

文章编号:0253-4339(2019)04-0017-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.04.017

# 三重回路空气源热泵热回收系统的热力性能分析

马安娜 马国远 王磊 周峰 姜明健 晏祥慧

(北京工业大学环境与能源工程学院 北京 100124)

**摘要** 为了提高大温差工况下空气源热泵系统的性能,本文提出一种三重回路空气源热泵系统的方案,并以回收建筑空调排风能量为基础,搭建了三重回路系统性能测试平台,实验测试了单回路与三重回路热泵系统在冬、夏季不同室外温度工况下的性能。结果表明:无论冬、夏季工况,三重回路系统在各工况下的整体性能均明显高于单回路系统,且随室内外温差的增大,三重回路系统可明显改善传统空气源热泵存在的压比过大、系统性能急剧降低等问题。冬季工况下,三重回路系统 COP 增长率可达 1.88,室内外温差为 40 °C 时,三重回路比单回路 COP 提高 54.8%;夏季工况下,三重回路 COP 增长率可达 89.8%,室内外温差为 13 °C 时,三重回路比单回路 COP 提高 74.6%。

**关键词** 空气源热泵;排风热回收;三重回路系统;COP

**中图分类号**:TB61<sup>+</sup>1;TQ051.5

**文献标识码**:A

## Thermodynamic Performance Analysis of a Triple-loop Air-source Heat Pump Heat Recovery System

Ma Anna Ma Guoyuan Wang Lei Zhou Feng Jiang Mingjian Yan Xianghui

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China)

**Abstract** To improve the performance of an air-source heat pump system under large temperature difference conditions, this paper proposed a triple-loop air-source heat pump system scheme. An energy recovery performance test platform was set up according to the exhaust energy recovery in a public building air-conditioning system. The performances of the single- and triple-loop heat pump systems were tested through experiments under different outdoor-temperature conditions in winter and summer. The results show that the overall performance of the triple-loop system was significantly higher than that of the single-loop system under all operating conditions. With the increase in the indoor and outdoor temperature difference, the triple-loop heat pump system could significantly minimize the problems of excessive compression ratio and system performance degradation of the traditional air-source heat pump. Under winter conditions, the increase rate of the coefficient of performance (COP) of the triple-loop system reached up to 1.88. When the indoor and outdoor temperature difference was 40 °C, the COP of the triple-loop system was 54.8% higher than that of the single-loop system. Under summer conditions, the increase rate of the COP of the triple-loop system reached 89.8%. When the indoor and outdoor temperature difference was 13 °C, the COP of the triple-loop system was 74.6% higher than that of the single-loop system.

**Keywords** air-source heat pump; exhaust heat recovery; triple-loop system; COP

当前我国的能源形势较为严峻,自 2010 年起,全国年平均能源消费增长率已达 4.2%<sup>[1]</sup>,据统计,2014 年全年能源消费总量已达 42.6 亿吨标准煤。随着经济发展和城镇化的加快,建筑能耗在我国能源消费结构中所占的比例越来越高。2015 年,我国建筑能耗占社会能源消费总量的 27.8%<sup>[2]</sup>。世界八大环境问题中,位列前三位的温室气体排放问题、臭氧

层破坏问题、酸雨问题均与建筑暖通空调领域的能源消耗直接相关,这就意味着建筑能耗是节能潜力最大的用能领域之一。

空气源热泵是以空气为低温热源,通过少量高位电能驱动,将空气中的低位热能提升为高位热能并加以利用的装置,具有高效节能、环保无污染等特点<sup>[3]</sup>,是热泵系统中较为常见的形式。但空气源热

基金项目:国家自然科学基金(51776004)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51776004).)

收稿日期:2018-07-10;修回日期:2018-10-17

泵的应用范围受外界条件的影响较大,尤其在某些北方寒冷地区,冬季室外温度很低时,制热量可能会受到很大影响,不仅无法满足用户的采暖要求,而且随着室内外温差的增大,压缩机压比也会逐渐增加,导致 COP 急剧下降,排气温度迅速升高,使压缩机无法正常运行甚至损坏<sup>[4]</sup>。

