

文章编号: 1006-1355(2014)06-0140-04+147

几何绕射理论下楔形障碍物衍射

王海波, 余志, 蔡铭

(中山大学工学院 广东省智能交通重点实验室, 广州 510006)

摘要:应用几何绕射理论,研究不同角度和不同频率情况下楔形障碍物衍射衰减规律,并结合90°楔形障碍物现实应用,模拟楔形建筑物下声音传播衰减。得出了楔形障碍物插入损失与楔形角度和声波频率的关系,结果与Maekawa实测值比较并进行精度分析。针对现实场景下楔形建筑物的遮挡,应用空间剖分和声线束追踪生成声音路径,模拟楔形建筑物区域的声音衰减。结果显示声音衰减随楔形角度减小和频率增加而增大,几何绕射理论可应用于大区域建筑物群声传播衰减计算中。

关键词:声学;几何绕射理论;衍射;90°楔角;斜顶建筑物

中图分类号: TB53; X8; O422

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.06.031

Study on Wedge-shaped Obstacle Diffraction Based on Geometrical Theory of Diffraction

WANG Hai-bo, YU Zhi, CAI Ming

(School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Geometrical theory of diffraction is used to study the diffraction rules of wedge-shaped obstacle with different angles and sound frequencies. A wedge-shaped obstacle with 90° wedge angle is taken as a typical example to simulate sound propagation and attenuation of wedge-shaped buildings. The relation of the insertion loss and the wedge angle of the obstacle and the sound frequency are obtained. The result of simulation is compared with the Maekawa's measurement data and the accuracy of the simulation is analyzed. Considering the sheltering effect of the in-situ wedge-shaped buildings, sound attenuation amid the buildings is calculated with the help of spatial subdivision and beam tracing method when the sound path is generated. The results show that the sound attenuation increases with the decreasing of the wedge angle and increasing of the sound frequency. And the geometrical theory of diffraction can be applied to the sound diffraction calculation amid buildings in a large area.

Key words: acoustics; geometrical theory of diffraction; diffraction; 90° wedge angle; pitched roof building

楔形障碍物指的是具有一定的棱角的构筑物,这种结构广泛存在于实际生活中,如不同顶部构造建筑物的棱角等。当声波经过楔形障碍物时,根据惠更斯原理,顶端会产生次波源,从而将声波衍射到声场的影区。研究楔形障碍物的衍射,可为探究声

波经过障碍物尤其是建筑物群的简化算法提供高精度计算方式。

目前楔形障碍物衍射研究已经取得了很多成果。学者们对声波衍射衰减提出的计算方法可以分为三类:数值解法(如边界元法^[1])、经验公式法(如Maekawa实测数据^[2])和理论解法(如几何绕射理论(Geometrical theory of diffraction(GTD))^[3])。学者们对硬质声屏障对点声源的衍射衰减问题时行了实验测量,实验结果反映了衍射衰减和波长、声屏障高度、衍射角的关系^[4],并有应用于声屏障声学设计和计算机仿真方面的研究^[5]。对于楔形障碍物衍射,经典的基尔霍夫衍射理论^[6]借助格林函数解Helmholtz方程,从而把面积分转化为对障碍物的线

收稿日期: 2014-03-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划2012AA112311)
国家自然科学基金(51178476)

作者简介: 王海波(1989-),男,河北保定人,博士生,目前从事
道路交通噪声方面的研究。

通讯作者: 余志,教授,博士生导师。

E-mail: yz987@sina.com

积分,对高频波的计算尤其精确。Keller 于 1951 年提出了无线电波衍射衰减的一致性几何绕射理论^[7]。现在该理论已经应用到声学问题的计算中^[8]。其他学者如 Ouis^[9]、Hyun-Sil kim^[10]等应用于解决声音衰减的频域问题。其他方法诸如 Biot-Tolstoy^[11]法和时域的有限差分法^[12]等也被应用于室内声学的振荡混响中。在工程上, Maekawa 图^[2]和 Kurze^[13]的简化公式最为常用。上述方法中,几何绕射理论由于相对简单且容易实现而被广泛应用于精确计算中。

