

doi: 10.3969/j.issn.2095-4468.2016.06.109

多温区冰箱用并联双蒸发器动态性能计算方法

杨丛彦*, 赵丹, 胡海涛**, 丁国良

(上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

[摘要] 多温区冰箱中采用并联双蒸发器可以有效地提高各间室的温度控制精度和冰箱的能效。冰箱并联双蒸发器运行模式复杂, 现有的蒸发器模型不能直接用于并联双蒸发器的动态仿真, 需要开发并联双蒸发器动态性能的计算方法。本文总结了并联双蒸发器所有的运行模式以及模式转换方式; 分析不同运行模式下蒸发器中制冷剂的分布状态, 建立不同分布状态下质量、能量及其他状态参数的计算公式以及各模式光滑转换准则; 基于以上分析开发了用于并联双蒸发器所有运行模式下动态性能的计算方法。最后将本文提出的方法嵌入到成熟的仿真软件中, 仿真计算结果与实验数据相对偏差均在 10% 以内。

[关键词] 并联双蒸发器; 冰箱; 动态性能; 快速; 稳定

Calculation Method for Transient Performance of Parallel Dual Evaporators for Multi-temperature Refrigerator

YANG Cong-yan*, ZHAO Dan, HU Hai-tao**, DING Guo-liang

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

[Abstract] The adoption of a parallel dual evaporators for multi-temperature refrigerator can improve the accuracy of temperature control and the system energy efficiency. Because of the complicated operation pattern of the parallel dual evaporator, the existing evaporator model cannot apply to the parallel dual evaporator transient simulation directly. The purpose of this study is to develop a fast and stable algorithm for calculating the transient performance of parallel dual evaporators. All phase distributions of the refrigerant in both evaporators are analyzed by summarizing all the operation patterns and the forms of operation pattern switchover of the parallel dual evaporators, and the equations for calculating mass, internal energy and other state parameters of all refrigerant states and the criterion of smooth pattern switchover are established. Based on the above analysis, a calculating method for the transient performance in all operation patterns of parallel dual evaporators is developed. The calculation method is inserted into the simulation software, and the relative deviation between the simulation results and the experimental data is less than 10%.

[Keywords] Parallel dual evaporator; Refrigerator; Transient performance; Fast; Stable

0 引言

多温区冰箱中采用并联双蒸发器可以有效地提高各间室的温度控制精度和冰箱能效^[1-5]。

并联双蒸发器冰箱两间室所需要的制冷量不同, 系统通过调节冷藏和冷冻毛细管的节流效应, 改变两蒸发器的换热温差以及制冷剂流量从而满足两蒸发器不同换热量, 为了使两蒸发器在不同的

换热温差以及制冷剂流量下换热性能达到最优, 需要对两蒸发器的结构进行设计。在并联双蒸发器冰箱实际运行过程中, 两蒸发器中制冷剂的状态参数时刻发生变化, 导致其动态性能时刻变化, 因此蒸发器的结构设计需要考虑动态性能。对于现有的经验设计方法, 需要反复制作样机并进行性能测试, 不仅设计效率低, 而且还会增加企业的设计成本。

*杨丛彦 (1990-), 女, 硕士生。研究方向: 冰箱系统仿真及优化设计。

**胡海涛 (通讯作者), 男, 博士, 副教授、博士生导师。研究方向: 制冷系统仿真及换热器优化设计。联系地址: 上海市东川路800号上海交通大学, 邮编: 200240。联系电话: 021-34206295。E-mail: huhaitao2001@sjtu.edu.cn。

而计算机仿真方法相较传统的设计方式,具有设计周期短、设计成本低等优点,在制冷装置动态性能的计算得到了广泛应用^[6-11]。因此,为了对并联双蒸发器冰箱进行优化设计,必须开发冰箱用并联双蒸发器动态性能计算方法。

并联双蒸发器要实现计算机动态仿真需要考虑并联双蒸发器的实际运行情况。并联蒸发器的运行模式复杂,共有4种运行模式包括:1)冷冻蒸发器开机、冷藏蒸发器停机;2)冷藏蒸发器开机、冷冻蒸发器停机;3)两蒸发器抽真空;4)两蒸发器停机。在冰箱实际运行过程中,通过控制4种运行模式相互切换,实现给两间室制冷的目的。为了避免冷藏蒸发器开机过程中冷冻蒸发器内还残存制冷剂的问题,冷冻循环结束之后通过抽真空过程实现制冷剂的再分配而不能直接切换至冷藏循环,因此共有11种模式切换方式。制冷剂分布状态在蒸发器运行模式切换前后会发生动态变化,因此,冰箱用并联双蒸发器动态性能计算方法需要能够描述两蒸发器在11种模式切换方式下制冷剂的分布状态,并能够计算在不同运行模式切换下两蒸发器的动态性能。

