

# 一拖三变频空调 (VRV) 系统运行特性的仿真研究

武永强, 周兴禧, 夏清, 陈武  
(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)



**摘要:** 一拖三 VRV 空调系统由于各蒸发器之间参数的相互影响, 使得其运行特性十分复杂。该文采用分布参数法, 引用空泡系数, 建立起以变频压缩机、三电子膨胀阀、三蒸发器为一体的系统的热力学仿真模型; 对系统进行仿真研究, 得出不同工况下系统的运行特性。仿真结果表明在一拖三 VRV 空调系统中进行吸气压力控制的必要性与优越性, 为系统的控制方法的制定以及系统的优化设计奠定基础。

**关键词:** 一拖三; 空调系统; 运行特性; 吸气压力; 仿真研究

文章编号: 1004-731X (2004) 05-0998-03      中图分类号: TU8      文献标识码: A

## Research on the Performance of the Triple-Evaporator VRV Air Conditioner

WU Yong-qiang, ZHOU Xing-xi, XIA Jing, CHEN Wu  
(School of Power and Energy Eng., Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The performance of triple-evaporator VRV air conditioner is very complex because of the interaction of respective evaporators. A distributed-parameter model based on two-phase flow theory in triple-evaporator VRV air conditioner is established in this paper. The simulations using this model have been conducted and the performance of system has been analyzed. According to the analysis the necessity and advantage of the control of suction pressure is presented here. The result of this paper should help the establishment of control strategies of such an air conditioning system.

**Key Words:** triple-evaporator; air conditioner; performance; suction pressure; simulation research

### 引言

一拖三 VRV (Variable Refrigerant Volume) 空调系统是以变制冷剂流量为特征, 以一台室外机(变频压缩冷凝机组)同时带动三台室内蒸发器的直冷式空调系统。该系统以其节能、舒适、安装布置灵活、高性能价格比等优势正越来越得到人们的青睐<sup>1</sup>。一拖三空调系统由于各室内机所需的制冷量不同、运行工况不同, 但共用一台压缩机和冷凝器, 这使得各室内机(蒸发器)的运行参数相互影响, 表现出很强的耦合性, 运行特性极其复杂。因而系统的优化设计、优化控制难以实现, 导致系统运行不够稳定, 控温精度难以保证。本文通过系统仿真研究系统的运行特性, 为系统控制方法的确立提供理论依据。

## 1 系统热力学模型

### 1.1 三蒸发器建模

本文选取制冷装置中常用的翅片式直接蒸发式蒸发器来作为仿真对象。在蒸发器建模方面, 前人已经作出了很多工作<sup>[1]</sup>。但在对三个并联蒸发器进行仿真运算时, 由于各蒸发器内质流量、蒸发压力、过热度等热力学参数的相互影响, 将导致迭代运算时间过长。加之本文侧重于通过运行特性的

研究以探讨系统控制方法的确立, 故在满足计算的精确性的条件下, 作相应的简化假设, 建立起蒸发器的两相流的分布参数模型。简化假设如下: 管内制冷剂两相区处于环状流; 制冷剂汽液两相不可压缩, 两相处于热平衡; 制冷剂流动为一维流动, 用空泡系数来表示某一截面上汽液两相的体积比; 忽略制冷剂重力的影响; 管外侧空气是不可压缩的, 即忽略空气质量和能量的积累。分为两相区与过热区分别进行建模。

#### 1.1.1 管内制冷剂侧建模

##### (1) 两相区

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} [ \langle \dot{a} \rangle \tilde{n}_v + (1 - \langle \dot{a} \rangle) \tilde{n}_l ] + \frac{\partial}{\partial z} [ \langle \dot{a} \rangle \tilde{n}_v u_v + (1 - \langle \dot{a} \rangle) \tilde{n}_l u_l ] = 0 \quad (1)$$

式中:  $\langle \dot{a} \rangle$  为空泡系数;  $r_v$ 、 $r_l$  分别为汽、液相密度 ( $\text{Kg/m}^3$ );  $u_v$ 、 $u_l$  分别为汽、液相速度 ( $\text{m/s}$ )。

