

# 定(变)负荷对冰箱制冷系统性能影响的模拟分析

宣萍  
(安徽省产品质量监督检验研究院 安徽合肥 230051)

摘要:通文采用MATLAB软件对传统的ON-OFF控制冰箱进行了建模,对它们在恒温闭门定负荷条件下和实际工作环境的变负荷下控制系统的效果进行了模拟和比较分析。模拟的结果显示,这两种条件下的耗电量与冰箱温度控制效果均存在不同程度的差异。  
关键词:开关门测试;耗电量;恒温闭门测试;测试系统

## Simulate the performance impact of fixed (variable) load conditions of the refrigeration system

XUAN Ping  
(Anhui Institute of Product Quality Supervision and Inspection Hefei 230051)

Abstract:In this paper, make the simulate to the ON-OFF control refrigerator modeled base on the MATLAB software, in order to analyze the difference among the constant temperature conditions and the effect of the actual work environment control system. Analog has concluded that there are different degrees of difference between the constant temperature conditions and the variable load conditions under the ON-OFF control system and the power consumption and refrigerator temperature control effect are different also.

Keywords: Opening and closing test; Energy consumption; Constant temperature closed test; Testing system

### 1 引言

智能冰箱能够根据运行情况进行自适应除霜和压缩机启停控制;变频冰箱能够自动调节转速适应不同的工作环境,同时在夜间保持低转速运行,降低噪声;具有学习能力的智能冰箱能够根据用户的使用习惯和工作环境变化制定最优的控制策略。这些先进的控制系统和控制方法无疑会提高冰箱的温度控制效果,同时具有节能的潜力,而恒温闭门的测试方法能否准确的反映这些控制系统和控制方法的优点<sup>[1][2]</sup>。本文针对恒温闭门定负荷和变负荷两种工况通过MATLAB软件进行模拟,并对模拟结果进行分析。

### 2 制冷系统模型

#### 2.1 制冷系统

基于常规设计条件下,假设循环过冷点温度与过热点温度相同,本文对不同蒸发温度、环境温度和频率下压缩机的制冷量、输入功率和COP进行了模拟(如图1~图6)。从模拟结果可以看出:压缩机制冷量和COP值随着环境温度的升高而减小,随着蒸发温度的升高而增大。同时,压缩机的制冷量和输入功率随着压缩机频率的增大而增大,而COP值在基频附近存在一个最大值。

本文采用非线性拟合的方法得到了基频下

冰箱压缩机的制冷量、输入功率与蒸发温度和环境温度的关联式(1);对非基频下的冰箱压缩机的制冷量、输入功率采用式(2)和式(3)进行修正。同时,假设不同型号压缩机的制冷量、输入功率与基准型号压缩机制冷量和输入功率的比值相同。

$$Z = \frac{Z_0 + A_0 T_e + B_0 T_o + B_0 T_o^2 + B_0 T_o^3}{1 + A_1 T_e + A_2 T_e^2 + A_3 T_e^3 + B_1 T_o + B_2 T_o^2} \quad (1)$$

式中:

$T_e$ ——制冷系统蒸发温度(°C);

$T_o$ ——冰箱工作环境温度(°C);

各系数见表1。

$$Q_0 = Q_0^*(c_1(f - f^*)^2 + c_2(f - f^*) + c_3) \quad (2)$$

式中

$Q_0$ ——实际制冷量(W)；

$Q_0^*$ ——基频下冰箱制冷量(W)；

$f$ ——实际工作频率(Hz)；

$f^*$ ——基准频率(60Hz)(Hz)；

$c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ ——方程系数,见表2。

$$P = P^*(d_1(f - f^*)^2 + d_2(f - f^*) + d_3) \quad (3)$$

式中

$P$ ——实际输入功率(W)；

$P^*$ ——基频下输入功率(W)；

$f$ ——实际工作频率(Hz)；

$f^*$ ——基准频率(60Hz)(Hz)；

$d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ——方程系数,见表2。

在正常使用中,冰箱会进行启停操作。

而在启停过程中,冰箱制冷系统工质会发生迁移,造成额外的不可逆损失。因此,假设冰箱压缩机启停一次的额外能量损失为20000J(0.0056kW·h)。

## 2.2 负荷模型

冰箱箱体模型选用了常见的冷藏冷冻箱,冷藏室与冷冻室外围尺寸均为0.8m×0.8m×0.8m,保温层厚度均为0.1m,保温层导热系数为0.02W/(m·K)。箱体结构示意图见图7。由式(4)可以计算出冷藏室和冷冻室的总热阻<sup>[3]</sup>。

