

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2023 年 1 月 19 日 (19.01.2023)



(10) 国际公布号
WO 2023/283752 A1

- (51) 国际专利分类号:
A61B 5/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/105675
- (22) 国际申请日: 2021 年 7 月 12 日 (12.07.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 中国科学院深圳先进技术研究院 (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。
- (72) 发明人: 郑海荣 (ZHENG, Hairong); 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。黄来鑫 (HUANG, Laixin); 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。李飞 (LI, Fei); 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。蔡飞燕 (CAI, Feiyan); 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。

(CN)。孟龙 (MENG, Long); 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。牛丽丽 (NIU, Lili); 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。周伟 (ZHOU, Wei); 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。林争荣 (LIN, Zhengrong); 中国广东省深圳市南山区深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518000 (CN)。

(74) 代理人: 深圳中一联合知识产权代理有限公司 (SHENZHEN ZHONGYI UNION INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国广东省深圳市福田区莲花街道紫荆社区深南大道 6008 号深圳特区报业大厦 33 层, Guangdong 518034 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,

(54) Title: ROTATION CONTROL MODULE, METHOD, AND SYSTEM

(54) 发明名称: 一种旋转控制模块、方法与系统

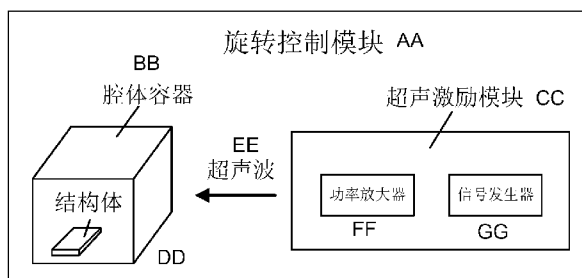


图 2

AA Rotation control module
BB Cavity container
CC Ultrasonic excitation module
DD Structural body
EE Ultrasound waves
FF Power amplifier
GG Signal generator

(57) Abstract: A rotation control module, method and system: pre-filling a liquid containing a target object into a cavity container, and placing a structural body into the cavity container; then using ultrasound waves to excite the structural body to produce resonance, and using the spatially distributed local strong sound field produced by the resonance to form an acoustic radiation force and acoustic flow on the surface of the structural body; under the action of the acoustic radiation force and acoustic flow, the target object can be controlled to rotate on the surface of the structural body to facilitate observation of the target object from multiple angles.

(57) 摘要: 一种旋转控制模块、方法与系统, 预先将包含目标物体的液体充入一个腔体容器, 并往该腔体容器内放入一个结构体。然后, 使用超声波激励该结构体产生共振, 利用共振产生的空间分布的局域强声场, 会在该结构体的表面形成声辐射力和声流, 在声辐射力和声流的作用下, 可以控制该目标物体于该结构体的表面旋转, 以便对该目标物体进行多角度的观测。

PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

一种旋转控制模块、方法与系统

技术领域

本申请涉及显微观测技术领域，尤其涉及一种旋转控制模块、方法与系统。

背景技术

- 5 秀丽隐杆线虫是一种身体组织结构简单的模式生物，精确和多视角地观测线虫的身体组织结构对线虫的研究具有重要意义。然而，由于线虫的尺寸较小，如何操控线虫进行旋转以对其进行多角度的显微观测成为技术人员需要考虑的问题。

技术问题

- 10 有鉴于此，本申请实施例提供了一种旋转控制模块、方法与系统，能够控制线虫等微小物体在指定位置旋转，以便对该物体进行多角度的观测。

技术解决方案

本申请实施例的第一方面提供了一种旋转控制模块，其包括腔体容器和超声激励模块，所述腔体容器内设有结构体；

- 15 所述腔体容器，用于容纳含有目标物体的液体；

所述超声激励模块，用于向所述腔体容器发射超声波，通过超声波激励所述结构体发生共振，以使所述结构体的表面产生声场，并通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转。

- 20 本申请实施例预先将包含目标物体（例如线虫）的液体充入一个腔体容器，并往该腔体容器内放入一个结构体。然后，使用超声波激励该结构体产生共振，利用共振产生的空间分布的局域强声场，会在该结构体的表面形成声辐射力和声流，在声辐射力和声流的作用下，可以控制该目标物体于该结构体的表面旋转，以便对该目标物体进行多角度的观测。

在该旋转控制模块的一种实现方式中，所述腔体容器的底部设有压电片，所述超声激励模块可以包括：

- 25 信号发生器，用于输出指定频率的脉冲信号，所述指定频率根据所述结构体的共振频率设定；

功率放大器，用于对所述脉冲信号进行放大，得到激励信号，以使所述压电片在所述激励信号的作用下产生超声波，所述超声波用于激励所述结构体发生共振。

在实际操作中，超声激励模块可以由信号发生器和功率放大器构成，其中信号发生器用

于输出指定频率（基于该结构体的共振频率设置）的脉冲信号，功率放大器用于对该脉冲信号进行放大，得到放大的激励信号，然后通过压电片将该激励信号转换为超声波。

在该旋转控制模块的一种实现方式中，所述腔体容器可以由石英基底、容器壁和可拆卸的顶盖构成。

5 由于该腔体容器的顶盖是可拆卸的，因此可以方便地实现开放空间下的微注射等显微操作。

在该旋转控制模块的一种实现方式中，所述结构体可以为矩形的板状结构，且所述板状结构上设有多列等间距排列的栅格。

10 采用这种结构可以激发结构体中的非泄露兰姆波，以产生局域化的强透射声场，从而产生强声辐射力和声流。

本申请实施例的第二方面提供了一种旋转控制方法，应用于本申请实施例第一方面提供的旋转控制模块，该方法包括：

使用所述超声激励模块向所述腔体容器发射超声波；

15 通过超声波激励所述结构体发生共振，以使所述结构体的表面产生声场，并通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转。

在操作时，使用超声激励模块向腔体容器发射超声波，通过超声波激励结构体产生共振，会在该结构体的表面形成足够强度的周期性的声场，进而产生周期性的声辐射力和声流。在声辐射力和声流的作用下，能够控制该目标物体于该结构体的表面旋转，以便于显微拍摄该目标物体在多个不同旋转角度下的图像。

20 在该方法的一种实现方式中，所述腔体容器的底部设有压电片，所述超声激励模块包括信号发生器和功率放大器；使用所述超声激励模块向所述腔体容器发射超声波，可以包括：

