

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-804-08

下沉式广场冷却塔噪声数值仿真模拟

姬得粮 李孔清

(湖南科技大学土木工程学院 湘潭 411100)

【摘要】 在冷却塔四周设置声屏障能有效地降低噪声对周边环境的影响。冷却塔采取下沉式安装方式时下沉式高度也会影响其噪声传播。为了研究声屏障高度、安装位置和下沉式广场下沉高度等三个因子对冷却塔噪声的影响,基于声线跟踪法对冷却塔噪声进行了数值仿真模拟。噪声模拟结果与现场实测数值相比,频谱特性变化趋势类似,最大相对误差为 8%。在本研究中,运用正交试验法将代表性受声点的声衰减量确定为试验目标,仿真模拟出 16 种不同情况下的冷却塔声场。发现声影区外受声屏障高度影响显著,声影区内受下沉式广场高度影响显著。此外,还通过线性回归分析总结出声影区内和声影区外噪声衰减量的公式。两个公式的 R^2 值分别达到了 76%和 97.4%。

【关键词】 冷却塔; 声线跟踪法; 正交试验法; 数值模拟

中图分类号 X593 文献标识码 A

Noise Simulation of Subsidence Cooling Tower

Ji Deliang Li Kongqing

(Civil Engineering College, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411100)

【Abstract】 Sound barriers installed in cooling towers can effectively reduce the impact of noise on the surrounding environment. Its sleeping mode will have an impact on the indoor environment when it is installed in a sunken manner. The influence of three factors such as sinking and sinking on the cooling noise, this paper simulates the cooling tower according to the sound ray tracking method. The simulated noise results are similar to the field measured trend, and the decoration changes are similar, and the maximum estimate is 8% of the tower. In the research, the simulation method was used to determine the sound wave attenuation at the sound receiving point as the test target, and 16 different cooling tower fields were simulated. It is found that the height of the sound barrier outside the shadow area is significantly affected by the height of the sound barrier, and the height of the subsidence analysis in the shadow area is significantly affected. In addition, today, the formula for the attenuation of noise in the acoustic shadow area and outside the shadow area is summarized through linear regression of acoustic waves. The R^2 values of the two reached 76% and 97.4%.

【Keywords】 cooling tower; sound ray tracing method; orthogonal test method; numerical simulation

0 引言

在中央空调系统中,冷却塔是一种常见的热交换设备,也是中央空调系统中的重要噪声来源。为了更好的通风效果,冷却塔均尽可能露天布置。因此冷却塔运行产生的噪声,会对周边居民的生活和工作产生不利影响。近些年城市建筑密度加大,

冷却塔与周边居民楼的距离越来越近,冷却塔的噪声影响呈逐年上升的趋势。

随着近年来对噪声的深入研究,声屏障被广泛应用于冷却塔噪声控制。马琪顺^[1]运用 Cadna/A 噪声评估软件,验证了仿真模拟噪声计算的准确性,并且发现采用声屏障和降噪网联合降噪的方案具

作者简介: 姬得粮 (1998.10-), 男, 硕士研究生, 研究方向为建筑噪声仿真模拟, E-mail: 1047933403@qq.com

通讯作者: 李孔清 (1974.09-), 男, 博士后, 副教授, E-mail: 705448042@qq.com

收稿日期: 2023-06-25

有良好的降噪效果。王亚平^[2]采用屋面冷却塔进风口设置消声器, 冷却塔主体安装隔声罩, 出入口安装隔声门的降噪方案, 将敏感点昼间噪声控制在 47dB(A)左右。舒永先^[3]分析了冷却塔噪声产生机理, 证明了落水噪声是火电厂冷却塔噪声主要来源, 并且发现水滴直径、通风风速等对落水噪声有较大影响, 由此提出了一种降噪网技术, 降噪效果可达到 8dB(A)。方应发^[4]采用多重参考系模型法模拟不同的布置方式对下沉式冷却塔工作环境的影响, 发现随着下沉深度增大、塔进风口间距减小, 以及塔进风口与下沉墙壁间距减小, 冷却塔回流率越高。Zhirui Zheng^[5]提出了一种在声屏障上安装通风百叶窗的方法, 从而降低声屏障对冷却塔气流的阻力, 并且通过模拟百叶窗的不同安装位置和角度, 达到最佳的改善效果, 使冷却塔的热性能达到最佳。Youhao Wang^[6]基于声线跟踪法研究了垂直声屏障和曲面声屏障的降噪效果。表明在相同条件下垂直声屏障的降噪表现优于弯曲声屏障。A Jolibois^[7]的研究表明声屏障的高度和布置位置均会影响噪音的传播, 并且研究了特定频率范围内声屏障对噪声衰减的影响。以上研究大多数是针对使用声屏障、消声器达到降噪效果, 然而对于特殊地形下结合声屏障的降噪方案研究比较少, 因此本文以湖南湘潭市市民之家下沉式安装的冷却塔为研究对象, 研究地形与声屏障对冷却塔噪声声场的影响。