现有的蒸发器动态仿真计算方法^[12-14]共有3种:分布参数计算方法、集中参数计算方法和分相集中参数计算方法。分布参数方法通过将蒸发器划分为大量的微元进行计算,在稳态仿真时具有计算精度高的优点,但存在计算速度慢的问题;集中参数计算方法通过采用均相假设,具有计算速度快、计算稳定等优点,但计算精度不高;分相集中参数方法依据制冷剂的分布状态将蒸发器划分为多个相区的组合,在现有的计算方法中具有综合优势,可以快速、稳定地仿真单蒸发器和串联双蒸发器的开机制冷以及停机两种运行模式下的动态性能。上述已有研究主要是针对单蒸发器和串联双蒸发器,到目前为止,关于并联双蒸发器计算机动态性能仿真的研究非常匮乏。并联双蒸发器相较单蒸发器和串联双蒸发器运行模式更加复杂,同时在实际运行过程中,不同运行模式还需要相互切换,因此现有的用于单蒸发器和串联双蒸发器的动态计算方法不能直接用于计算并联双蒸发器复杂的动态性能。

并联双蒸发器动态仿真方法主要有以下难点。

1) 制冷剂状态的确定:在并联双蒸发器仿真

过程中,制冷剂的动态变化主要发生在运行模式切换的过程中,因此描述所有运行模式下蒸发器中制冷剂的状态存在难点。

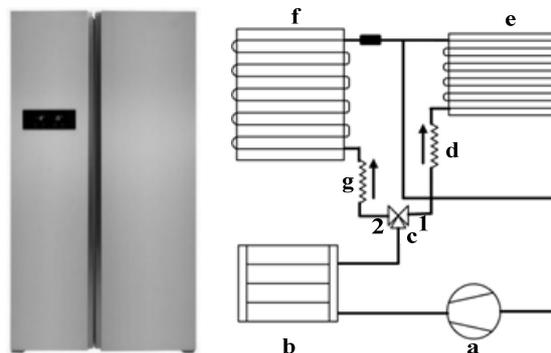
2) 保证运行模式切换中蒸发器数学模型光滑转换:动态性能仿真计算方法需要描述制冷剂不同分布状态下的数学模型,在11种模式切换方式中,数学模型间的光滑连接是保证系统仿真稳定性的关键。

3) 保证蒸发器动态仿真结果稳定的算法:在并联双蒸发器不同的运行过程中,两个蒸发器之间有质量和能量的传递,传递过程复杂,计算方法需要保证质量和能量的严格守恒,这就给双蒸发器算法的开发带来困难。

本文为解决以上难点,开发了冰箱并联双蒸发器动态性能计算方法,从而保证快速、精确地实现并联双蒸发器冰箱系统的动态性能的仿真计算。

1 开发动态性能计算方法

并联双蒸发器冰箱系统包含冷藏循环制冷回路(如图1中a-b-c-d-e-a)和冷冻循环制冷回路(如图1中a-b-c-g-f-a),系统控制策略通过三通电磁阀控制制冷剂的流向,实现了两制冷回路的交替运行。



(a) 冰箱实物图 (b) 冰箱系统连接示意图
a-压缩机, b-冷凝器, c-三通电磁阀, d-冷藏毛细管, e-冷藏蒸发器, f-冷冻蒸发器, g-冷冻毛细管

图1 并联双蒸发器冰箱的循环示意图

并联双蒸发器的运行模式包括:

1) 冷冻开机冷藏停机:压缩机开机,三通电磁阀的出口1关闭,制冷剂的流向为a-b-c-g-f-a,冰箱给冷冻室进行制冷;

2) 冷藏开机冷冻停机:压缩机开机,三通电磁阀的出口2关闭,制冷剂的流向为a-b-c-d-e-a,冰箱给冷藏室进行制冷;

3) 两蒸发器抽真空：压缩机保持开机，三通电磁阀的两出口均关闭，制冷剂通过压缩机，从两个蒸发器进入冷凝器；

4) 两蒸发器停机：压缩机关机。

动态性能计算方法就是要快速、稳定地计算这四种运行模式循环切换下蒸发器的动态性能。

1.1 计算思路

为了能够快速、精确地计算两蒸发器中制冷剂的状态参数，本文针对并联双蒸发器的运行特点提出如下计算思路。

1) 明确并联双蒸发器在所有运行模式下制冷剂的分布状态。总结并联双蒸发器所有的运行模式以及运行模式切换过程，并分析制冷剂在蒸发器所有运行模式转换前、后的分布状态。

