用于测量此处的湿度, 并根据湿度值控制加湿系统工作。湿度传感器 hn 放置于抽屉中央, 用于衡量抽屉中央湿度, 即目标湿度。

第一作者简介: 刘明(1987.10~), 男, 毕业于山东科技大学机械设计自造及其自动化专业, 青岛大学控制工程专业在取硕士研究生, 现任澳柯玛股份有限公司工程师, 主要从事冰箱结构设计。

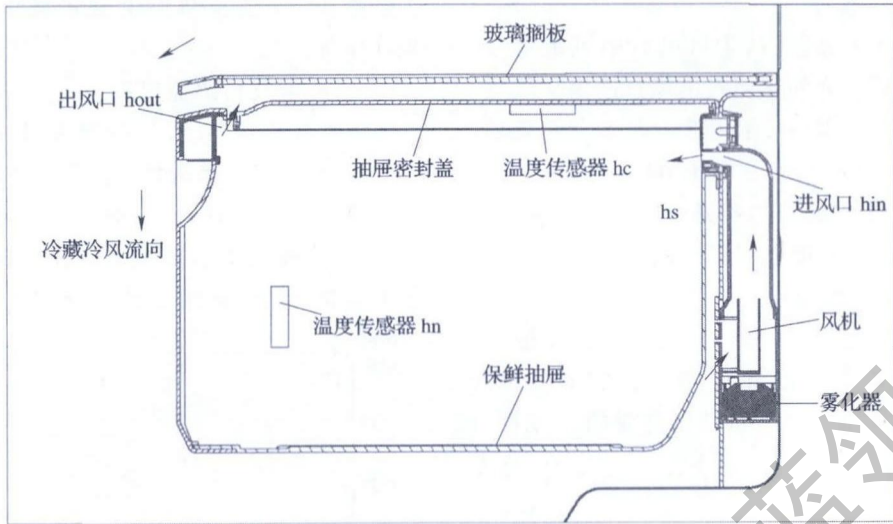


图1 保鲜加湿抽屉剖面图

### 3 系统模型建立

#### 3.1 冰箱系统初始环境条件

初始环境条件为冷藏室中抽屉内外都是温度 5℃ 和相对湿度 40%。饱和湿空气含湿量  $h_s = 5.4\text{g/kg}$ ，40% 相对湿度空气的含湿量为  $h_0 = 0.4 \times 5.4\text{g/kg} = 2.16\text{g/kg}$ 。抽屉内部被认为是等压、恒温状态，仅考虑空气湿度，即含湿量的变化。目标是达到相对湿度 90%，90% 相对湿度空气含湿量  $h_T = 0.9 \times 5.4\text{g/kg} = 4.86\text{g/kg}$ ，密度取  $\rho = 1.264\text{kg/m}^3$ 。

#### 3.2 含湿量变化模型

建立保鲜抽屉内含湿量平衡方程如下：

$$\rho_{a1} V h_s(t) = \int_0^t \rho_{a2} G_a h_{in} dt - \int_0^t \rho_{a3} G_a h_{out} dt - \int_0^t H_q dt + \rho_{a1} V h_0 \quad (1)$$

方程表示： $t$  时刻抽屉瞬时含湿量 = 进风含湿总量 - 出风含湿总量 - 损失含湿总量 + 初始含湿量

其中：

- $\rho_{a1}$ ——抽屉内空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ )；
- $\rho_{a2}$ ——进风水雾空气混合密度 ( $\text{kg/m}^3$ )；
- $\rho_{a3}$ ——出风空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ )；
- $V$ ——抽屉容积 ( $\text{m}^3$ )；

$G_a$ ——进风量或出风量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )。由于抽屉内部等压，认为出风口出风量等于进风口风量  $G_a$ ；

