

团 体 标 准
变电站设备声成像测试技术规范

T/CSEE 0228—2021

*

中国电力出版社出版、印刷、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

*

2021年9月第一版 2021年9月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 16开本 1.5印张 47千字

*

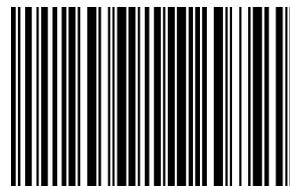
统一书号 155198·3097 定价 **38.00**元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



中国电机工程学会官方微信



155198.3097

团 体 标 准

T/CSEE 0228—2021

变电站设备声成像测试技术规范

Technical specification for acoustic imaging inspection of substation equipment



2021-03-11 发布

2021-05-01 实施

中国电机工程学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 检测原理	2
5 使用条件	2
6 检测仪器	2
7 测试方法	4
8 检测数据分析方法	6
9 测试报告	6
附录 A（资料性） 声成像算法原理	7
附录 B（资料性） 技术参数选择对声成像仪特性的影响	10
附录 C（资料性） 测试距离输入误差对成像结果准确度的影响	14
附录 D（资料性） 变电站设备声成像测试案例	15
附录 E（资料性） 声成像测试报告典型格式	19

前 言

本文件按照《中国电机工程学会团体标准管理办法（暂行）》的要求，依据 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会测试技术及仪表委员会技术归口并解释。

本文件起草单位：国网上海市电力公司电力科学研究院、国网上海市电力公司培训中心、中国电力科学研究院有限公司、国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、广东电网有限责任公司广州供电局电力试验研究院、广西电网有限责任公司电力科学研究院、国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院、国网河北省电力有限公司电力科学研究院、国网河南省电力公司电力科学研究院、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院、国网北京市电力公司电力科学研究院、上海交通大学、国网天津市电力公司电力科学研究院、上海睿深科技有限公司、国网湖南省电力有限公司电力科学研究院、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院。

本文件主要起草人：高凯、田昊洋、邵宇鹰、王泉、彭鹏、邵明鑫、杨景刚、黎大健、李光茂、金鑫、张嵩阳、丁国成、李伟、刘宏亮、王丰华、刘力卿、胡胜、曹浩、杜非、赵琳、余长厅、王磊磊、赵科、郑一鸣、张鑫、袁国刚、司文荣、周峰、张正东、王东辉、吉旺威、任茂鑫、颜海俊、张晨晨、林艺、王广周、刘晨蕾。

本文件为首次发布。

本文件执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条1号，100761，网址：<http://www.csee.org.cn>，邮箱：cseebz@csee.org.cn）。

变电站设备声成像测试技术规范

1 范围

本文件规定了变电站设备（以下简称“设备”）声成像测试的检测原理、使用条件、检测仪器、测试方法、检测数据分析方法、测试报告。

本文件适用于采用声成像技术对设备的噪声、异常声响或其他声音（如电晕放电声音、气体泄漏声音等）进行的检测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1094.10—2003 电力变压器 第10部分：声级测定

GB/T 20441.4—2006 测量传声器 第4部分：工作标准传声器规范

JJF 1496—2014 声源识别定位系统（波束形成法）校准规范

3 术语和定义

GB/T 1094.10—2003、GB/T 20441.4—2006界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

传声器阵列 microphone array

多个传声器按照一定的空间几何位置排列组成的阵列，用来采集空间中的声信号。

3.2

测试面 measurement surface

传感器阵列（3.1）布置所组成的平面，用于声信号接收。

3.3

阵列孔径 array aperture

传声器阵列（3.1）中任意两个传声器几何中心之间直线距离的最大值。

3.4

基准发射面 principal radiating surface

与测试面平行且位于被测设备处的假想表面。通常认为声信号是从该表面发出的。

[来源：GB/T 1094.10—2003，3.8，有修改]

3.5

阵列声成像视场角 array scanning angle

在单次声成像检测中，测试系统所限定的视场成像计算角度范围。

3.6

测试距离 measurement distance

测试面与基准发射面（3.4）之间的距离，通常用 L 表示。

3.7

成像角分辨率 imaging angle resolution

在基准发射面（3.4）上可分辨的两个声源的几何中心与阵列中心形成的最小夹角。

3.8

声场分布云图 sound field distribution nephogram

在基准发射面（3.4）上通过特定的算法重构出的声信号声压级分布结果。

3.9

成像显示动态范围 dynamic range of imaging display

为直观显示声源位置，在声场分布云图（3.8）上设定的声压级最大值与显示下限之间的差值。

3.10

截止频率 cut-off frequency

成像系统可准确定位的声源的频率上下限范围，通常受到传声器的频响范围、传声器阵列（3.1）中传声器数量、阵列孔径（3.3）等因素的影响。

3.11

定位误差 localization error

在基准发射面（3.4）上，实际声源中心点与声场分布云图（3.8）中指示的声源中心点位置的距离偏差。

[来源：JJF 1496—2014，3.3，有修改]

3.12

声成像图 acoustic imaging map

以设备光学成像图为背景，通过几何配准叠加声场分布云图（3.8）形成的声成像系统输出结果。

3.13

声色谱图 acoustic chromatogram

以时间为横轴，以频率为纵轴，以不同颜色表示声音强度的声信号特征展示图。

4 检测原理

设备检测原理见附录 A。

5 使用条件

设备使用条件：

- a) 温度宜为-10℃~50℃，相对湿度不宜大于85%。
- b) 测试宜在晴好天气，风速在5 m/s以下时进行。若需在特殊气象条件下测试，应采取必要措施保证测试的准确性，同时记录当时所采取的措施及气象情况。
- c) 尽量避开声传播路径中的封闭遮挡物（如墙体和挡板），并注意环境中干扰声源对成像结果的影响。

