

洁净厂房空调系统风量优化对能耗的影响分析

李星

湖北君邦环境技术有限责任公司 湖北武汉 435300

DOI:10.12238/ems.v7i6.13888

[摘要] 洁净厂房空调系统于高洁净度、全年无休运行等情形下,呈现出高能耗的特性,作为运行关键变量的风量参数,显著影响系统能源效率发挥,本文通过对风量设定方式、运行特性及控制策略展开深度剖析,缔造风量调节跟能耗的关联机理,也在送风系统、风管系统、冷热源及自动化控制等范畴提出系统的优化策略,实施风量优化举措可有效降低风机的功率损耗、减小风管的阻力、改善送回风的匹配程度,同时提高系统响应的精度以及运行的稳定性,展现出优异的节能效果与工程实用性。

[关键词] 洁净厂房; 空调系统; 风量控制; 能效分析; 自动化调节

引言

作为维持洁净度、热湿平衡及压差稳定的核心参数,直接左右系统的电力消耗与运行效率水平,就目前而言,多数洁净厂房采用固定风量设计法,未具备对负荷变化的实时响应能力,引起大量能量的无效浪费,运转成本上扬,就该问题而言,本文把风量优化作为切入的关键,从控制设备配置、运行特性调节直至系统自动化逻辑设计开展系统研究,意在增进洁净空调系统的能源利用效能,且为节能改造给出技术依据。

1 空调系统能耗构成及风量特征分析

1.1 洁净厂房空调系统能耗构成

洁净厂房空调系统能耗由冷热源系统、输配系统、末端风机设备与空气净化装置构成^[1]。系统运行时,冷热源借冷水机组及冷却塔提供冷量,承担室内显热和潜热负荷;输配系统依靠水泵实现冷媒循环,保障冷量有效传输;末端风机设备维持稳定风速以满足洁净等级;空气净化装置通过多级过滤器营造洁净气流环境,送风伴随多级能量转换,系统整体能耗受多环节联合作用。

1.2 风量设定方式与运行特征

送风量需符合洁净室换气次数规范要求,设计时考虑负荷变化对风量的动态调整能力。洁净室的分类方式有很多,最常见的是按照气流形式及使用性质进行划分。按照气流形式,可以分为单向流洁净室、非单向流洁净室、混合流洁净室等;按照用途,可以分为工业洁净室、生物洁净室、生物安全洁净室等。不同洁净室在气流组织方式和压差控制上有区别,对风量设定有具体要求,系统运行时,风量由空调机组或风机过滤单元维持恒定或可变模式,根据工况变化实时调节,高洁净等级场所对气流组织形式要求更严格,风量需保证单向流或稀释流稳定输出,同时满足不同区域正压控制需求。

2 风量调节对系统能效的影响机理

2.1 风机功耗与风量的数学关系

依据风机类比原理,风量增加时风机功率需求呈立方增长态势,同时系统总压损上升,进一步加重能耗负担^[2]。恒转速状态下,风量调节多通过阀门开度调整或风管阻力变化实现,但会明显降低系统效率;变频调速运行时,通过调节风机频率改变风量输出,既能实现线性控制,又能有效降低无效功耗。风量调节中,静压变化直接影响风机叶轮效率及系统运行点,系统阻力曲线与风机性能曲线交点移动,使风机运行偏离最优工况,能效随之波动,故风量控制需兼顾系统特性曲线与实际工况匹配度。

2.2 空调系统热湿负荷与风量匹配

系统负荷降低时,若维持固定风量运行,会造成送风过量,引发送风温度偏低、湿度不易控制等状况,同时减小冷盘管表面温差,降低传热效率,热湿负荷上升时,若风量不足,冷却能力难以满足需求,可能导致室内环境参数偏离,系统频繁启停调节,增加设备运行能耗,风量与负荷匹配调

控时,送风参数需综合考虑送风温度、风速及焓差,保证风量在满足净化要求前提下实现最小能耗运行。

3 不同风量控制策略的能效对比

3.1 定风量与变风量控制方式对比

定风量系统(CAV)开始运行之后,风量恒定不变动,应对负荷变化主要依靠调节供水温度或流量,空气处理单元始终以恒定的流量进行运转,无论实际热湿负荷是否发生了波动^[3]。此控制方式呈现出简单结构,但有能源不必要浪费的情形,就重庆某电子洁净厂房的实测数据而言,空调系统多数时候处于部分负荷状态,在非极端气象这种条件下,室内平均的冷负荷为286 kW,只是设计送风量所对应的满负荷供冷量为392 kW,导致系统长时间处于过冷的运行情形,送风的焓差呈现出偏小现象,冷盘管的利用情况不理想,能源利用的效率不太理想,风机连续进行高负荷的运转,每年电量消耗达25.4万kWh。

