

## ABSTRACT

While HVDC plays a vital role in electricity transmission, the big noise there of has a bad effect on the production and life of the personnel in and outside the station. Simulation of sound field in the station is of great significance.

This thesis has utilized the Sound PLAN software and completed the simulation of sound field in Huaxin and Caijiachong converter stations. After exploring the noise distribution, we have diagnosed the main noise source which affects the noise distribution inside and outside — converter transformer, smoothing reactor and AC filter field, and have analyzed the respective sound production principles. According to acoustics theory, the acoustic source model of the station has been constructed. Through processing, analyzing and inducing the data, and combining the actual situation, we have transformed the sound power level into the sound pressure level, which is lead into the model. Finally the Grid Noise Map of the two stations has been reached.

After the actual survey, the simulation value and the actual observed value have been compared. Then the model of the sound field has been examined and adjusted by the Sound PLAN. The result shows that the established model of Huaxin and Caijiachong converter stations agrees with the actual situation in the main. For some reason, the unconformity of the simulation value to the actual observed value in individual spots exists, but the overall error remains within  $\pm 3\text{dB}$ . Accuracy and feasibility of the model have been verified.

**Key words:** HVDC; noise source; simulation of sound field; sound power level

# 哈尔滨工程大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献等的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者（签字）： 陈思舟

日 期： 2008 年 3 月 20 日

# 第 1 章 绪论

## 1.1 选题的目的及意义

随着国民经济的增长,中国用电需求不断增加,中国的自然条件以及能源和负荷中心的分布特点使得超远距离、超大容量的电力传输成为必然,为减少输电线路的损耗和节约宝贵的土地资源,需要一种经济高效的输电方式。高压直流输电技术恰好迎合了这一要求。三峡直流输电工程的投产运营将缓解长江三角洲的城市工业和居民用电压力。

高压直流换流站工作时,站内的一些换流设备会产生很强的噪声,这些噪声已经超出了国家环评标准,它不仅对站内工作人员的身心健康产生损害,而且对周边居民的日常生活也产生严重影响。巨大持久的噪声可以引起神经系统的疲劳及与此有关的疼痛。如何解决好噪声、电磁波的影响问题,直接关系到广大居民的生活质量和身体健康。因此需要对换流站内外的噪声进行研究和控制。建立仿真模型对换流站内外的噪声分布进行计算,并与实测值进行对比、验证,得出换流站内外的噪声分布情况。这项工作对整个降噪工程都非常有意义。

换流站在运行过程中产生的噪声主要来自于换流变压器、平波电抗器、交流滤波器场和风机。换流变压器和平波电抗器等声源本体发出的噪声为低频噪声,其可以传得很远,并且难以消除。风机等产生的噪声为高频噪声,一般比较好处理,其衰减得也较快。寻求有效降低换流站噪声的措施已引起人们的重视。这凸显了进行声场模拟的重要性。

用声学软件模拟声场是便捷而有效的方法。国际上通用的声学分析软件有很多,并且应用范围涉及到了生产生活的方方面面。SoundPLAN 软件自 1986 年由 Braunstein + Berndt GmbH 软件设计师和咨询专家颁布以来,迅速成为德国户外声学软件的标准,并逐渐成为世界关于噪声预测、制图及评估的领先软件。SoundPLAN 在我国用户不多,所以 SoundPLAN 在我国的应用还有很大的发展空间。本次的毕业论文将 SoundPLAN 的功能运用到高压直流换流站的噪声场模拟、对未来换流站的选址、站内换流电器的布点都有很好的指导意义。

## 1.2 国内外声场模拟现状

1900 年 W.C. Sabine 发表题为《混响》的论文奠定了厅堂声学乃至整个建筑声学的科学基础。一百多年来,建筑声学的理论不断地得到完善。1934 年,德国的 Spandock 教授提出了一种“可听化”思想,他试图通过物理和数学的方法建立声场的模型,并利用缩尺模型来模拟音质效果,但限于当时的理论基础和技术条件,收获甚微。不过,这种思想却成了封闭声场模拟的重要里程碑,于 50 年代发展成熟。声学缩尺模型极大地推动了建筑声学的发展。但缩尺模型有投入大周期长、换算复杂的缺点。目前,这种以声场建模为中心的声学模拟思想已经得到了很大的发展,特别是近十年计算机技术的突飞猛进,促使数字式声场模拟研究开始呈现出蓬勃发展的局面,也为三维封闭声场的音质设计提出了全新的思路。

1968 年 Krokstad 提出第一个声线跟踪算法后,声场模拟技术开始逐渐由物理模型为主变为数字技术与模拟技术并行发展。

### 1.2.1 国外声场研究现状

德黑兰大学的 P. Nassiri<sup>[1]</sup>对 Karaj 火车站建立了铁路噪声预测模型。该模型针对铁路辐射噪声进行了多方面的优化考虑,从而预防或减少噪声对居民生活、生产造成的影响。该模型主要用计算机对内燃机火车的 A 声级进行模拟、仿真。该模型已经用于美国联邦运输管理系统和法兰克福铁路噪声防治当中。

约旦大学的 Saad Abo-Qudais<sup>[2]</sup>针对十字路口交通噪声建立声场统计模型。该模型基于对收集到的数据信息分为三部分。第一部分模型通过记录车流速度、通过距离、交通流量和“英国钟摆计数法”等预测相应的噪声级;第二部分模型描述最大声压级、最大车流量和扬声器的使用之间的关系;第三部分模型通过结合英国钟摆计数法、道路宽度和最小声压级方法预测声压级。通过对比在不同地点的预测噪声声压级,这个模型得到较好的验证,说明其具有良好的预测能力。

波兰 Adam Mickiewicz 大学的 Roman Golebiewski<sup>[3]</sup>发表了《紊流对点声源在地表面辐射噪声传播时的影响》。存在于大气中的紊流对声波和地表的相



互反射作用产生影响。通过地表大气中的紊流衰减的噪声要比没有紊流影响的噪声衰减要小。作者建立了一个预测地表噪声的工程模型,适用于固定或移动点声源。该模型可以计算空气的吸收和紊流对地表作用的影响。该模型以 100km/h 行驶的汽车作为点声源,并采集了数据。模型引入两个作为地表和空气吸收可调整的参数。

意大利的 Renzo Arina<sup>[4]</sup>撰写了用于分解技术领域的空气声模拟。用计算机工具模拟开放空间谐波声传播已经被应用。它主要由两阶段技术组成。在第一阶段被计算出来的黏性场,用以解决不能压缩的 Navier-Stokes 方程式。在第二阶段得到的声场用以解决 Liththill's 波的方程式。两个方程式应用于两个不同的声场。Liththill's 波的方程式着重用于解决在高频的、简单的、有限的频率领域,用于测试声音的处理情况。它可以计算声波绕过障碍物的衍射现象。完善过的空气声技术应用于模拟一个亚音速薄片边界层空腔的辐射噪声情况。流体场表现了周期性涡流从空腔经过后脱离了,将漩涡流模拟成噪声源。数据的结果证明了确实存在声场辐射的指向性。

日本东京的 Kenji Fujii<sup>[5]</sup>曾编写过用来鉴别噪声源并且能进行自动测量噪声的软件。该系统在通过背景噪声采集到目标噪声的同时,一些声音的参数就被计算出来了。这个软件还可以用于精密测量。这个系统装备了一套与计算声场相关联的模板用来进行噪声源的识别。这个系统实现了抗干扰的功能,例如在测量中人的说话、以及风声等等。整个噪声分析系统是完全仿造人耳听觉系统,进而声压级的时间信号和重要的声场参数被自相关系统和互相关系统在运转的同时萃取出来。

### 1.2.2 国内声场研究现状

90 年代前后是我国声场模拟研究的起步阶段,中科院声学所、清华大学以及同济大学王季卿教授、贺加添博士,华南理工大学吴硕贤教授等对该领域的研究在国内的推广起了较大的作用。不过,由于基础相对薄弱,加之研究规模和其它条件所限,总体水平与国外还有不小的差距。

西北工业大学的曾向阳、陈克安<sup>[6]</sup>对三维空间声场进行计算机仿真,该技术有助于建立既包括视觉,又包括听觉的真正的虚拟现实系统,同时也可为建筑声学设计、噪声控制等提供决策依据。

大连理工大学船舶工程系对半空间内结构声辐射进行了研究<sup>[7]</sup>, 该研究采用解析方法, 以脉动球为例研究了以自由表面或刚性表面为界的半空间内的声辐射问题。重点研究了自由表面或刚性表面对结构辐射声功率和辐射方向性的影响。

上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室对变压器铁心远场辐射噪声进行预估<sup>[8]</sup>。实验室建立了一种根据变压器铁心表面法向振动加速度预估变压器铁心远场辐射噪声声场的方法。基于封闭表面法向加速度计算辐射声场的 Helmholtz 积分公式, 建立了实验变压器铁心的声场计算数学模型, 进行数值仿真。

上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室对复杂声场中的频谱分离也在进行研究<sup>[9]</sup>。用一组传声器在不同位置测得声音信号, 利用盲源分离思想并结合声学故障诊断特点对混合信号进行频谱分离, 得到各台机器的特征频谱结构图, 使得对每台机器进行声学故障诊断成为可能。

上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室做过自由场波叠加的噪声源识别<sup>[10]</sup>。提出了一种基于波叠加的噪声源识别方法, 并通过仿真验证了在自由场条件下该方法的正确性。根据波叠加的原理, 声源产生的空间声场可以用其内部的一系列虚源点来等效代替, 而虚源源强可以通过匹配场点的声压来求得, 进而由这些虚源重构任意场点的各种声学量。

上海交通大学高性能计算中心对大电流母线桥电磁激励振动与噪声数值进行分析<sup>[11]</sup>。针对低压大电流母线桥的降噪难题, 应用有限元和边界元综合分析法建立了某型号母线桥的全三维数值模型, 并对其进行了振动声学数值计算。

浙江大学环境污染控制技术研究所对城市高架轨道交通沿线声场分布建立了理论计算模型<sup>[12]</sup>。根据波动声学 and 几何声学原理, 将列车看作运动着的有限长线声源, 建立了城市高架轨道交通沿线声场分布及其声屏障插入损失计算模型。

浙江大学分析测试中心池万刚教授对多声源声场特性进行过研究<sup>[13]</sup>。这项研究阐述了多声源声场的特性。并且通过对声场抗性指数 F3 和 F2 的计算及它们之间的差值大小来判别多声源声场中被测声源附近是否存在强指向性寄生噪声。同时通过对声压-质点速度相干系数的计算, 判别被测声源相对

寄声噪声是多声源声场中的弱声源，还是直接发射的强声源，或是混响区域内的强声源。

东南大学工程力学系建立了振动体向周围声场传播噪声的理论模型<sup>[14]</sup>。模型的建立以模态理论为基础，分析了振动体的结构振动与外部声场的相互关系，建立了求解振动与噪声正反两方面问题的理论模型，并给出了相应的计算方法。

### 1.3 本论文研究内容

本论文主要研究工作如下：

第一章：主要介绍了国内外有关声场建模的发展现状，及论文工作的研究背景；

第二章：论文针对两个换流站主要设备及建筑物的分布情况作了介绍，同时对换流站的主要噪声源的结构和工作原理进行阐述，并对换流设备产生噪声的机理进行分析；

第三章：介绍了 SoundPLAN 声学软件的基本功能和软件的使用流程，给出换流站主要噪声源仿真要求和计算完成后的校准方法；根据换流站内不同声源分布情况及实际换流设备的形状，通过 SoundPLAN 声学软件建立各个声源的模型，并对声场建模所需各种参数进行设定；

第四章：简述空气中声强、声功率与声压之间的关系，结合声场建模的要求，及换流站中主要噪声源辐射噪声的频谱特性，给出各种声源从声压级转换成声功率级的转换方法；

第五章：利用两个换流站满负荷运行时的现场实测数据，对换流站噪声建模情况进行验模，给出各种工况下的噪声分布图，对不同工况状态下仿真值与实测值进行了对比，并分析造成实测值与仿真值出现误差的原因。

最后，对整个仿真结果进行了综合分析，并对影响建模仿真计算精度的误差因素进行了分析。

## 第 2 章 换流站概况及主要噪声源介绍

### 2.1 换流站概况

#### 2.1.1 华新换流站概况

三峡—上海 $\pm 500\text{kV}$  直流输电工程华新换流站 (见图 2.1)位于上海市青浦区, 直流输电工程于 2004 年 12 月 28 日正式开工。华新换流站建设输电容量为 3000MW, 直流额定电压 $\pm 500\text{kV}$ 。换流站站内占地面积 9.13 公顷。

三峡—上海 $\pm 500\text{kV}$  直流输电工程是继三常、三广后我国建造的第三个三峡 3000MW 的大型直流输电工程, 是三峡右岸电站电力外送的骨干通道, 是我国实现直流输电技术国产化的关键性工程。它西起宜都换流站, 途径湖北、安徽、江苏、浙江和上海四省一市, 共计 33 个市区县, 跨越汉江、长江, 至上海华新换流站, 线路全长 1048.6 公里, 在 2006 年 11 月 25 日正式双极投入运行。华新换流站的建设是为了保证三峡右岸后四台机组的电力外送任务, 是三峡工程重点配套 $\pm 500\text{kV}$  输变电工程, 输送容量与政平换流站相同, 是国家电网公司跨大区进行电能交换的骨架之一。 $\pm 500\text{kV}$  华新换流站安装换流变 12 台, 平波电抗器 2 台, 500kV 交流滤波器 3 大组, 500kV 交流侧采用户内 GIS 装置。

该工程与我国已建成投产的龙政线、三广线及贵广线等 $\pm 500\text{kV}$ 、3000MW 直流工程相比, 无论是线路长度还是总体投资, 均为目前我国规模最大的直流线路工程和规模最大的单项送电工程。是三峡送出工程的重中之重, 是国家电网公司的形象工程和品牌工程。三沪直流线路工程承担着向上海送电 3000MW 的重要任务, 该工程的建设对于缓解华东电网及上海地区的用电紧张局面, 实现资源优化配置, 充分发挥三峡电站的效益, 促进上海地区的经济发展将起到极大的促进作用。

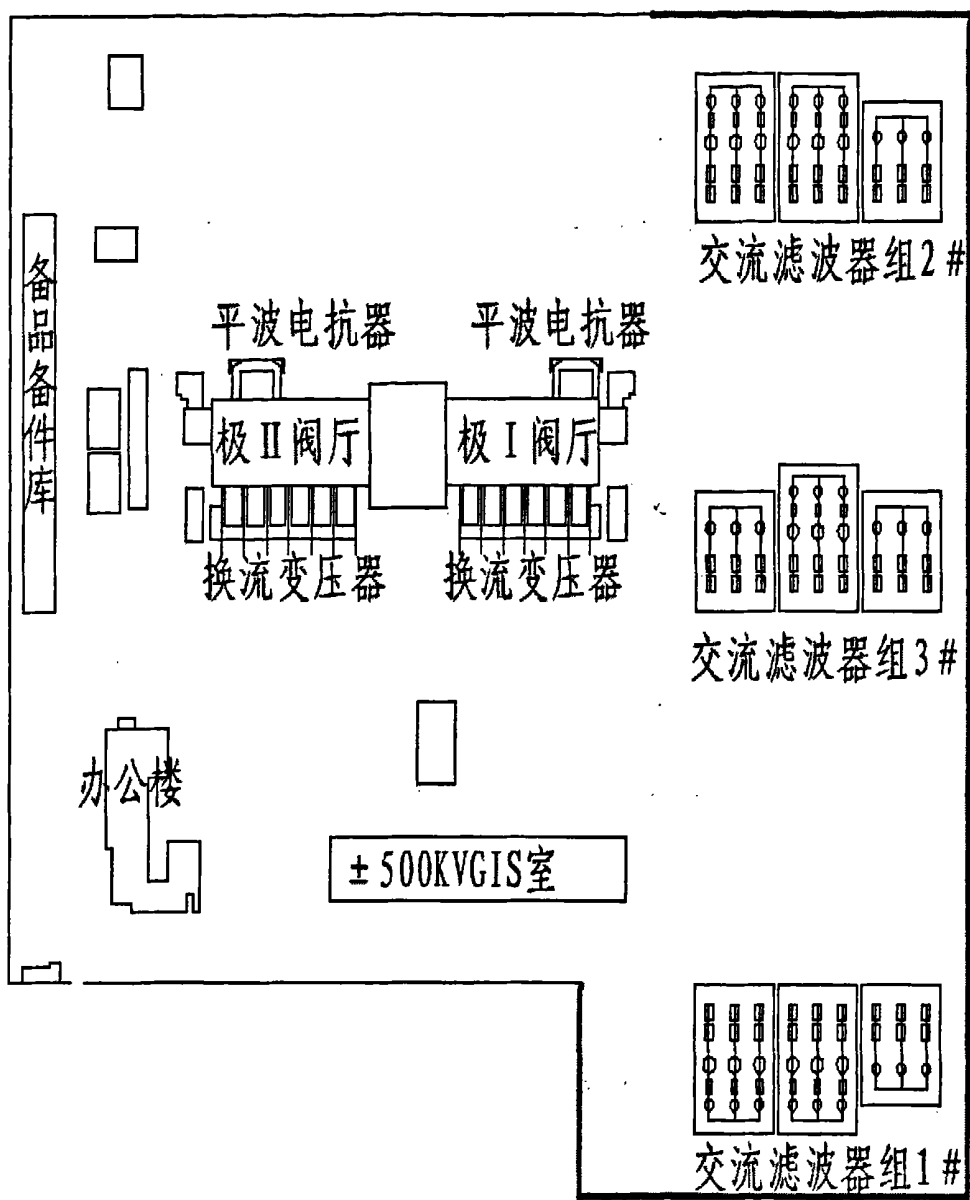


图 2.1 华新换流站平面布置图

### 2.1.2 蔡家冲换流站概况

蔡家冲换流站(见图 2.2)站址位于长江南岸, 东南距红花套镇约 3km。南距宜都市约 19km, 北距宜昌市约 25km, 西北距宜昌长江公路大桥约 5km。直流输送功率为 3000MW, 直流电压 $\pm 500\text{kV}$ , 每极安装两组换流变, 每组换

