

# 一种估算消声室室内声压级的新方法

王 钦<sup>1</sup>, 颜 伟<sup>1</sup>, 王恩荣<sup>1</sup>, 李 林<sup>2</sup>, 吴 云<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 江苏省计量科学研究院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** JJF 1147 消声室校准规程中反平方率声压级的推导公式存在一定缺陷, 易导致推算出的自由声场偏差值出现“近大远小”的不合理现象, 本文通过分析空气吸收因素对校准精度的影响, 提出一种估算消声室室内理论声压级的新方法, 在拟合模型中加入了空气吸收的衰减部分, 采用非线性最小二乘法估计理论声压级, 能够提高校准精度, 为实际消声室校准工作提供理论依据。

**[关键词]** 消声室, 校准方法, 自由声场, 空气吸收, 声压级

**[中图分类号]** TB95 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0010-06

## A Novel Method on the Sound Pressure Level Estimation Applied in Anechoic Chamber Calibration

Wang Qin<sup>1</sup>, Yan Wei<sup>1</sup>, Wang Enrong<sup>1</sup>, Li Lin<sup>2</sup>, Wu Yun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Jiangsu Institute of Metrology, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The formula to derivate sound pressure level based on the inverse law has some problems for the anechoic chamber calibration in JJF 1147 specifications, which causes the sound pressure level deviation to increase with the measurement distance from sound source closing. The influence of the air absorption factors have been analyzed on anechoic chamber calibration accuracy. A novel method is proposed to estimate the sound pressure level applied in the anechoic chamber calibration, which considers the air absorption attenuation and uses the nonlinear least square method to calibrate the theoretical sound pressure level. The present method can improve the calibration accuracy effectively and also provide the theoretical basis for the practical anechoic chamber calibration.

**Key words:** anechoic chamber, calibration method, free sound field, air absorption, sound pressure level

消声室(半消声室)是一种声学实验室,其可提供一个自由场空间的低噪声测试环境。消声室在各类声学产品的测试与检验、电声学测量仪器的计量校准等方面有着广泛的应用,其声学特性的好坏对所测试产品的鉴定结果有着重要影响。目前国内对于消声室(半消声室)的校准工作主要依据了 GB 6882、ISO 3745 附录 A 以及 JJF 1147 消声室校准规范中规定的校准程序<sup>[1-3]</sup>,校准的主要内容包括本底噪声和自由声场频率与空间范围的鉴定,其中被测消声室的最大自由声场半径需满足测量声压级和反平方率声压级最大允许偏差范围<sup>[4]</sup>。但若依据上述国标算法对消声室的反平方率声压级进行估算,得到的理论声压级与测量声压级的偏差存在“近大远小”的不合理现象<sup>[5]</sup>。另一方面,校准规程仅提到了在高精度校准时需对测量结果进行空气吸收影响的修正,而在理论声压级的推导公式中却并未体现消声室内部空气吸收引起的衰减。对于国标计算方法中的不足,在分析校准规程计算方法存在的问题之后,提出了一种改进的消声室理论声压级计算方法。新方法将空气吸收衰减部分加入计算模型,采用非线性最小二乘法拟合的方式对理论声压级进行估算,使偏差分布趋于合理,有效提高校准精度。

收稿日期:2016-04-26.

基金项目:国家自然科学基金(51475246)、江苏省高校自然科学基金(15KJB470011)、江苏省普通高校专业学位研究生科研实践计划项目(SJLX15\_0306)。

通讯联系人:颜伟,博士,讲师,研究方向:电气工程、电磁兼容。E-mail:61197@njnu.edu.cn

## 1 国标校准方法存在的缺陷

根据 JJF 1147 规程,基于平方反比定律估计的理论声压级主要由测量点处的实测声压级通过一种线性拟合方式估算得到,理论声压级的计算方程为

$$L_p(r) = 20 \lg \frac{a}{r - r_0}. \quad (1)$$

式中,  $L_p(r)$  为距离声源假定中心  $r$  处根据平方反比定律估计的理论声压级;  $r_0$  为对声源声中心的补偿,即声源的实际中心与假定声中心之间的距离. 引入参数  $q$ , 转化为数学模型

$$q(r) = \frac{r - r_0}{a}. \quad (2)$$

对此模型进行基于最小二乘法的一阶线性拟合, 判据为  $\sum \Delta q^2$  最小, 最终得到

$$r_0 = \frac{\sum_{i=1}^N r_i^2 \sum_{i=1}^N q_i - \sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N r_i q_i}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i}, \quad (3)$$

$$a = \frac{\left( \sum_{i=1}^N r_i \right)^2 - N \sum_{i=1}^N r_i^2}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i}. \quad (4)$$

