

地铁通风空调系统的噪声控制与声学设计

顾嘉伦 褚海锋

宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司

DOI:10.12238/jpm.v6i6.8138

[摘要] 本文聚焦地铁通风空调系统噪声控制与声学设计，对该系统噪声产生的根源进行系统阐述。深入分析噪声传播特性，对其在地铁复杂空间内的传播路径和规律进行剖析。从声学设计角度出发，提出综合性噪声控制策略，目的在于使地铁通风空调系统噪声降低，营造出舒适的乘车环境。

[关键词] 地铁通风空调系统；噪声控制；声学设计

Noise control and acoustic design of subway ventilation and air conditioning system

Gu Jialun Chu Haifeng

Ningbo Rail Transit Group Co., LTD. Operation branch

[Abstract] This paper focuses on noise control and acoustic design of subway ventilation and air conditioning systems, systematically elucidating the sources of noise in these systems. It delves into the characteristics of noise propagation, analyzing its transmission paths and patterns within the complex space of subways. From an acoustic design perspective, it proposes a comprehensive noise control strategy aimed at reducing noise levels in subway ventilation and air conditioning systems, thereby creating a comfortable riding environment.

[Key words] subway ventilation and air conditioning system; noise control; acoustic design

在现代城市公共交通中地铁是重要的组成部分，其具有高效率、大运量等优势，可以显著缓解地面的交通压力。但是，在地铁运行期间，通风空调系统会产生一定的噪声，成为影响周边居民生活质量、乘客乘坐体验的关键因素。地铁通风空调系统噪声不仅会对乘客的正常交流产生干扰，在高噪声环境中长时间暴露还可能会危害人体健康。所以，地铁建设与运营过程中，对地铁通风空调系统实施有效的噪声控制和合理的声学设计成为亟待解决的关键问题。

一、地铁通风空调系统噪声产生的原因

地铁通风空调系统噪声成因复杂，对其进行深入剖析是制定有效控制策略的基础。

（一）设备运行噪声

地铁通风空调系统的设备运行会产生噪声。作为系统中不可或缺的设备，风机的叶片在高速旋转时，会与空气发生剧烈的摩擦，从而产生气动噪声。而风机内部的轴承、齿轮等机械部件，在长时间的运转中，由于受力不均、摩擦损耗，也会产生非常刺耳的机械噪声。当轴承润滑不足时，金属间的直接接触，会使振动加剧，噪声会更加明显。压缩机在工作过程中，

反复压缩气体，内部压力发生剧烈的波动，导致缸体产生高频振动，进而出现强烈噪声。水泵运行过程中，水流的不稳定状态，如出现气蚀现象，水流中气泡破裂，会产生明显噪声，并且叶轮和泵壳之间的碰撞、摩擦，也会使噪声环境进一步恶化。冷却塔运行过程中，风机产生的噪声，以及介质水冷却过程中产生的噪声。这些设备的噪声，由于自身结构和运行特性的不同，其频率和强度存在差异，共同构成了复杂的噪声源^[1]。

（二）气流流动噪声

在通风空调系统的管道内，气流的运动轨迹会对着噪声的产生产生直接影响。管道内壁并不是完全光滑的，其粗糙度会导致气流在流动过程中形成湍流。当气流遇到管道截面的突然变化时，会瞬间改变气流的方向和速度，使强烈的涡流产生。这些涡流与管道壁面不断相互作用，发出阵阵轰鸣。特别是在气流速度较高的区域，存在更加突出的噪声问题。在出风口和回风口，气流从管道内喷出或吸入，和外界的空气相遇，会出现剧烈的扰动。如果出风口的风速比较大，气流会对周围空气产生冲击作用，形成噪声；风口不合理的形状设计，会使气流分布不均，导致噪声的产生进一步加剧。这些气流流动产生

的噪声，随着通风系统的运行持续存在，进而对地铁环境产生严重影响。

（三）设备安装和维护因素

设备安装和维护环节与通风空调系统的噪声状况具有非常密切的关系。安装期间，如果压缩机、风机等设备的安装精度不合格，会有额外的振动和噪声产生。设备间的螺栓、法兰等连接部件，如果安装不牢固或没有拧紧，在设备运转的震动下会逐渐松动，导致更强烈的振动和噪声产生。而在设备长期运行后，定期维护不足，会不断加剧机械部件的磨损。风机叶片表面的磨损，会使其气动性能改变，导致气动噪声增加；压缩机活塞环的磨损，会使气体泄漏，对压缩效率产生影响，并且出现异常噪声。水泵的密封件出现磨损，会导致漏水 and 振动，使噪声进一步放大。这些因安装和维护不当产生的噪声，不仅会对系统的运行效果产生影响，还会使设备的使用寿命缩短^[2]。