流变由 3 台 297.5MVA 单相双绕组换流变压器组成。

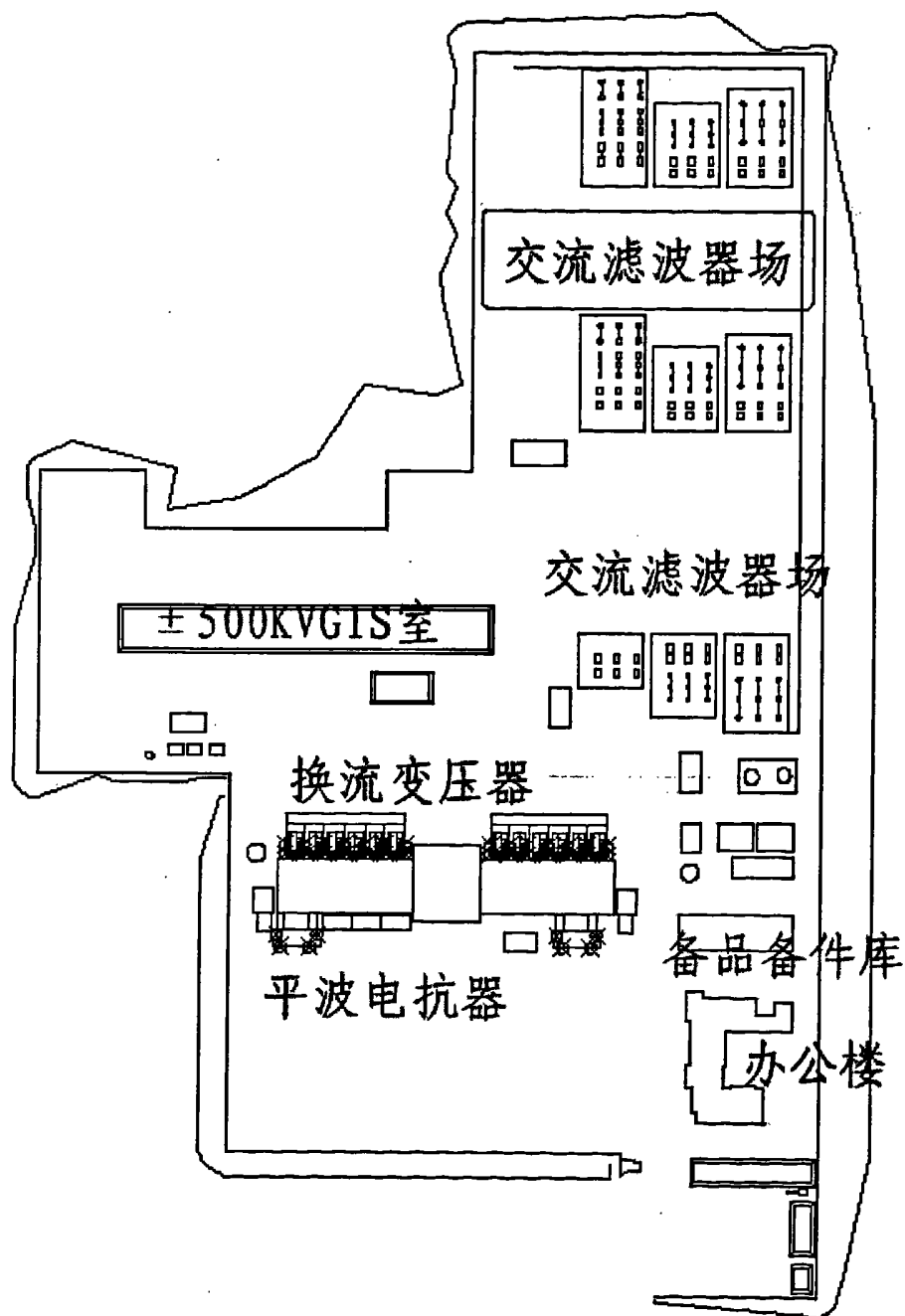


图 2.2 蔡家冲换流站平面布置图

直流配电装置场地位于站区的南部,  $\pm 500\text{kV}$  直流向南出线。换流站采用 GIS 方案, 站址总体布置方位北偏西  $32^\circ$  布置。 $500\text{kV}$  GIS 配电装置及交流滤波器配电装置位于站区北侧, 向南北两个方向出线。主控楼、阀厅及换流变布置于站区中部, 该区域还布置有平波电抗器、备用换流变、空调冷却设备、事故油坑等, 搬运轨道布置于该场地的两侧, 方便换流变和平波电抗器的运输和检修。直流配电装置场地位于站区的南侧, 与主控阀厅换流变场地对齐布置。 $\pm 500\text{kV}$  直流向南出线。站前区布置于站区东南侧, 即主控阀厅换流变场地和  $\pm 500\text{kV}$  直流配电装置场地的东侧。站前区内主要布置综合楼、检修备品备件库、消防水泵房、消防水池、生活给水机组、污水处理装置、油罐区等建筑物。站区边坡方面, 对于填方高度小于  $6\text{m}$  的边坡, 采用浆砌块石重力式挡土墙加放坡方案, 挡土墙高按  $4\text{m}$  考虑; 当填方高度大于  $6\text{m}$  时, 采取加筋土挡土墙加放坡方案。边坡高度较大时分两级放坡, 中部设一条马道, 加筋土挡土墙高  $4\sim 11\text{m}$ 。填方边坡坡度比按  $1: 2$  考虑。

## 2.2 换流站主要声源概况

对于一个工厂所产生的噪声, 不同的发声设备具有不同的频率特性及声压级, 而对于多机运行的车间、厂房, 其不同频率的噪声相互作用而形成的混响声场不仅使工作环境更为恶化, 而且给噪声治理带来很大的难度。因此, 对噪声污染的治理, 首先得找出噪声源所在, 找出各发声部位并分析其频率特性, 从而为噪声治理提供依据<sup>[19]</sup>。

换流站的主要噪声源有换流变压器(见图 2.3, 2.4 所示)、平波电抗器(见图 2.5 所示)、交流滤波器组和空调等。换流变压器是换流站的核心设备, 也是换流站噪声的主要来源。换流站中的噪声源大小、位置、形状等因素决定了在仿真计算中的声源模型。对声源建模时主要考虑的是噪声源在整个换流站噪声分布中所起的作用。换流变压器在换流站的作用至关重要, 因此对换流变压器进行仿真时要求的精度是最高的。平波电抗器辐射出的噪声也很大, 位置在主控楼两侧, 平波电抗器对整个换流站的噪声分布影响没有换流变压器强, 对平波电抗器的仿真要求没有换流变高。交流滤波器组中的噪声源辐射对整个换流站的噪声分布影响较大, 但是辐射的噪声远不及换流变压器和平波电抗器强, 因此交流滤波器组的仿真精度次于平波电抗器。另外空调从

地理位置和辐射的噪声大小来看都对整个换流站的噪声分布影响不大，因此是仿真精度要求最低的声源。

### 2.2.1 换流变压器

换流变压器的主要作用是将交流电与直流电进行转换，包括极 I 厅和极 II 厅。中心控制楼是构成换流站的控制、监视和保护系统的公共部分<sup>[16]</sup>。

换流变压器的噪声主要由以下两个声源产生：铁心(磁致伸缩和连接处产生的噪声)和变压器冷却系统。

铁心的磁致伸缩产生的噪声：铁心的磁致伸缩现象表现为在周期变化的磁场作用下，钢片改变了自己的尺寸，引起空气振动，它是变压器本体噪声最主要的根源。试验研究结果证明，变压器本体噪声的大小是由铁心所用硅钢片的磁致伸缩大小决定的。因此，降低变压器噪声最根本、最有效的方法是研究与磁致伸缩有关的各种因素，从而采取有效的技术措施来控制 and 减小硅钢片的磁致伸缩<sup>[17]</sup>。

变压器因铁心在磁通作用下产生磁致伸缩振动所引起“嗡嗡”声为电磁噪声。功率越大，电磁噪声越高。电磁噪声由变压器向外辐射，特别是产生共振时，辐射噪声最强<sup>[18]</sup>。变压器电磁噪声的基频为工频的两倍，且有高次谐波的噪声成分。体积较大的变压器，其谐波频率较低，而体积较小的变压器，其谐波频率较高<sup>[19]</sup>。

冷却装置对噪声的影响主要指冷却装置的振动，振动的根源在于：(1)冷却风扇和变压器油泵在运行时产生的振动；(2)变压器本体的振动可通过绝缘油、管接头及其装配零件等传递给冷却装置，使冷却装置的振动加剧，以声波的形式均匀地向四周辐射噪声<sup>[17]</sup>。变压器冷却风扇主要由空气动力性噪声、机壳、管壁、电动机轴承等辐射的机械性噪声和风机振动带动变压器壳体振动辐射的固体声组成。因变压器风扇转速较高，辐射的噪声主要集中在中高频。

变压器的振动通过基础地面向临近的建筑物传递，引起它们振动而产生的噪声为“二次噪声”<sup>[20]</sup>。



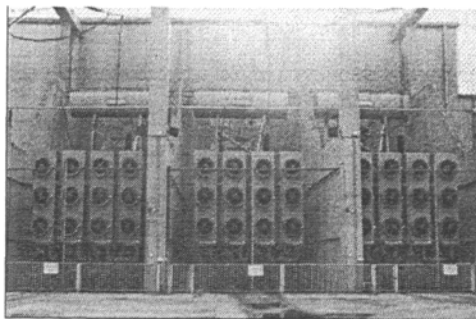


图 2.3 换流变压器外观图

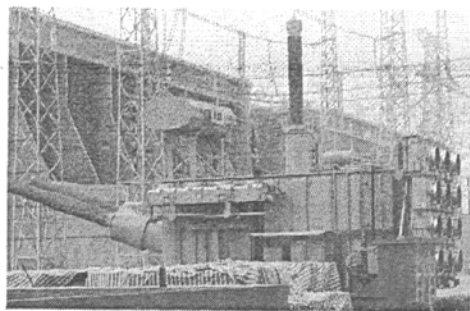


图 2.4 换流变压器侧面图

### 2.2.2 平波电抗器

平波电抗器又称直流电抗器，分为油浸式和干式，干式平波电抗器比油浸式平波电抗器具有对地绝缘简单、绝缘子承担对地电压、无油设计、无铁心和对地电容小等优点，高压直流输电工程推荐选用干式平波电抗器<sup>[21]</sup>。

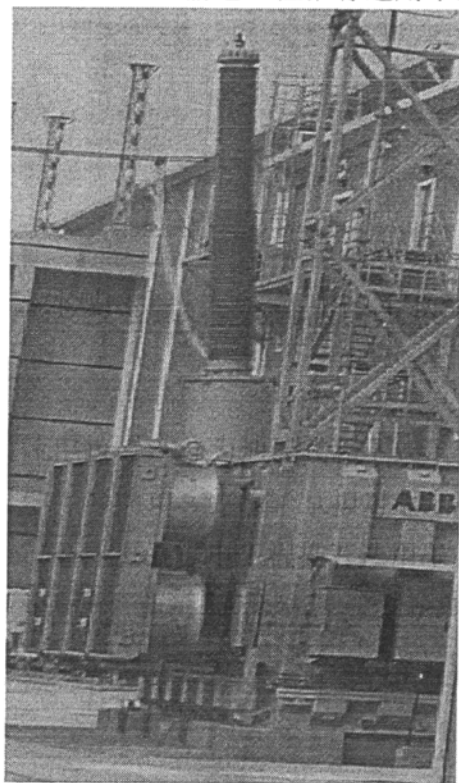


图 2.5 平波电抗器外观图

平波电抗器位于阀厅外直流场中，用于变流器的直流侧，电抗器中流过的具有交流分量的直流电流。主要用途是将叠加在直流电流上的交流分量限

定在某一规定值，它也能改善功率因数。平波电抗器还用于并联变流器间的直流侧解耦、降低断续极限、限制环流控制线路中的环流以及应用直流快速开关切断故障电流时限电流上升率，还被用在电流、电压型变频器中间回路的直流平波，也可用于整流电源平波，以消除纹波。

平波电抗器的噪声发声机理、声级强度、频率范围等与换流变压器相似。

### 2.2.3 交流滤波器组

换流站装有大容量的滤波、并联电容器装置。由于台数多、单台容量大和高次谐波电流流入电容器等原因<sup>[22]</sup>，使得电容器噪声成为换流站中噪声来源的主要因素之一。换流站通常设有交流和直流滤波器组，且一般分布在站区的角上，露天开阔布置。布置紧挨换流站围墙，其噪声对换流站外构成干扰。滤波器组中的电抗器和电容器产生的噪声主要是电磁噪声，只是在声级强度上低于换流变压器和平波电抗器的噪声。

#### 2.2.3.1 电抗器

电抗器工作原理：电磁感应产生反电动势，抑制电流变化，用来限制短路电流，由于电感线圈中的电压不能“跃变”，保证了非故障线路上的用户电气设备运行的稳定性。电力网中所采用的电抗器，实质上是一个无导磁材料的空心线圈。它可以根据需要，布置为垂直、水平和品字形三种装配形式。在电力系统发生短路时，会产生数值很大的短路电流。如果不加以限制，要保持电气设备的动态稳定和热稳定是非常困难的。因此，为了满足某些断路器遮断容量的要求，常在出线断路器处串联电抗器，增大短路阻抗，限制短路电流。由于采用了电抗器，在发生短路时，电抗器上的电压降较大，所以也起到了维持母线电压水平的作用，使母线上的电压波动较小，保证了非故障线路上的用户电气设备运行的稳定性和热稳定性。

近年来，在电力系统中，为了消除由高次谐波电压、电流所引起的电容器故障，在电容器回路中采用串联电抗器的方法改变系统参数，已取得了显著的效果。

一般电抗器都采用空心干式技术，其调节是由直流磁化强度控制磁路的磁导率来控制的<sup>[23]</sup>。

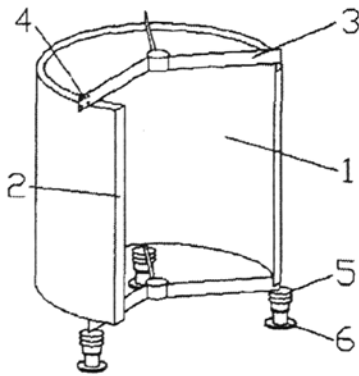


图 2.6 空心干式电抗器的主要结构

图中：(1)线圈 (2)导体

(3)三角架 (4)电源终端

(5)支撑绝缘体 (6)固定装置

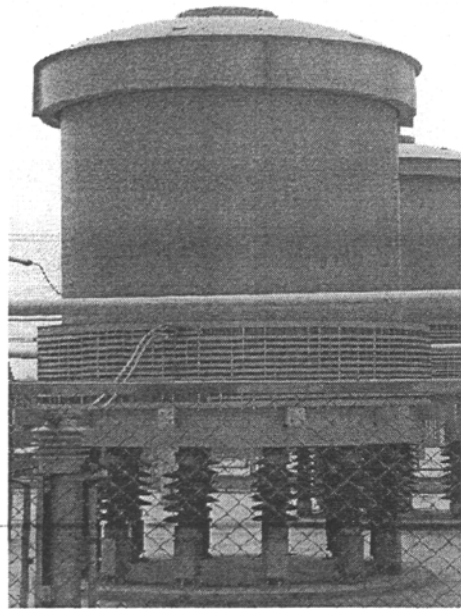


图 2.7 电抗器外观图

电抗器(如图 2.6, 2.7 所示)的线圈由一个或多个封装松质绝缘铝导体制成的线圈组成，同轴层平行的连接在一起。然后把它们的末端焊接在三角架上。三角架的顶部和底部由几层纤维玻璃带沿着线圈固定在一起。噪声产生机理：空心干式电抗器产生的噪声主要是由通过线圈和其磁场的电流互相作用产生的震荡环绕力引起的。至于铁心反应器，磁路中的力导致了更进一步的仪器震荡。加入有空隙的铁心，空气摩擦力产生的噪声比磁化强度引起的噪声大。

### 2.2.3.2 电容器

电容器(如图 2.8 所示)主要的功能是对电抗进行补偿，以及直流、交流的滤波<sup>[24]</sup>。但是，电容器的噪声对周围居民的生产生活影响也是很大的。电容器组由一系列的单个电容器组成。电容元件由两块缠绕的铝箔片和一些标准长度的塑料和纸薄膜组成。这些单个的元件采用串连的方式连接在一起。串连以后的电容器很高，在其他换流站中最高电容器组可达到 13 米，辐射的噪声对周围的居民影响很大。在经过了论证、改进后，将电容器由原来的单塔式变为双塔式，降低了电容器的高度。这样，既不会影响电容器的正常工

作,同时,降低了电容器组直接向站外辐射噪声。

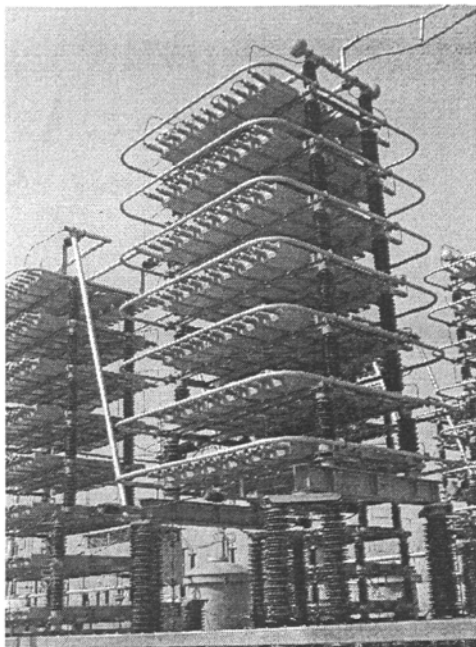


图 2.8 双塔式电容器外观图

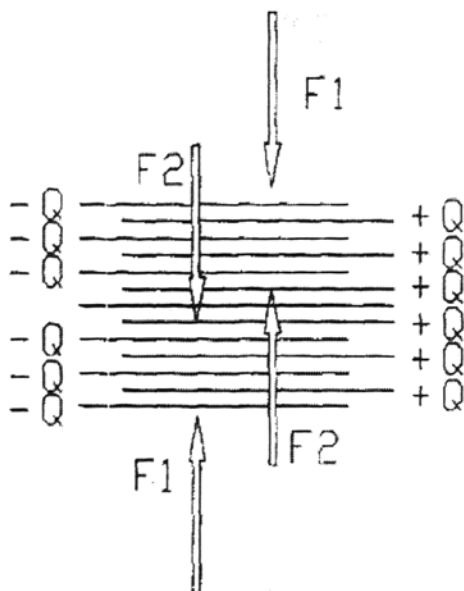


图 2.9 电容器剖片图

噪声产生机理:给电容元件两端加电压,大部分的电荷处于平衡状态。因为铝箔片的每一侧都有一个吸引力(如图 2.9 所示),处于不平衡状态的箔片受到两个力:边缘处的力( $F_1$ )和中间的力( $F_2$ )<sup>[25][26]</sup>。由于电容元件受力主要是边缘力产生振动,所以,电容元件的底部和顶部产生的噪声最大,是噪声的主要来源。这对整个电容器也是有效的<sup>[27]</sup>。因此,电容器整体产生的噪声音频比较单一,声音的辐射主要限制在垂直的表面,指向性很强。这在实际的测试中体现的非常明显。

## 2.3 本章小结

本章对仿真计算对象——华新换流站和蔡家冲换流站进行了介绍,给出了两个换流站主要设备及建筑物的分布情况,并予以图示说明,同时阐述了换流站在生产、生活中所起的重要作用。本章对换流站的主要噪声源(例如换流变压器、电抗器、电容器组等)的结构和工作原理做了描述,并对换流设备产生噪声的机理进行了说明。

## 第3章 软件的使用及声场模型的确立

### 3.1 SoundPLAN 软件的相关介绍

#### 3.1.1 SoundPLAN 软件介绍

SoundPLAN 软件自 1986 年由德国软件设计师和咨询专家颁布以来, 迅速成为德国户外声学软件的标准, 并逐渐成为世界关于噪声预测、制图及评估的领先软件。是包括墙体优化设计, 成本核算, 工厂内外噪声评估, 道路交通噪声预测, 空气污染评估等的集成软件<sup>[8]</sup>。

该软件具有以下优点:

1. 能对点声源、线声源、面声源和其他复杂声源的环境声传播计算;
2. 计算和预测的噪声量包括:  $L_a$ 、 $L_{eq}$ 、 $L_{10}$  等, 其中  $L_a$  为振动加速度级;  $L_{eq}$  为等效连续声级;  $L_{10}$ ——测定时间内, 10% 的时间超过的噪声级, 相当于噪声的平均峰值;
3. 能显示噪声分布的等值分布图, 噪声敏感点的噪声预测值和三维噪声分布图;
4. 测量值对预测模型的修正功能;
5. 预处理能与通用的 CAD 软件相连, 能输入复杂的地形, 建筑物、公路、铁路、机场、工业园等。

#### 3.1.2 SoundPLAN 软件仿真方法介绍

利用 SoundPLAN 软件对声源进行建模时需要对声源、环境等有足够的了解, 还需知道所计算的厂区布置、标高等数据。因为换流站中噪声源的形状、大小、噪声辐射情况各不相同, 因此需要对声源进行模拟, 这一步骤是重点。

首先通过 AutoCAD 绘制换流站内、外的平面布置图。将.Dxf 格式的换流站平面图导入 SoundPLAN 中, 设定换流站物理模型的相关参数, 然后对换流站内、外的噪声分布进行仿真计算。计算完成后得到 GNM (噪声区域图 Grid Noise Map): 这种图是对厂区噪声分布的仿真, 如图 3.1 所示。

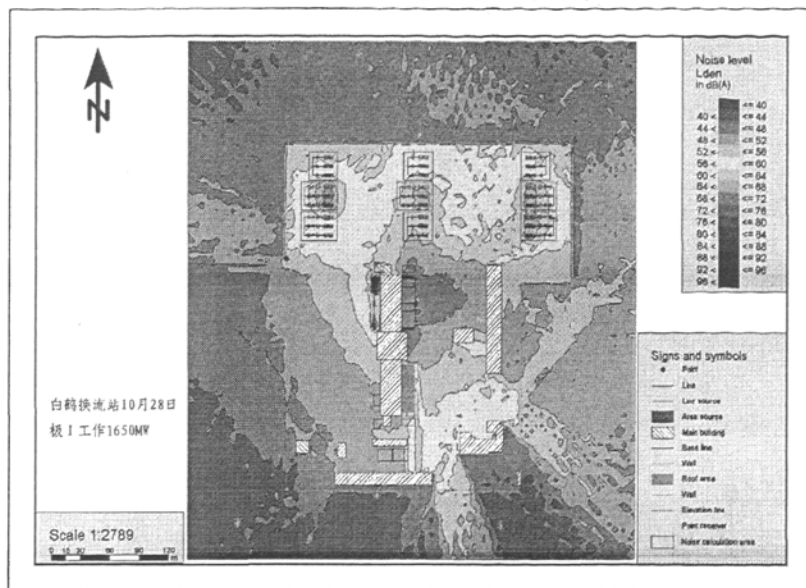


图 3.1 GNM 图例

GNM 的优点就是可以将换流站内、外的噪声分布情况直观地表现出来，图例右上角列出的是声压级与颜色的对应关系，相邻颜色的分贝差是可调节的，最小公差可调到 1dBA；右下角灰色方块中所列内容是厂区基本构成——建筑物、墙体、接收点等信息；左上角图标为指北针；左下角图标为比例尺。

