

中华人民共和国国家标准

GB/T 22075—2008

高压直流换流站可听噪声

HVDC converter station audible noise

2008-06-30 发布

2009-04-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准

高压直流换流站可听噪声

GB/T 22075—2008

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号

邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 3.25 字数 93 千字

2009年1月第一版 2009年1月第一次印刷

*

书号:155066·1-34376 定价 34.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68533533

目 次

前言 Ⅲ

引言 Ⅳ

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 环境影响 4

4.1 概述 4

4.2 背景噪声的影响 4

4.3 地形条件的影响 5

4.4 气象条件的影响 5

5 噪声级限值 7

5.1 概述 7

5.2 噪声级限值表示方法 7

5.3 噪声测量 7

5.4 用地类型 7

5.5 要求限制噪声的区域 8

5.6 噪声级限值与噪声持续时间的关系 8

5.7 典型的噪声级限值 9

6 发声源 9

6.1 概述 9

6.2 换流变压器..... 10

6.3 电抗器..... 11

6.4 电容器..... 16

6.5 冷却风扇..... 18

6.6 其他发声源..... 19

6.7 典型声功率级..... 20

7 降噪措施..... 20

7.1 概述..... 20

7.2 换流站布置..... 21

7.3 设备的降噪设计..... 22

7.4 声屏障..... 23

7.5 改进技术..... 24

8 运行工况..... 24

8.1 概述..... 24

8.2 正常运行工况..... 25

8.3 异常运行工况..... 25

8.4 验证噪声级时的运行工况..... 25

9 声级预测..... 26

9.1 概述..... 26

9.2 换流站模型..... 26

9.3 计算过程..... 27

9.4 计算结果的表示..... 31

10 确定设备的声功率 32

10.1 概述 32

10.2 计算 33

10.3 测量 34

10.4 计算和测量相结合 37

10.5 验证 38

11 高压直流换流站声级的验证 38

11.1 概述 38

11.2 声学环境 39

11.3 验证条件 39

11.4 计算 39

11.5 测量 39

11.6 计算与测量相结合 40

12 设计参数 41

12.1 概述 41

12.2 业主提供或承包商调查的数据 41

12.3 承包商应澄清的数据 44

前 言

本标准制定过程中参考了 IEC 的工作文件 22F/83/NP《High voltage direct current (HVDC) substation audible noise》。

本标准与 22F/83/NP 的主要差异：

- 按 GB/T 1.1—2000 的规定,对标准的语言表述和格式作了修改;
- 原第 1、第 2、第 3 章内容被综合编辑,并分别纳入引言、第 1 章范围和正文的其他相关部分。因此,本标准的章条号并不与 IEC 22F/83/NP 文件一一对应;
- 根据需要,原文各章之后的参考文献部分编入规范性引用文件中,没有全部引用;
- 对部分术语进行了修改,采用了我国现行声学标准名词术语的相关内容,并根据需要增加术语“计权”(3.3);
- 对原文中部分章节间雷同的内容不再重复,采取“见××”的方式表述;
- 因为我国电力系统工频为 50 Hz,所以删除原文中与工频 60 Hz 相关的描述;
- 3.8 中增加了“声功率不能直接测量,可以通过对声强的计算得到”;
- 删除原 6.1 中第 1 段内容;
- 原 6.1.1 标题改为“5.2 噪声级限值表示方法”;
- 原 6.1.2 标题改为“5.3 噪声测量”;
- 为了便于理解,在原 10.2.1(现条号 9.3.1)中增加四级条标题;
- 对原文中的“箱式油浸电抗器”、“铁芯油浸式电抗器”,统一改为“油浸式电抗器”。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国电力电子学标准化技术委员会归口。

本标准由全国电力电子学标准化技术委员会负责解释。

本标准负责起草单位:西安高压电器研究所。

本标准参加起草单位:西南电力设计院、南方电网技术研究中心、西安电力电子技术研究所、北京网联直流输电系统工程有限公司、北京机械工业北京电工技术经济研究所、西安西电电力变压器有限责任公司、西安西电电力电容器有限责任公司、西安西电整流器有限责任公司、北京电力设备总厂。

本标准参加起草人:苟锐锋、黎小林、程晓绚、胡劲松、方晓燕、马为民、田恩文、陆剑秋、蔚红旗、周观允、周登洪、田方、李宾宾、黄晓明、王琦、杨一鸣、王琨、李慧、郭蓉、王瑚、郭香福。

本标准主要起草人:苟锐锋、黎小林、程晓绚、胡劲松、方晓燕。

本标准为首次发布。

引 言

可听噪声是空气中能被人耳听到的具有一定频率的压力波,可由单一频率的音响信号(纯音)或由各种频率的声音组成。

高压直流换流站电力设备的噪声主要来自于电应力(电压或电流)引起的设备机械振动。大多数设备的机械结构有几个固有的谐振频率,如果设备电应力频谱中的一个或几个频率与其一致,振动将会加剧并使噪声增大。另外,由于交流/直流转换,会在高压直流换流站的交流侧和直流侧出现电流或电压谐波,使换流设备产生不同频率及强度的声音,增加了换流设备的噪声。

事实上,当高压直流换流站附近有对噪声敏感的居民区或商业区时,都会存在可听噪声问题。

制定本标准的主要目的是为了能根据本标准编写高压直流换流站可听噪声功能规范书,对换流站噪声进行综合评估,使换流站可听噪声级满足相关法律、法规和标准的要求。

高压直流换流站可听噪声功能规范书是确定高压直流换流站可听噪声技术要求的文件,它能确保投标的一致性,并为评标及合同的后续执行提供指导。编制时应注意:

第一,在提出详细的技术要求之前,应确定业主和承包商的责任范围,否则,有可能产生契约冲突、工程延期或可听噪声不达标等问题。对此,有两种比较极端的划分方式:

- 由业主确定环境条件、声级限值、计算方法和所有需要考虑的参数。承包商据此进行研究,并负责证明研究结果是按照功能规范的所有要求完成的。此时,大部分风险由业主承担。
- 业主仅提出有哪些法律、法规和标准需要满足或通过指定的现场试验进行验证。此时,大部分风险由承包商承担。

实际上,在划定责任的过程中,通常都会对这两种方式进行适当折衷。因为如果所有风险由承包商承担,则有可能需要提高工程造价。在本标准中没有推荐具体的方法,但是提供了能帮助业主对此做出决定的详细信息。

第二,在提出功能规范前应调查适用的规章、周围环境和测量背景噪声,并在功能规范书中明确提出对承包商所具有的能力要求,如换流站声级预测计算能力、单台设备的噪声计算和测量能力以及进行现场验证能力等。

第三,功能规范书中应规定承包商为满足噪声要求应采用的方法,有:

- 计算预测换流站及其周边的可听噪声,或者
- 换流站试运行后进行实地测量,或者
- 综合应用上述两种方法。

高压直流换流站噪声预测计算应考虑到最不利的情况,但换流站发声设备和换流站周围地形的模拟准确度、可能存在的错误数据以及不完善的计算方法等会造成计算结果的偏差。实地测量可获得准确的结果,但不一定能在换流站设计的不利环境下进行。而且这种测量是在换流站建成后进行的,此时所能采取的降噪措施已经非常有限并相当困难。所以,首先进行计算预测,然后实地测量可最大程度地保证可听噪声满足限值要求。

第四,功能规范书中应明确要求承包商提供与研究技术有关的数据,否则可能出现由不同承包商提交的研究信息不能反映其设计中可能存在的缺陷,或者出现不公平竞争现象。同时,在功能规范书(或业主和承包商间的其他协议)中,应明确指出由承包商提交的研究报告是否需要得到业主认可。如果需要,应在工程时间表内进行适当的安排,使业主有足够时间对这些报告进行检查、修改和批准。

本标准尽可能地包括了功能规范书以及后续技术评估中所有可能涉及的内容,对关键点或争议点做了详细的分析。

本标准中尽可能地给出了明确的建议,并描述了采取的方式和产生的结果。

本标准涉及了高压直流换流站可听噪声研究的大部分内容,但并不意味要求功能规范书也必须与此完全相同,如一些与拟建换流站站址有关的内容等。尽管如此,当制定功能规范书时,至少应考虑到本标准中讨论到的所有内容。在技术评估阶段,本标准中大部分内容都是适用的。

高压直流换流站可听噪声

1 范围

本标准用于指导编写高压直流换流站可听噪声功能规范书、评估承包商提议的设计方案以及监测工程建成后的可听噪声,对高压直流换流站可听噪声进行综合评定,使其可听噪声级满足相关法律、法规和标准的要求。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 1094.10—2003 电力变压器 第10部分:声级测定(IEC 60076-10:2001,MOD)

GB/T 3767—1996 声学 声压法测定噪声源声功率级 反射面上方近似自由场的工程法(eqv ISO 3744:1994)

GB/T 3768—1996 声学 声压法测定噪声源声功率级 反射面上方采用包络测量表面的简易法(eqv ISO 3746:1995)

GB/T 3947—1996 声学名词术语

ISO 3745:2003 声学 声压法测定噪声源声功率级 消声室和半消声室精密法

ANSI S1.11:2004 倍频带和分数倍频带模拟及数字滤波器规范

3 术语和定义

本标准采用下述术语和定义,更多相关信息请查阅 GB/T 3947—1996。

3.1

声(波) sound(wave)

弹性媒质中传播的压力、应力、质点位移、质点速度等的变化或几种变化的综合。

[GB/T 3947—1996,定义 2.1]

3.2

噪声 noise

噪声为紊乱断续或统计上随机的声振荡,或者为不需要的声音。

注:改写 GB/T 3947—1996,定义 2.11。

3.3

计权 weighting

对信号进行变换的一种方法。其基本点是突出信号中的某些成分,抑制信号中的另一些成分。对信号不同成分所乘的不同比例因子称为计权函数。

注1:因为“A计权”可以区分能被人耳接收到的以相似方式传输的不同频率的声音,所以通常使用“A计权”表征声音。

使用 dB(A)可以表示人们对声响度的感受,其他的频率计权,例如“C计权”,则比 A 计权更注重考虑低频声。

注2:改写 GB/T 3947—1996,定义 2.85。

3.4

声压 sound pressure

有声波时媒介中的压力与静压的差值,单位为帕(Pa)。

[GB/T 3947—1996,定义 2.21]

3.5

声压级 sound pressure level

声压与基准声压之比以 10 为底的对数乘以 20,单位为分贝(dB)。

计算公式如下:

$$L_p = 20 \lg(p/p_0) \dots\dots\dots(1)$$

式中:

p ——声压方均根值,单位为帕(Pa);

p_0 ——基准声压方均根值,为 20×10^{-6} Pa,该数值是感知声波的阈值。

注 1: 可以使用多点的 A 计权声压级计算平均声压级($\overline{L_{pA}}$),公式如下:

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_{pAi}}\right) \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$\overline{L_{pA}}$ ——A 计权平均声压级,单位为分贝(dB(A));

N ——测量点总数;

L_{pAi} ——第 i 点 A 计权声压级,可以根据背景噪声的影响进行修正,单位为分贝 dB(A)。

注 2: 使用相似的方式对几个频带的声压级(1/1 倍频程、1/3 倍频程等)求和:

$$L_{pA,TOT} = 10 \lg\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{0.1L_{p(f)j}}\right) \dots\dots\dots(3)$$

式中:

$L_{pA,TOT}$ ——A 计权声压级总和;

N ——频带数;

$L_{p(f)j}$ ——第 j 频带 A 计权声压级,单位为分贝(dB(A)),可以根据背景噪声的影响进行修正。

关于“1/1 倍频程”和“1/3 倍频程”的详细描述见 3.12。

注 3: 改写 GB/T 3947—1996,定义 2.47。

3.6

声强 sound intensity

声场中某点处,与质点速度方向垂直的单位面积上在单位时间内通过的声能称为瞬时声强。稳态声场中,声强为瞬时声强在一定时间 T 内的平均值,单位为瓦每平方米(W/m²)。

注 1: 对于自由平面波和球面波而言,在传播方向 n 上的声强为:

$$I_n = P^2/(\rho \times c) \dots\dots\dots(4)$$

式中:

P ——声压的方均根值,单位为帕(Pa);

ρ ——空气密度,常量,单位为千克每立方米(kg/m³);

c ——声速,单位为米每秒(m/s)。

注 2: 改写 GB/T 3947—1996,定义 2.26。

3.7

声强级 sound intensity level

声强与基准声强之比的以 10 为底的对数乘以 10,单位为分贝(dB)。计算公式如下:

$$L_I = 10 \lg(|I_n|/I_0) \dots\dots\dots(5)$$

注 1: 当声波反向进入声波包围面时, I_n 为负值,这种情况有可能发生在声源近场。此时声强级用“××”dB 表示。
在公式(5)中假定平面波在声源远场正向传播。

注 2: 改写 GB/T 3947—1996,定义 2.48。

3.8

声功率 sound power

单位时间内通过某一面积的声能,单位为瓦(W)。

注 1: 声功率不能直接进行测量,可以通过对声强的计算得到,其计算公式如下:

$$W = \oint_A \vec{I} \times d\vec{A} \dots\dots\dots(6)$$

公式(6)表示声功率 W 为声强矢量 \vec{I} 对闭合曲面 A 的积分。

注 2: 改写 GB/T 3947—1996,定义 2.30。

3.9

声功率级 sound power level

声功率与基准声功率之比的以 10 为底的对数乘以 10,单位为分贝(dB)。计算公式如下:

$$L_W = 10 \lg(W/W_0) \dots\dots\dots(7)$$

式中:

W——声功率;

W₀——基准声功率,为 1×10⁻¹² W,是感知声波的门槛值。

注 1: 声源的 A 计权声功率级(L_{WA})由平均声压级 L_{pA} 决定:

$$L_{WA} = L_{pA} + 10 \lg(S/S_0) \dots\dots\dots(8)$$

式中:

S——包围目标物的“测量面”面积,单位为平方米(m²);

S₀——基准面积,为 1 m²。

测量面内的声功率级大小与距声源的距离无关。

注 2: 改写 GB/T 3947—1996,定义 2.49。

3.10

声传播 sound propagation

某一点的声压级取决于该点距声源的距离(r)、声源的声功率级和空间几何位置。对于半球形传播的声波,适用公式(9):

$$L_p = L_W - 10 \lg(2\pi r^2) \dots\dots\dots(9)$$

注 1: 当声源为固定声源时,公式(9)在声学里被称为“距离原理”。该原理表明,假如测量是在声源远场执行,那么距声源的距离每增加一倍,声压级就降低 6 dB(A)。远场的起始距离由声源规模、声场的空间复杂性和传播频率决定。例如,对于一个大变压器,远场起始于距变压器 30 m 处;对于以 1 kHz 频率传播声波的小电抗器,远场起始于 5 m 处。

注 2: 严格来讲,距离原理只适用于点声源。当距声源很远时,大多数声源才可以被看作为点声源,所以在实际应用时应特别注意声源类型。

3.11

声辐射的指向性 directivity of sound radiation

指向性和声功率级、声压级的关系为:

$$L_p = L_W - 10 \lg(4\pi r^2/Q) \dots\dots\dots(10)$$

式中:

L_p——距声源距离为 r 处的声压级;

L_W——声源的声功率级;

r——声源和接收器间的距离;

Q——声辐射的指向性,例如 Q=1 (球形声辐射);Q=2 (半球形声辐射);Q>2 (方向不一的声辐射)。

注: 声辐射指向性也可以用分贝表达,称为指向性指数,由公式(11)确定:

$$D_i = 10\lg Q \dots\dots\dots(11)$$

指向性指数是球形传播时声偏移量的校正系数。此时,声压级可以通过公式(12)计算获得:

$$L_p = L_w + D_1 - 10 \lg(4\pi r^2) \dots\dots\dots(12)$$

3. 12

声测量滤波器 sound measurement filters

把信号中各分量按频率加以分离的设备。滤波器能使一个或几个频带中的信号分量通过时基本上不受衰减,对其他频带中的分量则加以衰减。

注 1: 通过使用标准滤波器,使声测量设备能在规定的频带内测量总声压级。通常使用“1/1 倍频程”滤波器或“1/3 倍频程”滤波器进行测量。一个 1/1 倍频带包含 3 个 1/3 倍频带。

“倍频程”滤波器的相邻频率间的关系如下:

$$f_2 = 2^a f_1 \dots\dots\dots(13)$$

公式(13)中, $a=1$ 时为“1/1 倍频程”滤波器; $a=1/3$ 为“1/3 倍频程”滤波器。

注 2: 声测量滤波器的中心频率应满足相关标准的要求。在 ANSI S1. 11 等标准中,“1/1 倍频程”的中心频率为(单位为赫):16,31. 5,63,125,250,500,1000,2000,4000,8000,16000;“1/3 倍频程”的中心频率为(单位为赫):16,20,25,31. 5,……,17780,22390。

注 3: 改写 GB/T 3947—1996,定义 6. 49。

3. 13

反射面 reflecting plane

任何能完全反射声波的表面。

3. 14

基准辐射面 principal radiating surface

测量对象周围的一个假定的面,假定声波是从这个表面辐射出去的。

3. 15

规定轮廓线 prescribed contour

与基准辐射面相距某一规定水平距离(即测量距离)的水平线,各测量点位于此线上。

[GB/T 1094. 10—2003,定义 3. 9]

3. 16

测量距离 measurement distance

基准辐射面与测量表面之间的水平距离。

[GB/T 1094. 10—2003,定义 3. 10]

3. 17

测量表面 measurement surface

包络声源的假想表面,各测量点位于此表面上。

[GB/T 1094. 10—2003,定义 3. 11]

3. 18

背景噪声 background noise

测量对象在非运行状态下的声压级(此处,测量对象可以是整个高压直流换流站或单台设备)。

4 环境影响

4. 1 概述

当声源发声时,周围环境将影响声波的传播以及在一定距离处对声波的感知。本章描述了背景噪声、地形条件和气象条件等环境因素对声波的影响,其中气象条件对声波的长距离(数百米)传播影响很大。

4. 2 背景噪声的影响

图 1 表明了固有噪声和背景噪声。对于背景噪声,即使在固有噪声消失后其仍会存在。固有噪声

级和背景噪声级共同作用形成总的测量声级。

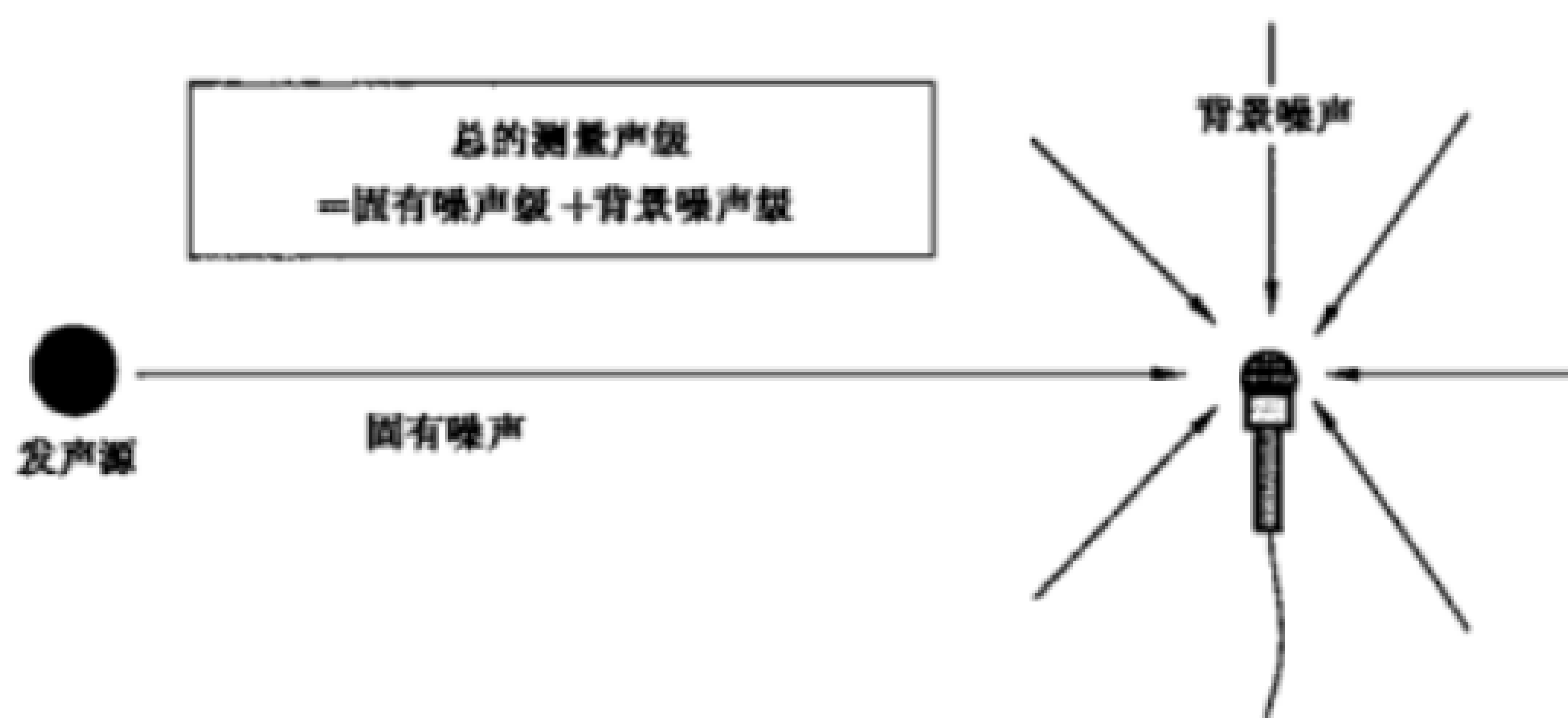


图1 固有噪声和背景噪声

在拟建高压直流换流站的站址处,总会存在背景噪声。人类活动的声音和自然界的聲音都属于背景噪声。这样的噪声源在白天或晚上,或其他某个特殊的时段内都有可能产生,因此确定不同时段背景噪声级是非常重要的。一般来讲,人们在午夜至凌晨四点间活动最少,此时的背景噪声级通常最低。

当背景噪声级接近规定的最大值或等于总的噪声级时,考虑背景噪声的影响是非常重要的。

为了确定背景噪声级是否接近最大限值,在高压直流换流站建设前应测量站址的背景噪声。一旦换流站建成,如果背景噪声级与总的测量声级之差小于 10 dB(A),则测量时应认真考虑背景噪声的影响。此时,即使可修正总的测量声级,但是已不可能准确地确定固有噪声级(见 10.3.1.4)。

4.3 地形条件的影响

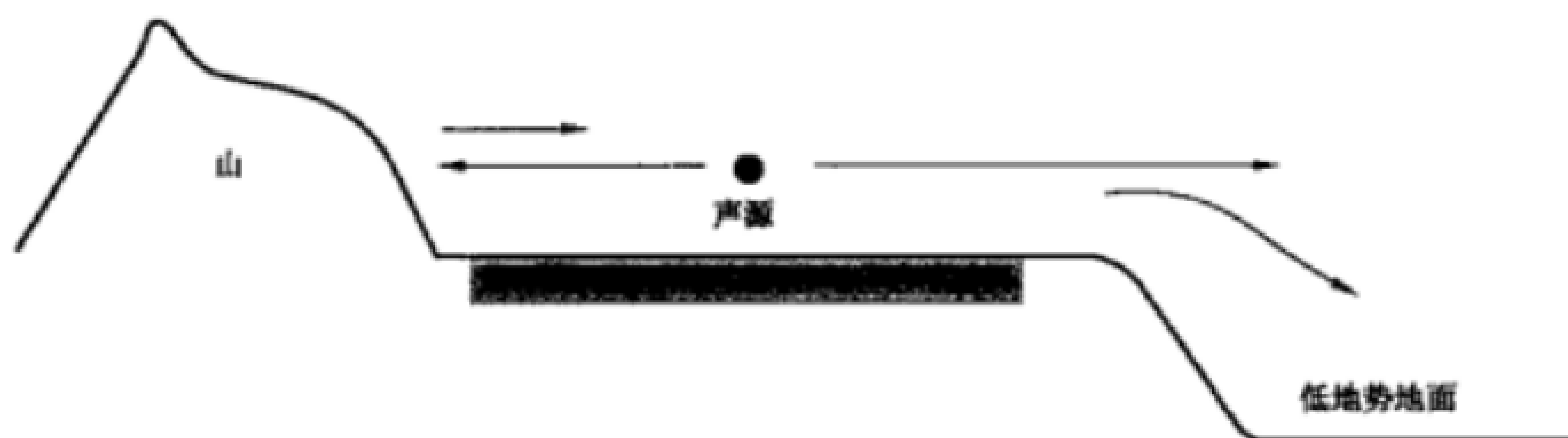


图2 山体和地势低的地面声波反射示例

高压直流换流站周围的地形各异,例如海洋附近、山上或山谷和平原等。地形影响声波的传播,特别是地面物体(如山体或地面本身)对声波的反射、吸收、屏蔽和衰减效应尤为明显。另外,当换流站位置与选定测量点的海拔高度不同与相近相比,声波的传播是不一样的。

