(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
2022 年 11 月 3 日 (03.11.2022)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2022/227282 A1

(51) 国际专利分类号:
G01R 33/20 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/105090

(22) 国际申请日: 2021 年 7 月 8 日 (08.07.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202110483123.5 2021年4月30日 (30.04.2021) CN

(71) 申请人: 上海交通大学 (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。

(72) 发明人: 高安柱 (GAO, Anzhu); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。 黄少平 (HUANG, Shaoping); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。 杨广中 (YANG, Guangzhong); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。

(74) 代理人: 上海段和段律师事务所 (DUAN & DUAN LAW FIRM); 中国上海市浦东新区金科路2966号2幢406室, Shanghai 200336 (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, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) **Title:** ROTARY ENCODER SAFE FROM MAGNETIC RESONANCE AND ROTATION ANGLE DETECTION METHOD

(54) **发明名称:** 一种磁共振安全的旋转编码器及旋转角度检测方法

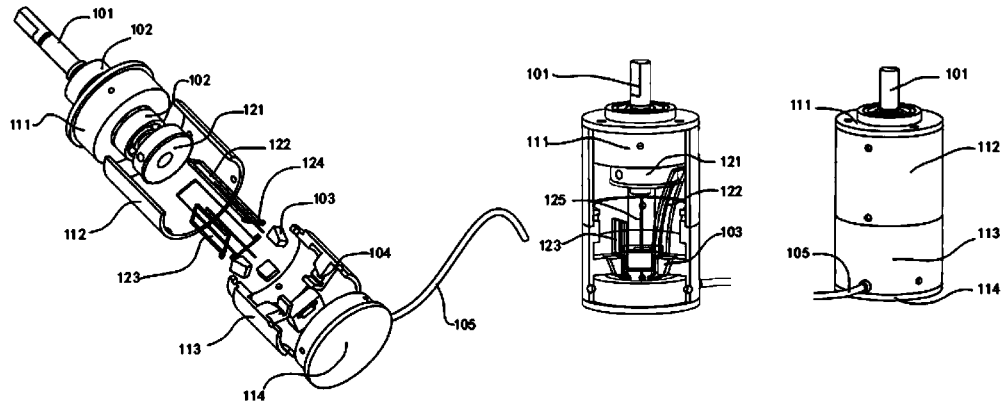


图 1

(57) **Abstract:** A rotary encoder safe from magnetic resonance. The rotary encoder comprises a rotary shaft (101), an eccentric wheel (121), a bearing (102), a bushing (111), a shape-sensing strain gauge (122), a fiber Bragg grating sensor (124), a temperature-compensating strain gauge (123), a wedge groove (104), a fixing wedge (103), a rear cover (114) and a sleeve (105), wherein the rotary shaft (101) is connected to an object to be measured; the tail end of the rotary shaft (101) penetrates the eccentric wheel (121), and the rotary shaft (101) drives the eccentric wheel (121) to rotate; the bearing (102) is mounted on two sides of the bushing (111); the rotary shaft (101) penetrates the bushing (111); the shape-sensing strain gauge (122) is arranged so as to be in contact with the eccentric wheel (121), the shape-sensing strain gauge (122) and the temperature-compensating strain gauge (123) are mounted in the wedge groove

WO 2022/227282 A1

[见续页]

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))。

(104), and the fixing wedge (103) is configured for fixing the shape-sensing strain gauge (122) and the temperature-compensating strain gauge (123); the fiber Bragg grating sensor (124) is mounted on the shape-sensing strain gauge (122), thereby solving the problem of it not being possible to measure a 360° rotation angle due to the measurement range of a conventional FBG-based measurement method being too small; in addition, the structure is easily fabricated from magnetic resonance safe materials, thus achieving the magnetic resonance safe property of the encoder.

(57) 摘要：一种磁共振安全的旋转编码器，包括旋转轴(101)、偏心轮(121)、轴承(102)、轴套(111)、形状感知应变片(122)、光纤布拉格光栅传感器(124)、温度补偿应变片(123)、楔形槽(104)、固定楔子(103)、后盖(114)和套管(105)；旋转轴(101)与待测物相连接；偏心轮(121)穿设在旋转轴(101)尾端，旋转轴(101)带动偏心轮(121)旋转；轴承(102)安装在轴套(111)的两侧；轴套(111)穿设在旋转轴(101)上；形状感知应变片(122)与偏心轮(121)接触设置，形状感知应变片(122)和温度补偿应变片(123)安装在楔形槽(104)，固定楔子(103)用于固定形状感知应变片(122)和温度补偿应变片(123)；光纤布拉格光栅传感器(124)安装在形状感知应变片(122)上，解决了传统基于FBG的检测方法的测量范围太小，无法检测360°旋转角度的问题；此外，该结构便于用磁共振安全的材料制作，实现编码器的磁共振安全特性。

一种磁共振安全的旋转编码器及旋转角度检测方法

技术领域

本发明涉及磁共振的技术领域，具体地，涉及一种磁共振安全的旋转编码器及旋转角度检测方法。

背景技术

随着磁共振成像技术在硬件及算法方面的日趋成熟，近年来它用于机器人介入手术的实时导航方面的潜力引起了越来越多的关注。相比于传统的 CT、PET 及超声成像，磁共振无电离辐射，并且有着更加丰富的软组织信息，还可以用于温度、动态血流检测。近年来，MRI 引导的手术机器人也推陈出新，表现出巨大的临床潜力。它相比医生的操作，有着高精度、高可靠、易操作等优点。然而，磁共振环境下，传统的设备涉及到磁兼容问题难以被应用。要求每个零部件都能在磁共振的环境下正常工作。美国测试与材料学会将用于该环境下的设备分为三个等级：磁共振安全；磁共振兼容；磁共振不安全。其中磁共振安全的设备，安全系数最高，适用于所有的磁共振场景。而磁共振兼容的产品需要针对特定的场景进行测试。目前，部分磁共振安全/兼容的驱动器、传感器已经被应用于实际工作中。但是磁共振安全的角度传感器仍然较为稀少。

磁共振安全的旋转角编码器的技术难点在于寻找一种磁共振安全的角度检测方法。传统的采用光电效应、电阻变化的方法将不再适用。光纤是一种天然的磁共振安全的器件。为此，现有技术采用光纤内光强变化的原理来设计磁共振安全的角度编码器。该装置通过在圆盘上设置一定规律的反射片，再设计光纤末端与反射片垂直，从而实现有无反射片情况下的反射光强变化。

现有技术的不足之处是：对于光强式的编码器，由于光经过长距离传输后，光的强度会衰减、波动，因此对光源的稳定性控制要求极高。且外部的机械振动也会导致光纤末端对位不准，进而导致光强检测产生波动。并且，由于加工技术的限制，要实现高精度的检测，需要设置大量的反射点。而小尺寸的传感器由于空间有限，难以加工大量刻槽，从而难以达到高精度检测。最后，传统的光纤布拉格光栅传感

