

有限大障板上轴对称扬声器声压级的近似计算方法

徐楚林^{1,2}, 陆晓¹, 温周斌^{1,3}, 胡长青³

(1. 中国科学院大学, 北京 100190; 2. 浙江中科电声研发中心, 浙江嘉善 314100; 3. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 扬声器声压级测试一般是将扬声器安装在矩形标准障板上进行的, 而要通过仿真分析方法准确计算该扬声器在这种声场条件下的声压级, 以往只能采用 3D 模型, 其计算量非常大。提出了一种近似计算方法, 将有限大障板近似为很多个扇形障板块的组合, 再利用 2D 轴对称模型的仿真分析方法计算每个扇形障板块影响下的声压, 进而得到轴对称扬声器安装在有限大障板上的声压级。这种方法使仿真分析模型与实际测试相符合, 同时也避免了规模庞大的 3D 仿真计算。

关键词: 扬声器; 仿真计算; 标准障板; 2D 轴对称; 扬声器测试

中图分类号: TN912

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-01-0049-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.01.011

An approximate SPL calculation method for axisymmetric loudspeaker mounted on finite baffle

XU Chu-lin^{1,2}, LU Xiao¹, WEN Zhou-bin^{1,3}, HU Chang-qing³

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Zhejiang Electro-Acoustic R&D Center, Chinese Academy of Sciences, Jiashan 314100, Zhejiang, China; 3. Shanghai Acoustic Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: Loudspeaker is commonly mounted on a finite baffle in SPL (sound pressure level) measurement. Formerly, a 3D model must be used for accurate SPL simulate calculation under this acoustic field, which spends huge computation time. An approximate method is proposed, in which the finite baffle is divided into many circulator sectors, then the SPL of the loudspeaker with every circulator sector baffle is calculated by using 2D axisymmetric simulation, and the SPL of the loudspeaker mounted on the finite baffle is finally obtained by combining these 2D simulation results. This method can effectively reduce the difference between simulate calculation and actual measurement. Moreover, the costly 3D model simulation is avoided.

Key words: loudspeaker; simulation; standard baffle; 2D axisymmetric; loudspeaker measurement

0 引言

随着扬声器应用场合的日益扩大和其重要性的不断提升, 近年来扬声器仿真计算方法也在迅速发展^[1-3]。许多扬声器都是轴对称的(旋转体), 在仿真计算中可采用 2D 轴对称模型。但实际扬声器产品的频响曲线一般是扬声器安装在矩形障板上测量得到的。扬声器需安装在偏离障板中心的位置, 使得扬声器中心点到障板四边的距离各不相同。矩形障板的形状和扬声器安装在障板的位置显然是无法在 2D 轴对称坐标系下整体建模的, 要通过仿

真计算方法准确计算这种声场条件下的扬声器的声压级就只能采用 3D 模型。然而, 采用 3D 模型的计算量要远大于 2D 模型。一个包含扬声器完整 3D 模型、标准障板和足够大的空气球的 3D 有限元模型, 按计算到 4 kHz 频率为标准, 单元最大尺寸应取 4 kHz 声波波长的 1/6 即 14.2 mm, 划分网格后, 整个模型的自由度接近一千万量级, 而同一扬声器的 2D 模型自由度一般在十万量级。这样巨大的 3D 模型即使采用专业超算服务器, 计算时间仍需要十几甚至几十小时, 如此昂贵的投入和漫长的计算时间, 一般电声企业都是难以接受的。另一方面, 若扬声器仿真分析方法选择采用理想的无限大障板或无障板以满足 2D 轴对称条件, 则因声场条件不同, 所得到的仿真计算结果与实际扬声器产品的测量结果难以比较和验证, 也不符合电声工程师的习惯。因此, 这一问题影响了仿真计算技术在实

收稿日期: 2015-08-04; 修回日期: 2015-11-30

作者简介: 徐楚林(1979-), 男, 吉林省吉林市人, 博士研究生, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 徐楚林, E-mail: xuchulin@mail.ioa.ac.cn

