

Design of a Micro Six-Axis Force Sensor Based on Double Layer E-Type Membrane*

YANG Wei-chao^{1,2}, YU Yong³, DENG Xiao-hong^{1,2}, GE Yun-jian^{1*}, GE Yu¹

- | |
|---|
| 1. Institute of Intelligent Machines Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; |
| 2. Dept. of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; |
| 3. Dept. of Mechanical Engineering Kagoshima University, Kagoshima 890-0065, Japan |

Abstract: The elastic body structure of Six-axis force sensor based on the double layer E-type membrane was used in the normal situation maturely. The possibility of the same elastic body structure used in the micro-operation is discussed. The working principle of the sensor structure is introduced firstly, and the static and dynamic characteristic of the elastic body is obtained by finite element analysis. The results demonstrate that six-axis force sensor with this kind of structure can be used in micro-operation and the sensor has high sensitivities in each axis and high linearity. The static couple is negligible.

Key words: six-axis force sensor; double layer E-type membrane; finite elements method; elastic body
EEACC: 7230; 0290T

一种基于双 E 型膜片的微小六维力传感器的设计*

杨卫超^{1,2}, 余永³, 邓小红^{1,2}, 葛运建^{1*}, 戈瑜¹

- | |
|---------------------------------|
| 1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031; |
| 2. 中国科技大学自动化系, 合肥 230027; |
| 3. 日本鹿儿岛大学机械工程系, 日本鹿儿岛 890-0065 |

摘要: 基于双 E 型膜片结构的六维力传感器用于常规环境下的机器人操作已有成熟应用, 探讨将该结构应用于微纳环境下的机器人操作的可能性。首先介绍了该弹性体结构的测力原理, 并用有限元分析软件对弹性体的静态和动态特性进行了仿真。结果表明此种结构的六维力传感器可在微纳环境下测力, 并具有各向灵敏度高、线形好、维间耦合小等优点。

关键词: 六维力传感器; 双 E 型膜片; 有限元法; 弹性体

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)07-1137-06

六维力传感器是智能机器人最重要的传感器之一, 自世纪 70 年代问世以来, 一直是机器人学术界研究的热点之一^[1-4], 至今, 随着机器人应用的不断广泛, 对机器人六维力传感器的研究仍在不断深入^[2-3]。

为了满足国家自然科学基金重点项目“纳米环境中机器人化操作的理论体系与实现方法”中对机器人力操作控制的要求, 研制一种能在微纳环境中测多维力的传感器的需求也被提上了日程。

中科院合肥智能机械研究所 1987 年研制成功

了国内第一台六维力传感器^[4], 并形成批量生产能力, 广泛应用于国内多家实际应用单位, 反应良好。虽然用于微纳环境下的六维力传感器的功能和用于常规环境下的六维腕力传感器基本相同, 但由于在微纳环境下的传感器要进行微小量的测量, 所以二者在基本结构和制作工艺等方面可能有一些本质区别。本文拟将中科院合肥智能机械研究所研制的基于双 E 型膜片结构的六维力传感器结构推广应用于微纳环境下的机器人六维力传感器, 探讨并解决在推广应用中可能出现的问题, 为实际实现可应用

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助 (60635040)

收稿日期: 2007-10-22 **修改日期:** 2007-12-12

于微纳环境下的六维力传感器奠定基础。

六维腕力传感器的结构是否能用在微纳环境下,必须对弹性体结构有足够的了解。弹性体结构的静态和动态特性,对于确定弹性体尺寸及其优化尤为重要。而对于此处力传感器推广的可能性,有限元分析成为一个必要而有效的计算工具。本文给出基于双 E 型膜片的六维力传感器的弹性体结构各部分的尺寸设计,并运用有限元分析软件 ANSYS Workbench 对该弹性体结构进行了静力和动力学特性的分析。