根据 GNM 与实测值进行对比、校准，得到最佳的仿真模型。用较好的仿真模型算得的 GNM 就可以比较准确地反映出换流站内、外的噪声实际分布情况。

### 3.1.3 SoundPLAN 软件仿真流程

1. 将.Dxf 格式的换流站平面图导入 Geo-Datebase 中
2. 设定换流站物理模型的相关参数

(1)设置已导入的换流站平面图中的建筑物、地势和声屏障的参数。建筑物的参数主要指楼房高度，地势的参数是指换流站和周边地区的海拔，声屏障的参数主要是指换流站的墙体高度；

- (2)设置换流站中接收点、接收面的参数

设定接收点和接收面是为了在对噪声进行仿真计算时，仿真计算的范围和精确度能得到保证；

(3)设置噪声源的声功率、声屏障吸声系数等参数。

噪声源参数设定是整个设计的重点和难点。由于换流站内声源为高压电器，其产生的高压、电磁等因素使得测量不能实现。利用现有的换流站噪声源资料，将声源的辐射情况设定为理想状态，根据理想状态下声压级  $L_p$  和声功率级  $L_w$  之间的关系估算出理想状态下的声源声功率级。

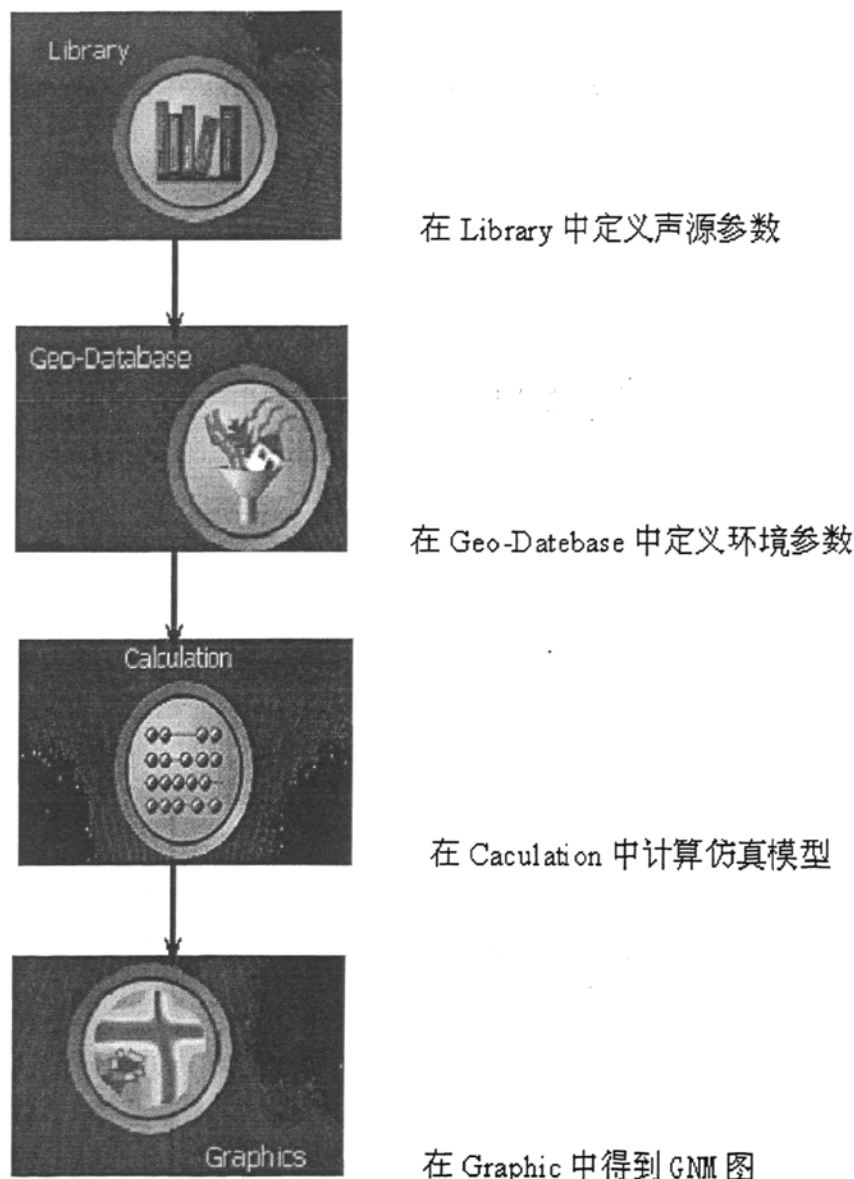


图 3.2 SoundPLAN 仿真计算流程图

### 3.在 Calculation 界面中，对物理模型进行运算

SoundPLAN 提供了多种计算方法，不同的计算方法针对不同的环境如：室外、室内、机场、地势等。本文用到的计算是：Outdoor 目录下的 Grid Map。

### 4.出图

计算完成后，进入 Graphics 界面，对已经经过仿真计算的换流站模型进行出图操作，本设计要导出的图是可以反映换流站内外噪声分布的 GNM)。

运用 SoundPLAN 进行仿真计算的流程图如图 3.2 所示。

### 5.GNM 图与实测点对比调整

具体步骤：

(1)根据 GNM 图找出测点的仿真值；

(2)与对应的实测数据对比。根据公式对模型进行调整，直到仿真值与实测值吻合为止；

(3)对整个换流站的噪声分布情况进行分析，若分布趋势与实测不符，则对不符合实测的部分进行调整，直至吻合为止；

## 3.2 声场模型的确立

### 3.2.1 声源的理论模型

在第二章介绍了换流站内主要的噪声源状况，下面根据理论知识对噪声源类型进行定义。根据实际的噪声源特点、辐射类型等结合 SoundPLAN 软件建立换流站内设备的声学模型。

#### 3.2.1.1 平面波理论

所谓平面波是指同相位面的波，即在同一时刻振动相位相同的质点在同一无限延展的平面上。其特点为保持波形和波幅不变。

其正向波的声压可以表示为

$$p(x,t) = f_1(x - ct) \quad (3-1)$$

振速为

$$u(x,t) = \frac{1}{\rho_0 c} p(x,t) \quad (3-2)$$



式中  $p(x, t)$ ——声压, Pa

$u(x, t)$ ——振速, m/s

$\rho_0 c$ ——特性阻抗, Pa·m/s

$c$ ——声速, m/s

### 3.2.1.2 球面波理论

所谓球面波是指波阵面为一系列同心球面的波<sup>[28]</sup>。当球形发射器表面沿径向做等幅、同相振动(即表面振速分布是均匀的), 可产生球面波声场。称波阵面上声振幅是等幅且同相的球面波为各向均匀球面波。

均匀球面波声场中的声压

$$p(r, t) = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\rho c}{r} f_1'(r - ct) + \frac{\rho c}{r} f_2'(r + ct) \quad (3-3)$$

式中  $p(r, t)$ ——声压, Pa

$r$ ——球面半径, m

$\frac{1}{r} f_1(r - ct)$ ——自声源向外扩散的波

$\frac{1}{r} f_2(r + ct)$ ——沿半径反方向向声源收敛的波

考虑到球形声源在均匀无限介质中发射声波时, 不会出现反射波, 这时只取向外扩散的行波

$$p(r, t) = -\frac{\rho c}{r} f_1'(r - ct) \quad (3-4)$$

$$\Psi(r, t) = \frac{1}{r} f_1(r - ct) \quad (3-5)$$

式中  $\Psi(r, t)$ ——自声源向外扩散的波

因而质点振速

$$u(r, t) = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} = -\frac{1}{r} f_1'(r - ct) + \frac{1}{r^2} f_1(r - ct) \quad (3-6)$$

式中  $u(r, t)$ ——振速, m/s

可见, 由于速度势的幅值随距离而变, 故其振速式中包含两部分, 前者

和 $r$ 成反比,后者和 $r$ 的平方成反比。在近场(近声源处)第二部分起主要作用,在远场第一部分起主要作用。但在远场处,波面的曲率半径很大,该处球面波的传播特性和平面波相似。

### 3.2.1.3 柱面波理论

柱面波是指其波阵面以柱的中心为轴的同心柱面。柱面波场的声场强度准确的随距离 $r$ 成反比衰减。对于柱面波的扩散所产生的许多特点和球面波相似,柱面波的特性都可以从球面波中找到。

## 3.2.2 声源模型的确立

### 3.2.2.1 平波电抗器和换流变压器建模

在换流站的换流设备中,由于平波电抗器和换流变压器后面的防火墙的作用,噪声辐射特性近似平面波的辐射特性,所以在 SoundPLAN 中建立模型时,将平波电抗器和换流变压器模拟为平面波。由于换流变压器和平波电抗器都经过了降噪处理,在周围建起了吸声结构和隔声屏障。所以,换流变压器和平波电抗器的辐射方向为向上和正前方。

依据这种情况将换流变及平抗的模型建为如图 3.3 所示。

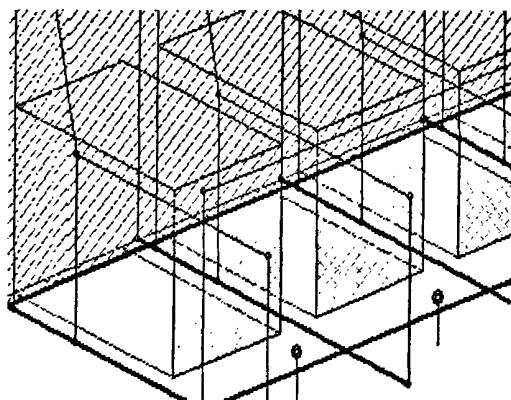


图 3.3 换流变压器(平波电抗器)声源模型

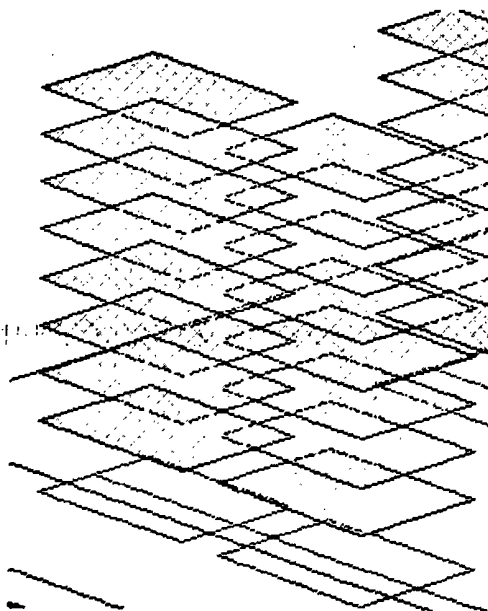


图 3.4 换流站内电容器组声源模型

### 3.2.2.2 电容器组建模

根据第二章介绍电容器的结构及发声机理,结合电容器的实际构造,将电容器组模型定义为面声源的组合。其传播特性为平面波的辐射特性,模型建为如图 3.4 所示。

通过 SoundPLAN 软件模拟后的组合声源声辐射效果如图 3.5 所示。

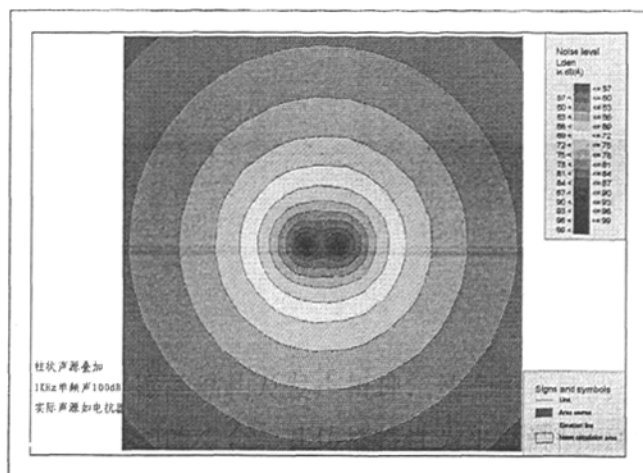


图 3.5 两个电容器组声源叠加模型噪声辐射图

### 3.2.2.3 电抗器建模

由于交流滤波器场中电抗器的形状,辐射特性和柱面波定义的辐射特性相似,所以电抗器模拟为柱面波<sup>[28]</sup>。

对电抗器的建模如图 3.6 所示。通过 SoundPLAN 软件模拟后的电抗器组合声源声辐射效果图如图 3.7 所示。

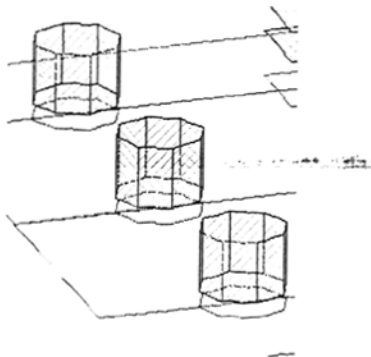


图 3.6 电抗器模拟图

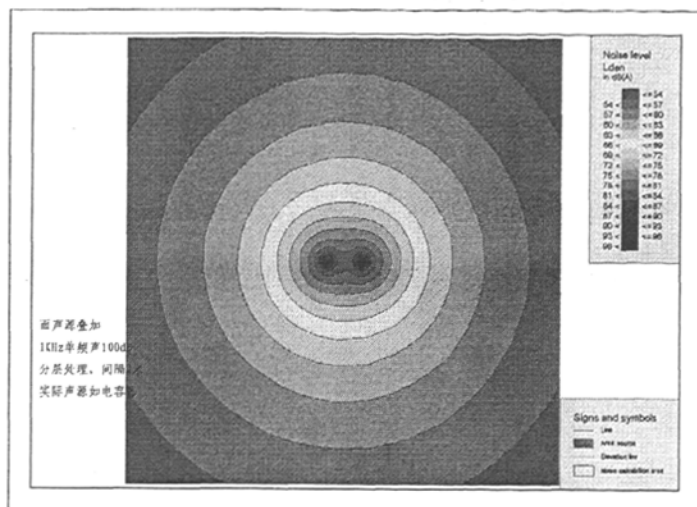


图 3.7 两个电抗器声源叠加模型噪声辐射图

### 3.2.2.4 空调建模

换流站中的空调也产生噪声, 对换流站的噪声分布有一定影响, 将空调模拟为面声源的组合。空调的噪声模型如图 3.8 所示。

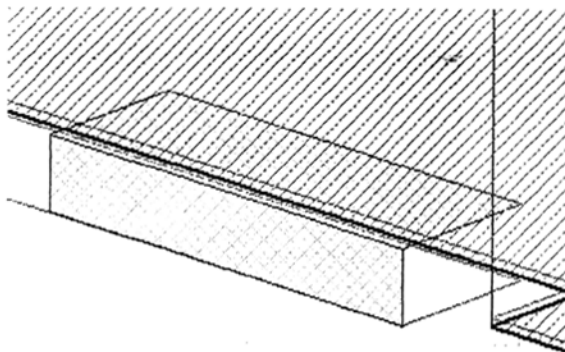


图 3.8 空调声源模型

声源类型的设定是仿真计算能否成功的关键, 也是全部工作中的难点。因为在 SoundPLAN 中不同的声源所仿真的结果是不同的, 为了得到真实可信的仿真结果, 需要对声源模型进行反复的调试修改。

### 3.2.3 声场参数设定

换流站环境参数设定即是对换流站内的建筑物和换流站周围地势的参数设定。对于建筑物来说需要设定的参数主要是建筑物的高度，周围地势参数的设定主要是等高线的设定。

#### 3.2.3.1 华新换流站参数的设置

1.建筑物高度的设定：根据换流站厂区布置图纸，可知：办公楼高：12.5 米，备品备件库 11.6 米，500KV GIS 室高 12 米，控制楼高 17.6 米，极 I 极 II 厅高 20 米。其他场内建筑物如：继电器室、综合泵房高 7.8 米。

2.换流站墙体的设定：为了降低交流滤波器场由站内向外辐射的噪声，在原高 5 米的围墙上增加了 3 米高的声屏障。其余围墙高为 3 米。布置见图(2-1)所示。在图中，粗线代表 8 米高的墙，细线代表 3 米高的墙。

3.换流站周围的地势设定：由于华新换流站周围的地势和换流站内部的地势是一样的，因此地势高度均设为 0。

4.换流站声功率级及声屏障参数的设定：

换流站采用隔声吸声板(盲板)，为共振腔和阻尼层的组合结构；隔声吸声板(孔板)，为阻尼层和微穿孔板的组合结构。换流站平波电抗器隔声吸声板为共振腔和微穿孔板的组合结构，平波电抗器防火墙空间吸声体为普通穿孔板吸声结构。换流站隔声板的吸声系数设计为大于 0.5。

经过检测，华新换流站平波电抗器吸声板在 100Hz~4000Hz 频段的 1/3 倍频程中心频率吸声系数均大于 0.7。其具体吸声系数见表 3.1。

表 3.1 华新换流站平波电抗器隔声屏障各频段吸声系数

频率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400
吸声系数	0.8	0.78	0.95	1.0	0.85	0.9	1.0
频率(Hz)	500	630	800	1000	1250	1600	2000
吸声系数	0.98	0.99	0.99	0.99	0.9	0.85	0.8

5.对换流站内、外的噪声接收点和接收面的设定。设定接收点时要与实测的测点一致，因为这样便于实测值和仿真值对比。设定接收面是定义计算噪声分布的面积和范围。接收面的设定要求将所有的测点都包括在内，接收面内即是要进行仿真计算的区域。

### 3.2.3.2 蔡家冲换流站参数的设置

1.建筑物高度的设定：参考华新换流站的建筑物高度。

2.换流站墙体的设定：蔡家冲换流站在交流滤波器场周围建立了 8 米高的声屏障，围墙高度设计为 3 米。

3.换流站周围的地势设定。由于蔡家冲换流站周围的地势起伏不平，结合实地情况用 SoundPLAN 软件内的地势参数模块设计当地的特殊地势。换流站内部地势高度设为 0。

4.换流站声功率级及声屏障参数的设定：

换流站隔声屏障，为刚性材料和吸声材料组合结构。换流站平波电抗器隔声屏障为渐变式空腔吸声体结构。经过检测，蔡家冲换流站平波电抗器吸声板吸声板在 100Hz~4000Hz 频段的 1/3 倍频程中心频率吸声系数均大于 0.7。其具体吸声系数见表 3.2。

表 3.2 蔡家冲流站平波电抗器隔声屏障个频段吸声系数

频率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400
吸声系数	0.8	0.9	0.97	1.0	1.2	1.15	1.05
频率(Hz)	500	630	800	1000	1250	1600	2000
吸声系数	1.07	1.03	1.10	1.01	1.0	0.98	0.85

5.换流站内、外的噪声接收点和接收面的设定。按照实际测点的坐标在图中进行标注，在作出图后，进行仿真值与实测值的对比。

## 3.3 本章小结

本章对所用软件的功能和软件的使用流程给予了说明，给出了换流站主要噪声源的仿真要求，并简单地介绍了计算完成后的校准方法。同时，对换流站声源模型做了定义，根据换流站内实际换流设备的形状，通过 SoundPLAN 声学软件建立了平波电抗器、换流变压器、电抗器、电容器组等的模型。另外，对换流站内部必要的参数进行了设定。

## 第 4 章 换流站声场研究及模型计算

### 4.1 换流站声场研究

#### 4.1.1 多声源声场噪声特性

在多声源声场条件下,存在着三种噪声:

- 1.被测声源发出的噪声;
- 2.除被测声源外的声源发出的噪声,即外部噪声;
- 3.与被测声源无关的,由外部噪声引起的反射声。

一般地,将后两种噪声通称为寄生噪声。

假如,在被测声源的假想包络面  $S$  上不仅测得被测声源的瞬时声压  $P$  和质子速度  $U_n$ ,而且测得一个或多个寄生声源的瞬时声压  $P_{par}$  和质子速度  $U_{n,par}$ ,那么,实际测得的声压量为

$$P_{\Sigma} = P + P_{par} \quad (4-1)$$

$$U_{n,\Sigma} = U_n + U_{n,par} \quad (4-2)$$

由这些可以得到

$$I_{n,\Sigma} = I_{n,S} + I_{n,p} + I_{n,i} \quad (4-3)$$

式(4-3)中,  $I_{n,\Sigma}$  为实际测得的声强,  $I_{n,S}$  为被测声源产生的声强,  $I_{n,p}$  为寄生声源产生的声强,  $I_{n,i}$  为寄生声源和被测声源之间的相关性引起的互作用声强。

