

文章编号 1004-924X(2011)12-2954-09

预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器

赵 磊^{1,2*}, 刘 巍¹, 巩 岩²

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对六维力/力矩传感器测量量程受限问题,提出一种具有分载测量功能的预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器。首先,对比传统 Stewart 结构力/力矩传感器,阐述了预紧式六维力/力矩传感器的结构特点和测量原理。然后,完成了预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的结构设计。建立了传感器的有限元模型,对模型进行了模态分析,得到了传感器的前五阶固有频率和振型,并确定了传感器的工作带宽为 0~204 Hz。最后,研究了传感器的静态标定原理,并对传感器进行了静态标定实验,得到了传感器的标定实验解耦矩阵。实验结果表明,该预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的测力量程为 0~3 000 N,测力矩量程达 0~300 N·m,测量精度优于实际值的 7.5%。传感器能够满足空间六维力/力矩的测量,具有量程大、解耦计算简单、安装调试方便等优点。

关 键 词:Stewart 并联结构;六维力/力矩传感器;解耦矩阵

中图分类号:TP212.1;TH823 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111912.2954

Pre-stressed six-axis force/torque sensor based on Stewart platform

ZHAO Lei^{1,2*}, LIU Wei¹, GONG Yan²

(1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaol@sklao.ac.cn

Abstract: A pre-stressed six-axis force/torque measurement method based on a Stewart platform was established to extend its measuring range. Compared to the traditional Stewart six-axis force/torque sensor, the principle of the pre-stressed Stewart six-axis force/torque measurement was analyzed. Then, structure design of the sensor was finished. By using the ANSYS software, a finite element model for the pre-stressed Stewart six-axis force/torque sensor was established. According to this model, the vibration modal was analyzed, and the natural frequencies and vibration modes were obtained. Finally, principle of the sensor calibration was analyzed, and the sensor coupling matrix was calculated according to the data of a static calibration experiment. Experimental results indicate that this pre-stressed Stewart six-axis force/torque sensor has the measuring ranges of 0~3 000 N for the

收稿日期:2011-03-03;修订日期:2011-04-01.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2006CB705406)

force and $0 \sim 300 \text{ N} \cdot \text{m}$ for the torque, and its measuring accuracy is better than 7.5% of the actual data. It shows its advantages in wide measuring range, easy to decoupling and convenient for assembly.

Key words: Stewart parallel structure; six-axis force/torque sensor; decoupling matrix

1 引言

六维力/力矩传感器是指能够测量空间任意力系中三维正交力(F_x, F_y, F_z)和三维正交力矩(M_x, M_y, M_z)的传感器,主要应用于力及力-位置控制领域,如精密装配、轮廓跟踪、精密运动控制等,尤其是在航空机器人运动、宇宙空间站对接仿真、火箭发动机推力测试、重载操作装备协调控制以及风洞实验等场合发挥着极其重要的作用。

目前,国内外学者对六维力/力矩传感器的研究主要集中于梁式结构^[1]、筒形结构^[2]、十字结构^[3]和 Stewart 结构等几种形式,其中 Stewart 并联结构式由于具有承载能力强、误差不积累、响应快、灵敏度高优点,在六维力/力矩测量领域应用广泛^[4]。但是目前六维力传感器局限于小量程范围,对于如何实现 1 kN 以上载荷的测量仍有待深入研究。

本文针对六维力/力矩传感器测量量程的局限,提出了基于预紧式 Stewart 结构的六维力/力矩分载测量方法。完成了预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的结构设计,并对其进行了模态分析。最后对研制的传感器进行了静态标定试验,获得了传感器的实验解耦矩阵。

2 六维力/力矩传感器的测量原理

传统 Stewart 结构六维力/力矩传感器示意图如图 1,Stewart 结构传感器由上平台、下平台以及利用球铰与两平台相连的 6 个支撑杆组成。传感器工作时,空间力/力矩作用在上平台上,进而传递到 6 个支撑杆上,根据 Stewart 的结构特点,通过测量 6 个支撑杆上的轴向力,便可获得空间的六维力/力矩。但是传统 Stewart 结构六维力/力矩传感器支撑杆上测得的力与实际作用力为同一量级,难以有效解决大量程测量的问题,并

且仅采用 6 个支撑杆通过球副连接上下平台,会导致传感器的预紧十分困难^[5]。

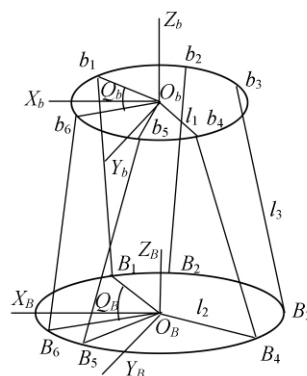


图 1 传统 Stewart 结构六维力/力矩传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Stewart six-axis force/torque sensor with traditional structure