使用所述信号发生器输出指定频率的脉冲信号，所述指定频率根据所述结构体的共振频率设定；

25 使用所述功率放大器对所述脉冲信号进行放大，得到激励信号，以使所述压电片在所述激励信号的作用下产生超声波。

使用信号发生器可以输出指定频率的脉冲信号，然后再使用功率放大器放大该脉冲信号，得到激励信号；当激励信号作用到压电片上时，会产生超声波。

在该方法的一种实现方式中，通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转，可以包括：

30 通过所述声场的声辐射力将漂浮于液体中的所述目标物体吸附至所述结构体的表面；

通过所述声场的声流控制所述目标物体旋转。

在声辐射力的作用下，能够将漂浮于液体中的目标物体吸附至该结构体的表面。而在声流的作用下，能够控制该目标物体旋转。

在该方法的一种实现方式中，在通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面
5 旋转之后，还可以包括：

拍摄所述目标物体在所述结构体的表面旋转的视频；

从所述视频中提取所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像，并根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像重建得到所述目标物体的三维模型。

可以使用相机拍摄目标物体在结构体的表面旋转的视频，然后使用计算机从该视频中
10 提取出目标物体在多个不同旋转角度的图像，并基于这些图像完成三维模型的重建。

进一步的，根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像重建得到所述目标物体的三维模型，可以包括：

根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像，采用三维重建算法重建得到初始三维模型；

15 对所述初始三维模型执行纹理映射和渲染处理，得到所述目标物体的三维模型。

根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像，可以使用现有的三维重建算法重建得到目标物体的三维形貌（初始三维模型），最后再进行纹理映射和渲染处理，得到最终的三维模型。

本申请实施例的第三方面提供了一种旋转控制系统，其包括成像模块、三维重建模块
20 和本申请实施例第一方面提供的旋转控制模块；

所述成像模块，用于拍摄所述目标物体在所述结构体的表面旋转的视频；

所述三维重建模块，用于从所述视频中提取所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像，并根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像重建得到所述目标物体的三维模型。

可以理解的是，上述第三方面的有益效果可以参见上述第一方面或第二方面中的相关
25 描述，在此不再赘述。

附图说明

图 1 是本申请实施例提供的一种旋转控制系统的示意图；

图 2 是图 1 中旋转控制模块的示意图；

30 图 3 是本申请实施例提供的一种板状结构体的示意图；

图 4 是图 3 所示的结构体的透射谱；

图 5 是本申请实施例提供的一种旋转控制方法的流程图；

图 6 (a) 是通过多物理场仿真软件模拟得到的结构体表面的声压分布示意图；

图 6 (b) 是通过多物理场仿真软件模拟得到的结构体表面的不同位置受到的声辐射力的示意图；

图 7 是目标物体在声流作用下进行旋转的示意图；

图 8 是目标物体的三维模型重建流程示意图；

图 9 是在显微镜下观察得到的线虫和玻璃圆棒沿着结构体的表面竖直排列的图像；

图 10 是线虫在多个不同旋转角度下的图像以及重建得到的三维模型的示意图。

10 本发明的实施方式

以下描述中，为了说明而不是为了限定，提出了诸如特定系统结构、技术之类的具体细节，以便透彻理解本申请实施例。然而，本领域的技术人员应当清楚，在没有这些具体细节的其它实施例中也可以实现本申请。在其它情况中，省略对众所周知的系统、装置、电路以及方法的详细说明，以免不必要的细节妨碍本申请的描述。另外，在本申请说明书和所附权利要求书的描述中，术语“第一”、“第二”、“第三”等仅用于区分描述，而不能理解为指示或暗示相对重要性。

本申请提出一种旋转控制模块、方法与系统，目的是为了实现操控线虫等微小物体在指定位置旋转，以便对该物体进行多角度的观测。本申请主要利用超声波激励腔体容器内的结构体（可以是一个声子晶体板）发生共振，利用共振产生的周期性分布的强声场对处于该腔体容器内的液体中的微小物体进行捕获和排列，同时利用声场在物体周围诱发的非对称分布的声流产生的力矩旋转该物体，相关的具体实施方式请参见下文。

如图 1 所示，是本申请实施例提供的一种旋转控制系统的示意图，该系统包括三个功能模块，分别为旋转控制模块、成像模块和三维重建模块。其中，旋转控制模块用于操控待观测物体改变姿态，例如进行移动和旋转；成像模块用于拍摄待观测物体在不同姿态下的图像；三维重建模块用于根据拍摄到的图像重建出待观测物体的三维模型。

图 1 中旋转控制模块的示意图如图 2 所示，主要包括超声激励模块和腔体容器两部分，腔体容器可以是一个指定形状（例如矩形或方形等）的腔体结构的容器，其尺寸可以根据待观测物体的尺寸合理设置，其材料可以采用玻璃或者聚二甲基硅氧烷等。该腔体容器主要用于容纳含有待观测的目标物体的液体，在操作时，将包含目标物体的液体充入该腔体容器中。另外，往该腔体容器内放入一个结构体，该结构体的尺寸和形状可以根据实际需求设置，该

结构体的材料可以采用不锈钢、黄铜或者硅等。示例性的，该结构体可以是一个声子晶体板，即弹性常数及密度周期分布的材料或结构。

超声激励模块用于向腔体容器发射超声波，激励处于该腔体容器内部的结构体产生共振。共振现象会使得该结构体的表面产生声场，通过该声场能够控制目标物体处于该结构体的表面旋转。在实际操作中，超声激励模块可以由信号发生器和功率放大器构成，其中信号发生器用于输出指定频率（基于该结构体的共振频率设置）的脉冲信号，功率放大器用于对该脉冲信号进行放大，得到放大的激励信号，然后通过压电片（或者其它超声换能器，如高斯束声源等）将该激励信号转换为超声波，通过产生的超声波激励该结构体产生共振。

在该旋转控制模块的一种实现方式中，腔体容器可以由石英基底、容器壁和可拆卸的顶盖构成，且在该石英基底上粘接一个压电片。其中，该容器壁可以与石英基底和顶盖键合。通过这样设置，一方面，该压电片产生的超声波能够直接作用到结构体上，产生足够强度的声场；另一方面，由于该腔体容器的顶盖是可拆卸的，因此可以方便地实现开放空间下的微注射等显微操作。