6 检测仪器

6.1 仪器构成

声成像仪包含传声器阵列、可见光摄像头、数据采集系统、数据处理分析系统。

6.2 仪器基本功能

6.2.1 声成像

仪器应能对声信号和可见光信号分别成像，并自动将同一位置、同一时间拍摄的声场分布云图与可见光图像进行融合配准，实现对声源的定位和成像。

6.2.2 频谱分析

仪器应具备实时显示频谱结果、频谱图输出、倍频程分析、计权分析等功能。

6.2.3 声压级测试

仪器应能测试并获得声压级大小。

6.2.4 成像显示

仪器应具备实时显示成像结果的功能，结果应在日光下清晰可见。

6.2.5 成像显示动态范围调节

仪器应具有成像显示动态范围调节的功能，以满足设备在不同测试环境下对结果精度和观测效果进行控制的需要。

6.2.6 成像频段调节

系统应能实时调整成像频率范围或预设多个成像频段，实现针对不同特征频率成像的需要。

6.2.7 记录和回放

仪器应能记录并输出声成像图结果，宜具备视频、音频的记录及输出功能，并可随时调取查看已记录的测试结果。

6.2.8 其他功能

仪器宜有软件升级和功能扩展能力。

6.3 仪器基本参数

6.3.1 传声器

传声器应满足 GB/T 20441.4—2006 中第 6 章的要求，并宜满足以下要求：

- a) 频率范围：20 Hz~20 kHz；
- b) 动态范围：36 dB~110 dB。

6.3.2 传声器阵列

传声器阵列应满足以下要求：

- a) 传声器阵列有一体式和组装式，组装式应组装简单、携带方便；
- b) 支架宜采用非金属材料制作；
- c) 阵列声成像视场角、阵列孔径、传声器间隔（传声器数量）的参数选择见附录 B。

6.3.3 摄像头

摄像头应满足以下要求：

- a) 像素不应低于 320×240；
- b) 视场角的选择见附录 B，不宜小于阵列声成像视场角。

6.3.4 数据采集系统

数据采集系统宜满足以下要求：

- a) 系统具有 20 通道及以上同步采集能力;
- b) 系统各通道具有 16 位及以上 A/D (模/数转换) 精度;
- c) 系统各通道采样率不低于 40 kHz。

6.3.5 数据处理分析系统

数据处理分析系统应满足以下要求:

- a) 系统声学图像刷新率不宜低于 30 帧/s, 光学影像刷新率不宜低于 10 帧/s;
- b) 系统应至少具备 CBF 算法;
- c) 成像系统定位误差应按 JJF 1496—2014 中 7.2.3 的规定进行校准并符合产品规范要求。

6.3.6 工作电源

工作电源应满足以下要求:

- a) 工作电源为 50 Hz、220 V 交流电源;
- b) 电池供电状态下持续正常工作时间不应少于 2 h。

6.3.7 数据存储

数据存储应满足以下要求:

- a) 视频、音频、图像等检测结果应采用 mp4、avi、jpg、png 等通用格式存储;
- b) 仪器存储空间不应少于 4 GB;
- c) 仪器数据传输应采用 USB 等通用接口;
- d) 测量结果的数据文件宜采用 uff、dat、tdms 等通用格式保存。

6.3.8 其他要求

测试时传声器宜加装防风罩; 声成像仪的防护等级不宜低于 IP51。

7 测试方法

7.1 测试方位

传声器阵列测试面应正对被测设备, 使设备上的疑似声源位置处于仪器成像区域的中心附近, 使被测设备或异常部位在声成像仪图像中尽量显示完整, 并尽量避开传播路径中的遮挡物。测试方位如图 1 所示。

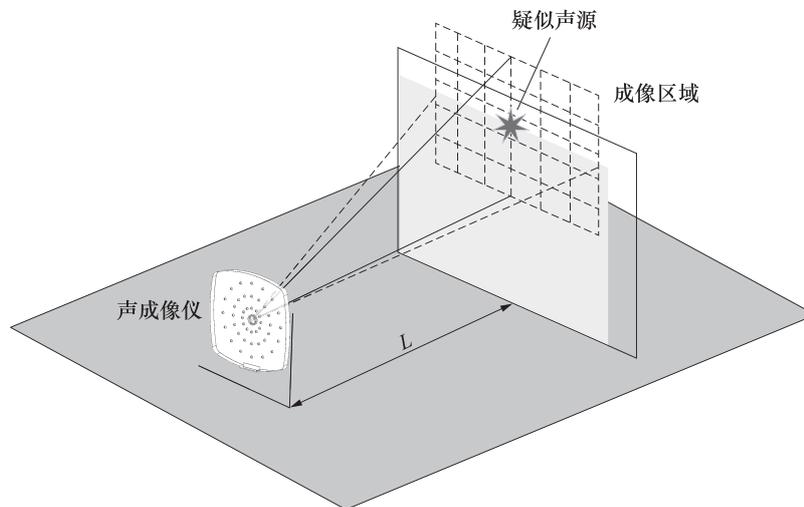


图 1 测试方位示意图

7.2 成像频率选取

当声源具有特定的频率特征时，如振动、松动、电晕、泄漏等，可根据声源频率范围调节声成像仪测试频率范围，对不同特征频率下的声源进行识别成像。

7.3 成像显示动态范围的选择

当现场存在背景干扰时，可通过减小声成像显示动态范围，过滤背景噪声干扰，增加主声源的识别分辨率；当现场有多个声源时，可通过增加动态范围发现其他声源。声成像动态范围的选择宜在 1 dB~6 dB 之间，具体选择范围应考虑现场声源特征及仪器测试精度、准确度的影响。