动量守恒方程:

文献<sup>[2]</sup>指出动量的传递相对于能量的传递是相当迅速的, 动量方程可按稳态列写:

$$-\frac{dp}{dz} = -\frac{dp_F}{dz} + \frac{d}{dz} (r u^2) \quad (2)$$

上式右边第一项是摩擦压降, 第二项是加速压降, 重力压降忽略不计。

能量守恒方程:

收稿日期: 2003-04-7      修回日期: 2003-12-12  
作者简介: 武永强(1974-), 男, 河南省人, 硕士, 研究方向为多联变频空调以及吸收式的传热传质。

$$\frac{\partial(\mathbf{r}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\mathbf{r}uh)}{\partial z} = \frac{\mathbf{p}D_i}{A} \mathbf{a}_{in} (T_w - T_r) \quad (3)$$

式中,  $h$  为焓 (KJ/Kg);  $D_i$  为管内直径 (m);  $\mathbf{a}_{in}$  为制冷剂管内侧的换热系数 ( $W/m^2 \cdot K$ );  $T_w$ 、 $T_r$  分别为管壁与制冷剂的温度 (K)。

其中,  $\mathbf{r} = \langle \mathbf{a} \rangle \mathbf{r}_v + (1 - \langle \mathbf{a} \rangle) \mathbf{r}_l$ ;  $h = xh_v + (1 - x)h_l$ , 空泡系数  $\langle \mathbf{a} \rangle$  则采用 Hughmark 模型<sup>[3]</sup>。

### (2) 过热区

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial t} + \frac{\partial (\mathbf{r}_s u_s A)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\mathbf{f}}{\mathbf{f}z} (\mathbf{r}_s u_s^2) = - \frac{dP}{dz} - F_s \quad (5)$$

能量守恒方程:

$$A \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{f}t} (\mathbf{r}_s h_s) + \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{f}z} (Gh_s) = \mathbf{p} D \mathbf{a}_{in} (T_w - T_r) \quad (6)$$

### 1.1.2 管壁及管壁外空气侧建模

管壁部分的能量方程:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{(q_a - q_r) \mathbf{p} D}{C_{p,w} M_w} \quad (7)$$

式中,  $q_a$ 、 $q_r$  分别为空气侧和制冷剂侧对管壁的换热 ( $W/m^2$ );  $M_w$ 、 $C_{p,w}$  分别为管子质量 (kg) 和比热 (KJ/Kg · K)。

$\mathbf{r}_s$ 、 $h_s$  由制冷剂的物性方程获得。

在两相区和过热区的动量方程中, 各分压降及弯头压降按文献[4]求解。

管外空气侧的能量方程:

$$\frac{d M_a h_a}{dz} = (\mathbf{p} D) q_a \quad (8)$$

### 1.2 各膨胀阀及压缩机的简化模型

压缩机模型为

$$q_{mcom} = V_h \cdot I n / v \quad (9)$$

式中:  $q_{mcom}$  为压缩机流量;  $V_h$  为压缩机容积输气量;  $I$  为输气系数,  $n$  为转速,  $v$  为压缩机吸气比容。

膨胀阀采用孔板方程来建模, 制冷剂流过的过程视为等焓过程, 计算流量:

$$q_m = \frac{F}{\sqrt{z}} \sqrt{\mathbf{r} \Delta P} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\sqrt{z}} = 0.82 - 0.053x \quad (11)$$

式中:  $\Delta P$  为阀前后的压降;  $F$  为阀的流通面积;  $z$  为流量系数;  $x$  为阀后制冷剂干度。

## 2 系统运行特性分析

### 2.1 一定压缩机转速下, 不同阀开度对各机参数的影响

其工况为: 压缩机转速为 2400rpm, 冷凝温度为 35℃, 三房间干球温度均为 25℃, 湿球温度均为 19.5℃, A、B 和 C 阀的开度分别为 0.6mm<sup>2</sup>、0.8mm<sup>2</sup> 和 0.4 mm<sup>2</sup>, 三蒸发器

