



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103249947 A

(43) 申请公布日 2013. 08. 14

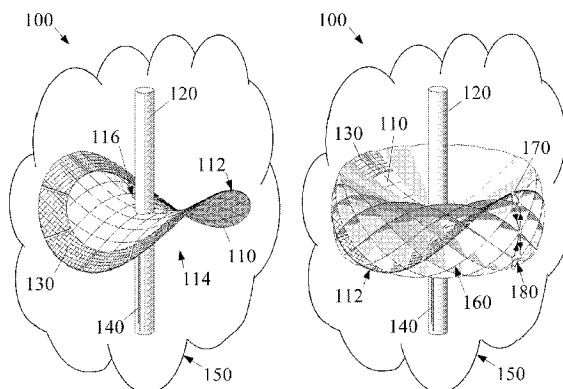
- (21) 申请号 201180046617. 1 F04B 43/00 (2006. 01)
- (22) 申请日 2011. 09. 26 B06B 1/10 (2006. 01)
- (30) 优先权数据 F03G 7/00 (2006. 01)
  - 2010904340 2010. 09. 27 AU F04B 45/00 (2006. 01)
  - 2011901482 2011. 04. 20 AU B06B 1/14 (2006. 01)
- (85) PCT申请进入国家阶段日 F04B 39/08 (2006. 01)
  - 2013. 03. 27 F16H 35/00 (2006. 01)
- (86) PCT申请的申请数据
- (87) PCT申请的公布数据
- (71) 申请人 特克通尼克股份有限公司
- 地址 澳大利亚昆士兰省
- (72) 发明人 Z. 本贾明 C.R. 史密斯
- (74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
- 代理人 杨炯
- (51) Int. Cl.
- F03G 7/06 (2006. 01)
- B06B 3/02 (2006. 01)

权利要求书2页 说明书14页 附图21页

(54) 发明名称  
波动结构

(57) 摘要

本发明提供一种波动结构及其制造和使用方法。该波动结构包括弯曲片材和用于使弯曲片材以波动方式变形的一个或多个功输入元件,其中弯曲片材的波状轮廓上的一系列点中的每个点至少部分地沿着8字形路径行进。该波动结构可以适合用作固态换能器,其中弯曲片材在不明显违背弹性恢复力的情况下提供机械效益,由此获得改善的力、位移和效率特性。



1. 一种结构,所述结构包括:  
具有波状轮廓的弯曲片材;以及  
与所述弯曲片材联系以用于使所述弯曲片材以波动方式变形的一个或多个功输入元件,其中所述波状轮廓上的一系列点中的每个点相对于共同参考框架至少部分地沿着 8 字形路径行进。
2. 根据权利要求 1 所述的结构,其中所述弯曲片材包括具有各向同性机械性质的材料。
3. 根据权利要求 1 所述的结构,其中所述弯曲片材具有为正弦状的波状轮廓。
4. 根据权利要求 1 所述的结构,其中所述弯曲片材具有从所述弯曲片材的截面观察的波状轮廓,所述截面具有选自下列的形状:圆周、直线和曲线。
5. 根据权利要求 1 所述的结构,其中所述弯曲片材具有从所述弯曲片材的截面观察的波状轮廓,所述波状轮廓具有在垂直于所述截面延伸的方形上以选自下列的方式表征的幅度:大致恒定、单调和波状变化。
6. 根据权利要求 1 所述的结构,其中所述弯曲片材为鞍状。
7. 根据权利要求 6 所述的结构,其中所述弯曲片材是无接头的。
8. 一种结构,所述结构包括:  
具有鞍点的弯曲片材,其中邻近所述鞍点的所述弯曲片材的截面具有鞍形状;以及  
连接到具有鞍形状的所述弯曲片材的所述截面的一个或多个功输入元件,用于通过使所述弯曲片材变形而相对于所述鞍点可旋转地重定向所述截面的鞍形状。
9. 根据权利要求 1-8 中的任一项所述的结构,其中所述弯曲片材以波动方式以大致恒定净应变能可变形,由此所述弯曲片材可以在不明显违背弹性恢复力的情况下变形。
10. 根据权利要求 1-9 中的任一项所述的结构,其中所述结构呈下列形式之一:换能器;致动器;传感器;发生器;风扇;泵;扬声器;热机;以及推进系统。
11. 根据权利要求 1-9 中的任一项所述的结构,其中所述结构是用于对与机器联系的一个或多个主体做功的所述机器,由此所述弯曲片材由于以波动方式变形而对所述一个或多个主体做功。
12. 根据权利要求 11 所述的结构,其中所述弯曲片材是机械变换器,所述机械变换器配置成提供所述一个或多个功输入元件和与所述机器联系的所述一个或多个主体之间的机械效益。
13. 一种用于对与具有波状轮廓的弯曲片材联系的一个或多个主体做功的方法,所述方法包括使所述弯曲片材变形,其中所述弯曲片材的所述波状轮廓上的一系列点中的每个点相对于共同参考框架至少部分地沿着 8 字形路径行进,由此所述弯曲片材由于变形而将运动产生的力施加于所述一个或多个主体上。
14. 根据权利要求 13 所述的方法,其中所述弯曲片材以大致恒定净应变能变形,由此在不明显违背弹性恢复力的情况下实现所述弯曲片材的变形。
15. 一种制造结构的方法,所述方法包括以下步骤:  
通过在柔性片材中引入弯曲应力而在柔性片材中形成波状轮廓;以及  
提供与所述柔性片材联系的至少一个功输入元件,用于使所述波状轮廓上的一系列点中的每个点相对于共同参考框架沿着 8 字形路径行进。

16. 根据权利要求 15 所述的方法,其还包括将所述柔性片材联接到支撑件的步骤。
17. 根据权利要求 15 所述的方法,其还包括弹性地平衡所述柔性片材的步骤。
18. 根据权利要求 15 所述的方法,其中在柔性片材中形成波状轮廓的步骤包括在外部对所述柔性片材施加应力的步骤。
19. 根据权利要求 15 所述的方法,其中在柔性片材中形成波状轮廓的步骤包括在所述柔性片材中引起残余应力的步骤。
20. 根据权利要求 19 所述的方法,其中在所述柔性片材中引起残余应力的步骤包括选自下列形成过程中的一个或多个:滚轧、冲击、打平和旋转。

## 波动结构

[0001] 申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于 2010 年 9 月 27 日提交的、澳大利亚临时申请第 2010904340 号和于 2011 年 4 月 20 日提交的澳大利亚临时申请第 2011901482 号的权益,上述申请通过引用完整地合并于本文中。

### 技术领域

[0003] 本发明总体上涉及包括可波动弯曲片材的结构及其制造和使用方法。特别地,但非排他地,本发明涉及利用波动结构做功的多种多样的机器。本文中所述的本发明的特定实施例包括:换能器、风扇、泵、扬声器、热机和波动推进系统。

### 背景技术

[0004] 波动推进系统是利用可波动元件做功的机器的典范。在生物学上从某些类型的鱼和鳍刺(ray)受到启发,人造波动推进系统典型地通过波动流体浸没鳍产生推力。不同于常规旋转推进系统,波动推进系统可以在没有旋转轴承和密封件的情况下构造,由于移动部件之间的紧密公差间隙,所述旋转轴承和密封件容易通过磨损、异物侵入和腐蚀而出现故障。在水域环境中,波动推进系统潜在地比常规螺旋桨式推进系统噪声更低、环境损害更小并且更不易受到空化和撞击损伤。

[0005] 尽管波动推进系统有潜在优点并且有数十年的相关研究,但是由于它们的成本、复杂性和性能,即使有也很少在商业上生产。已知的波动推进系统典型地需要许多致动器和复杂的控制系统。例如在 Journal of Vibration and Control Vol. 12No. 12(2006) pp. 1337-1359(Low 等人)中所述的机器鱼具有 20 个伺服电机和六个微控制器来致动一对鳍。

[0006] 进一步增加复杂性和潜在的故障点,先前所述的机器鱼的鳍由用滑动接头互连的刚性段制造。滑动接头需要适应致动元件之间的距离变化,所述距离变化是基于鳍的波动推进系统的常见问题。替代方案是由挠性材料构造鳍,所述挠性材料允许在致动元件之间形成松弛,但是这不利地影响系统推进效率和动力操作能力。

[0007] 在 Journal of Fluids and Structures 23(2007)pp. 297-307(Krylov 等人)中描述了可用单致动元件操作并且没有电子控制的比较简单的波动推进系统。它使用马达驱动枢轴臂在具有一个夹紧纵向边缘的橡胶带中生成弹性波。系统简化的缺陷在于橡胶带的总体形状不受限制并且受到倾向于使动力输送欠佳且难以控制的许多因素影响。特别地,由周围流体产生的阻尼随着离马达驱动枢轴臂的距离的增加而减小弹性波的幅度,并且弹性波的反射可能导致相消干涉。

[0008] 在 SICE-ICASE International Joint Conference Oct. 2006pp. 5847-5852(Rossiter 等人)中提出了能够由较少致动元件驱动类似于多个波动推进系统的具有波形鳍状元件的设备。该设备包括安装在弹性弯曲梁上的一系列致动元件。致动元件的特定启动序列在梁中点处产生圆形变形路径,其可以用于借助于平台增

量地传送固体物体以将来自梁中点的物体卸载到它的圆形变形路径的部分上。非理想地，该设备以非均匀运动传送固体物体，需要高致动力循环地提升被传送物体，并且由于呈弹性和重力形式的潜在能量的未恢复而受到效率损失。

[0009] 如下面将所述，可波动弯曲片材可以用作机械变换器。机械变换器广泛地用于使用机械效益使机械能量源的阻抗匹配负载。类似于改变输入和输出端子之间的电力的电压和电流的比率电变换器，机械变换器改变机械动力的力和速度的比率。

[0010] 与固态换能器结合使用的机械变换器通常集成在换能器的架构内。提供机械效益的换能器架构的公知类型包括弯折机、杠杆-臂和曲张配置。即使在提供机械效益的配置中使用，在固态换能器中常见的特性在于它们受到的净弹性恢复力渐增地抵抗远离平衡位置的变形。因此，净弹性恢复力减小输出能力并且导致输出畸变。在振荡条件下，净弹性恢复力与换能器的质量和阻尼特性组合以产生频率依赖响应，除了在窄带共振频率下以外典型地导致不良换能器效率。

[0011] 很少报导平衡内部弹性力以减小或消除净弹性及其影响的包含机械变换器的换能器架构。在美国专利第 6, 236, 143 号 (Lesieutre 等人) 中描述了一种这样的换能器架构，其使用轴向压缩预弯曲压电弯折元件，由此减小其横向刚度。尽管预弯曲弯折元件内的弹性力可以在一个位置被平衡，但是该架构在操作中受到弹性的影响，原因是它不具有中性稳定变形路径。不具有中性稳定变形路径的换能器架构包括由美国专利第 4, 010, 612 号 (Sandoval) 举例说明的基于连续带的设计、和例如在 Proceedings of the 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference Apr. 2004, pp. 19-22 (Murphey 等人) 中所述的中性弹性带弹簧。尽管克服了与净弹性恢复力相关的缺陷，但是由于仅仅具有在任何指定时间有效的它们的总致动能力的一小部分，因此这些换能器架构具有不良功率密度。此外，由于通常不仅沿着它们的中性稳定路径的耐变形性差，因此中性弹性带弹簧不适合于许多应用。在另一方面，连续带设计倾向于更稳健，但是为保持带张力所需的支撑结构的重量和体积所困扰。

[0012] 鞍状结构尤其可以在架构中发现，但是通常不具有平衡弹性力，使它们不适合作为机械变换器用于机器中。美国专利第 4, 183, 153 号 (Dickson) 描述了通过联接可以用至少部分平衡弹性力产生鞍状结构的挠性材料的特定形状产生的双曲线几何模型。所述的制造方法产生作为潜在故障点的联接部，并且可能产生破坏精细弹性平衡的几何和材料性质的不连续。

[0013] 考虑到现有技术，本发明的目的是解决或至少减轻现有技术的一个或多个缺陷或缺点，或至少为公众提供可使用的替代选择。另外的目的将从以下描述变得明显。

## 发明内容

[0014] 本发明的实施例涉及包括以波动方式可变形的弯曲片材的结构。

[0015] 在一种形式中，尽管它不需要是唯一的或实际上最宽泛的形式，本发明在于一种结构，所述结构包括：

[0016] 具有波状轮廓的弯曲片材；以及

[0017] 与弯曲片材联系以用于使弯曲片材以波动方式变形的一个或多个功输入元件，其中波状轮廓上的一系列点中的每个点相对于共同参考框架至少部分地沿着 8 字形路径行

进。

[0018] 优选地,弯曲片材为鞍状,其中它具有从其圆周截面观察的波状轮廓。在其它配置中,弯曲片材可以具有从其直线或曲线截面观察的波状轮廓,形成更类似鱼鳍的可能波动结构。也可以通过使波状轮廓的幅度在从其被观察的截面垂直延伸的方向上变化的方式影响弯曲片材的形状;在各种配置中该幅度可以是大致恒定的、单调的或波状变化的。

[0019] 在另一种形式中,然而它不需要是最宽泛的形式,本发明在于一种结构,所述结构包括:

[0020] 具有鞍点的弯曲片材,其中邻近鞍点的弯曲片材的截面具有鞍形状;以及

[0021] 连接到弯曲片材的截面的一个或多个功输入元件,用于通过使弯曲片材变形而相对于鞍点可旋转地重定向截面的鞍形状。

[0022] 优选地,在上述形式的每一个中,结构是用于对与机器联系的一个或多个主体做功的机器,由此弯曲片材由于以波动方式变形而对一个或多个主体做功。在这些实施例中,弯曲片材可以用作机械变换器,机械变换器配置成提供一个或多个功输入元件和与机器联系的一个或多个主体之间的机械效益。

[0023] 优选地,在上述结构的每一种形式中,弯曲片材以波动方式以大致恒定净应变能可变形,由此弯曲片材可以在不明显违背弹性恢复力的情况下变形。

[0024] 在又一种形式中,然而它不需要是最宽泛的形式,本发明在于一种用于对与具有波状轮廓的弯曲片材联系的一个或多个主体做功的方法,该方法包括使弯曲片材变形,其中弯曲片材的波状轮廓上的一系列点中的每个点相对于共同参考框架至少部分地沿着8字形路径行进,由此弯曲片材以波动方式移动并且由于变形而将运动产生的力施加于一个或多个主体上。

[0025] 在再又一种形式中,然而它不需要是最宽泛的形式,本发明在于一种制造结构的方法,该方法包括以下步骤:

[0026] 通过在柔性片材中引入弯曲应力而在柔性片材中形成波状轮廓;以及

[0027] 提供与柔性片材联系的至少一个功输入元件,用于使波状轮廓上的一系列点中的每个点相对于共同参考框架沿着8字形路径行进。

[0028] 优选地,在柔性片材中形成波状轮廓包括通过滚轧、冲击、打平或旋转的形成过程在柔性片材中引起残余应力。备选地或附加地,在柔性片材中形成波状轮廓包括在外部对柔性片材施加应力。

[0029] 本发明的另外形式和特征将从以下详细描述变得明显。

[0030] 定义

[0031] 当在本文中使用时,“片材”表示其厚度比其长度和宽度小的成形产品,无论是否平坦并且无论厚度是否恒定;并且包括在其定义内的以下术语:板、条、箔、薄膜、壳、膜、带、圆盘和圆环。