图 1 冷却塔系统

Fig.1 Cooling tower system

湖南省湘潭市市民之家使用的冷却塔长 6.8m、宽 3.6m、高 3.9m, 冷却塔采用下沉式安装方式, 与市民办公区直线距离仅 20m, 运行时的噪声会对其产生严重影响。如图 1 所示, 由于地形特殊, 此冷却塔机组被安装在下沉式广场。不同于常见的安装在设备层或楼顶。这种下沉式的安装方式使得冷却塔的噪声传输路径更多, 声环境情况更加复杂。本文利用 LMS Virtual.Lab 声学仿真软件, 对冷却

塔周边声环境进行了数值仿真模拟, 并采用正交试验法, 对声屏障高度、声屏障安装位置及下沉式广场高度进行了系统研究, 定量分析了各因子的变化对冷却塔噪声传播的影响, 确定各个因子在冷却塔噪声控制中的优先顺序。

1 冷却塔噪声仿真模拟

1.1 噪声源测量

为了获得冷却塔噪声的频谱信息, 于 2021 年 9 月 8 日在市民之家进行了冷却塔噪声测量, 确定了冷却塔噪声声源及四个测点的声压级。目前国家尚未出台冷却塔噪声测量的相关标准, 因此测量方法主要参考 GB/T16404-1996《声学 声强法测定噪声源的声功率级第 1 部分: 离散点上的测量》^[8]。噪声测试仪所在位置除地面外 3.5m 内无任何反射物, 并且与噪声源距离保持 1m, 为了减小测量误差, 噪声源和四个测点均测量 10s 内等效连续声压级。测量结果为 31.5Hz 至 8000Hz 1/1 倍频带中心频率不计权声压级。主要的测量设备是科赛乐 CEL-63X 环境噪声测试仪, 该设备符合 IEC 61672-1: 2002 标准 1 级, 频率响应范围在 6Hz-20kHz 之间, 显示分辨率为 0.1dB, 测量精度为 $\pm 1.5\text{dB}$, 由防风罩、前置放大器、校准器、采样泵组件、内部传声器、显示屏等组成。在温度为 -10°C 到 50°C 范围内仪器的电学稳定性 $\leq \pm 0.2\text{dB}$, 在相对湿度为 25%到 90%范围内仪器的电学稳定性 $\leq \pm 0.5\text{dB}$ 。测量当天天气晴, 风速小于 5m/s。

根据现场的地形情况, 共选取了四个测点进行测量, 测量结果如表 1 所示。

表 1 冷却塔运行期间各测点噪声测量值

Table 1 Noise measurements at each measuring point during cooling tower operation

中心频率/Hz	噪声源/dB	R1/dB	R2/dB	R3/dB	R4/dB
31.5	97.4	69.7	67.3	66.2	64.6
63	99.4	70.4	69	66.8	66.1
125	99.5	69.8	65.7	65.3	64.8
250	96.1	71.6	69.1	67.9	64.9
500	91.9	66.5	64.9	63.6	60.1
1000	86.7	63.8	63.9	58.5	54.4
2000	90.4	68.4	67.6	62.8	57.7
4000	87.4	64.6	64	58.3	54.3
8000	83.8	57	55.9	49.9	50
A 声级/dBA	96.3	72.9	72	67.9	63.9

根据实测的噪声源频谱数据,发现冷却塔顶部排风口的最高声压级为 99.5dB,出现在 125Hz,且具有声压级大、频带宽的特点;主要噪声为中低频噪声;较之中低频,1000-8000Hz 的声压级明显降低。

测点的相对位置如图 2 所示。

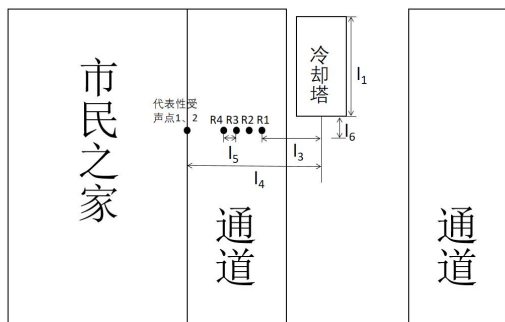


图 2 测点的相对位置图 (如实心圆点位置)

Fig.2 Relative position of measuring point (four solid dots)

1.2 仿真模型的建立

声学计算方法主要有声学有限元法、声学边界元法和声线跟踪法。但是声学有限元法和声学边界元法受限于网格尺寸,无法很好的模拟大型室外声学,因此本文运用声学软件LMS Virtual.Lab基于声线跟踪法对冷却塔周边声场进行数值仿真模拟。声线跟踪法主要通过设置不同的网格类型影响声场的反射、衍射和散射。