$$R = \frac{\lambda}{2 \times k \times \sum_{i=1}^5 A_i} \quad (4)$$

式中

$R$ ——热阻(W)；

——保温层壁厚(m)；

$k$ ——导热系数(W/(m·k))；

$A_i$ ——箱体各外表面面积(忽略冷藏室与冷冻室之间的传热)(m<sup>2</sup>)；

2——考虑门缝漏风负荷后的综合修正系数。

冰箱日常使用中存取食物开关门时引入的负荷可以认为近似服从正态分布。当冰箱门打开时,进入箱体的负荷逐渐增大;当冰箱门全开时,进入箱体的负荷达到最大值;当冰箱门关闭时,进入箱体的负荷逐渐减少。本文中开关门负荷使用式(5)进行计算,开关门负荷曲线如图8

表1 拟合方程参数值

参数	值1	值2	参数	值1	值2
Z0	580.12	77.6	A <sub>1</sub>	-0.02517	-0.00978
A0 <sub>1</sub>	0.973	-1.073	A <sub>2</sub>	2.6559×10 <sup>-4</sup>	8.777×10 <sup>-5</sup>
B0 <sub>1</sub>	-4.495	3.143	A <sub>3</sub>	-4.875×10 <sup>-6</sup>	-7.779×10 <sup>-7</sup>
B0 <sub>2</sub>	0.01017	0.02246	B <sub>1</sub>	4.566×10 <sup>-4</sup>	0.01227
B0 <sub>3</sub>	-1.650×10 <sup>-5</sup>	-4.454×10 <sup>-4</sup>	B <sub>2</sub>	-1.781×10 <sup>-6</sup>	-2.207×10 <sup>-4</sup>

注:值1为制冷量拟合方程参数值;值2为耗电量拟合方程参数值。

表2 参数值表

参数名	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>
值	-1.48×10 <sup>-5</sup>	0.0188	1.014	0.00016	0.0167	0.951

表3 温度和开关门操作时刻表

时刻	温度( )	开关门	时刻	温度( )	开关门	时刻	温度( )	开关门
18	20		2	13		10	21	
19	19		3	13		11	22	
20	18		4	13		12	24	
21	17		5	13		13	26	
22	17		6	13		14	25	
23	15		7	14		15	27	
0	15		8	16		16	27	
1	14		9	19		17	27	

所示。

$$Q_h = A \times e^{-\frac{(t-60)^2}{400}} \quad (5)$$

式中

$Q_h$ ——热负荷(W)；

$A$ ——系数,冷藏室取15,冷冻室取40；

$t$ ——自开门起经过的时间(0 t 120)(s)。

冰箱存入的食物带入的热量随着时间的变化先增大后减小且呈现非对称分布。在本文中,假设负荷的释放时间为20h(72000s),使用式(6)对其进行计算。同时假设每天冷冻室在19点存入一次食物,而冷藏室在7点存入一次食物。食品负荷曲线如图9所示。冷藏室放入食品一次增加的负荷为75518J,冷冻室为377591J。

$$Q_h = A \times \frac{\log(t^2 + 1)}{e^{11000}} \quad (6)$$

式中

$Q_h$ ——热负荷(W)；

$A$ ——系数,冷藏室取0.394,冷冻室取1.97；

$t$ ——自开门起经过的时间(0 t 72000)(s)。

冰箱运行环境温度选取合肥地区春季某一天晚上18点至次日17点的气温。假定冰箱在一天使用中冷藏室和冷冻室分别打开8次和3次,并分

表4 图11中主要信号的中英文对照表

英文	中文
clock	时钟信号
toutside	室外温度
S_open_door1	冷藏室开门负荷
S_food1	冷藏室食物热量
Gain	比例器
integrator	积分器
Constant t2	冷藏室设定温度
Relay	温控开关
switch	通断开关
Add	加法器
Scope	示波器
frequency	压缩机频率
teva	制冷系统蒸发温度
S_open_door2	冷冻室开门负荷
S_food2	冷冻室食物负荷

