

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2008.10.027

# 新型混合制冷剂 R161+ R227ea 的理论与实验研究

朱志伟, 韩晓红, 孙洁, 陈光明  
(浙江大学 制冷与低温研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 提出以循环性能优越的 R161 为基础组分, 并引入阻燃性能优越的 R227ea, 根据优势互补的原则, 将 R161 和 R227ea 进行优化配比, 获得一种循环性能与安全性能均较好的混合制冷剂以替代 R22。利用数据库 REFPROP 7.0, 通过自编软件对二元混合制冷剂 R161+ R227ea 的热力学性能和循环性能进行理论计算及分析, 并在电量热器制冷剂性能测试台上, 分别对工质 R407C 和 R161+ R227ea 进行了实验研究。通过理论与实验的研究发现, 该新型制冷剂的制冷量和耗功都比 R407C 稍小, 但是循环性能系数 (COP) 比较接近, 而排气温度比 R407C 低 5 °C 左右, 因此该新型混合制冷剂具有替代 R407C、R22 的潜在可行性。

**关键词:** R161; R227ea; 混合制冷剂; 循环性能

中图分类号: O643.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2008)10-1789-06

## Theoretical and experimental study on a novel mixture refrigerant of R161+ R227ea

ZHU Zhiwei, HAN Xiaohong, SUN Jie, CHEN Guangming  
(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** R161 with excellent cycle performance was employed as the main component and R227ea was introduced as an antifracking component. A new refrigerant with good cycle performance and safety performance was found to replace the traditional refrigerant R22 by optimizing the composition of R161 and R227ea based on the principle of complementary advantages. A program combined with REFPROP 7.0 was wrote to calculate the thermodynamic property and cycle performance. The cycle performances of R161+ R227ea and R407C were conducted on the electric calorimeter apparatus. The theoretical and experimental analysis show that the refrigerating capacity and power consumption of the new refrigerant is lower than R407C, while the coefficient of performance (COP) is equal to R407C and the discharge temperature is about 5 °C lower than R407C. The novel mixture refrigerant has the potential to replace R407C and R22.

**Key words:** R161; R227ea; mixture refrigerant; cycle performance

制冷剂 R22 于 1928 年最初被人们所认可, 并于 1936 年开始商业化生产使用。迄今为止, R22 已经在很多制冷系统中得到了应用。然而 R22 是 HCFCs 类物质, 对臭氧层有破坏作用以及产生温室效应, 根据《蒙特利尔议定书》及《京都议定书》规定, HCFC 类物质将被控制和逐步淘汰。

在制冷空调领域, 到目前为止还没有找到在各方面都能同 R22 相比拟的理想纯质来替代。目前在不同国家和地区, 往往采用不同的混合制冷剂作为 R22 的替代物, 例如美国、加拿大、意大利和瑞典等多数国家主要集中于 R407C 和 R410A, 并倾向于在家用空调器中使用 R410A, 在大中型制冷空调中使

收稿日期: 2007-09-12.

浙江大学学报(工学版)网址: [www.journals.zju.edu.cn/eng](http://www.journals.zju.edu.cn/eng)

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Z105034); 中国博士后基金资助项目(20060400311).

作者简介: 朱志伟(1983-), 男, 江西高安人, 硕士生, 从事混合制冷剂研究. E-mail: zhiwei\_123@zju.edu.cn

通讯联系人: 陈光明, 男, 教授. E-mail: gmchen@zju.edu.cn

用 R407C, 而欧共体国家则均倾向于 R407C. 美国环保署 (environmental protection agency, EPA) 的“重要的新替代物政策” (significant new alternatives policy program, SNAP) 也公布替代 R22 可接受的替代物是 R407C、R410A<sup>[1-2]</sup>. 随着时间的推移, 美国制冷空调协会 (US air-conditioning and refrigeration institute, ARI) 牵头设立了“替代制冷剂评估项目” (alternative refrigerants evaluation program, AREP), 也将可能的替代物范围逐渐收缩至 HFCs 类制冷剂混合物, 如 R407C、R410A. 但是, R407C 及 R410A 各有优缺点. R407C 的优点主要表现在与 R22 的沸点较接近, 且与 R22 有比较接近的饱和温度压力曲线, 替代 R22 时无须对现有系统做大的改动, R410A 的优点是可以获得较高的能效比, 输运性能优越; 它们的缺点分别主要表现在: R407C 的温度滑移较大, 传热特性较差; R410A 的工作压力约为 R22 的 1.6 倍, 需要对设备进行较大的设计变更才可使用. 更为重要的是这两种替代制冷剂是国外公司的定型产品, 受知识产权的保护, 这使其在生产和使用上具有很大限制.