7.4 成像算法选择

成像算法选择见附录 A，现场测试考虑成像实时性要求，宜采用 CBF 算法。

7.5 测试时机

在设备出现噪声增大、异常声响，或出现其他测试需要时进行检测。

7.6 测试步骤

7.6.1 开机检查

开启仪器并待系统稳定，检测视频采集是否正常，检查声信号采集是否正常。

7.6.2 成像定位功能自检

测试开始前需要对系统成像定位功能进行自检，宜采用正对测试面，且相距 2 m 处的参考声源发声并对其进行实时定位，定位误差应小于 50 mm。

7.6.3 测点选择

按照 7.1 的要求选定测试方位及测点，成像区域应尽可能避开干扰声源。

宜围绕疑似声源位置，从不同方向选取测点，调整测试面的方向和角度，确定至少 1 个检测结果较好的位置并记录。可从水平方向互差 120° 的三个位置选定测点进行测试。

7.6.4 距离确定

在测点选定之后，测量并在仪器中输入测试距离。测试距离不宜超过 50 m，并且不宜小于 0.7 倍的阵列孔径。测试距离输入误差对成像结果的影响见附录 C。

7.6.5 测试时段

测试时段应充分体现设备待测声音信号的时间特征。

如被测声源是稳态噪声，测试时长应至少为 10 s。

如被测声源是非稳态噪声，宜采用触发采集，有效数据时长不应少于 10 s。

7.6.6 数据记录

待测试目标工况稳定后进行测试，发现异常时应及时记录测试时段、测点位置、声成像结果等。详细记录内容见附录 D。

7.6.7 重复测试

重复测试要求如下：

- a) 可有针对性地近距离对异常部位和重点被测设备重复测试；
- b) 在声源特征随时间变化的情况下，宜在同一测点重复测试；
- c) 验证异常声源已消除，宜在相同工况下的同一测点重复测试。

8 检测数据分析方法

8.1 图像特征法

对比同类设备正常状态和异常状态的声成像图、频谱图等，分析设备状态。注意应尽量排除各种干扰因素对图像特征的影响，必要时结合电气试验或化学分析的结果进行分析。

8.2 综合分析法

分析同一设备不同时期（或时段）的声成像图、频谱图等，结合负荷、温度、湿度、风速、干扰声源等影响因素的变化，综合分析设备状态。

8.3 实时分析法

在一段时间内连续检测/监测被测设备，观察、记录设备声信号强度、声源位置、场强分布、频率特性等的变化，并进行实时分析。可用于耐压试验中的击穿定位、气体泄漏点定位等非常态试验或运行、带缺陷运行设备的跟踪和分析。

9 测试报告

测试报告应明确被测对象、测试条件、测试仪器、测试方位、测点位置等信息，并包含设备的声成像图、频谱特征、成像频率范围、主声源的声音强度、测试人员、校对人员、审核人等相关内容。测试报告具体内容见附录 E。

附录 A (资料性) 声成像算法原理

A.1 基本原理

声成像检测原理如图 A.1 所示。基于传声器阵列测量技术，以被测设备为观测对象布置声学成像仪器（以下简称“声成像仪”），通过传声器阵列同步接收到多个通道的声音信号，依据成像算法计算得到设备基准发射面上的声场分布云图。测量过程中同步记录设备的可见光图像，以其为背景，通过几何配准将声场分布云图与可见光图像叠加显示，获得声成像图。声成像图中直观显示声源位置、强度和频谱等特征。

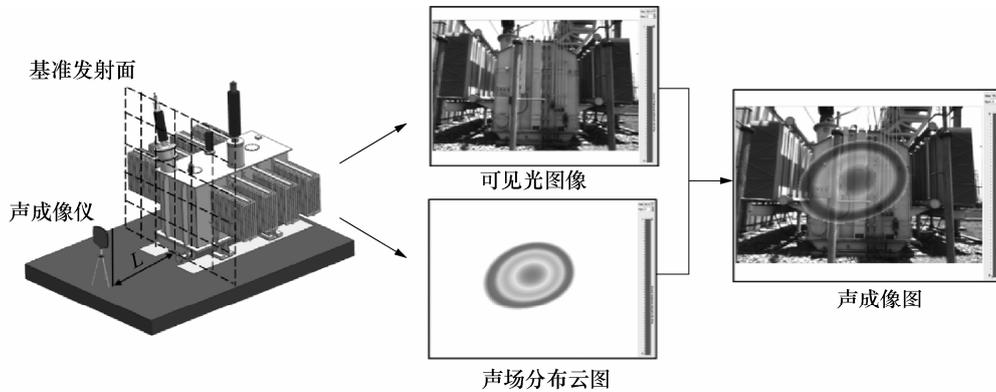


图 A.1 声成像检测原理

A.2 声成像算法

通常采用常规波束形成原理进行计算，该算法可兼顾近场和远场测试，基本原理如图 A.2 所示。声源位于基准发射面上，传声器阵列位于测试面上。由于各个传声器与声源的距离存在差异，因此不同传声器接收到的声信号之间存在时延 Δt 。将同步采集的各个传声器声信号通过延时求和重构至基准发射面上，叠加所有重构点后得到基准发射面的声场分布云图。若该重构点处传声器信号为同相位，叠加后信号幅值明显增加，形成主瓣；若相位错乱无序，叠加后形成旁瓣。在声场分布云图中，主瓣对应声源，旁瓣形成虚像。