预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器采用并联分载测量^[6]的原理,其安装示意图如图 2,将 Stewart 平台并联附着在机械手臂上,保证传感器的上下平台与机械手臂间刚性连接。机械手工作时,对机械手臂产生力 F ,力 F 在传感器的并联区域段分解为力 F' 和力 F'' ,其中力 F'' 分载到并联区域段的机械手臂上, F' 分载到预紧式 Stewart 结构六维力传感器上,进而通过 Stewart 结构传递到 6 个支撑杆上。因此,通过在 6 个支撑杆上安装单维拉压传感器,便可间接得到力的大小。

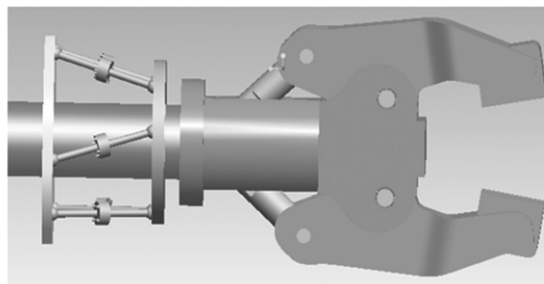


图 2 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器安装示意图

Fig. 2 Assembly schematic diagram of pre-stressed Stewart six-axis force torque sensor

预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的测量原理图如图 3 所示,图中虚线部分表示机械手臂。以 Stewart 下平台为定平台,上平台作为动平台,根据螺旋理论,当以力旋量表示 6 个轴向力时,考虑上平台的受力平衡,6 个杆的力螺旋之和应与上平台的六维力相平衡,得到螺旋方程如下^[7]:

$$f_1 \mathbf{S}_1 + f_2 \mathbf{S}_2 + f_3 \mathbf{S}_3 + f_4 \mathbf{S}_4 + f_5 \mathbf{S}_5 + f_6 \mathbf{S}_6 = \mathbf{F}' + \mathbf{M}, \quad (1)$$

其中: $f_i (i=1, \dots, 6)$ 为第 i 杆受到的轴向力; $\mathbf{S}_i (i=1, \dots, 6)$ 为第 i 杆轴线对固定坐标系的单位线矢, $\mathbf{S}_i = \mathbf{S}_{0i} + \mathbf{e} \mathbf{S}_{0i}$, $\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_i = 1$, $\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_{0i} = 0$; \mathbf{F}' 为上平台所受作用力的主矢; \mathbf{M} 为上平台对坐标原点的主矩。

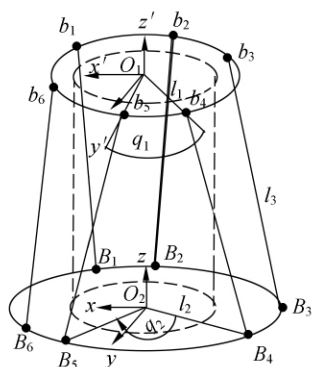


图 3 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器测量原理图

Fig. 3 Principle diagram of pre-stressed Stewart six-axis force torque sensor

螺旋方程(1)改写成矩阵形式的平衡方程为:

$$\mathbf{F}' = \mathbf{G}_f^F \mathbf{f}, \quad (2)$$

其中:

$$\mathbf{F}' = [\mathbf{F}_x', \mathbf{F}_y', \mathbf{F}_z', \mathbf{M}_x', \mathbf{M}_y', \mathbf{M}_z']^T,$$

$$\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T.$$

\mathbf{G}_f^F 为一阶静力影响系数矩阵

根据一阶静力影响系数矩阵^[7]求解公式有:

$$\mathbf{G}_f^F = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 & \mathbf{S}_3 & \mathbf{S}_4 & \mathbf{S}_5 & \mathbf{S}_6 \\ \mathbf{S}_{01} & \mathbf{S}_{02} & \mathbf{S}_{03} & \mathbf{S}_{04} & \mathbf{S}_{05} & \mathbf{S}_{06} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{S}_i = \frac{\mathbf{b}_i - \mathbf{B}_i}{|\mathbf{b}_i - \mathbf{B}_i|},$$

$$\mathbf{S}_{0i} = \mathbf{B}_i \times \mathbf{S}_i = \frac{\mathbf{B}_i \times \mathbf{b}_i}{|\mathbf{b}_i - \mathbf{B}_i|},$$