如果寄生声源与被测声源是无关的,也就是说它们之间的相互作用可以忽略,那么

$$I_{n,i} = 0 \quad (4-4)$$

在这种情况下,如果包络面  $S$  内没有声吸收,那么

$$\oint_S I_{n,p} \cdot ds = 0 \quad (4-5)$$

由此可以得到被测声源的实际声功率为

$$W_{insitu} = \oiint_S I_{n,\Sigma} \cdot ds = \oiint_S I_{n,s} \cdot ds = W_s \quad (4-6)$$

在多声源声场中, 寄生声源往往是与被测声源有关, 如对一个复杂声源系统的一部分进行测定时, 被测声源和寄生声源分别是一个复杂声源的一部分。因此, 它们相关。如果忽略包围面  $S$  内的声吸收, 那么, 在这种情况下

$$W_{insitu} = W_s + W_i \quad (4-7)$$

式(4-7)中,  $W_i = \oiint_S I_{n,i} \cdot ds$

$W_i$  可以是正数也可以是负数, 由于它的存在, 使实际测得的声功率与被测声源声功率存在差别。要使实际测得的声功率接近于被测声源声功率, 就必须采取措施尽可能抑制寄生噪声的影响。

声强国际标准 ISO9614 中提出了两个声场抗性指数: 表面声压—声强抗性指数  $F_2$  和负声功率抗性指数  $F_3$  <sup>[29]</sup>。 $F_2$  主要描述被选定测量表面上寄生噪声声场的无功部分, 它反映出对寄生噪声有功和无功两个部分中无功部分抑制的局部效应, 而不是整体效应。可由下式计算得到

$$F_2 = I_p - I_{|v_n|} \quad (4-8)$$

式(4-8)中,  $I_p$  为平均表面声压级,  $I_{|v_n|}$  为平均表面声强级标量。

$F_3$  主要描述被测量表面上寄生噪声声场的无功和有功两个部分的情况, 它反映出对寄生噪声抑制的整体效应。可由下式计算得到

$$F_3 = I_p - I_{I_n} \quad (4-9)$$

式(4-9)中,  $I_p$  为平均表面声压级,  $I_{I_n}$  为平均表面声强级矢量。

上述两个声场抗性指数  $F_3$  和  $F_2$  差的大小是用于检验强指向性寄生噪声源的存在与否。如果两者差别较大, 说明被测声源附近存在着强指向性寄生噪声源。从而必须采取相应的措施, 如减少测量面与被测声源之间的平均距离, 或将寄生噪声对被测量面隔开或采取措施减少寄生噪声与被测声源的反射等<sup>[30]</sup>, 直至  $W$  接近于零, 使得(4-6)式成立。

在多声源的环境中, 对被测声源进行声强测量时, 首先可以通过对声场抗性指数  $F_3$ 、 $F_2$  的计算以及它们之间的差值大小, 来判别被测声源附近是否存在着强指向性寄生噪声。然后判断被测声源相对于寄生噪声是弱声源, 还



是直接发射强声源, 还是混响区域里的强声源。如果是强声源, 表明寄生噪声对被测声源影响不大; 如果是弱声源, 就必须采取相应的措施, 抑制寄生噪声对被测声源的影响。

#### 4.1.2 换流站中输变电设备辐射声测量

在声学测量中, 传统的方法是测量声压。但这种方法易受到环境因素的影响, 必须进行修正, 甚至需要在特定声学环境(如消声室)中进行。而声强法则不同, 运用高斯定理, 从声源出发遇到障碍物后又返回到高斯面内的声音是不计入面积分结果的。因此, 声强法可以有效的避免周围环境对噪声测试的影响。但是, 声强难以直接测定。随着随机信号分析理论逐步深化, 在 FFT 谱分析技术的基础上, 声强及其频谱分析在理论和实践方面都得到了极大的发展。

##### 4.1.2.1 声强测试原理

声强定义为声场中某一点上, 在单位时间内, 在与指定方向(或声波传播方向)垂直的单位面积上通过的平均声能量<sup>[31]</sup>。

在没有流动的介质中, 声强矢量  $\vec{I}$  等于瞬时声压  $p(t)$  和同一点上相应的指点速度  $u(t)$  的时间平均乘积

$$\vec{I} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot \vec{u}_r(t) dt \quad (4-10)$$

式中  $u_r(t)$ ——传播方向  $r$  上某点处的瞬时质点振动速度, m/s;

$p(t)$ ——该点同一时刻的瞬时声压, Pa;

$T$ ——声波周期, s。

平均声能  $I$  之所以难以测定, 是由于无法测得  $u$ 。但是近年来, 已利用双传声器解决了这个困难。

当两个传声器的中心距远小于波长  $\lambda$  时, 可得

$$I = -\frac{(P_1 + P_2)}{2\rho\Delta r} \int_0^T (P_2 - P_1) dt \quad (4-11)$$

式中  $P$ ——两个传声器中心连线中点  $O$  处声压, Pa;

$P_1, P_2$ ——两个传声器分别测得的声压级, dB;

由声强频谱分析可以建立频域表达式, 目前多采用声强互谱表达式

$$I(f) = \frac{1}{2\pi f \rho \Delta r} I_m[G_{12}(f)] \quad (4-12)$$

式中  $G_{12}(f)$ ——两传声器声压的互功率谱,  $I_m$  表示取其虚部。

#### 4.1.2.2 声强测试中存在的问题

影响声强测量精度的因素来源于用有限值  $\Delta r$  代替  $\partial r$  产生的误差以及传声器与测量通道的相移产生的误差。

用  $(P_1 + P_2)/2$  和  $(P_2 - P_1)/\Delta r$  代替  $P$  和  $\partial P/\partial r$  使得此方法测得的声强  $I_M$  同真实的声强  $I$  两者的关系为

$$\frac{I_M}{I} = \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \cdot \frac{1}{1 - (\Delta r/2R)^2} \quad (4-13)$$

式中  $k$ ——波数( $=\frac{2\pi}{\lambda}$ );

$R$ ——探头至声源的距离, m。

可见只要在远场( $\Delta r \ll R$ )和传感器间距  $\Delta r$  小于波长  $\lambda$  的情况下,  $k\Delta r \ll 1$ ,  $\Delta r/2R \rightarrow 0$ , 这项误差才趋向于零。因此  $\Delta r$  的选取对消除或减小这项误差至关重要。

声强测量对于两个传声器及测量通道相位响应的差异极为敏感, 用 dB 表示的误差为

$$L_t = 10 \lg\left(\frac{I_M}{I}\right) \quad (4-14)$$

$$= 10 \lg\left[\frac{\sin(k\Delta r - \phi)}{k\Delta r}\right] \quad (4-15)$$

这种误差使测量设备的低限频率受到了限制,  $\Delta r$  越小, 低限频率就越高。由此得出结论, 即  $\Delta r$  不能过小。

文献[32]利用声强法对 Comerford HVDC Conversion Station 中的各种大型电力设备的噪声辐射进行了测量。文献作者认为, 在测量时只有声强测量技术才能有效避免电站中各种设备之间的噪声干扰。文献[33-34]介绍了利用声强测量技术在变电站、制造厂和消声室三种不同条件下对变压器噪声进行

测量的情况,其中文献[33]指出,对于测量 1000Hz 以下噪声,两个传声器的中心距  $\Delta r$  不能超过 75mm; 测量通道相位差不能大于  $0.3^\circ$ [35]。

## 4.2 换流站声场模型的构建

在 SoundPLAN 中设定噪声源参数时要求是声功率级  $L_w$ 。换流站内的噪声源多为高压电器,其产生的高压、电磁等因素使得很难进行近场测量。另外,受到现有的测试仪器、测试时间等客观因素影响,不能采用如前所述的方法进行深入的测量。因此,只能充分利用现有的换流站噪声源资料,将声源的辐射情况设定为理想状态,根据理想状态下声压级  $L_p$  和声功率级  $L_w$  之间的关系估算出理想状态下的声源声功率级。

### 4.2.1 声功率级的估算

声源声功率级的估算:由声强级的定义可知

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_{ref}} \quad (4-16)$$

式中  $L_I$ ——声强级, dB;

$I$ ——声强,  $W/m^2$ ;

$I_{ref}$ ——参考声强,  $W/m^2$ 。

又因为,声压与声强的关系为

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (4-17)$$

式中  $p$ ——声压, Pa;

$\rho c$ ——介质特性阻抗, Pas/m。

将式(4-17)代入式(4-16)可得

$$L_I = 10 \lg \left[ \frac{\frac{p^2}{\rho c}}{\frac{p_{ref}^2}{(\rho c)_{ref}}} \right] = L_p + 10 \lg \frac{(\rho c)_{ref}}{\rho c} = L_p + \Delta L \quad (4-18)$$

式中  $L_p$ ——声压级, dB。

在一般情况下, 在空气中  $\Delta L$  的值很小, 因此近似有声压级  $L_p \approx L_I$  声强级。

$$\text{声功率级} \quad L_W = 10 \log \frac{W}{W_{ref}} \quad (4-19)$$

式中  $W$  ——声源辐射声功率, W;

$W_{ref}$  ——参考声功率, W。

由声强和声功率的关系  $I = \frac{W}{S}$  以及在空气中  $L_p \approx L_I$  可得

$$L_p = 10 \log \left[ \frac{W}{S} \times \frac{1}{I_{ref}} \right] = 10 \log \left[ \frac{W}{W_{ref}} \times \frac{W_{ref}}{I_{ref}} \times \frac{1}{S} \right] \quad (4-20)$$

将  $W_{ref} = 10^{-12} \text{W}$ ,  $I_{ref} = 10^{-12} \text{W/m}^2$  代入上式得

$$\bar{L}_p = L_W - 10 \log S \quad (4-21)$$

式(4-21)即是声压级与声功率级之间的关系, 通过此关系式就可以将所测声压级估算为声源声功率级。

换流变压器辐射面积较大, 因此可将近距离的声场近似为平面波辐射<sup>[36]</sup>。对于平面波辐射

$$S = ah \quad (4-22)$$

式中  $a$  ——换流变压器的宽度, m;

$h$  ——换流变压器的高度, m。

平波电抗器与换流变压器的辐射情况一致。另外, 空调近距离的声场也视为平面波辐射。

从图 2.1 和图 2.2 可以看出交流滤波器场中的电抗器和电容器组对于整个换流站来说很小, 它们的近距离的声场可近似为柱面波辐射<sup>[37]</sup>。对于柱面波辐射

$$S = 2\pi rh \quad (4-23)$$

式中  $r$  ——测点到电容器或电抗器的距离, m;

$h$  ——电容器或电抗器的高度, m。

将电容器、电抗器模拟为面声源:

$$\bar{L}_p = L_W - 20 \lg r - 11 \quad (4-24)$$

式中 $r$ ——测点距电容器、电抗器距离, m。

#### 4.2.2 声功率级的计算

由于换流变压器、平波电抗器体积较大,在这些输变电设备的外面增加了吸声、隔声屏障,为测量增加了难度。测点布置在距其表面 1.5 米处,测点高度 1.5 米。计算时,将其近似为正方体理想化声源,其表面壳体假设为包络面。测量其声压级。结合公式(4-21),进行声功率级的转换。

以华新换流站测试为例,在对电容器组、电抗器等体积较小的输变电设备进行测量时,为了保障测试人员及测试设备的安全,测点布置在距其 4.5~6 米半径内,测点高度 1.5 米。结合公式(4-24),进行声功率级的转换。具体数值见表 4.1。

表 4.1 换流站噪声源声功率级模拟值对比

倍频程 中心频率/Hz	换流变压器噪声/dB			平波电抗器噪声/dB			电抗器噪声/dB		
	测量 声压 值	转换 声功 率值	代入 模型 值	测量 声压 值	转换 声功 率值	代入 模型 值	测量 声压 值	转换 声功 率值	代入 模型 值
63	63.2	76.2	74.7	77.9	90.9	89.4	42.6	54.0	44.6
125	64.8	77.8	76.3	78	91	89.5	36.7	48.1	38.7
250	69.5	82.5	81	72.5	85.5	84	57.6	69.0	59.6
500	73.5	86.5	85	71.9	84.9	83.4	62	73.4	64
1000	70	83	81.5	73.8	86.8	85.3	43.1	54.5	45.1
2000	67.8	80.3	79.3	71.4	84.4	82.9	35.3	46.7	37.3
4000	61.5	74.5	73	67.4	80.4	78.9	31.8	43.2	33.8
8000	51.1	64.1	62.6	60.4	73.4	71.9	29.2	40.6	31.2

如表 4.1 所示,测量声压值为在换流站测得的测量值,转换声功率值为经过公式(4-24)换算得到的声功率值,代入模型值为经过反复验算后最终代入声场模型的值。

将计算值代入软件模拟,做出噪声辐射图后,与实际测量值进行比对。经过反复的比对、验证,采用表中修正后的仿真值。根据美国 ABB 公司和西门子公司提供的数据显示:换流变压器的声功率级在 100~120dB;平波电抗器的声功率级在 80~100dB;电容器的声功率级在 70~90dB;电抗器的声功率级在 60~80dB。

建立仿真模型对换流站内外的噪声分布进行计算,并与实测值进行对比、验证,得出换流站内外的噪声分布情况。这项工作对整个降噪工程乃至未来换流站选址、布局、工程造价等都非常有意义。

### 4.3 本章小结

本章对多声源声场特性进行了介绍,测量声强时,给出了判断强指向性寄生噪声源是否存在的方法。介绍了声强的测试原理和影响声强测量精度的因素。说明了换流站中输变电设备的辐射特性,提出在声强的测量中存在的问题。结合声场模拟的特点,介绍了本次建模中声功率的转换方法,并通过实例进行了说明。

## 第 5 章 换流站声场模型仿真分析

2006 年和 2007 年, 国家电网直流建设有限公司两次邀请哈尔滨工程大学对上海华新换流站和宜昌蔡家冲换流站进行了不同功率负荷下的噪声测量工作。通过测量得到的数据, 对声场模型进行校验。针对不同测试条件, 得到相应的噪声辐射图, 对于噪声超标的部分, 提出了与其对应的降噪方案, 通过模型的计算, 得到降噪后的效果。

测量所用仪器是美国 Larson Davis 公司生产的 824 精密型声级计, 测量仪器和校准仪器均由黑龙江省计量检测站检定, 检定合格。测量均在仪器和校准器的有效使用期内, 仪器快速校准, 0 偏差。其性能符合 GB3785《声级计的电、声性能及测试方法》<sup>[38]</sup>和 GB/T17181《积分平均声级计》<sup>[39]</sup>对 II 型仪器的要求。测量现场进行声学校准, 其前、后校准值相差为 0.1 dB, 测试方法各项指标均符合 GB/T12349-1990《工业企业厂界噪声测量方法》<sup>[40]</sup>和 GB/T14623-1993《城市区域环境噪声测量方法》<sup>[41]</sup>的相关规定。测量后的值与 GB12348-1990《工业企业厂界噪声标准》<sup>[42]</sup>和 GB3069-1993《城市区域环境噪声标准》<sup>[43]</sup>相关标准进行比对, 并针对不达标的测点提出降噪方案。具体测点布置结合不同测试环境而变, 详见下面的仿真结果。

### 5.1 华新换流站仿真结果

华新换流站南北分布, 其测点如图 5.1 所示。北测为交流滤波器场; 中间为极 I、极 II 阀厅, 包括平波电抗器和换流变压器; 南侧为备品备件库; 东侧为±500KV GIS 室; 办公楼位于场内的东南角。

A~J 为站外测点: A~D 为站外附近的居民敏感点; E~J 为距场界 1.5 米的测点。A 点为场界正北距围墙 60 米处的居民家测点, B 点为场界东北角距围墙 91 米处居民家测点, C 点为场界西北角 60 米处的河沿处测点, D 点位于场界正南距围墙 50 米处居民家测点。E、F、G 点位于交流滤波器场 8 米高围墙的声影区内, H 点位于场界东侧场区大门处, I 点位于场界南侧备品备件库外围墙下, J 位于主控楼正对的 3 米高围墙外。

由于换流变压器工作时产生的噪声很强, 结合以往换流站的经验设计,

华新换流站换流变压器采用 BOX-IN 进行吸声、隔声降噪措施。在测量时对 BOX-IN 内外均进行了测量，验证该吸声、隔声结构的降噪效果。另外，考虑到电容器组辐射噪声具有指向性，所以在垂直于电容器的方向增加测点，具体测点布置如图 5.2 所示。从实测的数据中可以看出，电容器正面辐射的声压级高于垂直电容器处的声压级。根据测量日期不同，站内布点不尽相同。

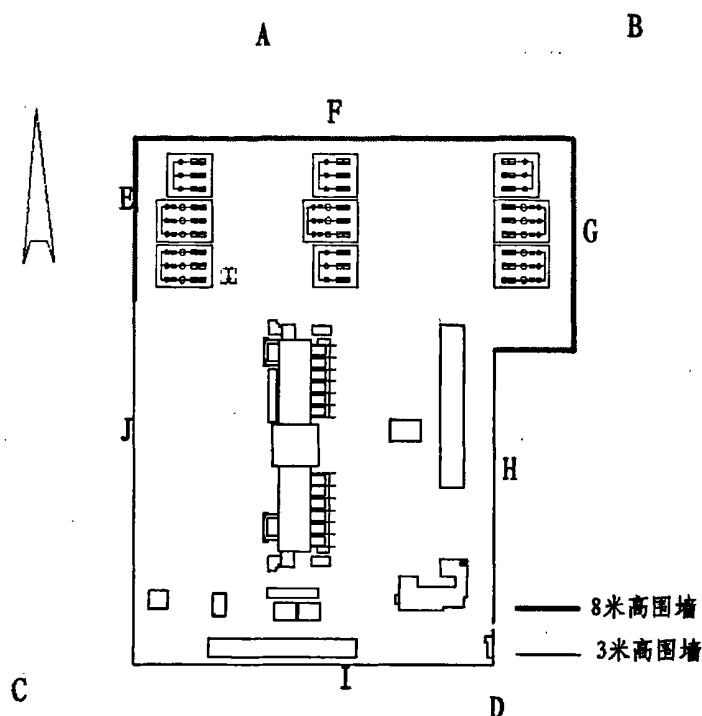


图 5.1 华新换流站场外测点布置图

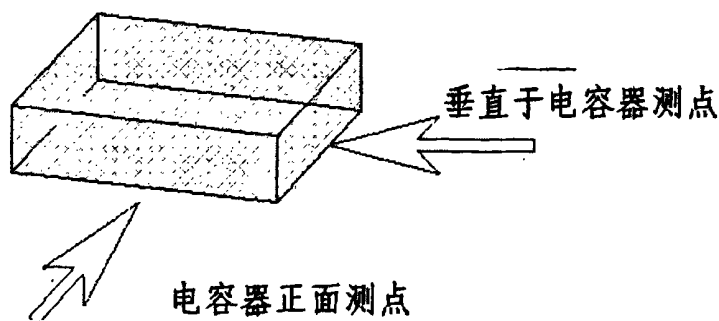


图 5.2 电容器布点位置图



### 5.1.1 华新换流站极 I 工作时辐射噪声情况

2006 年 10 月 28 日站内进行极 I 工作试验, 输出功率为 1650MW, 交流滤波器组 5611、5612、5622、5632 同时工作。根据 GB/T12349-1990《工业企业厂界噪声测量方法》和 GB/T14623-1993《城市区域环境噪声测量方法》, 传声器距场界 1.5 米。根据不同围墙高度, 将测点高度设置为 1.5 米、4.2 米和 9.2 米。计算出的噪声辐射图如图 5.3 所示, 计算面统一高度为 1.5 米。

