

六维大力传感器测量原理研究

林 盛*, 刘 巍, 王永青, 贾振元

(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 116024)

摘要: 针对巨型重载操作机六维大力测量的难题,提出了一种并联六维大力测量的方法,即采用 Stewart 结构与重型操作机械手手臂并联的方式,将机械手臂所受六维大力的小部分分载于 Stewart 结构的六杆,并对传感器进行力学解耦,进而实现六维大力值的测量.给出了六维大力传感器的仿真实例,并分析了传感器重要参数对分载能力的影响.实例表明:增大分载梁半径和减小上平台厚度都会提高分载能力,尤其分载梁半径对分载能力影响较大.为六维大力传感器的进一步优化设计提供了一定的理论依据,且最终验证了该测量方法的合理性和有效性.

关键词: 六维大力;分载;Stewart 结构;传感器

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

0 引言

巨型重载操作装备广泛应用于大型构件精确高效制造.在制造过程中,操作装备通常是与加工装备协调操作的,操作装备的末端执行机构对于制造过程中的工件变形所造成的位移需具有力顺应性和位置顺应性,这就要求必须对执行机构所受六维大力进行实时测量,因此对六维大力传感器的研制十分必要.

大力测量技术是在重型装备的需求驱动下发展起来的,通常称承载能力在 10~2 000 kN 的传感器为大力传感器,而重载制造装备中的大力传感器最大额定承载能力可高达 100 MN 以上.支承式重型大力传感器的制造工艺复杂,技术难度大,只有少数国家有规模生产.大力分流测量技术和具有并联分流传力方式的大力传感器设计思想源自 20 世纪 60 年代,此后美、加、德等国先后研制了附着式大力传感器^[1].1980 年沈久珩自行研制成功附着式大力传感器,并在轧钢机械等重型制造装备中得到广泛应用^[1],但仅限于一维大力测量.

六维力传感器是近 20 年国内外学者研究的热门问题之一,到目前为止提出的六维力传感器主要形式有筒形结构^[2]、十字梁结构^[3]、双头式结构^[4]以及 Stewart 结构^[5]等.但这些传感器测的六维力相对较小,目前尚无六维大力测量研究的报道.

本文采用并联六维分载的原理,将 Stewart 结构并联于被测机械手臂上,手臂所受力分载到六维力传感器上,实现大力的测量,并对分载原理进行仿真.

1 大力测量原理

大力测量的实现方法只有两种方式:一是提高传感器的承载能力;二是将大力进行分载.六维力传感器结构复杂,要提高其承载能力相对困难,因此,应用六维大力分载的思想设计传感器可以实现六维大力测量.本文依据上述思想设计出基于 Stewart 结构的六维大力传感器.

1.1 Stewart 结构测力原理

Stewart 结构原理图如图 1 所示.

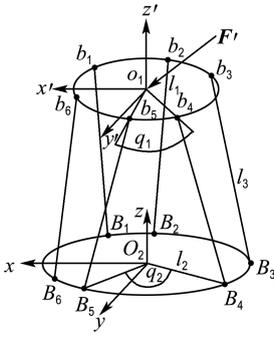


图 1 Stewart 结构原理图

Fig. 1 Principle diagram of the Stewart structure

Stewart 结构由上平台、下平台和 6 根连接杆组成, o_1 为上平台中心, $\angle b_1 o_1 b_3 = \angle b_3 o_1 b_5 = 120^\circ$, $\angle b_1 o_1 b_6 = \angle b_2 o_1 b_3 = \angle b_4 o_1 b_5 = q_1$, 上平台半径为 l_1 ; O_2 为下平台中心, $\angle B_1 O_2 B_3 = \angle B_3 O_2 B_5 = 120^\circ$, $\angle B_1 O_2 B_6 = \angle B_2 O_2 B_3 = \angle B_4 O_2 B_5 = q_2$, 下平台半径为 l_2 , 6 根连接杆长度均为 l_3 , 根据力螺旋理论^[6] 得到 Stewart 平台的力平衡方程

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

式中: f_i 为第 i 杆受到的轴向力; $\mathbf{\$}_i$ 为第 i 杆轴线对固定坐标系的单位线矢, $\mathbf{\$}_i = (S_i \ S_{0i})^T$; \mathbf{F}' 为作用在上平台上的六维力, 且 $\mathbf{F}' = (F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z)^T$.