2) 建立并联双蒸发器在所有分布状态下的计算模型。开发并联双蒸发器中制冷剂不同分布状态下具体的计算公式，实现所有分布状态下制冷剂状态参数计算。

3) 建立并联双蒸发器不同运行模式光滑转换判断准则。根据制冷剂各分布状态的计算模型计算得到的制冷剂的状态参数应满足光滑转换判断准则，从而保证并联双蒸发器仿真计算过程中各运行模式光滑转换。

4) 开发实现不同运行模式下并联双蒸发器质量和能量严格守恒的算法，稳定地计算制冷剂在并联双蒸发器不同运行模式切换过程的质量、能量及其他状态参数，保证仿真计算过程收敛。

1.2 明确制冷剂分布状态

在并联双蒸发器不同运行模式下，蒸发器中制冷剂分布状态有4种基本状态，包括SH(全过热)、SH+TP(过热和两相共存)、TP1(进出口均为两相)和TP2(进口两相/出口饱和)，如图2所示。

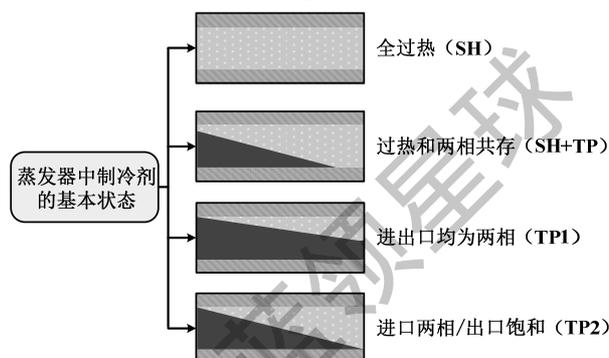


图2 蒸发器中制冷剂基本状态

在冰箱实际运行过程中，通过控制4种运行模式相互切换，即任意一种运行模式切换至其他3种运行模式，实现给两箱室制冷的目的。为了避免冷藏蒸发器开机过程中冷冻蒸发器内还残存制冷剂的问题，冷冻循环结束之后要通过抽真空过程实现制冷剂的再分配而不能直接切换至冷藏循环，因此4种运行模式相互切换的共有11种可能情况。在不同运行模式切换过程中，两蒸发器中制冷剂的分布状态会发生改变，下面将分别列出11种模式转换方式下并联双蒸发器转换前后的运行模式，以及模式转换前后两蒸发器中制冷剂的分布状态，如表1所示。

表1 制冷剂在两蒸发器中的状态变化

模式编号	模式转换		R 蒸发器制冷剂分布		F 蒸发器制冷剂分布	
	转换前模式	转换后模式	初始状态	稳定状态	初始状态	稳定状态
1	Pullout	R_off&F_off	SH	TP1(TP2)	SH	SH
2	R_off&F_on	R_off&F_off	SH	TP1	SH+TP	SH
3	R_on&F_off	Pullout	SH+TP	SH	SH	SH
4	R_off&F_on	Pullout	SH	SH	SH+TP	SH
5	R_off&F_off	Pullout	TP1(TP2)	SH	SH	SH
6	Pullout	R_off&F_on	SH	SH+TP	SH	SH
7	R_off&F_off	R_off&F_on	SH	SH	TP1(TP2)	SH+TP
8	R_on&F_off	R_off&F_on	SH+TP	SH	SH	SH+TP
9	R_on&F_off	R_off&F_off	SH+TP	TP1	SH	SH
10	Pullout	R_on&F_off	SH	SH+TP	SH	SH
11	R_off&F_off	R_on&F_off	TP1(TP2)	SH	SH	SH

注：R_off&F_on 为冷藏蒸发器关机冷冻蒸发器开机；R_on&F_off 为冷藏蒸发器开机冷冻蒸发器关机；R_off&F_off 为两蒸发器关机；Pullout 为两蒸发器抽真空

1.3 建立制冷剂不同分布状态下质量、能量及其它状态参数的计算公式

在并联双蒸发器实际运行过程中，2个蒸发器之间有质量和能量的传递，为保证计算算法质量和能量的严格守恒，将两蒸发器的总质量和总能量作为状态参数，这样质量和能量守恒方程就作为基本控制方程，如公式(1)和公式(2)所示。

$$\frac{dM}{dt} = m_{in} - m_{out} \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = m_{in}h_{in} - m_{out}h_{out} + Q \quad (2)$$