近年来,针对传统空气源热泵在低温环境下使用所面临的问题,一些国内外专家学者提出了不同的解决方案。马国远等<sup>[5]</sup>提出带辅助进气口的涡旋压缩机准二级热泵系统,并采用过冷器进行系统循环辅助,结果表明,在-15 ~ -10 °C 的低温环境,该系统仍具备较高的供暖能力,制热性能显著。许树学等<sup>[6]</sup>提出一种单机双腔并联压缩式系统,通过建立系统循环的理论模型,与普通单级压缩系统相比,双工作腔并联系统的制冷量、制热量分别提高 29.6% 和 29.2%。柴玉鹏等<sup>[7]</sup>提出以 R134a 为制冷剂的涡旋压缩机闪蒸器补气制冷/热泵系统,结果表明该系统的制热及制冷性能与单级系统相比均有较大提高。

D. H. Kim 等<sup>[8-10]</sup>对以 R134a/R410A 为制冷剂的复叠式热泵系统建立了数学模型,找出适应该系统的最佳理论中间压力。王林等<sup>[11]</sup>提出一种单级压缩循环与复叠式压缩循环运行相结合的空气源热泵系统,可以在室外环境温度为-30 ~ 40 °C 范围内运行。张丽等<sup>[12]</sup>提出带有分凝器的小型自复叠制冷循环,分析了 CO<sub>2</sub> 浓度、冷凝器出口蒸气干度及分凝器高压侧出口温度对带有分凝器的自复叠制冷循环性能的影响。

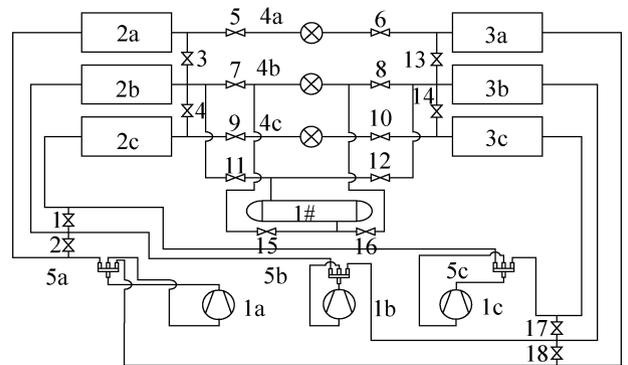
由于室内空调排风相对于室外环境具有一定的热量或冷量,因此回收空调排风的能量逐渐成为建筑节能领域的热点。近年来,很多学者在提高传统空气源热泵性能的基础上,逐渐将空气源热泵系统用于公共建筑空调系统排风能量回收。吴毅平等<sup>[13]</sup>提出以空调排风作为低温热源的空气源热泵系统,并分析了该系统的性能及节能性。赵岐华<sup>[14]</sup>提出将排风的能量用于空气源热泵室外换热器的换热,以加强其换热强度,并分析了该系统的性能及电能的消耗。李晓磊等<sup>[15]</sup>提出新型太阳能-低温热回收空气源热泵联合供暖系统,针对系统集热侧的设计,建立了太阳能保证率、单位面积流量等关键参数的计算方法,并以实验为基础,测得集热器单位面积流量的最优值。Chen A. 等<sup>[16]</sup>将热泵热回收系统与转轮热回收和板式热回收系统进行对比,结果表明,热泵热回收系统具有更大的节能潜力。G. V. Fracastoro 等<sup>[17]</sup>研究发现热泵系统采用建筑排风作为热源的工作效率要远高于使用地源的情况,且该系统的安装成本更低。

为进一步提高大温差环境下空气源热泵系统的性能,本文提出一种适合于寒冷地区的新型热泵供暖方式——三重回路空气源热泵系统,并以回收建筑空调排风能量为基础,搭建了三重回路系统性能测试平台,通过实验的方法对三重回路热泵系统的性能进行测试,研究三重回路系统的换热特性及其性能改进程度。

## 1 系统循环机理

系统主要包括新风换热器、排风换热器、储液罐、节流阀、四通换向阀、截止阀和压缩机等。

空气源热泵系统如图 1 所示。由图 1 可知,通过调节 5a~5c,可改变系统制冷剂的流向,以满足冬夏季对系统的不同需求。夏季工况下,开启截止阀 1~4、7、12~14、16~18,关闭其余截止阀,此时系统为单回路系统。制冷剂循环方向为:压缩机→排风换热器→储液罐→节流阀→新风换热器→压缩机。工作过程:压缩机吸入低温低压的制冷剂蒸气,压缩成高温高压蒸气后送至排风换热器,经排风换热器与冷却介质放热后,冷凝成高温高压液体,再经节流阀节流成低温低压液体,进入新风换热器中吸热汽化,汽化后的低温低压制冷剂再被压缩机吸入,形成完整的循环系统。整个循环过程中,制冷剂在新风换热器中从室外新风吸热,向新风制冷,再将新风排向室内,之后再回收室内排风中的冷量,使制冷剂在排风换热器放热,冷凝为高压液体,整体实现能量回收,提高能源利用率。



