

新型六维腕力传感器

茅晨¹ 宋爱国¹ 马俊青¹

摘要

设计了一种新型六维腕力传感器.采用有限单元法对六维腕力传感器的十字梁弹性体进行结构静力学分析,论述了该机械结构的合理性,确定了应变片黏贴的最佳位置,通过合理的应变片电桥的组桥将各维力/力矩信号转化为电压输出.设计放大电路对六维电压信号进行放大,最后通过试验标定装置对此六维腕力传感器进行标定.

关键词

六维腕力传感器;有限单元法;十字梁弹性体;电桥;放大电路

中图分类号 TP242.6

文献标志码 A

0 引言

六维腕力传感器可以感知空间六维力/力矩信息,一般安装在机械手的手腕部,用于检测机械手与外界环境作用力的大小和方向,并且反馈给机器人控制系统实现力控制.因此腕力传感器是智能机器人力觉控制系统中最重要的传感器之一^[1].

本文设计了一种新型十字梁弹性体结构的六维腕力传感器,该六维腕力传感器能够同时检测三维空间坐标 x, y, z 中的 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 六维力/力矩信息.本文主要介绍了六维腕力传感器的机械结构设计、弹性体有限元分析以及标定电路的设计.

1 机械结构的设计

根据弹性体应变梁的分布情况可将腕力传感器分为横梁结构和竖梁结构2种.本文所设计的六维腕力传感器采用的是横梁结构,其安装总体结构如图1所示.该六维腕力传感器的机械结构共由5个部分组成:弹性体、底座、基座、顶盖和标定轴.

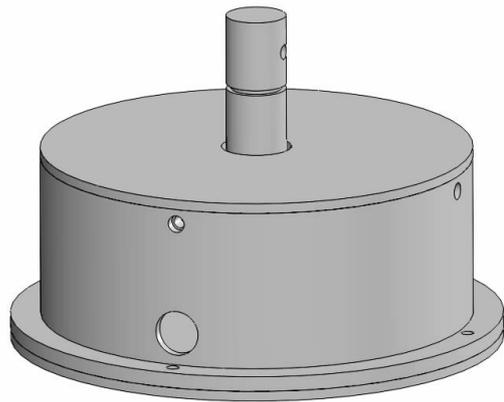


图1 总体结构

Fig.1 Overall structure of 6-axis wrist force sensor

收稿日期 2011-08-25

资助项目 中国空间技术研究院(CAST)科研基金(2009-12)

作者简介

茅晨,女,硕士生,主要研究方向为多维力传感器技术. maochencom@163.com

宋爱国(通信作者)男,博士后,主要从事测控技术和智能仪器等方面的研究和教学工作. a.g.song@seu.edu.cn

六维腕力传感器的弹性体的结构设计是影响传感器性能的关键性技术^[2].本文所设计的六维腕力传感器的敏感元件采用的是整体轮辐式十字梁结构的弹性体,其机械结构如图2所示.

十字交叉梁分为4个正方棱柱形主梁,每个主梁和轮缘的联结处

¹ 东南大学 仪器科学与工程学院,南京,210096

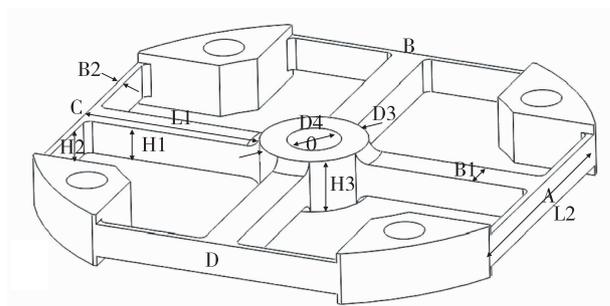


图2 弹性体结构

Fig. 2 Structure of elastic body

是一个薄板状的浮动梁. 三维空间坐标 x, y, z 中的 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 六维力/力矩信息通过与弹性体中心孔过盈配合的标定轴传递给弹性梁, 实现力/力矩信息的测量.

2 有限元分析

因为多维腕力传感器中弹性体的结构设计和应变片贴片是关系到整个传感器性能的关键技术, 因此要对弹性体进行力学分析, 确定其结构尺寸以及应变片的黏贴位置. 本文采用有限元分析 ANSYS 软件对十字梁结构的弹性体进行有限元分析.