[0032] 当在本文中使用时,术语“弯曲”表示弯曲后状态,其中片材由于弹性不稳定性而弯折、翘曲或起皱。

[0033] 当在本文中使用时,“加速”被定义为包括“减速”。

附图说明

- [0034] 为了可以容易地理解并且实施本发明,现在将参考附图,其中:
- [0035] 图 1A 示出根据本发明的一个方面的结构的透视图;
- [0036] 图 1B 示出图 1A 中所示的结构在操作中的运动;
- [0037] 图 2 显示图 1A 的结构的电示意图;
- [0038] 图 3 示出根据本发明的另一个方面的线性换能器的透视图;
- [0039] 图 4 示出根据本发明的另一个方面的泵的部分透明透视图;
- [0040] 图 5A 示出根据本发明的另一个方面的设备的透视图;
- [0041] 图 5B 显示图 5A 中所示的设备在操作中的运动;
- [0042] 图 6A 示出根据本发明的另一个方面的热机的透视图;
- [0043] 图 6B 示出图 6A 中所示的热机的放大和部分透明分解透视图;
- [0044] 图 7 显示图 6A 的热机的流体流动示意图;
- [0045] 图 8 示出根据本发明的另一个方面的周边耦合旋转致动器的部分透明透视图;
- [0046] 图 9 示出根据本发明的另一个方面的摩擦耦合旋转致动器的部分透明透视图;
- [0047] 图 10A 示出根据本发明的另一个方面的另一个结构的部分透明透视图;
- [0048] 图 10B 示出图 10A 中所示的结构在操作中的运动;
- [0049] 图 10C 示出图 10B 的放大部分视图;
- [0050] 图 11A 显示图 10A 中所示的结构电示意图;
- [0051] 图 11B 显示用于驱动图 10A 中所示的结构的一系列电波形;
- [0052] 图 12 示出根据本发明的另一个方面的密封泵的部分透明透视图;
- [0053] 图 13 示出根据本发明的另一个方面的搅拌器的部分透明透视图;
- [0054] 图 14 示出根据本发明的另一个方面的声换能器的部分透明透视图;
- [0055] 图 15A 示出根据本发明的另一个方面的旋转限制波动设备的部分透明透视图;
- [0056] 图 15B 在侧视图中示出图 15A 的旋转限制波动设备的操作运动;
- [0057] 图 15C 显示利用图 15A 的旋转限制波动设备的直接耦合致动器的侧视图;
- [0058] 图 16A 示出根据本发明的另一个方面的平移限制波动设备的部分透明透视图;
- [0059] 图 16B 在侧视图中示出图 16A 的平移限制波动设备的操作运动;
- [0060] 图 16C 显示利用图 16A 的平移限制波动设备的形状耦合致动器的侧视图;
- [0061] 图 17A 示出根据本发明的另一个方面的 8 字限制波动设备的部分透明透视图;
- [0062] 图 17B 在侧视图中示出图 17A 的 8 字限制波动设备的操作运动;
- [0063] 图 17C 显示利用图 17A 的 8 字限制波动设备的摩擦耦合致动器的侧视图;
- [0064] 图 18 示出根据本发明的另一个方面的波动推进系统的部分透明透视图;
- [0065] 图 19 示出根据本发明的另一个方面的波动推力器的部分透明透视图;
- [0066] 图 20 是根据本发明的另一个方面的制造结构的方法的总流程图;
- [0067] 图 21 示出根据图 20 中所示的方法的一个实施例的用于制造图 10A 的结构的部件的透视图;以及
- [0068] 图 22 示出根据图 20 中所示的方法的另一个实施例的用于制造图 1A 的结构的部件的透视图。

## 具体实施方式

[0069] 图 1A 示出根据本发明的一个方面的结构 100。结构 100 包括具有分布顺应性、在其中心固定连接到支撑轴 120 的弯曲片材 110。弯曲片材 110 通过其中的残余应力弯曲,为它提供:波状(并且在优选实施例中正弦状)圆周轮廓 112;类似双曲抛物面的总体鞍形状 114,鞍形状 114 具有中心鞍点 116,其中正弦状圆周轮廓 112 在幅度上随着离中心鞍点 116 的距离增加而增加;以及中性稳定性。结构 100 还包括呈以单晶(unimorph)方式环形地安装在弯曲片材 110 上的十二个压电致动器段 130 的形式的功输入元件。沿着支撑轴 120 和弯曲片材 110 延伸的电连接器 140 将电力提供给致动器段 130。可选地,围绕并且联系弯曲片材 110 的流体 150 提供主体,当弯曲片材变形时弯曲片材 110 可以对所述主体做功。

[0070] 图 1B 显示结构 100 在操作中的运动,其中致动器段 130 用于响应电输入的特定系列以波动方式变形弯曲片材 110。运动时间系列 160 显示弯曲片材 110 的波动变形路径,其中鞍形状 114 相对于鞍点 116 可旋转地重定向。表示运动时间系列 160 期间正弦状圆周轮廓 112 上的一系列点中的一个点的运动,标记 170 相对于支撑轴 120 沿着曲平面外、8 字形路径 180 行进。尽管弯曲片材 110 可以在不明显违背弹性恢复力的情况下以波动方式变形,但是应当注意鞍形状 114 由于其双轴曲率而对于其重量具有相当大的稳定性。

[0071] 图 2 显示结构 100 的电示意图 200,致动器段 130 在圆周轮廓中描绘。致动器段 130 与弯曲片材 110 的正弦状圆周轮廓 112 一致并且因此具有正弦变化曲率。三相电源 210 通过电连接器 140 将电力提供给致动器段 130。电源 210 的每个相连接到依靠正弦状圆周轮廓 112 的对称性动态地具有曲率的匹配幅度的一组致动器段 130。交替致动器段 130 配置有相反极性,从而匹配由电源 210 的每个相看到的致动器段 130 的曲率的表现方向。由电源 210 启动致动器段 130 用于使弯曲片材 110 和致动器段 130 的正弦变化曲率与由启动产生的圆周弯力的旋转正弦图案对准。

[0072] 有利地,弯曲片材 110 的波动变形随着大致恒定净应变能或换句话说沿着中性稳定变形路径发生,其中弹性力在弯曲片材 110 和致动器段 130 中动态地平衡。因此由致动器段 130 产生的致动力不可由局部弹性恢复力减小,允许结构 100 与传统换能器架构相比具有改善的力、位移和畸变特性以及高效率 and 宽带性能。除了弹性平衡以外,弯曲片材 110 的波动变形由于运动对称而动态地平衡,使得会导致噪声和振动的由弯曲片材 110 施加于支撑轴 120 的力被最小化。

[0073] 通过使用致动器段 130 变形弯曲片材 110 使得它的鞍形状 114 可旋转地重定向,结构 100 可以用作变形结构,所述变形结构可以例如用作美观显示或改变流体路径中的流体的流动。以类似方式,结构 100 可以用作用于对流体 150 做功的机器。这样做时,弯曲片材 110 可以用作机械变换器,提供机械效益以将致动器段 130 的高应力、低应变膨胀转换成流体 150 的低力高偏转。为了最大化对流体 150 做的功,例如可以通过弯曲片材 110 上的致动器段 130 的径向定位调节由该布置提供的机械效益的量。

[0074] 当流体 150 是空气时,结构 100 可以通过生成气流用作风扇。与常规风扇相比,结构 100 具有低噪声、低成本和耐沾灰的潜在优点,并且与叶片型压电风扇相比,具有在速度的大范围上高效操作的能力。通过将三相电源 210 配置成振荡弯曲片材 110 的波动变形的速度,结构 100 可以通过生成声能用作扬声器。与常规移动线圈扬声器相比,结构 100 由于下列原因而具有高效率 and 低畸变的潜在优点:能够从鞍形状 114 的任何旋转取向加速弯曲片材 110 的变形使得不需要定心弹簧和典型地用于管理由定心弹簧生成的振荡的伴随的



电和机械阻尼;能够精确地控制弯曲片材 110 的鞍形状的旋转取向;弯曲片材 110 能够产生大偏转;以及弯曲片材 110 的高形状稳定性。结构 100 当然可以在除了空气以外的流体(例如水)中生成流动和声能。参考图 3 和 4 将显而易见,其它功能可以由结构 100 执行。

[0075] 图 3 显示线性换能器 300,该线性换能器包括结构 100、滑动地安装在结构 100 的支撑轴 120 上的滑动器 310、以及在一端可枢转地连接到结构 100 的弯曲片材 110 并且在另一端可枢转地连接到滑动器 310 的连接杆 320。通过使用致动器段 130 以波动方式变形弯曲片材 110,换能器用作线性致动器,其中滑动器 310 被推动以在支撑轴 120 上滑动。相反地操作,滑动器 310 可以由振荡力驱动以便以波动方式变形弯曲片材 110,由此致动器段 130 生成电荷。以该方式,线性换能器可以用作位置传感器或用作发电机。

[0076] 图 4 示出泵 400,该泵包括除了缩短支撑轴 120a 以外类似于结构 100 的经修改的结构 100a。缩短支撑轴 120a 固定地连接在上半壳体 410 和下半壳体 420 的内部,电连接器 140 (被遮掩)穿过并且静态地密封在下半壳体 420 中。透明地显示上半和下半壳体 410 和 420 以展现用于容纳弯曲片材 110 的波动变形的腔 430,并且该腔形成包括流体入口 440 和流体排出口 450 的流体流动路径。弯曲片材 110 的波动变形使流体 150 (未显示)加速通过腔 430。有利地,泵可以密封以消除短时排放。泵也可以通过调制流体 150 的加速而用作声致动器。

[0077] 图 5A 示出特别适合用作风扇的设备 500。设备 500 包括类似于结构 100 的经修改的结构 100b,区别在于弯曲片材 110 在其边缘而不是其中心固定连接到支撑轴 120,从而增加它的峰值位移。图 5B 显示设备 500 在操作中的运动,运动时间系列 510 显示弯曲片材 110 的变形路径。

[0078] 图 6A 和 6B 示出根据本发明的另一个方面的热机 600,图 6B 显示放大和部分透明分解图以示出它的结构。热机 600 包括转子 610、上半定子 620 和下半定子 630。上半定子 620 包括热流体入口 621、热流体入口集管 623、热流体入口端口 626、冷流体出口 622、冷流体出口集管 624、冷流体出口端口 625 和鞍状上接触表面 627。下半定子 630 包括热流体出口 631、热流体出口集管 633、热流体出口端口 636、冷流体入口 632、冷流体入口集管 634、冷流体入口端口 635 和鞍状下接触表面 637。转子 610 包括可旋转轴 611、轴向固定到可旋转轴 611 的多个中性稳定的鞍状弯曲片材 612、以及对称地布置在每个弯曲片材 612 上并且与其联接的一个或多个环形带 613。环形带 613 具有不同于弯曲片材 612 的热膨胀系数,从而形成作用于变形弯曲片材 612 的功输入元件的热双晶元件 614。环形带 613 的窄宽度被设计成使得热双晶元件 614 主要在圆周意义上起作用。热双晶元件 614 夹入上和下接触表面 627 和 637 之间,并且带有穿孔,从而形成热流体入口端口 626 和相应的热流体出口端口 636 之间的热流体流动路径 615 (未显示)、以及在冷流体入口端口 635 和相应的冷流体出口端口 625 之间的冷流体流动路径 616 (未显示)。可选地,转子 610 还包括布置在相邻热双晶元件 614 之间以及热双晶元件 614 与上半和下半定子 620 和 630 之间的穿孔柔性间隔器以减小摩擦并且减小热和冷流体流动路径 615 和 616 之间的流体泄漏。

[0079] 图 7 显示热机 600 的流体流动示意图 700,热双晶元件 614 在圆周轮廓中描绘。热流体 710 将热能提供给热机 600 以部分地转换成机械功,并且冷流体 720 允许废热的排出。热和冷流体 710 和 720 穿过相应的热和冷流体流动路径 615 和 616,从而引起热双晶元件 614 中的温度分布,所述温度分布配置成生成热双晶元件 614 中的圆周弯力的图案,所述圆

周弯力的图案用于以波动方式变形弯曲片材 612。为了使弯曲片材 612 以波动方式变形,热双晶元件 614 以使得与上半和下半定子 620 和 630 滑动地和啮合地接合的方式推压上和下接触表面 627 和 637,由此导致转子 610 以连续方式旋转。与也沿着中性稳定路径循环地变形有源片材(active sheet)的连续带型热机相比,热机 600 由于下列原因而能够具有高功率密度:热双晶元件 614 的紧凑堆叠;以及热双晶元件 614 的分布式弯折,在任何指定时间允许它们的致动能力的高比例有效。

[0080] 在热机 600 的备选实施例中,弯曲片材 612 可以设计成以附加或备选方式与上半和下半定子 620 和 630 接合。示出使鞍状弯曲片材与相对旋转构件接合的一种备选方式,图 8 显示周边耦合旋转致动器 800,该周边耦合旋转致动器包括经修改的结构 100c 和透明地显示以展示经修改的结构 100c 的细节的外壳 810。经修改的结构 100c 类似于结构 100,区别在于具有在其相应中心固定连接到支撑轴 120 的一个以上弯曲片材 110 以便提供相对于外壳 810 的稳定性,并且提供增加的功率输出。外壳 810 包括:多个突起 812,用于通过俘获弯曲片材 110 防止支撑轴 120 的相对轴向运动;以及内部轮廓 814,其大体上为方形,具有从顶部观察与弯曲片材 110 的轮廓一致的圆形角部。弯曲片材 110 以波动方式变形导致弯曲片材 110 在其周边以使得与外壳 810 滑动地和啮合地接合的方式推压外壳 810,由此导致支撑轴 120 以连续方式相对于外壳 810 旋转。

[0081] 示出使鞍状弯曲片材与相对旋转构件接合的另一种备选方式,图 9 显示摩擦耦合旋转致动器 900。摩擦耦合旋转致动器 900 包括结构 100、具有上摩擦表面 915 的上半壳体 910、以及具有下摩擦表面 925 的下半壳体 920。结构 100 的弯曲片材 110 夹入上和下摩擦表面 915 和 925 之间使得它在其正弦状圆周轮廓 112 的峰和谷处与上半和下半壳体 910 和 920 摩擦地接合。透明地显示上半和下半壳体 910 和 920 以展示形成于其中的空隙 930,该空隙配置成容纳弯曲片材 110 的波动变形和支撑轴 120 的相对旋转。参考图 1B 和曲平面外、8 字形路径 180,可以看到弯曲片材 110 以波动方式变形导致在其正弦状圆周轮廓 112 的峰和谷处的切向运动,当从上方观察时相对于支撑轴 120 在相同顺时针意义上起作用。弯曲片材 110 在它和上和下摩擦表面 915 和 925 接触的区域中的该相同意义切向运动用于在类似滚动运动中同时在上和下摩擦表面 915 和 925 上移动弯曲片材 110,由此导致支撑轴 120 以连续方式相对于上半和下半壳体 910 和 920 旋转。

[0082] 图 10A 示出根据本发明的另一个方面的另一个结构 1000。结构 1000 包括弯曲带 1010,该弯曲带由沿着纵向边缘 1012 固定地或在备选实施例中可枢转地连接到较硬支撑件 1020 的热可启动形状记忆材料组成。弯曲带 1010 具有从直线截面观察的正弦状轮廓 1014,该正弦状轮廓在横向上从纵向边缘 1012 在幅度上增加。在所示实施例中,弯曲带 1010 具有带两个波长的波状轮廓 1014,然而备选实施例可以具有带不同数量的波长(包括非整数值的)的轮廓。结构 1000 还包括嵌入或在备选实施例中附连到弯曲带 1010 的面的多个循环可操作电阻加热元件 1030。弯曲带 1010 的部分的形状记忆可以以特定方式由加热元件 1030 启动以使用作用于以波动方式变形弯曲带 1010 的功输入元件。与弯曲带 1010 联系的流体 1040 用作散热器,用于通过冷却未由加热元件 1030 主动加热的弯曲带 1010 的部分局部地停用弯曲带 1010 的形状记忆。流体 1040 也可以用作主体,弯曲带 1010 在其变形时可以对所述主体做功。可选地,加热元件 1030 可以与弯曲带 1010 电绝缘,如后面参考图 21 所述。

[0083] 图 10B 显示结构 1000 在操作中的运动,运动时间系列 1050 示出弯曲带 1010 正以波动方式变形。有利地,弯曲带 1010 通过以波动方式以分布顺应性变形用作完全柔性机构,允许它在没有滑动接头或不形成松弛的情况下操作。进一步有利地,弯曲带 1010 的弯曲状态允许它以波动方式以大致恒定净应变能变形,由此它可以在不明显违背弹性恢复力的情况下变形。图 10C 是图 10B 的放大部分视图。表示运动时间系列 1050 期间正弦状轮廓 1014 上的一系列点中的一个点的运动,标记 1060 相对于支撑件 1020 沿着曲平面外、8 字形路径 1070 行进。

[0084] 图 11A 显示结构 1000 的电示意图 1100。一系列电波形 1110 将电力提供给在纵向轮廓中描绘的加热元件 1030。通过检查弯曲带 1010 可以注意到它的正弦状轮廓 1014 的每个半波长的三分之一相比于剩余三分之二较直。相应地,加热元件 1030 在弯曲带 1010 中配置成具有波长的每六分之一的间隔以用于使用形状记忆效应产生局部拉直应力,从而允许以波动方式变形弯曲带 1010。一系列电波形 1110 包括用于通过电连接器 1150 分别电连接到弯曲带 1010 的每个半波长的第三、第二和第一加热元件 1030 的第一相 1120、第二相 1130 和第三相 1140。

