



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111402852 A
(43)申请公布日 2020.07.10

(21)申请号 201911416118.1

(22)申请日 2019.12.31

(30)优先权数据

62/917,821 2019.01.02 US

(71)申请人 香港科技大学

地址 中国香港九龙清水湾

申请人 香港浸会大学

(72)发明人 沈平 董镇 张晓男 潘杰

麦浩尧 马冠聪

(74)专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理

有限公司 11112

代理人 张娜 顾丽波

(51)Int.Cl.

G10K 11/178(2006.01)

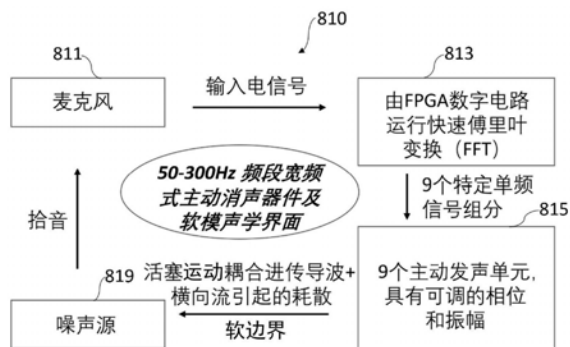
权利要求书3页 说明书11页 附图8页

(54)发明名称

频率离散主动面板的低频吸声和软边界效应

(57)摘要

提供了一种主动声音屏障和使用主动声音元素的声音衰减方法。主动声屏障在边界位置处或边界位置附近具有至少一个被动吸声器。麦克风向分频模块提供输出,在该分频模块中,对多个频率进行滤波,以在各自的频率处提供与所述接收换能器输出的频率段相对应的输出。主动驱动电路以所述频率中的相应频率来驱动多个扬声器或输出换能器,并且所述扬声器或输出换能器的至少一个子集处于或靠近所述屏障。所述扬声器或输出换能器与所述被动吸声器协作,以减小宽频带上的噪声,并实现可电切换的软边界。



1. 一种主动声音屏障,其包括:
屏障,其包括限定的边界位置;
至少一个被动吸声器,其位于所述边界位置处或所述边界位置附近;
麦克风或声音接收换能器,其提供接收换能器输出;
分频模块,所述分频模块包括滤波电路,其对多个频率进行滤波,以提供在各个频率处的与接收换能器输出的频率段相对应的输出;
主动驱动电路输出,其接收各个频率处的输出;以及
多个扬声器或致动器和输出换能器,所述多个扬声器或致动器和输出换能器从主动驱动电路接收驱动信号,以在各个频率处提供主动降噪,一个或多个输出换能器的至少一个子集在所述屏障处、邻近所述屏障或足够靠近所述屏障,所述多个扬声器或致动器和输出换能器与被动吸声器协作。
2. 根据权利要求1所述的主动声音屏障,其中,
所述滤波器电路对包括 n^2 个并联的L-C电路的多个频率进行滤波,所述并联的L-C电路被构造为将输入电压时间序列分解为 n^2 个预定频率分量,其中 n 是整数值, n^2 个预定频率分量将来自频率选择滤波器的输出提供到所述主动驱动电路。
3. 根据权利要求1所述的主动声音屏障,其中,
所述滤波器电路对多个频率进行滤波,所述滤波器电路包括数字FFT处理电路,所述数字FFT处理电路被构造为将输入电压时间序列分解为 n^2 个预定频率分量,其中, n 是整数值,所述 n^2 个预定频率分量将来自所述数字FFT处理电路的输出提供到所述主动驱动电路,
其中,所述主动驱动电路在多个频率下驱动所述多个扬声器或致动器或者输出换能器中的至少一个,
其中,所述主动驱动电路以 n^2 个预定频率分量中的单个离散频率分量驱动所述多个扬声器或致动器和输出换能器中的至少一个,其中 n 是整数值, n^2 个预定频率分量提供来自所述滤波器电路的输出。
4. 根据权利要求1所述的主动声音屏障,其中,
所述主动驱动电路在多个频率下驱动所述多个扬声器或致动器或输出换能器中的至少一个。
5. 根据权利要求1所述的主动声音屏障,其中,
所述主动驱动电路以 n^2 个预定频率分量中的单个离散的频率分量来驱动所述多个扬声器或致动器或输出换能器中的至少一个,其中 n 是整数值,所述 n^2 个预定频率分量提供来自所述滤波器电路的输出。
6. 根据权利要求1所述的主动声音屏障,还包括:
被动吸声层,其位于所述限定的边界位置处或所述限定的边界位置附近;以及
所述多个扬声器或致动器和输出换能器的至少一个子集,其位于所述吸声层处或所述吸声层附近,其中,
所述多个扬声器或致动器和输出换能器的多个工作频率的至少一个子集具有用于在比所述吸声层自身的预定吸声频率范围低的频率处的频率选择的谐振频率。
7. 根据权利要求6所述的主动声音屏障,其中,
所述多个频率的子集至少具有高达800Hz的谐振频率的子集。

8. 根据权利要求6所述的主动声音屏障,其中,
所述多个频率的所述子集至少具有高达400Hz的谐振频率的子集。
9. 一种使用主动声音元素的声音衰减方法,所述方法包括:
建立限定的边界或屏障位置作为屏障;
在所述边界位置处或附近安装被动吸声层;
接收与在邻近或靠近所述屏障的区域内发生的声音相对应的换能器输出;
使用单个或多个频率选择滤波器以在相应的频率选择滤波器的频率处提供与所接收的换能器输出的频率段相对应的输出;
将所述频率选择滤波器的输出提供给主动驱动电路,并利用所述主动驱动电路产生一个或多个主动降噪驱动输出信号;以及
通过将单个或多个输出换能器的至少一个子集放置在所述屏障处、邻近所述屏障处或足够靠近所述屏障处,在所述屏障处利用所述主动降噪驱动输出信号驱动所述一个或多个输出换能器,从而以所述频率选择滤波器的频率提供主动降噪,所述多个扬声器或输出换能器与被动吸声层的阵列协作。
10. 根据权利要求9所述的声音衰减方法,还包括:
在所述主动声音屏障处或接近所述主动声音屏障处提供至少一个被动吸声器。
11. 根据权利要求9所述的声音衰减方法,还包括:
使用包括 n^2 个并联的L-C电路的滤波器电路作为所述单个或多个频率选择滤波器,所述并联的L-C电路被构造为将输入电压时间序列分解为 n^2 个预定频率分量,其中 n 是整数值,所述 n^2 个预定频率分量将来自所述频率选择滤波器的输出提供到所述主动驱动电路。
12. 根据权利要求9所述的声音衰减方法,还包括:
使用包括数字FFT处理电路的滤波器电路作为所述单个或多个频率选择滤波器,所述数字FFT处理电路被构造为将输入电压时间序列分解为 n^2 个预定频率分量,其中 n 是整数值,所述 n^2 个预定频率分量将来自所述数字FFT处理电路的输出提供到所述主动驱动电路。
13. 根据权利要求9所述的声音衰减方法,还包括:
以多个频率驱动所述输出换能器或超材料谐振器中的一个或多个。
14. 根据权利要求9所述的声音衰减方法,还包括:
以所述预定频率分量的单个离散的频率分量驱动所述输出换能器中的一个或多个。
15. 根据权利要求9所述的声音衰减方法,还包括:
在所述吸声表面处或靠近所述吸声表面处设置所述限定的边界或屏障位置,所述吸声表面具有一个或多个最佳吸声频率范围;以及
将所述一个或多个输出换能器的至少一个子集定位在所述吸声表面处或靠近所述吸声表面处,其中,
所述频率选择滤波器的至少一个子集提供用于在比所述吸声表面的最佳吸声频率范围低的频率处频率选择的谐振频率。
16. 根据权利要求9所述的声音衰减方法,还包括:
将吸声表面定位在所述限定的边界位置处或所述限定的边界位置附近,所述吸声表面包括超材料并且具有一个或多个最佳吸声频率范围;以及
将所述多个扬声器或输出换能器的至少一个子集定位在所述吸声表面处或所述吸声

表面附近,其中,

所述频率选择滤波器的至少一个子集提供用于在比所述吸声表面的最佳吸声频率范围低的频率处的频率选择的谐振频率。

17. 一种主动声音屏障,包括:

限定的边界或屏障位置,作为屏障;

被动吸声装置,其位于所述限定的边界或屏障位置处或所述限定的边界或屏障位置附近;

接收与在邻近或靠近所述屏障的区域内发生的声音相对应的换能器输出的装置;

