

发明名称

一种扬声器振动和声学特性的数值模拟方法

摘要

本发明提出了一种扬声器振动和声学特性的数值模拟方法。首先，使用三维绘图软件绘制扬声器三维（3D）几何模型图。然后，将扬声器 3D 几何模型图导入网格划分软件，将其划分为体单元，定义单元类型、材料、边界条件并施加载荷，得到有限元模型，再建立与有限元模型相匹配的边界元模型。最后，通过有限元求解器对有限元模型求解得到扬声器的振动特性，包括固有频率、振动模态（振型）、位移、应变及应力，再通过边界元求解器对边界元模型求解得到扬声器的声学特性，包括频响曲线和指向性曲线。

1、一种扬声器振动和声学特性的数值模拟方法，其特征在于该方法至少包括以下步骤：

(1) 使用三维绘图软件绘制扬声器的三维(3D)几何模型图。

(2) 建立扬声器有限元模型。具体步骤如下：

A、将扬声器 3D 几何模型图导入网格划分软件，对其进行网格划分，得到有限元分析所用的体单元。若需考虑空气对扬声器振动的影响，还要在模型中加入空气并将其网格划分为体单元。

B、定义单元类型。为 A 步骤中各部分单元定义相匹配的单元类型。

C、定义材料参数。定义模型各部件的材料参数，包括杨氏模量、泊松比、密度及材料阻尼。若模型中包含空气，还需定义空气的材料参数，包括声速、密度及吸声系数。

D、定义边界条件。扬声器有限元模型的边界条件如下：1) 固定边界条件。由于扬声器振膜边缘是固定在盆架上的，需在其边缘定义固定边界条件，若扬声器还包含有定位支片，它与盆架接触的边缘也应定义固定边界条件；2) 流固耦合边界条件。若分析扬声器的振动特性时考虑空气的影响，在扬声器和空气的接触面两者会发生耦合作用，需在扬声器和空气的分界面定义流固耦合边界条件。

E、给有限元模型施加载荷，在模型的音圈部位施加驱动力。

F、将上述模型保存为有限元模型文件。

(3) 建立扬声器边界元模型。提取扬声器有限元模型的表面得到与有限元模型体单元匹配的面网格，由于障板对扬声器的声学特性有很大的影响，还要建立障板的面网格，定义上述面网格的单元类型，将上述模型保存为边界元模型文件。

(4) 用有限元求解器对有限元模型文件进行求解。将有限元模型文件导入有限元求解器并进行模态分析，可以得到扬声器的固有频率和振动模态（振型），再进行谐波分析，可以得到扬声器的位移响应、应变响应及应力响应。

A、对有限元模型进行模态分析

动力学分析的基本方程如下：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$$

上式中， $[M]$ 为系统质量矩阵， $[C]$ 为系统阻尼矩阵， $[K]$ 为系统刚度矩阵， $\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度向量， $\{\dot{u}\}$ 为节点速度向量， $\{u\}$ 为节点位移向量， $\{F\}$ 为施加的载荷向量，与时间相关。

假设扬声器做无阻尼的自由振动，方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}$$

对于线性系统，假定系统做简谐运动

$$\{u\} = \{u\}_i \cos \omega_i t$$

上述运动方程变为

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{u\}_i = \{0\}$$

求解上述方程可得到 ω_i 和 $\{u\}_i$, ω_i 为第 i 阶固有圆周频率, $\{u\}_i$ 为特征向量, 即第 i 阶固有圆周频率对应的振动模态 (振型)。

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}, \text{ 为第 } i \text{ 阶固有频率。}$$

B、对有限元模型进行谐波分析

在谐波分析中, $\{F\}$ 、 $\{u\}$ 是简谐的。有:

$$\{F\} = (\{F_1\} + i\{F_2\})e^{i\Omega t}$$

$$\{u\} = (\{u_1\} + i\{u_2\})e^{i\Omega t}$$

$$([K] - \Omega^2[M] + i\Omega[C])(\{u_1\} + i\{u_2\}) = \{F_1\} + i\{F_2\}$$

上式中, $\{u_1\}$ 、 $\{u_2\}$ 分别为位移的实部及虚部, $\{F_1\}$ 、 $\{F_2\}$ 分别为加载力的实部及虚部, Ω 为加载力的角频率。

求解上述方程可以得到位移的实部 $\{u_1\}$ 和虚部 $\{u_2\}$, 进一步由位移可推导出应变及应力。

(5) 将有限元求解器求解得到的位移和边界元模型文件提交到边界元求解器, 可求解得到扬声器的频响曲线和指向性曲线。

在各向同性的理想流体介质中, 对于简谐变化的声波, 声压满足亥姆霍兹方程:

$$\nabla^2 p(r) + k^2 p(r) = 0$$

根据散度定理, 可以将上述方程变成边界上的积分方程:

$$p(r) = \int_S [p(r_q) \frac{\partial G(r, r_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial p(r_q)}{\partial n_q} G(r, r_q)] dS$$

式中, k 为声波的波数, $p(r)$ 为扬声器外声场中任意一点的声压, r_q 为边界上一点, $G(r, r_q)$ 为格林函数, n_q 为边界的单位法向矢量。

$$\text{声压级 } L_p = 20 \log\left(\frac{P}{p_0}\right)$$

式中, $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 为基准声压。

求解出扬声器在特定位置 (一般指沿声轴线方向距扬声器声中心 1m 的位置) 不同频率下的声压级即可得到频响曲线, 求解出扬声器在某一特定频率下空间不同位置的声压级即可得到指向性曲线。