[0085] 图 11B 显示用于驱动结构 1000 的一系列电波形 1110 的细节。在它们的最基本形式中,一系列电波形 1110 的相 1120、1130 和 1140 在序列中循环地操作,所述序列的顺序和频率确定弯曲带 1010 的波动变形的相应方向和速度。可以为了各种目的对相 1120、1130 和 1140 的该基本形式进行修改,所述目的包括:最大化能量效率、平滑内周期功率输送、超温保护和超应变保护。这样的修改包括、但不限于:脉冲宽度调制,幅度调制,以及用于提前或延迟相 1120、1130 和 1140 之间的顺序操作的时间变量 1160。在所示的结构 1000 的实施例中,一系列电波形 1110 提供弯曲带 1010 的开环控制,但是诸如温度或位置反馈的反馈可以被包含以用于闭环控制。

[0086] 将容易理解备选的致动配置和技术可以用作功输入元件,从而以波动方式变形弯曲带 1010。例如,可以通过直接使电流通过形状记忆材料或通过沟流与其热联系的合适热流体而启动弯曲带 1010 的形状记忆。弯曲带 1010 可以具有形状记忆使得启动导致弯折而不是拉直作用,或者改为由除了形状记忆材料以外的材料组成,用例如下面参考图 20 所述的其它手段启动。加热元件 1030 的数量可以变化以提供运动的更大精度或简化制造和操作。此外,可以单独地控制加热元件 1030 以影响弯曲带 1010 的形状,在一定范围内包括它的正弦状轮廓 1014 的幅度和波长特性。

[0087] 结构 1000 可以通过附连到水运工具用作波动推进系统使得弯曲带 1010 平行于期望的运动方向浸没在水中。本领域的技术人员将清楚结构 1000 也可以以类似于结构 100 的方式用作致动器、传感器、发生器、风扇、泵或扬声器。

[0088] 图 12 示出密封泵 1200,该密封泵包括结构 1000 和固定连接到结构 1000 的支撑件 1020 的壳体 1210。透明地显示壳体 1210 以展示其中的楔形腔 1212,所述楔形腔用于容纳弯曲带 1010 的波动变形并且引导流体 1040 (未显示)的流动。在备选实施例中,弯曲带 1010 的前缘和 / 或后缘可以为锥形以减小拖曳并且最小化末端效应对弯曲带 1010 的形状的影响。

[0089] 图 13 显示包括曲线弯曲带 1310 的搅拌器 1300,所述曲线弯曲带由热可启动形状记忆材料组成,固定地附连到较硬的曲线支撑件 1320。搅拌器还包括多个加热元件 1030,

所述加热元件嵌入曲线弯曲带 1310 中以用于以波动方式变形它,从而搅拌周围流体(未显示)。搅拌器 1300 类似于结构 1000,区别在于曲线弯曲带 1310 具有从圆周截面而不是直线截面观察的正弦状轮廓 1312。在备选实施例中曲线弯曲带 1310 和刚性曲线支撑件 1320 可以是不连续的和/或具有变化曲率,其中曲线弯曲带 1310 具有从曲线截面观察的波状轮廓 1312。

[0090] 图 14 显示根据本发明的另一个方面的声换能器 1400。声换能器 1400 包括由形状记忆材料组成、具有第一边缘 1412 和相对的第二边缘 1414 的弯曲片材 1410,第一和第二边缘 1412 和 1414 都固定连接到框架 1420。弯曲片材 1410 通过由框架 1420 施加的力生成的剪切应力弯曲,从而形成从弯曲片材 1410 的直线截面观察的波状轮廓 1416。波状轮廓 1416 具有随着离第一边缘 1412 的距离增加而大致恒定的幅度,在弯曲片材 1410 连接到框架 1420 处的第一和第二边缘 1412 和 1414 的附近发生幅度的减小。声换能器 1400 还包括布置在弯曲片材 1410 上的多个带状加热器 1430 和用于将电力传递到带状加热器 1430 以便启动弯曲片材 1410 的部分的形状记忆的一系列电极 1440。通过将合适的一系列电波形施加到用于控制弯曲片材 1410 以波动方式变形的速率的一系列电极 1440,在与弯曲片材 1410 联系的流体(未显示)中生成声能,其中波状轮廓 1416 上的一系列点中的每个点相对于框架 1420 至少部分地沿着 8 字形路径行进。

[0091] 尽管弯曲片材 1410 通过由框架 1420 施加的力生成的剪切应力而发生弯曲,但是本领域中已知用于导致片材弯曲的许多其它配置和布置可以用于声换能器 1400 的备选实施例中;例如,在 *Physical Review E* Vol. 75No. 1 (2006) pp. 016609 (Concha 等人) 中描述了使用由弹性基材施加的力使带弯曲的布置。弯曲片材 1410 具有直带的弯曲图案,但是在声换能器 1400 的备选实施例中,弯曲片材 1410 可以具有不同弯曲图案,所述不同弯曲图案也具有可以以波动方式变形的波状轮廓,包括描述为棋盘、波动带和鲑鱼骨的图案。由于这些弯曲图案中的一些具有双轴波状轮廓,因此以可以在不同方向上发生波动变形的方式使弯曲片材 1410 变形成为可能。

[0092] 图 15A、16A、17A 和 18 显示本发明的实施例,其中带由动态地限制其波状轮廓上的至少两个点相对于彼此的一个或多个自由度的机构保持在具有波状轮廓的弯曲形式。在这些实施例的每一个中,带可以由功输入元件以波动方式变形,所述功输入元件作用于限制带的轮廓上的点的机构以便带对周围流体做功。然而,功输入元件可以以其它方式作用于带,在该情况下限制带的轮廓上的点的机构可以用作带对其做功的主体。

[0093] 图 15A 示出包括弯曲带 1510 的旋转限制波动设备 1500,所述弯曲带具有波状轮廓 1512,沿其纵向边缘刚性地和轴向地连接到一对可旋转轴 1514。可旋转轴 1514 可旋转地连接到框架 1520 并且连接到用于限制它们相对于彼此的旋转的皮带轮机构 1530。

[0094] 示出旋转限制波动设备 1500 在操作中的运动,图 15B 显示当弯曲带 1510 以波动方式变形时波状轮廓 1512 的运动图 1540。当弯曲带 1510 变形时波状轮廓 1512 上的一系列点 1550 沿着相应路径 1560 行进。参考图 16B 和 17B 将变得明显的弯曲带 1510 的变形特性在于一系列点 1550 中的每个点相对于从框架 1520 观察的共同参考框架沿着 8 字形路径行进,所述共同参考框架在与每个点沿其行进的 8 字形路径一致的路径中移动。

[0095] 类似于线性换能器 300,旋转限制波动设备 1500 可以直接耦合到固体主体以对其做功。图 15C 显示直接耦合致动器 1570,该直接耦合致动器包括旋转限制波动设备 1500 和

固定到弯曲带 1510 的直接耦合器 1580。以波动方式变形弯曲带 1510 生成直接耦合器 1580 的运动,在优选实施例中由于直接耦合器 1580 居中地位于弯曲带 1510 上,因此所述运动是线性运动。

[0096] 图 16A 示出平移限制波动设备 1600,该平移限制波动设备包括具有波状轮廓 1612 的弯曲带 1610。可平移轴 1614 轴向地对准并且刚性地连接到弯曲带 1610 的纵向边缘和纵向中线。可平移轴 1614 可枢转地连接到滑动器 1620,所述滑动器通过以正交方式可平移连接到支撑构件 1630 和带轮凸轮 1622 形成止转棒轭(scotch yoke)机构。带轮凸轮 1622 可旋转地连接到支撑构件 1630 并且相对于彼此由皮带 1624 可旋转地限制以用于限制可平移轴 1614 相对于彼此的平移。

[0097] 示出平移限制波动设备 1600 在操作中的运动,图 16B 显示当弯曲带 1610 以波动方式变形时波状轮廓 1612 的运动图 1640。当弯曲带 1610 变形时波状轮廓 1612 上的一系列点 1650 沿着相应路径 1660 行进。参考图 17B 将变得明显的弯曲带 1610 的变形特性在于一系列点 1650 中的每个点相对于从支撑构件 1630 观察的共同参考框架沿着 8 字形路径行进,所述共同参考框架在与每个点沿其行进的 8 字形路径的水平分量一致的路径中移动。

[0098] 平移限制波动设备 1600 可以直接耦合到固体主体以对其做功,或者可以类似于热机 600 由其波状轮廓 1612 的形状耦合。图 16C 显示形状耦合致动器 1670,该形状耦合致动器包括平移限制波动设备 1600 和具有与弯曲带 1610 滑动地和啮合地接合的波状狭缝 1682 的形状耦合器 1680。带轮凸轮 1622 的旋转导致形状耦合器 1680 的线性运动,或者相反地,形状耦合器 1680 的线性运动导致带轮凸轮 1622 的旋转。

[0099] 图 17A 示出类似于平移限制波动设备 1600、但是具有附加的一系列止转棒轭机构的 8 字限制波动设备 1700。8 字限制波动设备 1700 包括具有波状轮廓 1712 的弯曲带 1710。动态轴 1714 轴向地对准并且刚性地连接到弯曲带 1710 的纵向边缘和纵向中线。动态轴 1714 可枢转地连接到水平滑动器 1720,该水平滑动器通过以正交方式可平移连接到竖直滑动器 1722 和凸轮 1734 形成水平作用止转棒轭机构。竖直滑动器 1722 又通过经由可枢转连接导向件 1724 以正交方式可平移连接到支撑构件 1630 和带轮凸轮 1622(由竖直滑动器 1722 遮掩)形成竖直作用止转棒轭机构。凸轮 1734 经由 2:1 比率内部齿轮组(图未示)可旋转地连接到带轮凸轮 1622 使得水平滑动器 1720 和因此动态轴 1714 相对于支撑构件 1630 沿着 8 字形路径行进。带轮凸轮 1622 可旋转地连接到支撑构件 1630 并且相对于彼此由皮带 1624 可旋转地限制以用于限制动态轴 1714 相对于彼此的 8 字形路径。

[0100] 示出 8 字限制波动设备 1700 在操作中的运动,图 17B 显示当弯曲带 1710 以波动方式变形时波状轮廓 1712 的运动图 1740。当弯曲带 1710 变形时波状轮廓 1712 上的一系列点 1750 沿着相应路径 1760 行进。可以看到一系列点 1650 中的每个点相对于支撑构件 1630 沿着 8 字形路径行进。

[0101] 8 字限制波动设备 1700 可以直接耦合或形状耦合到固体主体以对其做功,或者可以改为类似于摩擦耦合旋转致动器 900 通过摩擦耦合。图 17C 显示包括 8 字限制波动设备 1700 的摩擦耦合致动器 1770,所述 8 字限制波动设备修改成具有附连到弯曲带 1710 的一系列柔性脚 1716 以用于增加摩擦并且为动态轴 1714 提供间隙。摩擦耦合致动器 1770 还包括摩擦耦合器 1780,该摩擦耦合器具有上内表面 1782 和相对的下内表面 1784 以用于摩擦地接合柔性脚 1716。弯曲带 1710 以波动方式变形将协同作用切向运动施加于与上和

内表面 1782 和 1784 接触的柔性脚 1716,从而在类似滚动运动中同时在上和下内表面 1782 和 1784 上移动弯曲带 1710。防旋转导向件(未显示)通过将摩擦耦合器 1780 限制到平移路径而防止其旋转。在备选实施例中,如果通过使用至少一个附加 8 字限制波动设备 1700 或具有带多个波长的波状轮廓 1712 的弯曲带 1710 充分地支撑摩擦耦合器,则可以省略防旋转导向件。

[0102] 在由提供每个设备中的动态限制的机构以波动方式变形时,弯曲带 1510、1610 和 1710 的运动可以在波动周期中的两个相对位置分叉成表观前向和后向行进波。在设备 1500、1600 和 1700 的备选实施例中,可以提供附加机构以动态地限制相应弯曲带 1510、1610 和 1710 上的附加点以便提供其确定性运动,由此扩展设备 1500、1600 和 1700 对需要半个以上连续波动周期并且波动的表观方向是重要的应用的适用性。尽管动态地限制弯曲带 1510 和 1610 上的附加点的路径涉及额外的复杂性,但是限制弯曲带 1710 上的附加点可以通过由于路径 1760 的一致增加适当调相双止转棒枢机构而简单地实现。不同于完全限制弯曲带 1510、1610 和 1710 上的附加点的运动,诸如弹簧、导向件或二次致动器的偏压机构可以配置成作用于弯曲带 1510、1610 和 1710 以便提供其确定性运动。

[0103] 将领会各种机构可以用于将片材动态地保持在弯曲形式。参考 8 字限制波动设备 1700,四连杆机构可以代替双止转棒枢机构以生成 8 字形路径 1760,并且齿轮、机械连杆或电控制致动器可以代替皮带 1624。图 18 显示波动推进系统 1800,示出将弯曲带上的点的运动限制到耦合 8 字形路径的齿轮耦合、四连杆机构设计。波动推进系统 1800 包括具有波状轮廓 1812 的弯曲带 1810、以及轴向地对准并且刚性地连接到弯曲带 1810 的纵向边缘和两个中间位置的动态轴 1814。动态轴 1814 刚性地或在备选实施例中可枢转地连接到连接杆 1820,所述连接杆在一端可旋转地连接到第一曲柄臂 1830 并且在相对端可旋转地连接到第二曲柄臂 1832。第一和第二曲柄臂 1830 和 1832 可旋转地连接到安装结构 1840,第一曲柄臂 1830 通过也可旋转地连接到安装结构 1840 的蜗轮组 1860 和非圆形齿轮组 1862 连接到驱动轴 1850。为了以波动方式以大致恒定净应变能变形弯曲带 1810,当驱动轴 1850 以恒定速度旋转时非圆形齿轮组 1862 成形为产生动态轴 1814 的双轴正弦运动。

[0104] 尽管弯曲带 1810 充分地被限制到具有确定性运动,但是当与相应的第一曲柄臂 1830 竖直对准时第二曲柄臂 1832 的每一个的旋转方向可以分叉。由弯曲带 1810 施加的弹性力用于防止第二曲柄臂 1832 的旋转分叉,但是在备选实施例中,第一曲柄臂 1830 和第二曲柄臂 1832 还可以与非圆形齿轮组耦合,或者不需要任何非圆形齿轮组,与常规差动齿轮组耦合。

[0105] 有利地,波动推进系统 1800 能够由于弯曲带 1810 的波状轮廓 1812 上的动态轴 1814 的数量和间隔并且由于两个最外侧动态轴 1814 相对于两个最内侧动态轴 1814 看到由周围流体提供的负荷的一半而在波动周期上输送恒定功率。波动推进系统 1800 的另一个优点在于弯曲带 1810 在没有多个致动器和复杂控制系统的情况下以波动方式可变形,仅仅需要在驱动轴 1850 的旋转功率输入。

[0106] 图 19 示出类似于结构 1000、但是类似波动推进系统 1800 机械驱动的波动推力器 1900。波动推力器 1900 包括具有波状轮廓 1912 的鳍状弯曲片材 1910,鳍状弯曲片材 1910 沿着纵向边缘固定连接到背衬结构 1920 并且沿着它在纵向间隔处的宽度固定连接到邻近其一端的撑杆 1914。撑杆 1914 在与连接弯曲片材 1910 一致的中间位置处可枢转地连接到

背衬结构 1920,并且在另一端可枢转地连接到相应连接杆 1930 的一端。连接杆 1930 在另一端可旋转地连接到曲柄轴 1940,由此曲柄轴 1940 的旋转导致撑杆 1914 将侧向力施加于弯曲片材 1910,侧向力用于使弯曲片材 1910 以波动方式变形,其中它的波状轮廓 1912 上的一系列点中的每个点沿着 8 字形路径行进。8 字形路径的纵向分量可以归因于弯曲片材 1910 的压缩刚度并且通过连接杆 1930 的接头的运动容纳在撑杆 1914 中。