际扬声器设计工作中的广泛应用。

障板的主要作用一方面是在正面方向反射扬声器发出的声波,另一方面则是阻碍背面方向的辐射声波向正面绕射。有些研究^[4-5]对于障板的影响给出了一些近似结果,但是这些分析计算将扬声器简化为点声源,也未考虑扬声器磁路等部件对声场的影响,因此,当所要分析的频率较高、扬声器尺寸较大,或设计的扬声器的磁路、盆架等部件对声传播会产生显著影响的时候,上述近似处理可能会产生较大的误差。

本文在 2D 轴对称扬声器仿真分析方法的基础上,提出一种计算安装在有限大障板上的扬声器的声压级的近似方法,并以国标 GB/T 12060.5^[6]中规定的标准障板为例,具体介绍在一款汽车扬声器仿真中加入标准障板的方法以及仿真结果。

1 2D 轴对称分析中有限大障板的近似处理方法

本文提出的方法适用于各种形状的有限大障板,但为了便于描述,接下来以最常用的矩形障板为例介绍该方法。为了计算一块矩形障板上轴对称扬声器的声压级,首先确定一个较大的 N (例如 $N=1000$),将矩形障板绕扬声器安装中心等角度地切分成 N 个三角形。在障板的四个直角附近,所切分出来的几何形状可能不是三角形,但当 N 较大时仍可将它们近似视为三角形。由于 N 较大,所以可将上述三角形近似为半径为 r_i 、圆心角为 $2\pi/N$ 的扇形,其中 r_i 是第 i 个三角形两条长边长度的平均值,如图 1 所示。对于一个半径为 r_i 、圆心角为 $2\pi/N$ 的扇形障板,它对前方声场反射和对后方声场绕射的影响相当于一块半径为 r_i 的圆形障板影响的 $1/N$ 。因此,只要通过仿真分析方法分别得到半径为 r_i 的圆形障板影响下的声压,就可以得到该

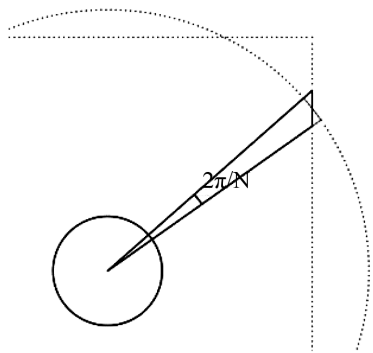


图 1 有限大障板切分并近似为扇形
Fig.1 Dividing finite baffle into approximate sectors

矩形障板影响下的声压结果。

但是 N 很大,要计算全部 N 个不同半径的圆形障板下的声压也是很困难的。为此,可先将 N 个不同半径的扇形划分为 M 个组($M \ll N$),每个扇形组近似以一个扇形来代表,该扇形的半径为本组中全部扇形半径的平均值。以最小的近似误差平方和为目标,寻找最佳的分组方法,这是一个非线性全局优化问题,可采用基因算法等全局优化算法得到较优的解。

经分组后,假设第 i ($1 \leq i \leq M$) 组中包含 n_i 个扇形,其半径均值为 \bar{r}_i ,分别仿真计算半径为 \bar{r}_i ($1 \leq i \leq M$) 的 M 种尺寸圆形障板下扬声器正前方指定点的声压有效值 p_i , p_i 为复数,可采用 COMSOL 等有限元分析软件实现该值的仿真计算,具体方法可参考文献[3]),最后,采用公式(1)计算就可得到在该矩形障板下扬声器声场在该点处的声压级。

$$SPL = \left(20 \lg \text{abs} \left(\sum_{i=1}^M p_i \frac{n_i}{N} \right) + 94 \right) \text{dB} \quad (1)$$