器的检测应变范围较小，现有的技术只能检测有限范围内的旋转角度。因此，需要提出一种技术方案以改善上述技术问题。

发明内容

针对现有技术中的缺陷，本发明的目的是提供一种磁共振安全的旋转编码器及旋转角度检测方法。

根据本发明提供的一种磁共振安全的旋转编码器，包括旋转轴、偏心轮、轴承、轴套、形状感知应变片、光纤布拉格光栅传感器、温度补偿应变片、楔形槽、固定楔子、后盖和套管；

所述旋转轴与待测物相连接；所述偏心轮穿设在旋转轴尾端，并由旋转轴带动偏心轮旋转；

所述轴承安装在轴套的两侧；所述轴套穿设在旋转轴上；

所述形状感知应变片与偏心轮接触设置，且所述形状感知应变片和温度补偿应变片安装在楔形槽，所述固定楔子用于固定形状感知应变片和温度补偿应变片；

所述光纤布拉格光栅传感器安装在形状感知应变片上，所述光纤布拉格光栅传感器上的光纤经过后盖穿过套管与外部光栅解调器相连接；

所述旋转轴发生旋转，形状感知应变片与偏心轮的接触点的运动轨迹近似为正弦曲线。

本发明还提供一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，所述方法包括上述中的一种磁共振安全的旋转编码器，所述方法包括如下步骤：

步骤 1：建立旋转轴的旋转角 θ 与形状感知应变片 122 与偏心轮 121 的接触点 P 点坐标的几何关系；

步骤 2：采用三关节伪刚体模型 PRB 3R 建立 P 点坐标与形状感知应变片 122 的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 之间的关系；

步骤 3:采用链式算法求解安装在形状感知应变片 122 上的布拉格光栅 125 的应变；

步骤 4：由布拉格光栅 125 的波长与应变的关系，得到经过温度补偿后的采集波长与实际形状感知应变片 122 的应变之间的关系；

步骤 5：通过步骤 1-4 建立的模型，设计相应的匹配算法用于最终的角度检测。

优选地，所述偏心轮在 xoy 平面上旋转，K 是偏心轮的 xoy 平面沿着 y 轴方向与原点 O 距离最远的点；当偏心轮旋转 θ 时，K 沿着圆形轨迹移动到 K' 点，该轨迹与

偏心轮 121 的中心 Q 的移动轨迹一致；K 的运动学表示为如下：

$$K=[-r_c\cos\theta, r_c\sin\theta+D/2, 0]^{\mathrm{T}}$$

其中，r_c是偏心半径，D 是偏心轮的直径；

所述 K_r和 K_l分别表示 K 点的运动轨迹中的 x 坐标绝对值最大的两个点；K_r表示 x 坐标为负数的点，K_l表示 x 坐标为正数的点。

优选地，所述形状感知应变片 122 的宽度 w 大于 K_r和 K_l之间的距离，形状感知应变片 122 相切于位于 K 点正上方的曲面 K_S；

所述 P 点为切点，P 点的坐标取决于 K 点的 y 坐标；接触力 F 的方向为从曲面 K_S中心指向 P 点；P 点的运动学表示为如下：

$$P=[-r_c\cos\theta, r_s\cos\beta+r_c\sin\theta+D/2, r_s-r_s\sin\beta]^{\mathrm{T}}$$

其中，r_s是曲面 K_S的半径，β是接触力 F 与 y 轴正方向的夹角。

优选地，所述 P 随着 θ的变化而变化，P 点的变化引起形状感知应变片的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 发生改变，状态变量 $\boldsymbol{B}$ 的定义如下所示：

$$\boldsymbol{B}=[L, F, \beta]^{\mathrm{T}}$$

其中，L 表示从 H 点到 P 点沿着梁方向的长度，L 为形状感知应变片的有效长度；F 表示接触力的大小；

所述状态变量 $\boldsymbol{B}$ 含有三个未知量，需建立三组约束关系来对三个未知量进行求解；α为形状感知应变片 122 的偏转角，形状感知应变片 122 与曲面 K_S的相切关系，得到第一组约束关系为：

$$\alpha=\beta \text{。}$$

优选地，所述 a 和 b 分别表示梁在 y 和 z 轴上的投影：

$$a=[\gamma_1\sin\theta_{p,1}+\gamma_2\sin(\theta_{p,1}+\theta_{p,2})+\gamma_3\sin(\theta_{p,1}+\theta_{p,2}+\theta_{p,3})]L$$
$$b=[\gamma_0+\gamma_1\cos\theta_{p,1}+\gamma_2\cos(\theta_{p,1}+\theta_{p,2})+\gamma_3\cos(\theta_{p,1}+\theta_{p,2}+\theta_{p,3})]L$$

其中，γ_i表示第 i 个伪刚体特征参数，$\theta_{p,i}$表示第 i 个伪刚体关节角。

优选地，所述固定点 H 的坐标为$[0, H_y, H_z]^{\mathrm{T}}$；$P$ 的 y，z 坐标用伪刚体参数表示为：

$$P_y=H_y+a$$
$$P_z=H_z-b \text{；}$$

将 $P=[-r_c\cos\theta, r_s\cos\beta+r_c\sin\theta+D/2, r_s-r_s\sin\beta]^{\mathrm{T}}$ 代入 $P_y=H_y+a$ $P_z=H_z-b$ 得到另

外两组约束方程：

$$r_s\cos\beta + r_c\sin\theta + D/2 = H_y + a$$
$$r_s - r_s\sin\beta = H_z - b$$
；

将三组约束关系与伪刚体的静力学模型联立，状态变量 $\boldsymbol{B}$ 通过以下方程进行求解：

$$\alpha = \beta$$
$$r_s - r_s\sin\beta = H_z - b$$
$$r_s\cos\beta + r_c\sin\theta + D/2 = H_y + a$$
$$\begin{pmatrix} k_1\theta_{p,1} \\ k_2\theta_{p,2} \\ k_3\theta_{p,3} \end{pmatrix} = [\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}]\begin{pmatrix} F_y L \\ F_z L \end{pmatrix}$$
；

其中，k_i是伪刚体关节的刚度系数，F_y和 F_z表示接触力 F 在 y 轴和 z 轴上的投影；$\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$是由伪刚体参数表示的雅克比矩阵。