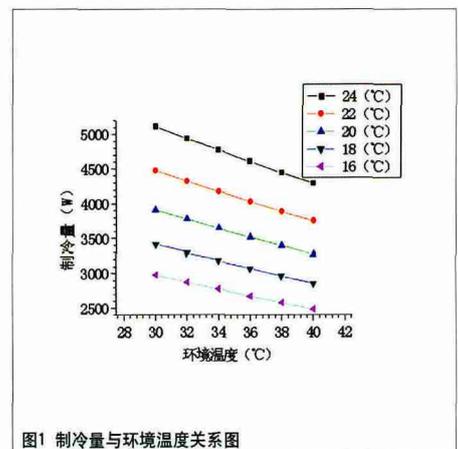


图11 制冷量与环境温度关系图

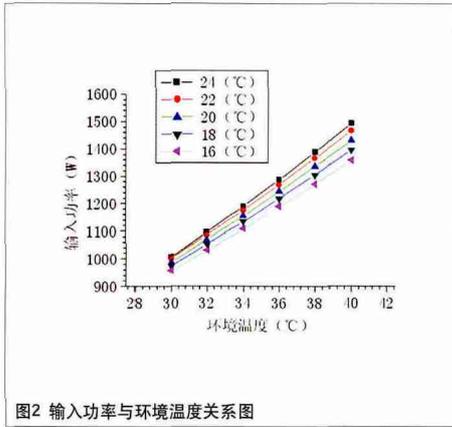


图2 输入功率与环境温度关系图

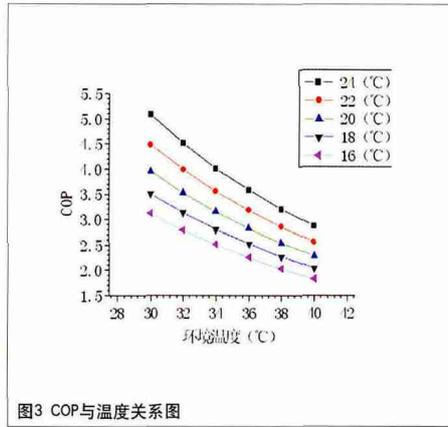


图3 COP与温度关系图

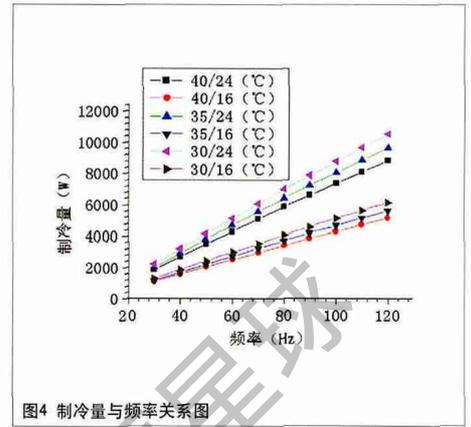


图4 制冷量与频率关系图

别向冷藏室和冷冻室存放一次常温食物<sup>[6]</sup>。温度变化、开关门和存放食物时刻列于表3中。为便于模拟，对工作环境温度按时间进行了4次多项式拟合，拟合曲线如图10所示。

### 2.3 箱体模型

采用集总热容法对冰箱箱体和箱内食物进行建模，则冷藏室与冷冻室均满足式(7)。假设冷藏室和冷冻室的比热容与质量乘积分别与10kg和20kg水相当，则冷藏室与冷冻室的比热容和质量乘积分别为42kJ/和84kJ/。箱体的热负荷来源主要有箱体导热负荷、冰箱开关门负荷和存放食物带入的负荷，忽略了冰箱内光源和风扇(如果有)带来的负荷，同时假设冰箱不进行除霜操作且忽略蒸发器结霜对制冷系统的影响。