式中,  $q_i = 10^{-0.05 L_{pi}}$ ,  $L_{pi}$  为第  $i$  个测量点的测量声压级;  $r_i$  为第  $i$  个测量点与声源假定中心的距离. 然而, 这种理论声压级计算方法尚存在一些不足, 主要有:

### (1) “近大远小”现象

通过国标理论声压级算法得到的声压级偏差曲线存在不符合常识的“近大远小”现象, 即距离声源较近处理论值与测试值的偏差较大, 自由声场特性不好; 而距离声源较远处理论值与测试值的偏差较小, 有较好的自由声场特性. 这是由于规程中为了拟合计算方便, 引入了没有物理意义的参数  $q$ , 将原有直接关于  $L_p(r)$  的数学模型式(1)转化为了关于  $q(r)$  的一次函数模型式(2), 进而对  $q(r)$  进行基于最小二乘法的线性拟合. 这样的拟合方式使  $\sum \Delta q^2$  最小, 却无法保证声压级偏差的平方和  $\sum \Delta L_p^2$  保持最小. 对其原因进一步分析, 易得到声压级偏差  $\Delta L_p$  为<sup>[6]</sup>

$$\Delta L_p \approx \frac{20}{\ln 10} \cdot \frac{1}{q_i} \cdot \Delta q. \quad (5)$$

结合式(2), 可见当  $r$  越大时,  $q_i$  越大, 若要将  $\Delta q$  的值保持在相对较小的范围内, 则相应的  $\Delta L_p$  也需同时减小, 相反当  $r$  越小时,  $\Delta L_p$  需增大. 则  $\Delta L_p$  将出现离声源近处较大, 随距离增大逐渐变小的“近大远小”现象.

### (2) 空气吸收影响

消声室自由声场理论声压级的推导公式模型中只包含了声音随声源距离的衰减量, 并未考虑空气吸收对声压级产生的影响. 实际上, 由于空气吸收的影响, 当球面声波在空气介质中传播时, 除声压与距离成反比关系衰减外, 还因空气的吸收而随距离衰减, 而空气吸收的大小与大气压力、温度、相对湿度、频率有关. 根据 GB/T 17247.1 标准<sup>[7]</sup>, 对于纯音信号声压级的衰减量可以表示为

$$\Delta L_p(f) = \alpha r. \quad (6)$$

式中,  $\Delta L_p(f)$  为频率  $f$  时产生的声压级衰减量(dB);  $\alpha$  为声压衰减系数(dB/m);  $r$  为与声源的距离(m). 在标准大气压条件下

$$\alpha = 8.686 f^2 \left[ 1.84 \times 10^{-11} \left( \frac{T_K}{T_0} \right)^{-\frac{1}{2}} + \left( \frac{T_K}{T_0} \right)^{-\frac{5}{2}} \times \left( 0.01275 \frac{f_{r0}}{f_{r0}^2 + f^2} e^{-\frac{2239.1}{T_K}} + 0.1068 \frac{f_{rN}}{f_{rN}^2 + f^2} e^{-\frac{3352.0}{T_K}} \right) \right]. \quad (7)$$

式中,  $T_K$  为大气温度(K);  $T_0$  为参考温度, 大小为 293.15 K;  $f$  为声源的频率(Hz);  $f_{r0}$  为氧弛豫频率(Hz);  $f_{rN}$  为氮弛豫频率(Hz).  $f_{r0}$  和  $f_{rN}$  分别为

$$f_{r0} = 24 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.319 + h}, \quad (8)$$

$$f_{rN} = 9 \sqrt{\frac{T_0}{T_K}} + 280 h e^{-4.170 \left( \sqrt{\frac{T_0}{T_K}} - 1 \right)} \sqrt{\frac{T_0}{T_K}}. \quad (9)$$

其中,  $h$  和  $T_K$  分别为

$$h = h_r 10^{-6.8346 \left( \frac{T_{01}}{T_K} \right)^{1.261} + 4.6151}, \quad (10)$$

$$T_K = T + 273.15. \quad (11)$$

式中,  $h$  为水蒸汽的摩尔浓度(%);  $T$  为温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $h_r$  为相对湿度(%);  $T_{01}$  为水的三相点温度, 大小为  $-273.16 \text{ K}$ . 对标准大气压下空气吸收的声压级衰减系数进行仿真分析, 不同频率下声压衰减系数随温度、相对湿度的变化如图1所示, 声压衰减系数可看做是由空气吸收引起的每米声压级衰减量.

