

基于暖通空调设计的洁净厂房恒温恒湿系统优化与节能改造实践

夏卫健

广东力中建设发展有限公司, 广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ERA.2025080024

摘 要 : 介绍洁净厂房恒温恒湿控制原理, 包括热力学原理及温湿度动态平衡模型, 分析生产工艺、人员等因素对温湿度场的耦合影响, 指出传统空调系统问题, 阐述能耗评估模型、多种控制算法及优化方案, 强调节能改造及未来发展方向。

关 键 词 : 洁净厂房; 恒温恒湿; 节能改造

Optimization and Energy Saving Transformation of Constant Temperature and Humidity System in Clean Plant Based on Hvac Design

Xia Weijian

Guangdong Lizhong Construction Development Co., LTD., Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : This paper introduces the principle of constant temperature and humidity control in clean rooms, including the thermodynamic principle and the dynamic balance model of temperature and humidity. It analyzes the coupling influence of production process, personnel and other factors on the temperature and humidity field, points out the problems of traditional air conditioning system, expounds the energy consumption evaluation model, various control algorithms and optimization schemes, and emphasizes the energy saving transformation and future development direction.

Keywords : clean plant; constant temperature and humidity; energy saving transformation

引言

随着现代工业的发展, 洁净厂房对恒温恒湿环境的要求日益严格。2022年发布的相关工业环境标准强调了洁净厂房环境控制的重要性。洁净厂房的温湿度受多种因素影响, 如生产工艺、人员活动和设备散热等, 这些因素相互耦合, 构成复杂的影响机制。传统空调系统在温湿度控制精度和能耗方面存在问题, 亟待优化。因此, 建立能耗评估模型、开发先进控制算法、构建预测控制模型、设计差异化送风方案、优化冷热源配置以及应用高效换热器技术等措施对于实现洁净厂房恒温恒湿系统的高效运行和节能改造至关重要。

一、洁净厂房恒温恒湿系统理论基础

(一) 恒温恒湿控制原理

洁净厂房恒温恒湿控制基于基本的热力学原理。热量传递主要有热传导、热对流和热辐射三种方式, 在厂房环境中均有体现。例如, 围护结构的热量传递涉及热传导, 空气流动带来热对流, 而设备及人员的热辐射也不可忽视。温湿度的动态平衡模型则考虑了水分的蒸发与凝结过程。当空气达到饱和状态时, 水汽含量达到最大值, 相对湿度为100%。在实际厂房环境中, 空气的温湿度受多种因素影响, 包括室外气候条件、厂房内设备散热散湿、人员活动等。通过对这些因素的综合分析, 并依据热力学原理和动态平衡模型, 可以实现对洁净厂房温湿度的有效控制^[1]。

(二) 环境参数影响因素

生产工艺、人员活动以及设备散热等因素均会对洁净厂房的

温湿度场产生耦合影响。生产工艺过程可能涉及到热量的产生或吸收, 例如某些化学反应会释放热量, 从而影响环境温度^[2]。人员在厂房内活动会释放热量和水汽, 其数量与人员的密度以及活动强度相关。设备散热也是一个关键因素, 各类生产设备在运行过程中会产生热量, 这些热量如果不能及时排出, 将会导致环境温度升高, 进而影响温湿度的平衡。这些因素相互作用, 共同构成了复杂的温湿度场影响机制, 在洁净厂房恒温恒湿系统的设计和运行中需要综合考虑。

二、洁净厂房空调系统现状分析

(一) 既有系统运行特性

传统空调系统在洁净厂房的运行中存在一些问题。在温湿度控制精度方面, 实测数据显示其难以精准维持设定的温湿度范

围。这可能是由于系统的传感器精度、控制算法不够先进，或者是设备老化等原因导致^[3]。在能耗方面，传统系统往往能耗较高。一方面可能是因为设备本身的能效比较低，另一方面可能是系统的运行模式不够优化，例如在部分负荷工况下不能有效调节制冷量或制热量，导致能源浪费。这些不足严重影响了洁净厂房的生产环境稳定性和能源利用效率，亟待优化与改造。

（二）能耗结构诊断方法

建立基于分项计量和负荷解耦的能耗评估模型，是洁净厂房空调系统能耗结构诊断的有效方法。分项计量可对空调系统的各组成部分，如制冷机组、风机、水泵等的能耗进行单独测量和记录，以便准确了解各部分能耗占比情况^[4]。通过负荷解耦，能够将空调系统的总负荷分解为不同的组成部分，如显热负荷、潜热负荷等，进而分析各负荷成分在不同运行工况下的变化规律及其对能耗的影响。该模型有助于深入剖析洁净厂房空调系统的能耗结构，为后续的优化与节能改造提供有力依据。