$$\frac{d(\sum Q_h - Q_0)}{dt} = cmdT_m \quad (7)$$

式中

$Q_h$ ——热负荷(W)；

$Q_0$ ——制冷量(W)；

$c$ ——比热容(kJ/(kg·))；

$m$ ——冰箱间室内食物质量(kg)；

$T_m$ ——冰箱间室平均温度( )。

### 3 ON-OFF控制模型

ON-OFF控制是冰箱控制系统中应用最广泛的一种控制方式。它通常分为单温控和双温控两种方式。单温控系统在冷藏室里设温度传感器，通过判断冷藏室温度是否超过设定温度值来启停冰箱制冷系统，使冷藏室和冷冻室的温度维持在规定范围以内<sup>[5]</sup>。但当冷冻室放入大量食物而冷藏室负荷较小时，冰箱制冷系统不能及时启动会导致冷冻室温度过高。图11为

采用双温控的ON-OFF仿真控制系统图，其中模块<sub>outside</sub>产生室外温度模拟信号；s Open door与s Food模块产生开关门和放入食物的负荷信号；system模块为制冷系统模块，根据输入的蒸发温度，室外温度和频率值产生制冷量和输入功率信号；Relay为温度控制器，当冷藏室温度高于设定值(+5 )时，控制器输出制冷系统启动信号，直至冷藏室温度低于设定最低温度值(+3 )，控制器输出制冷系统停止信号。输出端口输出值为冰箱的耗电量值，由两部分组成，一部分为制冷系统耗电量，另一部分为压缩机启停时的额外损耗的耗电量。当去掉s Open door与s Food模块，并使用固定温度值代替<sub>toutside</sub>模块时，仿真模型即可进行恒定环境温度下的闭门模拟<sup>[6]</sup>。表4为图11中主要信号的中英文对照表。

