

暖通空调系统噪声控制与气流组织设计研究

张艳刚

中国核电工程有限公司河北分公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]当下室内建筑的居住、使用体验,噪音和室内空气质量是大家最直观的感受。暖通空调一方面会产生运行噪音,另一方面送风方式也直接影响室内舒适度与设备能耗。结合空气动力学、建筑声学 and 暖通专业知识,对暖通空调的噪音来源传播方式进行系统性的梳理与分析,从设备本身、传播途径、室内出风口三个层面制定针对性的降噪措施,借助流体模拟测算出风口位置、送风速度、冷暖温差等关键参数的合理范围。文中对降噪设计和送风布局之间的相互影响进行了分析,制定了协同优化思路,也为空调实现低噪音、高能效运行提供理论参考。

[关键词]暖通空调; 噪声控制; 气流组织; 流场分布; 声学优化; 协同设计

DOI: 10.33142/ec.v9i7.20065

中图分类号: TU834.8+52

文献标识码: A

Research on Noise Control and Airflow Organization Design of HVAC Systems

ZHANG Yangang

Hebei Branch of China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The current living and usage experience of indoor buildings, noise and indoor air quality are the most intuitive feelings for everyone. On the one hand, HVAC systems generate operational noise, and on the other hand, the air supply method directly affects indoor comfort and equipment energy consumption. Based on the knowledge of aerodynamics, building acoustics, and HVAC, a systematic review and analysis of the sources and propagation of noise in HVAC systems were conducted. Targeted noise reduction measures were developed from three aspects: equipment itself, propagation pathways, and indoor air outlets. Fluid simulation was used to calculate the reasonable range of key parameters such as air outlet position, air supply speed, and temperature difference between cold and warm air. The article analyzes the mutual influence between noise reduction design and air supply layout, formulates collaborative optimization ideas, and provides theoretical reference for air conditioning to achieve low-noise and high-efficiency operation.

Keywords: HVAC; noise control; airflow organization; flow field distribution; acoustic optimization; co-design

引言

声环境作为重要的室内环境质量因素之一,对于人员的身心健康至关重要,因此越来越受到人们的关注。在绿色建筑、健康建筑持续推进的大环境下,室内舒适度、节能环保性能、环境质量已然成为建筑品质的三大核心评判标准。暖通空调是调节室内温湿度、保障空气清新的关键系统,可如今不少工程项目只侧重冷热负荷测算,忽略了声学设计和气流布局优化。这就导致设备投入使用后,频频出现噪音干扰、室内冷热分布不均、送风气流乱窜、室内通风效果差等问题,对声环境影响大,不仅使居住、使用体验大打折扣,影响人体健康,还会造成用电能耗增加,加快设备老化损坏。实际上,室内噪音和气流分布联系十分紧密,气流规划不合理,会导致空气流动杂乱,产生更

大的风噪。过度追求静音、刻意调低送风速度,又会造成室内通风量不够,空气质量变差,需采取合理措施降低设备噪声对室内的干扰。目前相关研究大多只单独研究其中某一项,缺少能兼顾两者的设计思路和规范标准,未构建一套完整可行的落地方法。因此,需搭建一套兼顾低噪音、高能效、高舒适度的一体化设计方案,使室内声环境满足标准规范及项目的要求。

1 暖通空调系统噪声源分类及声学特性分析

暖通空调的噪音是多类声响叠加的宽频噪音,主要包含机械振动、气流紊流、固体传声三类,了解暖通空调系统噪声源分类是开展降噪设计的前提。机械振动噪音大多源自风机、水泵、压缩机等动力设备,频段集中在 20~500Hz 的低频范围,这类声音衰减慢、穿透能力强。其中