2 标准障板的案例

2.1 标准障板的切分与近似

在国家标准 GB/T 12060.5《声系统设备 第 5 部分:扬声器主要性能测试方法》中,扬声器测试所需采用的标准障板的形状和尺寸如图 2 所示,扬声器需安装在标准障板的右上方的安装圆位置。

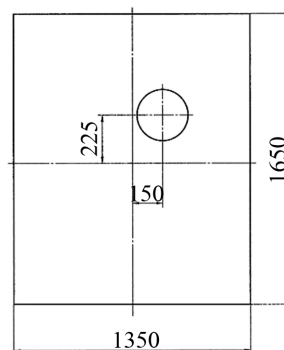


图 2 国标中的标准障板及其尺寸
Fig.2 Standard baffle in GB/T 12060.5

以扬声器安装圆的圆心为中心,从水平向右方向开始,逆时针将标准障板切分成 2048 个三角形。将上述三角形都近似认为是扇形,这 2048 个扇形的半径分布如图 3 所示。

将上述 2048 个扇形分为 10 组。可先将它们的半径按大小排序,显然此时每一组的成员应该是相邻的,因此只需将前 9 组各自包含的成员数量作为未知量(最后一组包含剩余成员)。在每种分组情况

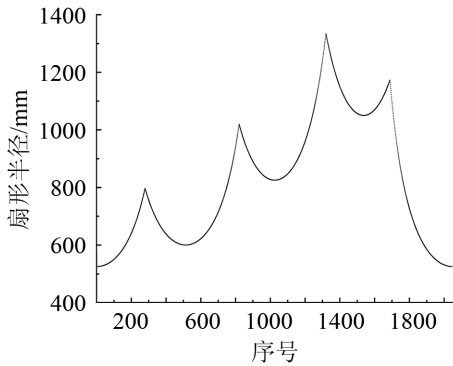


图 3 标准障板切分成 2048 个扇形的半径分布

Fig.3 Radii of 2048 sectors cut from the standard baffle

下，用每组内成员半径的均值统一代替组内各成员半径，可以计算此时近似误差平方的均值，这就得到一个 9 元单值函数。将这个函数作为目标函数，可以用约束的整数基因算法寻找最佳分组方式。基因算法具有随机性，不能保证总能找到全局最优解，一般局部最优解具有很好的近似效果。表 1 中所列的是一种分组结果，所对应的扇形近似障板与标准障板的几何图形的对比图如图 4 所示。

表 1 将 2048 个扇形分为 10 组的结果

Table 1 The result of dividing 2048 sectors into 10 groups

组序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
成员数量	278	366	216	160	269	157	122	257	147	76
平均半径/mm	542	612	676	752	838	903	980	1068	1148	1268

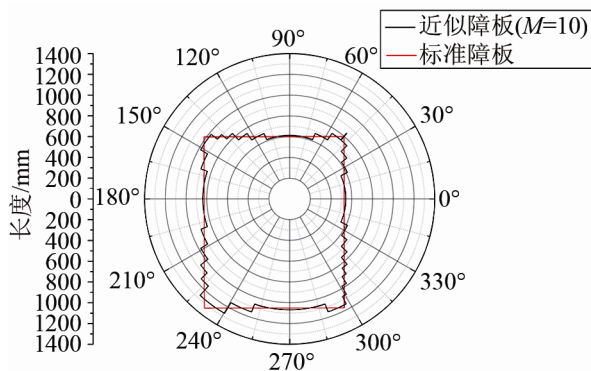


图 4 10 组扇形的近似障板与标准障板对比

Fig.4 Comparison of the standard baffle with an approximation of M=10 groups

2.2 扬声器模型和无限大障板仿真分析结果

图 5 是一款汽车扬声器的 2D 几何半剖模型，其基本参数、电磁参数和结构参数分别见表 2、3。

根据上述几何模型和材料参数可仿真计算得到在无限大障板条件下，该扬声器正前方 1 m 处的声压级(见图 6)，图 6 中黑色实线是该仿真分析结果，虚线是实际扬声器安装在标准障板下的测量结果，可以看出，两者存在显著差异。

