

论著 DOI: 10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2025.240702

· 调查研究 ·

基于 CadnaA 软件的某厂风机区噪声模拟计算和治理研究

刘臻真¹, 王义朋¹, 骆建宇², 方四新², 张庆波¹

1. 中安绿创(北京)职业卫生建设工程设计研究院有限公司, 北京 102200; 2. 安徽现代职业安全卫生与环境科学研究所, 安徽 合肥 230000

摘要:目的 利用 CadnaA 噪声模拟软件对噪声源和噪声声级水平进行数值模拟, 分析噪声声源贡献度与声场分布情况, 为工作场所噪声治理提供科学依据。方法 以某厂风机区作为研究对象, 对该区域各噪声源进行识别、检测, 并进行岗位接触情况调查; 再结合 CadnaA 软件数值模拟情况, 分析该区域的声场分布情况和主要声源对风机区人行道声环境的影响和贡献度, 并评估噪声治理效果。结果 该区风机以及配套电机的声压级水平为 87.8 ~ 99.7 dB(A), 大型风机配套电机散热风口的噪声值均达到 90 dB(A) 以上, 除尘器与过滤箱的声压级水平为 93.8 ~ 99.2 dB(A)。风机区北侧人行通道噪声均在 80 dB(A) 以下, 南侧人行通道各点位噪声为 80.7 ~ 86.6 dB(A)。噪声模拟分析表明, 靠近风机区南侧的 7 台设备对该区点位噪声贡献度超过 70%。对影响较大的声源 M104A 风机、M104 过滤箱、LG1 除尘器、M109A 风机和 M105 风机采取安装隔声罩、消声器以及隔声包扎等针对性的降噪措施。隔声罩和消声器均使用针对中低频噪声的高面密度板加阻尼层的复合结构, 从而增强隔声效果和减少振动。采取降噪措施后, 南侧通道各点位噪声降低了 3.8 ~ 8.9 dB, 通道的噪声水平低于 78.6 dB(A)。同点位软件计算值与实际检测值的误差在 -0.2 ~ 1.4 dB 范围内, 误差均在可接受范围内 (< 3 dB)。结论 使用 CadnaA 噪声模拟软件来模拟车间内噪声的衰减传播并分析噪声贡献度具有一定的可行性, 可为工作场所噪声的治理提供有益的思路。

关键词: 风机噪声; CadnaA 软件; 噪声模拟; 声源识别; 噪声治理

中图分类号: R136.2; X966 文献标志码: A 文章编号: 1007-1326(2025)03-0389-06

引用: 刘臻真, 王义朋, 骆建宇, 等. 基于 CadnaA 软件的某厂风机区噪声模拟计算和治理研究[J]. 职业卫生与应急救援, 2025, 43(3): 389-394.

Simulating calculation and control of noise in the fan area of a plant based on

CadnaA LIU Zhenzhen¹, WANG Yipeng¹, LUO Jianyu², FANG Sixin², ZHANG Qingbo¹ (1. Zhong'an GreenTech (Beijing) Occupational Health Construction Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China; 2. Anhui Modern Research Institute of Occupational Safety, Health and Environmental Science, Hefei, Anhui 230000, China)

Abstract: Objective To perform numerical simulation using CadnaA noise modeling software to analyze noise sources and sound pressure levels, assess the contribution of different noise sources and the distribution of the sound field, and provide scientific evidence for workplace noise control. **Methods** A fan area in a factory was selected as the study site. Noise sources in this area were identified, measured, and investigated regarding occupational exposure. Based on simulations using CadnaA software, the spatial distribution of the sound field and the impact and contribution of major noise sources on the pedestrian walkway in the fan area were analyzed. The effectiveness of noise control measures was also evaluated. **Results** The sound pressure levels of the fans and supporting motors in the area ranged from 87.8 to 99.7 dB (A). The noise levels at the cooling vents of large fan motors exceeded 90 dB (A). The sound pressure levels of the dust collector and filter box ranged from 93.8 to 99.2 dB(A). Noise levels along the northern walkway of the fan area were below 80 dB(A), while those along the southern walkway ranged from 80.7 to 86.6 dB (A). Simulation analysis indicated that seven devices near the southern side of the fan area contributed over 70% of the noise at various measurement points. Targeted noise reduction measures, including installing acoustic enclosures, silencers, and sound-insulating wraps, were implemented for major noise sources such as the M104A fan, M104 filter box, LG1 dust collector, M109A fan, and M105 fan. Both enclosures and silencers were constructed with high surface density panels and damping layers specifically designed for medium- and low-frequency noise, enhancing sound insulation and reducing vibration. After implementing these noise