$\mathbf{b}_i (i=1, \dots, 6)$ 表示上平台 6 个球铰点相对

固定坐标系的空间位置, $\mathbf{B}_i (i=1, \dots, 6)$ 表示下平台 6 个球铰点相对固定坐标系的空间位置。

将公式(3)带入(2)后得到:

$$\mathbf{F}' = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{b}_1 - \mathbf{B}_1}{|\mathbf{b}_1 - \mathbf{B}_1|} & \frac{\mathbf{b}_2 - \mathbf{B}_2}{|\mathbf{b}_2 - \mathbf{B}_2|} & \dots & \frac{\mathbf{b}_6 - \mathbf{B}_6}{|\mathbf{b}_6 - \mathbf{B}_6|} \\ \frac{\mathbf{B}_1 \times \mathbf{b}_1}{|\mathbf{b}_1 - \mathbf{B}_1|} & \frac{\mathbf{B}_2 \times \mathbf{b}_2}{|\mathbf{b}_2 - \mathbf{B}_2|} & \dots & \frac{\mathbf{B}_6 \times \mathbf{b}_6}{|\mathbf{b}_6 - \mathbf{B}_6|} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{f}. \quad (4)$$

根据拉压胡克定律,由测量得到的 6 个支撑杆的力 $f_i (i=1, \dots, 6)$, 得到 6 个杆的伸缩量 Δl_i 为

$$\Delta l_i = \frac{f_i \cdot l}{E \cdot A} (i=1, \dots, 6), \quad (5)$$

其中, l 和 A 分别为杆的长度和横截面积, E 为杆材料的弹性模量。

根据 Stewart 结构的位置正解^[8], 可得上平台的位置增量 $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 为

$$(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)^T = \mathbf{J}(\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4, \Delta l_5, \Delta l_6)^T, \quad (6)$$

其中, \mathbf{J} 为 Stewart 结构的雅克比矩阵, 并且有 $\mathbf{J} = [\mathbf{G}_f^F]^{-T}$ 。

对上下平台之间的机械手臂进行受力分析, 得到分载到机械手臂并联区域段上的分载力 \mathbf{F}'' 为

$$\mathbf{F}'' = \mathbf{K}(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)^T. \quad (7)$$

其中, $\mathbf{F}'' = (\mathbf{F}_x'', \mathbf{F}_y'', \mathbf{F}_z'', \mathbf{M}_x'', \mathbf{M}_y'', \mathbf{M}_z'')$, \mathbf{K} 为机械手臂并联区域段的刚度矩阵。

根据圆柱形悬臂梁刚度矩阵的求解公式^[9], 得到刚度矩阵 \mathbf{K} 为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{4h^3}{3\pi E' r^4} & 0 & 0 & 0 & \frac{2h^2}{\pi E' r^4} & 0 \\ 0 & \frac{4h^3}{3\pi E' r^4} & 0 & -\frac{2h^2}{\pi E' r^4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{h}{\pi E' r^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2h^2}{\pi E' r^4} & 0 & \frac{4h}{\pi E' r^4} & 0 & 0 \\ \frac{2h^2}{\pi E' r^4} & 0 & 0 & 0 & \frac{4h}{\pi E' r^4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2h}{\pi G' r^4} \end{bmatrix}^{-1}, \quad (8)$$

其中, E' 和 G' 分别为机械手臂材料的弹性模量和切变模量, h 和 r 分别为并联段圆柱形机械手臂的长度和半径。

式(5)、(6)带入式(7)后得到

$$\mathbf{F}'' = \frac{l}{E \cdot A} \cdot \mathbf{K} \cdot [\mathbf{G}_f^F]^{-T} \cdot (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6)^T, \quad (9)$$

根据总力 \mathbf{F} 与分载力 \mathbf{F}' 、 \mathbf{F}'' 的关系 $\mathbf{F} = \mathbf{F}' + \mathbf{F}''$, 可以得到 6 个支撑杆测量力 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T$ 与力 \mathbf{F} 之间的关系为

$$\mathbf{F} = \left(\frac{l}{E \cdot A} \cdot \mathbf{K} \cdot [\mathbf{G}_f^F]^{-T} + [\mathbf{G}_f^F] \right) \cdot \mathbf{f}. \quad (10)$$

3 六维力/力矩传感器的结构设计

预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的结构示意图如图 4 所示, 传感器主要由上平台、下平台、6 个支撑杆、6 个单向压电石英传感器、机械手臂、局部预紧装置、胀紧装置和底板等组成。为保证 6 个支撑杆与上下平台间球铰连接, 支撑杆的两端设计有球头, 同时上下平台接触部位配有锥形孔。传感器采用整体预紧与多点局部预紧相结合的方式, 通过胀紧装置与机械手臂刚性连接保证整体预紧, 同时在上平台每个球铰处均采用预紧螺母以保证多点局部可调式预紧^[10]。