单个频率选择滤波器或多个频率选择滤波器,在各个频率选择滤波器的频率处提供与
所述接收的换能器输出的频率段相对应的输出;

将来自所述频率选择滤波器的输出提供给主动驱动电路并利用所述主动驱动电路产生一个或多个主动降噪驱动输出信号的装置;以及

通过将一個或多个输出换能器的至少一个子集放置在所述屏障处、邻近所述屏障处或
足够靠近所述屏障处来在所述屏障处利用所述主动降噪驱动输出信号驱动所述一个或多个
输出换能器的装置,以在所述频率选择滤波器的频率处提供主动降噪,所述输出换能器
与所述被动吸声装置协同。

18. 根据权利要求17所述的主动声音屏蔽,还包括:

所述单个或多个频率选择滤波器包括滤波器电路,所述滤波器电路包括 n^2 个并联的L-C
电路,所述并联的L-C电路被构造为将输入电压时间序列分解为 n^2 个预定频率分量,其中 n
是整数值,所述 n^2 个预定频率分量将来自所述频率选择滤波器的输出提供到所述主动驱动
电路。

19. 根据权利要求17所述的主动声音屏蔽,还包括:

所述驱动一个或多个输出换能器的装置,以多个频率驱动所述输出换能器中的一个或
多个,或者

所述驱动一个或多个输出换能器的装置,以所述预定频率分量中的单个离散的频率分
量来驱动所述输出换能器中的一个或多个。

20. 根据权利要求17所述的主动声音屏蔽,还包括:

吸声表面,其形成所述声音屏障的一部分,并且所述限定的边界或屏障位置位于吸声
表面处或吸声表面附近,所述吸声表面具有一个或多个最佳吸声频率范围;以及

所述一个或多个输出换能器的至少一个子集,其位于所述吸声表面处或所述吸声表面
附近,其中,

所述频率选择滤波器的至少一个子集具有用于在比所述吸声表面的所述最佳吸声频
率范围低的频率处的频率选择的谐振频率。

频率离散主动面板的低频吸声和软边界效应

技术领域

[0002] 本公开涉及声吸收和主动降噪 (ANR)。更具体地,本公开涉及用主动壁板的主动吸声板和软边界。

背景技术

[0004] 声音在空气中以绝热形式传播,且几乎不会消散。通常,在吸声材料中,消散主要通过粘性边界层内的相对运动以及通过破坏声音传播的绝热特性的固体的热传导而集中在固体-空气界面处。声音/噪声消散的这种基本性质决定了大多数常规的吸声材料在结构上是多孔的,例如声学海绵、矿物棉或玻璃棉,其具有大的表面体积比,使得消散系数可能较大。总吸收取决于消散系数与能量密度的乘积;因此,在过去的十年期间,使用声学超材料来吸收声音的兴趣激增。这是因为声学超材料的许多新颖性能是由局部谐振引起的,局部谐振会导致较大的能量密度,从而导致有效的能量消散。尤其是,声学超材料可以在低频下以极薄的样品厚度进行吸收,这是传统吸收材料无法实现的壮举。

[0005] 传统的多孔吸收材料和声学超材料吸收材料都具有缺点。传统的吸收材料具有固定的吸收谱,其只能通过改变样品的厚度进行调整,而声学超材料由于导致声学超材料的奇异性能的局部谐振而存在固有的窄频带的问题。例如,虽然声学超材料可以在低频下以非常薄的样品厚度完美吸收,但吸收峰本来就非常窄;即,仅在特定的设计频率下才能获得良好的吸收。这与在大多数应用中通常需要宽频吸收这一事实相矛盾。

[0006] 对于传统的吸收材料,低频总存在问题,因为需要大体积的样品来进行高吸收,这在许多应用中是不切实际的。

发明内容

[0007] 在屏障处提供主动声屏障,其中屏障包括限定的边界位置。在边界位置处或边界位置附近设置至少一个被动吸声器。麦克风或声音接收换能器向分频模块提供接收换能器输出,其中分频模块包括对多个频率进行滤波的滤波器电路。滤波器电路提供与在各个频率处的接收换能器输出的频率段相对应的输出,并且主动驱动电路输出在各个频率处的接收所述输出。多个扬声器或致动器和输出换能器从主动驱动电路接收驱动信号,以在各个频率上提供主动噪声降低。输出换能器的至少一个子集在屏障处或屏障附近。多个扬声器或输出换能器与被动吸声器配合使用,以减少宽频噪声并实现可电切换的软边界。

附图说明

[0008] 图1为示出了响应入射声波的具有离散运动段的主动壁板的示意图。

[0009] 图2A至图2E是示出了基于法布里-珀罗谐振器的被动吸声器的图。图2A为示出了被动吸声器的示意图。图2B为图2A中示出的消声器的对应照片。图2C为图2A和图2B的吸声器上方没有声学海绵的表面阻抗曲线的图示。图2D和图2E为示出了在反谐振频率(其为位于两个FP通道的谐振频率之间的频率,如图2D中的左和右阴影正方形表示的)处的渐逝波

横向压力差的完整波形模拟的压力图。

[0010] 图3为示出了用COMSOL模拟软件的模拟几何的示意图。

[0011] 图4为示出了响应于任意远场平面波源在远场表面时域中的压力调制的COMSOL结果的曲线图,其中主动壁的振幅的改变通过可调整运动段的平均面积幅度的值K来调整。

[0012] 图5为示出了当将三个内插单频分量添加到入射波中时反射波的频域分量的COMSOL结果的曲线图。

[0013] 图6A至图6E为示出了主动面板表面附近的横向气压梯度的COMSOL模拟结果。图6A至图6D为示出了的压力梯度的谱图。图6E为针对产生图6A和图6B的压力梯度的面板的频率响应的图示。

[0014] 图7A和图7B为示出了输入和输出信号的模拟时间序列的L-C电路的示意图(图7A)和曲线图(图7B)。

[0015] 图8为被构造为宽频吸收器和软边界的主动吸声器和软边界面板的原型构造的示意性框图。

[0016] 图9为示出了出于产生大振幅、低失真、低频声音的目的在原型中如何使用弹簧质量谐振器的示意图。

[0017] 图10为具有由两个桥接弹簧悬挂的中央质量板的电镀挠曲谐振器的照片图像。

具体实施方式

[0018] 总述

[0019] 本技术涉及一种包括离散面板的主动系统,每个离散面板响应于入射波以固定频率运动,这可以影响总吸收以及形成软边界。

[0020] 通常期望通过集成离散谐振器来获得宽频和可调整的吸收并调整边界阻抗特性。当声波或电磁波入射到结构或材料的表面上时,将以反射波加穿透结构或材料的波的形式产生响应。这种波响应必须具有因果关系,即,在任何给定时刻的波响应只能取决于该时刻之前发生的情况,这称为因果原理。换言之,未来的波不会影响现在的响应。

[0021] 当以数学语言表达时,这种直观的且看似微不足道的陈述可能具有深刻的含义,其涉及几乎所有物理领域。在19世纪20年代,两位物理学家汉斯·克喇末(Hans Kramers)和拉尔夫·克勒尼希(Ralph Kronig)由因果原理独立地推导了现在被称为Kramers-Kronig关系的电磁介电函数的实部和虚部之间的关系,其被认为是电动力学领域的基础知识。因果原理的一个鲜为人知的含义是将样品厚度与电磁波吸收谱联系起来的不等式。本公开导出该因果约束的声学形式,其具有以下形式:

$$d \geq \frac{1}{4\pi^2} \frac{B_{eff}}{B_0} \left| \int_0^\infty \ln[1-A(\lambda)] d\lambda \right| = d_{min}, \quad (1)$$

其中

$\lambda = \frac{2\pi v_0}{\omega}$ 表示空气中的声波波长,

v_0 为空气中的声速,

ω 为声波的角频率,

$A(\lambda)$ 为吸收谱,

B_{eff} 为吸声结构在静态极限下的有效体积模量，

B_0 为空气的体积模量。

[0022] 可以将等式(1)解释为,对于给定的样品厚度 d ,由等式(1)右侧指示的积分给出的吸收源的数量有限。对于以低频为中心的吸收谱,所需的样品厚度量要比吸收谱的相同频率宽度以较高频为中心的所需的样品厚度量多得多。

