

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-127-06

定送变回分层空调系统在高大洁净厂房的应用

白彦飞

(北京市工程咨询股份有限公司 北京 100000)

【摘要】 基于高大洁净装配厂房工程实例, 对室内工艺环境需求进行分析, 选定合理的换气次数及气流组织, 提出了分层洁净空调系统设计方案, 并针对工程实际应用特点, 在分层洁净空调系统中引入了通过室内外静压差控制的定送变回系统。工程实测结果表明, 与传统空调系统设计相比, 定送变回分层空调系统不仅能够根据房间内外静压差快速调节空调系统的新风量和回风量, 保证高大空间的温湿度、洁净度及压差控制要求, 而且可以降低运维管理难度及空调运行能耗。

【关键词】 高大洁净厂房; 换气次数; 气流组织; 分层洁净空调; 静压差; 定送变回
中图分类号 TU831 文献标志码 A

Constant Supply Air Volume and Variable Return Air Volume of Stratified Air Conditioning System Application for a Large-space Clean Workshop

Bai Yanfei

(Beijing Municipal Engineering Consulting Co., Ltd, Beijing, 100000)

【Abstract】 Based on an engineering example of large space clean facility, the requirements of indoor process environment were analyzed, reasonable air exchange rate and air distribution were selected, then proposes the stratified cleaning air conditioning system design scheme. According to the practical application characteristics of the project, variable return air volume system controlled by indoor and outdoor static pressure difference was introduced into the stratified cleaning air conditioning system. The engineering test results show that, compared with the traditional air conditioning system, the variable return air volume of stratified air conditioning system could not only quickly adjust the fresh air rate and return air rate of the air conditioning system which based on the static pressure difference inside and outside the room, that ensured the temperature, humidity, cleanliness and pressure difference control requirements of large space, but also reduce the difficulty of operation and maintenance management, and save the energy consumption of air conditioning.

【Keywords】 Large space clean facility; Air exchange rate; Air distribution; Stratified cleaning air conditioning; Static pressure difference; Constant supply air volume and variable return air volume

0 引言

近年来, 我国核技术在民用领域应用高速发展, 相关资料^[1]显示, 核技术在工业、农业、医学、公共安全、环境保护等领域均有广泛研究, 大型核应用试验装置的严密性及安全性会受到车间的温度、湿度及洁净度的直接影响, 因此, 高大洁净厂房的建设成为必然趋势。

装配厂房一般高度大于 10m, 体积大于 1 万 m^3 , 且工作区高度一般不超过 10m, 上部空间一般为吊车作业区, 工作中无需整个高度空间设计净化通风, 上部区域可进行一般通风设计, 仅保证房间下部工作区洁净要求即可, 相较于全室净化通风, 采用分层空调系统可显著降低空调系统风量及负荷。

本文以某核应用试验装置装配大厅工程项目的空调系统设计为例,结合项目空间布局及工艺流程环境需求,进行了变回风量分层洁净空调系统设计,并对空调系统运行效果进行了第三方工程检测,验证了设计的合理性,也为系统的优化提出了建议,为后续类似工程设计提供参考。

1 项目概况

装配大厅长 36m、宽 20m、高 19m,总体积为 13680m³,在东南角设置检测间,装配大厅有效体积为 13040m³。大厅上部装设 16t 桥式起重机,用于大型部件的吊装。大厅平面图如图 1 所示。

