

LOW FREQUENCY NOISE

低频噪声

◎ 翟国庆 著

LOW
FREQUENCY
NOISE



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

013028474

0422
06

LOW
FREQUENCY
NOISE

低频噪声

◎ 翟国庆 著



042206



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社



北航

C1634991

图书在版编目(CIP)数据

低频噪声/翟国庆著. —杭州: 浙江大学出版社,
2013. 3

ISBN 978-7-308-10248-3

I. ①低… II. ①翟… III. ①低噪声—研究 IV.
①0422.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 156308 号

低频噪声

翟国庆 著

责任编辑 石国华

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州星云光电图文制作工作室

印 刷 杭州杭新印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19.25

字 数 500 千

版 印 次 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-10248-3

定 价 57.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部地址: 杭州 (0571)88925591



北航

C1634991

序

生活场所的声环境质量是评价人们生活质量的重要指标之一。由于环境噪声影响范围广、人数多,已被大多数国家列为重要环境影响因素。根据最近世界卫生组织对欧洲国家的流行病学研究,噪声污染已成为影响生活质量和人体健康的重要环境因素。过度暴露在噪声污染中,不仅会严重影响心理健康,也会增加心血管等疾病的风险。在中国大多数城市,环境噪声投诉占环境投诉的40%~50%,已位居环境投诉的首位,而且有继续增加的趋势。由于噪声引发的群体性事件也时有发生,这直接影响社会和谐与安定。在世界卫生组织(WHO)和欧盟合作研究中心最近公开的一份关于噪声对健康影响的报告《噪声污染导致的疾病负担》中指出,在欧洲地区,噪声污染导致的疾病负担程度仅次于空气污染。为此,WHO呼吁世界各国积极采取有效措施降低或减少噪声污染。

与中高频噪声相比,低频噪声控制难度相对较大。在对产品和环境辐射的中高频噪声得到更为有效控制情况下,环境中的低频声能量在总声能量中所占比重不断增加,中高频噪声对低频噪声的掩蔽效应也随之减小,低频噪声影响变得越来越显著。WHO早在2000年发布的报告中就指出:低频低声级噪声干扰人们的休息与睡眠;A计权网络对低频噪声的影响有所低估;针对低频噪声的标准限值应该更为严格;有关低频噪声负面作用的证据已经非常充分,值得人们关注。

作者所在研究小组多年来紧紧围绕我国低频噪声污染特点及新的发展趋势,在对典型低频噪声进行调查采样基础上,建立了国内首个低频环境噪声数据库;通过声学建模,开发了若干典型低频噪声源影响预测模型及软件;通过科学的社会声学调查和实验室实验,对典型低频噪声的心理效应、生理效应开展研究,获得了典型低频噪声的剂量效应关系;探索了低频噪声主观烦恼的声调控方法;开发了若干控制低频噪声污染的实用技术及产品;并研究提出了若干基于低频噪声的评价方法和管理建议。受国家环保公益行业专项经费资助,作者总结课题组多年来在国内外发表的相关论文和专利等成果基础上,潜心思考,系统整理,最终将研究成果以专著形式出版,实属对环境噪声领域的一大贡献。作为国内环境科学领域关于低频环境噪声的第一本专著,必将对我国低频噪声研究、污染防治和环境管理产生积极和深远影响。随着我国环境噪声领域人员队伍的不断壮大,殷切希望今后有更多更好的著作贡献于读者、贡献于社会。

康 健

2012年9月

前言

噪声污染影响人的心理和生理健康,已成为当今世界公认的环境问题之一。若把噪声污染给人体带来的健康风险用一个金字塔三角形来表示,位于金字塔最底层,受影响人数最多的噪声影响是产生“不舒服感”,比如导致扰民的情况,再往上一层是导致“压力”,再往上就出现了“风险因素”,引起包括如高血压、胆固醇等身体因素的疾病风险,再上一层就是“疾病”,比如引起睡眠失调、心血管疾病等,而金字塔的最顶层就是“死亡”。相对于低频噪声,产品和环境辐射的中高频噪声容易得到有效控制,环境中低频声能越来越显著,低频噪声污染呈现加剧态势。然而,与欧美等发达国家相比,我国在低频噪声来源、声学特性、影响方式、范围和程度(特别是心理和生理影响的剂量效应关系)、预测评价方法、控制技术方法及其环境管理(特别是相关法规标准制定)等方面的基础研究工作比较薄弱,不能满足公众日益增长的加强低频噪声污染防治和管理的要求。

环保部在“十一五”期间,在环保公益行业科研专项经费中拨款资助了《低频噪声效应、评价方法及其环境管理技术研究》(200809142),作者有幸作为项目负责人承担了该项目。本着科研服务于社会、服务于公众、服务于环境噪声污染防治和管理工作的宗旨,非常有必要对研究成果进行整理、归纳、总结和凝练,形成著作出版物为社会所共享。为使本书内容更系统,书中部分内容引用了作者负责的国家自然科学基金(11174251、10604048)、浙江省科技计划(2005C23078)、浙江省自然科学基金(Y505070)、杭州市科技计划(20091633F05)等科研项目成果。本书共分六章,第1章低频噪声及相关领域研究进展;第2章典型低频噪声源;第3章典型低频噪声源影响预测;第4章典型低频噪声源心理效应研究;第5章典型低频噪声生理效应研究;第6章典型低频噪声控制技术;第7章低频噪声评价及管理。

