

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.017

## 制冷剂类型对机载蒸发循环系统性能影响

彭孝天, 冯诗愚, 李超越, 王晨臣, 刘卫华

(南京航空航天大学航空学院飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室, 南京, 210016)

**摘要:** 为给直升机机载制冷循环系统制冷剂的选择提供借鉴, 首先以某直升机现有空调系统为例, 依据其系统及部件参数, 在 VapCyc 软件中建立制冷系统模型。然后选用不同制冷剂, 改变冷凝器侧入口空气温度、冷凝器/蒸发器侧风量及压缩机转速, 得到系统制冷系数 (Coefficient of performance, COP) 及制冷量。分析得到相同工况下, R134a 与 R1234yf 的 COP 值相差不大且最高, R407C 次之, R32 与 R410A 结果相近且 COP 值最低; 制冷量从高到低依次为 R32, R410A, R407C, R134a 和 R1234yf。在机载制冷系统研究初期, 应先满足系统制冷量的要求, 故认为在选择机载空调制冷剂时, 优先考虑 R410A 及 R407C。另外, 冷凝器侧风量、蒸发器侧风量及压缩机转速等参数对系统制冷量及 COP 均有较大影响, 设计制冷系统时应慎重确定。

**关键词:** 直升机; 蒸发循环制冷系统; 制冷剂; VapCyc

中图分类号: V19 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2020)03-0478-07

## Performance of Helicopter's Vapor Refrigeration System with Different Refrigerants

PENG Xiaotian, FENG Shiyu, LI Chaoyue, WANG Chenchen, LIU Weihua

(Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support, MIIT, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** In order to provide reference for the selection of refrigerant for helicopter refrigeration system, firstly, take an existing air conditioning system of a helicopter as an example. According to its system and component parameters, a refrigeration system model is established in VapCyc software. Then change the type of refrigerant, the system coefficient of performance (COP) and the cooling capacity with different inlet air temperature, condenser/evaporator side air volume, and compressor speed are obtained. Under the same conditions, the COP values of R134a and R1234yf are similar and the highest two, COP of R407C is the third one, COP of R32 is similar to that of R410A and their COP values are the lowest two. The cooling capacity is R32, R410A, R407C, R134a and R1234yf from high to low. In the early stage of the research on the airborne refrigeration system, the cooling capacity of the system should be satisfied firstly. Therefore, R410A and R407C should be given priority when selecting the refrigerant of the air conditioner. Parameters such as the air volume on the side of condenser, air volume on the side of evaporator, compressor speed and other parameters have great influence on the refrigerating capacity and COP of the system, which should be carefully determined.

**Key words:** helicopter; vapor cycle refrigeration system; refrigerant; VapCyc

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目; 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20170116)资助项目。

**收稿日期:** 2019-08-06; **修订日期:** 2019-09-07

**通信作者:** 冯诗愚, 男, 副教授, E-mail: shiyuf@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 彭孝天, 冯诗愚, 李超越, 等. 制冷剂类型对机载蒸发循环系统性能影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 478-484. PENG Xiaotian, FENG Shiyu, LI Chaoyue, et al. Performance of helicopter's vapor refrigeration system with different refrigerants[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 478-484.

随着直升机机载大功率电子设备逐渐增多,司乘人员对座舱舒适性期望越来越高,简单的通风和加温已不能满足用户需求,因此直升机加装制冷系统显得越来越紧迫,而蒸发循环制冷系统由于其性能系数高、无需发动机引气等优点,是未来直升机制冷系统的重要发展方向<sup>[1-7]</sup>。

制冷剂作为蒸发循环系统中能量传输的媒介,对该系统的性能起到十分重要的作用。目前,家用和汽车空调领域已对制冷剂的选择做了大量的研究工作。刘圣春等<sup>[8]</sup>从热物理性质、材料兼容性、溶油性及热工性能等方面比较了制冷剂 R1234yf 与 R32, R22 及 R717 的优劣,分析得到 R1234yf 比 R32 替代 R22 及 R717 的可能性更大。史琳等<sup>[9]</sup>对有望成为家用空调制冷剂 R22 替代物的 R32, R410A, R290 及 R161 进行了综合比较,认为 R32 替代 R22 最具前景。Daviran 等利用 Matlab 对汽车空调替代制冷剂 R1234yf 与 R134a 进行了仿真对比<sup>[10]</sup>,研究表明两种制冷剂性能相似。孙西峰等<sup>[11]</sup>对两种汽车空调替代制冷剂 CO<sub>2</sub> 及 R1234yf 的环保性能、空调性能、安全问题、使用成本及可持续发展等方面进行了比较,认为 CO<sub>2</sub> 是汽车空调最终必然采用的制冷剂。由此可见,家用/车用空调对制冷剂要求有差异,且研究者的结论也不尽相同。