2.1 有限元分析模型的建立

六维腕力传感器的十字梁结构弹性体是作为整体用铝合金一次加工成型的, 刚度好、灵敏度高, 其结构尺寸如表 1 所示, 弹性体的加工材料硬铝合金 LY12 的参数如表 2 所示.

表 1 弹性体主要结构参数

Table 1 Structure parameters of elastic body mm

结构单元	长度	宽度	高度	直径
十字弹性梁	27(L1)	5(B1)	5(H1)	
浮动梁	36(L2)	1(B2)	5(H2)	
中心台			8(H3)	16(D3)
中心孔			8(H3)	8(D4)
轮缘			8	82(外径)60(内径)
轮缘螺孔			8	6

表 2 LY12 材料参数

Table 2 Parameters of LY12

牌号	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
LY12	72	0.33	2.78×10^3

在利用 ANSYS 进行建模时, 采用软件自带的自

顶向下的实体建模方法, 这种建模方式适合于复杂模型, 更利于网格精度划分的控制^[3]. 结构分析单元采用 3D 实体单元 SOLID95, 该单元有 20 个节点, 每个节点有 3 个自由度, 适合边界为曲线的模型.

在有限元分析中, 需将实体单元进行网络划分得到有限元模型. 本文采用设置单元尺寸、自由网格划分的方式对十字梁结构弹性体进行网格划分, 得到的有限元模型如图 3 所示, 共有 130 839 个节点, 82 188 个单元.

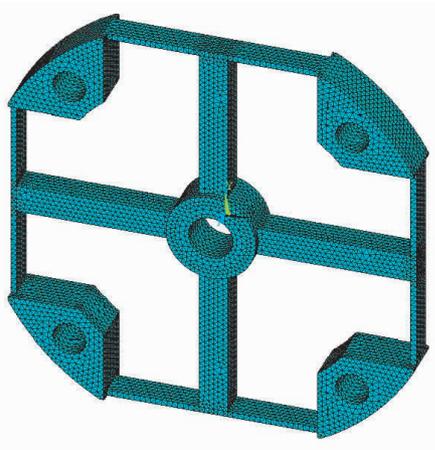


图 3 十字梁弹性体有限元模型

Fig. 3 The FEM mode of crossbeam elastic body

2.2 施加载荷及求解

弹性体是通过轮缘上的 4 个螺钉固定在传感器基座上的, 它们之间可以认为是刚性连接, 因此, 将这 4 个螺孔的自由度全部设为零.

为了尽量真实地反映六维腕力传感器的受力情况, 在施加载荷时将中心孔的内壁和中心台上下表面作为受力面^[4]. 在受到 x, y 轴方向的力时, 将载荷转化为点载荷, 均匀分布在中心孔的内壁; 在受到 z 轴方向的力时, 对中心台上表面施加均布面载荷; 在受到 x, y, z 轴方向的力矩时, 在中心台上表面选择一对大小相等、方向相反、距离一定的力代替力矩. 三维力的满量程为 100 N, 三维力矩的满量程为 10 N · m. 由于十字梁弹性体的结构是关于坐标轴对称的, 因此本文只对 x, z 轴向的力和力矩进行分析.

通过求解, 得到十字梁弹性体在受力后的变形情况如图 4 所示.

以分析六维腕力传感器受到 x 轴向的作用力为例, 当十字梁弹性体受到单维力 $F_x = 100 \text{ N}$ 的作用时, 弹性梁 OA 和 OC 产生拉压变形, 弹性梁 OB 和

