



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101782593 A

(43) 申请公布日 2010.07.21

(21) 申请号 201019060026.4

(22) 申请日 2010.03.01

(71) 申请人 龙兴武

地址 410073 湖南省长沙市开福区德雅路
47 号国防科技大学光电科学与工程学院

申请人 肖光宗

张斌

(72) 发明人 龙兴武 肖光宗 张斌

(51) Int. Cl.

G01P 15/03 (2006.01)

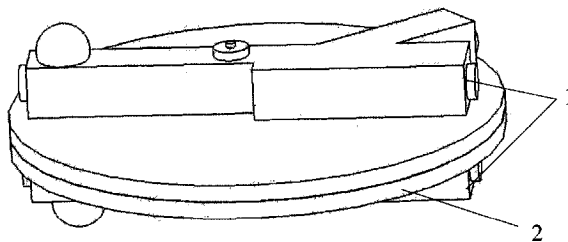
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 2 页

(54) 发明名称

双 Y 型腔双频激光加速度计

(57) 摘要

双 Y 型腔双频激光加速度计属于激光和精密测量技术领域,由光学模块、工作点选择与控制模块和信号采集与处理模块等组成。所述的光学模块由两支对称的 Y 型腔双频激光器和新型气体膜盒组成。利用气体膜盒作为第一级加速度敏感元件,将输入的加速度变化转化为气体膜盒内传感气体的折射率变化,进而转化为 Y 型腔双频激光器的拍频输出,再利用双 Y 型腔结构,将两支 Y 型腔双频激光器的拍频差动,得到最终输出信号。所述的工作点选择与控制模块用来选择和控制在加速度计的工作点,采用光强差的方法对双频激光器稳频。所述的信号采集与处理模块用来接收两支 Y 型腔双频激光器的输出拍频信号,计算出两拍频之差即为加速度计系统的最终输出信号。本发明双 Y 型腔双频激光加速度计是通过测量两支双频激光器的拍频之差的变化来测量载体的加速度,具有分辨率高、比例因子大、线性度好、数字式输出等特点。



1. 一种双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于利用新型气体膜盒作为第一级加速度敏感元件, 将输入的加速度变化转化为气体膜盒内传感气体的折射率变化, 进而转化为 Y 型腔双频激光器的拍频输出, 再利用双 Y 型腔结构, 将两支 Y 型腔双频激光器的拍频差动, 得到加速度计系统的最终输出信号。

2. 根据权利要求 1 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于双 Y 型腔双频激光加速度计由光学模块 19、工作点选择与控制模块 18 和信号采集与处理模块 17 组成。

3. 根据权利要求 1 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于输入加速度与系统输出信号之间的关系为

$$\Delta v = SF \cdot a$$

其中, $SF = SF_1 + SF_2$, SF_1 和 SF_2 分别为单支 Y 型双频激光器敏感加速度的比例因子,

$$SF_i = \frac{5}{128} \cdot \frac{v_0 L_{1i}}{n_1 L_{1i} + n_0 L_0} \cdot \frac{k \rho R^4 (m + m_0)}{D \left[\pi R^2 \cdot \varepsilon_{1i} + \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \cdot L_{1i} \right] (1 + \eta_i)}, \text{ 其中 } \eta_i = \frac{5}{64D} \cdot \frac{p_0 R^6}{\pi R^2 \cdot \varepsilon_{1i} + \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \cdot L_{1i}}, D$$

为石英膜片的弯曲刚度, L_{1i} 为传感气体管长, ϕ 为传感气体管直径, ε_{1i} 为气体膜盒分别与激光器 1 或 2 相通的盒体高度, m_0 为膜片质量, m 为质量块的质量, R 为超薄膜片半径, p_0 、 ρ 和 n_1 分别为无加速度输入时膜盒中传感气体的压强、密度和折射率, k 为传感气体的格拉德斯通 - 戴尔常数, v_0 为激光频率, n_0 为增益气体的折射率, $i = 1, 2$ 表示组成加速度计的两支 Y 型双频激光器。

4. 根据权利要求 1 和 2 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于光学模块 19 由两支 Y 型腔双频激光器 1 和新型气体膜盒 2 组成。

5. 根据权利要求 1 和 4 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于气体膜盒 2 由两个膜盒盒体 15 和一个超薄膜片 14 组成, 两个膜盒盒体 15 与超薄膜片 14 对称地以光胶或粘连的方式固连在一起。