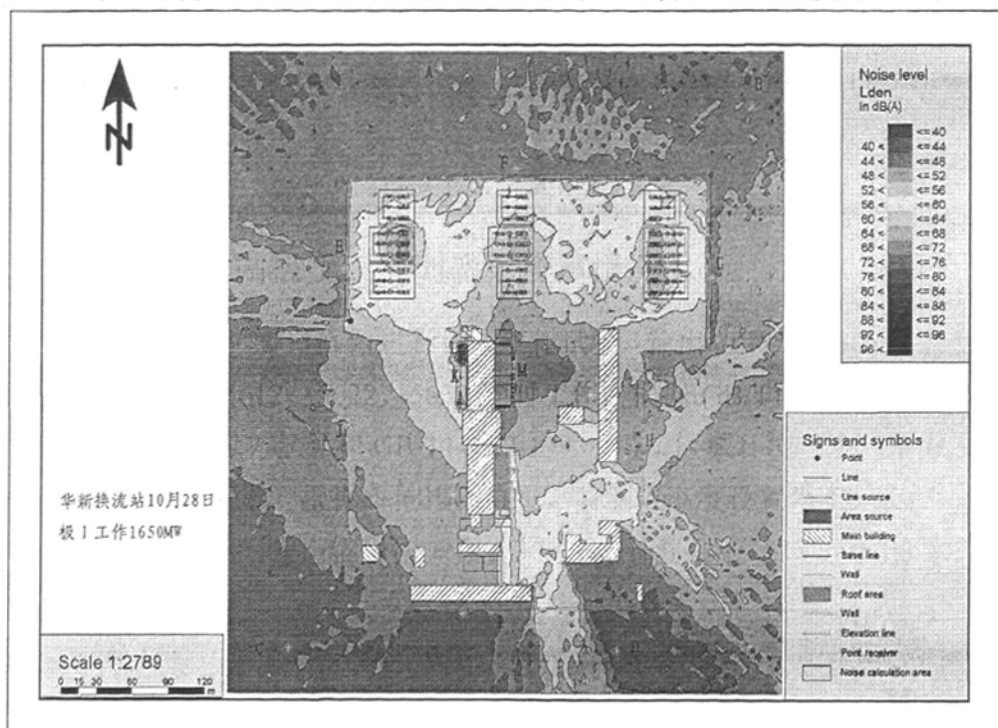


图 5.3 10 月 28 日极 I 工作 1650MW 噪声辐射图

表 5.1 站外敏感点噪声仿真值与实测值对比

测点	A(1.5m)	B(1.5m)	C(1.5m)	D(1.5m)	E(9.2m)
仿真值(dBA)	44~48	44~48	40~44	40~44	52~56
白天实测值(dBA)	45.3	44.4	46.3	43.8	53.9
测点	F(9.2m)	G(9.2m)	H(4.2m)	I(4.2m)	J(4.2m)
仿真值(dBA)	52~56	52~56	52~56	52~56	44~48
白天实测值(dBA)	51.7	51.5	53.1	52.8	47.4

表 5.1 给出站外敏感点噪声仿真值与实测值对比, 其中 A、B、D 点仿真值与实测值吻合, 由于当天为极 I 工作, 从图 5.3 可以看到, 换流变压器和

平波电抗器距离 C 测点很远, 所以极 I 换流变压器在这点的噪声辐射较弱, 但实测值与仿真值相比稍高。在对 E、F、G 进行测量时, 使传声器保持高出 8 米围墙 1.2 米, 从表 5.1 中可以看出, E 点仿真值与实测值吻合。F 和 G 点实测值略低于仿真值。在对 H、I、J 进行测量时, 使传声器保持高于 3 米围墙 1.2 米, 同样可以看出, 三点仿真值与实测值吻合。

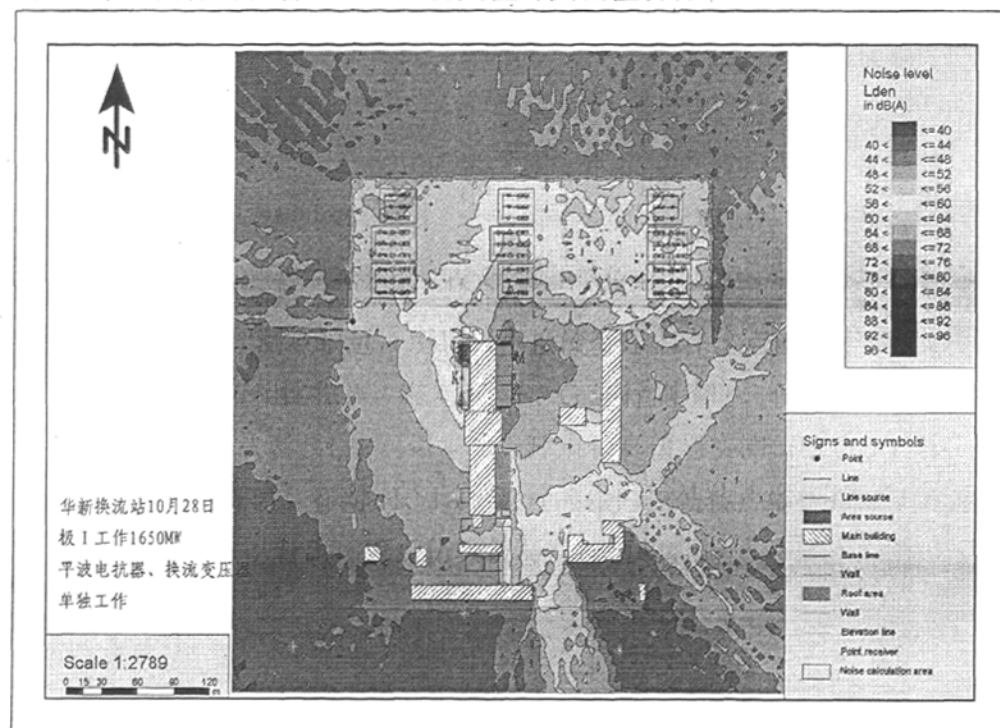


图 5.4 换流变压器、平波电抗器工作时噪声辐射图

图 5.4 给出换流变压器、平波电抗器工作时噪声辐射图, K~M 为场内极 I 处的测点: K 为空调机组处测点; L 为极 I 平波电抗器处测点; M 为极 I 换流变压器处测点。

表 5.2 K~M 点噪声仿真值与实测值对比

测点	K	L(外)	L(外)	M(内)	M(外)
仿真值(dBA)	64~68	84~88	64~68	>96	72~76
白天实测值(dBA)	68.6	88	65.7	100.6	75.9

表 5.2 给出 K~M 点噪声仿真值与实测值对比, 除空调处测点 K 实测值比仿真值稍高外, 其余各点的实测值均与仿真值相符。

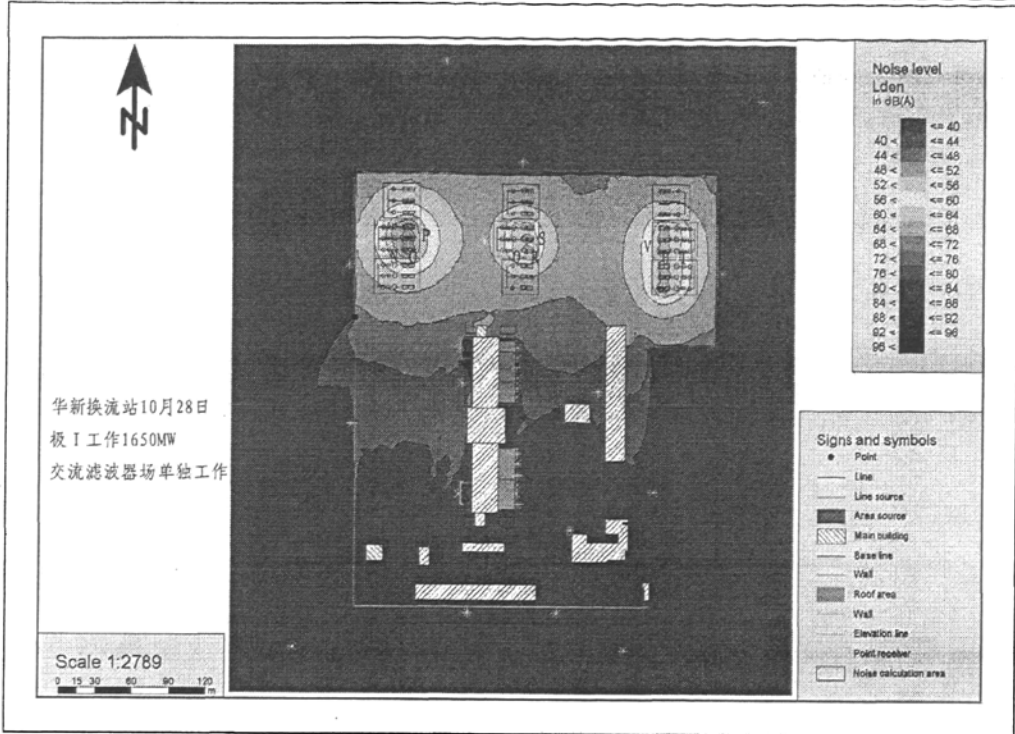


图 5.5 交流滤波器场工作时噪声辐射图

表 5.3 交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比

测点	N	O	P	Q	R
仿真值(dBA)	60~64	64~68	60~64	60~64	64~68
白天实测值(dBA)	61.5	65.4	60.7	60.7	67.3
测点	S	T	U	V	
仿真值(dBA)	60~64	60~64	64~68	60~64	
白天实测值(dBA)	60.6	63.1	63.7	60.4	

图 5.5 给出交流滤波器场工作噪声辐射图，N~V 为交流滤波器场内测点：N~P 分别为交流滤波器组 5622 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点；Q~S 分别为交流滤波器组 5632 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点；T~V 分别为交流滤波器组 5612 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点。

表 5.3 给出交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比，交流滤波器场内各点噪声的实测值与仿真值均相符。

### 5.1.2 华新换流站极 II 工作时辐射噪声情况

2006 年 10 月 30 日站内极 II 工作, 输出功率为 1650MW, 交流滤波器组 5612、5621、5622、5632 同时工作。测量方法及测点布置同前。计算出的噪声辐射图如图 5.7 所示。

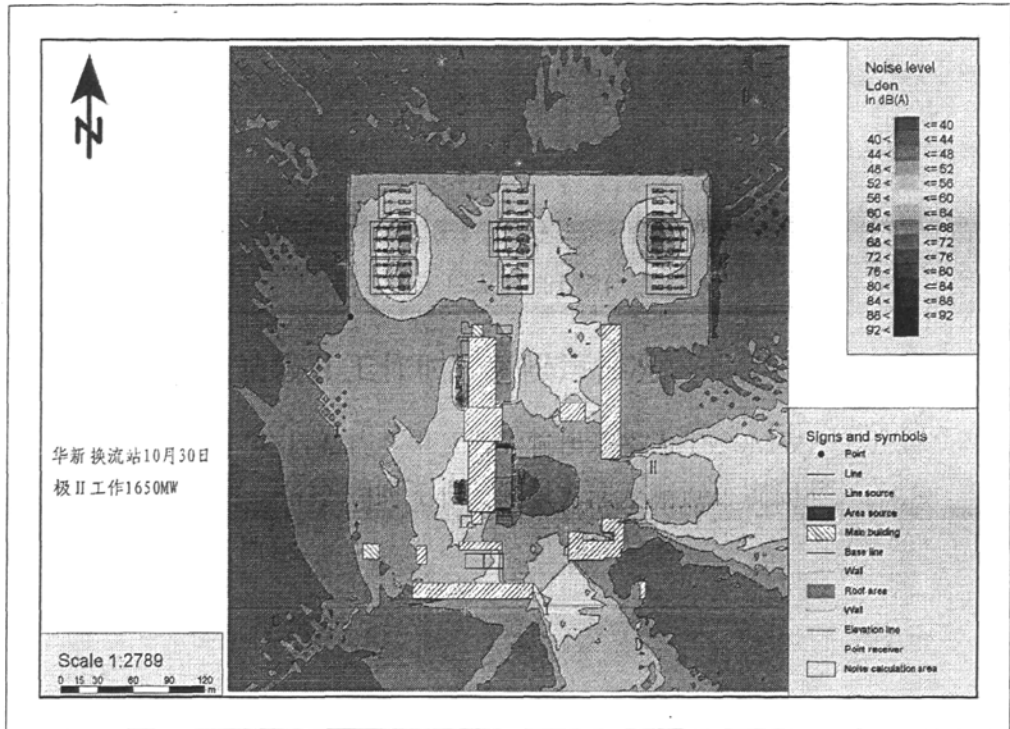


图 5.6 10 月 30 日极 II 工作 1650MW 噪声辐射图

表 5.4 站外敏感点噪声仿真值与实测值对比

测点	A(1.5m)	B(1.5m)	C(1.5m)	D(1.5m)	E(9.2m)
仿真值(dBA)	40~44	40~44	40~44	52~56	52~56
白天实测值(dBA)	42.1	38.4	46.5	50	54.4
测点	F(9.2m)	G(9.2m)	H(4.2m)	I(4.2m)	J(4.2m)
仿真值(dBA)	48~52	52~56	60~64	56~60	44~48
白天实测值(dBA)	51.3	52.3	57.4	57.1	47.2

表 5.4 给出站外敏感点噪声仿真值与实测值对比, 其中 A 点仿真值与实测值吻合, 由于当天为极 II 工作, 从图 5.6 可以看到, 换流变压器和平波电抗器距离 B 测点很远, 所以极 II 换流变压器对 B 点的噪声辐射声压级影响很小, 但实测值与仿真值相比稍低。而测点 C 距离极 II 平波电抗器较近, 受极

II 影响很强, 实测值比仿真值要高。测点 D 实测值比仿真值低。其中除 H 测点实测值略低于仿真值, 其余场界测点仿真值与实测值基本符合。

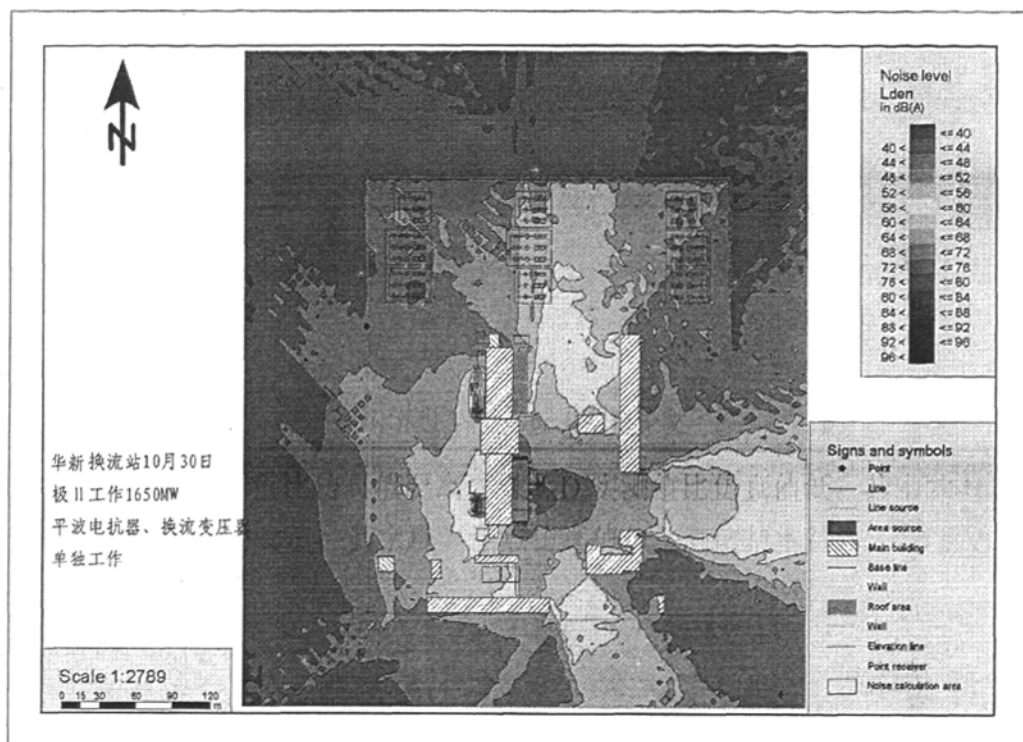


图 5.7 换流变压器、平波电抗器工作时噪声辐射图

图 5.7 给出换流变压器、平波电抗器工作时噪声辐射图, K~M 为场内极 II 处的测点: K 为空调机组处测点; L 为极 II 平波电抗器处测点; M 为极 II 换流变压器处测点。

表 5.5 给出 K~M 点噪声仿真值与实测值对比, 空调处测点 K 实测值比仿真值稍高, 其余各点的实测值均与仿真值相符。

表 5.5 K~M 点噪声仿真值与实测值对比

测点	K	L(内)	L(外)	M(内)	M(外)
仿真值(dBA)	64~68	84~88	64~68	>96	72~76
白天实测值(dBA)	69.2	88	65.7	99.7	75.1

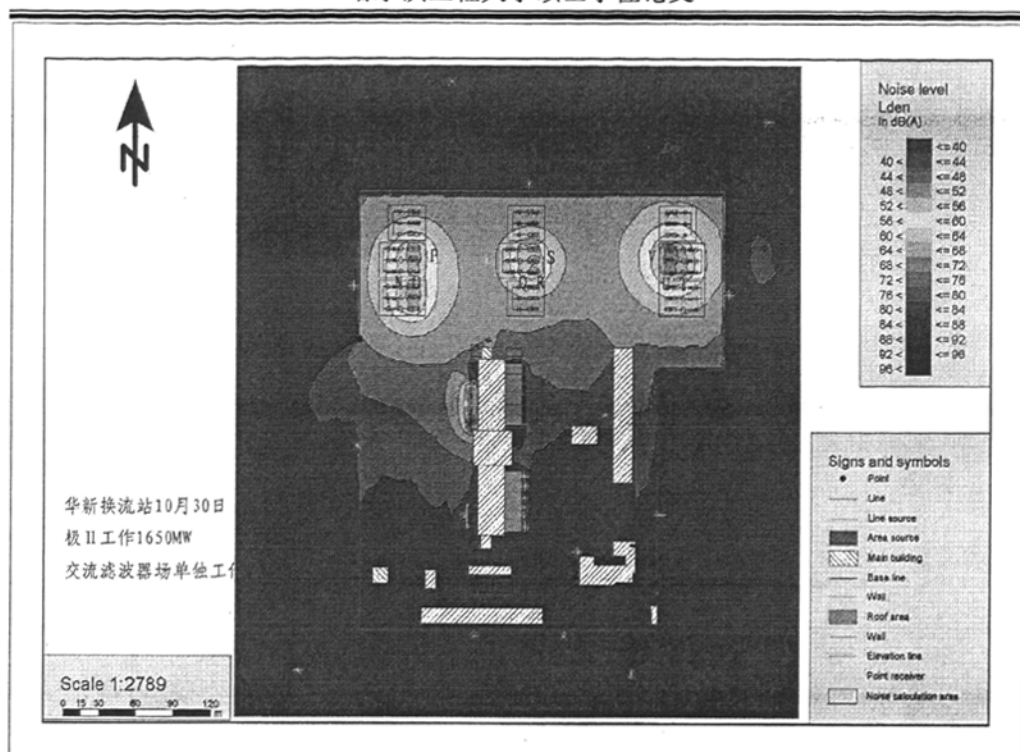


图 5.8 交流滤波器场工作时噪声辐射图

表 5.6 交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比

测点	N	O	P	Q	R
仿真值(dBA)	60~64	64~68	56~60	56~60	64~68
白天实测值(dBA)	59.7	65.6	58.2	58.4	67.6
测点	S	T	U	V	
仿真值(dBA)	60~64	60~64	60~64	60~64	
白天实测值(dBA)	60.4	63.1	62.8	60.3	

图 5.8 给出交流滤波器场工作时噪声辐射图, 其中 N~V 为交流滤波器场内测点: N~P 分别为交流滤波器组 5622 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点; Q~S 分别为交流滤波器组 5632 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点; T~V 分别为交流滤波器组 5612 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点。

表 5.6 给出交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比, 交流滤波器场内各点噪声的实测值与仿真值均相符。

5.1.3 华新换流站双极工作时昼间辐射噪声情况

2006 年 11 月 5 日站内双极工作满负荷运行，输出功率为 3000MW，交流滤波器组中 5611、5612、5613、5621、5622、5623、5632、5633 同时工作。测量方法同前，增加了站内测点。噪声辐射图如图 5.11 所示。

