

空调通风系统节能优化设计与运行能效提升路径研究

赵欣欣

(信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司青岛分公司, 山东 青岛 266109)

摘要 在“双碳”目标的指引下, 建筑能耗管控成为节能工作的重要方面。空调通风系统是建筑能耗的主要载体, 在节能优化设计和提高运行能效方面具有十分重要的现实意义。本文以系统架构优化、智能控制集成设计为主要方面来构建空调通风系统节能优化设计框架, 重点论述设计策略; 根据运行阶段的能效难点, 提出运行能效提升策略, 论述了动态负荷匹配、智能联动控制等技术, 并结合实践案例进行分析, 以期为促进空调通风系统节能升级提供技术参考。

关键词 空调通风系统; 节能优化设计; 运行能效; 智能控制; 动态调节

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.012

0 引言

随着建筑智能化水平的不断提升, 空调通风系统的功能范畴持续拓展, 它的能耗约占建筑总能耗的30%~50%, 是影响建筑节能水平提高的主要因素。传统的空调通风系统存在设计冗余、运行参数固定、系统协同性差等缺点, 造成能效低、能源浪费严重。当前物联网、人工智能、变频控制等技术的发展给空调通风系统的节能升级提供技术支持, 促使系统由“被动适应”转变为“主动调节”。

1 空调通风系统节能优化设计框架

1.1 系统架构优化

系统架构优化是空调通风系统节能设计的基础, 即根据实际情况把系统划分为不同的分区, 对管网进行合理的布置, 并选择合适的设备容量来达到能量传输和转化效率的最大化^[1]。根据负荷特性不同的分区设计是架构优化的重要部分, 对于负荷变化较大的外围区域和负荷比较稳定的中心区域, 应该用独立送风系统, 防止由于整体调节而造成能量的浪费, 在管网布置时要经过水力计算和气动性能分析, 改进管路弯头曲率半径, 减小局部阻力, 选用优质的保温材料来减小输送过程中冷热交换损耗。设备容量的匹配要抛弃传统的“大马拉小车”冗余的设计思想, 根据动态负荷预测的结果来选择高效的设备, 使设备处于额定负荷区间内稳定运行, 提高整个系统的能效水平。

1.2 智能控制集成设计

智能控制集成设计是完成空调通风系统精细化节能的关键技术支撑, 利用融合感知层、控制层和执行层的优势, 创建一个以数据为驱动的动态调控系统。感知层使用的是分布式物联网传感器网络, 实时采集室内室外温湿度、CO₂浓度、人数密度等各方面的参数, 为调控决策提供数据支持; 控制层利用人工智能算法和模型预测控制技术, 根据得到的信息创建负荷预测模型, 事先估计出负荷变化趋势, 得出最优的调控方案; 执行层依靠变频驱动器、电动风阀等智能执行装置, 精确响应控制命令, 使送风量、供水温度等各项参数动态调节。另外, 控制系统需要有多个设备联动的功能, 保证风机、水泵、冷水机组等主要设备可以互相配合来运作, 改善系统调节整体性和效率。

2 空调通风系统节能优化设计策略

2.1 高效热回收系统集成

高效热回收系统集成可以有效地降低新风处理的能耗, 它的主要原理是利用热交换设备回收排风的冷热量, 对预处理的新风进行预处理来减轻空调主机的负担。根据空气处理流程的不同, 可以采用全热回收器或者显热回收器, 全热回收器可以同时回收显热和潜热, 适合于温湿度变化大的场合, 它的热回收率可以达到60%~80%, 可以大大降低新风处理的能耗要求。热回收系统集成要兼顾气流组织的合理性和设备运行

作者简介: 赵欣欣(1992-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑环境与设备工程。

的稳定性,通过优化进排风路径的设计,防止交叉污染,再设置智能旁通阀,在室内外空气参数接近时切换到旁通模式,从而提高节能效果^[2]。

以大型公共建筑的新风系统为例,该系统内装有转轮式全热回收器,与送风管道、排风管道精准对接,达到新风和排风高效热交换的目的。夏季工况下,排风把冷量传给新风,减小新风预处理的冷却负荷;冬季工况下,排风把热传递给新风,减少新风加热能耗。从实际运行的数据可以看出,该热回收系统采用后冷却式新风处理能耗降低 40% 以上、系统综合能效比提高 0.8 ~ 1.2 的效果,证明热回收系统集成策略有节能的效果。

2.2 变风量系统 (VAV) 优化设计

变风量系统优化设计的核心在于根据实时负荷情况来动态调整送风量,从而达到节能的目的。系统设计要重点考虑末端装置选型、风机变频控制逻辑和最小风量保证这三个主要方面。末端装置应选择响应快、调节精度高的变风量箱,保证各个区域的温度准确控制;风机使用变频控制技术,按照系统总的风量需求来改变转速,使风机功率随着风量而变化,从而达到风机能耗明显下降的目的;最小风量要符合室内空气质量标准,一般不应少于最大风量的 30%,还需保证气流布置合理,不能出现局部过热或者温差过大等问题。

