



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110243305 A

(43)申请公布日 2019.09.17

(21)申请号 201810192197.1

(22)申请日 2018.03.08

(71)申请人 桂林电子科技大学

地址 541004 广西壮族自治区桂林市桂林
金鸡路1号

(72)发明人 苑立波 杨世泰 徐荣辉

(51)Int.Cl.

G01B 11/24(2006.01)

G01B 11/16(2006.01)

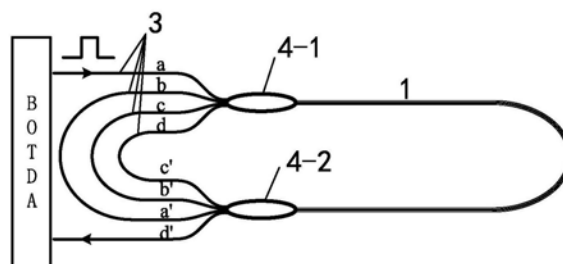
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器

(57)摘要

本发明提供的是一种基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器。该光纤形状传感器由多芯光纤,单模光纤和多芯光纤Fan-in器件,单模光纤和多芯光纤Fan-out器件以及连接Fan-in和Fan-out器件之间的多根单模光纤组成。采用多芯光纤的多根纤芯依次循环串接的方式,实现将多个纤芯展开成一维拓扑光路的功能。本发明可用于动态BOTDA传感系统的形状传感器件,可广泛用于智能结构的健康监测,还可用于机器人或者飞机机翼的蒙皮结构,实时检测其形状变化。



1. 一种基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器。其特征是：该光纤形状传感器由多芯光纤，单模光纤和多芯光纤Fan-in器件，单模光纤和多芯光纤Fan-out器件以及连接Fan-in和Fan-out器件之间的多根单模光纤组成。所述系统中有BOTDA输出的光脉冲由单模光纤进入多芯光纤Fan-in器件的一个分路a，输入多芯光纤的一根纤芯，光波传输至多芯光纤的另一端又经过多芯光纤Fan-out器件分路a' 输出，并且输出的光脉冲又通过多芯光纤Fan-in器件分支b输入多芯光纤的第二根纤芯传输，依次将多芯光纤的多根纤芯循环串接，最后将光脉冲返回到BOTDA，实现将多个纤芯映射成一维拓扑光路的功能。

2. 根据权利要求1所述的基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器。其特征是：所述的形状传感器经过BOTDA获取的是一维的数据信息，将该一维数据信息进行分段映射和提取，得到多芯光纤每根纤芯对应的形变信息。

3. 根据权利要求1所述的基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器。其特征是：所述多芯光纤两端采用多芯光纤Fan-in/out器件将多芯光纤和单模光纤连接，该器件是可以由熔融拉锥，使多根双包层光纤的纤芯逐渐减小制成的，也可以是通过激光诱导在波导集成芯片中制备而成的，它可实现多芯光纤内部每根纤芯的独立输入/输出。

4. 根据权利要求1所述的基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器，其特征是：所述的多芯光纤具备有N条纤芯， $N \geq 3$ ，其中每个纤芯对称地分布在光纤的圆周上。

5. 根据权利要求1所述的基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器，其特征是：所述的多芯光纤具备有N条纤芯， $N \geq 4$ ，其中一个纤芯在中间，其余的纤芯围绕中间芯圆周呈螺旋分布。

基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器

(一) 技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器,可用于智能结构的健康监测,还可用于机器人或者飞机机翼的蒙皮结构,实时检测其形状变化,属于分布式光纤形变传感技术领域。