文章着力于室外声经过楔形障碍物的衰减情况,选用几何绕射理论对不同角度、不同频率下的衰减规律进行研究,并结合现实建筑物常见的 90°楔角,对建筑物区域下声音的传播衰减进行模拟,结果显示声音衰减随楔形角度增大和频率降低而减小,几何绕射理论可应用于大区域建筑物群声传播衰减计算中。

1 几何绕射理论

考虑二维空间中圆柱坐标系下的楔形障碍物,如图 1 所示。声源 S 坐标 (R_s, θ_s) ; 接受点 R 为

$$D_Q = -\frac{e^{-i\pi/4}}{2v\sqrt{2\pi k}} \left\{ \cot\left(\frac{\pi + (\theta_R - \theta_s)}{2v}\right) F[2kAa^+(\theta_R - \theta_s)] + \cot\left(\frac{\pi - (\theta_R - \theta_s)}{2v}\right) F[2kAa^-(\theta_R - \theta_s)] + \cot\left(\frac{\pi + (\theta_R + \theta_s)}{2v}\right) F[2kAa^+(\theta_R + \theta_s)] + \cot\left(\frac{\pi - (\theta_R + \theta_s)}{2v}\right) F[2kAa^-(\theta_R + \theta_s)] \right\} \quad (4)$$

其中 $F(X)$ 为菲涅耳积分有的过渡函数,用于计算边缘绕射系数

$$F(X) = 2i\sqrt{X} e^{iX} \int_{\sqrt{X}}^{\infty} e^{-i\tau^2} d\tau \quad (5)$$

a^\pm 为反射边界和绕射边界上的角度突变的描述函数

$$a^\pm(\alpha) = \cos^2\left(\frac{2v\pi N^\pm - \alpha}{2}\right) \quad (6)$$

在公式 6 中, N 可以表示为

$$N^+ = \begin{cases} 0 & \alpha \leq v\pi - \pi \\ 1 & \alpha > v\pi - \pi \end{cases} \quad N^- = \begin{cases} -1 & \alpha < \pi - v\pi \\ 0 & \pi - v\pi \leq \alpha \leq \pi + v\pi \\ 1 & \alpha > \pi + v\pi \end{cases} \quad (7)$$

将公式(1)—公式(7)联立,便可以得到二维空间下圆柱坐标系楔形障碍物衍射场分布情况。

则障碍物对声衍射的衰减可以表示为

$$\Delta L = 20 \log \left(\frac{|\phi_{\text{direct}}|}{|\phi_{\text{diffraction}}|} \right) \quad (8)$$

其中 $|\phi_{\text{direct}}|$ 为无障碍物时直达声的模; $|\phi_{\text{diffraction}}|$ 为有障碍物时衍射声的模。值得指出的是,三维全自

(R_R, θ_R); 楔形角度为 $v\pi$ 。在接受点 R 上的衍射声场可以表示为^[9]

