

换流站电力电容器塔噪声指向性的修正方法

黄润鸿, 李明, 刘阳, 郭小易, 魏承志, 张福增

(南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 电力电容器是高压直流换流站中的主要噪声源之一, 其相干声场在远场表现为明显的指向性, 在进行电容器塔噪声计算时必须对其进行指向性修正。研究了电容器塔仿真计算中声源的指向性参数获取、指向性定义、以及指向性三维重构的方法, 并采用该方法和 Cadna/A 软件对某换流站中的交流滤波电容器塔进行了仿真对比计算, 结果表明, 该方法可以很好地解决电容器塔噪声计算中的指向性修正问题。

关键词: 换流站; 电容器塔; 噪声; 指向性; Cadna/A 软件

Correction Method of Noise Directivity for Power Capacitor Towers in Converter Stations

HUANG Runhong, LI Ming, LIU Yang, GUO Xiaoyi, WEI Chengzhi, ZHANG Fuzeng

(Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Power capacitor is one of the main noise sources in high-voltage direct current converter stations. The coherent sound field of power capacitors exhibit significant directivity in the far field, and directional correction must be applied when calculating the noise from capacitor towers. This study investigates the methods for obtaining directional parameters of sound sources, defining directivity, and reconstructing three-dimensional directivity in the simulation of capacitor towers. The proposed method, along with the Cadna/A software, is used to conduct comparative simulation calculations on an AC filter capacitor tower in a converter station. The results demonstrate that this method effectively addresses the issue of directional correction in capacitor tower noise calculations.

Key words: converter station; capacitor tower; noise; directivity; Cadna/A software

0 引言

为有效控制变电站/换流站噪声, 减小其对外界居民的影响, 对各主要噪声源辐射特性进行准确评价, 是各项工程建设过程中噪声污染防治的必要前提与手段^[1-5]。在直流换流站中, 电力电容器塔多为 6~8 层甚至十几层结构, 每层由十几个电容器单元排列而成, 且数量众多, 是换流站中主要噪声来源之一, 如图 1 所示。在实际测量过程中发

现, 各个换流站中电容器组辐射噪声存在明显的极大、极小的变化规律, 表现为典型的相干声场。这给噪声计算评估和控制噪声水平带来极大难度。

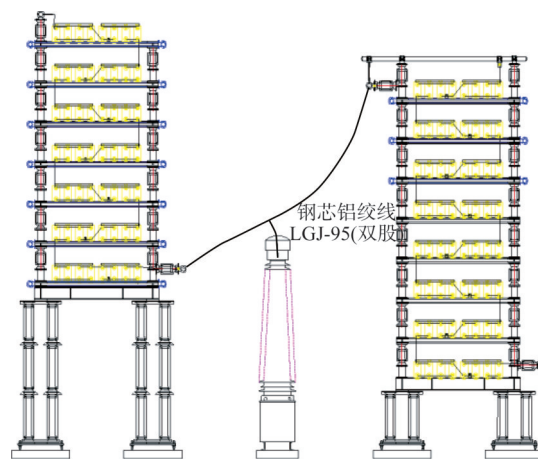


图 1 滤波电容器塔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of filter capacitor towers

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20221); 中国南方电网有限责任公司重点科技项目(CSGTRC-K163004); 南方电网科学研究院研发专项项目(SEPRI-K22B059)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation (U22A20221); the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (CSGTRC-K163004); the Research & Development Special Project of Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd. (SEPRI-K22B059).

对电容器塔相干噪声计算的研究多是基于有限元法,文献[6-7]使用边界元法研究了电容器塔架近场声场分布情况,表明电容器塔的不同结构形式对其噪声辐射分布产生很大的影响。此类方法计算过程复杂且计算量巨大,很难应用于计算换流站噪声这种复杂的实际工程中。当前在计算换流站噪声时主要采用声线法这类工程算法^[8-9],如ISO 9613-2 工程标准算法^[10],主流的环境噪声预测软件如SoundPLAN 和 Cadna/A 都是采用该算法。此类工程算法在计算噪声传播时都是按非相干声源处理,如果在设置声源参数时没有考虑相干声场的影响,就会导致计算结果存在很大的误差。由于电容器塔的相干声场在远场表现为明显的指向性分布^[11-12],因此在采用ISO 9613-2 这类工程算法进行电容器塔噪声计算时,可以采用设置声源整体指向性参数的方法来模拟电容器塔相干声场分布情况。