2、权利要求 1 所述的扬声器振动和声学特性的数值模拟方法, 其特征在于扬声器主要包括各种电动扬声器。

- 3、权利要求 1 所述的扬声器振动和声学特性的数值模拟方法，其特征在于通过求解扬声器有限元模型的无阻尼自由振动特征方程分析可以分析扬声器的多种振动模态（特征向量），如活塞振动、摇摆振动、弯曲振动、扭转振动及其复合振动等。
- 4、权利要求 1 所述的扬声器振动和声学特性的数值模拟方法，其特征在于三维绘图软件为 Pro/E，用它绘制扬声器的三维(3D)几何模型图，Pro/E 是一款 CAD/CAM/CAE 一体化的三维软件，功能包括零件设计、模具设计、钣金件设计、虚拟装配及工程出图。
- 5、权利要求 1 所述的扬声器振动和声学特性的数值模拟方法，其特征在于网格划分软件为 HyperMesh，用它可以对扬声器 3D 几何模型划分网格。
- 6、权利要求 1 所述的扬声器振动和声学特性的数值模拟方法，其特征在于有限元求解器为有限元软件 ANSYS，可以用来求解结构、流体、热、电磁问题。
- 7、权利要求 1 所述的扬声器振动和声学特性的数值模拟方法，其特征在于边界元求解器为 LMS Virtual. Lab，可以模拟分析结构完整性、振动噪声、系统动力学特性。

一种扬声器振动和声学特性的数值模拟方法

技术领域

本发明涉及的是一种计算机应用技术领域的模拟方法，采用该方法分析扬声器的振动和声学特性，能够得到扬声器的固有频率、振动模态（振型）、位移、应变、应力、频响曲线、指向性曲线。可广泛应用于扬声器的设计开发。

背景技术

传统的扬声器分析设计方法有两种：（1）经验法。一般为样品试做、测试、再改善样品、再测试的反复循环过程，这种方式必须等到设计后期才能发现扬声器问题，而且开发周期长、成本高；（2）等效电路法。当扬声器工作在低频时，扬声器振膜做整体的活塞运动，这时扬声器可看作是集中参数系统，根据电-力-声类比，各部件等效为集中参数的电路元件，可快速准确地得到分析结果，但当频率较高时，由于扬声器振膜会产生分割振动，扬声器成为分布参数系统，无法用等效电路分析扬声器特性。

丹麦 LoudSoft 公司开发了 FINEMotor、FINECone 等扬声器设计软件，可以对扬声器磁路、音圈、振膜进行分析，得到 T/S 参数、阻抗曲线、频响曲线及指向性曲线等参数，但是此两款软件所分析扬声器模型必须为轴对称模型，对于跑道型扬声器及振膜表面有加强筋的扬声器，它的局限性很大。

随着计算机技术的发展，使用计算机进行辅助设计越来越广泛，出现了很多通用的有限元及边界元软件。将有限元法及边界元法应用于扬声器分析设计，有效地克服等效电路法局限于低频的缺点，而且可以在样品试做前期预估扬声器的性能，从而加快扬声器设计进度，减少开发成本。

发明内容

本发明的目的是设计出一种扬声器振动和声学特性的数值模拟方法。

本发明要解决的是经验法存在的须等到设计后期才能发现扬声器问题且开发周期长、成本高的问题和等效电路法存在的在频率较高时无法用等效电路分析扬声器特性的问题。

本发明的一种扬声器的振动和声学特性的数值模拟方法，具体步骤为：

(1) 使用三维绘图软件绘制扬声器的三维(3D)几何模型图。

(2) 建立扬声器有限元模型。具体步骤如下：

A、将扬声器 3D 几何模型图导入网格划分软件，对其进行网格划分，得到有限元分析所

用的体单元。若需考虑空气对扬声器振动的影响，还要在模型中加入空气并将其网格划分为体单元。

B、定义单元类型。为 A 步骤中各部分单元定义相匹配的单元类型。

C、定义材料参数。定义模型各部件的材料参数，包括杨氏模量、泊松比、密度及材料阻尼。若模型中包含空气，还需定义空气的材料参数，包括声速、密度及吸声系数。

D、定义边界条件。扬声器有限元模型的边界条件如下：1) 固定边界条件。由于扬声器振膜边缘是固定在盆架上的，需在其边缘定义固定边界条件，若扬声器还包含有定位支片，它与盆架接触的边缘也应定义固定边界条件；2) 流固耦合边界条件。若分析扬声器的振动特性时考虑空气的影响，在扬声器和空气的接触面两者会发生耦合作用，需在扬声器和空气的分界面定义流固耦合边界条件。

E、给有限元模型施加载荷，在模型的音圈部位施加驱动力。

F、将上述模型保存为有限元模型文件。

(3) 建立扬声器边界元模型。提取扬声器有限元模型的表面得到与有限元模型体单元匹配的面网格，由于障板对扬声器的声学特性有很大的影响，还要建立障板的面网格，定义上述面网格的单元类型，将上述模型保存为边界元模型文件。

(4) 用有限元求解器对有限元模型文件进行求解。将有限元模型文件导入有限元求解器并进行模态分析，可以得到扬声器的固有频率和振动模态（振型），再进行谐波分析，可以得到扬声器的位移响应、应变响应及应力响应。

A、对有限元模型进行模态分析

动力学分析的基本方程如下：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$$

上式中， $[M]$ 为系统质量矩阵， $[C]$ 为系统阻尼矩阵， $[K]$ 为系统刚度矩阵， $\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度向量， $\{\dot{u}\}$ 为节点速度向量， $\{u\}$ 为节点位移向量， $\{F\}$ 为施加的载荷向量，与时间相关。

假设扬声器做无阻尼的自由振动，方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}$$

对于线性系统，假定系统做简谐运动

$$\{u\} = \{u\}_i \cos \omega_i t$$

上述运动方程变为

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{u\}_i = \{0\}$$

求解上述方程可得到 ω_i 和 $\{u\}_i$ ， ω_i 为第*i*阶固有圆周频率， $\{u\}_i$ 为特征向量，即第*i*阶固有圆周频率对应的振动模态（振型）。