[0107] 尽管在波动推力器 1900 中使用的曲柄轴机构具有较少部件数量,但是它由于撑杆 1914 的非正弦振荡而不会导致弯曲片材 1910 沿着中性稳定路径变形。当弯曲片材 1910 变形时在其中形成的弹性力的最终不平衡将振荡扭矩施加于曲柄轴 1940 上,可以通过将飞轮附连到曲柄轴 1940 或通过提供平衡振荡扭矩来抑制其影响。其它机构设计当然可以在波动推力器 1900 的备选实施例中用于以波动方式变形弯曲片材 1910,其可以通过以更正弦方式提供撑杆 1914 的振荡减小曲柄轴 1940 上的振荡扭矩。

[0108] 图 20 是根据本发明的另一个方面的制造结构的方法 2000 的总流程图。方法 2000 包括通过在其中引起弯曲应力在柔性片材中形成波状轮廓的步骤 2010。典型地柔性片材具有在 2cm 至 2m 之间的最大尺寸;然而,本发明的实施例也可以在小得多和大得多的尺度上有用,例如作为微型泵或轮船推进器。

[0109] 在步骤 2010 中使用的柔性片材可以由任何合适的自支撑材料组成,所述自支撑材料通常是具有足以防止来自组合弯曲和致动应力的塑性变形或失效的弹性限度的材料。其它材料选择考虑可以包括抗疲劳性、弹性滞后、应力松弛特性和蠕变特性、以及抗化学性、耐腐蚀性、耐磨性和耐温度极限性。作为可以使用的材料的例子而非限制,结构 100 的弯曲片材 110 可以是纸或塑料,热机 600 的弯曲片材 612 和环形带 613 可以是铁、铜、镍或钛基合金,并且波动推力器 1900 的弯曲片材 1910 可以是纤维增强弹性体。通常,柔性片材具有恒定厚度并且初始是平坦的和无应力的,然而,可以设计变化以在弯曲配置中影响其稳定特性。优选地,柔性片材具有各向同性机械性质以简化弹性力的平衡,然而,各向异性性质可以有用于将弯曲应力引入柔性片材中。

[0110] 为了执行步骤 2010,可以通过由应力构件施加于其上的力将弯曲应力引入柔性片材中。这样的应力构件可以是静态的,例如声换能器 1400 的框架 1420,或动态的,例如波动推进系统 1800 的动态轴 1814。包含可启动应力构件也可以与柔性片材结合以用于导致其弯曲,或改变特定弯曲配置的稳定性。当柔性片材由当保持静止时由于蠕变或应力松弛在经历一段时间后弹性平衡退化的材料构造时,仅仅当需要操作时将弯曲应力引入柔性片材中可能是有利的。备选地或附加地,柔性片材可以由通过形成或制造过程在其中引起的残余应力而弯曲。

[0111] 显示在弯曲力由静态应力构件施加到其上以执行步骤 2010 之前的柔性片材,图 21 示出可以用于制造结构 1000 的部件 2100。该部件包括加热器子组件 2110 和变为弯曲带 1010 的预成形体 2120。加热器子组件 2110 是包括包封在导热、电绝缘外层 2112 中的电阻加热元件 1030 的挠性带加热器。预成形体 2120 由定形成平坦环形扇区的形状的形状记忆材料组成,并且包括用于插入和固定加热器子组件 2110 的袋 2122、和用于将预成形体 2120 固定连接到支撑件 1020 的唇边 2124。预成形体 2120 中的弯曲应力由于唇边 2124 和它所固定到的较硬支撑件 1020 之间的曲率的差异而生成。

[0112] 显示在其经历制造过程以用于在其中引起残余应力以执行步骤 2010 之前的柔性

片材,图 22 示出可以用于制造弯曲片材 110 的部件 2200。部件 2200 包括狭缝盘 2210,该狭缝盘具有径向狭缝 2215、和用于在每个径向边缘联接到径向狭缝 2215 的相对边缘的扇区 2220,由此柔性片材圆周地被压缩。优选地,狭缝盘 2210 和扇区 2220 尽可能均匀地联接以避免会弱化结构并且破坏精细弹性平衡的几何和材料性质的不连续。更加优选地,通过使用包括机械、热、化学和电磁形成过程以在圆盘的外环形区域中产生压缩的方法在平坦圆盘中引起圆周或径向残余应力将弯曲片材 110 制造成没有接头。为了该目的适合于圆周地拉伸平坦圆盘的外环形部分的机械形成过程包括:滚轧;打平;非常规旋转(spinning),其中平坦圆盘以足够用于气动弹性颤振的速度旋转以导致塑性变形;以及冲击(peening),包括锤击、喷丸、激光喷丸和点刻。将领会这些形成过程中的许多可以更一般地应用于制造本发明的结构;例如弯曲带 1010 可以通过冲击由平坦直带形成,根据离纵向边缘 1012 的距离而密度增加,从而引起残余弯曲应力。

[0113] 残余弯曲应力也可以在片材的制造期间在柔性片材中引起。例如,在 Mathematical Intelligencer Vol. 23No. 2(2001)1337-1359(Henderson 等人)中描述了通过改变连续行中的针脚的数量弯曲的由纱钩编的柔性片材作为双曲面的构造。技术人员将领会所述的方法怎样可以应用于其它制造过程,例如针织、编织和打结。在柔性片材中引起残余弯曲应力的另一种方式是利用本领域中已知与不对称复合层压板相关的柔性片材的各向异性。也可能由干燥、固化、冷却等的过程硬化时通过导致可模塑材料中的波状轮廓波动在诸如纸浆或塑料的可模塑材料的柔性片材中引起残余弯曲应力。

[0114] 在柔性片材中形成波状轮廓的步骤 2010 之后,制造结构的方法 2000 可以可选地包括针对可接受弹性平衡检查柔性片材的步骤 2020。优选地,弹性平衡检查通过测量以波动方式将柔性片材变形到各位置所需的力执行,但是也可以在它以波动方式变形时通过其它方法执行,例如柔性片材的振动分析。典型地,弹性平衡的目标状态是中性稳定的状态使得柔性片材在不明显违背弹性恢复力的情况下可波动。然而在一些情况下,可能理想的是柔性片材具有可以包括一个或多个稳定位置的可变应变能轮廓。例如,施加到线性换能器 300 的滑动器 310 的弹性恢复力可以根据其位置定制。

[0115] 如果由步骤 2020 确定的柔性片材的稳定状态是不可接受的,则可以执行弹性平衡的步骤 2030。弹性平衡可以以多种方式实现,包括:改变作用于柔性片材的外力的分布;改变柔性片材中的残余应力的分布;局部地改变柔性片材的几何刚度;以及局部地改变柔性片材的材料刚度。

[0116] 可选地,制造结构的方法 2000 包括将柔性片材联接到支撑件以用于控制柔性片材相对于其环境的变形路径并且在一些情况下用于传输机械能的步骤 2040。在柔性片材中切出孔以容纳支撑件的情况下可能需要柔性片材的弹性平衡的补偿,但是在诸如结构 100 的其它情况下,可以在弯曲片材 110 中切出中心孔而不明显改变它的形式或稳定特性。

[0117] 制造结构的方法 2000 还包括提供与柔性片材联系以用于以波动方式变形它的波状轮廓的功输入元件的步骤 2050。通常,功输入元件是用于局部地对柔性片材施加应力以导致波动变形的致动器,然而也可以通过局部地改变柔性片材的几何刚度或材料刚度产生波动运动。致动器可以联接在柔性片材和外部支撑件之间,可以连接在柔性片材上的两个点之间,可以以分布方式作用于柔性片材,或者可以形成柔性片材自身。致动器可以布置成主要与柔性片材的纵向或圆周弯折耦合,或布置成与柔性片材的横向或径向弯折耦合,或



它们的组合。技术人员将领会许多替代致动器类型和配置可以用作用于导致柔性片材的至少部分波动的功输入元件。合适的致动器可以包括而限于：电磁、静电、液压、气动、热双材料、压电、电活化聚合物、形状记忆材料、磁致伸缩和电致伸缩致动器。

[0118] 在附图中，已在鞍状弯曲片材的透视图上显示投影网格线以突出它们的曲率并且不指示本发明的边缘或形成部分。

[0119] 在说明书中，目的是描述本发明而不将本发明限制到任何一个实施例或特征的具体集合。相关领域的技术人员可以从具体实施例实现变化，然而所述变化将属于本发明的范围内。

