

文章编号 1004-924X(2008)07-1258-08

新型预紧式六维力传感器及其位姿误差分析

侯雨雷¹, 康凯佳¹, 曾达幸¹, 姚建涛¹, 孙凤龙², 赵永生¹

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要:提出了一种新型的基于 Stewart 平台的预紧式六维力传感器结构, 并对其进行了位姿误差分析。以经典 Stewart 平台六维力传感器为比较对象, 描述了新型预紧式六维力传感器的结构特点; 综合利用影响系数法和矢量法建立其位姿误差模型, 定义位姿误差灵敏度指标并据此绘制误差灵敏度直方图以分析不同误差因素对传感器位姿误差的影响; 最后, 研制出传感器样机并完成了标定实验。实验结果表明, 该传感器测力精度在 1% 以内。所研究内容对六维力传感器的设计制造和实验标定具有理论指导意义。

关键词:力传感器; 预紧式传感器; Stewart 平台; 位姿误差

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A

Novel pre-stressed six-component force sensor and its position and orientation error analysis

HOU Yu-lei¹, KANG Kai-jia¹, ZENG Da-xing¹, YAO Jian-tao¹, SUN Feng-long², ZHAO Yong-sheng¹

(1. *College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*
2. *Baosteel Co., Ltd., Shanghai 201900, China*)

Abstract: In order to obtain the six-component force sensor with excellent comprehensive performance, a novel pre-stressed six-component force sensor based on Stewart platform was presented, and its position and orientation error was analyzed. Compared with the traditional Stewart platform-based six-component force sensor, the structure feature of proposed pre-stressed six-component force sensor was described. Then, the mathematical model of the position and orientation error was established using the influence coefficient method and vector method, the position and orientation error sensitivity indices were defined and the influence conditions of different error factors on the sensor's position and orientation error were analyzed by plotting histograms of error sensitivity. Finally, a sensor prototype was fabricated and the calibration experimentation was carried out. The experimental results indicate that the force measurement precision of the prototype is within 1%, which shows the research is useful for the design and calibration experimentation of the six-component force sensor.

Key words: force sensor; pre-stressed sensor; Stewart platform; position and orientation error

收稿日期: 2007-11-09; 修订日期: 2008-01-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50575192); 河北省自然科学基金资助项目 (No. E2007000349)

1 引言

传感器在工业生产、国防建设和科学技术领域发挥着重要作用,是现代信息产业的三大支柱之一。六维力传感器以其能够感知外力和外力矩的全部信息而成为最重要的一类传感器,其结构设计影响到传感器的灵敏度、刚性、动态性能、维间耦合等关键因素,是决定传感器性能的核心。目前而言,Stewart 平台结构是设计制造六维力传感器的最佳方案之一。然而由于这种力传感器采用传统结构的球面副作为连接副,因此存在一些问题,其结构有待于改进。

传感器结构参数误差的存在将导致受力平台实际位姿与理论位姿之间产生偏差,位姿误差是影响传感器测量精度的因素之一,对其进行分析对于各零部件的设计制造、误差影响的消除或补偿以及标定实验研究等具有理论指导意义。诸多学者对机构误差进行了研究。黄真等应用影响系数方法,使得含有 114 个原始误差参数的六自由度并联机构的位姿误差传递矩阵具有简单而统一的表达形式^[1]。刘深厚等提出空间机构误差分析的环路增量法,基于矩阵微分概念利用空间连杆机构的环路方程导出空间闭环机构位置误差的一般表达式^[2]。Ting 和 Long 分析了机构的误差敏感性,提出了灵敏度雅可比矩阵的概念,并引入该矩阵的瑞利商定义性能指标用以评价系统对空间误差的敏感度^[3]。黄田等以并联机床为研究对象,利用空间矢量链模型建立零部件制造误差与动平台位姿误差的映射关系^[4]。此外,其它文献也从不同角度对由机构误差所引起的精度问题进行了分析^[5-10]。

本文提出一种基于 Stewart 平台的新型整体预紧式六维力传感器结构并研制出样机,而且针对其进行了位姿误差分析。介绍了该传感器结构特点,结合影响系数法与矢量法建立了其位姿误差模型,给出了位姿误差灵敏度的定义并据此分析了不同误差因素对传感器位姿误差的影响程度。

