

空气源热泵辅助供热系统在低温环境下的运行性能研究

吴 涛

天津市津安热电有限公司 天津 300000

摘 要：空气源热泵辅助供热系统在低温环境下的运行性能备受关注。该系统结合空气源热泵与辅助供热手段，能提升供热效率和稳定性。但低温会使空气源热泵的制热量、能效比降低，改变压缩机工作状态，引发蒸发器结霜，影响系统稳定性与可靠性。为优化其在低温下的运行性能，可从系统设计、运行控制方案、辅助热源配置等方面着手，采取选用高效设备、改进控制算法、合理搭配热源等措施，提升节能与经济性能。

关键词：空气源热泵；辅助供热系统；低温环境；运行性能

引言：随着对清洁能源供热需求的增长，空气源热泵辅助供热系统凭借高效节能、环保等优势，应用日益广泛。然而，在低温环境下，该系统的运行性能面临诸多挑战。低温会导致空气源热泵制热量下降、能效比降低，还会引发压缩机故障、蒸发器结霜等问题，影响系统稳定性与可靠性。因此，深入研究空气源热泵辅助供热系统在低温环境下的运行性能，探索有效的优化策略，对于提高系统供热效率、降低能耗、保障供热质量具有重要的现实意义。

1 空气源热泵辅助供热系统概述

在当今追求绿色、高效能源利用的时代，空气源热泵辅助供热系统作为一种创新的供热解决方案，正逐渐受到广泛关注。该系统结合了空气源热泵技术与辅助供热手段，旨在提升供热效率与稳定性，满足不同环境下的供热需求。空气源热泵是该系统的核心组成部分，其工作原理基于逆卡诺循环。通过制冷剂在蒸发器、压缩机、冷凝器和膨胀阀等部件之间的循环流动，实现热量的吸收、压缩、释放和节流。在制热模式下，空气源热泵从环境空气中吸收低温热量，经压缩机压缩后提升温度，再通过冷凝器将热量释放到供热介质中，为室内提供温暖。这种利用空气中免费热能的方式，具有高效节能、环保无污染的显著优势。然而，单一的空气源热泵在某些特殊条件下可能无法满足全部供热需求，因此需要引入辅助供热系统。常见的辅助供热方式包括太阳能辅助、电加热辅助和地源辅助等^[1]。太阳能辅助供热利用太阳能集热器收集太阳能，将其转化为热能，与空气源热泵协同工作，提高系统的供热能力和能源利用效率。电加热辅助则在空气源热泵制热能力不足时，通过电加热器补充热量，确保供热的稳定性。地源辅助供热借助地下浅层地热资源，为空气源热泵提供稳定的

低温热源，增强系统在低温环境下的性能。空气源热泵辅助供热系统的组成结构较为复杂，主要包括空气源热泵机组、辅助热源设备、供热循环系统、控制系统等。空气源热泵机组负责主要的热量转换和传递；辅助热源设备根据不同的辅助方式进行配置；供热循环系统将热量输送到各个供热末端；控制系统则实时监测和调节系统的运行参数，确保系统在不同工况下都能高效、稳定地运行。

2 低温环境对空气源热泵运行性能的影响

2.1 制热量与能效比的变化

低温环境对空气源热泵的制热量与能效比产生显著的不利影响。(1) 制热量随环境温度降低而衰减。环境温度下降导致蒸发器从空气中吸热能力减弱，工质蒸发温度与压力随之降低，系统制热量明显下降，在-15℃以下时制热量可能衰减至额定制热量的一半以下。(2) 能效比(COP)持续下降。蒸发温度降低使压缩比增大，压缩机耗功增加的同时有效制热量减少，COP显著降低，低温工况下运行经济性大幅下降。(3) 压缩机性能劣化加剧。低温高压比工况下压缩机容积效率降低，排气温度升高，润滑条件恶化，长期运行易引发压缩机过热保护甚至停机故障。(4) 制热衰减存在临界温度点。当环境温度降至热泵平衡点温度以下时，制热量小于建筑热负荷，出现供热缺口，需依靠电辅热维持室温，能耗大幅增加。(5) 超低温工况下运行稳定性变差。普通热泵在-20℃以下难以稳定运行，喷气增焓等低温补气技术虽可改善低压制热量，但系统整体能效仍低于常温工况水平。