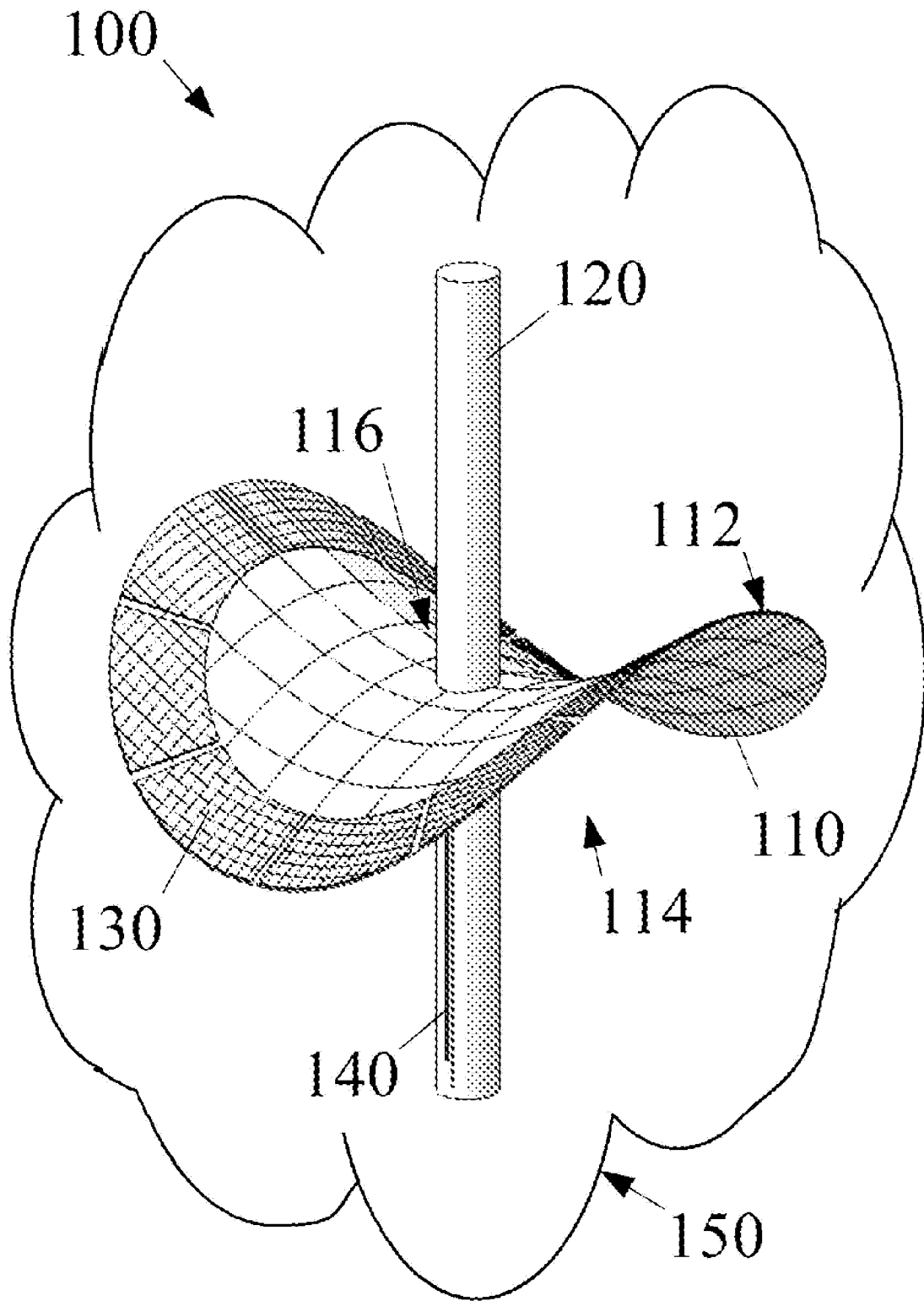


图 1A

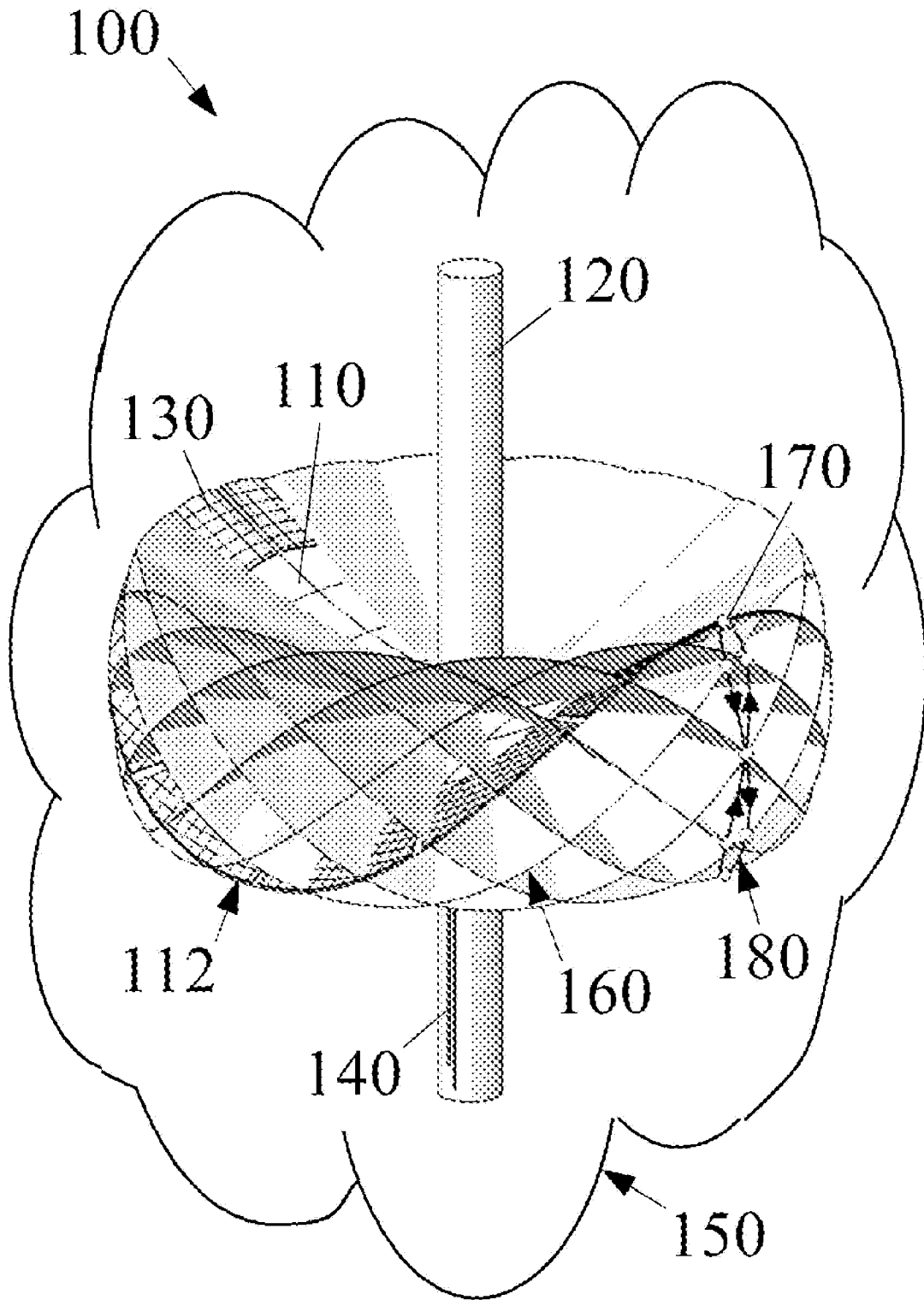


图 1B

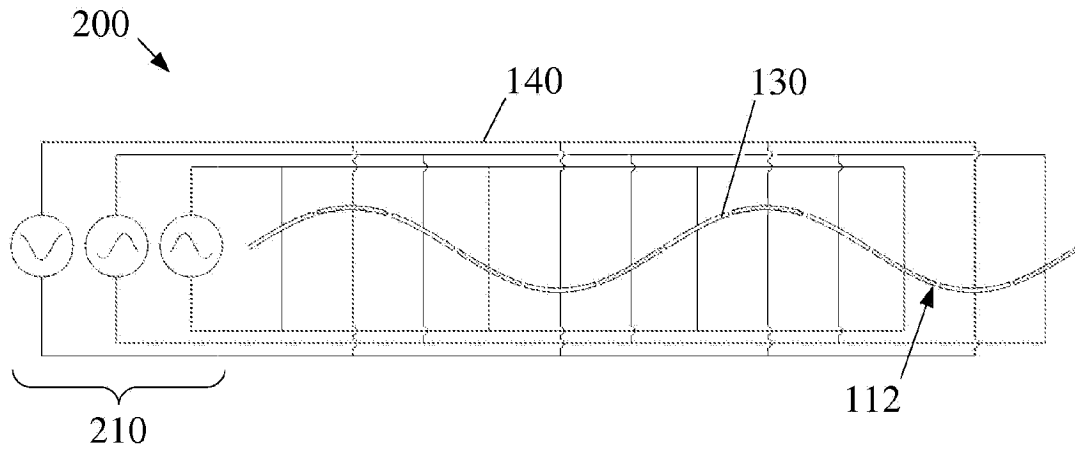


图 2

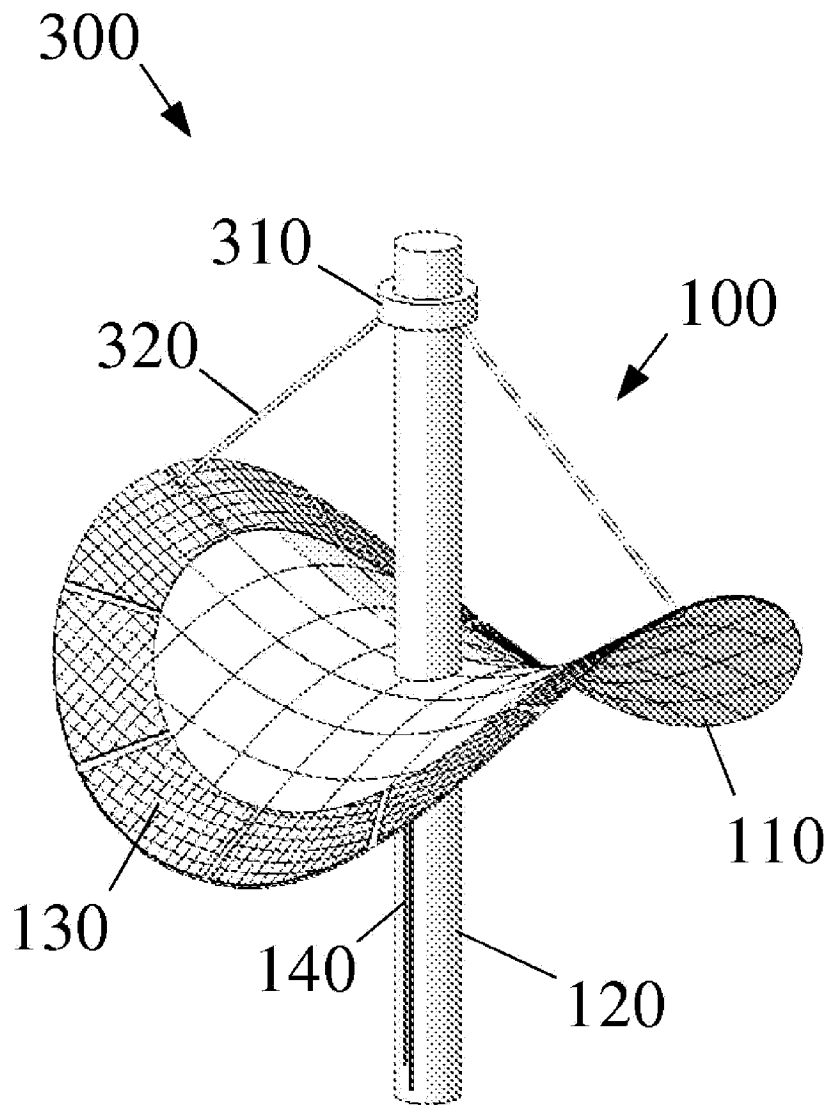


图 3

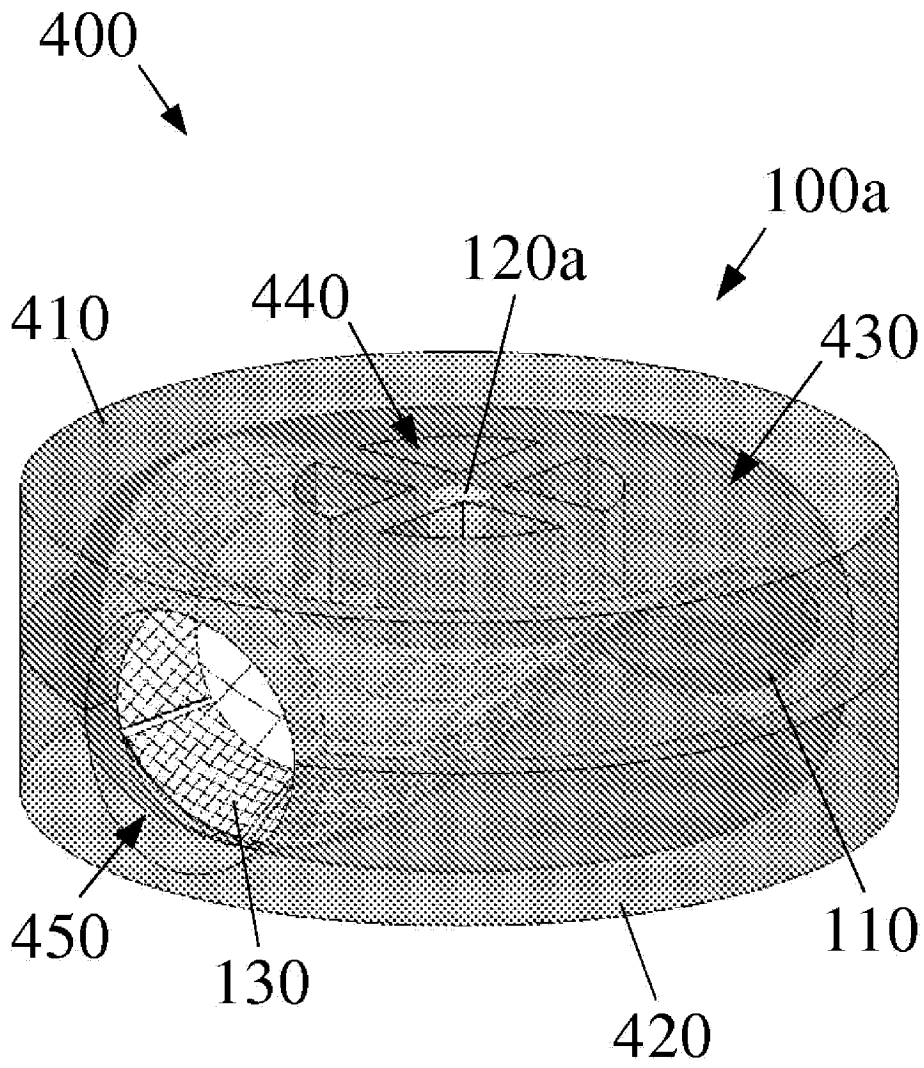


图 4

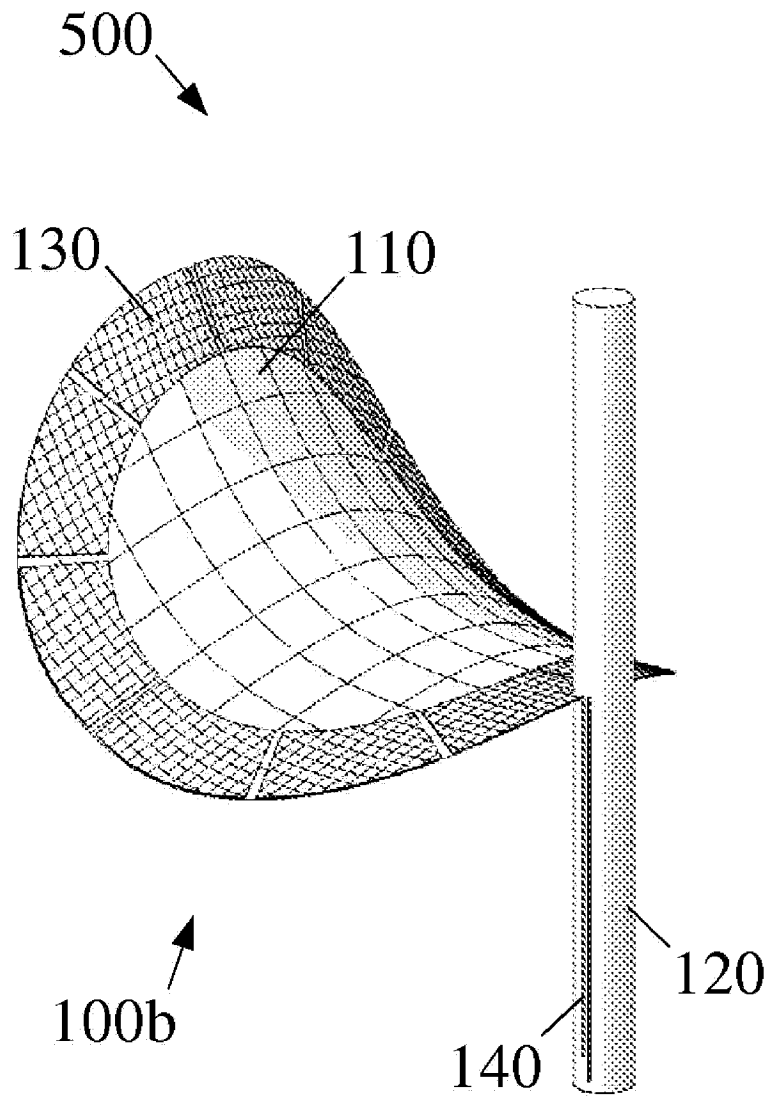


图 5A

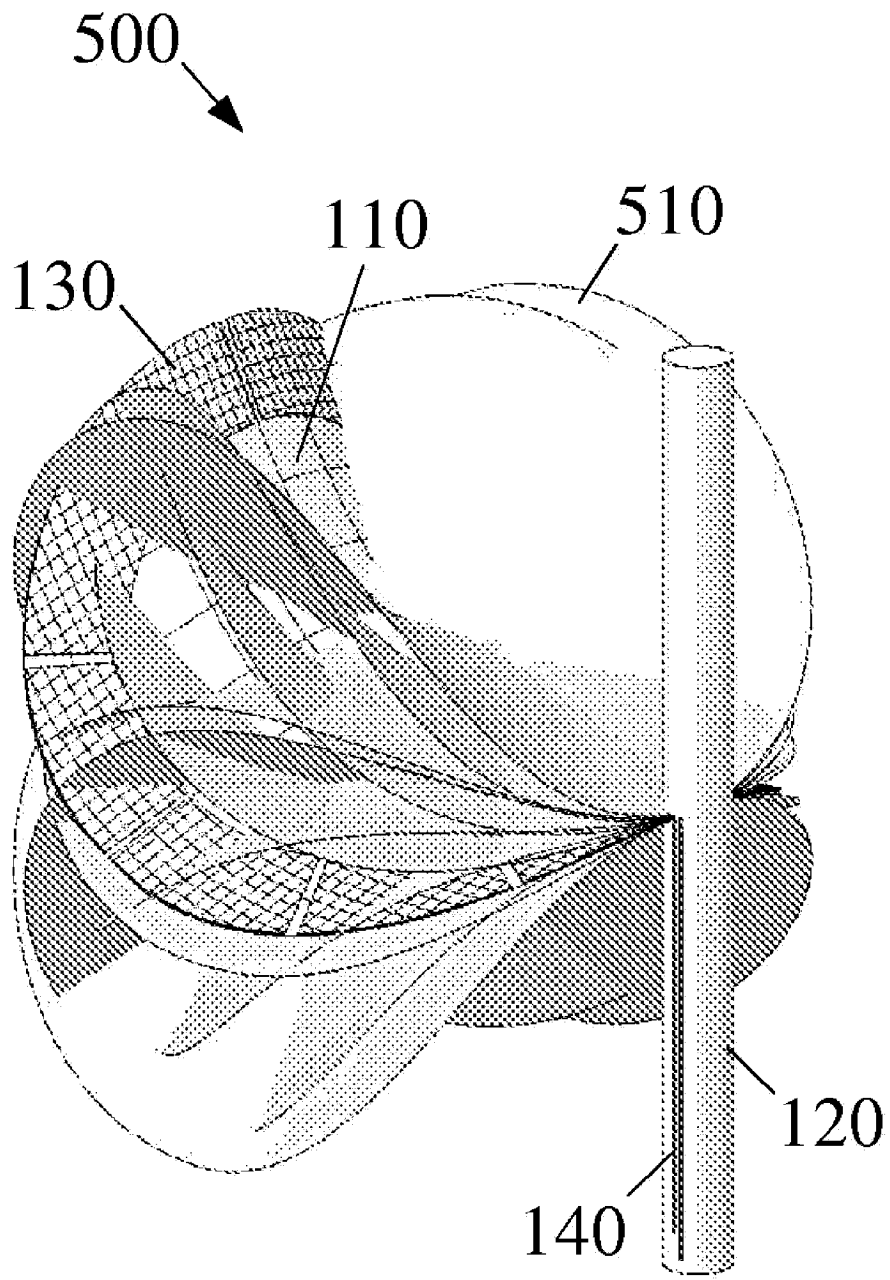


图 5B

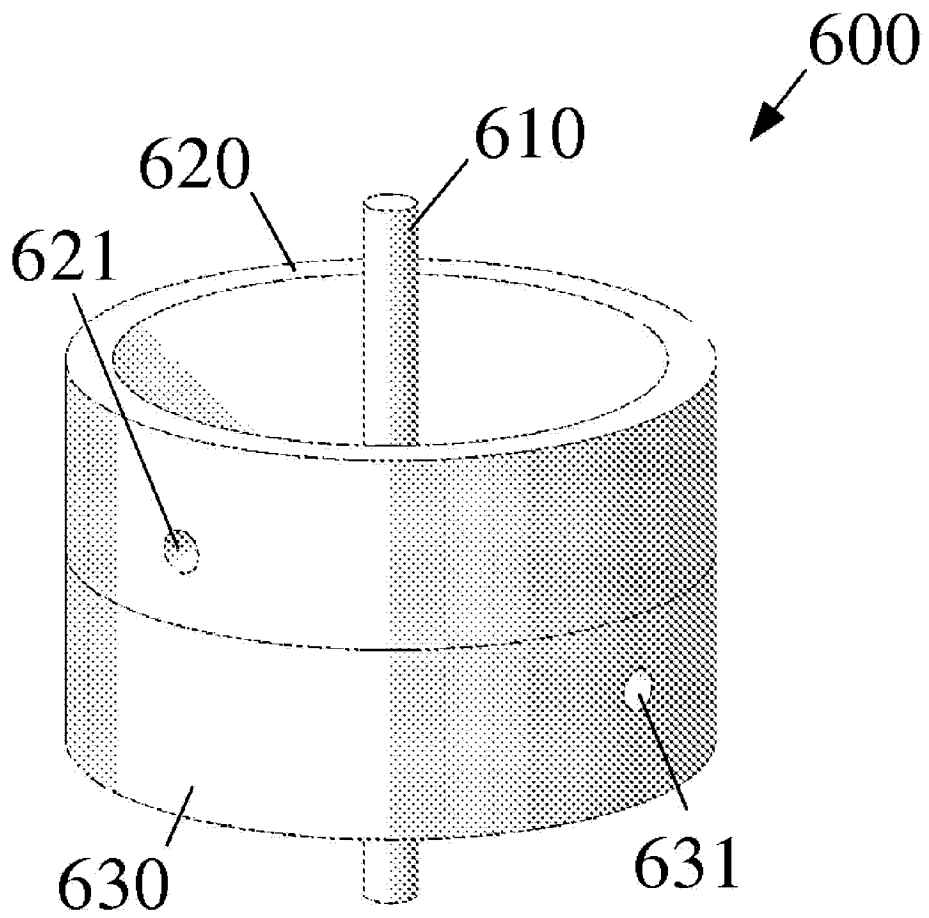


图 6A



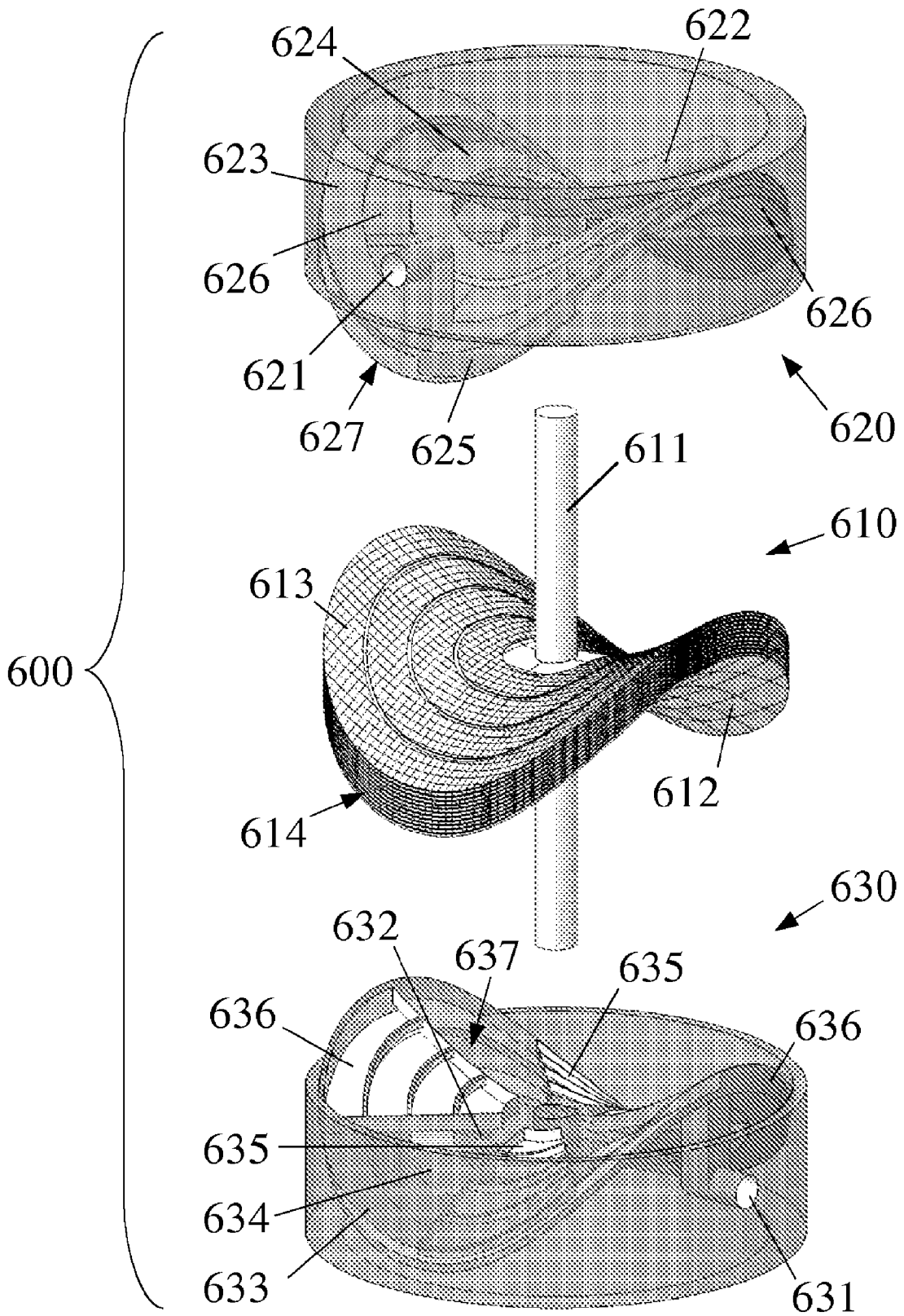