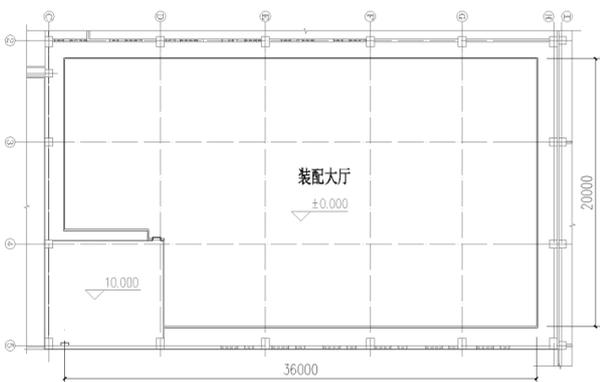


图 1 装配大厅平面图

Fig.1 Plan of the assembly hall

根据工艺要求,装配大厅夏季设计温度为 25±1℃,相对湿度 50%~70%,洁净度等级要求为 8 级,洁净工作区的高度为 7.5m,主要服务于大型试验装置的组装和调试。大厅的地面装修采用防静电环氧自流坪,吊顶采用 50mm 厚玻镁岩棉夹心彩钢板,桥式起重机以上墙体刷环氧树脂涂料,桥式起重机以下墙体由 50mm 厚玻镁岩棉夹心彩钢板做为通风夹墙,空调通风系统的管线布置于夹墙内,其中 3m 以下通风夹墙内壁涂刷环氧树脂涂料,可作为净化空调系统的回风风道。

2 空调冷热源

项目院区自建锅炉房,净化空调机组的加热及加湿所用蒸汽由院区蒸汽管网提供,蒸汽压力为 0.1MPa,蒸汽供热量为 616kW,流量为 0.98t/h。蒸汽加热与加湿管道分别设置电动二通阀,温湿度控制分别根据空调机组的回风温、湿度控制电动二通阀动作,保证房间的温度和相对湿度保持在设计

范围内。

本工程装配大厅空调冷负荷 425kW,冷源为设置在屋顶的风冷变频螺杆冷水机组,夏季供回水温度为 7℃/12℃。为降低空调水系统运行能耗,冷水系统采用一级泵变频变流量系统,系统采用定压罐定压,并设置软化水补水装置。

3 空调系统方案选择

本工程装配大厅工艺使用特征符合分层空调系统的适用条件,但下部工作区为 8 级洁净区域,通风量需要满足净化要求,根据国家规范^[2]规定,层高小于 4.0m 的 8 级洁净室推荐换气次数为 10~15h⁻¹,而高度大于 4.0m 的洁净室没有明确的规范要求,为此,许多学者对高度大于 4.0m 的洁净室(一般为 8 级)的换气次数进行了研究。根据董秀芳^[3]等人研究,喷口侧送风系统适用于高大洁净厂房,且全室净化换气次数达到 9h⁻¹即可满足洁净区温度、微粒子浓度要求;李兆坚^[4]等人通过对高大洁净厂房换气次数与洁净度关系的测试研究,认为全室换气次数可以减小到 8h⁻¹;佟歆^[5]等人对高大洁净厂房工作区的换气次数采用 12h⁻¹,折算到全室换气次数为 6h⁻¹,进一步降低房间换气次数,而且房间的洁净度等级仍可满足洁净区要求。

本工程采用分层空调系统,厂房高度为 19m,工艺要求洁净工作区高度为 7.5m,洁净区采用上部喷口双侧送风,回风采用双侧下部侧回风,回风口下缘距地 0.25m;非空调区设置机械排风系统,仅用于极端工况下厂房上部的排风,如图 2 所示。

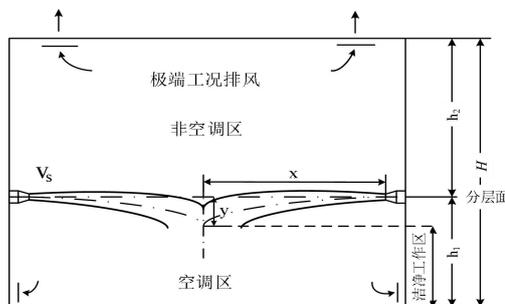


图 2 分层空调气流组织示意图

Fig.2 Schematic diagram of the air distribution for stratified air conditioning system