(二) 背景技术

[0002] 光纤形变传感是一种分布式传感技术,它利用光纤局部应变产生的后向散射信号来探测光纤的弯曲和扭转等信息,然后对这些信息进行处理以重构光纤的空间形变。这种技术在医疗、能源、国防、航空航天、结构安全监测以及其它智能结构等领域具有广泛的应用价值。而在航空航天领域,光纤智能结构已应用于自适应机翼、智能蒙皮、振动噪声控制以及智能结构健康监测等领域的研究。1979年5月,美国国家航空航天局(NASA)哥达德空间飞行中心提出“光纤机敏结构与蒙皮”计划,将光纤传感器植入飞行器的复合材料蒙皮中,构建光纤智能结构,监测应变和温度参数,使得飞行器和关键构件具有自检测、自诊断、自监控、自适应等功能,该计划开创了智能结构(Intelligent Structures)研究的先河。随后,美国空军项目“预测II”计划提出,21世纪的美国空军飞机及空间系统将在飞行器结构与蒙皮中植入集成阵列传感器、执行器,构建新型“机敏结构与蒙皮”,用于对飞行器的外部负载、内部温度、应力应变、裂纹及其扩展、损伤及失效等进行在线、动态、主动的监测,以保证飞行更加安全、可靠、经济。

[0003] 分布式布里渊光纤传感因具有分布式应变和温度的测量能力,以及在结构健康监测领域的重要应用而受到广泛的研究。在多种传感方案中,布里渊光时域分析技术(BOTDA)具有信噪比好、空间分辨率高、传感距离远等优点,受到广泛关注。但是,传统的BOTDA系统需要比较费时的平均和扫频过程,只适宜进行静态或缓慢的应变测量。为了提升BOTDA系统的动态分布式传感性能,各国研究人员提出了很多改进方案:偏振补偿技术、光学捷变频技术、斜坡法、光学啁啾链技术、光学频率梳技术等。哈尔滨工业大学的董永康研究团队采用差分脉宽对的方法,有效的提高了BOTDA系统的空间分辨率(Dong Y, Ba D, Jiang T, et al. High-Spatial-Resolution Fast BOTDA for Dynamic Strain Measurement Based on Differential Double-Pulse and Second-Order Sideband of Modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(3): 2600407-2600407.)。

[0004] 基于高分辨率的动态BOTDA系统,为了实现弯曲、扭转等形状变化的传感探测,还需要有结构简单、形状变化传感信息完备、集成度高的光纤形状传感器这一核心器件。

[0005] 将布里渊光纤传感技术与多芯光纤相结合,国内外研究者在多芯光纤形状传感方面开展了卓有成效的探索与研究。2015年, Yosuke Mizuno等人研究了七芯光纤的边芯和中间芯在布里渊散射测量中对应变和温度的感知系数不同,指出了多芯光纤用于应变和温度传感的可能性(Mizuno Y, Hayashi N, Tanaka H, et al. Brillouin scattering in multi-core optical fibers for sensing applications[J]. Sci Rep, 2015, 5: 11388.)。专利CN103438927B中采用多芯光纤作为分布式传感器件,但是其只是将多芯光纤的多个纤芯作

为多个传输通道,起到了多次测量的作用,并不能用于作为形状的实时传感。

(三) 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种结构简单紧凑、用于动态BOTDA系统的多芯循环串接式形状传感器。

[0007] 本发明的目的是这样实现的:

[0008] 由多芯光纤,单模光纤和多芯光纤Fan-in器件,单模光纤和多芯光纤Fan-out器件以及连接Fan-in和Fan-out器件之间的多根单模光纤组成。所述系统中有BOTDA输出的光脉冲由单模光纤进入多芯光纤Fan-in器件的一个分路a,输入多芯光纤的一根纤芯,光波传输至多芯光纤的另一端又经过多芯光纤Fan-out器件分路a' 输出,并且输出的光脉冲又通过多芯光纤Fan-in器件分支b输入多芯光纤的第二根纤芯传输,依次将多芯光纤的多根纤芯循环串接,最后将光脉冲返回到BOTDA,实现将多个纤芯映射成一维拓扑光路的功能。

[0009] 所述的形状传感器经过BOTDA获取的是一维的数据信息,将该一维数据信息进行分段映射和提取,得到多芯光纤每根纤芯对应的形变信息。

[0010] 所述多芯光纤两端采用多芯光纤Fan-in/out器件将多芯光纤和单模光纤连接,该器件是可以由熔融拉锥,使多根双包层光纤的纤芯逐渐减小制成的,也可以是通过激光诱导在波导集成芯片中制备而成的,它可实现多芯光纤内部每根纤芯的独立输入/输出。