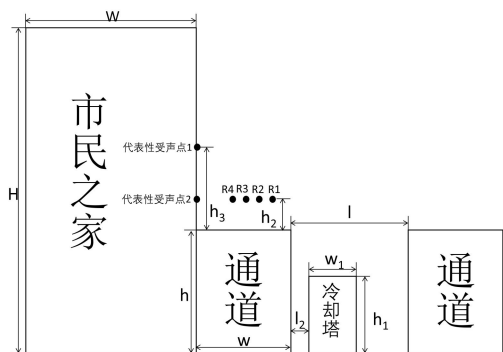


图 3 冷却塔系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of cooling tower system

冷却塔及周边环境如图 2 和图 3 所示,其中冷却塔长 $l_1=6.8\text{m}$,宽 $w_1=3.6\text{m}$,高 $h_1=3.9\text{m}$,下沉式广场的通道宽度 $l=7.8\text{m}$,高度 $h=6.5\text{m}$,冷却塔与墙的距离 $l_2=0.7\text{m}$ 。测点R1 与冷却塔的距离 $l_3=3.5\text{m}$, $l_6=2\text{m}$,四个测点的间距 $l_5=1\text{m}$,代表性受声点 2 与

四个测点高 $h_2=1.5\text{m}$,代表性受声点 1 高 $h_3=6\text{m}$,与冷却塔距离 $l_4=12.5\text{m}$,在冷却塔的东面是一个地下车库,西面是市民之家。市民之家是一座长 $L=60\text{m}$ 、宽 $W=20\text{m}$ 、高 $H=26\text{m}$ 的五层楼长方体建筑,与下沉式广场之间的距离 $w=10\text{m}$ 。

声线跟踪法以几何声学为理论基础,认为声源向四周发射大量声线,在空间中以声线的形式传播声能,当声线遇到障碍物时,会反射吸收,同时损失部分能量,声线的能量会随着空气和障碍物的吸收而逐渐降低,并在低于特定值的时候停止,最后对接收点的射线能量汇总,得到该点的声学信息。声线跟踪法的计算精度不受网格大小约束,是解决大型声学最有效的方法。在不影响声场模拟精度的情况下,对现场环境建模进行简化,简化后的噪声场涉及区域几何模型如图 4 所示。

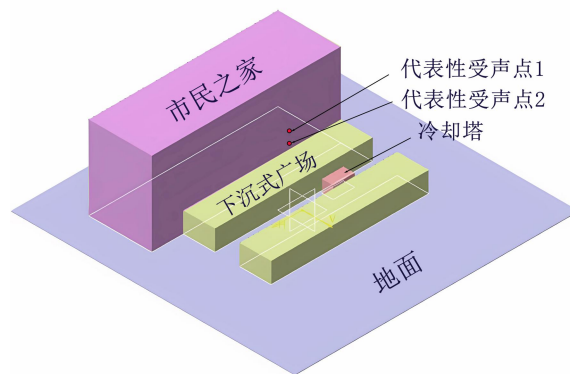


图 4 冷却塔及周边环境 3D 几何模型

Fig.4 3D geometric of cooling tower and surrounding environment

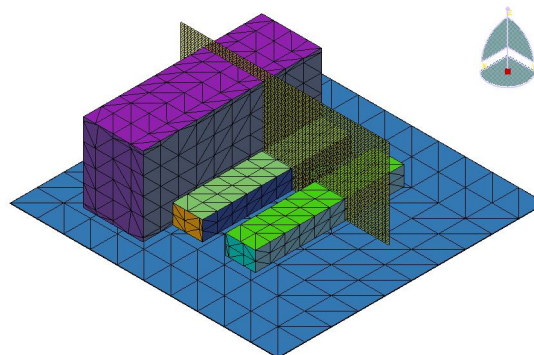


图 5 网格划分示意图

Fig.5 Schematic diagram of mesh division

图 5 是网格划分示意图。网格采取三角形面网格,由于不同建筑材料需要设置不同吸声系数,同时为了方便设置衍射单元组和声源位置,共建立了

八个三角形网格区域, 单元数分别为 40、40、204、120、384、80、224、480, 共有 923 个节点, 1572 个单元数。其中场点网格为 YZ 平面网格, 距离冷却塔顶部噪声源 5m, 长 70m, 高 30m, 划分为 150×150 的单元网格。根据 9 月 8 日的气象参数, 模拟温度设置为 29℃, 相对湿度设置为 63%, 声线数目设置为 10000, 反射系数取值 10。

通过模拟点声源、线声源和面声源三种不同类型的声源形式, 发现将冷却塔噪声源设置为点声源模拟误差最小, 且由于冷却塔声源尺寸相对于声波波长和传播距离较小, 综合考虑将冷却塔噪声源设置为一个点声源。

在声线跟踪法模块中, 主要是通过设置不同材料吸声系数来达到仿真边界条件的效果, 吸声系数是用以表征材料和结构吸声能力的基本参量^[9], 将入射声波在界面上失去的声能与入射声能之比称为吸声系数。吸声系数和声波入射角度有关, 在建筑声环境中, 普遍的情形是声波从各个方向同时入射到结构和材料表面, 因此采取无规入射吸声系数。本研究中主要包括混凝土砌块地面、混凝土墙和水磨石地面三种边界条件, 吸声系数设置如表 2 所示。