基金项目: 中安绿创科研培育项目 (CT-KY-003)

作者简介: 刘臻真 (1987—), 女, 硕士, 工程师

reduction measures, noise levels at southern walkway points decreased by 3.8 to 8.9 dB, with all levels falling below 78.6 dB(A). The discrepancy between simulation results and actual measurements at the same locations ranged from -0.2 to 1.4 dB, all within an acceptable error margin (< 3 dB). **Conclusions** Using CadnaA noise simulation software to model noise attenuation and analyze noise contribution in workshops is feasible and can provide useful insights and references for workplace noise control.

Keywords: occupational noise; CadnaA software; noise simulation; noise source identification; noise control

工作场所的噪声是常见的职业病危害因素之一^[1]。长期接触职业性噪声不仅会引起耳鸣、耳聋等症状^[2],还会对心血管和消化系统等产生不良影响^[3-4]。研究^[5-6]发现,职业性噪声暴露可导致大脑组织学发生改变,进而导致脑功能障碍,出现焦虑、抑郁等心理问题^[7],加剧安全生产的风险。因此,降低工作场所噪声水平对保障劳动者健康非常必要,科学有效地改善工作场所的声环境,需要客观分析工作场所噪声现状。目前工作场所噪声评估往往使用声级计监测法,使用数值模拟软件辅助分析的报道较少。

噪声模拟软件 CadnaA 是一款由德国 Datakustik 公司基于 ISO 9613 标准构建开发的专业噪声模拟和控制软件,主要运用于多种声源的预测、评价、工程设计和研究^[8]。CadnaA 软件具备强大的仿真运算能力,支持直接建模及导入 AutoCAD、JPEG 等多种格式的数据,可精确模拟地形与障碍物的分布,并分析噪声源的辐射特性与声传播规律。该软件能预测多噪声源的复合效应,通过三维彩色图像直观展示噪声等值线及声场分布,结果以 A 计权声级 [dB(A)] 呈现,从而为噪声控制设计的效果分析提供重要参考。目前 CadnaA 软件主要用于户外声源衰减传播的模拟,在建设项目环境影响评价^[9-11]以及工程治理^[12]中应用较多。本研究首次利用 CadnaA 软件,结合声屏障(模拟墙壁)和 3D 反射体(模拟屋顶),模拟车间内噪声的衰减与传播特性,分析目标点位的噪声贡献度,以期对工作场所噪声治理提供技术支持和参考依据。

1 对象与方法

1.1 对象

某工厂风机区位于厂房一层中心部位,该区域长、宽、高分别约 109.0 m、63.0 m、7.5 m。风机区南北两侧为行人通道,中间位置布置多台风机、除尘器、过滤箱等,整个区域噪声水平较高。该通道是进入车间的必经路径,除巡检人员经人行道前往风机区外,其他员工、客户等进入厂房均需要通过此处。

风机区东侧为空调设备区,西侧为公辅设施用房。厂房二层与三层为车间生产线。

1.2 方法

1.2.1 噪声源识别和检测

通过现场实地踏勘,主要采用主观听觉判断、分步运行测试和近场声级测试的方法对风机区的声源进行识别。为了校验 CadnaA 软件的数值模拟结果,按照 GBZ/T 189.8—2007《工作场所物理因素 风机区测量 第 8 部分:噪声》^[13]规定的噪声检测方法对南北侧通道的代表性点位进行测量。噪声检测点分别选取南北两侧通道中心线,距地面 1.5 m 处的位置。

1.2.2 岗位调查

研究人员通过与现场岗位人员沟通,调取企业历年职业病危害因素检测报告、个人防护用品使用情况,以及观察岗位人员工作方式等,调查岗位人员的噪声接触情况,包括工作班制、巡检路线与巡检时长、个人防护用品佩戴规范性等内容。