6. 根据权利要求 4 和 5 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于气体膜盒 2 的被超薄膜片 14 密闭的两个膜盒盒体 15 中均充有相同压强的传感气体, 传感气体包括氮气、二氧化碳和六氟化硫等。

7. 根据权利要求 6 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于膜盒盒体为一扁平状皿, 膜盒盒体上均开有通气孔 13, 膜盒盒体 15 的底面包括圆形、矩形等。

8. 根据权利要求 3 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于超薄膜片 14 的中心以光胶的方式粘连一圆柱形质量块 16, 超薄膜片 14 的其他部分表面形状包括光滑平面、锯齿形、梯形等。

9. 根据权利要求 6 和 7 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于膜盒盒体 15 的材料包括微晶玻璃等超低膨胀系数材料, 超薄膜片 14 的材料包括石英玻璃等弹性材料。

10. 根据权利要求 1、2 和 3 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于 Y 型腔双频激光器 1 利用偏振分光膜片 6 将 S 光和 P 光在空间上分开, 从而形成两个非共用腔 (7, 10), 两个非共用腔 (7, 10) 与共用腔 11 的位置关系可以为“Y”型和具有分叉结构的其它形状。

11. 根据权利要求 1、2 和 3 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计, 其特征在于 Y 型腔双频激光器 1 利用 S 光和 P 光在两个非共用腔中的光程差产生这两个偏振光的频率差, 从而形

成频率分裂。

12. 根据权利要求 1 所述的双 Y 型腔双频激光加速度计,其特征在于工作点选择与控制模块 18 选择 Y 型腔双频激光器的工作点,并采用光强差方法稳频。

双 Y 型腔双频激光加速度计

技术领域

[0001] 本发明是涉及一种新型高精度激光加速度计,尤其是新型气体膜盒式双频激光加速度计,属于激光和精密测量技术领域。

背景技术

[0002] 加速度计是惯性导航与制导系统中的重要元件,它将受控或被测载体沿其输入轴方向的运动加速度转化为电信号或其它形式信号。加速度计的发展已经经历了几十年的历史,种类繁多。近代激光技术、光纤传感技术、微制造技术的发展给光学加速度计的研究提供了有利条件,光学加速度计以其高灵敏度、强抗电磁干扰能力等优点逐渐成为国内外加速度计研究的热点。

[0003] 激光加速度计是建立在已经发展几十年的激光器理论和技术基础上的,它是将沿输入轴方向的加速度转化为激光器的输出频率变化,通过测量拍频来敏感加速度。国内外激光加速度计的专利较多,基本上可分为两大类。一是在激光器腔内置入晶体,加速度产生的应力引起晶体折射率的变化,进而引起输出频率的变化。该方案的专利较多,清华大学精密仪器国家重点实验室正在利用此方案进行研究(张书练. 正交偏振激光原理 [M]. 北京:清华大学出版社,2005. 224 ~ 228)。二是利用加速度产生的惯性力,引起弹性敏感元件的形变,进而引起输出频率的变化。Joseph P. Ficalora 等人提出了利用激光器高反端镜形变引起的横模间差频变化来测量加速度的方案 (Joseph P. Ficalora, Oak Ridge, N. J. High Accuracy Laser Accelerometer; United States Patent, 5456112 [P]. Oct. 10, 1995)。Litton 公司的 Graham J. Martin 等人提出了 L 型腔的结构,加速度引起激光器一臂的形变进而产生左右旋偏振光的差频 (Graham J. Martin, Canoga Park, Calif. Non-planar Ring Laser Accelerometer; United States Patent, 4637255 [P]. Jan. 20, 1987)。总的说来,以上方案各有特色,但由于原理和技术上均存在着各自固有的缺点,目前世界上尚未有高精度激光加速度计研制成功的相关报道。

发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题是:克服以往激光加速度计方案的不足,提出了一种新型的分辨率高、比例因子大、线性度好的高精度激光加速度计系统方案—双 Y 型腔双频激光加速度计。

[0005] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:

[0006] 本发明由光学模块、工作点选择与控制模块和信号采集与处理模块等部分组成。光学模块是整个加速度计的核心,由两支对称的 Y 型腔双频激光器和新型气体膜盒组成。S 光和 P 光被一偏振分光膜片分开,分别形成两个非共用腔。气体膜盒被一超薄膜片分成两部分,其中均充有相同压强的传感气体(如氮气、二氧化碳、六氟化硫等),这两部分通过其上下两个通气管分别与两支激光器中非共用腔中的一支相通,该支非共用腔称为传感气体管。此处的膜片即为敏感加速度的弹性元件。为提高系统的灵敏度,在膜片中心以光胶的