$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$, 为第 i 阶固有频率。

B、对有限元模型进行谐波分析

在谐波分析中, $\{F\}$ 、 $\{u\}$ 是简谐的。有:

$$\{F\} = (\{F_1\} + i\{F_2\})e^{i\Omega t}$$

$$\{u\} = (\{u_1\} + i\{u_2\})e^{i\Omega t}$$

$$([K] - \Omega^2[M] + i\Omega[C])(\{u_1\} + i\{u_2\}) = \{F_1\} + i\{F_2\}$$

上式中, $\{u_1\}$ 、 $\{u_2\}$ 分别为位移的实部及虚部, $\{F_1\}$ 、 $\{F_2\}$ 分别为加载力的实部及虚部, Ω 为加载力的角频率。

求解上述方程可以得到位移的实部 $\{u_1\}$ 和虚部 $\{u_2\}$, 进一步由位移可推导出应变及应力。

(5) 将有限元求解器求解得到的位移和边界元模型文件提交到边界元求解器, 可求解得到扬声器的频响曲线和指向性曲线。

在各向同性的理想流体介质中, 对于简谐变化的声波, 声压满足亥姆霍兹方程:

$$\nabla^2 p(r) + k^2 p(r) = 0$$

根据散度定理, 可以将上述方程变成边界上的积分方程:

$$p(r) = \int_S [p(r_q) \frac{\partial G(r, r_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial p(r_q)}{\partial n_q} G(r, r_q)] dS$$

式中, k 为声波的波数, $p(r)$ 为扬声器外声场中任意一点的声压, r_q 为边界上一点, $G(r, r_q)$ 为格林函数, n_q 为边界的单位法向矢量。

$$\text{声压级 } L_p = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

式中, $p_0 = 2 \times 10^{-5} Pa$ 为基准声压。

求解出扬声器在特定位置 (一般指沿声轴线方向距扬声器声中心 1m 的位置) 不同频率下的声压级即可得到频响曲线, 求解出扬声器在某一特定频率下空间不同位置的声压级即可得到指向性曲线。

附图说明

图 1 为本发明实施方法方框图。

图 2 为一款 6.5 英寸汽车扬声器的 3D 几何模型图。

图 3 为一款 6.5 英寸汽车扬声器的剖面示意图。

图 4 为该扬声器的有限元模型。

图 5 为该扬声器的边界元模型。

图 6A~图 6C 为该扬声器的几种典型振动模态。

图 7 为该扬声器的位移响应曲线。

图 8 为该扬声器的声压频响曲线。

图 9 为该扬声器指向性极图（频率为 1kHz）。

具体实施方式

下面结合附图及实施例对本发明作进一步的说明。

本发明以 6.5 英寸汽车扬声器为例，模拟分析其振动及声学特性。图 1 是本发明实施方法流程图，主要有如下步骤：

步骤 1：使用三维绘图软件 Pro/E 创建扬声器 3D 几何模型图，图 2 是该扬声器的 3D 几何模型图，图 3 是该扬声器的剖面示意图，由图可知，该扬声器由三部分组成：（1）磁路系统，包括 T 铁、磁钢及上夹板，主要产生磁场，会对通电音圈产生驱动力；（2）振动系统，包括纸锥、防尘帽、折环、定位支片（弹波）、骨架及音圈，在驱动力下振动并辐射声音；（3）辅助系统，包括盆架及压边，支撑及固定振动系统。

步骤 2：建立扬声器有限元模型（见图 4）。具体步骤如下：

- 1) 将扬声器三维模型导入 HyperMesh 软件中，由于扬声器磁路系统主要产生均匀的磁场，给扬声器振动系统提供驱动力，在数值模拟过程中相当于载荷的作用。扬声器辅助系统主要的作用是固定振动系统，在数值模拟过程中可代替为固定边界条件。这样，只需在 HyperMesh 中对纸锥、折环、防尘帽、音圈及骨架进行网格划分得到各部分的体单元。
- 2) 定义单元类型。单元类型选用 Solid45 单元。
- 3) 定义材料参数。对于本例的扬声器，振膜及防尘帽所选用材料为聚丙烯（pp），折环材料为橡胶，弹波材料为棉布，骨架材料为聚酰亚胺（kapton），音圈材料为铜，定义上述材料的材料属性，包括杨氏模量、泊松比、密度及材料阻尼。
- 4) 定义边界条件。由于扬声器折环和定位支片边缘是固定在盆架上的，在扬声器折环和定位支片的边缘定义固定边界条件（沿坐标系 x, y, z 轴的平动及转动位移为 0）。
- 5) 施加载荷。在音圈上施加大小为 Bil 的力，方向平行于音圈运动方向，其中 B 是磁通量密度， i 为流经音圈的电流， l 为音圈导线的长度。
- 6) 保存有限元模型文件。

步骤 3：建立边界元模型（见图 5）。从纸锥、折环、防尘帽的体单元表面提取与体单元相匹配的面网格，再建立障板面网格。面网格选用 shell63 单元，保存边界元模型文件。

步骤 4：将有限元模型文件导入 ANSYS，进行模态分析，得到扬声器的固有频率及振动模态，几种典型的振动模态见图 6A~图 6C；进行谐响应分析，计算出扬声器在一系列频率下

的响应并得到位移、应力、应变随频率变化的曲线。图 7 是模拟计算的位移曲线。

步骤 5：将边界元模型文件和步骤 4 的位移结果导入 LMS Virtual. Lab，进行求解得到扬声器的频响曲线和指向性曲线。图 8 是模拟计算的频响曲线。图 9 是模拟计算的 1kHz 的指向性极图。

最后应说明的是：以上实施例仅用以说明本发明而并非限制本发明所描述的技术方案；因此，尽管本说明书参照上述的各个实施对本发明已进行了详细的说明，但是，本领域的普通技术人员应当理解，仍然可以对本发明进行修改或等同替换；而一切不脱离发明的精神和范围的技术方案及其改进，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

