



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115575081 A

(43) 申请公布日 2023. 01. 06

(21) 申请号 202211577104.X

(22) 申请日 2022.12.09

(71) 申请人 中国空气动力研究与发展中心低速
空气动力研究所

地址 621000 四川省绵阳市涪城区二环路
南段6号

(72) 发明人 赵鲲 杨玫 章荣平

(74) 专利代理机构 绵阳山之南专利代理事务所
(普通合伙) 51288

专利代理师 沈强

(51) Int. Cl.

G01M 9/06 (2006.01)

G01M 9/02 (2006.01)

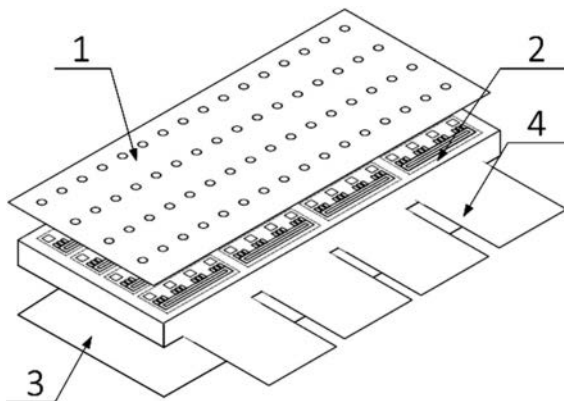
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法及装置

(57) 摘要

本发明公开了一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法及装置,测量装置具有三层结构,具备以信号测量需求为导向的二维面型点阵设计方法。该装置能够实现风洞模型表面二维高空间分辨率点阵测量,同时可实现在风洞模型较高曲率表面范围的保型测量,且完成后可恢复原状,能重复使用。本发明的不干胶式安装方法,与风洞试验模型表面进行配装也较为便捷,且装置配套数据处理算法,可直接获得有关重要参数。



1. 一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法,其特征在于对横向孔间距、纵向孔间距、孔直径、横向行数、纵向列数五个参数设计,包括以下步骤:

步骤一:根据试验模型波数-频率谱测量要求,通过表达式 $\Delta x = \frac{U_c}{5nf}$ 计算横向孔间距

最优值 Δx , U_c 为风速的迁移速度, f 为噪声频率, n 为采样倍数;

步骤二:根据步骤一计算的最优值和二维面型的硬件尺寸限制,计算出纵向孔间距最优值 Δy ;

步骤三:根据获得的横向孔间距和纵向孔间距,结合模型波数-频率谱特性测试需求计算出孔直径 $\phi = \frac{U_c}{10f_{max}}$, f_{max} 为测量的最高噪声频率;

步骤四:据横向测量所需波数分析精度及已得到的横向孔间距最优值 Δx ,通过 $m = 2\pi/(\alpha_x \Delta x)$ 计算获得横向点阵列数 m ,为流向波数分析精度;

步骤五:据纵向测量所需波数分析精度及已得到的纵向孔间距最优值 Δy ,通过 $n = 2\pi/(\alpha_y \Delta y)$ 计算获得纵向点阵列数 n , α_y 为展向波数分析精度;

步骤六:确定五个参数后,对二维面型点阵进行钻孔加工。

2. 根据权利要求1所述的一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法,其特征在在于:风洞工作风速和噪声频率为变量,所述横向孔间距最优值的选择区间为:

$$\frac{0.6U_{min}}{7.5f_{max}} < \Delta x < \frac{0.6U_{max}}{7.5f_{min}}$$

其中:

$$\text{风洞工作风速 } U = [U_{min}, U_{max}] = [20\text{m/s}, 80\text{m/s}],$$

$$\text{噪声频率 } f = [f_{min}, f_{max}] = [200\text{Hz}, 10\text{kHz}].$$

3. 根据权利要求1所述的一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法,其特征在在于:纵向孔间距最优值的最小值至少为横向孔间距最优值的最小值的两倍,纵向孔间距最优值的最大值不能大于最大波数的上限。

4. 根据权利要求2或3所述的一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法,其特征在在于:所述纵向孔间距最优值的选择区间为:

$$\frac{1.2U_{min}}{7.5f_{max}} < \Delta y < \frac{0.6U_{max}}{7.5f_{min}}$$

其中：

$$\text{风洞工作风速 } U = [U_{min}, U_{max}] = [20m/s, 80m/s],$$

$$\text{噪声频率 } f = [f_{min}, f_{max}] = [200Hz, 10kHz].$$

5. 根据权利要求1所述的一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法，其特征在于：所述孔直径至少为波长的1/10，所述孔直径的选择区间为：

$$\frac{0.6U_{min}}{10f_{max}} < \phi < \frac{0.6U_{max}}{10f_{min}}$$

其中：

$$\text{风洞工作风速 } U = [U_{min}, U_{max}] = [20m/s, 80m/s],$$

$$\text{噪声频率 } f = [f_{min}, f_{max}] = [200Hz, 10kHz].$$

6. 一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵装置，其特征在于：

共三层结构，从上至下依次包括连接为一体结构的顶板、集成电路板和底板，所述底板的外表面设置有粘贴层，顶板与底板均为记忆金属蒙皮，所述记忆金属蒙皮能够在弯曲后恢复初始形态；

集成电路板包括顶层FPC电路板、底层FPC电路板以及顶层FPC电路板与底层FPC电路板之间的柔性填充层，所述顶层FPC电路板与顶板固定连接，所述底层FPC电路板与底板固定连接，所述底层FPC电路板上设置有伸出到顶板与顶板外的柔性排线；

