

暖通工程中低温空气源热泵系统在寒冷地区的能效优化研究

刘洪梅

130924*****4346

摘要: 在全球能源结构转型与“双碳”目标推进的背景下,空气源热泵系统因清洁、高效的特性,成为暖通工程中冬季供暖的重要技术选择。然而,在寒冷地区,低温环境易导致系统蒸发温度降低、压缩机排气温度升高、COP(性能系数)显著下降,甚至引发机组停机等问题,严重制约其能效发挥与推广应用。本文针对寒冷地区低温空气源热泵系统的运行瓶颈,从系统部件优化、运行策略调控、辅助技术融合三个维度,深入探讨能效优化的关键路径与技术方向,旨在为寒冷地区暖通工程中低温空气源热泵系统的高效、稳定运行提供理论参考与实践思路,推动清洁供暖技术在严寒区域的规模化应用。

关键词: 暖通工程; 低温空气源热泵; 能效优化

DOI: 10.64216/3080-1508.25.10.075

引言

随着我国城镇化进程的加快与居民对室内热环境舒适度要求的提升,冬季供暖能耗在建筑总能耗中的占比持续攀升,其中寒冷地区因供暖期长、室外温度低,供暖能耗问题更为突出。传统供暖方式如燃煤锅炉、燃气壁挂炉等,不仅能源利用效率较低,还会产生大量污染物排放,与当前绿色低碳的发展理念相悖。空气源热泵系统以空气中的热能为主要热源,通过电能驱动实现能量转移,具有无污染物排放、能源利用率高、安装灵活等优势,已在我国华北、东北等寒冷地区逐步推广。

但寒冷地区冬季室外温度常低于 -5°C ,部分严寒区域甚至低至 -20°C 以下,极端低温环境对空气源热泵系统的性能构成严峻挑战。一方面,低温下空气中的水蒸气易在蒸发器表面凝结成霜,导致传热热阻增大,换热效率显著下降;另一方面,蒸发温度降低会使压缩机吸气比容增大、压缩比升高,不仅增加压缩机的功耗,还可能导致排气温度过高,触发机组保护机制而停机,严重影响系统的供暖稳定性与能效水平。因此,针对寒冷地区低温空气源热泵系统的能效优化研究,已成为暖通工程领域的重要课题,对推动建筑能源系统转型、实现“双碳”目标具有重要意义。

1 寒冷地区低温空气源热泵系统的运行瓶颈

1.1 蒸发器结霜问题

在寒冷地区冬季运行过程中,当室外温度低于空气露点温度时,空气中的水蒸气会在蒸发器表面凝结成水;

若室外温度进一步降低至 0°C 以下,凝结水则会冻结成霜。霜层的存在会显著增加蒸发器的传热热阻,减少空气与制冷剂之间的热交换量,导致蒸发器的换热效率大幅下降。随着霜层厚度的不断增加,空气流经蒸发器的阻力也会随之增大,风机的能耗显著上升,同时制冷剂的蒸发温度降低,压缩机的吸气压力下降,系统的COP值随之降低。当霜层厚度达到一定程度时,甚至会堵塞蒸发器的空气通道,导致系统无法正常换热,触发机组停机除霜,不仅影响室内供暖的连续性,还会因除霜过程消耗大量电能,进一步降低系统的整体能效。

1.2 压缩机运行效率低下

压缩机作为低温空气源热泵系统的核心动力部件,其运行效率直接决定了系统的整体能效水平。在寒冷地区低温环境下,由于蒸发器换热效率下降,制冷剂的蒸发温度显著降低,导致压缩机的吸气比容增大。为保证系统的供暖量,压缩机需要消耗更多的电能来压缩制冷剂,以提高制冷剂的排气温度和压力。同时,蒸发温度降低会使压缩机的压缩比升高,而压缩比的升高会导致压缩机的容积效率和绝热效率显著下降,进一步增加压缩机的能耗。此外,当室外温度过低时,压缩机的排气温度可能会超过其允许的最高工作温度,触发机组的过热保护机制,导致压缩机停机,影响系统的稳定运行。

