

# 四通阀换向延迟对热泵系统制热效率的影响机制与优化

金华海 何 锐 王飞冰 戴 漪  
浙江盾安机械有限公司 浙江 绍兴 311835

**摘要:** 本文聚焦四通阀换向延迟对热泵系统制热效率的影响机制与优化。分析了成因, 量化表征并设计工况模拟方案; 剖析其对制热效率的影响, 涵盖制冷剂循环、换热效率、压缩机运行等方面; 提出了动态响应优化、智能控制策略及新型技术研发等优化策略; 最后展望材料科学创新与数字孪生技术应用前景, 为提升热泵系统制热效率提供理论与技术支持。

**关键词:** 四通阀; 换向延迟; 热泵系统; 制热效率

引言: 在热泵系统运行中, 四通阀换向延迟问题不容忽视。它不仅影响系统制热效率, 还关乎整体运行的稳定性与可靠性。四通阀换向延迟成因复杂, 涉及结构、驱动及环境工况等多方面因素。准确量化表征并模拟不同工况下的延迟情况, 是深入分析其对制热效率影响机制的关键。基于此, 开展相关研究并提出优化策略, 对提升热泵系统性能具有重要现实意义。

## 1 四通阀换向延迟的成因与量化表征

### 1.1 换向延迟的核心成因分析

四通阀换向延迟的核心成因可归纳为结构设计、驱动机制及环境工况三大类。从结构层面看, 阀芯与阀腔的配合间隙偏差、阀内流道阻力分布不均, 会导致阀芯运动受阻, 延长换向响应时间; 复位弹簧的弹性系数衰减或形变, 也会降低阀芯复位的及时性。驱动机制方面, 电磁线圈的励磁功率不足、磁路磁阻过大, 会削弱驱动力矩, 无法快速推动阀芯切换; 若采用液压辅助驱动, 液压油的粘度变化或油路堵塞, 会进一步加剧延迟。环境与工况因素同样关键, 低温环境下润滑油粘度升高, 增加阀芯运动摩擦阻力; 系统内制冷剂压力波动过大时, 阀两端压力差不稳定, 会干扰阀芯的平稳运动<sup>[1]</sup>; 不同制冷剂的饱和压力不同, 能提供给四通阀的换向压力差有较大的差异, 也会影响换向时间。四通阀长期运行后的磨损、老化, 以及安装偏差导致的受力不均, 会使延迟现象随使用时长逐渐加剧, 这些因素相互叠加, 共同构成换向延迟的核心诱因。

### 1.2 换向延迟的量化表征与测试方法

换向延迟的量化表征需选取科学的评价指标, 核心指标包括换向响应时间、阀芯位移延迟量及系统压力波动滞后时间。换向响应时间指从接收换向指令到阀芯开始运动的间隔, 阀芯位移延迟量是指令发出后设定时间内阀芯实际位移与理论位移的差值, 压力波动滞后时间

则为阀芯到位与系统压力达到稳定状态的时间差。测试方法以动态监测为主, 采用高精度位移传感器实时采集阀芯运动轨迹, 结合压力传感器记录阀进出口及系统关键节点的压力变化, 通过数据采集系统同步整合数据, 计算延迟指标。为保证测试准确性, 需搭建标准测试平台, 模拟不同温度、压力工况, 排除外界干扰; 同时采用重复性测试法, 多次测量取平均值, 降低偶然误差。另外, 可通过高速摄像技术观测阀内流场变化, 辅助验证延迟特性, 形成多维度、精准化的量化表征体系。

### 1.3 不同程度换向延迟的工况模拟方案

不同程度换向延迟的工况模拟需基于延迟等级划分, 结合热泵系统实际运行场景设计方案。首先划分轻微、中度、重度三个延迟等级, 对应换向响应时间分别为50~100ms、100~300ms、300ms以上。模拟平台搭建需包含四通阀测试模块、环境模拟舱、系统循环回路及数据监测单元。轻微延迟模拟通过调整电磁线圈励磁电压, 降低驱动力矩, 或在阀芯处施加微小阻尼实现; 中度延迟可通过增大阀芯与阀腔的配合间隙、降低复位弹簧弹性系数, 同时控制环境温度在-5~5℃模拟低温工况干扰; 重度延迟则结合结构缺陷与极端工况, 采用磨损阀芯、堵塞部分流道, 搭配-15~-10℃低温及系统压力波动±10%的严苛条件。模拟过程中, 实时监测阀芯运动、系统压力、温度等参数, 记录不同延迟程度下的工况特征, 确保模拟场景与实际运行工况的一致性, 为后续影响分析提供可靠的试验基础。