二、地铁通风空调系统噪声的传播特性

明晰噪声的传播特性是构建完整声学控制体系的关键，只有精准把握其在地铁空间内的传播规律，才能为后续针对性降噪措施提供科学依据。

（一）固体传声

地铁通风空调系统里，设备运转引发的振动通过固体结构扩散，这便是固体传声。如风机、压缩机运行过程中产生的振动，顺着基础、支架等结构，以机械波的形式快速传递。它可以穿透墙体、楼板，波及到地铁的各个角落。当设备振动频率和地铁结构的固有频率接近时，还会引起共振，进一步放大噪声。例如风机基础与墙体相连，其振动产生的噪声，可顺着墙体影响到相邻公共区，使乘客受到影响。

（二）空气传声

噪声化作声波在空气中扩散，就是空气传声。通风空调系统产生的大部分噪声都靠空气传播。在地铁相对封闭的空间里，碰到设备、装饰、墙壁等障碍物，声波会不断反射、叠加，这使得噪声衰减比在开阔空间慢得多。并且，噪声传播的距离越远，虽然会减弱其整体声强，然而因反射作用，部分区域的依旧存在明显的噪声。出风口的气流噪声，就是通过空气直接影响乘客，障碍物阻挡、空气介质特性等因素会影响其传播过程。

（三）噪声在地铁空间内的传播路径

地铁通风空调系统噪声存在错综复杂的传播路径。噪声可以沿着通风管道直接抵达各个设备房、管理用房、公共区；设备振动产生的噪声，先通过固体结构传播到周边区域，再以空气为媒介扩散开来。噪声会顺着地铁的出入口、风井，扩散到地铁外部，对周边居民生活产生影响^[3]。比如机房内设备噪声，

不仅会通过管道传向公共区，也会经墙体传播到相邻区域，再经空气在整个地铁空间中弥漫。

三、地铁通风空调系统的声学设计原则

为实现地铁通风空调系统降噪目标，科学合理的声学设计是核心，而遵循特定原则则是保障设计有效性的根基。

（一）合理性原则

声学设计需要紧密贴合地铁通风空调系统的实际运行需求。在设计之初，需要充分了解系统的风量、风压特性以及噪声频率分布。如对于风机高频气动噪声，需要选择合适的阻性消声器；针对压缩机低频噪声，需要使用抗性消声器。同时，合理选择安装位置，消声器、吸声材料的布局不可以对设备检修和系统运行产生影响，保证噪声控制能够和系统功能和谐共存。

（二）经济性原则

在追求降噪效果的同时，还需要充分考虑经济方面。声学设计不能只使用高价设备和材料，而是要在满足降噪目标的基础上节约成本。以吸声材料为例，玻璃棉吸声性能优良、价格亲民，大面积铺设在通风管道、机房墙面等隐蔽处，具有非常高的性价比。此外，还需要关注设备的全生命周期成本，选择可靠性高、维护周期长的减振装置，从而使经济效益与环境效益实现双赢。

（三）安全性原则

在声学设计中安全性至关重要。地铁人员密集，任何设计都不能对乘客和设备安全产生威胁。消声装置安装过程中，如果固定不牢固，运行中松动脱落，较易引发安全事故；吸声材料必须达到防火阻燃标准，杜绝火灾隐患。对于减振设计，不仅要有效隔离振动，还不能因减振措施而对设备稳定性产生影响，像风机减振基础若设计不当，导致设备倾斜，反而会引发更大风险。此外，设计还需要与通风、疏散等安全规范相符合，保证噪声控制措施不会成为安全漏洞，从而确保地铁平稳运行^[4]。

四、地铁通风空调系统噪声控制策略

基于对噪声来源与传播特性的认知，构建系统化的控制策略成为改善地铁声环境的关键。

（一）设备选型优化

设备选型直接决定噪声产生的源头大小。风机选型时，需要对叶片的空气动力学设计优先关注。后倾式机翼型叶片可以使气动涡流有效降低。转速控制非常重要，利用变频调速技术，在满足通风需求的前提下，将风机转速从 1450r/min 降至 960r/min，可以显著降低噪声值。此外，风机的安装方式也会对噪声表现产生影响，采用分体式安装，分离电机和叶轮，中

间通过柔性联轴器连接，能够使电机振动对叶轮的干扰减少。针对压缩机，应当选择涡旋式、螺杆式等低噪声机型。以螺杆式压缩机为例，其双转子啮合运转的方式，相比活塞式压缩机减少了往复运动部件，运行时机械振动更小。水泵选型需要对叶轮的水力模型密切关注，通过大叶片、低比转速的设计，可以使水流冲击噪声有效降低。并且，选择带有内置减振装置的水泵，如将复合橡胶减振垫加装在泵体与基座间，能够阻断 80% 以上的振动传递。设备选型时还需要对设备的运行工况匹配充分考虑，防止由于负荷过大或过小而产生异常噪声。