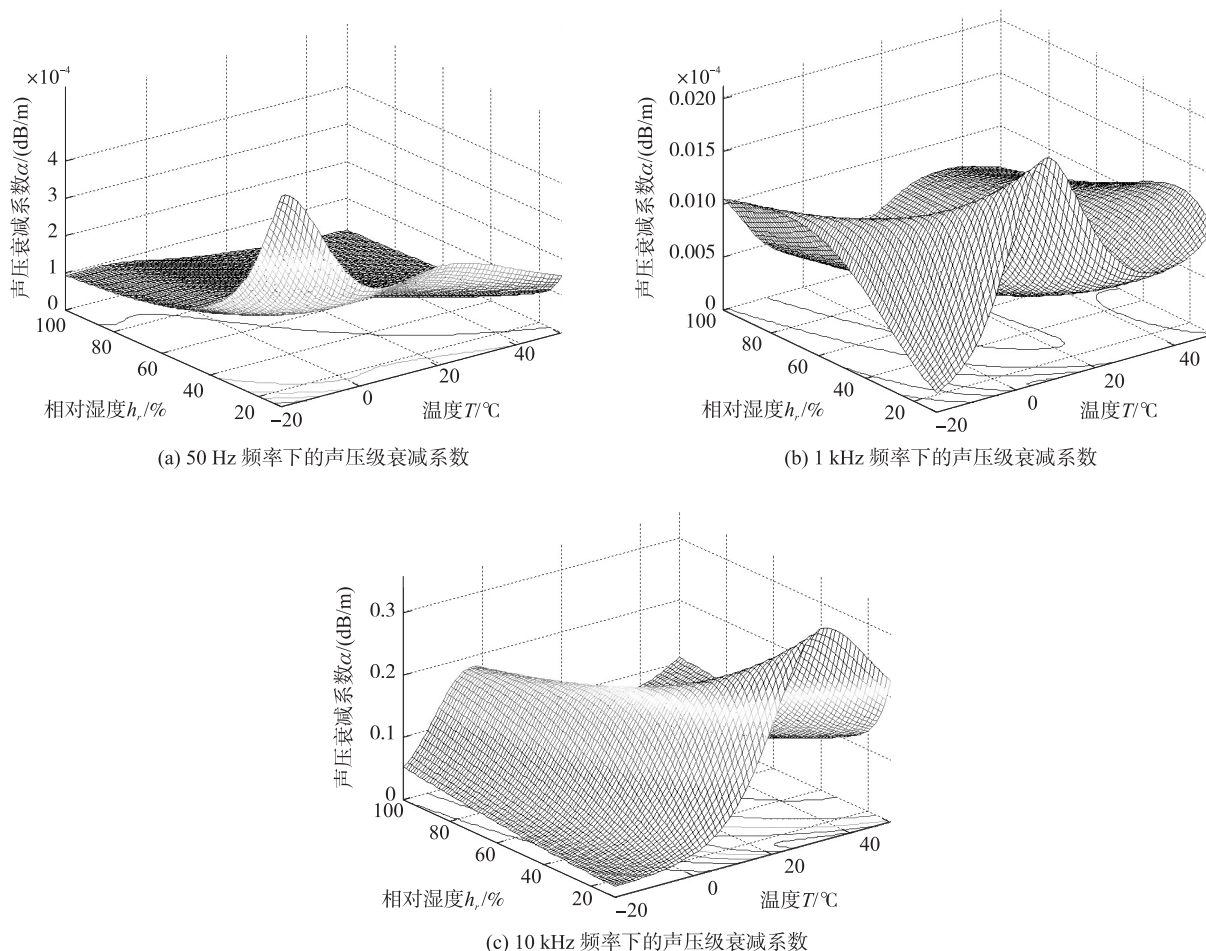


图1 不同频率下空气吸收引起的声压级衰减系数

Fig.1 The attenuation coefficient cause by air absorption under different frequency

如图1所示,从空气吸收的角度分析,在低频信号和中频信号中,每米范围内空气吸收所产生的声压级衰减值较小,而在实际测量中消声室所需的测试距离一般不超过10 m,其大小相比于声波随距离的衰减量可忽略不计.但在高频信号中,空气吸收因素所引起的声压级衰减系数较大,10 kHz频率下最高可超过0.3 dB/m.故在理论声压级的计算模型中特别地在高频情况下空气吸收的衰减量不容忽视.