$$\phi = \phi_i(Q) D_Q M e^{-ikR_R} \quad (1)$$

其中 $\phi_i(Q)$ 为声源到点 Q 的直接声场; D_Q 为衍射系数, M 为比例系数, k 为波数。

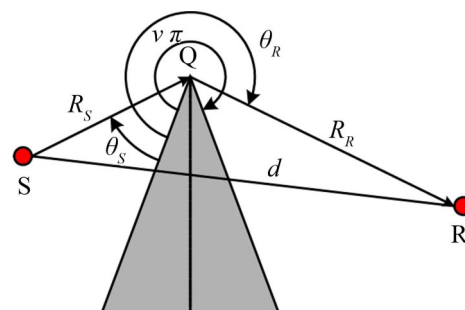


图 1 楔形障碍物衍射图

在三维情况下,根据声波方程的基本解及计算几何理论有

$$\phi_i(Q) = e^{-ikR_s}/R_s \quad (2)$$

$$M = \sqrt{\frac{R_s}{R_R(R_s + R_R)}} \quad (3)$$

由空间下,距声源点 r 半径的声场为

$$\phi_0 = e^{-ikR_s}/4\pi r \quad (9)$$

2 楔形障碍物角度及声波频率对衍射的影响

2.1 不同障碍物角度和不同声波频率下声衍射规律

在图 1 情况下,设定点声源的坐标为 $(2, 70^\circ)$, 接受点的坐标为 $(4, 310^\circ)$ 。选用频率为 100 Hz, 500 Hz, 2 000 Hz, 20 000 Hz 的声波作为研究,不同角度、不同频率状况下声波经过楔形障碍物的衰减结果如图 2 所示。

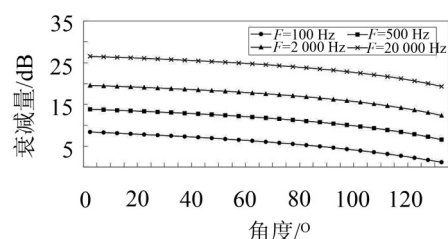


图 2 楔形障碍物衰减和声波频率及楔形角度的关系

结果显示四种频率的声波的插入损失表现为相同的规律:

随着角度的增加,插入损失不断减少;且越接近声源与接受点的夹角时,插入损失下降得越剧烈,这是因为越趋近于 130° 时,衍射越来越不明显,逐渐从影区趋近于亮区;当角度为 0° 时,楔形障碍物退化成为薄而不透声的板,此时的插入损失最大。

相同角度的楔形障碍物的插入损失在随着频率的增加而增加,这是因为低频的声波波长小,更容易产生衍射现象。

2.2 几何绕射理论计算值与 Maekawa 实测值的比较

Maekawa 在 1968 年在半消声室进行了薄板衍射的经典实测实验,故本文选取 0° 障碍物、500 Hz 频率声波计算数据和 Maekawa 实验图表进行对比。不同的菲涅尔系数下,即不同声源点接收点对应位置下 GDT 理论计算值和 Maekawa 实测值的比较如图 3 所示。

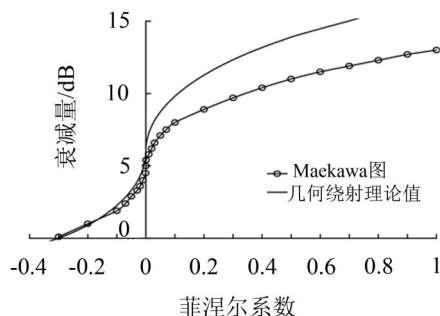
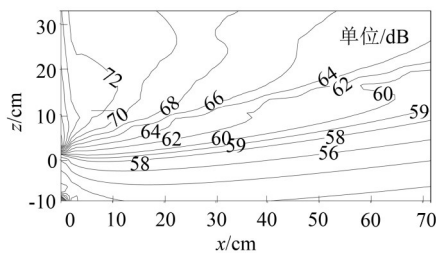


图3 不同菲涅尔系数下几何绕射理论和 Maekawa 实测值比较

图表显示,几何衍射理论值当 $N < 0$ 时与实验结果(Maekawa)比较接近;在 $N > 0$ 时,其数值大于 Maekawa 曲线的数值,而且随菲涅尔系数增大而增大;在 $N < 1$ 的情况下,几何绕射理论计算数值与 Maekawa 之间的误差控制在 3 dB 以内,在大区域建筑物群声衰减计算中可以采用。



(a) 障碍物下声衍射场

3 几何绕射理论在建筑物声衰减计算中的应用

3.1 90° 障碍物声衍射规律

在声波经过建筑物的边角点时,会产生衍射现象,而在大区域建筑物群声传播衰减计算中,斜屋顶建筑物通常可以简化为顶角为 90° 的典型模型。 90° 楔形障碍物衰减规律具有重要的现实意义。