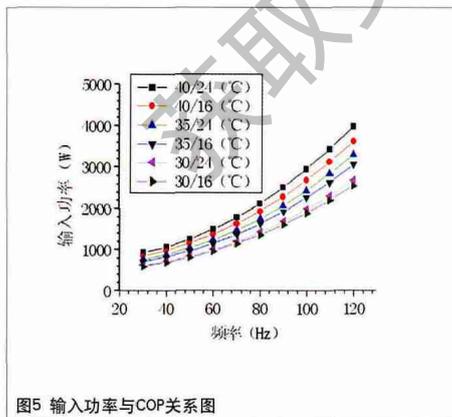


图5 输入功率与COP关系图

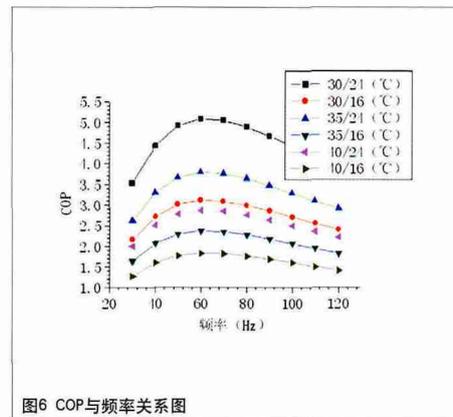


图6 COP与频率关系图

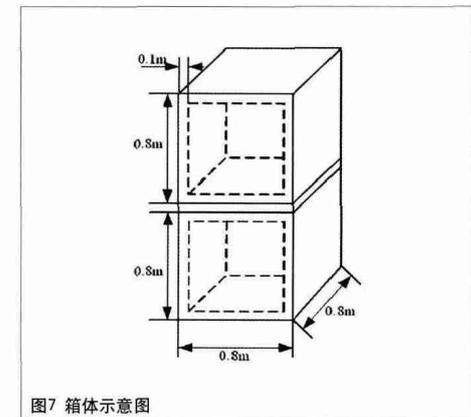
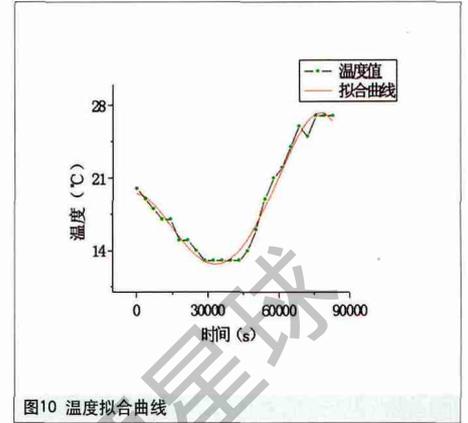
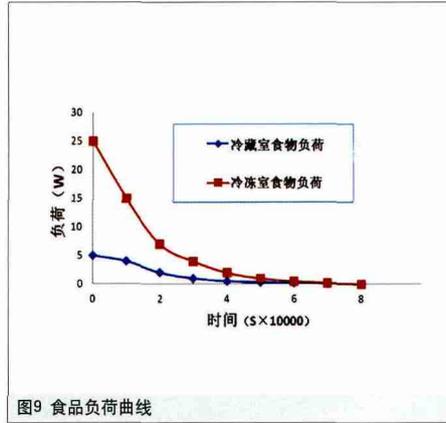
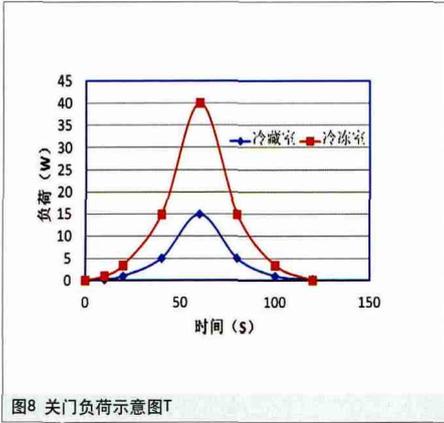


图7 箱体示意图



#### 4 模拟结论

如图12所示为定负荷闭门、环境温度为25℃时,传统的ON/OFF控制的仿真结果图,从图中可以看出控制信号呈现周期脉冲方波规律变化,冷藏室温度和冷冻室温度曲线均呈现锯齿状规律变化,且分别低于设定值5℃和-18℃<sup>[1]</sup><sup>[2]</sup>,控制效果较好。图13所示为波动负荷下ON/OFF控制的仿真结果图,从图中可以看出前半段时间中压缩机运行时间较短,压缩机启动较稀疏,后半段时间中压缩机运行时间较长且启动较为频繁,冷藏室温度控制效果较好,而冷冻室温度控制效果较差,部分超过了-15℃。这是因为ON/OFF根据冷藏室的温度变化产生控制信号,在前半段时间对应于傍晚至晚上的一段,室外温度较低,冷冻室负荷较小,故压缩机运行时间较短而且间隔时间较长;而模拟假

设在傍晚19点时冷冻室放入了2kg环境温度下的食物,放入的热食带入了大量负荷,而压缩机此时运行时间较短,导致冷冻室内温度严重超过了设定温度值。

#### 5 结论

本文中采用MATLAB软件对ON-OFF控制冰箱进行了建模,对它们在恒温闭门定负荷条件下和变负荷条件下的控制效果进行了模拟和比较分析;模拟计算结果发现,ON/OFF控制系统在变负荷条件下的耗电量较恒温闭门定负荷条件下减小了35.5%,但是冷冻室温度严重超出了设定温度值。因此,改进控制系统在变负荷条件下控制优化效果比较明显,而最优控制策略在恒温闭门条件下的控制优化效果比较明显。✈

#### 参考文献

- [1] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准 GB/T 8059.2-1995 家用制冷器具冷藏冷冻箱[S]. 北京: 1995.
- [2] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准 GB/T 8059.4-93 家用制冷器具 无霜冷藏箱、无霜冷藏冷冻箱、无霜冷冻食品储藏箱和无霜食品冷冻箱[S]. 1993.
- [3] 王宝琛. ERA软件在电冰箱产品开发设计中的应用[J]. 长岭技术, 2001(2):37-38.
- [4] SHAO S, SHI W, LI X, et al. Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data[J]. International Journal of Refrigeration, 2004,27(8):805-815.
- [5] 卢智利, 丁国良. 蒸发器并联双循环冰箱的温度与分时运行控制策略. 理论分析[J]. 上海交通大学学报, 2006,40(2):267-271.
- [6] 卢智利, 丁国良. 蒸发器并联双循环冰箱的温度与分时运行控制策略. 实验验证[J]. 上海交通大学学报, 2006,40(2):272-276.