因此, 研究对环境友好、循环性能优越、安全、具有自主知识产权的新型制冷剂用以替代 R407C、R410A 具有非常积极的意义. 本课题组已提出了一系列以 R161 为基本组元的替代 R407C 与 R410A 的新型混合制冷剂<sup>[3-7]</sup>, 在此基础上, 还提出了一种以 R161 和 R227ea 为组元 (质量分数比为 51.3:48.7) 用于替代 R407C 的新型混合制冷剂, 本文正是对这一组分的二元混合制冷剂的循环性能进行理论与实验研究.

## 1 新型制冷剂的提出

R161 (氟乙烷,  $\text{CH}_3-\text{CH}_2\text{F}$ ) 相对分子质量为 48.06, 沸点为  $-37.10^\circ\text{C}$ , 气化潜热为  $421.5\text{ J/g}$  ( $0.1013\text{ MPa}$ ), 临界温度为  $102.20^\circ\text{C}$ , 临界压力为  $4.70\text{ MPa}$ , 临界密度为  $288.0\text{ kg/m}^3$ ,  $20^\circ\text{C}$  时的饱和蒸汽压为  $0.789\text{ MPa}$ , 化学性质稳定; 环境性能优越: 其臭氧消耗潜能值 (ODP) 为 0, 全球变暖潜能值 (GWP) 为 12, 其平均大气寿命只有 0.3 年; 其缺点是具有可燃性, 与空气混合能形成爆炸性混合物, 遇明火、高温或与氧化剂接触, 有引起燃烧爆炸的危险.

R227ea (七氟丙烷,  $\text{CF}_3-\text{CHF}-\text{CF}_3$ ) 相对分子质量为 170.03, 沸点为  $-16.45^\circ\text{C}$ , 气化潜热较小, 为  $136.0\text{ J/g}$  ( $0.1013\text{ MPa}$ ), 临界温度为  $101.65^\circ\text{C}$ , 临界压力为  $2.926\text{ MPa}$ , 临界密度为  $573.0\text{ kg/m}^3$ .

$20^\circ\text{C}$  时饱和蒸汽压为  $0.389\text{ MPa}$ , 具有良好的热稳定性和化学稳定性, 无毒不燃, 无腐蚀性; 环境性能优越: 其 ODP 值为 0, GWP 值为 2050, 在大气中存留寿命短; R227ea 是一种良好的阻燃剂, 它的抑燃性优于 R125<sup>[8,9]</sup>. 相关纯质及混合制冷剂的基本物性参数见表 1, 其中  $t_b$  为标准沸点,  $t_p$  为泡点温度,  $t_d$  为露点温度,  $t_c$  为临界温度,  $p_c$  为临界压力,  $\Delta t$  为温度滑移. 对于混合工质, 其 GWP 的算法采用其组成的各单工质的 GWP 值乘以其质量分数之和

$$\text{GWP}_{\text{MIX}} = \text{GWP}_A \times w_A + \text{GWP}_B \times w_B + \text{GWP}_C \times w_C + \dots$$

式中:  $\text{GWP}_{\text{MIX}}$  为混合工质的 GWP 值;  $\text{GWP}_A$ 、 $\text{GWP}_B$ 、 $\text{GWP}_C$  为组分 A、B、C 的 GWP 值;  $w_A$ 、 $w_B$ 、 $w_C$  为组分 A、B、C 占混合工质的质量分数.

通过采用 NIST<sup>[10]</sup> 提供的 REFPROP 7.0 数据库 (已将 R161 的物性导入数据库) 计算, 得出了混合制冷剂 R161+R227ea 在不同的压力、不同的配比下, 温度滑移  $G_T$  (glide temperature) 随 R161 占二元混合物的质量分数  $w(\text{R161})$  的变化趋势, 如图 1.