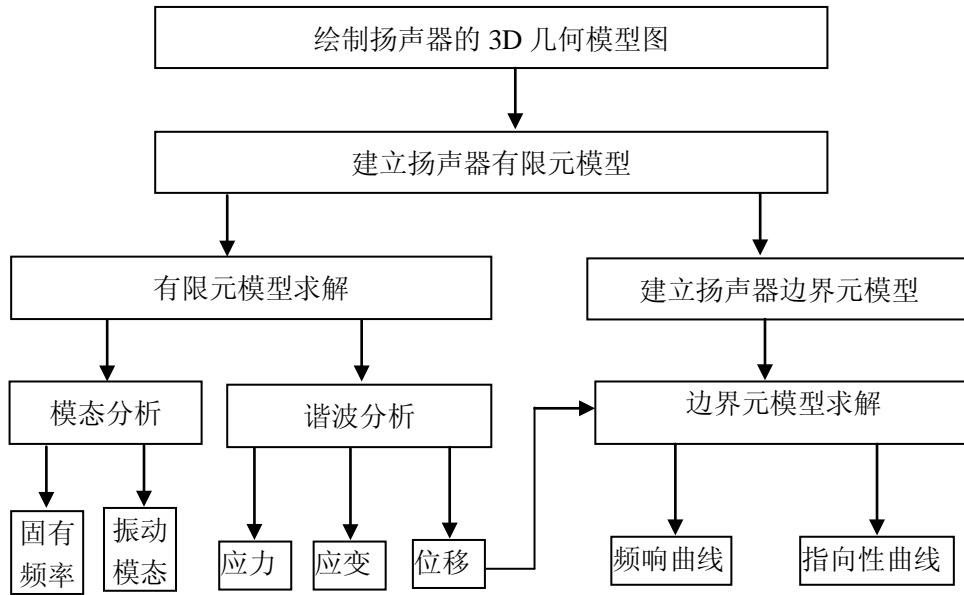


图 1

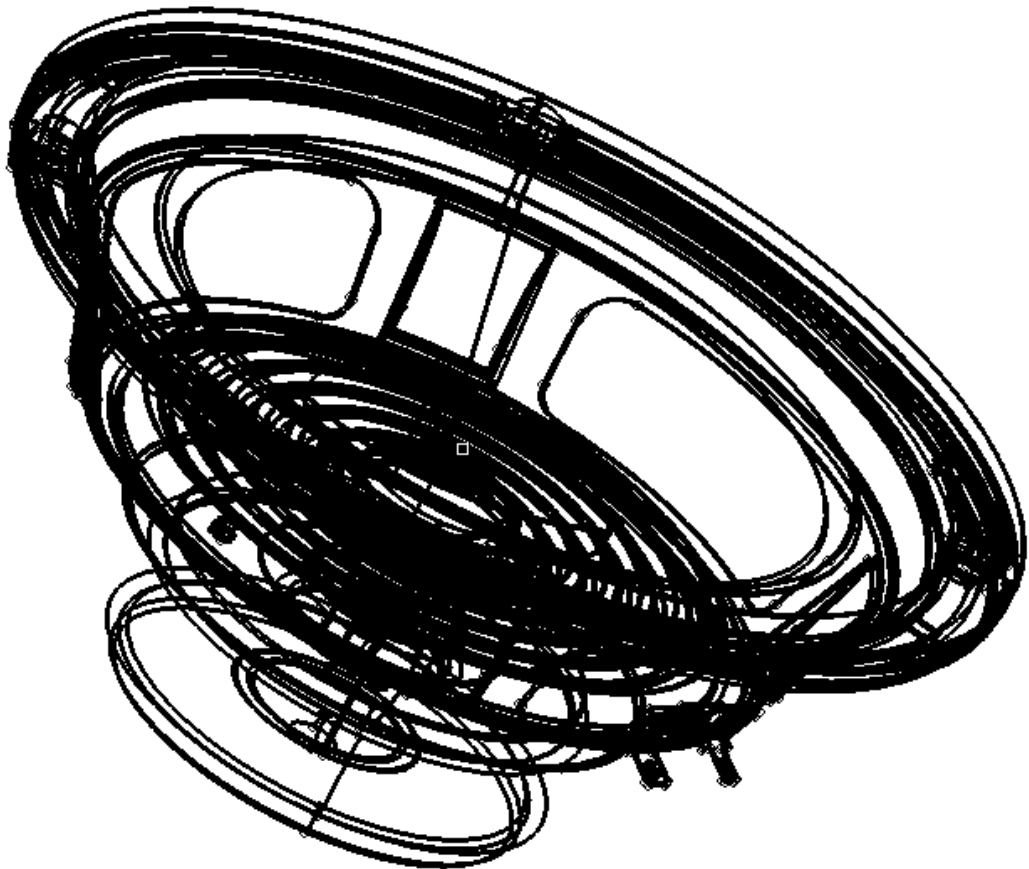


图 2