在本书撰写过程中,一直得到张邦俊教授、潘仲麟教授的支持和鼓励,在此对两位教授及参加课题研究的李争光、林旗力、柳小毅、周兵、贾丽、徐婧、郑玥、贺玲姣、施祥、倪荣、卓国祥等一并表示衷心感谢。同时,也要感谢本书所引用文献的相关作者,特别感谢国家环保公益行业科研专项经费对本书出版给予的资助。

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,衷心希望各位同行、读者批评指正,联系邮箱:dgq@zju.edu.cn,电话:0571-88982816,实验室网址:<http://ene.zju.edu.cn>。

翟国庆
2012年7月

目 录

第 1 章 低频噪声及相关领域研究进展	(1)
1.1 低频噪声	(1)
1.1.1 低频噪声的概念	(1)
1.1.2 环境中的低频噪声	(2)
1.1.3 低频噪声产生的环境问题	(3)
1.2 低频噪声效应	(5)
1.2.1 低频噪声的心理效应	(5)
1.2.2 低频噪声的生理效应	(7)
1.3 低频噪声控制技术	(8)
1.4 低频噪声评价与管理	(9)
1.4.1 低频噪声评价方法	(9)
1.4.2 国内外低频噪声标准限值	(11)
1.4.3 低频噪声管理技术	(13)
1.5 小 结	(14)
参考文献	(14)
第 2 章 典型低频噪声源	(20)
2.1 典型低频噪声源调查	(20)
2.1.1 采样方法	(20)
2.1.2 数据整理	(21)
2.1.3 低频噪声源信息数据库及其应用	(21)
2.2 城市居住区典型低频噪声源声学特性	(24)
2.2.1 居住区固定设备噪声声学特性分析	(24)
2.2.2 居住区地下车库出入口噪声声学特性分析	(32)
2.3 典型交通噪声特性	(36)
2.3.1 城市轨道交通噪声声学特性分析	(36)
2.3.2 高架复合道路噪声声学特性分析	(37)
2.3.3 铁路交通噪声声学特性分析	(47)
2.4 其他典型低频噪声源噪声特性	(49)
2.4.1 风电机组噪声声学特性分析	(49)
2.4.2 变电站噪声声学特性分析	(62)
2.4.3 特高压换流变噪声声学特性分析	(82)

2 低频噪声

2.5 小 结	(86)
参考文献	(88)

第3章 典型低频噪声源影响预测

(89)

3.1 居住区内车流噪声影响预测	(89)
3.1.1 车库出入口坡道噪声影响因素及预测	(89)
3.1.2 居住区车流噪声在建筑群间的传播和影响模拟计算	(93)
3.1.3 受车流噪声影响建筑噪声防护距离计算模式	(99)
3.2 交通噪声影响预测	(102)
3.2.1 城市高架轨道交通噪声影响预测	(102)
3.2.2 铁路噪声影响预测	(106)
3.3 风电场噪声影响预测	(110)
3.3.1 风电场噪声预测模型	(110)
3.3.2 风电场噪声预测模型比较研究及源强估计方法	(115)
3.3.3 风电场噪声预测软件	(121)
3.4 变电站主变噪声影响预测	(123)
3.5 小 结	(125)
参考文献	(126)

第4章 典型低频噪声源心理效应研究

(128)

4.1 噪声的声学特性对主观感受的影响	(128)
4.1.1 噪声频域特性对主观感受的影响	(128)
4.1.2 噪声时域特性对主观感受的影响	(132)
4.1.3 用纯音模拟实际噪声的主观感受	(136)
4.2 典型低频噪声社会声学调查	(140)
4.2.1 居住区室外噪声社会声学调查	(140)
4.2.2 居住区室内噪声社会声学调查	(145)
4.2.3 机场噪声社会声学调查	(147)
4.2.4 城市地面交通噪声社会声学调查	(153)
4.2.5 城市高架复合道路噪声社会声学调查	(161)
4.2.6 视觉感受对噪声主观感受影响社会声学调查	(174)
4.3 典型低频噪声心理效应实验研究	(176)
4.3.1 居住区固定设备噪声心理效应实验研究	(176)
4.3.2 变电站噪声心理效应实验研究	(181)
4.3.3 高速铁路与普通铁路噪声心理效应实验研究	(195)
4.4 小 结	(202)
参考文献	(205)

第5章 典型低频噪声生理效应研究

(208)