文献[13-15]研究了电容器单元的实验室电流加载技术,可以通过实验方法模拟实际工程中的实际电流负载,解决了实验室测量电容器单元的声辐射参数问题。文献[15]给出了一种基于电容器单元噪声参数计算整个电容器塔噪声指向性和声功率级修正的方法,可以很好地模拟其相干声场的影响,该方法使得应用工程类算法处理相干声成为可能。

本文研究了电容器塔仿真计算中声源的指向性参数获取、指向性定义以及指向性三维重构方法,并采用该方法对某换流站中的交流滤波电容器进行了仿真计算,并与 Cadna/A 软件的计算结果进行对比,结果表明该方法对提高电容器塔噪声计算精度具有实际的工程参考价值。

1 电容器塔噪声指向性参数获取

在进行电容器塔噪声辐射仿真计算时必须先获取电容器塔的声学特性参数,主要包括电容器塔噪声辐射的频谱、声功率的量值和指向性数据^[16-17]。通常这些参数可通过计算方法和测量方法获取。本文只讨论通过计算方法获取电力电容器塔的噪声指向性参数。

在建立声学模型时考虑电容器的噪声主要为中低频,其波长通常在 0.5 m 以上,电容器单元的最小尺寸一般都小于声波波长,且由于高频声具有衰减快的特点,为了简化计算,换流站中的电容器塔可看成是由多个点声源按照阵列的形式组成,由于

电容器塔中的电容器单元具有相同的参数和结构,因此,这些点声源具有相同的频率和相位。图2为典型电容器塔单层的简化声源模型,为 $n_1 \times n_2$ 排布,每列距离 $l_2=L_2$ (L_2 为电容器塔水平方向的尺寸),共 n_3 层。

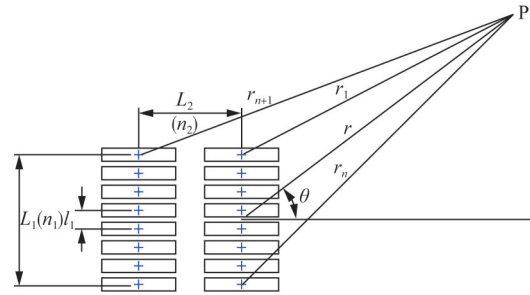


图2 电容器塔单层简化声源模型

Fig. 2 Simplified source model of one layer of filter capacitor stack

对于距离声源 $r \gg L_2$ 的远场,电容器塔的噪声表现为强指向性,式(1)为水平方向上的指向性 $D_T(\theta)$ 计算公式。

$$D_T(\theta) = \left| \frac{\sin(n_1 k \Delta_1)}{\sin(k \Delta_1)} \frac{\sin(n_2 k \Delta_2)}{\sin(k \Delta_2)} \frac{\sin(k l_2 / 2)}{n_1 \sin(n_2 k l_2 / 2)} \right| D_s(\theta) \quad (1)$$

式中: k 为声波的波数; $\Delta_1 = \frac{l_1}{2} \sin \theta$, $\Delta_2 = \frac{l_2}{2} \cos \theta$, 其中 l_1 、 l_2 分别为行间距、列间距和层间距; φ 为声源辐射向量与水平面间的夹角; $D_s(\theta)$ 为电容器单元自身指向性。

包含A、B、C三相的电容器组在水平面上的指向性可由式(2)计算。

$$D_G(\theta) = \left| \frac{\sin(n_4 k \Delta'_1)}{\sin(k \Delta'_1)} \frac{\sin(3 k \Delta'_2)}{\sin(k \Delta'_2 + 2\pi/3)} \frac{\sin(k l'_2 / 2 + 2\pi/3)}{n_4 \sin(3 k l'_2 / 2)} \right| D_T(\theta) \quad (2)$$

式中: n_4 表示单双塔结构形式($n_4=2$ 时为双塔, $n_4=1$ 时为单塔); $\Delta'_1 = \frac{l'_1}{2} \sin \theta$, $\Delta'_2 = \frac{l'_2}{2} \cos \theta$, 其中 l'_1 为同相塔间距, l'_2 为不同相塔间距。