上述螺旋方程可以很方便地改写为矩阵形式的平衡方程

$$\mathbf{F}' = \mathbf{G}_f^T \cdot \mathbf{f} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{f} = (f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6)^T$; \mathbf{G}_f^T 为一阶静力影响系数矩阵:

$$\mathbf{G}_f^T = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 \\ S_{01} & S_{02} & S_{03} & S_{04} & S_{05} & S_{06} \end{pmatrix} \quad (3)$$

若上平台 6 个球铰点坐标分别记为 $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$, 它们在固定坐标系的空间位置以矢量 $\mathbf{b}_i (i = 1, \dots, 6)$ 表示; 下平台 6 个球铰点坐标分别为 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$, 对固定坐标系的位置以矢量 $\mathbf{B}_i (i = 1, \dots, 6)$ 表示, 则

$$\mathbf{S}_i = \frac{\mathbf{b}_i - \mathbf{B}_i}{|\mathbf{b}_i - \mathbf{B}_i|} \quad (4)$$

$$\mathbf{S}_{0i} = \mathbf{B}_i \times \mathbf{S}_i = \frac{\mathbf{B}_i \times \mathbf{b}_i}{|\mathbf{b}_i - \mathbf{B}_i|} \quad (5)$$

根据平台的结构尺寸及位形参数可求得上下平台各个铰点的坐标, 结合式(3)、(4) 和(5) 可得到矩阵 \mathbf{G}_f^T . 因此, 只要测得各杆受力, 根据式(2) 便可得到 Stewart 上平台受到的六维力 \mathbf{F}' .

1.2 六维大力分载测量原理

Stewart 结构并联于机械手的手臂上, 上下平台与手臂采用螺栓连接, 原理图如图 2 所示, 图中虚线部分为机械手的手臂, 机械手工作时, 对手臂产生一个作用力 \mathbf{F} , \mathbf{F} 主要由机械手手臂承担, 少部分力分载到 Stewart 结构上. 设 \mathbf{F} 分载到 Stewart 上平台的作用力为 \mathbf{F}' , 以 Stewart 下平台作为定平台, 上平台作为动平台, 将六杆上测得的力 f_i 代入式(2) 可以计算出 \mathbf{F}' . 将测得的各杆受力 f_i 代入下式^[7]

$$\Delta l_i = \frac{f_i l}{EA} \quad (6)$$

式中: E 为弹性模量, A 为测量杆的截面积. 则各个杆的变形量写成向量形式为 $\Delta \mathbf{l} = (\Delta l_1 \ \Delta l_2 \ \Delta l_3 \ \Delta l_4 \ \Delta l_5 \ \Delta l_6)$, 由位置正解公式^[8]

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_0) \cdot \Delta \mathbf{l} \quad (7)$$

得到上平台位置增量 $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z)$, 其中 $\mathbf{J}(\mathbf{x}_0)$ 为 Stewart 结构变形的 Jacobian 矩阵^[7]. 以上平台的位移作为边界条件, 对图 2 的 $o_1 O_2$ 之间的部分进行受力分析, 可得到这段手臂的位移场, 根据位移得到机械手与手臂连接处受到的六维力 \mathbf{F}'' , \mathbf{F}'' 为机械手对手臂的作用力 \mathbf{F} 和 Stewart 平台对手臂的作用力 \mathbf{F}' 的合力, 即 $\mathbf{F}'' = \mathbf{F} + \mathbf{F}'$, 则机械手对手臂的作用力为 $\mathbf{F} = \mathbf{F}'' - \mathbf{F}'$.