5.1 典型低频噪声源对人体生理指标的影响	(208)
-----------------------------	-------

5.2 典型低频噪声源对动物生理指标的影响	(212)
5.2.1 机场噪声对动物生理指标的影响	(212)
5.2.2 高速铁路噪声对动物生理指标的影响	(220)
5.3 小 结	(236)
参考文献	(237)
第 6 章 典型低频噪声控制技术	(238)
6.1 典型低频噪声源控制技术	(238)
6.1.1 车库出入口坡道噪声控制技术	(238)
6.1.2 特高压换流变噪声控制技术	(243)
6.2 从传播途径和保护受声者角度控制低频噪声技术	(250)
6.2.1 民用建筑隔声窗技术	(250)
6.2.2 民用建筑隔声门技术	(255)
6.2.3 从传播途径优化控制市区铁路噪声	(261)
6.3 低频噪声声调控技术研究	(265)
6.3.1 声调控技术实验室研究	(265)
6.3.2 变电站主变噪声调控技术研究	(270)
6.4 低频低声级结构传播噪声污染控制	(276)
6.4.1 噪声源频谱特性测量	(276)
6.4.2 噪声传播途径分析	(277)
6.4.3 噪声源相对源强识别估计	(277)
6.4.4 控制措施	(278)
6.4.5 降噪效果	(278)
6.5 小 结	(279)
参考文献	(280)
第 7 章 低频噪声评价及管理	(282)
7.1 低频噪声评价	(282)
7.1.1 结构传播固定设备室内噪声测量及建议限值	(282)
7.1.2 结构传播固定设备室内噪声评价及管理建议	(286)
7.1.3 低频噪声投诉案件评价方法建议	(288)
7.1.4 应用噪声地图完善城市低频噪声评价的建议	(289)
7.2 优化区域环境长期噪声监控	(290)
7.3 建设国家级噪声源数据库及其交流、分析平台	(293)
7.4 其他政策和管理建议	(294)
7.5 小 结	(295)
参考文献	(296)
关键词索引	(297)

第1章 低频噪声及相关领域研究进展

噪声污染影响人的心理和生理健康^[1],已成为当今世界公认的环境问题之一。噪声对人的影响,不但与其声压级大小有关,也与其频率等特性有关^[2]。低频噪声在环境中广泛存在,但其影响长期被低估。近年来,随着社会经济的快速发展,噪声源种类及其影响方式不断发生变化。由于相对于低频噪声,产品和环境辐射的中高频噪声容易得到有效控制,环境中低频声能越来越显著,低频噪声污染及其引发的社会矛盾日益突出。根据低频噪声污染趋势及其影响特点^[3],开展低频噪声效应、评价方法及其环境管理和控制技术研究具有重要意义。

20世纪中叶,美国空间计划(American Space Programme)开始开展低频噪声研究,但由于他们主要关注的是运载火箭产生的高声压级低频噪声主观效应,在当时并未引起人们的广泛关注^[4]。六七十年代,一些学者开始着手研究低频噪声(包括次声)的听力保护标准^[5,6,7]。1977年,Vasudevan等^[8]对投诉室内低频噪声问题的居民进行了现场调查和实验室研究。1978年,Challis等^[9]指出原有的噪声评价方法无法很好地适用于低频噪声。之后,Broner等^[10,11,12]开始研究探索针对低频噪声的评价方法。2000年^[13],世界卫生组织(World Health Organization)提出了社会生活噪声中的低频噪声问题,使得人们开始关注身边的低频噪声污染。

近些年来,低频噪声效应、评价方法及其环境管理和控制技术已成为国内外环境声学 and 噪声控制领域的研究热点。本章将论述低频噪声及相关领域研究进展,包括低频噪声的定义与其带来的环境问题、低频噪声心理生理效应、低频噪声评价方法及其管理技术等进展。

1.1 低频噪声

1.1.1 低频噪声的概念

低频噪声是相对于中频和高频噪声而言的,但它们之间并没有明确的界限。一般而言,国内外将低频噪声的频率下限定为20Hz,频率低于20Hz的声音属于次声的范畴^[14]。20Hz并不是一个绝对的界限,当声压级较高时,人体有时也能感知到频率低于20Hz的声音^[15,16],但传统上仍以20Hz为界限。

对于低频噪声频率上限的定义,因其不像下限一样涉及次声与可听声问题,声学界没有统一的定论。Backteman等^[14]将该界限定为100Hz,而在另一些研究中,研究者根据需要,将低频的上限放宽至150Hz^[17]、200Hz^[4],但一般不超过250Hz^[3,18]。

实际环境噪声的频域一般较宽,所以无法单纯地根据其频率来判断低频噪声。Landstrom等^[19]把噪声按20~200Hz、200~2000Hz和大于2000Hz分为低频噪声、中频噪声和

高频噪声,并将声源频谱中最大声压级对应频率所在频段作为该噪声的主要影响频段。然而,在一些情况下,仅根据最大声压级所在频段来评判噪声总的频率特征并不合理,可进一步根据倍频带分析结果,利用式(1-1)和式(1-2),计算低频段声能量占噪声总能量的比率^[20]。

$$\eta_{\text{低}} = \frac{E_{\text{低}}}{E_{\text{总}}} = \frac{p_{\text{低}}^2}{p_{\text{总}}^2} = 10^{0.1(L_{\text{低}} - L_{\text{总}})} \quad (1-1)$$

$$L_{\text{低}} = 10 \lg \left(\sum_i 10^{0.1L_{di}} \right) \quad (1-2)$$

式中, $\eta_{\text{低}}$ 为低频段声能量占总声能量比率; $E_{\text{低}}$ 为低频段声能量; $E_{\text{总}}$ 为总的可听声能量; $p_{\text{低}}$ 为低频段声压; $p_{\text{总}}$ 为总声压; $L_{\text{低}}$ 为低频段总声压级(即低频段各倍频带声压级叠加值); $L_{\text{总}}$ 为总声压级; L_{di} 为低频段各频带声压级。

图 1-1 给出了 A 计权声压级与 C 计权声压级计权因子值,由图可知,在低频段,A 计权网络比 C 计权网络衰减值大。Broner^[21]于 1979 年提出可将 C 计权声压级与 A 计权声压级的差值作为低频噪声的判定指标,若差值大于 20dB 的临界值,说明该噪声以低频成分为主,而 Kjellberg 等^[22]通过研究将该临界值修正为 15dB。1992 年,Cocchi 等^[23]在对不同响度等响曲线和频率计权网络进行比较后,提出以声压级与 A 计权声压级的差值为低频噪声的判定指标。