1a~1c 压缩机;2a~2c 新风换热器;3a~3c 排风换热器;  
1# 储液罐;4a~4c 节流阀;5a~5c 四通换向阀;  
1~18 截止阀。

图 1 空气源热泵系统

Fig.1 The air source heat pump system

在冬季工况时,只需调节 3 个四通换向阀,同时关闭截止阀 7、12、16,开启 8、11、15,其余截止阀状态不变,便可由制冷模式变为制热模式。制冷剂循环方

向为:压缩机→新风换热器→储液罐→节流阀→排风换热器→压缩机。工作过程类似,只是制冷剂由室外新风冷却,在新风换热器中放热凝结,向新风制热,再将新风排向室内,回收室内排风中的热量,使制冷剂在排风换热器受热蒸发,实现能量回收。

如图 1 所示,当截止阀 1~4、13、14、17、18 均处于关闭状态,系统为三重回路空气源热泵系统,每个回路形成独立的循环系统。与单回路热泵系统相比,由于三重回路系统的每个回路中制冷剂流量相对较少,且各回路制冷剂间不存在相互交换的问题,使系统的管路也相对更简单。且仅需调节四通换向阀,便可实现冬、夏系统循环模式的转换。

## 2 实验方法与系统性能评价分析

单回路与三重回路空气源热泵系统中使用的换热器相同,新风换热器和排风换热器均采用铜管-铝翅片式换热器,两换热器结构尺寸相同,等高放置,在空气流通方向各有 3 排管路,翅片为波纹形整张铝制套片,换热器的配套风机为轴流式风机,额定功率为 72 W。

实验在焓差实验室中进行,由焓差室提供恒温恒湿的环境条件。焓差实验室主要由两个测试室(室内和室外)、空气再处理系统(包括制冷设备、电加热设备和电加湿设备)、风速测试装置及计算机测控系统(包括数字功率计、PID 控制器和数据采集器)组成。室内测试室模拟空调系统排风风道,提供排风空气条件;室外测试室模拟空调系统新风风道,提供新风空气条件。故实验中将排风换热器安装在室内测试室,新风换热器、储液罐和制冷剂泵等其余部件均安装在室外测试室。在进行实验前,通过查阅相关规范<sup>[18-19]</sup>确定各实验工况,最终选择的三重回路空气源热泵热回收实验工况为:冬季工况,室内温度为 20 ℃,室外温度分别为 -20、-15、-10、-5、0、5、10、15 ℃;夏季工况,室内温度为 27 ℃,室外温度分别为 30、33、35、38、40 ℃。

为更直观地评价三重回路空气源热泵系统的性能,本文以单回路系统作为对比对象,依次分析两个系统在相同条件下压缩机功率  $W$ 、系统平均压比及性能系数 COP 的变化趋势。因此实验过程中,需控制各工况下新风换热器和排风换热器的迎面风速、风量(空气的质量流量)、制冷剂质量流量及制冷剂种类保持不变;单回路和三重回路系统使用同一套换热器,传热面积相同;循环制冷剂均为 R410A,系统的总制冷剂流量保持不变;压缩机均采用同一型号的 1 HP 转子式压缩机,频率为 50 Hz,适用该压缩机的最

