

# Performance Comparison between Quasi-Secondary Compression Heat Pump System and Single Stage Compression Heat Pump System

Laisheng Si, Meiqin Ni, Jingyi Chang, Yucui Su, Wenjing Wu

College of Hydraulic and Energy Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu  
Email: 1745487417@qq.com

Received: Apr. 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: May 14<sup>th</sup>, 2019; published: May 21<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

The air source heat pump uses air as a low-level heat source, which has the advantages of convenient heat extraction, energy saving and environmental protection. However, when the air source heat pump is applied in the northern region, there are problems such as a decrease in heating performance at a low temperature. This paper mainly describes the low temperature characteristics of air source heat pump and quasi-secondary compression technology, and compares the heating performance of quasi-secondary compression heat pump system and single stage compression heat pump system in winter. The results show that the performance of the quasi-secondary compression heat pump system is better than that of the single-stage compression heat pump system when the ambient temperature is lower than  $-4.78^{\circ}\text{C}$ .

## Keywords

Air Source Heat Pump, Low Temperature Characteristics, Single Stage Compression, Quasi-Secondary Compression

---

# 准二级低温热泵机组与普通热泵机组的性能比较

司来胜, 倪美琴, 常静毅, 苏玉翠, 吴文婧

扬州大学, 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州  
Email: 1745487417@qq.com

收稿日期: 2019年4月29日; 录用日期: 2019年5月14日; 发布日期: 2019年5月21日

**文章引用:** 司来胜, 倪美琴, 常静毅, 苏玉翠, 吴文婧. 准二级低温热泵机组与普通热泵机组的性能比较[J]. 土木工程, 2019, 8(3): 728-734. DOI: 10.12677/hjce.2019.83085

## 摘要

空气源热泵以空气作为低位热源, 具有取热方便、节能、环保等优点。但是空气源热泵在北方地区应用时存在低温下供热性能下降等问题。本文主要阐述了空气源热泵的低温运行特性以及准二级压缩技术, 对比准二级压缩式热泵系统与单级压缩式热泵系统在冬季的供热性能。结果表明, 在环境温度低于 $-4.78^{\circ}\text{C}$ 时, 准二级压缩式热泵系统的性能优于单级压缩式热泵系统。

## 关键词

空气源热泵, 低温特性, 单级压缩, 准二级压缩

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

有许多报告显示, 顽固的高建筑能耗(BEC)是人类可持续发展面临的主要全球挑战之一[1] [2]。2018年, 我国建筑能耗已达社会总能耗的33%, 其中, 空调和采暖能耗占建筑能耗的40%~50% [3]。空气源热泵技术是回收和利用低位空气热能的有效手段之一, 研究和推广应用空气源热泵技术对于节约能量、提高社会效益、促进生产发展具有重要意义[4] [5]。但是空气源热泵在环境温度较低时存在着制热量不足、制热系数降低、排气温度升高等问题, 这些问题严重限制了空气源热泵技术在低环温地区的推广使用。许多学者[6] [7] [8] [9] [10]的研究表明, 采用准二级压缩技术是解决空气源热泵低温适应性的有效途径, 不过与普通热泵系统相比, 性能提升多少有待研究。

## 2. 空气源热泵低温运行特性分析

普通空气源热泵机组进行设计的时候, 通常采用静态设计方法, 即热泵机组在设计阶段只考虑了标准工况下(环境温度为 $7^{\circ}\text{C}$ )的运行特性, 并未考虑机组的蒸发温度、制冷剂比容等参数的变化以及蒸发器结霜现象等, 导致机组对外界环境条件的变化缺乏有效的调节机制[10]。

普通空气源热泵的工作原理如图1所示, 在制热工况下, 热泵的运行性能状况可以用制热系数(COP)来表示:

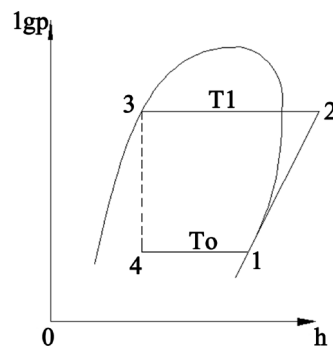


Figure 1. Common heat pump working principle pressure map

图1. 普通热泵工作原理压焓图

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_0} \tag{1}$$

其中： $T_1$  为冷凝温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_0$  为蒸发温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $COP$  为热泵制热系数。

