

## 惯组动态测试台误差分析及附加运动补偿算法\*

蔡洪<sup>1</sup>, 孙文利<sup>1</sup>, 马建明<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

**摘要:**为了完成惯组的高精度、大动态测试任务,基于 Gough - Stewart 平台设计了电动六自由度惯组动态测试台。建立了系统的误差模型并分析了电动缸长度误差对系统精度的影响,分析了电动缸在惯组动态测试台运动过程中产生的被动螺旋附加运动,并对该运动补偿算法进行了研究。对被动螺旋附加运动产生的误差进行量化分析,结果表明,被动螺旋附加运动对惯组动态测试台的位姿精度存在非常显著的影响。为了消除该影响,编制了补偿算法,并将其应用于惯组动态测试台的实时控制系统中。实验结果表明,经过算法补偿后,惯组动态测试台的位姿精度达到了设计指标要求。

**关键词:**惯组; Gough - Stewart 平台; 误差分析; 附加运动; 补偿算法; 实时控制

中图分类号: TP242 文献标志码: A 文章编号: 1001 - 2486 (2014) 05 - 058 - 08

## Error analysis of dynamic testing table of inertial measurement unit and its increment motion compensation

CAI Hong<sup>1</sup>, SUN Wenli<sup>1</sup>, MA Jianming<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Beijing Aerospace Control Device Institute, Beijing 100854, China)

**Abstract:** In order to implement high accurate and large dynamic test tasks of inertia measurement unit (IMU), 6 - degrees of freedom electric dynamic test table of IMU was designed on the basis of Gough - Stewart platform. Error model was established and the effect of electric cylinder length error on the accuracy of the system was analyzed. The passive spiral increment motion of electric cylinder produced in the movement of IMU dynamic test table was analyzed further and the compensation algorithm of the movement was studied. The quantitative analysis of the error brought from the passive spiral increment motion shows that the effect of the motion to the pose accuracy of dynamic test table is significant. In order to clear the effect, the compensation algorithm was accomplished and was applied to the real-time control system of the dynamic test table of IMU. Experimental results show that the position accuracy of dynamic test table of IMU reaches the design specification due to compensation algorithm.

**Key words:** inertial measurement unit; Gough - Stewart platform; error analysis; increment motion; compensation algorithm; real-time control

随着航空、航天工业技术的高速发展,对惯性元件及其组成的惯组的精度要求不断提高<sup>[1-2]</sup>,而作为测试惯组动态特性重要设备之一的三轴摇摆台来说,其动态精度和动态性能直接关系到惯组动态测试试验结果的真实性和有效性,因此对其性能指标的要求也越来越高。传统的三轴摇摆台,通常采用串联机构的方式,由3个相互垂直的可实现有限转动的驱动机构和框架组成。采用这种方式的缺点在于串联机构的相对刚度较小,系统的动态精度和动态特性、系统带宽等在许多要求较高的应用场合都满足不了要求,并且无法实现惯组的六自由度测试,因此其应用受到了一定的限制。

将高精度的 Gough - Stewart 平台应用于测试

惯组动态特性是近些年发展起来的新技术。Gough - Stewart 并联机构具有定位精度高、刚度大、结构稳定、承载能力强、运动惯量小、动态特性好等特点<sup>[3-6]</sup>,特别是其六自由度运动能力为惯组动态测试所需的正弦摇摆运动提供了很好的解决方案。文献[7]采用高精度六自由度运动平台为装甲车辆火控稳瞄系统的研制和性能测试提供真实的环境模拟,可以精确实现各种标准波形和随机波形的姿态运动。美国 Taranti 基于并联机构设计了用于激光通信的精密跟瞄装置 PPH<sup>[8]</sup> (Precision Pointing Hexapod),该装置具有精确的指向能力和振动控制能力。崔龙<sup>[9]</sup>为实现高精度的空间跟踪瞄准任务,基于宏微动作驱动器,采用 6 - SPS 并联机构设计了具有振动控制能力的高

\* 收稿日期: 2014 - 03 - 11

基金项目: 航天科技创新基金资助项目 (CASC201105)

作者简介: 蔡洪 (1967—), 男, 湖南涟源人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: hcail@nudt.edu.cn

稳定精密跟瞄机构,可实现扰动环境中的大范围高精度跟瞄功能。刘勺斌<sup>[10]</sup>基于 Stewart 平台设计了多维空间光学仪器主动隔振系统,保证了高精度空间光学仪器的精度。

