

# 以绿色工业建筑理念为思路的医药洁净厂房暖通节能设计探讨

全明强

上海朗脉洁净技术股份有限公司，上海市，201100；

**摘要：**本文探讨了以绿色工业建筑理念为指导的医药洁净厂房暖通节能设计。项目位于华东地区国家级经济技术开发区，总建筑面积58,000平方米，遵循GMP及ISO 14644-1标准，设计为7级和8级洁净度等级。通过BIM技术优化布局、高效围护结构、节能设备选型、用能计量、节能控制及能量回收等技术手段，构建了全生命周期的节能体系。项目实现了单位产品能耗较行业基准值降低25%的目标，其中暖通空调系统能耗占比由45%降至38%以下。本文详细阐述了洁净空调系统、CNC区空调、舒适性空调及其他系统的设计，以及节能设备选用、用能计量、节能控制和能量回收等关键节能设计要点，为医药洁净厂房的绿色设计与建设提供了参考。

**关键词：**绿色工业；医药；洁净厂房；暖通设计

**DOI：**10.69979/3029-2727.24.11.038

## 引言

随着生物医药产业的快速发展，医药洁净厂房的建设需求日益增长。然而，医药洁净厂房因其高洁净度、高精度环境控制要求，导致能源消耗巨大，尤其是暖通空调系统的能耗占比显著。在国家推动绿色工业建筑发展的背景下，如何以绿色工业建筑理念为指导，实现医药洁净厂房的暖通节能设计，成为当前亟待解决的问题。本文依托某大型生物医药企业新建的现代化医药洁净厂房项目，通过综合运用先进的节能技术和设计理念，旨在探索一种高效、环保的医药洁净厂房暖通节能解决方案，为同类项目的建设提供借鉴和参考。

## 1 工程概况

本工程为大型生物医药企业新建58,000平方米医药洁净厂房，位于华东开发区，高23.5米，含五大功能模块，遵循GMP和ISO 14644-1标准，核心区域洁净空调覆盖12,000平方米。作为省级绿色工业示范，依据GB/T 51141-2015标准，重点构建暖通空调系统节能体系。通过BIM优化布局，利用自然光与风；围护结构采用300mm防火岩棉与Low-E玻璃，外窗传热系数 $\leq 2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，屋面 $\leq 0.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。秉承“被动优先、主动优化”理念，实施建筑本体节能、设备能效提升、可再生能源利用三级架构，实现单位产品能耗降25%，暖通空调系统能耗占比降至38%以下。

## 2 设计参数

### 2.1 室外设计参数

#### 2.1.1 室外设计参数<sup>[2]</sup>

项目所在地属夏热冬冷气候区，室外设计参数依据《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50019及当地气象站近10年统计数据综合确定。夏季空调室外计算干球温度为35.6℃，湿球温度28.2℃，极端最高温度41.3℃；冬季空调室外计算干球温度-3.5℃，相对湿度75%，极端最低温度-8.7℃。过渡季（4月、10月）平均温度范围为15~22℃，相对湿度55%~70%。全年主导风向为东南风，夏季平均风速2.8m/s，冬季平均风速3.2m/s，大气压力夏季为100.12kPa，冬季为102.34kPa。室外空气质量指数（PM2.5年均值）为45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，满足医药厂房新风过滤系统的设计边界条件。

### 2.2 室内设计参数

如表1所示，室内环境控制严格遵循生产工艺需求与《医药工业洁净厂房设计标准》GB 50457要求。核心生产区（7级洁净度）温度控制为20~24℃ $\pm 1^\circ\text{C}$ ，湿度45%~60% $\pm 5\%$ ，洁净度等级对应的悬浮粒子浓度限值为 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 粒子 $\leq 352,000$ 个/ $\text{m}^3$ ；辅助生产区（8级洁净度）温度22~26℃ $\pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度40%~65% $\pm 10\%$ 。质量控制实验室采用独立温控系统，温度精度达 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。非洁净区域（如包装区）夏季温度设定为26 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，冬季20 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 65\%$ 。各区域新风量按人员密度（4~6 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$ ）与维持正压需求（8~15次/h换气）综合确定，噪声控制指标按功能区划执行A声级 $\leq 65\text{dB}(\text{A})$ 标准，压差梯度从核心区至普通区依次递减（5Pa $\rightarrow$ 10Pa $\rightarrow$ 15Pa），有效防止交叉污染。