由公式(1)可知，在热用户末端温度不变即冷凝温度不变的情况下，蒸发温度越低，热泵的制热系数  $COP$  越小，即输入相同功率的能量，所能得到的热量越小，说明了普通空气源热泵机组制热性能随蒸发温度的降低而降低。

普通空气源热泵的压缩机采用单级压缩，假设压缩机内制冷剂的压缩过程为等熵过程，且流动状态为一维均匀流动，则压缩机的制冷剂质量流量的计算公式如下：

$$m_{com} = \lambda \frac{V_{th}}{v_{suc}} \tag{2}$$

其中： $v_{suc}$  为制冷剂气体在压缩机吸气口的比容， $\text{m}^3/\text{kg}$ ； $\lambda$  为压缩机输气系数； $V_{th}$  为压缩机输气量， $\text{m}^3/\text{min}$ 。

压缩机输气系数的计算公式如下：

$$\lambda = \lambda_v \cdot \lambda_p \cdot \lambda_T \cdot \lambda_D \tag{3}$$

其中： $\lambda_v$  为压缩机容积系数； $\lambda_p$  为压缩过程压力系数； $\lambda_T$  为压缩机温度系数； $\lambda_D$  为压缩机泄露系数。

从公式(2)、(3)中可看出，在冷凝温度不变的情况下，压缩机制冷剂流量与制冷剂比容成反比，与蒸发温度成正比，低温工况下制冷剂比容升高会降低压缩机吸气量，同时较低的蒸发压力也对压缩机输气系数产生不良影响，这都是导致普通空气源热泵机组制热量下降的因素，并且由于压缩机内制冷剂的质量流量减少，蒸发压力降低，压缩机的压缩比增大，造成排气温度过高，压缩机高温保护程序频繁启停，不仅导致机组制热量大幅下降，而且会对压缩机造成机械损害。

### 3. 准二级压缩式热泵技术

普通空气源热泵在运行时当环境温度降低，系统的蒸发温度降低，会出现如上所述的压缩机压缩比增大，出现压缩机排气温度过高、润滑油的润滑能力显著下降等问题，导致机组实际供热量下降，严重时机组无法正常运行[11]。因此，研究人员对单级压缩机进行了改进，出现了准二级压缩式热泵技术。准二级压缩式热泵技术，即喷气增焓技术，其压缩过程由低级压缩、补气、高级压缩组成，与普通空气源热泵不同的是从冷凝器出来的制冷剂分为主辅两路：辅路的低温制冷剂在过冷器中吸收主路的高温制冷剂的热量，降低压缩机的排气温度；辅路制冷剂蒸汽有效补偿了低温环境引起的主路减小的制冷剂流量，

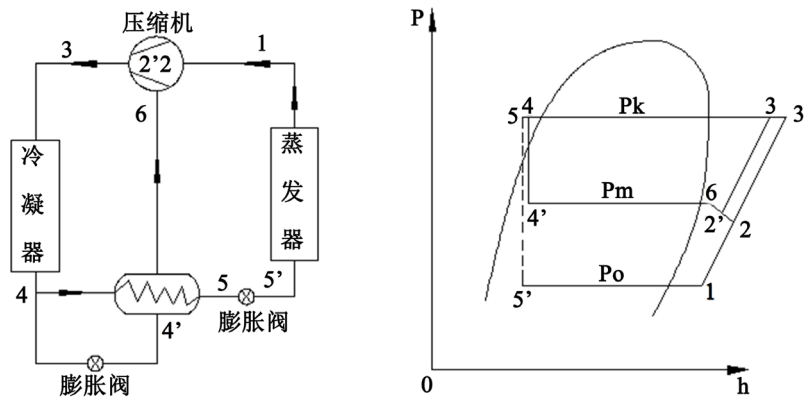


Figure 2. Jet booster heat pump system with economizer  
图 2. 带经济器的喷气增焓热泵系统

提高系统的制热性能,是目前能够较好的解决空气源热泵在低温下运行时供热性能下降的方案[12]。准二级压缩式热泵的结构简单、初投资低,因此应用广泛[13]。带经济器的系统蒸发器流量和中间喷气流量分别由两个节流阀单独控制,互不耦合,系统调节容易且喷气口压力低于排气压力,不会产生回流[14],其系统原理图如图2所示。