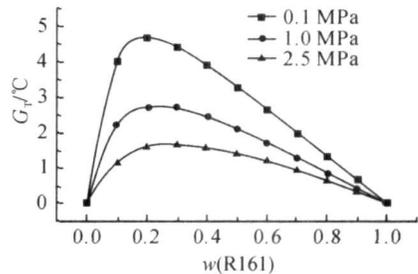


图 1 不同饱和压力下  $G_T$  随  $w(\text{R161})$  变化趋势

Fig. 1  $w(\text{R161})-G_T$  curves of different saturated pressure

从图 1 中可以看出, 在不同压力下,  $G_T$  随 HFC161 质量分数的变化均有一峰值, 压力越低, 峰值越高. 在上升段,  $G_T$  随 R161 的成分增加而迅速上升, 而在下降段, 其变化要相对缓慢. 因此, 在选择制冷剂的配比时, 为了使  $G_T$  较小, 同时又有较大的选择范围, R161 比例应该在 50% 到 100% 之间选择比较合适.

由于 R227ea 和 R161 这两种纯工质各有优缺点, 利用优势互补的原则组成新的环保混合制冷剂 R161+R227ea. 本文选取了一个配比 (质量分数比为 51.3:48.7), 分别从理论与实验两方面对它的循环性能进行了研究.

从表 1 可知, R161+R227ea 的 ODP 值为 0, 与 R407C 相同, 但其 GWP 值为 1004, 仅为 R407C 的 65.7%, 更加符合当前保护大气臭氧层、减少全球温室效应的环保要求新趋势.

表 1 不同纯质及混合制冷剂的基本物性参数

Tab. 1 Basic properties for different pure refrigerants and mixed refrigerant

工质	$t_b/^\circ\text{C}$	$t_p/^\circ\text{C}$	$t_d/^\circ\text{C}$	$t_{cr}/^\circ\text{C}$	$p_c/\text{MPa}$	相对分子质量	可燃性	毒性	GWP	ODP	$\Delta t/^\circ\text{C}$
R22	-40.81	—	—	96.15	4.990	86.47	无	无	1 700	0.04	0
R125	-48.09	—	—	66.02	3.618	120.02	无	无	3 200	0	0
R32	-51.65	—	—	78.11	5.782	52.02	微	无	580	0	0
R134a	-26.07	—	—	101.06	4.059	102.03	无	无	1 300	0	0
R161	-37.10	—	—	102.20	4.700	48.06	微	无	12	0	0
R227ea	-16.45	—	—	101.65	2.926	170.03	无	无	2 050	0	0
R407C	—	-43.81	-36.72	86.03	4.630	86.20	无	无	1 526	0	7.09
R161+ R227ea	—	-33.82	-30.60	102.30	4.474	73.86	无	无	1 004	0	3.22

通过调用 NIST 建立的 REFPROP 7.0 数据库中的子函数, 计算得出了 R161+ R227ea 混合工质和 R407C、R22 的饱和蒸汽压  $p$  随温度  $t$  的变化, 如图 2, 可以看出, R407C 和 R22 的饱和蒸汽压相当接近, 而 R161+ R227ea 混合工质的蒸汽压比 R22 低, 这是由于 R227ea 的饱和蒸汽压比较低。

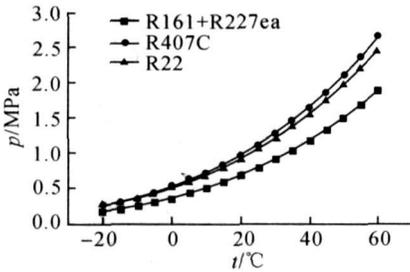


图 2 R161 混合工质与 R407C、R22 的饱和蒸汽压  
Fig. 2 Saturated vapor pressure curves of R161 mixture, R407C and R22

## 2 新型制冷剂理论循环性能计算

从热力性能与环境性能分析可以看出, 新混合制冷剂的 GWP 值与  $G_T$  都比 R407C 小很多, 且新混合制冷剂是二元混合制冷剂, 与 R407C 相比, 其基本环境性能优于 R407C, 下面从理论循环性能上对两种混合制冷剂进行计算与比较。