## 2 四通阀换向延迟对热泵系统制热效率的影响机制分析

### 2.1 制冷剂循环中断引发的制热量衰减机制

四通阀换向延迟会导致制冷剂循环出现短暂中断或紊乱, 进而引发制热量显著衰减。在换向过程中, 延迟会使阀芯处于中间过渡位置, 此时阀内流道无法正常导通,

高压高温制冷剂无法顺利进入室内换热器释放热量,同时低压低温制冷剂也难以进入室外换热器吸热,形成循环“卡滞”状态。循环中断会直接导致室内换热器的换热量骤降,因为缺乏持续的高温制冷剂热源,室内侧散热功率大幅降低。循环中断还会导致系统内制冷剂流量瞬时减少,单位时间内参与换热的工质质量下降,进一步加剧制热量衰减。这种衰减具有瞬时性和累积性,短暂的循环中断会引发室内温度波动,若延迟频繁出现,累积的热量损失会使系统制热性能持续恶化,尤其在低温制热工况下,原本系统制热能力就较弱,循环中断带来的衰减会更为明显,严重影响室内供暖效果。

## 2.2 换热效率下降的连锁反应机制

四通阀换向延迟通过引发制冷剂流动状态异常,触发换热效率下降的连锁反应。首先,延迟导致的循环紊乱会使制冷剂在换热器内的流动速度不稳定,出现流速骤增或骤减的情况,破坏了换热器内的传热边界层,增加传热热阻,直接降低换热效率。其次,当换向延迟引发系统压力波动时,制冷剂的蒸发温度和冷凝温度会随之变化,偏离设计工况,导致换热器的传热温差偏离最优范围,进一步削弱换热效果<sup>[2]</sup>。另外,换热效率下降会使制冷剂在换热器内的吸热或放热不充分,进入压缩机的制冷剂过热度不足,或进入节流装置的制冷剂过冷度不够。过热度不足可能导致压缩机出现液击风险,而过冷度不够会降低节流后的制冷剂蒸发能力,这两种情况都会反向影响后续换热过程,形成“换热效率下降-工质状态恶化-换热效率进一步下降”的连锁反应,最终导致系统整体制热效率大幅下滑。

## 2.3 压缩机运行稳定性下降的间接影响机制

四通阀换向延迟通过改变系统热力学状态,间接导致压缩机运行稳定性下降,进而影响制热效率。换向延迟引发的制冷剂循环紊乱,会使压缩机吸入端的制冷剂流量和压力出现周期性波动,导致压缩机负载不稳定,出现频繁的加载与卸载现象。负载波动会加剧压缩机内部零件的机械磨损,增加运行噪声和振动,同时导致压缩机的排气温度和压力波动过大,偏离最优运行区间。此外,循环中断可能导致压缩机出现短暂的空转或液击风险,空转时压缩机无法有效做功,制热效率骤降;液击则会损坏压缩机阀片、活塞等关键部件,严重影响压缩机使用寿命和运行可靠性。压缩机运行稳定性下降还会导致其能效比降低,单位输入功率的制热量减少,形成“换向延迟-压缩机稳定性下降-制热效率衰减”的间接影响链条,进一步恶化系统整体性能。

## 2.4 不同延迟程度与工况的影响差异机制

四通阀换向延迟对制热效率的影响存在显著的延迟程度与工况依赖性差异。从延迟程度看,轻微延迟(50-100ms)仅在系统换向瞬间引发短暂的循环波动,制热量衰减幅度较小(5%以内),且在稳定工况下可快速恢复;中度延迟(100-300ms)会导致循环紊乱持续时间延长,制热量衰减幅度达5%-15%,同时引发压缩机负载波动,稳定性下降;重度延迟(300ms以上)会造成循环中断,制热量衰减超过15%,甚至出现系统停机保护现象。从工况差异看,低温工况(-15~0℃)下,系统本身制冷剂循环流量较小,延迟引发的循环中断影响更为显著,制热量衰减幅度比常温工况高8%-12%;高负荷工况下,系统压力和流量较大,延迟导致的压力波动更为剧烈,压缩机稳定性下降更明显,间接加剧制热效率损失;而在部分负荷工况下,系统调节能力较强,延迟带来的影响相对缓和。此外,不同气候区域的工况差异,也会导致延迟影响的表现形式和程度有所不同。

# 3 四通阀换向延迟的优化策略

## 3.1 动态响应优化

动态响应优化旨在通过改进四通阀结构与驱动方式,提升阀芯运动的及时性和平稳性,从根源上缩短换向延迟。结构优化方面,采用高精度加工技术减小阀芯与阀腔的配合间隙,降低运动摩擦阻力;优化结构设计,轻型高强度材料的采用,降低阀芯重量,提高阀芯换向过程中的动能;选用高弹性模量的记忆合金材料制作复位弹簧,增强弹簧的复位能力和抗疲劳性;优化阀内流道设计,采用流线型结构减少制冷剂流动阻力,避免流道内涡流产生,确保阀芯受力均匀。驱动方式优化上,升级电磁线圈设计,采用高磁导率铁芯材料提升励磁效率,增大驱动力矩;引入脉冲宽度调制(PWM)技术,实现励磁电流的精准调控,根据工况变化动态调整驱动功率,避免驱动力不足或过度消耗;取消传统的电磁线圈驱动先导阀的方式,阀芯由常规的压差驱动改为电机直接驱动,由电机直接输出固定动力,换向时间不再受系统压差及传统影响因素的影响。