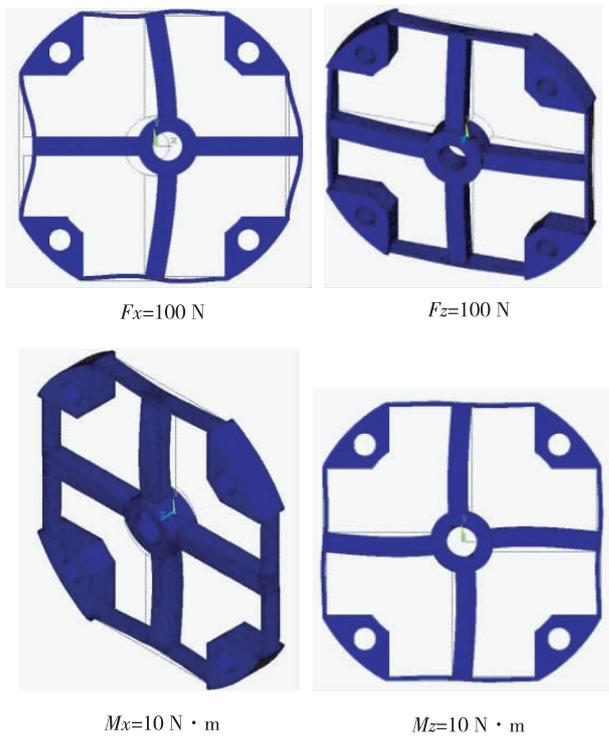


图4 十字梁弹性体变形

Fig. 4 The deformation of crossbeam elastic body

OD 以及 x 向的浮动梁产生弯曲变形,此时浮动梁的弯曲变形远大于主梁的弯曲变形,可认为弹性梁 OA、OC 只传递力而不产生形变,将 x 向的浮动梁看成是理想的柔性梁。

弹性体属于敏感元件,为了获得较高的灵敏度和稳定性,需要选择最佳的贴片位置^[5]。为分析节点距中心台的位置与应变大小的关系,利用 ANSYS 后处理器提供的路径映射技术,选择位于发生弯曲变形的主梁表面沿中心线的位置定义一条路径,得到路径上各节点的应变如图 5 所示。其中横坐标表示路径距中心原点各点的坐标值,单位为 mm,纵坐标为对应点的应变值。

由图 5 可知,对于每种受力情况,在 $0 \sim 27\text{ mm}$ 的路径区间内, $M_x = 10\text{ N}\cdot\text{m}$ 时产生最大应变 $\varepsilon = 2.030 \times 10^{-3}$, $\varepsilon \times E = (2.030 \times 10^{-3}) \times 72\text{ GPa} \approx 146.16\text{ MPa}$,小于硬铝合金的屈服强度 380 MPa ,说明安全。

当力 $F_x = 100\text{ N}$ 作用在十字梁弹性体上时,在弹性梁 OB 靠中心台距离小于 3 mm 处应变趋势是成非线性的;靠中心台距离越近,应变越大。综合考虑稳定性和灵敏度要求,应变片的黏贴位置应选为距中心台边缘 5 mm 处^[6]。

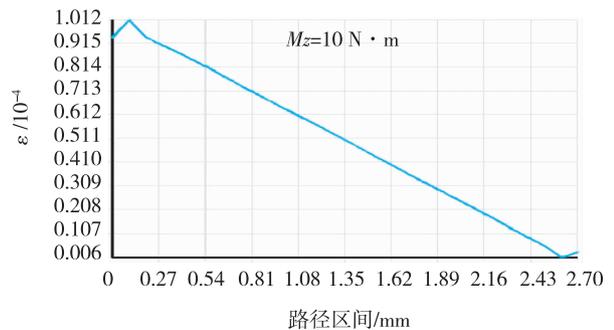
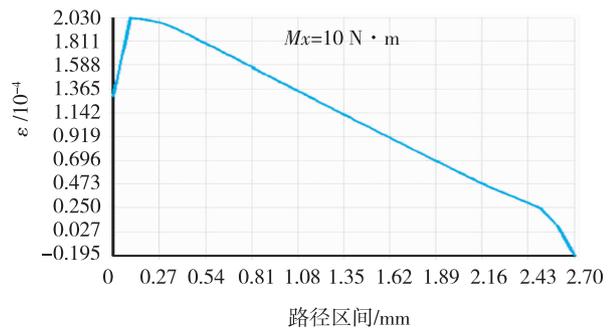
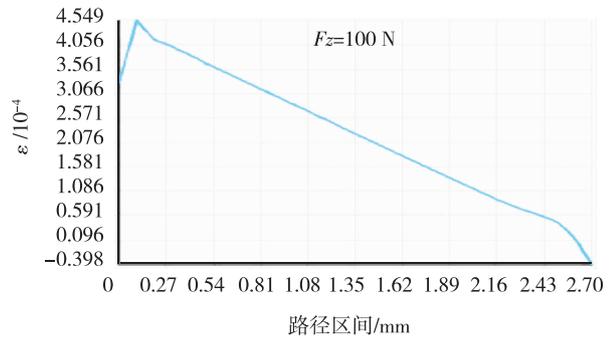
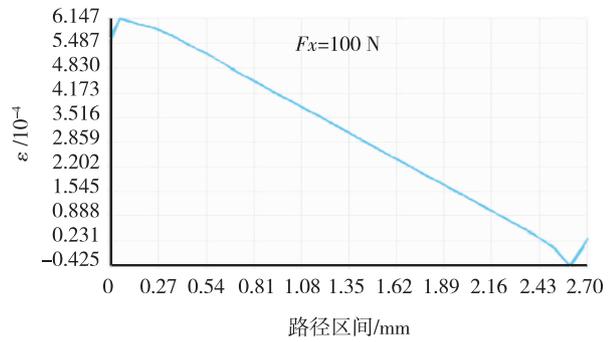