在 1.1 小节的假设条件下, 90° 障碍物插入损失可以应用几何绕射理论求出。图 4 为障碍物区域的声场模拟图以及插入衰减图。

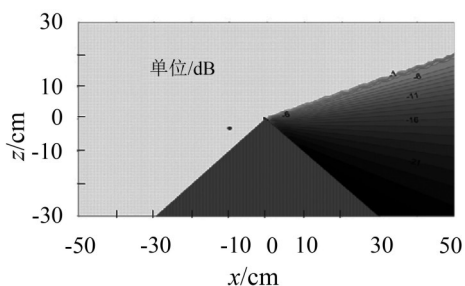
从图 4 可以看出,点声源其衰减特性与接收点距离有关;声波经过障碍物边界时,声波发生衍射,声压级由边界向内部递减,在障碍物背后的边缘附近生成声影区。 90° 障碍物插入明显削减了声影区的声能,其衰减值也从衍射边界的 0 dB 增加到边界内部的 20 +dB。

3.2 建筑物群声传播衰减计算实例

在建筑物群声衰减计算实例中,文章采用声线束追踪法生成声线路径,综合考虑了声传播过程中的反射衍射现象,其中衍射时采用几何绕射理论进行计算。先将整个空间剖分成有序的四面体网络,并递归地构建声线束树形结构。对每一对声源点和接收点,通过声线束追踪法在生成的四面体树形结构中搜索所有节点并生成声音传播路径。最后进行声衰减计算(该部分另文阐述)。

模拟现实建筑物场景,文章设计了两栋建筑物的模拟算例。设计的两栋建筑物 A 和 B 的高度分别为 5 m 和 3 m。算例设定建筑物表面反射系数设为 0.8。声源为单点定频率无指向性声源,频率为 500 Hz。对平顶和斜顶两种情况进行声衰减计算。得到了两栋建筑物区域在三维情况下单点声源声场分布,在高度为 1.5 m 时如图 5 所示。