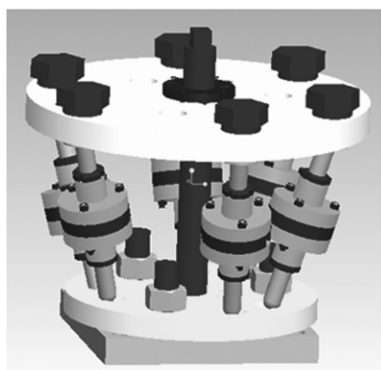


图 4 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pre-tensioned Stewart six-axis force torque sensor

图 5 表示支撑杆的结构示意图, 支撑杆由上下法兰、上下杆、压电石英传感器、定位环、螺栓、螺母、垫片等组成。上下杆与法兰间螺纹连接, 通过调整拧入深度保证支撑杆的长度, 并通过圆螺母进行防松。

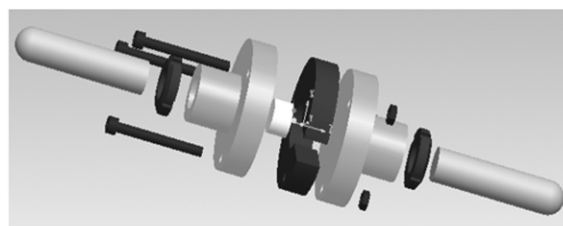


图 5 支撑杆结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of connecting pole

4 六维力/力矩传感器的建模与仿真分析

预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的主要结构参数为上平台半径 r_1 、下平台半径 r_2 、支撑杆长度 l 、上平台相邻两球铰夹角 q_1 , 以及下平台相邻两球铰夹角 q_2 ^[11]。根据 Stewart 结构各参数的优化原则^[12], 选取 $r_1 = 160 \text{ mm}$, $r_2 = 100 \text{ mm}$, $l = 210 \text{ mm}$, $q_1 = 50^\circ$, $q_2 = 30^\circ$, 在 ANSYS 环境下对传感器进行了建模, 如图 6 所示。其中上下平台和圆柱形机械手臂选用 solid45 单元, 6 个支撑杆选用 link8 单元, 圆柱形手臂与上下平台之间分别刚体连接, 杆单元与上下平台对应节点间进行节点耦合, 并将下平台底面完全约束。

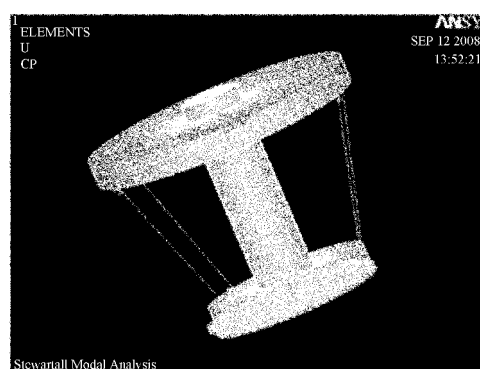
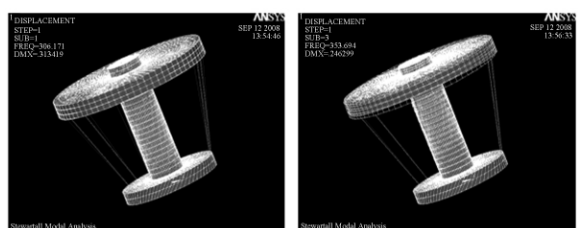


图 6 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器有限元模型

Fig. 6 Finite element model of pre-tensioned Stewart six-axis force torque sensor

固有频率和振型是表征结构固有动态特性的重要参数, 其中基频和低阶振型对结构动力的影响最大。为获得传感器的前五阶固有频率和振型, 采用 Block Lanczos 法对预紧式 Stewart 结构

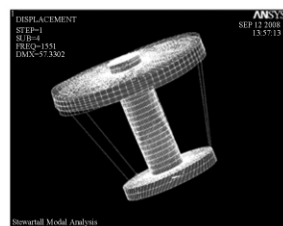


(a) 一阶模态

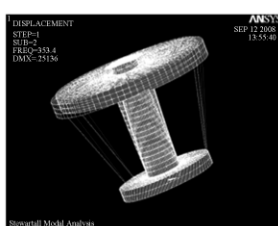
(b) 二阶模态

(a) The first order mode

(b) The second order mode



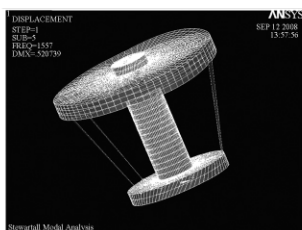
(c) 三阶模态



(d) 四阶模态

(c) The third order mode

(d) The forth order mode



(e) 五阶模态

(e) The fifth order mode

图 7 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的固有振型

Fig. 7 Natural vibration modes of pre-stressed Stewart six-axis force torque sensor