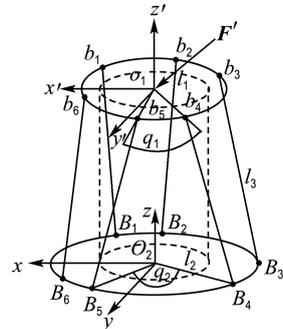


图 2 分载测量原理图

Fig. 2 Principle diagram of partial load

2 六维大力传感器的结构设计

依据所提出的六维大力分载测量原理,对六维大力传感器具体结构进行设计,如图3所示。

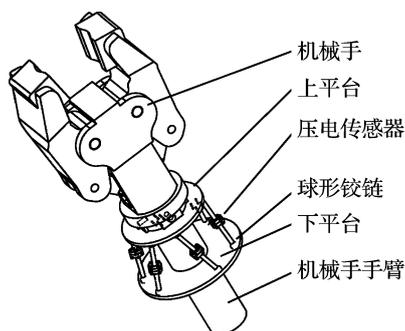


图3 六维大力传感器结构图

Fig. 3 Structure of six-axis heavy force sensor

该结构主要包括 Stewart 上下平台、8 只固定上下平台的连接螺栓、6 根上下平台连接杆、6 套测量拉压的压电式传感器以及 12 对球形铰链。上下平台通过螺栓与操作手臂相连,连接杆与上下平台铰链连接,每只连接杆中间安装有压电传感器。

连接杆分成上下两部分,如图4所示,连接处一面带有凹槽,一面带有凸台,将石英晶片放入凹槽内,凹槽与凸台相互配合,确保上下杆中心对中,通过连接螺栓给压电石英片一定的预紧力。

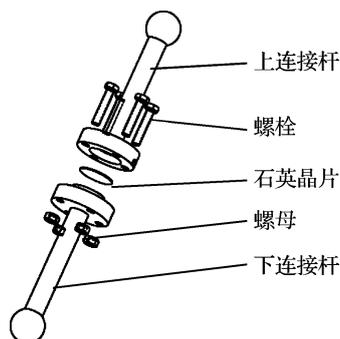


图4 压电石英传感器部分结构

Fig. 4 Partial structure of the piezoelectricity quartz sensor

3 六维大力传感器的仿真

3.1 分载效果仿真

根据机构的安装方式和测力原理,在ANSYS

中构造有限元模型,首先对几何参数进行确定。由图1可知,Stewart结构的5个尺寸参数为上平台半径 l_1 、下平台半径 l_2 、中间杆长 l_3 、上平台两球铰夹角 q_1 和下平台两球铰夹角 q_2 ,且 $0^\circ < q_2 - q_1 < 120^\circ$,取 $q = q_2 - q_1$,令^[9]

$$l = (l_1 + l_2 + l_3)/3 \quad (8)$$

$$l_{ri} = l_i/l; i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

其中 l_{ri} 为杆的相对长度,是一个量纲一的参数。由式(8)、(9)得

$$l_{r1} + l_{r2} + l_{r3} = 3 \quad (10)$$

为保证该机构能够正确安装,各量纲一杆长的范围满足以下条件:

$$0 < l_{r1} < 1.5, 0 < l_{r2} < 1.5, \mu < l_{r3} < 3 \quad (11)$$

其中 $\mu = \sqrt{l_{r1}^2 + l_{r2}^2 - 2l_{r1}l_{r2}\cos(q/2)}$ 。

根据上面约束选取 Stewart 结构各几何参数如下:上平台半径 l_1 为 0.12 m;下平台半径 l_2 为 0.16 m,6 根连接杆长 l_3 为 0.15 m,杆的截面积为 3 cm^2 ,上平台两个球铰间的夹角 q_1 为 40° ,下平台两个球铰间的夹角 q_2 为 80° 。理想的上平台应为厚度为零的平面,但建模困难,因此,取上平台厚度为 0.03 m,将上下平台之间的机械手臂抽象成如图5所示的中间圆柱部分,其半径 r 为 0.1 m,采用单元 beam188 作为六杆模型,将杆单元上节点与上平台相对应的节点进行 x 、 y 、 z 三个自由度的节点耦合,模拟球形铰链。因为下平台为定平台,为减少由于下平台厚度所引起的误差,将中间圆柱下截面完全约束,杆单元下端约束 x 、 y 、 z 三个方向的自由度,其效果等同于约束一个厚度为零的下平面。模型如图5所示。