2 预紧式六维力传感器结构特点

并联结构六维力传感器所具备的独特优势

已为众多学者所认可。经典的基于 Stewart 平台的六维力传感器(如图 1 所示)是一种装配结构形式,由分离元件组装而成,其各弹性构件通过球面副与上下平台连接,每个弹性测力构件在原理上只承受沿杆件轴线方向的拉力或压力,可实现无应力耦合的六维力测量。但是由于其采用传统结构的球面副作为连接副,因此存在以下主要问题:此类力传感器的结构复杂;12 个球面副需要分别调整和预紧,调整工作量大,并且各预紧力很难一致;由于自身结构的原因,传统球面副球体的直径必须保持一定的尺寸,由此造成球面副的接触面积很大,预紧后摩擦力矩较大,进而使各弹性构件的力敏感部位产生较大的应力耦合(即各弹性测力支路在工作时要承受拉压和弯扭的联合作用),容易引起传感器的维间耦合并且很难解耦;由于传统球面副容易产生间隙,使得传感器受力过零性差,即当传感器所承受的外力方向改变时,线性度不好,容易产生迟滞现象。为解决上述问题,就要求这类六维力传感器采用特殊结构的球铰并需要极高的制造和装配精度。

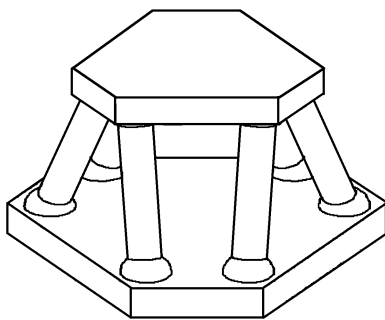


图 1 经典 Stewart 平台结构六维力传感器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of traditional Stewart platform-based six-component force sensor

有学者曾提出采用弹性球铰替代传统球面副,将传感器加工成一体化形式,在原理上其性能较经典 Stewart 结构六维力传感器有很大改进,同时使得传感器微型化工作成为可能,所研制的产品已成功应用于机器人灵巧手、六维鼠标和微操作机器人控制系统中^[12]。然而,作为整体式结构,该类型传感器无法避免弯扭耦合的存在。

图 2 所示为本文提出的基于 Stewart 平台的整体预紧式六维力传感器原理示意图。该传感器结构是在经典 Stewart 平台结构的上下平台之间

增设一个由两个反向球面副和一个螺旋机构所组成的中间预紧支路,利用该预紧支路拉紧上、下平台,对传感器进行整体预紧,同时预紧各球副,消除间隙,大大提高力传感器的整体刚度。由于传感器实现了整体预紧,因此所有球面副不需要采用传统的分离式球形窝壳夹紧球体的结构形式,而可以采用带有球头(直径可以做得很小,只受接触强度的限制)的圆锥体与球窝相接触的形式代替球面副。此整体预紧式六维力传感器既保持了 Stewart 平台结构六维力传感器的优点,同时极大克服或改善了其前述的主要缺点:取消了传统结构的球铰,结构大为简化,调整工作量大为减少;组成球面副的球头与球窝的直径和接触面积都很小,摩擦力矩大为减小,各弹性构件力敏感部位的应力耦合也将大大降低;由于是整体预紧,因此只要有足够的预紧力,即可保证各弹性构件在传感器量程范围内始终承受压力,不存在过零问题,传感器的非线性和迟滞误差将大为减小;作为超静定结构,加上预紧力的作用,传感器的动刚度会大为增加。

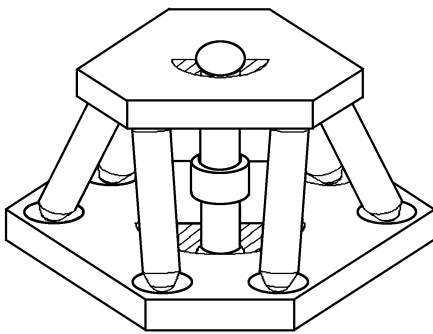


图 2 整体预紧平台式六维力传感器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pre-stressed six-component force sensor

3 位姿误差分析

如图 3 所示为预紧式 Stewart 平台结构六维力传感器结构简图,分别在传感器上、下平台几何中心处建立坐标系 $\{A\}$ 和 $\{B\}$,且以 $\{B\}$ 为基系,二系姿态相同,坐标原点分别为 O_u 和 O_d , X 轴分别平分上下平台 1、6 两球铰点与坐标原点连线所成夹角, Z 轴均垂直于上下平台且以向上为正。以 U_i 和 D_i ($i=1,2,\dots,6$) 分别表示上、下平台第

i 球铰点相对于基准坐标系的空间位置矢量,以 R_1 和 R_2 分别表示上、下平台球铰点所处圆环半径,以 L 表示各分支杆杆长,以 ϕ 和 ω 分别表示上、下平台第一个球铰点和坐标原点连线在 XY 平面内投影与基准坐标系 X 轴夹角。如下将讨论引起传感器位姿误差的因素,研究结构参数误差和位姿误差之间的关系,建立相应的数学模型,并分析位姿误差对各影响因素的敏感程度。