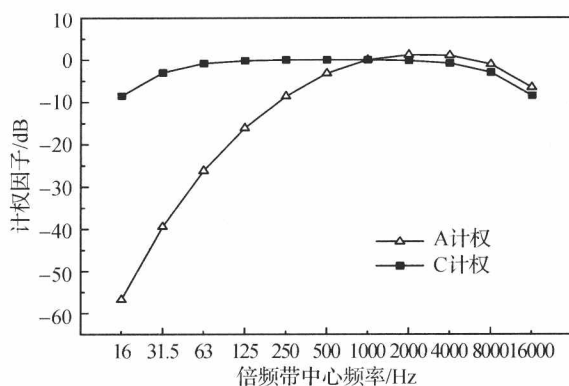


图 1-1 C 计权网络和 A 计权网络

1.1.2 环境中的低频噪声

(1) 低频噪声来源

自然界中的低频噪声来源非常广泛,例如风、雷电、海浪、地震、火山喷发等都会产生低频噪声。人工低频噪声来源主要有社会生活噪声(如住宅或办公建筑配套的空调、通风机、水泵、电梯、变配电设备及商业娱乐活动噪声等)、交通噪声(如道路、铁路、航空、航运等噪声)、工业企业噪声(如变电站、换流站、风电场、电厂等噪声)及建筑施工噪声(含土石方、打桩、结构和装修噪声),上述噪声源与人们的生活密切相关,其中的低频噪声成分较为显著时,更易对人产生影响^[24]。

随着社会经济和技术的发展,人工低频噪声源本身也在发生变化。如普通铁路噪声的低频特性并不明显,但随着列车速度的提升特别是高速铁路的发展,具有显著低频特性的气动噪声逐渐取代轮轨噪声成为铁路噪声主要来源^[25,26]。超高压、特高压电网技术和风电技

术的应用,变电站、换流站、风电场等引起的低频噪声污染越来越受到公众关注。

(2) 低频噪声传播

低频噪声作为一种声波,最显著的特点是频率低、波长长。假设空气中声速为 340m/s,若干低频空气声波长见表 1-1。由表可知,低频噪声的波长与一般房间的尺寸相近,较容易在室内引起振动。Beranek 与 Blazier 等^[27,28]都对该现象开展过研究,并提出了相关评价方法。

表 1-1 若干频率空气声波长

频率/Hz	25	50	100	150	200
波长/m	13.6	6.8	3.4	2.3	1.7

随着所使用的建筑材料或建筑结构空气声隔声量的不断提高,现代城市建筑空气声隔声性能得到持续改善。低频声传播过程中遇到尺寸比自身波长小得多的孔缝或障碍物时,可产生较为明显的衍射声能,因此民用建筑目前空气声隔声的最薄弱环节是门、窗,特别是针对门窗等孔缝的密封措施有待改善。相对于空气传声,固体传声也应受到足够重视。建筑内固定设备振动可直接通过与其相连的建筑结构传播至其他房间产生低频噪声污染。设备所在室内低频空气声引起房间的墙壁、天花板等振动后,也可通过建筑结构传播至其他房间产生低频噪声污染。事实上,目前固定设备结构传播噪声已成为建筑室内低频噪声污染的最主要来源,相应的噪声投诉事件不断增加。

声波在空气中传播,一部分声能将转化为热能而损耗,称为空气吸收衰减。以标准大气压(101.325kPa)下,温度为 20℃,相对湿度为 70%时为例,表 1-2 给出了部分频率声波的空气吸收衰减^[29]。由表可知,频率越低,单位距离产生的空气吸收衰减越小,即相对于中高频噪声,低频噪声在空气中传播时衰减得更慢。

表 1-2 标准大气压下空气中的衰减(温度为 20℃,相对湿度为 70%)

频率/Hz	63	125	250	500	1000	2000
衰减量/(dB/km)	8.97×10^{-2}	3.39×10^{-1}	1.13	2.80	4.98	9.02

1.1.3 低频噪声产生的环境问题

(1) 低频噪声污染现状及发展趋势

随着城市化的快速推进和基础设施的不断完善,城市的规模、建筑密度和人口密度等呈不断增加趋势,相应的城市交通噪声源(含道路、轨道交通等)、城市建筑配套的固定设备或设施(含供水、供电、供热、通风、空调等)数量持续增加。在农村,随着生活条件的不断改善,为城市或自身提供能源、资源产品的电厂、变电站、风力发电场、工矿企业等噪声源数量也在不断增加。针对这些噪声源的低频噪声污染,世界卫生组织在 2000 年的报告中指出^[13]:低频低声级噪声干扰人们的休息与睡眠;A 计权网络对低频噪声的影响有所低估;针对低频噪声的标准限值应该更为严格;有关低频噪声负面作用的证据已经非常充分,值得人们关注。

已经有充分的证据证明低频噪声对人可产生负面作用^[30,31,32]。由于环境噪声测量中常用的 A 计权网络对低频段衰减较多,低频噪声的 A 声级往往较低,所以经常出现人们抱怨低频噪声干扰,测量结果却显示 A 声级达标^[33]的现象。