柔性填充层内设置有若干组电器单元，每组电器单元包括有连接到顶层FPC电路板的若干个压力传感器和一个连接器，每个压力传感器的测压孔与顶层FPC电路板、顶板上的导压孔同轴对齐，连接器的另一端连接到底层FPC电路板上与柔性排线连接。

7. 根据权利要求6所述的一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵装置，其特征在于：所述顶板上设置有与传感器数量相等的导压孔，所述底板为无孔的光滑平板。

8. 根据权利要求7所述的一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵装置，其特征在于：顶板上的导压孔呈矩阵分布。

9. 根据权利要求7所述的一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵装置，其特征在于：底板外表面的粘贴层为金属不干胶，所述金属不干胶能够根据不同测试对象覆盖在底板的外表面的不同位置。

一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法及装置

技术领域

[0001] 本发明设计噪声测量领域,具体涉及一种一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法及装置。

背景技术

[0002] 国民经济与军事领域多种类型的型号风洞试验都需要获得表面脉动压力特征。例如,脉动压力是引起飞机、高铁舱体表面结构振动从而诱发舱内噪声的重要声源。对于军用水下航行体而言,脉动压力问题更为重要。这主要是由于一方面作为直接声源影响水下航行体辐射声性能,另一方面若航行体自身配备声呐,将干扰自身声呐基阵区工作,从而限制航行体声探能力。在风洞内开展水下航行体表面脉动压力测量,目标获得的最重要参数包括测点的压力均方根、自功率谱、时间-空间相干系数、波数-频率谱等。这其中压力均方根与自功率谱只需要对每个测点进行独立分析,而时间-空间相干系数与波数-频率谱需要对多个相近测点进行共同分析,且测点数量、空间分布率要求较高。

[0003] 现行的主要方法包括单点法与一维线阵列法。单点法即通过采购市面常见的单个脉动压力传感器,通过安装在模型表面从而实现在风洞内开展脉动压力测量。单点法是日前主流方法,能够实现模型表面单点信号测量,且精度较高;传感器安装位置较为灵活,需要测量不同部位脉动压力信号时可安装多个传感器。然而,由于传感器尺寸较大,一方面在表面安装多个传感器时存在间距较大且测点数量不多的问题,不易实现时间-空间相干系数、波数-频率谱分析;另一方面模型表面一般为曲面,传感器测量面由于形状固定无法贴合模型,造成测量点不保型,从而导致过大测量误差。

[0004] 一维线阵列法是目前较为先进的一种方法。公开专利(CN109068484)和2019年《声学技术》第38卷2期《新型流激载荷测试柔性传感器阵列设计》公开了以预定数量底部入声的MEMS传感器、柔性电路板、钢片为主要组成部件。钢片表面加工一维高密度均匀排列的线型测压孔,并通过柔性电路板与同数量的MEMS传感器进行焊接。钢片光滑有孔面为测量面,另一面与柔性电路板焊接。传感器阵列通过螺钉固定在模型表面,安装时尽量与模型表面保持平整。这种测量方法较单点法有较大优势:由于测压孔小且密,可为获得相干系数、波数-频率谱提供数据支撑;由于钢片有一定弹性,且黏连柔性电路板,可实现模型表面较低曲率范围测量面的有限度保型。

[0005] 然而,当前的相关装置主要存在以下不足:一维线阵列对脉动压力进行测量是以Corcos假设为前提,即假设边界层中纵向波动和横向波动是相互独立的。然而对于结构复杂的流场来说,该假设并不成立,因此一维阵列无法满足测量需求。

[0006] 现有点阵测压孔直径、间距选取一般只以MEMS传感器排列的硬件条件限制为标准,缺少针对模型脉动压力信号特点的设计方法,点阵布置密度不满足测量要求。传感器安装面由于布置MEMS传感器,表面凹凸不平,且需要螺纹孔进行固定,与模型贴合安装较为不便。钢片材质虽具有一定韧性,但针对较大曲率模型表面位置测量时,无法弯曲贴合或弯曲后无法复原,不能重复使用。

发明内容

[0007] 本发明的目的是针对现有技术无法满足单位面积内压力测量中空间分布律不够高的缺点,根据其二维型面提出一种设计方法,并根据其设计方法设计一种具有点阵结构的测量装置,使其能满足在单位面积内极大的提高测压点的数量。

[0008] 为了实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵设计方法,对横向孔间距、纵向孔间距、孔直径、横向行数、纵向列数五个参数设计,包括以下步骤:

步骤一:根据试验模型波数-频率谱测量要求,通过表达式 $\Delta x = \frac{U_c}{5nf}$ 计算横向孔间距最优值 Δx , U_c 为风速的迁移速度, f 为噪声频率, n 为采样倍数;

步骤二:根据步骤一计算的最优值和二维面型的硬件尺寸限制,计算出纵向孔间距最优值 Δy ;

步骤三:根据获得的横向孔间距和纵向孔间距,结合模型波数-频率谱特性测试需求计算出孔直径 $\phi = \frac{U_c}{10f_{max}}$, f_{max} 为测量的最高噪声频率;

步骤四:据横向测量所需波数分析精度及已得到的横向孔间距最优值 Δx ,通过 $m = 2\pi/(\alpha_x \Delta x)$ 计算获得横向点阵列数 m , α_x 为流向波数分析精度;

步骤五:据纵向测量所需波数分析精度及已得到的纵向孔间距最优值 Δy ,通过 $n = 2\pi/(\alpha_y \Delta y)$ 计算获得纵向点阵列数 n , α_y 为展向波数分析精度;