### 2.1 理论循环性能计算

采用如图 3 所示的循环进行分析, 循环性能计算如下: 压比  $P_R = p_c/p_e$ , 压缩机出口焓  $h_2 = h_1 + (h_{2s} - h_1)/\eta_{\text{is}}$ , 制冷量  $Q_0 = (h_1 - h_5) \cdot q_m$ , 耗功量  $P = (h_2 - h_1) \cdot q_m$ , 单位容积耗功量  $w_v = (h_2 - h_1)/v_1$ , 循环性能系数  $\text{COP} = Q_0/P$ . 其中,  $p_c$  表示冷凝压力,  $p_e$  表示蒸发压力,  $h$  表示各状态点的比焓值,  $\eta_{\text{is}}$  表示压缩机循环的总效率,  $q_m$  表示制冷剂质量流量,  $v_1$  表示比体积。

名义工况: 冷凝温度  $t_c = 54.4^\circ\text{C}$ , 过冷度 8.3  $^\circ\text{C}$ , 蒸发温度  $t_e = 7.2^\circ\text{C}$ , 过热度 11.1  $^\circ\text{C}$ 。

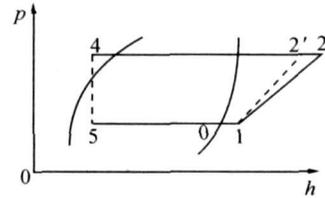


图 3 理论循环的  $p-h$  图

Fig. 3  $p-h$  diagram of theoretical cycle

通过采用 NIST 提供的 REFPROP 7.0 数据库计算, 在名义工况下, R227ea 的 COP 值比 R22 低, 为 R22 的 98%, 而 R161 的 COP 值为 R22 的 102%, 可见, 将 R161 和 R227ea 混合作为一种替代制冷剂, 既可以利用 R227ea 的阻燃性, 抑制 R161 的可燃性, 又可以利用 R161 较高的 COP 值, 在制冷的循环性能上弥补 R227ea 的不足. 因此, 在选择好适当配比的前提下, 这种新混合制冷剂具有替代 R22 的潜在可行性。

### 2.2 名义工况下的循环性能计算

调用 NIST 建立的 REFPROP 7.0 数据库中的子函数, 计算了 R161+ R227ea 按照 51.3 : 48.7 质量分数比和 R407C 在名义工况下的循环性能参数(计算中采用的压缩机模型的排气容积为 14.8  $\text{cm}^3$ , 转速为 2 880  $\text{r/s}$ ), 计算结果见表 2, 其中  $t_2$  表示排气温度。

### 2.3 其他不同工况下的循环性能计算

为了反映不同环境下的性能, 调用 NIST 建立的 REFPROP 7.0 数据库中的子函数, 计算了 R161+ R227ea 按照 51.3 : 48.7 质量分数比和 R407C 在其他不同工况下的循环性能参数, 计算结果见表 3。

由表 2、3 可知, 在名义工况下, R227ea+ R161 计算所得的 COP 值稍高于 R407C 计算所得的 COP, 而排气温度低于 R407C 的排气温度, 尤其是在低温工况下更明显, 这对于系统在低温环境下运行更为有利, 然而, R227ea+ R161 的制冷量与耗功均要小于 R407C, 其中制冷量只有 R407C 的 75%。对于压比, 两者相差并不大。

表2 R407C与R227ea+R161在名义工况下的循环性能参数

Tab. 2 Cycle performance of R407C and R227ea+R161 at standard condition

制冷剂	COP	$Q_0/W$	$P/W$	$t_2/^\circ\text{C}$	$w_v/(kJ\cdot m^{-3})$	$p_c/\text{MPa}$	$p_e/\text{MPa}$	$P_R$
R407C	2.464	2.146	870.79	90.73	3.938	0.65	2.26	3.587
R227ea+R161	2.539	1.597	629.24	82.60	2.934	0.46	1.65	3.587