佳制冷剂为 R410A。

各回路压缩机的吸排气压力可由数据采集器进行采集;因只有单回路涉及并联问题,所以只有单回路循环时需计算系统的平均压比;压缩机功率及换热器风机功率可由数字功率计进行测量;系统换热量为排风换热器的换热量,因此  $h_1$ 、 $h_2$  为排风换热器进出口空气的焓值,在新风换热器进、出口处、排风换热器进、出口处各设置 6 个取样器,通过数据采集器采集新风换热器和排风换热器的进、出口干湿球温度,进而可计算空气的进、出口焓值和密度;通过风速测试装置可测量新风换热器和排风换热器的进、出口风速,换热器的进出口面积可通过产品说明书查询,进而计算换热器进、出口空气的质量流量。具体计算公式如下:

$$\text{平均压比} = \sum p_b / \sum p_a \quad (1)$$

$$Q = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$\dot{m} = \rho v A \quad (3)$$

$$\text{COP} = Q / (W_1 + W_2 + \sum W_n) \quad (4)$$

## 3 实验结果与分析

利用上述公式,可依次分析单回路与三重回路系统在冬夏季室外温度的变化下压缩机功率、系统平均压比及 COP 的变化趋势。

### 3.1 冬季运行模式

由于空气源热泵系统易受气候条件的影响,所以在我国冬季室内外温差较大的北方寒冷地区的使用和推广受到了严重影响。针对以上因素,对空气源热泵提出了三重回路系统改进方案,因此在进行冬季运行模式实验时,室外的温度主要以寒冷地区冬季至春季时期内的部分温区为主。制热模式下,新风换热器仅由室外新风冷却,此冷却过程不包括新风与室内回风空气的混合,新风被加热后再引入室内供热,而排风换热器的加热则由室内的排气完成,然后直接传送到室外。

冬季工况下,单回路与三重回路热泵系统的平均压比、压缩机运行功率  $W$  及 COP 随室外温度变化的对比如图 2 所示。

由图 2 可知,当室内温度保持 20 ℃ 不变时,随着室外温度逐渐降低,单回路与三重回路系统的平均压比与压缩机功率均逐渐降低,而 COP 则明显增大。

由图 2(a)可知,当温差从 5 ℃ 升至 40 ℃,三重回路系统的平均压比与单回路系统相比整体有明显的降低,单回路系统与三重回路系统的平均压比分别降低 0.51、0.31,原因是单回路系统中新风被逐渐加

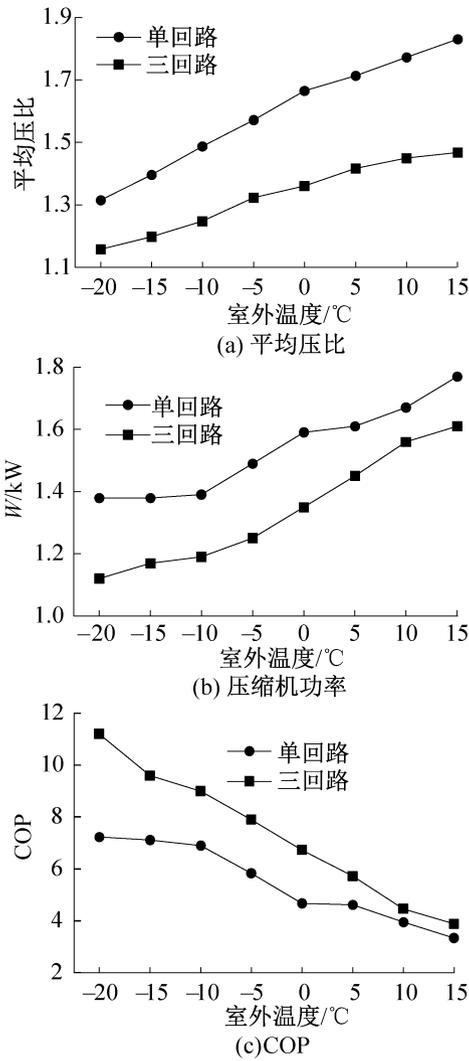


图 2 冬季工况下单回路系统与三重回路系统性能对比  
Fig.2 Performance comparison of single-loop system and triple-loop system under winter condition

热,导致新风与换热器中制冷剂的传热温差越来越小,传热效果越来越差;而三重回路系统中各回路之间形成了不同的梯度,提高了新风与各换热器间的传热效果,改善了换热器的传热温差分布,因此单回路系统平均压比降低的趋势明显高于三重回路系统。两种回路的平均压比随室内外温差增大均呈降低趋势,这与传统的使用室外空气作为热源的热泵系统不同,因该系统使用室外新风作为新风换热器的冷源,使用室内排风作为排风换热器的热源,而进入排风换热器的空气温度远高于进入新风换热器的空气温度,所以该系统的压比会随室内外温差的增大而减小。