图5 沿路径各节点应变分布趋势

Fig. 5 Strain distribution along path

3 放大电路的设计

3.1 电阻应变电桥的设计及测量原理

上文通过对十字梁弹性体的有限元分析确定了应变片的黏贴位置。六维腕力传感器在其 4 根弹性梁的正反面及 2 个侧面共贴有 24 片应变片,如图 6

所示.

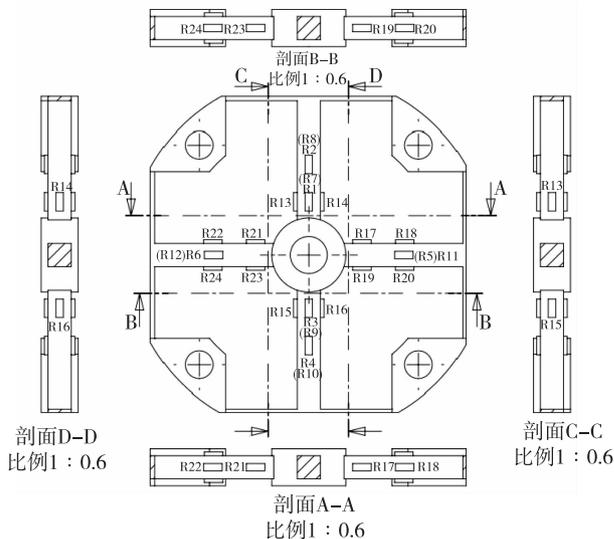


图6 十字梁弹性体应变片分布

Fig. 6 Location of strain gauges in crossbeam elastic body

24片应变片组成6组全桥电路,分别用来测量三维空间坐标 x, y, z 中的 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 六维力/力矩信息,桥路组成如图7所示.

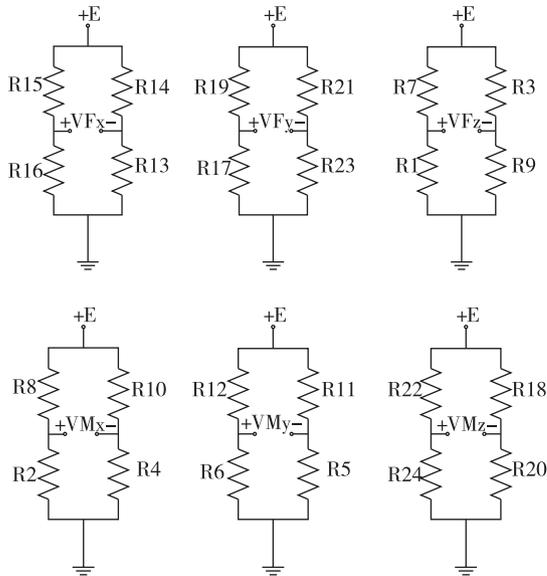


图7 电阻应变电桥

Fig. 7 Hilton bridge circuit

当传感器受到六维力/力矩载荷的作用之后,应变片的零位电阻 R_0 将发生变化. 根据应变片在梁上分布的对称性,在参考坐标系 $OXYZ$ 各坐标轴的正方向上受到作用力之后,可得到如下公式:

$$\begin{aligned} R_{14} &= R_0 + R'_{F_x} - R'_{M_z}; & R_{17} &= R_0 + R'_{F_y} + R'_{M_z}; \\ R_1 &= R_0 + R'_{F_z} + R'_{M_x}; & R_{13} &= R_0 - R'_{F_x} + R'_{M_z}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{19} &= R_0 - R'_{F_y} - R'_{M_z}; & R_7 &= R_0 - R'_{F_z} - R'_{M_x}; \\ R_{16} &= R_0 + R'_{F_x} + R'_{M_z}; & R_{21} &= R_0 + R'_{F_y} - R'_{M_z}; \\ R_3 &= R_0 + R'_{F_z} - R'_{M_x}; & R_{15} &= R_0 - R'_{F_x} - R'_{M_z}; \\ R_{23} &= R_0 - R'_{F_y} + R'_{M_z}; & R_9 &= R_0 - R'_{F_z} + R'_{M_x}; \\ R_2 &= R_0 + R'_{M_x} + R'_{F_z}; & R_6 &= R_0 + R'_{M_y} + R'_{F_z}; \\ R_{18} &= R_0 + R'_{M_z} + R'_{F_y}; & R_4 &= R_0 - R'_{M_x} + R'_{F_z}; \\ R_5 &= R_0 - R'_{M_y} + R'_{F_z}; & R_{20} &= R_0 - R'_{M_z} - R'_{F_y}; \\ R_{10} &= R_0 + R'_{M_x} - R'_{F_z}; & R_{11} &= R_0 + R'_{M_y} - R'_{F_z}; \\ R_{24} &= R_0 + R'_{M_z} - R'_{F_y}; & R_8 &= R_0 - R'_{M_x} - R'_{F_z}; \\ R_{12} &= R_0 - R'_{M_y} - R'_{F_z}; & R_{22} &= R_0 - R'_{M_z} + R'_{F_y}. \end{aligned}$$

式中 $R'_{F_x}, R'_{F_y}, \dots, R'_{M_z}$ 分别表示受 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 方向的力后,应变片阻值 $R_1 \sim R_{24}$ 绝对值的变化.

可以得到三维输出分量的表达式为:

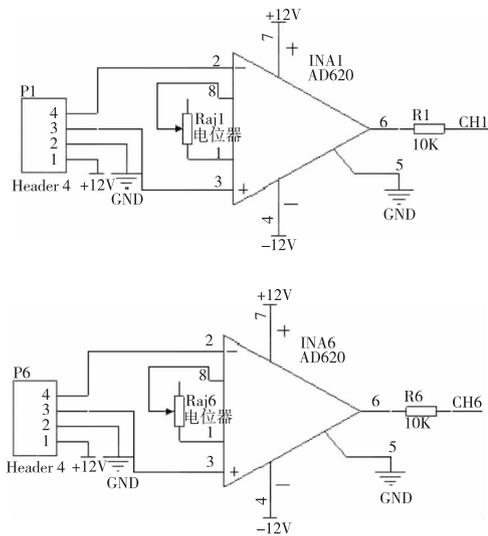
$$\begin{aligned} V_{F_x} &= \frac{R_{16}}{R_{16} + R_{15}} - \frac{R_{13}}{R_{13} + R_{14}} = \frac{R'_{F_x}}{R_0} E, \\ V_{F_y} &= \frac{R_{17}}{R_{17} + R_{19}} - \frac{R_{23}}{R_{23} + R_{21}} = \frac{R'_{F_y}}{R_0} E, \\ V_{F_z} &= \frac{R_1}{R_1 + R_7} - \frac{R_9}{R_9 + R_3} = \frac{R'_{F_z}}{R_0} E, \\ V_{M_x} &= \frac{R_2}{R_2 + R_8} - \frac{R_4}{R_4 + R_{10}} = \frac{R'_{M_x}}{R_0} E, \\ V_{M_y} &= \frac{R_6}{R_6 + R_{12}} - \frac{R_5}{R_5 + R_{11}} = \frac{R'_{M_y}}{R_0} E, \\ V_{M_z} &= \frac{R_{24}}{R_{24} + R_{22}} - \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{18}} = \frac{R'_{M_z}}{R_0} E. \end{aligned}$$

通过合理的组桥,将6维力/力矩信号转化为电压输出.