图 6B

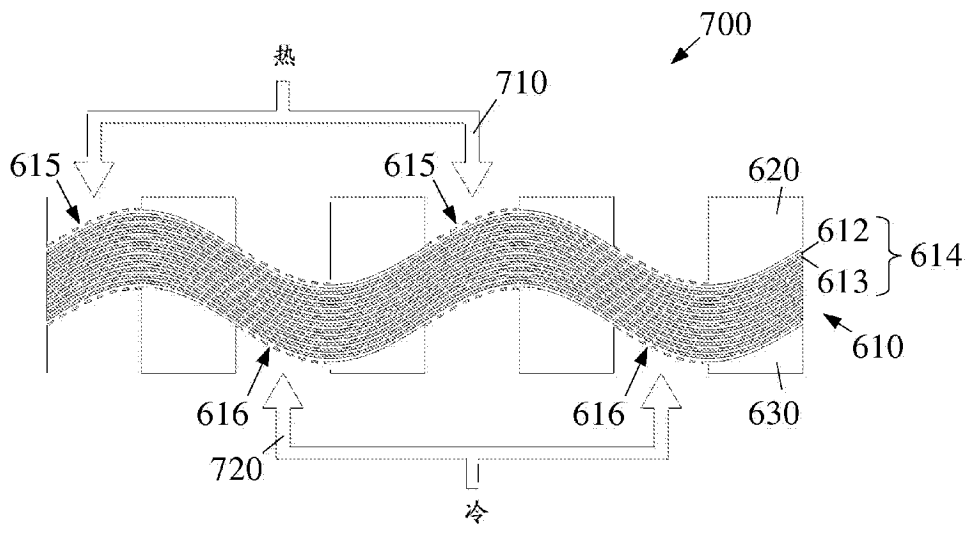


图 7

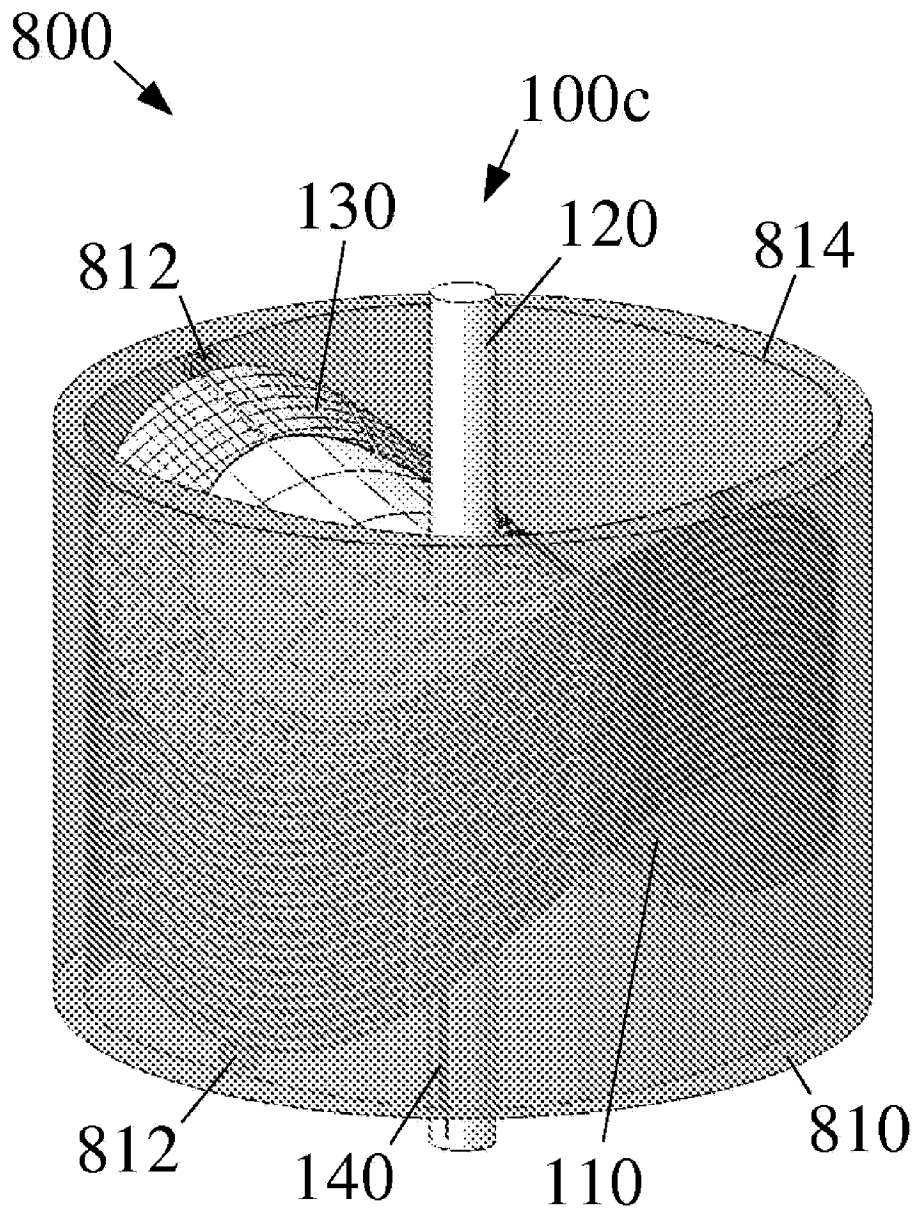


图 8

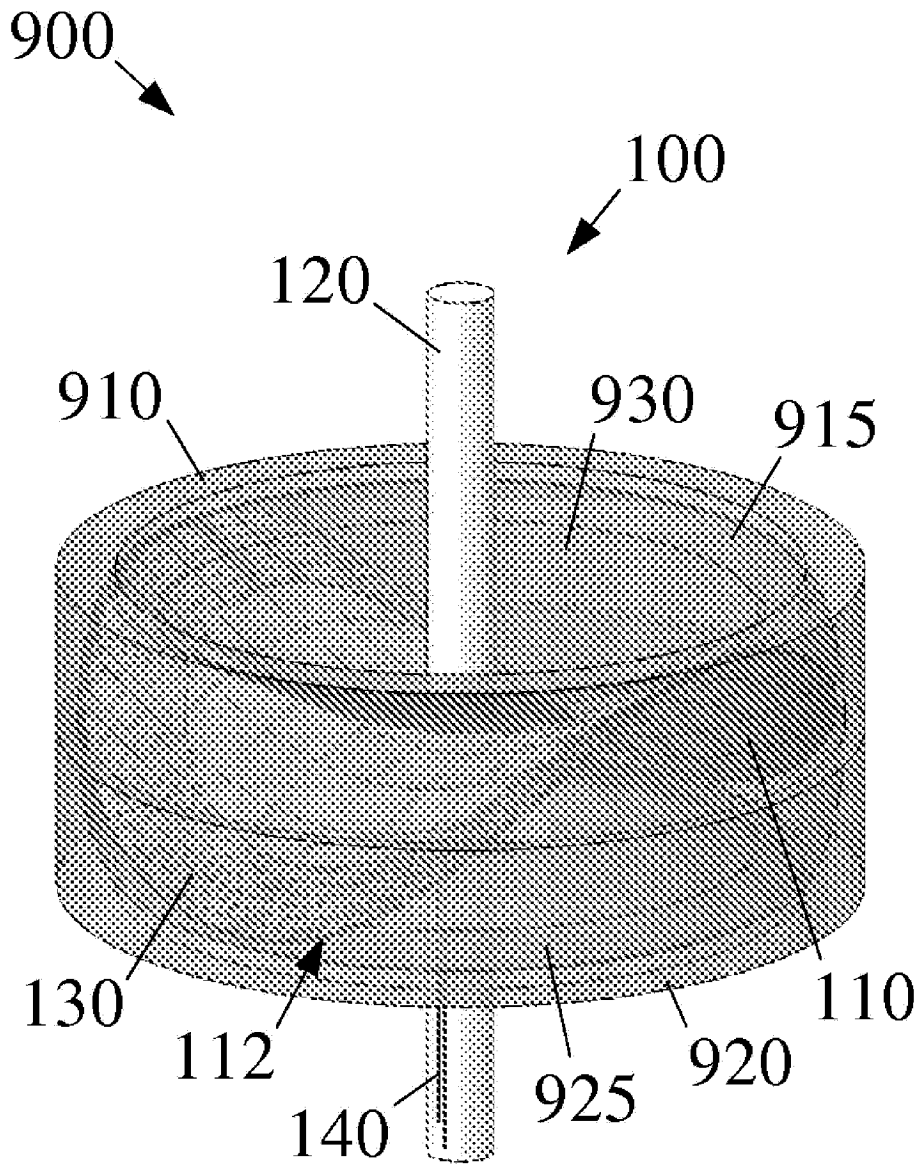


图 9

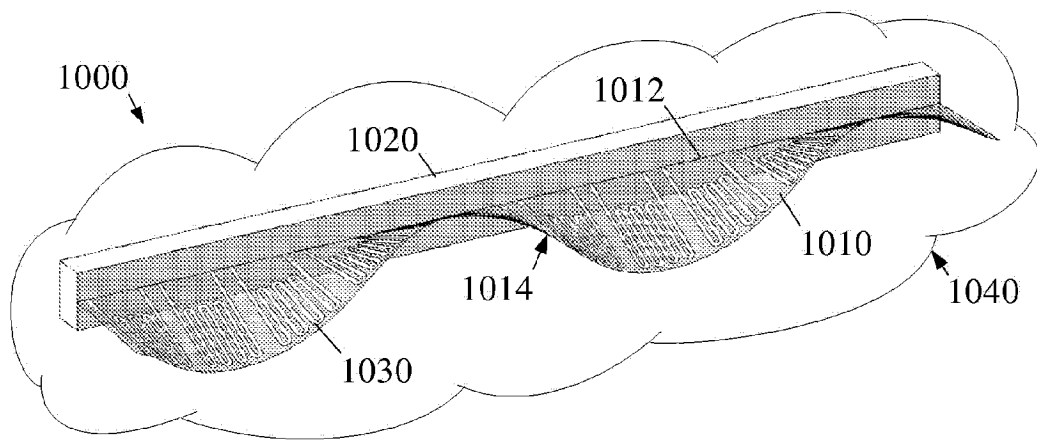


图 10A

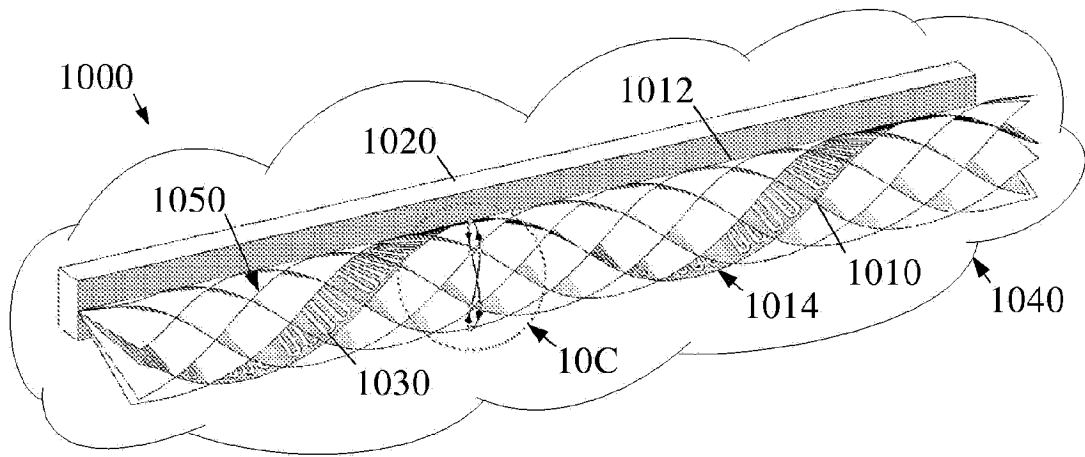


图 10B

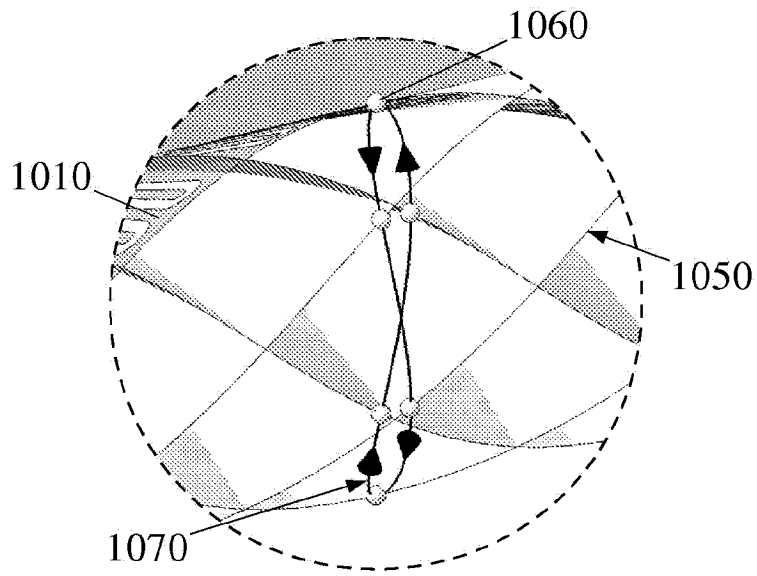


图 10C

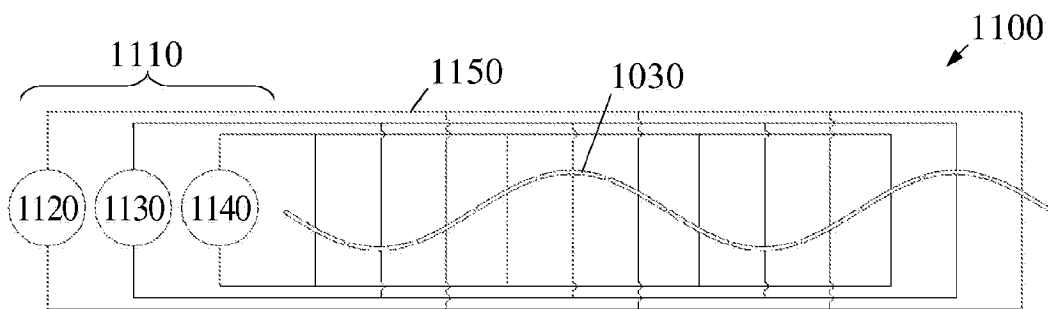


图 11A

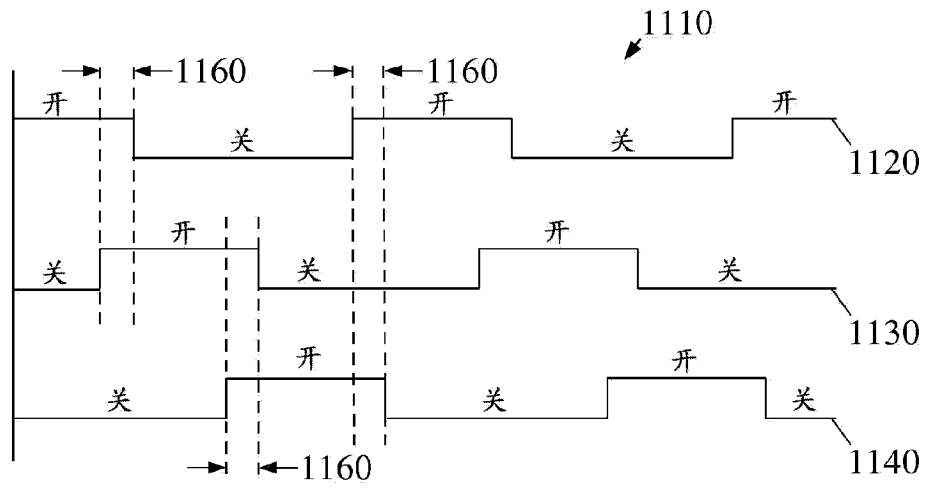


图 11B

