

# 空气源热泵的低温研究概述与市场前景

彭斌<sup>1</sup>, 王永强<sup>1</sup>, 吴武通<sup>2</sup>, 程俊超<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 浙江迦南科技股份有限公司, 浙江 温州 325000)

**[摘要]:** 空气源热泵系统拥有节能高效、安全环保等优点, 得到了越来越多的关注, 近几年在我国发展迅速, 市场潜力巨大。对空气源热泵系统的工作原理和优点做了简单的介绍, 对热泵系统的市场前景做了展望, 针对热泵在低温环境下的研究做了比较详细的总结, 并给出了各种方法的优缺点, 为热泵系统的低温工况研究提供一定的参考。

**[关键词]:** 空气源热泵; 低温环境; 热水器

中图分类号: TK114 文献标志码: A

文章编号: 1006-2971(2020)03-0009-09

DOI:10.16051/j.cnki.jsjjs.2020.03.002

## Low Temperature Investigation Overview and Market Prospect of Air Source Heat Pump

(PENG Bin<sup>1</sup>, WANG Yong-Qiang<sup>1</sup>, WU Wu-Tong<sup>2</sup>, CHENG Jun-Chao<sup>2</sup>)

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Zhejiang Canaan Technology Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** Air source heat pump system has the advantages of energy-saving, high efficiency, safety and environmental protection, which has attracted more and more attention. In recent years, it has developed rapidly in China and has great market potential. The working principle and advantages of air source heat pump system are briefly introduced, and the market prospects of heat pump system are prospected. The investigation of heat pump in the low temperature environment is summarized in detail, and the advantages and disadvantages of various methods are given, which can provide a reference for the investigation on the low temperature working conditions of heat pump system.

**Key words:** air source heat pump; low temperature environment; water heater

### 1 引言

我国工业的能源利用率低于世界的平均水平, 工业生产中的高温余热用于发电, 以废气和废水等形式存在的低品味余热较多<sup>[1]</sup>, 但回收效率低, 这是造成我国能源利用率低的主要原因, 同时也

反映出我国回收低品位余热的潜力较大。随着全球经济的快速发展, 导致能源问题和环境问题日益严重, 以及国家可持续发展战略、节能减排和绿色理念的日渐推广, 使得人们更加倾向于回收利用低品位余热<sup>[2]</sup>。针对我国能源方面所面临的能源利用率低及其所带来的经济性差和环境污染严重等, 应将节能减排、提高能源利用率置于优先发展的战略位置, 有效的解决我国能源问题面临的现状。热泵技术因安全环保、高效无污染等特

收稿日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275226, 51675254)

点可以回收低温余热并且可以减少化石燃料燃烧, 以前的低温余热回收主要利用有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle) 技术<sup>[3]</sup>, 热泵技术回收低温余热是在近几年发展起来的。热泵最早出现欧洲, 而我国在热泵行业的研究最早在天津大学, 在最近20年的研究中, 家用热泵的节能研究可以满足部分地区的供暖需求, 但热泵在回收低温工业余热方面的研究很少, 已有研究表明, 将热泵技术用于回收低温工业余热, 可减少温室气体的释放, 有利于保护环境<sup>[1]</sup>。近年来, 由于政府红利政策和煤改电工程的出现, 使得空气源热泵迎来了突破式的发展。

2008年12月17日, 欧盟议会决定, 将空气能认为是可再生能源, 因热泵技术可以高效的利用空气能。在日本该技术已是可再生能源范畴, 且政府的支持和补助对热泵的发展推动很大。2015年, 住建部发布了《空气能纳入可再生能源范畴的指导手册》提议将空气能热水器能纳入可再生能源范畴, 我国部分地区以将其归入可再生能源范畴。空气源热泵的主要动力是可再生能源空气, 而热泵技术被认为是最有效的利用可再生低温热的一种方式<sup>[4]</sup>。

随着我国人民居住条件的改善, 对生活热水的需求量迅速上升, 以及节能、环保意识的增强, 促进了空气源热泵热水器的发展, 同时空气源在干燥及供暖和制冷方面的研究也在增多。本文针对空气源热泵在低温工况下制热量的下降研究做了综述, 对不同的除霜方法做了比较, 分析了其优缺点, 并对空气源热泵在我国的应用前景做了展望。

## 2 工作原理及优点

### 2.1 工作原理

空气源热泵技术是一种节能、环保的技术, 其原理是逆卡诺循环。空气源热泵系统在空气中获取低温热源, 经系统高效转化后成为高温热源, 用来取暖或供应热水及干燥药品, 系统在供暖或供应热水及干燥的原理相同, 只是在冷凝器末端的换热连接方式不同。空气源热泵热水器工作时, 蒸发器从空气中吸收大量低温热源来蒸发传热工

质, 蒸发后的低温低压传热工质蒸气经压缩机压缩后变为高温高压的气体, 高温高压的气体通过冷凝器上端内管冷凝换热, 换热后的冷凝液从冷凝器内管下端流出, 而冷却水从下端进入套管冷凝器管间空腔, 经逆流换热后从冷凝器上端流出进入保温水箱, 温度升高的冷却水可以用于生活用水等, 冷凝后的传热工质通过膨胀阀回到蒸发器中, 再被蒸发, 如此的往复循环下去。