[0023] 通过解决针对特定的波吸收谱的样品厚度的最终下界的问题,等式(1)基本上解决了上面提出的第一个问题。为了吸收低频可听范围(例如20Hz至400Hz)的声音,吸收器所需的最小厚度($d > 15\text{cm}$)可能太大,以致无法在更广泛的应用范围中使用。所公开的技术通过将主动部件应用到所公开的宽频吸声器的集成设计策略中来打破低频吸收器厚度的限制。这些频率范围和厚度作为非限制性示例给出,因为可以应用其他范围。通过非限制性示例,频率范围可以包括低于20Hz的频率,并且可以包括高达600Hz或高达800Hz的频率。当然也可以提供高达并超过人类听力正常范围的频率响应。

[0024] 基于既有的研究经验,自然会产生两个问题。首先,对于特定的波吸收谱,样品厚度是否有最终的下限?其次,是否可以通过集成以不同频率工作的多个局部谐振器来扩宽声学超材料的吸收频谱?最近的一项研究突破肯定地回答了这两个问题。响应范围更宽的吸收超材料已经由香港静音科技有限公司使用基于法布里-珀罗谐振器(Fabry-Pérot resonators)的被动吸声器商业化。

[0025] 最近已证明设计宽频吸收的集成方案在使吸收谱适应噪声谱方面非常成功。通过根据集成方案的基于法布里-珀罗谐振器的被动吸声器的大规模生产(诸如香港静音科技有限公司生产的那些),宽频吸收也已成功实现商业化。

[0026] 本公开提供了一种主动声学超材料壁板,其可以吸收包括宽频低频声音分量的宽频声音且具有其它可调声学功能。由麦克风收集的输入声音进入滤波电路,其中选择 n^2 个不同的预定单频分量以符合目标宽频吸收谱。 n^2 个信号被调整为与入射源的相同频率部分同相,并馈入包括单独的主动面板段的 $n \times n$ 阵列的主动单元,其中 n 为整数值。每段包括微型扬声器/致动器和由致动器激发的机械谐振器,以产生具有低失真和大动态范围的低频声波。

[0027] 每个段的运动以固定频率进行。 n^2 个段的运动分为两个分量。在所有段上的面积平均运动(命名为活塞模式)对传播波有耦合贡献。减去面积平均分量的运动构成另一个分量,其特征是:来自不同段运动之间的横向相互作用而产生的 $\sim n^4$ 个意外的额外频率分量,其可以有效地使吸收谱平滑化。同时调整 n^2 个段的运动幅度可以使功能从硬壁→总吸收器→软边界以及它们之间的任何位置转移。

[0028] 离散谐振器的频率选择策略

[0029] 在具有可用连续谐振的理想情况下,用于实现目标阻抗谱 $Z(f)$ 的谐振频率的最优选择满足简单的微分方程,该方程由下式给出:

$$\frac{df}{d\bar{n}} = 2\phi \frac{Z(f)}{Z_0} f \quad (2)$$

其中

ϕ 为被谐振器占据的表面积分数,

Z_0 为空气阻抗,

\bar{n} 是频率的连续线性指标, 范围为0到1。

[0030] 对于所公开的主动吸收器, 可以通过相消干涉或所谓的“相干完美吸收”或CPA来实现等效效果。对于在频率 f 处的总吸收, 期望 $Z(f)/Z_0=1$ 。这一平坦数学形式的 $Z(f)$ 表示等式(2)具有指数形式解。

[0031] 假设只能选择 n^2 个离散频率, 那么从等式(2)可以得出, 这些频率应遵循以下选择规则:

$$f_m = f_1(1+2\varepsilon)^{n^2-1}, \quad (3)$$

其中参数 ε 由频谱范围确定。

[0032] 例如, 如果下限为50Hz, 上限为300Hz, 且离散频率总数为9, 则 ε 必须满足以下等式:

$$300 = 50(1+2\varepsilon)^8 \quad (4)$$

[0033] 通过使用主动壁板来打破因果关系约束

[0034] 图1是示出了响应于入射声波的具有离散运动段的主动壁板的示意图。根据因果关系约束, 宽频低频声音的吸收必然与可能不适用于大多数应用的厚样品相关联。为了打破该限制, 本公开提出了使用主动壁板, 其包括独立移动的段, 每个段以固定频率致动, 其振幅和相位参照入射声波的相同频率分量进行调整。

[0035] 主动面板的单个单元的横向尺寸应该是所公开技术所考虑的相关频率范围内的亚波长。主动面板的一个重要方面是将分段面板的运动分为两个分量。一个分量(表示为活塞分量)表示面板的区域平均运动(在单个单元中的所有段上)。可以将面板构造成使得活塞分量是耦合到传播的入射波和反射波的唯一分量。渐逝波构成了另一个分量, 其不耦合到传播波。相反, 渐逝波远离主动面板而呈指数衰减。

[0036] 为了示出两个分量的耦合/非耦合性质, 使用波矢量 \vec{k} 和频率 $\omega = 2\pi f$ 来表征声波。令 k_{\parallel} 和 k_{\perp} 分别表示与主动面板/散射边界平行和垂直的声波矢量, 它们必须服从色散关系:

$$k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \quad (5)$$

[0037] 当面板的各段处于运动中时, 亚波长尺度表示除了 $k_{\parallel}=0$ 分量(确切地说是活塞模式)以外, 其他模式将满足以下条件:

$$k_{\parallel} > \frac{2\pi}{2d} \gg \frac{2\pi}{\lambda} \quad (6)$$

[0038] 因此, 从色散关系可以得出, 这样的模式必须满足 $k_{\perp}^2 < 0$, 这意味着 k_{\perp} 是纯虚数, 即, 这些模式本质上是渐逝的。另一方面, 对于 $k_{\parallel}=0$ 分量而言, k_{\perp} 是实数, 因此可以与传播的入射波和反射波耦合/相互作用。

[0039] 渐逝波的性质意味着这些波只能存在于主动壁中或主动壁附近, 并且相关的气压调制沿水平/横向方向。在竖直方向上, 波幅度呈指数衰减, 并且沿该方向没有能量流。渐逝波的本质意味着它们无法传播到远场。相反, 主动面板的运动的活塞模式满足:

$$\begin{aligned} k_{\parallel} &= 0, \\ k_{\perp} &= \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

[0040] 这是主动壁中耦合到入射波和反射波的唯一分量。

[0041] 渐逝波的吸声

[0042] 图2A至图2E是示出了基于法布里-珀罗谐振器的被动吸声器的图。图2A是示出被动吸声器的示意图。图2B是图2A中所示的吸声器的相应照片。。图2C是在图2A和图2B的吸声器上方没有声学海绵的情况下的表面阻抗曲线的图示。图2D和图2E是示出了在非常靠近通道口的表面处的渐逝波的横向压力差的全波形模拟的压力图。图2D和图2E中的压力差是在反谐振频率处获取的,反谐振频率是位于两个FP通道的谐振频率(在图2D中显示为左侧和右侧阴影正方形)之间的频率。由箭头指示的图2C中的频率为大于约600Hz。根据达西定律,这种随着时间的推移而振荡的横向压力差可能引起横向气流的振荡,从而在诸如声学海绵的多孔介质中发生这种气流时消散声能。

[0043] 尽管以上的分析表明渐逝波对传播的声场没有贡献,但是它们确实对散射边界附近的水平能量流有所贡献,就像图2D和图2E中示出的那样。通过利用此功能,当在吸收单元的顶部放置声学海绵的薄层时,基于法布里-珀罗谐振器的被动吸声器可以实现非常好的宽频吸声。在这种结构中,渐逝波固有的横向空气流(现在在消散介质(声学海绵)内部发生)可以有效地消散谐振之间的那些频率处的声能。

[0044] 基于频率离散的主动段的主动吸收板

[0045] 所公开的技术使用两个重要要素来衰减声音。一个要素是通过将入射声波的连续时域信号分解为离散的单个频率来实现宽频响应,其频率选择由等式(2)给出的积分方案决定。这些离散的频率分量(振幅和相位由入射波分解给出)将以电信号的形式用于激活主动面板的各个段。另一要素是利用渐逝波的振荡的横向气流来吸收声能。作为面板中不同段的非相关运动的结果,必然产生振荡的横向气流。期望通过在主动面板附近使用例如消音海绵的消散介质来使这种声音吸收最大化。应当注意,在吸收的情况下,振荡的横向空气流可以具有与所述段的频率不同的许多频率分量,从而填补了离散化方案固有的频率间隙。