风机是首要噪声来源,运转转速越高,噪音就越大;水泵和压缩机持续规律的振动还容易触发共振,让噪声问题变得更严重。气流湍流噪声占暖通空调系统总噪音的 60%~80%,主要集中在 500~5000Hz 的中高频区间。噪音大小和风速关联极强,风速翻倍后,声压级会上升 15~18dB,风速过高是产生这类噪音的主要原因。同时风口出风还容易出现尖锐啸声,直接破坏室内安静的环境。建筑固体传声衍生出来的二次噪音,不仅最难察觉,整改起来也最棘手。设备震动会顺着基座、支架和管道传到建筑墙体与楼板,这类噪音以低频为主,能穿透隔断,让噪音串到其他房间、其他楼层。普通的消音手段作用不大,想要解决就得靠减振、隔振装置切断声音传播的路径。

按照《民用建筑隔声设计规范》(GB50118-2010)要求,不同用途的房间都有明确的噪音标准。空调噪音覆盖多个频段,低频噪音多来自设备振动,中高频则主要是气流扰动造成,因此要分频段选用对应的降噪方案。各类典型噪音指标与管控措施可参考表 1。

2 暖通空调系统全维度噪声控制技术体系

2.1 源头噪声控制技术

源头降噪是性价比最高、效率最佳的方式,关键就在选好设备、调好运行参数,从根上减少震动和噪音。风机盘管是半集中式暖通空调系统的核心末端设备,也是室内噪音最主要的直接来源。运行产生的噪音受设备做工、结构搭配、选型规格和安装工艺多重影响。不同于大型空调主机,风机盘管紧邻人员活动区域,噪音带来的干扰感受十分明显。因此,从末端设备着手源头降噪,是管控室内噪声的重点,主要通过优化设备本身、规范安装配套,从根本上降低振动和风管噪音。挑选设备时,优先选效率高、转速低、噪音小的风机、水泵和压缩机,室内送风尽量用后倾式离心风机,这类风机叶片经过特殊设计,能大幅减小风噪,避免将高转速轴流风机装在室内送风系统中。另外设备功率要和实际需求匹配,避免“大机带小负荷”、频繁启停或是超负荷运转,这类不当工况都会让震动和噪音变得更严重。也可以搭配变频技术,跟着室内实际需求实时调整设备转速,在保证正常送风的同时降低运转速度,能明显减弱机械低频噪音和气流抖动产生的异响。

2.2 管道系统降噪优化设计

风管里气流噪音,大多是管道局部阻力骤变造成的,管道设计要保证走向顺畅、阻力小、气流稳定。规范风管内风速取值,维持合理工况,从源头减少气流紊乱产生的噪音。办公室、居室、会议室这类对安静度要求高的区域,主风管风速控制在 4~6m/s,支风管 2~3m/s,出风口风速不超过 2m/s。优化管道配件,减少弯头、三通、变径、阀门等阻力构件使用,90 度弯头优先做成弧形,或是加装导流叶片,规避气流回旋扰动,有效降低噪音,管道变径处选用渐变样式,实现气流平稳过渡。此外,还可以在风管内壁贴超细玻璃棉、聚酯纤维等吸音材料,吸收中高频气流声,减弱噪音顺着管道向外传播。

设计消声器时要把控好空气流通性能,将风阻控制在标准范围内,防止风量偏小、风机超负荷运转。同时合理控制气流速度,减少二次噪音和风阻损耗。在声学匹配上,要让噪音峰值频段对应消声器的高降噪区间,充分发挥降噪作用。空调系统噪音以中低频居多,优先选用抗性或阻抗复合式消声器,针对性削弱中低频声响,弥补普通吸声材料对低频噪音效果不足的问题,做到全频段有效降噪。

2.3 振动与固体传声阻隔技术

为了解决固体传声问题,关键就是隔断震动的传导路径。所有动力设备都要单独做减震基座,辅以橡胶减震垫、弹簧减震器,同步实施浮筑地基降噪减振方案,减少设备震动往建筑结构传递。风管、水管系统支吊架均采用减震悬吊结构,不能直接硬性固定。管道穿墙、穿楼板部位统一设置柔性防火减震防护套管,内部填充软性隔音材料,规避管道同墙体、楼板产生硬接触,阻断振动传导。另外,设备和管道之间加装柔性接头,有效缓冲并阻断振动传递,可以降低结构传声。