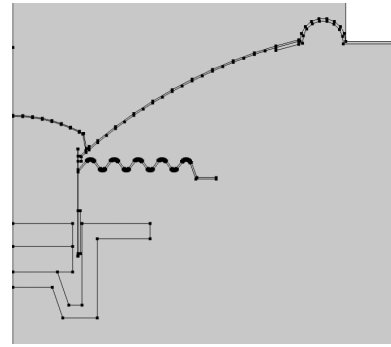


图 5 某型扬声器简化几何模型

Fig.5 Simplified geometry model of a loudspeaker

表 2 某型扬声器的基本参数和电磁参数

Table 2 Basic parameters and electromagnetic parameters of a certain type of loudspeakers

基本参数		电磁参数			
		磁钢		导磁碗上夹板	
直流阻抗/ Ω	线圈圈数	剩磁/T	相对磁导率	BH 曲线	电导率/[S/m]
3.53	74	1.21	1.07	[测量值]	1.12×10^7

表 3 某型扬声器的结构参数

Table 3 Structural parameters of a certain type of loudspeakers

	杨氏模量 /MPa	泊松比	密度/(kg/m^3)	损耗因子
锥体	6000	0.33	620	0.09
折环	4	0.33	650	0.02
定心支片	300	0.33	450	0.15
音圈	1.5×10^5	0.35	6500	0.002
音圈骨架	1.54×10^4	0.33	1000	0.002
防尘帽	100	0.33	550	0.09

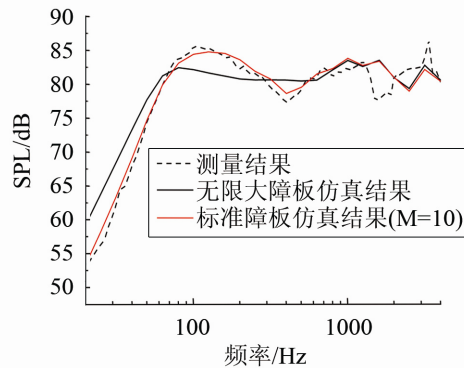


图 6 声压级仿真结果与测量结果对比

Fig.6 SPL simulation results of the loudspeaker in different conditions compared with the measuring result (mounted on the standard baffle)

2.3 标准障板(近似)仿真分析结果

根据 2.1 节标准障板切分和近似结果，将上述扬声器仿真分析模型中的无限大障板改为半径分别为表 1 中所列的 10 种尺寸的圆形障板，同样计

算该扬声器前方 1 m 处的声压。再根据式(1), 即可得到在标准障板下该扬声器声压级的仿真结果, 如图 6 中红色曲线所示。由图 6 可知, 在中低频段本近似计算方法可以有效地模拟标准障板对声场的影响, 获得与标准障板下的测量结果更为一致的仿真计算结果。

2.4 分组数 M 的影响

显然, 增加分组数 M 有利于减少近似误差和提高仿真精度。当 $M=50$ 时, 扇形近似障板与标准障板的几何图形已经非常接近, 绝大多数的障板边缘部分的差异在 5 mm 以内(见图 7)。

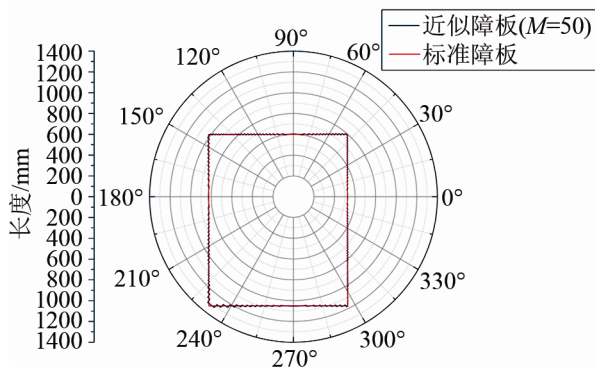


图 7 近似障板($M=50$)与标准障板对比

Fig.7 The standard baffle compared with an approximation of $M=50$

如果以分组数 $M=50$ 的仿真分析结果作为基准, 可以评估较小 M 的仿真分析误差, 图 8 给出了 $M=6$ 、8、10 和 12 时的仿真分析结果与 $M=50$ 时的差值曲线。由图可知, 在 20~4000 Hz 频率范围内, 当 $M=10$ 开始就有较高的精度, 而如果只关注 1000 Hz 及更低频率, $M=6$ 就足够了。