表3 不同工况下两种制冷剂的循环性能参数

Tab. 3 Cycle performance of two refrigerants at different condition

制冷剂	工况		COP	$Q_0/W$	$P/W$	$w_v/(kJ\cdot m^{-3})$	$t_2/^\circ\text{C}$	$P_R$
	$t_e/^\circ\text{C}$	$t_c/^\circ\text{C}$						
R227ea+R161	40	-10	2.298	938.13	408.25	1.745	71.7	4.64
	40	0	3.054	1406.59	460.56	2.571	67.2	3.22
	40	10	4.223	2025.45	479.62	3.662	63.5	2.32
	50	-10	1.806	836.95	463.45	1.581	83.5	5.96
	50	0	2.329	1265.70	543.47	2.340	79.2	4.14
	50	10	3.072	1834.30	597.06	3.343	75.5	2.98
R407C	40	-10	2.278	1301.31	571.15	2.415	80.6	4.54
	40	0	2.964	1884.88	635.93	3.445	74.8	3.24
	40	10	4.087	2704.53	661.74	4.889	69.5	2.34
	50	-10	1.785	1161.99	650.93	2.188	93.7	5.83
	50	0	2.257	1695.03	751.00	3.131	88.0	4.16
	50	10	2.970	2445.97	823.54	4.457	82.8	3.00

从其他工况下的计算结果表明,在相应的工况下,所得结论与名义工况下相似,R227ea+R161的COP比R407C高1%到3%,但是其制冷量只有R407C的72%~75%。

为了检验用新型混合制冷剂R161+R227ea替代R407C后在实际应用中的效果,在原有的新型混合制冷剂循环性能实验台上进行了实验测试。

### 3 实验

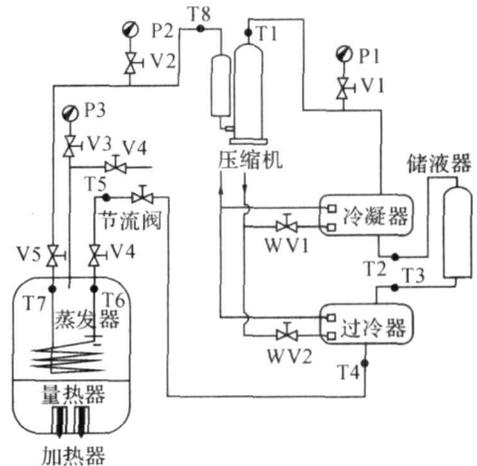
在按GB/T 5773-2004所搭建的电量热器制冷剂性能测试台上(如图4所示),对这种新的混合制冷剂与所替代的制冷剂进行了测试。实验装置详细介绍及步骤参见文献[4,7]。为了便于比较,在系统中分别充灌了R407C和R161+R227ea混合制冷剂进行实验。

#### 3.1 样品

R227ea和R161浙江蓝天环保科技股份有限公司提供,纯度分别为99.99%、99.7%,实验用之前没有经过进一步的提纯;R407C由浙江蓝天环保科技股份有限公司提供。

#### 3.2 实验结果及分析

为了分析制冷剂变工况下的循环性能,需要对制冷剂在不同冷凝温度及不同蒸发温度下进行实验测试,因此,除名义工况外,还对过冷度取8℃,过热



P1~P3 压力表;T1~T8 热电偶与 PT100 热电阻;V1~V5 截止阀;WV1~WV2 水阀

图4 实验装置流程图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

度取11℃,  $t_c$  分别取45、50、54.4℃,  $t_e$  取-10、-5、0、5、10℃等工况进行了实验研究。图5~8给出了各个工况下的实验结果。

从图5、6中可以看出,R161+R227ea的制冷量和耗功均低于同工况下R407C的制冷量和耗功,是R407C的75%左右,这是由于新混合工质中R227ea的单位容积制冷量非常低,但从图7中看出,R161+R227ea循环COP值与R407C非常接近,部分工况下COP还比R407C高,两者的差别在

5% 以内. 循环性能中, R161+ R227ea 的突出优势表现在它的排气温度相对较低, 比 R407C 的排气温度低 5 °C 左右.