表 2 建筑材料的吸声系数

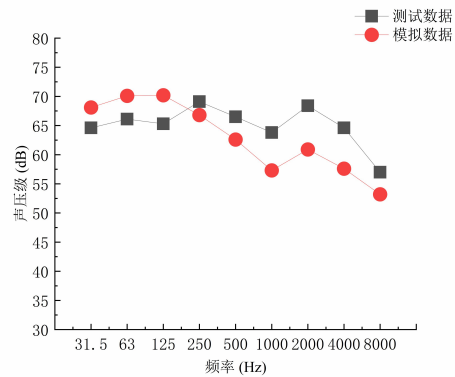
Table 2 Sound absorption coefficient of building materials

材料	中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
混凝土砌块地面	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
混凝土墙	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
水磨石地面	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03

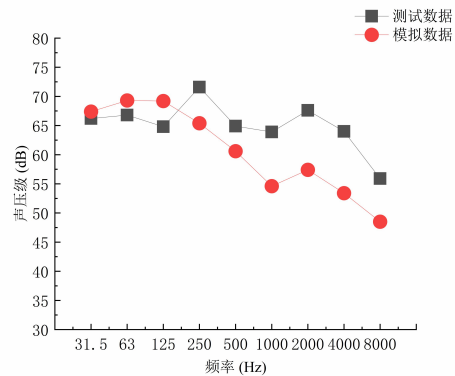
1.3 模拟验证

为验证仿真模拟的准确性, 将各测点的实测噪声值与仿真模拟得到的结果进行对比如图 6 所示。可以看出, 噪声模拟的计算值与实测值频谱数据变化趋势基本一致, 随着距离的增加, 噪声的计算值和实测值均呈下降趋势。中低频时, 实测值略小于模拟值, 高频时, 实测值略大于计算值, 最大误差为 5.45dB, 对应 R1 监测点 125Hz 时的数据。相对误差反映了模拟数据偏离测试数据的相对程度, 计算得出, 相对误差最大为 8%。均方根误差反映了模拟数据偏离测试数据的离散程度, 计算得出, 四

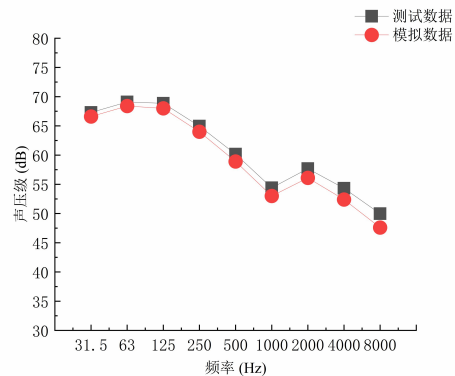
个测点的均方根误差分别为 3.39、5.11、2.21、4.08, 考虑到大型声场模拟的复杂的背景噪声、气象环境以及声学仿真软件本身存在的 3dB 误差 (在理想状态下声线数目和反射系数的设置分别会引起 1.24dB 和 1.7dB 的误差, 总体平均误差约为 3dB^[10]), 本文的数值模拟仿真是准确可靠的, 以软件模拟仿真的结果进行冷却塔声场传播规律分析是具备参考价值的。



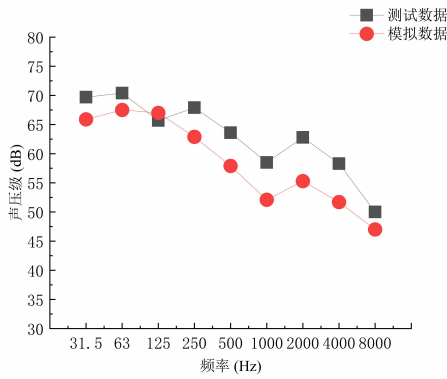
(a) R1 测点实测值与仿真模拟值对比图



(b) R2 测点实测值与仿真模拟值对比图



(c) R3 测点实测值与仿真模拟值对比图



(d) R4 测点实测值与仿真模拟值对比图

图 6 四个测点实测声压级与模拟声压级对比

Fig.6 Comparison of measured sound pressure level and simulated sound pressure level at four measuring points

1.4 噪声场分析

安装声屏障是常见的噪声控制方法。从图 7 可以看出当噪声源发出的声波遇到声屏障时，声波将沿着三条路径传播^[11]：一部分声波从声屏障顶端绕射到达受声点；一部分穿透声屏障到达受声点；还有一部分在声屏障壁面上发生反射。由于声屏障的阻挡，声线不能直接到达的区域，成为声影区，如图 8 所示。

