

## 一种扬声器磁路系统的数值模拟方法

### 技术领域

[001] 本发明属于扬声器领域，涉及扬声器磁路特性的模拟方法，特别是涉及一种扬声器磁路分析的数值模拟方法。采用该方法分析扬声器的磁路，可以得到扬声器磁路的磁场特性，包括磁通密度(又称感应强度，符号  $B$ )的分布情况及音圈相应位置上的  $Bl$  值，可以用磁感线图、 $B$  或磁场强度(符号  $H$ )的云图、矢量图的方式来描绘磁场分布状况。可以广泛用于动圈式扬声器磁路的设计。

### 背景技术

[002] 传统扬声器分析设计方法主要是经验法。一般为样品设计、试做、测试、再修改设计、再测试的反复循环过程，这种方法只能在样品制作出来以后才能发现扬声器磁路存在的问题，而反复制样则会耗费大量的人力、物力和时间。磁路设计的目标在于寻找  $B$  与磁路结构之间的确切关系，但实际磁路中  $B$  的大小不仅与结构有关而且受所用胶水、充磁方法等工艺问题的影响，难以确定  $B$  值的变化仅缘于结构的改变。

[003] 丹麦 LoudSoft 公司开发了 FINEMotor、FINECone 等扬声器设计软件，可以对扬声器磁路进行分析，但此两款软件所分析扬声器模型必须为轴对称模型，不能设计分析非轴对称的跑道形扬声器或受话器等。

### 发明内容

[004] 本发明的目的是提出一种用于扬声器磁路系统的数值模拟方法。

[005] 本发明要解决的主要问题是：(1) 经验法存在的必须反复制样且在磁路样品制作出来以后才能发现扬声器磁路缺陷的问题；(2) 反复制样时开发周期长、成本高的问题；(3) 难以确定改进后的样品中磁场变化是缘于磁路结构本身还是缘于工艺的问题；(4) 其它软件难以对非对称结构的磁路进行数值模拟的问题。

[006] 本发明的一种扬声器磁路系统数值模拟方法，具体步骤为：

[007] (1) 使用三维(以下简称 3D)绘图软件绘制扬声器磁路的 3D 几何图形。为了更加精确地模拟磁路周围空间的漏磁情况和空气对磁场分布的影响，需要在模型中建立一个包围磁路几何体的 3D 空气模型。如果扬声器磁路具有轴对称的结构特性，则 3D 磁场分析可简化为针对旋转面的二维(以下简称 2D)分析，只需建立磁路的旋转面模型，然后建立包围磁路的平面空气模型。

[008] (2) 建立扬声器磁路的有限元模型。具体步骤如下：

[009] A、划分网格。将扬声器磁路 3D 几何模型连同空气模型导入网格划分软件，对其划分网格，得到体单元。如果是 2D 分析则对面划分网格得到面单元。

[010] B、定义单元类型。有限元分析中，按照分析所需要的自由度数目和节点数目设计了多种单元类型。定义单元类型即为 A 步骤中所得体单元或面单元列出相匹配的单元类型。空气最外层单元定义为远场单元。

[011] C、定义材料属性。定义模型各部分的材料参数，包括  $B-H$  曲线、磁导率、矫顽磁力等材料参数。

[012] D、指定单元类型和材料属性。将 B、C 步骤中定义的单元类型和材料属性关联到 A 步骤中所得相应单元。

[013] E、保存有限元模型。将以上步骤中得到的有限元模型保存为有限元软件可识别的文件格式。

[014] (3) 将 E 步骤保存的有限元模型导入有限元求解软件。

[015] (4) 创建音圈。扬声器中音圈是带动振膜一起振动而使扬声器发声的结构件。音圈受力是因为其处在磁场中且其中通有与磁感线垂直的电流。音圈在仿真分析中是一个特殊的组成部分，需要在有限元软件中创建，其单元类型为 SOURCE36。在 2D 分析中，将电流密度以载荷的形式加载到音圈截面上。