[0046] 本主动设计具有许多优点。首先,将输入时间序列信号分解为频率分量是简单的频率滤波或傅立叶变换过程,其可以通过硬件(模拟L-C电路或数字处理电路)执行快速傅立叶变换(FFT)来完成。如大多数主动声学方案一样,不需要反馈。其次,不需要必须对实时控制做出快速响应的昂贵的扬声器。这里,主动分量各自处于单个频率,使得谐振器可用于放大该频率的输入致动信号。即,可以以低成本实现较大的动态范围。第三,几何形状是平板,使得其可以在较大的区域中用于大空间中的声音处理。第四,利用渐逝波可使吸收谱接近均匀且宽频。

[0047] 为了说明设计的概念,在FEM软件COMSOL Multiphysics程序中建立了模拟模型。该模型的几何结构示出在图3中。图3是示出了使用COMSOL模拟模型的模拟几何结构的示意图。黑色正方形的四个段各自以具有参考入射声波的相同频率分量的幅度和相位的固定频率致动。

[0048] 在该模型中,选择四个分别由 f_1, f_2, f_3, f_4 表示的任意离散频率作为分解频率(不按照等式(2)给出的频率复合方案),并且(所建模的)主动壁四个单元面板将按照这四个单个频率值移动。为了简化模拟,使用了由相同的四个频率分量组成的入射波。

[0049] 图4是COMSOL结果的图形图。该图示出了任意远场表面在时域上的压力调制,其中

主动壁的振幅变化通过改变K来调整。对于K=1,主动面板的活塞分量与具有相同的时域幅度变化的入射波完全同相。当发生这种情况时,由于入射声压在运动面板上起作用,因此入射波被完全吸收(没有反射)。对于K<1,该反射接近K减小的硬壁的反射。对于K>1,可以看到反射波改变符号;即,其表现为对于K<1的反射波的镜像。换言之,这建立了“软”壁行为,其反射相较于硬壁反射获得了符号变化。

[0050] 由于仅活塞式运动分量对远场有贡献,因此每个段的运动的致动振幅必定是入射波中相同频率分量的振幅的 $1/\phi$ 倍,其中 ϕ 表示该段在主动面板单元中的面积分数。只有这样做,活塞运动才能具有与入射波中相同频率分量的振幅相对应的正确振幅。如果主动面板具有 n^2 个段,则每个段的运动幅度大约是该特定频率分量的入射波幅度的约 n^2 倍。如此大的幅度将意味着由渐逝波引起非常强的横向流。

[0051] 为了改变活塞分量的运动幅度,将通过乘数K来同时调整用于所有段的致动信号的强度。在模拟时,将四个单元的相位固定为与入射波分量中的相位完全相同,调整因子K改变,以便观察反射在时域中如何变化。本质上,因子K调整活塞模式的振幅。

[0052] 在图4中,K=1表示主动壁的活塞分量的运动幅度与入射波的幅度相同,并且它们也同相。时域曲线清楚地示出,当K=1时,几乎没有压力调制,因此没有反射波,这意味着全吸收。当主动壁的振幅超过K=1时,会发生相位变化,并且主动壁被调整为软声边界。因此,对于主动壁与入射波匹配的所有单个频率值,主动壁的同相运动可以根据活塞分量的振幅充当完美的吸收器或软边界。

[0053] 图5是示出了将三个内插单频分量添加到入射波中时反射波和入射波的频域分量的COMSOL结果的图形示图。入射波中的三个内插单频分量用 f_{12}, f_{23}, f_{34} 表示。

[0054] 三个内插的单频分量与之前的四个频率不对应,这导致主动壁与入射波之间的相互作用在总共七个单频入射分量处发生。主动壁保持为具有与之前相同的四个单元,并具有频率 f_1, f_2, f_3, f_4 。图5通过在K=1的情况下对反射波进行傅立叶变换来给出频域分量,其中绿色曲线是反射波的频率分量,同时蓝色曲线是入射波的频率分量。可以看出,在这种情况下,在这三个内插频率处出现了3个反射波峰,这意味着内插频率被完全反射。

[0055] 为了吸收作为主动面板上的选定离散频率之间的中间值的那些入射频率分量,将产生横向空气流的渐逝波用作消散声能的方式。模拟结果表明,这种横向空气流在选定的离散频率之间可以具有许多频率分量中间值,这将有利于吸收这样的中间频率分量。在流

体动力学中,由流体流消散的能量由 $E = \frac{1}{2} Q \nabla p$ 给出,其中Q表示与振荡的压力梯度同相的流速, ∇p 表示横向压力梯度。由于达西定律指出 $Q = (\kappa/\eta) \nabla p$,其中 κ 是渗透率, η 是粘度,因此综上能量消散可以评估为:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\kappa}{\eta} |\nabla p|^2, \quad (8)$$

[0056] 根据等式(8),基于COMSOL模型模拟的结果进行计算,其目的是寻找主动面板的表面上的横向压力梯度的平方,即, $|\nabla p|^2$ 。

[0057] 图6A至图6E是示出了主动面板表面附近的归一化横向空气压力梯度的平方的COMSOL模拟结果。图6A至图6D是示出了归一化的横向压力梯度的平方的彩色谱图。图6E是针对产生图6A至图6D的横向压力梯度的面板的频率响应的图示。

[0058] 图6A至图6D的图示示出了在与声波的拦截或入射一致的四个任意选择的时间点上经入射波最大压力梯度平方归一化的归一化横向压力梯度平方。图6E的图示给出了横向梯度的频域分量,其由垂直箭头指示。这里,对于 2×2 阵列,共有14个频率分量,其中5个超出300Hz范围。

[0059] 图6A至图6E的彩色谱图是基于无量纲参数 $|\nabla p_{lateral}|^2 / \left(\frac{p_0}{\lambda_0/4} \right)^2$ 。对于时域中四个任意选择的点中的每个点,可以通过这些图中的颜色来标识横向空气流。归一化因子 $\left(\frac{p_0}{\lambda_0/4} \right)^2$ 表示入射波的最大压力梯度。从图6A至图6D可以看出,横向压力梯度的平方 $|\nabla p|^2$ 可以比入射波中的最大值大得多。因此,根据等式(8),如果空气流过放置于主动面板附近的给出较大值 $\frac{\kappa}{\eta}$ 的吸声海绵,则可以预期会产生大量能量消散。为了检视这些横向流的频域行为,在图6E中示出了傅立叶变换结果。与入射波中的三个内插频率分量相比,存在更多的横向流动频率,其中许多可以近似重合或接近内插频率。这意味着,当将吸音海绵放置在主动面板的顶部时,横向流可吸收中间频,从而导致宽频吸收谱。

[0060] 由于横向流/消散是由具有不同频率的主动壁段之间的相互作用导致的,因此用于横向流的频率分量的数量应大致增加为 n^4 ,其中 n^2 是主动面板单元内的段数。因此,如果单元的段数增加到9(基于 3×3 阵列),则可期望宽频吸收谱。

[0061] 结果是,通过设计具有(在单个频率下)独立移动的分段壁单元且具有放置在其表面上的薄层吸音海绵的主动壁可以实现以下功能:

(1) 入射声波的宽频近全声吸收,其中,在选定频率处的全吸收的生效因于主动壁与入射波同相运动时被入射波做功,其它频率吸收的生效因于渐逝波的横向空气流。最终结果是宽频、相当平滑的总吸收谱。

(2) 通过将K值调整为超过1 ($K > 1$) 来增加活塞分量的振幅,可以对主动面板的频率分量产生软边界效应。

(3) 通过在0与2之间连续调整K值,可以调整主动面板以呈现硬壁反射、小于硬壁反射、总吸收、阻抗接近零的完整软边界或阻抗在零与空气的阻抗之间的软边界。

[0062] 模拟L-C电路

[0063] 在初始方法中,模拟L-C电路用于建立基于L-C电路的可调面板。在这种构造中,通过将主动部件的相位从与声源完全反相调整到完全同相来实现面板功能从吸声器到声学边界的转变。

[0064] 后来的模拟示出了另一种技术,其可以更方便且有效,其中可以使相位与声源的相位始终保持同相。通过调整主动部分的振幅(与前面部分中描述的方式相似,其将K从 $K > 1$ 调整为 $K = 1$,再到 $K < 1$),使相位与声源保持同相,面板的声学行为会从软边界($K > 1$)变为吸声器($K = 1$),再变为硬壁($K < 1$)。在模拟L-C电路的该部分中,调整方案应采用这种方式,而不应为将相位从同相(相长)调整到反相(相消)的原始方式。