## 2 理论声压级计算新方法

针对国标理论声压级计算方法的尚存不足,考虑采用一种基于非线性拟合的新计算方法对理论声压级  $L_p(r)$  进行计算.这种改进后的新计算方法的拟合模型主要包括了两个部分,一个部分是基于反平方率

声压级原理点声源的扩散衰减,另一部分是空气吸收的衰减.

### (1) 声音随距离的衰减

消声室和半消声室校准中的标准声源默认为可以发出球面波的点声源,且具有无指向性,声波以球面波的方式较均匀地向各个方向辐射.在自由声场环境中,球面波的波阵面面积  $S=4\pi r^2$ ,声源发出的声功率  $W$  可表示为<sup>[8]</sup>

$$W = IS = 4\pi r^2 I. \quad (12)$$

将声功率转化为声功率级,声功率级为

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} = L_I + 20 \lg r + 10 \lg 4\pi. \quad (13)$$

式中,  $r$  为球面波半径,即与声源的距离;  $I$  为声强;  $L_W$  为声功率级;  $L_I$  为声强级.由于常温常压下声压级和声强级基本视作相等,即  $L_p \approx L_I$ ,则有消声室中球面波的声功率级与声压级之间的关系为:

$$L_p = L_W - 20 \lg r - 10 \lg 4\pi. \quad (14)$$

同理,对于半消声室,由于校准时测试声源需要放置在刚性地面上,声波只能向半球面空间辐射,波阵面面积  $S=2\pi r^2$ ,则其声压级可以表示为:

$$L_p = L_W - 20 \lg r - 10 \lg 2\pi. \quad (15)$$

因声功率级与声源的声辐射有关,在声源发出声波一定时,  $L_W$  为一个固定值,距离声源  $r$  处的声压级公式为:

$$L_p = 20 \lg \frac{C}{r}. \quad (16)$$

式中,  $C$  为一个固定常数.声压随距离衰减部分的估算方程为

$$L_p(r) = 20 \lg \frac{a}{r-r_0}. \quad (17)$$

### (2) 空气吸收引起的衰减

对于空气吸收部分,考虑采用纯音声源的空气吸收衰减函数关系,考虑声中心的修正,纯音声源从声压为  $p_i$  的声中心处到声压为  $p_r$  的距离声中心  $r$  处的声压级衰减量可表示为

$$L_{pi} - L_{pr} = \alpha(r_0 - r). \quad (18)$$

其中,声压衰减系数  $\alpha$  的计算公式如式(7).

对照国标 GB/T 17247.1 中的空气吸收衰减表 1 进行取值,得理论声压级的总拟合模型为

$$L_p(r) = 20 \lg \frac{a}{r-r_0} + \alpha(r_0 - r). \quad (19)$$

式中,等号右侧第一项表明声压级随距离衰减;第二项表示空气吸收的衰减.新计算方法采用基于最小二乘法的非线性拟合方式对理论声压级进行估算,使用声压级偏差的平方和  $\sum \Delta L_p^2$  作为判据,且在不同声源频率下对理论值分别计算.在新方法中的拟合运算过程相对复杂,不易直接推导出  $\alpha$  和  $r_0$  的简化公式,可利用 MATLAB 的 CFTOOL 工具箱建立 New Custom Equation 进行拟合计算并绘制图像,如图 2 所示,将  $r_0$  修正值上限设置为初始测量时的 0.5 m,初值设为随机,最终可通过 MATLAB 软件确定参数  $\alpha$  和  $r_0$  的值.