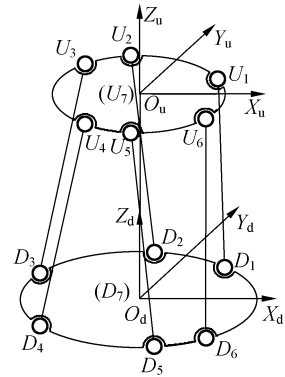


图 3 预紧式 Stewart 平台结构六维力传感器结构简图

Fig. 3 Structure of pre-stressed Stewart platform-based six-component force sensor

3.1 位姿误差来源

与串联机构相比,并联机构不存在误差累积效应。Stewart 平台结构六维力传感器的位姿受到各分支杆机械加工尺寸误差、上下平台各球铰点空间位置误差等的影响,但总体并非各误差源的简单线性叠加,而是含有不同程度的重叠或抵消。此外,对于整体预紧式传感器而言,其结构特点之一即在预紧力作用下,能够很好地消除各分支杆与上下平台连接的间隙,故本文未考虑球面副间隙对平台位姿误差的影响。

平台位姿误差的存在是难以避免的,为尽量减小其影响,比较直接的办法就是尽可能提高加工装配的精度,然而对各项结构参数无原则地要求过苛,则传感器制造成本会大幅上升,如此设计并不合理。因此,有必要建立包含各项结构误差在内的数学模型并进行相关分析,以评估各项误差对平台位姿的影响。

3.2 位姿误差建模

并联机构的误差分析有别于串联机构,后者易于给出以关节变量直接表示的位姿矩阵,对其全微分即能方便地建立关于关节变量误差和构件

误差的末端执行器位姿误差方程组;而并联机构由于正解只能有数值解或相当复杂的解析解,因此难以直接建立关于各分支杆长的位姿矩阵,但并联机构具有很方便的反解,可以依据运动平台的位姿参数来计算反解,并建立误差方程组。

针对所提出的基于 Stewart 平台的整体预紧式六维力传感器结构,假定各结构参数误差因素对平台位姿误差的影响相互独立,本文推导了它的位姿误差传递矩阵。

本文所讲的位姿误差系指以受力平台(上平台)几何中心作为参考点。由六维力传感器受力平台位置和姿态参数误差所组成的位姿误差向量可表示为:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{p} \\ \Delta \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = [\Delta x_p \quad \Delta y_p \quad \Delta z_p \quad \Delta \omega_x \quad \Delta \omega_y \quad \Delta \omega_z]^T, \quad (1)$$

式中, $\Delta \mathbf{p} = [\Delta x_p \quad \Delta y_p \quad \Delta z_p]^T$ 为位置误差向量; $\Delta \boldsymbol{\omega} = [\Delta \omega_x \quad \Delta \omega_y \quad \Delta \omega_z]^T$ 为姿态误差向量。

不失一般性,若用 \mathbf{w} 表示平台任一广义位姿参数,其可以表示成传感器各构件结构参数的函数形式,即有:

$$\mathbf{w} = f(\mathbf{q}, \mathbf{s}), \quad (2)$$

式中, $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6 \quad q_7]^T$ 为由各分支杆杆长参数所组成的向量; $\mathbf{s} = [s^{(1)T} \quad s^{(2)T} \quad s^{(3)T} \quad s^{(4)T} \quad s^{(5)T} \quad s^{(6)T} \quad s^{(7)T}]_{1 \times 42}$ 为各分支与平台球铰连接点空间位置参数向量; $q_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 依次表示外环分支、内环分支以及中间预紧分支的杆长参数; $s^{(i)} = [s_1^{(i)} \quad s_2^{(i)} \quad s_3^{(i)} \quad s_4^{(i)} \quad s_5^{(i)} \quad s_6^{(i)}]_{1 \times 6}^T (i=1, 2, \dots, 7)$ 中各元素依次表示第 i 分支中分别与上、下平台球铰连接点的空间位置参数。

对式(2)取全微分,以矩阵形式表示有:

$$\Delta \mathbf{w} = [\Delta \mathbf{J}] \mathbf{H}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{H} = [\Delta \mathbf{q}^T \quad \Delta \mathbf{s}^T]_{1 \times 49}^T$, $[\Delta \mathbf{J}] = \left[\frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}} \quad \frac{\partial f}{\partial \mathbf{s}} \right]_{1 \times 49}^T$ 。