图3为按上述方法计算获得的单个电容器塔的水平方向上指向性图。

2 声学模型指向性定义及重构方法

已知声源的声功率级为 L_w ,则预测点位置的声

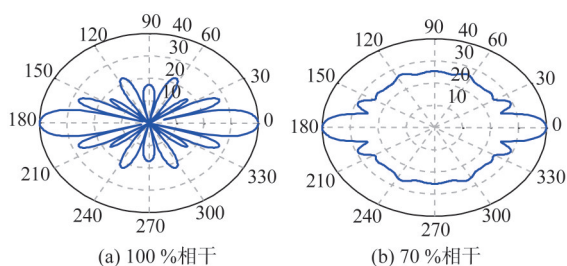


图3 电容器塔水平方向指向性

Fig. 3 Directionality of capacitor towers in the horizontal direction

压级 L_p 计算可按式(3)计算。

$$L_p = L_w + D_c - A \quad (3)$$

式中: A 为声源到预测点的衰减项; D_c 为指向性修正,描述点声源在规定方向上的声压级与声功率级 L_w 的全向点声源声级的偏差程度。噪声计算软件进行指向性修正的流程如图4所示。

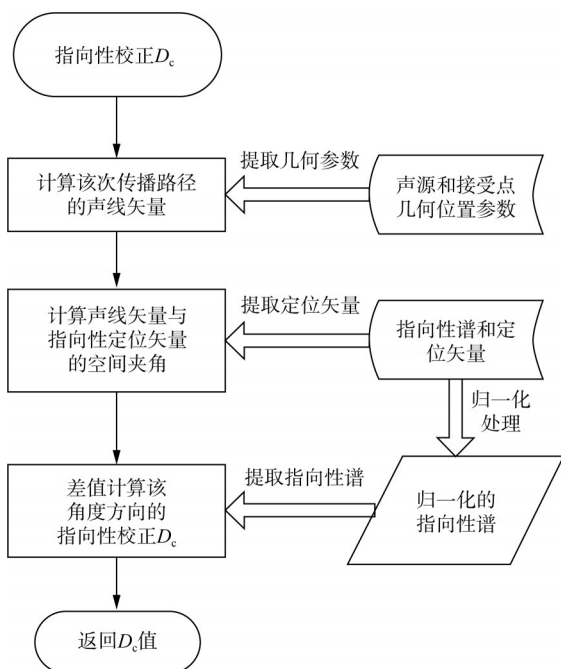


图4 指向性修正流程图

Fig. 4 Flow chart of directional correction

2.1 指向性谱的定义方式

现实环境中,声源的指向性谱按其各个方向上辐射强弱不同可看成一个围绕声源的三维包络面,如图5所示。指向性定义方式一般可分为二维和三维的两种。以声源为圆心的球面表示声源在三维空间的各个方位,三维定义形式可以理解为:每个经度和纬度都对应一个方向,都需定义指向性数值,

理论上这种三维定义形式可以定义所有类型的指向性声源,这些数据的数目通常会达到成百上千,且许多情况下竖直方向上的指向性数据通常无法测量,因此,很难获取和定义声源的三维指向性谱;二维定义形式则只需定义一个平面上的指向性数值,其所需的数据量只有三维定义形式的十几分之一,定义更加简单,如图6所示,可以在水平面上围绕声源360°方向上等角度划分成36个扇形区域,这样只需通过设置对应36个数值来定义指向性谱。