变风量系统(VAV)采用调节风阀角度或风机变频方式让送风量自动调节,按照负荷的实时变动对风机频率进行调整,在同一厂房内引入变风量控制之后,风系统配置了压差传感器以及送风流量采集模块,采用电动调节阀对风阀进行控制,各功能区所需风量由中央控制系统实时计算得出,而后发出调控命令,VAV系统于维持目标洁净度及热湿参数的前提下,极大地减少风机运行频率,在全年运行的这一阶段,风系统平均频率从50 Hz降低到了34 Hz,风机全年耗电量降为15.6万kWh,风机全部运行时间减少约1300小时。

3.2 风量分区优化调控

就实际应用情况而言,选取重庆电子厂区中3700 m²的洁净区域作为示例,把整体空调系统拆分为三个子系统:高洁净要求的Class 100区域、中洁净要求的Class 1000区域和一般洁净要求的Class 10000区域,分别设置三套彼此独立的送风管路 with VAV控制箱,为每个区域分别配备压差传感器和空气质量监测探头,从而系统控制器可依照实时数据自动调整对应区域的风量输出。

控制逻辑依托设定的静压目标值(高洁净区为20 Pa,中洁净区的静压设定以15 Pa为准,一般区以10 Pa作为静压目标,控制器采集送风端与回风端静压间的相差值,马上把此结果反馈给风机控制模块,若监测到某一区域负荷降低,且净化指标波动较小时,系统通过对电动风阀角度的调节,把该区域风量降至与负荷相匹配的值,杜绝多余风量的输出。数据记录传达出,就全年而言,高洁净区每小时风量在45000 m³ - 72000 m³间变化,中洁净区每小时的风量处于28000 m³到42000 m³范畴,一般洁净区风量于18000 m³至29000 m³区间内,系统运行稳定性维持在波动范围为±5%之内,采取分区控制举措后,风机平均运行功率降低了13 kW,年总冷负荷需求降低了61.3 MWh,引发冷源系统供冷量下降,水泵系统负载同步跟着变小,进而实现全系统层级彼此联动的节能成果,从表1能看到:

表1 某电子洁净厂房全年风量调节数据记录与能耗响应情况

区域划分	最小风量 (m ³ /h)	最大风量 (m ³ /h)	平均风机功率 (kW)	静压目标值 (Pa)	年累计送风量 (×10 ⁶ m ³)
高洁净区	45000	72000	18.2	20	19.5
中洁净区	28000	42000	12.4	15	14.2
一般洁净区	18000	29000	9.6	10	9.6

数据来源:重庆大学建筑城规学院《电子洁净厂房净化空调系统节能优化技术措施》(刘俊麟,2020) 硕士论文原始实测数据与仿真模型输出结果整理。

4 风量优化对系统运行的联动影响

4.1 对风管系统阻力与噪声的影响

实际运行中,风量改变会引发系统总压损调整,需按风道设计风速区间重新评估风管系统局部与沿程阻力变化^[4]。以某电子洁净厂房为例,原系统最大送风量 145000 m³/h,对应风管平均流速 9.6 m/s,总系统阻力 1525 Pa,优化控制后,风量在不同区域调至平均值 107000 m³/h,风管流速降至 7.1 m/s,总压损减至 1180 Pa,系统中风阀、弯头、异径管等局部构件产生的附加阻力也随之降低,风机工作点移至性能曲线低静压区域,有效降低运行负载。

风速下降对系统噪声控制有正向作用。同一系统中,送风主管道运行噪声值从原来的 78 dB(A) 降至 71 dB(A),回风支管端部噪声值由 64 dB(A) 减至 58 dB(A),此降幅主要因风速与噪声声压呈对数函数关系,风速降低使湍流动能减少,气流与风管内壁碰撞频率下降,压缩波传播能力减弱。为进一步控制局部高速段产生的涡流噪声,在管道系统节点处加装多孔消声器,并在主风管悬挂支架与结构界面间嵌入橡胶减震垫,隔绝结构传播路径,结合优化后的低风量运行状态,有效实现对气动噪声与结构噪声的双重控制,优化控制稳定运行时,噪声频谱分析数据显示系统在 125 Hz、250 Hz 和 500 Hz 频段噪声峰值均低于 65 dB,符合高洁净区声环境要求,系统长时间运行未出现风道振动放大或回风啸叫情况。

4.2 对送风温度与回风控制的影响

某厂房夏季典型工况日运行时,设计送风温度为 14.5℃,但实际送风温度需维持在 12.8℃至 13.2℃间才能满足室内负荷平衡,这增加了冷源负载^[5]。引入变风量控制后,风量与负荷实现动态匹配,送风量调低使送风焓差回归设计值,送风温度可提升至 14.2℃至 14.8℃,在冷盘管供水温度保持不变的情况下,盘管表面热交换强度降低,除湿深度减少,系统冷负荷输出趋于稳定。

回风控制时,风量优化改变送风压差分布和气流路径,影响回风静压与流量分布,风量调整需同步调节回风口风量,避免压差失衡导致室内气流短路或污染回流。该厂房 VAV 运行阶段,系统设定送回风压差在 5 Pa 内,用变频控制回风风机运行频率,让回风流量与送风实时联动。不同负荷时段,