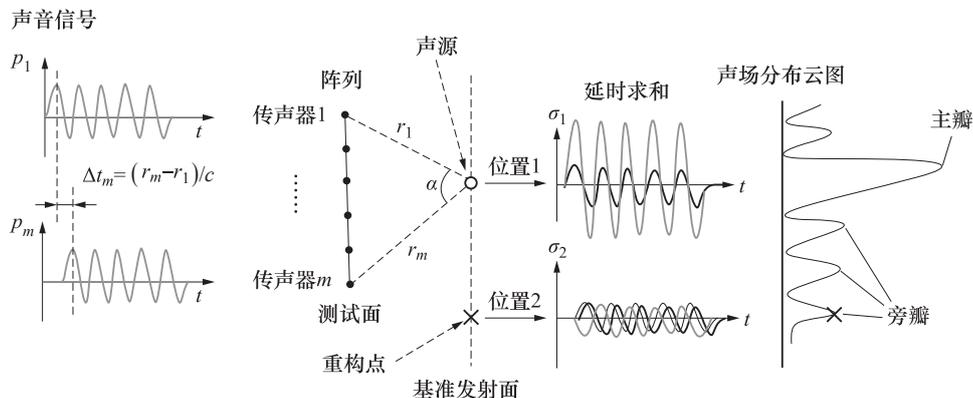


图 A.2 常规波束形成算法基本原理

A.3 声成像算法选择

基于传声器的声成像测试技术的关键之一是成像算法的选取，不同的算法具有不同的特点，为满足变电站设备异常声响测试的不同需求，声成像仪的基本处理算法应包括常规波束形成（conventional beamforming, CBF）算法，宜包括特征值分解优化（eigenvalue optimization beamforming, EVOB）算法、反卷积声成像（deconvolution approach for the mapping of acoustic source, DAMAS）算法、基于空间源相干性的清除法（clean based spatial source coherence, CLEAN-SC）等优化算法，其特点见表 A.1。

表 A.1 四种声成像算法的特点

算法名称	优点	缺点	应用场景
CBF	稳定，计算效率高	精度低	快速声成像
EVOB	稳定，精度高于 CBF 算法	计算效率偏慢	大多数无实时性要求的场合
DAMAS	精度高于其他算法	计算效率极慢	对识别精度要求高的细小部件
CLEAN-SC	精度高于 EVOB 算法	相干声源识别效果差，计算效率偏慢	非相干声源、气动噪声、摩擦噪声

A.4 常规波束形成算法原理

假设空间存在一个点声源，见图 1，声源信号频率为 f ，则声波到达传声器阵列的某一指定传声器与至其他传声器之间的时间差 Δt_m 可表示为：

$$\Delta t_m = (r_1 - r_m) / c \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

- r_1 —— 声源到指定传声器的距离；
- r_m —— 声源到第 m 号传声器的距离；
- c —— 声音在空气中的传播速度。

不考虑环境中的噪声，则传声器阵列中任意一个传声器单元接收到的信号为：

$$x_m(t) = p(t)e^{j\omega\Delta t_m}$$

$$\omega = 2\pi f \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

- $p(t)$ —— 传声器接收到的声压幅值；
- t —— 时间；
- ω —— 声源的圆频率。

对基准发射面划分网格，如图 A.3 所示，假设每个网格点都为一个声源，对于网格中的任意一点 ξ ，将所有传声器接收到的声压信号重构至该点并叠加后的信号可表述为：

$$B(r, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta t_\xi) \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

- M —— 阵列中的传声器数量；
- w_m —— 第 m 号传声器的加权系数；
- p_m —— 第 m 号传声器的声压值；
- r —— 重构点到传声器的距离；
- Δt_ξ —— 网格中 ξ 点上的声源到达传声器阵列的参考阵元与至其他阵元之间的时间差。

实际定位过程中需要对不同频段的声源进行定位，所以需要进行频域处理，对式（A.3）进行傅里叶变换后得到波束形成的频域表达式：

$$B(r, \omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p(\omega) e^{j\omega(\Delta t - \Delta t_\xi)} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

$p(\omega)$ ——声压值在频域上的分量。

由式（A.4）可知，当 $\Delta t = \Delta t_\xi$ 时，补偿后的各个信号具有相同的相位，加权求和后的输出值最大；当 $\Delta t \neq \Delta t_\xi$ 时，补偿后的各个信号相位均不相同，求和时会相互抵消，输出值会减小。当 $\Delta t = \Delta t_\xi$ 时，波束形成输出最大值，并在声场分布云图中形成主瓣，即可认为点 ξ 为声源的位置。

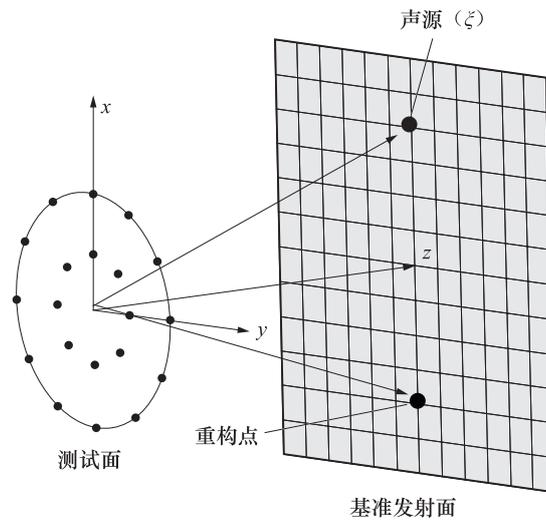


图 A.3 传声器阵列测试原理

频域计算之后可得到基准发射面网格所有点对应的 $B(r, \omega)$ ，进而形成基准发射面上的声场分布云图，从而直观地确定声源具体位置。

附录 B

(资料性)

