

BIANDIANZHAN  
JIANGZAORYONGCAILIAO

# 变电站 降噪用材料

主 编 韩 钰  
副主编 聂京凯 陈 新



非 外 借



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 变电站 降噪用材料

主编 韩 钰  
副主编 聂京凯 陈 新  
藏书章



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书详细阐述了变电站噪声的危害及噪声控制用材料的降噪原理、评价方法、应用形式及工程应用。本书共7章,主要内容有噪声基本概念、降噪材料的发展、变电站降噪用材料评价方法、变电站用吸声材料、变电站用隔声材料、变电站用阻尼材料及降噪材料在输变电工程中的应用。

本书可供变电站设计、运检维护人员学习,也可供从事电网环境保护管理、运行、检修等专业人员及大专院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

变电站降噪用材料 / 韩钰主编. —北京: 中国电力出版社, 2017.11

ISBN 978-7-5198-1064-1

I. ①变… II. ①韩… III. ①变电所—噪声控制—材料 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 196174 号

---

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 袁 娟 (juan-yuan@sgcc.com.cn)

责任校对: 朱丽芳

装帧设计: 王红柳

责任印制: 邹树群

---

印 刷: 三河市百盛印装有限公司印刷

版 次: 2017 年 11 月第一版

印 次: 2017 年 11 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张: 8.5

字 数: 139 千字

印 数: 0001—1000 册

定 价: 40.00 元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

## 主 编

---

韩 钰

## 副主编

---

聂京凯 陈 新

## 参 编

---

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 李 睿 | 卢 林 | 汪美顺 | 樊 超 | 王广克 |
| 田 一 | 刘晓圣 | 何 强 | 侯 东 | 张嵩阳 |
| 孔晓峰 | 刘主光 | 王 斌 | 钱诗林 | 易永利 |
| 肖伟民 | 孔 玮 | 吴 健 | 胡 胜 | 白晓春 |
| 兰新生 |     |     |     |     |

## 前 言

---

近年来,随着经济的快速发展,为满足社会发展的需要,输变电工程建设正紧锣密鼓地开展。但由于土地资源的紧缺,一些变电站区域不可避免地成为人口密集区域,对周边居民的工作和生活带来了干扰,尤其是变电站的低频噪声影响备受公众关注。已出台的《国务院环境宏观战略》中,电力行业变电站(换流站)也已被明确列为噪声整治重点,并将逐步加大噪声超标惩治力度,电网建设不断遇到环境保护方面的问题。

国家电网公司对电网的环境保护非常重视,2004 年国家电网公司组织制定了《国家电网公司环境保护管理办法(试行)》,并于当年的 2 月 20 日予以印发,要求各单位认真贯彻执行,该管理办法明确要求电网设备的运行应满足国家有关环境保护标准的要求,电网企业对电网设备运行过程中产生的噪声源应进行监测分析,对不能达到国家环保要求的送电线路和变电站依据国家有关要求进行综合治理与改造。国家电网公司针对输变电设备的噪声治理持续投入,相关科研人员也针对输变电噪声产生机理及治理方法开展了系统、深入的研究,取得了大量的研究成果。目前我国已将输变电工程的环境评价与竣工验收列入环保法规,使得输变电工程的环境保护法制化。在电网规划、立项、设计、施工、验收和运行等环节,已经把输变电系统的环境影响问题作为一个重要指标。

为了满足输变电工程噪声控制的需要,本书内容理论联系实际,对变电站降噪用材料进行系统梳理,结合国内外在输变电降噪领域的研究成果,以及输变电降噪工程中积累的经验,详细阐述了输变电噪声危害及治理方法,主要内容有:噪声基本概念、降噪材料发展概况及趋势、变电站降噪用材料评价方法、变电站用吸声材料、变电站用隔声材料、变电站用阻尼材料及降噪材料在输变电工程中的应用。本书第 1 章由韩钰、卢林、汪美顺编写,第 2 章由聂京凯、张嵩阳、孔晓峰编写,第 3 章由樊超、刘晓圣、刘主光编写,第 4 章由田一、孔玮、钱诗林编写,第 5 章由王广克、王斌、易永利编写,第 6 章由何强、吴健、胡胜编写,第 7 章由侯东、肖伟