优选地，总的所述 FBG 偏转角度 φ 通过下式求解：

$$\varphi = \sum_{i=M_S}^{M_E}\sigma_i$$
；

其中，M_S和 M_E表示 FBG 的起始节点和终止节点，起始节点表示距离 H 最近的节点，终止节点表示最远的点；M_S和 M_E取决于 n，l，L 和 d；当 n 足够大时，也就是 $\delta L=L/n<<l$ 时，M_S和 M_E为如下所示：

$$M_S = \frac{nd}{L}$$
$$M_E = \frac{n(d+l)}{L}$$
；

FBG 的应变 ε 通过得到的偏转角度 φ 进行求解；FBG125 安装在应变片的凹槽内，定义 FBG 的中心线与梁的中心线的距离为 h；FBG 的应变表示为如下所示：

$$\varepsilon = h/\kappa$$
；

其中，$\kappa= l/\varphi$ 是 FBG 的曲率半径。

优选地，当满足相位匹配条件时，光栅的布拉格波长为：

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda$$
；

其中，n_{eff}是光线传播模式的有效折射率；Λ 为光栅周期；波长的变化量 $\Delta\lambda$ 由应变 ε 和温度 T 决定，其关系为：

$$\Delta\lambda = \lambda_0[(1-\rho_\alpha)\varepsilon + (\alpha_B + \frac{(\mathrm{d}n_{eff}/\mathrm{d}T)}{n_{eff}})\Delta T]$$ ；

其中，ρ_α是光纤材料的弹光系数；λ_0是中心波长；ΔT是温度的变化量。

优选地，当应变ε为0，将温度补偿FBG的波长变化代入应变FBG得到：

$$\lambda^i = \lambda_0^i + \lambda_0^i(1-\rho_\alpha)h^i/\kappa^i + \Delta\lambda_T \quad i=1,2$$ ；

其中，$\Delta\lambda_T$是温度补偿FBG的波长变化量；上标i表示第i个应变FBG的参数值。

与现有技术相比，本发明具有如下的有益效果：

1、本发明通过采用偏心轮与形状感知应变片配合的结构，将转轴的旋转角度转换为形状感知应变片的形变；解决了传统基于FBG的检测方法的测量范围太小，无法检测360°旋转角度的问题；并且，该结构可用磁安全的材料如：树脂/PMMA等进行装配，从而实现磁共振安全的特性；

2、本发明在实现该检测方法的建模方面，通过采用伪刚体的建模方法并引入3组约束关系，解决了梁的长度可变情况下传统积分方法难以求解梁的状态变量的问题，从而实现旋转角度到FBG波长变化的映射；经过实验表明，该装置的总体检测精度为1.6°；均方根误差为0.46°。

附图说明

通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述，本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显：

图1为本发明的整体结构图；

图2为本发明的FBG形状感知应变片结构图；

图3为本发明的形状感知应变片与偏心轮的接触方式图；

图4为本发明的偏心轮与形状感知应变片的几何关系示意图；

图5为本发明的形状感知应变片的伪刚体模型示意图；

图6为本发明的链式算法节点分割图；

图7本发明的FBG检测原理图。

其中：

101、旋转轴	111、轴套	121、偏心轮	125、布拉格光栅
102、轴承	112、前盖	1210、曲面轮廓	

103、固定楔	113、形状感知应变片安装盖	122、形状感知应变片	
104、楔形槽	114、后盖	123、温度补偿应变片	
105、套管		124、光纤布拉格光栅传感器	

具体实施方式

下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明，但不以任何形式限制本发明。应当指出的是，对本领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变化和改进。这些都属于本发明的保护范围。

图 1 表示该角度传感器的整体结构图。将旋转轴 101 与待测物连接，通过旋转轴 101 的旋转来带动偏心轮 121 的旋转。两个陶瓷轴承 102 安装在轴套 111 的两侧，用以保证旋转轴 101 的稳定性。组装后，两个形状感知应变片 122 与偏心轮 121 的边缘相接触。因此，当轴 101 旋转时，接触点将会发生变化，进而形状感知应变片 122 的应变大小会随之发生改变。将光纤布拉格光栅传感器 124 安装于形状感知应变片 122 中间，当形状感知应变片 122 的发生偏转时，传感器 124 同步发生应变，此时传感器检测到的光的波长将会发生变化。形状感知应变片 122 与偏心轮 121 的接触关系可以有多种形式，如图 3 所示，一种垂直接触，一种切向接触。形状感知应变片 122 及温度补偿应变片 123 安装与楔形槽 104 内，通过固定楔子 103 进行固定。光纤 124 经过后盖 114 穿过套管 105 与外部光栅解调器相连接。

根据偏心轮 121 的几何结构，当轴 101 发生旋转时，形状感知应变片 122 与偏心轮 121 的接触点 P 的运动轨迹可近似为正弦曲线。由于正弦曲线在一个周期内的任意一个幅值对应两个旋转角度，该幅值与形状感知应变片 122 的应变大小相一致。因此，至少需要检测两个不同位置的形状感知应变片 122 的应变大小来确定当前的旋转角度。本发明采用 120° 的分布方式设计这两个形状感知应变片之间的相对位置关系，其他形状感知应变片的位置关系或者安装两个以上形状感知应变片也与该发明所提出的想法相一致。另一方面，光纤布拉格光栅传感器 124 对温度极其敏感，为了补偿因为温度变化而导致的传感器数值变化，设计一个不与偏心轮接触的温度补偿应变片 123 与另外两个形

状感知应变片 122 呈 120° 间隔的圆周分布关系，方向与轴向一致。根据匹配算法，检测到的两个形状感知应变片 122 内的传感器 124 波长值可与轴的旋转角度一一对应。形状感知应变片的应变检测方式也可以采用压电传感器或其他可检测梁的形变的传感器。

整体的建模思路如下所示：首先建立轴 101 的旋转角 θ 与 P 点坐标（形状感知应变片 122 与偏心轮 121 的接触点）的几何关系；其次，采用三关节伪刚体模型（PRB 3R）建立 P 点坐标与形状感知应变片 122 的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 之间的关系；再采用链式算法求解安装在形状感知应变片 122 特定位置的布拉格光栅（FBG）125 的应变；最后，由 FBG125 的波长与应变的关系，可得经过温度补偿后的采集波长与实际形状感知应变片 122 的应变之间的关系。通过以上建立的模型，设计相应的匹配算法用于最终的角度检测。

图 4 表示的是偏心轮 121 与形状感知应变片 122 之间的几何关系。根据坐标定义关系，偏心轮在 xoy 平面上旋转，如图 4(a)所示。K 是偏心轮的 xoy 平面沿着 y 轴方向与原点 O 距离最远的点。当偏心轮旋转 θ 时，K 沿着圆形轨迹移动到 K'点，该轨迹与偏心轮 121 的中心 Q 的移动轨迹一致。因此，K 的运动学可以表示为如下：

$$K=[-r_c\cos\theta, r_c\sin\theta+D/2, 0]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

其中，r_c 是偏心半径，D 是偏心轮的直径。

定义两个最远点 K_r 和 K_l 分别表示 K 点的运动轨迹中的 x 坐标绝对值最大的两个点。K_r 表示 x 坐标为负数的点，K_l 表示 x 坐标为正数的点。通过设计形状感知应变片 122 的宽度 w 大于 K_r 和 K_l 之间的距离，并且形状感知应变片的扭转可忽略不计，由此假设形状感知应变片 122 始终相切于位于 K 点正上方的曲面 K_S。定义 P 点为切点，如图 4(b)所示。因此，P 点的坐标取决于 K 点的 y 坐标。另一方面，根据图 4(c)所示的相切关系，接触力 F 的方向始终为从曲面 K_S（半圆形曲面）中心指向 P 点。因此，P 点的运动学可以表示为如下：

$$P=[-r_c\cos\theta, r_s\cos\beta+r_c\sin\theta+D/2, r_s-r_s\sin\beta]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