在该旋转控制模块的一种实现方式中，结构体为矩形的板状结构，且所述板状结构上设有多列等间距排列的栅格。如图3所示，为本申请实施例提供的一种板状结构体的示意图。图3示出的是该板状结构体的横截面，其中 t 为板厚， a 为两个栅格之间的距离， w 为栅格的宽度， h 为栅格的高度。根据腔体容器和目标物体的尺寸，可以合理地设置该板状结构的长度、宽度以及图3中的各个尺寸参数。例如，若目标物体为线虫，通常成年线虫的身体直径约为 $50\text{ }\mu\text{m}$ ，体长约 1mm ，则图3中该板状结构体的各个尺寸参数可以设为 $t=60\text{ }\mu\text{m}$ ， $h=40\text{ }\mu\text{m}$ ， $w=70\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $a=300\text{ }\mu\text{m}$ 。采用图3这种结构可以激发结构体中的非泄露兰姆波，以产生局域化（亚波长）的强透射声场，从而产生强声辐射力和声流。需说明的是，图3只是该板状结构体的一种表现形式，按照需求也可以将该板状结构体设置为弯曲的，且其栅格也可以是曲线形式的或者非等间距的，本申请不对该结构体的具体形状结构进行限定。

如图4所示，为图3所示结构体（由不锈钢材料制作）的透射谱。通过该透射谱可以获知，该结构体的共振频率约为 4.6MHz ，也即采用频率约为 4.6MHz 的超声波激励该结构体能够使其产生共振现象，从而生成强度足够大的声场，如此，才能获得较强的声辐射力和声流来操控目标物体运动。

图1中的成像模块可以由明场光源、光学透镜和相机等部件组成，主要用于拍摄目标物体在结构体的表面旋转的视频。另外，针对线虫体内组织器官或者细胞三维形貌重建的应用场合，还可以为该成像模块添加荧光光源。由于目标物体在声场的作用下自行旋转，故在视

频拍摄过程中无需移动相机。

图 1 中的三维重建模块可以使用计算机等设备，通过采用相机标定算法和三维重建算法，在该计算机上运行图像处理软件以及纹理映射和渲染软件，基于成像模块采集到的目标物体的旋转视频，可以提取目标物体在多个不同旋转角度下的图像，进而根据这些图像重建出该目标物体对应的三维模型。

关于图 1 所示系统的工作原理和具体操作步骤，可以参见下文所述的方法实施例。

如图 5 所示，是本申请实施例提供的一种旋转控制方法的流程图，该方法应用于前文所述的旋转控制模块或系统。该方法包括：

501、使用超声激励模块向腔体容器发射超声波；

针对前文所述的旋转控制模块，首先，往腔体容器中充入包含目标物体的液体，具体可以使用移液枪等设备将混有微小物体（一般为柱形或者近似柱形的颗粒，例如线虫，作为待观测的目标物体）的液体（例如水）移入该腔体容器内。该腔体容器内还放置一个结构体（例如可以采用图 3 所示的板状结构体），可以使用移液枪将该液体直接注射到该结构体上，在后续过程中液体可以作为声传播介质。

在操作时，使用超声激励模块向腔体容器发射超声波，通过超声波可以激励腔体容器内的结构体产生共振，从而在该结构体的表面形成声场。在本申请的一种实现方式中，腔体容器的底部设有压电片，超声激励模块包括信号发生器和功率放大器，使用超声激励模块向腔体容器发射超声波，可以包括：

（1）使用信号发生器输出指定频率的脉冲信号，所述指定频率根据结构体的共振频率设定；

（2）使用功率放大器对脉冲信号进行放大，得到激励信号，以使压电片在激励信号的作用下产生超声波。

超声激励模块可以由信号发生器和功率放大器构成，其中信号发生器用于产生指定频率（基于结构体的共振频率以及压电片的中心频率设置）的脉冲信号；例如，若该结构体的共振频率为 4.6MHz，而该压电片的中心频率为 4.5MHz，则可以采用信号发生器输出频率为 4.577MHz 的脉冲信号。该脉冲信号通过功率放大器放大，得到激励信号，用于激励压电片（作为超声换能器）产生超声波。

502、通过超声波激励结构体发生共振，以使结构体的表面产生声场，并通过声场控制目标物体于结构体的表面旋转。

通过超声波激励结构体产生共振，会在该结构体的表面形成足够强度的周期性的声场，

进而产生周期性的声辐射力和声流。在声辐射力和声流的作用下，能够控制该目标物体于该结构体的表面旋转，以便于显微拍摄该目标物体在多个不同旋转角度下的图像。通过声场控制目标物体于该结构体的表面旋转的具体原理，请参见下文所述。

在本申请的一种实现方式中，通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转，可以包括：

(1) 通过所述声场的声辐射力将漂浮于所述液体中的所述目标物体吸附至所述结构体的表面；

(2) 通过所述声场的声流控制所述目标物体旋转。

在声辐射力的作用下，能够将漂浮于液体中的目标物体吸附至该结构体的表面。而在声流的作用下，能够控制该目标物体旋转。以图 3 所示的板状结构体为例，使用多物理场仿真软件（例如 COMSOL）可以计算模拟该板状结构表面产生的声场，包括声压场和速度场等，还可以进一步计算目标物体在声场中受到的声辐射力，根据软件模拟的结果可以解释目标物体移动和旋转的原理。

考虑到结构体的周期性和对称性，使用二维计算模型，计算区域包括液体（一般是水）和结构体，其中液体由压力声学（频域）模拟，结构体由固体力学模型模拟。在结构体的底部区域设置平面波入射（模拟压电片产生的超声波），在结构体的顶部区域设置平面波辐射，假设超声波无反射，通过多物理场仿真软件模拟得到的该结构体表面的声压分布示意图如图 6 (a) 所示。在图 6 (a) 中，示出了结构体两个栅格表面附近的声压分布，其中两个白色小圈标示出目标物体（例如线虫）的捕获位置，可以视作目标物体的横截面，在计算中近似视为圆柱形。另外，通过多物理场仿真软件可以模拟得到图 6 (a) 中该结构体表面的不同位置受到的声辐射力的示意图，如图 6 (b) 所示。在图 6 (b) 中， F_x 为在 x 方向上受到的二维声辐射力分量， F_y 为在 y 方向上受到的二维声辐射力分量，x 方向和 y 方向可以参照图 6 (a) 所标示的方向。可见，图 6 (b) 中 F_x 为 0 的位置，是目标物体在 x 方向的平衡位置（图中的灰色圆圈），由于在该平衡位置两侧的声辐射力均指向该平衡位置，因此会迫使该目标物体向该平衡位置移动。另外，由于在 F_x 为 0 的位置，对应的 F_y 为负值，即 y 方向上的声辐射力指向该结构体的表面，因此，漂浮的目标物体会被吸附至该结构体的表面。从结构体的上方朝下看，可以观察到目标物体以一定的间距排列分布。