民、白晓春、兰新生编写。全书由韩钰主编，聂京凯、陈新、李睿进行统稿。本书在编写过程中得到了作者所在单位全球能源互联网研究院电工新材料所和同行专家的大力支持和帮助。特在此表示衷心的感谢。

本书是电力行业员工、电力设计人员和电力运检维护人员的培训教材，也可供从事电网环境保护管理、运行、检修等专业人员及大专院校有关专业的师生参考。

由于编者水平和经验有限，书中难免存在一些缺点和错误之处，望读者提出宝贵意见，供作者及时进行修正。

编者

2017年6月

# 目 录

---

## 前言

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第 1 章 噪声           | 1  |
| 1.1 定义与分类          | 1  |
| 1.2 主要危害           | 3  |
| 1.3 控制与防治策略        | 6  |
| 第 2 章 降噪材料的发展      | 7  |
| 2.1 吸声材料           | 7  |
| 2.2 隔声材料           | 12 |
| 2.3 现状与发展          | 15 |
| 第 3 章 变电站降噪用材料评价方法 | 18 |
| 3.1 声学性能评价方法       | 18 |
| 3.2 服役性能评价方法       | 34 |
| 第 4 章 变电站用吸声材料     | 38 |
| 4.1 吸声降噪原理         | 38 |
| 4.2 吸声材料的原理与分类     | 40 |
| 4.3 吸声材料应用的建筑因素    | 49 |
| 4.4 常用的吸声材料        | 51 |
| 4.5 吸声常见应用形式       | 57 |
| 第 5 章 变电站用隔声材料     | 59 |
| 5.1 隔声的基本概念及隔声原理   | 59 |
| 5.2 隔声结构           | 63 |
| 5.3 隔声材料           | 68 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 5.4 隔声常见应用形式               | 73         |
| <b>第 6 章 变电站用阻尼材料</b>      | <b>80</b>  |
| 6.1 阻尼材料的基本概念及作用原理         | 80         |
| 6.2 阻尼材料                   | 82         |
| 6.3 阻尼材料常见应用形式             | 91         |
| <b>第 7 章 典型案例</b>          | <b>94</b>  |
| 7.1 变电站噪声控制需求概述            | 94         |
| 7.2 降噪材料的模块化设计与应用          | 95         |
| 7.3 降噪材料在典型老旧变电站噪声控制工程中的应用 | 105        |
| 7.4 降噪材料在新建变电站噪声控制中的应用     | 112        |
| <b>参考文献</b>                | <b>124</b> |

# 1 噪 声

## 1.1 定义与分类

随着近代工业和交通运输业的发展,噪声污染越来越严重,已经成为世界公害。纽约、北京、上海、伦敦、东京等城市每年在各类环境污染方面的投诉案件都曾有过噪声投诉数量占首位的报告。日本公布的 1966~1974 年全国公害诉讼案件统计报告显示:在大气污染、水污染、土壤污染、噪声污染、地面下沉等诉讼案件中,噪声污染年年稳居首位。美国环境署统计美国有 1 亿人生活在噪声超过 55dB(A)(噪声超过该数值人就难以忍受)环境中,1300 万人生活在噪声超过 70dB(A)(噪声超过该数值对人体健康有害)环境中。随着现代化城市和工农业经济的发展,部分变电站已处于城市的中心或人口密集区。因此,变电站内各种电气设备运行时产生的噪声,不可避免地会对站内的工作人员和附近的居民及环境产生影响。在日益注重环境保护的今天,对变电站内噪声的产生原因进行分析和控制,减少对工作人员和环境的影响,愈发重要。