本文基于 Gough - Stewart 平台设计了电动六自由度惯组动态测试台,可完成惯组的高精度、大动态测试任务。

## 1 系统组成及工作原理

### 1.1 系统组成

六自由度惯组动态测试台采用 Gough - Stewart 平台结构形式,主要由上平台、基座、上铰组件、下铰组件,电气控制柜以及连接于上平台和基座之间的 6 套交流伺服电机控制的电动缸构成,如图 1 所示。电动缸与上平台和基座之间均采用可承受大载荷的无间隙两自由度虎克铰连接,通过 6 个电动缸的协调伸缩动作来实现上平台在空间的六自由度运动。将惯组安装在上平台的负载安装面上,通过控制六自由度惯组动态测试台的上平台进行六自由度正弦运动,即可实现惯组在 6 个自由度方向上的高精度、大动态测试。

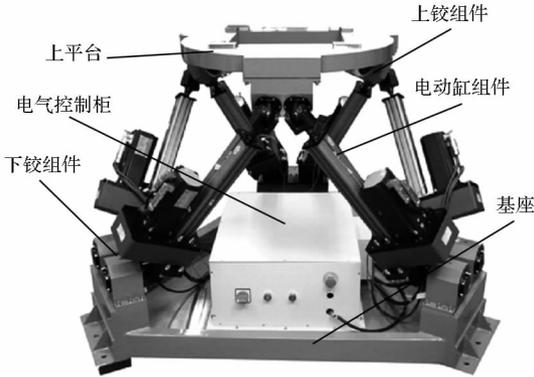


图 1 电动六自由度惯组动态测试台

Fig. 1 6 - DOF electric dynamic test table of IMU

### 1.2 工作原理

六自由度惯组动态测试台属于典型的并联机构,其最基本的控制模式是位姿控制,其工作原理如图 2 所示。测试人员输入期望的运动位姿参数(上平台位姿),并将该运动参数传输给运动控制计算机;运动控制计算机通过运动学反解计算出 6 个电动缸的运动参数(电动缸的位移量),然后把 6 个驱动系统的运动参数输出给伺服控制系统;伺服控制系统根据该位移参数经过位置闭环控制,使电动缸缸杆达到所要求的位移量,上平台也就达到了所期望的运动位姿。

这种控制方法被称为基于铰点空间的控制方

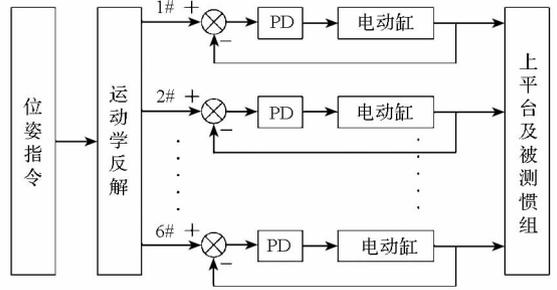


图 2 系统原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of the system

法,该方法主要是基于运动学反解与单支路电动伺服控制系统来实现的,6 套电动伺服系统采用独立的位置闭环控制,具有控制器设计简单,易于实现分布式控制和设计安全保护策略等优点,是目前六自由度电动平台应用最广泛的一种控制方法。

根据空间机构学中的自由度理论计算公式可知,本文设计的六自由度惯组动态测试台,其伺服电动缸必须同时具有直线伸缩和旋转两个自由度的运动能力时,整个机构才能正常运动,这种构型的惯组动态测试台也被称为 6 - U (RP) U 型 Gough - Stewart 平台。对于丝杠螺母式电动缸来说,其本身就同时具有直线伸缩和旋转两个自由度的运动能力,然而其移动副和旋转副之间不独立,旋转副转动的同时会产生移动副的移动,因此在惯组动态测试台运动的过程中电动缸将产生被动螺旋附加运动,造成系统的位姿误差。

## 2 精度与误差分析

六自由度惯组动态测试台的精度是其性能的重要指标之一,其实际位姿与理论位姿之间的偏差,称为系统的位姿误差。在对测试台进行精度分析时,首先需要明确其误差来源,然后建立系统的误差模型,最后分析各误差源对系统精度的影响,并对影响较大的误差源进行补偿,以提高六自由度惯组动态测试台的系统精度。

### 2.1 误差源分析

影响六自由度惯组动态测试台位姿误差的原因主要有以下 4 个方面:

#### 1) 几何参数误差

六自由度惯组动态测试台的机械系统在机械加工和装配过程中不可避免地会存在误差,这些误差包括上铰组件和下铰组件的加工装配误差以及安装时的空间位置误差,还包括电动缸的初始长度误差等。

#### 2) 物理参数误差

上铰组件、下铰组件以及电动缸的滚柱丝杠由于温度、负载等物理参数变化引起的弹性变形误差,例如六自由度惯组动态测试台在其工作空间内,每一个伺服电动缸的单缸载荷会发生宽幅变化,从而会引起滚柱丝杠发生较大的弹性变形,从而引起整个系统的位姿误差。

3) 传动误差

丝杠和螺母之间的间隙、丝杠的螺距误差、齿形同步带的弹性误差以及被动螺旋附加运动引起的误差构成了系统的传动误差。

4) 控制误差

六自由度惯组动态测试台伺服电动缸的传动形式是旋转交流伺服电机 + 同步齿形带 + 滚柱丝杠式电动缸。反馈编码器安装在交流伺服电机的输出轴上,属于典型的半闭环控制,因此引起系统控制误差的因素很多,主要有编码器误差、控制系统误差、交流伺服电机摩擦力引起的误差、电动缸摩擦力引起的误差、传感器调理电路误差等。

对于六自由度惯组动态测试台来说,控制误差一般要远低于机械系统的参数误差和传动误差,而且控制误差只会导致上铰点和下铰点之间的距离产生误差,这与伺服电动缸的长度误差对系统精度的影响是相同的,可以将控制误差包含在电动缸的初始长度误差中,所以影响六自由度惯组动态测试台位姿误差的主要因素是几何参数误差。最终经过分析可得六自由度惯组动态测试台的误差源共有 42 个,即上铰点坐标误差、下铰点坐标误差和伺服电动缸的长度误差。

2.2 误差模型的建立

六自由度惯组动态测试台加工和装配完后的参数为实际参数,实际参数是客观存在的,但往往不能精确测量,因而六自由度惯组动态测试台控制器中采用的铰点坐标、伺服电动缸的初始长度等参数与实际参数总是存在偏差的。通常将控制器中采用的参数或者结构设计时的理论参数称为名义参数。进行六自由度惯组动态测试台的精度分析时需要先建立其误差模型,一般可对运动学反解方程进行微分来建立系统的误差模型。

六自由度惯组动态测试台的上铰组件和下铰组件的回转中心分别表示为  $A_i$  和  $B_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ )。如图 3 所示,在基座上建立惯性坐标系  $\{g\}$ :  $O_b - X_b Y_b Z_b$ ,在上平台上建立体坐标系  $\{p\}$ :  $O_p - X_p Y_p Z_p$ 。上铰组件的回转中心在体坐标系  $\{p\}$  下的坐标表示为:  $a_i^p = [a_{ix}^p, a_{iy}^p, a_{iz}^p]^T, i = 1, \dots, 6$ ,下铰组件的回转中心在惯性坐标系  $\{g\}$  下的坐

标表示为:  $b_i = [b_{ix}, b_{iy}, b_{iz}]^T, i = 1, \dots, 6$ 。用  $t = [x, y, z]^T$  表示体坐标系的原点在惯性坐标系下的坐标向量,  $x, y, z$  分别称为纵向位移、横向位移和升降位移。

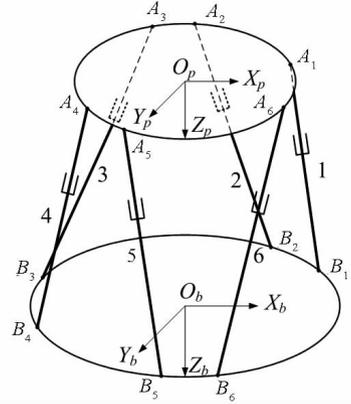


图 3 Gough - Stewart 平台结构简图

Fig. 3 Schematic diagram of the Gough - Stewart platform

据上述定义,利用空间机构学的原理可得

$$a_i = t + R a_i^p \quad (1)$$

式中  $R$  为旋转变换矩阵,表示由惯性坐标系到体坐标系的坐标变换。文中采用  $Z_\psi - Y_\theta - X_\varphi$  的变换次序,因此  $R$  的表达式为

$$R = \begin{pmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi & s\psi s\varphi - s\psi s\theta c\varphi \\ s\psi c\theta & c\psi c\varphi - s\psi s\theta s\varphi & c\psi s\theta c\varphi - c\psi s\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中  $\psi, \theta, \varphi$  为上平台姿态  $q_i$  的三个欧拉角,分别称为偏航、俯仰和横滚,  $q_i = [\varphi, \theta, \psi]^T$ 。c 表示 cos, s 表示 sin。