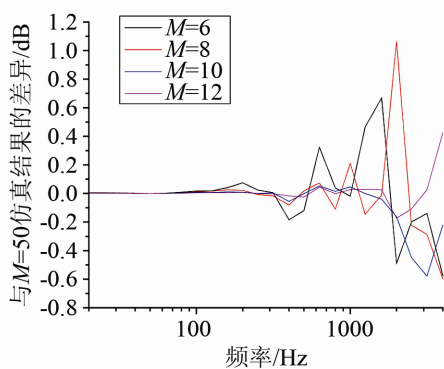


图 8 $M=6$ 、8、10、12 情况下的仿真结果与 $M=50$ 的仿真结果之差值

Fig.8 Differences between the simulation results for $M=6, 8, 10, 12$ and the simulation result for $M=50$

3 小 结

本文所提出的有限大障板上轴对称扬声器声

压级近似计算方法可有效地模拟有限大障板的影响, 仿真计算结果与测量结果更为一致。虽然需要进行多次 2D 轴对称仿真计算, 但其总计算量仍远远小于进行 3D 扬声器耦合分析的计算量。

采用本方法使得扬声器仿真计算的声场环境与实际产品的测试环境相符合, 从而可定量地评估仿真结果的准确性。另一方面, 本方法亦可帮助电声工程师更加深入地理解矩形障板对扬声器测量的影响, 正确认识其测量结果, 从而更好地指导改进扬声器的设计和制造。

本方法只能用于计算轴对称扬声器对称轴上的各点处的声压级, 而不能计算偏离扬声器对称轴的其他点处的声压级。所幸的是, 扬声器的指向性一般不在标准障板上测量, 因此, 也很少需要仿真分析计算标准障板上偏离轴线处的声压级。

参 考 文 献

- [1] CHAPPELL D J, GEAVES G, Henwood D J, et al. Modeling the transient acoustic field radiated by a loudspeaker[J]. J Audio Eng Soc, 2008, 56(11): 956-971.
- [2] SALVATTI A. Virtual acoustic prototyping—practical applications for loudspeaker development[C]// Audio Engineering Society Convention 129. San Francisco, CA, USA, 2010.
- [3] 陆晓, 徐楚林, 温周斌. 动圈式扬声器数值分析方法[J]. 声学技术, 2012, 31(4): 407-412.
LU Xiao, XU Chulin, WEN Zhoubin. Research on a new numerical simulation method of moving-coil loudspeaker[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(4): 407-412.
- [4] 孙广荣, 曹水轩, 吴启学, 等. 非无限大障板对扬声器测试的影响[J]. 电声技术, 1983, (5): 6-11.
SUN Guangrong, CAO Shuixuan, WU Qixue, et al. Effect on loudspeaker measurement by a finite baffle[J]. Audio Engineering, 1983, (5): 6-11.
- [5] LE Y, SHEN Y, XIA J. A diffractive study on the relation between finite baffle and loudspeaker measurement[J]. J. Audio Eng. Soc., 2012, 59(12): 944-952.
- [6] 全国音频、视频及多媒体系统与设备标准化技术委员会. GB/T 12060.5—2011 声系统设备 第五部分: 扬声器主要性能测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
National Standardization Technical Committee of audio, video and multimedia system and device. GB/T 12060.5—2011, Sound system equipment—Part 5: Methods of measurement for main characteristics of loudspeakers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.