以商业建筑空调系统为例,本系统使用 BIM 技术进行变风量系统优化设计,用三维建模的方法准确地计算出管网阻力,并对支管布置、风阀的位置做相应的调整,使整个系统的风阻降低 18%。另外,还配套使用矢量控制型变频器,可以对风机转速进行平滑调节,在 50% 风量工况下,风机能耗比定风量系统降低 50% 以上。此外,系统利用室内 CO₂ 浓度传感器联动调节送风量,在 CO₂ 浓度小于 800 ppm 时自动减小送风量,从而提高节能效果,整个系统的年能耗比传统的定风量系统降低 35%。

2.3 动态负荷匹配的设备选型

动态负荷匹配的设备选型策略的核心是根据建筑全生命周期的负荷特性来选择具有宽负荷高效运行能力的设备,保证设备在各种不同的负荷工况下都能达到较高的能效水平。冷水机组作为空调系统的能耗中心,选择变频离心式或者螺杆式机组,用变频技术控制压缩机的转速,在部分负荷工况下仍然可以保持较高的性能系数 (COP);风机和水泵的选择要选用高效节能型产品,配套变频驱动装置,实现流量、压力的动态匹配。设备选型要通过负荷计算软件来模拟出一年之中负荷的变化曲线,使设备额定容量与负荷峰值相适应,防止设备长时间处于低负荷下导致效率降低^[3]。例如:在某办公建筑空调系统的选型过程中,用 EnergyPlus 软件对全年的负荷进行模拟,选择变频离心式冷水机

组,其 COP 在 100% 负荷时可达 6.1,在 50% 负荷时仍然能达到 5.2。配合使用高效、低噪声的风机,风机电力比值 (FPR) $\leq 1.1 \text{ hp}/1\,000 \text{ cfm}$,使用变频驱动器来实现实时调速。系统运行数据表明,采用动态负荷匹配的方式选择空调主机、风机水泵等设备后,空调主机能耗降低 25%,风机水泵能耗降低 30%,整个系统的能效提高很多。

2.4 自然通风与机械通风协同设计

自然通风和机械通风协同设计主要是利用自然通风的免费冷源,在过渡季节或者室外参数适合时,切换为自然通风模式或者混合通风模式,减少机械通风的能耗。设计过程中需要通过计算流体力学 (CFD) 模拟来优化建筑开口布局,保证自然通风路径畅通,达到室内和室外空气高效交换的目的,并且设置智能通风控制模块,在室内外温湿度、污染物浓度等参数的基础上自动调节通风模式,实现自然通风与机械通风的无缝切换。协同设计既要考虑通风的效率也要注意室内舒适度,不能造成由于自然通风导致的温度波动过大或气流组织混乱。

对大型公共建筑采用可开启式外窗加机械通风系统的综合设计方案,利用 CFD 模拟来改善外窗开启角、位置,创建合理的自然通风路径。智能通风控制模块实时比较室内外的温湿度和污染物浓度,当室外温度在 18 ~ 26 °C、PM2.5 浓度小于 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,自动开启外窗切换到自然通风模式,室外参数超出合适范围的时,自动关闭外窗切换到机械通风模式。经过实际运行表明,在过渡季节自然通风的时间大约占到总时长的 40% 以上,机械通风能耗比降低 38%,室内空气质量和舒适度达到设计标准。

3 空调通风系统运行能效提升路径

3.1 基于 AI 的动态负荷预测与参数优化

基于 AI 的动态负荷预测和参数优化是提高运行效率的主要途径,核心在于采用人工智能算法挖掘出历史运行数据与负荷影响因素之间的联系规律,创建准确的负荷预测模型,完成运行参数的前瞻式调整。所用到的 AI 算法有遗传算法、神经网络、模糊逻辑等,其中神经网络模型具有很强的非线性拟合能力,可以准确地反映温湿度、人员密度等各方面的因素对负荷的影响,预测精度能达到 85% 以上。根据预测的结果,系统可以提前对冷水机组的供水温度、风机送风量等主要参数进行调节,使设备的运行状态与未来负荷的需求保持一致,防止由于滞后调节而造成能量的浪费^[4]。

空调通风系统运行时,使用带有 BP 神经网络的负荷预测模型,在训练历史运行数据的基础上(包含室

内外温湿度、人员流量、照明能耗等),建立负荷预测模型。模型提前15分钟给出负荷预测结果,控制系统根据此结果对冷水机组的蒸发温度和冷凝温度进行调节,并调节变频风机的转速。实际运行验证表明,该种优化方法可以使冷水机的COP增加0.6~0.9,风机能耗降低15%~20%,整个系统运行能效提升22%,室内温度波动不超过 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,保证舒适度。