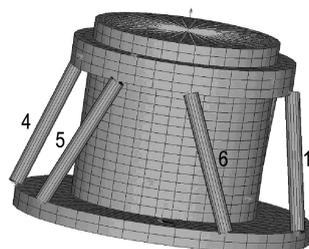


图5 六维大力传感器有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the six-axis heavy force sensor

现对中间圆柱上平面分别施加各个方向的力和力矩,各个方向上的力和力矩均加载到上平台中心的节点上,该节点与同平面上各点通过 mpc184 刚性单元连接,计算得各杆的内力值如表 1 所示,

当沿 x 轴方向加载 80 kN 的力时,由表 1 可知,受力最大的杆为第 3 杆和第 4 杆,第 3 杆和第 4 杆受到 2 017.4 N 的拉力,若不采用分载方式,而是直接将力加载到上平台,模型如图 6 所示。

表 1 六杆内力表

Tab.1 Six rods internal forces

	内力/N					
	$F_x=80\text{ kN}$	$F_y=80\text{ kN}$	$F_z=80\text{ kN}$	$M_x=10\text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_y=10\text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_z=10\text{ kN}\cdot\text{m}$
f_1	-1 665.9	-1 367.2	258.52	768.24	-1 914.1	981.86
f_2	-351.57	-2 125.6	258.49	2 258.3	-129.16	-791.86
f_3	2 017.4	-760.02	258.55	691.80	1 373.5	854.00
f_4	2 017.4	760.02	258.55	-691.80	1 373.5	-854.00
f_5	-351.57	2 125.6	258.49	-2 258.3	-129.16	791.86
f_6	-1 665.9	1 367.2	258.52	-768.24	-1 914.1	-981.86

注:负号代表压力

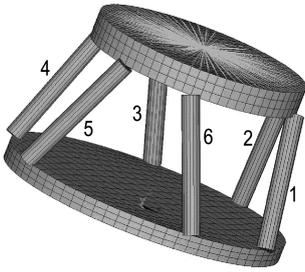


图 6 Stewart 结构六维力传感器有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the six-axis heavy force sensor based on the Stewart structure

选取沿 x 轴方向加载 80 kN 力时结果与分载情况进行比较,未分载时六杆的受力 $f = (25\ 573\ -73\ 592\ 48\ 020\ 48\ 020\ -73\ 592\ 25\ 573)^T$,其中最大力为 $-73\ 592\ \text{N}$ 。而从表 1 可知,分载后在 x 方向加力 $F = (80\ 000\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)^T$ 时,六杆中第 3、4 杆受力最大,仅为

2 017.4 N,是没有分载时最大力的 2.7%。

3.2 重要结构参数对分载效果的影响

分载和未分载两种情况六杆的受力分析表明:未分载时受力最大杆在 2 杆和 5 杆,其内力为压力;而分载后受力最大杆在 3 杆和 4 杆,其内力为拉力,可见分载后上平台不仅受力大小发生变化,力的分布也有所变化。从 Stewart 结构与机械手臂的连接方式可知,上平台所受的力是从手臂分载过来的,加载于 x 轴方向力 F 直接作用到手臂上,手臂产生沿 x 轴方向的弯曲变形,该变形带动上平台沿 x 轴方向移动同时绕 y 轴转动。因此,手臂给上平台的作用力 F' 应包含沿 x 轴方向的力和绕 y 轴的扭矩两部分,而且上平台的厚度也会影响到 F' 。为验证上述结论,将仿真中用到的 Stewart 结构的几何参数,代入式(3)得到矩阵