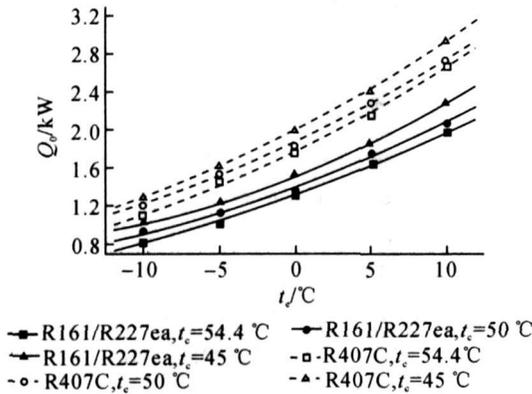


图 5 R161+R227ea、R407C 在不同冷凝温度下制冷量随蒸发温度的变化

Fig. 5  $Q_0$  of R161+R227ea and R407C varies with  $t_e$  at different  $t_c$

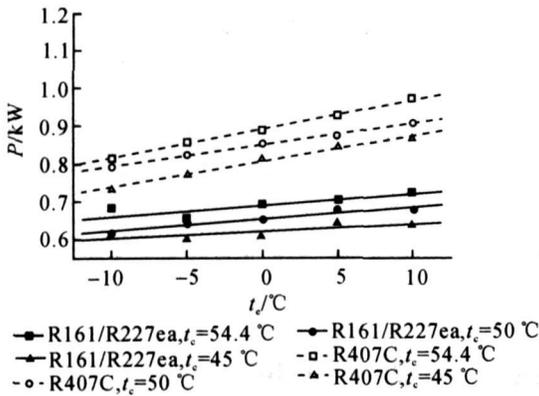


图 6 R161+R227ea、R407C 在不同冷凝温度下耗功量随蒸发温度的变化

Fig. 6  $P$  of R161+R227ea and R407C varies with  $t_e$  at different  $t_c$

### 4 结 论

(1) R161+ R227ea 混合制冷剂 ODP 值为 0, GWP 值小于 R407C, 不会破坏大气臭氧层, 也有利于减小全球温室效应, 是环境“友好”的制冷工质; 温度滑移值也小于 R407C.

(2) R161+ R227ea 的制冷量为 R407C 的 75%, 但考虑到 R161+ R227ea 的 GWP 仅为 R407C 的 65.7%, 因此, 为了获得相同的制冷量, 尽管要增加制冷剂用量, 但在环境性能方面, R161+ R227ea 仍然有一定的优势.

(3) R161+ R227ea 的排气温度低于 R407C;

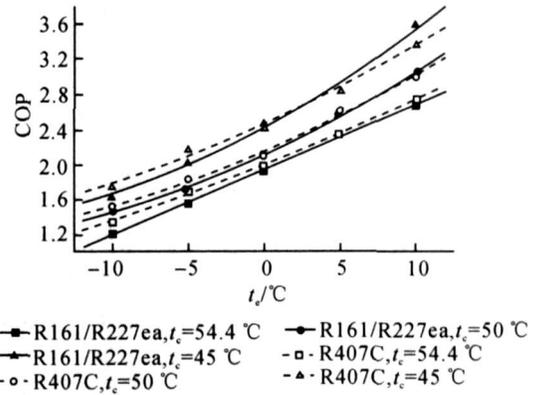


图 7 R161+R227ea、R407C 在不同冷凝温度下 COP 随蒸发温度的变化

Fig. 7 COP of R161+R227ea and R407C varies with  $t_e$  at different  $t_c$

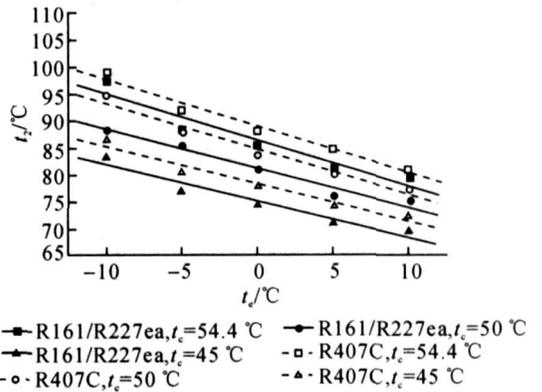


图 8 R161+R227ea、R407C 在不同冷凝温度下排气温度随蒸发温度的变化

Fig. 8  $t_2$  of R161+R227ea and R407C varies with  $t_e$  at different  $t_c$

(4) 为了解决 R161+ R227ea 的制冷量和耗功小于 R407C 的不足, 用增加混合物中 R161 的比例, 以及利用 R161 具有较高的单位容积制冷量和较高 COP 这个优势来改进 R161+ R227ea 的循环性能, 但是必须保证 R161 在爆炸极限范围之外.

(5) R161+ R227ea 的 COP 与 R407C 相比较差别不大, 但是 R161+ R227ea 的制冷量和耗功要小于 R407C, 这是 R161+ R227ea 的不足之处. 由于单位容积制冷量偏低, 在实际系统中, 应该采用排气量相对较大一点的压缩机, 且必须增加制冷剂的使用量, 这也是下一步的研究方向.