表 1 空气吸收引起的声压衰减系数  $\alpha$  (dB/m)

Table 1 The attenuation coefficient cause by air absorption,  $\alpha$  (dB/m)

$f/\text{Hz}$	$T=20\text{ }^\circ\text{C}, P_a=101.325\text{ kPa}$		$T=25\text{ }^\circ\text{C}, P_a=101.325\text{ kPa}$	
	$h_r=40\%$	$h_r=50\%$	$h_r=40\%$	$h_r=50\%$
125	$5.21 \times 10^{-4}$	$4.45 \times 10^{-4}$	$4.79 \times 10^{-4}$	$3.99 \times 10^{-4}$
500	$2.63 \times 10^{-3}$	$2.73 \times 10^{-3}$	$3.19 \times 10^{-3}$	$3.23 \times 10^{-3}$
1 000	$4.65 \times 10^{-3}$	$4.66 \times 10^{-3}$	$5.39 \times 10^{-3}$	$5.68 \times 10^{-3}$
2 000	$1.12 \times 10^{-2}$	$9.86 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^{-2}$
4 000	$3.61 \times 10^{-2}$	$2.94 \times 10^{-2}$	$3.01 \times 10^{-2}$	$2.57 \times 10^{-2}$
10 000	$1.94 \times 10^{-1}$	$1.59 \times 10^{-1}$	$1.60 \times 10^{-1}$	$1.31 \times 10^{-1}$

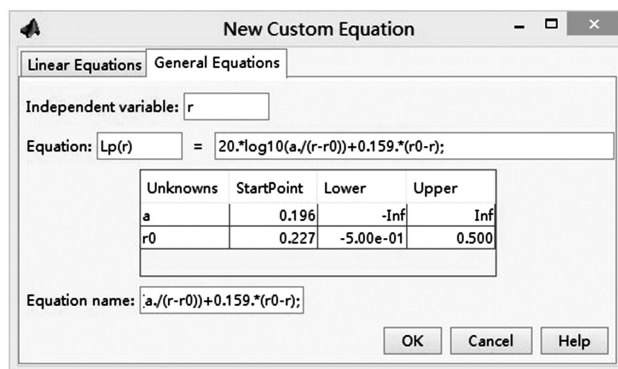


图 2 创建 New Custom Equation 拟合模型

Fig.2 Create a New Custom Equation fitting model



3 理论声压级新计算方法结果分析

为验证新计算方法能否改变国标计算方法,下面使用在某消声室的实测数据来将这两种方法与国标方法进行比较,选择 10 kHz 高频数据.图 3 为根据 GB 6882 及 JJF 1147 标准中计算公式对声压数据进行处理后得到的测量声压级及理论声压级曲线对比图,可见在首端测量值与理论值偏差值较大,而末端偏差反而有所减小,出现了离声源较近的位置自由声场特性差、离声源较远距离位置自由声场特性好的“近大远小”现象.

用新方法对理想声压级进行拟合计算,选取声源频率为 10 kHz、温度为 20 ℃、相对湿度为 50%时的衰减系数  $\alpha$ ,值为 0.159 dB/m,新方法计算得到的声压级曲线如图 4 所示.

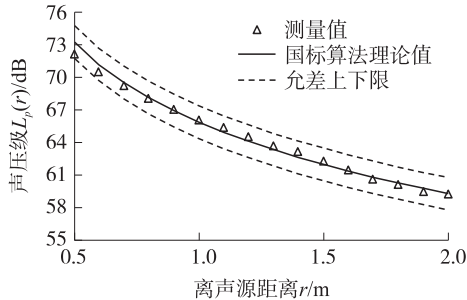


图 3 国标计算方法得到的声压级曲线  
Fig.3 The sound pressure level curve base on national standard calculated method

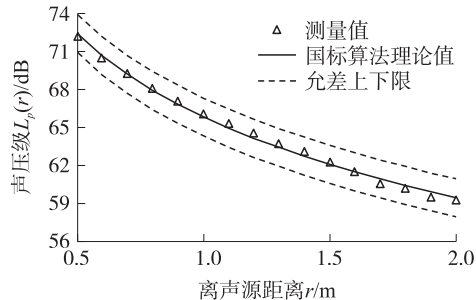


图 4 新方法计算得到的声压级曲线  
Fig.4 The sound pressure level curve base on novel calculated method

由图 5 可见,10 kHz 下通过新计算方法求出的声压级偏差在靠近声源处的绝对值较小,有着较好的自由声场特性,而在远离声源处偏差值浮动较大,并未一直缩小,满足声压级偏差随距离变化的客观规律.同时在不同频率内实验还发现新计算方法在各频率范围内均能较好地改善偏差曲线“近大远小”的不合理现象.将两种方法进行比较(如表 2).两种方法的主要区别在于在新方法计算模型中不仅考虑了随声源距离的衰减,还考虑了空气吸收因素,且选用了全部测量点进行非线性拟合的计算,校准精度显著提高.在空气吸收衰减部分采用了 GB/T 17247.1 中计算公式,或可以直接使用空气吸收衰减表中数据带入进行计算,数据相对精确.