式中：

- E ——制冷剂热力学能，kJ；
- M ——制冷剂质量，kg；
- m_{in} ——蒸发器进口质量流量，kg/s；
- m_{out} ——蒸发器出口质量流量，kg/s；
- h_{in} ——蒸发器进口焓，kJ/kg；
- h_{out} ——蒸发器出口焓，kJ/kg；
- Q ——制冷剂侧换热量，kJ；
- t ——时间，s。

本文提出了制冷剂不同分布状态下的质量、能量及其他状态参数的计算公式。下面将分别列出制冷剂4种分布状态下的计算公式。

1.3.1 制冷剂为过热状态 (SH)

$$M = LA\bar{\rho}_{sh} \quad (3)$$

$$E_{cal} = LA\bar{\rho}_{sh} \left(\bar{h}_{sh} - \frac{p}{\bar{\rho}_{sh}} \right) \quad (4)$$

$$\bar{\rho}_{cal} = f(p, \bar{h}_{sh}) \quad (5)$$

$$\bar{h}_{sh} = h_{out} \quad (6)$$

式中：

- A ——蒸发器截面积， m^2 ；
- L ——蒸发器长度，m；
- p ——蒸发压力，kPa；
- $\bar{\rho}_{cal}$ ——制冷剂密度， kg/m^3 ；
- $\bar{\rho}_{sh}$ ——制冷剂过热区密度， kg/m^3 ；
- \bar{h}_{sh} ——制冷剂过热区焓值，kJ/kg。

1.3.2 制冷剂为两相和过热共存状态 (SH+TP)

$$M = L_p A \bar{\rho}_p + (L - L_p) A \bar{\rho}_{sh} \quad (7)$$

$$E_{cal} = LA\bar{\rho}_{sh} \left(\bar{h}_{sh} - \frac{p}{\bar{\rho}_{sh}} \right) + L_p A \bar{\rho}_p \left(\bar{h}_p - \frac{p}{\bar{\rho}_p} \right) \quad (8)$$

$$\bar{\rho}_{cal} = \bar{\gamma}_{cal} \rho_g + (1 - \bar{\gamma}_{cal}) \rho_l \quad (9)$$

$$\bar{h}_{sh} = (h_g + h_{out}) / 2 \quad (10)$$

$$\bar{h}_p = [\bar{\gamma}_p \rho_g h_g + (1 - \bar{\gamma}_p) \rho_l h_l] / \bar{\rho}_p \quad (11)$$

$$\bar{\gamma}_p = \frac{1}{1-C} - \frac{1}{x_0 - x_i} \frac{C}{(1-C)^2} \log \left(\frac{C + (1-C)x_0}{C + (1-C)x_i} \right) \quad (12)$$

$$x_i = (h_i - h_l) / (h_g - h_l) \quad (13)$$

式中：

- C ——系数；
- $\bar{\gamma}_{cal}$ ——制冷剂空泡系数；
- x_i, x_0 ——相区进出口干度；
- ρ_g, ρ_l ——蒸发器气态、液态密度， kg/m^3 ；
- h_g, h_l ——蒸发器气态、液态焓，kJ/kg；
- $\bar{\rho}_p$ ——制冷剂两相区密度， kg/m^3 ；
- \bar{h}_p ——制冷剂两相区焓值，kJ/kg；
- $\bar{\gamma}_p$ ——制冷剂两相区空泡系数。

1.3.3 制冷剂为进出口均为两相 (TP1) 状态或制冷剂为进口两相/出口饱和 (TP2) 状态

$$M = LA\bar{\rho}_p \quad (14)$$

$$E_{cal} = LA\bar{\rho}_p \left(\bar{h}_p - \frac{p}{\bar{\rho}_p} \right) \quad (15)$$

$$\bar{\rho}_{cal} = \bar{\gamma}_p \rho_g + (1 - \bar{\gamma}_p) \rho_l \quad (16)$$

$$x_o = \begin{cases} g(p, x_i) & \text{制冷剂为TP1状态} \\ 1 & \text{制冷剂为TP2状态} \end{cases} \quad (17)$$