表示平台位姿误差的 6 个参数均可表达成如上式(3)所示形式,如此则结构参数原始误差向量与平台位姿误差向量之间的关系可以表示为:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{J}] \mathbf{H}, \quad (4)$$

式中, $[\mathbf{J}]$ 为 6×49 的由对结构参数原始误差的各偏导数所组成的长矩阵。

为清晰起见,将原始误差向量 \mathbf{H} 作分块处理如下:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^T : \mathbf{H}_2^T : \dots : \mathbf{H}_8^T]^T, \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_1 &= \Delta \mathbf{q} = [\Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3 \quad \Delta q_4 \quad \Delta q_5 \quad \Delta q_6 \quad \Delta q_7]^T; \\ \mathbf{H}_i &= \Delta \mathbf{s}^{(i-1)} = [\Delta s_1^{(i-1)} \quad \Delta s_2^{(i-1)} \quad \Delta s_3^{(i-1)} \quad \Delta s_4^{(i-1)} \\ &\quad \Delta s_5^{(i-1)} \quad \Delta s_6^{(i-1)}]^T (i=2, 3, \dots, 8). \end{aligned}$$

与此同时,矩阵 $[\mathbf{J}]$ 中元素做相应分块调整,则有:

$$[\mathbf{J}] = [\mathbf{J}_1 : \mathbf{J}_2 : \dots : \mathbf{J}_8], \quad (6)$$

式中, \mathbf{J}_1 为 6×7 的长阵; $\mathbf{J}_i (i=2, 3, \dots, 8)$ 为 6×6 的方阵。

根据线性叠加原理,式(4)可以写成如下形式

$$\mathbf{W} = \sum_{i=1}^8 \mathbf{W}_i = \sum_{i=1}^8 [\mathbf{J}_i] \mathbf{H}_i. \quad (7)$$

进而可以得到如下矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \\ \dots \\ \mathbf{W}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & & & 0 \\ & \mathbf{J}_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \mathbf{J}_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \\ \dots \\ \mathbf{H}_8 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

为方便计算, \mathbf{J}_1 需作特殊处理,使其成为方阵。由于预紧分支安装位姿的特殊性(连接上下平台的几何中心点),故 \mathbf{H}_1 中的 Δq_7 分量仅仅影响 \mathbf{W}_1 中的 Δz_{p1} 分量,且比例系数为 1,则 $\mathbf{W}_1 = [\mathbf{J}_1] \mathbf{H}_1$ 可改写为:

$$\mathbf{W}_1' = [\mathbf{J}_1'] \mathbf{H}_1', \quad (9)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_1' &= [\Delta x_{p1} \quad \Delta y_{p1} \quad \Delta z_{p1} + \Delta q_7 \quad \Delta \omega_{r1} \quad \Delta \omega_{y1} \quad \Delta \omega_{z1}]^T; \\ [\mathbf{J}_1'] &= [\mathbf{J}_1]_{1:6;1:6}; \\ \mathbf{H}_1' &= [\Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3 \quad \Delta q_4 \quad \Delta q_5 \quad \Delta q_6]^T. \end{aligned}$$

依据图 3 中所建立坐标系,对于第 i 个封闭环 $O_u - U_i - D_i - O_d - O_u$ (暂不考虑中间预紧分支),存在矢量关系:

$$l_i \mathbf{v}_i = \mathbf{R} \mathbf{U}_i^A + \mathbf{P} - \mathbf{D}_i \quad (i=1, 2, \dots, 6), \quad (10)$$

式中, l_i 为各分支杆杆长; \mathbf{v}_i 为沿相应杆长方向的单位矢量; $l_i \mathbf{v}_i$ 表示由 \mathbf{D}_i 指向 \mathbf{U}_i 的矢量,包含有各分支杆误差、上下平台球铰制造及安装误差等在内; \mathbf{R} 为 $\{A\}$ 系相对于 $\{B\}$ 系的旋转矩阵; \mathbf{U}_i^A 为上平台第 i 个铰点在 $\{A\}$ 系内的坐标表示; \mathbf{P} 为 $\{A\}$ 系原点在 $\{B\}$ 系中的坐标表示; \mathbf{D}_i 为下平台第 i 个铰点在 $\{B\}$ 系内的坐标表示。