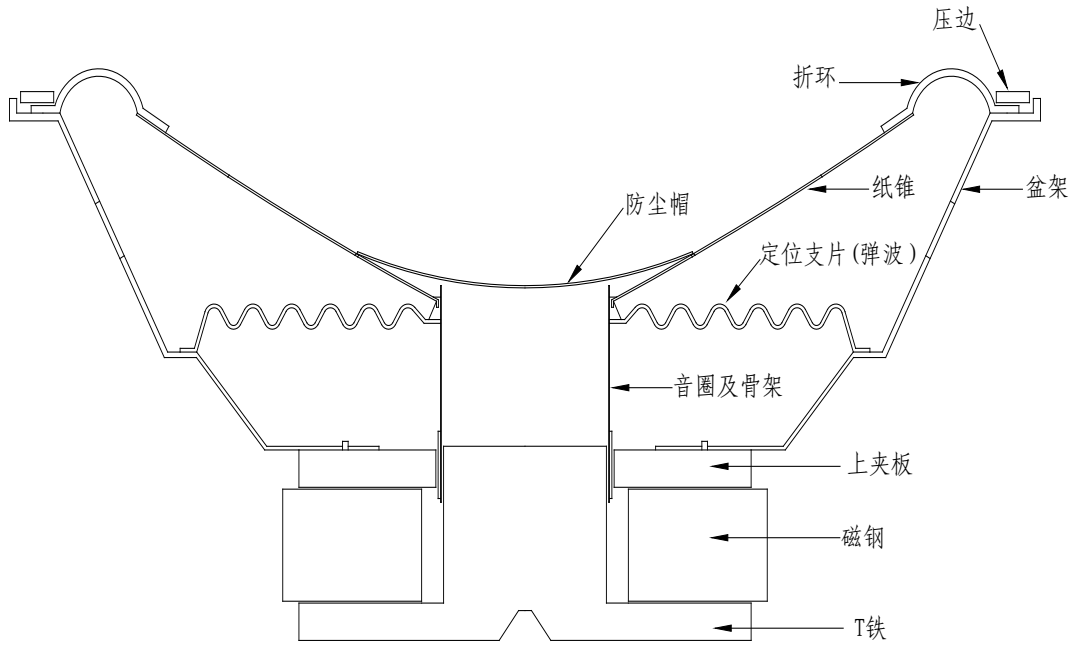


图3

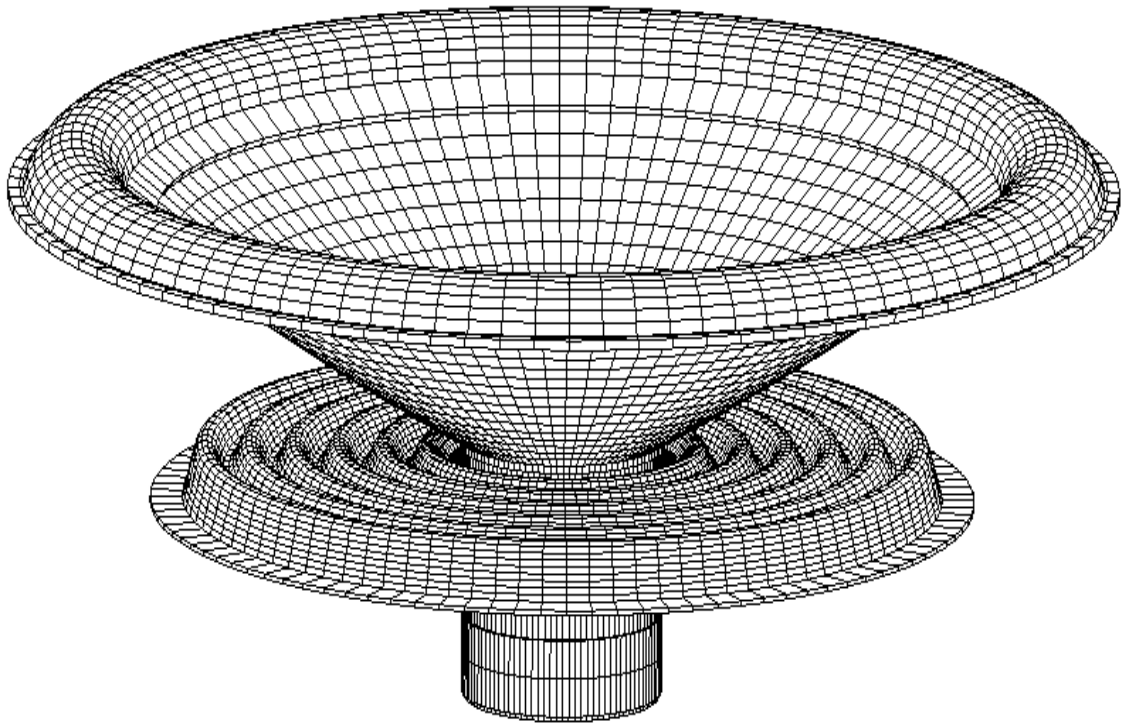


图4