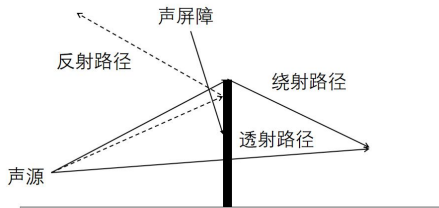


图 7 声波传播路径

Fig.7 Sound wave propagation path

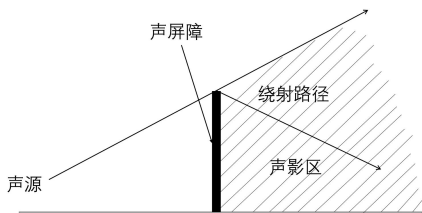


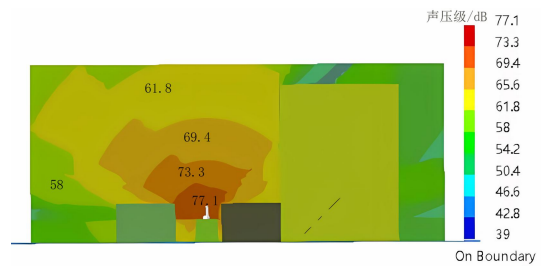
图 8 声波绕射路径

Fig.8 Sound wave diffraction path

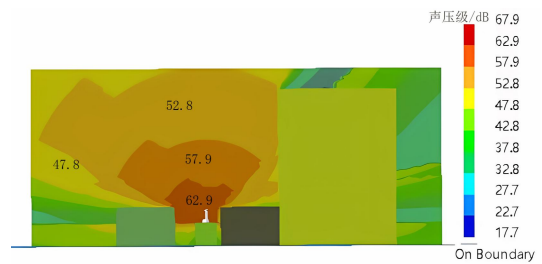
下沉式广场对冷却塔噪声的影响机理与声屏障类似。分别选取低频 125Hz、中频 2000Hz 和高频 8000Hz 声压级云图作为参考，研究下沉式广场

中冷却塔噪声对市民之家的影响。

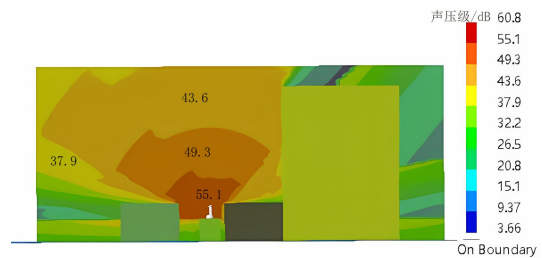
图 9 是未设置声屏障、下沉高度 6.5m 时模拟得到的声压级云图。由于冷却塔位置靠近市民之家一侧，使得整个冷却塔噪声声场呈现出市民之家这一侧声压级偏高，对侧声压级偏低的特点。受到下沉式广场的影响，冷却塔发出的声线经过下沉式广场壁面的反射形成了一个扇形声能集中区域；同时，下沉式广场阻挡了部分直达声的传播，从而使声波只能从下沉式广场顶部绕射过去，削弱了声影区内噪声的影响。



(a) 125 Hz 声压级云图



(b) 2000 Hz 声压级云图



(c) 8000 Hz 声压级云图

图 9 冷却塔噪声声场云图

Fig.9 Cooling tower noise sound field cloud map

为了进一步研究下沉式广场和声屏障对冷却塔噪声的影响，选取两个代表性受声点，仿真模拟并计算出不同情况下代表性受声点的 A 声级声衰减量；同时运用正交试验法，在不影响试验结果的准确性和可靠性前提下，减少试验量、简化试验结果的分析过程。

代表性受声点一般情况下选择噪声最严重的敏感点, 从图 9 可以看出, 市民之家二楼距离地面 6m 处声压级最大, 且位于声影区外, 因此确定此位置为代表性受声点 1。通常, 代表性受声点处能满足噪声控制要求, 则该区域亦能满足要求。同时为了使研究结果更具有代表性, 另选取位于声影区内, 距离地面 1.5m 人耳处为代表性受声点 2, 代表性受声点 1、2 具体位置如图 2、图 3、图 4 标注。

2 正交试验方案与结果分析

在实际工程中, 声屏障的高度一般是通过经验值来确定的, 其安装位置应尽可能靠近噪声源处, 所以一些研究者只把满足噪声治理需求作为模拟试验目标, 而忽略了声屏障的高度、安装位置以及各种地形对噪声传播的影响。为此采用正交试验法, 通过模拟各因子不同水平对噪声衰减量的影响, 确定各因子对冷却塔声场传播的影响作用。

2.1 正交试验法

作为工农业生产和科学研究中常用的试验设计方法之一, 正交试验法是用正交表来安排和分析多因子问题试验的一种高效的数理统计方法, 选取正交表时, 需遵循一个总原则: 能容纳所有考察因子, 又使试验号最小。正交试验法具有均匀分散、齐整可比的特点。在实际应用中, 对试验结果有影响的条件叫做因子, 对各个因子的不同状态叫做水平。

