

暖通空调系统的故障诊断与预测性维护研究

陈 念

中冶南方都市环保工程技术股份有限公司 湖北 武汉 430205

摘 要：暖通空调系统（HVAC）是现代建筑中不可或缺的部分，负责调节室内环境。本文概述了暖通空调系统的基本组成和常见故障类型，探讨了基于传感器、模型和人工智能的故障诊断方法，并深入分析了预测性维护技术，如振动分析、油液分析和红外热成像技术。同时，提出了制定维护计划和合理配置维护资源的策略，以实现系统的高效、可靠运行。本文的研究为暖通空调系统的故障诊断与预测性维护提供了理论和实践指导。

关键词：暖通空调系统；故障诊断；预测性维护；可靠性

引言：暖通空调系统作为现代建筑中不可或缺的重要组成部分，对于营造舒适、健康的室内环境具有关键作用。然而，随着系统运行时间的增长，各种故障问题也随之涌现，严重影响了系统的正常运行和使用效果。因此，开展暖通空调系统的故障诊断与预测性维护研究显得尤为重要。本文旨在通过综合分析系统故障类型、故障原因及现有诊断与维护技术，探索更为高效、可靠的故障诊断方法和预测性维护策略，以期提升系统性能和延长使用寿命。

1 暖通空调系统概述

暖通空调系统（HVAC）是现代建筑中不可或缺的一部分，它主要负责调节室内的温度、湿度、空气质量和气流分布，为人们创造一个舒适、健康的室内环境。该系统通常由供暖、通风和空气调节三个主要部分组成。供暖部分在寒冷季节为室内提供温暖，常见方式有热水供暖和蒸汽供暖。通过锅炉将水加热，热水或蒸汽在管道中循环，热量经散热器散发到室内。通风系统负责引入新鲜空气，排出室内污浊空气，保证空气流通，降低有害物质浓度，提升室内空气品质，常见设备有风机、风道等。空气调节部分则能精确控制室内温湿度，夏季制冷，冬季制热，通过制冷压缩机、冷凝器、蒸发器等设备，利用制冷剂相变实现热量转移，还可通过加湿器、除湿器调节湿度。

暖通空调系统广泛应用于各类建筑，在住宅中，为居民打造四季宜居空间；商业建筑如商场、写字楼，满足大量人员舒适需求，提升工作和购物体验；医院里，精准温湿度控制利于医疗设备正常运行和患者康复；数据中心，保证设备在适宜环境稳定工作。随着技术发展，暖通空调系统正朝着高效节能、智能控制方向迈进，以降低能耗，提升环境调节精准度与舒适度^[1]。

2 暖通空调系统常见故障类型及原因分析

2.1 制冷系统故障

制冷系统故障是暖通空调常见问题。常见故障表现为制冷效果不佳，室内温度降不下来。其原因之一可能是制冷剂泄漏，制冷剂充注量不足，导致无法充分实现热量转移。制冷系统的密封性受损，比如管道焊接处破裂、阀门密封垫老化等，都会造成制冷剂泄漏。另外，压缩机故障也不容忽视，压缩机长期高负荷运转，机械部件磨损，导致压缩能力下降，无法有效压缩制冷剂，制冷循环就难以正常进行。蒸发器结霜严重同样会影响制冷，空气流通受阻，热交换效率降低，原因可能是温控器失灵，未能及时调整制冷量，使蒸发器温度过低进而结霜。

2.2 制热系统故障

制热系统故障时，室内无法达到预期温度，感觉不暖和。最常见原因是供暖热水或蒸汽循环不畅，可能是管道内有气堵，气体积聚在管道高处，阻碍了热水或蒸汽流动，影响热量输送。锅炉故障也会导致制热问题，例如燃烧器故障，不能充分燃烧燃料，产生的热量不足，使得热水或蒸汽温度不达标。散热器故障也是原因之一，散热器内部水垢堆积，热传导效率降低，即便有足够热量的热水或蒸汽流过，也难以将热量有效散发到室内。

2.3 通风系统故障

通风系统故障主要体现在室内空气不流通，空气质量下降。空气处理系统故障包括风机故障、过滤器堵塞、风道漏风等。风机故障是首要原因，风机叶片损坏、电机烧毁等，都会使风机无法正常运转，新鲜空气无法有效引入，室内污浊空气也难以排出。风道堵塞也较为常见，灰尘、杂物在风道内长期积累，尤其是在风道弯道、分支处，容易造成堵塞，阻碍气流通。新风阀故障，无法根据需求开启或关闭，也会导致通风不畅，要么新风引入量