从物理定义而言,振幅和频率杂乱、断续或统计上无规律的声振动称之为噪声。从生理学和心理学的观点看,令人不愉快的、使人讨厌和烦躁的、过响的、干扰妨碍人们生活工作学习的以致对人们健康有影响或危害的声音都是噪声。从环境保护的角度而论,凡是人们所不需要的声音统称为噪声。由于人们对噪声的判别更多的是心理学上的,而不完全取决于它的物理特性,如强度、频率、时间等。因此从心理学上噪声可大致分为以下三类:

- (1) 过响声。超过一定强度标准的声音,可危及人体健康。
- (2) 妨碍声。妨碍人们工作、生活、学习、生产等活动。
- (3) 不愉快声。使人产生厌恶感。

对应输变电工程而言,噪声可分两类,一类是输电线路因电晕产生的可听噪声,可听噪声是导线周围空气电离放电时所产生的人耳能够直接听得见的噪声,是 110kV 以上电压等级才出现的问题,是一种声频干扰。交流输电线路可听噪声有两个特征分量:一部分是由正极性流注放电产生的宽频带噪声(破

裂声、吱吱声或嘶嘶声),这是交流噪声的主要成分;另一部分是由于电压周期变化,使导线带电离子往返运动产生的纯音(哼声和嗡嗡声),频率是 50Hz 的倍频。直流输电线路电晕产生的噪声主要来源于正极性流注放电,噪声中明显烦恼的分量是脉冲性的,随机发生的流注放电发出的不连续的“噼啪”声,以较高声压的声波形式传播,噪声中不含有纯音。另一类是变电站内变压器、高压电抗器等设备本体和辅助设备产生的噪声,且声源的主频段噪声大多为低频噪声。本体的噪声主要来自变压器等运行时产生的电磁噪声。磁致伸缩引起的铁心振动使铁心随着励磁电流周期性地振动,发出噪声。另外,负载电流产生的漏磁,引起绕组、油箱壁的振动,产生的噪声也会以波的形式向四周传播。辅助设备的噪声主要来自冷却风机、油泵运行时,以及连接部位转动时的振动产生的噪声。变压器等本体振动有时也可能通过变压器油管、接头及其装配零件等传递给冷却器,加剧其振动,加大其辐射的噪声。

本书将主要针对变电站噪声控制用各类材料、技术措施进行详细介绍。



续表

| 等效连续<br>A 声级 (dB) |       | 工龄 (年) |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------|-------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                   |       | 0      | 5  | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 110               | 危害率   | 0      | 20 | 55 | 71 | 78 | 78 | 77 | 72 | 62 | 45 |
|                   | 听力损伤者 | 1      | 28 | 58 | 76 | 85 | 88 | 91 | 93 | 95 | 95 |
| 115               | 危害率   | 0      | 36 | 71 | 83 | 87 | 84 | 81 | 75 | 64 | 47 |
|                   | 听力损伤者 | 1      | 38 | 74 | 88 | 94 | 94 | 95 | 96 | 97 | 97 |

表 1-2 不同声级稳态噪声连续暴露下各工龄组工人的噪声耳聋情况

| 噪声级/<br>dB (A) | 10 年            |                 |                   | 20 年            |                 |                   | 30 年            |                 |                   |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
|                | 统计<br>人数<br>(人) | 耳聋<br>人数<br>(人) | 耳聋阳性百分率<br>(置信区间) | 统计<br>人数<br>(人) | 耳聋<br>人数<br>(人) | 耳聋阳性百分率<br>(置信区间) | 统计<br>人数<br>(人) | 耳聋<br>人数<br>(人) | 耳聋阳性百分率<br>(置信区间) |
| 80             | 270             | 0               | 0 ~ 1.37          | 143             | 0               | 0 ~ 2.61          | 102             | 1               | 0.18 ~ 5.34       |
| 85             | 271             | 0               | 0 ~ 1.39          | 142             | 1               | 0.14 ~ 3.64       | 132             | 2               | 0.41 ~ 5.35       |
| 90             | 324             | 0               | 0 ~ 1.2           | 238             | 2               | 0.23 ~ 3.01       | 111             | 2               | 0.55 ~ 6.33       |
| 95             | 173             | 2               | 0.25 ~ 3.95       | 224             | 5               | 0.95 ~ 5.11       | 57              | 5               | 3.81 ~ 18.93      |
| 100            | 203             | 5               | 1.08 ~ 5.62       | 116             | 11              | 5.36 ~ 16.18      | 77              | 15              | 12.23 ~ 29.83     |