步骤六:确定五个参数后,对二维面型点阵进行钻孔加工。

[0009] 在上述技术方案中,风洞工作风速和噪声频率为变量,所述横向孔间距最优值的选择区间为:

$$\frac{0.6U_{min}}{7.5f_{max}} < \Delta x < \frac{0.6U_{max}}{7.5f_{min}}。$$

[0010] 在上述技术方案中,纵向孔间距最优值的最小值至少为横向孔间距最优值的最小值的两倍,纵向孔间距最优值的最大值不能大于最大波数的上限。

[0011] 在上述技术方案中,所述纵向孔间距最优值的选择区间为:

$$\frac{1.2U_{min}}{7.5f_{max}} < \Delta y < \frac{0.6U_{max}}{7.5f_{min}}。$$

[0012] 在上述技术方案中,所述孔直径至少为波长的1/10,所述孔直径的选择区间为:

$$\frac{0.6U_{min}}{10f_{max}} < \phi < \frac{0.6U_{max}}{10f_{min}}。$$

[0013] 上述表达式中,

$$\text{风洞工作风速 } U = [U_{min}, U_{max}] = [20\text{m/s}, 80\text{m/s}],$$

$$\text{噪声频率 } f = [f_{min}, f_{max}] = [200\text{Hz}, 10\text{kHz}]。$$

[0014] 在上述设计方法的基础上设计一种面向风洞脉动压力测量的二维点阵装置,从上至下依次包括连接为一体结构的顶板、集成电路板和底板,所述底板的外表面设置有粘贴

层；

集成电路板包括顶层FPC电路板、底层FPC电路板以及顶层FPC电路板与底层FPC电路板之间的柔性填充层，所述顶层FPC电路板与顶板固定连接，所述底层FPC电路板与底板固定连接，所述底层FPC电路板上设置有伸出到顶板与顶板外的柔性排线；

柔性填充层内设置有若干组电器单元，每组电器单元包括有连接到顶层FPC电路板的若干个压力传感器和一个连接器，每个压力传感器的测压孔与顶层FPC电路板、顶板上的导压孔同轴对齐，连接器的另一端连接到底层FPC电路板上与柔性排线连接。

[0015] 在上述技术方案中，顶板上的导压孔呈矩阵分布。

[0016] 在上述技术方案中，所述顶板与底板均为记忆金属蒙皮，所述金属蒙皮能够在弯曲后恢复初始形态。

[0017] 在上述技术方案中，所述顶板上设置有与传感器数量相等的导压孔，所述底板为无孔的光滑平板。

[0018] 在上述技术方案中，底板外表面的粘贴层为金属不干胶，所述金属不干胶完全覆盖底板的外表面。

[0019] 综上所述，由于采用了上述技术方案，本发明的有益效果是：

本发明的设计方法能够完成具备以信号测量需求为导向的二维面型点阵设计，测量装置能够实现风洞模型表面二维高空间分辨率点阵测量；可实现在风洞模型较高曲率表面范围的保型测量，且完成后可恢复原状，能重复使用；不干胶式安装方法，与风洞试验模型表面进行配装较为便捷。

附图说明

[0020] 本发明将通过例子并参照附图的方式说明，其中：

图1是测量装置的分解结构示意图；

图2是图1的侧面剖视示意图；

图3是图1中集成电路板顶层的结构示意图；

图4是图1中集成电路板底层的结构示意图；

图5是图1中顶板的结构示意图；

图6是本实施的相关性风洞试验测量结果(以流向第4个测点为参考点)；

图7是本实施的相干函数风洞试验测量结果(以流向第4个测点为参考点)；

其中：1是顶板，1-1是导压孔，2是集成电路板，2-1是顶层FPC电路板，2-2是底层FPC电路板，2-3是柔性填充层，2-4是压力传感器，2-5是电容，2-6是连接器，2-7是测压孔，3是底板，4是柔性排线。

具体实施方式

[0021] 本说明书中公开的所有特征，或公开的所有方法或过程中的步骤，除了互相排斥的特征和/或步骤以外，均可以以任何方式组合。

[0022] 本说明书(包括任何附加权利要求、摘要和附图)中公开的任一特征，除非特别叙述，均可被其他等效或具有类似目的的替代特征加以替换。即，除非特别叙述，每个特征只是一系列等效或类似特征中的一个例子而已。

[0023] 本实施例的设计方法,对横向孔间距、纵向孔间距、孔直径、横向行数、纵向列数五个参数设计,包括以下步骤:

步骤一:根据试验模型波数-频率谱测量要求与相关数学方法,计算横向孔间距 Δx 的最优值;

由于脉动压力波数-频率谱测量对传感器点阵要求较压力均方根、自功率谱、时间-空间相干系数等其它参数高,因此本发明所述设计方法也主要依据波数-频率谱测量需求进行设计。湍流边界层内脉动压力波数-频率谱一般可以划分为三个区域:声学区、低波数区和迁移脊区,不同波数段测量对传感器点阵间距和孔径要求各不相同,而不同模型所重点关注的区域各不一致。以水下航行体模型为例,迁移脊区是所关注的重点,因此二维面型点阵参数的选取主要针对迁移脊区段波数特性。其它类型模型参照相同方法执行。