[0011] 所述的多芯光纤具备有N条纤芯, $N \geq 3$,其中每个纤芯对称地分布在光纤的圆周上。

[0012] 所述的多芯光纤具备有N条纤芯, $N \geq 4$,其中一个纤芯在中间,其余的纤芯围绕中间芯圆周呈螺旋分布。

[0013] 与传统的光纤形状传感器,本发明至少具备有以下优点:

[0014] (1) 其采用多芯光纤纤芯的循环串接的方式,实现将多个纤芯展开成一维拓扑光路的功能,相比于用多根光纤作为形状传感器来说,具有明显的高度集成的优势。

[0015] (2) 该传感器用作动态BOTDA的形状传感器,将三维分布的多芯光纤光路转换为拓扑上的一维光路,在信号解调时,将一维光路上的一维序列信息分段映射到每根纤芯,得到每根纤芯的形变信息,可用于弯曲、扭转等三维动态形变的实时测量,而这恰是传统应变传感器难以做到的。

[0016] (3) 本发明中可以采用的多芯光纤中间纤芯可用作参考纤芯,排除环境温度变化和轴向应变所带来的影响,提高了三维形变光纤传感器的稳定性和可靠性。

(四) 附图说明

[0017] 图1为可用于本传感器的各类多芯光纤的结构示意图(不限于图中所示的结构和种类)。

[0018] 图2为实施例中所所述的四芯光纤结构图,(a)为四芯光纤三维结构图,四根纤芯的两端分别用a、b、c、d和a'、b'、c'、d'表示,(b)为四芯光纤端面结构图。

[0019] 图3为螺旋四芯光纤的结构图,其周边纤芯围绕中间芯圆周螺旋分布。

[0020] 图4为四芯光纤Fan-in/out器件结构示意图。图中,1为四芯光纤,3为单模光纤,5为双包层光纤,6为纯石英套管。

[0021] 图5为基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器的光路图。其中包含四芯光纤1,单模光纤3,四芯光纤Fan-in/out器件4-1/4-2。

[0022] 图6为一维数据序列分段映射到每根纤芯的情况示意图。其中(a)为BOTDA系统获取的一维数据信息,(b)为映射得到的每根纤芯的形变信息,(c)为螺旋四芯光纤。

[0023] 图7为本发明用于弯曲传感器的工作原理示意图:(a)横截面示意图(面N-N'为光纤弯曲的中性面,1为纤芯1相对于y轴的方位角,纤芯距包层中心的距离都为r, θ_b 为光纤弯曲方向与y轴的夹角);(b)四芯光纤弯曲示意图。

[0024] 图8为本发明用于扭转传感器的工作原理示意图:(a)传感原理示意图;(b)扭转螺旋四芯光纤示意图。

(五) 具体实施方式

[0025] 下面结合具体的实施例来进一步阐述本发明。

[0026] 实施例:

[0027] 为了获得三维形状传感,需要同时实现分布式的弯曲与扭转传感。在多芯光纤上,采用布里渊光时域分析技术(BOTDA)就能达成这个目标。为此,本发明提供了一种用于动态BOTDA系统的多芯循环串接式光纤形状传感器。该传感器采用了多芯光纤。这种多芯光纤可以有多种形式:(1)多根纤芯圆周对称排列,纤芯数 $N \geq 3$ 的多芯光纤,如图1(a)所示的三芯光纤;(2)具备有一根中间纤芯和多根纤芯围绕中间纤芯圆周分布的多芯光纤,纤芯数 $N \geq 4$,如图1(b)和(c)所示的四芯光纤和七芯光纤;(3)周边纤芯围绕中间纤芯螺旋分布的螺旋多芯光纤。为了方便,以下内容和附图采用四芯光纤为例进行详细说明,但是本发明不限于此。

[0028] 如图2所示,其中图2(a)是四芯光纤1的三维图,图2(b)是四芯光纤1的端面示意图。除了采用图2所示的四芯光纤外,也可以采用具有螺旋边芯的螺旋四芯光纤,如图3所示的螺旋四芯光纤2。采用螺旋四芯光纤2可以增加弯曲、扭转等形变量测量的灵敏度。