2.2 压缩机工作状态的改变

低温环境下空气源热泵压缩机的工作状态发生显著改变，直接影响系统运行的可靠性与寿命。(1) 压缩比

显著增大。环境温度降低使蒸发压力下降,而冷凝压力基本不变,压缩机压缩比随之增大,容积效率降低,实际输气量减少,导致系统制热能力进一步下降。(2)排气温度异常升高。高压压缩工况下压缩过程焓增加,排气温度明显升高,过高的排温会引起润滑油碳化变质、阀片损坏,严重时触发高温保护而停机。(3)润滑状况逐渐恶化。低温启动时润滑油黏度增大,流动性变差,供油不足导致运动部件润滑不良;高温运行时油温过高又使黏度下降,润滑与密封性能降低,加剧机械磨损。(4)压缩机频繁启停与过载。制热量衰减后机组需长时间高负荷运转才能满足供热需求,压缩机长期接近满载运行,电流增大,绕组温升提高,电气故障风险上升。(5)低温启动困难问题突出。环境温度过低时制冷剂与润滑油互溶性变差,部分液态制冷剂积存于曲轴箱造成稀释,启动阶段易发生回液冲击与缺油现象。

2.3 蒸发器结霜问题及影响

在低温环境下,空气源热泵蒸发器结霜问题突出,对系统性能影响显著。当环境温度降到 5°C 以下,空气中水蒸气易在蒸发器表面形成霜层。结霜初期,蒸发器表面的微小冰晶会增加空气流动阻力,使空气与制冷剂之间的热交换效率降低。随着霜层不断增厚,热阻进一步增大,空气源热泵蒸发器换热系数大幅减小,导致制热量明显减少,制热效率显著降低。同时,结霜还会使压缩机的工作条件恶化^[2]。由于蒸发器结霜后吸热量减少,压缩机吸气压力降低,压缩比增大,排气温度迅速升高。这不仅增加了压缩机的能耗,还可能导致压缩机因过热而自动停机保护,影响系统的正常运行。此外,频繁的结霜化霜过程会使蒸发器表面的材料受到热应力的反复作用,加速材料老化,缩短蒸发器的使用寿命。因此,解决蒸发器结霜问题是提高空气源热泵在低温环境下运行性能的关键。

2.4 系统稳定性与可靠性挑战

低温环境给空气源热泵系统的稳定性与可靠性带来诸多挑战。从电气部件来看,低温会使电气元件的性能发生变化,比如电阻增大、电容值漂移等,这可能导致控制电路出现误动作,影响系统的正常运行逻辑,甚至引发故障停机,降低了系统运行的连续性。压缩机在低温下也面临严峻考验,润滑油粘度增加,使得压缩机启动扭矩变大,启动困难且容易出现过载现象。同时,低温导致压缩机内部金属件收缩,摩擦副间隙变小,增加了抱轴或卡缸的风险,严重威胁到压缩机的使用寿命和系统的可靠性^[3]。冷凝器同样受低温影响,表面结霜后频繁的冻融循环会使管道承受较大应力,容易造成管道

冻裂,一旦发生这种情况,制冷剂泄漏,系统将无法正常工作,维修成本高昂。而且低温下热泵系统中的传感器等控制元件也更容易出现老化和失效问题,导致系统对运行参数的监测和调节不准确,进一步影响系统的稳定性与可靠性。

3 空气源热泵辅助供热系统在低温环境下的运行性能优化策略

3.1 系统设计层面的优化

从系统设计层面进行优化是提升空气源热泵辅助供热系统低温性能的根本途径。(1)选用低温高效压缩机。优先采用喷气增焓压缩机或双级压缩技术,通过中间补气降低压缩比与排气温度,显著改善低压制热能力,使机组在 -25°C 工况下仍能稳定运行。(2)合理配置辅助热源。依据建筑热负荷与热泵制热衰减特性确定辅助电加热或太阳能等辅助热源容量,设置在热泵平衡点温度以下自动投入,弥补低温供热缺口。(3)优化换热器设计。增大蒸发器换热面积,采用亲水翅片与内螺纹铜管强化换热,降低蒸发器侧空气流动阻力,提高低温高湿工况下的吸热效率并延缓结霜。(4)科学确定设备容量与台数。按照当地冬季极端温度校核机组选型,避免按标准工况选型偏小,采用多台机组并联配置,实现负荷调节灵活与互为备用。(5)完善保温与防冻设计。对室外管路、水泵及阀件采取保温措施,设置水系统防冻循环与排空装置,防止停机时段管路冻结损坏。

