

Design and Application of Precision Air Conditioning System for Clean Room

Zuguo Yu

Jiangsu Zhongdian Innovation Environmental Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214135, China

Abstract

To address the stringent requirements of high-purity cleanrooms for temperature and humidity control precision (temperature fluctuation within $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$, humidity fluctuation within $\pm 1\%$) and airflow uniformity, a precision HVAC system for cleanrooms has been designed. This system integrates four core modules: a precision fresh air conditioning system, a precision thermal load regulation system, low-thermal-conductivity enclosure structures, and a microporous airflow distribution system. Through high-precision rapid-response components, permeable flow distribution structures, adjustable load units, and secondary temperature control mechanisms, it resolves issues such as uneven air mixing, difficulty in eliminating secondary loads, and insufficient control accuracy in traditional systems. Practical applications demonstrate that this system significantly reduces temperature and humidity fluctuation ranges, optimizes temperature distribution and airflow uniformity within cleanrooms, effectively mitigates the impact of excessive secondary loads, and meets environmental control requirements for high-end scenarios such as Class 100 cleanrooms.

Keywords

Cleanroom; Temperature and humidity control; Air conditioning system; Precision regulation; Airflow organization; CFD

一种用于洁净室的精密温湿度空调系统设计与应用

余祖国

江苏中电创新环境科技有限公司, 中国·江苏 无锡 214135

摘 要

针对高净化等级洁净室对温湿度控制精度(温度波动 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 以内、湿度波动 $\pm 1\%$ 以内)及气流均匀性的严苛需求,设计一种用于洁净室的精密温湿度空调系统。该系统集成精密新风空调系统、精密冷热负荷调节系统、低导热围护结构和微孔式气流分布系统四大核心模块,通过高精度快速反应组件、渗透型均流结构、可调节负荷单元及二次温控机制,解决传统系统混风不均、二次负荷难以消除、控制精度不足等问题。实践表明,该系统可显著降低温湿度波动范围,优化洁净室内温度场与气流组织均匀性,有效规避二次负荷超限影响,满足百级洁净室等高端场景的环境控制需求。

关键词

洁净室; 温湿度控制; 空调系统; 精密调节; 气流组织; CFD

1 引言

在半导体制造、精密仪器研发、生物制药等高精尖领域,洁净室的温湿度稳定性与气流均匀性直接决定产品质量与检测精度。这类场景通常要求百级洁净等级,且温湿度波动控制在 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 1\%$ 以内,传统精密温湿度空调系统难以同时满足洁净度、控温精度与气流均匀性的三重需求。

现有技术主要存在两类缺陷:一是采用高效送风口非满布+普通照明灯具形式,虽可控制送风温湿度波动,但紊流气流易导致洁净度不达标,且普通照明产生的二次负荷无法消除,破坏温度均匀性;二是采用风机过滤单元+普通照明灯具+DCC+MAU形式,虽能实现层流气流,但新风

与回风混风不充分,且设备运行产生的二次负荷难以调控,影响温湿度控制精度。为此,本文设计一种集成多模块协同工作的精密温湿度空调系统,通过结构优化与控制机制升级,弥补传统系统不足,为高要求洁净室提供可靠的环境控制方案。

2 系统总体设计

本系统以“精准调控、均匀布风、负荷可控、低耗保温”为设计原则,整体由精密新风空调系统、精密冷热负荷调节系统、低导热围护结构和微孔式气流分布系统构成,各模块协同运作,形成完整的温湿度控制闭环。系统核心逻辑为:通过新风预处理与循环风精密调节结合,实现温湿度精准控制;借助渗透型均流结构与层流布风设计,保障气流均匀性;通过可调节负荷单元消除二次负荷影响;依托低导热围护结构减少外界环境干扰,最终实现洁净室高等级环境控

【作者简介】余祖国(1972—),男,中国湖北黄梅人,本科、高工(暖通),从事通风与空调工程研究。

制目标。

3 系统各模块结构与工作原理

3.1 精密新风空调系统

精密新风空调系统是保障洁净室空气质量与正压环境的基础,主要由精密新风空调机组、新风管、新风定风量阀、精密新风温湿度采集系统和精密控制阀组组成。各组件的布局与功能设计如下:精密新风空调机组通过新风管连接洁净室外侧的回风夹道,负责将室外空气处理至接近室内温湿度状态点;新风定风量阀设置在新风管中部,通过稳定风量维持洁净室正压环境,避免外界污染物渗入;精密新风温湿度采集系统安装在新风管与回风夹道连接处,实时监测送入回风夹道的新风温湿度参数;精密控制阀组部署在精密新风空调机组进风管上,根据采集系统反馈信号动态调节新风处理参数,确保新风对洁净室温湿度的影响处于可控范围。

工作时,室外空气经精密新风空调机组处理后,通过新风管送入回风夹道,与循环风初步混合。新风定风量阀持续调节风量以维持洁净室正压,精密温湿度采集系统与控制阀组形成闭环控制,保障新风参数稳定,为后续循环风精密调节奠定基础。