技术参数选择对声成像仪特性的影响

B.1 传声器阵列特性

波束形成传声器阵列的性能主要体现在成像角分辨率、截止频率、有效动态范围三个方面。成像角分辨率主要受主瓣宽度的影响，主瓣越窄，分辨率越高。用基准发射面上能被准确区分的两个声源间的角度表征为成像角分辨率，根据瑞利准则，得出其公式如下：

$$R(\theta) = 2 \arctan\left(\frac{\alpha\lambda}{2D \cos^3 \theta}\right) \dots\dots\dots (B.1)$$

$$\lambda = c / f$$

式中：

- $R(\theta)$ —— 成像角分辨率；
- α —— 阵列系数，线性阵列 $\alpha = 1$ ，平面阵列 $\alpha = 1.22$ ；
- λ —— 声源信号的波长；
- D —— 阵列孔径；
- θ —— 阵列声成像视场角；
- c —— 声音在介质中的传播速度；
- f —— 声源信号频率。

R 与 D 、 f 、 θ 等有关，且 D 或 f 越大， θ 越小，分辨率越高。截止频率由混叠现象引起，是波束形成算法可准确识别信号的最高频率，其值越高越好，由空间采样定理得出截止频率公式如下：

$$f_{\max} = \frac{c}{d(1 + \sin \theta)} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

- d —— 传声器间隔。
- θ 和 d 越大， f_{\max} 越低。

B.2 阵列典型参数选择

B.2.1 阵列声成像视场角 θ 的选择

- a) 由式 (B.1) 可知，在 λ 、 D 一定的情况下， $\theta=0^\circ$ 时，阵列轴向分辨率 $R_{\text{Axis}} = 2 \arctan\left(\frac{\alpha\lambda}{2D}\right)$ 为最小，分辨率最高。
- b) $\frac{R(\theta)}{R_{\text{Axis}}} = \frac{1}{\cos^3 \theta}$ ，如图 B.1 所示，阵列轴向分辨率随 θ 的增大而急剧降低。 $\theta=\pm 30^\circ$ 的成像角分辨率相比在 0° 时降低 53.96%， θ 通常宜为 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 。

B.2.2 阵列孔径 D 的选择

在成像角分辨率 $R=60^\circ$ ，阵列声成像视场角 $\theta=0^\circ$ 的状态下，阵列孔径 D 与声源识别频率下限 f_l 的关系如表 B.1 所示，声源识别频率下限越低需要的阵列孔径越大，现场检测时实际阵列声成像视场角 θ

大于 0° ，因此所需的阵列孔径不应小于表 B.1 中的数值。

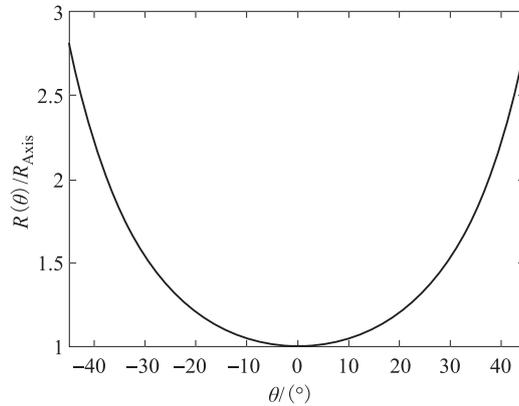


图 B.1 成像角分辨率 R 与阵列声成像视场角 θ 关系图

表 B.1 阵列孔径 D 与声源识别频率下限 f_1 的关系

f_1/Hz	D/m	f_1/Hz	D/m	f_1/Hz	D/m
100	3.59	600	0.60	2000	0.18
200	1.80	700	0.51	3000	0.12
300	1.20	800	0.45	4000	0.09
400	0.90	900	0.40	5000	0.07
500	0.72	1000	0.36	6000	0.06

B.2.3 传声器间隔 d 的确定

传声器间隔 d 受阵列孔径 D 、传声器数量 M 的影响，传声器间隔 d 与声源识别频率上限 f_2 的关系如表 B.2 所示，传声器间隔 d 越小，声源识别频率上限 f 越高，通常采用增加传声器数量 M 的方式获得对高频段的识别能力。

表 B.2 传声器间隔 d 与识别频率上限 f_2 的关系

f_2/Hz	d/m	f_2/Hz	d/m	f_2/Hz	d/m
1000	0.357 8	8000	0.044 7	15 000	0.023 9
2000	0.178 9	9000	0.039 8	16 000	0.022 4
3000	0.119 3	10 000	0.035 8	17 000	0.021 0
4000	0.089 4	11 000	0.032 5	18 000	0.019 9
5000	0.071 6	12 000	0.029 8	19 000	0.018 8
6000	0.059 6	13 000	0.027 5	20 000	0.017 9
7000	0.051 1	14 000	0.025 6	21 000	0.017 0

B.2.4 阵列动态范围的选择

阵列动态范围定义为最大旁瓣值相对于主瓣峰值的差值，其主要与阵列中传声器的排布形式有关。

图 B.2 中不同排布形式的传声器阵列的响应图谱的计算结果如图 B.3 所示，其中星形、环形、棋盘阵列采用均匀排布，螺旋形为非均匀排布，相邻最近的传声器间隔为 0.04 m，分析过程中阵列孔径