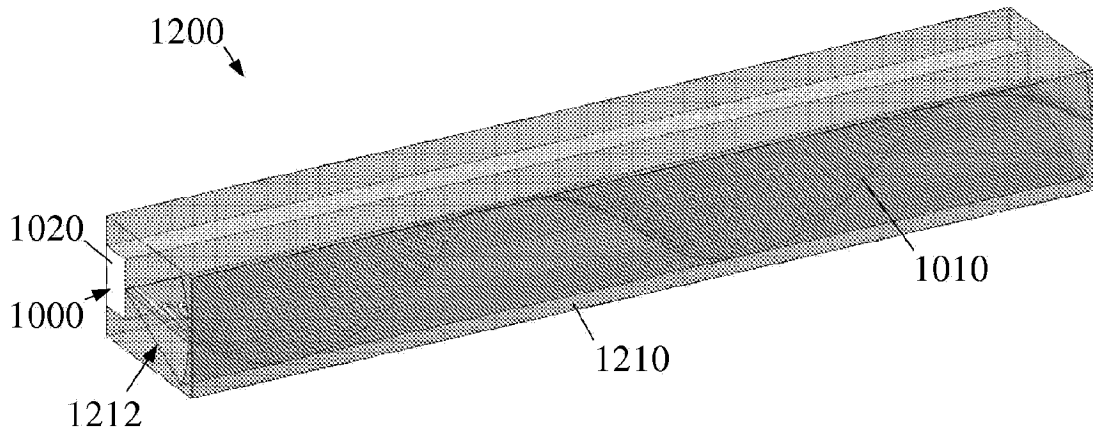


图 12

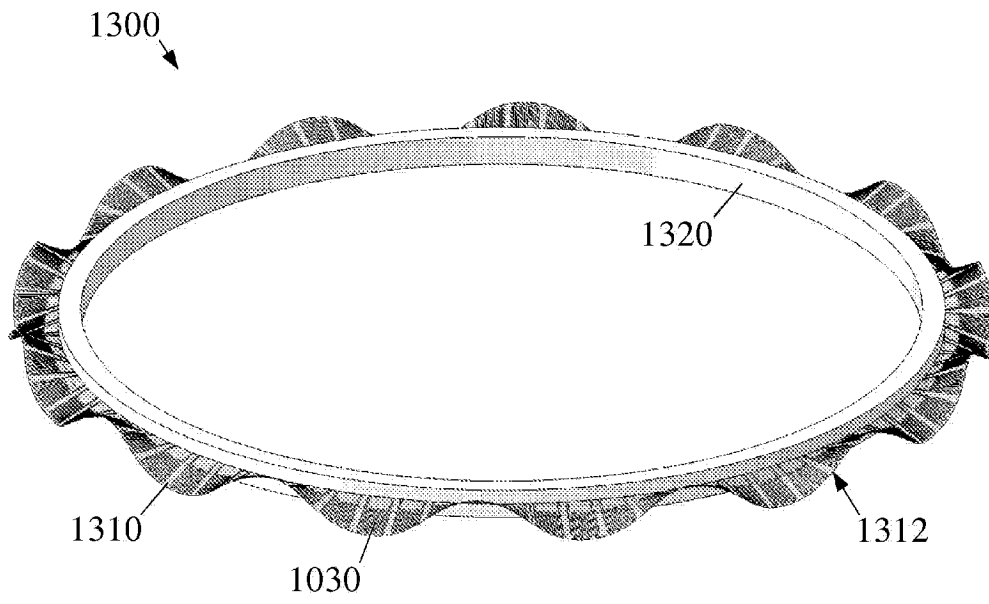


图 13

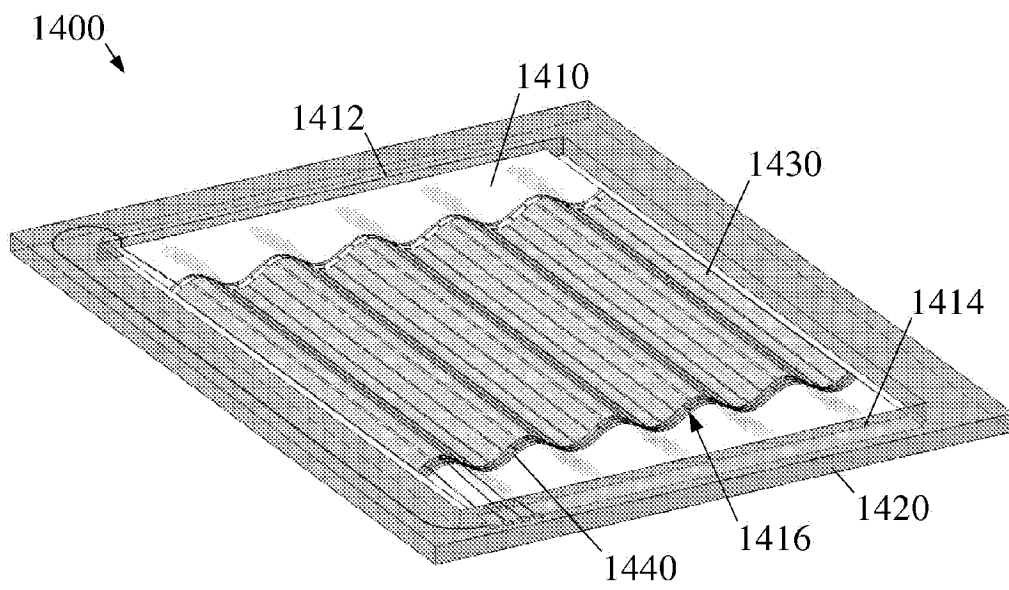


图 14

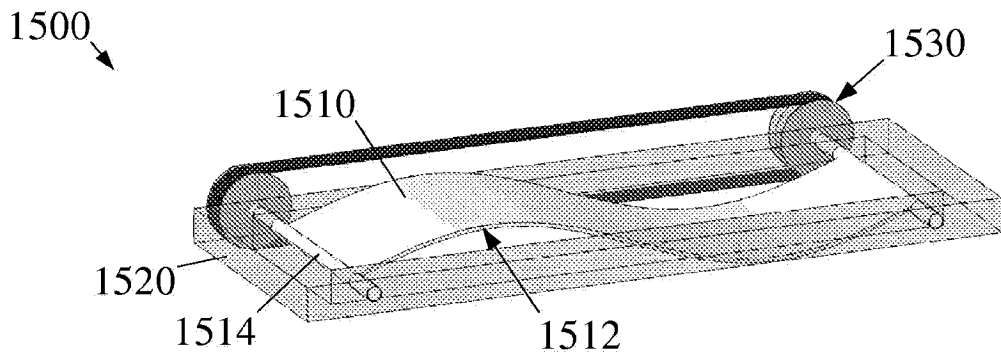


图 15A

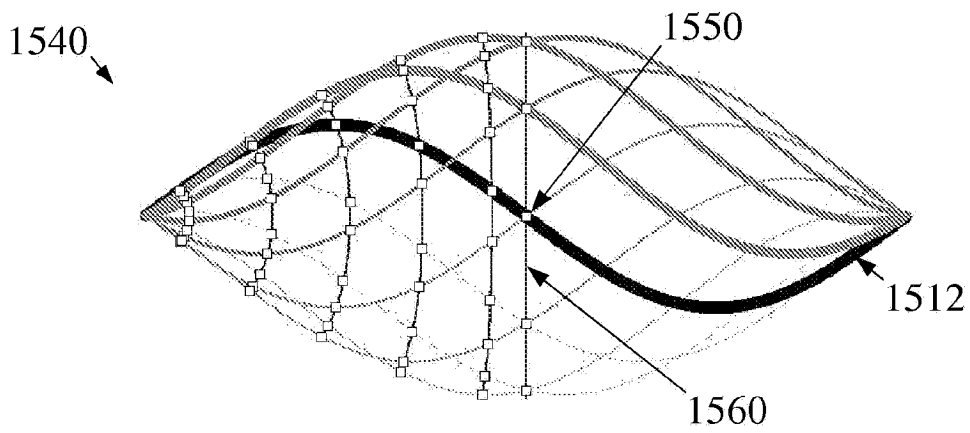


图 15B

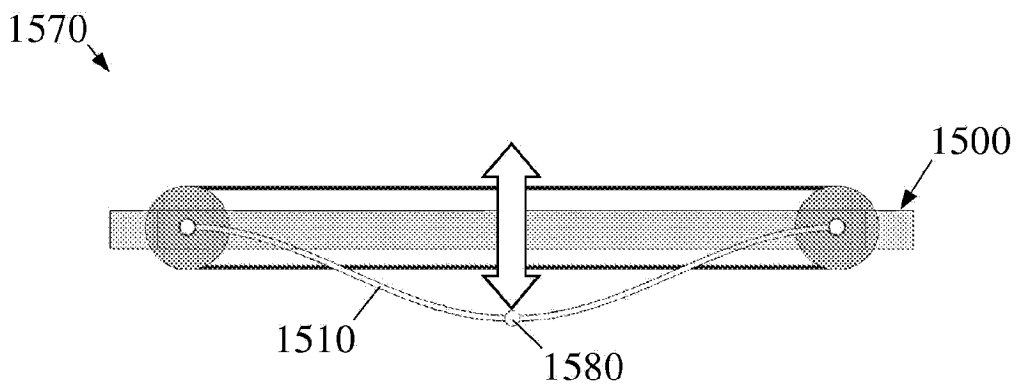


图 15C



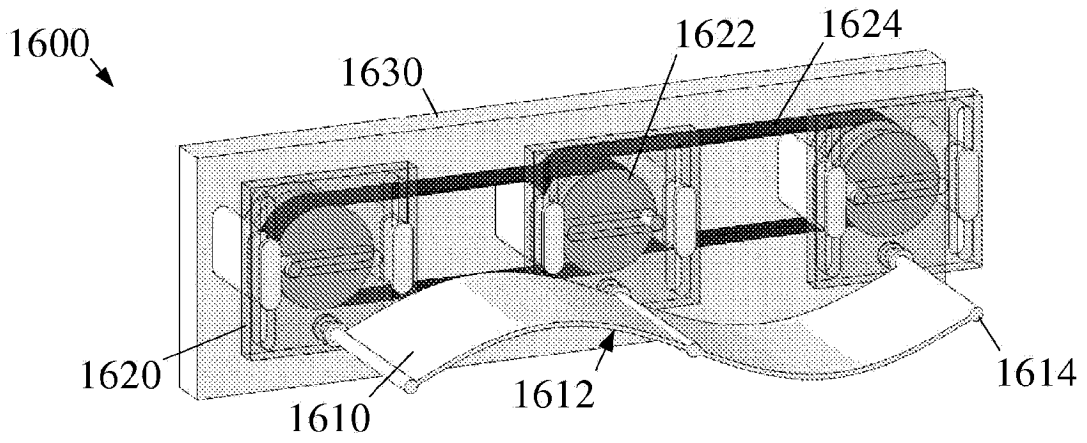


图 16A

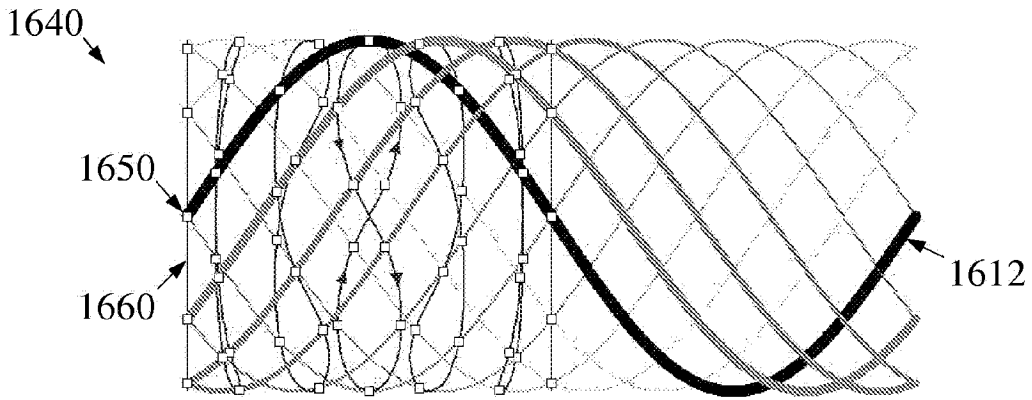


图 16B

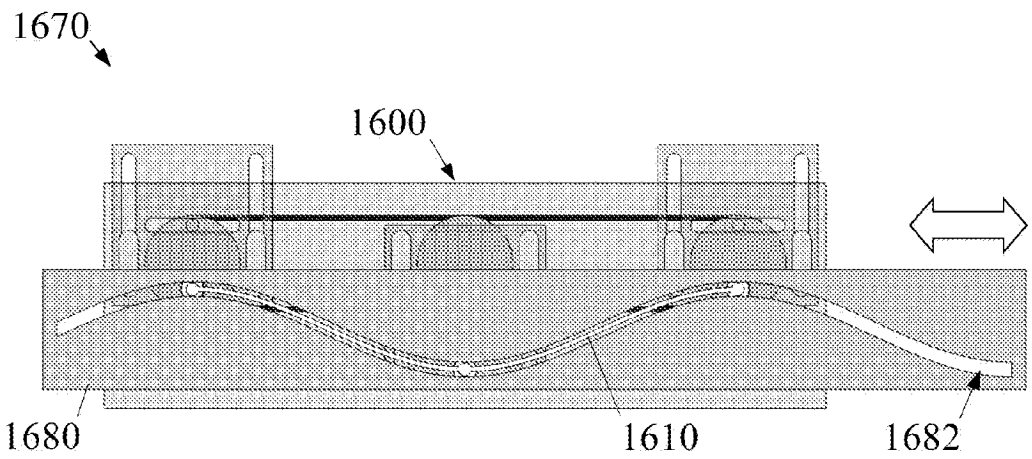