式(1)两边同时减去  $b_i$  可得

$$a_i - b_i = t + R a_i^p - b_i \quad (3)$$

若用  $l_i$  表示电动缸矢量,  $l_{ni}$  表示电动缸的单位矢量,  $l_i$  表示电动缸的长度,则式(3)可写成如下形式

$$l_i = l_{ni} \cdot l_i = a_i - b_i = t + R a_i^p - b_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

对式(4)两边取微分,可得

$$l_{ni} \cdot dl_i + dl_{ni} \cdot l_i = dt + dR \cdot a_i^p + R \cdot da_i^p - db_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

其中,  $dR$  为动平台姿态  $q_i$  的函数,可表示为

$$dR = \begin{bmatrix} 0 & -d\psi & d\theta \\ d\psi & 0 & -d\varphi \\ -d\theta & d\varphi & 0 \end{bmatrix} \cdot R \quad (6)$$

代入式(5),可得

$$l_{ni} \cdot dl_i + dl_{ni} \cdot l_i = dt + d\Omega \times R a_i^p + R \cdot da_i^p - db_i \quad (7)$$

式中  $d\Omega = [d\varphi \quad d\theta \quad d\psi]^T$ 。

对式(7)两端同时乘以矢量  $l_{ni}^T$ ,并整理得



以消除。

### 3.2 被动螺旋附加运动补偿算法

在惯性坐标系  $\{g\}$  下, 电动缸的矢量如图 4 所示, 其中  $k_i$ 、 $j_i$ 、 $m_i$ 、 $n_i$  分别表示上铰组件和下铰组件轴线的单位方向矢量。从图中可以看出, 缸杆与缸筒之间的转角变化可以通过矢量  $k_i$  与  $m_i$  的夹角变化来表示。

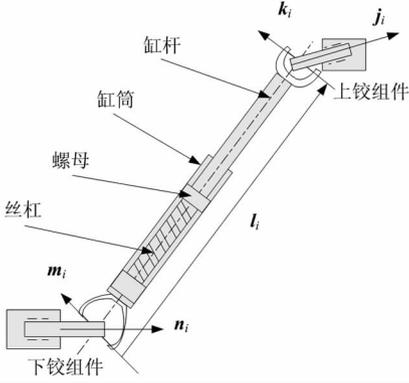


图 4 电动缸矢量图

Fig. 4 Vector diagram of electric cylinder

向量  $j_i$  可以表示为

$$j_i = R j_i^p \quad (13)$$

式中  $j_i^p$  为上铰组件与上平台的连接轴线在体坐标系中的单位矢量。

根据两自由度虎克铰的结构形式可得

$$k_i \perp j_i, m_i \perp n_i, k_i \perp l_i, m_i \perp l_i \quad (14)$$

向量  $k_i$  与  $m_i$  可以表示为

$$k_i = \frac{j_i \times l_i}{|l_i|} \quad (15)$$

$$m_i = \frac{n_i \times l_i}{|l_i|} \quad (16)$$

因此,  $k_i$  与  $m_i$  的空间夹角大小可以表示为

$$\alpha_i = \arccos(k_i \cdot m_i) = \arccos\left(\frac{j_i \times l_i}{|l_i|} \cdot \frac{n_i \times l_i}{|l_i|}\right) \quad (17)$$

由式(17)求出的  $\alpha_i$  在  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间, 修改初始矢量  $n_i$  的默认正方向, 将计算所得上平台位于中位时夹角  $\alpha_{i0}$  归一化到  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间, 具体方法为

$$n_i = \begin{cases} n_i, & \alpha_{i0} \in [0^\circ \sim 90^\circ] \\ -n_i, & \alpha_{i0} \in (90^\circ \sim 180^\circ] \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (18)$$

定义电动缸缸杆相对于缸筒做逆时针旋转为正, 则相对旋转角度可以表示为

$$\Delta\alpha_i = (\alpha_i - \alpha_{i0}) \frac{(k_i \times m_i) \cdot l_z}{|(k_i \times m_i) \cdot l_z|} \quad (19)$$