1.2.3 噪声模拟数学模型

噪声源可用 1 组分区表示,每个分区有一定的声功率及指向特性。1 个线声源可以分为若干线分区,1 个面声源可以分为若干个面分区,每个分区用处于中心位置的点声源表示^[14]。在每个分区内以 1 个代表性点所计算的衰减来表示这个分区的声衰减。工业噪声预测计算模式参照 HJ 2.4—2021《环境影响评价技术导则 声环境》中的相关规定^[15]。

点声源的几何发散衰减基本公式见式 1。

$$L_p(r) = L_w - 20lgr - Dc \quad (\text{式 1})$$

式中, $L_p(r)$ 为预测点处声压级,dB; L_w 为点声源产生的倍频带声功率级,dB; r 为预测点距离声源的距离,m; Dc 为指向性校正,当声源处于自由声场, Dc 取 11 dB,当声源处于半自由声场, Dc 取 8 dB。

假设第 i 个声源在预测点产生的 A 声级为 L_{A_i} ,在 T 时间内该声源工作时间为 t_i ;第 j 个等效声源在预测点产生的 A 声级为 L_{A_j} ,在 T 时间内该声源工作时间为 t_j ,则拟建工程声源对预测点产生的等效声级贡献值(L_{eq})计算公式见式 2。

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \left(\sum_{i=1}^N t_i 10^{0.1L_{Ai}} + \sum_{j=1}^M t_j 10^{0.1L_{Aj}} \right) \right] \quad (式2)$$

式中, L_{eq} 为建设项目声源在预测点产生的噪声贡献值, dB; T 为用于计算等效声级的时间, s; N 为声源个数; t_i 为在 T 时间内 i 声源工作时间, s; L_{Ai} 为第 i 个声源在预测点产生的声压级, dB; M 为等效声源个数; t_j 为在 T 时间内 j 声源工作时间, s; L_{Aj} 为第 j 个等效声源在预测点产生的声压级, dB。

2 结果

2.1 声源识别与检测情况

现场踏勘发现风机区主要噪声源为 25 套风机及其配套管道设备, 部分风机管道直接与附近除尘器或过滤箱相连, 另一部分风机管道沿着厂房屋顶进入厂房其他工序。风机以及配套电机的声压级水平为 87.8 ~ 99.7 dB(A), 大型风机配套的电机散热风口的噪声值均达到 90 dB(A) 以上。除尘器与过滤箱的声压级水平为 93.8 ~ 99.2 dB(A)。南北两侧通道噪声检测结果显示, 风机区南侧通道处声压级水平约为 80.7 ~ 86.6 dB(A), 北侧通道处声压级水平约为 77.7 ~ 79.8 dB(A)。选择对南侧通道贡献大的典型声源进行噪声频谱检测, 结果显示风机的中低频噪声较为突出。见表 1。

表 1 典型噪声源 1/1 倍频程噪声频谱检测结果

噪声源	噪声检测值/dB									L_{eq} / dB(A)
	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	
M104A 风机	88.3	93.0	93.6	91.5	96.0	90.9	91.4	78.2	79.1	97.2
M104A 电机	95.9	97.6	102.1	96.6	101.5	89.1	88.6	80.1	75.9	99.7
M104B 风机	85.7	91.1	88.1	85.7	89.3	78.9	73.8	69.2	66.1	87.8
M104B 电机	86.4	93.0	91.3	89.5	87.7	81.3	77.0	69.6	65.5	88.2
M109A 风机	88.8	94.4	93.9	92.2	95.9	90.9	85.8	76.0	71.6	95.9
M109A 电机	96.4	96.5	101.0	97.3	98.7	85.0	81.5	81	75.1	97.0
M109 过滤箱	87.9	96.7	91.5	94.7	96.5	82.3	78.8	70.7	68.9	94.5
M105 风机	90.0	92.8	89.6	85.1	86.9	83.6	74.6	72.2	68.6	87.6
M105 电机	90.3	98.2	93.3	89.3	90.6	84.1	76.5	78.1	75.3	90.3
M114A 风机	97.4	97.1	100.7	100.7	100.4	91.7	84.1	80.2	76.0	99.4
M114A 电机	89.7	93.5	95.3	93.9	97.5	90.9	88.5	76.7	74.3	97.2
LG1 除尘器	89.3	91.2	93.8	91.6	94.7	88.3	83.0	77.6	71.1	93.8