直升机空调更类似于汽车空调,但其工作环境更恶劣,且对系统重量及结构尺寸的要求比车用空调更严格。而制冷剂对空调性能起着举足轻重的作用,因此需要针对机载制冷系统制冷剂的选择展开研究。

机载空调制冷剂应具备优良的热力学特性、热物理性质、安全性及环保性。本文选择常见制冷剂中最有影响力的 5 种方案进行对比: R134a, R32, R407C, R410A 及 R1234yf<sup>[12-14]</sup>。从热物理性质来看, R32 和 R410A 最优, R407C 次之, R134a 与 R1234yf 最差。安全环保方面, 5 种制冷剂 ODP 值均为 0; R1234yf 的 GWP 值最小、大气寿命最短; 但 R1234yf 及 R32 具有燃烧性。

目前,研究制冷剂对系统性能影响的方法多数是在给定冷凝温度及蒸发温度等设计条件,得到系统性能参数<sup>[15]</sup>。但当选择不同工质时,换热器及压缩机等部件参数会随之变化。而直升机空调限于安装空间,部件尺寸往往是确定的。本文利用 VapCyc 软件,在设计参数下确定换热器结构尺寸、压缩机及节流阀等部件参数,然后在选用不同制冷剂时,改变冷凝器侧入口空气温度、冷凝器/蒸发器侧风量及压缩机转速,得到系统制冷系数(Coefficient of performance, COP)及制冷量,分析制冷剂类型对机载制冷循环的影响。

## 1 计算模型

VapCyc 是一款蒸发循环制冷系统稳态仿真软件<sup>[16]</sup>,其原理是将独立部件构建为制冷系统,通过改变系统部件及环境参数,在系统 4 大部件遵守质量守恒定律、能量守恒定律及系统在稳态下工作等假设条件下,计算出系统在不同条件下的性能参数<sup>[17-18]</sup>。计算模型如图 1 所示。

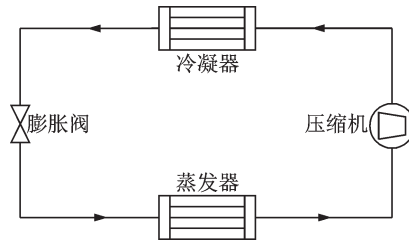


图1 计算模型图

Fig.1 Computation model diagram

### 1.1 模型验证

欧阳光<sup>[19]</sup>对一台电动汽车空调进行了测试,系统选择型号为 ZRH49KJE-TF5-600 的涡旋压缩机,外平衡式热力膨胀阀,冷凝器与蒸发器为设计的微通道换热器,制冷剂为 R407C。测试工况如表 1 所示。

表1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

参数	数值
蒸发温度,冷凝温度/°C	7.2, 54.4
室内干球,湿球温度/°C	27, 19.5
室外干球,湿球温度/°C	35, 27
室内换热器迎面风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	1 500
室外换热器迎面风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	3 300, 4 500, 5 500, 6 500

用 VapCyc 对上述工况仿真,得到系统制冷量和 COP 值,并与实验结果进行对比。验证结果如图 2, 3 所示。由图 2, 3 可见, VapCyc 的计算结果与实验值的误差基本都在 10% 以内,说明 VapCyc 仿