由图 2(b)可知,随室外温度的降低,三重回路系统与单回路系统的功率均呈下降趋势,分别降低 30.4% 和 22%。因为该系统的总功率是新风换热器风机功率、排风换热器风机功率与压缩机功率的总

和,而实验过程中,新、排风换热器的迎面风速、风量不变,故新、排风换热器的风机功率不变,系统功率与压缩机输入功率的变化趋势一致。又因排气热回收系统的特征是当室外空气温度变化时,压缩机功率主要受冷凝器(或蒸发器)负荷变化的影响,符合该运行工况下的压缩机的运行特性<sup>[20]</sup>。

由图 2(c)可知,随室外温度的降低,单回路与三重回路系统的 COP 均升高,这与传统热泵系统相反,同样与该系统的运行特性有关。由于该系统中新风换热器由室外新风处理,而室外温度的降低会导致冷凝温度的降低,因此该系统 COP 会随室外空气温度的降低而升高。当温差为 5、40 °C,三重回路系统与单回路系统的 COP 分别相差 0.54、3.96,增长率分别达 1.88 和 1.16。因相对于单回路系统,三重回路系统的整体换热效果更明显;且三重回路系统的压缩机功率不仅整体均低于单回路系统,整体下降趋势也较高于单回路系统。故三重回路系统的性能系数整体优于单回路系统,且室内外温差越大,三重回路系统的优势越明显,在室内外温差为 40 °C 时,三重回路比单回路 COP 高 54.8%。

### 3.2 夏季运行模式

夏季工况不同室外温度条件下,单回路系统与三重回路系统各性能的对比如图 3 所示。

由图 3 可知,当室内温度保持 27 °C 不变时,随着室内外温差的增大,单回路与三重回路系统的平均压比均呈下降趋势但幅度很小,两系统的 COP 均明显增大。

由图 3(a)可知,三重回路系统的平均压比均低于单回路系统,且随着室外温度升高,三重回路与单回路系统的平均压比均有所降低,原因同冬季工况。又因夏季工况下室内外温差相对冬季工况较小,三重回路系统对换热器的传热温差分布改善效果不明显,所以单回路与三重回路系统平均压比下降的幅度均较小,分别降低 0.06、0.07。

由图 3(b)可知,随室外温度的升高,两回路系统的压缩机功率均呈上升趋势,分别升高 25.0%、28.0%,但三重回路系统的功率均低于单回路系统,符合系统压缩机的实际运行情况。

由图 3(c)可知,两系统的 COP 均随室内外温差的增大而升高,这是因为在夏季工况下,室外温度的升高会导致蒸发温度升高。当室内外温差为 3、13 °C 时,三重回路系统与单回路系统的 COP 分别相差 0.56、1.67,增长率分别为 89.8% 和 49.3%。分析可知,由于夏季工况室内外温差相对较小,虽然采用三重回路系统改变了换热器的传热温差分布,但两个回

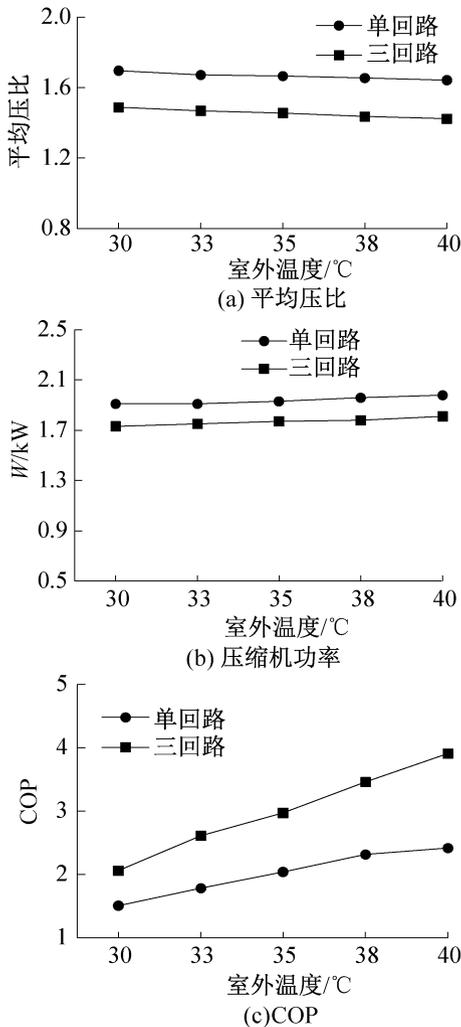


图 3 夏季工况下单回路系统与三重回路系统性能的对比  
Fig.3 Performance comparison of single-loop system and triple-loop system under summer condition