方式加入一圆柱形质量块。工作点选择与控制模块用来选择和控制加速度计的工作点,采用光强差的方法对双频激光器稳频。信号采集与处理模块用来接收两支 Y 型腔双频激光器的输出拍频信号,计算出两拍频之差即为加速度计系统的最终输出信号。

[0007] 本发明的基本工作过程如下:当垂直于超薄膜片方向有加速度输入时,超薄膜片产生弹性形变,气体膜盒的上半部分体积增大(或减小),下半部分体积减小(或增大),则与膜盒上半部分相连的传感气体管内气体密度减小,折射率也相应减小,光学长度也随之减小,从而引起两段非共用腔光学长度差的改变,这样该支双频激光器的输出拍频,亦即 S 光和 P 光的频率差也将发生变化。同理,另外一支双频激光器的输出拍频将发生与之相反的变化。

[0008] 本发明的工作原理详细分析如下:

[0009] 当垂直于膜片方向输入的加速度为 a 时,膜片形变和受力分析如图 4。膜片的自身质量产生的惯性力载荷为 $q_0 = -\rho_0 at$,其中 ρ_0 为膜片材料的密度, t 为膜片的厚度。设圆柱形质量块密度为 ρ_m ,直径为 d_m ,高度为 t_m ,则质量块对膜片产生的惯性力载荷为 $q_m = -\rho_m at_m$ 。设膜片上下两部分气体的压强对膜片产生的载荷分别为 $-p_1$ 和 p_2 。当 $q_m \gg q_0$, $p_1, p_2, d_m \ll d$ (d 为膜片直径) 时,该问题可简化为平膜片中心受集中力的情况。该集中力为图 4 中各力的合力

$$[0010] \quad F = ma + m_0 a - (p_2 - p_1) \pi R^2 \quad (1)$$

[0011] 其中, m_0 为膜片质量, m 为质量块的质量, $R = \frac{d}{2}$ 为膜片半径。

[0012] 设膜片形变引起的膜盒上下部分的体积变化分别为 ΔV ,由气体状态方程,膜盒上下部分的压强变化 $(p_2 - p_1)$ 为

$$[0013] \quad \Delta p = (p_2 - p_1) = 2 \frac{\Delta V}{V_0} p_0 \quad (2)$$

[0014] 其中, ΔV 为膜盒上(或下)部分气体的体积变化, V_0 和 p_0 分别为无加速度输入时膜盒上(或下)部分气体的体积和压强。

[0015] 根据弹性力学知识,对于固定边圆形平面膜片中心受集中力 F 时,膜片上距离圆心 r 处的挠度为^[6,7]

$$[0016] \quad \omega(r) = \frac{F}{8\pi D} \left(\frac{1}{2} (R^2 - r^2) + r^2 \ln \frac{r}{R} \right) \quad (3)$$

[0017] 其中, $D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$ 为石英膜片的弯曲刚度, μ 为膜片材料的泊松比, E 为其杨氏模量。发生弹性形变后的膜片与膜片的初始平面围成的几何体体积即为加速度引起的膜盒体积的变化。由(1)~(3)容易推导出加速度 a 引起的气体膜盒上半部分的体积变化为

$$[0018] \quad \Delta V = \frac{5}{128} \frac{R^4 (m + m_0)}{D(1+\eta)} a \quad (4)$$

$$[0019] \quad \text{其中, } \eta = \frac{5}{64D} \cdot \frac{p_0 R^6}{V_0}。$$

[0020] 忽略气体膜盒与传感气体管之间的通气管体积,气体膜盒和传感气体管初始总体积为

$$[0021] \quad V_0 = \pi R^2 \cdot \varepsilon_1 + \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \cdot L_1 \quad (5)$$

[0022] 其中, L_1 为传感气体管长, ϕ 为传感气体管直径, ε_1 为气体膜盒的上半部分高度。由式 (4) 和式 (5) 可得, 加速度 a 引起的传感气体的密度变化为

$$[0023] \quad \Delta \rho = \rho \cdot \frac{\Delta V}{V_0}$$

[0024] 由格拉德斯通—戴尔 (Gladstone-Dale) 公式 $\frac{n-1}{\rho} = k$ (k 为格拉德斯通—戴尔常数即 G-D 常数), 可得加速度 a 引起的传感气体的折射率变化为

$$[0025] \quad \Delta n_1 = \frac{5}{128} \cdot \frac{k \rho R^4 (m + m_0)}{V_0 D (1 + \eta)} \cdot a \quad (6)$$