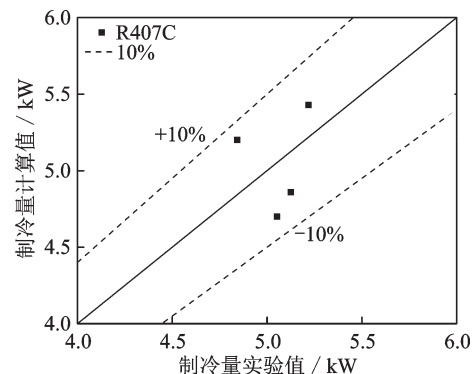


图2 制冷量验证结果

Fig.2 Test results of refrigeration capacity

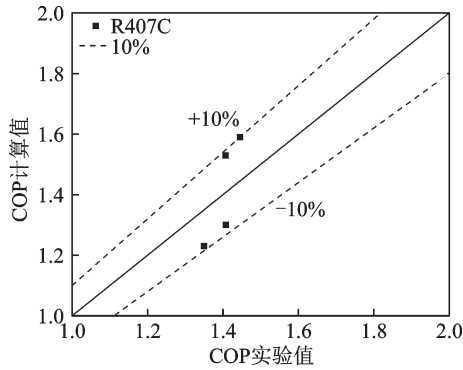


图3 COP验证结果

Fig.3 Test results of COP

真结果可靠。

## 1.2 参数设置

本文以某直升机现有空调系统为例,其系统部件参数如下。

### (1) 系统循环参数

系统循环参数如表2所示。

表2 系统循环参数

Table 2 System parameters

参数	数值
蒸发温度,冷凝温度/°C	7.2,54.4
蒸发温度/°C	7.2
冷凝温度/°C	54.4
过热度/°C	5
过冷度/°C	5.5

### (2) 空气参数

参考GBT 21361—2008《汽车用空调器》以及GB7725—2004《房间空气调节器》技术要求,冷凝器侧、蒸发器侧空气参数设置如表3所示。

表3 空气参数

Table 3 Air parameters

空气参数	冷凝器侧	蒸发器侧
温度/°C	35	27
相对湿度/%	60	60
风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2 500	1 000

### (3) 两器参数

为减轻蒸发器、冷凝器质量,降低系统代偿损失,两器均选用铝制微通道换热器。且限于直升机安装尺寸,为满足换热要求,冷凝器设计为4层,具体参数设置见表4。

### (4) 压缩机

压缩机类型为涡旋式,参数设置见表5。

### (5) 节流装置

节流装置类型为热力膨胀阀,其当量直径为1.1 mm。

表4 换热器结构参数

Table 4 Structural parameters of heat exchanger

参数	蒸发器	冷凝器
层数/层	2	4
每排扁管数/个	54	50
扁管长度/mm	200	350
扁管高度/mm	1.8	1.4
扁管宽度/mm	18	16
扁管间距/mm	7	6.4
每根扁管通道数/个	20	14
通道宽度/mm	0.8	0.7
通道长度/mm	1.0	0.8
翅片类型	百叶窗	百叶窗
翅片间距/mm	1.39	3.6
翅片厚度/mm	0.1	0.1
每英寸翅片数	17	6.87
百叶窗间距/mm	1.3	1
百叶窗长度/mm	5	5
百叶窗角度/(°)	27	30
翅片深度/mm	35	16

表5 压缩机参数

Table 5 Compressor parameters

参数	数值
容积/ml	34
容积系数	0.95
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 000
绝热效率	0.65
机械效率	0.95

## 2 计算结果

利用VapCyc建模,计算得到了选用不同制冷剂时,系统COP及制冷量随各参数的变化关系。

### 2.1 冷凝器侧进风温度

图4所示为COP及制冷量随冷凝器侧进风温度的变化关系,可以看出,在相同冷凝器侧进风温度下,R134a与R1234yf的COP值最高,R407C次之,R32与R410A的COP值最低,且制冷剂R134a与R1234yf、R32与R410A的COP变化曲线基本重合。制冷量从高到低依次为R32,R410A,R407C,R134a和R1234yf。

COP及制冷量随进风温度升高而降低,且下降速率接近线性。这是因进风温度增加,换热温差减小,冷凝器换热量减少,蒸发器入口焓值增大导致。

相同工况下,R134a与R1234yf虽然效率高,但制冷量太低;R32与R410A制冷量高,但系统效率低;R407C的性能处于中间<sup>[20]</sup>。由于直升机常在较高环境温度下工作,在制冷系统发展设计初期,