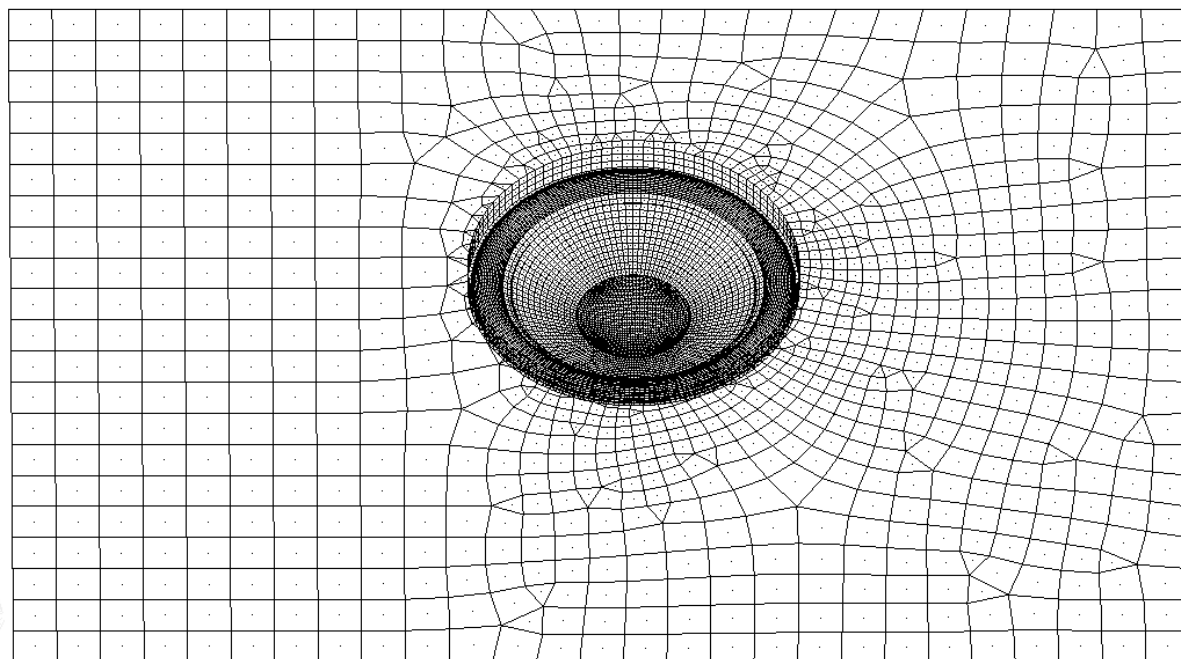


图5

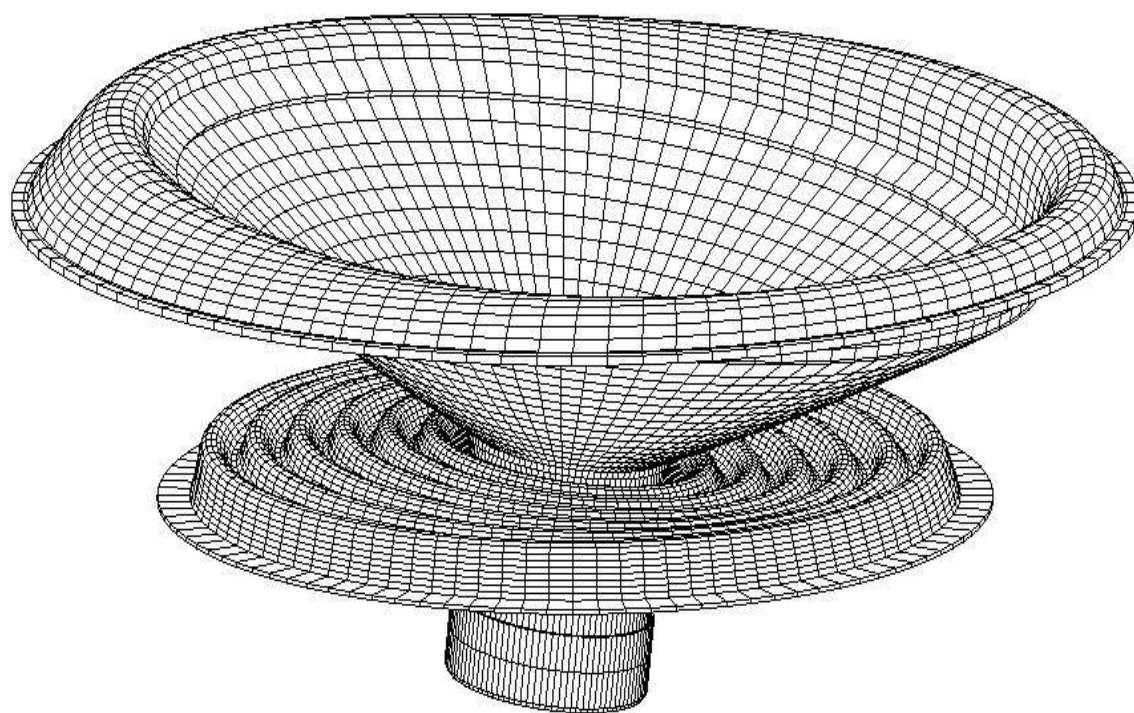


图6A

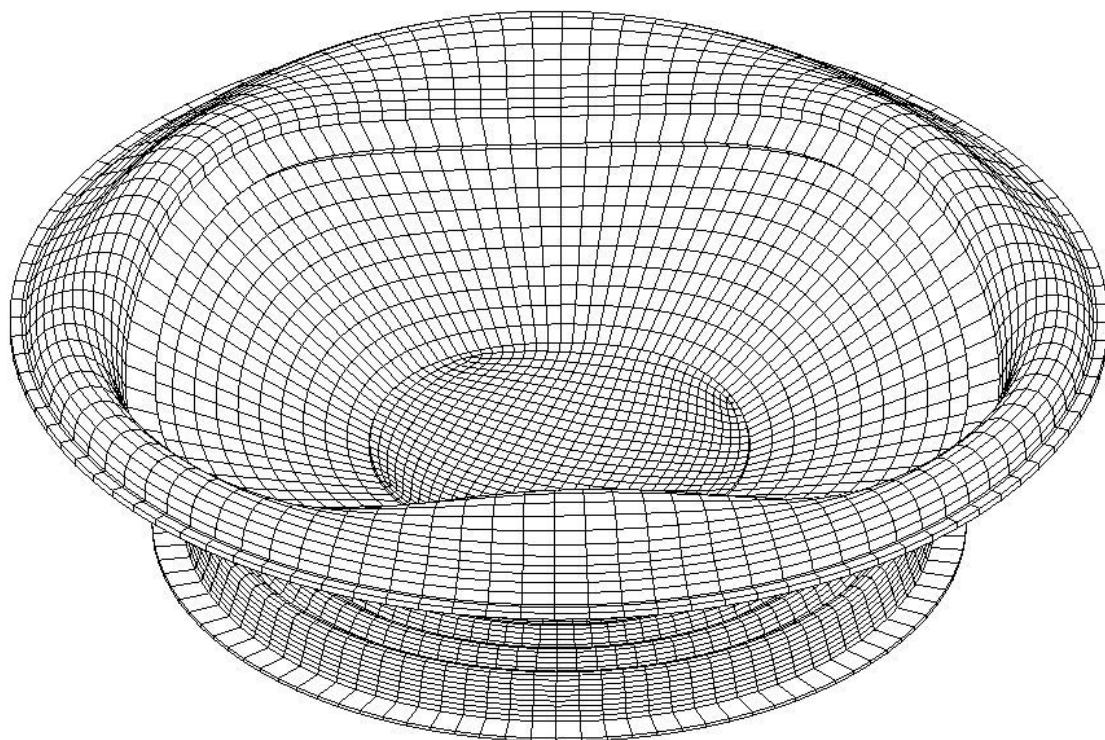