表1 室内设计参数表

区域名称	洁净度等级 (ISO 14644-1)	温度 (°C)	相对湿度 (%)	悬浮粒子浓度 (≥0.5μm, 个/m³)	新风量 (次/h)	噪声 [dB(A)]	压差梯度 (Pa)
核心生产区	7级 (10,000级)	20~24±1	45~60±5	≤352,000	8~12	≤65	15
辅助生产区	8级 (100,000级)	22~26±2	40~65±10	≤3,520,000	6~10	≤65	10
质量控制实验室	非洁净区	22±0.5 (恒温)	50±5 (恒湿)	—	10~15	≤60	10
包装区	非洁净区	26±2 (夏)/20±2 (冬)	≤65	—	4~6	≤65	5
动力中心	非洁净区	≤32 (夏)/≥16 (冬)	—	—	3~5	≤70	—

### 3 暖通系统设计

#### 3.1 洁净空调系统

本项目洁净空调系统采用“MAU (新风机组)+FFU (风机过滤单元)+DCC (干式冷盘管)”组合式空气处理方案,实现核心生产区 (ISO 7级)与辅助生产区 (ISO 8级)的温湿度及洁净度精准控制。MAU机组配备三级过滤 (G4初效+F8中效+H14高效过滤器),预冷除湿后新风经FFU层流送风,垂直单向流组织确保洁净区换气次数≥40次/h,同时通过DCC干工况运行消除室内显热负荷,避免传统冷冻除湿导致的再热能耗。系统冷源采用磁悬浮离心式冷水机组 (COP 6.8)+高温螺杆机组 (COP 5.2)的梯级供冷模式,夏季为MAU提供12°C/18°C中温冷水,冬季通过板换回收工艺废热制备45°C热水,满足核心区恒温需求。洁净区压差控制采用变风量文丘里阀,实时监测相邻区域压差并动态调节送排风量,压差精度达±1Pa。此外,系统集成变频控制技术,非生产时段切换至30%风量的“值班模式”,年节能率可达18%。

#### 3.2 CNC区空调、舒适性空调及其他系统

针对质量控制实验室等CNC (恒温恒湿)区域,采用独立双冷源精密空调系统,配置二次回风与电极式加湿器,实现温度波动≤±0.3°C、湿度波动≤±3%的严苛要求。通过湿度优先控制策略,利用转轮除湿机预除湿与表冷器深度除湿协同运行,解决夏季冷热抵消问题,综合能效较常规方案提升22%。非洁净区 (如包装区、动力中心)采用变冷媒流量多联机 (IPLV 8.5)与全空气定风量系统结合的设计,夏季按26°C设定运行,冬季通过热回收装置利用排风余热预热新风,过渡季启用免费冷却模式。此外,动力中心设置防爆型屋顶式空调机组,配套无蜗壳离心风机 (效率82%)与电子膨胀阀,确保高温高湿环境下设备稳定运行。全厂空调水系统采用四管制异程式设计,通过动态水力平衡阀实现各支路流量自适应调节,减少输配能耗15%。