2.2 模型分析计算结果

2.2.1 3D 模型建立

根据现场实际踏勘结果, 修改风机区的设备平面布置 AutoCAD 总图, 再将总图导入到 CadnaA 软件中, 通过捕捉相应的建筑物以及设备等轮廓进行三维建模。建模过程中将不发声设备设置成障碍物; 墙壁设置成屏障; 屋顶设置成 3D 反射体, 模型如图 1 所示(为了展示设备布置情况, 隐藏屋顶)。

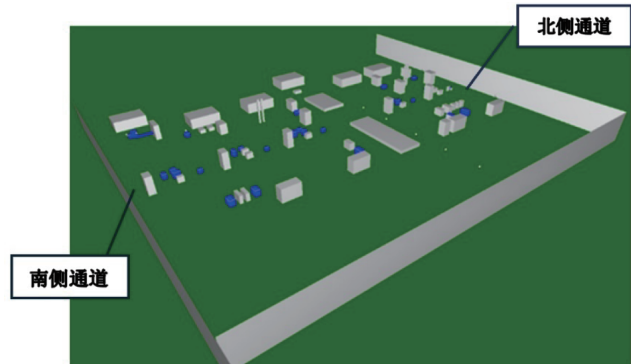


图 1 风机区 3D 建模图

2.2.2 可行性分析

3D 模型建立后, 对各声源进行赋值调试。对于不发声设备、墙壁、地面等根据现场勘探情况设置表面吸声系数。如墙壁与不发声的设备表面相对光滑, 吸声系数较小, 依据其声学特性, 将反射损失量设定为 0.5 dB。为确保噪声模拟计算的结果尽可能贴近实际传播情况, 同时优化计算效率, 将声音反射的最大次数设定为 3 次。在南北各通道设置一系列的接收点, 接收点位置与南北通道噪声检测点位置 and 高度设置一致。同位置模型模拟值与噪声检测值对比情况见表 2。由表 2 可知, 相同接收点计算值与实际监测值的误差在 -0.8 ~ 1.5 dB 范围内, 对于噪声工程治理来说, 误差均在可接受范围内 (< 3 dB)。由此可见, 该声学模型用于风机区声场分布计算和接收点噪声分析是可行的。

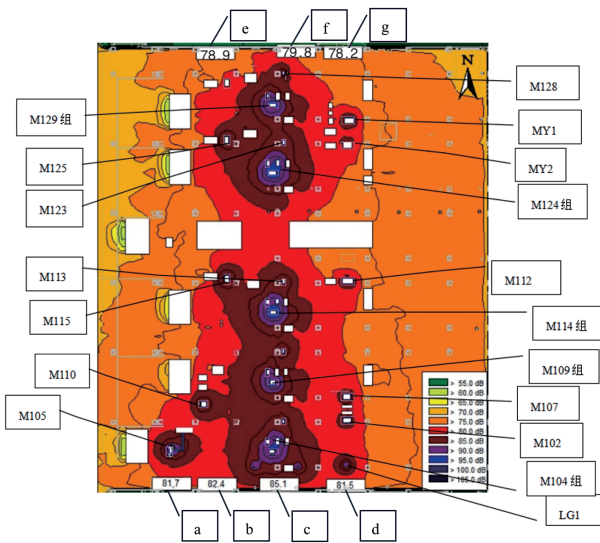
表 2 同位置模型模拟值与噪声监测值对比

接收点	位置	高度/m	噪声测量 值/dB(A)	噪声模拟 值/dB(A)	差值/dB
a	南侧通道西	1.5	82.4	81.7	0.7
b	南侧通道中 1	1.5	82.3	82.4	-0.1
c	南侧通道中 2	1.5	86.6	85.1	1.5
d	南侧通道东	1.5	80.7	81.5	-0.8
e	北侧通道西	1.5	79.4	78.9	0.5
f	北侧通道中	1.5	79.8	79.8	0
g	北侧通道东	1.5	77.4	78.2	-0.8