[0024] 选择点阵参数前,首先需要明确的是模型试验所需要关注的频率 f 范围。一般而言,200Hz~10kHz的测量频率范围可以覆盖绝大多数关键信号(即 $f_{min} = 200\text{Hz}$, $f_{max} = 10\text{kHz}$),是关注的重点频段。低速风洞工作风速 U 常用范围为20~80m/s(即 $U_{min} = 20\text{m/s}$, $U_{max} = 80\text{m/s}$),所对应的迁移速度 U_c 为12~48m/s(即迁移速度为来流速度的0.6倍)。为实现对迁移脊区段能量的相对精确辨识,最大波数 $K_{max} = 5\omega/U_c$,其中 ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$ 。计算中, k_{max} 范围上限应采用频率范围最小值、下限应采用最大值计算,因此最大波数区间约为130 rad/m~26000rad/m。由采样定理可知 $K_{max} = 2\pi/(n \Delta x)$,其中 Δx 即为横向孔间距, n 为采样倍数(工程中一般选2.5)。因此,由上可知得到的 Δx 的选择区间为0.1mm~19.3mm。

综上所述, Δx 数学表达式为 $\frac{U_c}{5nf}$ 。以 U_{min} 、 U_{max} 、 f_{min} 、 f_{max} 作为变量进行表达,其选择区间为:

$$\frac{0.6U_{min}}{7.5f_{max}} < \Delta x < \frac{0.6U_{max}}{7.5f_{min}}$$

[0025] 步骤二:根据已获得的 Δx 值及硬件条件限制,获得纵向孔间距 Δy 的最优值;

确定 Δx 值后,受本方案所述立体FPC电路板排列所限, Δy 最小值至少为 Δx 的二倍,且其最大值不能使 K_{max} 大于上限,因此 Δy 满足0.2mm~19.3mm,即其选择区间数学表达式为:

$$\frac{1.2U_{min}}{7.5f_{max}} < \Delta y < \frac{0.6U_{max}}{7.5f_{min}}$$

[0026] 步骤三:根据已获得的横向、纵向孔间距 Δx 、 Δy 及模型波数-频率谱特性测试需求,计算孔直径 ϕ ;

特定频率的脉动压力能量一般集中在 ω/U_c 的波数区域。采用试验中测量的最高频率 f_{max} 为关键参数,由于波长 $\lambda = U_c/f_{max}$,所以基于波数和频率建立的大致对应关系可知波长为1.2mm~4.8mm。由于需要使孔径 ϕ 至少为波长1/10才能完成相对精确的测量,所以此时孔径的大小 ϕ 区间为0.12mm~0.48mm。综上, ϕ 表达式为 $\lambda/10$,其选择区间表

达式为：

$$\frac{0.6U_{min}}{10f_{max}} < \phi < \frac{0.6U_{max}}{10f_{min}}。$$

[0027] 步骤四：根据横向测量所需波数分析精度及已得到的 Δx 值，通过计算获得横向点阵列数 m ；

对于横向点阵列数 m ，波数-频率谱在做离散时，以流向波数 k_1 为标准进行确定。由采样定理可知其无混叠域为 $(-\pi/\Delta x, \pi/\Delta x)$ ，即 k_1 波数分析精度为 $\alpha_x = 2\pi/(m\Delta x)$ ，因此 $m = 2\pi/(\alpha_x \Delta x)$ 。一般而言，流向分析精度为 $\alpha_x = 50m^{-1}$ 即满足要求，所以可以确定 m 值。

[0028] 根据纵向测量所需波数分析精度及已得到的 Δy 值，通过计算获得纵向点阵行数 n ；

对于纵向点阵列数 n ，波数-频率谱在做离散时，以展向波数 k_3 为标准进行确定。由采样定理可知其无混叠域为 $(-\pi/\Delta y, \pi/\Delta y)$ ，即 k_3 波数分析精度为 $\alpha_y = 2\pi/(n\Delta y)$ ，因此 $n = 2\pi/(\alpha_y \Delta y)$ 。一般而言，展向分析精度为 $\alpha_y = 100n^{-1}$ 即满足要求，所以可以确定 n 值。

[0029] 步骤六：孔直径 ϕ ，横向、纵向点阵行、列数 m 、 n ，横向、纵向孔间距 Δx 、 Δy 五个参数确定后，采用精密CNC工艺完成“三明治结构”上层的记忆钛蒙皮点阵的钻孔加工如图5所示。

[0030] 根据如图5所示的顶板1进行其他层的设计，为了考虑到增加空间分辨率，配合顶板1上导压孔1-1的数量，每一个导压孔1-1必然有一个压力传感器2-4，因此对于整个集成电路板2采用“三明治结构”设计，如图1所示包括有顶板1、集成电路板2和底板3，所属集成电路板2设置在顶板1与底板3之间，且相互连接为一体。

[0031] 如图2所示，集成电路板2包括有与顶板1连接的顶层FPC电路板2-1、与底板3连接的底层FPC电路板2-2、以及设置在顶层FPC电路板2-1与底层FPC电路板2-2之间的柔性填充层2-3，在柔性填充层2-3设置有若干个压力传感器2-4，每一个压力传感器2-4的测压孔2-7与顶板1上的一个导压孔1-1保持同轴中心对齐，压力传感器2-4焊接到顶层FPC电路板2-1上，顶层FPC电路板2-1与底层FPC电路板2-2之间通过连接器2-6实现电连接。

[0032] 如图3所示，本实施例中以四个压力传感器2-4位一组测量单元，每个压力传感器2-4配三个电容2-5其供电与输出信号进行滤波处理，一组测量单元中设置有一个连接器2-6，连接器2-6其主要作用是将压力传感器2-4的信号由顶层FPC电路板2-1传递到底层FPC电路板2-2，在通过底层FPC电路板2-2上的柔性排线4与外部电路连接，如图4所示。