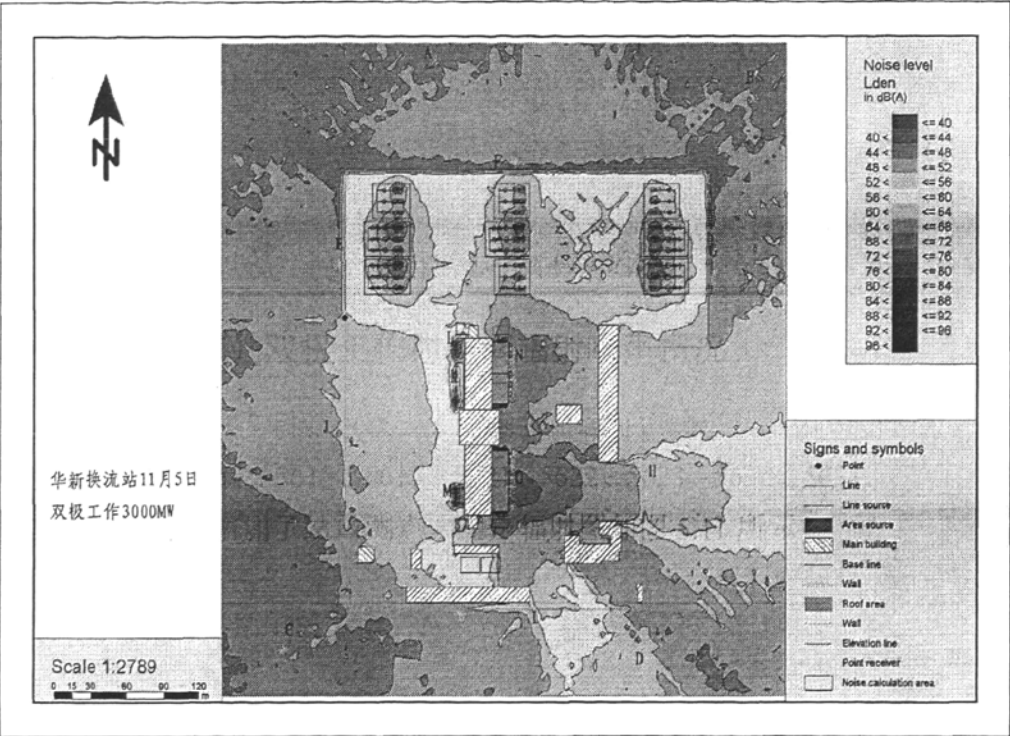


图 5.9 11 月 5 日双极工作 3000MW 噪声辐射图

表 5.7 站外敏感点噪声仿真值与实测值对比

测点	A	B	C	D	E
仿真值(dBA)	44~48	44~48	44~48	52~56	48~52
白天实测值(dBA)	44.2	47.8	45.5	50	45.6
测点	F	G	H	I	J
仿真值(dBA)	44~48	44~48	60~64	52~56	44~48
白天实测值(dBA)	42.5	44.3	64.2	52.6	44.8

表 5.7 给出站外敏感点噪声仿真值与实测值对比，整体的测量值与仿真值非常吻合。测点 D 实测值比仿真值低。由于 E、F、G 三点在 8 米高围墙的声影区内，各主要声源对这几点的影响均降低，其中 G 点测量值与实测值相



符, E、F 两点的测量值略低于仿真值。其余几点实测值与仿真值符合。

结合 GB12348-1990《工业企业厂界噪声标准》和 GB3069-1993《城市区域环境噪声标准》相关标准, 换流站外居民敏感点昼间噪声基本小于 55dBA, 满足 I 类地区标准。

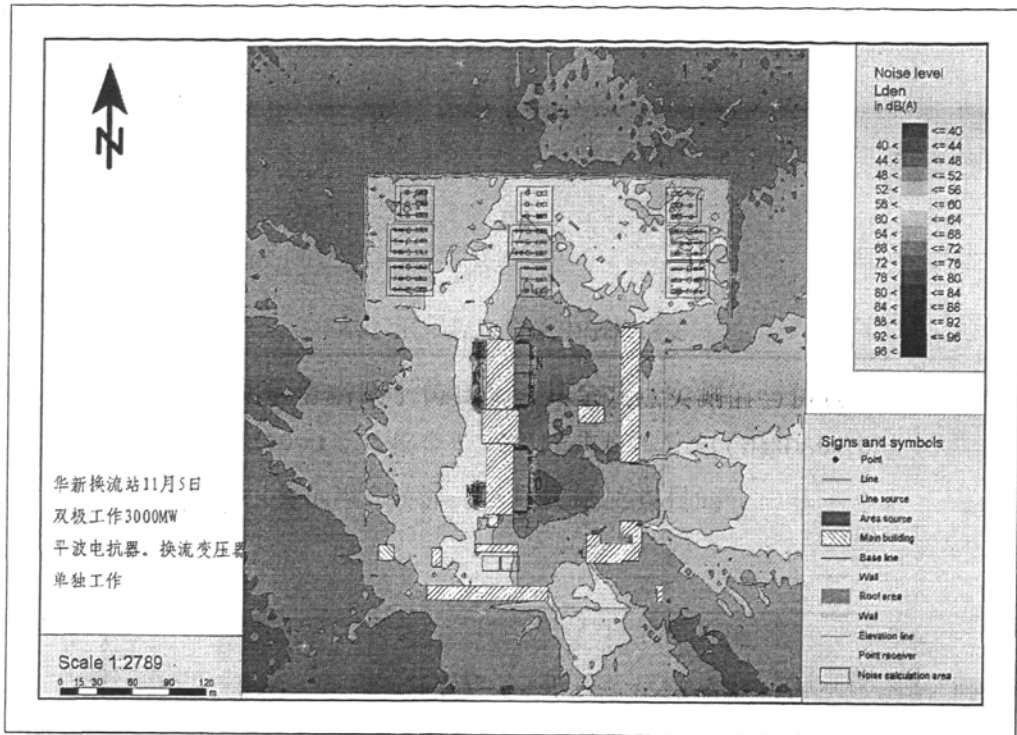


图 5.10 换流变压器、平波电抗器工作时噪声辐射图

图 5.10 给出换流变压器、平波电抗器工作时噪声辐射图, 其中 K~O 为场内极 I, 极 II 处的测点: K 为空调机组处测点; L、M 分别为极 I、极 II 平波电抗器处测点; N、O 分别为极 I、极 II 换流变压器处测点。

表 5.8 给出了 K~O 点噪声仿真值与实测值对比, 除极 II 平波电抗器外处测点 L 实测值比仿真值稍高外, 其余各点的实测值均与仿真值相符。

表 5.8 K~O 点噪声仿真值与实测值对比

测点	K	L(内)	L(外)	M(内)	M(外)
仿真值(dBA)	68~72	80~84	60~64	80~84	64~68
白天实测值(dBA)	70	83.6	64.7	83.5	67.3
测点	N(内)	N(外)	O(内)	O(外)	
仿真值(dBA)	>96	72~76	>96	72~76	
白天实测值(dBA)	98.3	74.5	98.5	74.2	



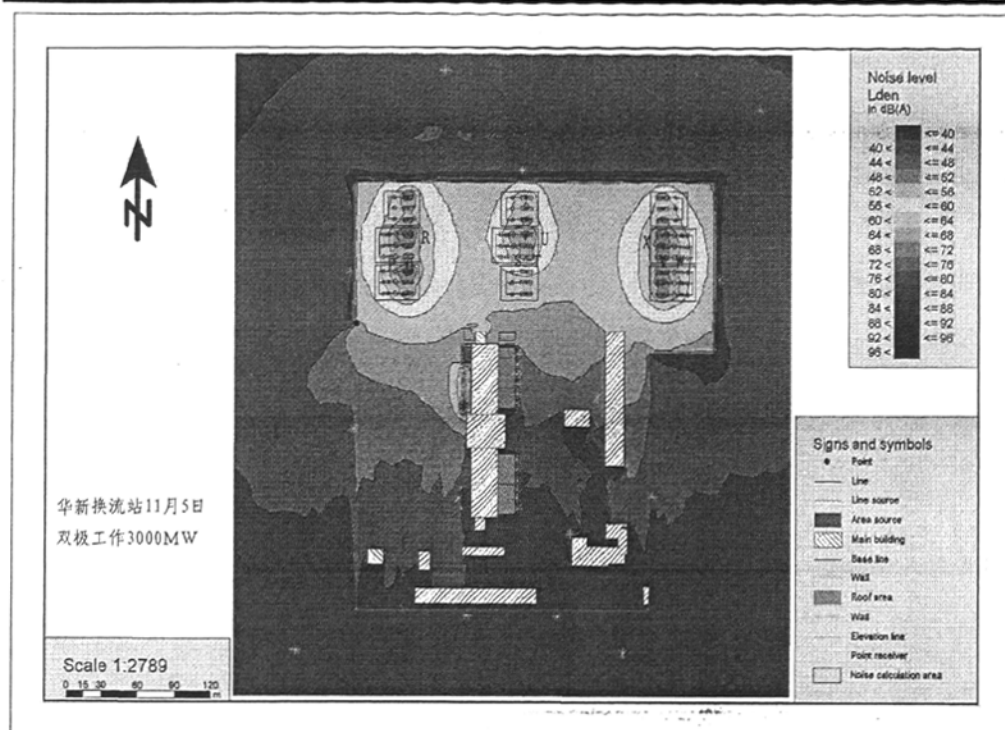


图 5.11 交流滤波器场工作时噪声辐射图

如图 5.11 所示, 为了满足测试运行的需要, 交流滤波器场中的输变电设备几乎全部运行, 选取 5612、5622、5632 交流滤波器组进行噪声测量。P~X 为交流滤波器场内测点: P~R 分别为交流滤波器组 5622 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点; S~U 分别为交流滤波器组 5632 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点; V~X 分别为交流滤波器组 5612 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点。

表 5.9 交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比

测点	P	Q	R	S	T
仿真值(dBA)	60~64	64~68	60~64	60~64	64~68
白天实测值(dBA)	61	66.4	61.8	62.5	68
测点	U	V	W	X	
仿真值(dBA)	60~64	64~68	68~72	60~64	
白天实测值(dBA)	64.1	67.4	69.9	63.6	

表 5.9 给出了交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比, 交流滤波器场内各点噪声的实测值与仿真值均相符。

### 5.1.4 华新换流站双极工作时夜间辐射噪声情况

2007 年 9 月 27 日凌晨对华新换流站进行夜间满负荷噪声测量。测量工况与 2006 年大致相同, 双极工作满负荷运行, 输出功率 3000MW, 交流滤波器组中 5611、5612、5613、5621、5622、5623、5632 同时工作。由于测试时间有限, 同时还由于换流站满负荷运行时, 站内噪声是不变的, 因此本次夜间满负荷测试仅对站外敏感点噪声进行测量, 没有对场内噪声进行测量。测量方法及测点布置与 2006 年测试时相同。根据换流站技术人员介绍, 当晚 BOX-IN 的门处于打开状态。建模时对模型进行了变动。将换流变压器的 BOX-IN 留出了一个门的宽度, 处于敞开状态。与 2006 年测试条件相比, 2007 年测试时为秋天, 夜间受到虫子的干扰比较严重, 对整体测试产生很大影响, 因此在对数据的处理时, 对虫子的干扰进行了修正。具体噪声辐射图如图 5.12 所示。

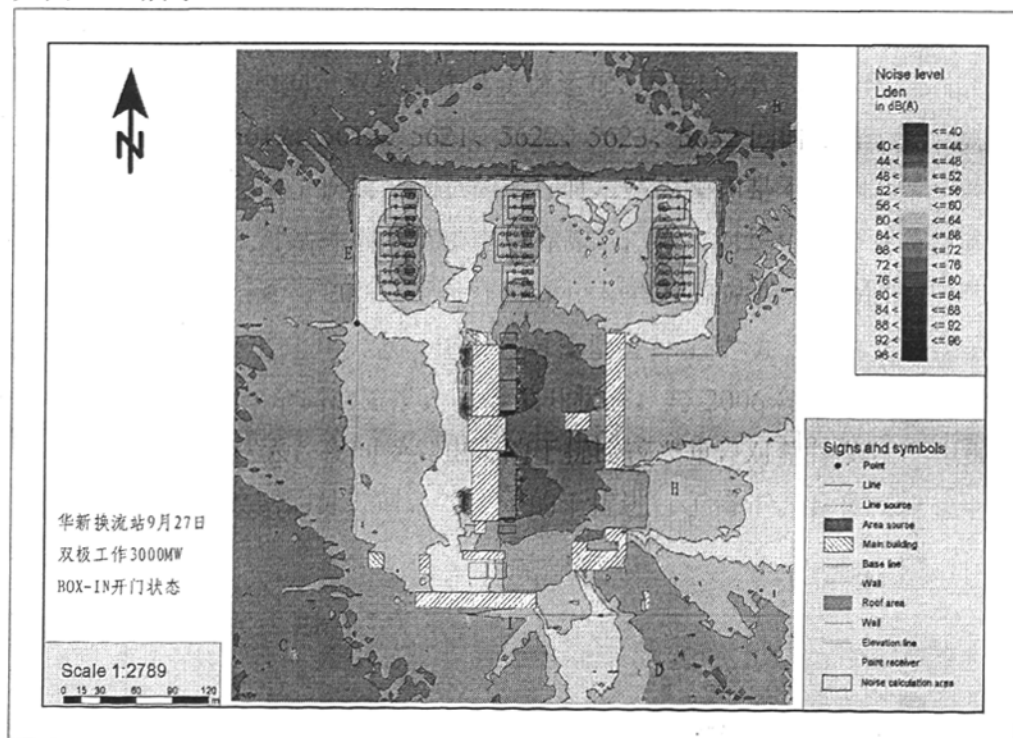


图 5.12 9 月 27 日双极工作 3000MW、BOX-IN 开门状态噪声辐射图

表 5.10 给出 BOX-IN 开门时站外敏感点噪声仿真值与实测值对比, 整体的测量值与仿真值非常吻合。与 2006 年测量时相同, 测点 D、E、G、H 点

测试值略低于仿真值。

表 5.10 BOX-IN 开门时站外敏感点噪声仿真值与实测值对比

测点	A	B	C	D	E
仿真值(dBA)	44~48	44~48	44~48	52~56	44~48
夜间实测值(dBA)	45.6	46.5	44.2	47.8	39.4
测点	F	G	H	I	J
仿真值(dBA)	44~48	44~48	60~64	48~52	52~56
夜间实测值(dBA)	45.7	42.5	59.3	48.2	54.5

结合 GB12348-1990《工业企业厂界噪声标准》和 GB3069-1993《城市区域环境噪声标准》相关标准，换流站外居民敏感点 B、D 夜间噪声略高于 45dBA，考虑到测量时的干扰因素，华新换流站基本满足 I 类地区标准。

### 5.1.5 模拟双极工作时增加隔声屏障时的辐射噪声情况

考虑到个别点的声压级高于国家标准的要求，在超标点处增加声屏障，以降低噪声辐射强度。结合声学理论和图 5.13 可以看出，当隔声屏障封闭不好时隔声量下降。

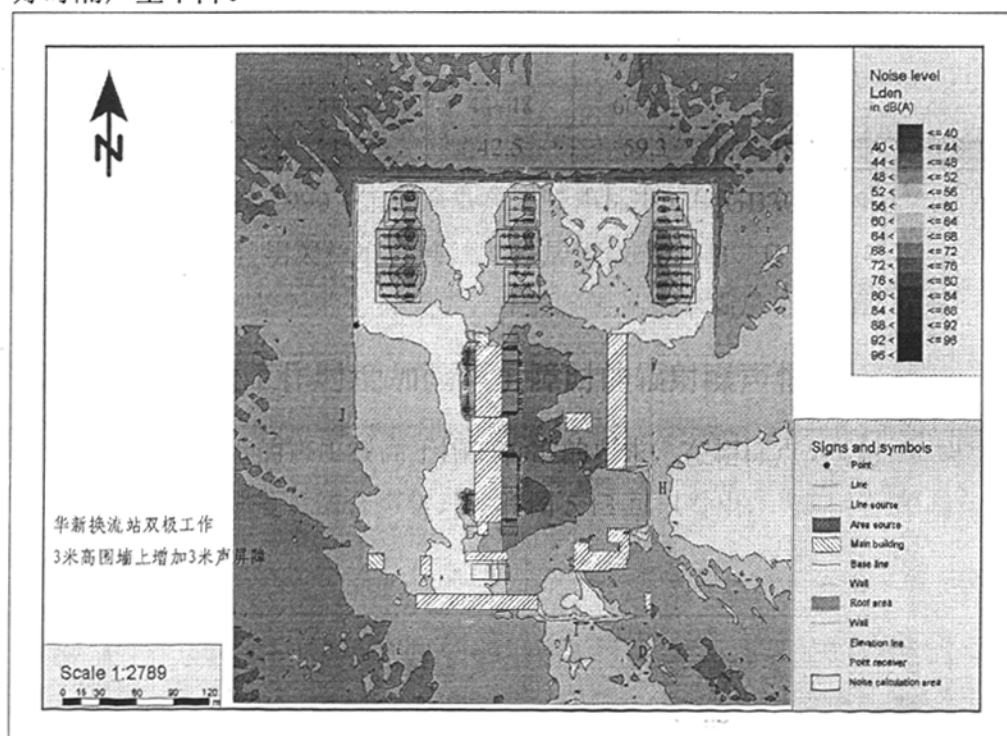


图 5.13 双极工作 3 米高围墙上增加 3 米声屏障噪声辐射图

为了既能保障换流变压器正常运行，又能保证场界周围噪声降低，在原有 3 米高的围墙上加设 3 米高声屏障，模拟换流站正常工作时的噪声辐射状况。

结合图 5.12，对比图 5.13 可以看出，D、H、J 三点处的噪声值范围变化很明显，增加围墙对这两点有很好的降噪效果。

表 5.11 增加隔声屏障后仿真前后及与实测值对比

测点	D	H	J
增加围墙前的仿真值(dBA)	52~56	60~64	52~56
增加围墙后的仿真值(dBA)	48~52	52~56	48~52
白天实测值(dBA)	50	59.3	54.5

5.2 蔡家冲换流站仿真结果

蔡家冲换流站场区的测点布置图见图 5.14。换流站的中部为主控楼、阀厅及换流变，该区域还布置有平波电抗器、备用换流变、空调冷却设备、事

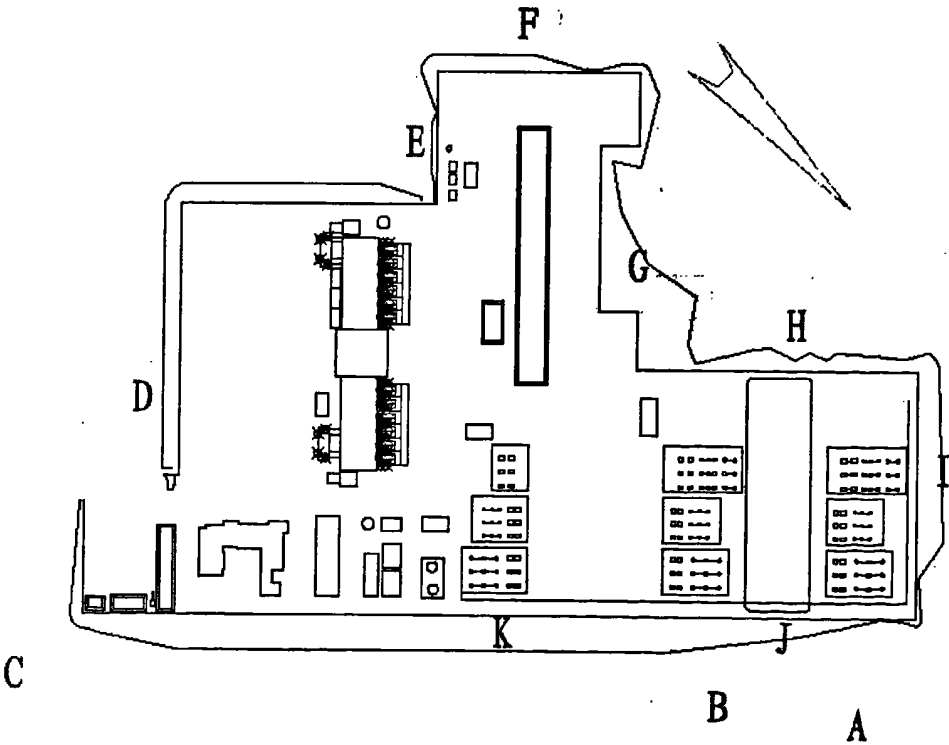


图 5.14 蔡家冲换流站场外测点布置图

故油坑等。换流站的南侧为斜坡,北侧为高速公路;换流站的北侧为 500kV GIS 配电装置及交流滤波器配电装置;办公楼位于场内的东南角;直流配电装置场地位于站区的南侧,与主控阀厅换流变场地对齐布置。

A、B 为站外附近的敏感点;C~K 为站外距围墙外 1.5 米的测点。A、B 点为站外东北角的居民家测点,该敏感点在地势较低的位置,受换流站噪声影响很小。C、D 点测量平波电抗器及空调噪声在围墙外辐射状况;E、F、G 点测量换流变压器噪声在围墙外辐射状况;H、I、J 点测量交流滤波器场噪声在围墙外辐射状况。由于地势的影响,其中某些点的仿真值与实测值误差较大。根据测量日期不同,站内布点不尽相同。