由微分变换原理,对方程式(10)两端求全微分,忽略高阶微量并整理后可得:

$$\Delta l_i = (\mathbf{U}_i \times \mathbf{v}_i)^T \Delta \boldsymbol{\omega} + \mathbf{v}_i^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{U}_i^A + \mathbf{v}_i^T \Delta \mathbf{P} - \mathbf{v}_i^T \Delta \mathbf{D}_i = [\mathbf{v}_i^T \quad (\mathbf{U}_i \times \mathbf{v}_i)^T] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} + [-\mathbf{v}_i^T \quad \mathbf{v}_i^T \mathbf{R}] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{D}_i \\ \Delta \mathbf{U}_i^A \end{bmatrix}. \quad (11)$$

综合考虑除预紧分支外的其它六分支,可得:

$$\Delta l = J_w W' + J_H H', \quad (12)$$

式中:

$$\Delta l = [\Delta l_1 \quad \Delta l_2 \quad \cdots \quad \Delta l_6]^T; W' = W_1' + \sum_{i=2}^7 W_i;$$

$$H' = [H_2^T; H_3^T; \cdots; H_7^T]^T;$$

$$J_w = \begin{bmatrix} v_1^T & (U_1 \times v_1)^T \\ \vdots & \vdots \\ v_6^T & (U_6 \times v_6)^T \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{6 \times 6};$$

$$J_H = \begin{bmatrix} (-v_1^T & v_1^T R) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & (-v_6^T & v_6^T R) \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{6 \times 36}.$$

由于 J_w 为一可逆方阵,则式(12)两边同乘以其逆,可推导出:

$$W' = J_w^{-1} \Delta l + J_w^{-1} J_H H' = \begin{bmatrix} J_w^{-1} & J_w^{-1} J_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta l \\ H' \end{bmatrix}. \quad (13)$$

联立式(6)、式(7)、式(13)三式,有:

$$J_1' = J_w^{-1}; H_1' = \Delta l; [J_2 \quad J_3 \cdots J_7] = [J_w^{-1} J_H].$$

特别地,对于中间预紧分支,由与上述类似的推导过程,有:

$$\Delta l_7 = [v_7^T \quad (U_7 \times v_7)^T] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -v_7^T & v_7^T R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta D_7 \\ \Delta U_7^A \end{bmatrix}, \quad (14)$$

进而,联立式(8)、式(9)和式(13),可得

$$\Delta W = [\Delta J] \Delta H, \quad (15)$$

式中:

$$\Delta W = [\Delta x_p \quad \Delta y_p \quad \Delta z_p \quad \Delta l_7 \quad \Delta \omega_x \quad \Delta \omega_y \quad \Delta \omega_z]^T;$$

$$[\Delta J] = [J_w^{-1} \quad J_w^{-1} J_H \quad J_8]_{6 \times 48};$$

$$\Delta H = [\Delta l^T \quad (H')^T \quad H_8^T]_{1 \times 48};$$

$$J_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

至此,得到了基于 Stewart 平台的预紧式六维力传感器 49 个结构参数误差与上平台位姿误差之间的传递矩阵 $[\Delta J]$,初步建立起传感器的位姿误差数学模型。该误差传递矩阵仅与结构的位形有关,其各元素值随位形参数的改变而变化。

3.3 位姿误差灵敏度分析

影响传感器受力平台位姿误差的因素很多,

不同的误差因素对位姿误差的影响程度是不同的,对于同一类误差因素,其各个分量对平台位姿误差的影响程度也是不同的。因此,有必要对平台位姿误差相对各误差因素的灵敏度进行分析。

为描述各误差因素影响程度的不同,定义当各项误差为 1 时,将各误差项单独作用时所造成的平台位姿误差称之为独立位姿误差灵敏度,将分别只考虑所有分支杆杆长机械加工尺寸误差或全部球铰点空间位置误差时所产生的平台位姿误差称之为类别位姿误差灵敏度。由于量纲不同,将传感器平台位姿误差分为位置误差 $\delta_p = |\Delta p|$ 和姿态误差 $\delta_\omega = |\Delta \omega|$ 来分别考虑。相应地,独立位姿误差灵敏度可分为独立位置误差灵敏度和独立姿态误差灵敏度;类别位姿误差灵敏度可分为类别位置误差灵敏度和类别姿态误差灵敏度。

独立位置误差灵敏度指标 S_{pd} 涉及 7 个分支杆(含预紧分支)杆长制造误差以及 14 个球铰点空间位置误差,共计 21 个分量,其定义式如下:

$$\begin{cases} S_{pd}(i) = \left(\sum_{k=1}^3 [\Delta J]_{k;i}^2 \right)^{0.5} (i = 1, 2, \dots, 6) \\ S_{pd}(j) = (\Lambda_p)^{0.5} (j = 7, 8, \dots, 20) \end{cases}, \quad (16)$$