[0065] 在非限制性示例中,与最初提出的压电扬声器的形式相异,主动模块采取由微型扬声器或致动器驱动的弹簧质量谐振器的功能形式。

[0066] 总体而言,模拟L-C电路应作为较早描述的FFT计算部件/数字电路的硬件组件的替代手段,因此,无论选择FFT电路还是L-C模拟电路,本发明的所有其他组件都应保持一致。对于模拟L-C滤波方法,模拟结果表明由模拟L-C电路选择的输出信号与输入时间序列信号中的目标信号极为吻合,如下所示。

[0067] 图7A中示出的典型L-C电路的谐振频率由 $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 表示。该L-C谐振电路可以滤除输入时间序列信号中的所有其他频率分量,仅将 f_0 分量保留为输出信号,如图7B中由 V_{out} 线所示。在图7B中, V_{f_0} 线表示输入时间序列信号 V_{in} 中的 f_0 频率分量。可以看出,滤波结果 V_{out} 与目标源 V_{f_0} 之间的一致性非常好,具有相同的幅度并且没有相移。这里,通过合成范围从5Hz到15Hz,步长为0.1Hz的101个单频率分量来生成时间序列信号 V_{in} 。 V_{in} 在图7B中被示出为不规则的大幅度曲线。在101个频率中,应注意10Hz分量,其是较早提到的 V_{f_0} 信号。

[0068] 对于L-C谐振电路,选择的参数为:

$$1/(2\pi\sqrt{LC}) = f_0 = 10 \text{ Hz 并且 } \sqrt{L/CR^2} = 200, \quad (9)$$

[0069] 由于这是线性电路,因此可以容易地计算输出信号 V_{out} 。对于频率 f 的输入信号分量(即, $V_{in}(f)$), 输出信号由以下关系式确定:

$$V_{out}(f) = A_m(f) \exp(i\theta(f)) \cdot V_{in}(f), \text{ 式中 } A_m(f)^{-1} = 1 + \frac{L}{CR^2} \left(\frac{f^2 - f_0^2}{ff_0} \right)^2 \quad (10)$$

以及,

$$\theta(f) = -\arctan \sqrt{\frac{L}{CR^2}} \left(\frac{f^2 - f_0^2}{ff_0} \right), \quad (11)$$

[0070] 对于 $f=f_0$, L-C电路谐振的频率分量, $A_m=1$ 和 $\theta=0$, 这意味着将不通过L-C谐振电路来改变输入 f_0 分量(幅度或相位)。对于其他输入频率分量, A_m 迅速降至零, 这意味着它们将被滤除。由 V_{out} 曲线示出了模拟的输出时间序列信号。可以看出, V_{out} 和 V_{f_0} 曲线彼此非常吻合(基本重叠), 清楚地示出了L-C谐振电路可以用作模拟滤波器, 以从输入时间序列信号中选择出具有期望的频率的分量。这里, 无量纲因子 $\sqrt{L/CR^2}$ 被视为充当控制频率分量选择的有效性的滤波器。较高的 $\sqrt{L/CR^2}$ 因子将在频域中增强滤波效果。滤波器选择的一个非限制性示例是 $\sqrt{L/CR^2} \geq 200$ 。

[0071] 为了使谐振频率在 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 处保持不变的同时获得高值的因子 $\sqrt{L/CR^2}$, 一种有效的方法是将许多L-C滤波器串联。如果所有的L-C滤波器都具有完全相同的L值和C值, 则谐振频率仍将与单个L-C滤波器相同, 但滤波效果非常明显。即, 串联的L-C滤波器电路将滤除除 f_0 以外的几乎所有其他频率, 甚至频率非常接近 f_0 的分量也将被滤除。此外, 如果该限制放宽了所有单个L-C滤波器完全相同的条件, 则串联滤波器电路整体上将具有偏

离 f_0 的谐振频率,因此,如果针对一些单独的滤波器有目的地选择L值和C值,则这可能是一种调整总滤波频率的方法。

[0072] 在实际应用中,应该有n个这样的并列的L-C电路,每个电路具有:

$$f_i = 1 / \left(2\pi \sqrt{L_i C_i} \right) \quad , \quad (12)$$

以及

$$\sqrt{L_i / C_i R_i^2} = 200, \quad (13)$$

其中

$i = 1, 2, \dots, n^2$, 其中, n^2 为前述的离散主动段的总数。

[0073] 原型构造

[0074] 图8是被构造为50-300Hz宽频吸收器和软边界的主动吸声器和软边界面板的原型构造的示意性框图。描绘了:麦克风811;现场可编程门阵列(FPGA)处理器813,其提供单频输出;以及放大器和扬声器输出815。在非限制性示例中,FPGA对九个单频输出执行快速傅立叶变换(FFT),并且由放大器和扬声器输出815提供相应数量的九个放大器和扬声器输出。扬声器输出815通过响应于由麦克风811检测到的声音而提供活塞运动耦合和横向消散来减少噪声源819的声音。

[0075] 为了将该设计方案付诸实践,构造了一种基于电子电路的装置,其旨在利用如图8中描绘的 3×3 阵列($n=3$)吸收50-300Hz频率范围内的宽频声音。高灵敏麦克风检测入射的噪声信号,并将其输入到电路的处理单元。该处理器的电子构造是基于现场可编程门阵列(FPGA)架构,并执行快速傅立叶变换(FFT)以输出具有由积分方案确定的频率值的选定的九个单频信号。这九个信号通道分别馈入九个单独的扬声器。九个扬声器形成三乘三的阵列,并用作用于先前的COMSOL模拟中建模的主动壁单元的致动器。通过使用致动扬声器来激发调整到选定频率的谐振器来进一步放大每个扬声器的动态范围。调整每个扬声器的声音,使得其相位与入射波中的对应部分的相位相同。为了调整信号馈入的幅度,可以使所有其他频道静音并调整馈入信号强度,直到来自谐振段的最终反射波消失为止。由此达到 $K=1$ 的条件。通过对每个频道进行此操作,可获得针对每个频道的“正确”幅度。

[0076] 当制造该第一原型时的一个主要问题是,在低频范围处,似乎必须依靠非常昂贵且大型的扬声器来产生大响度且低失真的声音。由于设计的一个目标是使装置尺寸紧凑且成本低,因此绕开了传统方法,从而避免了使用大型且昂贵的高保真扬声器。

[0077] 图9是示出了出于产生大振幅、低失真、低频声音目的在原型中如何使用弹簧质量谐振器的示意图。图10是具有由两个桥接弹簧悬挂的中央质量板的电镀挠曲谐振器的照片图像。

[0078] 为了装置的预期的批量生产,可以通过其他方式来实现使用弹簧质量谐振器的想法。具体地,该弹簧质量谐振器可以被替换为具有简单设计图案和切口的非常薄的金属挠性板谐振器,使得与固定框架连接的可移动部件可以在谐振时被激发振动。相似地,可以使用压电换能器。

[0079] 由于电子滤波/调制部件可以与麦克风-扬声器-反馈部件分离,因此单个面板的尺寸将相当紧凑。通过非限制性示例的方式,单个面板的尺寸在横向尺寸上将10-20厘米

米,在厚度上仅为几毫米,然而,预计尺寸会有很宽的变化。因为其紧凑的物理尺寸,所有这些可转换的吸收器或软边界可以模块化以适合特定的应用环境。

[0080] 主动面板作为低频扬声器的使用

[0081] 如果致动器的输入来自立体声放大器(而不是来自麦克风),则主动面板将充当新颖的频率离散的低频扬声器单元。在非限制性示例中,在“换能器”或“扬声器”指主动面板中的单频谐振分段部分的意义上,每个主动面板是换能器或扬声器的等同物。

[0082] 从图4可以看出,对于吸收性能, $K=1$ 导致主动壁的有效阻抗与如通过入射波看到的空气的有效阻抗 Z_0 相匹配。在没有在此由四个离散频率组成的入射波的情况下,主动面板将充当扬声器单元,其产生声音时间序列,该时间序列恰好是(减去的)入射声波的再现。假设立体声放大器的输入具有连续的频谱(而不是模拟中的四个频率),则为了完全重现所考虑的频率的整个范围,重要的是要根据等式(2)和等式(3)来选择谐振器的频率模式,并且不像在模拟情况下那样任意选择。

[0083] 换言之,由于声音发射只是没有入射波的场景,因此对于扬声器来说,应该适用相同的频率选择规则。

[0084] 注意到具有各自以固定的频率运动的多个段的这样的扬声器可以为单独调整每个频率分量的幅度提供灵活性。这是可能的,因为通过调整到该频率的机械谐振器(由预计其输出较弱的小型扬声器)来放大每个主动段的幅度;因此提供了很大的动态范围。由于低音扬声器(和亚低音扬声器)通常大且昂贵,因此,这种频率离散的低音扬声器可以提供价格低廉的替代品,且有传统低音扬声器不具备的灵活性。