$h_s(t)$ —— $t$  时刻抽屉瞬时含湿量 ( $\text{g/kg}$ )；

$h_{in}$ ——进风含湿量 ( $\text{g/kg}$ )；

$h_{out}$ ——出风含湿量 ( $\text{g/kg}$ )；

$h_0$ ——初始含湿量 ( $\text{g/kg}$ )；

$H_q$ ——含湿量损失速率 ( $\text{g/s}$ )。

#### 3.3 进风量和进风含湿量

加湿系统工作时由雾化器产生水雾，通过风机将水雾由进风口吹入抽屉。已知进风口截面面积是  $S = 3.25 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ，风速  $v = 1\text{m/s}$ ，则进风量  $G_a = Sv = 3.25 \times 10^{-4} \times 1\text{m}^3/\text{s} = 3.25 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ ，加湿系统不工作时  $G_a = 0$ 。

加湿系统工作与否通过湿度传感器所测湿度值（即含湿量  $h_c$ ）与设定湿度值  $h_T$  的差值来控制：

$$G_a = \begin{cases} 3.25 \times 10^{-4} & (h_c(t) < h_T) \\ 0 & (h_c(t) \geq h_T) \end{cases} \quad (2)$$

其中：

雾化器产生雾速率恒定，通过实验测得为  $H_w = 2.2\text{g/min}$ ，那么，单位时间进风含湿量 = 40% 湿空气含湿量 + 雾化器雾量

因此，公式(1)右边第2项中的积分量为

$$\rho_{a2} G_a h_{in} = \rho_a G_a h_0 + H_w/60 = 1.264 \times 3.25 \times 10^{-4} \times 2.16 + 2.2/60 (\text{g/s}) = 0.03756\text{g/s}$$

### 3.4 出风口模型

由于抽屉内部等压,认为出风口出风量等于进风口进风量  $G_a$ 。为便于建模出风口排出空气含湿量,认为已经混合均匀,用内部中央一点传感器 hn 测得数值  $h_n$  表示均匀含湿量,即  $h_{out} = h_n$ 。出风空气密度  $\rho_{a3}$  近似认为与抽屉内空气密度  $\rho_{a1}$  相等。抽屉内均匀含湿量  $h_n$  与瞬时含湿量  $h_i$  之间的关系通过实验方法建模。

通过湿度传感器 hn 测得在加湿系统连续工作时,抽屉内部均匀含湿量  $h_n$  的离散实验数据。利用 Matlab 的曲线拟合工具获得连续曲线方程,如图 2 所示。

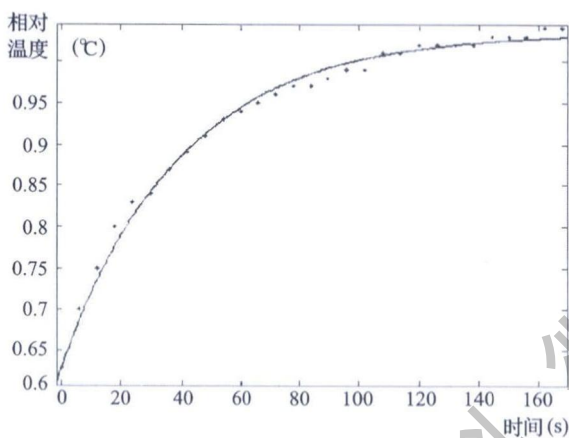


图 2 hn 实验数据及曲线拟合

以一阶系统单位阶跃响应过程曲线方程进行拟合,得到输出响应曲线:

$$h_n(t) = 0.39 \times (1 - e^{-\frac{t+40.36}{43.38}}) + 0.599 = 0.9892 \times (1 - e^{-\frac{t+40.36}{43.38}})$$