[0026] 加速度引起传感气体折射率的变化称为本发明的第一级敏感, 气体膜盒也称为“第一级敏感元件”。

[0027] 由激光器的驻波条件, Y 型腔双频激光器中的激光频率须满足谐振条件

$$[0028] \quad \nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{N \cdot c}{n_1 \cdot L_1 + n_0 \cdot L_0}$$

[0029] 则传感气体的折射率变化引起谐振频率变化为

$$[0030] \quad \Delta \nu = \nu_0 \cdot \frac{L_1}{n_1 \cdot L_1 + n_0 \cdot L_0} \Delta n_1 \quad (7)$$

[0031] 气体折射率的变化引起 Y 型腔双频激光器输出拍频的变化称为本发明的第二级敏感, Y 型腔双频激光器称为“第二级敏感元件”。

[0032] 将 (6) 代入 (7) 式可得, 加速度 a 引起的谐振频率变化 $\Delta \nu$ 为

$$[0033] \quad \Delta \nu = \frac{5}{128} \cdot \frac{\nu_0 L_1}{n_1 L_1 + n_0 L_0} \cdot \frac{k \rho R^4 (m + m_0)}{V_0 D (1 + \eta)} \cdot a \quad (8)$$

[0034] 令上式中 $SF = \frac{5}{128} \cdot \frac{\nu_0 L_1}{n_1 L_1 + n_0 L_0} \cdot \frac{k \rho R^4 (m + m_0)}{V_0 D (1 + \eta)}$, 则 (11) 式可写为

$$[0035] \quad \Delta \nu = SF \cdot a \quad (9)$$

[0036] SF 称为单支 Y 型双频激光器敏感加速度的比例因子。

[0037] 对加速度计中的两支 Y 型腔双频激光器, 由于加速度引起的传感气体折射率变化趋势相反, 当垂直于超薄膜片方向输入的加速度为 a 时, 它们的拍频输出分别为 $\Delta \nu_1 = SF_1 \cdot a$ 和 $\Delta \nu_2 = -SF_2 \cdot a$, 那么加速度计的输出信号即为上下两支激光器的输出拍频之差即

$$[0038] \quad \Delta \nu = (SF_1 + SF_2) \cdot a \quad (10)$$

[0039] 由 (10) 式, 通过测量出上下两支激光器的输出拍频之差即可检测出加速度 a 的大小。

[0040] 本发明的有益效果是:

[0041] (一) 利用新型气体膜盒作为加速度的第一级敏感元件, 首先将加速度转化为膜盒内气体的折射率变化, 这种设计有三大优点:

[0042] 由于系统是通过气体折射率将加速度信号传递到激光器的光路上, 进而改变激光

器的光学腔长的,而不改变激光器谐振腔的几何长度,与已有的其它方案相比,这种方案中加速度的输入并不影响激光器的光路结构,因此加速度计的光学模块结构和物理性能更加稳定;

[0043] 由于气体膜盒和激光器完全分离,气体膜盒结构完全不受激光器限制,这种设计为进一步优化弹性敏感元件的结构提供了便利,可以通过改变气体膜盒的各种参数来提高系统的分辨率和其它性能指标;

[0044] 加速度信号是通过气体折射率传递到加速度计上的,而外界噪声(主要指温度)是通过改变激光器的几何腔长传递到加速度计上的,它们对加速度计输出频率的影响途径不同,因此信号与噪声的分离成为可能,可以通过数字信号处理的方法进一步提高系统的分辨率。

[0045] (二)独特的双Y型腔结构,使得SP光共用增益区并同时起振,利用SP光的一次差动和对称的双Y型腔激光器的二次差动,很大程度的抑制了温度变化引起的噪声。单支双频激光器输出频率的一次差动基本消除了共用腔部分的温度影响;而两支双频激光器输出拍频的第二次差动则主要抑制由非共用腔部分温度梯度带来的零偏随机变化。

附图说明

[0046] 图1为双Y型腔双频激光加速度计光学模块的结构图;

[0047] 图2为Y型腔双频激光器的剖面图;