[0029] 为了实现这种四芯光纤的分路连接,保证每根纤芯内的光束互不影响地输入与输出,本发明可以采用四芯光纤Fan-in/out器件4-1/4-2,可以使传感用四芯光纤1的每个纤芯都能和一根输入/输出标准单模光纤3连接。这里对可采用的一种制备方法,对其作用原理做详细说明。该四芯光纤Fan-in/out器件4如图4所示:将一根纯石英套管6打孔,用于嵌入特殊设计的双包层光纤5,通过熔融拉锥,使双包层光纤5的纤芯逐渐减小而模式截止,这样内包层逐渐转换为光波的主要传输层。当锥腰处内包层传输的模式与四芯光纤1传输的模式匹配时(通过锥腰直径来控制),停止拉锥,并在锥腰处切断,并与四芯光纤1进行焊接,这样就形成如图4所示 4×4 多芯光纤Fan-in/out器件。

[0030] 下面将结合附图说明本发明的结构和用于形变传感的实现原理:

[0031] (1) 基于动态BOTDA的多芯循环串接式光纤形状传感器的结构:

[0032] BOTDA光纤传感系统适合于处理一维光纤光路的分布式应变,为此,需要解决将四芯光纤1的四个纤芯及其四个通道光路转化为适合于BOTDA系统进行一维分布式传感测量的方式,这需要针对四芯光纤1三维空间结构的光波通道特性,解决将三维空间分布的四芯光路转换为拓扑上的一维光路的问题,从而实现三维形状传感。如图5所示,本发明提出的形状传感器由四芯光纤1,单模光纤3和四芯光纤Fan-in/out器件4-1/4-2组成。所述结构

中,光束由单模光纤3进入四芯光纤Fan-in器件4-1的一个分路,输入四芯光纤1的一根纤芯,光束传输至四芯光纤1的另一端又经过四芯光纤Fan-out器件4-2输出,并且输出的光束又通过四芯光纤Fan-in器件4-1输入四芯光纤1的第二根纤芯传输,依次将四芯光纤的四根纤芯循环串接,实现将多个纤芯展开成一维拓扑光路的功能。从而在空间拓扑结构映射的视角来看,就将四芯光纤1的四个通道测量问题转换成了BOTDA可连续测量的单通道光纤应变测量的问题了。而在物理空间上,本发明将来自BOTDA的一维分布式测量所对应的四个纤芯1的四段应变测量结果进行数据重构。如图6所示,BOTDA系统和测得的信号序列应该如图6(a)所示,通过测得的一维数据序列,我们能够识别并提取每根纤芯的应变测量结果,如图6(b)所示每段数据的长度都对应于四芯光纤1的长度L。通过这四段数据,将以中间芯应变数据为参考,与其它三根纤芯做差分运算,以此来获得该四芯光纤1的分布式弯曲与扭转信息,进而重构出其空间三维形状。将这样重构出的空间三维形状连续地进行实时更新,就能够得到动态的三维形状变化的结果了。

[0033] 在这种数据差分运算过程中,由于四芯光纤1的直径很小,仅有125 μm ,因此,四芯光纤1的四根纤芯的环境温度可视为近似相同。经过差分运算后,就自动消除了四芯光纤1中的每个纤芯沿着光纤轴向的应变,同时也自动消除了由于环境温度变化所产生的影响。获得的是四芯光纤1的纯弯曲和纯扭转的信息,因此,提高了三维形变光纤传感器的稳定性和可靠性。

[0034] (2) 本发明用于弯曲传感的机理:

[0035] 采用BOTDA进行光纤分布式测量是通过将入射光调制成脉冲实现的。光纤沿线每点的位置可以由脉冲光在光纤中的传播时间确定,而沿线每点布里渊频移的改变量由光纤该点所处受到的应力和环境温度决定:

$$\Delta v_B = C_\epsilon \cdot \Delta \epsilon + C_T \cdot \Delta T \quad (1)$$

[0036] 式中: C_ϵ 为布里渊频移应变系数, C_T 为布里渊频移温度系数, $\Delta \epsilon$ 为应力变化量, ΔT 为温度变化量。在不考虑温度变化时,式(1)可简化为:

$$\frac{\Delta v_B}{v_B} = C_\epsilon \cdot \epsilon \quad (2)$$

[0037] 在纯弯曲条件下,对于圆截面弹性梁,轴向应变和曲率之间存在以下关系:

$$\epsilon = \frac{D}{\rho} = D \cdot C \quad (3)$$

[0038] 在公式(3)中, ϵ 为基于BOTDA光纤形状传感器感测位置承受轴向表面线应变值, ρ 为传感器感测位置的曲率半径, C 为对应的曲率, D 为传感器到中性面的距离。在给定 D 、 C 的情况下,能够求出传感光纤的应变。从公式(2)和(3)可看出,应变与布里渊频移的改变量 Δv_B 成正比,所以曲率 C 与 Δv_B 成正比。这样,通过监测布里渊频移的改变量 Δv_B 的大小就可以得到光纤曲率 C 的变化情况。

[0039] 如图7所示,四芯光纤1主要由一个位于包层中心的中央纤芯和三个以正三角形的形式排列的纤芯组成。当光纤沿着 NN' 轴作曲率半径为 ρ 的弯曲时,由图7(a)中的几何关系可以得到纤芯 i 到中性面的距离:

$$D_i = r_i \sin(\theta_b - 2\pi/3 - \theta_i) \quad (4)$$

[0040] 把式(4)代入式(3)及式(2)中,就可分别得到纤芯 i 上的布里渊频移的改变量 Δv_B

与曲率半径 ρ 的关系:

$$\frac{\Delta v_B}{v_B} = C_\varepsilon \frac{r_i \sin(\theta_b - 2\pi/3 - \theta_i)}{\rho} \quad (5)$$

[0041] 在实际BOTDA弯曲传感系统中,布里渊频移的改变量 $\Delta v_B/v_B$ 可以通过实验数据得到,这样,公式(5)中仅有三个未知量 ρ 、 θ_b 和 θ_i (这里,根据四芯光纤纤芯排布, θ_1 、 θ_2 和 θ_3 存在固定的位置关系),所以通过联立三个纤芯对应的方程(公式(5))就可求解出这三个未知量,根据光纤局部的弯曲半径和弯曲方向就可以得到光纤局部形态变化数据,借助于这些形态变化数据就可以重构光纤整体的三维形变。

[0042] (3) 本发明用于扭转传感机理:

[0043] 图8(a)给出了节距为 L_p ,螺旋芯距离光纤中心为 r 的螺旋芯光纤在外加扭转下发生 θ_t 的扭转角。从图中可看出,螺旋纤芯的长度由 L 变为 L_ε ,因此根据图中的几何关系,可以得到螺旋纤芯轴向应变 ε 与单位节距上的扭转角 θ_t 之间的关系:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_\varepsilon - L}{L} = \sqrt{\frac{L_p^2 + r^2 (2\pi + \theta_t)^2}{L_p^2 + 4\pi^2 r^2}} - 1 = \sqrt{1 + \frac{4\pi\theta_t + \theta_t^2}{(L_p/r)^2 + 4\pi^2}} - 1 \quad (6)$$

[0044] 把公式(6)带入公式(2)中就可得到螺旋纤芯上的布里渊频移量与扭转角 θ_t 的关系:

$$\frac{\Delta v_B}{v_B} = C_\varepsilon \left[\sqrt{1 + \frac{4\pi\theta_t + \theta_t^2}{(L_p/r)^2 + 4\pi^2}} - 1 \right] \quad (7)$$