将曲线延伸至原点,得到标准形式:

$$h_n(t) = 0.9892 \times (1 - e^{-\frac{t}{43.38}})$$

取拉普拉斯变化得到输出为

$$h_n(s) = \frac{0.9892}{s(43.38s + 1)}$$

单位阶跃输入函数拉普拉斯变换  $h_i(s) = \frac{1}{s}$

$h_n(s)$  与  $h_i(s)$  的传递函数为

$$h_n(s) = G_s \cdot h_i(s) = \frac{0.9892}{43.38s + 1} h_i(s) \quad (3)$$

### 3.5 含湿量损失速率

湿空气遇到壁面会凝结,认为含湿量以恒定

速率减少,经试验测得含湿量减少速率  $H_q = 0.00012 \text{g/s}$ 。

### 3.6 湿度传感器模型

湿度传感器 hc 所处位置含湿量  $h_c$  与抽屉瞬时含湿量  $h_i$  的传递函数通过实验方法建模。

通过湿度传感器 hc 测得在加湿系统连续工作时  $h_c$  的离散实验数据。利用 Matlab 的曲线拟合工具获得连续曲线方程,如图 3 所示。

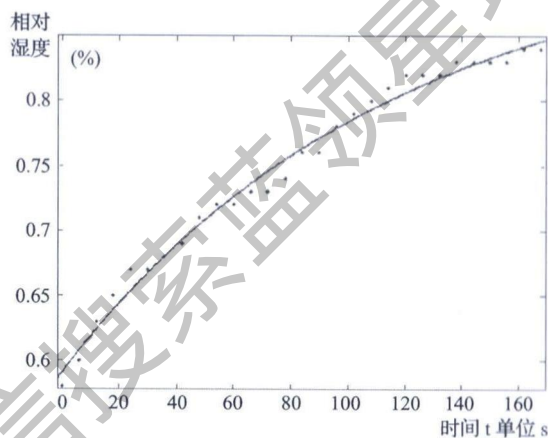


图 3 hc 实验数据及曲线拟合

以一阶系统单位阶跃响应曲线方程进行拟合,得到输出响应曲线:

$$h_c(t) = 0.33 \times (1 - e^{-\frac{t}{114.1}}) + 0.591 = 0.922 \times (1 - e^{-\frac{t+116.8}{114.1}})$$

将曲线延伸至原点,得到标准形式:

$$h_c(t) = 0.922 \times (1 - e^{-\frac{t}{114.1}})$$

取拉普拉斯变化得到输出为:

$$h_c(s) = \frac{0.922}{s(114.1s + 1)}$$

单位阶跃输入函数拉普拉斯变换  $h_i(s) = \frac{1}{s}$

$h_c(s)$  与  $h_i(s)$  的传递函数为:

$$h_c(s) = G_s \cdot h_i(s) = \frac{0.922}{114.1s + 1} h_i(s) \quad (4)$$

## 4 simulink 湿度控制系统建模仿真

### 4.1 Simulink 湿度控制系统建模

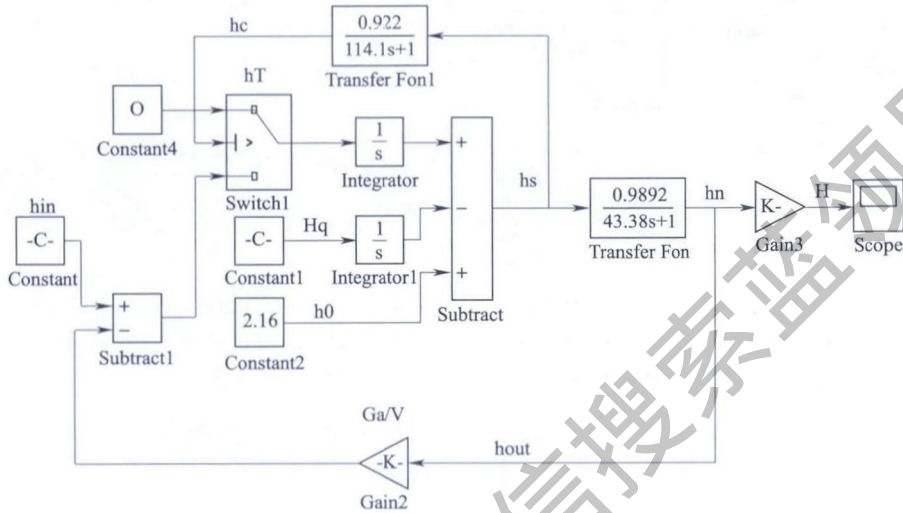
整理公式(1)如下:

$$h_i(t) = \int_0^t \frac{\rho_{a2} G_a h_{in}}{\rho V} dt - \int_0^t \frac{G_a}{V} h_n(t) dt$$

$$-\int_0^t \frac{H_q}{\rho V} dt + h_0 \quad (5)$$

其中： $\rho_{a2} G_a h_{in} = 0.03756g/s$ ,  $\rho = 1.264kg/m^3$ ,  $h_0 = 2.16g/kg$ ,  $V = 0.0314m^3$ ,  $H_q = 0.00012g/s$ 。

根据公式(2)、(3)、(4)、(5)在 Simulink 中建立湿度控制系统模型如图 4 所示



Constant: 常数输入模块; Switch: 三路选择器模块; Transfer Fon: 线性连续系统传递函数模块; Integrator: 输入信号的连续时间积分模块; Subtract: 减法运算模块; Gain: 信号增益模块; Scope: 信号显示器模块

图 4 加湿控制系统模型 1

Switch1 表示加湿系统工作状态,  $h_c > h_r$  时输出 0,  $h_c \leq h_r$  时输出 subtract1。由于  $h_c$  的放大系数  $k = 0.922$ , 因此将  $h_r$  修正为  $0.922 \times 4.86 = 4.48$ 。

Subtract1 表示公式(1)中  $\int_0^t \frac{\rho_{a2} G_a h_i}{\rho V} dt - \int_0^t \frac{G_a}{V} h_o dt$  两项中被积分项, 即进风、出风含湿量。

Transport Fcn1 表示瞬时含湿量  $h_i$  变化到均匀含湿量  $h_n$  的响应过程。

Transport Fcn2 表示瞬时含湿量  $h_i$  变化到湿度传感器处含湿量  $h_n$  的响应过程。

#### 4.2 Simulink 湿度控制系统仿真

湿度控制系统运行仿真结果如图 5 所示。

从图 5 仿真结果可以看出前期较短时间内产生很大超调量, 最终达到抽屉内相对湿度 90% 的设定值。由公式(4)可知, 湿度传感器  $h_c$  的时间常数  $T = 114.1$ , 响应速度非常缓慢, 导致进风含湿量远超出所需含湿量。因此加湿器在湿度传感器  $h_c$  响