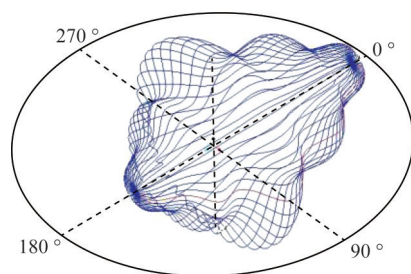


图5 三维指向性谱

Fig. 5 Three-dimensional directivities spectrum

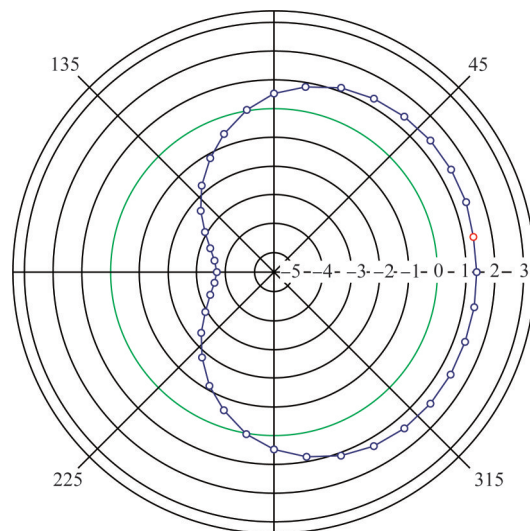


图6 指向性谱二维定义

Fig. 6 Two-dimensional definition of directivities spectrum

SoundPLAN采用的二维指向性定义形式,允许存在关于0~180°线两侧非对称的形式,定义相对较灵活,在进行噪声计算时依据水平面上声源辐射声线与0°之间投影夹角以及定义的有限个指向性谱值,对指向性修正进行插值。当定义的指向性为非对称谱时,在过0~180°线的竖直面位置会出现数值突变现象,这和现实中指向性分布情况并不

相符, 所以 360° 定义方式并不实用。实际上多数声源的辐射指向性都是对称的, 如电容器塔的指向性就是这种情况, 只需定义水平方向上 $0 \sim 180^\circ$ 半圆方向上的指向性谱, 这里称之为二维对称定义形式。在计算噪声时, 围绕指向性谱 0° 方向线旋转一周即可重构出三维指向性, 如图 5 所示。

2.2 指向性谱的归一化重构

在建立声源声学模型时, 实际输入的指向性数据一般都是只反映各个方向之间声压级大小分布关系^[16], 并不是可以直接用于指向性修正的指向性指数 D_i , 在建立声学模型时, 由于声源的指向性和声功率是分别定义的, 指向性修正不应改变声源总声功率的大小, 因此, 在计算噪声时, 首先会对指向性数据进行能量平均为 0 的归一化处理。

对指向性数据的归一化处理方式必须和指向性的三维重构方式相统一, 如图 7 所示, 以常用的 15° 间隔划分一个半圆为例, 采用二维对称定义形式, 定义 13 个数据 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_{13}$ 为 $0 \sim 180^\circ$ 范围内的指向性谱值, 则可采用插值法计算出水平面上任意角度方向指向性数值, 通过对相邻角度对应的指向性数据进行中间插值迭代计算, 直到相邻角度的指向性数值相差不超过误差限 (如 0.2 dB), 这样可把声源辐射球面细分为 n 个环带面元。可见每个指向性谱值 D_i 所对应的环带面积是不同的, 因此不能简单地通过计算指向性谱值 D_i 的平均值来进行归一化处理。

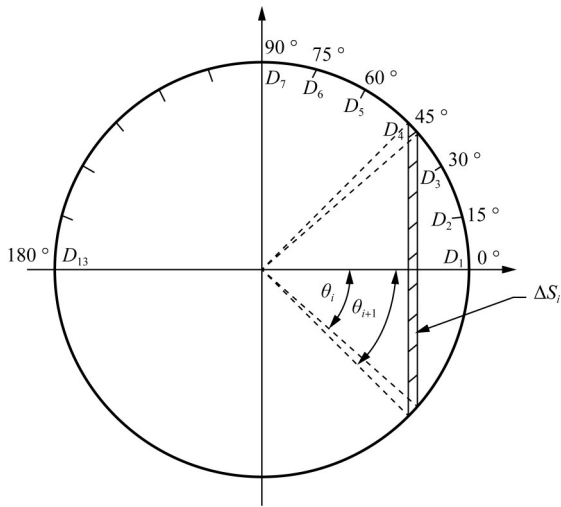


图 7 三维指向性谱的重构

Fig. 7 Reconstruction of three-dimensional directivities spectrum

根据声压法测量声功率的原理, 声功率可由声源包络面上均方声压与包络面表面积来计算, 如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} 10^{0.1 \times L_p} \times S_{\text{球}} = \sum_{i=1}^n [10^{0.1 \times (L_p + d_i - \Delta)} \times \Delta S_i] \\ 10^{0.1 \times L_p} \times 4\pi r^2 = \sum_{i=1}^n [10^{0.1 \times (L_p + d_i - \Delta)} \times 2\pi r^2 (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1})] \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_p 为声源包络面上平均声压级; $S_{\text{球}}$ 为包络面表面积; d_i 为插值计算后得到的某环带面域的指向性数值; θ_i 为环带面域的方向角; ΔS_i 为第 i 个环带面域面积; r 为包络球面的半径。