[0048] 图3为新型气体膜盒的剖面图;

[0049] 图4为气体膜盒中超薄膜片的受力分析示意图;

[0050] 图5为双Y型腔双频激光加速度计系统结构图;

[0051] 图中1为Y型腔双频激光器,2为气体膜盒,3、8和9为高反射率镜片或输出镜片,4为阴极,5为阳极,6为偏振分光膜片,7为非共用腔,10为非共用腔(传感气体管),11为增益区(内充有氦氖气体),12为传感气体管上的通气孔,13为气体膜盒上的通气孔,14为超薄膜片,15为气体膜盒的箱体,16为圆柱形质量块,17为信号采集与处理模块,18为工作点选择与控制模块,19为光学模块,a为输入加速度方向。

具体实施方式

[0052] 下面结合附图对本发明的一个实施示例作详细的说明。但不应因此限制本发明的保护范围。

[0053] 如图5所示,双Y型腔双频激光加速度计由光学模块19、工作点选择与控制模块18和信号采集与处理模块17等部分组成。其中,工作点选择与控制模块18用来选择和控制在加速度计的工作点,采用光强差的方法对双频激光器稳频;信号采集与处理模块17用来接收两支Y型腔双频激光器的输出拍频信号,计算出两拍频之差即为加速度计系统的最终输出信号;光学模块19是整个系统的核心。以下主要对本发明的实施示例中光学模块19的结构和工作机理作详细说明。

[0054] 如图1所示,光学模块19由两支Y型腔双频激光器1和新型气体膜盒2组成。两支Y型腔双频激光器1与气体膜盒2之间采用光胶或粘连的方式固连。Y型腔双频激光器1和气体膜盒2之间由通气管(12,13)相连通。

[0055] 如图 2 所示, Y 型腔双频激光器由高反射率镜片或输出片 (3,8,9)、共用腔 (包括增益区) 11、非共用腔 (7,10) 和偏振分光膜片 6 组成。高反射率镜片或输出片 (3,8,9) 以光胶的方式贴在共用腔 (包括增益区) 11 和非共用腔 (7,10) 的端面上, 形成谐振腔。共用腔 (包括增益区) 11 中充有氦氖气体, 作为增益介质。非共用腔 10 上有通气孔 12。共用腔 (包括增益区) 11 和非共用腔 7 一体化设计加工完成。并以光胶的方式与非共用腔 10 固连。偏振分光膜片 6 的两面分别镀制偏振分光膜和增透膜。Y 型腔双频激光器的腔体 (包括共用腔 (包括增益区) 11、非共用腔 (7,10)) 材料可使用微晶玻璃或其它超低膨胀率材料。

[0056] 如图 3 所示, 气体膜盒盒体 15 是由微晶玻璃材料加工而成, 其底面为圆形, 膜盒盒体为一扁平状皿。超薄膜片 14 材料使用石英玻璃。超薄石英膜片 14 的中心以光胶或粘连的方式固连一圆柱形质量块 16。超薄石英膜片 14 与两个气体膜盒盒体 15 以光胶或粘连的方式固连在一起, 形成等容积的上下两部分, 这就构成了气体膜盒。气体膜盒盒体 15 上有通气孔 13。气体膜盒 2 的上下两部分均内充有等压强的传感气体。传感气体可选用二氧化碳、氮气、六氟化硫等。

[0057] 本实施示例的具体工作过程如下:

[0058] 如图 4 所示, 当垂直于超薄膜片 14 方向有加速度 a 输入时, 超薄膜片 14 产生弹性形变, 气体膜盒 2 (图 3) 的上半部分体积增大 (或减小), 下半部分体积减小 (或增大), 则与气体膜盒 2 上半部分相连的传感气体管 10 内气体密度减小, 折射率也相应减小, 光学长度也随之减小, 从而引起两段非共用腔 (7,10) 光学长度差的改变, 这样该支 Y 型腔双频激光器 1 的输出拍频将发生变化, 也就是 S 光和 P 光的频率差也将发生变化。同理, 另外一支 Y 型腔双频激光器 1 的输出拍频将发生与之相反的变化。工作点选择与控制模块 18 选择两支 Y 型腔双频激光器 1 运转的最佳频率, 并采用等光强的方法稳定该频率。信号采集与处理模块 17 接收两支 Y 型腔双频激光器 1 的输出拍频, 计算出它们的变化之差即为双 Y 型腔双频激光加速度计的系统输出信号。