均为 0.6 m，均匀阵列的传声器间隔均为 0.04 m。

在相同的阵列孔径及传声器间隔下，星形、环形、棋盘阵列所需要的传声器个数依次增多，而螺旋形排布的传声器个数为 112 个，矩形阵列所需要的阵元个数远远超出其他结构的阵列。

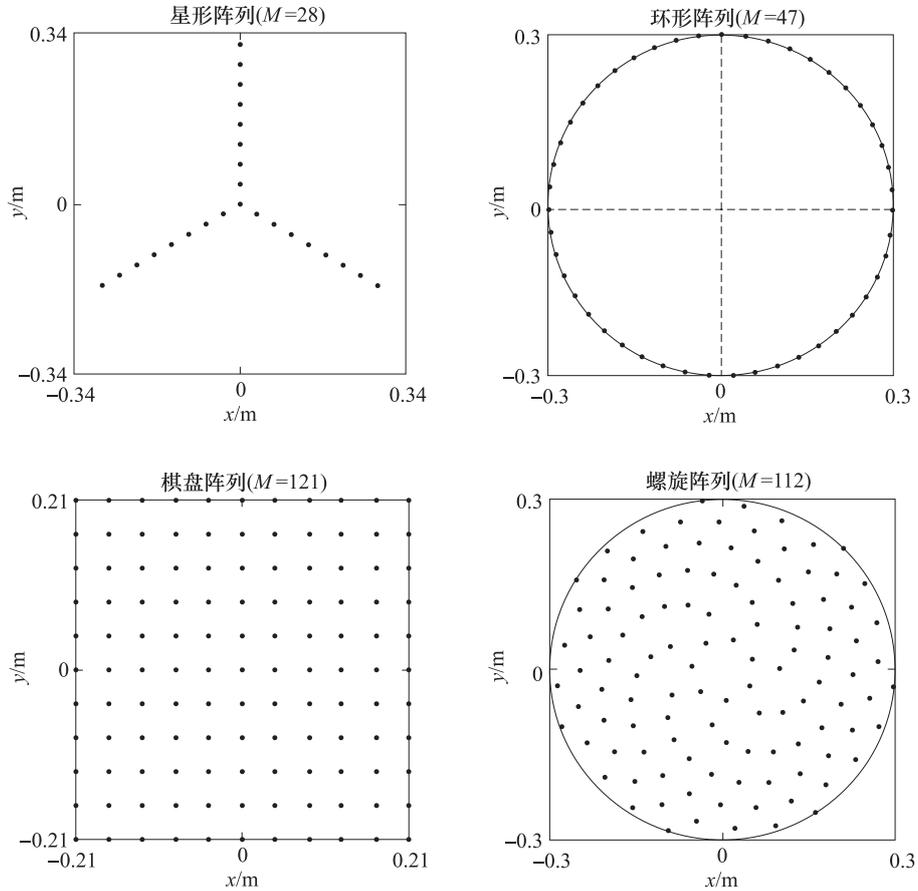


图 B.2 阵列模型

图 B.3 中声源频率为 5 kHz，测试面到声源面的距离均为 1 m，成像显示动态范围为 15 dB，阵列响应图谱结果显示，星形阵列、环形阵列的旁瓣较多，矩形阵列、螺旋形阵列的旁瓣相对较少，这说明矩形阵列与螺旋形阵列拥有相对较好的抗干扰能力。螺旋形阵列在 15 dB 的显示范围内没有虚假声源，更适应在复杂的声学环境中准确地识别出真实声源的位置。