图 6B

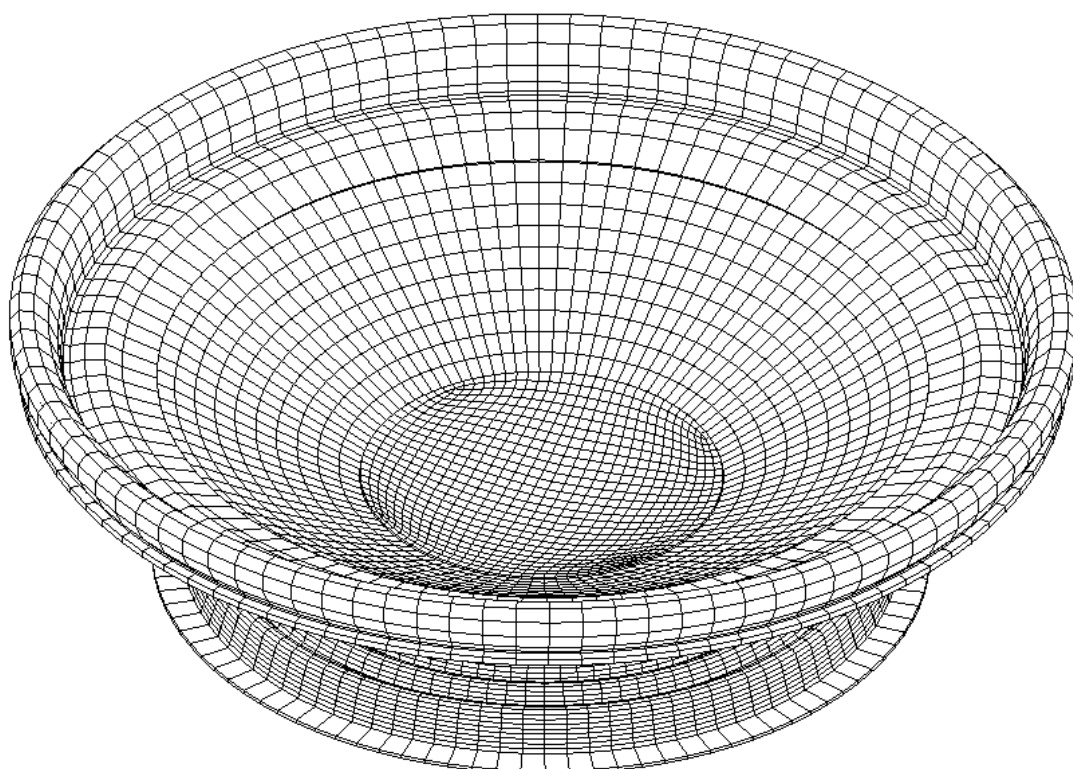


图 6C

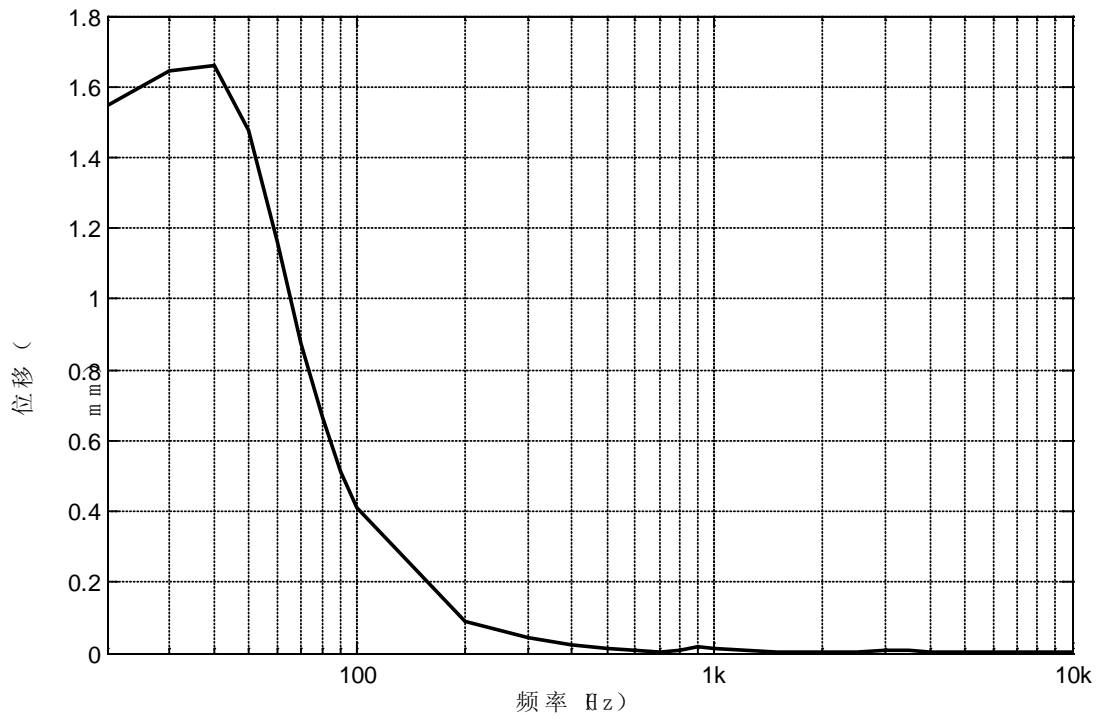