特别需要指出的是,中高频噪声对低频噪声会产生掩蔽效应,因此环境中中高频噪声比

较显著时,人们不容易感觉到低频噪声影响。随着社会经济和技术的发展,环保“三同时”措施不断落实到位,对声源、声传播途径及受声者等采取的综合噪声污染防治措施日益完善,但由于低频噪声控制技术难度相对较大,这些措施往往对降低中高频噪声更有效,因而环境中中高频噪声在总的噪声能量中所占的比重不断降低,其对低频噪声的掩蔽效应也随之减小^[34],低频噪声影响变得越来越显著。

同时,近年来我国出现许多新型噪声源,如高速铁路、风力发电、特高压变电站和换流站等设施,这些设施运行时排放的噪声以气流噪声或电磁噪声为主,噪声的低频特性较为显著。其中高速铁路噪声与飞机噪声相似,还具有持续时间短、声级较高特性,属于突发性噪声。在等 A 声级条件下,突发噪声对人主观烦恼的影响要大于稳态噪声^[35]。现行标准中的等效连续 A 声级均低估此类噪声的影响^[36,37],值得人们关注。

(2) 低频噪声引起的环保投诉

1988 年, Persson-Waye 等^[38]对瑞典国内 284 家地方环保机构噪声投诉案件进行了调查,发现对通风系统、热泵及交通工具这三种低频噪声源的投诉占了总数的 71%。1989 年, Tempest^[39]对英国国内 242 家地方环保机构也进行了类似的调查,结果表明,英国每年对低频噪声的投诉约为 526 次,占了总数的近 88%。2002 年, Persson-Waye 等^[40]从瑞典 284 家环保机构中随机选取了 41 家,对其自 1988 年以来 14 年的噪声投诉案件进行了调查,由图 1-2 可知,具有明显低频特性的声源包括空压机、通风设备、热泵、航海/航空及道路交通等,其占比达 58%。2006 年,俞鹏等^[20]对 2003 年 4 月—2006 年 3 月期间杭州市的噪声投诉案件进行了调查,并进一步分析了针对居住区周边设备的投诉案件,由调查结果(表 1-3~表 1-4)可知,尽管 2003—2005 年工业企业噪声的投诉仍占主导,居住区及周边设备噪声的投诉案件排在次位,但后者增加较快,2004—2005 年间比上一年度增多了 115%。刘砚华等^[41]对 2003 年与 2004 年间我国 47 个重点城市区域环境噪声声源进行了统计,由统计结果(图 1-3)可知,47 个重点城市的噪声源构成为:道路交通噪声占 17.0%,工业噪声占 6.2%,施工噪声占 2.1%,社会生活噪声占 47.2%,其他噪声占 27.5%,可见城市中社会生活噪声是主要噪声源。

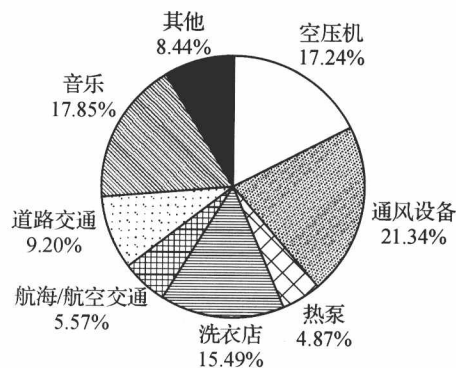


图 1-2 1988—2002 年瑞典噪声投诉声源比例

表 1-3 2003—2006 年杭州市区噪声投诉案件声源分类

类别	投诉次数		
	2003—2004 年	2004—2005 年	2005—2006 年
工业企业生产	53	87	216
居住区及周边设备	20	43	— *
商业娱乐场所(含餐饮、宾馆)	13	14	130
建筑工地施工噪声	4	8	— *
交通噪声	1	5	— *
其他	1	0	— *
总计	90	159	— *

* 表示没有统计数据。

表 1-4 居住区及周边设备噪声投诉案件声源分类

类别	投诉次数		
	2003—2004 年	2004—2005 年	总计
空调设备(冷却塔、热泵)	4	14	18
发电设备	3	13	16
排风、排烟设备	5	10	15
锅炉房设备	4	3	7
餐饮设备	1	2	3
变电所、基站设备	2	1	3
水泵	1	0	1
总计	20	43	63

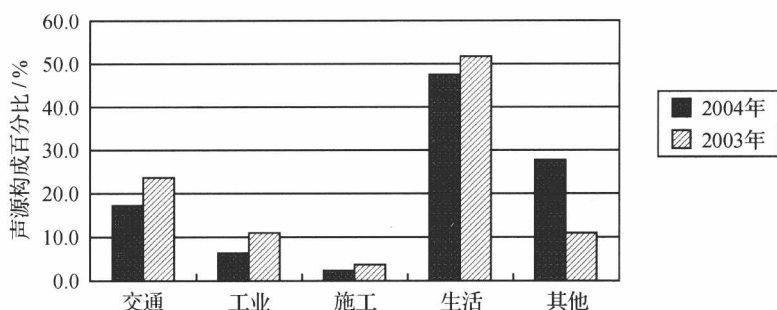


图 1-3 2003 年与 2004 年全国 47 个重点城市区域环境声源构成比较

1.2 低频噪声效应

1.2.1 低频噪声的心理效应

(1) 实验室研究

1978 年, Broner^[42] 对低频噪声的心理效应进行了研究, 发现主观烦恼 (Annoyance) 比响度 (Loudness) 和噪度 (Noisiness) 等更适于描述低频噪声引起的心理效应。跟响度与噪度不同, 主观烦恼涉及多方面的因素, 不但与受声者的个人感受有关, 而且可能与其所处的社会环境因素等有关^[43,44]。1999 年, Guski^[45] 对影响主观烦恼的因素进行了总结, 图 1-4 给出了各因素间的关系。