接下来说明通过声场控制目标物体旋转的原理。声场中的粒子所受的辐射应力可以用以下公式表示：

$$\boldsymbol{\sigma} = \left[\frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \langle p^2 \rangle - \frac{\rho_0}{2} \langle |\mathbf{v}|^2 \rangle \right] \mathbf{I} + \rho_0 \langle \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} \rangle$$

其中， $\boldsymbol{\sigma}$ 表示辐射应力， $\langle * \rangle$ 表示时间平均算子， $\mathbf{I}$ 表示单位张量， $\otimes$ 为并矢符号； ρ_0 和 c_0 分别为声传播介质的密度和声速，室温下是介质的固定参数，可通过查询资料获得； p 和 $\mathbf{V}$ 分别为一阶声压和速度场。

5 根据波动方程和动量守恒方程，可以获得以下 2 个公式：

$$\begin{aligned} c_0^2 \nabla^2 p &= \partial_t^2 p \\ -\nabla p &= \rho_0 \partial_t \mathbf{v} \end{aligned}$$

其中， t 表示在时间维度下求偏导。基于上述 3 个公式，采用有限元法和有限差分法等数值求解方法可以求解得到辐射应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 。

10 在计算出声场中的粒子所受的辐射应力之后，可以采用以下公式分别计算目标物体在声场中受到的辐射力和辐射力矩：

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{rad} &= - \iint_S \boldsymbol{\sigma} d\mathbf{S} \\ \mathbf{T}_{rad} &= - \iint_S \mathbf{r} \times \boldsymbol{\sigma} d\mathbf{S} \end{aligned}$$

15 其中， $\mathbf{F}_{rad}$ 表示辐射力， $\mathbf{T}_{rad}$ 表示辐射力矩， $\mathbf{r}$ 表示目标物体的质心（在二维计算模型下，质心可以为目标物体横截面的中心）到目标物体表面一点的方向向量， $d\mathbf{S}$ 为该表面一点的法向向量和面积微元的乘积。

经过模拟的数值计算，发现目标物体受到的辐射力矩接近于 0，而在目前的理论体系中，认为声场中的力矩来源于辐射力和声流，因此若辐射力矩接近于 0，则可以判定目标物体的旋转是由声流引起的，以下计算声场在结构体表面产生的声流分布。

20 不可压缩流体的粘性应力（黏性应力）可以表示为：

$$\tau_{ij} = \mu (u_{i,j} + u_{j,i})$$

25 其中， τ_{ij} 表示粘性应力， μ 为流体动力粘度，在室温下是介质的固定参数，可通过查阅资料获得； $\mathbf{u}$ 表示声流速度；下标 i 和下标 j 的取值可以为 1、2 或者 3，分别表示变量在空间中沿着三个坐标轴 x 、 y 和 z 的分量， i 和 j 之间的逗号表示变量对坐标求偏导。例如， x 方向和 y 方向之间的粘性应力可以表示为：

$$\tau_{12} = \mu (u_{1,2} + u_{2,1})$$

其中， $u_{1,2}$ 表示 $\mathbf{u}_x$ 在 y 方向上的偏导， $u_{2,1}$ 表示 $\mathbf{u}_y$ 在 x 方向上的偏导， $\mathbf{u}_x$ 表示声流速度在 x 方向上的分量， $\mathbf{u}_y$ 表示声流速度在 y 方向上的分量。

具体的，声流速度 $\mathbf{u}$ 可以采用以下公式计算得到：

$$\begin{aligned} \nabla \langle p_2 \rangle - \mu \nabla^2 \langle \mathbf{u} \rangle &= -\rho_0 \nabla \cdot \langle \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} \rangle \\ \rho_0 \nabla \cdot \langle \mathbf{u} \rangle &= 0 \end{aligned}$$

其中， p_2 为二阶压力场， $\langle * \rangle$ 为时间平均算子， $\otimes$ 为并矢符号， ρ_0 为声传播介质的密度， μ 为流体动力粘度， $\mathbf{v}$ 为速度场，此公式可使用软件COMSOL中的蠕动流模块求解，在求解出声流速度 $\mathbf{u}$ 后即可计算得到粘性应力，根据粘性应力可得目标物体所受的声粘性扭矩为：

$$\mathbf{T}_{vis} = \iint_S \mathbf{r} \times \boldsymbol{\tau} dS$$

由于捕获的目标物体两侧的声流是非对称分布的，即一侧强一侧弱，这导致两侧声流在目标物体表面产生的力矩虽然方向相反，但是大小不同，从而使得声粘性扭矩不为零，因此会使目标物体发生旋转。

图7是目标物体在声流作用下进行旋转的示意图，其中图7左方的目标物体1（圆形表示目标物体的横截面）沿着自身中心顺时针旋转，图7右方的目标物体2沿着自身中心逆时针旋转。图7中还用箭头标示出目标物体附近的声流和目标物体所受的力矩，可以看出对于左方的目标物体1，其左侧的声流较强，而右侧的声流较弱，因此会产生顺时针方向的力矩，使得目标物体顺时针旋转，对于右方的目标物体则结论相反。

在本申请的一种实现方式中，在通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转之后，还可以包括：

（1）拍摄所述目标物体在所述结构体的表面旋转的视频；

（2）从所述视频中提取所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像，并根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像重建得到所述目标物体的三维模型。

为了重建该目标物体的三维模型，可以使用相机拍摄该目标物体在结构体的表面旋转的视频，然后使用计算机从该视频中提取出目标物体在多个不同旋转角度（例如 0° 、 90° 、