六维力/力矩传感器进行了模态分析,得到的前五阶振型图如图 7 所示,前五阶固有频率分别为 306.17, 353.4, 363.69, 1 550.6, 1 557.4 Hz。其中,第一阶和第二阶固有频率基本相等,第四阶和第五阶固有频率基本相等。按照传感器工作环境带宽上限为一阶固有频率 2/3 的经验值推算,得到传感器工作带宽为 0~204 Hz,能够满足传感器工作环境中的振动要求。

5 六维力/力矩传感器的静态标定实验

5.1 六维力/力矩传感器静态标定实验原理

Stewart 结构六维力/力矩传感器的静态标定是传感器研制中的重要环节。标定目的是通过实验的方法,观察传感器在不同静态力/力矩作用下呈现出的力/力矩与变形的规律,建立实际输入量和实际输出量间的数学关系,并确定传感器的线性度、灵敏度和重复性等各项性能指标。

Stewart 结构六维力/力矩传感器是一个多输入多输出系统,传感器的输入为空间六维力/力矩($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$),输入量经压电石英传感器、电荷放大器,最后输出为 6 个支撑杆上相应的电压值。Stewart 结构六维力/力矩传感器的输入与输出之间的关系可以通过解耦矩阵 C 表示为

$$\begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} & U_{15} & U_{16} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} & U_{25} & U_{26} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} & U_{35} & U_{36} \\ U_{41} & U_{42} & U_{43} & U_{44} & U_{45} & U_{46} \\ U_{51} & U_{52} & U_{53} & U_{54} & U_{55} & U_{56} \\ U_{61} & U_{62} & U_{63} & U_{64} & U_{65} & U_{66} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} F_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_z \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 C 为 6×6 的矩阵。可以得到

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} & U_{15} & U_{16} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} & U_{25} & U_{26} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} & U_{35} & U_{36} \\ U_{41} & U_{42} & U_{43} & U_{44} & U_{45} & U_{46} \\ U_{51} & U_{52} & U_{53} & U_{54} & U_{55} & U_{56} \\ U_{61} & U_{62} & U_{63} & U_{64} & U_{65} & U_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_z \end{bmatrix}^{-1}.$$

因此,用标定实验的方法,对 Stewart 结构六维力/力矩传感器加载标准力/力矩,得到 6 个支撑杆输出的电压值,代入上式就可以得到六维力传感器的解耦矩阵 C 。静态标定实验时,首先对 6 个支撑杆进行标定,进而完成对整个预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的标定。

5.2 单个支撑杆的静态标定实验

将力/力矩加载装置、标准测力环、支撑杆、电荷放大器、数据采集卡、处理软件等连成一体,通过加载装置施加载荷,得到各个杆件的标定实验数据如图 8 所示,由最小二乘法得到各支撑杆的灵敏度分别为 $3.317 \times 10^{-3} \text{ V/N}$ 、 $3.09 \times 10^{-3} \text{ V/N}$ 、 $3.315 \times 10^{-3} \text{ V/N}$ 、 $3.038 \times 10^{-3} \text{ V/N}$ 、 $3.028 \times 10^{-3} \text{ V/N}$ 、 $3.325 \times 10^{-3} \text{ V/N}$ 。

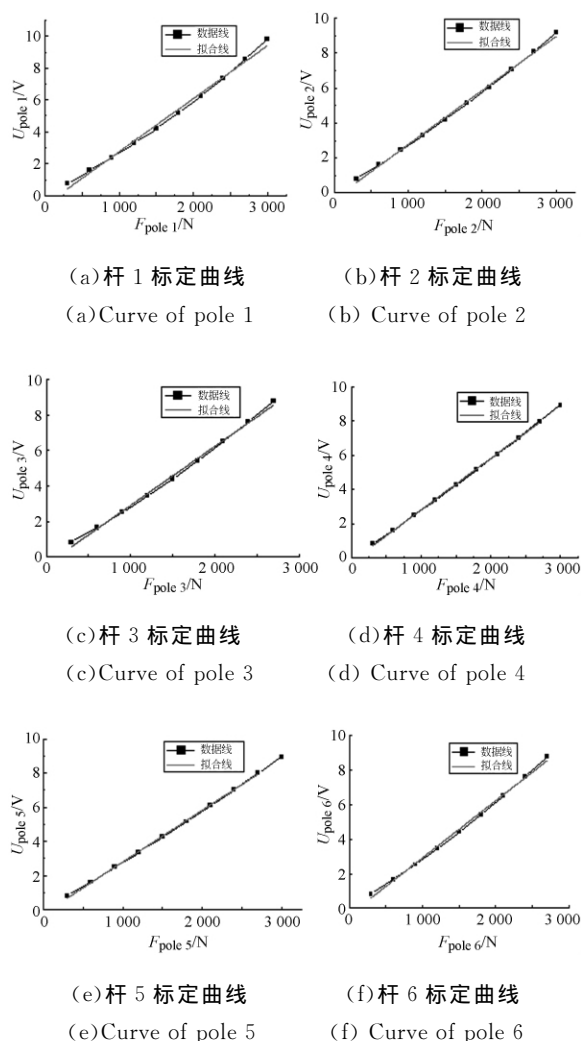


图 8 支撑杆的实验标定曲线

Fig. 8 Calibration curves of connecting poles

5.3 预紧式 Stewart 六维力/力矩传感器的静态标定实验^[13]