图 16C

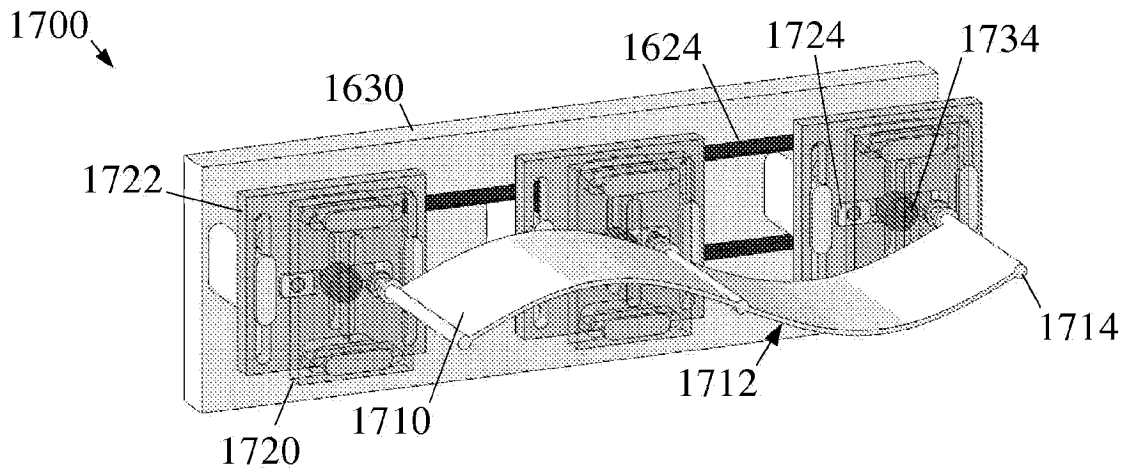


图 17A

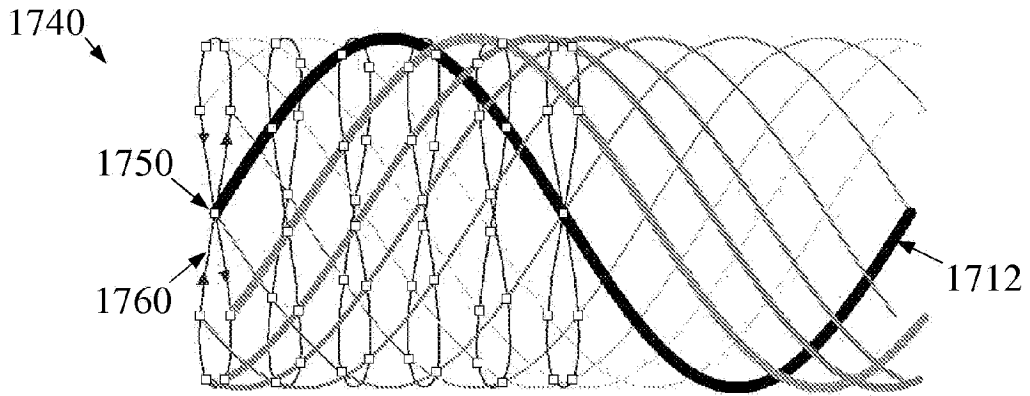


图 17B

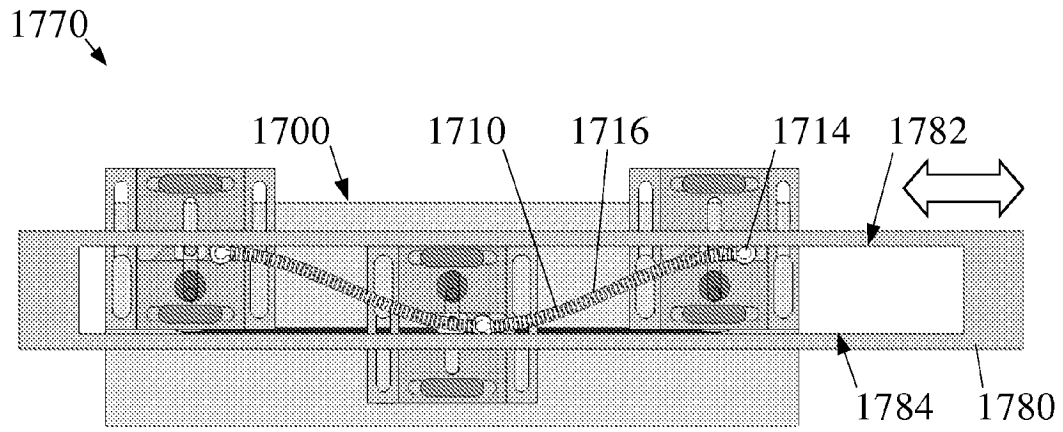


图 17C

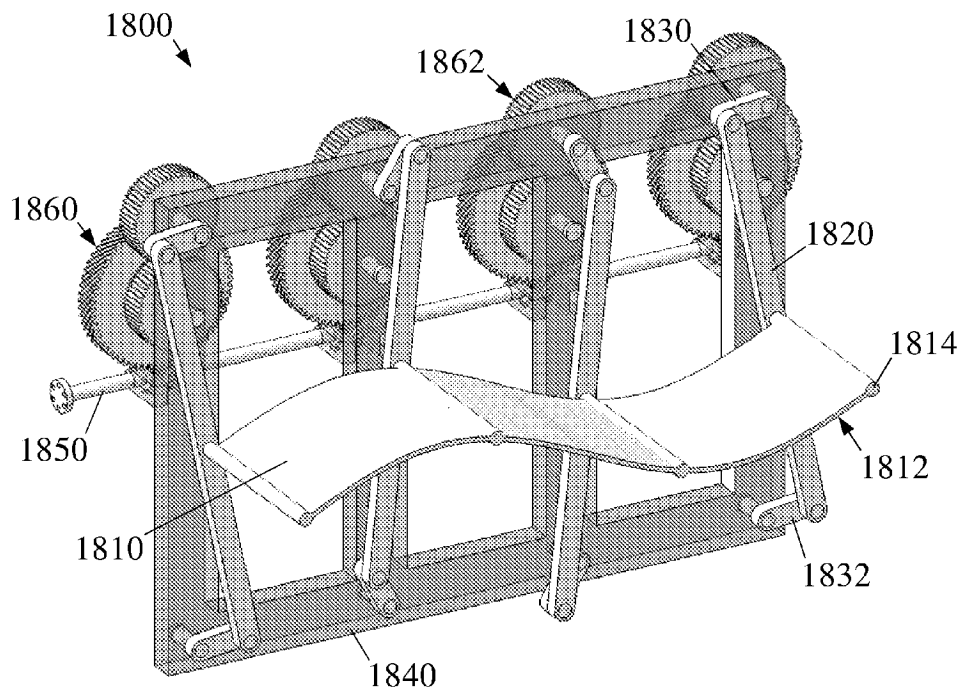


图 18

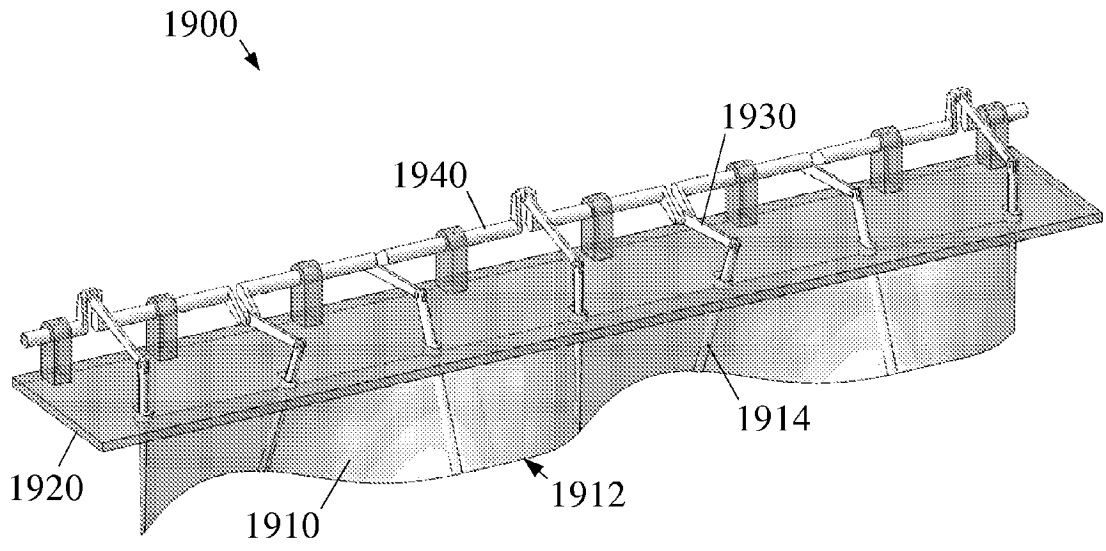


图 19

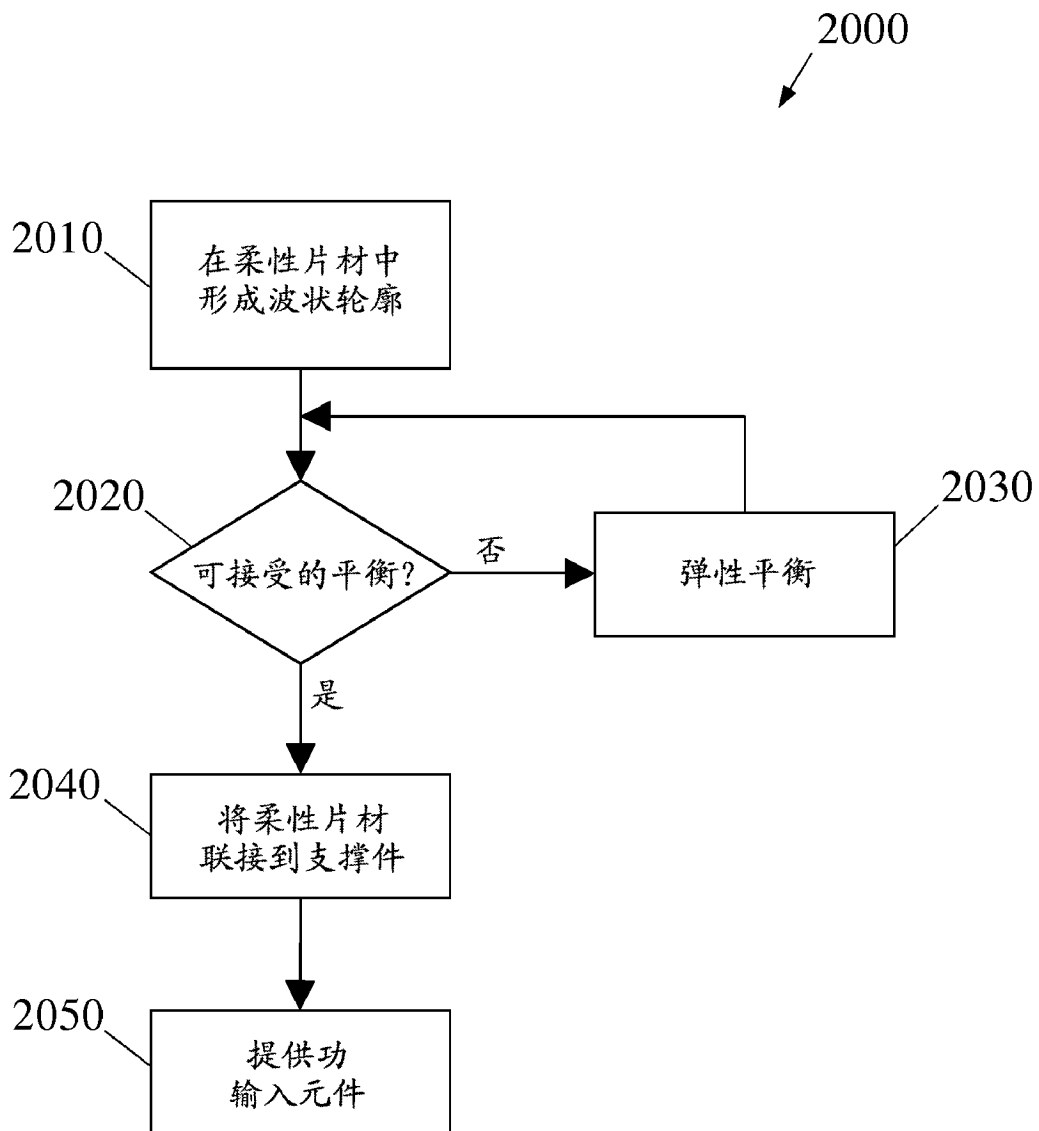


图 20

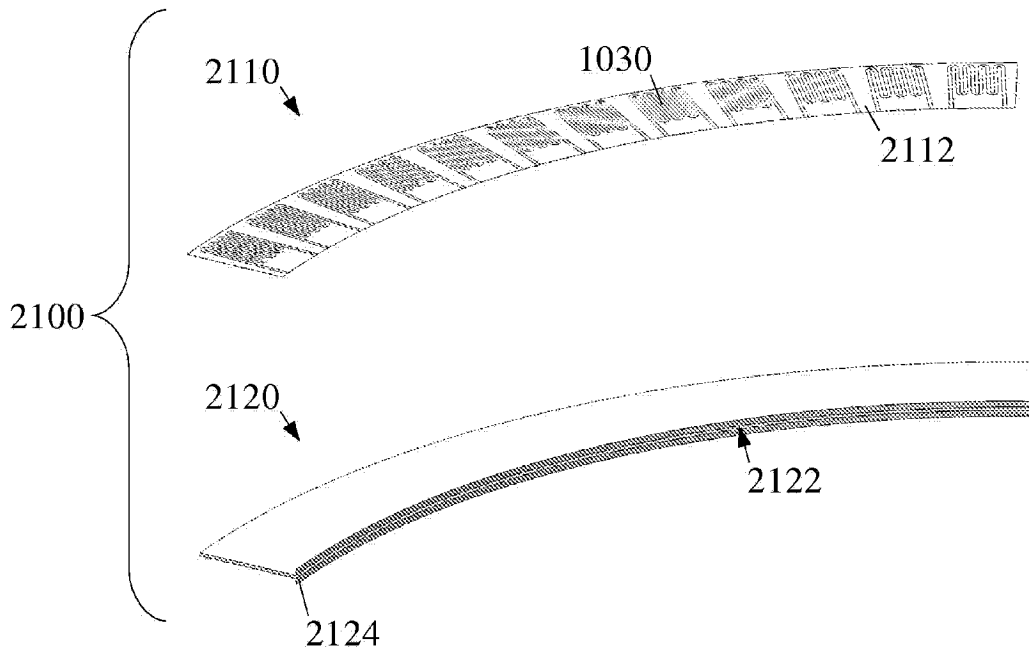


图 21

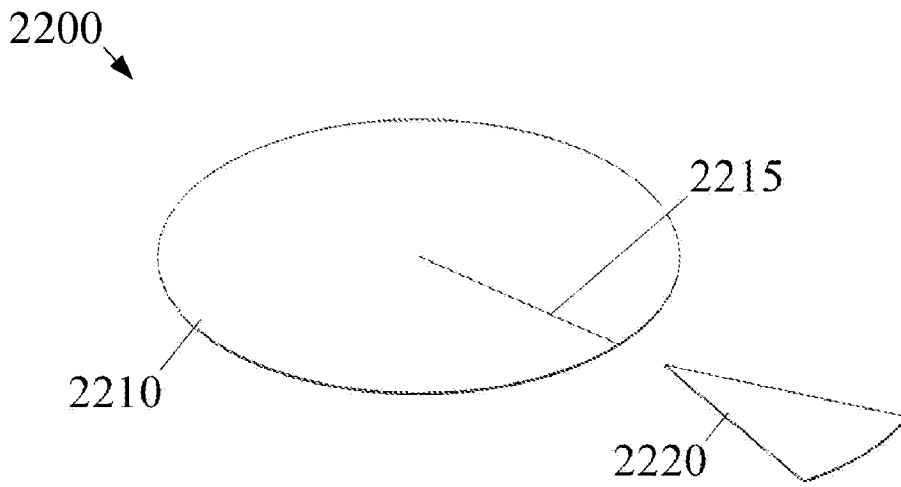


图 22