180°、270° 和 360°) 的图像, 这个过程也称为拆帧, 之后可以对图像进行裁剪、增强、滤波或者边缘识别等预处理过程; 接着, 使用三维重建算法 (例如 Marching Cube 算法、Ball Pivoting 算法和 Screened Poisson 算法等) 重建得到目标物体的三维形貌, 最后再进行纹理映射和渲染处理, 得到对应的三维模型, 相应的模型重建流程示意图如图 8 所示。

5 另一方面, 在重建目标物体的三维模型之前, 需要对相机参数进行标定和求解, 即需要获得相机矩阵 $\mathbf{P}$, 以描述三维空间中一点在二维图像中的像素点坐标 (x, y) 和实际空间坐标 (X, Y, Z) 的对应关系。相机矩阵的具体形式可以表示为 $\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$, 其中 $\mathbf{K}$ 为相机的内参矩阵, 可用现有的相机标定方法获得, $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$ 为外参矩阵, 表示世界坐标系和相机坐标系的变换矩阵, 其中 $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵, 可根据目标物体的旋转角度求得, $\mathbf{t}$ 为平移矩阵, 可根据世界坐标系原点和相机坐标系原点的位置求得。在获得相机矩阵后, 结合图像处理获得的不同旋转角度的目标物体的图像坐标, 可以计算出不同旋转角度的目标物体在世界坐标系下的坐标, 之后再执行三维模型的重建流程。

本申请实施例采用超声激励结构体发生共振, 利用共振产生的空间分布的局域强声场, 会在该结构体的表面形成声辐射力和声流, 在声辐射力和声流的作用下, 可以控制该目标物
15 体于该结构体的表面旋转, 以便对该目标物体进行多角度的观测。而且, 可以采用具有可拆卸顶盖的腔体容器, 从而实现开放空间下的微注射等显微操作。另外, 在控制目标物体旋转后, 还可以通过显微镜相机拍摄目标物体不同旋转角度的图像, 采用三维重建算法对这些图像进行重建, 获得对应的三维模型。

应理解, 上述各个实施例中各步骤的序号的大小并不意味着执行顺序的先后, 各过程的
20 执行顺序应以其功能和内在逻辑确定, 而不对本申请实施例的实施过程构成任何限定。

为便于理解本申请提出的技术方案, 以下列举一个实际的应用场景。首先, 采用 C304 不锈钢, 基于标准化学刻蚀工艺, 制作出如图 3 所示的带有周期性栅格的结构体, 具体尺寸参数为 $t=60\mu\text{m}$, $h=40\mu\text{m}$, $w=70\mu\text{m}$, $a=300\mu\text{m}$ 。将该结构体放入一个腔体容器内, 该腔体容器由石英玻璃基底、聚二甲基硅氧烷材料的容器壁和玻璃顶盖构成, 容器壁可以与基底和
25 顶盖键合。超声换能器采用中心频率为 4.5MHz 的 PZT4 型压电陶瓷片, 其通过环氧树脂与腔体容器的玻璃基底粘接在一起。采用信号发生器产生频率为 4.577MHz 的脉冲信号, 经由功率放大器放大后, 激励压电陶瓷片产生超声波。结构体在超声波的作用下产生共振, 使得该结构体的表面形成较强的声场。

在操作时, 首先打开腔体容器的玻璃顶盖, 使用移液枪将混有线虫和玻璃圆棒的水注射
30 到该结构体的表面, 然后盖上玻璃顶盖。线虫和玻璃圆棒在声场的作用下, 会移动至该结构

体的表面旋转，具体原理可参照前文所述。其中，玻璃圆棒用于辅助验证计算结论，证明本申请提出的方案可以用于观测任意圆柱形或者近似圆柱形的微小物体。将整个腔体容器放置于显微镜下，可以观察到线虫和玻璃圆棒都沿着结构体的表面竖直排列，如图 9 所示。

5 接下来，用显微镜观测其中一条线虫，拍摄该线虫进行旋转的视频，对视频拆帧后可以得到该线虫在多个不同旋转角度下的图像，之后即可按照图 8 所示的流程重建得到该线虫的三维模型。获得的线虫在多个不同旋转角度下的图像以及重建得到的三维模型的示意图如图 10 所示。

10 以上所述实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的精神和范围，均应包含在本申请的保护范围之内。

权利要求书

1. 一种旋转控制模块，其特征在于，包括腔体容器和超声激励模块，所述腔体容器内设有结构体；

5 所述腔体容器，用于容纳含有目标物体的液体；

 所述超声激励模块，用于向所述腔体容器发射超声波，通过超声波激励所述结构体发生共振，以使所述结构体的表面产生声场，并通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转。

2. 如权利要求 1 所述的旋转控制模块，其特征在于，所述腔体容器的底部设有压电片，
10 所述超声激励模块包括：

 信号发生器，用于输出指定频率的脉冲信号，所述指定频率根据所述结构体的共振频率设定；

 功率放大器，用于对所述脉冲信号进行放大，得到激励信号，以使所述压电片在所述激励信号的作用下产生超声波，所述超声波用于激励所述结构体发生共振。

15 3. 如权利要求 1 所述的旋转控制模块，其特征在于，所述腔体容器由石英基底、容器壁和可拆卸的顶盖构成。

 4. 如权利要求 1 至 3 任一项所述的旋转控制模块，其特征在于，所述结构体为矩形的板状结构，且所述板状结构上设有多个等间距排列的栅格。

5. 一种旋转控制方法，应用于如权利要求 1 至 4 任一项所述的旋转控制模块，其特征
20 在于，所述方法包括：

 使用所述超声激励模块向所述腔体容器发射超声波；

 通过超声波激励所述结构体发生共振，以使所述结构体的表面产生声场，并通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转。

6. 如权利要求 5 所述的旋转控制方法，其特征在于，所述腔体容器的底部设有压电片，
25 所述超声激励模块包括信号发生器和功率放大器；

 使用所述超声激励模块向所述腔体容器发射超声波，包括：

 使用所述信号发生器输出指定频率的脉冲信号，所述指定频率根据所述结构体的共振频率设定；

 使用所述功率放大器对所述脉冲信号进行放大，得到激励信号，以使所述压电片在所述
30 激励信号的作用下产生超声波。

7. 如权利要求 5 所述的旋转控制方法，其特征在于，通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转，包括：