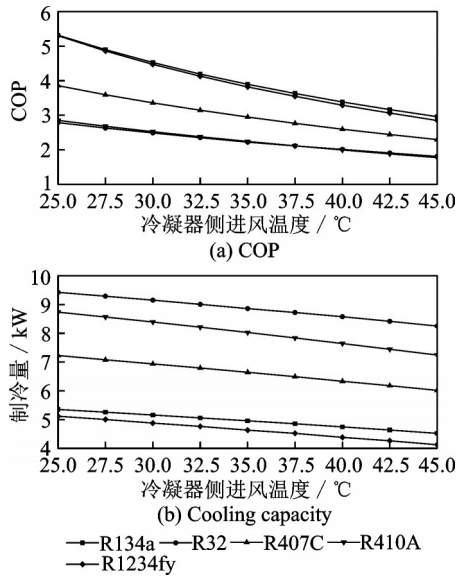


图4 COP及制冷量随冷凝器侧进风温度的变化曲线  
Fig.4 Effect of air temperature on side of condenser on COP and refrigeration capacity

应首先满足制冷量的要求。

### 2.2 冷凝器侧风量

COP及制冷量随冷凝器侧风量的变化关系如图5所示。

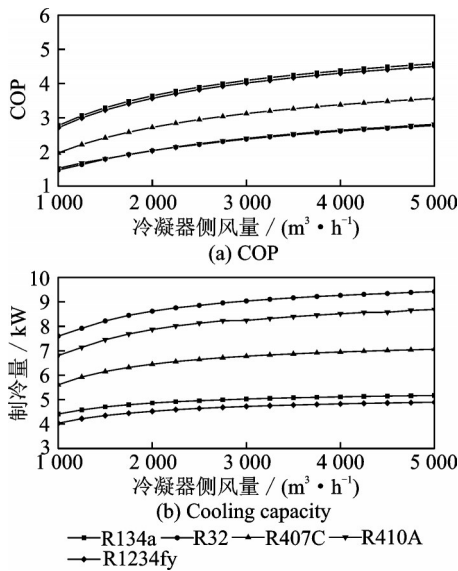


图5 COP及制冷量随冷凝器侧风量的变化曲线  
Fig.5 Effect of air volume on side of condenser on COP and refrigeration capacity

相同冷凝器侧风量下,COP从高到低依次为R134a,R1234yf,R407C,R32和R410A。并且制冷剂R134a与R1234yf的平均差值在2%左右,R32与R410A变化曲线基本重合。制冷量从高到低依次为R32,R410A,R407C,R134a和R1234yf。

系统COP及制冷量随冷凝器侧风量的增加均

逐渐增大,但增大速率逐渐减缓。这是因为冷凝器侧风量增大时,空气侧换热系数变大,如图6所示,但风量增加到一定程度后,换热系数增加趋势变慢,冷凝器侧换热量增加减缓。

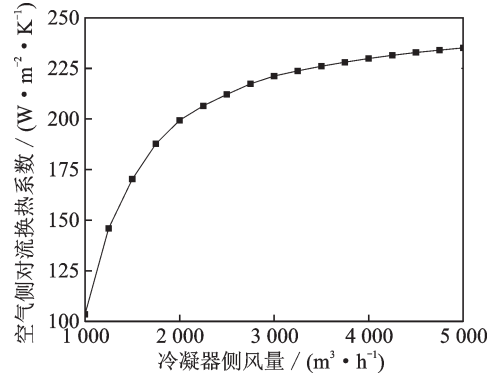


图6 空气侧换热系数随冷凝器侧风量的变化曲线  
Fig.6 Effect of air volume on side of condenser on heat transfer coefficient on air side

### 2.3 蒸发器侧风量

图7为COP及制冷量随蒸发器侧风量的变化关系,由图7可知,制冷剂R134a与R1234yf的COP平均差值在2%左右且最高,其次为R407C,R32与R410A的COP值最低,且蒸发风量大于600 m<sup>3</sup>/h时,两曲线基本重合。蒸发器侧风量相同时,制冷量从高到低仍依次为R32,R410A,R407C,R134a和R1234yf。