式中  $\alpha_{i0}$  为上平台位于中位时, 矢量  $k_i$  与  $m_i$  的初始夹角;  $l_z$  为单位向量,  $l_z = (0, 0, 1)$ 。

由此, 被动螺旋附加运动引起的各个电动缸

的伸长变化量可表示为

$$\Delta L_{2i} = (-1)^n \frac{\Delta\alpha_i}{2\pi} \cdot P \quad (20)$$

式中  $P$  为丝杠导程; 若滚珠丝杠右旋时,  $n$  取 2; 若滚珠丝杠左旋时,  $n$  取 1。

则被动螺旋附加运动引起的位姿误差可以表示为

$$\Delta q = J^{-1} \Delta L_{2i} \quad (21)$$

式中  $J^{-1}$  为由电动缸长度变化到上平台位姿变化的 Jacobin 矩阵。

### 3.3 被动螺旋附加运动误差量化分析

利用上述对被动螺旋附加运动进行的理论分析, 对本文设计的电动六自由度惯组动态测试台进行相应的误差量化分析。以上平台作  $x$  向(纵向)平动为例进行说明, 其最大直线运动范围为  $-200\text{mm} \sim +200\text{mm}$ , 在  $x$  向的整个运动范围内, 通过式(19)对被动螺旋附加运动产生的 6 个电动缸缸杆的旋转运动进行计算, 计算结果如图 5 所示。

从图中可见, 1#电动缸和 6#电动缸在运动到  $-200\text{mm}$  时产生的旋转运动角度最大, 均为  $7.36^\circ$ , 且 1#电动缸缸杆为顺时针旋转, 6#电动缸缸杆为逆时针旋转, 并且由于 Gough - Stewart 平台具有一定的结构对称性, 上平台作  $x$  向(纵向)平动时, 1#和 6#电动缸、2#和 5#电动缸、3#和 4#电动缸的旋转运动均表现出反向对称性。

在上面分析的基础上, 利用式(20)对被动螺旋附加运动引起的各个电动缸的伸长变化量进行计算, 计算结果如图 6 所示。

从图中可见, 1#电动缸和 6#电动缸在运动到  $-200\text{mm}$  时产生的伸长变化量最大, 均为  $0.26\text{mm}$ 。由式(19)和式(20)可知, 被动螺旋附加运动产生的电动缸缸杆的旋转运动与其伸长变化量具有线性关系, 因此图 6 中各电动缸的运动趋势与图 5 中各电动缸的运动趋势相似。

其他 5 个自由度的运动同样存在由于对被动螺旋附加运动产生的电动缸缸杆的旋转运动, 以及由其引起的电动缸的伸长变化, 此处不再赘述。通过对被动螺旋附加运动进行误差量化分析可知, 被动螺旋附加运动引起的电动缸长度误差达到了毫米数量级, 通过式(21)计算可知, 其对于惯组动态测试台的位姿精度存在着非常显著的影响。