3.2 精密冷热负荷调节系统

该系统是温湿度精准控制的核心,集成高精度快速反应可变量负荷处理单元、变频压缩机、冷媒管、冷却水控制阀组、送风静压箱、送风管、渗透型均流风管、回风静压箱、送风定风量阀、电加热器、高精度可变量加湿系统、扩散管及精密循环风温湿度控制系统等组件,形成多级负荷调节与温控闭环。

高精度快速反应可变量负荷处理单元设置在上静压箱内,内置冷盘管,通过回风静压箱与回风夹道连接,负责处理循环风的湿负荷与冷负荷;变频压缩机安装在回风夹道中、处理单元同侧下方,通过冷媒管与处理单元连接,将处理负荷过程中产生的热量导出;冷却水控制阀组连接变频压缩机与外部冷却水系统,实现系统热量向外界的转移;送风静压箱部署在处理单元出口,用于稳定送风压力;送风管各支路均配备送风定风量阀与电加热器,分别调节支路风量与补充热负荷;渗透型均流风管与送风管末端连接且与回风夹道相通,保障送风与回风充分混合;高精度可变量加湿系统通过扩散管连接送风静压箱,向送风内补充水蒸气以调节湿度;精密循环风温湿度控制系统安装在洁净室内墙上,实时采集室内温湿度信号并反馈至核心处理单元。

工作流程分为负荷处理、混风调节、湿度补充与热量转移四部分:首先,精密循环风温湿度采集系统将室内参数信号反馈至处理单元,回风静压箱从回风夹道吸入混合风,经处理单元内冷盘管处理湿负荷与冷负荷后送入送风静压箱;随后,送风经送风管支路输送,送风定风量阀调节风量,电加热器根据需求补充热负荷,再通过渗透型均流风管与回风夹道内空气均匀混合,消除混风不均导致的温度场波动;

同时,高精度可变量加湿系统通过扩散管向送风静压箱内送入水蒸气,与送风充分混合以精准调节室内湿度;最后,处理单元产生的热量经冷媒管传递至变频压缩机,再通过冷却水控制阀组与外部冷却水系统配合,将热量导出系统,实现负荷平衡。此外,加湿系统与变频压缩机运行产生的附加冷负荷,会被回风夹道内空气带入处理单元再次处理,避免附加负荷影响室内环境。

3.3 低导热围护结构

为减少外界环境温度波动对洁净室内部的干扰,系统设计低导热围护结构,涵盖第一低导热夹心彩钢板、第二低导热夹心彩钢板、低导热天棚维护结构与低导热地面维护结构。其中,第一低导热夹心彩钢板用于洁净室四周墙体封装,第二低导热夹心彩钢板用于回风夹道四周封装,且后者厚度大于前者,强化回风夹道的保温隔热效果;低导热天棚维护结构粘贴在上静压箱上方的楼板、混凝土梁、混凝土柱子表面,低导热地面维护结构粘贴在下静压箱下方的楼板表面,形成全方位的保温隔热屏障,从结构层面阻断外界热量传递,降低系统负荷调节压力,保障温湿度控制稳定性。

3.4 微孔式气流分布系统

该系统负责优化洁净室气流组织,实现层流送风与均匀回风,同时消除设备运行产生的二次负荷,主要由负荷可调整调节过滤单元、均流天花孔板系统、均流高架地板系统及负荷可调整均匀辐射照明系统组成。

负荷可调整调节过滤单元安装在洁净室上部,连通上静压箱与均流层,既能过滤空气以保障洁净度,又可根据室内温度需求调节自身发热量,避免产生过量二次负荷;均流天花孔板系统部署在洁净室与均流层之间,将过滤后的空气均匀分配至每个送风孔,形成稳定层流气流;负荷可调整均匀辐射照明系统安装在均流天花孔板上,避开送风孔位置,可根据室内温度控制要求调节发热量,消除照明设备带来的二次负荷干扰;均流高架地板系统设置在洁净室底部与下静压箱之间,通过孔板将室内层流气流入回风夹道,完成气流循环。

工作时,上静压箱内的空气经负荷可调整调节过滤单元过滤与负荷调节后,送入均流层;均流天花孔板系统将空气均匀分配为层流,送入洁净室精密温控区;室内空气经均流高架地板系统导入回风夹道,与新风、处理后的循环风混合后返回上静压箱,形成闭环气流循环。同时,过滤单元与照明系统通过可调整负荷设计,将自身运行产生的二次负荷控制在合理范围,避免影响室内温湿度稳定性。

4 系统优势分析

相较于传统精密温湿度空调系统,本设计具备四大核心优势:

第一,控温精度显著提升。采用高精度快速反应可变量负荷处理单元与冷媒盘管—压缩机—冷却水主系统的二次温控机制,可快速响应室内温湿度变化,极大降低温湿度

波动范围，完全满足百级洁净室 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 1\%$ 的波动控制要求，同时减少传感器信号延迟带来的调控偏差。