## 4. 两种热泵机组的测试研究及测试结果分析

### 4.1. 两种机组的测试研究

本文在环境温度分别为 $-16^{\circ}\text{C}$ 、 $-12^{\circ}\text{C}$ 、 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $7^{\circ}\text{C}$ 的情况下对普通热泵机组与准二级低温空气源热泵机组从制热量、耗功及机组 COP 三个方面进行性能比较。空气源热泵系统主要由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器等组成,其系统原理图见图3。本次测试机组内部参数如下:

压缩机:准二级低温热泵机组:两台谷轮带经济器的喷气增焓涡旋式压缩机,型号为 VR144KS-TFP,额定功率为 10.1 kW,制冷剂为 R410A,额定电压为 380 V (50 Hz);普通热泵机组:两台普通涡旋式压缩机,型号为 SH295-7,额定功率为 10.8kW,制冷剂为 R410A,额定电压为 380 V (50 Hz)。

水侧换热器:高效壳管式换热器 BL26-28D,换热面积  $3.61\text{ m}^2$ 。

空气侧换热器:翅片管换热器,换热面积  $172\text{ m}^2$ ,连续整体式套铝翅片,紫铜管为  $\Phi 10\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ,铝片厚  $0.115\text{ mm}$ ,片距  $2.0\text{ mm}$ ,外形尺寸为  $2100\text{ mm} \times 905\text{ mm} \times 1324\text{ mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高)。

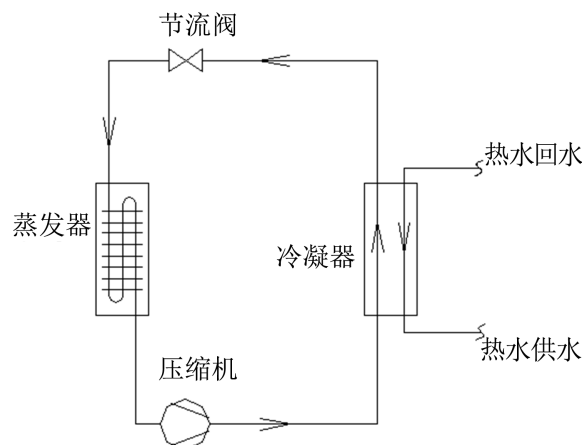


Figure 3. Air source heat pump system flow chart  
图 3. 空气源热泵系统流程图

测试在低温环境实验室中进行,实验室可实现最低 $-40^{\circ}\text{C}$ 的低温人工环境,控制精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,可通过加湿器保持环境相对湿度为 60%,满足本测试的模拟室外环境温湿度的控制要求。测试时,模拟室外环境温度分别为 $-16^{\circ}\text{C}$ 、 $-12^{\circ}\text{C}$ 、 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $7^{\circ}\text{C}$ ,热泵出水温度为 $37^{\circ}\text{C}$ 。

### 4.2. 测试结果分析

#### 4.2.1. 机组制热量随环境温度的变化

图4为机组制热量随环境温度的变化曲线,图中可看出,准二级低温热泵机组与普通热泵机组的制热量均随着环境温度的降低而降低,但是在相同的环境温度下,准二级低温热泵机组的制热量高于普通热泵机组,并且,随着环境温度的下降,准二级低温热泵机组与普通热泵机组的制热量之差在逐渐增大。