通过所述声场的声辐射力将漂浮于液体中的所述目标物体吸附至所述结构体的表面；

通过所述声场的声流控制所述目标物体旋转。

5 8. 如权利要求 5 至 7 任一项所述的旋转控制方法，其特征在于，在通过所述声场控制所述目标物体于所述结构体的表面旋转之后，还包括：

拍摄所述目标物体在所述结构体的表面旋转的视频；

从所述视频中提取所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像，并根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像重建得到所述目标物体的三维模型。

10 9. 如权利要求 8 所述的旋转控制方法，其特征在于，根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像重建得到所述目标物体的三维模型，包括：

根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像，采用三维重建算法重建得到初始三维模型；

对所述初始三维模型执行纹理映射和渲染处理，得到所述目标物体的三维模型。

15 10. 一种旋转控制系统，其特征在于，包括成像模块、三维重建模块和如权利要求 1 至 4 任一项所述的旋转控制模块；

所述成像模块，用于拍摄所述目标物体在所述结构体的表面旋转的视频；

所述三维重建模块，用于从所述视频中提取所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像，并根据所述目标物体在多个不同旋转角度下的图像重建得到所述目标物体的三维模型。



图 1

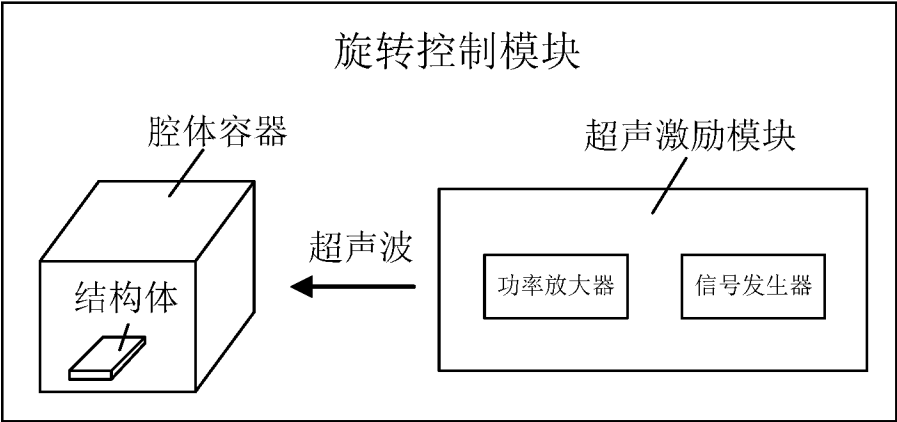


图 2

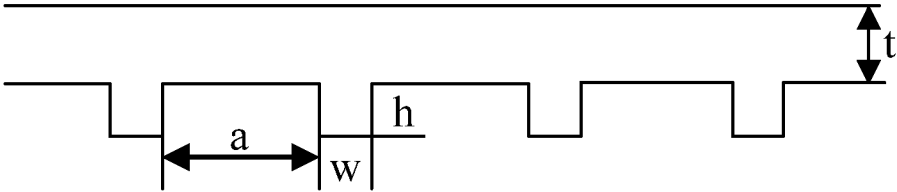


图 3

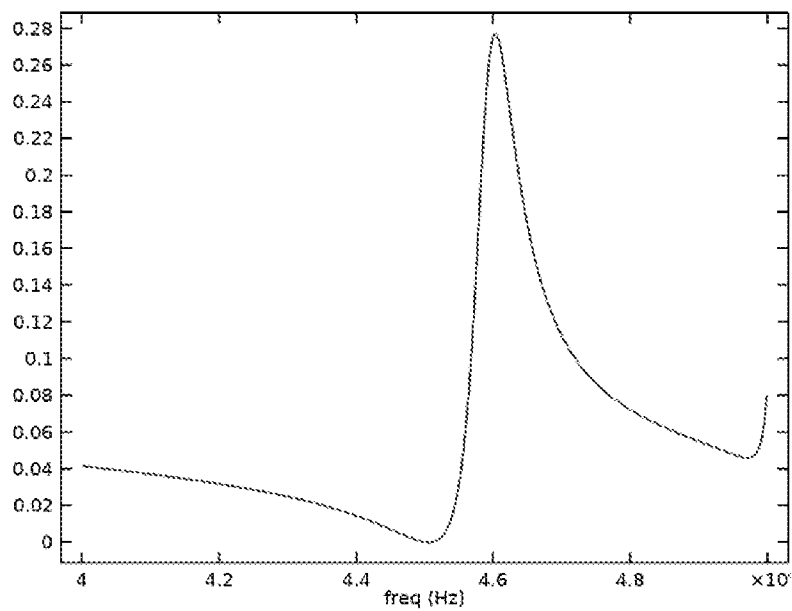


图 4

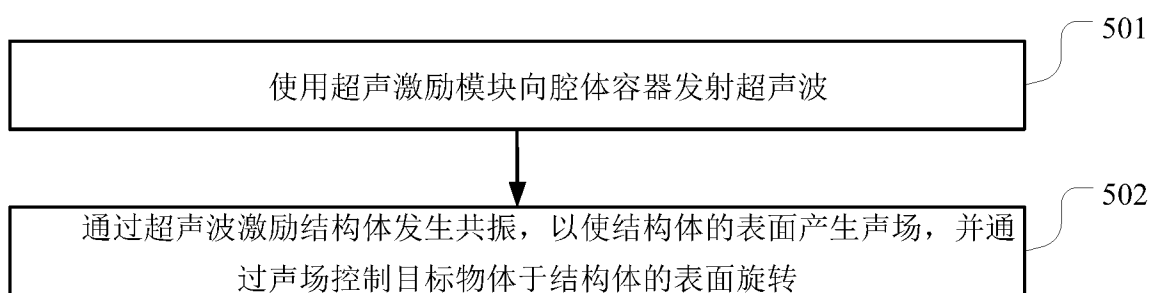


图 5

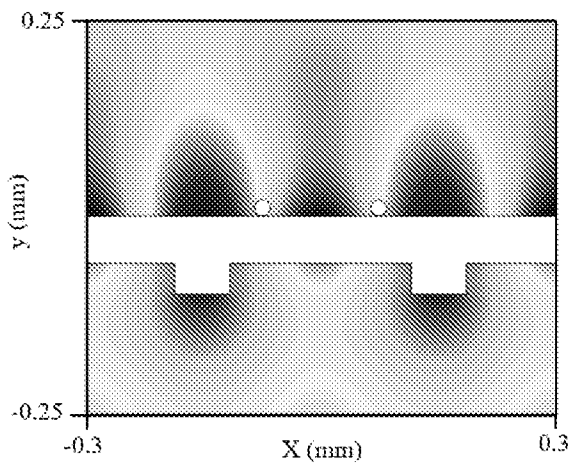


图 6 (a)