$$G_i^F = \begin{pmatrix} -0.064\ 1 & -0.317\ 1 & 0.381\ 1 & 0.381\ 1 & -0.317\ 1 & -0.064\ 1 \\ -0.402\ 9 & -0.256\ 6 & 0.145\ 5 & -0.145\ 5 & 0.256\ 6 & 0.402\ 9 \\ 0.913\ 0 & 0.913\ 0 & 0.913\ 0 & 0.913\ 0 & 0.913\ 0 & 0.913\ 0 \\ 0.037\ 5 & 0.107\ 9 & 0.070\ 5 & -0.070\ 5 & -0.107\ 9 & -0.037\ 5 \\ -0.103\ 0 & 0.018\ 9 & 0.083\ 8 & 0.083\ 8 & 0.018\ 9 & -0.103\ 0 \\ -0.042\ 8 & 0.042\ 8 & -0.042\ 8 & 0.042\ 8 & -0.042\ 8 & 0.042\ 8 \end{pmatrix}$$

将表1第一列 $f = (-1\ 665.9\ -351.57\ 2\ 017.4\ 2\ 017.4\ -351.57\ -1\ 665.9)^T$ 以及计算得到的矩阵 G^f 代入式(2),得到上平台受力 $F' = (1\ 974.4\ 0\ -0.13\ 0\ 668.01\ 0)^T$, 该结果验证了上平台受到的力主要是沿 x 轴方向的力和绕 y 轴的扭矩两部分的结论。

为讨论上平台厚度 T 对分载效果的影响,改变上平台的厚度,得到上平台受到的 x 轴方向的力和绕 y 轴的扭矩与上平台厚度关系曲线,如图7、8所示。

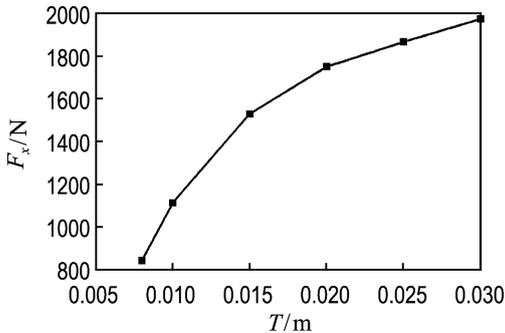


图7 上平台厚度与上平台受力的关系

Fig. 7 The relationship between the force and the thickness of the upper platform

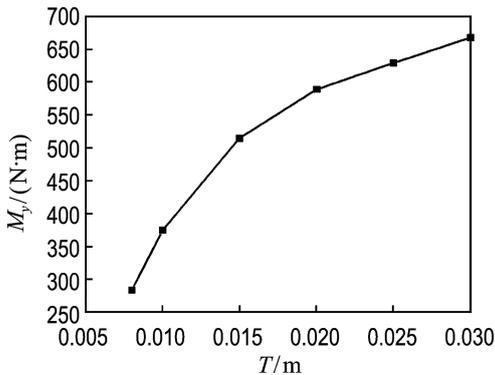


图8 上平台厚度与上平台受力矩的关系

Fig. 8 The relationship between the moment and the thickness of the upper platform

结果表明,上平台厚度 T 减小后,无论上平台 x 轴方向受力还是 y 轴方向的扭矩都减小,但在上平台上需安装球形铰链,且要保证刚度,如本文中结构球窝半径大于 5 mm,则根据球铰及上平台的刚度要求,上平台的厚度不能低于 20 mm。因此,在具体设计时应根据球铰的球窝深度及要求的刚度选择合适的上平台厚度。