[016] (5) 标定边界。对使用远场单位的空气模型外表面进行边界标定。在 2D 分析中，对空气模型的边界线上进行边界标定。

[017] (6) 对有限元模型求解。在有限元软件中选择求解模块，定义分析类型为静态分析，然后进行求解计算。

[018] 静态磁场是电磁场中的一种特殊情形。而电磁场分析的基本方程为 Maxwell 方程，即：

$$[019] \begin{cases} \nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \\ \nabla \times \{E\} = -\left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \\ \nabla \cdot \{B\} = 0 \\ \nabla \cdot \{D\} = \rho \end{cases}$$

[020] 其中  $\nabla \times$ 、 $\nabla \cdot$  分别为旋度计算和散度计算， $\{J\}$ 、 $\{D\}$ 、 $\{E\}$  和  $\{B\}$  分别为总电流密度、电通量密度（又称电位移）、电场强度和磁通量密度（又称磁感强度， $B$ ）的矢量。上述场方程的求解必需结合磁场的本构关系进行。

[021] 对于非磁材料而言，磁场的本构关系为：

$$[022] \{B\} = [\mu]\{H\}$$

[023] 其中  $[\mu]$  为磁导率矩阵。如果材料为各向异性，则  $[\mu]$  可简化为一对角矩阵。

$$[024] [\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{rx} & & \\ & \mu_{ry} & \\ & & \mu_{rz} \end{bmatrix}$$

[025] 其中  $\mu_0$  为真空中的绝对磁导率， $\mu_{rx}$ 、 $\mu_{ry}$ 、 $\mu_{rz}$  分别为 x、y、z 三个方向上的相对磁导率。如果

$[\mu]$  只是与磁场大小有关的函数，材料导磁特性为各向同性，则  $[\mu]$  可简化为：

$$[026] [\mu] = \mu_h \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

[027] 其中  $\mu_h$  为  $B$  与  $H$  的比值。

[028] 对于铁磁材料而言，当外界提供一个原磁场时，铁磁材料内部会被磁化而产生一个与原磁场相比不可忽略的附加磁场，总磁场是外部提供的原磁场  $B_0 = [\mu]\{H\}$  和介质内的附加磁场  $B' = \mu_0\{M_0\}$  之和，则磁场的本构关系变为：

$$[029] \{B\} = [\mu]\{H\} + \mu_0\{M_0\}$$

[030] 其中  $\{M_0\} = \chi_m\{H\}$  为磁化强度矢量， $\chi_m$  为磁化率。上式还可以简写成总磁感强度与原磁场间的关系式：

$$[031] \{B\} = \mu_0[\mu_r]\{H\}$$

[032] 其中  $\mu_r = (1 + \chi_m)$  为相对磁导率。铁磁质中相对磁导率  $\mu_r$  的值随  $H$  的变化而变化， $\mu_r$  对应于某  $H$  值的大小可由材料属性中  $B$  与  $H$  的非线性曲线(即  $B$ - $H$  曲线)得到。

[033] 在介质的交界面上还存在以下的边界条件：

$$[034] \hat{n} \cdot (B_2 - B_1) = 0, \hat{n} \times (H_2 - H_1) = 0,$$

[035] 其中  $\hat{n}$  为介面的法向单位矢量, 而  $B_1, H_1$  和  $B_2, H_2$  则分别为介面两端的磁通密度和磁场强度。当仅由永磁体为磁介质提供一外加磁场时, 在材料属性中定义了磁介质的磁导率或  $B-H$  曲线及永磁体中的矫顽磁力和剩磁的情况下, 可结合以上方程根据已知  $H$  计算得到  $B$  值, 亦可根据已知的  $B$  求得  $H$  值, 进而得到  $B$  或  $H$  的分布情况。将通有电流  $i$  的长为  $l$  的导线放入已知磁场中, 当  $B$  与  $i$  相互垂直时, 安培力  $F$  的大小为  $B$ 、 $l$  和  $i$  三者的乘积, 即  $F = Bli$ 。