2.2.3 区域声场分布

模型建模与计算调试后, 设置相应的计算区域, 计算网格设置为 1 m × 1 m, 计算截面高度设置

为距离地面 1.5 m 的平面,以模拟人耳处于常规高度时的噪声环境。再启动运算模型进行模拟运算,生成噪声声场分布图,如图 2 所示。由图 2 可知,声源附近的声级线呈辐射状扩散,风机区噪声整体水平在 80 dB(A)以上,属于噪声作业场所。85 dB(A)及以上声场的面积占比较大。图 2 中从南至北有 5 台风机的噪声水平较高,形成较大尺寸的声场圈[噪声 ≥ 90 dB(A)],直径依次为 8.34、6.47、8.09、8.95 和 6.33 m。南北通道噪声模拟值与检测值比较接近,说明通道噪声主要来源于风机区的设备。



注:“M+数字”或“MY+数字”代表单一风机设备,“M+数字+组”代表某一组风机设备,如 M104 风机组,左上为 M104B 风机,右上为 M104 过滤箱,下为 M104A 风机;M109 风机组,左上为 M109B 风机,下为 M109A 风机;M114 风机组,左上为 M114B 风机,右上为 M114 过滤箱,下为 M114A 风机;M124 风机组,左上为 M124B 风机,右上为 M124 过滤箱,下为 M124A 风机;M129 风机组,左上为 M129B 风机,下为 M129A 风机;LG1 代表除尘器。

图 2 风机区声场分布

2.2.4 噪声贡献分析

经过计算机模拟分析,南侧通道各点位的主要声源贡献以及贡献量见表 3。由表 3 可知,M104A 风机对 b、c、d 3 个点位的噪声贡献均最大,贡献值分别是 75.6、79.6 和 78.5 dB(A),其中对 c 点位贡献率达到 43.5%。a 点位的第一大噪声贡献源为 M105 风机,噪声贡献值达 74.3 dB(A),贡献率为 26.9%;其次是 M104A 风机,噪声贡献值和贡献率分别为 72.3 dB(A)和 17.0%。M109A 风机和 M114A 风机对 a 点位的噪声贡献值相似,约 69 dB(A)。b 点位的第二大噪声贡献源为 M105 风机,噪声贡献值达 72.2 dB(A),贡献率为 13.1%;M104 过滤器、LG1 除尘器和 M109A 风机对 b 点位的噪声贡献值相似,约 70 dB(A)。对 c 点位影响第二大的噪声源为 LG1 除尘器,噪声贡献

值为 76.0 dB(A),贡献率为 19.0%;其次是 M104 过滤箱和 M109A 风机,噪声贡献率分别是 8.4%和 6.6%。对 d 点位影响第二大的噪声源是 LG1 除尘器,噪声贡献值和贡献率分别为 76.6 dB(A)和 24.5%;其次是 M104 过滤箱和 M109A 风机,噪声贡献值分别是 73.6 dB(A)和 69.6 dB(A)。风机 M104B 对所有点位的贡献均较低。

表 3 风机区南侧通道噪声贡献量分析

贡献声源	对不同点位噪声贡献值/dB(A)				对不同点位噪声贡献率/%			
	a	b	c	d	a	b	c	d
M104A	72.3	75.6	79.6	78.5	17.0	28.8	43.5	38.0
M104 过滤箱	67.6	70.2	72.4	73.6	5.7	8.3	8.4	12.1
LG1 除尘器	66.2	70.5	76.0	76.6	4.2	8.9	19.0	24.5
M109A	69.0	70.4	71.4	69.6	8.0	8.6	6.6	4.8
M105	74.3	72.2	68.5	65.6	26.9	13.1	3.4	1.9
M114A	68.6	69.4	68.4	67.4	7.3	6.8	3.4	2.9
M104B	61.3	64.6	67.8	65.1	1.4	2.3	2.9	1.7
合计	78.5	79.9	82.6	82.1	70.5	76.8	87.2	85.9