### 5.2.1 蔡家冲换流站极 I 工作时辐射噪声情况

2006 年 10 月 28 日站内极 I 工作,输出功率为 1650MW,交流滤波器组 5611、5621、5622、5623、5631、5632 同时工作。测量方法同华新换流站。噪声辐射图如图 5.15 所示。计算面统一高度为 1.5 米。

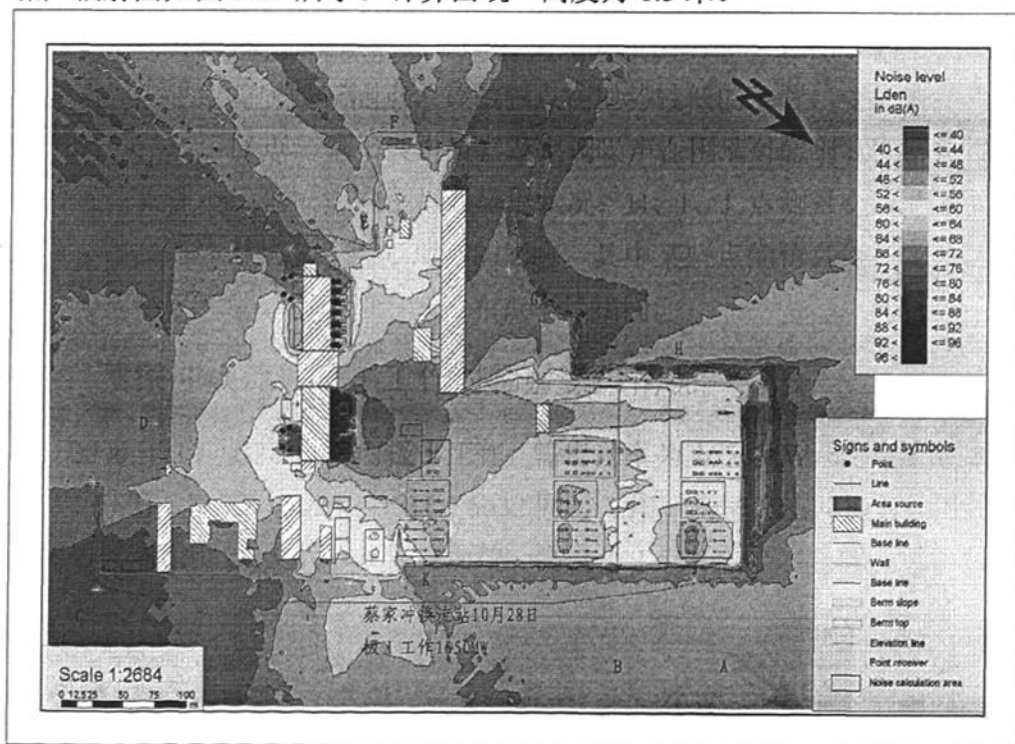


图 5.15 10 月 28 日极 I 工作 1650MW 噪声辐射图

表 5.12 站外敏感点噪声仿真值与实测值对比

测点	A	B	C	D	E	F
仿真值(dBA)	48~52	48~52	40~44	44~48	52~56	48~52
白天实测值(dBA)	42	44.9	43.1	48.5	55.9	52
测点	G	H	I	J	K	
仿真值(dBA)	44~48	48~52	<40	40~44	44~48	
白天实测值(dBA)	47.4	47.9	38.1	43.9	47.8	

表 5.12 给出站外敏感点噪声仿真值与实测值对比。居民敏感点处测点 A、B 实测值比仿真值低很多，因为这两点的高程比测试点低，模型运算的接收平面高度为 1.5 米，A、B 两点的真实声压级在该图中无法显示。D 点仿真值比实测值稍低，H 点仿真值比实测值稍高。从表 5.12 中看出，其余场界测点的实测值均与仿真值相符。

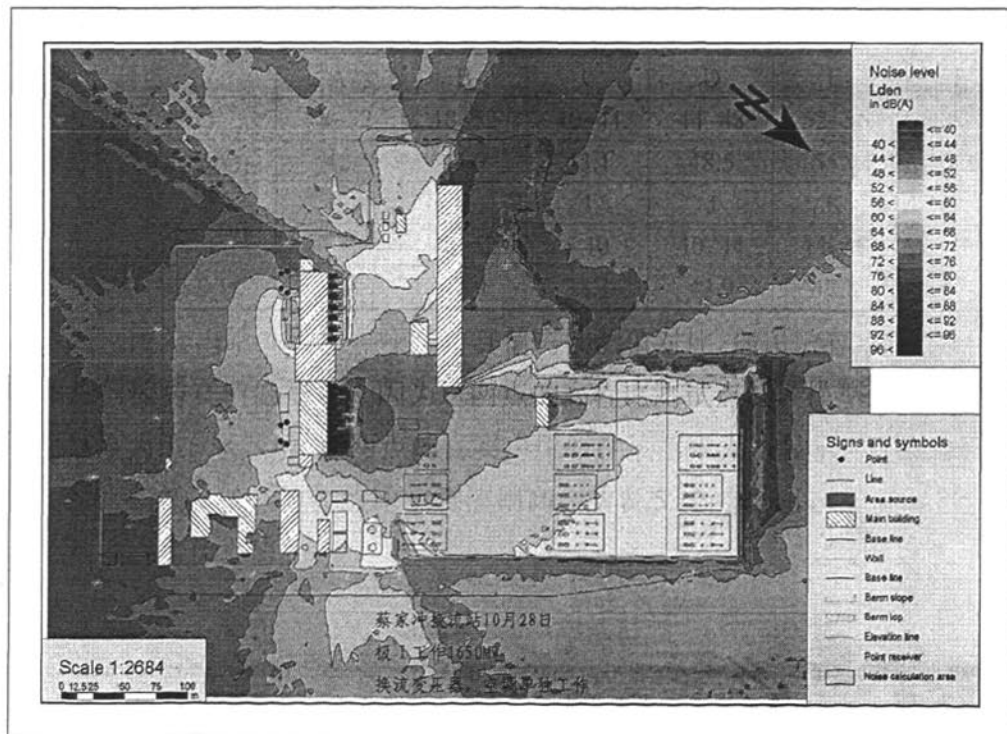


图 5.16 换流变压器、空调工作时噪声辐射图

图 5.16 和图 5.17 给出换流变压器、平波电抗器和空调工作时噪声辐射图，其中 L~N 为场内极 I 处的测点：L 为空调机组处测点；M 为极 I 平波电抗器处测点；N 为极 I 换流变压器处测点。

表 5.13 L~N 点噪声仿真值与实测值对比

测点	L	M(内)	M(外)	N(内)	N(外)
仿真值(dBA)	64~68	84~88	56~60	88~92	64~68
白天实测值(dBA)	68.2	84.1	59.8	90.3	67.4

表 5.13 给 L~N 点噪声仿真值与实测值对比, 空调处测点 L 实测值比仿真值稍高, 其余各点的实测值均与仿真值相符。

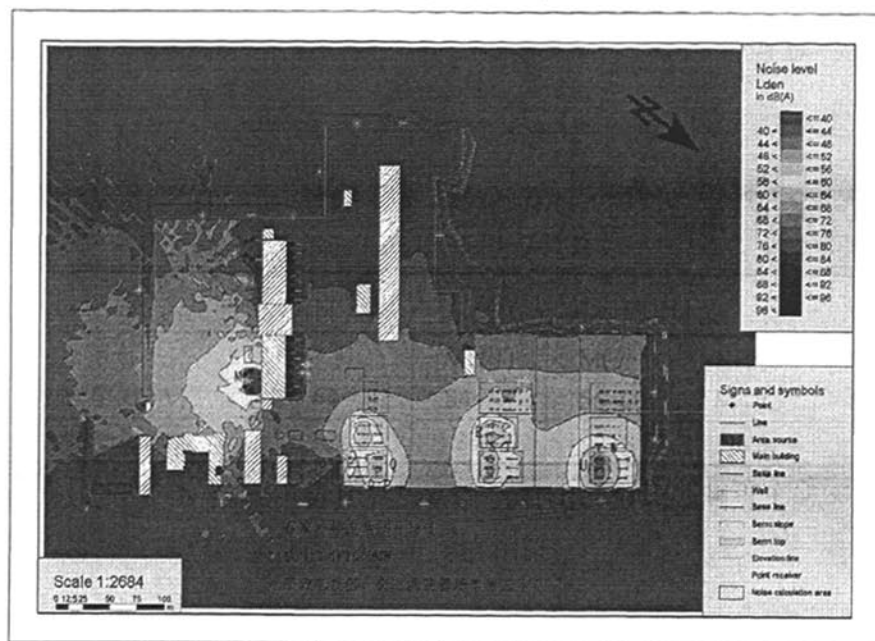


图 5.17 平波电抗器及交流滤波器场工作时噪声辐射图

图 5.17 给出了平波电抗器及交流滤波器场工作时噪声辐射图,其中 O~W 为交流滤波器场内测点: O~Q 分别为交流滤波器组 5631 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点; R~T 分别为交流滤波器组 5622 中垂直电容器、电容器组正面、电抗器组处测点; U~W 分别为交流滤波器组 5611 中垂直电容器、电容器组正面、电抗器组处测点。

表 5.14 交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比

测点	O	P	Q	R	S
仿真值(dBA)	60~64	64~68	60~64	60~64	64~68
白天实测值(dBA)	63.7	67.4	59.2	60.9	67
测点	T	U	V	W	
仿真值(dBA)	60~64	60~64	64~68	60~64	
白天实测值(dBA)	60.3	60.5	67.3	60.9	



表 5.14 给出交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比, 垂直电容器组处 Q 测点的噪声低于仿真值, 其余交流滤波器场内各点噪声的实测值与仿真值均相符。

## 5.2.2 蔡家冲换流站极 II 工作时辐射噪声情况

2006 年 10 月 30 日站内极 II 工作, 输出功率为 1650MW, 交流滤波器组 5611、5621、5622、5623、5631、5632 同时工作。测量方法及站外测点分布同前。具体噪声辐射图如下所示。

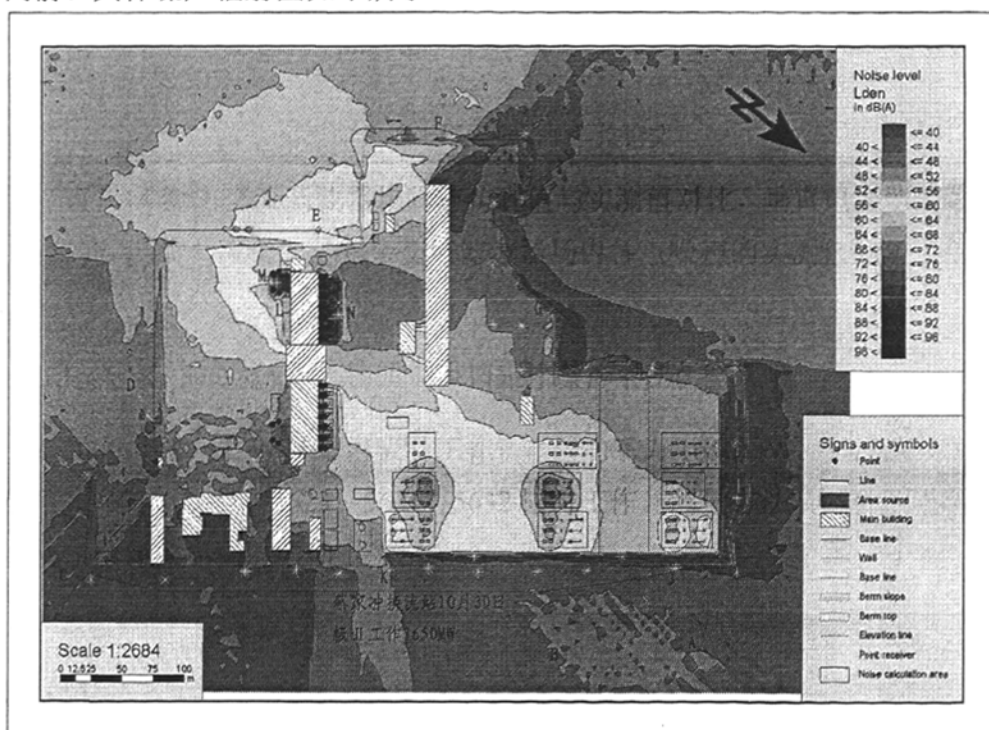


图 5.18 10 月 30 日极 II 工作 1650MW 噪声辐射图

表 5.15 站外敏感点噪声仿真值与实测值对比

测点	A	B	C	D	E	F
仿真值(dBA)	40~44	40~44	40~44	44~48	56~60	48~52
白天实测值(dBA)	42.7	40.9	43.4	48.8	59.6	50.6
测点	G	H	I	J	K	
仿真值(dBA)	44~48	44~48	<40	40~44	44~48	
白天实测值(dBA)	46.5	45.5	37.2	42.5	47.5	

表 5.15 给出站外敏感点噪声仿真值与实测值对比, 除测点 D 的实测值比



仿真值稍高，测点 J 的实测值比仿真值稍低，其余测点实测值与仿真值符合。由于 30 号为极 II 工作，从图 5.18 中可以看出，换流变压器距离居民敏感点较远，对这些点贡献的声压级较少，所以 A、B 两点实际的声压级与仿真值相符。

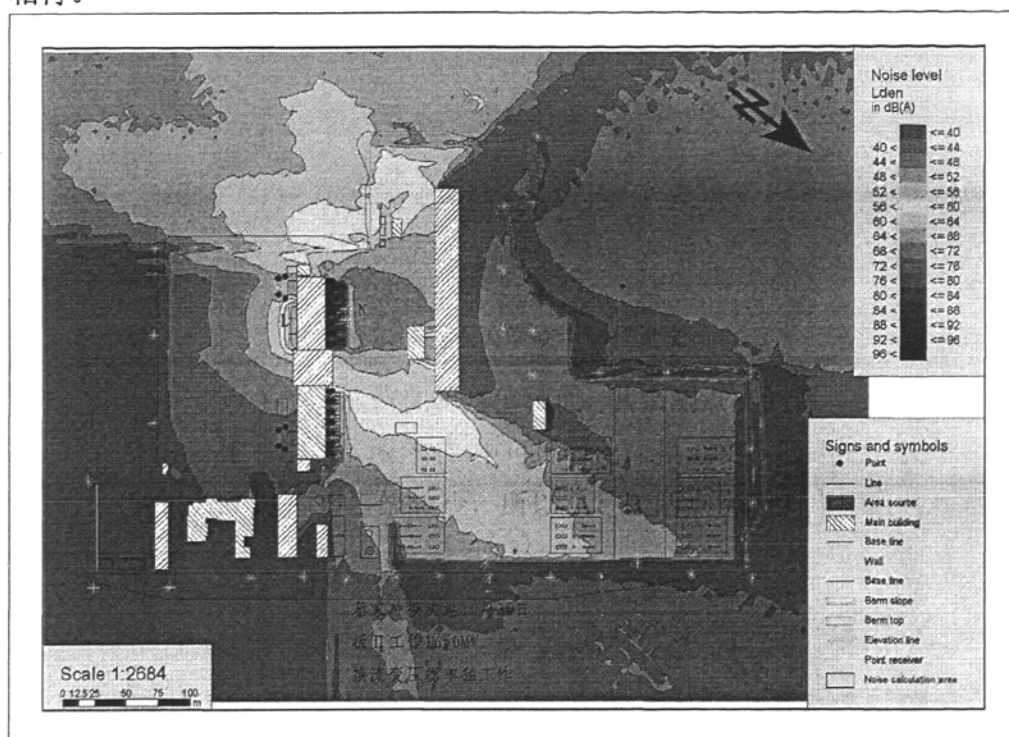


图 5.19 换流变压器、空调工作时噪声辐射图

图 5.19 给出换流变压器、空调工作时噪声辐射图，L~N 为场内极 II 处的测点：L 为空调机组处测点；M 为极 II 平波电抗器处测点；N 为极 II 换流变压器处测点。

表 5.16 给出 L~N 点噪声仿真值与实测值对比，空调处测点 L 实测值比仿真值稍高，其余各点的实测值均与仿真值相符。

表 5.16 L~N 点噪声仿真值与实测值对比

测点	L	M(内)	M(外)	N(内)	N(外)
仿真值(dBA)	64~68	84~88	56~60	88~92	64~68
白天实测值(dBA)	68.2	84.1	59.8	90.3	67.4



图 5.20 平波电抗器、交流滤波器场单独工作时噪声辐射图

表 5.17 交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比

测点	O	P	Q	R	S
仿真值(dBA)	60~64	68~72	60~64	60~64	64~68
白天实测值(dBA)	63.8	72.9	60.9	58.6	67
测点	T	U	V	W	
仿真值(dBA)	60~64	52~56	60~64	56~60	
白天实测值(dBA)	60.3	54	62.7	56.9	

图 5.20 给出平波电抗器、交流滤波器场单独工作时噪声辐射图，O~W 为交流滤波器场内测点：O~Q 分别为交流滤波器组 5632 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点；R~T 分别为交流滤波器组 5622 中垂直电容器组、电容器组正面、电抗处测点；U~W 分别为交流滤波器组 5611 中垂直电容器组、电容器组正面、电抗器处测点。

表 5.17 给出交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比，交流滤波器场内各点噪声的实测值与仿真值基本相符。其中 P、R 两点实测值与仿真测有一定误差。

5.2.3 蔡家冲换流站双极工作时辐射噪声情况

2006 年 11 月 5 日白天和 2007 年 9 月 27 日凌晨对蔡家冲换流站分别进行昼间和夜间的噪声测量工作。两次测量的工况大致相同，双极工作满负荷运行，输出功率 3000MW，交流滤波器场中所有交流滤波器组同时工作。两次测量方法与测点均相同。

与 2006 年测试条件相比，2007 年测试时为秋天，夜间受到虫子的干扰比较严重，对整体测试产生很大影响，因此，在对数据进行处理时，将虫子的干扰进行了修正。具体噪声辐射图见图 5.21。

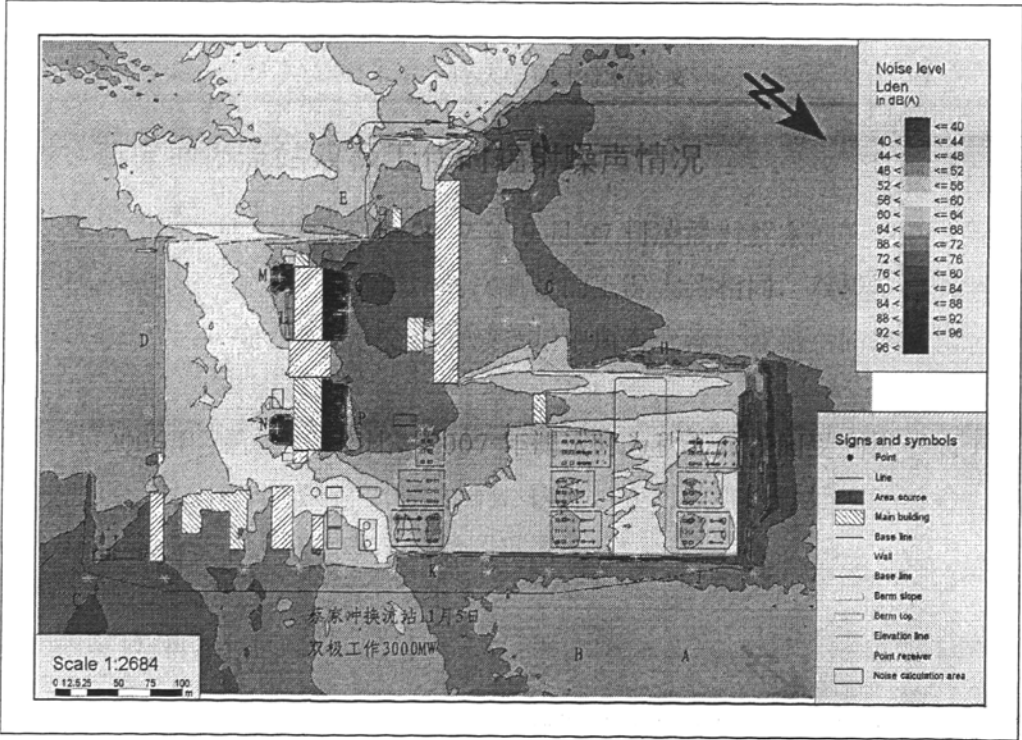


图 5.21 11 月 5 日双极工作 3000MW 噪声辐射图

表 5.18 给出场界噪声仿真值与实测值对比。测点 A、B 实测值比仿真值低，因为这两点的地势比测试点低。其余测量点实测值与仿真值符合。

结合 GB12348-1990《工业企业厂界噪声标准》和 GB3069-1993《城市区域环境噪声标准》中 II 类地区标准，昼间不高于 60dBA，夜间不高于 50dBA。换流站外居民敏感点 A、B 昼夜噪声影响均达到国家标准，场界测点 E 昼间噪声超出国家标准 0.4dBA，夜间超出国家标准 7.9dBA，但考虑到 E 点为陡