1.3 系统匹配性不足

低温空气源热泵系统的能效水平不仅取决于单个部件的性能,还与系统各部件之间的匹配性密切相关。

在寒冷地区,部分热泵系统在设计过程中,未能充分考虑低温环境对系统性能的影响,导致系统各部件之间的匹配性不足。例如,蒸发器的换热面积设计过小,无法满足低温环境下制冷剂与空气之间的热交换需求;冷凝器的换热面积与压缩机的排气量不匹配,导致制冷剂的冷凝温度过高,影响系统的散热效率;风机的风量与蒸发器的换热需求不匹配,导致空气流经蒸发器的速度过快或过慢,影响蒸发器的换热效果。系统各部件之间的匹配性不足,不仅会导致系统的 COP 值降低,还会增加系统的运行噪音和故障发生率,缩短系统的使用寿命。

2 低温空气源热泵系统在寒冷地区的能效优化策略

2.1 蒸发器结霜抑制与除霜技术优化

2.1.1 蒸发器表面改性处理

通过对蒸发器表面进行改性处理,改变其表面的物理化学特性,可有效抑制霜层的形成与生长。目前,常用的蒸发器表面改性技术主要包括涂层改性和表面结构改性。涂层改性技术是在蒸发器表面涂覆一层具有低表面能、高疏水性的涂层材料,如聚四氟乙烯、硅烷类化合物等,使水蒸气在蒸发器表面难以凝结,即使凝结也不易形成连续的霜层,从而减少霜层对蒸发器换热效率的影响。表面结构改性技术则是通过机械加工、激光雕刻等方式,在蒸发器表面构建微纳尺度的粗糙结构,利用“莲花效应”提高蒸发器表面的疏水性,进一步增强其抗结霜性能。此外,将涂层改性与表面结构改性相结合,可实现协同增效,显著提升蒸发器的抗结霜能力,延长系统的无霜运行时间,减少除霜次数,降低除霜能耗。

2.1.2 智能除霜控制策略

传统的除霜控制策略多基于固定时间或固定温度阈值进行除霜,存在除霜不及时或过度除霜的问题,不仅影响系统的能效,还会降低室内热环境舒适度。针对这一问题,可采用智能除霜控制策略,通过传感器实时采集蒸发器表面温度、霜层厚度、空气流量、制冷剂温度与压力等参数,利用模糊控制、神经网络等智能算法,对蒸发器的结霜状态进行精准判断,确定最佳的除霜时机与除霜时长。例如,当传感器检测到蒸发器表面霜层厚度达到设定阈值,或系统 COP 值下降至一定程度时,

自动启动除霜程序;在除霜过程中,根据制冷剂温度与压力的变化,实时调整除霜功率与除霜时间,确保除霜彻底且能耗最低。智能除霜控制策略可有效避免传统除霜方式的弊端,提高系统的除霜效率,减少除霜能耗,保障系统的稳定运行。

2.2 压缩机性能优化

2.2.1 压缩机结构改进

针对寒冷地区低温环境下压缩机运行效率低下的问题,可通过改进压缩机的结构设计,提高其在低温工况下的性能。例如,采用双级压缩或准双级压缩结构,将制冷剂的压缩过程分为两级进行,降低每级压缩机的压缩比,从而提高压缩机的容积效率和绝热效率,减少压缩机的能耗。双级压缩结构中,低压级压缩机将制冷剂压缩至中间压力后,经过中间冷却器冷却,再由高压级压缩机进一步压缩至冷凝压力,可有效降低压缩机的排气温度,避免因排气温度过高导致的机组停机问题。此外,优化压缩机的气缸结构、气门机构和润滑油系统,也可减少压缩机的内部泄漏和摩擦损失,提高压缩机的运行效率。

2.2.2 压缩机变频技术应用

采用变频技术控制压缩机的转速,可使压缩机的输出功率根据系统的供暖需求进行实时调整,提高系统在部分负荷工况下的能效水平。在寒冷地区冬季供暖初期和末期,室外温度相对较高,室内供暖需求较低,此时通过降低压缩机的转速,减少制冷剂的循环量,可避免系统在高负荷工况下运行,降低压缩机的能耗。而在室外温度极低、室内供暖需求较高时,提高压缩机的转速,增加制冷剂的循环量,可保证系统的供暖量,满足室内热环境需求。此外,变频压缩机启动时转速逐渐升高,可避免传统定频压缩机启动时的电流冲击,减少对电网的影响,同时延长压缩机的使用寿命。

2.3 系统匹配性优化

2.3.1 基于低温工况的系统部件选型

在寒冷地区低温空气源热泵系统的设计过程中,应充分考虑低温环境对系统性能的影响,进行基于低温工况的系统部件选型。对于蒸发器,应选择换热面积较大、空气流通阻力较小的高效蒸发器,如翅片管式蒸发器,并