式中:

$$\Lambda_p = \sum_{k=1}^3 ([\Delta J]_{k;(3j-14)} + [\Delta J]_{k;(3j-13)} + [\Delta J]_{k;(3j-12)})^2.$$

特别地,对于中间预紧分支,其独立位置误差灵敏度为 1。

独立姿态误差灵敏度 $S_{\omega d}$ 涉及 6 个分支杆(不含预紧分支)杆长制造误差以及 14 个球铰点空间位置误差,共计 20 个分量,其定义式如下:

$$\begin{cases} S_{\omega d}(i) = \left(\sum_{k=4}^6 [\Delta J]_{k;i}^2 \right)^{0.5} (i = 1, 2, \dots, 6) \\ S_{\omega d}(j) = (\Lambda_\omega)^{0.5} (j = 7, 8, \dots, 20) \end{cases}, \quad (17)$$

式中:

$$\Lambda_\omega = \sum_{k=4}^6 ([\Delta J]_{k;(3j-14)} + [\Delta J]_{k;(3j-13)} + [\Delta J]_{k;(3j-12)})^2.$$

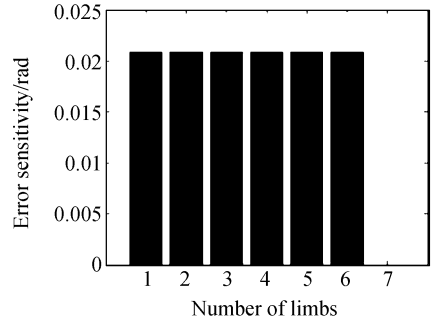
类别位置误差灵敏度 S_{pl} 涉及各分支杆(含预紧分支)杆长加工误差和球铰点空间位置误差两类,包含两个分量,其定义式分别为:

$$\begin{cases} S_{\mu}(1) = \left(\sum_{k=1}^2 ([\Delta J]_{k;1} + [\Delta J]_{k;2} + \dots + [\Delta J]_{k;6})^2 + ([\Delta J]_{3;1} + [\Delta J]_{3;2} + \dots + [\Delta J]_{3;6})^2 \right)^{0.5} \\ S_{\mu}(2) = \left(\sum_{k=1}^3 ([\Delta J]_{k;7} + [\Delta J]_{k;8} + \dots + [\Delta J]_{k;48})^2 \right)^{0.5} \end{cases} \quad (18)$$

类别姿态误差灵敏度 S_{ω} 涉及各分支杆(不含预紧分支)杆长加工误差和球铰点空间位置误差两类,亦包含两个分量,其定义式分别为:

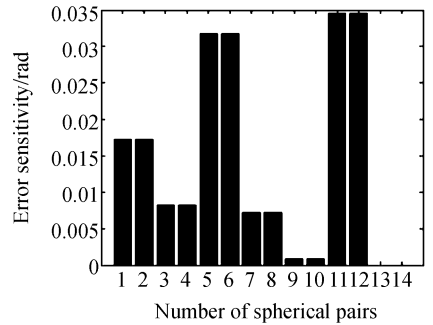
$$\begin{cases} S_{\omega}(1) = \left(\sum_{k=4}^6 ([\Delta J]_{k;1} + [\Delta J]_{k;2} + \dots + [\Delta J]_{k;6})^2 \right)^{0.5} \\ S_{\omega}(2) = \left(\sum_{k=1}^6 ([\Delta J]_{k;7} + [\Delta J]_{k;8} + \dots + [\Delta J]_{k;48})^2 \right)^{0.5} \end{cases} \quad (19)$$

不同结构尺寸传感器的特性亦不同,选择何种结构尺寸要根据传感器的具体要求而定。综合考虑各种因素,最终确定传感器结构尺寸为: $R_1 = 30 \text{ mm}$, $R_2 = 24 \text{ mm}$, $L = 32 \text{ mm}$, $\phi = 10^\circ$, $\omega = 50^\circ$ ^[13]。针对该组传感器结构尺寸,根据上述各定义式利用 MATLAB 软件编制程序进行计算,并绘制误差灵敏度直方图如图 4 所示。从独立误