坡，且附近没有居民，对周围环境影响很小。其它场界测点昼间均达到Ⅱ类地区标准，测点 D、F、H 夜间略有超标，不会对周围环境产生影响。

表 5.18 场界噪声仿真值与实测值对比

测点	A	B	C	D	E	F
仿真值(dBA)	48~52	48~52	40~44	48~52	60~64	52~56
白天实测值(dBA)	42.7	44.1	41.6	51.5	60.4	53.3
夜间实测值(dBA)	42	49	43	50.1	57.9	50.3
测点	G	H	I	J	K	
仿真值(dBA)	48~52	52~56	44~48	44~48	44~48	
白天实测值(dBA)	49.6	54.3	47.4	45.5	47.5	
夜间实测值(dBA)	49	51	47.3	46.4	47.1	

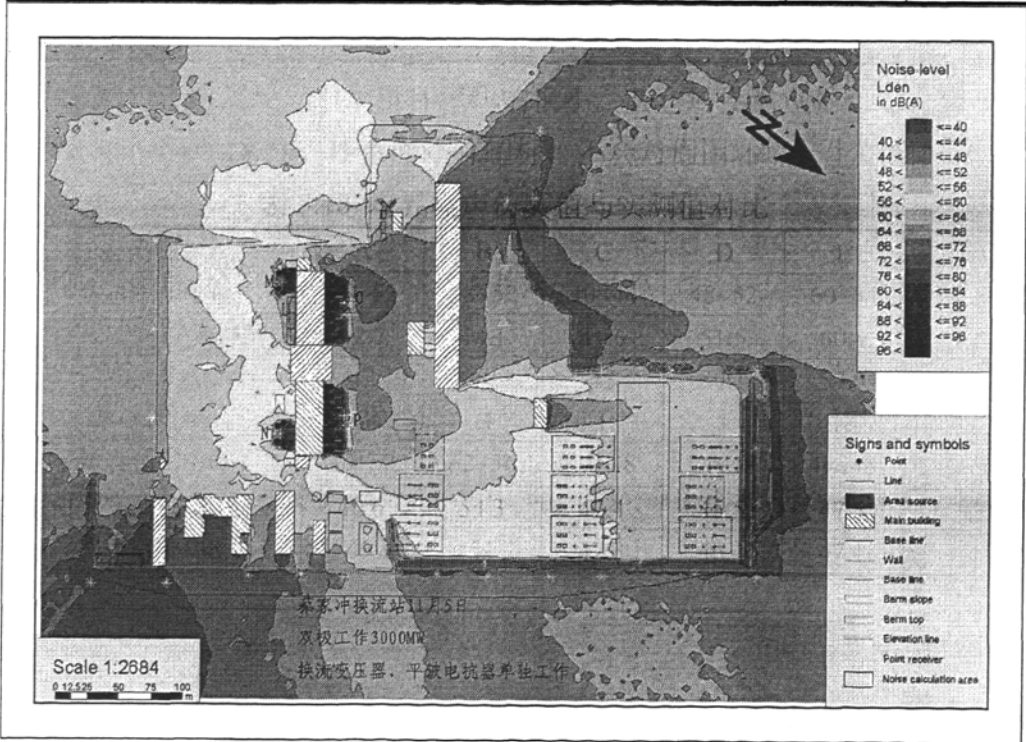


图 5.22 换流变压器、平波电抗器工作时噪声辐射图

图 5.22 给出了换流变压器、平波电抗器工作时噪声辐射图，其中 L~P 为站内极 I、极 II 处的测点：L 为空调机组处测点；N、M 分别为极 I、极 II 平波电抗器处测点；P、O 分别为极 I、极 II 换流变压器处测点。

表 5.19 给出了 L~P 噪声仿真值与实测值对比，除极 II 平波电抗器外处测点 M 实测值比仿真值稍低，其余各点的实测值均与仿真值相符。

表 5.19 L~P 噪声仿真值与实测值对比

测点	L	M(内)	M(外)	N(内)	N(外)
仿真值(dBA)	64~68	80~84	60~64	80~84	60~64
白天实测值(dBA)	67.9	83.7	59.5	81.5	60.5
测点	O(内)	O(外)	P(内)	P(外)	
仿真值(dBA)	>96	68~72	88~92	64~68	
白天实测值(dBA)	99.8	71.7	88.8	66.3	

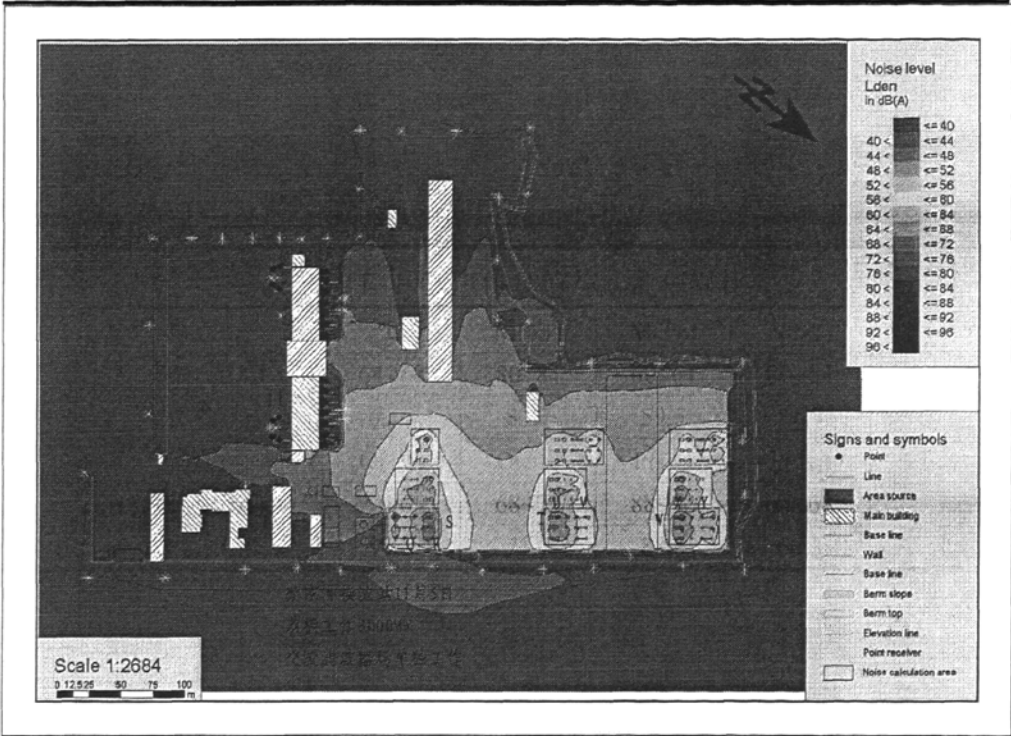


图 5.23 交流滤波器场工作时噪声辐射图

图 5.23 给出了交流滤波器场工作时噪声辐射图。为了满足测试运行的需要，交流滤波器场中的输变电设备几乎全部运行，选取 5612、5622、5631 交流滤波器组进行噪声测量。Q~X 为交流滤波器场内测点：Q~S 分别为交流滤波器组 5631 中电抗器、电容器组正面、垂直电容器组处测点；T~V 分别为交流滤波器组 5622 中垂直电容器组处、电容器组正面、电抗器测点；W~Y 分别为交流滤波器组 5611 中垂直电容器组处、电容器组正面、电抗器测点。

表 5.20 给出了交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比，交流滤波器场内各点噪声的实测值与仿真值均相符。

表 5.20 交流滤波器场噪声仿真值与实测值对比

测点	Q	R	S	T	U
仿真值(dBA)	60~64	64~68	60~64	56~60	64~68
白天实测值(dBA)	63.8	66.9	62.5	59.5	65.3
测点	V	W	X	Y	
仿真值(dBA)	60~64	60~64	64~68	60~64	
白天实测值(dBA)	61.5	61.3	66.8	61.4	

### 5.3 仿真对比分析

通过仿真噪声图与实际值的对比可以看出,换流站声场模型的建立比较符合实际。华新换流站模型与实际测量吻合,个别点由于误差等因素与实际测量值有差异,总体控制在 $\pm 3\text{dB}$ 以内。蔡家冲换流站模型与实际测量基本吻合,由于地势因素,导致模型建立与实际情况有差异,但总体符合换流站内实际声场辐射状况。从两个换流站满负荷工作的噪声辐射图中可以看到,华新换流站站外居民敏感点均达到《城市区域环境噪声标准》中 I 类地区标准,即白天 55dBA,夜间 45dBA;蔡家冲换流站站外居民敏感点均达到《城市区域环境噪声标准》中 II 类地区标准,即白天 60dBA,夜间 50dBA。

### 5.4 误差分析

#### 5.4.1 物理因素的影响

在本文的建模过程中,模型参数的设定直接影响仿真效果。具体主要影响参数如下:

##### 5.4.1.1 反射的影响

模型建立中,反射角度越大,计算速度越快,但是计算精度随之降低。反射次数、反射深度的设定也是如此,数量越高,精度越高,但计算速度越慢。在仿真的过程中都提高了相应的参数设定。

##### 5.4.1.2 声屏障尺寸的影响

声屏障的高度、吸声系数、反射系数等参数直接影响最终的仿真效果。建模中完全按照实际换流站的尺寸进行模拟。

#### 5.4.1.3 接收点高度的影响

接收面高度不同，辐射声压级也不同。随着高度的增加，声压级降低。建模中按照国家标准中的要求，将接收面的高度参数统一设定为 1.5 米，与实际测量时一致。

#### 5.4.1.4 地势因素的影响

地势影响声传播。蔡家冲换流站中地势的影响尤为突出。测量点与接收面高度不同时，产生了相应的误差。在模型的建设之初应该考虑地势因素。在模型的验证阶段，也应该把地势的误差考虑进去。

### 5.4.2 测量误差的影响

测量误差主要由系统误差和随机误差组成。系统误差是测量过程中由于仪器结构上不够完善或仪器未经很好校准等原因会产生误差，称为固定误差。系统误差的数值可以是恒定的，也可以是遵循一定规律变化的。随机误差是由于大量随机因素干扰而产生的误差。在同样的测试条件下，大多数随机误差是正态分布的。

综上所述，考虑到环境因素的影响和误差因素，本次的仿真结果误差控制在 $\pm 3\text{dB}$  以内，满足工程上的要求。

## 5.5 本章小结

本章主要对华新换流站和蔡家冲换流站内外噪声分布做了计算，给出各种工况下的噪声分布图。结合每次的测点对不同工况状态下仿真值与实测值进行了对比，认真分析了造成实测值与仿真值出现误差的原因。对整个仿真结果进行了评价。最后对整个仿真计算过程中的误差进行分析。

## 结 论

本文运用 SoundPLAN 软件, 完成了华新换流站和蔡家冲换流站声场的模拟。通过实际测量, 并将仿真值与实际测量值进行了比对, 验证了模型建立的准确性。下面对全文的主要研究内容做一总结。

首先, 根据已投入运行的换流站噪声测试结果, 对正在建设的华新、蔡家冲换流站内外的主要噪声源分布情况进行了分析; 详细阐述了换流站内主要噪声源的结构及发声机理: 换流站内噪声分布主要受换流变压器的影响, 由于铁芯的磁致伸缩产生低频噪声, 导致换流变压器本身的声辐射很强, 加之换流变压器之间加有防火墙, 这样就使声辐射具有一定的指向性。平波电抗器与噪声产生机理相似, 但辐射出的噪声不如换流变压器强, 对换流站内外的噪声分布影响仅次于换流变压器。另外, 交流滤波器场对换流站内外的噪声影响也很大, 其中的电容器组和电抗器辐射的低频线谱, 对换流站周围居民的生产、生活造成很大的影响。

第二, 给出建模仿真的流程, 根据声学原理, 针对不同声源, 构建换流站内的主要噪声源模型。将换流变压器、平波电抗器、空调设备和交流滤波器场内的电容器模拟为面声源, 或者为面声源的组合体; 将交流滤波器场内的电抗器模拟为柱状声源。结合实际隔声屏障的吸声效果, 给出了站内的围墙及隔声屏障的设计参数。

第三, 根据 GB/T12349-1990《工业企业厂界噪声测量方法》和 GB/T14623-93《城市区域环境噪声测量方法》, 对声场测量方式、方法进行了介绍。通过对换流站实测数据的整理、分析, 对主要噪声源的分布进行声场建模及仿真计算, 结合实际的情况, 将声压级转换为声功率级, 并带入实际模型中运算, 最终给出换流站噪声声场分布图。

最后, 再根据实际测量的数据, 验证模型的准确程度。总体上华新换流站和蔡家冲换流站所建模型与实际情况相符, 个别点由于其他因素的影响造成模拟值与实测值之间有一定的误差, 但总体误小于 $\pm 3\text{dB}$ 。论文最后阐述了造成误差的主要原因。



## 参考文献

- [1] P. Nassiri, M. Abbaspour, M. Mahmoodi, S. Givargis. A rail noise prediction model for the ehran-Karaj commuter train. *Applied Acoustics*, 2007, 3(68): 326-333P
- [2] Saad Abo-Qudais, Arwa Alhiary. Statistical models for traffic noise at signalized intersections. *Building and Environment*, 2007, 8(42): 2939-2948 P
- [3] Roman Gołebiewski. The influence of turbulence on noise propagation from a point source above a flat ground surface. *Applied Acoustics*, 2007, 1(25): 469-472P
- [4] Renzo Arina, Marco Falossi. Domain decomposition technique for aeroacoustic simulations. Potential of microperforated panel absorber. *J. Acoust.* 2004, 1(49): 263-275P
- [5] Kenji Fujii, Masatsugu Sakurai, Yoichi Ando. Computer software for identification of noise source and automatic noise measurement *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 3(227): 573-582P
- [6] 曾向阳, 陈克安, 宁方立, 孙进才. 三维声场数字式模拟研究发展. *电声技术*. 2001(12): 19-23 页
- [7] 黎胜, 赵德有. 半空间内结构声辐射研究. *船舶力学*. 2004, 1(8): 105-112 页
- [8] 许庆新, 沈密群, 顾晓安, 沈荣瀛. 变压器铁心远场辐射噪声预估方法. *噪声与振动控制*. 2002(5): 12-15 页
- [9] 顾垣, 陈进, 钟平. 复杂声场中的频谱分离. *振动与冲击*. 2002, 1(21): 54-56 页
- [10] 李加庆, 陈进, 张桂才, 陈少林, 雷宣扬. 自由场波叠加噪声源识别的仿真研究. *振动与冲击*. 2006, 4(25): 58-60 页
- [11] 庞峰, 金先龙, 许莎, 申杰, 张晓云. 大电流母线桥电磁激励振动与噪声数值分析. *上海交通大学学报*. 2006, 1(40): 112-115 页
- [12] 翟国庆, 张邦俊, 过春燕. 城市高架轨道交通沿线声场分布计算模型. *中国环境科学*. 2004, 3(24): 320-323 页

- [13] 池万刚. 多声源声场特性及声强技术在多声源工业现场的应用. 浙江大学学报. 2000, 6(34): 681-685 页
- [14] 姚志远. 振动体向周围声场传播噪声理论模型. 应用数学和力学. 2002, 3(23): 316-320 页
- [15] 李友志. 噪声声源分析方法及应用. 西南工学院学报. 2002, 17(1): 39-41 页
- [16] 钱伟佳. 西电东送中的安顺换流站简介. 安顺师范高等专科学校学报. 2002, 7(1): 87-88 页
- [17] 林明芳. 变压器的噪声及其合理控制. 韶关学院学报(自然科学版). 2004, 9(25): 45-47 页
- [18] Massom. Réduction des nuisances sonores et vibratoires liées aux transformateurs de puissance. Revue de l'électricité et de l'électronique N°.2003,8(10): 40-48P
- [19] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册. 机械工业出版社, 2002: 360-457 页
- [20] 杨一鸣, 章旭雯. 特高压直流换流站设备的降噪措施. 高电压技术. 2006, 32(9): 149-152 页
- [21] 乐波, 张燕秉, 郑劲, 聂定珍.  $\pm 800\text{KV}$  直流干式平波电抗器的技术规范. 高电压技术. 2006, 32(12): 170-173 页
- [22] 汲胜昌, 寇小括, 李彦明. 换流站中电容器装置噪声水平计算方法的研究. 中国电机工程学报. 2006, 26(3): 112-118 页
- [23] O.Winroth, H.P.Schut.Design of HVDC Converter Stations with respect to AudibleNoiseRequirements.IEEETrans.onPowerDelivery.1995,7(10):268-298P
- [24] 房金兰. 直流输电用电力电容器的技术发展. 电力电容器. 2003(1): 4-7 页
- [25] 马遵院, 王香芳. 关于直流输电用 PLC 耦合电容器和噪音滤波电容器设计的几点建议. 电力电容器. 2004(3): 23-25 页
- [26] A.Persson,L.Carlsson, M.Aberg.New Technologies in HVDC Converter design. SEPOPE conference in Recife. 1996,5(8):83-96P
- [27] 谷德林. 换流站设备降噪方法研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文

- 文. 2006: 12-14 页
- [28] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 国防工业出版社, 1981: 96-109 页
- [29] 池万刚, 叶贵如, 杨世超. 用声场抗性指数和不确定度限制规则确定声强测量的精度. 浙江大学学报. 1992, 26(1): 52-59 页
- [30] 池万刚. 采用声强技术测定电机声功率级的测试程序. 中小型电机. 1998, 25(3): 15-17 页
- [31] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册. 机械工业出版社, 2002: 69-103 页
- [32] Kending R P. Sound intensity survey of the comerford HVDC converter station. IEEE Trans. Power Deliv. ,1989,4(3):1876-1881P
- [33] Kending R P. Wright S E. Validation of acoustic intensity measurements for power transformer[J]. IEEE Trans. Power Deliv. , 1991,6(4): 1551-1530P
- [34] Champoux Y, Gosselin B. Application of intensity technique to the characterization of transformer noise[J]. IEEE Trans. Power Deliv. , 1988. 3(4):1802-1808P
- [35] 顾晓安, 沈荣瀛, 徐基泰. 国外变压器噪声研究的动向. 变压器. 2002, 6 (39): 36-38 页
- [36] 张林. 噪声及其控制. 哈尔滨工程大学, 2001: 22-30 页
- [37] 马大猷. 声学手册. 科学出版社, 1979: 755-764 页
- [38] GB3785 声级计的电、声性能及测试方法
- [39] GB/T17181 积分平均声级计
- [40] GB/T12349-1990 工业企业厂界噪声测量方法
- [41] GB/T14623-93 城市区域环境噪声测量方法
- [42] GB12348-1990 工业企业厂界噪声标准
- [43] GB3096-93 城市区域环境噪声标准

## 攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

- [1] 陈思舟, 张林. 隔声罩的性能测试和实验研究. 声学与电子工程(2006增刊). 2006: 82-84 页

## 致 谢

在我的硕士论文完成之际，回想我两年多来的硕士研究生生活，我真诚的向曾经帮助我和关心我的人表示深深的谢意，是你们在学习和科研上给我鼓励，在生活上给我关心，使我能够顺利的完成硕士学业。

本论文的研究工作是在导师张林研究员的悉心指导下完成的。她对科学知识的不断追求、勇于开拓进取的精神，以及一丝不苟、严谨的治学态度给学生留下了深刻的印象，并受益匪浅。她给我提供了良好的学习、科研和实践条件，拓宽了学生的知识面，增强了我的动手能力、语言表达能力、书面写作能力。从她的身上我学到了太多的东西。在此由衷的感谢导师两年多来的辛勤培养和教育。

论文工作期间，还得到了孙辉教授的热情指导，在此表示诚挚的谢意；感谢北京声望声电技术有限公司王凡先生在软件的培训、使用上对我的帮助；感谢身边蒋延超、沈加曙、郑旭、张超诸位同学，他们不仅对课题工作提供了帮助，更使我感受到了工作的乐趣及生活的多彩，体会到了集体力量之伟大。

感谢父母对我孜孜不倦的教诲和养育之恩，感谢亲人对我的无私关心和帮助。

最后感谢所有关心、帮助我的各位同学和朋友！