[0033] 集成电路板2中的柔性填充层2-3可以起到对整个电路元器件的支撑作用，保持了对二维面型点阵柔韧性的要求，还兼具防潮、防尘功能。

[0034] 在本实施例中，顶板1和底板3采用记忆金属制成的蒙皮，其物理特性使得蒙皮在受到外力变形后，在无外力的状态下可以恢复原状。集成电路板2中的柔性FPC和柔性填充层，使得整个“三明治结构”可以在受到外力的作用后恢复初始形态。

[0035] 基于上述的特性,对底板3的外表面设置一层粘贴层,粘贴层采用金属不干胶,根据模型表面安装要求覆盖在底板3的外表面对应位置。这种粘贴的好处就在于可以使得整个底板3的外表面可以完全贴合在被测对象的表面,即使被测对象表面凹凸不平也不影响测量装置的安装和测量。在测量过程中,受到外力的影响,即使被测对象发生形变,测量装置也会跟随其发生形变,不会影响最终的测量效果。

[0036] 如图6和图7所示,是给出了已制造的 32×8 通道点阵流向脉动压力和相关性风洞试验测量结果(以流向第4个测点为参考点),可以看出,由本方案设计的风洞试验装置可以很好的完成相关参数测量。图6和图7中, x 为流向坐标,单位m, γ 为相关性系数,代表两相关变量之间线性关系的强度和方向,范围为-1~1,其中 $\gamma=1$ 代表正线性相关, $\gamma=-1$ 代表负线性相关, ρ :为相干函数,指两个变量在不同频率的相关程度,范围为0~1,其中 $\rho=0$ 代表完全不相干, $\rho=1$ 代表呈线性相关。