过少,要么无法关闭,在不需要新风时仍持续引入影响室内空气分配均匀性和室内温度调节^[2]。

2.4 控制系统故障

控制系统负责调节暖通空调各部件运行,控制系统故障会使暖通空调系统操作失灵,无法精准调节。故障表现为传感器故障、控制器故障、执行器故障,其中传感器故障是常见原因,温度、湿度传感器老化或损坏,传感器故障会使测量数据不准确,不能准确感知室内环境参数,反馈给控制系统的信息有误,导致系统调节偏差。控制器故障也不容忽视,如电路板短路、程序出错,控制器无法正确接收传感器信号并发出控制指令,使制冷、制热、通风等设备不能协同工作。此外,执行器故障,如电动调节阀、风门执行器等,不能按照控制器指令动作,也会使系统无法正常调节,比如调节阀无法准确调节水流量,影响制冷或制热效果,使系统运行失调。

3 暖通空调系统故障诊断方法与技术

3.1 基于传感器的故障诊断技术

基于传感器的故障诊断技术是暖通空调系统中较为基础且应用广泛的手段。在系统的关键部位,如制冷系统的蒸发器进出口、压缩机吸排气口,制热系统的锅炉进出口、散热器表面,以及通风系统的风道内、风机前后等位置,布置大量传感器,包括温度传感器、压力传感器、流量传感器、湿度传感器等。这些传感器实时监测系统运行过程中的各项参数,并将数据传输至控制系统;当系统发生故障时,某些参数会偏离正常运行范围。例如,制冷系统中若制冷剂泄漏,蒸发器出口温度会异常升高,压力则会降低,传感器捕捉到这些变化后,系统通过预设的阈值判断规则,就能初步确定故障类型与位置。该技术的优势在于实时性强,能快速察觉系统异常,为及时维修提供依据。并且由于传感器直接获取实际运行数据,诊断结果直观可靠^[3]。不过,其缺点也较为明显,传感器数量众多,安装与维护成本较高,且传感器自身存在老化、精度漂移等问题,可能导致误判。同时,对于一些复杂故障,单一传感器数据可能无法全面反映问题,需要多个传感器数据综合分析,增加了诊断复杂性。

3.2 基于模型的故障诊断方法

基于模型的故障诊断方法借助暖通空调系统的数学模型来实现故障诊断。首先,通过对系统物理过程的深入理解,建立起能准确描述系统运行特性的数学模型,如热力学模型、流体力学模型等。这些模型考虑了系统中各部件的相互作用以及能量、物质的传递关系。在系统实际运行过程中,将传感器采集到的实时数据输入模

型,模型根据预设算法计算出系统在正常运行状态下应输出的参数值;然后,将模型计算值与实际传感器测量值进行对比分析。若两者偏差超出允许范围,则表明系统可能存在故障。例如,在制热系统中,依据热水循环的流体力学模型,结合水泵功率、管道阻力等参数,计算出热水在各部位的流量与温度分布。当实际测量的流量或温度与模型计算值不符时,可推断出可能是管道堵塞、水泵故障等问题。这种方法的优点是对系统运行原理有深入剖析,诊断结果具有较高准确性,尤其适用于复杂系统的故障诊断。但构建精确的数学模型难度较大,需要对系统有全面且深入的了解,同时系统运行条件的变化可能导致模型参数需要不断修正,否则诊断精度会受到影响。

3.3 人工智能故障诊断技术

随着人工智能技术的飞速发展,其在暖通空调系统故障诊断领域的应用愈发广泛。人工智能故障诊断技术主要包括基于神经网络、专家系统、模糊逻辑等的诊断方法。以神经网络为例,通过收集大量暖通空调系统正常与故障状态下的数据样本,对神经网络进行训练,使其学习到不同故障模式与数据特征之间的映射关系。训练完成后的神经网络就像一个智能“专家”,当输入实时传感器数据时,能快速判断系统是否存在故障以及故障类型。专家系统则是将暖通空调领域专家的经验知识整理成规则库,结合实时数据进行推理诊断。模糊逻辑利用模糊集合理论,对一些边界不清晰的故障特征进行描述与判断,更贴合实际系统中故障表现的模糊性。人工智能故障诊断技术的优势显著,它能够处理复杂、非线性的故障问题,具有很强的自学习能力,随着数据不断积累,诊断准确性会持续提高。而且可以快速处理大量数据,提高诊断效率。不过,该技术也面临挑战,如神经网络的训练需要大量高质量数据,数据获取与标注工作量大,且神经网络结构复杂,其内部机制犹如“黑箱”,解释性较差。专家系统的规则库构建依赖专家经验,可能存在知识不完备的情况。

4 暖通空调系统预测性维护技术与策略

4.1 预测性维护技术手段

预测性维护技术手段是实现暖通空调系统高效、可靠运行的关键支撑。其一,振动分析技术被广泛应用。在暖通空调的核心设备,如压缩机、风机等部位安装振动传感器,这些传感器实时监测设备运行时的振动信号。正常运行状态下,设备的振动频率和幅度处于特定范围。当设备内部出现部件磨损、不平衡等潜在故障时,振动特性会发生显著变化。通过对采集到的振动数