COP及制冷量随蒸发器风量的增加而升高,但增加趋势逐渐趋于平缓。这是因为随着蒸发风量的变大,空气侧换热系数增加变缓,如图8所示,蒸发器换热量增量也逐渐减少,导致系统COP及制冷量变化趋于平缓。

除此之外,可以看出蒸发器侧风量在600 m<sup>3</sup>/h左右时,COP及制冷量变化曲线出现突变点。所以在设计直升机制冷系统时,应慎重确定蒸发风量,避免系统性能不稳定。

### 2.4 压缩机转速

COP及制冷量随压缩机转速的变化关系如图9所示,压缩机转速相同时,制冷剂R134a与R1234yf的COP值相差不大且最高、R407C次之,R32与R410A变化曲线基本重合且最低。从制冷量大小来看,从高到低依次为R32,R410A,R407C,R134a和R1234yf。

压缩机设计转速较高时,可以减小压缩机的体积和重量。但随着压缩机转速升高,系统COP减小且下降速率逐渐趋于平缓。制冷量随压缩机转



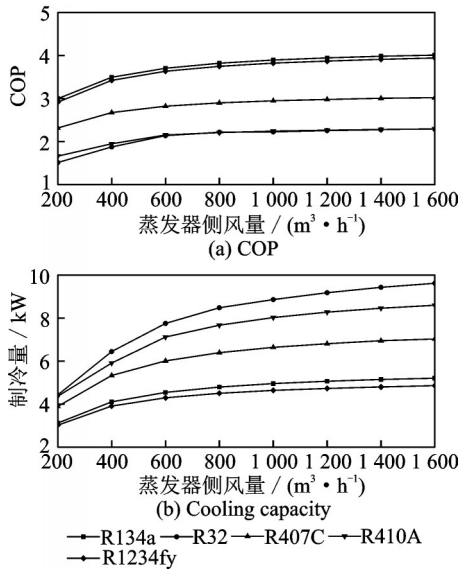


图7 COP及制冷量随蒸发器侧风量的变化曲线  
Fig.7 Effect of air volume on side of evaporator on COP and refrigeration capacity

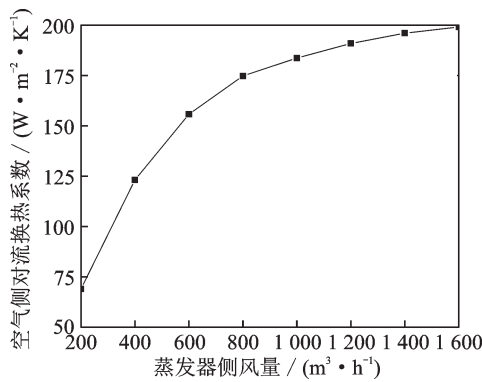


图8 空气侧换热系数随蒸发器侧风量的变化曲线  
Fig.8 Effect of air volume on side of evaporator on heat transfer coefficient on air side

速升高而逐渐增加,且升高的趋势也逐渐减缓。这是由于压缩机转速增大时,制冷剂流量增加,所以制冷量增大,但压缩机耗功也增加,致使COP逐渐减小。限于换热器及管道尺寸,当转速增大到一定值后,COP及制冷量变化减缓。

图10为系统制冷剂选择R407C时,在不同压缩机转速下,COP及制冷量随制冷剂充注量的变化关系。

可以看出,充注量增加时,制冷量变大,但变化趋势逐渐减缓。另外,制冷剂充注量为0.2 kg时,COP值最高,即质量流量存在最优值,所以在提高压缩机转速的同时,应调制冷剂的流量,以使系统性能最优。未来应探索电子膨胀阀在直升机载制冷系统中的应用。

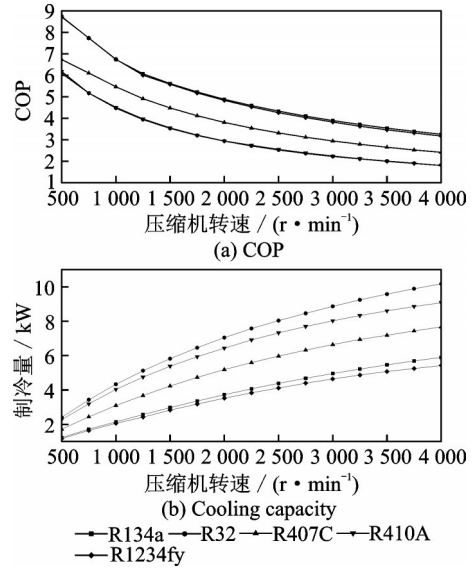


图9 COP及制冷量随压缩机转速的变化曲线  
Fig.9 Effect of rotating speed of compressor on COP and refrigeration capacity