2.2 正交试验方案

受地形因素和声屏障设计规范所限, 下沉式广场高度和声屏障高度不能设计的太大, 初始设计下沉式广场高度 6.5m, 声屏障高度 2.5m, 声屏障安装位置距离下沉式广场 1m。为了提高研究结果的可靠性和准确性, 每个因子在原有基础上再各取 3 个水平, 声屏障高度分别取 3m, 3.5m, 4m; 下沉式广场高度分别取 7m, 7.5m, 8m; 声屏障安装位置与下沉式广场的距离分别取 2m, 3m, 4m。用因子 1、因子 2、因子 3 分别代表声屏障高度、下沉式广场高度、声屏障安装位置与下沉式广场的距离; 以 1、2、3、4 分别代表每个因子下的水平值。各因子与水平的选取结果如表 3 所示。根据正交表的选取原则, 选择了 L16 (4⁵), 并对多余的两列因子进行剔除。建立如表 4 所示的试验计划表。根据表 4 所列正交实验表中各影响因子的取值, 通过

LMS Virtual.Lab 软件模拟 16 种不同方案下冷却塔声场, 计算出代表性受声点 1、2 的噪声衰减量。

为了减小声源设置引起的模拟误差, 声源声压级采取不计权形式。由于《声屏障声学设计和测量规范》中的环境噪声限值采取的是 A 计权声级, 因此将模拟结果通过声压级求和转化为 A 计权声级。

表 3 模拟试验因子与水平

Table 3 Simulation test factors and levels

水平	因子		
	声屏障高度 /m	下沉式广场高度 /m	声屏障安装位置 /m
1	2.5	6.5	1
2	3	7	2
3	3.5	7.5	3
4	4	8	4

表 4 模拟试验计划表

Table 4 Simulation test schedule

试验号	因子 1	因子 2	因子 3	代表性受声点 1A 声级衰减量/dB	代表性受声点 2A 声级衰减量/dB
1	1	1	1	36	37.4
2	1	2	2	36.3	38.5
3	1	3	3	36.3	39.4
4	1	4	4	35.4	40.6
5	2	1	2	38.8	37.4
6	2	2	1	35.9	38.7
7	2	3	4	37	39.4
8	2	4	3	35.4	40.1
9	3	1	3	35.8	37.4
10	3	2	4	36.7	38.1
11	3	3	1	41.7	39.5
12	3	4	2	39.3	40.7
13	4	1	4	36.3	37.5
14	4	2	3	39.9	38.7
15	4	3	2	41.9	39.5
16	4	4	1	43.8	40.2

2.3 极差分析

表 5 给出了代表性受声点 1 的极差分析结果, 极差 R 用于判断因子 1、因子 2、因子 3 的重要性

次序,按照由大到小排出次序为:因子 1、因子 3、因子 2,说明声屏障高度对代表性受声点 1 的影响是主要的,其次是声屏障与下沉断面之间的距离,相比之下,下沉式广场的高度在三个参数中对代表性受声点 1 的影响是最小的。

图 10 给出了因子各水平均值图,可以看出,代表性受声点 1 的声衰减量随着声屏障高度的增大而增大,随下沉式广场高度的增大而先增大后趋于平和,随声屏障与下沉式广场距离增大而减小。由于三个因子的趋势线并无相交或相交趋势,因此判断并不存在交互作用。

表 5 代表性受声点 1 极差分析

Table 5 Representative sound point 1 range analysis

项	水平	因子 1	因子 2	因子 3
K 值	1	144.00	146.90	157.40
	2	147.10	148.80	156.30
	3	153.50	156.90	147.40
	4	161.90	153.90	145.40
K avg 值	1	36.00	36.72	39.35
	2	36.77	37.20	39.07
	3	38.38	39.23	36.85
	4	40.47	38.47	36.35
最佳水平		4	3	1
R		4.47	2.50	3.00
水平数量		4	4	4
每水平重复数 r		4.0	4.0	4.0

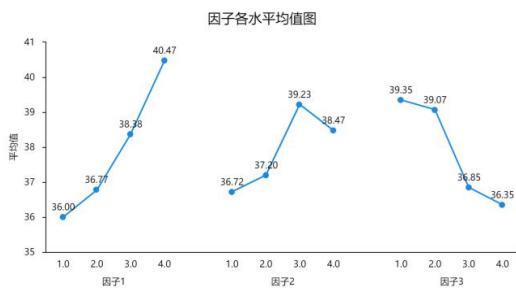


图 10 代表性受声点 1 各因子极差均值

Fig.10 The mean value of each factor range of representative sound receiving point1

表 6 给出了代表性受声点 2 的极差分析结果,说明下沉式广场的高度对代表性受声点 2 的影响是显著的,而声屏障的高度、声屏障与下沉式广场

之间的距离对代表性受声点 2 的声衰减量影响可以忽略不计。

图 11 给出了因子各水平均值图,可以看出,代表性受声点 2 的声衰减量随着下沉式广场高度的增大而增大,而几乎不受到声屏障的高度、声屏障与下沉式广场之间的距离的影响,且三个因子之间不存在交互作用。