装配大厅上部非空调区仅设置机械排风系统,未设置机械送风系统,出于以下考虑:非空调区的散热设备只有一台桥式起重机,且由于装配大厅为

8 级洁净室，并按照绿色工业建筑设计，围护结构的密封性和热工性能均较好，计算所得体积散热量为 $3.5\text{W}/\text{m}^3 < 4.2\text{W}/\text{m}^3$ ，根据文献^[6]规定，非空调区可不设进排风装置。但近年来极端高温天气频发，且装配大厅内焊接等操作工艺可能向大厅释放大量有害气体，为此，装配大厅上部非空调区设置机械排风系统，平时不运行，仅偶尔用于应对意外情况。同时，本工程为试验性厂房，洁净功能使用周期为 3 年，为降低建筑能耗、减少初投资，非空调区短暂运行的机械排风系统不再单独设置送风系统，需要补风时由空调区的上升气流补充。上述气流组织方式与张永建^[7]等人用 CFD 进行高大厂房分层空调数值模拟的气流组织是一致的，说明当非空调区机械排风开启时，空调区的仍能保持良好的气流组织形式。非空调区机械排风充分考虑房间下部空调区低温上升空气的混合降温作用，按非空调区换气次数 2h^{-1} 计算，排风量为 $16300\text{m}^3/\text{h}$ 。

装配大厅 7.5m 以下为 8 级洁净工作区，工艺设备在组装时焊接等工序作业会产生的烟尘，虽设有局部排风系统直接排至室外，但也会有少量外溢，影响工作区的洁净度，并且非空调区的排风会对下部空调区的洁净空调系统送风产生一定的抽吸作用，造成工作区换气次数一定程度小于设计值。结合以上几点因素和相关文献研究成果，为保证工作区洁净要求，空调系统送风量按照 7.5m 以下区域换气次数为 15h^{-1} 计算^[8]，总送风量为 $76500\text{m}^3/\text{h}$ 。折算到全室换气次数为 5.87h^{-1} ，与佟歆等人的研究成果接近。

4 分层净化空调系统设计

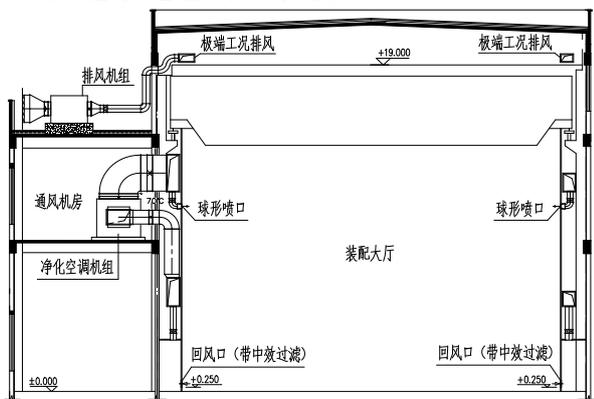


图 3 装配大厅空调通风系统剖面图

Fig.3 Section view of the HVAC system for the assembly hall

本工程净化空调通风系统剖面图如图 3 所示。按照分层空调气流组织理论，计算得出净化空调系统喷口的安装高度、直径、个数、风速以及射流的射程和落差等参数，并运用多股平行非等温射流水平送风 ($\beta=0$) 轴心轨迹方程和轴心速度衰减方程对计算结果进行校核。

4.1 工作区空调系统设计

4.1.1 送风参数的确定

装配大厅总送风量为 $76500\text{m}^3/\text{h}$ ，从节能和降低初投资角度考虑，采用一次回风空调系统，设置 2 台组合式净化空调机组，每台机组风量为 $38250\text{m}^3/\text{h}$ 、送风温度 19°C 、相对湿度约 92%，机组设置初、中、高效三级过滤，机组所配风机风量为 $42392\text{m}^3/\text{h}$ 、风压为 1800Pa 、功率为 30kW ，自带变频器进行变频调节。根据本工程送风量和房间负荷计算可得送风温度与房间温度差值为 6°C 。考虑到装配大厅存在设备排风及非空调区排风系统，系统选用变回风量空调系统，冷冻水系统采用变流量控制，以适应空调系统负荷变化。