如图2所示,声波可被山体反射,而地势低的地方可成为无声区。这说明即使距声源的距离相同,各处声波的衰减也可不一样。

地表特性决定了地面对声波的反射或吸收能力。因此,当要求准确计算从高压直流换流站传出的噪声时,不仅需要考査地形条件,还应考虑地表特性,如森林、岩石、草地等。

但是,当地面基本平坦、地表均匀、海拔较低而使“距离”成为声波衰减的主要原因时,通常在计算中不必过多地考虑地形对声波传播的影响。

4.4 气象条件的影响

声波在空气中的远距离传播受气象条件,如风、温度、雨、雾和雪的影响。特别是风和温度对声波传播的影响尤为显著。因此,在换流站测量声波时应特别关注气象状况。

4.4.1 风速和风向的影响

由于摩擦阻力,近地表的风速通常比高处的风速低。如图3所示,因为声速为风速和初始声速的矢量和,所以声波会发生折射,因此声波顺风向和逆风向的传播是不同的。

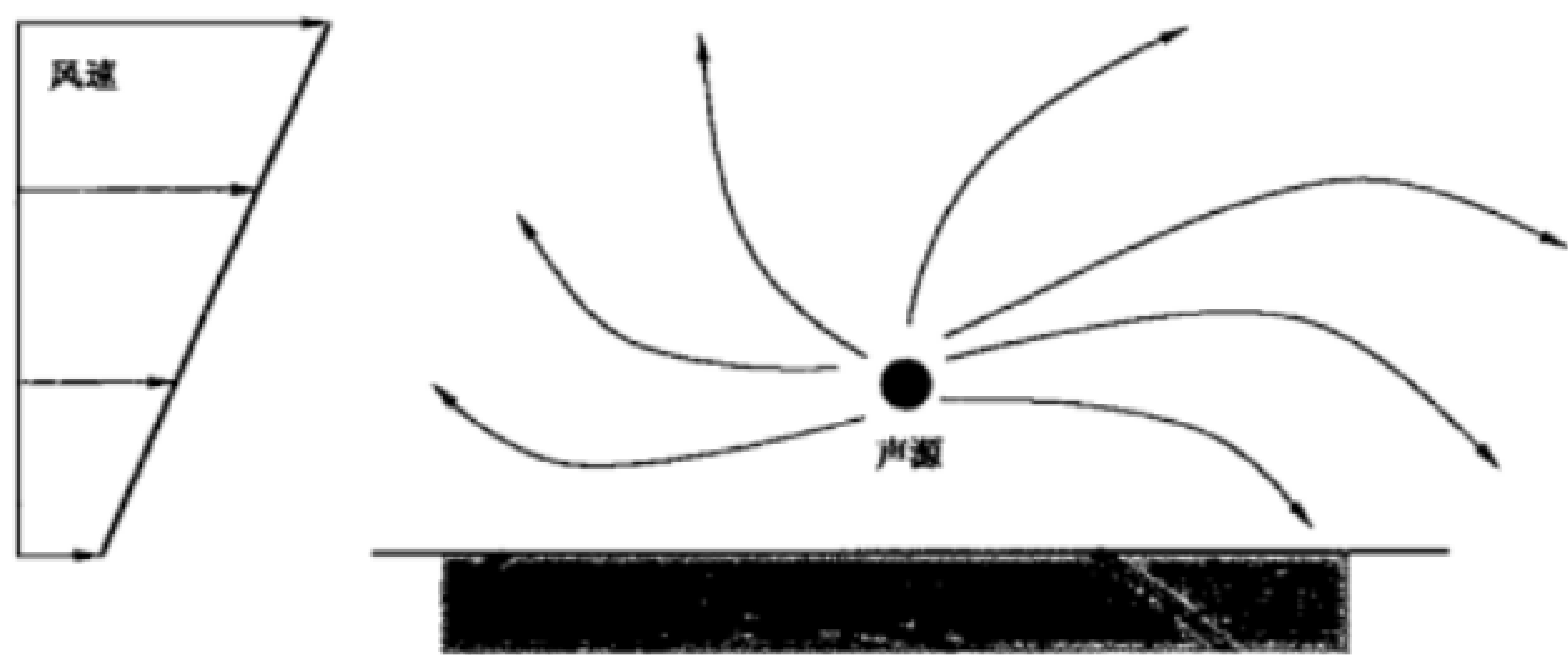


图3 存在风梯度的声波折射示例

如果高压直流换流站区域的风很大,则同一声源逆风向的声级比顺风向的低。利用这一条件有可能使换流站布置和隔声设计达到最优化(如果在风大时测量,风在传声器上会产生所谓的自噪声,这种自噪声可采用在传声器上安装挡风装置的方法降低)。

4.4.2 温度梯度的影响

热地表和冷地表在大气中可形成垂直温度梯度,因为声波在热空气中比冷空气中传播快,所以温度梯度对声波传播有很大的影响(见图4和图5)。因此,对于处于地面的人来说,图5中的声波衰减相对较小,这种现象通常在夜间发生。

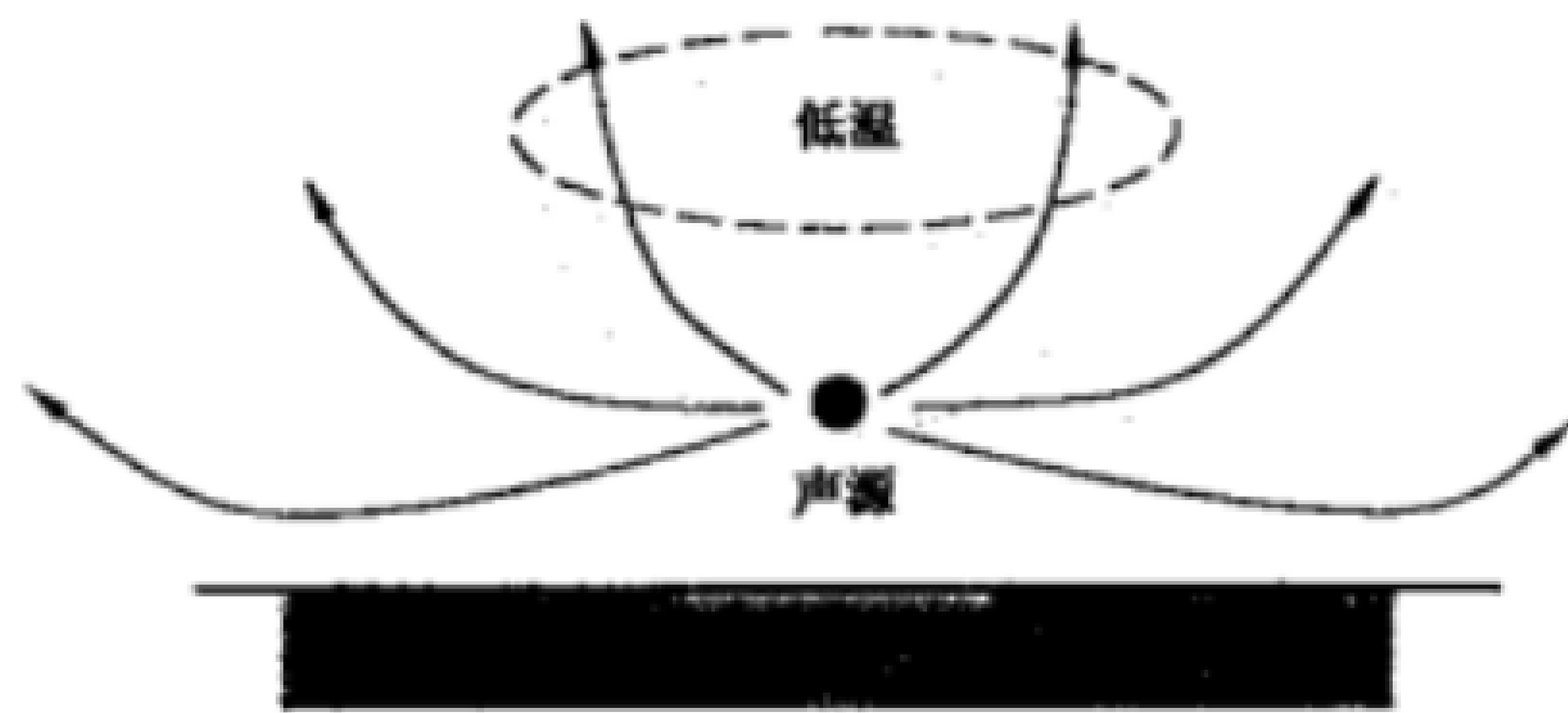


图4 近地面处(热地表)声波传播较快

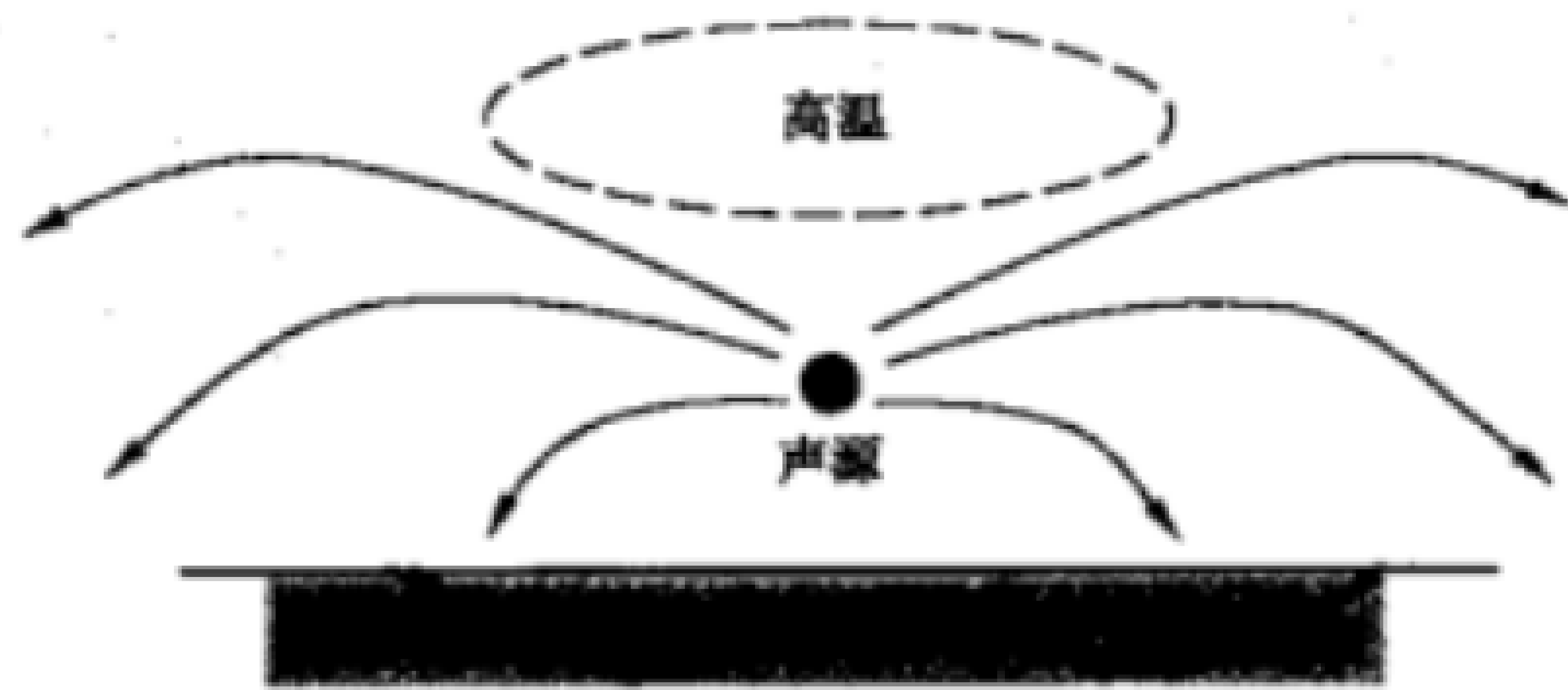


图5 近地面处(冷地表)声波传播较慢

4.4.3 大气条件的影响(温度、湿度和压力)

因为空气会吸收声波的能量,所以声波通过空气传播时强度会衰减。衰减量主要与空气介质的黏滞性和氧分子(O₂)、氮分子(N₂)的弛度有关。总的来说,声波频率较低时衰减量很小,可忽略不计;但频率较高时这种衰减就会变得很大(见9.3.1.2)。

4.4.4 雨、雾和雪的影响

在雨天或雾天,声波有时会被传送得更远一些。主要原因不是雨或雾的声学特性,而是伴随这种天气产生的风梯度和温度梯度对声波传播的影响(见图4和图5)。试验数据表明,雨和雾引起的声波衰减相对较小。

另一方面,新下的雪覆盖的地面对声波有很高的吸收率,引起的声波衰减量较大。

在雨天由于雨滴声的存在,会使背景噪声级增加。

4.4.5 示例及典型数据

气象条件对声波的影响及典型数据如下:

- 逆风时测量的声级比没有风时测量的声级低 20 dB(A);
- 即使温度梯度很大,低风速或中等风速对声波传播的影响还是大于温度梯度对此的影响;
- 当风速超过 3 m/s~4 m/s 时,很难准确测量低于 40 dB(A)的噪声级。如果使用了挡风装置,上述风速限值会有所增加,但通常增加值也仅有几米每秒;
- 低频声波在大地干燥与潮湿时有很大差别(如 63 Hz 音在大地潮湿时的声级比干燥时小 10 dB(A))。

总之,每天的气象状况都会不同,不同的地理位置气象状况也会不同,因此考虑气象条件对声波传播的影响是很有必要的。

5 噪声级限值

5.1 概述

由政府或权力机构制定的规章中规定了多种用地类型下的最大允许噪声级,其中还包括了用于验证声级的测量方法。噪声级也有不同的频率计权,如 A 计权和 C 计权,见 3.3。

5.2 噪声级限值表示方法

通常,噪声级限值与用地类型有关,与距噪声源(如高压直流换流站)的距离无关。但是有些情况下,为了更符合业主和当地规划机构的验收程序,规章中也会给出与距离有关的噪声级限值。就另一方面而言,规定更多的限制条件以适应不同的运行状态也是有必要的。

现有的地方规章中,表示噪声级限值的主要方法有:

- 不同用地类型的最大允许 A 计权声压级,包括背景噪声在内;
- 在背景噪声基础上的最大允许增加量;
- 也可结合 A 计权和 C 计权表示噪声级限值,例如规定 C 计权总声级比 A 计权总声级小 15 dB(A)。

一些规章中没有规定整个区域的声级限值,而仅给出了特殊边界上的限值。第一种方法适合低背景噪声级区域,第二种方法更适合高背景噪声级区域。

5.3 噪声测量

正确完成噪声测量应充分考虑下列因素:

- 具有代表性的单点测量的数量和测量时间;
- 所使用的测量设备;
- 障碍物和传声器间的允许距离;
- 气象条件,例如,风向和最大允许风速。

除以上因素外,还应明确测量准确度,即测量的不确定度,例如表示为 (45 ± 3) dB(A)。

测量方法的详细描述见 10.3。

5.4 用地类型

人类的大部分活动都会发出声音,这些声音可能会影响周围环境中人们的谈话和休息,因此,应有法律或规章来规定可接受的噪声级。

如果声波在声源处被抑制,则不会存在噪声问题,但造价可能会与收益在很大程度上不成比例。同时,有些情况下声波很难在声源处抑制,如移动声源(飞机)等。

因此需要对用地进行分类,如果有可能,应把噪声源集中在远离居住区和商业区的地区。拟建高压直流换流站的站址及其周围地区当前可能正用于其他用途,如工厂、商业、农场或公用地,每一个区域的

噪声级限值通常是由当地的法规和规章决定的,同时也是基于不同的用地种类上确定的。

当高压直流换流站的位置选定时,为了使建设时或以后不会产生噪声问题,有必要提前调查用地情况和相关规章,特别是在居住区,应了解换流站未来相邻对象的生活和要求。同时也应认识到,现有的背景噪声级可能恰恰就是来自于当前的用地规章的限值。

5.5 要求限制噪声的区域

要求限制噪声的区域的划分方式有:

- 高压直流换流站的围墙处或征地红线处;
- 距高压直流换流站一定距离的给定边界线处,例如,在一个圆周界上或某地域边界线上;
- 附近的地域边界。

不同划分方式的优点和缺点如下:

- 在高压直流换流站围墙或征地红线处:

优点:

- 背景噪声的影响小;
- 测量受气象条件的影响小;
- 受周围地形和地面声场的影响小。

缺点:

- 选择的验证地点无法确定噪声危害对人的影响,不具有代表性;
- 对换流站的布置可能产生不必要的影响;
- 由于靠近换流站的噪声最大,使测量更复杂,耗费时间更多;
- 承包商可能不得不采取措施以降低噪声,工程造价会比较高。

- 在距离高压直流换流站一定距离的给定边界线处:

优点:

- 比靠近换流站围墙处预测噪声级更简单。原因是换流站可以被当作点声源。

缺点:

- 选择的测量地点无法确定噪声危害对人的影响,不具有代表性;
- 受到背景噪声、天气条件、地形和地表的影响。

- 在附近地域的边界处:

优点:

- 在真正存在危害的地方进行测量;
- 与户外可听噪声规章一致;
- 能很简单地预测噪声级。

缺点:

- 进行验证时,很难实现同一时间内所有测量条件都满足;
- 需要能靠近私人地域。

对环境噪声而言,因为噪声危害人们居住或工作,所以最后一种划分方式最好。当然,将来可能会在以前无人居住的地方建造房屋,当地的规划机构应对此进行规划。另外,住宅开发计划在选择位置和布局时应考虑周围环境的噪声,包括运行着的高压直流换流站。

5.6 噪声级限值与噪声持续时间关系

通常,来自高压直流换流站的噪声是连续的,但换流站某些设备会产生脉冲噪声,如断路器和隔离开关(见 6.6.1)。描述脉冲噪声的主要性能参数包括:

- 噪声级峰值;
- 持续时间;
- 在一天中的时段;

- 发生的频率；
- 规律性(每天相同的音调可能比变化的音调更有危害)；
- 单音；
- 噪声脉冲随时间的变化。

公式(26)提供了使用连续等效声级计算脉冲噪声的方法。许多规章中既规定了白天的噪声级限值,也规定了晚上的噪声级限值。

很多情况下,工作人员安全条例对脉冲噪声级限值的規定是最严格的。

5.7 典型的噪声级限值

在给出典型的噪声级限值之前,需要指出的是即使仅仅改变几个分贝,所要投入的费用也有可能是很可观的。

下面给出了两种描述噪声级限值的方法。

5.7.1 A 计权声压级

根据用地类型,户外声压级一般分为几个级别。下述为典型应用值(仅给出夜间值):

- 无工业噪声的工作场所: $<50 \text{ dB(A)} \sim 70 \text{ dB(A)}$;
- 居住区、教育场所和医院: $<40 \text{ dB(A)} \sim 55 \text{ dB(A)}$;
- 商业区: $<35 \text{ dB(A)} \sim 45 \text{ dB(A)}$ 。

如果存在一主控单音,限制会更严格。每个规章中都有对单音的定义,当有主控单音时,以上给出的声级数值可能会减小。

注:地方规章中的规定有可能不同,所以上述典型值表示为一定的范围。

5.7.2 在背景噪声基础上的最大允许增加量

因为在背景噪声级基础上的最大允许增加量的变化范围较大,所以很难给出一个确切数值作为示例,但是在此可给出背景噪声级的允许增加范围为 $0 \text{ dB(A)} \sim 7 \text{ dB(A)}$,该范围通常为背景噪声敏感区域的临界值。通常,如果存在单音,所允许的增加量会减少。

6 发声源

6.1 概述

为了限制由高压直流换流站辐射到其周围区域的噪声级,应对换流站的_{可听噪声}提出要求。但是当所有设备在换流站现场安装后,几乎就不可能再准确确定单台设备的噪声级了,所以应把整个高压直流换流站_{可听噪声级}的要求分解到对各相关设备的要求上,并在设备制造厂的实验室确认各设备的_{可听噪声级}。因此,为了满足噪声级限值,必须了解每一个发声设备的声学特性和噪声强度。

本章介绍了高压直流换流站的主要发声源,简单地讨论了每一个声源的声学特性并阐述了影响每个设备声功率的主要参数。其中主要的噪声源设备有:

- 换流变压器;
- 电抗器;
- 电容器;
- 冷却风扇。

其他噪声源设备包括:

- 开关装置;
- 同步调相机;
- 柴油发电机;
- 空调设备;

- 冷却泵；
- 换流阀；
- 电晕。

6.2 换流变压器

6.2.1 换流变压器中的噪声源

换流变压器是高压直流换流站单台设备中声功率最高的设备,所以是换流站的主要噪声源。

换流变压器中产生的噪声来源于:

- 铁芯(由磁致伸缩和结合处产生噪声);
- 绕组、箱壁和磁屏蔽中的电磁力;
- 变压器散热系统的风扇/泵。

换流变压器的风扇/泵严格意义上不属于变压器本体,由不同的制造商提供。

6.2.2 与交流变压器的比较

因为对交流变压器的发声结构有较深的了解,所以首先对此进行讨论。

过去,铁芯振动是交流变压器的主要噪声源,此时的噪声辐射主要取决于变压器的额定功率和铁芯的磁通密度,而不是负载。然而,随着铁芯设计技术的提高,如使用能减少磁致伸缩的高质量硅(锡)钢片以及铁芯连接技术的改进而降低了铁芯噪声,这就使得由电磁力产生的与负载有关的绕组噪声变得相对突出。

对于现代交流变压器,如果额定电压时的铁芯磁感应强度减小到大约 1.4 T 或更低,则绕组噪声的声功率就有可能与铁芯噪声的声功率相当,甚至更大。绕组噪声的声功率级可用公式(14)计算:

$$L_{WA,W} \approx 39 + 10 \lg(S_r/S_p) \dots\dots\dots (14)$$

式中:

- $L_{WA,W}$ ——额定电流、额定电压和额定频率下绕组的 A 计权声功率级,单位为分贝[dB(A)];
- S_r ——额定功率,单位为兆伏安(MVA);
- S_p ——基准功率,1 MVA。

变压器额定运行时,产生频率为 1 kHz 以下的噪声频谱。在负载电流为正弦时,绕组噪声包含两倍工频频率的噪声,而铁芯噪声频谱包含大量的 4 次到 10 次工频谐波,这取决于磁通密度水平。因此,交流变压器负载时的噪声主要为叠加了空载频谱的 100 Hz 音频(工频为 50 Hz)。

6.2.3 换流变压器的特有性能

通常,在高压直流换流变压器和交流变压器的额定功率相同时,换流变压器的声功率级比交流变压器大,这是由两个因素造成的:

- 高压直流换流变压器的负载电流的谐波含量较高;
- 高压直流换流变压器连接换流阀桥的绕组中有少量的直流偏磁电流。

上述因素使换流变压器的声功率级比正常交流运行时增加 10 dB(A)以上。

换流变压器的声频谱包含高达几千赫兹的频率,因此更易被人类听到(使用 A 计权声级表示,见

3.3)。当换流变压器的主频率大于 300 Hz 时,使用外部降噪措施(例如屏蔽和吸收装置)会更有效果。

直流磁化产生的噪声不直接取决于负载水平,因为直流偏磁电流含量由下述几方面决定:

- 换流阀不对称触发,取决于阀触发控制系统的准确度;
- 换流变压器的阻抗差;
- 单极大地回线运行时,接地极和换流站接地的电位差。

变压器铁芯的直流磁化能增加 50 Hz 音频、奇次谐波音频和偶次谐波音频,所以即使是换流变压器的直流电流含量不多,变压器铁芯的直流磁化也会增加变压器的可听噪声。

通常,对于高压直流换流变压器,绕组是主要的可听噪声源,因此可听噪声级将会随着变压器负载的增加而增加。

在高压直流换流站中,通过声压测量法得到的换流变压器声功率级一般随着变压器负载的增加而增加。声功率级随负载的变化量与变压器额定功率几乎没有关系,空载时的声功率级和额定负载时的声功率级之间的差别从几分贝到二十几分贝均有可能。

另外,应考虑变压器冷却设备产生的声功率,尤其是对于采用低噪声设计的变压器。有关冷却风扇的声学特性见 6.5。

6.2.4 变压器绕组噪声

当电流通过变压器绕组时,带电绕组在杂散磁场中会产生电磁力,形成绕组振动,从而产生绕组噪声。绕组的电磁力与绕组的磁场强度和电流的乘积成正比,并与电流的平方成正比,如下所示:

$$F \propto B \times I \propto I^2 \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中:

F ——绕组电磁力,单位为牛(N);

B ——绕组中的磁场强度,单位为特(T);

I ——绕组电流,单位为安(A)。

绕组振动的振幅和速度与电磁力成正比,绕组噪声的声功率与振动速度的平方成正比,与负载电流的 4 次方成正比:

$$W \propto v^2 \propto (\omega \times x)^2 \propto F^2 \propto I^4 \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中:

W ——绕组噪声的声功率;

v ——振动速度;

ω —— $2\pi f$,声学角频率;

x ——振动幅度。

6.3 电抗器

6.3.1 高压直流电抗器的类型和结构

高压直流系统中的电抗器有以下几类:

- 滤波器电抗器:为交流/直流滤波器的组成部分,用于滤除交流侧和直流侧的谐波;
- 高压直流平波电抗器:与高压直流传输线和/或电缆串联,或接入背靠背直流回路的中间以减小直流侧谐波、抑制直流系统故障引起的电流升高和提高系统的动态稳定性;
- 电力线路载波器和无线电干扰滤波电抗器:用于高压直流换流站交流侧和/或直流侧,以减少线路中的高频噪声;
- 并联电抗器:主要用于配合交流滤波器提供感性无功补偿,尤其是在轻负载下为满足系统谐波要求而投入最小滤波器组时,需投入并联电抗器。

其中,应重点研究滤波器电抗器和高压直流平波电抗器的噪声对换流站总声级的影响。

除了特殊情况下需要采用油浸式平波电抗器(例如,在极端的污秽和气候状况的地方)之外,通常高压直流系统用电抗器均采用干式空芯电抗器(自调谐交流滤波器电抗器例外,它使用铁芯控制被直流磁化的磁路的导磁性实现滤波器调谐)。

对于油浸式电抗器,除了其另有铁芯间隙产生噪声之外,它与换流变压器的发声机理和采用的降噪措施相似,见 6.2。下面介绍基于干式空芯技术的电抗器设计和发声机理。干式空芯电抗器的主要构造如图 6 所示:

电抗器绕组由单层或多层绕组组成,绕组层由绝缘铝导线制成并由树脂填充压缩。这些绕组层的

端部被焊接到支架上,使同心绕组层并联。顶部支架和底部支架通过几组玻璃丝结沿绕组上下夹紧固定。绕组被由圆周状布置的玻璃加强丝棒隔出放射形的间隔,从而形成可进行绕组自然对流冷却的垂直空气通道。