## 4 实验研究及结果分析

被动螺旋附加运动误差补偿算法的具体实现如图 7 所示。首先, 由  $q_i = (i = 1, 2, \dots, 6)$  实时

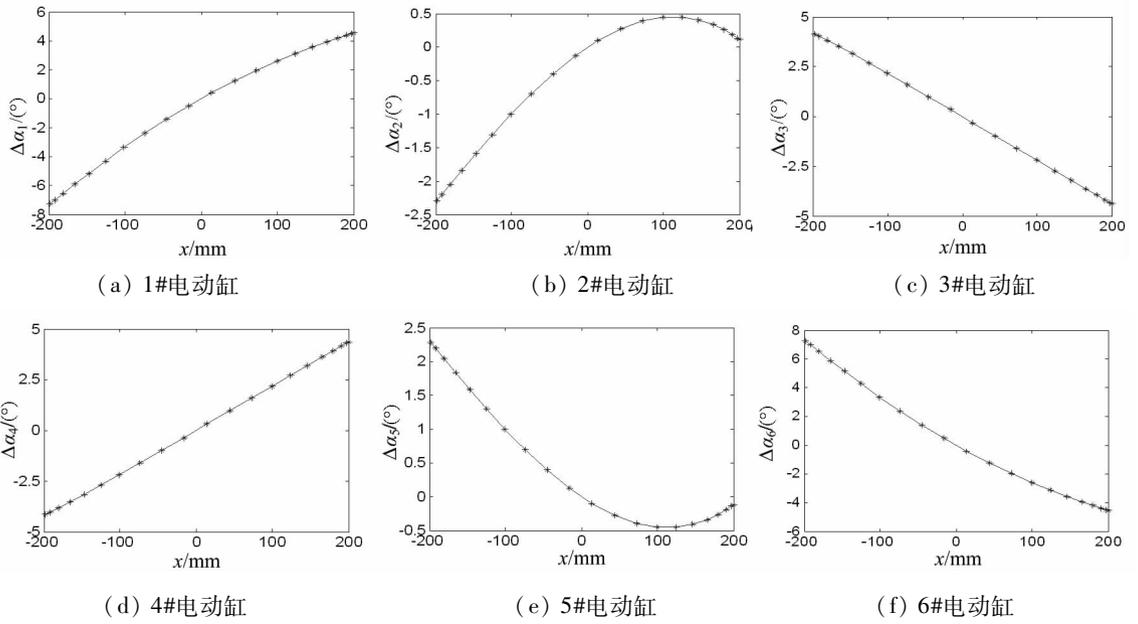


图5 被动螺旋附加运动产生的旋转角度

Fig. 5 Rotation angle produced by passive spiral increment motion

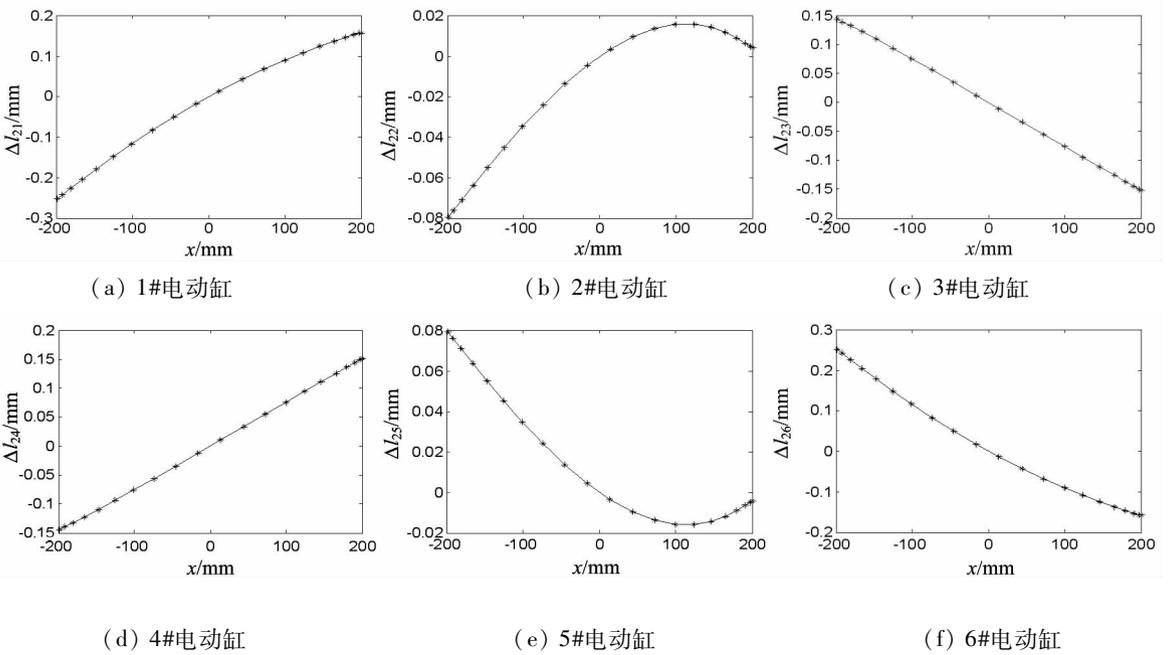


图6 被动螺旋附加运动产生的电动缸伸长量

Fig. 6 Extension value of electric cylinder produced by passive spiral increment motion

求解出相对转角变化量  $\Delta\alpha_i$  以及因此产生的电动缸附加运动伸长量  $\Delta L_{2i}$ ; 然后, 将  $\Delta L_{2i}$  作为误差量对由位置反解得到的电动缸伸长量  $\Delta L_i$  进行修正, 即可得到修正后电动缸的控制伸长量  $\Delta L_i^*$ 。