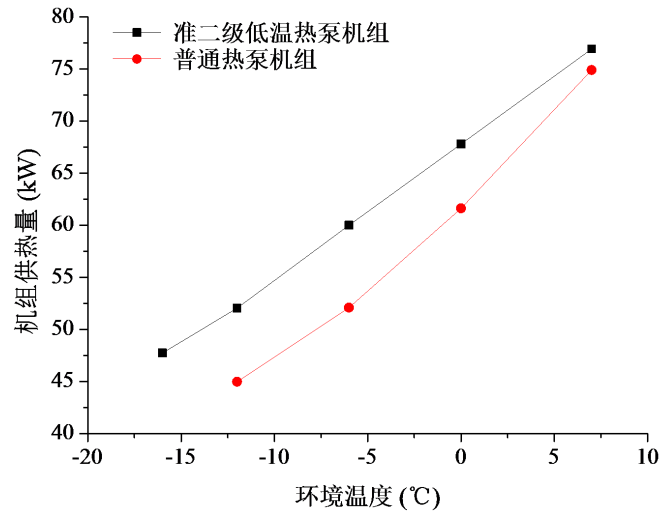


Figure 4. The coefficient of heat generation of the unit with the ambient temperature  
 图 4. 机组制热量随环境温度的变化曲线

#### 4.2.2. 机组耗功随环境温度的变化

图 5 为机组耗功随环境温度的变化曲线，图中可看出，准二级低温热泵机组与普通热泵机组的耗功均随着环境温度的降低而降低，但是在相同的环境温度下，准二级低温热泵机组的耗功大于普通热泵机组。这是由于压缩机输入功率与制冷剂流量和排气焓值与吸气焓值之差成正比，低温环境下制冷剂流量的下降幅度大于排气焓值与吸气焓值之差的上升幅度，所以准二级低温热泵机组与普通热泵机组的耗功均随着环境温度的降低而降低；但是在相同的环境温度下，准二级低温热泵机组的制冷剂流量和排气焓值均大于普通热泵机组，因此准二级低温热泵机组的耗功大于普通热泵机组的耗功。

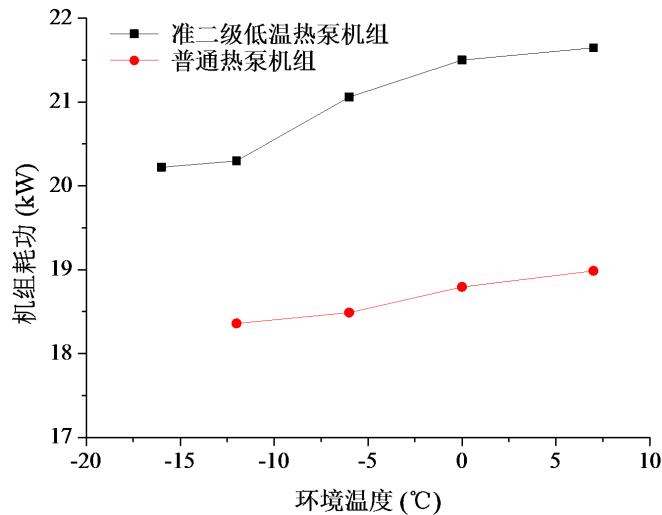


Figure 5. The curve of unit power consumption with ambient temperature  
 图 5. 机组耗功随环境温度的变化曲线

#### 4.2.3. 机组 COP 随环境温度的变化

图 6 为机组 COP 随环境温度的变化曲线，图中可看出，准二级低温热泵机组与普通热泵机组的 COP 均随着环境温度的降低而降低，当环境温度小于-13°C时，普通热泵机组无法正常运行，但在-4.78°C时准

二级低温热泵机组与普通热泵机组 COP 相等, 当环境温度大于 $-4.78^{\circ}\text{C}$ 时, 普通热泵机组的 COP 大于准二级低温热泵机组, 此时准二级低温热泵机组增加的补气量所增加的制热量小于其引起的耗功量的增加。