将标准力加载装置、预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器、电荷放大器、数据采集卡、采集软件等连成一体,其中标准力加载装置由力加载机构和三级标准测力计串联而成。图 9~11 分



图 9 传感器 X 方向力标定实验照片

Fig. 9 Actual picture of X-axis force calibration experiment



图 10 Z 轴方向力标定实验照片

Fig. 10 Actual picture of Z-axis force calibration experiment



图 11 Z 轴方向扭矩标定实验照片

Fig. 11 Actual picture of Z-axis torque calibration experiment

别为传感器在 X 向力、 Z 向力、 Z 向力矩标定时的实物照片。标定实验前,首先通过 6 个预紧螺母对标定好的 6 个测量杆施加 10 kN 的预紧力。

标定时采用阶梯加载^[14]的方式,记录下各标准输入力值对应的输出电压值。对传感器反复加载 3 次,记录相应的输入输出数据,对实验数据进行必要的修正整理,并通过“最小二乘法”拟合输入输出直线,得到的实验数据如图 12~17 所示。

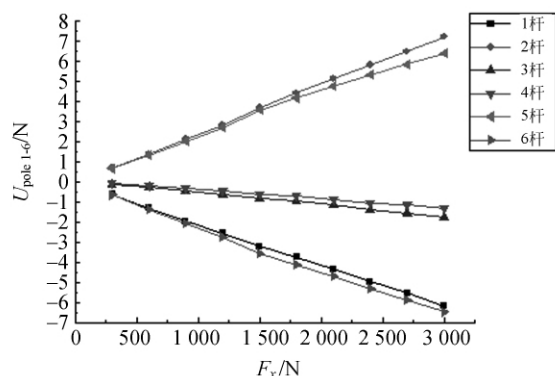


图 12 X 轴方向力标定实验数据

Fig. 12 Data of X -axis force calibration experiment

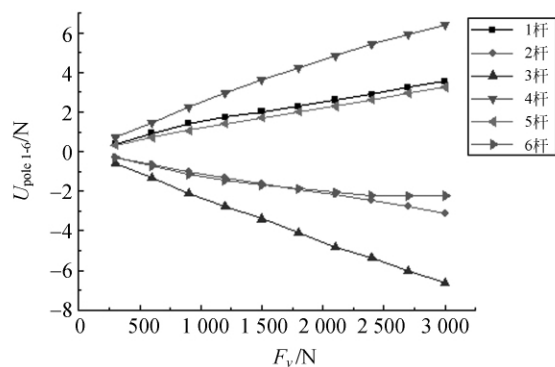


图 13 Y 轴方向力标定实验数据

Fig. 13 Data of Y -axis force calibration experiment

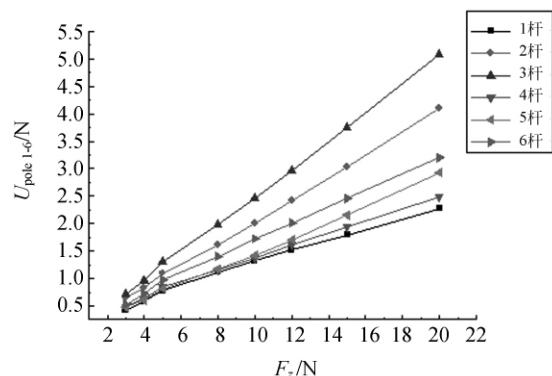


图 14 Z 轴方向力标定实验数据

Fig. 14 Data of Z -axis force calibration experiment

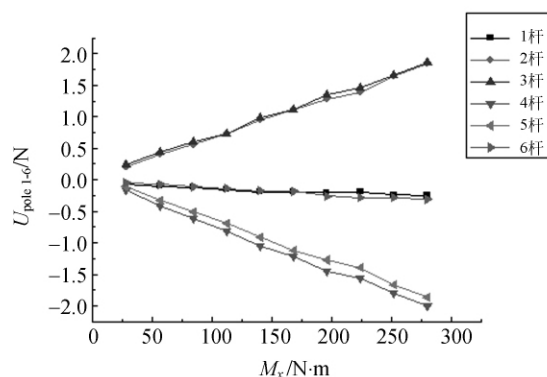


图 15 绕 X 轴方向力矩标定实验数据

Fig. 15 Data of X -axis torque calibration experiment

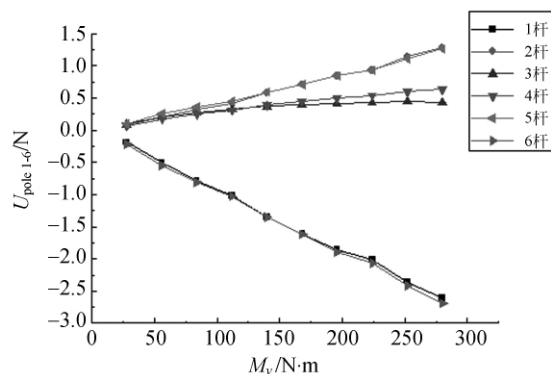


图 16 绕 Y 轴方向力矩标定实验数据

Fig. 16 Data of Y -axis torque calibration experiment

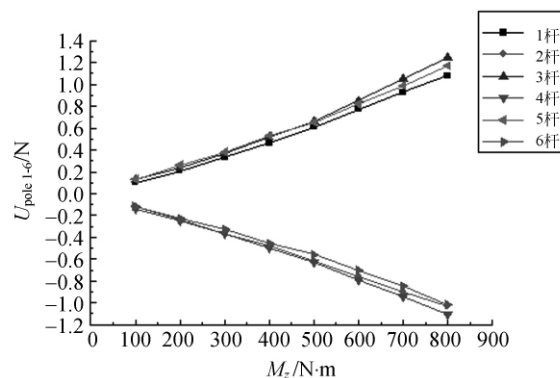


图 17 Z 轴方向扭矩标定实验数据

Fig. 17 Data of Z -axis torque calibration experiment