1 六维力传感器弹性体的结构与原理

传感器弹性体设计与普通机械设计略有不同,对于传感器弹性体来说,除了满足机械强度和刚度的要求以外,还必须保证弹性体上的粘贴电阻应变片部位的应变与弹性体承受的力保持严格的对应关系;同时,为了提高测力传感器测力的灵敏度,还须使粘贴应变片部位达到较高的应变水平。

如图 1 所示,六维力传感器是由上 E 型膜片 1,下 E 型膜片 3 以及连接上下 E 型膜片硬中心的十字梁 2 这三个主要部分组成。在结构上,E 型膜片外法兰和硬中心的厚度要远远大于中间环形膜片的厚度,因此只有中心环形膜片作为敏感弹性区域。中间层的十字梁结构 2 既是双 E 型膜片联接和力传递机构,同时又是获取 M_z 力矩信息的敏感弹性体。这种独立的十字梁结构克服了 z 向力矩信息与其他五维力/力矩信息之间相互干扰的问题,并且保证了在测量 M_z 时比较敏感,而在测量其他方向的力/力矩信息时保持较大的刚度。通过改变十字梁机构的结构尺寸,容易实现灵敏度的调整,并且有较大的调整空间和灵活性。传感器的安装形式是下 E 型膜片通过法兰和基座相联,上 E 型膜片通过法兰与产生力/力矩的被测物相联。

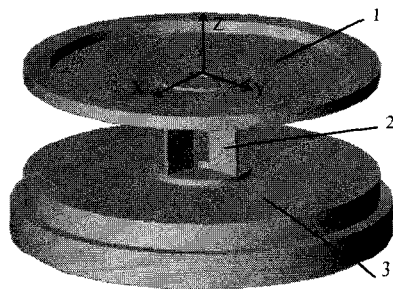


图 1 弹性体结构图

在上下两层 E 型膜片的环形敏感区域贴片,上下两层膜片贴片的形式一致,且所贴的应变片方向保持平行。分别沿着 X 轴、Y 轴以及与 X 轴成 45°

方向上对称粘贴四个应变片。 M_z 向的贴片如图 2 (d)所示,所贴的四个应变片靠近十字梁的端点。

当传感器受到力/力矩时,引起某向的膜片的变形和应变同其他向不同,图 2 显示了在不同的力/力矩下,传感器结构体的不同的变形和应变,其中符号 T 表示受到拉应力,C 表示受到压应力。

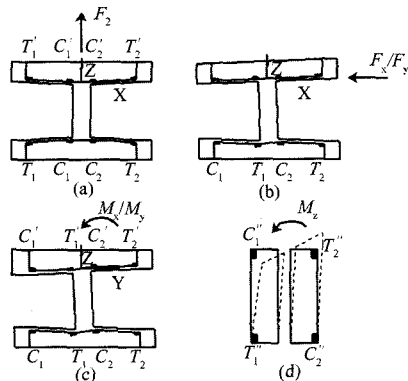


图 2 膜片变形、应变与受力关系

下层的沿着 X 轴的一组应变片测量 F_x 的值,下层的沿着 Y 轴的一组应变片测量 F_y 的值,见图 2 (b);上层的沿着 X 轴的一组应变片测量 M_y 的值,上层的沿着 Y 轴的一组应变片测量 M_x 的值,见图 2(c);上下两层的与 X 轴成 45° 的一组应变片测量的都是 F_z 的值图 2(a),可以提供 F_z 路的一组冗余信息;贴在十字梁上的一组四个应变片测量 M_z 的值,见图 2(d),十字梁最多可以贴四组应变片,提供三组冗余的 M_z 路信号。这些冗余信息主要用于传感器的校准和补偿,在特殊情况下(如贴片缺陷),冗余的信号路可以作为输出,增加了该路可靠性。

每个桥路的平均应变能通过下式来计算:

$$S_x = (\epsilon_{T1} - \epsilon_{C1} + \epsilon_{T2} - \epsilon_{C2}) / 4 \quad (1)$$