各模式的判断准则保证了各模式之间的光滑转换。根据焓值线性分布假设，具体的各模式的判断准则如表2所示。

表2 制冷剂基本状态判断准则

制冷剂基本状态	判断准则
SH	$\bar{\rho}_{cal} < \rho_g$
SH+TP	$\bar{\rho}_{cal} > \rho_g ; \bar{\gamma}_{cal} > \bar{\gamma}_{x-1}$
TP1	$\bar{\rho}_{cal} > \rho_g ; \bar{\gamma}_{0-1} \leq \bar{\gamma}_{cal} \leq \bar{\gamma}_{x-1}$
TP2	$\bar{\rho}_{cal} > \rho_g ; \bar{\gamma}_{cal} < \bar{\gamma}_{0-1}$

注： $\bar{\gamma}_{x-1}$ 为出口为饱和气体时的空泡系数； $\bar{\gamma}_{0-1}$ 为进口为饱和液体，出口为饱和气体时的空泡系数

1.4 算法实现

确定两蒸发器在不同运行模式下状态参数的计算方法如下：

- 1) 首先输入边界条件制冷剂进口质量流量 m_{in} 、出口质量流量 m_{out} 、进口焓 h_{in} 、出口焓 h_{out} 以及制

冷剂侧换热量 Q ;

2) 根据式(1)~式(2)积分计算第 i 时刻制冷剂的总质量 M^i 和总能量 E^i ;

3) 输入制冷剂的总质量 M^i 、总能量 E^i ;

4) 并联双蒸发器运行模式切换共分为 11 种, 不同切换过程, 两蒸发器中制冷剂的状态参数确定流程不同, 如果切换模式为模式 1~3 中的 1 种, 转到步骤 5); 如果切换模式为模式 4~8 中的 1 种, 比较冷藏、冷冻蒸发器内压力, 当冷藏蒸发压力大于冷冻蒸发压力转到步骤 6); 否则转到步骤 5); 如果切换模式为模式 9~10 中的 1 种, 比较冷藏、冷冻蒸发器内压力, 当冷冻蒸发压力大于冷藏蒸发压力转到步骤 6); 否则转到步骤 8); 如果切换模式为模式 11, 转到步骤 8);

5) 假定压力, 分别计算冷藏蒸发器和冷冻蒸发器中制冷剂的状态参数, 如果计算的两蒸发器内制冷剂的总质量(总能量)和实际总质量(总能量)相等时, 计算收敛, 转到步骤 10); 否则调整压力假定值, 重新计算;

6) 假设蒸发器内压力, 计算冷冻蒸发器中制冷剂状态参数, 如果计算的总能量与实际总能量相等时, 计算收敛, 转到步骤 7), 否则调整压力假定值, 重新计算;

7) 假设蒸发器内压力, 计算冷藏蒸发器中制冷剂状态参数, 如果计算的总质量与实际总质量相等时, 计算收敛, 转到步骤 10); 否则调整压力假定值, 重新计算;

8) 假设压力, 计算冷冻蒸发器中制冷剂的状态参数, 如果计算的冷冻蒸发器内制冷剂的总能量与其实际总能量相等时, 计算收敛, 转到步骤 9); 否则调整压力假定值, 重新计算;

9) 假设蒸发器内压力, 计算冷藏蒸发器中制冷剂状态参数, 如果计算的总能量与实际总能量相等时, 计算收敛, 转到步骤 10), 否则调整压力假定值, 重新计算;