可见, 噪声能够对交流、睡眠等行为产生干扰, 行

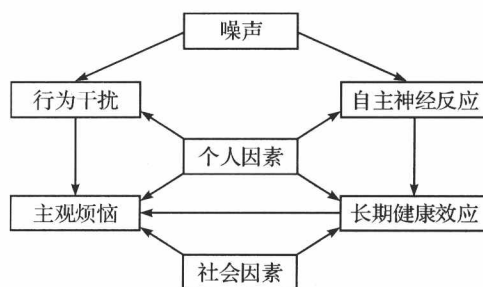


图 1-4 主观烦恼影响因素关系

为干扰将导致主观烦恼。噪声可引起人体自主神经反应, 持续的反应将影响人体健康, 人体的健康状况又将影响主观烦恼。在这些环节中, 个人因素对行为干扰、自主神经反应、长期健康效应及主观烦恼会产生影响, 而社会因素将对后二者产生影响。

1978年, Broner 和 Leventhall^[46]以 10 种低频噪声为声源, 测量了 20 个被试的个人烦恼函数。在研究中, 他们把心理生理学函数假设为如式(1-3)所示的一个简单的能量函数。

$$\Psi = k\epsilon^\beta \quad (1-3)$$

式中, Ψ 为心理生理学评价量, ϵ 为刺激强度, β 为主观显著指数。研究表明, 个体指数 β 的范围在 0.045~0.400 之间。

1987 年, Møller^[47]研究了频率为 4Hz、8Hz、16Hz、31.5Hz 及 1000Hz 纯音的等烦恼度曲线(见图 1-5), 图中竖轴为 150mm 长的直线轴上标记得到的主观烦恼度。可见, 低频声维持在一个较高的声级时才听得到, 一旦可被听到, 其烦恼度将随着声压级的上升迅速增大。从图 1-5 可看出, 当主观烦恼度从 0 增至 150, 4Hz 的纯音声压级上升范围为 10dB, 8Hz 和 16Hz 的纯音为 20dB, 31.5Hz 为 40dB, 而作为对照的 1000Hz 纯音, 其上升范围为 60dB。

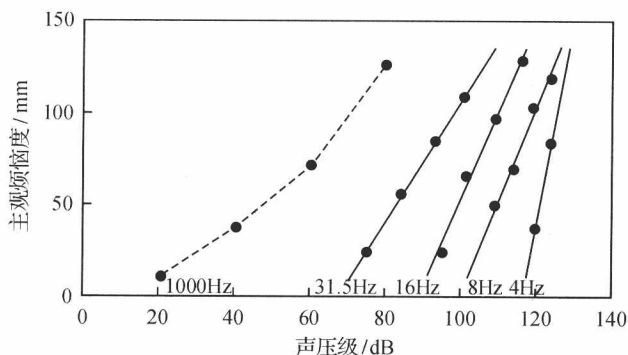


图 1-5 主观烦恼影响因素关系

1985 年, Persson-Waye^[48]等对峰值所在频率分别为 250Hz 和 100Hz 的 2 种窄带噪声进行了研究, 结果发现, 在等 A 声级情况下, 频率较低的窄带声主观烦恼明显高于频率较高者。随后, 他们又采用宽带噪声进行了相关研究^[34,49], 提出 A 声级低估了频率低于 200Hz 噪声主观烦恼的观点。

除了主观烦恼度, 舒适度^[50] (Pleasantness)、可接受度^[51] (Acceptable)、干扰度^[52] (Disturbance) 等都曾被用于低频噪声主观感受的实验室研究。此外, 一些学者也尝试过利用认知心理学的方法研究低频噪声的心理效应, 并在实验中发现, 低频噪声可对多种认知任务产生影响, 尤其是注意力任务^[53,54]。

(2) 现场调查

低频噪声这一概念是相对于中高频噪声提出的, 现实中不可能存在只有低频噪声的环境。针对低频噪声的现场调查, 基本都是在低频噪声影响要明显大于其他噪声的环境中开展的。

1977 年, Vasudevan 等^[8]在低频噪声投诉者的家中进行了现场调查, 发现了以下现象: 低频噪声投诉案件较容易发生在农村或郊区等较安静的地区; 噪声经常是接近于听阈, 一部分人抱怨低频噪声干扰, 而另一些人却感受不到; 一般情况下室内比室外更容易听见低频噪声; 此类噪声一般具有隆隆声特性; 55~77 岁之间的人群更容易抱怨低频噪声影响; 投诉者拥有正常的听力。

1996—1997 年间, Homberg 等^[55,56]对低频噪声的主观烦恼进行了现场调查, 并研究了主观烦恼度与各声学参量之间的关系。结果发现, 低频噪声的声压级、A 声级、B 声级、C 声级、D 声级、响度级以及 C 声级与 A 声级的差值与其主观烦恼度之间的相关性均较差, 因