由式 (4) 化简可得修正值 Δ 为:

$$\Delta = 10 \times \lg \left(0.5 \times \sum_{i=1}^n [10^{0.1 \times d_i} \times (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1})] \right) \quad (5)$$

则归一化后的指向性谱值 D'_i 为:

$$D'_i = D_i - \Delta \quad (6)$$

在所建模型空间中, 实际声源的朝向是多变的, 所定义指向性谱 0° 方向和坐标系 x 坐标的指向可能存在一定的夹角。可采用一个三维矢量 (x_0, y_0, z_0) 来定义声源指向性 0° 的朝向。

$$\theta_i = \arccos \left(\frac{x_i x_0 + y_i y_0 + z_i z_0}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \right) \quad (7)$$

在进行噪声计算时, 由式 (7) 可得某个噪声辐射方向 (x_i, y_i, z_i) 与声源指向性朝向的空间夹角 θ_i , 再对 D'_i 进行插值计算, 得到式 (3) 中的指向性修正 D_c 。图 8 中箭头即为该声源指向性 0° 朝向。

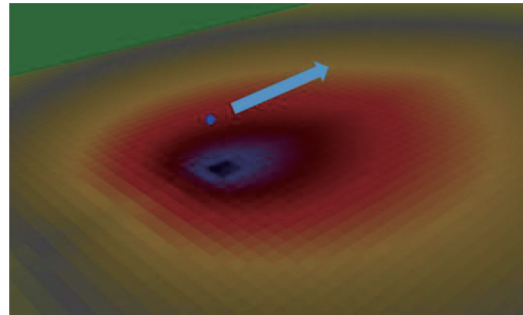


图 8 指向性声源朝向

Fig. 8 Direction of the directional sound source

3 电力电容器塔架装置仿真计算

目前对电力电容器塔装置的声学建模方式主要有两种^[17-18], 如图 9 所示, 图 9(a) 把电容器塔模拟

成点声源阵列,各个单台电容器都看作独立的声源,图9(b)则是把电容器塔看作为一个整体,模拟成一个竖直线声源(或竖直面声源),前者直接采用实验室测得的单台电容器的声学参数,后者则是采用预先计算或测得的整个电容器塔的声功率级和指向性数据即可。

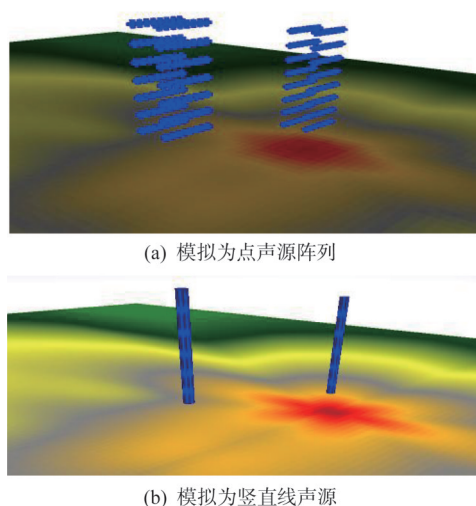


图9 电容器塔两种不同的声学模型形式

Fig. 9 Two different acoustic model forms of capacitor towers

选择指向性谱同样采用二维对称定义方式的Cadna/A和本文算法软件进行对比计算,但由于Cadna/A对竖直线声源的计算存在欠划分缺陷^[19],因此,只采用Cadna/A软件对第一种建模方式进行仿真计算,而对第二种建模方式采用本文算法软件进行仿真计算。

本文算法软件采用ISO 9613-2国际标准算法,建模时可以为声源选定数据库中的指向性谱并指定声源朝向。软件在计算时首先按一定规则对竖直线声源进行等效声源划分,然后把划分后的线段等效为各线段中点位置的点声源来处理,具体计算的方法参见文献[10]。图10—12是3种建模方式计算得到的电容器噪声云图,为计算比较它们的误差,在两个模型中的不同位置处加入了9个对应测点,测点高度统一设为1.5 m,测点1—5在电容器塔装置北侧,呈纵向分布,测点1距离声源为6 m,各测点间距离10 m。测点6—9在电容器塔装置西侧,呈横向分布,测点6距离声源为6 m,各测点间距离10 m。模型中定义声源指向性谱如表1所示。