其中 ϵ_{T1} 和 ϵ_{T2} 为受拉应力的应变片 T_1 和 T_2 的应变, ϵ_{C1} 和 ϵ_{C2} 为受压应力的应变片 C_1 和 C_2 的应变。

六组应变片按图 3 方式组成六组惠斯通电桥。在外加电压的作用下,当电桥的应变片电阻由于膜片的变形而发生变化时,六组全桥的输出电压会相应发生改变,且电压的变化与输入的力/力矩成线性关系,通过测量电桥的输出电压即可得到力/力矩信息。

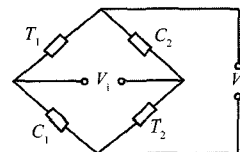


图 3 四个应变片的组桥关系

当受到 Z 向力 F_z 作用时,上下 E 型膜片都可以等效为外圆周固定,集中力作用在硬中心的圆形薄板。根据板的小挠度变形理论,由虚功原理可得

到膜片的法向位移为^[2]:

$$\omega_r = \frac{3F(1-\mu^2)r_i^2}{4\pi E h^2} [R^2(2\ln R - B - 1) + 2B\ln R + B + 1] \quad (2)$$

$$R = \frac{r}{r_o}; B = \frac{-2K\ln K}{1-K^2}; K = \frac{r_o}{r_i}$$

式中 r_o 为圆膜片外径, r_i 为圆膜片内径, h 为膜片厚度, F 为垂直于膜片的 Z 向力。那么膜片表面的应变为:

$$\epsilon_r = -\frac{h}{2} \frac{d^2\omega}{dr^2} = -\frac{3F(1-\mu^2)}{4\pi E h^2} [2\ln R - B - \frac{B}{R^2} + 2] \quad (3)$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{h}{2} \frac{d\omega}{dr} = -\frac{3F(1-\mu^2)}{4\pi E h^2} [2\ln R - B + \frac{B}{R^2}] \quad (4)$$

那么可以得到 Z 向灵敏度为

$$S_z/F = -\frac{3(1-\mu^2)}{4\pi E h^2} [\ln R_i + \ln R_o - B - (\frac{B}{R_i^2} + \frac{B}{R_o^2})/2 + 2] = \frac{3(1-\mu^2)}{4\pi E h^2} (\ln 3 + 6B - 2) \quad (5)$$

其中: $R_i = r_i/r_o = 1/3; R_o = r_o/r_o = 1$

弹性体结构在每个方向的固有频率求解, 可以简化为单自由度二阶系统问题。在 Z 轴方向上, 有 Z 轴向固有频率:

$$\omega_z = \sqrt{\frac{K_z}{m}} \quad (6)$$

式中, K_z 为弹性体 Z 轴向刚度, 与 E 和膜片结构有关, 与灵敏度为倒数关系; m 为弹性体中可动部分的总质量, 主要为法兰的质量。

在其他受力方向上膜片的应力分布比较复杂, 力学模型的建立与求解困难。在进行动态分析, 简化为质量-弹簧系统时, 误差也较大, 而采用有限元分析可以有效的解决这些问题。

双 E 型膜片的结构及其工作原理如上面所述, 把该结构扩展来进行微力测量时, 传感器的体积和尺寸相应的会缩小, 但是由于机械加工以及贴片的限制, 传感器的结构及其量程不能无限的缩小, 在允许情况下, 设计传感器的尺寸如表 1 所示, 该尺寸是否能满足传感器的设计需要, 可以通过有限元分析来判断。

表 1 弹性体的主要几何尺寸 单位(mm)

弹性体部分	外径	内径	长	宽	厚
上下膜片	24	8	—	—	0.1
十字梁	—	—	6	3	0.3

2 六维力传感器弹性体的有限元分析

采用 ANSYS Workbench 来对弹性体进行有限元分析, ANSYS Workbench 是用 ANSYS 求解

实际问题的新一代产品, 它给 ANSYS 的求解提供了强大的功能^[5]。这种环境为 CAD 系统和使用者设计提供了全新的平台, 保证了最好的 CAE 结果。AWE(ANSYS Workbench Environment)环境能直接读入各种 CAD 软件的零件模型, 并在其统一环境中实现任意模型装配和 CAE 分析。