空气流量都是 400 m<sup>3</sup>/h。

图 1 为三阀在不同开度下, 蒸发压力沿程分布曲线, 由于阀开度不同, 各蒸发器制冷剂进口压力不同, 质量流量不同, B 阀开度最大, 制冷剂进口压力和流量也最大, 但由于摩擦和加速压降作用下, 最终各蒸发器出口压力趋于一致, 保持同一吸气压力。显然, 在各种压缩机转速下, 各机运行工况、阀开度虽不相同, 却具有相同的吸气压力这一运行特性。

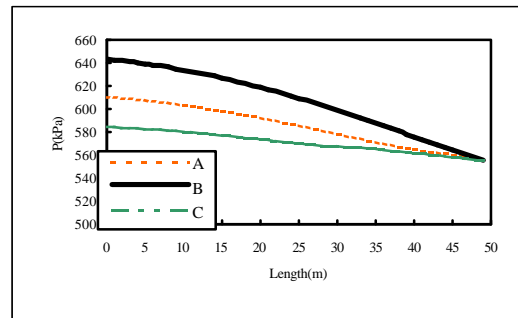


图 1 沿程蒸发压力

### 2.2 各阀开度保持不变, 改变压缩机转速的调节特性

图 2 表示在上述工况下, 改变压缩机转速, 压缩机吸气压力变化的曲线。可见, 随着转速的提高, 压缩机吸气压力成线性下降, 显然各蒸发器内制冷剂的蒸发压力也随之下降。图 3 表示不同转速下, 各蒸发器制冷量变化曲线, 可以看出, 随着压缩机转速增大, 各蒸发器的制冷量也随之增大, 但由于各阀开度不同, 增量明显不同, A 阀开度最大, 制冷量增加最大, 反之 C 阀增加不明显。这是由于三蒸发器并联, 且具有同一吸气压力, 使得系统各参数相互影响, 相互耦合所致。

### 2.3 一定压缩机转速下, B、C 两阀开度保持不变, 改变 A 阀的开度对其它蒸发器参数的影响

工况同 2.1

图 4 表示各蒸发器制冷量随 A 阀开度变化的曲线, 可以看出, 当 A 阀开度增大时, 蒸发器 A 的制冷量增大, 以满足负荷的需要, B、C 两阀开度与蒸发器运行工况虽然没有变化, 但制冷量却随之减小, 因而要影响 B、C 两室的控温品质。

### 2.4 一定压缩机转速下, 阀总体开度不变, 不同阀开度组合对系统的影响

其工况为: 压缩机转速为 2200rpm, 冷凝温度为 35℃, 三房间干球温度均为 25℃, 湿球温度均为 19.5℃, 总阀开度为 1.5 mm<sup>2</sup>, B 阀的开度固定为 0.5mm<sup>2</sup>, 三蒸发器空气流量都是 400 m<sup>3</sup>/h。

从图 5 - 图 7 中可以看出, 系统阀总体开度虽然保持不变, 当 A 阀开度增大, C 阀开度减小, 系统吸气压力上升,

当三阀开度相同时，吸气压力最大，系统制冷量也最大。此时，系统的节流损失最小，效率最高。可见，尽管压缩机转速和阀总体开度都保持不变，但随着三阀开度的变化，系统吸气压力、制冷剂质量流量以及总制冷量都在发生变化。

### 2.5 保持一定吸气压力下，系统特性变化

以上仿真结果表明，在多联变频空调系统中，各参数都是相互耦合。运转工况变化，调节压缩机的转速和各阀的开度，都会引起系统吸气压力变化，通过吸气压力又影响到各单机的运行参数，难以同时保持各单机的控制品质。