此,研究一种适用于低频噪声的评价方法是非常必要的。

到目前为止,采用现场调查方法最多的还是针对机场、道路交通等低频噪声源的研究。由于调查方法的限制,早期的调查受到了多种因素的干扰,因此并未取得理想的结果^[57,58]。1978年,Schultz^[59]建立了一个交通噪声主观烦恼数据库,该数据库包含了24个来自多个国家的调查。其后,Fields分别于1991年^[60]与1994年^[61]对数据库进行了补充。同时,Schultz还提出利用高烦恼率描述交通噪声主观感受的方法。1990年,Kryter^[62]对数据统计及样本筛选等方法进行了修改。直至今日,这套方法仍被广泛应用。

随着我国高速铁路、风力发电和特高压交直流输电技术产业的快速发展,这3种低频噪声源也逐渐受到重视。1996年,Lambert等^[63]对法国的高速铁路噪声主观烦恼进行了现场调查,结果发现,在昼间,等效连续A声级与主观烦恼度的相关性较好;在夜间,超过70dBA的噪声事件数或持续时间长度与主观烦恼度的相关性较好。2004年,Pedersen等^[64]对瑞典的风电场噪声主观烦恼进行了现场调查,结果发现等A声级下,风电场噪声的主观烦恼要高于交通噪声。2009年,Pedersen等^[65]在荷兰又进行了类似的调查,结果发现风电产业受益者的主观烦恼明显低于其他人。

1.2.2 低频噪声的生理效应

众所周知,高声压级的噪声能够造成听力损失,所以人们最早开始关注的低频噪声生理效应就是听力损失。1973年,Nixon等^[66]的研究证实了低频噪声暴露能够造成人体暂时性听力阈移(TTS),暴露剂量越大,TTS恢复所需的时间越长。1978年,Burdick等^[67]将南美栗鼠暴露在声压级为120dB的低频噪声下三天后,观察到了南美栗鼠的永久性听力阈移(PPT),因此,提出长时间的高声级低频噪声暴露可能会造成人体的PPT。现有的研究表明,高声级低频噪声的短期暴露会造成人体的TTS,但会在短期内恢复,而关于人体长期噪声暴露效应的研究文献较少。现有生理效应实验研究用暴露声源声压级基本上都远远高于实际环境中声源。

除了对听觉的影响,低频噪声可通过引起人体振动而影响其他器官。Brown等^[68,69,70]利用频域为3~100Hz声压级为107dB的低频噪声开展了相关研究,其将一根弹性带连接人体,并在弹性带的另一端上安装加速计,以测量人体振动。同时,他们还在被试的胸骨、胃等部位外面安装了加速计。声源暴露开始后,人体产生了振动,其中胸腔的振动最为明显。这种振动一般人很难察觉到,并且是长期的效应,容易引发人体的一些慢性病。

低频噪声可对血压与心率产生影响,这一点已在实验室研究中得到证实^[71,72]。同时,1986年,Cohen等^[73]发现,生活在洛杉矶飞机航线下方的儿童血压偏高。1991年,Zhao等^[74]通过对低频噪声职业暴露的调查,发现了长期暴露可引发人体的血管收缩,Neus等^[75]的调查也得到了类似结论。1993年,Babisch等^[76]发现,长期暴露于较高声压级道路噪声下,会略微提高人的心脏病发病率。

人在睡眠过程中对噪声是比较敏感的,所以低频噪声对睡眠的影响也是人们关注的焦点之一,大量证据表明低频噪声可影响人们的睡眠质量^[77,78,79]。1989年,Nagai等^[80]通过对高速公路噪声的研究发现,低频噪声可造成窗户等振动,此时其比中高频噪声对睡眠的影响更大。值得一提的是,睡眠对人体非常重要,低频噪声影响睡眠质量后,会间接引起其他疾病,比如神经衰弱、偏头疼、内分泌失调等。

1.3 低频噪声控制技术

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。而根据技术实施方法,噪声控制技术又可分为吸声技术、隔声技术、消声技术、隔振技术及阻尼减振等。在此,介绍几种近年来正在发展的针对低频噪声污染的若干控制技术。

如针对变压器的有源降噪技术。变压器噪声主要来自于铁心的磁致伸缩导致的振动,主要频率为 100Hz 的基频和 200Hz、300Hz 及 400Hz 等谐频。1998 年,Teoh 等^[81]提出一套基于声波叠加原理的主动降噪方法,即将两个频率相同、波幅相等、相位差为 180° 的信号相互叠加,令其产生干涉现象以达到降噪目的,该方法首先通过传感器对变压器噪声信号进行采样,将声信号转化为电信号,接着采用数字电路或模拟电路处理电信号^[82],以得到与噪声相位相反的电信号,再通过功率放大器与电子声源产生这一信号。这一方法为针对频率较为集中的稳定低频噪声源的控制提供了思路,具有很好的应用前景。

利用有源降噪技术开发的主动式降噪耳机^[83,84]。传统的被动式降噪耳机只是单纯依靠隔声材料将外部噪声与耳朵隔绝开来,其对高频噪声比较有效,但低频噪声降噪效果并不理想。主动式降噪耳机,利用设在耳机上的传声器拾取环境噪声信号,经过分析后产生相位相反的噪声信号,利用声波干涉原理达到降噪的目的,此类耳机对低频噪声的降噪效果也比较好。