两种建模方式下各测点的仿真计算比较结果如

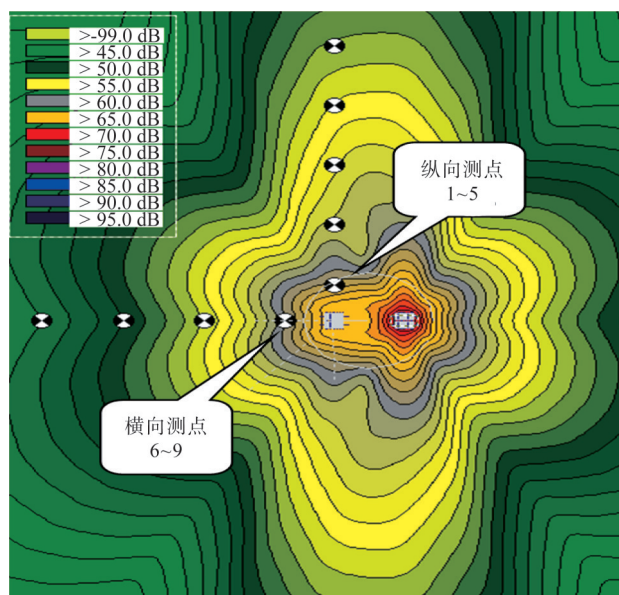


图10 点声源阵列模型计算结果(Cadna/A)

Fig. 10 Calculation results of point source array model (Cadna/A)

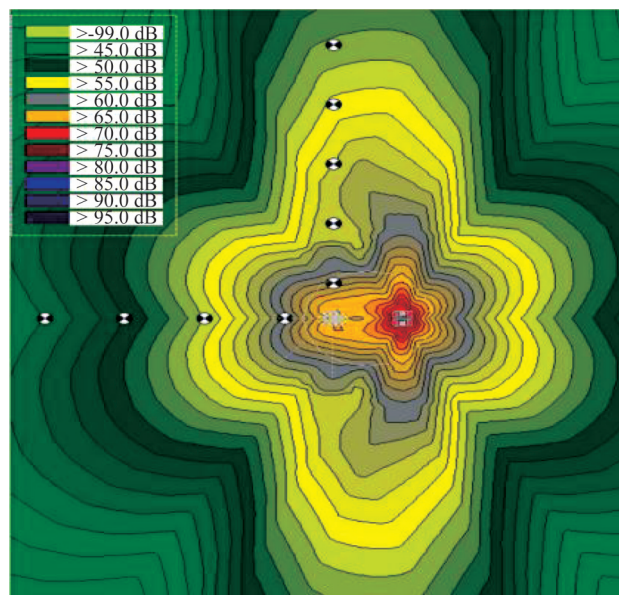


图11 竖直线声源模型计算结果(Cadna/A)

Fig. 11 Calculation results of vertical line sound source model (Cadna/A)

表2所示。

比较图10和图12可以看出两种模型的噪声分布计算结果基本吻合,图11的计算结果则偏差较大,且水平面上下方向的噪声分布云图变化不够平滑,主要是Cadna/A对竖直线声源的计算存在欠划分缺陷。由表2可以看出除了预测点6的A声压级误差为0.4 dB,其余各点误差都在0.2 dB以内,

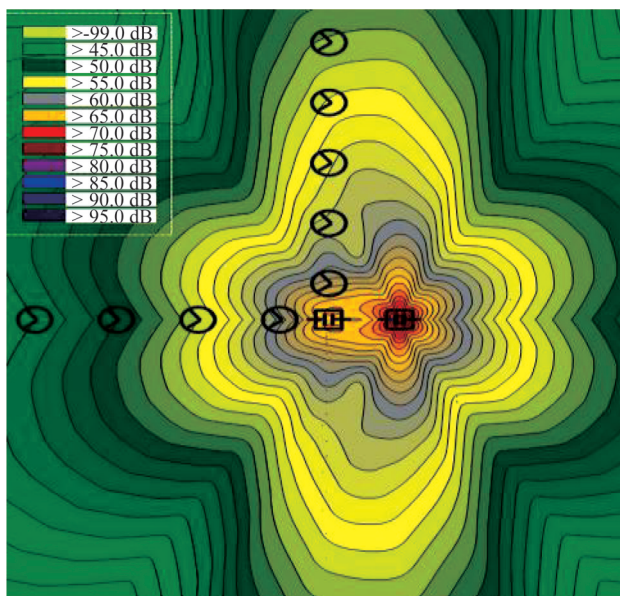


图 12 竖直线声源模型计算结果(本文算法)