[0045] 从公式(7)可看出,一般情况下,影响基于BOTDA多芯光纤扭转传感灵敏度的主要因素为螺距与纤芯到光纤中央的距离之比 L_p/r 。对于图8(a)和图8(b)所示的四芯螺旋光纤2,由于三个螺旋纤芯到光纤中央的距离都相等,因此这里只用考察光纤扭转螺距 L_p 对扭转传感灵敏度的影响,而中央纤芯对扭转不灵敏,仅起着补偿温度或光纤纵向拉伸的作用。对于同轴度良好的螺旋芯光纤,由于三个螺旋纤芯的螺距 L_p 相同,因此三个纤芯上的布里渊频移的改变量 $\Delta v_B/v_B$ 对光纤扭转的响应是一致的,也就是说光纤扭转引起三个纤芯上布里渊频移的改变量是相同的。对于非扭转多芯光纤,纤芯的螺距 L_p 可以看成无穷大,此时该光纤对扭转传感的灵敏度趋近于零(见式(7))。但是,一旦采用扭转光纤,光纤对扭转传感的灵敏度将迅速提高,并且纤芯螺距 L_p 越小,灵敏度越高。因此,本发明可以采用螺旋四芯光纤2来提高对空间扭转应变的探测能力。当然,考虑到纤芯弯曲损耗等因素,纤芯螺距 L_p 不能过小,一般需要毫米量级以上。从图8(b)可看出,利用在光纤沿线获得的布里渊频移的改变量 $\Delta v_B/v_B$,就可以求得沿光纤每个位置的应变变量,从而得到若干光纤局部形态参数,利用获得的若干光纤局部形态变化数据,就能够重构光纤整体的三维形变。

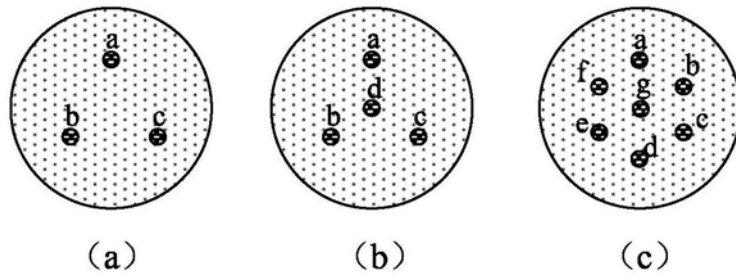
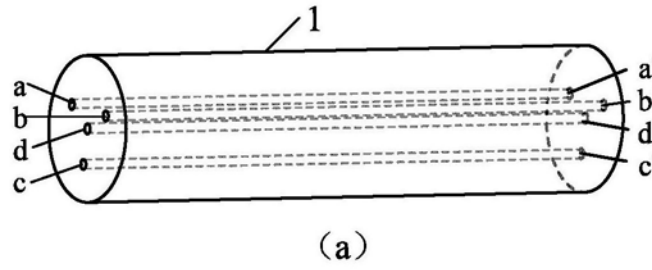
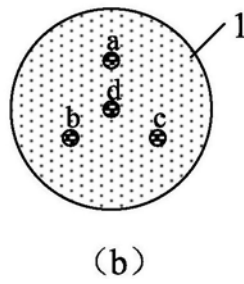


图1



(a)



(b)

