

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.04.011

Waterhouse 修正及其在空气声隔声测量的应用研究

蔡阳生^{1,2,3}, 赵越喆²

- (1.福建工程学院 建筑与城乡规划学院, 福建 福州 350118;
2.华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;
3.广州大学 机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:从空气声隔声量的测量原理出发,讨论声强法与声压法两种测量方法在低频段的隔声量测量结果偏差,指出在对两种方法的测量结果进行对比时须考虑 Waterhouse 修正项。对不同容积房间的 Waterhouse 修正项计算结果显示,在接收室容积较小的情况下,采用完整项的 Waterhouse 修正以减小两种方法在低频范围的偏差。

关键词:空气声隔声; 声压; 声强; Waterhouse 修正

中图分类号: TU 112.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)04-0367-04

The application of Waterhouse correction in the measurement of airborne sound insulation

Cai Yangsheng^{1, 2, 3}, Zhao Yuezhe²

- (1.College of Architecture and Urban Planning, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2.State Key Laboratory of Subtropical Building Science, School of Architecture,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
3.School of Mechanical and Electrics Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The measuring principle of airborne sound reduction index was introduced. The error between the measured sounds in the low frequency (reduction index bias) between the conventional sound pressure method and the measurement method based on sound intensity was discussed. Waterhouse correction was employed to compare the results between the two methods. The results of Waterhouse correction for rooms in different volumes were obtained. The results show that the complete term of Waterhouse correction would reduce the low frequency errors between the two methods.

Keywords: airborne sound insulation; sound pressure; sound intensity; Waterhouse correction

随着城市化发展,各种噪声源,特别是低频噪声源越来越多^[1]。因此建筑隔声的低频测量与评价日益重要。这就要求隔声测量在低频范围(低至 50 Hz)有更好的复现性,方能为隔声评价与改造提供更科学的依据。

建筑构件空气声隔声的实验室测量,需测量

声源室侧入射到构件上的声功率和通过建筑构件辐射到接收室的声功率。根据在接收室内直接测量的物理量将测量方法分为声压法和声强法。Crocker 等首先利用声强这一矢量来测量隔声量^[2],随后研究者陆续开展了相关的测量研究工作。一般都认为两种方法在中频范围的结果比较

收稿日期: 2016-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408141);广州市属高校科研项目(1201430807);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT160321)

第一作者简介: 蔡阳生(1980-),男,福建泉州人,讲师,博士,研究方向:建筑声学。

一致,在高频和低频存在一定的偏差。Halliwell 认为可通过 Waterhouse 修正来缩小两种方法在低频范围的偏差,这是因为声压法在接收室的中心区域测量平均声压级以表征声功率,而声强法是在接收室的边界处测量声强级来表征通过被测构件辐射到接收室的声功率^[3]。被测构件辐射到接收室的声功率包括中心区域的声功率和边界区域的声功率,由于边界对声波的反射作用,边界区域的声功率一般会大于中心区域的声功率,因此需要采用 Waterhouse 修正^[4]。Jonasson 也认为可通过采用 Waterhouse 修正声压法和声强法之间在低频范围的偏差^[5]。该文的成果亦是建筑构件空气声隔声声强法测量标准的重要依据。Machimbarrena 则认为声压法和声强法在低频范围不存在偏差^[6]。可见对是否采用 Waterhouse 修正仍存有争议。本文从空气声隔声量的定义出发,对隔声量测量是否需要采用以及如何采用 Waterhouse 修正进行讨论。

1 空气声隔声测量方法及其理论

建筑构件的空气声隔声量定义如下:

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2}, \quad (1)$$

其中 W_1 为入射到建筑构件的声功率, W_2 为通过构件透射到接收室的声功率。假设房间声场为扩散声场,入射到被测构件的声功率和通过被测构件辐射到接收室的声功率分别为:

$$W_1 = \frac{\langle p_1^2 \rangle_{t,s} S}{4\rho c}, \quad (2)$$

$$W_2 = \frac{\langle p_2^2 \rangle_{t,s} A}{4\rho c}, \quad (3)$$

其中 $\langle p_1^2 \rangle_{t,s}$ 、 $\langle p_2^2 \rangle_{t,s}$ 分别是声源室和接收室的时间和空间平均的声压均方值, ρ 是空气密度, c 是空气中的声速, S 为隔离声源室和接收室的建筑构件面积, A 是接收室的吸声量。通过建筑构件辐射到接收室的声功率,还可通过在接收室设置一完全包住构件的包围面进行声强测量得到:

$$W_2 = I_{n2} S_m = \sum_i S_{mi} 10^{0.1L_{mi}}, \quad (4)$$

其中 I_{n2} 为测量面的平均法向声强,第 i 个子面的面积记为 S_{mi} ,对应子面的声强级记为 L_{mi} ,如果对某个子面测得的声强为负(如声能流的方向指向被测试件的情形),则在代入式(4)前,需在该

S_{mi} 前加一负号。由式(2)和式(3)可得传统声压法测量构件隔声量 R :

$$R = 10 \lg \left(\frac{\langle p_1^2 \rangle_{t,s}}{\langle p_2^2 \rangle_{t,s}} \right) + 10 \lg \frac{S}{A} = L_{p1} - L_{p2} + 10 \lg \frac{S}{A}, \quad (5)$$