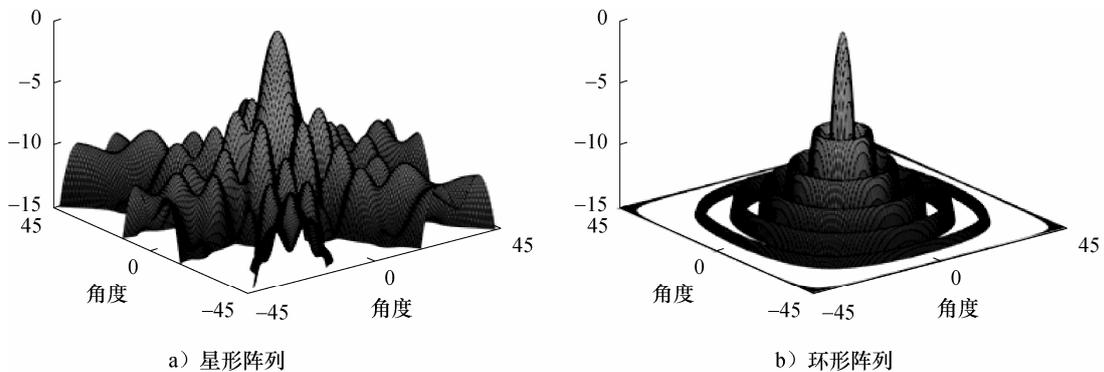


图 B.3 阵列响应三维图谱

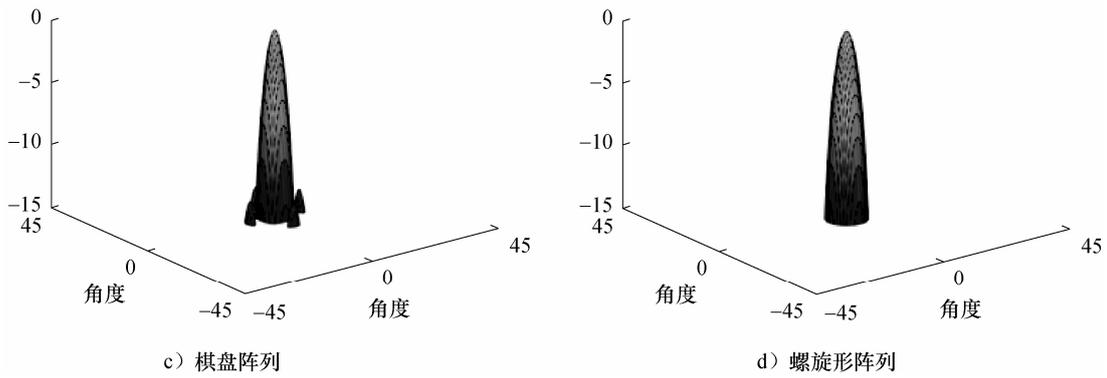


图 B.3 阵列响应三维图谱 (续)

表 B.3 所示为不同阵列的有效动态范围数值结果，可见螺旋形阵列的有效动态范围远高于其他阵列。

表 B.3 不同阵列有效动态范围分析

<p style="text-align: center;">星形阵列</p> <p style="text-align: center;">阵列动态范围: -6.3 dB</p>	<p style="text-align: center;">环形阵列</p> <p style="text-align: center;">阵列动态范围: -7.9 dB</p>
<p style="text-align: center;">棋盘阵列</p> <p style="text-align: center;">阵列动态范围: -12.4 dB</p>	<p style="text-align: center;">螺旋形阵列</p> <p style="text-align: center;">阵列动态范围: -16.3 dB</p>

附录 C

(资料性)

测试距离输入误差对成像结果准确度的影响

在实际检测中，测试距离常难以精确测定，测试距离对测试结果的影响分为对测试声压级的影响和对声成像定位结果的影响。

- a) 对测试声压级的影响。假设实际声源距离为 r ，当输入的计算距离相比实际声源距离误差为 a (%)，则由球面波扩展可知，声压级测试误差 ΔL_p 可以表示为：

$$\Delta L_p = 20 \lg \frac{1}{1-a} \dots\dots\dots (C.1)$$

表 C.1 给出了不同距离输入误差下声压级计算结果的误差，由此可知，距离输入越精确，声压级计算结果就越准确。

表 C.1 不同距离误差下声压级测试误差

输入距离误差 %	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
声压级测试误差 dB	-6.02	-4.44	-3.10	-1.94	-0.92	0.00	0.83	1.58	2.28	2.92	3.52

- b) 对声成像定位结果的影响。设备声源的来波可分为近场球面波与远场平面波，基于近场球面波进行的计算可以将距离参数作为变量，在基准发射面上进行扫描重构，而平面波作为球面波的简化，可忽略距离因素的影响。因此，无论是球面波还是平面波，输入的测试距离都不是定位计算需要精确确定的量，但输入正确的测试距离有助于缩短定位计算的时间。

附录 D

(资料性)

变电站设备声成像测试案例

D.1 变电站电抗器均压环异常声响检测

某变电站 A 相电抗器上方存在异常声响情况，该异常声响时有时无，无规律性。采用声成像仪对电抗器 A 相均压环方向进行声音录波，持续约 20 s 的异常声响声色谱图如图 D.1 所示。由图 D.1 可知，在无异常声响时频率基本在 2 kHz 以下（图 D.1 中 2 kHz 附近的直线以下），出现异常声响时在声音波形中存在一些频率明显增大的峰值（图 D.1 中谱线圈起部分）。对异常频率进行声成像计算后结果如图 D.2 所示，定位到异常部位位于均压环上。后续对该部位进行拆解后发现，该均压环内部支撑条脱落，并且均压环内部积水严重。

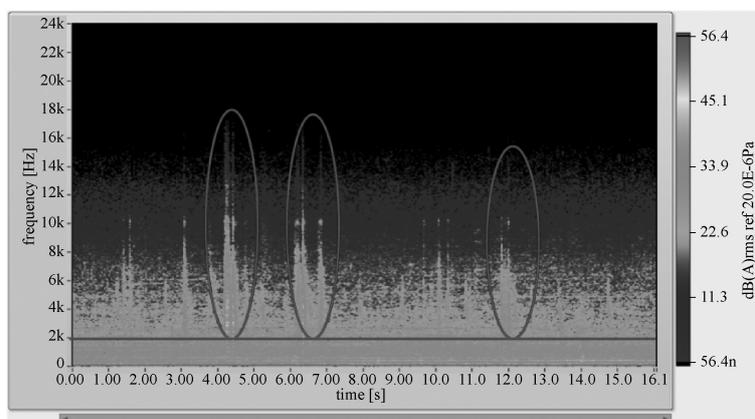


图 D.1 电抗器 A 相均压环附近声色谱图



图 D.2 声成像定位异常声响源位置（成像频率为 2500 Hz~3500 Hz）

D.2 换流变压器电抗器异常声响检测

某换流站电抗器附近出现异常声响，采用声成像仪对异常声响范围内的电抗器设备进行检测，异

常声响声色谱图如图 D.3 所示，发现其在 1 kHz 以上出现了较多的特征频谱（图 D.3 中谱线圈起部分）。对特征量从不同测试方位进行成像分析，结果如图 D.4 及图 D.5 所示，发现两处较明显的异常声响位置分别在 B 相电抗器本体与支架处。结合电抗器结构推断，位于本体处的声源为异常声响产生的主要原因，在电抗器本体与支撑座交界位置可能存在部件松动，在电磁力激励下产生剧烈振动，激发出宽频带的噪声。停电检查发现该电抗器与其支撑绝缘子连接处均压棒螺栓存在严重松动，并有滑丝现象，与声成像分析结果一致。