表 6 代表性受声点 2 极差分析

Table 6 Representative sound point 1 range analysis

项	水平	因子 1	因子 2	因子 3
K 值	1	155.90	149.70	155.80
	2	155.60	154.00	156.10
	3	155.70	157.80	155.60
	4	155.90	161.60	155.60
K avg 值	1	38.98	37.42	38.95
	2	38.90	38.50	39.03
	3	38.92	39.45	38.90
	4	38.98	40.40	38.90
最佳水平		4	4	2
R		0.08	2.98	0.13
水平数量		4	4	4
每水平重复数 r		4.0	4.0	4.0

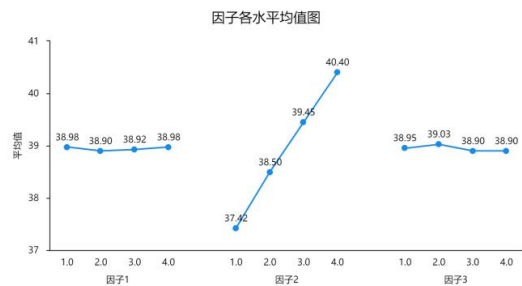


图 11 代表性受声点 2 各因子极差均值

Fig.11 The average mean value of each factor range of representative sound receiving point2

2.4 试验结果的回归分析

经以上分析可知,三个因子均对代表性受声点 1 存在规律性影响,而只有下沉式广场高度对代表性受声点 2 存在规律性影响,为了得到各因子与试验结果的函数关系,因此对各因子进行多元线性回归分析。

表 7 给出了代表性受声点 1 的线性回归分析结

果。置信区间 (confidence interval, CI) 是关于总体参数的区间估计, 方差膨胀系数 (variance inflation factor, VIF) 是多元线性回归模型中判断共线性问题的参数。模型通过 F 检验, 意味着研究模型具有意义。VIF 值为 1, 说明不存在共线性问题, 模型较好。模型 R^2 值为 0.76, 意味着声屏障高度、下沉式广场高度、声屏障安装位置与下沉式广场的距离作为自变量可以解释试验结果 76% 的变化原因。模型公式为:

$$y_1 = 35.135 + 1.502x_1 + 0.728x_2 - 1.123x_3 \quad (1)$$

式中, y_1 表示代表性受声点 1 的 A 声级衰减量, x_1 表示声屏障高度, 取值范围 $2.5\text{m} \leq x_1 \leq 4\text{m}$; x_2 表示下沉式广场高度, 取值范围 $6.5\text{m} \leq x_2 \leq 8\text{m}$; x_3 表示声屏障安装位置与下沉式广场的距离, 取值范围 $1\text{m} \leq x_3 \leq 4\text{m}$ 。

表 7 代表性受声点 1 线性回归分析结果

Table 7 Linear regression analysis results of representative sound point 1

	回归系数	95% CI	VIF
常数	35.137**	32.278~37.997	-
因子 1	1.502**	0.863~2.142	1.000
因子 2	0.728*	0.088~1.367	1.000
因子 3	-1.123**	-1.762~-0.483	1.000
样本量		16	
R^2		0.760	
F 值	$F(3,12)=12.679, p=0.000$		

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

表 8 给出了代表性受声点 1 的线性回归分析结果, 只有下沉式广场高度对代表性受声点 2 存在显著性影响。模型通过 F 检验, 意味着研究模型具有意义。VIF 值为 1, 说明不存在共线性问题, 模型较好。模型 R^2 值为 0.974, 意味着下沉式广场高度作为自变量可以解释试验结果 97.4% 的变化原因。模型公式为:

$$y_2 = 36.538 + 0.987x_2 \quad (2)$$

式中, y_2 表示代表性受声点 2 的 A 声级衰减量, x_2 表示下沉式广场高度, 取值范围 $6.5\text{m} \leq x_2 \leq 8\text{m}$ 。

表 8 代表性受声点 2 线性回归分析结果

Table 8 Linear regression analysis results of representative sound point 2

	回归系数	95% CI	VIF
常数	36.538**	36.129~36.946	-
因子 1	0.002	-0.089~0.094	1.000
因子 2	0.987**	0.896~1.079	1.000
因子 3	-0.027	-0.119~0.064	1.000
样本量		16	
R^2		0.974	
F 值	$F(3,12)=149.853, p=0.000$		

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

3 结论

为了研究声屏障高度、声屏障安装位置和下沉式广场高度对冷却塔机组的噪声影响, 本文基于声线跟踪法准确可靠的仿真模拟下沉式广场中的冷却塔噪声场, 并提出运用正交试验法分析不同情况下的冷却塔噪声衰减量。研究结果表明:

(1) 当冷却塔采取下沉式安装方式时, 影响声影区外受声点的噪声衰减量的主要因子为声屏障高度和安装距离, 随着声屏障高度的增大以及安装距离的减小, 噪声衰减量增大;

(2) 影响声影区内受声点的主要因子为下沉式广场的高度, 随着下沉式广场高度的增大, 噪声衰减量逐渐增大;

(3) 当下沉式广场通道宽度为 7.8 m, 噪声源与广场墙面距离 0.7 m 时, 根据线性回归分析建立的模型公式可以预测类似地形的噪声衰减量, 为冷却塔噪声控制工程提供有益参考。

参考文献:

[1] 马琪顺, 鄢晓忠, 林日成, 等. 火电厂自然通风冷却塔噪声治理研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(1): 200-205.
 [2] 王亚平, 江朝梅, 李星宇. 工业厂房屋面冷却塔噪声控制研究[J]. 建筑技术, 2021, 52(2): 236-239.
 [3] 舒永先, 鄢晓忠, 徐慧芳, 等. 火电厂冷却塔噪声原因分析及降噪改造[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(4): 199-203, 245.