用 ANSYS Workbench 对结构进行静力学分析和模态分析主要包括以下几个步骤: 创建有限元模型、施加载荷、对模型求解以及后处理等。

2.1 有限元分析模型的建立

弹性体的结构如图 1 所示, 具体的几何尺寸见表 1。对弹性体建模, 首先确定坐标系, 以上膜片的平面为 XY 平面, 圆心为膜片中心 O 。单元的类型采用 ANSYS Workbench 提供的 SOLID187 单元, 这种单元是一个高阶 3 维 10 节点固体结构单元, 每个节点有 3 个沿着 x, y, z 方向平移的自由度。单元支持塑性、超弹性、蠕变、应力刚化、大变形和大应变能力。本文采用智能划分后, 再对设计中感兴趣的部分进行网格的加密细化, 最后得到的有限元模型如图 4 所示, 共有 152 304 个节点, 83 883 个单元。

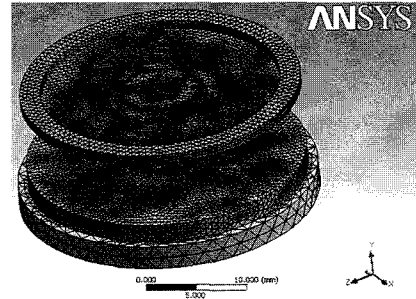


图 4 有限元模型

该弹性体采用硬铝合金(LY12)加工, 其弹性模量 $E=72 \times 10^9$ Pa, 泊松比 $\mu=0.33$, 密度 $\rho=2.78 \times 10^3$ kg/m³。

2.2 施加载荷及约束

(1) 约束设置

传感器工作时, 通过下 E 型膜片法兰上的四个螺纹孔与底座固定, 可以认为法兰与底座是刚性联接, 因此把与底座固定的法兰的盘的端面的自由度设为零。

(2) 施加力/力矩

由于传感器工作时所受的力可以分解为沿着各个坐标轴的力或力矩, 且传感器在受到的最大的力/力矩合作用状态下仍然在传感器的弹性形变范围。考虑到传感器关于 Z 轴对称, 因此静力分析时可以分解为几种典型的受力工况。

① 作用于上膜片法兰表面,沿着 X 轴方向的集中力 F_x (F_y 情况类似);

② 作用于上膜片法兰表面,沿着 Z 轴方向的集中力 F_z ;

③ 作用于上膜片法兰表面,绕 X 轴方向的力矩 M_x (M_y 情况类似);

④ 作用于上膜片法兰表面,绕 Z 轴方向的力矩 M_z ;

2.3 静力分析结果

根据传感器的量程,在传感器的上 E 型膜片的法兰处按照典型的几种工况施加满量程的力/力矩。在 X 向施加 $F_x=0.2\text{ N}$ 的力;在 Z 向施加 $F_z=0.5\text{ N}$;在绕 X 轴向施加力矩 $M_x=0.2\text{ N}\cdot\text{mm}$;绕 Z 轴向施加力矩 $M_z=0.2\text{ N}\cdot\text{mm}$ 。施加力后进行求解,可以得到在不同工况下传感器的位移、应变和应力值等。对于应变式传感器,我们关注的是应变值,故文中给出粘贴应变片的敏感部分的应变值,并加以分析。

1) F_x 向的应变分析

在 F_x 的作用下,弹性体下 E 型膜片的径向应变 ϵ_r 的分布云图如图 5(a) 所示。沿着 X 轴靠近膜片内、外侧处的应变是最大的,在此处贴片可以获得较大的灵敏度。在靠近硬中心两侧的对称位置应变相反,在硬中心单侧的膜片内外径处,其应变方向也相反,且靠近硬中心处的应变比靠近法兰处的应变大。在 X 轴向的应变的最大值为 $-3.215\text{e-}4$,而此时可以看到其他方向的应变值很小(颜色表示为绿色)。故传感器在测量 F_x 时对其他方向的耦合可以忽略。 F_y 与 F_x 的应变情形类似。