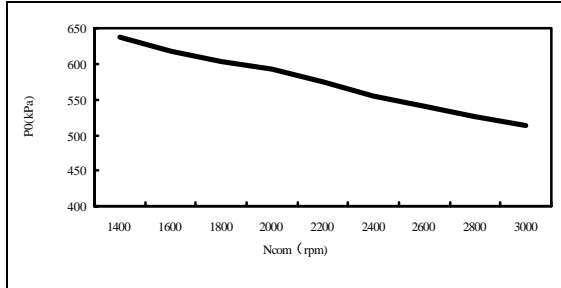


图 2 吸气压力随压缩机转速的变化

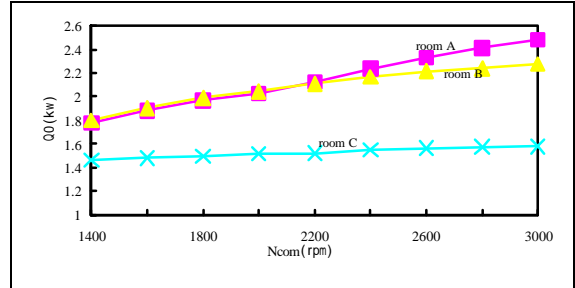


图 3 各机制冷量随压缩机转速变化

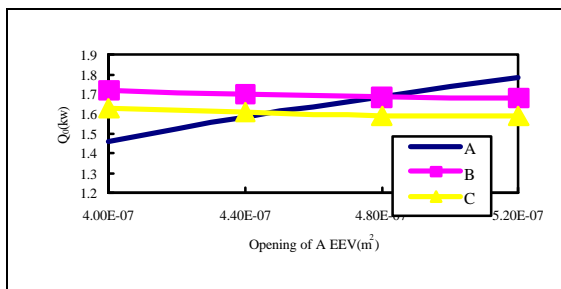


图 4 各机制冷量随 A 阀开度的变化

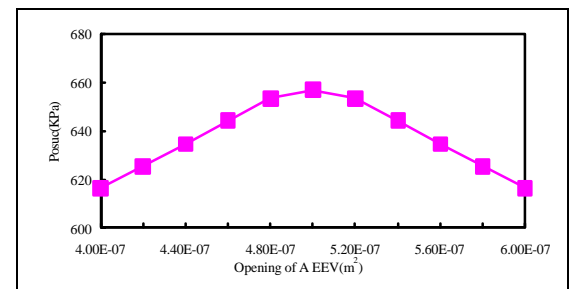


图 5 吸气压力随 A 阀开度的变化

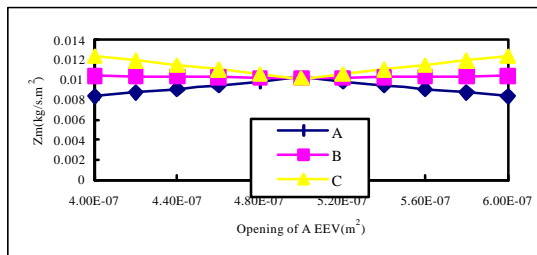


图 6 各机制冷剂流量随 A 阀开度的变化

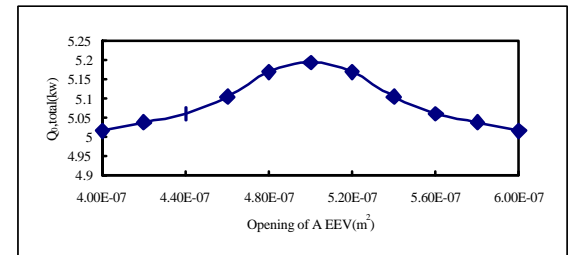


图 7 总制冷量随 A 阀开度的变化

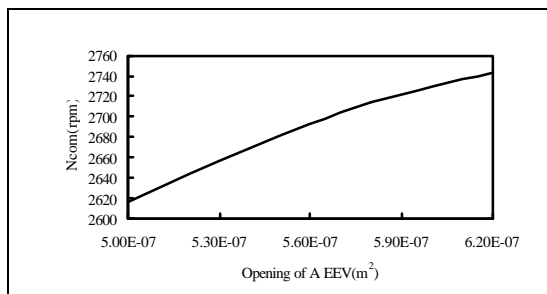


图 8 压缩机转速随 A 阀开度的变化

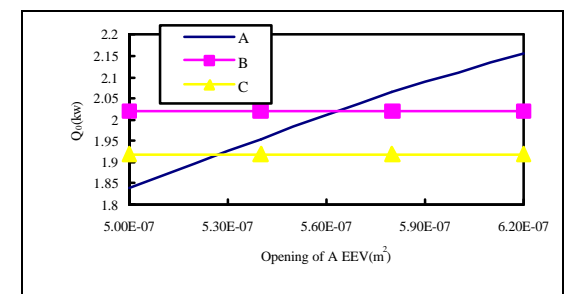


图 9 各机制冷量随 A 阀开度变化

本节讨论通过调节压缩机的频率，而保持吸气压力不变时系统的运行特性。

其工况为：冷凝温度为 32℃，三房间进口空气干球温度分别为 27℃、26℃ 和 25℃，湿球温度均为 19.5℃，B 和 C 阀的开度分别为 0.58mm<sup>2</sup> 和 0.55 mm<sup>2</sup>，A 阀开度变化为 0.5mm<sup>2</sup>–0.62mm<sup>2</sup>，吸气压力保持为 630kPa。

图 8 表示随着 A 阀开大，为了保持一定的吸气压力，压缩机转速变化的曲线。可见，只要调节压缩机的转速，便

可以维持一定的吸气压力。从图 9 可以看出，当 A 阀开度增大时，A 机的制冷量也相应增大，且与电子膨胀阀的流量特性曲线相近，而 B、C 两机在其运行工况不变的情况下，其制冷量并未受到干扰，基本保持不变。以上仿真结果表明，当通过调节压缩机转速来保持系统吸气压力不变后，各机运行参数之间相互影响基本可以解决。

(下转第 1008 页)

combination rule set to model it when no prior knowledge, i.e., divide appropriate fuzzy subsets in every input dimension, then combine all these fuzzy subsets into rules. Although it is better compared with conventional BP, it still has a shortcoming, i.e., there may exist great difference between combination rule set and the optimal rule set, which may lead to long learning time. Moreover, too many rules will lead to low ability of generalization.

So how to extract rules (when no expert knowledge) becomes the bottleneck of applying FNN. In this paper, we utilize **IREA** algorithm based on rough set to solve this problem. Fuzzy rule set extracted by **IREA** has characteristics of fewer rules and shorter rule length, i.e., **IREA** is an effective method in fuzzy rule discovery. Simulation results