2.4 机房隔声与末端消声设计

机房是设备噪音最集中的区域,整体实施隔声降噪措施。墙体、楼板选用加厚隔音构造,墙面加装吸音材料,门窗统一更换为专业隔音型材及构件,墙体和管道的孔洞缝隙全部封堵严实,防止噪音穿透、外泄。针对风机风口、主风管节点布设阻抗复合消声器,微孔板消声器,全方位削弱低、中、高频各类噪音,阻断管道传声,实现消音降噪。如果周边空间对静音要求较高,还可以在出风口前加装消声静压箱,既能稳定气流,也能进一步削弱残留噪音。

表 1 暖通空调系统噪声特性及控制措施对照表

噪声类型	频率特性	核心产生部位	主要控制措施
机械振动噪声	低频 (20~500Hz)	风机、水泵、压缩机	低噪设备选型、变频调速、设备减振基础
气流湍流噪声	中高频 (500~5000Hz)	风管、弯头、风口、阀门	控制风速、优化管道构造、内壁吸声、稳流风口
固体传声噪声	低频为主	设备基础、管道支架、建筑结构	柔性减振、隔离套管、减振吊架、浮筑基础

3 暖通空调系统气流组织设计核心理论与设计要点

3.1 常见气流组织形式及适配特性

暖通空调四种主流气流组织形式各有特点,上送上回构造简易,但是气流易出现短路,适合层高偏低的常规空间。上送下回温度分布均匀,换热效果出色,适用范围最广。下送上回气流优先覆盖人员活动区域,能耗更低,多用于高大空间,侧送侧回设备布局隐蔽、运行噪音小,常见于办公室这类小型空间。四种形式在温控效果、通风能力、噪音表现上各有优劣,结合建筑层高、使用功能与舒适标准挑选即可,具体参数如表2所示。

表2 主流气流组织形式综合性能对比表

气流组织形式	温度均匀性	通风效率	噪声水平	适用场景
上送上回	一般	较低	中等	普通办公、商铺
上送下回	优良	高	低	写字楼、会议室、住宅
下送上回	良好	较高	中等	高大空间、展厅、厂房
侧送侧回	良好	中等	优良	客房、小型办公室

3.2 气流组织关键设计参数控制

开展气流组织设计时,需重点关注出风速度、冷暖温差、风口位置、送风覆盖范围和气流漩涡区域,直接影响室内气流是否平稳、环境噪音大小。日常使用场景里,送风温差建议控制在 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$,温差太大容易让人感受到吹风、体感忽冷忽热;温差太小需要加大送风量,进而导致噪音升高。人员长期停留的区域,风口出风速度保持在 $0.8\sim 1.5\text{m/s}$ 最合适,能减少乱流、降低噪音。同时要精准计算气流射程,避免出现送风死角或是气流短路的情况。不同功能区域,对应的设计参数也有区别,见表3。

表3 不同功能空间风速与噪声控制标准参数

空间类型	主风管风速 (m/s)	支风管风速 (m/s)	末端风口风速 (m/s)	噪声限值 dB(A)
住宅卧室	3~4	1.5~2.0	0.8~1.2	≤ 30
办公室	4~5	2.0~2.5	1.0~1.5	≤ 40
会议室	3.5~4.5	1.8~2.2	0.9~1.3	≤ 35
商业空间	5~6	2.5~3.0	1.5~2.0	≤ 50

3.3 基于CFD仿真的气流组织优化方法

传统手工计算仅能完成风量与负荷核算,无法精准预判室内流场、温度场分布。CFD流体仿真技术可通过数值模拟方式可视化室内气流状态,是现阶段气流组织精细化优化的核心手段。通过建立室内三维模型,设置边界条件、送风参数、热源参数,可精准模拟室内速度分布、温度分布、涡流区域、气流短路位置,针对性优化风口数量、安装位置、送风角度与风量配比,消除流场紊乱区域,降