图2

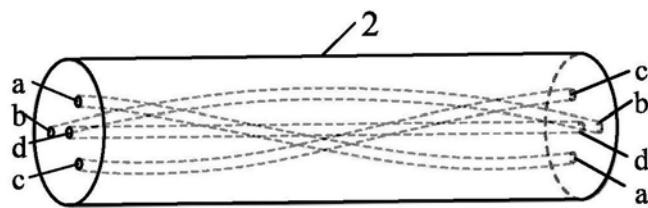


图3

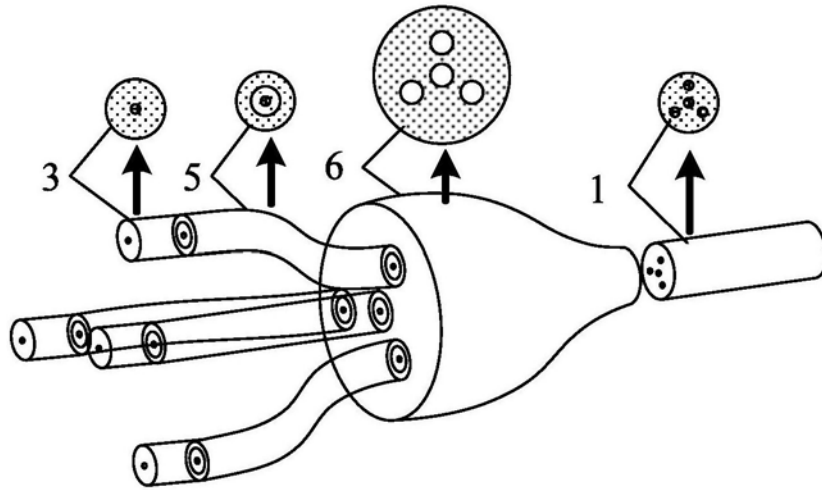


图4

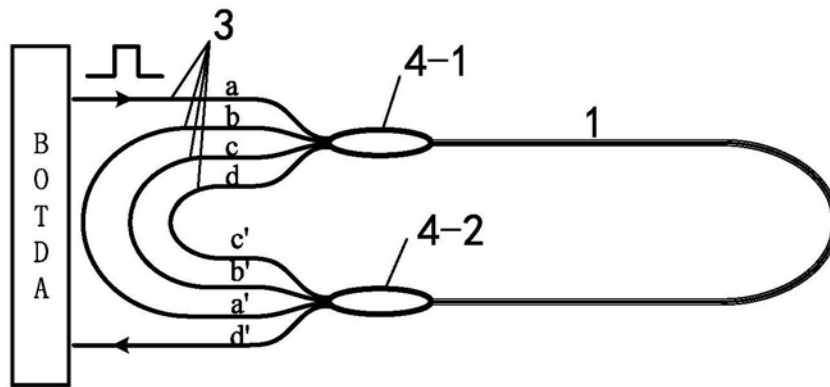


图5

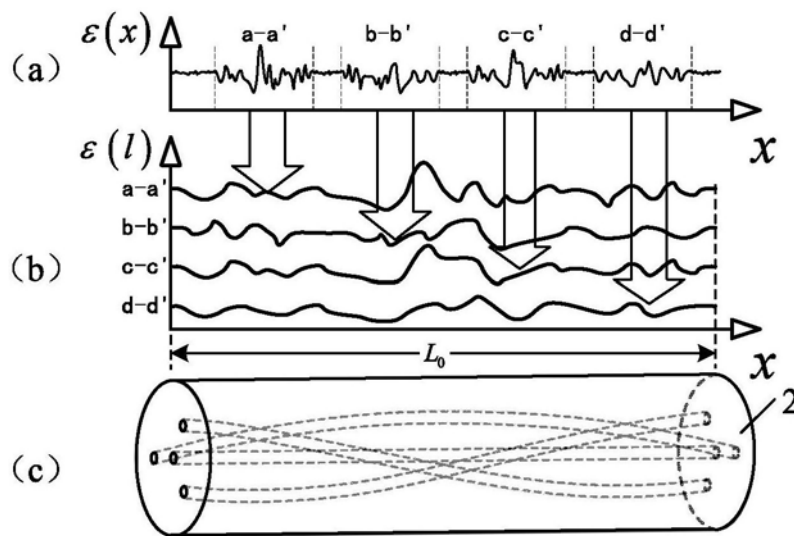
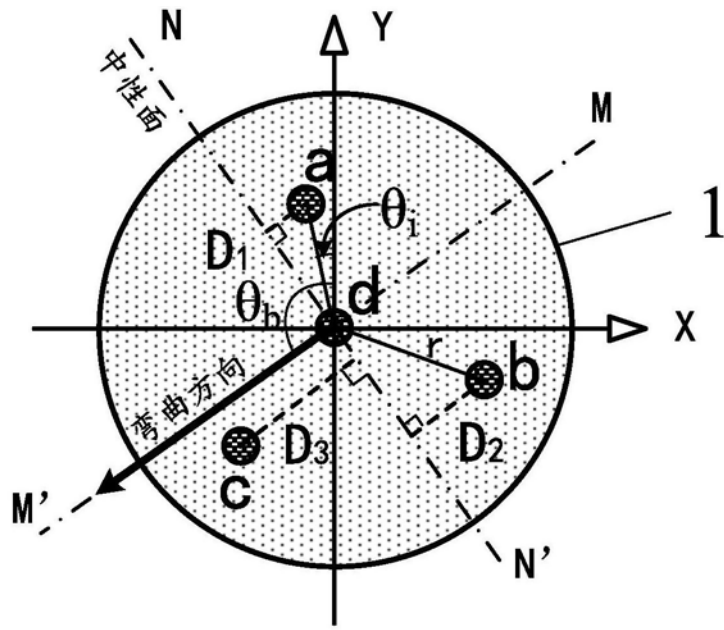
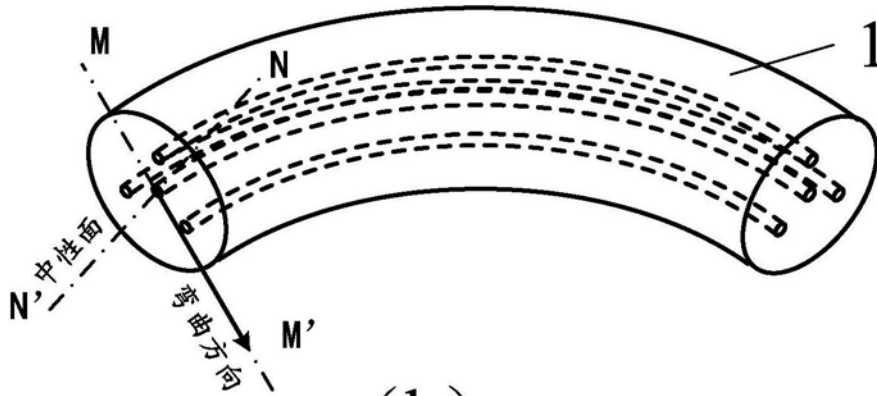