Fig. 12 Calculation results of vertical line sound source model (algorithm in this article)

表 1 电容器塔的指向性谱

Tab. 1 Spectrum of directivities of capacitor stacks

方向/(°)	指向性/dBA
0	8
15	6
30	-2
45	0.5
60	1
75	0.5
90	-1
105	0.5
120	1
135	0.5
150	-2
165	6
180	8

其主要原因是,竖直线声源模型等效为点声源时,水平方向只有 1 个点源,而点声源模型水平方向上则有 16 个点源,造成距离声源较近时两种模型计算结果存在较大差距。由模拟计算可知,点声源阵列模型建模繁琐、容易出错,且计算工作量很大,以该模型为例,双塔共需建立 240 个点声源,而采用竖直线声源模型,则只需建立 2 个竖直线声源,在计算时,软件自动将竖直线声源等效为间隔 1 m 的竖直点声源阵列,共 15 个等效点声源,计算工

表 2 两种模型的计算结果比较

Tab. 2 Comparison of the calculation results of the two models

预测点	dBA			
	线源(本文算法)	线源(Cadna/A)	点声源	两种模型的偏差
1	62.5	62.3	62.5	0
2	58.2	57.6	58.3	-0.1
3	56.7	57	56.8	-0.1
4	55.1	55.3	55.1	0
5	53.1	53.2	53.2	-0.1
6	60.4	60.6	60.8	-0.4
7	53.9	54	54.1	-0.2
8	49.8	50.1	50	-0.2
9	47	47.1	47.1	-0.1

作量相差 16 倍,大大减少了仿真建模和计算的工作量,且也能够得到合理的计算结果,使计算更为快捷。且对三维指向性谱的重构效果与 Cadna/A 的计算结果一致。

4 结论

本文探究了电容器塔仿真计算中声源指向性参数的获取、指向性的定义以及指向性三维重构的方法,并运用该方法与 Cadna/A 软件对某换流站中的交流滤波电容器塔开展了仿真对比计算,得出结论如下。

1)由于电力电容器参数相同、数量巨大,其辐射的噪声是典型的相干声波,它们在塔架装置上的安装特点使得电容器塔装置整体噪声的指向性更为强烈,在进行噪声计算时必须要进行指向性处理,指向性数据可以通过计算或测试方式获取。

2)电容器塔指向性谱可以采用二维对称定义方式定义,再经过归一化重构三维空间指向性校正数据,基于重构后的三维指向性数据谱的噪声计算结果和 Cadna/A 的计算结果基本一致。

3)在对电容器塔装置进行噪声计算时,可以将其简化为点声源阵列模型或竖直线声源模型处理,仿真计算表明二者的计算差别很小,但后者可以有效地提高建模效率和降低计算的工作量。

参考文献

- [1] CIGRE. HVDC stations audible noise [R]. Paris: CIGRE Working Group 14.26, 2002.
- [2] 汲胜昌,祝令瑜,崔瀚焘,等.高压直流输电滤波电容器可听噪声研究综述与展望[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(4):1-10.