按照上述被动螺旋附加运动误差补偿算法, 采用 LabVIEW 图形化编程语言实现了该算法, 并编制了被动螺旋附加运动补偿算法模块, 最后将所编制的补偿算法模块嵌入到六自由度惯组动态测试台实时控制系统软件中。所开发的控制系统

软件人机操作界面如图 8 所示, 该软件具备运动信号生成(包括常值位姿信号、正弦信号、方波信号、三角波信号等)、驱动器使能操作、上平台自动寻零、伺服运动控制、误差标定及补偿、操作逻辑保护、状态监测及显示、故障保护、采集信号实时显示等功能。

为了验证被动螺旋附加运动补偿算法的有效性, 在未采取其他任何误差补偿方法的情况下, 利用某型激光干涉仪的线性测量功能对本文设计的六自由度惯组动态测试台上平台的静态精度进行

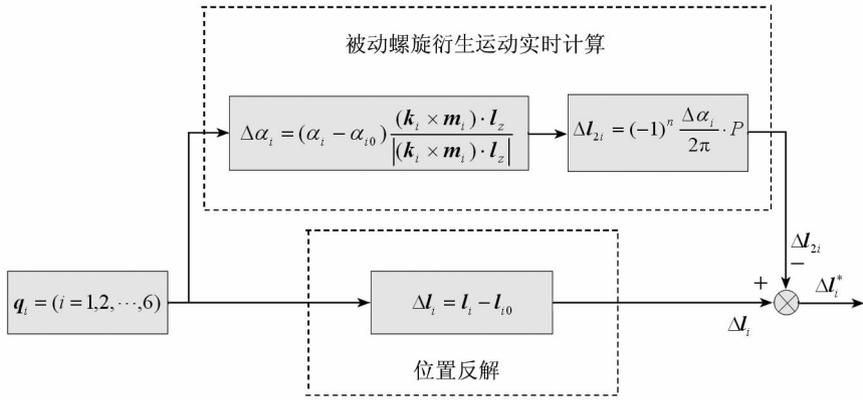


图 7 误差补偿框图

Fig. 7 Block diagram of the error compensation



图 8 控制程序主界面

Fig. 8 Main interface of control program

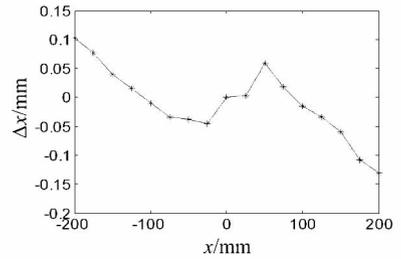


图 9 x 向平动测量误差曲线

Fig. 9 Measurement error curve of x direction translation

测试。该型激光干涉仪的线性测量分辨率为 0.001 $\mu\text{m}$ , 测量范围 40m, 线性测量精度为  $\pm 0.7\text{ppm}$ , 最大测量速度为 1m/s, 长期稳频精度为  $\pm 0.05\text{ppm}$ 。

假设初始工作零位处, 上平台的位置误差为 0mm, 以 25mm 位移为间隔, 在  $\pm 200\text{mm}$  的运动范围内, 依次测试 16 个位置, 测量结果如图 9 所示。从图中可知, 最大正向误差为: 0.102 6mm, 出现在上平台运动到 200mm 处; 最大负向误差为 -0.131mm, 出现在上平台运动到 -200mm 处, 并且所测量的位置误差相对于 x 向(纵向)平动具有一定的线性关系。从图中还可发现, 最大正向、最大负向误差均出现在 x 向(纵向)平动的极限运动范围处, 这同样也验证了 Gough - Stewart 平台在其极限运动范围处雅克比矩阵的条件数最大, 平台的运动和动力传递特性最差的固有特性。

由于目前实验室尚不具备对六自由度惯组动态测试台同时进行 6 个自由度的高精度在线测量条件, 因此本文只对单自由度方向的被动螺旋附加运动及其补偿算法情况进行了实验研究。对实验研究结果分析可知, 通过对被动螺旋附加运动进行补偿, 六自由度惯组动态测试台上平台在其

运动范围内, 达到了平动位姿精度  $\leq \pm 0.2\text{mm}$  的设计指标要求。若是将该补偿算法与其他误差补偿方法结合起来, 将进一步提高六自由度惯组动态测试台的位姿精度。