[0085] 特征

[0086] 尽管先前已经实现了使用麦克风-扬声器-反馈电子系统的ANR,但是有必要“识别”入射波,使得主动元件可以以适当的响应进行响应。随着电子和半导体工业的最新发展,存在许多基于该想法的消费产品,诸如ANR或主动降噪(ANC)耳机和耳塞或者可消除任何给定空间体积的噪声的主动降噪设置。这些现有产品通常依靠智能芯片及其高保真扬声器的能量来实现宽频衰减/消除,并且通常需要一个反馈环路以达到最佳结果。因此,制造成本和价格仍然很高。

[0087] 与现有的ANR或ANC产品相比,所公开的主动吸声器的构造不需要用于信号计算的智能芯片,因为所公开的传入声波识别过程本质上是模拟的并且极其简单。无需反馈环路。通过频率滤波和积分方案能够使此简单性成为可能,在频率滤波和积分方案中,可以将时间序列形式的传入声音信号分为多个离散频率,通过非常简单的电L-C谐振电路或数字FFT处理电路实现的从输入时间序列信号的频率选择。因为由横向空气流给出的频谱扩展效应以及通过使用谐振器的动态范围,因此不需要高保真扬声器。

[0088] 所公开的技术提供了紧凑、极薄的轮廓,具有低的制造成本,在经济上可行并且可以被批量生产用于工业级ANC产品,该工业级ANC产品将在噪声衰减方面具有异常广泛的应用,诸如在工厂、建筑设计、飞机、汽车发动机甚至许多家用电器中。所公开的主动吸收器对于低频噪声吸收将特别有用,因为通过使用主动元件,其可以打破对相关吸收器的厚度的因果关系约束,该因果吸收器的厚度对于低频吸收而言是非常大的。主动吸收器被设计成对于所有低频具有基本上相同的厚度,这是主动吸收器的期望特性。此外,通过调整主动段的运动幅度,该装置还可以用作声学软边界或声学硬壁或者两者之间的任何物体。该装置

甚至用作具有可调的频率响应和可能更低的成本的新型低频扬声器。

[0089] 总结

[0090] 将理解,本领域技术人员可以在如由所附权利要求表述的本发明的原则和范围内的领域中已经在此描述并示出为解释主题的性质部件在细节、材料、步骤和布置上进行许多额外的改变。