其中，r_s 是曲面 K_S 的半径，β 是接触力 F 与 y 轴正方向的夹角。公式(2)可以看出，P 随着 θ 的变化而变化，而 P 点的变化会引起形状感知应变片的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 发生改变，状态变量 $\boldsymbol{B}$ 的定义如下所示：

$$\boldsymbol{B}=[L, F, \beta]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

其中，L 表示从图 4(b)中的 H 点到 P 点沿着梁方向的长度，为形状感知应变片的有效长度。F 表示接触力的大小。FBG 安装于图 4(b)所示的点 M 处，它的长度为 l。d 表

示 H 点沿着梁到 M 点的距离。传统的梁理论大多用于分析 L 确定的梁状态，而本模型中的 L 是变量，因此难以直接采用传统梁理论求解 FBG 所在位置 M 的应变。本发明将该问题分解成两个步骤：1）首先采用三关节伪刚体模型建立状态变量 $\boldsymbol{B}$ 与 P 的对应关系；2）采用链式算法求解应变值。

在梁的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 未知的情况下，传统的积分方法很难求解。因为传统方法所建立的方程含有复杂的积分项或者大量的迭代运算。伪刚体方法通过将梁离散成多个关节，可以大大简化该问题。由于本发明的形状感知应变片是大变形梁，因此选用三关节伪刚体模型对其进行求解。图 5 表示形状感知应变片 122 的三关节伪刚体模型。

由于状态变量 $\boldsymbol{B}$ 含有三个未知量，因此需要建立三组约束关系来对其进行求解。定义 α 为形状感知应变片 122 的偏转角，如图 5 所示。由于形状感知应变片 122 与曲面 K_S 的相切关系，可以得到第一组约束关系为：

$$\alpha = \beta \tag{4}$$

定义 a 和 b 分别为梁在 y 和 z 轴上的投影：

$$\begin{aligned} a &= [\gamma_1 \sin\theta_{p,1} + \gamma_2 \sin(\theta_{p,1}+\theta_{p,2}) + \gamma_3 \sin(\theta_{p,1}+\theta_{p,2}+\theta_{p,3})]L \\ b &= [\gamma_0 + \gamma_1 \cos\theta_{p,1} + \gamma_2 \cos(\theta_{p,1}+\theta_{p,2}) + \gamma_3 \cos(\theta_{p,1}+\theta_{p,2}+\theta_{p,3})]L \end{aligned} \tag{5}$$

其中，γ_i表示第 i 个伪刚体特征参数，$\theta_{p,i}$表示第 i 个伪刚体关节角。固定点 H 的坐标为$[0, Hy, Hz]T$。因此，P 的 y，z 坐标可以用伪刚体参数表示为如下所示：

$$\begin{aligned} P_y &= H_y + a \\ P_z &= H_z - b \end{aligned} \tag{6}$$

将(2)代入(6)可得另外两组约束方程如下所示：

$$\begin{aligned} r_s \cos\beta + r_c \sin\theta + D/2 &= H_y + a \\ r_s - r_s \sin\beta &= H_z - b \end{aligned} \tag{7}$$

将三组约束关系与伪刚体的静力学模型联立，状态变量 $\boldsymbol{B}$ 可以通过以下方程进行求解：

$$\alpha = \beta$$
$$r_s - r_s \sin\beta = H_z - b$$
$$r_s \cos\beta + r_c \sin\theta + D/2 = H_y + a$$
$$\begin{pmatrix} k_1\theta_{p,1} \\ k_2\theta_{p,2} \\ k_3\theta_{p,3} \end{pmatrix} = [\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}] \begin{pmatrix} F_y L \\ F_z L \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中，k_i是伪刚体关节的刚度系数，F_y和 F_z表示接触力 F 在 y 轴和 z 轴上的投影。$\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$是由伪刚体参数表示的雅克比矩阵。由于(8)包含多种正弦函数，因此难以直接得到解析解。采用 MATLAB 数值求解算法“fsolve”对该问题进行求解。

为了获得 FBG 的应变，首先需要根据梁的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 求解 M 处的偏转角 φ。采用链式算法对该问题进行求解，它的求解思想与有限元类似，但链式算法拥有更快的求解速度。因此链式算法更加适用于本问题中状态变量 $\boldsymbol{B}$ 不断变化的情况。图 6 表示链式算法的几何结构图。将形状感知应变片的有效长度离散成 n 个等长的小节。公式(8)计算出状态变量 $\boldsymbol{B}$ 的值后，根据链式算法可以得到第 i 个小节的偏转角度 σ_i。

因此，总的 FBG 偏转角度 φ 可以通过下式求解：

$$\varphi = \sum_{i=M_S}^{M_E} \sigma_i \quad (9)$$

其中，M_S和 M_E表示 FBG 的起始节点和终止节点，起始节点表示距离 H 最近的节点，反之，终止节点表示最远的点。M_S和 M_E取决于 n，l，L 和 d。当 n 足够大时，也就是 $\delta L = L/n << l$ 时，M_S和 M_E可以近似为如下所示：

$$M_S = \frac{nd}{L}$$
$$M_E = \frac{n(d+l)}{L} \quad (10)$$

因此，FBG 的应变 ε 可以通过(9)求解得到的偏转角度 φ 进行求解。图 7(a)表示为 FBG 的应变示意图。因为作用在梁上的力为侧面接触力，因此可以忽略形状感知应变片轴向的力。因此可以假设形状感知应变片的中心线长度不变。如图 7(a)所示，FBG125 安装在形状感知应变片的凹槽内，定义 FBG 的中心线与梁的中心线的距离为 h。因此，FBG 的应变可以表示为如下所示：

$$\varepsilon = h / \kappa \quad (11)$$

其中，$\kappa= l/\varphi$ 是 FBG 的曲率半径。

由耦合波理论可得，当满足相位匹配条件时，光栅的布拉格波长为：

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda \tag{12}$$

其中，n_{eff}是光线传播模式的有效折射率；Λ 为光栅周期。波长的变化量 $\Delta\lambda$ 由应变 ε 和温度 T 决定，其关系为：

$$\Delta\lambda = \lambda_0[(1-\rho_\alpha)\varepsilon + (\alpha_B + \frac{(\mathrm{d}n_{eff}/\mathrm{d}T)}{n_{eff}})\Delta T] \tag{13}$$

其中，ρ_α是光纤材料的弹光系数，它的取值为 0.216；λ_0是中心波长，它对应光纤处于伸直状态下的反射波长；ΔT 是温度的变化量。

对于温度补偿 FBG，它只受到温度的影响，不受到外力作用，因此在公式(13)中的应变 ε 为 0，将温度补偿 FBG 的波长变化代入应变 FBG 可得：

$$\lambda^i = \lambda_0^i + \lambda_0^i(1-\rho_\alpha)h^i/\kappa^i + \Delta\lambda_T \quad i = 1,2 \tag{14}$$