#### 3.3 通风系统

通风系统按工艺需求划分为工艺排风、全面通风与事故排风三类。核心生产区设置VAV变风量排风系统,

配备袋进袋出式高效过滤器 (对0.3μm颗粒物过滤效率≥99.99%),排风量根据反应釜运行状态动态调节 (0~100%无级变速),废气经活性炭吸附+喷淋塔两级处理后达标排放。洁净区全面通风采用热管式热回收装置,显热回收效率达70%,年节约新风处理能耗约120MWh。实验室局部排风系统采用文丘里变风量阀,确保通风柜面风速稳定在0.5m/s±0.1m/s,同时通过DDC控制器与房间压差连锁,防止有害气体外溢。动力中心柴油发电机房设置独立防爆排风系统,事故工况下换气次数≥12次/h,并配置消声器与防火阀。全系统采用智能化控制平台,通过OPC协议与BMS系统集成,实现通风设备启停、风量调节与能耗数据的实时监控与优化。

### 4 以绿色工业建筑理念为思路的暖通节能设计要点

#### 4.1 选用高效的节能设备

本项目基于全生命周期能效最优原则,系统性配置高效暖通设备,构建覆盖冷热源、输配系统及末端装置的节能矩阵。冷源侧采用磁悬浮变频离心式冷水机组 (COP 6.8)与高温水螺杆机组 (COP 5.2)的复合供冷系统,前者通过无油磁轴承技术降低30%机械损耗,实现10%~100%无级调节,部分负荷性能系数 (IPLV)达1.15;后者提供18°C中温冷水适配干式冷盘管 (DCC)运行,避免传统7°C冷水再热能耗。洁净空调系统核心设备选用FFU (风机过滤单元)模组,搭载EC后弯离心风机 (效率82%)与U15型高效过滤器 (阻力≤120Pa),较常规AC风机节能25%;MAU (新风机组)集成变频驱动离心风机 (AMCA认证等级A)、高分子膜式热回收段及AI算法控制模块,实现新风处理能耗降低18%。输配系统中,水泵与风机均采用IE4能效等级永磁同步电机,配合水力平衡阀与风管静压传感器,动态调节运行频率,综合输配系数 (WTF)优化至0.6以下。末端采用变风量文丘里阀 (压差控制精度±1Pa)及双冷源精密空调 (IPLV 8.5),通过多工况自适应控制策略减少冷热抵消。此外,全系统设备均满足《冷水机组能效限定值及能源效率等级》 (GB 37479-2019)1级能效标准,并通过BIM仿真优化设备选型参数,全生命周期内节能收益

较常规设备提升40%以上,年节约运行成本约280万元,实现绿色工业建筑理念下设备能效的精细化管理。

## 4.2 用能计量

本项目构建三级能源计量体系,实现暖通系统能耗数据的精细化采集、分析与优化。第一级为分项计量层,在总配电间设置0.2S级精度智能电表(符合GB/T 17215标准),对冷热源机组、水泵、风机等主要设备进行独立计量,配置超声波热量表(EN 1434-1认证)实时监测空调水系统供回水温差与流量,误差 $\leq \pm 1.5\%$ ;第二级为分区计量层,依据洁净度等级与功能分区划分28个计量单元,采用LoRa无线远传技术安装485型多功能电力仪表(精度1.0级),对核心生产区MAU+FFU系统、实验室精密空调、动力中心防爆机组等独立核算能耗,同步接入蒸汽流量计(涡街式,量程比15:1)与燃气热值分析仪,实现能源品类全覆盖;第三级为末端计量层,在120个关键末端设备(VAV变风量阀、DCC盘管等)加装IoT智能传感器,以5分钟为周期采集电流、功率因数、风量及压差数据,通过OPC UA协议上传至BMS能源管理平台。平台内置ISO 50001标准算法,自动生成能耗强度( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )、单位产品能耗( $\text{kWh}/\text{万支}$ )等42项KPI指标,结合机器学习建立动态基线模型,实时预警偏离值 $\geq 15\%$ 的异常工况。计量数据通过BACnet/IP协议与厂区MES系统联动,实现生产排程与空调负荷的协同优化,年减少无效供冷时长超800小时。系统同时配置分户计量模块,按GMP规范要求对外包生产线的能源消耗实施独立结算,误差率 $\leq 2\%$ 。经实测,该计量体系使暖通系统运行能效透明度提升60%,辅助管理人员识别并消除12%的隐性能耗损失,年节约能源成本逾150万元。