2.3 治理措施与效果

2.3.1 治理措施

检测数据显示,北侧通道噪声水平基本在 80 dB(A)以下,南侧通道处声压级水平约为 80.7 ~ 86.6 dB(A),因此需要将南侧通道的噪声降到 80 dB(A)以下。根据 2.2.4 节的分析,按照 GB/T 50087—2013 《工业企业噪声控制设计规范》^[16],对 M104A 风机、M104 过滤箱、LG1 除尘器、M109A 风机以及 M105 风机进行降噪治理。

(1) 风机噪声治理。风机加装隔声罩,隔声罩配观察窗和通风散热消声器。风机排风口加装消声器或者消声弯头。隔声罩使用针对中低频噪声的高面密度板加阻尼层的复合结构。隔声罩综合降噪量 ≥ 20 dB,隔声罩配套观察窗计权隔声量 $R_w \geq 25$ dB,配套散热消声器消声量 $L_{II} \geq 20$ dB。

(2) 过滤箱噪声治理。过滤箱进风口加装进风消声器,消声器采用针对中低频噪声的高面密度板加阻尼层的复合结构,消声器消声量 $L_{II} \geq 20$ dB。

(3) LG1 除尘器噪声治理。除尘器顶部脉冲阀组加装隔声罩,隔声罩使用针对中低频噪声的高面密度板加阻尼层的复合结构,综合降噪量 ≥ 20 dB;除尘器与管道连接处采用柔性连接。除尘器管道采用计权隔声量 $R_w \geq 15$ dB 的吸隔声结构包扎,降低管道噪声对外界的影响。

2.3.2 效果预测与验证

各声源区域经过治理后,CadnaA 软件预测厂界

和周围各敏感点的噪声情况见表4。厂区噪声声场分布情况见图3。由表4可知,经过降噪治理后,南侧通道各点位噪声降低了3.8~8.9 dB,通道的噪声水平低于78.6 dB(A)。相同点位计算值与实际监测值的误差在-0.2~1.4 dB范围内,误差均在可接受范围内(<3 dB)。由图3可知,风机区靠南的两台高噪声风机的90 dB声场圈(噪声≥90 dB(A)的范围)消失了。

表4 风机区南侧通道噪声治理前后噪声对比

位置	治理前噪声(实测)/dB(A)	治理后噪声(预测)/dB(A)	治理后噪声(实测)/dB(A)	实际降噪量/dB	模拟误差/dB
a	82.4	77.2	78.6	3.8	1.4
b	82.3	77.5	77.3	5.0	-0.2
c	86.6	77.6	77.7	8.9	0.1
d	80.7	75.5	76.2	4.5	0.7

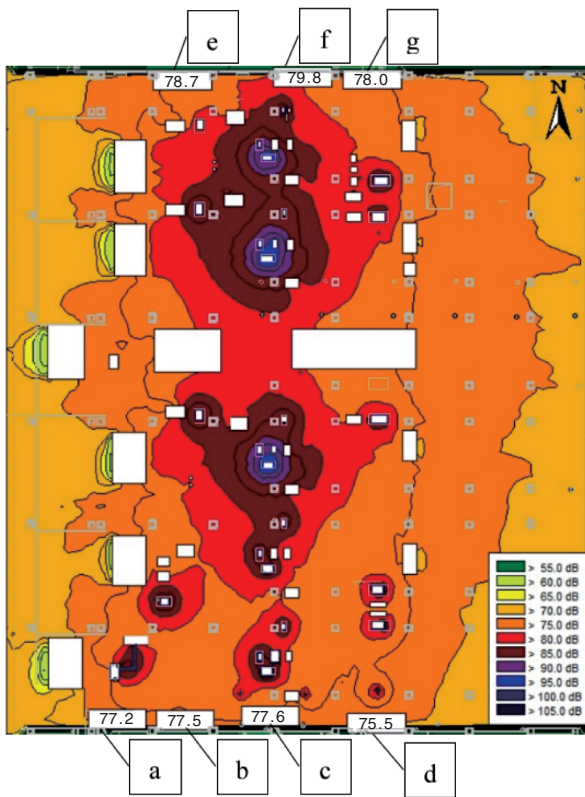


图3 风机区治理后声场分布

3 讨论

本研究以某工厂风机区作为研究对象,通过对该区各噪声源进行识别、监测和数值模拟并对比研究,分析了主要声源对风机区人行道声环境的影响和贡献度。结果表明,该区风机以及连接风机的电动机的声压级水平为87.8~99.7 dB(A),大型风机配套电机风口的噪声值均达到90 dB(A)以上。除尘器与过滤箱的声压级水平为93.8~99.2 dB(A)。风机区声场分布图显示噪声整体水平在80 dB(A)