其中，$\Delta\lambda_T$是温度补偿 FBG 的波长变化量；上标 i 表示第 i 个应变 FBG 的参数值，这两个 FBG 有着 120° 的相位差，因此这两者的波长与轴的旋转角之间的关系曲线如图 7(b)所示。

最终，通过 FBG 调制解调仪检测对应的波长数据，并通过图 7(b)所示的波长与角度的映射关系，轴的旋转角 θ 可以被唯一确定。

本发明通过采用偏心轮与形状感知应变片配合的结构，将转轴的旋转角度转换为形状感知应变片的形变；解决了传统基于 FBG 的检测方法的测量范围太小，无法检测 360° 旋转角度的问题；并且，该结构可用磁安全的材料如：树脂/PMMA 等进行装配，从而实现磁共振安全的特性。

本发明在实现该检测方法的建模方面，通过采用伪刚体的建模方法并引入 3 组约束关系，解决了梁的长度可变情况下传统积分方法难以求解梁的状态变量的问题，从而实现旋转角度到 FBG 波长变化的映射；经过实验表明，该装置的总体检测精度为 1.6° ；均方根误差为 0.46° 。

本领域技术人员知道，除了以纯计算机可读程序代码方式实现本发明提供的系统及其各个装置、模块、单元以外，完全可以通过将方法步骤进行逻辑编程来使得本发明提供的系统及其各个装置、模块、单元以逻辑门、开关、专用集成电路、可编程逻辑控制器以及嵌入式微控制器等的形式来实现相同功能。所以，本发明提供的系统及其各项装

置、模块、单元可以被认为是一种硬件部件，而对其内包括的用于实现各种功能的装置、模块、单元也可以视为硬件部件内的结构；也可以将用于实现各种功能的装置、模块、单元视为既可以是实现方法的软件模块又可以是硬件部件内的结构。

以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是，本发明并不局限于上述特定实施方式，本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变化或修改，这并不影响本发明的实质内容。在不冲突的情况下，本申请的实施例和实施例中的特征可以任意相互组合。

权 利 要 求 书

1、一种磁共振安全的旋转编码器，其特征在于，包括旋转轴（101）、偏心轮（121）、轴承（102）、轴套（111）、形状感知应变片（122）、光纤布拉格光栅传感器（124）、温度补偿应变片（123）、楔形槽（104）、固定楔子（103）、后盖（114）和套管（105）；

所述旋转轴（101）与待测物相连接；所述偏心轮（121）穿设在旋转轴（101）尾端，并由旋转轴（101）带动偏心轮（121）旋转；

所述轴承（102）安装在轴套（111）的两侧；所述轴套（111）穿设在旋转轴（101）上；

所述形状感知应变片（122）与偏心轮（121）接触设置，且所述形状感知应变片（122）和温度补偿应变片（123）安装在楔形槽（104），所述固定楔子（103）用于固定形状感知应变片（122）和温度补偿应变片（123）；

所述光纤布拉格光栅传感器（124）安装在形状感知应变片（122）上，所述光纤布拉格光栅传感器（124）上的光纤经过后盖（114）穿过套管（105）与外部光栅解调器相连接；

所述旋转轴（101）发生旋转，形状感知应变片（122）与偏心轮（121）的接触点的运动轨迹近似为正弦曲线。

2、一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，所述方法包括权利要求 1 中所述的一种磁共振安全的旋转编码器，所述方法包括如下步骤：

步骤 1：建立旋转轴的旋转角 θ 与形状感知应变片 122 与偏心轮 121 的接触点 P 点坐标的几何关系；

步骤 2：采用三关节伪刚体模型 PRB 3R 建立 P 点坐标与形状感知应变片 122 的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 之间的关系；

步骤 3：采用链式算法求解安装在形状感知应变片 122 上的布拉格光栅 125 的应变；

步骤 4：由布拉格光栅 125 的波长与应变的关系，得到经过温度补偿后的采集波长与实际形状感知应变片 122 的应变之间的关系；

步骤 5：通过步骤 1-4 建立的模型，设计相应的匹配算法用于最终的角度检测。

3、根据权利要求 2 所述的一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，所述偏心轮在 xoy 平面上旋转，K 是偏心轮的 xoy 平面沿着 y 轴方向与原点 O 距离最远的点；当偏心轮旋转 θ 时，K 沿着圆形轨迹移动到 K' 点，该轨迹与

偏心轮 121 的中心 Q 的移动轨迹一致；K 的运动学表示为如下：

$$K=[-r_c\cos\theta, r_c\sin\theta+D/2, 0]^{\mathrm{T}}$$

其中，r_c是偏心半径，D 是偏心轮的直径；

所述 K_r和 K_l分别表示 K 点的运动轨迹中的 x 坐标绝对值最大的两个点；K_r表示 x 坐标为负数的点，K_l表示 x 坐标为正数的点。

4、根据权利要求 1 所述的一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，所述形状感知应变片 122 的宽度 w 大于 K_r和 K_l之间的距离，形状感知应变片 122 相切于位于 K 点正上方的曲面 K_S；

所述 P 点为切点，P 点的坐标取决于 K 点的 y 坐标；接触力 F 的方向为从曲面 K_S中心指向 P 点；P 点的运动学表示为如下：

$$P=[-r_c\cos\theta, r_s\cos\beta+r_c\sin\theta+D/2, r_s-r_s\sin\beta]^{\mathrm{T}}$$

其中，r_s是曲面 K_S的半径，β是接触力 F 与 y 轴正方向的夹角。

5、根据权利要求 1 所述的一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，所述 P 随着 θ的变化而变化，P 点的变化引起形状感知应变片的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 发生改变，状态变量 $\boldsymbol{B}$ 的定义如下所示：

$$\boldsymbol{B}=[L, F, \beta]^{\mathrm{T}}$$

其中，L 表示从 H 点到 P 点沿着梁方向的长度，L 为形状感知应变片的有效长度；F 表示接触力的大小；

所述状态变量 $\boldsymbol{B}$ 含有三个未知量，需建立三组约束关系来对三个未知量进行求解；α为形状感知应变片 122 的偏转角，形状感知应变片 122 与曲面 K_S的相切关系，得到第一组约束关系为：

$$\alpha=\beta。$$

6、根据权利要求 1 所述的一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，所述 a 和 b 分别表示梁在 y 和 z 轴上的投影：

$$a=[\gamma_1\sin\theta_{p,1}+\gamma_2\sin(\theta_{p,1}+\theta_{p,2})+\gamma_3\sin(\theta_{p,1}+\theta_{p,2}+\theta_{p,3})]L$$
$$b=[\gamma_0+\gamma_1\cos\theta_{p,1}+\gamma_2\cos(\theta_{p,1}+\theta_{p,2})+\gamma_3\cos(\theta_{p,1}+\theta_{p,2}+\theta_{p,3})]L$$