从表 1-1 和表 1-2 可以看出，在 85dB (A) 以下的职业性噪声暴露时，一般不至于引起噪声性耳聋，当然，这不等于不造成听力损失。在 85dB (A) 以上，造成轻微的听力损伤；在 85 ~ 90dB (A)，造成少数人的噪声性耳聋；在 90 ~ 100dB (A)，造成一定数量和一定程度的噪声性耳聋；在 100dB (A) 以上，造成相当数量和相当程度的噪声性耳聋。由于输变电工程产生的是稳态连续噪声，不连续的脉冲噪声（如枪炮噪声）引发的听力损失这里就不详细阐述。

1.2.2 对神经系统和心血管系统等的影响

噪声作用于人的中枢神经系统，引起大脑皮层的兴奋和抑制平衡失调，导致条件反射异常、脑血管受损害、脑电位改变、神经细胞边缘出现染色质的溶解，严重的会引起渗出性出血灶。这些生理学变化，如果是早期接触噪声，在 24h 内可以复原，但长期在噪声作用下，将形成牢固的兴奋灶，累及植物神

经系统，产生病理学影响，导致神经衰弱症。噪声可导致交感神经紧张、心率加快、心律不齐、心肌结构损伤、心电图异常等，甚至引起心律失常、高血压等。调查研究发现，接触噪声的人群易发生胃功能紊乱，表现为食欲不振、恶心、无力、消瘦以及体质减弱等。噪声对视力、内分泌系统也有一定影响。

### 1.2.3 对设备仪器的影响

众所周知，噪声源于物体的振动。振动会影响精密设备的正常运行、降低机器的使用寿命。在电抗器等设备中，由于振动引起的结构松动较为明显，会增加自身电能损耗、漏磁增大，严重者导致设备失效。

## 1.3 控制与防治策略

噪声控制要采取技术措施,需要投资,因此最终只能达到适当的声学环境,即经济上、技术上和要求上合理的声学环境和标准,而不是噪声降得越低越好。

根据声学系统的三个组成环节,噪声控制技术一般分为对声源的控制、对传播环节的控制以及对接收器的控制。国际噪声控制协会曾经提出自 20 世纪 80 年代起是“从声源控制噪声”的年代。降低声源的噪声辐射是经济有效地控制噪声的根本性手段。

### 1.3.1 声源控制

控制运转的变压器、电抗器等机械设备噪声的主要途径有两条:①改进结构,提高设备部件的加工精度和装配质量,采用高磁导铁芯材料、降低铁芯磁通密度等,降低声源的噪声;②利用声的吸收、反射、干涉等特性,采用吸声、隔声、减振、隔振等技术,以及加装消声器等,如切断噪声向外传播途径,在铁芯与油箱结合处加装隔振胶垫,以控制声源的噪声辐射。

此外目前最简单有效控制声源噪声的方法就是在声源设备外加装隔声罩(box-in)。以换流变压器为例,隔声罩一般罩在设备本体侧,而设备散热器部分仍直接在罩外的空气中工作。