将上述 Stewart 结构六维力/力矩传感器静态标定实验得到的数据,代入求解公式(11)中,得到了 Stewart 结构六维力/力矩传感器的解耦矩阵 C :

$$C = \begin{bmatrix} -0.002\ 0 & 0.001\ 5 & 0.000\ 1 & -0.000\ 7 & -0.009\ 4 & 0.001\ 4 \\ 0.002\ 4 & -0.001\ 1 & 0.000\ 2 & 0.006\ 4 & 0.004\ 7 & -0.001\ 3 \\ -0.000\ 6 & -0.002\ 4 & 0.000\ 3 & 0.006\ 4 & 0.001\ 3 & 0.001\ 6 \\ -0.000\ 5 & 0.002\ 5 & 0.000\ 1 & -0.007\ 1 & 0.002\ 2 & -0.001\ 4 \\ 0.002\ 2 & 0.001\ 2 & 0.000\ 1 & -0.006\ 8 & 0.004\ 4 & 0.001\ 5 \\ -0.002\ 2 & -0.001\ 3 & 0.000\ 2 & -0.001\ 1 & -0.009\ 6 & -0.001\ 3 \end{bmatrix}.$$

得到解耦矩阵的逆阵 C^{-1} :

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 56.705\ 4 & 211.934\ 3 & -242.302\ 9 & -247.963\ 4 & 215.639\ 7 & 60.029\ 8 \\ 268.289\ 1 & 129.356\ 6 & -77.710\ 7 & 155.202\ 4 & -104.6967 & -223.045\ 5 \\ 731.424\ 8 & 1\ 158.712\ 0 & 1\ 340.300\ 3 & 1\ 366.129\ 4 & 726.945\ 9 & 674.958\ 7 \\ 64.918\ 5 & 62.924\ 3 & 8.230\ 2 & -1.689\ 7 & -74.039\ 1 & -66.143\ 4 \\ -56.922\ 5 & -36.048\ 6 & 70.638\ 4 & 73.934\ 9 & -30.626\ 9 & -53.779\ 5 \\ 99.211\ 3 & -126.589\ 2 & 115.830\ 5 & -125.568\ 6 & 130.349\ 0 & -112.4827 \end{bmatrix}.$$

因此有:

$$[F_x', F_y', F_z', M_x', M_y', M_z'] = C^{-1}U, \quad (12)$$

其中:

$F_x', F_y', F_z', M_x', M_y', M_z'$ 为空间六维力/力矩, U 为 6 个支撑杆的输出电压值

根据公式(12), 已知 6 个支撑杆输出的电压值, 就可以得到六维力/力矩的数值。最后, 将传感器的实际加载值与通过实验解耦矩阵得到的值进行了比较, 结果表明传感器的测量精度能够控制在实际加载数值 7.5% 以内。

6 结 论

本文针对空间六维力/力矩大量程测量的难题, 在传统 Stewart 结构六维力/力矩传感器的基础上, 提出了具有分载测量功能的预紧式 Stewart

结构六维力/力矩传感器, 完成了预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的结构设计和装配工作, 设计的传感器具有多点局部预紧、支撑杆长度可调、上下平台与机械手臂连接可靠等优点。在 ANSYS 环境下建立了预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的模型, 对传感器进行模态分析, 得到了传感器的前五阶振型和固有频率。最后对研制的预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器进行了静态标定实验, 得到了传感器的实验解耦矩阵。试验表明, 该预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器的测量精度优于实际加载值的 7.5%, 测力量程为 0~3 000 N, 测力矩量程为 0~300 N·m。研制的传感器具有量程大、解耦计算简单、安装调试方便等优点, 能够用于空间六维力/力矩的测量。

参考文献:

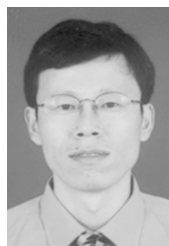
- [1] WATSON P C, DRAKE S H. Pedestal wrist force sensors for industrial assembly[C]. *Proc. of the 5th Int. Symp. on Industrial Robots, Chicago*, 1975: 501-511.
- [2] KEGON. *Robot Technology* [M]. London: page Ltd, 1983: 56-61.
- [3] YOSHIKAWA T, MIYAZAKI T. A six-axis force sensor with three-dimensional cross-shape structure [C]. *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 1989(1): 249-255.
- [4] FERRARESI C. Static and dynamic behavior of a high stiffness stewart platform-based force/torque sensor [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1995, 12 (12): 883-893.
- [5] 侯雨雷, 曾达幸, 赵永生, 等. 超静定并联式六维力传感器动力学 [J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(7): 1594-1601.
- [6] HOU Y L, ZENG D X, ZHAO Y SH, et al.. Dynamics of hyperstatic parallel six-component force sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1594-1601. (in Chinese)
- [6] 沈久珩. 大力测量技术的新进展-附着式超轻型大力传感器 [J]. *中国工程科学*, 2001, 3(10): 22-27.
- [6] SHEN J H. The new development of heavy force

- measurement technique-adhesion and super-miniature type of heavy force sensor [J]. *Engineering Science*, 2001,3(10): 22-27. (in Chinese)
- [7] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005:295-300.
- HUANG ZH, ZHAO Y SH, ZHAO T SH. *Advanced Spatial Mechanism* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005:295-300. (in Chinese)
- [8] CHUL-GOO K. Closed-form force sensing of a 6-axis-force transducer based on the Stewart platform [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001,90:31-37.
- [9] KOSEKI Y, TANIKAWA T, KOYACHI N, *et al.*. Kinematic analysis of translational 3-DOF micro parallel mechanism using matrix method [C]. *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, Oct. 31-Nov. 5, Takamatsu, IEEE, 2000:786-792.
- [10] 贾振元, 刘巍, 林盛, 等. 一种可调分载力机构的多点局部预紧方法: 中国, 200810229235. 2 [P].
- JIA ZH Y, LIU W, LIN SH, *et al.*. A force adjustable mechanisms using multi points pre-stressed method: China, 200810229235. 2 [P]. (in Chinese)
- [11] 徐刚, 杨世模. Gough-Stewart 平台机构的普适工作空间及其几何求解 [J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(2):257-264.
- XU G, YANG SH M. Universal workspace characteristics of Gough-Stewart platform and its analytic solution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):257-264. (in Chinese)
- [12] 徐刚, 杨世模, 龚雨兵. 大型光学望远镜副镜位姿精调机构的优化设计 [J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(7):1181-1189.
- XU G, YANG SH M, GONG Y B. Optimal design of pose and position fine tuning apparatus for secondary mirror in large optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1181-1189. (in Chinese)
- [13] 赵磊. Stewart 结构六维大力传感器的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- ZHAO L. *Research of the six-axis heavy force sensor based on the Stewart platform structure* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] 戴恒震, 孙宝元, 李万全, 等. 一种多功能测力仪标定加载器 [J]. *现代机械*, 2003(6):45-47.
- DAI H ZH, SUN B Y, LI W Q, *et al.*. A multi-functional loading and calibrating device for force transducers [J]. *Modern Machinery*, 2003(6):45-47. (in Chinese)

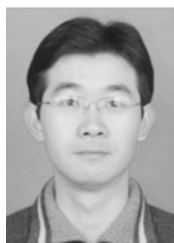
作者简介:



赵磊 (1982—), 男, 山东临沂人, 助理研究员, 工学硕士, 主要从事结构设计与仿真分析、传感与检测方面的研究。E-mail: zhaol@sklao.ac.cn



巩岩 (1968—), 男, 吉林梅河口人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事传感器技术、光机电一体化技术的研究。E-mail: gongy@sklao.ac.cn



刘巍 (1979—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 主要从事测试技术与仪器、磁致伸缩材料与微执行器等方面的研究。E-mail: lw2007@dlut.edu.cn