其中，γ_i表示第 i 个伪刚体特征参数，$\theta_{p,i}$表示第 i 个伪刚体关节角。

7、根据权利要求 1 所述的一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，所述固定点 H 的坐标为$[0, H_y, H_z]^{\mathrm{T}}$；$P$ 的 y，z 坐标用伪刚体参数表示为：

$$P_y = H_y + a$$
$$P_z = H_z - b \quad ;$$

将 $P = [-r_c\cos\theta, r_s\cos\beta + r_c\sin\theta + D/2, r_s - r_s\sin\beta]^{\mathrm{T}}$ 代入 $\begin{matrix} P_y = H_y + a \\ P_z = H_z - b \end{matrix}$ 得到另外两组约束方程：

$$r_s\cos\beta + r_c\sin\theta + D/2 = H_y + a$$
$$r_s - r_s\sin\beta = H_z - b \quad ;$$

将三组约束关系与伪刚体的静力学模型联立，状态变量 $\boldsymbol{B}$ 通过以下方程进行求解：

$$\alpha = \beta$$
$$r_s - r_s\sin\beta = H_z - b$$
$$r_s\cos\beta + r_c\sin\theta + D/2 = H_y + a$$
$$\begin{pmatrix} k_1\theta_{p,1} \\ k_2\theta_{p,2} \\ k_3\theta_{p,3} \end{pmatrix} = [\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}]\begin{pmatrix} F_y L \\ F_z L \end{pmatrix} \quad ;$$

其中，k_i是伪刚体关节的刚度系数，F_y和 F_z表示接触力 F 在 y 轴和 z 轴上的投影；$\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$是由伪刚体参数表示的雅克比矩阵。

8、根据权利要求 1 所述的一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，总的所述 FBG 偏转角度 φ 通过下式求解：

$$\varphi = \sum_{i=M_S}^{M_E} \sigma_i \quad ;$$

其中，M_S和 M_E表示 FBG 的起始节点和终止节点，起始节点表示距离 H 最近的节点，终止节点表示最远的点；M_S和 M_E取决于 n，l，L 和 d；当 n 足够大时，也就是 $\delta L=L/n<<l$ 时，M_S和 M_E为如下所示：

$$M_S = \frac{nd}{L}$$
$$M_E = \frac{n(d+l)}{L} \quad ;$$

FBG 的应变 ε 通过得到的偏转角度 φ 进行求解；FBG125 安装在应变片的凹槽内，定义 FBG 的中心线与梁的中心线的距离为 h；FBG 的应变表示为如下所示：

$$\varepsilon = h/\kappa \quad ;$$

其中，$\kappa= l/\varphi$ 是 FBG 的曲率半径。

9、根据权利要求 1 所述的一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，当满足相位匹配条件时，光栅的布拉格波长为：

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda ;$$

其中，n_{eff}是光线传播模式的有效折射率；Λ 为光栅周期；波长的变化量 $\Delta\lambda$ 由应变 ε 和温度 T 决定，其关系为：

$$\Delta\lambda = \lambda_0[(1-\rho_\alpha)\varepsilon + (\alpha_B + \frac{(\mathrm{d}n_{eff}/\mathrm{d}T)}{n_{eff}})\Delta T] ;$$

其中，ρ_α是光纤材料的弹光系数；λ_0是中心波长；ΔT 是温度的变化量。

10、根据权利要求 9 所述的一种磁共振安全的旋转编码器的旋转角度检测方法，其特征在于，当应变 ε 为 0，将温度补偿 FBG 的波长变化代入应变 FBG 得到：

$$\lambda^i = \lambda_0^i + \lambda_0^i(1-\rho_\alpha)h^i/\kappa^i + \Delta\lambda_T \quad i = 1,2 ;$$