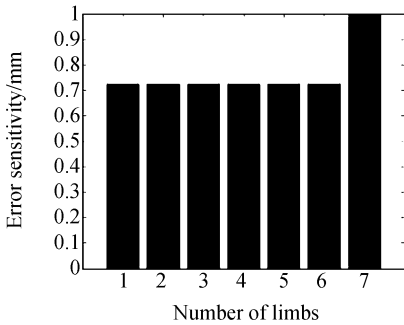
(c)独立姿态误差灵敏度

(c)Independent orientation error sensitivity



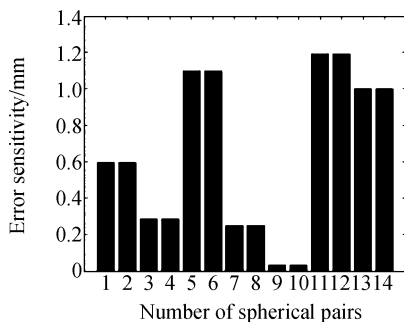
(d)独立姿态误差灵敏度

(d)Independent orientation error sensitivity



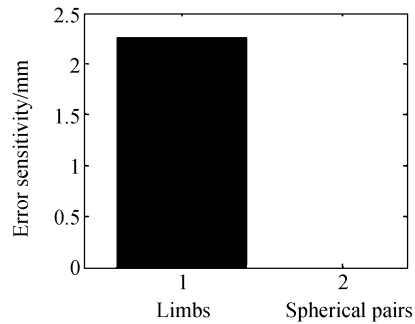
(a)独立位置误差灵敏度

(a)Independent position error sensitivity



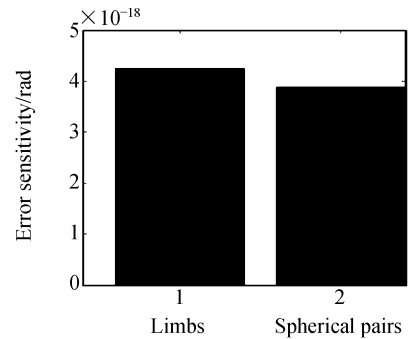
(b)独立位置误差灵敏度

(b)Independent position error sensitivity



(e)类别位置误差灵敏度

(e)Classified position error sensitivity



(f)类别姿态误差灵敏度

(f)Classified orientation error sensitivity

图 4 误差灵敏度直方图

Fig. 4 Histograms of error sensitivity

差灵敏度直方图 4(a)~(d)中可看出,对于此传感器结构,各分支杆(不含预紧分支)独立位置误差灵敏度相同,杆长误差对独立姿态误差影响相同;分支杆 6 两端的球铰点空间位置误差对平台位置误差和姿态误差影响最大,同一分支杆两端的球铰点空间位置误差对平台位姿误差影响基本相同。从类别误差灵敏度直方图 4(e)、(f)中可看出,各分支杆杆长误差对平台位姿误差影响较大,而球铰点空间位置误差对平台位姿误差的影响相对较小。

4 样机设计

传感器样机的设计既要考虑各种性能指标的要求,同时也要考虑应用场合的环境条件约束以及加工与安装的可行性和经济性等,必须根据具体情况,从全局的角度出发,选择最为合适的结构参数组。依据前述位姿误差分析结果,同时总体考虑各种影响因素及相关要求,研制出基于 Stewart 平台的整体预紧式六维力传感器样机,其实物如图 5 所示^[13]。此传感器样机各弹性分支杆材料选择为硬铝 12,上下平台为 45 钢。其基本结构尺寸如下:上平台直径为 96 mm,底座直径为 84 mm,整体高度为 55.5 mm,各分支杆直径均为 3 mm。该样机已完成静态标定实验,实验结果表明,此传感器样机各维力与力矩满量程值分别为: $F_m = [200 \ 200 \ 200]^T$ N, $M_m = [9 \ 9 \ 4]^T$ N·m,测力精度在 1% 以内^[14]。

参考文献:

- [1] 黄真, 方跃法. 六自由度并联机器人的随机位姿误差分析[J]. 东北重型机械学院学报, 1989, 13(3):1-9. HUANG ZH, FANG Y F. Analysis of random error of position and orientation of the parallel robot arm[J]. *Journal of Northeast Institute of Heavy Machinery*, 1989, 13(3):1-9. (in Chinese)
- [2] 刘深厚, 陆锡年, 石则昌. 空间连杆机构位置误差分析的环路增量法[J]. 机械工程学报, 1991, 27(2):13-20. LIU SH H, LU X N, SHI Z CH. Loop incremental theory for position error analysis of spatial linkage mechanisms [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1991, 27(2):13-20. (in Chinese)
- [3] TING K L, LONG Y F. Performance quality and tolerance sensitivity of mechanisms[J]. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 1996, 118(1):144-150.
- [4] 褚琳, 黄田, 王洋, 等. 面向制造的并联机床精度设计[J]. 中国机械工程, 1999, 10(10):1114-1118. MA L, HUANG T, WANG Y, et al.. Manufacturing oriented tolerance design of parallel machine tools[J]. *China Mechanical Engineering*, 1999, 10(10):1114-1118. (in Chinese)
- [5] HUANG ZH. Error analysis of position and orientation in robot manipulators[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1987, 22(6):577-581.
- [6] KIM K, KIM M K. Volumetric accuracy analysis based on generalized geometric error model in multi-axis machine