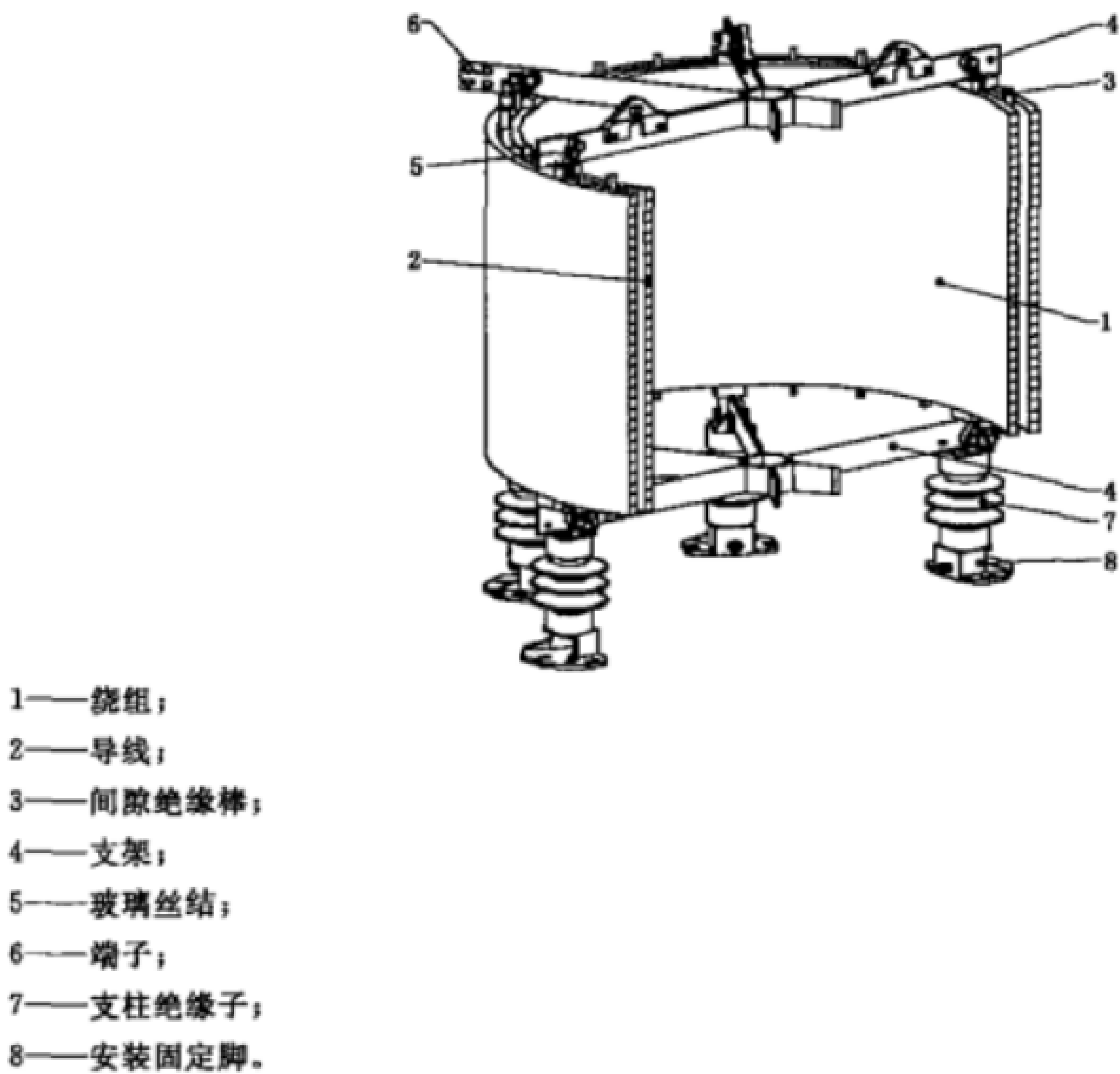


图 6 干式空芯电抗器

6.3.2 发声的机理

空芯电抗器绕组电流和磁场相互作用产生绕组振动,从而产生噪声。

如果是铁芯电抗器,作用于磁路的力会加剧设备振动。如果铁芯有气隙,则应考虑由气隙中的力导致的噪声。这些噪声通常比由磁致伸缩产生的噪声大。

任何通电导线放到磁场中都会受到力的作用,因此,通过绕组区域的磁场会产生绕组电磁力。图 7 示例说明额定功率为 30 Mvar 的空芯电抗器的磁场分布。

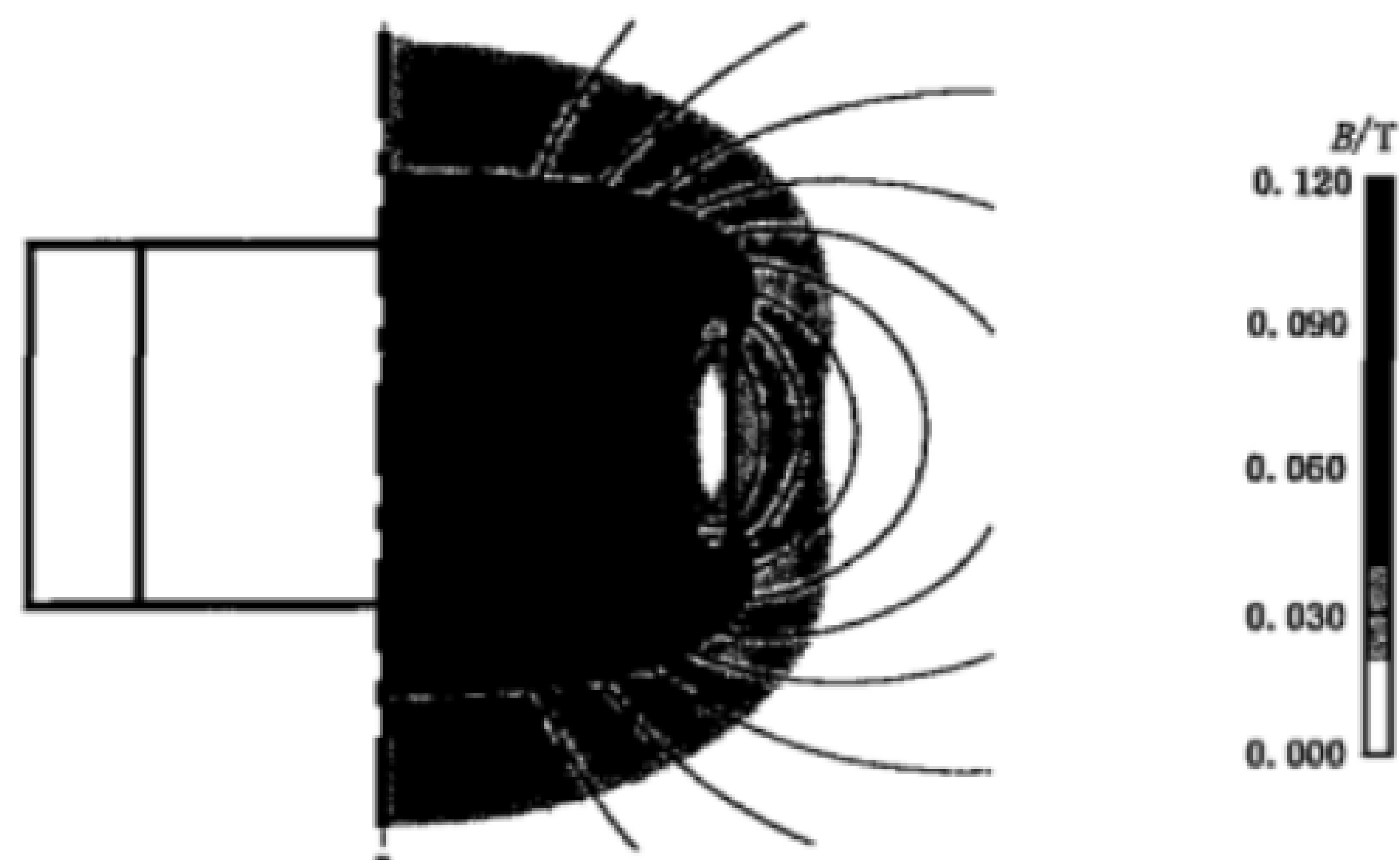


图 7 空芯电抗器绕组的磁场分布

6.2.4 中已经说明,绕组力与绕组的磁场强度和电流的乘积成正比,与电流的平方成正比。

计算绕组力时,力频谱与电频谱不同。如果是单频交流电流,力以两倍的电流频率振荡。然而,如果电抗器同时流过几种不同频率的电流,除了频率为两倍电流频率的振动模式外,还存在另外的振动模式。

绕组上的振动力引起电抗器轴向和径向振动。虽然振动力的大小可以确定,但对绕组结构的振动响应分析却很复杂。对任一机械结构,可按照“振动模式”描述电抗器的动态行为。因为振动力几乎是旋转对称的,所以希望只存在与振动力分布形状相同的对称模式结构。然而,因为存在同心绕组层间一定数量的气隙绝缘棒、固定在绕组端部的支架以及制造误差等因素,所以还存在其他非旋转对称的模式。圆柱体电抗器结构的基本振动模式有:

- 所谓的“呼吸模式”,此时电抗器绕组像一个圆柱形的压力容器。这种模式的频率基本上取决于绕组的材料参数,与绕组的直径成反比。呼吸模式的典型频率在几百赫兹到 1 kHz 之间。呼吸模式的形状是完全对称的,见图 8,并与由轴向磁场分量激励的分布电磁力一致。
- 轴向上的“压缩模式”,此时电抗器向着电抗器中心平面被轴向对称压缩。这种模式由径向电磁场分量激励。
- 绕组层的“弯曲模式”,以圆周向和轴向上的节点数表征。该模式的主要频率通常低于呼吸模式频率。尽管弯曲模式不是旋转对称,但它还是由电磁力激励的,见图 9。

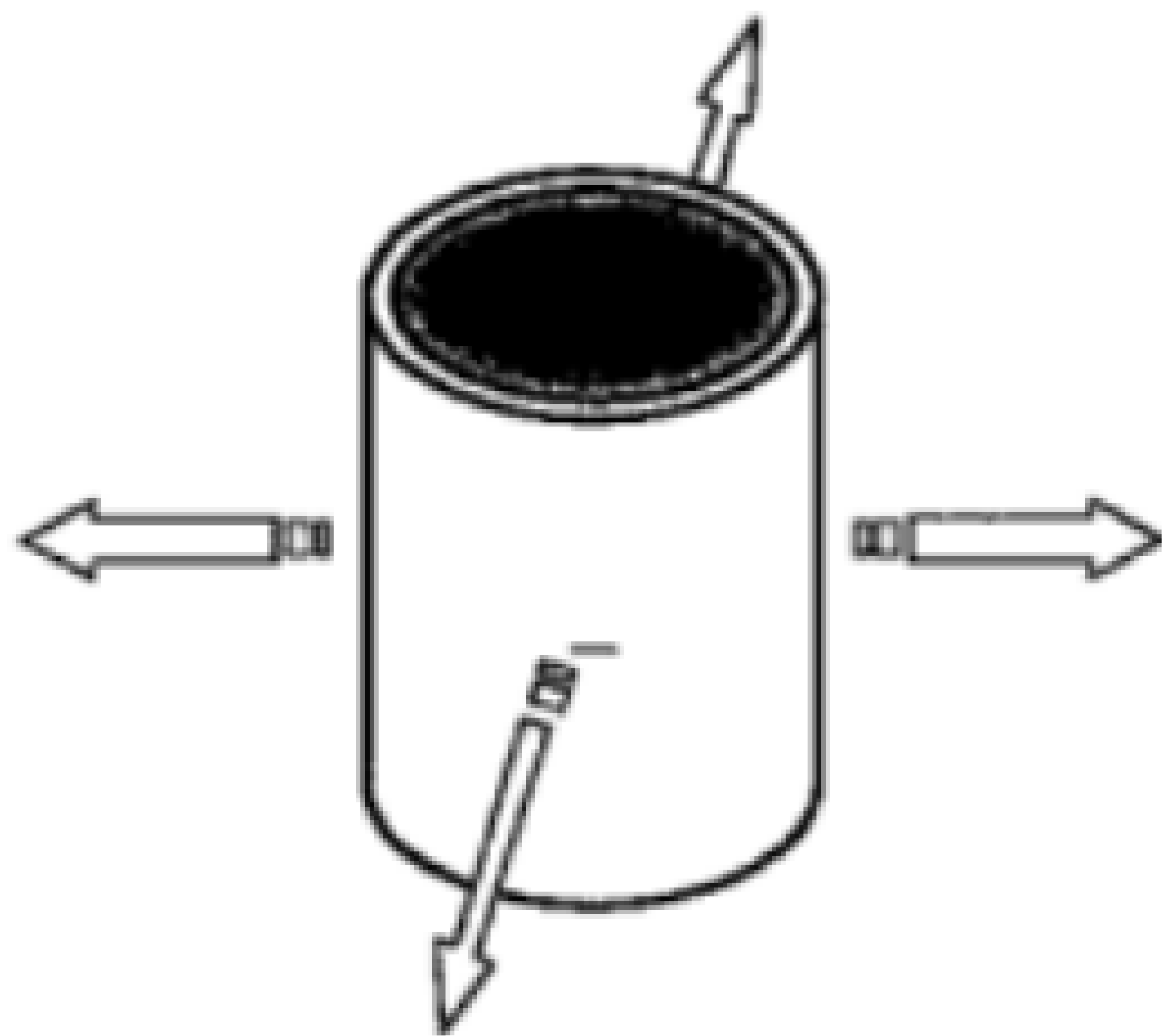


图 8 电抗器呼吸模式简化结构

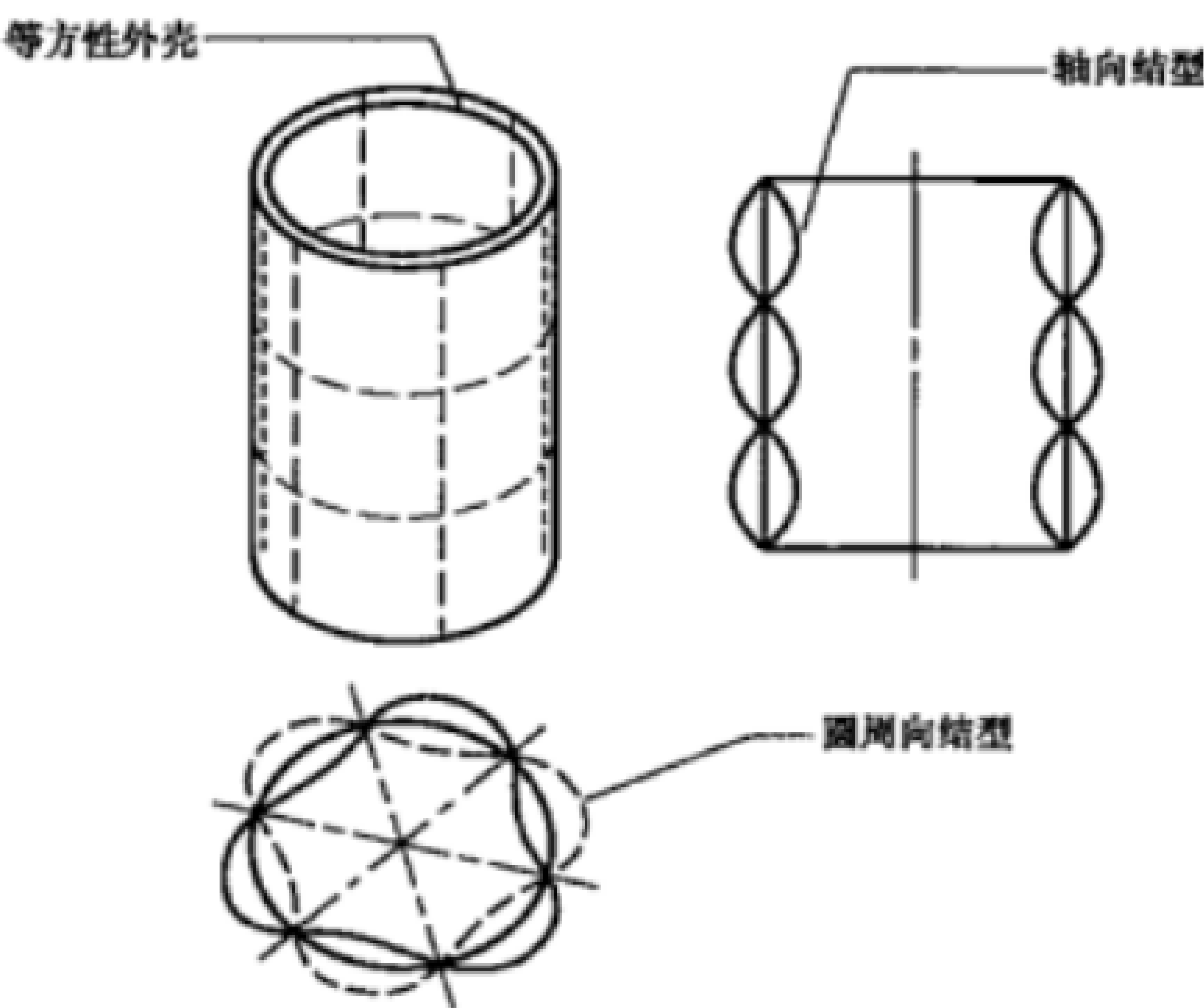


图 9 电抗器弯曲模式示例(绕组层无轴向约束)

电抗器表面的振动辐射到周围环境中,成为由空气传播的可听噪声。辐射的声功率可由式(17)、式(19)计算:

$$W = \rho_0 \times c \times A_w \times \sigma \times v^2 \dots\dots\dots (17)$$

其中,

$$v = \omega \times x \quad \dots\dots\dots (18)$$

则

$$W = \rho_0 \times c \times A_w \times \sigma \times \omega^2 \times x^2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

W ——辐射的声功率,单位为瓦(W);

ρ_0 ——空气密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

c ——声波在空气中的传播速度,单位为米每秒(m/s);

v ——振动速度,单位为米每秒(m/s);

A_w ——声辐射面面积,单位为平方米(m^2);

σ ——辐射效率;

ω —— $2\pi f$,声学角频率;

x ——振动幅度,单位为米(m)。

设备的振动幅度和声辐射面的大小基本决定了辐射声功率的大小,因为干式空芯电抗器的绕组是声辐射面的主要部分,所以其声辐射由绕组径向振动的幅度决定。轴向绕组振动和其他部件的振动对整个声辐射的作用相对较低。

为了避免振动的幅度加大,力频率(由电流频谱决定)不应与设备固有谐振频率相同。

电抗器的声功率与负荷电流的4次方成正比(见6.2.4)。为了获得准确的计算结果,有必要明确换流站的运行状态。满足电抗器声学要求的电流额定值可以不同于满足热应力要求的电流额定值。

辐射效率 σ 由设备的频率、几何特性和结构特性决定。例如,假定一个面以一定频率振动,在周围介质(如空气)中振动波长明显大于声学波长,此时空气不能被横向释放以消除压力差,空气微粒的速度等于这个面上空气微粒的速度,甚至超出最靠近这个面处的外部空间中空气微粒的速度,此时 $\sigma=1$,反之则 $\sigma<1$ 。振动波长与空气波长相同时, σ 可以大于1。见10.2.3。

因为声功率随着负载电流4次方的增加而增加,所以可以直接根据试验结果按比例计算。因为很难在试验室中达到实际运行电流,所以这一点在应用中是非常有用的。如公式(20)所示,可以使用在电流 I_1 时测量的声功率级 L_{w1} 计算出电流为 I_2 时的声功率级 L_{w2} :

$$L_{w2} = L_{w1} + 40 \lg(I_2/I_1) \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

L_{w1} ——电流为 I_1 时的声功率级,单位为分贝[dB(A)];

L_{w2} ——电流为 I_2 时的声功率级,单位为分贝[dB(A)]。

包括所有声频的总声功率级可由对数求和得到(见第3章)。电抗器的声频谱取决于它的负载电流频谱,因此在很大程度上也取决于电抗器的应用场所,详见6.3.3、6.3.4和6.3.5。

6.3.3 交流滤波器电抗器

图10是交流滤波器电抗器的简化电流频谱示例,假定电流由基频 f 和谐波次数为 n 的谐波组成。实际上,电流至少包含一种谐波成分。

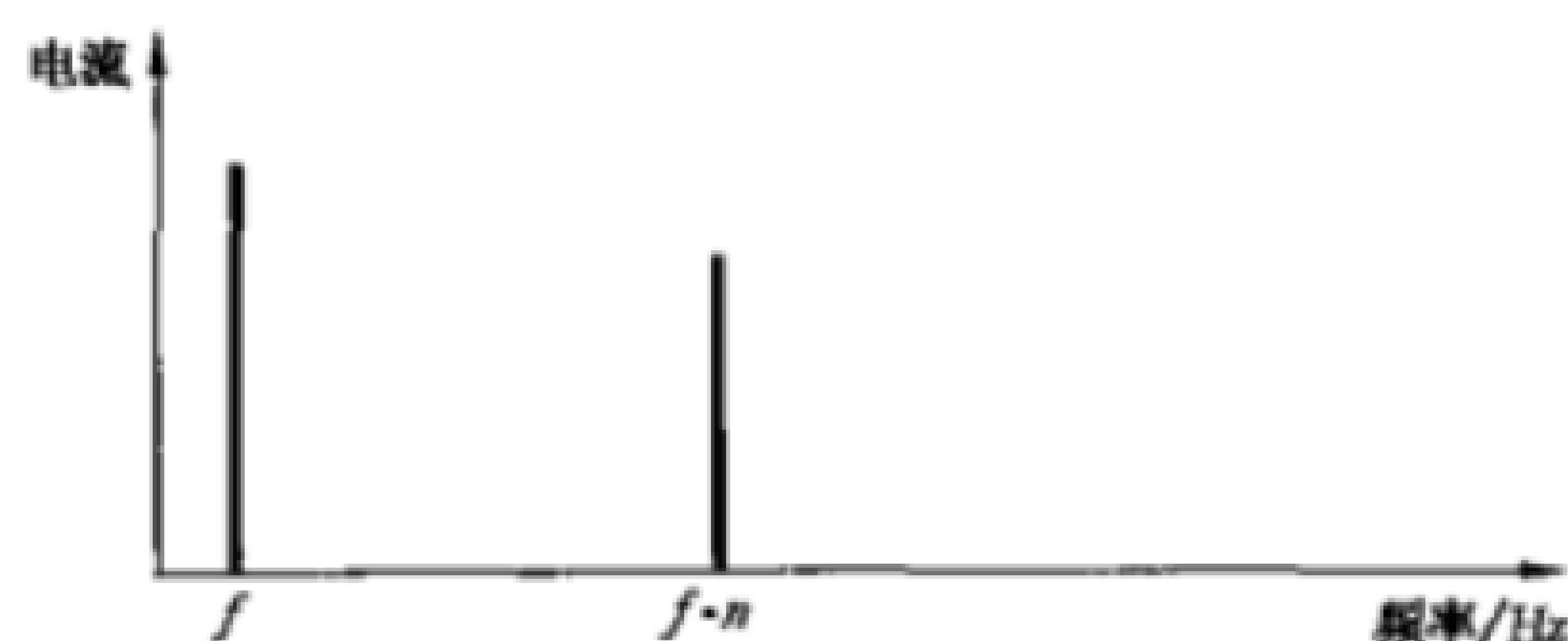


图10 交流滤波器电抗器的电流频谱示例

图 11 举例说明了交流滤波器电抗器绕组上力的组成。此力由一个静态预加负载和频率为 $2f$ 、 $f(n-1)$ 、 $f(n+1)$ 、 $2fn$ 的振动力组成。仅振动力产生噪声。静态预加负载不影响声功率。

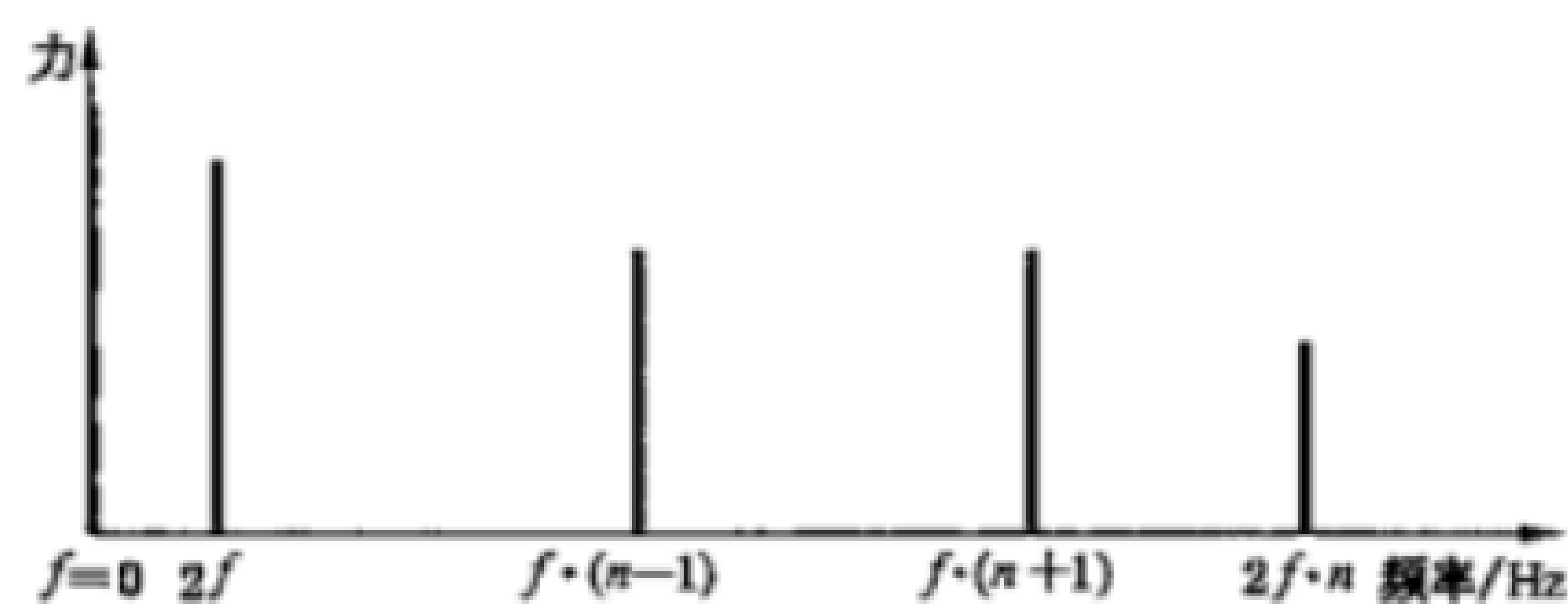


图 11 交流滤波器电抗器绕组的力频谱示例

在电流产生电磁力的过程中,频率发生了变化,力频谱中的频率数量($f=0$ 除外)等于电流频谱中的频率数量的平方。如果电抗器的电流频谱包括几种谐波,则声频谱中的分量也会显著增多。

与任何机械结构一样,具有分布质量和结构特性的电抗器有无数的固有谐振点。如果力频谱中的一种或几种频率与这些固有频率相同,则设备振动将会加剧,从而使设备噪声增加。所以在考虑滤波器电抗器的声学特性时,必须同时考虑基波电流和谐波电流这两者的影响。

6.3.4 高压直流平波电抗器

干式空芯平波电抗器绕组的噪声主要由绕组振动产生,而绕组振动则由直流电流和谐波电流引起。目前,换流站通常采用 12 脉波换流桥运行,直流侧的主要谐波是 12 次和 24 次,因此,当交流系统为 50 Hz 时,平波电抗器的主要噪声在 600 Hz 和 1200 Hz 谐波电流下产生。