10) 输出蒸发器中制冷剂的状态参数, 计算 $i+1$ 时刻制冷剂的状态参数。

具体算法如图 3 所示。

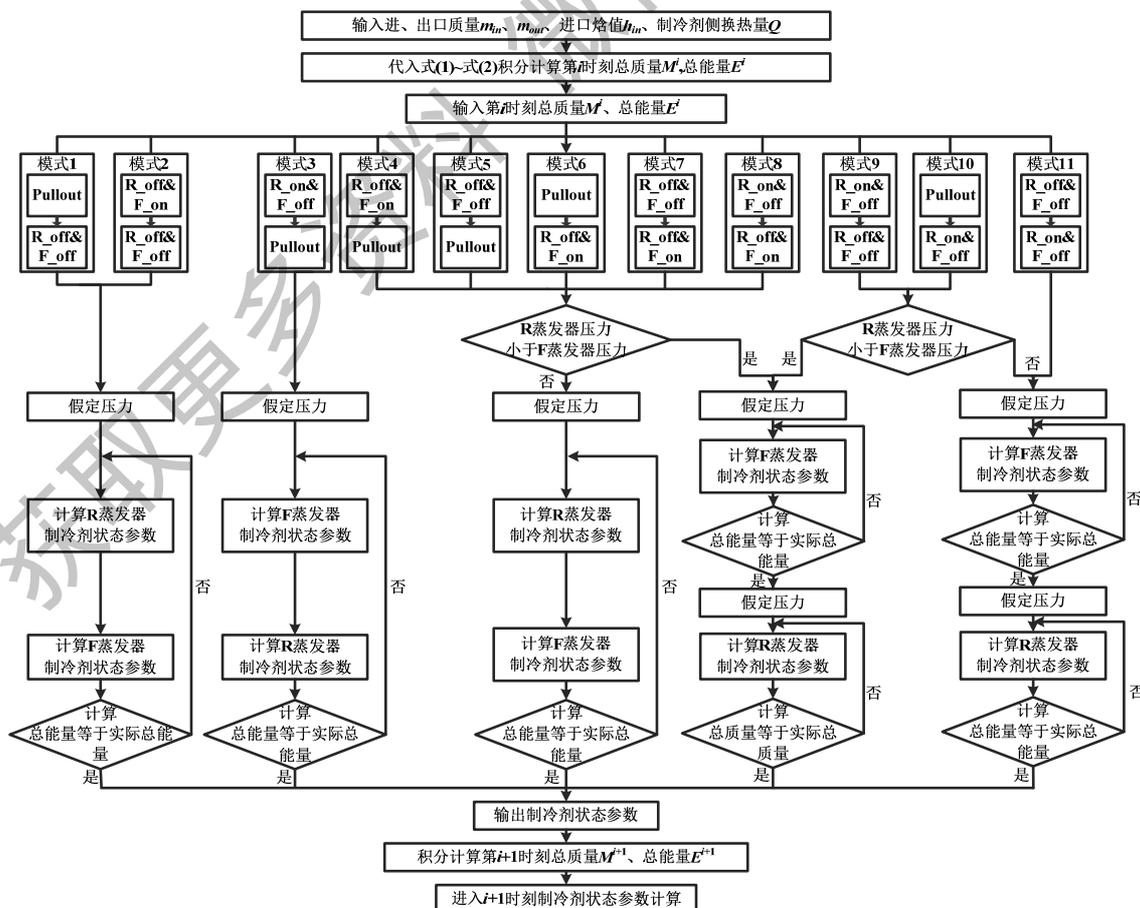


图 3 并联双蒸发器计算流程

基于式(3)~式(17),确定蒸发器中制冷剂分布状态和状态参数的计算流程如下。

- 1) 输入已知条件。
- 2) 计算制冷剂密度 $\bar{\rho}_{cal}$ 及空泡系数 $\bar{\gamma}_{cal}$ 。
- 3) 比较 $\bar{\rho}_{cal}$ 和 ρ_g ,当 $\bar{\rho}_{cal}$ 小于 ρ_g 时为SH(全过热)状态,采用式(3)~式(6)计算制冷剂的状态参数,转到9),否则转到4)。
- 4) 计算出口刚好为饱和气体的空泡系数 $\bar{\gamma}_{x-1}$ 。
- 5) 比较 $\bar{\gamma}_{cal}$ 和 $\bar{\gamma}_{x-1}$,当 $\bar{\gamma}_{cal}$ 大于 $\bar{\gamma}_{x-1}$ 时为SH+TP(两相和过热共存)状态,采用式(7)~式(10)及式(15)~式(17)

计算制冷剂状态参数,转到9),否则转到6)。

- 6) 计算进口为饱和和液体,出口为饱和和气体时的空泡系数 $\bar{\gamma}_{0-1}$ 。
- 7) 比较 $\bar{\gamma}_{cal}$ 和 $\bar{\gamma}_{0-1}$,当 $\bar{\gamma}_{cal}$ 在 $\bar{\gamma}_{0-1}$ 和 $\bar{\gamma}_{x-1}$ 之间时为TP2(出口饱和全两相)状态,采用式(11)~式(14)及式(15)~式(17)计算制冷剂的状态参数,转到9),否则为TP1(出口两相全两相),转到8)。
- 8) 采用式(11)~式(14)及式(15)~式(17)计算制冷剂的状态参数,转到9)。
- 9) 输出制冷剂质量、能量及蒸发压力等参数。具体计算流程如图4所示。