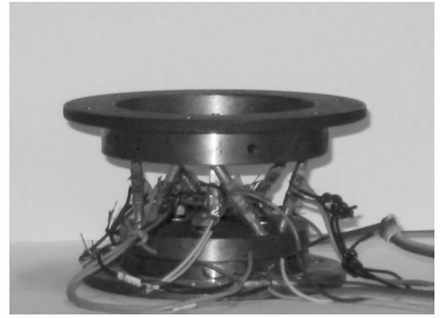


图 5 基于 Stewart 平台的整体预紧式六维力传感器样机

Fig. 5 Prototype of pre-stressed Stewart platform-based six-component force sensor

5 结 论

本文提出了一种新型的整体预紧式 Stewart 平台六维力传感器结构,并对其进行了位姿误差分析,建立了仅与结构位形有关的位姿误差模型,定义了位姿误差灵敏度指标,并绘制了其相应误差灵敏度直方图,进而得到了不同误差因素对传感器位姿误差的影响程度。以位姿误差分析结果为依据之一,研制出预紧式六维力传感器样机并完成静态标定实验,实验结果表明该传感器样机测力精度在 1% 以内。所研究内容为提高六维力传感器的精度奠定了理论基础,对传感器的设计与标定实验研究有指导性意义。

- tools[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1991, 26(2):207-219.
- [7] ROPPONEN T, ARAI T. Accuracy analysis of a modified Stewart platform manipulator[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, (1):521-525.
- [8] JEHA R, JONGEUN C. Volumetric error analysis and architecture optimization for accuracy of hexaslide type parallel manipulators[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2003, 38(3):227-240.
- [9] 王家骐, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2):105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):105-116. (in Chinese)
- [10] 刘治华, 白越, 黎海文, 等. 单轴飞轮储能与姿态控制系统误差分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1):127-132.
LIU ZH H, BAI Y, LI H W, *et al.*. Analysis on errors of single axis energy storage/attitude control system with double flywheels[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):127-132. (in Chinese)
- [11] 杨德华, 戚永军. 应用在拼接镜面中的电容位移传感器的结构性误差分析及校正[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):173-178.
YANG D H, QI Y J. Structural error correction and simulation of capacitive displacement sensor for segmented mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):173-178. (in Chinese)
- [12] WANG H R, GAO F, HUANG Z. Design of 6-axis force/torque sensor based on Stewart platform related to isotropy[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1998, 11(3):217-222.
- [13] ZHAO Y SH, HOU Y L, YAN ZH W, *et al.*. Research and design of a pre-stressed six-component force/torque sensor based on the Stewart platform[C]. *Proceedings of IDETC/CIE 2005, ASME, California, USA, September 24-28, 2005*, 7B:573-581.
- [14] HOU Y L, YAO J T, LU L, *et al.*. Calibration of a pre-stressed Stewart platform-based force/torque sensor[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, Henan, China, June 25-28, 2006*, 2006:2324-2329.

作者简介:侯雨雷(1980—),男,河北定州人,讲师,博士,主要从事并联机构理论,传感器技术等方面的研究。

E-mail: ylhou@ysu.edu.cn

赵永生(1962—),男,吉林龙井人,教授,博士研究生导师,主要研究领域为机器人技术和传感器技术等。

E-mail: yszhao@ysu.edu.cn

●下期预告

马鞍型并联跟踪台仿真设计方法

刘 峰,王向军,许 薇,张召才

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

为了提高并联机构仿真设计速度,以马鞍型并联跟踪台为研究对象,提出了编写 Matlab 仿真程序与 ADAMS 仿真分析相结合的仿真设计方法。通过编写 Matlab 仿真程序对马鞍型并联跟踪台进行了优化设计,利用得到的优化设计尺寸进行三维造型后,导入到 ADAMS 分析环境下进行仿真分析,依据得到的仿真结果研制出马鞍型并联跟踪台实验样机。通过编写数据监测模块程序对实验样机各驱动杆速度进行监测,并将监测结果与仿真结果进行对比,验证了仿真结果的正确性。研究表明,该仿真设计方法能够避免仿真设计过程中重复进行三维造型的问题,与现有方法相比,仿真设计周期短了近一半。