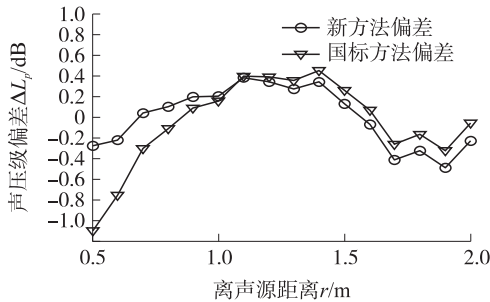


图 5 新方法与国标方法计算得到的声压级偏差对比  
Fig.5 The sound pressure level deviation of novel calculated method and national standard calculated method

表 2 新的理论声压级计算方法与国标方法对比		
Table 2 The comparison between the novel calculated method and the national standard calculated method		
	国标计算方法	新计算方法
空气吸收因素	不考虑	考虑
拟合方法	线性拟合	非线性拟合
偏差分布是否合理	不合理	合理

4 结语

由实验仿真可见,在高频时空气吸收因素会造成较高的声压级衰减量,故在消声室的声学特性校准中,理论声压级的计算模型需加入空气吸收引起的衰减部分.新的理论声压级计算方法分别考虑了声压随距离、空气吸收引起的衰减,有效提高了消声室自由声场的校准精度;同时新方法直接使用声压级偏差平方和最小作为拟合判据,较好地改善国标方法中自由声场偏差值“近大远小”的不合理现象.

### [参考文献](References)

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 声学声压法测定噪声源声功率级消声室和半消声室精密法:GB/T 6882—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.  
AQSIQ. Acoustics-determination of sound power levels of noise sources-precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms:GB/T 6882-2008[S]. Beijing:Standards Press of China,2008. (in Chinese)
- [2] International standards organization. Acoustics-determination of sound power levels of noise sources using sound pressure-precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms:ISO 3745-2012[S]. Geneva:HIS,2012.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 消声室和半消声室声学特性校准规范:JJF 1147-2006[S]. 北京:中国计量出版社,2006.  
AQSIQ. Calibration specification for acoustic performance of anechoic rooms and hemi-anechoic rooms:JJF 1147-2006[S]. Beijing:China Metrology Publishing House,2006. (in Chinese)
- [4] 杨德俊,吴杰歆,何卓斌,等. 浅谈反平方律鉴定消声室自由声场的方法研究[J]. 家电科技,2012(4):76-78.  
YANG D J, WU J X, HE Z B, et al. Preliminary discussion on method to calculate the sound pressure level based on the inverse law in anechoic room[J]. Household appliance technology,2012(4):76-78. (in Chinese)
- [5] 蒲志强,孙磊,鄂治群. 一种用于消声室校准计算反平方律声压级的新方法[J]. 计量学报,2013,34(5):466-468.  
PU Z Q, SUN L, E Z Q. New method on estimation of sound pressure level based the inverse law in anechoic room calibration [J]. Acta metrologica sinica,2013,34(5):466-468. (in Chinese)
- [6] 钟静,夏哲雷. 一种新的消声室声压级的计算方法[J]. 中国计量学院学报,2014,25(2):191-196.  
ZHONG J, XIA Z L. A new method to calculate the sound pressure level of anechoic rooms[J]. Journal of China jiliang university,2014,25(2):191-196. (in Chinese)
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. 声学 户外声传播衰减 第1部分:大气声吸收的计算:GB/T 17247.1-2000[S]. 北京:中国标准出版社,2000.  
AQSIQ. Acoustics-attenuation of sound during propagation outdoors-part 1: calculation of the absorption of sound by the atmosphere:GB/T 17247.1-2000[S]. Beijing:Standards Press of China,2008. (in Chinese)
- [8] 高红武. 噪声控制技术[M]. 2版. 武汉:武汉理工大学出版社,2009.  
Gao H W. Noise control technology[M]. 2nd ed. Wuhan:Wuhan University of Technology Press,2009. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]