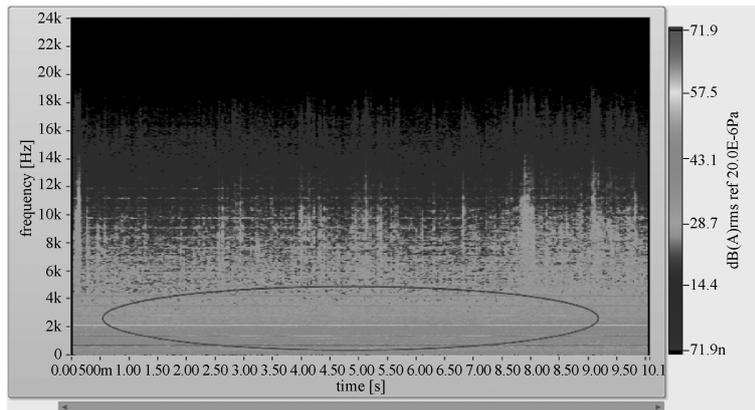


图 D.3 PLC 电抗器异常声响声色谱图



图 D.4 声成像正面测试结果（成像频率为 1500 Hz~3000 Hz）

D.3 气体绝缘金属全封闭组合电器（GIS）击穿放电检测

GIS 击穿放电会引起周围介质的剧烈振动，经气体和固体等介质传播会形成高幅值的声波信号，检测得到的击穿放电声信号表现为衰减振荡型的高幅值宽频脉冲信号，如图 D.6 所示（图 D.6 中谱线圈起部分）。对特征频率进行声成像测试，结果如图 D.7 所示，放电位置位于 GIS 中间管段的靠下位置，与耐压试验的实际放电位置一致。



图 D.5 声成像侧面测试结果（成像频率为 1500 Hz~3000 Hz）

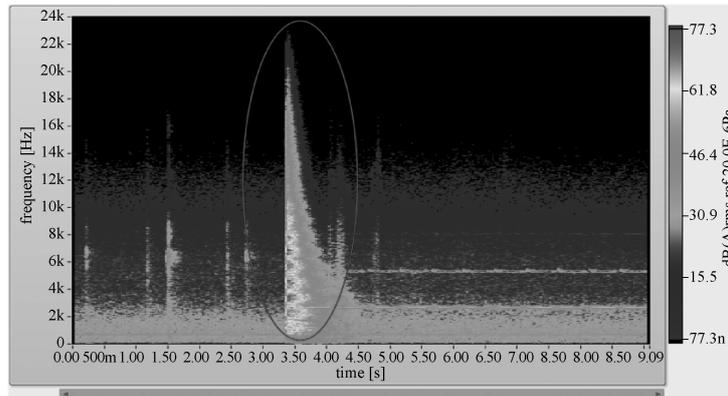


图 D.6 GIS 耐压试验击穿放电声色谱图



图 D.7 GIS 耐压击穿放电声成像结果（成像频率为 1500 Hz~2500 Hz）

D.4 气体泄漏检测

气体泄漏时伴随着流场中的压力脉动和速度脉动，会在漏点处形成频率较宽的气动噪声源。环境

中的背景噪声一般处于较低频段，而气体泄漏时的声音强度较小，因此通常选择 10 kHz 以上的高频特征量进行声成像计算，以利于过滤背景中的低频噪声，实现气体泄漏点的声成像定位。图 D.8 所示为气体泄漏时声成像测试结果（泄漏量为 0.3 L/min，成像频率为 15000 Hz~31250 Hz，测试距离为 0.5 m）。

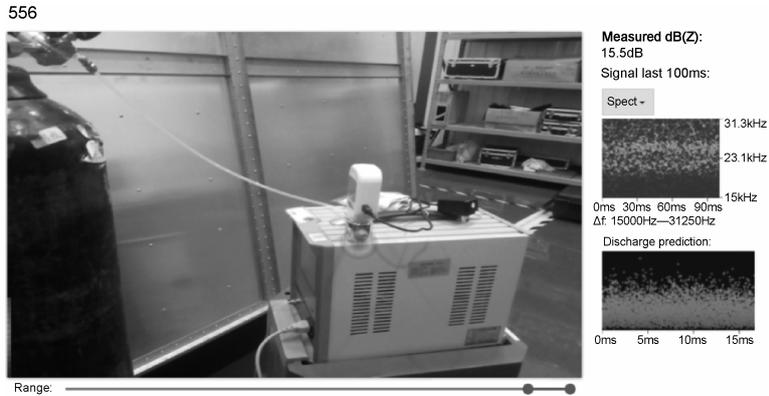


图 D.8 气体泄漏时声成像测试结果

附录 E
(资料性)
声成像测试报告典型格式

声成像测试报告典型格式见表 E.1。

表 E.1 声成像测试报告典型格式

变电站名称					
设备名称		设备电压等级		设备运行编号	
主要检测仪器	声成像仪	风速仪	温湿度计		
仪器型号					
仪器编号					
仪器有效期					
风速	m/s		天气		
温度	℃		湿度		
测试时间	年	月	日	时	分
设备负荷			测试距离	m	
测点位置					
测点示意图:					
测试现场照片:					
测试结果					
成像频段		声压级标注	dB	成像显示动态范围	dB
声成像图:					

表 E.1 (续)

频谱图及色谱图 (如有):	
测试结论:	

测试:

校对:

审核:
