



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119309727 A

(43) 申请公布日 2025. 01. 14

(21) 申请号 202411447699.6

(22) 申请日 2024.10.16

(71) 申请人 清华大学深圳国际研究生院

地址 518071 广东省深圳市南山区桃源街
道丽水路2279号

(72) 发明人 张旻 黄文治

(74) 专利代理机构 深圳新创友知识产权代理有
限公司 44223

专利代理师 王震宇

(51) Int. Cl.

G01L 5/165 (2020.01)

G06F 30/17 (2020.01)

G06F 30/23 (2020.01)

G06F 30/27 (2020.01)

G06N 3/0499 (2023.01)

G06N 3/084 (2023.01)

G06N 3/006 (2023.01)

G06F 119/14 (2020.01)

G06F 111/04 (2020.01)

G06F 111/06 (2020.01)

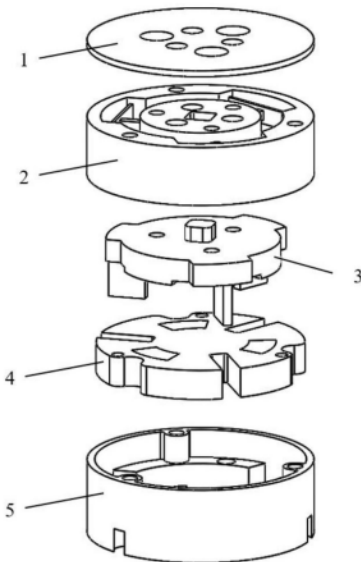
权利要求书3页 说明书18页 附图5页

(54) 发明名称

电容式小型六维力传感器、优化设计及六维
力解耦方法

(57) 摘要

一种电容式小型六维力传感器、优化设计方
法及六维力解耦方法,该传感器包含三T型梁式
弹性体、下电极板、上电极板和底座,三T型梁式
弹性体将外界六维力转换为位移变化,上电极板
与弹性体连接,上电极板与下电极板形成六组正
对电极,包括三组水平和三组垂直布置的电极,
构成六组平行平板电容结构。当传感器受到外力
作用时,弹性体的形变带动上电极板产生位移,
改变电容值,将力的信息转化为六个电容信号输
出。该传感器设计紧凑、尺寸小,便于集成至机器
人手指尖等狭小空间。基于电容测量原理,具有
优异的动态响应性能,能快速响应外力变化。该
传感器具有高灵敏度,各方向刚度一致,有效降
低力的耦合效应,结合解耦算法实现高精度六维
力解耦。



1. 一种电容式小型六维力传感器,其特征在于,包括三T型梁式弹性体、下电极板、上电极板和底座;所述三T型梁式弹性体用于将外界六维力转换为位移变化,所述下电极板置于所述底座上,所述上电极板与所述三T型梁式弹性体相连接,所述上电极板与所述下电极板的电极对应形成六组正对电极;所述六组正对电极包括三组水平布置的电极和三组垂直布置的电极,形成六组平行平板电容结构;所述三T型梁式弹性体包括弹性梁、柔性板簧和受载圆台,其中三组所述弹性梁和所述柔性板簧构成T型结构,用于承受力的作用,位于中心的所述受载圆台通过所述柔性板簧连接所述弹性梁,用于传递力矩;所述上电极板与所述三T型梁式弹性体相连接;其中,所述传感器受到外力时,所述三T型梁式弹性体的形变带动所述上电极板产生位移,从而引起六组平行平板电容的极板间距发生变化,进而将六维力的信息转化为六个电容信号输出。

2. 如权利要求1所述的电容式小型六维力传感器,其特征在于,所述下电极板包括水平布置在下电极板上表面的三个水平电极,和垂直布置在下电极板三个凹槽的侧壁处的三个垂直电极,所述三个水平电极和所述三个垂直电极沿圆周方向均匀分布。

3. 如权利要求2所述的电容式小型六维力传感器,其特征在于,所述三个水平电极和所述三个垂直电极沿圆周方向交替间隔分布。

4. 如权利要求2或3所述的电容式小型六维力传感器,其特征在于,所述上电极板包括水平布置在上电极板下表面的三个水平电极,和从上电极板下表面垂直向下延伸的三个垂直电极,所述上电极板的水平电极和垂直电极与所述下电极板的水平电极和垂直电极相对应设置。

5. 如权利要求1至4任一项所述的电容式小型六维力传感器,其特征在于,所述下电极板基于电路板构造,所述电路板上设置有数字电容芯片,所述六组正对电极均连接所述数字电容芯片。

6. 如权利要求1至5任一项所述的电容式小型六维力传感器,其特征在于,还包括置于所述三T型梁式弹性体上的顶盖。

7. 一种权利要求1至6任一项所述的电容式小型六维力传感器的三T形梁式弹性体结构的优化设计方法,其特征在于,包括:

建立所述三T型梁式弹性体的力学模型;

通过BP神经网络改进所述力学模型,利用BP神经网络的非线性拟合能力,对所述力学模型进行补偿,以建立弹性体尺寸参数与力学模型误差之间的非线性关系;

其中,根据所述力学模型和ANSYS有限元分析的结果,生成一组补偿系数,其中,通过仿真得到多组数据,将仿真结果与力学模型计算结果做比值,得到补偿系数;

将所述尺寸参数和对应的补偿系数组成的数据集划分为训练和测试集,通过训练集对BP神经网络进行训练,利用测试集检验网络的补偿效果;

通过训练好的BP神经网络,将所述力学模型的求解误差降低至预设阈值以内,从而获得改进后的力学模型;

利用所述改进后的力学模型,结合粒子群搜索算法,进行所述三T型梁式弹性体的尺寸的最优化设计。

8. 如权利要求7所述的电容式小型六维力传感器的三T形梁式弹性体结构的优化设计方法,其特征在于,建立四个7输入1输出的BP神经网络,每个网络对应于四种受力情况下的

力学模型补偿;每个BP神经网络配置为接收七个尺寸参数,具体为弹性梁的长度、弹性梁的宽度、弹性梁的高度、柔性板簧的长度、柔性板簧的宽度、柔性板簧的高度和受载圆台的半径,作为输入,输出一个补偿系数;所述四种受力情况分别为:

- F_z 情况:沿Z轴方向施加的垂直力;
- M_x 情况:绕X轴旋转的力矩;
- F_y 情况:沿Y轴方向施加的水平力;
- M_z 情况:绕Z轴旋转的力矩。

9.如权利要求7所述的电容式小型六维力传感器的三T形梁式弹性体结构的优化设计方法,其特征在于,进行所述三T型梁式弹性体的尺寸的最优化设计的约束条件和适应度函数为:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2mm < r < 4mm \\ 1.5mm < L_1 < 3.5mm \\ 0.4mm < b_1 < 1.2mm \\ 0.6mm < h_1 < 2.2mm \\ 5mm < L_2 < 7mm \\ 0.15mm < b_2 < 0.5mm \\ 0.4mm < h_2 < 0.6mm \\ 4.5mm < r + L_1 < 5.5mm \\ h_2 > h_1 \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} dFx_{max} = 0.1mm \\ dFy_{max} = 0.1mm \\ dFz_{max} = 0.1mm \\ dMx_{max} = 1.43^\circ \\ dMy_{max} = 1.43^\circ \\ dMz_{max} = 1.43^\circ \end{array} \right.$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n |D_i - D_j|^2, f_2 = \frac{1}{\bar{D}^2}$$

$$F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2$$

其中, L_1 表示弹性梁的长度、 b_1 表示弹性梁的宽度、 h_1 表示弹性梁的高度、 L_2 表示柔性板簧的长度、 b_2 表示柔性板簧的宽度、 h_2 表示柔性板簧的高度, r 表示受载圆台的半径, $i=1 \sim n$ 依次表示六维力 $F_x \sim M_z$, D_i 表示该力/力矩引起的最大有效位移, $\bar{D}$ 表示六维力引起的最大的有效位移的平均值, ω_1 和 ω_2 分别表示接近性目标和灵敏性目标的权重。

10.一种权利要求1至6任一项所述的电容式小型六维力传感器的三T形梁式弹性体结构的六维力解耦方法,其特征在于,包括:

S1.建立电容与位移的关系:在传感器受到外部作用力时,通过弹性体的形变带动动极板发生位移,静极板固定于底座,形成对应于各向位移的电容变化量,其中三个水平电容分别对应法向位移 d_{n1}, d_{n2}, d_{n3} ,三个竖直电容分别对应切向位移 d_{s4}, d_{s5}, d_{s6} ;

S2.求解垂直力 F_z :利用水平电容的变化量,通过力学模型确定的系数 K_{F_z} ,计算垂直力 F_z ,公式为 $F_z = \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n3}$,同时考虑力矩 M_x 和 M_y 的影响,确保不存在耦合;

S3.求解力矩 M_x :根据水平位移的变化量,通过力学模型确定的系数 K_{M_x} ,计算力矩 M_x ,

公式为 $M_x = -\frac{2}{3rK_{M_x}}\Delta d_{n1} + \frac{1}{3rK_{M_x}}\Delta d_{n2} + \frac{1}{3rK_{M_x}}\Delta d_{n3}$, 同时考虑力 F_z 的耦合影响, 并进行解耦;

S4. 求解力矩 M_y : 利用水平位移的变化量, 通过力学模型确定的系数 K_{M_y} , 计算力矩 M_y , 公式为 $M_y = \frac{1}{2r \cos \frac{\pi}{6} K_{M_y}}\Delta d_{n2} - \frac{1}{2r \cos \frac{\pi}{6} K_{M_y}}\Delta d_{n3}$, 同时考虑力 F_z 和力矩 M_x 的耦合影响, 并进行解耦;

S5. 求解力矩 M_z : 根据竖直位移的变化量, 通过力学模型确定的系数 K_{M_z} , 计算力矩 M_z , 公式为 $M_z = \frac{1}{3rK_{M_z}}\Delta d_{s4} + \frac{1}{3rK_{M_z}}\Delta d_{s5} + \frac{1}{3rK_{M_z}}\Delta d_{s6}$, 同时考虑力 F_x 和 F_y 的耦合影响, 并进行解耦;

S6. 求解水平力 F_y : 利用竖直位移的变化量, 通过力学模型确定的系数 K_{F_y} , 计算水平力 F_y , 公式为 $F_y = \frac{4K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}}\Delta d_{n1} - \frac{2K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}}\Delta d_{n2} - \frac{2K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}}\Delta d_{n3} + \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}}\Delta d_{s4} - \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}}\Delta d_{s5}$, 同时考虑力 F_x 的耦合影响, 并进行解耦;

S7. 求解水平力 F_x : 根据竖直位移的变化量, 通过力学模型确定的系数 K_{F_x} , 计算水平力 F_x , 公式为 $F_x = -\frac{K'_{M_y}}{\sqrt{3}rK_{F_x}K_{M_y}}\Delta d_{n2} + \frac{K'_{M_y}}{\sqrt{3}rK_{F_x}K_{M_y}}\Delta d_{n3} + \frac{1}{3K_{F_x}}\Delta d_{s4} + \frac{1}{3K_{F_x}}\Delta d_{s5} - \frac{2}{3K_{F_x}}\Delta d_{s6}$, 同时考虑力 F_y 和力矩 M_z 的耦合影响, 并进行解耦;

S8. 实现解耦: 通过标定的方法确定解耦矩阵中的参数, 利用电容变化量计算得到的位移变化量 Δd , 通过公式 $F/T = \text{Calib} * \Delta d$ 实现六维力的解耦, 其中 F 和 T 分别表示力和力矩, Calib 为解耦矩阵。

电容式小型六维力传感器、优化设计及六维力解耦方法

技术领域

[0001] 本发明涉及力传感器技术领域,特别是涉及一种电容式小型六维力传感器、优化设计及六维力解耦方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着机器人技术的快速发展,机器人在工业制造、医疗护理、服务机器人等领域的应用日益广泛。在这些应用中常需要进行力的测量,以便执行更高级、更精细化的任务。特别是对于类人机器人,力传感器是类人性能的重要组成部分。在机器人的各个部件中,类人手指关节在操纵工具或物体时呈现出各种各样的力信息,合理采集并处理这些力信息能够大大提高机器人的性能,因而机器人手指尖的力和力矩感知成为了关键技术,它直接影响了机器人在复杂环境下的操作灵活性、安全性以及与环境互动质量。

[0003] 六维力传感器能够测量空间中某一点的所有力和力矩信息,即三个正交力和三个正交力矩。它可以测量各种类型的力信息,因此是一种适合于机器人指关节的力传感器。传统的力传感器在大多数情况下可以满足一般机器人操作的需求,但对于机器人手指尖这样的狭小空间,传感器需要更小巧、更灵敏,以实现微小力和扭矩的高精度测量。此外,机器人在实际工作中常需要与环境或人进行接触,对于一些特殊应用,如医疗手术机器人,对手指尖力的高精度感知更是必不可少。然而设计这种高性能的小型传感器在结构设计、信号测量、解耦设计等方面仍然存在困难,这阻碍了六维力传感器在机器人中的实际应用。近年来,用于机器人指关节的小型六维力传感器成为了机器人技术研究的热点之一。

[0004] 需要说明的是,在上述背景技术部分公开的信息仅用于对本申请的背景的理解,因此可以包括不构成对本领域普通技术人员已知的现有技术的信息。

发明内容

[0005] 本发明的主要目的在于克服上述背景技术中存在的缺陷,提供一种电容式小型六维力传感器、优化设计及六维力解耦方法。

[0006] 为实现上述目的,本发明采用以下技术方案:

[0007] 一种电容式小型六维力传感器,包括三T型梁式弹性体、下电极板、上电极板和底座;所述三T型梁式弹性体用于将外界六维力转换为位移变化,所述下电极板置于所述底座上,所述上电极板与所述三T型梁式弹性体相连接,所述上电极板与所述下电极板的电极对应形成六组正对电极;所述六组正对电极包括三组水平布置的电极和三组垂直布置的电极,形成六组平行平板电容结构;所述三T型梁式弹性体包括弹性梁、柔性板簧和受载圆台,其中三组所述弹性梁和所述柔性板簧构成T型结构,用于承受力的作用,位于中心的所述受载圆台通过所述柔性板簧连接所述弹性梁,用于传递力矩;所述上电极板与所述三T型梁式弹性体相连接;其中,所述传感器受到外力时,所述三T型梁式弹性体的形变带动所述上电极板产生位移,从而引起六组平行平板电容的极板间距发生变化,进而将六维力的信息转化为六个电容信号输出。

[0008] 进一步地,所述下电极板包括水平布置在下电极板上表面的三个水平电极,和垂直布置在下电极板三个凹槽的侧壁处的三个垂直电极,所述三个水平电极和所述三个垂直电极沿圆周方向均匀分布。

[0009] 进一步地,所述三个水平电极和所述三个垂直电极沿圆周方向交替间隔分布。

[0010] 进一步地,所述上电极板包括水平布置在上电极板下表面的三个水平电极,和从上电极板下表面垂直向下延伸的三个垂直电极,所述上电极板的水平电极和垂直电极与所述下电极板的水平电极和垂直电极相对应设置。

[0011] 进一步地,所述下电极板基于电路板构造,所述电路板上设置有数字电容芯片,所述六组正对电极均连接所述数字电容芯片。

[0012] 进一步地,还包括置于所述三T型梁式弹性体上的顶盖。

[0013] 一种所述的电容式小型六维力传感器的三T形梁式弹性体结构的优化设计方法,包括:

[0014] 建立所述三T型梁式弹性体的力学模型;

[0015] 通过BP神经网络改进所述力学模型,利用BP神经网络的非线性拟合能力,对所述力学模型进行补偿,以建立弹性体尺寸参数与力学模型误差之间的非线性关系;

[0016] 其中,根据所述力学模型和ANSYS有限元分析的结果,生成一组补偿系数,其中,通过仿真得到多组数据,将仿真结果与力学模型计算结果做比值,得到补偿系数;

[0017] 将所述尺寸参数和对应的补偿系数组成的数据集划分为训练和测试集,通过训练集对BP神经网络进行训练,利用测试集检验网络的补偿效果;

[0018] 通过训练好的BP神经网络,将所述力学模型的求解误差降低至预设阈值以内,从而获得改进后的力学模型;

[0019] 利用所述改进后的力学模型,结合粒子群搜索算法,进行所述三T型梁式弹性体的尺寸的最优化设计。

[0020] 建立四个7输入1输出的BP神经网络,每个网络对应于四种受力情况下的力学模型补偿;每个BP神经网络配置为接收七个尺寸参数,具体为弹性梁的长度、弹性梁的宽度、弹性梁的高度、柔性板簧的长度、柔性板簧的宽度、柔性板簧的高度和受载圆台的半径,作为输入,输出一个补偿系数;所述四种受力情况分别为:

[0021] $-F_z$ 情况:沿Z轴方向施加的垂直力;

[0022] $-M_x$ 情况:绕X轴旋转的力矩;

[0023] $-F_y$ 情况:沿Y轴方向施加的水平力;

[0024] $-M_z$ 情况:绕Z轴旋转的力矩。

[0025] 进行所述三T型梁式弹性体的尺寸的最优化设计的约束条件和适应度函数为:

$$[0026] \quad \left\{ \begin{array}{l} 2\text{mm} < r < 4\text{mm} \\ 1.5\text{mm} < L_1 < 3.5\text{mm} \\ 0.4\text{mm} < b_1 < 1.2\text{mm} \\ 0.6\text{mm} < h_1 < 2.2\text{mm} \\ 5\text{mm} < L_2 < 7\text{mm} \\ 0.15\text{mm} < b_2 < 0.5\text{mm} \\ 0.4\text{mm} < h_2 < 0.6\text{mm} \\ 4.5\text{mm} < r + L_1 < 5.5\text{mm} \\ h_2 > h_1 \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} dF_{x_{\max}} = 0.1\text{mm} \\ dF_{y_{\max}} = 0.1\text{mm} \\ dF_{z_{\max}} = 0.1\text{mm} \\ dM_{x_{\max}} = 1.43^\circ \\ dM_{y_{\max}} = 1.43^\circ \\ dM_{z_{\max}} = 1.43^\circ \end{array} \right.$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n |D_i - D_j|^2, f_2 = \frac{1}{\bar{D}^2}$$

$$[0027] \quad F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2$$

[0028] 其中, L_1 表示弹性梁的长度、 b_1 表示弹性梁的宽度、 h_1 表示弹性梁的高度、 L_2 表示柔性板簧的长度、 b_2 表示柔性板簧的宽度、 h_2 表示柔性板簧的高度、 r 表示受载圆台的半径、 $i = 1 \sim n$ 依次表示六维力 $F_x \sim M_z$, D_i 表示该力/力矩引起的最大有效位移, $\bar{D}$ 表示六维力引起的最大的有效位移的平均值, ω_1 和 ω_2 分别表示接近性目标和灵敏性目标的权重。

[0029] 一种所述的电容式小型六维力传感器的三T形梁式弹性体结构的六维力解耦方法, 包括:

[0030] S1. 建立电容与位移的关系: 在传感器受到外部作用力时, 通过弹性体的形变带动动极板发生位移, 静极板固定于底座, 形成对应于各向位移的电容变化量, 其中三个水平电容分别对应法向位移 d_{n1}, d_{n2}, d_{n3} , 三个竖直电容分别对应切向位移 d_{s4}, d_{s5}, d_{s6} ;

[0031] S2. 求解垂直力 F_z : 利用水平电容的变化量, 通过力学模型确定的系数 K_{F_z} , 计算垂直力 F_z , 公式为 $F_z = \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n3}$, 同时考虑力矩 M_x 和 M_y 的影响, 确保不存在耦合;

[0032] S3. 求解力矩 M_x : 根据水平位移的变化量, 通过力学模型确定的系数 K_{M_x} , 计算力矩 M_x , 公式为 $M_x = -\frac{2}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n3}$, 同时考虑力 F_z 的耦合影响, 并进行解耦;

[0033] S4. 求解力矩 M_y : 利用水平位移的变化量, 通过力学模型确定的系数 K_{M_y} , 计算力矩 M_y , 公式为 $M_y = \frac{1}{2r \cos \frac{\pi}{6} K_{M_y}} \Delta d_{n2} - \frac{1}{2r \cos \frac{\pi}{6} K_{M_y}} \Delta d_{n3}$, 同时考虑力 F_z 和力矩 M_x 的耦合影响, 并进行解耦;

[0034] S5. 求解力矩 M_z : 根据竖直位移的变化量, 通过力学模型确定的系数 K_{M_z} , 计算力矩 M_z , 公式为 $M_z = \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s4} + \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s5} + \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s6}$, 同时考虑力 F_x 和 F_y 的耦合影

响,并进行解耦;

[0035] S6. 求解水平力 F_y :利用竖直位移的变化量,通过力学模型确定的系数 K_{F_y} ,计算水

平力 F_y ,公式为 $F_y = \frac{4K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}}\Delta d_{n1} - \frac{2K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}}\Delta d_{n2} -$

$\frac{2K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}}\Delta d_{n3} + \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}}\Delta d_{s4} - \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}}\Delta d_{s5}$,同时考虑力 F_x 的耦合影响,并进行解耦;

[0036] S7. 求解水平力 F_x :根据竖直位移的变化量,通过力学模型确定的系数 K_{F_x} ,计算水

平力 F_x ,公式为 $F_x = -\frac{K'_{M_y}}{\sqrt{3}rK_{F_x}K_{M_y}}\Delta d_{n2} + \frac{K'_{M_y}}{\sqrt{3}rK_{F_x}K_{M_y}}\Delta d_{n3} +$

$\frac{1}{3K_{F_x}}\Delta d_{s4} + \frac{1}{3K_{F_x}}\Delta d_{s5} - \frac{2}{3K_{F_x}}\Delta d_{s6}$,同时考虑力 F_y 和力矩 M_z 的耦合影响,并进行解耦;

[0037] S8. 实现解耦:通过标定的方法确定解耦矩阵中的参数,利用电容变化量计算得到的位移变化量 Δd ,通过公式 $F/T = \text{Calib} * \Delta d$ 实现六维力的解耦,其中 F 和 T 分别表示力和力矩,Calib为解耦矩阵。

[0038] 本发明具有如下有益效果:

[0039] 本发明提出了一种电容式的小型六维力传感器结构及其优化设计方法和六维力解耦方法。当外界六维力作用于三T型梁式弹性体,弹性体发生形变从而带动上电极板发生位移,进而使六组平行平板电容的极板间距发生变化而引起电容值的变化,采集微小电容值,利用本发明所设计的六维力解耦算法对六维力进行解耦,能够实现三个正交方向上的力和力矩的准确测量。本发明主要优点有:①本发明所设计的传感器结构紧凑,尺寸小,便于集成至机器人灵巧手指关节的狭小空间内;②本发明所设计的传感器基于电容式测量原理而设计,因而其动态响应性能好,能够快速响应外力的变化;③本发明所设计的传感器能够测量 $\pm 30\text{N}$ 的外力和 $\pm 0.3\text{Nm}$ 的外力矩,能够满足机器人灵巧手指尖的使用需求;④本发明所设计的三T型梁式弹性体结构灵敏度高、各个方向上的刚度相近,能够降低六维力的耦合效应;④本发明所设计的电容布置结构便于六维力的解耦,耦合效应小,结合所设计的解耦算法能够实现高精度的六维力解耦。

[0040] 本发明实施例中的其他有益效果将在下文中进一步述及。

附图说明

[0041] 图1是本发明实施例的电容式小型六维力传感器的一种实施例的结构爆炸示意图;

[0042] 图2是本发明实施例的电容式小型六维力传感器的一种实施例的顶盖结构立体示意图;

[0043] 图3是本发明实施例的电容式小型六维力传感器的一种实施例的三T型梁式弹性体结构立体示意图;

[0044] 图4是本发明实施例的电容式小型六维力传感器的一种实施例的上电极板结构立体示意图;

[0045] 图5是本发明实施例的电容式小型六维力传感器的一种实施例的下电极板(电路板)结构示意图;

[0046] 图6是本发明实施例的电容式小型六维力传感器的一种实施例的底座结构示意图。

[0047] 图7是本发明实施例的弹性体的结构参数图。

[0048] 图8是弹性体单独施加 F_z 的受力示意图。

[0049] 图9是弹性体单独施加 M_x 的受力示意图。

[0050] 图10是弹性体单独施加 F_y 的受力示意图。

[0051] 图11是弹性体单独施加 M_z 的受力示意图。

[0052] 图12是为改进力学模型所建立的BP神经网络的结构图。

[0053] 图13是神经网络对力学模型的补偿效果图。

[0054] 图14是电容式小型六维力传感器的电容与上电极板位移对应关系图。

具体实施方式

[0055] 以下对本发明的实施方式做详细说明。应该强调的是,下述说明仅仅是示例性的,而不是为了限制本发明的范围及其应用。

[0056] 需要说明的是,当元件被称为“固定于”或“设置于”另一个元件,它可以直接在另一个元件上或者间接在该另一个元件上。当一个元件被称为是“连接于”另一个元件,它可以是直接连接到另一个元件或间接连接至该另一个元件上。另外,连接既可以是用于固定作用也可以是用于耦合或连通作用。

[0057] 需要理解的是,术语“长度”、“宽度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明实施例和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。

[0058] 此外,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括一个或者更多该特征。在本发明实施例的描述中,“多个”的含义是两个或两个以上,除非另有明确具体的限定。

[0059] 参阅图1至图7,本发明实施例提供一种电容式小型六维力传感器,包括顶盖1、三T型梁式弹性体2、上电极板3、下电极板4和底座5;所述三T型梁式弹性体2用于将外界六维力转换为位移变化,所述下电极板4置于所述底座5上,顶盖1置于三T型梁式弹性体2上,所述上电极板3与所述三T型梁式弹性体2相连接,所述上电极板3与所述下电极板4的电极对应形成六组正对电极;所述六组正对电极包括三组水平布置的电极和三组垂直布置的电极,形成六组平行平板电容结构;所述三T型梁式弹性体2包括弹性梁、柔性板簧和受载圆台,其中三组所述弹性梁和所述柔性板簧构成T型结构,用于承受力的作用,位于中心的所述受载圆台通过所述柔性板簧连接所述弹性梁,用于传递力矩;所述上电极板3与所述三T型梁式弹性体2相连接;其中,所述传感器受到外力时,所述三T型梁式弹性体2的形变带动所述上电极板3产生位移,从而引起六组平行平板电容的极板间距发生变化,进而将六维力的信息转化为六个电容信号输出。

[0060] 如图1、图4和图5所示,在优选的实施例中,所述下电极板4包括水平布置在下电极板4上表面的三个水平电极,和垂直布置在下电极板4三个凹槽的侧壁处的三个垂直电极,所述三个水平电极和所述三个垂直电极沿圆周方向均匀分布。所述三个水平电极和所述三个垂直电极沿圆周方向交替间隔分布。所述上电极板3包括水平布置在上电极板3下表面的三个水平电极,和从上电极板3下表面垂直向下延伸的三个垂直电极,所述上电极板3的水平电极和垂直电极与所述下电极板4的水平电极和垂直电极相对应设置。

[0061] 该电容式小型六维力传感器能将外界六维力的大小转化为传感器中六组电极电容的变化量,对六组电容的变化量进行解耦,从而实现利用电信号的变化来感知外界六维力的大小。该传感器具有尺寸小、质量轻、灵敏度高、动态响应好、易于加工组装等优点,适用于机器人灵巧手指尖关节。

[0062] 一种所述的电容式小型六维力传感器的三T形梁式弹性体结构的优化设计方法,包括:

[0063] 建立所述三T型梁式弹性体的力学模型;

[0064] 通过BP神经网络改进所述力学模型,利用BP神经网络的非线性拟合能力,对所述力学模型进行补偿,以建立弹性体尺寸参数与力学模型误差之间的非线性关系;

[0065] 其中,根据所述力学模型和ANSYS有限元分析的结果,生成一组补偿系数,其中,通过仿真得到多组数据,将仿真结果与力学模型计算结果做比值,得到补偿系数;

[0066] 将所述尺寸参数和对应的补偿系数组成的数据集划分为训练和测试集,通过训练集对BP神经网络进行训练,利用测试集检验网络的补偿效果;

[0067] 通过训练好的BP神经网络,将所述力学模型的求解误差降低至预设阈值以内,从而获得改进后的力学模型;

[0068] 利用所述改进后的力学模型,结合粒子群搜索算法,进行所述三T型梁式弹性体的尺寸的最优化设计。

[0069] 建立四个7输入1输出的BP神经网络,每个网络对应于四种受力情况下的力学模型补偿;每个BP神经网络配置为接收七个尺寸参数,具体为弹性梁的长度、弹性梁的宽度、弹性梁的高度、柔性板簧的长度、柔性板簧的宽度、柔性板簧的高度和受载圆台的半径,作为输入,输出一个补偿系数;所述四种受力情况分别为:

[0070] $-F_z$ 情况:沿Z轴方向施加的垂直力;

[0071] $-M_x$ 情况:绕X轴旋转的力矩;

[0072] $-F_y$ 情况:沿Y轴方向施加的水平力;

[0073] $-M_z$ 情况:绕Z轴旋转的力矩。

[0074] 进行所述三T型梁式弹性体的尺寸的最优化设计的约束条件和适应度函数为:

$$[0075] \quad \left\{ \begin{array}{l} 2\text{mm} < r < 4\text{mm} \\ 1.5\text{mm} < L_1 < 3.5\text{mm} \\ 0.4\text{mm} < b_1 < 1.2\text{mm} \\ 0.6\text{mm} < h_1 < 2.2\text{mm} \\ 5\text{mm} < L_2 < 7\text{mm} \\ 0.15\text{mm} < b_2 < 0.5\text{mm} \\ 0.4\text{mm} < h_2 < 0.6\text{mm} \\ 4.5\text{mm} < r + L_1 < 5.5\text{mm} \\ h_2 > h_1 \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} dFx_{\max} = 0.1\text{mm} \\ dFy_{\max} = 0.1\text{mm} \\ dFz_{\max} = 0.1\text{mm} \\ dMx_{\max} = 1.43^\circ \\ dMy_{\max} = 1.43^\circ \\ dMz_{\max} = 1.43^\circ \end{array} \right.$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n |D_i - D_j|^2, f_2 = \frac{1}{\bar{D}^2}$$

$$[0076] \quad F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2$$

[0077] 其中, L_1 表示弹性梁的长度、 b_1 表示弹性梁的宽度、 h_1 表示弹性梁的高度、 L_2 表示柔性板簧的长度、 b_2 表示柔性板簧的宽度、 h_2 表示柔性板簧的高度、 r 表示受载圆台的半径、 $i = 1 \sim n$ 依次表示六维力 $F_x \sim M_z$, D_i 表示该力/力矩引起的最大有效位移, $\bar{D}$ 表示六维力引起的最大的有效位移的平均值, ω_1 和 ω_2 分别表示接近性目标和灵敏性目标的权重。

[0078] 以下进一步描述本发明具体实施例。

[0079] 一种小型电容式六维力传感器, 包括三T型梁式弹性体2、具有特定电容布置结构的下电极板4、具有特定结构的上电极板3以及顶盖1和底座5。所述具有特定电容布置结构的下电极板4置于底座5上, 所述上电极板3与所述三T型梁式弹性体相连接并与下电极板4形成六组正对电极。该传感器能将外界六维力的大小转化为传感器中六组电极电容的变化量, 对六组电容的变化量进行解耦, 从而实现利用电信号的变化来感知外界六维力的大小。所述下电极板4布置了有六个电容电极, 六个电极在圆形电路板上均匀布置, 其中三个水平布置在电路板上表面, 三个垂直布置在电路板三个凹槽的侧壁处, 六个电极均连接至电路板中间的数字电容芯片, 通过数字电容芯片测量电容值。所述上电极板3的结构与下电极板4的结构相对应, 六个电极在圆形极板上均匀布置, 其中三个水平布置, 三个垂直布置。

[0080] 传感器受到外力时, 所述三T型梁式弹性体2的形变带动上电极板3产生位移, 从而引起6组平行平板电容的极板间距发生变化, 进而将六维力的信息转化为6个电容信号输出。

[0081] 具体实施例中, 所述传感器结构可采用如下方式组装。在下电极板4上焊接数字电容芯片及信号线, 将下电极板4放置在底座5上, 并将信号线从底座5下部引出; 将上电极板3与三T型梁式弹性体2通过凹槽对准后用螺丝连接; 将三T型梁式弹性体2与底座5上的下电极板4用销钉定位, 对准后用螺丝将底座5与三T型梁式弹性体2连接, 从而将下电极板4压紧, 并使下电极板电极与上电极板电极形成6组正对平行板电容, 板间距为0.2mm; 将顶盖1与三T型梁式弹性体2对准后用螺丝连接。所述六维力传感器由此方式组装完成。

[0082] 电容信号采集可通过AD7147数字电容芯片实现, 该芯片能够测量 $\pm 8\text{pF}$ 的电容, 分辨率为16位, 可测电容通道数为14, 使用单个芯片能够同时测量6个电容信号。

[0083] 该传感器具有尺寸小、质量轻、灵敏度高、动态响应好、易于加工组装等优点,适用于机器人灵巧手指尖关节。

[0084] 所述三T型梁式弹性体的力学模型经过BP神经网络进行改进。三T型梁式弹性体的尺寸结构利用粒子群搜索算法进行最优设计。具体尺寸取决于六维力传感器在各个方向上的检测要求以及六维力传感器的尺寸要求。

[0085] 三T型梁式弹性体结构尺寸由改进力学模型及粒子群搜索算法实现最优设计,其中BP神经网络将力学模型的模型相对误差降低到5%以内,粒子群搜索算法计算最优尺寸结构使弹性体实现高灵敏度和各向同性。

[0086] 三T型梁式弹性体结构尺寸设计方法

[0087] 首先建立三T型梁式弹性体结构的力学模型;然后利用BP神经网络对该模型进行补偿,得到改进力学模型,该模型的求解误差能够控制在5%以内;然后结合改进力学模型,使用粒子群搜索算法,以高灵敏度、各项刚度相近为目标,求解出弹性体最优尺寸结构。

[0088] 建立力学模型

[0089] 三T形梁式弹性体结构的力学模型中的结构体参数共有6个,分别是弹性梁的长宽 l_1, b_1 ,柔性板簧的长宽 l_2, b_2 ,弹性梁和柔性板簧的高 h ,以及受载圆台的半径 r 。为了优化弹性体在各方向上的刚度,并提高弹性体的可设计空间,将弹性梁的高和柔性板簧的高区分开,分别记为 h_1 和 h_2 。弹性体的结构参数如图7所示。

[0090] 将竖直方向记为Z方向,在考虑弹性体受到六维力时,由于弹性体结构是对称的,可以验证的是力 F_y 的位移与力 F_x 的位移计算相同,力矩 M_x 的位移计算与力矩 M_y 的位移计算相同。因此在六维力的作用下弹性体位移计算可以简化为两个力(F_x 和 F_z)和两个力矩(M_y 和 M_z)的位移计算。在原有模型的基础上,由于弹性梁的高和柔性板簧的高被区分开,因此需要对力学模型进行调整和改善,其结果如下。

[0091] 1) 单独施加 F_z

[0092] 单独施加 F_z 的受力如图8所示。

[0093] 记

[0094] $l'_1 = l_1 + b_2/2, l'_2 = l_2 - b_1, k = 5/6, I_{12} = b_1 h_1^3/12, I_{22} = b_2 h_2^3/12, S_1 = b_1 h_1, S_2 = b_2 h_2, I_t = \beta h_2 b_2^3$ (β 为截面扭转系数), 记 $a_1 = \frac{l'_1(2l'_1 G I_t + l'_2 E I_{12})}{4l'_1 G I_t + l'_2 E I_{12}}$ 。

[0095] 此时 F_z 与 Δd_{F_z} 的关系可写为

[0096] $\Delta d_{F_z} = K_{F_z} F_z \#(1)$

[0097] 其中 $K_{F_z} = \frac{1}{3} \left(\frac{l_1^3}{3EI_{12}} - \frac{a_1 l_1^2}{2EI_{12}} + \frac{(l_1 - a_1) l_1 l'_2}{4GI_t} + \frac{l_2^3}{192EI_{22}} + \frac{4l_1 S_2 + l_2 S_1}{4kGS_1 S_2} \right)$, E 为材料的杨

氏模量, G 为材料的剪切模量。

[0098] 2) 单独施加 M_x

[0099] 单独施加 M_x 的受力如图9所示。

[0100] 记 $\lambda_1 = l'_1 / r, \lambda_2 = l'_2 / r, A_1 = \left(\frac{l_1^3}{3EI_{12}} + \frac{l_1 l'_2}{4GI_t} + \frac{1}{kGS_1} \right) \lambda_1 + \left(\frac{1}{4kGS_2} + \right.$

$$\frac{\dot{l}_2}{192EI_{22}}\lambda_2 + \left(\frac{\dot{l}_1^2}{2EI_{12}} + \frac{\dot{l}_1\dot{l}_2}{4GI_t}\right)B_1 = \left(\frac{\dot{l}_1}{2EI_{12}} + \frac{\dot{l}_2}{4GI_t}\right)\lambda_1 + \left(\frac{\dot{l}_1}{EI_{12}} + \frac{\dot{l}_2}{4GI_t}\right).$$

[0101] 此时 M_x 与 Δr_{M_x} 的关系可写为

$$[0102] \quad \Delta r_{M_x} = K_{M_x} M_x \#(2)$$

$$[0103] \quad \text{其中 } K_{M_x} = \frac{2}{3\left(\frac{A_1}{B_1} + r\right)r} \left(\frac{\dot{l}_2^3}{192EI_{22}} + \frac{\dot{l}_2}{4kGS_2} + \frac{2\dot{l}_1^3 - 3\frac{A_1}{B_1}\dot{l}_1^2}{6EI_{12}} + \frac{\dot{l}_1}{kGS_1} + \frac{\left(\dot{l}_1 - \frac{A_1}{B_1}\right)\dot{l}_1\dot{l}_2}{4GI_t} \right).$$

[0104] 3) 单独施加 F_y

[0105] 图10为单独施加 F_y 的受力示意图。

[0106] 记 $I_{11} = h_1 b_1^3/12$, $I_{21} = h_2 b_2^3/12$, 记

$$[0107] \quad A_2 = \frac{\dot{l}_1^2}{2I_{11}} + \frac{\dot{l}_1\dot{l}_2}{16I_{21}} , \quad B_2 = \frac{\dot{l}_1}{I_{11}} + \frac{\dot{l}_2}{16I_{21}} , \quad A_3 = \frac{\dot{l}_1^3}{3EI_{11}} + \frac{\dot{l}_1^2\dot{l}_2}{16EI_{21}} + \frac{\dot{l}_1}{kGS_1} - \frac{A_2}{B_2} \left(\frac{\dot{l}_1^2}{2EI_{11}} + \frac{\dot{l}_1\dot{l}_2}{16EI_{21}} \right) B_3 = \sqrt{3} \left(\frac{\dot{l}_2^3}{192EI_{21}} + \frac{\dot{l}_1}{ES_1} + \frac{\dot{l}_2}{4kGS_2} \right) , A_4 = \left(\frac{3}{2} + \sqrt{3} \frac{B_3}{2A_3} \right).$$

[0108] 此时 F_y 与 Δd_{F_y} 的关系可写为

$$[0109] \quad \Delta d_{F_y} = K_{F_y} F_y \#(3)$$

$$[0110] \quad \text{其中 } K_{F_y} = \frac{B_3}{2A_3A_4 \cos 30^\circ} \left(\frac{\dot{l}_1^3}{3EI_{11}} - \frac{A_2\dot{l}_1^2}{2EI_{11}B_2} + \frac{\dot{l}_1^2\dot{l}_2 - \frac{A_2}{B_2}\dot{l}_1\dot{l}_2}{16EI_{21}} + \frac{\dot{l}_1}{4kGS_1} \right).$$

[0111] 4) 单独施加 M_z

[0112] 图11为单独施加 M_z 的受力示意图。

$$[0113] \quad \text{记 } a_2 = \frac{\frac{\dot{l}_1}{EI_{11}} + \frac{\dot{l}_2}{16EI_{21}} + \left(\frac{\dot{l}_1}{2EI_{11}} + \frac{\dot{l}_2}{16EI_{21}} \right) \lambda_1}{\frac{\dot{l}_1}{2EI_{11}} + \frac{\dot{l}_1\dot{l}_2}{16EI_{21}} + \left(\frac{\dot{l}_1^2}{3EI_{11}} + \frac{\dot{l}_1\dot{l}_2}{16EI_{21}} + \frac{1}{kGS_1} \right) \lambda_1}.$$

[0114] 此时 M_z 与 Δr_{M_z} 的关系可写为

$$[0115] \quad \Delta r_{M_z} = K_{M_z} M_z \#(4)$$

$$[0116] \quad \text{其中 } K_{M_z} = \frac{1}{3r(r+a_2)} \left(\frac{\dot{l}_1^3}{3EI_{11}} - \frac{\dot{l}_1^2 a_2}{2EI_{11}} + \frac{\dot{l}_1^2 \dot{l}_2 - \dot{l}_1 \dot{l}_2 a_2}{16EI_{21}} + \frac{\dot{l}_1}{kGS_1} \right).$$

由弹性体结构的对称性, 易得

$$[0117] \quad \Delta r_{M_y} = K_{M_y} M_y \#(4-5)$$

$$\Delta d_{F_x} = K_{F_x} F_x \#(4-6)$$

$$[0118] \quad \text{其中 } K_{M_y} = K_{M_x}, K_{F_x} = K_{F_y}.$$

[0119] 改进力学模型

[0120] 通过对比上述力学模型的求解结果和Ansys有限元分析的求解结果,可知上述力学模型的求解误差在5%~20%左右,该误差较大。为了进行弹性体结构的最优化设计,需要一个准确度较高的力学模型。对模型进行优化,选择的方法是用人工神经网络来进行补偿。

[0121] BP神经网络是一种常见的人工神经网络模型,它适用性广泛,并且具有强大的非线性拟合能力,能够通过激活函数引入非线性映射,从而使神经网络拟合复杂的非线性关系。BP神经网络的这些优势使得它非常适用于解决当前的问题,即建立弹性体尺寸参数与力学模型误差之间的非线性关系。

[0122] 对于所示设计的三T形梁式弹性体结构,一共有7个尺寸参数,因此可以建立4个“7输入-1输出”的BP神经网络,分别对应 F_z 、 M_x 、 F_y 、 M_z 四种情况下的力学模型补偿。在建立BP神经网络时,需要选择合适的隐含层层数以及节点个数。由于所设计的神经网络输入参数较少,因此1层隐含层即可满足使用要求,通常节点个数为输入参数个数的两倍,为避免过拟合现象,将节点个数取为10。所建立的BP神经网络的结构如图12所示。

[0123] 通过ANSYS仿真生成200组数据,将仿真结果与现有力学模型所计算的结果做比值,得到200组补偿系数。将200组尺寸参数与对应的200组补偿系数组合成一个数据集,其中尺寸参数为输入,补偿系数为输出。随机选择其中的150组作为训练集,剩下的50组作为测试集。利用训练集训练结束后,将测试集输入神经网络中,检验神经网络对力学模型的补偿效果,其结果如图13所示。图中的蓝色曲线为测试集参数加入神经网络补偿前力学模型的求解误差,红色曲线为加入神经网络补偿后力学模型的求解误差。可以看到求解误差有显著的下降,以 F_z 为例,力学模型的求解误差从原来的20%左右降到了5%以内,同样地,其余情形也均能将误差控制在5%以内。因此神经网络在测试集上能够体现出优秀的性能,说明模型在新数据上具备泛化能力。

[0124] 弹性体尺寸结构最优设计

[0125] 基于前文所优化的弹性体力学模型,结合优化算法可以进行弹性体结构尺寸的最优化设计。常见的优化算法有梯度下降法、遗传算法、模拟退火算法、粒子群搜索算法等。其中粒子群搜索算法适用于多维度的复杂问题,实现简便,适用于本发明中弹性体结构的优化设计。

[0126] 适应度函数是优化过程的关键,函数的设计需要体现优化目标。此外,对于粒子的位置和速度也需要满足的一定的约束条件。在本研究中,针对弹性体的优化设计将约束条件和优化目标定为以下四点:

[0127] • 尺寸约束:对于弹性体结构中的每一个尺寸参数都有严格的范围要求;

[0128] • 变形约束:弹性体的表型不能过大或过小;

[0129] • 接近性目标:弹性体在受到不同方向上同等大小的力/力矩时,引起的变形相近;

[0130] • 灵敏度目标:在约束范围内变形量尽可能大。

[0131] 基于以上四点,给出优化设计的约束条件和适应度函数如下:

$$[0132] \quad \left\{ \begin{array}{l} 2\text{mm} < r < 4\text{mm} \\ 1.5\text{mm} < L_1 < 3.5\text{mm} \\ 0.4\text{mm} < b_1 < 1.2\text{mm} \\ 0.6\text{mm} < h_1 < 2.2\text{mm} \\ 5\text{mm} < L_2 < 7\text{mm} \\ 0.15\text{mm} < b_2 < 0.5\text{mm} \\ 0.4\text{mm} < h_2 < 0.6\text{mm} \\ 4.5\text{mm} < r + L_1 < 5.5\text{mm} \\ h_2 > h_1 \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} dFx_{\max} = 0.1\text{mm} \\ dFy_{\max} = 0.1\text{mm} \\ dFz_{\max} = 0.1\text{mm} \\ dMx_{\max} = 1.43^\circ \\ dMy_{\max} = 1.43^\circ \\ dMz_{\max} = 1.43^\circ \end{array} \right\} \#(4-7)$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n |D_i - D_j|^2, f_2 = \frac{1}{\bar{D}^2}$$

$$[0133] \quad F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 \#(4-8)$$

[0134] 其中, L_1 表示弹性梁的长度、 b_1 表示弹性梁的宽度、 h_1 表示弹性梁的高度、 L_2 表示柔性板簧的长度、 b_2 表示柔性板簧的宽度、 h_2 表示柔性板簧的高度、 r 表示受载圆台的半径、 $i = 1 \sim n$ 依次表示六维力 $F_x \sim M_z$ 、 D_i 表示该力/力矩引起的最大有效位移、 $\bar{D}$ 表示六维力引起的最大的有效位移的平均值、 ω_1 和 ω_2 分别表示接近性目标和灵敏性目标的权重。

[0135] 六维力解耦方法

[0136] 所述小型电容式六维力传感器, 根据其特定的电容布置方式, 设计了相应的六维力解耦算法, 其解耦的相对误差在 0.5% 以内。

[0137] 所设计的六维力传感器在受到外部作用力时, 弹性体受力发生变形, 固连在弹性体上的动极板也随之发生位移, 而静极板在底座上固定不动, 因此上电极板的位移将引起极板间距的变化, 进而引起电容的变化。在解耦时, 按照以下顺序进行:

$$[0138] \quad C \rightarrow d \rightarrow F/T$$

[0139] 在如图 14 所设计的结构下, 各电容与上电极板各处位移一一对应, 其中水平电容 C_1, C_2, C_3 分别对应各处的法向位移 d_{n1}, d_{n2}, d_{n3} , 竖直电容 C_4, C_5, C_6 分别对应各处的切向位移 d_{s4}, d_{s5}, d_{s6} 。因此由电容变化量求解位移变化量这一步骤不涉及耦合问题, 仅需考虑位移变化量与六维力的耦合问题。

$$[0140] \quad 1) \text{ 求解 } F_z$$

[0141] 由力学模型可知:

$$[0142] \quad \Delta d_{n1} = \Delta d_{n2} = \Delta d_{n3} = K_{F_z} F_z$$

[0143] 进而有

$$[0144] \quad F_z = \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n3} \#(4-7)$$

[0145] 考虑力矩 M_x 引起的耦合问题: 当施加 F_z 时, 若同时施加 M_x , 由 M_x 引起的 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 满足以下关系:

$$[0146] \quad \Delta d_{n1} = -2 \Delta d_{n2} = -2 \Delta d_{n3}$$

[0147] 因此不会使得式 (4-7) 的计算结果发生变化, 也即不存在耦合。

[0148] 考虑力矩 M_y 引起的耦合问题:当施加 F_z 时,若同时施加 M_y ,由 M_y 引起的 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 满足以下关系:

[0149] $\Delta d_{n1}=0$

[0150] $\Delta d_{n2}=-\Delta d_{n3}$

[0151] 因此不会使得式(4-7)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0152] 此外, F_x 、 F_y 、 M_z 均不会引起 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 发生变化,因此均不存在耦合。式(4-7)即为 F_z 的解耦式。

[0153] 2) 求解 M_x

[0154] 由力学模型可知:

[0155]
$$-\frac{\Delta d_{n1}}{r} = \frac{\Delta d_{n2}}{r \sin \frac{\pi}{6}} = \frac{\Delta d_{n3}}{r \sin \frac{\pi}{6}} = K_{M_x} M_x$$

[0156] 进而有

[0157]
$$M_x = -\frac{1}{3rK_{M_x}}\Delta d_{n1} + \frac{1}{3r \sin \frac{\pi}{6} K_{M_x}}\Delta d_{n2} + \frac{1}{3r \sin \frac{\pi}{6} K_{M_x}}\Delta d_{n3} \#(4-8)$$

[0158] 考虑力矩 M_y 引起的耦合问题:当施加 M_x 时,若同时施加 M_y ,由 M_y 引起的 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 满足以下关系

[0159] $\Delta d_{n1}=0$

[0160] $\Delta d_{n2}=-\Delta d_{n3}$

[0161] 因此不会使得式(4-8)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0162] 考虑力 F_z 引起的耦合问题:当施加 M_x 时,若同时施加 F_z ,由 F_z 引起的 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 满足以下关系

[0163] $\Delta d_{n1} = \Delta d_{n2} = \Delta d_{n3}$

[0164] 这将使得式(4-8)的计算结果发生变化,需要进行解耦。其方法是先由式(4-7)计算出 F_z ,然后将 F_z 引起的位移变化计算出来并代入式(4-8)提前消去,具体过程为

[0165]
$$\begin{aligned} M_x &= -\frac{1}{3rK_{M_x}} \left[\Delta d_{n1} - \frac{1}{3}(\Delta d_{n1} + \Delta d_{n2} + \Delta d_{n3}) \right] \\ &+ \frac{1}{3r \sin \frac{\pi}{6} K_{M_x}} \left[\Delta d_{n2} - \frac{1}{3}(\Delta d_{n1} + \Delta d_{n2} + \Delta d_{n3}) \right] \\ &+ \frac{1}{3r \sin \frac{\pi}{6} K_{M_x}} \left[\Delta d_{n3} - \frac{1}{3}(\Delta d_{n1} + \Delta d_{n2} + \Delta d_{n3}) \right] \\ &= -\frac{2}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n3} \#(4-9) \end{aligned}$$

[0166] 此外, F_x 、 F_y 、 M_z 均不会引起 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 发生变化,因此均不存在耦合。式(4-9)即为 M_x 的解耦式。

[0167] 3) 求解 M_y

[0168] 由力学模型可知:

$$[0169] \quad \frac{\Delta d_{n2}}{r \cos \frac{\pi}{6}} = -\frac{\Delta d_{n3}}{r \cos \frac{\pi}{6}} = K_{M_y} M_y$$

[0170] 进而有

$$[0171] \quad M_y = \frac{1}{2r \cos \frac{\pi}{6} K_{M_y}} \Delta d_{n2} - \frac{1}{2r \cos \frac{\pi}{6} K_{M_y}} \Delta d_{n3} \#(4-10)$$

[0172] 考虑力 F_z 引起的耦合问题:当施加 M_y 时,若同时施加 F_z ,由 F_z 引起的 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 满足以下关系

$$[0173] \quad \Delta d_{n1} = \Delta d_{n2} = \Delta d_{n3}$$

[0174] 因此不会使得式(4-10)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0175] 考虑力矩 M_x 引起的耦合问题:当施加 M_y 时,若同时施加 M_x ,由 M_x 引起的 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 满足以下关系

$$[0176] \quad \Delta d_{n1} = -2 \Delta d_{n2} = -2 \Delta d_{n3}$$

[0177] 因此不会使得式(4-10)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0178] 此外, F_x 、 F_y 、 M_z 均不会引起 Δd_{n1} 、 Δd_{n2} 、 Δd_{n3} 发生变化,因此均不存在耦合问题。式(4-10)即为 M_y 的解耦式。

[0179] 4) M_z 求解

[0180] 由力学模型可知:

$$[0181] \quad \frac{\Delta d_{s4}}{r} = \frac{\Delta d_{s5}}{r} = \frac{\Delta d_{s6}}{r} = K_{M_z} M_z$$

[0182] 进而有

$$[0183] \quad M_z = \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s4} + \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s5} + \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s6} \#(4-11)$$

[0184] 考虑力 F_x 引起的耦合问题:当施加 M_z 时,若同时施加 F_x ,由 F_x 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0185] \quad \Delta d_{s6} = -2 \Delta d_{s4} = -2 \Delta d_{s5}$$

[0186] 因此不会使得式(4-11)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0187] 考虑力 F_y 引起的耦合问题:当施加 M_z 时,若同时施加 F_y ,由 F_y 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0188] \quad \Delta d_{s4} = -\Delta d_{s5}$$

$$[0189] \quad \Delta d_{s6} = 0$$

[0190] 因此不会使得式(4-11)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0191] 考虑力矩 M_x 引起的耦合问题:当施加 M_z 时,若同时施加 M_x ,由 M_x 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0192] \quad \Delta d_{s4} = -\Delta d_{s5}$$

$$[0193] \quad \Delta d_{s6} = 0$$

[0194] 因此不会使得式(4-11)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0195] 考虑力矩 M_y 引起的耦合问题:当施加 M_z 时,若同时施加 M_y ,由 M_y 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0196] \quad \Delta d_{s6} = -2 \Delta d_{s4} = -2 \Delta d_{s5}$$

[0197] 因此不会使得式(4-11)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0198] 此外, F_z 不会引起 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 的变化,因此不存在耦合。式(4-11)即为 M_z 的解耦式。

[0199] 5) F_y 求解

[0200] 由力学模型可知:

$$[0201] \quad \frac{\Delta d_{s4}}{\cos \frac{\pi}{6}} = -\frac{\Delta d_{s5}}{\cos \frac{\pi}{6}} = K_{F_y} F_y$$

[0202] 进而有

$$[0203] \quad F_y = \frac{1}{2 \cos \frac{\pi}{6} K_{F_y}} \Delta d_{s4} - \frac{1}{2 \cos \frac{\pi}{6} K_{F_y}} \Delta d_{s5} \#(4-12)$$

[0204] 考虑力 F_x 引起的耦合问题:当施加 F_y 时,若同时施加 F_x ,由 F_x 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0205] \quad \Delta d_{s6} = -2 \Delta d_{s4} = -2 \Delta d_{s5}$$

[0206] 因此不会使得式(4-12)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0207] 考虑力矩 M_z 引起的耦合问题:当施加 F_y 时,若同时施加 M_z ,由 M_z 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0208] \quad \Delta d_{s6} = \Delta d_{s4} = \Delta d_{s5}$$

[0209] 因此不会使得式(4-12)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0210] 考虑力矩 M_y 引起的耦合问题:当施加 F_y 时,若同时施加 M_y ,由 M_y 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0211] \quad \Delta d_{s6} = -2 \Delta d_{s4} = -2 \Delta d_{s5}$$

[0212] 因此不会使得式(4-12)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0213] 考虑力矩 M_x 引起的耦合问题:当施加 F_y 时,若同时施加 M_x ,由 M_x 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0214] \quad \Delta d_{s4} = -\Delta d_{s5}$$

$$[0215] \quad \Delta d_{s6} = 0$$

[0216] 这将使得式(4-12)的计算结果发生变化,需要进行解耦。记静极板与动极板的质心间距为 D ,则单独施加 M_x 时有以下关系成立

$$[0217] \quad \Delta d_{s4} = -\Delta d_{s5} = D \Delta r_{M_x} = D K_{M_x} M_x$$

[0218] 记 $K'_{M_x} = D K_{M_x}$,则有

$$\begin{aligned} \Delta d_{s4} &= K'_{M_x} M_x \#(4-13) \\ [0219] \quad \Delta d_{s5} &= -K'_{M_x} M_x \#(4-14) \end{aligned}$$

[0220] 在进行解耦时,先由式(4-9)计算出 M_x ,再将 M_x 引起的位移变化计算出来并代入式(4-12)提前消去即可,具体过程为

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}} \left[\Delta d_{s4} - K'_{M_x} \left(-\frac{2}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n3} \right) \right] \\ &\quad - \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}} \left[\Delta d_{s5} - K'_{M_x} \left(-\frac{2}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n3} \right) \right] \\ [0221] \quad &= \frac{4K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}} \Delta d_{n1} - \frac{2K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}} \Delta d_{n2} - \frac{2K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}} \Delta d_{n3} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}} \Delta d_{s4} - \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}} \Delta d_{s5} \quad \#(4-15) \end{aligned}$$

[0222] 此外, F_z 不会引起 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 的变化,因此不存在耦合。式(4-15)即为 F_y 的解耦式。