据进行频谱分析、时域分析等处理,能够精准识别设备的异常振动模式,从而提前预测故障发生的可能性。例如,压缩机内部的叶片磨损,会导致振动频谱中出现特定频率的峰值,维修人员依据此就能提前安排检修,避免设备突发故障。其二,油液分析技术在预测性维护中也发挥着重要作用。对于使用润滑油的设备,定期采集油液样本,运用光谱分析、铁谱分析等方法检测油液中的磨损颗粒、污染物含量以及理化性质变化。例如,油液中金属颗粒浓度的升高可能预示着设备内部机械部件的过度磨损;酸值、水分含量的增加则可能影响润滑油的润滑性能,进而对设备造成损害。通过油液分析结果,可及时发现设备潜在的磨损、腐蚀等问题,为预防性维护提供有力依据。其三,红外热成像技术也是有效的预测性维护手段。利用红外热像仪对暖通空调系统的管道、设备表面进行扫描,获取其温度分布图像。在正常运行时,系统各部位温度分布相对稳定且符合设计要求。当管道存在堵塞、阀门故障导致局部流量异常,或者设备内部存在接触不良、散热不畅等问题时,相应部位的温度会出现异常升高或降低。通过分析红外热像图,能够快速定位潜在故障区域,提前采取措施解决问题,保障系统正常运行。

4.2 预测性维护实施策略

4.2.1 维护计划制定

制定科学合理的维护计划是预测性维护得以有效实施的重要环节。首先,依据预测性维护技术手段获取的数据,对系统设备的运行状态进行全面评估。将设备按照故障风险程度进行分级,对于高风险设备,制定更为频繁和详细的维护计划。例如,对于使用年限较长且近期振动分析显示异常的压缩机,缩短维护周期,从原本的半年一次检查调整为每季度一次全面检查,包括拆解检查内部部件磨损情况、校准传感器精度等。同时,结合历史维护数据和设备制造商的建议,确定不同设备在不同运行阶段的维护内容。对于新安装的暖通空调系统,初期维护重点在于设备的调试和磨合检查,确保各项参数正常;随着运行时间增长,维护内容逐渐侧重于易损部件的更换和系统性能优化。并且,考虑到季节变化对系统运行的影响,制定季节性维护计划。在夏季制冷高峰期来临前,重点维护制冷系统,检查制冷剂充注量、清洗冷凝器等;冬季制热前,对制热系统进行全面检修,包括检查锅炉燃烧器、疏通热水管道等,以保障系统在不同季节都能高效稳定运行。

4.2.2 维护资源配置

合理的维护资源配置是保障预测性维护计划顺利执行的基础。在人力配置方面,组建专业的维护团队,团队成员应具备暖通空调系统的专业知识和丰富的维修经验,涵盖机械维修、电气控制、制冷制热原理等多个领域。根据维护计划的复杂程度和工作量,合理分配人员任务。对于简单的日常巡检和设备清洁工作,安排初级维修人员;对于涉及设备拆解、复杂故障诊断与修复的任务,则由经验丰富的高级技术人员负责。定期对维护人员进行培训,使其掌握最新的预测性维护技术和设备维修技能,提升团队整体维护能力;在物力资源配置上,储备充足的备品备件。根据设备的易损部件清单和历史更换记录,合理确定备品备件的种类和数量。对于关键设备的重要部件,如压缩机的密封件、风机的电机等,保持一定的安全库存,确保在设备出现故障时能够及时更换,减少停机时间。此外,配备先进的检测和维修工具,如高精度的振动分析仪、红外热像仪、专业的管道清洗设备等,以提高维护工作的效率和质量。在财力资源方面,设立专项维护资金,用于购买备品备件、设备检测工具以及支付维护人员的培训费用等,保障预测性维护工作的持续开展。

结束语

综上所述,暖通空调系统的故障诊断与预测性维护对于保障系统高效、稳定运行具有重要意义。通过采用先进的故障诊断技术和制定科学的预测性维护计划,我们可以及时发现并处理系统故障,有效延长设备使用寿命,同时降低能耗和维护成本。未来,随着物联网、大数据、人工智能等技术的不断发展,未来暖通空调系统故障诊断与预测性维护技术将朝着智能化、集成化、精准化方向发展,进一步提升建筑设施管理水平,为实现绿色建筑目标提供有力支撑。在实际应用中,应根据不同建筑类型和暖通空调系统特点,选择合适的故障诊断与预测性维护方案,智能化、大数据等技术的不断发展,暖通空调系统的故障诊断与预测性维护将迎来更多创新应用,为建筑行业绿色发展贡献力量。

参考文献

- [1]王波.建筑暖通空调设备故障分析及管理维护措施[J].基层建设, 2021, 8(15):49-50.
- [2]刘丽刚.暖通空调系统故障预测维护研究[J].暖通技术与市场, 2024, 3(2):68-71.
- [3]韩硕硕.胡情.暖通空调的自动故障检测及诊断分析[J].制冷技术与工程, 2023, 20(4):34-37.