

地源热泵长期运行稳定性评估

张万龙 张隽玮 邢智力 白 珩
北京北投生态环境有限公司 北京 101117

摘 要：地源热泵系统作为一种高效、环保的能源利用方式，其长期运行稳定性对于系统的能效、经济性和环境效益具有重要影响。本文详细分析了地源热泵系统的工作原理、组成、影响长期运行稳定性的因素，并通过实际案例深入评估了系统的长期运行稳定性，最后提出了具体的改善策略，以期地为地源热泵系统的设计和运行提供有益的参考。

关键词：地源热泵；长期运行稳定性；影响因素；评估方法；改善策略

引言

地源热泵系统利用地球表面浅层地热资源进行制冷和供暖，具有高效、节能、环保等优点。然而，在实际运行过程中，地源热泵系统的长期稳定性受到多种因素的影响，如地下岩土体热物性、地下水流、热泵机组性能等。这些因素不仅影响系统的换热效率，还可能导致系统运行不稳定，甚至出现故障。因此，对地源热泵系统的长期运行稳定性进行评估，对于确保系统的稳定运行、提高能效、降低运行成本具有重要意义。

1 地源热泵系统的工作原理与组成

1.1 工作原理

地源热泵系统通过地下埋管系统，利用地下水或土壤中的热能进行制冷和供暖。在制冷模式下，系统通过地下埋管吸收土壤或地下水中的冷量，通过热泵机组的压缩机和冷凝器将冷量传递到室内；在供暖模式下，系统则通过地下埋管吸收土壤或地下水中的热量，通过热泵机组的压缩机和蒸发器将热量传递到室内。

1.2 系统组成

地源热泵系统主要由室外地源换热系统、水源热泵机组和室内采暖空调末端系统三部分组成。室外地源换热系统包括土壤埋盘管、地下水井或地表水系统等，用于与地下热源进行热量交换；水源热泵机组则负责将地下埋管中吸收或释放的热量进行压缩和传递；室内采暖空调末端系统则负责将热量或冷量输送到室内，满足用户的供暖或制冷需求。

2 影响地源热泵长期运行稳定性的因素

2.1 地下岩土体热物性

地下岩土体的热物性，特别是导热系数和热容，是地源热泵系统换热效率的基础。导热系数决定了热量在岩土体中的传递速度，而热容则反映了岩土体储存热量的能力。不同地质条件下的岩土体，其热物性存在显著

差异。例如，沙土的导热系数相对较低，而岩石的导热系数则较高。这种差异直接导致地下埋管与岩土体之间的热量交换效率不同，进而影响地源热泵系统的整体运行效果^[1]。当岩土体的导热系数较低时，热量传递速度减慢，导致系统换热效率降低，可能需要更长的运行时间来满足建筑物的冷热需求。同时，岩土体热容的不足也会限制系统储存和释放热量的能力，使得系统在面对极端天气条件时难以保持稳定的运行状态。这些因素共同作用下，可能导致地源热泵系统的能效比下降，甚至无法满足建筑物的能源需求。

2.2 地下水流

地下水流对地源热泵系统的换热效果具有不可忽视的影响。当地下水流速度较快时，它会带走或带来大量的热量，从而干扰地下埋管中的热量交换过程。这种干扰可能导致系统换热效率显著降低，使得地源热泵系统难以维持稳定的运行状态。此外，地下水流还可能引起地下水位的变化，进而影响埋管周围的土壤温度分布。土壤温度是地源热泵系统换热的重要参数，其变化会直接影响系统的换热效率和稳定性。当地下水位上升或下降时，土壤温度也会随之发生变化，这种变化可能导致系统换热效率的不稳定，甚至引发系统故障。

2.3 热泵机组性能

热泵机组的性能是地源热泵系统运行效率和稳定性的核心。一个高效、稳定的热泵机组能够确保系统在各种工况下都能正常运行，并提高系统的能效比。然而，如果热泵机组性能不佳，就可能对系统的稳定运行造成严重影响。性能不佳的热泵机组可能表现为制冷或制热能力不足、能效比低、运行噪音大等问题。这些问题不仅会降低系统的运行效率，还可能增加能耗和维护成本。在极端情况下，热泵机组甚至可能因无法承受过大的负荷而出现故障，导致整个地源热泵系统无法正常运行。