[0037] 本发明并不局限于前述的具体实施方式。本发明扩展到任何在本说明书中披露的新特征或任何新的组合,以及披露的任一新的方法或过程的步骤或任何新的组合。

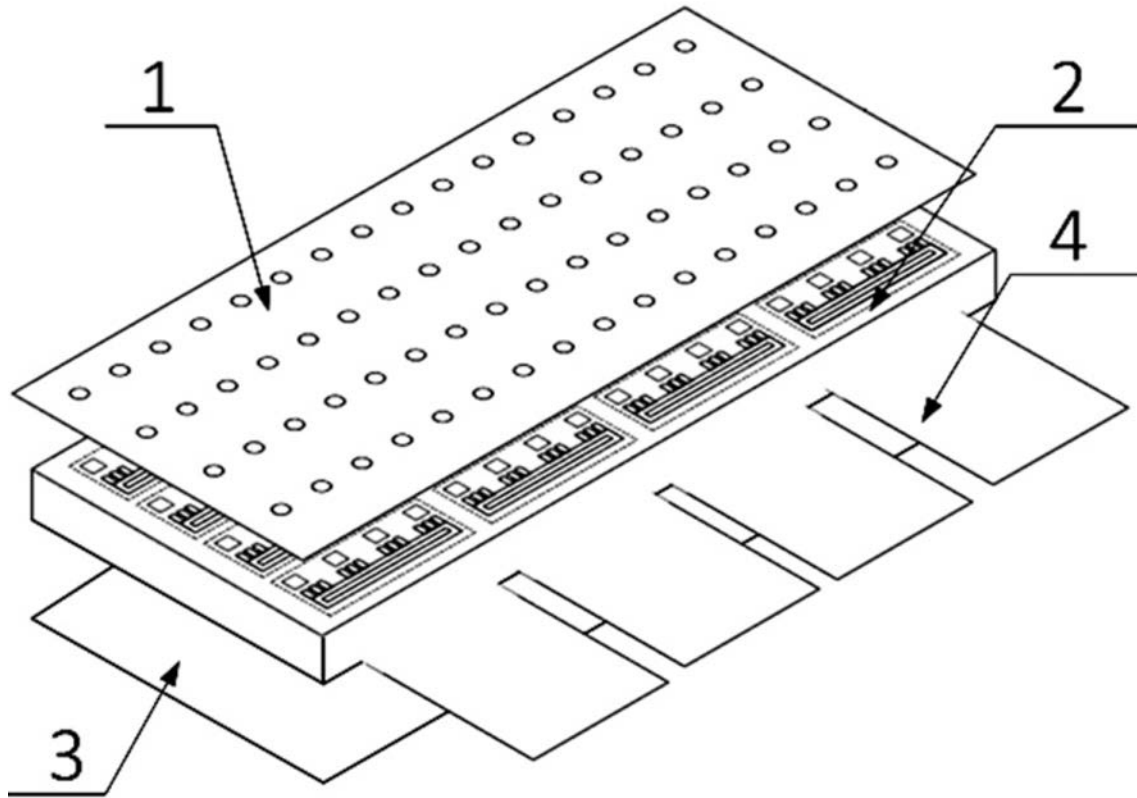


图1