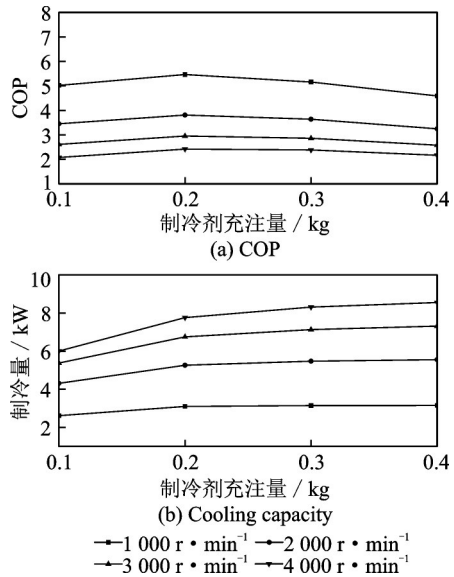


图10 COP及制冷量随制冷剂充注量的变化曲线(R407C)  
Fig.10 Effect of refrigerant charge on COP and refrigeration capacity (R407C)

### 3 结 论

本文利用 VapCyc 软件仿真得到了相同工况下,选择不同制冷剂时,制冷量和COP随系统参数的变化情况。得到以下结论:

(1)相同工况下,从COP大小趋势来看,R134a与R1234yf相差不大且最高,R407C次之,R32与R410A相差不大且COP值最低。从制冷量大小来看,趋势从高到低依次为R32,R410A,R407C,R134a和R1234yf。

(2)对于直升机空调来说,常在高温环境下工作,现阶段更看重的是制冷量满足要求而非系统效率;且R32具有可燃性,因此在选择机载空调制冷剂时,应优先考虑R410A及R407C。

(3)增加冷凝器侧风量,可以显著提高系统制冷效率及制冷量;因此在满足重量及耗功要求时,可选择功率较大的冷凝器侧风机。

(4)蒸发器侧风量在600 m<sup>3</sup>/h左右时,系统COP和制冷量变化曲线出现突变点,故在设计机载空调系统时,应慎重确定蒸发风量,避免系统运行性能不稳定。