图 12 是高压直流平波电抗器的简化电流频谱示例。假定电流由直流分量和谐波次数为 n 的谐波组成。实际上,电流至少包含一种谐波成分。

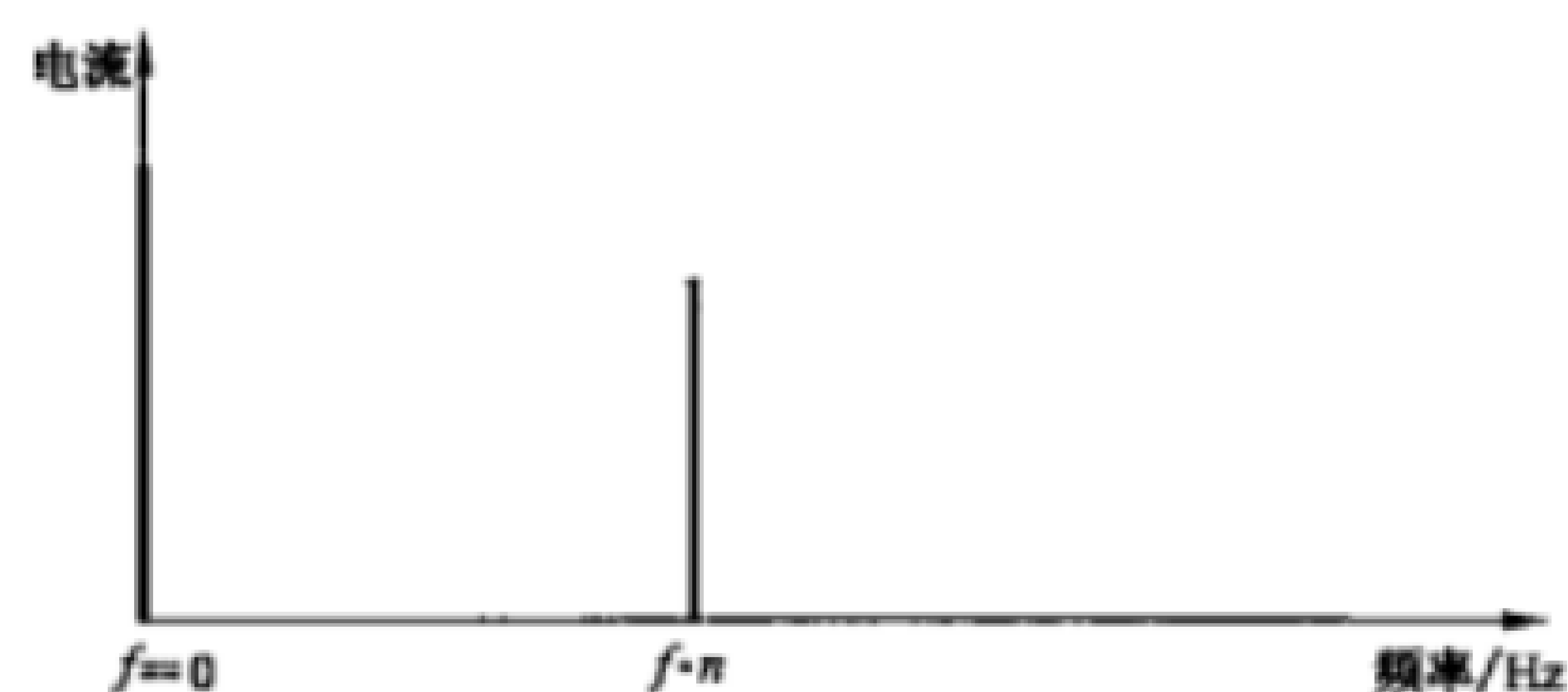


图 12 高压直流平波电抗器的电流频谱示例

图 13 举例说明了高压直流平波电抗器绕组上力的组成。这个力由一个静态预加负载(力频率 $f=0$)和频率为 fn 和 $2fn$ 的振动力组成。

静态预加负载(力频率 $f=0$)实际上不影响总噪声。

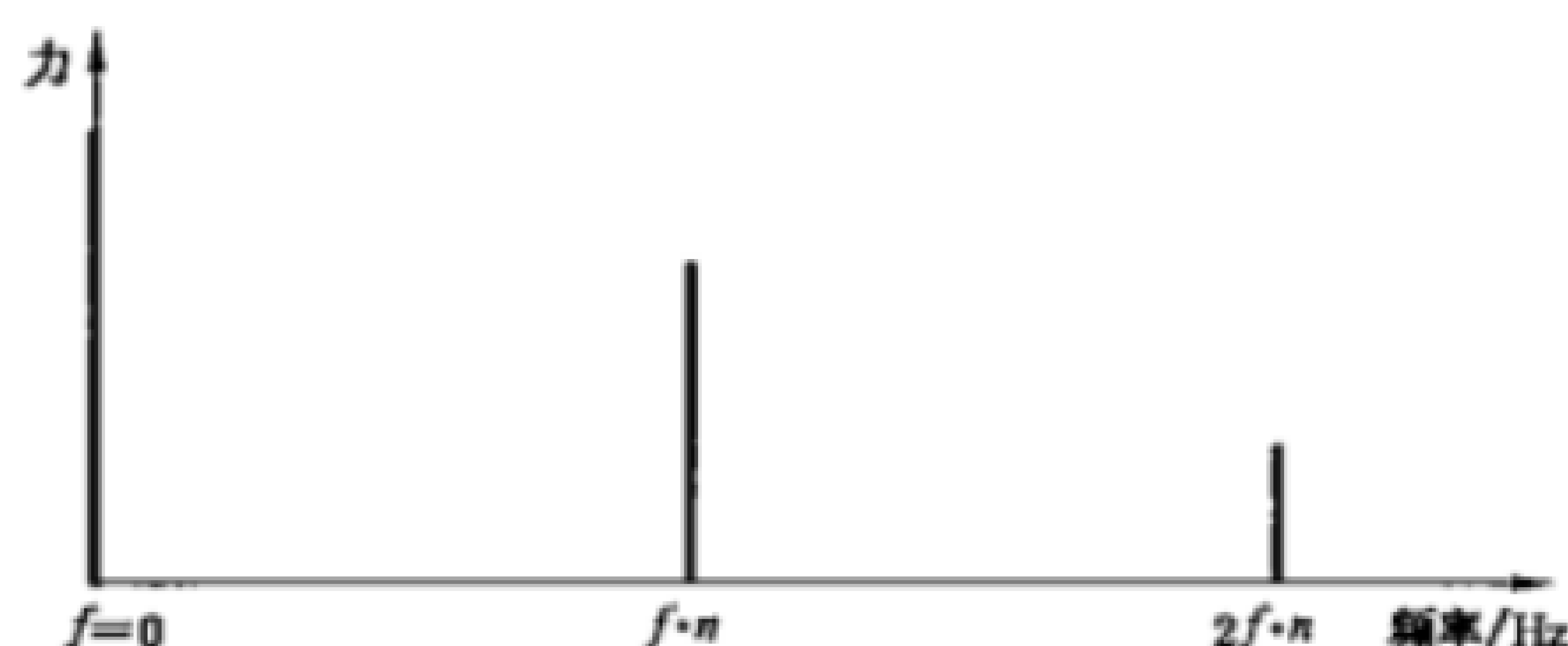


图 13 高压直流平波电抗器绕组的力频谱示例

6.3.5 自调谐滤波器电抗器

交流滤波器应有一定的频带宽度以防止滤波器失调,自调谐滤波器电抗器通过自调节以适应频率

的偏移,如图 14 所示。这种电抗器有一个带可控绕组的铁芯(励磁电流可调节),可控绕组中的直流电流变化影响铁芯的磁导率和电抗器的电感,交流电磁线绕在包围着铁芯的玻璃纤维圆桶上。电抗器外围设有隔声屏。

声测量表明,这种电抗器本质上与常规空芯电抗器性能一样。在某一交流频率下直流电流与交流电流共同作用产生如图 13 所示的振动力,其中直流电流的变化仅影响声波的大小(而不会使交流频率变化,如使其加倍)。频率为 0 时没有声辐射。

自调谐滤波器电抗器的声功率由玻璃纤维圆桶的径向振动决定,而不同于空芯电抗器,其声功率由(交流)绕组径向振动决定,如图 14 所示。

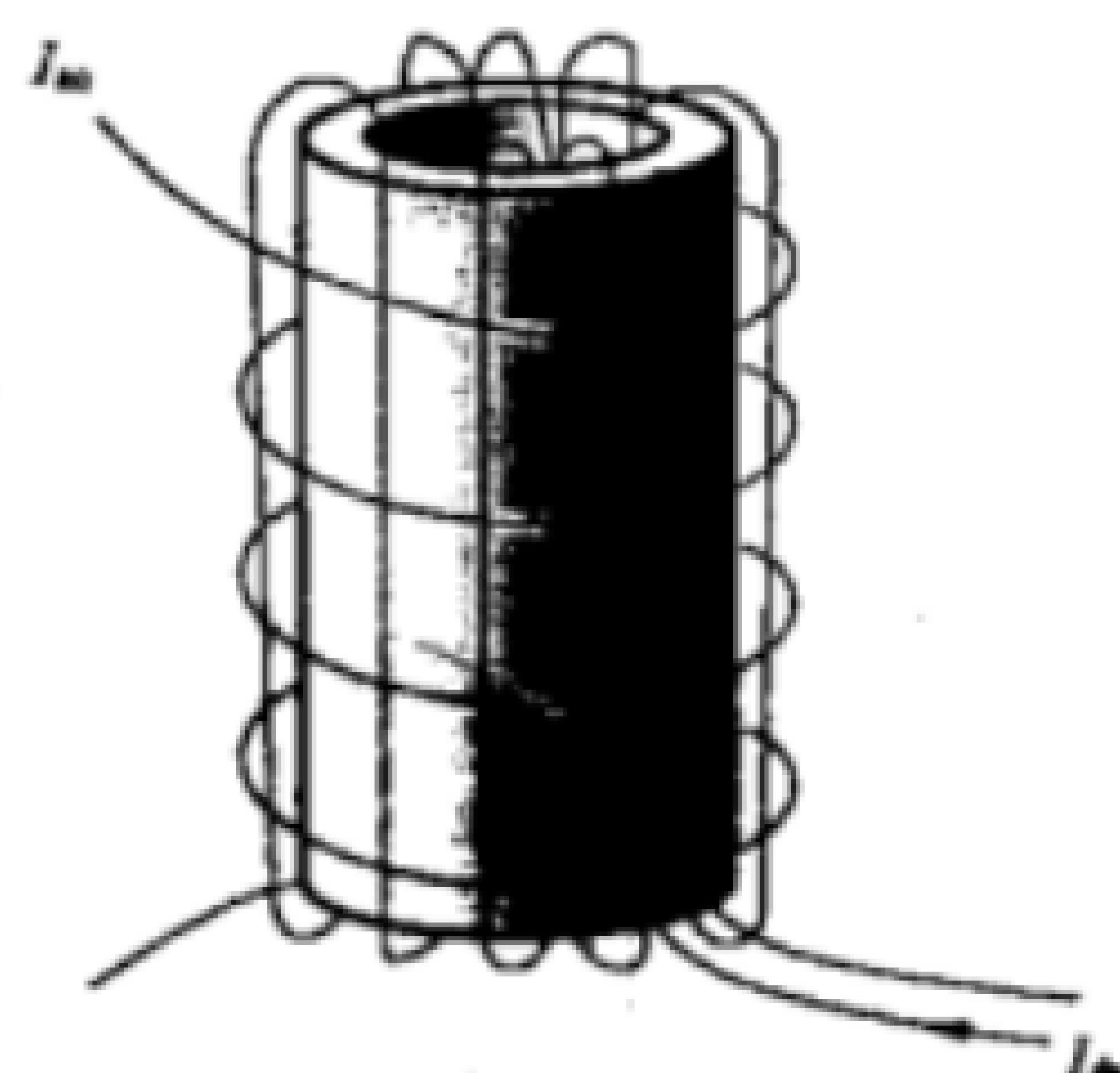


图 14 自调谐滤波器电抗器

6.4 电容器

6.4.1 电容器的类型与结构

除了换流变压器和电抗器,电容器也是高压直流换流站主要噪声源之一。电容器被广泛应用于高压直流系统中,如用于交/直流滤波器,无功功率补偿,电力载波滤波器(PLC)和电容式电压互感器(CVTs)等。

滤波器和无功功率补偿设备中的电容器是典型的壳式电力电容器;PLC 回路中的耦合电容器和电容式电压互感器(用于测量与保护)中的电容器使用瓷套式电容器。如果受现场空间的限制,或者因为环境污染和/或频繁地震等因素,可使用箱式电容器。

通常,需要限制壳式电容器噪声,因此下面主要针对壳式电容器描述电容器设计。

为了说明电容器的发声机理,首先对电容器的结构进行描述。电容器塔由许多单台电容器组成。单台电容器表面是钢外壳,配有套管。每一单台电容器内都充满了油,并且内含了一个由许多电容器元件串、并联组成的元件组,如图 15 所示。每个电容器元件由两层铝箔和数层一定长度的塑料薄膜和纸膜绕制而成。

瓷套式电容器元件和元件组的设计与壳式电容器元件和元件组的设计基本相同。因此下面关于发声机理的描述适用所有类型的电容器。

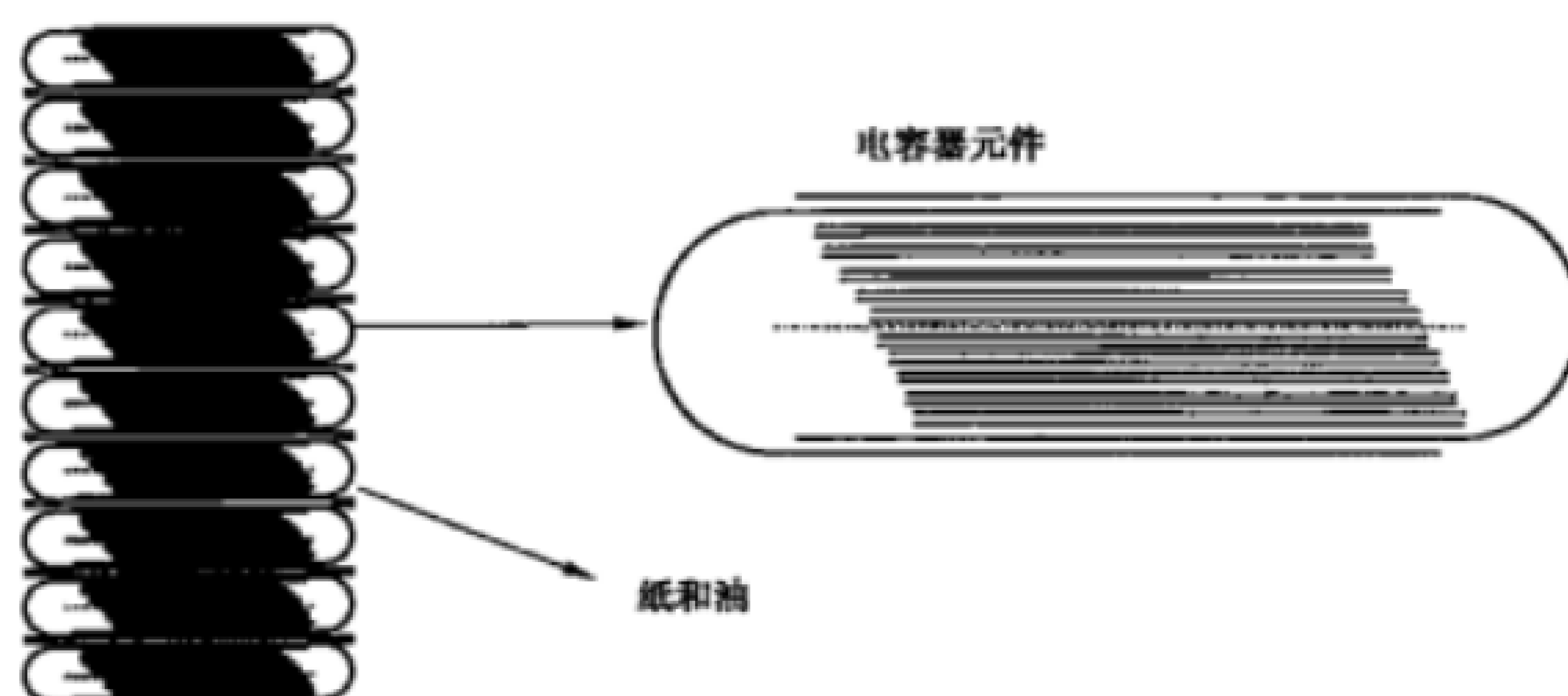


图 15 由电容器元件组成的电容器元件组

6.4.2 发声机理

如图 16 所示,因为电容器元件的每侧均有铝箔,所以带电电容器元件的大部分部位受力都是平衡的,受力不平衡的部位仅是电容器元件的边缘处(图 16 中的力 F_1)和中间(图 16 中的力 F_2)。由于电容器元件中间薄油层的强度是非常高的,尽管中间受力处上下力之间有小的偏移,但还是可互相抵消,所以电容器元件上的静力仅为边缘上的力。因此,电容器元件的大部分可听噪声是从其顶部和底部发出的。

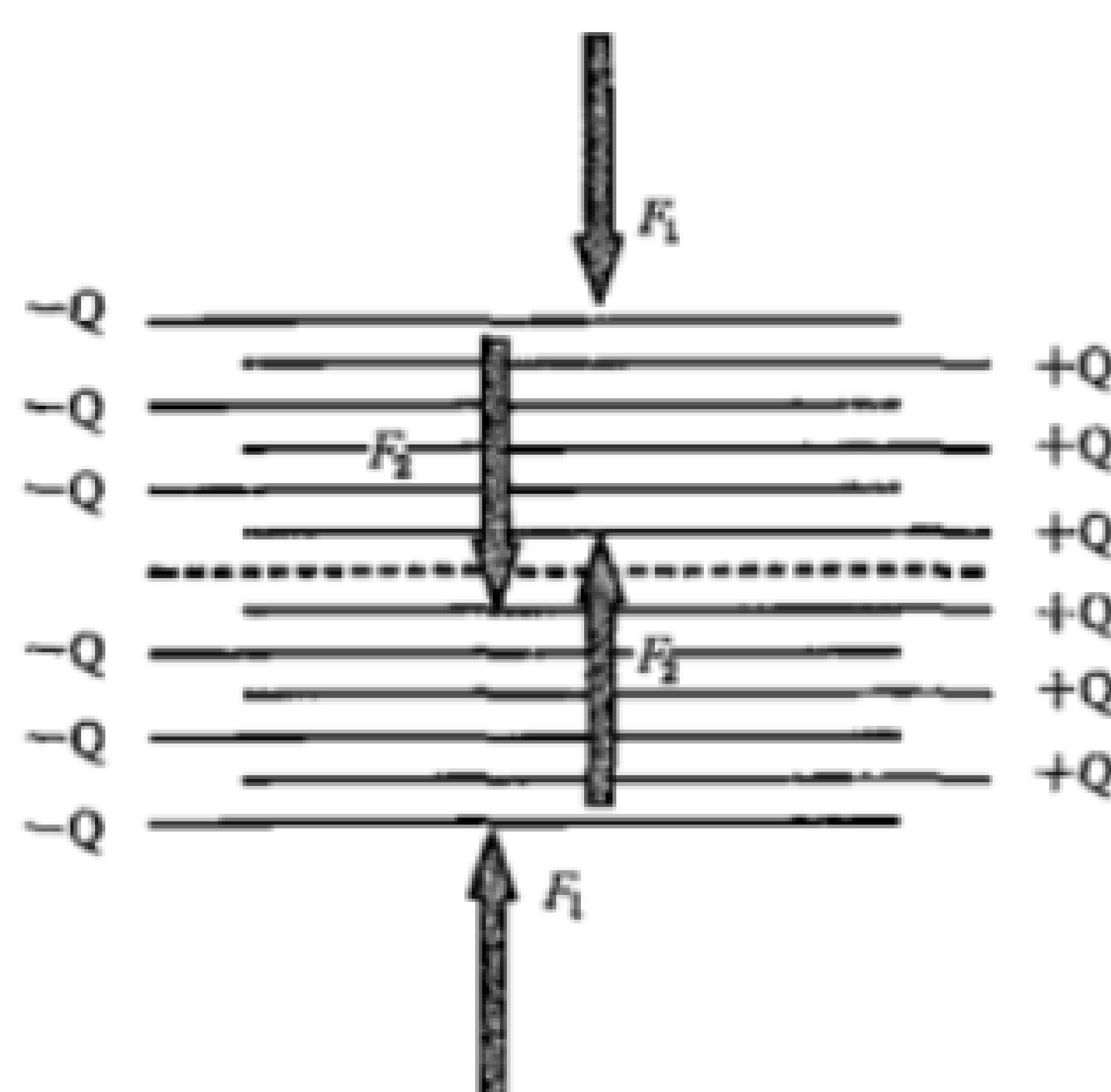


图 16 电容器元件的受力

电容器元件组的发声机理与电容器元件类似,它的机械响应由元件组中最初的轴向共振决定,为一维空间的声辐射,且声辐射主要被限制在与电容器元件组纵向垂直的平面上。

可通过电容器的能量对电容器极板间距离的微分计算(虚位移定理)电容器受力:

$$F = \frac{dW}{dx} \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:

W ——电容器中储存的能量,单位为瓦(W);

x ——电容器极板间的距离,单位为米(m)。

电容器中储存能量可以通过下式计算:

$$W = (U^2 \times C)/2 \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

U ——施加在电容器上的电压的方均根值,单位为伏(V);

C ——电容,单位为法(F)。

因此,电容器受力可表示如下:

$$F = - (U^2 \times C)/2x \quad \dots\dots\dots (23)$$

如果 U 为正弦电压,即:

$$U(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \quad \dots\dots\dots (24)$$

此时,电容器的受力由一个静态力和一个振荡(谐波)力组成。如果电压频谱包括几种谐波,声频谱的分量会明显增多。

图 17 举例说明了交流滤波器电容器的简化电压频谱,假定电压频谱由基频 f 和谐波次数为 n 的谐波构成。实际上,电压总是包含至少一种以上的谐波分量。

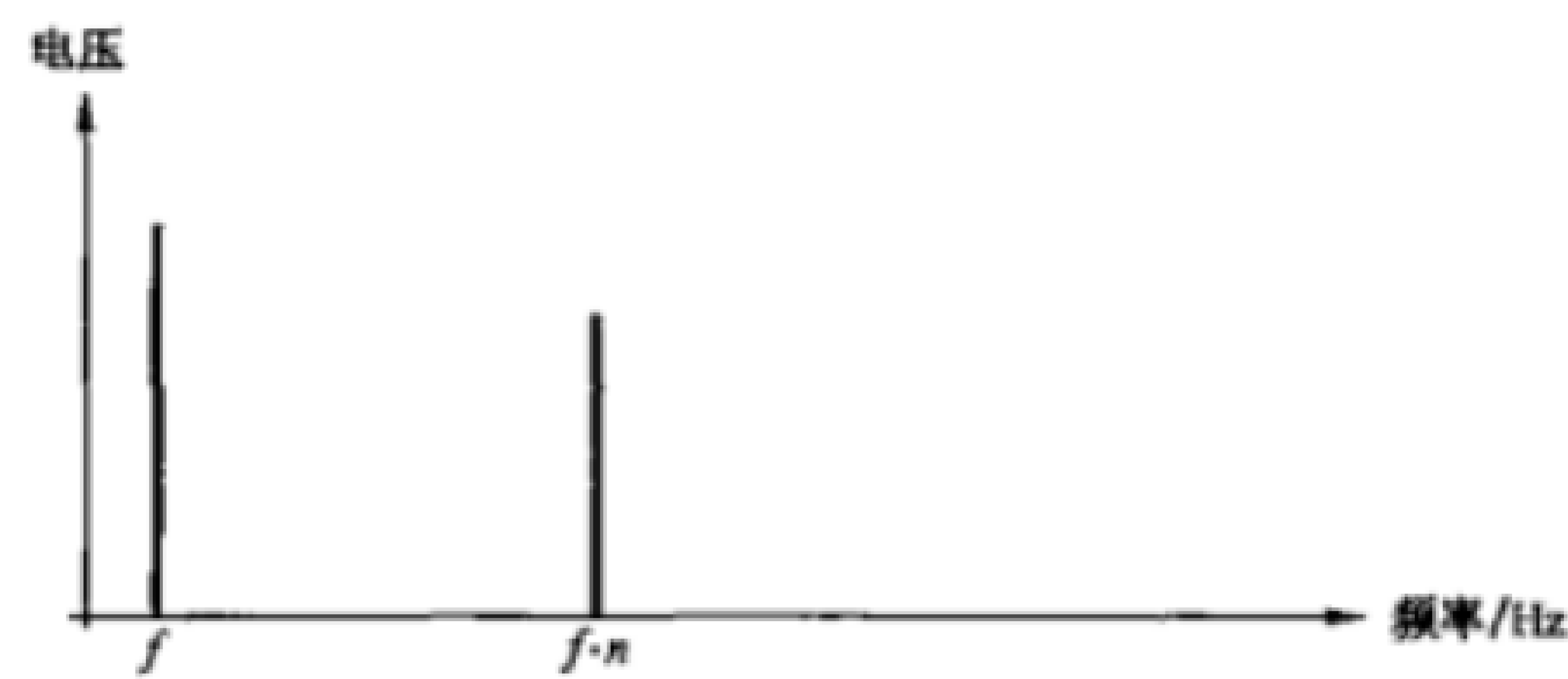


图 17 交流滤波器电容器的电压频谱示例

图 18 举例说明了交流滤波器电容器绕组上振动力的组成。这个力由频率为 $2f$ 、 $f(n-1)$ 、 $f(n+1)$ 和 $2fn$ 的力组成。

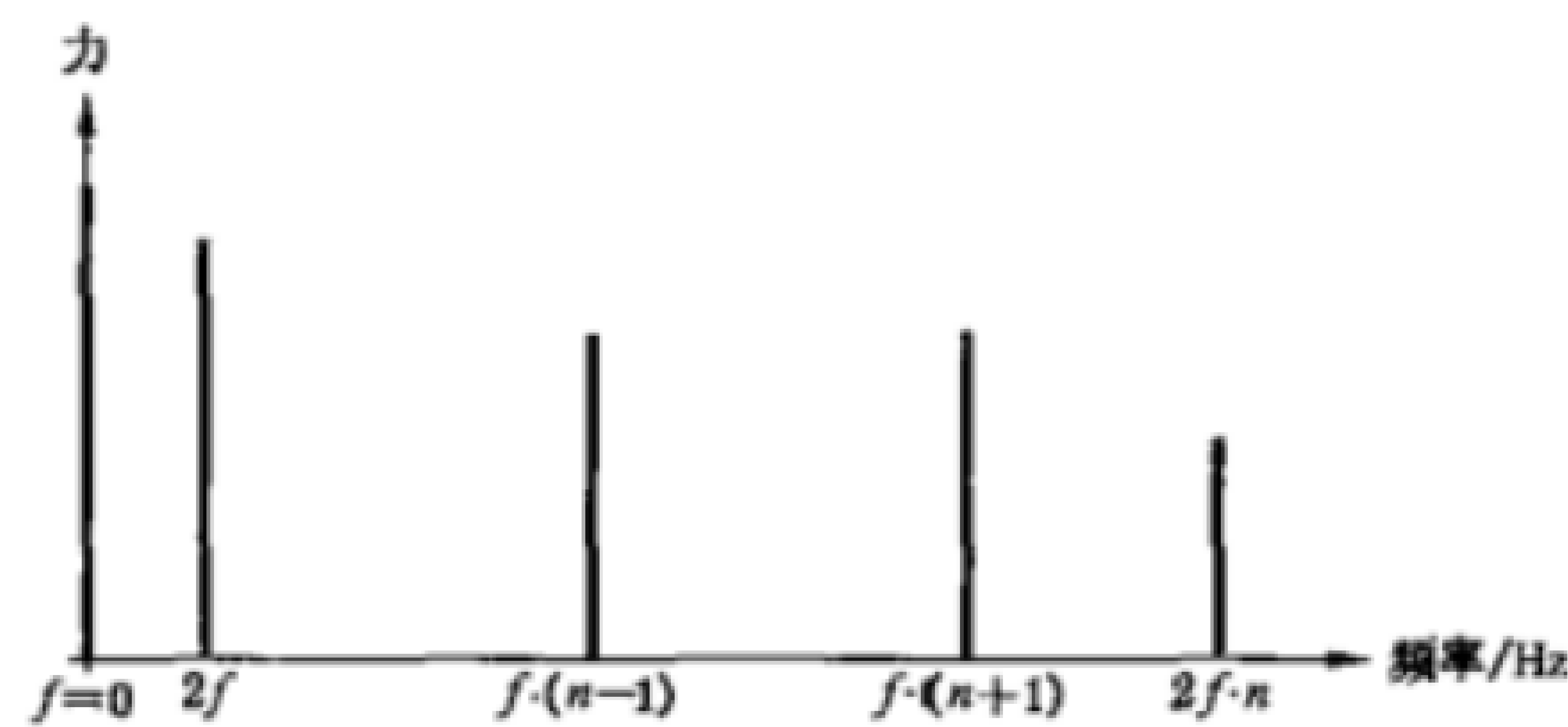


图 18 交流滤波器电容器的力频谱示例

如图 18 所示，在由电压产生力的过程中，频率发生了变化，力频谱中的频率数量（ $f=0$ 除外）等于电压频谱中的频率数量的平方。电容器元件组中的力最终会引起单台电容器钢外壳的振动，因此产生电容器可听噪声。