其中，$\Delta\lambda_T$是温度补偿 FBG 的波长变化量；上标 i 表示第 i 个应变 FBG 的参数值。

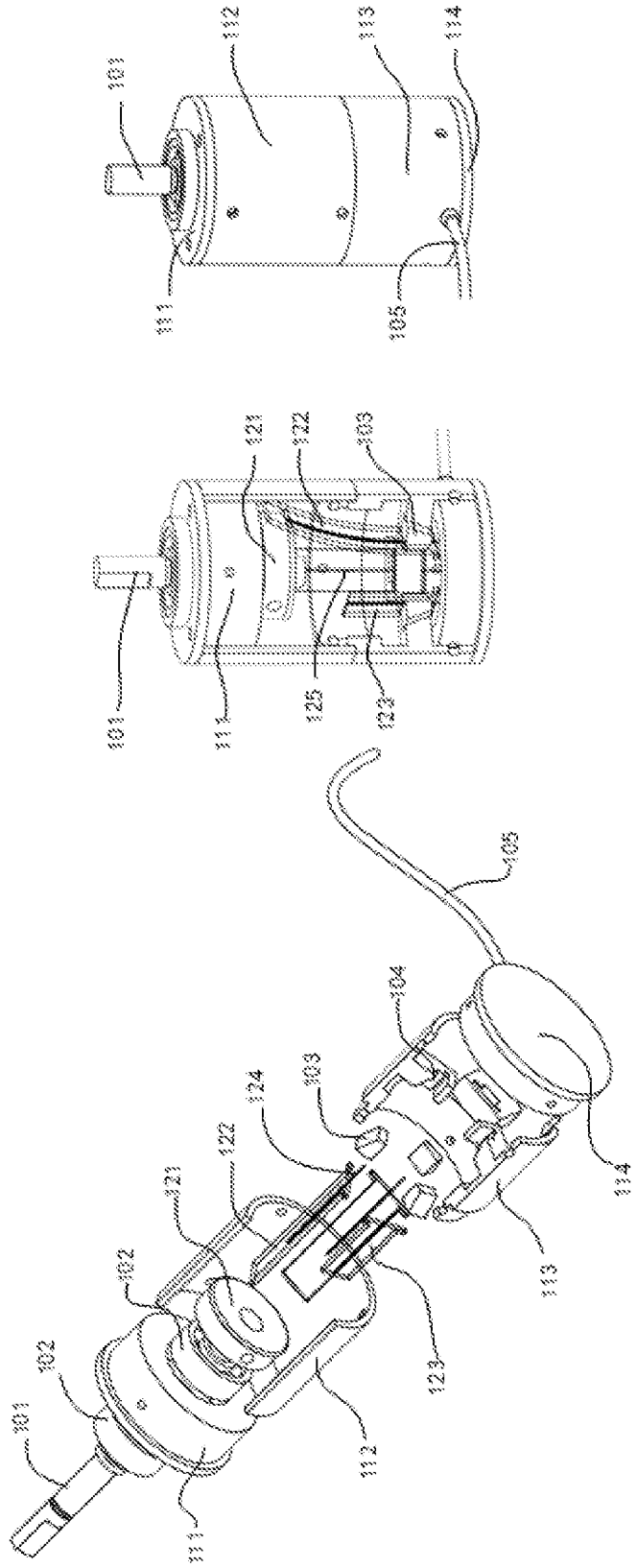


图 1

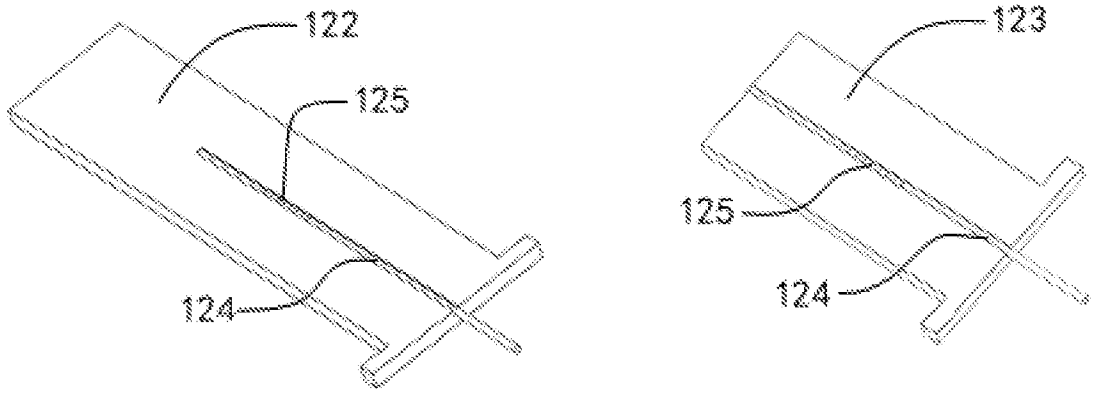

122
125
124
123
125
124

图 2

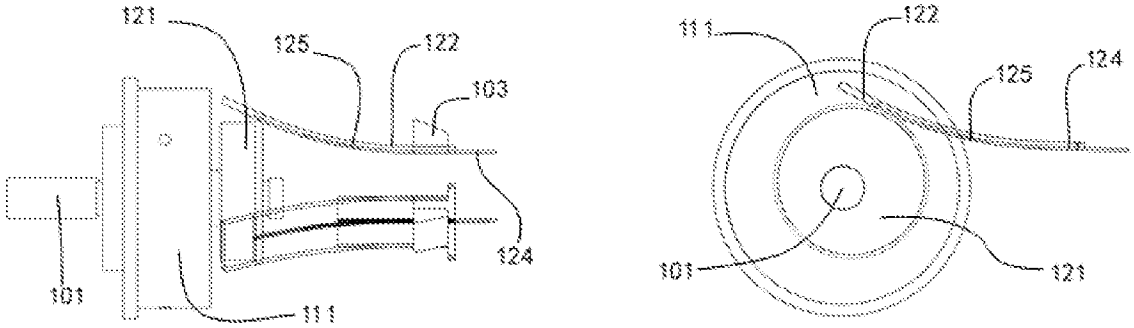

121
125
122
103
124
101
111
111
122
125
124
101
121

图 3

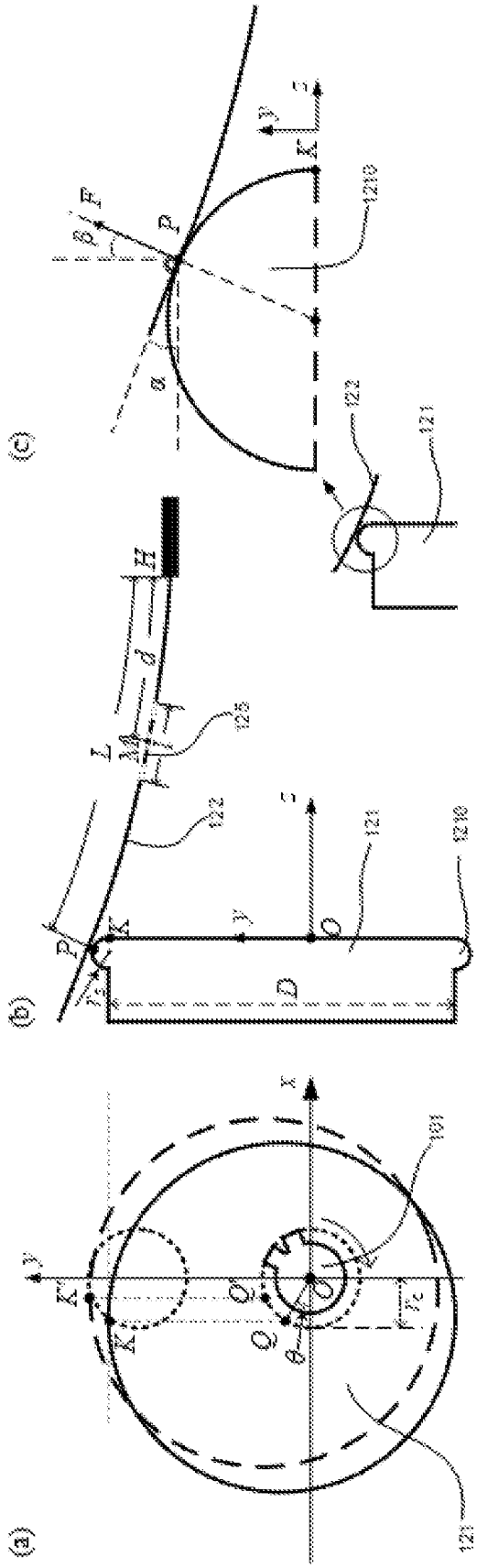


图 4

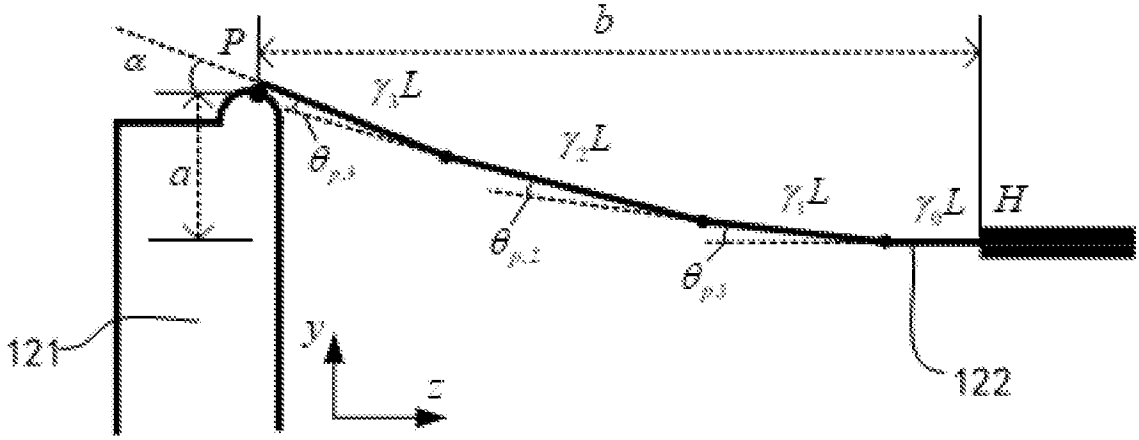

α
P
b
a
$\gamma_1 L$
$\gamma_2 L$
$\gamma_3 L$
$\gamma_4 L$
H
θ_{p1}
θ_{p2}
θ_{p3}
121
122
y
z