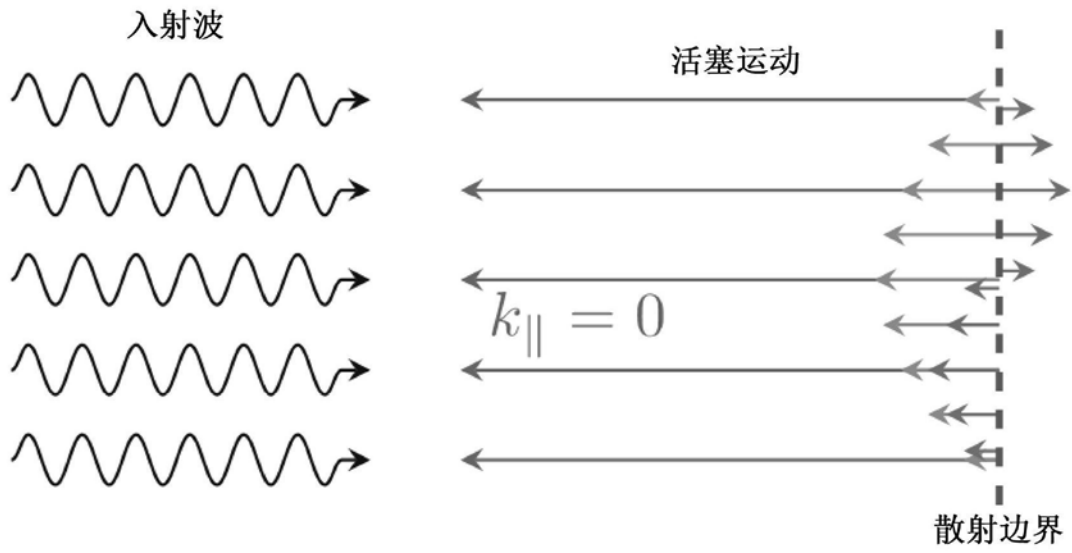


图1

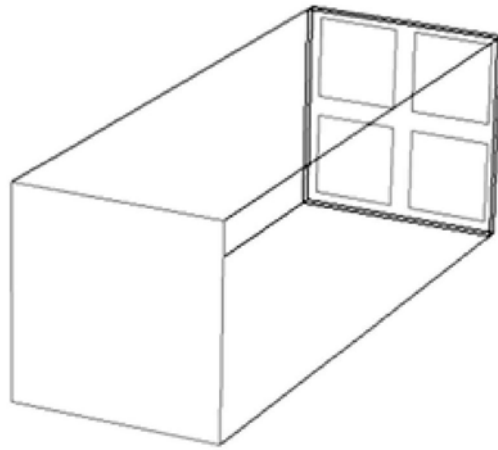


图3

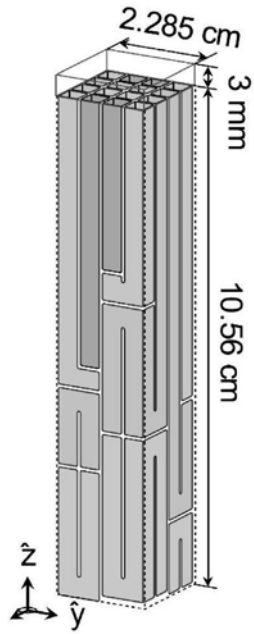


图2A

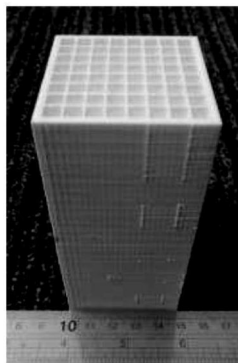


图2B

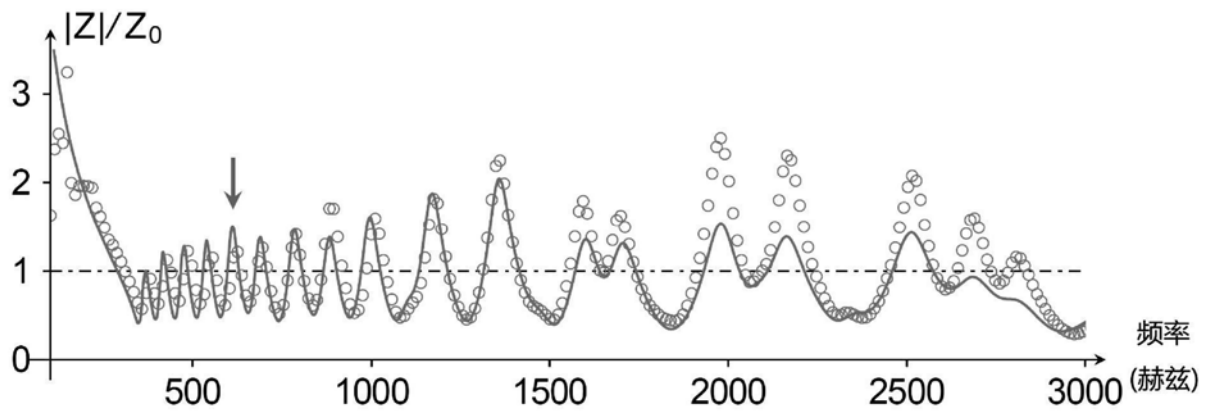


图2C

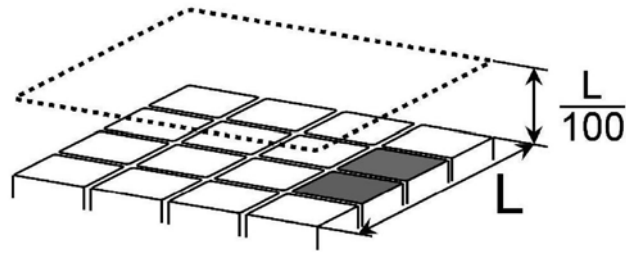


图2D

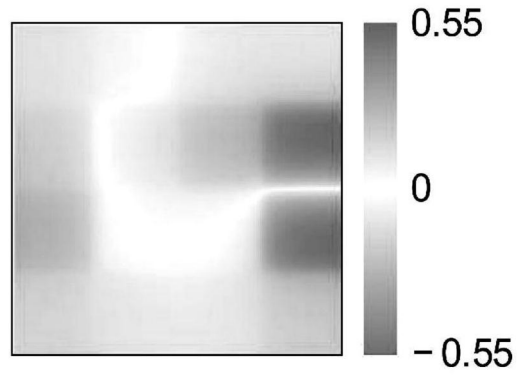


图2E

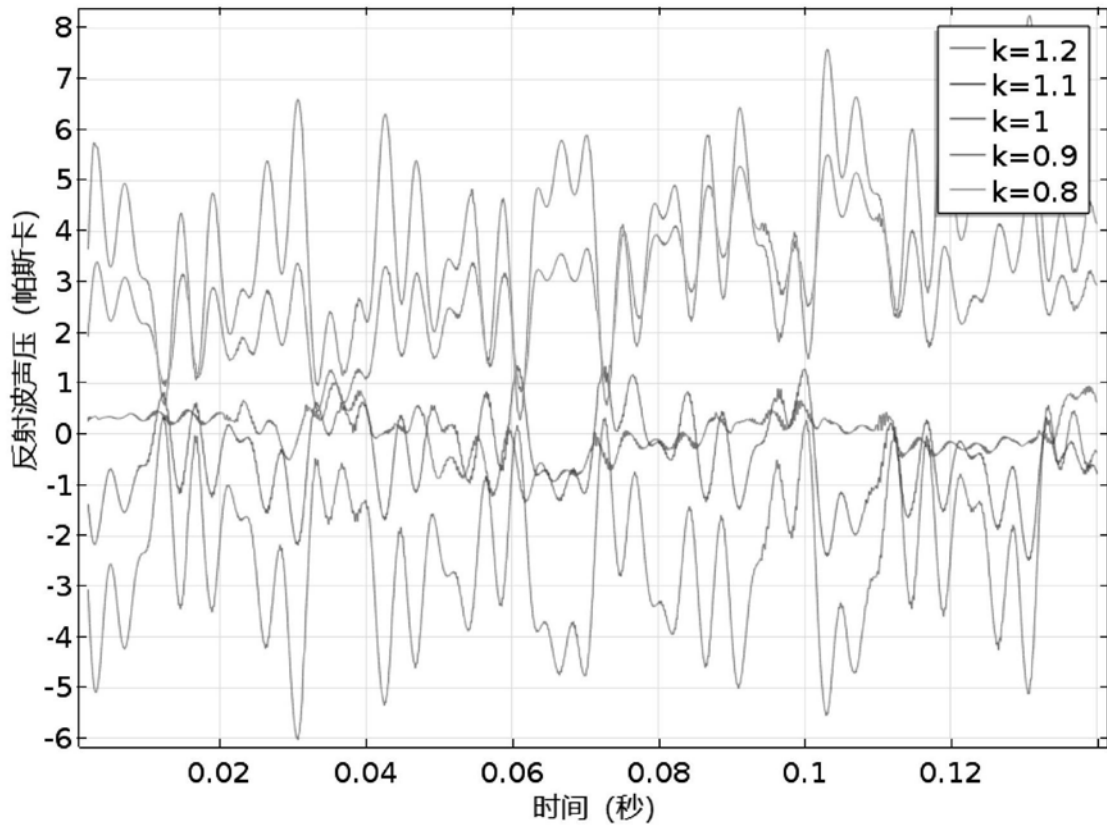


图4

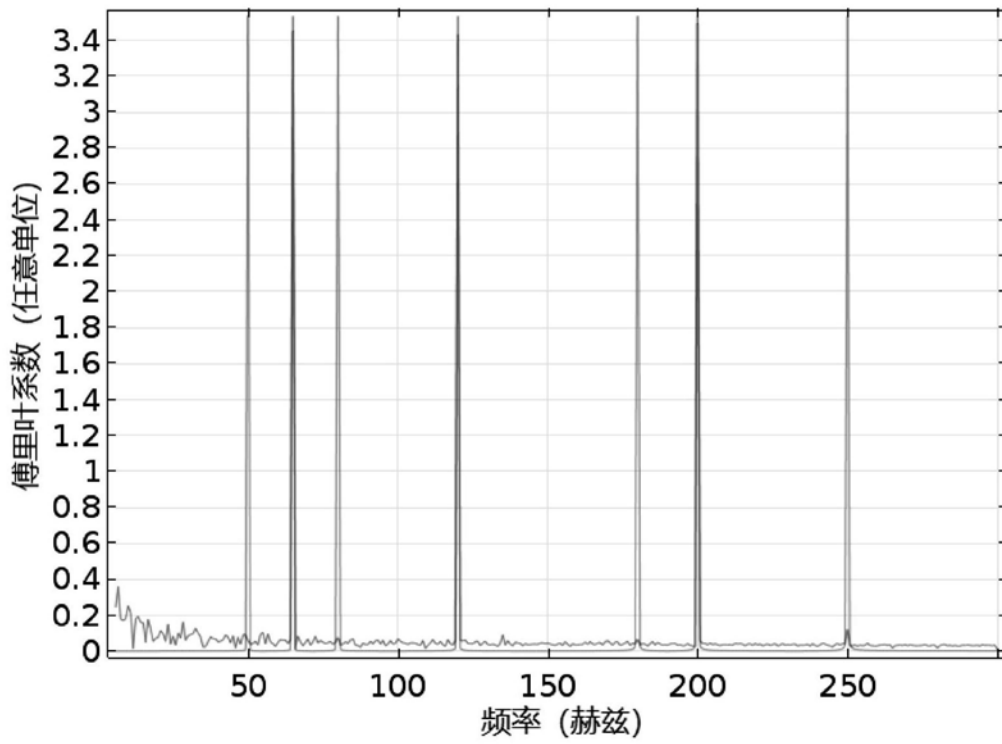


图5

横向场压强梯度随时间变化图