可使用 6.3 中的公式计算电容器噪声的声功率和声功率级，并且从计算中可知电容器噪声的声功率与电容器电压的 4 次方成正比。

为了确定整个电容器塔的声功率级，可将所有单台电容器的声功率级作为独立的声源相加，即：

$$L_{\text{W}}^{\text{stack}} = L_{\text{W}}^{\text{unit}} + 10\lg N \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中：

$L_{\text{W}}^{\text{stack}}$ ——整个电容器堆的声功率级，单位为分贝[dB(A)]；

$L_{\text{W}}^{\text{unit}}$ ——单台电容器的声功率级，单位为分贝[dB(A)]；

N ——电容器台数。

电容器塔的噪声主要由下列因素决定：

- 电容器工频电压和谐波电压；
- 电容器塔的机械强度；
- 机械固有频率(由电容器元件组，外壳和支架等决定)；
- 单台电容器数量；
- 单台电容器/电容器组所处的位置。

以上声功率和声功率级的计算公式仅考虑了单声频情况，对于包含多声频的总的声功率级可通过对数求和计算(见 3.9)。电容器的声频谱由加在电容器上的电压频谱决定。

6.5 冷却风扇

强迫通风冷却装置一般用于换流阀的冷却，由热交换器(包含冷却介质水/乙二醇、空气等)和轴流式风扇组成。通常每一组冷却组件配有几个风扇，风扇之间由隔板分开，每个风扇都能根据冷却的需要分别投切以逐步调节冷却装置容量。

应根据不同使用要求选择最佳容量的冷却装置、最佳风扇转速(一般从几百转每分钟到 1 000 r/min)和风扇数量,从而将噪声控制到最小。使用直径大且以低转速运行的低噪声轴流式风扇、具有双速电动机的风扇或变频调速风扇,均能减小风扇的噪声。应通过选用具有足够声学等级的标准组件,以优化冷却装置的降噪设计。

相对于没有隔声设计的换流变压器,冷却设备的噪声是可以忽略的;而相对于具有隔声设计的或低噪声的换流变压器,由冷却风扇产生的额外声功率就不能忽略。

额定功率大的变压器的冷却可采用单独的散热器箱,这种方式更利于变压器本体封装。

6.6 其他发声源

6.6.1 开关装置

与上述设备相比,开关装置如断路器和隔离开关仅在操作时(开关合、分动作)产生短时的可听噪声(即脉冲噪声)。这种可听噪声有可能远远高于背景噪声。断路器的合/分产生的单个声脉冲的持续时间一般不超过 1 s。

通常使用等效连续噪声级表示脉冲噪声。时间间隔为 T_i 的脉冲噪声的等效连续 A 计权声功率级可以通过计算 T_i 期间的 A 计权声功率级得到,见公式(26)。 T_i 没有可参考的值,选择的 T_i 值应能合理描述短时事件,例如,空气隔离开关或接地开关的 T_i 是 10 s,见 7.3.6。

$$L_{WAeq} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \sum T_i 10^{0.1 L_{WAeq, T_i}} \right] \dots\dots\dots (26)$$

式中:

L_{WAeq} ——时间间隔为 T 的等效连续 A 计权声功率级,单位为分贝[dB(A)];

T ——总的的时间间隔($T = \sum T_i$),单位为秒(s);

L_{WAeq, T_i} ——持续时间为 T_i 的等效连续 A 计权声功率级,单位为分贝[dB(A)];

T_i ——噪声的声功率级为 L_{WAeq} 的时长,单位为秒(s)。

根据不同的总的的时间间隔 T ,使用不同的 A 计权量计算脉冲噪声对环境的影响,如:

- 等效连续声级;
- 白天的平均声级;
- 夜间的平均声级;
- 白天和夜间的平均声级(叠加了夜间声级分贝值);
- 每小时的平均声级。

通常,除了滤波器组的断路器可能在一天中操作几次外,其他开关设备一年只操作几次,由此累积的噪声量相对低于连续噪声源产生的噪声,所以开关设备产生的噪声对高压直流换流站的总噪声级没有很大影响。但是,为了防止开关设备噪声对现场工作人员听力的损害,应规定开关设备在工作日期间累积的声级限值。一般,该限值取决于噪声持续的累积时间,由当地的安全规章规定。对于高频声波,通常规定较低的声级限值以提高对高频噪声的限制要求。

开关操作期间产生的脉冲噪声由开关类型(真空断路器和 SF₆ 断路器)及其操动机构(如弹簧机构,液压机构)决定。

隔离开关和接地开关操作时会产生长达 10 s 的噪声。

6.6.2 同步调相机

同步调相机被安装在建筑物里或一个预制的隔音和防风雨的箱体里,通常为连续运行。同步调相机噪声主要由冷却设备产生,因此,冷却风扇(见 6.5)的内容也适用于同步调相机。调相机的另一部分噪声来自于户内设备残余噪声,如励磁机、滑环/电刷和辅助变压器噪声等。

6.6.3 柴油发电机

通常,柴油发电机不会长期运行,且几乎都是安装在户内的。由于建筑物有排气口,所以柴油发电机运行时户外会听到噪声。但是因为柴油发电机仅偶尔运行,如在例行检查或紧急情况下使用,且例行

检查通常在工作日的白天进行,因此基本能避免在噪声敏感期出现柴油发电机噪声。

6.6.4 空调设备

空调设备的噪声大部分被限制在户内,但部分残余噪声(来源于气流、百叶片噪声及空调设备)还是会从通风口传出。关于空调装置中风扇产生的噪声,见 6.5 中相关内容。

6.6.5 冷却回路泵

如果冷却系统的泵安装在户外,则应限制其噪声。

6.6.6 换流阀

本标准仅讨论对高压直流换流站周围区域声功率级有影响的换流站设备,因为通常换流阀安装在户内,其噪声对换流站周围区域的声功率级没有明显的影响,所以本标准中不讨论换流阀的声学特性。

阀本体的噪声主要来自于阀的磁性组件如阀电抗器(阻尼电抗器)等元件,这些元件通常安装在户内。但是阀冷却设备通常安装在户外,所以阀冷却设备的风扇也就成为了一个主要的发声源,也需限制其噪声,相关内容见 6.5。

6.6.7 电晕

所有高压线路都会产生电晕。无论出于什么原因(满足噪声的要求、无线电干扰要求和限制闪络等),都应采取抑制措施(见 7.2.8)将电晕限制在较低的水平。

6.7 典型声功率级

表 1 中各设备的声功率级是在下列前提下给出:

- 各设备按标准要求设计;
- 在设计中尽量减小设备内部固有噪声,例如避免机械共振等;
- 未采用外部降噪措施,如声屏蔽、隔声罩等。

表 1 主要设备声功率级

发 声 源		声功率级 $L_{W(A)}/dB(A)$
高压直流换流变压器:		
额定负载		100~125
无负载		90~110
高压直流平波电抗器		85~100
自调谐滤波电抗器		90~100
交流滤波电抗器		70~90
交流滤波电容器组(壳式电容器)		60~105
冷却风扇(用于阀冷却的强迫通风冷却装置)		
风扇转速大约	300 r/min	大约 55/85
冷却容量	30 kW/300 kW	
风扇转速大约	900 r/min	大约 90/105
冷却容量	500 kW/1 300 kW	
开关设备		105~130(脉冲噪声)

7 降噪措施

7.1 概述

当预测的高压直流换流站设备噪声超过限值时,应当采取降噪措施。

降噪措施应在设备设计中就予以考虑,并与换流站的站设计相结合,从而使降噪措施有效且经济。常用的降噪措施是通过封闭或屏蔽把声波限制在允许的区域内。若设备安装之后,测量结果显示不能满足噪声限值要求,则还需进一步进行降噪处理。所以,最终有可能采用更多的封闭或屏蔽甚至有源降

噪技术(见 7.5.3)。

7.2 换流站布置

在换流站设计中应尽可能将产生噪声的设备和噪声敏感的区域分隔,合理布置主要的噪声源,尽量利用自然地形或换流站设备和其他建筑物的屏蔽效应来阻止声波向噪声敏感区传播。

有些噪声源,如泵和换流阀均是户内设备,应根据噪声对工作人员和参观人员的影响考虑。通常,这些设备传到户外的声级是无危害的。当需要在设备运行时进入户内检查时,可使用护耳器。

整个换流站降噪的有效措施:

- 在换流站周围建立围墙;
- 将换流站建在低凹地或合适的山谷里,山谷里最好没有陡峭的岩石。

7.2.1 变压器和油浸式电抗器

从换流站布置角度考虑,对变压器和油浸式电抗器采取的降噪措施有:

- 采用屏蔽罩(用于吸收声波能量,如使用特殊的吸声材料);
- 将声波定向向某个允许一定声波干扰等级的方向传播。

在某些情况下,可通过对换流站建筑和换流变压器甚至整个换流站定向,以避开周边的声敏感地区,使其不受变压器噪声的影响。

目前,高压直流换流站设计中换流变压器和油浸式电抗器通过穿墙套管与换流器连接,如果阀厅明显高于换流变压器或电抗器,则阀厅的墙壁就成为声波在该方向上传播的有效屏障。

变压器之间或变压器周围常会有防火墙,假如它们的高度与变压器/电抗器相比足够高,也会使声波有效衰减。在不完全屏蔽的地方,必须考虑不完全屏蔽可能会导致某个不受保护的方向上的噪声由于共振或反射而被加强。

7.2.2 空心电抗器

空心电抗器(特别是滤波电抗器)是主要的发声源。由于它需要空气流动进行冷却,所以很难像变压器一样被屏蔽。

从换流站布置的角度考虑,有两种降噪方法:

- 将其布置在远离噪声敏感区的地方。由于滤波器中有多台电抗器,所以可以进行优化布置;
- 将其安装在户内。

7.2.3 电容器

某些情况下,电容器可能会成为主要的噪声源。通过换流站布置实现电容器降噪的措施与空心电抗器相同。

另外,高压直流滤波器电容器塔体积庞大,噪声辐射复杂,并有一定的方向性,因此需在高压直流换流站布置时对其位置、方向以及屏蔽措施进行优化。

7.2.4 冷却风扇

从发声的角度看,冷却风扇与空心电抗器很相似。风扇的噪声有很强的方向性,所以可通过定向布置使风扇噪声向某个允许一定声波干扰等级的方向传播。

7.2.5 柴油发电机

柴油发电机的主要噪声是从排气口传出的(见 6.6.3)。在换流站布置中,采用与空心电抗器相同的降噪措施。

7.2.6 开关设备

与常规的变电站相同,通常开关设备在操作时产生的噪声是可以接受的。对特殊的噪声敏感区,可考虑把开关安装在户内。

7.2.7 空调设备

采用与冷却风扇相同的降噪措施。

7.2.8 电晕

降低电晕水平的方法有以下几种：

- 在设备电极结构及外形设计上应配置合适；
- 增加相间、母线间和设备间的净距；
- 应用电缆或气体绝缘母线。

7.2.9 同步调相机

同步调相机中最主要的噪声来自于冷却装置(见 6.6.2)，所以采用与冷却风扇相同的降噪措施。

7.3 设备的降噪设计

在第 6 章中已介绍了设备噪声产生的机理，本条主要介绍设备的降噪设计。

通常，在设备设计时应使设备的固有振动频率不同于主要的电磁频率，以尽量减小设备噪声辐射面的振幅，从而满足设备低噪声要求。

对多种设备均有效的一种降噪技术是使用弹性衬垫，将振动隔离(可以限制低频噪声的传播)以降低设备噪声。

7.3.1 变压器和油浸式电抗器

变压器和油浸式电抗器的降噪设计包括(但不限于)：

- 采用新型铁芯材料；
- 设备低磁通运行；
- 采用先进的铁芯连接技术；
- 避免临界机械共振；
- 在油箱内和安装时采用机械阻尼；
- 应用先进的绕组设计尽量减小阻抗公差；
- 进一步减小制造公差；
- 使用低噪声风扇(见 7.3.4)；
- 使用独立的冷却装置(见 6.5)。

7.3.2 空心电抗器

降低电抗器噪声的关键在于限制其绕组的振动，通常采用的降噪措施包括：

- 调整物理尺寸、隔板和机械支架，使振动频率偏离临界共振频率；
- 使用体积较大的导体(通过增加惯性降低振幅)，但是这是一种不经济的方法，例如当导体横截面面积增加一倍，绕组重量相应也增加一倍时，减小的噪声仅约为 6 dB(A)。

7.3.3 电容器

降低电容器噪声的关键在于降低单台电容器表面的振动，通常采用的降噪措施包括：

- 增加电容器元件的串联数量，减小电容器介质的应力以抑制振动；
- 增加机械阻尼，使电容器元件紧密堆叠在一起，从而增加电容器元件组的刚度；
- 考虑固有频率对噪声的影响。

7.3.4 冷却风扇

目前，低噪声风扇的设计技术已经成熟，而且很多技术对降低冷却风扇的噪声都是很有有效的，包括：

- 采用大直径低转速轴流风扇；
- 采用消音器和空气挡板。

换流变压器冷却可根据需要采用独立冷却设备。

7.3.5 泵和柴油发电机

尽管泵和柴油发电机正常运行时产生的噪声是有限的，但是如果不采取基本的防范措施，其噪声有

可能大幅增加并对周围事物产生危害。应确保电机旋转部分的对中正确,并应非常准确地操作。

7.3.6 开关设备

对具有特殊设计的断路器,几乎不需要采取任何措施去减小其操作噪声。

减小隔离开关和接地开关操作时产生的噪声的方法有:

- 在保证安全的前提下重新考虑这些开关的投切顺序;
- 如果可能的话,在白天操作开关。

7.3.7 空调设备

按照 7.3.4 进行空调设备中风扇的降噪设计。

7.3.8 高压连接处

如果电晕水平过高,通常使用具有更高电压等级的连接件、较粗的导线或导线束和防晕环以降低电晕水平。

7.4 声屏障

声屏障用于屏蔽和吸收声波,所屏蔽的噪声通常为高频噪声(300 Hz 以上)。换流站建筑物、隔板、封装外壳等均可作为声屏障使用。

声屏障应具有一定的高度,且被保护的区域必须处于屏障后的声屏蔽区内才能使屏障有效地发挥作用。可通过公式计算出该保护区的范围。

设计声屏障时应综合考虑多种因素,如可靠性、可利用率和价格。

7.4.1 变压器和油浸式电抗器

变压器和油浸式电抗器的隔声技术已很成熟。由于设备噪声频谱的主要频率均高于 300 Hz,所以隔板和吸声装置的作用非常明显。实际上,在很多工程中变压器和油浸式电抗器都被全部包围起来,并使用独立冷却设备,同时将独立冷却设备放置在隔声区之外,从而极大地简化了隔声设计。

全包围隔声技术最基本的形式是通过搭建砖墙或扩建防火/防爆围墙(不包含吸声材料)将变压器/电抗器完全包围。其降噪能力大部分取决于墙的结构和墙面打磨程度,同时还与变压器和围墙的体积有关。无顶部时最多可降噪 14 dB(A),有顶部时则可降噪 20 dB(A)~35 dB(A)。但是同时应注意,如果围墙设计不当,反而有可能使噪声加大。

还有一种方法可代替全包围隔声技术使用,即在围墙上加装吸声覆层,尤其是在原来就有的防火/防爆墙上。这种方法更适用于换流变压器隔声,因为换流变压器通常位于靠近阀厅的外墙处,如果在此不加装吸声材料会形成大量的噪声反射,影响隔声效果。

另外,在需要大幅度降低噪声的场所,则需采用内含吸声材料的围墙(有可能为双层材料)进行全包围。这种方式的降噪多达 40 dB(A)。

7.4.2 空心电抗器

因为空心电抗器需保证一定的通风以免电抗器过热,以及需满足设备电气净距的要求,所以对空心电抗器采用声屏障(即空心电抗器消声罩)使降噪变得相对复杂。

任一消声罩的设计必须和空心电抗器的设计相结合。消声罩有两种基本形式:房屋或安装在空心电抗器上的消声罩。用于降噪的房屋需满足散热要求,通常在屋顶装有风扇。这种消声效果与变压器围墙相同。采用这种方式时需保证不能产生任何环绕电抗器的磁链,否则空心电抗器会在磁场的影响下过热。

安装在空心电抗器上的消声罩是空心电抗器设计的一部分。这种消声罩的形式可以从简单到复杂,例如它可以是一个附加在空心电抗器外的简单外壳,也可以是具有独立支架结构和吸声材料的复杂玻璃纤维外壳,后者约可降噪 15 dB(A),但其造价有可能超过空心电抗器本身。另外,空心电抗器的电压水平有可能限制消声罩的使用,尤其是对于处于潮湿、污秽环境中的雷电冲击耐受水平较高的电抗器而言。

空心电抗器消声罩最大降噪的典型值为:

- 顶部和底部隔声板 5 dB(A);
- 加装外部圆筒式声罩 10 dB(A);
- 加装完整声罩 15 dB(A)。

7.4.3 电容器

可以通过包围电容器降低电容器噪声。但是,电容器组通常为分级绝缘的高压设备,所以包围时必须考虑最大净距要求或者分别包围各独立部分。包围油浸式电容器相对简单,可采取与换流变压器相同的方式完成。

全包围时可采用非吸声屏障(简单)或吸声屏障(材料结构复杂且价格昂贵),这取决于噪声要求和经济性的考虑。

对电容器塔的每一层分别设置声屏障至少降噪 10 dB(A)。采用全包围方式降噪能力将会更高。

7.5 改进技术

7.5.1 声屏障技术

对于在运行时发出的噪声超出预期值的设备,在服从换流站布置、满足散热要求和电气要求的前提下,应有可能在其周围建立噪声屏障。但是,其造价通常都比在换流站投运前建立的等效屏障的造价高很多,而且需要中断高压直流系统运行。

7.5.2 阻尼降噪

通常,对于因设备和地基或支架之间的相互作用产生噪声的场所可以通过增加额外的阻尼降噪。

这种方式包括改变支架结构或设备本体(如增加设备质量),例如在变压器梁上填装砂子等可抑制噪声传播。

7.5.3 有源降噪

有源噪声减振控制(ANVC)利用安装在声辐射面处的传声器或安装在发声设备附近的喇叭降噪。这一技术要求准确地建立各部分的研究模型,进行详细的噪声研究。

ANVC 主要用于降低低频噪声。目前用于电力变压器上的 ANVC 由两部分组成,一部分是直接安装在油罐上的振动调节器,另一部分是安装在油罐附近的声调节器。由安装在远场的声差传声器测量噪声声级,并给控制器提供输入信号。对于新型的变压器,可以使用近场传声器或装在油罐上的振动传感器,电子式控制器从传声器取得输入信号,并驱动调节器使多处的噪声减到最小。

如果安装正确,ANVC 消除低频噪声的效果比声屏障更好。但是,有源控制处理三维空间的噪声和振动问题比其处理一维空间的问题困难得多。通常,在小噪声源上实现 ANVC 要比在变压器油罐这类大噪声源上实现更简单、经济。

8 运行工况

8.1 概述

很多运行参数会影响到高压直流换流站的噪声,这些参数包括:

- 高压直流换流站运行参数,如:
 - 功率;
 - 功率输送方向;
 - 投运极;
 - 触发角;
 - 投运的滤波器/并联电容器/并联电抗器;
 - 冗余设备是否投入使用,如冷却装置。
- 交流网络参数,如:
 - 交流系统的电压和频率;
 - 背景谐波;

- 其他换流器和静止无功补偿装置(SVC)。
- 环境条件(见第 4 章),如:
- 一天中的时间;
 - 环境温度;
 - 风和其他气象因素;
 - 背景噪声源。

由于设备的负荷(如冷却设备和风扇的负荷)、换流器产生的谐波、投入运行的设备的数量(如投入的冷却设备数量和交流滤波器组数)等都与系统运行工况有关,所以可听噪声级也会受到运行工况的影响。

当功能规范书中提出噪声限值要求并要求确定噪声级时,了解运行工况如何影响噪声级是很重要的。

- 运行工况可分为:
- 正常运行工况;
 - 异常运行工况;
 - 验证噪声级时的运行工况。

8.2 正常运行工况

正常运行工况指可以长期实现或能规律性重复的工况,其运行数据如表 2 所示。

表 2 正常运行工况

功 率 范 围	从最小值到额定值
直流电压范围	额定值(对于远距离传输系统)
功率范围	从最小值到额定值
交流电压和频率	正常连续
滤波器配置	与输送功率有关
控制策略	正常
冗余	无冗余设备运行

8.3 异常运行工况

异常运行工况指在激活特殊控制功能时、暂时(短时)操作期间(如投切交流滤波器)或交流网络不正常时的运行工况。其运行数据如表 3 所示。

表 3 异常运行工况

功率范围	从最小值到最大可能值
直流电压范围	全运行范围(对于远距离传输系统)
交流电压和频率	正常连续
滤波器配置	与输送功率有关
控制策略	如:增大触发角和/或降低直流电压运行
冗余	所有冗余设备均投入运行(如换流阀冷却设备、换流变压器冷却设备)

如果要求在所有的运行工况下声级必须在指定范围内,建议分别给出正常运行工况下和异常运行工况下的声级限值。

8.4 验证噪声级时的运行工况

建议声级验证在正常运行工况或某个允许的工况下进行。由于换流站现场测量条件的限制,通常验证都是结合测量和计算完成的。测量是对在某一特殊运行工况下进行的计算的验证,包括计算中预测到的正常运行和异常运行的最苛刻工况。应在研究前列出以下工况(如果存在):

- 正常运行时的最苛刻工况；
- 异常运行时的最苛刻工况；
- 能完成噪声测量的典型工况。

9 声级预测

9.1 概述

在进行下述项目(包括但不限于)时,应进行高压直流换流站声级预测:

- 设计新站点;
- 扩建已有站点;
- 已有站点运行工况发生变化时;
- 对站点采取降噪措施;
- 更新或改变已有设备;
- 进行换流站预设评审时。

最终,计算预测完成后,可将其结果与测量点的声级限值进行比较。

高压直流换流站周围区域声级的预测,是针对站内设备发出的噪声而进行的。预测对象只包含从高压直流换流站发出的噪声,而不包含背景噪声。背景噪声级在一天中会随时段的不同而变化,它与气象条件、公路、铁路、飞机、非换流站设备的运行等因素有关。背景噪声并不影响高压直流换流站噪声,但它对声级的测量有很大影响。

换流站内或其周围区域声级预测值的准确度,取决于站内声源数据的准确性。另外,因为高大建筑及障碍物能阻挡或反射声波,所以进行声级预测计算时应视其为声屏障。同时,在计算时也应考虑换流站周围的地形对声波传播的影响。

9.2 换流站模型

建立换流站模型时,应选择主要的发声设备及其相应结构作为模型的输入数据。通常,站点建模由承包商在投标期间完成。实际上,换流站声级计算(尤其是多声源多频率的换流站)都是使用工程手段完成,如计算机程序(应为商业软件)。

通常,高压直流换流站主要由交/直流滤波器、换流变压器、平波电抗器、换流阀和冷却设备等组成,换流站建筑物包括配电室和阀厅。用于声级预测计算的模型应包含换流站内主要发声源和建筑物,同时应考虑换流站的布置和声波传播路径。

9.2.1 换流站布置

在换流站模型中,换流站布置确定了站内所有设备的位置和朝向,同时建筑物和换流站区域范围也包括在模型中。此外,地表也按照实际地表类型模拟,如沥青公路、沙砾或种草地等(见 9.3.1.5),并会因此影响声波的反射和传播。

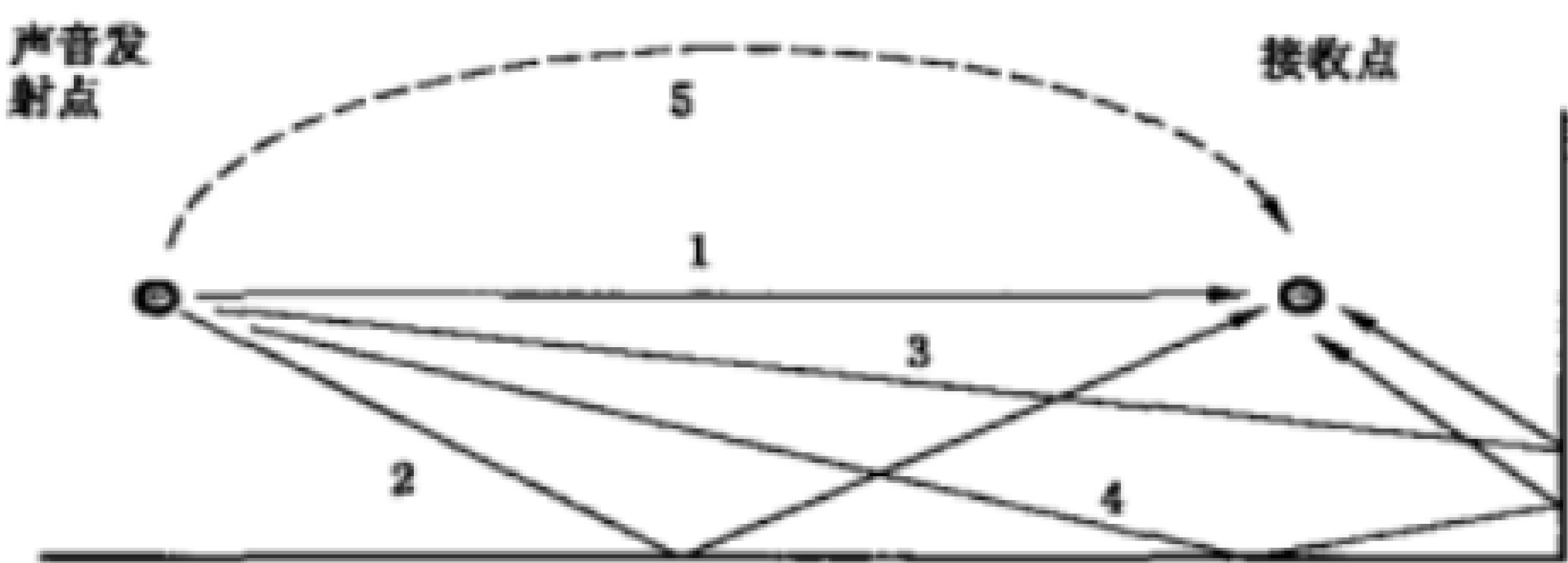
9.2.2 发声源

在换流站模型中,使用等效的单极子声源表示实际声源。单极子是一种信号源模型,它的所有声粒子做同相运动。模型中的声源有下列特性参数:

- 声功率;
- 声频率;
- 声辐射指向性模式。

9.2.3 传输路径

对每个能把声波发送到接收点的声源,分别计算经不同路径传输至接收点的各频段下的声压级,并将结果相加得到接收点的总声压级,见图 19。



- 1——直接从发射点至接收点的路径；
- 2——通过地面反射的路径；
- 3——通过障碍物反射路径；
- 4——通过地面和障碍物反射的路径；
- 5——受诸如大气层温度、风速和方向影响的路径，该路径太复杂以至于无法计算。

图 19 从声源至接收点传播路径的示例

9.3 计算过程

本条简要地描述声级计算的步骤和不同衰减条件对声波传播的影响。
通常，分别计算每个声源传至接收点的声压级可使计算更灵活，结果更准确。但在实际计算过程中，为了减少计算量，经常将多个声源合并计算。

- 式(27)~式(34)均适用于点声源计算。
- 当一组点声源具有以下特征时，可用一个位于声源组中心的等效点声源来描述(见图 20)：
- 组中各点声源具有相近的声功率级、频率特性、方向和距地面高度；
 - 组中各点声源传声至同一接收点的传播条件相同；
 - 等效点声源到接收点的距离超过组内各声源之间最大距离的 2 倍。

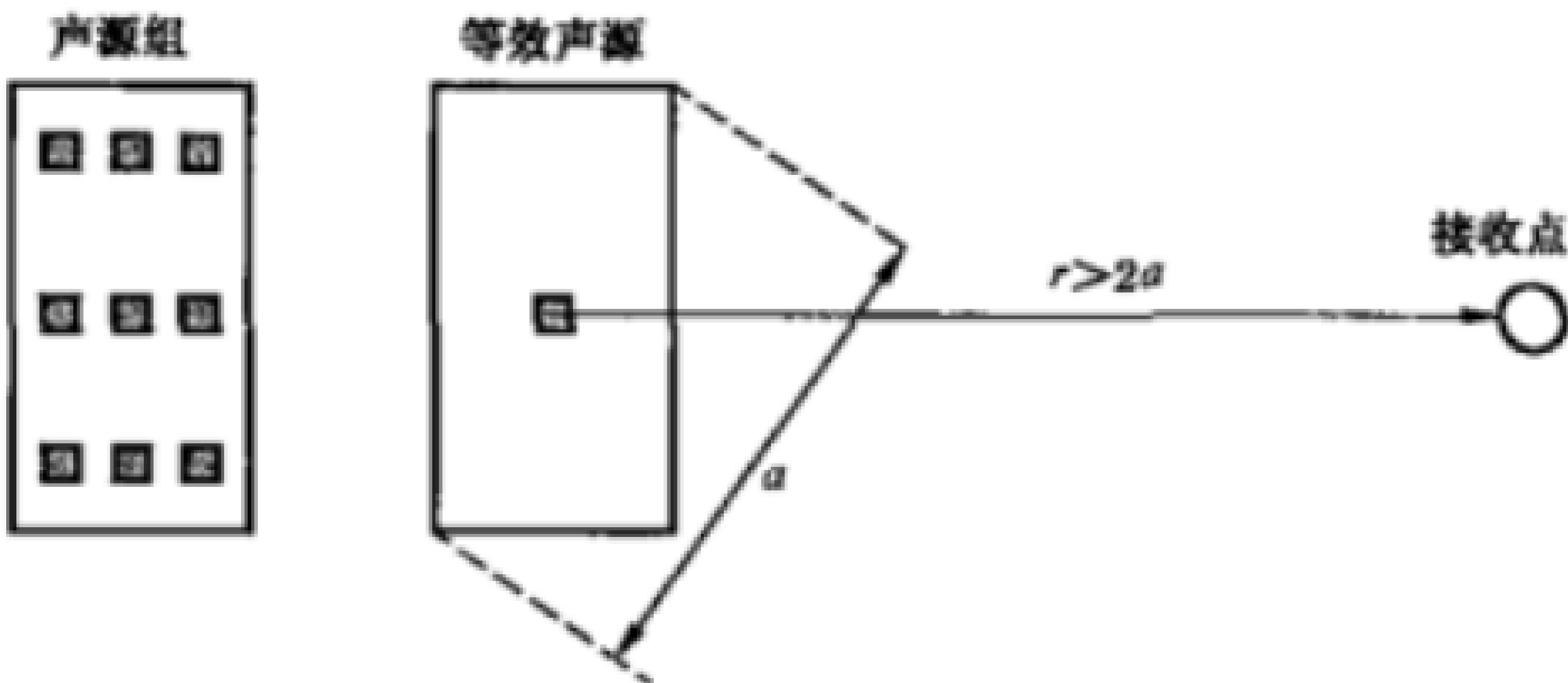


图 20 等效点声源示例

如果等效点声源至接收点的距离小于图 20 中所示，或者组内各点声源的传播条件不同(如有屏蔽)，则这组点声源必须被分成各个独立点声源进行计算。

对于每个点声源和每个具有中频带频率的倍频带(通常为 63 Hz~8 kHz)，应计算接收点处的平均声压级。计算过程可按下述三个步骤进行(不同计算程序的顺序可能不同)：

- a) 对于每个位于中频带的频率 f ，计算每个声源的声功率级，计算涉及该点路径 i 的指向性。

$$L_{wfi} = L_{wf} + D_i \dots\dots\dots (27)$$

式中：

D_i ——指向性指数，单位为分贝[dB(A)]，见 3.11。它描述了实际声源向不同方向辐射时相对无方向性的点声源的声辐射方向偏离的范围。

- b) 对每个声源(n)，考虑从声源到接收点的路径，计算位于接收点的频带 f 的声压级。

$$L_{pTOT}(N) = \sum_{n=1}^N L_{wfi,n} - A_{fi,n} \dots\dots\dots (28)$$

式中:

$A_{fi,n}$ ——声源 n 在向接收点传播过程中与频率相关的声波衰减;

N ——点声源总数。

衰减项 $A_{fi,n}$ 由下式给出:

$$A_{fi,n} = A_{div} + A_{atm} + A_{screen} + A_{reflect} + A_{ground} + A_{veg} \dots\dots\dots (29)$$

式中:

A_{div} ——几何离散造成的衰减;

A_{atm} ——大气吸收造成的衰减;

A_{screen} ——障碍物屏蔽造成的衰减;

$A_{reflect}$ ——障碍物反射和吸收造成的衰减;

A_{ground} ——由地面条件造成的衰减(地面上可能有植被,如草等);

A_{veg} ——通过植被传播造成的衰减。

c) 最后,各频带声压级的总和 L_{pTOT} 通过公式(30)计算:

$$L_{pTOT} = 10 \lg \sum_{f=1}^n 10^{L_{pTOT(n)}/10} \dots\dots\dots (30)$$

此处, n 表示频带数。

9.3.1 衰减项计算

9.3.1.1 几何离散造成的衰减

声源在自由场发出的声波在每个方向上是相等的(球形)。这个球体的表面积随着直径增大而增大。由于声源声功率不变,每单位面积上的声能会随着直径的增大而减小。

$$A_{div} = 10 \lg [4\pi(r/r_0)^2] \dots\dots\dots (31)$$

式中:

r ——声源到接收点的距离,单位为米(m);

r_0 ——参考距离(或半径),以表面积为 1 m² 的球体为标准确定。

当 $r < 0.28$ m(导致 $A_{div} < 0$)时,认为 $A_{div} = 0$,此时如果没有其他衰减,声压级与声功率级相等,即 $L_p = L_w$ 。

9.3.1.2 大气吸收造成的衰减

大气吸收造成的声波衰减由公式(32)计算:

$$A_{atm} = (a_a \times d/1\,000) \dots\dots\dots (32)$$

式中:

a_a ——大气衰减系数(见表 4),单位为分贝每千米[dB(A)/km];

d ——声传输距离,单位为米(m)。

表 4 大气衰减系数示例

大气温度/ ℃	相对湿度/ %	额定倍频程中心频率/Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
		大气衰减系数/[dB(A)/km]							
-20	70	0.17	0.51	1.73	5.29	11.5	16.6	20.2	27.8
-10	70	0.15	0.33	0.83	2.65	9.19	27.8	58.5	86.2
0	70	0.15	0.39	0.76	1.61	4.64	16.1	55.5	153
10	70	0.12	0.41	1.04	1.93	3.66	9.66	32.8	117
20	70	0.09	0.34	1.13	2.80	4.98	9.02	22.9	76.6

表 4 (续)

大气温度/ ℃	相对湿度/ %	额定倍频程中心频率/Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
		大气衰减系数/[dB(A)/km]							
30	70	0.07	0.26	0.96	3.14	7.41	12.7	23.1	59.3
15	20	0.27	0.65	1.22	2.70	8.17	28.2	88.8	202
15	50	0.14	0.48	1.22	2.24	4.16	10.8	36.2	129
15	80	0.09	0.34	1.07	2.40	4.15	8.31	23.7	82.8

大气衰减系数值极大程度上取决于声频率、环境温度和空气相对湿度,大气压力对其影响不大。计算某一环境中的噪声级时,应使用基于当地典型气候条件得到的平均衰减系数。

9.3.1.3 障碍物屏蔽造成的衰减

计算由于障碍物屏蔽造成的声波衰减的关键是识别声源与接收点之间的所有障碍。把每个障碍模拟为一个薄屏蔽层是一种简单的模拟方法,计算程序根据屏蔽层数完成计算。

当障碍物具有以下特性时,被视为有效屏蔽:

- 障碍物单位面积的质量应超过 10 kg/m²;
- 障碍物没有裂缝和开口;
- 垂直于声源与接收点连线的尺寸应大于空气中声波的波长,如 $s_1 + s_r > \lambda_c$, 见图 21。

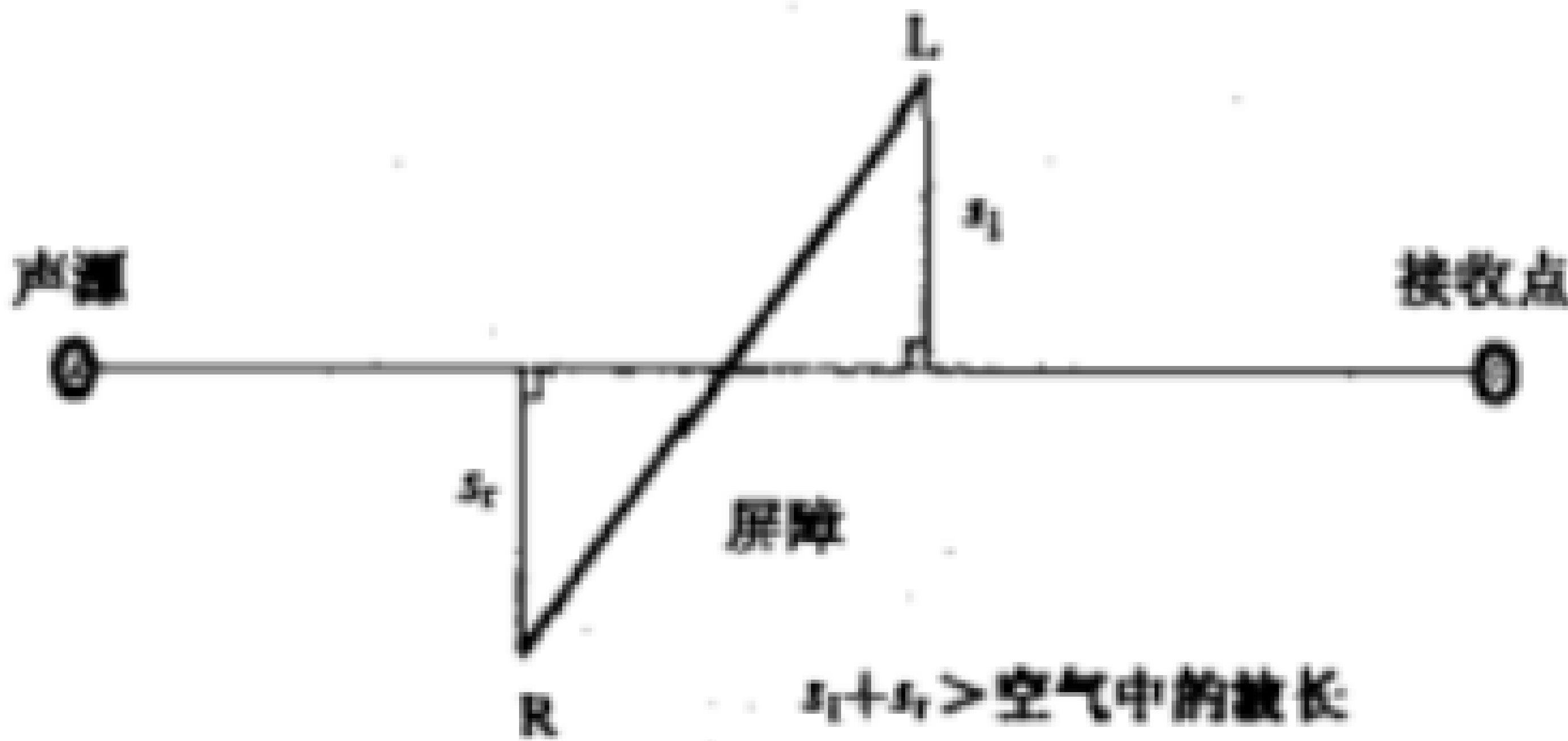


图 21 用于屏障计算的几何参数定义

9.3.1.4 障碍物反射和吸收造成的衰减

通常,在计算模型中,声波在障碍物上的反射按镜面反射模拟,见图 22。

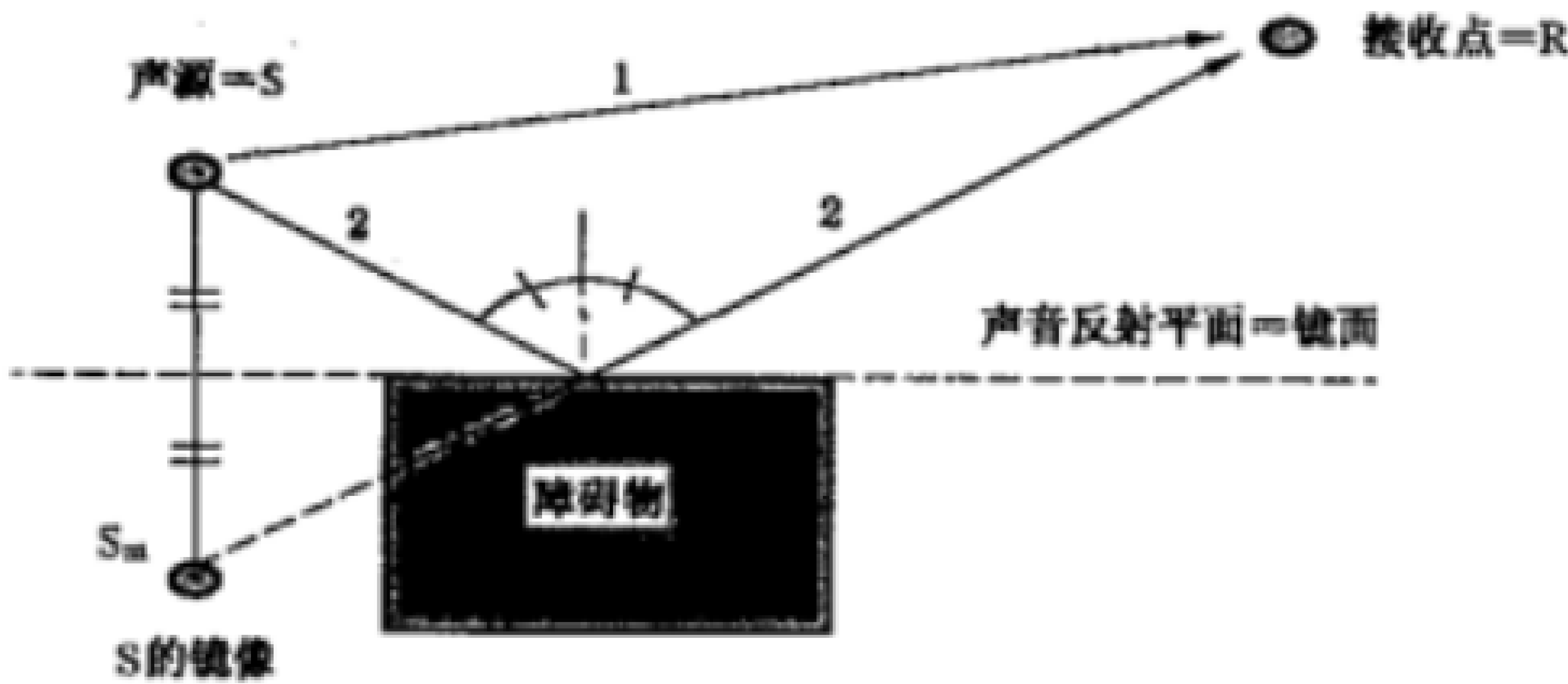


图 22 声波镜面反射

如图 22 所示,声波入射方向与反射表面法线的夹角等于反射表面法线与反射方向的夹角。接收点的声压级可以认为是由两个独立路径的分量组成。

当声波到达反射表面时,有可能一部分被反射,一部分继续传播,一部分被障碍物吸收(取决于反射表面的声学特性和声波的特性)。

可以通过把声源 S 在接收点产生的声压级和声源镜像 S_m (见图 22) 在接收点产生的声压级相加得到声源 S 经过障碍物反射后在接收点产生的总声压级。

9.3.1.5 由地面条件造成的衰减

通常,把从声源到接收点的区域划分为三部分,即声源区域、中心区域和接收点区域(见图 23),分别计算这三个区域内的由地面条件产生的声波衰减,并通过这三个值的相加获得总衰减值。

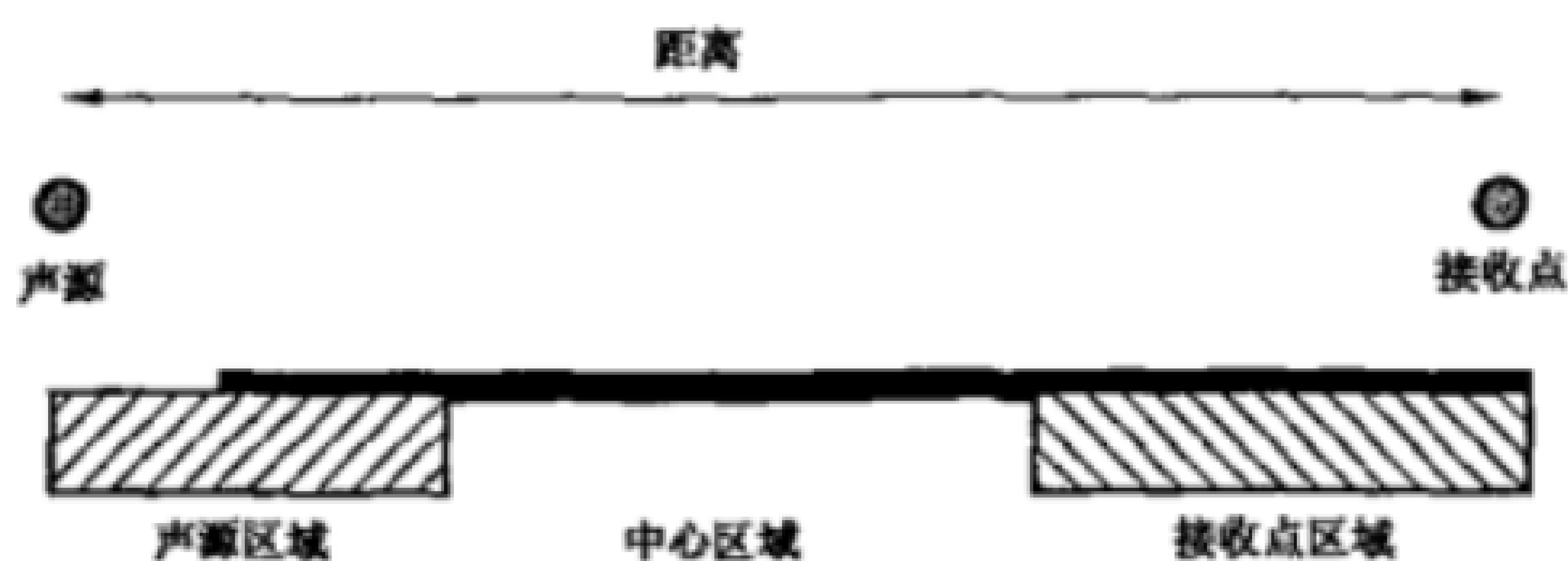


图 23 由地面条件产生的声衰减的部分计算参数的定义

各区域内由地面条件产生的声波衰减与声源和接收点的高度、地表类型、声源和接收点间的距离以及传输路径上是否有障碍物屏蔽等条件有关。该值可为正也可为负,二者分别表示对声波产生的衰减或放大作用。

地面有两种类型:硬地,如沥青、公路、混凝土、水和有许多散射障碍物的地面,在声学上认为是“硬”的;软地,即所有可生长植被的表面,以及很少有散射障碍物的表面,如草地、有或没有植被的耕地、森林、沼泽和花园等(声学上均认为是多孔的表面),在声学上认为是“软”的。

9.3.1.6 声波通过植被传播造成的衰减

图 24b) 中声波传输路径为曲线,传输路径上有密集的树木或灌木丛,而视线不能穿透,即传输路径被遮挡。这些植被也有可能是由几组构成,每组的传输路径长度 d_v 为 50 m。

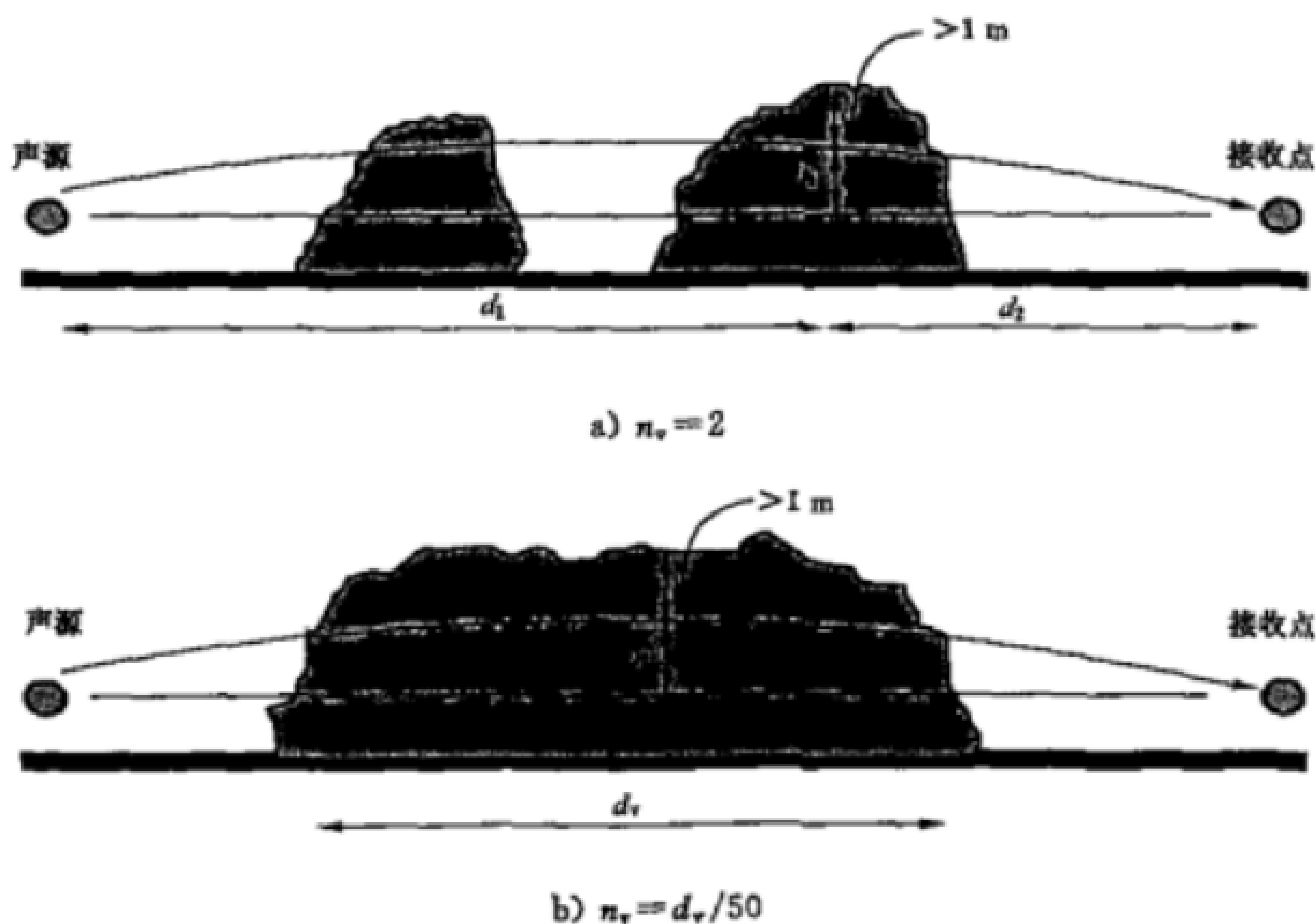


图 24 式(34)中各参数定义示例

此外,如果声波传输需穿过几组连续的树木或灌木组,并且每组树木或灌木都挡住了路径,则这些树木或灌木组最多可被分为 4 组。植被高度应超过传输曲线高度 1 m 以上(见图 24)。以连接声源和接收点的水平线为基准定义的 h 值按下式计算:

$$h = (d_1 \times d_2) / 16 \times d \quad \dots\dots\dots (33)$$

式中：

h ——传输路径与连接声源和接收点的水平线之间的垂直距离，单位为米(m)；

d_1 ——声源到“屏蔽”的水平距离，单位为米(m)；

d_2 ——接收点到“屏蔽”的水平距离，单位为米(m)；

d —— $d_1 + d_2$ ，单位为米(m)。

植被造成的声波衰减 A_{veg} 由式(34)计算：

$$A_{veg} = - n_v \times a_v \dots\dots\dots (34)$$

式中：

n_v ——植被组数；

a_v ——每组的衰减系数，见表 5。

若 $n_v > 4$ ，则将 n_v 设为 4。

表 5 相应 1/1 倍频程的衰减系数示例

1/1 倍频程 f_m/Hz	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
每组衰减系数 $a_v/[\text{dB(A)/组}]$	0	0	1	1	1	1	2	3