3.2 运行控制方案的改进

在低温环境下改进空气源热泵辅助供热系统运行控制方案是一项系统性工程,需从算法创新、硬件升级、系统集成和智能管理四个维度协同推进。在算法创新层面,需研发适应低温特性的专用控制算法,如基于模糊控制和神经网络的复合控制策略,通过实时采集环境温度、湿度、负荷需求等参数,动态调节压缩机转速、变频启停频率及辅助热源投运比例,使系统始终处于最佳运行工况。硬件升级方面,重点提升关键电气元件的低温适应性,包括采用宽温域电容、低温性能优异的传感器及信号传输线路的防潮处理,确保在低温下控制信号的精准传输与执行机构的可靠动作^[4]。系统集成层面,需优化系统匹配设计,如增大辅助热源的蓄热容量,采用相变材料等新型储能技术,缓解低温时段供热负荷突增的压力。智能管理维度,构建基于物联网的远程监控管理平台,实现设备状态的实时监测、故障预警和远程诊断,同时通过大数据分析,为用户提供定制化的运行策略建议,如合理设置供暖时段和温度,避免频繁启停造成的能耗浪费。通过这四个维度的协同优化,显著提

升系统在低温环境下的运行稳定性与可靠性。

3.3 辅助热源的合理配置

辅助热源的合理配置是保障低温环境下系统供热能力与经济性的关键环节。(1)辅助热源类型的选择。结合当地资源条件与经济性比较,合理选择电加热、太阳能、燃气锅炉或蓄热装置等辅助热源,优先采用清洁能源,实现多能互补供热。(2)辅助容量的科学确定。依据当地冬季室外计算温度下热泵制热量与建筑热负荷的差额确定辅助加热容量,既避免容量过大造成投资浪费,又防止容量不足导致室温不达标。(3)辅助热源投入策略的优化。以热泵平衡点温度作为辅助热源自动投入的判定条件,采用分级投入方式,随室外温度降低逐级启用,兼顾供热保障与运行节能。(4)蓄热装置的联合配置。配置蓄热水箱或相变蓄热装置,利用夜间低谷电蓄热、白天放热,实现热泵与辅助热源的错峰运行,降低运行电费并提高系统调节能力。(5)多热源协同控制设计。建立基于室外温度、热负荷及蓄热状态的协同控制逻辑,实现热泵优先、辅助热源补充的智能调度,确保系统整体能效最优。

3.4 节能与经济性能提升措施

在低温环境下,提升空气源热泵辅助供热系统的节能与经济性能,是实现高效供热、降低成本的关键。选用高能效比的空气源热泵主机和辅助热源设备至关重要。高能效主机在相同工况下,能以更少的电能消耗产生更多的热量,直接降低运行成本。同时,合理配置辅助热源容量,避免出现“大马拉小车”造成能源浪费,或供热不足影响使用效果的情况,确保设备始终高效运行。采用智能控制系统,依据环境温度和室内负荷变化,自动精准调节设备运行参数,实现精细化控制^[5]。例如,在夜间室外温度较低且室内人员活动减少时,适度调低供热温度,既能保证基本的舒适度,又能显著降

低能耗。加强对管道、水箱等部件的保温处理,能大幅减少热量散失,提高能源利用率。良好的保温措施可有效降低系统的热损失,使热量得到更充分的利用。充分利用峰谷电价政策,在低谷电价时段开启辅助热源进行蓄热,在高峰电价时段使用蓄热满足供热需求。这种错峰运行方式,能有效降低用电成本,提升系统整体的节能与经济性能。通过这些综合措施,空气源热泵辅助供热系统在低温环境下将更具优势。

结语

未来,随着能源需求与环保要求的不断提升,空气源热泵辅助供热系统在低温环境下的应用前景广阔但也充满挑战。需持续深入研究低温环境对系统的影响机制,进一步完善系统设计与运行控制策略。在技术创新上,可探索更高效的辅助热源形式、先进的压缩机技术及智能控制算法,提升系统的节能性与稳定性。同时,加强多学科交叉融合,将新材料、新能源等技术融入其中。此外,建立更完善的标准与规范,推动系统的规模化应用与产业化发展,使空气源热泵辅助供热系统更好地服务于低温环境下的供热需求。

参考文献

- [1] 郭海霞. 基于变工况模拟的空气源热泵供热性能优化研究 [J]. 黑龙江科学, 2026, 17(10): 68-71.
- [2] 陈翔, 林文野, 姚少鹏, 等. 燃气空气源热泵系统低温环境制热特性 [J]. 化工进展, 2026, 45(2): 778-788.
- [3] 刘显玲, 张华, 黄洁. 用于低温环境的复叠式空气源热泵热水机组系统性能研究 [J]. 暖通空调, 2025, 55(12): 69-76.
- [4] 陶婷. 低环境温度空气源热泵供热经济性研究 [J]. 洁净与空调技术, 2026, (1): 30-34.
- [5] 龚延鹏, 李猛. 双热源耦合供热与空调系统运行性能的实验研究 [J]. 家电维修, 2026, (2): 16-18.