在实际环境中,低频噪声经常被其他噪声所掩蔽,不易为人们所察觉。1992 年,Landström 等^[85]研究发现,在存在音调的通风噪声中加入声调所在频段的粉红噪声对主观感受的改变有积极作用。2005 年,Yang 等^[86]也发现,声环境的舒适度很大程度上受声源类型所影响,声压级较高但愉快的声音可能使声环境更舒适。2006 年,Genell 等^[87]对卡车内噪声的研究也发现,高低频成分的适当平衡会使卡车内的低频噪声听起来更舒服。因此,Zwicker 等^[88]提出,当人们受低频噪声影响,并且该声源无法减小时,可通过提高背景噪声增加其对低频噪声的掩蔽效果,以减小人的不悦感,但增加的背景声必须考虑其频域与声压级,否则可能会产生更大的不适感^[89]。在欧洲,地铁在运行过程中,列车车厢内会同步播放专门设计的音量随列车车速增加而增加的背景音乐,用于提高车厢内乘客的声舒适度。Blazier^[28]在采用 Room Criterion Mark II (RC Mark II)方法评价供热、通风和空调系统(Heating, Ventilating, and Air-Conditioning system, HVAC)引起的室内噪声时,从频谱平衡的角度进一步提出了质量评价指标(Quality Assessment Index, QAI)的概念,认为 QAI 小于 5dB 的声环境是比较合适的,该方法之后被应用于室内声品质的改造。从这一点上不难认识,我们投入大量资金去降低噪声有时会显得得不偿失,因为在一定环境中,噪声级不是越低越好,这时可适当调整策略,在不降低噪声级甚至噪声级有所增加情况下,合理的调控噪声的时域和频域特性,降低噪声的主观烦恼度或改善声的舒适度,不失为一种更好的选择。事实上,这一研究领域正成为环境噪声领域的一个热点。

1.4 低频噪声评价与管理

1.4.1 低频噪声评价方法

(1) 基于 A 声级的评价方法

目前, A 声级是应用最为广泛的噪声评价量。但是, A 计权网络对低频段噪声的衰减较多, 因此并不适用于低频声的评价^[13,33,90]。Persson 等^[34,91]研究结果表明对于频带较宽的低频噪声, 当无计权声压级达到 65dB 时, A 计权声压级应获得 3dB 的补偿值, 当无计权声压级达到 70dB 时, A 计权声压级应获得 6dB 的补偿值。Kjellberg 等^[92]于 1984 年也得出相似的结论。1997 年, Kjellberg 等^[22]又发现, 当 $L_C - L_A$ 大于 15dB 时, A 计权声压级需获得 6dB 的补偿值, 才可较好地反映受声者的主观烦恼(再次研究验证可以达到 70.7% 的预测正确率)。鉴于 A 计权曲线对声音的低频部分衰减较大, Inukai 等^[93]提出了 LF 曲线与 LF2 曲线, 分别用于评价低声压级的低频噪声和高声压级的低频噪声。LF 曲线与 LF2 曲线相对于 A 计权曲线减少了对低频成分的衰减, 如图 1-6 所示。

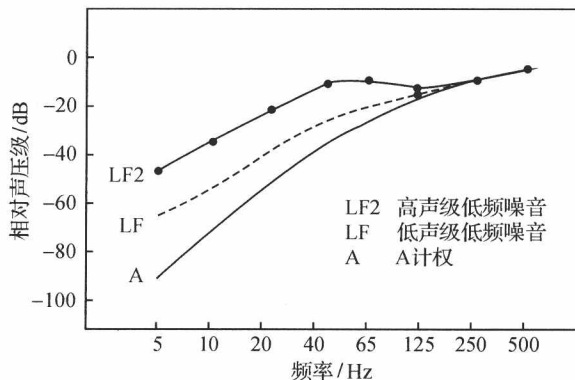


图 1-6 LF 曲线与 LF2 曲线

(2) 基于 NR 曲线的评价方法

1962 年, Kosten 和 Vanos^[94]参考等响曲线与语音干扰程度提出了 NR 曲线, 用以评价室内噪声(见图 1-7)。1971 年, NR 曲线正式被国际标准化组织(ISO)接受并推广使用。1978 年, Challis 等^[9]指出 NR 曲线不适合于评价高声压级的低频噪声, 并将 NR 曲线的频率下限从 31.5Hz 拓展至 16Hz, 建立了 NRM 曲线。Broner 等^[10]以带宽为 10Hz 的低频噪声为声源进行了主观烦恼度实验, 发现当中心频率位于 35Hz 至 45Hz 之间时, 噪声的主观烦恼度会出现一个峰值, 由此说明该频带的声音比其他频带的声音更烦恼, Kraemer^[95]也得到了相似的结论。之后, Broner 等根据研究结果对 NR 曲线进行了修正, 并针对低频噪声提出了 LFNR 曲线^[96]。

(3) 基于 NC 曲线的评价方法

1957 年, Beranek^[97]以等响曲线和语言干扰程度为基础, 提出了 NC 曲线(见图 1-8)。其具体求法是对噪声进行倍频程分析后, 再在 NC 曲线上画出频谱图, 该噪声的 NC 值就等于各个倍频带声压级中, 接触到最高 NC 曲线的数值。由于低频噪声声压级一般随频率增加衰减较为显著, NC 曲线对频率集中的低频声评价具有缺陷。为此, Beranek^[98]于 1971 年提出了噪声评价 PNC 曲线。1989 年, Beranek^[27]又提出了 NCB 曲线(见图 1-9)。该曲线将 NC 曲线和 PNC 曲线的低频端从 31.5Hz 向下延伸到 16Hz。这是因为在低频噪声(如空调系统噪声)中, 低于 31.5Hz 倍频带的成分是不可忽视的。