应慢的情况下, 连续工作必然造成较大超调量, 为避免这种情况, 下面将加湿器改为周期工作的方式。

#### 4.3 仿真调试

在 Subtract1 后加入与 Pulse Generator1 相乘的 Product 环节, 用于表示进风出风以周期方波方式工作, 如图 6 所示。

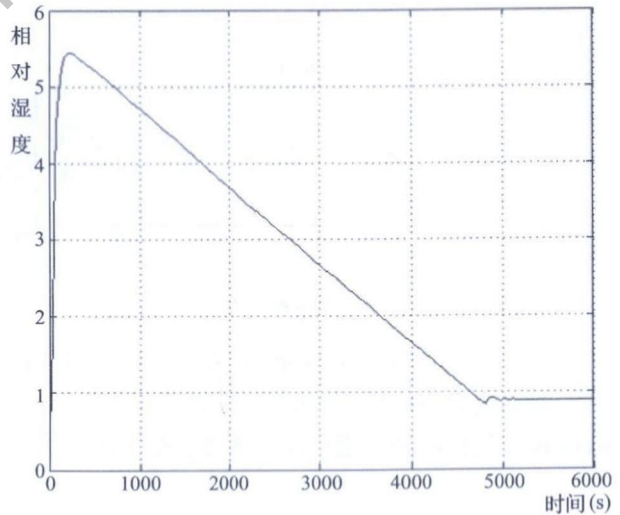
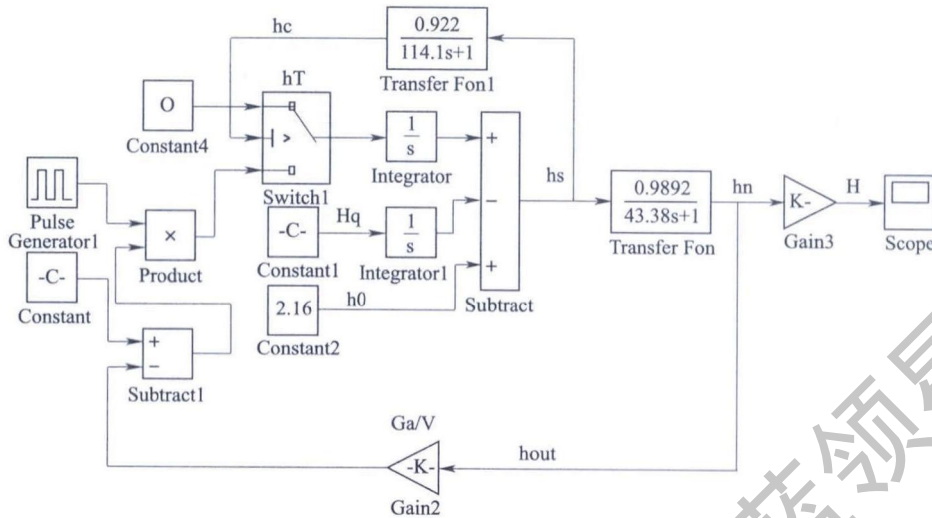


图 5 湿度控制系统运行仿真 1

周期方波 Puls Generator1 设置周期 60s, 脉冲时间 2s, 并进行仿真, 仿真结果如图 7 所示, 可以看出, 超调量已经大大减少, 并能够保持在 0.9 附近波动。



Product:乘法运算模块;Pulse Generator:输入脉冲信号模块;Constant:常数输入模块;Subtract:减法运算模块;Subtract:三路选择器模块; Transfer Fon:线性连续系统的传递函数模块;Integrator:输入信号的连续时间模块;Gain:信号增益模块;Scope:信号显示器模块

图6 加湿控制系统模型2(进风采用周期方波方式)

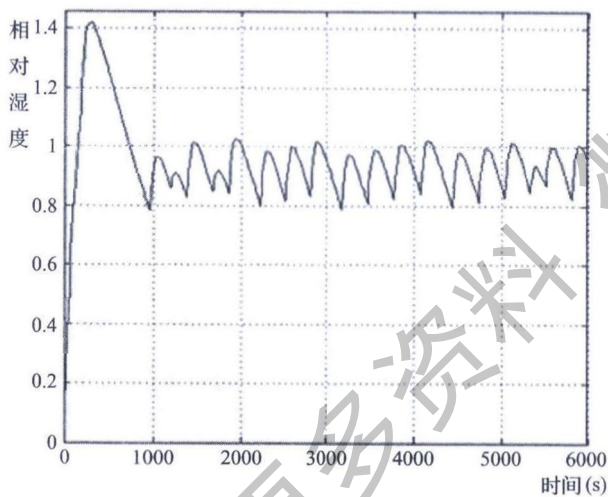


图7 湿度控制系统运行仿真2

由于系统具有延时性能,加湿器改为周期通断工作方式后,对比图7和图5得到了如图7所示的很好的湿度控制性能。当系统参数变化时,

利用该模型,调节模型中相应的数值即可进行仿真。

## 5 结束语

本文通过机理分析和实验测试的方法对冰箱加湿过程进行建模,并建立冰箱湿度控制系统的Simulink模型,仿真调试表明,进风以周期方波方式输入时,达到很好的系统湿度控制性能。

## 参考文献:

- [1]胡寿松.自动控制原理.北京:科学出版社,2007
- [2]宋志安,徐瑞银.机械工程控制基础 - MATLAB 工程应用.北京:国防工业出版社,2008
- [3]李亚芬.过程控制系统与仪表.大连理工大学出版社,2010
- [4]周文杰.洁净空调温湿度控制系统的机理建模研究.化学工程与设备,2010(2):53~58