路系统的整体换热量相差较小,所以影响 COP 的主要原因是三重回路系统的总功率较小,与冬季工况相同。又因三重回路系统压缩机功率的整体上升趋势高于单回路系统,导致三重回路系统的 COP 增长率较高。当室内外温差为 13 °C 时,三重回路比单回路 COP 提高 74.6%。

## 4 结论

为了改善传统空气源热泵在我国北方寒冷地区使用的性能,同时解决我国能源形势紧张的问题,本文提出了三重回路空气源热泵热回收系统,充分利用建筑空调系统的排风能量,提高能源利用率。

针对冬夏季不同的室外环境温度区间,对研制的热泵样机单回路系统与三重回路系统的运行特性进行了测试,通过对比分析两种回路系统在制热与制冷模式下各性能的变化趋势,得出如下结论:

1) 无论冬季或夏季工况,三重回路系统的整体性能均明显高于单回路系统,且随室内外温差的增大,三重回路系统对于传统空气源热泵存在的压比过大、系统性能急剧降低等问题均有明显改善。

2) 冬季室内外温差较大,冬季工况下系统的 COP、压缩机功率和系统平均压比均有较明显的波动,主要原因是三重回路系统中各回路之间形成了不同的梯度,相比于单回路系统,提高了新风与各换热器间的传热效果,改善了换热器的传热温差分布,而夏季工况室内外温差较小,所以三重回路系统对换热器的传热温差分布几乎没有起到改善的作用。

3) 随室内外温差的增大,冬季工况下,三重回路系统与单回路系统 COP 增长率分别达 1.88 和 1.16,压缩机功率分别降低 30.4% 和 22%,且在室内外温差为 40 °C 时,三重回路比单回路系统 COP 提高 54.8%;夏季工况下,三重回路系统与单回路系统 COP 增长率分别为 89.8% 和 49.3%,压缩机功率分别升高 25.0% 和 28.0%,室内外温差为 13 °C 时,三重回路 COP 比单回路提高 74.6%,这也说明采用三重回路系统的热回收利用率高。

### 符号说明

- $\sum p_b$  —— 单回路系统压缩机总排气压力, kPa
- $\sum p_a$  —— 单回路系统压缩机总进气压力, kPa
- $Q$  —— 排风换热器换热量, kW
- $\dot{m}$  —— 排风侧空气质量流量, kg/s
- $h_1, h_2$  —— 排风换热器进、出口空气焓值, kJ/kg
- $\rho$  —— 排风侧空气密度, kg/m<sup>3</sup>
- $v$  —— 排风侧空气速度, m/s
- $A$  —— 排风侧排风换热器面积, m<sup>2</sup>
- COP —— 系统性能系数
- $W_1$  —— 新风换热器风机功率, kW
- $W_2$  —— 排风换热器风机功率, kW
- $\sum W_n$  —— 压缩机总功率, kW

### 参考文献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 (2015) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. (National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook (2015) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.)

[2] 赵丽丽. 我国建筑能耗现状分析 [J]. 住宅与房地产, 2016(30): 25. (ZHAO Lili. Analysis of the current status of building energy consumption in China [J]. Housing and Real Estate, 2016(30): 25.)