### 2.2 空气源热泵的理论循环

空气源热泵系统在运行时有各种不可避免的损坏, 而卡诺循环是理想的循环过程, 实际的循环与理想循环有一定的差距。在热泵系统的循环计算和分析中, 对实际的循环作适当的简化、假设, 将会使实际的循环处理起来比较方便, 也能表示实际循环的理论特征。

在空气源热泵系统中的假设如下:

(1) 基于某一特定的循环工质, 工质在压缩机中进行等熵过程;

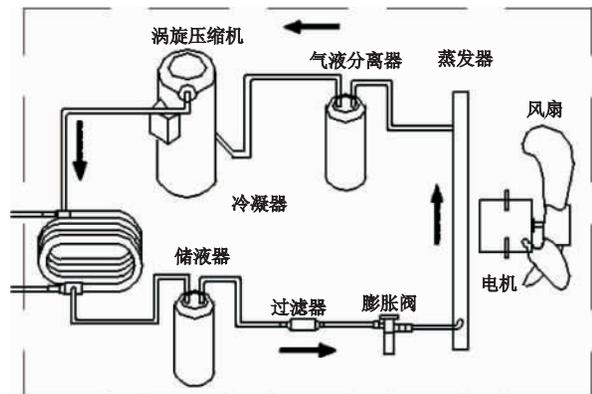


图1 空气源热泵热水器原理图

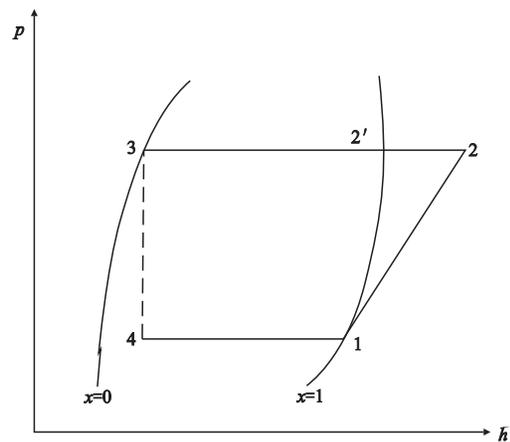


图2 基本理论压焓图

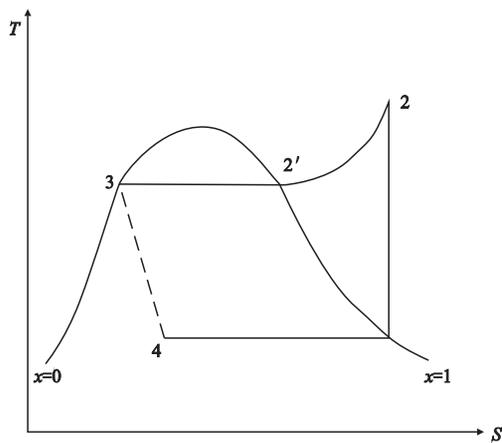


图3 基本理论温熵图

- (2) 在冷凝器中进行等压等温冷凝；
- (3) 在节流阀中进行绝热节流，等焓不变；
- (4) 从节流阀出来进入蒸发器中进行等压等温的蒸发，来完成一次理论循环。

所谓基本理论循环是指制冷剂工质在蒸发器出口为饱和气体，在冷凝器出口为过冷液体的循环，基本理论循环在压焓图和温熵图上的表示如下。

其中，1-2过程为工质在压缩机中的等熵压缩，2-2'-3过程为冷凝过程，3-4过程为节流过程，图中用虚线画出，4-1过程为蒸发器吸收空气中的低温热源而进行的等温等压吸热，机组完成过程1-2-2'-3-4-1来循环运行。

### 2.3 空气源热泵的优点

- (1) 节能省钱：节能效果好使得投资回报期短，与燃气、电热水器相比，全年费用最低。
- (2) 环保安全<sup>[5]</sup>：无污染物排出，对人体无害，具有良好的环保、社会效益。没有电热水器加热元件与水直接接触的漏电危险，没有燃气热水器的漏气、中毒危险<sup>[6]</sup>。
- (3) 缓解用电高峰：多组机组安装建立中央热水系统，可在晚上工作产生热水供白天用电高峰使用，起到缓解用电高峰的作用。
- (4) 装方便，使用寿命长：占地面积小、安装方便，对大中城市的高层建筑是个很好的选择；使用寿命长达10年以上，不受夜晚、阴天的影响，设备自动、稳定运行。

## 3 低温环境下热泵的研究

空气源热泵由于高效节能、绿色环保而受到

广泛的关注。而环境温度对空气源热泵的性能有很大的影响，在环境温度正常时系统运行可靠，但低温环境下系统的可靠性和制热量下降严重<sup>[7]</sup>。低温环境下，会使系统的蒸发温度降低，压缩比增大进而引起排气温度较高，使压缩机超负荷工作，致使压缩机频繁启停，严重时甚至损坏压缩机。此外，压缩机吸气比体积增大，输气系数减小；蒸发器表面容易结霜导致换热器传热效果大大减弱，机组制热量减少，性能下降<sup>[8]</sup>。这使得空气源热泵的推广使用受到了一定的阻力，因此，怎样将其优势在低温环境中发挥出来成为学者们研究的重点。通过学者们的不断努力，空气源热泵在低温环境下的制热量和稳定性等性能可以通过提高蒸发侧的除霜和延缓结霜技术的有效途径得到缓解和改善<sup>[9]</sup>。