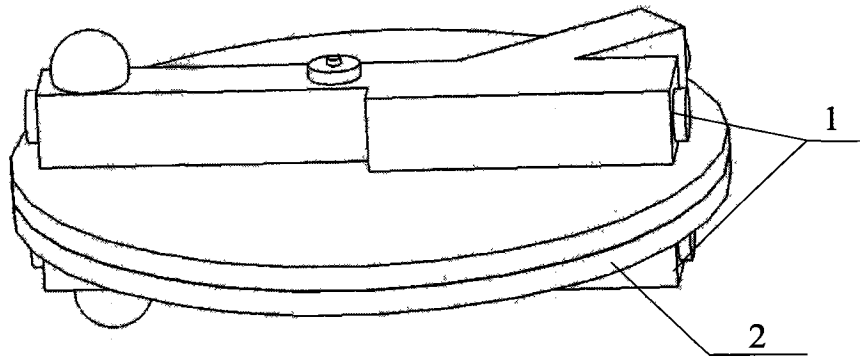


图 1

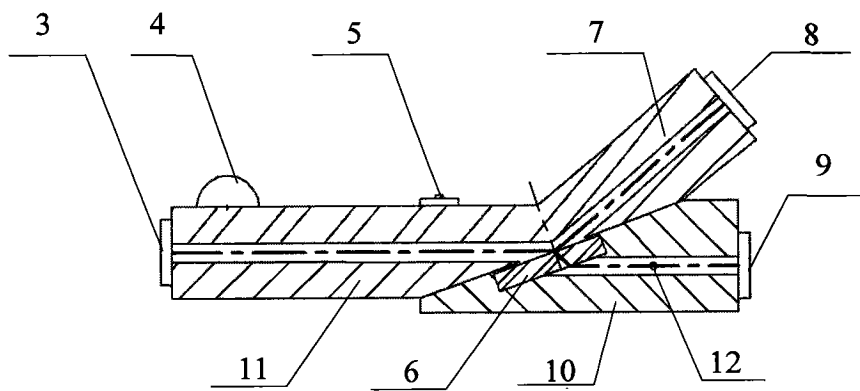


图 2

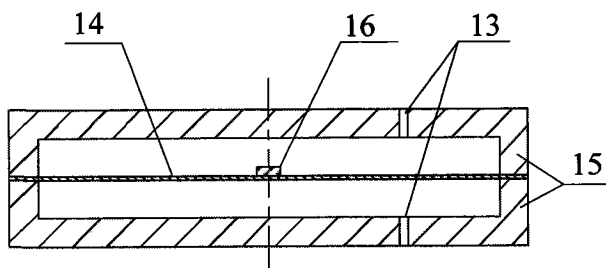


图 3

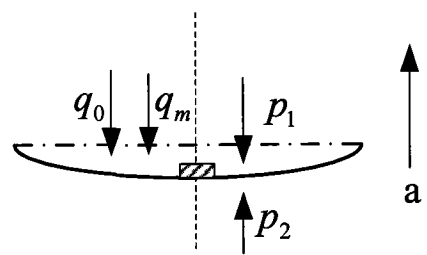


图 4

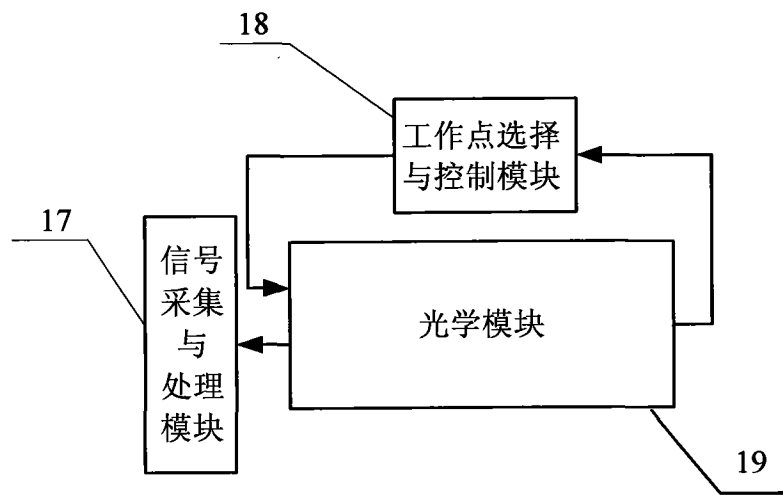


图 5