如果传输路径被挡，无论是冬天还是夏天，均要使用衰减系数计算声波衰减。通常不列出冬季值，如果需要的话，可把表 5 中的数值乘以 0.5 后用于冬季计算。

50 m 的浓密树林大约可降低噪声 1 dB(A)。

9.4 计算结果的表示

有两种实际有用的方法用于表示声级预测计算结果：

- 图例表示法，即如图 25 所示的用于描述等效声级的声级等值线图；
- 表格表示法，如表 6 所示，表中罗列了接收点的声级预测值。

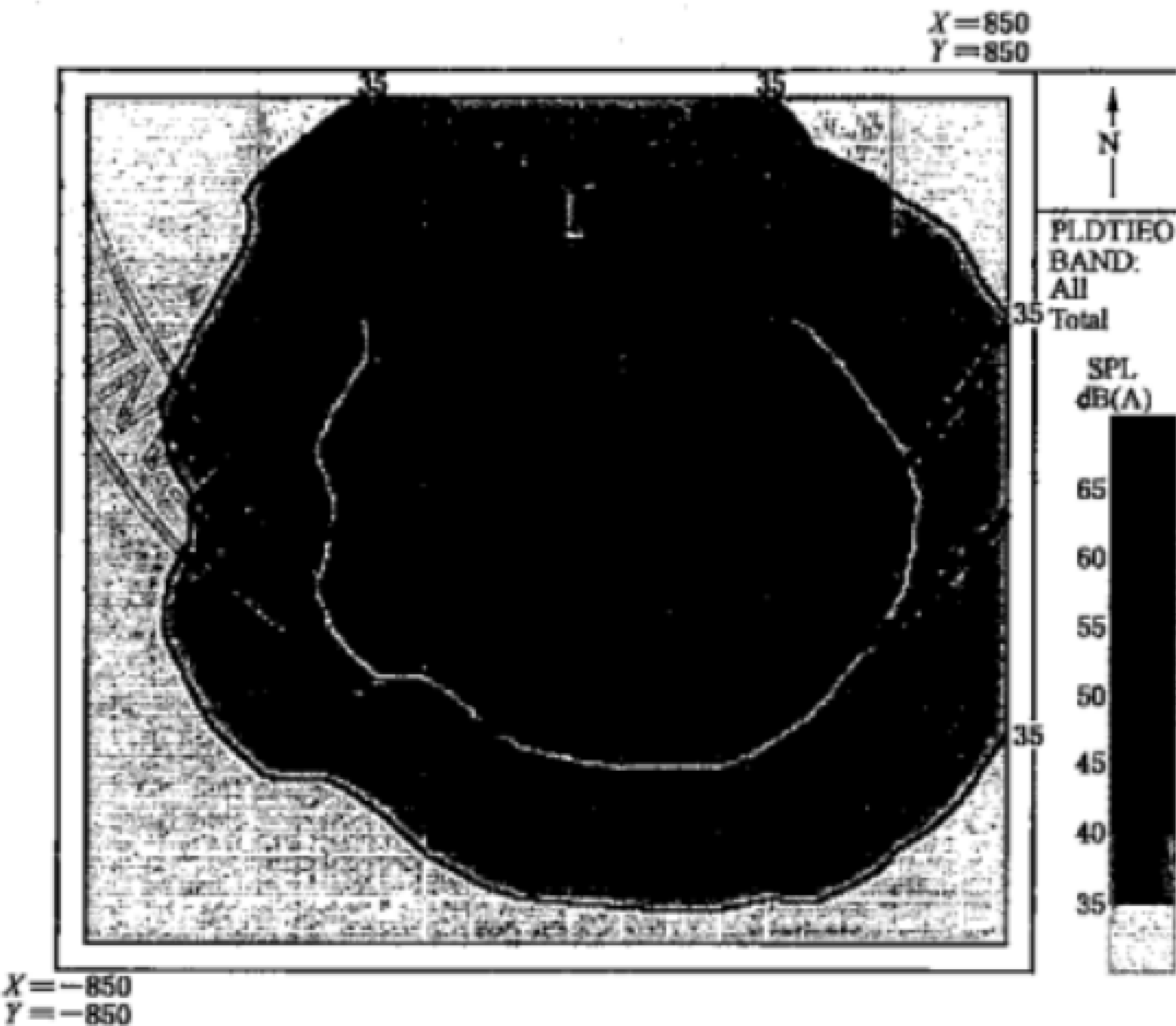


图 25 用图例表示声压级计算结果

图 25 显示了计算得到的换流站内及其周围的声压级预测值，但从中看不出哪个声源是主要噪声源。

使用表格表示计算结果的方法非常有用，特别是声源阵列表格的建立。表中显示了每个频率下各

声源或声源组在总声压级中所占的比重,因此可以从表中得知需重点降噪的设备。表 6 中,每行按各声源或声源组排列,每列表示各声源或声源组在不同倍频程频率或窄频段下的声压级。表 7 按声压级由大到小排列了各声源或声源组,并列出了各声源或声源组所对应的发声对象。

表 6 声源阵列表 a

接受点(最近的房屋):X(570.00),Y(130.00),Z(1.50)											
每个频率下各声源或者声源组在总声压级中所占比重的等级											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
频率	总计		1 000	500	700	600	250	125	2 000	1 200	其他声源
序号	dB(A)	声源组	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)
Tot	40.6	—	35.6	34.5	29.6	29.4	27.8	27.1	26.1	25.9	25.0
1	34.3	1	29.3	29.4	7.8	8.6	23.2	21.2	23.1	—	26.1
2	32.6	10	29.8	27.4	—	—	—	—	19.7	20.2	20.7
3	32.5	9	29.9	27.6	—	1.3	—	—	19.6	19.1	17.1
4	32.0	3	26.4	25.3	—	27.7	—	—	—	23.1	12.2
5	31.1	8	20.0	17.8	29.5	19.7	—	—	9.8	—	21.3
6	29.5	7	19.5	17.2	—	22.4	—	—	9.4	—	27.5
7	28.9	6	—	21.7	—	—	25.1	24.8	—	—	4.4
8	25.7	4	23.1	22.3	—	—	—	—	—	—	—
9	23.4	5	—	18.8	—	—	17.8	19.2	—	—	—
10	12.3	2	—	9.4	—	—	4.4	—	—	—	7.4
注:“—”表示噪声源不包含该次频率。											

表 7 声源阵列表 b

序号	dB(A)	声源组	描 述	X/m	Y/m	Z/m
1	34.3	1	<声源组>变压器和变压器冷却设备	23.0	1.0	2.8
2	32.6	10	<声源组>36 th 电容器和电抗器	168.5	-7.0	4.5
3	32.5	9	<声源组>24 th 电容器和电抗器	163.5	-15.0	4.5
4	32.0	3	<声源组>平波电抗器	5.0	26.0	8.0
5	31.1	8	<声源组>13 th 电容器和电抗器	170.0	-13.3	4.5
6	29.5	7	<声源组>11 th 电容器和电抗器	162.0	-8.3	4.5
7	28.9	6	<声源组>交流并联电抗器	166.5	-12.5	1.5
8	25.7	4	<声源组>PLC 滤波器	-41.0	-12.2	18.4
9	23.4	5	<声源组>交流并联电容器	165.5	-8.5	5.0
10	12.3	2	<声源组>阀冷却风扇	-16.3	-25.3	2.0

10 确定设备的声功率

10.1 概述

通常,为了满足高压直流换流站的噪声限值,必须把对换流站的总体噪声要求分解为对各设备的噪声要求。各设备的声功率级应在设备现场安装之前确定,因为当所有设备在现场安装之后,几乎就不可

能再准确地确定出单台设备的声功率级了。然而,在背景噪声足够低的前提下,在换流站现场有可能对一组设备的总声功率级进行验证,如交流滤波器组。

确定设备声功率的方法主要有三种:

- 计算;
- 测量:
 - 声压测量法,根据测量标准在声学测量室或户外完成;
 - 声强测量法;
 - 振动测量法。
- 计算与测量相结合。

10.2 计算

10.2.1 计算步骤

声功率是表征声源声量特征的最重要的声学参数,也是对声源进行评价和比较的基本参数。声功率是对声源输出量的度量。声功率级表征声源对周围环境的噪声影响,通过限制噪声的声功率级进行有效的噪声控制。

通常,电气设备噪声的声功率的计算步骤可分为三步:

- 首先,计算电应力:
 - 电容器的静电;
 - 电抗器线圈和变压器绕组的电磁量;
 - 变压器铁芯和电抗器铁芯的磁致伸缩。
- 第二步,确定系统响应或传递函数。
- 第三步,计算振幅和由此产生的噪声声功率。

计算流程见图 26。

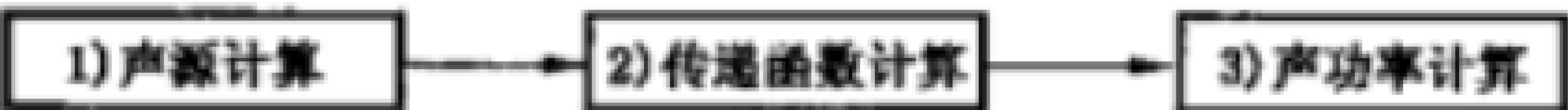


图 26 高压直流设备声功率的计算步骤

10.2.2 力频谱计算

本条中,用术语“电流”表示电气负载,有时也可用“电压”表示。

如果设备上流过某一频率的交流电流,在直流不存在时它会产生两倍该频率的电应力。如果存在直流电流,力频谱中还会出现该频率的电应力。

如果存在两种频率的电流,则力频谱中包含的频率为:电流频率两倍的频率(两种),两个电流频率之和的频率及之差的频率。例如,工频 50 Hz 及其 11 次谐波 550 Hz 可生成表 8 中的力频谱。

表 8 50 Hz 和 550 Hz 电流频率产生 100 Hz、500 Hz、600 Hz 和 1 100 Hz 的力频率

力频率/Hz	来源于电流频率(Hz)的计算表达式
100	2×50
500	$550 - 50$
600	$550 + 50$
1100	2×550

10.2.3 传递函数的计算

在计算外力引起的振幅时,设备的机械特性是很重要的。所有的电气设备都具有机械结构及其固有的振动模式,每种振动模式都各有其谐振频率和阻尼。阻尼决定了在设备振动接近谐振频率时的响应特性。

当一个力施加在设备的结构体上时,将会激起多个固有振动模式,各模式的强弱主要取决于:

- 外力频率与这种振动模式的谐振频率的接近程度；
- 这种振动模式的阻尼大小；
- 这种振动模式的空间形态与外力形态的相似程度。

上述列项一和列项二的原因是很明显的，首先，如果外力频率等于谐振频率，结构振幅会很大；第二，如果一种振动模式的阻尼大于另一种，同时两种模式的谐振频率都等于外力的频率，则阻尼较小的振动模式将会主导机械结构的振动。

列项三说明每个固有振动的模式或空间形态是很重要的，如 6.4.2 中的电容器，施加于其上的外力是正轴向的，见图 16，则电容器发出的声功率由轴向谐振频率决定，垂直于轴向的谐振频率不会受静电力的影响，因此对声功率没有影响。

图 27 举例说明了上述内容，其中表明了具有一定自由度(DOF)的机械结构的受力和振幅的关系。从图 27 中可清楚地看到，在振动频率接近谐振频率时，阻尼对系统响应的重要性。

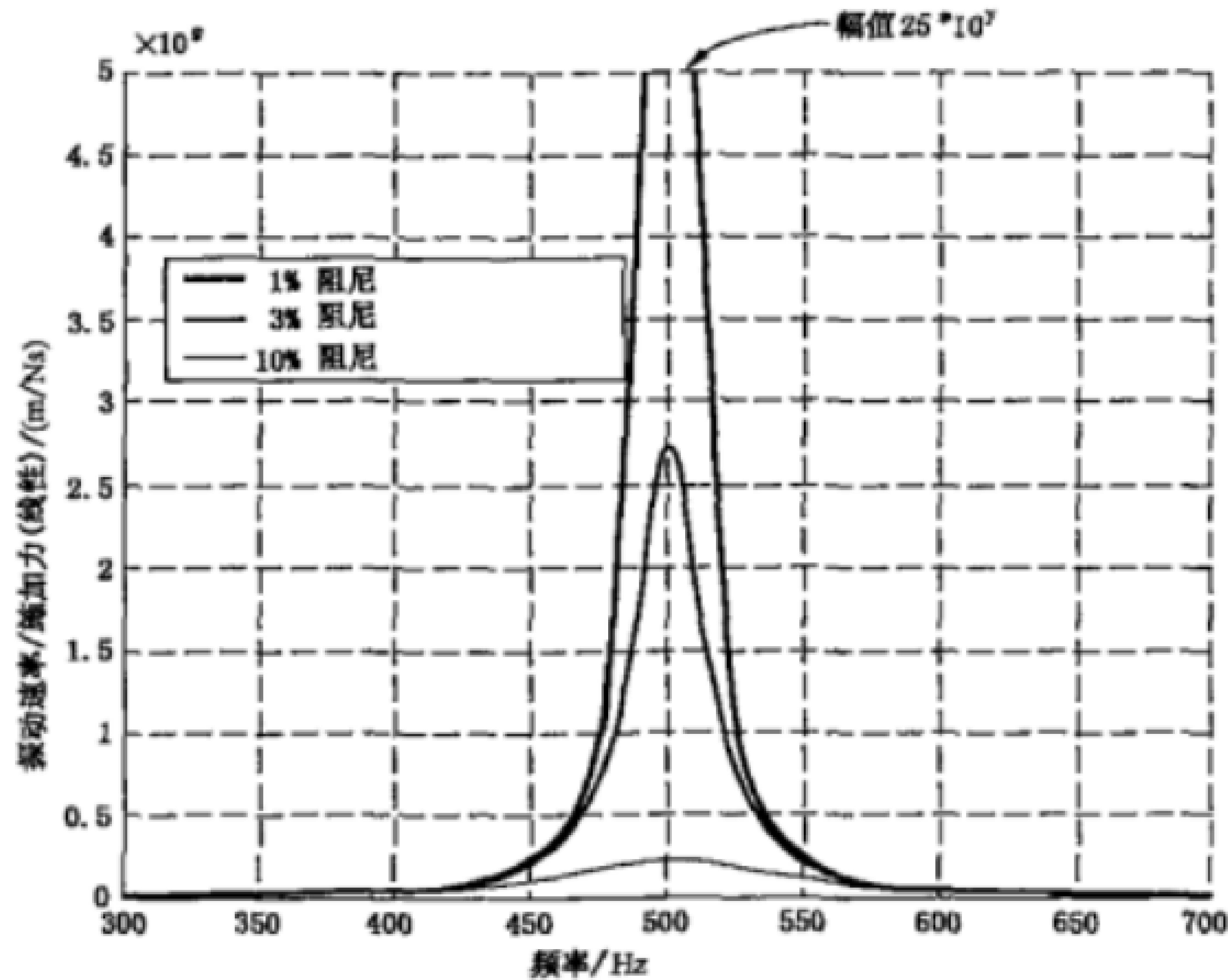


图 27 固有频率 500 Hz, 1-DOF 系统的振动速度和受力(线性)的关系

10.2.4 声功率计算

在已知机械结构的振动速率 v 时，使用式(35)可以准确地计算出声功率：

$$L_w = 10 \lg[\rho_c \times A \times \sigma \times \langle \bar{v}^2 \rangle / 1 \times 10^{-12}] \dots\dots\dots (35)$$

式中：

ρ_c ——周围介质的阻抗，单位为牛秒每立方米(Ns/m³) (空气 $\rho_c = 410$ Ns/m³)；

A ——振动表面的表面积，单位为平方米(m²)；

σ ——辐射效率；

$\langle \bar{v}^2 \rangle$ ——振动表面的振动速率(方均根值)的二次方，单位为米每秒的二次方(m/s)²；

1×10^{-12} ——声功率的基准值，单位为瓦(W)。

有时会因为辐射效率 σ (见 6.3.2) 的不同造成计算结果的不同，例如弯曲波在电抗器绕组呼吸模式下的辐射效率一般在 $10^{-4} \sim 1$ 之间，其中，仅当声波波长与电抗器高度的数量级相同时(导致 σ 减小) $\sigma < 1$ ，否则 $\sigma = 1$ 。

为了获得比较准确的辐射效率，可使用边界元法或有限元法。

10.3 测量

10.3.1 确定声功率的一般方法

声功率是表示声源特性的最重要的声学参数，然而，声功率是无法使用仪器直接测量的。有几种不

同的方法可以确定一个对象的声功率,每种方法都有它的优点和不足。

10.3.1.1 方法分类

确定声功率最简单也是最常用的方法是声压测量法。大部分标准都是基于声压测量法。这种方法需要使用专用设备(声级计)完成,同时声级计应能分析被测声波的频率成分(通过配套使用 FFT 分析仪或实时滤波器实现)。同时,需要一个符合声学标准的测量室(但不一定是声学实验室)或符合声学标准的自由场环境,声学标准 GB/T 3767、GB/T 3768 适用。这种方法的优点是“简单”,但对背景噪声和反射很敏感。此外,在带电设备附近使用任何仪器进行测量时,都必须考虑人员安全。

第二种方法是声强测量法。声强测量法可减小测量过程中始终存在的背景噪声的影响,因此可在不宜采用声压测量法的环境中使用。这种方法耗时,且需要有经验的人员才能获得准确结果。如果操作正确,声强测量法是一种能非常准确确定声功率的方法。

第三种方法是振动测量法,即测量机械结构的振幅,并合理地计算声功率。对此,有两个因素会造成计算结果的不同,一个是辐射效率,另一个是用于计算空间平均振动速率的测量点数的多少。测量时,为了避免在测量对象上出现高电压和/或电流,同时考虑到有可能损坏直接安装在带电物体上的测量设备,所以这种方法可能需要使用激光设备作为振动传感器。振动测量不需要特别的实验室,但如果需要使用激光设备,则成本较高。

这三种方法在 10.5 中作了总结,同时列出了每种测量方法的优缺点。

10.3.1.2 指向性

由振动产生的设备噪声大多是空间不对称的,所以产生了声辐射的指向性,从而导致了声波在某方向上出现了最大或最小值。所以当采用声压测量法时,选择足够多的测量点以获得一个准确的空间平均声压级是很重要的,否则由此得到的声功率会有很大误差。在使用声强测量法和振动测量法时也应考虑测量点数量对计算结果的影响。在 GB/T 3767 中给出了相关建议。

另外,噪声源和反射表面的相互位置关系也会造成声辐射的指向性(见 3.11)。这一点在确定声功率时也很重要。

10.3.1.3 测量环境

在制造厂确定声功率很复杂,这是因为:首先,工厂可能没有一个专门用于声学测量的特别试验区;第二,工厂背景噪声有可能过高,不宜使用声压测量法。但是,在工厂内找到一个符合声学标准的试验场地也是有可能的,甚至可使用外面的停车场,或在夜间背景噪声降低时进行测量。声学测试环境的要求在声学标准 ISO 3745 中给出。

此外,在试验室中几乎不可能产生与换流站现场同样的大电流和/或高电压,更何况是产生与换流站现场相同的、有几种谐波的负载频谱。在试验室里,使设备在一个频率下小负荷运行比使其额定运行更易于实现。设备额定和满负荷运行时的声功率随后可按比例算出,但是必须在测试对象的声级大于背景噪声级时才可使用这种方法。

如果需要高精度地确定某个对象的声功率,则需使用特殊设计的声学试验室,如消声室或混响室。此时,设备制造商可与声学咨询公司和/或大学合作。但是,因为使用这种声学试验室需要耗费太长时间并且成本太高,所以并不实际,除特别需要,可不予考虑。

10.3.1.4 背景噪声的修正

在此,某个固有的噪声级被认为是被测对象的“真实”噪声级,如果背景噪声级与总噪声级之差在 10 dB(A) 以内,则应修正总噪声级以减小背景噪声的影响。理论上,只要在背景噪声级没有超过固有噪声级时这种修正都是可行的;但在实际中,如果两者之差很小,即只有几个分贝时,这种修正将会变得很不可靠,ISO 标准中规定该值不能低于 6 dB(A)。

式(36)为总噪声级 $L_{p,t}$ 、背景噪声级 $L_{p,b}$ 和固有噪声级 $L_{p,s}$ 的关系式:

$$L_{p,s} = 10 \lg(10^{(L_{p,s}/10)} - 10^{(L_{p,b}/10)}) \dots\dots\dots(36)$$

10.3.2 声压测量法

如上所述,声压测量法是一种测量声辐射的简单方法,所以应用最为广泛。但是,声压测量法对其他声源产生和反射的噪声比被测对象产生和反射的噪音更加敏感。为了避免周围环境的影响,声压测量法通常在测量试验室或设备制造厂的户外特殊测量区内进行。

由于在声源周围的声级分布通常是不均匀的,应采用在不同位置测得的数据的平均值来评估空间噪声级,而不是使用在一个位置的测量值。测量点应选择一个假想的围绕声源的包络面上。

平均声压级 L_{pA} 的计算公式如下:

$$\overline{L}_{pA} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{pAi}} \right] \dots\dots\dots(37)$$

式中:

\overline{L}_{pA} ——平均声压级,单位为分贝[dB(A)];

N——测量点总数;

L_{pAi} ——测量点 i 的 A 计权声压级,单位为分贝[dB(A)]。

然后使用平均声压级 \overline{L}_{pA} 计算测量对象的 A 计权声功率级 L_{WA} ,公式如下:

$$L_{WA} = \overline{L}_{pA} + 10 \lg(S/S_0) \dots\dots\dots(38)$$

式中:

L_{WA} ——A 计权声功率级,单位为分贝[dB(A)];

\overline{L}_{pA} ——平均声压级,单位为分贝[dB(A)];

S——基准辐射面面积,单位为平方米(m^2);

S_0 ——基准面积,为 $1 m^2$ 。

式(38)中各参数的定义见图 28。

上述计算声功率级的方法,仅在各测量点到声源的声学中心的距离基本相等时有效。然而,如果背景噪声过高以至于不能准确地计算被测对象的声功率时,则通过声压测量法得到的声功率级就会不准确。此时,声压测量法确定的声功率级比实际值大,如果这个偏大的数值仍能满足要求(噪声限值),可不必做进一步的测量计算。若要得到更准确的数据,可在离声源更近的地方进行测量或采用其他的测量方法。

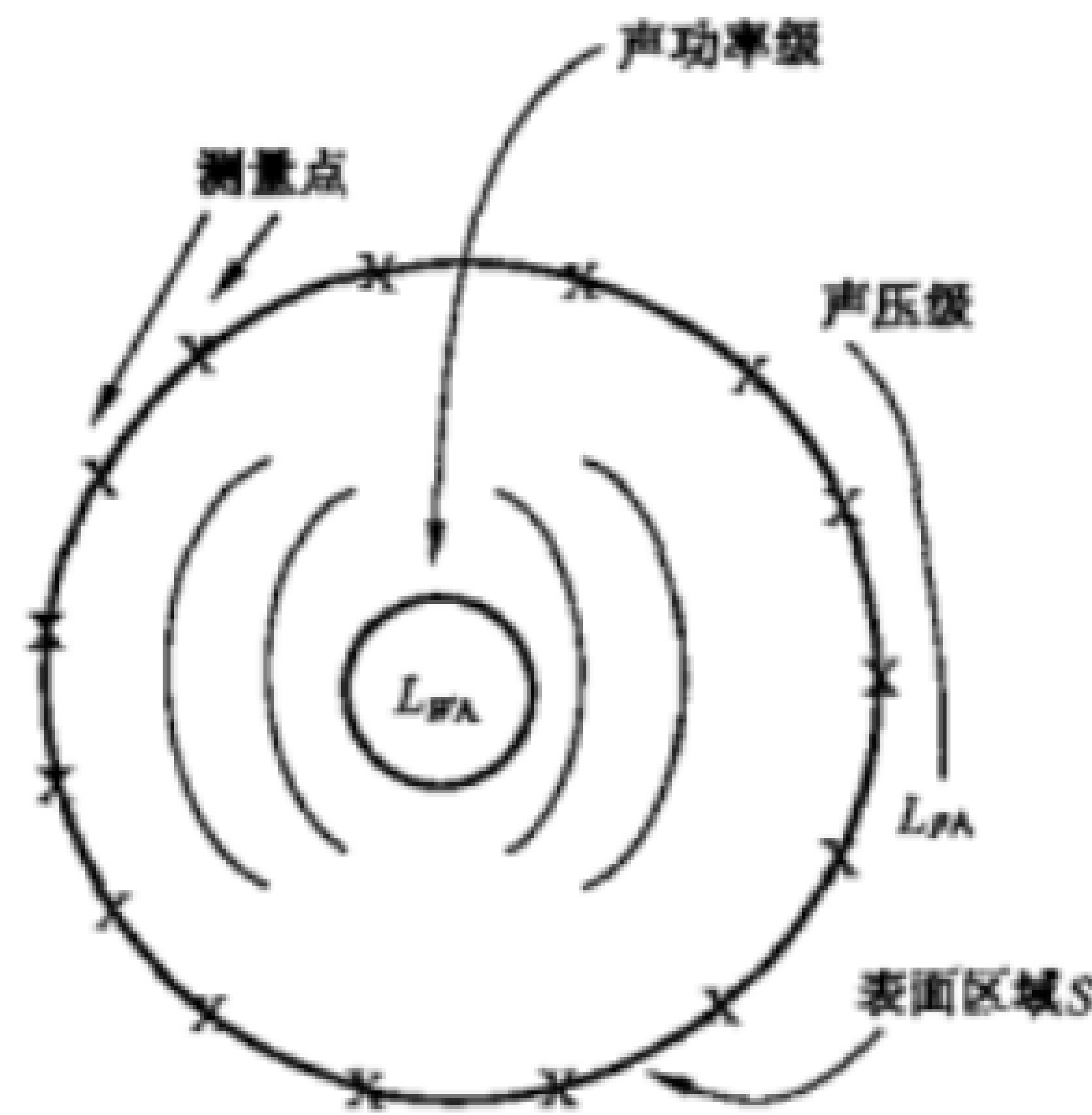


图 28 式(38)中的参数定义

10.3.3 声强测量法

声强是一个矢量,等于瞬时声压和相应的瞬时质点速度的乘积。声波在 r 方向上的声强为:

$$\vec{I}_r = \langle p(t) \times v_r(t) \rangle \dots\dots\dots(39)$$

式中:

\vec{I}_r —— r 方向上的声强;

$p(t)$ ——瞬时声压的方均根值;

$v_r(t)$ ——瞬时质点速度在 r 方向上的方均根值。

符号“ $\langle \rangle$ ”表示为时间平均值。

与声压(声压是个标量,只有大小)相比,声强是矢量值,它有大小和方向。

式(39)中的声强可以使用一个或几个传声器采用简单的方法进行测量。因为质点速度很难直接测量,所以可以通过使用两个传声器在沿 r 方向的 r_1 和 r_2 ($r_2 > r_1$) 处测量相应的声压 p_1 和 p_2 ,使用公式(40)确定声强:

$$\vec{I}_r = \frac{1}{2\rho \times \Delta r} \left[(p_1 + p_2) \int_0^t (p_1 - p_2) dt \right] \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

p_1, p_2 ——在 r_1 和 r_2 点测得的声压方均根值;

Δr ——两个传声器之间的距离;

ρ ——媒质密度(空气, 20 °C, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$)。

声功率 W 可以通过声强对包围声源的闭合曲面的积分求出,见公式(41)。

$$W = \oint_A \vec{I} \times d\vec{A} \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中:

W ——总声功率;

\vec{I} ——使用声强仪测得的声强矢量;

$d\vec{A}$ ——曲面 A 的面积积分元。

声源发出的声波穿过假想轮廓线向外辐射。从外部声源传过来的声波(包括障碍物反射的声波),也即假想轮廓线外的声波,会传入假想轮廓线内并从它的另一端传出,因此“外部”声波对积分的结果没有影响,从而使声强测量法可区分被测物体的声功率和由其他持续声源产生的声功率。