低气流湍流度,在提升通风效率的同时,从源头减少湍流噪声的产生。

4 噪声控制与气流组织耦合关系及协同设计策略

暖通空调的降噪和气流组织设计本就相辅相成,风速是串联二者的核心纽带。风速调大,换热效率与送风覆盖范围都能得到有效提升,但空气流动紊乱加剧,噪音也会明显变大;风速调低,噪音能得到有效控制,可又容易出现送风量不够、室内冷热分布不均、部分区域通风不到位的情况。除此之外,风口样式、风管排布、消音装置,都会同时影响气流状态和室内噪音。要是管路局部阻力偏大,不仅会产生涡流异响,还会打乱气流分布的均匀度。所以实际设计中一定要统筹兼顾、协同优化,参照室内舒适标准与相关规范要求,在保证指标达标的基础上尽量提升送风效率,同时在气流顺畅均匀的前提下,把噪音降到最低。

具体可从三方面落实优化策略。第一,按区域差异化设定运行参数:卧室、会议室这类对静音要求高的场所,优先把控噪音,适当调低风速、加大风口尺寸,既降低声响,也让送风更均匀;商场、大堂等大空间以通风效果为先,合理提高风速,平衡能耗与通风需求。第二,调整风口类型与安装位置,用散流器、百叶风口这类气流更平稳的款式,替换高速喷射风口,减少气流冲撞扰动,做到稳流又降噪。第三,合理布置消音配件,把消声器、静压箱装在气流平缓的主管道上,防止管道阻力突变造成气流混乱、产生额外噪音,在保障消声作用的同时,维持整个系统气流稳定。

结合以上设计原则,梳理出一套标准化协同设计流程:先开展基础参数调研,明确空间用途、噪音标准及空调负荷;接着初步计算风量与风速;再优化管道构造,做到稳流、减小风阻;随后完成设备减振降噪设计;借助CFD仿真模拟检验气流状态,同时完成噪音频谱检测;根据结果反复调整参数,最终确认方案达标。整套流程通过参数搭配、结构改良和模拟核验,确保降噪效果与气流输送效果达到整体平衡。

5 结论与展望

本研究全面梳理了暖通空调噪声控制、气流组织设计的核心理论,清晰拆解了空调系统中机械噪声、气流噪声、固体传声的产生原因以及不同频率的噪音特点,厘清各类空调噪音的产生机理与传播路径,在此基础上搭建出一套从噪音产生源头、传播路径到设备末端优化的全方位噪声控制方案。对比分析四种主流室内送风气流组织的应用效果与性能差异,厘清了室内气流布局和噪音大小之间相互影响、相互制约的关联关系。在此基础上,结合分析结果,

制定分区差异化设计、结构稳流降噪、仿真模拟联合校核的精细化优化设计思路,解决了传统设计中气流组织与噪声控制难以兼顾的难题。研究结果证实,送风风速成为平衡空调降噪效果与室内气流舒适感的关键参数。结合设备结构优化、运行参数精准匹配、仿真迭代调试的协同设计方式,可同时满足室内声环境与空气流通的双重舒适设计要求。未来,依托 CFD 声学耦合仿真技术、依托智能变频自适应调控技术的升级优化,暖通空调设计逐步朝着更智能、更精细、更贴合人居舒适需求的方向迭代发展。

[参考文献]

- [1]唐亮.洁净空间中央空调系统节能控制研究[J].科技创新与应用,2026,16(7):81-84.
[2]刘云宽,李运波.工业厂房暖通空调的节能设计探讨[J].

中国设备工程,2025,11(23):256-258.

- [3]张成跃,吴运良.某工业厂房送风系统运行异常分析及优化措施[J].暖通空调,2025,55(12):493-495.
[4]王迪.基于模型预测控制的高大厂房供暖控制系统的研究[D].河北:河北建筑工程学院,2024.
[5]冶成龙.大空间工业厂房暖通空调设计与节能分析[J].居舍,2021,2(17):94-95.
[6]张莉珊.通风空调系统设计中暖通空调新技术的应用[J].建筑与预算,2019,9(10):47-50.
[7]潘国平.某厂房采暖通风与空调安装施工研究[J].建材与装饰,2019,7(3):222-223.

作者简介:张艳刚(1994—),男,河北石家庄人,毕业于石家庄铁道大学机械工程专业,硕士,工程师。