其中 L_{p1} 、 L_{p2} 分别是声源室和接收室的声压级的时间和空间平均值。

由式(2)和式(4)可得声强法测量被测构件的空气声隔声量 R_l :

$$R_l = L_{p1} - L_{ln} - 6 + 10 \lg \frac{S}{S_m}, \quad (6)$$

其中 L_{ln} 为接收室侧测量得到的平均声强级, S_m 是各测量子面的面积和。

2 矩形房间的模态密度及 Waterhouse 修正

接收室中心区域的声功率和包含中心区域以及边界区域的声功率的关系即 Waterhouse 修正,可通过矩形房间的模态密度的计算得出。矩形房间的模态密度为^[4]:

$$\frac{dN}{df} = \frac{4\pi f^2 V}{c^3} \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} + \frac{L\lambda^2}{32\pi V} \right) = \frac{4\pi f^2 V}{c^3} W, \quad (7)$$

其中 f 为中心频率, df 为带宽, dN 为对应频率范围的模态数, L 为矩形房间所有边线的周长, S 为矩形房间所有内表面的面积总和, V 为矩形房间的容积, W 称为 Waterhouse 修正项,即:

$$W = 1 + \frac{S\lambda}{8V} + \frac{L\lambda^2}{32\pi V}, \quad (8)$$

在建筑构件空气声隔声声强法测量标准 ISO 15186-1 以及文献[3,5]中,认为在房间容积较小时,式(8)右边的第3项可以省略,即:

$$W = 1 + \frac{S\lambda}{8V}, \quad (9)$$

根据矩形房间的模态密度计算公式(7)和式(3)利用接收室中心区域声压计算房间声功率,可以得到通过建筑构件辐射到接收室的总声功率为:

$$W_2 = I_{n2} S_m = \frac{\langle p_2^2 \rangle_{t,s}}{4\rho c} A W, \quad (10)$$

将式(10)代入式(6),则有:

$$R_l = 10 \lg \frac{\langle p_1^2 \rangle_{t,s} S}{I_{n2} S_m} =$$

$$\left[L_{p1} - L_{p2} + 10 \lg \frac{S}{A} \right] - 10 \lg W = R - 10 \lg W,$$

(11)

对式(8)和式(9)取对数乘以 10 可分别得到 Waterhouse 修正的完整项和缩略项。可以看出 Waterhouse 修正项与房间尺寸关系较大。在 GB/T 19889 标准以及 ISO 10140-5-2010 标准中要求接收室容积最少应为 50 m³(照顾现有的小容积实验室)。ASTM E90-09 标准要求接收室容积最少为 80 m³,这是为了保证以 125 Hz 为中心频率的 1/3 倍频程满足扩散场的要求(该频率是 ASTM 标准计算单值隔声量的最低频率)。当测

量频率低到 100 Hz 时,接收室的容积应至少为 125 m³;当测量频率低到 80 Hz 时,接收室的容积应大于等于 180 m³。对上述容积的房间(尺寸比例采用 ASTM E90-09 标准所推荐的 1:1.26:1.59)分别做 Waterhouse 修正的完整项和缩略项计算(见表 1)。由表 1 可知不同容积房间 Waterhouse 修正都是随着频率升高而减小,在 125 Hz 以上频率 Waterhouse 修正的完整项和缩略项仅相差 0.1 dB,基本可以忽略不计(500 Hz 以上两者完全相同,未列出)。当频率低至 50 Hz 时,在尺寸较小的房间如 50 m³,两者相差达到 0.8 dB。

表 1 声隔声强 Waterhouse 修正

Tab.1 Waterhouse correction for sound insulation and sound strength

频率/Hz	50 m ³		80 m ³		125 m ³		180 m ³	
	缩略项/dB	完整项/dB	缩略项/dB	完整项/dB	缩略项/dB	完整项/dB	缩略项/dB	完整项/dB
50	3.8	4.5	3.4	4.0	3.1	3.5	2.8	3.1
63	3.3	3.8	2.9	3.3	2.6	2.9	2.4	2.6
80	2.7	3.1	2.4	2.7	2.2	2.4	2.0	2.1
100	2.3	2.6	2.0	2.2	1.8	2.0	1.6	1.7
125	1.9	2.1	1.7	1.8	1.5	1.6	1.4	1.4
160	1.6	1.7	1.4	1.5	1.2	1.3	1.1	1.1
200	1.3	1.4	1.1	1.2	1.0	1.1	0.9	0.9
250	1.1	1.1	0.9	1.0	0.8	0.9	0.7	0.8
315	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6
400	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5