4.1.2 喷口设计

分层空调系统喷口设计的主要计算公式^[6]如下：

(1) 射流的射程 X

$$X = 0.93(B - E) \quad (1)$$

式中： B 为厂房宽度的一半，m； E 为风口离同侧洁净墙面的水平距离，m。

(2) 射流垂直落差 Y

$$Y = \left(\frac{1}{16} \sim \frac{1}{4}\right) X \quad (2)$$

(3) 喷口安装高度 h_1

$$h_1 = h + Y + h_a \quad (3)$$

式中： h 为洁净工作区高度，m； h_a 为安全值，恒温车间取 0.3m ，本厂房非恒温车间，故取值为 0 。

(4) 圆喷口直径 d_0 及送风速度 v_0

$$d_0 = 0.064 \left(\frac{T}{\Delta t_0}\right)^{0.615} X^{-0.302} Y^{0.687} v_x^{1.23} \quad (4)$$

$$v_0 = 4.295 \left(\frac{T}{\Delta t_0}\right)^{-0.591} X^{1.124} Y^{0.533} v_x^{-0.182} \quad (5)$$

式中： T 为空调区空气的绝对温度，K； Δt_0 为送风温差， $^\circ\text{C}$ ； v_x 为射流末端轴心速度，m/s。

(5) 阿基米德数 Ar

$$Ar = \frac{g \cdot \Delta t_0 \cdot d_0}{v_0^2 \cdot T} \quad (6)$$

式中： g 为重力加速度， m/s^2 。

(6) 轴心轨迹方程

$$\frac{Y}{d_0} = 0.812 Ar^{1.158} \left(\frac{X}{d_0}\right)^{2.5} \quad (7)$$

(7) 轴心速度衰减方程

$$\frac{v_x}{v_0} = 3.347 Ar^{-0.147} \left(\frac{X}{d_0}\right)^{-1.151} \quad (8)$$

根据厂房内洁净工作区高度及射流落差 Y 等参数进行反复计算，最终得出喷口安装高度为 8.5m，喷口直径为 0.27m，计算风速为 5.62m/s，可得每个喷口的风量约为 1159m³/h，共需布置 66 个，喷口沿厂房长度方向两侧均匀对称布置，风口间距保持 1.1m 左右。送风口选用活动式喷口，便于换季时调节送风角度，冬季供暖工况下送风向向下倾角大于 30°。经校核，射流末端至风口中心线的垂直落差为 1.003m，与选用射流落差选定值 1.0m 基本相等，满足设计要求。末端轴心速度为 0.79m/s，回流区平均风速小于 0.40m/s，满足装配工艺需求。

4.2 定送变回控制系统设计

洁净厂房室内外压差控制是净化空调系统设计中的一个重要的环节。只有保证净化区域相对正压，才能满足工作区洁净生产的要求。本工程装配大厅中设置车床、焊接线、铣削台等，会产生较多有异味的烟尘，为了满足房间洁净度及工作场所的卫生要求，含尘烟气应直排室外，并采取措施维持房间的正压、洁净的环境。

4.2.1 不同工况下风量分析

装配大厅进风为洁净空调系统的送风，出风由非空调区的排风、设备的不定期排风、洁净空调的回风及维持房间正压渗透风组成。为保证房间换气次数要求，空调送风量维持不变，随着非空调区排风量及设备排风量的改变，需要调整回风量及新风量，在保证送风量不变的前提下，控制房间排风量（含回风量）为送风量的 85~90%，从而保证洁净房间相对非洁净房间的压差不小于 5Pa，相对于室外静压差不小于 10Pa。非空调区排风平时不运行，仅在极端高温及室内突然释放大量有害气体情况下短暂运行。根据工艺使用情况，房间空调及通风工况有表 1 所示 4 种。

表 1 不同运行工况风量统计表

Table 1 Blowing rate statistical table of Different working conditions

工况	送风量 /(m ³ /h)	非空调区排风量 /(m ³ /h)	设备排风量 /(m ³ /h)	回风量 /(m ³ /h)	新风量 /(m ³ /h)	新风量占送 风量百分数	备注
工况 1	76500	16300	6000	43500	33000	43.14%	仅在极端工况发生，频次低
工况 2	76500	16300	—	49500	27000	35.29%	
工况 3	76500	—	—	65800	10700	13.99%	—
工况 4	76500	—	6000	59800	16700	21.83%	