2) F_z 向的应变分析

在 F_z 作用下,下 E 型膜片的应变云图如图 5(b) 所示, ϵ_r 的应变沿圆周等值分布。靠近硬中心处的应变仍然比靠近外法兰处的应变大。膜片应变沿着径向有从负到正的变化过程。按照文献 1 中的特殊的组桥方式,可以直接消除 Z 向与 X 、 Y 向的维间耦合^[6]。测量 M_x 、 M_y 的上表面以及测 M_z 中间十字梁为绿色,应变很小,故测 F_z 对弯矩 M 的测量耦合也很小。

为表明有限元分析的有效性,根据公式 3 提供的在 F_z 作用下的径向应变理论公式,可以求得在 $F_z=0.5\text{ N}$ 情况下,膜片靠近硬中心和外法兰处的应变分别为 -4.34×10^{-4} 以及 2.14×10^{-4} ,而有限元法求出的相应位置的应变分别为: -4.012×10^{-4} 和 2.081×10^{-4} 。有限元法与解析法求得的两处的应变值相对误差分别为 7.5% 和 2.7%。而有限元法在

靠近硬中心和法兰边沿处的误差相对是较大的^[7]。这表明有限元法中网格划分密度已经达到了收敛的标准,有限元法在此处的应用是有效的。

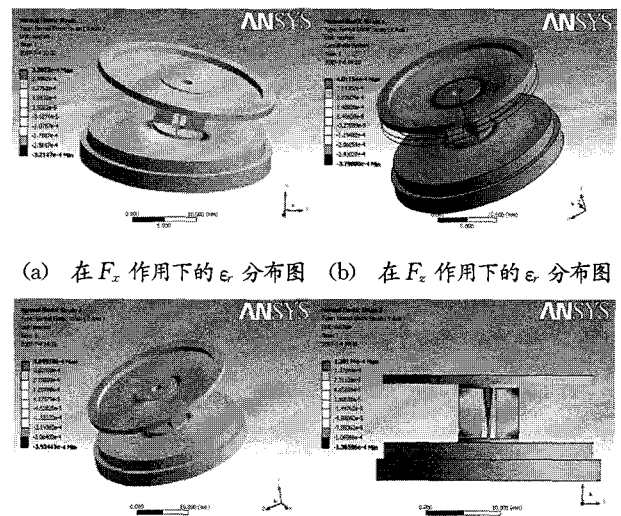
通过有限元分析还可以得到传感器在受大小不同 F_z 作用力时,膜片靠近硬中心和法兰处的径向应变 ϵ_r 和拉力之间的对应关系,如图 6 所示。“+”表示靠近法兰处膜片的应变;“o”表示靠近硬中心处膜片的应变,可以看出传感器的应变与拉力 F 有很好的线性关系,符合传感器设计的基本准则。

3) M_x 向的应变分析

在受到 M_x 力矩作用的情况下,上下膜片都发生变形,上下膜片的沿着 Y 轴的径向应变 ϵ_r 的分布云图如图 5(c) 所示。沿着 Y 轴靠近膜片内、外侧处的应变是最大的,在此处贴片可以获得较大的灵敏度。在靠近硬中心两侧的对称位置应变相反,且靠近硬中心处的应变比靠近法兰处的应变大。通过判断其他方向的颜色可以得到测 M_x 时对其他方向的耦合很小, M_x 对 F_y 的影响可以通过解耦矩阵解掉。 M_y 与 M_x 情形类似。

4) M_z 向的应变分析

在受到 M_z 力矩情况下,十字梁的沿着 Z 向的正应变云图如图 5(d) 所示。可以看出在十字梁的对角线处的应变方向相同,在同一边上的应变方向相反。此时上下膜片应变很小,故 M_z 对其他方向的耦合极小。