(5)压缩机转速提高时,增加制冷剂质量流量可以增加制冷量,但COP先增后减,因此未来可探索电子膨胀阀在直升机机载制冷系统的应用。

#### 参考文献:

- [1] 张广林. 我国直升机产业的现状与发展前景[J]. 中国民用航空, 2009, 102(6): 30-33.  
ZHANG Guanglin. The status and prospects of China's helicopter industry [J]. China Civil Aviation, 2009, 102(6): 30-33.
- [2] 沈振, 吕人力. 轻小型直升机: 我国民用直升机市场的主力军[J]. 中国民用航空, 2014, 187(10): 58-59.  
SHEN Zhen, LYU Renli. Light and small helicopters: The mainforce in China civil helicopter market [J]. General Aviation, 2014, 187(10): 58-59.
- [3] 赵晓军, 封卫忠, 赵利利. 蒸发循环制冷技术在航空器上的应用[J]. 中国科技信息, 2015, 7(13): 55-57.  
ZHAO Xiaojun, FENG Weizhong, ZHAO Lili. Application of evaporative refrigeration technology in aircraft [J]. China Science and Technology Information, 2015, 7(13): 55-57.
- [4] 程立嘉. 直升机环境控制系统[J]. 航空科学技术, 1999(6): 35-36.  
CHENG Lijia. Environment control system for helicopters [J]. Aeronautical Science and Technology, 1999(6): 35-36.
- [5] 吴晓丽, 张兴娟, 袁修干. 直升机蒸气循环制冷系统技术现状与展望[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 57-59.  
WU Xiaoli, ZHANG Xingjuan, YUAN Xiugan. Current status and perspective of cooling system of helicopter using steam cycling technique [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(6): 57-59.
- [6] 夏亮, 林贵平. 蒸发制冷技术在直升机上的应用[J]. 直升机技术, 2009(1): 62-65.  
XIA Liang, LIN Guiping. Application of vapor-cycle refrigeration technology using on helicopter [J]. Helicopter Technique, 2009(1): 62-65.
- [7] 肖晓劲, 袁修干. 直升机空气循环制冷系统方案比较[J]. 制冷学报, 2004, 25(3): 56-59.  
XIAO Xiaojin, YUAN Xiugan. Scheme comparison of air cycle refrigeration system on helicopter [J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(3): 56-59.
- [8] 刘圣春, 饶志明. R1234yf与R32、R22和R717的性能对比分析[C]//全国制冷空调新技术研讨会. 北京: 中国制冷空调工业协会, 2012: 92-95.  
LIU Shengchun, RAO Zhiming. Performance comparison on R1234yf, R32, R22 and R717 [C]//Proceedings of National New Technology Symposium on Refrigeration and Air Conditioning. Beijing: CRAA, 2012: 92-95.
- [9] 史琳, 朱明善. 家用/商用空调用R32替代R22的再分析[J]. 制冷学报, 2010, 31(1): 1-5.  
SHI Lin, ZHU Mingshan. Re-analysis on using R32 to substitute for R22 in household/commercial air-conditioning [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(1): 1-5.
- [10] DAVIRAN S, KASAEIAN A, GOLZARI S, et al. A comparative study on the performance of HFO-1234yf and HFC-134a as an alternative in automotive air conditioning systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1091-1100.
- [11] 孙西峰, 韩杨. 汽车空调替代制冷剂的比较[J]. 制冷与空调, 2015, 15(5): 60-67.  
SUN Xifeng, HAN Yang. Comparison of automotive air conditioning alternative refrigerants [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2015, 15(5): 60-67.
- [12] 梅奎, 李明, 梁路军. R32和R410A循环特性对比研究[J]. 制冷与空调, 2011, 11(2): 56-59.  
MEI Kui, LI Ming, LIANG Lujun. Comparative research on the cycle performance of R32 & R410A [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2011, 11(2): 56-59.
- [13] 张光辉. 空调制冷剂的选择[J]. 山西建筑, 2010, 36(7): 160-161.  
ZHANG Guanghui. The choice of air-conditioner refrigerant [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(7): 160-161.
- [14] 牛永明, 刘军, 周永, 等. R1234yf及R1234ze(E)研究进展概述[J]. 制冷与空调, 2015, 15(11): 82-91.  
NIU Yongming, LIU Jun, ZHOU Yong, et al. General introduction of R1234yf and R1234ze(E) [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2015, 15(11): 82-91.
- [15] 孙维栋, 张鹏, 张昌. R1234yf汽车空调制冷剂的理论循环性能分析[J]. 制冷与空调, 2016, 16(10):

- 33-37.
- SUN Weidong, ZHANG Peng, ZHANG Chang. Performance analysis on theoretical cycle of R1234yf vehicle air-conditioning[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2016, 16 (10): 33-37.
- [16] RICHARDSON D H, JIANG H, LINDSAY D, et al. Optimization of vapor compression systems via simulation[C]//Proceedings of International Refrigeration and Air Conditioning Conference. America: Purdue University, 2002: 529-538.
- [17] AL-JOUDI K A. Performance evaluation of small scale air-conditioning system using R22 and alternative refrigerants[J]. Journal of Engineering, 2014, 20(1): 62-77.
- [18] ALABDULKAREM A, CRISTIANO M, HWANG Y, et al. Design and testing of a separate sensible and latent cooling packaged terminal air conditioning unit [C]//Proceedings of the ASME 2015 9th International Conference on Energy Sustainability. California: ASME, 2015: 1-7.
- [19] 欧阳光. 热泵型电动汽车空调系统性能实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 21-61.
- OUYANG Guang. Performance evaluation of heat pump air conditioning for electric vehicles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 21-61.
- [20] YAU Y H, PEAN H L. The performance study of a split type air conditioning system in the tropics, as affected by weather[J]. Energy & Buildings, 2014, 72: 1-7.

(编辑: 孙静)