## 3.2 智能控制策略

智能控制策略通过引入先进的控制算法和感知技术,实现对四通阀换向过程的精准调控,补偿延迟带来的负面影响。首先,搭建多传感器监测网络,实时采集系统压力、温度、阀芯位移等关键参数,通过数据融合技术精准判断换向状态和延迟程度。基于监测数据,采用模糊PID控制算法替代传统的开关控制,根据工况变化动态调整换向指令的发出时机和驱动参数,实现换向过程的自适应调节,补偿延迟带来的循环紊乱<sup>[3]</sup>。引入预测控制

技术,通过建立系统动态模型预测换向延迟趋势,提前发出控制指令,避免延迟引发的系统波动。结合热泵系统的运行模式,设计工况自适应控制逻辑,在低温、高负荷等易出现延迟问题的工况下,自动增强驱动功率、调整换向策略,确保系统稳定运行。通过智能诊断技术实时监测四通阀运行状态,及时发现延迟异常并发出预警,便于维护调整。

### 3.3 新型四通阀技术研发

新型四通阀技术研发聚焦于突破传统结构的局限,开发具有更高响应速度和可靠性的新型阀结构。一方面,研发无阀杆式四通阀,采用电磁直驱式阀芯设计,取消传统阀杆传动机构,减少运动部件数量,降低机械磨损和传动延迟,同时提升阀的密封性能。另一方面,探索采用压电驱动技术替代传统电磁及压力差驱动,利用压电材料的快速响应特性,实现阀芯的毫秒级精准驱动,大幅缩短换向响应时间;结合微机电系统(MEMS)技术,实现四通阀的微型化和集成化,提升其与热泵系统的适配性。

## 4 未来展望

### 4.1 材料科学创新

材料科学创新将为四通阀性能提升提供核心支撑,推动换向延迟问题的根本性解决。未来将重点研发具有高耐磨、低摩擦、耐高温、轻型等特性的新型结构材料,如陶瓷基复合材料、纳米涂层材料、航空航天特殊低密度合金材料等,应用于阀芯、阀腔等关键部件,降低运动摩擦阻力,提升部件使用寿命,减少磨损引发的延迟加剧。在驱动材料方面,开发高性能永磁材料和压电材料,提升电磁驱动和压电驱动的效率与响应速度;探索新型形状记忆合金材料,实现阀芯的精准、快速复位,增强结构的自适应能力。研发具有优异热力学性能的制冷剂兼容材料,避免制冷剂对阀内材料的腐蚀和溶胀,确保密封性能稳定;开发轻量化、高强度的高分子复合材料,降低阀芯惯性,提升动态响应速度。材料科学与四通阀结构设计的深度融合,将推动四通阀向高性能、长寿命、低延迟方向发展,为热泵系统效率提升奠定材料基础。

### 4.2 数字孪生技术

数字孪生技术将为四通阀及热泵系统的优化运行、精准管控提供全新路径,有效破解换向延迟带来的系统优化难题。未来将构建四通阀全生命周期数字孪生模型,整合设计、制造、运行、维护等全流程数据,通过三维建模、仿真模拟技术,精准复现四通阀的结构特征和运行状态。基于数字孪生模型,可实现换向过程的虚拟仿真,提前预判不同工况下的延迟风险,优化结构设计和控制策略;在实际运行中,通过实时数据交互,将物理系统的运行参数与数字模型同步,动态模拟延迟对系统的影响,实现延迟的精准预测和提前调控<sup>[4]</sup>。利用数字孪生技术开展虚拟调试和故障诊断,无需拆卸物理设备即可模拟不同优化方案的效果,降低试验成本;通过模拟部件老化过程,预测延迟加剧趋势,制定精准的维护计划,延长设备使用寿命。数字孪生技术与智能控制的结合,将实现四通阀换向过程的全流程智能化管控,大幅提升系统运行效率和可靠性。

### 结束语

四通阀换向延迟对热泵系统制热效率影响显著,通过对其成因、影响机制的深入剖析,以及动态响应优化、智能控制策略和新型技术研发等优化措施的提出,为解决该问题提供了方向。未来,材料科学创新与数字孪生技术的应用,有望从根本上提升四通阀性能,实现热泵系统的高效、稳定运行,推动热泵技术在更多领域的广泛应用与发展。

### 参考文献

- [1]虞启辉,王海宇,王前程,等.环境温度对空气源热泵系统制热性能的影响研究[J].区域供热,2021(3):64-70,105.
- [2]徐伟堂.空调四通阀换向不良原因分析及预防[J].日用电器,2023(11):56-59.
- [3]徐姗,郭弢,刘雅斌,等.四通换向阀改善建筑垂直热力失调的实测研究[J].区域供热,2025(3):69-76,150.
- [4]王驿凯,赵栋霖,杨曙川,等.区域能源系统中热泵储能技术研究与应用综述[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(3):839-848.