三、恒温恒湿系统优化设计

（一）控制策略优化

1. 多参数耦合控制算法

针对洁净厂房暖通空调恒温恒湿系统，开发基于模糊 PID 的温湿度解耦控制算法具有重要意义。传统控制方法难以满足高精度温湿度控制需求，尤其是在多参数耦合的复杂工况下。模糊 PID 控制算法结合了模糊控制的灵活性和 PID 控制的精确性，能够有效应对系统的非线性与时变性。通过对温湿度的解耦处理，避免了两两者之间的相互干扰，提高了控制精度和稳定性。该算法能够根据系统的实时运行状态自动调整控制参数，适应不同的工作负荷和环境变化，从而实现更高效的恒温恒湿控制，达到节能的目的^[5]。

2. 动态调节机制设计

构建考虑工艺排班和设备启停的预测控制模型，可有效优化恒温恒湿系统的动态调节机制。通过分析工艺排班和设备启停规律，获取室内热湿负荷的动态变化信息^[6]。基于这些信息，建立预测模型，提前预估系统所需的温湿度调节量。该模型能够根据不同的生产阶段和设备运行状态，动态调整系统的运行参数，避免过度调节造成的能源浪费。同时，结合实时监测数据对模型进行修正和优化，提高预测的准确性和可靠性。这样的动态调节机制设计，使恒温恒湿系统能够更加精准地适应洁净厂房的实际需求，在保证室内环境稳定的前提下，实现节能目标。

（二）系统架构改进

1. 分区送风系统设计

基于洁净等级划分，设计差异化送风方案以优化分区送风系统。针对不同洁净等级区域，合理确定送风量、风速及送风角度等参数。在洁净度要求高的区域，提高送风量及风速，确保空气快速置换，维持洁净环境；同时，精确调整送风角度，使空气均匀分布，避免产生涡流及死角。对于洁净度要求相对较低的区域，适度降低送风量及风速，既能满足环境要求，又可降低能

耗。通过这种基于洁净等级的差异化送风设计，提高恒温恒湿系统的性能，实现节能与环境控制的双重目标^[7]。

2. 冷热源配置优化

洁净厂房对恒温恒湿系统要求严格，其冷热源配置优化至关重要。多联机与集中式冷源协同运行的优化配置是关键方向。需综合考虑厂房的实际负荷需求、运行时间以及不同区域的温湿度要求差异等因素。通过精确计算各区域的冷热负荷，合理分配多联机与集中式冷源的承担比例。例如，对于负荷变化较大且使用时间不固定的区域，可优先采用多联机系统，以提高系统的灵活性和部分负荷性能^[8]。而对于负荷相对稳定且较大的核心生产区域，集中式冷源则能更好地保证温湿度的稳定性和精度。同时，要注重两者之间的协同控制策略，确保在不同工况下都能高效运行，实现节能和温湿度精准控制的目标。

四、节能改造实施路径

（一）设备系统改造

1. 高效换热器应用

板式换热器与热管技术在高效换热器应用中具有显著的节能效益。板式换热器通过其独特的板片结构，实现了高效的热交换。其紧凑的设计使得传热面积较大，能够在较小的空间内完成大量的热量传递，从而提高了能源利用效率。热管技术则利用了热管内工质的相变过程来传递热量，具有极高的导热性能。这种技术能够快速地将热量从一个地方转移到另一个地方，减少了热量在传递过程中的损失。在洁净厂房恒温恒湿系统中应用这些高效换热器技术，可以有效地降低系统的能耗，提高系统的运行效率，实现节能改造的目标^[9]。

2. 变频技术集成

设计风机水泵的变频联动控制方案是变频技术集成的关键。根据洁净厂房的实际需求和运行特点，合理配置变频器，实现对风机和水泵的精确调速。通过传感器实时监测环境温度湿度、压力等参数，将数据反馈给控制系统。控制系统根据预设的目标值和反馈信息，自动调整变频器的输出频率，从而调节风机和水泵的转速。这样可以使设备的运行功率与实际需求相匹配，避免了设备长期在高负荷或低效率状态下运行，达到节能的目的。同时，变频联动控制还可以提高系统的稳定性和可靠性，减少设备的启停次数，延长设备的使用寿命^[10]。