Machimbarrena^[6]在一容积为 240 m³的接收室分别用声强法和声压法测量了 4 个构件(编号为 A1、A2、B1、B2)的隔声量,并结合理论分析认为两者在低频范围没有系统偏差,无需进行 Waterhouse 修正。本文通过对文献[6]给出的两种方法的数据做处理,由声压法隔声量减去声强法隔声量,得到结果如图 1 所示。在如此大容积的接收室进行声压法测量,有复现性较好的低频测量结果,但仍可看到除了个别频率,两者偏差随频率变化的趋势与其 Waterhouse 修正相似(其高频数据有较大的偏差,可能是由声强测量设备的有限差分引起,但不在本文讨论范围之内)。由上述讨论可知,在对声强法和声压法测量隔声量的结果进行对比时,必须采用 Waterhouse 修正。

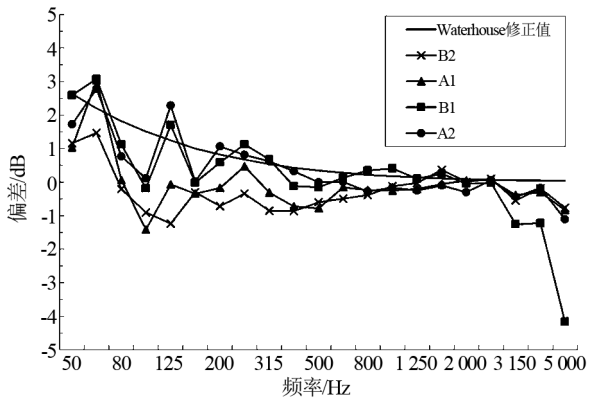


图 1 声压法与声强法的测量结果偏差值

Fig.1 The measured error between sound pressure and sound intensity methods

3 总结

本文讨论了声压法和声强法测量建筑构件空气声隔声量的低频偏差问题。由于声强法在接收室测量得到的是通过被测构件辐射到接收室的声功率,而声压法测量得到声功率则需要如式(9)所示乘以 Waterhouse 修正才是通过被测构件辐

射到接收室的声功率,因此在采用 Waterhouse 修正时,建议采用声压法减去 Waterhouse 修正项后与声强法对比,更符合隔声量测量的物理意义。对比 Waterhouse 修正的缩略项和完整项在不同容积接受室的计算结果,可看出两者在低频范围(特别是 50~100 Hz)的差别较大,因此若采用 Waterhouse 修正时,建议采用完整项修正。

参考文献:

[1] 俞鹏,翟国庆,黄逸凡,等.城市居住区设备噪声频率特性分析[J].中国环境科学,2006,26(4):491-495.
[2] Crocker M J, Raju P K, Forssen B. Measurement of transmission loss of panels by the direct determination of transmitted acoustic intensity[J]. Noise Control Engineering,1981,17(1):6-11.
[3] Halliwell R E, Warnock A C C. Sound transmission loss; Comparison of conventional techniques with sound intensity techniques[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1985,77(6):2094-2103.
[4] Uosukainen S. On the use of the Waterhouse correction[J]. Journal of Sound and Vibration,1995,186(2):223-230.
[5] Jonasson H G. Sound intensity and sound reduction index[J]. Applied Acoustics,1993,40(3):281-293.
[6] Machimbarrena M, Jacobsen F. Is there a systematic disagreement between intensity-based and pressure-based sound transmission loss measurements[J]. Building Acoustics,1999, 6(2):101-111.

(特约编辑:黄家瑜)

(上接第 366 页)

参考文献:

[1] 于英潭,杨少杰,徐丹丹,等.活性炭对乙腈水溶液中新型 POPs 六溴环十二烷的吸附[J].环境化学,2015,34(5):965-970.
[2] 林莉莉,邱兆福,韩晓琳,等.吸附气相甲醛活性炭的选型研究[J].环境污染与防治,2013,35(12):19-25.
[3] 蒙冕武,齐丛亮,刘庆业,等.甘蔗叶活性炭的制备工艺优化及表征[J].材料导报,2014,28(9):46-50.
[4] 陈钰,龚正君,杨顺生,等.改性玉米秸秆吸附 Cu²⁺的动力学和热力学[J].环境工程学报,2013,7(2):523-529.
[5] 李坤权,郑正,罗兴章,等.KOH 活化微孔活性炭对对硝基苯胺的吸附动力学[J].中国环境科学,2010,30(2):174-179.
[6] Xu Jianzhong, Chen Lingzhi, Qu Hongqiang, et al. Preparation and characterization of activated carbon from reedy grass leaves by chemical activation with H₃PO₄[J]. Applied Surface Science,2014,320:674-890.
[7] 马承愚,熊慧珍,宋新山. ZnCl₂活化茄子秸秆制备活性炭及表征[J].功能材料,2012,43(2):342-345.
[8] Vadivelan V, Vasanth K K. Equilibrium, kinetics, mechanism, and process design for the sorption of methylene blue onto rice husk[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2005,286:90-100.
[9] 丁世敏,封享华,汪玉庭,等.交联壳聚糖多孔微球对染料的吸附平衡及吸附动力学分析[J].分析科学学报,2005,21(2):127-130.
[10] Hameed B H, Elkhaiary M I. Equilibrium, kinetics and mechanism of malachite green adsorption on activated carbon prepared from bamboo by K₂CO₃ activation and subsequent gasification with CO₂[J]. Journal of Hazardous Materials,2008,157:344-351.

(特约编辑:黄家瑜)