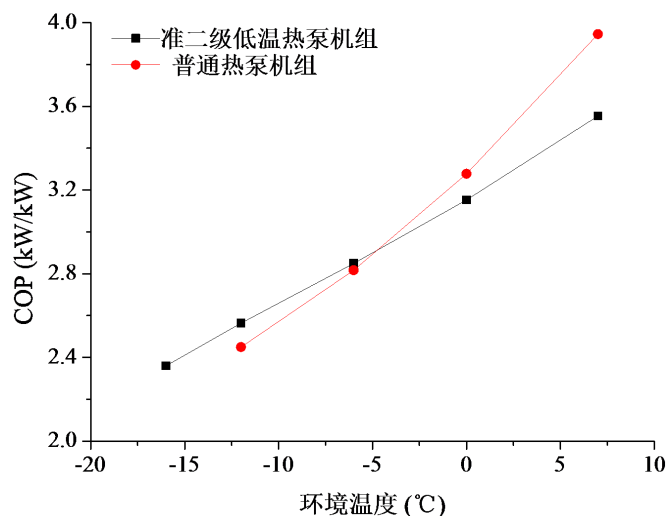


Figure 6. The curve of unit COP with ambient temperature

图 6. 机组 COP 随环境温度的变化曲线

## 5. 结论

本文阐述了空气源热泵的低温特性, 将准二级低温热泵机组和普通热泵机组进行性能比较, 得出以下结论:

1) 普通空气源热泵在冷凝温度不变的情况下, 随着蒸发温度的下降, 机组制热性下降, 压缩机内制冷剂的质量流量减少, 蒸发压力降低, 压缩机的压缩比增大, 造成排气温度过高, 压缩机高温保护程序频繁启停, 不仅导致机组制热量大幅下降, 而且会对压缩机造成机械损害;

2) 准二级低温热泵机组通过中间补气的喷气增焓技术, 以单台压缩机实现两级压缩, 节省投资和运行费用, 性价比较高;

3) 准二级低温热泵机组和普通热泵机组的制热量和耗功均随环境温度的下降而下降, 但在相同的环境温度下, 准二级低温热泵机组的制热量和耗功均大于普通热泵机组;

4) 准二级低温热泵机组和普通热泵机组的 COP 随环境温度的下降而下降, 但当环境温度小于 $-4.78^{\circ}\text{C}$ 时, 准二级低温热泵机组的性能优于普通热泵机组。

## 基金项目

扬州大学大学生科技创新基金资助 X20180429。

## 参考文献

- [1] Urge-Vorsatz, D., Cabeza, L.F., Serrano, S., Barreneche, C. and Petrichenko, K. (2015) Heating and Cooling Energy Trends and Drivers in Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **41**, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>
- [2] Urge-Vorsatz, D., Petrichenko, K., Staniec, M. and Eom, J. (2013) Energy Use in Buildings in a Long-Term Perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **5**, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.05.004>
- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2018 [M]. 北京: 北京工业出版社, 2018.
- [4] 陈汝东. 制冷技术与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.

- [5] Xu, D., Qi, T. and Zhen, L. (2017) Energy and Exergy Analysis of Solar Integrated Air Source Heat Pump for Radiant Floor Heating without Water. *Energy & Buildings*, **142**, 128-138.
- [6] 张超, 吕新刚, 陈建平, 张亚伟, 乔婧. 低环温空气源热泵技术研究新进展[J]. 建筑节能, 2015, 43(10): 22-26.
- [7] 罗鸣, 谢军龙, 沈国民. 风冷热泵冷热水机组除霜研究[J]. 建筑热能通风空调, 2002(21): 15-17.
- [8] Yang, D., Lee, K. and Song, S. (2006) Modeling for Predicting Frosting Behavior of a Fin-Tube Heat Exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **49**, 1472-1479.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.022>
- [9] 马最良, 姚杨, 姜益强. 热泵技术应用理论基础与实践[M]. 北京: 中国工业出版社, 2010.
- [10] 李艳. 空气源热泵机组低温运行特性研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
- [11] 王伟, 马最良, 姚杨. 空气源热泵机组新型低温运行工况稳态特性研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(10): 28-31.
- [12] 李春艳, 马广兴, 梁春阳. 严寒地区喷气增焐空气源热泵供暖系统实验研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 39-44.
- [13] Zhang, L., Jiang, Y.Q., Dong, J.K. and Yao, Y. (2018) Advances in Vapor Compression Air Source Heat Pump System in Cold Regions: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **81**, 353-365.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.009>
- [14] 胡青松, 吴玉庭, 马重芳. 适合严寒地区的先进热泵采暖技术[J]. 建设科技, 2016(2): 21-24.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)