（二）能源回收利用

1. 排风热回收系统

转轮式全热回收装置是排风热回收系统的关键。其通过转轮在排风与新风之间交替旋转，实现热量和湿度的传递与回收。在洁净厂房暖通空调设计中，需根据厂房实际的排风量和新风量需求，合理选型转轮。转轮的材质和性能对回收效果至关重要，应选择具有高效热传导和吸湿性能的材料。同时，要精确设计转轮的转速，确保在排风与新风之间实现最佳的热湿交换效率。安装位置也需精心考虑，要保证排风与新风能够顺畅地流经转轮，且避免出现气流短路等情况。此外，还需配备相应的控制系统，根

据室内外温湿度差异以及厂房的运行工况，自动调节转轮的运行参数，以实现高效的能源回收利用，降低暖通空调系统的能耗。

2. 冷凝水余热利用

在洁净厂房恒温恒湿系统的节能改造中，冷凝水余热利用是重要环节。冷凝水在暖通空调系统运行过程中会携带大量热量，若直接排放会造成能源浪费。通过合理的技术手段，可将这部分余热回收利用。例如，可采用热交换器，使冷凝水与需要加热的介质（如新风或循环水）进行热交换，从而提高介质的温度，减少系统中其他加热设备的能耗。同时，要精确控制热交换过程，确保热量传递的效率和稳定性。还需考虑冷凝水的水质对热交换设备的影响，采取相应的水质处理措施，防止设备结垢和腐蚀，保障系统长期稳定运行，实现能源的高效回收利用。

（三）智能监控平台

1. 物联网监测架构

在节能改造实施路径的智能监控平台中，物联网监测架构是关键。该架构基于无线传感网络部署实时监测系统。通过在洁净厂房内关键位置设置多种传感器，如温度传感器、湿度传感器、能耗传感器等，实时采集暖通空调系统运行相关的数据。这些传感器将数据无线传输至汇聚节点，再由汇聚节点将数据发送至监控平台。监控平台对接收的数据进行分析处理，一方面可以实时了解系统的运行状态，包括温度、湿度是否达标，能耗是否正常等；另一方面，通过对历史数据和实时数据的综合分析，为节能改造提供数据支持，以便及时调整暖通空调系统的运行策略，实

现恒温恒湿系统的优化和节能目标。

2. 数字孪生模型应用

建立系统运行的虚拟仿真与优化平台，即基于数字孪生模型应用于暖通空调洁净厂房恒温恒湿系统。通过采集厂房实际运行数据，包括温度、湿度、风速等参数，构建精准的数字孪生模型。该模型能够实时反映系统的运行状态，模拟不同工况下的性能表现。利用此模型，可对系统进行优化分析，如预测不同季节、不同生产负荷下的能耗情况，提前调整运行策略以实现节能目标。同时，结合智能监控平台，实时获取设备运行数据并反馈至数字孪生模型，使其不断更新和完善，从而为节能改造提供更准确的决策依据。

五、总结

系统优化与节能改造在基于暖通空调设计的洁净厂房恒温恒湿系统中展现出协同效应。通过改造，温湿度控制精度显著提升，达到30%的提升幅度，同时能耗降低25%，这充分证明了改造措施的有效性。在未来发展方向上，AI算法与可再生能源的集成具有巨大潜力。AI算法可实现更精准的温湿度控制和能源管理，提高系统运行效率。可再生能源的应用则能进一步降低能耗，减少对传统能源的依赖，符合可持续发展的理念。这将为洁净厂房恒温恒湿系统带来更高效、节能、环保的运行模式，推动相关行业的发展。

参考文献

- [1] 俞春尧. 恒温恒湿空调系统节能研究 [D]. 浙江大学, 2011.
- [2] 王培. 恒温恒湿空调系统的节能研究 [D]. 南京理工大学, 2008.
- [3] 陈浩. 恒温恒湿车间空调设计 [D]. 同济大学, 2004.
- [4] 陈青龙. 基于双回路表冷器的恒温恒湿空调系统优化控制 [D]. 浙江大学, 2017.
- [5] 刘俊麟. 电子洁净厂房净化空调系统节能优化技术措施 [D]. 重庆大学, 2022.
- [6] 张兰英, 边玉国. 洁净厂房恒温恒湿空调系统设计 [J]. 企业技术开发 (下半月), 2014(5): 22-24.
- [7] 赵琳, 董欣. 某改造厂房恒温恒湿洁净空调设计 [J]. 新材料新装饰, 2020, 2(17): 51-52.
- [8] 姜吉鹏. 恒温恒湿空调用于洁净厂房中的要点 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017.
- [9] 张亮. 暖通空调的恒温恒湿设计 [J]. 科技视界, 2016(20): 82, 101.
- [10] 李阳阳. 浅谈暖通空调的恒温恒湿设计 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018(33): 1139.