Stewart 结构的各个结构参数以及中间机械手臂的半径都是影响分载能力的因素,采用“单因素法”分析各参数的影响,即在其他参数不变的情况下,改变其中一个参数,观察对分载效果的影响,其中机械手臂的半径对分载效果影响最大,机械手臂半径与各杆受力的关系如图9所示。结果表明,随着机械手臂半径的增加,分载能力增强,且在当前结构参数下,半径超过 0.06 m 时,六杆受力变化相对较小。

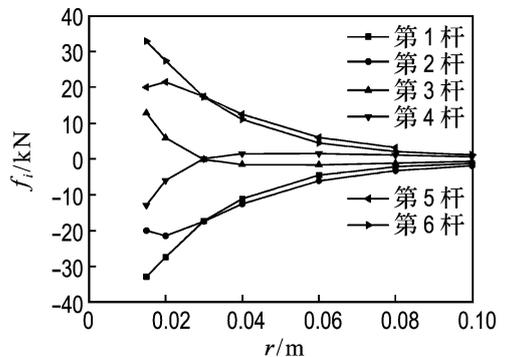


图9 机械手臂半径与各杆受力之间的关系

Fig. 9 The relationship between the radius of manipulator and forces of the six rods

分析仿真结果可知:分载后连接杆的受力明显减小,且连接杆受力受机械手臂半径影响最大;另外,上平台的厚度对上平台受到的力和力矩有较大影响。

4 结论

(1)给出了获得六维大力值的相关理论推导,具体算法为首先计算 Stewart 结构对被测机械手臂的作用力,其次计算上平台的位移,最后对位于上下平台之间的一段机械手臂进行受力分析,得到机械手作用到手臂上的六维大力。

(2)对分载效果进行计算机仿真,在沿 x 轴方向加载 80 kN 力的情况下,分载时连接杆所受的最大力仅为未分载时的 2.7%,分载效果良好。

(3)分析了传感器两个重要结构参数上平台厚度和机械手臂半径对分载效果的影响:在满足铰链安装条件的前提下,上平台越薄,分载效果越好;机械手臂半径增加,分载能力增强,对于本传感器结构,当机械手臂半径大于 0.06 m

时,对分载效果影响不明显.

参考文献:

- [1] 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
- [2] 高国富, 谢少荣, 罗 均. 机器人传感器及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2005
- [3] YOSHIKAWA T, MIYAZAKI T. A six-axis force sensor with three-dimensional cross-shape structure [C] // **Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Scottsdale: IEEE, 1989:249-255
- [4] KANEKO M, NISHIHARA T. Twin-head type six-axis force sensors [C] // **Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**. Yokohama:IEEE, 1993:991-996
- [5] KERR D R. Analysis, properties and design of a Stewart platform transducer [J]. **Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design**. 1989, 111(1):25-28
- [6] 黄 真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1997
- [7] 苟文选. 材料力学(D)[M]. 北京:科学出版社, 2005
- [8] KANG Chul-goo. Closed-form force sensing of a 6-axis transducer based on the Stewart platform [J]. **Sensors and Actuators**, 2001, 90(1-2):31-37
- [9] 高 峰, 刘辛军, 金振林. 机器人机构 CAD 的研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(4):9-13

Research on measuring principle of six-axis heavy force sensor

LIN Sheng*, LIU Wei, WANG Yong-qing, JIA Zhen-yuan

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To solve the difficult problem of measuring the six-axis heavy force, a method of parallel connection is presented, and the concrete implementing scheme is also established. Firstly, the Stewart structure is connected to the arm of heavy equipment in parallel, as a result, partial load of six-axis heavy force is shared on the Stewart structure. Secondly, mechanics decoupling method is used to get the six-axis force. Finally, simulation analysis of the six-axis heavy force sensor is conducted, and the effect of the important parameters on the ability of load sharing is analyzed. Results show that the ability of load sharing is improved with the increment of the radius of load sharing beam and the reduction of the thickness of the upper platform, which presents theoretical basis for the design of this kind of sensor. Furthermore, the rationality and validity of this method are verified.

Key words: six-axis heavy force; partial load; Stewart structure; sensor