[0223] 6) F_x 求解

[0224] 由力学模型可知:

$$[0225] \quad \frac{\Delta d_{s4}}{\sin \frac{\pi}{6}} = \frac{\Delta d_{s5}}{\sin \frac{\pi}{6}} = -\Delta d_{s6} = K_{F_x} F_x$$

[0226] 进而有

$$[0227] \quad F_x = \frac{1}{3 \sin \frac{\pi}{6} K_{F_x}} \Delta d_{s4} + \frac{1}{3 \sin \frac{\pi}{6} K_{F_x}} \Delta d_{s5} - \frac{1}{3K_{F_x}} \Delta d_{s6} \#(4-16)$$

[0228] 考虑力 F_y 引起的耦合问题:当施加 F_x 时,若同时施加 F_y ,由 F_y 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0229] \quad \Delta d_{s4} = -\Delta d_{s5}$$

$$[0230] \quad \Delta d_{s6} = 0$$

[0231] 因此不会使得式(4-16)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0232] 考虑力矩 M_z 引起的耦合问题:当施加 F_x 时,若同时施加 M_z ,由 M_z 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0233] \quad \Delta d_{s6} = \Delta d_{s4} = \Delta d_{s5}$$

[0234] 这将使得式(4-16)的计算结果发生变化,需要进行解耦。其方法是先由式(4-11)计算出 M_z ,然后将 M_z 引起的位移变化计算出来并代入式(4-16)提前消去,具体过程为

$$\begin{aligned}
F_x &= \frac{2}{3K_{F_x}} \left[\Delta d_{s4} - \frac{1}{3} (\Delta d_{s4} + \Delta d_{s5} + \Delta d_{s6}) \right] \\
&\quad + \frac{2}{3K_{F_x}} \left[\Delta d_{s5} - \frac{1}{3} (\Delta d_{s4} + \Delta d_{s5} + \Delta d_{s6}) \right] \\
&\quad - \frac{1}{3K_{F_x}} \left[\Delta d_{s6} - \frac{1}{3} (\Delta d_{s4} + \Delta d_{s5} + \Delta d_{s6}) \right] \\
&= \frac{1}{3K_{F_x}} \Delta d_{s4} + \frac{1}{3K_{F_x}} \Delta d_{s5} - \frac{2}{3K_{F_x}} \Delta d_{s6} \#(4-17)
\end{aligned}$$

[0236] 考虑力矩 M_x 引起的耦合问题:当施加 F_x 时,若同时施加 M_x ,由 M_x 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0237] \quad \Delta d_{s4} = -\Delta d_{s5}$$

$$[0238] \quad \Delta d_{s6} = 0$$

[0239] 因此不会使得式(4-17)的计算结果发生变化,也即不存在耦合。

[0240] 考虑力矩 M_y 引起的耦合问题:当施加 F_y 时,若同时施加 M_y ,由 M_y 引起的 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 满足以下关系

$$[0241] \quad \Delta d_{s6} = -2\Delta d_{s4} = -2\Delta d_{s5}$$

[0242] 这也将使得式(4-17)的计算结果发生变化,需要进行解耦。单独施加 M_y 时有以下关系成立

$$[0243] \quad 2\Delta d_{s4} = 2\Delta d_{s5} = -\Delta d_{s6} = D\Delta r_{M_y} = DK_{M_y}M_y$$

$$[0244] \quad \text{记 } K'_{M_y} = DK_{M_y}, \text{ 则有}$$

$$\Delta d_{s4} = \frac{1}{2}K'_{M_y}M_y \#(4-18)$$

$$[0245] \quad \Delta d_{s5} = \frac{1}{2}K'_{M_y}M_y \#(4-19)$$

$$\Delta d_{s6} = -K'_{M_y}M_y \#(4-20)$$

[0246] 在进行解耦时,先由式(4-10)计算出 M_x 和 M_y ,再将 M_y 引起的位移变化计算出来并代入式(4-17)提前消去即可,具体过程为

$$\begin{aligned}
F_x = & \frac{1}{3K_{F_x}} \left[\Delta d_{s4} - \frac{1}{2} K'_{M_y} \left(\frac{1}{\sqrt{3}rK_{M_y}} \Delta d_{n2} - \frac{1}{\sqrt{3}rK_{M_y}} \Delta d_{n3} \right) \right] \\
& + \frac{1}{3K_{F_x}} \left[\Delta d_{s5} - \frac{1}{2} K'_{M_y} \left(\frac{1}{\sqrt{3}rK_{M_y}} \Delta d_{n2} - \frac{1}{\sqrt{3}rK_{M_y}} \Delta d_{n3} \right) \right] \\
& - \frac{2}{3K_{F_x}} \left[\Delta d_{s6} + K'_{M_y} \left(\frac{1}{\sqrt{3}rK_{M_y}} \Delta d_{n2} - \frac{1}{\sqrt{3}rK_{M_y}} \Delta d_{n3} \right) \right] \\
= & - \frac{K'_{M_y}}{\sqrt{3}rK_{F_x}K_{M_y}} \Delta d_{n2} + \frac{K'_{M_y}}{\sqrt{3}rK_{F_x}K_{M_y}} \Delta d_{n3} \\
& + \frac{1}{3K_{F_x}} \Delta d_{s4} + \frac{1}{3K_{F_x}} \Delta d_{s5} - \frac{2}{3K_{F_x}} \Delta d_{s6} \quad \#(4-21)
\end{aligned}$$

[0248] 此外, F_z 不会引起 Δd_{s4} 、 Δd_{s5} 、 Δd_{s6} 的变化, 因此不存在耦合。式 (4-21) 即为 F_y 的解耦式。

[0249] 综合以上, 将六维力的解耦算法总结如下:

$$\begin{aligned}
F_x = & - \frac{K'_{M_y}}{\sqrt{3}rK_{F_x}K_{M_y}} \Delta d_{n2} + \frac{K'_{M_y}}{\sqrt{3}rK_{F_x}K_{M_y}} \Delta d_{n3} + \frac{1}{3K_{F_x}} \Delta d_{s4} + \frac{1}{3K_{F_x}} \Delta d_{s5} \\
& - \frac{2}{3K_{F_x}} \Delta d_{s6} \\
F_y = & \frac{4K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}} \Delta d_{n1} - \frac{2K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}} \Delta d_{n2} - \frac{2K'_{M_x}}{3\sqrt{3}rK_{F_y}K_{M_x}} \Delta d_{n3} \\
& + \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}} \Delta d_{s4} - \frac{1}{\sqrt{3}K_{F_y}} \Delta d_{s5} \\
F_z = & \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3K_{F_z}} \Delta d_{n3} \\
M_x = & - \frac{2}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n1} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n2} + \frac{1}{3rK_{M_x}} \Delta d_{n3} \\
M_y = & \frac{1}{\sqrt{3}rK_{M_y}} \Delta d_{n2} - \frac{1}{\sqrt{3}rK_{M_y}} \Delta d_{n3} \\
M_z = & \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s4} + \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s5} + \frac{1}{3rK_{M_z}} \Delta d_{s6}
\end{aligned}$$

[0251] 也可以将其表达为以下形式

[0252] $F/T = \text{Calib} * \Delta d \# (4-22)$

[0253] 在实际使用时,可以通过标定的方法得到解耦矩阵中的参数。从电容变化量可计算得到 Δd ,在使用式 (4-22) 可实现六维力的解耦。

[0254] 示例

[0255] 如图1至图6所示,传感器包括顶盖1、三T型梁式弹性体2、上电极板3、下电极板4、底座5。顶盖1与三T型梁式弹性体2之间通过螺丝固定、三T型梁式弹性体2与上电极板3之间通过定位块定位并通过螺丝固定、三T型梁式弹性体2与下电极板4之间通过销钉定位、下电极板4与底座5之间通过凹槽定位、三T型梁式弹性体2与底座5之间通过螺丝固定。

[0256] 如图1至图6所示,选用SUS304不锈钢作为顶盖1、上电极板3、底座5的加工材料,使用机械加工的方法进行加工。选用A212铝合金作为三T型梁式弹性体的加工材料,使用机械加工的方法进行加工。选用FR-4板材作为下电极板4的加工板材制作PCB。

[0257] 如图1所示,顶盖1的总体直径为15mm,厚度为1mm;

[0258] 如图2所示,三T型梁式弹性体2的总体直径为15mm,厚度为4mm;

[0259] 如图4所示,下电极板4的总体直径为13.8mm,厚度为2mm,下电极板中水平布置的电容电极采用开窗工艺加工而成,垂直布置的电容电极使用50nm铜贴纸粘贴于侧壁加工而成;

[0260] 如图5所示,底座5的总体直径为15mm,厚度为5mm。

[0261] 以上内容是结合具体/优选的实施方式对本发明所作的进一步详细说明,不能认定本发明的具体实施只局限于这些说明。对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,其还可以对这些已描述的实施方式做出若干替代或变型,而这些替代或变型方式都应当视为属于本发明的保护范围。在本说明书的描述中,参考术语“一种实施例”、“一些实施例”、“优选实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必须针对的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。尽管已经详细描述了本发明的实施例及其优点,但应当理解,在不脱离专利申请的专利保护范围的情况下,可以在本文中进行各种改变、替换和变更。