在竖直面,两种情况的声衰减分布如图 6 所



b) 障碍物插入带来的声衰减值

图4 90° 障碍物区域声衍射示意图

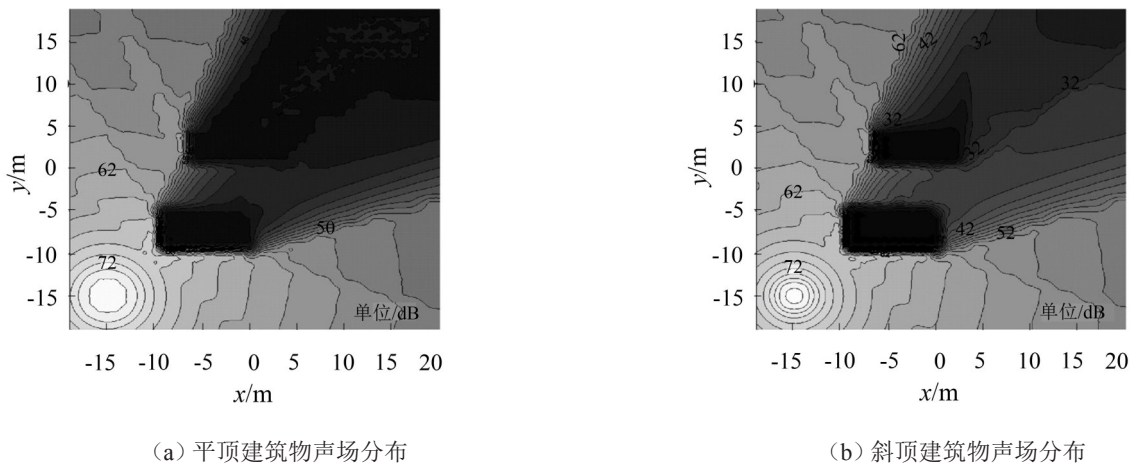


图5 建筑物区域平面声场分布图

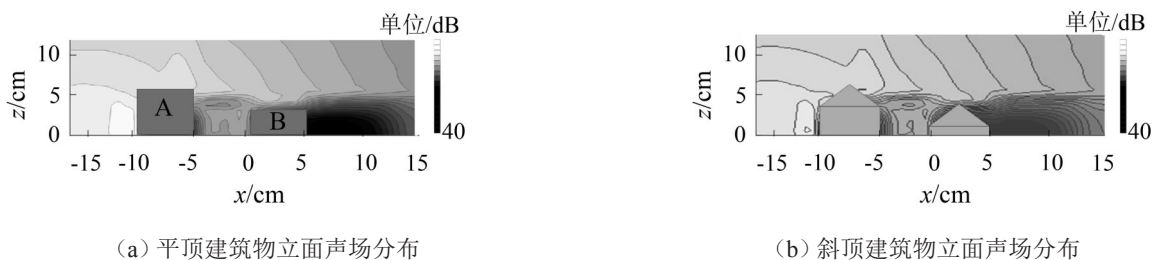


图6 建筑物区域立面声场分布图

示。

文章选取1—4号点作为声压级数值研究对象,其坐标依次对应图5中的(0, -7.5)、(0, 2.5)、(0, 7.5)和(0, 12.5)。在平顶建筑物和斜顶建筑物两种情况下,各个点位的声压级数值及对比情况如表1所示。

表1 各点位平顶建筑物和斜顶建筑物声场比较

| 点位/声压级(dB) | 平面屋顶 | 斜面屋顶 | 差值 |
|------------|------|------|------|
| 1 | 61.7 | 61.5 | -0.2 |
| 2 | 42.1 | 41.2 | 1.1 |
| 3 | 37.1 | 39.4 | 2.3 |
| 4 | 38.8 | 40.3 | 1.5 |

对比平顶建筑物和斜顶建筑物的声场,可以发现,在建筑物高度相同的情况下,平顶建筑物对声音的遮挡作用更加明显,算例中两种情况下建筑物后的声能大小直接反映了建筑物的遮挡:建筑物前的1号点,两种情况下声压级大小相若;在一栋建筑物后的2号点,平面屋顶比斜面屋顶声压级小1.1 dB;两栋建筑物后的3号点和4号点,声音衰减差值大约为2 dB。这是由于在其他条件相同的条件下,不考虑建筑物的自防护遮挡,平顶建筑物对声音的传播过

程中有两次衍射作用,而斜顶建筑物只有一次,在这种情况下,平顶建筑物带来了额外的一次衍射(算例中约为1 dB~2 dB)的衰减。

4 结 语

(1) 应用几何绕射理论研究楔形障碍物插入损失。随着楔形障碍物的角度增加,声波的衰减量逐渐减少;随着声波频率的增加,声波的衰减量逐渐增大。与Maekawa实测值对比显示,菲涅尔系数较小时,几何绕射理论计算值较为准确。

(2) 90°障碍物插入明显削减了声影区的声能,其衰减值也从衍射边界的0 dB增加到边界内部的20 +dB。90°的楔形障碍物在建筑物群声衰减计算中有一定的价值。

(3) 90°障碍物的几何绕射理论可应用与建筑物群声传播衰减计算,文章算例下,平顶建筑物所带来的声衰减比斜顶建筑物大约大1 dB~3 dB。

参考文献:

- [1] 张胜勇,陈心昭. 利用边界元法中的全特解场方法计算结构振动声辐射[J]. 噪声与振动控制, 1997, 12(6): 8-10.
- [2] Z MAEKAWA. Noise reduction by screens[J]. Applied Acoustics, 1968: 157-173.