demonstrate its effectiveness and advantages over conventional FNN. The reason is that method 2 utilize the distribution characteristics of sample data and extract "better" rule set, so the FNN based on "better" rule set has "better" topology and thus has better robust and learning speed consequently.

The proposed method something like the fuzzy rule simplification method based on a measure of similarity, in which similar fuzzy sets are merged to create a common fuzzy set to replace them. Merging similar fuzzy sets might result in equal rules that also can be merged, thereby reducing the number of rules. However, the proposed method emphasizes much more on extracting appropriate rules from data, i.e., extract rules from data when no field knowledge available.

### References

[1] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Inform. Contr., 1965, (8): 338-353.  
 [2] Z.Pawlak, Rough Sets, Theoretical Aspects of Reasoning About Data.

(上接第 1000 页)

### 3 结论

一拖三变频空调系统运行特性仿真结果表明,系统中各机的运行参数相互耦合、相互影响,调节压缩机转速和各阀的开度都会通过吸气压力而影响到其他单机的运行参数。但通过压缩机变频调速保持系统的吸气压力,则可以基本杜绝各单机运行参数的相互影响。即在系统吸气压力一定下,压缩机的调速可起到调节系统总制冷量的作用,调节各膨胀阀开度可用来分别调节单机制冷剂流量的分配,保证各机的控制品质。而且,这种控制方式还有利于系统的进一步扩展。

(上接第 1004 页)

障所在部位。且诊断准确率较高,具有工程价值,该方法也可用于其它类似发电机或电动机的故障诊断中。

### 参考文献:

[1] Patton R., Clark R.N. and Frank P.M.. Fault diagnosis in dynamic systems[M], New York: Prentice Hall, 1989.  
 [2] Leonhardt S. and M. Ayoubi . Methods of fault diagnosis[J] . Control Eng. Practice, 1997, 5(5): 683-692.  
 [3] Isermann R..Supervision, Fault-detection and Fault-Diagnosis methods-An introduction[J] . Control Eng. Practice, 1997, 5(5): 639-652.  
 [4] Isermann R. and Ayoubi M.. Fault detection and diagnosis with neuro-fuzzy- systems[R] .Aachen Germany: EUFIT' 96, 1996-09. 2-5.