参考文献:

- [1] 刘国臻.北京市雨水口内沉积物物理力学性质相关研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020:13-35.
- [2] 朱一铭,王嘉君,徐源鸿,等.CH₄和CO₂的水合物沉积物力学特性对比研究[J].非常规油气,2021,(5):1-8.
- [3] 杨辉,朱代强,刘祥刚,等.细粒沉积学研究动态及探讨[J].非常规油气,2021,(1):1-7.
- [4] 常海东,金鹏康,付博文,等.昆明市不同功能区排水管道沉积物性质[J].环境科学,2016,37(10):3821-3827.
- [5] 李海霞,顾韞辉,王红武,等.基于初雨污染控制的雨水管道淤积指数研究[J].给水排水,2022,58(S1):450-455.
- [6] 谈帅,刘翠云,杨钰婷,等.变流量及初期效应下水管道内悬浮颗粒物的沉积规律[J].安全与环境工程,2019,26(6):94-100.
- [7] 王春伟,孙志峰,杜焕福.牛庄洼陷沙三下一沙四上泥页岩特征及沉积环境[J].非常规油气,2022,9(2):42-48,84.
- [8] 李晓路,杜永慧,陈义国,等.延安南部延长组长9段顶部页岩古沉积环境恢复及意义[J].非常规油气,2022,9(5):36-42.
- [9] 景新胜.基于ICM模型的合流制管道沉积物变化规律及调蓄池污染控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022:12-43.
- [10] 王健,刘国华,齐鲁,等.城市排水管道沉积物与污水间物质转移转化研究进展[J].中国给水排水,2021,37(24):34-44.
- [11] 张青文.基于SWMM的排水管道沉积物冲刷模型及初期雨水截流量计算方法研究[D].长沙:湖南大学,2020:14-26.
- [12] 何静,王满学,周普,等.油田采出水Zeta电位和中值粒径对絮凝效果条件研究[J].非常规油气,2021,(1):116-120.
- [13] 付晨阳,谢振强,李玮,等.冲击角度对硬质颗粒冲击柔性靶板的影响[J].非常规油气,2022,9(6):108-113,120.
- [14] 陈仕哲.淤积排水管道过流阻滞特性研究[D].郑州:郑州大学,2022:23-57.
- [15] 黄乃先,齐一凡,金伟.排水管道沉积物控制的研究进展[J].环境工程技术学报,2021,11(3):507-513.
- [16] 周敬钦,刘翠云,周俊,等.排水管道内不同粒径沉积颗粒物冲刷率的分析与计算[J].环境化学,2021,40(3):896-903.
- [17] 吴俊.排水管道中雨污水颗粒物沉降速率特征分析[J].环境工程,2023,41(4):1-9.
- [18] 周英,徐瑾,侯齐敏.天津市排水系统沉积物的沉积状况及影响因素[J].中国给水排水,2018,34(17):116-118.
- [19] 姚振杰,赵洋,李剑,等.J区块注水开发储层物性变化规律研究[J].非常规油气,2021,(6):46-51,67.
- [20] 张怡蕾,操家顺,薛朝霞,等.城市排水管道内污染物迁移转化规律研究进展[J].环境科学研究,2020,33(1):111-121.

(上接第811页)

- [4] 方应发,曾臻,张越,等.地铁车站下沉式冷却塔工作环境研究及优化[J].城市轨道交通研究,2019,22(8):118-123.
- [5] Zheng Z, Zhang D, Jiang L, et al. Numerical simulation on influence of noise barrier on thermal performance for natural draft wet cooling towers[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021,28:101403.
- [6] Wang Y, Zhang D, Jiang L, et al. Research on noise reduction characteristic of sound barrier on natural draft wet cooling towers[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 133:73-79.
- [7] Jolibois A, Defrance J, Koreneff H, et al. In situ measurement of the acoustic performance of a full scale tramway low height noise barrier prototype[J]. Applied Acoustics, 2015,94(7):57-68.
- [8] GB/T 16404-1996,声学 声强法测定噪声源的声功率级 第1部分:离散点上的测量[S].北京:中国标准出版社,1996.
- [9] 刘加平.建筑物理[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:365.
- [10] 曾向阳,Claus Lynge Christensen.声线法误差及其影响参数分析[J].电声技术,2006,(9):10-12.
- [11] HJ/T 1990-2004,声屏障声学设计和测量规范[S].北京:中国环境出版社,2004.