[037] (7) 结果后处理。对模型进行有限元分析后, 需要检查求解结果, 这种检查称为后处理。经过对有限元求解结果进行处理, 可将  $B$  和  $H$  分布及音圈的  $Bl$  值等显示出来。其中  $B$  和  $H$  的分布情况可以云图或矢量图的形式显示出来。

[032] 所述的三维建模软件为 Pro/E, 用它绘制扬声器的三维几何模型图, 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、虚拟装配及工程图出图。

[038] 所述的网格划分软件为 HyperMesh, 用它可方便地对 2D 和 3D 几何模型进行网格划分, 并为相应的单元定义属性。

[039] 所述的有限元求解软件为 ANSYS, 它可用于求解结构、流体、热、电磁和耦合场等问题。

[040] 本发明的特点是: 本发明将有限元分析方法运用到扬声器的磁路设计, 可以有效地克服传统法中样品制作出来后才能发现磁路缺陷的问题, 加快扬声器设计进度, 降低设计成本。

## 附图说明

[041] 图 1 为本发明的实施流程图。

[042] 图 2 为一款跑道形微型扬声器磁路的 3D 几何模型图。

[043] 图 3 为图 2 的剖面示意图。

[044] 图 4 为包含空气的跑道形微型扬声器磁路结构的 3D 几何模型剖视图。

[045] 图 5 为跑道形微型扬声器磁路的有限元模型图。

[046] 图 6 为包含空气的跑道形微型扬声器磁路结构的 3D 有限元模型剖视图。

[047] 图 7 为 3D 分析时用  $B$  的云图表示的磁路中磁场分布图。

[048] 图 8 为 3D 分析时用  $B$  的矢量图表示磁场分布图。

[047] 图 9 为 2D 磁路分析时用磁感线描绘的磁场分布图。

[050] 图 10 为 2D 磁路分析时磁感强度矢量描绘的磁场分布图。

[051] 图 11 为 2D 磁路分析时磁场强度矢量描绘的磁场分布图。

## 具体实施方式

[052] 下面结合附图及实施例对本发明作进一步说明。

[048] 本发明以一款跑道形扬声器为例, 用数值模拟方法分析其磁场特性。如图 1 所示, 本发明步骤如下:

[053] 步骤 1: 使用 3D 绘图软件绘制扬声器磁路的 3D 几何模型。

[054] 图 2 是一款扬声器磁路系统的 3D 几何模型图, 图 3 是该扬声器磁路长轴方向的垂直剖面示意图, 由图可知该扬声器磁路系统由四部分组成: 前夹板 1、磁钢 2、铁碗 3 和音圈 4, 铁碗与磁体之间的空隙为磁隙 5, 音圈 4 处在磁隙之中。为了更加精确地模拟磁路在周围空间的漏磁情况, 需要建立一个包含空气的磁路结构 3D 模型, 其剖视图如图 4 所示, 其中空气 6 是用于模拟磁路周围的空气, 空气 7 用于模拟无限远处空气。

[055] 步骤 2: 建立扬声器磁路的有限元模型。具体步骤如下:

[056] (1) 将步骤 1 中的 3D 几何模型导入 HyperMesh 软件中, 进行网格划分得到扬声器磁路各部分的体单元。扬声器磁路系统主要利用的是它在磁隙中产生的均强磁场部分, 即使通电后的音圈在其中受安培力作用上下运动, 并带动扬声器的振膜振动发声。为了使模拟结果能达到足够的计算精度, 磁路的磁隙部分要有足够的网格密度。图 5 为磁路的 3D 有限元模型, 图 6 为包含空气的磁路结构的 3D 有限元模型剖视图。