图 7

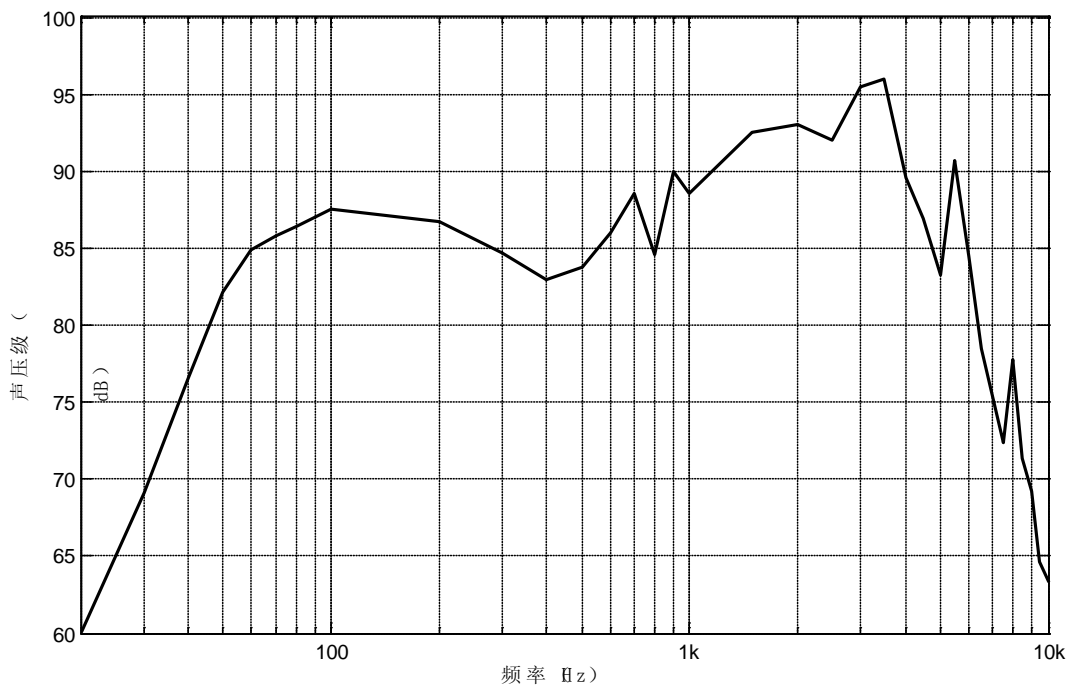


图 8

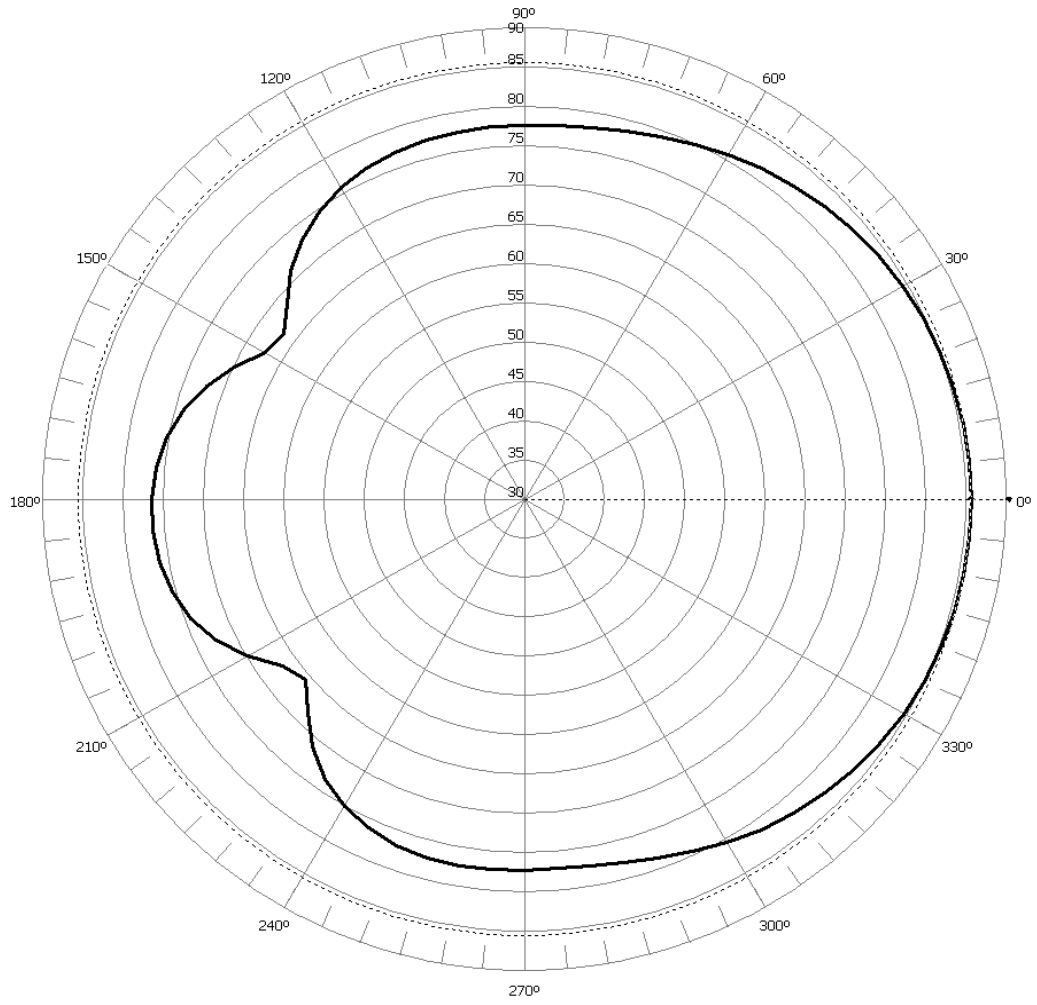


图 9