第二，气流与温度场均匀性优化。通过渗透型均流风管设计，使送风与回风在回风夹道内充分混合，有效规避传统系统混风不均导致的温度场波动；结合微孔式气流分布系统的层流送风设计，进一步保障洁净室内气流均匀，兼顾洁净度与温度均匀性。

第三，二次负荷可控。采用负荷可调整调节过滤单元与负荷可调节均匀辐射照明系统，可根据室内温度控制要求动态调节设备发热量，从源头消除二次负荷超限问题，避免二次负荷对温湿度控制的干扰，降低系统调节压力。

第四，抗干扰能力强。全方位低导热围护结构形成高效保温隔热屏障，显著减少外界环境温度波动对洁净室内部的影响，为系统精准调控提供稳定的外部环境，提升系统运行稳定性。

5 CFD 技术应用

以某国家存储器项目为例，通过 CFD 技术对洁净室内气流组织及温湿度进行模拟评估，项目 LITHO 区百级单向流，单侧回风距离超过 60m，温度控制精度 $22^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，通过 CFD 模拟评估快速确定最优方案，优化 LITHO 区域的 FFU 布置，由原设计 50% 布置率调整为 33%，LITHO 区域 FFU 减少 415 台，减少投资和运维成本，整体温湿度控制要求满足 $22 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 要求。

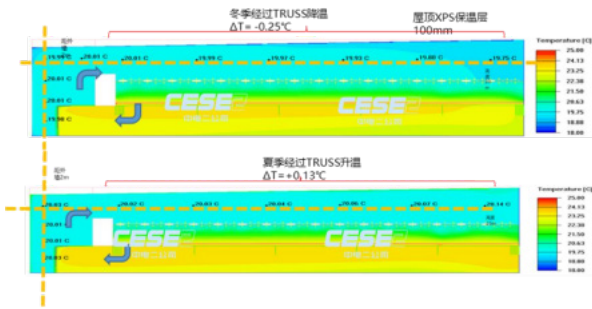


图 1

通过仿真模拟分析高架地板布置对洁净室气流单向流影响，优化高架地板布置梯度，使气流满足单向流要求。

6 结语

本文设计的用于洁净室的精密温湿度空调系统，通过四大核心模块的协同设计，有效解决了传统系统混风不均、

二次负荷难以消除、控制精度不足等关键问题，能够实现百级洁净室对温湿度波动与气流均匀性的严苛要求，为高精尖领域洁净室环境控制提供了可靠方案。该系统的模块化设计便于安装与维护，各组件采用现有成熟技术，具备较强的工程应用可行性。

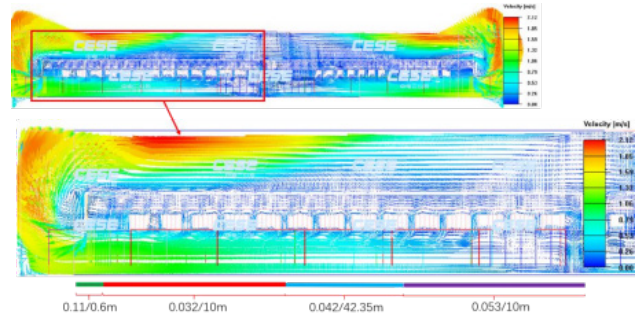


图 2

未来可进一步优化方向：一是引入智能算法，结合机器学习对系统运行参数进行预判性调节，提升调控响应速度与精度；二是优化系统能耗结构，通过余热回收、变频调速优化等技术，降低系统运行能耗；三是针对不同行业洁净室的个性化需求，开发模块化定制方案，拓展系统应用场景。相信随着技术的不断迭代，该系统将在更多高精尖制造与研发领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部；中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 洁净厂房设计规范：GB 50073-2013[S]. 北京：中国计划出版社，2013. 代替GB 50073-2001，适用于各类洁净厂房的设计，明确了空气净化、温湿度控制等核心技术要求。
- [2] 精密洁净室温湿度控制技术进展[J]. 暖通空调，2018，48（10）：1-7. DOI: 10.19991/j.hvac1971.2018.10.01. 该文聚焦百级洁净室控温难点，提出多模块协同调控策略，为本文系统设计提供理论参考。
- [3] 洁净室气流组织优化设计与数值模拟[J]. 建筑科学，2019，35（8）：56-62. 基于Fluent仿真工具，对比分析不同布风方式的气流均匀性，为本文微孔式气流分布系统设计提供数据支撑。
- [4] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ANSI/ASHRAE 110-2016, Methods of Testing Performance of Laboratory Fume Hoods[S]. Atlanta: ASHRAE, 2016. 该标准规定了通风柜性能测试方法，可间接用于评估洁净室通风与气流组织的稳定性。