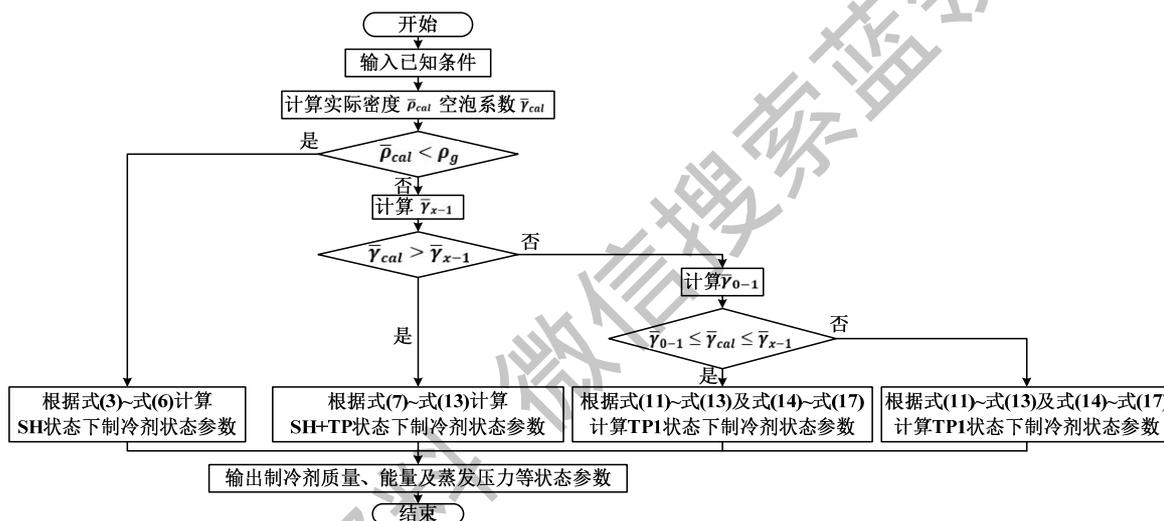


图4 蒸发器状态参数计算流程

2 算法验证

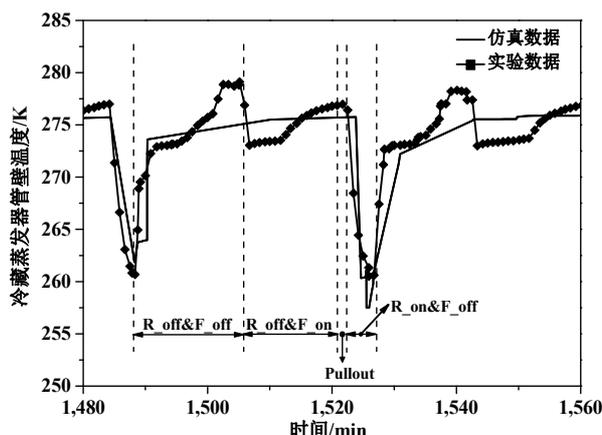
为了证明计算方法的有效性,本文将提出的计算方法嵌入到成熟的冰箱系统仿真软件^[15]中,仿真软件在个人电脑(Intel Pentium D CPU 2.66 GHz; 1024 MB RAM)模拟测试冰箱实际运行24小时的动态性能,仿真所花费的时间在300秒以内,并将仿真结果中蒸发器中制冷剂的状态参数与实验测试结果^[16]进行比较,其中温度测量精度为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$,制冷剂压力测量精度为 $\pm 0.2\%$ 。用于测试的蒸发器参数如表3所示。

表3 两蒸发器的结构参数

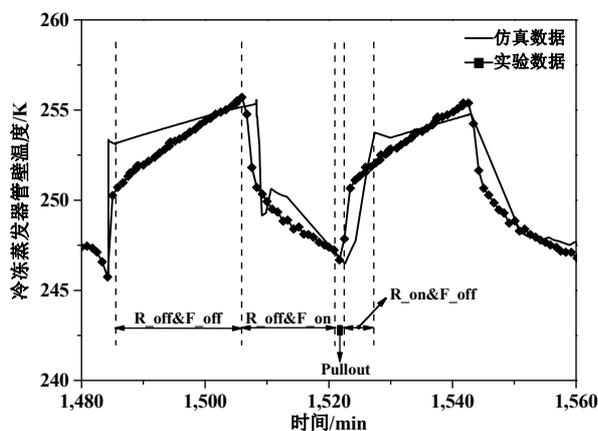
结构参数	冷藏蒸发器	冷冻蒸发器
类型	翅片管型	翅片管型
管长/m	5.6	18.56
内径/mm	6.6	6.92
外径/mm	8	7.94