图 5

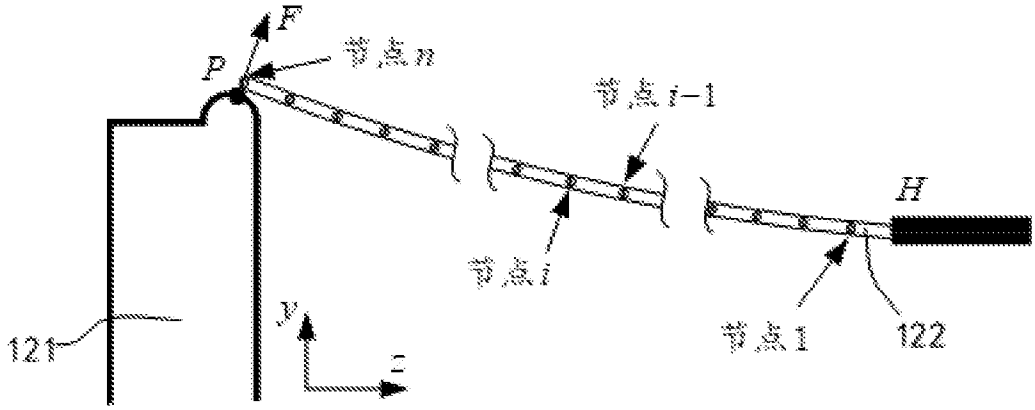

F
P
节点 n
节点 i−1
节点 i
H
节点 1
121
122
y
z

图 6

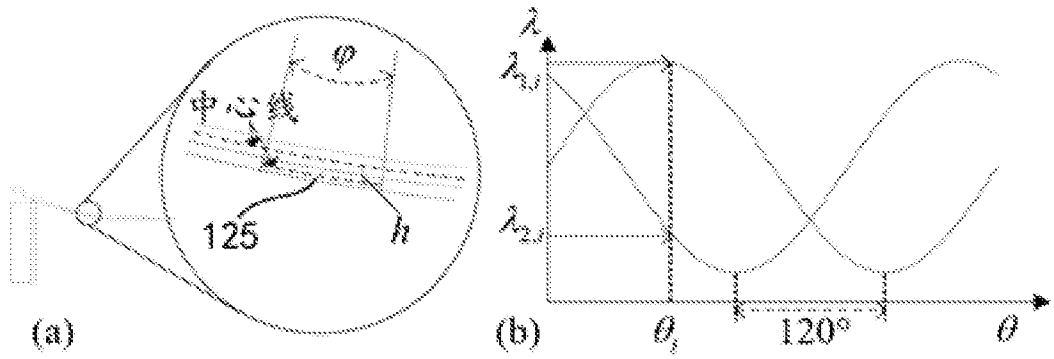

φ
中心线
125
h
(a)
λ
λ_{max}
λ_{min}
(b)
θ_i
120°
θ

图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2021/105090

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 33/20(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)

G01R, G01D

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: 高安柱, 黄少平, 杨广中, 旋转, 编码, 角, 测量, 检测, 传感, 偏心, 凸轮, 形变, 应变, 变形, 伪刚体, 伪刚性, 建模, 约束, 链式, 梁, rotary, angle, encod+, measurement, cam, deformat+, pseudo, rigid, PRB

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 110146053 A (TIANJIN NORMAL UNIVERSITY) 20 August 2019 (2019-08-20) description, paragraphs [0015]-[0024], and figure 1	1
A	CN 109325315 A (GRADUATE SCHOOL AT SHENZHEN, TSINGHUA UNIVERSITY) 12 February 2019 (2019-02-12) entire document	1-10
A	US 2014353477 A1 (THE CLEVELAND ELECTRIC LABORATORIES COMPANY) 04 December 2014 (2014-12-04) entire document	1-10
A	CN 110076775 A (GRADUATE SCHOOL AT SHENZHEN, TSINGHUA UNIVERSITY) 02 August 2019 (2019-08-02) entire document	1-10
A	CN 208012590 U (SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY) 26 October 2018 (2018-10-26) entire document	1-10
A	CN 101701800 A (LASER INSTITUTE OF SHANDONG ACADEMY OF SCIENCES) 05 May 2010 (2010-05-05) 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	Date of mailing of the international search report
08 December 2021	**12 January 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/CN2021/105090

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 110146053 A	20 August 2019	None	
CN 109325315 A	12 February 2019	None	
US 2014353477 A1	04 December 2014	None	
CN 110076775 A	02 August 2019	WO 2020216155 A1	29 October 2020
CN 208012590 U	26 October 2018	None	
CN 101701800 A	05 May 2010	CN 101701800 B	13 April 2011

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2021/105090

A. 主题的分类

G01R 33/20(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)

G01R，G01D

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,EPODOC,CNKI:高安柱，黄少平，杨广中，旋转，编码，角，测量，检测，传感，偏心，凸轮，形变，应变，变形，伪刚体，伪刚性，建模，约束，链式，梁，rotary,angle,encod+,measurement,cam，deformat+,pseudo,rigid,PRB

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
X	CN 110146053 A (天津师范大学) 2019年8月20日 (2019-08-20) 说明书第[0015]-[0024]段及图1	1
A	CN 109325315 A (清华大学深圳研究生院) 2019年2月12日 (2019-02-12) 全文	1-10
A	US 2014353477 A1 (THE CLEVELAND ELECTRIC LABORATORIES COMPANY) 2014年12月4日 (2014-12-04) 全文	1-10
A	CN 110076775 A (清华大学深圳研究生院) 2019年8月2日 (2019-08-02) 全文	1-10
A	CN 208012590 U (石家庄铁道大学) 2018年10月26日 (2018-10-26) 全文	1-10
A	CN 101701800 A (山东省科学院激光研究所) 2010年5月5日 (2010-05-05) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 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
2021年12月8日	2022年1月12日
ISA/CN的名称和邮寄地址 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	受权官员 邵文 电话号码 86-（10）-53962475

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2021/105090

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 110146053 A	2019年8月20日	无	
CN 109325315 A	2019年2月12日	无	
US 2014353477 A1	2014年12月4日	无	
CN 110076775 A	2019年8月2日	WO 2020216155 A1	2020年10月29日
CN 208012590 U	2018年10月26日	无	
CN 101701800 A	2010年5月5日	CN 101701800 B	2011年4月13日