[057] (2) 定义单元类型。步骤 (1) 所得扬声器磁路各部分的体单元需要使用与之相适应的含磁自由度

# 说明书

的单元类型，扬声器磁路各部分所用到的单元类型名称如表格 1 所示。其中远场单元是用于模拟磁路外围空气的无限边界。

表格 1

空气	音圈	永磁体	铁磁材料	远场单元
SOLID98	SOLID36	SOLID5	SOLID96	SOLID111

[058] 当磁路结构具有轴对称特性时，3D 磁场分析可简化为对其旋转面的 2D 磁场分析，在定义单元类型时轴对称面的各部分单元类型可统一使用 4 节点的平面单元 PLANE13 或 8 节点的平面单元 PLANE53，但都必须对单元类型设置轴对称属性。

[059] (3) 定义材料属性。在扬声器磁路结构中，磁钢为永磁体，前夹板和铁碗为铁磁材料，而音圈和空材料则为具有固定磁导率的导磁介质。利用各种材料参数定义具有不同导磁特性的材料类型，如表格 2 所示。

表格 2

空气 (导磁介质)	材料参数: $MUR$ (MURX),
前夹板和磁碗 (铁磁材料)	材料参数: $MUR$ (MURX) 或 $B-H$ 曲线
磁钢 (永磁体)	材料参数: $MUR$ (MURX) 或 $B-H$ 曲线; $H_c$ (抗磁力)
音圈/2D 分析 (导磁介质)	材料参数: $MUR$ (MURX)

[060] (4) 指定材料属性和单元类型。将步骤 (2)、(3) 中定义的单元类型和材料属性关联到相应结构的体单元。图 4 中空气 6 使用 SOLID98，空气 7 使用远场单元 SOLID111。

[061] (6) 保存有限元模型文件。将以上步骤得到的有限元模型保存为有限软件可以识别的 cdb 格式的文件。

[062] 步骤 3: 将保存的 cdb 文件导入有限元软件 ANSYS 中。

[063] 步骤 4: 创建音圈。在 ANSYS 中用创建音圈的功能建立音圈。

[064] 步骤 5: 标定边界。在应用无限单元的空气模型外表面上进行标定边界的操作。

[065] 步骤 6: 对有限元模型求解。在有限元软件中选择求解模块，定义分析类型为静态分析，然后进行求解计算。

[066] 步骤 7: 结果后处理。通过对求解所得原始数据进行处理，可得到  $B$  和  $H$  分布的数据及音圈的  $BI$  值等。其中  $B$  和  $H$  的分布情况可用云图或矢量图的形式显示出来。图 7 为以云图形式表示的  $B$  分布图，图中不同的灰度代表不同大小的  $B$  值。图 8 为 3D 分析时磁感强度的矢量分布图，其中位置 8 处为磁隙与上夹板中磁感强度的矢量在长轴方向垂直平面上的投影，在打印图中难以区分，但是在计算机中以 3D 图像显示时可以清楚的区分。鉴于打印出来的 3D 矢量图的视觉效果不佳，另提供了 2D 磁场分析所得图像以示说明，图 9 为 2D 分析时用磁感线描绘的磁场分布图，图中磁感线的疏密代表  $B$  的大小，磁感线某点的切线方向为该点  $B$  矢量的方向。图 10 为用  $B$  矢量描绘的磁场分布，图中箭头的方向代表某点上磁感强度的方向，箭头的长短代表磁感度的大小。图 11 为用  $H$  矢量描绘的磁场分布，图中以带箭头的短线表示  $H$ ，箭头的方向代表某点上  $H$  的方向，箭头的长短代表  $H$  的大小。音圈中电流方向皆在垂直于音圈截面的方向上，由图 9、图 10、图 11 看出磁隙中的磁场几乎为均强磁场，磁场方向与音圈电流垂直，表明该设计方法正确，设计结果满足要求。

[067] 以上实施实例仅用以说明本发明而非限制本发明所描述的技术方案。尽管本说明书参照上述各个实施实例对本发明进行了详细的说明，但本领域的普通技术人员应该理解，在不脱离以下所附权利要求的所限定的精神和范围的情况下，可做出许多修改、变化或等效替换；而一切不脱离本发明的精神和范围的技术方案及其改进，其均应涵盖于本发明的权利保护范围内。