以上,属于噪声作业场所。85 dB(A)及以上区域的面积占比较大。该风机区位于厂房一层中心部位,南侧通道是进入厂房的必经之路,因此该区域噪声强度对人员影响较大。GBZ 1—2010《工业企业设计卫生标准》^[17]要求,产生噪声的车间与非噪声作业车间、高噪声车间与低噪声车间应分开布置;噪声与振动较大的生产设备宜安装在单层厂房内。而作为本次研究对象的风机区布局显然不符合GBZ 1的相关要求,噪声影响人群范围较大。

风机区南侧人行通道各点位噪声为80.7~86.6 dB(A),CadnaA软件噪声模拟分析表明靠近风机区南侧的7台设备(M104A风机、M104过滤箱、LG1除尘器、M109A风机、M105风机、M114A风机和M104B风机)对该区通道各点位噪声贡献度超过70%。对噪声声级较高的声源M104A风机、M104过滤箱、LG1除尘器、M109A风机以及M105风机采取安装隔声罩、消声器以及隔声包扎等措施。中低频隔声通常遵循“质量定律”,即材料的面密度越大,隔声量越高^[18]。本研究中的隔声罩和消声器均使用针对中低频噪声的高面密度板加阻尼层的复合结构,从而增强隔声效果和减少振动。措施采取后南侧通道各点位噪声降低了3.8~8.9 dB,最终通道的噪声声级低于78.6 dB(A),成功实现低于80 dB(A)的降噪目标。降噪后,通过对比分析CadnaA软件模拟的预测值与现场实测值,发现两者差值较小,最大差值为1.4 dB,表明CadnaA软件对本次研究降噪效果的模拟精度较高,达到了预期效果。

同时,本次检测模拟发现,风机区从南至北有5台风机的噪声水平较高,形成较大尺寸的90 dB声场圈[噪声≥90 dB(A)]。若职业卫生管理存在漏洞,工人防护用品佩戴不规范,那么该岗位存在较大的噪声暴露风险。目前该岗位每班接触总时长为2 h,根据时间减半接触限值增加3 dB(A)的原则^[13],2 h的暴露噪声最大为91 dB(A),建议采取措施进一步治理风机区靠北侧另外3台高噪声风机声源M114A、M124和M129A,从而消除该区域90 dB声场圈,降低工人噪声暴露的风险。

综上,本研究首次利用CadnaA软件模拟车间内噪声的衰减传播,直观地展示声场分布,分析关心点位的噪声贡献度,这对于降噪工程的治理具有重要的实践价值,可为类似项目的实施提供有益的思路和技术支持。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] 肖华. 某烟厂 2013—2015 年接触噪声作业人员职业健康状况研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [2] 谢庆堂, 陈开, 罗健, 等. 职业性噪声作业工人双耳高频平均听阈与耳鸣的关系[J]. 中国医药指南, 2020, 18(21): 28-30.
- [3] NSERAT S, AL-MUSA A, KHADER Y S. Blood pressure of Jordanian workers chronically exposed to noise in industrial plants[J]. Int J Occup Environ Med, 2017, 8(4): 217-223.
- [4] 周安寿. 其他职业病及诊断鉴定管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 76-77.
- [5] 潘庆春, 米雪芹, 李蓓, 等. 职业噪声暴露人群额叶脑网络功能连通性研究[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2024, 22(3): 264-269.
- [6] MENON B. Towards a new model of understanding—the triple network, psychopathology and the structure of the mind[J]. Med Hypotheses, 2019, 133: 109385.
- [7] DZHAMBOV A M, LERCHER P. Road traffic noise exposure and depression/anxiety: an updated systematic review and meta-analysis [J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(21): 4134.
- [8] 林明庆, 刘春元, 王志浩, 等. 基于 Cadna/A 的校园声环境模拟计算及分析[J]. 应用技术学报, 2023, 23(2): 137-143.
- [9] 赵艳飞, 杜红燕, 周耀权, 等. Cadna/A 软件在某拟建核设施环境影响评价中的应用[J]. 科技视界, 2021(32): 1-4.
- [10] 陈晓琳. 基于 Cadna/A 软件的特高压变电站噪声影响研究[J]. 四川电力技术, 2017, 40(2): 31-33.
- [11] 李丽珍, 刘辉. Cadna/A 噪声预测软件在火电厂工程环评中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2015(4): 106-108.
- [12] 阮学云, 张馨月, 魏浩征, 等. 燃煤发电厂锅炉岛的噪声治理研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(6): 208-215.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 工作场所物理因素测量 第 8 部分: 噪声: GBZ/T 189.8—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] 国家技术监督局. 声学 户外声传播的衰减 第 2 部分: 一般计算方法: GB/T 17247.2—1998[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 环境影响评价技术导则声环境: HJ 2.4—2021[S]. 北京: 中国环境出版社, 2021.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 工业企业噪声控制设计规范: GB/T 50087—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [17] 中华人民共和国卫生部. 工业企业设计卫生标准: GBZ 1—2010[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- [18] 周新祥. 噪声控制技术及其新进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 100-102.