表中工况 1 为空调制冷季净化空调、房间上部排风与设备排风设备同时运行，工况 2 为空调制冷季净化空调与房间上部排风同时运行，工况 3 为仅净化空调运行，工况 4 为净化空调与设备排风设备同时运行，其中工况 1、2 发生的可能性较小，仅在极端工况发生。装配大厅的工作人员为 30 人，所需最小新风量为 1200m³/h，可知 4 种工况下的新风量均满足人员所需新风量。由表 1 可知，同样条件下，设备排风开启时，新风量占比减少约 7.84%，新风负荷显著减少。为保证房间洁净环境，仅需调节净化空调机组的回风量及新风量即可。上述工况

与薛永明^[9]等人对实验室通风空调系统中工况类似，为此，笔者在分层变风量空调系统中引入定送变回控制系统。

4.2.2 定送变回控制的原理

为了能较快的适应由于房间密闭性发生变化、局部排风设备的启停以及其他的不可控因素所引起的房间内外压差波动，根据不同工况下风量变化的特点，本工程采用定送变回主动压差控制模式，即送风量恒定，依据房间实际的压差值变化调整回风量，具体控制原理如图 4 所示。

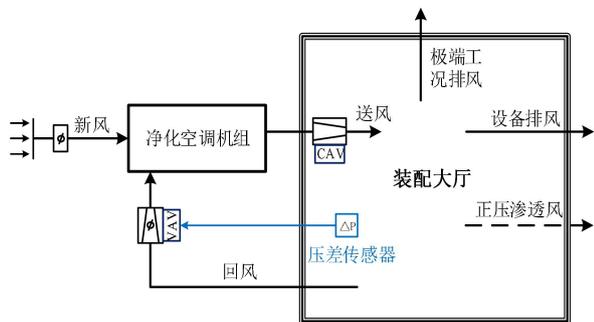


图 4 压差控制原理图

Fig.4 Schematic diagram of differential pressure control

在装配大厅设置压差传感器，并在送风管道上设置机械式压力无关型定风量阀（CAV）、回风管道上设置变风量阀门（VAV），装配大厅与室外的压差设定为10Pa，当局部设备排风开启或其他原因

引起阀件压差波动时，压差传感器将压差变化信号传送到回风变风量阀，回风变风量阀根据压差传感器信号迅速调整回风量，同时，由于送风量恒定不变，根据新风量=总送风量-回风量，可以实现新风量自我调节，从而将房间的压力控制在一定范围内。此外，送风管道上设置机械式压力无关型定风量阀还可以避免在运行过程中因空调系统过滤器阻力变化等原因引起的送风量波动。

5 工程实测结果

本工程装配大厅洁净工程完工后，委托第三方检测机构对空态情况下室内的悬浮粒子、换气次数、静压差、温度、相对湿度、噪声等项目进行了全面的检测，结果如表 2 所示，所测参数均满足《洁净厂房设计规范》（GB 50073-2013）中规定的 8 级洁净室的标准。

表 2 装配大厅洁净项目检测结果

Table 2 Test results of cleanliness project for assembly hall

项目	温度/℃	相对湿度/%	噪声/dB(A)	换气次数/h ⁻¹	静压差/Pa		悬浮粒子数/(个/m ³)	
					对室外	对非洁净区	≥0.5μm	≥5μm
检测标准	20~26	30~70	≤60	≥10	≥10	≥5	≤3520000	≤29300
检测结果	20.3	58.6	52.6	17	18	18	1276368	1521

检测过程中，悬浮粒子检测装置采用尘埃粒子计数器 BCJ-1，在大厅内共布置了 22 个水平和垂直方向采样点，测得粒径≥0.5μm 的粒子浓度为 1276368 个/m³（95%置信上限），远小于检测标准的 3520000 个/m³；≥5μm 的粒子浓度为 1521 个/m³（95%置信上限），远小于检测标准的 29300 个/m³。同时，由所测得换气次数可知，工作区换气次数取 15h⁻¹ 完全满足工艺需要，且在一定程度上还可降低。



图 5 装配大厅完工实景图

Fig.5 Real-life photo of completed assembly hall



6 结论

(1) 对于洁净度要求为 8 级的高大厂房，若非空调区体积散热量小且非空调区的排风系统使用频率较低时，空调区采用上部双侧喷口送风、下部双侧回风，非空调区采用机械排风、利用空调区上升气流补风的分层空调送风方式是一种有效的