- JI Shengchang, ZHU Lingyu, CUI Handao, et al. Review and prospect on audible noise of HVDC filter capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(4): 1-10.
- [3] 师愉航, 李金宇, 汲胜昌, 等. 交流滤波电容器振动噪声特性及声场控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 65-70.
- SHI Yuhang, LI Jinyu, JI Shengchang, et al. Study on vibration and noise characteristics of AC filter capacitor and acoustic field control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 65-70.
- [4] 李慧奇, 陈腾飞, 杨光. 防火墙吸声特性对变电站噪声影响研究[J]. 高压电器, 2025, 61(8): 139-145.
- LI Huiqi, CHEN Tengfei, YANG Guang. Research on influence of sound absorption characteristics of firewall on noise of substation [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(8): 139-145.
- [5] 潘超, 安景革, 刘闯, 等. 考虑地铁杂散电流干扰的电网变压器振动噪声耦合效应[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9): 70-81.
- PAN Chao, AN Jingge, LIU Chuang, et al. Power grid transformer vibration-noise coupling effect considering subway stray current interference [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 70-81.
- [6] 吴鹏, 汲胜昌, 曹涛, 等. 高压直流换流站交流滤波电容器降噪措施[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 162-169.
- WU Peng, JI Shengchang, CAO Tao, et al. Audible noise reduction measures for filter capacitors in HVDC converter station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 162-169.
- [7] 肖鲲, 高岩, 雷晓燕, 等. ± 800 kV 布拖换流站声环境影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 47-54, 66.
- XIAO Kun, GAO Yan, LEI Xiaoyan, et al. Analysis on acoustic environmental impact of ± 800 kV Butuo converter station[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 47-54, 66.
- [8] 鲁伟, 高湛, 张华, 等. 特高压换流站噪声控制设计研究[J]. 电力勘测设计, 2021(2): 27-33.
- LU Wei, GAO Zhan, ZHANG Hua, et al. Study on noise calculation of HVDC converter station [J]. Electric Power Survey & Design, 2021(2): 27-33.
- [9] ISO. Acoustics-attenuation of sound during propagation outdoors-part 2: general method of calculation: ISO 9613-2-1996[S]. Geneva:ISO, 1996.
- [10] SMEDE J, JOHANSSON C G, WINROTH O, et al. Design of HVDC converter stations with respect to audible noise requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 747-758.
- [11] 朱洪波, 吴旭涛, 张庆平, 等. 换流站交流滤波场噪声分布特性分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(4): 24-29.
- ZHU Hongbo, WU Xutao, ZHANG Qingping, et al. Analysis on noise distribution characteristics of AC filter in converter station [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(4): 24-29.
- [12] 陆益民, 黄国兴, 李志远, 等. 电力电容器噪声测试中电流注入方式的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(6): 33-38.
- LU Yimin, HUANG Guoxing, LI Zhiyuan, et al. Study on the current loaded method of noise testing on the power capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(6): 33-38.
- [13] 黄成, 旷冬伟, 冯春林, 等. 电力电容器单元噪声测量方法的若干问题试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 33(5): 75-80.
- HUANG Cheng, KUANG Dongwei, FENG Chunlin, et al. Research on several issues in noise measurement of power capacitor [J]. Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 33(5): 75-80.
- [14] 黄莹, 黄国兴, 李志远, 等. 电力电容器单元噪声测量的不确定度分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 62-66.
- HUANG Ying, HUANG Guoxing, LI Zhiyuan, et al. Uncertainty analysis of noise measurement of power capacitor unit [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(5): 62-66.
- [15] 全国声学标准化技术委员会. 声学换流站声传播衰减计算工程法: GB/Z 38251—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [16] HUANG G X, WEI H Z, LI Z Y, et al. Noise prediction for power capacitor stacks based on whole-condition multiharmonic-frequency loaded circuit environment [J]. Ekoloji, 2019, 28(107): 4803.
- [17] 郑中原, 魏浩征, 黄国兴, 等. 换流站电力电容器塔的相干辐射声指向性算法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 5-10, 15.
- ZHENG Zhongyuan, WEI Haozheng, HUANG Guoxing, et al. Study on coherent radiation directivity algorithm for power capacitor tower at HVDC converter station [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 5-10, 15.
- [18] 国家能源局. 换流站噪声控制设计规程: DL/T 5526—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] 魏浩征, 李志远, 黎小林, 等. 换流站电容器塔的噪声预测声学模型和算法[J]. 应用科学学报, 2010, 28(2): 152-157.
- WEI Haozheng, LI Zhiyuan, LI Xiaolin, et al. Acoustic model algorithm of noise prediction for capacitor tower of dc converter station [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(2): 152-157.

收稿日期: 2024-05-17; 网络首发日期: 2025-03-21

作者简介:

黄润鸿(1988), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 研究方向为柔性直流与电力电子技术、配电自动化和电力系统噪声测量与控制, huangrh@csg.cn;

李明(1977), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为高压直流输电、交直流控制保护与自动化系统、电力系统噪声测量与控制, liming@csg.cn;

刘阳(1988), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为继电保护、变电自动化和电力系统噪声测量与控制, liuyang4@csg.cn。