(下转第147页)

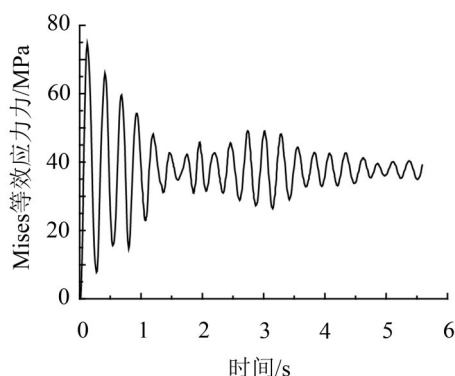


图6 V撑最大等效应力时程曲线

多数的振动能量,仅小部分的振动能量传给了上部大跨度钢结构,因而,各工况下上部大跨度钢结构的动力响应相差不大;

3) 从应力时程曲线看,除网壳部分外,其余各构件的应力峰值出现均出现在最开始的0.1 s左右,随后由于结构阻尼,衰减较快,最后均在静力作用时结构应力值附近波动;

4) 结构各构件的最大应力仅86.6 MPa,对于Q345钢而言,远小于其屈服强度值(345 MPa),即列车振动荷载对结构的强度影响不大,因而,更多的注意应放在焊接钢结构的长期振动疲劳方面。

参考文献:

- [1] 贺玉龙,向 怡. 郑西高速铁路渭南北高架车站环境振动测试分析[J]. **噪声与振动控制**,2012,(3):152-155.
- [2] 邓世海,郭向荣,王慧慧,等. 高速列车对建筑结构的振动影响[J]. **噪声与振动控制**,2010,(2):72-76.
- [3] 颜 锋,钱基宏,赵鹏飞,等. 武汉火车站高速列车对建筑结构的振动影响研究[J]. **建筑结构**,2009,39(1):25-28.
- [4] 胡小勇,张光辉,谢伟平. 高速列车作用下简支梁的动力响应分析[J]. **武汉理工大学学报**,2010,32(7):125-128.
- [5] 张 弥,夏 禾,冯爱军. 轻轨列车和高架桥梁系统的动力响应分析[J]. **北方交通大学学报**,1994,18(1):1-8.
- [6] 赵鹏飞,潘国华,汤荣伟,等. 武汉火车站复杂大型钢结构体系研究[J]. **建筑结构**,2009,39(1):1-4.

(上接第143页)

- [3] Peter R. T. Munro, Konstantin Ignatyev, Robert D. Speller, et al. The relationship between wave and geometrical optics models of coded aperture type X-ray phase contrast imaging systems[M]. *Optics Express*,2012, 18(5): 4103-4117.
- [4] P. Chevret, J. Chatillon. Implementation of diffraction in a ray-tracing model for the prediction of noise in open-plan offices [J]. **Acoustical Society of America**, 2012, 132: 3125.
- [5] 陈永光,袁启慧,蔡伟明,等. 声屏障声学设计与计算机仿真应用[J]. **噪声与振动控制**,2013,33(4):182-184.
- [6] Born M, Wolf E. Principles of optics, electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Seventh (Expanded) Edition[M]. Oxford: Pergamon Press; 1999.
- [7] J B Keller, A Blank. Diffraction and reflections of pulses by wedges and corners[J]. **Communications on Pure and Applied Mathematics**, 1951, 4: 75-94.
- [8] David J Oldham, Christopher A Egan. A parametric investigation of the performance of T-profiled highway noise barriers and the identification of a potential predictive approach [J]. **Applied Acoustics**, 2011, 72(11): 803-813.
- [9] D Ouis. Noise attenuation by a hard wedge-shaped barrier [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2003, 262: 347-364.
- [10] H S Kim, J S Kim, H J Kang, B K Kim , et al. Sound diffraction by multiple wedges and thin screens[J]. **Applied Acoustics**, 2005, 66: 1102-1119.
- [11] Michael I. Mishchenko, Victor P. Tishkovets, Electromagnetic scattering by a morphologically complex object: Fundamental concepts and common misconceptions[J]. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, 2011, 112(4): 671-691.
- [12] Van Renterghem T, Botteldooren D. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs [J]. **Building and Environment**, 2009, 44: 1081-1087.
- [13] Alexander Pohl, Dirk Schröder, Uwe M. Stephenson, et al. Influence of reflecting walls on edge diffraction simulation in geometrical acoustics[J]. **Acoustical Society of America**, 2013, 19 (1): 45-66.