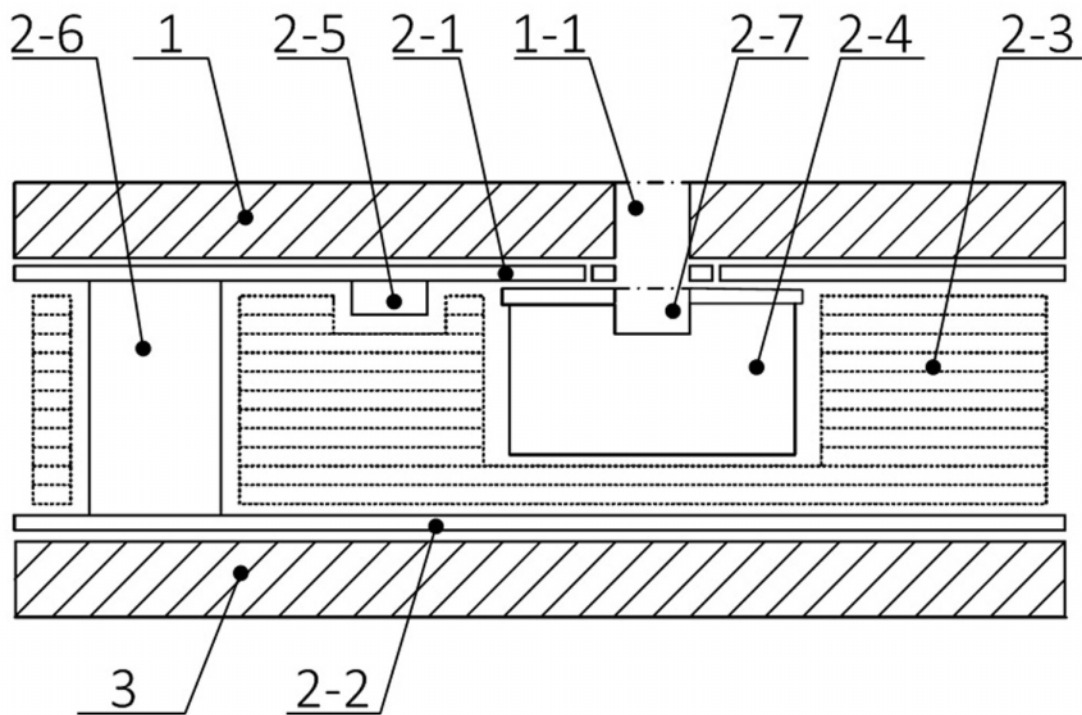


图2

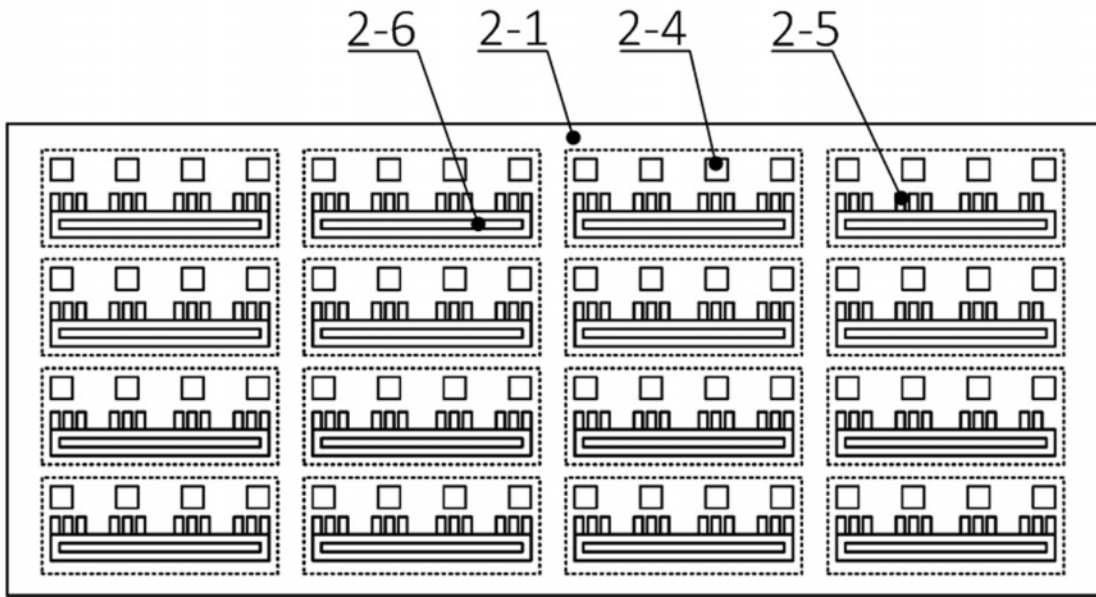


图3

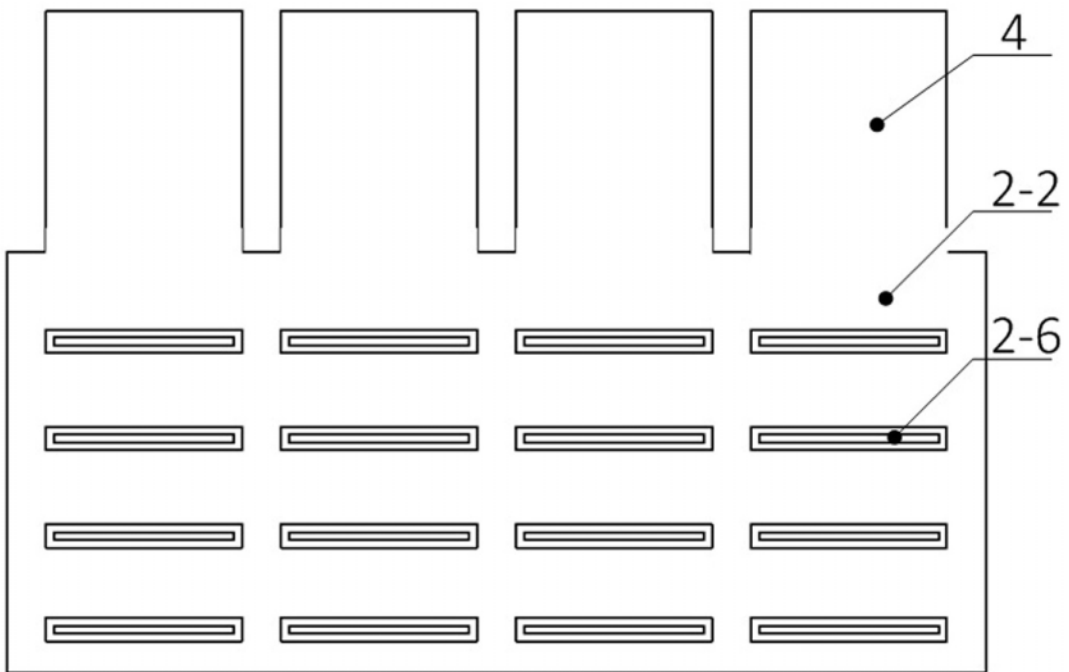


图4