优化翅片的结构参数（如翅片间距、翅片高度、翅片厚度等），提高蒸发器在低温工况下的换热效率。对于冷凝器，应根据系统的供暖需求和寒冷地区的气候特点，选择合适的冷凝器类型（如壳管式冷凝器、板式冷凝器等），并确保冷凝器的换热面积与压缩机的排气量相匹配，避免因冷凝器换热不足导致的冷凝温度过高问题。对于风机，应选择高效、低噪音的变频风机，其风量可根据蒸发器的换热需求进行实时调整，确保空气流经蒸发器的速度适宜，提高蒸发器的换热效果。

2.3.2 系统管路设计优化

系统管路的设计合理性对低温空气源热泵系统的能效水平也具有重要影响。在管路设计过程中，应尽量缩短制冷剂管路的长度，减少制冷剂在管路中的流动阻力和冷量损失。同时，合理选择管路的直径，确保制冷剂在管路中的流速适宜，避免因流速过快导致的压力损失过大，或因流速过慢导致的制冷剂在管路中停留时间过长，影响系统的换热效率。此外，在管路的保温设计中，应选择保温性能良好的保温材料，并确保保温层的厚度足够，减少制冷剂在管路中的冷量损失，特别是在室外管路部分，应加强保温措施，避免因低温环境导致的管路冻裂问题。

2.4 辅助加热技术融合

在寒冷地区极端低温环境下，仅依靠低温空气源热泵系统自身难以满足室内的供暖需求，此时可融合辅助加热技术，提高系统的供暖能力和稳定性。常用的辅助加热技术主要包括电辅助加热、燃气辅助加热和太阳能辅助加热等。电辅助加热技术具有安装简单、控制方便等优势，但能耗较高，适用于短期极端低温天气下的应急供暖。燃气辅助加热技术能源利用效率较高，运行成本较低，但需要铺设燃气管道，适用于燃气供应充足的地区。太阳能辅助加热技术则是利用太阳能集热器收集太阳能，为热泵系统提供预热后的空气或水，提高蒸发器的进口温度，从而提高系统的COP值，减少电能消耗，是一种清洁、可持续的辅助加热方式。在实际应用中，应根据寒冷地区的气候条件、能源供应情况和用户需求，选择合适的辅助加热技术，并优化辅助加热系统与热泵

系统的联动控制策略，确保在满足室内供暖需求的前提下，最大限度地降低系统的整体能耗。

3 结论与展望

3.1 结论

本文研究暖通工程中低温空气源热泵系统在寒冷地区的运行瓶颈与能效优化发现，蒸发器结霜、压缩机效率低、系统匹配性不足是制约能效的核心因素。通过蒸发器表面改性 with 智能除霜控制，可抑制霜层、提升换热效率并减少除霜能耗；改进压缩机结构（如双级压缩）与应用变频技术，可降低压缩比、动态调整输出功率；基于低温工况优化部件选型与管路设计，可增强系统匹配性、减少能量损失；融合辅助加热技术，可提升极端低温下的供暖能力。上述策略综合应用，能显著提高系统在寒冷地区的能效与稳定性，为清洁供暖提供支撑。

3.2 展望

未来，该系统能效优化将向智能化、多元化、集成化发展。智能化方面，结合物联网、大数据等技术构建智能监控运维平台，实现参数实时调控与故障诊断；多元化方面，探索太阳能、地热能等与热泵的耦合，构建多能互补系统以降低电能依赖；集成化方面，与建筑围护结构节能、室内热环境调控技术结合，优化建筑能源系统。同时需加强核心部件研发，突破技术瓶颈，提升系统低温适应性与可靠性，助力寒冷地区清洁供暖可持续发展。

参考文献

- [1] 张吟. 寒冷地区户式空气源热泵采暖适用工质研究[D]. 北京建筑大学, 2022.
- [2] 陈少杰. 空气源热泵采暖技术在寒冷地区的应用研究[D]. 山东建筑大学, 2017.
- [3] 罗鑫. 空气源热泵系统建模与优化控制研究[D]. 山东建筑大学, 2023.
- [4] 官静. 严寒地区空气-土壤源热泵系统多目标优化评价研究[D]. 东北林业大学, 2022.
- [5] 张晓月. 北京农村地区太阳能空气源热泵双水箱复合供热系统性能模拟研究[D]. 北京建筑大学, 2020.