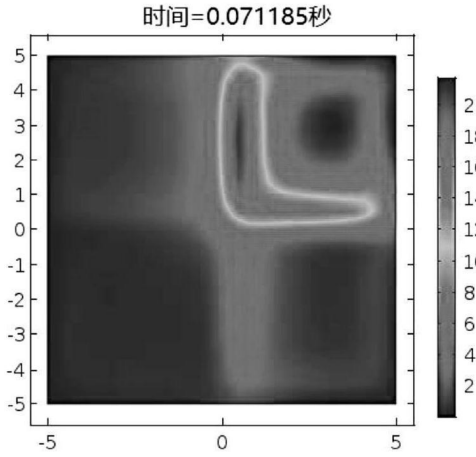


图 6A

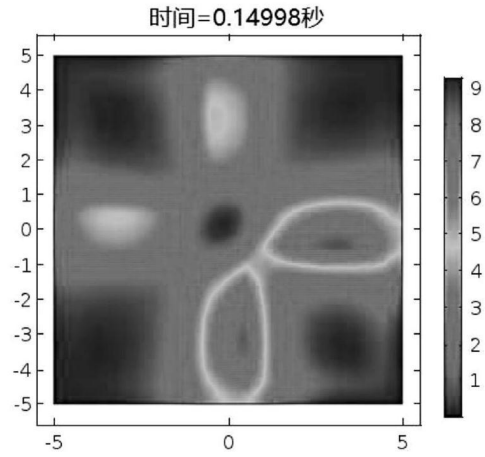


图 6B

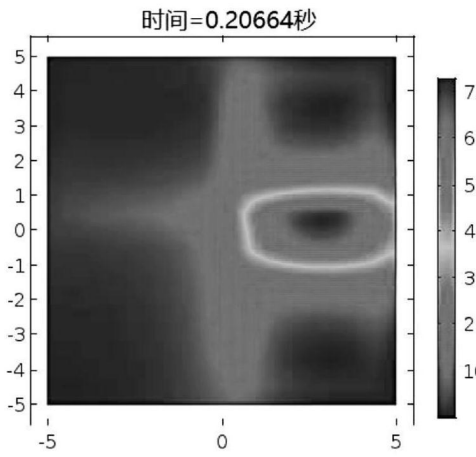


图 6C

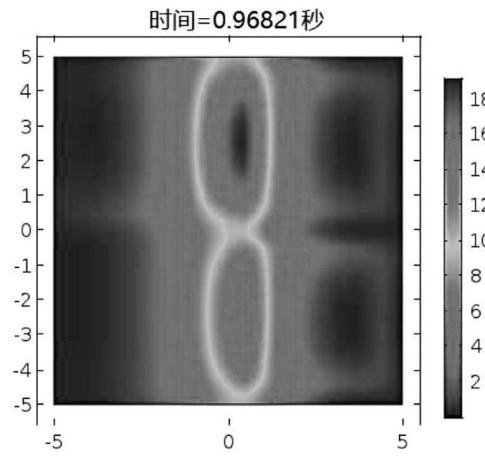


图 6D

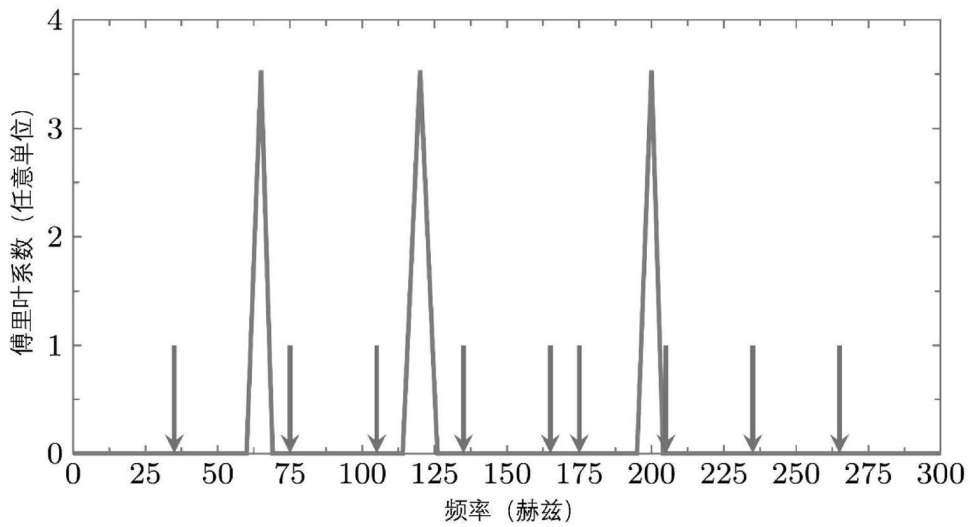


图 6E

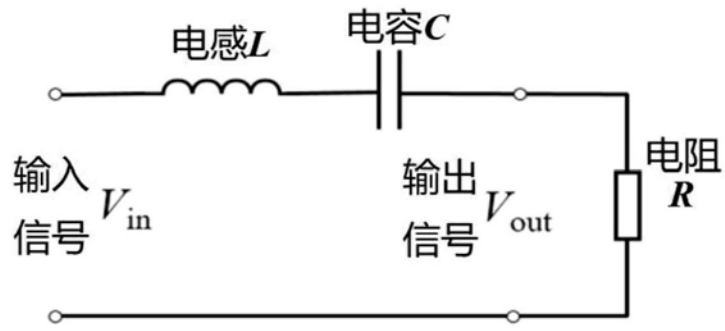


图7A

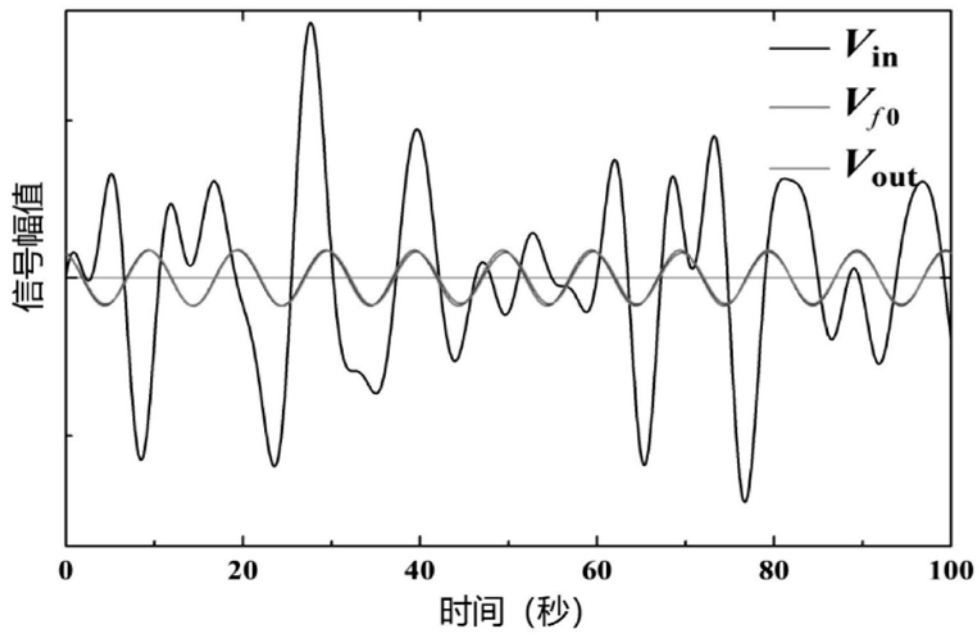


图7B

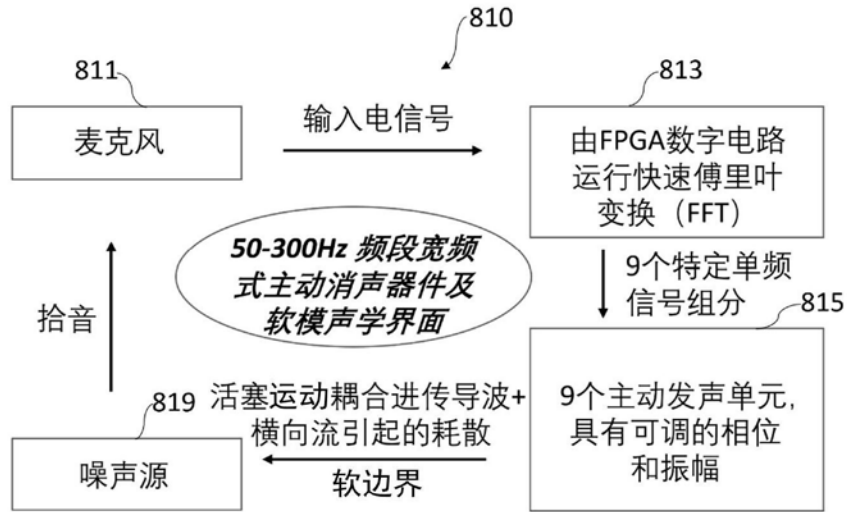


图8

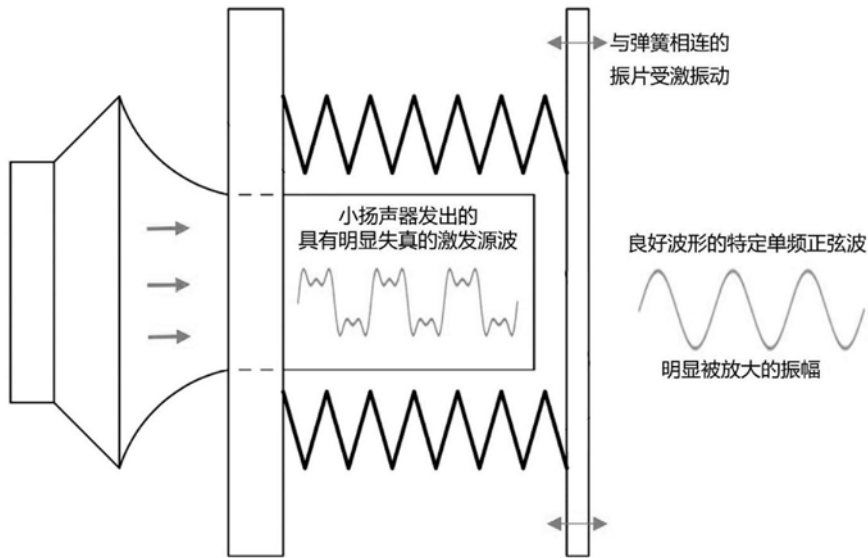


图9

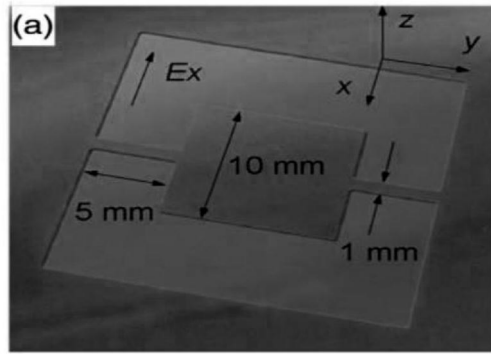


图10