2.4 施工质量与维护管理

施工质量和维护管理对于地源热泵系统的长期运行稳定性至关重要。在施工过程中,埋管深度、管径、间距等参数的精确控制以及管道连接的密封性、保温材料的选用和施工质量都直接关系到系统的换热效率和稳定性。如果施工质量不佳,就可能导致系统换热效率降低、管道泄漏或保温层失效等问题。同样,合理的运行管理和维护保养也是确保系统长期稳定运行的关键。缺乏对系统的定期清洗、检查和维护可能导致潜在故障无法及时发现和处理,进而引发更严重的系统问题^[2]。例如,管道内的杂质和污垢可能堵塞换热器,降低换热效率;管道连接处的松动或腐蚀可能导致泄漏;保温层的破损可能导致热量损失增加。这些问题都会直接影响地源热泵系统的运行稳定性和使用寿命。

3 地源热泵长期运行稳定性评估方法

3.1 数据分析

通过对地源热泵系统的运行数据进行分析,可以评估系统的长期运行稳定性。运行数据包括温度、流量、能耗等关键指标,通过对这些数据的监测和分析,可以了解系统的运行状态和性能变化趋势。例如,可以监测地下埋管进出口水温的变化情况来判断系统的换热效率是否稳定;可以监测热泵机组的能耗情况来评估其运行效率是否高效。

3.2 模型预测

建立地源热泵系统的数学模型,利用历史数据对模型进行训练,并对未来运行状态进行预测,是评估系统长期运行稳定性的另一种有效方法。通过模型预测,可以模拟不同工况下系统的运行状态和性能变化,从而评估系统的稳定性和可靠性。例如,可以建立地下埋管换热过程的数学模型,模拟不同地下水流速度下系统的换热效率变化情况;可以建立热泵机组的性能模型,预测不同工况下机组的能耗和制冷/制热能力。

3.3 故障诊断

通过监测地源热泵系统的运行状态,及时发现并诊断潜在故障,是确保系统长期稳定运行的重要手段。故障诊断可以通过实时监测系统的关键参数(如温度、压力、流量等)来实现。当系统出现异常时,可以通过分析故障数据、查看故障日志等方式来定位故障原因,并采取相应的措施进行修复和维护。

4 实践案例分析

4.1 案例背景

北京某住宅小区自2014年冬季开始采用地源热泵系统为小区内的高层住宅和联排别墅供暖制冷。该系统共

设有412个钻孔埋管换热器,埋管深度为100米,管径为DN32,间距为4米。至2020年11月,埋管区域的地温已从最初的14.78℃降至13.00℃,且系统在冬季的稳定运行存在一定风险。

4.2 评估过程

为了评估该地源热泵系统的长期运行稳定性,研究人员进行了以下工作:(1)数据收集:整理了系统2014-2020年的运行数据,包括地下埋管进出口水温、热泵机组能耗、室内外温度等。(2)模型构建:利用单孔3-D有限元模型获得了土层综合热物性参数,并结合群孔2-D有限元模型对系统的长期稳定性进行了评估和预测。(3)策略比较:比较了不同运行策略(如冬季停机1个季度、增大夏季用量和冬季采用燃气锅炉调峰)的效果,评估其对系统稳定性和经济性的影响。

4.3 评估结果

评估结果显示,该地源热泵系统在长期运行过程中存在以下问题:(1)地温下降:由于地下岩土体热物性的变化和地下水流的影响,埋管区域的地温逐渐降低,导致系统的换热效率下降。(2)冬季运行不稳定:在冬季供暖高峰期,系统的冷热负荷波动较大,容易出现运行不稳定的情况。针对这些问题,研究人员提出了采用燃气锅炉调峰的运行策略。通过引入燃气锅炉作为辅助热源,在冬季供暖高峰期补充热量,提高了系统的稳定性和可靠性。同时,该策略还降低了系统的运行成本,提高了经济效益。

5 改善地源热泵长期运行稳定性的策略

5.1 优化系统设计

针对地下岩土体热物性和地下水流的影响,设计师需进行详尽的地质勘探和热力学分析,以确保系统设计与实际地质条件相匹配。在埋管设计方面,选择合适的埋管深度、管径和间距至关重要。埋管深度应综合考虑地下岩土体的温度分布、导热性能以及系统所需的换热面积。通过精确计算,确定最优的埋管深度,以确保系统能够高效、稳定地与地下岩土体进行热量交换。同时,管径和间距的选择也需根据地质条件和系统需求进行精确计算,以避免因管道过密或过疏而导致的换热效率降低或热量分布不均。在地下水流较快的区域,设置隔水层是减少水流对系统影响的有效措施^[3]。隔水层可以采用防渗材料或构造防水层,以阻断地下水流对埋管周围土壤温度场的干扰。此外,结合水平埋管和垂直埋管的优势,采用混合系统也是提高系统适应性和稳定性的有效途径。水平埋管适用于浅层土壤,而垂直埋管则能深入地下,利用更深层的岩土体进行换热。通过混合使