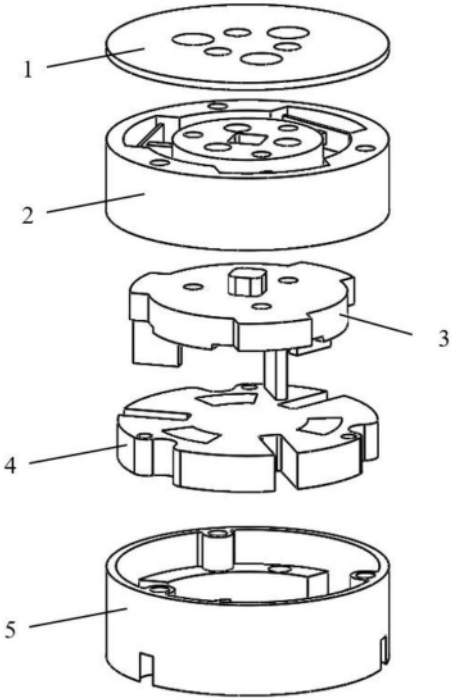


图1

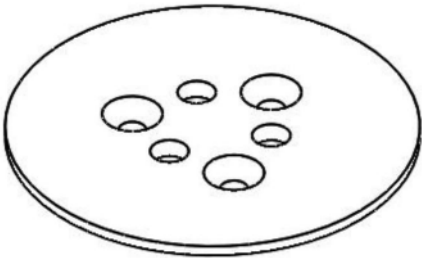


图2

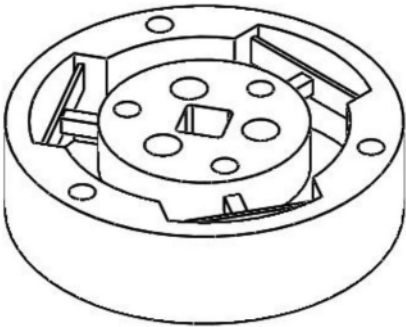


图3

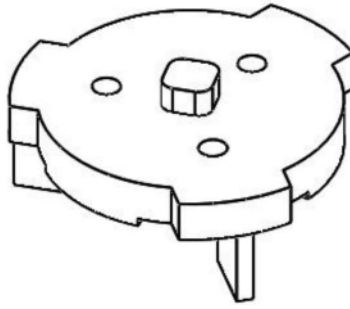


图4

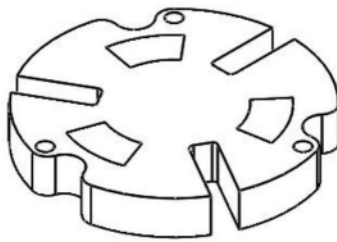


图5

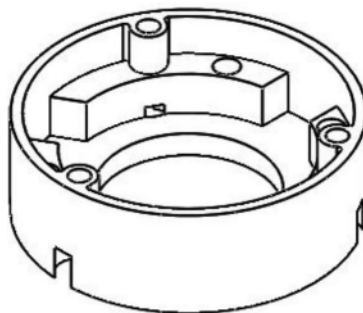


图6

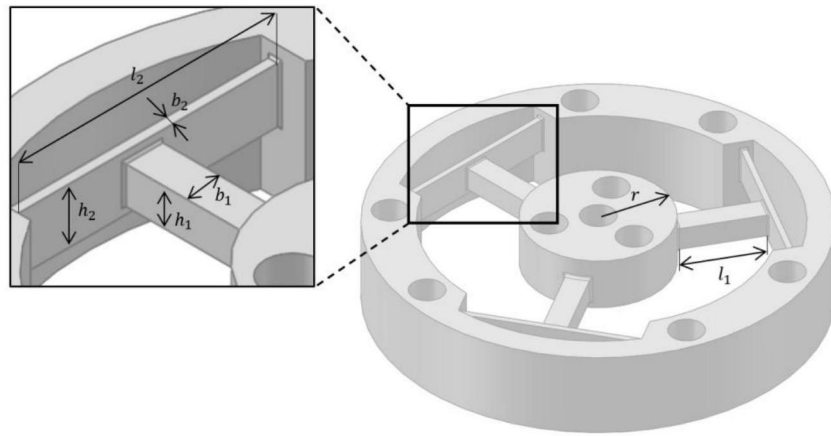


图7

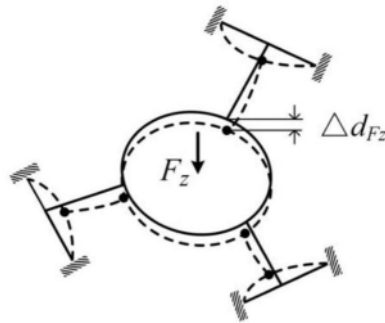


图8

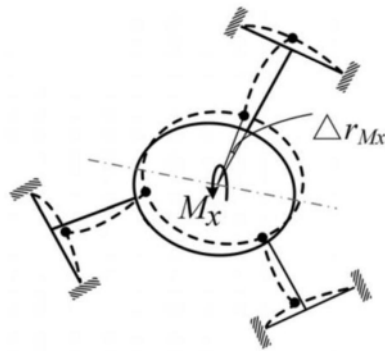


图9

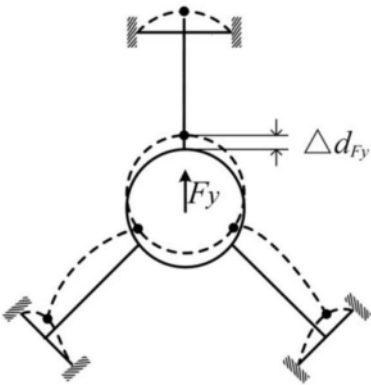


图10

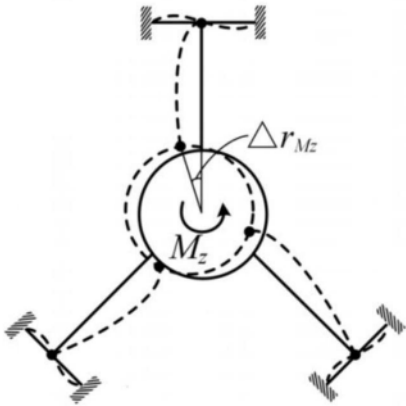


图11

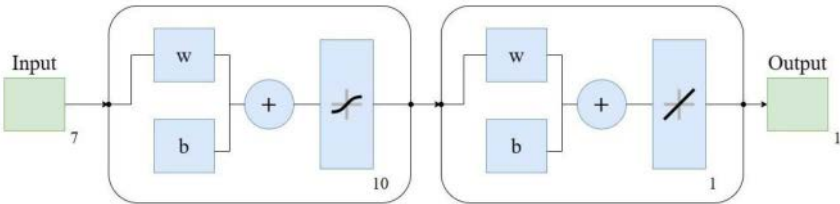


图12

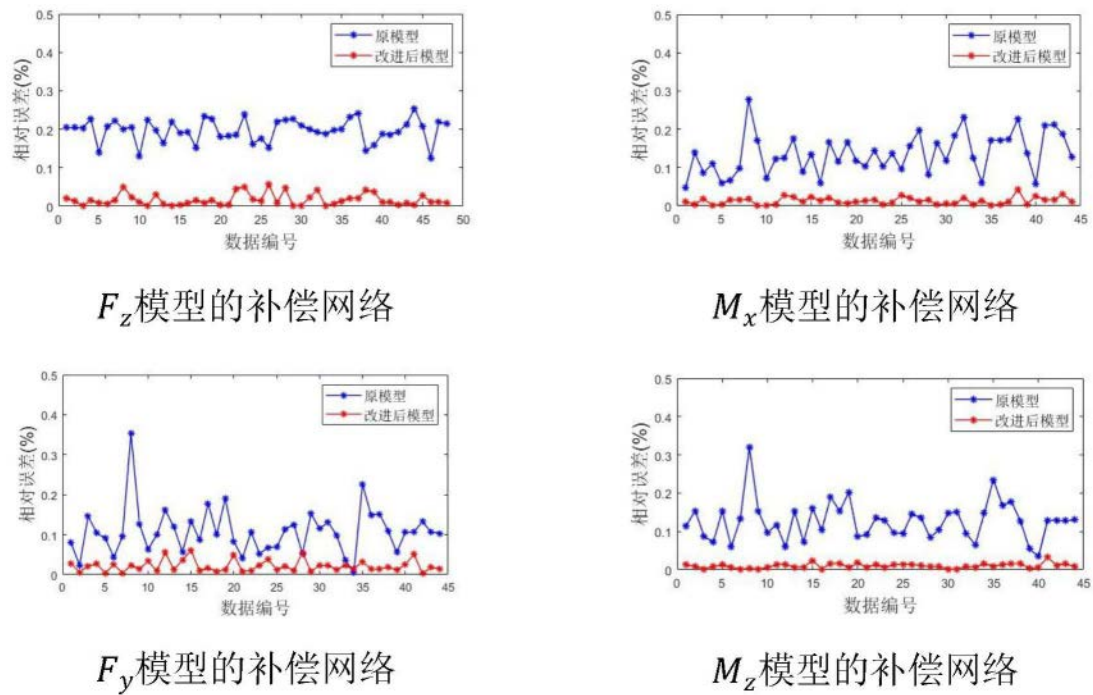


图13

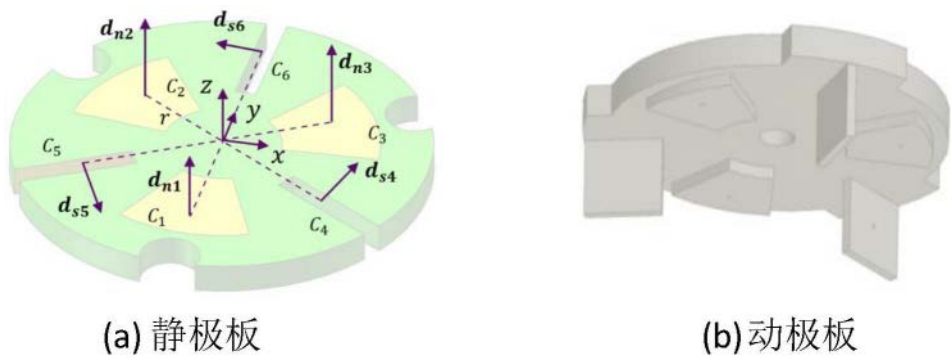


图14