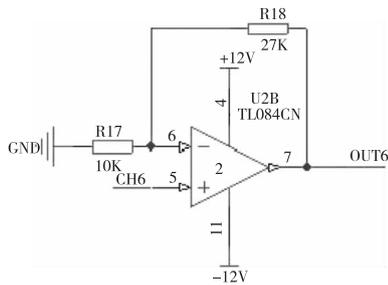
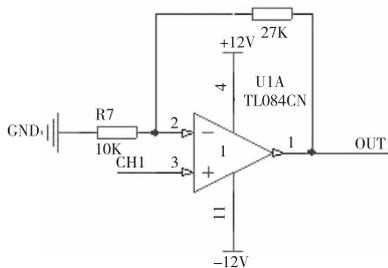
3.2 放大电路的设计

各维电桥输出的电压值范围在 $-14 \sim 14$ mV,需经过电路放大100倍进行A/D转换. 由于放大倍数较大,为保证信号不失真,防止信号受到噪声干扰,采用2级放大方式^[7],且第1级的放大倍数不能过大. 本文中第1级放大电路共(6路)信号拥有各自的放大电路,采用集成仪用放大器AD620,将信号放大27倍左右,如图8a所示;第2级放大电路选用TL084构成同相比例运算电路,如图8b所示.

制成的放大电路板用螺丝固定在六维腕力传感器基座的下半部分,信号线和电源线通过基座侧边的圆孔引出. 最终设计的六维腕力传感器实物如图9所示.



a. 一级放大示例



b. 二级放大示例

图8 放大电路原理

Fig. 8 Principle diagram of amplifying circuit



图9 六维腕力传感器实物

Fig. 9 Overall image of the 6-axis wrist force sensor

4 小结

本文设计了一种新型六维腕力传感器,通过对十字梁弹性体进行有限元分析,得到各点的受力情况,确定了应变片的最佳黏贴位置,并且设计了放大电路对六维输出信号进行放大.后期通过试验标定装置对六维腕力传感器进行标定,对标定数据进行处理后拟合六维力/力矩信息中施加载荷与输出电压的关系直线,即力/力矩与电压的关系,即可用此六维腕力传感器测量三维空间坐标 x, y, z 中的 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 六维力/力矩信号.

参考文献

References

- [1] 金振林,高峰. 新型六维腕力传感器弹性敏感元件的灵敏度特性分析[J]. 燕山大学学报, 2000, 24(3): 228-231
JIN Zhenlin, GAO Feng. The analysis of sensitivity for a novel sense organ of 6-axis robot wrist force transducer [J]. Journal of Yanshan University, 2000, 24(3): 228-231
- [2] 秦岗,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(3): 238-241
QIN Gang, CAO Xiaoying, SONG Aiguo, et al. Finite element analysis for elastic body of new 4-axis wrist force sensor [J]. Chinese Journal of Sensor Actuators, 2003, 16(3): 238-241
- [3] 张朝晖. ANSYS11.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 北京:机械工业出版社, 2011: 39
ZHANG Zhaohui. ANSYS11.0 structure analysis and examples of engineering application [M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 39
- [4] 陈乐. 三维力传感器的设计[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院, 2008
CHEN Le. Design of a three-dimension force sensor [D]. Nanjing: School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, 2008
- [5] 唐慧强,黄惟一. 智能化腕力传感器的设计[J]. 机器人, 2003, 25(1): 53-56
TANG Huiqiang, HUANG Weiyi. Design of an Intelligent Wrist Force Transducer [J]. Robot, 2003, 25(1): 53-56
- [6] 干方建,刘正式,任传胜,等. 一种应变式六维力传感器的动态设计[J]. 中国机械工程, 2007, 18(8): 967-970
GAN Fangjian, LIU Zhengshi, REN Chuansheng, et al. Dynamic design of a multi-axis force sensor [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(8): 967-970
- [7] 金振林,高峰,陈桂林,等. 新型3-2-1 正交结构机器人六分量腕力传感器设计[J]. 机械设计, 2001(5): 12-14

JIN Zhenlin, GAO Feng, CHEN Guilin, et al. Design of a new typed six-component wrist force sensor of robot with

3-2-1 orthogonal structure[J]. Journal of Mechanical Design, 2001(5): 12-14

A new 6-axis wrist force sensor

MAO Chen¹ SONG Aiguo¹ MA Junqing¹

1 School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract A new 6-axis wrist force sensor is designed in this paper. The finite element method for the crossbeam elastic body of the sensor is established to analyze the characteristics of structure static. The rationality of the mechanical structure is discussed, and the best pasting position of strain gages is determined. The force/moment signal of every dimension is translated into output voltage through reasonable bridge group. An amplifying circuit is designed to amplify the 6-axis signal, and the 6-axis wrist force sensor is calibrated through static calibration device.

Key words 6-axis wrist force sensor; finite element method; crossbeam elastic body; bridge circuit; amplifying circuit