实际中应选择对靠近声源表面的闭合曲面积分来增大声强测量的信噪比,并应通过声强仪长时间扫描闭合曲面或者测量一些离散点得到整个曲面的空间平均声强。因为测量时,对积分面上所有点的测量不是同时进行的,所以,在此期间背景噪声必须稳定,否则声波出入积分面的声功率会有差别。

总之,声强测量法在某些情况下很有效,但需由有经验的人员完成。

10.3.4 振动测量法

在声压或声强测量均无法确定被测对象的声功率时,振动测量法可以给出较好的或至少是合理的声功率。采用这种方法时,必须考虑测量对象的振动模式。测量时至少应按照每结构波长 4 个~6 个测量点进行,才能得到正确的振幅空间平均值,因此,在测量振幅之前“描绘”振动模式是很重要的。同时,因为辐射效率可在 $10^{-4} \sim 1$ 之间变化(见 10.2.3),所以采用不同的辐射效率计算出的声功率不同。

10.4 计算和测量相结合

需要得到的声功率必须是设备额定负荷下的声功率,如电容器在额定电压下的声功率、电抗器在额定电流下的声功率等。同时试验频率必须正确。就电气设备而言,根据负荷和声功率的关系,可在设备非额定负荷运行时进行测量,然后按比例计算相应的额定负荷运行时的声功率。对于电容器,声功率与电压的 4 次方成正比;对于空心电抗器,声功率与电流的 4 次方成正比。

对此,下面举例进行说明。假设通过声压测量法得到的电容器的声功率级为 56 dB(A),测量时电压为实际运行电压的 1/5,则实际运行条件下的声功率为:

$$56 + 10 \times \lg(5^4) = 56 + 40 \times \lg 5 = 83 \text{ dB(A)}$$

当变压器铁芯的磁通密度在一定的范围内时,变压器电压和声功率具有线性关系。当磁通密度超过这个范围时,则其关系为非线性,按照上述方法在非线性区内确定的声功率会有误差,因此,应以线性区的测量为准。

10.5 验证

在此针对两类对象总结了确定声功率的方法。这两类对象分别为:单个设备(在制造厂)和在换流站现场的关键设备(多台设备)

10.5.1 单个设备声功率的验证

确定单个设备(在制造厂)声功率的三种方法总结于表 9 中:

表 9 确定声功率的三种方法

方 法	所 需 设 备	优 点	缺 点
声压测量法	声级计,配有 FFT 分析仪或实时滤波器	——简单且快速 ——低成本测量设备	——需要某种测量试验室或自由场条件 ——对背景噪声和声波反射敏感
声强测量法	声强仪	——正确操作下为最准确的方法 ——不受持续的背景噪声的影响 ——用于诊断的很好的工具	——耗时较长 ——需要两个传声器和专用软件。使用的设备比声压测量法昂贵
振动测量法	振动传感器或激光设备	通过简单扫描较快地得到声功率计算值	——由于辐射效率或平均振幅的不确定性,会产生很大误差 ——可能需要昂贵的激光设备

10.5.2 换流站现场关键设备声功率的验证

在换流站现场验证声功率的最常用的方法是声压测量法。然而,使用这种方法在验证单个设备的声功率(如交流滤波器元件)时可能会很困难。与其他设备不同,平波电抗器噪声主要集中在设备附近,采用振动测量法可以较直接地确定平波电抗器的声功率。

当在换流站现场进行验证性测量时,应记录实际电流、电压等数值,并将这些数值与用于进行换流站噪声预测计算时的数值相比较。如果二者差值较大,则需要使用不同的电压和/或电流值重新进行测量。

当测量设备音频噪声的声压时,应使用旋转吊杆或测量多点噪声以得到正确的空间平均值,否则最终得到的声功率会由于音频声场的干扰产生误差。

11 高压直流换流站声级的验证

11.1 概述

由于电气负载特性、与交流网络相关的背景谐波、气象条件的变化以及测量环境的不同(如存在反射障碍物)等因素,一天 24 h 中换流站周围任何位置的声级都会有明显的波动。规定噪声限值和进行声级测量时,这些情况都应予以考虑。

测量声压时,通常将测量点选在与居民区(最靠近换流站的居民区)最近的接收点处。如果在该接收点处背景噪声偏高(可能会高于允许的来自于高压直流换流站的噪声),则无法得到所需数据。此时,应在距高压直流换流站更近的地方测量,然后通过衰减计算得到所期望得到的接收点的声压级。

如果在最近的居民区和高压直流换流站之间找不到合适的测量点,则应在紧靠换流站的地方或在站内采用声压测量法确定换流站(多声源区)的声功率级,并且依此计算出站外的声压级。这种测量可能会受到声场复杂性的影响。如果使用简单的测量方法,如在少数点使用固定传声器,测量结果可能会随传声器的空间位置的不同而发生很大的变化,对此可通过使用旋转传声器解决,该旋转传声器的半径至少为主要频率中的最低频率的半波长。

测量高压直流换流站的声波有两种方式,第一种是直接校验业主要求的结果(声压级),第二种是确定声源的声功率(声功率级)。第一种方式的测量通常在距高压直流换流站一定距离处进行,其主要问题是如何将来自换流站的声波从背景声中提取出来。这种测量法一般需花费很长时间,直到气象条件的影响被最终平衡后才能得到准确的平均值。第二种方式的难点在于有多个声源且都带有高电压,无法靠近声源测量。解决方法是在离声源一定距离处进行测量,而后根据距离原理(见 3.10)进行计算。

11.2 声学环境

当在高压直流换流站内部和附近测量声波时,通常会有纯音音频和电磁场存在,测量设备必须适用于这种环境。由于动态传声器会受磁场影响,所以应使用容性传声器。因此可能需要采用一定的测量技术远距离估算声源。同时,应配有两种分析仪器,即用于分析声级信息的实时分析仪和用于量化音频含量及识别单个噪声源的频率分析仪。

换流站内部和附近的户外声场和混响室内的离散音频的驻波波形相似。此处,由许多不同的声源发射出的声频率是离散的。当某些声源的声频率是相同的,或声源附近有反射障碍物时(相当于镜像声源),就会形成一个干扰模型。作用于干扰模型的某一点的多个具有相同频率的声是同相的,从而会导致一个很高的声级;与此相反,在另一点上会因为破坏性的干扰而使声级降低。由此形成的声级最大、最小点之间的距离取决于空气中这些声波的波长。因此,测量时必须旋转或平移传声器,或在足够多的测量点进行测量。实际中,通常在测量时使用手提式声级计做圆周运动或把传声器安装在旋转吊杆上测量。接收点距离换流站较远时(如几百米远),如图 29 所示,由于远距离传输路径中气象条件的变化使声波衰减量变化,并且因为距离较远,由于地面反射、风、温度梯度等使干扰模型的干扰强度减小,所以此时可以使用固定传声器。

11.3 验证条件

接收点的声压级测量主要受四个因素影响:

- 声源的运行工况(见第 8 章);
- 气象条件(见第 4 章);
- 地面和地形状况(见第 4 章、第 9 章);
- 背景噪声(见第 4 章、第 10 章)。

因为声源发出的声波与测量时声源的电压电流有关,所以测量时考虑声源的运行状态是很重要的。气象条件对声波传播的影响很复杂,见第 4 章。当测量目的在于验证声级时,应满足规定的气象条件,例如:

- 风向与主要声源中心到接收点的连线的夹角在 $\pm 45^\circ$ 的范围之内,且风向是从声源至接收点;
- 风速在 $1\text{ m/s} \sim 5\text{ m/s}$ 之间,在高于地面 $3\text{ m} \sim 10\text{ m}$ 处或与之等效的条件下,如动植物生存状态良好处或在地面逆温层处测量。

在所有的气象参数中,包括温度、湿度、气压、混浊度、降雨和风等,风是影响测量的最主要的参数。详见第 4 章。

11.4 计算

规划和设计高压直流换流站时,通过计算预测声级的方法是非常有用的。它给出了换流站声学性能指标。实际中,计算与测量相结合是最常用的方法,见 11.6。

11.5 测量

为了验证固有声级是否满足限值要求而进行的测量,必须是长时间的多次测量。单次短时间的测量不能给出有代表性的正确结果。对于恒定声源的等效声压级测量,夜间测量至少应进行 3 次,每次至少持续 10 min ,两次之间至少间隔 1 h ;白天测量按同样要求至少进行 5 次,这样才能求出能量等效平均值。

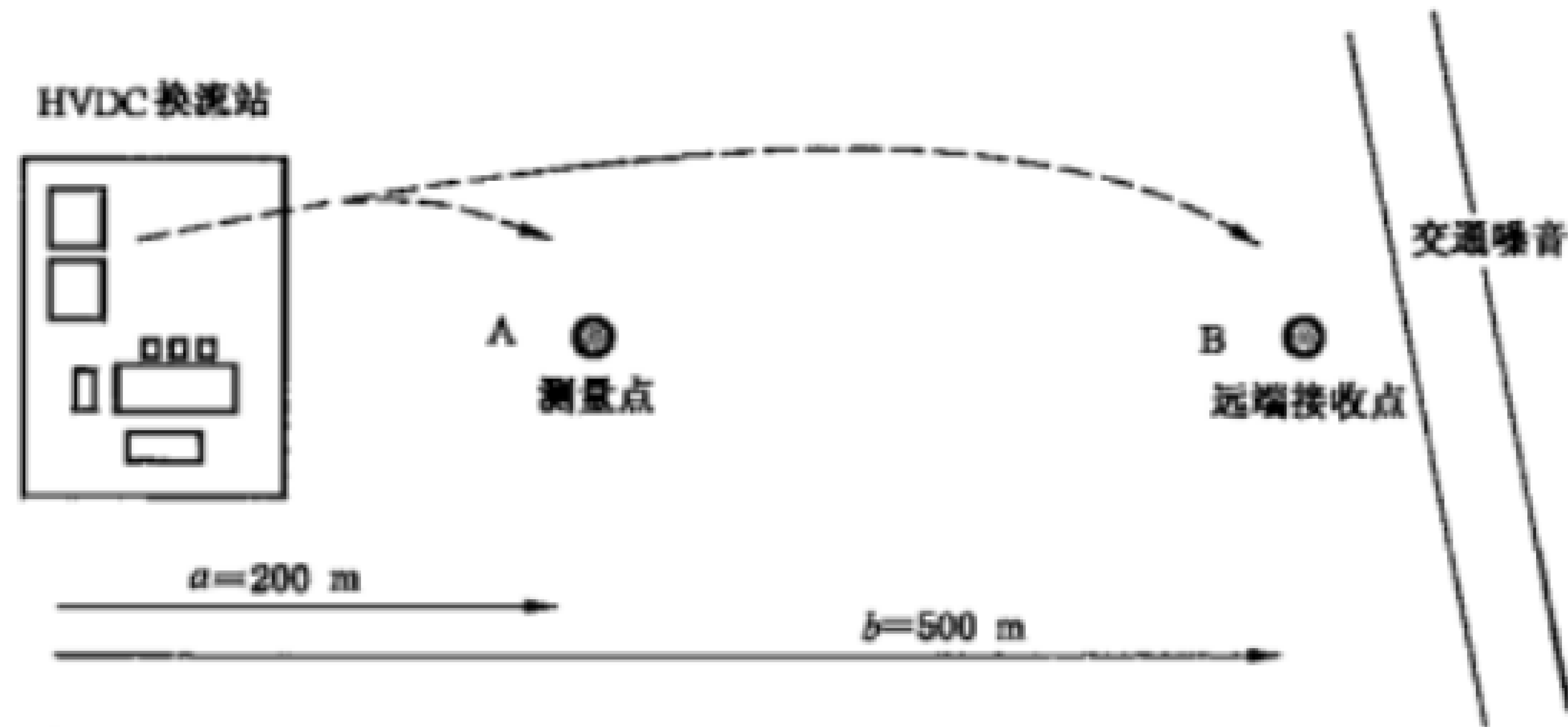


图 29 声测量时高压直流换流站和接收点位置示例

测量时,应结合气象条件选择测量时刻使测量在声波适度地顺风传播时进行。为了能最终平衡阵风带来的风速变化的影响,通常测量时间都足够长,为 10 min 至 1 h 之间。

11.6 计算与测量相结合

有些情况下,如在该测量点存在很高的背景噪声时,在远方接收点有可能无法正确测量来自换流站的噪声。此时,可在声源和接收点之间选择靠近换流站的地方进行测量,随后再计算接收点的声级,如图 30 所示。如果地形很平坦,且在传播路径上没有障碍物时,使用这种方法可以得到非常准确的结果。



例如
A 点测量声压级 $A_{50} \text{ dB(A)}$
B 点计算声压级 $B = L_B = L_A - 20 \lg(b/a)$
 $L_B = 50 - 20 \lg(500/200) = 42 \text{ dB(A)}$

图 30 在 A 点测量声压级,然后使用其值计算 B 点声压级

如果地形恶劣、周围道路的交通拥挤或其他环境干扰使测量不能在声源和接收点之间进行,则可在换流站内测量,并计算出声源的声功率级,然后通过对上述值的计算就可以得到所期望得到的接收点的声压级。计算方法见第 10 章。

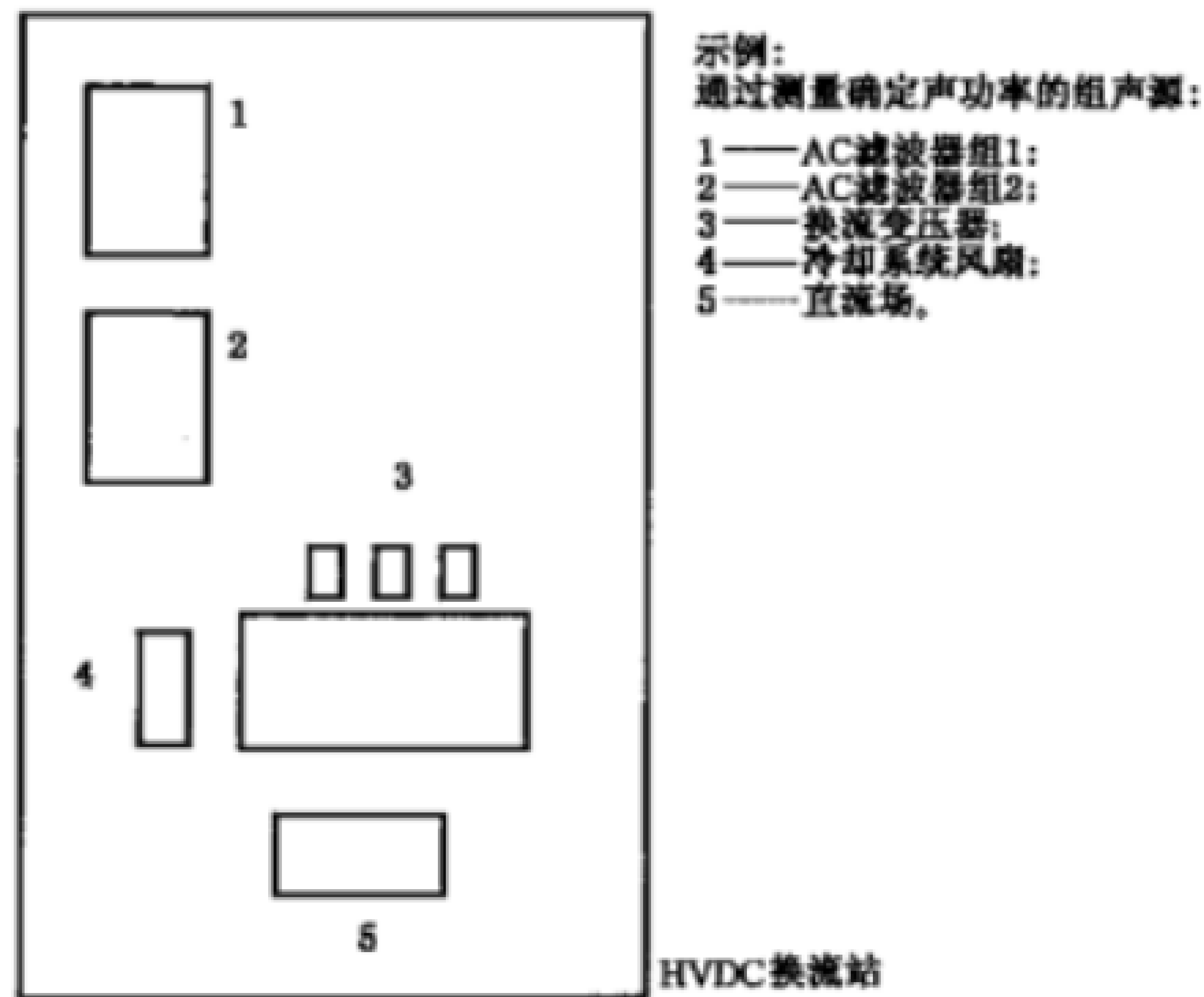


图 31 噪声源组示例

由于实际条件的限制,通常在换流站现场无法测量单个声源。此时,可把换流站划分为几个大的组声源,如划分为交流滤波器组、换流变压器、阀冷却风扇、直流滤波器等各个分组,这样就可以对站内各组声源周围的声级采用适当的方法进行测量,如图 31 所示。但是,在这些组声源周围进行测量时,传声器的高度常常会受到限制,例如受到架空母线高度的限制。有时,传声器也会由于围栏或换流站安全规范的约束无法靠近期望的位置。因此,在不同的情况下,应根据换流站特定的环境采取不同的方法。图 32 给出了通过测量交流滤波器组的声压级来确定交流滤波器组的声功率级时的测量位置示例,图中示例了测量区域(取决于声源覆盖区)、从声源区域到测量点的距离、测量点的数量等。

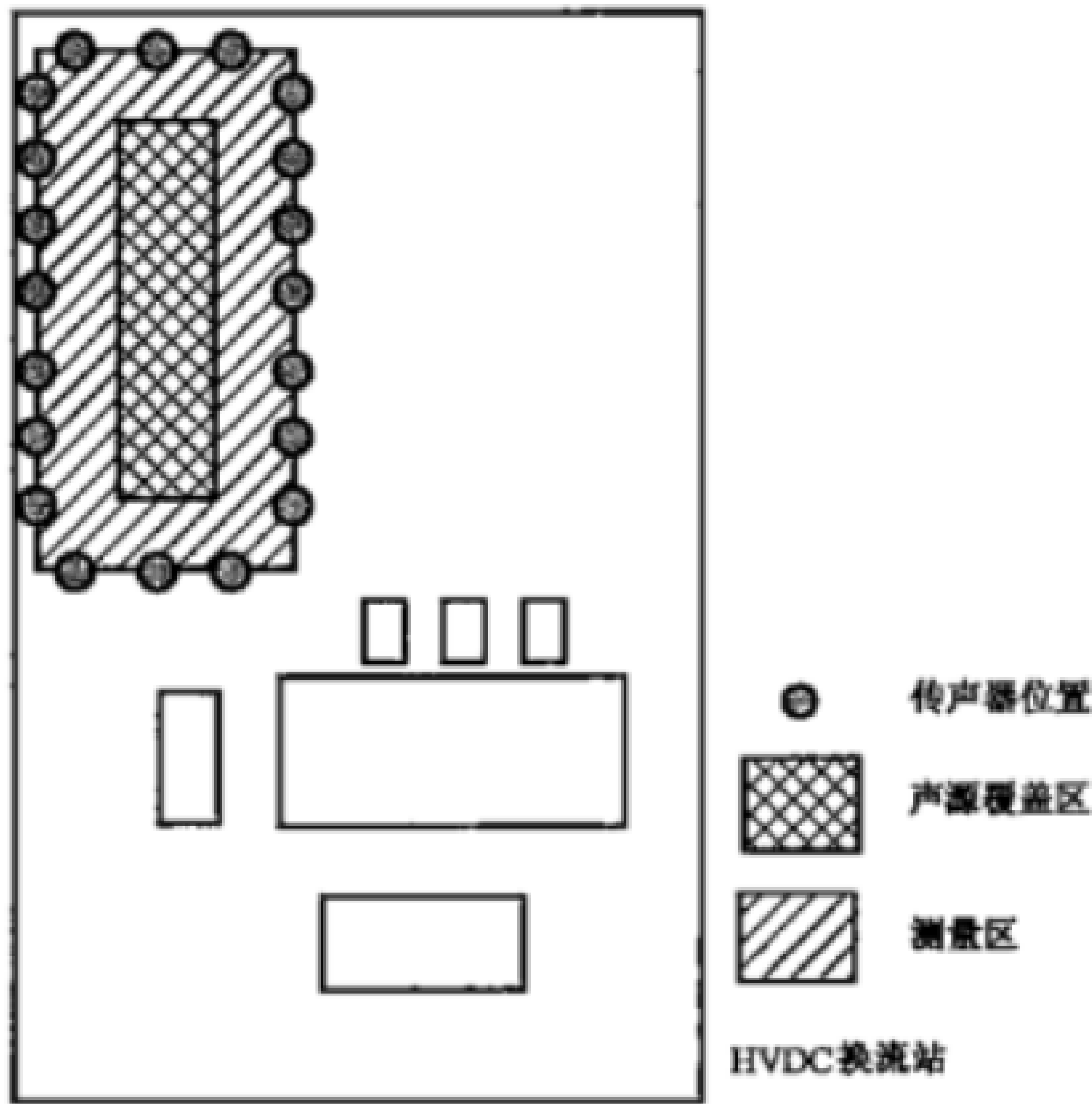


图 32 用于确定声功率级的传声器位置示例

12 设计参数

12.1 概述

本章给出了进行高压直流换流站可听噪声设计时所需要的数据和信息,并包括了随后在换流站内及其周围声级验证所需要的数据和信息,同时给出了范例。这些内容也可作为检查列表使用,目的在于进一步说明相关设计内容的合理性。

12.2 业主提供或承包商调查的数据

12.2.1 土地使用分类,噪声规定和限值要求

12.2.1.1 高压直流换流站土地使用分类

应提供拟建站址的地图,最好是一份包括换流站区域的土地分类的地形图。地图上还应标明周围区域的用地类型以及最近的居民区、商业区、公共场所、工业场所的位置(见表 10)。见第 4、第 5、第 11 章。

表 10 高压直流换流站土地使用分类参数

工业区	商业区	住宅区
娱乐区	其他区域	
注:如果在靠近换流站的边界区域存在其他用地类型,则应提供该处的用地分类图。		

12.2.1.2 换流站一日内各时间段的噪声限制

应提供相关的噪声规定(见表 11),以及需要遵守这些规定的地点的位置(见表 12)。可能的话还应注明在不同时段内的噪声限制要求(见表 13)。有关其他声的规定,如音频设备或短时噪声的控制也应提供。见第 4、第 5、第 11 章。

表 11 现行规章的噪声规定

项 目	是	否
存在单个或特有频率噪声的规定		
存在短时噪声的规定		
注：应明确所有可行的噪声规定，说明限制条件来源于哪个规章。		

表 12 噪声限值的位置

换流站围栏处	在用户边界处
距换流站中心给定距离处	附近地区边界
距换流站围栏一定距离处	其他点
注：在地图上标明相应位置地点。见第 4、第 5、第 11 章。	

表 13 换流站一日内各时间段的噪声限值表

噪声限值/[dB(X)/dB(A)]	时 段
注：上表中噪声限值(声功率级或声压级)的单位 dB(X)表示 dB(L)(L 表示线性变化,无计权)或 dB(C)(C 计权)等。	

12.2.2 环境条件

12.2.2.1 进行验证测量时存在的背景噪声级

拟建换流站区域的背景噪声会影响将来对高压直流换流站声级测量的结果。背景噪声源(如已安装的设备,公路噪声或空中交通工具的噪声)的噪声级一般与一天中的时间有关(见表 14)。这些噪声源应按其声学分布绘制在地图上并随功能规范一起提交。如果背景噪声级不能或没有预先确定,则必须在测量时进行假定,这种方法是不推荐使用的。见第 4、第 10、第 11 章。

表 14 背景噪声级

最大背景噪声级/ [dB(X)/dB(A)]	位 置	时 间

12.2.2.2 地形

地形参数见表 15。

表 15 地形参数

项 目	是	否
存在造成声波反射的山或丘陵		
存在大波浪地貌		
注：如果选择“是”，则需附录地形轮廓图。		

12.2.2.3 验证可听噪声时的气象条件

气象参数见表 16 和表 17。

表 16 气象参数 1

最高温度/℃	最低温度/℃
最高湿度/%	最低湿度/%

表 17 气象参数 2

项 目	是	否
大风天		
大雪天		
注：这些因素会对声波的传播有较大影响。如果选择“是”，需对内容给予解释。		

12.2.2.4 相邻区域

相邻区域的参数见表 18 和表 19。

表 18 相邻区域参数 1

必须满足噪声限值的相邻最近的区域(商业,公共或工业)的位置

表 19 相邻区域参数 2

项 目	是	否
将来最有可能相邻的区域		
注：如果相邻区域有噪声限值要求,则需附录相关图表、图示或地图。		

12.2.2.5 其他(见表 20)

表 20 其他参数

项 目	是	否
附近有变电站或电厂		
传输线上存在电晕噪声		
附近有重要的噪声源		
注：如果选择“是”,则需进行详细解释。		

12.2.3 高压直流换流站运行工况

12.2.3.1 正常运行工况

应详细规定声级验证测量期间换流站的运行工况(见表 21 和表 22),需要考虑的相关条件见第 8 章。

表 21 换流站运行工况 1

最大功率/%	最小功率/%	最高电压/kV	最低电压/kV	负相序(NPS)/%
交流电压谐波/%	3 th	5 th	7 th	其他
最高频率/Hz	最低频率/Hz			

表 22 换流站运行工况 2

需考虑的电力系统条件

12.2.3.2 用于控制噪声设计的运行工况

列出除额定运行工况外必须考虑的工况参数。

12.3 承包商应澄清的数据

12.3.1 设备噪声

设备噪声数据见表 23。

表 23 设备噪声数据

设备名称				
噪声级/[dB(X)/dB(A)]				
降噪措施				
声测量方法				
声修正方法				
电压和电流条件				
备注				

12.3.2 高压直流换流站噪声预测

与噪声有关的设计包括预测换流站周围地区的各噪声分量。该数据(见表 24)一般在描述计算方法、声源、结果以及必要的降噪措施的报告中给出。见第 9 章。

表 24 换流站噪声预测数据

运行工况及其他假设	
计算方法	
换流站布局	见地图
计算结果	见地图或表格

12.3.3 站内噪声测量

通常，验证性测量依照现有的规定和规章进行，其所有结果在描述测量方法、测量设备、运行工况、气象条件和测量的噪声级的报告中给出，测量数据见表 25。对是否满足要求的评价和对可能需要采用的降噪措施的建议也包括在这份报告中。

表 25 高压直流换流站站内噪声测量数据

日期和时间	
测量方法	
测量仪器	
测量点位置(在地图上给出)	
测量的噪声级/dB(X)/dB(A)	
气象条件	
运行工况	
备注	



GB/T 22075-2008

版权专有 侵权必究

*

书号:155066·1-34376

定价: 34.00 元

www.bzxz.net

免费标准下载网