### 3.1 喷气增焓

补气增焓系统是采用两级节流中间喷气技术，采用闪蒸器进行气液分离，实现增焓效果。它通过中低压时边压缩边喷气混合冷却，然后高压时正常压缩，提高压缩机排气量，达到低温环境下提升制热能力的目的。

陈晓宁<sup>[10]</sup>等在寒冷地区沈阳对喷气增焓热泵机组的运行特性做了测试，结果显示系统的制热季节能效比可达2.51，供热稳定，而当供水高于10℃时，水泵再次运行，使得回水温度低于正常值，对机组的性能要求较高。张东<sup>[11]</sup>在兰州地区实测了喷气增焓空气源热泵系统在不同温度的性能，结果表明；该系统可以很好地改善系统的性能，在环境温度为-11.2℃，系统的COP能达到2.0。Bach.C.K<sup>[12]</sup>介绍了一种可实现两级注气、闪蒸旁通和单机压缩三种模式可切换的热泵装置。Cao<sup>[13]</sup>等将经济器喷注系统和混合制冷剂用于热泵热水器中，机组的能效比和热容量均有所增加，但压缩机排气温度明显降低。Wang<sup>[14]</sup>等建立了喷气增焓空气源热泵的模型，比较了中间换热器喷气和闪蒸器注气时热泵的性能，发现前者注气时热泵系统的性能较好。胡文举<sup>[15]</sup>对待闪光器的补气增焓空气源热泵系统进行了数值模拟研究，结果表明：存在最佳的一级压力比，使系统的性能趋于稳定压缩机的排气温度降低。费继友<sup>[16]</sup>对低温环境下吸气喷液热泵系统做了研究，发现压缩机的排气温度可

有效地降低,但吸气喷液降低了系统的制热量和能效比,造成热泵机组功耗上升,对高压压缩比没有改善。

### 3.2 双级压缩热泵

双级压缩热泵系统是通过中间压力补气方式来提高系统低温下的性能,降低了高压级压缩机吸气温度,改善了高压级压缩机的冷却效果,有效的提高热泵系统在低温工况下的制热性能,减小了压比,降低了压缩机的排气温度,提高了系统的经济性和可靠性。

Xu<sup>[17]</sup>等对活塞式双级压缩热泵系统进行了研究,系统的性能有较大的提高。Kwon<sup>[18]</sup>等利用余热作为热源,对两级压缩热泵系统在区域供热方面做了研究,发现余热温度从10℃增加到30℃,热泵系统的COP增加了22.6%。尹应德<sup>[19]</sup>设计了带中间经济器的准二级压缩热泵系统,研究结果表明:在环境温度从20℃逐渐减少到-15℃过程中,系统的制热量和COP均下降,但在-15℃时COP为1.8,较电设备仍节能。田长青<sup>[20]</sup>提出将双级变频压缩技术用到空气源热泵系统中,通过试验发现,在室外-18℃时系统的制热系数大于2,可满足供暖要求。金旭<sup>[21]</sup>在不同工况下对双级压缩热泵系统深入研究,在-20℃时系统COP和制热量分别为2.1和4.65 kW,具有较好的低温性能。

很多学者发现喷气增焓涡旋压缩机技术在低温热泵中有成功的应用<sup>[12, 22-23]</sup>,在单级压缩系统中低温适应性有一定缓解,仍存在压缩比大和排气温度过高及系统启动的可靠性等问题没有明显的改善;而双级压缩系统对空气源热泵在低温的运行有一定的改善,也出现变频压缩低高压级的合理输气量比、最佳中间压力的变化等问题,因此,对空气源热泵的补气增焓和双级压缩的研究还需要继续。

### 3.3 新工质替代

制冷剂的选取要对人类生存环境没有破坏并节约能源,学者们对新型制冷剂 and R22 做了对比研究,分析了新型制冷剂代替传统含HCFCs制冷剂的前景,并比较了各种制冷剂对空气源热泵系统性能的影响。

翁文兵<sup>[24]</sup>等对R417a和R13a及R22用在空气源热泵热水器中,从理论和试验分析的角度出发,

综合考虑系统的制热量、功耗、排气温度、冷凝压力及安全性等指标,得出R417a代替R22时系统的性能和环保效果更好。Neksa.p<sup>[25]</sup>对CO<sub>2</sub>热泵热水器的性能研究,该系统在蒸发温度为0℃时,将9℃的水加热到60℃,系统COP为4.3且在能耗方面比燃气、电热水器更少。Ju<sup>[26]</sup>和Fan<sup>[27]</sup>等为了研究R744和R290混合后代替R22的性能,通过理论模拟与试验验证,R744和R290在按12%和88%混合时,得到的最佳COP为4.73,相比于R22单独使用时COP提升11%且排气温度约下降28 K,有利于提高热泵效率和压缩机寿命。Wang<sup>[28]</sup>等比较了R134a、R407c和R22三种制冷剂在无霜空气源热泵中的性能,在环境温度和湿度分别为-10℃和85%时,R134a的平均COP较R22和R407c分别大3.3%和8.6%,在环境温度和湿度为0℃和85%时,R134a的排气压力比R22和R407c降低29%和32%。藕俊彦<sup>[29]</sup>在不同工况下对喷气增焓热泵系统的试验研究发现,在室外温度较低时,R410A更适合代替R22。Ali<sup>[30]</sup>等研究了电加热设备的空气源热泵在寒冷地区的性能,将R32和CO<sub>2</sub>按8:2混合后,用数值模拟发现系统相对于R410A,系统季节性节能达12%,改变混合量后节能效果可提升至23%,也可降低GWP16%,证明了混合制冷剂在空气源热泵应用中的优越性。

### 3.4 除霜方法

霜层的形成和露的形成原理类似,都是空气遇到冷表面时,冷表面附近空气的饱和蒸汽分压降低,相对湿度增加,导致水分从空气中析出而形成;对于空气源热泵,当室外换热器表面温度低于周围空气露点温度,而高于水的三相温度时,空气中的水蒸气会在其表面发生液态凝结并附在上面,这样就形成了霜层<sup>[31]</sup>。当空气源热泵在结霜工况下运行时,换热器温差变大,压缩机排气温度升高,机组功耗增加,因此,结霜会严重影响空气源热泵的性能。

常见的除霜方法有方法电加热除霜,热气旁通除霜,逆循环除霜3种<sup>[32]</sup>,电加热除霜是在蒸发器表面或翅片内安装加热棒来进行除霜,这种除霜方式不仅消耗的电能大、热量散失到空气中使得效率低,而且电热丝存在安全性问题。逆循环除霜是将四通阀换向,热泵机组的工作工况发生

转换,由制热工况转变为制冷工况,将蒸发器表面的霜层除掉,但会造成室内温度差,浪费能量,除霜不均匀等问题。热气旁通是将压缩机排出的气体经旁通阀流向室外蒸发器来进行除霜,除霜不干净,会严重影响压缩机寿命。热气旁通除霜的时间较逆循环除霜法长,是因为后者除霜的热量来自室内换热器表面余热和压缩机做功,而前者的除霜热量仅来自压缩机做功,这是由它们的除霜原理决定的,但整个运行周期内系统的COP优于逆循环除霜<sup>[33]</sup>,且压缩机的吸、排气压力波动范围小<sup>[34]</sup>。此外,使用这两种除霜方法时,需要停止室内换热器的工作,在完成除霜后室内换热器表面温度达到一定值后才能开启风机供热,因此会影响室内的舒适度。

Vocale P<sup>[35]</sup>等用数值分析法研究了空气温度和相对湿度对逆循环除霜的影响,结果显示相对湿度对结霜的影响较大,热泵在相对湿度超过80%且温度在0~6℃区域运行时,COP月均减少17%。虽然逆循环和热气旁通法除霜效果不佳,M. Amer<sup>[36]</sup>等研究表明,热气旁通法较逆循环法系统的供热量和COP分别提高5.7%和8.5%,在室内舒适性的改善和除霜能耗方面稍有优势。张杰<sup>[37]</sup>等研究发现,热气旁通法较逆循环法除霜在室内舒适度恢复时间上优于25%。为了解决热气旁通除霜方法除霜时间长的问题,梁彩华等<sup>[38]</sup>提出了显热除霜法,但该方法对控制系统要求较高;黄东等<sup>[39]</sup>在四通换向阀和室外换热器之间增设一个制冷剂补偿器,通过增大制冷剂流量,进而增加除霜模式下压缩气体的放热量,以提高逆循环的效率和缩短除霜时间。针对低温工况的空气源热泵系统,孙福涛等<sup>[40]</sup>提出了在两级压缩的基础上增加了两除霜支路和补热支路,并在经济器内增设电热丝,该系统可以保持在低温工况下(<-10℃)的制热量,同时进行有效的除霜。

由于传统除霜方法存在的除霜时间长,能耗较大等问题,相变蓄热除霜可以改善这一缺陷;而且还能延缓室外环境温度对系统制热量的影响,平衡系统制热量与用户对用热量的需求,调节电力负荷<sup>[32]</sup>。曲明璐<sup>[41]</sup>提出了蓄能重叠式空气源热泵除霜系统,试验结果对比分析,间断式蓄能除霜比热气旁通除霜运行稳定,能耗减少85.2%,除霜

时间缩短77.6%。马素霞<sup>[42]</sup>等人设计的相变蓄热蒸发型空气源热泵系统,兼顾制热和除霜等模式,在不同温度下测试,该系统-25℃和-30℃时的COP分别为2.0和1.94,且除霜时间短、能耗少、效果好。张杰<sup>[37]</sup>等通过试验比较了相变蓄热除霜与逆循环和热气旁通除霜,结果显示相变蓄热除霜在除霜耗时和能耗及室内舒适度恢复时间上有明显的优势。Hu<sup>[43]</sup>等对空气源CO<sub>2</sub>热泵的除霜做了研究,得到除霜率(35%)较低,原因是除霜的能量主要用于加热水,且除霜率随相对湿度的降低和干球温度的上升而增加。胡文举<sup>[44]</sup>等提出了串联供热和连通、非连通供热3种供热模式的蓄热除霜系统,结果显示串联供热模式的性能系数最高,连通模式吸排气都比串联模式高。Dong<sup>[45]</sup>等研究了蓄热除霜系统的蓄热特性,结果表明并联和余热蓄热模式的吸排气压力均降低,但排气温度可达122.5℃,而系统在串联蓄热模式下的压力和温度特性稳定、蓄热时间较短,对室内舒适度的影响最小。Kim J<sup>[46]</sup>等将蓄热器和双重热气旁通除霜相结合,在相同条件下比较了逆循环和双重热气除霜,结果显示:该方法在除霜时间和效率上比逆循环除霜提升15%,也解决了双重热气旁通除霜在时间和效率的不足。

采用相变材料蓄热除霜好时段、节能,也可以提高低温下的制热量,但低温下机组的运行效率却没有明显改善,而新型无霜空气源热泵热水器,从机组形式上进行改进以解决空气源热泵低温运行和适用性<sup>[47]</sup>。王志华<sup>[48]</sup>等提出了一种新型无双空气源热泵热水器,其原理是利用固体干燥剂的强吸附性使实现无霜运行,利用相变蓄热装置对冷凝余热进行回收作为再生模式下的低温热源,对干燥剂进行再生以保证系统的持续运行;并在工况为0℃和80%时与热气旁通法和电加热除霜相比,系统的COP分别提升7.25%和46.3%。

新型的除霜方法,高压电场除霜和超声波除霜,还有热水除霜。前两者的除霜原理类似,都是利用外电场抑制霜层的扩大而使其脱落,高压电场除霜法是利用外加电场破坏霜晶的成长实现除霜,超声波除霜是依据共振原理,利用霜晶和超声波之间的共振效应,达到除霜的目的。热水除霜<sup>[49]</sup>是通过在室外换热器上方安装一个化霜装置

(内设有电加热棒、水泵、抽水管、电子水位探测计、电子水温计和电磁)；在制热模式下利用电加热棒加热化霜装置内的水至设定温度，除霜时打开电磁阀使装置内的热水流过室外换热器表面进行除霜，化霜后的水通过水泵送回化霜装置内进行加热，该方法进行除霜可以实现热泵系统的不停机和持续制。Tudor<sup>[50]</sup>和Tan<sup>[51]</sup>分别对高压电场除霜和超声波除霜做了实验研究，结果显示，高压电场除霜比电加热除霜用时少、节能明显；超声波除霜的效率和能耗情况均比逆循环除霜理想。以上两种除霜方法仍在研究中，且都有一定的不足，如高压电场除霜时电极材料的选择问题，超声波除霜对基冰层效果差。

综上，学者们对低温时空气源热泵做了大量研究，补气增焓技术、双级压缩系统热泵系统，机组的制热量和稳定性都有了相应的提升；逆循环除霜，热气旁通和蓄热除霜方式，都是在寒冷地区对空气源热泵系统的推动<sup>[8]</sup>，且各种方式仍有自己的缺点。如逆循环除霜的操作简单<sup>[52]</sup>，效果良好，但高低压差削弱了系统可靠性，而新型的除霜方法还在研究中；以上多数研究在实验条件下完成，其实际应用需要大量的验证，因此，空气源热泵低温的性能还要进一步研究，在空气源热泵结霜的问题上，亟待解决的是重视结霜机理的研究和实际结霜特性，以及将材料学科结合起来研究解决抑制和缓解结霜问题<sup>[31]</sup>。

#### 4 推广和行业规范问题

作为第四代的热热水器的空气源热泵，在采暖市场和热水器市场的起步都比较晚。但是由于“节能减排”及“煤改电政策”的相继出台，对空气源热泵技术有相当大程度的促进作用，并且其本身节能

高效的特点，使其占据一定的市场份额。然而没有得到快速的发展，表明该行业存在的问题。相比于传统的热水器及太阳能热水器，热泵行业起步晚，它的安全性和节能性还没有得到广泛的推广与认可，这就需要政府相关政策的支持与补贴，使空气源热泵技术被更多的消费者所了解并认可。

此外，应该加强热泵行业的标准，给一些不规范的企业不留机会，由于该技术还没有被广大消费者认可，不规范的产品不仅严重影响热泵技术的推广，而且使消费者的利益受损。因此，要有严格的行业标准来保证热泵行业健康发展。

#### 5 热泵热水器行业的前景

根据BSRIA数据统计<sup>[53]</sup>，从2012年2015年，空气源热泵数量从88.4万台增长到139.3万台，在这期间其增长率有波动，但仍能保持在两位数；由于节能惠民工程和房地产业的推动热泵数量持续增长。2014年热泵技术及应用在京召开，热泵行业领军人物分享了成熟的经验<sup>[54]</sup>。欧洲和日本的发言人对热泵技术和相关政策作了介绍。金继宗介绍了在北京地区低温热泵供暖技术的示范工程，已经证明，热泵技术可以满足供暖需求同时节约了供暖费用；在北方热泵技术可替代燃煤锅炉进入供暖市场，具有大规模推广应用的潜在前景。2016年，北方多省推出的煤改清洁能源政策，使空气源热泵市场又迎来了快速的增长，相比2015年，热泵整体销量达到203万台，增长率为31.53%。

“煤改电政策”的实行使得空气源热泵成了最大的赢家，北京在2016年农村地区“煤改电”工程中，在19.9万户中有75.85%选择了空气源热泵；2017年是“煤改电”规模最大的一年，仅北京一个地方就完成了近35万户的工程。同年，山东省在5个市县和上百个乡镇大力推广了空气源热泵，并计划在2020年时空气源热泵占农村供暖的70%<sup>[55]</sup>。根据BSRIA数据统计<sup>[53]</sup>，2017年中国空气源热泵销量达292万台，比去年增长了30.4%。由于政策红利和煤改电的大力推动，据相关数据统计，2017年，作为中国空气源热泵行业先驱品牌的美的在空气源热泵领域销售规模突破20亿元，

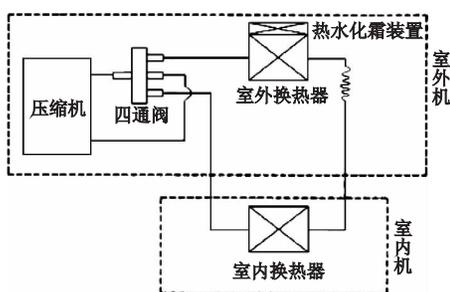


图4 热水融霜的空气源热泵系统原理

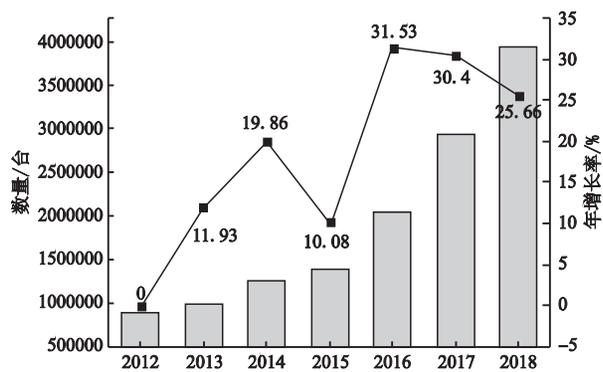


图5 空气能热泵热水器年数量变化图

成为行业内第一家。BSRIA 预计<sup>[53]</sup>，2018 年空气源热泵市场总销量将达到 393 万台，同比增长 25.66%。《北方地区冬季清洁取暖规划（2017~2021 年）》提出，到 2019 年和 2021 年，北方地区清洁取暖率分别达到 50% 和 70%，这将给空气源热泵市场的发展带来机遇，从下图的柱状图可以看出，空气源热泵热水器的市场占有率在逐年增加，折线图表示空气源热泵热水器的市场增长率，可以看出在近 3 年内的增长率都超过了 25%。从 2012 年目前为止，空气源热泵市场在持续的扩大，可以预想，在未来的几年内它的广阔前景。

目前，我国的供暖需求受很多因素的影响。在冬天，北方地区一直有供暖需要，供暖过程中的能源损耗和环境污染等问题，有必要对供暖方式要重新思考；而南方地区由于气温非常适合空气源热泵的工作，此外，空气源热泵也可用于回收低温工业余热，不仅节约能源，而且有利于减少化石燃料消耗、保护自然环境。因此，空气源热泵由于其节能高效、安全环保等优点将会用有广阔的前景。

## 6 结语

空气源热泵由于高效节能、环保安全等优点被广泛的关注，而在低温环境时，出现的结霜、压缩机排气压力高等问题对空气源热泵的推广有一定的制约，所以低温时热泵的应用还需要进一步的研究。我国近几年来空气源热泵供暖的市场潜力巨大，这将对低温下热泵的研究起到一定的促经作用，工业余热领域低品位余热的回收利用

也使得空气源热泵市场占有率增加。另外，加强行业标准和推广力度，将使空气源热泵行业健康、快速的发展；对环境的保护和节能贡献力量。

### 参考文献：

- [1] Zhang J,Zhang H H,He Y L, et al. A Comprehensive Review on Advances and Applications of Industrial Heat Pumps Based on the Practices in China [J].Applied Energy, 2016, 178: 800-825.
- [2] Li X,Liu R M,Zeng Y T, et al.A Review of Low-temperature Heat Recovery Technologies For industry Processes [J].Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 11 (12): 1-11.
- [3] Thalfeldt M,Kurnitski J,Latšov E.Exhaust Air Heat Pump Connection Schemes and Balanced Heat Recoveryventilation Effect on District Heat Energy Use and Return Temperature [J].Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 402-414.
- [4] 胡连营.热泵技术与可再生能源的开发利用[J].可再生能源, 2007(01): 95-97.
- [5] Hudon K,Spam B,Christensen D, et al.Heat Pump Water Heater Technology Assessment Based on Laboratory Research and Energy Simulation Models:Preprint [J].ASHRAE Transactions, 2012, 118(4): 683-704.
- [6] 郝吉波,王志华,姜宇光,等.空气源热泵热水器系统性能分析[J].制冷与空调, 2013, 13(1): 59-62.
- [7] Guo J J,Wu J Y,Wang R Z, et al.Experimental Research and Operation Optimization of an Air-source Heat Pump Water Heater[J].Applied Energy, 2014, 88(11): 4128-4138.
- [8] 王泮浩,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.
- [9] 王志华,王泮浩,郑煜鑫,等.一种新型无霜空气源热泵热水器实验研究[J].制冷学报, 2015, 36(1): 52-58.
- [10] 陈晓宁,李万勇,张成全,等.低温环境下户式变频空气源热泵地板辐射采暖系统性能测试及分析[J].太阳能学报, 2018, 39(1): 57-63.
- [11] 张东,李金平,刘伟,等.喷气增焓空气源热泵热性能评价及预测[J].化工学报, 2014, 65(12): 5004-5009.
- [12] Bach C K,Vetsch B,Groll E A, et al.Experimental Investigation of Vapor Injected Compression for Cold Climate Heat Pumps [J].Journal of Animal Science, 2014, 92(2): 816-829.
- [13] Feng C,Kai W,Shouguo W, et al.Investigation of the Heat Pump Water Heater Using Economizer Vapor Injection System and Mixture of R22/R600a[J].International Journal

- of Refrigeration, 2009, 32(3): 509-514.
- [14] Baolong W, Zuo C, Wenxin S, et al. Numerical Study of Gas Injected Heat Pump Using Zeotropic R32/R1234ze (E) Mixture: Comparison of Two Type Economizers[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, (142): 410-420.
- [15] 胡文举, 常默宁, 刘琴, 等. 补气压力损失系数与一级压比对补气增焓空气源热泵性能影响[J]. 化工进展, 2017, 36(b11): 115-120.
- [16] 费继友, 曹锋, 邢子文, 等. 吸气喷液对空气源热泵热水器性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 818-822.
- [17] Shuxue X, Guoyuan M. Experimental Study on Two-stage Compression Refrigeration/heat Pump System with Dual-cylinder Rolling Piston Compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 803-808.
- [18] Kwon O, Cha D, Park C. Performance Evaluation of a Two-stage Compression Heat Pump System for District Heating Using Waste Energy [J]. Energy, 2013, 57(3): 375-381.
- [19] 尹应德, 朱冬生, 孙晋飞, 等. 基于准二级压缩空气源热泵热水器的热力性能实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2018, (1): 78-84.
- [20] 田长青, 石文星, 王森. 用于寒冷地区双级压缩变频空气源热泵的研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(3): 388-393.
- [21] 金旭. 双级压缩空气源热泵采暖系统实验研究[D]. 大连理工大学, 2009.
- [22] Guoyuan M, Qinhu C, Yi J. Experimental Investigation of air-source Heat Pump for Cold Regions [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 12-18.
- [23] Bell I, Groll E, Braun J, et al. Simulation of a Cold Climate Heat Pump Furnished with a Scroll Compressor with Multiple Injection Lines[C]// 2013.
- [24] 翁文兵, 王丰霞, 王俊, 等. R134a和R417A应用于热泵热水器灌注式替代R22的实验分析[J]. 制冷学报, 2011, 32(4): 43-47.
- [25] Neksa P, Reksta V. CO<sub>2</sub>-heat Pump Water Heater: Characteristics, System Design and Experimental Results[J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(3): 172-179.
- [26] Ju F, Fan X, Chen Y, et al. Experimental Investigation on a Heat Pump Water Heater Using R744/R290 Mixture for Domestic Hot Water [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 132: 1-13.
- [27] Fan X, Zhang X, Wang F. Simulation Study on a Heat Pump System Using R744/R290 as Refrigerant[J]. 土木工程与建筑: 英文版, 2013, (2): 220-226.
- [28] Wang Z H, Wang F H, Ma Z, et al. Numerical Study on the Operating Performances of a Novel Frost-free Air-source Heat Pump Unit Using Three Different Types of Refrigerant[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 248-258.
- [29] 藕俊彦, 王芳, 余大维, 等. R417A喷气增焓热泵热水器低温环境下的变流量特性分析 [J]. 流体机械, 2016, 44(9): 82-87.
- [30] Hakkaki-Fard A, Aidoun Z, Ouzzane M. Improving Cold Climate Air-source Heat Pump Performance with Refrigerant Mixtures[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 695-703.
- [31] 王伟, 倪龙, 马最良, 等. 空气源热泵技术与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [32] 倪龙, 周超辉, 姚杨, 等. 空气源热泵蓄热系统形式及研究进展[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 23-30.
- [33] BYUN J S, LEE J, JEON C D. Frost Retardation of an Air-Source Heat Pump by the Hot Gas Bypass Method[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(2): 328-334.
- [34] HUANG Dong, LI Quanxu, YUAN Xiuling. Comparison between Hot-gas Bypass Defrosting and Reverse-cycle Defrosting methods on an Air-to-water Heat Pump[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1697-1703.
- [35] Vocale P, Morini G L, Spiga M. Influence of Outdoor Air Conditions on the Air Source Heat Pumps Performance[J]. Energy Procedia, 2014, 45: 653-662.
- [36] Amer M, Wang C C. Review of Defrosting Methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 53-74.
- [37] 张杰, 兰菁, 杜瑞环, 等. 几种空气源热泵除霜方式的性能比较[J]. 制冷学报, 2012, 33(2): 47-49.
- [38] 梁彩华, 张小松, 巢龙兆, 等. 显热除霜方式与逆向除霜方式的对比试验研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(4): 20-24.
- [39] HUANG Dong, LI Quanxu, YUAN Xiuling. Comparison between Hot-gas Bypass Defrosting and Reverse-cycle defrosting methods on an Air-to-water Heat Pump[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1697-1703.
- [40] 孙福涛, 蒲亮. 一种空气源热泵除霜新技术研究[J]. 制冷与空调, 2017, 17(4): 7-10.
- [41] 曲明璐, 李天瑞, 樊亚男, 等. 复叠式空气源热泵蓄能除霜与常规除霜特性实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(1): 34-39.
- [42] 马素霞, 蒋永明, 文博, 等. 相变蓄热蒸发型空气源热泵性能实验研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 604-609.
- [43] Hu B, Wang X, Cao F, et al. Experimental Analysis of an Air-source Transcritical CO<sub>2</sub> Heat Pump Water Heater Us-

- ing the Hot Gas Bypass Defrosting Method [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(1): 528-535.
- [44] 胡文举, 姜益强, 姚杨, 等. 基于除霜的相变蓄热器对空气源热泵性能的影响[J]. 天津大学学报, 2009, 42(10): 908-912.
- [45] Dong J K, Jiang Y Q, Yang Y, et al. Operating Performance of Novel Reverse-cycle Defrosting Method Based on Thermal Energy Storage for Air Source Heat Pump [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(6): 2163-2169.
- [46] Kim J, Choi H J, Kim K C. A Combined Dual Hot-Gas Bypass Defrosting Method with Accumulator Heater for an Air-to-air Heat Pump in Cold Region [J]. Applied Energy, 2015, 147: 344-352.
- [47] 张毅, 张冠敏, 张莉莉, 等. 空气源热泵结霜机理及除霜/抑霜技术研究进展[J]. 制冷学报, 2018, 39(05): 13-24+49.
- [48] Wang Z H, Zheng Y X, Wang F H, et al. Experimental Analysis on a Novel Frost-free Air-source Heat Pump Water Heater System [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1): 808-816.
- [49] 沈九兵, 李自强, 邢子文, 等. 空气源热泵系统无霜化及除霜方法概述[J]. 制冷学报, 2019, 40(02): 85-94+104.
- [50] Tudor V, Ohadi M, Salehi M A, et al. Advances in Control of Frost on Evaporator Coils with an Applied Electric Field [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(21-22): 4428-4434.
- [51] Tan H, Tao T, Xu G, et al. Experimental Study on Defrosting Mechanism of Intermittent Ultrasonic Resonance for a Finned-tube Evaporator [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2014, 52(1): 308-317.
- [52] Dong J, Deng S, Jiang Y, et al. An Experimental Study on Defrosting Heat Supplies and Energy Consumptions During a Reverse Cycle Defrost Operation for an Air Source Heat Pump [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37(5): 380-387.
- [53] 李春雷. 空气源热泵行业热点分析[J]. 制冷技术, 2018, 38(S1): 78-84.
- [54] 杨慧泉. 分享成熟经验共促行业发展-2014热泵技术及应用论坛在京召开[J]. 制冷与空调, 2014, (7): 54-55.
- [55] 魏玮. 给空气源热泵市场降降温 [N]. 中国能源报, 2017, 04-24(20).

作者简介: 彭斌(1976-), 男, 新疆伊宁人, 博士, 现任兰州理工大学机电工程学院教授, 主要研究方向为涡轮机械、低温余热技术。E-mail: pengb2000@163.com

(上接第46页)

### 3.2 存在的问题

(1) 调速系统改造后, 机组启动前静态输出为0后需要将速关阀手动全开, 但是出现了阀碟跟蒸汽室阀座密封不严的情况, 导致机组静态输出为0时, 机组就转起来。因此需要在下次检修时对阀碟与阀座的密封面进行检查, 但也存在机组设计时对阀碟的密封性能要求不像现在要求这样严格, 因为之前采用的是手动开机的方式, 在该模式下开机时静态输出为100%, 采用手动开速关阀的方式来控制转速暖机、穿越临界的方式, 因此在静态输出为0%时允许一定的泄漏。

(2) 改造后虽然实现了自动停机的功能, 但机组静态输出即使为0时, 机组的转速仍然维持在2000 r/min左右, 需要手动关闭速关阀来停运机组。但机组在降低转速跨越临界的时候振动平稳, 无异常。

## 4 结语

经过本次大检修对调速系统进行的优化改造, 成功解决了原先机组开机过程中升速率难以控制、操作难度大、操作不便利等问题。设置了暖机/目标程序, 即开发了自动暖机、开停机程序, 实现了低速暖机、自动跨越临界、自动控制机组转速的目标, 降低了员工的劳动强度, 简化了开机操作, 提高了设备运行水平。

### 参考文献:

- [1] 李杨. 工业汽轮机调速系统的改进[J]. 钢铁, 2002, 37: 709-711.
- [2] 魏建华, 路甬祥, 吴根茂. 工业汽轮机调节系统的电液控制改造[J]. 汽轮机技术, 1994, 36(4): 204-207.

作者简介: 陈龙, 工程师, 2012年毕业于西南石油大学, 现从事催煤柴加氢装置的设备管理工作。E-mail: 740365934@qq.com