回风风机频率从 48 Hz 动态降至 33 Hz - 42 Hz,回风流量维持在总送风量 90%以上,有效控制室内正压分布,回风管道设 CO₂浓度探测器,系统耦合回风参数与室内污染物浓度信号调节,回风路径污染物水平上升,就增加新风补风量、降低回风占比来控制气体质量。

5 实施风量优化的系统配置建议

5.1 控制设备选型

电子洁净厂房节能改造里,送风系统配备差压传感器、流量传感器和电动风阀作为核心调控部件,差压传感器选用量程 0 - 500 Pa、精度 ±1 Pa 的风道型差压模块,安装在送风管与洁净室之间的静压取压孔处,用来实时反馈目标压差信号,风量测量使用皮托管式风速传感器,量程 0 - 15 m/s,信号输出 4 - 20 mA,对应风量范围 0 - 90000 m³/h,适配主风管最大设计风速。风阀执行机构采用带比例控制功能的电动执行器,调节范围 0 - 90°,配合风阀本体的双层钢板可调百叶结构,通断时间短于 30 秒,响应延迟低于 2 秒,可满足系统快速风量调节需求,变频风机控制器选用支持 Modbus 协议的变频器,通过控制电机频率调节风机转速,频率调节范围在 20 - 50 Hz,所有设备通过 485 总线通信方式接入中央控制系统,实现数据上传和远程控制。

5.2 自动化控制逻辑设计

电子厂房项目中,中央控制器按设定送风压差目标值(高洁净区 20 Pa)采集压差传感器实时数据,结合空气质量传感器(PM_{0.3}、CO₂)数据综合判定,压差低于设定值时,控制器向对应电动风阀发出调节信号,将阀门开度提升 10%并保持 30 秒后重新检测压差变化;若压差仍未达标,则重复调节流程直至反馈数据稳定在目标区间内。检测到风量调整后室内温度超过偏差范围 ±0.5℃,即启动冷源联动模块,对冷水供水阀开度进行微调以配合新风量变化。控制程序每 30 秒刷新一次状态数据,风机变频器实时读取电流与频率,根据反馈算法自动调整至最优能效点,回风系统由另一组控制逻辑单独调控,依据送风频率与风量信号设定回风风机变频值,使送回风流量比维持在 0.9 - 1.0 区间,保持稳定正压环境,控制器具备学习功能,通过连续 72 小时数据采集自动生成运行曲线,在非满负荷工况下执行风量修正功能,进一步提升调节精度与节能水平。如图 1 所示:

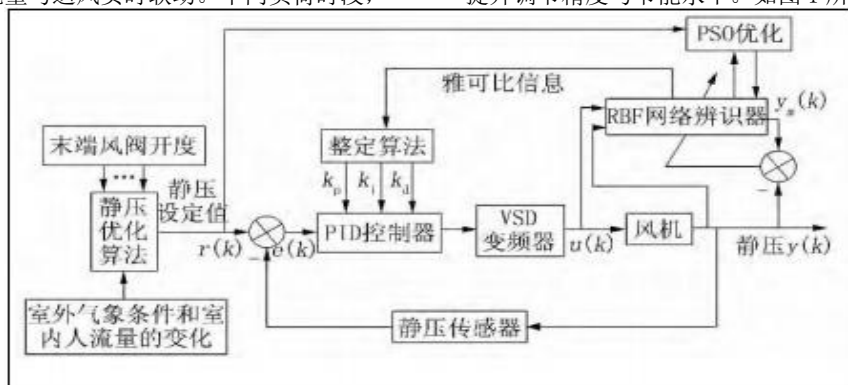


图1 自动化控制逻辑设计

结语

风量优化是洁净厂房空调系统节能的关键方式,藉由精细的设备选型、差压反馈控制和分区调节策略,有效建立风量调节与能耗间的联动机制,优化控制达成风系统运行状态的动态稳定,降低风机功耗和系统压损,提高冷热源匹配效率及送回风平衡度,研究显示,在确保洁净室运行指标不变的情况下,能实现系统运行的高效性与节能性,为洁净空调系统运行优化提供工程实践依据。

参考文献

[1]白彦飞.定送变回分层空调系统在高大洁净厂房的应

用[J].制冷与空调(四川),2025,39(01):127-132.

[2]赵杰.电子洁净空调系统工程设计实例[J].洁净与空调技术,2024,(04):26-28.

[3]王殿玉.洁净厂房空调系统安装技术[J].工程建设与设计,2024,(18):116-118.D

[4]周祺,黄丕迪.镀锌风管在工业厂房洁净空调系统中的施工技术要点[J].安装,2024,(09):17-19.

[5]让红梅,蔡正燕,靳德勇,等.某医药工业厂房空调系统设计[J].制冷与空调,2024,24(09):96-100.