收稿日期: 2025-02-08

(上接第 315 页)

- [23] 中华人民共和国卫生部. 工作场所职业病危害作业分级 第 2 部分: 化学物: GBZ/T 229.2—2010[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- [24] WU Y, HUANG H, WU J, et al. Lead activates neutrophil degranulation to induce early myocardial injury in mice [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2023, 268: 115694.
- [25] ETTINGER A S, EGAN K B, HOMA D M, et al. Blood lead levels in U.S. women of childbearing age, 1976—2016 [J]. Environ Health Perspect, 2020, 128(1): 17012.
- [26] 王芳芳, 赵俊君. 2022 年濮阳市铅酸蓄电池作业工人职业健康检查结果分析[J]. 河南医学高等专科学校学报, 2023, 35(4): 437-440.
- [27] LONG X, WU H, ZHOU Y, et al. Preventive effect of Limosilactobacillus fermentum SCHY34 on lead acetate-induced neurological damage in SD rats [J/OL]. Front Nutr, 2022, 9: 852012.
- [28] 荣幸, 廖阳, 周海林, 等. 广州市重点职业病危害作业工人职业健康状况及职业病发病风险研判[J]. 职业卫生与应急救援, 2024, 42(5): 605-610.
- [29] EUM K D, NIE L H, SCHWARTZ J, et al. Prospective cohort study of lead exposure and electrocardiographic conduction disturbances in the department of veterans affairs normative aging study[J]. Environ Health Perspect, 2011, 119(7): 940-944.
- [30] FU Y, LIU Y, LIU Y, et al. Relationship between cumulative exposure to metal mixtures and heart rate among Chinese preschoolers[J]. Chemosphere, 2022, 300: 134548.
- [31] MITRA P, SHMRMA S, PUROHIT P, et al. Clinical and molecular aspects of lead toxicity: an update [J]. Crit Rev Clin Lab Sci, 2017, 54(7-8): 506-528.
- [32] FERREIRA D M G, COSTA C, SAVIO F, et al. Lead poisoning: acute exposure of the heart to lead ions promotes changes in cardiac function and Cav1.2 ion channels [J]. Biophys Rev, 2017, 9(5): 807-825.
- [33] QU W, DU G L, FENG B, et al. Effects of oxidative stress on blood pressure and electrocardiogram findings in workers with occupational exposure to lead[J]. J Int Med Res, 2019, 47(6): 2461-2470.
- [34] WANG X, YU Q, LIAO X, et al. Mitochondrial dysfunction in arrhythmia and cardiac hypertrophy[J]. Rev Cardiovasc Med, 2023, 24(12): 364.
- [35] 赵卫华. 农民工职业病的现状、困境与对策[J]. 国家行政学院学报, 2012(6): 89-93.
- [36] 吴昊. 2019 年长春市 135 家企业在岗职工职业健康检查结果分析[D]. 长春: 吉林大学, 2022.

收稿日期: 2025-03-21