Dordrecht, The Netherlands:Kluwer,1991.  
 [3] Wang Shitong. Fuzzy system and Fuzzy Neural Networks[M]. Edition 1. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1998.  
 [4] Mohua Banerjee, et.at. Rough Fuzzy MLP: Knowledge Encoding and Classification[J] IEEE Trans. Neural Networks, 1998, 9(6): 1203-1216.  
 [5] Wang L X. A Course on Fuzzy Systems[M], U.S.A, Prentice-Hall press, 1999.  
 [6] Wang Shitong, Yu Dongjun. Error analysis in nonlinear system identification using fuzzy system[J]. J. of software research, 2000, 11(4): 447-452.  
 [7] A.Skowron and C.Rausser. The discernability matrices and functions in information system[A], in Intelligent Decision Support, Handbook of Application and Advances of Rough Sets Theory, R.Slowinski, Ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 1992, 331-362.  
 [8] Yu dongjun, Wang Shitong, Yang Jingyu. An incremental rule extraction algorithm [J]. Mini-Micro System , 2004, 25(1): 79-81.  
 [9] Mao Zhongyuan, et.al.. Topology-Changeable neural network, Control theory and application[J]. 1995, 16(1):54-60.  
 [10] Shan N, Ziarko W. An incremental Learning Algorithm for Constructing Decision Rules[A]. In: Kluwer R S,ed. Rough Sets. Fuzzy Sets and Knowledge Discovery[C]. The Netherlands , Springer-Verlag, 1994. 326-334.  
 [11] Wang Peizhuang, Constructive theory for fuzzy system[J], Fuzzy sets and systems, Vol.88 ,No.2, pp.1040-1045, 1997  
 [12] NS2(Network Simulator version 2)[EB/OL]. <http://www-mash.cs.berkeley.edu.cn/ns/>, Referenced on 2002.  
 [13] S. Floyd, V. Jacobson. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. IEEE/ACM Trans.on Networking, 1993, 1(4): 397-413.

### 参考文献:

[1] 葛云亭等. 蒸发器动态参数数学模型的建立和理论计算[J]. 制冷学报, 1995, 1: 9-17.  
 [2] Wang H., Towber S.. Distributed and Non-steady-state Modeling of An Air Cooler[J]. Int.J.Refrig., 1991, 14: 98-111.  
 [3] Mohen Farzad, Dennis L.o' NEAL. The Effect of Void Fraction Model on estimation of air conditioner system performance variables under a range of refrigerant charging conditions[J]. Int.J.Refrig, 1994, 17: P85-93.  
 [4] Geary,D.F.. Return bend pressure drop in refrigeration system[J]. ASHRAE. Trans,1975,81(1).  
 [5] Ayoubi M. . Fuzzy systems design based on ahybrid neural structure and application to the fault diagnosis of technical processes[J]. Control Eng. Practice, 1996, 4(1):35-42.  
 [6] A. Miyazaki, K. Kwon, H. Ishibuchi and H. Tanaka .Fuzzy regression analysis by fuzzy neural networks and its application[R] .Orlando, FL: 3rd IEEE Conf. on Fuzzy Systems, 1994. 52-57.  
 [7] Maki.Y and Loparo.K.A . A Neural network approach to fault detection and diagnosis in Industrial processes[J] . IEEE Transactions on control systems technology, 1997, 5(6): 529-541.  
 [8] 胡式旺, 黎小明. 汽车电器电子设备原理与检修[M] .北京: 机械工业出版社, 2002-06. 28 ~ P53.  
 [9] 李伟清, 王绍禹. 发电机故障检查分析及预防[M] .北京: 中国电力出版社, 1996.  
 [10] 娄天玲. 基于 CAN 总线的车用发电机综合测试系统的设计[D] .合肥: 合肥工业大学电气工程学院硕士论文, 2003