(a) 在 F_x 作用下的 ϵ_r 分布图 (b) 在 F_z 作用下的 ϵ_r 分布图

(c) 在 M_x 作用下的 ϵ_r 分布图 (d) 在 M_z 作用下的 ϵ_r 分布图

图 5 各向力作用下的 ϵ_r 分布图

如图 3 所示,测量每个分量力的桥路由四个应变片组成,该分量上的应变及耦合出来的应变能通过以上分析及式 1 来计算得到,表 2 显示了各桥路相应应变及耦合应变的值。从表中可以看出此力传

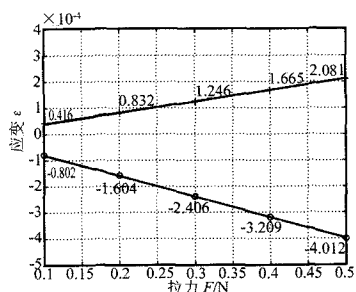


图 6 应变与 F_x 拉力曲线

传感器除了在测量 M_x (M_y) 时对 F_y (F_x) 有耦合, 其他方向上没有耦合。

表 2 各桥路应变及耦合应变值 单位: $\text{mm}/\text{mm} \times 10^{-6}$

桥路	在各力下的应变					
	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
S_{F_x}	321	0	0	0	128	0
S_{F_y}	0	321	0	128	0	0
S_{F_z}	0	0	304	0	0	0
S_{M_x}	0	0	0	269	0	0
S_{M_y}	0	0	0	0	269	0
S_{M_z}	0	0	0	0	0	137

若把传感器的灵敏度定义为某向桥路平均应变值与该向单位长度的力载荷比值, 那么表 3 显示了该传感器各项及耦合灵敏度。其中耦合灵敏度值可以通过解耦矩阵消去。

表 3 有限元分析的传感器灵敏度

向量值	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
	$/\text{mm} \cdot 10^{-6} (\text{mm} \cdot \text{N})^{-1}$			$/\text{mm} \cdot 10^{-6} (\text{mm} \cdot \text{N})^{-1}$		
灵敏度	1605	1605	608	1345	1345	685
	(640) ^a	(640) ^b				

①在 M_y 下的耦合灵敏度

②在 M_x 下的耦合灵敏度

2.4 动力学分析结果

对弹性体的有限元模型进行模态分析时, 其边界约束条件与传感器的工作情况一致, 也即采用静力学分析时的约束, 但模态分析是计算弹性体的固有频率和振型, 因此不施加载荷。在这里只给出传感器的前 6 阶固有频率如表 4 所示。

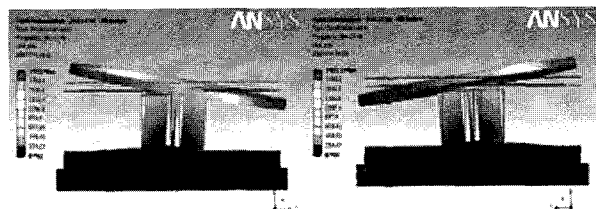
表 4 传感器弹性体的固有频率

阶数	1	2	3	4	5	6
固有频率 /Hz	253.61	254.37	408.77	593.93	712.20	714.12

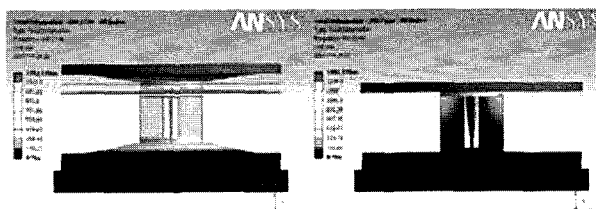
弹性体的振型如下: 第一阶为沿 X 轴的平动; 第二阶为沿 Y 轴的平动; 第三阶为沿 Z 轴的平动; 第四阶为绕 Z 轴的转动; 第五阶为绕 Y 轴的转动; 第六阶为绕 X 轴的转动。由于弹性体结构关于 Z 轴对称, 从表 4 及图 7 可以看出传感器的第一阶与第二阶的固有频率大小约相等, 振型一致。第