### 1.3.2 传播途径控制

在噪声源设备周围或厂界建立隔声屏障,隔声屏障的材料可以是金属材料(如钢板)和无机类材料(如钢筋混凝土),声屏障内也可采用吸声材料和吸声结构,将传播中的噪声声能转变为热能等。对于固体振动产生的噪声采取隔振和阻尼措施,减弱噪声的传播,如在变压器油箱和基础之间加缓冲器。也可为噪声源附近居民的居室更换隔声门窗。另外,合理的城镇建设规划,也是预防噪声的有效措施。

### 1.3.3 接收者控制

变压器等设备在运行中发出的噪声是不可避免的。这种噪声会使人们增加烦恼,但由于多种原因,这个问题又难以解决,其主要原因有两个:①配电变压器通常要比其他设备离民宅或办公场所更近;②由于变压器每天 24h 连续运行,尤其是在夜间,连续的噪声最为突出。为了减小噪声对人们的困扰,人员可佩戴护耳器,如耳塞、耳罩、防声盔等。建筑公司采用隔声通风窗等。

## 2 降噪材料的发展

降噪材料从功能及原理上主要分为吸声材料、隔声材料及阻尼材料。上述材料在各自领域分类方法也多种多样,如结构、材质、功能、吸声原理等。从最常用的吸声原理角度,一般将吸声材料分为三类。多孔吸声材料、共振吸声材料(或结构)、特殊吸声结构;隔声材料按其结构分为均质隔声材料和复合隔声材料;而阻尼材料一般按其材质进行分类,分为金属阻尼材料及非金属阻尼材料。

### 2.1 吸声材料

#### 2.1.1 吸声材料原理

多孔吸声材料内部一般具有大量小孔,小孔相互贯通并直接连通至材料表面,当声波透入材料孔隙后,就会引起空气在孔隙与孔壁间的摩擦,从而使声能由于粘滞性和热传导性更易于变为热能而消耗,媒质各处存在温度梯度,从而使相邻质点间产生热交换过程,且热交换是不可逆的,随着机械能的损耗,也会使声能更多地转化为热能,如图 2-1 所示。

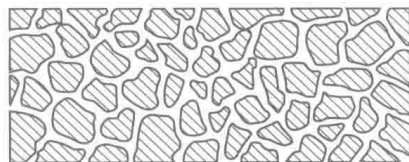


图 2-1 多孔吸声材料

共振吸声原理是利用亥姆霍兹共振器(如图 2-2 所示)原理,通过与低频声波发生共振消耗声波的声能量,即当入射声波的频率等于吸声结构的固有频率时,就会发生共振,这时颈管内空气振动的速度达到最大值。当入射声波频率偏离共振频率,振速就相应地逐渐减小,由于摩擦损耗的声能  $W_a$  和振速的平方成正比,可表示为

$$W_a = R_a U^2 \quad (2-1)$$

对于声阻一定来说,振速越大,消耗的声能也越大,共振时振速最大,因此其吸声系数也最大。共振结构的孔径尺寸、分布方式、排布密度等很多因素均可对结构的吸声效果产生影响。