### 参考文献 (References):

[1] CALM J M, DOMANSKI P A. R 22 replacement status [J]. *ASHRAE Journal*, 2004, 46(8): 29-39.

[2] 陈斌, 陈光明. R407C、R410A 系统热力性能研究综述 [J]. *制冷*, 2003, 22(3): 24-30.

- CHEN Bin, CHEN Guang-ming. Recent researches on thermal performance of R407C and R410A system [J]. **Refrigeration**, 2003, 22(3): 24-30.
- [3] 宣永梅, 陈光明, 陈斌. 一种替代 HCFC-22 新型替代制冷剂的实验研究[J]. **工程热物理学报**, 2004, 25(2): 201-204.
- XUAN Yong-mei, CHEN Guang-ming, CHEN Bin. Experimental study as a new alternative refrigerant to HCFC-22 [J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2004, 25(2): 201-204.
- [4] XU AN Yong-mei, CHEN Guang-ming. Experimental study on HFC-161 mixture as an alternative refrigerant to R502 [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2005, 28(3): 436-441.
- [5] HAN Xiao-hong, CHEN Guang-ming, LI Chang-shen, et al. Isothermal vapor-liquid equilibrium data for the binary mixture refrigerant pentafluoroethane (R125) + fluoroethane (R161) at 265.15, 275.15, 283.15, 293.15, 303.15 and 303.15 K with a recirculating still [J]. **Journal of Chemical Engineering Data**, 2006, 51(4): 1232-1235.
- [6] 张锐. 新型替代制冷剂爆炸极限理论与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- ZHANG Rui. Experimental and theoretical of the explosion limits of the new refrigerant [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [7] 韩晓红, 朱志伟, 孙洁, 等. 新型三元混合制冷剂 R32/R125/R161 替代制冷剂 R407C 的实验研究[J]. **浙江大学学报: 工学版**, 2007, 41(2): 337-341.
- HAN Xiao-hong, ZHU Zhi-wei, SUN Jie, et al. Experimental study of ternary mixture R32/R125/R161 as alternative refrigerant to R407C [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2007, 41(2): 337-341.
- [8] 王兆华, 沈永年, 宋世亮. 含 R227ea 的混合制冷剂替代 R22 研究[J]. **能源工程**, 2005(2): 35-39.
- WANG Zhao-hua, SHEN Yong-nian, SONG Shi-liang. Study on R227ea mixtures in replacement of R22 [J]. **Energy Engineering**, 2005(2): 35-39.
- [9] 田贯三, 马一太, 杨昭. 含有阻燃组元的可燃制冷剂爆炸极限的研究[J]. **爆炸与冲击**, 2003, 23(3): 225-229.
- TIAN Guan-san, MA Yi-tai, YANG Zhao. The explosion limit of the flammable refrigerants containing non-flammable components [J]. **Explosion and Shock Waves**, 2003, 23(3): 225-229.
- [10] NIST. REFPROP standard reference database 23. NIST Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures. Version 7.0 [S]. USA: Thermophysics Division, National Institute of Standards and Technology, 2002.

下期论文摘要预登

## 适合正交空时编码连续相位调制系统的 信道估计算法

赵民建, 林科, 陈沪东

(浙江大学 信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对准静态瑞利衰落信道中突发模式的正交空时编码连续相位调制(OSTG-CPM), 利用双发多收空时编码连续相位调制系统的波形正交特性, 提出了一种基于数据辅助的信道估计算法. 接收天线将得到的信号同步地乘上每一发射天线对应的训练序列, 然后延迟一码元相加并除以该训练序列能量, 估计得到相应的信道衰落系数. 理论分析结果表明, 该算法的对数估计方差将随比特信噪比的增加而线性减小. 对不同训练序列长度、过采样倍数和成形滤波器进行仿真, 结果表明在准静态瑞利衰落信道中, 估计性能与理论分析结果吻合. 系统的误比特性能与理想情况相差不到 0.2 dB. 该算法适合 OSTG-CPM 系统在准静态衰落信道条件下的信道估计.

**关键词:** 正交空时编码连续相位调制(OSTG-CPM); 准静态衰落信道; 波形正交; 估计方差