用这两种埋管方式，可以充分利用不同深度的岩土体热物性，提高系统的整体换热效率和稳定性。

5.2 加强施工质量管理

施工质量的优劣直接关系到地源热泵系统的长期运行稳定性。在施工过程中，应严格控制施工参数，确保埋管深度、管径、间距等参数的精确性符合设计要求。这要求施工人员具备丰富的经验和精湛的技术，能够准确执行设计图纸中的各项参数。同时，加强管道连接的密封性也是至关重要的。管道连接处是系统中最容易出现泄漏的部位，因此应采用高质量的连接件和密封材料，确保管道连接的牢固性和密封性。在管道安装完成后，还应进行严格的压力测试和泄漏检测，以确保系统的密封性能满足设计要求。此外，选用优质保温材料对管道进行保温处理也是提高系统稳定性的重要措施。保温材料应具有良好的保温性能、耐腐蚀性和耐久性，以确保在长期使用过程中能够保持稳定的保温效果。在保温材料的选择和施工过程中，还应考虑其对环境的影响和成本效益，以实现可持续的能源利用。

5.3 建立完善的运行管理制度

建立完善的运行管理制度是确保地源热泵系统长期稳定运行的重要保障。定期维护保养是确保系统稳定运行的基础。制定详细的维护保养计划，定期对系统进行清洗、检查和维护保养，可以及时发现并处理潜在故障，延长系统的使用寿命。在维护保养过程中，应重点关注管道连接处、换热器、水泵等关键部件的磨损和腐蚀情况，及时更换或修复损坏部件。建立完善的故障处理机制也是至关重要的。当系统出现故障时，应能够迅速响应并处理故障，以避免故障扩大或引发更严重的系统问题。这要求运维人员具备丰富的经验和专业的技能，能够准确判断故障原因并采取有效的处理措施。同时，还应建立故障记录和分析制度，对故障原因、处理过程和结果进行记录和分析，为今后的运维工作提供经验和参考^[4]。能耗监测与管理是提高系统能效比的重要手段。定期对系统的能耗进行监测和分析，可以了解系统的能耗情况和能效水平，发现能耗异常和能效低下的问题，并根据监测结果调整运行策略以提高能效比。

5.4 引入辅助系统

在地质条件不佳或系统运行不稳定的情况下，引入辅助系统可以提高地源热泵系统的稳定性和可靠性。这

包括引入燃气锅炉、太阳能热水系统以及采用智能控制系统等措施。引入燃气锅炉可以作为冬季供暖高峰期的辅助热源补充热量。当地源热泵系统无法满足建筑物的供暖需求时，燃气锅炉可以迅速启动并提供额外的热量，以确保建筑物的供暖稳定性。同时，燃气锅炉还可以作为系统的备用热源，在地源热泵系统出现故障或停机时提供应急供暖。太阳能热水系统则可以提供部分热水需求以减少地源热泵系统的负荷。太阳能是一种清洁、可再生的能源，利用太阳能热水系统可以为建筑物提供热水，同时减少地源热泵系统的能耗和负荷。这不仅可以提高系统的能效比，还可以降低系统的运行成本和维护费用。采用智能控制系统对系统的运行状态进行实时监测和调整也是提高系统稳定性和能效比的有效途径。智能控制系统可以实时监测系统的各项参数和指标，如温度、压力、流量等，并根据监测结果自动调整系统的运行策略和参数。这可以确保系统始终保持在最佳的运行状态下，提高系统的稳定性和能效比。同时，智能控制系统还可以实现远程监控和故障预警功能，为运维人员提供便捷、高效的运维手段。

结语

地源热泵系统的长期运行稳定性受到多种因素的影响，包括地下岩土体热物性、地下水流、热泵机组性能、施工质量与维护管理等。通过数据分析、模型预测和故障诊断等方法可以对地源热泵系统的长期运行稳定性进行评估。针对评估结果可以采取优化系统设计、加强施工质量管理、建立完善的运行管理制度和引入辅助系统等措施来提高地源热泵系统的稳定性和可靠性。未来随着技术的不断进步和政策的持续支持地源热泵系统将在更多领域得到广泛应用和推广。

参考文献

- [1]郭红仙,王天麟,程晓辉,等.地源热泵系统长期稳定性及运行策略案例研究[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(05):801-809.
- [2]王玉强.基于TRNSYS的地源热泵长周期工况稳定性研究[J].铁道建筑技术,2017,(11):11-15.
- [3]邓欣,王猛,汪峰,等.某示范小区地源热泵系统长期运行特性监测与分析[J].能源研究与利用,2024,(05):40-45.
- [4]刘馨,宋萌萌,鲁倩男,等.严寒地区地源热泵供热系统运行优化研究[J].建筑技术,2024,55(07):878-881.