（二）消声装置设计

在拦截噪声传播过程中，消声装置发挥着重要作用，需要按照噪声特性实施针对性设计。阻性消声器在中高频噪声治理中比较适用，在风机出风口安装的片式消声器，内部填充离心玻璃棉等多孔吸声材料。为使消声效果增强，玻璃棉密度需控制在 $32\sim 48\text{kg/m}^3$ ，厚度保持在 $150\sim 200\text{mm}$ 。并且，消声器的气流通道宽度不宜过大，一般控制在 $200\sim 300\text{mm}$ ，从而确保声波充分接触吸声材料。抗性消声器则适用于低频噪声，常用的扩张室式消声器，其扩张比需要按照噪声频率计算确定，一般控制在 3-5 倍。为防止气流再生噪声，扩张室的长度应当满足奇数倍 $1/4$ 波长的条件。在实际应用过程中，一般会将阻性与抗性消声器组合成阻抗复合式消声器。除此之外，消声弯头、消声百叶也是非常关键的辅助装置。消声弯头在管道转弯处设置吸声导流板，导流板采用穿孔铝板内填吸声棉的结构，穿孔率控制在 20%-25%，不仅可以改变气流方向，还能够吸收噪声。在出风口安装消声百叶时，叶片角度设计为 45° ，表面喷涂微孔吸声涂层，在确保通风量的同时，能够使风口噪声有效降低^[5]。

（三）吸声材料应用

为营造安静的环境，吸声材料的应用尤为重要，需要按照不同场所特性合理选用。在机房等设备集中区域，墙面可以采用双层结构：底层铺设 50mm 厚的岩棉板，密度控制在 64kg/m^3 ，以吸收中高频噪声；外层加装 1.2mm 厚的穿孔铝板，穿孔直径 3mm，穿孔率 25%，形成共振吸声结构，使低频吸声效果增强。为避免岩棉受潮，中间还需要合理设置防潮薄膜。针对地铁站的高大空间，可以采用空间吸声体，将玻璃棉毡制成六面体形状，将玻璃纤维布覆盖在表面，悬挂在天花板下。根据混响时间计算确定空间吸声体的悬挂密度，一般每平方米悬挂 0.5-1 个。此外，在通风管道内壁，可采用微穿孔板吸声结构。微穿孔板的孔径小于 1mm，穿孔率在 1%-3% 之间，板后预留 100-150mm 空腔，这种结构不需要填充吸声材料，可以对中高频噪声进行有效吸收，并且不容易积尘，在通风管道的特殊

环境中比较适用。

（四）减振措施

为阻断噪声传播，需要采取有效的减振措施，需要从设备基础到管道系统实施全面防护。设备基础减振方面，针对大型风机，需要浇筑独立的钢筋混凝土基础，基础重量应为设备重量的 3-5 倍。将弹簧减振器安装在基础和设备底座间，需要按照设备重量和运行时的动载荷确定弹簧的额定载荷，减振器的固有频率控制在 3-5Hz。并且，在基础表面铺设 20mm 厚的橡胶隔振垫，更好地隔离振动传递。管道减振方面，将防火软接安装在风机和管道连接处，软接的长度一般为 150-300mm，与风机连接的法兰应采用螺栓连接，软连接能够承受风机的工况，包括扭转、振动、晃动。针对长距离管道，每隔 3-5 米设置弹性支吊架，支吊架的吊杆采用橡胶包裹的钢质吊杆，管道穿过墙体时，采用柔性套管，将弹性密封材料填充在套管和管道间，形成减振环。除此之外，针对水泵等设备，可以将橡胶挠性接头安装在其进出口管道上，接头的内径和管道保持一致，按照管径大小选择长度。通过综合应用这些减振措施，可以有效降低设备振动传递，使固体传声对周边环境的影响明显减少^[6]。

五、结语

地铁通风空调系统的噪声控制与声学设计属于综合性的工程，涉及多方面的内容。通过采取优化设备选型、合理设计消声装置等措施，能够使地铁通风空调系统的噪声水平明显降低，使乘客享受一个舒适、安静的乘车环境，并且可以降低对周边居民生活的影响。未来，在地铁建设与运营期间需要对通风空调系统的噪声控制问题高度重视，进一步完善声学设计方案，通过先进的技术和设备，促进地铁的运营水平和环境质量得到显著提升。

【参考文献】

- [1]马林飞. 地铁通风空调系统设备安装施工问题及改进措施[J]. 工程机械与维修, 2022 (6): 281-283.
- [2]王蛟洋, 简辰宇, 王敏. 郑州地铁通风空调系统工程施工难点及质量控制[J]. 智能城市, 2023, 7 (17): 27-28.
- [3]安睿. 浅谈直膨式蒸发式冷凝空调系统在地铁车站中的应用[J]. 建材发展导向 (上), 2023, 19 (9): 217-218.
- [4]李涛涛. 地铁工程通风空调中通风与防排烟施工质量控制[J]. 工程管理, 2022, 3 (12): 110-112.
- [5]陈明辉. 轨道交通直膨磁悬浮空调系统研究[J]. 设备管理与维修, 2024 (7): 41-45.
- [6]王超. 地铁通风空调系统绿色建造应用设计探析[J]. 城市开发, 2024 (3): 118-120.