[3] 王洋浩, 王志华, 郑煜鑫, 等. 低温环境下空气源热泵

- 的研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2013, 34(5):47-54.(WANG Fenghao, WANG Zhihua, ZHENG Yuxin, et al. Research progress and prospect of air source heat pump in low temperature environment[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(5):47-54.)
- [4] 俞丽华, 马国远, 徐荣保. 低温空气源热泵的现状与发展[J]. 建筑节能, 2007, 35(3):54-57.(YU Lihua, MA Guoyuan, XU Rongbao. Current status and development of low temperature air-source heat pump[J]. Building Energy Efficiency, 2007, 35(3):54-57.)
- [5] 马国远, 邵双全. 寒冷地区空调用热泵的研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(1):17-21.(MA Guoyuan, SHAO Shuangquan. Research on air-conditioning heat pump in cold regions [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(1):17-21.)
- [6] 许树学, 马国远, 刘琦, 等. 单机双腔并联压缩式制冷/热泵系统的性能模拟研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(6):1-4, 34.(XU Shuxue, MA Guoyuan, LIU Qi, et al. Simulation study on single-machine two-chamber in-parallel compression refrigeration/heat pump system[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(6):1-4, 34.)
- [7] 柴玉鹏, 马国远, 许树学, 等. 带闪蒸器补气的 R134a 准二级压缩制冷/热泵系统实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(2):11-16.(CHAI Yupeng, MA Guoyuan, XU Shuxue, et al. Experimental research on quasi two-stage compression heat pump with flash tank vapor-injection using R134a[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(2):11-16.)
- [8] KIM D H, PARK H S, KIM M S. Optimal temperature between high and low stage cycles for R134a/R410A cascade heat pump based water heater system [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 47: 172-179.
- [9] KIM D H, PARK H S, KIM M S. The Effect of the refrigerant charge amount on single and cascade cycle heat pump system[J]. International Journal of refrigeration, 2014, 40: 254-268.
- [10] PARK H S, KIM D H, KIM M S. Thermodynamic analysis of optimal intermediate temperature R134a-R410A cascade refrigerant systems and its experimental verification [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 54(1): 319-327.
- [11] 王林, 陈光明, 陈斌, 等. 一种用于低温环境下新型空气源热泵循环研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(2):34-38.(WANG Lin, CHEN Guangming, CHEN Bin, et al. Cycle analysis of heating and refrigeration in new air-source heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(2):34-38.)
- [12] 张丽, 徐士鸣, 都萍, 等. 带有分凝器的小型自复叠制冷循环性能分析[J]. 制冷学报, 2015, 36(4):52-57.(ZHANG Li, XU Shiming, DU Ping, et al. Performance of a small-sized auto-cascade refrigerator with a fractionation heat exchanger [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(4):52-57.)
- [13] 吴毅平, 叶勇军, 寇广孝. 基于空调排风的空气源热泵的节能特性分析[J]. 制冷空调与电力机械, 2004, 26(5):26-28.(WU Yiping, YE Yongjun, KOU Guangxiao. Analysis of energy-saving characteristics of air source heat pump based on air conditioning exhaust [J]. Construction Machinery for Hydraulic Engineering & Power Station, 2004, 26(5):26-28.)
- [14] 赵岐华. 空气源热泵回收空调系统排风能量的节能利用探讨[J]. 制冷与空调(北京), 2014, 14(3):7-10.(ZHAO Qihua. The depth of energy-saving air source heat pump air conditioning based on exhaust air[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2014, 14(3):7-10.)
- [15] 李晓磊, 王勇. 太阳能-低温热回收空气源热泵联合供暖系统集热侧设计计算方法[J]. 暖通空调, 2016, 46(10):99-103.(LI Xiaolei, WANG Yong. Design and calculation method of heat collection side for combined heating system of solar and low temperature heat recovery air-source heat pump [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2016, 46(10):99-103.)
- [16] CHEN A, LIU H, RAN C, et al. Economic analysis on application of exhaust air heat recovery in existing public buildings in the severe cold regions [C]//International Forum on Energy, Environment Science and Materials. 2015.
- [17] FRACASTORO G V, SERRAINO M. Energy analyses of buildings equipped with exhaust air heat pumps (EAHP) [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(8):1283-1289.
- [18] 空气-空气能量回收装置: GB/T 21087—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.(Air-air energy recovery device: GB/T 21087—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.)
- [19] 采暖通风与空气调节设计规范: GB 50019—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.(Code for design of ventilation and air conditioning for mining: GB 50019—2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.)
- [20] FRACASTORO G V, SERRAINO M. Energy analyses of buildings equipped with exhaust air heat pumps (EAHP) [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(8):1283-1289.

#### 通信作者简介

马安娜, 女, 硕士研究生, 北京工业大学环境与能源工程学院, 18811716787, E-mail: 1030394743@qq.com. 研究方向: 制冷低温系统及其环保节能理论与技术。

#### About the corresponding author

Ma Anna, female, master degree candidate, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, +86 18811716787, E-mail: 1030394743@qq.com. Research fields: refrigeration cryogenic system and its environmental protection and energy saving theory and technology.