图6



(a)



(b)

图7

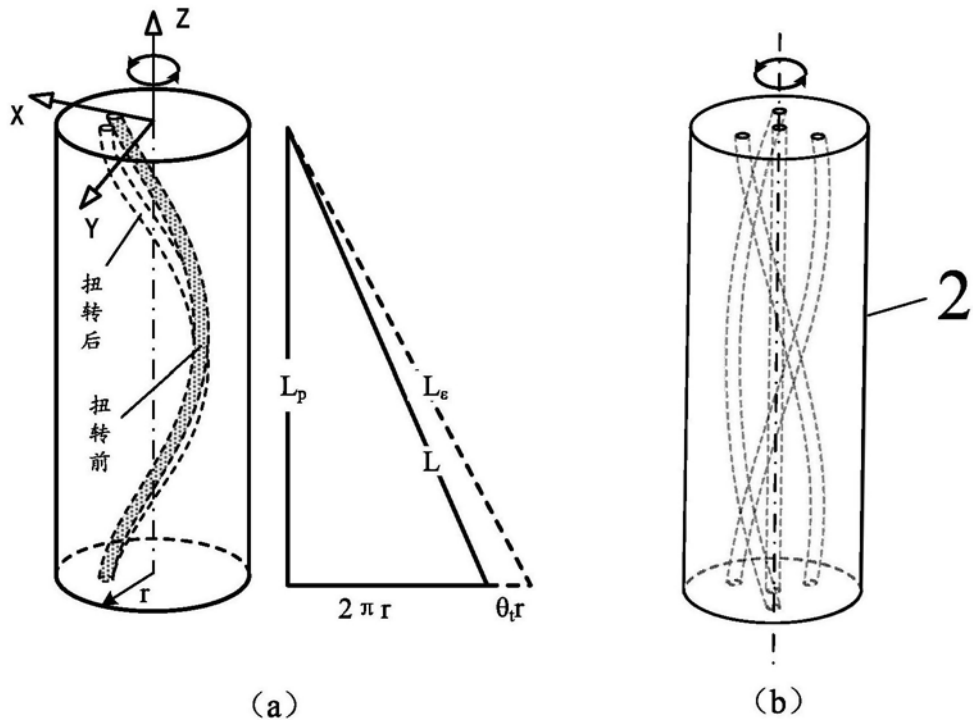


图8