气流组织形式,并且可以降低工程投资。

(2) 对净化要求有竖向分区的高大厂房,在工艺生产过程中无较大产生尘且房间的密闭性较好的前提下,净化通风的区域宜以净化工作区有效体积为研究对象,换气次数可以参照国家标准的推荐值,并可适当减少,根据温晓军等^[10]人研究,换气次数取规范推荐值的 30%~80%即可满足要求。

(3) 当高大洁净厂房内有产尘量较大的工艺设备排风时,为保证洁净室的洁净度及静压要求,降低净化空调机组的能耗,建议设置独立的排风系统将工艺设备产生的含尘气体直接排至室外。

(4) 对室内外静压差要求严格的洁净通风空调系统,在送风管道上设置定风量阀、回风管道上设置变风量阀的主动压差控制系统,不仅能根据房间静压差实时调控新、回风量从而维持室内温湿度、洁净度及压差波动,还可以很大程度的降低运行管理难度。

参考文献:

[1] 国家原子能机构,核技术应用概述[EB/OL].<https://>

www.caeca.gov.cn/n6760340/n6760353/index.html.

- [2] GB 50073-2013,洁净厂房设计标准[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [3] 董秀芳,肖武,赵彬.高大洁净厂房分层净化 CFD 模拟与节能性分析[J].暖通空调,2012,42(11):58-62.
- [4] 李兆坚,张晓航,宋道宏,等.高大洁净厂房净化换气次数与洁净度关系的测试研究[J].暖通空调,2015,(1):1-4.
- [5] 佟歆.高大洁净厂房分层净化空调设计[J].洁净与空调技术,2017,(1):36-38.
- [6] 陆耀庆.实用供热空调设计手册(第二版)[J].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [7] 张永建,田冀锋.高大厂房分层空调数值模拟[J].建筑节能,2010,38(7):24-26.
- [8] 冯宝岳,陈之日,郝军,等.高大洁净厂房分层空调系统的设计[J].暖通空调,2001,31(2):44-46.
- [9] 薛永明,冯廷龙,冯江发,等.定变风量阀在实验室通风空调系统的应用探讨[J].制冷与空调,2024,38(2):249-256.
- [10] 温晓军,林素菊,赵华.高大厂房洁净室设计[J].洁净与空调技术,2012,(1):55-57.

(上接第 93 页)

- [3] 乔雅静,袁培,刘海,等.自然冷源在数据中心空调系统中的应用[J].制冷与空调,2022,22(4):71-77.
- [4] 金洪文,龚恒勤,赵家楠,等.基于自然冷却系统的数据中心在冬季节能潜力分析[J].制冷与空调,2023,23(11):75-79.
- [5] 孙海峰.基于自然冷源的数据中心制冷系统节能潜力的分析[J].发电与空调,2016,37(4):69-73.
- [6] 一种自然冷源与制冷机组耦合运行的乙二醇溶液冷却系统[P].中国专利:CN217715583U,2022.11.01.
- [7] 一种利用自然冷源的节能空调系统[P].中国专利,CN107990454A,2018.05.04.
- [8] 王伟,吴小虎,龙澜,等.数据中心自然冷源与余热回收

节能应用研究[J].电信工程技术与标准化,2023,36(S1):207-210.

- [9] 张润霞,顾兆林,王赞社,等.基于自然冷源的蓄冷材料制备及蓄释冷实验研究[J].建筑节能,2021,49(2):86-90.
- [10] 崔华玉,李红旗,罗宇辰.自然冷源及蒸发冷却机房空调的运行能耗分析[J].建筑热能通风空调,2020,39(12):59-63.
- [11] 黄成达,许树学,马国远,等.利用自然冷源过冷改善 R32 热泵制热性能的实验研究[J].制冷与空调,2018,32(4):423-427.
- [12] GB/T 18430.1-2007,蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组:第 1 部分:工业或商业用及类似用途的冷水(热泵)机组[S].北京:中国标准出版社,2023.