五阶与第六阶的固有频率大小约相等, 振型一致。

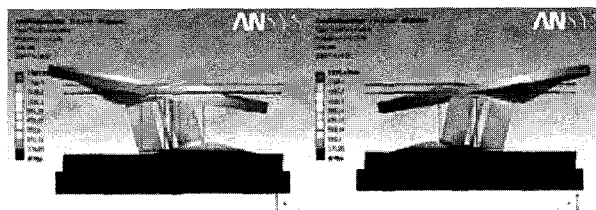
根据弹性体固有频率特性, 可以看出此微型六维力传感器为低通型传感器。传感器的工作带宽一般为第一阶固有频率的 $2/3$ ^[8], 可以估算出该传感器的工作带宽为 0~170 Hz。



(a) 第 1 阶振型 (b) 第 2 阶振型



(c) 第 3 阶振型 (d) 第 4 阶振型



(e) 第 5 阶振型 (f) 第 6 阶振型

图 7 传感器的振型

3 结论

本文探讨一种基于双 E 型膜片十字梁应变式传感器结构用于微力检测的可能性, 使用 ANSYS Workbench 对其弹性体进行了有限元分析和仿真, 其结论如下:

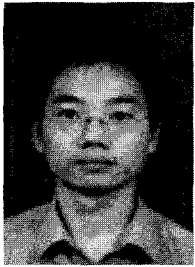
① 静态分析结果表明对于各向力/力矩载荷, 该微型六维力传感器弹性体结构都具有灵敏度高、线形好、维间耦合很小等特点;

② 从模态分析得到了传感器的固有频率和振型, 这可以在传感器弹性体固有频率和灵敏度之间的相互矛盾之中合理的进行优化。

各项性能指标表明: 设计的传感器能满足微纳环境下力的测量应用要求。因此, 本论文的工作能为进一步在微纳环境下, 采用基于双 E 型膜片十字梁应变式传感器研制奠定了基础, 也为使用 ANSYS Workbench 对该类型传感器的弹性体进行分析和仿真提供了一个成功的范例。

参考文献:

- [1] 王国泰,易秀芳等. 六维力传感器发展中的几个问题[J]. 机器人, 1997. 6: 474-478.
- [2] 唐慧强,黄惟一. 智能化腕力传感器的设计[J]. 机器人, 2003. 25:53-56.
- [3] 姚智慧,张付祥. 新型力解耦机器人六维力传感器研究. 哈尔滨工业大学学报. 2004. 36:160-162.
- [4] 葛运建等. 多维力传感器的研究现状[J]. 机器人情报 1993. 2:27-30.
- [5] 小飒工作室. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程[M]. 电子工业出版社. 2004.
- [6] 孙旺强. 基于三维加速度计数字铅球的设计与应用研究[D]. 硕士学位论文,合肥:中国科学院合肥智能机械研究所,2005.
- [7] 孟明,葛运建等. 一种新型多维加速度传感器弹性体设计与仿真分析[J]. 传感技术学报. 2003. 16:379-383.
- [8] 秦刚,曹效英,宋爱国等. 新型四维腕力传感器弹性体的有限元分析[J]. 传感技术学报. 2003. 16:238-241.



杨卫超(1983-),男,中国科学技术大学自动化系硕士生,研究方向:传感器结构设计、信息获取与处理, wcyang@mail.ustc.edu.cn



葛运建(1947-),男,研究员,教授,1982年1月毕业于东北大学计算机专业,1989年11月在法国 INSA(国家应用科学学院)获法国博士学位。中国科技大学博士生导师;国家自然科学基金委员会信息科学部第九、十届专家评审组成员;中国自动化学会机器人专业委员会常务委员。享受国务院颁发的为发展我国科学技术事业做出突出贡献的政府特殊津贴。