翅片间距/mm	6.35	8.47
---------	------	------

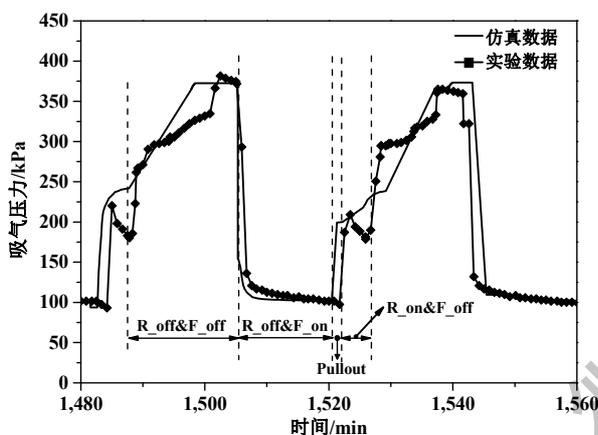
采用本文提出的并联双蒸发器计算方法仿真冰箱蒸发器正常工作时的性能,仿真结果和实验结果吻合很好,结果显示仿真值相对于实验值的相对偏差在均在10%以内,如图5所示。



(a) 冷藏蒸发器管壁温度



(b) 冷冻蒸发器管壁温度



(c) 吸气压力

图5 两蒸发器出口温度仿真计算结果和实验结果对比

3 结论

1) 通过将制冷剂的分布状态划分为SH(全过热)、SH+TP(两相和过热共存)、TP1(进出口均为两相)以及TP2(进口两相/出口饱和)4种分布状态,给出制冷剂四种分布状态下质量、能量及其他状态参数的计算公式,可以实现并联双蒸发器所有运行模式下动态性能计算;

2) 依据焓值线性分布假设,将制冷剂的密度 $\bar{\rho}_{cal}$ 和空泡系数 $\bar{\gamma}_{cal}$ 作为判定参数,可以实现制冷剂各分布状态计算模型光滑转换,从而保证了并联双蒸发器动态性能仿真计算方法稳定性。

3) 提出了基于质量和能量守恒的并联双蒸发器动态性能算法,计算蒸发器正常工作时的动态性能与实验结果吻合良好,结果显示仿真值和实验值的相对偏差均在10%以内。在个人电脑仿真24h性能所花费的时间仿真小于300s,满足设计要求。

参考文献:

- [1] YOON W J, JUNG H W, CHUNG H J, et al. Performance optimization of a two-circuit cycle with parallel evaporators for a domestic refrigerator-freezer[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(1): 216-224.
- [2] YOON W J, SEO K, CHUNG H J, et al. Performance optimization of dual-loop cycles using R-600a and hydrocarbon mixtures designed for a domestic refrigerator-freezer[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(6): 1657-1667.
- [3] WON S, JUNG D, RADERMACHER R. An experimental study of the performance of a dual-loop refrigerator freezer system[J]. International Journal of Refrigeration, 1994, 17(6): 411-416.
- [4] 张艳. 三温室冰箱的节能方案研究[J]. 制冷技术, 2011, 31(1): 15-17.
- [5] 梅勤光. 家用冰箱的节能减排技术[J]. 制冷技术, 2008, 28(4): 12-14.
- [6] 卢智利, 丁国良, 张春路. 双温双控冰箱的仿真与应用[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(2): 268-272.
- [7] 丁国良, 陈芝久, 阙雄才, 等. 制冷空调装置设计方法现代化与智能化仿真探索[J]. 制冷技术, 1999, 19(1): 10-14.
- [8] LU Z L, DING G L, ZHANG C L. Dynamic simulation of natural convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application Part II: system simulation and application[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(10): 1525-1533.
- [9] 孙浩然, 任滔, 李智强, 等. 结合用户数据的空调器仿真平台构建[J]. 制冷技术, 2014, 34(4): 31-37.
- [10] 陆震. 以制冷节能促进可持续发展[J]. 制冷技术, 2005, 25(3): 33-37.
- [11] 付德钢, 陆震, 曹卫华, 等. 直燃型双效溴化锂吸收式制冷机扰动工况的动态仿真[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(2): 281-285.
- [12] 赵丹, 丁国良, 胡海涛. 质量和能量严格守恒的蒸发器动态仿真模型[J]. 制冷学报, 2015, 36(1): 76-83.
- [13] GRUHLE W D, ISERMANN R. Modeling and control of a refrigerant evaporator[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1985, 107(4): 287-292.
- [14] CHI J, DIDION D. A simulation model of the transient performance of a heat pump[J]. International Journal of Refrigeration, 1982, 5(3): 176-184.
- [15] 杨丛彦, 赵丹, 丁国良, 等. 多类型冰箱部件及系统仿真软件开发[C]// 中国家用电器技术大会论文集. 北京:《电器》杂志社, 2015: 37-46.
- [16] 赵丹. 面向制冷空调装置快速稳定仿真的部件模型拓展及系统仿真平台开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.