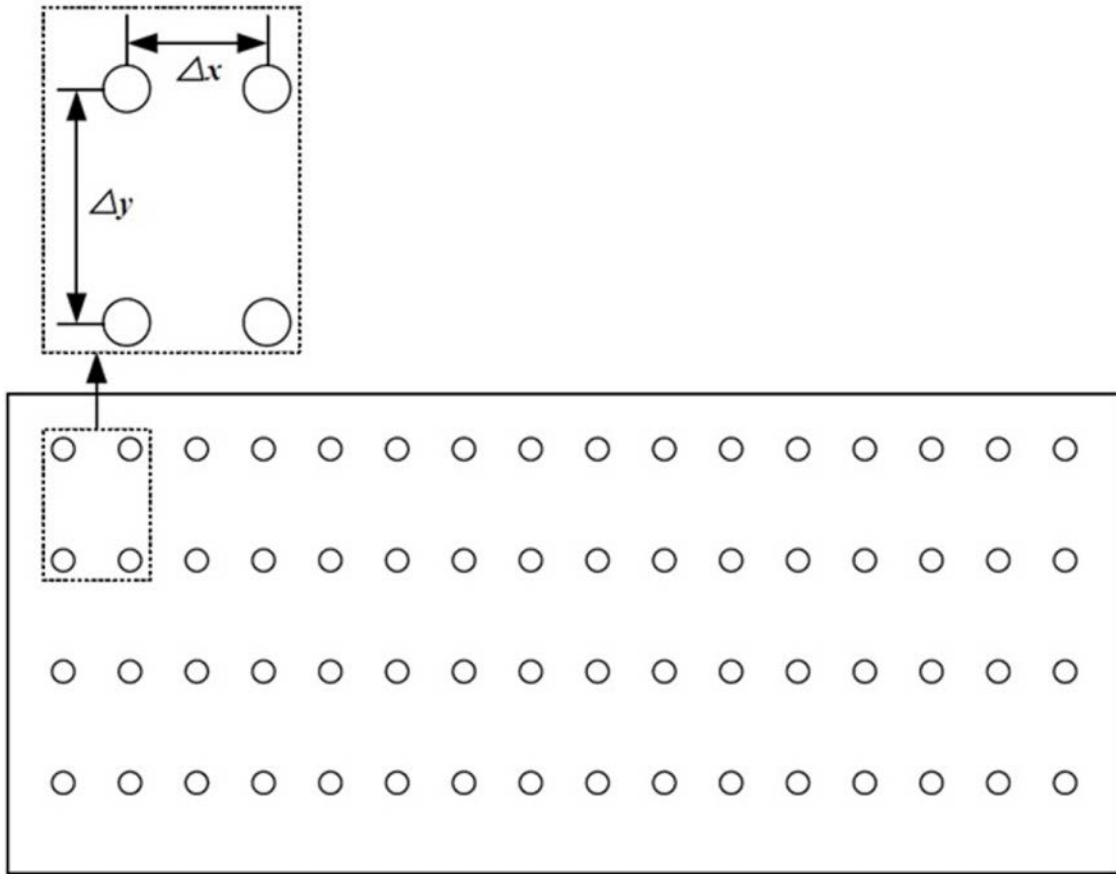


图5

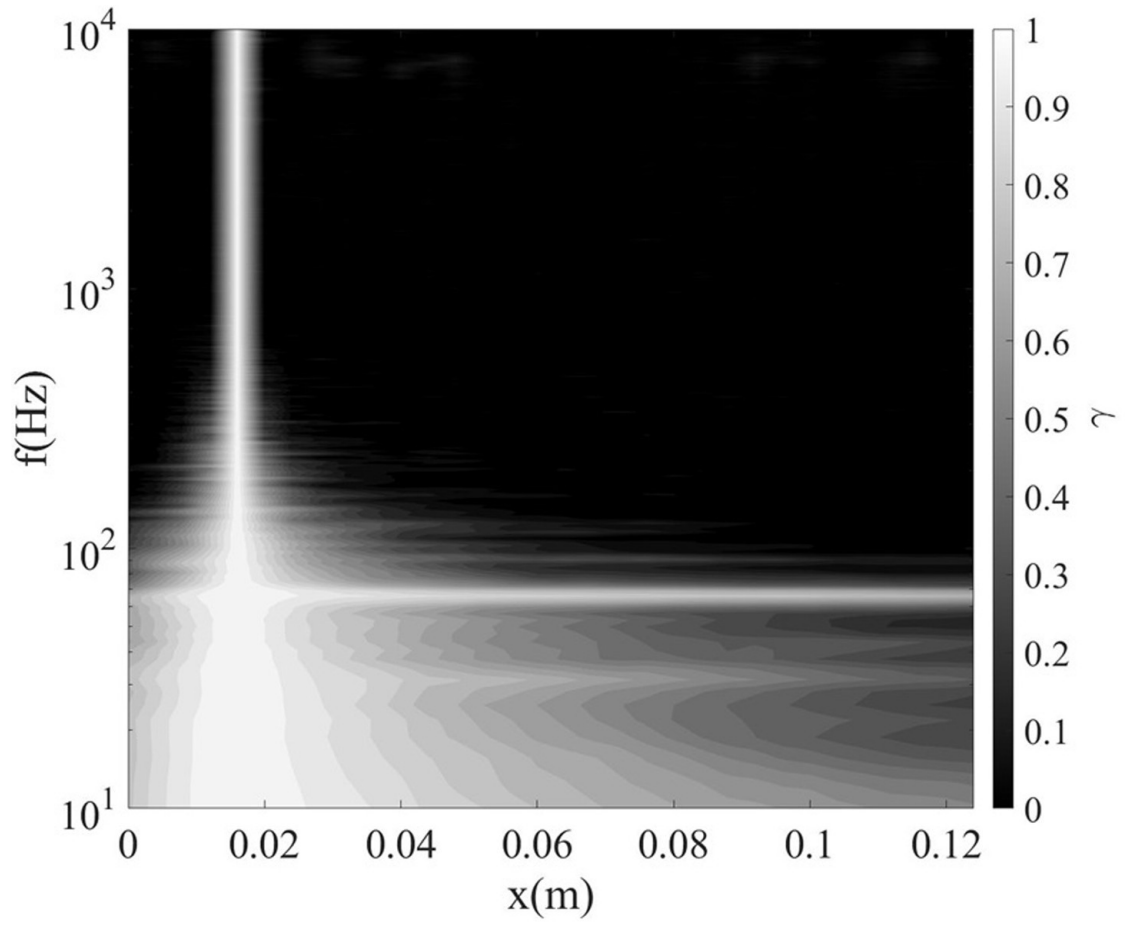


图6

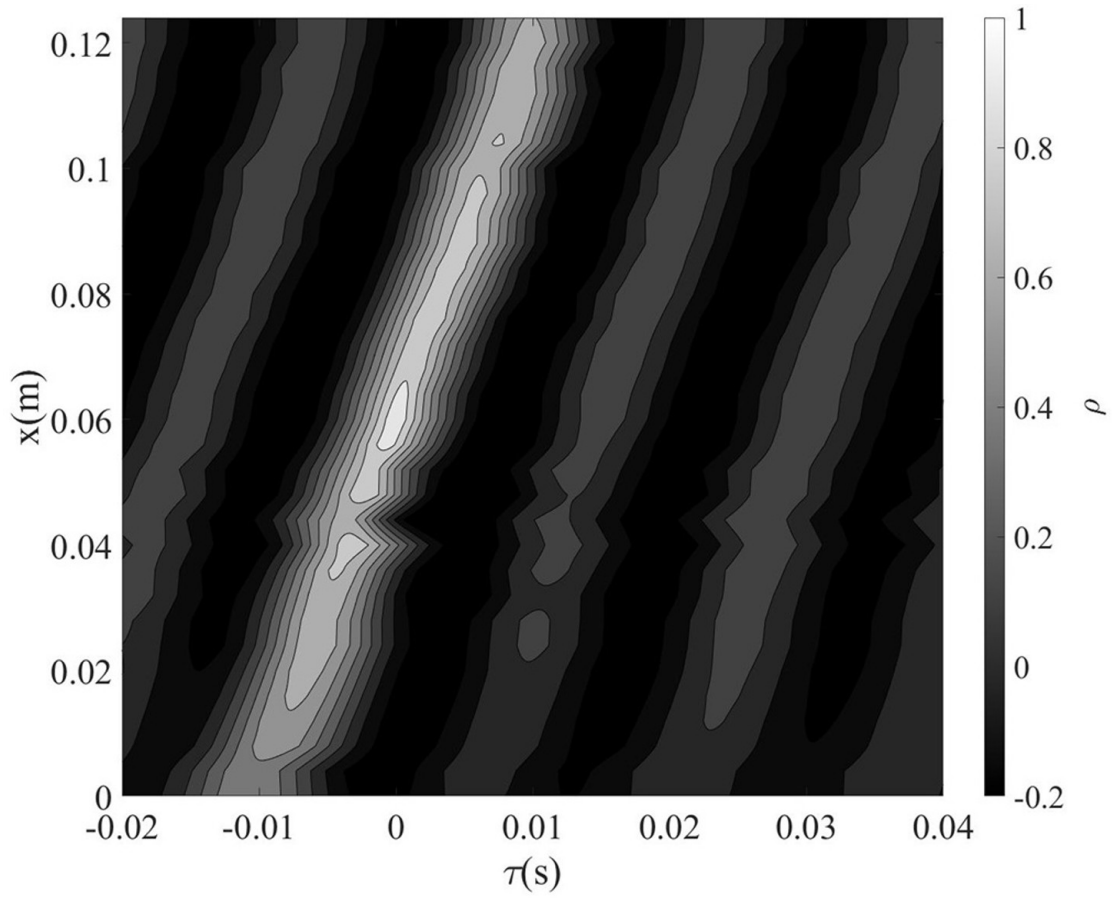


图7