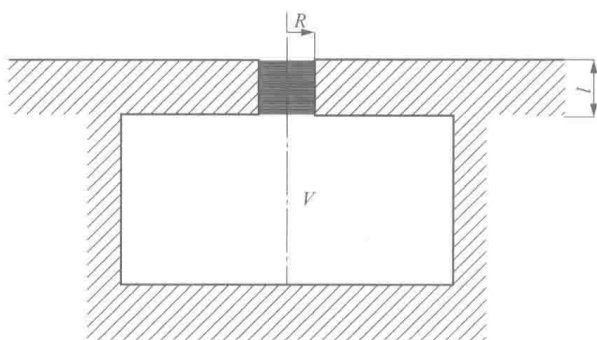


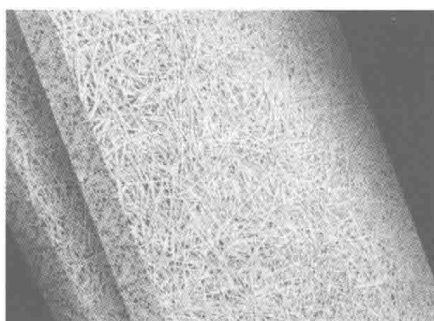
图 2-2 亥姆霍兹共振吸声原理图

### 2.1.2 吸声材料现状及发展

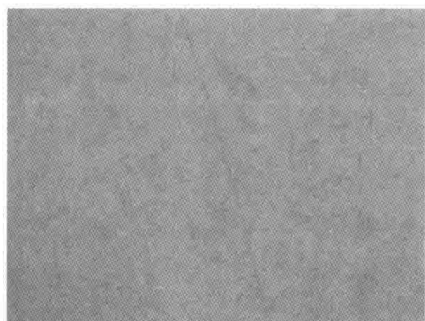
(1) 纤维（多孔）吸声材料。早期使用的吸声材料主要为多孔吸声材料，以植物纤维制品为主，如棉麻纤维、毛毡、甘蔗纤维板、木质纤维板、水泥木丝板以及稻草板等有机天然纤维材料。有机合成纤维材料主要是化学纤维，如晴纶棉、涤纶棉等。这些材料在中、高频范围内具有良好的吸声性能，但防火、防腐、防潮等性能较差，如图 2-3 所示。



(a) 化纤毛毡



(b) 木纤维板



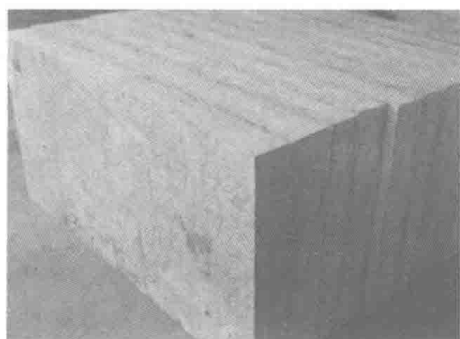
(c) 水泥木丝板



(d) 有机纤维毡

图 2-3 天然及有机纤维材料

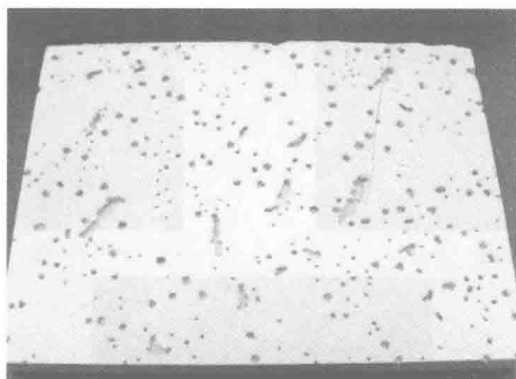
随后,人工制造的各类无机纤维材料不断问世,如岩棉、矿渣棉和玻璃棉等。这类材料不仅具有良好的吸声性能,而且具有质轻、不燃、不腐、不易老化、价格低廉等特性,从而替代了天然纤维的吸声材料,在声学工程中获得广泛的应用。但此类材料的主要特点是其微尘对于环境的污染。如岩棉/玻璃棉类吸声材料纤维间没有结合强度,且容易受潮,受潮后易产生塌落,吸声性能损失严重;此外,上述材料易老化污染环境,在某些服役条件下,2~3年即开始岩棉微尘挥发,平均不到十年就会污染很严重。此外,此类吸声材料对于低频噪声吸声系数低,如需达到特定降噪要求,往往需要在结构上增大材料厚度,使安装、布设都存在较多弊端,如图2-4所示。



(a) 岩棉



(b) 玻璃棉



(c) 矿渣棉

图2-4 矿物纤维材料

除上述天然植物纤维、矿物纤维吸声材料外,目前降噪领域还出现了种类众多的人造纤维,或对现有的植物纤维进行改性提高其防火、防腐、防蛀的能力。如喷涂纤维K13就是利用纯植物纤维与水基胶黏剂混合制备而成,它们正被广泛应用在各服役环境中,如图2-5所示。