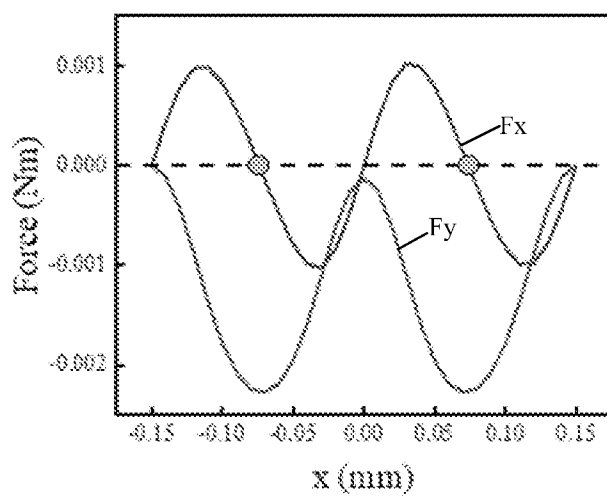


图 6 (b)

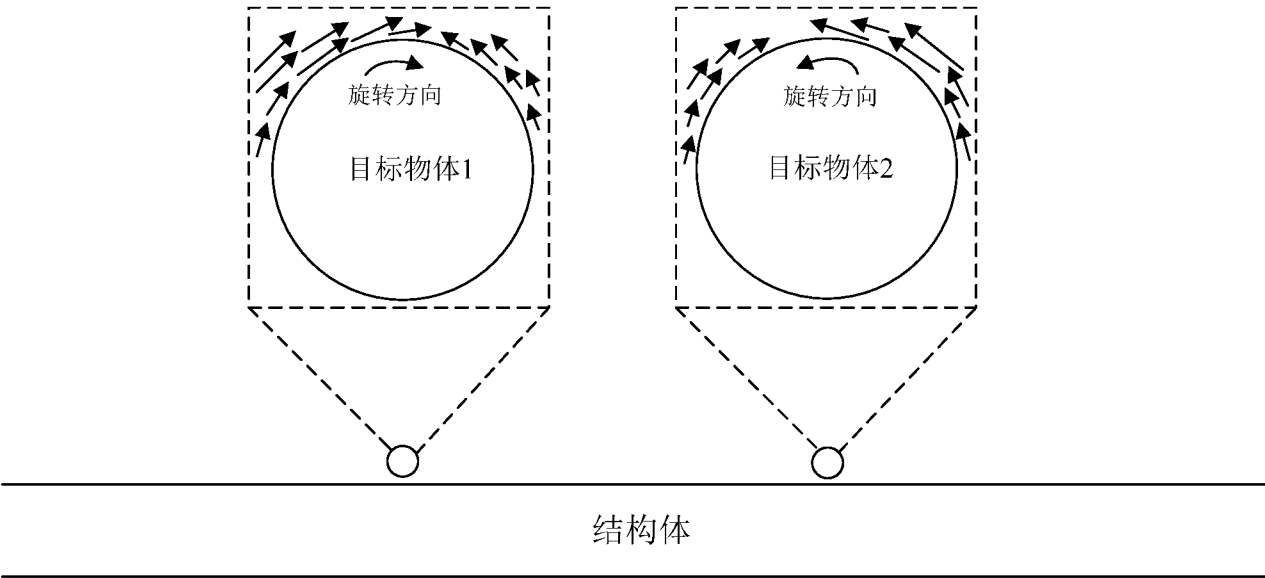


图 7

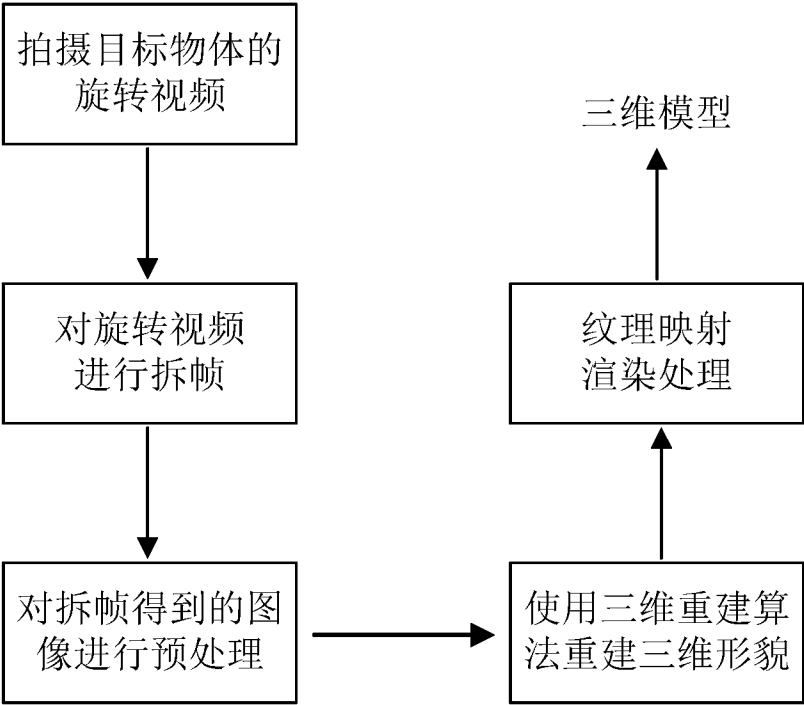


图 8

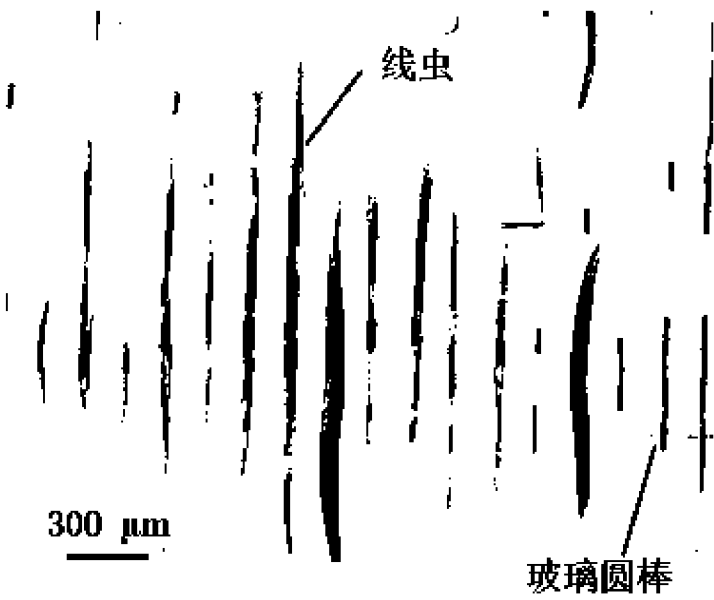


图 9

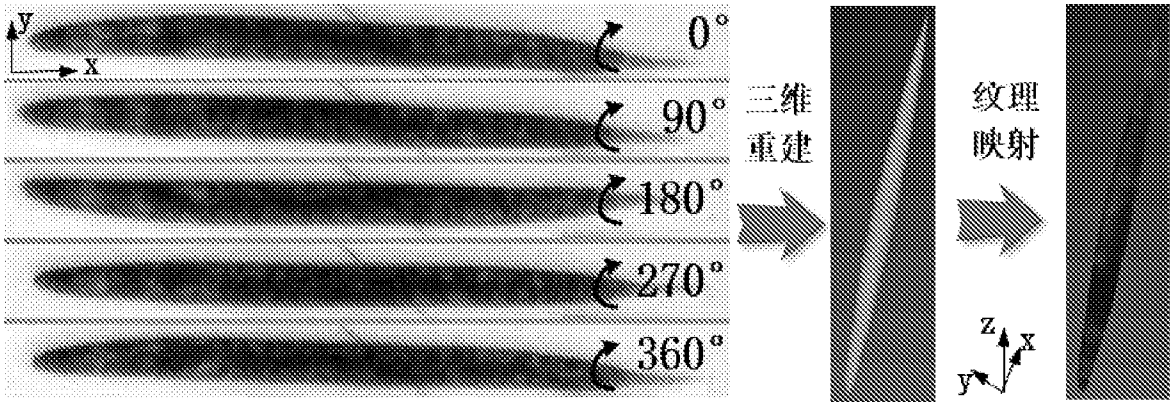


图 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/105675

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

A61B 5/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

A61B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, IEEE: 控制, 操控, 超声波, 共振, 频率, 信号, 液体, 场, 结构, 图像, 旋转, 运动, control, ultrasonic, resonance, frequency, signal, liquid, field, structure, image, rotation, movement

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 105214742 A (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 06 January 2016 (2016-01-06) claims 1-15, and description, paragraphs [0033]-[0065]	1-10
A	CN 111346292 A (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 30 June 2020 (2020-06-30) entire document	1-10
A	CN 109946217 A (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 28 June 2019 (2019-06-28) entire document	1-10
A	WO 2014139260 A1 (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 18 September 2014 (2014-09-18) entire document	1-10
A	US 2014342373 A1 (CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE) 20 November 2014 (2014-11-20) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25 March 2022

Date of mailing of the international search report

14 April 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/105675

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	105214742	A	06 January 2016	None			
CN	111346292	A	30 June 2020	None			
CN	109946217	A	28 June 2019	None			
WO	2014139260	A1	18 September 2014	CN	103203328	A	17 July 2013
US	2014342373	A1	20 November 2014	CN	103930210	A	16 July 2014
				EP	2758173	A1	30 July 2014
				WO	2013041983	A1	28 March 2013

A. 主题的分类 A61B 5/00 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) A61B 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNPAT, WPI, EPDOC, CNKI, IEEE: 控制, 操控, 超声波, 共振, 频率, 信号, 液体, 场, 结构, 图像, 旋转, 运动, control, ultrasonic, resonance, frequency, signal, liquid, field, structure, image, rotation, movement																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>CN 105214742 A (中国科学院深圳先进技术研究院) 2016年1月6日 (2016 - 01 - 06) 权利要求1-15, 说明书第[0033]-[0065]段</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 111346292 A (深圳先进技术研究院) 2020年6月30日 (2020 - 06 - 30) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 109946217 A (深圳先进技术研究院) 2019年6月28日 (2019 - 06 - 28) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>WO 2014139260 A1 (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 2014年9月18日 (2014 - 09 - 18) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2014342373 A1 (CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE) 2014年11月20日 (2014 - 11 - 20) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	X	CN 105214742 A (中国科学院深圳先进技术研究院) 2016年1月6日 (2016 - 01 - 06) 权利要求1-15, 说明书第[0033]-[0065]段	1-10	A	CN 111346292 A (深圳先进技术研究院) 2020年6月30日 (2020 - 06 - 30) 全文	1-10	A	CN 109946217 A (深圳先进技术研究院) 2019年6月28日 (2019 - 06 - 28) 全文	1-10	A	WO 2014139260 A1 (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 2014年9月18日 (2014 - 09 - 18) 全文	1-10	A	US 2014342373 A1 (CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE) 2014年11月20日 (2014 - 11 - 20) 全文	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
X	CN 105214742 A (中国科学院深圳先进技术研究院) 2016年1月6日 (2016 - 01 - 06) 权利要求1-15, 说明书第[0033]-[0065]段	1-10																		
A	CN 111346292 A (深圳先进技术研究院) 2020年6月30日 (2020 - 06 - 30) 全文	1-10																		
A	CN 109946217 A (深圳先进技术研究院) 2019年6月28日 (2019 - 06 - 28) 全文	1-10																		
A	WO 2014139260 A1 (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 2014年9月18日 (2014 - 09 - 18) 全文	1-10																		
A	US 2014342373 A1 (CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE) 2014年11月20日 (2014 - 11 - 20) 全文	1-10																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期																		
2022年3月25日		2022年4月14日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员																		
中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		王莹 电话号码 86-(10)-53961411																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/105675

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	105214742	A	2016年1月6日	无			
CN	111346292	A	2020年6月30日	无			
CN	109946217	A	2019年6月28日	无			
WO	2014139260	A1	2014年9月18日	CN	103203328	A	2013年7月17日
US	2014342373	A1	2014年11月20日	CN	103930210	A	2014年7月16日
				EP	2758173	A1	2014年7月30日
				WO	2013041983	A1	2013年3月28日