### 5 结论

本文建立的电动六自由度惯组动态测试台误差模型可以作为测试台位姿误差的基本依据对其进行误差分析。所讨论的被动螺旋附加运动经过量化分析表明, 其对于惯组动态测试台的位姿精度存在非常显著的影响。针对被动螺旋附加运动所提出的补偿算法, 经过相关实验验证, 结果表明, 该补偿算法合理有效。经过该算法补偿后, 惯组动态测试台的位姿精度有明显提高, 达到了设计指标要求。同时, 所提出的被动螺旋附加运动补偿算法对于其他类似结构的 Gough - Stewart 平台同样具有普遍意义。

### 参考文献 (References)

[1] 宋海凌, 马溢清. 惯性技术发展及应用需求分析[J]. 现代防御技术, 2012, 40(2): 55 - 59, 76.  
SONG Hailing, MA Yiqing. Developing trend of inertial navigation technology and requirement analysis for armament[J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(2): 55 - 59, 76. (in Chinese)

[2] 徐景硕, 周胜明, 蒋华君. 惯性导航系统的发展及其关键

- 技术综述[J]. 科技信息, 2009, 35:865-866.
- XU Jingshuo, ZHOU Shengming, JIANG Huajun. Survey of the development and the key technology of the inertial navigation system [J]. Science & Technology Information, 2009, 35:865-866. (in Chinese)
- [3] Merlet J P. Parallel Robots [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [4] Merlet J P. Parallel manipulators: state of the art and perspectives [J]. Advanced Robotics, 1994, 8(6): 589-596.
- [5] Hunt K H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms [J]. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, 1983, 105(4):705-712.
- [6] Jafari F, McInroy J E. Orthogonal Gough-Stewart platforms for micromanipulation [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(4):595-603.
- [7] 何景峰, 靳军, 李保平, 等. 火控系统测试用6自由度运动模拟器研制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(7):1066-1070.
- HE Jingfeng, JIN Jun, LI Baoping, et al. Development of 6-DOF motion simulator for firing control system testing [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(7): 1066-1070. (in Chinese)
- [8] Taranti C G R. A computationally efficient algorithm for disturbance cancellation to meet the requirements for optical payloads in satellites [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2001.
- [9] 崔龙, 黄海. 高稳定精密跟踪机构设计与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(12):1462-1465.
- CUI Long, HUANG Hai. Design and simulation of highly stable and precise tracking-pointing platform [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(12):1462-1465. (in Chinese)
- [10] 刘匀斌, 杨洪波, 刘洋, 等. 基于Stewart平台的空光学仪器主动隔振系统研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(2):10-14.
- LIU Shaobin, YANG Hongbo, LIU Yang, et al. Study on an active vibration isolation system for spaceborne optical instrument based on Stewart platform [J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28(2):10-14. (in Chinese)
- [11] 佟志忠, 姜洪洲, 何景峰, 等. 基于广义Stewart平台的精密跟踪机构动态各向同性优化设计[J]. 宇航学报, 2011, 32(5):1019-1025.
- TONG Zhizhong, JIANG Hongzhou, HE Jingfeng, et al. Optimal design of generalized Stewart parallel manipulator based precise tracking-pointing platform with dynamic isotropy [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(5):1019-1025. (in Chinese)
- [12] 佟志忠, 段广仁, 何景峰, 等. 基于加速度各向同性的空间光学仪器主动隔振Stewart平台设计[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2):109-114. (in Chinese)
- TONG Zhizhong, DUAN Guangren, HE Jingfeng, et al. Optimal design of an acceleration isotropy-based active vibration isolation Stewart platform for spaceborne optical instrument [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 109-114. (in Chinese)
- [13] 张秀峰, 季林红, 孙立宁. 精密并联机器人系统误差的分析与补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2005, 45(5): 630-633.
- ZHANG Xiufeng, JI Linhong, Sun Lining. Error analysis and correction for high-precision parallel robots [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(5): 630-633. (in Chinese)
- [14] 马建明, 黄其涛, 丛大成, 等. 幅相控制策略在六自由度运动模拟器中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(11):1216-1221.
- MA Jianming, HUANG Qitao, CONG Dacheng, et al. Application of the amplitude-phase control strategy in a 6-DOF motion simulator [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(11):1216-1221. (in Chinese)
- [15] 马建明, 何景峰, 熊海国, 等. 六自由度运动模拟器振动控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(2): 511-516.
- MA Jianming, HE Jingfeng, XIONG Haiguo, et al. Vibration control strategy for six-DOF motion simulator [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology), 2010, 40(2):511-516. (in Chinese)