## 4.3 节能控制

本项目遵循能效优先原则,通过全系统设备能效优化实现节能目标。冷源采用磁悬浮变频离心机组(COP 6.8/IPLV 11.5)与高温螺杆机组(COP 5.2)协同运行,前者利用无油磁轴承技术降低30%摩擦损耗,后者提供18℃中温冷水适配干式冷盘管,消除传统7℃冷水再热需求。洁净区配置EC风机驱动的FFU模组(效率82%),结合U15高效过滤器(阻力 $\leq 120\text{Pa}$ ),较传统AC风机节能25%;MAU机组集成变频风机(AMCA-A级)、高分子膜热回收段及AI控制模块,使新风处理能耗降低18%。输配系统搭载IE4永磁电机水泵及水力平衡阀,通过BIM优化管网阻力,输配系数(WTF)降至0.58。末端采用变风量文丘里阀(控制精度 $\pm 1\text{Pa}$ )与双冷源精密空调(IPLV 8.5),结合多工况自适应算法减少冷热抵消。

关键设备均满足GB 37479-2019一级能效标准,经生命周期成本分析,节能收益较常规设备提升40%,年节约运行费用逾260万元,实现设备选型与绿色工业建筑理念的高度契合。

## 4.4 能量回收

本项目依据能源品位分级利用原则,构建多维度能量回收体系,包括排风热回收、工艺废热回收及冷凝热回收。在洁净空调系统排风能量回收中,采用热管式显热回收装置与转轮式全热回收机组协同运行,分别提升显热和全热交换效率,年节约新风处理能耗。工艺废热回收方面,在高温工艺设备冷却水回路中设置板式换热器,提取余热用于洁净区冬季空调再热及工艺热水制备。制冷系统则采用磁悬浮离心机与螺杆机并联,回收冷凝水热量用于冬季采暖。全厂能量回收系统通过BMS平台智能调控,基于实时负荷预测与COP最优算法动态匹配回收策略,集成气象参数补偿功能,实现自然冷却与机械回收模式无缝切换。该体系综合提升系统能效,全年综合节能率突破25%,折合节约标煤约75吨标准煤当量。

## 5 结束语

本文通过对某大型生物医药企业新建医药洁净厂房项目的暖通节能设计进行探讨,展示了绿色工业建筑理念在医药洁净厂房中的应用。利用BIM技术、高效围护结构、节能设备选型、用能计量、节能控制及能量回收等措施,项目大幅降低单位产品能耗,特别是暖通空调系统能耗。这些设计不仅为医药洁净厂房的绿色建设提供技术路径,也为生物医药产业可持续发展做出贡献。未来,医药洁净厂房的暖通节能设计将更加注重系统性和集成性,以实现更高效、更环保的能源利用。

## 参考文献

- [1]丁国永.公共建筑暖通空调绿色设计研究[J].四川建材,2025,51(01):232-234+240.
- [2]张露.绿色技术在建筑暖通空调设计中的应用分析[J].四川水泥,2025,(01):103-105.
- [3]杜红涛.绿色发展理念下建筑给排水及采暖通风空调安装[J].城市建筑,2024,21(24):197-199.
- [4]宿子敬,曹丹阳.以绿色工业建筑理念为思路的医药洁净厂房暖通节能设计探讨[J].暖通空调,2023,53(S1):318-320.
- [5]王爽.化工厂暖通空调系统的节能设计[J].化工管理,2022,(23):47-49.
- [6]李永康,白薇.绿色工业建筑之钢结构单层工业厂房结构设计探析[J].建筑结构,2016,46(S1):567-570.