3.2 多设备协同联动运行优化

多设备协同联动运行优化的核心是打破单设备独立调控的局限,用全局优化的目标函数来实现风机、水泵、冷水机组等核心设备的协调运行。协同联动要通过建立设备间运行关联模型,确定各个设备运行参数之间的耦合关系,水泵流量和冷水机组制冷量的匹配关系、风机送风量与空调末端负荷的适应关系等。根据关联模型,用多目标优化算法,在保证室内舒适度的基础上,最小化系统的总能耗。另外,协同运行要具有故障自诊断和冗余备份的功能,在某个设备出现异常时,自动调整其他设备的运行参数,保证系统的正常运转。

具体而言,采用中央空调通风系统多风机联动控制技术,使用Q-learning算法建立协同决策模型,实时得到各个区域的温湿度、风量数据,并依据实际情况动态调节各风机的运行功率及风阀的开度。当某一区域的人员密度增大而造成负荷增大时,系统会提高该区域风机转速,同时对其他区域的风机参数进行微调来保持系统的压力平衡,在非高峰时段负荷降低时,系统就切换到低能耗联动模式,同步降低风机和水泵的转速。运行数据表明,采用该协同优化路径后系统综合节能率可达30%以上,温度调节响应时间缩短到2分钟以内,设备故障引起的停机时间减少60%。

3.3 设备运行状态监测与能效诊断优化

设备运行状态监测及能效诊断优化是保证系统长久稳定运行的重要途径,依靠实时监控设备核心的运行参数,找出设备性能降低和运行异样的地方,适时采取维修保养以及调控的办法。监测参数有冷水机组的COP、风机的单位风量能耗、水泵的水力效率等主要能效指标,还有设备的振动、噪声、轴承温度等状态参数,来预测出设备存在的故障隐患。根据监测数据建立能效诊断模型,比较标准运行参数和实际运行参数之间的差别,找到能效降低的原因,如叶轮积尘造成风机效率下降、制冷剂泄漏造成机组COP降低等,从而得出相应的改进措施^[5]。

3.4 可再生能源与空调系统耦合运行

可再生能源和空调系统耦合运行是实现能源替代和节能增效的重要途径,将太阳能、地热能等可再生

能源与传统的能源消耗相结合,减少系统对电网电力的依赖,达到节约能源的目的。太阳能和空调系统耦合可以利用太阳能集热器预热新风或者加热生活热水,从而减小空调主机以及辅助加热设备的负荷;地热能耦合使用地源热泵系统,依靠地下土壤温度稳定的特点来提高热泵机组的COP,COP一般在3.5~4.5之间,远远大于传统的空气源热泵。耦合系统需要设置智能切换装置,在可再生能源供应量和负荷需求之间,自动调节能源供应的比例,保证系统的稳定、高效。

以地源热泵和空调通风系统耦合为例,系统利用地埋管换热器从地下土壤中获取热量,在冬季为空调系统提供预热热源,在夏季作为冷却热源。在耦合系统中添加智能能源管理系统模块,对地下土壤温度、热泵机组的COP和空调负荷进行实时监控,自动调整地源热泵和传统冷水机组的运行负荷比例。当可再生能源供应充足时,地源热泵承担70%以上负荷,当供应不足时,自动增加传统机组的负荷。实际上的运行结果显示,该耦合途径可使系统每年的耗电量降低25%至30%,二氧化碳排放量减少约205吨,大大提高系统的节能和环保水平。

4 结束语

在建筑能耗管控和“双碳”目标推进的双重作用之下,空调通风系统节能优化、提高能效成为建筑领域实现绿色转型的重要突破口。通过系统架构优化和智能控制集成设计的协同创新,利用动态负荷匹配、多设备协同联动、设备状态监测以及可再生能源耦合等先进的技术途径,不但能提高系统的运行能效和稳定性,而且能促使建筑能源管理向精细化、智能化的方向不断深入。采用这些技术策略进行实践,给建筑领域的节能降碳提供一个可以复制、可以推广的技术范式,有利于行业的高质量可持续发展。

参考文献:

- [1] 洪青春.城市综合体空调通风设计体会[J].洁净与空调技术,2025(02):69-72.
- [2] 孔敏,侯凯娟.基于变频技术的地铁车站空调通风系统自适应控制方法[J].设备管理与维修,2024(21):45-48.
- [3] 王美菊.洁净区域净化空调通风系统的构建与维护措施[J].建设科技,2024(14):96-98.
- [4] 刘欢.变频控制技术在地铁站空调通风系统中的节能应用研究[J].工程机械与维修,2023(06):61-63.
- [5] 张建炜.某RO-PAX船空调通风系统的应用研究[J].机电技术,2023(03):78-81,116.